

[특별조사 2022-001]



해양사고 특별조사보고서

- 광석운반선 스틸라데이지 침몰사고 -

사고일자 : 2017.03.31.

공표일자 : 2022.06.23.



중앙해양안전심판원 특별조사부

참고사항

이 보고서는 「해양사고의 조사 및 심판에 관한 법률」 제18조의3에 따라 해양사고의 원인을 규명하고 사고 교훈을 공유함으로써 향후 유사한 해양사고 발생을 방지하기 위하여 작성되었으므로, 해양사고에 대한 책임을 묻거나 비난하기 위한 근거로 활용될 수 없습니다.

이 보고서에 기술된 관련 법령 및 기관 명칭 등은 보고서 작성 당시 시점을 기준으로 작성되었음을 알려드립니다.

Contents

1. 사고 요약	3
2. 사실 관계	7
2.1 선박 주요 명세	7
2.2 선박 소유자	10
2.3 용도변경	11
2.4 선박검사	17
2.5 무선·안전 설비	18
2.6 승선 선원	19
2.7 개조 후 화물 운송	20
2.8 선박 안전관리 체계	23
2.9 개조 후 주요 수리 및 검사 내역	26
2.10 선사에 의한 자체 점검	32
3. 사고 경위	39
3.1 제41항차 브라질 구아이바항(GIT) 입항	39
3.2 화물 적재	41
3.3 구아이바항(GIT) 출항 및 항해	46
3.4 사고 발생	47
3.5 사고 위치	50
3.6 수색·구조	51

4. 사고 분석	57
4.1 선박 운항여건	57
4.1.1 해상상태	57
4.1.2 비손상복원성	63
4.1.3 손상복원성	65
4.1.4 화물적재 시 종강도	69
4.1.5 화물 액상화	70
4.1.6 소결	71
4.2 선박개조 및 구조상태	71
4.2.1 선박개조	71
4.2.2 격창양하	73
4.2.3 운항 중 선박수리	76
4.2.4 소결	77
4.3 손상범위 및 침몰과정 추정	77
4.3.1 손상범위 추정	77
4.3.2 침몰과정 시뮬레이션	80
4.3.3 소결	84
4.4 손상가능성 확인을 위한 사후 구조해석	84
4.4.1 사후 구조해석의 목적	84
4.4.2 2번 좌현 평형수탱크 침수 시 선체 구조강도해석	85
4.4.3 구조강도해석	88
4.4.4 피로강도해석	91
4.4.5 횡경사별 선체 구조강도해석	93
4.4.6 최종강도해석	96

4.4.7 손상해석	101
4.4.8 소결	103
5. 심해수색 결과 분석	107
5.1 심해수색 개요	107
5.2 저주파 초기수색	109
5.3 초기 육안조사	111
5.4 고해상도 잔해조사	115
5.5 전체 육안조사	115
5.6 잔해 영상분석 결과	118
5.7 내파해석	119
5.8 항해자료기록장치 데이터 복원	122
5.9 소결	124
6. 결론	127
7. 사고 이후 조치사항	133
8. 권고	137
부록: 상세 육안조사 결과	143

section

1

사고 요약

1. 사고 요약

- 1.1 스텔라데이지는 1992년 7월 23일 일본의 미쓰비시중공업 나가사키조선소에서 건조된 총 톤수 146,950톤, 재화중량톤수 264,165톤, 길이 311.89미터, 너비 58.00미터, 깊이 29.50미터의 단일선체구조 유조선이었다.
- 1.2 이 선박은 2009년 1월 21일 중국의 코스코조선소에서 초대형광석운반선(VLOC)으로 개조하고, 용도를 변경하였다. 개조 후 길이, 너비 및 깊이에는 변경이 없었다. 개조로 인해 화물창 구조가 변경되고 만재홀수가 증가함에 따라 총톤수와 재화중량톤수는 각각 148,431톤과 266,141톤으로 커졌다.
- 1.3 이 선박은 브라질 구아이바항(Guaiba Inland Terminal)에 접안하여 2017년 3월 23일 08시 25분(LT)경부터 같은 달 25일 21시 24분(LT)까지 분철광석 260,003톤을 선적한 후, 같은 날 22시 54분(LT)경 중국 칭다오(Qingdao)를 향해 출항하였다. 선원은 24명(한국선원 8명, 필리핀선원 16명)이 승선하고 있었다.
- 1.4 선박에서 2017년 3월 31일 정오 기준으로 작성한 정오보고서가 같은 날 13시 03분(LT)경 전산시스템을 통해 선사로 송부되었고, 이 선박은 침로 110도, 속력 11.09노트¹⁾로 항해 중이라고 보고되었다. 항해당직을 수행하던 2등항해사는 같은 날 13시 05분(LT)경 업무용 휴대전화로 공무감독에게 SNS 메시지를 보내 방수복 검사 관련 사항을 문의하였다.
- 1.5 같은 날 13시 20분(LT)경 업무용 휴대전화로 “긴급상황입니다. 본선 2번 포트 물이 샐니다. 포트 쪽으로 긴급하게 기울고 있습니다.”라는 SNS 메시지가 공무감독에게 전송되었다. 공무감독은 위성전화로 전화해 줄 것을 요청하였으나, 선박으로부터 응답이 없었다. SNS 메시지 수신 약 1분 후인 13시 21분(LT)경, 위성통신장치(INMARSAT-C) 디지털선택 호출(Digital Selective Calling)을 통한 이 선박에 대한 조난신호가 수신되었다.
- 1.6 이후 사고해역을 관할하는 우루과이 해상구조센터(Marine Rescue Coordination Center)는 인근 항해선박에 수색·구조를 요청하였고, 4월 1일 12시 50분(UTC¹⁾)경 M/V 엘피다호에 의해 구명뗏목에 승선하고 있는 선원 2명(갑판수A와 조기장)이 구조되었으나, 다른 선원 22명은 발견되지 않았다.

1) 세계표준시간(Universal Time Coordinated), 사고 당시 스텔라데이지의 선내시간은 UTC -1임

- 1.7 생존선원은 사고 당시에 강한 진동을 느꼈고, 선박이 좌현으로 급격하게 기울며 순식간에 침몰되었다고 진술하였다. 갑판수A는 선장의 선내방송을 듣고 선교에 올라 왔으나, 선박이 좌현으로 더욱더 기울어 해수가 선교를 덮치려 하자 좌현 윈브릿지에서 바다로 뛰어 들었다고 진술하였다. 조기장은 우현 측에 있는 구멍뚫목 진수를 시도하였으나 선박이 너무 기울어 진수하지 못하고 핸드레일을 잡고 있던 중 큰 파도가 밀려와 바다로 휩쓸려 갔다고 말했다.
- 1.8 사고 전 정오보고서, 사고 당시 위성통신장치 디지털선택호출에 의한 조난위치 등을 볼 때 스텔라데이지는 2017년 3월 31일 14시 21분(UTC)경 브라질 산토스 남동방 약 1,550마일 거리인 남위 34도 23분·서경 18도 30분 해상에서 침몰한 것으로 추정된다.
- 1.9 사고조사 결과 스텔라데이지는 24년 이상 운항되는 과정에서 선체의 구조·피로강도가 조금씩 감소되었으며, 이 상태에서 비대칭 횡압력 등에 의한 하중의 불균형이 2번 좌현 평형수탱크가 위치한 선체외판 하부에 과도한 응력을 유발하여 구조적 손상이 발생하였고, 손상된 부위로 해수가 최초 유입되었을 것으로 추정된다. 이후 횡경사 증가로 인해 횡격벽 등이 붕괴되어 3번과 4번 평형수탱크 등 다른 구획으로 침수가 확산되었고, 결국 침몰에 이르게 되었다고 판단된다.
- 1.10 한편, 사고 이후 대한민국은 침몰된 스텔라데이지의 선체위치 확인, 가능한 경우 항해자료기록장치 회수 등을 목적으로 2019년 2월 사고해역에 대한 심해수색을 수행하였다. 심해수색 결과 선체잔해는 형태를 알아볼 수 없을 정도로 많은 조각으로 흩어져 있었다. 심해수색을 통해 회수한 항해자료기록장치는 항적정보만이 복원되어 이 선박의 침몰 원인 분석을 위한 자료로 활용하는데 한계가 있었다.

section

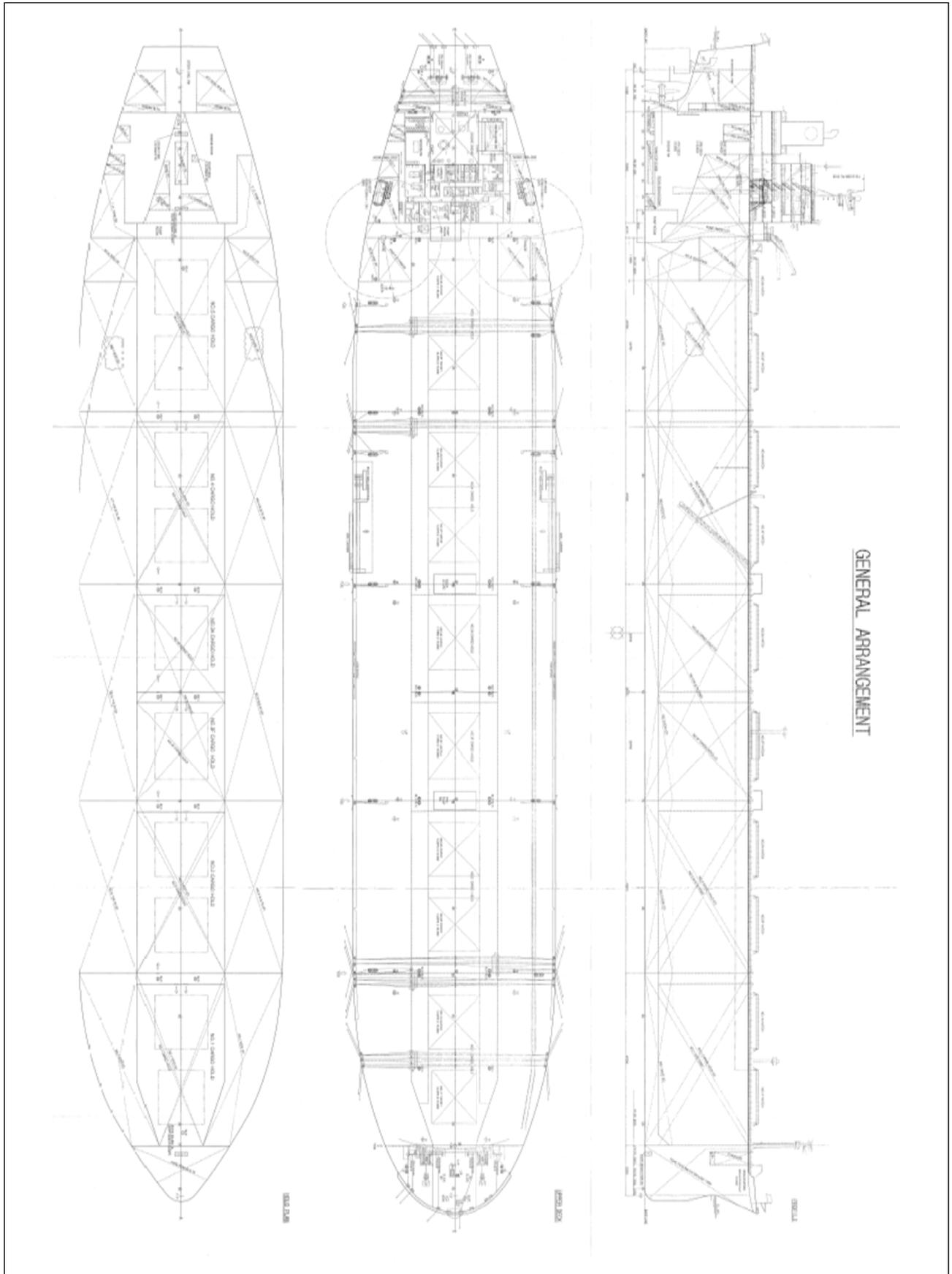
2

사실 관계

2. 사실 관계

2.1 선박 주요 명세

선명	스텔라데이지(STELLAR DAISY)
국적	마셜제도(Republic of the Marshall Islands)
선적항	마주로(Majuro)
호출 부호	V7RD9
IMO NO.	9038725
선박 종류	광석운반선(Very Large Ore Carrier, VL0C)
선박소유자/선박운항자	VP-14 Shipping Inc. / 폴라리스쉬핑(주)
최대승선인원(명)	30
조선자	미쓰비시중공업(Mitsubishi Heavy Industries)
용골거치일/진수일	1992년 7월 23일 / 1993년 2월 25일
용도변경(개조)일	2009년 1월 21일
선박검사단체	사단법인 한국선급
길이(미터)	311.89
너비(미터)	58.00
깊이(미터)	29.50
총톤수(톤)	148,431
재화중량톤수(DWT, 톤)	266,141
하기만재흘수(미터)	20.327
주기관	Mitsubishi UE Marine Diesel "9UEC75LSII" 1기
최대 출력	29,800HP × 76RPM
추진기	나선식 1
타(Rudder)	1
설계속력(노트)	15.5



<그림 1> 스텔라데이지 일반배치도



<그림 2> 스텔라데이지 전경

- 2.1.1 스텔라데이지는 1992년 7월 23일 일본 미쯔비시중공업 나가사키조선소에서 건조된 총 톤수 146,950톤, 재화중량톤수 264,165톤, 길이 311.89미터, 너비 58.00미터, 깊이 29.50미터의 단일선체구조 유조선이었다.
- 2.1.2 이 선박은 2009년 1월 21일 초대형유조선(VLCC)에서 초대형광석운반선(Very Large Ore Carrier, VLOC)으로 개조·용도가 변경되었다. 선박개조로 인해 길이, 너비, 깊이에는 변경이 없었으나 화물창 구조 등이 변경됨으로써 총톤수는 148,431톤으로 증가되었다. 재화중량톤수도 만재흘수가 19.849미터에서 20.327미터로 변경²⁾되어 266,141톤으로 증가되었다.

2.2 선박 소유자

- 2.2.1 폴라리스쉬핑(주)은 유조선으로 운항되던 스텔라데이지를 광석운반선으로 운항하기 위해 2007년 12월 17일 선박리스계약을 통해 이 선박을 도입하였고, 같은 해 12월 21일 대한민국 국적을 취득하였다.
- 2.2.2 이 선박은 광석운반선으로 개조가 완료된 후, 선박소유자가 Stellar Ocean Shipping Limited로 변경되면서 2009년 1월 22일 마셜제도(Republic of the Marshall Islands)로 국적이 변경되었다. 이후 선박소유자가 2012년 1월 22일 Daisy Maritime Limited, 2015년 7월 27일 V-12 Shipping Inc.로 변경되었다.
- 2.2.3 폴라리스쉬핑(주)은 이 선박의 서류상 선박소유자가 변경될 때마다 그 회사와 국적취득조건부 선체용선(BBCHP)³⁾ 계약을 체결하고, 실질적인 선박소유자 역할을 수행하였다. 스텔라데이지에 선적되는 화물의 영업, 선적·양하지 이동 등 선박운항, 선박검사·수리·안전관리시스템(ISM) 운영 등 안전관리 뿐만 아니라 선원 채용·배승 등 선원관리에 대한 부분까지 폴라리스쉬핑(주)가 수행하였다.

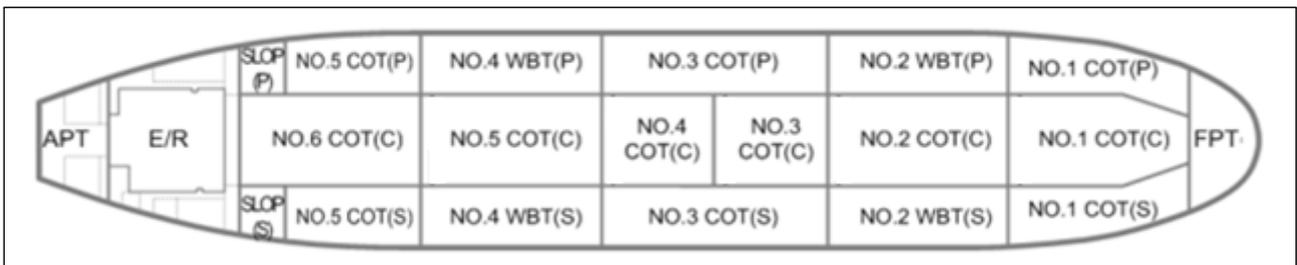
2) 개조 후 건현은 9.223미터로, 이 선박이 확보하여야 하는 최소 건현(7.434미터) 기준을 만족함

3) 국적취득조건부 선체용선(Bare Boat Charter with Hire Purchase)이란 선체용선 기간 만료 및 총 선체용선료 완불 후 대한민국 국적을 취득하는 매선(買船) 조건부 선체용선을 말함(「선박안전법」 제2조제18호)

2.3 용도변경

2.3.1 용도변경 전 구조

2.3.1.1 스텔라데이지는 건조 당시 일본선급 강선규칙에 따라 건조된 단일선체유조선으로 중앙에 화물유탱크 6개, 좌현과 우현에 화물유탱크 각각 3개와 평형수탱크 각각 2개가 배치되어 있었다.



<그림 3> 건조 당시 구조

2.3.2 선박개조에 따른 국제협약 및 관련 규정 적용

2.3.2.1 국제해상인명안전협약(International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS) 제2-1장 제1.3규칙 및 제2-2장 제1.3규칙에 따르면 주요 수리, 개조, 변경은 주관청이 합리적이고 실행가능하다고 인정하는 한, 관련 규정이 발효되는 날 이후에 건조된 선박에 대해 적용되는 요건에 적합하여야 한다.

2.3.2.2 이 선박은 2007년 12월 19일 사단법인 한국선급(이하 ‘한국선급’이라 한다)에 입급하여, 2008년 7월 22일부터 2009년 1월 21일까지 중국 코스코조선소(저우산)에서 유조선에서 광석운반선으로 선박의 용도를 변경하는 개조작업을 시행하면서 2007년판 한국선급 규칙에 따라 설계 승인을 받았다. 당시 기국인 대한민국이 국제협약의 일부를 완화 또는 면제⁴⁾함으로써 이 선박은 상설접근설비(Permanent Means of Access, PMA), 선체보호도장기준(Performance Standard for Protective Coatings, PSPC) 등에 관한 사항은 적용⁵⁾받지 않았다.

4) 구조적으로 실행이 어렵거나 실효성이 없다고 검토된 사항에 대해 신조선에 적용되는 국제협약의 일부 규정을 완화 또는 면제함

5) 국제해사기구 제89차 해사안전위원회(2011.05.11.~05.20.) 및 제62차 해양환경보호위원회(2011.07.11.~07.15.)에서는 2011년 12월 1일 이후 단일선체유조선을 이중선체 유조선 또는 산적화물선으로 개조하는 경우 SOLAS, MARPOL 및 LOAD LINE 협약 요건의 적용에 관한 통일해석을 승인하면서 상설접근설비(PMA), 선체보호도장기준(PSPC) 등의 적용을 제외함(MSC-MEPC.2/Circ.10)

<표 1> 국제협약 완화 또는 면제 사항

항목	SOLAS 규정	적용일자	SOLAS 적용여부	면제일자
상설접근설비(PMA)	II-1 Reg.3-6 (SOLAS 04Amend)	2006.01.01. 이후 건조선박	면제	2007.09.27.
선체보호도장기준 (PSPC)	II-1 Reg.3-2 (SOLAS 06Amend)	2008.07.01. 이후 건조계약	면제	2008.04.18.
예인 및 계류설비의 하부보강 강도 강화	II-1 Reg.3-8 (SOLAS 05Amend)	2007.01.01. 이후 건조선박	교체, 신설되는 부분 적용	2008.04.18.
예비연료탱크 설치, 빛물유입방지장치	II-1 Reg.26.11 (SOLAS 96Amend)	1998.07.01. 이후 건조선박	예비연료유탱크 설치 면제, 빛물유입방지장치 적용	2008.04.18.
전기공급장치의 이중화	II-1 Reg.41.4 (SOLAS 96Amend)	1998.07.01. 이후 건조선박	면제	2008.04.18.
할론 소화장치 금지	II-2 Reg.10.4.1 (SOLAS 00Amend)	2002.07.01. 이후 건조선박	할론 소화장치의 교체시까지 사용 인정	2008.04.18.
기관실 국부소화 장치 의무화	II-2 Reg.10.5.6 (SOLAS 00Amend)	2002.07.01. 이후 건조선박	면제	2008.04.18.
항해자료기록장치 (VDR)	V Reg.20 (SOLAS 99/00Amend)	2002.07.01. 이후 건조선박	기존 설치된 SVDR을 인정	2008.04.18.
갑판적일 때 항해 선교시아 확보	V Reg.22 (SOLAS 96Amend)	1998.07.01. 이후 건조선박	개조전 평형수 항해조건에서 규정 만족시 기존 상태 인정	2008.04.18.

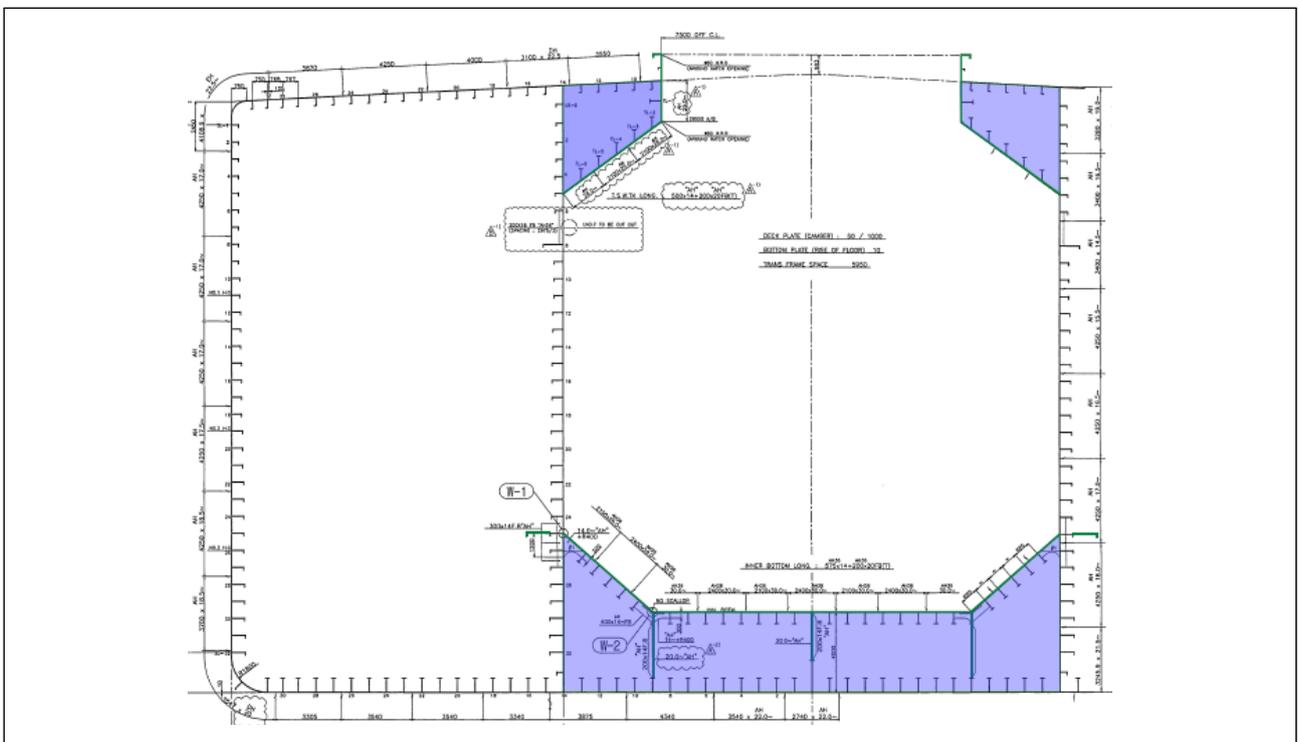
2.3.2.3 또한, 이 선박은 유조선에서 광석운반선으로 개조되어 국제해상인명안전협약(SOLAS) 제12장 제5규칙⁶⁾을 새롭게 적용받게 됨에 따라, 1번 화물창이 침수되는 경우 종강도와 이중저 구조강도가 기준을 만족하는지를 검토하였고, 그 결과 이 기준을 만족하였다.

2.3.3 선박개조 및 선체 부재의 변경

2.3.3.1 스텔라데이지의 용도변경을 위해 2008년 7월 22일부터 2009년 1월 21일까지 중국 코 스크조선소(저우산)에서 선체 주요 구조 및 부재를 변경·신설하는 개조작업이 실시되었다.

6) SOLAS XII/Reg5(산적화물선의 구조강도) 1. 1000kg/m³ 이상의 밀도를 가지는 고체산적화물을 운송하도록 설계된 단일 선측구조를 가진 길이 150미터 이상의 1999년 7월 1일 이후 건조된 산적화물선은, 선박의 화물창 중 어떠한 한 개의 화물창에 대하여 모든 화물적재 및 평형수 적재 상태에서 해당 침수상태의 선박외측의 수면레벨까지의 침수에도 견딜 수 있는 충분한 강도를 가져야 함. 2. 2006년 7월 1일 이후에 건조되고 1000kg/m³ 이상의 밀도를 가지는 고체산적화물을 운송하도록 설계되었으며, 종격벽의 어떠한 부분도 지정 하기만재출수선에서 선측으로부터 안쪽으로 선체중심선에 직각방향으로의 거리가 B/5 또는 11.5m중에서 작은 거리 이내에 위치하는 이중선측구조를 가지는 길이 150m 이상의 산적화물선은, 상기 1항의 구조강도 요건을 만족하여야 함

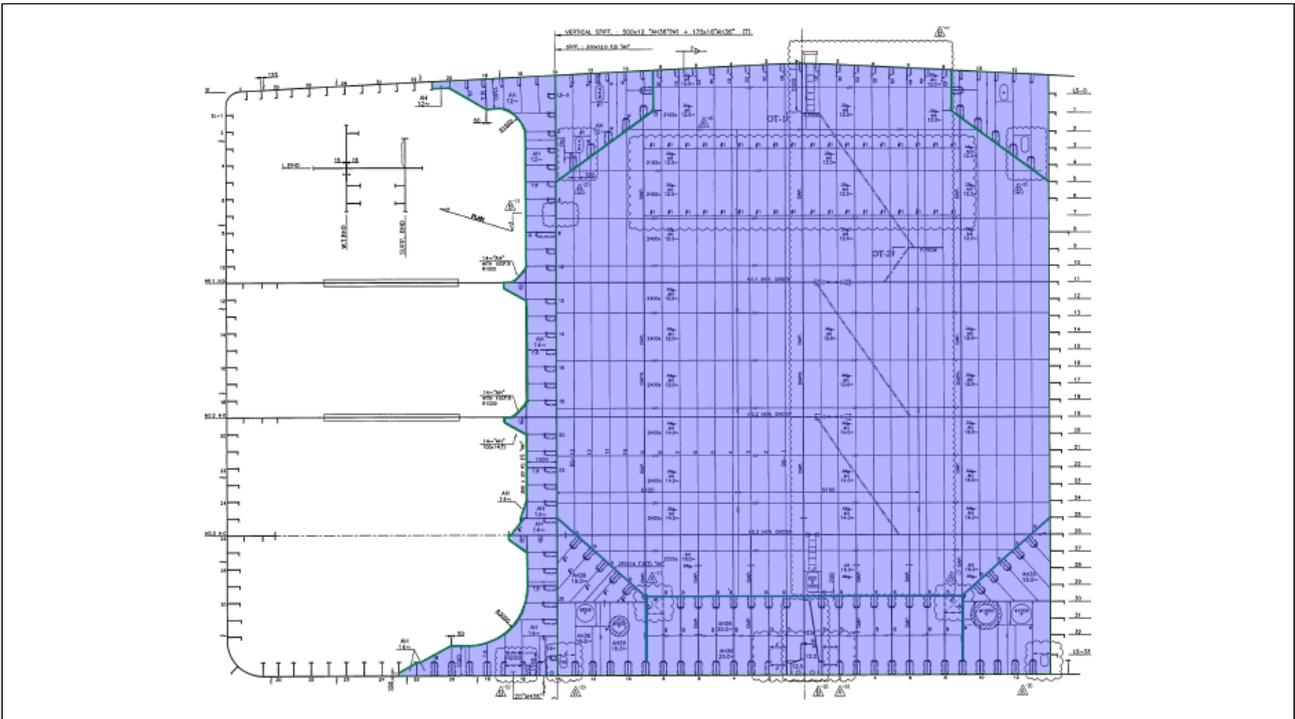
- 2.3.3.2 선체구조·부재 변경 필요 부분의 식별은 (주)중앙선박기술에 의해 수행된 화물창 구조해석에 기초하였다. 구조해석 모델의 부재치수는 부식에 대한 예비두께를 포함한 부재치수(설계두께)가 적용되었다. 해석 결과를 바탕으로 화물창에 이중저(Inner Bottom) 및 호퍼(Hopper) 구조 신설, 화물창 상부 선측 구조(Top Side Structure) 신설, 횡강도 보강을 위한 지지 격벽(Support Bulkhead) 신설, 현측 탱크에 중간 웨브프레임(Intermediate Web Frame) 신설, 크로스 타이(Cross Tie) 구조 보강 등 대대적인 작업이 진행되었다.
- 2.3.3.3 1번~5번 화물창에는 원유에 비해 단위중량이 큰 철광석 적재에 적합하도록 하부에 이중저(Inner Bottom) 및 호퍼(Hopper) 구조를 신설⁷⁾하였고, 상부에 해치 커버와 코밍(Hatch Cover and Coaming) 및 상부 선측 구조(Top Side Structure)를 신설하였다.



<그림 4> 화물창 이중저 신설 등 개조 후 단면도

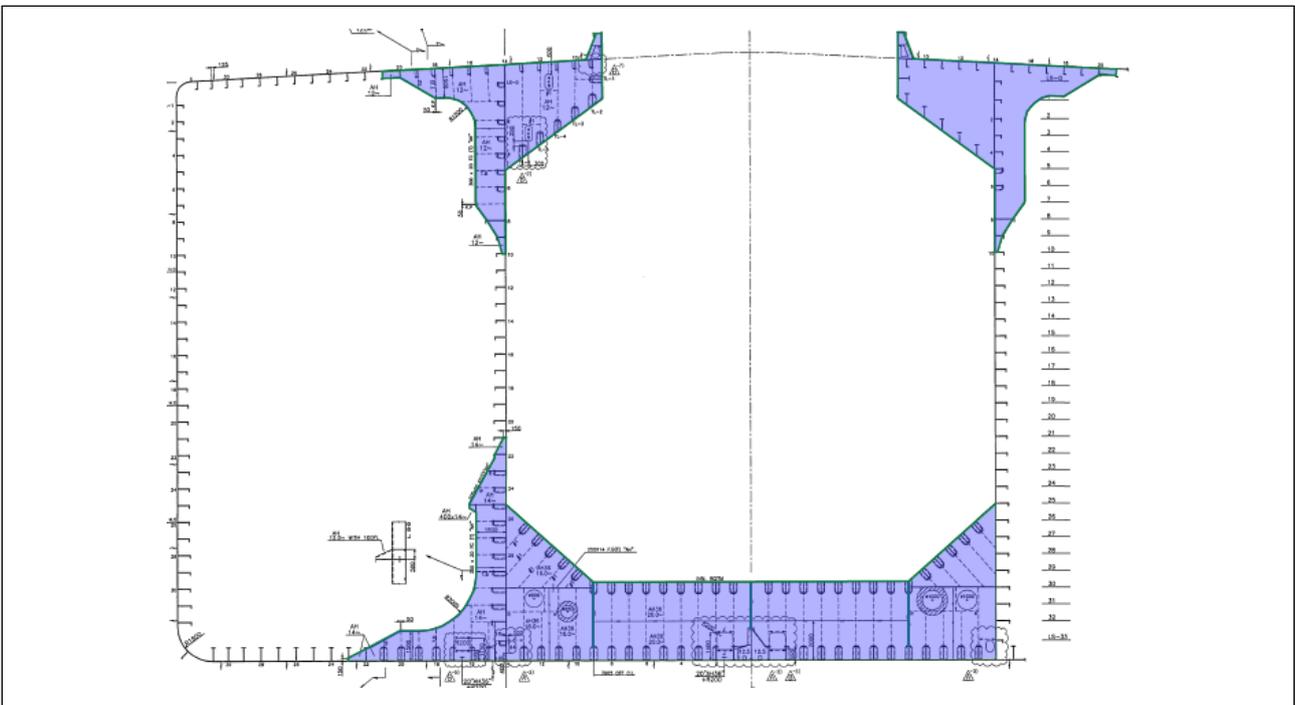
- 2.3.3.4 1번에서 5번 화물창 사이에 위치한 57.5(4번과 5번 화물창 사이), 65.5(3A번과 4번 화물창 사이), 70.5(3F번과 3A번 화물창 사이), 75.5(2번과 3F번 화물창 사이), 83.5(1번과 2번 화물창 사이) 프레임에는 횡강도 보강을 위한 지지 격벽(Support Bulkhead)을 신설하였다.

7) 신설·보강된 부분은 <그림 4>부터 <그림 8>까지에서 파란색 음영으로 표기함



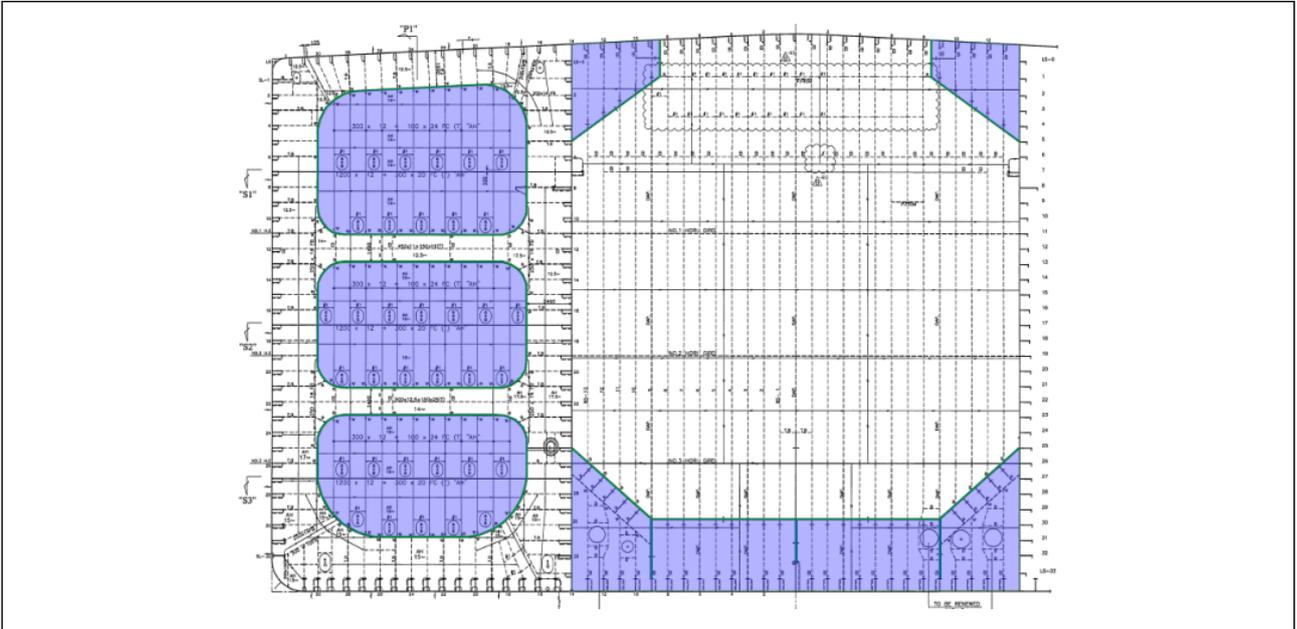
<그림 5> 횡 지지 격벽(Support Bulkhead)

2.3.3.5 기존의 현측탱크(Wing Tank)에는 상·하부 중간 웨브프레임(Lower and Upper Intermediate Web Frame)을 신설하였다.



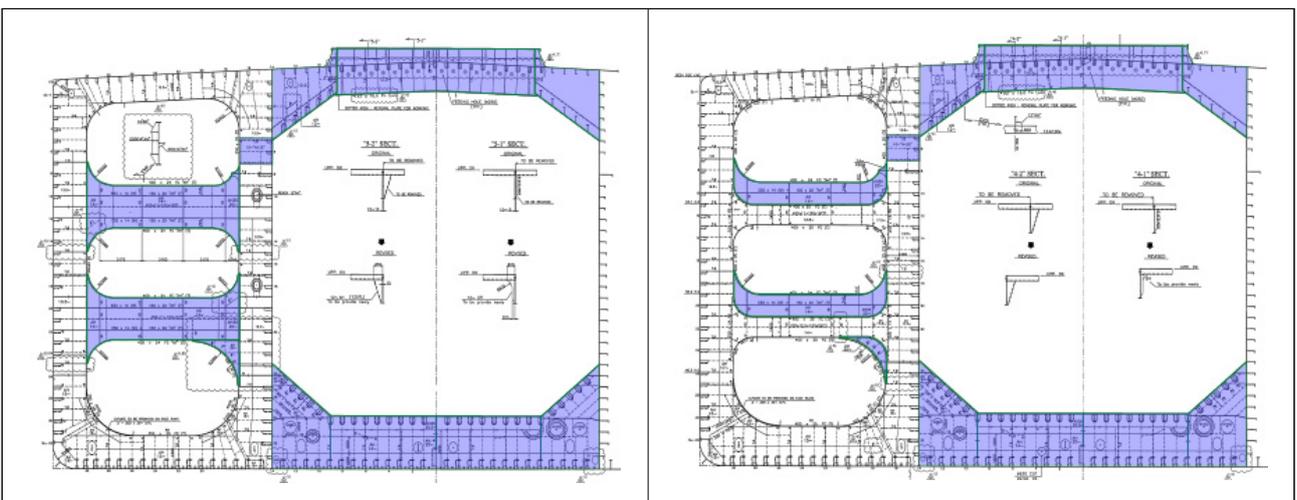
<그림 6> 중간 웨브프레임(Intermediate Web Frame)

2.3.3.6 횡강도 보강이 필요한 2, 3, 4번 현측탱크에는 61, 70, 79번 프레임에 제수격벽⁸⁾(Swash Bulkhead)을 신설하였고, 67, 72번 프레임에 부분 제수격벽(Partial Swash Bulkhead)을 추가로 신설하였다.



<그림 7> 70번 프레임 수밀 격벽(FR.70 W.T.BHD)

2.3.3.7 현측탱크 내에는 웨브프레임을 가로지르는 크로스타이(Cross Tie)를 신설 및 보강함으로써 모든 웨브프레임은 크로스타이, 제수격벽 또는 부분 제수격벽으로 보강되었다.



<그림 8> 격벽 인접 횡단면(Trans Sect. Adjacent to O.T.BHD)

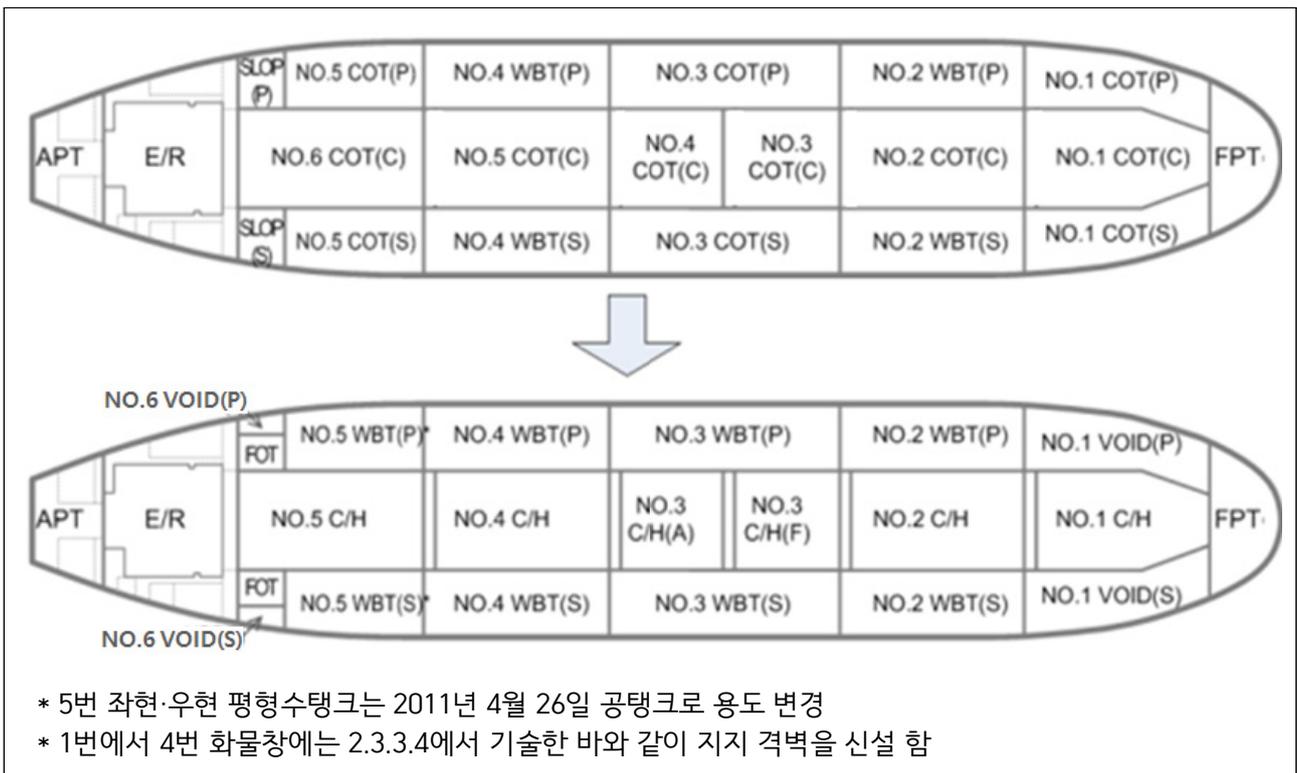
8) 평형수탱크내 해수의 유동을 억제하기 위해 설치하는 격벽

2.3.4 선체 구획의 주요 변경사항

2.3.4.1 중앙에 위치한 1번~6번 화물유탱크(Cargo Oil Tank)는 1번, 2번, 3번 앞·뒤(Fore & Aft), 4번 및 5번 화물창(Cargo Hold)으로 변경되었다.

2.3.4.2 1번 좌현·우현 화물유탱크는 1번 좌현·우현 공탱크(Void Tank)로 각각 변경되었다. 3번과 5번 좌현·우현 화물유탱크는 각각 3번과 5번 좌현·우현 평형수탱크(Water Ballast Tank)로 변경되었고, 좌현·우현 슬롭탱크(Slop Tank)는 6번 좌현·우현 공탱크 및 연료유탱크로 변경되었다. 2번과 4번 좌현·우현 평형수탱크는 개조 후에도 평형수탱크로 사용되었다.

2.3.4.3 변경된 1번~5번 화물창과 2번~5번 좌현·우현 평형수탱크에는 경화도장(Hard Coating)이 새로 시공되었다.



<그림 9> 선체구획의 용도 변경

2.3.4.4 개조 후 평형수탱크 및 화물창 용량은 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 개조 후 평형수탱크 및 화물창 용량

구분	위치(FR.No)	용량(m ³)	구분	위치(FR.No)	용량(m ³)
F.P.T(C)	91-FE	7,845.0	No.1 C/H	83½-91	25,104.4
No.2 W.B.T(S)	75-83	23,493.9	No.2 C/H	75½-83	27,315.6
No.2 W.B.T(P)	75-83	23,493.9	No.3 C/H(F)	70½-75	16,389.3
No.3 W.B.T(S)	65-75	29,332.5	No.3 C/H(A)	65½-70	16,389.3
No.3 W.B.T(P)	65-75	29,332.5	No.4 C/H	57½-65	27,315.8
No.4 W.B.T(S)	57-65	23,150.3	No.5 C/H	49½-57	28,524.3
No.4 W.B.T(P)	57-65	23,150.3	FWD F.O.T(S)	49-51	1,637.5
No.5 W.B.T(S)	51-57	14,626.8	FWD F.O.T(P)	49-51	1,637.5
No.5 W.B.T(P)	51-57	14,626.8	F.O.T(S)	34-49½	2,280.4
A.P.T(C)	AE-14	3,194.2	F.O.T(P)	27-49½	2,528.4

2.4 선박검사

- 2.4.1 스텔라데이지는 2009년 1월 21일 개조작업이 완료되어 정기검사에 합격하였고, 이후 매년 한국선급 규칙에 따른 연차검사, 중간검사 등 정기적 검사에도 합격하여 사고 당시에는 2013년 7월 3일부터 2018년 6월 15일까지 유효한 선박검사증서를 보유하고 있었다.
- 2.4.2 또한, 정기적인 검사 이외에 운항 중 선체나 기관의 주요 손상, 수리, 변경이 발생하는 경우나 선박검사증서의 기재내용이 변경되는 경우 및 선박소유자 신청이 있는 경우 등에는 임시검사를 받게 되는데, 이 선박은 개조 이후 총 4차례의 임시검사를 받았다.
- 2.4.3 첫 번째 임시검사는 2009년 1월 22일 국적을 대한민국에서 마셜제도로 변경하면서 시행되었다. 두 번째와 세 번째 임시검사는 이 선박이 부두와 접촉하는 사고⁹⁾가 발생하여 2012년 6월 15일 한국 광양항과 2012년 7월 5일 중국 제스코조선소(저우산)에서 손상부위를 수리하면서 시행되었다. 네 번째 임시검사는 연차검사에서 발견된 선체손상¹⁰⁾에 대해 2016년 8월 25일 중국 제스코조선소(저우산)에서 수리하면서 시행되었다.

9) 2012년 6월 11일 광양항 원료부두에 접안 중 부두와 접촉하여 선수우현 상부외판, 갑판 및 갑판창고 등이 손상됨

10) 3번 좌현과 우현 평형수탱크 내 후부격벽 보강재(Aft Bulkhead Stiffener)의 변형(Deformation)이 확인됨

2.4.4 이 선박이 한국선급에 입급한 후 받은 선박검사 이력은 <표 3>과 같다.

<표 3> 선박검사 이력

구분	검사종류	검사일	구분	검사종류	검사일
1	제조 후 등록검사	2007.12.19.	9	임시검사	2012.06.18.~ 2012.07.05.
2	개조검사 및 정기검사	2008.05.20.~ 2009.01.21.	10	연차검사, 정기검사(착수)	2012.06.16.~ 2012.07.06.
3	임시검사	2009.01.22.	11	정기검사(종료)	2013.04.02.~ 2013.04.04.
4	연차검사	2009.07.02.~ 2009.07.03.	12	연차검사	2014.07.28.~ 2014.07.29.
5	연차검사	2010.07.19.~ 2010.07.21.	13	중간검사(착수)	2015.05.09.~ 2015.05.12.
6	중간검사(착수)	2011.06.28.~ 2011.07.02.	14	중간검사(종료)	2015.05.15.~ 2015.05.24.
7	중간검사(종료)	2011.07.04.~ 2011.07.13.	15	연차검사	2016.08.11.~ 2016.08.12.
8	임시검사	2012.06.14.~ 2012.06.15.	16	임시검사	2016.08.16.~ 2016.08.25.

2.5 무선·안전 설비

2.5.1 스텔라데이지에 설치된 무선설비는 선교 내에 초단파 무선설비(VHF Radio) 2대, 중단파 무선설비(MF/HF Radio) 1대, 네비텍스 수신기(NAVTEX Receiver) 1대, 위성통신장치(INMARSAT-C) 1대, 수색 및 구조위치 확인장치(SART) 2대, 양방향 초단파대 무선전화장치(2-Way VHF) 3대가 설치되어 있고, 선교 밖 좌현 측에 위성비상위치지시용 무선표지설비(EPIRB) 1대가 설치되어 있었다.

2.5.2 사고 당시 플라리스쉬핑(주)에서 운항하는 선박들은 플리트 브로드밴드(Fleet Broadband) 위성통신방식을 적용하여 선박 1척당 매월 4기가바이트(Gigabyte) 용량의 무선 데이터 통신이 가능하였다. 스텔라데이지에서도 매월 4기가바이트의 무선 데이터 범위 내에서 업무용 컴퓨터나 휴대전화¹¹⁾ 또는 팩스를 사용하여 회사와 통신할 수 있었다. 선원들도 이 데이터를 이용하여 개인용 휴대전화를 사용할 수 있었다.

11) 사고 당시 스텔라데이지에는 업무용 휴대전화 1대가 보급되어 있었고, 평소 이 휴대전화를 통해 선사와 선박 간 SNS(카카오톡)로 통신하고 있었음

- 2.5.3 이 선박의 무선설비에 대한 검사는 2016년 8월 12일 실시되었고, 2018년 6월 15일까지 유효한 무선설비 검사증서가 발급되어 있었다.
- 2.5.4 이 선박의 주요 구명설비¹²⁾로는 선미 거주구역 상갑판 좌현과 우현에 30인용 전폐형 구명정 각 1대와 자동이탈기가 부착된 16인용 팽창식 구명뗏목 각 2대가 설치되어 있었다. 선수 갑판에는 자동이탈기가 요구되지 않는 6인용 팽창식 구명뗏목 1대가 설치되어 있었다. 그 밖에 구명조끼 40개, 방수복 40개¹³⁾ 및 구명부환 14개가 비치되어 있었다.
- 2.5.5 간이 항해자료기록장치¹⁴⁾(Simplified Voyage Data Recorder, S-VDR)는 선박개조 작업을 실시하면서 2009년 1월 21일 추가로 설치되었다. 이 장치는 제이알씨(Japan Radio Company, JRC)에서 제조한 모델명 JCY-1850이며, 선교 대화, VHF 통신, 레이더 이미지 및 각종 센서¹⁵⁾ 정보가 선교에 설치된 본체 내 저장장치(Recording Unit)와 최상위갑판에 설치된 보호용기(Protective Capsule)¹⁶⁾에 각각 저장된다. 보호용기는 수심 6,000미터에서 24시간 동안 견딜 수 있도록 설계되어 있으나, 본체는 높은 수압에 대비한 설계¹⁷⁾가 적용되어 있지 않다.
- 2.5.6 이 선박의 구명설비와 항해자료기록장치 등 설비에 대한 검사는 한국선급에 의해 2016년 8월 12일 실시되었고, 2018년 6월 15일까지 유효한 안전설비 검사증서가 발급되었다.

2.6 승선 선원

- 2.6.1 스텔라데이지의 선박검사증서상 최대승무정원은 30명, 최소승무정원증서상 최소승무기준은 총 16명이다. 사고 당시 승선하고 있던 인원은 24명으로 직책별로는 <표 4>와 같다.

12) 여객선 이외의 선박으로서 국제항해에 종사하는 총톤수 500톤 이상의 선박은 각 현에 최대승선인원을 수용하는데 충분한 구명정과 구명뗏목을 비치하여야 하고, 선박의 구명정 및 구명뗏목 위치가 선수에서 100미터를 넘을 경우 전방에 구명뗏목 1개를 추가로 비치하여야 함

13) 구명조끼와 방수복은 최대승선인원과 같은 수를 비치하고, 당직 또는 작업 장소 등을 고려하여 추가분을 비치하여 함

14) 국제해상인명안전협약(SOLAS) 제5장 제20규칙 및 선박설비기준(해양수산부 고시) 제108조의7제3항에 따라 2002년 7월 1일 전에 건조된 총톤수 3,000톤 이상의 선박은 간이 항해자료기록장치를 설치할 수 있음

15) GPS, Speed Log, Gyro Compass, AIS 등

16) JCY-1850의 보호용기는 L3Harris Technologies Inc.에서 제조한 것으로 모델명은 NDH-317임

17) 국제해상인명안전협약(SOLAS) 및 선박설비기준(해양수산부 고시)은 보호용기에 대해서는 심해침수시험을 요구하나, 본체에 대해서는 요구하지 않음

<표 4> 승선선원 현황

직책	정원	승선선원	직책	정원	승선선원
선장	1	1	기관장	1	1
1등항해사	1	1	1등기관사	1	1
2등항해사	1	1	2등기관사	1	1
3등항해사	1	1	3등기관사	1	2
갑판부원	5	5	기관부원	3	6
조리원	-	2	실습생	-	2

2.6.2 승선인원 24명 중 선장, 1등항해사, 2등항해사, 3등항해사, 기관장, 1등기관사, 2등기관사, 3등기관사(2명 중 1명) 등 총 8명은 한국선원이었고, 또 다른 3등기관사 1명, 갑판부원 5명, 기관부원 6명 및 실습항해사, 실습기관사 등 총 16명은 필리핀선원이었다. 선원들은 선내에서 영어를 공용어로 사용했다.

2.6.3 2017년 2월 21일 이 선박에 승선한 선장은 1급항해사 면허(STCW 제Ⅱ장 제2절에 따른 증명서)를 소지하고 있었다. 이 선박 승선 전 선장 경력은 약 6년 9개월이다. 광석운반선 승선경력은 1등항해사로서 약 10개월간 승선한 경험이 있다.

2.6.4 1등항해사는 2016년 11월 1일 이 선박에 승선하였다. 1급항해사 면허를 소지하고 있었으며 이 선박 승선 전 약 5년 4개월의 1등항해사 경력이 있었다. 광석운반선 승선 경력은 없다.

2.7 개조 후 화물 운송

2.7.1 폴라리스쉬핑(주)은 해양수산부로부터 2005년 12월 15일 외항화물운송사업자 등록증을 교부받았다.

2.7.2 폴라리스쉬핑(주)은 스텔라데이지의 용도를 변경한 후, 포스코와 체결한 연속항해용선 계약에 따라 2009년 2월 28일부터 브라질, 남아프리카공화국 또는 호주에서 광양과 포항으로 철광석을 운송하는 항로에 이 선박을 투입하였다.

2.7.3 이후 폴라리스쉬핑(주)은 브라질 철광석생산업체인 발레(VALE S.A)와 2014년 2월 28일부터 2023년 6월 30일까지 연속항해용선계약을 다시 체결하고, 2014년 11월 2일부터 브라질 투바라오(Tubarao), 폰타 다 마데이라(Ponta Da Madeira, PDM), 구아이바(Guaiba Island Terminal, GIT) 등에서 철광석을 싣고 중국으로 운송하는 항로에 투입되었다.

2.7.4 개조 이후 이 선박은 <표 5>와 같이 37번의 항차(입거 항차 포함)를 운항하였다. 대부분 항차는 양하항이 1곳이었으며, 선적된 화물은 해당 양하항에서 전부 하역되었다. 그러나 제23항차, 제25항차, 제26항차, 제30항차, 제31항차, 제33항차, 제37항차, 제40항차 등 8번의 항차에서는 양하항이 2곳이었다. 양하항이 2곳일 때에는 첫 번째 양하항에서 선적 화물의 일부만 하역하고, 나머지 화물은 다른 항구에서 하역하는 등 2곳의 항구에 화물을 나누어 하역하는 형태로 운항되었다.

<표 5> 개조 이후 스텔라데이지 운항이력

항차	선적량	선적항	기간	양하항	기간
V.4	253,531MT	Ponta Da Madeira	2009.02.28.~ 2009.03.06.	광양항	2009.04.13.~ 2009.04.17.
V.5	253,618MT	Ponta Da Madeira	2009.05.19.~ 2009.05.23.	광양항	2009.06.29.~ 2009.07.04.
V.6	251,889MT	Saldanha Bay	2009.08.02.~ 2009.08.08.	광양항	2009.09.02.~ 2009.09.08.
V.7	253,249MT	Ponta Da Madeira	2009.10.11.~ 2009.10.22.	광양항	2009.11.28.~ 2009.12.11.
V.8	221,415MT	Port Walcott	2009.12.20.~ 2009.12.23.	광양항	2010.01.03.~ 2010.01.07.
V.9	252,637MT	Ponta Da Madeira	2010.02.18.~ 2010.02.23.	광양항	2010.04.02.~ 2010.04.11.
V.10	256,514MT	Ponta Da Madeira	2010.05.14.~ 2010.05.31.	광양항	2010.07.08.~ 2010.07.24.
V.11	256,627MT	Ponta Da Madeira	2010.08.30.~ 2010.09.13.	광양항	2010.10.29.~ 2010.11.08.
V.12	258,772MT	Ponta Da Madeira	2010.12.13.~ 2010.12.24.	광양항	2011.02.02.~ 2011.02.09.
V.13	257,172MT	Tubarao	2011.03.16.~ 2011.04.07.	광양항	2011.05.17.~ 2011.05.21.
V.14	222,670MT	Port Walcott	2011.06.02.~ 2011.06.12.	광양항	2011.06.24.~ 2011.06.29.

항차	선적량	선적항	기간	양하항	기간
V.15	입거(Dry Dock)				
V.16	255,437MT	Ponta Da Madeira	2011.08.18.~ 2011.08.27.	광양항	2011.10.06.~ 2011.10.15.
V.17	252,365MT	Tubarao	2011.11.19.~ 2011.11.21.	광양항	2012.01.01.~ 2012.01.09.
V.18	250,641MT	Tubarao	2012.02.14.~ 2012.03.01.	광양항	2012.04.11.~ 2012.04.14.
V.19	252,317MT	Saldanha Bay	2012.05.09.~ 2012.05.13.	광양항	2012.06.10.~ 2012.06.16.
V.20	입거(Dry Dock)				
V.21	251,283MT	Saldanha Bay	2012.08.03.~ 2012.08.14.	광양항	2012.09.11.~ 2012.09.28.
V.22	252,270MT	Tubarao	2012.11.02.~ 2012.11.06.	광양항	2012.12.15.~ 2012.12.21.
V.23	253,012MT	Ponta Da Madeira	2013.01.28.~ 2013.02.16.	광양항, 포항항	2013.03.31.~ 2013.04.10.
V.24	252,317MT	Tubarao	2013.05.15.~ 2013.05.26.	광양항	2013.07.04.~ 2013.07.09.
V.25	258,507MT	Ponta Da Madeira	2013.08.16.~ 2013.08.21.	광양항, 포항항	2013.10.04.~ 2013.10.08.
V.26	259,173MT	Ponta Da Madeira	2013.11.18.~ 2013.12.01.	광양항, 포항항	2014.01.13.~ 2014.01.26.
V.27	260,316MT	Ponta Da Madeira	2014.03.04.~ 2014.03.17.	광양항	2014.04.28.~ 2014.05.04.
V.28	226,611MT	Tubarao	2014.06.09.~ 2014.06.15.	포항항	2014.07.24.~ 2014.07.30.
V.29	227,417MT	Ponta Da Madeira	2014.09.07.~ 2014.09.09.	포항항	2014.10.25.~ 2014.11.01.
V.30	259,800MT	Ponta Da Madeira	2014.12.09.~ 2014.12.21.	Majishan, Qingdao	2015.02.01.~ 2015.02.08.
V.31	260,027MT	Tubarao	2015.03.18.~ 2015.03.22.	Majishan, Rizhao	2015.05.02.~ 2015.05.11.
V.32	입거(Dry Dock)				
V.33	259,916MT	Ponta Da Madeira	2015.07.03.~ 2015.07.10.	Majishan, Lianyungang	2015.08.22.~ 2015.08.31.

항차	선적량	선적항	기간	양하항	기간
V.34	260,057MT	Ponta Da Madeira	2015.10.08.~ 2015.10.14.	Lianyungang	2015.11.27.~ 2015.12.01.
V.35	260,009MT	Ponta Da Madeira	2016.01.07.~ 2016.01.11.	Lianyungang	2016.02.22.~ 2016.03.02.
V.36	260,000MT	Tubarao	2016.04.04.~ 2016.04.11.	Lumut	2016.05.08.~ 2016.05.24.
V.37	258,327MT	Guaiba	2016.06.21.~ 2016.06.27.	Lianyungang, Rizhao	2016.08.05.~ 2016.08.13.
V.38	입거(Dry Dock)				
V.39	260,009MT	Ponta Da Madeira	2016.10.01.~ 2016.10.08.	Lumut	2016.11.11.~ 2016.11.20.
V.40	260,002MT	Guaiba	2016.12.19.~ 2016.12.25.	Tianjin, Caofeidian	2017.02.05.~ 2017.02.13.
V.41	260,003MT	Guaiba	2017.03.22.~ 2017.03.26.		

2.8 선박 안전관리 체계

2.8.1 안전관리시스템 수립 및 인증

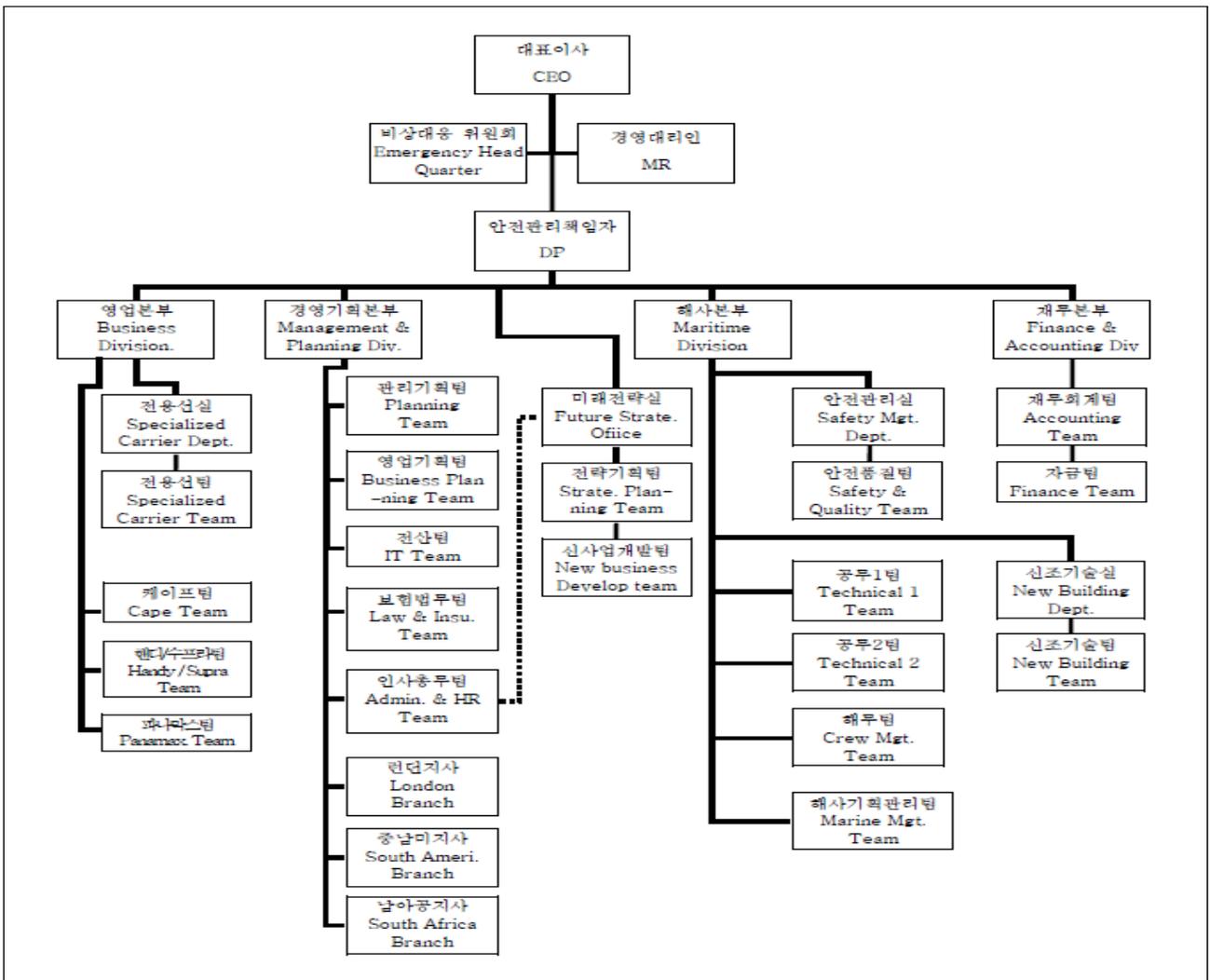
- 2.8.1.1 국제해상인명안전협약(SOLAS) 제9장 및 국제안전관리규약(ISM Code)에 따라 국제항해에 종사하는 선박과 이들 선박을 운항하는 회사는 안전관리시스템을 수립·시행해야 한다.
- 2.8.1.2 폴라리스쉬핑(주)은 스텔라데이지를 포함하여 총 28척의 선박에 대해 안전관리시스템을 수립·시행하고 한국선급으로부터 2013년 12월 11일 사업장 갱신 인증심사에 합격하여 2019년 2월 3일까지 유효한 안전관리적합증서(DOC)를 소지하고 있었다.
- 2.8.1.3 스텔라데이지는 2009년 1월 22일 임시 인증심사를 걸쳐 같은 해 7월 1일 최초 인증심사에 합격하였고, 2014년 4월 30일 선박 갱신 인증심사에 합격하여 2019년 6월 30일까지 유효한 선박안전관리증서(SMC)를 소지하고 있었다. 개조 이후 선박 인증심사 이력은 <표 6>과 같다.

<표 6> 선박 안전관리시스템 인증심사 현황

구분	심사종류	심사일	구분	심사종류	심사일
1	임시(Interim)	2009.01.22.	4	갱신(Renewal)	2014.04.30.
2	최초(Initial)	2009.07.01.	5	중간(Intermediate)	2017.02.07.
3	중간(Intermediate)	2012.04.13.			

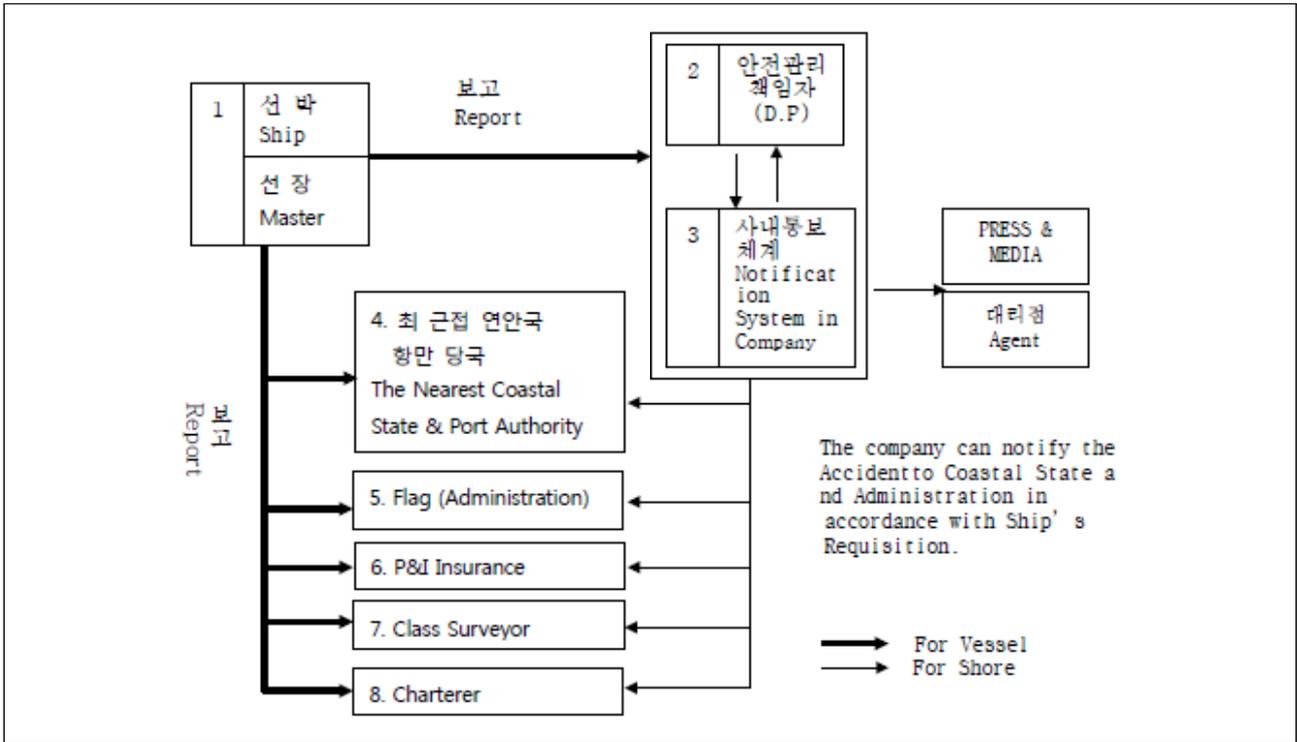
2.8.2 안전품질환경매뉴얼 주요내용

2.8.2.1 폴라리스쉬핑(주)은 서울에 본사가 있고, 부산에 지사를 두고 있다. 서울본사에는 영업본부, 경영기획본부, 미래전략실, 재무본부가 있고, 부산지사에는 해사본부가 운영되고 있다(2017년 기준).



<그림 10> 사고 당시 선사 조직도

- 2.8.2.2 선박의 안전운항을 담당하는 안전관리책임자(Designated Person, DP)는 선박과 육상 부서 간 또는 각 부서·팀 간의 원활한 의사소통을 보장하기 위하여 정기/수시로 안전 품질환경과 관련한 경영활동을 대표이사에게 직접 보고할 수 있는 권한을 가진다.
- 2.8.2.3 선장은 선박의 운항관리에 책임을 지고 승선 중에 회사를 대리하여 선박안전과 환경 보호를 위한 최선의 결정을 내리고 필요한 경우 육상에 지원을 요청할 수 있는 책임과 권한을 가진다.
- 2.8.2.4 해무팀은 회사가 소유 또는 관리하는 선박의 모든 해상직원에게 대한 교육훈련 절차를 마련하고 선박의 안전운항, 화물관리 및 비상상황 등에 대해 선종별로 교육을 시행한다.
- 2.8.2.5 해상직원인사관리절차서에 따라 한국인 선원에 대한 채용, 승진 및 배승 등 인사관리는 폴라리스쉬핑(주)이 직접 수행한다. 외국국적 선원의 승선은 폴라리스쉬핑(주)와 해상직원관리회사의 관리계약에 따라 이루어진다. 폴라리스쉬핑(주)가 승선선박, 직급, 승선 예정일 등을 관리회사에 통보하면 관리회사는 승선예정자를 회신하고, 승선 예정자에 대한 적격성을 해무팀에서 검토한 후 외국국적 선원의 승선이 이루어진다.
- 2.8.2.6 공무팀은 선체, 기관 등의 상태 관련하여 선박에서 보고하는 분기별 마스터리포트와 선체점검보고서를 검토하고 선박의 자체정비가 불가능한 경우에는 육상에서 정비할 수 있도록 지원한다.
- 2.8.2.7 육상정비를 요청하기 위해서는 기관장 검토, 선장의 승인을 거친 수리신청서를 입항 전 최소 7일 전에 공무감독에게 송부해야 한다. 긴급한 경우에는 공무감독과 협의하여 진행할 수 있다.
- 2.8.2.8 영업팀은 화물의 안전한 취급과 운송을 위하여 적정한 화물정보를 선박에 제공하고, 선박에서 작성하는 적·양하 계획서를 검토하는 등 화물관리를 총괄한다.
- 2.8.2.9 또한, 운항항로의 해상기상이 풍력계급(Beaufort) 8 이상으로써 선박, 화물에 손상을 줄 수 있는 경우 선장은 기상상태를 파악하여 침로를 변경하거나 속력을 줄이고 필요 시 피항 등의 조치를 하여야 하며 회사의 안전관리실과 영업팀에 보고해야 한다.
- 2.8.2.10 선박에서 비상상황 발생 시에 선장은 안전관리책임자와 관계기관에 상황을 보고하고, 안전관리책임자는 해사본부장 및 대표이사에게 상황을 보고하여 비상대책위원회를 소집하며, 회사의 각 팀별로 24시간 당직체제를 유지하도록 되어 있다.



<그림 11> 사고 당시 선사 비상보고체계도

2.9 개조 후 주요 수리 및 검사 내역

2.9.1 중간검사 / 2011년 7월 입거

2.9.1.1 개조 후 첫 번째 중간검사를 위해 2011년 6월 28일부터 7월 2일까지 항해 동승 (Riding)검사와 플로팅(Floating)검사, 같은 해 7월 4일부터 7월 13일까지 중국 코스코 조선소(저우산)에서 입거(Drydock)검사가 실시되었다. 이때 모든 평형수탱크, 1번과 6번 좌현·우현 공탱크, 1번에서 4번까지의 중앙 공탱크, 그리고 모든 화물창에 대한 정밀검사와 두께계측이 실시되었다. 이들 검사는 한국선급 규칙에 따라 집행되었다.

2.9.1.2 정밀검사와 두께계측 결과, 한국선급 규칙에 따른 지적사항은 식별되지 않았다. 다만, 평형수탱크 도장상태는 2번과 4번 좌현·우현 평형수탱크는 양호(Fair)¹⁸⁾로, 3번 좌현·우현 평형수탱크는 불량(Poor)¹⁹⁾으로 식별되었다.

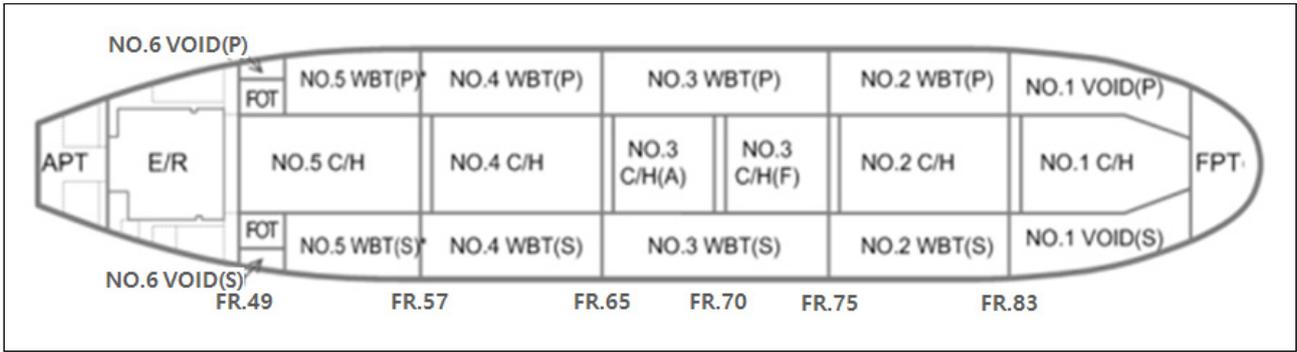
18) 부분적 도막 탈락이나 20% 이상의 가벼운 부식이 있는 상태임(불량으로 식별되는 경우는 제외)

19) 20% 이상의 전반적 도막 탈락이 있거나 10% 이상에 심한 부식이 있는 상태로 다음 선급검사 시에도 지속적인 관찰이 필요한 상태임

2.9.1.3 조선소에 입거검사 중 주요 강재에 대한 수리내역은 <표 7>과 같다.

<표 7> 2011년 7월 입거검사 시 주요 강재 수리내역

구역	위치(Frame No)	수리 부위	비고
2번 좌현 평형수탱크	75번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 18번 수직보강재²⁰가 통과하는 1번 수평거더 슬롯홀 주변 더블플레이트 22번 수직보강재가 통과하는 2번 수평거더 슬롯홀 주변 더블플레이트 	변형 또는 균열부위 신환
	82번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 3번과 4번 선측 종통재 사이 선측 횡늑골 7번과 8번 선측 종통재 사이 선측 횡늑골과 종통재 	
	82번과 83번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 3번과 4번 선측 종통재 	
2번 우현 평형수탱크	75번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 22번 수직보강재가 통과하는 1번 수평거더 슬롯홀 주변 더블플레이트 21번 수직보강재가 통과하는 2번 수평거더 슬롯홀 주변 더블플레이트 	균열부위 신환
3번 좌현·우현 평형수탱크	70번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 19번과 20번 갑판 종통재 	균열부위 신환
4번 좌현 평형수탱크	57번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 20번과 21번 및 26번~28번 수직보강재가 통과하는 1번 수평거더 슬롯홀 주변 더블플레이트 20번과 21번 수직보강재 	변형 또는 균열부위 신환
	57번과 58번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 격벽의 8번 종통재 	
	60번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 상부 크로스타이 	
	61번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 상부 크로스타이 왼쪽 끝단 면재 12번 선측 종통재를 지지하는 브라켓 용접부 	
4번 우현 평형수탱크	57번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 10번과 12번 및 13번 선측 종통재에 위치한 수평보강재 종격벽에 위치한 8번 종통재 면재 종격벽의 14번~17번 종통재를 지지하는 수평트리핑 브라켓 20번과 21번, 24번 및 26번 수직보강재가 통과하는 2번 수평거더 슬롯홀 주변 더블플레이트 	변형 또는 균열부위 신환
		59번 프레임	
	61번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 갑판 아래 크로스타이 양 끝단의 보강재 및 용접부 	
	63번과 64번 프레임	<ul style="list-style-type: none"> 갑판 아래 크로스타이 양쪽 끝단 용접부 	



<그림 12> 주요 프레임 위치

2.9.2 정기검사 / 2012년 6월 입거

2.9.2.1 개조 후 첫 번째 정기검사는 2012년 6월 16일부터 2013년 4월 4일까지 실시되었다. 중국 제스코조선소(저우산)에서 2012년 6월 16일부터 7월 6일까지 입거검사 등 검사를 수행하였고, 이후 2013년 4월 2일부터 4월 4일까지 검사를 최종 마무리함으로써 정기검사가 완료되었다. 정기검사에서는 모든 화물창과 평형수탱크, 1번, 5번, 6번 좌현·우현 공탱크에 대한 정밀검사와 두께계측을 실시하였다.

2.9.2.2 정밀검사와 두께계측 결과, 한국선급 규칙에 따른 지적사항은 없었다. 3번 우현 평형수탱크는 부식으로 인하여 내부 경화도장을 다시 하였고, 2번과 4번 좌현·우현 평형수탱크는 신환된 강재에 대해 경화도장을 하여 모든 화물창 및 평형수탱크 도장상태는 대체로 양호하였으나, 3번 좌현 평형수탱크는 불량(Poor)으로 식별되었다.

2.9.2.3 조선소 입거검사 중 한국 광양항에서 발생한 부두접촉(2012년 6월 11일)으로 인한 선수우현 상부외판, 갑판 및 갑판창고 등에 대해 손상수리를 실시하였다.

2.9.2.4 입거검사 시 주요 강재에 대한 수리내역은 <표 8>과 같다.

20) 주부재에 연결되는 스티프너 등 보 형태의 작은 부재(2차 부재)

<표 8> 2012년 6월 입거검사 시 주요 강재 수리내역

구역	위치(Frame No)	수리 부위	비고
4번 좌현 평형수탱크	58번 프레임	• 15번, 16번, 17번, 29번, 30번, 31번 갑판 총통재 인근 늑판	부식부위 신환
	59번 프레임	• 28번~30번 갑판 총통재 인근 늑판	
	61번 프레임	• 17번~19번과 22번~28번, 31번 갑판 총통재 인근 늑판	
	62번 프레임	• 19번~26번, 28번 갑판 총통재 인근 늑판 일부	
	63번 프레임	• 20번에서 32번까지 갑판 총통재 인근 늑판 일부	
	64번과 65번 프레임	• 19번 갑판 총통재 면재	
	58번 프레임	• 30번~32번 갑판 총통재 면재	
4번 우현 평형수탱크	57번 프레임	• 30번 갑판 총통재 면재	부식부위 신환
	58번 프레임	• 17번~28번 갑판 총통재 인근 늑판	
	59번 프레임	• 20번~27번 갑판 총통재 인근 늑판	
	63번 프레임	• 20번~27번 갑판 총통재 인근 늑판	
	64번 프레임	• 19번~24번 갑판 총통재 인근 늑판	
	63번~65번 프레임	• 19번 갑판 총통재 면재	
	64번과 65번 프레임	• 30번과 32번 갑판 총통재 면재	

2.9.3 중간검사 / 2015년 5월 입거

2.9.3.1 개조 후 두 번째 중간검사는 2015년 5월 9일부터 5월 12일까지 항해 동승(Riding)검사와 2015년 5월 15일부터 5월 24일까지 중국 코스코조선소(대련)에서 입거검사를 실시하였고, 모든 평형수탱크와 화물창, 1번과 5번, 6번 좌현·우현 공탱크에 대한 정밀검사와 두께계측을 실시하였다.

2.9.3.2 정밀검사와 두께계측 결과, 한국선급 규칙에 따른 지적사항은 식별되지 않았다. 모든 화물창 및 평형수탱크에 대한 도장상태는 대체로 양호하였으나 3번 좌현 평형수탱크는 불량(Poor)으로 식별되었다.

2.9.3.3 조선소에 입거검사 중 주요 강재에 대한 수리내역²¹⁾은 <표 9>와 같다.

<표 9> 2015년 5월 입거검사 시 주요 강재 수리내역

구역	위치(Frame No)	수리 부위	비고
2번 좌현 평형수탱크	81번 프레임	• 0번~6번 종격벽 종통재	부식부위 신환
	75번 프레임	• 0번 종격벽 종통재	
2번 우현 평형수탱크	78번 프레임	• 2번 선측 종통재 • 3번 선측 종통재 면재	부식부위 신환
	79번 프레임	• 2번 선측 종통재 면재	
	80번 프레임	• 1번 종격벽 종통재 면재	
	75번~77번 프레임	• 1번과 4번 선측 종통재 면재	
	76번~78번 프레임	• 17번~30번 갑판 종통재 사이 갑판 늑골 면재	
	78번~79번 프레임	• 0번 종격벽 종통재	
	78번과 80번 프레임	• 2번 종격벽 종통재	
	80번~81번 프레임	• 1번 선측 종통재 면재	
4번 좌현 평형수탱크	프레임 번호 미상	• 28번~29번 갑판 종통재 사이 갑판 늑골 면재 • 26번~30번 갑판 종통재 사이 갑판 늑골 면재	부식부위 신환
	58번 프레임	• 8번 종격벽 종통재 면재	
4번 우현 평형수탱크	60번과 63번 프레임	• 5번 종격벽 종통재	부식부위 신환
	57번 프레임	• 1번 선측 종통재 면재	
	60번 프레임	• 4번 종격벽 종통재	
	63번 프레임	• 6번 종격벽 종통재	
	64번 프레임	• 5번 종격벽 종통재 면재	
	59번과 63번 프레임	• 5번 종격벽 종통재	
프레임 번호 미상	• 20번~23번 수직보강재의 1번 수평 거더 면재 • 20번~22번 수직보강재의 2번 수평 거더 면재		

2.9.4 입시검사 / 2016년 8월

2.9.4.1 2016년 8월 11일부터 8월 12일까지 중국 르자오항에서 연차검사를 실시하던 중 65번 프레임에 위치한 좌현 3번과 4번 평형수탱크 사이에 있는 횡격벽 수직보강재(Vertical Stiffener)와 우현 3번과 4번 평형수탱크 사이의 횡격벽 수직보강재에서 좌굴변형²²⁾이 발견되었다.

21) 검사보고서에는 강재작업이 기록되지 않았지만, 조선소 작업완료 보고서에 보고된 강재작업을 담당 검사원이 확인한 메모기록에 근거함

22) 구조물이 압축하중을 받을 때 구조물이 버틸 수 있는 한계에 도달하여 구부러지는 등 불안정한 형태로 변형되는 현상

- 2.9.4.2 한국선급 현장검사원은 해당 손상부위 이외에 인접한 다른 횡격벽(57번과 75번 프레임)에서는 손상이 관찰되지 않았고, 선장진술서에 2016년 2월에 항해 중 풍력계급(Beaufort) 7~8 정도의 바람과 파도를 만나 선박의 동요가 심하게 있었으며, 같은 해 3월에 해당 손상부위를 발견하였다고 서술되어 있음을 확인하였다고 진술하였다.
- 2.9.4.3 한국선급 현장검사원은 65번 프레임 횡격벽 손상을 한국선급 본부(부산)에 보고하였고, 한국선급 본부는 구조해석 보고서 및 검사기록 등을 검토²³⁾한 결과, 해당 손상이 65번 횡격벽에 한정된 것으로 판단하고 손상 부위만 원상복구토록 하였다.
- 2.9.4.4 이에 따라 이 선박은 중국 제스코조선소(저우산)로 이동하여 2016년 8월 16일부터 8월 25일까지 안벽에 접안한 상태에서 <그림 13>과 같이 65번 프레임의 손상 횡격벽을 신환하고 임시검사를 실시하였다. 주요 신환내역은 다음과 같다.
- 좌현 3번과 4번 평형수탱크 사이 횡격벽 : 가로²⁴⁾ 약 12.1미터 × 세로 약 13.4미터의 횡격벽 면재 및 해당 부분의 수직보강재 14개, 브라켓 14개 등이 신환되었다.
 - 우현 3번과 4번 평형수탱크 사이 횡격벽 : 가로 약 12.1미터 × 세로 약 9.4미터의 횡격벽 면재 및 해당 부분의 수직보강재 14개, 브라켓 14개 등이 신환되었다.



<그림 13> 65번 프레임 횡격벽 수리내역

23) 선박개조 당시에 승인된 화물창 구조해석 보고서에 따르면 해당 횡격벽의 구조해석 응력 결과치가 선급 허용치를 만족(선급 허용치의 약 69% 수준)하였고, 유사 구조를 갖는 주변 격벽에서는 손상이 발견되지 않았음

24) 가로 길이는 횡격벽의 신환된 부분 중 상부의 길이임(우현도 같음)

2.10 선사에 의한 자체 점검

- 2.10.1 폴라리스쉬핑(주)의 안전관리절차에 따라 선장은 화물창, 탱크 및 갑판·기관설비 등 선박 전반에 대하여 분기별로 점검을 하고 결과를 선사(공무팀)에 보고하도록 되어 있다.
- 2.10.2 이에 따라 2009년 1분기부터 사고 발생 직전인 2016년 4분기까지 매분기 선장보고서(Master's Report)와 선체점검보고서(Hull Inspection Report)가 선사에 제출되었다. 각 화물창과 탱크의 상태는 공선항해 중 선원이 내부로 들어가 점검한 결과이다.
- 2.10.3 이 선박의 분기별 점검보고서를 보면, 개조 후 처음 실시한 2009년 1분기 점검보고서에서 도장 마무리 미흡과 화물선적 후 크로스데크(Cross Deck) 등 상갑판 좌굴(Buckling)이 지적되었다.
- 2.10.4 첫 번째 점검보고서 이후에도 상갑판 전반에 대한 좌굴현상은 지속적으로 관찰되었으나 일정 기간 이후 더 이상 진전되었다는 기록은 없었다.
- 2.10.5 평형수탱크나 공탱크의 도장불량 문제는 자체 점검에서 지속적으로 보고되었다. 특히 3번 좌현 평형수탱크의 도장상태는 모든 점검보고서에서 불량으로 보고되었다(〈그림 14〉 참조). 1번, 5번 좌현·우현 공탱크의 도장상태도 2010년부터 2015년 2분기까지 대부분 불량한 것으로 평가되었다. 화물창 아래에 위치한 1번~5번 중앙 공탱크의 도장상태도 2013년 4분기부터 모두 불량으로 보고되었다(〈그림 15〉 참조).



〈그림 14〉 3번 좌현 평형수탱크(2013년 4분기 점검보고서)



<그림 15> 화물창 하부 중앙 공탱크(2013년 4분기 점검보고서)

2.10.6 다른 평형수탱크에 비해 도장상태가 불량하다고 보고된 3번 좌현·우현 평형수탱크 중 우현 평형수탱크는 2012년 6월경 정기검사를 위한 조선소 상가 시에 도장을 다시 하였으나 3번 좌현 평형수탱크는 다시 도장하지 않았다²⁵⁾.

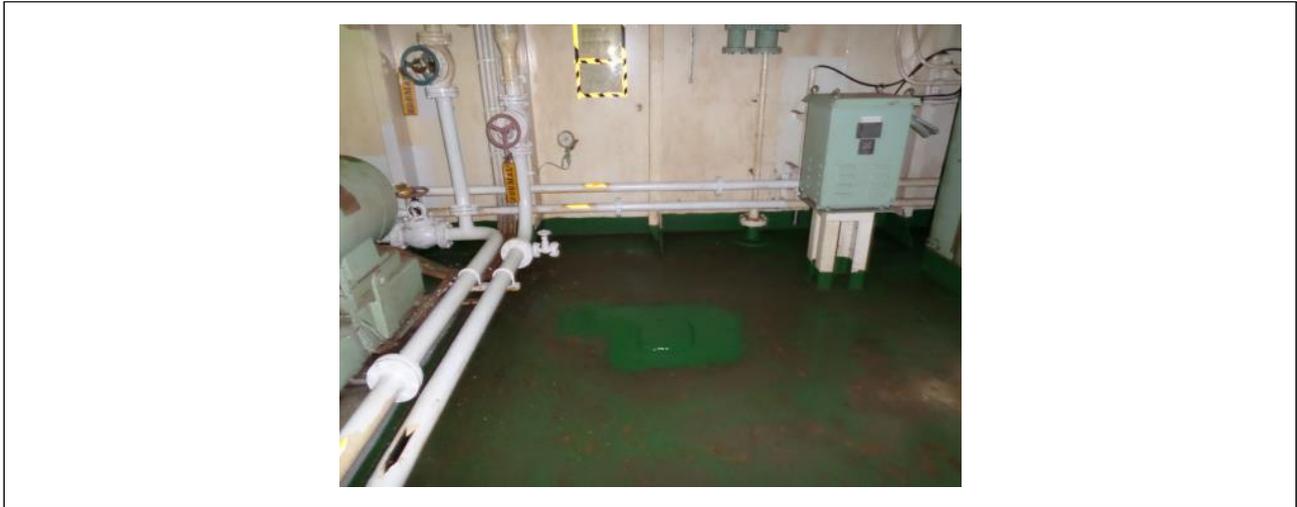
2.10.7 또한, 이 선박의 분기별 보고서에는 선수 상갑판 외판파공부위 신환, 선수 갑판창고 바닥판 덧 시공(Doubling)²⁶⁾, 4번 좌현 평형수탱크 트랜스버스 웨브 균열 등 크고 작은 선체손상에 대해 자체 수리한 기록이 있었으나, 이러한 사항이 선박검사기관인 한국선급에 일일이 보고되어 검사받은 것은 아니었다.



<그림 16> 선수 상갑판 외판파공(2015년 3분기 점검보고서)

25) 선사는 2015년 5월경 중간검사를 위한 조선소 상가 시에 3번 좌현 평형수탱크에 대해 도장을 다시 할 계획이었으나, 도장작업에 한 달 이상 소요된다는 이유로 실시하지 아니함

26) 2015년 3분기 점검보고서에 따르면 갑판창고 바닥이 파공되어 덧 시공하였고, 전체적으로 얇아진 상태였다고 언급함



<그림 17> 선수 갑판창고 바닥 뒗 시공(2015년 3분기 점검보고서)



<그림 18> 4번 좌현 평형수탱크 트랜스버스 웹브 균열(2015년 3분기 점검보고서)

2.10.8 이 선박의 화물창 빌지웰(Bilge Well)에는 화물창 하부 중앙 공탱크로 연결되는 별도의 배출라인이 설치되어 있어 화물창에서 발생하는 수분을 중앙 공탱크로 배출²⁷⁾할 수 있도록 되어 있다. 점검보고서에 따르면 이 배출라인을 통해 화물창 빌지를 중앙 공탱크로 배출시키는 과정에서 수분이 유입됨으로써 중앙 공탱크가 부식되는 것으로 분석했다.

2.10.9 화물창 빌지웰과 중앙 공탱크를 연결하는 배출라인은 한국선급의 승인 없이 개조 당시 선사에서 임의로 설치한 것으로 추정된다.

27) 이 선박의 일항사 인수인계서에 따르면 중앙 공탱크를 통하여 화물창 빌지를 배출한 기록이 있음

- 2.10.10 2015년 9월 30일 작성된 2015년 3분기 점검보고서에서는 평형수탱크나 공탱크의 도장상태 불량 이외에 좌·우현 3번과 4번 평형수탱크 사이의 횡격벽 수직보강재 (Vertical Stiffener) 좌굴변형 현상이 보고되었다.
- 2.10.11 횡격벽 보강재의 변형은 2015년 4분기 점검보고서에도 보고되었다. 특히, 2016년 1분기 점검보고서에는 해당 횡격벽이 뒷면에서 앞면(4번 평형수탱크에서 3번 평형수탱크 방향)으로 힘을 받아 횡격벽에 있는 수직보강재 28개(좌현 14개, 우현 14개)가 상당히 휘어진 상태인 것으로 보고되었다.
- 2.10.12 선사 공무감독은 2016년 5월경 말레이시아 루무트(Lumut)항에서 이 선박을 방선하여 평형수탱크 횡격벽의 수직보강재의 좌굴변형 현상을 확인하고 선사에 수리가 필요하다는 방선결과를 보고하였다. 같은 달 선사에서는 이 선박이 싱가포르 외항에 입항하였을 때 선박설계 전문가를 보내 점검토록 하였다.
- 2.10.13 선박설계 전문가도 평형수탱크 횡격벽 수직보강재의 좌굴변형 현상을 육안으로 확인하고 선사에 수리 필요성이 있다는 결과를 제출하였으나, 선사는 이 결과를 한국선급에 보고하거나 수리 하지 않고, 이 선박을 한 항차 더 운항하였다.
- 2.10.14 이후 이 선박이 중국 르자오에 입항하여 2016년 8월 11일에서 12일까지 연차검사를 받으면서 한국선급 현장검사원에게 평형수탱크 횡격벽 수직보강재의 좌굴변형 현상을 보고하였고, 2.9.4.4와 같이 수리를 수행하였다.

section

3

사고 경위

3. 사고 경위

3.1 제41항차 브라질 구아이바항(GIT) 입항

3.1.1 이 선박은 2017년 2월 13일 중국 차오페이디안(Caofeidian)항에서 화물을 양하하고 공선상태로 출항하였다. 같은 해 2월 21일, 싱가포르에 기항하여 선장 및 선원을 교대한 후 브라질로 항해를 시작하였다.

3.1.2 브라질로 항해 중이던 이 선박은 2월 27일 폴라리스쉬핑(주) 영업팀으로부터 선적항이 브라질 리우데자네이루에 위치한 구아이바항(Guaiba)임을 통보받았다. 그리고 3월 6일에는 화물적재량이 포함된 상세 항해지시서를 받았다.

- | |
|---|
| 1) LOADPORT : Guaiba Island, Brazil
2) CARGO : 260kt +/- 10% SFHG
3) STOWAGE PLAN : Send Preliminary Stowage Plan
4) NOTICES AT LOADPORT : ETA Notice
5) DISCHARGE PORT : Chinese Ports |
|---|

<그림 19> 항해지시서 주요 내용

3.1.3 이 선박의 1등항해사는 항해지시서에 따라 화물적재량 260,000톤을 기준으로 적하계획서를 작성하여 선장에게 보고 후, 영업팀에 이를 송부하였다. 영업팀과 용선주인 발레는 선적항 출항 흘수(Draft) 및 화물적재량을 수정하여 같은 해 3월 22일 최종 적하계획서를 <그림 20>과 같이 확정하였다. 적하계획서에 따른 최종 출항흘수는 선수, 중앙 및 선미 모두 20.22미터이며, 해당 흘수는 이 선박의 하기만재흘수인 20.327미터를 초과하지 않았다.

VALE STANDARD FORMAT - CARGO PLAN AND SEQUENCE											DOCUMENT	VSFFPLAN						
											EDITION	04						
											ISSUE DATE	29/10/18						
VESSEL STELLAR DAISY						PIER GIT - SOUTH BERTH												
AGENTS GEM SHIPPING						OPERATION LOAD												
SF																		
GRADE																		
QTTY																		
TOTAL CARGO 260,000.00 mt											Load / unload rate agreed 8500 mt/hour							
Figures from cargo plan for comparison											Ballast/deballast rate 7000 mt/hour							
											ballast/deballast time (incl. stripping) 30 hour							
											TPC 165.4 mt							
LOADING / UNLOADING SEQUENCE PLAN				COMMENTS	CALCULATED VALUES							OBSERVED VALUES						
POUR	CARGO GRADE	HATCH	CARGO QUANTITY		BALLASTING OPERATIONS	TIME REQUIRED	DRAFT				MAXIMUM			DRAFT				
							FWD	AFT	BM	SF	AIR DRAFT	WD DRAFT	TRIM	FWD	AFT	WD		
BERTHING																		
1	SFHG	5	15,000	PO WBT 3 -13000, APT 400	1.88	11.05	13.80	48	81	18.55	12.40	2.80						
2	SFHG	10	15,000	PO WBT 4 -13000, APT 400	1.88	11.56	13.22	59	78	12.50	18.75	1.56						
3	SFHG	1	6,000	PO WBT2 -5000, APT 400	0.75	10.29	12.63	40	67	19.89	11.46	2.34						
4	SFHG	6	15,000	PO WBT3 -13000, APT 400	1.88	11.19	14.00	30	48	18.76	12.60	2.81						
5	SFHG	9	15,000	PO WBT4 -13000, APT 400	1.88	11.05	14.00	20	50	18.83	12.53	2.95						
6	SFHG	2	15,000	PO WBT2 -13000	1.88	10.26	15.51	35	41	18.47	12.89	5.25						
7	SFHG	8	15,000	PO WBT4 -13000	1.88	11.86	14.13	54	44	18.46	12.90	2.47						
8	SFHG	3	15,000	PO WBT2 -13000	1.88	11.38	14.73	60	56	18.30	13.06	3.35						
9	SFHG	7	15,000	PO WBT2 -4000, WBT4 -8400	1.88	12.00	14.30	67	60	18.20	13.15	2.30						
10	SFHG	4	15,000	PO WBT2 -13200	1.88	11.55	15.15	53	53	18.00	13.35	3.60						
11	SFHG	5	15,400	PO FPT 2000, WBT 3 -2000	1.93	11.61	15.34	43	32	17.88	13.48	3.73						
12	SFHG	1	11,600	FPT -3500	1.45	12.51	15.86	17	41	17.17	14.19	3.35						
13	SFHG	10	7,000	STRIPPING	0.88	13.98	15.06	29	39	16.83	14.52	1.08						
14	SFHG	6	15,400	STRIPPING	1.93	13.28	16.77	40	43	16.33	15.03	3.49						
15	SFHG	4	10,700	STRIPPING	1.34	14.23	17.74	13	43	15.37	15.99	3.51						
16	SFHG	9	11,300	STRIPPING	1.41	15.82	17.41	25	51	14.74	16.62	1.59						
17	SFHG	7	10,700	STRIPPING	1.34	15.23	19.48	22	44	14.00	17.36	4.25						
18	SFHG	3	10,000	STRIPPING	1.25	15.49	20.52	37	71	13.35	18.01	5.03						
19	SFHG	8	9,700	STRIPPING	1.21	17.31	19.89	33	39	12.75	18.60	2.58						
20	SFHG	2	11,200	STRIPPING	1.40	17.23	21.15	41	82	12.16	19.19	3.92						
CHECK DRAFT FOR TRIMMING																		
21	SFHG	9	3,000		0.38	19.54	20.53	33	77	11.32	20.04	0.99						
22	SFHG	2	3,000		0.38	20.22	20.22	55	85	11.13	20.22							
TOTAL = 260,000 MT					32.50													
REMARKS: 1- FOR ONE TYPE/GRADE OF CARGO, FILL UP ONLY HOLD / HATCH / QUANTITY 2- PLEASE COUNT NUMBERS OF HATCHES IN SEQUENTIAL MODE WITHOUT ANY LETTERS (EXAMPLE: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, ETC.) (IT IS NECESSARY FOR REFERENCE OF SHIPLOADER'S OPERATORS) 3- BENDING MOMENTS (BM) AND SHEAR FORCES (SF) ARE TO BE EXPRESSED AS A PERCENTAGE OF MAXIMUM PERMITTED IN-PORT VALUES FOR INTERMEDIATE STAGES, AND OF MAXIMUM PERMITTED AT-SEA VALUES FOR THE FINAL STAGE. EVERY STEP IN THE LOADING / UNLOADING PLAN MUST REMAIN WITHIN THE ALLOWABLE LIMITS.																		
CARGO PLAN AND SEQUENCE AGREED:																		
VALE											ON BEHALF OF VESSEL				ON BEHALF OF TERMINAL			

<그림 20> 적하계획서

3.1.4 이 선박은 같은 해 3월 22일 05시 30분(LT)경 구아이바 외항에 도착하여 투묘·대기하였으며, 당시 평형수 적재량은 2번 평형수탱크 좌현과 우현에 각각 24,100톤, 4번 평형수탱크 좌현과 우현에 각각 23,700톤, 선미 평형수탱크(APT)에 3,000톤, 선수 평형수탱크(FPT)에 7,500톤 등 총 106,100톤을 적재하고 있었다.

3.1.5 이 선박은 같은 날 18시 24분(LT)경 구아이바 외항에서 양묘하고 구아이바 내항으로 이동하기 시작하였고, 같은 날 20시 30분(LT)경 구아이바 내항에 도착하여 다시 투묘하였다.



<그림 21> 구아이바항 전경

- 3.1.6 구아이바항은 북측과 남측에 접안 선석이 각 1개씩 있다. 북측 선석의 경우 접안이 허용되는 최대 수면 위 높이(Air draft)는 19미터, 최대 선박 길이와 폭은 각각 295미터와 47미터, 최대 재화중량톤수(Deadweight)는 185,000톤이다. 남측 선석은 최대 수면 위 높이가 19미터, 최대 선박 길이와 폭은 각각 340미터와 62미터, 최대 재화중량톤수는 350,000톤이다.
- 3.1.7 이 선박은 구아이바항 남측 선석에 접안하기로 되어 있었고, 남측 선석 최대 허용가능 수면 위 높이인 19미터를 맞추기 위해 구아이바항에서 3번 좌현 및 우현 평형수탱크²⁸⁾에 각각 14,000톤의 평형수를 추가로 적재하였다.
- 3.1.8 이후 이 선박은 같은 날 23시 00분(LT)경 구아이바 내항에서 닻을 감아올린 후 다음 날인 3월 23일 01시 50분(LT)경 구아이바항 남측 선석에 접안하였다.

3.2 화물 적재

- 3.2.1 이 선박이 화주인 발레로부터 제공받은 화물명세에 따르면, 선적되는 화물의 명칭은 Sinter Feed High Silica Guaiba, 화물종류는 분철광석(Iron Ore Fines)으로 국제해상고체산적화물규칙(International Maritime Solid Bulk Cargoes Code, IMSBC Code) A그룹²⁹⁾에 속하는 화물이다.

28) 폴라리스쉬핑에 따르면 3번 평형수탱크는 평상시 사용되지 않으며, 브라질 구아이바항에서 화물적재를 위해 수면 위 높이를 낮추기 위해서만 사용되었다고 함

29) 국제해상고체산적화물규칙 제7-5규칙의 정의에 따라 A그룹에 속하는 화물은 수분함량이 운송가능수분한계를 초과할 경우 액상화될 수 있는 화물을 의미함

3.2.2 이 선박은 ‘화물의 수분함량 및 운송가능수분한계에 관한 증명서(Certificate of Moisture Content and Transportable Moisture Limit)³⁰⁾’를 발레로부터 제공받았다. 이 증명서에는 운송가능수분한계(Transportable Moisture Limit, TML)는 11.44%, 화물 수분함량(Moisture Content, MC)은 9.23%로 기재되어 있다. 증명서에 포함된 주요 내용은 <그림 22>와 같다.

CERTIFICATE OF MOISTURE CONTENT (MC) AND TRANSPORTABLE MOISTURE LIMIT (TML)	
PRODUCT:	SINTER FEED HIGH SILICA GUAIBA (SFHG)
SHIPPER:	Vale S. A.
VESSEL:	STELLAR DAISY
TRANSPORTABLE MOISTURE LIMIT (TML):	11.44 %
MOISTURE CONTENT (MC):	9.23 %
TEST PROCEDURE FOR DETERMINATION OF THE TML:	Modified Proctor/Fagerberg test procedure for Iron Ore Fines
DATE WHEN THE TML TEST PROCEDURE WAS CONDUCTED:	28/09/2016 , valid through 6 months, i. e., valid until 27/03/2017
DATE WHEN THE MOISTURE CONTENT WAS ASSESSED:	March 22nd, 2017
DATE OF ISSUE OF THE PRESENT CERTIFICATE:	March 22 nd , 2017

<그림 22> 화물의 수분함량 및 운송가능수분한계에 관한 증명서 주요 내용

3.2.3 이 선박은 브라질 구아이바항 남쪽부두에 접안하고 2017년 3월 23일 08시 25분(LT)경 부터 사전에 작성된 적하계획에 따라 화물 선적을 시작하였다. 육상 컨베이어를 통해 화물이 적재되는 양은 시간당 약 8,500톤이었고, 화물의 적재에 따라 선박에서 배출할 수 있는 평형수의 양은 시간당 약 7,000톤이었다.

30) 화물의 운송가능수분한계(Transportable Moisture Limit)와 수분함량(Moisture Content)의 계측은 브라질 정부로부터 승인받은 구아이바 항만에서 실시하였음



<그림 23> 폴라리스쉬핑(주) 동종 선박의 화물적재 사진

3.2.4 화물적재 중 같은 해 3월 25일 19시 48분(LT)경 홀수확인 및 화물정리(Trimming)를 한 차례 하였고, 이후 같은 날 20시 11분경 작업을 재개하여 21시 24분경 화물적재를 완료 하였다. 화물적재 도중 육상의 요청에 의해 몇 차례의 작업 중단이 있었다.

3.2.5 이 선박의 시간대별 화물 적재작업은 <표 10>과 같이 이루어졌다.

<표 10> 화물 적재작업 일정

DATE	TERMINAL TIME		OTHER PERIODS		NOTE
	START	END	START	END	
2017.03.23.	08:25	24:00	-	-	Commenced Loading/ Loading in Progress
2017.03.24.	00:00	24:00	-	-	Loading and Stoppages by Terminal Account
2017.03.25.	00:00	19:48	-	-	Loading and Stoppages by Terminal Account
2017.03.25.	-	-	19:48	20:11	Draft Check for Trimming -Vessel's Request
2017.03.25.	20:11	21:24	-	-	Loading and Stoppages by Terminal Account
2017.03.25.	-	21:24	-	-	Loading Completed
2017.03.25.	-	-	21:24	21:28	Final Draft Survey

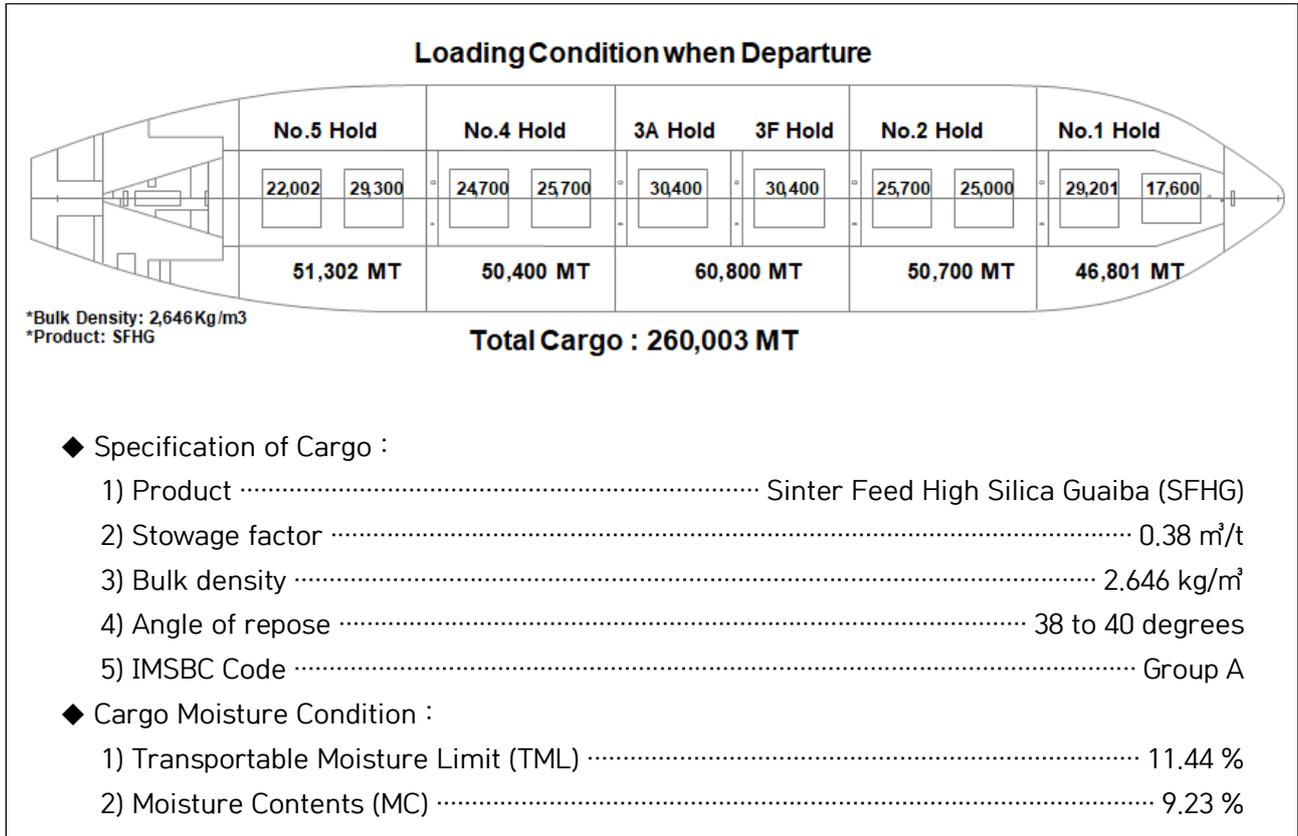
3.2.6 화물적재 완료 후 실시한 흘수 검정(Draft Survey) 결과는 <표 11>과 같다.

<표 11> 흘수 검정(Draft Survey) 결과

DRAFT SURVEY REPORT			VALE
TERMINAL: TIG		BERTH: SOUTH	
Vessel: STELLAR DAISY		LBP: 310 m	
Port Reg: MAJURO		DWT: 266140.5 MT	
Port Discharge: MAIN CHINESE PORTS		Const declared: 575.00 MT	
Light Ship: 38188.715	G. Tons: 148431	Const Found: 575.00 MT	
Port of Survey: TIG SOUTH			
DESCRIPTION	INITIAL SURVEY	FINAL SURVEY	
Date	March 23rd, 2017	March, 25th, 2017	
Fr. Draft on Mark	10.60000	20.22000	
Correction to pp	-0.00815	0.00000	
Cor. frd. Draft	10.59185	20.22000	
After Draft	13.62000	20.22000	
Correction to pp	0.12808	0.00000	
Corrected After Draft	13.74808	20.22000	
MEAN DRAFT	12.16997	20.22000	
Midship Draft Port	0.00000	20.22000	
Midship Draft Star	12.50000	20.22000	
Mean Midship Draft	12.50000	20.22000	
Correction to Midship	0.00000	0.00000	
Cor. Midship Draft	12.50000	20.22000	
QUARTER MEAN	12.41749	20.22000	
Corresp. DISPLACEMENT	178456.50	302558.06	
True TRIM	3.15623	0.00000	
L.C.F.	-10.168	0.360	
TPC/TPI	152.72	165.32	
MTC + 0.5m/MTI + 6	2832.50	3545.40	
MTC - 0.5m/MTI - 6"	2771.30	3484.00	
Trim Correction	-1482.74	0.00	
Displac. Corrected	176973.77	302558.06	
Sea Water Density	1.0240	1.0250	
Displac. Corrected	176801.11	302558.06	
CONSUMABLES	138037.40	3791.50	
Fuel Oil	3229.47	3229.50	
Diesel Oil	187.80	162.00	
Lub Oil	0.00	0.00	
Fresh Water	342.00	300.00	
Ballast	134278.13	100.00	
Others	0.00	0.00	
NET DISPLACEMENT	38763.72	298766.56	
TOTAL CARGO LOADED IN WET METRIC TONS		260003	

原本對照畢

3.2.7 이 선박에는 최종적으로 화물 260,003톤, 평형수 100톤 및 연료유(F.O) 3,229톤 등이 적재되었다. 화물창 등의 각각 적재현황은 <그림 24> 및 <표 12>와 같다.



<그림 24> 화물 적재현황

<표 12> 평형수 및 연료유 등 적재현황

구분	Weight(MT)	Volume(%)	구분	Weight(MT)	Volume(%)
F.P W.B.T(C)	0	0	FWD F.O TANK(P/S)	0	0
No.2 W.B.T(P)	30	0.12	F.O TANK(P)	2000	82.40
No.2 W.B.T(S)	30	0.12	F.O TANK(S)	1107	50.59
No.3 W.B.T(P)	10	0.03	F.O SETT. T(P)	85	95.79
No.3 W.B.T(S)	10	0.03	F.O SERV. T(P)	37	87.37
No.4 W.B.T(P)	10	0.04	D.O TANK(S)	150	45.47
No.4 W.B.T(S)	10	0.04	D.O SERV T(S)	12	74.21
A.P W.B.T(C)	0	0	DRINK WATER T(P)	150	57.89
B.W.T TOTAL	100	0.06	FRESH WATER T(S)	150	57.89

3.2.8 한편, 날씨정보업체인 웨더컴퍼니(<https://weather.com>)에서 제공하는 기상정보에 따르면 이 선박이 브라질 구아이바항에 입항하기 전날인 2017년 3월 21일부터 2017년 3월 25일 출항할 때까지 현지에 비는 오지 않았다.

3.3 구아이바항(GIT) 출항 및 항해

3.3.1 스텔라데이지는 브라질 구아이바항에서 철광석 260,003톤을 적재하고, 2017년 3월 25일 22시 54분(LT)경 중국 칭다오항(Qingdao)을 향해 출항하였다. 선원은 24명(한국선원 8명, 필리핀선원 16명)이 승선 중이었다.

3.3.2 출항 당시 이 선박의 흘수(Draft)는 선수 20.22미터, 중앙부 20.22미터, 선미 20.22미터로 보고되었다.



<그림 25> 개략적인 예정 항로 및 사고위치

3.3.3 브라질 구아이바항을 출항한 후 같은 해 3월 26일부터 3월 31일까지 이 선박이 선사에 보고한 정오보고서(Noon Report)에 따르면, <표 13>과 같이 주기관 회전수 약 64RPM, 속력 11~12노트로 항해 중이었다. 침로는 110~120도로 남대서양을 가로질러 아프리카 대륙 남단을 향하고 있었다.

<표 13> 정오보고서(2017.03.26.~03.31.) 주요 내용

Date	Position		RPM	Speed	Course	Wind Direction	Wind Force
	LAT.	LONG.					
3.26.	24-13S	041-52W	63.4	11.74	116	W	4
3.27.	26-33S	037-07W	64.0	12.29	120	W	5
3.28.	28-54S	032-15W	63.9	11.67	120	SE	7
3.29.	30-54S	028-15W	64.3	11.13	115	SE	7
3.30.	32-27S	023-24W	64.2	11.08	115	SE	7
3.31.	34-18S	018-47W	63.7	11.09	110	SE	7

3.3.4 항해 중 기상상황은 같은 해 3월 26일과 27일은 풍력계급(Beaufort) 4-5였으나 3월 28일부터 사고 당일까지는 풍력계급 7로 보고(정오보고서)되었다.

3.3.5 이 선박의 항해당직은 1등항해사, 2등항해사, 3등항해사가 각자 조타수 1명과 함께 4시간씩 근무 후 교대하여 8시간 휴식하고, 다시 당직을 수행하는 체계로 24시간 운용되었다. 다만, 항해 중 조타수는 야간에는 항해사와 함께 당직을 수행하나 주간에는 일상적인 갑판 정비작업을 지원하였다.

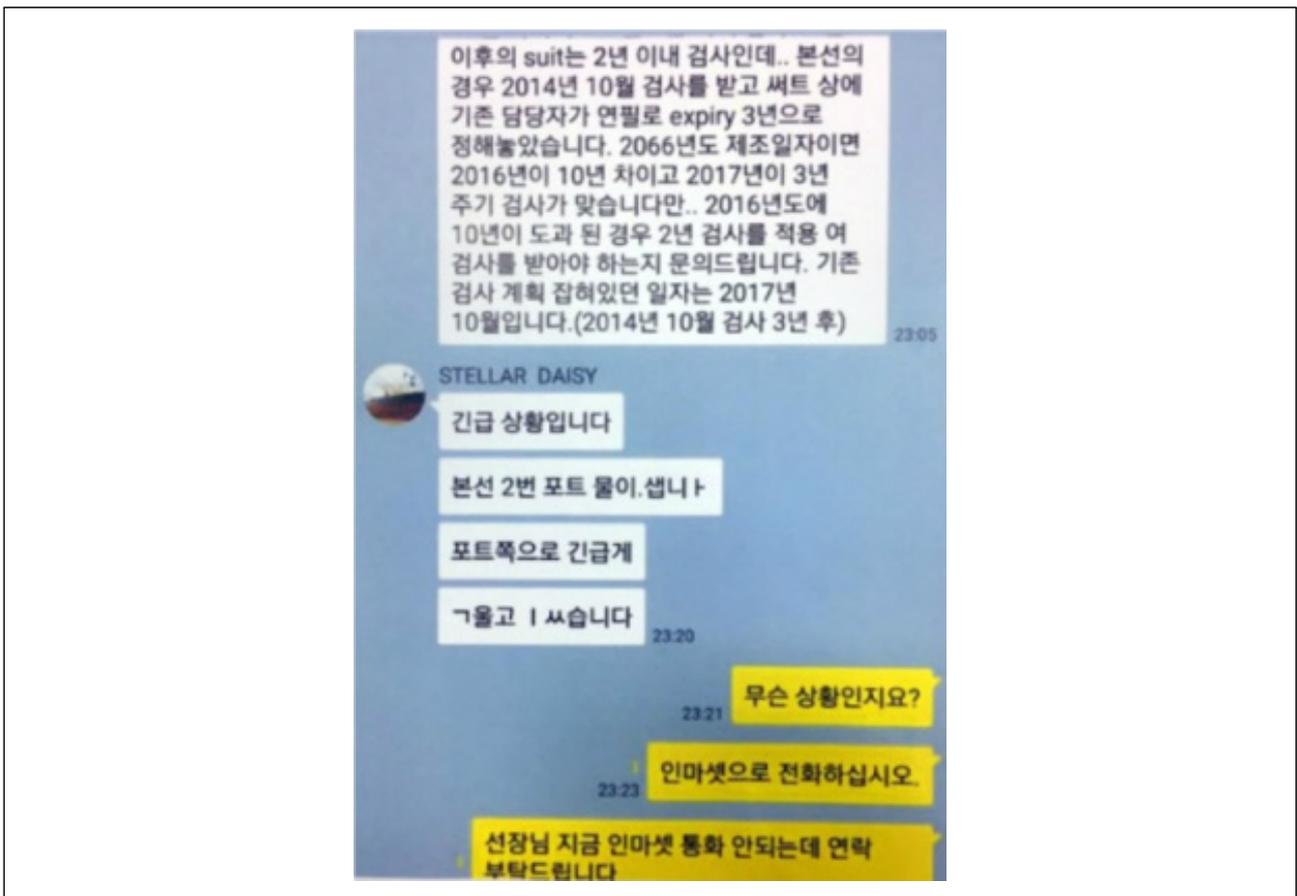
3.3.6 항해 중 기관실 당직은 2등기관사, 3등기관사A, 3등기관사B가 항해당직과 같은 형태로 4시간씩 번갈아 당직업무를 수행하였고, 1등기관사와 기관부원은 일상적인 기관 정비작업을 전담하면서 필요에 따라 기관당직도 지원하였다.

3.4 사고 발생

3.4.1 2017년 3월 31일 11시 45분(LT)경 2등항해사는 3등항해사로부터 당직을 인계받고 선교에서 항해당직을 수행하기 시작하였다.

3.4.2 3월 31일 정오 기준으로 작성한 정오보고서(Noon Report)가 같은 날 13시 03분(LT)경 전산시스템을 통해 선사로 송부되었고, 이 선박은 침로 약 110도, 속력 약 11.09노트로 항해 중이라고 보고되었다.

- 3.4.3 같은 날 13시 00분(LT)경 갑판부원들은 점심식사를 마치고 거주구역 내에서 페인트 작업 등을 시작하였고, 기관부원들은 기관실 내에서 파이프 청소·수리 작업을 시작하였으며, 2등기관사는 기관실에서 기관당직 업무를 수행하고 있었다.
- 3.4.4 항해당직을 수행하던 2등항해사는 이 선박에 제공된 업무용 휴대전화로 같은 날 13시 05분(LT)경 공무감독에게 SNS(카카오톡) 메시지를 보내 방수복(Immersion Suit) 검사 관련 사항을 문의하였다.
- 3.4.5 약 15분 후인 13시 20분(LT)경, 이 선박의 업무용 휴대전화를 통해 “긴급상황입니다. 본선 2번 포트 물이 샐니다. 포트 쪽으로 긴급하게 기울고 있습니다.”라는 SNS 메시지가 공무감독에게 전송되었다. 약 1분 후 13시 21분(LT)경 호놀룰루 RCC³¹⁾는 이 선박이 위성통신장치(INMARSAT-C) 디지털선택호출(Digital Selective Calling)로 발신한 조난신호를 수신하였다.



<그림 26> SNS(카카오톡) 메시지 화면³²⁾

31) 호놀룰루 합동구조협력본부(Joint Rescue Coordinate Center HONOLULU)

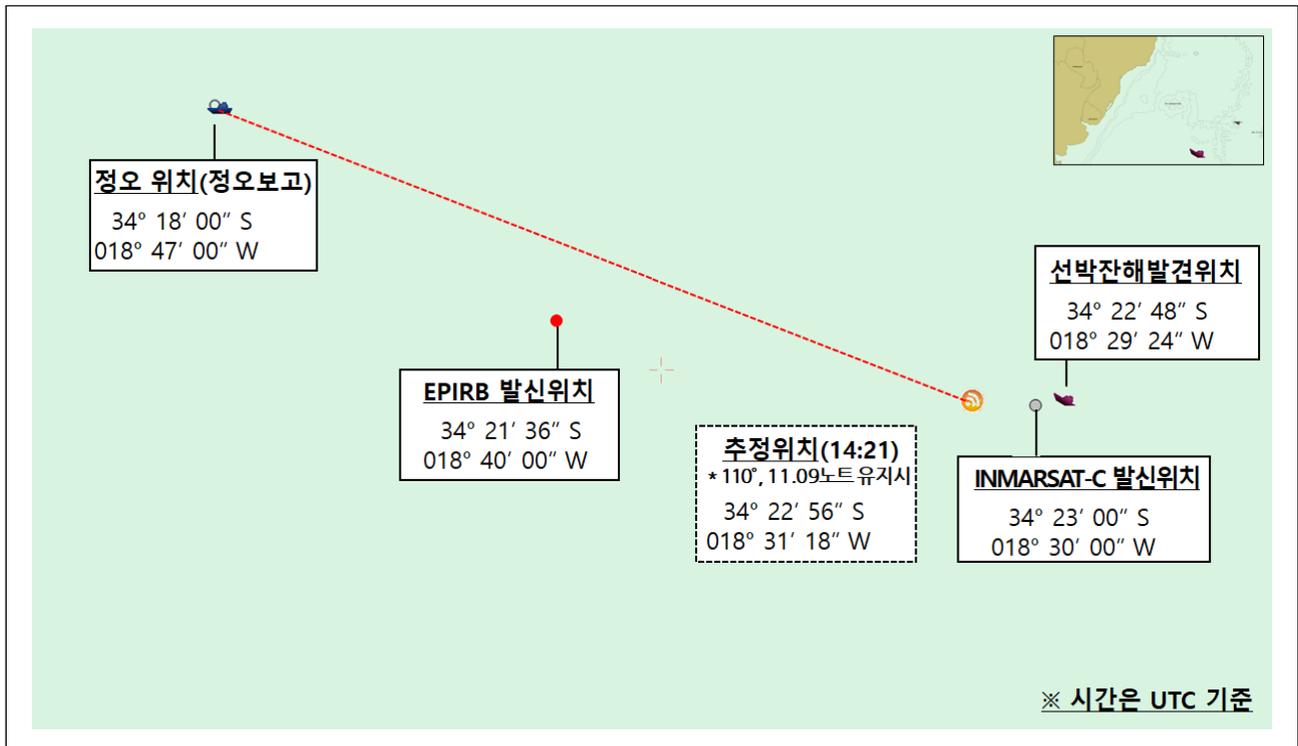
32) SNS 메시지 화면은 공무감독 휴대전화의 화면을 캡처한 것으로, SNS 메시지에 표시된 시간은 한국시간임

- 3.4.6 SNS 메시지를 확인한 공무감독은 즉시 SNS 메시지로 본선 상태가 어떤지에 대해 확인을 요청하였고, 약 2분 후인 13시 23분(LT)경에는 위성전화로 전화해 줄 것을 요청하였으나 선박으로부터 응답이 없었다.
- 3.4.7 한편, 생존선원 2명의 진술에 따르면 갑판수A는 거주구역에서 페인트 작업 중 좌현 측에서 충격음과 강한 진동 및 선박이 좌현으로 기울는 것을 느끼고 선실로 가서 구명조끼를 입고 방수복을 들고 거주구역 좌현 외부 비상소집장소로 달려갔으나 아무도 없었으며, 이어 선장의 선내방송(“ALL CREW GO TO BRIDGE”)을 듣고 거주구역 외부통로를 이용하여 선교로 올라갔다.
- 3.4.8 선교로 올라간 갑판수A는 선장, 기관장, 2등항해사, 3등항해사, 실습항해사, 조리장, 조리원, 갑판부원, 기관부원 등이 있는 것을 보았으며, 3등항해사가 무선통신장비로 “MAYDAY”를 외치고 있는 것을 보았다. 그가 선교에서 본 경사계는 좌현 40도를 가리키고 있었다.
- 3.4.9 갑판수A는 선박이 좌현으로 계속 기울어 해수가 선교를 덮치려 하자 좌현 윈브릿지에서 바다로 뛰어 들었다.
- 3.4.10 또 다른 생존자인 조기장은 기관실 3rd Deck에서 기기 정비작업 중 강한 진동과 함께 주기관 회전수가 감소하는 것을 느꼈으며, 이후 선장의 선내방송을 듣고 기관실을 벗어났다고 진술했다.
- 3.4.11 조기장은 기관실 3rd Deck에서 2등기관사가 발전기를 구동하는 것을 보았고, 2nd Deck에서 1등기관사가 빨리 기관실을 벗어나라고 손짓을 하는 것을 보았으며, 선박이 좌현으로 기울기 시작했다.
- 3.4.12 조기장은 기관실을 벗어나 상갑판(Upper Deck)으로 나왔을 때 선박이 좌현으로 더욱 기울어져서 선교로 올라가지 못하고 거주구역 우현 비상소집장소(Muster Station)에서 핸드레일을 붙잡고 있었다.
- 3.4.13 조기장 뒤쪽에는 갑판장이 핸드레일을 붙잡고 있었고, 상갑판 거주구역 우측 출입문 통로에는 1등항해사, 1등기관사, 기관원, 실습기관사가 통로 핸드레일을 잡고 있었다. 조기장과 갑판장은 우현 측에 있는 구명뗏목을 진수하려 하였으나 선박이 너무 기울어 상갑판 우현 측 핸드레일을 계속 붙잡고 있어야 했다.

- 3.4.14 조기장은 우현 5번 평형수탱크 인근에서 물과 기름이 치솟아 오르는 것을 보았으며, 이후 배가 좌현으로 계속 기울어졌으며, 결국 밀려오는 큰 파도에 의해 바다로 휩쓸려 갔다.
- 3.4.15 이후 이 선박은 좌현으로 더욱더 기울면서 순식간에 침몰되었고, 갑판수A와 조기장은 물속으로 빨려가듯 들어갔다가 다시 물 밖으로 나왔다.
- 3.4.16 물속에서 나온 갑판수A는 약 300미터 거리에 있는 구멍뚫목을 발견하고 수영하여 구멍뚫목에 올라탔고, 이어 조기장도 약 300미터를 수영하여 갑판수A가 있는 구멍뚫목에 올라탔다.
- 3.4.17 이 선박에 설치된 위성비상위치지시용 무선표지설비(EPIRB)의 조난신호는 브라질 산토스 남서쪽 약 1,550마일 해상에서 작동되어 같은 날 13시 25분(LT)경 호놀룰루 RCC에서 수신하였다.

3.5 사고 위치

- 3.5.1 위성통신장치 디지털선택호출(INMARSAT-C DSC)을 통해 13시 21분(LT)경 수신된 조난 위치는 남위 34도 23분·서경 18도 30분이다. 위성비상위치지시용 무선표지설비(EPIRB)의 조난신호는 13시 25분(LT)경 수신되었는데, 그 위치는 위성통신장치 디지털선택호출(INMARSAT-C DSC) 위치로부터 약 280도 방향, 약 8.5마일 떨어진 남위 34도 21.6분·서경 18도 40.0분 해상으로 표시되었다.
- 3.5.2 사고 당일 보고된 정오보고서에 따르면 이 선박은 12시 00분(LT)에 남위 34도 18분·서경 018도 47도 해상을 침로 약 110도, 속력 약 11.09노트로 항해 중이었고, 정오위치로부터 위성통신장치 디지털선택호출에 의한 조난위치까지는 약 110도, 11.48노트의 속력으로 항해해 온 것으로 계산된다.



<그림 27> 사고위치

3.5.3 정오위치, 선박에서 보내온 SNS 메시지 발신시각, 조난신호(발신위치, 시각) 등을 고려할 때, 이 사고는 위성통신장치 디지털선택호출에 의한 조난위치 발신 직후인 2017년 3월 31일 14시 21분경(UTC) 브라질 산토스 남동방 약 1,550마일 거리인 남위 34도 23분·서경 18도 30분 해상에서 발생³³⁾한 것으로 추정된다.

3.6 수색구조

3.6.1 2017년 3월 31일 14시 25분(UTC)경 호놀룰루 RCC(Joint Rescue Coordinate Center HONOLULU)는 스텔라데이지의 위성비상위치지시용 무선표지설비(EPIRB) 조난신호를 접수하였으며, 이를 기국인 마셜제도에 통보하였다.

3.6.2 스텔라데이지의 조난신호 수신 사실을 통보받은 마셜제도 담당자는 같은 날 14시 43분경(UTC) 선사 안전관리책임자에게 이 사실을 유선상으로 통보하고 같은 날 14시 52분경(UTC) 이메일을 통해서도 이를 통보하였다.

33) 2019년 2월에 실시된 스텔라데이지에 대한 심해수색 결과, 선체잔해는 위성통신장치 디지털선택호출을 통해 발신된 조난신호 위치에서 약 1km 떨어진 지점(남위 34도 22.8분·서경 018도 29.4분을 중심으로 길이 약 1km, 폭 약 0.8km으로 이루어진 구역)의 수심 약 3,400미터 해저에서 확인됨

3.6.3 이후 사고해역을 관할하는 우루과이 해상구조센터(Marine Rescue Coordination Center URUGUAY)는 인근 항해선박에 수색·구조를 요청하였다. 같은 해 4월 1일 02시 40분경(UTC) 스피타호(사이프러스 국적)가 사고해역에 최초 도착하여 기름띠를 발견하였고, 이후 같은 날 M/V 씨케이엔지호(한국 국적), M/V 이터널호(파나마 국적), M/V 엘피다호(몰타 국적)가 사고해역에 도착하여 수색작업에 참여하였다.

3.6.4 같은 날 12시 50분(UTC)경 M/V 엘피다호가 구명뗏목 2척을 발견하였으며 그 중 1척의 구명뗏목에 승선하고 있던 갑판수A와 조기장을 구조³⁴⁾하였고, 같은 날 M/V 씨케이엔지호에서도 손상된 구명뗏목 1척과 손상된 구명정 2척을 추가로 발견하였으나 생존선원은 없었다.



<그림 28> 수색·구조 작업 시 발견된 구명뗏목



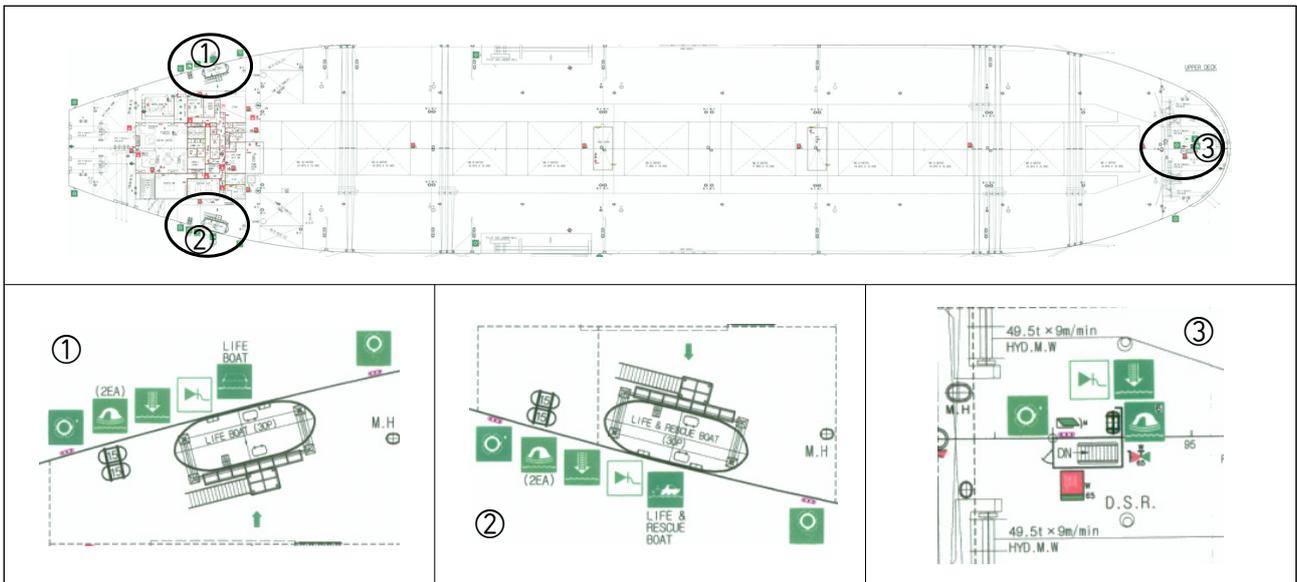
<그림 29> 수색·구조 작업 시 발견된 구명정

34) 필리핀 국적 선원 2명이 구조된 위치는 위성비상위치지시용 무선표지설비(EPIRB) 발신위치에서 약 35킬로미터 떨어진 위도 32-03.48S, 경도 018-33.04W임

3.6.5 M/V 엘피다호에서 구조한 선원 2명은 같은 달 13일 남아프리카공화국 케이프타운에서 하선하였다.

3.6.6 사고발생 이후 우루과이 해상구조센터 지휘 하에 40일간 군함(2017.4.6.~4.16., 3척), 항공기(2017.4.2.~4.13., 브라질 8회/미국 5회), 민간선박(30척) 등 대규모 수색자원을 동원하여 집중수색 하였으나 추가로 발견된 것은 없었다.

3.6.7 이 선박의 구명설비는 선미 거주구역 상갑판 좌현과 우현에 30인용 전폐형 구명정 각 1대와 자동이탈기가 부착된 16인용 팽창식 구명뗏목³⁵⁾ 각 2대 및 선수 전방에 자동이탈기가 부착되지 않은 6인용 팽창식 구명뗏목³⁶⁾ 1대가 있었으나, 이 중에 16인용 구명뗏목 1대와 6인용 구명뗏목 1대는 발견되지 않았다.³⁷⁾



<그림 30> 구명정 및 구명뗏목 설치 위치

35) 수심 4미터 이하로 잠기면 구명뗏목 고정장치가 자동으로 풀리면서 구명뗏목이 선체로부터 이탈되고, 이탈된 구명뗏목은 뗏목 내부의 팽창용 압축된 공기에 의해 펼쳐지면서 수면 위로 뜨게 됨

36) 일반적으로, 평상시에는 파도에 휩쓸리지 않도록 갑판에 줄로 고정되어 있으며, 비상 시 인위적으로 작동 줄을 당겨야만 팽창 됨

37) 16인용 구명뗏목 1대와 6인용 구명뗏목 1대는 심해수색 영상에서도 식별할 수 없었음

section

4

사고 분석

4. 사고 분석

4.1 선박 운항여건(Ship's Voyage Condition)

4.1.1 해상상태

- 4.1.1.1 사고 당시의 해상상태와 관련하여, 선박에서 작성한 정오보고서의 기상정보와 스텔라 데이지가 기상정보서비스업체인 스톱지오사(StormGeo)로부터 수신한 기상정보 및 사고 이후 확보한 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 자료³⁸⁾를 검토하였다.
- 4.1.1.2 정오보고서로 확인할 수 있는 해상상태는 현지 시간 정오(12시)의 바람과 파도의 방향과 세기이고, 스톱지오에서 제공하는 정보는 하루 두 차례(00시와 12시) 바람과 파도 등에 관한 정보인 반면, 미국 해양대기청은 30분 간격으로 매 3시간의 전세계 바람과 파도 등에 관한 정보를 제공하고 있다. 따라서 이 선박이 2017년 3월 25일 브라질 구아이바항 출항 이후의 해상상태 분석에는 미국 해양대기청의 자료를 활용하였다. 사용된 자료는 예보정보가 아니라 계측된 정보 등을 이용하여 보정한 관측자료(Hindcast)³⁹⁾이다.
- 4.1.1.3 미국 해양대기청 자료를 바탕으로 스텔라데이지의 항로상 해상상태를 나타내면 <표 14> 및 <표 15>와 같다.

38) National Center for Environmental Information(<https://www.ncei.noaa.gov/>)에서 제공하는 전세계 해안선과 수심 자료 및 NWS Environmental Modeling (<https://polar.ncep.noaa.gov/>)에서 제공하는 전세계 바람과 파도 자료

39) 해상상태 자료는 Forecast(향후 6시간 이후 상황에 대한 예보), Nowcast(단시간 내의 예보, 통상 6시간 내의 예보), Hindcast(지나간 시간에 대한 해상상태 정보로서 계측정보 등을 이용하여 수정한 정보임) 등 3종류로 나뉜다.

<표 14> 스텔라데이지의 항로상 파도(미국 해양대기청 자료 재구성)

Date and Time				Location				Combined Wave ⁴⁰⁾			Wind Wave			Swell		
Date	Time Local	Time Zone	UTC	Lat. S	Long. W	Lat. Decimal	Long. Decimal	Sig. height meter	Dir. ⁴¹⁾	Mean periods	Sig. height meter	Dir.	Mean periods	Sig. height meter	Dir.	Mean periods
03.26	13:00	-3	16:00	24°13.00'	041°52.00'	-24.28	-41.87	1.34	132.34	7.55	0.56	255.21	3.58	1.05	133.77	9.96
			18:00			-24.4774	-41.457	1.31	136.69	7.34	0.60	251.37	3.66	0.98	135.47	9.83
			00:00			-25.0696	-40.2178	1.36	139.50	6.86	0.71	252.55	3.85	1.10	122.14	9.11
			06:00			-25.6617	-38.9787	1.32	122.48	7.00	0.57	274.55	4.02	1.11	118.34	8.72
			12:00			-26.2539	-37.7396	1.23	96.54	6.84	0.48	296.58	4.10	0.67	95.42	6.58
03.27	13:00	-2	15:00	26°33.00'	037°07.00'	-26.55	-37.12	1.23	91.87	6.91	1.01	0.75	5.81	0.70	140.83	8.01
			18:00			-26.8438	-36.5525	1.38	110.92	6.64	0.89	149.25	7.56	0.71	19.16	5.67
			00:00			-27.4313	-35.4175	2.11	144.18	6.25	1.85	151.09	6.59	0.79	19.34	6.17
			06:00			-28.0188	-34.2825	2.67	151.76	6.57	2.48	156.40	6.99	0.83	21.28	6.75
			12:00			-28.6063	-33.1475	2.77	155.28	6.73	2.60	159.68	7.26	0.89	10.42	6.96
03.28	13:00	-2	15:00	28°54.00'	032°35.00'	-28.9	-32.58	3.1	150.43	6.91	2.97	153.51	7.51	0.81	9.76	7.13
			18:00			-29.15	-32.0388	3.04	152.69	7.04	2.91	155.54	7.66	0.80	6.29	7.13
			00:00			-29.65	-30.9563	3.03	156.86	7.22	2.92	158.43	8.07	0.69	3.00	7.41
			06:00			-30.15	-29.8738	2.75	150.84	7.17	2.61	153.08	7.83	0.61	359.52	7.59
			12:00			-30.65	-28.7913	2.63	142.58	7.08	2.50	143.58	7.47	0.53	356.60	7.59
03.29	13:00	-2	15:00	30°54.00'	028°15.00'	-30.9	-28.25	2.82	141.35	7.20	2.73	143.42	7.52	0.49	353.80	7.64
			18:00			-31.0938	-27.6438	2.86	142.50	7.23	2.77	144.46	7.55	0.50	352.07	7.64
			00:00			-31.4813	-26.4313	2.99	140.62	7.46	2.20	110.02	6.90	1.90	182.21	8.50
			06:00			-31.8688	-25.2188	3.17	143.00	7.59	2.60	121.46	7.47	1.68	192.11	9.49
			12:00			-32.2563	-24.0063	3.2	140.54	7.54	2.66	119.34	7.36	1.62	193.33	9.48
03.30	13:00	-2	15:00	32°27.00'	023°24.00'	-32.45	-23.4	3.15	138.35	7.66	2.61	116.33	7.35	1.61	191.88	9.55
			18:00			-32.6913	-22.7974	3.15	133.19	7.68	2.64	111.17	7.35	1.53	192.27	9.58
			00:00			-33.1739	-21.5922	2.81	138.37	8.00	2.20	101.93	6.71	1.06	179.58	9.44
			06:00			-33.6565	-20.387	3.21	171.72	10.03	1.70	87.40	6.39	2.45	186.30	12.83
			12:00			-34.1391	-19.1817	3.61	183.56	11.20	1.35	65.22	7.15	3.28	190.64	13.23
03.31	13:00	-1	14:00	34°18.00'	018°47.00'	-34.3	-18.78	3.7	189.33	12.18	1.41	3.25	9.46	3.42	192.30	14.90
03.31	13:25	-1	14:25	34°21.36'	018°40.00'	-34.356	-18.667	3.72	189.98	12.18	1.13	62.90	7.49	3.48	193.47	15.11
			18:00			-34.3107	-18.6494	3.73	189.84	12.14	1.20	3.25	9.47	3.53	193.73	14.81
			00:00			-34.2349	-18.6199	3.56	187.18	11.55	1.34	3.15	8.72	3.30	193.83	14.38
			06:00			-34.1591	-18.5903	3.15	191.15	11.15	1.13	3.26	8.74	2.94	195.61	13.56
			12:00			-34.0833	-18.5608	2.75	195.43	10.80	1.36	3.43	8.65	2.39	194.10	12.95
04.01	13:00	-1	14:00	34°03.48'	018°33.04'	-34.058	-18.551	2.59	197.44	10.68	1.30	3.48	8.55	2.24	195.55	12.81

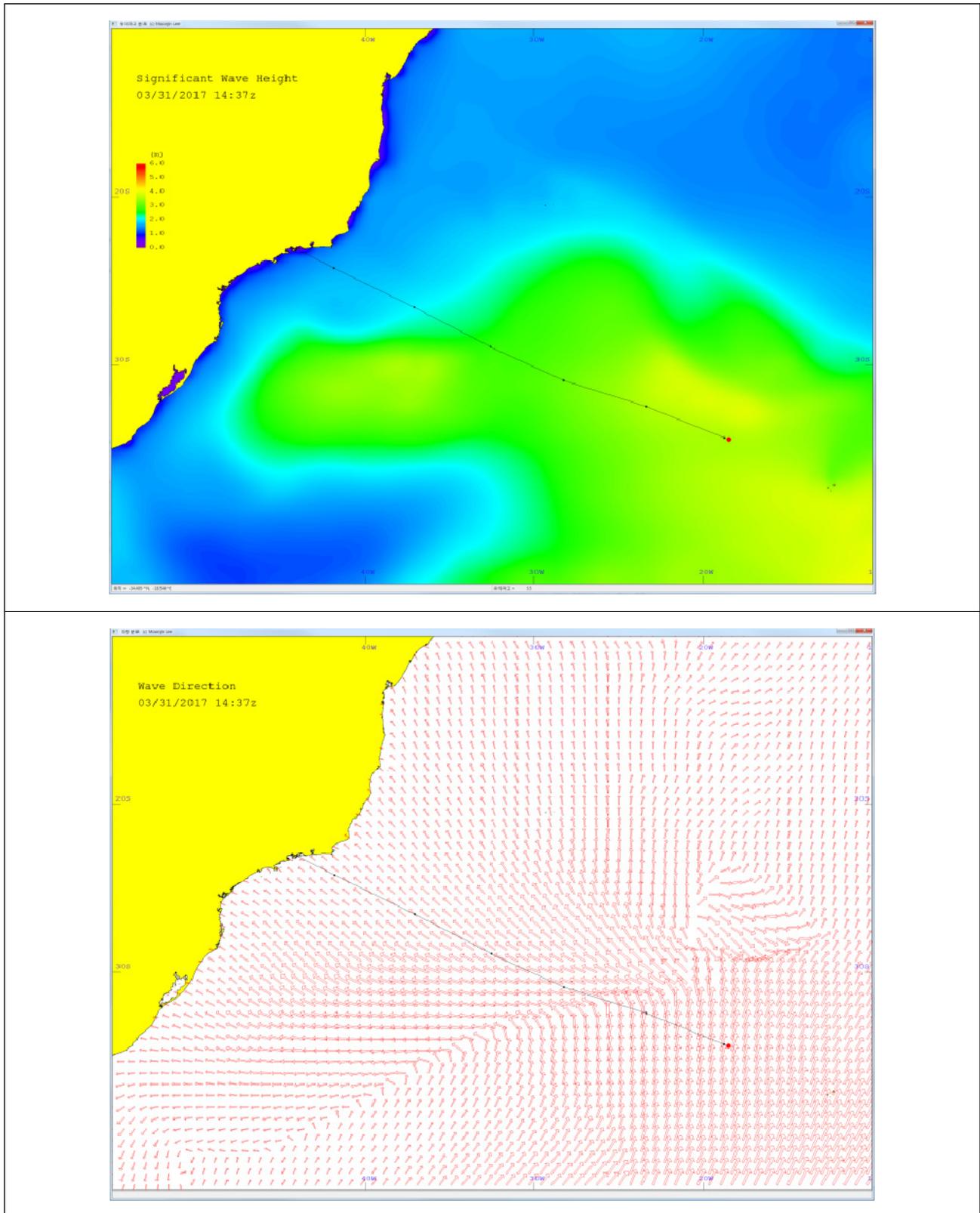
40) 파도는 발생형태에 따라 바람이 강할 때 발생하는 풍파와 바람이 잦아들었을 때 다른 곳에서 발생한 파가 전파되어 온 스웰로 대별됨. 일기예보에서 언급하는 파도는 이 두 종류의 파도 에너지를 합친 것으로 위 표에서는 Combined Wave 로 표기됨

41) 파도의 방향은 파도가 들어오는 방향을 의미함(풍향 표시방법과 같음)

<표 15> 스텔라데이지의 항로상 바람 및 조류(미국 해양대기청 자료 재구성)

Date and Time				Location				Wind			Current		Air	
Date	Time Local	Time Zone	UTC	Lat. S	Long. W	Lat. Decimal	Long. Decimal	BF No.	Speed m/s	Dir.	Eward m/s	Nward m/s	Temp. °C	Press. Pa
03.26	13:00	-3	16:00	24°13.00'	041°52.00'	-24.28	-41.87	4	5.79	245.38	-0.24	0.09	25.65	101316.4
			18:00			-24.4774	-41.457	4	6.36	227.68	-0.32	0.19	26.25	101110.9
			00:00			-25.0696	-40.2178	4	7.04	223.96	-0.08	-0.01	25.65	101168.9
			06:00			-25.6617	-38.9787	4	5.54	249.6	0.12	0.13	25.35	100985.5
			12:00			-26.2539	-37.7396	3	4.90	231.96	-0.18	0.10	25.55	101070.9
03.27	13:00	-2	15:00	26°33.00'	037°07.00'	-26.55	-37.12	3	4.04	207.58	-0.18	0.04	25.15	100913.3
			18:00			-26.8438	-36.5525	4	6.76	168.74	0.01	0.09	25.25	100907.4
			00:00			-27.4313	-35.4175	6	11.49	153.55	0.28	0.18	24.25	101036.4
			06:00			-28.0188	-34.2825	6	12.85	155.21	0.05	0.10	23.55	101018.7
			12:00			-28.6063	-33.1475	6	12.85	144.44	0.08	0.02	23.65	101152.7
03.28	13:00	-2	15:00	28°54.00'	032°35.00'	-28.9	-32.58	7	14.34	143.51	0.02	0	23.25	100926.3
			18:00			-29.15	-32.0388	6	13.25	144.99	-0.08	0.05	22.95	101247.8
			00:00			-29.65	-30.9563	6	12.32	143.95	0.15	0	21.45	101513.6
			06:00			-30.15	-29.8738	6	10.82	131.74	-0.22	-0.14	20.95	101495.5
			12:00			-30.65	-28.7913	6	11.16	121.18	-0.08	0.17	20.75	101624.3
03.29	13:00	-2	15:00	30°54.00'	028°15.00'	-30.9	-28.25	6	12.08	114.87	-0.08	0.06	20.25	101542.4
			18:00			-31.0938	-27.6438	6	12.24	116.40	-0.11	0	20.15	101627.0
			00:00			-31.4813	-26.4313	6	12.08	115.23	-0.12	0	20.05	101800.2
			06:00			-31.8688	-25.2188	6	12.69	122.45	-0.13	-0.17	19.35	101757.8
			12:00			-32.2563	-24.0063	6	13.72	121.99	0	-0.24	18.55	101994.2
03.30	13:00	-2	15:00	32°27.00'	023°24.00'	-32.45	-23.4	6	11.86	122.36	-0.13	-0.26	19.05	101822.1
			18:00			-32.6913	-22.7974	6	12.80	117.25	-0.43	-0.34	18.35	101778.5
			00:00			-33.1739	-21.5922	6	11.70	112.99	-0.14	-0.15	19.05	101666.0
			06:00			-33.6565	-20.387	5	9.24	122.18	-0.20	-0.08	18.15	101639.2
			12:00			-34.1391	-19.1817	5	9.66	127.64	0	0.05	17.95	101783.5
03.31	13:00	-1	14:00	34°18.00'	018°47.00'	-34.3	-18.78	4	6.64	123.76	0.29	0.08	17.65	101717.1
03.31	13:25	-1	14:25	34°21.36'	018°40.00'	-34.356	-18.667	4	7.40	120.45	0.19	-0.04	17.45	101702.9
			18:00			-34.3107	-18.6494	4	7.12	158.41	0.19	-0.04	18.25	101754.3
			00:00			-34.2349	-18.6199	4	6.83	161.03	0.13	0.21	18.65	101865.9
			06:00			-34.1591	-18.5903	4	6.58	178.17	0.13	0.21	18.75	101805.2
			12:00			-34.0833	-18.5608	3	5.25	178.58	0.13	0.21	19.05	102014.3
04.01	13:00	-1	14:00	34°03.48'	018°33.04'	-34.058	-18.551	3	5.48	188.81	0.13	0.21	18.75	101805.2

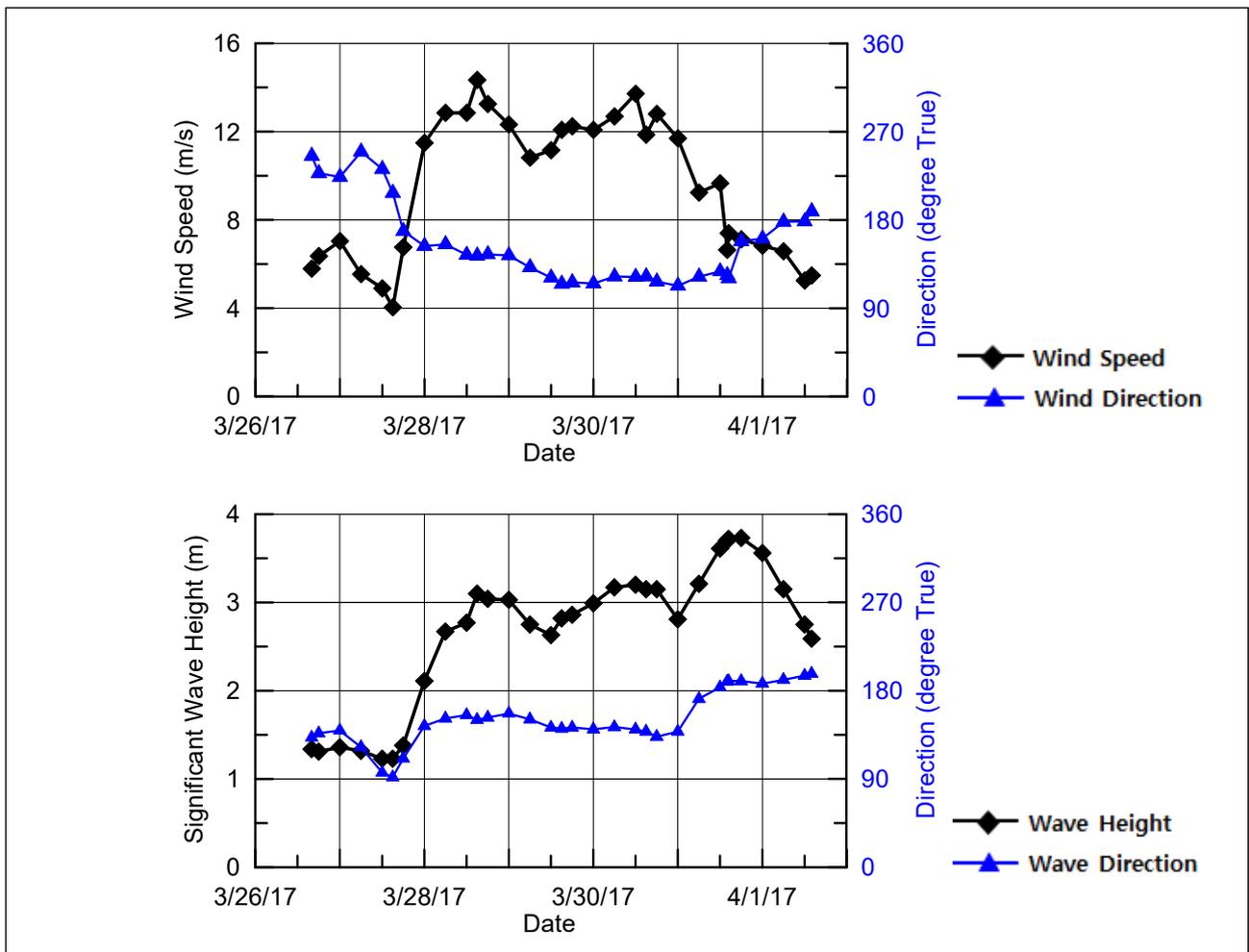
4.1.1.4 사고 시점의 유의파고와 파향 분포를 시각화 하면 <그림 31>과 같다.



<그림 31> 사고 시점의 유의파고와 파향 분포

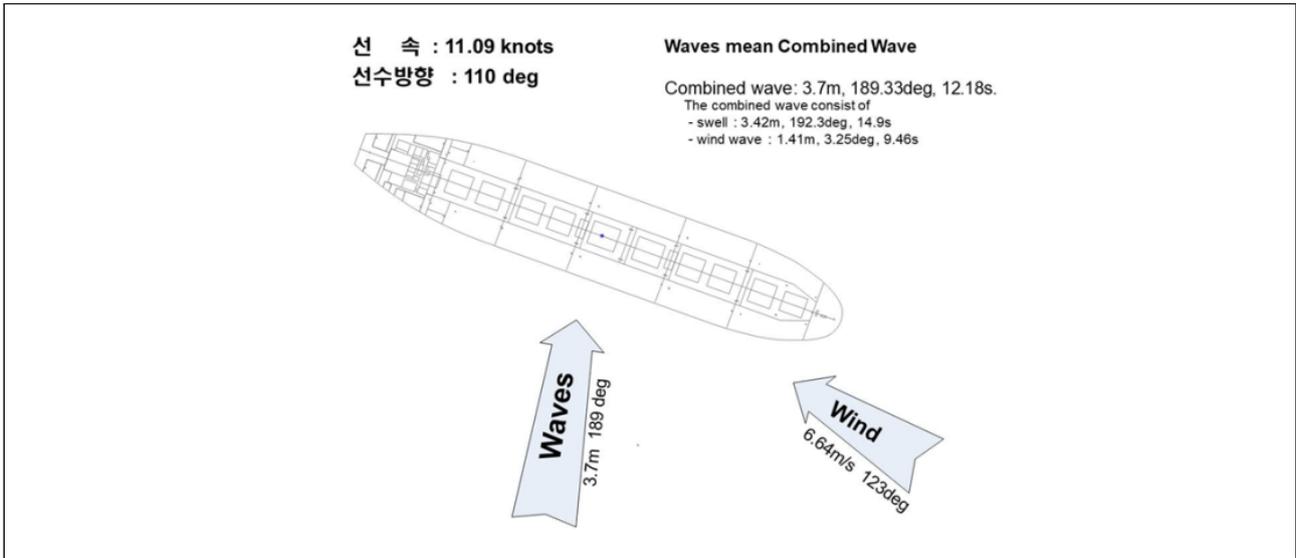
4.1.1.5 정오보고서에 따르면 이 선박은 3월 25일 브라질 구아이바항을 출항 후 이틀 동안은 약 12노트로 항해하였으며, 주기관 회전수는 64RPM으로 일정하게 유지하였지만 바람과 파도의 세기가 점차 강해지면서 3월 28일 11.67노트로 감속되기 시작하여 3월 30일 정오에는 평균 11.08노트로 떨어졌다. 3월 31일 정오에는 강한 바람과 파도의 영향이 지속되면서 평균 11.09노트로 항해하고 있었다.

4.1.1.6 또한, 이 선박은 3월 25일 출항 후 사고 당시까지 평균 11.5노트로 약 129시간을 항해하는 도중에 주로 남동쪽에서 불어오는 초당 6~14미터의 바람과 동쪽에서 남쪽으로 변한 유의파고 1.2~3.7미터의 파도를 만난 것으로 분석되며, 이를 그래프로 표시하면 <그림 32>와 같다.



<그림 32> 사고항차 시간대별 해상상태

4.1.1.7 사고 당시에는 <그림 33>과 같이 바람은 초당 약 6.6미터의 속력으로 우현 선수에서 불어오고 있었고, 파도는 약 3.7미터의 파고로 우현 측면에서 오고 있었다.



<그림 33> 사고 당시 바람과 파도

4.1.1.8 이러한 해상상태가 이 사고에 미친 영향을 파악하기 위하여 상하동요, 횡동요 및 종동요 등 선박의 운동량을 추정⁴²⁾하였다.

<표 16> 사고 당시 선박의 운동량 추정

표준 스펙트럼 (바람에 의한 파, 너울 등이 혼재하는 파도 스펙트럼) (참고 : ITTC Standard Spectrum)		
유의 파고(Significant Wave Height) : 3.7 m		
파향(Wave Heading) 좌현 100 degree		
구분	유의값(Significant)	최대값(Maximum)
상하동요(Heave) (m)	0.60	1.20
횡동요(Roll) (deg)	0.54	1.08
종동요(Pitch) (deg)	0.44	0.88
스웰 스펙트럼 (너울파가 주인 파도 스펙트럼) (참고 : ISO15016 Swell Spectrum)		
유의파고 : 3.42 m, 주기(period) : 14.90 s		
파향(Wave Heading) 좌현 100 degree		
구분	유의값(Significant)	최대값(Maximum)
상하동요(Heave) (m)	1.30	2.60
횡동요(Roll) (deg)	1.06	2.12
종동요(Pitch) (deg)	0.20	0.40

- * 파향은 0도가 선박의 이동방향과 같은 방향으로 진행하는 파도이고, 180도가 반대방향으로 진행하는 파도임
- * 최대값은 수천 번의 움직임 중 가장 큰 것을 의미하며, 일반적으로 유의값의 2배임
- * 운동량이 크게 나오는 상황을 알아보기 위하여 두 가지 스펙트럼(일반적인 파도스펙트럼과 너울파가 주파도인 파도스펙트럼)을 고려하였음

42) 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 실시함

4.1.1.9 사고 당시 해상상태에 의한 선박 운동량은 스웰 형태의 파도가 우현 정횡방향에서 올 경우 운동량이 커지면서, 상하동요는 1.3미터, 횡동요는 1.06도, 종동요는 0.20도로 계산되었다. 파도는 높지만, 이 정도의 운동량은 이 선박의 크기를 고려할 때 상대적으로 작은 운동량 또는 통상적인 범위의 운동량에 해당되는 수준으로 분석된다.

4.1.1.10 따라서 사고 당시의 파도 등 해상여건에 의하여 선박의 운동이 과도하게 커져서 선체의 대규모 손상이 발생되거나 전복사고를 유발할 가능성은 낮다고 판단된다.

4.1.2 비손상복원성

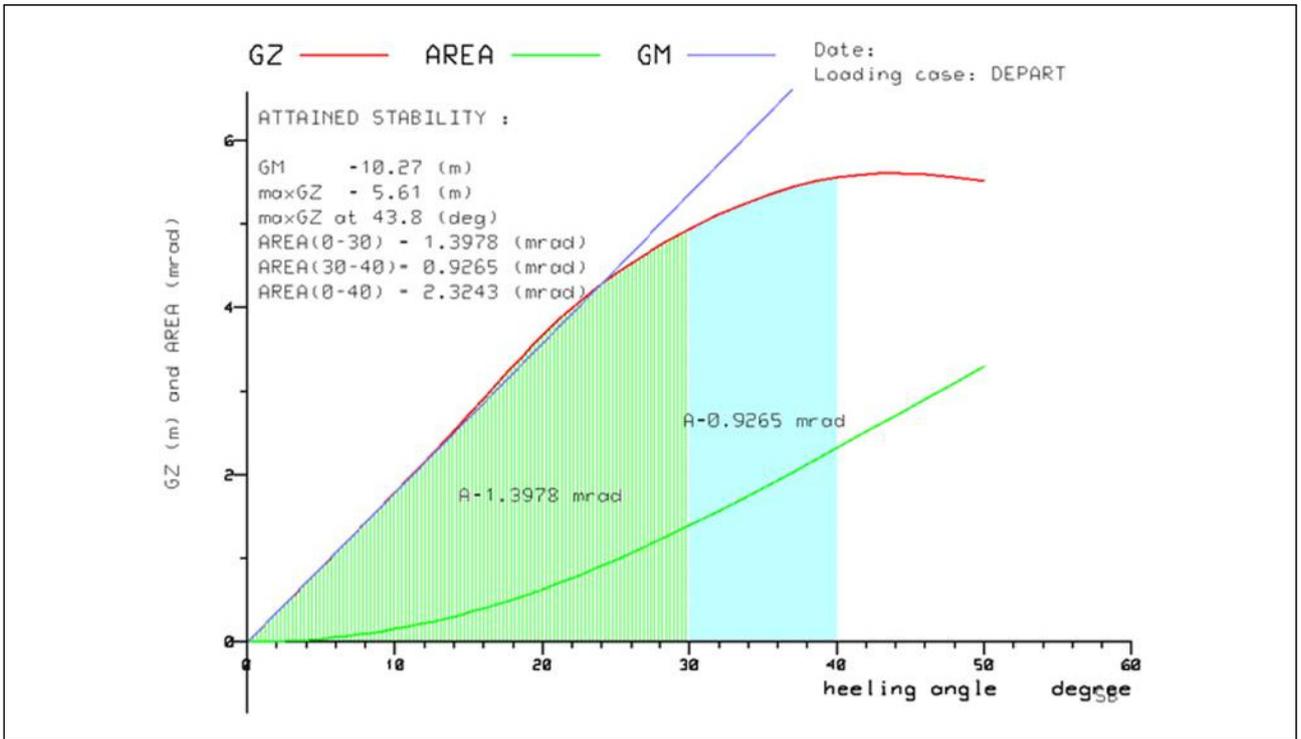
4.1.2.1 스텔라데이지가 2017년 3월 25일 브라질 구아이바항을 출항할 당시 화물적재량과 평형수 및 연료량 등을 기준으로 계산한 선박의 비손상복원성 결과는 <표 17>과 같다.

<표 17> 출항 당시 비손상복원성 계산 결과⁴³⁾

구분		적재량	CGX	CGY	CGZ
		Ton	m	m	m
CARGO HOLD	RHO=2.646				
NO.5 CARGO		51302.30	70.90	0.00	13.60
NO.4 CARGO		50400.00	119.27	0.00	13.53
NO.3A CARGO		30400.20	157.94	0.00	13.58
NO.3F CARGO		30400.20	187.69	0.00	13.58
NO.2 CARGO		50700.30	226.37	0.00	13.58
NO.1 CARGO		46800.90	272.06	0.00	13.92
SUBTOTAL		260003.90	170.63	0.00	13.64
HFO	RHO=0.960				
		3229.50	44.98	-0.88	17.70
BWT	RHO=1.025				
		100.00	9.13	0.00	12.77
FWT	RHO=1.000				
		300.00	12.02	3.39	22.08
DOT	RHO=0.900				
		162.00	26.82	18.15	20.94
Deadweight		263795.60	168.77	0.00	13.70
Lightweight		38188.70	145.34	0.00	14.98
Displacement		301984.30	165.80	0.00	13.86
FLOATING POSITION					
Draught moulded		20.23 m	KM		24.14 m
Trim ⁴⁴⁾		0.07 m	KG		13.86 m
Heel, SB=+		0.00 deg			
TA		20.20 m	GM		10.27 m
TF		20.27 m	GMCORR		0.00 m
Trimming moment		25915.00 ton-m	GoM		10.27 m

43) 복원성에 영향이 크지 않은 것으로 판단되는 평형수(당시 배수량의 0.03%), 연료유(당시 배수량의 1.07%) 등은 탱크별 적재량이 아닌 적재총량을 기준으로 계산함

4.1.2.2 선박의 복원성 계산 결과에 따른 복원정 곡선은 <그림 34>와 같다.



<그림 34> 복원정 곡선

4.1.2.3 스텔라데이지가 출항할 당시 초기 메타센터 높이, 최대 복원정 크기 등은 <표 18>에 서 볼 수 있듯이 비손상복원성 안전기준⁴⁵⁾을 충족하고 있다.

<표 18> 출항 당시 비손상복원성 기준 충족 여부

IMO 비손상복원성 기준	요구 수치	계산 수치	평가
초기 메타센터 높이(GoM)	0.15m 이상	10.27m	기준 충족
최대 복원정 크기(GZmax)	횡경사 각도 30° 이상에서 0.2m 이상	43.8°에서 5.61m	기준 충족
복원정 곡선 하부면적(m-rad)	0°-30° 하부면적 > 0.055	1.3978	기준 충족
	30°-40° 하부면적 > 0.030	0.9265	기준 충족
	0°-40° 하부면적 > 0.090	2.3243	기준 충족

44) 출항 당시 작성한 흘수 검정(Draft Survey) 보고서의 흘수(선수 20.22미터, 선미 20.22미터)와 약간의 차이가 있는데, 이는 흘수 검정 시 흘수값은 눈으로 읽은 것이고, 비손상복원성 계산 시 사용한 값 중 정확한 수치가 알려지지 않은 일부 중량은 설계 시 중량을 사용하였기 때문인 것으로 추정됨

45) 선체에 손상이 발생하지 않은 조건에서 선박이 스스로 직립, 복원할 수 있는 힘의 크기에 관한 기준 즉, 비손상복원성의 안전기준은 IMO Resolution A.749(18) Chapter 3.1에서 규정하고 있음

4.1.2.4 산적화물선(Bulk Carriers)에 곡물을 적재하는 경우 정지각(Angle of Repose) 효과⁴⁶⁾를 고려하여 복원성을 확보하여야 하므로 국제해사기구(IMO) 국제곡물코드⁴⁷⁾에 따라 곡물적재복원성(Grain Stability)을 검토해야 한다. 이 선박은 곡물을 적재하지 않았으므로 곡물적재복원성이 적용되는 선박은 아니다. 그럼에도 불구하고, 화물이 유동 시 안전성을 판단하기 위하여 비손상복원성 계산조건과 동일한 하중조건을 적용하여 계산한 결과 곡물적재복원성기준도 만족하는 것으로 나타났다.

<표 19> 곡물적재복원성 기준 충족 여부

IMO 곡물복원성 기준	요구 수치	계산 수치	평가
횡경사각	12° 이하	6.3°	기준 충족
초기 메타센터 높이(GoM)	0.3m 이상	10.335m	기준 충족
복원정 곡선 하부면적(m-rad)	0°-40° 하부면적 > 0.075	1.687	기준 충족

4.1.3 손상복원성

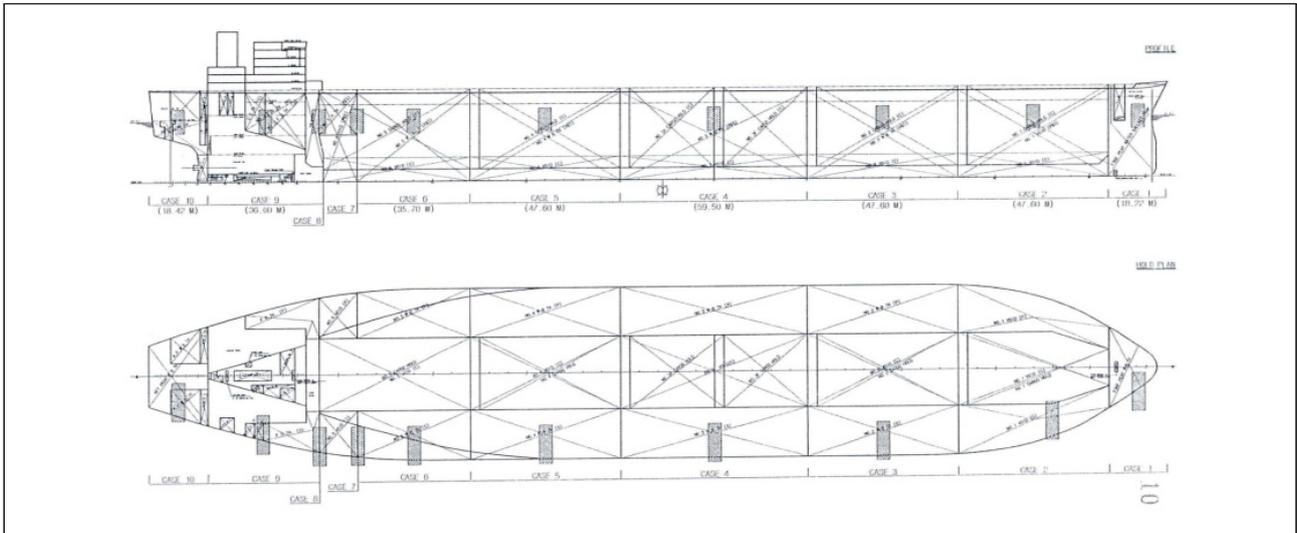
4.1.3.1 한국선급은 1966년 국제만재흡수선협약에 관한 1988년 의정서(이하 “ICLL 1988 의정서”라 한다)의 부속서 B(개정 부속서) 제27규칙(건현) (8) (d)항에 따라 건현 지정을 위하여 손상복원성을 검토하였다.

4.1.3.2 2009년 6월 19일 한국선급이 승인한 손상복원성 계산서에 따르면, 하기만재흡수선까지 화물이 균일하게 만재된 상태에서 ICLL 1988 의정서의 부속서 B 제27규칙 (12)항에서 정한 손상조건, 즉 일부 수밀구획이 손상되어 침수되었을 경우에도 평형상태가 유지되는 등을 검토한 결과, 이 선박은 손상복원성 기준을 충족하였다.

4.1.3.3 이 선박 손상복원성 계산서에서 검토한 손상조건은 총 10개이며, 손상조건별 복원성 계산 결과는 <그림 35>와 <표 20>에서 보는 바와 같다.

46) 정지각(Angle of Repose) 효과는 선박이 일정 각도 이상으로 기울어져 적재된 화물 표면이 경사되면 화물이 이동하게 되고, 이로 인해 복원성이 감소되는 효과를 말함

47) International Code for Safe Carriage of Grain in Bulk(IMO Resolution MSC.23(59)에서 채택)



<그림 35> 손상조건(Damage Cases)

<표 20> 손상복원성 계산 결과

구분	손상구획(DAMAGED COMPARTMENTS)	Heel Angle ⁴⁸⁾	GM minimum(A)	GM actual (B)	GM excess (B-A)
CASE No.1	BOSUN STORE(C) CHAIN LOCKER(P&S) F.P.W.B TANK(C)	0.00	0.004	7.021	7.017
CASE No.2	No.1 CARGO HOLD(C) No.1 VOID(S) No.1 VOID(C)	9.82	6.258	7.021	0.763
CASE No.3	No.2 W.B.TANK(S)	10.12	4.790	7.021	2.231
CASE No.4	No.3 W.B.TANK(S)	12.29	5.799	7.021	1.222
CASE No.5	No.4 W.B.TANK(S)	9.44	4.384	7.021	2.638
CASE No.6	No.5 W.B.TANK(S)	5.26	2.585	7.021	4.436
CASE No.7	No.5 W.B.TANK(S) No.6 VOID(S) FWD F.O.TANK(S) F.O.TANK(S)	6.29	3.184	7.021	3.837
CASE No.8	FWD F.O.TANK(S) No.6 VOID(S) F.O.TANK(S)	0.32	0.668	7.021	6.353
CASE No.9	ENGINE RM F.O.TANK(S) D.O.TANK(S) STEERING G. RM(C)	0.18	0.755	7.021	6.266
CASE No.10	ENGINE RM APT TANK(C) STEERING G. RM(C)	0.00	0.383	7.021	6.638

48) ICLL 1988 의정서의 부속서 B 제27규칙(건현) (13)(c)에 따라 횡경사가 15도를 넘지 않아야 하고 갑판의 어느 부분도 잠기지 아니할 경우 횡경사는 17도까지 허용됨

- 4.1.3.4 손상조건 10개 중 화물창 구역 내 현측탱크의 침수와 관련되는 손상조건은 7개(CASE No.2~8)다. 이 중에서 국제해상인명안전협약(SOLAS) 제12장(산적화물선에 대한 추가 안전조치) 제4규칙 제2항의 손상복원성 요건이 적용되는 경우는 1번 화물창이 손상되는 조건 2번(CASE No.2)이 이에 해당된다. 손상조건 2번에 대한 계산 결과, 횡경사는 기준인 15도에 미치지 않는 9.82도가 발생하며, GM 값은 기준인 6.258미터보다 0.763미터가 큰 7.021미터로 나타났다. 이와 같은 계산 결과는 이 선박의 손상복원성이 SOLAS 제12장 제4규칙에서 요구한 손상복원성 요건⁴⁹⁾을 만족한다는 것을 의미한다.
- 4.1.3.5 사고 당시 이 선박의 실제 적재상태는 손상복원성 계산서상 적재상태와 동일하지 않으므로 사고 당시 적재상태를 기준으로 손상복원성을 검토할 필요가 있다. <표 21>은 손상복원성 계산을 위한 적재상태와 사고 당시 적재상태를 비교한 것⁵⁰⁾으로, 사고 당시 실제 적재상태는 손상복원성 계산서상 적재상태에 비해 GM 값이 약 3미터 더 크고, 흘수도 약 0.1미터 작아 상대적으로 복원성이 더 양호한 상태였다.

<표 21> 손상복원성 계산서와 사고 당시 실제 적재상태간 손상복원성 비교

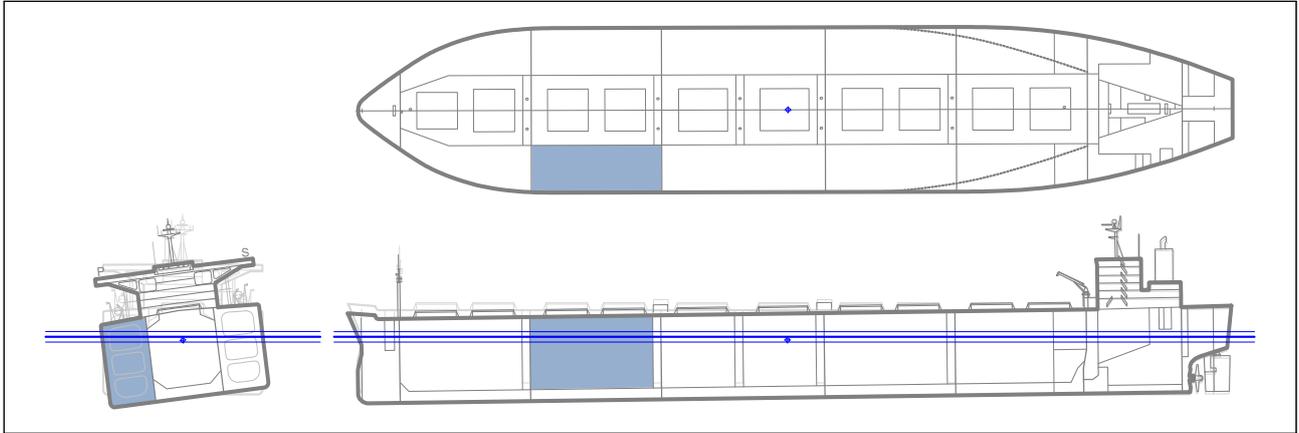
Item	Loading Condition in Damage Stability Booklet	Loading Condition (Accident)	비고
Specific Gravity of Cargo	1.92298724	2.646	
Displacement	304329.25MT	301984.3MT	
GoM	6.96m	10.27m	3.3m 증가
Mean Draft	20.33m	20.22m	0.107m 감소

- 4.1.3.6 사고 당시 선박의 복원성은 손상복원성 계산을 위한 적재상태 때보다 양호했기 때문에 실제 횡경사는 손상조건별 계산 결과에서 나타난 횡경사보다 더 작아지게 되며, 이는 상갑판이나 개구부가 물에 잠길 가능성도 더 낮다는 것을 의미한다.
- 4.1.3.7 사고 당시 선박에서 SNS를 통해 “본선 2번 포트에서 물이 샐니다.”라고 보고하였는데, 여기서 “2번 포트”는 2번 좌현 평형수탱크를 의미한다고 추정된다. 이 경우는 손상복원성 계산서상 3번 손상조건(CASE No.3)에 해당되며, 2번 현측(좌현 또는 우현) 평형수탱크가 손상되면 10.12도의 횡경사가 발생하는 것으로 계산되었다.

49) SOLAS 제12장 제4규칙제2항에 따라 선측에서 안쪽으로 B/5 또는 11.5m 중에서 더 작은 범위에 종격벽이 위치하는 화물창은 1번 화물창이며, 해당 화물창이 포함된 손상조건 2번(CASE No.2)은 침수 후에도 평형상태를 유지하는 등 제4항의 규정을 만족함

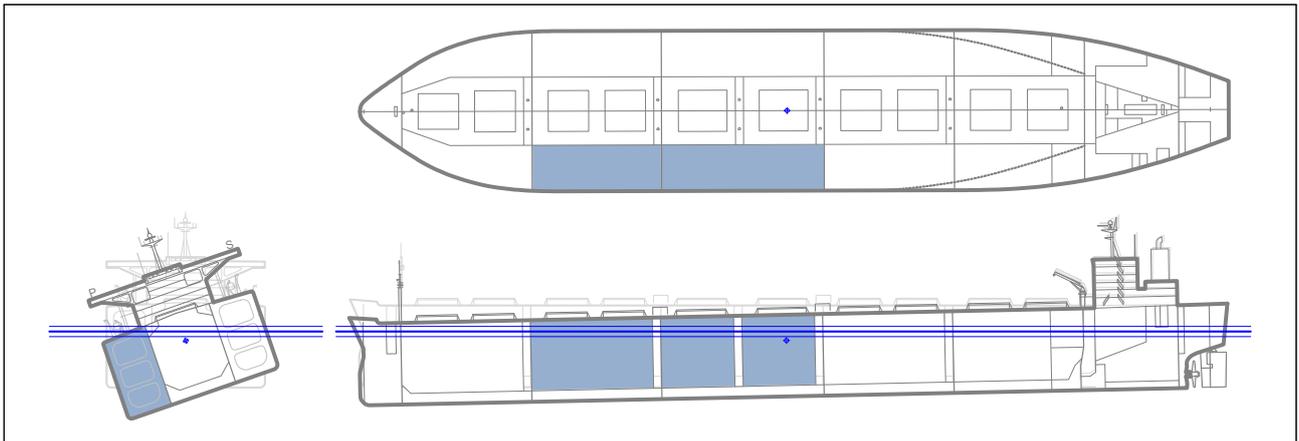
50) 사고 당시 실제 적재상태에 대한 계산은 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 실시함

4.1.3.8 사고 당시의 적재상태에서 2번 좌현 평형수탱크가 손상되었을 때에는 <그림 36>과 같이 약 7도의 횡경사가 발생하고, 선체는 약 1.2미터 더 침하되는 것으로 나타났다.



<그림 36> 2번 좌현 평형수탱크 손상 가정 시 선체 침하 및 자세⁵¹⁾

4.1.3.9 또한, 손상복원성 계산 요건에는 해당하지 않으나 사고 당시의 적재상태에서 2번과 3번 좌현 평형수탱크가 동시에 손상되었을 때는 횡경사는 약 19도 발생하고 약 3.3미터가 침하되어 상갑판이 물에 잠기기 시작하는 것으로 나타났다. 그러나 사고 당시 유의파고를 고려하더라도 화물창 덮개는 <그림 37>과 같이 여전히 수면 위에 위치하는 것으로 계산되었다.



<그림 37> 2번과 3번 좌현 평형수탱크 손상 가정 시 선체 침하 및 자세⁵²⁾

51) 2번 좌현 평형수탱크의 수면 하 선체외판 하부에 약 1m × 4m의 손상이 발생했다고 가정하였고, 최종 상태의 90%에 도달하는 시간은 침수 시작 후 약 500초가 소요되었음(파란선은 유의파고 3.7m에서의 해수면 변화를 나타냄)

52) 2번과 3번 좌현 평형수탱크의 수면 하 선체외판 하부에 각각 약 1m × 4m의 손상이 발생하였다고 가정하였고, 최종 상태의 90%에 도달하는 시간은 약 700초 소요되었음

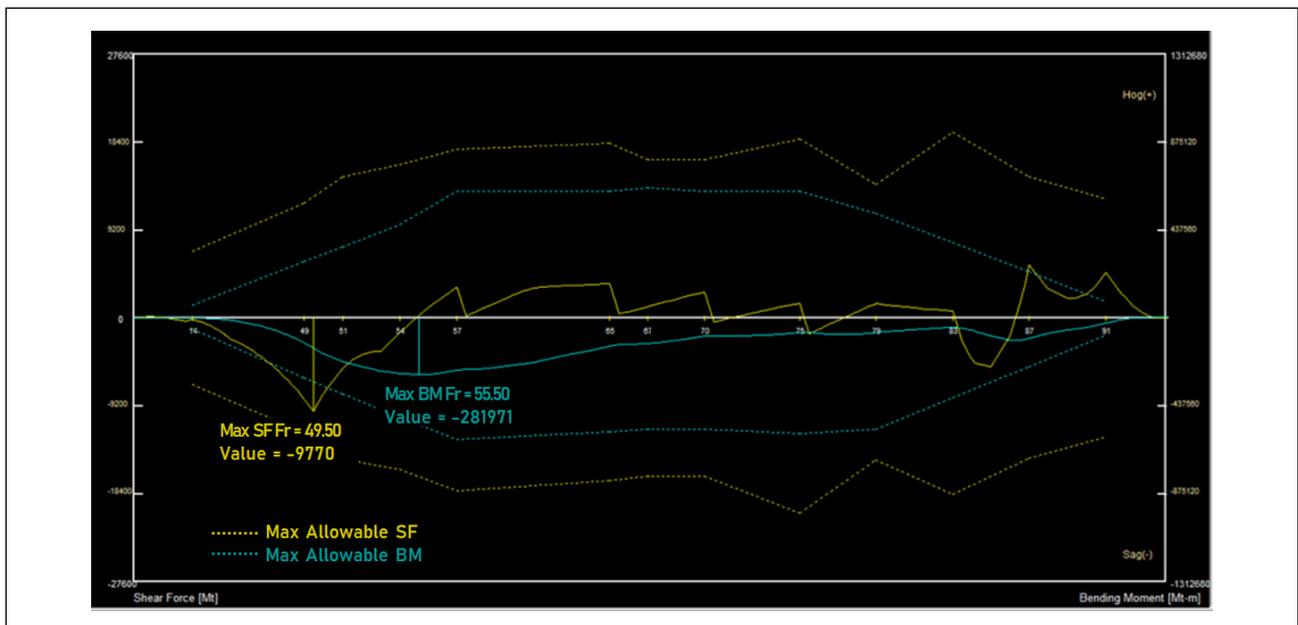
4.1.3.10 따라서, 사고 당시 이 선박의 적재상태는 규정에서 요구하는 손상복원성 기준을 만족하는 상태였고, 설령 2번과 3번 좌현 평형수탱크가 동시에 손상된 경우에도 복원성 문제로 인해 침몰이 발생하였다고 보기는 어려울 것으로 판단된다.

4.1.4 화물적재 시 종강도

4.1.4.1 한국선급으로부터 승인된 스틸라데이지의 복원성 계산 컴퓨터를 통해 구아이바항 출항 당시 화물적재상태에 따른 종굽힘모멘트⁵³⁾(Bending Moment, BM)와 전단력⁵⁴⁾(Shearing Force, SF)을 검토하였다.

4.1.4.2 이 선박이 2017년 3월 23일부터 같은 해 3월 25일까지 브라질 구아이바항에서 화물적재하는 과정(정박상태 기준)에서 종굽힘모멘트 최대값은 65.50번 프레임에서 허용기준의 68%, 전단력 최대값은 61.00번 프레임에서 허용기준의 60%로 기준을 초과하지 않았다.

4.1.4.3 화물적재를 완료한 항해상태(At Sea)를 기준으로 계산한 종굽힘모멘트와 전단력은 <그림 38>과 같으며, 종굽힘모멘트 최대값은 55.00번 프레임에서 허용기준의 53%, 전단력 최대값은 49.50번 프레임에서 허용기준의 77%로 기준을 초과하지 않았다.



<그림 38> 화물적재 완료 후 종강도 계산 결과

53) 선체의 종방향으로 중량과 부력간의 차이로 인해 발생하는 힘인 전단력을 적분한 값. 종굽힘모멘트는 선체 양끝에서 0 이 되고 중앙부에서 최대가 됨

54) 선체의 종방향으로 중량과 부력간의 차이로 인해 특정 단면에서 수직방향으로 어긋나려는 힘

4.1.4.4 다만, 이 선박의 평형수 배출능력은 시간당 약 7,000톤인 반면, 육상 컨베이어를 통해 화물이 적재되는 양은 시간당 약 8,500톤으로 시간 당 약 1,500톤의 차이가 있다. 평형수 배출능력과 화물 적재능력의 차이로 인해 화물 적재작업 중 평형수 배출이 빨리 이루어지지 않을 경우 일시적으로 특정 위치에서의 선체강도에 영향을 줄 수 있다. 이러한 영향을 방지하기 위해서는 평형수 배출속도에 맞춰 화물 적재속도를 일시적으로 정지하거나 늦추는 등의 통제가 필요하다. 그러나 평형수 배출 지연으로 작업이 중단된 기록이 없는 것으로 보아 평형수 배출에는 문제가 없었고, 따라서 선체강도에 미치는 영향도 없었던 것으로 추정된다.

4.1.5 화물 액상화

4.1.5.1 스텔라데이지가 브라질 구아이바항에서 적재한 화물의 종류는 분철광석으로 국제해상고체산적화물규칙(International Maritime Solid Bulk Cargoes Code, IMSBC Code) A 그룹에 속하며 수분함량이 기준치 이상일 경우 액상화 가능성이 있는 화물이다.

4.1.5.2 화물을 선적하기 전 화주인 발레(VALE S.A)가 제공한 ‘화물의 수분함량 및 운송가능 수분한계에 관한 증명서’에 따르면, 적재된 화물의 수분함량(Moisture Content, MC)은 9.23%로 운송가능수분한계(Transportable Moisture Limit, TML) 11.44%를 초과하지 않았다.

4.1.5.3 현지 기상자료에 따르면 이 선박에 화물을 적재하기 전 화물의 수분함량을 검사하고 화물선적을 완료할 때까지 비는 내리지 않았다. 생존선원 진술을 통해서도 화물적재 과정 또는 출항 후부터 사고 당시까지 비가 내리지 않았음을 확인할 수 있었다.

4.1.5.4 또한, 이 선박은 항해 중 화물창 빙지를 매일 2회(08시, 16시) 측정·배출하고 그 기록을 약 3일 간격으로 선사에 보고하였다. 해당 기록을 보면 2017년 3월 27일부터 같은 달 29일까지 화물창별로 약 0.19~0.30미터(빙지웰 높이 0.9미터)의 화물창 빙지가 계측되었다. 화물창 빙지가 특별히 크게 증가하는 현상은 나타나지 않았음을 알 수 있다.

4.1.5.5 따라서, 이 선박은 액상화 가능성이 있는 분철광석을 화물로 적재하였지만, 선적 시 화물의 수분함량은 운송가능수분한계 미만이었으며, 화물적재 중 비는 내리지 않았으며, 항해 중에도 화물창에 발생한 빙지량도 적었기 때문에 화물의 액상화 현상이 나타났을 가능성은 낮다고 판단된다.

4.1.6 소결

4.1.6.1 초대형 광석운반선이 운항하는 과정에서 발생할 수 있는 일반적인 사고원인을 검토하기 위하여 사고 당시 해상상태, 비손상복원성과 손상복원성, 화물적재 시의 종강도 및 액상화 가능성을 분석하였으나, 이번 사고를 야기할 만한 위험요인은 확인되지 않았다.

4.2 선박개조(Ship Conversion) 및 구조상태(Ship's Structural Condition)

4.2.1 선박개조

4.2.1.1 선박 용도변경을 위한 개조작업 시에 한국선급은 선체설계의 구조적 적합성을 확인하기 위해 구조해석 결과를 바탕으로 종강도, 횡강도 등이 한국선급 규칙에 따른 요구치를 만족하는지를 검토하였다. 선박의 중앙부에 대해서는 직접강도평가⁵⁵⁾를 수행하였다.

4.2.1.2 종강도의 경우 선박 길이방향의 굽힘강도와 전단강도가 한국선급 규칙에 따른 요구치를 충족하였고, 횡강도는 프레임(Frame)의 치수를 증가시키거나 웹프레임(Web Frame)을 증설하는 방법으로 한국선급 규칙의 요구치를 충족시켰다.

4.2.1.3 직접강도는 선박의 중앙부에 인접한 3개 화물창⁵⁶⁾을 범위로 정하여 화물창 구조해석을 수행하였다. 구조해석에 적용한 하중조건은 정수압과 파랑변동하중을 고려한 외부하중, 화물·평형수 하중을 고려한 내부하중으로 구분하여 총 9가지 조건을 적용하였다.

4.2.1.4 개조 당시 좌굴허용기준 적용에 있어 한국선급은 자체 지침(제3편 부록3-2 직접강도 평가에 관한 지침 표 8)에서 좌굴판정치 허용기준을 1.2 이상으로 규정하고 있다. “적절하다고 인정할 경우에는 지침에 의하지 아니하고 좌굴강도를 검토할 수 있다”는 예외사항도 지침에 규정⁵⁷⁾되어 있다. 한국선급은 좌굴판정치 허용기준을 1.0 이상으로 변경하여도 국제선급연합 허용기준과 동등 이상의 강도를 확보할 수 있다고 판단하였고, 예외규정을 근거로 좌굴판정치 허용기준 1.0 이상을 기준으로 좌굴강도를 검토하였다.

55) 선체 구조설계 시 여러 가지 경험식에 의한 계산에 의해 설계를 하였는데, 이러한 경험식만으로는 충분한 구조 안전성을 보장할 수 없기 때문에 관측된 파랑자료 등을 직접 적용하고 이에 따른 선체의 반응을 관찰함으로써 선체의 구조안전성을 평가하는 방법

56) 3번(No.3 fore, No.3 aft) 화물창 전체와 2번 화물창 1/2, 4번 화물창 1/2임

57) 선급 및 강선규칙 적용지침 제3편(선체구조), 부록 3-2 직접강도평가에 관한 지침 Ⅲ.2.(1)(다)

- 4.2.1.5 직접강도 계산 결과, 신설된 구조부재의 응력⁵⁸⁾수준은 허용응력⁵⁹⁾ 범위 이내였고 좌굴강도평가에서도 웹프레임 등 일부 부재를 제외하고 좌굴판정치 허용기준인 1.0 이상을 충족⁶⁰⁾하는 것으로 나타났다. 좌굴강도가 취약한 웹프레임 등⁶¹⁾에 대해서는 설계변경(보강) 후 재평가한 결과, 그 기준을 만족시켰다.
- 4.2.1.6 직접강도 계산에서 허용응력값을 산정함에 있어 부재치수는 부식에 대한 여유치가 포함된 설계치수(도면상 두께)가 적용되었다. 이는 한국선급의 규칙에 따른 것이기는 하지만, 실제 계측두께를 사용하는 것보다 용도변경 전까지 진행된 부식상태가 정확하게 반영되지 않을 수도 있다.
- 4.2.1.7 용도변경을 위한 개조작업 시에 한국선급 규칙에는 피로강도⁶²⁾에 대한 요구가 없었으므로 피로평가는 시행되지 않았다. 이러한 이유로 용도변경 당시에는 개조 전 유조선으로 운항하는 동안 선체에 축적된 피로도와 이에 따른 취약성 유무는 검토되지 않았다.
- 4.2.1.8 그 밖에 내저판, 호퍼 및 화물창 상부 선측 구조 등 신설되는 종강도 부재 중 일부에서 기존 부재와 용접 시에 용접각장⁶³⁾ 5밀리미터의 필릿용접⁶⁴⁾(Fillet Weld)이 적용되었다. 횡강도 보강을 위한 빌지부 선측 트랜스버스 특설늑골의 면재에도 이중판(Doubler)으로 보강하면서 용접각장 5밀리미터의 필릿용접이 적용되었다.
- 4.2.1.9 일반적으로, 신설되는 종강도 부재의 경우 종통성을 유지하기 위하여 기존 횡격벽으로 인해 단절이 발생하는 부분은 필릿용접보다는 완전 또는 부분 용입용접⁶⁵⁾(Full or Partial Penetration Weld)을 적용한다.
- 4.2.1.10 필릿용접을 적용하면 용접부위에 부식이 발생하거나 물성이 약화되는 경우에 균열이 초래될 수 있으므로 선체강도를 보강하는 주요 부재에 필릿용접이 적용된 경우에는 용접부위에 대한 주의 깊은 점검과 관리가 요구된다.

58) 선체 등에 하중이 작용할 때 이 하중에 견디기 위해 구조물의 내부에서 발생하는 단위면적 당 힘

59) 구조물의 사용 중에 발생하는 사용응력(working stress)이 넘어서는 안 되는 기준응력 값

60) 선저외판은 화물이 적재되지 않은 상태에서 파랑변동하중이 파정일 때 가장 큰 압축응력(좌굴판정치 1.294)이 발생하였고, 종격벽은 발라스트 하중조건 및 수압시험상태에서 가장 큰 압축응력(좌굴판정치 1.276)이 발생하였으며, 선측외판은 고비중(3.0) 화물적재 시 파정상태에서 가장 큰 압축응력(좌굴판정치 1.164)이 발생하였음

61) Web Frame, W.T.BHD, Support BHD

62) 항복응력보다 낮은 응력이 반복적으로 작용하는 경우 구조물에 균열이 발생하는 현상을 피로파괴(fatigue failure)라 하는데 이에 견디는 강도

63) 용접용 금속이 용접되어 있는 길이

64) 판과 보강재 등을 수직으로 접합할 때 접합부분의 측면을 용접하는 방식

65) 부재를 용접할 때 접합하는 부분 전체 또는 일부에 용접용 금속을 침투시켜 접합하는 방식

4.2.1.11 다만, 이 선박의 개조 후 검사보고서 기록에 따르면 신설 부재의 용접부위에 대한 손상이나 수리에 대한 기록이 없었다는 점을 고려할 때 필릿용접으로 인한 균열은 발생하지 않은 것으로 추정된다.

4.2.2 격창양하

4.2.2.1 한국선급으로부터 승인받은 스텔라데이지의 “비손상복원성 자료 및 적하지침서 (Final Trim, Stability & Longitudinal Strength)”에는 화물적재와 관련하여 화물을 화물창마다 균등하게 만재한 상태에서 출항 또는 입항하는 경우를 표준적하상태로 선정하였으며 이를 기반으로 선체강도 등을 계산하고 지침서가 승인되었다. 화물이 각 화물창에 균등하게 적재되지 않은 상태에 대해서는 언급되어 있지 않다.

4.2.2.2 이 책자 5쪽의 선장을 위한 지침 중 2번째 항목에 따르면 ‘이 책자에 포함되지 않는 화물적재 방식에 대한 복원성과 강도 계산은 적하지침기기로 보완할 수 있다.⁶⁶⁾’고 기술되어 있다. 같은 쪽 5번째 항목에는 ‘선장은 적하지침서에 포함되지 않는 방식으로 화물을 적재하는 경우 특별한 주의를 가져야 한다.⁶⁷⁾’고 기술되어 있다. 그러나 특별한 주의가 무엇인지, 어떻게 이루어져야 하는지에 대한 구체적인 언급하지 않고 있다.

4.2.2.3 국제해상인명안전협약(SOLAS) 제12장 제14규칙(화물창을 비운 상태로의 항해 제한)에는 $1,780\text{kg/m}^3$ 이상의 밀도를 가지는 고체산적화물을 운송하는 단일선측구조의 길이 150미터 이상 산적화물선은 만재상태에서 어느 화물창이든지 해당 화물창의 최대 허용 화물중량의 10%보다 적은 화물을 적재한 상태로 항해하지 않도록 규정되어 있으나, 이 선박은 개조 후 이중선측구조가 되었으므로 이 규칙은 적용되지 않는다.

4.2.2.4 이 선박의 항해기록에 따르면, 이 선박은 개조 후 37번의 항차 중 <표 22>와 같이 8차례의 항차에 걸쳐 적재한 화물을 2개의 양하항에 나누어 하역하는 형태로 운항하였다. 이 중 4차례는 첫 번째 양하항에서 화물창마다 균등하게 화물을 양하한 후 두 번째 양하항으로 이동하였으나, 나머지 4차례는 <그림 39> 예시와 같이 첫 번째 양하항에서 화물창을 건너뛰며 전량을 양하한 후 두 번째 양하항에서 나머지 화물창의 화물을 양하하는 ‘격창양하’의 형태로 운항하였다.

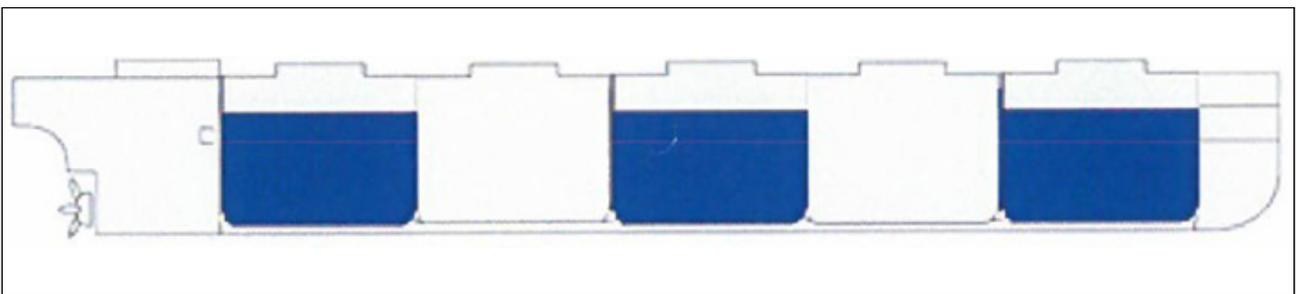
66) As a complement to this booklet the loading computer provided on board may also be used to perform the trim, stability and strength calculation for any loading conditions not included in this booklet.

67) It should be noted that, however, this booklet can not cover unusual condition or and the master of the ship shall take special care when loading the ship different loading cases.

<표 22> 개조 이후 다항양하 이력

항차	선적량	선적항	기간	양하항	기간	비고
V.23	253,012MT	Ponta Da Madeira	2013.01.28. ~02.16.	광양항, 포항항	2013.03.31.~04.05. 2013.04.05.~04.10.	균등 양하
V.25	258,507MT	Ponta Da Madeira	2013.08.16. ~08.21.	광양항, 포항항	2013.10.04.~10.05. 2013.10.06.~10.08.	균등 양하
V.26	259,173MT	Ponta Da Madeira	2013.11.18. ~12.01.	광양항, 포항항	2014.01.13.~01.15. 2014.01.16.~01.26.	균등 양하
V.30	259,800MT	Ponta Da Madeira	2014.12.09. ~12.21.	Majishan, Qingdao	2015.02.01.~02.04. 2015.02.05.~02.08.	균등 양하
V.31	260,027MT	Tubarao	2015.03.18. ~03.22.	Majishan, Rizhao	2015.05.02.~05.07. 2015.05.08.~05.11.	격창 양하
V.33	259,916MT	Ponta Da Madeira	2015.07.03. ~07.10.	Majishan, Lianyungang	2015.08.22.~08.28. 2015.08.30.~08.31.	격창 양하
V.37	258,327MT	Guaiba	2016.06.21. ~06.27.	Lianyungang, Rizhao	2016.08.05.~08.08. 2016.08.08.~08.13.	격창 양하
V.40	260,002MT	Guaiba	2016.12.19. ~12.25.	Tianjin, Caofeidian	2017.02.05.~02.08. 2017.02.08.~02.13.	격창 양하

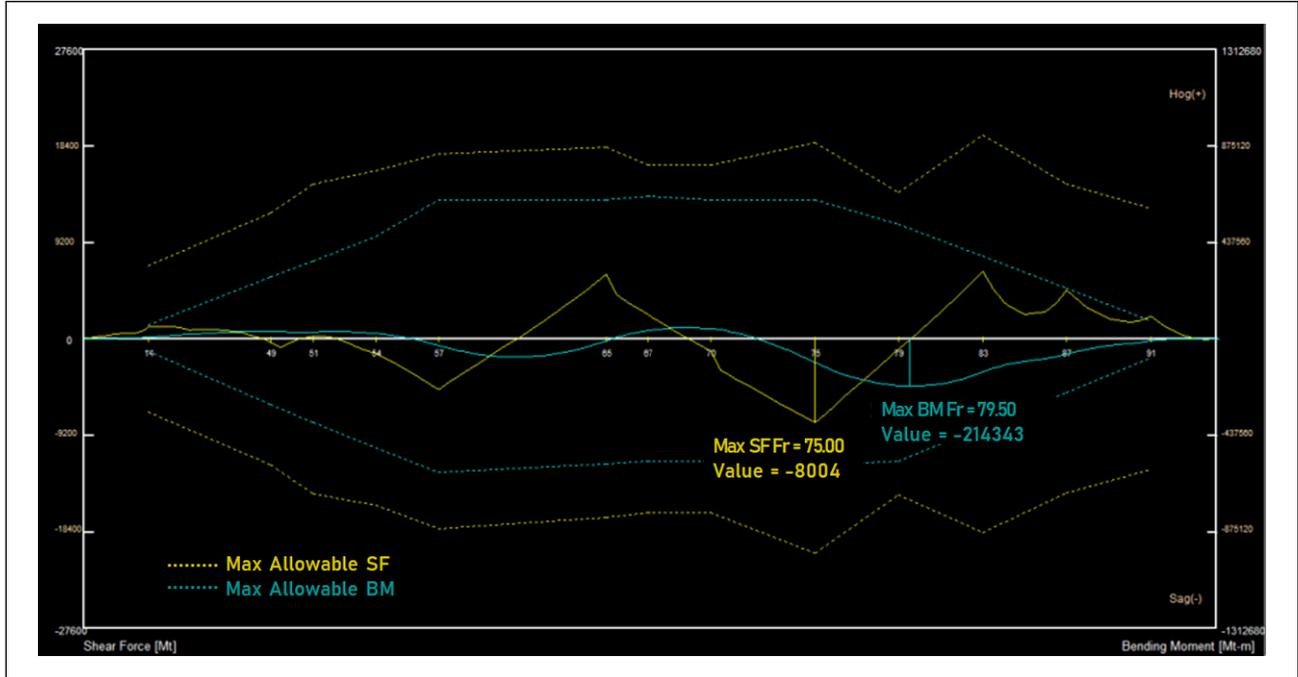
4.2.2.5 사고 직전 항차인 제40항차의 경우에도 중국 텐진(Tianjin)에서 2번과 4번 화물창의 화물만 전량 양하하고 1번, 3번 및 5번 화물창의 화물은 그대로 적재한 채로 중국 차오페디안(Caofeidian)까지 격창적재된 상태로 운항하였다.



<그림 39> 격창양하(화물창을 건너뛰며 화물 양하) 예시

4.2.2.6 제40항차의 격창적재상태에 대하여 적하지침기기를 통해 계산한 선체강도는 <그림 40>과 같이 종굽힘모멘트 최대값은 75.90번 프레임에서 허용기준의 40%, 전단력 최대값은 75.00번 프레임에서 허용기준의 93%으로 나타나 종굽힘모멘트와 전단력은 허용기준을 벗어나지 않는 것으로 나타났다.

4.2.2.7 그러나 화물을 균등하게 적재 또는 양하하지 않을 경우에 발생할 수 있는 국부응력⁶⁸⁾은 확인되지 않았다. 이것은 적하지침기기를 통한 선체강도 계산은 굽힘모멘트와 전단력만 가능하기 때문이다.



<그림 40> 적하지침기기 종강도 계산 결과

4.2.2.8 선박이 격창양하를 하고자 할 경우, 즉 비순상복원성 자료 및 적하지침서에 포함되지 않는 화물적재 상태로 운항하고자 할 경우에는, 화물을 균등하게 적재 또는 양하하지 않음으로써 발생할 수 있는 선체의 국부응력에 대해 해당 선급의 규칙에 따라 미리 검토되어야 하고, 그 결과에 따라 필요 시 선체를 보강하거나 운항조건 등을 제한 받을 수 있다. 그러나 이 선박의 선장 및 선사는 이러한 적재상태에 대한 검토를 한국선급에 요청하지 않았다.

4.2.2.9 이 선박의 경우 이중선측구조이고 격창적재 상태로 만재한 것이 아니므로 국제해상인 명안전협약 제12장 제14규칙이 적용되지 않으며, 격창양하 운항기간도 2일 이내 짧은 연안항해였으므로 이로 인해 발생하였을 국부응력에 의해 선체가 심하게 손상되었을 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

68) 고밀도 화물이 균등하게 적재되지 않을 경우 선체에 부분적으로 과하중을 받는 국부응력이 발생하고 이러한 국부응력은 이중저 및 갑판구조의 균열과 좌굴을 야기할 수 있음

4.2.2.10 다만, 짧은 기간이라고 할지라도 고밀도 화물을 균등하게 적재하지 않은 채 운항할 경우 선체에 국부응력이 발생할 가능성을 완전히 배제할 수는 없다. 반복적인 국부 응력 발생은 선체강도 전체에 영향을 줄 수 있으므로 격창양하와 같은 형태로 운항하고자 할 경우에는 사전에 해당 선급의 검토를 받는 것이 바람직했을 것으로 판단된다.

4.2.3 운항 중 선박수리

4.2.3.1 스텔라데이는 개조 당시 선체보호도장기준이 적용되지 않고, 경화도장(Hard Coating)으로 시공되었다. 개조 후 한국선급에서 작성한 검사보고서나 승선 중인 선장이 작성한 자체 점검보고서에 따르면 3번 좌현 평형수탱크⁶⁹⁾ 등 일부 평형수탱크와 공탱크⁷⁰⁾의 도장불량이 지속적으로 보고되었다.

4.2.3.2 선체의 도장이 불량하다고 하여 반드시 도장을 새로 하거나 해당 강재를 교체해야 하는 것은 아니나 도장이 불량하면 강재의 부식이 심화될 수 있고 이로 인하여 해당 강재의 강도가 저하되는 것은 널리 알려진 사실이다.

4.2.3.3 또한, 이 선박은 2015년 3분기 자체 점검보고서를 통해 3번 좌현·우현 평형수탱크와 4번 좌현·우현 평형수탱크 사이의 65번 프레임에 위치한 횡격벽 보강재가 좌굴변형되는 현상이 보고되었다.

4.2.3.4 선사는 2016년 5월경 방선점검을 수행한 선박설계 전문가로부터 수리가 필요하다는 의견을 받았지만 1항차를 더 운항하였다. 이후 2016년 8월경 한국선급 현장검사원은 연차검사를 수행하던 중 65번 프레임에 횡격벽 보강재의 좌굴변형을 확인하였다.

4.2.3.5 한국선급 검사원은 횡격벽 보강재의 손상부위가 비교적 크게 발생한 사실을 확인하고 한국선급 본부에 보고하였다. 한국선급 본부는 개조 당시 화물창 구조해석 보고서를 검토한 결과 해당 횡격벽의 응력치가 선급허용치를 만족했고, 유사 구조를 갖는 주변 격벽의 손상 이력이나 동종의 개조 선박에서 유사 손상 사례도 없음을 확인하였다. 이를 근거로 한국선급은 해당 손상이 스텔라데이지의 65번 횡격벽에 한정된 현상으로 판단하고 손상부위만 영구 수리토록 하였다.

69) 폴라리스쉬핑에 따르면 3번 평형수탱크는 평상시는 사용하지 않다가 화물 적재장에서 수면위 높이(Air Draft)를 낮출 필요가 있을 때만 사용됨

70) 선장의 2015년 3분기 점검보고서에 따르면 화물창 내 빌지웰과 연결되는 관(Pipe Line)이 설치되어 화물창 빌지를 공탱크로 배출시킴으로 인해 부식이 발생한 것으로 분석함

- 4.2.3.6 해당 손상에 대해 선장은 기상이 악화(풍력계급 7~8)된 가운데 항해하다가 발생한 것으로 진술서를 제출하였으나, 선사 및 한국선급에서는 해당 손상이 기상악화로 발생한 것인지 아니면 다른 원인도 있는지에 대하여 별도의 원인분석을 수행하지는 않았다.
- 4.2.3.7 2016년 8월 손상부위에 대한 영구수리가 이루어졌고 수리 이후 사고항차까지 선박의 주기적 점검보고서에 해당 부위나 주변 부위에서 다시 손상이 발생했다는 보고가 없었으므로, 해당 손상이 이번 사고를 유발한 원인이라고 단정하기에는 근거가 미약하다고 판단된다.
- 4.2.3.8 이 밖에 개조 이후 이 선박의 선박검사 기록상 조선소 입거수리 시 검사내역이 상세하게 기재되지 않았거나⁷¹⁾ 오기로 추정되는 기재사항, 자체 점검보고서를 통해 보고된 상갑판 좌굴 등에 대한 조치가 없었다는 점 등이 조사과정에서 식별되었으나, 사고 발생과 직접적인 연관성은 확인되지 않았다.

4.2.4 소결

- 4.2.4.1 이 선박이 단일선체유조선에서 광석운반선으로 개조된 후 사고 당시까지 운항하는 동안의 선박검사 내역과 선사의 관리내역 등 기록을 분석한 결과, 일부 평형수탱크와 공탱크의 지속적인 부식 발생, 선체 주요부재 손상에 대한 수리지연 및 손상 원인과악미흡, 안전성 여부가 사전 검토되지 않은 격창양하 형태의 운항 사례 등이 확인되었다.
- 4.2.4.2 그러나 이러한 사항들이 침몰을 야기할 만큼의 대규모 선체손상을 발생시킨 원인이 되었다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 다만, 다른 취약요인과 복합적으로 결합될 경우에는 선체손상을 가속화시킬 수 있는 잠재적인 요인으로 작용할 가능성은 있다고 판단된다.

4.3 손상범위 및 침몰과정 추정

4.3.1 손상범위 추정

- 4.3.1.1 스텔라데이지가 침몰되었다는 사실은 이 선박이 부력을 상실했다는 것을 의미한다. 따라서 사고선박이 부력을 상실하고 침몰될 수 있는 침수 규모와 범위에 대하여 분석하였다.

71) 2015년 5월 중간검사 시 주요 강재에 대한 수리내역이 검사보고서에 기재되지 않음

4.3.1.2 스텔라데이지는 사고 발생 전에 화물을 만재한 상태에서 운항 중이었으며, 생존선원들의 진술을 종합하여 침몰상황을 유추하면 다음과 같다.

- 1) 파도는 높았다.
- 2) 횡동요(Rolling)는 조금 있었지만 종동요(Pitching)는 거의 없었다.
- 3) “뿡”하는 충격음과 큰 선체 진동을 느낀 후 2번 좌현에서 물이 새고 좌현으로 기울기 시작했다.
- 4) 충격음과 진동 후 1~2분 사이에 10~15도 정도 횡경사 되었으며, 2~3분 후 약 40도 까지 기울었다.
- 5) 갑판수A는 횡경사 40~50도 정도일 때 좌현 윈브릿지에서 바다로 뛰어들었다.
- 6) 우현 상갑판에 있던 조기장(No.1 Oiler)은 좌현으로 50도 정도 기울어졌을 때 밀려오는 파도에 휩쓸려 바다로 빠졌다.
- 7) 종경사와 관련해 확인된 정보는 없다.

즉 “뿡”하는 충격음과 큰 선체 진동이 있을 후 침몰까지의 과정이 5분여의 짧은 순간에 일어났고, 좌현으로 기울다가 침몰 직전 급격하게 기울면서 침몰했다.

4.3.1.3 이 선박의 상갑판 아래 배수량은 약 47만톤이므로 사고 당시 약 30만톤의 배수량을 제외하면 예비부력은 약 17만톤이다. 이 선박이 침몰하려면 부력이 모두 상실되어야 하므로, 예비부력 약 17만톤 만큼의 해수가 선내로 유입되어야 한다.

4.3.1.4 또한, 약 5분의 짧은 시간에 침몰까지 이어졌으므로 17만톤의 해수도 약 5분 안에 선내로 유입되어야 하며, 이럴 경우 유입량은 초당 566톤 이상이 되어야 한다. 손상부위가 해수면 아래 10미터이고, 이에 해당하는 압력으로 물이 들어온다고 가정하면 개구부의 크기는 40m² 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

4.3.1.5 그러나 한 구획만 침수되어서는 약 17만톤의 해수가 유입될 수 없다. 스텔라데이지의 상갑판 하부는 2~3만톤 규모의 여러 구획으로 나뉘어져 있기 때문이다. 평형수탱크나 공탱크 중 가장 큰 구획인 3번 평형수탱크가 침수되는 경우에도 약 3만톤 정도가 유입될 뿐이다. 즉, 이 선박이 침몰하려면 여러 구획이 동시에 침수되어야 한다.

4.3.1.6 <표 23>과 같이 손상구획에 따른 침수량, 그리고 이에 따른 부력상실(침몰) 가능성을 검토해 보면, 좌현의 모든 탱크(평형수탱크, 공탱크)에 해수가 유입되더라도 유입량이 약 11만톤에 불과하므로 나머지 6만톤은 화물창이나 우현 탱크 등 다른 구획에도 해수가 유입되어야만 부력이 소실되는 것으로 계산된다.

<표 23> 침몰 가능성 판단을 위한 손상 예시

	Volume (m ³)	좌현 탱크 침수 (ton)	좌현 탱크 및 이중저 침수 (ton)	좌현 및 우현 탱크 침수 (ton)	좌·우현 탱크, 이중저 침수 및 화물창 손상 ⁷²⁾ (ton)
Light Weight		38188	38188	38188	38188
Miscellaneous Weight*		3691	3691	3691	3691
Cargo Hold	141038	260003	260003	260003	144564
Port WBT, VOID	109531	112269	112269	112269	112269
STBD WBT, VOID	109531	0	0	112269	112269
Double Bottom	32110	0	32913	0	32913
Miscellaneous Space**	35280	0	0	0	36162
Sum		414151	447064	526420	480056
Displacement Under Main Deck	459700	471192	471192	471192	471192
		Floating	Floating	Sinking	Sinking

* Miscellaneous Weight: Fuel Oil(3229ton) + Fresh Water(300ton) + Diesel Oil(162ton)

** Miscellaneous Spaces: APT + FPT + Engine Room + Engine Casing

4.3.1.7 또한, 짧은 시간에 선박이 좌현으로 대각도 기울어져 침몰되려면 좌현의 모든 탱크가 손상을 입고, 여기에 더하여 우현 탱크까지 손상을 입어야 할 것으로 계산된다. 그렇지 않다면 좌현 탱크가 전부 손상되고 이중저 탱크와 화물창까지 연속적으로 손상되어 다량의 침수가 발생하여야 한다.

4.3.1.8 생존선원의 진술과 같이 서서히 침몰하지 않고 급격하게 경사되고 짧은 시간에 침몰되는 상황이 가능하려면, 예비부력보다 더 많은 침수가 있어야 하므로 약 17만톤 보다 수 만톤 정도의 침수가 더 발생하였다고 추정하는 것이 보다 합리적이라고 판단된다.

4.3.1.9 모든 화물창이 손상을 입어 화물(철광석)이 모두 흘러나가는 상황도 가정할 수 있다. 그러나 이 경우는 빈 공간에 철광석보다 낮은 비중의 해수가 들어오게 되고 일부 침수되지 않은 평형수탱크와 빈 공간 등으로 인해 오히려 선체 부력이 유지됨으로써 침몰에 이르지 않는 것으로 계산되었다.

72) 화물창이 손상을 입어 화물(철광석)이 모두 바다로 흘러나가고, 그 공간에 해수가 들어오는 경우를 가정함

- 4.3.1.10 이런 이유로 화물창이 크게 손상되어 다량의 화물이 바다로 흘러나갔을 것이라는 가능성은 배제하는 것이 타당하다. 다만, 평형수탱크 등의 침수가 진행되면서 선체 균열이 발생하게 되면 화물창에도 일부 균열이 발생할 가능성은 있으므로 이 균열을 통해 화물의 일부가 조금씩 흘러나갔을 수는 있다고 추정된다.
- 4.3.1.11 한편, 선체 상갑판 하부가 절단되는 경우의 침몰 가능성을 검토하기 위하여 2번 화물창과 평형수탱크가 위치한 구획이 절단되거나 거의 절단되어 상갑판 등 일부 부재로만 연결되었을 가능성에 대해서도 분석을 수행하였다.
- 4.3.1.12 이 경우에는 절단된 부위 사이로 2번 화물창에 실린 50,700톤의 화물이 모두 유실되고, 인접한 2번 좌현·우현 평형수탱크 및 이중저에 해수가 채워진다면 당시의 선박 흘수를 기준으로 유입되는 해수 무게는 54,786톤 인 것으로 계산되었다. 원래 2번 화물창이 있던 화물 50,700톤이 없어지고 대신에 해수 54,786톤의 해수가 실리게 된다.
- 4.3.1.13 이로 인해 침수 전후로 4,086톤의 차이가 발생하며, 그 차이만큼 부력 감소만 있을 뿐이다. 절단된 부분이 침수되더라도 상당한 부력이 남아 있기 때문에 상갑판 하부가 일부 침수된 채로 바다에 떠있게 된다.
- 4.3.1.14 따라서, 이 선박에는 커다란 선체손상이 있어야 하고, 이러한 손상은 좌현 평형수탱크를 포함한 여러 구획에서 동시 다발적으로 발생해야 하며, 중량화물인 철광석의 유출량은 많지 않아야 침몰하게 된다는 결론을 도출할 수 있다.
- 4.3.1.15 즉, 생존선원의 진술내용과 같이 짧은 시간에 빠른 좌현 횡경사 및 침수 속도에 부합되는 상황은 이 선박의 좌현 현측탱크가 다수 손상되고, 우현 평형수탱크와 공탱크 등도 손상되어 거의 동시에 침수가 발생하는 상황에 가깝다고 볼 수 있다.

4.3.2 침몰과정 시뮬레이션

- 4.3.2.1 2번 좌현 평형수탱크에 침수가 있었다는 점, 횡경사가 좌현으로 심하게 발생하였다는 점, 5분 내에 침몰이 되었다는 점을 반영할 수 있는 시나리오에 대해 선박해양플랜트 연구소(KRISO)에 의뢰하여 시뮬레이션을 수행하였다.
- 4.3.2.2 시뮬레이션은 화물창에 손상이 없는 경우, 화물창이 침수가 되어 철광석과 해수가 잘 섞여서 철광석이 바다로 흘러나가는 경우, 철광석과 해수가 비중 때문에 잘 섞이지 않아 철광석은 선외로 흘러나가지 않고 해수의 유입만 있는 경우 등 크게 3가지로 구분한 후 상황에 따라 침수 구역을 변경해가며 수행되었다. 선박에서 보낸 SNS에 언급된 2번 좌현 평형수탱크 침수는 사실이라고 전제했다.

- 4.3.2.3 화물창에 손상이 없는 경우에 대한 시뮬레이션(15개 시나리오) 결과, 좌현 2번 평형수 탱크에 손상이 있는 경우 횡경사 약 7도, 침하는 1.2미터가 발생했다. 좌현 2번 및 3번 평형수탱크에 손상이 있는 경우 횡경사 약 19도, 침하 3.3미터가 발생하였다. 좌현 평형수탱크 침수를 추가하는 방식으로 시뮬레이션을 수행하였으나, 모든 경우 상당히 오랜 시간 선체가 해상에 떠 있는 것으로 분석되었다. 즉, 기관실에 침수가 발생하지 않으면 좌현 탱크의 침수만으로는 침몰되지 않았다.
- 4.3.2.4 또한, 좌현 평형수탱크 2개만 손상을 입는 경우에는 모든 이중저가 손상을 입어도 침몰되지 않는다. 침몰이 되기 위해서는 적어도 좌현 평형수탱크 3개 이상이 손상을 입어야 하고⁷³⁾, 이중저와 우현까지 침수가 확대되어야 침몰이 된다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 5분이라는 짧은 시간 안에 선체가 물속으로 들어가려면 손상의 크기는 상당히 커야 한다는 것도 확인할 수 있었다.
- 4.3.2.5 두 번째, 화물창이 침수되어 철광석과 해수가 잘 섞여서 철광석이 흘러나가는 경우에 대한 시뮬레이션(14개 시나리오)에서는, 여러 가지의 손상 시나리오에서 선체가 침몰하지 않는 것으로 나타났다. 철광석이 바다로 흘러나가는 경우 이 선박이 침몰하기 위해서는 거의 모든 구획이 손상되어야 하는 것으로 분석되었다.
- 4.3.2.6 세 번째 시나리오인 철광석은 바다로 흘러나가지 않고 해수의 유입만 있는 경우에 대한 시뮬레이션(5개 시나리오) 결과에서는 선체의 침하량은 커졌으나 해수가 밑 부분부터 차므로 횡경사가 줄어드는 결과를 보였다.
- 4.3.2.7 이러한 시뮬레이션 시나리오(34개) 중 선박에서 보낸 SNS 메시지, 구조된 선원 진술 등과 부합되는 대표적인 시나리오는 <표 24>와 같다.

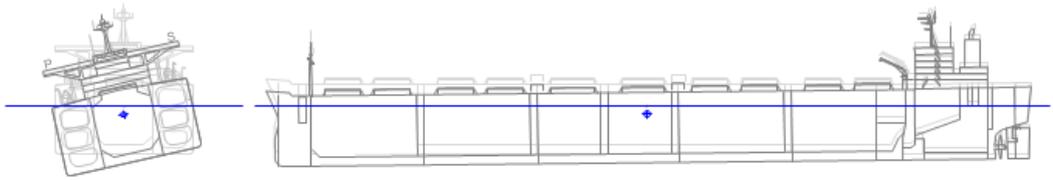
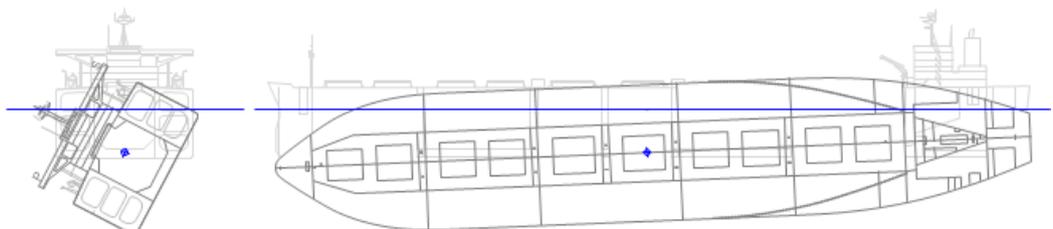
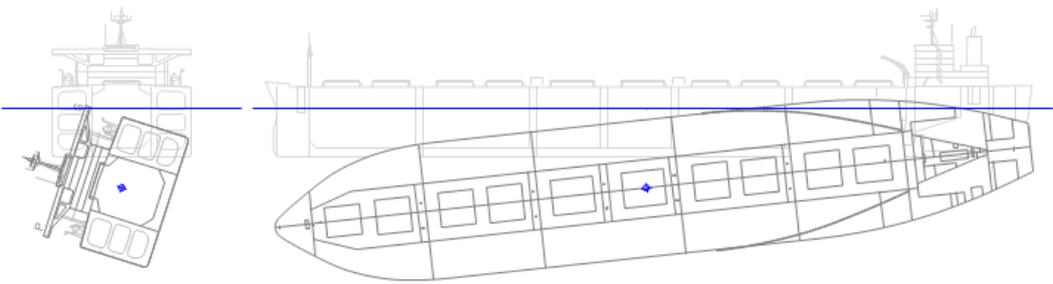
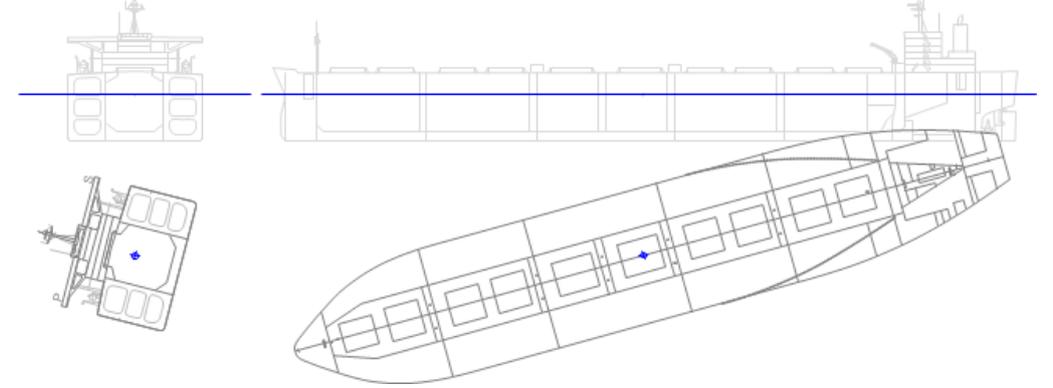
<표 24> 추정 가능한 손상 시나리오

구분	손상위치			비고
	외판손상	내부손상	기타손상	
추정 시나리오 1	2번 좌현 평형수탱크 3번 좌현 평형수탱크 4번 좌현 평형수탱크 5번 좌현 공탱크	2번 이중저탱크(좌우손상) 3번 이중저탱크(좌우손상)	2번 화물창 상부 4번 화물창 상부 기관실 전방	
추정 시나리오 2	2번 좌현 평형수탱크 3번 좌현 평형수탱크 4번 좌현 평형수탱크 5번 좌현 공탱크	2번 이중저탱크(좌우손상) 3번 이중저탱크(좌우손상)	2번 화물창 상부 4번 화물창 상부 5번 화물창 상부 5번 우현 공탱크 상부 기관실 전방	

73) 2~3분 후 약 40도의 횡경사 등 선원진술에 부합되기 위해서는 4개 이상의 좌현 평형수탱크가 침수되어야 함

4.3.2.8 시나리오 1에서는 침수 후 3분이 되기 전에 횡경사가 40도를 넘는 것으로 나타났다. 침몰은 선수부부터 시작되었다. 선수가 먼저 물속으로 가라앉았는지 또는 선미가 먼저 가라앉았는지에 대해 확인된 것은 없다.

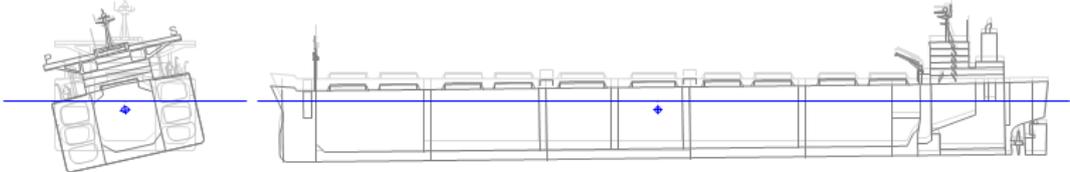
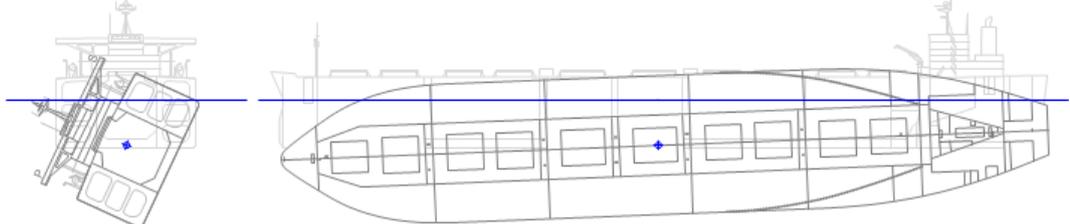
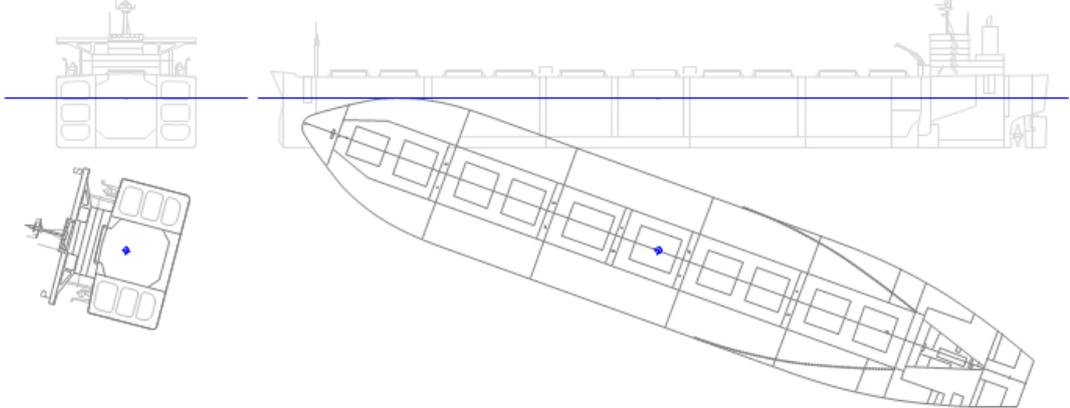
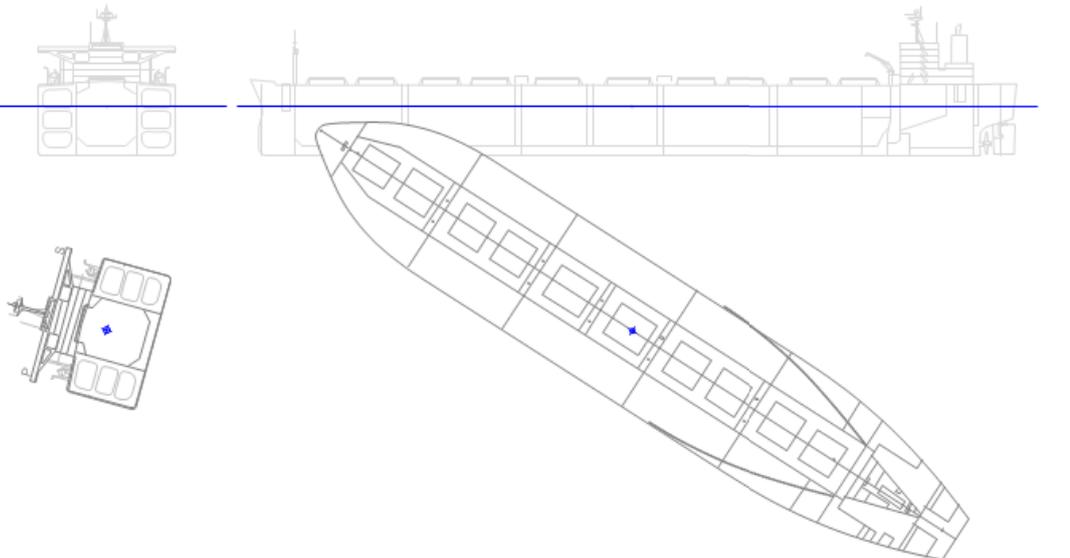
<표 25> 추정 시나리오 1

시간(초)	선체 침하 및 자세 ⁷⁴⁾
100	
200	
300	
333	

74) 횡단면은 선미에서 볼 때를 기준으로 작성되었고, 종단면은 좌현에서 볼 때를 기준으로 작성됨

4.3.2.9 시나리오 2도 선원의 진술과 부합된다. 시나리오 2는 시나리오 1의 침수구역에 5번 화물창과 5번 우현 공탱크가 추가적으로 손상되었다고 가정한 것으로 시나리오 1과는 달리 선미부부터 물속으로 가라앉는다.

<표 26> 추정 시나리오 2

시간(초)	선체 침하 및 자세
100	
200	
300	
310	

4.3.3 소결

- 4.3.3.1 손상범위와 이에 대한 시뮬레이션 결과를 통해 스텔라데이지가 5분 정도의 짧은 시간 안에 침몰되려면 2번 좌현 평형수탱크를 포함해 총 3개 이상의 좌현 탱크가 침수되어야 한다는 결론이 도출되었다.
- 4.3.3.2 아울러, 부력 상실이 가능하려면 17만톤 이상의 침수가 있어야 하는데, 좌현에 있는 평형수탱크·공탱크의 침수만으로는 17만톤이 유입될 수 없으므로 이중저가 손상되고 이를 통한 우현 평형수탱크도 함께 침수되어야 한다는 것을 추정⁷⁵⁾할 수 있다. 또한, 화물은 바다로 흘러나가지 않았거나 흘러나갔다고 하더라도 그 양이 적어야 함을 알 수 있다.

4.4 손상가능성 확인을 위한 사후 구조해석

4.4.1 사후 구조해석의 목적

- 4.4.1.1 스텔라데이지는 사고 직전까지 선체손상 또는 침수를 예측할 만한 징후가 보고되지 않은 상태에서 2번 좌현 평형수탱크 침수 및 “뽕”하는 굉음과 진동 등이 있을 후 급격히 좌현으로 기울면서 5분여의 시간 내 침몰된 것으로 추정된다.
- 4.4.1.2 침몰의 원인을 밝혀내기 위해 개조과정, 선박검사, 안전관리 및 운항과정에서 발생할 수 있는 위험상황과 이와 관련된 취약요소를 검토하였으나 이것만으로 사고 원인을 설명하기에는 한계가 있었다.
- 4.4.1.3 하지만 침수가 발생했으므로 외판에 손상이 있어야 한다는 점, 침몰이 되기 위해서는 선체에 상당히 큰 파공이 발생하여만 한다는 점, 그리고 부력보다 침수량이 많아야 하므로 여러 구획이 침수되어야 한다는 점, 좌현으로 빠르게 기울어졌으므로 좌현 평형수탱크가 다수 손상되어야 한다는 점 등은 생존선원 진술 및 SNS 메시지와 4.3에서 분석한 결과 등으로 미루어보아 사실이라고 추정하는 것이 합리적이다.
- 4.4.1.4 따라서, 이러한 추정을 뒷받침할 근거를 찾기 위해 조선공학적인 방법을 활용하여 사후 구조해석을 수행하였다. 분석은 최초 침수를 야기할 만한 구조적 취약성과 취약부위를 식별하는데 특히 초점을 두었다.

75) 침수가 발생했을 것으로 추정되는 평형수탱크의 숫자, 위치 등은 예비부력, 탱크용적과 사고 당시 침몰시간 및 횡경사 등을 바탕으로 추정한 것으로, 실제 해당 탱크에 손상요인이 있었는지 여부는 고려되지 않았음

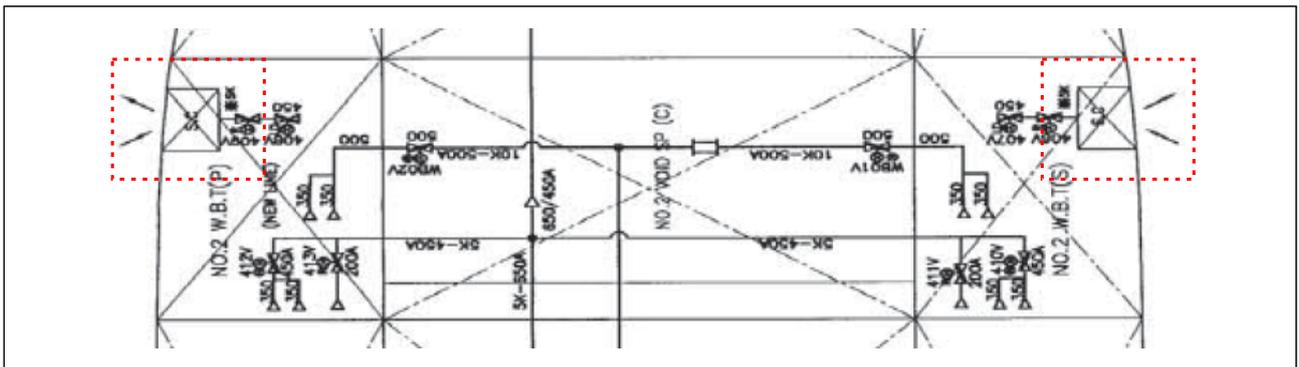
4.4.1.5 사후 구조해석에서는 여러 각도에서 구조강도를 평가하기 위해 한국선급 기준 뿐만 아니라 영국선급 등의 규칙도 적용하여 분석하였고, 개조 당시 사고선박에 적용되지 않았던 피로강도와 최종강도⁷⁶⁾도 함께 검토하였다.

4.4.1.6 추가로, 과도한 응력이나 변형률⁷⁷⁾에 의한 재료의 파단 가능성을 검토하기 위하여 4.4.7과 같이 손상해석도 실시하였다.

4.4.2 2번 좌현 평형수탱크 침수 시 선체 구조강도해석

4.4.2.1 스텔라데이지 침몰사고 이후 한국선급은 선체손상이 없는 상태에서 2번 좌현 평형수탱크가 약 80% 침수되었을 경우를 가정하여 선체 구조강도를 검토하였다. 개조 당시 검토한 바와 같이 구조강도 규정을 만족하고 있음에도 스텔라데이지가 침몰되었다는 점을 감안하여, 2번 좌현 평형수탱크의 침수가 구조안전성에 어떤 영향을 미쳤는지 등 구조적인 문제점, 그리고 침몰과의 연관성을 파악하기 위함이었다.

4.4.2.2 한국선급은 2번 좌현 평형수탱크 침수 발생 이유에 대해서 해수주입밸브(Sea Chest Valve)에 주목했다. 이 선박의 2번 좌현·우현 평형수탱크에는 선저에 설치된 해수주입 밸브와 직접 연결되는 별도의 배관이 설치⁷⁸⁾되어 있었다. 이 배관을 통하면 2번 평형수탱크에 중력으로 해수를 주입하거나 배출할 수 있으므로 선체손상이 없는 상태에서도 2번 좌현 평형수탱크의 해수주입밸브가 열려 있으면 해수가 유입될 수 있는 구조이다.



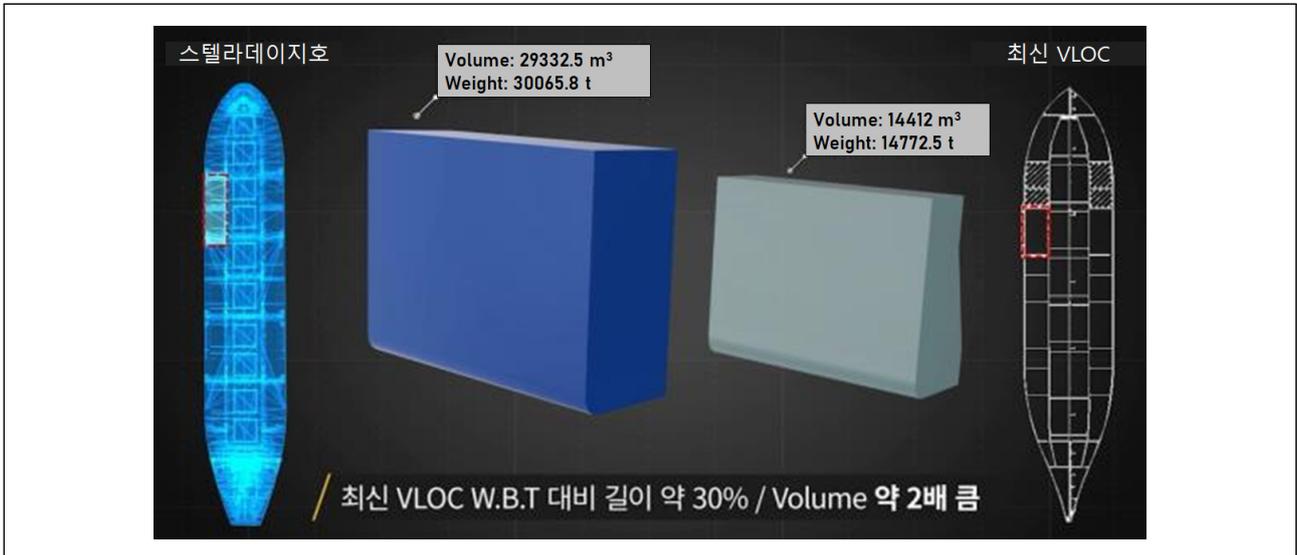
<그림 41> 2번 평형수탱크 해수주입밸브 및 배관도

76) 좌굴 등 변형이 발생한 후 최종적으로 붕괴되는 시점에서의 응력으로 하중에 대해 선체가 견딜 수 있는 최대응력. 본 보고서에서는 종방향의 최종강도를 의미함

77) 물체에 외력을 가하면 형태와 크기가 변하는데 원래 치수와 변화한 치수를 비율로 나타낸 값

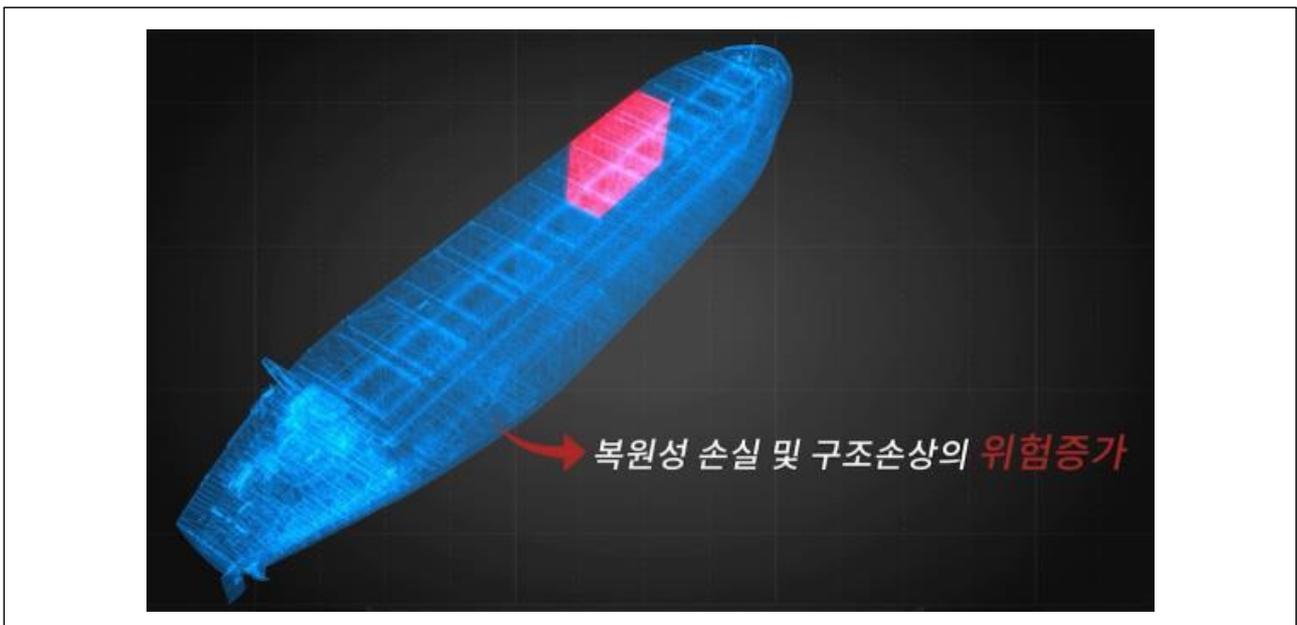
78) 2번 평형수탱크에 해수주입밸브와 연결된 배관은 직경 450밀리미터이고 중간에 2개의 밸브가 있음. 이 밸브들은 유압으로 작동되는 나비형 밸브(Butterfly Valve)였으며, 바깥쪽에 설치된 밸브는 화물작업통제실(Cargo Control Room)에서 개폐를 제어하고 안쪽에 설치된 밸브는 상갑판에서 개폐를 조작할 수 있음

4.4.2.3 또한, 이 선박은 단일선체유조선을 광석운반선으로 개조한 선박으로 최근에 건조되는 광석운반전용선에 비해 좌현·우현 평형수탱크의 길이가 약 30% 길고, 탱크용량은 약 2배 가량 크다.



<그림 42> 스텔라데이지와 최신 VLOC 평형수탱크 크기 비교

4.4.2.4 한국선급의 분석에 의하면 2번 좌현 평형수탱크가 침수되면 선박의 굽힘모멘트가 약 30% 증가하고, 비대칭 하중에 따른 횡경사와 함께 비틀림 모멘트가 발생하며, 비대칭 중량분포에 따라 롤모션(Roll Motion) 및 가속도가 발생하면서 선체외판에 과량압력이 증가하고 화물 관성력도 증가하였다.



<그림 43> 좌현 2번 평형수탱크 침수 시 위험성

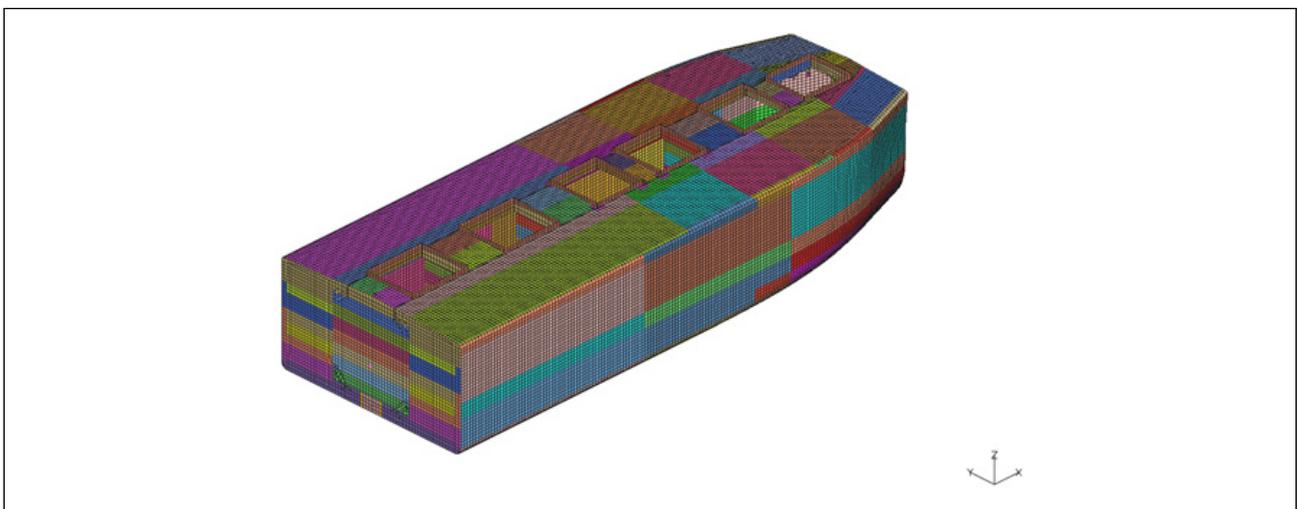
- 4.4.2.5 이러한 비틀림 모멘트, 화물 관성력 등의 증가는 갑판 화물창구 주위, 갑판 아래 웹프레임 및 크로스데크에 과도한 응력이 발생시키고, 특히 4번 화물창 갑판 아래 웹프레임에서부터 치명적인 손상이 발생되면서 전체적인 구조붕괴가 시작될 수 있는 것으로 분석되었다.
- 4.4.2.6 4번 화물창의 갑판 아래 웹프레임의 구조손상은 화물창 전후단 횡격벽의 붕괴를 유발하고 이로 인해 횡하중을 지지하는 부재들도 기능을 상실하면서 4번 좌현 평형수탱크의 선저 및 선측외판 등도 연쇄적으로 붕괴하게 되는 것으로 나타났다.
- 4.4.2.7 그러나 2번 좌현 평형수탱크의 침수가 해수주입밸브의 손상이나 오작동으로 인해 발생했을 가능성⁷⁹⁾은 낮은 것으로 판단된다. 이 선박이 개조된 후 보고된 점검보고서나 수리내역 등에서 2번 평형수탱크에 설치된 해수주입밸브의 고장이나 수리내역이 없었고, 사고항차 화물적재 시 2번 좌현 평형수탱크의 평형수를 중력으로 배출하기 위하여 이 밸브를 사용했는지에 대한 기록이나 이를 추정할만한 근거를 확인할 수 없었기 때문이다.
- 4.4.2.8 아울러 해수주입밸브를 통하여 2번 좌현 평형수탱크에 해수가 채워지는데 평균 2시간 이상 소요되고, 손상복원성 계산 결과에 따르면 2번 좌현 평형수탱크 침수 시 약 7도의 횡경사가 발생된다는 점을 고려할 때 주간에 활동 중인 선원들이 2번 좌현 평형수탱크가 침수되고 있음을 사전에 인지하지 못할 가능성이 낮고, 만약 그러한 사실을 인지하였다면 대응할 충분한 시간이 있었을 것이기 때문이다.
- 4.4.2.9 한편, 현행 국제해상인명안전협약 제12장 제4규칙 및 제5규칙에는 화물창 침수로 인한 복원성 확보 및 연쇄적인 구조붕괴를 방지하기 위한 요건이 규정되어 있는데 이는 화물창 침수 시를 고려한 규정이다. 스텔라데이지와 같이 일반적인 광석운반선용선의 평형수탱크보다 상대적으로 큰 평형수탱크를 가지고 있는 선박에서 평형수탱크가 침수되는 경우에 대한 복원성 및 구조강도 요건을 규제하는 규정⁸⁰⁾은 마련되어 있지 않다.

79) 심해수색을 통하여 2번 좌현 평형수탱크의 해수주입밸브를 확인하고자 했으나, 선체손상이 심하여 2번 좌현 평형수탱크를 비롯한 해수주입밸브를 확인할 수 없었음

80) 마셜제도는 스텔라데이지 사고와 관련한 조사보고서를 공표(2019.04.19.)하면서 개조된 광석운반선의 평형수탱크가 상대적으로 매우 크고 이로 인해 침수 시 연쇄적인 구조붕괴 가능성을 지적하였고, 이를 방지하기 위하여 IMO에 관련 규정의 개정을 제안할 것을 권고하였음

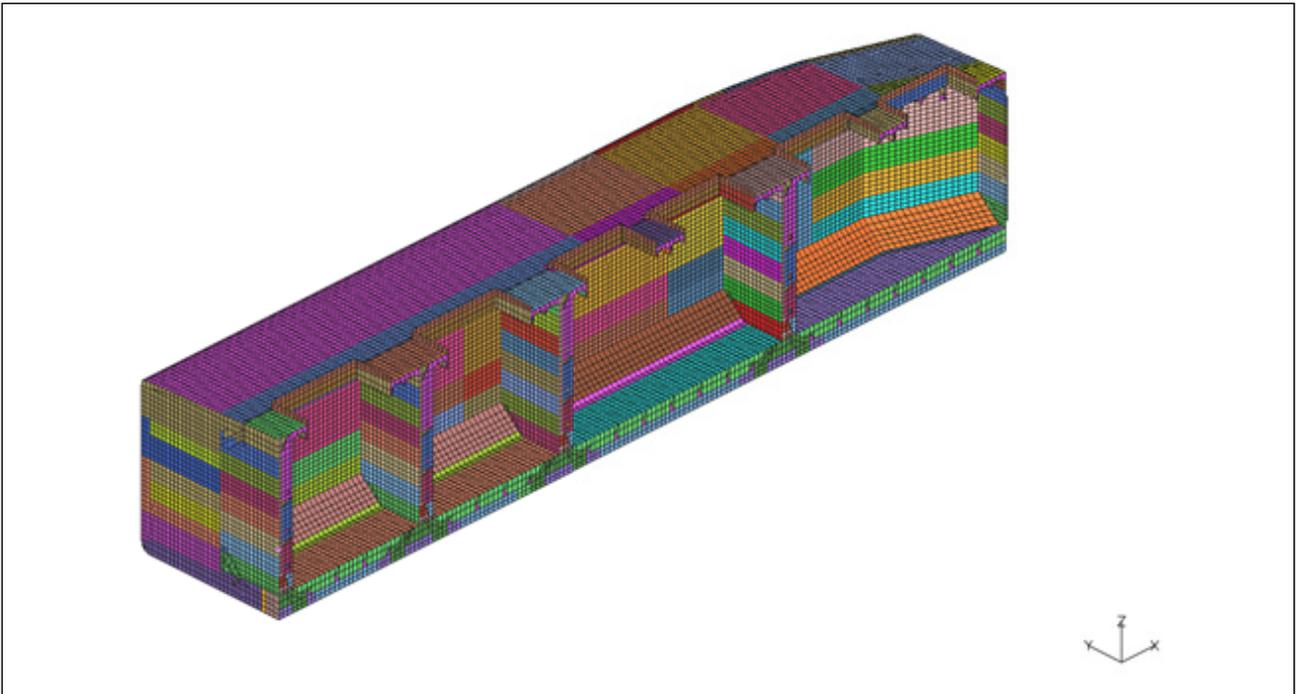
4.4.3 구조강도해석

- 4.4.3.1 침수를 유발할 정도의 손상이 발생하고 이후 대규모 선체손상으로 발전할 가능성이 있는 부위를 파악하기 위해 선체구조의 적합성을 평가하는 화물창 구조강도해석을 실시⁸¹⁾하였다. 이 해석은 4.4.2에서 기술한 한국선급의 구조강도해석과는 별개로 수행되었다.
- 4.4.3.2 사고조사의 일환으로 수행된 본 해석은 설계검증이 아닌 손상가능성 분석 등 구조 취약 부를 파악하기 위한 것인 만큼 영국선급 규칙⁸²⁾의 하중 및 평가기준 등이 적용되었다.
- 4.4.3.3 해석 대상은 최초 손상이 발생하였을 것으로 보이는 2번 좌현 평형수탱크가 있는 2번 화물창(FR.75~FR.83) 구역을 선정하였고, 해석을 위한 모델링은 2번 화물창과 이에 인접한 1번 및 3번 화물창을 대상으로 하였다. 부재의 두께는 사고 당시 실제상황과 최대한 근접한 두께를 적용하기 위하여 선체구조 도면상의 부재치수(설계두께)가 아닌 2015년 수행된 선체두께 계측보고서⁸³⁾의 두께를 인용하였다.
- 4.4.3.4 외판, 내저판, 갑판 및 횡격벽은 판 요소로 모델화하였으며, 종늑골 및 횡늑골 등의 보강재는 보 요소로 모델화하여 해석모델을 구성한 후 유한요소해석⁸⁴⁾(Finite Element Analysis)을 수행하였다.



<그림 44> 유한요소 해석모델 예시(선박전체)

81) 모베나 코리아 유한책임회사(MOVENA KOREA, Maritime Consulting & Services)에서 실시함
 82) Lloyd's Register, 2016. 'Structural Design Assessment -Procedure for primary structure of ore carrier', Ch. 2 Sec. 5 Stress acceptance criteria and Sec. 6 buckling acceptance criteria
 83) 선체구조 전반으로 3~6%의 쇠모가 진행되었고 상갑판은 4~6%가 진행되었으며 쇠모가 가장 심한 부위는 종격벽과 선측판 중통재로 쇠모율이 10%가 넘는 곳이 많았음
 84) 구조물을 수많은 조각으로 분할하여 실제 구조물과 매우 유사하게 재현하고 해석하는 수치해석 기법



<그림 45> 유한요소 해석모델 예시(반쪽)

- 4.4.3.5 모델에 적용되는 하중은 정수압 및 파랑변동하중을 포함한 외부하중, 적하지침서에 따라 비중 3.0 t/m^3 의 화물적재 시 내부하중을 고려하였다.
- 4.4.3.6 하중조건은 호깅(선수미 처짐, Hogging)과 새깅(중양부 처짐, Sagging), 그리고 파랑변동하중으로 파정(Wave Crest)과 파곡(Wave Trough)을 고려한 4가지 만재적재상태, 공선항해 상태(Ballast Condition), 수압시험 상태, 화물창침수 손상상태 등 총 7가지를 검토하였다.
- 4.4.3.7 구조강도해석 결과, 단위중량이 큰 화물(고비중 화물)이 적재된 경우에는 화물창 및 평형수탱크의 일부분에서 설계응력보다 큰 응력이 발생함을 확인할 수 있었다. 선저 만곡부(Bilge) 트랜스버스 웨브(Transverse Web) 부위, 평형수탱크 모서리 인근의 스트링거 플랜(Stringer Plan), 갑판 화물창구(Hatch) 코너의 상갑판(Deck Plate)과 호퍼(Hopper) 상부의 종격벽 등의 위치에서 상대적으로 설계응력보다 높은 응력이 발생⁸⁵⁾ 되었다. 설계응력보다 높은 응력이 발생하는 것으로 파악된 부위는 <표 27>과 같다.

85) 개조 당시 한국선급 규칙과 2016년 영국선급 규칙 간의 평가방법 등의 차이로 인해 발생한 것으로 추정됨

<표 27> 설계응력보다 높은 응력이 발생한 부위

위치	취약부위	발생응력, A (N/mm ²)	설계응력, B (N/mm ²)	적합도, A/B (A/B>1, 부적합)
FR.77	선저만곡부	266.94	236.25	1.130
FR.78	선측 발지부, 상부 크로스타이	260.44	176.25	1.478
FR.80	선측 발지부, 상부 크로스타이	270.48	176.25	1.535
FR.81	선측 발지부, 상부 크로스타이	294.33	176.25	1.670
FR.82	선측 발지부, 상부 크로스타이	270.84	176.25	1.537
No.3 Stringer	평형수탱크 모서리	275.19	236.25	1.165
No.2 Stringer	평형수탱크 모서리	261.59	236.25	1.107
No.1 Stringer	평형수탱크 모서리	268.02	236.25	1.134
Upper Deck	갑판 화물창구 뒤쪽 코너	402.35	300.27	1.340
Inner Hull	호퍼 상부	280.32	277.18	1.011
FR.79	하부 호퍼 끝단	310.47	236.25	1.314
Center Girder	선수 부분	408.30	277.18	1.473
Top Side	측면부	288.20	277.18	1.010

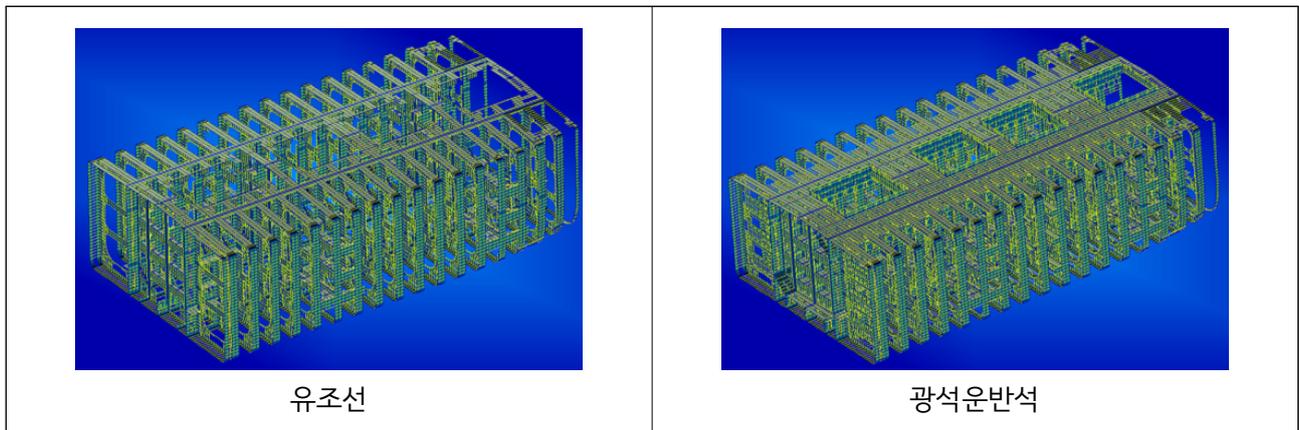
4.4.3.8 이런 부위에 고응력이 발생하게 되면 실제수명이 설계수명보다 짧은 부위가 생길 수 있으나, 이 현상은 국부적으로 나타나기 때문에 선체손상의 요인이라고 단정하기는 어려울 것으로 판단된다.

4.4.3.9 구조해석을 통해 얻어진 각 주요 부재의 발생응력을 토대로 좌굴강도에 대해서도 분석했다. 그 결과, 선체외판은 전반적으로 양호하였다.

4.4.3.10 내부재는 선측 트랜스버스 웨브 등에서 좌굴 허용치를 초과하였으나, 개조 당시 좌굴 보강재(Buckling Stiffener)를 반영하여 해당 부위 강도를 향상시켰으므로 좌굴로 인해 선체손상이 발생하였다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 다만, 좌굴에 취약한 부위가 많이 나타난다는 점은 다른 요인으로 인하여 파단 등 구조손상이 진행되면 이를 가속화시킬 수 있는 요인으로 작용될 수 있다는 것을 의미한다.

4.4.4 피로강도해석

- 4.4.4.1 스텔라데이지가 진수된 후 운항하면서 누적된 피로손상도를 계산하여, 이 선박에 구조적 취약점이 있는지를 검토하기 위해 피로강도해석을 실시⁸⁶⁾하였다. 해석기준은 주로 영국선급 규칙(Lloyd's Register, 2009. 'Fatigue design assessment level 3 - Guidance on direct calculation')을 따랐다.
- 4.4.4.2 이 선박은 유조선에서 광석운반선으로 개조된 선박이므로 개조 후 운항 시(광석운반선 상태) 피로도와 개조 전 운항(유조선 상태) 시 피로도를 모두 평가하여야 한다. 이를 위해 광석운반선 모델과 유조선 모델을 각각 생성하고, 건조 이후부터 사고 당시까지의 피로도 평가하였다.
- 4.4.4.3 피로강도해석의 범위는 1번 화물창의 1/2, 2번 화물창 전체, 3번 화물창의 1/2로 정하고, 구조요소 중 다른 부재와 용접으로 연결된 모든 부재에 대해 피로강도해석을 수행하였다.



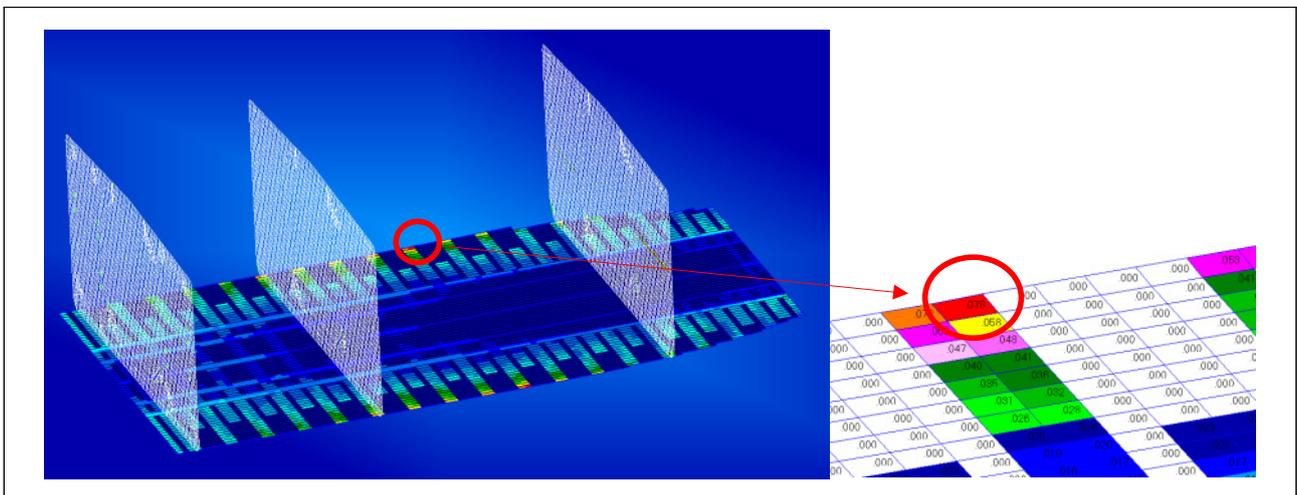
<그림 46> 피로강도해석 모델

- 4.4.4.4 피로강도해석을 위한 선박의 운항속도는 정오보고서를 참조하여 유조선과 광석운반선으로 운항할 때 모두 만재상태 시 12.69노트, 공선항해 시 14.0노트로 가정하였다. 유조선의 운항비율은 만재상태 0.425, 공선상태 0.425로 가정하였고 광석운반선의 운항비율은 만재상태 0.5, 공선상태 0.35로 가정⁸⁷⁾하였다.

86) 한국해양대학교 산학협력단에서 실시함

87) 피로강도해석을 위해 적용한 유조선 및 광석운반선의 운항비율은 노르웨이독일선급의 지침을 따랐으며 실제 운항비율과 차이가 있을 수 있음

- 4.4.4.5 피로손상 예측을 위하여 유조선과 광석운반선으로 운항했던 항로의 해상상태는 노르웨이독일선급(DNV-GL)에서 제공하는 전 세계 취항 해상상태 정보⁸⁸⁾를 사용하였다.
- 4.4.4.6 하중은 영국선급 피로강도해석 절차에 따라 굽힘모멘트, 외력하중 및 화물·평형수 적하상태의 하중을 생성하였다. 피로손상을 구하는데 있어서는 일반적으로 용접 연결부 피로손상사고 검증에 적합한 것으로 알려진 영국선급의 필릿용접 평균 S-N곡선⁸⁹⁾(Fillet Weld Mean S-N Curve)을 사용⁹⁰⁾하였다.
- 4.4.4.7 피로수명의 정확한 예측을 위해서는 해석모델의 요소크기를 해당 판 정도의 두께인 상세분할요소(20~30밀리미터)로 해야 하나, 피로강도해석 대상을 선정함에 있어 응력집중이 예상되는 특정 부위가 아닌 전체 선체부위를 상세분할요소로 하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 이런 이유로 구조강도해석에 활용된 모델의 요소 크기(약 800~900밀리미터)로 피로강도해석을 실시하되, 피로수명의 연수가 아닌 피로에 있어 상대적으로 취약한 부위를 식별하는데 중점을 두고 평가⁹¹⁾하였다.
- 4.4.4.8 피로강도해석 결과, <그림 47>, <그림 48>과 같이 선체구조 주부재⁹²⁾(Primary Member) 중 2번 평형수탱크의 선저만곡부에 인접한 선저외판 및 선측외판이 상대적으로 가장 취약한 것으로 나타났다. 해당 취약부위는 응력집중도를 경감시키기 위한 구조배치가 없기 때문에 상세구조해석을 수행하면 피로손상이 높게 나올 수 있다.



<그림 47> 선저외판의 피로 취약부

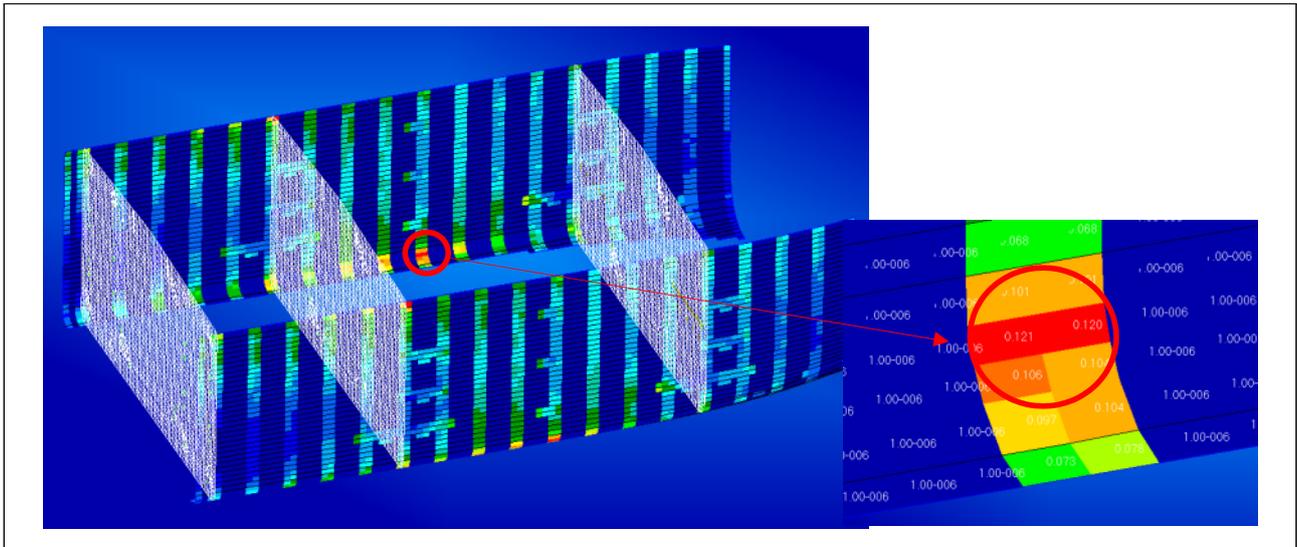
88) Det Norske Veritas, 2014. 'Fatigue assessment of ship structures', DNV Classification Notes, No. 30.7.

89) 응력범위와 피로수명간의 관계를 나타내는 도표

90) Lloyd's Register, 2009. 'Fatigue design assessment level 3 -Guidance on direct calculation'

91) 피로강도해석 결과값이 절대적인 피로수명(년)을 의미하는 것은 아님

92) 상갑판, 선저·선측외판, 횡격벽, 늑골 등 주로 커다란 판 형태의 부재로써 선박 전체의 구조 건전성 확보를 위한 1차 부재



〈그림 48〉 선측외판의 피로 취약부

4.4.4.9 한편, 사고발생 이후 한국선급에서도 국제선급연합(IACS)의 공통구조규칙(CSR) 및 한국선급 규칙 3편 부록 3-3에 따른 피로강도해석방법⁹³⁾으로 피로수명을 계산하였다. 그 결과 상대적으로 피로강도가 낮아진 부분이 식별되었고, 그 중 중부재 연결부는 대부분 50년 이상, 피로강도가 상대적으로 낮은 수선면 근처의 선측 보강재 연결부는 설계수명을 넘은 30년 이상으로 계산되었다. 즉 부재별로 피로강도가 상대적으로 약한 부분이 식별되기는 하였지만 피로수명에는 근접하지 않은 것으로 나타났다.

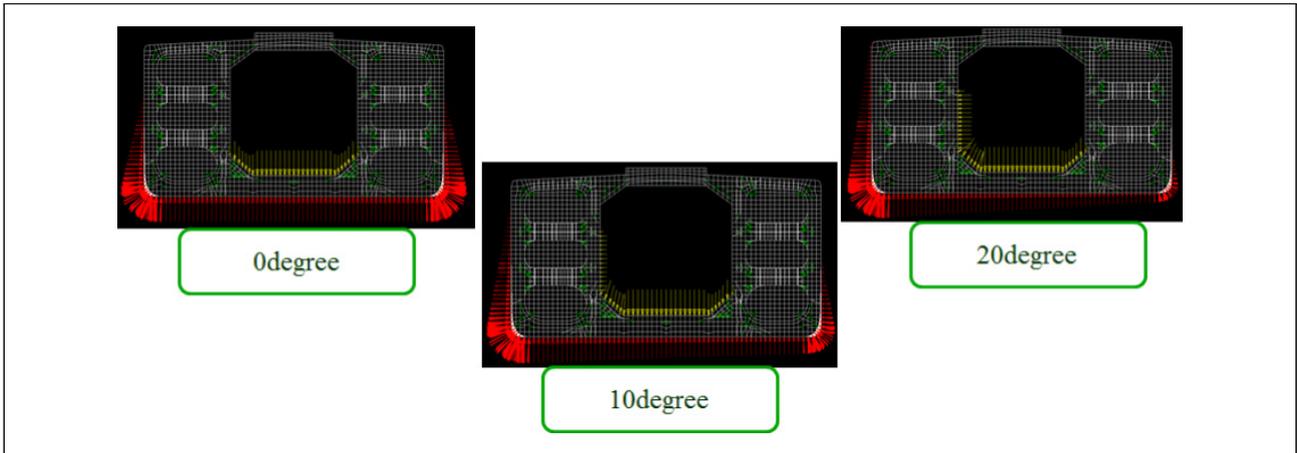
4.4.5 횡경사별 선체 구조강도해석

4.4.5.1 개조 당시 한국선급 규칙에 따라 화물창 구조해석이 수행되었으나, 당시 규칙은 비대칭 횡하중 검토를 의무화하고 있지 않기 때문에 비대칭 횡하중은 고려되지 않았다. 이에 비대칭 횡하중의 영향을 평가하기 위하여 피로강도해석에 사용되었던 화물창 모델을 4번 화물창까지 확장하여 1~4번 화물창과 연결된 구조부재의 횡경사별 선체 구조강도를 검토⁹⁴⁾하였다.

4.4.5.2 구조강도는 운항 시와 유사한 흘수에 대응되는 부력을 횡경사별로 선체에 적용되 횡경사에 대응되는 화물창의 하중을 수직방향과 횡방향 성분으로 작용시켜 0도부터 20도까지 5도 간격으로 평가하였다.

93) 하중을 계산하고 하중의 통계학적인 장기 분포로부터 수명을 계산하는 방식임

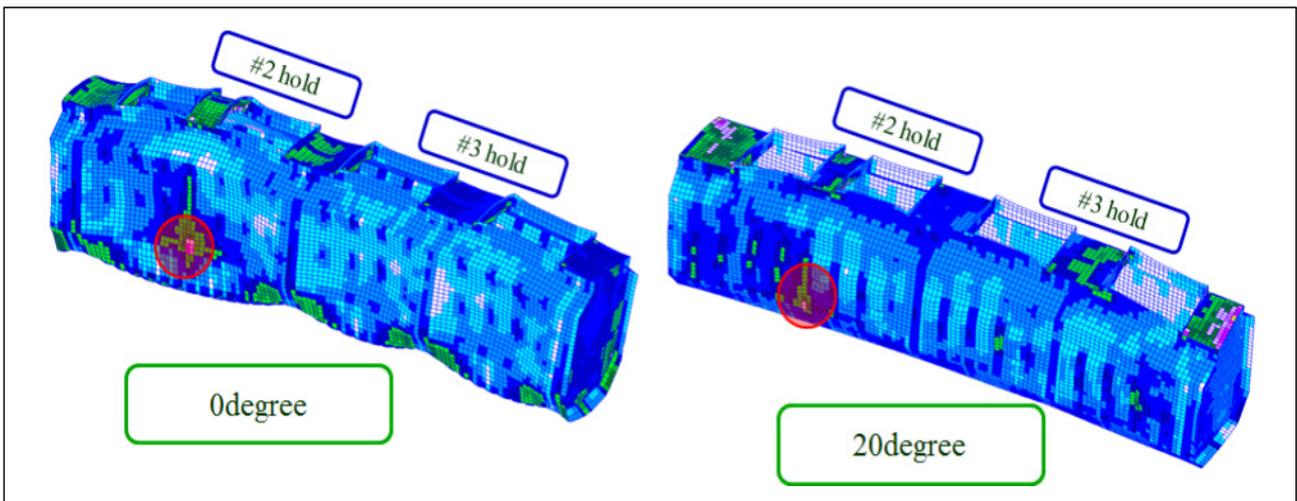
94) 한국해양대학교 산학협력단에서 실시함



<그림 49> 횡경사별 하중 적용

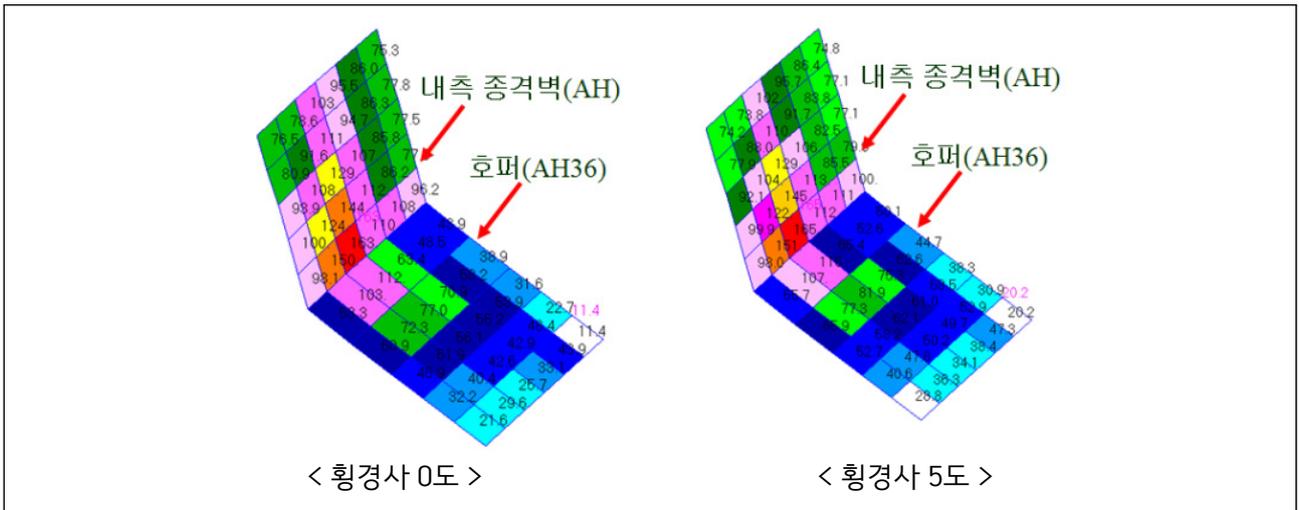
4.4.5.3 하중은 횡경사에 대한 정적인 부력과 고체화물 하중만 고려하였다. 이러한 조건은 실제 해상에서 발생할 수 있는 동적인 상태의 하중보다 작기 때문에 발생응력도 작게 계산된다. 따라서 횡경사별 구조강도의 평가기준을 항복응력⁹⁵⁾의 80%로 낮추고 이를 넘는 경우에 구조손상이 발생할 수 있는 것으로 판단하였다.

4.4.5.4 횡경사에 따른 2번과 3번 화물창에 대한 구조강도 해석 결과, 2번 화물창 늑골(FR. 79)의 내측 종격벽, 호퍼 등 일정한 위치에서 응력이 높게 나타남을 알 수 있었다. 다만, 발생응력은 해당부재 항복응력(315MPa)의 약 53% 수준으로 항복응력의 80%를 넘지는 않았다.



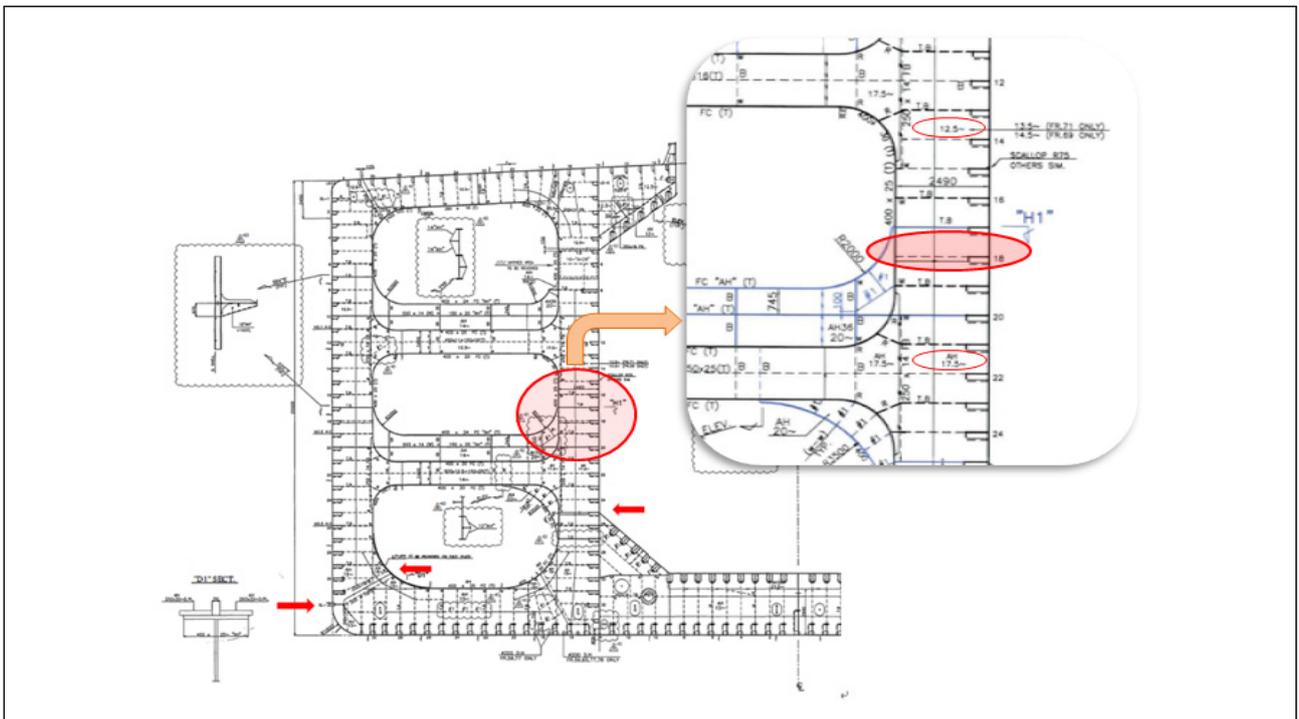
<그림 50> 2번, 3번 화물창에서 발생하는 응력

95) 하중을 가하면 내부응력이 하중에 비례하여 증가하다가 일정시점에서 더 이상 내부응력의 증가없이 변형률만 증가하는데 이때의 응력 값으로, 하중을 없애더라도 본래의 형태로 되돌아오지 않는 값



<그림 51> 79번 늑골부분의 응력결과

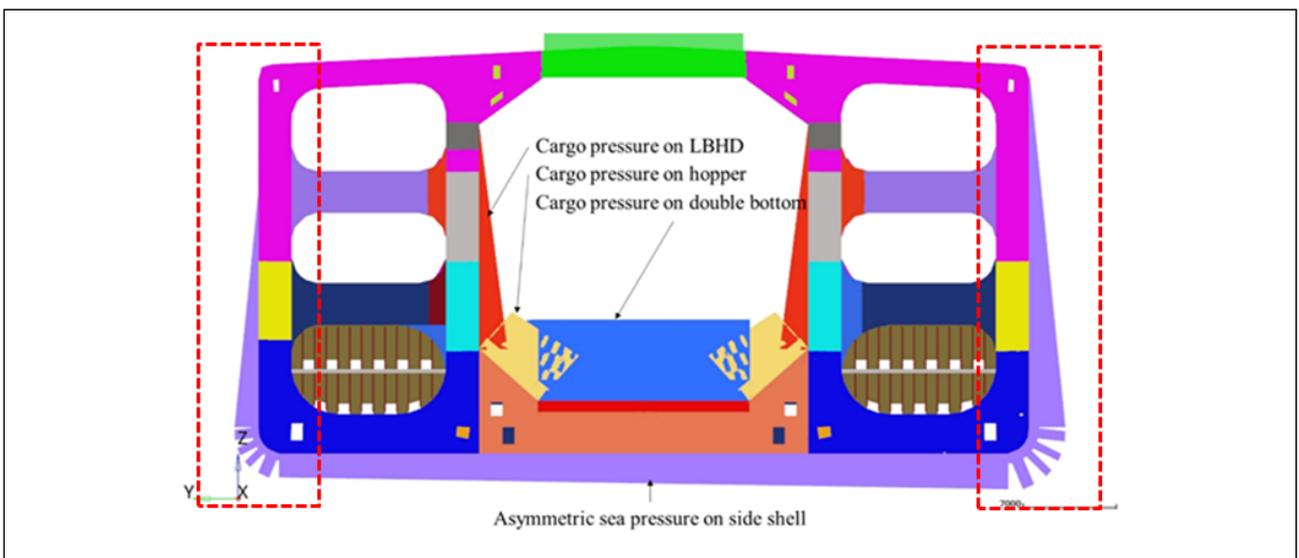
4.4.5.5 한편, 화물창과 인접한 구조부재에 대한 구조강도해석 결과에서는 2번 화물창에 있는 79번 늑골 부분의 횡부재, 3번 화물창에 있는 72번 늑골의 횡부재 등에서 0도에서 10도의 경사 시에 일부 허용응력을 초과하는 부분이 식별되었다. 10도 이상 경사 시에는 2번 및 3번 화물창의 많은 횡부재 상부 부분에 구조손상 가능성이 있는 것으로 나타났다. 이는 횡부재의 재료가 연강이고, 고응력이 발생하는 부분의 하단부에 용접선이 있기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 52> 횡단면 취약부 및 고응력부

4.4.6 최종강도해석

- 4.4.6.1 유조선 및 산적화물선 공통구조규칙(IACS, 2018)이 요구하는 외력 모멘트와 스텔라데이지의 최종강도를 비교하여 최종강도 부족으로 인한 붕괴 가능성이 있는지를 추가 검토⁹⁶⁾하였다.
- 4.4.6.2 공통구조규칙에서 제시하는 방법으로 산정한 외력 모멘트는 새김 상태에서 15,000MN-m 및 호킹 상태에서 15,900MN-m이며, 해당 선박의 최종강도는 이 외력 모멘트 이상이어야 한다.
- 4.4.6.3 최종강도해석을 위한 하중은 파랑 동압력에 의한 수직굽힘모멘트(Vertical Bending Moment, VBM)가 지배적일 경우와 사고 당시와 같은 너울성 횡파가 선측에 작용하여 비대칭 횡압력⁹⁷⁾(Asymmetric Pressure, ASP)이 생성되는 경우 등 2가지 상황을 고려하였다.
- 4.4.6.4 이 때 비대칭 횡압력은 해상의 상태에 따라 다양한 상황을 가정할 수 있다. 그러나 사고 당시 파도가 우현 측면에서 파고 약 3.7미터였다는 점을 감안하여 이번 분석에서는 우현에서 오는 횡파를 적용하였다. 즉, 우현 수두는 상갑판까지, 좌현 수두는 만재 흘수까지로 비대칭 수두를 가정하여 외판에 작용하는 압력을 산정하였다. <그림 53>에서 보는 바와 같이 우현 수두가 좌현의 수두보다 높은 비대칭 압력이 생성되었음을 알 수 있다.

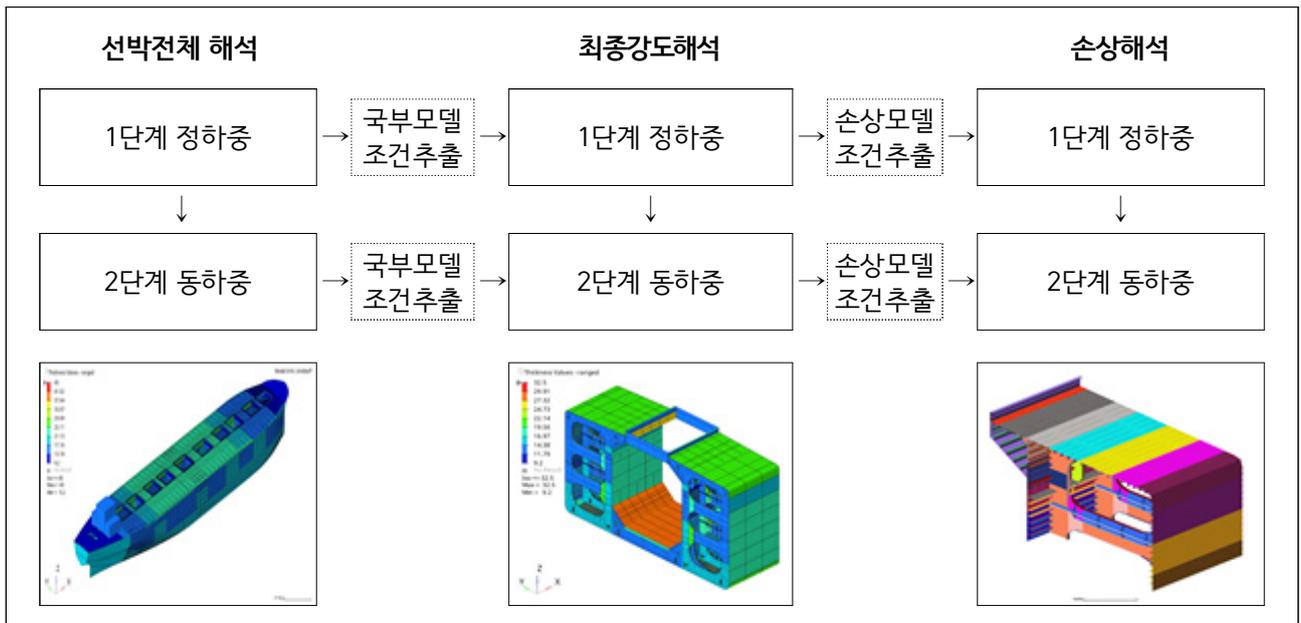


<그림 53> 비대칭 파랑 압력과 화물압력에 따른 하중분포(2단계 동하중 ASP)

96) 대한조선학회에서 실시함

97) 파도로 인해 좌현과 우현의 해수면 높이에 차이가 발생하여 선체외판에 작용하는 압력에 차이가 있는 상태

4.4.6.5 각각의 하중에 따라 해석은 2단계로 수행되었다. 첫 번째 단계(Step 1)에서는 정하중⁹⁸⁾으로 화물 압력과 선체 자중에 의한 중력 및 이와 평형을 이루는 부력을 구현하였고, 두 번째 단계(Step 2)는 동하중⁹⁹⁾으로 파랑 수직굽힘모멘트(WVBM¹⁰⁰⁾) 또는 비대칭 횡압력(ASP¹⁰¹⁾)이 작용하도록 하였다. 이는 뒤에서 기술하는 손상해석에도 동일하게 적용하였다.



<그림 54> 선박전체 해석, 최종강도해석, 손상해석 절차

<표 28> 최종강도해석 모델 및 하중 단계

화물창	해석 모델, 하중	하중 단계(Step)		비고
		1단계(Step 1)	→ 2단계(Step 2)	
2번	선박전체 해석-WVBM	자중/부력/화물 압력	→ 파랑 수직굽힘모멘트(WVBM)	
	최종강도해석-WVBM			
	선박전체 해석-ASP	자중/부력/화물 압력	→ 비대칭 파랑 하중(ASP)	
	최종강도해석-ASP			
3번	선박전체 해석-WVBM	자중/부력/화물 압력	→ 파랑 수직굽힘모멘트(WVBM)	
	최종강도해석-WVBM			
	선박전체 해석-ASP	자중/부력/화물 압력	→ 비대칭 파랑 하중(ASP)	
	최종강도해석-ASP			

98) 화물하중, 선박자체 하중 및 부력 등과 같이 거의 변화하지 않는 하중

99) 파랑으로 인한 하중과 같이 시간에 따라 변하는 하중

100) Wave Vertical Bending Moment(파랑 수직굽힘모멘트)

101) Asymmetric Pressure(비대칭 횡압력)

4.4.6.6 최종강도해석을 위해 먼저 종보강재 간격 크기의 요소로 선박 전체에 대한 해석 모델을 생성한 후 정하중과 동하중에서 발생하는 새깅 또는 호깅 변형 값을 도출하였다. 그리고 2번과 3번 화물창에 대해서는 100밀리미터 × 100밀리미터 크기의 상세 요소를 적용한 국부모델을 생성¹⁰²⁾하고 선박전체 해석에서 얻은 변형을 국부모델의 경계면에 반영(Mapping)하여 국부모델에 대한 최종강도를 평가하였다.

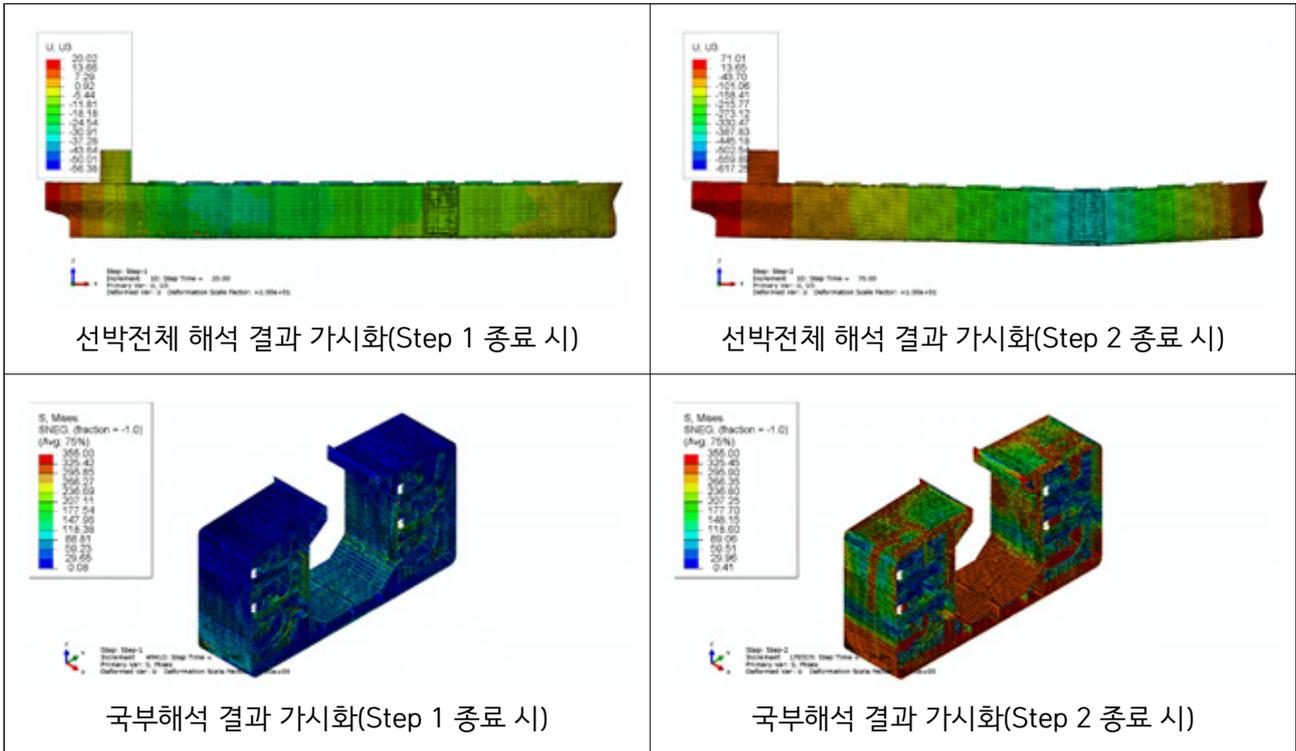
4.4.6.7 2번과 3번 화물창의 파랑 수직굽힘모멘트 및 비대칭 횡압력 작용에 대한 최종강도해석을 수행한 결과, 파랑 수직굽힘모멘트가 작용하는 경우에는 정하중과 동하중 모두 새깅 변형이 발생하였고, 비대칭 횡압력이 작용할 때에는 정하중에서 새깅이 발생하였으나, 동하중에서는 호깅으로 반전되었다.

<표 29> 최종강도해석 결과

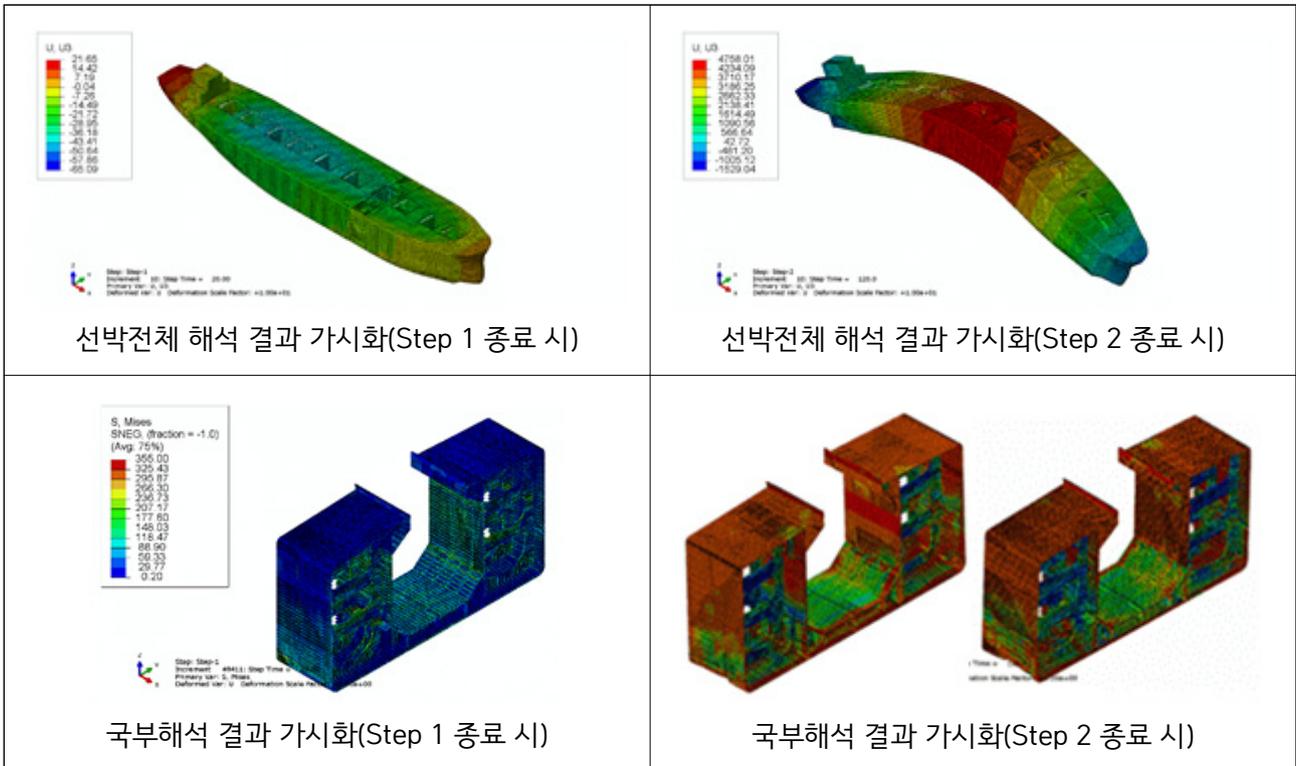
구분	화물창	하중 단계	최대 모멘트(MN-m)	비고
파랑 수직굽힘 모멘트 (WVBM)	2번	정하중(1단계)	-55	새깅
		동하중(2단계)	-24,700	새깅
	3번	정하중(1단계)	-760	새깅
		동하중(2단계)	-23,300	새깅
비대칭 횡압력 (ASP)	2번	정하중(1단계)	-529	새깅
		동하중(2단계)	25,500	호깅
	3번	정하중(1단계)	-1,150	새깅
		동하중(2단계)	24,500	호깅

4.4.6.8 최종강도에 있어 정하중 단계에서는 모멘트가 크게 발달하지 않았다. 동하중(WVBM 및 ASP) 단계에서도 공통구조규칙에 근거한 외력 모멘트(새깅 15,000MN-m, 호깅 15,900 MN-m)에 비하여 최종강도가 더 큰 것으로 확인되었다. 즉, 스텔라데이지는 최종강도 측면에서는 안전한 것으로 판단된다.

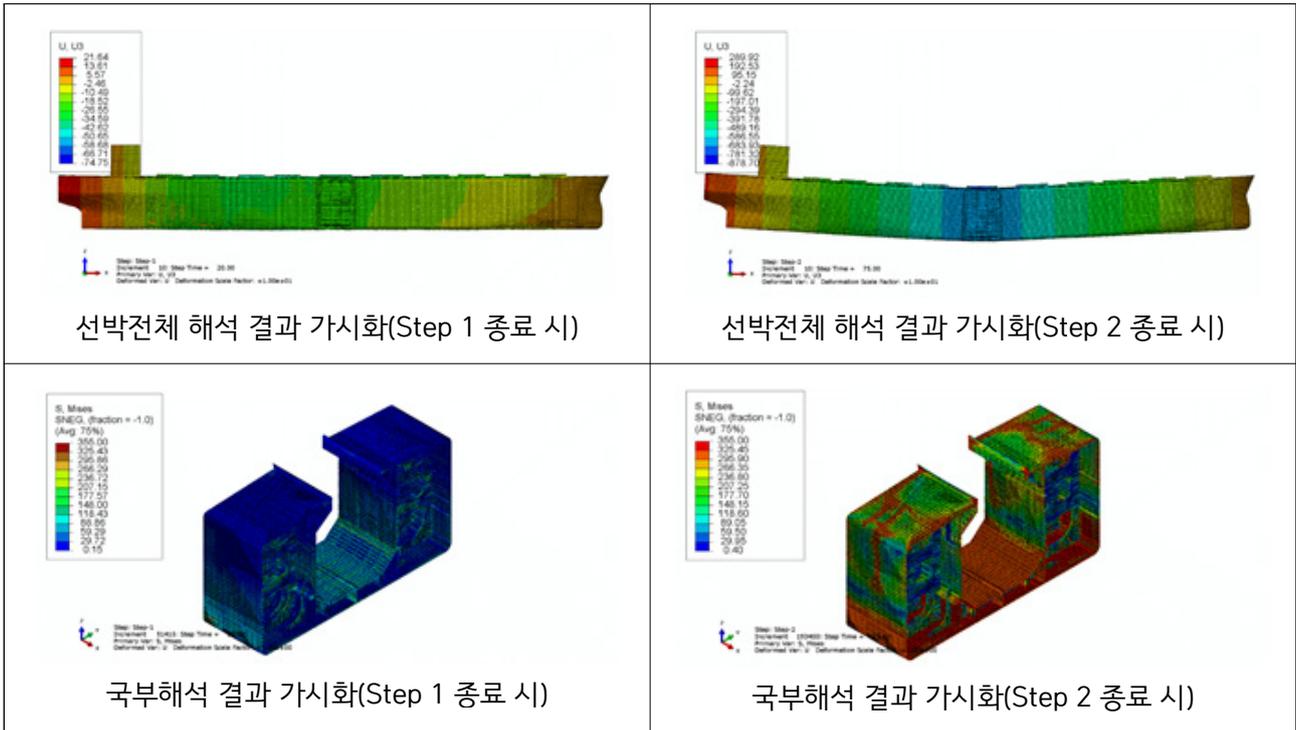
102) 최종강도의 해석시간 단축과 하중의 속도를 용이하게 제어하기 위하여 선박전체 구조강도해석 모델을 통하여 국부모델을 분리하였고, 국부모델로는 초기 침수가 발생된 것으로 추정되는 2번 화물창, 선체 중앙에 위치하고 2번 화물창과 인접한 3번 화물창을 선정함



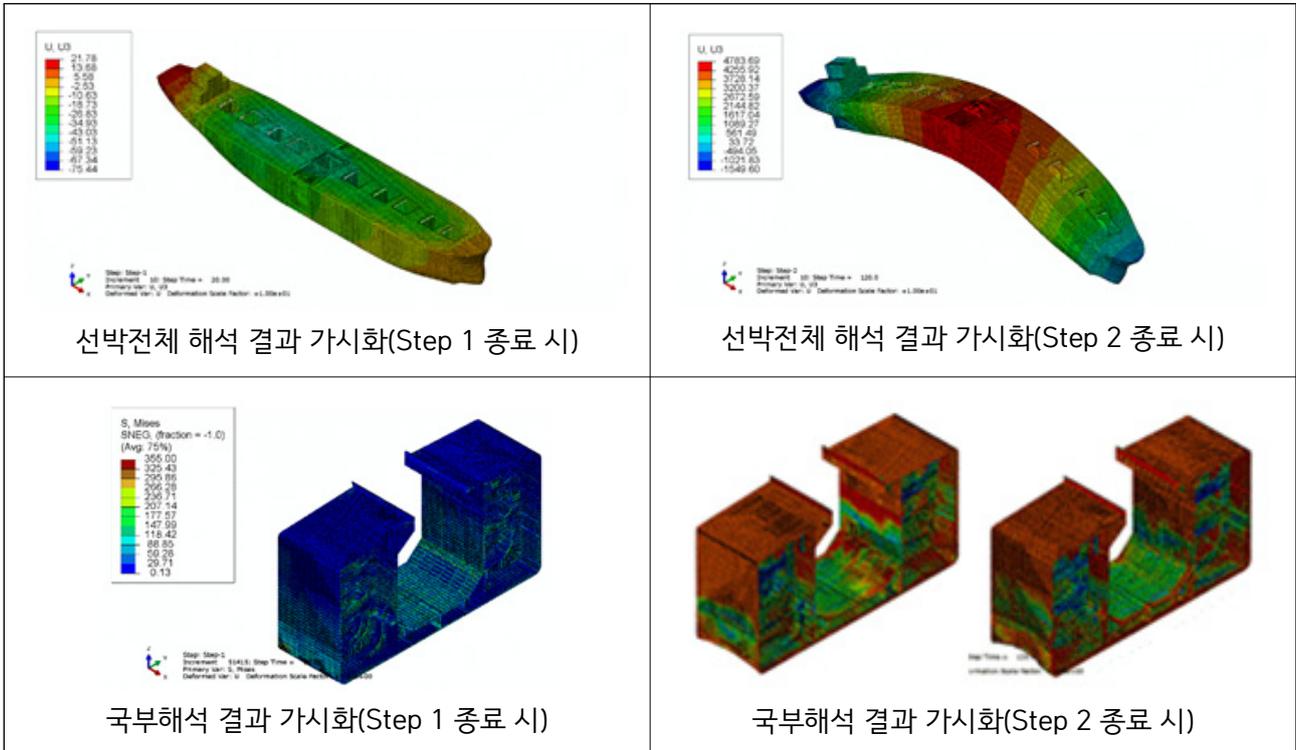
<그림 55> 2번 화물창 파랑 수직굽힘모멘트(WBM) 작용



<그림 56> 2번 화물창 비대칭 횡압력(ASP) 작용



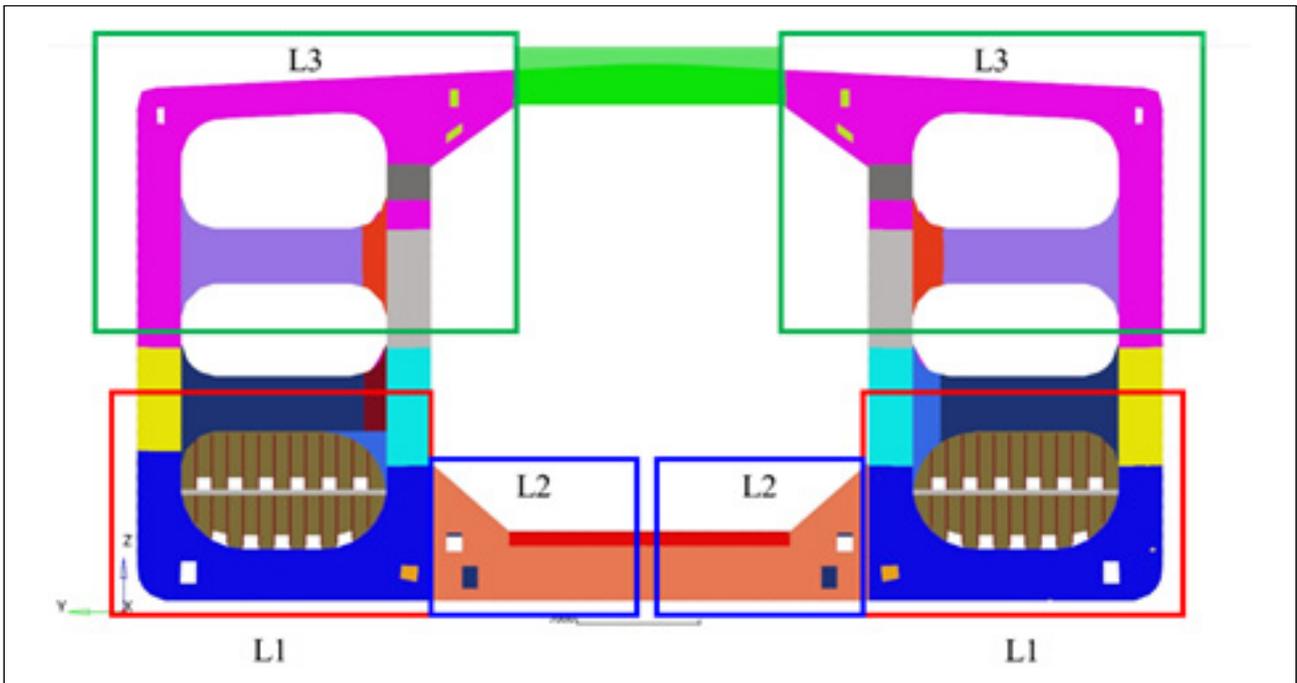
<그림 57> 3번 화물창 파랑 수직굽힘모멘트(WBM) 작용



<그림 58> 3번 화물창 비대칭 횡압력(ASP) 작용

4.4.7 손상해석

- 4.4.7.1 손상해석은 구조물에 과도한 응력이나 변형률이 발생하여 구조물에 찢김 또는 파단이 발생하는지를 파악하기 위한 해석¹⁰³⁾으로 수치적으로 누적 손상이 1.0에 도달하면 파단이 발생하는 것으로 간주하였다.
- 4.4.7.2 본 해석은 대한조선학회에 의뢰하여 수행하였다. 해석방법에 있어 손상을 판단하는 기준은 다양하게 제안되고 있으나, 선박과 같은 판 형태 구조물에 적용하기에 가장 적합한 것으로 알려진 HC-LC 파단 모델¹⁰⁴⁾을 적용하였다.
- 4.4.7.3 손상해석 모델은 기본적으로 최종강도 모델(국부모델)과 동일하다. 손상해석은 해석 효율성을 높이기 위해 세 구획(L1: 선저부 평형수 구획, L2: 선저부 화물창 구획, L3: 갑판부 평형수 구획)을 위주로 진행하였다.



<그림 59> 손상해석 모델 영역

103) 본 보고서에서 손상은 하중에 의하여 소성변형(Plastic Deformation)되다가 종국에는 찢김 또는 파단되는 현상을 의미함

104) HC 파단 모델(Hosford-Coulomb Fracture Model)은 2015년 처음 개발되어 주로 고체상태 구조물의 3차원 응력상태에 적용 가능한 모델이고, LN 파단 모델(Localized Necking Fracture Model)은 판 상태의 구조물이 인장응력을 경험할 때 적용 가능한 모델이며, 이 두 모델의 장점을 결합한 것이 HC-LC 파단 모델임. 이는 최근 수년 사이에 관련 학계 학술지 등에 소개된 기술이며, 한국선급이나 국제선급연합 등의 선박검사 관련 규칙에는 아직 도입되지 않음

4.4.7.4 손상해석은 2개의 화물창(2번, 3번)을 대상으로 3개의 부분 모델(L1, L2, L3)로 구분하고, 각 모델에 두 가지 하중(WVBM, ASP)을 적용하는 등 총 12가지 경우로 나누어 수행하였다.

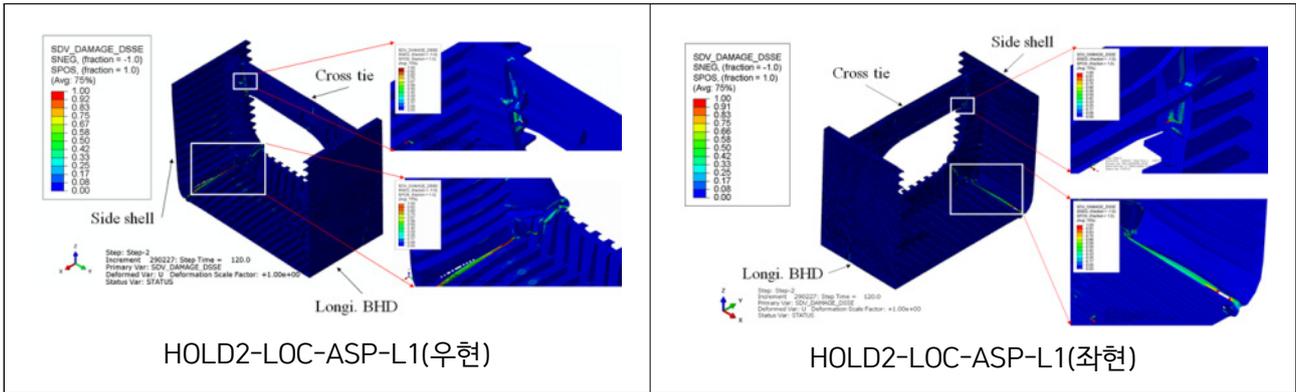
<표 30> 손상해석 조건

최종강도해석 조건	손상해석 조건(12개)
2번 화물창 파랑 수직굽힘모멘트 (HOLD2-LOC-WVBM)	HOLD2-LOC-WVBM-L1
	HOLD2-LOC-WVBM-L2
	HOLD2-LOC-WVBM-L3
2번 화물창 비대칭 횡압력 (HOLD2-LOC-ASP)	HOLD2-LOC-ASP-L1
	HOLD2-LOC-ASP-L2
	HOLD2-LOC-ASP-L3
3번 화물창 파랑 수직굽힘모멘트 (HOLD3-LOC-WVBM)	HOLD3-LOC-WVBM-L1
	HOLD3-LOC-WVBM-L2
	HOLD3-LOC-WVBM-L3
3번 화물창 비대칭 횡압력 (HOLD3-LOC-ASP)	HOLD3-LOC-ASP-L1
	HOLD3-LOC-ASP-L2
	HOLD3-LOC-ASP-L3

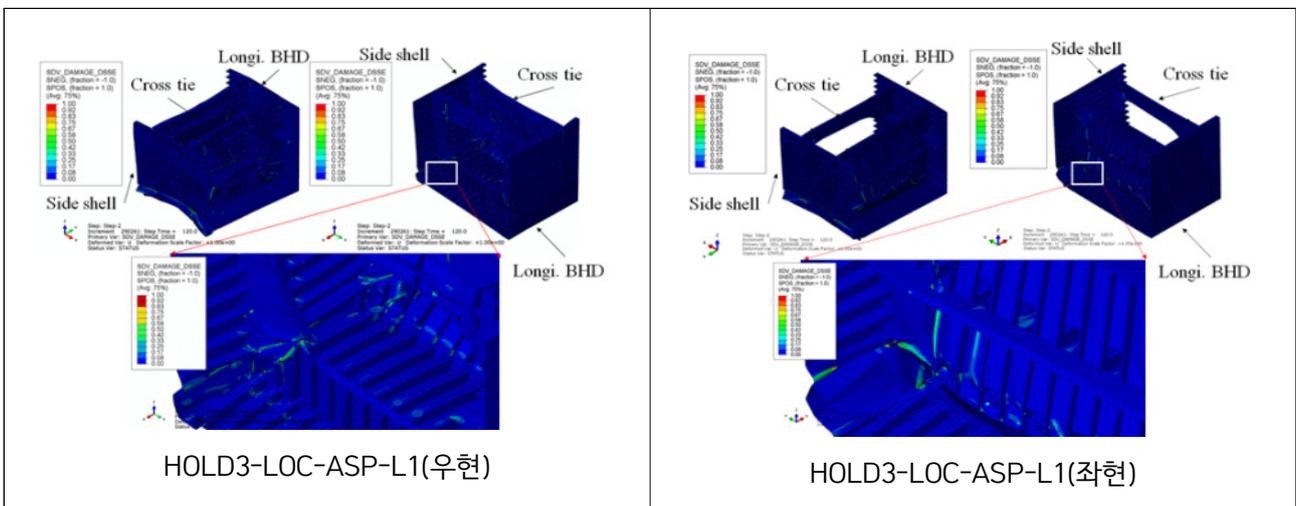
4.4.7.5 손상해석 결과, 파랑 수직굽힘모멘트(WVBM)가 선박에 작용하는 경우 국부적으로 누적 손상이 1.0에 도달하는 부분이 있었으나 구조손상은 비교적 제한적이거나 전파 가능성이 적은 것으로 나타났다.

4.4.7.6 반면, 비대칭 횡압력(ASP)이 작용하면 부분 모델 L1에서 외판 하부 빌지 및 내부 크로스 타이와 횡능골 연결부 등에서 좌굴과 구조손상 즉, 파단이 광범위하게 발생할 가능성이 있는 것으로 분석되었다. <그림 60>은 2번 화물창, <그림 61>은 3번 화물창의 부분 모델 L1의 손상도를 가시화한 그림이다.

4.4.7.7 우현에서 비대칭 횡압력이 작용하는 경우에 좌현과 우현 모두 부분 모델 L1에서 유사한 손상이 진행되는 것으로 나타났고, 좌현에서 비대칭 횡압력이 작용하더라도 결과는 동일하게 나타난다.



<그림 60> 2번 화물창 L1 부분 손상 가시화



<그림 61> 3번 화물창 L1 부분 손상 가시화

4.4.7.8 손상해석 결과를 볼 때 선박이 횡파에 의한 비대칭 압력¹⁰⁵⁾을 받으며 오랜 기간 운항하는 경우 2번 좌·우현 평형수탱크와 3번 좌·우현 평형수탱크 구획의 외판 하부 밑지 및 내부의 크로스타이와 횡늑골 연결부 등에서 손상(파단)이 발달할 수 있고, 이러한 손상의 누적은 횡강도를 약화시켜 선박이 구조적으로 취약해 질 수 있는 것으로 판단된다.

4.4.8 소결

4.4.8.1 침몰 원인을 과학적으로 밝히기 위해 스텔라데이지의 최초 침수가 보고된 2번 화물창 부분을 중심으로 여러 가능성을 열어두고, 다양한 조건을 부여하여 조선공학적 해석을 시도하였다.

105) 손상해석 수행 시에는 비대칭 횡압력이 선박의 전체 길이에 걸쳐서 균일하게 작용했다고 가정하였기 때문에 파정 길이가 짧거나 입사각이 달라 선체 길이의 일부에만 비대칭 횡압력이 작용한 경우에는 해석 시 적용한 비대칭 횡압력 크기와 차이가 있을 수 있음

- 4.4.8.2 손상가능성 등 구조 취약부를 알아보기 위해 구조강도, 좌굴강도 등에 대해 전문가 해석을 수행하였다. 이 결과 고비중 화물 적재시 2번 화물창의 선저만곡부 트랜스버스 웹 등에서 높은 응력이 발생하였으나 이는 국부적으로 나타났다. 좌굴에 취약한 내부재도 다수 관찰되었으나 개조 당시에 해당 부위에 대한 강도를 향상시켰으므로 좌굴로 인해 선체손상이 발생하였다고 보기는 어려운 것으로 분석되었다.
- 4.4.8.3 개조 전 운항을 포함한 이 선박의 전체 운항기간 동안 누적된 피로와 이로 인한 안전성 취약여부 등을 확인하기 위해 피로강도해석을 수행하였다. 피로해석에서는 2번 평형수탱크 선저만곡부에 인접한 선저외판 및 선측외판이 피로강도 측면에서 상대적으로 취약한 것으로 나타났다.
- 4.4.8.4 선체가 횡경사되는 경우, 구조강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 선체를 0도~20도 까지 횡경사될 경우 발생하는 응력을 검토하였다. 그 결과 10도 이상 횡경사가 발생하면 2, 3번 화물창의 많은 횡부재에서 구조손상 가능성이 있는 것으로 분석되었다.
- 4.4.8.5 파랑 등으로 인해 선박 좌우에 압력이 서로 다르게 작용하는 비대칭 횡압력 상태에서의 최종강도는 국제선급연합 공통구조규칙(IACS CSR)에서 요구하는 외력 기준을 충족하는 것으로 평가되었다.
- 4.4.8.6 이 선박에 비대칭 횡압력이 작용하는 경우 손상(파단) 발생 가능성이 있는지를 확인하기 위해 손상해석도 수행하였다. 비대칭 횡압력이 장기간 작용할 경우 2번과 3번 평형수탱크의 외판 하부 빌지, 내부의 크로스타이와 횡늑골 연결부 등에서 손상, 즉 파단이 발달될 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 4.4.8.7 따라서 사후 구조해석 결과를 종합해보면, 피로 누적 등으로 선체가 장기간에 걸쳐 조금씩 손상을 입은 상태에서 측면에서 오는 파도에 의해 비대칭 횡압력이 작용하게 되면서 상대적으로 취약했던 2번 평형수탱크 선저만곡부의 선측외판과 선저외판에서 최초 손상이 발생하였을 개연성이 클 것으로 추정된다.
- 4.4.8.8 최초 손상으로 인한 2번 좌현 평형수탱크 침수와 측면에서 오는 파도에 의한 비대칭 횡압력은 횡경사를 빠르게 증가시켰다. 이로 인해 좌현에 하중이 크게 증가하여 좌현 측 평형수탱크의 횡부재와 횡격벽이 붕괴되는 등 동시 다발적이고 광범위한 구조손상이 발생하였고, 3번과 4번 평형수탱크까지 해수유입이 확산되었을 것으로 추정된다.

section

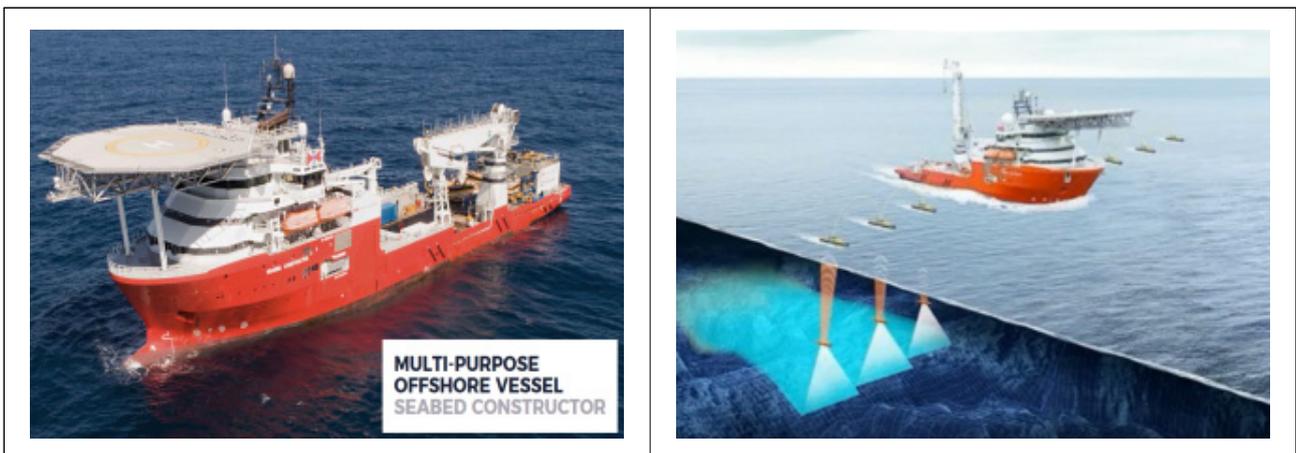
5

심해수색 결과 분석

5. 심해수색 결과 분석

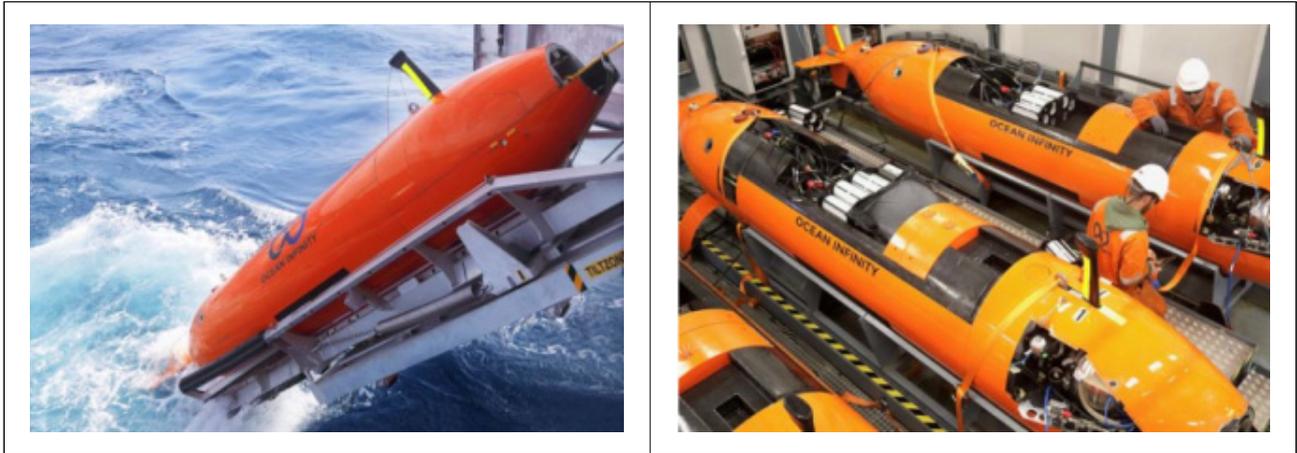
5.1 심해수색 개요

- 5.1.1 대한민국은 침몰된 스텔라데이지의 선체위치 확인, 선체 촬영 및 3차원 모자이크 영상 구현, 미발견 구멍뚫목 및 항해자료기록장치 수색·확인, 가능한 경우 항해자료기록장치 회수 등을 목적으로 2018년 12월 28일 오션인피니티사¹⁰⁶⁾와 스텔라데이지 심해수색 용역계약을 체결하였다.
- 5.1.2 오션인피니티사는 스텔라데이지 심해수색을 위하여 다목적 해양작업 선박 1척 (Multi-Purpose Offshore Vessel, Seabed Constructor), 측면주사음탐기(Side Scan Sonar) 와 멀티빔음향측심기(Multi-Beam Echo Sounder) 등의 센서가 부착된 자율무인잠수정 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 4대 및 고화질(High Definition) 카메라가 부착된 원격무인잠수정(Remotely Operated Vehicle, ROV) 2대 등을 투입하기로 하였다.

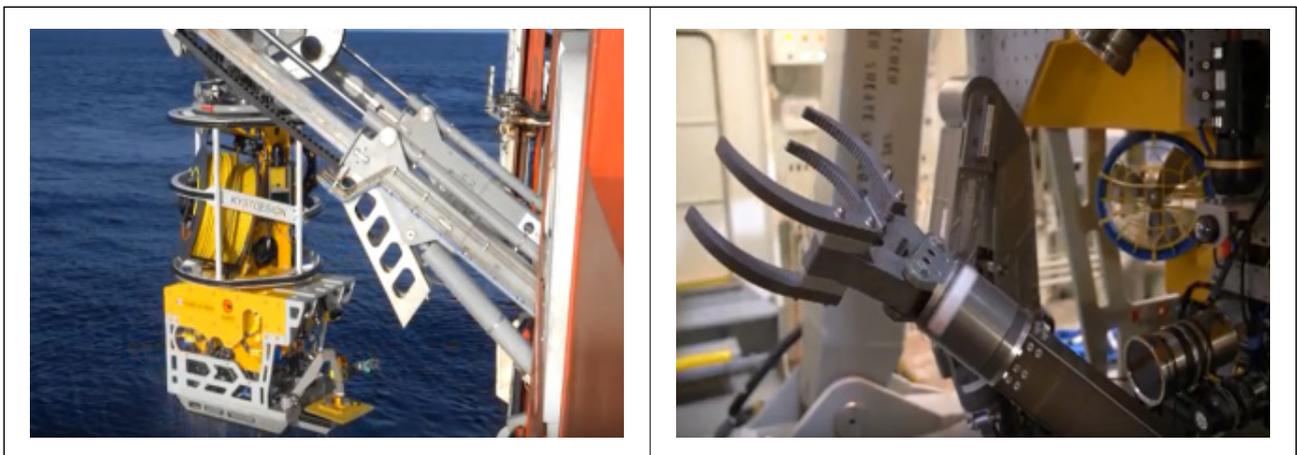


<그림 62> Seabed Constructor

106) 수중로봇을 이용한 심해수색을 통해 정보를 수집하는 회사로서 2017년 미국에서 설립되었고 주요 실적으로 2018년 말레이시아 실종 항공기(MH370) 수색 참여, 아르헨티나 해군 실종 잠수함(ARA San Juan) 발견 등이 있음



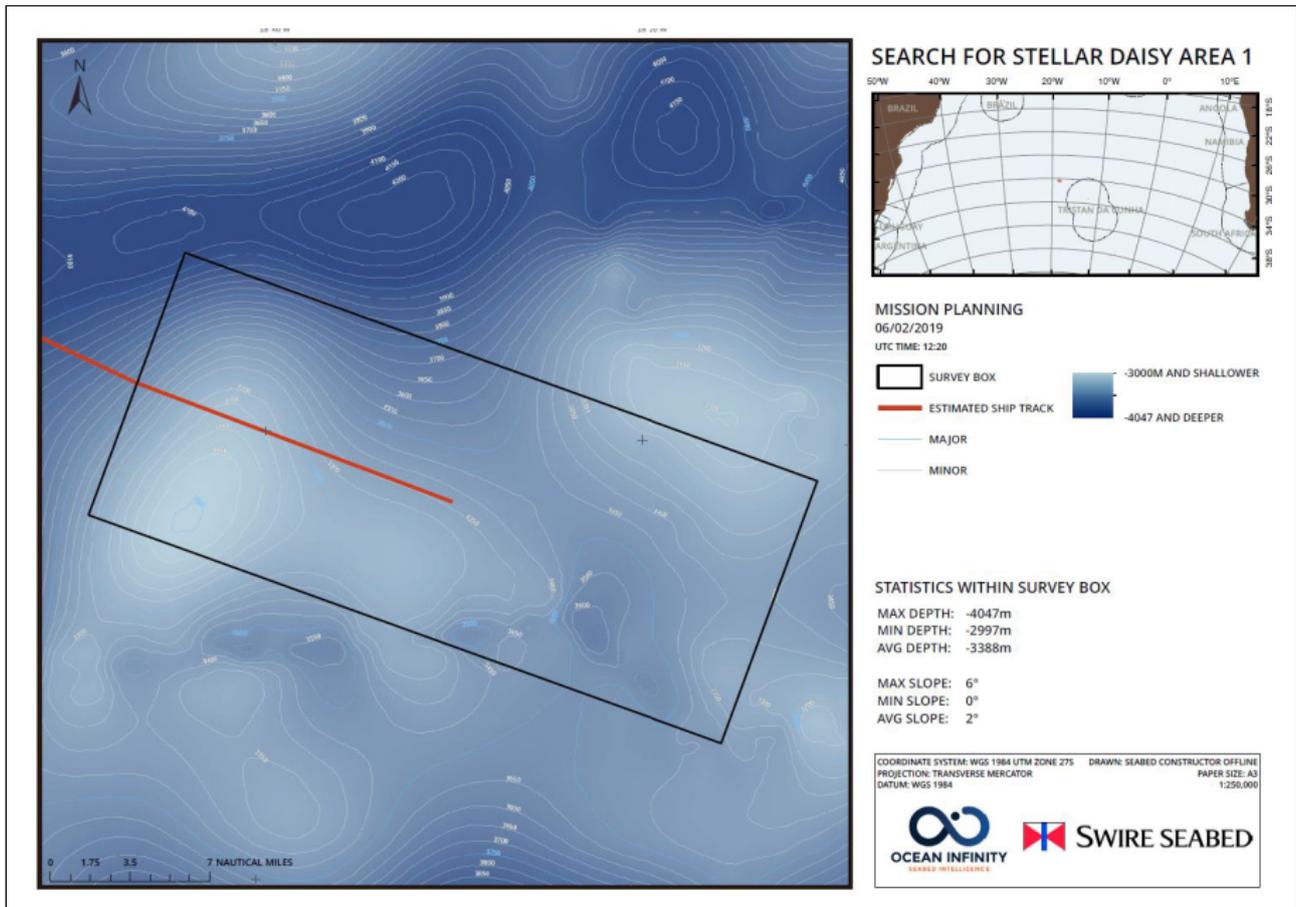
<그림 63> AUV(Autonomous Underwater Vehicle)



<그림 64> ROV(Remotely Operated Vehicle)

5.1.3 오션인피니티사는 심해수색에 앞서 스텔라데이지 사고 시 발신된 위성조난신호(INMARSAT-C DSC), 위성비상위치지시용 무선표지설비(EPIRB) 등의 신호에 근거하여 추정된 사고 해역을 중심으로 55킬로미터 × 22.5킬로미터의 수색구역을 설정하였다. 해당 수역의 중심은 약 3,400미터이다.

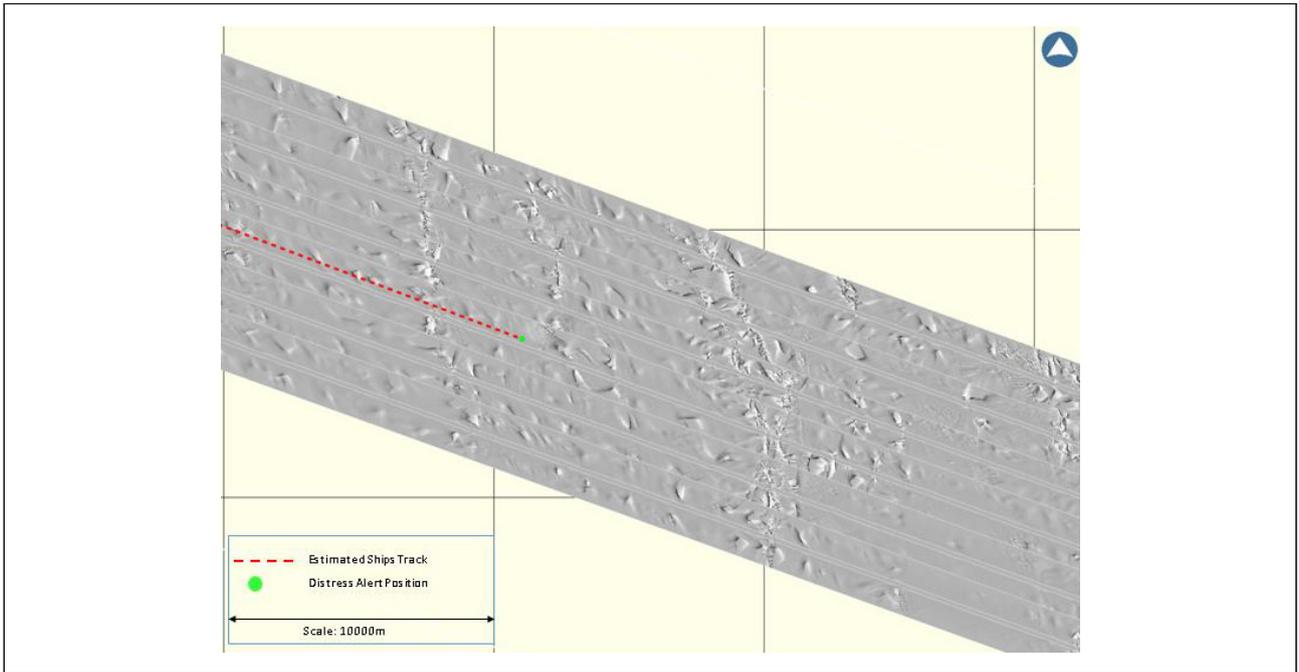
5.1.4 다목적 해양작업 선박인 씨베드 컨스트럭터(Seabed Constructor)는 심해수색을 위해 2019년 2월 8일 남아프리카공화국 케이프타운을 출항하여 같은 해 2월 14일에 스텔라데이지 수색구역에 도착하였다.



<그림 65> 수색구역

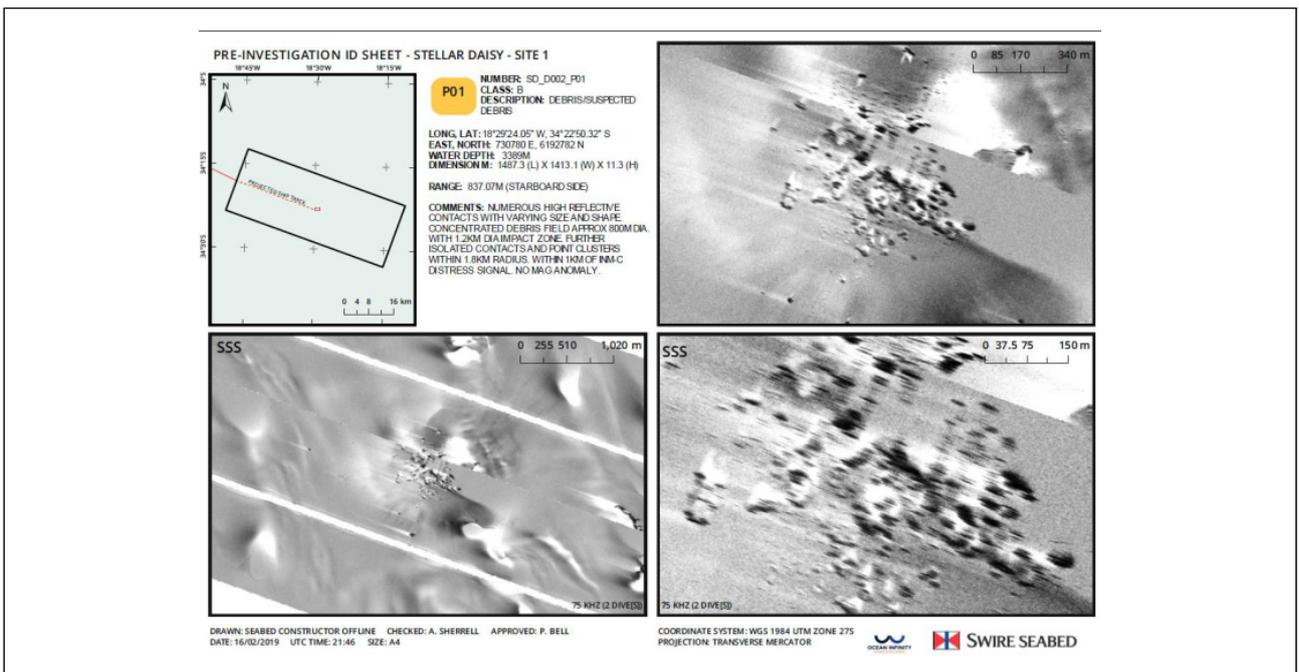
5.2 저주파 초기수색(Low Frequency Initial Survey)

- 5.2.1 전체 수색구역에 4대의 자율무인잠수정(AUV)을 배치하고 측면주사음탐기와 멀티빔음향측심기를 활용하여 2월 14일부터 2월 16일까지 저주파 초기수색을 실시하였다.
- 5.2.2 저주파 초기수색 결과, 수색해역의 해저는 높은 반사율을 가진 암석 일부가 노출(Rock Outcrops)되어 남북으로 자리하고 있었고, 나머지 해저는 반사율이 낮은 심해퇴적물로 나타났다.



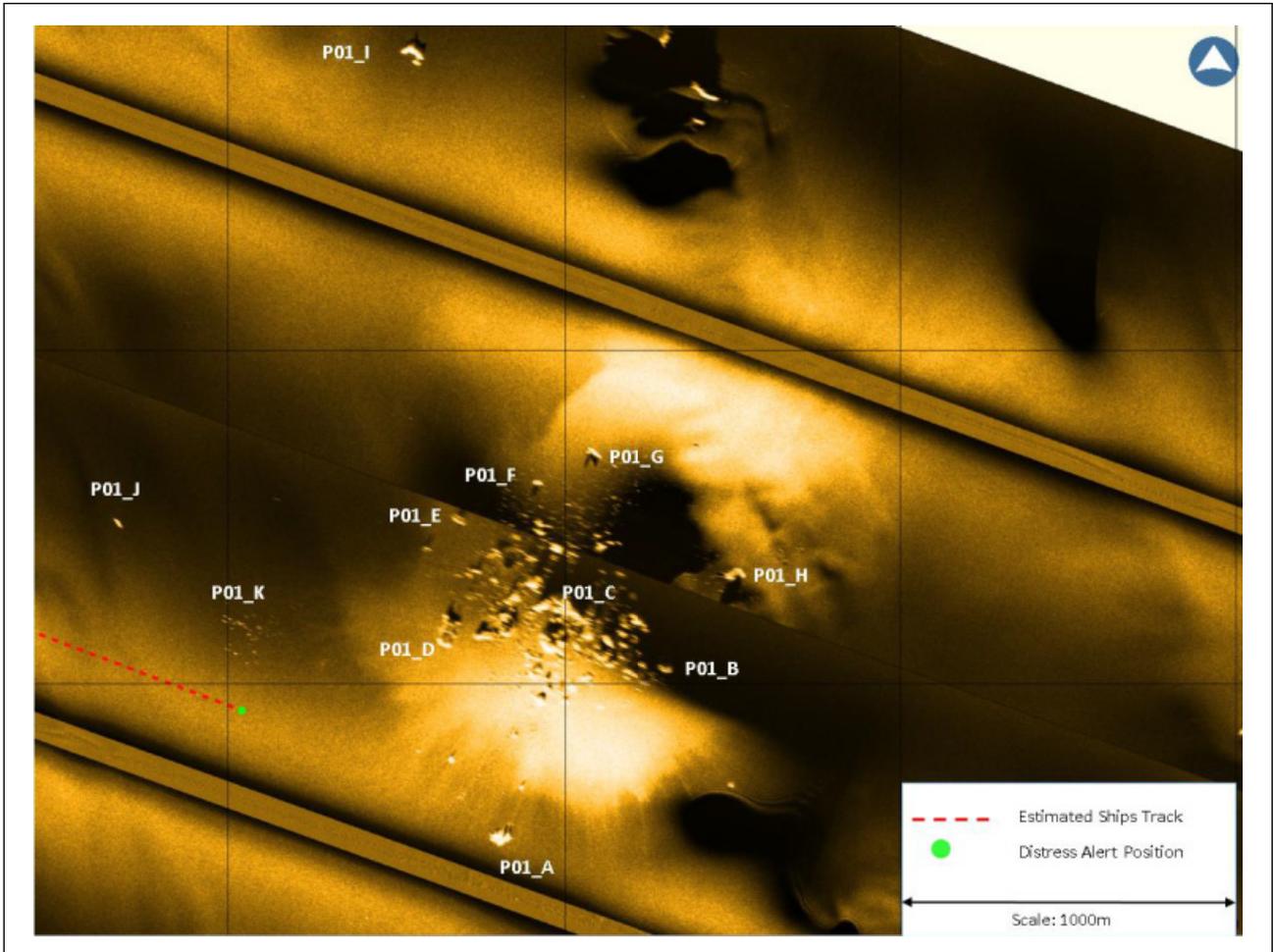
<그림 66> 수색구역의 저주파 측면주사음탐기 자료 모자이크

5.2.3 스텔라데이지의 선체 크기와 유사한 물체는 확인되지 않았으나 위성조난신호가 발신된 위치에서 약 1킬로미터 떨어진 암석 능선(Rock Ridge) 인근 길이 약 1킬로미터, 폭 0.8킬로미터 범위의 해저에서 선박잔해로 추정되는 다양한 크기와 모양의 고반사점(High Reflective Point Contacts)이 발견되었다.



<그림 67> 잔해 추정지역의 저주파 측면주사음탐기 자료 모자이크

5.2.4 오션인피니티사는 이 지점들을 기본관심지점(Point of Interest, POI)으로 지정하고, 세부적으로 P01_A~K로 분류한 뒤 원격무인잠수정(ROV)을 통한 세부 조사계획을 수립하였다.



<그림 68> 기본관심지점 세부 분류

5.3 초기 육안조사(Initial Visual Inspection Survey)

5.3.1 저주파 수색을 통해 확인된 기본관심지점에 스텔라데이지 잔해가 있는지를 확인하기 위하여 2월 16일 원격무인잠수정(ROV)을 투입하여 초기 육안조사에 착수하였다.

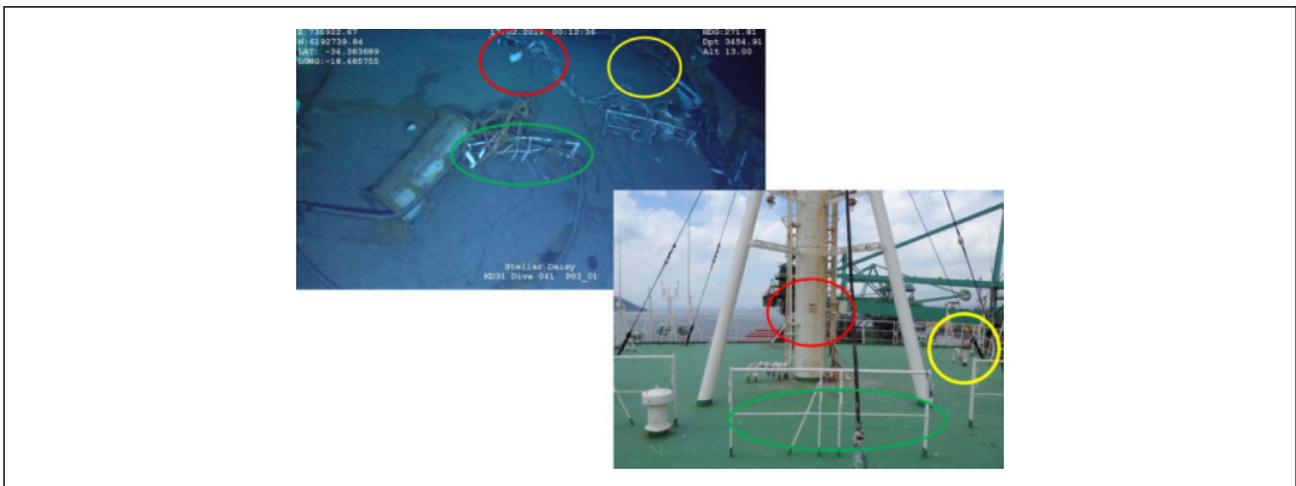
5.3.2 초기 육안조사에서 적색 페인트가 칠해진 상당히 큰 금속 파편, 화물창 덮개(Hatch Cover) 파편 등이 관찰되었으며 BC 03 지점에서 IMO 번호가 표시된 선박 거주구역 구조물이 발견되어 이 지점이 스텔라데이지의 잔해가 분포된 지역이라는 것이 확인되었다.



<그림 69> 스텔라데이지 잔해

5.3.3 이후 스텔라데이지의 항해자료기록장치의 보호용기(VDR Protective Capsule)를 찾기 위한 육안조사가 계속되었다.

5.3.4 항해자료기록장치 보호용기는 조타실 상부 컴퍼스테크(Compass Deck)에 설치되어 있었으나, 육안조사에서 나타난 조타실 위 갑판은 마스트, 핸드레일, 안테나 등이 떨어져 나갔거나 변형된 상태였다.



<그림 70> 조타실 위 갑판 사고 전후 비교

5.3.5 선박의 거주구역 구조물 주변에 대한 육안조사를 실시하던 중 선교 우현 측에 사다리 로 보이는 물체 아래에서 항해자료기록장치 보호용기가 발견되었다.



항해자료기록장치 발견위치

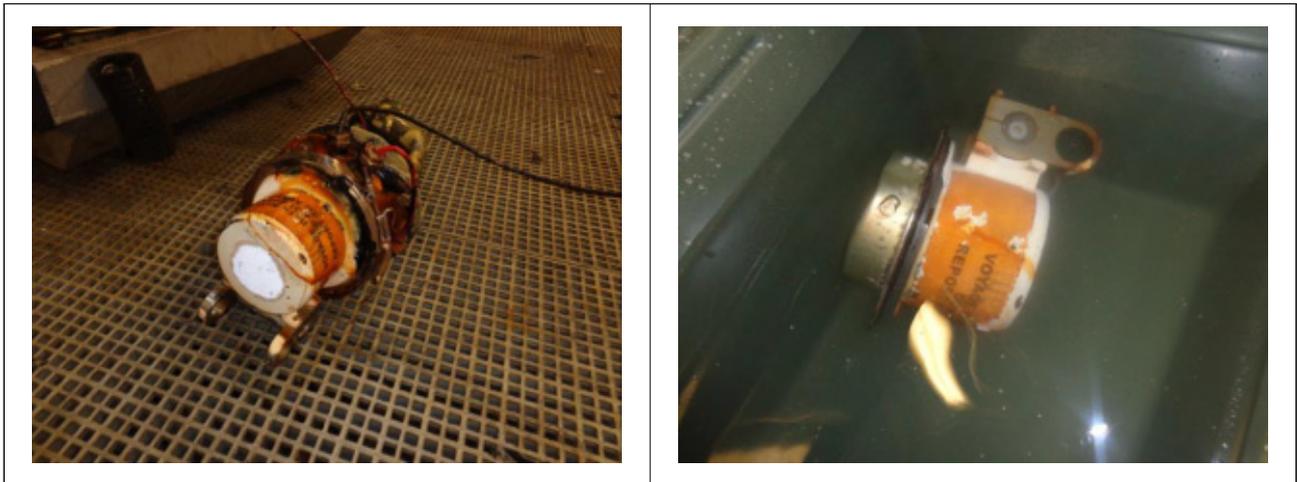


항해자료기록장치 회수

<그림 71> 항해자료기록장치 발견 및 회수

5.3.6 발견된 항해자료기록장치 보호용기는 2월 17일 원격무인잠수정(ROV)을 이용하여 씨베드 컨스트럭터 갑판으로 회수되었고, 보호용기 제조사¹⁰⁷⁾의 지침에 따라 탈이온수를 넣은 상자에 넣어 선내 보관하였다.

107) L3Harris Technologies, Inc.



<그림 72> 항해자료기록장치 보관

5.3.7 한편, 자율무인잠수정의 크기에 비해 선교 출입문 또는 창문이 협소하여 선교 내로 진입이 어려워 선교 밖에서 창문을 통해 선교 내부를 확인한 결과, 선교 내부는 전반적으로 광범위하게 손상되었고 벽과 천장의 내부 판넬이 대부분 부서져 있었으며 격벽 내부의 전선도 노출된 상태였다.



<그림 73> 상부구조물 상세

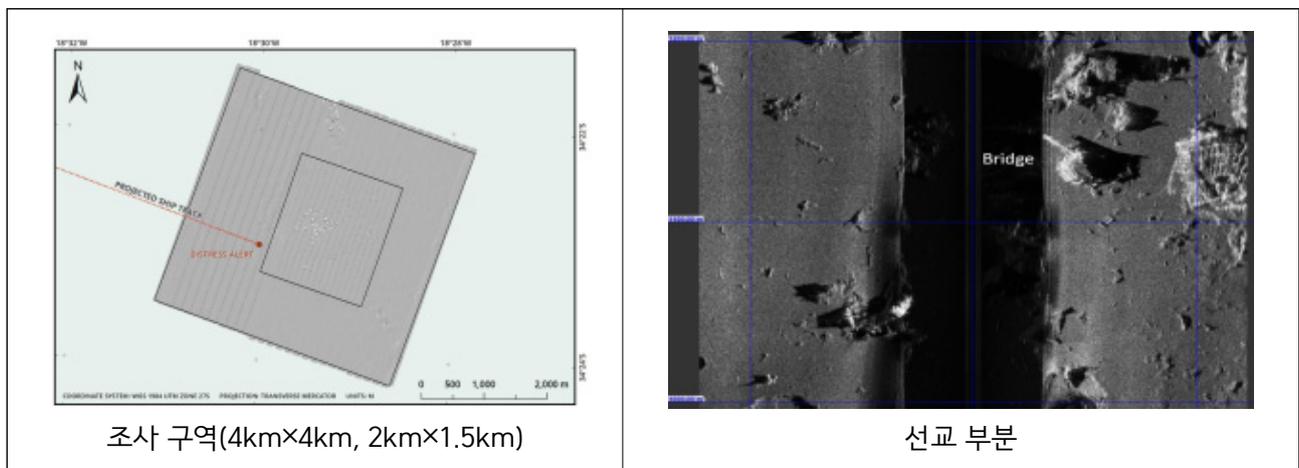
5.3.8 조타실 안에서 수색 및 구조위치 확인장치(SART) 거치대는 발견되었으나, 해당 장치는 거치대에 거치되어 있지 않았다. 또한, 수색 및 구조위치 확인장치 거치대 옆은 항해자료기록장치의 본체가 설치되어 있던 위치이나, 이 위치에서 본체는 보이지 않았다.

5.4 고해상도 잔해조사(High Resolution Debris Survey)

5.4.1 2월 20일에는 2대의 자율무인잠수정을 배치하고 측면주사음탐기와 멀티빔음향측심기를 활용하여 고해상도 잔해 조사를 실시하였다.

5.4.2 고해상도 잔해조사는 잔해 분포지역을 더 높은 해상도로 집중 조사하여 육안조사를 지원하기 위해 이루어졌다.

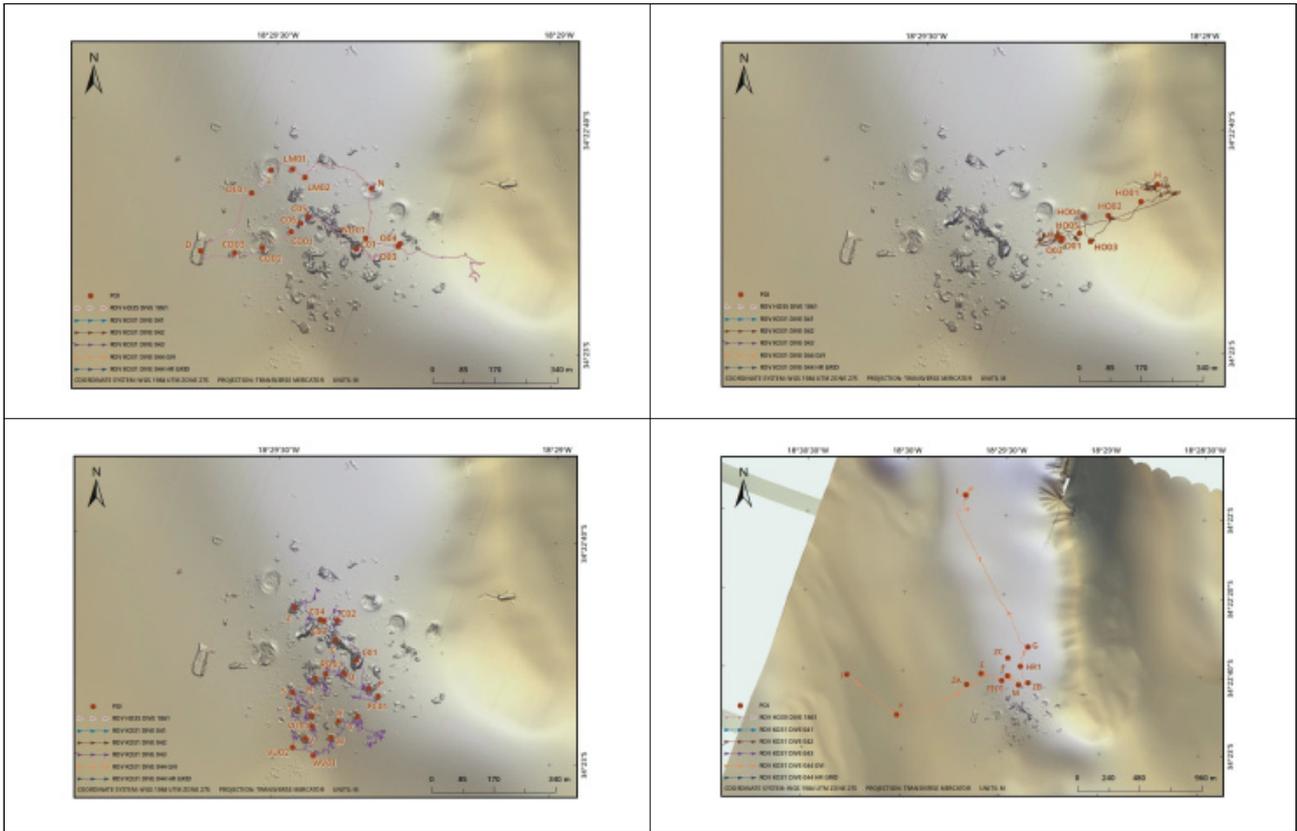
5.4.3 스텔라레이저 잔해가 발견된 해역 해저에 대해 75미터 간격으로 4킬로미터 × 4킬로미터를 조사하고, 추가로 50미터 간격으로 2킬로미터 × 1.5킬로미터 해저를 정밀 조사하였다.



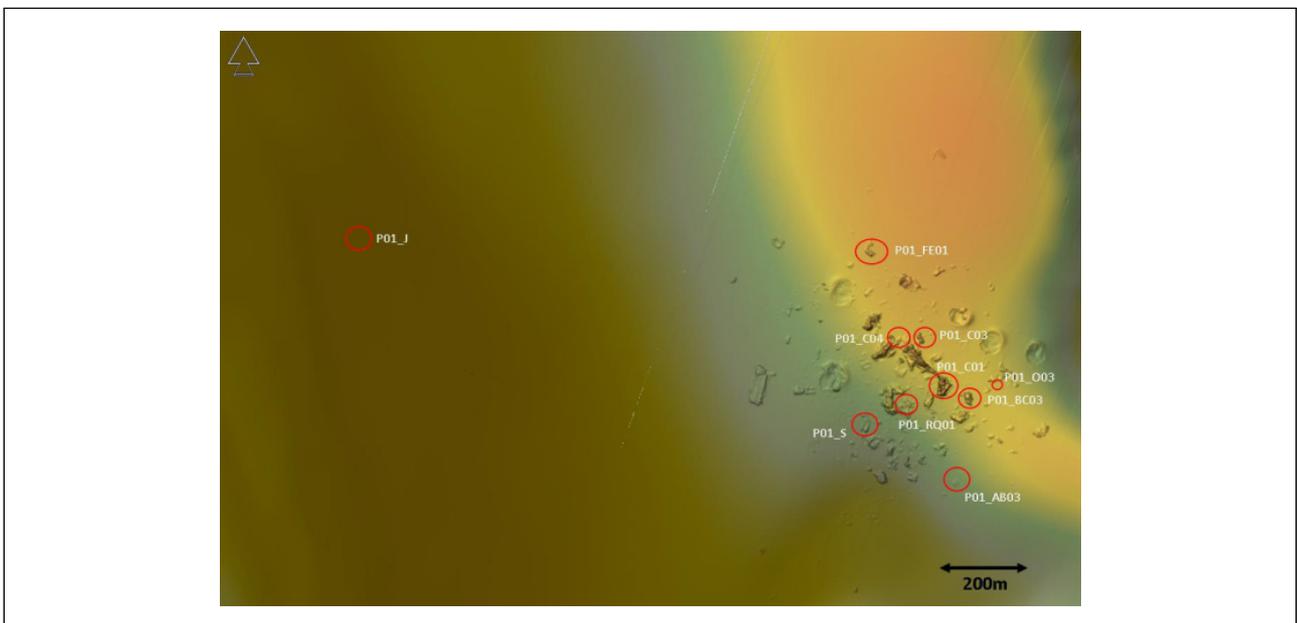
<그림 74> 고해상 측면주사음탐기 잔해조사

5.5 전체 육안조사(Visual Inspection Survey Outline)

5.5.1 스텔라레이저는 넓은 지역에 다양한 크기와 모양으로 잔해가 분포되어 있어서 기본관심지점을 A~Z까지 구분하여 체계적인 경로를 따라 원격무인잠수정으로 육안조사를 실시하였다.



<그림 75> 전체 육안조사 시 ROV 이동경로



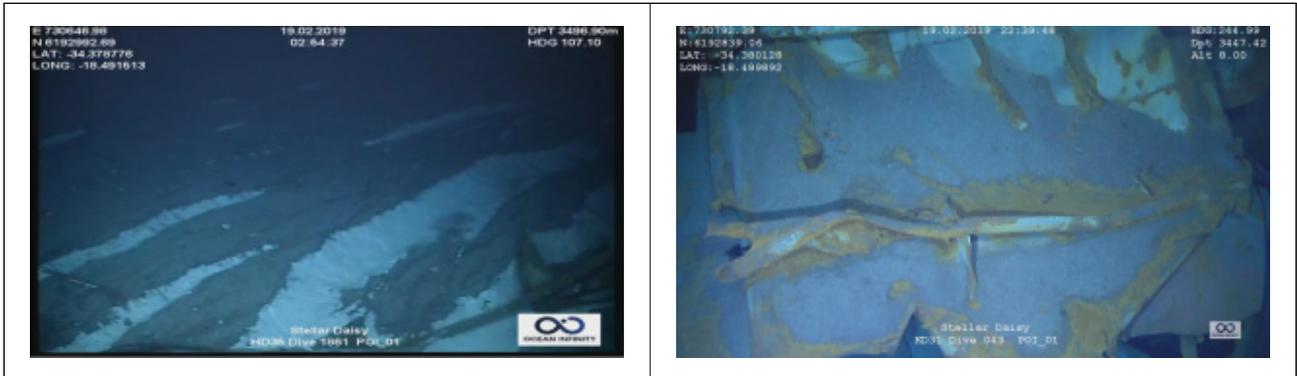
<그림 76> 주요 선체잔해 위치

5.5.2 육안조사를 통해 식별된 주요 선체잔해는 <그림 77>과 같다. 상세한 결과는 부록 1에 기술하였다.

 <p>1730815.87 18.02.2019 23:31:18 HDG: 01.95 N: 6192723.13 Dpt: 3499.96 LAT: -34.381730 Alt: 3.00 LONG: -18.497759 Stellar Daisy HD31 Dive 043 POI_01</p>	 <p>1730890.60 19.02.2019 01:39:14 HDG: 07.88 N: 6192733.40 Dpt: 3460.38 LAT: -34.382088 Alt: 10.00 LONG: -18.498777 Stellar Daisy HD31 Dive 041 POI_01</p>
 <p>1730070.50 18.02.2019 01:33:39 HDG: 3501.30m N: 6192746.70 Dpt: 3451.48 LAT: -34.390942 Alt: 11.00 LONG: -18.498018 Stellar Daisy HD36 Dive 1661 POI_01</p>	 <p>1730805.38 19.02.2019 02:42:05 HDG: 287.60 N: 6192853.38 Dpt: 3451.48 LAT: -34.379273 Alt: 11.00 LONG: -18.498755 Stellar Daisy HD31 Dive 043 POI_01</p>
 <p>1730782.75 19.02.2019 23:10:09 HDG: 199.31 N: 6192872.02 Dpt: 3453.54 LAT: -34.379843 Alt: 13.00 LONG: -18.490440 Stellar Daisy HD31 Dive 043 POI_01</p>	 <p>1730839.54 20.02.2019 23:07:10 HDG: 213.64 N: 6193051.80 Dpt: 3429.49 LAT: -34.378245 Alt: 3.00 LONG: -18.491610 Stellar Daisy HD31 Dive 044 POI_01</p>
 <p>1730447.01 21.02.2019 01:03:49 HDG: 281.94 N: 6192715.52 Dpt: 3556.83 LAT: -34.378297 Alt: 2.00 LONG: -18.504575 Stellar Daisy HD31 Dive 043 POI_01</p>	 <p>1730850.07 18.02.2019 03:50:02 DPT: 3490.60m N: 6192762.34 Dpt: 3490.60m LAT: -34.390782 HDG: 67.90 LONG: -18.498862 Stellar Daisy HD36 Dive 1861 POI_01</p>
 <p>1730773.37 19.02.2019 23:25:28 HDG: 234.20 N: 6192730.54 Dpt: 3473.64 LAT: -34.381110 Alt: 8.00 LONG: -18.490549 Stellar Daisy HD31 Dive 043 POI_01</p>	 <p>1730876.03 19.02.2019 20:41:08 HDG: 329.92 N: 6192682.49 Dpt: 3483.28 LAT: -34.381561 Alt: 12.00 LONG: -18.492115 Stellar Daisy HD31 Dive 043 POI_01</p>

<그림 77> 주요 선체잔해 육안조사

5.5.3 스텔라데이지에 적재된 철광석(iron ore)은 잔해 주변에 침전되어 있었으며 회색이나 갈색의 금속 광택이 관찰되었다.



<그림 78> 잔해 주변의 철광석

5.5.4 2월 23일 육안조사를 완료하고 2월 24일 씨베드 컨스ٹر럭터는 우루과이 몬테비데오를 향해 출발하였다.

5.6 잔해 영상분석 결과

5.6.1 스텔라데이지의 잔해는 수심 약 3,400미터, 1킬로미터 × 0.8킬로미터 해역에 다양한 크기와 모양으로 분포되어 있었다.

5.6.2 <그림 77>과 같이 구조물의 원래 위치 또는 기능 등을 특정할 수 있는 일부 잔해를 제외하고 대부분의 잔해가 원래 형태를 추정하기 어려울 정도로 뒤틀리고 심하게 손상되어 있었다. 화물이 실려있던 화물창 구역도 선체외판, 내부 격벽 등의 잔해가 원래 위치를 추정하기 어려울 정도¹⁰⁸⁾로 손상되어 있었다.

5.6.3 영상으로 식별되는 잔해의 손상부위를 검토한 결과, 침몰 전에 발생한 손상인지, 침수 과정 또는 바다 속에 가라앉는 과정에서 발생한 손상인지, 또는 해저면에 부딪히면서 발생한 손상인지를 구분하는 것도 어려웠다.

5.6.4 특히, 최초 손상이 발생한 것으로 추정되는 2번 좌현 평형수탱크 구조물이나 잔해를 영상에서 확인할 수 없었고, 이는 다른 평형수탱크도 마찬가지였다. 화물창의 경우도 화물창 덮개를 제외하고는 화물창의 어느 부분인지 식별할 수가 없었다.

108) 외판이나 내부 격벽 등의 잔해가 선체 몇 번 프레임에 속하는지 확인 또는 추정이 곤란함

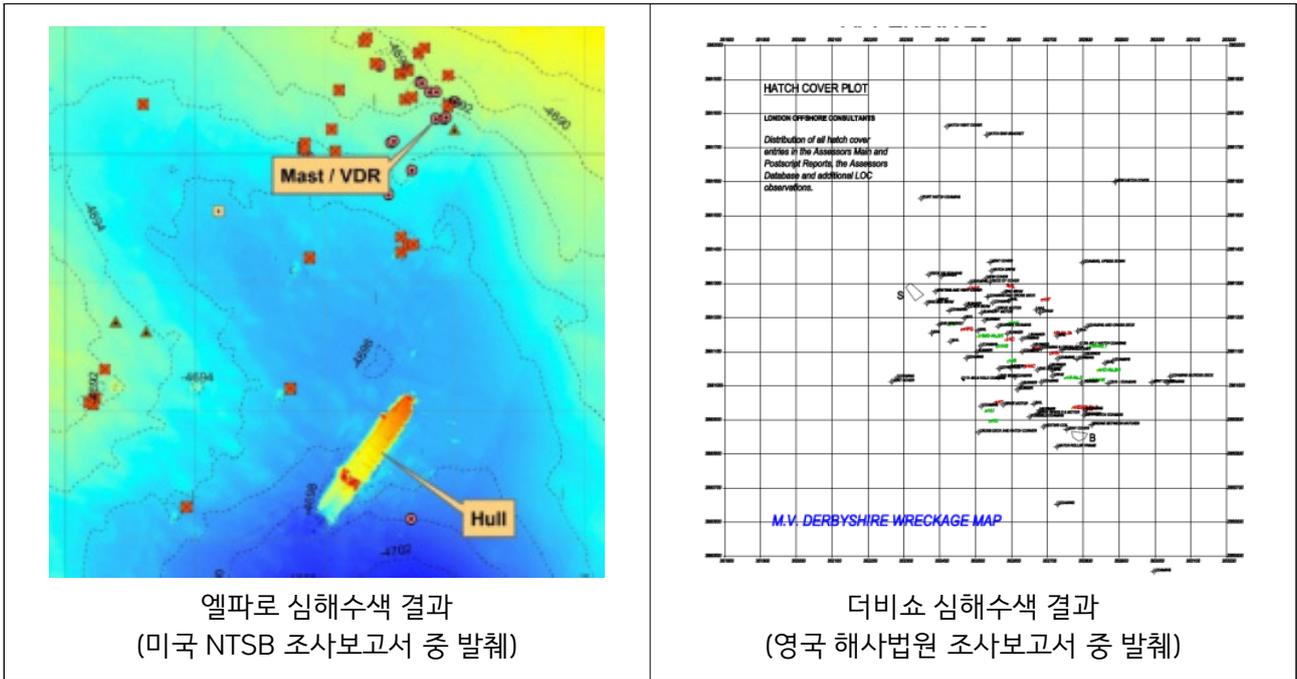
- 5.6.5 또한, 주기관, 프로펠러, 타(Rudder), 닻(Anchor) 등 비교적 부피가 크고 손상이나 변형이 되어도 식별이 가능한 선체 설비 등은 발견되지 않았고, 화물창 덮개도 일부분만 식별되었다.
- 5.6.6 이는 심해수색을 통해 촬영된 잔해의 형상은 전체 선박 중 일부분에 해당하며, 상당수 잔해는 해저 퇴적물에 묻혀있거나 화물인 철광석이나 다른 잔해 밑에 깔려 있어 심해수색 영상촬영으로 선체 모든 구성품을 식별하는 데 한계¹⁰⁹⁾가 있음을 의미한다.
- 5.6.7 심해수색으로 확인된 선체잔해 분석 결과 최초의 손상위치 식별이 곤란하였기 때문에 이 영상으로는 손상이 발생하게 된 원인도 확인할 수 없었다.

5.7 내파해석

- 5.7.1 밀폐구획을 갖는 선박이 침몰하게 되면 수심이 증가함에 따라 밀폐구획 외부에서 작용하는 압력(수압)이 증가하게 된다. 이때 외부압력이 밀폐구획이 견딜 수 있는 최대 능력(붕괴 압력)보다 더 크게되면 그 구획은 붕괴하기 시작하는데 이를 내파(Implsion)라고 한다.
- 5.7.2 심해수색 결과 발견된 스텔라데이지의 잔해 형상을 볼 때 침몰 중 내파가 발생했을 가능성이 있다고 판단되어 이를 확인하기 위해 내파해석¹¹⁰⁾을 실시하였다.
- 5.7.3 일반적으로 침몰 당시 격실이 수밀된 상태로 침몰되었다면 수압에 의해 내파가 발생했을 가능성이 높고, 격실이 수밀이 되지 않아 침수된 상태라면 내파의 가능성은 낮다. 내파 여부는 침몰된 선박의 잔해를 통해 추정이 가능하다. <그림 79>에서 보는 바와 같이 2015년 대서양에서 침몰한 컨테이너선 엘파로(El Faro)는 침몰 당시 대부분 격실이 침수되었기 때문에 내파가 발생하지 않은 것으로 추정된다. 반면에 1980년 북태평양에서 침몰한 광석운반선 더비쇼(Derbyshire)의 경우 선체잔해가 여러 조각으로 흩어져 있는 것을 볼 때 침몰 당시 상당수 격실이 수밀을 유지하다가 물속으로 가라앉는 과정에서 내파 되었음을 추정할 수 있다.

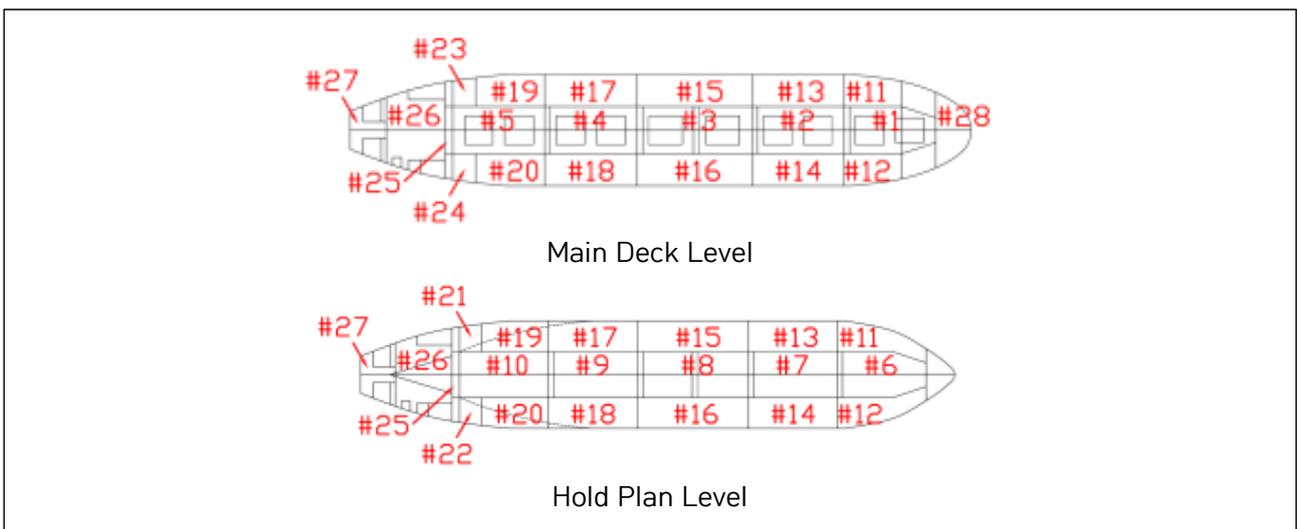
109) 선수부, 선미부 및 거주구역 제외 1번~5번 화물창(길이 약 250미터)에 사용된 철판(갑판, 선측외판, 선저외판, 중격벽, 횡격벽 등)의 넓이를 모두 합치면 최소 10만㎡가 넘어 축구장 크기의 약 15배 정도이나 심해수색을 통해 추정되는 1~5번 화물창 잔해의 2차원 넓이를 모두 합쳐도 5만㎡가 넘지 않는 것으로 추정됨

110) 대한조선학회에서 실시함



<그림 79> 침몰선박 심해수색 사례

5.7.4 심해수색을 통해 확인된 스텔라데이지는 수심 약 3,400미터의 해저, 길이 약 1킬로미터, 폭 약 0.8킬로미터의 면적에 선체 잔해가 다양한 크기로 분포되어 있다는 점을 고려하면, 침몰하는 과정에서 내파¹¹¹⁾가 발생된 것으로 추정된다. 내파 가능성을 확인하고, 붕괴압력을 추정하기 위하여 선박의 밀폐구획을 <그림 80>과 같이 28개로 식별하였다.



<그림 80> 밀폐구획 식별번호

111) 밀폐된 구획별로 붕괴압력이 다르기 때문에 서로 다른 수심에서 여러 차례의 내파현상이 발생할 수 있음. 내파가 발생하게 되면 밀폐구획을 구성하는 구조물은 안쪽으로 찌그러지게 되고 찢어지기도 함

- 5.7.5 밀폐구획을 구성하는 구조물(판)이나 밀폐구획에 설치된 개구부가 외부압력에 의해 붕괴되면 그 밀폐구획은 붕괴된다. 따라서 각 밀폐구획의 구조물이나 개구부의 붕괴압력을 조사하여 그 최소값을 그 밀폐구획의 내파 붕괴압력으로 추정할 수 있다.
- 5.7.6 먼저 화물창의 개구부(Access Hatch, Main Hatch), 공탱크의 개구부(Manhole, Air Vent, Bilge Line), 평형수탱크의 개구부(Access Hatch, Air Vent, Ballast Line), 연료유탱크의 개구부(Manhole, Air Vent, Filling Line, Suction Line) 등 밀폐구획 개구부의 붕괴압력은 도면에 따른 설계압력의 약 1.5배¹¹²⁾로 추정하였다. 밀폐구획을 구성하는 구조물의 붕괴압력은 구조물의 길이, 폭, 두께 등을 고려하여 계산하였다.
- 5.7.7 밀폐구역의 개구부와 구조물의 붕괴압력을 비교하면 <표 31>과 같이 조사되었고, 이 표에 보는 것처럼 화물창은 밀폐된 상태로 수심 5~10미터(0.054~0.101MPa), 평형수탱크는 약 35.7미터에서 내파로 붕괴가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 이중저 공탱크는 평형수탱크와 접하고 있기 때문에 평형수탱크가 무너진 직후에 붕괴가 된 것으로 판단된다.

<표 31> 밀폐구획 붕괴압력

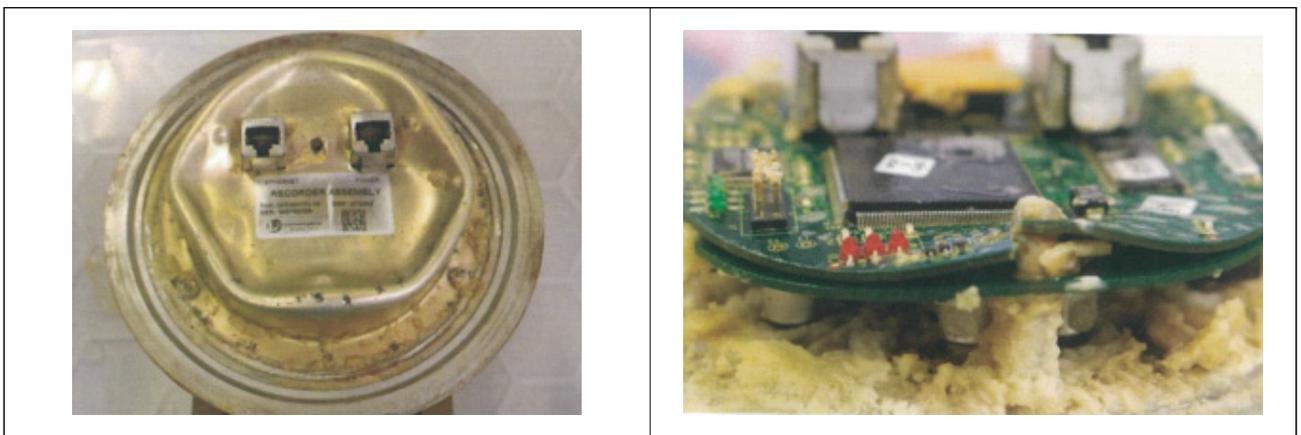
밀폐구획		개구부 붕괴압력(MPa)	구조물 붕괴압력(MPa)	밀폐구획 붕괴압력(MPa)	붕괴위치
#1	No.1 Cargo Hold F	0.101	0.257	0.101	Hatch Cover
#2	No.2 Cargo Hold	0.101	0.434	0.101	Hatch Cover
#3~#5	No.3~No.5 Cargo Hold	0.054	0.434	0.054	Hatch Cover
#6~#12	Void Space	0.375	0.117	0.117	Center Girder
#13~#20	WBT	0.375	0.357	0.357	BHD
#21~#22	No.6 Void Space	0.525	0.475	0.475	Upper Deck
#23~#24	FWD FOT	0.525	0.289	0.289	Longi. BHD
#25~#26	Pump Room, Engine Room	Open end	-	Open end	-
#27~#28	Fore Peak, Aft Peak Tank	0.525	0.538	0.525	Manhole

112) 밀폐 압력용기의 내압시험 시 적용하는 수압시험 압력을 붕괴압력으로 간주한 것으로, 수압시험 압력은 설계압력의 1.5배를 적용하고 있음

5.8 항해자료기록장치 데이터 복원

5.8.1 심해수색 때 회수된 간이 항해자료기록장치 보호용기의 데이터 추출작업¹¹³⁾은 포렌식 전문업체가 참여한 전문가팀에 의해 수행하였다.

5.8.2 회수된 보호용기의 케이싱은 손상되어 있었고, 케이싱을 분해 후 확인된 전자기판 (Processor Board)도 손상되었으며, 전자기판을 분리하고 내부 절연물질을 빼낸 후 확인한 메모리 모듈 용기는 여러 군데가 일그러져 있었다.



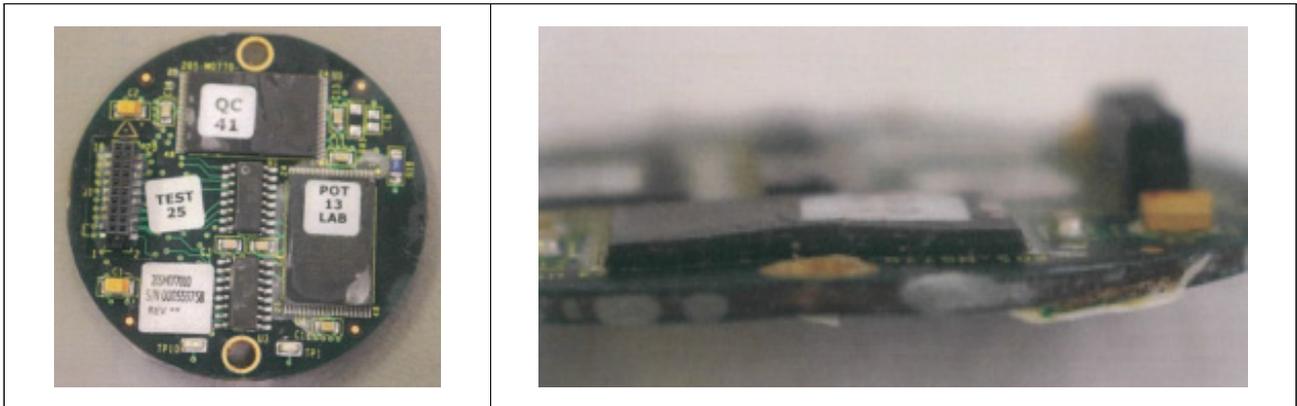
<그림 81> 보호용기 케이싱 및 전자기판



<그림 82> 메모리 모듈 용기

5.8.3 메모리 모듈 용기를 분해하여 내부 회로기판을 확인한 결과 핵심 부품인 메모리칩 2개 중 1개가 손상되어 있음을 확인했다. 나머지 메모리칩도 손상 가능성을 알리는 흔적이 발견되었다. 또 다른 핵심부품인 컨트롤러칩도 손상되어 있었다.

113) 데이터 추출은 가슴기살균제 사건과 4·16 세월호참사 특별조사위원회가 주관함



〈그림 83〉 메모리 모듈

5.8.4 비교적 덜 손상된 메모리칩의 데이터를 추출하기 위하여 회로기판으로부터 메모리칩을 분리하여 칩 리더기를 통해 데이터를 확인한 결과 데이터의 50%는 무효 데이터¹¹⁴⁾였고, 43%는 비어 있었으며, 7%만이 남아 있었다.

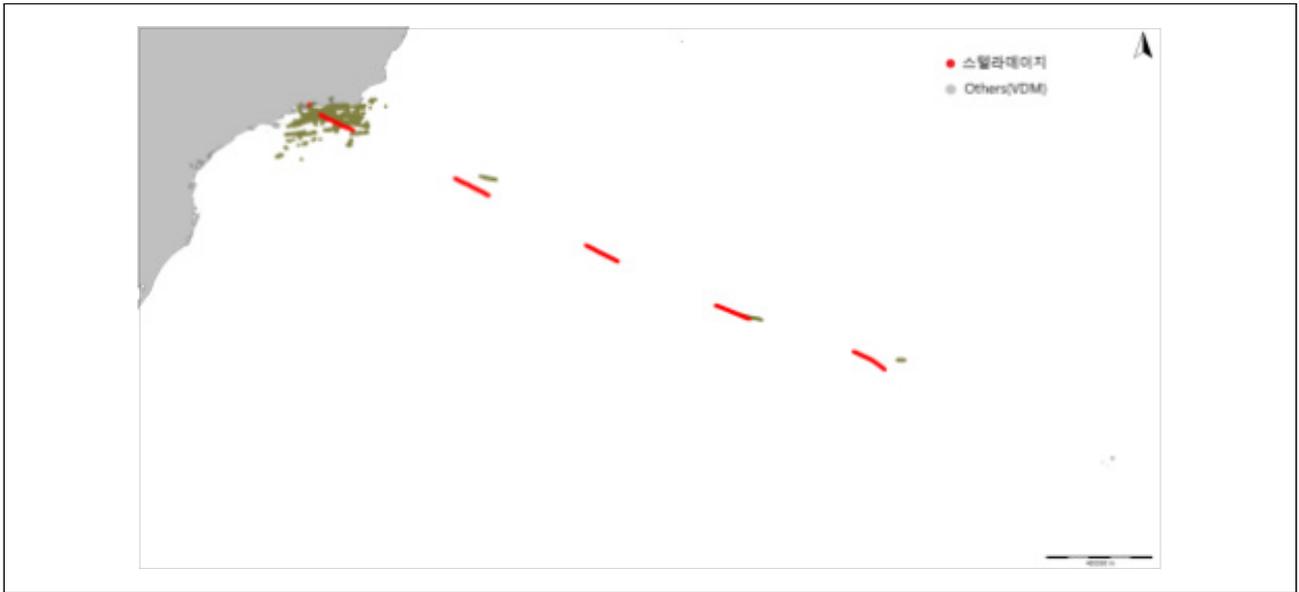
5.8.5 남아 있는 7% 데이터를 처리하여 확인한 결과, GPS와 AIS 정보로 전체 저장된 정보는 약 47시간 분량이고 <표 32>와 같이 7개의 저장 구간으로 나뉘져 있었고, 이를 해도 위에 표시하면 <그림 84>와 같다.

〈표 32〉 복원된 데이터

구분	시작 시간	종료 시간	위치정보(건)
스텔라데이지	2017.03.24. 00:16:22	2017.03.24. 07:01:44	24,339 ¹¹⁵⁾
	2017.03.25. 03:12:48	2017.03.25. 09:50:56	23,899
	2017.03.26. 05:58:04	2017.03.26. 12:46:59	24,549
	2017.03.27. 09:12:46	2017.03.27. 15:55:20	24,158
	2017.03.28. 12:19:34	2017.03.28. 19:09:20	24,594
	2017.03.29. 15:33:08	2017.03.29. 22:16:13	24,202
	2017.03.30. 18:50:20	2017.03.31. 01:26:55	23,812
주변 선박 213척			93,328

114) 칩 리더기 제조사는 무효 데이터는 칩 리더기가 해당 데이터를 읽을 수 없는 상태로 판단한 것으로 이는 칩이 손상되었기 때문인 것으로 추정함

115) 3월 24일과 3월 25일 정보는 정박 중의 위치정보로 <그림 84>에서 동일한 위치로 표시됨



<그림 84> 복원된 데이터에 의한 스텔라데이지 항적

5.8.6 복원된 데이터는 사고항차에 있어서 선박의 운항경로를 확인할 수 있는 항적정보로써 객관적인 자료이나, 이 선박의 손상 및 침몰 원인을 밝혀 줄 단서를 제공하고 있지는 않다.

5.9 소결

5.9.1 심해수색을 통해 확보된 선체잔해 영상으로는 최초 손상위치를 식별하거나 손상이 발생한 원인을 도출하는 것이 불가능하였다. 다만, 선체잔해가 많은 조각으로 흩어져 있는 점을 고려할 때 해저로 가라앉는 과정에서 수압에 의한 내파현상이 있었음을 추정할 수 있었다.

5.9.2 내파 가능성을 보다 정확히 확인하기 위해 선박의 밀폐구획을 식별하고, 붕괴압력을 분석하는 등 내파해석을 수행하였다. 심해수색 선체잔해 영상을 통해 추정한 바와 같이 내파해석 결과에서도 침몰과정에서 내파가 있었음을 확인할 수 있었다.

5.9.3 항해자료기록장치에는 선교 대화, 레이더 이미지, 항적 등의 정보가 저장되지만 회수된 항해자료기록장치에서는 항적정보의 일부만이 복원됨에 따라 이 선박의 손상 및 침몰 원인 분석 자료로 활용되는데는 한계가 있었다.

section

6

결론

6. 결론

- 6.1 스텔라데이지는 사고발생 직전 “2번 포트 물이 샐니다. 포트 쪽으로 긴급하게 기울고 있습니다”라는 SNS 메시지를 보내고 연락이 두절되었다. 생존선원 2명은 항해 중 갑자기 큰 충격음과 진동이 있었고 선체가 좌현으로 급격히 경사되면서 5분여의 짧은 시간에 선박이 침몰하였다고 진술하였다.
- 6.2 이번 사고는 선체가 순식간에 침몰하였고, 최초 침수를 목격한 선원의 실종 등으로 인하여 침몰 원인과 침몰 과정을 밝혀줄 직접적 증거를 확보하는데 어려움이 있었다. 이로 인해 SNS 메시지에 나타난 단편적 사실과 생존자 진술을 기초로 이 선박이 약 5분 만에 침몰하기 위해서는 좌현 외판에 커다란 손상이 발생하여 선체 내로 해수가 유입되고, 침수가 인접한 구획으로 급격히 확산되어야 한다는 전제하에 침몰 가능 시나리오를 검토하였다. 사고조사는 그러한 전제의 가능성 특히, 최초로 선체가 손상된 원인을 밝혀내기 위해 노력하였다. 그리고 최초 손상 이후 침수량이 부력을 상실할 정도로 확산될 가능성에 대해서도 다각도로 분석하였다.
- 6.3 먼저, 선박의 운항과정에서 발생할 수 있는 통상적인 사고원인 가능성을 확인하기 위해 기상상황, 복원성, 화물적재 시의 종강도 및 화물 액상화 가능성 등을 분석한 결과 이번 사고를 야기할 만한 직접적인 위험요인은 확인되지 않았다.
- 6.4 다음으로 이 선박의 개조 후 사고 당시까지 운항하는 동안, 선박의 관리 과정에서 사고원인이 될 수 있는 요인을 파악하기 위해 선박검사 내역과 선사의 관리내역 등을 분석하였다. 그 결과 일부 평형수탱크와 공탱크의 지속적인 부식 발생, 선체 주요부재 손상에 대한 수리지연과 손상 원인파악 미흡 및 안전성 여부가 사전 검토되지 않은 격창양하 형태의 운항 사례 등이 확인되었다. 하지만 이러한 요인이 침몰을 야기할 만큼 대규모 선체손상을 일으켰다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 다만, 이들이 다른 취약요인과 복합적으로 결합될 경우에는 선체손상을 가속화시킬 수 있는 잠재적인 요인으로 작용할 가능성은 있다고 판단된다.
- 6.5 또한, 이 선박의 구조적 안전성 또는 취약부위 등을 파악하기 위해 선체구조강도해석, 피로강도해석, 최종강도해석, 손상해석을 수행하는 등 최초 손상가능성 및 이후 침수의 확

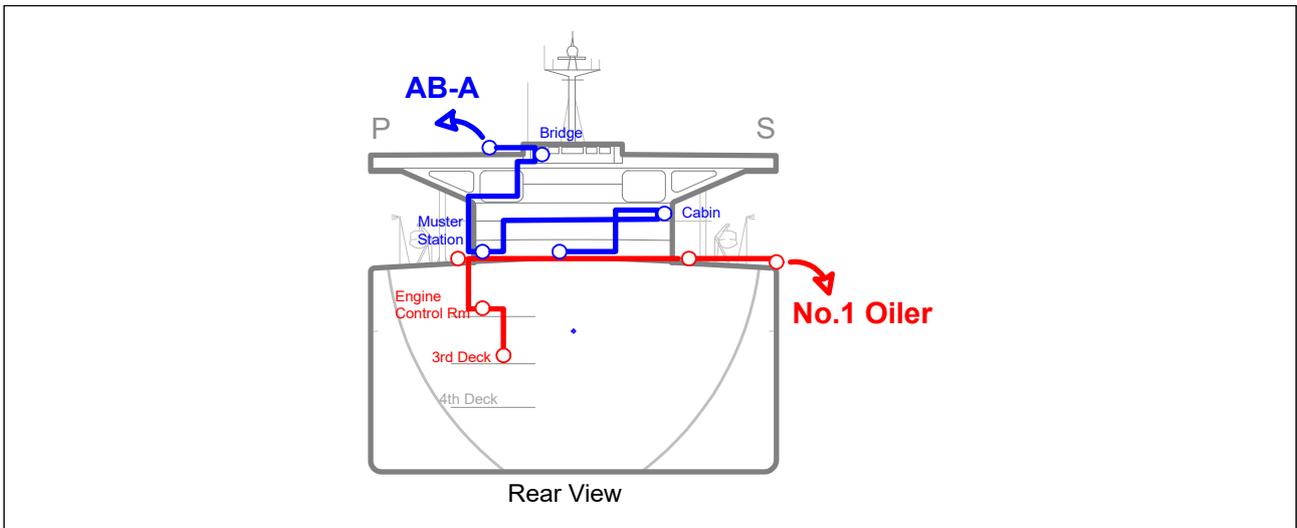
산 가능성에 대해 조선공학적 분석을 수행하였다. 그 결과 피로 누적 등으로 선체가 장기간에 걸쳐 조금씩 약화된 상태에서 측면에서 오는 파도에 의해 비대칭 횡압력이 작용하게 되면서 상대적으로 취약했던 2번 평형수탱크 선저만곡부의 선측외판과 선저외판에서 최초 손상이 발생하였을 개연성이 큰 것으로 추정되었다. 또한, 횡경사가 10도 이상이 되면 상당수 횡부재에서 구조손상이 발생된다는 점도 알 수 있었다.

6.6 분석결과를 종합해 볼 때, 이 선박의 최초 손상은 오랜 기간에 걸친 구조부재의 강도 약화, 안전성 여부가 사전 검토되지 않은 격창양하 등에 따른 피로 누적 및 파도에 의한 비대칭 횡압력 등이 복합적으로 작용하여 2번 좌현 평형수탱크 선체외판 하부에서 발생하였고, 이 손상 부위로 해수가 최초 유입되었을 것으로 판단된다.

6.7 최초 손상으로 인한 2번 좌현 평형수탱크의 침수는 횡경사를 빠르게 발생시키고 이로 인해 좌현에 하중이 크게 증가하여 좌현 평형수탱크의 횡부재와 횡격벽이 붕괴되고 3번과 4번 평형수탱크까지 해수유입이 확산되었을 것으로 추정된다. 이후 횡경사 및 선체 침하가 가속화되면서 일부 화물창 덮개와 종격벽까지 손상이 진행되었고 화물창이나 우현 평형수탱크까지도 해수가 유입, 부력이 상실되면서 급격한 속도로 침몰하는 상황에 이르게 되었을 것으로 추정된다.

6.8 조사결과를 바탕으로 추정한 이 선박의 사고 경과는 아래와 같다.

- 1) 생존선원의 진술과 선사가 받은 휴대전화를 통한 SNS 메시지 및 위성비상위치지시용 무선표지설비 조난신호 등에 근거하여 사고 당시 생존선원의 위치, 이동 경로 및 특이사항 등은 <그림 85>와 <표 33>과 같다.



<그림 85> 사고 당시 생존선원 위치

〈표 33〉 사고 당시 시간대별 생존선원의 이동 경로 재구성

추정 시간(LT)	갑판수A(AB-A)	조기장(No.1 Oiler)	횡경사(추정)
13:20 이전	(거주구역 상갑판 통로) • 강력한 진동 느낌 • 좌현 경사 시작	(기관실 3층 갑판) • 강력한 진동 느낌	0°
13:20 (SNS 메시지)	(좌현 비상소집장소) • 선장 방송 2회 들음	(기관실 3층 갑판) • 선장 방송 2회 들음	5°-40°
	(좌현 거주구역) • 선교로 이동	(기관실 2층 갑판) • 선교로 이동	
	(선교) • 선교에 도착	(상갑판) • 선교로 이동 불가	
13:22	(선교) • 선체 경사 가중	(우현 상갑판) • 우현 구명정으로 이동	40°-50°
	(조타실) • 좌현 측 해수면 접근	(우현 상갑판 구명정 옆) • 핸드레일에 매달림	
13:24	(좌현 윈브릿지) • 바다로 뛰어듬	(우현 상갑판 구명정 옆) • 핸드레일에 매달림	50°-70°
	• 물 밑으로 빨려들어 감	• 우현 갑판 위로 파도가 덮쳐 바다로 떨어짐	
13:25 (EPIRB 조난신호)	• 회류 속에 가라앉음	• 바다 속으로 끌려들어 회류 속에 가라앉음	
	• 수면으로 떠오르니 선박은 보이지 않았음	• 수면으로 떠오르니 선박은 보이지 않았음	

- 2) 사고의 시작은 두 생존선원이 강한 진동을 느낀 시점이며, 이때는 선박에 침수가 발생했다는 휴대전화를 통한 SNS 메시지와 선장이 안내방송 한 것으로 추정되는 13시 20분의 약 1분 전이다. 이때 선박의 외판이 손상되었다.
- 3) 최초 손상부위는 2번 좌현 평형수탱크의 선측외판이나 선저외판이며, 이 부위를 통해 해수가 유입되면서 좌현으로 선체 횡경사가 발생하였다. 이때 선박에서는 SNS 메시지로 선사에 위급 상황을 보고하였고, 선내 안내방송을 실시하였다.
- 4) 2번 좌현 평형수탱크의 침수로 선체 횡경사가 발생하는 동시에 횡방향에서 오는 파도 압력에 의하여 순간적으로 좌현으로 10도가 넘는 횡경사가 발생하였다. 횡경사에 의한 하중 불균형은 2번, 3번 및 4번 좌현 평형수탱크의 대부분 트랜스버스와 횡격벽에 손상을 유발했다.

- 5) 2번과 3번 좌현 평형수탱크 횡격벽이 붕괴되어 3번 좌현 평형수탱크가 침수되고, 이어서 3번과 4번 좌현 평형수탱크 사이의 횡격벽도 붕괴되어 4번 평형수탱크까지 침수되기 시작하였다. 선체는 좌현으로 40도 가까이 기울어졌다.
- 6) 2번, 3번 및 4번 좌현 평형수탱크의 침수로 횡경사는 더욱 가중되고 상갑판 좌현 끝단이 해수면 아래로 침하되면서 1번과 2번 화물창 덮개가 손상되었고, 화물창 안으로 해수가 유입되기 시작되었다.
- 7) 화물창 침수는 선체 침하를 가중시켰고, 4번과 5번 좌현 평형수탱크 사이 횡격벽의 붕괴로 5번 평형수탱크가 침수되고, 이어서 연료유 탱크도 붕괴되어 연료유가 유출되기 시작하였다. 이때 선체의 경사는 50도 정도이며, 조타수는 윈브릿지에서 바다로 뛰어 들었다. 뒤이어 우현 상갑판 핸드레일에 잡고 있던 조기장은 파도에 휩쓸려 바다로 떨어졌다.
- 8) 이어 화물창과 접해 있는 좌현 종격벽이 대부분 붕괴되면서 화물이 좌현 평형수탱크로 이동하고 3번, 4번 및 5번 화물창 덮개도 손상되어 화물창 안으로 해수가 유입되기 시작했다.
- 9) 화물창에 해수가 유입되면서 화물창 이중저 탱크가 손상되고 우현 종격벽도 붕괴되기 시작하여 우현 평형수탱크로 해수가 유입되기 시작하였고, 부력을 상실한 이 선박은 좌현으로 경사되면서 선체는 완전히 침몰하였다. 이후 바다에 빠진 조타수와 조기장이 해수면 위로 나왔으나 선체는 보이지 않았다.

6.9 사고발생 후 심해수색을 통해 수심 약 3,400미터 해저에서 선박의 잔해를 발견하였으나, 약 1킬로미터 × 0.8킬로미터 넓이의 구역에 파손된 상태로 분포되어 있었다. 거주구역 또는 화물창 덮개와 같은 일부 부분을 제외한 다른 선체 부위는 원래 형태를 알아볼 수 없을 정도로 파단 및 변형되어 있었다.

6.10 침몰과정에서 내파가 발생하였는지를 알아보기 위해 내파해석을 수행한 결과, 침수 시 손상되지 않은 구획이 침몰하는 과정에서 밀폐공간을 형성하였고, 이 밀폐공간이 해수 압력에 의해 내파된 것으로 추정된다. 선체가 여러 조각으로 파손되어 있었던 것은 내파가 원인인 것으로 판단된다.

section

7

사고 이후 조치사항

7. 사고 이후 조치사항

7.1 대한민국 정부 조치사항

- 7.1.1 대한민국 정부는 2017년 4월부터 2019년 9월까지 민·관 합동점검반을 구성하여 플라리스쉬핑(주)에서 운항하는 개조 광석운반선박 10척을 포함한 총 14척의 개조 광석운반선에 대한 점검을 실시하였다.
- 7.1.2 합동점검 결과 중대한 구조적 결함은 식별되지 않았다. 2018년 3월 15일부터 20일까지 플라리스쉬핑에서 운항하는 스텔라이글(Stellar Eagle)에 대한 합동점검 중 화물창 빌지웰에 설치된 배출라인이 선박검사기관에 승인받지 않고 설치된 것을 확인하고 원상복구 명령¹¹⁶⁾을 내렸다.
- 7.1.3 「강화검사 등에 관한 기준」(해양수산부 고시)을 2018년 5월 24일 개정하여 선박의 규모와 선령에 따라 구조적 취약부위에 대한 검사 시 전담 검사관 등을 추가 투입하는 등 노후 선박에 대한 선체검사를 강화하였다.
- 7.1.4 특히, 선령 10~15년 사이의 단일선체구조 산적화물선과 이중선체구조 산적화물선 및 유조선에 대한 선박검사 시 검사원을 추가 투입하여 구조적 취약구역과 의심구역에 대한 검사와 정밀 확인을 시행토록 하였다.
- 7.1.5 대한민국 해운회사가 운항 중인 개조 광석운반선(단일선체유조선을 광석운반선으로 개조)에 대해 조기폐선 등 운항중단을 독려함으로써 개조 광석운반선 29척의 상업적 운항은 2020년 12월까지 순차적으로 모두 종료되었다.

116) 플라리스쉬핑(주)는 스텔라이글을 포함하여 총 6척의 개조 광석운반선에서 화물창 빌지웰 배출라인이 설치된 것으로 확인하고 해당 배출라인을 제거함

7.2 한국선급 조치사항

- 7.2.1 한국선급은 사고 발생 직후 대한민국 정부의 요청에 따라 한국선급에 등록된 개조 광석운반선 29척에 대한 구조적 안전성을 확인하기 위하여 2017년 4월부터 같은 해 11월 까지 자체 일체점검¹¹⁷⁾을 실시하였다.
- 7.2.2 일체점검 결과, 중대한 구조적 결함은 식별되지 않았고, 상갑판 및 구조 보강재 등에 경미한 균열 또는 변형이 확인되어 해당 부위를 교체 또는 보강하였다.
- 7.2.3 또한, 2020년 1월 1일자로 한국선급 규칙을 개정하여 선령 25년 이상의 개조 광석운반선에 대한 검사주기를 단축(정기적 검사 사이 6개월 간격으로 임시검사를 추가 실시)하고, 연차검사 시 정밀검사 및 현상검사 등의 검사요건을 강화하였다. 횡강도에 대한 안전성을 강화하기 위해 광석운반선의 직접강도평가 시 횡파에 의한 상하 방향의 횡동요를 반영한 하중조건을 추가하였다.

7.3 폴라리스쉬핑(주) 조치사항

- 7.3.1 폴라리스쉬핑(주)는 이 사고 발생 직후 한국선급과 영국선급에 의뢰하여 자사가 운항 중인 개조 광석운반선 18척에 대한 구조 취약부 등을 식별하기 위한 구조해석 및 정밀검사를 실시하였다.
- 7.3.2 또한, 선적국인 마셜제도가 발표한 조사보고서의 권고에 따라 안전관리절차를 개선하였고, 안전품질 및 선원·기술 관리 등을 위한 육상 인력을 보강하였으며, 사고 이후 개조 광석운반선을 2020년 7월까지 순차적으로 모두 폐선 또는 운항 종료시켰다.

117) 중간검사 또는 정기검사 등의 정기적 검사일정이 있는 선박은 해당 검사와 연계하여 점검을 실시하고 정기적 검사 일정이 없는 선박은 별도의 임시검사를 실시함

section

8

권고

8. 권고

8.1 선체 강도 검토 시 비대칭 횡압력 고려

- 8.1.1 정수압, 파랑하중 및 화물하중 등으로 발생하는 응력(Stress)이 선체 강도의 허용응력을 초과하면 선체에 좌굴, 균열 또는 파단 등의 손상을 유발할 수 있으므로 선체구조는 설계 하중에 견딜 만한 충분한 강도(Strength)와 강성(Stiffness)을 가지고 있어야 한다.
- 8.1.2 이러한 선체 강도는 크게 종강도, 횡강도 및 국부강도로 구분되고, 종강도 및 국부강도를 만족하면 일반적으로 횡강도가 확보되므로 현행 강선구조기준에서는 항해 중에 조우할 수 있는 횡파에 의한 비대칭 횡압력이 충분히 고려되지 않고 있다.
- 8.1.3 그러나 중량화물을 적재하고 갑판에 개구(Opening)가 있는 광석운반선의 경우 다른 선박에 비해 횡압력에 의한 영향이 커지게 되므로 이러한 선박을 건조 또는 개조 시에는 비대칭 횡압력을 고려하여 강도를 평가하는 것이 바람직하며 국제해사기구에서는 현행 선체강도 관련 기준에 이를 적용하기 위한 방안을 검토할 필요가 있다고 판단된다.

8.2 화물적재 방식에 대한 안전성 검토

- 8.2.1 선박소유자는 선박을 건조 또는 개조하는 경우 화물을 균일하게 적재한 상태 등을 포함한 여러 가지 화물 적재상태가 기술된 적하지침서를 작성하여 선박검사기관에 제출하고, 선박검사기관은 화물 적재상태에 따른 종강도 및 국부강도 등을 검토하여 그 적하지침서를 승인하고 있다. 선박검사기관은 이 적하지침서에 근거하여 적하지침기기를 승인한다.
- 8.2.2 적하지침서에 포함되지 않은 적재방식으로 화물을 적재하는 경우에 선장, 1등항해사는 적하지침기기를 이용하여 화물적재 계획을 수립하고 검증한다. 그러나, 화물 적재에 따른 복원성 및 종강도는 적하지침기기를 통해 확인할 수 있지만, 국부강도 측면에서 안전한지 여부에 대해서는 확인할 수 없다.

- 8.2.3 따라서, 격창 적·양하 등 적하지침서에 제시된 적재상태와 현저히 다르게 화물을 적재하고자 하는 경우에는, 선박검사기관을 통해 예정된 적하계획에 따른 선박의 국부강도 등 안전성을 사전에 확인해야 한다. 또한, 이와 같은 검증 절차가 이행되어야 함을 선장, 항해사 등이 명확히 인지할 수 있도록 해야 한다.
- 8.2.4 이를 위해 선박운항자는 해당 절차를 선박안전관리매뉴얼에 규정하고, 선장 등이 절차를 준수하도록 교육을 해야 할 필요가 있다. 또한, 선급은 적하지침서의 적재상태와 현저히 다른 상태(격창 적·양하 등)로 화물을 적·양하하려는 경우 선박검사기관의 사전 검토 및 승인을 받아야 한다는 점을 선장 등이 쉽게 인지할 수 있도록 주의·경고 문구 형태로 적하지침서 및 적하지침기기에 표시할 필요가 있다.

8.3 선박검사기관의 선박검사 기록관리 개선

- 8.3.1 선박검사기관은 선박을 건조 또는 개조하는 경우 관련 규칙 및 지침에 따라 선체구조의 적합성을 검토하여 승인하고, 정기적 선박검사를 통하여 선박의 상태를 점검하고 있다.
- 8.3.2 규칙 및 지침에 따른 검토·승인이나 선박검사 시 확인 사항 등에 대한 기록은 선박검사기관 자체 규정에 따라 적절히 관리되고 있으나, 해당 업무를 수행하는 검사원에 따라 선체 수리사항에 대한 상세 내역 등의 기록방식 또는 수준이 상이¹¹⁸⁾하다.
- 8.3.3 따라서, 한국선급은 주요 선체 수리사항에 대한 검사보고서 등을 작성 시 상세 내역 등을 기록하는 표준방식을 마련하는 등 선박검사 기록관리를 철저히 할 필요가 있다고 판단된다.

8.4 선사의 선박관리 철저

- 8.4.1 선박 소유자 또는 운항자는 선박검사 후 검사상태를 유지할 의무가 있으므로 선체의 손상이 발생하면 선박검사기관에 통보하여 손상 원인 등을 파악하고 신속히 수리하여야 한다.

118) 스텔라데이지 개조검사 시 선체 횡단면계수 및 좌굴판정기준에 대한 단서조항(선급규칙 제3편3장2절4항 및 선급규칙 제3편 부록 3-2, 3항) 적용에 대한 기록 부재 및 개조 후 중간검사 및 정기검사 시 일부 수리내역을 검사보고서에 미기재 등

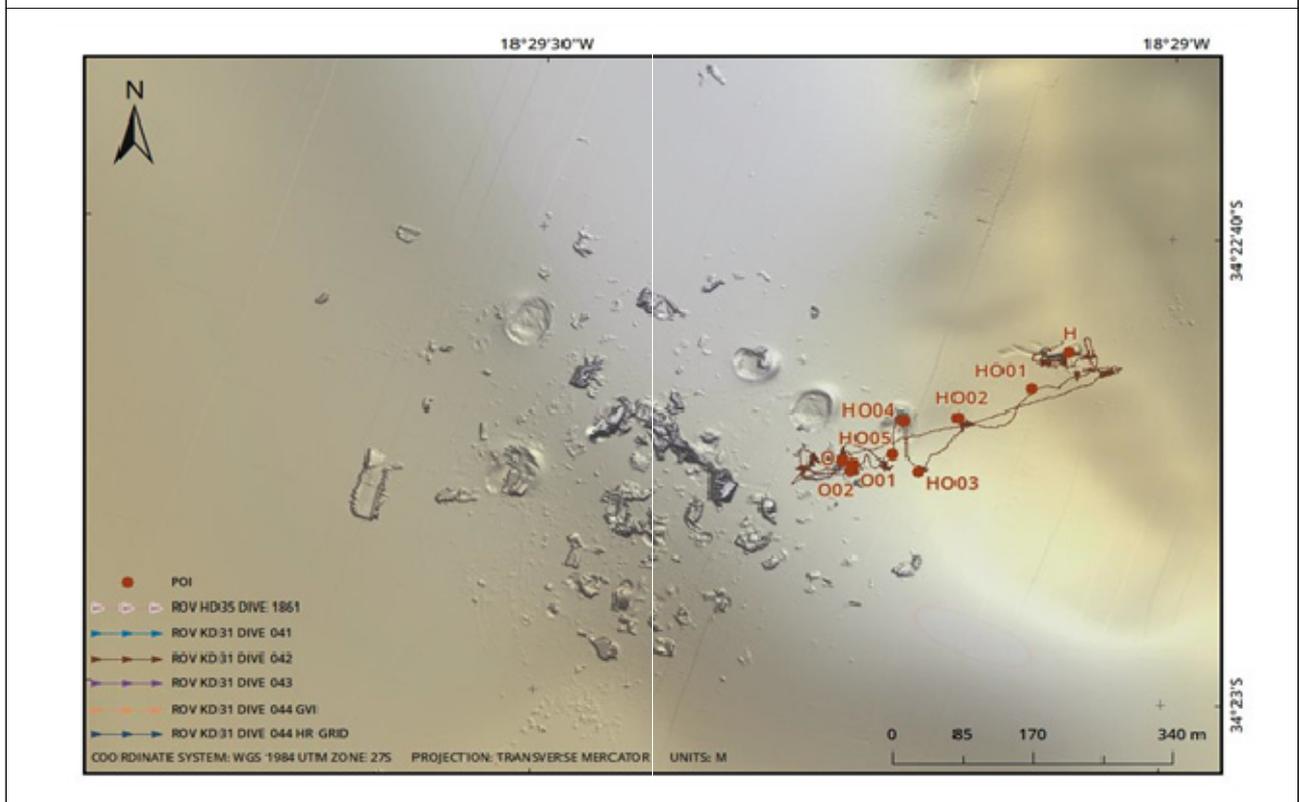
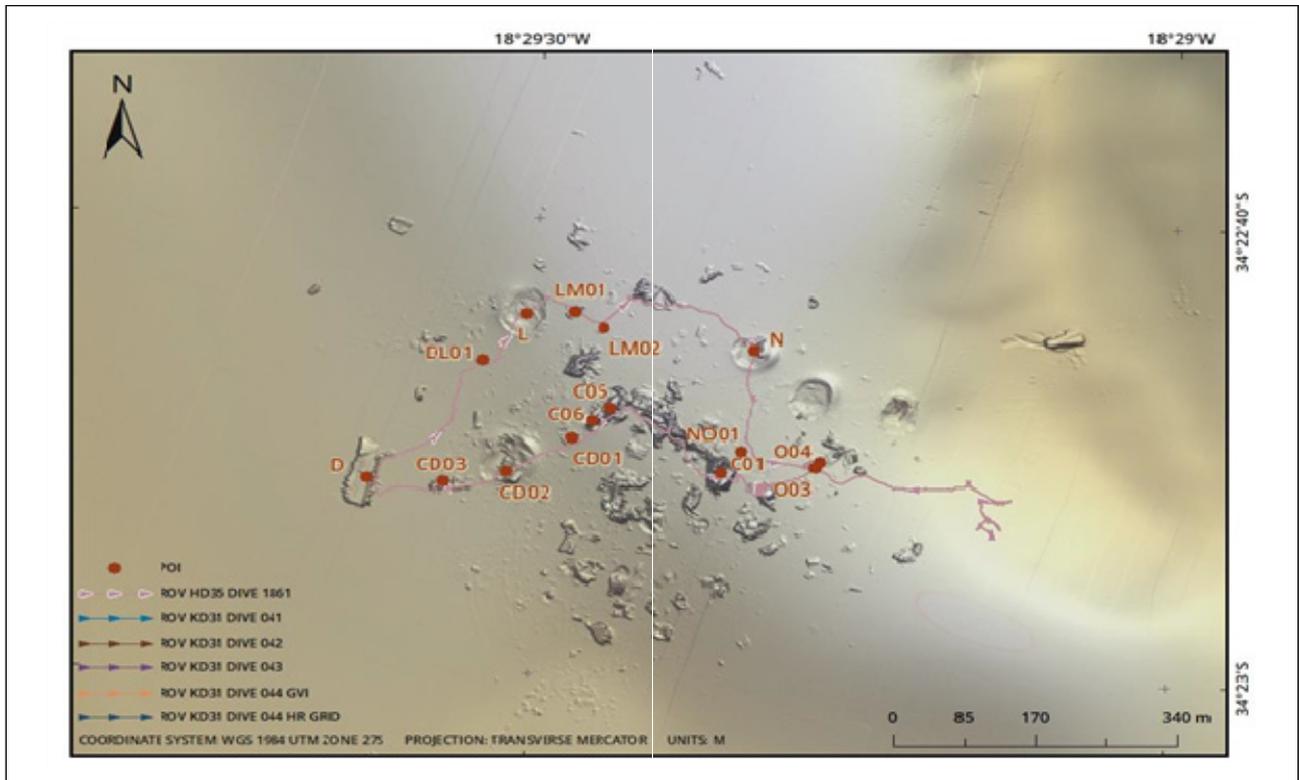
- 8.4.2 또한, 승인받은 화물적재 방식으로 화물을 적·양하하고, 승인받지 않는 방식으로 화물을 적·양하 하는 경우에는 사전에 선박검사기관에 검토 또는 승인을 요청하여야 한다.
- 8.4.3 선박소유자인 폴라리스쉬핑은 선박의 검사상태 유지, 적절한 화물적재 등과 관련하여 안전관리매뉴얼에 세부 절차를 마련하고 있으므로, 이를 철저히 이행하고, 주기적으로 이행 상태를 확인해야 한다.

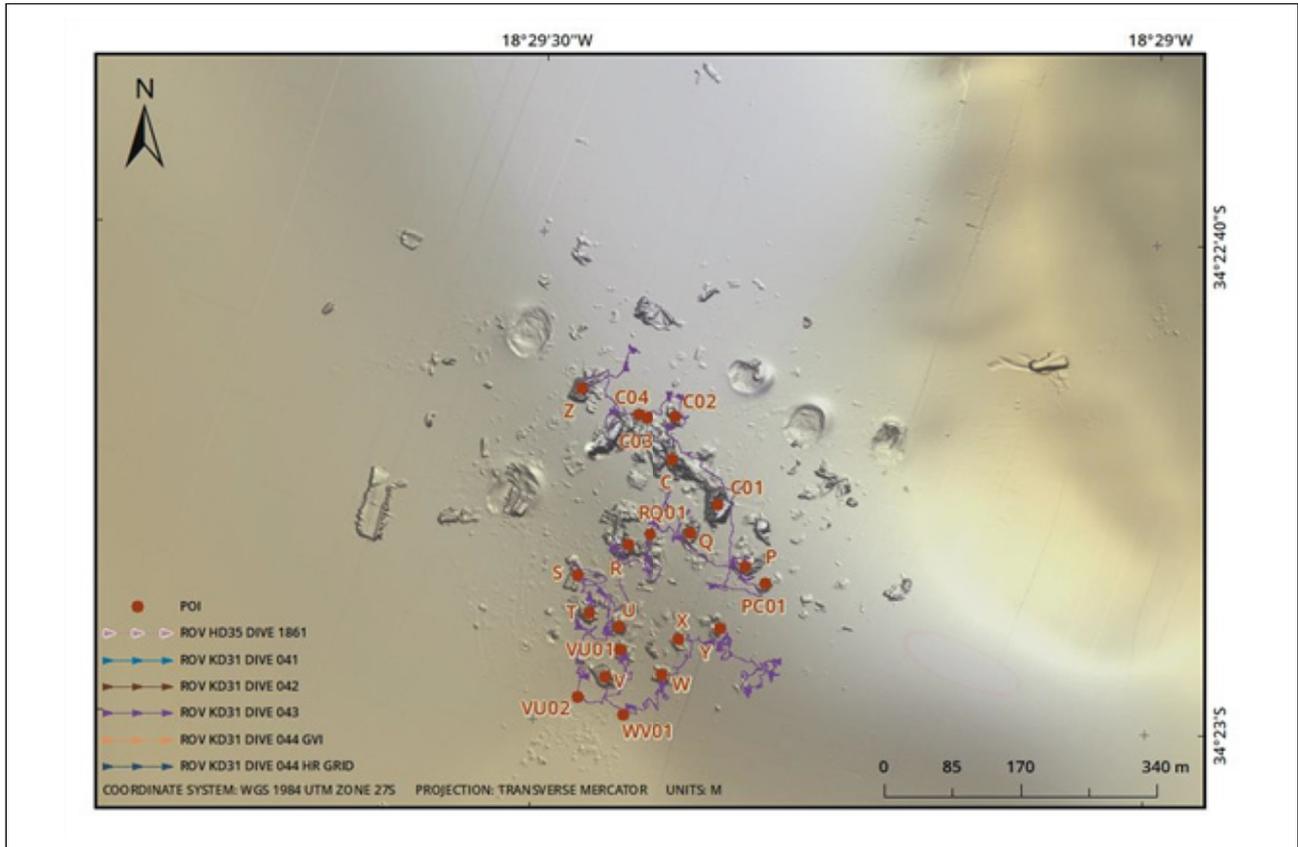
section

부록

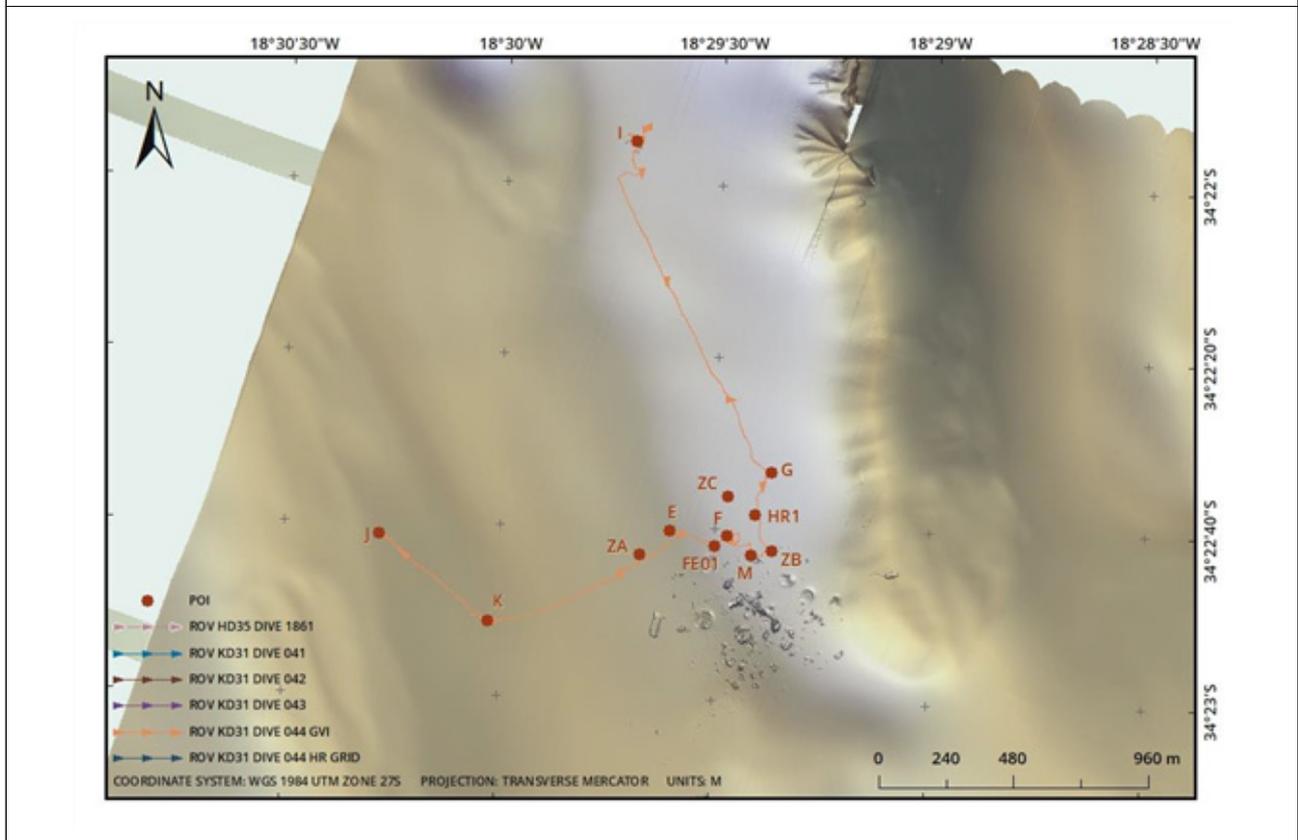
상세 육안조사 결과

I. 상세 육안조사 경로





③ ROV 이동경로

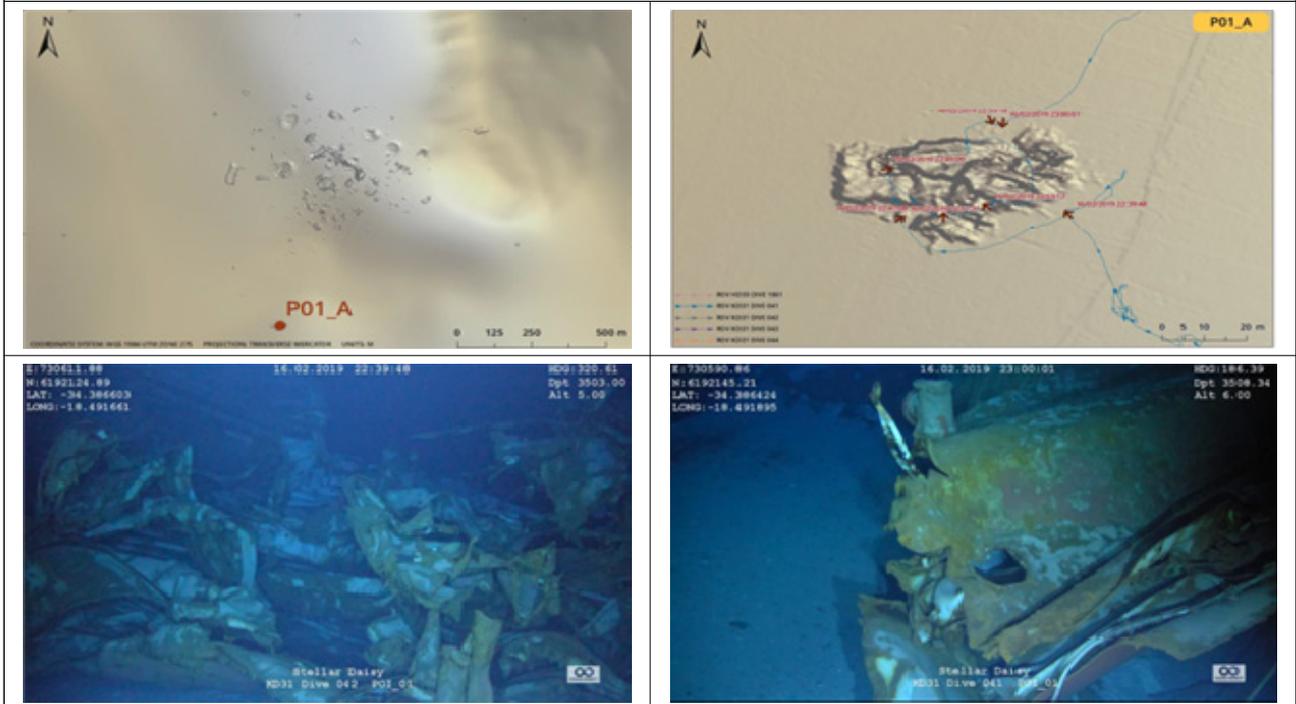


④ ROV 이동경로

II. 상세 육안조사 결과

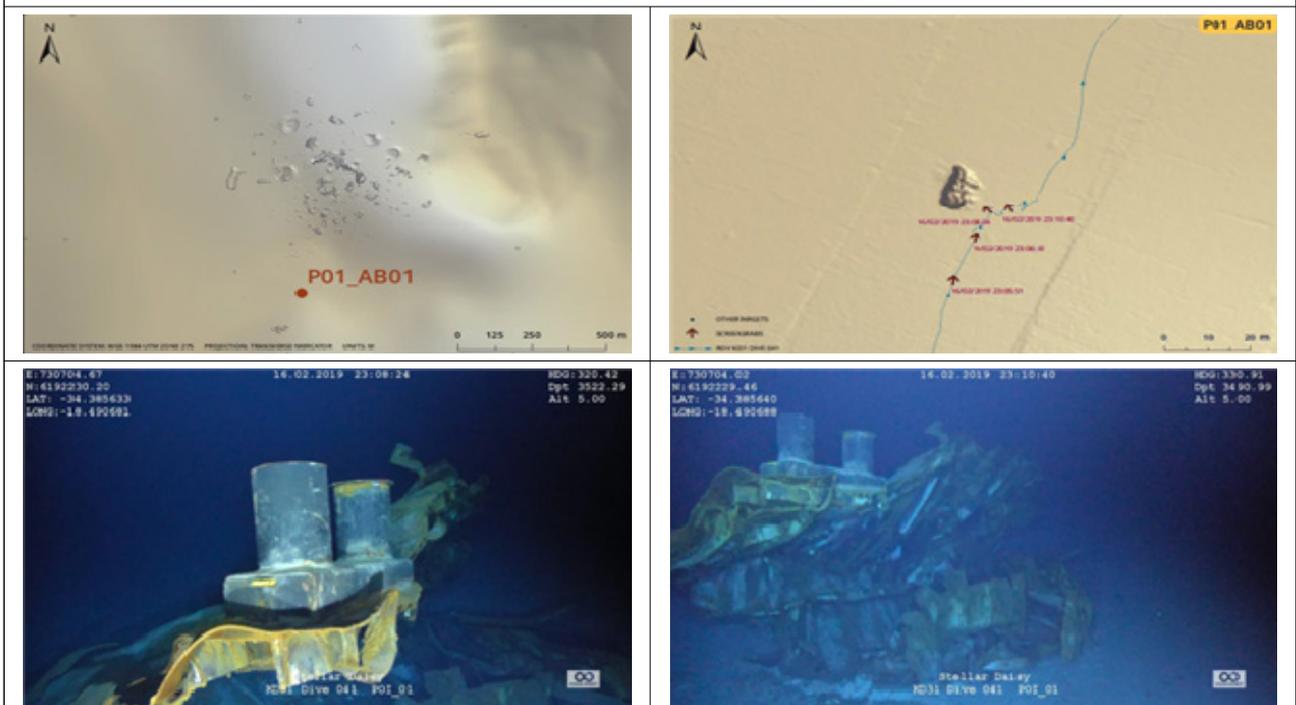
1. P01_A

작은 보강재가 다수 부착된 보강판 구조물로 심하게 찢어지고 구겨져 있음. 선체 내 격벽 구조물의 일부로 추정됨



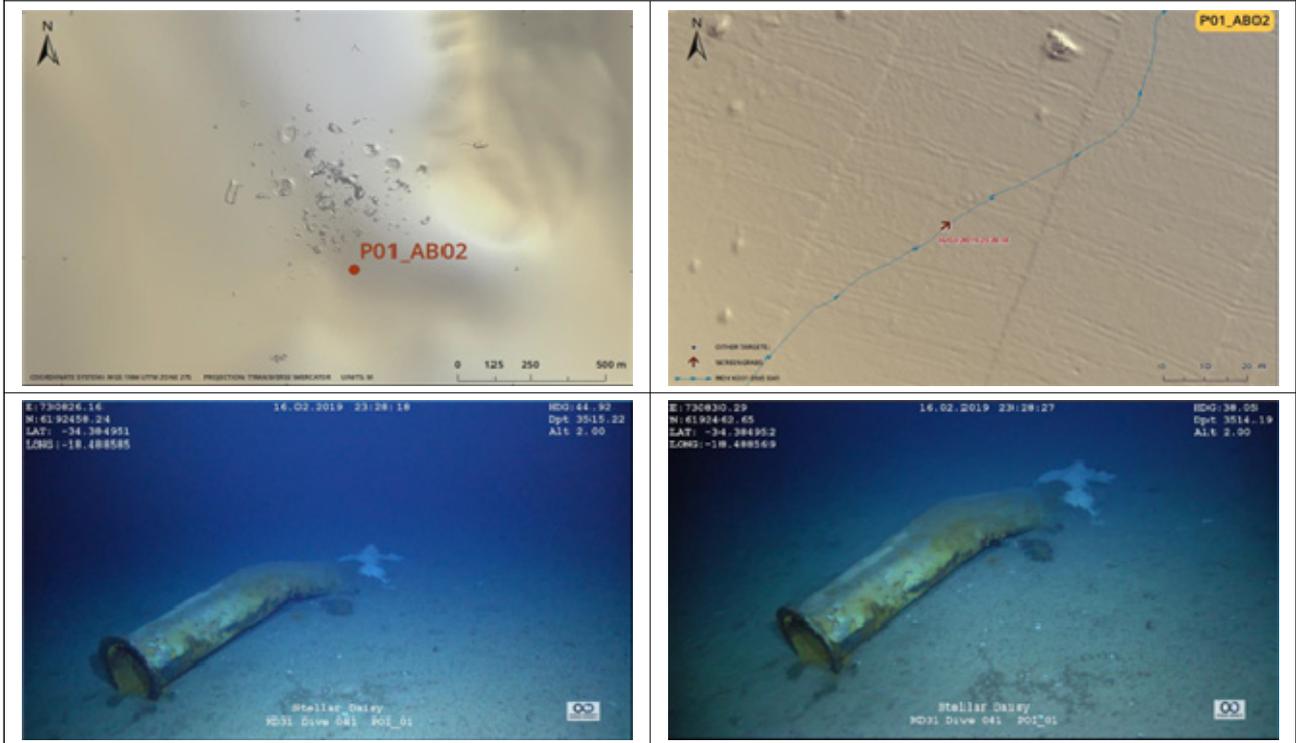
2. P01_AB01

계류 볼라드가 있는 갑판 일부로 추정됨



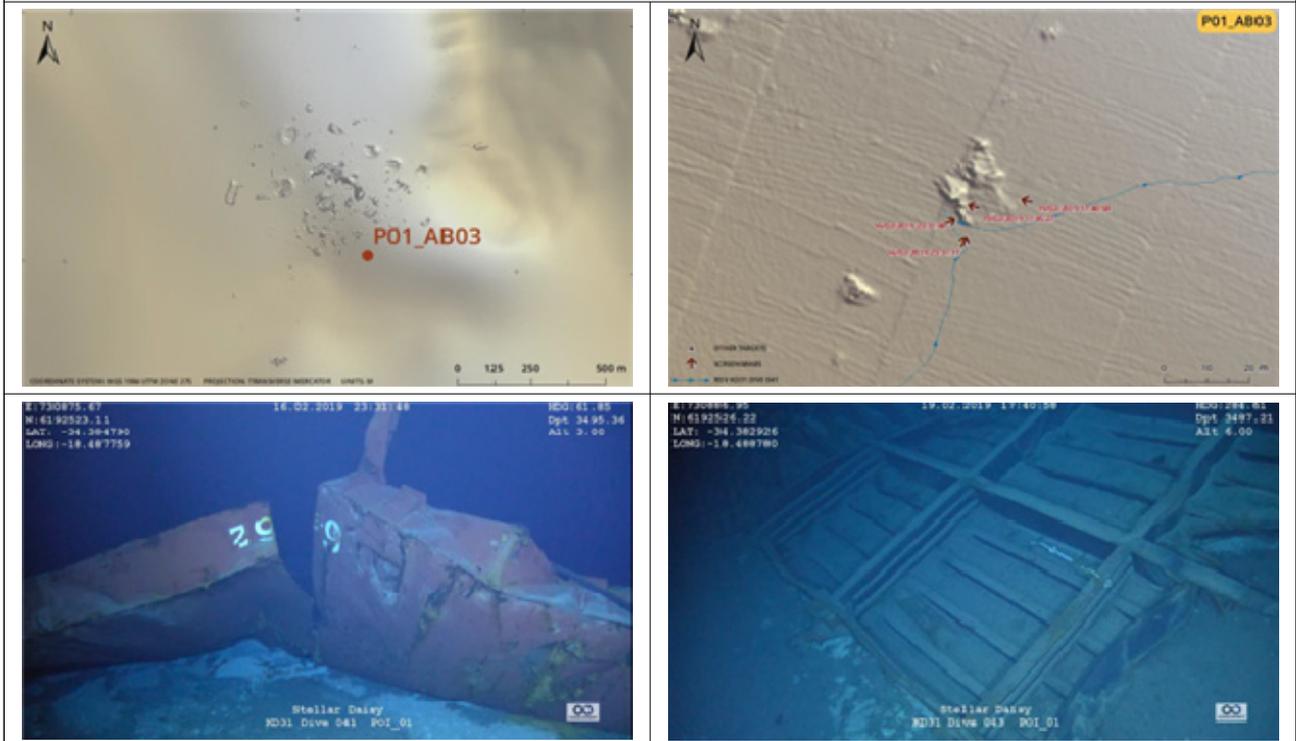
3. P01_AB02

한쪽이 짓눌려서 끊어진 파이프로 어느 부위인지 식별이 어려움



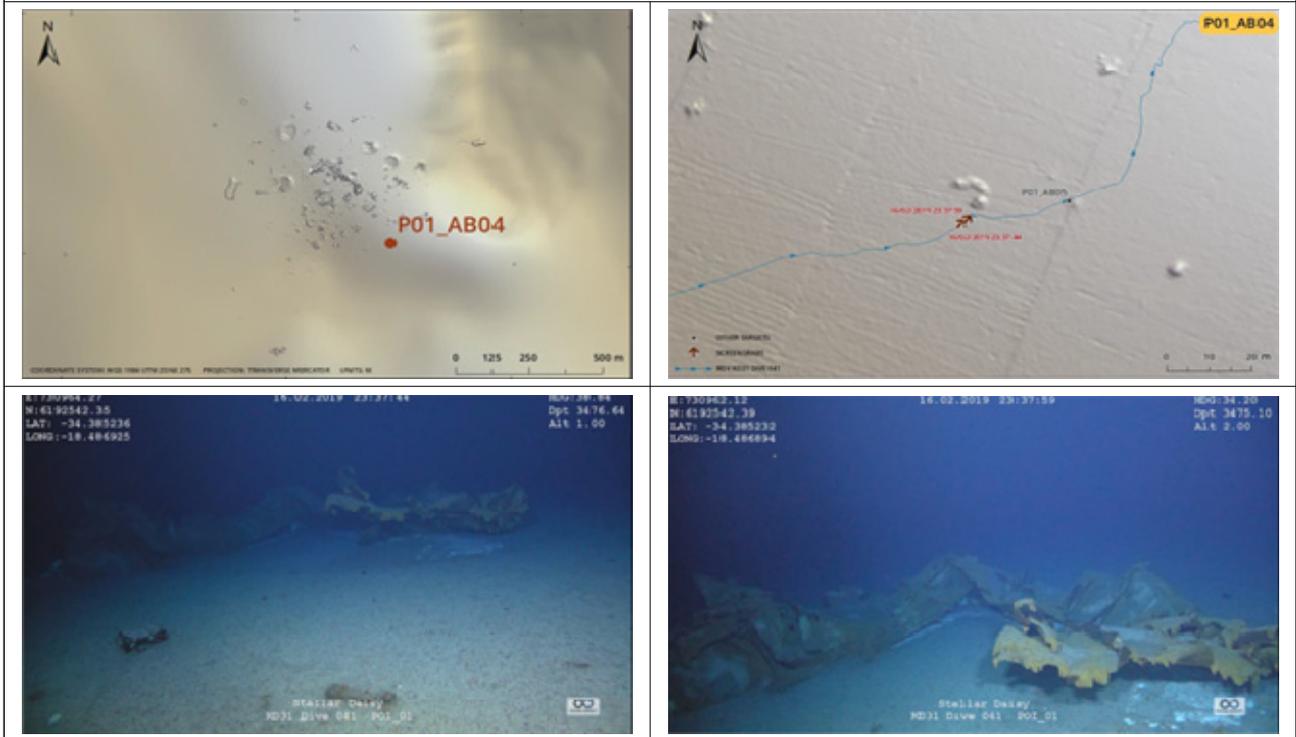
4. P01_AB03

화물창 덮개(Cargo Hold Hatch Cover) No.6-2로 식별됨



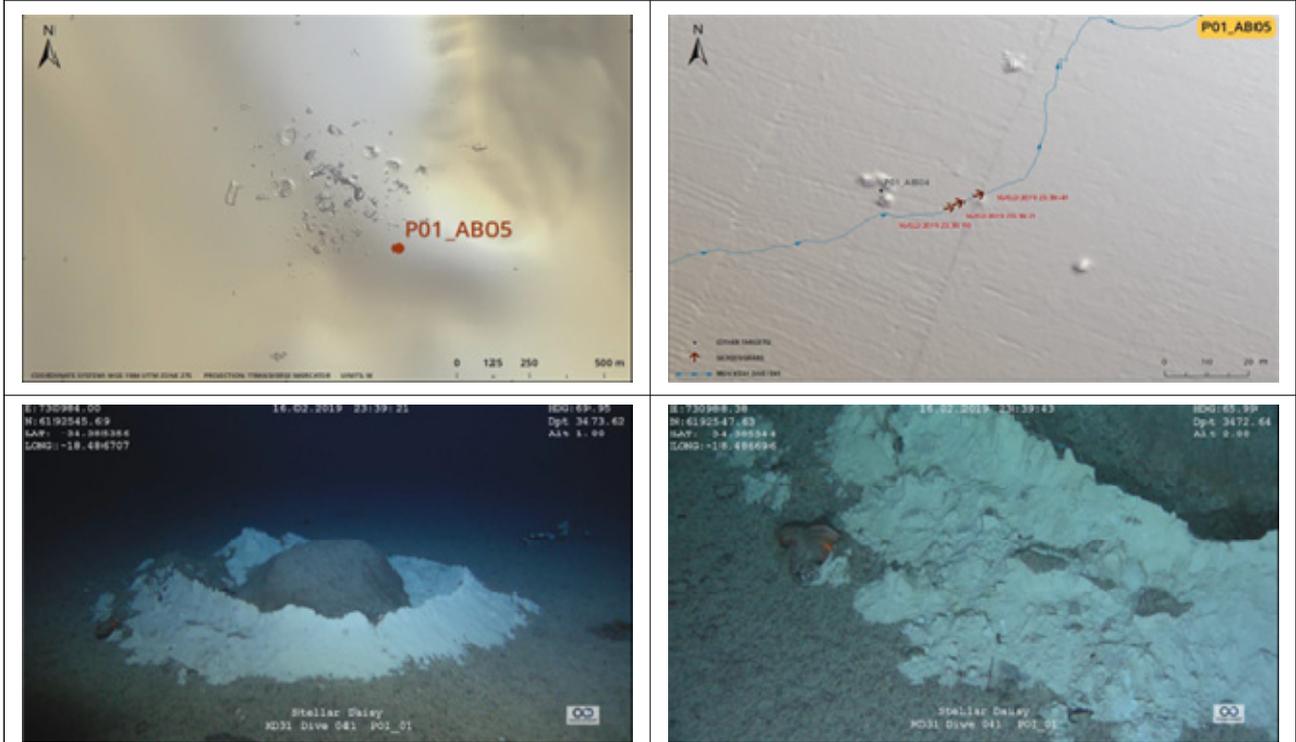
5. P01_AB04

보강판이 보강재 방향으로 길게 찢어진 모습으로 어느 부위인지 식별이 어려움



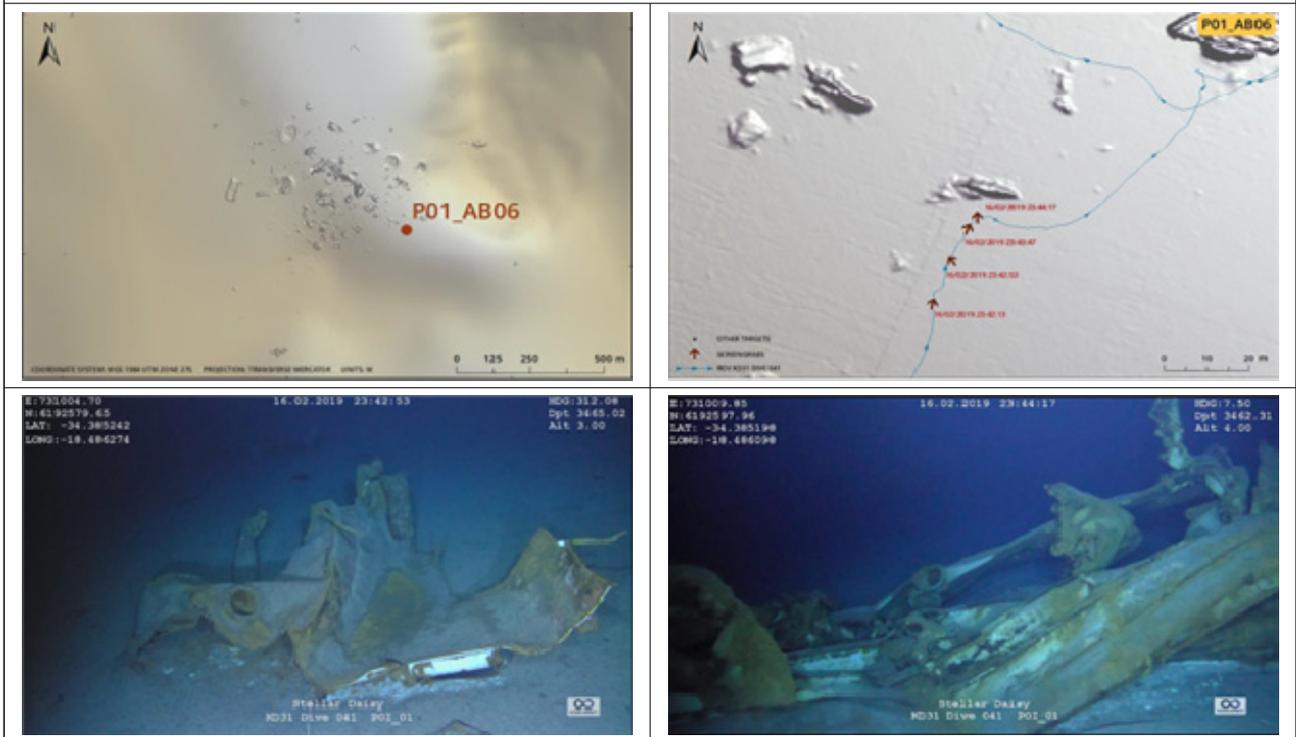
6. P01_AB05

철광석 화물이 변형 및 굳어서 바닥과 충돌한 크레이터 현상으로 추정됨



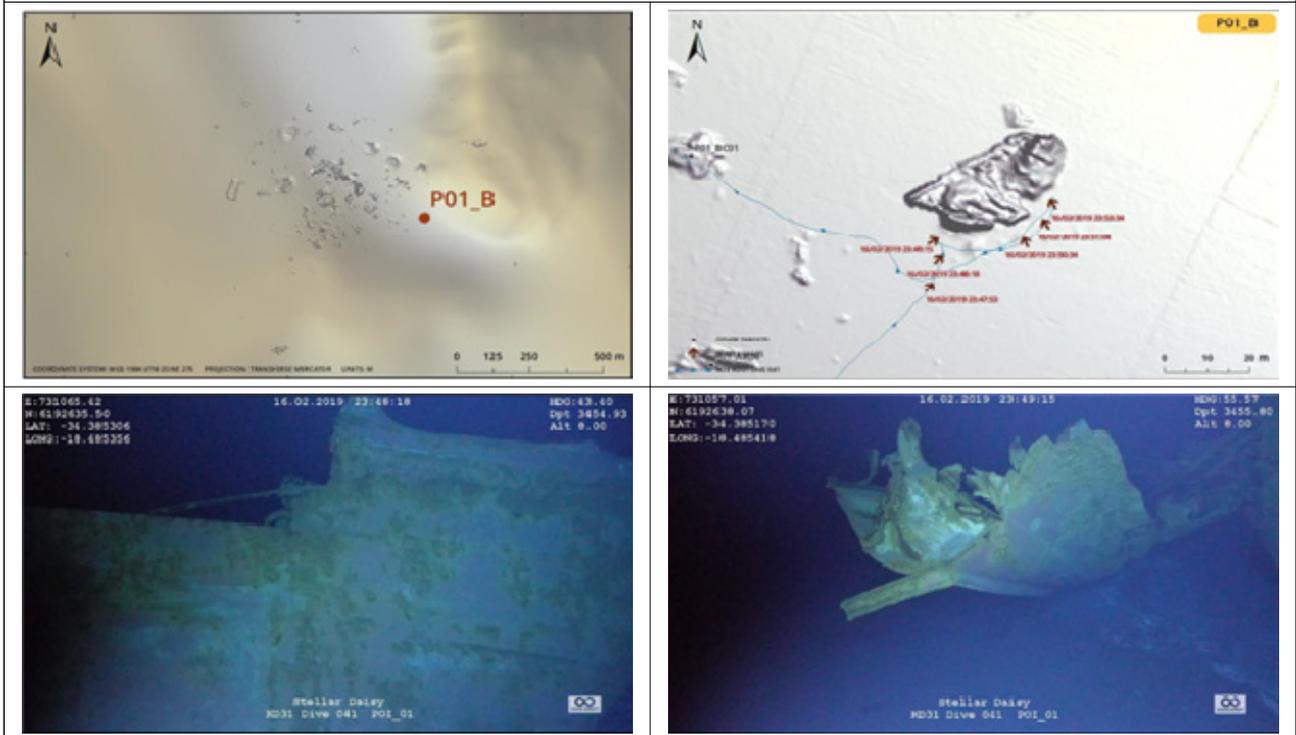
7. P01_AB06

찢어지고 구겨진 보강판 구조물이며, 선체 내부 격벽 구조 일부로 추정됨



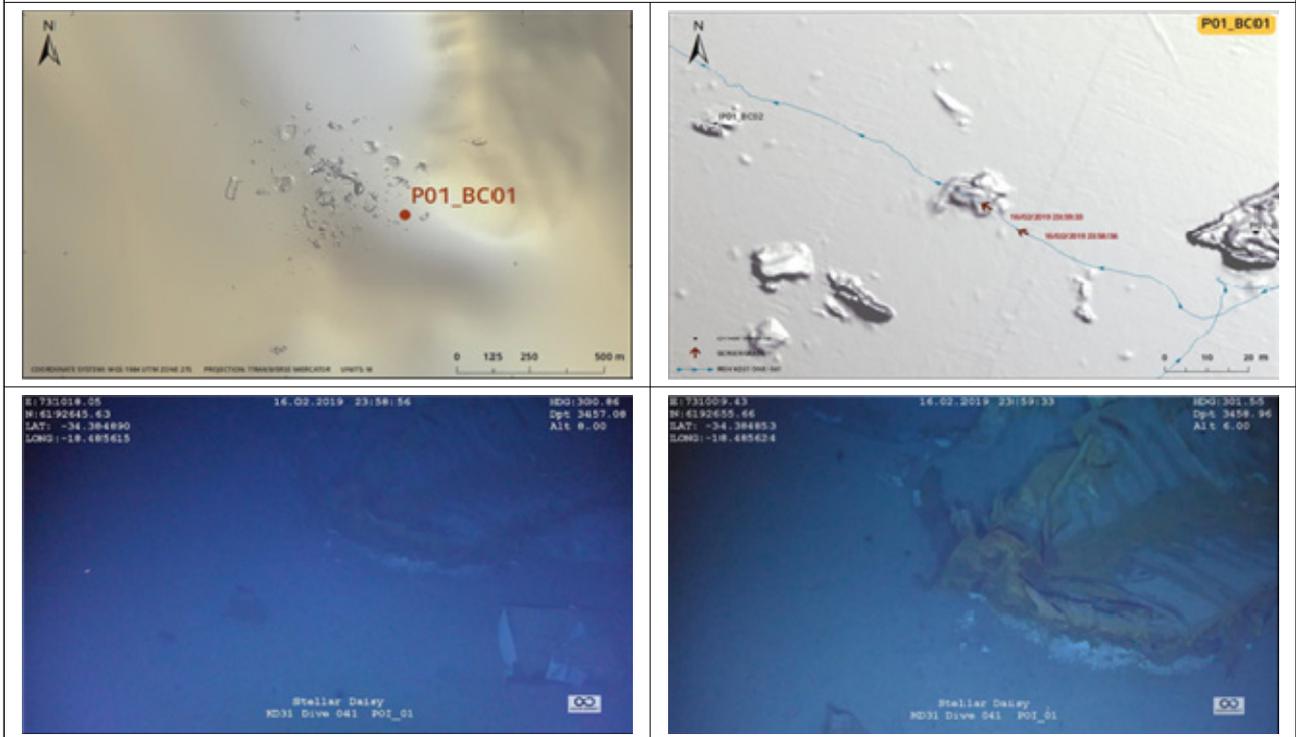
8. P01_B

찢어지고 구겨진 보강판 구조물이며, 선체 바닥의 일부 구조물로 추정됨(단면의 형태가 깔끔하게 잘리지는 않은 것으로 추정됨)



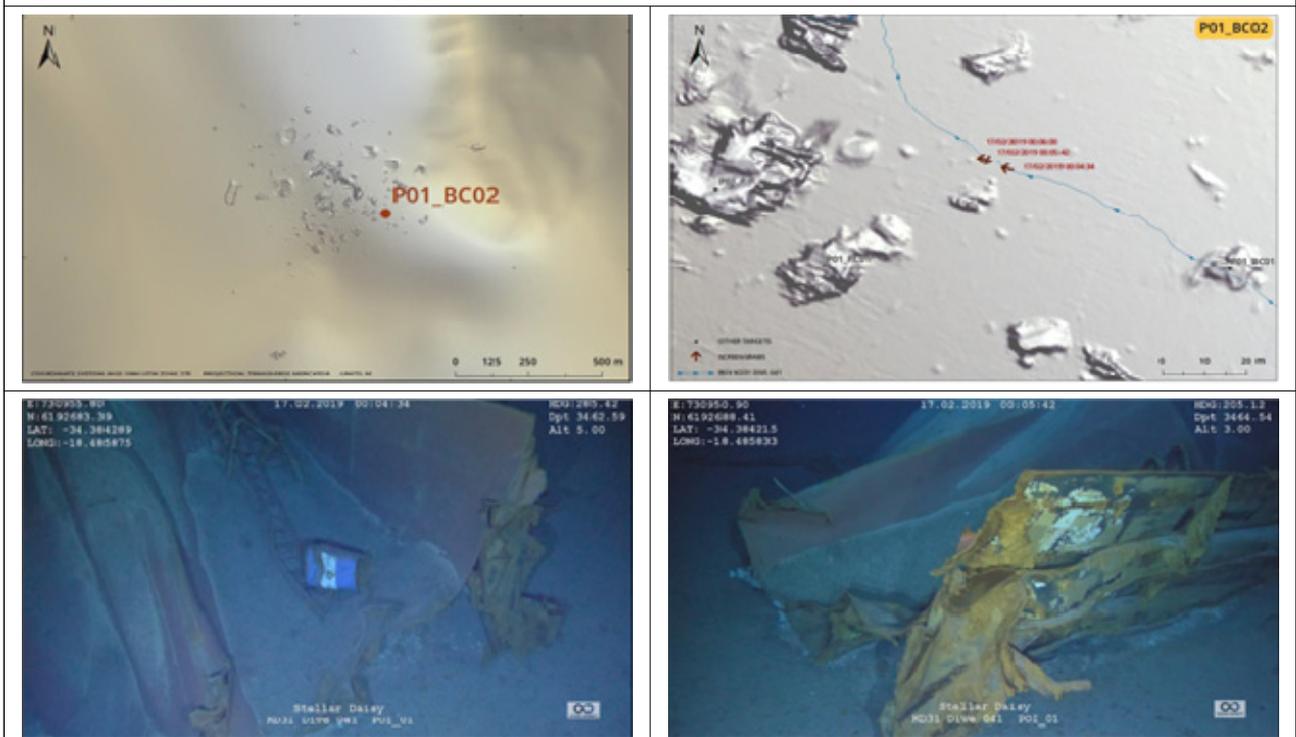
9. P01_BC01

찢어지고 구겨진 보강판 구조물로 선체 외판 구조의 일부로서 흡수선 이하의 부위이거나 갑판 구조물로 추정됨



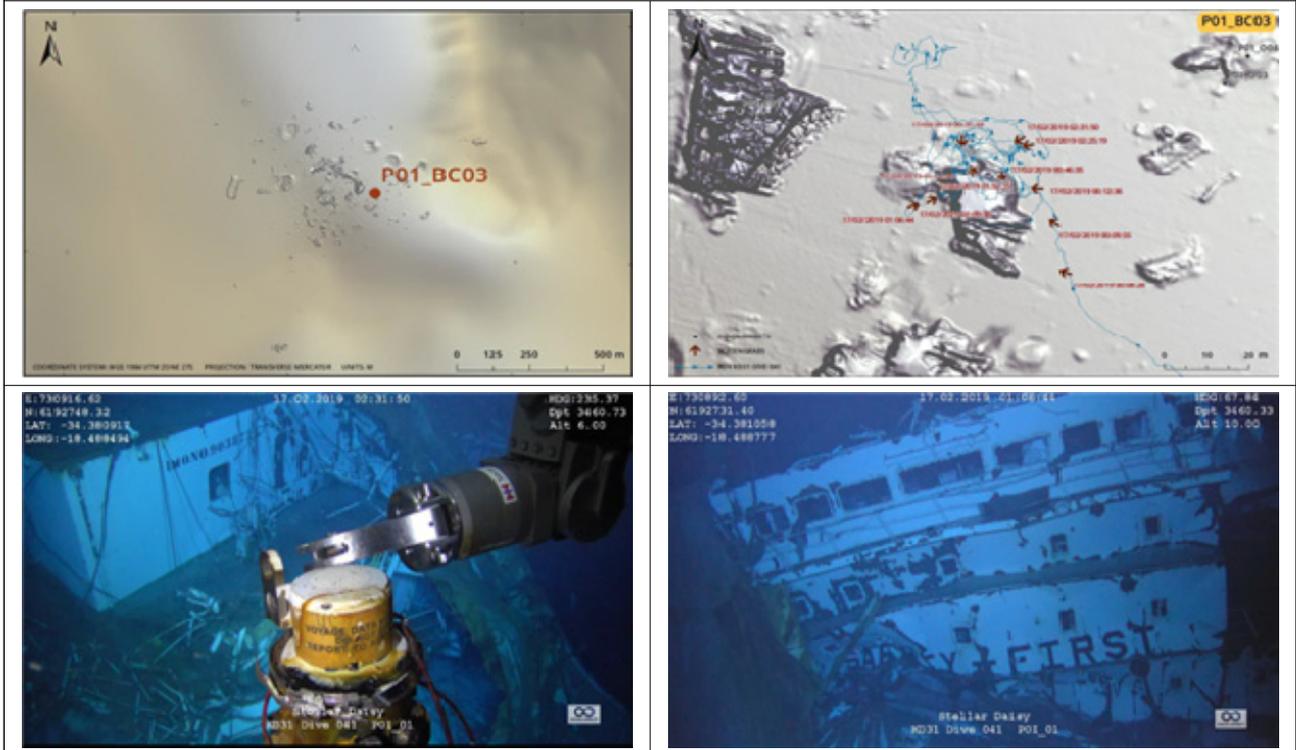
10. P01_BC02

구조물에 부착된 사다리로 추정되며, 사고선박의 만재흡수선 외판경계 또는 상갑판과 외판의 경계에 해당하는 위치로 추정됨



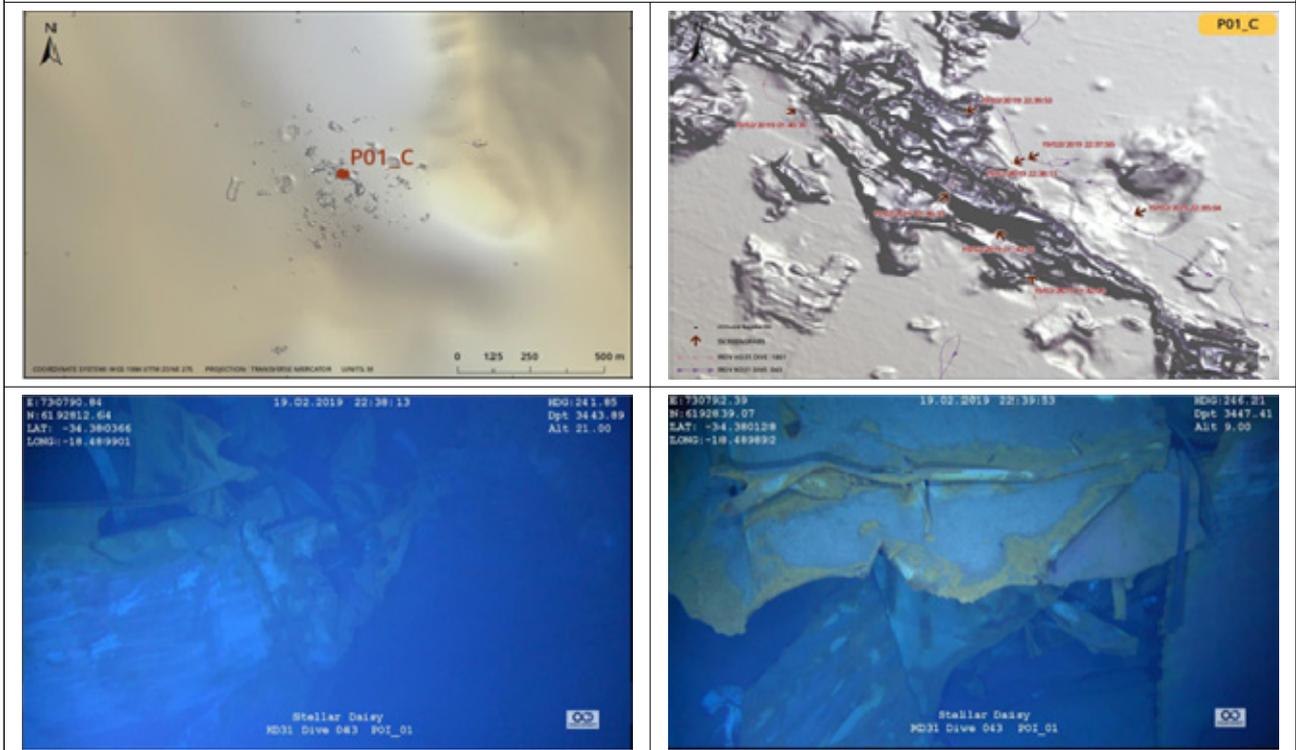
11. P01_BC03

선박 선교(Bridge) 일부로 식별됨



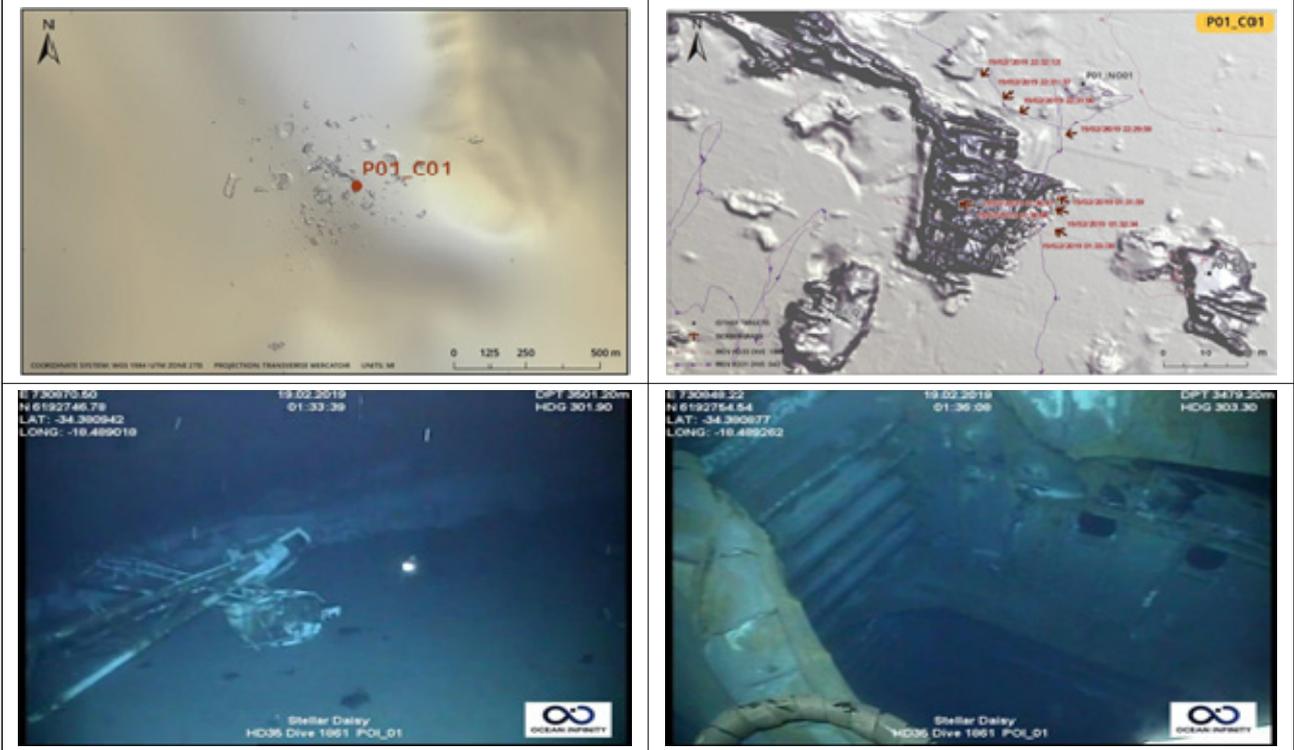
12. P01_C

찢어지고 구겨진 보강판 구조물이며, 흰색의 큰 보(Beam) 구조물이 보이나 식별은 어려움



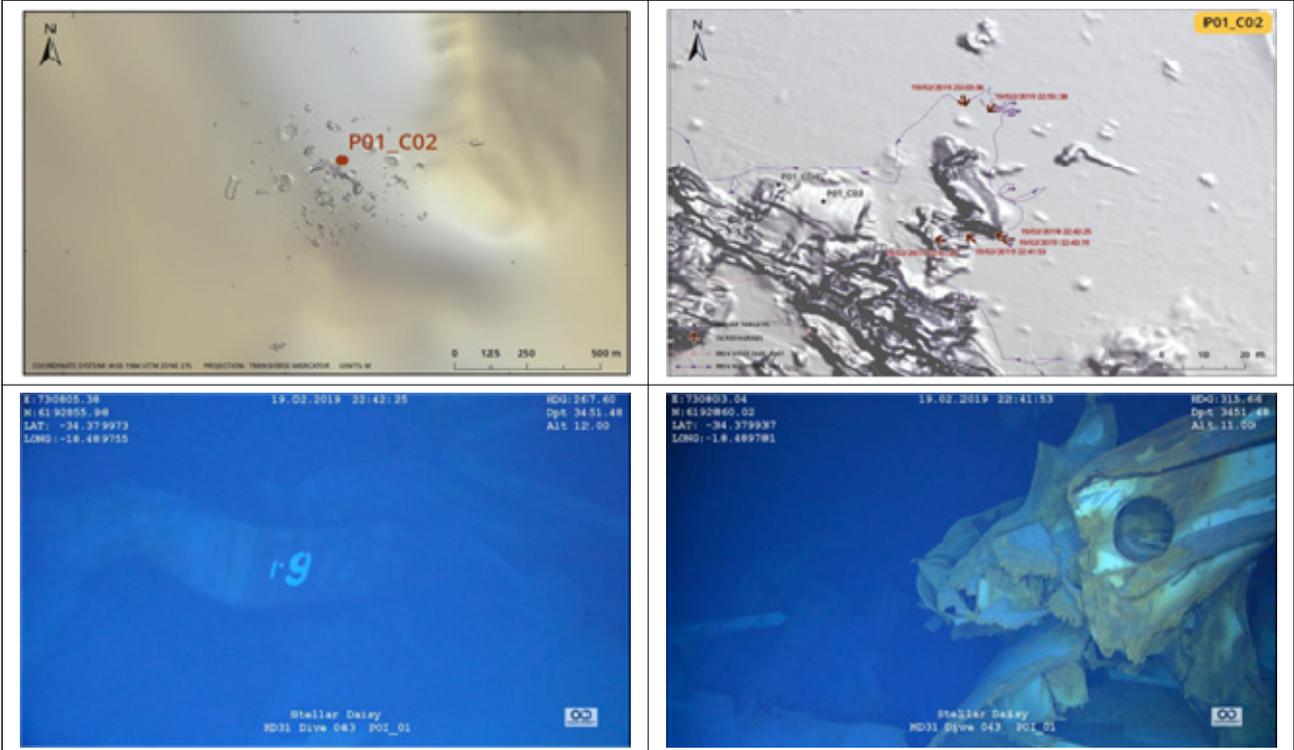
13. P01_C01

선수부 및 선수부 구조물(Bow Mast) 일부로 식별됨



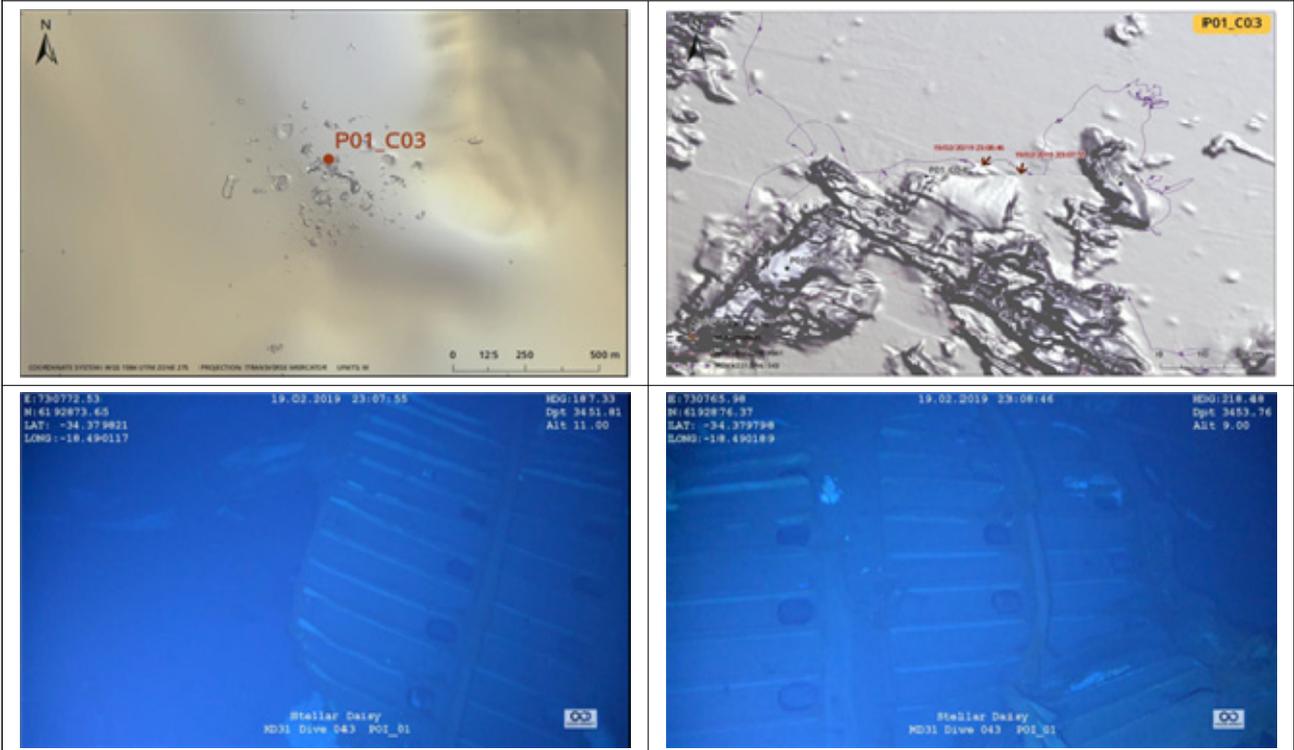
14. P01_C02

화물창 덮개(Cargo Hold Hatch Cover) No.6-1로 식별됨



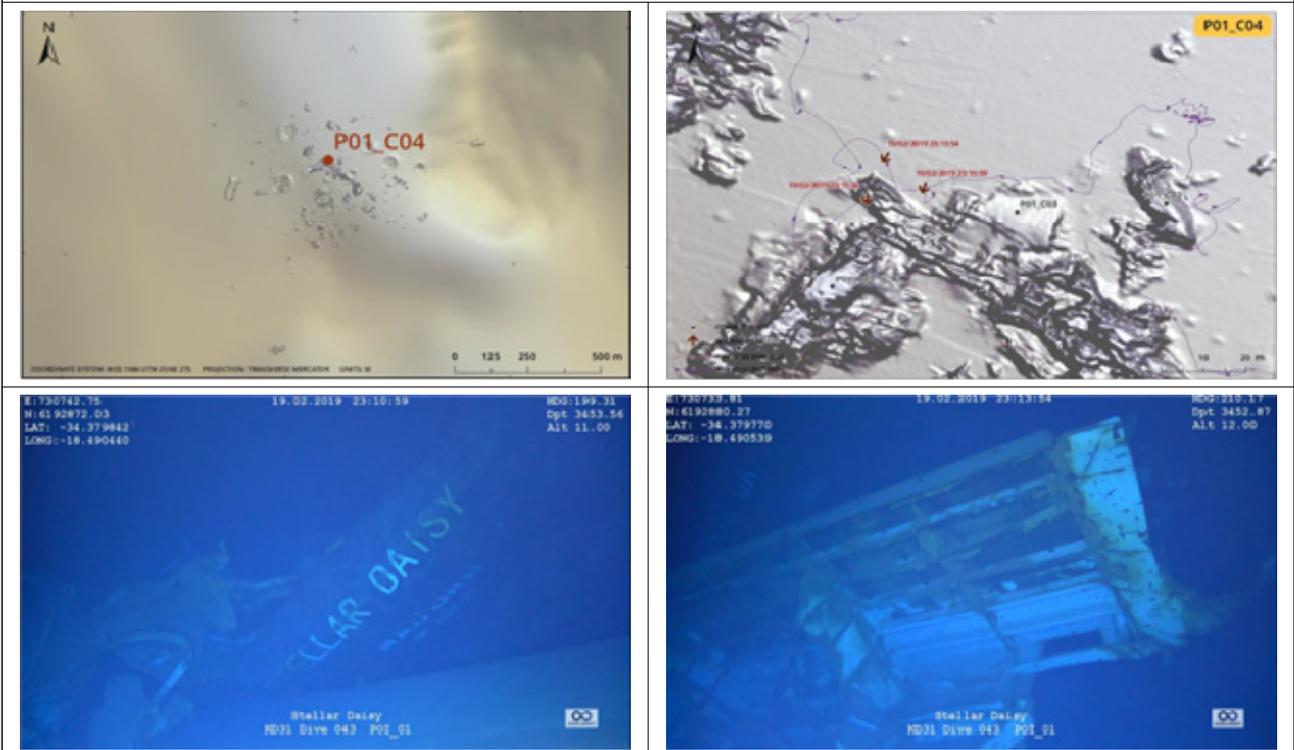
15. P01_C03

선박평형수 탱크 내 제수격벽(Swash Bulkhead)으로 추정됨



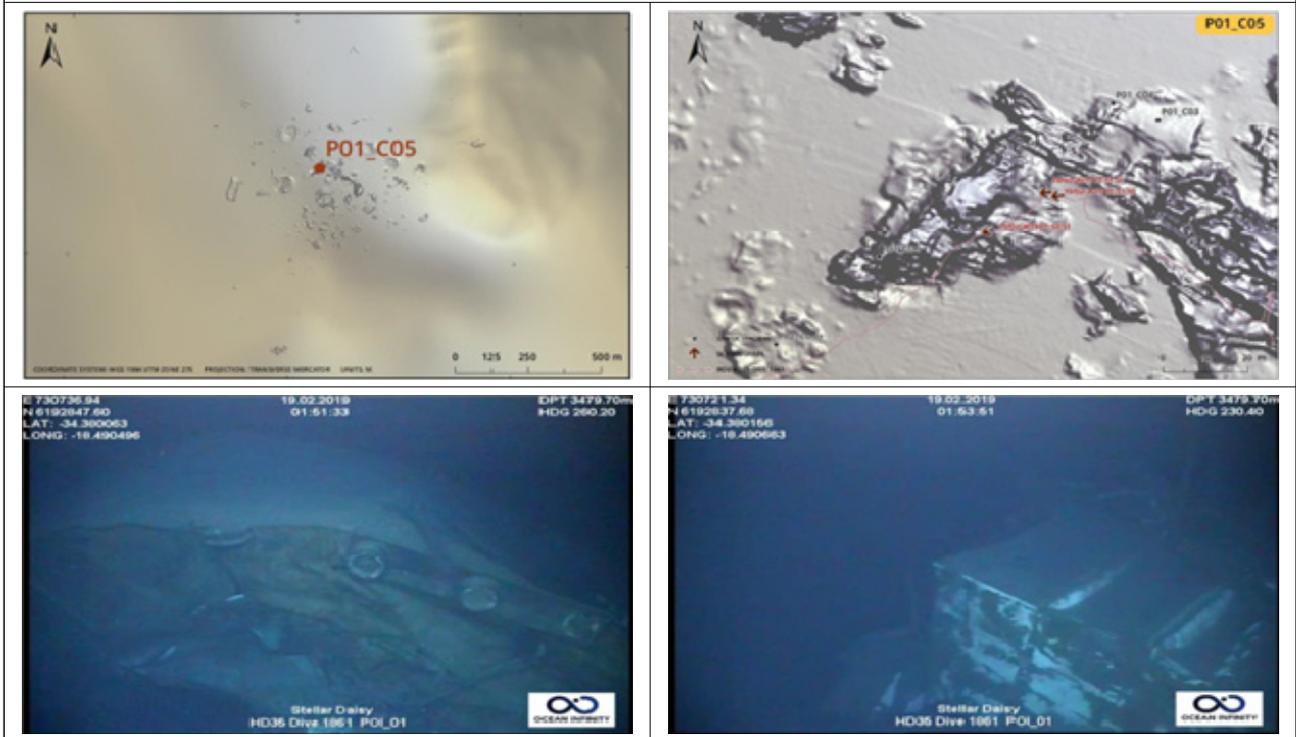
16. P01_C04

선미 구조물 일부로 식별됨



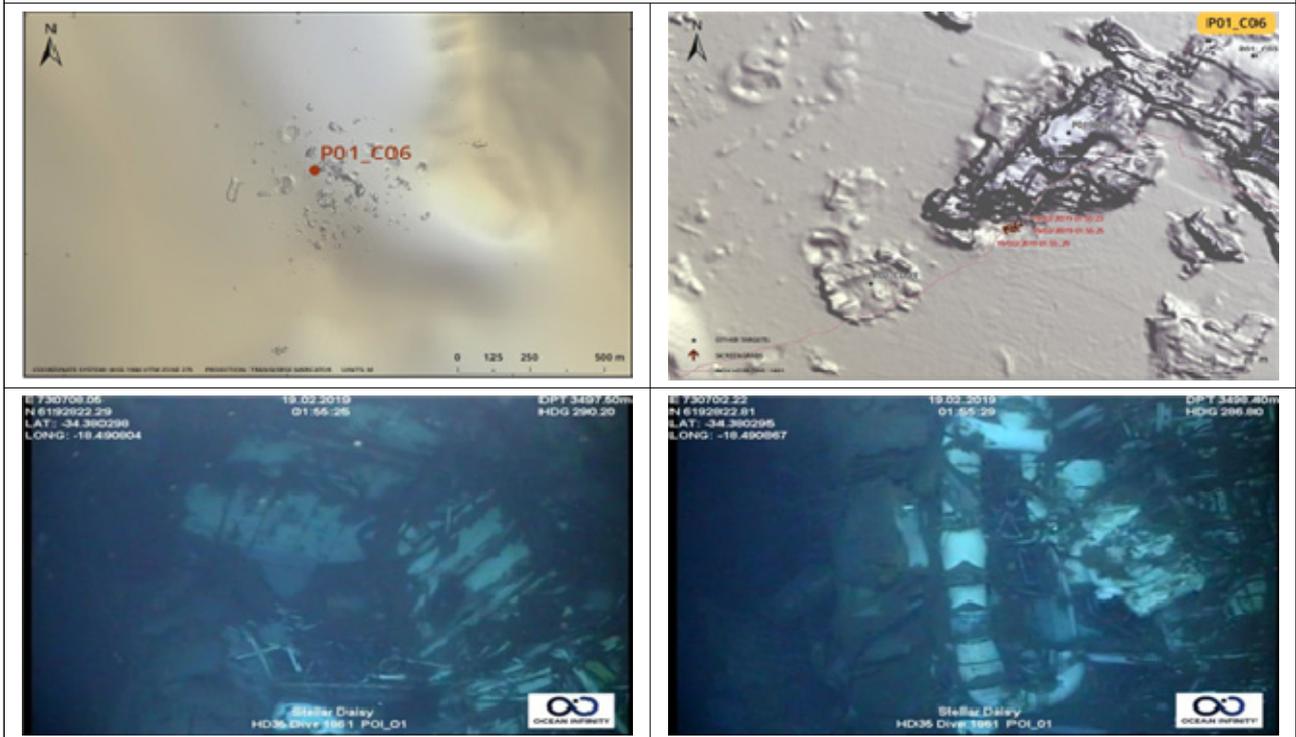
17. P01_C05

계류선을 묶는 볼라드 구조물이 관찰되고, 붉은색 페인트가 칠해진 면으로 보아 갑판 및 선측부 구조물로 추정됨



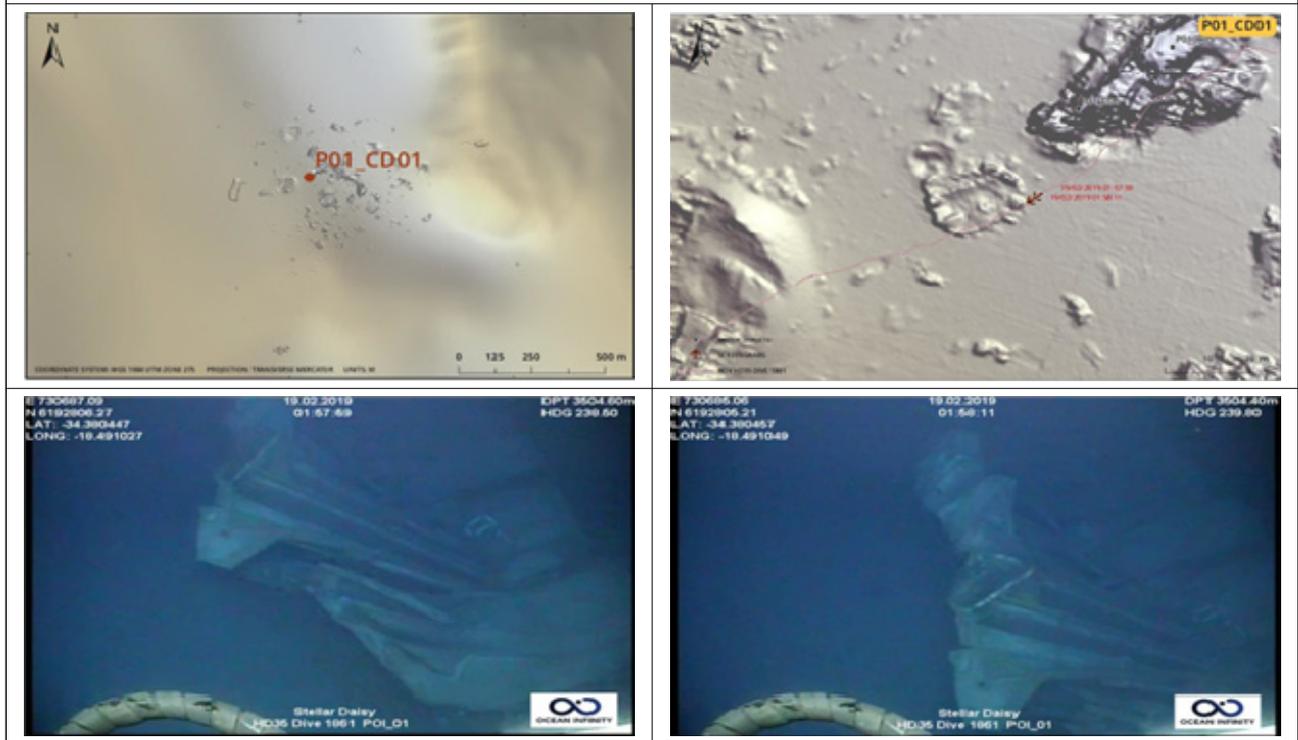
18. P01_C06

가느다란 다수의 파이프 및 하얀색 큰 파이프 구조물이 관찰되었으며, 기관실 또는 그 인근 구조물로 추정됨



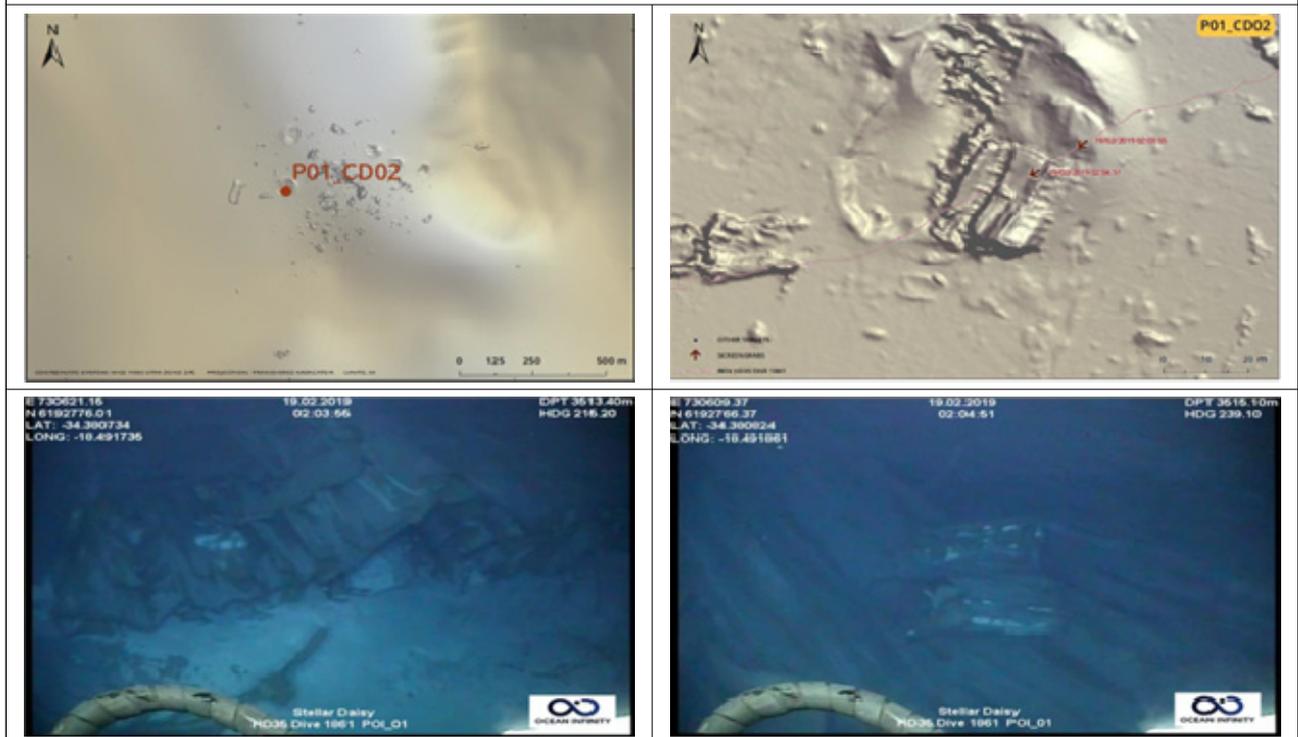
19. P01_CD01

찢어지고 구겨진 보강판 구조물 잔해로 선체부위를 추정하기 매우 어려움



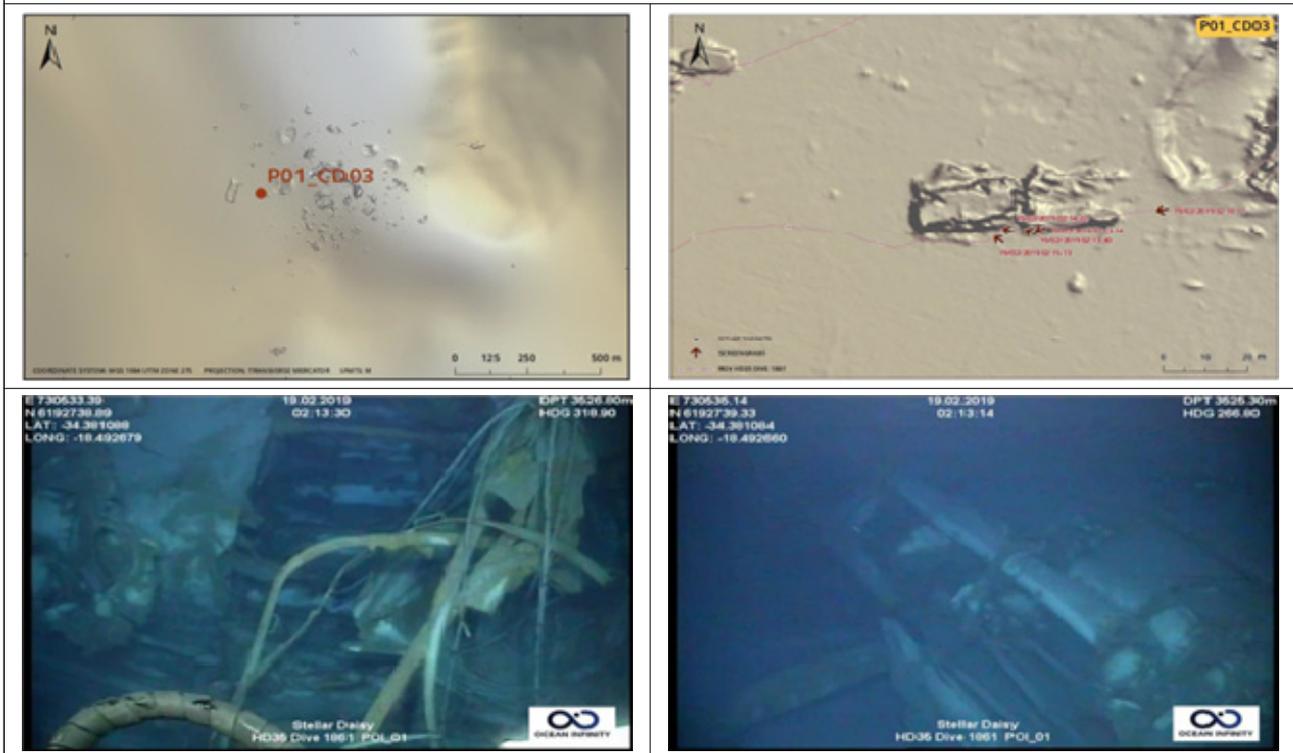
20. P01_CD02

침몰시 충돌로 생기는 것으로 추정되는 거대 크레이터 내부에 찢어지고 구겨진 보강판 구조물 잔해가 흩어져 있음



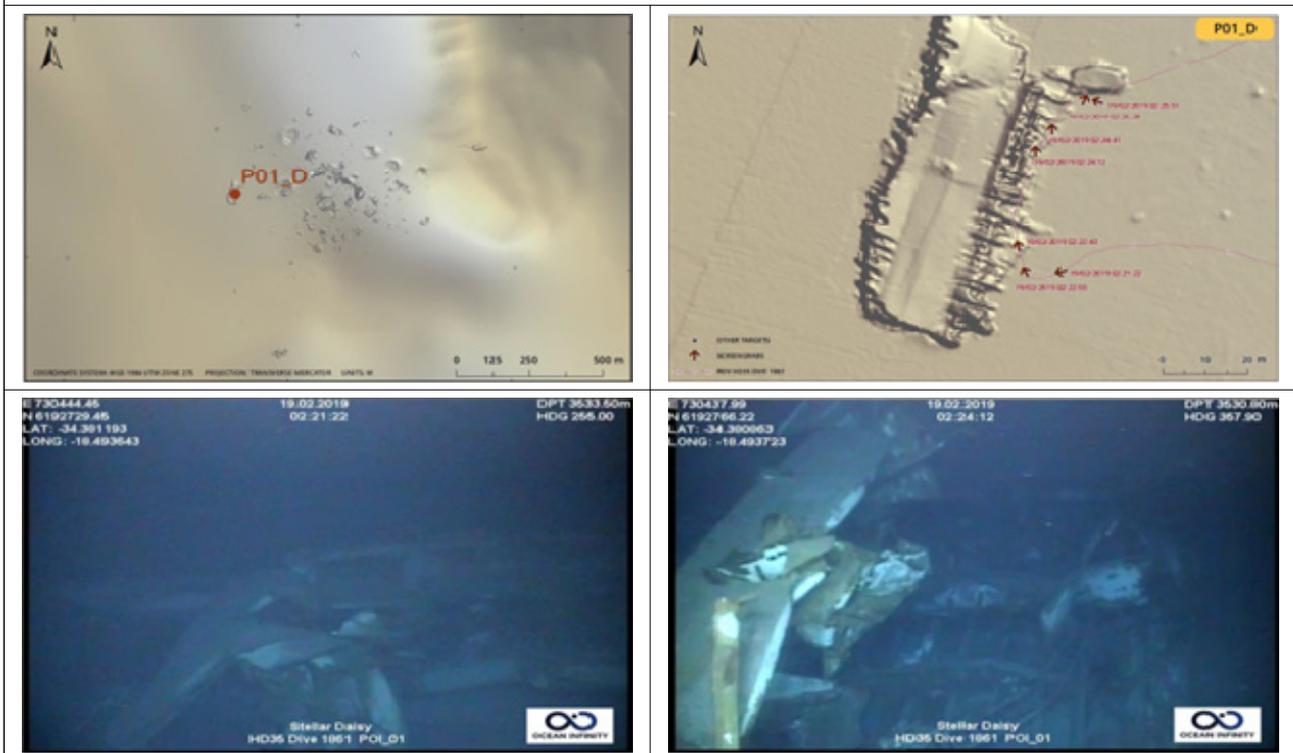
21. P01_CD03

보강판 케이블과 전선, 일부 기자재 파편이 존재하며 구조물이 모두 심하게 뒤틀려 있음



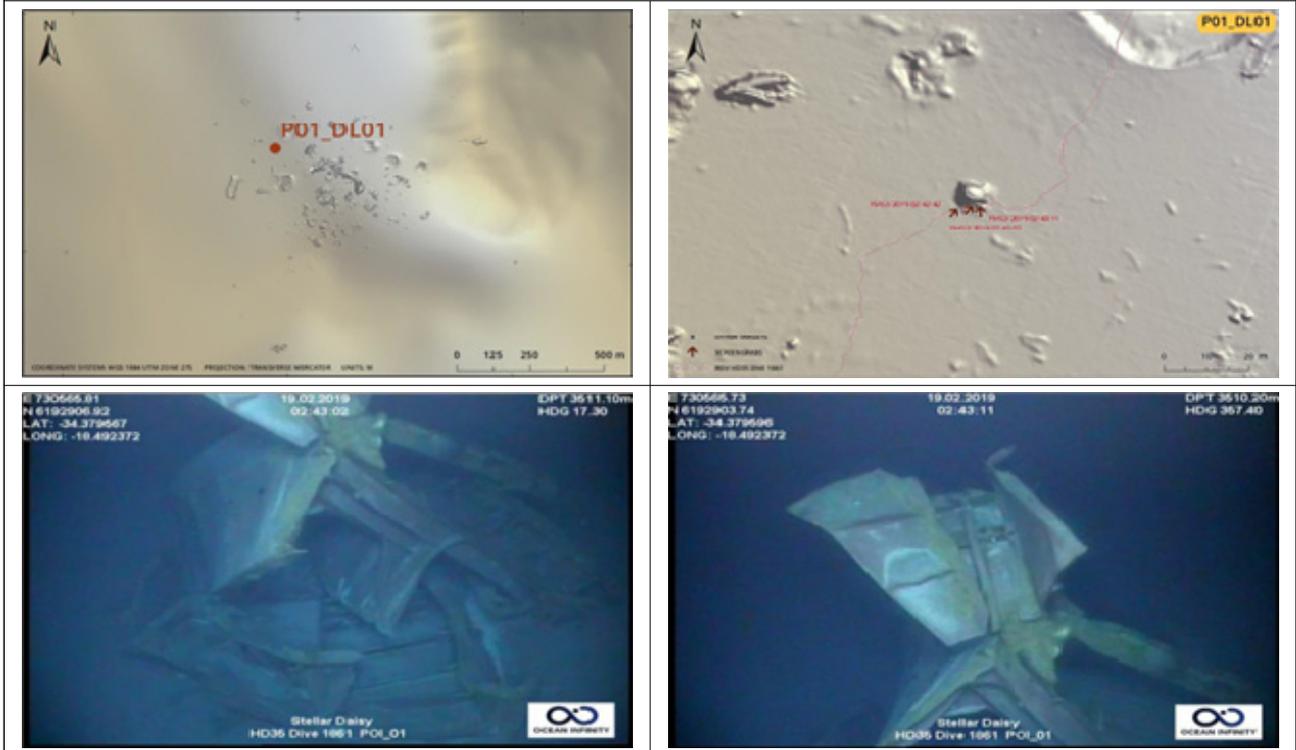
22. P01_D

화물창과 갑판 사이의 내부 구조물로 추정되나 찢겨지고 구겨져 매우 불확실함



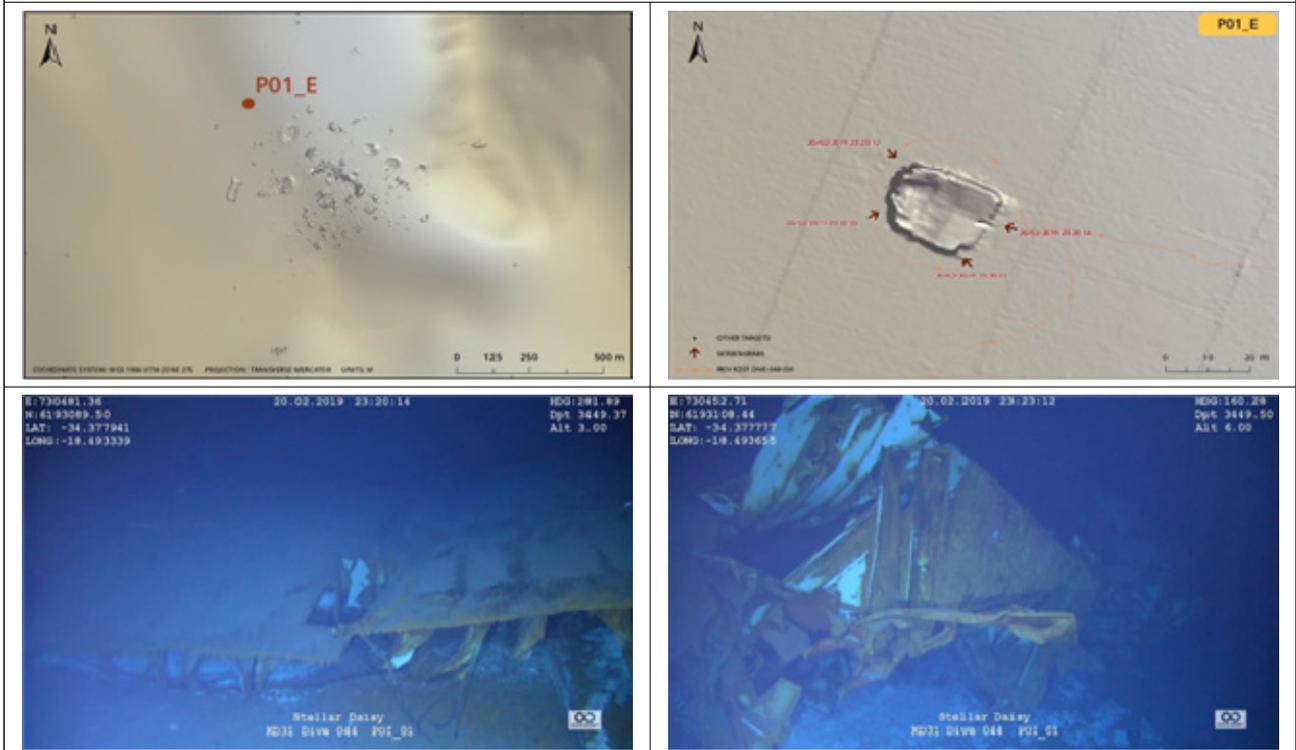
23. P01_DL01

뒤틀어진 보강재로 매우 강건한 구조물로 추정됨. 화물창 내부 격벽 관련 구조물로 추정됨



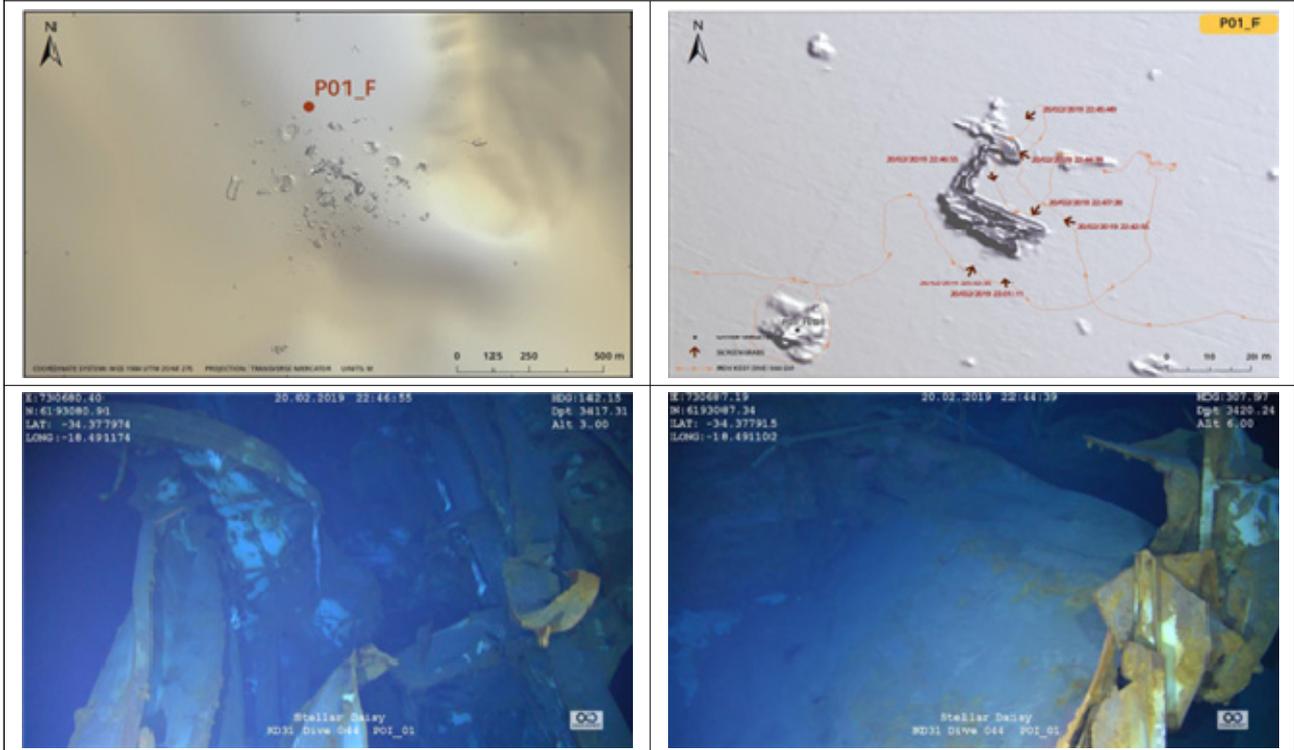
24. P01_E

구겨진 갑판 구조물로 추정되나 흡수선 아래 선체구조물의 일부일 수도 있음



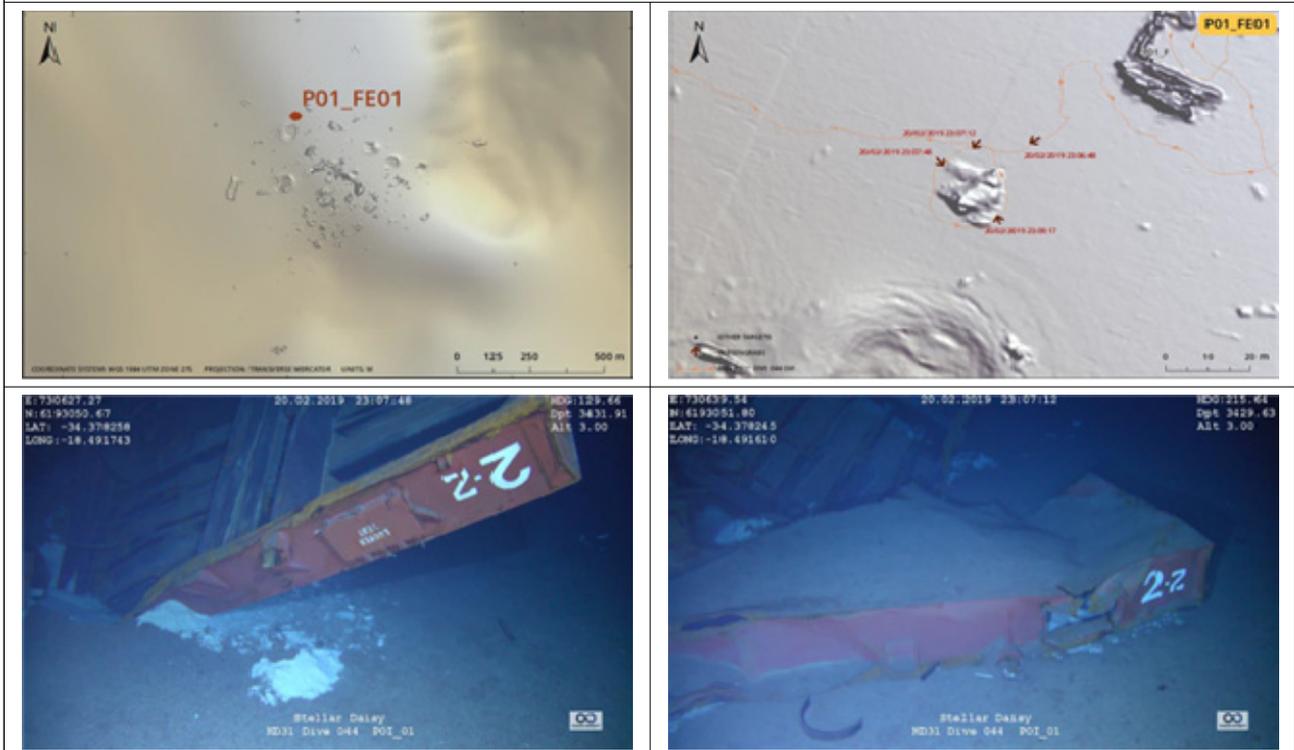
25. P01_F

찢어지고 구겨진 구조물로 선체 외부와 가까운 구조물의 일부로 추정되나 특정하기 어려움



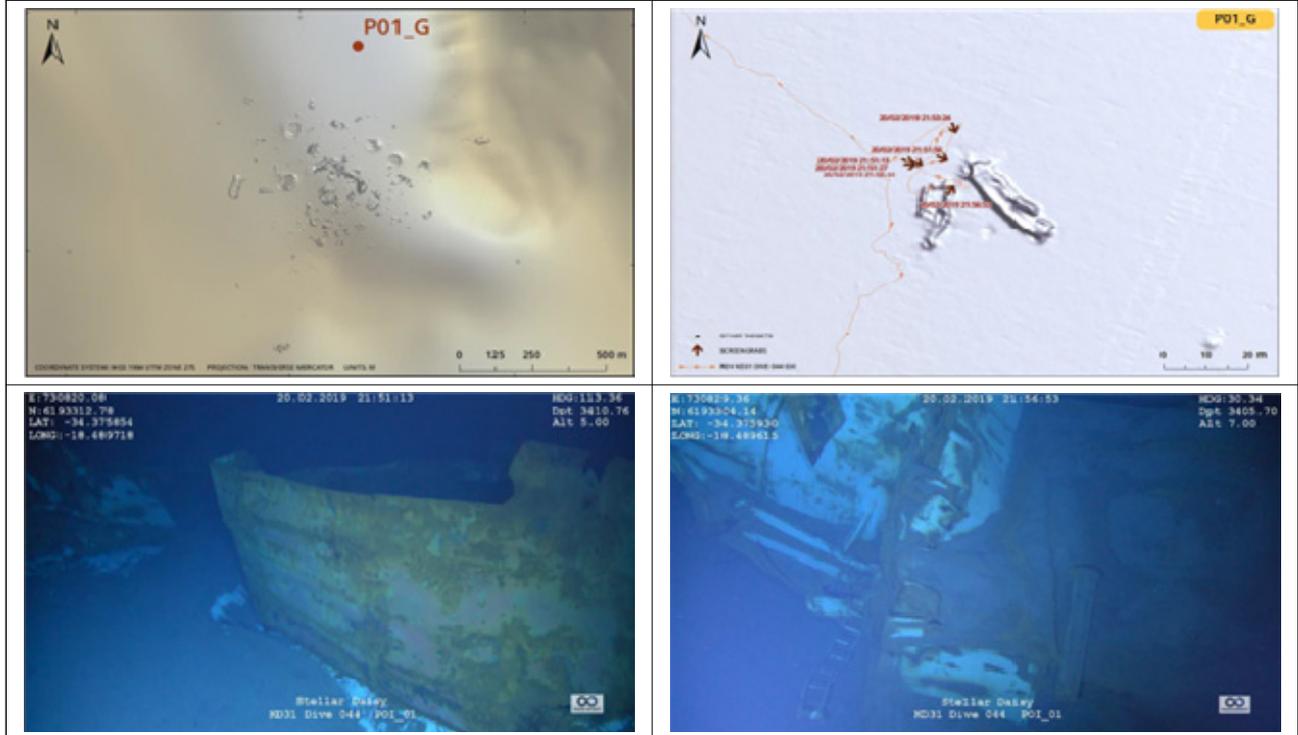
26. P01_FE01

화물창 덮개(Cargo Hatch Cover) No.2-2로 식별됨



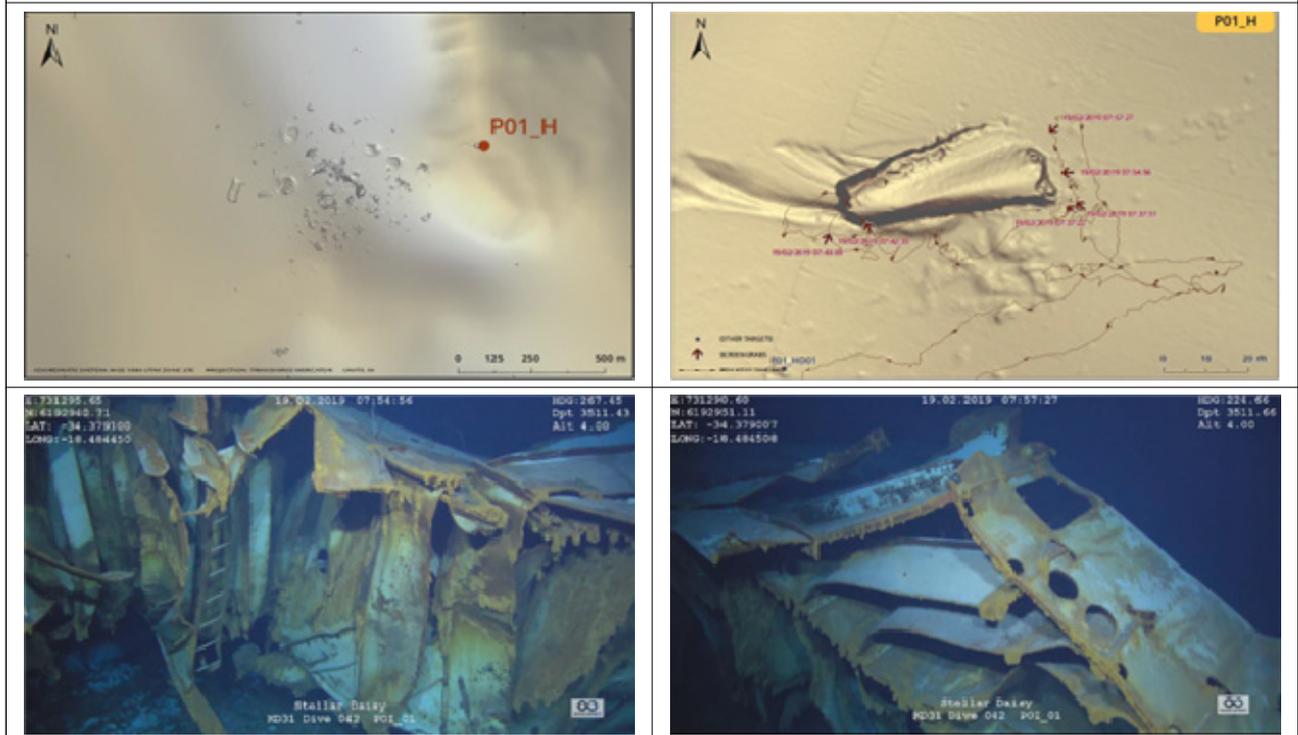
27. P01_G

찢기고 구겨진 보강판 구조물 2개로 사다리가 부착되어있으며, 선체 외판쪽 구조물 일부로 추정됨



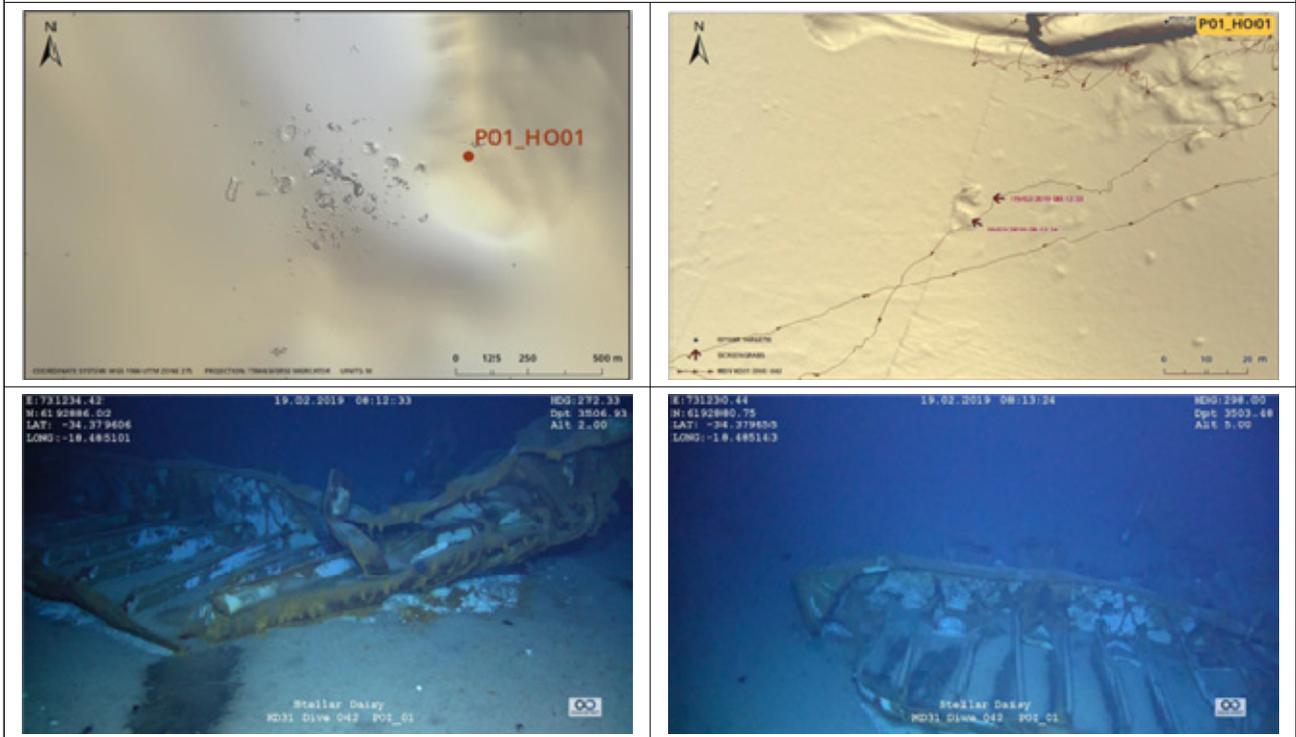
28. P01_H

사다리가 달려 있는 찢겨지고 구겨진 패널 구조물의 잔해로 선체 내부 격벽 구조의 일부로 추정됨



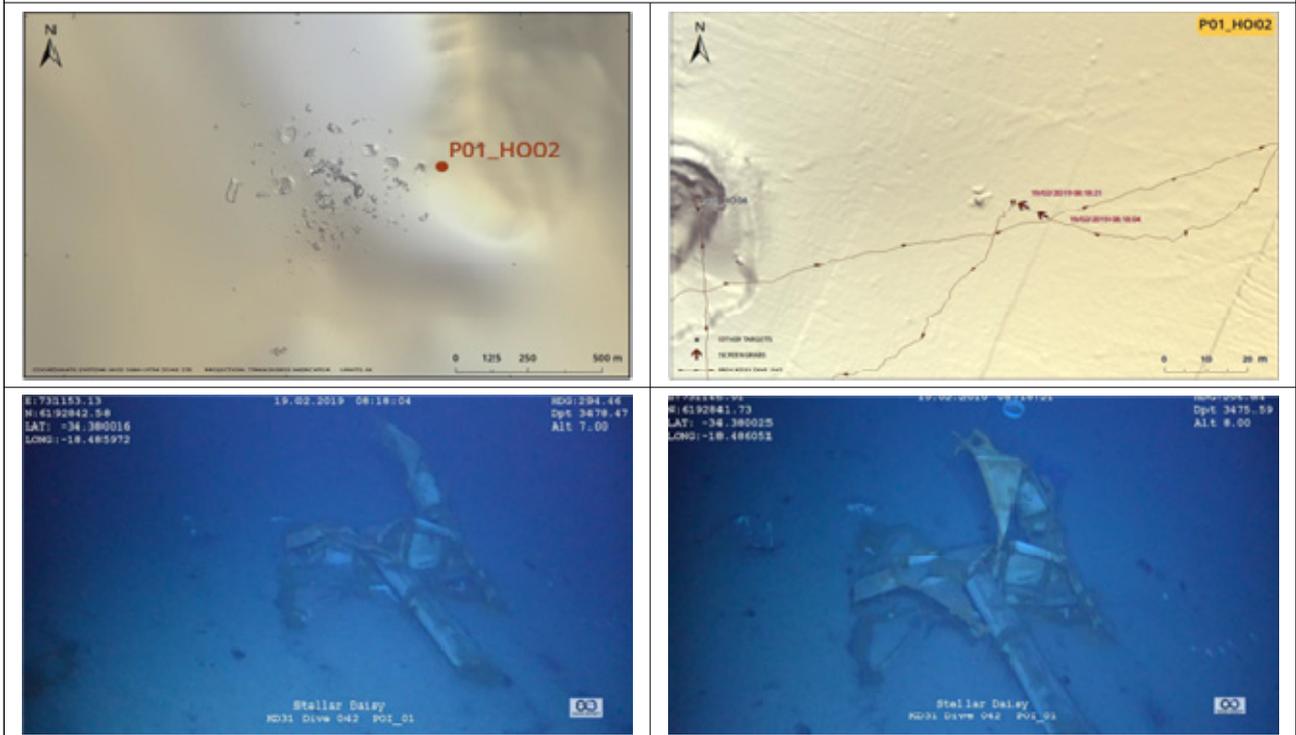
29. P01_H001

찢어지고 구겨진 보강판 구조물이며, 확정하기 매우 어려우나 화물창 격벽 구조물의 일부로 추정됨



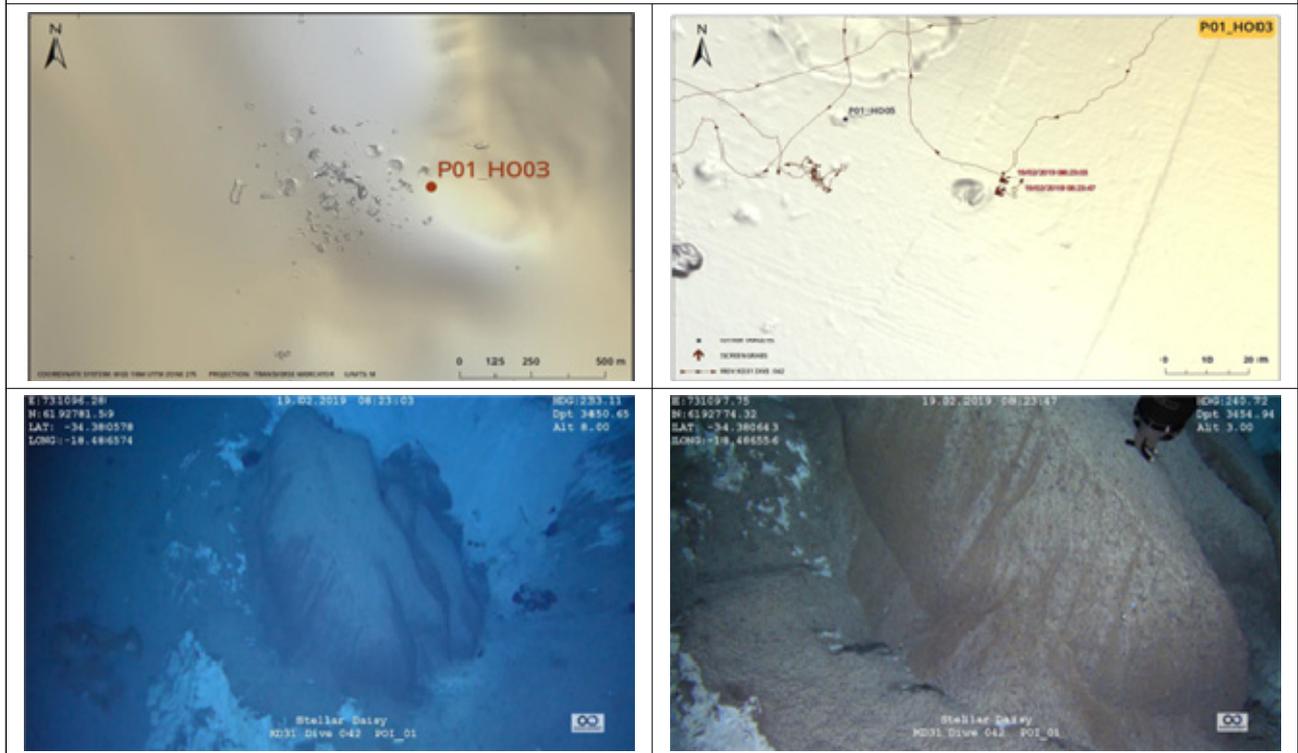
30. P01_H002

회색의 찢어지고 구겨진 구조물로 확정하기 매우 어려우나 화물창 격벽의 일부로 추정됨



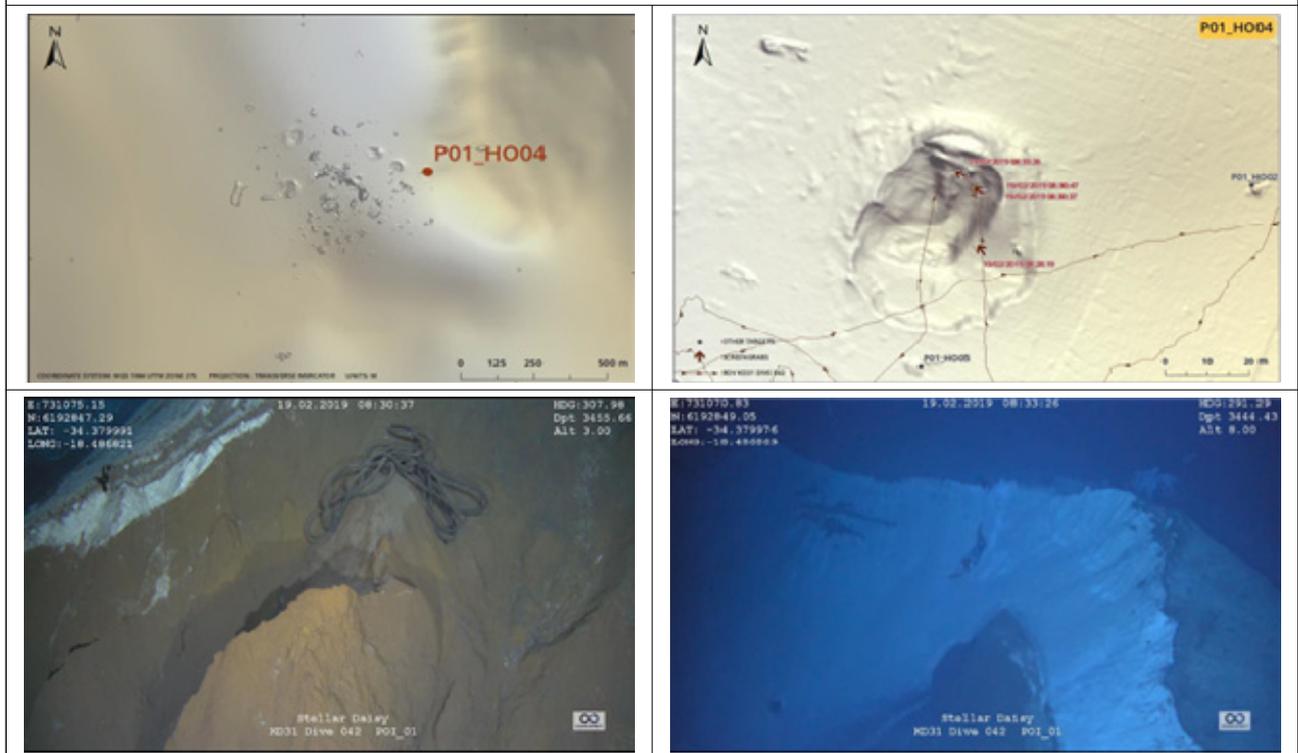
31. P01_H003

낙하 시 충격으로 생긴 크레이터 내부에 고형물질 발견



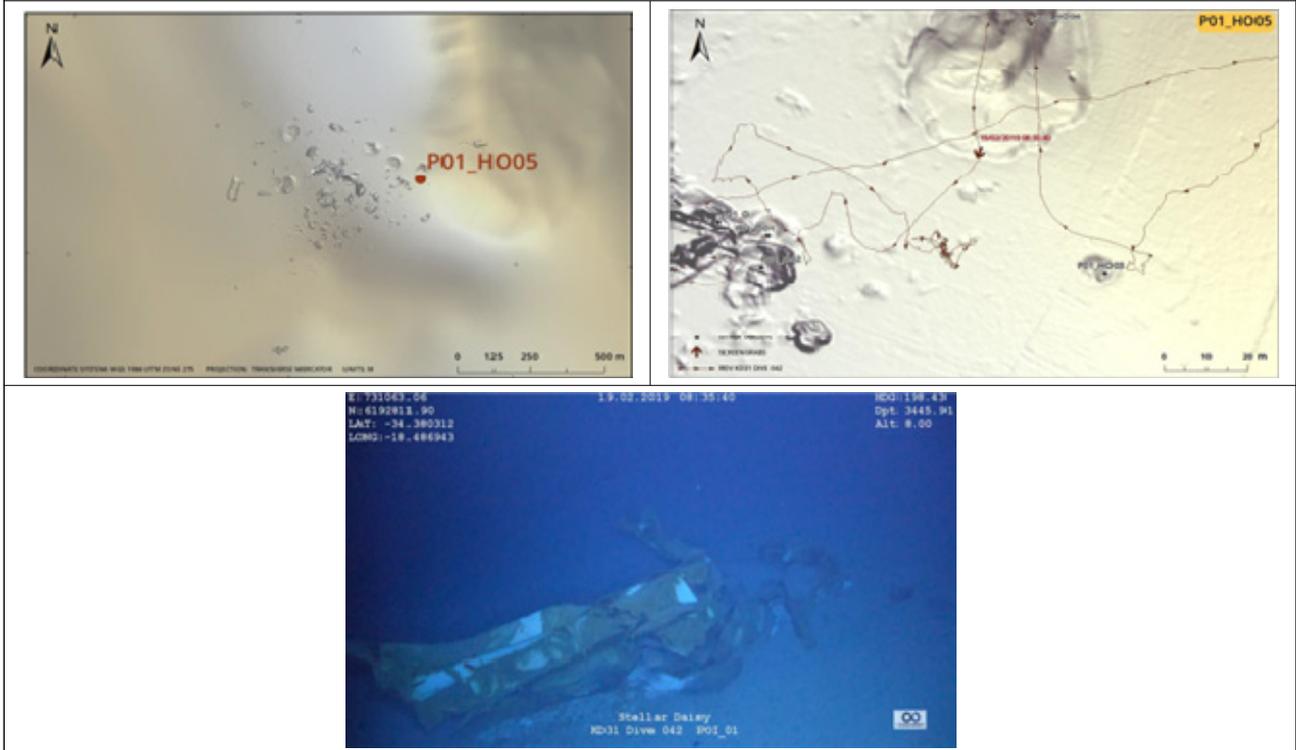
32. P01_H004

철광석 화물로 추정되는 고형물질이 있고 로프로 추정되는 물체가 식별됨



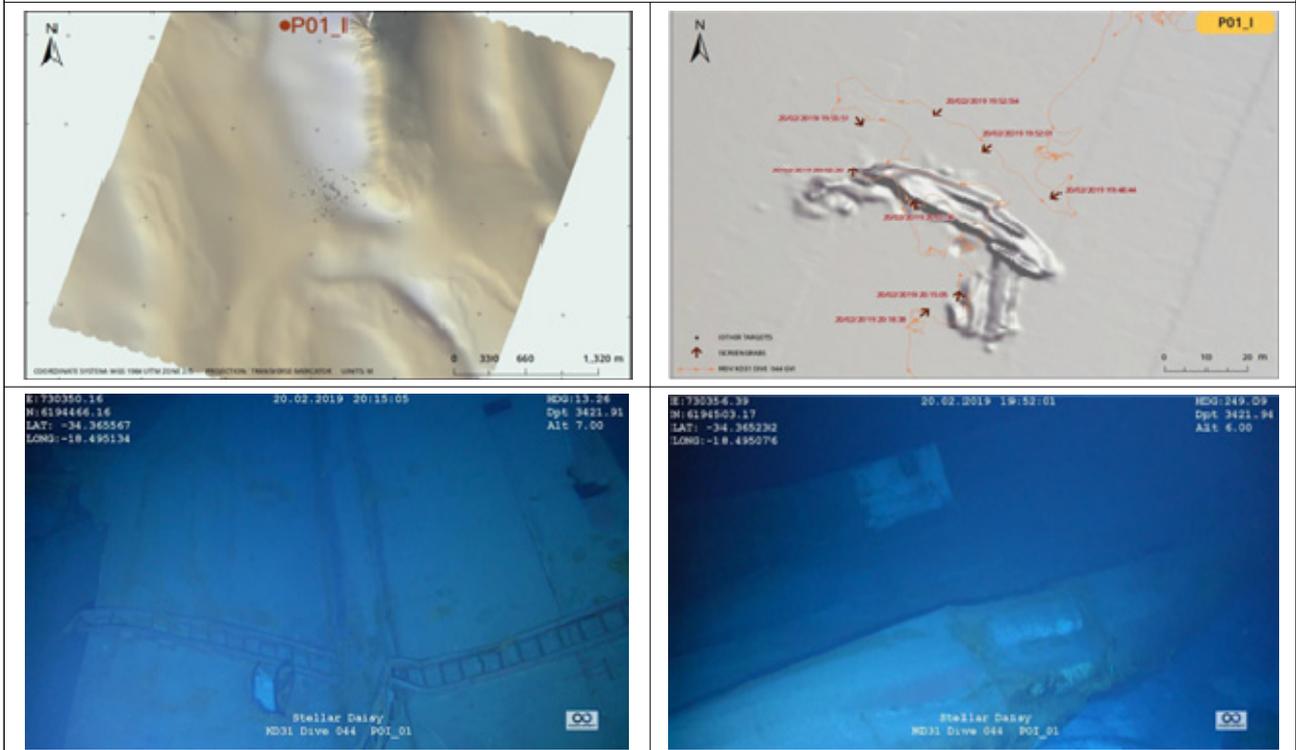
33. P01_H005

찢어지고 구겨진 보강판 구조물로 주위에 식별할 수 없는 잔해들이 흩어져 있음



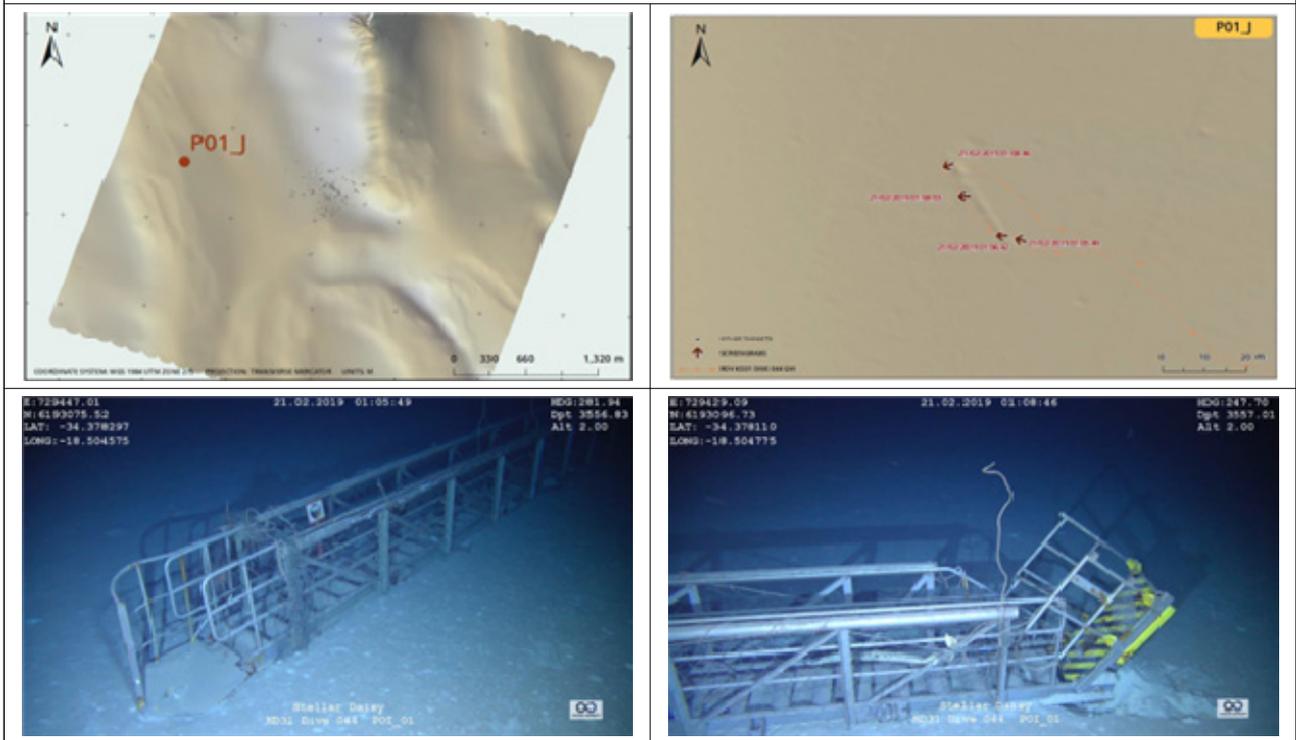
34. P01_I

구조물에 부착된 사다리 구조물이 관찰되며, 선체 외부 구조물의 일부로 추정됨



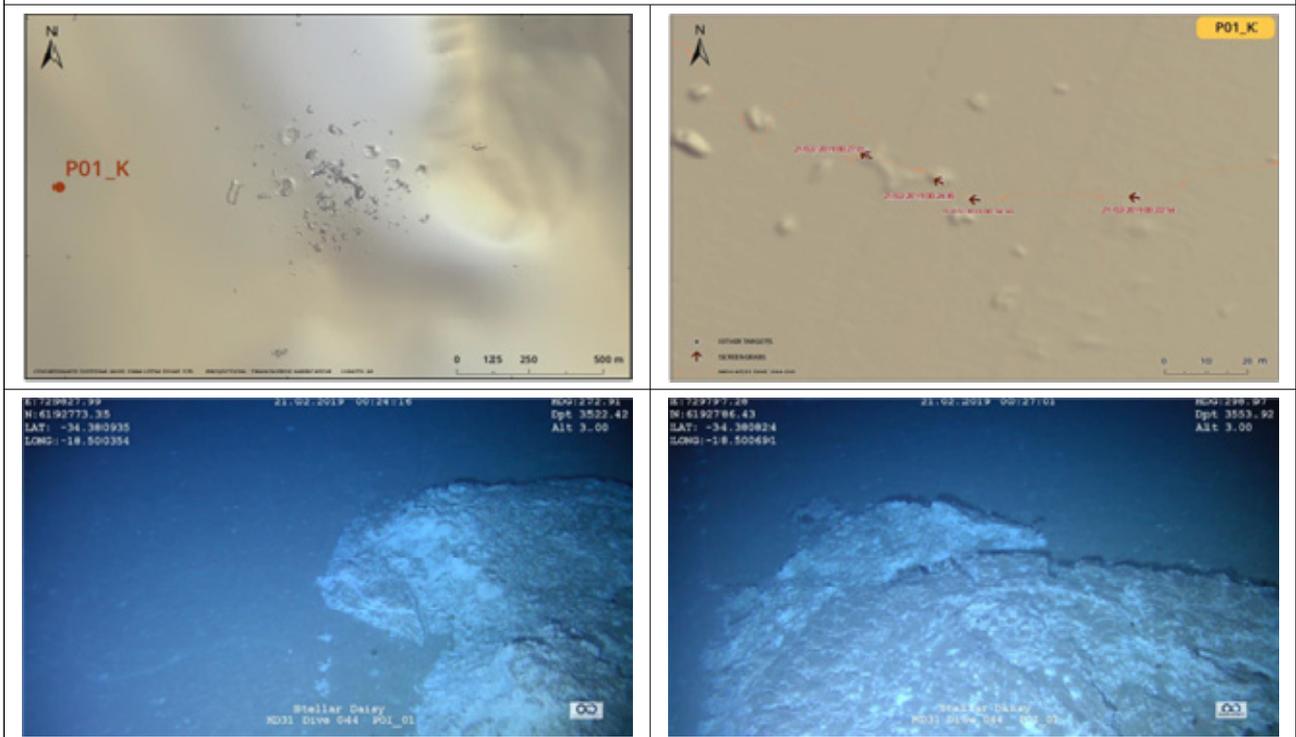
35. P01_J

갱웨이(Gangway) 구조로 식별됨



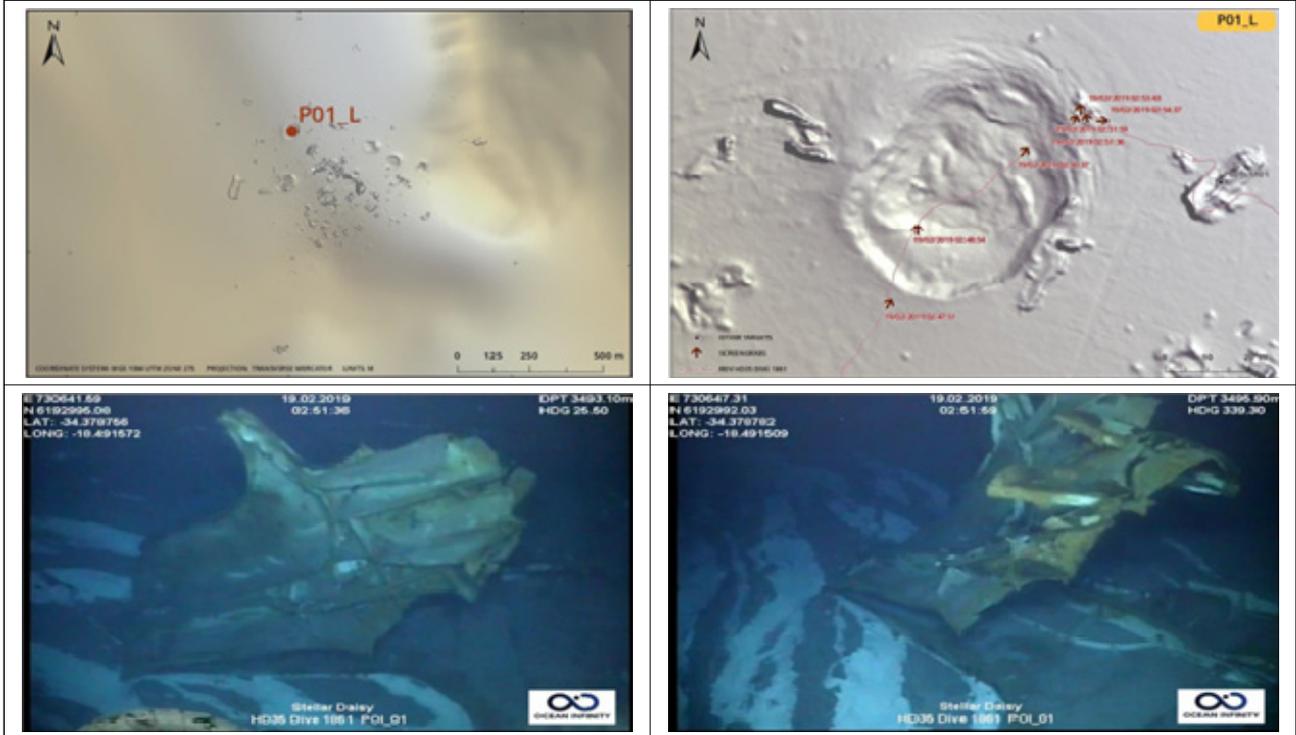
36. P01_K

넓은 영역에 걸쳐 잔해들이 흩어져있고 기름이 일부 묻어있으나 선체 잔해는 없으며 연료유 일부가 침전된 지역으로 보임



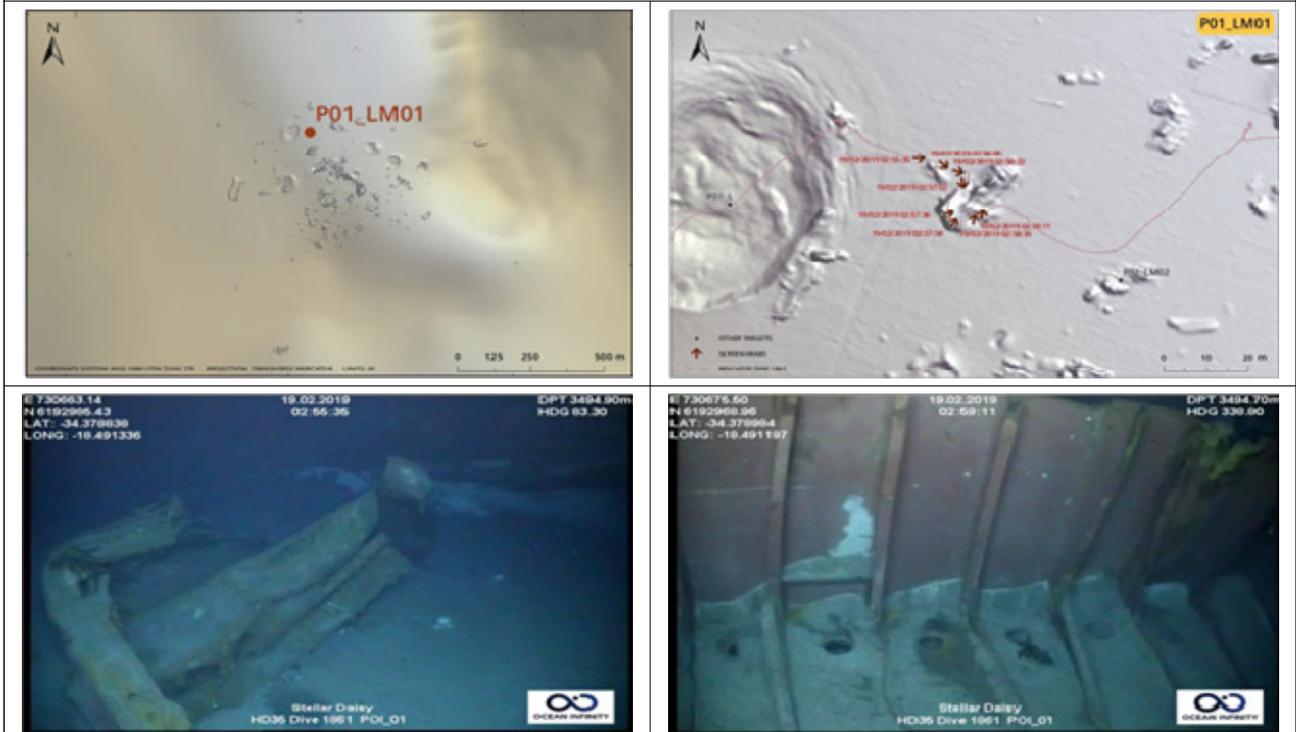
37. P01_L

사다리 일부 및 철광석 등으로 보이는 잔해물이 식별되었으며, 확정하기 어려우나 선체내부 구조물 일부로 추정됨



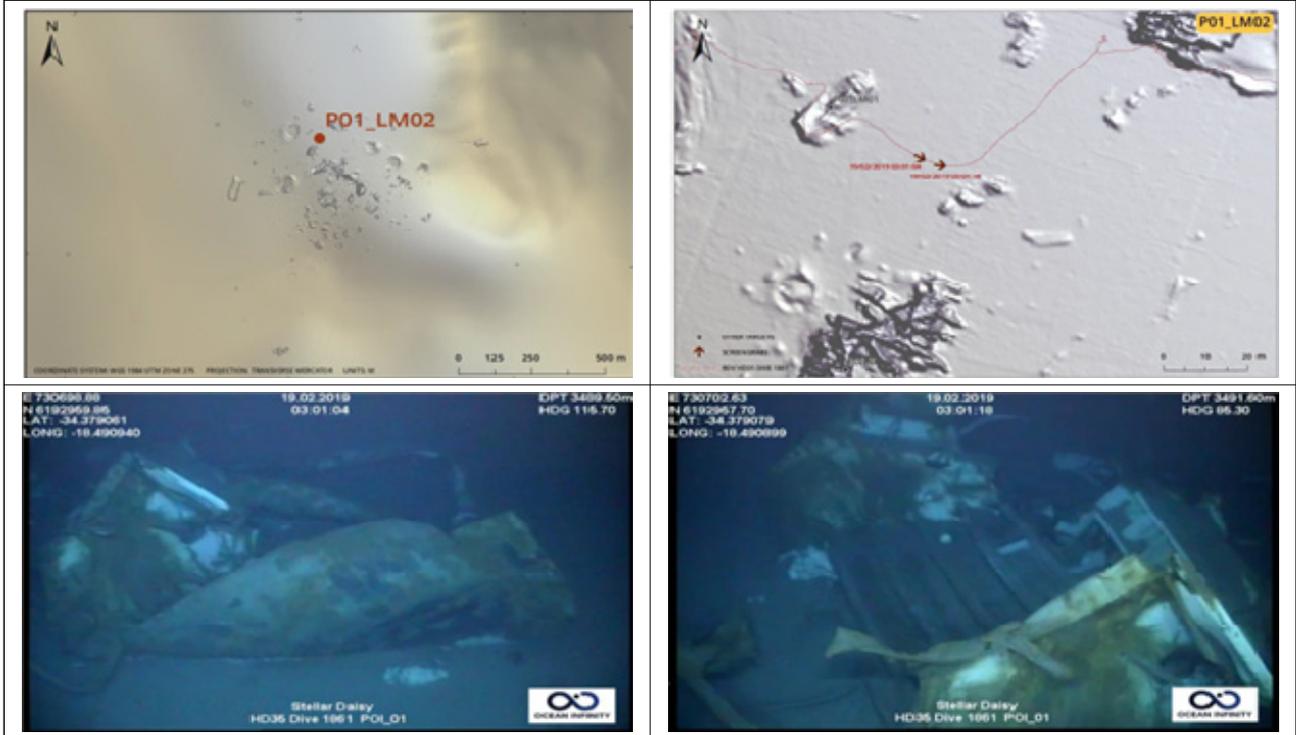
38. P01_LM01

파이프 및 막대형 구조물이 찢어지고 구겨진 보강판 구조물이며, 화물창 또는 선박평형수 탱크 구조물의 일부로 추정됨



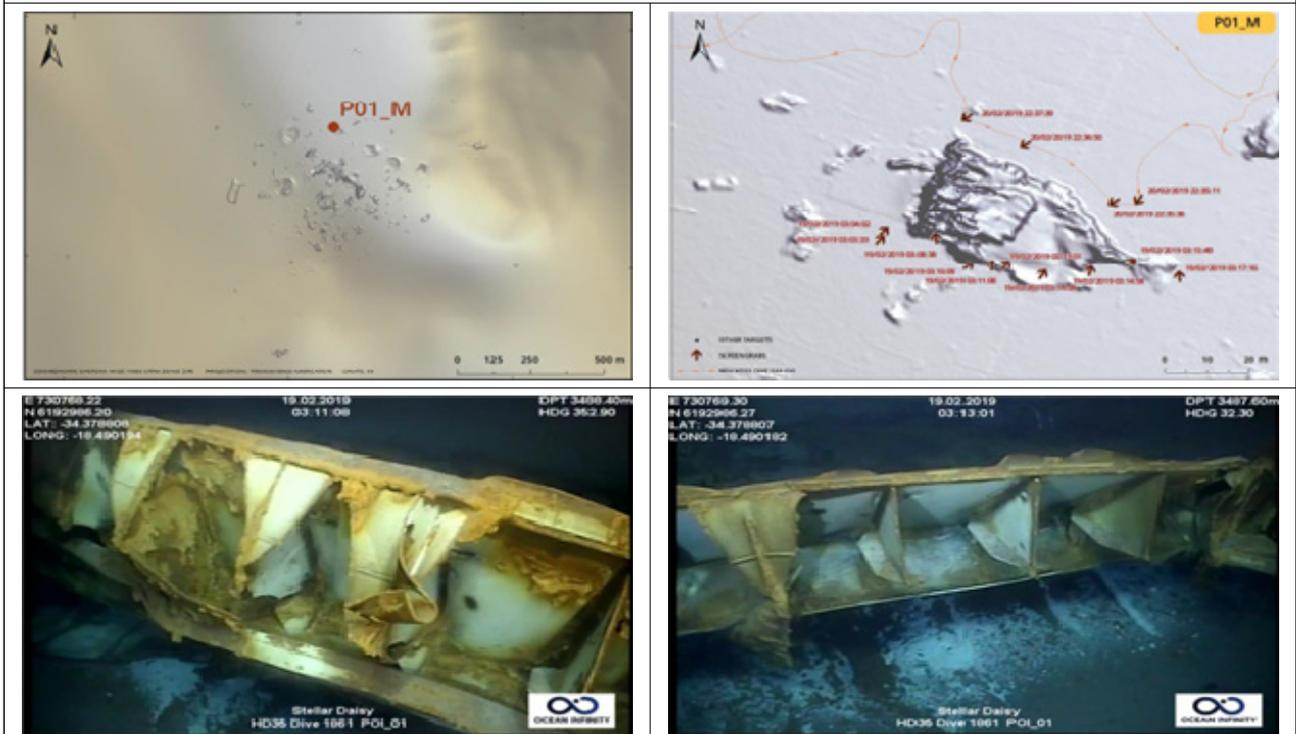
39. P01_LM02

심하게 찢어지고 구겨져 있으며, 확정하기 어려우나 프레임이 부착된 선체 내부 보강판 구조물로 추정됨



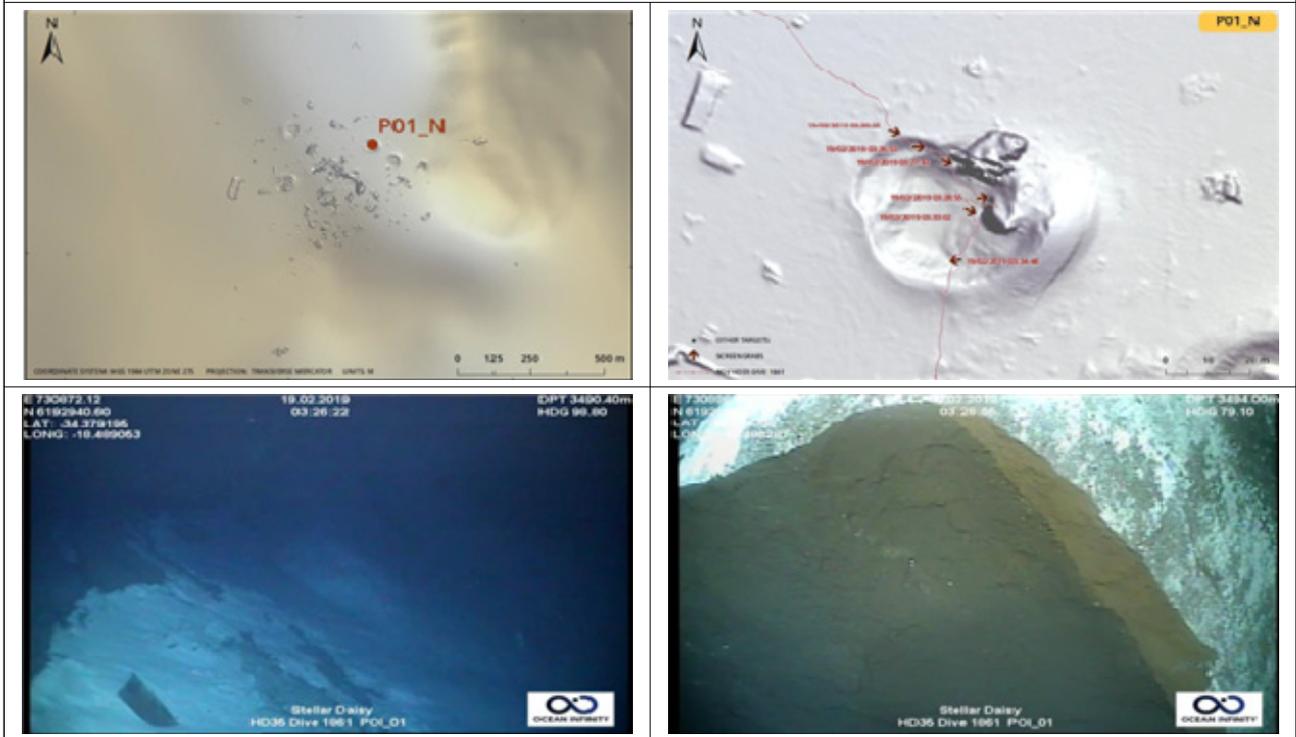
40. P01_M

구부러진 보강판 구조물이며, 선체 어느 부위인지 알기 어려우나 다수의 프레임이 부착된 내부 구조물인 것으로 추정됨



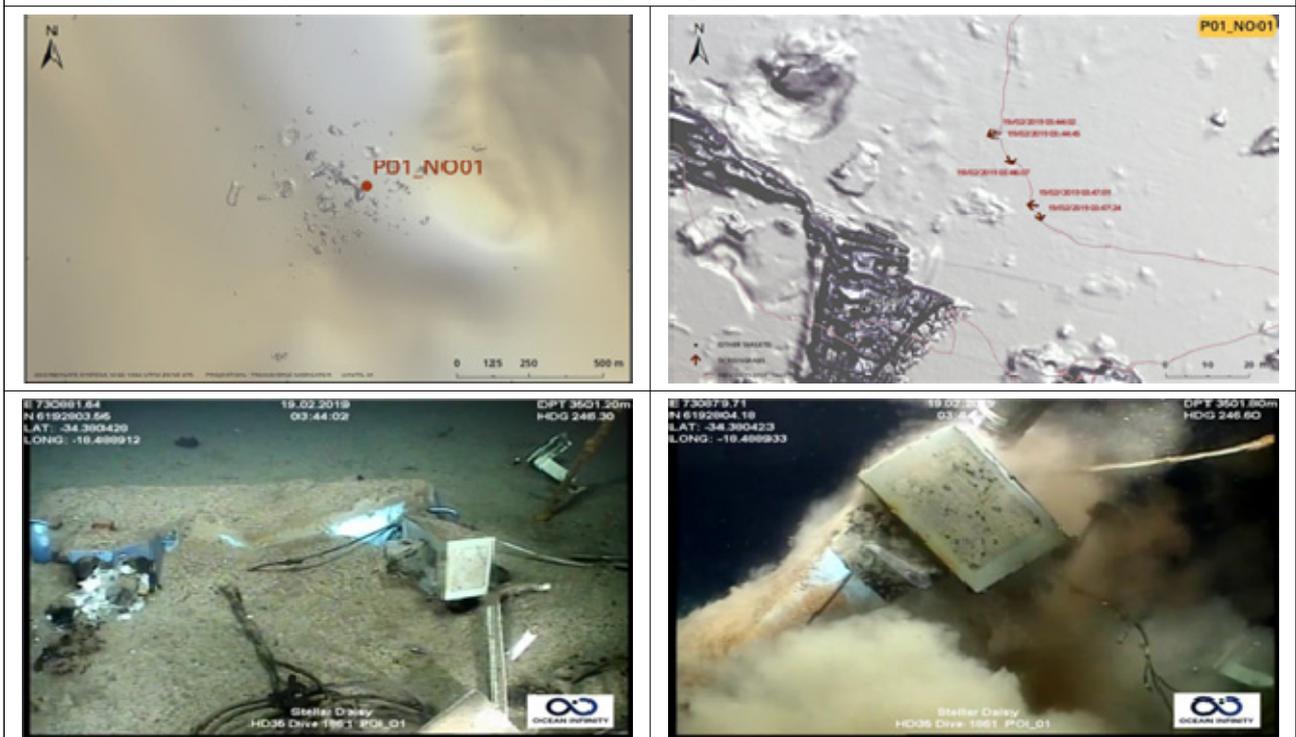
41. P01_N

철광석 화물로 추정되는 고품질과 다수의 구조물 잔해들이 식별되었고, 확정하기 어려우나 화물창 인근 선체 내부 구조물로 추정됨



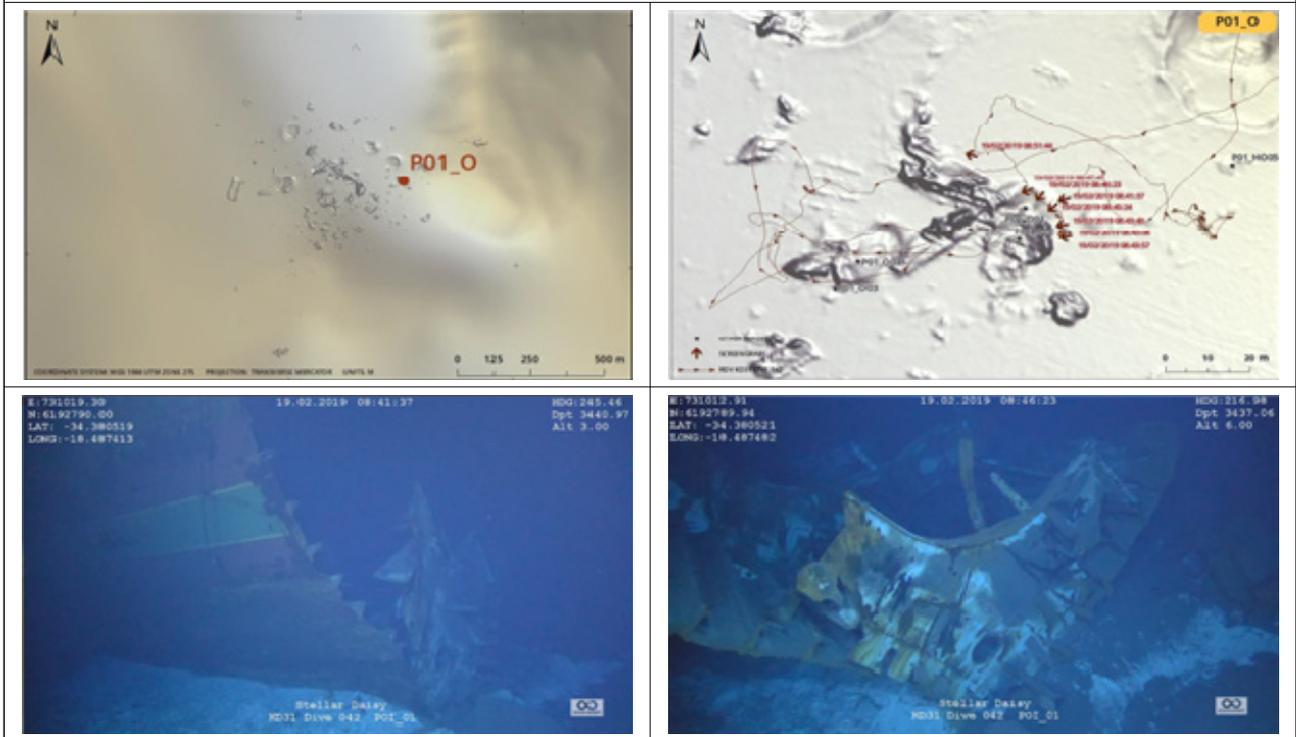
42. P01_NO1

막대형 구조물, 케이블, 파이프, 기타 장비 일부로 보이는 다수의 작은 잔해들과 찢어지고 구겨진 보강판 구조물 식별. 선체 내부 구조물 일부 추정됨



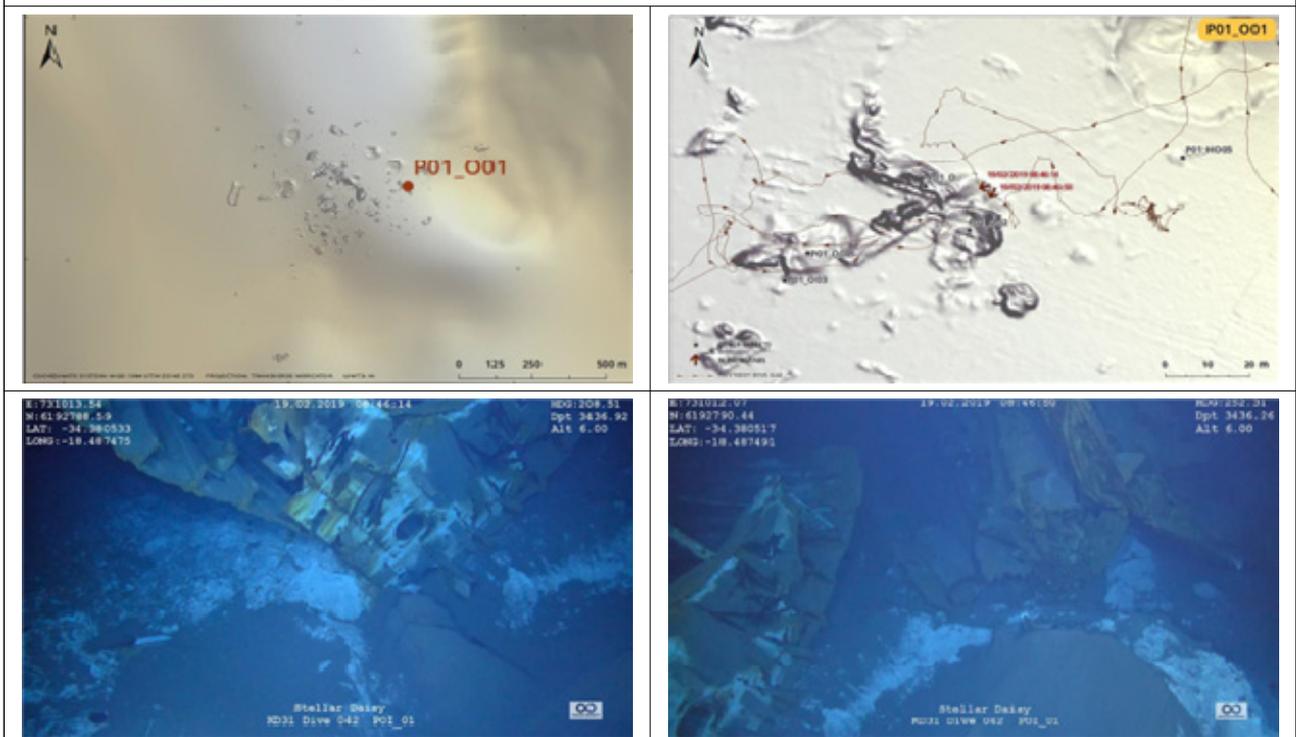
43. P01_O

찢어지고 구겨져있으며, 구멍이 일부 존재하는 프레임으로 보아 선체 외판에 해당하는 구조물로 추정됨



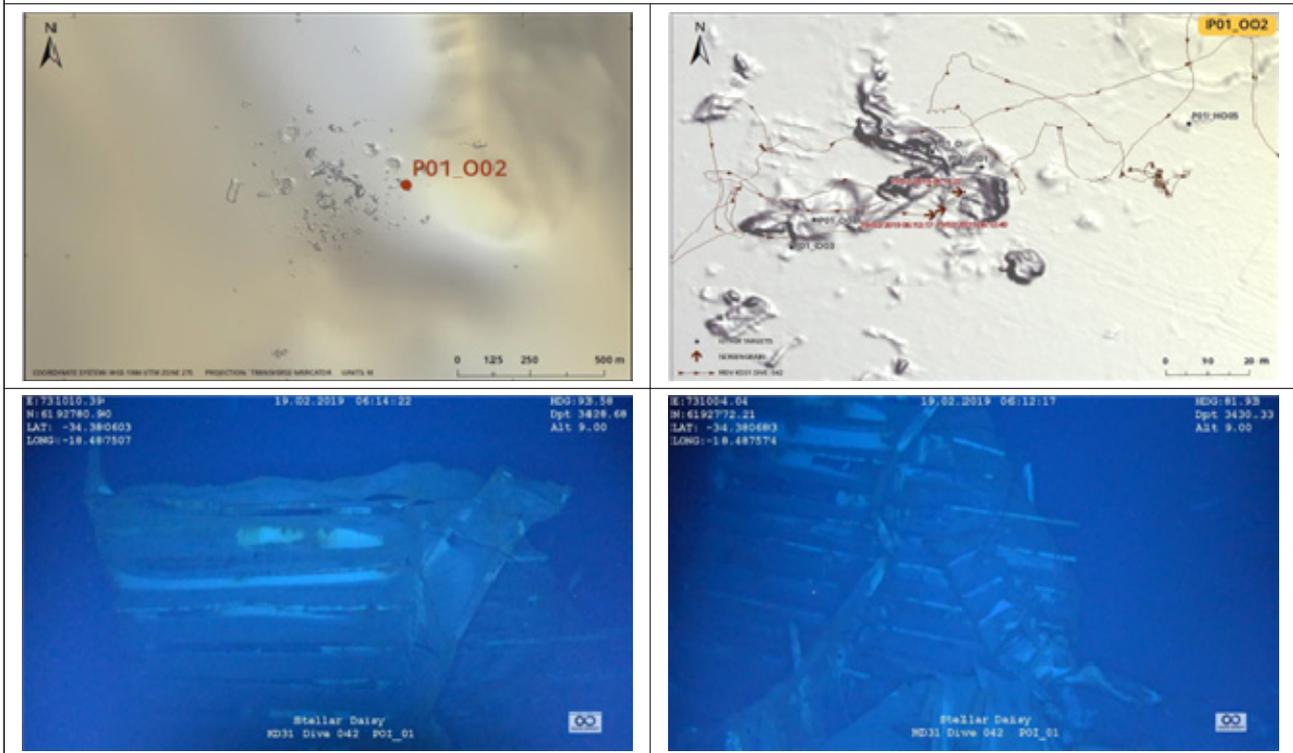
44. P01_001

노란색 잔해조각으로 대부분 보강재가 부착된 보강판 구조물로 보이며, 확정은 어려우나 선체 내부 구조물 일부로 추정됨



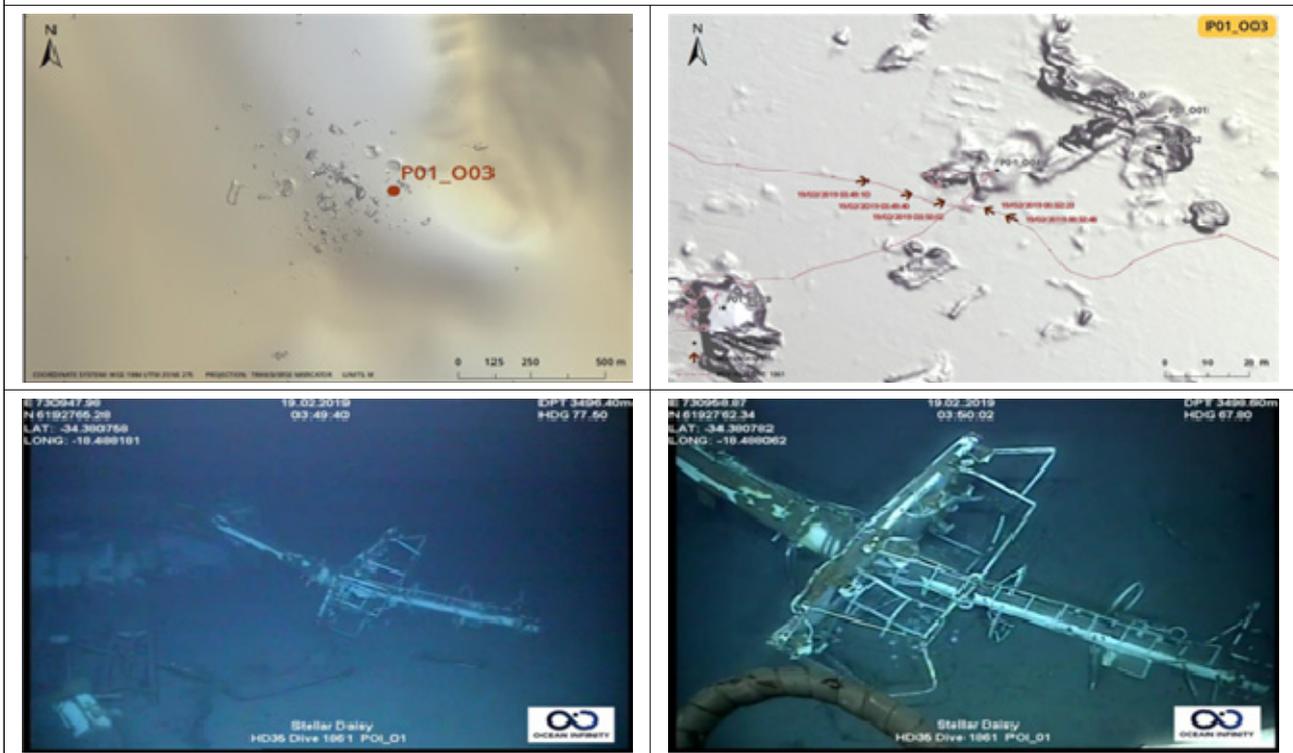
45. P01_002

보강재로 보강된 보강판 구조물이 찢어지고 구부러져 있으며, 선체 내부 구조물 일부로 추정됨



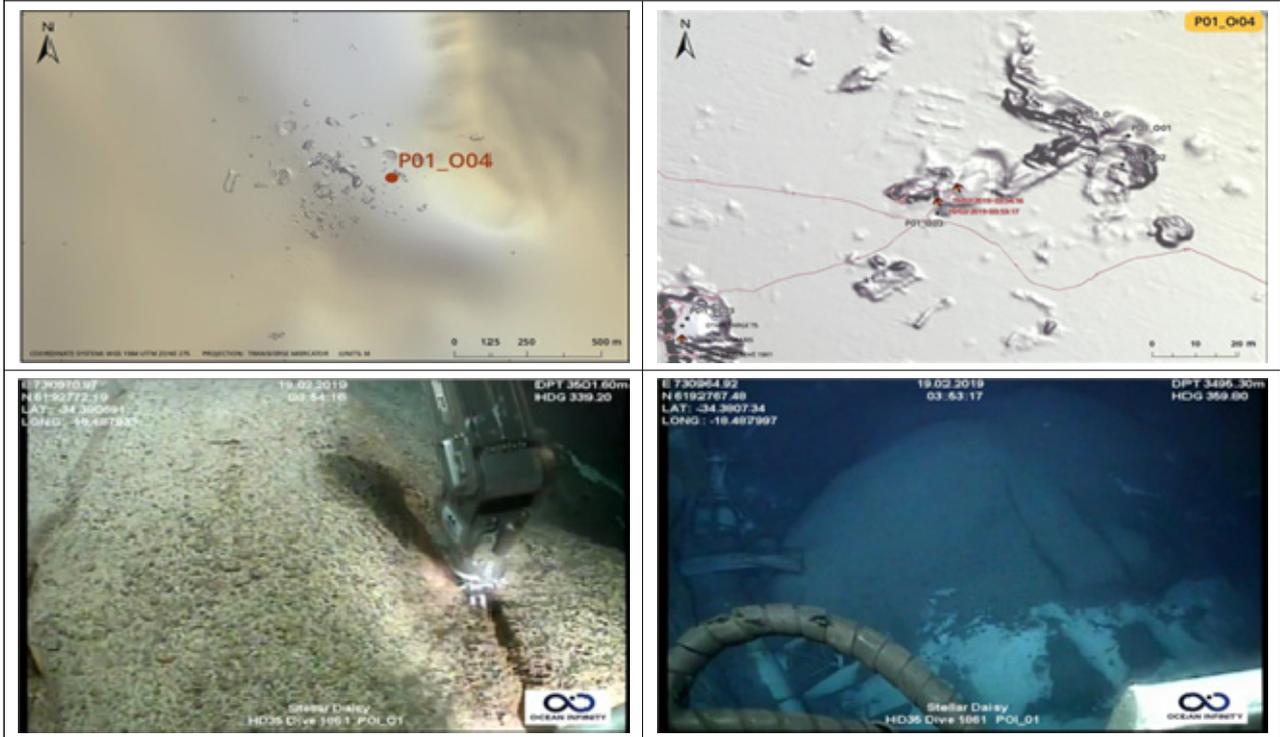
46. P01_003

마스트 구조물 일부로 식별



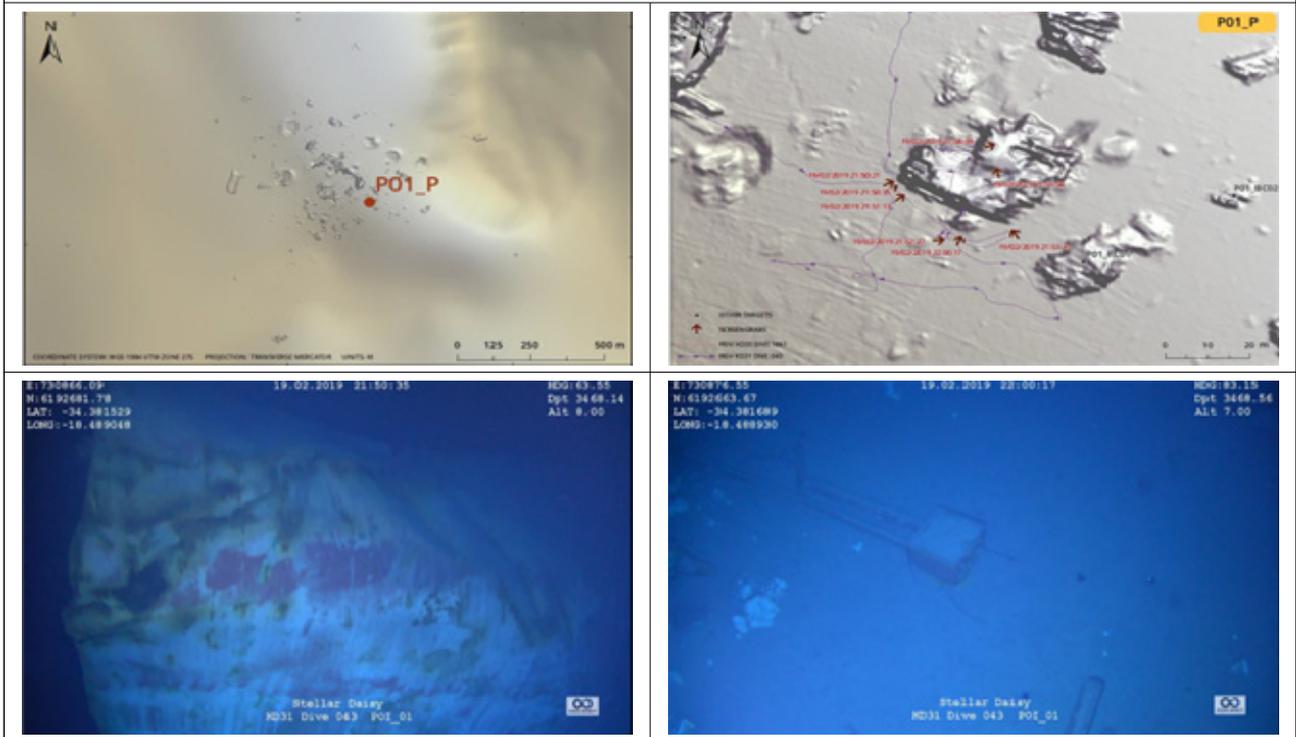
47. P01_004

철광석 고품물질과 구겨진 보강판 구조물이 있으며, 화물창 내부 구조물 일부로 추정됨



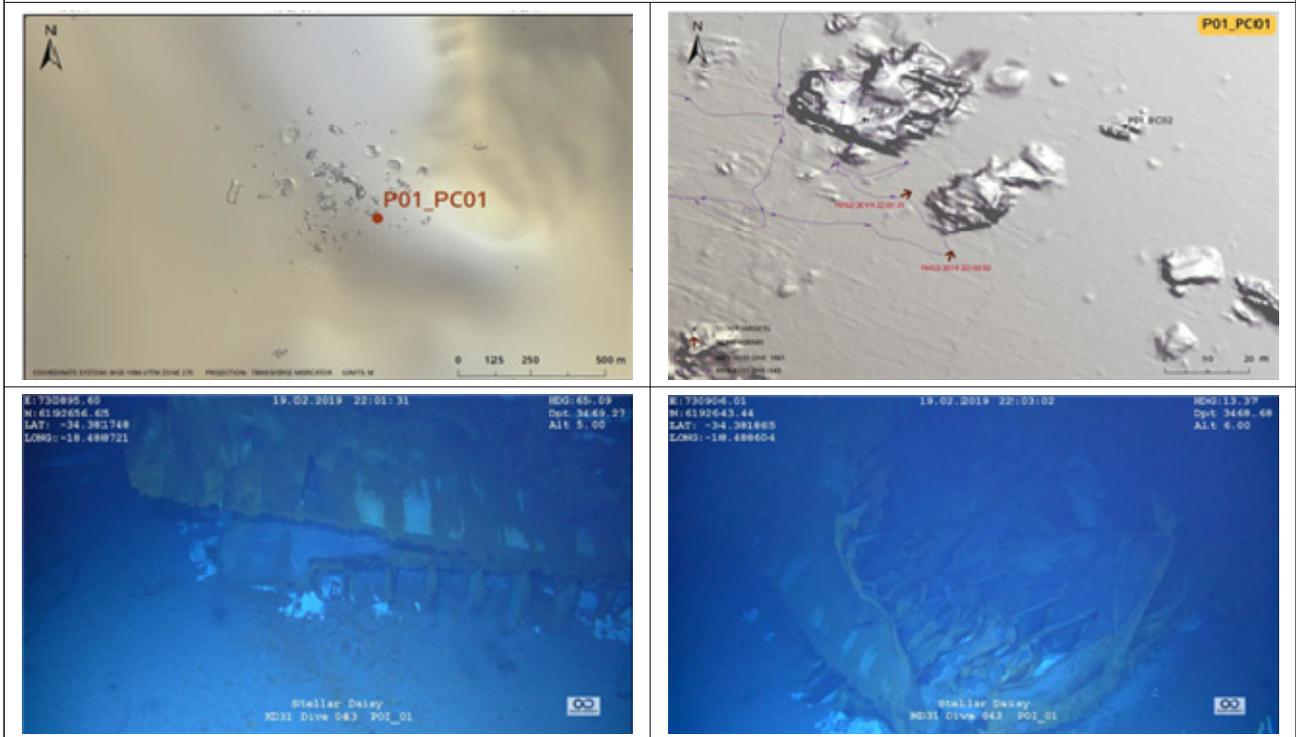
48. P01_P

다수의 찢어지고 구겨진 작은 보강판 구조물이 있으며, 주변에 볼라드와 컨트롤 박스(전기 캐비닛) 잔해가 있고 거주구역 인근 구조물로 추정됨



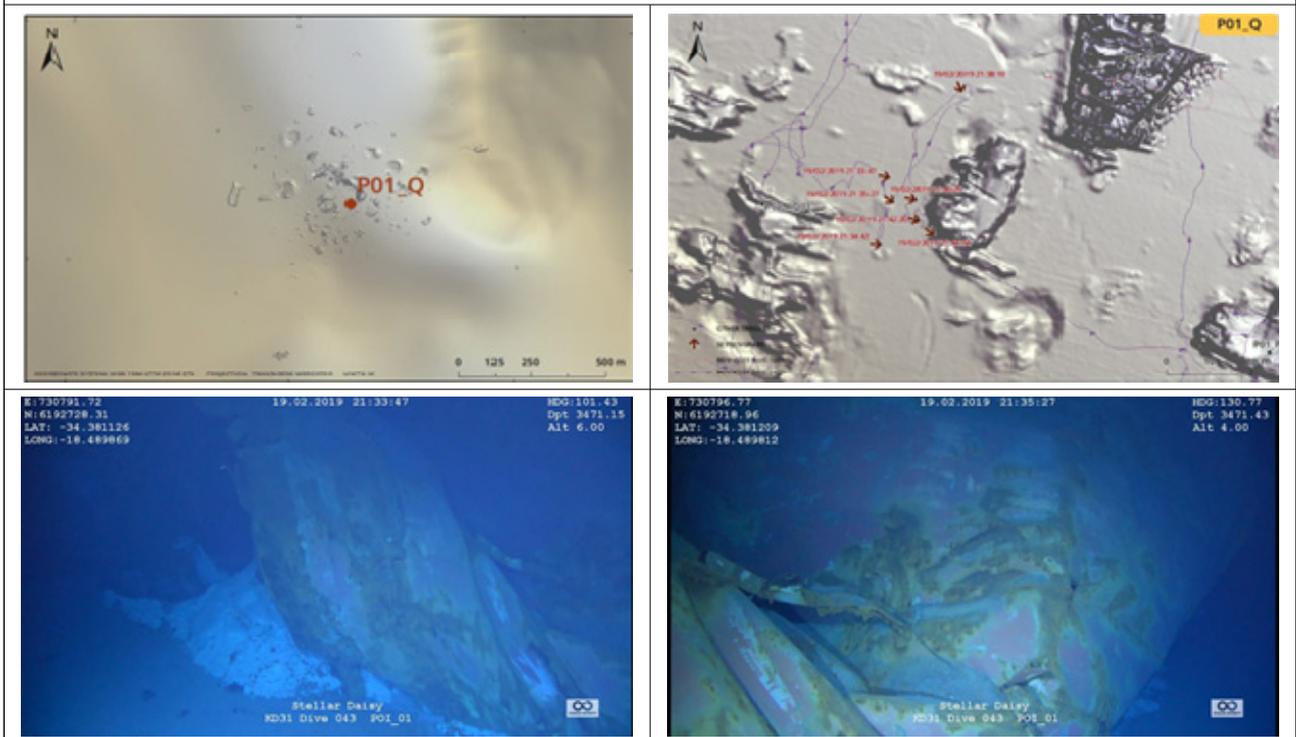
49. P01_PC01

보강재가 통과하는 프레임이 부착된 보강판 구조물이 찢어지고 구부러져 있으며, 선체 내부 구조물 일부로 추정됨



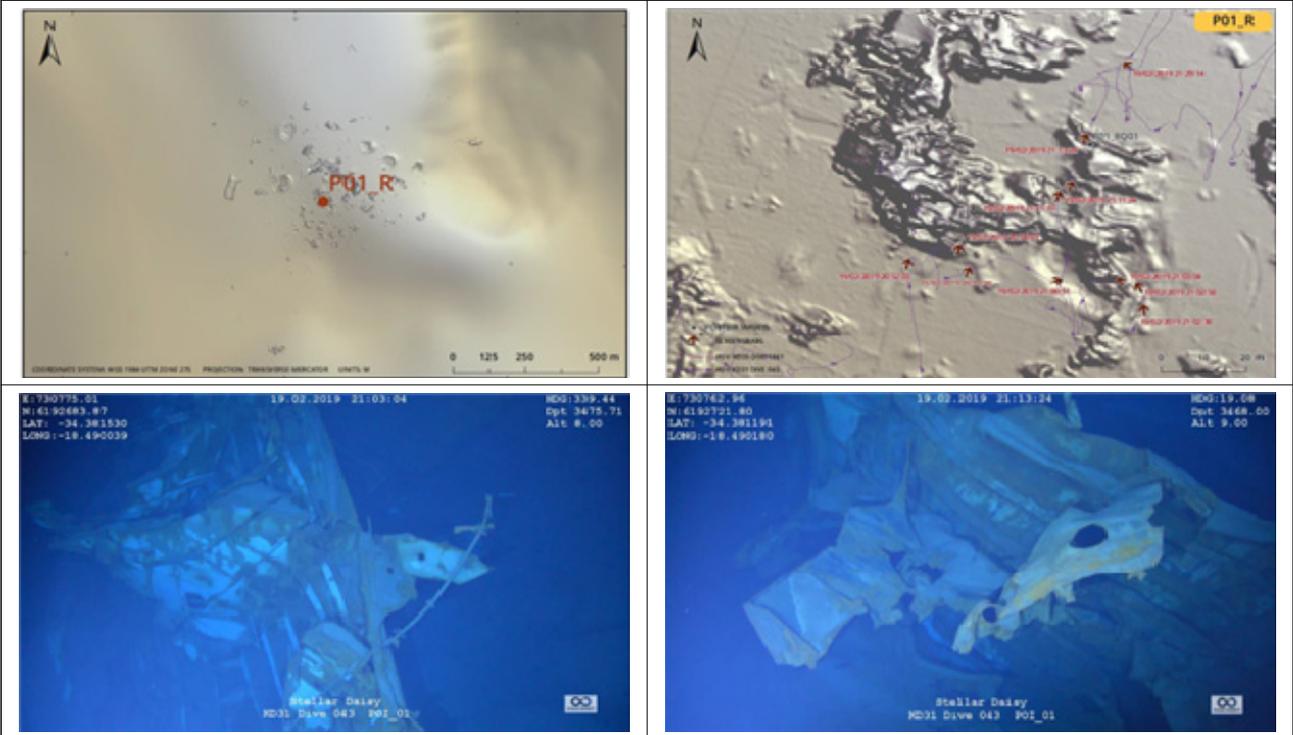
50. P01_Q

심하게 찢어진 구조물로 선체 외판인지 갑판인지 명확하지 않으며, 주위 사다리 구조물 잔해 발견



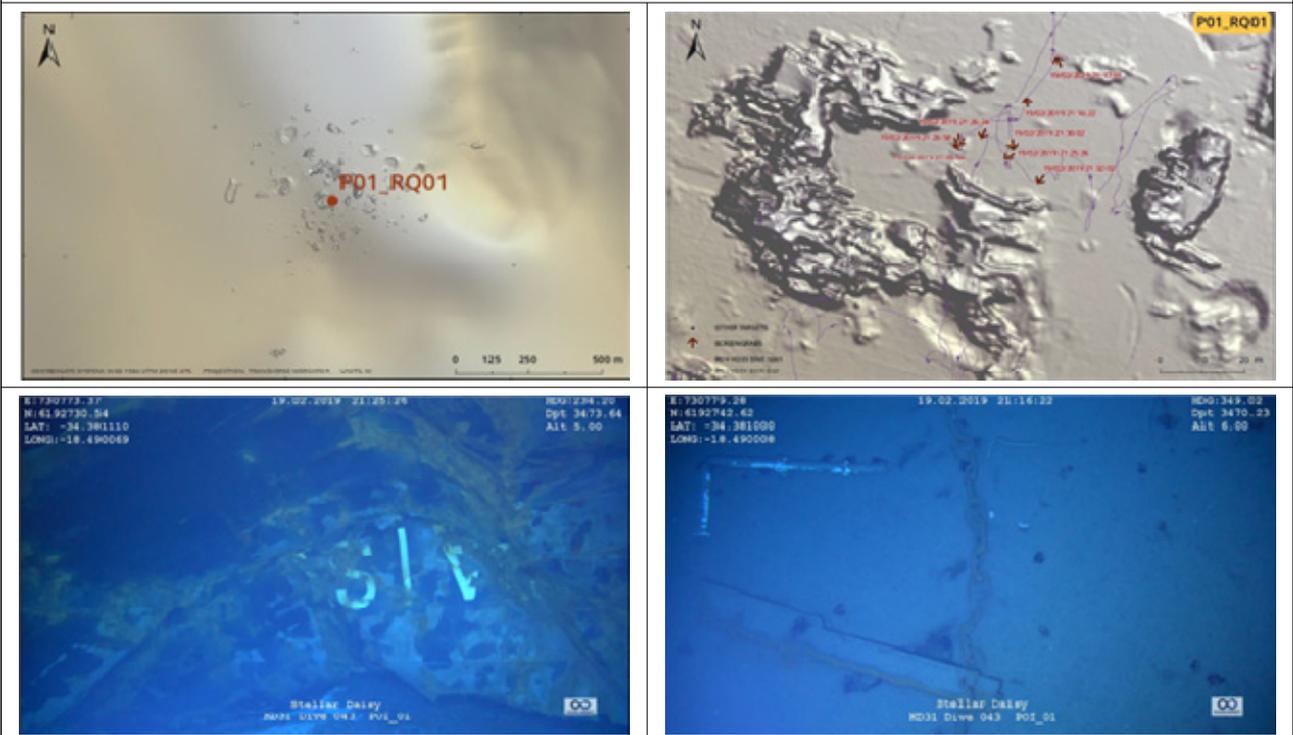
51. P01_R

다수의 찢어지고 구부러진 소형의 보강판 구조물 및 케이블 잔해이며, 선체 내부 구조물 일부로 보임



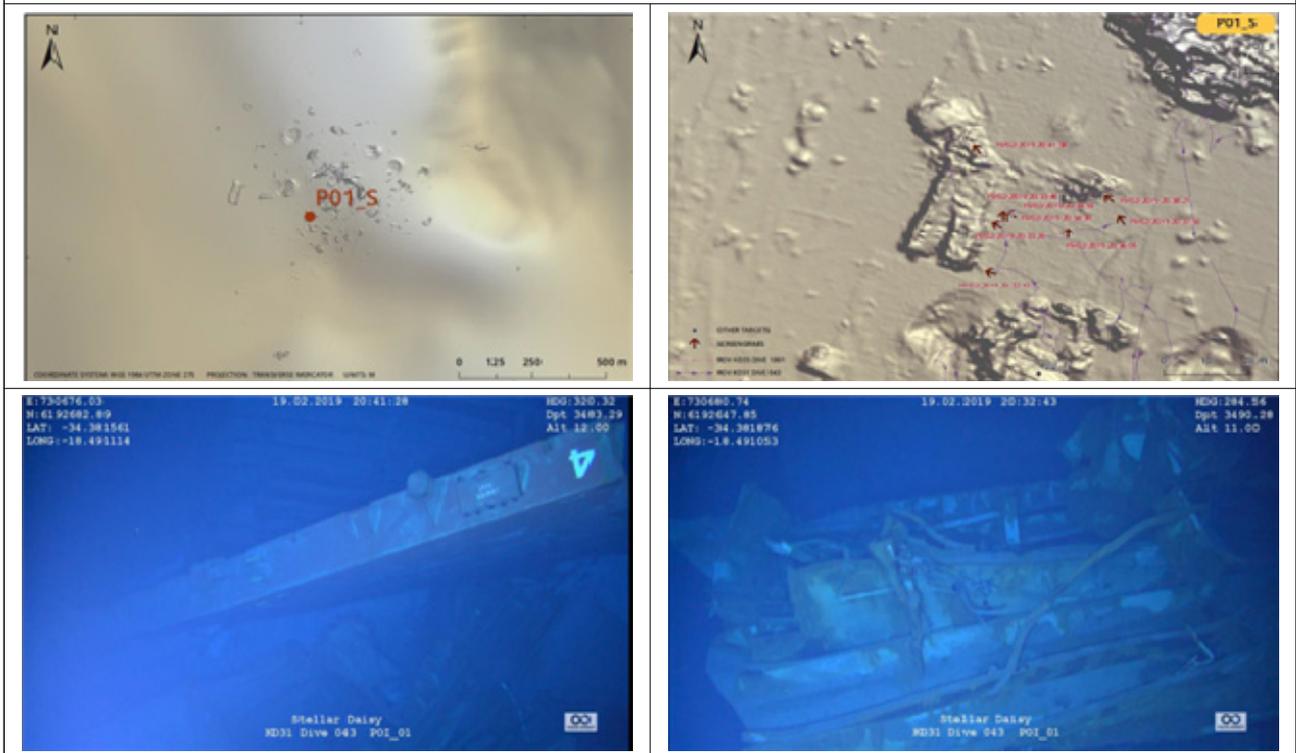
52. P01_RQ01

선명 표시, 계류용 체인, 흡수 표시를 통해 선수부 식별됨



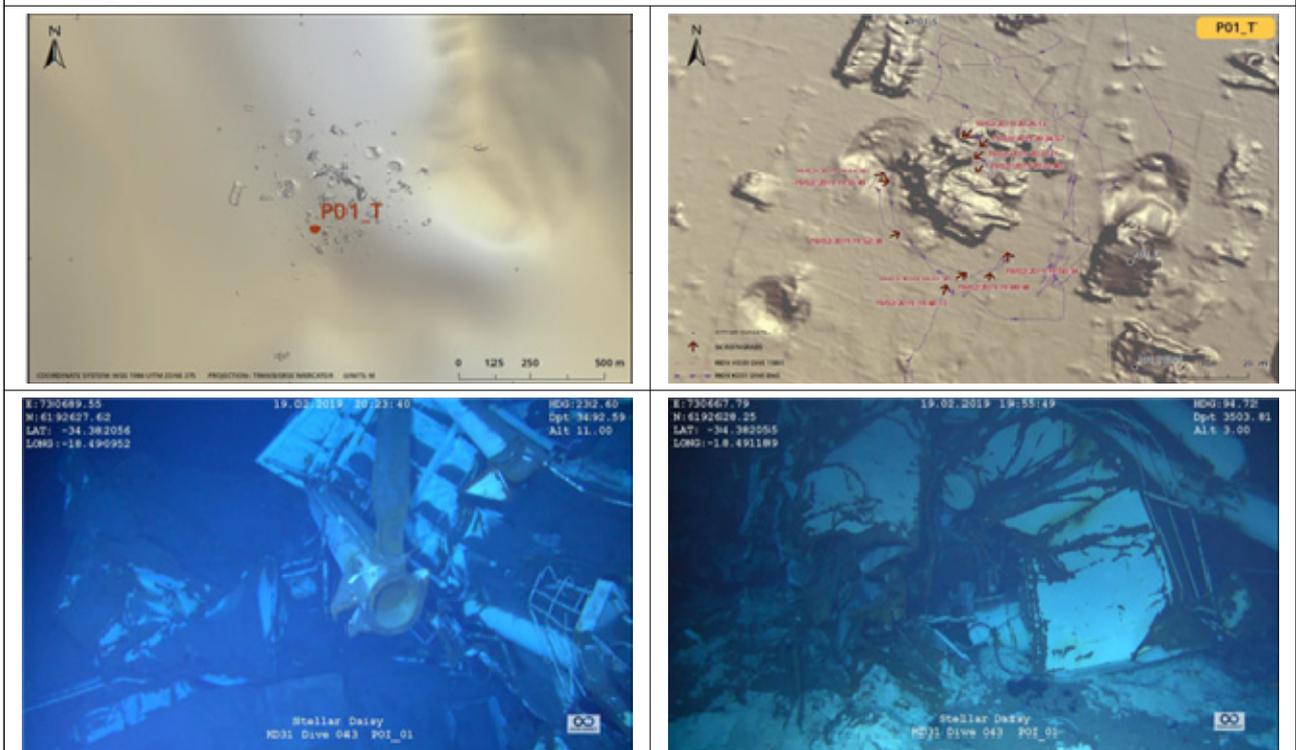
53. P01_S

화물창 덮개(Cargo Hold Hatch Cover) No. 4번 식별됨



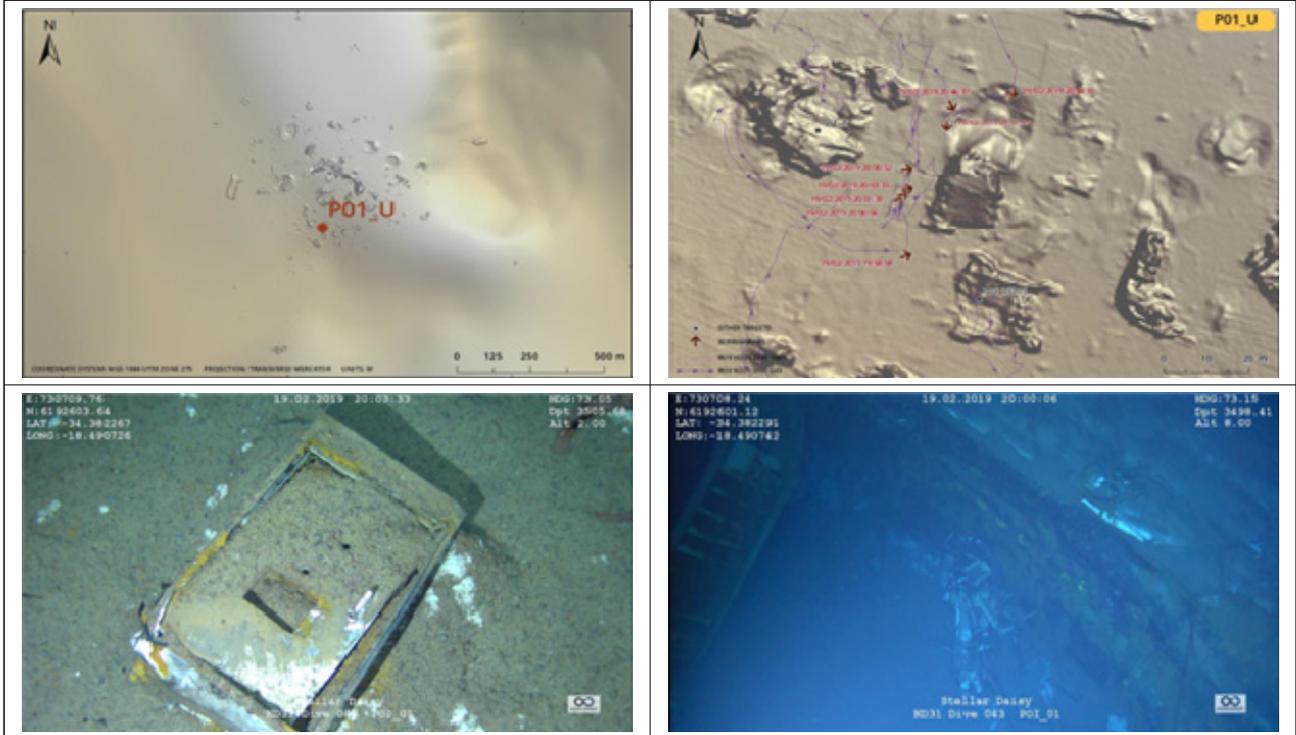
54. P01_T

난간구조물, 기둥 구조물, 마스트 발받침대, 케이블 잔해가 섞여 있으며, 거주구역 일부 구조물로 추정됨



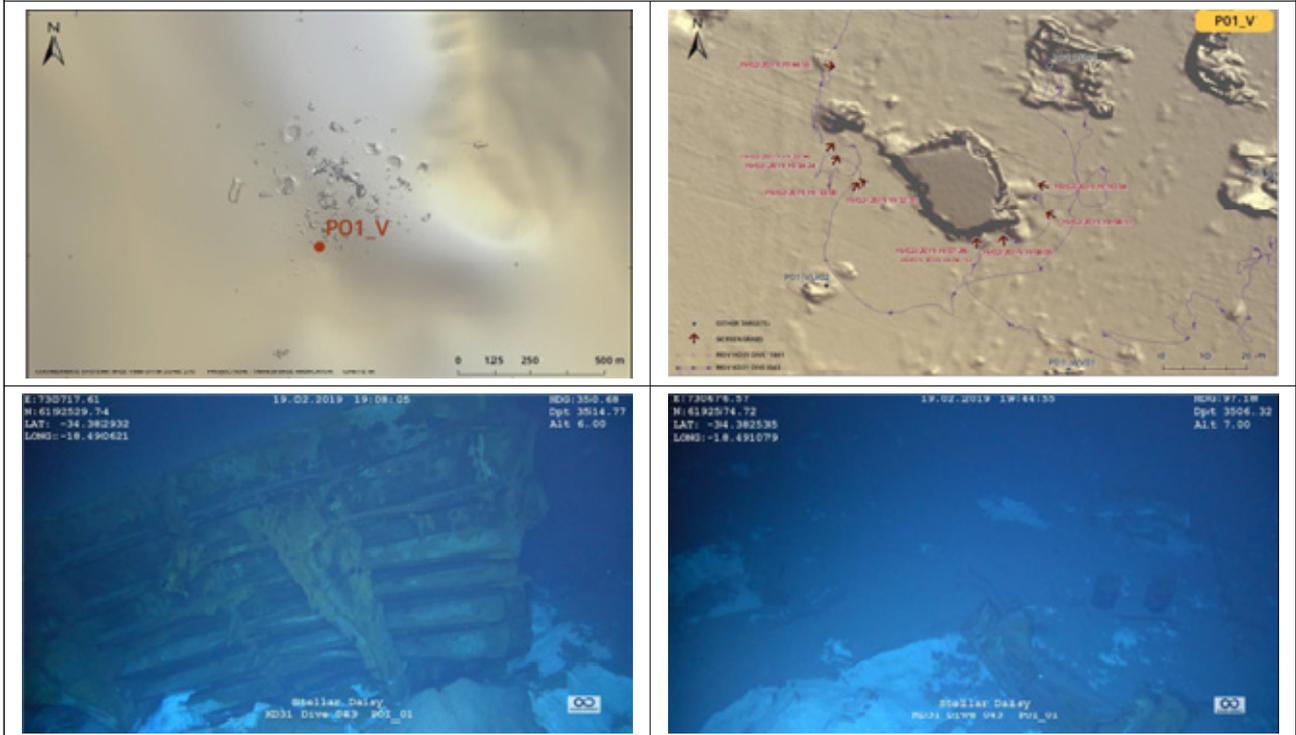
55. P01_U

전기 콘트롤 박스로 보이는 잔해와 전선 및 케이블이 있으며, 구겨진 보강판 구조물이 있어 선체 격실 내부의 잔해로 추정됨



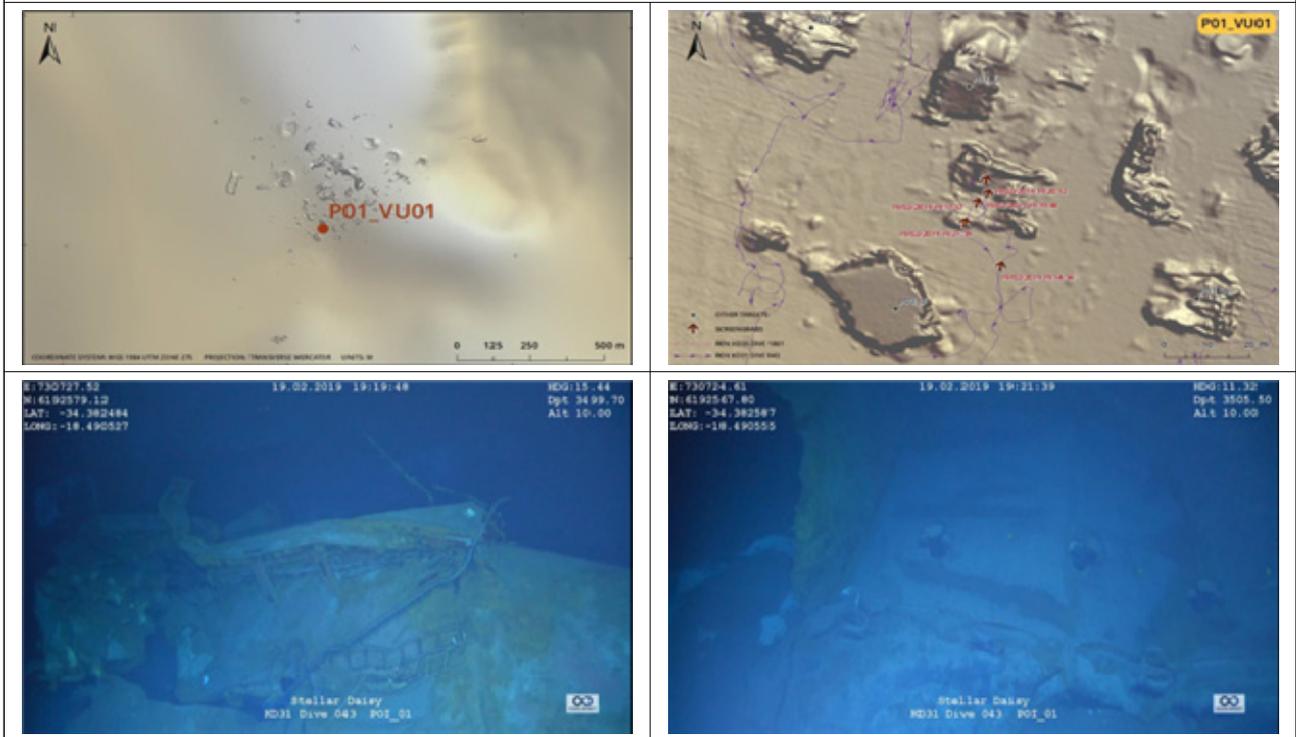
56. P01_V

파이프가 통과하는 프레임으로 찢어지고 심하게 구부러져 있고 블라드가 있으며 갑판 또는 선체 외판부로 추정됨



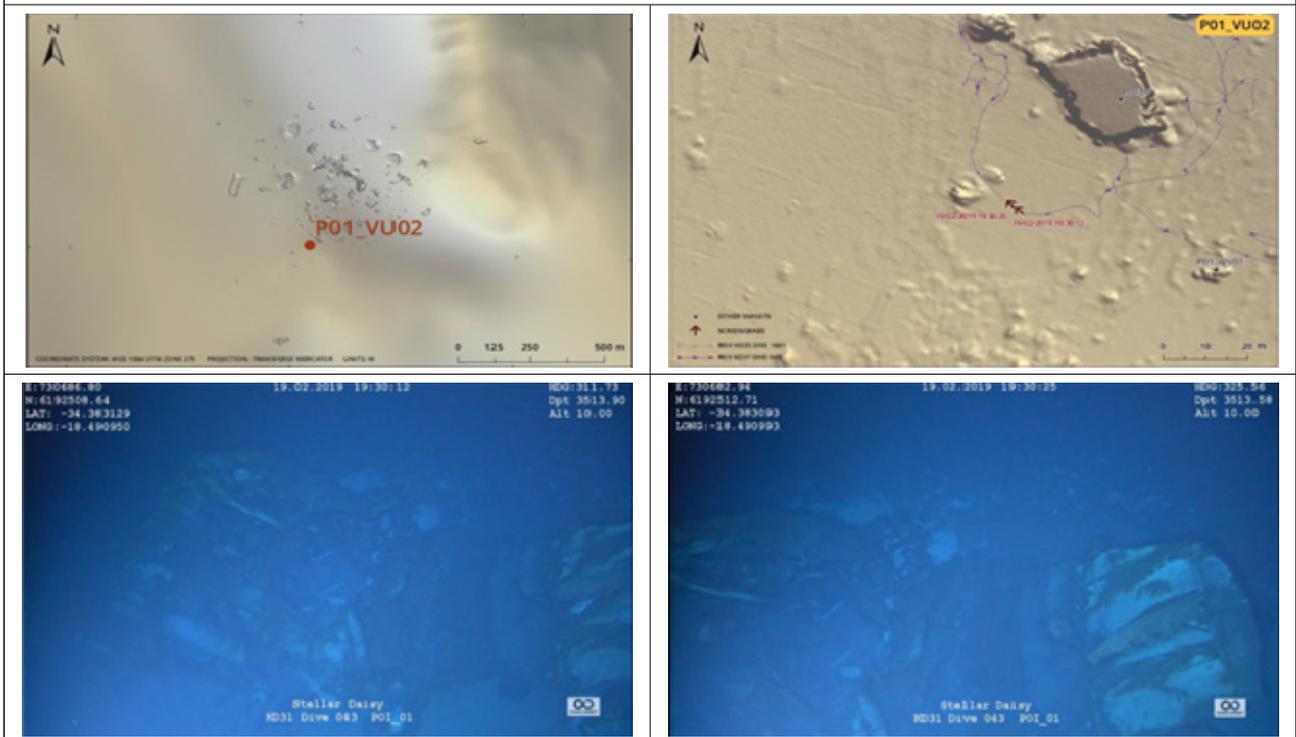
57. P01_VU01

사다리, 파이프 등 금속파편과 로프 케이블 잔해, 구조물에 부착된 볼라드, 파이프가 통과하는 보강판 구조이며, 갑판부에서 떨어진 구조물로 추정



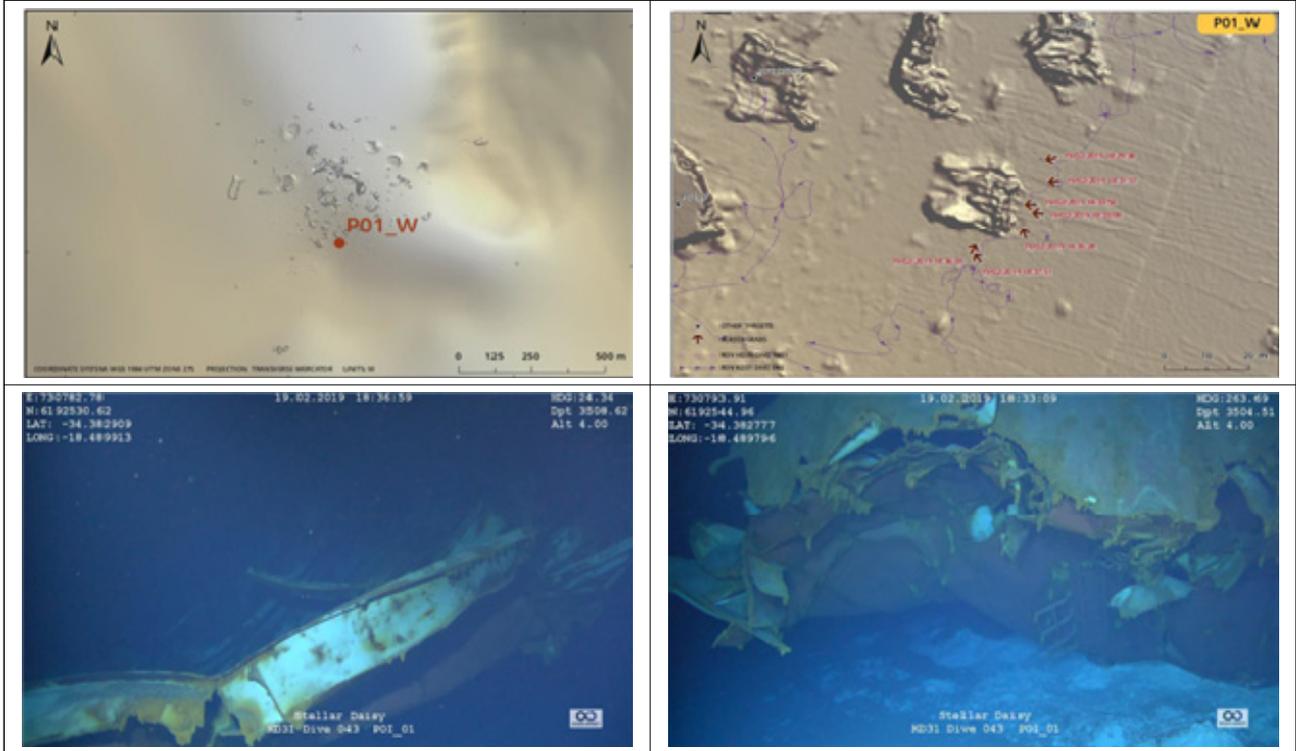
58. P01_VU02

찢어지고 구부러진 보강판 구조물이며, 선체 내부 구조물의 일부로 추정됨



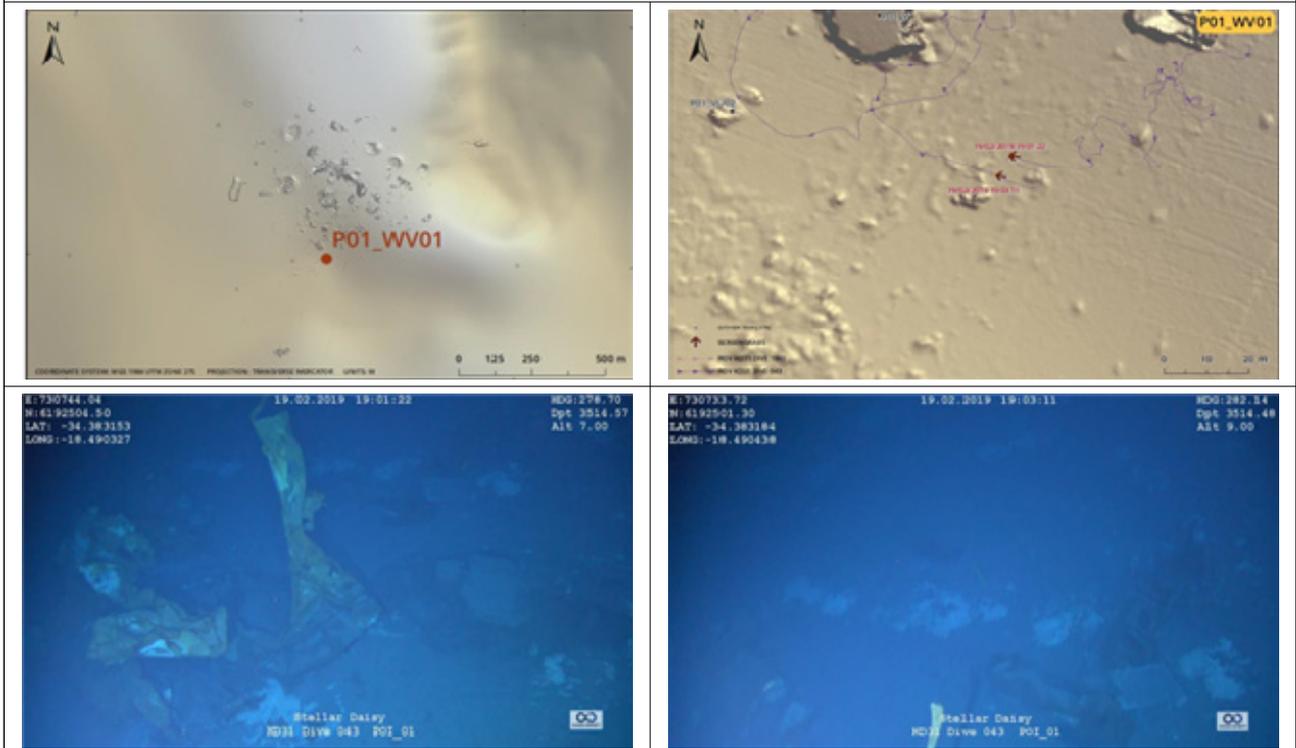
59. P01_W

찢어지고 구겨진 보강판 구조물이 겹쳐져 쌓여있으며, 선체 외부 구조물로 추정되나 매우 불확실함



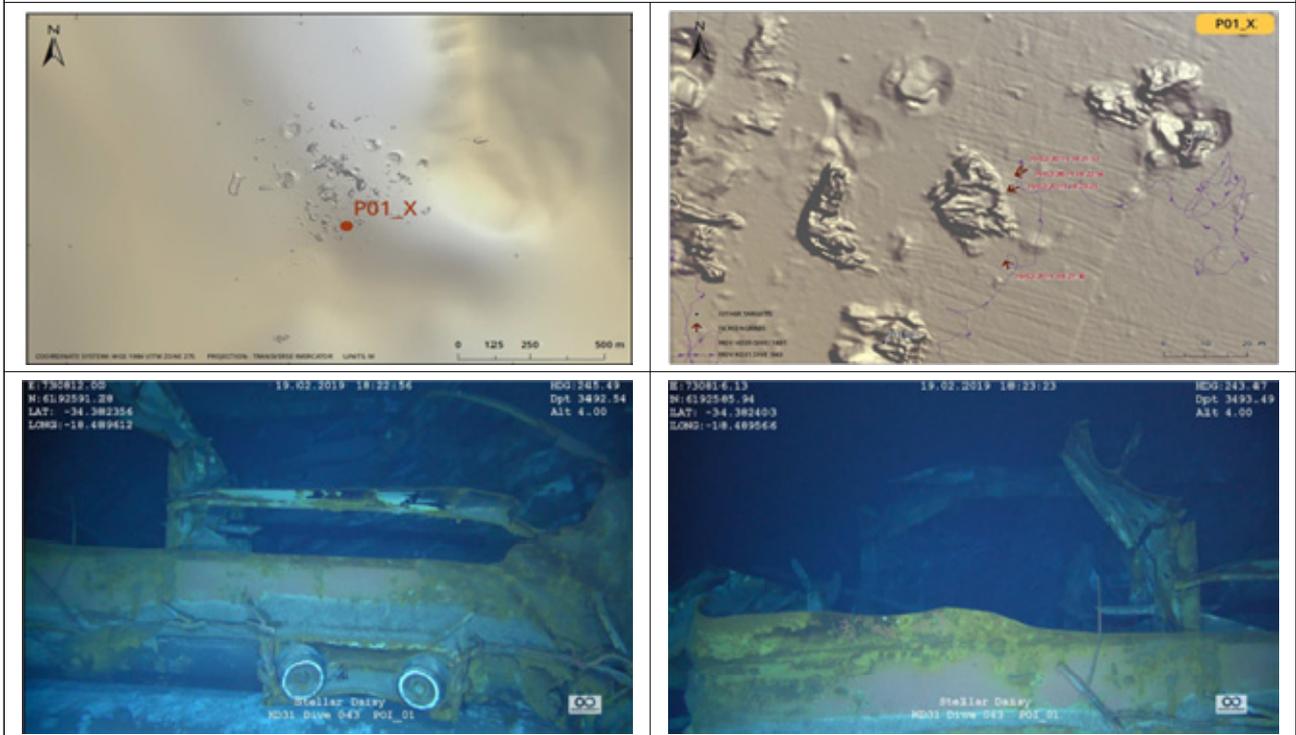
60. P01_WW01

2~3조각의 찢어지고 구겨진 보강판 구조물의 일부로 어느 부분 잔해인지 파악이 어려움



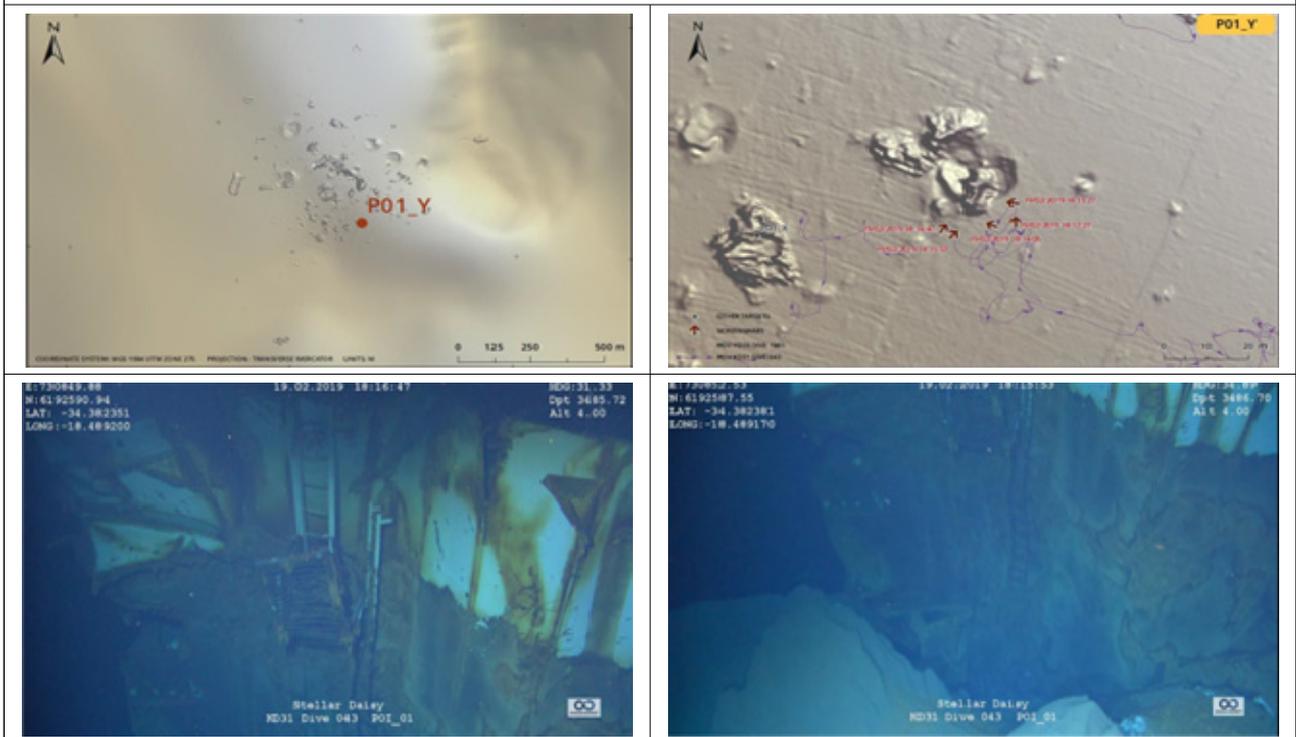
61. P01_X

여러 개의 찢어지고 구겨진 보강판 구조물이 발견되고 갑판 가장자리와 선체 흡수선 윗 부분이 만나는 부분의 구조물 잔해로 추정



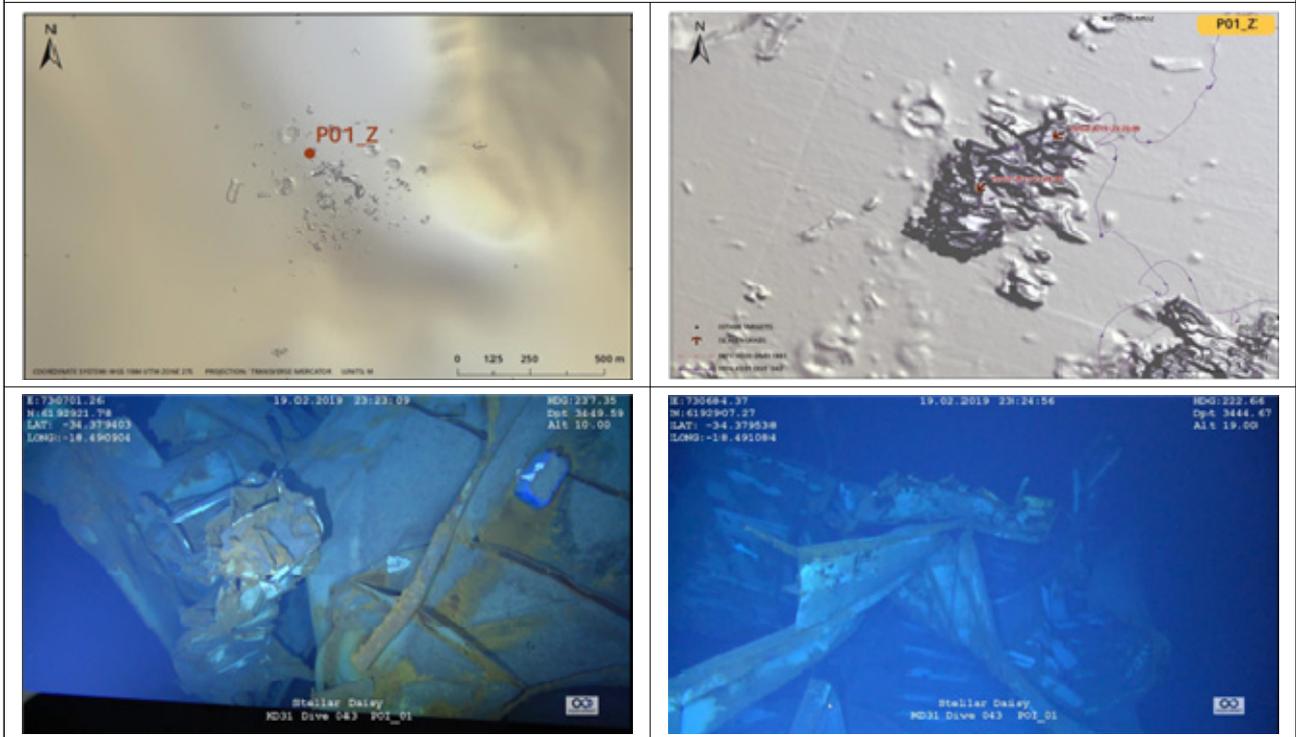
62. P01_Y

찢어지고 구겨진 보강판 구조물로 화물창 또는 선체 내부 구조의 격벽 구조물로 추정됨



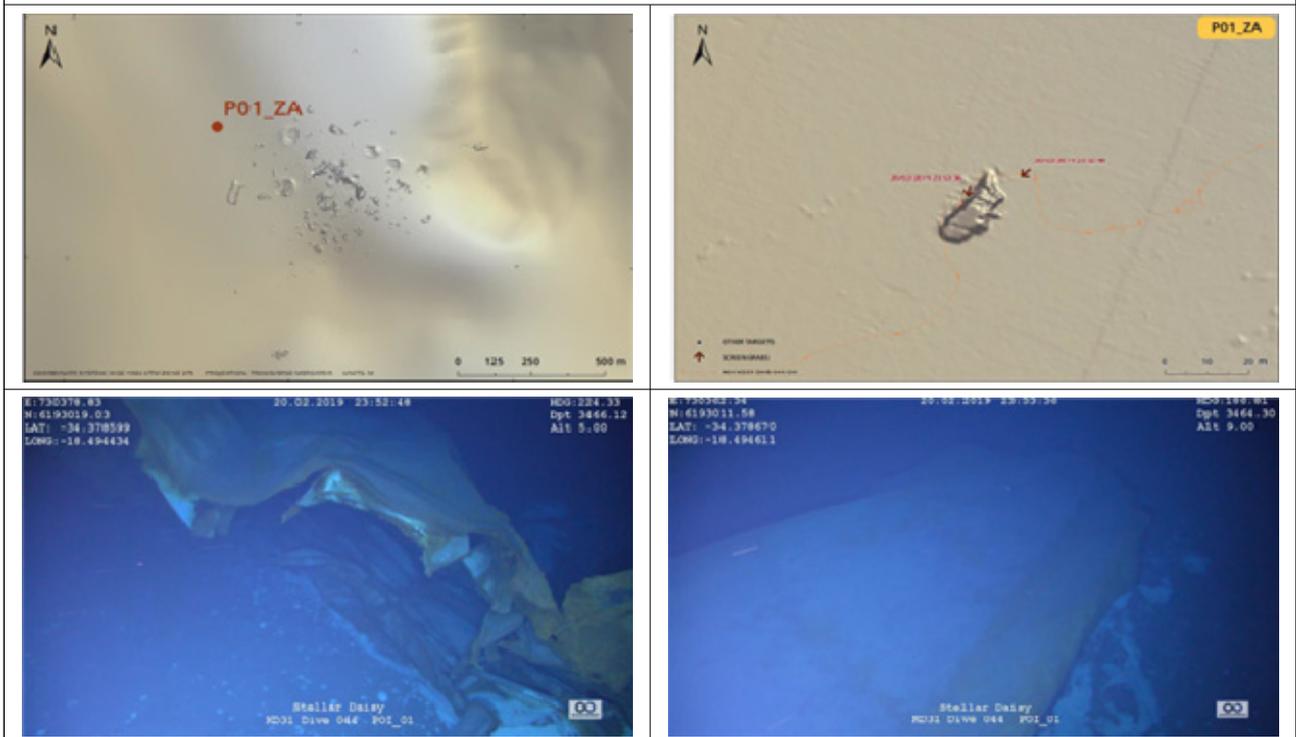
63. P01_Z

찢어지고 구겨진 보강판 구조물이며, 식별하기 곤란하나 화물창 또는 선체 내부의 격벽 구조물로 추정됨



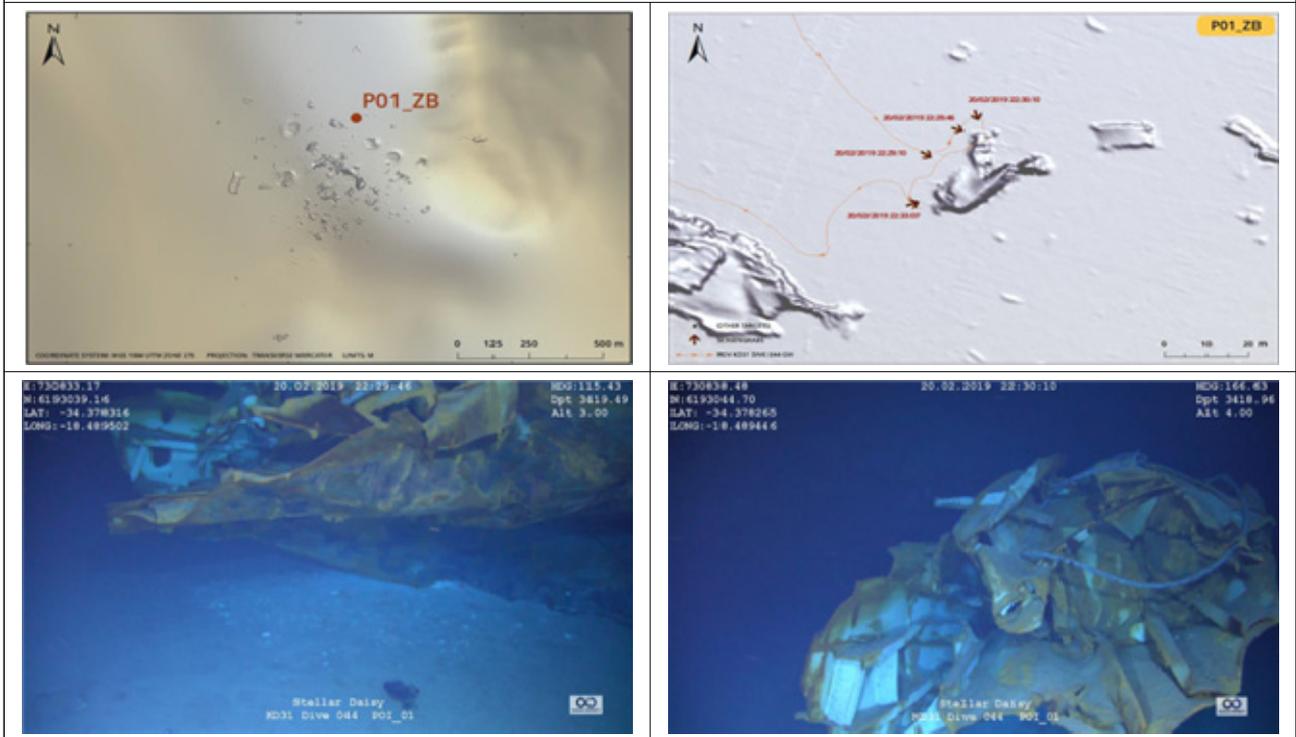
64. P01_ZA

찢어지고 구부러진 보강판 구조물이며, 붉은색으로 보아 갑판 또는 흡수선 아래 부분으로 추정됨



65. P01_ZB

찢어지고 구부러진 보강판 구조물로서 한쪽 면이 검은색 다른 면이 회색으로 선체외판 흡수선
 윗부분으로 추정됨



66. P01_ZC

구멍이 등간격으로 뚫린 구조물로서 해치코밍 일부로 추정됨

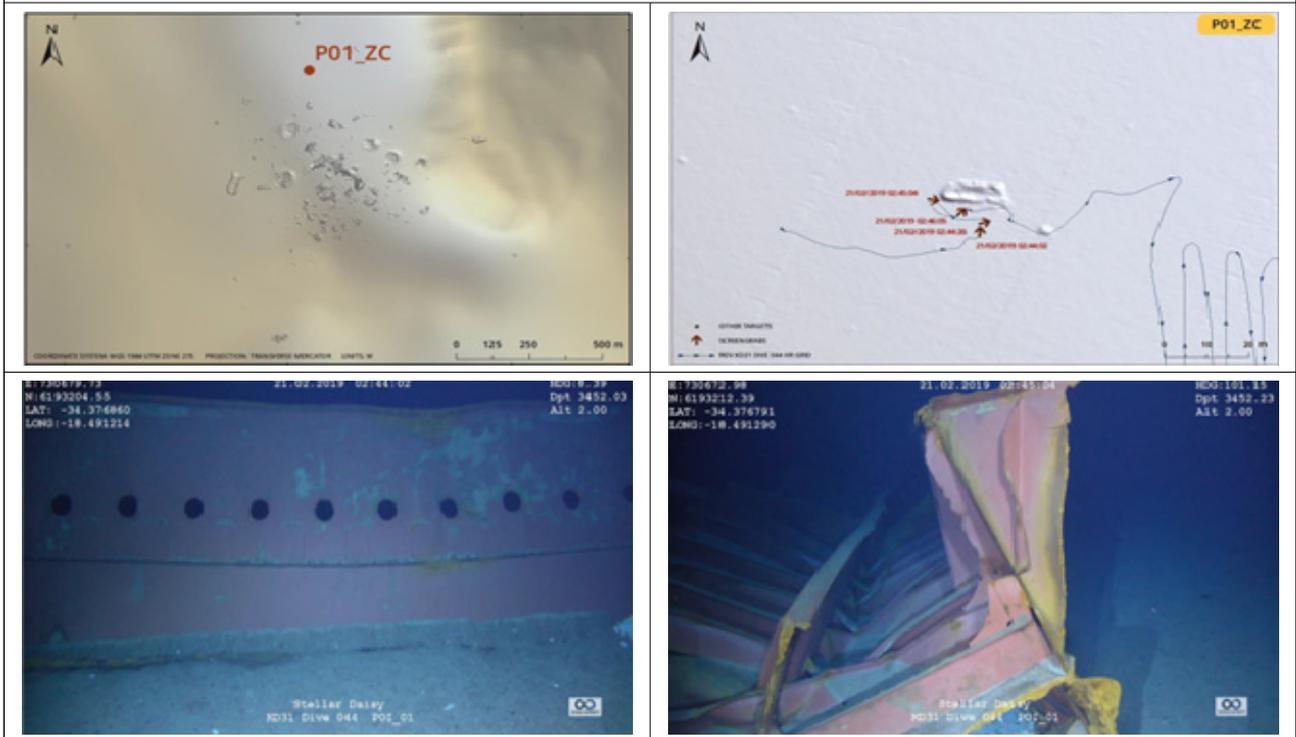


표 목차

<표 1> 국제협약 완화 또는 면제 사항	12
<표 2> 개조 후 평형수탱크 및 화물창 용량	17
<표 3> 선박검사 이력	18
<표 4> 승선선원 현황	20
<표 5> 개조 이후 스텔라데이지 운항이력	21
<표 6> 선박 안전관리시스템 인증심사 현황	24
<표 7> 2011년 7월 입거검사 시 주요 강제 수리내역	27
<표 8> 2012년 6월 입거검사 시 주요 강제 수리내역	29
<표 9> 2015년 5월 입거검사 시 주요 강제 수리내역	30
<표 10> 화물 적재작업 일정	43
<표 11> 흘수 검정(Draft Survey) 결과	44
<표 12> 평형수 및 연료유 등 적재현황	45
<표 13> 정오보고서(2017.03.26.~03.31.) 주요 내용	47
<표 14> 스텔라데이지의 항로상 파도	58
<표 15> 스텔라데이지의 항로상 바람 및 조류	59
<표 16> 사고 당시 선박의 운동량 추정	62
<표 17> 출항 당시 비손상복원성 계산 결과	63
<표 18> 출항 당시 비손상복원성 기준 충족 여부	64
<표 19> 곡물적재복원성 기준 충족 여부	65
<표 20> 손상복원성 계산 결과	66
<표 21> 손상복원성 계산서와 사고 당시 실제 적재상태간 손상복원성 비교	67
<표 22> 개조 이후 다항양하 이력	74
<표 23> 침몰 가능성 판단을 위한 손상 예시	79
<표 24> 추정 가능한 시나리오	81

<표 25> 추정 시나리오 1	82
<표 26> 추정 시나리오 2	83
<표 27> 설계응력보다 높은 응력이 발생한 부위	90
<표 28> 최종강도해석 모델 및 하중 단계	97
<표 29> 최종강도해석 결과	98
<표 30> 손상해석 조건	102
<표 31> 밀폐구획 붕괴압력	121
<표 32> 복원된 데이터	123
<표 33> 사고 당시 시간대별 생존선원의 이동 경로 재구성	129

그림 목차

<그림 1> 스텔라데이지 일반배치도	8
<그림 2> 스텔라데이지 전경	9
<그림 3> 건조 당시 구조	11
<그림 4> 화물창 이중저 신설 등 개조 후 단면도	13
<그림 5> 횡 지지 격벽	14
<그림 6> 중간 웹프레임	14
<그림 7> 70번 프레임 수밀 격벽	15
<그림 8> 격벽 인접 횡단면	15
<그림 9> 선체구획의 용도 변경	16
<그림 10> 사고 당시 선사 조직도	24
<그림 11> 사고 당시 선사 비상보고체계도	26
<그림 12> 프레임 위치	28
<그림 13> 65번 프레임 횡격벽 수리내역	31

<그림 14> 3번 좌현 평형수탱크(2013년 4분기 점검보고서)	32
<그림 15> 화물창 하부 중앙 공탱크(2013년 4분기 점검보고서)	33
<그림 16> 선수 상갑판 외판파공(2015년 3분기 점검보고서)	33
<그림 17> 선수 갑판창고 바닥 덧 시공(2015년 3분기 점검보고서)	34
<그림 18> 4번 좌현 평형수탱크 트랜스버스 웹브 균열(2015년 3분기 점검보고서)	34
<그림 19> 항해지시서 주요 내용	39
<그림 20> 적하계획서	40
<그림 21> 구아이바항 전경	41
<그림 22> 화물의 수분함량 및 운송가능수분한계에 관한 증명서 주요 내용	42
<그림 23> 플라리스쉬핑(주) 동종 선박의 화물적재 사진	43
<그림 24> 화물 적재현황	45
<그림 25> 개략적인 예정 항로 및 사고위치	46
<그림 26> SNS(카카오톡) 메시지 화면	48
<그림 27> 사고위치	51
<그림 28> 수색·구조 작업 시 발견된 구멍뚫목	52
<그림 29> 수색·구조 작업 시 발견된 구멍정	52
<그림 30> 구멍정 및 구멍뚫목 설치 위치	53
<그림 31> 사고 시점의 유의파고와 파향 분포	60
<그림 32> 사고항차 시간대별 해상상태	61
<그림 33> 사고 당시 바람과 파도	62
<그림 34> 복원정 곡선	64
<그림 35> 손상조건(Damage Cases)	66
<그림 36> 2번 좌현 평형수탱크 손상 가정 시 선체 침하 및 자세	68
<그림 37> 2번과 3번 좌현 평형수탱크 손상 가정 시 선체 침하 및 자세	68
<그림 38> 화물적재 완료 후 종강도 계산 결과	69
<그림 39> 격창양하 예시	74
<그림 40> 적하지침기기 종강도 계산 결과	75
<그림 41> 2번 평형수탱크 해수주입밸브 및 배관도	85

<그림 42> 스텔라데이지와 최신 VLOC 평형수탱크 크기 비교	86
<그림 43> 좌현 2번 평형수탱크 침수 시 위험성	86
<그림 44> 유한요소 해석모델 예시(선박전체)	88
<그림 45> 유한요소 해석모델 예시(반쪽)	89
<그림 46> 피로강도해석 모델	91
<그림 47> 선저외판의 피로 취약부	92
<그림 48> 선측외판의 피로 취약부	93
<그림 49> 횡경사별 하중 적용	94
<그림 50> 2번, 3번 화물창에서 발생하는 응력	94
<그림 51> 79번 늑골부분의 응력결과	95
<그림 52> 횡단면 취약부 및 고응력부	95
<그림 53> 비대칭 파랑 압력과 화물압력에 따른 하중분포(2단계 동하중 ASP)	96
<그림 54> 선박전체 해석, 최종강도해석, 손상해석 절차	97
<그림 55> 2번 화물창 파랑 수직굽힘모멘트(WVBM) 작용	99
<그림 56> 2번 화물창 비대칭 횡압력(ASP) 작용	99
<그림 57> 3번 화물창 파랑 수직굽힘모멘트(WVBM) 작용	100
<그림 58> 3번 화물창 비대칭 횡압력(ASP) 작용	100
<그림 59> 손상해석 모델 영역	101
<그림 60> 2번 화물창 L1 부분 손상 가시화	103
<그림 61> 3번 화물창 L1 부분 손상 가시화	103
<그림 62> Seabed Constructor	107
<그림 63> AUV(Autonomous Underwater Vehicle)	108
<그림 64> ROV(Remotely Operated Vehicle)	108
<그림 65> 수색구역	109
<그림 66> 수색구역의 저주파 측면주사음탐기 자료 모자이크	110
<그림 67> 잔해 추정지역의 저주파 측면주사음탐기 자료 모자이크	110
<그림 68> 기본관심지점 세부 분류	111
<그림 69> 스텔라데이지 잔해	112

<그림 70> 조타실 위 갑판 사고 전후 비교	112
<그림 71> 항해자료기록장치 발견 및 회수	113
<그림 72> 항해자료기록장치 보관	114
<그림 73> 상부구조물 상세	114
<그림 74> 고해상 측면주사음탐기 잔해조사	115
<그림 75> 전체 육안조사 시 ROV 이동경로	116
<그림 76> 주요 선체잔해 위치	116
<그림 77> 주요 선체잔해 육안조사	117
<그림 78> 잔해 주변의 철광석	118
<그림 79> 침몰선박 심해수색 사례	120
<그림 80> 밀폐구획 식별번호	120
<그림 81> 보호용기 케이싱 및 전자기판	122
<그림 82> 메모리 모듈 케이스	122
<그림 83> 메모리 모듈	123
<그림 84> 복원된 데이터에 의한 스텔라데이지 항적	124
<그림 85> 사고 당시 생존선원 위치	128