

[특별조사 2021-007]



해양사고 특별조사보고서

- 케미컬운반선 스톨트그로엔랜드 폭발사고 -

사고일자 : 2019.09.28.

공표일자 : 2021.12.31.

중앙해양안전심판원 특별조사부

참고사항

영국(MAIB)은 사고 선박의 기국인 케이맨제도와 체결한 양해각서(MOU)에 따라, 폭발사고 직후 사고조사에 착수하였고, 연안국인 우리나라(중앙해양안전심판원)는 사고 조사에 협력하였으며, 영국은 조사 후 사고발생 원인과 교훈사항 등을 담은 조사보고서를 공표하였습니다.

중앙해양안전심판원은 이 폭발사고의 발생 원인과 교훈 등을 국내 케미컬 운항선사 및 선박종사자 등과 공유하기 위하여 영국의 조사보고서를 한글로 번역하여 발간하였습니다.

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

화학제품운반선 *스톨트 그로엔랜드* 화물탱크 폭발 및 화재사고 조사보고서

2019년 9월 28일

대한민국 울산



이 사고조사는 영국 해양사고조사국(Marine Accident Investigation Branch, MAIB)이 MAIB와 REG(Red Ensign Group: 영국의 역외선적제도 그룹-GC1 & GC2)의 GC1인 맨섬, 케이맨 제도, 버뮤다 제도 및 지브롤터 간 체결된 양해각서(MOU)에 따라 케이맨 제도 정부를 대신하여 수행하였다.

2018년 케이맨 제도 상선규정
(해양사고 보고 및 조사)
제4조 발체

“본 법에 따른 해양사고조사의 유일한 목적은 사고원인과 정황을 확인하여 향후 사고를 예방하는 것이다. 단, 상기 목적을 달성하기 위한 경우를 제외하고 책임소재나 책임유무를 따지는 것은 본 조사의 목적이 아니다.”

참고

본 보고서는 소송을 고려하여 작성되지 않았으며 2018년 케이맨 제도 상선(해양사고 보고 및 조사) 규정 제22조에 따라 민·형사상 책임, 처벌 또는 비난 등을 위해 작성된 것이 아니다.

MAIB의 모든 발행물은 웹사이트(www.gov.uk/maib)에서 확인할 수 있습니다.

표지 출처: 라피노(Lappino, shipspotting.com)

모든 문의는 다음 주소 및 연락처로 하시길 바랍니다.

영국 해양사고조사국(Marine Accident Investigation Branch)

주소:

First Floor, Spring Place
105 Commercial Road Southampton
SO15 1GH
United Kingdom
이메일: maib@dft.gov.uk
전화번호: +44 (0)23 8039 5500

케이맨 제도 선급

주소:

Breezy Castle Unit 1
125 Owen Roberts Drive
P.O. Box 2256
Grand Cayman KY1-1107
www.cishipping.com/contact-us

근무시간 내 언론 문의응대: +44 (0)1932 440015

근무시간 외 언론 문의응대: +44 (0)300 7777878

© 2021년 Crown저작권

부서 또는 기관의 로고를 제외하고 이 문서/출판물을 어떠한 형식 또는 매체를 통하여 재사용 할 수 있다. 재사용하는 자는 정확하게 사용하여야 하고 잘못된 내용으로 사용되어서는 안 된다. 자료의 출처가 Crown 저작권에 속한다는 것을 알려야 하고 출처 출판사의 제목을 표시하여야 한다. 제3자의 저작물이 발견된 경우에는 해당 저작권자의 허가를 받아야 한다.

목차

용어 및 약어	vi
개요	1
제1장 사실정보	2
1.1 스톨트 그로엔랜드호 선박명세 및 사고정보	2
1.2 사고 경과	3
1.2.1 항해 및 화물양하	3
1.2.2 폭발	7
1.2.3 비상대응	7
1.3 환경 여건	10
1.4 현장조사	10
1.5 손상	10
1.6 선내 기록	11
1.7 화물(스티렌 모노머)	12
1.7.1 기본정보	12
1.7.2 중합반응	16
1.7.3 중합억제제	16
1.8 화물시스템	18
1.9 휴스턴에서의 선적	18
1.9.1 계획수립 및 문서작성	18
1.9.2 화물	20
1.9.3 스티렌 모노머와 중합억제제의 혼합	21
1.9.4 스티렌 모노머 표본채취	21
1.10 항해 중 화물온도 변화	23
1.11 승무원	25
1.11.1 일반 사항	25
1.11.2 선장	25
1.11.3 1등 항해사(울산항)	25

1.11.4 1등 항해사(선적 및 항해)	25
1.11.5 항해일정	25
1.12 육상 화물관리	26
1.13 선내 화물절차	27
1.13.1 계획수립 및 적하	27
1.13.2 화물 모니터링	27
1.14 IBC 코드	27
1.15 해운업계 지침	29
1.15.1 탱커안전지침	29
1.15.2 CDI 지침	29
1.16 저장 및 취급 지침	30
1.16.1 스티렌 모노머: 안전취급지침서(2018)	30
1.16.2 안전취급자료	31
1.16.3 안전보건자료	32
1.17 최근 검사와 심사, 현장검사(Vetting inspection)	32
1.18 염포부두	32
1.19 스티렌 모노머 관련 해양사고 및 준해양사고	33
1.19.1 스톨트 포커스(Stolt Focus)호	33
1.19.2 그 밖의 다른 해양사고	34
1.19.3 육상에서의 사고	34
1.20 스티렌 모노머 표본 및 작업복 분석결과	35
제2장 분석	37
2.1 목적	37
2.2 폭발과 화재의 메커니즘	37
2.3 중합반응 개시	37
2.4 열전도	38
2.5 중합억제제와의 혼합	39
2.6 중합억제제의 고갈	39
2.7 화물 적부	40
2.8 온도 모니터링	43
2.9 중합반응 시 취한 조치	43
2.10 화재진화 작업	44
2.11 스톨트 포커스호 사고	44

제3장 결론	46
3.1 본 사고의 직접적인 원인으로 과거 권고사항으로 언급되었거나 권고사항으로 결정되었던 안전문제	46
3.2 본 사고의 직접적인 원인은 아니나 과거 권고사항으로 언급되었거나 권고사항으로 결정되었던 안전문제	47
3.3 본 사고의 직접적인 원인이 아닌 기타 안전문제	47
제4장 조치	48
4.1 MAIB가 취한 조치	48
4.2 그 밖의 다른 기관이 취한 조치	48
제5장 권고사항	49

그림 목차

그림 1. 울산항 오드펠터미널 및 염포부두	5
그림 2. 울산항 하역 후 남은 화물	6
그림 3. 9S의 P/V 밸브에서 여전히 배출되고 있는 증기(CCTV 정지화면)	8
그림 4. 탱크 파열과 증기배출 장면(CCTV 정지화면)	8
그림 5. 증기 인화(CCTV 정지화면)	8
그림 6. 울산대교 인근 화염	9
그림 7. <i>바우 달리안호</i> 상갑판 위 연소된 스티렌 모노머 잔여물	11
그림 8. 스티렌 모노머 잔여물 표본	11
그림 9. <i>바우 달리안호</i> 승무원 작업복	11
그림 10. 9S 온도조절밸브	12
그림 11. 상갑판과 9S 탱크 위치 조감도	13
그림 12. 9S 탱크 파열	14
그림 13. 9S 탱크 출입구	14
그림 14. 선체중앙부 갑판실	15
그림 15. 거주구역 내부	15
그림 16. 거주구역 전면	16
그림 17. VDR로 기록된 화물온도	17
그림 18. 중합억제제 증명서	22
그림 19. 최종 표본 분석결과	24
그림 20. 9월 20일 ~ 28일 9S 스티렌 모노머 온도	41

표 목차

표 1. 8월 17일자 휴스턴 출항 시 화물적부 상태	3
표 2. 고베와 울산에서 양하한 화물온도	4
표 3. 2019년 9월 19일 ~ 27일 화물탱크 8S, 9S, 10S 및 11S의 12시 00분(UTC) 기준 일일온도	23
표 4. 스티렌 모노머의 TBC 고갈(대기 중 저장된 경우)	31
표 5. 제조사별 스티렌 모노머 요건 비교	31
표 6. 1990년 이후 스티렌 모노머 중합폭주 육상사고	35
표 7. 여러 가지 물질의 20°C 비열용량(SHC)	39
표 8. 플라스틱스 유럽의 스티렌 모노머: 안전취급지침서(2018)에 제시된 수치를 활용하여 계산한 TBC 고갈	40

용어 및 약어

2/O	2등 항해사
3/O	3등 항해사
ACA	American Cargo Assurance
AIS	자동식별장치
CCR	하역제어실
CDI	Chemical Distribution Institute
C/O	1등 항해사
ERT	비상대응팀
HMD	헥사메틸렌다이아민(Hexamethylene diamine)
IBC Code	위험화학품 산적운송 선박의 구조 및 설비를 위한 국제규칙
IMO	국제해사기구
Ineos	이네오스 스티롤루션 미국지사
INTERTANKO	국제독립탱커선주협회
iStow	탱커 화물적재프로그램 iStow
KMST	한국 중앙해양안전심판원
LPD	LPD 랩 서비스(LPD Lab Services Ltd.)
m	미터
m ³	입방미터
mb	밀리바
MARPOL	국제해양오염방지협약
MCO	선사 해사규정담당자
OS	갑판원

OTK	오드펠터미널(대한민국 울산)
ppm	피피엠(100만분율)
PTZ	페노티아진(Phenothiazine)
p/v	압력진공차단밸브
SDS	안전보건자료
SHC	비열용량
SMS	안전관리체제
SOLAS	국제해상인명안전협약
ST B503	육상저장탱크 503
STCW	선원의 훈련·자격증명 및 당직근무의 기준에 관한 국제협약
Stolt	스톨트 탱커스 B.V.(Stolt Tankers B.V.)
t	톤
TBC	중합억제제 4-tert-Butylcatechol
TEA	트리에탄올아민(Triethanolamine)
TSG	탱커안전지침
UTC	세계협정시
VCR	운송화물보고서
VDR	선박항해기록장치
Voranol	프로폭실산화 및 에톡실산화 글리세롤(Glycerol, propoxylated and ethoxylated)
YMP3	염포부두 제3선석

시각: 본 보고서에 기재된 모든 시각은 별도로 명시하지 않는 한 UTC+9:00(한국표준시)을 기준으로 한다.



스톨트 그로엔랜드호(Stolt Groenland)

개요

2019년 9월 28일 케이맨 제도 선적의 화학제품운반선 *스톨트 그로엔랜드호*(*Stolt Groenland*)에서 스티렌 모노머(Styrene Monomer)를 선적한 화물탱크가 파열되어 폭발과 화재사고가 발생하였다. 해당 선박은 한국 울산항 일반 화물 선적에 접안되어 있었고, 싱가포르 선적의 *바우 달리안호*(*Bow Dalian*)는 *스톨트 그로엔랜드호*에 접현계류하고 있었다. 스티렌 모노머 증기가 연소되어 큰 불씨로 이어져 위쪽에 있던 울산대교에까지 도달하였다. 선박 두 척 모두 손상되었고 선원 두 명은 경미한 부상을 당했다. 6시간 동안 이어진 화재진압과정에서 비상대응팀원 15명이 부상을 당한 것으로 알려졌다.

스티렌 모노머가 적재된 탱크의 파열은 선내 다른 화학물질로부터 전도된 열이 탱크내 온도를 상승시켜 중합폭주(runaway polymerization)가 시작되었기 때문이다. 항해기간중 화학물질 중합을 방지하고자 첨가된 중합억제제는 탱크내 온도상승으로 인해 예정보다 더 빨리 고갈되었다. 고온화물에 바로 인접하여 스티렌 모노머를 적재하지는 않았지만, 중간에 위치한 탱크를 통해 열이 전도될 가능성을 충분히 고려하거나 사정하지 않았다. 선박이 울산대교 아래에 접안하기 전 온도는 이미 임계치에 도달하였다. 항해기간 동안 선원들은 스티렌 모노머 온도를 모니터링하지 않았으며 점차 위험한 상황에 도달하는 것을 인지하지 못했다.

사고발생 2주 전 이 선사(스톨트 탱커스 B.V.)가 운항하는 또 다른 선박인 *스톨트 포커스호*(*Stolt Focus*)에서 이와 유사한 스티렌 모노머의 중합반응 사고가 발생하였다. 당시에는 중합폭주가 일어날 수 있는 온도에 이르기 전, 중합과정에서 열이 발생하는 것을 발견하였다. 두 경우 모두 휴스턴에서 스티렌 모노머를 비슷한 시기에 동일한 탱크로부터 받아 선적하였고 노출된 환경조건도 서로 유사하였다. *스톨트 포커스호* 사고는 기국이나 스톨트 탱커스 B.V. 소속 선박의 다른 선장들에게 보고되지 않았다.

사고 후 대한민국 해양수산부(Ministry of Oceans and Fisheries, MOF)는 울산항 일반화물 선적에서 위험화물에 대한 STS 이송작업을 금지하였다. 스톨트 탱커스 B.V.는 즉시 자사 선박이 운송하는 모든 화물의 온도를 확실히 모니터링하고 육상 사무소에 보고하도록 조치를 취하였다. 또한, 중합억제제가 첨가된 화물과 열에 민감한 화물이 지닌 위험성에 대한 승무원의 인식을 높이는 조치를 취하였다. 그리고 회사에서는 열에 민감한 화물의 안전한 적재 및 모니터링을 돕기 위한 기술 및 행정 이니셔티브를 개발하고 있다.

스톨트 포커스호 사고에서 얻은 교훈과 그 결과로 실시된 연구 이니셔티브가 광범위한 화학물질해상운송 분야에 도움이 되도록 스톨트 탱커스 B.V.에 권고하였다. 또한, 케이맨 제도 선박등록국(Cayman Island Shipping Registry)과 CDI(Chemical Distribution Institute), 그리고 플라스틱스 유럽(Plastics Europe, 스티렌모노머생산자협회(Styrene Producers Association))에 대해서도 권고하였다. 이러한 것들은 선내 장비와 테스트 설비의 한계를 고려하여 중합억제제 증명서와 스티렌 모노머 처리 가이드에서 일관되고 달성가능한 지침을 제시하는 것을 돕기 위한 것이다.

제1장 사실정보

1.1 스톨트 그로엔랜드호 선박명세 및 사고정보

선박 주요명세	
선명	스톨트 그로엔랜드(<i>Stolt Groenland</i>)
국적	케이맨 제도
선급	노르웨이-독일 선급(DNV-GL)
IMO번호/ 어선번호	9414072
선박종류	화학제품/석유제품운반선
등록선주	스톨트 탱커스 B.V.
선박관리자	스톨트 탱커스 B.V.
건조자재	철강
건조연도	2009년
전장(LOA)	182.72m
폭	32.24m
총톤수	25881
재화중량톤수	43478
법정최소승무원	17명
운송허가화물	산적액체 화학품 및 석유제품
항해 정보	
출발항	일본 고베
도착항	대한민국 울산
항행구역	국제항해
화물정보	산적액체 화학품 27,117톤
승무원원	25명
해양사고 정보	
일시	2019년 9월 28일 10시50분
해양사고 또는 준해양사고 유형	중대한 해양사고
사고발생 위치	대한민국 울산
선내 사고발생 위치	화물탱크 및 갑판
사상자	2명(스톨트 그로엔랜드호와 바우 달리안호 승무원 각 1명)은 경미한 부상을 입음. 육상 하역인부/공무수행자 15명이 부상당한 것으로 보고됨. 부상 경중은 미상
피해/환경영향	유독성 증기가 대기로 방출됨
선박 운항	접안
항해 구분	접안
외부 및 내부환경	맑음. 대기온도: 섭씨 24도 바람: 실바람 습도 93%
승선인원	26명

1.2 사고 경과

1.2.1 항해 및 화물양하

스톨트 탱커스 B.V.(스톨트社)가 운항하는 케이맨 제도 선적의 화학제품운반선 스톨트 그로엔랜드호는 2019년 8월 2일부터 17일까지 미국 텍사스 터미널에서 20개의 다른 화학물질들을 선적하였다. 화물은 화물탱크 39개 중 37개에 실려져 극동지역 여러 항만으로 운송되었다.(표1). 3번 좌현탱크(3P), 7번 우현탱크(7S), 8번 좌현탱크(8P), 9번 좌현탱크(9P), 10번 좌현탱크(10P), 11번 좌현탱크(11P)에는 고온화물이 있었다. 3P와 7S 화물온도는 섭씨 40 ~ 45도 사이를 유지해야 하며, 마지막에 선적되는 8P, 9P, 10P, 11P 탱크의 화물온도(헥사메틸렌다이아민, HMD)는 섭씨 45 ~ 50도 사이를 유지해야 한다. 선적 당시 HMD의 온도는 섭씨 61도였다.

KEY: 탱크번호 액체수량/98% 탱크용량(㎥) IMO 화학물질명 선적/하역항 선적/운송온도(°C)	P=좌현		C=중앙	S=우현
		가열화물		스티렌 모노머
1P: 502/809 - 부틸셀로솔브 텍사스시티/싱가포르 31/대기온도	1C: 1272/1377 - 아크릴로나이트릴 포인트 컴포트/대만 29/대기온도	1S: 아디포니트릴 - 870/890 휴스턴2/울산 31/대기온도		
2P: 1259/1279 - 아디포니트릴 휴스턴2/울산 OTK 32/대기온도	2C: 1191/1326 - 아크릴로나이트릴 포인트 컴포트/대만 29/대기온도	2S: 1269/1279 - 염화에틸렌 프리포트/울산 30/대기온도		
3P: 432/620 - 비스페놀 A 디글리시딜 에테르 프리포트/울산 42/40-45	3C: 578/596 - 아디포니트릴 휴스턴2/울산 OTK 32/대기온도	3S: 585/620 - 아이소부틸 아세테이트 휴스턴2/울산 31/대기온도		
4P: 264/352 - 다이클로로메타인 프리포트/울산 37/대기온도	4C: 205/273 - 다이클로로메타인 프리포트/울산 35/대기온도	4S: 262/352 - 다이클로로메타인 프리포트/울산 35/대기온도		
5P: 578/663 - 에틸렌 글리콜 모노부틸 에테르 휴스턴2/대만 33/대기온도	5C: 587/610 - 아디포니트릴 휴스턴2/울산 OTK 31/대기온도	5S: 443/663 - 톨루엔 다이이소시아네이트 휴스턴1/울산 33/대기온도		
6P: 1973/2157 - 스티렌 모노머 휴스턴1/대만 17/대기온도(중화방지 처리 - 가열금지)	6C: 1842/2085 - 스티렌 모노머 휴스턴1/대만 17/대기온도(중화방지 처리 - 가열금지)	6S: 2110/2157 - 아디포니트릴 휴스턴2/울산 31/대기온도		
7P: 916/1212 - 에톡스 폴리하이드릭 알코올 휴스턴2/울산 39/대기온도	7C: 528/1149 - 폴리(2-8) 알킬렌 글리콜 모노알킬(C1-C6) 에테르 텍사스시티/싱가포르 31/대기온도	7S: 462/1212 - 비스페놀 A 디글리시딜 에테르 프리포트/울산 50/40-45		
8P: 599/663 - 헥사메틸렌다이아민(HMD) 휴스턴2/울산 61/45-50	8C: 494/610 - 트리에탄올아민 텍사스시티/울산 40/대기온도	8S: 595/663 - 유해액체물질(5) (Alfol 610) 휴스턴2/고베 31/대기온도		
9P: 2092/2157 - HMD 휴스턴2/싱가포르 61/45-50	9C: 1953/2085 - 아디포니트릴 휴스턴2/울산 34/대기온도	9S: 1966/2157 - 스티렌 모노머 휴스턴1/대만 17/대기온도(중화방지 처리 - 가열금지)		
10P: 1124/1212 - HMD 휴스턴2/울산 61/45-50	10C: 1147/1149 - Voranol(프로폭실산화 및 에톡실산화 글리세롤) 프리포트/울산 32/대기온도	10S: 955/1212 - 메타크릴산메틸 휴스턴2/대만 32/대기온도(중화방지 처리 - 가열금지)		
11P: 314/324 - HMD 휴스턴2/싱가포르 58/45-50	11C: 299/329 - 에탄올아민 텍사스시티/고베 33/대기온도(최고 55°C)	11S: 321/324 - Voranol(프로폭실산화 및 에톡실산화 글리세롤) 프리포트/울산 33/대기온도		
12P: 0/1383 - 없음	12C: 1346/1347 - 염화에틸렌 프리포트/울산 32.5/대기온도	12S: 0/1383 - 없음		
13P: 1887/1889 - 염화에틸렌 프리포트/울산 31/대기온도	13C: 1944/1954 - 염화에틸렌 프리포트/울산 33/대기온도	13S: 1886/1889 - 염화에틸렌 프리포트/울산 32/대기온도		

표 1: 8월 17일자 휴스턴 출항 시 화물적부 상태

또한, 화물에는 8월 7일과 8일에 선적된 스티렌 모노머 5,245톤도 포함되어 있었다. 이는 화물탱크 6P(1,789톤)와 6번 중앙탱크(6C, 1,671톤), 9S(1,785톤)로 나누어 선적되었으며, 중합억제제가 첨가되어 있었다[제1.7.2장 참고]. 8월 17일 이 선박은 일본으로 향했다.

*스톨트 그로엔랜드호*는 9월 22일과 24일 사이 일본 고베 앞바다에 정박해 있는 동안 선내 화물탱크 5S와 8C(부분적재), 8S, 11C에서 바지선으로 화물을 양하하였다. 그리고 나서 선박은 대한민국 울산으로 출발하였으며, 9월 26일과 27일 오드펠터미널(Odfjell terminal, OTK)에서 아디포니트릴(adiponitrile)이 실린 화물탱크 6개를 양하하였다. 9월 26일 하역하는 동안 선박의 1등 항해사(C/O)는 접안 후 바로 도착한 교대승무원에게 인계하였다. 그는 15시 00분경 하선하였다.

2019년 9월 27일 오후 동안 *스톨트 그로엔랜드호*는 OTK에서 울산대교 아래 염포부두 제3선석(YMP3)으로 이동하였다(그림 1). 해당 선박은 부두에 우현 접안하였고 저녁 동안 선박대선박(ship-to-ship, STS) 이송방식을 통해 화물 VORANOL을 화물탱크 10C와 11S에서 *스톨트 보이저호(Stolt Voyager)*로 양하하였다. 화물작업 완료 후 *스톨트 보이저호*는 *스톨트 그로엔랜드호* 앞에 접안하였다.

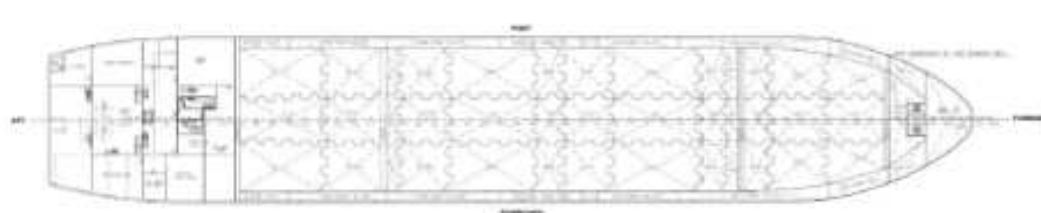
적재량 증명서에 기록된 고베와 OTK에서 양하한 화물온도는 표 2와 같다. 당시 울산에 있던 화물검사원은 9C 내 아디포니트릴 온도(섭씨 48.8도) 상승을 발견했으나 해당 온도는 용선주가 명시한 최고온도인 섭씨 50도보다 낮았기에 C/O와 이를 논의하지 않았으며 조치도 취하지 않았다. 고베와 OTK에서 양하 후 *스톨트 그로엔랜드호*에 남은 화물분포는 그림 2와 같다.

일자	탱크	화물	장소	양하 시 온도
9월 22 ~ 23일	5S	톨루엔(Toluene)	일본 고베	33.2℃
9월 22 ~ 23일	8C (부분적재)	트리에탄올아민 (Triethanolamine)	일본 고베	43.6℃
9월 22 ~ 23일	8S	알폴(ALFOL)	일본 고베	39.1℃
9월 22 ~ 23일	11C	모노에탄올아민(MEA)	일본 고베	48.2℃
9월 26 ~ 27일	1S	아디포니트릴 (Adiponitrile)	울산 OTK	27.2℃
9월 26 ~ 27일	2P	아디포니트릴 (Adiponitrile)	울산 OTK	30.0℃
9월 26 ~ 27일	3C	아디포니트릴 (Adiponitrile)	울산 OTK	29.8℃
9월 26 ~ 27일	5C	아디포니트릴 (Adiponitrile)	울산 OTK	30.5℃
9월 26 ~ 27일	6S	아디포니트릴 (Adiponitrile)	울산 OTK	31.9℃
9월 26 ~ 27일	9C	아디포니트릴 (Adiponitrile)	울산 OTK	48.8℃
9월 27일	10C	VORANOL	울산 YMP3	46.0℃
9월 27일	11S	VORANOL	울산 YMP3	38.4℃

표 2: 고베와 울산에서 양하한 화물온도



그림 1: 울산항 오드펠터미널 및 염포부두



- 가열탱크 (3P, 7S, 8P, 9P, 10P, 11P)
- 공탱크 (1S, 2P, 3C, 5C, 5S, 6S, 8S, 9C, 10C, 11C, 11S, 12P, 12S)
- 스티렌 모노머 탱크 (6P, 6C, 9S)
- 기타 화물 (나머지 탱크)

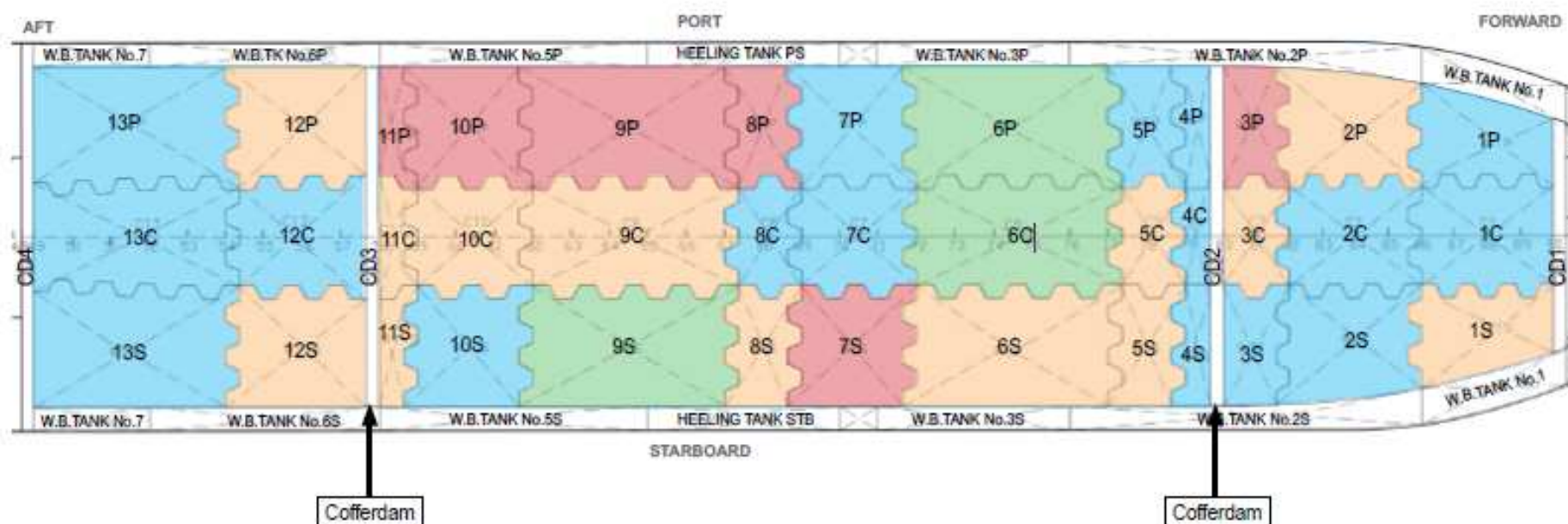


그림 2: 울산항 하역 후 남은 화물

1.2.2 폭발

9월 28일 약 06시 00분경 싱가포르 선적의 케미컬탱커 *바우 달리안호*는 *스톨트 그로엔랜드호* 좌현에 나란히 접현계류하였다. *바우 달리안호*는 *스톨트 그로엔랜드호*와의 STS 이송준비를 위해 육상 차량으로 질소를 받아 화물탱크에 가스치환(Purging) 작업을 시작하였다.

10시 43분경 *스톨트 그로엔랜드호* 화물탱크 9S의 압력진공차단밸브(P/V 밸브)에서 증기가 배출되기 시작하였다(그림 3). 약 2분 경과 후, 탱크에서 상위수준 위험경보(9S 수치가 95%에 도달했음을 알림)가 울렸고 선교 전단에 섬광 등이 켜졌다. 갑판원(OS)은 현문 당직 중 이 경고신호를 발견하였고 즉시 휴대용 무전기로 당직 갑판사관인 3등 항해사(3/O)에게 이를 알렸다. 3/O는 선장실에서 근무 중이었으며 조사를 위해 무인 하역제어실(CCR)로 갔다.

C/O 역시 OS의 무전을 듣고 3/O가 있는 CCR으로 갔다. 그 직후, 선교 전단에서는 최상위수준 위험경보가 울렸으며, 이는 9S 수치가 98%에 달했음을 알리는 것이었다. OS는 다시 한 번 경보를 보고하였다. C/O와 3/O는 화물 모니터링 시스템을 통해 9S 내 압력이 1,340mb였으며 곧 2,000mb로 빠르게 증가하는 것을 관찰하였다.

10시 50분경 선박의 화물 매니폴드 근처에서 폭발이 두 차례 연달아 발생하였다(그림 4). 두 번째 폭발은 배출된 스티렌 모노머 증기를 인화시켰고(그림 5) 그 결과 발생한 화재가 부두 위 울산대교와 매우 인접하여 지나갔다(그림 6). 또한, 불길은 9S와 9C의 P/V 밸브에서 배출된 증기를 연소시켰다.

1.2.3 비상대응

스톨트 그로엔랜드호

스톨트 그로엔랜드호 현문당직 승무원은 두 번째 폭발의 폭발력으로 인해 상갑판에 있는 우현 난간 너머로 날려갔다. OS는 처음에는 난간 중 하나를 붙잡고 있었으나 곧 화재 속 열기로 인해 놓칠 수밖에 없었다. 그는 부두와 선박 사이 바다에 빠졌으나 방현재에 기어올라 부두로 올라올 수 있었다.

C/O는 화재경보를 작동시켰고 승무원들은 각자 소화위치에 집결하였다. C/O 역시 갑판의 포말분사장치를 작동시켜 좌현 방수포(Foam monitor)가 화물 매니폴드를 향하도록 하였다. 3/O는 우현 방수포를 동일하게 작동시켰다. 그러나 화재의 강도와 두꺼운 검은 연기로 인해 선장은 곧바로 전승조원을 갑판 위 구명정 위치로 소집하도록 지시하였다. 승무원은 자유낙하식구명정을 사용하여 퇴선하였다.

바우 달리안호

폭발 후 *바우 달리안호* C/O는 선박의 비상경보와 갑판의 포말소화장치를 작동시켰다. 그는 선장과 함께 방수포가 *스톨트 그로엔랜드호* 상갑판과 화물 매니폴드를 향하도록 하였다. 그리고 나서 승무원들은 선박의 좌현부 줄사다리꼴로 퇴선하였고 지원을 위해 도착해 있던 한국 해양경찰 경비정에 승선하였다.



그림 3: 9S의 P/V 밸브에서 여전히 배출되고 있는 증기(CCTV 정지화면)



그림 4: 탱크 파열과 증기배출 장면(CCTV 정지화면)



그림 5: 증기 인화(CCTV 정지화면)



그림 6: 울산대교 인근 화염

스톨트社

스톨트社는 스톨트 보이저호에 탑승하고 있었던 선사 해사규정담당자(MCO)를 통해 스톨트 그로엔랜드호의 폭발 및 화재사고를 알게 되었고 즉시 네덜란드에 있는 비상대응팀(ERT)을 가동시켰다. ERT는 MCO와 전화 및 “왓츠앱(WhatsApp) 메신저”로 연락하였고 스톨트 그로엔랜드호의 승무원들이 모두 안전하다는 것을 확인하였다. 15시 28분경 ERT는 선박 거주구역쪽 추가 폭발을 보고 받았다. 그러나 16시 12분경 불길이 악화되었고 육안으로 확인되는 불꽃이 없다는 보고를 받았다. 그 직후 화재가 모두 진화되었다는 보고를 받았지만 거주구역에 연기는 아직 남아 있었다.

스톨트社의 선주상호보험사(P&I)인 가드(Gard)는 스톨트社 비상대응팀을 지원하도록 네덜란드에 있는 해난구조업체 아던트(Ardent)를 지정하였다. 또한, 그들이 운항하고 있는 다른 선박에 이메일을 보내 운송 중인 스티렌 모노머가 있는지 확인하였고, 이는 추후 스티렌 모노머 운송 시 필요한 주의사항을 강조한 선단의 플래시리포트(Flash Report) 2019/08호에 반영되었다.

현지 비상대응서비스

11시 01분경 현지 소방대의 육상장비가 YMP3에 도착하였고 진화작업이 시작되었다. 바우 달리안호는 한국 해양경찰의 소방설비를 갖춘 예인선의 도움을 받아 염포부두로부터 이안할 수 있었다. 총 726명의 비상대원이 소화 및 구조작업에 참여하였고 117개의 소화장비가 현장에 배포되었다. 선박 2척의 승무원들과 15명의 비상대원들이 부상을 입었으며 조사나 치료를 위해 병원으로 이송되었다.

1.3 환경 여건

텍사스에서 화물을 선적하는 기간 및 카리브해를 항해하는 동안 *스톨트 그로엔랜드호*가 접한 대기와 해수 평균온도는 섭씨 30도였으며, 당일의 대기온도는 최고 섭씨 37도였다. 이 평균값은 태평양 해역을 건너는 동안 섭씨 25도로 낮아졌다.

고베의 해수온도는 섭씨 26도였으며 대기의 최고 및 최저온도는 각각 섭씨 30도, 28도였다. 울산의 경우 해수온도는 섭씨 24도였으며 최대 및 최저온도는 섭씨 25도, 19도였다.

1.4 현장조사

9월 28일 케이맨 제도 해사청(Maritime Authority)은 국제해사기구(IMO) 해양사고조사코드(Casualty Investigation Code, IMO 결의안 MSC 255(84))에 따라 이 사고를 조사할 것을 MAIB측에 요청하였다. 울산에서의 현장조사 동안 MAIB는 한국 중앙해양안전심판원(Korea Maritime Safety Tribunal, KMST)의 도움을 받았다. *스톨트 그로엔랜드호*에 대한 접근은 한국 해양경찰에 의해 통제되었으며 선내 유독성 공기로 인해 제한되었다.

10월 3일 *바우 달리안호* 선주와 싱가포르 교통안전조사국(Transport Safety Investigation Bureau, TSIB)의 협조로 MAIB 및 KMST의 조사관들은 울산에 있는 *바우 달리안호*를 방문하였다. 선박의 노천갑판과 거주구역에는 연소된 잔여물이 떨어져 있었다(그림 7). 증기가 9S P/V 밸브에서 배출되는 동안 갑판에 있었던 승무원 1명의 작업복(그림 9)과 잔여물 표본(그림 8)은 분석을 위해 수거되었다[제1.2장 참고].

10월 7일 *스톨트 그로엔랜드호* 화물탱크 6C와 6P에서 수집한 스티렌 모노머 표본분석으로 중합억제제 TBC(4-tert-Butylcatechol)의 농도가 각각 8ppm, 7ppm이었음을 알게 되었다. 다음 날 MAIB 조사관은 선박 접근을 승인받았다. 그러나 잔여 유해화학물질과 화재손상으로 인해 주로 검사는 상갑판까지로 제한되었다. 11월 12일 KMST와 KCG의 도움으로 추가 검사를 하였다. 이 검사와 스톨트社가 직접 또는 스톨트社를 대신하여 실시된 검사를 통해 9C와 9S가 열관이 닫혀 있었고 막혀있다는 것(그림 10), 9S와 9C의 P/V 밸브에서 배출된 증기가 점화되었음을 확인하였다.

1.5 손상

*스톨트 그로엔랜드호*의 화물탱크 9S와 9C의 공동 격벽과 9S에 인접한 상갑판에서 큰 구멍이 발견되었다(그림 11과 12). 9S 탱크 출입을 위한 해치(Hatch) 덮개 또한 날아갔다(그림 13). 매니폴드 구역은 각기 다른 수준으로 화재손상을 입었으며 선체중앙부 갑판실은 전소되었다(그림 14).

선박의 거주구역 내부는 광범위한 화재피해를 입었다(그림 15). 기계실과 CCR 사이 갑판은 붕괴되었으며 두 공간 모두 전소되었다. 열기와 연기는 선교를 관통하면서 선교에 있는 장비의 상당 부분을 손상시켰다. 비상대응 기간중 화재 진압을 위해 소방요원들이 깨뜨린 창문을 제외하면 거주구역 전면에는 외부 손상이 적었다(그림 16).

1.6 선내 기록

화물 관련 기록과 “정오보고서(noon report)”와 같은 항해 관련 기록은 *스툴트 그로엔랜드호*에서 정보를 저장하고 육상 관계자와 소통하는데 사용하는 네트워크 시스템인 “베스링크(Veslink)”를 통해 확인할 수 있었다. 의무적으로 기록하는 정보에 추가하여, *스툴트 그로엔랜드호* 항해기록장치(VDR)에는 화물탱크 액면높이, 체적, 온도, 그리고 액체 밀도가 기록되어 있었다.

CCR에 보관된 화물관련 모든 기록(디지털 및 종이문서)과 선체중앙부 갑판실에 저장된 화물표본은 화재로 파손되었다. 그러나 8월 30일 00시 01분(UTC)부터 9월 28일 01시 50분(UTC)까지의 화물온도데이터는 VDR에서 복구되어 이용가능하였다.



그림 7: *바우 달리안호* 상갑판 위 연소된 스티렌 모노머 잔여물



그림 8: 스티렌 모노머 잔여물 표본



그림 9: *바우 달리안호* 승무원 작업복

1.7 화물(스티렌 모노머)

1.7.1 기본정보

스티렌 모노머(또는 에테닐벤젠(ethenylbenzene), 페닐에틸렌(phenylethylene), 페닐에텐(phenylethene), 비닐벤젠(vinylbenzene), 또는 씨나멘(cinnamene)이라 칭함)는 유황의 탄화수소로 플라스틱 제품의 원재료다. 일반적으로 다양한 플라스틱, 고무, 폴리스티렌 제품 제조에 사용된다. 매년 약 3천만 톤의 스티렌 모노머가 생산되며, 이 중 상당수는 플라스틱 제조공장으로 해상운송 된다.

스티렌 모노머는 대기 일반적 조건에서 무색 투명한 액체이며 특징적인 달콤한 냄새를 가진다. 휘발성 및 인화성 물질로 발화점은 섭씨 32도이다. 비등점은 섭씨 145도, 자연발화점은 섭씨 490도이다.

스티렌 모노머는 위장 뿐 아니라 눈과 점막에 심각한 가려움증을 유발하는 등 유해한 영향을 미친다. 스티렌 모노머에 만성적으로 노출되면 두통, 피로, 쇠약, 우울증과 같은 중추신경계 기능장애와 청력상실, 신경손상으로 이어질 수 있다.



그림 10: 9S 온도조절밸브

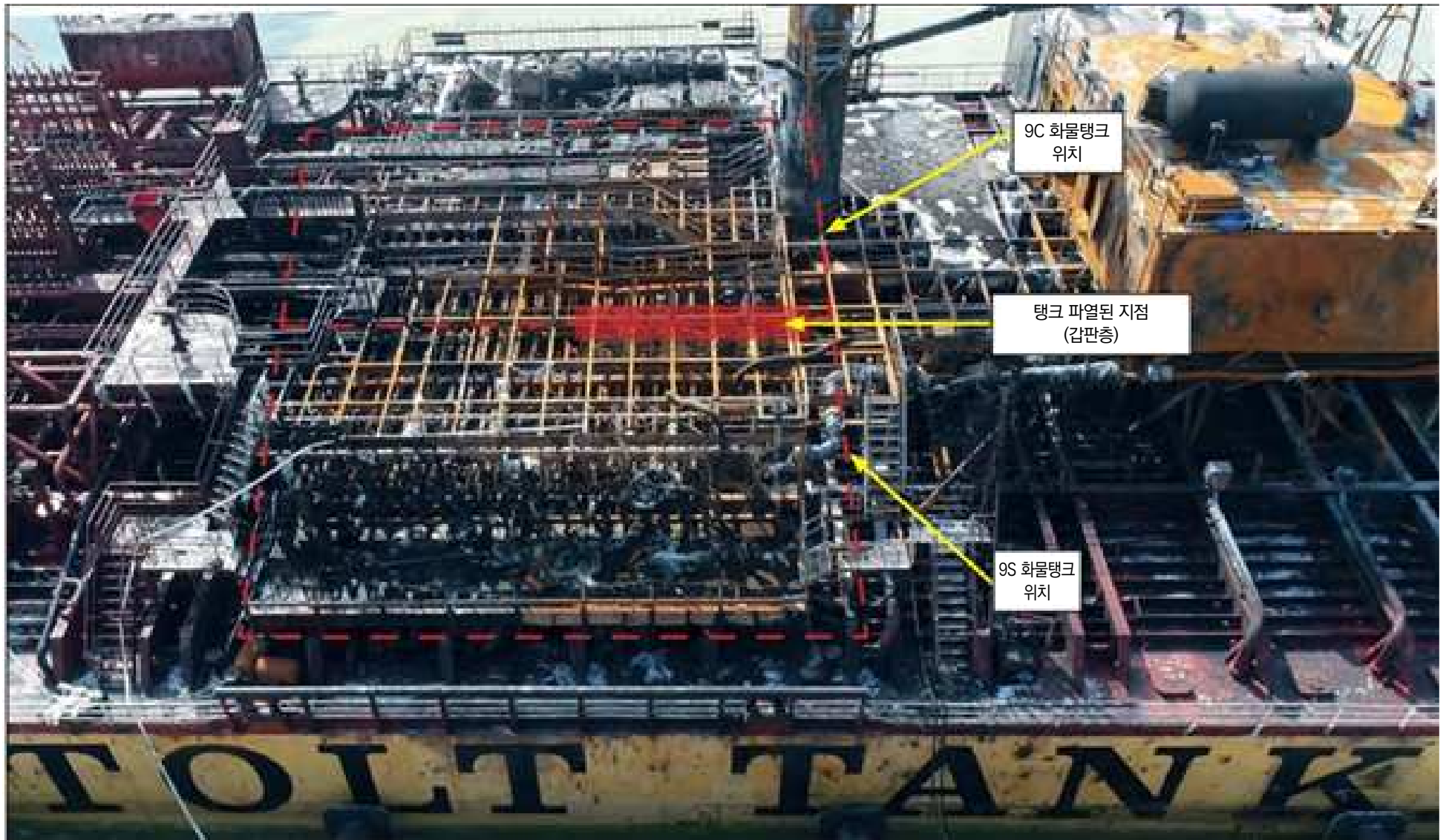


그림 11: 상갑판과 9S 탱크 위치 조감도



그림 12: 9S 탱크 파열



그림 13: 9S 탱크 출입구



그림 14: 선체중앙부 갑판실



그림 15: 거주구역 내부



그림 16: 거주구역 전면

1.7.2 중합반응

중합은 하나의 단량체(monomer) 또는 복수 단량체 화합물이 폴리스티렌과 같은 중합체로 전환되는 화학반응이나 그 과정을 의미한다. 스티렌 모노머는 일반 대기온도에서는 느리게 중합하지만 높은 온도에서는 매우 빠르게 중합한다. 또한, 열, 용존산소량 부족, 중합억제제 부족, 산화제와 대부분의 할로젠화물에 의한 오염으로 중합반응이 가속화될 수 있다.

중합과정에서 열이 발생하며, 그 열이 제거되지 않으면 벌크 스티렌 모노머의 온도는 자기중합이 계속해서 매우 빠르게 일어나는 수준으로 올라갈 수 있다. 이는 “중합반응폭주(runaway polymerisations)”라 불리며 보통 섭씨 65도를 초과한 온도에서 시작된다. 중합폭주가 일어나는 동안 화물은 팽창하여 탱크 통기구나 P/V 밸브에서 증기가 분출될 수 있을 정도로 압력이 증가하게 된다. 때에 따라 과도한 압력으로 탱크가 파열될 수 있다.

1.7.3 중합억제제

화물을 저장하고 운송하는 동안 중합반응을 막기 위해서는 반드시 중합억제제를 첨가해야 한다. 가장 보편적으로 사용되는 중합억제제는 TBC로 고체상태지만 스티렌 모노머에 첨가되기 전 종종 메탄올과 혼합하여 액체화하기도 한다. 육상 저장시설에서 TBC는 억제제 등 안정제 투입절차(dosing system)를 통해 스티렌 모노머에 첨가된다. 벌크 스티렌 모노머의 해상운송을 위해 선적 전 화물탱크 바닥에 TBC를 첨가한다. TBC는 대기온도에서 무반응성 차광용기에 저장해야 한다. TBC의 유통기한이 제한적이라고 알려지지 않았다.

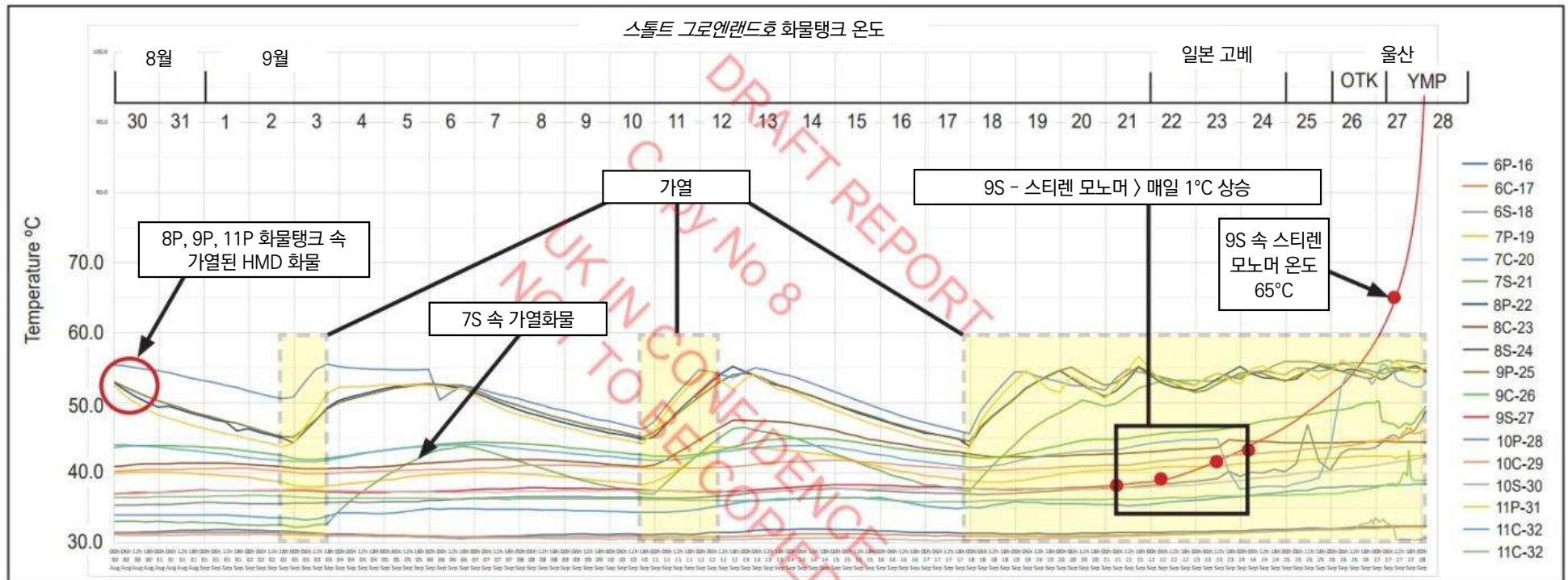


그림 17: VDR로 기록된 화물온도

TBC 혼합범위는 중합체 형성을 막기 위한 특정 농도 범위인 보통 10-15ppm 사이로 유지되어야 한다. 용존산소는 중합억제제가 제거능하도록 하기 위해 필요한데, 산소의 소모를 제어하는 것이 바로 중합억제제다. 대기온도가 화물의 발화점을 초과할 것으로 보인다면 질소봉입(nitrogen blanket) 방식을 사용하여 폭발이나 화재의 위험을 최소화하는 것이 바람직할 것이다. 그러나 스티렌 모노머 상부의 대기중에는 중합억제제의 효용성을 유지시키고 이를 통해 중합을 막기 위해 산소가 3%에서 8%(vol.) 있어야 한다. 중합억제제는 공기 중이나 질소를 봉입하여 적재하는 경우 그 농도가 고온에서 더 빠르게 고갈된다. 따라서 스티렌 모노머는 운송 시 일반적으로 섭씨 30도 미만, 육상 저장탱크에서는 섭씨 20도 미만으로 유지되어야 한다.

1.8 화물시스템

*스톨트 그로엔랜드호*는 2009년 건조되었으며 6척의 자매선 중 하나이다. 이 선박에는 각기 용량이 다른 일체형 화물 탱크 39개가 있으며 이는 선수에서 선미까지 3개 구역(종방향)으로 분리되며 이를 2개의 코퍼담(횡방향)이 가로지른다. 선수와 선미부에 있는 탱크(1-3번, 12-13번)는 아연으로 코팅된 연강으로 되어 있으며 중앙탱크(4-11번)는 견고한 2상계 스테인리스 강으로 만들어졌다. 탱크 격벽부에는 S자형으로 골이 져 있다. 모든 스테인리스 강 탱크에는 온도를 섭씨 85도까지 유지할 수 있는 가열관이 있다. 가열매체는 물이며 이 시스템은 갑판에 있는 밸브를 통해 수동 조절된다.

화물탱크 각각은 독립적이며 자체 펌프와 파이프라인이 배열되어 있다. 각 탱크는 개별 P/V 안전밸브로 고압과 저압을 방지한다. 이 밸브는 상갑판에 있는 두 개의 증기배출관에 설치되어 있다. P/V 밸브의 리프팅 압력은 206mb였다.

탱크 속 액면의 높이는 폐쇄형 레이더시스템으로 측정되고 탱크압력과 온도는 내부 센서로 측정되었다. 온도센서는 각 탱크의 하부와 중심부에 위치하고 있었다. 레이더와 탱크 센서의 데이터는 CCR에 있는 아리스톤(Ariston)의 컴퓨터 화물모니터링시스템에 나타난다(연계화면은 선교에 위치). 또한, 데이터는 선박의 카고맥스(CargoMax) 복원성 컴퓨터에도 입력되었다. 사용자의 선호에 따라 화물모니터 스크린 상에서 아리스톤 시스템을 통해 나오는 정보를 결정할 수 있다. 시스템은 개별 탱크나 탱크그룹을 보여주도록 설정할 수 있다. 또한 사용자는 각 탱크 화물 액면높이, 온도와 압력에 대한 경보치를 설정할 수 있다.

스톨트 그로엔랜드호 승무원은 스티렌 모노머 속 TBC 농도, 산소 수준, 또는 중합체 증가 여부를 테스트하거나 모니터링할 수 없었다. 이는 육상 실험실에서만 확인될 수 있었다.

1.9 휴스턴에서의 선적

1.9.1 계획수립 및 문서작성

8월 2일과 17일 사이 선적을 위한 화물 적부계획서는 7월 19일 먼저 육상에 있는 *스톨트 그로엔랜드호*의 선박 운항 담당자(ship operator)를 통해 선박으로 송부되었다[제1.11장 참고]. C/O는 운송화물보고서(VCR)와 선박의 화물적재프로그램인 iStow Tanker(iStow)가 서로 다른 것을 발견하였다. 이는 추후 선박 운항담당자가 처리하였고, 계획서는 재발송되었다. 이후 스티렌 모노머 적재계획이 화물탱크 6P, 6C, 10S에서 6P, 6C, 9S로 수정되면서 계획은 몇 차

레 수정을 거듭하였고, iStow파일과 VCR의 최종본은 8월 1일 선박 운항담당자를 통해 발송되었다. 본 계획서는 스톨트 그로엔랜드호 C/O가 확인하고 동의하였으며 선장이 승인하였다.

VCR에는 향후 항해에 할당된 화물목록이 나와 있었다. 이 역시 화학물질명, 수량, 선적항과 하역항, 화물취급요건, 주의사항을 선하증권(B/L) 숫자와 교차확인 하였다.

430 스티렌 모노머(Styrene Monomer)

일반사항:

취급 2018년 4월 1일자 SHELL REVISION 9을 2018년 7월 1일 업데이트함

가열화물과의 인접성 인접한 곳에 가열화물을 적재하지 말 것

IMO 본 화학제품을 운송하는 선박은 제15조13항3목의 요건을 준수하도록 화주로부터 반드시 중합방지 증명서(Certificate of Protection, 또는 중합억제제 증명서(Inhibitor Certificate))를 받아야 한다.

- 1) 첨가제/억제제 명칭 및 수량
 - 2) 첨가제가 산소를 필요로 하는 경우
 - 3) 첨가제가 투입된 일자와 효용성 지속기간
 - 4) 첨가제의 유효기간에 영향을 미치는 온도 제한사항
 - 5) 항해기간이 첨가제 유효기간을 초과할 때 취해야 할 조치, 또는 제15장 13조 4항에 따라 산화방지를 위해 공기제거기법을 적용하고 있을 때 필요한 산소수준에 대한 설명
- 중합억제제 증명서가 발행될 예정인 경우 해당 증명서에는 중합억제제의 산소의존성 여부가 반드시 기재되어 있어야 하며, 만약 산소 의존적인 경우 중합억제제 효과가 나타나는 산소수준이 반드시 함께 명시되어 있어야 한다.
- 해당 문서를 받지 못했다면 선박 운항담당자에게 최대한 빨리 알려야 한다.

IBC 코드 제15장 19조 6항 화물탱크 고액면경보

IBC 코드 제16장 6조 1항 본 화물은 중합, 분해, 열적 불안정 또는 기체 방출 상태로 발전할 가능성이 있기에 열과 인접해서는 안 된다.

IBC 코드 제16장 6조 2항 본 화물을 적재하는 탱크 속 가열관은 반드시 폐쇄시켜야 한다.

IMO명칭 스티렌 모노머

혼합위험성 중합촉매, 강력한 산화제

VCR에 언급된 쉘(Shell) 문서는 스티렌 모노머에 대한 화물취급자료(Cargo Handling Sheet)로 쉘 케미칼스(Shell Chemical)가 용선한 선박을 위해 작성되었으며, 다음 내용을 포함하고 있다.

적하온도 범위: 13 - 23 °C / 55 - 73 °F

수송온도 범위: 대기온도

양하온도 범위: 대기온도

가열관 최고온도: 막혀 있음

인접화물 최고온도: 35°C

참고 1: 본 화학품은 열에 민감하고 자기반응하며 중합방지 처리(inhibited)되어 있다.

참고 2: 쉘 케미칼스의 스티렌 모노머는 일반적으로 Para-tertiary Butyl Catechol(p-TBC)로 중합방지 처리되며, 농도는 항해기간에 따라 보통 10 ~ 20ppm 또는 그 이상을 적용한다. 스티렌 모노머가 선적된 탱크에 중합억제제를 추가해야 하는 경우 밀폐형 장비를 사용한다. 이용가능한 장비가 없고 중합억제제를 추가해야 한다면 현지 쉘 케미칼스의 해양기술자문가(Chemical MTA)와 상담하여야 한다.

일지: 항해기간 동안 선박은 다음 일지를 작성해야 하며 요청이 있을 경우 쉘 케미칼스 용선담당자에게 일지를 전송하여야 한다.

1. 화물(스티렌 모노머) 온도

2. 인접화물 온도

3. 대기 및 해수온도

항해 동안 다음 중 하나가 관찰되는 경우 즉시 쉘 케미칼스 용선담당자에게 알려야 한다.

- 화물(스티렌 모노머) 일일 온도가 3일 연속 1°C 상승한 경우
- 화물(스티렌 모노머) 온도가 24시간 이내 2°C 초과 상승한 경우
- 화물 온도가 30°C 초과한 경우
- 질소충전 시 화물(스티렌 모노머)탱크 속 O₂ 함량이 4% 이하인 경우

화물(스티렌 모노머) 양하작업을 완료한 후 선박은 온도/압력/O₂ 함량 일지 사본을 쉘 케미칼스 용선담당자에게 제공하여야 한다.

스티렌 모노머는 중합위험이 있어 화물 펌프실 탱크로 운송해서는 안 된다.

1.9.2 화물

스톨트 그로엔랜드호에 선적된 스티렌 모노머는 이네오스 스티롤루션 미국지사(Ineos Styrolution America LLC)가 미국 휴스턴 LBC터미널로 공급하였다. 해당 화물은 2019년 8월 7일과 8일 사이 육상저장탱크 B503 (ST B503)에서 선박으로 선적되었으며 화물 OBL430으로 지정되었다. B/L에 기재된 용선주는 삼성물산(Samsung C&T Corporation)이었다.

선적에 앞서 화물탱크 6P, 6C, 9S는 ACA의 화물검사원이 실시한 탱크벽면시험(Wall Wash Test, WWT)과 육안검사를 통과하였고 사전적재 승인 증명서가 발급되었다.

8월 7일 오후 동안 ACA 화물검사원과 *스톨트 그로엔랜드호* C/O는 사전적재 체크리스트를 작성하였고, 이네오스 스티롤루션에서 발행한 스티렌 모노머(안정화된)의 안전보건자료(Safety Data Sheet, SDS)가 포함된 화물문서를 교환하였다. 그리고 바로 감정사는 화물탱크 6P, 6C, 9S에 대한 최종 육안점검을 실시하였고 3갤런(미국갤런 기준, 11.4리터)에 달하는 액체 중합억제제 TBC를 각 화물탱크에 세척창구(cleaning hatch)를 통해 부었다. 중합억제제 첨가는 터미널 관계자가 목격하였다. 항해기간중 선박에 비치할 중합억제제를 선원들에게 제공하지는 않았다.

8월 7일 17시 35분경(UTC-5) 1개의 육상 화물호스로 스티렌 모노머가 적재되기 시작했다. 호스는 탱크 6P와 6C에 연결된 분리형 스플피스(splitter spool piece)를 통해 선박 매니폴드로 연결되어 있었다. 매니폴드에 교차 연결되어 그와 동시에 화물탱크 9S로 적재할 수 있었다. 육상저장탱크ST B503에 저장된 스티렌 모노머 온도는 섭씨 13도였다.

8월 8일 01시 46분과 03시 40분 사이 화물탱크에서 채취한 스티렌 모노머 표본의 육상 테스트 결과를 기다리는 동안 펌프사용은 중단되었다. 분석결과 어떤 문제도 발견되지 않았으며, 15시 20분경 선적이 완료되었다. 선적 직후 관측한 *스톨트 그로엔랜드호* 화물탱크 속 스티렌 모노머 온도는 섭씨 16.7도와 17.2도 사이였다.

15시 50분경 ACA 화물검사원은 화물탱크 6P, 6C, 9S 출입 및 세척창구를 밀봉하였다. 그리고 나서 그는 현장에 함께 있던 터미널 관계자와 *스톨트 그로엔랜드호* C/O가 서명한 중합억제제 증명서(그림 18)를 발급하였다. 이 증명서에는 화물의 이상적 온도는 화씨 60~85도(섭씨 15.5~29.4도)이며, 이 온도를 초과한 경우 필요시 추가 억제제를 첨가하며 억제제 수치와 중합을 위해 화물을 모니터링 해야 한다고 명시되어 있다.

1.9.3 스티렌 모노머와 중합억제제의 혼합

선적 전 탱크에 첨가된 TBC 용액은 탁하며 점성이 있었고 스티렌 모노머와의 혼합은 적재과정 동안 발생하는 교반과 항해 시 선박의 움직임으로 인한 슬로싱(sloshing: 화물 출렁거림)에 의존하였다. 스티렌 모노머를 탱크에 적재할 때 생긴 출렁임으로 이루어진 부분적 교반만으로는 TBC와 스티렌 모노머를 적절하게 혼합할 수 없었다. 따라서 선적하는 동안, 그리고 선적 직후 실시된 TBC 농도시험은 정확도가 떨어질 수 있어 실시하지 않았다. 대신 계산을 하여 선적 화물 분석보고서(shipment analysis report)에는 “XXppm으로 조정”이라 표기되었다. 해당 프로세스는 스티렌 벌크 화물의 해상운송을 위한 업계의 표준적 관행이었다.

1.9.4 스티렌 모노머 표본채취

스티렌 모노머를 적재하는 동안 ACA 화물검사원은 부두측 배관(dock-line)과 연결된 육상저장탱크 ST B503 개구와 화물 매니폴드, 6P, 6C, 9S 펌프스택(pump stack)에서 샘플 1파인트(미국 파인트 기준, 0.47리터)를 채취하였다. 또 화물검사원은 각 탱크에 선적된 화물의 최초 1피트¹⁾와 화물적재가 완료된 최종 액면상태에서 표본을 추출했다. 그리고 이를 C/O에게 전달하였고 이 표본은 선체중앙부 갑판실에 보관되었다.

또한 화물검사원은 육상저장탱크 ST B503에서 채취한 샘플과 화물탱크 샘플을 육상의 Ineos 실험실로 보냈다. 6P, 6C 및 9S 화물탱크에서 채취한 샘플은 액면 높이가 1피트일 때와 최종 선적된 액면 상태에서의 샘플을 각각 결합하였던 것이며, 이들은 복합 샘플로서 테스트를 시행하였다.

1) 적재화물의 “최초 1피트”(약 30cm)는 화물 파이프라인 시스템의 청결도를 점검하기 위해 채취되는 표본이다.

ACA
AMERICAN CARGO ASSURANCE
중합억제제 증명서
(스티렌 모노머)

선박:	<u>스톡트 그로엔랜드</u>	적재:	<u>6P, 6C, 9S</u>
시설 / 항만:	<u>LBC 휴스턴</u>	제조사:	<u>스티롤루션</u>
제품:	<u>스티렌 모노머</u>	감정사:	_____
고객번호#:	<u>8001158394</u>	ACA 참고번호#:	<u>H-191003</u>

ACA는 상기 선적하물이 다음과 같이 적절하게 중합방지 처리되었음을 확인함

중합억제제 유형: 액체 TBC

유효기간: 60 ~ 90일

지정 수량: 5,250 M/T

목표농도: 17 PPM

첨가 일자: 2019년 7월 8일

첨가 수량: 9 갤런

중합억제제 설명:

중합억제제는 산소의존적이다. 선적 전 질소퍼징 작업이 필요할 경우 선적될 화물탱크 속 산소함량은 5 ~ 8% 수준으로 낮춰져야 한다.

중합억제제의 무결성과 효용성을 유지하기 위한 산소 최소수치는 5%이다.

본 화물의 적정 온도는 화씨 60 ~ 85도이다.

스티렌 모노머를 가열화물 옆에 적재하지 않는 것을 권장한다.

위 조건에서 벗어나는 경우 화물은 중합억제제 수준과 중합반응 때문에 모니터링되어야 하며 필요에 따라 중합억제제를 추가해야 한다.

제공된 중합억제제를 추가하기 전 고객과 확인한다.

비상연락번호

ACA 담당자: 서명

발행인: 서명 (ACA를 대표하여)

증인: 서명 (터미널 관계자)

선박: 서명 (1등항해사)

그림 18: 중합억제제 증명서

최종표본 혼합물에 대한 스티렌 모노머 선적 분석보고서(Styrene Shipment Analysis, 그림 19)에는 TBC 농도가 17ppm로 조정된 것으로 기재되어 있으며, 중합억제제 증명서에는 “유효기간”이 60~90일로 기재되어 있었다. 농도 수준은 육상저장탱크 ST B503(11.3ppm)의 TBC농도와 적재 전 탱크에 첨가된 중합억제제 분량에 기초하여 계산되었다.

1.10 항해 중 화물온도 변화

스톨트 그로엔랜드호 스티렌 모노머는 휴스턴에서 적재되었고 그로부터 약 56일 후 대만 안핑항(Anping)에 하역될 예정이었다. VDR에서 폭발 전 30일 동안 기록된 시간별 화물온도를 제공하였다(그림 17). 8월 30일 12시 00분경(UTC) 6P, 6C, 9S 스티렌 모노머 온도는 각각 섭씨 31.5도, 31.4도, 37.2도로 기록되었다. 9P HMD와 9C 아디포니트릴 온도는 각각 섭씨 51.5도, 43.9도로 기록되었다.

화물탱크 8P, 9P, 10P, 11P 속 화물온도의 변화 기록을 보면 HMD 온도는 규칙적으로 약 섭씨 55도까지 상승시킨 후 섭씨 45도까지 하락하도록 하였다. 가열관 밸브를 개폐하면서 해당 온도변화를 만들 수 있었다. 일반적으로 HMD 온도상승에는 약 2일이 걸리고 온도하락에는 약 5일이 걸렸다. 이렇게 일주일 주기 가열로 화물탱크 9C는 섭씨 2.5도, 9S는 섭씨 0.5도의 온도변화가 발생했다.

9월 18일 화물탱크 8P, 9P, 10P, 11P의 가열관 밸브가 열렸고 온도는 약 섭씨 55도로 상승하였다. 이는 앞서 계획한 화물하역 일정보다 더 이른 시점이었다. 9월 18일 12시 00분경(UTC) 화물탱크 8S, 9S, 10S, 11S 화물온도는 각각 섭씨 37도, 37.7도, 37.8도, 36.1도였다. 이후 우현 화물탱크의 12시 00분(UTC) 기준 일일온도는 표 3과 같다.

일자	8S 정오 온도(°C)	9S 정오 온도(°C)	10S 정오 온도(°C)	11S 정오 온도(°C)
9월 19일	37.3	37.6	37.8	36.2
9월 20일	37.7	37.9	37.7	36.2
9월 21일	37.9	38.4	37.9	36.2
9월 22일	38.5	39.4	38.1	36.5
9월 23일	39.4	41.8	38.6	36.7
9월 24일	40.1	44.9	39.3	36.8
9월 25일	46.0	48.9	40.1	36.9
9월 26일	43.4	54.5	40.7	37.4
9월 27일	44.9	66.7	41.6	38.7

표 3: 2019년 9월 19일 ~ 27일 화물탱크 8S, 9S, 10S 및 11S의 12시 00분(UTC) 기준 일일온도

9S의 스티렌 모노머 온도는 9월 21일부터 24일까지 3일 연속 섭씨 1도, 9월 22일과 23일 사이 섭씨 2.4도 상승하였다. 9월 27일 약 10시 00분경(UTC)에는 온도가 섭씨 65도에 도달하였으며 폭발 직전에는 섭씨 100.8도가 되었다.

이네오스 스티롤루션 베이포트	스티렌 모노머 선적분석보고서	작성일자: 2019년 8월 8일	
		작성시각: 17시 01분	
고객: 삼성(텍사스 휴스턴)	상태: 통과	선박/바지선명: 스톨트 그로엔랜드	
		육상저장탱크: B503	
송장번호: 8001158394		비고: 없음	
고객 PO: SAM07262019-SM-001 July SM 2019			
검사/검사방법		사양	최종표본
색깔, Pt-Co Scale / ASTM D5386, max		15	7
TBC, mg/kg (탱크 10 ~ 15) / ASTM D4590		(목표치 17)	17로 조정됨
폴리머, mg/kg / ASTM D2121, max		10	1.0
Aldehydes, ppm, max / ASTM D2119, max		100	50
Peroxides, ppm, max / ASTM D2340, max		50	6
외관		밝고 선명함	통과
물, ppm / ASTM D7375			87
GC 사용한 순도 wt.% / ASTM D5135			
에틸벤젠(Ethylbenzene)		0.010	0.007
스티렌 모노머, min		99.90	99.929
자일렌(Xylene)			0.001
쿠멘(Cumene)			0.007
N-프로필벤젠(n-Propylbenzene)			0.004
알파 메틸스티렌(Alpha-Methylstyrene)			0.027
페닐아세틸렌(Phenylacetylene)			0.0128
기타			0.0122
위 분석에 대한 문의는 다음으로 연락하시기 바랍니다. 승인자: 위 사양목록은 고객이 화학제품의 최고 품질과 성능을 보장하기 위해 요청한 수준보다 더욱 제한적일 수 있음. 벤젠 (Benzene)은 GC기법 ASTM D5135를 통해 0.0001 wt.% 미만으로 확인(수정).			

그림 19: 최종 표본 분석결과

1.11 승무원

1.11.1 일반 사항

스톨트 그로엔랜드호 승무원은 사관 10명과 부원 15명이었다. 사관은 러시아 국적이었으며 부원은 필리핀 국적이었다. 모든 승무원은 화학제품운반선 기초교육 이수(1)를 포함, 적합한 STCW²⁾ 증명서를 소지하였다. 사관 계약기간은 4개월이었다. 부원 2명은 펌프맨(pumpman)이며 주업무는 화물 작업이었다.

STCW협약 V/1-1과 V/1-2에 따라 선장, 기관장, 1항해사/기관사 및 항해사 역시 최근 5년 안에 STCW 화학제품운반선 상급교육[제1.15.2 참고]을 이수하였다. 이들은 스티렌 모노머를 중합억제제가 첨가된 경우 비교적 까다롭지 않은(benign) 화물로 생각하는 것으로 보였으며, 누구도 과거 이 화물 운송 시 문제를 겪지 않았다.

1.11.2 선장

스톨트 그로엔랜드호 선장은 1999년부터 스톨트社에서 근무하며 다양한 선박에 승선해왔다. 그는 5년 반 동안 C/O였고 이후 2009년 선장으로 승진하였다. 2016년에는 스톨트 그로엔랜드호 담당 선장(regular master)이 되었으며 그 전까지는 자매선에 승선하였다. 그는 2019년 8월 14일 스톨트 그로엔랜드호에 마지막으로 승선하였다.

1.11.3 1등 항해사(울산항)

울산에서 탑승한 C/O는 2008년부터 지금까지 스톨트社에 근무하고 있다. 그는 2011년에는 2/O로, 2016년에는 C/O로 승진하였다. 이번이 그가 스톨트 그로엔랜드호에 5번째의 승선계약이었으며, 앞서 자매선에도 승선한 적이 있다.

1.11.4 1등 항해사(선적 및 항해)

화물 적하작업을 감독하고 울산까지 항해를 마친 C/O는 2006년 실습생으로 일하기 시작해 2011년 3/O로 스톨트社에 입사하기 전 유조선에 승선하였다. 그는 2012년 2/O로 승진하였고 2017년 C/O가 되었다. 그는 C/O로 스톨트 그로엔랜드호에 세 번째 탑승하였고, 대개 같은 선장과 승무원들이 함께 하였다. 그가 이 배에 마지막으로 승선한 것은 2019년 6월이다.

1.11.5 항해일정

항해 당시 스톨트 그로엔랜드호 승무원들은 당직업무와 일상적인 유지보수를 수행하였다. C/O는 행정업무와 점검을 완수하는 것 뿐만 아니라 갑판부원과 펌프맨을 감독하며 주간근무를 하였다. C/O는 화물을 모니터링하고 가열화물이 VCR에 명시된 온도범위 안에 있도록 하는 일을 담당하였다. 가열화물을 온도 범위 안에 있도록 하는 온도조절(밸브)을 조정하는 것은 펌프맨 중 한 사람에게 위임하였다. 또 다른 펌프맨은 질소봉입된 화물탱크 내부 압력을 모니터링하고 유지하는 일을 도왔다.

2) 선원의 훈련·자격증명 및 당직근무의 기준에 관한 국제협약(International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers 1978, as amended. STCW협약)

1.12 육상 화물관리

스톨트社は 100척 이상의 화학제품 운반선단을 운영하는 세계 최대 선박회사였다. 화물작업은 로테르담과 휴스턴, 싱가포르에 있는 주요 운항센터와 협업으로 이루어지며, 각 선박에 대해서는 화물할당, 선적, 하역프로그램을 담당하는 지정된 선박 운항담당자(ship operator)가 있다. 선박 운항담당자는 선장이 화물 관련 사안에 대해 연락을 취하는 육상연락처(POC)이다.

스톨트 그로엔랜드호의 운항담당자는 휴스턴에 있었으며 일반적으로 한 번에 탱커 4 ~ 5척을 담당하였다. 해당 운항담당자는 업계에서 23년의 경력을 보유하고 있었으며, 경험있는 책임자(manager)의 감독하에 첫 6개월간의 현장실무훈련(OJT)을 마치고 스톨트社에서 4년 동안 일을 해오고 있었다.

운항담당자는 스톨트社の “캠스캔(Chemscan)” 데이터베이스에서 지원하는 iSTOW 프로그램을 사용하여 화물 적부계획을 수립하였다. 데이터베이스에는 온도, 질소 필수요건 등과 같은 각 화학물질의 상세내용이 포함되어 있었고, iSTOW 프로그램을 통해 가열 및 냉각화물, 인접탱크의 열기, 화물의 품질요건 등과 관련하여 적부계획서 상의 내용과 불일치하는 사항을 확인할 수 있었다. 그 결과, 선박 운항담당자는 iSTOW 프로그램을 통해 선박이 운송할 수 있는 화물조합을 알 수 있었다.

iSTOW 사용안내서는 이 프로그램에 대해 다음과 같이 설명하였다.

… (중략) 선박 운항담당자의 화물 적재프로세스를 지원하는 컴퓨터 시스템이다. 이 시스템은 “클릭, 드래그, 드롭” 기능을 통해 화물목록에서 화물을 각 화물탱크로 분배한다. STOW는 선박 운항담당자를 위해 선박에 화물을 적부하는 것이 아니라, 선박 운항담당자의 적재프로세스를 지원하고 법이나 규정 위반사항을 알려주는 수단이다.

이 시스템은 운항담당자의 적부 변경내역을 기록하고, 적부계획서(마지막 화물 3개와 탱크 상태 버전 포함)를 전송하고 출력한다. 일단 적부계획서가 완성되면, 운항담당자는 시스템을 통해 현 적부계획서를 점검할 수 있다. 이 점검은 스톨트社の 캠스캔(CHEMSCAN) 데이터베이스와 IMOS³⁾에서 얻은 정보를 결합하여 활용한다. 이를테면, 고객 중 하나가 자신의 화물은 스테인리스 강으로 된 탱크를 이용해 운송되어야 하며 인접화물에서 나오는 열이 특정 온도를 초과해서는 안된다고 요청하는 경우, 시스템은 잠재적인 문제가 있는지 발견하고 운항담당자에게 알린다. 다른 점검사항으로 미국 해안경비대(US Coast Guard, USCG)의 다른 물질과의 상관성, 혼합성(commingling), 그리고 최근 마지막으로 해당 탱크에 선적하였던 물질의 제약사항 등이 있다. 법과 규제가 변경되면 그에 따라 추가로 점검을 하게 된다.

iSTOW에서 화물 적부계획서 검증을 마치면 운항담당자는 iSTOW 파일과 VCR을 선박에 전달하여 화물의 다른 물질들과의 상관성, 선박의 복원성과 트림 등의 요소에 대해 적부계획서 이행가능성을 점검하도록 한다.

스톨트 그로엔랜드호 운항담당자는 스티렌 모노머 중합반응 가능성과 해당 화학물질을 가열탱크에 인접하여 적재해서는 안 된다는 점을 알고 있었다. 운항담당자는 9S 스티렌 모노머 적재와 9P와 7S 탱크에 가열화물의 적재는 (9C와 8S로 분리되었기에) 허용될 수 있다고 판단하였다.

3) 선박 운항관리 소프트웨어

1.13 선내 화물절차

1.13.1 계획수립 및 적하

스톨트 그로엔랜드호 안전관리체제(SMS)에는 다양한 화물작업 단계에 대한 지침을 제시하는 화물 및 밸러스트 작업 매뉴얼이 포함되어 있었다. 다음은 해당 매뉴얼의 표준운영절차 섹션에 포함된 일부이다.

화물 주문 커뮤니케이션(Cargo Orders Communication) 절차에 기재된 바와 같이 운항담당자의 적부계획 제안서는 제안서이며, 반드시 항만과 선적 선석의 로테이션, 흘수, 횡경사, 트림, 선적 순서 등을 고려하여 긴밀히 숙고되어야 한다. 작업 시 선장이 최대한 유연성을 갖고 변경할 수 있어야 하지만, 가열 요건, 탱크 도막과의 적합성, 탱크 크기, 펌프, 화물 명세, 마지막 선적되었던 화물과 고객의 요구사항 등으로 인해 선장과 일등항해사는 종종 적재 선택에 제약을 받는 경우도 직면하게 된다.

... (중략) 선박은 화물이 제대로 적재되도록 운항담당자가 보내준 적부계획 제안서에 기초하여 세부내용을 점검해야 할 책임이 있다. (중략)...

최종 적부계획서는 항상 선장의 승인을 받아야 한다.

스톨트 그로엔랜드호로 운송된 스티렌 모노머 적부에 대하여 선장이나 C/O는 아무런 이의를 제기하지 않았다.

1.13.2 화물 모니터링

화물과 밸러스트 작업 매뉴얼에는 다음 내용도 포함하고 있었다.

선적 후에도 계속 고객 화물에 주의를 기울여야 하며, 이는 하역항에 도착해 양하하는 동안까지 계속된다. 일부 화물은 안전성, 품질, 취급, 탱크세정, 고객 요구사항 등, 하나 또는 그 이상의 요소와 관련하여 항해하는 동안 더 많은 주의와 통제를 필요로 할 수 있다. 지속적인 화물 관리는 화학제품운반선 항해에 있어서 가장 중요한 사항이며, 일등항해사는 이들을 수행하고 기록하여야 하는 책임이 있다. (중략)...

항해지시서에서는 가열(heating)이나 냉각(cooling)이 필요한 화물의 온도를 최소 하루에 한 번 화물온도 일지에 기록해야 하며, 해당 일지는 양하항에서 화물 수신자가 면밀히 검토할 수 있어야 한다고 규정하고 있다. 또한, 항해지시서에서는 비가열과 비냉각화물도 중합과 같은 이상반응 신호를 대비해 모니터링되어야 한다고 규정하였다. 비가열 화물과 비냉각 화물에 대해서 화물 온도를 기록하여야 한다는 특정 요건들은 없었다.

1.14 IBC 코드

SOLAS⁴⁾ 제7장과 MARPOL⁵⁾ 부속서2에서는 1986년 7월 1일 이후 건조된 화학제품운반선은 벌크상태의 위험화학품 운송 선박의 구조 및 설비를 위한 국제규칙(IBC Code)과 IBC Code의 벌크 위험화학품 목록을 준수하도록 규정하

4) 국제해상인명안전협약(International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, as amended. SOLAS)

5) 국제해양오염방지협약(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended. MARPOL)

고 있다. IBC 코드에서는 설계 및 건조 표준규정에 더하여 750개 이상의 위험화학물질에 대한 최소 필수요건을 표로 제시하고 있다.

IBC 코드상의 화물온도, 중합방지 처리된 화물, 과도한 열에 노출되어서는 안되는 화물에 대한 내용은 다음 사항들을 포함하고 있다.

제7장 화물온도 통제

제7장 1조 5항 화물온도를 측정할 수 있는 수단을 제공해야 한다.

제7장 1조 5항 4목 과열이나 과냉각이 위험한 상황을 유발할 수 있는 경우 화물온도를 모니터링하는 경보시스템이 있어야 한다. (제16장 6조 운영상 요건(Operational Requirements) 참고)

제15장 특별 요건

제15장 13조 첨가제로 보호된 화물

제15장 13조 3항 항해하는 동안 항상 유해한 화학적 변화를 방지하기 위해 이러한 화물이 충분히 보호되도록 확실히 하기 위해 주의를 기울여야 한다. 이러한 화물을 운송하는 선박은 제조사로부터 다음 사항이 명시된 중합방지 증명서(Certificate of Protection)를 받아 항해하는 동안 소지해야 한다.

1. 첨가제 명칭 및 수량
2. 첨가제의 산소 의존성 여부
3. 첨가제가 제품에 투입된 일자와 유효기간
4. 첨가제의 유효기간에 영향을 미치는 온도 제한사항
5. 항해기간이 첨가제 유효기간을 초과할 때 취해야 할 조치

제16장 운영상 요건

제16장 6조 과도한 열에 노출되어서는 안되는 화물

제16장 6조 1항 화물이 탱크 또는 연결된 파이프라인 내부에서 화물의 국부과열로 인해 중합, 분해, 열적 불안정, 또는 기체방출 등과 같은 위험한 반응을 일으킬 가능성이 있는 경우, 해당 화물은 화학반응을 개시할 정도로 충분히 고온인 다른 화학제품으로부터 적절하게 분리시켜야 적재하고 운송하여야 한다 (제7장 1조 5항 4목 참고).

제16장 6조 2항 이 화학제품을 운송하는 탱크 내부의 가열관은 차폐시키거나 동일한 수단으로 안전하게 조치하여야 한다.

1.15 해운업계 지침

1.15.1 ICS 탱커안전지침

탱커안전지침(Tanker Safety Guide, TSG, 2014)는 국제해운회의소(International Chamber of Shipping, ICS)가 모범사례를 알리고자 발행하였다. 스티렌 모노머와 관련하여 해당 지침서에서는 온도상승이 중합을 자주 촉발시키며 이는 중합억제제의 효용성이나 유효기간을 감소시킬 수 있다고 언급하였다. 또한, 다음과 같이 기술하고 있다.

이러한 중합억제제는 특정 온도에서 일정 시간 동안 효력을 발휘하도록 되어 있다. 따라서 중합억제제 유효기간 동안의 효용성은 항해에 충분해야 하며 올바른 안전 여유를 포함해야 하는 것은 매우 중요하다.

온도상승으로 중합억제제의 효용성이나 그 유효기간이 줄어들 수 있기 때문에 열원은 반드시 해당 화물로부터 멀리 떨어져야 하며, 온도는 최소 하루에 한 번, 화물 제조사가 권고한 경우에는 더 자주 긴밀히 모니터링되어야 한다는 것은 필수적이다.

대기 기후상태 또는 대기 화물온도와 관련이 없는 화물온도의 상승은 중합과정 개시를 알리는 조기경보일 수 있다. 이런 경우, 즉시 화물 제조사에 연락하여 더 많은 중합억제제를 첨가하거나 인접한 곳을 냉각시키는 것도 포함하는 적절한 대응조치를 문의해야 한다. 만일 온도상승이 빠르게 진행된다면, 화물탱크와 선박에 대한 심각한 구조적 피해를 방지하기 위한 유일한 방법으로 화물을 버려야 할 수도 있다.

화물적부 및 취급과 관련하여 탱커안전지침에는 다음 사항들을 포함하고 있다.

- 가열화물은 인접한 탱크의 화물과 상관성이 없도록 적부하여야 한다.
- 가열화물은 열에 민감한 화물 또는 열원이 위험한 반응으로 이어질 수 있는 화물에 인접하지 않도록 적부한다.
- 일부 화물은 항해 중 중합억제제가 화학적 안정성을 유지하도록 요구하고 있다. 해당 화물은 가열화물에 인접하여 적부하지 않아야 한다.
- 일부 화물은 특정 조건에서 자기반응을 할 수 있다… (중략)… 자기반응할 수 있는 화물의 온도를 긴밀히 모니터링하여야 한다. 예상치 못한 온도의 변화는 자기반응 가능성을 알려주는 조기경보이다. 온도상승이 예상 수준을 초과하는 경우 대기 상황 및 인접한 화물 온도를 고려하여 비상상황으로 취급하여야 하고 그에 따른 조치를 취하여야 한다. (중략) …

1.15.2 CDI 지침

STCW의 케미컬 탱커 운항 상급과정(케미컬탱커직무교육) - 2018년에 CDI에서 케미컬탱커 승무원들의 상급교육훈련을 위한 “케미컬탱커 운항실무지침(Cheical Tanker Operations for the STCW Advanced Training Course – A Practical Guide to Chemical Tanker Operations 2018)”을 발행하였다.

무엇보다 중합반응 및 중합방지 처리된 화물과 관련하여 위 지침서에서는 다음과 같이 명시하였다.

열은 반응성 단량체의 중합을 촉발할 수 있으며 발열반응으로 더 많은 열을 발산하게 된다.

중합방지 처리된 자기반응화물: 가열화물에 인접하여 적재하지 않으며 가열시스템은 별도로 분리되어야 한다.

1.16 저장 및 취급 지침

1.16.1 스티렌 모노머: 안전취급지침서(Styrene Monomer: Safe Handling Guide, 2018)

이네오스 스티롤루션 유럽지사(Ineos Styrolution Europe GmbH)와 쉘 케미컬스 유럽지사(Shell Chemicals Europe BV)가 회원으로 가입되어 있는 스티렌모노머생산자협회(Styrene Producers Association)에서는 “플라스틱스 유럽의 스티렌 모노머 안전취급지침서(Plastics Europe Styrene Monomer: Safe Handling Guide, 2018),”⁶⁾ (이하 “지침서”라 칭함)를 발행하였다. 이네오스 스티롤루션에서는 자사 모든 고객에게 안전취급지침서 사본을 배포하였다. 본 지침서는 스톨트社의 VCR에서 참고되지도, 스톨트 그로엔랜드호에 전달되지도 않았다.

본 지침서는 도로, 철로, 바지선과 해상을 통한 스티렌 모노머의 운송에 대한 것으로, 다음 사항들을 포함하고 있다.

코퍼덱으로 분리되어 있어도 가열화물과 인접하지 않도록 한다.

스티렌 모노머는 코퍼덱으로 분리되어 있어도 온도가 섭씨 30도(화씨 86도) 또는 그 이상인 화물과는 인접하거나 모서리가 맞닿아 있는 화물탱크에 적재되어서는 안 된다. 스티렌 모노머의 온도가 해당 온도를 초과하여 상승하면 중합억제제의 유효기한이 감소하며 화물탱크 내에서 중합반응 위험성이 증대된다.

스티렌 모노머를 육상에서 보관하는 경우 중합반응을 대비하여 본 지침서 부속서 2에 다음과 같은 점검사항을 포함하고 있다.

- 폴리머 함량 (< 10ppm, 제품사양마다 다름)
- 온도 (< 2-3°C/일). 온도가 매일 1°C씩 상승하는 경우 경각심을 가지도록 이를 알리고 온도를 적극적으로 감시해야 한다. 재순환을 통해 온도상승을 멈출 수 있다. 온도가 매일 2-3°C씩 상승하는 것은 중합반응 폭주의 개시를 알리는 전형적인 신호로, 온도는 계속해서 모니터링하여야 한다.
- TBC 수준 (목표치 > 10ppm wt). 화물탱크/용기 내부 온도가 15°C 미만인 경우 매주 표본을 채취하는 것으로 충분할 수 있다. 25°C를 초과하는 경우 매일 표본을 채취할 것을 권고한다. 정상적인 TBC 농도수준은 10~15ppm 사이(일부 경우 더 높아야 함)이다. 10ppm 미만인 TBC 중합체의 농도수준은 천천히 증가할 수 있다. 4ppm 미만인 경우 TBC는 효용성이 없으며 가속화된 중합이 발생하게 된다.
- 산소 농도의 수준 (기화 단계에서 3 ~ 8 vol/%)

6) 플라스틱스 유럽(Plastics Europe)이란 플라스틱제조사로 구성된 범유럽권 산업협회로, 스티렌모노머생산자협회(Styrene Producers Association)가 하위단체로 속해 있다.

본 가이드에 따르면 특정 환경에서는 스티렌 모노머 속에 TBC와 산소가 있어도 반응폭주가 일어날 수 있다. 그 이유에는 (1)오염물질 존재, (2)탱크 내부의 녹, (3)높은 (현지) 온도 (>40°C), (4)탱크 내부에서 TBC와 산소의 비균질한 분포가 포함된다.

또한, 본 지침서에서 고온에서 TBC는 반응물로 인해 충분히 오랫동안 활성화되지 않으며, 그로 인해 고갈율이 매우 높아진다고 설명하였다. 여기에는 온도별 TBC 고갈율도 포함되어 있다(표 4).

온도	고갈 일수/1ppm	TBC 함량	TBC 함량	유통기한
°C		[초기 ppm]	[마지막]	보장일수
25	11	15	10	55
30	7	15	10	35
40	1.5	15	10	7

표 4: 스티렌 모노머의 TBC 고갈(대기 중 저장된 경우)

1.16.2 안전취급자료

스톨트 그로엔랜드호 VCR에서 참고한 쉘 케미칼스의 스티렌 모노머에 대한 화물취급자료(Cargo Handling Sheet) [제1.9.1장 참고]에 추가하여, 다른 스티렌 모노머 제조사 역시 이와 유사한 지침을 제공하고 있었다. 이 지침서에는 TBC 농도와 스티렌 모노머 온도에 대한 요건들을 표 5와 같이 요약하고 있다.

제조사	저장을 위해 권장하는 TBC 농도	저장 및 운송온도	최고온도	비고
아메리카스 스티레닉스 (Americas Styrenics)	10-15ppm	대기 온도	인용된 사항 없음	온도가 24°C를 초과하는 경우 냉각할 것을 권장함. 스티렌 모노머를 선적한 선박은 외부 열원으로부터 보호되어야 함.
쉘 유럽 (Shell Europe)	10-20ppm	대기 온도	30°C	열에 인접하지 말 것. 대기 최고온도는 35°C
라이온델바젤 (Lyondellbasell)	10-15ppm	대기 온도	30°C	가열된 고온의 탱크 및 구획에 인접해 스티렌 모노머를 적재해서는 안 됨.
쉐브론 필립스 (Chevron Phillips)	10ppm	<24°C	30°C	다른 물질과의 상관성, 열 인접성 및 기타 요건을 고려하여 적재함.

표 5: 제조사별 스티렌 모노머 요건 비교

1.16.3 안전보건자료

SDS는 화학품 제조사가 제품에 대한 일반적인 안전성 정보를 제공하기 위해 표준화 된 양식으로 발행되고 있다. SDS는 해상운송만을 위한 것은 아니다.

이네오스 스티롤루션이 제공한 (안정화된) 스티렌 모노머 안전보건자료에 기재된 운송정보에는 벌크상태의 스티렌 모노머의 해상운송에 대한 지침은 없었다.

1.17 최근 검사와 심사, 현장검사(Vetting inspection)

2019년 5월 22일 *스톨트 그로엔랜드호*는 스톨트社 소속 감독관으로부터 심사를 받았다. 내부심사 보고서에 따르면 안전관리시스템이 잘 이행되었으며 관리자급 사관들은 근면하고 탱커의 유지보수는 매우 잘 이행되었다. 부적합 2건과 관찰사항 11건이 기록되었다. 부적합 사항은 탱크세정작업 시 대기에 관한 점검 기록과 근로시간 기록이 되어 있지 않은 것에 관한 것들이었다. 관찰사항은 문서작성에서 경미한 오류와 생략에 대한 것이었다.

2019년 7월 6일 *스톨트 그로엔랜드호*는 미국 롱비치(Long Beach)에서 항만국통제관(PSCO)으로부터 점검을 받았다. 확인된 결함사항은 없었다.

2019년 8월 6일 *스톨트 그로엔랜드호*는 미국 포인트 컴포트(Point Comfort)에서 CDI 검사관으로부터 현장검사(vetting inspection)를 받았다. CDI 질의서에 포함된 질문 중 하나는 다음과 같다.

사관들은 화물과 중합억제제에 대한 문서작성과 처리요건을 잘 알고 있는지, 만약 운송되는 화물이 중합억제제가 투입되어야 하는 경우 필요한 정보가 있는지?

기록된 결함은 없으며 베팅 보고서에는 다음과 같이 기재되어 있었다.

선내 다양한 부속서 2 화물(MARPOL Annex II, 유해액체물질)로 인해 현재와 과거 화물작업계획을 점검하였고 IBC 코드 및 회사의 절차를 준수하고 있는 것으로 확인됨.

그리고

화물작업 동안 갑판과 CCR에 있는 화물처리 및 모니터링 장비를 관찰하였고 전체적으로 좋은 상태인 것으로 확인됨.

1.18 염포부두

울산항은 해양수산부 관할구역이며, 해양수산부와 울산항만공사(Ulsan Port Authority, UPA), 민간기업, 이 3개의 각기 다른 주체에 의해 관리 및 운영되고 있었다. 염포부두의 경우 제1선석과 제2선석은 UPA가 운영 및 관리하고 있는 반면 본 사고가 발생한 제3선석은 해양수산부에 의해 운영되고 있었다.

울산항에는 위험화물을 취급하는 선석과 부두가 여러 곳이 있으며 이는 해양수산부가 발행한 “유조선의 안전항행 안내서(울산항)(Safety Navigation Guide for Oil Tankers(Ulsan Port))”에 수록되어 있었다. 본 안내서에는 염포부두가 위험화물 취급이 허가된 선석으로 명시되어 있지 않았다.

염포부두에 있는 *스톨트 그로엔랜드호* 선적은 항만당국으로부터 STS 이송작업을 위한 사용허가를 받은 현지 선박대리점이 배정하였다.

1.19 스티렌 모노머 관련 해양사고 및 준해양사고

1.19.1 *스톨트 포커스호*

스톨트 그로엔랜드호 폭발사고 원인 및 정황에 대해 조사하는 동안 MAIB는 몇 주 전 *스톨트 포커스호*에서 발생한 스티렌 모노머 중합사고를 알게 되었다.

스티렌 모노머 선적

스톨트사가 운항하는 케이맨 제도 선적의 화학제품운반선 *스톨트 포커스호*는 2019년 8월 3일과 4일 사이 휴스턴 LBC터미널에서 스티렌 모노머 4,900톤을 9개의 스테인리스강 화물탱크에 선적하였다. 스티렌 모노머는 이네오스 스티롤루션에서 생산된 것으로 육상저장탱크 ST B503에 적재되었다. 육상탱크 속 온도는 섭씨 13.33도였으며 TBC 농도는 11.7 ppm이었다. 선적 직후 관측된 스티렌 모노머 온도는 섭씨 16.6 ~ 21.5도 사이였다.

현장에 있던 ACA 화물검사원이 발급한 중합억제제 증명서에는 액체 TBC 14갤런(미국갤런 기준)이 화물탱크에 나누어 실렸으며 TBC 목표농도는 21ppm라고 기재되어 있었다. 증명서에 명시된 유효기간(60 ~ 90일)과 중합억제제 설명은 *스톨트 그로엔랜드호*에 발급된 증명서(그림 18) 내용과 동일하였다. 증명서에는 검사원과 선박 C/O가 서명되어 있었다.

항해

*스톨트 포커스호*는 2019년 8월 12일 휴스턴을 출항하여 9월 13일 고베에 도착하였다. 당시 스티렌 모노머가 담긴 탱크 일부에서 온도상승을 발견하였으며 해당 화물을 냉각시키고 온도상승을 멈추기 위한 조치를 하였다. 당시 본 사건은 기국에 보고되지 않았다.

2019년 11월 20일 스톨트사는 케이맨 제도 선급에 *스톨트 포커스호*가 스티렌 모노머 관련 문제를 겪었다고 알렸다. 선급에 발송한 이메일 내용은 다음과 같다.

*스톨트 포커스호*는 선적된 스티렌 모노머의 지속적 온도상승을 관찰하였고 이를 안정시키기 위해 모든 노력을 다했습니다. 당사의 화학전문가와 협의 후 스티렌 모노머를 해수와 혼합하여 반응을 중단시키기로 결정하였고, 결과는 성공적이었습니다. 그 결과 저희에게 이제 펌프로 이송할 수 없는 해수 혼합물이 담긴 탱크 4개가 생겼고, 따라서 이를 벤젠으로 희석시켜 점도를 줄여야 했습니다.

SOLAS에는 화물희석에 대한 명확한 규정이 없어 저희가 관련된 모든 규정을 준수하면서 올바르게 행동할 수 있도록 알려주셨으면 합니다. 초기 계획은 말레이시아에서 접안상태에서 이를 실행하는 것이었습니다만, 현재 말레이시아 당국의 허락을 얻지 못해 본 계획을 이행하지 못하고 있습니다.

스톨트社は 공해 상에서 스티렌 모노머를 벤젠과 희석하는 방안을 제안하였다.

계획한 비율로 “반응정지제(short stop)⁷⁾”인 PTZ(phenothiazine) 첨가와 혼합이 촉진되어 스티렌 모노머가 육상에 서 연소될 수 있게 안정화되었다.

케이맨 제도 선급은 다음의 몇 가지 조건을 전제로 스톨트社の 제안을 승인하였다. 여기에는 위험성 평가, 장비의 준비와 기능 여부, 강화된 모니터링, 이송 및 배출에 대한 연안국에 통보 등이 포함된다.

추가정보 요청

스톨트 포커스호와 스톨트 그로엔랜드호 선내 스티렌 모노머 발열사건의 공통점(동일 제조사, 동일 선적항, 동일 육상탱크, 유사한 시간대, 유사한 항로)으로 MAIB는 스톨트社에 스톨트 포커스호에서 이와 같이 대응할 수밖에 없었던 정황에 대한 추가정보를 요청하였다. 이에 스톨트社は 스티렌 모노머의 발열과 이후 배출처리가 해양사고나 준해양사고에 속하지 않는 것으로 보았고 이에 MAIB 요청을 거절하였다.

스톨트 그로엔랜드호 사고 당시 비상대응팀 일지에 기록된 메모에는 “스톨트 포커스호와 동일한 선적 터미널”이라 기재되어 있었다.

1.19.2 그 밖의 다른 해양사고

2019년 12월 MAIB는 스톨트 그로엔랜드호 선상 폭발 및 화재사고에 대한 중간보고서를 발표하였다. 위 보고서를 통해 MAIB는 선주, 선박 및 터미널 운영사, 개인에게 스티렌 모노머 해상운송 관련 사고 또는 “아차사고(near-misses)” 정보를 요청하였다.

이에 단 한 건의 응답을 받았는데, 이는 휴스턴에서 선적한 스티렌 모노머 탱크 4개 중 하나가 중합체 농도가 높아 중국 하역항에서 거절된 사례에 대한 것이었다. 스티렌 모노머 온도는 섭씨 37도에 달하였지만 갑판에서 유수로 냉각처리 하였다. 게다가 양하항 터미널에서 중합억제제를 제공하였고, P&I 조사관의 입회 하에 혼합되었다. 스티렌 모노머의 중합반응을 점검하였고, 마침내 화학제품전문 도급업체가 제공한 제품의 사양범위 안으로 돌아왔다.

이 경우는 스티렌 모노머 내부의 산소 고갈로 중합반응이 일어난 것으로 추측된다. 스티렌 모노머 화물탱크의 증기배출관은 질소가 채워진 헥센 화물탱크 증기배출관의 옆이었다. 헥센 탱크 내부의 질소는 증기배출관을 통해서 질소 병을 사용하여 가득 채워져야 했기 때문에 승무원들은 스티렌 모노머의 증기배출관을 잘못 사용해 부주의로 질소를 스티렌 모노머 탱크에 넣을 수 있었던 것이다.

스톨트는 스티렌 모노머 관련 과거 발생된 해양사고나 준해양사고는 보고하지 않았다.

1.19.3 육상에서의 사고

전세계 화학품관련 발생된 사고 데이터베이스가 없어 다음 표 6과 같이 여러 출처에서 스티렌 모노머 중합반응폭주로 발생된 사고를 수집하였다.

7) “반응정지제(short stop)”란, 일시적으로 중합반응을 정지시키기 위해 중합시스템에 첨가될 수 있는 자유 유리기 제거제(free radical scavenger)다. 반응정지제가 모두 소진되면 중합은 계속된다.

일자	장소	부상자	사망자
2020년 5월 7일	인도 비사카퍼트남	>300	11
2005년 6월 30일	미국 메사	0	1
2004년 4월 8일	중국 강소성	0	1
2003년 4월 2일	미국 애디스턴	0	1
2000년 3월 27일	미국 패서디나	71	1
1999년 10월 6일	대만 자이	1	0
1999년 6월 23일	미국 패서디나	21	2
1998년 6월 27일	미국 채나혼	1	0
1998년 12월 24일	일본 카나가와	0	0
1998년 1월 21일	대만 가오슝	4	0
1996년 1월 26일	대만 자이	1	0
1994년 7월 5일	대만 가오슝	0	1

표 6: 1990년 이후 스티렌 모노머 중합폭주 육상사고

확인된 사고원인은 다양했지만 화물의 온도를 철저히 감시하지 않은 것이 공통 요인이었다.

1.20 스티렌 모노머 표본 및 작업복 분석결과

현장조사 당시 *바우 달리안호*에서 회수한 잔여물 표본(그림 8)과 승무원 작업복(그림 9)[제1.4장 참고]은 LPD 랩 서비스(Lab Services Limited, LPD)로 보내 분석을 요청하였다.

LPD에서는 폭발사고의 원인을 나타내는 잠재적인 지표를 확인하기 위해 푸리에변환적외선분광법(FTIR)⁸⁾과 열분해 가스 크로마토그래피-질량 분석법(pyGC-MS)⁹⁾을 사용하였다.

LPD 보고서에 따르면 열과 물, 대기, 그리고 가장 중요한 열이 TBC 고갈에 영향을 미쳤다고 기술하고 있다. LPD는 중합억제제 농도수준이 10ppm 아래로 떨어질 때 중합억제제를 추가해야 하며, 일반적인 농도수준은 10~15ppm이지만 일부 고객은 60ppm까지 요청한다고 설명하였다.

LPD의 분석보고서에서는 다음을 확인하였다.

- 플라스틱 볼륨은 폴리스티렌 또는 폴리스티렌에 기초한 물질로 확인되었다.
- 2량체와 기타 스티렌 모노머 제품 생성을 알리는 일부 지표가 있었다. 이로써 중합반응 폭주가 개시되었음을 알 수 있다.

8) 푸리에변환적외선분광법(FTIR)은 고체와 액체, 기체를 포함, 모든 상태의 표본에서 유기화학물질을 확인하는데 특히 민감한 기법이다. FTIR은 일부 무기화합물 특성화에도 사용될 수 있다.

9) 열분해 가스 크로마토그래피-질량 분석법(pyGC-MS)은 샘플을 열분해하여 가스 크로마토그래피(GC)를 통해 더 작은 분자로 분리시키고 질량분석법을 활용하여 분석하는 화학분석기법이다.

- 중합체 블록 물질 속에서는 TBC가 발견되지 않았다. 이는 예견되었으며, TBC가 중합반응"폭주" 전에 고갈되었을 것으로 예상되기에 중합폭주를 알리는 추가 지표이다.
- 작업복에서 스티렌 모노머가 확인되었다. 이는 모든 부분에서 관찰되었지만 오염된 부분에서는 더 강력하게 나타났다.
- 오염도가 높은 부분(오염된 작업복)에서 TBC가 확인되었다.
- 스티렌 모노머 중합반응과 폭발이 관찰됨과 동시에 작업복도 스티렌 모노머로 오염되었다고 가정한다면, 중합억제제가 존재했고 발견할 수 있다고 할 수 있다.
- 본 조사에서 정량화를 시도하지는 않았지만 작업복 속 TBC 양은 미량오염 검출농도수준(일반적으로 1~10ppm 사이)보다 상당히 높을 것이다. 따라서 TBC의 부재가 폭발사고의 핵심은 아닐 것이다.

LPD에서는 중합반응의 화학적 개시와 관련된 혼합개시제를 보여주는 분명한 지표는 찾지 못했다. LPD의 분석결과에 기초하여 내린 결론은 다음과 같다.

조사의 현 단계에서 TBC는 작업복에서는 분명하게 존재하였기에, TBC 부족과 관련된 것보다 스티렌모노머의 중합반응폭주는 아마도 잘못된 환기나 혼합으로 인해 저장하는 동안 불충분했던 용존산소량과 관련될 가능성이 있다. 따라서 TBC는 중합반응 속도를 통제할 수 없었다. 그리고 나서의 열 제거는 중합반응의 기폭제로 반응 가속화 또는 열 폭주로 이끌었을 것이다.

제2장 분석

2.1 목적

이 장은 향후 유사한 사고의 재발을 방지하기 위해 제시할 권고사항 기초가 될 사고의 기여 원인과 정황을 결정하기 위함이다.

2.2 폭발과 화재의 메커니즘

VDR에 기록된 9S 탱크 온도의 기하급수적 기울기(그림 17)를 보면 *스톨트 그로엔랜드호* 선내 폭발 및 화재사고는 스티렌 모노머 중합폭주로 인한 것이 자명하다. 화물탱크 9S의 P/V 밸브에서 갑자기 대량의 증기가 배출(그림 3)되었고 선교 전단에서 위험을 알리는 상위 및 최상위수준 경보가 연속 작동하였으며 CCR에서 C/O와 3/O가 목격한 9S 탱크 내부의 빠른 압력증가가 이를 증명한다.

중합반응폭주로 스티렌 모노머 부피는 빠르게 팽창하였고 이는 탱크의 P/V 밸브의 배기량을 초과하는 속도로 9S 탱크 내부 압력을 증가시켰다. 그 결과 탱크는 상갑판과 빈 화물탱크였던 9C의 공통 격벽을 뚫고 파열되었다(그림 11과 12).

폭발이 일어나고 거의 바로 스티렌 모노머 증기는 연소되었다. 폭발 당시 9S 화물온도가 스티렌 모노머의 자연발화점보다 한참 낮았기 때문에 증기는 탱크가 파열되는 동안 발생한 금속간 마찰이나 정전기로 인한 불꽃 등 외부 원천으로 연소된 것이 틀림없다.

2.3 중합반응 개시

스티렌 모노머 중합은 열과 용존산소량 부족, 중합억제제 부족, 또는 과산화물 등 자유라디칼 개시제와의 접촉으로 촉발된다. 이러한 잠재적 개시제로부터 스티렌 모노머를 보호하기 위해 *스톨트 그로엔랜드호*에 선적된 스티렌 모노머에는 다음의 조치를 취하였다.

- 대기 상태에서 선적하여 산소고갈 가능성을 크게 낮추었다.
- 화물부피와 항해 중 예상된 대기온도를 감안하여 최소 60일 간 효용성을 갖도록 다량의 TBC로 스티렌 모노머의 중합반응을 억제하였다.
- WWT와 육안검사를 마친 스테인리스강 화물탱크에 저장하여 오염될 위험을 낮추었다.
- 선적완료 시 표본검사를 하였고(그림 19) 과산화물 농도는 최대허용치인 50ppm보다 훨씬 낮은 6ppm으로 제품 사양 내에 있는 것으로 확인되었다.

- 가열이 필요한 화물이 저장된 탱크와 인접하지 않은 탱크¹⁰⁾에 스티렌 모노머를 적재하였고, 이를 위해 가열관은 차폐하였다.

그러나, 위와 같은 사전조치에도 불구하고 중합반응폭주가 일어났다.

9S 탱크에 담긴 스티렌 모노머는 항해기간중 노출된 대기온도를 크게 상회하는 수준으로 온도가 상승하였다. VDR 데이터(그림 17)에 따르면 8월 30일부터 9월 28일 사이 29일 동안 9S 스티렌 모노머 온도는 섭씨 37도를 초과하였다.

휴스턴에서 선적된 스티렌 모노머는 육상저장탱크에서 섭씨 13도로 유지되었다. 8월 8일 선적작업이 끝났을 즈음에 이 온도는 약 섭씨 4도 상승하였다. 휴스턴 대기온도가 약 섭씨 30도였음을 감안하면, 8월 17일 휴스턴을 출항했을 때 그리고 전체 항해기간 동안 스티렌 모노머 온도는 중합억제제 증명서(그림 18)에 명시된 최대온도인 섭씨 29.4도(화씨 85도)에 도달하였거나 이보다 더 높았을 것이다.

온도상승이 중합반응폭주의 유일한 원인은 아니었겠지만 이는 TBC 고갈속도를 크게 높였고 그로 인해 중합 위험도 올라갔다. 따라서 9S의 화물온도 상승이 이 사고의 핵심요인이었다.

2.4 열전도

해당 선박이 휴스턴 지역과 파나마 운하로 항해하여 이를 통과하는 동안의 대기와 해수온도는 약 섭씨 30도였기에 스티렌 모노머와 다른 "주변" 화물의 온도는 그에 따라 반드시 상승했을 것이다. 화물 온도가 추가 상승하려면 열이 더 필요했었다.

스톨트 그로엔랜드호 내 "주변" 화물의 유일한 열원은 가열화물로 특히 8P ~ 11P 탱크의 HMD이다. 선적 당시 이들 온도는 섭씨 61도였다. VDR(그림 17)에 따르면 HMD 온도는 선박의 화물가열시스템을 주기적으로 사용하여 섭씨 45 ~ 55도 사이로 유지되고 있었다. 또한, VDR은 열전도 효과로 인해 그 주변 중앙탱크(8C ~ 11C) 속 화물온도는 섭씨 40 ~ 44도 사이로 유지되었고, 우현탱크(8S ~ 11S)는 섭씨 36 ~ 38도 사이로 유지된 것으로 보여주었다. HMD이 이와 같은 고온으로 선적된 점과 이후 명시된 운송 최고온도인 섭씨 50도를 초과한 점은 제품 품질에는 영향을 미치지 않았겠지만 열전도 수준을 악화시켰을 것이다.

HMD에서 9S 스티렌 모노머로의 열전도 속도와 수준은 상대적으로 비열용량(SHC)이 낮은 9C 아디포니트릴과 스티렌 모노머(표 7) 자체에 영향을 받았을 수 있다. 비열용량은 단위질량 당 물질 온도를 높이는데 필요한 열에너지의 양을 의미한다. 비열용량이 낮은 물질은 비열용량이 높은 물질보다 더 쉽게 온도가 상승(하강)한다. 이 경우, 아디포니트릴과 스티렌 모노머는 온도가 더 쉽게 상승했을 것이고 인근 탱크와 하부의 빈 밸러스트 탱크, 태양에 노출된 갑판 상부를 통한 열 손실은 제한되었다.

10) 플라스틱스 유럽의 스티렌 모노머: 안전취급지침서에 포함된 지침과는 달리, 6C(스티렌 모노머를 포함)는 7C(가열화물을 적재)과 모서리가 닿아 있었다는 점에 주목해야 한다.

물질	SHC (J/KgK)
물	4200
글리세롤	2400
아크릴로나이트릴	2090
스티렌	1730
나트륨(액체)	1230
아디포니트릴	1190
구리	0.386

표 7: 여러 가지 물질의 20°C 비열용량(SHC)

2.5 중합억제제와의 혼합

TBC 농도는 계산값이며 측정값이 아니다. 그리고 개방된 탱크에 부었으며 스티렌 모노머는 기계적 혼합 없이 위에 그대로 선적되었다. 스티렌 모노머 속 TBC와 산소의 잘못된 분배로 탱크 속 특정 부분에서 농도가 낮아지면 해당 지점이 산적물질 속 중합폭주 지점이 될 수 있다.

스톨트 그로엔랜드호 선상에서의 중합억제제 첨가 및 혼합방법은 가장 기본적인 방식이었으며 항해하는 동안 선박과 화물 움직임에 크게 의존하였다. 선박이 휴스턴을 출항하기 10일 전 스티렌 모노머를 선적하였고 중합억제제를 첨가하였지만 이는 이미 과거에 시도했고 테스트를 마친 업계의 관행이었으며, 사고 후 6P와 6C에서 발견된 TBC 농도수준을 고려했을 때, 이것이 사고원인이었을 가능성은 낮다.

2.6 중합억제제의 고갈

선적 시 TBC의 목표농도는 17ppm이었다. 이는 항해하는 동안 TBC가 효용성을 확실히 유지할 수 있도록 필요한 양에 기초한 것으로 도착 시 10ppm를 초과하게 된다. ACA를 대표하여 발행된 중합억제제 증명서에 따르면 TBC는 권장 온도범위인 섭씨 15.6 ~ 29.4도(화씨 60 ~ 85도)에서 60 ~ 90일 기간 동안 효력을 발휘해야 한다. 휴스턴에서 *스톨트 그로엔랜드호*에 스티렌 모노머를 선적하고 계획대로 대만 안핑항에서 이를 하역하기까지 기간은 56일이었다.

플라스틱스 유럽의 스티렌 모노머: 안전취급지침서(2018, 표 4)에서 제공한 고갈율을 사용하면, 다음과 같다.

- 25°C에서 TBC는 11일 동안 매일 약 1ppm 비율로 고갈되었을 것이다. 해당 속도라면 TBC가 17ppm에서 10ppm(표 8)로 떨어지는데 77일 소요되었을 것이다.
- 30°C에서 TBC는 7일 동안 매일 약 1ppm의 비율로 고갈되었으며, 이로 인해 49일 안에 10ppm으로 떨어졌을 수 있다. 이는 계획된 해상운송 기간보다 더 짧다.
- 37°C에서 TBC 고갈율은 상당히 더 높았을 것이다.

주위온도(°C)	고갈율 (일수/1ppm)	TBC 유효함량 (17ppm - 10ppm)	보장된 유효기간
25°C	11	7	77
30°C	7	7	49
40°C	1.5	7	10.5

표 8: 플라스틱 유럽의 스티렌 모노머: 안전취급지침서(2018)에 제시된 수치를 활용하여 계산한 TBC 고갈

사고 발생 후 6P와 6C에서 채취한 표본에 진행한 테스트를 통해 각 탱크 속 TBC 함량은 각각 8ppm과 7ppm으로 확인되었다. 9S 스티렌 모노머의 온도가 6P와 6C 온도보다 섭씨 5 ~ 6도 높았기 때문에 TBC 고갈율은 상당히 더 높았을 것이고, 울산 도착 시 농도수준은 훨씬 더 낮았을 것이다.

TBC 중합억제제 농도가 4ppm 미만인 경우 효력이 상실되며 이는 섭씨 40도인 경우 21일 내에 도달가능하다. LPD가 실시한 실험실 테스트[제1.2장 참고]에서 9S 화물탱크 속 증기가 P/V 밸브를 통해 배출되고 있을 때 *바우 달리안* 호 갑판에서 작업을 하고 있었던 승무원의 작업복에서 TBC 미량이 확인되었다. 이를 통해 TBC는 폭발 당시 여전히 스티렌 모노머 속에 남아 있었다는 점을 알 수 있다. 그러나 9S 속 화물 온도가 계속해서 상승한 것을 생각하면, 항해하는 동안 TBC는 어느 순간에 효력을 잃었으며 아마도 *스톨트 그로엔랜드*호가 울산에 입항하기 전이었을 가능성이 매우 높다.

9S 스티렌 모노머의 온도상승과 TBC 농도감소로 스티렌 모노머 속 용존산소가 고갈될 가능성이 높아졌을 것이며, 그로 인해 중합속도도 높아졌을 것이다. 중합은 발열성 반응이므로 스티렌 모노머 온도는 계속 상승하였고, 9월 27일 반응을 더 이상 멈출 수 없는 지점인 중합폭주 임계치, 섭씨 65도(그림 20)에 도달하였다.

2.7 화물 적부

IBC 코드에서는 국부과열로 인한 열기 때문에 위험한 반응을 일으킬 수 있는 화물은 반응을 개시할 정도로 온도가 충분히 높은 다른 제품으로부터 적절히 분리하여 적재하고 운송할 것을 규정하고 있다. 해당 요건은 *스톨트 그로엔랜드* 호 VCR에도 참고되었으며 "가열화물은 열에 민감한 화물 또는 열원이 위험한 반응으로 이어질 수 있는 화물에 인접하지 않도록 적재한다"라고도 강조하였다. 쉘의 스티렌 모노머에 대한 화물취급자료에는 인접한 탱크 속 화물의 최고온도가 섭씨 35도를 초과해서는 안 된다고 명시되어 있다. 다른 산업체에서도 유사한 지침을 제공하고 있었다. "스티렌 모노머: 안전취급지침서"에는 이보다 더 나아가 "스티렌 모노머는 코퍼뎀으로 분리되어 있다고 하더라도 온도가 섭씨 30도(화씨 86도) 또는 그 이상인 화물과는 인접하거나 모서리가 맞닿아 있는 화물탱크에 적재되어서는 안 된다"라고 명시되어 있다.

일부 업계에서 발행된 자료에서는 인접한 탱크에 대한 온도의 최고 임계치를 명시하는 것보다는 가열화물을 열에 민감한 화물로부터 물리적으로 분리시킬 필요성에 초점을 맞추고 있었다. 이러한 접근법은 적재된 화물을 통한 탱크 간 열전도 위험을 감안하지 않았다. 8P ~ 11P 탱크에 선적된 HMD는 분명 가열화물이었으며 그 온도는 선박의 화물가열 시스템을 사용하여 유지되었다. 8C ~ 11C까지 화물은 가열화물로 간주되지 않았다. 그러나, 열전도로 인해 이들은 셀과 플라스틱 유럽에서 정한 임계치를 크게 초과하는 온도로 운송되고 있었다. 따라서, 9P 속 HMD에 의해 온도가 상승한 9C 탱크 화물이 9S 탱크 내 스티렌 모노머 온도를 상승시킬 것이라는 점은 전적으로 예측이 가능하며, 예상 밖의 일은 아니었을 것이다. 열전도로 인한 온도상승 가능성은 TSG에서도 인정하였다. 여기에서는 "대기 기후상태 또는 대기 화물온도와 무관하지 않은 화물온도의 상승은 중합과정 개시를 알리는 조기경보일 수 있다"라고 명시하였다.

스톨트 그로엔랜드호의 스티렌 모노머 중합사고를 통해 열에 민감한 화학물질을 가열화물 바로 옆에 적재하지 말라는 주의사항 만으로 IBC 코드의 "적절히" 분리하라는 요건[제1.14장 참고]을 충족할 수는 없다는 점을 알 수 있다. 중간탱크를 통해 가열화물에서 열에 민감한 화물까지 열전도 될 가능성과 범위 또한 반드시 정확하게 판단해야 한다.

스톨트 그로엔랜드호의 스티렌 모노머 적부는 경력있는 선박 운항담당자가 iStow 프로그램을 사용하여 계획하였으며 준거 규정과 선내 필수요건을 준수하였고 업계 지침에 부합한 것으로 보였다. 당시 선박 C/O는 선장이 이를 승인하기 전, 제안된 계획서를 면밀히 검토하였다. 그러나 중합억제제 증명서 상 스티렌 모노머 화물의 최고온도는 화씨 85도 또는 섭씨 29.4도로 명시되어 있지만, 적부계획을 수립하는 동안 인접한 탱크에서 발생하는 열로 인해 화물이 최고온도를 초과하지 않도록 하기 위한 계산을 하지는 않았다. 대신, 선박 운항담당자와 선박 선장, C/O는 자신의 경험에 의존하였다. 이는 다음 요소들을 포함한 여러 가지 요소들에 기인하였다.

- 열전도 계산은 각기 다른 비열용량, 탱크구조, 탱크 액면 높이, 적재 기간, 그리고 기타 변수들로 복잡하다. 따라서 이것은 평상시 없는 이례적인 일이었다.
- 열전도 계산의 복잡성은 iStow 프로그램 범주 밖의 수준이었다.
- 열전도에 대해 선장과 C/O가 갖고 있는 지식은 STCW 훈련과정 요목으로 제한되어 있었다. 또한, 이들은 과거 스티렌 모노머를 운송할 당시 어떤 어려움도 겪지 않았다.

IBC 코드와 TSG, CDI 가이드에 나와있는 지시사항과 지침에서는 열에 민감한 화물과 가열화물은 인접하여 적재되어서는 안 된다는 점이 분명하게 명시되어 있다. 그러나, 업계 지침에는 중간탱크를 통한 잠재적인 열전도, 또는 이러한 열전도가 어떻게 예측되는지에 대한 언급은 거의 또는 아예 없었다. 대신, 온도 모니터링을 신뢰하였다.

2.8 온도 모니터링

스톨트 그로엔랜드호의 안전관리시스템에서는 9S의 스티렌 모노머, 9C의 아디포니트릴을 포함한 모든 비가열화물의 온도를 매일 모니터링할 것을 규정하였다. 이러한 요건을 충족하고 IBC 코드를 준수하기 위해 아리스톤(Ariston) 화물모니터링시스템을 통해 원격으로 온도를 측정하고 온도경보를 사용할 수 있었다.

스톨트 그로엔랜드호 승무원은 선교 전단의 상위수준 위험경보가 작동되며 경고음이 울릴때까지 9S탱크 스티렌 모노머의 온도상승과 중합반응을 인지하지 못했다. 이는 비가열화물의 온도가 전혀 모니터링되지 않았으며 어떤 온도경보도 설정되지 않았다는 사실을 의미한다. 또한, 이들은 이를 தெ면, 8C (43.6°C), 8S (39.1°C), 11C (48.2°C), 9C(48.8°C), 10C (46.0°C), 11S(38.4°C)와 같이 고베와 울산(표 2)에서 하역하는 화물의 온도상승이 얼마나 중요한지 알아차리거나 인지하지 못했다. 울산항에서 이는 화물작업하는 동안 교대하는 C/O가 처리해야 하는 중요한 업무들 때문에 간과되었을 것이다.

승무원들이 비가열화물의 온도를 모니터링하지 않은 것은 이들이 중합방지 처리된 스티렌 모노머를 위험하지 않은 화물로 생각하였으며 과거 이를 운송했을 때 문제나 어려움을 겪지 않았기 때문이다. 결과적으로 가열화물의 온도는 주로 화물의 품질을 이유로 모니터링하고 온도를 유지시킨 반면 "대기온도" 상에서 운송된 스티렌 모노머와 그 밖의 다른 비가열화물에 대해서는 열에 민감할지라도 주의를 덜 기울였다.

스티렌 모노머 온도를 자세히 모니터링하고 중합억제제 증명서에서 제시한 최고온도인 화씨 85도(섭씨 29.4도)를 잘 지켰더라면, 본 사고는 막을 수 있었을 것이다. 스톨트 그로엔랜드호가 고베와 울산에 입항하기 훨씬 전, 심지어 휴스턴을 출항하기 전 우려를 제기하고 용선주에게 알렸어야 했다. 스티렌 모노머 온도가 섭씨 30도에 도달했을 때 즉시 이를 용선주에게 알렸어야 했다. 아마 선박이 휴스턴을 출항하기 전에 이 온도에 도달했을 것이다. 그리고 9S 화물온도가 3일 연속 섭씨 1도씩 증가하고 24시간 동안 섭씨 3도씩 증가(그림 20)했을 때 이를 용선주에게 알려 긴급한 조치를 취해 사고를 막는 두 번째 기회도 놓쳤다. 이 두 경우는 폭발이 발생하기 4일 전 선박이 고베에 머무르던 9월 24일에 일어났다. 9월 27일 약 10시 00분경 중합폭주가 일어나는 온도 섭씨 65도에 도달하였으며, 이는 스톨트 그로엔랜드호가 오포부두로 이동하기 직전이었다.

2.9 중합반응 시 취한 조치

스톨트 포커스호 화물탱크 4개 속 스티렌 모노머의 중합은 결국 스티렌 모노머를 해수와 혼합함으로써 막을 수 있었다[제1.19.1장 참고]. 이 조치는 성공적이었으나, 스티렌 모노머 온도상승을 직면한 상황에서 승무원들이 선택할 수 있는 대안에 대한 우려도 생겨났다.

선적을 마친 후 스톨트 그로엔랜드호에 발급된 스티렌 모노머의 중합억제제 증명서(그림 18)에는 해당 물질의 최고온도를 초과하게 되면 화물은 중합억제제 농도수준과 중합반응 여부를 위해 모니터링되어야 하며, 필요한 경우 중합억제제를 추가로 첨가해야 한다고 명시하였다. 그러나 현장 상황은 다음과 같았다.

- 스톨트 그로엔랜드호 승무원은 TBC농도를 검사할 수 있는 수단이 없었다.

- 선내에는 중합체를 검사할 수 있는 수단이 없었다.
- 용선주는 항해를 위한 추가 TBC를 제공하지 않았다.
- 스티렌 모노머와 TBC를 추가로 혼합할 수 있는 수단이 없었다.

그 결과, *스톨트 그로엔랜드호* 승무원들이 9S, 6P, 6C 속 화물온도가 상승한 것을 확인했다 하더라도 중합억제제 증명서에 나온 조치를 이행하지 못했을 것이다.

대부분의 경우, 탱크와 인접탱크 온도의 모니터링, 그리고 질소봉입을 사용한 경우 산소수준을 모니터링하는 것을 넘어, 스티렌 모노머의 중합을 방지하거나 멈추기 위해 선박의 승무원들이 할 수 있는 일은 선박 외부를 냉각시키거나 물이 탱크에 넘치도록 하여 탱크온도를 낮추는 것에 제한된다. 따라서 중요한 것은 중합억제제 증명서와 관련 지침에 열거된 바와 같은 대응책은 이행 가능해야 하며 육상기반 절차보다 해상운송에 초점을 맞춰야 한다는 점이다. 이는 전문성과 실용성을 이유로 아마 화물 제조사나 육상에 있는 화학전문가에 자문하는 것에 제한될 것이다.

2.10 화재진화 작업

*스톨트 그로엔랜드호*와 *바우 달리안호* 승무원들이 즉각 반응하여 고정식 포말방사기로 화재를 진압하고 각각의 선박에서 퇴선한 것은 긍정적인 대응이었으며 이들의 안전을 확보하는데 도움이 되었다.

스톨트 그로엔랜드호 선내 화재는 5시간 30분 동안 계속되었으며 그동안 화재는 매니폴드 구역에서 거주구역까지 번졌다. 거주구역 전단이 비교적 큰 손상을 입지 않았기에 현장조사를 하는 동안 화재확산 경로는 불분명했다. 불이 거주구역으로 확산된 것은 가스감지 또는 화물탱크의 가열시스템에서 가연성인 스티렌 모노머 증기가 나왔기 때문일 가능성이 있다.

염포부두가 일반화물 선석인 점을 감안하였을 때 현지 비상대응서비스도 시의적절 했으며, 화학물질이나 석유제품을 취급하는 터미널과는 다르게 해당 부두에는 강화된 소방시설이나 비상대응절차가 확립되어 있지 않았다. 울산시 및 울산대교(그림 1과 6)와 선석의 인접성, 그리고 화재 및 폭발에서 배출된 유독성 연기를 고려하였을 때 해당 사고가 대기 환경에 미칠 잠재적 영향도 중대하였다.

2.11 *스톨트 포커스호* 사고

몇 주 앞서 *스톨트 포커스호*에서 발생한 중합반응 사고[제1.19.1장 참고]는 두 선박이 모두 동일한 항에서 동일한 제조사의 스티렌 모노머를 동일한 육상탱크에서 동일한 시간대에 선적했기에 조사 당시 특별한 관심을 갖게 되었다. 뿐만 아니라 해상경로와 그에 따른 환경조건도 유사하였다.

핵심적 차이점은 *스톨트 포커스호* 선내 TBC 목표농도가 훨씬 더 높다(17ppm이 아닌 21ppm)는 점이다.

이는 아마도 계획한 운송시간 때문이었을 것인데, 중합억제제 증명서 상 계산된 유효기간은 두 선박 모두 동일(60 ~ 90일)하였다. *스톨트 포커스호*의 화물적재 배열, 온도상승 원인 및 정도, 그리고 선상에서 온도상승을 확인하게 된 정황은 알려지지 않았고, 그로 인해 두 사건을 비교할 수 없었다.

스톨트社가 스톨트 포커스호 사고에 대한 세부내용을 전혀 제공하지 않은 것은 해당 선사가 스티렌 모노머를 운송하면서 이와 유사한 해양사고나 일어날 뻔한 사고를 겪지 않은 것이 분명하기에 특히나 유감스럽다. 또한 놀라운 사실은 선사가 이를 IMO 해양사고조사코드¹¹⁾에 정의된 바와 같이 준해양사고¹²⁾로 간주하지 않았다는 점이다. 만약 스톨트 포커스호 사고가 시정되지 않았다면 선박과 승선자, 그리고 기타 인근 사람들의 안전을 위협했을 것이라는 점은 스톨트 그로엔랜드호 사고와 육상에서 발생한 주요 스티렌 모노머 폭발사고 숫자에서도 명백히 드러난다. 따라서 이 사건은 기국 규정¹³⁾에 따라 보고되었어야 했다.

스톨트社가 다른 선박의 선장에게 스톨트 포커스호 준해양사고를 보고하거나 알리지 않았기에 울산항 폭발사고를 방지할 수 있는 기회를 놓쳤다. 또한, 본 조사에도 사건 정황을 공유하지 않아 더 많은 업계가 발생할 뻔한 사고로부터 더 많은 교훈을 얻을 기회가 역시 사라졌다. 사업상 민감성과 무관하게 스톨트社가 스티렌 모노머 중합사고를 통해 얻은 추가적인 교훈을 화학제품운반선사와 공유한다면 향후 안전성에 도움이 될 것이다.

11) 준해양사고는 해양사고를 제외한 것으로, 선박이나 사람의 안전 또는 해양환경에 위해를 끼쳤거나, 만약 시정되지 않으면 위해를 끼칠 수 있는 선박의 운항과 직접적으로 관련하여 발생된 하나 또는 일련의 사건을 의미한다.

12) 해양사고 또는 준해양사고 안전조사 관련 국제표준 및 권고사항에 대한 국제협약

13) 케이맨 제도의 상선법(Merchant Shipping Law, 2016년 개정) - 2018년 상선법(해양사고보고 및 조사)

제3장 결론

3.1 본 사고의 직접적인 원인으로 과거 권고사항으로 언급되었거나 권고사항으로 결정되었던 안전문제

1. 스톨트 그로엔랜드호 선내 폭발 및 화재사고는 화물탱크 9S 내부 스티렌 모노머의 중합폭주로 발생되었다. [제2.2장 참고]
2. 9S 탱크의 스티렌 모노머 중합은 항해기간 중 상당기간 동안 발생된 화물의 온도상승으로 개시되었으며, 이로 인해 중합억제제 TBC의 효용성이 감소되었다. [제2.3장과 제2.6장 참고]
3. 9S 탱크 스티렌 모노머의 온도상승은 9C 탱크 아디포니트릴을 통해 좌현탱크 내 HMD에서 열이 전도되었기 때문이다. [제2.4장 참고]
4. 스티렌 모노머는 가열된 HMD 화물 바로 옆에 적재하면 안 된다는 주의사항 만으로 IBC 코드의 적절한 격리 요건을 충족할 수 없었다. [제2.7장 참고]
5. 화물적재를 계획하고 승인하는 동안 HMD에서 스티렌 모노머로의 열전도 가능성을 충분히 고려하지 않았다. [제2.7장 참고]
6. 화물 적부계획을 수립하는 동안 열전도를 예측하는 계산은 복잡하며 선박 운항담당자 및 승무원들의 역량 밖이었으므로 간과되었다. 이는 화물적재프로그램 범주 밖의 수준이었다. [제2.7장 참고]
7. 중합방지 처리된 화물을 가열화물에 인접하여 적재해서는 안된다는 지시사항과 지침은 명확했다. 하지만 인접탱크 또는 중간탱크를 통한 열전도 가능성은 상세하게 다뤄지지 않았다. [제2.7장 참고]
8. 스톨트 그로엔랜드호의 안전관리시스템 요건에도 불구하고 스티렌 모노머 온도를 모니터링하지 않았으며, 화물 모니터링시스템 상에서 이용가능한 온도경보도 설정하지 않았다. 또한, 승무원들도 고베와 울산에서 하역한 화물의 온도상승이 얼마나 중요한지 알아차리거나 인지하지 못했다. [제2.8장 참고]
9. 승무원들이 스티렌 모노머 온도를 모니터링하지 않은 것은 중합방지 처리된 스티렌 모노머를 위험하지 않은 화물로 생각하였으며 과거 이를 운송했을 때 문제나 어려움을 겪지 않았기 때문이다. [제2.8장 참고]

3.2 본 사고의 직접적인 원인은 아니나 과거 권고사항으로 언급되었거나 권고사항으로 결정되었던 안전문제

1. 스톨트 그로엔랜드호에서 스티렌 모노머의 온도상승을 직면했을 때 중합억제제 증명서에 명시된 대로 조치를 취하는 것은 이행불가능했다. 승무원들은 TBC농도나 중합체를 검사할 수 있는 수단이 없었으며 선내에는 TBC 여분도 없었다. [제2.9장 참고]
2. 울산시 및 울산대교와 염포부두의 인접성, 그리고 선내 폭발 및 화재에서 배출된 유독성 연기를 고려하였을 때 해당 사고가 대기 환경에 미칠 잠재적 영향은 중대하였다. [제2.10장 참고]

3.3 본 사고의 직접적인 원인이 아닌 기타 안전문제

1. 2주 전 발생한 유사한 중합반응 사고를 다른 선박의 선장에게 보고 또는 경고하지 않아 이 사고를 미연에 방지할 수 있는 기회를 놓쳤다. [제2.11장 참고]

제4장 조치

4.1 MAIB가 취한 조치

MAIB는 화학제품운반선사에 사고 정황을 알리고 과거 유사한 사고나 사건에 대한 정보를 요청하는 중간보고서를 발행하였다.

4.2 그 밖의 다른 기관이 취한 조치

스톨트 탱커스 B.V.는 다음 조치를 취하였다.

- 등록된 선박에 중합억제 처리된 화물운송 관련 사안을 통지하였다.
- 선박이 매주 3회씩 육상에 있는 선박 운항담당자에게 화물온도를 보고하는 제도를 도입하였다.
- 화물 관련 경보설정을 위한 절차를 개선하였다.
- 가열화물과 중합방지 처리된 화물을 포함하는 화물적재를 점검하는 절차를 강화하였다.
- 중합방지 처리된 화물에 대한 승무원의 인식제고를 위해 해사규정담당자를 통해 보다 구체적인 캠페인을 시작하였다.
- 가열 및 열에 민감한 화물 모두를 포함해 화물적재 시 열전도를 계산하고 예측할 수 있도록 화물적재프로그램의 업그레이드 가능성을 조사하기 시작하였다.
- 중합방지 처리된 화물에 대해 실질적이고 이행 가능한 화물취급 지시사항 및 프로토콜을 확립하기 위해 제조사 및 업계와 협력을 시작하였다.
- 선박에서 중합체 검사장비 사용 가능성을 조사하기 시작하였다. 불행히도 이는 현재의 기술로는 불가능할 것으로 판단되었다.

대한민국 해양수산부가 취한 조치는 다음과 같다.

- 울산항 일반화물 선석에서 위험화물에 대한 STS 이송작업을 금지하였다.

ICS는 다음을 분명히 하기 위해 2021년 1월 TSG(화학물질)의 제6.3.4장 적부계획(Stowage planning)을 개정하였다.

- 가열 및 중합억제 처리된 화물 적재는 복잡하고 예측이 어려운 수준의 열전도가 일어나는 역동적인 상황으로 이어질 수 있다.
- 가열화물과 열에 민감한 화물 사이를 하나의 화물탱크로 분리하는 것만으로는 충분하지 않을 수 있다.

CDI는 무엇보다도 중합억제제 수량을 확인할 수 있는 선박 화물탱크의 안정제 투입절차에 대한 실무지침 문서화 작업에 착수하였다.

제5장 권고사항

케이맨 제도 선박등록국은 REG(Red Ensign Group)의 회원국으로서 영국을 통해 다음 사항들을 이행하도록 권고한다.

2021/117

다음과 같이 IBC 코드 제15장13조를 개정할 것을 IMO에 제안한다.

- 화물온도가 제조사가 명시한 산소 및 온도 임계치를 벗어나는 경우 취해야 하는 조치를 중합방지 증명서에 포함한다.
- 항해 중 중합억제제의 모니터링, 첨가 및 혼합과 관련하여 모든 조치는 선내 제약사항을 고려해 현실적이어야 한다.

ICS는 다음을 이행할 것을 권고한다.

2021/118

본 보고서를 회원사에 알린다.

INTERTANKO는 다음을 이행할 것을 권고한다.

2021/119

본 보고서를 회원사에 알린다.

CDI는 다음을 이행할 것을 권고한다.

2021/120

“STCW 상급교육과정(직무교육)을 위한 화학제품운반선 운항 - 화학제품운반선 운항을 위한 실무 지침”이 다음을 명시하도록 개정한다.

- 가열화물과 중합방지 처리된 화물적재는 열전도의 수준이 복잡하고 예측이 어려울 수 있는 역동적 상황으로 이어질 수 있다.
- 가열화물과 열에 민감한 화물을 탱크 하나로 격리시키는 것만으로는 충분하지 않을 수 있다.
- 본 보고서를 회원사에 알린다.

플라스틱스 유럽(스티렌모노머생산자협회)은 다음을 이행할 것을 권고한다.

2021/121

회원사와 함께 협력하여 스티렌 모노머 - 안전취급지침서 내부에 본 사고로 얻은 교훈을 포함시키도록 노력한다.

스톨트 탱커스 B.V. 는 다음을 이행할 것을 권고한다.

2021/121

INTERTANKO와 함께 스톨트 포커스호 사건의 정황 및 교훈, 그리고 개선된 화물적재프로그램에 대한 연구결과를 공유하여 열전도 및 화물 행태의 예측이 가능하도록 한다.

안전 권고는 어떠한 경우에도 비난이나 책임을 추정하지 않는다.