



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

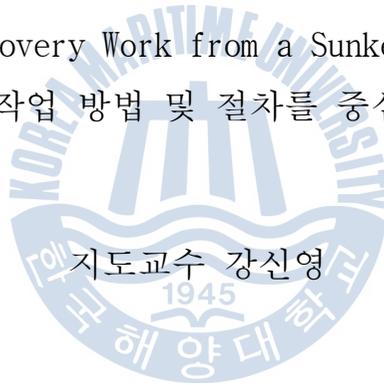
[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

침몰유조선 내 잔존유 회수에 대한 국내 작업사례 비교분석 연구

A Case Study on the Comparison and Analysis of
Remaining-oil Recovery Work from a Sunken Tanker in Korea

- 수중작업 방법 및 절차를 중심으로 -



2014년 8월

한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

해양관리기술학과

강광구

본 논문을 강광구의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

강 효 진 (인)

위 원

김 재 수 (인)

위 원

강 신 영 (인)

2014년 6월 5일

한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi

1. 서 론

1.1 연구배경	1
1.2 선행 연구	3
1.3 연구목적 및 절차	4

2. 침몰유조선 잔존유 회수 활용장비 및 주요기술

2.1 일반적인 잔존유 회수작업 절차	5
2.2 해상기지선 설치	7
2.2.1 생활바지선	7
2.2.2 DP선	9
2.3 탱크별 잔존유량 추정	10
2.3.1 중성자를 활용한 비파괴 검사	10
2.3.2 잠수사를 활용한 물리적 확인	11
2.4 잔존유 회수 작업	14
2.4.1 ROV를 활용한 회수방법	14
2.4.2 잠수사를 활용한 회수방법	17
2.5 고점도 잔존유에 대한 유동성 확보	20

3. 국내 침몰유조선 잔존유 회수 작업사례 비교분석

3.1 분석 개요	24
3.2 잔존유 회수 해외 유사 작업사례 조사	25
3.2.1 무인회수장비를 활용한 잔존유 회수 작업사례	25
3.2.2 잠수사를 활용한 잔존유 회수 작업사례	26

3.3 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업(1998)	27
3.3.1 사고 개요	27
3.3.2 작업여건 및 주변환경	28
3.3.3 잔존유 회수 주요 동원장비	29
3.3.4 회수방법 및 절차	30
3.3.5 회수작업 종료	33
3.3.6 소요기간 및 비용	34
3.4 경신호 잔존유 회수작업(2011)	35
3.4.1 사고개요	35
3.4.2 작업여건 및 주변환경	36
3.4.3 잔존유 회수 주요 동원장비	37
3.4.4 회수방법 및 절차	38
3.4.5 회수작업 종료	42
3.4.6 소요기간 및 비용	44
3.5 비교분석	45
3.5.1 작업여건 및 환경조사의 적정성	45
3.5.2 작업의 안전성	49
3.5.3 작업진행의 통제성 및 탄력성	50
3.5.4 작업의 신속성	52
3.5.5 작업의 효율성	53
3.5.6 작업의 완결성	56
3.5.7 작업의 경제성	58
4. 결론 및 고찰	
4.1 결론	62
4.2 고찰	64
4.2.1 ROV를 활용한 잔존유 재순환 가열장비 개발의 필요성	64
4.2.2 잔존유 재순환 가열 효율성에 대한 추가 연구의 필요성	65
5. 참고문헌	66

List of Tables

Table 1 ROV의 규격 및 용도에 따른 Class 구분	15
Table 2 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 추정량 대비 회수량	29
Table 3 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수 총 작업기간 대비 중지기간 ..	34
Table 4 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업에 투입된 소요비용 내역 ..	34
Table 5 경신호 잔존유 회수작업 전 침몰지점 인근 유증 발견 횟수	36
Table 6 경신호 잔존유 추정량 대비 실제 회수량	37
Table 7 경신호 잔존유 회수 총 작업기간 대비 중지기간	44
Table 8 경신호 잔존유 회수작업 소요비용 내역	45
Table 9 두 작업사례에 대한 총 작업기간 대비 순 작업기간 비교	46
Table 10 두 작업사례에 대한 잔존유 추정량 대비 실제 회수량 오차율 비교 ..	47
Table 11 두 작업사례에 대한 1개 화물유 탱크당 평균 작업 소요일수 비교 ...	52
Table 12 두 작업사례에 대한 유성혼합물 대비 유류 회수효율 비교	54
Table 13 두 작업사례에 대한 회수유 1kl당 평균 폐기물처리 소요비용 비교 ..	54
Table 14 두 작업사례에 대한 1일당 평균 잔존유 회수량 비교	55
Table 15 두 작업사례에 대한 1일당 평균 작업 소요비용 비교	59

List of Figures

Fig. 1	최근 30년간 700kl 이상 유류오염사고 발생현황	2
Fig. 2	연구수행 절차도	4
Fig. 3	일반적인 침몰유조선 잔존유 회수작업 절차도	6
Fig. 4	생활바지선 모습(경신호 작업사례)	8
Fig. 5	묘박 수에 따른 바지선의 일반적 묘박 형태	9
Fig. 6	저장탱크 내 중성자 반응 신호 예시	11
Fig. 7	Drill-Tap-Stud 구조	11
Fig. 8	잠수사의 기름유무 확인장면(일자형 막대 활용)	12
Fig. 9	잠수사의 기름유무 확인장면(ㄱ자형 막대 활용)	12
Fig. 10	경신호 잔존유량 측정 현장제작 장비 기본원리 개념도	13
Fig. 11	ROV 모습(제1유일호, 제3오성호 작업사례)	14
Fig. 12	베이스플레이트와 베이스플레이트가 장착된 ROLS	16
Fig. 13	ROV와 ROLS를 활용한 잔존유 회수작업 개념도	17
Fig. 14	포화잠수 장비(챔버 및 다이빙 벨)	18
Fig. 15	Hottap 장비	19
Fig. 16	Hottap 장비를 활용한 선체 천공작업 개념도	19
Fig. 17	온도변화에 따른 기름 종류별 점도 변화	20
Fig. 18	잔존유 회수작업 중 유회수용 호스가 압착된 모습	21
Fig. 19	해수통로(water way) 생성 개념도	21
Fig. 20	화물유 탱크 내 잔존유 가열 개념도	22
Fig. 21	잔존유 가열봉(스팀코일) 제작 모습	22
Fig. 22	가열봉을 활용한 국소적 가열한계에 대한 개념도	23
Fig. 23	셔틀백을 활용한 심해 잔존유 회수작업 개념도	26
Fig. 24	Costa Concordia호 잔존유 회수작업 사진	27
Fig. 25	제1유일호 및 제3오성호 침몰위치	28

Fig. 26	제1유일호 및 제3오성호 해상기지선 배치도	30
Fig. 27	선체측면 베이스플레이트 장착 개념도	31
Fig. 28	ROLS를 활용한 잔존유 가열 개념도	32
Fig. 29	경신호 침몰위치 및 당시 인근 오염지역 추정도	35
Fig. 30	경신호 잔존유 회수장비 장착 개념도	39
Fig. 31	1단계 히터로 가열된 잔존유의 재순환 가열 개념도	40
Fig. 32	경신호 잔존유 재순환 가열작업 후 회수 개념도 및 실제 사진 ..	40
Fig. 33	Cascading 방식의 회수유 저장탱크	41
Fig. 34	회수유 저장탱크 바닥 도면	41
Fig. 35	경신호 화물유 탱크 내부 세척작업 개념도	42
Fig. 36	제1유일호 및 제3오성호, 경신호 작업여건 및 환경조사 절차도 ...	48
Fig. 37	경신호 잔존유 회수작업에 사용된 기름유출 긴급 밀폐용 자재 ...	50
Fig. 38	샘플링을 통한 유분농도 확인	57
Fig. 39	탱크 선체측면 막대로 직접 확인	57
Fig. 40	탱크 최상단부(해치) 개방	57
Fig. 41	제1유일호 및 제3오성호, 경신호 잔존유 회수 작업종료 절차도	58
Fig. 42	잔존유 회수방법에 따른 경제성 분석 예시	60
Fig. 43	국내 침몰유조선 잔존유 회수 표준 작업모델	63

A Case Study on the Comparison and Analysis of Remaining-oil Recovery Work from a Sunken Tanker in Korea

Kang, Kwang Gu

Department of Maritime Management Technology
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

If the residual oil remaining in the hull of a sunken tanker is not recovered, in case of sinking accident in nearby national cost, no salvage operation can be performed safely and the remaining-oil itself might lead to a catastrophic disaster at any time. Because of these above conditions, a proper remaining-oil recovery operation is necessary.

In this regard, this paper summarized the general remaining-oil recovery operation procedure and introduced the equipment used in such operations generally. Based on this basic information, this paper focused on the two remaining-oil recovery operations over sunken tankers that were performed under 70m or more in depth of water in Korea by studying the applied methodologies and techniques in these two oil recovery operations in order to compare and analyze the rapidity, safety, efficiency, economic feasibility and even more factors from various possible angles.

And on the basis of such study, this paper deducted a standard model of remaining-oil recovery operation procedure appropriate for domestic circumstances in Korea.

The standard model of remaining-oil recovery operation procedure obtained through this comparative study bears four stages which are 'the Preparation', 'the Oil Recovery', 'the Tank Cleaning' and 'the Work Termination'. The later three stages are designed to be applied for an each cargo tank of sunken tanker.

During 'the Preparation', the operation method shall be decided on the basis of the pre-inspection result obtained from documentary surveys and work condition investigating on site. Following the Preparation, the selected recovery method shall be applied to 'the Oil Recovery' and 'the Tank Cleaning' work which comes alternately to each tanks. 'The Work Termination' step shall come when an internationally recognized independent surveyor is satisfied with the level of the 'the Oil Recovery' and 'the Tank Cleaning' operations. The Work Termination procedure is progressed by 2 steps which work performer checks out whether any remaining-oil exists by putting a short stick into the hole made on top side of each tank's hull and opening up the toper part of the sunken tank such as hatch cover to confirm and declare of the clean tank. However, such 'the Work Termination' procedure in this paper is designed with flexibility which each checking steps shall be progressed through discussion amongst the ordering party, the work performer and the independent surveyor by reflecting the condition of the sunken tanker, the level of difficulty, the demand level of the ordering party and etc.

KEY WORDS: Oil recovery operation 기름회수작업; Salvage operation 구난작업; Sunken tanker 침몰유조선; Underwater operation 수중작업.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

2012년 말 기준으로 국내 입출항 선박은 약 197,000척이며 이 중 원유운반선은 약 3,000척, 석유정제품 운반선은 약 40,000척으로 2012년 국내 입출항 선박 중 유조선이 차지하는 비율은 21.9%에 달한다(KOSIS 국가통계포털, 2013). 국내 각 지역별 항만에서는 지금도 1일 평균 약 120여척에 달하는 유조선이 지속적으로 입출항하고 있으며, 이 선박들은 언제든지 갑작스런 사고로 좌초되거나 침몰될 수 있는 가능성을 가지고 있다.

1992년 International Marine Organization (IMO) (1992)에서는 1989년 알래스카 연안 1,600km에 이르는 해안을 시커멓게 오염시킨 엑슨 발데즈호 좌초사고를 계기로 MALPOL 92 협약을 제정하여 1993년 7월 이후 계약되는 모든 5,000kl급 이상 유조선은 이중선체를 의무화하도록 했다. 이 협약이 발효됨에 따라 이중선체로 건조된 유조선이 사고로 좌초하거나 침몰하게 되는 경우에는 선체가 쉽게 파공되지 않아 화물유 탱크 내 기름을 온전하게 적재한 상태일 가능성 또한 높아지고 있다.

이중선체 의무화로 유조선의 화물유 탱크 파손 가능성이 줄어들었지만, 유조선의 화물유 탱크가 파손되면서 일정량의 기름이 유출된 후 침몰하는 경우도 물론 발생할 수 있다. International Tanker Owners Pollution Federation limited (ITOPF) (1968)의 2012년 통계자료에 따르면 세계 각 지역에서 발생하는 700kl 이상 유조선 기름유출사고는 최근 30년간 지속적으로 감소하는 추세이나 여전히 매년 1건 이상씩은 계속 발생하고 있다(Fig. 1). 이는 국내 연안에서도 대형 기름유출 사고를 동반하는 유조선 침몰사고가 언제든지 발생할 수도 있다는 것을 말해준다.

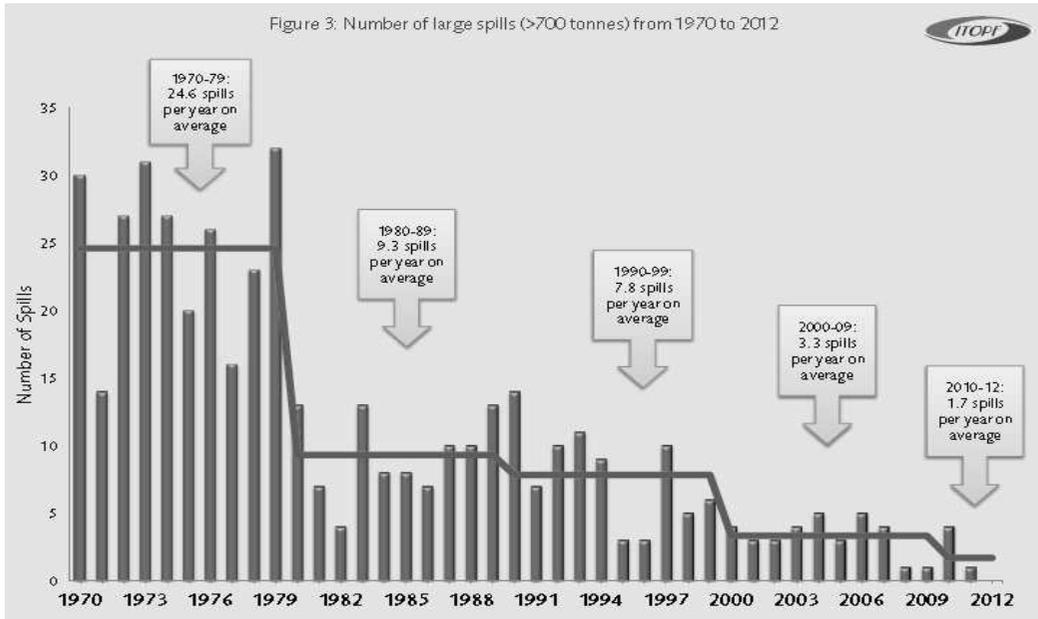


Fig. 1 최근 30년간 700kl 이상 유류오염사고 발생현황

이외에도 IMO (2007)에서는 배타적 경제수역(EEZ, Exclusive Economic Zone) 내에서 발생한 난파물로 인한 위험요소를 신속하게 제거하고자 “난파물 제거에 관한 나이로비 협약”을 2007년 5월 제정하였다. 이 협약에서는 선박의 항해안전과 해양환경을 저해하고, 해양자원을 훼손시킬 수 있다고 판단되는 경우에는 관련 연안국에서 선사에 대해 해당 난파물의 제거를 요구할 수 있도록 명시하고 있다. 향후 IMO 회원국 중 10개국 이상이 가입하여 협약이 발효된다면 앞으로 침몰유조선의 안전한 제거를 위한 선체 내 잔존유 회수는 더욱 중요해질 것이다. 침몰유조선 내 적재된 기름의 안전한 사전제거 없이는 선박의 인양 자체가 매우 곤란할 수 있으며, 그렇다고 이를 방치할 경우 자칫 대형오염사고로 연결되어 막대한 국가적 재산 피해를 초래할 수도 있기 때문이다.

이렇듯 침몰유조선에 대한 잔존유 회수작업의 중요성이 점차적으로 부각되고 있는 가운데 지금도 세계 여러 지역에서는 글로벌 대형 구난업체들이 각국 연안에 침몰하는 유조선으로부터 잔존유를 회수하기 위해 다양한 장비를 개발·적용하고 기술잠수사 등의 전문인력을 활용하여 회수작업을 수행하고 있다. 이와 관련하여 국내에서는 현재까지 두 차례의 침몰유조선 내 잔존유 회수작업이 진행되었지만, 당시 관련분야에 대하여 풍부한 경험을 가진 전문업체 또는 기

술인력이 부족하여 작업방법 및 적용기술 등 진행과정의 대부분을 해외 전문가의 의견에 의지할 수밖에 없었다.

이에 따라, 본 논문에서는 과거 국내에서 실제 이루어졌던 앞서 말한 두 차례의 침몰유조선 잔존유 회수작업 사례를 조사하고 비교분석함으로써, 향후 국내 연안에서 침몰유조선 잔존유 회수작업 시행이 필요한 경우 발주자의 신속하고 정확한 의사결정에 조금이나마 도움이 되고자 하였다. 또한, 이 두 작업사례의 비교분석 결과를 토대로 국내 연안에서 보편적으로 적용이 가능한 침몰유조선 잔존유 회수에 대한 표준 작업모델을 마련해 보고자 하였다.

1.2 선행 연구

침몰된 유조선의 화물유 탱크 내 잔존유에 대한 회수작업은 전 세계 여러 지역에서 수십 년간 지속적으로 이루어지고 있다. 해양환경관리공단 (KOEM) (2011)에 의해 작성된 관련 백서에 따르면 우리나라에서도 현재까지 두 차례의 성공적인 해저수심 70m 이상 침몰유조선 잔존유 회수작업이 이루어졌다. 1998년 이루어진 침몰유조선 제1유일호 및 제3오성호 선체 내 잔존유 회수작업 사례가 국내 최초의 작업사례였으며, 이후 최근 2개년(2010~2011)에 걸쳐 작업이 이루어진 포항 앞바다 침몰유조선 경신호 잔존유 회수작업이 두 번째 작업사례이다.

이 중 첫 번째 작업사례인 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업에 대해서는 해당 작업의 진행과정을 바탕으로 우리나라의 현실과 여건에 적합한 침몰선 잔존유 회수방법에 대한 선행 연구(심유탉, 2004)가 이루어진 바 있다. 이 연구는 몇몇 해외 유사사례를 포함하여 실제 잔존유 회수 작업사례를 조사하고, 이를 통해 우리나라 실정에 적합한 침몰선 잔존유 제거방법에 대한 합리적인 의사결정 모델을 제안하기 위해 이루어졌다. 이 선행 연구에서도 침몰유조선 내 잔존유 회수작업 방법 및 적용기술에 대한 내용이 일부 포함되어 있었다. 하지만, 당시 연구는 침몰선 내 잔존유를 위해요소로 간주하고 주변여건 및 사고 상황을 고려하여 '유출유 봉쇄, 잔존유 회수, 침몰선 인양'이라는 3가지 잔존유 제거방법 중 한 가지를 선택하기 위한 의사결정 모델의 정립이 연구의 핵심이었다.

1.3 연구 목적 및 절차

수중작업은 특성상 기압, 온도, 해류, 산소공급의 필요 등 육지에서와는 달리 작업진행상 많은 제약요소가 존재한다. 이는 수중, 특히 심해에서 이루어지는 모든 작업은 계획단계부터 실행을 거쳐 작업을 종료하기까지 육상작업보다는 많은 변수가 존재한다는 것을 말해준다. 따라서 본 연구에서는 과거 국내에서 실제 성공적으로 진행되어 이미 검증된 두 잔존유 회수 작업사례에 대한 작업 방법 및 적용기술 등에 대한 자료를 조사하고, 두 사례를 비교분석 해보고자 하였다. 더 나아가서는 이 분석결과를 토대로 향후 국내에서 발생하는 침몰유조선 잔존유 회수작업에 보편적으로 적용이 가능한 표준 작업모델 도출을 해보고자 시도하였다. 본 연구는 다음과 같은 4단계로 나누어 연구가 진행되었다(Fig. 2).

1단계에서는 침몰유조선 잔존유 회수를 위해 일반적으로 사용되고 있는 장비 및 기술에 대한 일반현황을 정리하였다.

2단계에서는 우리나라에서 실제 이루어진 침몰유조선 잔존유 회수작업 사례를 조사하여 효율성, 경제성, 작업의 완결성 등 여러 가지 측면에서 상호 비교분석을 실시하였다.

3단계에서는 두 작업사례의 비교연구를 통해 분석된 결과를 토대로 국내 연안에 침몰하는 유조선 내 잔존유 회수에 대한 표준 작업모델을 도출하였다.

4단계에서는 본 연구의 결과로 도출된 표준 작업모델 적용의 한계점을 생각해보고 향후 추가로 연구가 필요한 사항에 대하여 고찰하였다.

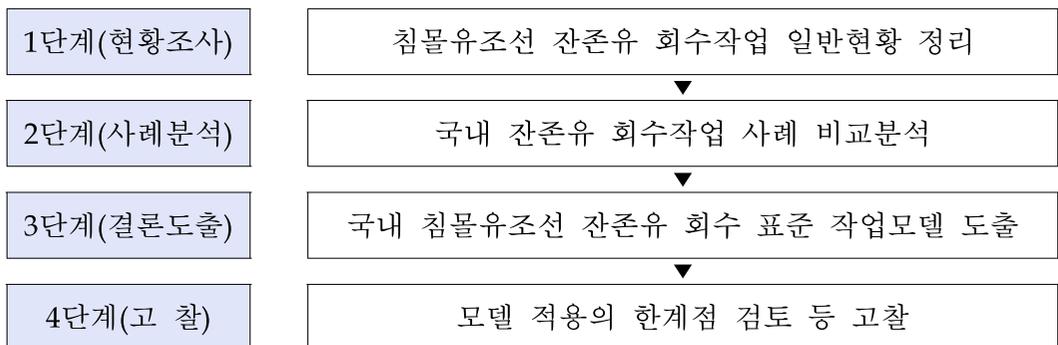


Fig. 2 연구수행 절차도

제 2 장 침몰유조선 잔존유 회수 활용장비 및 주요기술

2.1 일반적인 잔존유 회수작업 절차

KOEM (2011), 한국해양오염방제조합 (KMPRC) (1998)에서 작성한 관련도서
에 따르면 일정수심 이상의 해저면에 침몰한 유조선 내 잔존유 회수작업에 대
한 절차 및 기술을 글로벌 전문 구난업체들은 사고위치, 침몰수심, 주변여건 등
작업여건 및 환경적 요인에 따라 각각 조금씩 다르게 적용하고 있지만 일반적
인 잔존유 회수작업 절차를 정리해보면 다음과 같다.

우선 잔존유 회수작업 시행 관련 각종 필요장비 및 기술인력을 탑재한 해상
기지선(working platform)을 침몰유조선 상단 해상에 묘박 등을 통해 고정시키
게 된다. 해상기지선의 설치가 완료되면 사전에 계획된 인력 또는 무인장비를
해저로 투입시켜 침몰유조선 주변 작업여건 및 주변환경을 조사하게 되며, 이
후 화물유 탱크별 선체 내 잔존유 유무를 파악하고 잔존유가 남아있는 화물유
탱크부터 잔존유 회수작업을 시작하게 된다.

화물유 탱크별 잔존유 회수작업의 시작은 탱크 표면에 유회수 관련장비 장착
을 위한 천공위치를 표시하는 것으로 시작된다. 이 작업을 진행하는 도중 주변
에 장애물 등이 다량 존재하여 작업이 곤란하다고 판단되는 경우에는 각종 장
애물 제거 도구를 사용하여 작업 전 안전하게 제거하여야만 한다. 이후 사전에
표시된 천공위치에 천공작업을 실시하고 해상기지선과 연결된 유회수용 호스,
잔존유 가열장비(필요시) 등의 잔존유 회수 주요장비를 선체표면에 장착하게
된다.

잔존유 회수 주요장비 장착이 완료되면 화물유 탱크 내부로부터 잔존유를 회
수하여야 하는데 원활한 회수작업을 위해서는 회수작업 도중 탱크 내부 압력과
잔존유의 유동성을 반드시 고려해야만 한다. 화물유 탱크 내 일정한 압력유지

를 위서는 선체하단에 해수유입구(inlet valve)를 설치하거나 또는 갑판 상단에 화물유 탱크 내부 바닥의 해수부분까지 연결된 통수관을 설치하는 것이 보통이다. 또한, 심해 저온으로 인해 점도가 높아져 현저히 떨어진 잔존유의 유동성은 일반적으로 탱크 내부에 가열봉을 삽입하거나 고압, 고온의 스팀을 분사하는 방식으로 유동성을 확보한다.

이렇게 1개의 화물유 탱크에 대한 천공작업 후 주요장비 장착, 통수관 설치 등의 잔존유 회수작업 사전준비가 완료되면 본격적인 잔존유 회수작업이 시작된다. 화물유 탱크 내 잔존유를 해상기지선으로 일정한 펌핑(pumping) 압력을 유지하며 회수하게 되면 일정시점에 잔존유와 해수가 섞여 나오기 시작하게 된다. 이 때 잔존유 회수작업을 잠시 중단하고 해상기지선의 고온수를 탱크 내부로 주입하여 순환시키는 방법 등을 사용, 탱크 내부를 세척하게 된다. 이러한 작업을 몇 차례 반복 실시하여 화물유 탱크 내 잔존유 회수 가능범위 내 전량 회수되었다고 판단되는 시점에 해당 화물유탱크에 대한 회수작업의 종료를 선언하게 된다.

이렇게 심해에 침몰된 유조선 화물유 탱크 내 잔존하고 있는 기름을 안전하고 성공적으로 회수하기 위해 해상기지선 설치부터 잔존유 회수 후 세척작업까지의 일련의 과정을 통상적으로 침몰유조선 잔존유 회수작업이라 말한다. 심해에 침몰된 유조선 내 잔존유를 회수하게 되는 경우 통상적으로 이와 같은 절차를 거쳐 작업이 이루어지게 된다(Fig. 3).

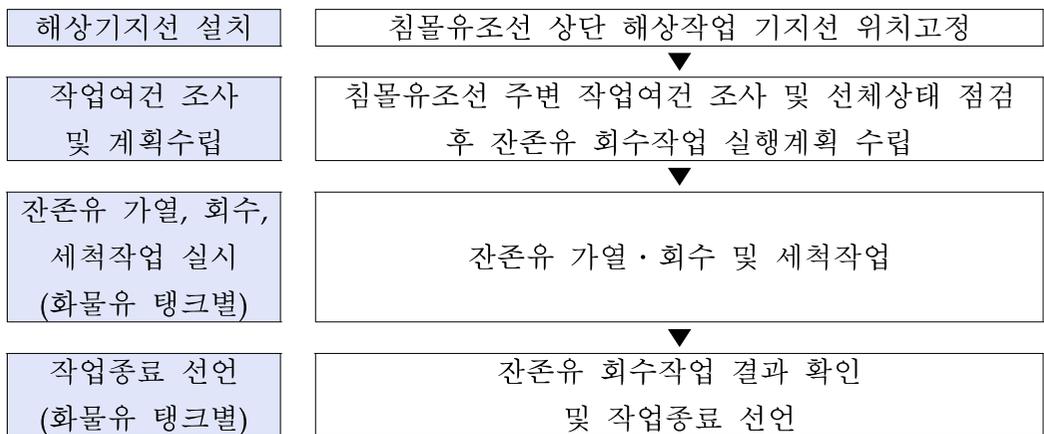


Fig. 3 일반적인 침몰유조선 잔존유 회수작업 절차도

2.2 해상기지선 설치

심해에 침몰한 잔존유를 회수하기 위해 가장 먼저 선행되는 작업이 해당 침몰유조선 상단 해상에 작업자와 각종 장비를 적재한 해상기지선을 설치하는 일이다. 이렇게 해상기지선으로 활용되는 선박은 우선 작업자들의 기본적인 숙식이 가능하여야 하고, 침몰유조선 내 잔존유 회수작업을 위한 각종 장비의 설치 및 운영이 가능한 충분한 공간이 확보되어야만 한다. 이외에도 작업 중 언제든지 발생 가능한 악천후 속에서도 해상에서의 위치가 안정적으로 고정될 수 있어야만 한다. 이 모든 조건들은 안전하고 신속한 잔존유 회수작업을 위해서 해상기지선으로서 꼭 필요한 중요한 조건들이다.

심해 침몰유조선 잔존유 회수작업에 활용되는 해상기지선 선박의 대표적 유형으로는 크게 2가지를 꼽을 수 있다. 그 중 하나는 잔존유 회수작업 기간 내 투입인력의 숙식이 가능한 거주시설이 완비된 무동력 바지선인 생활바지선(accommodation barge)이며, 또 다른 한 가지 유형은 정밀 위치측정 시스템(dynamic positioning system)을 활용하여 해상에서의 선박의 위치를 묘박 없이 고정시킬 수 있는 DP선박이다.

2.2.1 생활바지선

바지(barge)선이라 함은 원래 주로 운하, 항구 등에서 모선(母船)에 필요한 물품을 나르기 위한 통선역할을 하는 평평한 배를 일컬어 왔다. 하지만, 요즘 들어서는 다양한 용도로 변형 건조되어 크레인바지, 모래운반용, 준설용 등으로 해상운송에서 각종 해상작업까지 폭 넓게 사용되고 있다.

이 중, 해상작업용으로 건조된 각종 특수목적의 바지선 중 생활바지선이라는 불리는 바지선이 잔존유 회수작업의 해상기지선으로 주로 사용되고 있다(Fig. 4). 생활바지선은 보통 해양시추선, 리그선 등 해양구조물 옆에 정박해 해상에서 장시간 작업을 해야만 하는 작업자들을 위한 거주시설이 설치되어 통상 300~350명 정도의 인원을 수용할 수 있다. 침몰유조선 잔존유 회수작업을 위한 해상기지선으로 생활바지선이 주로 활용되는 이유도 작업현장 해상에서 위치를 고정시킨 상태에서 수십 명의 작업인력이 장기간 숙식을 해결할 수 있으며 각

중 잔존유 회수 관련장비를 비치하기 위한 충분한 작업공간을 보유하고 있기 때문일 것이다.



Fig. 4 생활바지선 모습(경신호 작업사례)

이러한 해상작업용 생활바지선의 위치를 작업현장에 고정시키기 위해서는 묘박(mooring)과정이 필요하며, 보통 바지선은 이러한 묘박의 수에 따라 구분되기도 한다(Fig. 5). 묘박 수가 많고 적음에 따라 바지선의 해상에서의 위치고정 능력이 좌우될 수 있으므로 작업수심, 난이도, 기상여건 등을 합리적으로 고려하여 작업에 필요한 적정규모의 바지선을 선택하는 것이 중요하다. 2점 묘박 또는 4점 묘박 바지선은 해상상태가 양호하거나 비교적 얕은 수심에서 짧은 기간 내 이루어지는 수중환경 조사, 지질조사, 폐기물 수거, 준설 등의 작업에 많이 사용되고 있다. 하지만, 심해 침몰유조선 잔존유 회수작업과 같은 깊은 수심에서의 작업은 작은 실수로도 대형 해양오염사고 또는 인명사고로 연결 될 수 있으므로 해상기지선의 위치고정 능력이 작업의 성공여부에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 2점 또는 4점 묘박 바지선보다 상대적으로 위치고정능력이 뛰어난 8점 묘박 등의 대규모 생활바지선이 경제적인 측면만 배제한다면 이러한 깊은 수심에서의 수중작업에는 더욱 적합할 것으로 사료된다.

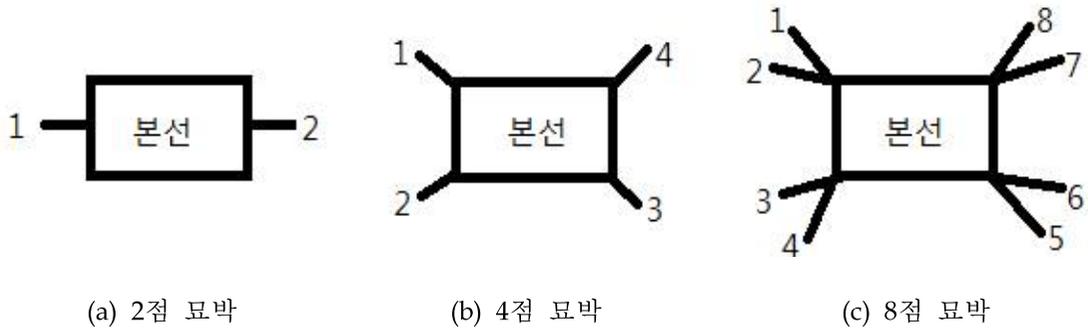


Fig. 5 묘박 수에 따른 바지선의 일반적 묘박 형태

2.2.2 DP선

선박 내 장치된 컴퓨터 조정시스템을 통해 선박의 위치를 유지시켜 주는 DP(dynamic positioning) 시스템을 장착한 DP선은 주로 심해 해양조사선(research ship)이나 정유사 시추선(drilling vessel)으로 활용되었다. 여러 가지 위치고정 기법이 사용되고 있지만 가장 흔하게 사용되고 있는 방식은 GPS(위성항법장치)를 이용한 위치고정 방식이다. 이 방식은 선박 내 탑재된 바람 및 파도, 해류 등의 변수를 위성으로부터 전송받아 조절하는 컨트롤 패널에서 선박 후미의 추진기(propeller)와 러더(rudder)로 전송됨으로써 자동으로 위치를 고정시켜 주는 방식이다(Hiteshk, 2010).

이러한 DP선박을 IMO (1994)에서는 최악의 경우가 발생하는 단계별 상황에 대하여 대응할 수 있는 장비능력에 따라 Class 1, 2, 3으로 구분하고 있다(IMO, 1994).

- Class 1: 단순한 1가지 고장에도 DP시스템 작동 불가
- Class 2: 작동 관련장비 및 시스템(generators, thrusters, switchboards, remote controlled valves, etc.) 고장시 DP시스템이 정상 작동하나 전파 관련 장비(cables, pipes, manual valves. etc.)가 고장시 작동 불가
- Class 3: Class 2에서 언급한 관련장비를 포함한 모든 관련장비가 화재나 해수 범람 등으로 완전히 소실되더라도 DP시스템이 작동 가능(백업시스템 보유 등 필요)

앞서 설명한 생활바지선과 종류는 다르지만 침몰유조선 잔존유 회수작업의 해상기지선으로 사용될 수 있는 가장 큰 이유는 침몰유조선 상단에서 위치고정이 가능하며 작업자의 거주공간이 확보되고, 또한, 잔존유 회수작업에 사용되는 주요 작업장비(ROV, 포화잠수 설비 등) 설치가 용이하기 때문이다.

생활바지선과 비교하여 DP선박의 장점은 선박 자체동력을 가지고 있기 때문에 별도의 예인선이 필요하지 않으며, 생활바지선처럼 묘박이 별도로 필요하지 않아 태풍 등의 천재지변 발생시 작업 현장으로부터의 대피가 더욱 신속하게 이루어질 수 있는 장점이 있다. 하지만, 침몰유조선 잔존유 회수작업에 동원되는 기본 장비(ROV, 잠수장비 등) 외 추가적인 장비가 다수 탑재되어야 하는 경우 이를 비치할 공간이 동일 선박규모의 생활바지선에 비해 상대적으로 협소할 수 있고, 사실상 묘박을 통해 정박한 생활바지선이 위치고정 능력은 더욱 뛰어나다. DP선박도 생활바지선과 마찬가지로 해상기지선으로 사용될 경우 작업방법 및 동원장비 규모, 침몰지점의 기상여건 등이 다각적으로 고려되어 신중하게 결정되어야 할 것이다.

2.3 탱크별 잔존유량 추정

2.3.1 중성자를 활용한 비파괴 검사

침몰유조선 화물유 탱크별 잔존유량을 측정할 수 있는 방법 중 하나는 주로 육상에서 사용되는 중성자를 활용한 비파괴 검사를 응용한 방법(Neutron Backscatter)이다. 이 방법은 실제 육상에서 각종 액상폐기물 저장탱크 내 서로 다른 액체물질간 경계면(interface) 측정이 필요할 때 사용되고 있다. 밀폐된 저장탱크 내 2개 이상의 서로 다른 액상물질간 투과되는 액체의 보유에너지에 따라 입자의 반응 형태 및 속도가 다르다는 중성자의 기본원리를 응용하여 탱크 측면을 최상단부에서 최하단부까지 스캐닝(scanning)하여 경계면을 찾아낸다. 이 방법을 활용하여 수중에서 화물유 탱크 측면을 관련 측정장비로 스캐닝 함으로써 물과 기름의 경계면을 찾아낼 수 있다(Fig 6).

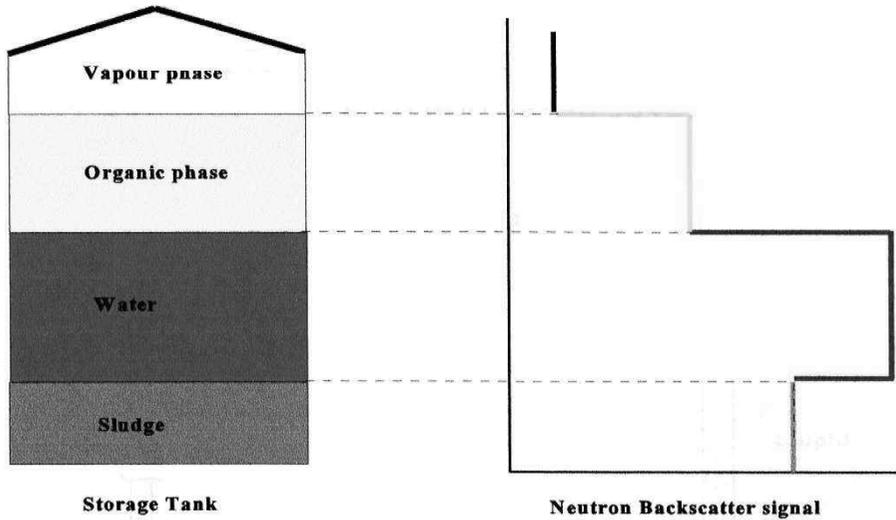


Fig. 6 저장탱크 내 중성자 반응 신호 예시(INTECH, 2012)

2.3.2 잠수사를 활용한 물리적 확인

잠수사 활용이 가능한 경우 선체 상단 또는 측면을 잠수사가 천공하여 물과 기름의 경계면을 막대로 직접 확인하는 방법도 잔존유량 측정방법으로 사용된다. KOEM (2010)에서 작성한 보고서에 따르면 이 때 사용되는 일반적인 도구로는 유희수용 호스를 선체에 부착하기 위해 주로 사용하는 특수합금으로 제작된 Drill-Tap-Stud라는 특수한 드릴용 볼트가 사용된다. 잠수사는 Drill-Tap-Stud를 물과 기름의 경계면이라 추정되는 지점에 천공장비를 활용하여 삽입(bolting) 후 빼내어(un-bolting) 막대로 직접 기름유무를 확인하여 물-기름 경계면을 확인할 수 있다. Drill-Tap-Stud는 천공에 필요한 Drilling부, 천공 후 볼트형태로 전환되는 Tapping부, 볼트형태로 삽입된 후 고정되기 위한 Stud부, 3가지 부분의 구조로 이루어져 있다(Fig. 7).



Fig. 7 Drill-Tap-Stud 구조

갑판 또는 선체 측면에 삽입된 Drill-Tap-Stud를 빼낸 후 약 30cm 가량의 얇은 일자형 막대를 활용해 직접 선체 내 잔존유 유무를 확인한다(Fig. 8).



Fig. 8 잠수사의 기름유무 확인장면(일자형 막대 활용)

이 때 선체측면 최상단으로부터 하단으로 약 30cm까지는 천공장비의 부착이 불가능하여 이러한 특수볼트의 삽입이 불가능하다. 이런 경우에는 T자 막대를 활용하여 화물유 탱크별 잔존유 유무를 확인하기도 한다(Fig. 9).



Fig. 9 잠수사의 기름유무 확인장면(T자형 막대 활용)

또한, KOEM (2010)에서 작성한 보고서에 따르면 유조선 침몰시 선체가 해지면 뺄에 묻혀 천공작업 자체가 불가능한 경우도 발생할 수 있다. 실제 2010년 침몰유조선 경신호 선체 내 잔존유를 측정하는 도중 선체 하단부가 뺄에 깊숙이 묻혀 있어 선체 주변을 준설하지 않고는 잠수사의 접근이 불가능한 경우가 있었다. 이런 경우 대부분의 전문 구난업체들은 각 현장상황에 맞는 다양한 도구들을 현장에서 직접 제작하여 사용하는 것이 일반적이다. 경신호의 경우 침몰유조선 선체 상단에 샘플링 통과 얇은 관(rod)으로 이루어진 특수 제작장비를 설치하고 이 장비와 해상기지선 상단 펌프를 얇은 호스로 연결하여 물-기름 경계면을 측정하였다. 기본원리는 선체 최 하단부부터 삽입된 얇은 관(rod)을 조금씩 빼내면서 샘플링 통으로 유입되는 액상물질(물 or 기름)의 종류를 확인할 수 있다는 점을 활용했다. 선체 내로 삽입된 얇은 관 최하단 부분에 물이 존재한다면 해상과 작업수심(약 100m)간 약 10기압 차이로 인하여 샘플링 통에 물이 즉시 채워지게 된다(Fig. 10a). 하지만, 물이 아닌 잔존유가 존재하는 경우에는 좁은 관경과 잔존유의 높은 점도로 인하여 샘플링 통에 일정시간 진공상태가 유지되거나 기름이 채워진다(Fig. 10b). 이러한 원리를 활용하여 당시 물과 기름의 경계면을 확인할 수 있었다.

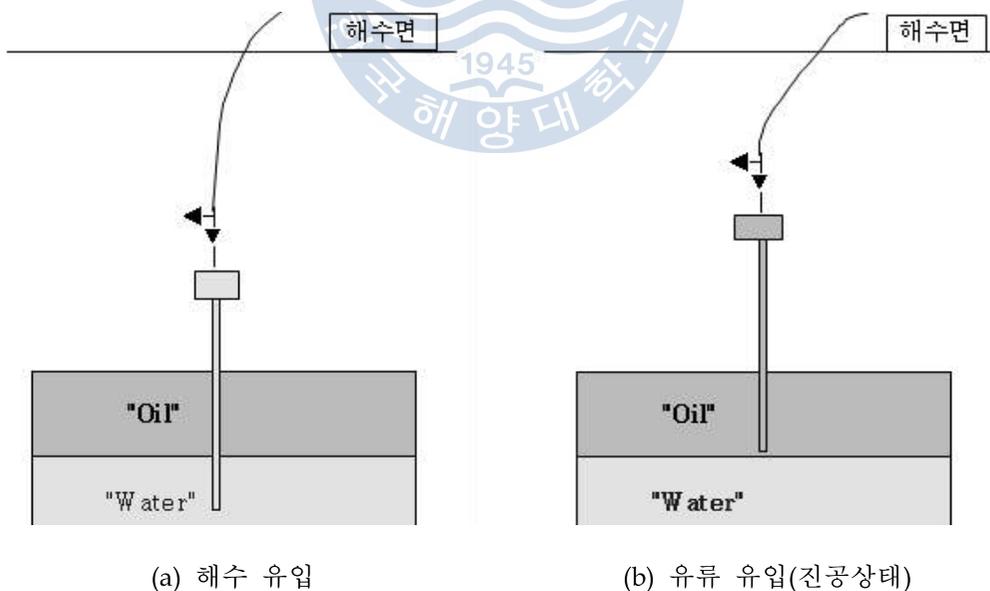


Fig. 10 경신호 잔존유량 측정 현장제작 장비 기본원리 개념도

하지만, 이 장비는 당시 약 10기압(수심 98m지점) 수온 4℃ 상태의 고점도 중질유에 대해 적용된 잔존유량 측정장비로써 앞서 말한 바와 같이 현장에서 주어진 상황이 다른 경우 그 현장에 맞는 측정장비가 별도로 제작되어 활용되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

2.4 잔존유 회수작업

2.4.1 ROV를 활용한 회수방법

해저 작업에 있어 ROV(remote operation vehicle)란 보통 사람이 접근하기 불가능한 수 천 미터 해저면의 케이블 설치 및 유지보수에 활용되는 로봇을 일컫는다(Fig. 11). 이러한 ROV가 잔존유 회수작업에 활용되기 시작한 시점이 언제부터인지는 공식적으로 확실하게 밝혀진 바 없다.

ROV의 앞서 말한 바와 같이 주로 심해에서 잠수사의 접근이 위험하거나 불가능한 경우에 주로 사용되는 무인조종 로봇 장비로써 장비 조종사가 위치한 해상 컨트롤 박스와 엄블리컬(umbilical) 호스로 연결되어 원격으로 작동되게 된다. ROV의 기본적인 구조는 장비의 상단부에 작업 진행시 해저에서의 시야 확보를 위한 비디오카메라가 장착되어 있으며 사람의 팔과 같은 기능을 가진 매뉴플레이터(manipulator)가 전면 하단부분에 장착되어 있고, 마지막으로 후면에 수중 이동을 위한 프로펠러가 장착되어 있다(심유택 2004).

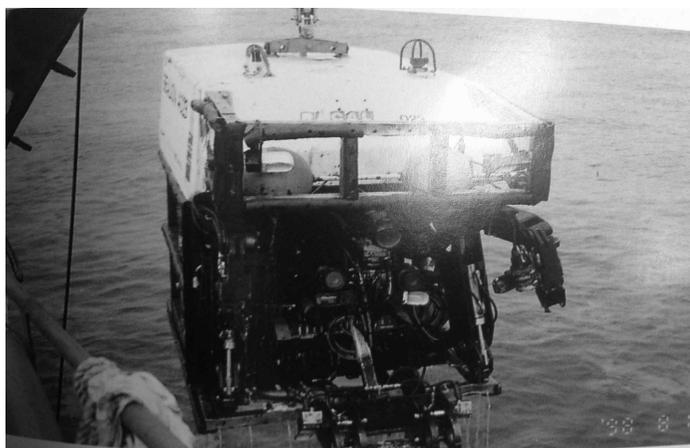


Fig. 11 ROV 모습(제1유일호, 제3오성호 작업사례)

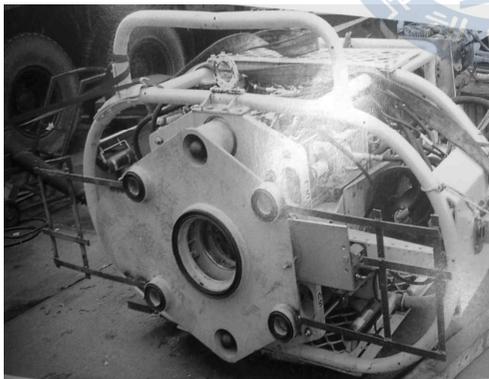
Remotely Operated Vehicle committee of the marine technology society (1978)에서는 ROV를 작업수심, 구동마력 등을 기준으로 Table 1과 같이 구분하고 있다.

Table 1 ROV의 규격 및 용도에 따른 Class 구분

Class	규격 및 용도	예시
Micro	<ul style="list-style-type: none"> · 무게 3kg 미만 · 잠수사 접근이 불가능한 작은 공간의 조사작업에 활용 	
Mini	<ul style="list-style-type: none"> · 무게 약 15kg · 소형보트를 이용해 운반 가능 · 용도는 Micro Class와 유사 	
General	<ul style="list-style-type: none"> · 추진력 5HP 미만 · 3개의 손가락 구조 Manipulators 장착 · 가벼운 수중 조사 작업 · 통상적 작업수심 1,000m 미만 	
Light Work class	<ul style="list-style-type: none"> · 추진력 50HP 미만 · 폴리에틸렌과 같은 중합체로 제작 · 통상적 작업수심 2,000m 미만 	
Heavy Work class	<ul style="list-style-type: none"> · 추진력 220HP 미만 · 최소 2개 이상의 Manipulators 장착 · 통상적 작업수심 3,500m 미만 	
Trenching /Burial	<ul style="list-style-type: none"> · 추진력 200HP~500HP · 심해 케이블 매설작업에 활용 · 통상적 작업수심 6,000m 미만 	
Autonomous underwater vehicle	<ul style="list-style-type: none"> · 조종사 없이 심해 탐사 가능 · 심해 작업장비 중 최고 Class 	

ROV를 사용한 잔존유 회수작업은 모든 작업절차가 해상기지선에 승선한 로봇 조종사에 의해 제어되므로 잔존유 회수에 활용되는 각종 장비가 대부분 자동화 되어있어야만 정상적인 회수작업이 가능하다. 왜냐하면, ROV가 아무리 정교한 로봇일지라도 수중작업에 있어 로봇의 팔이 잠수사의 팔처럼 자유로운 작업은 불가능하기 때문이다. 이는 ROV를 활용하여 잔존유 회수작업을 진행하는 경우 ROV의 성능이나 조종사의 기술도 물론 중요하지만 잔존유 회수작업에 함께 사용되는 무인 잔존유 회수장비의 성능 및 효율성이 작업의 신속성 및 성공여부에 큰 영향을 주게 된다는 것을 말해준다.

ROV를 활용한 잔존유 회수에 활용되는 가장 일반적으로 알려진 무인 잔존유 회수장비는 FRAMO사에서 개발한 ROLS(remotely off-loading system)(Fig. 12a)이다. 이 장비는 1996년 여객선 에스토니아호의 잔존유 회수를 위해 사용되기 시작하여 현재까지도 ROV와 함께 자주 사용되고 있는 대표적인 무인 잔존유 회수장비이다(심유택, 2004). ROLS의 작동원리는 ROV가 침몰유조선 선체 표면에 유회수구 천공위치를 선정 후 ROLS를 부착시키면 해상기지선에서 ROLS와 이미 결합시켜 놓았던 베이스플레이트(Fig. 12)가 선체표면에 설치되고, 이후 해상기지선과 ROLS간 연결된 유회수용 호스를 통해 해상기지선으로 잔존유가 회수된다(Frank Mohn Flatoy As Oil & Gas Division, 2003).



(a) 베이스플레이트가 부착된 ROLS



(b) 베이스플레이트

Fig. 12 베이스플레이트와 베이스플레이트가 장착된 ROLS

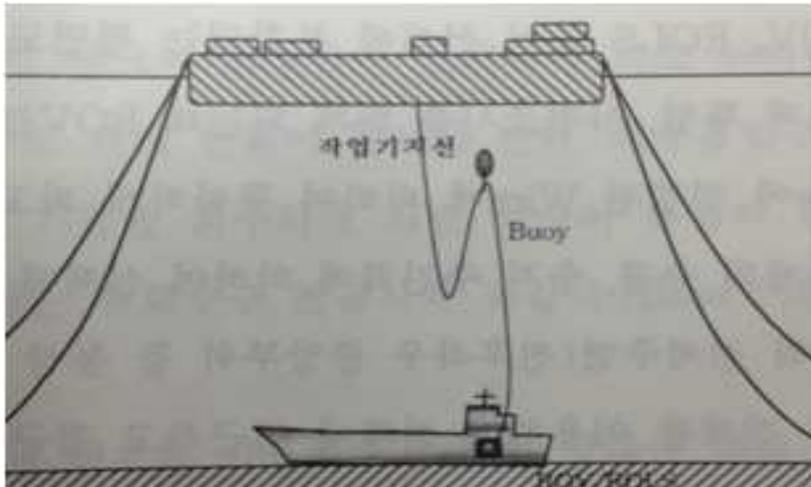


Fig. 13 ROV와 ROLS를 활용한 잔존유 회수작업 개념도

2.4.2 잠수사를 활용한 회수방법

앞서 말한 바와 같이 ROV를 활용하여 잔존유 회수작업을 진행하는 것은 원격조종 로봇을 통해 모든 수중작업이 진행되어야 하므로 작업진행 중 여러 가지 한계점에 부딪힐 수 있다. 반면, 포화잠수 장비(Fig. 14) 등을 활용하여 잠수사가 직접 잔존유 회수작업이 진행되는 경우에는 ROV를 활용한 작업과 비교해 볼 때 신속하게 작업을 진행시킬 수 있으며, 또한, 로봇만으로는 수행이 불가능한 정교한 작업까지도 수행이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 잠수사를 통한 잔존유 회수작업은 작업수심에 분명한 한계가 있으며, 사람이 직접 수중에서 장시간 작업을 실시하게 되므로 잠수사에 대한 안전 및 보건관리가 철저하지 않으면 자칫 인명사고로 연결될 수도 있다. 따라서, 잠수사를 활용하여 잔존유 회수작업을 진행할 경우에는 안전사고에 대비하여 비상시 즉시 비상투입 가능한 잠수사를 작업 진행시간 내내 24시간동안 작업구역 인근에 상시 대기시켜 혹시 일어날지 모를 인명사고에 철저히 대비하게 된다.

잠수사를 활용한 잔존유 회수작업은 잔존유 회수장비에 대한 제어가 대부분 잠수사의 손으로 직접 이루어지기 때문에 ROV를 활용한 회수작업과는 달리 잔존유 회수 관련장비가 어느 정도 자동화 되었는지는 작업의 성공여부와 직결되지 않는다. 다만 수중에서 잠수사의 물리적인 힘으로 실행이 불가능한 최

소한의 작업절차(선체 천공작업 등)만이 해상기지선에서 원격제어로 실행된다. 잠수사를 활용하여 회수작업을 진행할 때 오히려 무리하게 회수장비를 자동화하여 사용하는 것은 장비의 프로그램상 오류 등으로 작업에 소요되는 시간적 손실이 발생할 수 있으며, 또한 갑작스런 기기 오작동으로 잠수사의 안전을 위협할 수도 있다. 이 점을 감안한다면 수중에서 잠수사가 물리적으로 작업이 불가능하여 반드시 자동화가 필요한 최소기능 이외에는 오히려 잠수사의 직접 제어가 가능한 수동으로 작동되는 장비가 잠수사에게 더욱 안전하고 효율적일 수 있을 것이라 사료된다.



Fig. 14 포화잠수 장비(챔버 및 다이빙 벨)

잠수사를 활용하여 침몰유조선 내 잔존유 회수작업을 진행하는 경우 일반적으로 Hottap이라 일컫는 장비가 사용되고 있다(IMO, 2010). 세계 각지의 구난 회사마다 이러한 Hottap 장비를 잠수사 작업의 편의성과 안전성, 작업의 신속성 등을 고려하여 독자적 형태로 변형·개발 후 침몰유조선 잔존유 회수작업에 활용하고 있으나 기본원리는 동일하다.

KOEM (2011)의 보고서에 따르면 이 장비의 기본원리는 앞서 ROV를 활용하여 회수작업을 진행할 때 사용한 회수장비 ROLS와 유사하다. 다만, ROLS라는 기계에서 자동화되어 부착되던 베이스플레이트 부착부터 유회수용 호스 연결까지의 모든 잔존유 회수 기초 작업과정이 잠수사의 손을 통해 이루어져야 하기 때문에 잠수사가 안전하고 편리하게 사용할 수 있도록 장비가 소형화되어 있다

(Fig. 15).

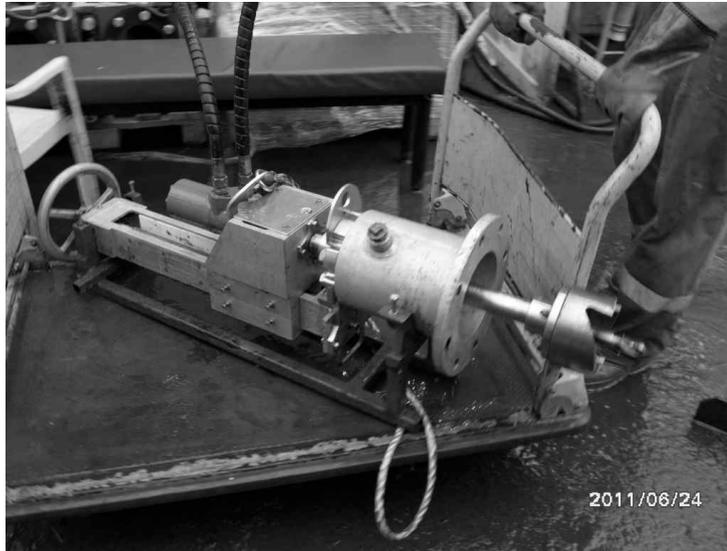


Fig. 15 Hottap 장비

작동원리는 우선 1단계로 잠수사가 Hottap 어댑터라고도 불리우는 베이스플레이트를 천공위치에 설치한다. 다음 2단계로 베이스플레이트의 개폐구 개방 후 천공작업을 실시하고 곧바로 개폐구를 다시 폐쇄한다. 마지막 3단계로 해상 기지선으로부터의 유회수용 호스 연결로 잔존유 회수 사전준비는 마무리 된다 (Fig. 16).

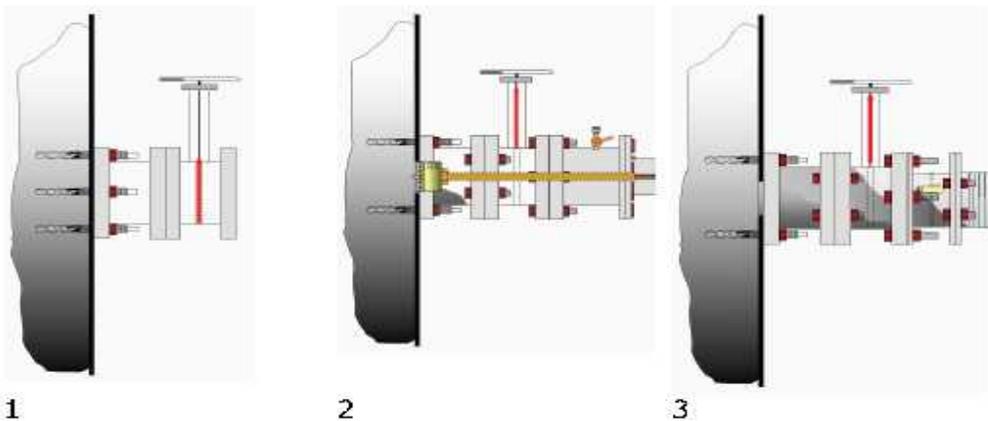


Fig. 16 Hottap 장비를 활용한 선체 천공작업 개념도

만약 점도를 낮추기 위한 가열작업이 충분히 이루어지지 않은 상태에서 신속한 작업종료를 위해 무리하게 펌핑 압력을 가하게 되면 잔존유의 높은 점도와 심해 고기압으로 인해 유회수용 호스 내부가 진공상태가 되어 압착될 수도 있다(Fig. 18).



Fig. 18 잔존유 회수작업 중 유회수용 호스가 압착된 모습

또한, 충분한 사전 가열작업이 이루어지지 않는 경우에는 잔존유 회수작업 진행시 침몰유조선 화물유 탱크 내 일정한 압력유지를 위하여 탱크 하단부분 등에 만들어 놓은 해수유입구와 잔존유 회수를 위한 기름 유출구(outlet) 사이에 해수통로(water way)가 생길 위험도 있다(Fig. 19).

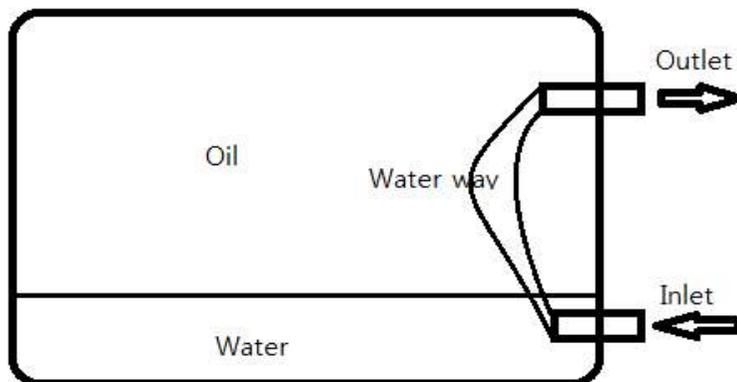


Fig. 19 해수통로(water way) 생성 개념도

이런 이유로 심해에 침몰한 유조선 내 잔존유를 회수함에 있어 가장 중요하게 고려되어야 하는 요소 중 한 가지가 바로 고점도 잔존유에 대한 충분한 유동성의 확보이다. 고점도 잔존유에 대한 유동성을 높이기 위해서는 선체 내부를 가열하여 잔존유 점도를 낮추어야만 한다. 침몰유조선 내 잔존유를 가열하는 방법으로는 대부분의 경우 유희수구 주변에 열을 가하는 방법(Fig. 20)이 사용된다(IMO, 2010). 구리와 같은 열전도율이 높은 여러 겹의 얇은 관을 코일 형태로 제작(Fig. 21)하여 선체 내 삽입 후 코일 내부로 고온의 스팀을 통과시키면서 선체 내 잔존유를 가열하게 된다.

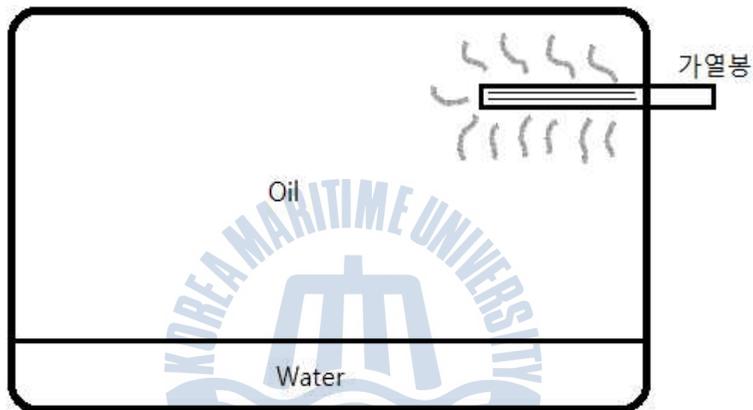


Fig. 20 화물유 탱크 내 잔존유 가열 개념도



Fig. 21 잔존유 가열봉(스팀코일) 제작 모습

물론 침몰유조선 화물유 탱크의 규모, 잔존유의 종류, 주변 수온에 따른 점도에 따라 모든 경우가 작업환경이 상이하겠지만 중질유의 경우 저장탱크 내 모든 잔존유를 가열하기에는 잔존유 회수밸브 주변에 대한 단순한 가열작업만으로는 화물유 탱크 반대편 안쪽부분까지 가열하는 것은 현실적으로 불가능하다는 분석이 일반적이다(Fig. 22).

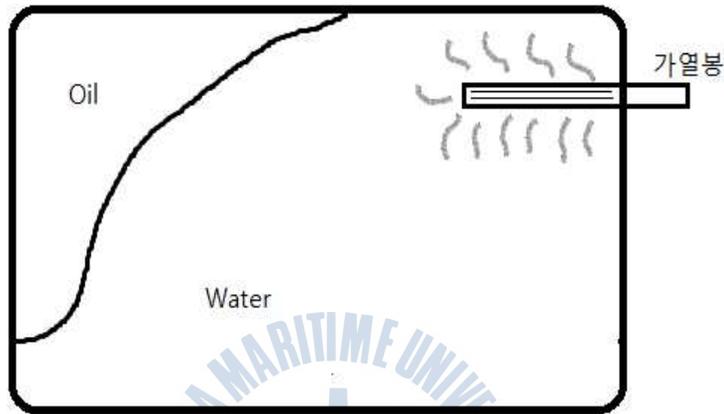


Fig. 22 가열봉을 활용한 국소적 가열한계에 대한 개념도

이러한 이유 때문에 2011년 경신호 잔존유 회수작업에는 앞서 말한 1차적인 잔존유 가열방법을 통해 가열된 잔존유를 재차 가열하여 화물유 탱크 내부로 다시 주입하여 탱크 내 잔존유를 재순환 가열시키는 폐쇄회로식의 잔존유 가열방법이 적용되었다(KOEM, 2011). 이 방법을 통해 탱크 안쪽부분의 선체에 부착된 잔존유까지도 최대한 가열하여 탱크 내 거의 모든 잔존유가 회수될 수 있었다. 이와 관련된 내용은 다음 장에서 자세히 소개하고자 한다.

제 3 장 국내 침몰유조선 잔존유 회수작업 사례 비교분석

3.1 분석 개요

침몰유조선 내 잔존유 회수작업은 각종 사고로 유조선 내 기름이 해상에서 유출되지 않은 채 선박이 침몰하는 경우 작업에 대한 수요가 발생된다. 오래전부터 최근까지도 글로벌 구난회사들은 이러한 침몰 유조선 내 잔존유 회수작업을 구난작업의 한 분야로 인식하고 지속적으로 새로운 회수방법과 적용기술을 연구하고 관련 장비를 개발하고 있다. 이렇게 심해에 침몰한 선박에 대한 잔존유 회수방법 및 기술은 선박의 종류 및 작업환경에 따라 다양한 형태로 계획되어 현장에 맞게 적용되고 있지만, 작업주체를 기준으로 크게 두 분류로 나누자면 앞서 설명한 바와 같이 ROV를 활용한 잔존유 회수방법과 잠수사를 활용한 회수방법으로 구분될 수 있다. 이 두 가지 잔존유 회수 작업방법은 각각의 장단점을 가지고 있으며, 공교롭게도 국내에서 실시된 유일한 두 차례의 70m 이상 심해에 침몰한 유조선 내 잔존유 회수작업이 이 두 가지 방법이 각각 적용되어 이루어졌다.

첫 번째 작업사례는 한국해양오염방제조합 (KMPRC) (1998)에 의해 작성된 침몰선 잔유제거작업 백서에 기술되어 있는 남해 거제도 인근에서 실시된 유조선 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업이다. 이 작업은 우리나라 최초로 이루어진 심해 침몰유조선 잔존유 회수작업으로써 앞서 설명한 ROV와 ROLS를 활용하여 작업이 이루어졌다. 두 번째 작업사례는 해양환경관리공단 (KOEM) (2011)에 의해 작성된 경신호 잔존유 회수작업 백서에 기술되어 있는 2010~2011년 2개년에 걸쳐 진행된 포항 앞바다 침몰유조선 경신호에 대한 잔존유 회수작업이다. 이 작업은 선박 침몰 이후 23년이 지난 시점에서야 작업이 진행되어 작업 대상선박의 선체상태 및 주변여건이 파악되지 않고는 안전하고

성공적인 작업 진행이 불가능했다. 이에 따라 본 작업 실시 전 별도의 사전조사 작업(pre-survey)을 통해 침몰유조선에 대한 상태, 잔존유량, 주변 작업여건(기름의 상태, 선체 주변 장애물, 준설 필요여부 등)을 파악한 후 이를 토대로 적정한 잔존유 회수작업이 설계되었다. 그 결과 기존 제1유일호 및 제3오성호에 적용되었던 ROV와 ROLS를 활용한 잔존유 회수방법이 아닌 포화잠수사가 Hottap장비 및 잔존유 재순환 가열 장비 등을 활용하는 형태로 잔존유 회수작업이 진행되었다.

이 장에서는 해외 유사 작업사례와 ROV와 ROLS를 활용하여 침몰유조선 내 잔존유를 회수한 제1유일호 및 제3오성호 작업사례와 포화잠수사를 활용하여 침몰유조선 내 잔존유를 회수한 경신호 작업사례를 각각 조사한 결과를 토대로 일반적으로 잔존유 회수작업에서 고려되어야 할 여러 요소를 다각적 측면에서 비교분석해 보았다.

3.2 잔존유 회수 해외 유사 작업사례 조사

3.2.1 무인회수장비를 활용한 잔존유 회수 작업사례

제1유일호 및 제3오성호는 무인회수 장비를 활용하여 잔존유 회수작업이 진행되었다. 국내뿐만 아니라 해외에서도 과거에 이러한 방법으로 잔존유 회수작업이 이루어진 사례가 있다. Estonia호 잔존유 회수사례, Prestige호 잔존유 회수사례가 대표적이다.

우선 Estonia호는 건조당시 발틱해에서는 두 번째로 큰 Ro-Ro선으로써 1994년 9월 사고로 인해 수심 62m 지점에 침몰하였다. 당시 적용된 잔존유 회수방법은 제1유일호 및 제3오성호에 적용된 방법과 동일한 방법인 ROV와 잔존유 무인회수장비 ROLS를 활용하는 방법이 적용되어 잔존유가 회수되었으며, 고점도의 잔존유를 Steam을 활용하여 가열하기도 했다. 당시 회수작업으로 총 230~250kl를 성공적으로 회수되었다(최혁진, 2003).

두 번째로 Prestige호는 벙커C유 77,000톤을 적재한 대형 유조선으로서 2002년 11월 스페인 인근 해상에서 수심 3,500m 해저에 침몰하였다. 선체는 2등분

되었으며 많은 양의 기름이 유출되었지만 선체에는 약 35,000톤의 잔존유가 존재할 것으로 추정되었다. 당시 잠수사 활용이 불가능한 수심에서의 잔존유 회수를 위해 약 1,000톤의 유류를 심해에서 저장할 수 있는 셔틀백(Shuttle Bag)을 제작하여 ROV를 활용해 설치 후 해상기지선으로 회수하는 형태로 작업이 이루어 졌다. 이 작업은 2004년 완료되었으며 총 13,400톤의 잔존유가 회수되었으며 이는 추정량의 약 80%에 해당하는 양으로써 무인회수장비를 활용한 성공적인 잔존유 회수 작업사례로 평가된다(F.Andritsos, P.A.Konstantinopoulos. & K.J.Charatsis, 2008)

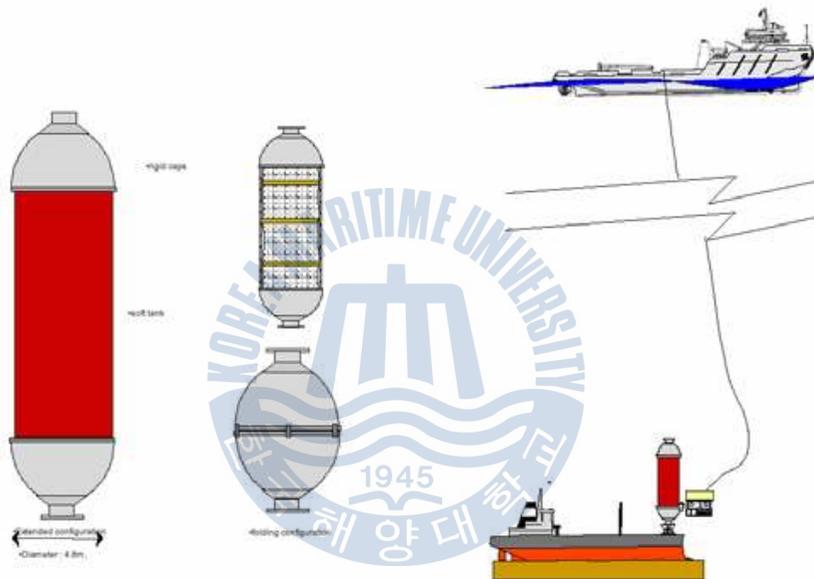


Fig. 23 셔틀백을 활용한 심해 잔존유 회수작업 개념도

3.2.2 잠수사를 활용한 잔존유 회수 작업사례

경신호는 잠수사가 Hottap 장비를 사용하는 방식으로 잔존유 회수작업이 진행되었다. 이 또한 국내뿐만 아니라 해외에서도 유사한 방법으로 잔존유 회수작업이 이루어지고 있다. 물론 심해 침몰유조선은 아니지만 지난 2012년 1월 이탈리아 인근 좌초된 Costa Concordia호 또한 잠수사가 Hottap 장비를 사용해 연료유 탱크 내부의 잔존유가 제거되었다.

Costa Concordia호는 호화 유람선으로써 티레니아해의 토스카나 제도 인근에

암초와 충돌하여 좌초했다. 선박의 총톤수가 11,450톤으로서 연료유 탱크 내 적재된 중질유는 2,200톤으로 추정되었다. 하지만 Costa Concordia호는 선박이 좌초된 상태로 작업수심이 깊지 않아 잔존유의 가열작업은 불필요한 것으로 판단되었다. 좌초선박 측면에 크레인바지선을 설치하고 잠수사가 투입되어 Hottap 공법으로 연료유 탱크 표면에 베이스플레이트를 설치한 후 순차적으로 유회수 호스를 연결, 잔존유를 바지선 상단의 회수유 저장탱크로 이송하였다. 이 작업은 2012년 1월 사고 직후부터 약 3개월간 진행되었으며 회수 가능한 선체 연료유 탱크 내 잔존유 전량이 성공적으로 회수되었다(SMIT, 2012).



Fig. 24 Costa Concordia호 잔존유 회수작업 사진

3.3 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업(1988)

3.3.1 사고 개요

제1유일호는 1995년 9월 20일 23:40분경 Bunker-C유 2,870kl, Bunker-B유 20 kl를 적재하고 울산항을 출항, 광양항으로 향하던 중 다음날인 9월 21일 04:55분경 선위확인 소홀 등 항해 부주의로 남형제도 북단 수중 암초에 좌초되었다. 좌초된 후 구조예인 도중 북형제도 정남방 약 1.0마일 지점에서 침몰되었다. 당시 침몰되면서 선체파손으로 인한 기름 유출 사고로 인하여 가덕도, 거제도 동남부 해안 일원이 크게 오염되었다. 제3오성호는 제1유일호 침몰 2년 후인 1997년 4월 3일 10:00경 Bunker-C유 1,615kl를 적재하고 온산항을 출항, 군산항으로 향하던 중 항해 부주의로 거제도 남단 등가도 서남방 약 0.8마일 지점에

서 침몰되었다. 제3오성호 또한 당시 선체파손으로 인한 기름 유출 사고로 인해 거제도 남단 도서해안 및 일본 서해안 일원을 크게 오염시켰다.

두 사고 모두 항해 부주의로 선체가 파공되어 기름이 유출된 사고가 먼저 발생한 후 유조선이 침몰된 것을 볼 때, 유조선 침몰사고는 통상적으로 파공으로 인한 기름유출사고 이후 침몰사고로 연결되기 쉽다는 것을 짐작해 볼 수 있다. 또한, 두 사고 모두 많은 섬들로 인하여 해안선이 매우 복잡한 곳에 선체가 침몰함으로써 침몰선 내 잔존유가 유출되는 2차적 오염을 사전에 예방하는 것이 매우 중요하였다.



Fig. 25 제1유일호 및 제3오성호 침몰위치

3.3.2 작업여건 및 주변환경

제1유일호는 선령이 14년된 총 톤수 1,591톤의 유조선으로써 수심 78m 해저면에 침몰되어 선박의 상태는 선수방위 240도 방향으로 좌현측으로 84도 내외 전도된 채 선체 최하단부가 약 4m 정도 벌에 묻혀있는 상태였다. 조류는 2knot 내외였으며 침몰유조선 주변 수온은 12~14℃ 정도였다. 당시 잔존유량은 기름유출량을 감안하여 추정된 추정량으로써 1,500~1,800kl 가량의 잔존유가 선체에 남아있을 것으로 추정되었다.

제3오성호는 선령이 19년 된 총 톤수 768톤의 유조선으로써 수심 약 70m 해

저면에 침몰되어 선박의 상태는 선수를 정복으로 좌현측으로 약 5도정도 경사된 채 선체 깊이 약 1/3 정도가 뿔에 묻혀 있는 상태였다. 어망 로프 등 폐어구류가 다량 선체에 걸려 있어 작업여건이 매우 좋지 않았으며 제3오성호 선체내 잔존유량 또한 당시 기름유출량을 감안하여 1,400kl 가량의 잔존유가 선체내 남아있을 것으로 추정되었다.

당시 침몰유조선 주변여건 및 작업환경에 대한 조사작업은 ROV와 ROLS를 활용한 잔존유 회수 작업방법 적용이 이미 결정된 상태에서 본격적인 작업 착수 직전에 수일동안 실시되었다. 당시 주변여건 및 작업환경 조사결과 선체 주변에 폐그물 등 다량의 장애물이 발견되었음에도 불구하고 작업방법 변경은 불가능하였다. 이는 잔존유 회수작업 진행 중 장애물로 인한 잔존유 회수장비의 잦은 고장을 유발하여 작업기간이 지연되는 결과를 초래하였다.

잔존유량은 실제 침몰유조선을 대상으로 측정된 것이 아닌 당시 선체 파손으로 유출된 기름량을 감안하여 추정되었다. 이 추정량은 침몰유조선 선체로부터의 실제 회수량과는 다소 큰 차이를 보였다(Table 2). 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업의 결과는 제1유일호가 총 664.8kl, 제3오성호가 22.5kl 회수되어 총 687.3kl가 회수되었으며 이는 사고당시 유출량을 토대로 추정한 3,049.1kl와는 큰 차이를 보였다.

Table 2 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 추정량 대비 회수량

(단위: kl)

구 분	추정량	회수량
제1유일호	1,435.0	664.8
제3오성호	1,614.1	22.5
계	3,049.1	687.3

3.3.3 잔존유 회수 주요 동원장비

ROV와 ROLS를 활용한 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업에 당시 동원된 주요 장비 내역과 해상기지선상 배치도는 다음과 같다(Fig. 24).

- 동원선박: 해상기지선(4점 묘박 바지선), 예인선 1척, 보급선 2척, 방제선 3척

- 작업장비: 사전조사용 ROV 1대, 작업용 ROV 1대, ROLS 1대, C/R panel 1식, Booster Pump, Manifold, Deck Hoses, Hydraulic Pump, Power Pack, Steam Generator 1식, 장비운반용 크레인 1대, 기타 베이스플레이트 설치관련 소모자재 1식
- 거주시설: 거주용 컨테이너 16동, 사무실 1동, 화장실 1동, 샤워실 1동, 창고 1동

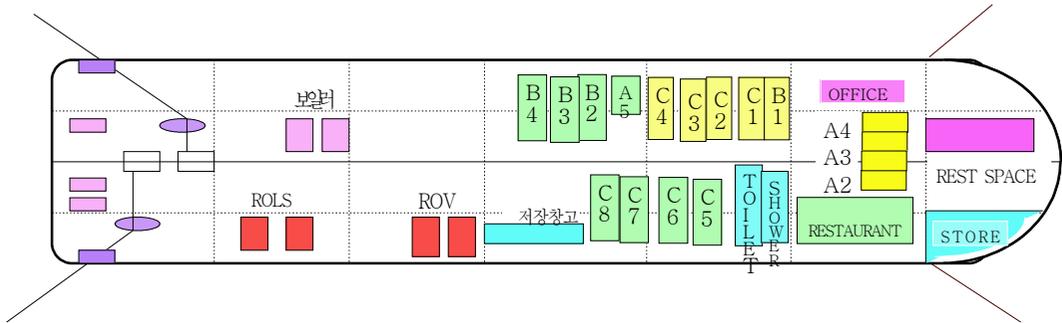


Fig. 26 제1유일호 및 제3오성호 해상기지선 배치도(A~C: 작업인원 숙소)

해상기지선은 총 톤수 11,000톤의 4점 묘박 바지선으로써 앞서 제2장에서 설명한 거주시설을 완비한 생활바지선은 아니었기 때문에 20동의 컨테이너를 바지선 위에 고정시켜 작업자들의 생활공간을 조성하였으며, 이외 공간에 잔존유 회수작업을 위한 각종 장비들을 배치하였다. 당시 직접 작업에 참여한 작업자 해양환경관리공단 소속 심유택과 허인석 (2013)을 인터뷰한 결과 갑판상단 많은 수의 컨테이너 설치로 인하여 선박 내 공간이 다소 협소하였다고 한다. 또한, 당시 활용되었던 4점 묘박의 바지선은 선박을 고정시키는 묘박수가 4개밖에 되지 않아 잔존유 회수작업 도중 발생한 악천후에 선체가 심하게 흔들리는 등 인명사고의 위험을 초래하기도 하였다고 한다.

3.3.4 회수방법 및 절차

침몰유조선 제1유일호와 제3오성호에 적용된 잔존유 회수방법 및 절차는 두 척 모두에게 동일한 방법 및 절차가 적용되었다. 우선, 해상기지선이 잔존유 회수작업 대상 침몰유조선 상단 해상에 설치가 완료된 후 ROV를 투입하여 트랜스폰더(transponder)가 선박 주변에 설치되었다. 트랜스폰더는 침몰유조선 주변에 설치되어 ROV 투하시 기기에서 발생하는 무선전파를 통해 침몰유조선 및

ROV의 위치 확인을 용이하게 해주는 장치이다. 트랜스폰더 설치작업이 완료되고 나면 곧바로 다시 ROV를 투입하여 원활한 작업 진행을 위한 침몰유조선 선체 주변의 장애물을 파악·제거하고 선체의 위치 및 침몰상태를 살피게 된다. 사람이 아닌 ROV를 활용하여 장애물을 제거하다 보니 추진기 부분에 그물이 감기거나 기계적 오류로 인하여 고장이 발생한 경우에는 즉시 ROV를 인양 후 수리하여 재투입해야 했다. 이러한 ROV 고장으로 인해 소요되는 시간은 당시 총 작업 소요일수의 약 15%를 차지할 정도로 작업에 소요되는 기간에 대해 큰 영향을 미쳤다.

이후 ROV를 활용하여 본격적인 잔존유 회수작업을 진행시키기 위한 유회수용 호스 부착위치에 직접 마킹(marking)작업을 실시하게 된다. 다음 ROV를 활용해 무인 잔존유 회수장비인 ROLS를 앞서 마킹된 위치에 밀착시키고 유회수용 호스 연결을 위한 베이스플레이트를 선체에 부착시키게 된다. 베이스플레이트 부착이 완료되면 ROLS를 작동시켜 시켜 천공작업을 실시하게 되고, 천공작업이 완료된 후 해상기지선과 연결된 유회수용 호스를 통해 선체 내 잔존유를 회수하게 된다. 이 작업을 진행함에 있어 회수작업 중 탱크 내부가 진공상태가 되는 것을 방지하기 위해 같은 방식으로 해수 유입용 베이스플레이트를 탱크 하단부분에 미리 설치해 놓는 사전작업이 반드시 이루어져야만 한다(Fig. 25).

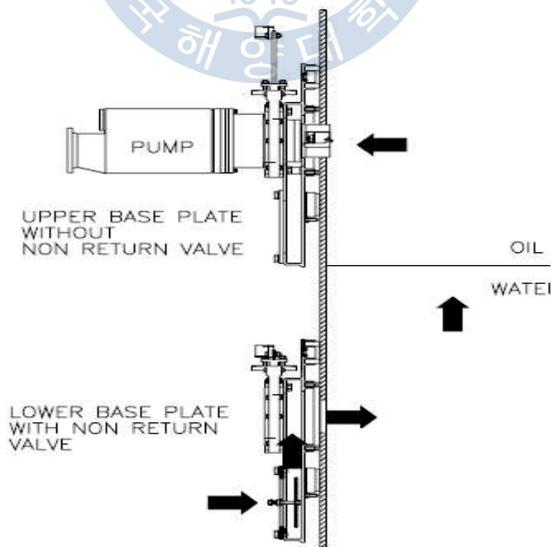


Fig. 27 선체측면 베이스플레이트 장착 개념도

또한, 주변의 낮은 수온으로 인하여 점성이 높아진 경우 유회수구 주변에 오히려 가열된 기름을 주입하여 유회수구 주변 잔존유의 점도를 낮추기도 하며, 유회수용 호스 내부에 얇은 관을 삽입하여 스팀(steam)을 통과시켜 고점도 잔존유로 인한 호스 내부 진공상태로 인한 압착현상을 예방하기도 한다(Fig. 26).

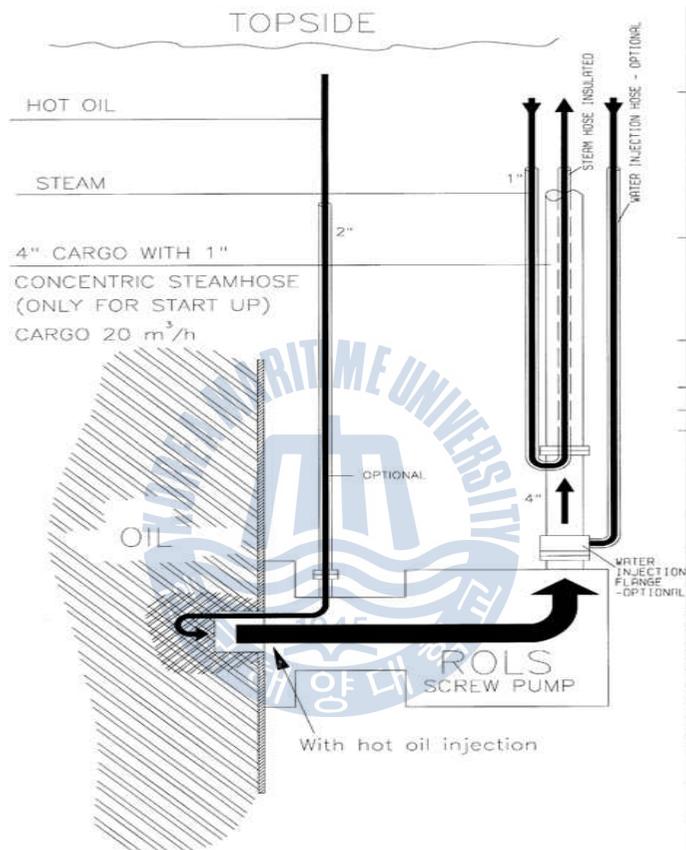


Fig. 28 ROLS를 활용한 잔존유 가열 개념도

침몰유조선 탱크 내 잔존유가 가열되지 않은 이유로 처음에는 해수가 섞여 나오다가 회수펌프의 압력을 일정하게 유지한 채 지속적으로 잔존유를 회수하게 되면 조금씩 해수에 기름이 섞여 나오기 시작한다. 1개의 화물유 탱크 상단에 부착된 ROLS를 통해 잔존유 회수작업이 안정적으로 진행되기 시작하면 ROV는 또 다른 화물유 탱크로 이동하여 앞서 설명한 방법으로 ROLS를 부착시키기 위한 또 다른 천공위치를 선정하고 마킹작업을 다시 시작하게 된다.

앞서 ROLS가 설치된 화물유 탱크 내 잔존유 회수가 거의 완료되어 기름이 아닌 해수가 다량 섞여 회수되기 시작하면 해상기지선에서 미리 가열된 고온수로 해당 화물유 탱크 내부 세척작업을 실시하게 된다. 이 세척작업의 목적은 탱크 벽면과 구석부분에 부착된 잔존유를 탈착시키기 위한 작업으로, 작업 실시 후에는 기름이 화물유 탱크 내 해수와 분리될 수 있도록 일정한 시간동안 대기하게 된다. 일정시간 대기 후 기름과 해수가 충분히 분리되었다고 판단되는 시점에 분리된 잔존유에 대한 회수작업을 다시 시작하며, 이러한 작업을 몇 차례 반복하면서 해당 화물유 탱크에 대한 잔존유 회수작업은 최종 마무리 된다.

3.3.5 회수작업 종료

제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업 사례의 경우에는 모든 작업의 방법과 절차를 발주자, 작업수행자로부터 독립된 제3의 전문가를 독립검정사로 지정하여 모든 의사결정이 이루어졌다. 특히 제3의 독립검정사에 의해 작업종료가 결정되는 방식은 글로벌 구난업계에서 보편적으로 적용되는 방법이기도 하다.

제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업에 적용된 화물유 탱크별 회수작업에 대한 종료 세부절차는 다음과 같다(심유택, 2003).

- 가. 침몰유조선으로부터 잔존유 펌핑작업이 시작되면 회수되는 잔존유에 대하여 적정온도 및 회수압력을 유지한다.
- 나. 회수작업 진행 중 해수가 발견되는 경우 공기를 탱크 내부구조 아래로 주입하여 가능한 한 화물유 탱크 측면에 설치된 유회수구 상단부분의 잔존유를 유회수구가 있는 위치까지 낮추면서 잔존유 회수작업을 재실시한다.
- 다. 다음 단계로 해상 작업기지선에서 50℃까지 가열한 고온수를 12시간동안 순환시키고 다시 회수작업을 실시하여 기름 회수 여부를 확인한다.
- 라. 화물유 탱크 내부를 12시간 동안 해수-기름을 분리시킨 후 잔존유가 다시 회수되는지 여부를 다시 확인한다.
- 마. 제3의 독립검정사의 합리적 판단으로 화물유 탱크로부터 기름이 더 이상 유출되지 않을 것이 선언될 때까지 나, 다, 라 작업을 계속해서 반복한다.

3.3.6 소요기간 및 비용

제1유일호 잔존유 회수작업은 1998년 6월 24일 정오를 기하여 본격적인 회수작업이 착수되어 1998년 8월 30일까지 총 69일이 소요되었다. 이 소요기간에는 기상악화로 인한 대기일수 21일, 장비의 고장수리로 인하여 작업이 중지된 19일이 포함되어 있다(Table 3).

제3오성호 잔존유 회수작업은 1998년 9월 1일 해상기지선이 작업현장에 설치되어 본격적인 작업이 시작된 후 1998년 11월 8일까지 총 69일이 소요되었다. 이 소요기간 중에는 강조류와 기상여건으로 수중작업을 수행하지 못한 36.3일, 장비의 고장수리로 인하여 작업이 중지된 기간 12.3일이 포함되어 있다(Table 3).

Table 3 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수 총 작업기간 대비 중지기간

(단위: 일수)

구 분	총 작업기간	기상에 따른 작업중지 기간	장비고장에 따른 작업중지 기간
제1유일호	69.0	21.0	19.0
제3오성호	69.0	36.3	12.3

작업에 투입된 총 소요비용은 다음과 같았으며 변호사·독립검정사 수수료와 내부직원에게 대한 인건비, 출장비 등 제경비는 제외하였다(Table 4).

Table 4 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업에 투입된 소요비용 내역

(단위: 백만원)

구 분	계	제1유일호	제3오성호	공동
용역비	11,745	5,183	5,319	1,243
폐기물처리비	526	236	4	286

3.4 경신호 잔존유 회수작업(2011)

3.4.1 사고개요

유조선 경신호는 1988년 2월 24일 새벽 Bunker-C유 2,560kl을 적재하고 울산 온산항을 출항, 동해시 묵호항으로 향하던 중 선체이상 및 기상악화의 이유로 포항시 대보등대 동북동 3.5마일 지점에서 침몰되었다. 당시 경신호는 침몰되면서 파손된 선체부위로부터 기름이 유출되었으며, 이렇게 유출된 기름은 인근 58개 어촌계를 포함하여 42km에 달하는 해안선을 오염시켰다(Fig. 27).

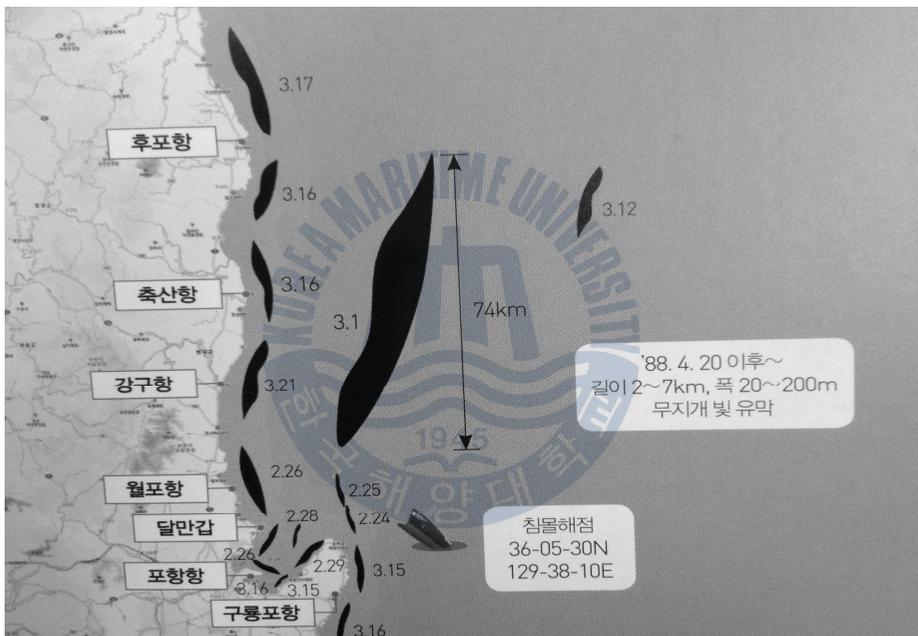


Fig. 29 경신호 침몰위치 및 당시 인근 오염지역 추정도

1988년 사고 직후 지속적으로 기름이 유출되고 있는 침몰유조선 경신호 선체의 파손부위를 봉쇄하기 위해 잠수사가 긴급 투입되어 총 26개소에 대한 임시 밀폐조치가 실행되었다. 이 기름 유출부위에 대한 밀폐작업 이후 당분간 기름 유출현상이 발견되지 않았으나, 일정시간이 지난 후 침몰유조선 경신호 선체로부터 소량의 기름이 지속적으로 유출되는 현상이 침몰사고 지점 주변 해상에서 포항해양경찰서 (2009)에 의해 Table 5와 같이 관찰되었다.

Table 5 경신호 잔존유 회수작업 전 침몰지점 인근 유증 발견 횟수

(단위: 횟수)

구 분	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년
당해연도	37	54	32	18	10	27	16
누 적	37	91	123	141	151	178	194

3.4.2 작업여건 및 주변환경

경신호는 제1유일호 및 제3오성호와 다르게 선박이 침몰된지 23년만에 잔존유 회수작업이 진행되었다. 이에 따라 해당 선박에 대한 정보가 대부분 유실되거나 소멸된 상태였으며, 침몰 당시 선체가 심하게 파손되어 안전한 잔존유 회수작업 시행을 위해서는 별도의 사전 정밀조사 작업이 필요했다. 이 사전조사 작업을 통해 선체상태, 화물유 탱크별 잔존유 유무, 장애물 분포상태 등 작업여건 및 주변환경에 대한 자세한 정보를 얻을 수 있었다. 이러한 사전조사 결과는 적절한 잔존유 회수작업 방법 적용 및 장비 선정·동원을 위해 매우 중요한 기초적 자료로써 활용되었으며, 그 결과 모든 작업이 안전하고 성공적으로 완료될 수 있었다.

우선, 선체 주변은 폐로프, 폐그물 등 장애물이 선체 구조물간 서로 얽혀 있어 ROV는 물론 잠수사 조차 잔존유 회수장비 장착을 위해 선체로 접근하는 것이 불가능한 것으로 판단되었다. 또한, 상갑판 전체가 약 5cm 두께의 마른 빨로 덮혀 있고 주변 유속이 평균 0.1m/s였기 때문에 작업을 진행을 위해 선체 접근시 빨이 부상하여 작업시야 확보가 곤란할 것으로 조사되었다.

멀티빔과 잠수사를 활용하여 선체 부위별 수심 분포를 조사한 결과 선박의 선수부위가 부러진 상태로 빨 속에 깊숙이 묻혀 있는 상태였으며, 전체적으로 선체의 기울기는 종경사(trim) 6.9m, 5.6도, 횡경사(heeling) 우현 4도로 기울어

저 있었다. 선체 주변의 수온은 평균 4.9℃로 조사되었으며, 이렇게 낮은 수온으로 인해 선박 화물유 탱크 내 잔존유의 동점도는 4℃ 기준 60,771cst로써 엇가락 같은 형태가 되어있을 것으로 추정되었다(한국고분자시험연구소(주), 2010). 이는 잔존유에 대한 효과적인 가열작업 없이는 정상적인 회수작업 진행이 불가능하다는 것을 의미하였다.

침몰유조선 내 화물유 탱크별 잔존유량의 측정방법은 잠수사가 선체 측면을 천공 후 직접 막대로 물-기름 경계면을 확인하는 방식으로 이루어졌으며, 당시 정확한 선체도면이 없었기에 선체의 기울기 및 볼륨을 감안하여 최종 탱크별 잔존유량을 추정하였다. 잠수사를 활용하여 직접적인 물-기름 경계면 확인을 통해 잔존유량을 추정했다 하더라도 실제 회수량과는 오차율이 어느정도 발생하였으며(Table 6), 이 오차율은 회수작업 종료 후 상온의 열에 의한 회수된 기름의 부피 팽창과 선체도면이 유실된 상태에서 조사된 탱크별 볼륨 계산상 오차에서 발생한 것으로 추정되었다.

Table 6 경신호 잔존유 추정량 대비 실제 회수량

(단위: kl)

구 분	추정량	회수량
경신호	512.3	634.0

3.4.3 잔존유 회수 주요 동원장비

포화잠수 장비와 잠수사용 잔존유 회수장비 등을 중심으로 작업이 진행된 경신호 잔존유 회수작업은 다음과 같은 주요장비가 동원되었다.

- 동원선박: 해상기지선(8점 묘박 바지선), 예인선 1척, 보급선 1척, 방제선 4척
- 작업장비: 포화잠수 1세트(6인용 150m급), 뿔 제거용 펌프, Hottap장비(200mm, 150mm 천공 및 볼팅장비) 1세트, 잔존유 가열장비(보일러, 1~2단계 히터) 2세트, 유회수 펌프 2세트, 유수분리장치 등
- 거주시설: 해상기지선이 생활바지선으로써 선박 내 152명 수용 가능한 거주 시설 완비

해상기지선은 총 톤수 7,323톤의 8점 묘박 바지선으로써 작업자의 거주시설이 갑판 하단에 완비된 앞서 설명한 생활바지선이 활용되었다. 이는 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업에서 사용된 바지선처럼 갑판상단에 별도의 컨테이너 설치가 불필요했으므로 충분한 작업공간을 확보할 수 있었다. 또한, 8점 묘박의 바지선으로써 수심 70m 이상의 잔존유 회수작업의 해상기지선으로 활용되기에는 4점 묘박의 바지선보다는 훨씬 안정적이었다. 실제 몇 차례 작업구역 인근 태풍의 영향으로 악천후가 종종 발생하였으나 해상기지선이 8점 묘박을 통해 안정적으로 고정됨에 따라 수중작업은 정상적으로 계속 진행되는 등 신속한 작업진행에 큰 도움이 되었다.

3.4.4 회수방법 및 절차

경신호에 적용된 잔존유 회수의 기본원리는 앞서 설명한 제1유일호 및 제3오성호에 적용된 잔존유를 회수작업 원리와 유사하다. 다만, 경신호에 적용된 잔존유 회수방법과 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수방법의 가장 큰 차이점은 수중작업 전 과정을 ROV가 아닌 잠수사를 활용하여 진행했다는 점이다. 또한, 잔존유의 고점도 특성을 사전에 파악하여 화물유 탱크 내부 가열작업의 중요성을 인식하고 탱크 내부를 1, 2차에 걸쳐 폐쇄회로 형태로 재가열하는 원리의 획기적 가열공법을 적용시켰다는 점이다.

경신호에 적용된 회수방법 및 절차는 우선 제1유일호 및 제3오성호 작업에서와 같이 침몰유조선 상단 해상에 해상기지선을 설치하고, 잠수사를 투입하여 선체 및 주변에 트랜스폰더를 설치하게 된다. 트랜스폰더는 앞서 설명한 바와 같이 침몰유조선 주변에 설치되어 잠수사 투입시 그 전파로써 위치 확인을 용이하게 해주는 장치이다. 이 작업이 완료되고 나면 곧바로 잠수사를 다시 투입하여 침몰유조선의 주변을 살핀 후 선체 상단부 각종 장애물 및 땔의 제거작업을 실시하게 된다. 잔존유 회수장비 설치가 가능해진 갑판 최상단 부위에 1단계 가열장비(히터) 장착을 위해 베이스플레이트 부착하고 천공작업이 실시된다. 이후 갑판 최하단 부위에 2단계 가열장비 장착을 위한 베이스플레이트를 부착하고 다시 천공작업을 실시하게 된다. 또한, 갑판 상단 1단계 히터가 설치된 반대편 지점에 화물유 탱크 내부 최 하단부의 해수와 연결되는 관(통수관)을 설

치하여 잔존유 가열시 잔존유의 부피가 팽창하여 발생할 수 있는 탱크 내 압력 증가를 사전 예방할 수 있다.

이렇게 잔존유 가열 및 회수장비의 장착을 위한 모든 사전준비 작업이 완료되고 나면 우선 1단계 히터를 해상기지선으로부터 하강시켜 갑판 최상단 부위에 설치하게 되고, 2단계 가열장비가 장착된 스키드를 선체 옆 해저면에 안착시키게 된다. 이후 1, 2단계 가열장비를 침몰유조선 선체상단에 부착된 2개의 베이스플레이트와 연결시키게 된다(Fig. 28).

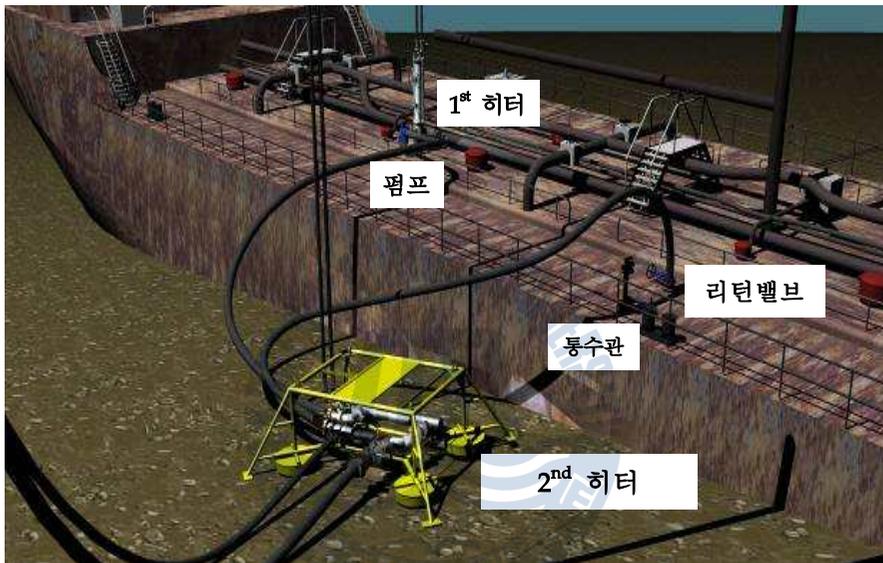


Fig. 30 경신호 잔존유 회수장비 장착 개념도

이렇게 침몰유조선 선체와 해상기지선간 연결된 모든 잔존유 회수장비의 장착이 완료되고 나면 해상기지선 상단에서 1단계 히터를 작동시켜 1단계 가열장비를 통해 가열된 잔존유를 2단계 히터로 이송하고, 2단계 히터로 이송된 잔존유는 다시 한 번 가열코일을 지나가며 재차 가열되게 된다. 두 차례에 걸쳐 가열된 잔존유는 리턴밸브를 통해 다시 탱크 내부로 주입되게 된다. 이러한 폐쇄 회로 형태를 잔존유로 순환 가열하는 잔존유 가열장비를 활용하여 화물유 탱크 내 잔존유의 높은 점도를 전체적으로 낮추어 회수작업에 필요한 정도의 충분한 유동성을 확보할 수 있었다(Fig. 29).

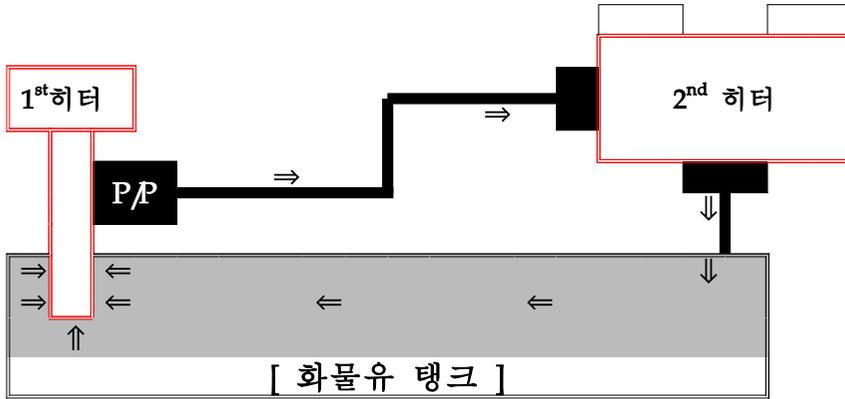
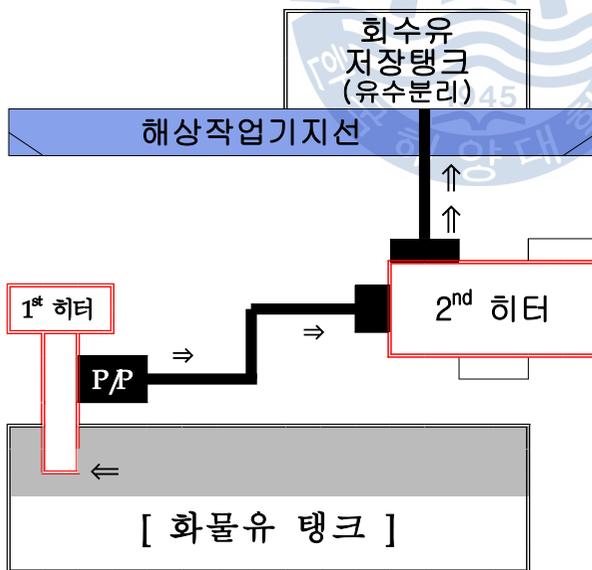


Fig. 31 1단계 히터로 가열된 잔존유의 재순환 가열 개념도

이러한 방법으로 회수대상 화물유 탱크 내부를 계속해서 재순환 가열을 실시하며 일정시간이 경과하면 어느 순간 2단계 가열장비를 통과하는 잔존유의 온도가 60℃ 이상까지 올라가게 된다. 이 때 2단계 히터에서 해상기지선으로 연결된 유회수용 호스를 서서히 개방하게 되면 60℃까지 가열되어 유동성이 충분히 확보된 잔존유는 해상기지선 상단 유수분리탱크로 신속히 이송된다(Fig. 30).



(a) 재순환 가열된 잔존유의 회수 개념도

(b) 실제 경신호 잔존유 회수 사진

Fig. 32 경신호 잔존유 재순환 가열작업 후 회수 개념도 및 실제 사진

회수된 잔존유는 해상기지선 상단에 설치된 Cascading 방식으로 제작된 유수 분리탱크에 저장된다(Fig. 31). Cascading 방식으로 설계된 유수분리탱크는 기름과 물을 분리시킨 후 기름은 기름저장용 탱크로 이송되며, 기름이 섞인 오염된 해수는 탱크 바닥면에 가열코일(Fig. 32)이 설치된 별도의 저장탱크로 분리되어 회수작업의 마지막 단계인 세척작업에 활용 된다. 이는 오염된 해수를 세척작업에 재활용함으로써 잔존유를 회수할 때 발생할 수 있는 유성혼합 폐기물 양을 획기적으로 줄이는 결과를 가져올 수 있었다.

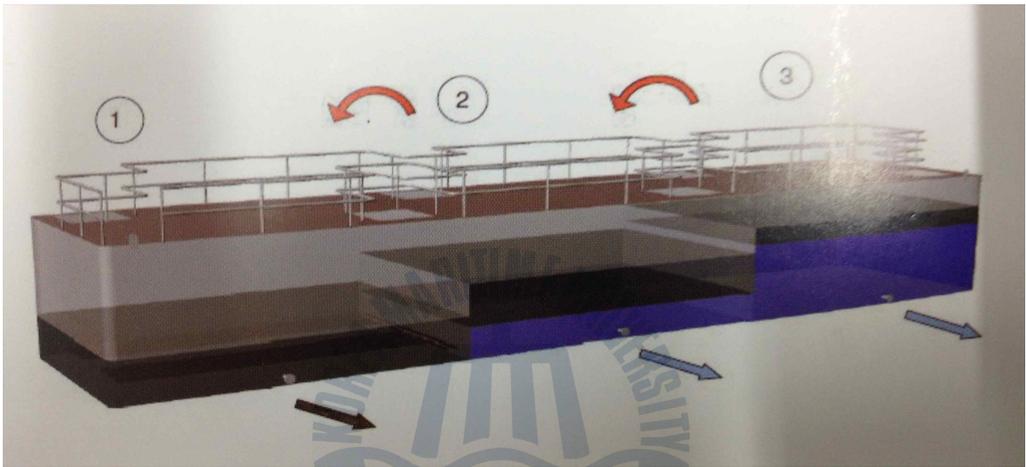


Fig. 33 Cascading 방식의 회수유 저장탱크

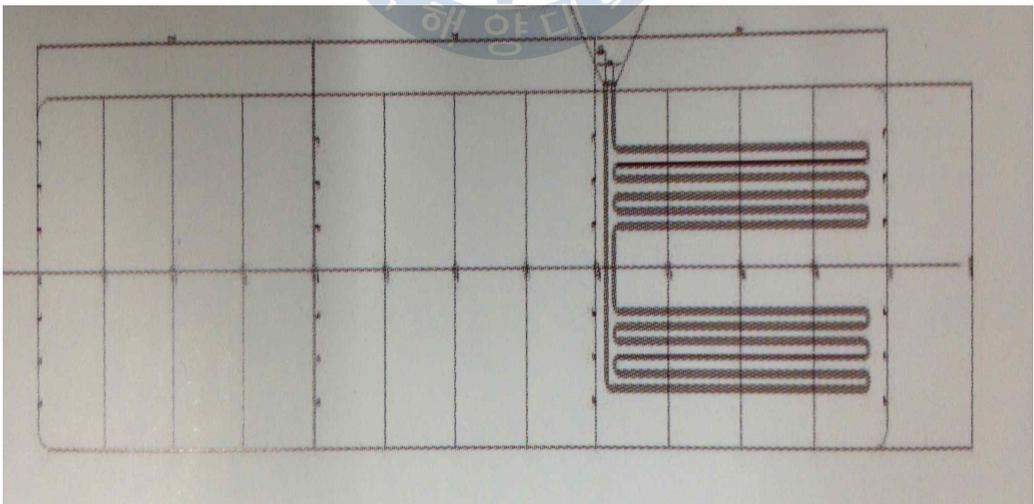


Fig. 34 회수유 저장탱크 바닥 도면

화물유 탱크 내 잔존유 회수가 거의 완료되면 우선 탱크 내부의 해수를 활용하여 재순환 가열을 다시 실시하게 되고, 탱크 내 물과 기름이 분리되도록 일정시간 대기시킨 후 다시 회수작업을 재개하게 된다. 또 다시 해수가 발견되면 앞서 설명한 유수분리탱크 내 분리 저장된 오염된 해수를 60℃까지 가열하여 화물유 탱크 내부를 세척하게 된다(Fig. 33). 세척작업 후 물과 기름이 분리되도록 일정시간 놓아두었다가 다시 회수작업을 반복 개시하게 된다. 두 차례의 이런 세척작업을 마지막으로 해당 탱크의 잔존유 회수작업은 마무리 되게 된다.

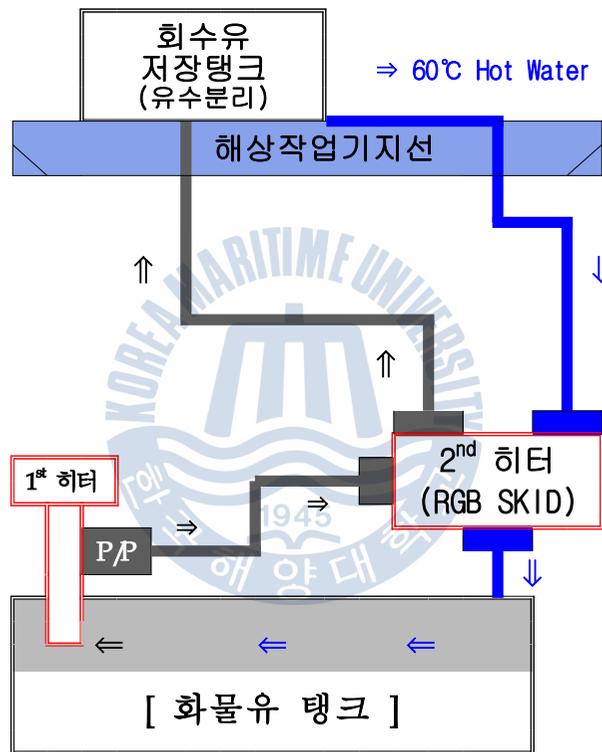


Fig. 35 경신호 화물유 탱크 내부 세척작업 개념도

3.4.5 회수작업 종료

경신호 작업사례의 경우는 제3의 독립검정사를 활용해 작업이 진행된 제1유 일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업과는 달리 모든 작업절차에 대한 감독이 발주자에 의해 직접 수행되었다. 따라서, 화물유 탱크별 잔존유 회수작업의 종료 절차 또한 독립검정사의 의사결정 중심이 아닌 발주자와 작업수행자 상호 합의

에 의한 합리적 절차로 수립되었다. 이렇게 수립된 경신호 잔존유 회수작업에 대한 작업종료 절차는 독립검정사의 주관적인 판단에 의존하지 않고 작업수행자가 보유한 장비 및 기술을 최대한 활용하여 물리적이고 객관적인 검증을 통하여 작업의 종료가 결정되었다는데 큰 의미가 있었다.

경신호 잔존유 회수작업에 적용된 화물유 탱크별 회수작업 종료 세부절차는 다음과 같다(KOEM, 2011).

- 가. 탱크별 1, 2단계 히터 및 통수관의 설치가 완료되면 60℃ 이상의 온도에 도달할 때까지 탱크 내 잔존유에 대하여 순환가열을 시킨다.
- 나. 탱크 내 재순환 가열되고 있는 기름이 60℃ 이상 도달하면 잔존유 회수작업을 시작하여 해상기지선으로 해수가 나올 때까지 1시간당 5~15m³의 펌핑 압력을 유지하며 1차 잔존유 회수작업을 실시한다.
- 다. 해수가 나오기 시작하면 1차 잔존유 회수작업을 중지하고 다시 60℃ 이상의 온도에 도달할 때까지 탱크 내 잔존유에 대하여 다시 재순환가열을 시킨다.
- 라. 탱크 내 재순환 가열되고 있는 기름이 60℃ 이상 도달하면 잔존유 회수작업을 시작하여 해상기지선으로 해수가 나올 때까지 1시간당 5~15m³의 펌핑 압력을 유지하며 2차 잔존유 회수작업을 실시한다.
- 마. 2차 회수작업시 해수가 나온 순간 작업을 중지하고 탱크 내부의 잔존유 잔량과 해수를 6시간 동안 순환가열 시켜 1차 세척작업을 실시한다.
- 바. 1차 세척작업이 완료되면 2시간 동안 안정화 시킨 후 회수작업을 해수가 다시 발견되는 시점까지 다시 실시한다.
- 사. 해수가 나온 순간 작업을 다시 중지하고 해상기지선에서 60℃ 이상 가열된 고온수를 탱크로 주입하여 2차 세척작업을 6시간 동안 실시한다.
- 아. 2차 세척작업이 완료되면 2시간 동안 안정시킨 후 회수작업을 해수가 다시 발견되는 시점에 앞서 말한 바, 사 단계를 반복하여 3차 세척작업을 실시한다.
- 차. 3차 세척작업이 완료되면 2시간 동안 안정시킨 후 마지막 회수작업을 해

수가 발견될 때까지 다시 실시한다.

카. 해당 화물유 탱크 측면 최 상단부를 천공하여 잔존유 유무를 확인한 후, 확인되지 않으면 갑판 상단의 해치커버를 개방하여 남아있는 소량의 잔존유를 모두 회수한다.

타. 해치커버 내 잔존유가 모두 회수되면 해치커버를 완전히 개방하여 해당 화물유 탱크 내 잔존유가 완전히 회수되었음을 최종 확인한다.

3.4.6 소요기간 및 비용

경신호 잔존유 회수작업은 2개년 사업으로 진행되었다. 1차년도 사업으로는 경신호 선체상태, 장애물 현황, 화물유 탱크별 잔존유량 등 회수작업에 필요한 각종 정보를 획득하고자 사전조사 작업이 실시되었고, 2차년도 사업으로는 이렇게 확보된 각종 정보를 활용해 본격적인 잔존유 회수작업이 실시되었다.

경신호 사전조사 작업은 현장에 해상기지선이 설치된 2010년 7월 26일부터 2010년 8월 8일까지 현장작업 기간만 총 14일이 소요되었다. 본 사전조사 작업을 통해 1988년 임시적으로 봉쇄되었던 26개 유출개소에 대한 보강작업, 선체 도면 확보, 탱크별 잔존유량 측정, 선체주변 환경조사 등이 이루어졌다. 이후 경신호 사전조사 작업을 통해 확보된 경신호에 대한 각종 정보를 분석하여 경신호 잔존유 회수작업이 본격적으로 시행되었다. 2차년도에 실시된 잔존유 회수작업은 해상기지선 설치가 시작된 2011년 6월 20일부터 2011년 7월 11일까지 총 22일 소요되었으며 작업기간 내 태풍 등 기상악화 및 잔존유 가열장비의 오작동 등으로 작업 초기에 3일간 작업이 중단되었다(Table 7).

Table 7 경신호 잔존유 회수 총 작업기간 대비 중지기간

(단위: 일수)

구 분	총 작업기간	기상에 따른 작업중지 기간	장비고장에 따른 작업중지 기간
조사작업(2010)	14.0	0	0
회수작업(2011)	22.0	1.0	2.0

총 22일간 진행된 경신호 잔존유 회수작업의 결과는 634kl의 잔존유가 회수되었으며 이는 사전조사 작업을 통해 추정된 512.3kl와는 121.6kl의 차이를 보였다. 추정량보다 회수량이 오히려 증가한 이유는 당시 해저면과 해상의 온도 차이로 인한 기름의 팽창, 정확한 선체도면의 부재로 인한 선체 내 화물유 탱크별 용량(capacity) 계산의 오차로 추정되었다.

작업에 투입된 총 소요비용은 다음과 같았으며 변호사·해외전문가 수수료 및 내부직원 인건비, 출장비 등 제경비를 제외한 순수 용역비와 폐기물 처리비용만을 사전조사 작업과 잔존유 회수작업으로 분리하여 산정되었다(Table 8).

Table 8 경신호 잔존유 회수작업 소요비용 내역

(단위: 백만원)

구 분	계	조사작업 (1차년도)	회수작업 (2차년도)
용역비	17,050	3,750	13,300
폐기물처리비	30	-	30

3.5 비교분석

3.5.1 작업여건 및 환경조사의 적정성

제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업 계획수립에 필요한 주변여건 및 환경조사는 작업 착수 직전 현장에서 ROV를 통해 진행되었다. 잔존유 회수작업을 ROV와 ROLS를 활용하여 진행하기로 이미 잔존유 회수에 대한 작업방법이 결정된 상태로써 작업여건 및 환경조사가 ROV를 통해 이루어질 수밖에 없었다. 이 결과 총 작업기간 138일 중 약 22.7%인 31.3일이나 장애물로 인한 ROV 및 ROLS의 고장이 발생하여 작업이 중지되었다. 반면, 경신호 작업사례는 주변여건 및 환경조사를 본 작업과는 별도로 사전에 실시함으로써 경신호 주변 장애물 분포 및 선체의 침몰상태가 정확히 조사되었다. 이를 바탕으로 포화잠수

사를 활용한 잔존유 회수방법 적용이 결정되었으며, 그 결과 총 작업기간 36일 중 장비고장에 따른 작업중지 기간이 단 2일에 불과하였다(Table 9).

Table 9 두 작업사례에 대한 총 작업기간 대비 순 작업기간 비교

(단위: 일수)

구 분		총 작업기간	기상에 따른 작업중지 기간	장비고장에 따른 작업중지 기간	순 작업기간
제1유일호		69.0	21.0	19.0	29.0
제3오성호		69.0	36.3	12.3	20.4
경신호	조사작업	14.0	0	0	14.0
	회수작업	22.0	1.0	2.0	19.0

위의 Table 9 자료에서 볼 때 우리나라 조업구역 내 발생하는 선박 침몰사고는 일정시간 이상 방치될 경우 어망 및 폐 로프 등 각종 장애물이 쉽게 선체에 부착되는 경향이 있으며, 기상여건 또한 정상적인 작업진행에 큰 영향을 준다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 우리나라 인근 해역에서 침몰한 채 일정 시간이 지난 침몰유조선에 대한 잔존유 회수작업은 주변 장애물 상태를 충분히 파악하여 작업방법을 설계하는 것이 중요하며, 침몰지점에 대한 연중 기상여건을 고려하여 적절한 작업시기를 결정해야만 한다. 또한, 국내 두 작업사례의 작업환경이 유사했다는 점을 비추어 볼 때 침몰 후 일정시간이 지난 국내 조업구역 내 침몰유조선은 ROV를 활용한 회수방법보다는 포화잠수사를 활용한 회수방법이 각종 작업환경에 영향을 적게 받는다는 사실을 짐작해 볼 수 있다.

탱크별 잔존유량 파악을 위해 제1유일호 및 제3오성호는 두 선박의 출항당시 적재한 기름의 양과 사고당시 유출되었다고 추정된 기름의 양을 감안하여 침몰 유조선 내 잔존유량을 추정하였다. 이 결과 추정된 잔존유량 대비 실제 회수된 잔존유 회수 총량의 오차율은 평균 76.2%까지 벌어졌다. 하지만, 경신호의 경우 실제 잠수사가 투입되어 탱크별 잔존유 유무를 확인하였을 뿐 아니라 물-기름

의 경계면을 천공 후 막대로 직접 확인함으로써 더욱 신뢰할 수 있는 추정치를 얻을 수 있었다. 그 결과 사전조사 작업을 통한 잔존유량 대비 실제 회수된 잔존유 회수 총량의 오차율은 23.8%로써 사고 당시 유출량을 근거로 잔존유량을 단순 추정한 제1유일호 및 제3오성호 사례의 오차율보다 상대적으로 정확하였다(Table 10).

Table 10 두 작업사례에 대한 잔존유 추정량 대비 실제 회수량 오차율 비교

(단위: kℓ)

구 분	추정량 (A)	회수량 (B)	오차율 ($ A-B /A \times 100$)
제1유일호	1,435.0	664.8	53.7%
제3오성호	1,614.1	22.5	98.6%
경신호	512.3	634.0	23.8%

이는 제1유일호 및 제3오성호와 같이 침몰유조선의 선체도면과 침몰당시 유출된 기름량을 토대로 실제 화물유 탱크 내 적재된 잔존유량의 추정은 큰 의미가 없다는 사실을 보여준다. 화물유 탱크별 잔존유량의 측정이 꼭 필요한 경우라면 물과 기름의 경계면을 경신호 작업사례와 같이 물리적으로 측정함으로써 더욱 정확한 정보를 얻을 수 있을 것이다. 하지만, 다른 한편으로는 잔존유 회수작업에 있어 화물유 탱크 내 잔존유가 존재한다는 사실을 확인한 이상 잔존유량 측정 자체가 무의미할 수도 있다고 생각한다. 물론 정확한 잔존유량 정보가 있다면 회수작업에 도움은 될 수 있겠지만 화물유 탱크 내 잔존유가 적재되어 있다는 사실만으로도 회수작업은 일단 수행되어야 하기 때문이다. 따라서, 이미 작업의 완결성 측면에서 검증된 화물유 탱크 내 잔존유 회수방법을 적용하고 작업종료에 대한 명확한 확인이 가능하다면 화물유 탱크별 정확한 잔존유량 측정은 불필요한 절차로 사료된다.

이렇게 작업여건 및 환경조사의 적정성 부분에서는 제1유일호 및 제3오성호

의 경우 사고당시 원인 및 각종 자료 조사결과를 토대로 ROV를 활용하여 잔존유 작업여건 및 환경조사를 본 작업에 포함하여 실시하였다. 이는 결론적으로 각종 장애물 및 악천후 등으로 과도한 작업 중지기간을 발생시켰다. 하지만, 사전조사를 별도의 프로젝트로 실시한 경신호 작업사례의 경우 선체구조 및 침몰상태, 수심, 잔존유량 및 성상, 장애물 분포현황 등에 대한 정밀조사 결과를 토대로 잠수사를 활용한 잔존유 회수방법을 선택함으로써 작업 중지기간을 최소화 시킬 수 있었다. 두 작업사례의 작업여건 및 환경조사에 대한 수행절차를 도식화 하여 비교해보면 다음과 같다(Fig. 34).

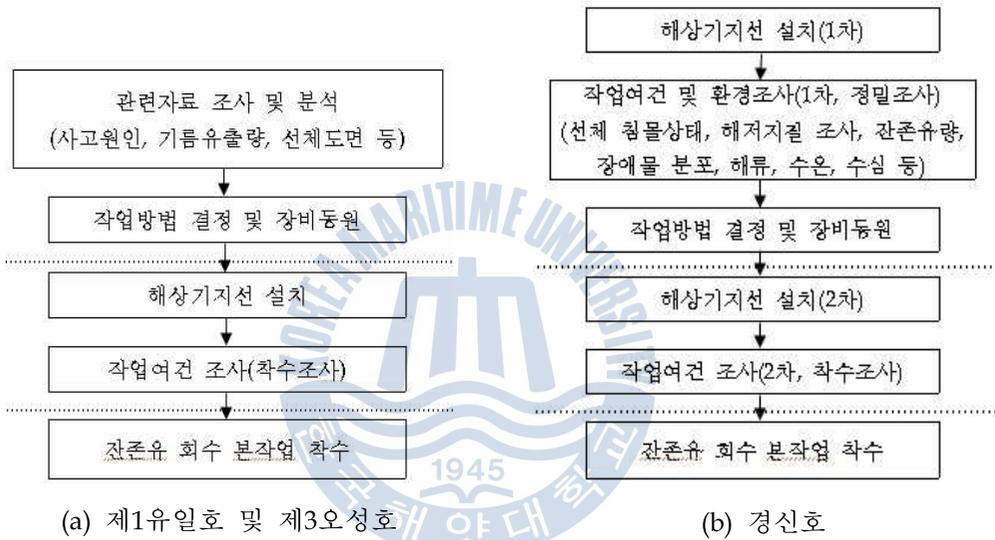


Fig. 36 제1유일호 및 제3오성호, 경신호 작업여건 및 환경조사 절차도

경신호 작업사례처럼 사전조사를 별개의 프로젝트로 실시하는 것은 치밀하고 정확한 작업계획 수립을 가능하게 하여 작업의 신속성 및 정확성이 향상될 수 있다. 하지만, 경신호 작업사례와 같이 본 작업과 동일한 규모의 장비동원이 필요한 사전조사 작업은 전체 잔존유 회수작업 소요비용 등의 경제성과 직결된다. 경신호 작업사례의 경우 총 작업비용의 약 23%가 사전조사 작업에 소요될 정도로 많은 비용이 소요되었다. 경신호 작업사례는 침몰한지 20여년이 지나서야 잔존유 회수작업이 이루어졌다. 오랜 기간 지나오면서 선박에 대한 정보가 대부분 유실된 상태였기 때문에 정밀조사가 필요하였다. 하지만, 대부분의 침몰 유조선 잔존유 회수작업은 침몰 후 즉시 또는 수년 내 이루어지는 경우가 대부

분이다. 따라서, 본 작업 진행방법 및 적용기술 결정에 초점을 맞추어 장애물 분포현황, 선체상태, 해류, 수심 등의 최소한의 정보에 대한 1차적인 사전조사만 간단하게 실시하는 것만으로도 일반적인 상황에서의 사전조사는 충분할 것으로 사료된다.

3.5.2 작업의 안전성

제1유일호 및 제3오성호 작업사례와 같이 ROV를 사용하여 잔존유를 제거하는 방법의 가장 큰 장점 중 하나는 바로 인명사고로부터의 안전성을 확보할 수 있다는 점이다. 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업은 이렇게 ROV를 사용함으로써 수중작업 중 각종 변수로 인한 잠수사의 인명피해 위험을 원천적으로 차단할 수 있었다. 반면, 경신호 잔존유 회수작업은 잠수사가 직접 회수작업을 수행하였다. 물론 숙련된 잠수사가 안전에 대한 충분한 교육을 받고 작업에 투입되지만 작업자는 수중작업으로 인한 각종 위험에 항상 노출되어 있는 것이 사실이다. 이 때문에 잠수사가 위험에 처하는 긴박한 상황을 대비하고자 긴급투입이 가능한 잠수사가 24시간 대기하여야 했으며, 구조용 챔버(rescue chamber) 등 응급조치 장비를 반드시 비치해야만 했다. 다행히도 두 작업사례 모두 작업 중 어떠한 인명사고나 안전사고는 발생하지 않았다.

안전성 측면에서의 또 다른 시각인 환경오염 위험성 측면에서 생각해 본다면 침몰유조선으로부터의 갑작스런 기름유출 사고에 대한 대응능력이 중요한 요소일 것이다. ROV가 수중작업을 수행하는 경우 유사시 발생할 수 있는 선체 내부로부터의 잔존유 유출에 대한 순간적인 대응이 거의 불가능하다. 침몰유조선 선체에 부착된 유회수용 호스의 탈착, 선체상단 파이프라인의 갑작스런 파손 등, 작업 중 발생 가능한 사고로 잔존유가 유출되는 경우 순간적인 대응이 매우 곤란한 것이 사실이다. 반면, 잠수사를 이용한 경신호 잔존유 회수작업의 경우 잠수사의 작업장소 주변에 기름 유출 사고에 대한 긴급 밀폐용 자재를 항상 비치하여 앞서 말한 갑작스런 기름 유출사고 등에 작업기간 내 항상 대비할 수 있었으며, 실제 경신호 잔존유 회수작업 도중 예기치 않게 발생한 소량의 기름 유출사고에도 신속하게 대응하면서 2차 오염사고로의 확산을 미연에 방지할 수 있었다(Fig. 35).



(a) Grease tape



(b) Putty



(c) Clay



(d) Screw dog

Fig. 37 경신호 잔존유 회수작업에 사용된 기름유출 긴급 밀폐용 자재

이를 종합해보면 작업의 안전성 측면에서는 제1유일호 및 제3오성호 작업사례의 경우 사람이 아닌 ROV를 활용하여 모든 작업이 진행됨으로써 어떠한 경우에서라도 수중작업으로부터의 인명사고를 방지할 수 있지만 갑작스런 잔존유 유출사고 등에 대한 긴급대응은 매우 곤란했다. 반면 경신호 작업사례의 경우에는 잠수사가 작업에 투입되므로 인명사고 발생에 대한 위험성은 일부 존재하나 갑작스런 잔존유 유출사고에 대한 긴급 대응은 용이할 수 있다. 이를 볼 때 안전성 측면에서 어떤 방법이 더욱 유리하다는 결론이 도출되기보다는 적절한 잔존유 회수 방법을 선택함에 있어 작업 진행과정에서 잠수사 투입시 인명사고의 위험성과 작업 중 기름유출 위험성에 대한 충분한 검토가 있어야만 성공적인 작업수행이 가능하다는 사실을 알 수 있다.

3.5.3 작업진행의 통제성 및 탄력성

제1유일호 및 제3오성호는 수중에서 일어나는 모든 작업과정이 ROV라는 로

봇이 담당하였으며 이 ROV는 해상기지선의 숙련된 조종사에 의해 원격으로 조종되었다. ROV 전면에 달린 카메라를 통해 해상기지선 내 조종사가 ROV를 통해 모든 잔존유 회수작업을 진행시켰다. 이렇게 ROV를 활용한 잔존유 회수작업은 작업의 총괄책임자가 지정되어 있으나 총괄책임자의 경험 및 능력이 충분하다 하여도 ROV 조종사의 경험 및 능력에 따라 작업의 성공여부가 크게 좌우될 수 있었다. 또한, ROV를 활용할 경우 사람이 아닌 로봇의 특성상 수행할 수 있는 작업범위에는 분명한 한계가 존재하였으므로 기존 계획된 작업방법 이외 현장상황에 맞춘 탄력적인 작업방법 변경이 매우 제한적이었다.

반면, 경신호는 잠수사가 수중에서 일어나는 모든 작업의 제어를 담당하며 이 잠수사는 해상기지선의 총괄책임자와 umbilical 호스를 통해 상호 실시간으로 교신하며 작업이 진행되었다. 물론 제1유일호 및 제3오성호의 경우처럼 ROV를 조종하는 사람의 노하우나 경험에 따라 작업의 성공여부가 크게 좌우되는 것처럼 작업을 수행하는 잠수사의 노하우나 경험이 작업에 영향을 줄 수 있다. 하지만, 잠수사는 ROV와 달리 총괄책임자의 지시에 따라 수중에서 거의 대부분의 작업을 수행할 수 있을 정도로 ROV와 비교해 볼 때 수중작업 수행능력이 월등하게 뛰어나므로 총괄책임자의 각종 유사경험을 바탕으로 한 작업진행 및 상황 판단능력이 무엇보다도 성공여부와 직결된다고 볼 수 있었다. 또한, ROV를 활용한 잔존유 회수기술과는 다르게 현장 상황에 따라 당초 계획된 작업방법이 적합하지 않게 되버린 경우라도 현장상황에 맞게 잠수사의 작업수행 능력 범위 내에서는 얼마든지 탄력적으로 작업방법 변경이 가능하였다. 이는 ROV를 활용한 잔존유 회수작업과 비교할 때 잠수사를 활용한 잔존유 회수방법의 가장 큰 장점이라고 볼 수 있다.

이를 종합해보면 작업진행의 통제성 부분은 총괄책임자-ROV조종사-ROV간 3차례에 걸친 교신으로 작업이 진행되는 제1유일호 및 제3오성호 작업사례보다는 총괄책임자-잠수사간 직접적인 교신을 통해 작업이 진행되는 경신호 작업사례가 총괄책임자 중심의 작업통제가 훨씬 수월했던 것으로 사료된다. 또한, 갑작스런 환경변화 및 작업여건 변화에 대응한 탄력적인 장비개조 및 작업방법의 변경도 잠수사를 통해 진행된 경신호 작업사례가 더욱 용이했던 것으로 사료된다. 따라서 작업내용이 타 작업에 비해 과다한 장애물 등으로 인한 복잡한 작

업일 경우 또는 작업 도중 예기치 않은 돌발변수가 많이 발생할 것으로 예측되는 침몰유조선에 대한 잔존유 회수작업에 대해서는 ROV를 활용한 회수작업 방법보다는 가급적 경신호 작업사례와 같은 잠수사를 활용한 회수방법의 적용이 바람직할 것으로 사료된다.

3.5.4 작업의 신속성

침몰유조선 내 잔존유 회수작업은 대부분 일일 단가계약 형태로 계약이 체결되므로 작업 착수일로부터 종료일까지의 작업 소요기간은 총 소요비용에 큰 영향을 미치게 된다. 이 분야의 전문가들은 일반적으로 침몰유조선 선체 내 잔존유를 100% 회수하는 것은 95% 회수하는데 소요되는 작업기간의 2~3배 정도 소요될 것이라고 판단한다. 왜냐하면, 유조선 화물유 탱크 최 상단부에 고여 있을 잔존유나 벽면에 부착되어 쉽게 탈착되지 않는 고형화 된 잔존유, 갑판 상단의 파이프라인 등 각종 구조물 내부에 갇혀있는 잔존유 등의 회수는 생각보다 쉽지 않기 때문이다. 제1유일호 및 제3오성호와 경신호 작업사례 또한 서로 다른 회수방법 및 종료절차의 적용으로 인해 잔존유 회수작업 완료 수준도 서로 다르다. 다만, 두 작업사례가 거의 동일한 수준으로 잔존유가 회수되었을 것이라는 가정 하에 각각 사례 소요된 작업기간을 단순 비교하기 위하여 각각의 잔존유 회수 대상 침몰유조선의 화물유 탱크 1개당 평균 작업기간을 산정해 비교해보았다. 그 결과 제1유일호 및 제3오성호 작업사례는 1탱크당 평균 9.9일이 소요되었으며 경신호 작업사례는 1탱크당 평균 3.7일이 소요된 것으로 산정되었다(Table 11).

Table 11 두 작업사례에 대한 1개 화물유 탱크당 평균 작업 소요일수 비교

구 분	총 작업일수 (일수)	작업탱크 수 (개)	1 탱크당 평균 작업일수 (일수/개)
제1유일호	69.0	7	9.9
제3오성호	69.0	7	9.9
경신호	조사작업	-	-
	회수작업	6	3.7

이는 작업의 신속성과 밀접한 관련이 있는 작업장비 고장, 기상악화 등에 따른 작업 중지기간이 주요 원인이겠지만, 작업시야 확보에 대한 부분도 무시할 수 없는 부분이다. 왜냐하면 신속한 작업진행을 위해서는 무엇보다 중요한 변수이기 때문이다. 보통 국내에서 선박이 심해 해저면에 침몰하는 경우 해저면의 빨이 부상하여 선박에 쌓이기 쉽다. 이는 ROV의 수중 이동을 위한 추진기뿐 아니라 잠수사의 작은 움직임에도 쉽게 부상하여 작업시야를 흐리게 한다. 이렇게 빨이 부상한 상태에서 ROV 상단에 설치된 카메라만을 통해 해상기지선의 ROV 조종사가 정확한 작업을 진행시키기는 매우 어렵다. 잠수사도 이러한 상황은 마찬가지이지만 작업을 수행하는 잠수사는 직접 육안으로 수중 작업상황의 파악이 가능하므로 총괄책임자와의 충분한 교신을 통해 작업을 더욱 정교하게 진행시킬 수 있다. 또한 진공청소기와 같은 빨 제거를 위한 장비를 사용해 잠수사가 빨을 제거할 수 있어 신속한 작업진행이 가능하다. 국내 조업구역 내 발생한 침몰유조선 잔존유 회수작업은 신속한 작업진행이 인근 어민의 정상적인 조업재개에 도움을 줄 수 있으며, 작업기간이 단축될수록 갑작스런 기후변화에 따른 작업 대기시간이 줄어들 수 있다. 따라서 침몰유조선의 침몰지점 부근이 어민들의 주된 조업구역 또는 환경이 민감한 지역인 경우에는 신속한 작업진행이 필요하므로 ROV를 활용한 회수 작업방법보다는 포화잠수사를 활용한 잔존유 회수 작업방법의 적용이 적정할 것으로 사료된다.

3.5.5 작업의 효율성

제1유일호 및 제3오성호의 경우 잔존유 회수작업의 마무리 단계로 탱크 내부 세척작업을 시행함에 있어 해상기지선 상단의 고온수를 지속적으로 주입하면서 화물유 탱크 내부에 남아있는 잔존유를 기름과 해수가 섞인 유성혼합물 형태로 회수하였다. 이렇게 회수된 유성혼합물은 해상기지에 설치된 별도의 저장탱크에 전량 저장되었으며, 이 유성혼합물의 총량은 제1유일호의 경우 2,368kl이었다(제3오성호는 자료가 남아있지 않음). 이중 최종 잔존유 회수량은 664.8kl으로써 유성혼합물 총량의 28.1%밖에 미치지 못했다(Table 12).

반면, 경신호의 경우는 잔존유 회수작업을 통해 회수된 유성혼합물은 앞서 설명한 바와 같이 해상기지선 상단 Cascading 방식으로 설계된 유수분리탱크

로 저장되어 기름과 오염된 해수로 분리된 후 오염된 해수를 가열하여 탱크 세척작업에 활용함으로써 회수된 유성혼합물 총량 868kl의 73%인 634kl이 재활용 가능한 합수율이 매우 낮은 상태의 순수기름 형태로 회수되었다(Table 12).

Table 12 두 작업사례에 대한 유성혼합물 대비 유류 회수효율 비교

(단위: kl)

구 분	유성혼합물 회수량 (A)	유류 회수량 (B)	회수효율 (B/A×100)
제1유일호	2,368.0	664.8	28.1%
제3오성호	자료 없음	22.5	-
경신호	868.0	634.0	73.0%

이를 통해 제1유일호 및 제3오성호 작업사례의 화물유 탱크 세척작업보다 경신호 작업사례에 적용된 세척작업이 효율성 측면에서 월등하게 뛰어난 것을 알 수 있으며, 이는 곧 폐기물 발생량을 최소화 시킨다는 환경적인 측면과 폐기물 처리비용을 절감할 수 있다는 경제적인 측면과도 직결된다. 실제 두 작업사례에서 회수된 잔존유 1kl당 폐기물 처리비용을 비교해 보면 경신호 작업사례에 소요된 처리비용이 제1유일호 및 제3오성호 작업사례에 소요된 처리비용의 6.18%밖에 되지 않았다(Table 13).

Table 13 두 작업사례에 대한 회수유 1kl당 평균 폐기물처리 소요비용 비교

구 분		총 폐기물 처리비용(천원)	유류 회수량(kl)	1kl당 평균 폐기물 처리비용(천원/kl)
제1유일호 및 제3오성호		526,000	687.3	765.3
경신호	조사작업	-	-	-
	회수작업	30,000	634.0	47.3

작업의 효율성은 또 다른 측면에서는 1일당 평균 잔존유 회수량으로도 비교해 볼 수 있을 것이다. 경신호와 최종 잔존유 회수량이 유사한 제1유일호의 잔존유 회수효율(장비고장, 기상악화 등으로 중지된 작업 일수를 제외한 순 작업일수 기준으로 1일당 평균 회수량으로 산정)을 경신호와 비교한 결과 제1유일호의 경우 22.9(kl/일), 경신호의 경우 33.4(kl/일)으로 계산되었다(Table 14).

Table 14 두 작업사례에 대한 1일당 평균 잔존유 회수량 비교

구 분	유류 회수량 (kl)	순 작업일수 (일)	1일당 평균 회수량(kl/일)
제1유일호	664.8	29.0	22.9
제3오성호	22.5	20.4	1.1
경신호	634.0	19.0	33.4

이는 앞서 설명한 포화잠수와 잔존유 재순환 가열공법을 적용한 경신호의 작업사례의 1일당 작업효율이 ROV와 ROLS를 활용한 제1유일호 및 제3오성호 작업사례보다 더욱 뛰어나다는 것을 단편적으로 보여주고 있다.

작업의 효율성 부분은 크게 두 가지로 구분하여 비교하였다. 첫 번째 효율성 비교 관점은 잔존유 회수작업을 통해 회수된 오염된 해수 총량 중 순수 기름량에 대하여 비교하였다. 오염된 해수는 바다로 재방출이 불가하므로 전량 육상에서 폐기처분 된다는 점에서 폐기물 발생량에 따른 처리비용과도 직접적인 관련이 있다. 경신호의 경우 잔존유 해상기지선 상단에서 기름과 오염된 해수를 분리하여 오염된 해수를 재활용하는 방식의 유류저장 탱크를 사용함으로써 제1유일호 및 제3오성호와 비교하여 폐기물량을 획기적으로 줄일 수 있었다. 따라서 ROV를 활용한 잔존유 회수 작업모델을 적용할 경우라도 해상기지선 상단 회수유 저장탱크는 경신호 작업사례에 적용된 Cascading 방식의 유수분리탱크를 활용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 다음 두 번째 효율성 비교 관점은 두 작업사례(제3오성호 제외)에 대한 1일당 평균 잔존유 회수량을 비교했다.

경신호 작업사례는 잔존유 2차례 연속하여 재순환 가열시키는 획기적 잔존유 가열방법을 활용함으로써 제1유일호 잔존유 제거작업 사례와 비교할 때 1일 평균 잔존유 회수작업의 효율성이 약 46% 가량 뛰어났다. 따라서 경제적 여건 또는 침몰위치, 침몰상태 등 작업여건 등을 고려할 때 작업의 효율성이 매우 중요한 기준으로 판단되는 경우 경신호 작업사례에 적용된 작업모델이 더욱 적정할 것으로 사료된다.

3.5.6 작업의 완결성

제1유일호 및 제3오성호의 경우 앞서 말한 바와 같이 글로벌 구난업계에서 일반적으로 통용되는 작업종료 절차를 적용하였다. 이는 발주자와 작업수행자로부터 완전히 독립된 제3의 독립검정사의 판단에 의해 화물유 탱크별 잔존유 회수작업이 진행되고 종료된다. 이는 제3의 독립검정사가 작업을 진행함에 있어 발주자와 작업수행자 양측 어느 쪽에도 구속되지 않고 독립성과 상황판단의 자율성이 보장되어야만 한다는 전제조건이 필요하다. 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업의 경우에는 제3의 독립검정사가 해당 침몰유조선의 모든 화물유 탱크 내 잔존유 회수작업의 완료여부를 판단하고 종료를 선언하였다. 하지만, 당시 이런 독립검정사를 활용한 잔존유 회수작업 종료절차는 발주자와 작업수행자 상호간 신뢰를 기반으로 한 종료절차로써 국내 정서에는 다소 익숙하지 않은 방식이었다. 왜냐하면 발주자가 원하는 수준까지 작업이 완료되었는지에 대한 직접적인 확인이 불가하였으며, 작업 종료에 대한 모든 판단을 전적으로 독립검정사에게만 의존해야 했기 때문이다.

반면, 경신호 작업사례의 경우에는 발주자와 작업수행자 상호간의 합의에 의해 작업 종료절차가 수립되어 적용되었다. 이 절차에 따라 화물유 탱크별 잔존유 회수작업의 종료는 발주자 및 작업수행자 상호간 합의에 의하여 결정되었다. 이 종료절차는 화물유 탱크별 완전한 작업종료를 확인하기 위해 탱크내부 세척 후 회수되는 유성혼합물 농도를 우선 확인하고(Fig. 36), 선체측면 최상단 부분을 천공 후 막대로 다시 확인하였으며(Fig. 37), 마지막으로 해치덮개를 개방하여 탱크 내 잔존유가 전량이 모두 회수되었다는 사실을 발주자와 작업수행자 상호간 잠수사의 헤드카메라를 통해 최종 확인하였다(Fig. 38).



Fig. 38 샘플링을 통한 유분농도 확인



Fig. 39 탱크 선체측면 막대로 직접 확인



Fig. 40 탱크 최상단부(해치) 개방

작업 종료절차와 관련된 작업의 완결성 측면에서는 앞서 설명한 바와 같이 두 작업사례의 화물유 탱크별 작업종료 기준 및 방법에 대해 비교해보았다. 우선, 제1유일호 및 제3오성호의 경우 작업수행 주체가 ROV라는 이유로 제3의 독립검정사를 선정하여 작업 종료절차를 정하고 이를 토대로 발주자와 작업수행자로부터 완전히 독립되어 합리적인 수준에서 종료를 선언하는 방식으로 작업이 완료되었다(Fig. 39a). 반면, 경신호의 경우 작업수행 주체가 로봇이 아닌 잠수사로서 발주자와 작업수행자간 합의를 통해 결정된 3단계에 걸친 물리적 확인방법이 적용되었다(Fig. 39b). 물론, 독립검정사에 의한 정성적 판단에 의한 작업종료를 확인한 제1유일호 및 제3오성호 작업사례보다는 물리적이고 직접적인 확인절차가 적용된 경신호 작업사례가 작업의 완결성 측면에서는 월등하다고 볼 수 있다.

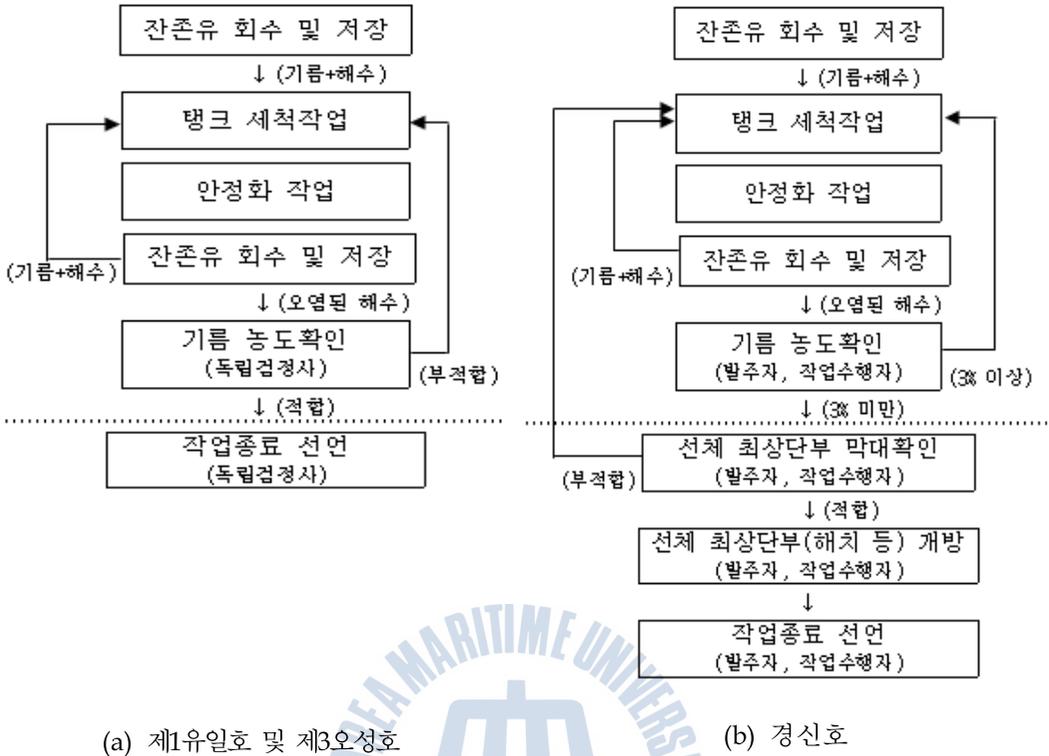


Fig. 41 제1유일호 및 제3오성호, 경신호 잔존유 회수 작업종료 절차도

하지만, 이러한 수중에서의 잔존유 회수작업은 ROV로 시도할 수 있다는 가능성을 완전히 배제할 수 없으므로 경신호 작업사례와 같은 물리적 확인은 작업현장 상황에 따라서 적용이 불가능 할 수도 있다. 발주자의 확인 요구수준 및 작업수행자, 독립검정사의 기술적·상황적 판단을 충분히 고려할 때 경신호 작업사례에 적용된 종료 확인절차를 단계별로 적용할 수 있는 탄력적인 작업종료 절차의 정립이 필요할 것으로 사료된다.

3.5.7 작업의 경제성

침몰유조선 잔존유 회수방법을 결정함에 있어서는 안전하고 성공적인 작업수행 가능성 여부가 가장 중요한 첫 번째 고려 요소이다. 물론 작업 소요비용에 대한 경제성도 중요한 요소에 해당되지만 아무리 경제적이라 할지라도 작업방법이 적정하지 않아 작업이 실패한다면 불필요한 예산낭비 또는 대규모 환경피

해를 유발할 수 있는 기름 유출현상으로 직결될 수 있기 때문이다. 하지만, 작업의 난이도 및 작업여건 등을 고려할 때 ROV 또는 잠수사 어느 쪽이라도 활용이 가능한 상황이라면 당연히 경제성을 고려하여 적절한 방법을 선택하는 것이 바람직하다.

물론 이 두 작업사례의 경제성을 비교함에 있어 1일당 소요비용의 산정은 중요한 요소이다. 하지만, 잔존유 회수작업은 앞서 말한 바와 같이 통상적으로 일일 단계계약을 체결하는 것이 일반적이라는 점을 감안하면 작업에 소요된 총 소요기간 또한 두 사례의 경제성을 비교하는데 중요한 요소로 작용될 수 있다. 왜냐하면, 1일당 총 소요비용이 높지 않더라도 적용된 잔존유 회수방법에 따라 작업기간이 무한정 길어진다면 1일당 높은 비용으로 단기간 내 작업을 완료하는 것보다 비경제적으로 될 수 있기 때문이다.

제1유일호 및 제3오성호, 경신호 두 작업사례의 경제성을 비교함에 있어 작업시기의 차이로 인한 물가수준을 보완하기 위해 제1유일호 및 제3오성호 잔존유 회수작업 소요비용에 1998년도부터 2011년도까지의 물가상승률을 반영(통계청 e-나라지표, 2008)하고, 경신호 작업사례의 경우 총액계약으로 계약이 체결된 점을 감안하여 잔존유 회수용역 착수시 작업수행자의 작업비용 산정기준에 반영되었던 예상 소요기간을 총 소요기간으로 산정하였다. 또한, 제1유일호 및 제3오성호에 소요된 공통경비는 각각 50%씩 배분하여 작업대상 선박별 1일당 평균 소요비용의 차이를 비교해 보았다(Table 15).

Table 15 두 작업사례에 대한 1일당 평균 작업 소요비용 비교

구 분	총 작업비용 (백만원)	총 소요기간 (일)	1일당 평균 소요비용(백만원/일)
제1유일호	8,528	69.0	123.6
제3오성호	8,727	69.0	126.5
경 신 호	17,200	59.0	291.5
조사작업	3,900	14.0	278.6
회수작업	13,300	45.0	295.6

상기 비교표를 볼 때 경신호 잔존유 회수작업 예상 소요일수를 감안한 1일당 평균 소요비용은 제1유일호 또는 제3오성호 잔존유 회수작업 1일당 평균 소요비용보다 약 2.3배 높게 소요될 것으로 분석된다. 이는 사전조사 작업을 별도작업으로 수행하고 포화잠수 및 잔존유 재순환 가열공법을 적용하는 잔존유 회수방법의 경우 ROV와 ROLS를 활용한 잔존유 회수작업보다 1일당 평균 소요비용이 상대적으로 높다는 사실을 말해준다. 여기서 두 사례만을 놓고 비교해 본다면 일반적으로 ROV 및 ROLS를 활용한 잔존유 회수작업에 소요되는 기간이 포화잠수 및 잔존유 재순환 가열공법을 활용한 잔존유 회수작업에 소요되는 기간의 약 2.3배를 넘어설 정도로 작업의 난이도가 높은 작업이라면 포화잠수 및 잔존유 재순환 가열공법을 활용한 경신호 사례와 같은 잔존유 회수작업이 더욱 경제적이 될 수 있다는 사실을 유추해 볼 수 있다.

예를 들어 잔존유 회수작업을 위해 예산을 150억원을 편성하였다고 가정할 때 일단 작업환경 및 주변여건(난이도, 안전성, 돌발상황 예측 가능성 등)을 분석하여 앞서 말한 각각의 잔존유 회수방법을 적용 하였을 때 예상되는 소요기간을 추정해 본다면 적용방법(ROV 또는 포화잠수)에 따른 경제성을 어느 정도 비교해 볼 수 있을 것으로 사료된다.

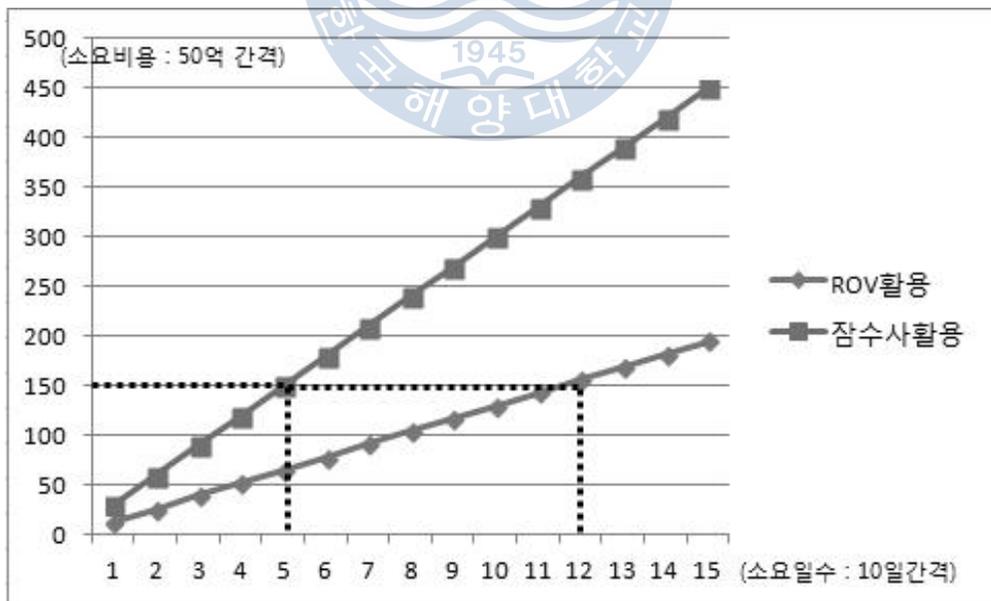


Fig. 42 잔존유 회수방법에 따른 경제성 분석 예시

상기 분석예시를 볼 때 150억 예산 범위 내에서 제1유일호 및 제3오성호에 적용된 ROV와 ROLS를 활용한 잔존유 회수기술을 사용하는 경우 약 120일 소요될 것으로 예상되는 경우 경신호에 적용된 잔존유 회수기술을 적용하여 약 50일 이내 완료가 가능한지 예상 작업 소요기간을 추정 해보는 방식으로 두 작업사례에 적용된 잔존유 회수기술 및 방법에 대한 경제성을 어느 정도 검토해 볼 수 있을 것이다. 하지만, 국외에서 발생한 많은 유사 작업사례에 대한 소요비용 정보는 각각의 작업수행사 보안상 수집하기 곤란하여 본 연구에서는 국내에서 발생한 두 작업사례에 대한 소요비용 정보만으로 결과를 도출하였다. 더욱 실효성 있는 잔존유 회수 작업방법에 따른 경제성 검토기준을 얻기 위해서는 추가적인 자료조사가 필요할 것으로 사료된다(Fig. 40).



제 4 장 결론 및 고찰

4.1 결론

국내에서 실제 이루어진 두 차례의 대표적 심해 침몰유조선 잔존유 회수 작업사례를 비교분석한 결과를 바탕으로 총 4단계, '작업준비', '잔존유 회수', '세척작업', '작업종료'로 구분하여 향후 국내에서 발생하는 침몰유조선 잔존유 회수작업에 대한 표준모델(Fig. 41)을 설계할 수 있었으며 세부설명은 다음과 같다.

우선, '작업준비' 단계에서는 침몰선에 및 사고정황에 대한 각종 문헌조사가 실시되며 ROV 또는 잠수사를 통해 수중 작업여건 조사가 실시된다. 이후 조사 결과를 토대로 인명사고의 위험성, 작업의 난이도, 작업의 시급성, 각종 돌발상황에 대한 예측 가능성을 판단하여 작업주체(ROV 또는 잠수사)가 결정된다.

'잔존유 회수' 단계에서는 앞서 말한 '작업준비' 단계를 통해 결정된 작업주체(ROV 또는 잠수사)에 따라 관련장비 및 기술인력이 동원되고 작업현장에 해상 기지선이 설치된다. 이후 진행되는 작업주체(ROV 또는 잠수사)에 따른 잔존유 회수 적용기술 및 절차는 국내에서 이미 검증된 제1유일호 및 제3오성호, 경신호 작업사례에 적용되었던 기술 및 절차를 기본으로 작업이 진행된다.

'잔존유 회수'가 거의 완료되면 탱크별 '세척작업'이 실시된다. 세척작업시 고온수는 경신호 작업사례에 적용된 Cascading 방식의 유수분리탱크를 사용하게 되며, 독립검정사의 판단으로 유성혼합물 내 기름농도가 일정기준 낮아졌을 때 마지막 단계인 '작업종료' 단계로 진행된다.

마지막 '작업종료' 단계는 발주자, 작업수행자, 독립검정사가 상호 협의를 통해 선체 최상단부 잔존유 유무 확인 및 최상단부(해치 등) 개방의 순서의 작업종료 검증절차의 단계별 진행여부를 결정하여 탱크별 작업종료를 선언하게 된다.

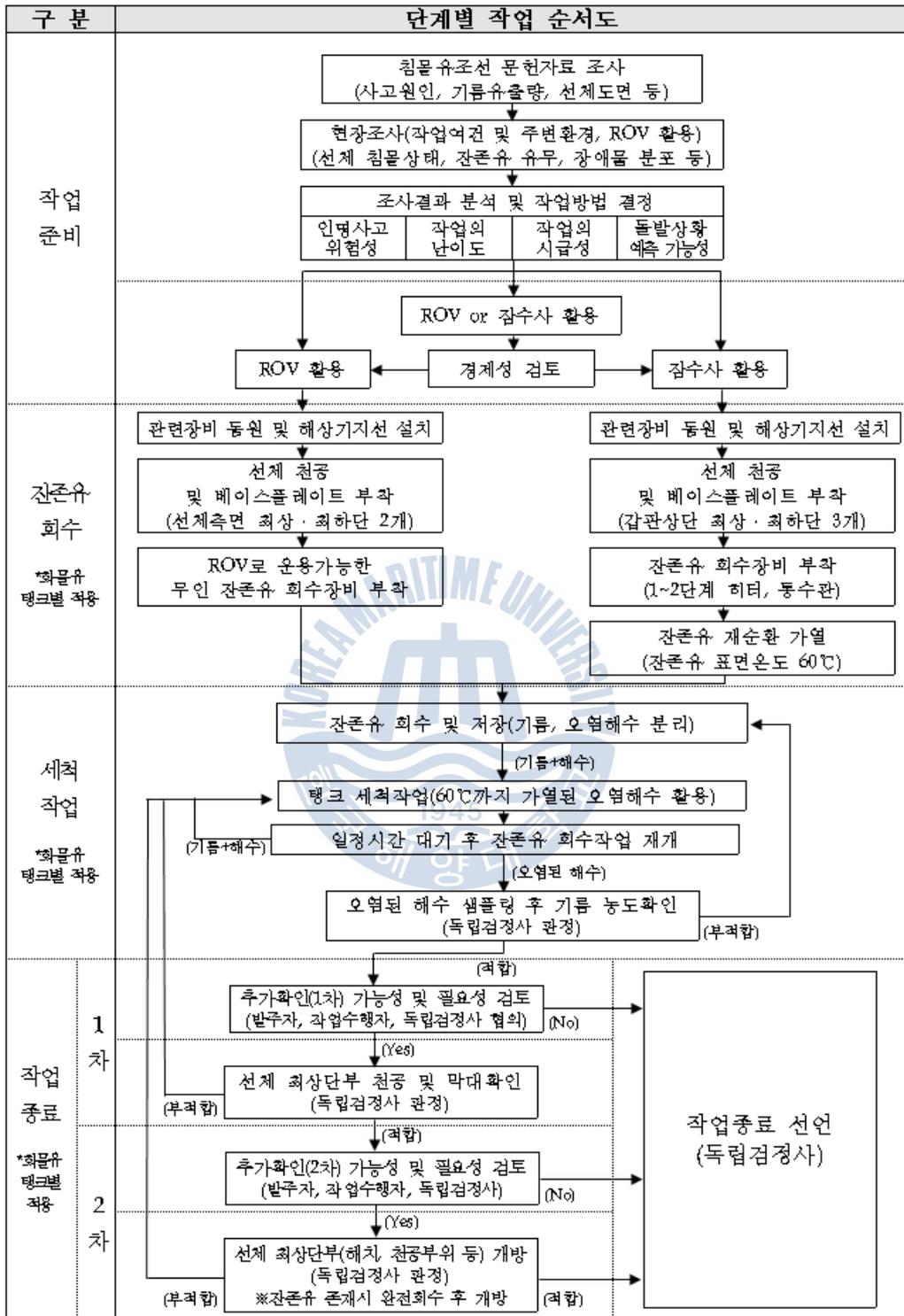


Fig. 43 국내 침몰유조선 잔존유 회수 표준 작업모델

향후 국내 연안에서 유조선 침몰사고 발생시 화물유 탱크 내 유처리제 투입, 심해 수중 셔틀백 이송 등의 국내에서 지금까지 사전 검증되지 않은 새로운 잔존유 회수방법의 무리한 적용을 시도하기 보다는 Fig. 41의 잔존유 회수 표준 작업모델을 적용하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다. 본 연구에서 제안한 모델은 앞서 언급한 바와 같이 국내에서 이미 검증된 두 작업사례의 비교분석 결과를 토대로 도출된 표준 작업모델로서 향후 국내 침몰유조선 발생시 적정 작업방법 설계에 소요되는 시간을 단축시켜 줄 수 있을 것이다. 또한, 이는 국내 연안지역에 유조선이 침몰하는 경우 침몰유조선 화물유 탱크 내 잔존유를 더욱 신속하고 안전하게 회수하는데 큰 도움이 될 것이다.

향후 국내 연안에 유조선이 침몰하는 경우 조업 및 항로에 방해가 되거나 자칫 추가유출로 인한 대형 오염사고를 유발할 수 있는 위험한 상태가 지속될 수도 있다. 하지만, 본 연구를 통해 도출된 침몰유조선 잔존유 회수 표준 작업모델이 실제작업에 활용됨에 따라 자칫 침몰유조선으로 부터의 유류 유출로 연결되어 유발될 수 있는 환경피해 등의 2차적 피해원인이 안전하고 신속하게 사전 제거될 수 있기를 기대한다.

4.2 고 찰

4.2.1 ROV를 활용한 잔존유 재순환 가열장비 개발의 필요성

본 연구에서 제안한 잔존유 회수 표준 작업모델에서는 반드시 잠수사를 활용하는 경우에만 잔존유를 재순환 가열하는 장비를 활용할 수 있다. 심해로 갈수록 수온은 낮아지고, 이로 인해 잔존유의 점도는 점점 높아질 것이다. 이는 만약 포화잠수의 한계수심을 넘어선 매우 깊은 심해에 유조선이 침몰하는 경우 잠수사의 활용이 불가능해지면 경우 경신호 작업사례에 적용된 잔존유 재순환 가열공법은 적용될 수 없다는 것을 말해준다. 물론 일부 구난업체에서 심해 기압차를 이용하여 셔틀백과 같은 이동식 유류저장 장치를 활용하는 회수방법도 제안한 바 있으나 충분한 가열작업 없이는 회수작업도 장기간 이루어질 것으로 예상될 뿐 아니라 탱크 내 잔존유의 완벽한 회수는 거의 불가능할 것이라 사료된다. 무엇보다도 검증되지 않은 방법은 발주자의 입장에선 침몰유조선 내 회

수 가능한 모든 잔존유가 전량 회수 되었을 것이라는 확신을 갖기 힘들다. 따라서, 향후 ROV와 같은 원격조종 로봇으로 제어가 가능한 잔존유 재순환 가열 장비 개발에 대한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다. 이는 포화잠수의 수심 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 오히려 잠수사의 한계수심 이내의 작업도 인명사고의 위험성이 높거나 작업 난이도가 ROV로 수행이 가능한 정도라면 굳이 고가의 잠수사를 활용하지 않고도 성공적인 작업수행이 가능할 것이라 사료된다.

4.2.2 잔존유 재순환 가열의 효율성 대한 추가 연구의 필요성

본 연구에서 제안한 잔존유 회수 표준 작업모델 중 포화잠수를 활용한 심해 잔존유 회수작업의 핵심은 경신호 작업사례에 적용되었던 잔존유 재순환 가열 공법이다. 이 공법은 화물유 탱크 내부의 잔존유를 폐쇄회로식으로 반복적으로 순환 가열시켜 고점도의 중질유를 빠른 시간 내 효과적으로 고온 액상화 시키는 고점도 잔존유의 유동성 확보를 위한 획기적 방법이다. 이는 해상으로 잔존유 회수작업을 매우 신속하고 용이하게 만들어주는 경신호 작업사례의 핵심 기술이다. 제1유일호 및 제3오성호에 적용된 ROV 및 ROLS를 활용한 잔존유 회수작업 방법에 비해 작업의 신속성 및 효율성이 월등히 높다는 것은 앞서 비교 분석 결과로도 충분히 설명될 수 있다.⁴ 하지만, 이러한 작업에 대한 효율성을 더욱 높이기 위해서는 화물유 탱크 내 잔존유를 가열할 때 고점도 잔존유를 회수 가능한 상태로 만드는데 소요되는 최소 가열시간과 적정 가열온도에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이러한 추가 연구는 잔존유 가열에 소요되는 불필요한 시간을 최소화함으로써 작업진행의 효율성을 증대시키고, 이는 곧 신속한 작업진행과 작업 소요비용 절감에 큰 도움이 될 수 있을것이라 사료된다.

참고문헌

- 권오수, 2006. *보일러 용어사전 일본보일러용어 연구회편*. 성안당: 서울.
- 심유태, 2004. *침몰선으로부터의 잔존유 회수 방안에 관한 연구*. 석사학위논문. 부산: 한국해양대학교.
- 최혁진 등, 2003. 침몰선박 잔존유 무인회수기술 개발에 관한 연구. *한국해양환경공학회 2003년도 춘계학술대회 논문집*, pp.117-121.
- 통계청 e-나라지표, 2008. 연도별 소비자 물가 등락률. [Online] (Updated 1 June 2013) Available at: <http://www.index.go.kr> [Accessed 1 July 2013].
- 한국고분자시험연구소(주), 2010. *경신희 잔존유(Bunker-C)의 물성분석 연구보고서*. 서울: 한국고분자시험연구소(주).
- 한국해양오염방제조합, 1998. *침몰선 잔유제거작업 백서*. 서울: 한국해양오염방제조합.
- 해양환경관리공단, 2010. *경신희 잔존유 조사작업 최종보고서*. 서울: 해양환경관리공단.
- 해양환경관리공단, 2011a. *경신희 잔존유 제거작업 백서*. 서울: 해양환경관리공단.
- 해양환경관리공단, 2011b. *경신희 잔존유 회수작업 최종보고서*. 서울: 해양환경관리공단.
- KOSIS 국가통계포털, 2007. *지역별 선박 입출항 현황*. [Online] (Updated 7 June 2013) Available at <http://kosis.kr> [Accessed 7 July 2013].
- Frank Mohn Flatoy As Oil & Gas Division, 2003. *Technical Description Remote Operated Offloading System ROLS*. Norway: FRAMO.

Hiteshk, 2010. *What is a Dynamic Positioning Ship?*. [Online] (Updated 30 October 2013) Available at <http://www.marineinsight.com/marine/types-of-ship-s-marine/what-is-a-dynamic-positioning-ship> [Accessed 30 October 2013].

International Marine Organization, 1994. *Guidelines for Vessels with Dynamic Positioning System*. London: IMO.

International Marine Organization, 1992. *MALPOL 73/78 in the revised Annex I*. London: IMO.

International Marine Organization, 2010. *Technical guidelines on sunken oil assessment and removal techniques*. London: IMO.

International Marine Organization, 2007. *Nairobi International Convention on the Removal of Wrecks*. London: IMO.

F. Andritsos, P.K Konstantinopoulos. & K.J Charatsis, 2008. *Recuperation of Oil Trapped in Ship-Wrecks: the DIFIS Concept*. International Oil Spill Conference. London: IOSC.

Rachad Alami and Abdeslam Bensitel, 2012. *Radioisotope Technology as Applied to Petrochemical Industry*. Petrochemicals, Rejeka: INTECH.

Remotely Operated Vehicle committee of the marine technology society, 1978. *What is an ROV? & ROV categories-summary*. [Online] (Updated 21 May 2013) Available at http://www.rov.org/rov_overview.cfm [Accessed 21 June 2013].

SMIT Salvage, 2010. *Salvage Project 'Costa Concordia'*. [Online] (Updated 24 March 2012) Available at <http://www.smit.com/projects/project/costa-concordia.html> [Accessed 21 June 2013].

The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, 1968. *Data & Statistics, oil tanker spill statistics 2012*. [Online] (Updated 1 June 2013) Available at <http://www.itopf.com> [Accessed 11 July 2013].