

工學碩士 學位論文

침몰선 잔존유 회수 표준화에 관한 연구

A Study on Standardization of the Removal of
Remaining Oil onboard the Wrecks

指導教授 尹 鍾 輝



2013年 2月

韓國海洋大學校 海事產業大學院

海事輸送科學科

金 泰 賢

本 論文을 金泰賢의 工學碩士 學位論文으로 認准함

위원장 工學博士 李 殷 邦 (인)

위 원 工學博士 鞠 承 淇 (인)

위 원 理學博士 尹 鍾 輝 (인)



2013年 2月

韓國海洋大學校 海事産業大學院

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
Abstract	v
제1장 서 론	1
1.1 연구의 배경과 목적	1
1.2 연구의 방법 및 범위	3
제2장 해양 오염 사고 분석	4
2.1 개요	4
2.2 해양 오염 사고 현황 분석	5
2.3 해양 오염 사고 사례 분석	10
2.4 침몰선 사고 현황 분석	19
제3장 침몰선 잔존유 제거 작업 분석	21
3.1 국외 사례	21
3.2 국내 사례	26
3.3 국내 침몰선 잔존유 회수 작업 비교 분석	29
제4장 침몰선 잔존유 회수 표준화	34
4.1 잔존유 회수 작업 시 고려 사항	34
4.2 침몰선 잔존유 회수 작업의 표준화 모델 설계	36
4.3 잔존유 회수의 표준화 모델	66

제5장 결 론 69

참고문헌 71



표 목 차

<표 2-1> 선종별 오염사고 발생 현황	5
<표 2-2> 100kl 이상 유출사고 현황	6
<표 2-3> 전 세계 유조선, 유조부선에 의한 기름 유출사고 통계	9
<표 2-4> 최근 10년간 침몰선박 현황	19
<표 3-1> 경신호 침몰 사고 해역 기름 발견 횟수	28
<표 3-2> 침몰선의 제원	29
<표 3-3> 침몰 위치에서의 해양 환경	30
<표 3-4> 침몰선 내 잔존유의 특징	30
<표 3-5> 침몰선 위치 및 상태	31
<표 3-6> 침몰선 작업일 세부 분석표	32
<표 4-1> 톤수로 본 일반적인 선박의 연료유 적재량	38
<표 4-2> 풍속과 관계된 취송류	41
<표 4-3> 경신호로부터 유출된 기름의 수면부상 소요시간	47

그림 목 차

<그림 2-1> 선종별 오염 사고 발생 현황	7
<그림 2-2> 원인별 오염 사고 발생 현황	7
<그림 2-3> 오염사고로 인한 유출량 현황	8
<그림 2-4> 유출유 최대 확산상태	11
<그림 2-5> 인천항 내 유출유 최대 확산 범위	13
<그림 2-6> 선종별, 해역별 침몰 선박 현황(1983년~2004년)	20
<그림 3-1> Asian Forest호 침몰 사고	21
<그림 3-2> Ice Prince호 침몰 사고	22
<그림 3-3> 선상폭발로 침몰한 Haven호	23
<그림 3-4> Selendag ayu호 침몰 사고	24
<그림 3-5> Ievoli Sun호 침몰 사고	25
<그림 4-1> 동해지역 바람의 바람장미 도표	42
<그림 4-2> 대한해협외 조류(2월,6월)	43
<그림 4-3> 동해 수심 50m에서의 월 평균 조류와 수온	44
<그림 4-4> 수면 하로부터 유출된 기름의 풍화 과정	45
<그림 4-5> 해수 염분 대 기름 밀도(비중) 관계에 따른 기름 부상 여부	48
<그림 4-6> 기름침강에 이르는 연안 오일샌드 상호작용	48
<그림 4-7> 0.01g/m ³ 을 초과하는 수면부양기름의 확률	50
<그림 4-8> 수면부양기름이 0.01g/m ³ 을 초과하는데 필요한 최소시간	51
<그림 4-9> 0.01g/m ³ 초과하는 해안선 기름의 확률	52
<그림 4-10> 일본연안을 따라 0.01g/m ³ 을 초과하는 해안선 기름의 확률	53

<그림 4-11> 유출유에 의한 해안선 오염의 최소 소요시간	54
<그림 4-12> 유출유에 의한 일본연안 해안선 오염의 최소 소요시간	54
<그림 4-13> 기름유출 12시간 후 예측도	55
<그림 4-14> 기름유출 24시간 후 예측도	56
<그림 4-15> 기름유출 4일 후 예측도	56
<그림 4-16> 기름유출 6일 후 예측도	57
<그림 4-17> 기름유출 10일 후 예측도	57
<그림 4-18> 기름유출 12일 후 예측도	58
<그림 4-19> 기름유출 15일 후 예측도	58
<그림 4-20> 기름유출 18일 후 예측도	59
<그림 4-21> 기름유출 21일 후 예측도	59
<그림 4-22> 월별 작업 가능 추정모델	61
<그림 4-23> 경신호 탱크 내 기름 히팅 과정 시뮬레이션 (순환되지 않는 상태)	63
<그림 4-24> 경신호 탱크 내 기름 히팅 과정 시뮬레이션(재순환 상태)	64
<그림 4-25> 잔존유 회수 표준화	67

A Study on Standardization of the Removal of Remaining Oil onboard the Wrecks

by Tae Hyun, Kim

*Division of Maritime Transportation Science
The Graduate School of Maritime Industry of
Korea Maritime University*



Abstract

As catastrophic oil spills in past 2 decades like Tanker Exxon Valdez & Prestige took place, significant measures for prevention, preparedness and response against large spill were taken by international organization and maritime developed countries such as OPA 90, OPRC 90 and Supplementary Fund etc. Likewise spill response technique and policies were improved and relevant R&D were conducted in Korea experiencing large spill like Tanker Sea Prince and Hebei Spirit. These improvements and

R&D, however, were mostly about on-water and onshore response. Meantime, tens of vessel sank every year due to marine accidents in Korean coastal waters, of which only a few sunken vessels were lifted. But there may exist threat of oil leakage from those vessels at all times caused by rupture of cargo tanks and diffusion, also oil spill could occur in the process in case of removal of remaining oil onboard the wrecks. The latter requires professional technique & measure for successful performance, accordingly the author attempts to design and suggests a standardization model for safe, effective and efficient removal of remaining oil from the wreck against possible spill accidents investigating wreckage status, previous remaining works and modelling with various factors.

It is found that 60 vessels approximately sank per year in Korean coastal water, 87% of those vessels were fishing vessels and 40% took place in South Sea. And removal works of remaining oil were recently done to 3 vessels, No.1 Yoo-Il, No.3 Oh-Sung and Kyung-Shin. With the investigation of working time (lapse time from beginning to end) of them, the case of Kyung-Shin were only one-third of the other two cases.

As a result of modelling with various factors applied to the Kyung-Shin, it was proven that the removal work could be accomplished by scrupulous plan considering water

environment(wind, current, water temperature, bottom property, depth), proper working method, selection of appropriate equipments, preparation for possible spill accident including floating time of oil particles, slicks trajectories both in water and surface, mobilization of response resources, response options, action plan for on-water and onshore cleanup.

Since this study presents the simple model of standardization of removal of remaining oil, the author will continue to study for making more improved and detailed model.



제1장 서론

1.1 연구의 배경과 목적

지난 20년 동안 세계적으로 1989년 Exxon Valdez호 및 2002년 Prestige호와 같은 대형 해양오염사고가 발생하여 막대한 환경피해와 비용이 발생함에 따라 미국의 유류오염방지법(OPA 90)의 제정, 유조선에 대한 이중선체(double hull) 도입, OPRC 90 및 유류오염피해배상 보충기금(Supplementary Fund) 등이 채택되었다. 뿐만 아니라 국가별 방제역량 강화 및 인접국가간의 협력 체제구축 등의 제도적 개선과 방제장비 연구개발 부분에서도 상당한 발전이 있었다. 국내에서도 1995년 Sea Prince호, 제1유일호 및 호남사파이어호, 1997년 제3오성호, 그리고 2007년 Hebei Spirit호 등을 포함한 크고 작은 기름유출사고로 인해 막대한 환경 피해와 비용이 발생하였다. 이에 따라 해양오염사고로 인한 환경피해를 최소화하기 위하여 유조선 운항금지 구역 설정, 해양환경관리법(구 '해양오염방지법') 제정, 방제전문기관인 해양오염방제조합(현 '해양환경관리공단') 설립, 국가방제능력 설정 및 그에 따른 해상방제장비의 조속한 확보계획 수립, 인근 국가와의 협력관계 구축을 비롯하여 재난적 사고에 대비한 방제 조직 및 정책 수립 등을 통해 해양오염 방제관련 제도적·기술적 변화를 가져왔다.

한편, 우리나라 연근해에서는 연간 약 1,000여건의 해양사고가 발생한다. 그 주요 원인으로서는 선박의 충돌, 좌초, 침몰, 전복, 화재 및 폭발 등을 들 수 있다. 선박에 의한 해양사고가 발생하면 무엇보다도 인명피해 및 선체손상과 더불어 기름유출사고가 뒤따르게 마련이다. 이에 따라 관

런 대학 및 연구소의 학자와 해양경찰청 및 해양안전심판원 등의 유관기관에서는 해양사고를 근절 또는 줄이기 위해 연구개발 및 정책제도 개선 방안 모색 등 부단한 노력을 기울여 왔다. 특히 해양사고로 인한 기름유출사고에 대응하기 위해 해양선진국의 선진방제기술과 시스템을 벤치마킹하여 우리나라 실정에 적합한 해양오염방제시스템을 개발·채택·시행하고 있다. 그러나 이들 연구 및 제안의 대부분은 선박의 충돌 및 좌초 사고로 인한 기름유출에 대해 신속·효율적으로 대응하는 해상방제와 해안방제에 초점이 맞추어져 있고, 침몰선으로부터의 기름유출 또는 침몰선의 잔존유 회수과정에 발생할 수 있는 기름유출사고에 대비한 연구 및 대응책 마련은 거의 없었다. 실제 우리나라 연근해에서는 매년 약 60여 척의 선박이 해양사고로 인해 침몰하며, 이들 선박중 일부만 인양되고 나머지 대부분은 그대로 방치되어 있음으로 인해 일부 선박에서는 기름이 유출된 바가 있었고, 또 앞으로 일부 선박에서 선체 파열 및 확산작용 등으로 기름이 유출될 가능성을 배제할 수 없다.

따라서 향후 침몰선으로부터의 기름유출에 대비한 전문기술 개발과 대책마련이 요구되며, 이에 추가하여 침몰선의 잔존유를 회수하는 경우, 작업과정에서 발생할 수 있는 제반 리스크를 예측하고 발굴하여, 사고 발생 시의 대응체계 구축과 관련된 연구가 수행되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 우리나라 연안 역에서 시행되었던 침몰선 잔존유 회수작업 사례를 조사·분석하여 상호 비교하였다. 동시에 유조선 경신호를 대상으로 침몰선 잔존유의 회수과정 중 발생할 수 있는 기름유출사고를 예측하는 모델링을 시도하여, 여러 가지 상황에 사전대비가 가능함을 보여줌으로써 향후 우리나라 연근해에서 침몰선의 잔존유 회수작업의 신속성·효율성·대비성 제고를 위한 표준화 모델을 설계하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 지난 11년간(2000년~2011년) 국내·외에서 발생한 해양 오염 사고 현황을 조사·분석하였고 해양 오염 사고들 중 잠재적 해양 오염의 위험을 가진 우리나라 연안 해역에서 시행한 제1유일호, 제3오성호, 경신호의 잔존유 회수 작업 사례를 비교 분석하였다.

본 연구에서는 네덜란드 구난회사 SMIT가 국외 사례에 2010년에 ASIAN FORREST과 2007년도에 M/V ICE PRINCE 잔존유 회수 작업수행시 기상 예측도, 시간의 경과에 따른 기름의 이동, 외력(해류, 바람)에 의한 기름의 이동, 해안부착 상태, 심해에서의 히팅 프로세스 시뮬레이션 등을 적용하였고 국내 잔존유 회수 사례 중 경신호 대상으로 유출 사고를 예측하는 모델링, 잔존유 히팅 시뮬레이션 등으로 잔존유 회수 사전설계를 보여줌으로 이 사례를 통해 잔존유 회수 표준화를 연구하였다.

본 연구는 총 5장으로 구성되어 있고 제 1장은 연구의 목적 배경, 제2장은 지난 10년간 국내·외에서 발생한 해양 오염 사고현황을 조사하였고 해양 경찰청 오염 사고 통계 자료를 분석해 재구성하였다. 또한, 국내에서 발생한 대형 오염사고 사례를 조사하였다.

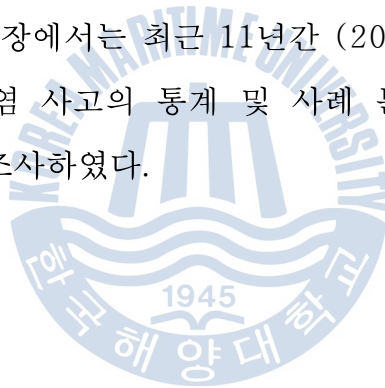
제3장은 국내·외 침몰 사고 사례 현황을 조사하였다. 국내에서 시행한 침몰선 제1유일호, 제3오성호, 경신호 잔존유 회수 작업에 대한 작업 현황과 작업 사례에 대한 비교 분석을 침몰선 잔존유 제거작업 백서와 경신호 침몰선 잔존유 백서를 통해 조사하였다

제4장은 잔존유 제거 작업 시 고려 사항을 조사하였고 경신호를 대상으로 고려사항별 모델링을 시도·분석하여 이를 통한 국내 실정에 맞는 잔존유 표준화 방안을 설계하였다.

제2장 해양 오염 사고 분석

2.1. 개요

우리나라 연·근해에서 발생한 선박에 의한 유류 오염사고들 중 해양 오염 사고 현황과 침몰선 유류 오염 사고의 사례를 살펴보면 통상적으로 일시적이고 집중적인 발생으로 인하여 오염피해가 심각함을 볼 수 있었다. 이들 해양 오염 사고들은 일시적으로 심각한 오염을 유발시켰음에도 불구하고, 특히 유조선 침몰 사고의 경우에는 여전히 외부적 요소 등에 의해 언제든지 다시 잔존유 유출이 될 수 있는 잠재적 2차 해양오염의 위험 요소가 상존한다. 본장에서는 최근 11년간 (2000년~ 2011년) 국내·외에서 발생한 해양오염 사고의 통계 및 사례 분석과 해양 오염사고들 중 침몰 사고 현황을 조사하였다.



2.2 해양 오염 사고 현황 분석

최근 11년(2000년~2011년)동안 우리나라 연·근해에서 발생된 선박에 의한 유류 오염사고는 총 4,116건이고(<표 2-1>) 연 평균 374건에 이르고 있으며 100kl 이상 대형 유류 오염 사고는 10건이었다(<표 2-2>).

배출원별로 보면 선박에 의한 오염사고는 전체 4,116건 중 2,756건으로 약 67%를 차지하고 있으며 해양시설 및 불명등과 같은 기타부분이 약 33%이지만 대부분 선박에 의한 유류오염사고가 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

<표 2-1> 선종별 오염사고 발생 현황

년도	오염 발생 건수				
	유조선	화물선	어선	기타	계
2000	28	61	272	122	483
2001	33	52	259	111	455
2002	32	33	218	102	385
2003	29	41	134	93	297
2004	39	39	149	116	343
2005	13	43	183	116	355
2006	26	33	112	114	285
2007	36	47	141	121	345
2008	23	32	98	112	265
2009	18	36	125	108	287
2010	37	33	140	119	329
2011	25	39	97	126	287
합 계	339	489	1,928	1,360	4,116

※ 상기 표는 연간 발생된 기름 1l 이상 유출사고와 선저폐수, 유해물질 10l, 폐기물 1kg 이상의 해양 유출사고에 관한 자료

※ 자료 - 해양오염관리업무 30년의 발자취(해양경찰청), e나라지표.

<표2-2> 100kl 이상 유출사고 현황

구 분	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
건 수	1	0	2	1	0	0	3	1	0	1	1
유출량(kl)	328	0	983	1,200	0	0	13,629	253	0	132	100

※ 자료 - e나라지표.

<그림 2-1>은 각 연도별 선박의 종류에 따른 사고 건수 및 연도별 선종에 따른 사고율을 표시하였다. 해양오염사고 발생건수는 2000년을 기점으로 감소하다 2004년부터 다시 소폭 증가하였으나 2006년 285건으로 감소추세로 재진입하였다.

<그림 2-1>과 <그림 2-2>를 살펴보면 2007년도에는 태풍과 태안 앞바다에서 발생한 허베이 스프리트호 해양오염사고의 영향으로 전년도 대비 사고 건수는 345건, 유출량은 14,021.8kl로 유례없는 증가를 기록하였다.

2008년도에는 고유가로 인한 어선의 출어 포기과 연안어선 감축사업, 태풍 내습으로 인한 피해 미발생, 해양오염에 대한 국민적 경각심 증가로 인해 사고건수는 전년도에 비해 대폭 감소한 265건, 유출량은 435.9kl를 기록하였다.

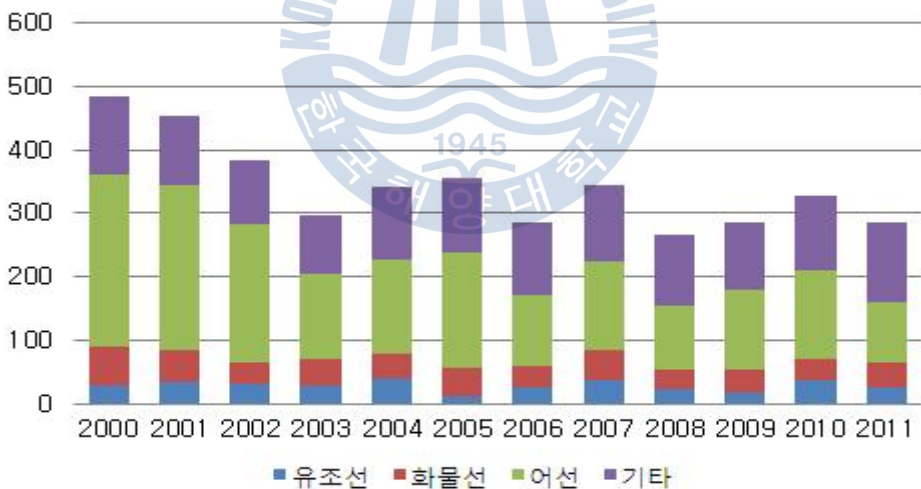
2008년도 대비 2009년도 우리나라 해상 유류물동량은 비슷한 수준이었는데, 유조선 선주, 선원들의 해양오염에 대한 안전의식 향상으로 사고건수는 287건으로 전년 대비 8% 증가하였으나, 유출량은 110.8kl로 74% 감소를 기록하였다.

2010년도는 전년도 대비 해상유류물동량 및 유조선 출입항 척수는 비슷한 수준이었으나 기상불량 및 중대형 오염사고 증가로 사고건수는 329건으로 15% 증가하였으며 유출4량은 601kl로 대폭 증가하였음을 보여준다.

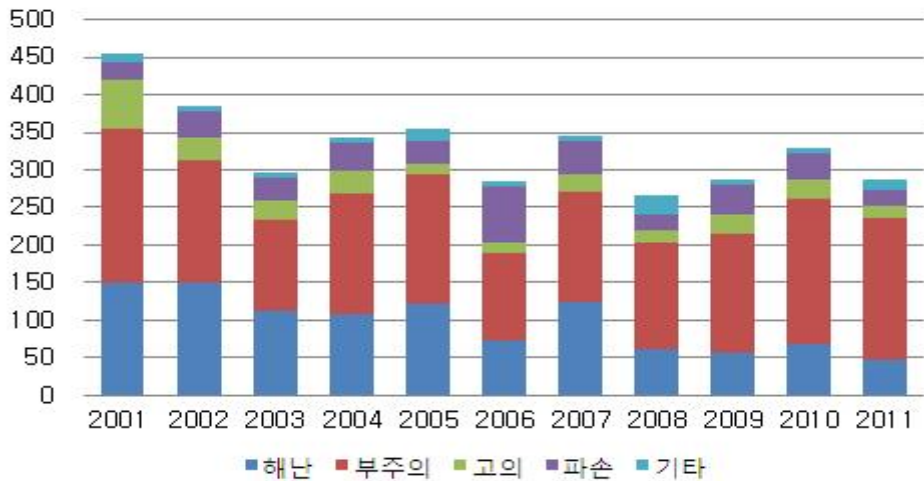
2011년도는 전년도 대비 사고건수 13%(329건 → 287건), 유출량

39%(601kl→369kl) 감소하였는데 이는 기상특보의 영향으로 풍랑주의보, 경보가 2010년에 888회에서 2011년에는 426회로 태풍주의보, 경보가 2010년에 61회에서 11년에는 32회로 전년대비 50% 감소하였다.

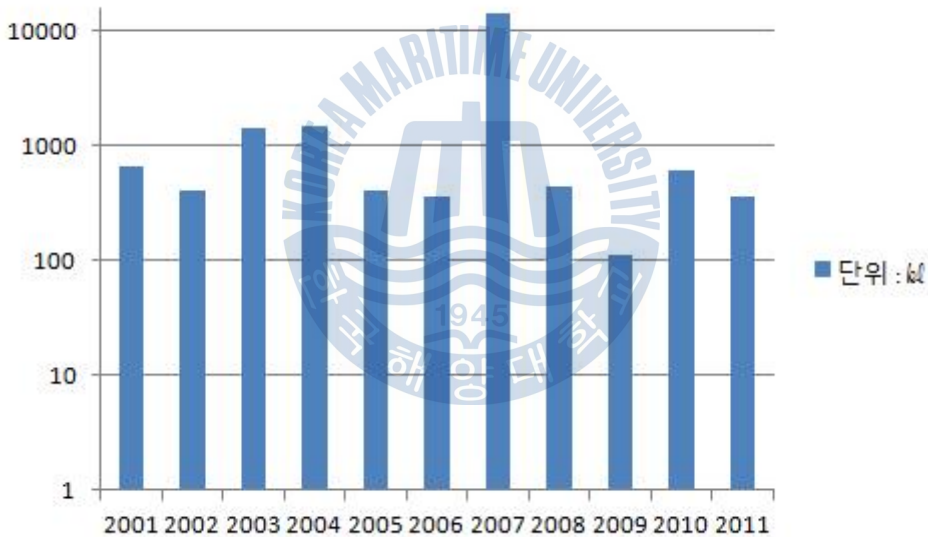
우리나라 사고 통계 중 부주의에 의한 사고(<그림 2-2>)는 전체의 59%로 여전히 높아 주요 오염원에 대한 지속적 해양오염방지를 위한 지도 및 계도활동으로 행위자의 의식전환이 필요하다. 어선에 의한 사고는 2009년, 2010년 이후 다시 증가추세에 있고, 약 43%를 차지하는 등 어민들을 대상으로 지도 및 계도 활동 강화하고 국적별로는 외국적선이 44건(13%), 80.6kl(13%) 차지하며, 이중 행위자의 국적별로는 파나마, 중국, 러시아 선원들에 의한 오염사고가 57%(25건)로 높게 나타나, 이들 선박에 대한 지도 및 단속강화가 필요하다.



<그림 2-1> 선종별 오염사고 발생 현황



<그림 2-2> 원인별 오염사고 발생 현황



<그림2-3> 오염사고로 인한 유출량 현황

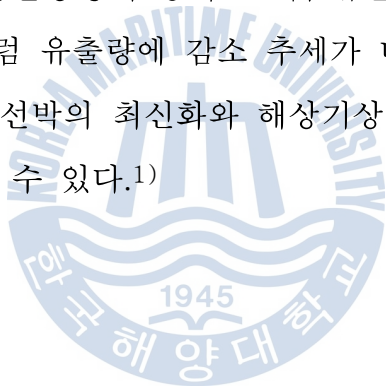
2007년 허베이스피리트 사고를 제외하고 대체적으로 감소 추세를 보이는 것과 같이 전 세계 유출량도 2002년 프리스티지 유출사고를 제외하고는 대체적으로 감소 추세를 보이고 있다. 국내의 오염사고로 인한 기름 유출량 현황과 전 세계 유조선, 유조부선에 의한 기름 유출량별 오염 사

고 현황과 비교해보면(<그림 2-3>, <표 2-4>) 국내에서 2007년도를 제외하고는 감소 추세를 보인 바와 같이 국제 사회에서 발생한 전 세계 유조선, 유조부선에 의한 오염사고 또한 2001년부터 다소 감소 추세이나, 이들 선박에 의한 오염사고는 꾸준히 발생하고 있음이 나타난다.

<표 2-4> 전 세계 유조선, 유조부선에 의한 기름 유출량

구 분	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10
유출량(톤)	8,000	67,000	42,000	15,000	17,000	13,000	18,000	3,000	2,000	10,000

선박의 대형화와 해상운송량의 증가로 기름유출 가능성은 높아지고 있음에도 불구하고, 이처럼 유출량에 감소 추세가 나타나는 요인으로는 과학기술의 발전에 따른 선박의 최신화와 해상기상예측 기술의 발달, 선박의 안전의식 증가를 들 수 있다.¹⁾

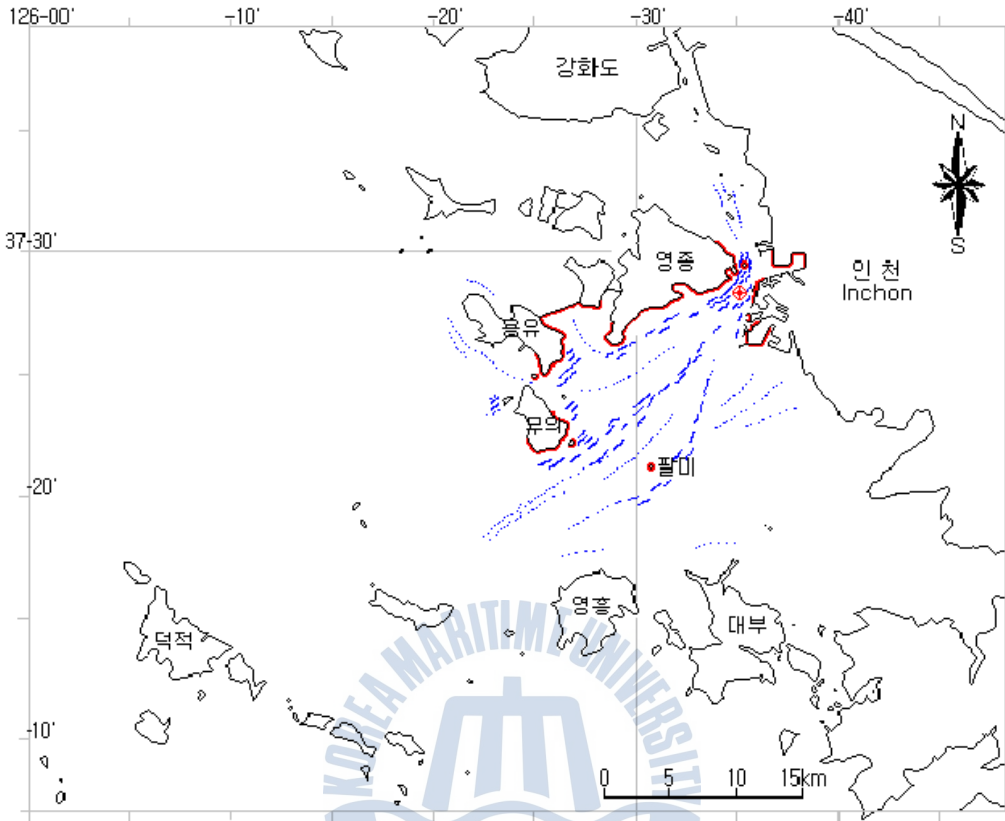


1) 출처 The International Tanker Owners Pollution Federation LTD., "Oil Tanker Spill Statistics:2008"
www.itopf.com

2.3 해양 오염 사고 사례 분석

(1) 인천 코리아 호프호 사고

1990년 7월15일 09:45경 (주)대한유조선 소속 코리아 호프호(G/T 12,644톤, 유조선)가 인천 호남정유의 계류부표(Mooring Buoy) 부근해상(37-28.5N, 126-35.5E)에서 계류부표에 접안(Mooring)하려고 접근 중, 이안(Unmooring)하여 출항하던 같은 회사 소속의 유조선 코리아 씨니힐호(16,813톤, 유조선)와 충돌하였다. 사고 당시 만조시간은 09:41이었으며, 기상은 남동풍이 초속 3m로 불고 파도는 거의 없었으나 짙은 안개로 인하여 가시거리가 500m로 극히 제한된 상태였다. 코리아 호프호는 독일에서 건조된 유조선으로 33개의 화물탱크로 구획되어 있으며 재화중량톤수가 18,990톤인 단일선체형으로 충돌 당시 병커 C유 16,470kl를 적재하고 있었다. 이 충돌로 인하여 코리아 씨니힐호는 구형 선수부(Bulbous bow)가 굴곡 되고 선저로부터 6.6m의 정선수부에 약 1m×0.3m 크기의 파공이 생긴 경미한 손상을 입었으나, 코리아 호프호는 좌현 외판 27.5m×6m(No.2~5 좌현 화물탱크 사이, 수선상을 중심으로 상하 3m) 크기의 파공이 발생하여, No.2, 3, 4 좌현 화물탱크에 적재된 병커 C유 중 약 1,500kl가 유출되었다.



<그림2-4> 유출유 최대 확산상태

오염피해는 인천수협 관내 영종도, 용유도, 무의도, 송도, 동막 및 고잔 등 15개 어촌계의 공동어장 599ha, 양식어장 485ha, 관행어장 3,133ha 및 어선피해 213척, 어선조업 손실 670척, 개인양식장 14개소, 일반 상인들이 피해를 보았고 방제작업에 연인원 약 7만 명, 선박 1,578척이 동원되었으며, 방제비용은 총 62억여 원이 소요되었다.

병커 C유 1,500kl가 순식간에 유출되었고 유출유 확산방지 등의 초동조치가 이루어지기 전에 기름은 낙조류를 따라 6시간 동안 약 9마일 가량이나 확산되었다. 해상방제는 해양경찰, 항만청, 해군 등 기관별로 방

제해역만을 분담하였을 뿐 해역별로 어떤 방법으로 방제를 할 것인지에 대한 아무런 전략도 없이 단순히 유처리제를 살포하여 분산시키거나 유흡착재를 이용하여 흡착 수거하는 방법을 하여 아쉬움을 남긴 사고였다.

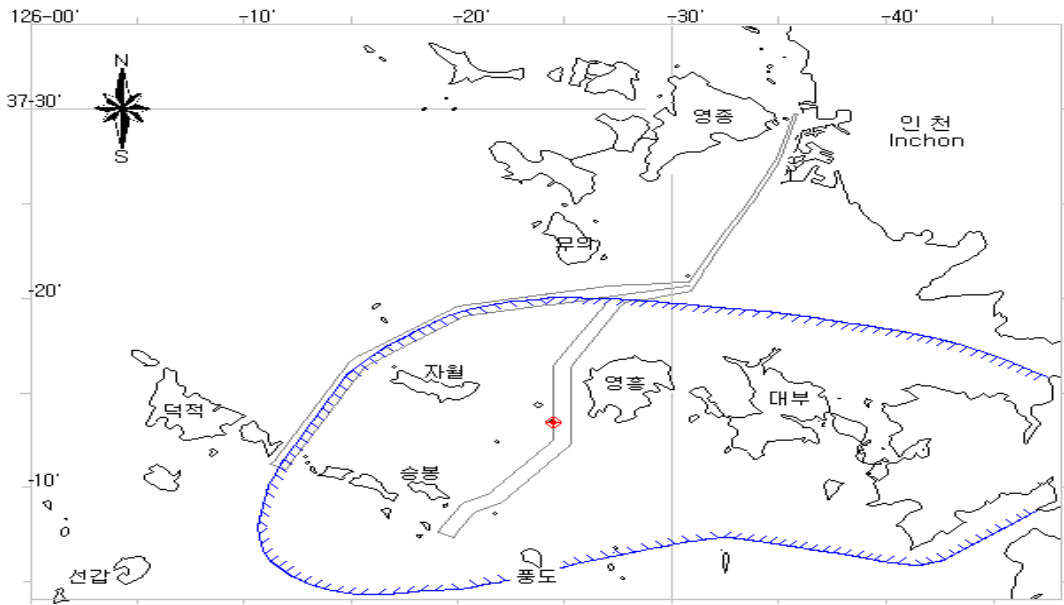
(2) 코리아 비너스호 사고

1993년 6월 16일 12:07경 유조선 코리아 비너스호가 짙은 안개 속에서 인천항 동수도를 따라 호남정유 인천저유소로 항해중 백암등대 부근에서 역행하는 어선(동수도는 입항로로 출항하는 선박은 서수도를 사용해야 함)을 피하려다 백암등대 암초에 (37-13.5N, 126-24.5E) 좌초하였다.

이 사고로 선수의 선저 51m 정도에 4m×3m 크기로 8군데가 심하게 굴곡, 파손되었으며 No.1 화물탱크의 항공유 2,288kl 및 No.3 화물탱크의 경유 2,000kl 등 총 4,288kl가 유출되었다. 코리아 비너스호는 1988년 10월 일본에서 건조된 유조선으로 선체 중앙에 7개의 화물창과 좌우측에 5개의 발라스트 탱크가 구획되어 있었고, 재화중량톤수가 38,985톤인 단일저(Single bottom) 구조로 충돌당시 항공유, 휘발유, 경유 등 정제유 총 32,937kl를 적재하고 있었다.

사고당시 짙은 안개로 항공탐색을 실시할 수 없었고, 선박을 이용하여 기름 분포상태를 확인하였으나 가시거리가 매우 제한되어 전체적인 기름의 이동 상태나 확산범위를 파악하기 곤란하였다. 또한 경질유라 한 곳에 오래 정체하지 않고 스쳐 지나가면 흔적이 거의 남지 않기 때문에 기름 냄새로 이동 상태를 추측할 수밖에 없었다.

이 해역의 조류는 창조 시에는 동수도와 서수도를 따라 복류하던 조류가 팔미도에서 합류하여 인천항으로 유입되고 낙조류는 이와 반대로 흐르는데, 유출유의 최대 확산 범위는 <그림 2-5>와 같다.



<그림2-5> 인천항 내 유출유 최대 확산범위

유출된 기름이 휘발유와 경유로 경질성 정제유였으나, 사고 후 5일이 지난 후에도 해상에 유막이 남아 있었으며 냄새가 심하여 선박 103척을 동원하여 유처리제를 살포하였다. 또한 유조선을 동원하여 파공탱크내 잔존유를 이적하였는데 여기에 소요된 총 비용은 1억 2,980만원이었다. 어장 및 양식장 내에서 유막은 발견되지 않았으나 채취한 굴, 조개, 바지락 등 어패류에서 기름 냄새가 났고 어선들도 냄새로 인하여 조업을 중단하는 피해를 입었다.

이 사고로 원유 또는 병커유 같은 중질유는 해양에 유출되면 자체 점성으로 인하여 해안에 표착되어 장기간에 걸쳐 피해를 주기 때문에 대부분 해양환경에 심각한 문제를 야기하지만, 이 사고처럼 경질유의 유출사고도 상황에 따라 단기간에 넓은 지역에 심각한 피해를 발생시킬 수 있음을 보여 주었다.

(3) 제5금동호 사고

1993년 9월 27일 광양항에서 제5금동호(유조부선, G/T 481톤, 한국 국적)는 LG정유(주) 제품 부두 제4번 선석에서 병커 C유 2,100kl를 적재하고 광양제철소 인접 한국급유(주) 저유소로 이동하기 위해 경기513호(예인선)와 함께 18:30분경 출항하였다. Bijiisan호는 임시 투묘 지점까지 이동하기 위해 도선사가 승선, 예인선 2척이 선박을 부두에서 이탈시킨 후 19:02분경 저속으로 광양항내 제1번 묘박지로 이동하기 시작했다.

이때 제5금동호는 제품부두를 출항하여 특별한 경계 없이 한국급유(주) 저유소를 향하여 이동 중이었으며, 19:09분경 제25번 등부표 부근에 Bijiisan호의 녹등을 확인하고 상대선을 VHF로 호출 중 Bijiisan호 선수부가 제5금동호 우현 정 중앙을 충돌하였고 제3번창을 중심으로 제2번창과 제4번창까지 길이 18m×폭 4.5m이 파손되고 Bijiisan호는 좌현 길이 3m×폭 1m정도의 손상을 입게 되었고 Bijiisan호는 약간의 침수는 있었으나 침몰 위험은 없는 상태였다. 제5금동호의 화물창 파손으로 적재한 병커 C유 약 1,228kl가 유출되어 광양만 일원과 노량수도, 진주만, 멀리는 삼천포 수도 일원까지 유출유가 확산되는 오염사고가 발생했다.

사고 당시 해상은 낙조류가 흐르고 있어 묘도 북쪽해상을 따라 남해도 남해대교 및 여수해만으로 급속하게 확산되고 있는 상황에서 해양경찰은 오염상황 파악을 위해 다음날 아침 전남도경 헬기로 오염군을 탐색한 결과, 묘도 북편~동편~남해도 향촌~여수반도 만성리 해상(광양항만부터 여수해만 전 해역 까지) 전역에 걸쳐 기름이 확산되어 있는 것을 확인했다.

사고지점인 광양항은 수로를 따라 조류가 빠르게 흐르는 지역으로 사고 발생 시 오일펜스 전장등 초동조치가 지연되어 오염범위가 확대되고

피해가 증가되는 결과를 초래하였다.

이에 대비하기 위해서는 유조선 입·출항이 빈번하여 대형 유출사고 위험이 높은 해역은 방제선을 배치하여 신속한 초동대응이 이루어질 수 있도록 하는 것이 필요하다.

(4) 씨프린스호 사고

1995년 7월 23일 17시경 씨프린스호(G/T 144,567톤)는 태풍과 파도에 의해 전남 여수 작도 해역에서 1차 좌초 후 전남 여주시 남면 소리도 남서단 (34-24.36N, 127-47.21E)위치에서 2차 좌초 되었다. 태풍 페이 대비 피항 시기가 지연되었다는 점, 단일선체 구조로 인하여 화물탱크가 쉽게 파손되었다는 점 및 대형 선박을 운항하는 선원들의 조종 능력이 부족했다는 점을 사고 원인으로 지적할 수 있다. 화물탱크 18개 중 13개가 파손되어 적재중인 원유 4,155kl 및 연료유 880kl 등 총 5,035kl가 유출되었다. 유출된 기름은 7월 25일에는 여천군 금오도와 남해도까지 기름군이 확산되었고 7월 26일 경남 거제도와 육지도까지 확산되었다. 유출된 기름은 7월 29일에는 사고 해역에 흐르는 동서조류와 북상하는 대한 난류의 영향으로 일본 대마도 서방20마일에서 발견되었으며, 국내의 경우 점차 범위가 확산되어 부산 해운대 해수욕장, 울산해역, 포항 해안까지 확산되었다. 이로 인해 전남지역 38km와 부산-경남지역 13개 마을 26.3km 총 73.2km 해안이 오염되었다. 방제비용으로 224억 원, 어민 피해 735억 원 등 약 960억원의 비용이 들었다. 이 같은 재난적 해양사고의 계기로 대한민국 정부는 해양 오염방지법을 개정하고, 해상 방제 체계를 일원화하는 등 국가의 방제 능력을 강화하였으며, OPRC 협약 가입

등 재난적 대형 오염사고 대응을 위한 국내·외 제도정비 체제를 구축하는 계기가 되었다.

(5) 호남 사파이어호 사고

호남 사파이어호(파나마 국적, G/T 142,488톤)는 원유수송선으로 중동의 오만, 아랍에미레이트, 사우디아라비아 등지에서 원유 253,897톤을 선적하고 1995년 10월 26일 20시24분경 사우디아라비아 라스타누라항을 떠나 20일간의 항해를 마친 후, 11월 17일 14시경 여수해만 대도부근에서 도선사 및 수습도선사를 승선시키고 LG-Caltex 정유 원유부두로 향하였다.

같은 날 15시 35분경 여천시 낙포동 삼일항 소재 LG정유 원유부두 약 1마일 해점에 도착한 본선에 예인선 6척을 우현에 배치시켜 접안 준비를 완료하고, 15시50분경 6척의 예인선으로부터 조력을 받으면서 부두에 접안 시도 중 선미부분이 선수부분 보다 부두에 먼저 접근하자 예인선으로 선수부분을 부두 쪽으로 밀도록 하였다.

16시경 선수부분이 너무 과도하게 밀리게 되었고, 본선이 부두에 30-40m 근접할 때까지 강한 전진타력의 힘을 소멸시키지 못하여 선수부분이 부두에 먼저 접근하게 되자 전진타력을 소멸시킬 목적으로 우현 선수 측에서 예인선 2척으로 선수부분을 당기도록 하였으나 예인선이 호남 사파이어호 가까이 위치하여 예인력을 발휘하지 못하고, 본선은 타력으로 계속 밀려 16시 10분경 원유 제 2부두 제8번 돌핀에 부착된 방현재 전반부와 접촉되면서 방현재를 지지하는 체인 고정용 U-볼트 및 돌핀 교각 모서리와 사파이어호의 좌현 2번 원유탱크가 접촉으로 인해 파공이 발생, 적재된 원유가 유출된 사고이다.

당시 호남 사파이어호 좌현 2번 탱크에는 아라비안 원유 22,470kl가 적재되어 있었으며 중력과 불활성가스의 압력으로 적재된 원유가 부두 돌핀 상단 약 1m 정도까지 분수처럼 치솟으면서 좌현 2번 탱크에 들어 있던 원유 중 1,402kl가 해상에 유출되어 여수해만으로 확산되면서 북쪽으로는 광양항 내 묘도 앞 해상까지 남쪽으로는 여수 반도해안을 따라 여수 신항~돌산도를 지나 방죽포까지 유막이 형성될 정도로 넓은 해역을 오염시켰다.

씨프린스 사고 이후 유일호, 호남사파이어호등 대형 오염사고가 연이어 발생되고 있으나 국가방제능력 부족으로 유출된 기름이 광범위하게 확산, 피해가 확대되고 있어 국가방제능력 확충이 시급한 국정과제로 대두되었다.

(6) 허베이스피리트 사고

2007년 12월 7일 07시경 태안군 원북면 신도 남서방 6마일 해상 (36-52.00N, 126-02.09E)에서 풍랑주의보가 발효되어 북서풍이 14~16m/s로 강하게 불고 파도가 3~4m로 높은 상태에서 무리한 운항으로 예인 중이던 크레인선(삼성1호)과 투묘 중이던 원유선 허베이스피리트호(G/T 146,848톤)가 충돌하면서 좌현 1,3,5번 화물탱크에 적재중인 원유 12,547kl가 유출된 국내 최대 오염사고가 발생했다. 다음날인 12월 8일에는 원북면 방갈리 학암포 해안에서 소원면 모항리에 이르는 약 17km 구간과, 12월 9일에는 원북면 방갈리에서 소원면 파도리에 이르는 약 40km구간, 12월 10일에는 이원면 내리 만대 해안까지 총 70km해안에 빠르게 오염이 확산되었다. 특히, 학암포에서 파도리 구

간 35km는 두꺼운 기름 층이 부착되었다.

이후 태안군 남면 몽산포, 청포대, 마검포, 안면읍 꽃지, 상삼 해안과 보령시 무창포, 독산, 용두포 해안에 기름덩어리가 유입됐다. 해안으로 유입되지 않은 일부 기름은 타르상태로 변해 해류를 따라 이동하면서 12월 15일에는 서천, 12월 17일에는 군산 말도 해상까지 남하했다. 사고 후 27일째인, 2008년 1월 2일에는 제주 추자도 해안과 31일째인, 2008년 1월 6일에는 사고해역에서 약 330km 떨어진 제주시 조천읍 다려도 해안까지 타르볼 유입이 확인됐다. 피해 지역 규모는 충남 서산 가로림만에서 태안군 안면읍 내파수도 연안 167km이르는 해안의 오염으로 충청남도 11개 읍·면 소재 473개소의 5,159ha 어장, 전라남도 소재 7,905ha 김 양식장과 14,356ha 마을어장 및 전라북도 소재 1,830ha 양식어장 피해를 입었다.

방제작업의 주도기관이 해양경찰청으로 일원화되고 이에 따른 국가방제기본계획과 지역방제실행계획이 있음에도 불구하고, 이 같은 대형 해양 오염 사고가 발생 했을 때에도 예상 및 예측의 방제활동이 아닌 사고 수습 방제활동이 되고 말았다.

2.4 침몰선 사고 현황 분석

(1) 침몰선박 현황

우리나라 연근해에서 2000년부터 2010년 까지 해양사고로 침몰한 선박은 총 653척이고 매년 60척 정도가 침몰되고 있으며, <표 2-4>을 통해 보면 최근 3년간 감소추세를 보이고 있다.

<표 2-4> 최근 10년간 침몰선박 현황

연도	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	총계
척수	75	89	77	60	67	61	51	67	32	42	32	653

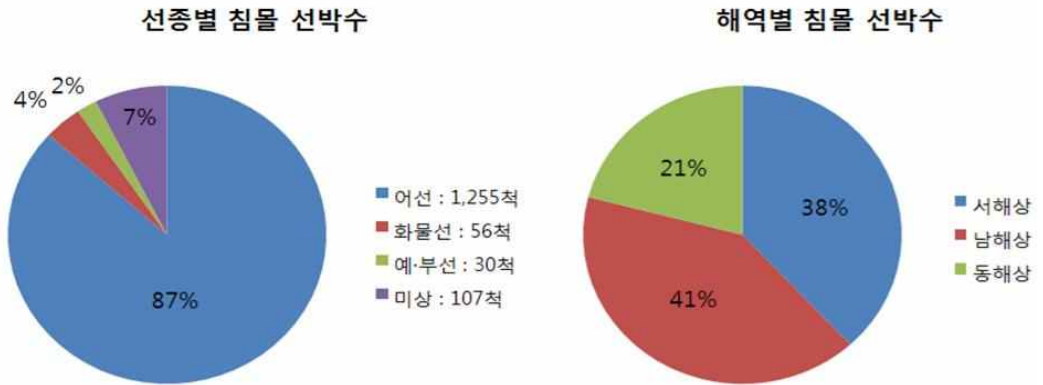
※자료 : 해양경찰청(2010년), 단 2010년 경우 8월까지임

(2) 해양사고척수 대비 침몰선박 현황

1983년부터 2004년 말까지 국내 연안에 침몰된 선박 1,979척 중 인양된 선박은 339척에 불과한 것으로 분석되었다.

침몰 선박은 선종별로 1,486척 중 어선이 1,255척으로 84.5%, 화물선이 56척, 예·부선이 30척으로 2.0% 및 선종 미상 선박이 107척으로 분석되었다. 침몰 선박은 해역별로 서해상이 567척으로 38.3%, 남해상이 608척으로 41.1% 및 동해상이 311척으로 20.6%를 차지하는 것으로 분석되었다. 특히, 동해 및 서해상에서의 침몰선은 어선이, 남해상에서의 침몰선은 화물선 및 유조선의 비율이 높은 것으로 분석되었다²⁾

2) 침몰선박 관리 시스템구축연구(한국해양연구원 2004)



<그림2-6> 선종별, 해역별 침몰 선박 현황(1983년~2004년)



제 3장 침몰선 잔존유 제거 작업 분석

3.1 국외 사례

(1) MV Asian Forrest 침몰사고

M/V ASIAN FORREST호는 2009년 7월 인도 뉴 망갈로르 항구의 입구 5마일에서 망간 광석을 선적하고 출항하던 중 침몰하였다. 수심 32m 지점에 항구 쪽을 향하여 좌현으로 60도 각도로 선체가 기울어진 상태로 위치하고 있었다. 항구에서 불과 5마일 떨어진 지점이라 2차 해양 오염이 발생할 수 있는 위험요소가 있는 상황이었다. 난파선의 위치와 조건을 조사하기 위해 잠수조사에서 탱크에 접근가능한 모든 부분을 검토하였다. 2010년 1월 2일, 인도 정부로부터 모든 작업 승인이 내려졌고, 유류 및 오염물질 제거작업을 시작하여 유류제거작업은 2010년 1월 21일에 완료되었다. 침몰된 선박으로부터 오염물질 및 연료유 B-C 250톤을 회수, 안전하게 처리되었다.



<그림 3-1> Asian Forest 호 침몰사고

(2) M/V ICE PRINCE 침몰사고

M/V ICE PRINCE호는 2007년 1월 5,535톤 목재를 싣고 스웨덴 UMEA 항에서 이집트 ALEXANDRIA항으로 항해 중 영국해협에서 악천후를 만나 선체동요에 의한 화물의 과도한 이동으로 인한 복원력 상실로 선체가 25도 기울어지게 되었다. 선미가 침수되면서 선체는 복원력을 완전히 상실하여 65m 깊이 수중으로 완전히 침몰하였다. 2007년 4월 10일부터 ROV 등을 사용하여 침몰선의 위치와 상황을 사전 조사하였으며, 사전 조사 자료를 바탕으로 실제 작업에는 무인으로 심해 작업이 가능하게 하는 ROV와 ROLS 시스템을 적용하였다. 심해의 빠른 유속으로 인해 작업은 유속이 낮아지는 시점인 조수가 변하는 약 1.5시간만 작업이 가능했던 관계로 잔존유 제거 작업이 오래 걸렸다. F.O 탱크 12개와 엔진실에서 오염원 전량 제거 및 Heavy fuel oil 160톤을 회수한 후 2007년 5월 6일 모든 작업이 완료 되었다.



<그림 3-2> Ice Prince 호 침몰 사고

(3) M/V Haven 호 침몰사고

VLCC 원유운반선인 MV HAVEN호는 1991년 선박 내 폭발로 이탈리아 제노바 연안 수심 80m 깊이에 침몰하였다. 제노바 시에서 주변의 굴홍합 서식지 및 해수욕장 보호를 목적으로 잔존유 제거 작업을 실시하였다. 잔존유 제거작업은 Haven호의 내부 공간을 진공상태로 만든 후, 핫 탭 천공 방법으로 탱크 내 유류를 제거하는 방법을 채택하였으며, 이 작업을 위하여 포화잠수 장비(MINI SAT 시스템)로 작업을 수행하였다. 잔존유 제거작업 후 총 88개의 구획에 유류가 존재하지 않음을 확인하였고, 침몰선의 화물유 탱크는 비어있는 것으로 확인하였고, 잔존유 Crude Oil 100m³ 을 회수하였다.



<그림 3-3> 선상폭발로 침몰한 Haven호

(4) M/V Selendang Ayu 호 사고

말레이시아 선적 화물선인 M/V SELENDANG AYU호는 2004년 주엔진 고장으로 인해 단전된 채 표류하다 Unalaska 섬 서부 연안에서 선체

중양부분이 절단되었다. 선내 잔존유 제거작업을 위하여 헬리콥터로 탱크컨테이너를 선박 갑판으로 이동 설치하고 선박의 각 격실에서 유류를 제거하는 작업을 시작하였다. 각 탱크 컨테이너에 2.5톤의 잔존유를 회수하여 다시 헬리콥터를 이용하여 연안으로 운송하는 방식으로 MDO 100톤과 Heavy fuel Oil 400톤을 회수하였다. 히팅 시스템을 설치가 어려운 관계로 Annular Injection Flange 시스템을 사용하였다. Annual Injection Flange System은 플랜지와 펌프용 호스에 소량의 물을 주입하여 Heavy fuel oil을 보다 원활하게 먼 거리로 제거할 수 있는 방법으로 특히 기온이 낮은 상황에서는 Heavy fuel oil의 밀도가 높아져 제거 시 호스와 마찰이 크게 생겨 제거에 어려움이 크기 때문에 유용한 기술이다.



<그림 3-4> Selendag ayu 호 침몰 사고

(5) M/V Ievoli Sun호 침몰 사고

MV IEVOLI SUN호는 1999년 11월 영국 알더니 섬의 연안에서 예인선의 예인 실패로 수심 90m 깊이로 침몰하였다. 본선에는 화물이 각각 Styrene 4,000톤, Methyl Ethyl Ketone(MEK) 1,000톤, Iso Propyl

Alcohol(IPA) 1,000톤이 실려 있었다. 잔존유 제거 작업은 처음으로 침몰선의 상태를 파악하기 위해 ROV를 통해 해저조사를 수행했다. 그 후 ROLS 시스템을 통해 오염물질 제거 작업은 오염을 발생시키지 않기 위해 핫탭 천공 공법이 각 탱크마다상단과 하단 두 위치에 수행되었다. 2001년 5월 22일 화물유 (Styrene) 4,000톤을 회수, 완료 되었고 며칠 후 Levoli Sun호의 B-C 제거 작업을 완료하였다.



<그림 3-5> Ievoli Sun 호 침몰사고

3.2 국내 사례

(1) 제1유일호 잔존유 제거작업

1995년 9월 21일 05시경 남형제도 서암초에 충돌 좌초된 유조선을 이안 및 예인 작업 중 12시경 침수 발생하여, 16시 20분경 34-54.54N, 128-58.27E 해상에서 수심 70m 지점에 완전히 침몰되었다. 1996년 10월 22일부터 11월 20일까지 29일간 침몰선 조사를 실시하였으며, 1998년 6월 25일부터 8월 29일까지 66일간 잔존유 회수작업을 실시하는 과정에서 작업의 지연을 포함한 사고사례가 발생되었다. 침몰선이 가라앉은 지역은 3knots에 이르는 강력한 표면해류가 발생하여 ROV와 ROLS의 실행과 조정이 어려웠을 뿐 아니라 작업 가능한 시간이 한정되어 있었다. 또한 해류는 파도와 해수표면간 차이가 2knots까지 다양하게 변화하였고, 이로 인하여 ROV와 ROLS의 조정이 더욱 어려워져 작업시간은 상당히 지연되었다. 침몰선 상태 확인을 위한 조사 중 ROV 장비분실 등 작업착수 준비과정 중 사고사례가 발생했다. 이는 수중환경에 대한 고찰과 수중환경 정보에 대한 충분한 사전정보 부재에 의한 대처 미흡이 주원인이었으며, 수중 작업에 대한 인식 부족이 간접적 요인으로 파악되었다. 1995년도에 침몰한 제1유일호의 작업은 1998년도에 침몰선 작업을 수행하여 수심 70m에서 잔존유 634톤을 회수하였다³⁾.

3) 우리나라 산업잠수의 현황과 발전방안 1999.6 김도현

(2) 침몰선 제3오성호 잔유 제거작업

제3오성호는 1997년 4월3일 침몰하여 1998년 9월1일에서 당해 11월 8일까지 약 69일간 잔존유 제거 작업을 실시하였다. 작업 기간 69일 중 기상악화로 대기일이 36일이며, 주요 침몰선이 가라앉은 지역은 3knots에 이르는 강력한 표현 해류가 발생하여 ROV와 ROLS의 실행과 조정이 어려웠을 뿐 아니라 작업 가능한 시간이 한정되어 있었다. 또한 해류는 파도와 해수표면의 사이가 2knots까지 다양하게 변화하였고, 이로 인하여 ROV와 ROLS의 조정이 더욱 어려워져 주요 장비유실 및 고장으로 12일이 소요되어, 결국 순수 작업수행일이 21일에 불과했다. 사전조사에 1,480톤 정도로 잔존유를 추정하였으나 실제 22.5톤 잔존유 회수에 그쳤다.

(3) 침몰선 경신호 잔존유 제거 작업

1988년 2월 24일 침몰 유조선 경신호는 사고 당시 P&I(선주책임상호보험)에 약 10억 원의 한도액으로 가입이 되어 있었으나, 당시에는 법률적으로 가입 의무가 없어 기타 다른 보험에는 가입되어 있지 않았다. 침몰 당시 방제비용은 약 20억 2,200만원이었으며, 이중에서 약 6억 2,200만원은 P&I보험에서 지급되었고 나머지 비용은 국가에서 임시로 지급했다. 그러나 사고 후 선주 회사 법인이 해체되어 국가가 구상권을 행사치 못하게 되었다. 23년이 경과하여 모든 구상권이 소멸했지만 여전히 바다 속에는 많은 양의 잔존유가 남아 있어 해양환경을 위협하는 상황이었다. 특히 사고해역 인근을 중심으로 소량의 기름이 계속 유출되어, 기름을 보았다는 제보와 건의가 잇따르고 있었다.

2006년 조사결과 침몰선 경신호 내부에 잔존유량이 374kl정도 보고되었고, 2003년에서 2009년까지 포항 인근해역인 침몰 현장 부근 기름 발견 횟수가 <표 3-1>을 살펴보면 연 평균 22.5회 정도로 계속적으로 보고 되었다.

<표 3-1> 경신호 침몰 사고 해역 기름 발견 횟수

년도	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
횟수	37	54	32	18	10	27	16

※자료 : 포항경찰서 예찰 결과

일련의 위험요소 및 선체의 부식으로 대형 오염사고 가능성이 높아짐에 따라 침몰된 유조선 경신호의 선체 내부에 있는 잔존유를 회수하여 오염원을 제거하는 이번 사업은 해양환경의 또 다른 재앙이 될 수도 있는 위험요소를 원칙적으로 제거함으로써, 대형 해양오염사고의 원인을 사전에 제거하고 기름 유출에 대한 지역 어민들의 불안감을 해소하고, 어장 등의 재산을 보호하는 데에 의의와 목적이 있었다.

그래서, 정부는 총 256억 원의 예산을 투입해 2011년 잔존유 이송작업을 시행하였다. 작업지점은 포항시 남구 대보면 대보등대 3.5마일로 해도 상 36-05.30N, 129-38.10E의 수심 98m의 해역에서 2010년 7월 24일부터 8월 7일까지 침몰선 최종조사를 실시하였다. 사전조사를 통해 선체 3D구현 및 손상 부위파악과 선체작업도면 작성과 선체 주변의 장애물 분포 현황과 량 산정과 잔존유 제거 작업을 위해 선체 외판 천공 위치 선정을 위해 기름 잔존량 실제측이 필요하고 기름유출 밀폐개소 상태 점검 조치 결과를 확인하였다. 침몰선 주변 환경의 조사는 천공부분의 확보와 잔존유 이송을 위한 장비의 성능 및 규모를 결정 하는데 활용 되었다. 2011년 6월 20일부터 7월 10일까지 잔존유 회수작업을 수행하였으며, 잔존유 868kl(기름량 634kl 및 유성 혼합물 234kl)을 회수하였다.

3.3 국내 침몰선 잔존유 제거 작업 비교 분석

국내에서 시행한 2차 해양 오염 리스크를 가진 유조선 제1유일호, 제3오성호 및 경신호를 대상으로 시행된 잔존유 제거 작업 3.1절에 대하여 상호 비교하였다. <표 3-2>은 사고 선박별의 제원과 선적 화물의 종류 및 적재량을 보여주는 것으로 제1유일호, 제3오성호 및 경신호 모두 적재화물은 B-C임을 알 수 있다. <표 3-3>는 침몰 위치에서의 해양 환경을 나타낸 표로써 제1유일호, 제3오성호 및 경신호 모두 수심 70m 이상의 심해에 침몰됨을 알 수 있다.

<표 3-2> 침몰선의 제원

제원	제1유일호	제3오성호	경신호
제작 연도	1980	1978	1970
길이	80.75m	70.34m	68m
높이	12.00m	10.50m	11.50m
깊이	6.10m	5.25m	5.75m
G/T	1,591ton	1,115ton	999ton
D/T	2,992ton	1,796ton	2,091ton
화물탱크수	Total 8(No. 1,2,3,4, P&S Tank)	Total 8(No. 1,2,3,4, P&S Tank)	Total 8(No. 1,2,3,4, P&S Tank)
화물	Bunker-C	Bunker-C	Bunker-C
적재량	2,870ton	1,614ton	2,560ton
선저 형태	Single bottom	Double bottom	Single bottom

<표 3-3>에서 보이는 바와 같이 침몰 위치에서의 해양 환경은 제1유일호와 제3오성호는 비슷한 환경이나 경신호는 수온도 4.9°로 낮고 조류 또한 다름을 살펴볼 수 있다.

<표 3-3> 침몰 위치에서의 해양 환경

특징	제1유일호	제3오성호	경신호
수온	12°~15°	12°~15°	4.9°
조류	3knots	3knots	0.01m/s~0.39m/s
해저 최대 시야	1m 미만	3m 미만	1m~10m
해저 저질	진흙	진흙	진흙
수심	78m	70m	98~100m

<표 3-4>는 침몰선내의 잔존유 특징으로 제1유일호와 제3오성호에 비해 경신호의 잔존유 비중이 낮고 사고 선박 내 잔존유는 모두 고점성과 유동점이 낮음을 알 수 있다.

<표 3-4> 침몰선 내 잔존유의 특징

특징	제1유일호	제3오성호	경신호
비중	15.4 (API gravity@60°F)	22.8 (API gravity@60°F)	0.99 SG (specific gravity)
유동점	5°C	6°C	4°C
점성	393cSt (50°C)	105.4cSt (50°C)	394cSt (50°C)
		1,756cSt (12°C)	

<표 3-5>는 침몰선 위치 및 상태에 대한 것으로, 침몰 사고 시점으로 부터 각각 제3오성호는 1년, 유일호는 3년 후, 경신호의 경우 20년이 지난 후이나 해당 침몰선의 당시 적재유와 화물유에 대한 회수 및 제거작업이 이루어졌다.

<표 3-5> 침몰선 위치 및 상태

	제1유일호	제3오성호	경신호
침몰 지점	34°54.972'N,128°5 8.446'E	34°36.300'N,128°3 4.986'E	36°05.30'N,129°38. 10'E
Bow direction	240°	355°	218°
침몰선 상태	우현 쪽으로 84°	좌현 쪽으로 3°	중경사로 8°
파 손	<ul style="list-style-type: none"> · No.1 T(P) · No.4 T(S) · Slop T · L.O tank 	<ul style="list-style-type: none"> · No.1 T(S) · No.2 T(S) · No.3 T(S) 	No.1 T(P&S)

상기 침몰선 3척의 작업환경의 공통점은 수심 70m 이상 위치에 침몰되어 있어 심해 작업이 요구되는 상황이었으므로, ROV, REMOTE OPERATED LOADING SYSTEM, NEEDLE EXTRACTION SYSTEM, 포화 잠수 시스템, 핫-탭 천공기법, 등을 적용하여 작업을 시행하였고, 이를 위해 첨단 해상 장비들이 필요했으며 잔존유 제거 작업 시행 전 침몰선 사전 조사를 통해 작업 환경을 검토하였다.

<표 3-6>의 작업일 세부분석에 대하여 분석하면 사전 조사와 검토를 통해 침몰선 잔존유 제거 작업을 국내 해양 기상 여건에 맞게 6월-7월에 수행하기 적기임을 알 수 있었으나, 제1유일호 작업은 그 기간 중 예상 기간을 훨씬 넘겨 1998년 6월에 착수해 8월까지 이루어졌다. 제1유일호 작업지연은 장비의 고장 및 해양 기상악화 등이 주원인으로 그 결과 현장 작업에 69일 소요되었다. 제3오성호에 대한 작업 수행은 비용 지급 주체인 IOPC FUND 측에서 연내 수행원칙에 의해 제1유일호의 작업종

료 후 실시된 관계로 3오성호 작업이 계절적으로 국내 해양 기상 여건이 불리한 시점인 1998년 9월에서 11월까지 수행하게 되었다. 또한 오성호 작업 동안 작업 지역에 직접적인 영향을 주는 Todd, Yanny, Zeb 세 번의 태풍이 같은 해양 기상악화, 장비고장 등의 영향으로 현장작업에 69일이 소요되었다. 두 작업 수행 139일 중 기상악화 58일, 장비고장 외 30일이 지연되었으며, 순작업일은 51일로 볼 수 있다. 이 작업 지연기간은 해상기상 날씨 원인이 총 작업 기간의 41%, 장비 고장 외 원인이 총 작업 기간의 22%에 해당하는 수치이다.

경신호 작업의 경우 그로부터 13년 후 해양 관련 기술의 발전과 관련 장비의 성능 개선 및 과학적인 해양 기상 데이터 및 예측 시뮬레이션 등 과거보다 많은 연구개발을 통해 경신호 잔존유 제거 사업은 해양 기상 환경 예측, 장비 개선 및 고장에 대한 차후책 방안 강구 등으로 사전 예상 작업 공기 60일보다 현저히 작업 기간 단축을 할 수 있었다.

단순히 기름 회수량 비교를 하면 제1유일호 내 638kl 회수 제거를 하는데 29일 소요되었으며 3오성호내 23kl 회수하는데 22일이 소요되었으며 경신호 868kl 회수 잔존유 제거에 21일이 소요되었다.

<표 3-6> 침몰선 작업일 세부 분석표

구분	제1유일호	제3오성호	경신호
잔존유 제거작업기간	1998.6.24-8.29	1998.9.1-11.8	2011.6.20-7.10
작업 중 중단일 및 사유	· 21일-기상악화 · 19일-장비문제	· 37일-기상악화 · 11일-장비문제	없음
순작업일 / 총작업일	29일 / 69일	22일 / 69일	21일 / 21일

이 같은 잔존유 제거 작업일 차이 부분은 작업 수행방법에 따라 다소 작업일이 차이가 있을 수 있으나 수행업체는 비용측면에서 임무 수행완료를 조속히 해야 하기 때문에 작업일 변화에 큰 영향을 미칠 수 없다.

잔존유 제거 작업방법에서 제1유일호는 ROV, REMOTE OPERATED LOADING SYSTEM을 이용해 선체 천공후 잔존유 제거 작업을 하였고 제3오성호는 ROV, REMOTE OPERATED LOADING SYSTEM NEEDLE EXTRACTION SYSTEM를 시행하였다. 경신호는 선체 부식정도에 따라 ROV, 포화 잠수 시스템을 통하여 보다 정확하게 작업 효율을 높이는 방법을 택하여 이와 함께 HOT-TAPPING SYSTEM , HEATING RECIRCULATING SYSTEM 등을 시행하였다.

위 3가지 비교 사례에서 볼 수 있듯이 침몰 잔존유 작업 시기는 원칙적으로 기상 예측으로 하여야 하나 제3오성호는 작업시기를 정한부분이 있어 기상예측에 대한 부분은 고려되지 않아 작업이 도중 37일이나 중단되었다. 제1유일호와 경신호의 경우 기상 예측을 통해 작업시기가 정해졌다. 제1유일호는 장기 기상 예측에 오차로 인해 작업 일수가 연장되었고, 경신호는 충분한 사전 조사에 의해 예측하고 검증됨에 따라 환경, 비용 리스크가 크게 감소 되었다.

제 4 장 침몰선 잔존유 회수 표준화

4.1 잔존유 회수 작업시 고려 사항

침몰선의 잔존유의 회수 작업은 주어진 환경과 상황을 정확하게 분석하고 발생 가능한 제반 사항을 가정하여 이에 대한 대비책을 수립함으로써 작업의 실효성과 완성도를 높일 수 있다. 이를 위해서 잔존유 회수 작업 시 고려해야 할 중요 사항으로서는 다음을 들 수 있다.

① 선박 관련 정보

- 선박 재원
- 화물창 배치
- 선박 구조
- 선체의 파손 상태 등

② 침몰 지점의 해양 환경

- 풍향, 풍속
- 조류, 해류
- 수온
- 해저 상태 등

③ 잔존유에 대한 정보

- 탱크별 잔존량
- 기름의 유종
- 성상 및 물리적 특성 등



- ④ 해상 작업 시기
 - 해상 기상 자료(중 · 장기)
- ⑤ 포괄적 검토를 통해 작업 방법을 결정
 - 무인/유인 작업
 - 예산, 비용
- ⑥ 작업 방법에 따른 장비 결정
 - 작업선 결정
 - 펌프 시스템
 - 히팅 시스템
 - 핫텡핑 시스템
- ⑦ 기름 유출 시 비상 방제 대책 수립
 - 기름의 부상
 - 유막의 이동
 - 민감 지역 접근 여부
 - 해상 · 해안 방제 실행 계획
 - 방제 자원 동원 및 배치
 - 방제 장비 선정

위의 고려 사항이 검토되면 회수 과정 중 작업 시행을 할 수 있으며 시행 중 발생 될 수 있는 기름 유출 시 비상 방제 대책 수립 시 기름 부상량, 잔존량 및 잔존유 상태를 파악하여야 한다. 또한 시간 경과에 따른 기름 변화를 살펴 수면 상·하 기름 이동을 경로화 하여 기름 이동을 예측한 뒤 해안이나 민감한 지역에 부착 되는 유출유들에 대한 방제 방법을 선택을 고려하여야 한다.

4.2 침몰선 잔존유 회수 작업의 표준화 모델 설계

4.1절에 제시되었던 고려사항을 경신호를 대상으로 각 항목별로 잔존유 회수 작업에 적용하기 위해 다음과 같은 모델링을 통해 시도하였다.

4.2.1 사전 조사

조사작업은 침몰선박 선체현황 및 주변 환경을 조사하고, 경신호 선체 내 잔존유량을 계측하여, 취득 자료를 취합·분석을 통한 잔존유 회수방법을 제안하는 것이다. 이 조사 작업의 첫 번째는 먼저 정확한 침몰선의 현황을 파악하는 일이다. 그리고 작업환경 사전조사를 통해 주변 환경(해수, 온도, 수심자료, 지질자료, 주변지형 등)을 파악하는 것이다. 또한 침몰선 선체에 제거가 필요한 장애물 등을 사전에 조사하는 작업도 반드시 선행되어야 하는 필수 작업이다.

(1) 선체 정밀 조사 방안

선체 침몰 자세 정보와 해저의 빨에 묻힌 정도를 파악하고 선체 손상 부위를 정확히 파악하고 기름 탱크 외의 유출 부위는 없는지도 확인하였다.

Multibeam echo sounder, Side scan sonar, 관측용 R.O.V 등의 장비를 사용 하고 포함 잠수(Saturation Diving) 시행하여 침몰선의 자세에 대한 정보 및 묻힌 정도를 파악하고 선체 3D 구현과 손상부위 파악 및 선체 도면 작성, 장애물 분포현황 및 량 산정 및 밀폐개소를 점검하였다.

(2) 선체 환경 조사 방법

선수부가 해저면에 묻혀있는 상태로서 선체 천공부위 확보를 위한 준설 방안을 수립하기 위해 선체 주변 환경조사를 실시하였다. Sub-bottom profiler(지층 탐사), ADCP(해저 유속 측정, Acoustic Doppler Current Profiler), CTD(수온·염분 측정, Conductivity Temp.Depth meter) 등의 장비를 사용하여 수심, 수온 및 해저 유속을 측정하고 침몰선 주변 해저 지질을 수중작업 동원 장비의 성능 및 규모를 결정하고 침몰선 주변 해저면 지질조사를 조사하였다.

(3) 침몰선 잔존유량 계측

잔존유 회수 대상 탱크를 선정하고 예상 작업 기간을 설계하기 위해서는 침몰선 내부에 기름이 얼마만큼 남아있는지 잔존량을 계측하는 조사는 필수적이었다. 따라서 전체 화물유 탱크 8개 및 연료유(F,O) 탱크 7개 중 4개 (No.2, 4양현)를 계측하고 각 기름 탱크 용량표 및 도면을 작성한다. 잔존유는 기름 탱크 용량표 및 도면 기름 경계층 측정 위치, 선체 기울임을 참조하여 산정하였다. (기름 경계층 표시한 다음, 측정값에 측정 위치, 선체기울임, 탱크용량 등의 요소를 반영하여 정확한 탱크별 잔존유량을 산정한다. 연료유 탱크 3개소는 기관실 내부에 위치하여 선체외부 계측불가)

어려운 부분에서는 잔존유량 산정이 불가할 경우 잔존량 추정 시 잔존량은 다음과 같이 추산 하였다. <표 4-2> 톤수로 본 일반적인 선박의 연료유 적재량⁴⁾으로 침몰선의 잔존 화물유 및 잔존 연료유에 유출량 산

4) 침몰선박 관리와 인양문제에 관한 정책보고서 / 최철국 [저]

출 및 해양오염사고 대응계획 수립의 일환으로 침몰선 제거 작업이 요구된다. 이에 10년간 침몰되어 방치된 선박의 연료유 적재량이 어느 정도 되는지 산정하여 보았다. 다만 연료유 산정에 있어서 선박의 엔진마력, 항해시간, 톤수에 따라 산정 값이 달라 질 수 있어 정확한 예측은 할 수 없다. 가장 기본적인 선박의 톤수를 바탕으로 연료유 적재량을 계산하여 계략적인 정도만 산정하였음을 밝힌다.

침몰선박의 연료유 적재량 계산은 해양경찰청에서 제출한 2000년부터 2010년 침몰선박의 톤수를 바탕으로 선박안전기술공단에서 제공한 선박 연료유 적재량을 대입하여 산출하였다. 침몰선박 652척의 잔존 연료유는 11,356kl(추정)로 추정되었다.

<표 4-1> 톤수로 본 일반적인 선박의 연료유 적재량

톤 급(톤)	연료유 적재량(kl)	톤 급(톤)	연료유 적재량(kl)
2~3	0.8	1,000	121
5	1.2	2,000	250
10	1.2	3,000	322
20	1.2	4,000	382
30	1.2	5,000	739
50	4.0	6,000	780
100	5.1	7,000	829
200	7.1	8,000	1,200
300	25.1	9,000	1,521
500	119	10,000	1,529

※ 자료 : 선박안전기술공단

4.2.2 잔존유 회수 방법

침몰선의 잔존유 회수 원리는 다음과 같다. 먼저 침몰선의 외부에서 유류저장탱크의 2개소(상, 하부)에 천공하고 밸브를 장착(Hot-Tapping)하고 상부 밸브에 펌프를 연결하여 하부의 체크밸브를 통해 해수를 유입시켜 일정 압력을 유지한 후 잔존유를 뽑아 올리는 방식이다. 이것은 포화 잠수(SATURATION DIVING)로 심해에서 유류저장탱크에 천공하고 펌프를 연결시키는 방법을 사용했다.

핫 탭핑 작업 절차로는

- ① 침몰선 상갑판을 덮고 있는 진흙과 침전물을 머드 바이터(Mud Biter)를 이용해 제거
- ② 천공(Hot-tap)시스템인 선박의 기름 탱크에서 오염원을 제거하기 위해 배의 선체 경계면을 피해 천공장비를 설치하고 펌핑시스템으로 오염물질을 저장탱크로 펌핑작업
 - ⓐ 천공 어댑터와 밸브를 드릴/탭 스톱퍼를 사용하여 바깥 부분에 설치
 - ⓑ 그 후 천공 밀링머신을 밸브의 상단에 연결
 - ⓒ 밀링헤드를 밸브를 통과해 밀어 넣은 후 탱크에 홀을 만듦
 - ⓓ 홀을 다 만든 후 밸브가 손상되기 전에 밀링머신을 제거
 - ⓔ 밸브를 닫고 천공 밀링머신을 제거
 - ⓕ 호스나 펌프를 밸브에 연결하여 오염원을 제거
- ③ 잔존유를 가열하는 1단계 히터와 가열된 기름을 재가열 하는 2단계 히터, 그리고 이를 해상작업기지선으로 뽑아 올리는 두 가지의 펌프 시스템을 이용
 - ⓐ 첫 번째 펌프 시스템은 Vogelsang i210의 펌프 시스템으로 맨홀

을 통해 맞춰진 소형 프레임에 의하여 오일이 회수

- ② 두 번째 펌프 시스템은 Vogelsang I 60으로 i210펌프와 유사하지만 크기와 오일 회수량이 다소 작다. 이 과정에서 재순환 가열 시스템의 원리는 열의 전도 현상을 응용
- ③ 일단 먼저 탱크 내의 잔존유를 두 단계의 히터를 거쳐 가열시킨 후 이 가열된 잔존유를 다시 탱크 내부로 주입하여 주변의 응고된 다른 잔존유를 가열된 기름으로 계속하여 서서히 가열
- ④ 이 원리를 통해 액체 상태에 가까운 형태로 바뀐 잔존유는 해상기지선으로 회수
- ④ 화물유 탱크에서 잔존유의 대부분을 회수한 후, 탱크를 가능한 깨끗하게 세정하기 위해 세척(Washing)작업
 - ① 첫 번째 세척작업은 화물유 탱크에서 이미 가열된 물로 세척이 실시
 - ② 두 번째와 세 번째 세척작업은 미리 60°C 이상으로 준비되어 있는 해상기지선 상단 고온수가 사용
 - ③ 세척하는 동안 사용될 물은 해상작업기지선 내에 저장되고, 해상작업기지선 선상에서 미리 가열된 물과 호스를 통해 퍼 올려진 물은 다시 화물유 탱크로 역류하지 않도록 Non return valve를 사용했으며, 가열된 물은 화물유 탱크 내부의 상층부에 도달하도록 함
 - ④ 미리 가열된 세척수는 탱크 내로 이동되고 탱크의 가장 높은 지점에 위치한 1단계 히터를 통해 탱크 밖으로 배출. 이 방법은 남아있는 탱크의 가장 높은 지점에 모여 있는 모든 기름을 탱크 밖으로 제거 할 수 있는 방법
 - ⑤ 배출되어 나온 물과 기름의 혼합물은 해상 작업기지 상의 유수분리탱크를 통해 각각 분리. 분리된 기름은 탱크에 저장되고 물은

재가열되어 다시 침물선으로 보내짐

- ⑥ 뽑아 올린 잔존유와 유성혼합물 회수된 물과 기름의 모든 유성 혼합물은 유수분리 탱크로 모아짐

4.2.3 침물선 잔존유 회수 모델

(1) 해양 기상 상태

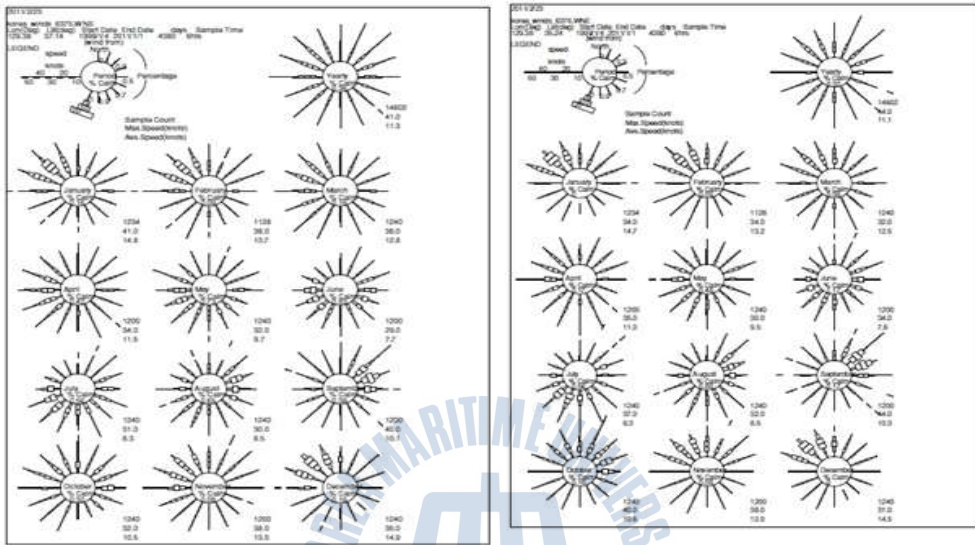
해양 조류와 바람, 수면 또는 수면 부근에서의 유출 후에, 기름은 바람과 조류의 작용에 의해서 수면을 가로 질러 확산되고 이동한다. 수면을 가로지르는 기름의 이동은 주로 바람에 의해서 밀려가게 된다. 바람의 효과는 풍속에 0.035를 곱해서 측정한다. 기름 유막의 이동을 예측하기 위해 바람에 의해 생성된 취송류 벡터의 가장 먼 이동을 측정하기 위해 취송류의 벡터와 조류를 합한다. 취송류와 조류속도는 각각의 상대 벡터에 따라 증폭되거나 상쇄 될 수 있다.

<표 4-2> 풍속과 관계된 취송류

풍속 (m/s)	취송류 (m/s)
19.40	0.68
38.80	1.36
58.20	2.04
77.60	2.72

동해 호미곶 주변의 조류와 바람에 대한 예비분석은 풍향과 풍력이 지역과 계절에 의해 변화한다는 것을 나타낸다. 동해의 바람에 대한 바람장미⁵⁾ 도표는 <그림 4-1>에 보여진다. 유출된 기름의 궤적예측과 민감한

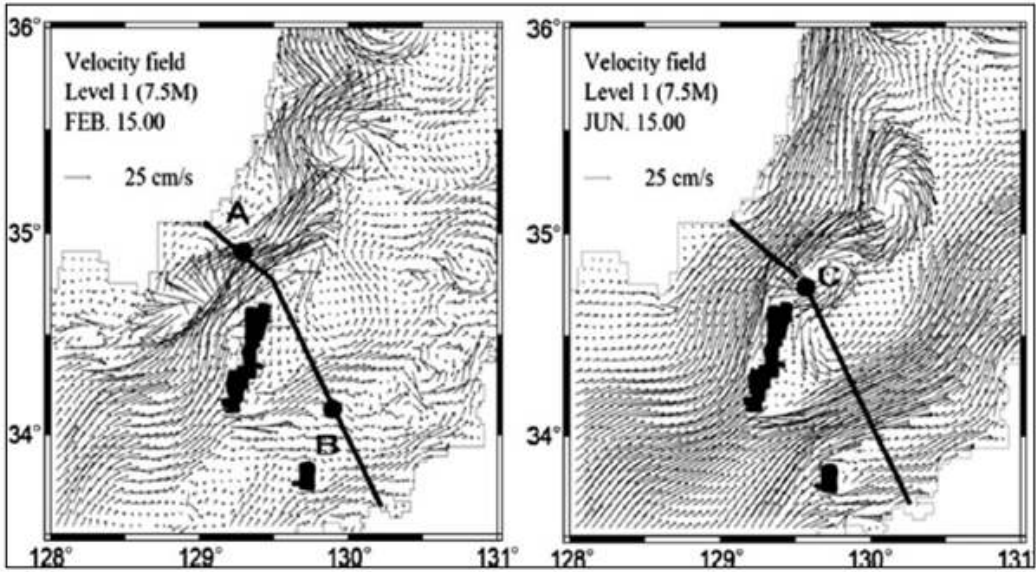
지역 보호를 위한 뽕설치를 포함한 방제계획에는 계획단계에서는 이들 바람에 대한 철저한 분석을 그리고, 작업 기간 동안에는 실시간으로 수행할 필요가 있을 것이다.



<그림 4-1> 동해지역 바람의 바람장미 도표

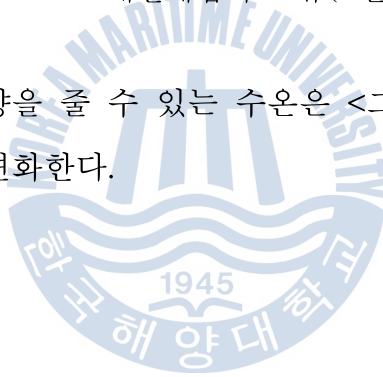
동해 대한 해협에서의 해양 조류는 <그림 4-2>에서 보이는 것과 같이 계절에 의해 변화한다. 일반적으로 이 지역은 북북 방향의 조류가 우세하나, 이 조류도 역시 변화한다.

- 5) 바람장미란 특정 지역에서 얻어진 바람의 속도와 방향을 나타내기 위해 기상학자들이 일반적으로 사용하는 도표를 말한다. 원형의 형태로 나타내는 풍배도는 30년 이상(또는 임의의 시간)의 기간 동안 특정 방향으로부터 불어오는 바람의 빈도를 보여준다. 살(spoke)의 길이는 단위시간당 특정방향으로부터 불어오는 바람의 빈도와 관계가 있다. 각각의 중심축을 가지는 원은 원의 바깥에 증가하는 빈도를 가지고 각각의 다른 빈도를 나타낸다.

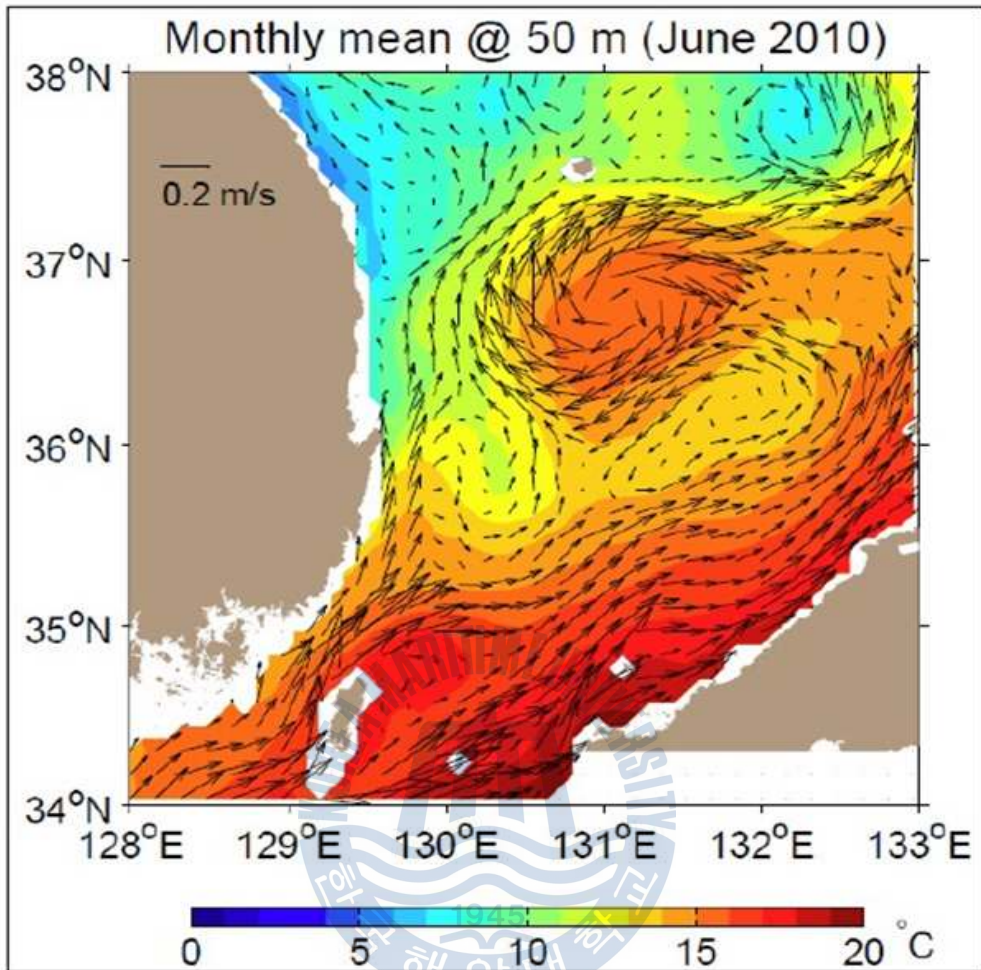


<그림 4-2> 대한해협을 조류(2월,6월)⁶⁾

기름의 특성에도 영향을 줄 수 있는 수온은 <그림 4-3>에서 보이는 것과 같이 지역에 따라 변화한다.



6) Yoon, J.H. And Y.J. Kim, Review on the seasonal variation of the surface circulation in the Japan/East Sea, Journal of Marine Systems, v. 78, p. 226-236



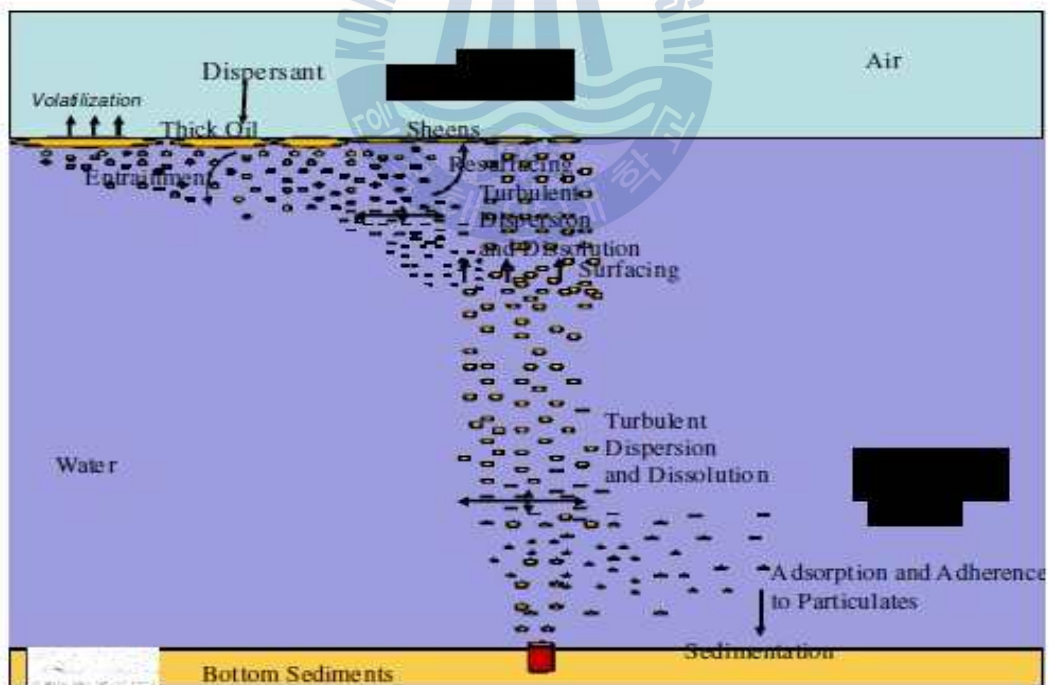
<그림 4-3> 동해 수심 50m에서의 월 평균 조류와 수온

(2) 기름 풍화 작용

경신호처럼 가라앉은 침몰선의 수면하의 출처로부터 방출되는 기름은 일반적으로 그렇듯이 수면 하 조류에 의해서 수면에 도달하기 이전에 이동될 수 있다. 기름 방출의 깊이와 기름의 특성, 특히 이 비중(밀도)과 형성된 유적의 크기에 따라서, 기름이 수면에 도달하는데 시간이 걸릴 수 있다. 유출된 기름은 표층에서 유막을 형성하고 바람과 파도, 해류에

의해 이동하고 <그림 4-4>와 같이 유막은 중력 때문에 기름 층을 형성하며 빨리 넓은 해역으로 퍼져 간다. 이때 기름에 함유된 많은 양의 탄화수소들은 휘발성이 있어 금방 증발하기 시작하는데 기름이 퍼지고 유막 층이 얇아지면 증발 속도가 증가하게 된다.

가벼운 휘발성 물질이 증발하게 되면 기름은 더욱 무거워져서 표층에 떠있기보다는 가라앉을 수 있다. 물의 난류성질에 의해 물과 기름이 유화되어 조그마하게 분해, 분산된다. 또 유화작용에 의해 아주 많은 조그마한 입자가 형성되어 해수에 녹지 않고 깊은 곳까지 침강하게 된다. 이 입자들은 비중이 비슷한 깊이에서 부유하고 오랜 기간 존속하며 해류에 의해 먼 곳까지 이동된다. 또 해저면에 고체입자가 붙어 침강한다. 기름의 이 과정을 <그림 4-4>에서 알 수 있다.



<그림 4-4> 수면 하로부터 유출된 기름의 풍화 과정

4개의 화물탱크에 적재되어 있는 침몰선에 적재된 기름의 대부분은 0.99로 측정된 비중과 60,771 동점도 계수를 가지는 매우 비중이 큰 벙커 C이다. 벙커 C는 (비중 1.025의) 해수보다 약간 가볍기 때문에 이 기름은 수심 98미터로부터 방출되어 수면 하에서는 특히 경유보다 매우 다른 반응을 보일 것이다. 이런 고밀도와 고점성의 기름은 침몰선으로부터 상대적으로 느리게 부상할 것이며, 이 기름은 수면하의 조류를 따라 원거리로 이동될 가능성이 있다.

기름이 침몰선으로부터 수직으로 부상하는 경우, 기름부상특성은 스트로크의 법칙에 따를 것이다.

$$V = (2gr^2)(\Delta d) / 9\mu$$

여기서 g = 중력가속도

R = 유적의 반지름

Δd = 물과 기름의 비중차

μ = 물의 점도

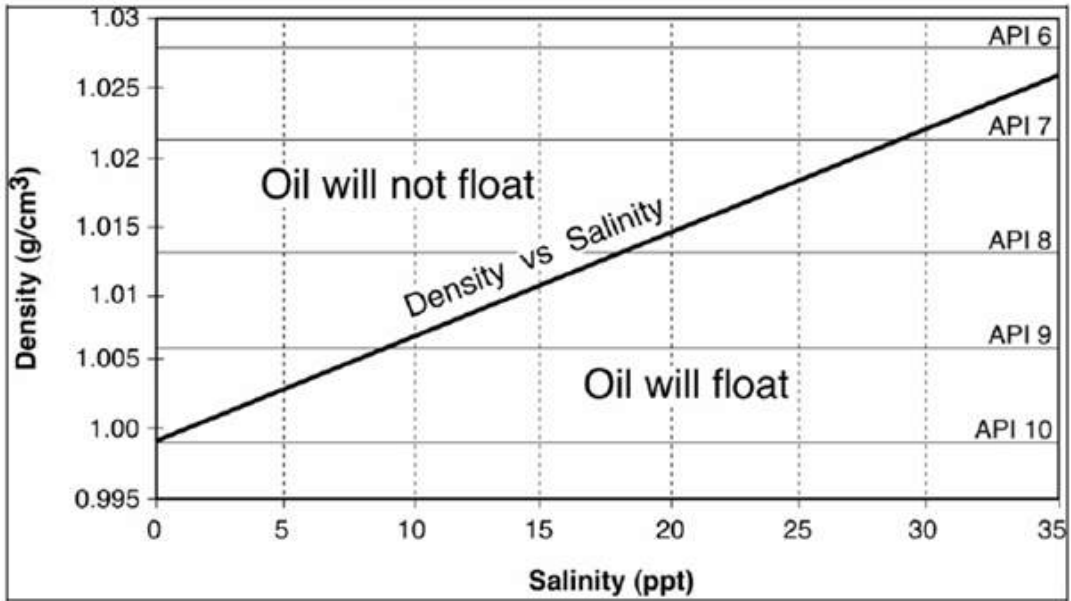
<표 4-3>은 침몰선 경선호로부터 물기둥을 통해서 98m을 부상하는 기름의 소요시간을 보여준다.

<표 4-3> 경신호로부터 유출된 기름의 수면부상 소요시간

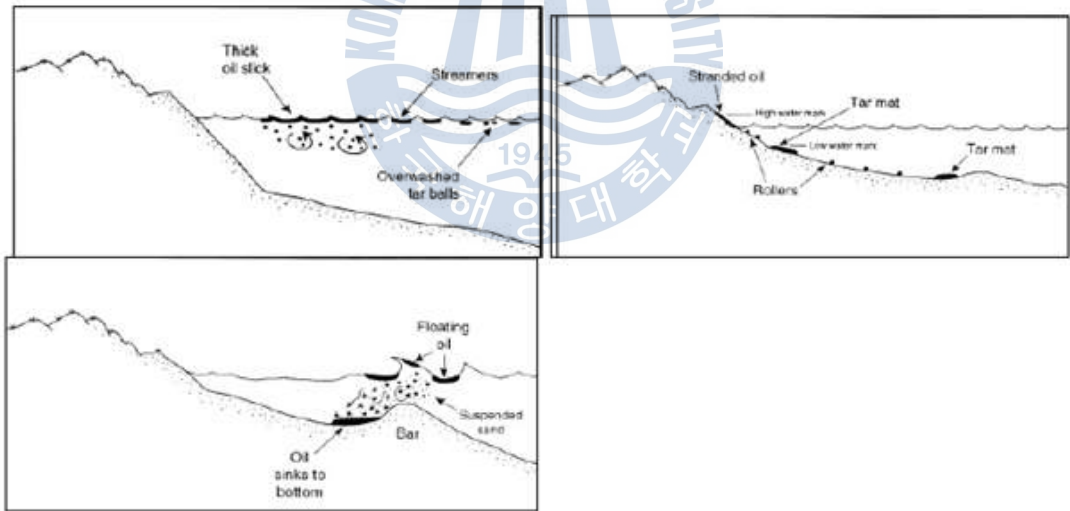
Droplet Size (microns) 유적 크기 (마크론)	Rise Time from 98 meters in depth to surface
300	4.3 hours
150	15 hours
60	90 hours (3.75 days)
30	15.5 days
15	61.5 days
5	537 days (1.5 years)

기름 부상이 매우 서서히 진행되는 상태에서, 특히 작은 유적의 경우, 기름은 장시간 동안 수면 하 조류에 영향을 받을 것이다. 기름 이동구간의 예측에는 수면 상 조류뿐 아니라 수면하의 유체역학에 관한 지식이 요구될 것이다.

경신호의 기름이 고점성이고 침몰선이 해안에 비교적 가깝다는 사실이다. 기름은 연안 지역에서 침전물과 결합될 것이고 그 다음 보통 기름에서 일어나는 것과 같이 해수보다 무거워져서 수면에 떠오르기보다는 하강을 야기할 것이다. 이것은 유출방제 작업에 있어 중대한 요소가 될 수 있다.



<그림 4-5> 해수 염분 대 기름 밀도(비중) 관계에 따른 기름 부상 여부



<그림 4-6> 기름 침강에 이르는 연안 오일샌드 상호작용⁷⁾

7) National Research Council. 1999. Spills of Nonfloating Oils: Risk and Response. NRC, Washington, DC. 74 pp.

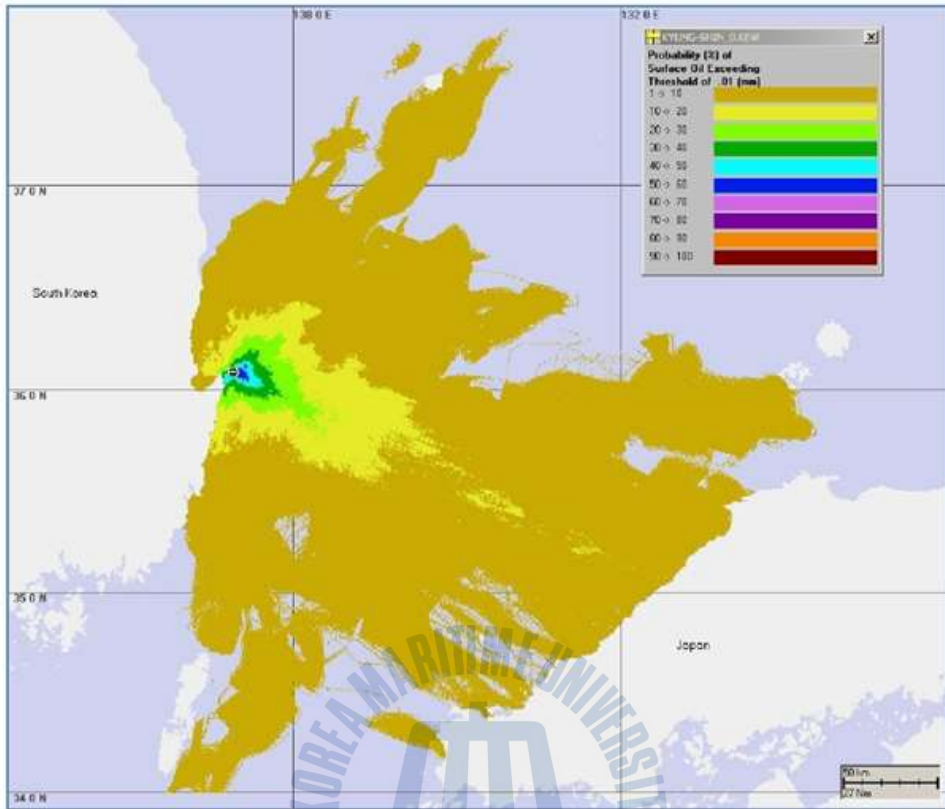
미시시피강과 푸켓사운드⁸⁾에서의 여러 형태의 유출의 경우 조류가 강할 경우 기름은물기둥 내에 정체되어 남아있을 수 있고 장거리를 이동할 수 있다. 만약 조류가 약할 경우 기름은 유출지역에 침강할 수 있다⁹⁾. <그림 4-6>에서 보여지는 것과 같이 연안지역에서 기름은 모래 및 수중의 기름 매트 형태의 다른 침전물과 섞일 수 있다.

(3) 유막의 이동

ASA의 SIMAP 모델은 침몰선 경신호의 수면 기름유출 모의실험에 사용되었다. 100개로 구성된 시나리오는 10년 이상의 바람자료의 값에서 임의 추출된 시작 자료를 가지고 운용된다. NCEP/NCAR 바람 자료¹⁰⁾는 모델링에 사용되었다. 추가의 개발에 필요한 지역을 위한 유체역학으로써 시나리오에는 바람만을 사용하였다.

0.01g/m²(수면상 광택(sheen)을 만드는 최소한의 두께)를 초과하는 수면 부양 기름의 확률을 보여주는 100개 모델의 추측통계학적인 결과는 <그림 4-7>에서 보인다.

-
- 8) Weems, L.H., I. Byron, D.W. Oge, J. O'Brien, and R. Lanier. 1997. Recovery of LAPIO from the bottom of the Lower Mississippi River. Proceedings of the 1997 International Oil Spill Conference: pp. 773 -- 776; Yaroch, G.N., and G.A. Reiter. 1989. The tank barge MCN-5: Lessons in salvage and response guidelines. Proceedings of the 1989 Oil Spill Conference: pp. 87 -- 90.
- 9) Michel, J. 2006. *Assessment and Recovery of Submerged Oil: Current State Analysis*. US Coast Guard Research & Development Center, Groton, Connecticut, USA. 34 pp. + appendices.
- 10) Kalnay et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470. < <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> >

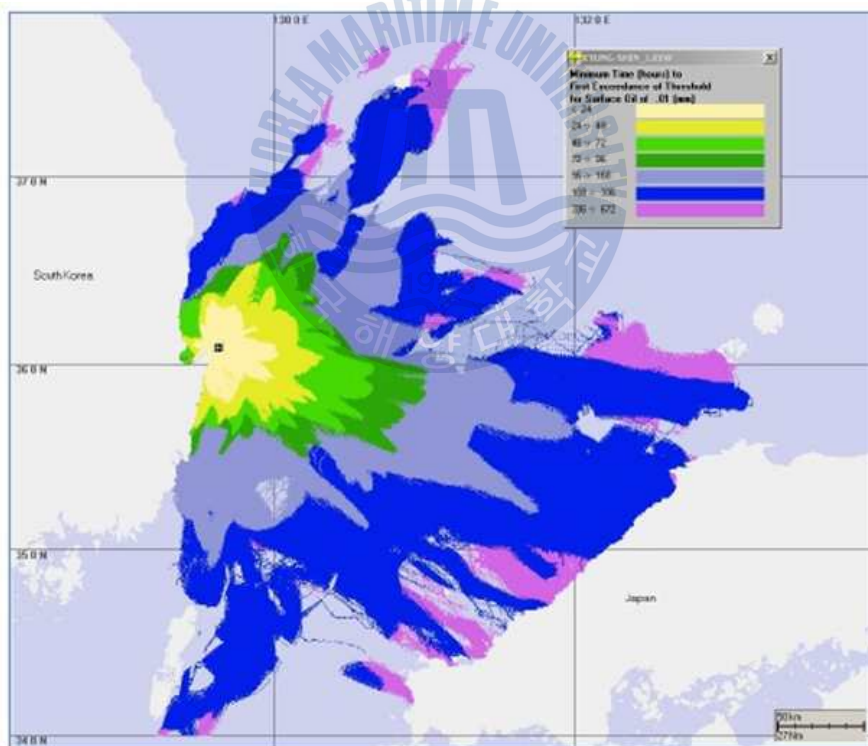


<그림 4-7> 0.01g/m²를 초과하는 수면부양기름의 확률

각 모델의 가정 개시일(start date)을 변경하면서, 모의 실험된 기름유출을 역사적으로 특정일에 발생된 특정 바람과 조류에 노출시킨다. 이 임의 추출된 100번의 개시일(start date)은 다른 바람과 조류를 기초로 가상유출 이후 21일간의 코스를 통한 100번의 다른 모의실험을 가능하게 한다. 이런 방법으로 개연성에 입각한 분석은 가능한 결과 값의 범위와 이들 결과 값과 연관된 확률을 계산을 계속적으로 수행하게 할 수 있다. 최소기준두께 또는 응집이 유출 후 시간경과마다 각 지역에서 초과할 확률. 그 모델은 기름의 항공상 적용범위와 상관없이 도표를 통한 두께보다 기름의 값이 큰 경우 수면기름 두께를 기록한다. 모델 도표의 각 지역에서 확률은 기준 초과 유출지역이 퍼센트로 계산된다.

<그림 4-7>은 100개 모델의 모의실험을 위하여 가상 방출 이후 21일 기간 동안의 바람과 조류에 따른 수면상 기름 확산의 다양성을 보여준다. 예상했듯이 기름이 수면을 덮는 확률이 가장 높은 곳은 침몰선 위치의 주변지역이다. 그러나 10% 정도의 경우, 기름은 일본 연안까지를 포함한 매우 여러 지역까지 도달할 것이다.

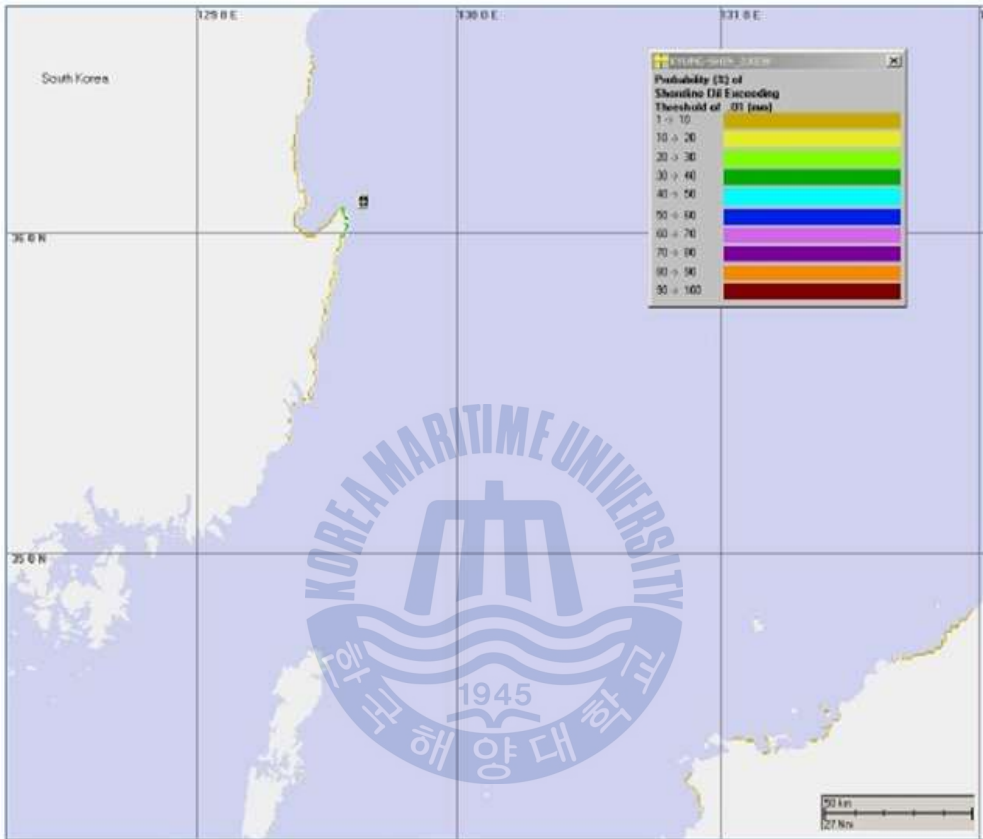
<그림 4-8>은 광택(sheen) 생성을 위한 최소한의 응집을 초과하기 위한 수면상 기름의 최소 소요시간(시간으로)을 보여준다. 침몰선 주변으로 광택(sheen) 또는 유막은 즉시 적어도 24시간 이내에 형성될 것이다. 파란색 또는 보라색으로 표시된 지역의 경우 기름이 그 두께에 도달하기 위해 각각 7일 내지 13일이 그리고 13일 내지 28일이 소요될 것이다.



<그림 4-8> 수면부양기름이 0.01g/m^2 를 초과하는데 필요한 최소시간¹¹⁾

11) Exposure indices and minimum thresholds (i.e., those less than values that might have an impact on any resource) used in the modeling was: surface slick or floating oil: $> 0.01\text{ g/m}^2$

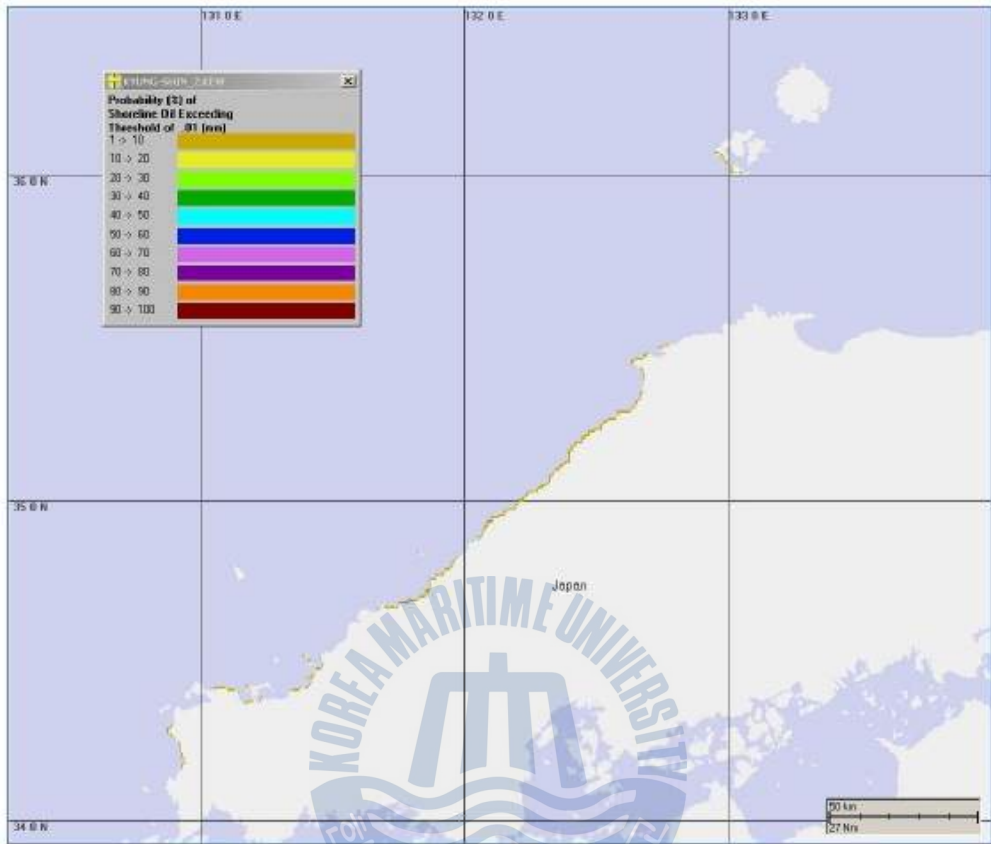
해안지역이 최소 0.1mm 두께의 기름이 덮일 수 있는 확률은 <그림 4-8>에서 대한민국과 일본을, <그림 4-9>에서 일본만을 보여준다.



<그림 4-9> 0.01g/m²를 초과하는 해안선 기름의 확률¹²⁾

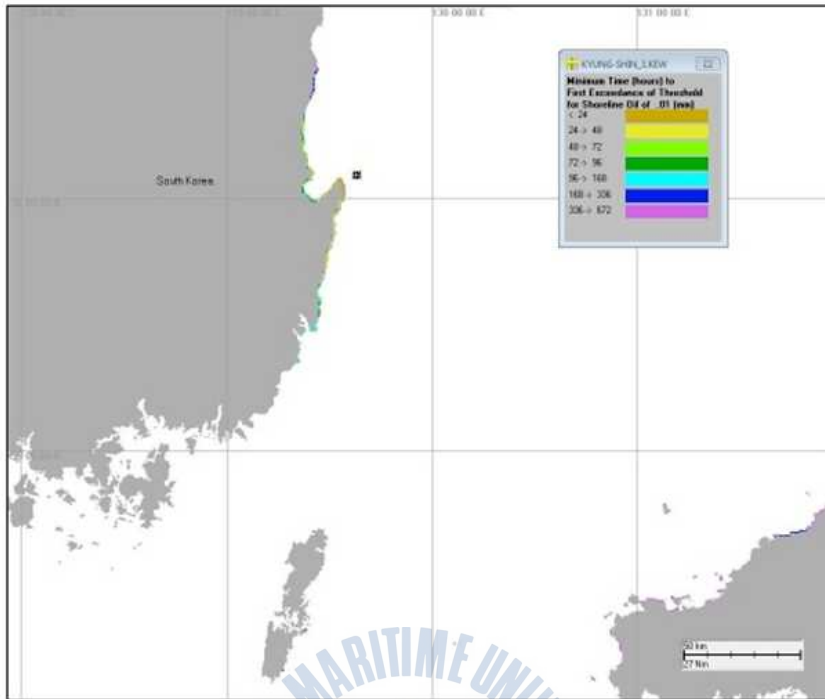
(average thickness > 0.01 micron).

- 12) Exposure indices and minimum thresholds (i.e., those less than values that might have an impact on any resource) used in the modeling was: shoreline: average mass loading over the shore segment (length of one grid cell, calculated as the cell diagonal length, times the typical width for the habitat type) > 0.01 g/m².

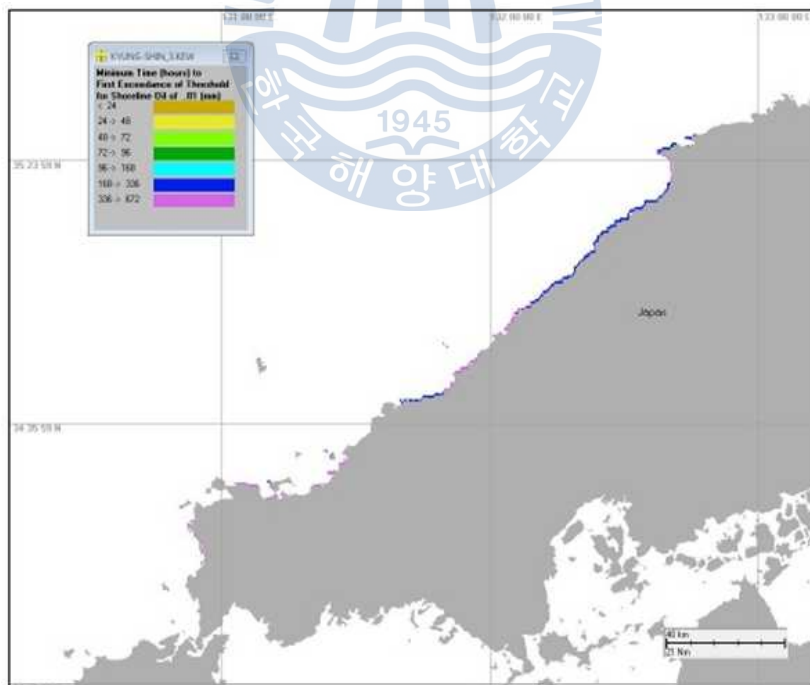


<그림 4-10> 일본 연안을 따라서 0.01g/m²를 초과하는 해안선 기름의 확률
(그림 14의 확대 영상)

이런 유출유에 의한 오염이 발생하는 최소시간을 <그림 4-9>와 <그림 4-12>에 보여준다. 침몰선 지역(호미곶)에 가장 가까운 해안지역의 유출유에 의한 오염은 기름의 수면 부상 이후 24시간 내지 48시간 이내에 발생할 것이다. 조금 더 원거리 지역은 며칠 동안은 유출유에 의한 오염은 일어나지 않을 것이다.



<그림 4-11> 유출유에 의한 해안선 오염의 최소 소요시간

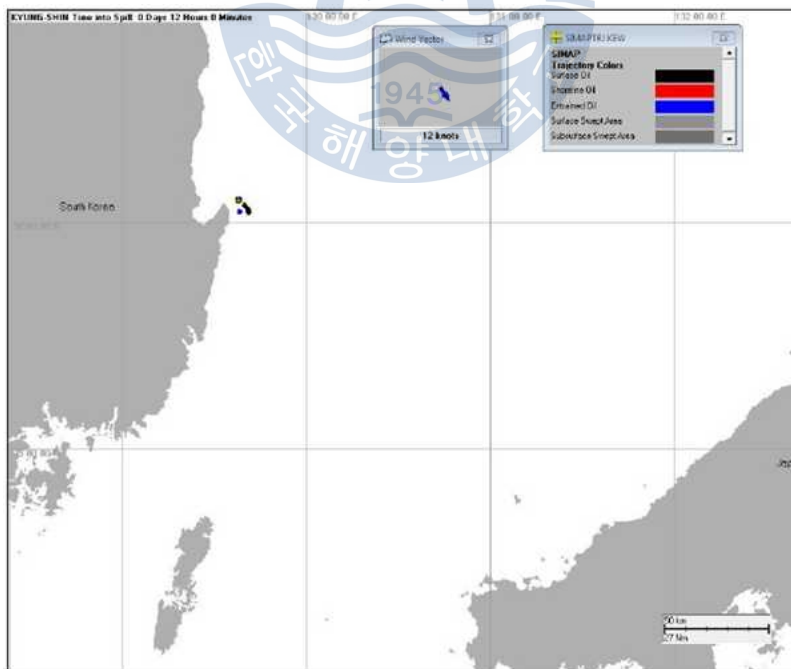


<그림 4-12> 유출유에 의한 일본연안 해안선 오염의 최소 소요시간

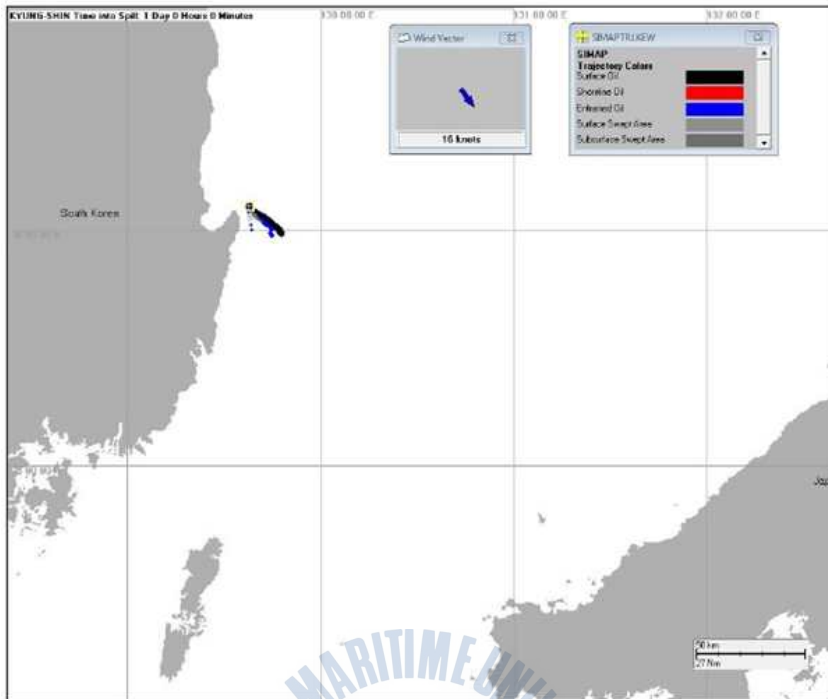
일본 해안에 도달하는 추측통계학적인 시나리오로부터 100개의 경우 중 하나 (북쪽으로부터 일반적인 바람이 부는 경우)는 SIMAP의 3D fate 모델을 통해 21일 간 기름의 궤적과 소멸을 실례로써 명확하게 하기 위해 모델을 만든다. 3D fate 시나리오를 위한 입력 값은 추측통계학적인 시나리오를 위한 값과 같고 벙커-C 연료유 500톤의 수면방출 2일을 가정한다.

수면의 기름을 포함한 기름의 궤적, 부유시켜 이동된 기름(부유시켜 이동된 기름은 파도의 작용으로 수면 아래의 물기둥 안에 있는 기름임)과 해안선의 기름은 시간에 따라서 <그림 4-13>부터 <그림 4-21>에 보여준다. 또한 그림은 21일 기간 동안 어떤 지역에서의 기름이 휩쓸거나 영향을 미친 수면과 수면 하 지역을 보여주는 점을 주목해야 한다.

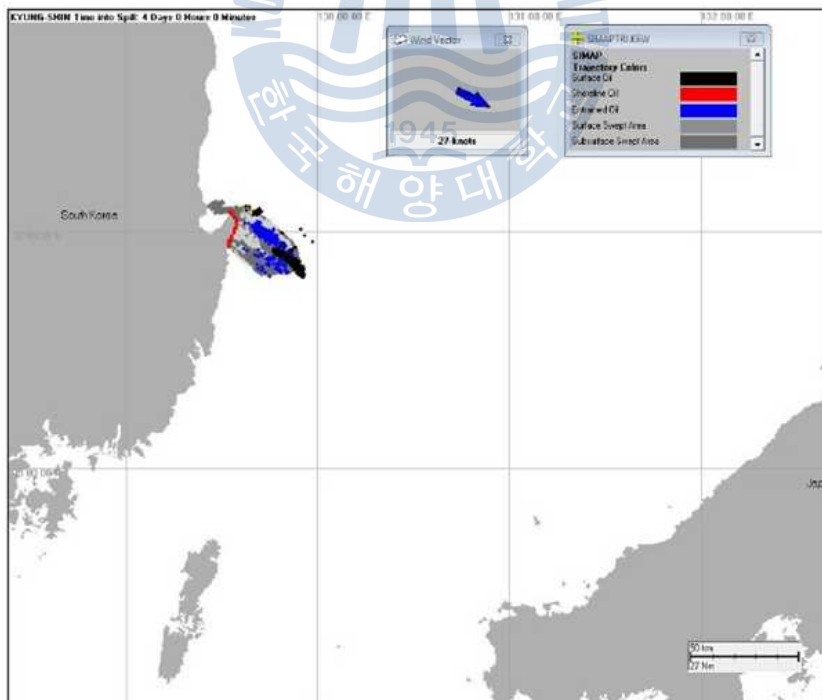
수면과 해안선의 노출된 지역의 기름 확산 모델의 궤적을 보여주는 이 시나리오의 모델 결과 값을 기록하여 이용할 수 있다.



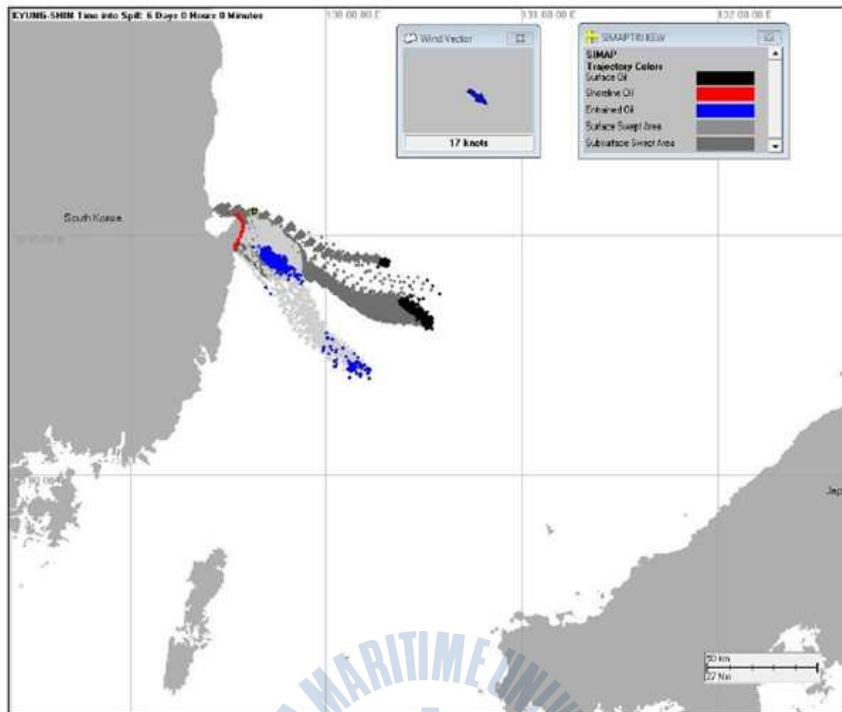
<그림 4-13> 기름유출 12시간 후 예측도



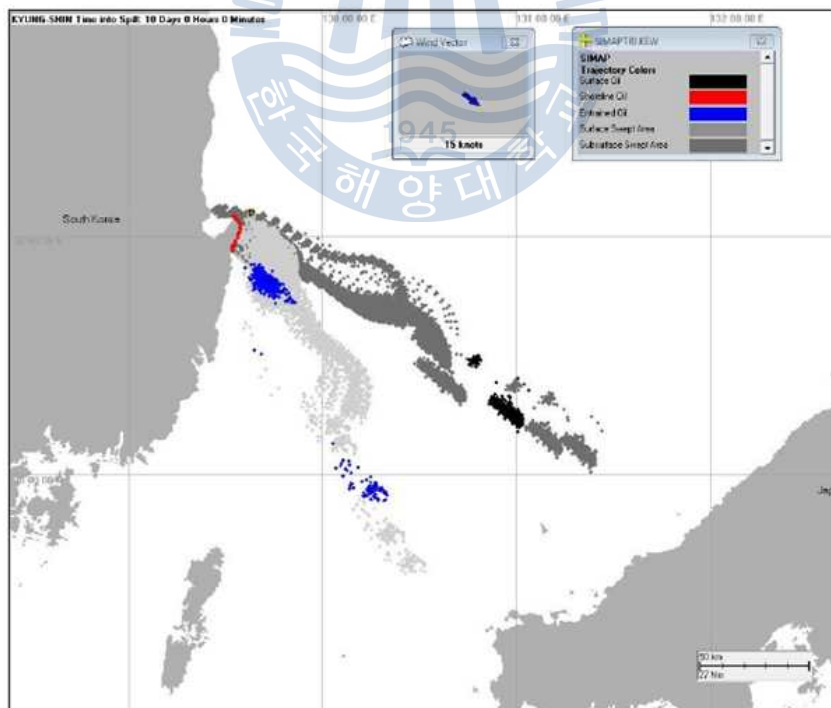
<그림 4-14> 기름유출 24시간 후 예측도



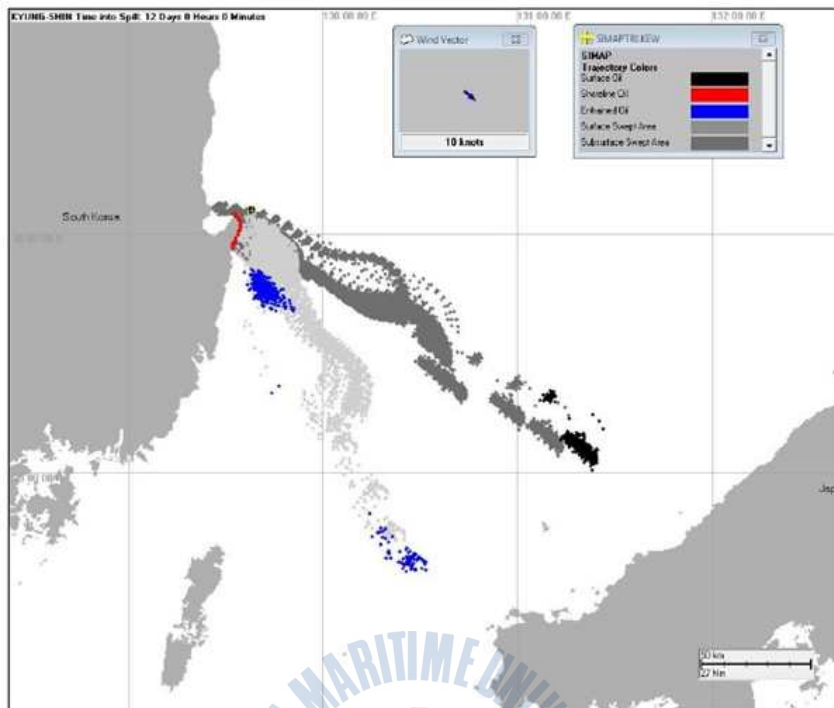
<그림 4-15> 기름유출 4일 후 예측도



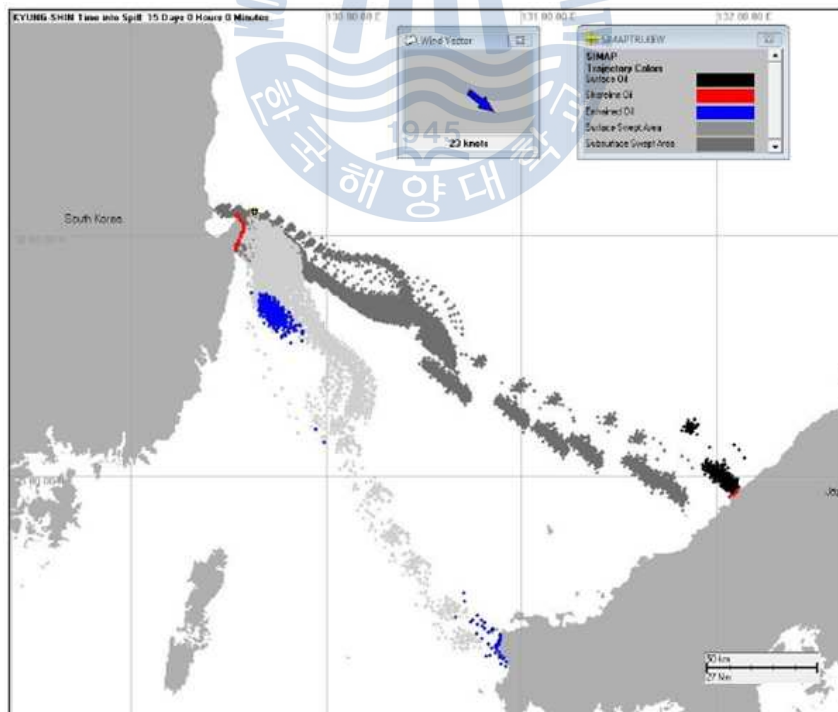
<그림 4-16> 기름유출 6일 후 예측도



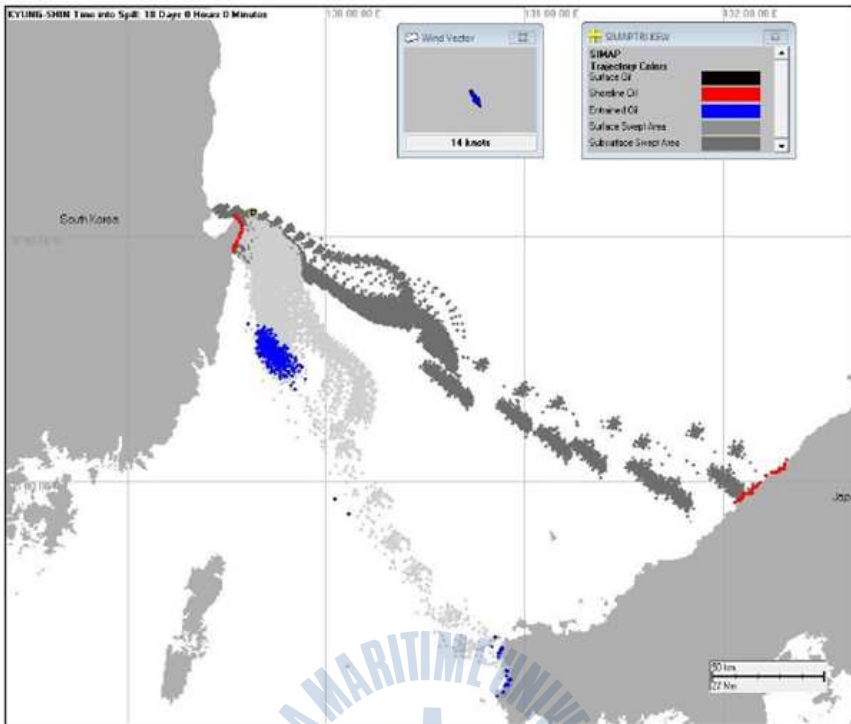
<그림 4-17> 기름유출 10일 후 예측도



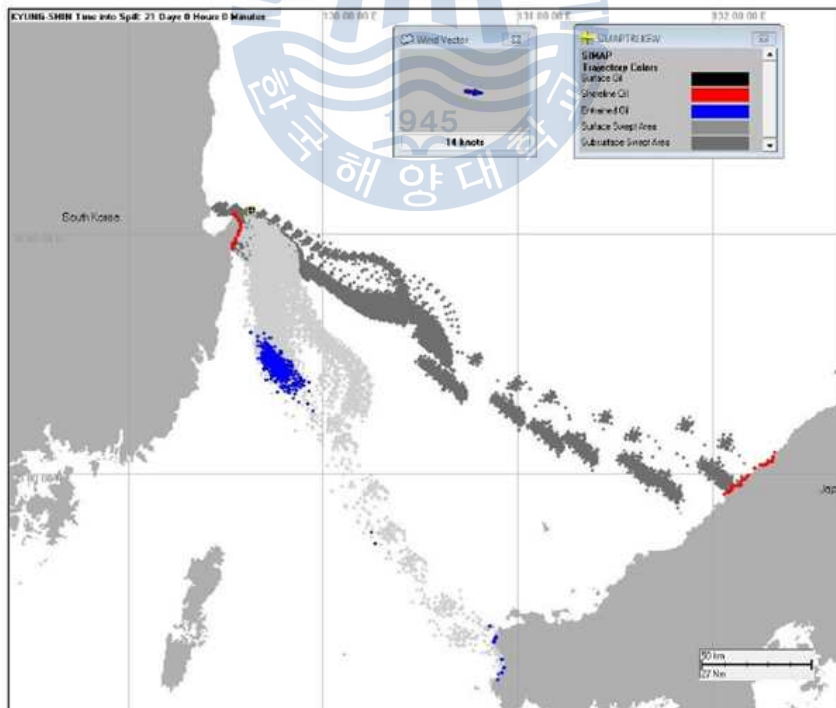
<그림 4-18> 기름유출 12일 후 예측도



<그림 4-19> 기름유출 15일 후 예측도



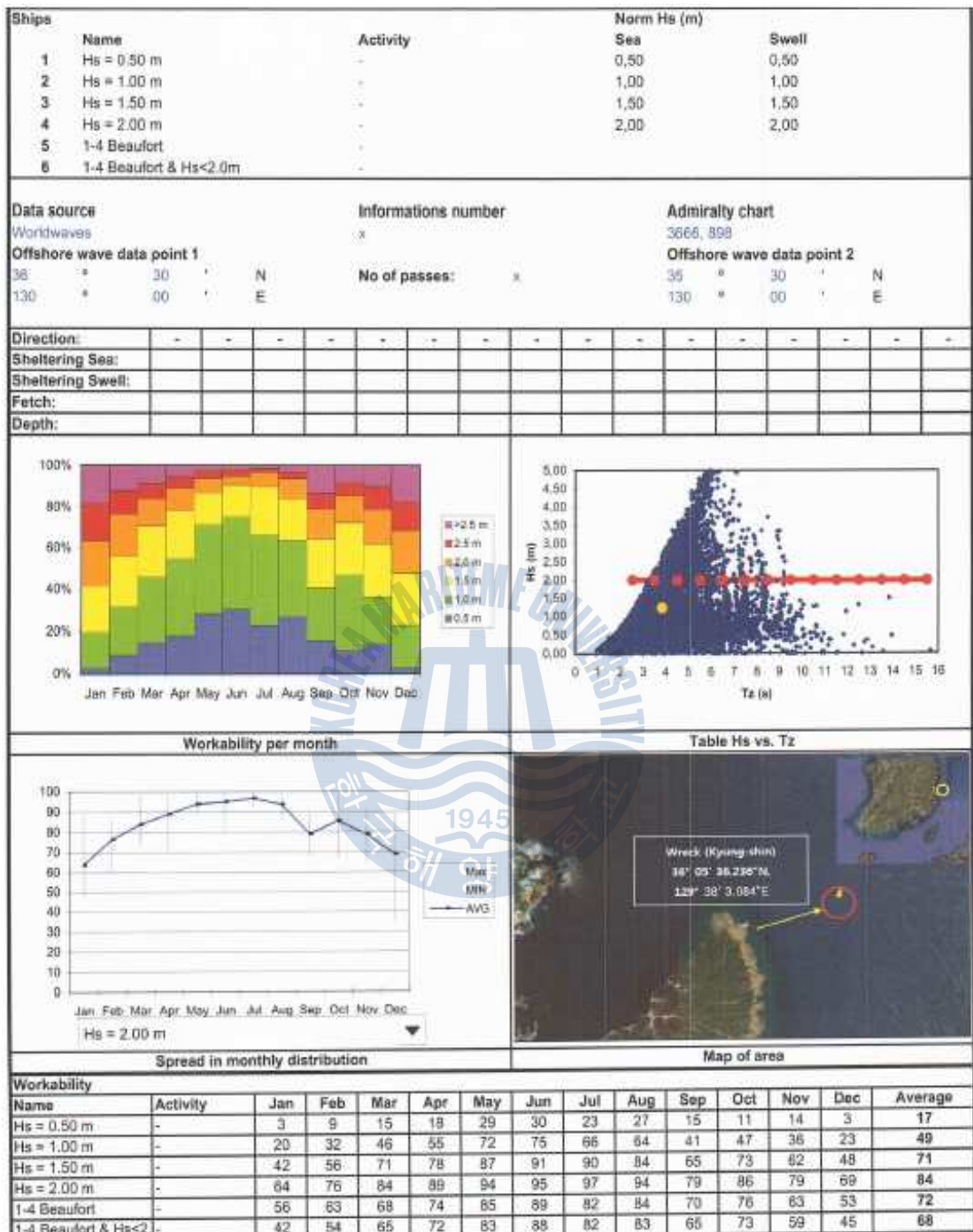
<그림 4-20> 기름유출 18일 후 예측도



<그림 4-21> 기름유출 21일 후 예측도

(4) 작업 가능 시기

해상 기상 자료를 통한 작업 시기 선정이 이루어졌다. <그림 4-22>는 월별 작업 가능 추정 모델은 침몰지역의 WORLD WAVE(2008년 8월)&SWAN 40.51 데이터를 이용하였고, WINDROSE, WAVEROSE, 태풍 TRACKMAP, 포항 기후표, 조력도의 추가 데이터로 산출표이다. 화암추 등대와 장기곶 사이에 여름철에 조류가 0.5-1노트로 가장 세다. 이 데이터는 1997년에서 2006년 동안으로 월별 데이터를 사용하여 이를 통해 5월 6월 7월에 침몰선 잔존유 회수작업에 해상 기후 환경이 가장 적합할 시기로 선정되었다. 이번 경신호잔존유제거사업은 작업이 해상과 수중에서 이루어지는 만큼 사업 수행 시기가 매우 중요한 사항이었다. 따라서 해상기상조사 작업을 전문 기관에 의뢰하여 성공적인 사업 수행을 도모하고자 했다. 해상기상조사 작업은 최근 10년간의 기상·해양환경을 조사·분석하고, 이를 바탕으로 최적의 연속 작업 기간을 도출했다. 해상기상조사작업은 2010년 1월 26일부터 2월 16일까지 수행되었으며 성과물의 검토를 거쳐 2월 24일 최종 확정되었다. 포항지역의 해상 기상은 호미곶등대와 포항부이 이렇게 두 곳에서 측정되고 있었다. 경신호 침몰지점에서 가까운 호미곶등대 기상자료를 주된 분석 자료로 활용했고, 침몰지점에서 33km 떨어진 포항부이에서의 기상자료는 참고적으로 활용했다. 해상기상조사 작업은 날씨, 기온, 풍향, 풍속 등의 기상환경 요소와 해상상태, 바람상태, 해류유속, 해류유향, 수온 등의 해양환경 요소를 조사 분석하여 경신호 잔존유제거작업이 가장 양호한 기간(연속된 3개월)을 도출했다.



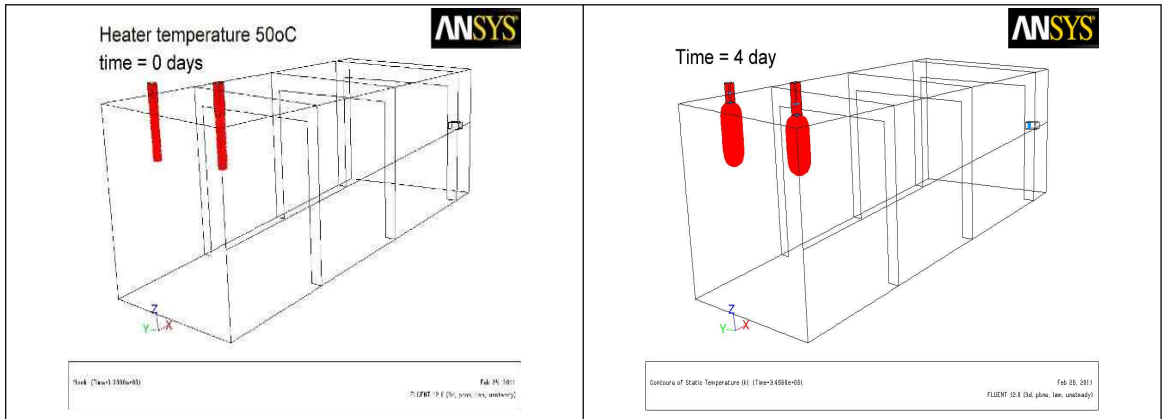
<그림 4-22> 월별 작업 가능 추정 모델

(5) 잔존유 히팅 프로세서 시뮬레이션

대상지역인 포항의 조류, 해류, 파랑 및 기상자료 등의 물리적 특성을 분석했으며, 수심 100m에 위치한 잔존유에 열을 가함에 따른 시간적 성상의 변화를 통하여 최적의 이적 시간을 산출하는데 모델링 및 검증과정을 거친 후 현장작업 적용을 하였다.

2010년 7월 수행된 침몰선 경신호 조사 과정에서 침몰선으로부터 화물유 샘플을 채취하였다. 잔존유의 온도는 수온의 온도와 같은 4°C 일 것으로 측정되었다. 잔존유의 유동점이 4°C 인 것을 확인하였고, 잔존유의 대부분이 고체 상태이며, 화물유의 펌핑작업이 가능하도록 하기 위해서는 히팅작업이 필요하였다.

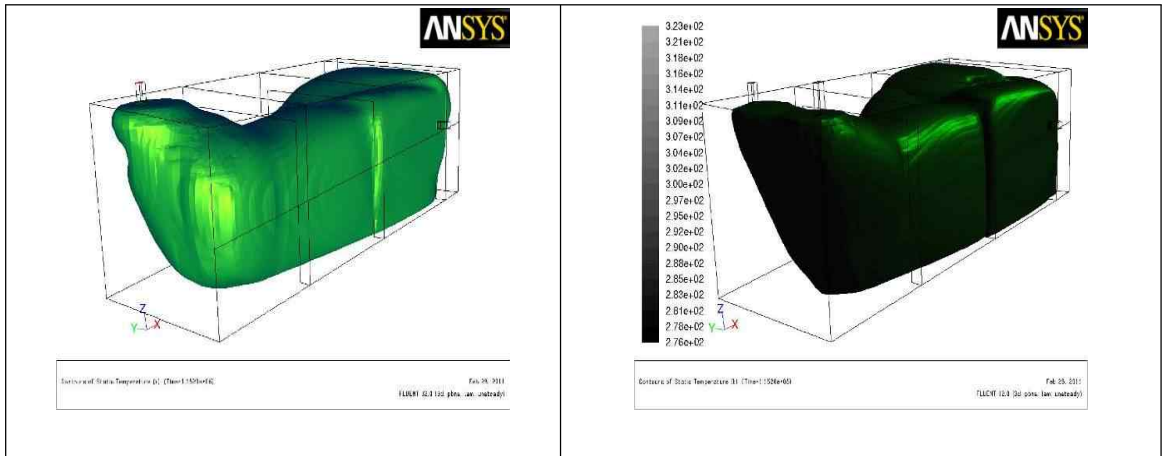
경신호로부터 기름을 제거하기 위해서 샘플 채취된 기름의 특성을 기본으로 하여 유체 흐름이 있는 상태에서의 펌프용량 조사하였으며, 적절한 히팅 과정을 배제하고는 유체 흐름에 제약이 있다는 점을 발견하였고 히팅작업에 유동과 흐름의 적용을 추가한 최적의 방안을 찾을 필요가 있음을 보여준다. 재순환 과정이 없는 잔존유 제거는 불가능하다고 판단되었다. 네덜란드 독립 연구기관인 TNO와 연계하여 경신호 화물탱크의 히팅 시뮬레이션에 관한 포괄적인 CFD(계산유체역학) 연구를 수행하였다.



<그림 4-23> 경신호 탱크 내 기름 히팅 과정 시뮬레이션
(순환되지 않는 상태)

순환이 없는 상태에서 상기 좌측 그림<4-23>은 경신호 3번 화물탱크에 1대당 86kW의 용량을 가진 열교환기를 적용하여 히팅작업 시작 전 효과를 도식화한 것이다. 붉은 부분이 히터와 히팅된 기름을 표시한 것이다. 이 작업 단계에서 화물탱크 내부의 모든 기름은 대기온도와 동일한 온도 (3° C) 이다.

상기 우측 <그림 4-23>은 경신호 3번 화물탱크에 1대당 86kW의 용량을 가진 열교환기를 적용한 히팅작업 4일째 효과를 도식화한 것이다. 붉은 부분이 히팅된 기름을 표시한 것이다. 히팅작업 4일 후 대략 2.5 m³의 기름이 펌핑 가능한 상태로 변환되었다.



<그림 4-24> 경신호 탱크 내 기름 히팅 과정 시뮬레이션¹³⁾ (재순환 상태)

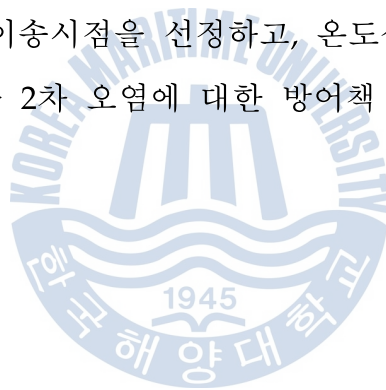
열교환기를 이용한 재순환 상태 일 경우 상기 그림은 용량 86kW의 1단계 열교환기 1대와 용량 35kW의 2단계 히터 1대를 이용한 순환과 시간당 12m³ 용량의 재순환 시스템을 적용한 효과를 도식화한 것이다. 구름같이 보이는 녹색부분이 3번 좌현 화물탱크 내 히팅된 기름을 표시한 것이다. 32시간 이후 히팅된 기름의 총량이 재순환을 적용하지 않은 시나리오에 비해 눈에 띄게 증가하였으며, 3번 좌현 화물탱크 내 기름의 약 60%, 175 m³의 기름이 펌핑 가능한 상태로 변환되었다 상기 그림은 용량 86kW의 1단계 열교환기 1대와 용량 350kW의 2단계 히터 2대를 이용한 순환과 시간당 12 m³ 용량의 재순환 시스템을 적용한 효과를 도식화한 것이다. 32시간 이후 탱크 내 기름의 약 75%, 220 m³가 히팅되었다 해저로부터의 기름이송 과정 중 배출율은 철저히 조사되었으며, 펌프에 7bar의 압력이 걸리는 펌프를 기준으로 배출율은 대략 시간당 27 m³로 확인되었다. 재순환 과정 중 기름이 25 °C 이상으로 히팅되면 상당

13) Simulation of oil heating process for Kyung Shin tank COT 3(S) conducted by NO using ANSYS FLUENT CFD package. Recirculation: No. 참조 simulation of oil heating process using ansys fluent cfd package.

량의 기름제거가 가능하다. 해저로부터 기름을 이송하기 위해서는 용적 펌프를 이용하며, 기름을 펌핑 하는데 있어 12시간 내지 18시간이 소요 되는 것으로 계산된다.

<그림 4-23>은 2010년 6월에서 8월에 경신호 침몰선 사전 조사시 샘플링한 잔존 기름을 토대로 3D 히팅 프로세스 시뮬레이션을 구현함으로써 히터 1개, 히터2개를 경신호 3번 화물 탱크의 기름 온도 50도까지 가열해 히팅된 기름을 재순환 전재로 시간별 1시간에서 최고 32시간까지 히팅으로 기름의 유동점 및 팽창으로 이송의 최적 시점을 예측하고 시행하고 분석함으로써 효율적 작업시행과 리스크 관리 자료로 활용 되었다.

시뮬레이션을 통하여 탱크 내 기름의 온도와 시간에 흐름에 따른 정상 변화를 고려하여 최적이송시점을 선정하고, 온도상승에 따른 부피팽창에 의하여 발생할 수 있는 2차 오염에 대한 방어책 구축에 큰 영향과 자료를 제공한다.



4.3 잔존유 회수의 표준화 모델

제1유일호, 제3오성호 잔존유 회수 작업에 대한 비용지급부분에서의 비용지급주체가 IOPC측이므로 이에 따른 4.2절과 같은 고려사항에 대한 사전 조사 없이 단지 작업의 합리성과 적합성만을 기준으로 한 방면 경신호 잔존유 회수 작업은 우리나라 정부 예산배정으로 체계적이고 효율적으로 모델링 적용으로 고려 사항에 대한 모델을 실시하여 작업 수행함으로써 환경리스크를 관리하였다

3.3절에서 잔존유 회수 작업을 실시하였던 세 선박에 대한 상호 비교 분석에서 알 수 있듯이 경신호의 경우 4.2절에서 적용한 것과 같은 모델링을 실시함으로써 최단 시간에 작업이 완료 되었다.

이에 따라 경신호 잔존유 제거작업의 적용한 적용모델을 통해 다음과 같은 잔존유 표준화 모델을 개발하였다(<그림 4-25>).

- (1) 침몰사고가 발생하면 우선적으로 침몰선의 제원 및 선체구조, 파손정도, 적재유 유종 및 적재량 등을 조사하고 또한 기름 유출 가능성과 민감지역 오염 가능성을 평가하여 잔존유 회수 여부를 결정한다. 이 때 선주, P&I 클럽, IOPC 펀드, 정부 책임기관 및 유관기관, 구난전문업체, 사고지역 지역주민 등 이해당사자와 협의하여 회수작업 여부가 결정된다.
- (2) 일단 잔존유 회수작업이 결정되면 적절한 작업시기 등을 정하기 위하여 침몰지점의 증장기 바람자료, 조류 및 해류, 수온, 해저저질, 수심 등의 자료를 수집하여 분석한다.
- (3) 무인 및(또는) 유인작업, 잔존유 물리적 특성 등을 고려하여 작업시간을 단축하고 안전하고 효율적·경제적인 작업방법을 선택한다. 이 때 작업에 소요될 예산 및 비용 측면도 고려되어야 한다.
- (4) 작업방법 선택과 함께 작업선에 대한 결정, 핫탭핑시스템, 히팅시스템

및 펌핑시스템에 필요한 적정장비를 결정한다.

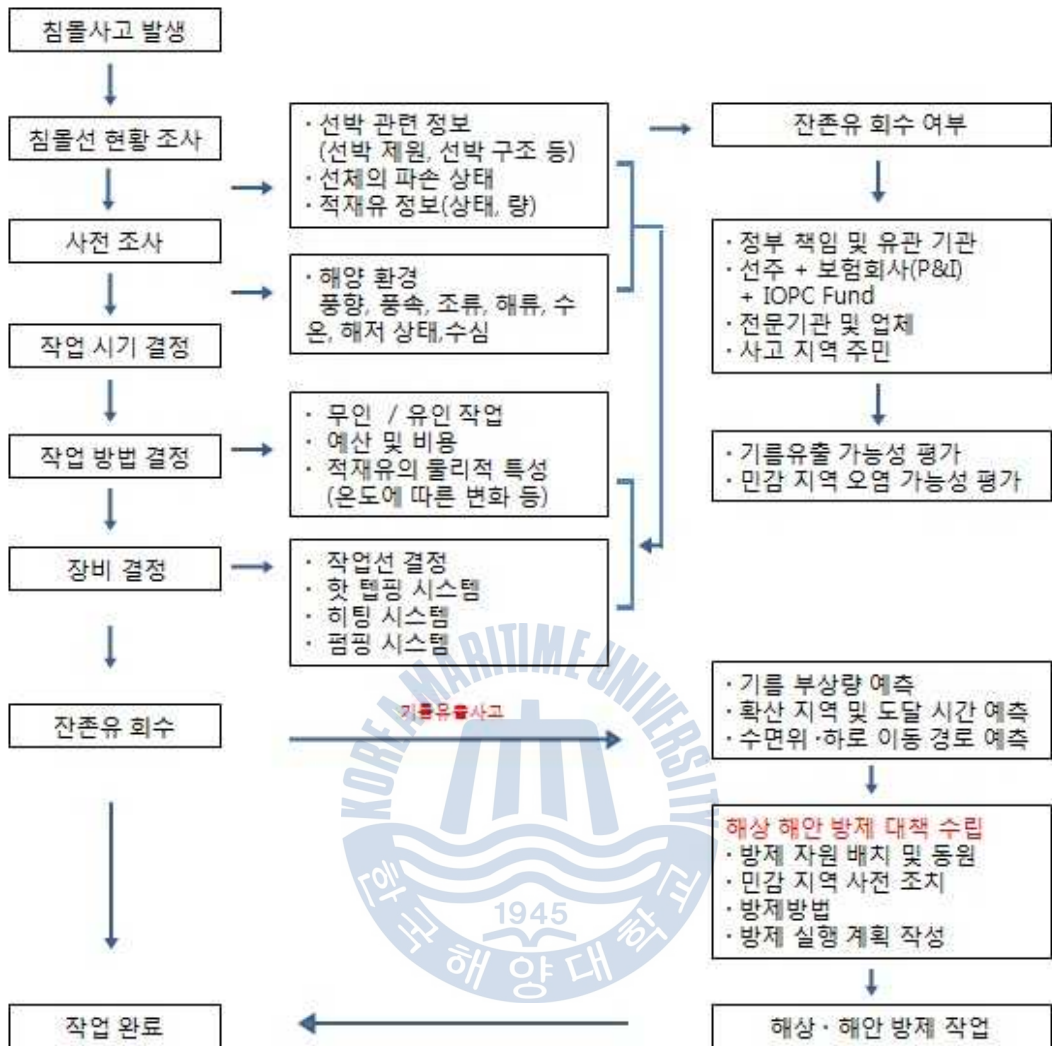
(5) 잔존유 회수작업과정에서 선체결함, 부적절한 장비취급, 회수장비에 이상 발생, 해양기상상태의 급격한 변화 등 예기치 못한 상황으로 인한 기름유출사고를 가정하여 이에 대비한다.

(6) 우선적으로 검토되어야 할 사항으로는 기름유출지점에서 유적의 수중 및 수면 상하 이동 경로 예측, 기름부상량 추산, 유막의 확산지역 및 민감지역 도달시간 예측 등이 있다.

(7) 방제작업이 필요할 경우에 대비하여 해상 및 해안방제 대책을 수립한다. 여기에는 적절한 방제장비 결정, 방제자원의 배치 및 동원방법, 방제 방법, 방제실행계획이 포함되어야 한다.

이상과 같은 절차를 사전에 충분히 고려, 검토하여 치밀한 계획을 수립한 후 잔존유 회수작업을 실시한다.





<그림 4-25> 잔존유 회수 표준화

제5장 결 론

우리나라 연근해에서는 선박이 해양사고로 인해 침몰하며, 이 들 선박 중 일부만 인양되고 나머지 대부분은 그대로 방치되어 있음으로 인해 일부 선박에서는 기름이 유출된 바가 있었고, 또 앞으로 일부 선박에서 선체 파열 및 확산작용 등으로 기름이 유출될 가능성을 배제할 수 없으며 유출시 즉각적인 그리고 효과적인 대응이 필요하다. 따라서 향후 침몰선으로부터의 기름유출에 대비한 전문기술 개발과 대책마련이 요구되며, 이에 추가하여 침몰선의 잔존유를 회수하는 경우, 작업과정에서 발생할 수 있는 제반 리스크를 예측하고 발굴하여, 사고 발생 시의 대응체계 구축과 관련된 연구가 수행되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 우리나라 연안역에서 발생하였던 기름유출사고 현황과 침몰선 현황을 조사하였다. 그리고 국내외 대표적인 침몰선 잔존유 회수작업 사례를 조사하고 또한 국내에서 실시되었던 제1유일호, 제3오선호 및 경신호 잔존유 작업을 상호 비교 분석하였다. 동시에 유조선 '경신'호를 대상으로 침몰선 잔존유의 회수과정중 발생할 수 있는 기름유출사고를 예측하는 모델링을 시도하여, 여러 가지 상황에 사전대비가 가능함을 보여줌으로써 향후 우리나라 연근해에서 침몰선의 잔존유 회수작업의 신속성·효율성·대비성 제고를 위한 표준화 모델을 설계하였다.

최근 11년간(2000년~2010년) 국내 해양 오염사고 현황을 통해 점차 감소세는 있으나 오염 사고가 대형화 추세로 있으며 해양사고 중 침몰 사고에 잔존 기름에 대해 국내·외에서도 점차 해양 오염에 대한 위험도

에 적극 대응하는 추세이다.

침몰사고가 발생하여 해양오염 가능성이 높다고 판단될 경우 잔존유 회수를 통해 해양 환경을 보전하는데, 우리나라 연근해에서 대표적 사례로 경신호(1988년), 제1유일호 (1995년), 제3오성호(1998년)를 들 수 있다. 이들 회수 작업을 비교해 본 결과, 수온 및 유속 등 다소 차이가 있으나 잔존유는 모두 중질유로서 고점성과 유동점이 낮고 수심이 70m 이상의 심해에서 작업이 이루어졌다는 점은 공통적이다. 그리고 세 선박의 회수작업에서 가장 두드러진 것은 경신호의 작업일수가 다른 두 선박의 1/3에 지나지 않다는 것임이 조사되었다.

침몰선으로부터 잔존유를 회수하는 작업을 안전하고 효과적·효율적으로 실시하기 위한 회수작업 표준화 모델을 설계하기 위해 경신호를 대상으로 제반 고려사항을 적용하여 모델링을 실시하였다. 침몰선의 잔존유 회수작업이 결정되면 먼저 침몰지점의 중장기 바람자료, 조류 및 해류, 수온, 해저저질, 수심 등의 자료를 수집·분석하여 적절한 작업시기를 결정한다. 그리고 무인 및(또는) 유인작업, 잔존유 물리적 특성 등을 고려하여 작업시간을 단축하고 안전·효율적·경제적인 작업방법을 선택한다. 이와 함께 작업선에 대한 결정, 핫탭핑시스템, 히팅시스템 및 펌핑시스템에 필요한 적정장비를 결정한다. 이에 추가하여 회수작업과정에서 발생할 수 있는 있는 예기치 못한 기름유출사고를 가정하여 이에 대비한다. 여기에는 유적의 수중 및 수면 상하 이동 경로 예측, 기름부상량 추산, 유막의 확산지역 및 민감지역 도달시간 예측, 해상 및 해안방제 대책 수립(적절한 방제장비 결정, 방제자원의 배치 및 동원방법, 방제방법, 방제실행계획 등)이 포함되어야 한다.

본 논문에서는 침몰선 잔존유 회수 표준화 모델에 대한 기초연구를 실

시하였다. 향후 국내외 사례를 보다 정밀하게 조사·분석하여 수학적으로 적용할 수 있는 세부적인 표준화 모델 개발을 위한 연구를 수행할 계획이다.



참 고 문 헌

1. 경신프로젝트 보고서, workability prediction report by modelbathymetry&world waved (aug08)& swan 40.51
2. 경신희 잔존유 제거사업 백서
3. 우리나라 산업잠수의 현황과 발전방안, 1999.6., 김도현
4. 침몰선박 관리 시스템구축연구(한국해양연구원 2004)
5. 침몰선박 관리와 인양문제에 관한 정책보고서 / 최철국 [저]
6. 침몰선 잔유 제거작업 백서
7. 해안방재연구센터. 2007 물속에 침강된 기름, p29
8. 해양시스템의 정기간행물 v. 78, p226-236
9. 해양오염관리 업무 30년의 발자취, 해양경찰청
10. Kalnay et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
11. Michel, J. 2006. *Assessment and Recovery of Submerged Oil: Current State Analysis*. US Coast Guard Research & Development Center, Groton, Connecticut, USA. 34 pp. + appendices.
12. National Research Council. 1999. Spills of Nonfloating Oils: Risk and Response. NRC, Washington, DC. 74 pp
13. Oil Removal Operation - YUILN0.1 AND OSUNGNO.3 by Yoo Tack Shim, Jae-Gon Lee and Uk Kim
14. The International Tanker Owners Pollution Federation LTD., "Oil Tanker Spill Statistics:2008" www.itopf.com

15. Weems, L.H., I. Byron, D.W. Oge, J. O'Brien, and R. Lanier. 1997. Recovery of LAPIO from the bottom of the Lower Mississippi River. Proceedings of the 1997 International Oil Spill Conference: pp. 773 - - 776;
- Yaroch, G.N., and G.A. Reiter. 1989. The tank barge MCN-5: Lessons in salvage and response guidelines. Proceedings of the 1989 Oil Spill Conference: pp. 87 - 90

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>



감사의 글

본 논문이 완성되기까지 시종 세심하게 지도해 주신 윤종휘 교수님의 무한한 은혜에 진심으로 감사드리며, 더욱 더 겸허한 자세로 정진할 것을 약속드립니다.

바쁘신 중에도 자상한 지도와 격려를 해주시고 면밀히 논문을 검토하여 다듬어 주신 국승기 교수님, 이은방 교수님께 감사드립니다.

아울러 본 논문을 준비하는 동안 많은 도움을 준 김종창님에게도 감사드립니다.

끝으로 그 동안 어려운 여건 하에서도 항상 헌신적 사랑과 뒷바라지에 여념이 없던 사랑하는 아내에게 이 논문을 바칩니다.