

최적 구난 기술(해양사고)



강 창 구(KIMM 해상안전방제연구단)

'73 - '77 서울대학교 조선해양공학과 (학사)
 '77 - '79 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (석사)
 '85 - '88 미국 미시간대학교 선박해양공학과 (박사)
 '79 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

세계적으로 대형 해양오염사고들을 살펴보면 영국의 1967년 Torrey Canyon호 사고, 1979년 Atlantic empress 사고, 1993년 Braer 사고, 1996년 Sea empress호 사고를 들 수 있으며, 프랑스의 Amoco Cadiz호 사고를 들 수 있지만, 1989년 미국의 알래스카에서 발생한 Exxon Valdez호 사고가 피해규모에서 가장 큰 것으로 알려지고 있다. Exxon Valdez호 사고의 경우 그 피해액이 4조원 이상이며, 환경피해의 회복에는 수십년이 걸릴 것으로 예상된다. 1996년 2월 15일에 발생한 Sea Empress호 사고는 영국 Wales 지방의 Milford Haven 근처의 바위위에 좌초함으로써 발생했는데 14만톤의 북해산 원유를 적재하고 있었으나 이중 약 7만 2천 톤이 영국에 하나밖에 없는 해상공원에 유출되어 심각한 피해를 주었다.

최근 우리나라도 경제성장이 급격히 이루어지고 유류물동량이 증가함에 따라 유조선에 의한 해양오염사고가 빈발하고 있다. 특히 우려되는 바는 20여만톤급의 유조선에 의한 해양오염사고로서 우리의 바다를 심각하게 위협하고 있다. 1995년에 소리도에서 발생한 씨프린스호 사고(그림 1)는 대형 탱커선에 의한 해양오염에 대한 경각심을 불러 일으켰으며, 연이어 유일호 좌초·예인중 침몰에 따른 해양 오염사고와 호남 사파이어호의 부두충돌에 의한 유류오염사고들은 우리나라도 상시 해난사고에 의한 오염사고에 직면해 있는 것을 잘 보여 주고 있다.

해양오염문제는 수산업, 해양생태계 등에 치명적인 영향을 주며 방제를 위한 비용과 함께 피해보상에만 연간 수백여억원이 소요되고 있다. 우리나라 경제규모의 증대에 따른 산업화는 연안지역에서 전개될 것이 예상되므로 연안 수산양식 및 해수오염에 민감한 산업시설의 보호를 위하여 해양오염의 예방 및 방제대책이 절실하다. 특히 한반도의 입지적 여건상 기름의 주된 운송수단으로 해상운송이 되고 있는 점을 감안하면 장래 발생할 수 있는 사고에 대한 종합적인 구난 및 방제대책 마련이 시급한 실정이다.

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 1970년대부터 선박의 해난사고로 인한 유류유출과 선박운항으로 인한 생활폐기물, 유류폐기물, 어로폐기물, 동력기관의 배기가스 및 화물유 탱크 소제후 배출되는 유혼합물 등에 의하여 야기되는 해양오염문제를 중점적으로 다루기 위해 해양환경보호위원회(MEPC: Marine Environmental Protection Committee)를 두어 MARPOL 73/78이라는 국제협약을 제정·보완으로 보다 강화된 규약을 모든 관련시설에 적용하고 있다. 한편, MARPOL 73/78은 해양오염의 예방 차원에 중점을 둔 것이며 사고

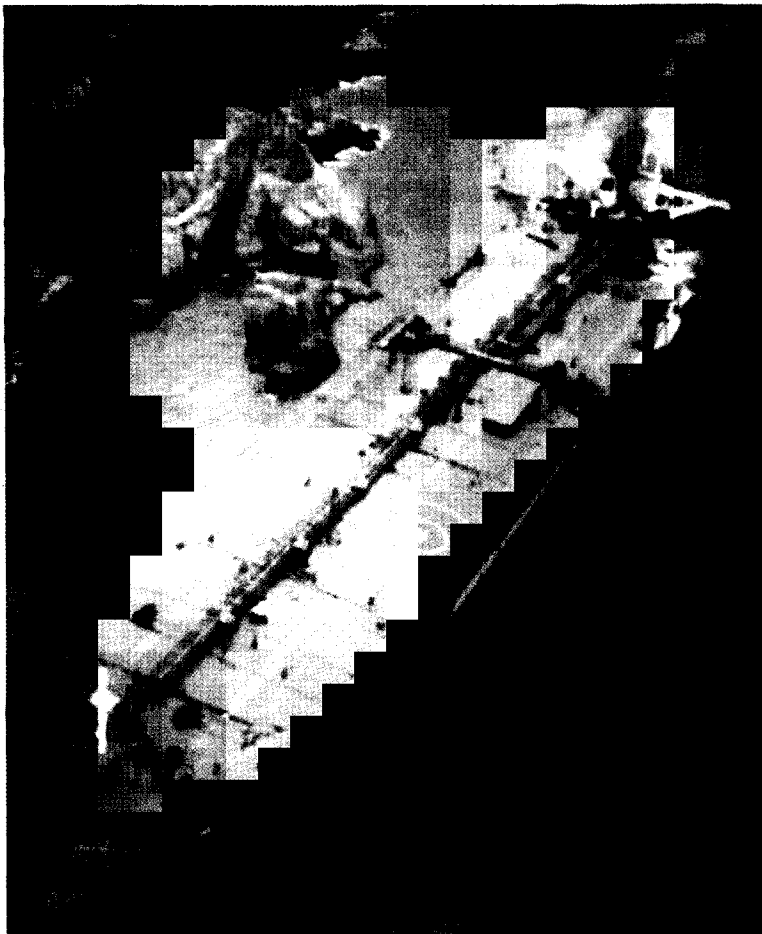


그림 1. 씨프린스호 좌초사고

발생후에 대비하기 위하여 1990년말에 유류오염 사고 대비·대응 방법에 관한 IMO의 규정이 채택되었다. 이는 OPRC 90 (Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990)으로 불리는 국제협약으로서 대규모 오염사고의 처리를 국제협약에 의한 공동대응으로 신속하고 효과적으로 수행하는데 그 취지를 둔 것이다. 이 규정은 1991년 초에 발생한 중동의 걸프만 유류 오염사고의 대응에서 국제협력에 의해 큰 성과를 거두었다. 이와 같은 국내외적인 여건에 따라 환경오염 예방 및 방제기술의 개발은 국제적인 환경규제 강화 움직임에 능동적으로 대처하고 국가의 해양환경보전에 필수적인 것이다

본 보에서는 국내의 대형 해양오염사고 등 해난사고 현황의 분석과, 구난에 필요한 기술분야의 분류, 구난과정 및 구난계획 수립에 대하여 설명한다. 또한, 구난을 수행하기 위한 구난계산 기술을 열거하고 이에 대한 간단한 계산예를 보여주고 있으며, 해난사고시 발생하는 기름 유출에 의한 오염확산 시뮬레이션 및 유류유출에 의한 손해 평가방법을 소개하고 있다. 이어서 씨프린스호와 유일호 사고의 비교분석에 의한 최적구난 기술의 중요성 및 기술검토 과정을 자세히 설명하고, 각종 구난 방법에 따른 위해도 분석 및 최적화 방법을 통하여 최적구난 기술을 제시하고자 한다.

2. 해양오염사고 현황

국내 경제가 급속히 발전함에 따라 국내 석유 수요 증가율이 매년 10~20%씩 증가하고 있는데 1990년대에도 매년 평균 14.9%씩 증가하고 있다. 우리나라의 석유소비 규모가 1993년에 이미 세계 10위권에 진입했고, 국내 석유정제능력이 세계 9위의 규모로 확장됨에 따라 석유수입 규모도 급격히 증가되어 세계 6위를 차지하고

있다. 또한 우리나라의 총 1차 에너지 수요중 석유가 차지하는 비중은 1984년 51.8%에서 1994년에는 62.9%로 크게 증가했다. 이에 따라 유류의 수출입물동량도 1984년 3,049만톤에서 1994년에는 1억 2,613만톤으로 연평균 15.3% 증가했으며, 유류의 연안물동량도 1984년 1,338만톤에서 1994년에는 4,463만톤으로 연평균 12.8%의 높은 증가율을 보였다.

표 1. 기간별 국내 석유수요 증가율

기 간	연평균 증가율(%)
1976 ~ 1980	11.6
1981 ~ 1985	0.8
1986 ~ 1990	13.6
1991 ~ 1995	14.9

자료 : 대한석유협회, 「석유협회보」, 1995. 6.

이와같이 석유소비와 유류물동량이 급격히 증가함에 따라 해양오염사고도 증가일로에 있다. 1991년부터 1995년까지 발생한 해양오염 사고는 1,583건에 유출량은 2만 2,541kl에 달하고 있어 매년 평균 310건 이상의 유출사고가 발생하였다. 이중에서 100kl 이상의 유류가 유출된 사고는 20건이다(표2 참조).

해양오염사고를 발생 원인별로 분석하면, 취급부주의에 의한 유출사고가 55.2%(874건)로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 고의배출 19.3%, 해난 18.5%, 기타 7%로 나타나고 있다.

1995년 7월 발생한 씨프린스호 사고와 유사한 초대형 유조선 사고로 수십만톤의 원유가 우리나라 연안해역에 유출될 경우 그 피해는 우리의 상상을 초월할 것이다. 1989년 미국의 Exxon Valdez호 사고시 42,000톤의 원유가 흘러나왔으며, 이에 의한 피해는 자연생태계 파괴 부분을 제외하고 약 4조원 이상이다.

1996년 2월 15일 영국 Wales 연해에서 발생한 리베리아 국적의 Sea Empress호 사고는 영국 전체를 공포로 몰아넣었다. 이 선박은 1993년에 건조되었으며, 단일 선각구조선박으로서는 마지막으로 건조된 선박중의 하나이다. 이 선박은 Milford Haven항 근처에서 선회실수로 인하여 바위위에 좌초하게 되었다. 14만톤의 북해산 원유를 적재한 Sea Empress호가 좌초했을 당시

6천톤의 기름이 유출된 것으로 추정하였으나 구난작업이 늦어져 14만톤중 약 7만 2천톤이 흘러나온 것으로 최종 발표되었다. 영국의 Coast Guard와 지역 협의체제에서는 긴급계획(contingency plan)에 따른 구난작업이 진행되어 재부양된 후 Belfast로 예인된 바 있다.

그러나 이 과정에서 영국정부는 1993년 Braer호 사고에 따른 조사결과를 제대로 이행치 못했

표 2. 유류 100kl 이상 유출 해난사고

(단위 : 톤)

일시	장 소	선 명	원인	오염물질(kl)
1991. 2. 21	충남 태안	퍼시픽 프랜드(화물선)	침몰	벵커-C 115 윤활유 41
5. 25	전남 여천	제9남성호 (유조선)	충돌	벵커-B 115
6. 28	경기 용진	치아웨이 (화물선)	충돌	벵커-C 286 경 유 72
8. 13	인천 팔미도	알렉스 (유조선)	충돌	경 유 400
1992. 4. 9	전남 거문도	타우라우어 (화물선)	침몰	벵커-C 120 윤활유 8
5. 10	부산 남형제도	스텐레스 프린세스 (유조선)	좌초	경 유 400 S.M 1,500
6. 5	부산 태종대	버거 마리너 (화물선)	충돌	경 유 165 윤활유 8
1993. 6. 2	부산 남외항	71 동방호 외 12척 (어선)	좌초	경 유 477
6. 16	인천 영흥도 앞	코리아 비너스 (유조선)	좌초	경 유 4,288
6. 19	부산 오륙도 앞	우일호 (유조선)	충돌	경 유 102
7. 19	전남 완도	우룡호 (유조선)	충돌	BASE유 194
8. 1	부산 영도	팔스트리아 (화물선)	충돌	벵커-C 186
9. 27	전남 광양만	제5금동호 (유조선)	충돌	벵커-C 1,228
10. 1	충남 대산항	프론티어 익스프레스 (유조선)	좌초	납사 8,322
1995. 5. 25	전남 여천	제51보양호 (어선)	충돌	벵커-A 124 경 유 35
6. 30	부산 남형제도	알렉산드리아 (화물선)	침몰	벵커-C 803 경 유 113
7. 23	여수 소리도	씨 프린스 (유조선)	좌초	원유 및 연료유 5,035
7. 24	부산 조도	68 태흥호 (어선)	충돌	경 유 105
9. 21	부산 남형제도	제1유일호 (유조선)	좌초, 침몰	미정
11.17	여천 호남정유 전용 부두	호남 사파이어호	접촉	원유 1,402
1996. 9. 19	전남 여서도	오션제이드호	충돌	벵커-C 207

자료 : 해양경찰청

표 3. 해양오염사고의 발생원인별 현황

(단위 : 건)

연도	계	해 난	부주의	고 의	파 손	불 명
1991	240	72	103	47	11	7
1992	328	55	155	95	19	4
1993	371	68	213	68	10	12
1994	365	56	231	55	16	7
1995	279	41	172	41	16	9
합 계	1,583	292	874	306	72	39
비율(%)	100	18.5	55.2	19.3	4.5	2.5

자료 : 해양경찰청

다고 비난을 받았다. 즉, 유조선 사고시 재앙으로 발전하는 것을 막기 위하여 더 많은 구난용 대형 예선(tug)을 준비해야 한다는 제안을 받았던 것이다. 영국정부는 Shetland에 한척, 서남지방에 한척을 배치하였으나 아주 신속하게 대응치 못하여 조기에 최적 구난에 실패함에 따라 이 사고가 대형사고로 확대되는 결과를 빚었던 것이다.

3. 구난 기술 분야

앞에서 언급한 바와 같이 해난사고시 구난에 실패하거나 늦어질 경우 심각한 대형사고로 발전된다. 이때 필요한 선박의 구난기술은 현장 및 설계기술 요소들의 복합체이며, 다음과 같은 분야로 분류될 수 있다.

- 선박사고의 평가 : 사고선의 복원성, 여유 부력, 주어진 조건하에서의 구조강도 등
- 국부 구조강도 해석 : 사고부분의 용량 결정이나 극한이나 비정상 하중을 견디는 선박구조지
- 환경요소 결정 : 해류, 바람, 파도 등 환경 요인에 의한 힘과 압력 추정
- 시스템 설계 : 외력에 견딜수 있거나 부력 회복가능 시스템 설계

- (1) 예인, 부양, 밧줄시스템 설계
- (2) 코퍼담(cofferdam), 해류전향기(current deflector), 등 이와 유사한 구조물 설계 및 건조
- (3) 부양 또는 인양시스템의 부착점 선정 및 평가
- (4) 구조보강재 설계 및 설치
- (5) 펌프, 압축공기 등을 이용한 배수시스템의 설계, 조립
- (6) 대형 수리용 철판의 설계, 건조, 설치
- (7) 현장 제작이나 임시 중량과 화물처리시스템 설계
- (8) 앵커 파지력 계산 및 계류시스템 설계
- (9) 지지대 설계, 건조
- (10) 구난 목적의 기존 시스템 개조

- 시스템 작동 : 시스템이 안전하고 효율적으로 작동하는지 확인, 개조된 시스템의 작동한계 설정, 작업자가 작동특성과 한계를 아는지 확인
- 계획 : 과업수행에 요구되는 타당성, 시간, 인력, 재료, 특수자재의 추정, 손상 선박 상태를 개선하기 위한 방법 검토, 구난작업중 사고 복원성, 여유 부력, 강도 추정
- 서류작성 : 구난계산, 시스템 설계 자료, 작업의 기술 분석 자료 작성

4. 구난 과정 및 계획

4.1 구난 과정

구난 지휘관은 구난계획 수립 방법, 완벽하고 시행가능한 계획을 수립하기 위한 정보수집 방법, 그 정보를 필요한 사람에게 주입하는 방법 등 구난과정에 대해서 전반적으로 파악하고 있어야 한다. 대체로 구난해야 하는 경우가 일반적인 것에 속하더라도 그 하나하나가 독특한 면을 갖고 있기 때문에 일정한 방법으로 구난을 수행해서는 안된다. 즉, 구난은 잘 조직되고 체계적인 정보수집, 분석, 계획, 성공적인 결과에 이를 수 있는 시행방안을 마련하여 수행되어야 하고, 항상 그 사고에 적합한 구난 방법이 적용되어야 한다.

구난과정은 11개의 단계로 구성되어 있다.^[1]

- ① 비손상 선박의 정보 수집
- ② 선박의 안정화
- ③ 그 해난사고에 특징적인 정보 수집 및 분석
- ④ 선박과 환경에 영향을 줄 수 있는 위해도 도출 및 계량화
- ⑤ 최적의 구난방법 선정
- ⑥ 적정 장비 선정 및 계약
- ⑦ 인적, 물적 자원과 구난시행 방법 선정
- ⑧ 구난 작업 공정계획 수립
- ⑨ 구난 작업 수행
- ⑩ 구난된 선박의 인도
- ⑪ 동원장비, 기구 해산

4.2 구난계획 수립

구난계획을 작성하기전에 먼저 사고조사를 통해서 사고 선박, 사고해역 등에 관한 자료를 확보하고 이를 분석해야 한다. 이러한 분석이 끝난 후 구난계획 수립작업에 착수하게 되며, 이

구난계획은 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

- 근본적으로 시간과 조류에 영향을 받음. 목표 일시, 조류주기, 과업지시서 등
- 주변 상황 변화에 따라 수정, 보완 가능한 동적(dynamic)기록임
- 구난지휘관의 책임과 승인사항임.
- 사고상황과 구난작업 난이도에 따라 복잡성이 변함.

계획수립과정 :

- ① 사용될 기법 선정
- ② 선정된 기법을 단계나 과업으로 분할
- ③ 사전조사에 의한 정보를 개별 과업에 연계
- ④ 각 과업을 완수하기 위한 시간 추정
- ⑤ 과업 시간표 구성. 순차적으로 완수되어야 하는 과업은 순서에 따라 시간표를 작성하고, 독립적으로 수행가능한 과제는 다른 과업과 병행하여 시간표 작성
- ⑥ 가장 효율적인 조합을 얻을 수 있도록 인력과 장비를 배치. 자원에 따른 과업의 조정에 의해서 시간표의 재조정이 필요할 수 있음.
- ⑦ 준비사항이 예측된 환경 힘(environmental forces)에 적합한 목표일자 선정
- ⑧ 계획의 재평가, 조직과 자원 배분의 수정 후 완수 날짜 수정
- ⑨ 통제불가능한 요소를 고려한 구난지휘관의 희망일자의 조정, 도크의 사정, 오염통제와 저감요구, 피항지 입항 승인 등 목표날짜에 영향을 줄수 있는 사항 고려

5. 구난 계산 기술

구난작업을 위해서는 선박과 외부 환경에 관련된 여러 가지 계산을 수행하여 사고상태에 가

장 적합한 장비 및 용량, 작업선정, 작업방법 등에 이용되어야 한다. 최근 PC의 발달에 따라 복잡한 계산도 노트북 PC에서 수행가능하기 때문에 현장에서 바로 계산을 하고 이에 따라 구난 전략, 장비 및 용량 선정 등이 가능해지고 있다. 구난에 필수적인 항목이 표4에 기술되어 있다.

표4 에서 언급된 구난계산 항목 중에서 간단한 예를 보기로 한다. 항목번호 30의 탱크내의 유체정력학적 압력에 대한 것은 유조선의 파공시 유출 가능성을 간단히 검토할 수 있는 중요한 것이다.

예를들어 해수에 떠있는 10.5m 홀수의 유조선내에 15m 깊이의 탱크에 비중(SG) 0.90의 기름을 적재하고 있는 경우를 고려하자. 탱크의 바닥이 깨졌다면 선내외의 압력은 다음과 같이 간단히 계산될 수 있다.

내부압력(기름):
 $P_o = SG_o \times D_o = 0.90 \times 15 = 13.5$
 외부압력(해수):
 $P_w = SG_w \times D_w = 1.024 \times 10.5 = 10.8$

P_o 가 P_w 보다 크기 때문에 탱크내의 기름이 밖으로 유출되며, 이는 평형을 이룰때까지 계속 되게 된다. 압력의 평형을 고려하여 기름 유출량을 계산할 수 있으나, 파공부위가 크고, 파도나 조류가 있을 경우 기름이 정적압력 평형상태 후에도 계속 유출된다.

항목 44의 좌초반력(R)에 대한 계산은 이초작업을 위해서 중요한 항목으로서 여러상태에 따라 계산방법이 있으며 선수홀수 변화시 계산 방법은 다음과 같다.

$$R = \frac{TPC \times MTC \times L \times (T_{fb} - T_{fa})}{(MTC \times L) + (d_r \times d_f \times TPC)}$$

여기서,

- T_{fb} : 좌초전의 홀수
- T_{fa} : 좌초후의 홀수
- d_f : 선수수선 (F.P)과 부면심(LCF) 사이 거리
- d_r : 좌초반력 중심과 부면심(LCF)사이 거리

표 4. 구난계산 항목

Group	Title
Group 1 : Naval Architecture, Stability, and Strength	1. Displacement
	2. Center of Gravity
	3. Moment of Inertia
	4. Block Coefficient
	5. Midships Section Coefficient
	6. Waterplane Coefficient
	7. Estimated Block Coefficient
	8. Estimated Waterplane coefficient
	9. Tonnes per Centimeter(TPC) Immersion
	10. Height of the Center of Buoyancy (KB)
	11. Longitudinal Position of the Center of Buoyancy(LCB)
	12. Position of the Center of Flotation (LCF)
	13. Metacentric Radius (BM)
	14. Height of the Center of Gravity (KG)
	15. Metacentric Height (GM)
	16. Movement of the Center of Gravity
	17. List from Weight Movement
	18. Free Surface

Group	Title
Group 1 : <i>Naval Architecture, Stability, and Strength</i>	19. Free Communication 20. Longitudinal Metacentric Radius (BM _L) 21. Longitudinal Metacentric Height (GM _L) 22. Moment to Trim One Centimeter(MTC) 23. Trim Calculation 24. Lightship Weight Distribution 25. Buoyancy Curve 26. Bending Strength 27. Minimum Section Modulus 28. Deflection Analysis for Flooded or Grounded Cases
Group 2 : <i>Oil-Water Hydrostatics</i>	29. Conversion Between Specific and API Gravities 30. Hydrostatic Pressure inside and outside a Tank 31. Water Bottom Depth
Group 3 : <i>Rigging</i>	32. Estimated Breaking Strength of Wire Rope 33. Estimated Breaking Strength of Fiber Rope 34. Snapback Energy 35. Storage Volume for Faked Rope 36. Length of Rope That Can Be Stored on a Drum 37. Weight of Chain 38. Approximate Breaking Strength and Proof Loads of Chain 39. Safe Working Load of Shackles 40. Safe Working Load of Hooks 41. Actual Mechanical Advantage 42. Sling Leg Tension
Group 4 : <i>General Salvage Calculations</i>	43. Height of Tide at Any Time 44. Ground Reaction 45. Neutral Loading Point 46. Change in Ground Reaction Caused by Tide 47. Virtual Rise in Center of Gravity from Grounding 48. Tractive Force to Free a Ship 49. Effective Force 50. Bollard Pull 51. Holding Power of an anchor 52. Ground Leg Scope 53. Wind Force on a Ship 54. Current Force on a Ship 55. Flow through a Hole 56. Stiffener Spacing for Patches 57. Pump Capacity 58. Pumping Calculations 59. Standard Cubic Feet per Minute 60. Blowing Pressure 61. Volume of Air for Collapsible Pontoons 62. Time to Fill Collapsible Pontoons 63. Hull Cutting by Lift Wires 64. Air Volume for Air Lifts 65. Potential Fish Kill Radius of Explosives 66. Safe Distance from an Explosion 67. Explosive Cutting 68. Flat Width of Fenders 69. Equivalent Ship Size for Fendering

표4 에서 보는 바와 같이 구난관련 계산은 종류와 계산량이 상당히 많고, 신속하게 이루어져야 하기 때문에 위험물 운반선 등에 대한 DB를 사전에 구축하고 언제라도 사용할 수 있는 체제를 구축해야 한다.

6. 유출유 확산 시뮬레이션

한국 근해는 해안선의 길이가 매우 길고 복잡하기 때문에 누유사고시 연안지역의 피해가 매우 크며, 조류의 속도가 빠르므로 신속하고 효과적인 방제 시스템의 구축없이 누유확산을 예방하기 어렵다. 누유사고시 피해를 최소화하고 효과적인 방제작업이 이루어지기 위해서는 모의 시뮬레이션 등을 통한 일반적인 방제계획의 수립, 환경 Database 구축 및 수치확산 모델링에 의한 누유거동의 정확한 예측, 효율적인 방제장비의 개발과 방제장치 시스템의 구성 등이 필수적이다. 특히 누유사고시 신속한 해상조건의 파악과 초기확산의 방지가 무엇보다 중요하다. 누유가 넓은 지역에 확산된 후에는 방제작업이 보다 어려워지며 많은 시간과 경비가 소요된다. 초기확산의 방지를 위해서는 오일붐 등의 물리적 확산방지 장비의 확보와 함께 유출된 기름의 이동 및 확산 경로를 예측하여 피해가능 지역을 보호하고 유출유의 회수작업을 위한 자료를 제공하기 위한 요소기술의 확보가 필수적이다.

본 절에서는 누유사고에 효과적으로 대응하기 위해서 요구되는 해상유출유의 확산예측 프로그램의 내용을 소개한다.

○ 유출유 확산모델 : 해난사고에 의해 유출된 기름은 증발, 응고, 침전 등의 물리, 화학적 변화를 거치면서 주변해역으로 확산되어진다. 누유의 확산 경로, 범위, 속도는 현장에서 필요

한 방제전략 수립에 매우 중요하므로 오염피해를 최소화 하기 위해서는 누유 거동의 정확한 예측이 필수적이다. 기름의 물적 특성과 함께 파랑, 조류, 바람 등의 환경요인들과 해역의 지형적 특성에 따라 누유의 거동이 달라지므로 이들 요소들을 모두 고려한다.

○ 해양환경 D/B : 유출유 확산모델의 적용을 위해서는 사고해역 환경인자들의 자료가 요구된다. 이중 조류는 사고 발생후에 계속하는 것이 현실적으로 불가능하므로 주기적인 변화를 고려한 한국근해의 조류분포 Database를 평소에 확보하는 것이 필요하다. 바람은 비교적 넓은 지역에 걸쳐 일정하고 시간에 따라 불규칙하게 변화하므로 Database의 구축보다는 사고시 지상 관측소의 실시간 자료를 이용하기 위한 방안의 수립이 보다 효율적이다. GIS (Geographic Information System)는 환경 D/B와 함께 누유 확산 모델의 실행에 기본자료이므로 Database의 구축에 필수적이다.

○ 기름특성 D/B : 누유의 거동은 누유의 물리적 특성에 따라 상이하므로, 정확한 누유확산 예측에는 기름특성에 대한 이해가 필수적이다. 또한 기름특성에 따라 효과적인 방제장비가 결정되므로 방제시스템의 구축에서 기름 D/B가 사용된다.

○ 프로그램 구조 설계 : 사고시 신속한 대응을 위해서는 누유확산 모델에 의한 누유 거동의 정확한 예측과 함께 평소 다양한 형태의 사고에 대비한 긴급 계획 수립이 선행되어야 한다. 이러한 계획수립에 필요한 모듈들은 지속적인 개선이 요구되므로 방제지원 S/W의 구조는 추가 모듈들을 허락하는 유연성과 확장성을 갖도록 설계되어야 한다.

○ GUI(Graphic User Interface) 설계 :환경
 인자들의 입력과 누유확산 결과들의 출력을 그
 래픽적으로 처리하여 현장 사용자들의 편의성과
 실용성을 제고할 필요가 있다. 현재의 소프트웨
 어 환경 및 개발 추세를 감안할 때 PC 윈도우
 를 운영체제로 하는 것이 바람직하며, 32비트를
 통한 처리속도 향상과 그래픽 환경 구축의 용이
 성을 감안할 때 윈도우 '95를 운영체제로 하며,
 또한 객체 지향적 프로그래밍 언어(Object-
 Oriented Programming Language)를 사용하여
 프로그램의 유지 및 확장성을 갖도록 한다.

유출유 확산예측 프로그램의 개발은 조류의 3
 차원적인 유동특성을 해석하기 위한 수치기법의
 개발, 남해안 전역을 포함하는 한국근해 주요해
 역의 조류분포 데이터베이스 구축, 해양 환경인
 자에 의한 기름층의 풍화 현상들을 고려한 누유

확산 Fate 모델의 모듈화, 통계적 확산모델의
 개발, 그리고 국제공동 연구를 통해 확보한 전
 후처리 장치를 개선하여 프로그램의 사용자 편
 의성과 확장성을 제고한 그래픽 사용자 인터페
 이스를 개발하였다^[4]. 또한 해상누유의 거동을
 추적하여 누유의 확산경로에 관한 정보를 제공
 하는 유출유 추적부이에 대한 연구 내용과, 추
 적부이 형상의 최적화와 추적부이 위치 파악을
 위한 송수신 장치를 설계하여 실험역시험을 수
 행하였다.

한국기계연구원 선박해양공학연구센터에서 개
 발한 실시간 누유확산 예측 프로그램 “푸른바다
 (Green Sea Ranger)”는 누유사고시 누유의 이
 동경로와 방제장비 배치에 따른 누유거동 변화
 (그림2 참조)를 예측함으로써 효과적인 현장 방
 제전략 수립을 지원하며, 사고시 큰 피해가 예
 상되는 주요해역에 대한 모의 시뮬레이션을 수

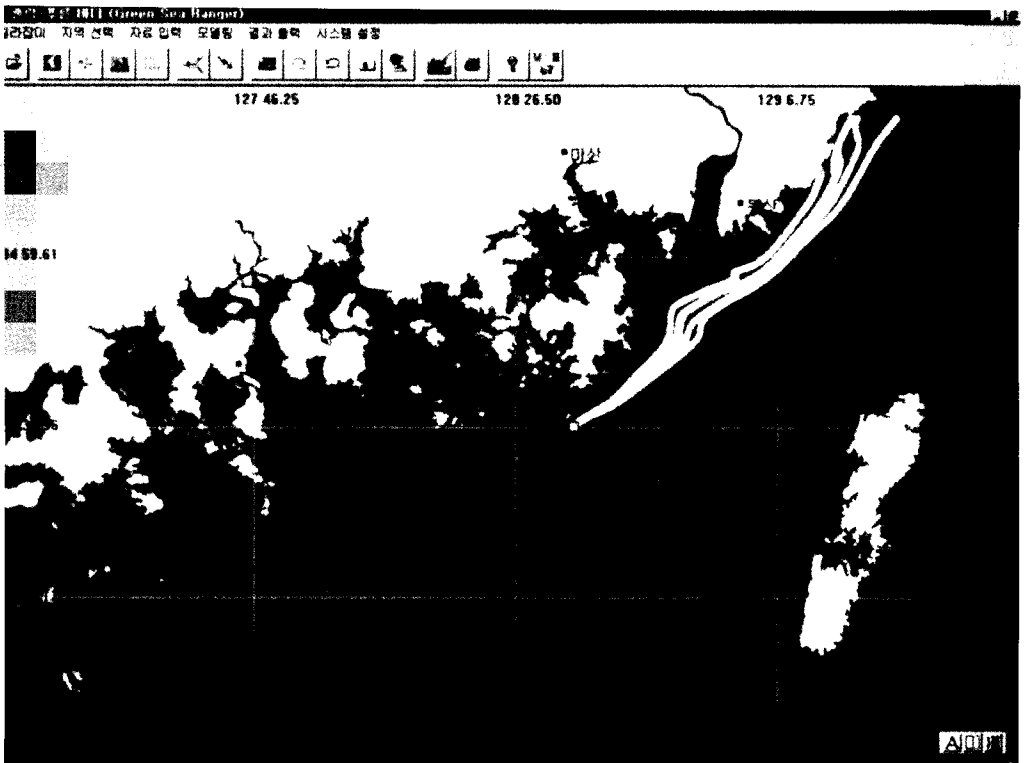


그림2. 유류유출시 확산경로 예측

행함으로써 사전 방제계획(Contingency Plan) 수립을 위한 정보를 제공할 수 있다. 또한, 사고 시에는 구난방법에 따른 피해지역 예측과 손해 평가를 수행하는데 사용되어 위해도 분석(Risk Analysis)이 가능해진다.

7. 유류 유출에 의한 손해 평가방법

미국 환경보호국(Department of Environmental Protection)에서 개발한 유류유출에 의한 손해 평가 계산방법(Damage Assessment Formula)은 다음과 같다.^[3]

$$[(B \times V \times L \times SMA) + (A \times SMA)] \times PC + ETS + AC$$

(단위 : \$)

여기서,

B : \$1/Gallon로 산정한 값

V : 유출량(Gallon)(유출된기름이 어장에 도달되는 량 Gallon)

L : 유출된 지역의 민감도계수 (해안가로부터 1-3 Mile 떨어진 경우, 5)

SMA : 특별관리 해역에 따른 계수

A : 환경영향계수(\$ 0.5/ft²)

PC : 유출유의 종류에 따른 계수 (벵커-C유인 경우, 8)

ETS : 생물 및 동물피해에 따른 피해보상

AC : 방제작업에 소요된 비용

또한, 피해 예상지역의 어업생산량의 통계치가 발표되어 있을 경우, 이를 이용하여 쉽게 손해평가를 할 수 있다.

8. 씨프린스호와 유일호 사고의 비교 분석

씨프린스호는 좌초시 암초에 심하게 부딪혀 바위가 선각을 뚫고 들어가 선체 중앙부 선저와

선측이 1/2가량 손상을 입었으며, 선미부의 경우 전체적으로 선저에 심한 손상을 입고 바위 위에 얹게 되었다.

사고가 난 후 일본의 구난전문회사에서는 선체를 부양시켜 유조선인 호남다이아몬드호에까지 예인하여 원유를 이적하는 방법(선 부양 후 이적방법)을 채택하였으며 언론에도 이에 대한 자세한 과정이 소개되었다. 선박해양공학연구센터가 호유해운으로부터 자료를 받아서 부양에 따른 선체강도, 작업위험성 등을 검토해 본 결과 선부양 후이적방법은 극히 위험하다고 결론을 내렸다. 선체중앙부 등이 심하게 손상을 받아서 바다에 부양되어 있을 경우 파랑에 의하여 선체의 손상이 가속화되어 침몰 위험 가능성마저 적지 않은 것으로 나타났던 것이다. 따라서, 위험화물인 원유를 좌초위치에서 먼저 이적하고 후에 선박을 부양시키는 선 이적 후 부양방법이 최선임을 호유해운에 통보하였다.

그 당시 선체중앙부에서부터 선미까지 모든 탱크가 손상되어 있었으며, 원유가 해수보다 가볍기 때문에 상부에는 원유가 하부에는 해수가 차 있었고, 이 손상된 탱크내에 떠 있는 원유가 26,000톤 정도 되었다. 만약, 선 부양 후 이적방법을 택하였을 경우 부양 작업도중이나 부양 상태에서 작은 실수나 파랑에 의해서 2차 사고가 발생했다면 우리 나라에는 엄청난 재앙이 닥쳤을 지도 모른다.

선 이적 후 부양방법을 채택한 후 원유이적방법을 여러 가지로 검토하였다. 우선, 3가지 정도의 시나리오를 가정하고 각 시나리오에 따른 작업 수행시의 선체강도를 검토하였다. 소리도 해역에서는 사리시 간만의 차가 4m가 되기 때문에 이에 의한 선체강도에 미치는 영향을 고려하고, 원유적재 정도와 손상정도 등 각종 위험요소를 고려하여 검토하였다. 또한, 원유이적과 목적지가 정해지지 않은 상태에서 좌초힘(Grounding Force)이 부력으로 바뀌게 되면 대

책없이 일부가 뜨게되고 파랑에 의해서 더 심각한 손상을 초래할 수 있었다. 이런 위험을 감소시키기 위하여 원유이적과 해수주입을 동시에 수행해야 했으며, 좌초힘이 유지되면서 가능하면 균일하게 무게를 분포시킴으로써 하중을 최소화해야 했다. 이때 또 하나 고려한 것은 원유 탱크에 물을 주입하면 후에 오염된 상당량의 해수를 처리하는 것이 문제이기 때문이기 때문에 이를 최소화하도록 노력하였다. 이러한 사항을 종합적으로 검토하여 최적의 구체적인 원유이적 및 해수주입 방법을 제시하였다. 기존의 선박 설계용 프로그램의 경우 입력에 많은 시간이 소요되고 좌초 등 상황변화에 대응이 어렵기 때문에 좌초선박의 굽힘 모멘트(Bending Moment), 전단력(Shear Force), 좌초 힘 등을 계산할 수 있는 프로그램을 긴급히 개발하여 사용하였다. 계산결과중 조위변동에 따른 전단력과 굽힘 모멘트가 그림3에 보여지고 있다.

원유이적에는 많은 시간(최소 10일)이 걸리기 때문에 그 동안 태풍이 올 가능성이 적지 않았

다. 이에 따라 태풍 내습시의 대책을 다각도로 검토하였다. 일반적으로는 대형 탱커의 경우 항내에서 태풍을 맞는 것보다는 외해에서 태풍을 맞는 것이 더 안전한 것으로 알려져 있다. 그러나 이번 경우와 같이 선미가 심하게 손상 받은 선체에 대해서는 좀 다른 각도에서 검토되어야 한다. 먼저 주어진 흘수로 부양된 선체의 파랑중 운동을 계산하고, 이를 이용하여 파도중 수면과 선체의 상대운동을 계산하였다. 손상된 선박을 부양시키는 공기압은 갑판강도를 고려하여 0.5기압 이내가 되어야 하며, 파도중 수면과 선체의 상대운동은 선체 중앙부에서 선미까지 주입된 공기의 압축과 팽창에 따른 갑판 응력의 크기에 직접 영향을 주는 항목이다. 즉, 평수 중에서 손상 탱크내에 0.5기압을 주입했다라도 파도에 의해서 부피가 줄어들면(압축되면) 공기압이 상승하여 갑판의 안전성에 영향을 준다.

또, 파도중 굽힘 모멘트와 전단력의 변동량을 선체중앙부(손상이 제일 심한 부분 이기도 함)에서 계산하여 각 파고, 각 파향에서 검토하였

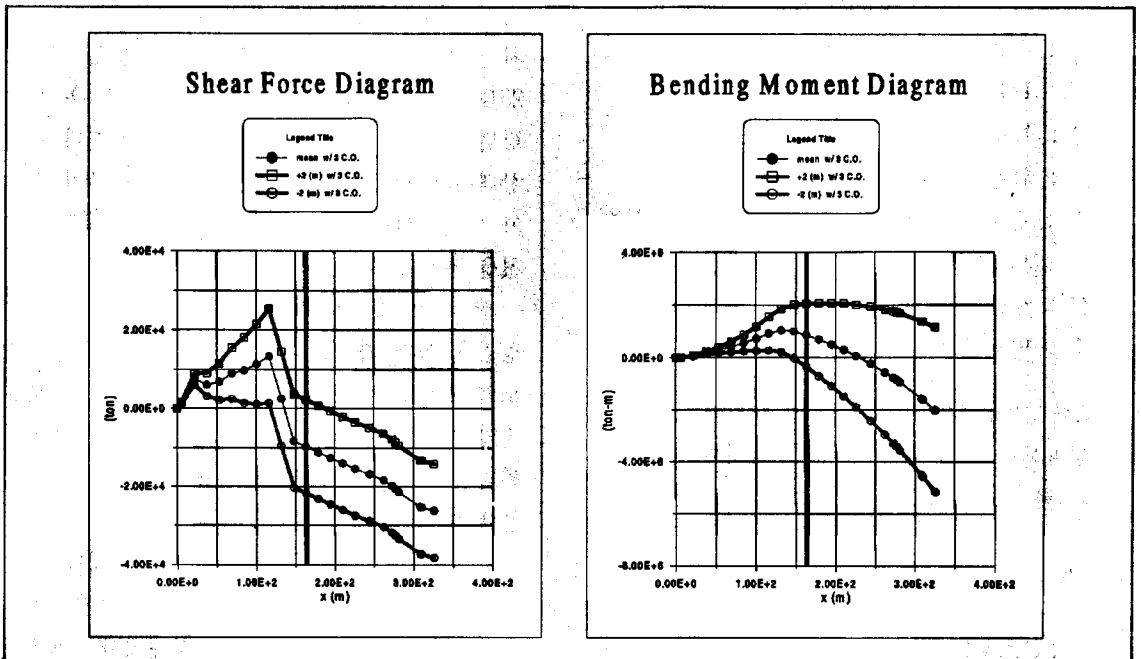


그림 3. 조위변동에 따른 선체강도 계산결과 (전단력과 굽힘 모멘트)

다. 이상과 같이 파도중 운동성능, 파도중 수면과 선체의 상대운동, 파도중 파랑력 등을 종합적으로 검토한 결과 부양상태에서 파고 5m 이상의 해상상태에서는 매우 위험한 것으로 판단되었다.

다른 한편으로 좌초된 위치에서 태풍을 맞을 경우에 파도에 의해서 받게 되는 힘을 계산하여 굽힘 모멘트와 전단력을 계산하였다. 이 결과 파고 5m 이하에서는 좌초위치에서 안전하지만 선체중앙부의 균열(Crack)이 계속 전파될 경우 위험에 처할 수도 있었다. 전체적으로 검토한 결과, 해상에 나가는 것보다 현재의 좌초위치에서 태풍을 맞는 것이 더 안전하다는 결과를 얻었다.

1995년 9월 21일 부산 사하구 다대동 남형제도 앞바다에서 벙커-C유 2,800톤을 싣고 가던 제1유일호가 침몰했다. 이 배는 침몰 사고가 발생하기 6시간 전 암초에 부딪쳐 좌초했다. 좌초 사고가 나자마자 어떠한 기술적 위해도 분석없이 이 유조선을 암초에서 끌어내려 예인중 기관실을 통해 물이 들어와 침몰한 것이다. 이 배가 침몰한 지역은 수심이 깊어 방제작업에 곤란을 겪었으며, 소형사고를 대형오염사고로 만들어 버렸다.

국내에 축적된 해상안전·방제관련기술을 보유한 기계연구원 선박해양공학연구센터가 있으나 이러한 전문 연구기관이 참여하여 대응하는 제도적 장치가 없었기 때문에 초기 구난 활동이 지연되고 2차 사고가 유발되는 등 효율적인 대처가 이루어지지 못하였다. 이에 대한 대책으로서 외국 및 국내 구난회사의 작업과정을 기술적으로 면밀히 검토하여 안전성에 대한 평가를 포함하는 기술감리가 전문연구기관에 의해서 수행되어야 이윤위주의 구난작업에 따른 대형 해양

오염 등을 예방할 수 있다. 최근에 해양오염방지법 시행령이 개정되어 당연구소가 방제기술지원단으로 본격적으로 활동함에 따라 이러한 상황은 많이 개선될 것으로 생각된다.

9. 구난방법에 따른 위해도 분석 및 최적화

일반적으로 사고선박의 구난방법은 여러 가지 방법이 있다. 그러나 항상 염두에 두어야 할 것은 시간의 제약성, 인명 및 환경피해가능성, 구난비용, 기타 정치·사회적인 제약성 등이다. 여러 구난방법은 다음과 같은 3가지의 형태의 위해도(risk)를 갖고 있다^[2].

- 가. 공학적 위해도 : 구조물, 장비, 기술, 방법
(예 : 펌프의 기계 고장)
- 나. 작업자 건강 및 안전 : 작업자의 건강 및 안전 관련 위해도
- 다. 환경 위해도 : 유류유출 등에 의한 환경영향을 가치로 표시한 위해도

각 구난방법을 평가하기 위하여 10점 만점의 평가표를 작성할 수 있다. 여기서, 10점은 위해도가 가장 높은 경우이고, 1점은 위해도가 최소인 것을 표시한다. 앞질의 씨프린스호 경우와 같이 3가지 구난방법에 대한 위해도를 계획대로 수행되었을 경우와 대형사고 발생에 대한 경우로 나누어 위해도 평가를 수행할 수 있다. 그 일례를 표5에서 보여주고 있으며, 각각은 심도 있는 기술적 분석이 필요하다. 공학적 위해도는 5절의 구난기술을 이용하여 평가되고, 환경 위해도는 6절의 오염확산 시물레이션과 7절의 손해평가 방법에 의해서 평가된다.

표5에서 보는 바와 같이 방법 II가 계획대로 수행될 경우와 대형사고가 있을 경우 모두 가장 낮은 위해도를 보여주고 있기 때문에 방법 II를 선택하게 된다.

표 5. 구난방법에 대한 위해도 평가 예

	구난방법	방법 I	방법 II	방법 III
공학적 위해도	계획대로 수행	1	1	4
	대형 유출	8	4	6
작업자 건강 및 안전	계획대로 수행	1	1	4
	심각한 인명사고	1	1	5
환경 위해도	계획대로 수행	6	3	1
	대형 유출	9	4	1
계	계획대로 수행	8	5	9
	대형 사고	18	9	12

이상에서와 같이 현재 주어진 시간내에 채택할 수 있는 구난방법중 위해도(risk)가 가장 적으면서 비용이 최소화 할 수 있는 방법을 채택함으로써 해난사고시 최적구난을 수행할 수 있게 된다.

10. 결론

본 보에서는 최근 우리나라 연안에서 자주 발생하는 해난사고에 대응하는 가장 효율적인 방법을 선정할 수 있는 최적 구난기술에 대하여 기술하였다.

해난사고 시점에서 사용가능한 구난기술 및 장비를 이용하여 실현성이 높은 3~4가지의 구난방법을 선택하여 공학적 및 작업자에 대한 검토를 함으로써 공학적 위해도와 작업자의 위해도 평가를 수행하고, 각 구난방법에 의한 유류 유출 가능성을 평가하여 유류 오염 확산 시뮬레이션을 수행하고, 이 결과를 이용하여 유류 유출에 의한 손해 평가를 함으로써 환경 위해도 평가를 수행한다. 이렇게 수행된 위해도 평가를 종합적으로 분석하여 최적구난방법을 선정하여 구난에 직접 적용한다. 이렇게 선정된 구난방법도 기상, 해상 등 환경요인 등이 변화될 경우

이에 대한 위해도 분석을 다시 수행하여 상황변화에 적응할 수 있는 최적 구난 방법이 제시되었다.

이상에서와 같이 신속하고 과학적인 분석을 통한 최적 구난 기술에 의하여 우리나라의 해양 환경보전에 기여할 수 있을 것으로 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] Milwee, Jr., W. I., Mordern Marine Salvage, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1996.
- [2] Department of Fisheries and Oceans and Environment Canada, "The Further Assessment of the Recovery of the Irving Whale in Light of the Presence of PCBs", 1996.
- [3] Department of Environmental Protection in Florida, "Damage Assessment Formula", 1997.
- [4] 홍기용, "해양장비핵심기술 개발 - 해상유출유 확산 방지기술 개발 III", 한국기계연구원 보고서 UCN011-1586·D, 1996.