

딥워터 호라이즌호 유출유 수지분석 모델의 국내 적용성 검토

김충기¹ · 오정환² · 강성길^{2,†}

¹한국환경정책·평가연구원

²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A review of Deepwater Horizon Oil Budget Calculator for its Application to Korea

Choong-Ki Kim¹, Jeong-Hwan Oh² and Seong-Gil Kang^{2,†}

¹Korea Environment Institute, Sejong 30147, Korea

²Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO) / Korea Institute of Ocean Science and Technology, Daejeon 34103, Korea

요 약

연안 및 해양에 유출된 기름의 자연적 또는 인위적 제거 경로와 양을 파악하고 방제활동이 필요한 잔류기름 양을 산정하는 것을 유출유 수지분석이라 한다. 2010년 멕시코만 딥워터 호라이즌호 사고 시 개발된 유출유 수지분석 모델은 현장 방제기술 분석 수단의 하나로서 미국 국가사고지휘본부에 방제전략 수립을 위한 핵심적인 정보를 제공하였고 방제활동의 언론 및 대국민 홍보 등에 성공적으로 활용되었다. 본 연구에서는 유출유 수지분석 기법의 이론적 내용을 분석하고 향후 국내 적용 가능성을 검토하였다. 국내외의 재난적 해양오염사고들의 유출유 수지분석 결과를 비교해보면, 유회수기를 활용한 기계적 수거로 유출량 대비 3~8%, 소각 1~5%, 유처리제에 의한 화학적 분산으로 4.8~16%의 기름이 제거되었고, 자연적 풍화작용(증발, 용해, 자연분산 등)에 의해서 37~56%가 제거된 것으로 분석되었다. 이는 유회수기와 함께 소각 및 화학적 분산이 효과적인 해상방제 기술로 적용될 수 있으며, 자연적인 풍화작용 또한 유출유 제거에 효과적임을 보여준다. 유출유 수지분석 모델이 국내 방제활동에 활용되기 위해서는 국내의 계절적 해양환경, 유류 및 방제장비 특성, 방제방법 등을 고려한 최적화된 매개변수 설정연구가 선행되어야 하며, 해안방제에 의한 유출유 제거량 산정 기법이 새로이 개발되어야 한다. 향후 국내 환경에 최적화된 유출유 수지분석 모델을 개발하여 방제 현장에 적용할 경우 보다 체계적이며 신뢰성 있고 일관성 있는 방제전략 수립, 방제작업 현장관리, 대국민 홍보 및 언론 보도 등에 유용하게 활용가능 할 것으로 사료된다.

Abstract – Oil budget calculator identifies the removal pathways of spilled oil by both natural and response methods, and estimates the remaining oil required response activities. A oil budget calculator was newly developed as a response tool for Deepwater Horizon oil spill incident in Gulf of Mexico in 2010 to inform clean up decisions for Incident Command System, which was also successfully utilized to media and general public promotion of oil spill response activities. This study analyzed the theoretical background of the oil budget calculator and explored its future application to Korea. The oil budge calculation of four catastrophic marine pollution incidents indicates that 3~8% of spilled oil was removed mechanically by skimmers, 1~5% by in-situ burning, 4.8~16% by chemical dispersion due to dispersant operation, and 37~56% by weathering processes such as evaporation, dissolution, and natural dispersion. The results show that in-situ burning and chemical dispersion effectively remove spilled oil more than the mechanical removal by skimming, and natural weathering processes are also very effective to remove spilled oil. To apply the oil budget calculator in Korea, its parameters need to be optimized in response to the seasonal characteristics of marine environment, the characteristics of spilled oil and response technologies. A new algorithm also needs to be developed to estimate the oil budget due to shoreline cleanup activities. An oil budget calculator optimized in Korea can play a critical role in informing decisions for oil spill response activities and communicating spill prevention and response activities with the media and general public.

Keywords: Oil budget calculator(유출유 수지분석 계산기), Oil spill incident(기름 유출사고), Deepwater Horizon oil spill(딥워터 호라이즌호 기름 유출사고), Hebei Sprit oil spill(허베이 스프리트호 기름 유출사고)

[†]Corresponding author: kangsg@kriso.re.kr

1. 서 론

2010년 4월 20일 미국 루이지아나주 연안으로부터 남동쪽으로 83 km 떨어진 멕시코만 해역에서 영국 석유회사(British Petroleum)의 딥워터 호라이즌(Deepwater Horizon)호가 폭발하면서 화염에 휩싸였다(National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling[2011]; KRISO[2013]). 폭발사고로 사망 11명, 부상 17명의 인명피해가 발생하였고, 사고 유정으로부터 원유 490만 배럴(약 77.8만 톤)이 유출되어 약 2,570 km의 해안선이 오염되어 역사상 최악의 환경사고로 기록 되었다(Kim *et al.*[2011]; Choi *et al.*[2011]; KRISO[2013]).

미국은 딥워터 호라이즌호 사고 발생 후 곧바로 가용한 모든 방제장비 및 방제기술을 적용하여 유출된 기름을 제거하기 시작했다(Ha *et al.*[2010]). 유정으로부터 직접제거, 유회수기, 소각, 유처리제 등을 사용한 인위적 방제에 의해 유출유의 41%가 제거되었다(Fig. 1)(Ramseur[2010]). 인위적 방제에 의해 제거되지 않은 기름은 증발, 용해, 분산에 의한 자연적 풍화작용에 의해 유출유의 37%가 제거되었고, 나머지 22%의 기름은 해안에 부착되거나, 유막 및 타르볼 형성, 침강 및 퇴적 작용에 의해 처리된 것으로 분석되었다(Ramseur[2010]). 이와 같이 미국 방제당국은 해양에 유출된 기름의 인위적 또는 자연적 제거 경로와 양을 파악하고 추가 방제작업이 필요한 잔류기름 양을 산정하기 위해서 유출유 수지분석 모델(Oil Budget Calculator)을 개발하였고, 국가사고지휘본부(NIC) 및 방제현장에서 해양오염 방제전략 수립을 위한 핵심적인 정보를 제공하였다.

유출유 수지분석 기법은 멕시코만 딥워터 호라이즌호 사고 이전부터 유회수기에 의한 수거, 소각된 기름, 유처리제 살포량 등을 기록하기 위해 적용되었다(Douglas *et al.*[1994]; Jernelöv and Lindén[1981]; The Federal Interagency Solution Group[2010]). 기존 유류 오염 사고의 경우 선박 탱크를 조사하고, 현장에서 수거된 유류의 양을 산정하며, 유류의 거동특성을 고려하여 질량보전 표를 작성하였다. 기존의 방법들은 딥워터 호라이즌호 사고의 유출유 수지분석에 적용하는 데는 한계가 있었고, 더 정교한 기술이 필요하였다. 이에 딥워터 호라이즌호 사고 당시 미국 지질조사국(USGS), 연안경비대

(USCG), 해양대기청(NOAA), 국립표준기술연구소(NIST)가 함께 관측자료와 방제전문가에 의해 제공된 자료를 활용하여 유출유 수지분석 모델을 새로이 개발하였다(The Federal Interagency Solution Group[2010]). 이 모델은 딥워터 호라이즌호 기름유출 사고 약 2달 후인 2010년 6월 22일부터 방제를 위한 의사결정지원 도구의 하나로 공식적으로 사용되기 시작했다. 사고 약 3.5달 후인 2010년 8월 4일에는 유출유 수지분석 모델 결과를 대중들에게 처음 발표하였고, 이후 국회 및 대통령 보고자료, 보도 및 홍보자료 등에 유출유 수지분석 결과가 활발히 인용되었다(Ramseur[2010]; Lehr *et al.*[2011]; National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling[2011]).

우리나라는 선박 통항량과 유류 운송량이 많아 해상사고 발생 위험이 높고, 세계에서 해양오염에 가장 취약한 국가 중 하나이다. 또한 선박의 대형화 및 해상 운송량 증가로 매년 약 251건(2011-2015년 연평균)의 오염사고가 발생하고 있다(National Indicator System [2016]). 특히 한 국가의 대응 능력을 초과하는 재난적 오염사고로 인해 막대한 환경적·경제적 피해가 발생하고 있다. 특히, 씨프린스호 사고(1995)시 보상청구액은 736억원(Maritime Affairs and Fisheries[2002]), 허베이 스프리트호 사고(2007)로 약 7,341억원의 경제적 피해를 초래하였다(Choo[2014]). 재난적 해양오염사고가 지속적으로 발생함에도 불구하고, 체계적이고 과학적인 해양오염 대응 관리 및 기술이 부족하여 신속한 의사결정 지원에 한계가 있다. 특히 유출된 기름이 어떤 방제기술에 의해서 얼마나 회수되었고 방제가 필요한 잔류기름은 얼마나 되는지에 대한 관심은 방제 현장에서 쟁점 이슈의 하나가 되었다. 이에 본 연구에서는 딥워터 호라이즌호 사고 대응에서 성공적으로 적용된 유출유 수지분석 기법을 국내에 도입하고자 하는 목적으로 관련 모델의 기본방정식, 신뢰도, 민감도 분석을 통한 모델특성을 조사하였다. 또한 유출유 수지분석 모델을 국내 허베이 스프리트호 기름유출 사고에 시범 적용하였고, 그 결과를 국외의 중요 기름 유출사고의 수지분석 결과와 비교 검토하였다(Table 1). 이를 기반으로 유출유 수지분석모델의 국내 적용가능성을 검토하고 관련 기술을 활용한 국가 방제능력 향상을 위한 정책적 시사점을 도출하였다.

2. 유출유 수지분석 모델*

2.1 모델의 기본 특성

유류오염 현장 방제 지원시스템의 하나로 새로이 개발된 유출유 수지분석 모델은 유출된 기름의 제거 경로, 제거량 및 잔류기름을 수량화하기 위한 틀로서 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 방제인력에 의해 쉽게 얻을 수 있는 입력자료를 사용하여 운용될 수 있어야 한다.
- 사고지휘시스템 질량보전 표(ICS-209)가 제공하는 정보와 비슷한 결과를 생산해야 한다.

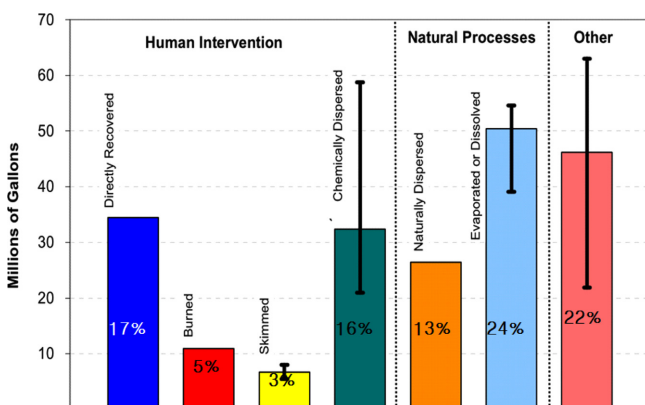


Fig. 1. Oil budget estimates with the ranges of uncertainty (Ramseur 2010: Fig. 5).

*유출유 수지분석 모델에 관한 내용 및 수식은 The Federal Interagency Solution Group[2010] 및 KRISO[2013]에 기술된 것을 정리 인용하였다.

Table 1. Major oil spill incidents in marine environment

Spill Incident	¹ Deepwater Horizon	² Ixtoc I	³ Exxon Valdez	⁴ Hebei Spirit
Area of Incident	Gulf of Mexico, USA	Gulf of Mexico, Mexico	Alaska, USA	Chungnam Province, Korea
Source of oil spill	oil well (1500 m depth)	oil well (51 m depth)	oil tanker	oil tanker
The amount of spilled oil in barrel	4.9 million	3.5 million	0.26~0.75 million	0.079 million

¹Ramseur, J.L.[2010]; ²Jernelöv, A. and O. Lindén[1981]; ³Douglas *et al.*[1994]; ⁴Kim[2008].

- 현장에서 얻어지는 불완전한 자료를 다룰 수 있어야 하고, 최상의 결과를 신뢰도와 함께 제공해야 한다.
- 방제를 고려하여 보수적인 결과를 도출해야 한다. 즉 방제가 필요한 잔류 기름양을 과소평가하기보다 과대평가하는 경향이 있어야 한다.

아울러 유출유 수치분석 모델은 현장에서 쉽게 운용할 수 있도록 단순화되었기 때문에 결과를 해석 할 때 다음과 같은 한계가 있음을 주지해야한다.

- 피해산정을 위한 틀이 아니며 유출유에 의한 환경영향평가에 사용될 수 없다.
- 유출유의 거동특성을 추적하지 않으며, 방제를 위한 의사결정에 필요한 유출유의 제거 경로, 제거량 및 잔류 기름양에 대한 정보를 제공한다.

2.2 지배 방정식

유출유 수치분석 모델은 질량보전 법칙에 기초하고 있다(Fig. 2). 오염원에서 유출된 기름에서 직접 수거된 기름(V_{DT})을 제거하여 순 유출된 유효 방류량(V_{RE})을 계산한다. 순 유출된 기름은 저층이나 해

수 중에서 자연 분산(V_{DN}) 및 화학적 분산(V_{DC}) 작용에 의해 제거되고, 그 나머지 기름이 해수면으로 떠오른다. 해수면에 떠오른 기름은 기계적 회수(V_{NW}), 소각(V_{BU}) 및 유처리제에 의한 화학적 분산(V_{DS}) 등 다양한 방제작업에 의해 제거된다. 인위적 방제작업으로 제거되지 않은 기름은 증발/용해(Z), 분산(V_{NS}) 등 자연의 풍화작용에 의해 제거된다. 방제작업과 풍화작용에 의해 제거되지 않은 남은 잔류기름(V_S)은 타르볼을 형성하거나, 침강 및 퇴적, 또는 해안에 부착될 수 있다.

이러한 프로세스에 대한 지배 방정식은 다음과 같다(The Federal Interagency Solution Group[2010]).

2.2.1 유효 방류량(순 유출량)

유효 방류량(V_{RE})은 오염원에서 분출되는 전체 기름양에서 직접 수거되는 양을 빼서 식 (1)과 같이 계산된다.

$$V_{RE}(t) = V_R(t) - V_{DT}(t) \quad (1)$$

여기서, t =시간(일), $V_R(t)=t$ 일에 방류되는 기름의 양, $V_{DT}(t)=t$ 일에 직접 수거되는 기름의 양을 의미한다.

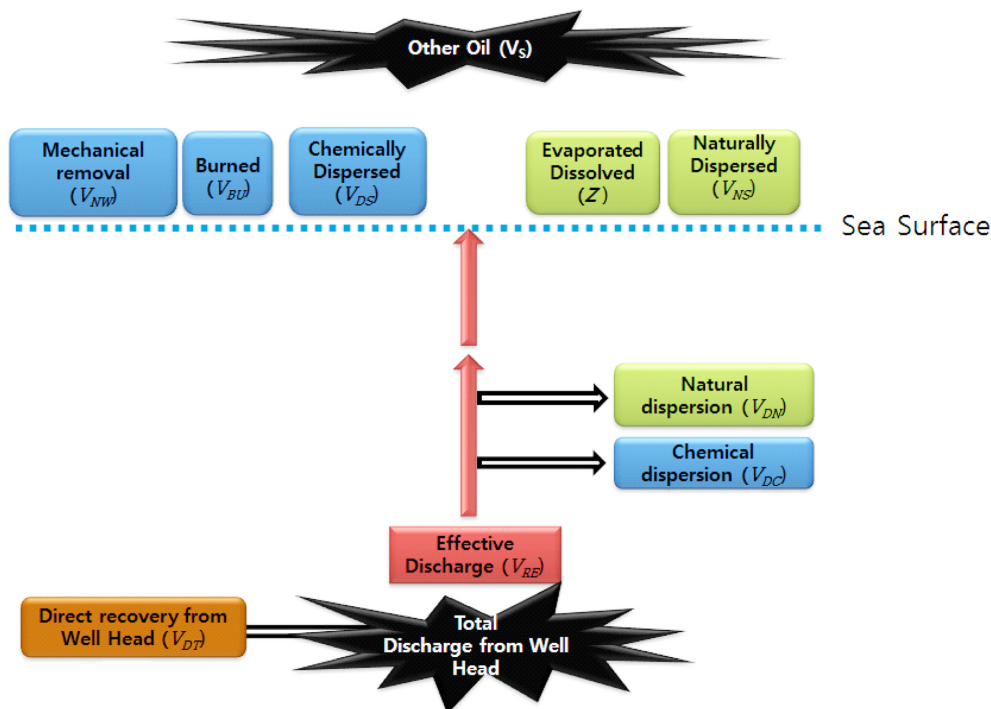


Fig. 2. A diagram for oil budget calculation based on mass balance of spilled oil (modified from The Federal Interagency Solution Group [2010]; Fig. 1).

2.2.2 해수면 아래에서 화학적으로 분산된 기름

해수면 아래에서 분산제를 사용해서 분산된 기름 양은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$V_{DC}(t) = (1 - k_7) \min(90 \cdot k_2 V_{CB}(t), V_{RE}(t)) \quad (2)$$

여기서, V_{DC} =화학적 순 분산량, k_2 =해수면 아래의 화학적 분산율, k_7 =분산된 기름 용해율, V_{CB} =유류 분출구에 삽입된 분산제 양을 의미한다. 이때 분산된 기름양은 유효 방류량보다 크지 않아야 한다.

2.2.3 해수면 아래에서 자연 분산된 기름

저층에서 분산제에 의해 제거되지 않은 기름 중 자연 분산된 기름양(V_{DN})은 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{DN}(t) = (1 - k_7) \max(0, k_1(V_{RE}(t) - V_{DN}(t)/(1 - k_7))) \quad (3)$$

여기서 k_1 =해수면 아래의 자연 분산율이다.

2.2.4 해수면 아래에서 총 분산량

해수면 아래에서 총 분산량은 화학적 분산량(V_{DC})과 자연적 분산량(V_{DN})의 합(V_{DB})으로 식 (4)로 계산된다. 여기서 해수면 아래에서 분산된 기름은 증발되지 않고, 용해된 기름을 포함하지 않는다고 가정한다.

$$V_{DB}(t) = V_{DC}(t) + V_{DN}(t) \quad (4)$$

2.2.5 기계적 회수에 의해 수거된 기름

유회수기를 사용한 기계적 회수에 의해 수거된 액체는 유류와 물의 혼합물이기 때문에, 수거된 기름의 양(V_{NW})은 비율 상수 k_6 를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$V_{NW}(t) = k_6 V_{OW}(t) \quad (5)$$

여기서 V_{OW} =기계적 회수에 의해 수거된 기름-물 혼합 액체량, k_6 =유회수기에 의해 제거된 기름-물 혼합물 중 기름 비율을 의미한다. 풍화작용 과정에 있는 모든 기름은 기계적 회수가 가능하다. 본 방정식은 회수된 기름 대부분은 오래된 기름임을 가정하며, 수거된 기름은 증발성분이 제거되었다고 가정한다.

2.2.6 증발/용해된 기름

증발 또는 용해된 기름양은 첫째날 해수면에서 증발/용해된 기름과 둘째날 증발/용해된 기름으로 계산된다. 첫째날(t) 표층으로 올라온 기름(Z)은 V_{RE} 와 V_{DB} 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$Z = V_{RE}(t) - V_{DB}(t)/(1 - k_7) \quad (6)$$

해수면에서 자연 분산이나 유회수기에 의한 제거를 무시하면, $t-1$ 일에 해수면에 올라온 기름 중 남아 있는 양(W)은 비율상수 k_4 (첫째 날 증발율)를 사용하여 다음과 같이 계산된다.

$$W(t-1) = (1 - k_4)Z(t-1) - V_{BU}(t-1) \quad (7)$$

여기서, V_{BU} =현장소각으로 제거된 기름을 의미하며, 본 모델에서는 일일 현장 소각된 기름의 양을 사용한다. 소각은 주어진 시간 전에 해수표면에 올라온 모든 기름을 태우기 때문에, 특정한 날에 소각된 기름의 양은 때때로 그날 표층에 올라온 기름의 양보다 많을 수 있다.

순 증발 또는 용해된 기름양(V_E)은 식 (8)과 같이 계산된다. 오른 쪽 첫째 항은 첫째날 해수면에서 증발되거나 용해된 기름양을, 둘째 항은 둘째날 증발된 기름양을, 마지막 항은 분산된 기름중 용해된 기름양을 나타낸다.

$$V_E(t) = k_4 Z(t) + k_5 W(t-1) + V_{DB}(t) \quad (8)$$

여기서, k_5 =둘째날 증발율을 나타낸다.

2.2.7 해수면에서 자연 분산된 기름

해수면에서 분산작용은 에멀전화와 경쟁적인 작용이며 분산 정도는 기름의 풍화작용이 진행됨에 따라 감소한다. 해수면에서 증발과 소각된 기름양을 제거한 후 남은 유류가 자연 분산되며 다음 식으로 분산량(V_{NS})이 계산된다.

$$V_{NS}(t) = k_8 \max(0, W(t)) \quad (9)$$

여기서, k_8 =해수면에서 자연 분산율을 의미한다.

2.2.8 해수면에서 화학적으로 분산된 기름

해수면 유막에 뿌려진 분산제 양(V_{CS})과 비율상수 k_3 (해수면에서 화학적 분산율)를 사용하여 화학적으로 분산된 기름양(V_{DS})을 계산할 수 있다. 이때 분산된 기름양이 그 전날 해수면에 남은 총 유류의 양($V_S(t-1)$)보다 많지 않아야 한다.

$$V_{DS}(t) = \min(20k_3 V_{CS}(t), V_S(t-1)) \quad (10)$$

2.2.9 잔류기름

이상의 식으로 계산되지 않은 기름은 “잔류 기름(V_3)” 또는 “나머지 기름”으로 분류된다. 나머지 기름의 일부는 해수면 아래에 남아 있을 수 있지만, 본 모델 활용 목적을 고려하여 모두 표층에 있는 것으로 가정하여 방제작업으로 제거해야 할 기름으로 간주된다.

2.3 신뢰도 및 오차

유출유 수지분석 모델은 사고 현장에서 사용하기 위해 많은 단순화가 적용되었고, 불완전한 자료 및 전문가의 의견을 종합하여 개발되어 불확실성이 내재되어 있다. 이러한 모델 결과의 불확실성은 통계적 기법을 적용하여 표현된다. 유출된 기름양은 $\pm 10\%$ 오차를 가정하여 정규분포로 표현되었다. 소각된 기름양은 일일 평균, 최소, 최대값을 활용하여 정규 분포도를 작성하였다. 자연분산, 화학적분산, 유회수기에 의한 수거 및 증발 또는 용해되는 기름은 8개의 비율상수(k_1 - k_8 , Table 2)를 활용하여 통계기법을 적용하였다. 비율상

Table 2. Rate constants of oil budget calculator (The Federal Interagency Solution Group [2010]: Table A1.2). Expected values (μ) and 2.5th ($\zeta_{0.025}$) and 97.5th ($\zeta_{0.975}$) percentiles of the probability distributions that model the associated uncertainties

Rate Constant	Definition	$\zeta_{0.025}$	μ	$\zeta_{0.975}$
k_1	Natural dispersion(subsurface)	0.10	0.20	0.30
k_2	Chemical dispersion(subsurface)	2/9	4/9	1.00
k_3	Chemical dispersion(surface)	0.05	0.10	0.20
k_4	1 st day evaporation	0.33	0.37	0.44
k_5	2 nd day evaporation	0.00	0.04	0.06
k_6	Net oil fraction in skimmed oil	0.10	0.20	0.40
k_7	Dissolution of dispersed oil	0.05	0.075	0.10
k_8	Natural dispersion(surface)	0.00	0.05	0.10

수는 현장자료 및 방제전문가의 의견을 바탕으로 결정되었고, 비정규분포로 표현되었다(The Federal Interagency Solution Group [2010]: Fig. A1.3).

정규 및 비정규 확률분포로 표현된 입력변수들은 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 수치분석 모델 입력값을 결정하였다. 딥워터 호라이즌호 유류오염 사고의 경우 샘플링을 100,000번 수행하여 각각의 입력 값에 대해 계산하고 그 결과를 요약하여 출력하였다. 주요 방제활동이 완료된 이후의 유출유 수치분석 결과는 오차범위와 함께 제시된다(Fig. 1). 딥워터 호라이즌호 기름유출 사고의 경우 직접제거(17%), 소각(5%), 유회수기(3%), 유처리제(16%)에 의한 방제작업에 의해 평균 41%의 기름이 제거되었고, 자연분산(13%), 증발/용해(24%)에 의한 풍화작용에 의해 37%가 제거되었다. 자연적 풍화작용과 인위적 방제작업에 의해 제거되지 않은 나머지 기름은 유출된 기름의 22%로 유막, 타르볼, 침강 및 퇴적, 또는 해안에 부착된 기름을 포함한다. 직접제거, 소각, 유회수기에 의한 제거, 및 자연분산은, 프로세스에 대한 이해도가 높아 모델에서 계산된 추정치에 오차가 작다. 반면, 화학적 분산, 증발/용해에 의한 추정치는 오차가 크며, 이러한 오차는 잔류 기름량 추정치에 더해진다. 유출유 수치분석 모델 결과의 정확도를 높이기 위해서는 화학적 분산 및 증발/용해에 대한 더 많은 연구가 필요함을 시사한다.

2.4 민감도 분석

유출된 기름 제거 프로세스에 대한 이해도가 증가함에 따라 수치분석 모델에 적용된 가정, 지배 방정식, 통계적 접근법 등은 변할 수 있다. 이러한 변화에 모델결과가 얼마나 민감하게 반응하는지 검토되었다. 상대적으로 오차가 큰 화학적 분산, 증발/용해에 대한 민감도 조사는 관련 비율상수를 변화시키면서 조사되었다. 기본모델 지배 방정식에서는 해수면 아래 및 해수면 위에서 화학적 분산율(k_2 , k_3)이 서로 비상관적이고, 어제와 오늘의 증발율(k_4 , k_5)이 비상관적이라 가정하였다. 그러나 이들은 상관성이 있을 수 있어, 화학적 분산율 상수와 증발율 상수들 사이에 50% 상관성을 부여하여 민감도 분석을 수행하였다. 화학적 분산율, 증발율의 변화에 따라 모델 결과는 큰 차이를 보이지 않았다(The Federal Interagency Solution Group[2010]: Fig. A.1.4). 잔류기름 산정값의 상위 2.5%는 기본모델 결과와 거의 비슷한 값을 보였고, 하위 2.5%는 기본모델 결과보

다 더 작은 값을 예측하였다. 이는 기본 모델이 방제작업이 필요한 잔류기름 양을 과대평가하는 경향이 있어 방제에 더 보수적인 결과를 도출하고 있음을 보여준다.

기본모델은 유출량 및 소각량 입력값을 정규분포로 가정하고 있다. 이들 입력값을 랜덤 분포로 가정하여 최저, 최고, 또는 기대치가 모두 같은 비율로 일어난다고 가정하고 모델 민감도 검사를 실시하였다. 유출량 및 소각량에 대한 민감도 분석 결과 또한 기본 모델의 결과와 큰 차이를 보이지 않았고 기본 모델이 잔류 기름량을 더 많이 보수적으로 산정하였다(The Federal Interagency Solution Group [2010]: Fig. A.1.4). 이는 유출유 수치분석 모델이 적용된 가정이나 중요 입력변수들의 변화에 덜 민감하며, 입력값의 불확실성에도 불구하고 방제 전략 수립을 위한 일관성 있는 정보를 제공해 줄을 시사한다.

2.5 웹기반의 유출유 수치분석 툴

유출유 수치분석 모델을 방제전문가들이 현장에서 쉽게 적용할 수 있도록 사용하기 위해 다음과 같은 특성을 고려하여 웹기반의 툴로 개발되었다.

- 국가사고지휘본부(NIC) 담당자 또는 NOAA 과학자들이 쉽게 방제활동에 필요한 정보 제공
- NIC 담당자가 본 시스템에서 특정기능을 수행할 전문가를 지정
- 권한을 부여 받은 사람이 자료를 입력하고, 기록일지는 자동 저장
- 권한이 있는 사람만이 유출유 수치분석 결과(일일 및 종합 보고서)에 접근가능
- 과학적인 지원에 관여하는 전문가 만이 모델 개발을 위한 가정들과 계산식 수정 가능
- 방제, 보도 및 홍보 관련자가 사용할 수 있도록 사고기간 동안의 일별 유출유 수치분석 결과 및 누적결과를 그림이나 표로 출력

방제 현장 작업자들이 매일의 입력변수 값(예, 유출량, 소각된 기름량, 액상폐기물 수거량, 유처리제 사용량 등)을 입력하고, 비율상수 및 통계변수를 포함한 광역변수들은 통계분석이나 방제전문가에 의해 사전에 준비된 값을 사용한다. 이들 자료는 유출유 수치분석 모델에 입력되고, 설정된 가정에 따라 계산 및 통계 처리되어 일별 및 시간에 따른 수치분석 결과를 표나 그래프 형태로 불확실성과 함께 출력한다. 또한 기존에 설정된 방제 시나리오에 따라 수치분석 결과를 도출할 수 있다(Fig. 3). 2010년 7월 14일까지 최상 대응 시나리오일 경우 해상방제 및 풍화작용에 의해 유출유의 39%, 33%가 제거되었고 11%가 잔류하였다. 최악 대응 시나리오에서는 해상방제와 풍화작용으로 17%, 37%가 제거되었고 30%가 잔류기름으로 분류되었다. 최상 시나리오와 비교해 최악 시나리오의 경우 해상방제 효율이 2배 이상 낮았고 다음날 방제가 필요한 잔류기름은 약 3 배정도 많게 추정되었다. 다음날 방제전략 수립을 위해서는 잔류기름의 양을 과하게 산정하는 최악 시나리오 결과를 활용할 것이 권장된다.

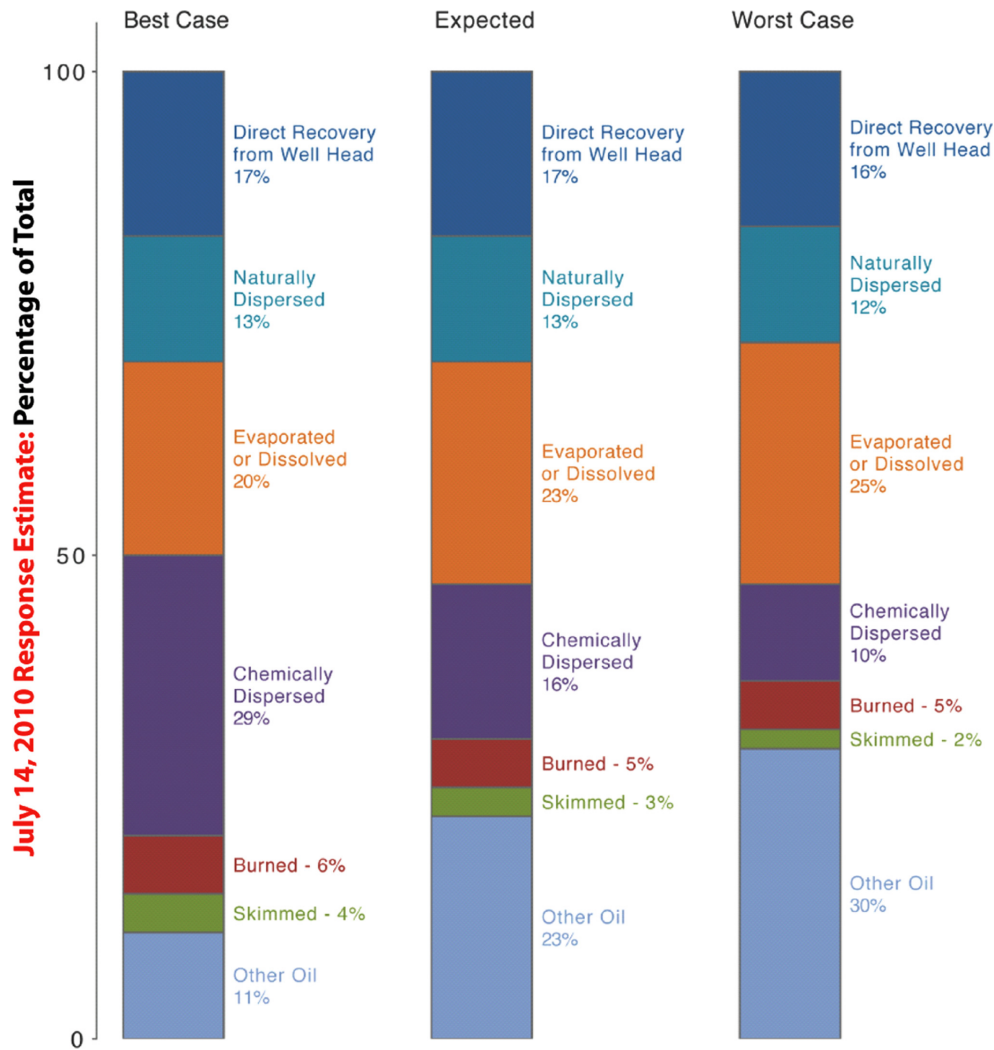


Fig. 3. Oil budget estimate expressed as percentages of the cumulative volume of oil discharged through July 14, 2010, in the best, expected, and worst case scenarios (source from The Federal Interagency Solution Group [2010]: Fig. 13).

3. 유출유 수지분석 모델의 국내 유류오염 사고 적용

미국 딥워터 호라이즌호 사고 시 개발된 유출유 수지분석 모델을 국내에서 발생한 허베이 스프리트호 유조선 기름유출 사고에 시범 적용하였다. 허베이 스프리트호 사고는 2007년 12월 7일에 발생 후 2일 동안 12,547 kl(7만9천 배럴)의 유류가 유출되었고 2008년 10월 10일 까지 약 310일간 방제작업이 지속되었다(Korea Maritime Institute[2008]). 약 213만 명의 방제인력, 선박 19,864척, 헬기 346대가 동원되었고, 오일펜스 47 km, 유회수기 42대, 유흡착제 493톤, 유처리제 298 kl가 사용되었다. 해상방제 활동으로 액상 폐기물

2,360 kl, 고형 폐기물 1,034톤이 수거되었고, 해안방제 활동에 의해 액상 폐기물 1,815 kl, 고형 폐기물 31,040톤이 수거되었다(Korea Maritime Institute[2008]). 현재 유출유 수지분석 모델이 해상방제에 초점을 맞추고 있어, 허베이 스프리트호 관련 방제 작업 중 해상방제 부분에 모델을 적용하였다. 수지분석 모델에 입력된 기름 유출량 및 방제 정보는 Table 3과 같고, 지배방정식에 사용된 비율상수(k_1 , k_8)는 딥워터 호라이즌호 사고 시 적용된 기대치(μ)(Table 2)를 사용하였다. 딥워터 호라이즌 유조선 사고와 달리 허베이 스프리트호 사고는 해상에서 발생한 유조선 사고이기 때문에 해수중에서의 분산 작용(V_{DC} , V_{DN})은 없는 것으로 가정하였다. 수지분석 모델 적용결과

Table 3. Data input for Hebei Spirit spill incident used by oil budget calculator (Based on Korea Maritime Institute [2008]: Table 3-3)

Response Information	Volume (kl)	Note
Discharge	12,547	The amount of spilled oil during the first 2 days period after the spill incident
Oily water waste	2360	Oily water waste collected from the surface water
Dispersant use	298	The amount of dispersant applied for spill response in the surface water

Table 4. Comparison of oil budget calculation for major oil spill incidents (percentage of total spilled oil)

Spill incidents	Response Activities in the surface water			Weathering Process		⁵ Others
	Mechanical Removal (Skimmed)	Burned	Chemically Dispersed	Evaporated /Dissolved	Naturally Dispersed	
¹ Deepwater Horizon	3	5	16	24	13	39
² Ixtoc I	5	1	6	50	6	32
³ Exxon Valdez	8	0	0	20	23	48
⁴ Hebei Spirit	3.8	0.0	4.8	39.5	3.2	48.8

¹Source from Ramseur [2010]. The oil directly recovered from Well Head is categorized as Others. Chemically dispersion includes both surface and subsurface application of dispersant.

²Source from Jernelöv and Lindén [1981]. 12% of spilled oil was removed by both chemical and natural dispersion. We assumed 6% was dispersed by each of chemical and natural dispersion.

³Source from Douglas [1994]. Naturally dispersed oil is the estimate during the 50 day period after the spill.

⁴The result of oil budget calculation for Hebei Spirit, based on input data in Table 3 and rate constants (μ) in Table 2.

⁵Others indicate the remaining oil that is not removed by response activities and weathering processes in the water column, which include tar balls, surface slicks, sinks due to sedimentation, beached oil, etc.

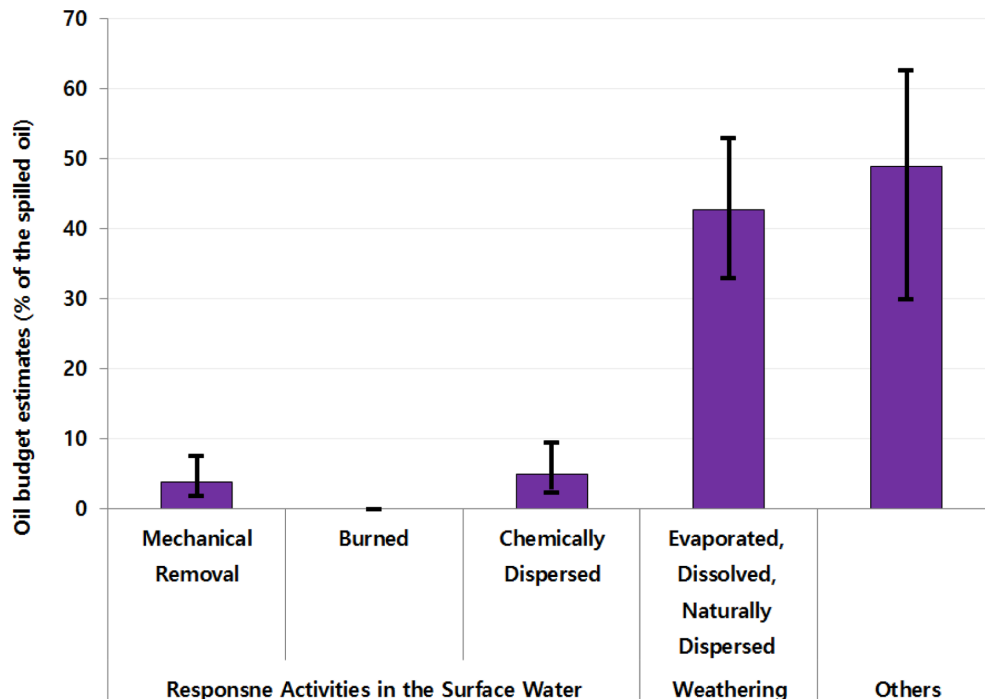


Fig. 4. Oil budget estimates for Hebei Spirit incident with the ranges of uncertainty based on expected (μ), 2.5th ($\zeta_{0.025}$) and 97.5th ($\zeta_{0.975}$) percentiles of k values.

유회수기(3.8%) 및 유처리제(4.8%)를 사용한 해상방제에 의해 8.6%가 제거되었고 증발/용해 및 자연분산에 의해 42.7%가 제거되었다(Table 4, Fig. 4). 자연적 풍화작용 및 해상방제에 의해 제거된 기름을 제외한 나머지 기름은 유출된 기름의 48.8%로, 연안방제에 의해 제거된 기름, 퇴적 및 침강된 기름 등을 포함한다. 비율상수 적용에 따라 방제방법에 따른 유출유 제거량은 차이가 있었지만, 여전히 기계적 수거와 화학적 분산에 비해 자연적 유출유 제거량이 6~17배 이상 큰 값을 보였다(Fig. 4).

4. 주요 해양오염사고 유출유 수지분석 결과 비교

국외의 주요 해양오염 사고에 대한 유출유 수지분석 기존 결과와

본 연구에서 수행된 허베이 스프리트호 수지분석 결과를 비교 검토하였다. 딥워터 호라이즌호(수심 1500 m에서 약 4.9백만 배럴 유출), 이스트록 I호(수심 51 m에서 3백 50만 배럴 유출) 사고는 멕시코만 유정에서 발생한 유출 사고이다. 엑손 발데즈호(26~75만 배럴 유출)와 허베이 스프리트호 사고는 유조선 기름유출 사고이다(Table 1). 사고 원인, 해상환경, 유출유 특성, 유출량 등의 현저한 차이에도 불구하고, 유출유 수지분석 결과는 특징적인 경향을 보여 준다(Table 4, Fig. 5).

사고 유형에 관계없이 유회수기에 의한 해상 방제는 상대적으로 제한적임을 알 수 있다. 예를 들어, 딥워터 호라이즌호 사고 시 수많은 방제정과 새로운 기술들이 도입되었지만 기계적 기름 수거량은 유출유의 3%에 불과하였다. 다른 해양오염 사고의 경우도 기계적

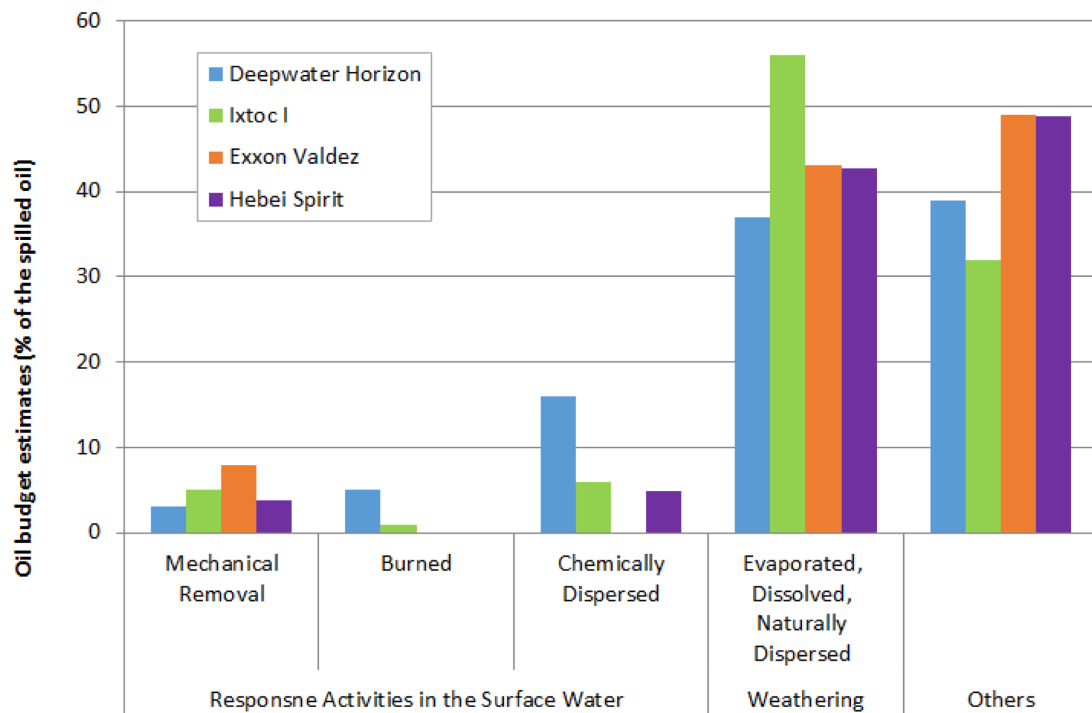


Fig. 5. Oil budget estimates for major oil spill incidents. Detail information of the estimates is explained in Table 4.

회수량은 유출유의 8%를 넘지 않았다. 소각에 의한 유출유 제거량은 1~5%로 나타났다. 딥워터 호라이즌호 사고시 소각이 적극적으로 적용되어 유출유의 약 5%를 제거할 수 있었다. 유처리제 살포에 의해 화학적 분산된 기름은 유출유의 0~16%로 사고별로 많은 차이를 보였다. 특히 딥워터 호라이즌호 사고의 경우 유출유의 16%가 화학적 분산으로 제거되어 높은 효과성이 새로이 주목받고 있다. 해수면 위에 유처리제를 살포하는 기존 방법과 병행하여 원유 유출구에 파이프를 연결하여 직접 살포하는 해저 살포를 처음으로 시도하였다(Kim *et al.*[2011]; The Federal Interagency Solution Group[2010]). 국내의 허베이 스프리트호 사고시 4.8%가 화학적 분산에 의해 제거된 것으로 추정되지만, 국내에서 사용되는 유처리제의 효율이 상대적으로 낮은 것을 고려하면 실제 화학적 분산량은 더 적을 것으로 판단된다.

유출된 기름의 37~56%는 자연적 풍화작용에 의해 제거되었다. 이는 해상 방제에 의한 유출유 제거율 8~24% 보다 크다는 것을 알 수 있다. 풍화작용에 의한 제거율은 유출된 기름의 종류, 해상에서의 분포 형태(예, 유출유의 표층 두께) 및 해상 특성(예, 온도, 풍속, 해류, 조류, 난류) 등에 따라 결정된다(ITOPF[2016]). 기름의 휘발성이 크고 풍속 및 해류가 강할 때 풍화작용에 의한 기름 제거율은 더 커진다. 예를 들어 엑손 발데즈호 사고의 경우 알래스카 해역의 강한 바람 및 해류가 유출된 기름의 43%를 분산시켰다(Table 4).

5. 종합토의 및 결론

딥워터 호라이즌호 사고시 개발된 유출유 수지분석 모델을 국내 유류 오염 사고인 허베이 스프리트호 사고에 시범 적용하였다. 유희

수기 및 유처리제를 사용한 해상방제에 의해 유출유의 8.6%가 제거되었고 자연적 풍화작용에 의한 증발, 용해 및 분산에 의해 42.7%가 제거되었다. 나머지 48.8%는 연안방제, 타르볼 형성, 해안 부착, 퇴적 및 침강 작용에 의해 처리되었다. 본 결과는 미국 멕시코만에서 적용된 수지분석 기법을 국내에 소개하고자 시범 적용된 결과로서 앞으로 추가적인 연구가 더 필요하다.

유출유 수지분석 모델이 국내 기름오염 사고시 현장 방제 톨로 공식적으로 사용되기 위해서는 계절별 지역별 해양환경, 기름 특성, 방제장비 및 방제방법 등을 고려한 모델 최적화가 선행되어야 한다. 특히, 국내의 방제특성이 고려된 비율상수(Table 2) 설정을 위한 연구가 필요하다. 해양에 유출된 기름은 풍속, 파고 등 해양기상 조건에 따라 풍화의 정도에 차이가 난다. 현재의 유출유 수지 분석모델은 해상조건에 따른 풍화작용을 고려할 수가 없는 한계가 있어 추가 보완이 요구된다. 또한 국내에서 해안방제를 적극적으로 실행하는 것을 고려하면 해안방제에 의해 제거된 기름량을 산정할 수 있는 기법이 추가 개발되어야 한다. 이러한 기술적 보완을 거쳐서 국내환경에 최적화되고 검증이 완료된 유출유 수지분석 모델은 방제작업 일일 상황 보고에 일관적이고 신뢰성 있는 정보를 제공할 수 있고, 유류오염 대비·대응을 위한 장기 방제전략 수립에도 유용하게 활용될 수 있다. 또한 유출유 수지분석 결과는 방제정보의 보도 및 홍보에도 활용될 수 있어 정책결정자, 이해당사자, 일반 국민들에게 방제정보를 효과적으로 전달하는데 도움을 줄 수 있다. 그러나 유출유 수지분석 모델 결과는 방제 현장에서 긴급 의사결정을 지원하기 위해 함이기에 환경영향평가, 유류오염 피해보상 등 방제 이외의 목적으로 활용되지 않도록 주의가 요구된다. 앞으로 국내에서 수지분석 모

텔을 활용할 경우 그 결과 해석이나 활용 범위에 대한 구체적인 명시를 통해 잘못 활용되는 것을 방지하기 위한 노력이 필요하다.

본 연구의 주요 시사점은 우리나라에서 방제방법의 하나로 중점고려하고 있는 기계적 회수기법의 한계가 분명하다는 점이다. 현재 우리나라의 국가방제능력은 200,000톤급 유조선이 사고로 60,000톤의 기름이 유출되는 것을 가정하여, 이중 1/3(약 33.3%)을 해상에서 회수하기 위한 목표를 설정하고 있다(Kim[2008]). 이러한 목표달성을 위해 해상방제 기법의 하나인 기계적 회수에 초점을 두고 방제전략을 수립하고 있다. 주요 해양오염 사고시 기계적 회수에 의한 방제효율이 유출유의 3~8%로 낮은 것을 고려하면 유출기름의 33% 이상을 제거하는 것은 매우 도전적인 목표이다. 이스톡[호] 사고의 경우 해상방제에 의한 이론적 수거량은 유출유의 20%였지만 다양한 장애물로 인해 실제 기계적 수거량은 5%로 매우 저조하였다(Jernelöv, A. and O. Lindén[1981]). 국내의 해상 방제능력을 현저히 높이기 위해서는 기계적 수거 기법과 함께 다양한 방제기법을 도입하기 위한 노력이 필요하다. 예를 들어, 국내에서는 아직 고려되고 있지 않은 소각 및 매우 제한적으로 적용되고 있는 유처리제 사용에 대한 논의가 필요한 시점이다. 멕시코만 딥워터 호라이즌호 사고시 소각 및 화학적 분산이 유출유 제거에 효과적임이 입증되었고, 국제해사기구 및 노르웨이를 포함한 방제 선진 국가에서는 소각 및 유처리제의 활용을 방제전략에 추가하고 있음을 주지할 필요가 있다.

그러나 소각이나 유처리제 사용은 생태계 및 수산업 활동에 새로운 위협이 될 수 있어 정부부처 및 이해관계자들 사이에서 상당한 논란이 예상된다. 유처리제의 사용은 유출된 기름의 생물학적인 분해를 증가시키고 해양오염을 줄일 수 있는 장점이 있지만, 화학적으로 분산된 기름은 기계적 회수가 불가능하고 생태계 먹이사슬을 통한 위협요인이 될 수 있다(Laleian A. and Azwell T.[2011]). 또한 해양환경에 투입된 유처리제는 독성 화학물질로 해양생태환경에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 새로운 방제기술 사용을 위한 가이드라인 제시가 필요하며, 환경 모니터링, 독성실험, 천연자원 피해평가(NRDA), 수산물 안전관리 등에 관한 과학적이고 객관적인 정보제공을 통해 방제활동에 대한 대국민 인식 전환 노력이 필요하다.

인위적인 방제에 의한 유출유 제거와 함께 자연적 풍화작용(증발, 용해, 자연분산 등)에 의한 기름 제거 능력을 파악하고 그 속도를 향상하기 위한 다양한 노력들이 필요하다는 점도 중요한 결론의 하나이다. 아울러 유출유 수지분석 기법을 활용하여 방제기술에 따른 유출유 제거량 및 효율성을 분석 비교함으로써 사고 현장별 환경 특성에 최적화된 방제기법을 운용하여 기름 유출사고로 인한 환경피해가 최소화 될 수 있도록 해야한다.

후 기

본 연구는 국민안전처 해양경비안전본부 및 UN환경계획(UNEP)이 지원하는 “NOWPAP 방제지역활동센터 운영 및 연구사업”과 국

민안전처의 재원으로 재난안전기술개발사업단이 지원하는 “빅데이터 분석을 통한 해역별 해양오염사고 위험도 평가 및 대응지원 시스템 구축과제(과제번호: MPSS-해경-2016-05)”에서 수행한 성과물의 일부입니다.

References

- [1] Choi, H.-S., Lee, S.-K. and Do, C.-H., 2011, Subsea responses to the BP Oil Spill in the Gulf of Mexico. *J. Ocean Eng. Technol.*, 25(3), pp 90-95.
- [2] Choo, J.-M., 2014, Hebei Sprit oil spill incident, National Archives of Korea, <http://www.archives.go.kr/next/search/listSubjectDescription.do?id=009324&pageFlag=>. Visited on Oct. 2016.
- [3] Douglas, A.W., Hameedi, M.J., Galt, J.A., Watabayashi, G., Short, J., O'claire, C., Rice, S., Michel, J., Payne, J.R., Brad-dock, J., Hanna, S. and Sale, D., 1994, The fate of the oil spilled from the Exxon Valdez, *Environment Science Technology*, Vol. 28, No. 13, pp. 561A-568A.
- [4] Ha, C.-W., Kim, S.-W., Yoon, J.-Y. and Kim, H.-K., 2010, A study on the response system for Gulf of Mexico oil spill in USA. *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 45-49p.
- [5] ITOPE, 2016 accessed, Fate of marine oil spills, Technical Information Paper 2, The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, London, United Kingdom. Accessible at <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/fate-of-oil-spills/>, Visited on Oct. 2016.
- [6] Jernelöv, A. and Lindén, O., 1981, Ixtoc I: A case study of the world's largest oil spill, *Ambio*, Vol. 10, No. 6, The Caribbean, pp. 299-306.
- [7] Kim, S.-W., 2008, The proposals for improvement of oil pollution preparedness and response system from the oil spill incident of the tanker Hebei Sprit, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, Vol. 30, No. 2, pp. 115-120.
- [8] Kim, S.-W., Lim, C.-S., Lee, W.-S. and Ha, C.-W., 2011, A study on the improvement of national marine pollution response policy based on the analysis of Gulf of Mexico Oil Spill Incident, *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, Vol. 17, No. 3, pp. 257-264.
- [9] Korea Maritime Institute, 2008, A study on advanced response system for oil spill, Korea Coast Guard, 189p.
- [10] KRISO (Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering), 2013, A study on the responses to Gulf of Mexico oil spill incident, Korea Coast Guard, 121p.
- [11] Laleian, A. and Azwell, T., 2011, The tradeoffs of chemical dispersant use in the marine oil spills. Deepwater Horizon Study Group Working Paper.
- [12] Lehr, W., Aliseda, A., Overton, E. and Leifer, I., 2011, Computing mass balance for the Deepwater Horizon spill. 2011 International Oil Spill Conference, 11p.
- [13] Maritime Affaires and Fisheries, 2002, White paper on Sea Prince oil spill incident. 326 pp.

- [14] National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, 2011, Deep Water: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling, Report to the President, 380p.
- [15] Ramseur, J.L., 2010, Deepwater Horizon oil spill: The fate of the oil, CRS Report for Congress, Congressional Research Service, 20p.
- [16] The Federal Interagency Solution Group, 2010, Oil budget calculator: Deepwater Horizon, Technical Documentation: A report to the National Incident Command, 50p.
- [17] National Indicator System, 2016, Status of Marine pollution incidents, Ministry of Public Safety and Security, http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1626, Visited on October 2016.

Received 14 October 2016

Revised 28 October 2016

Accepted 3 November 2016