



Original Article

유회수기의 회수능력 산정방법 개선에 관한 연구: 우이산호 유류오염 사례를 통한 비교분석

김현욱¹ · 최윤선¹ · 허철^{2,†}

¹한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과 대학원생

²한국해양대학교 해양과학기술전문대학원 해양과학기술융합학과 교수

A Study on the Improvement of Skimmer's Recovery Capacity Estimation: Comparative Analysis with WuYiSan Oil Spill Case

Hyeonuk Kim¹, Yunseon Choe¹, and Cheol Huh^{2,†}

¹Graduate student, Department of Convergence Study on Ocean Science and Technology, Ocean Science and Technology School(OST), Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

²Professor, Department of Convergence Study on Ocean Science and Technology, Ocean Science and Technology School(OST), Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

유출유의 거동특성, 해양환경과 장비의 효율이 반영된 유회수기의 회수능력을 시간 경과에 따라 수치해석적으로 계산하였다. 이를 2014년 1월 31일에 발생한 우이산호 유류오염 사고에 적용하여 유회수기의 회수능력을 추정하였다. 유회수기 명목 용량을 이용한 회수량과 본 연구의 회수능력 추정 모델을 이용하여 계산된 회수량 추정 결과를 비교하였다. 명목 용량을 이용하여 추정된 회수량은 실제 값보다 과대 예측하는 경향이 있었다. 본 연구의 모델로 계산된 회수량이 실제 수거량 결과와 가장 유사한 결과를 보였다. 유회수기의 회수능력 추정 모델은 향후 효율적 방제전략 수립에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract – Estimation of marine oil spill recovery capacity using skimmer was calculated. The weathering process of spilled oil, marine environment, and efficiency change of skimmer over the time were numerically calculated. To verify the calculation model, WuYiSan oil spill accident happened on January 31, 2014 was selected as benchmarking test. A comparative analysis on the recovery capacity using the nameplate capacity and the present calculating model was carried out. The nameplate capacity estimations showed overestimation. On the other hands, the calculation results of the present study showed similar recovery capacity with actual value. The recovery capacity estimation model used in this study will be helpful in establishing the response strategy in the future.

Keywords: Oil Spill(유류 유출), Weathering Process(풍화과정), Recovery Efficiency(회수효율), Skimmer(유회수기), Recovery Capacity(회수능력)

1. 서 론

우리나라를 포함하여 전 세계적으로 선박 사고에 의해 크고 작은 해양에서의 기름 유출 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 선박 사고에 의한 기름 유출은 해양 생태계와 민감 자원에 피해를 주고 막대한 경제적 손해를 발생시킨다(Chun *et al.*[2018]). 이러한 기름 유출 사고 시 여러 방제기술과 장비들이 동원되어 사고 지역에서 방제

작업이 시행된다.

국내에서는 1995년 씨프린스호 기름 유출 사고 이후 부족한 방제 장비를 확보할 목적으로 ‘국가방제능력’을 도입하였다(KCG[2011]). 2011년 이후 ‘국가방제능력’에서 ‘해상 기름회수 목표량’으로 용어가 변경되었으며, 각 지역방제 실행계획에 따라 위험평가에서 산출된 가상의 최대 유출량을 산정하여 동원계획을 수립하고 있다(KCG [2011]). 지역방제 실행계획에서는 사고 시 유출유의 증발, 유상화 등과 같은 화학적인 변화는 없는 것으로 가정하고, 해안 부착 가능성을 고려하여 지역, 권역 및 국가 대응 단계에 따라 평가한다

†Corresponding author: cheolhuh@kmou.ac.kr

(KCG[2005]). 국내의 해상 기름회수 목표량 산정 시 해상방제 일수에 따라 유회수기 명목 용량의 총합, 작업시간, 효율 계수 및 동원율을 고려하여 유회수기의 회수능력을 산정한다(KCG[2011]). 미국에서는 유회수기의 명목 용량, 작업시간 및 효율(0.2)을 고려하여 1일 유효기름 회수용량(EDRC : Effective Daily Recovery Capacity)을 정의하고 있다(USCG [1997]). 이와 같은 선행연구에서는 유회수기의 해상 회수능력을 산정함에 있어 장치의 특성과 시간에 따라 변화하는 유출유의 특성을 고려하는 대신 일정한 효율 계수(0.2)를 적용하고 있다.

더욱 합리적인 방제자원 동원계획 수립을 위해서는 유회수기의 회수능력을 추산하기 위한 세부 사항을 정확히 고려할 필요가 있다. 해상에 기름이 유출되면 비중이나 동점성과 같은 유출유의 특성 및 유출된 해역의 풍속, 파고, 수온과 같은 해상환경조건에 의해서 기름의 거동특성이 변하는 현상이 발생하는데, 이를 유출유의 풍화작용(weathering process)이라고 한다(Fingas[2011]). 유출유의 특성이 변화하면 이를 회수하기 위한 유회수기의 회수효율도 변화한다(Fingas[2004]). 이에 따라 동원해야 할 방제 장비의 수량과 같은 방제전략 또한 달라지기 때문에 기름 유출 사고 시 기름의 풍화과정을 파악하는 것은 필수적이다(Fingas[2011]). 따라서 실제 사고에서 방제전략을 수립할 때, 유출유의 증발(evaporation), 유상화(emulsification), 자연 분산(natural dispersion) 등과 같은 풍화과정과 이로 인한 유출유의 특성 변화에 따른 유회수기의 회수효율이 반영된 유회수기의 회수능력 추산이 필요하다.

유출유의 거동특성을 파악하기 위한 많은 선행연구가 수행되었으며, 특히 해상에 잔존하는 기름의 물리화학적 풍화작용을 모사하기 위한 수치 모델이 지속해서 개발되었다(Sebastiao and Soares[1995]; Lehr *et al.*[2002]; Genwest[2012]; Berry *et al.*[2012]; Spaulding[2017]). ROC(Response Options Calculator)는 ADIOS2(Automated Data Inquiry for Oil Spills)의 자연 분산, 증발, 유상화와 같은 풍화과정 모델을 기반으로 유출유의 밀도(density), 점성(viscosity) 및 에멀전의 물 함유량(water contents) 등의 유류특성 변화를 계산한다(Lehr *et al.*[2002]; Dale[2011]). 이러한 모델은 해상 잔존유의 특성을 파악함으로써 사고 대응에 적합한 유회수기의 선정과 필요수량을 산정하는 데 도움이 되고 있다.

본 연구에서는 ROC의 풍화과정 알고리즘(Galt[2014])의 세부 모델을 기반으로 유출유의 특성 변화를 시간 경과에 따라 계산할 수 있는 수치해석 모델을 작성하였다. 이를 활용하여 유출유의 거동특성, 해양환경 조건과 장비의 효율이 반영된 유회수기의 회수능력을 산정하였다. 이를 2014년 1월 31일에 발생한 우이산호 유류오염 사고에 적용하여 유회수기의 회수능력을 추정하는 계산을 수행하였다. 계산 결과로부터 동원된 유회수기의 회수량을 산정하였고, 실제 회수량과 비교 검토하였다. 또한, 기존의 회수량 추정방식과 비교함으로써 기존 방식이 유회수기의 해상 유출유 회수량 산정에서 갖는 한계점을 분석하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 수치해석 모델

2.1.1 풍화과정 모델링

해상에서 유출유의 확산속도는 주로 유류의 유출량과 점성, 환경조건에 따라 결정된다. 기름의 확산은 시간 경과에 따라 중력과 관성력의 평형(gravity-inertia spreading), 중력과 점성력의 평형(gravity-viscous spreading), 표면장력과 점성력의 평형(surface tension-viscous spreading) 단계로 진행된다(Fay[1971]). 점성이 낮은 유류는 점성이 높은 유류보다 비교적 더 빨리 확산되고, 시간이 지남에 따라 유류특성보다는 환경조건이 확산의 주된 요인으로 작용한다(Hoult[1972]). 본 연구의 관심 시간 척도(time-scale)에서는 Fay[1971]의 연구 결과에 따라 중력과 점성력 평형에 의한 유출유 확산이 지배적이므로 선행연구를 참고하여 확산면적과 유막의 두께를 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$t = \frac{V}{A(1-Y)} \times C_1 \times C_2 \quad (1)$$

식 (1)은 에멀전에 의한 유막 두께의 증가와 액적의 거동을 모두 고려한 것이다. C_1 은 유막이 파도에 의해 부서져 생성된 기름 액적의 수직 거동을 고려한 계수이며 이는 재부유(refloating)된 기름 액적이 유막의 면적에 추가되는 것을 고려한 것이다. C_2 는 부유 기름 표층에서 windrow로 인한 면적 변화를 고려한 계수이다. 각 계수는 기름의 특성 및 환경조건에 따라 정의되는 값으로 Galt and Overstreet[2009]의 연구내용을 참고하여 적용하였다.

기름의 시간당 증발량은 Jones[1997]의 유사성분(pseudo-component) 증발량 산정방식을 이용하여 식 (2)와 같이 계산하였다.

$$\frac{dV_e}{dt} = \frac{A \times K_i \times P_i \times V_i}{R \times T \times \sum_{j=1}^{n_c} \frac{V_j}{V_j}} \quad (2)$$

물질전달 계수 K_i 는 풍속 및 기름의 성분에 따라 결정된다. 기름은 여러 탄화수소 성분들로 구성되며 증기압 P_i 는 기름의 탄화수소 성분에 따라 달라진다.

해상에 유출된 기름은 조류 및 해류에 따라 기름 액적의 크기가 변화하고 자연 분산(natural dispersion) 과정을 거치게 된다. 분산의 비율은 주로 유류의 특성과 해황에 따라 결정되는데, 쇄파가 존재하는 곳에서 점성이 낮을 때 가장 빨리 진행된다. 자연 분산에 의한 기름 액적의 비말율(entrainment rate)은 Delvigne and Sweeny[1988] 및 Lehr *et al.*[2002]의 연구 결과를 통하여 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$Q_e = C_0 D_{ba}^{0.57} S_{cov} F_{wc} d_o^{0.7} \quad (3)$$

여기서 C_0 는 기름의 소산(Dissipation) 상수이며, 이는 기름 점성의 함수로써 제시된다.

유류가 해상에 존재하면 물을 흡수하여 점성과 밀도가 증가하는

에멀전이 형성된다. 에멀전의 비율은 탄화수소 화합물의 종류와 풍속 및 파고에 따라 결정된다(Eley[1988]). 본 연구에서는 선행연구(Eley[1988]; Lehr *et al.*[2002])를 참고하여 식 (4)를 통해 시간 경과에 따라 유출유의 유상화에 의한 수분 함량(Y)을 계산하였다.

$$Y = \frac{S_c d_w}{6 + S_c d_w} \quad (4)$$

기름과 물의 계면 영역(S_c)은 파 에너지의 영향을 받으며 풍속의 함수로써 구해진다(Lehr *et al.*[2002]).

상기와 같이 시간 경과에 따라 진행되는 풍화과정은 유류의 물성치를 변화시킨다. 식 (5)는 기름의 풍화과정 및 환경조건에 따른 점성 변화에 대한 관계식이다(Mackay[1982]).

$$v = v_0 \left(\exp^{C_{temp} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \times \exp^{C_{evap} F} \times \exp^{\left(\frac{2.5Y}{1 - C_{emul} Y} \right)} \right) \quad (5)$$

점성 증가는 유출유의 특성(v_0), 해수 온도(T), 및 풍화과정에 따른 증발(F)과 유상화(Y)에 영향을 받는다. 온도 상수(C_{temp}) 및 증발 상수(C_{evap})는 Mackay[1982]의 기름 거동 실험으로 산출된 값이다. 에멀전 상수(C_{emul})는 에멀전 기름 입자 크기 증가에 따른 값으로 표현된다(Lehr *et al.*[2002]). 점성 증가는 방제 장비의 효율에 영향을 줄 수 있으며 이는 다음 절에 서술하였다.

본 연구에서는 유회수기의 회수능력 분석을 위하여 유출유의 거동특성에 영향을 미치는 풍화과정을 모델링하여 시간 경과에 따라 계산할 수 있도록 하였다. 이를 통해 유출유의 풍화과정에 따른 기름특성 변화를 고려하고 이것이 회수능력에 미치는 영향을 분석하였다.

2.1.2 회수량 모델링

Fig. 1은 방제정과 유회수기를 이용한 기계적 회수시스템을 나타낸다. 회수시스템은 부유 기름을 모으기 위한 오일 붐(oil boom), 방제정(OSRV)에 장착된 유회수기(skimmer), 회수된 폐유 저장을 위한 저장 탱크(storage) 및 저장 탱크에서 기름과 함께 회수된 해수를 배출하는 장치(decanting facility)로 구성된다(ASTM[2010]).

오일 붐으로 기름 유막이 들어오는 조우율(Encounter Rate, ER)은

식 (6)과 같이 계산된다.

$$ER = W \times v \times t \quad (6)$$

여기서 W = sweep width, swath
 v = tow speed
 t = oil thickness calculated in eq.(1)

본 연구에서는 기름이 오일 붐 밖으로 유실되지 않고 잘 포집될 수 있는 적정 속도가 0.5 knot에서 1 knot 사이인 것을 고려하여(ITOPF[2011]), 예인 속도를 0.75 knot로 가정하였다. 또한, 유출된 기름을 포집하기 위해 국내 보유 방제정에 설치된 스위핑암의 폭(KCG[2015a])을 고려하여 스위핑 폭(swath)을 17 m로 가정하였다. 유막의 두께는 시간 경과에 따른 확산을 고려하여 식 (1)을 통해 계산하였다.

식 (6)에서 오일 붐으로 유입되는 조우율 중, 동반되는 해수를 제외한 유회수기로 회수되는 기름/에멀전 회수율(Oil and Emulsion Recovery Rate, ERR)은 식 (7)과 같이 계산하였다.

$$ERR = TFRR \times RE = ER \times TE \quad (7)$$

여기서 $TFRR$ = Total Fluid Recovery Rate
 RE = Recovery Efficiency
 TE = Throughput Efficiency

유회수기를 통해 회수된 에멀전에 포함된 물을 제외한 순수 기름 회수율(Oil Recovery Rate, ORR)은 기름/에멀전 회수율에서 식 (4)로 계산되는 수분 함량(Y)을 제외한 값을 곱한 것으로 식 (8)과 같이 계산하였다.

$$ORR = ERR \times (1 - Y) \quad (8)$$

회수효율(Recovery Efficiency, RE) 및 처리효율(Throughput Efficiency, TE)의 정의는 다음과 같다.

$$RE(\%) = \frac{\text{Volume of Oil/Emulsion Recovered}}{\text{Volume of Fluid Recovered}} \times 100 \quad (9)$$

$$TE(\%) = \frac{\text{Volume of Oil/Emulsion Recovered}}{\text{Volume of Oil/Emulsion Encountered}} \times 100 \quad (10)$$

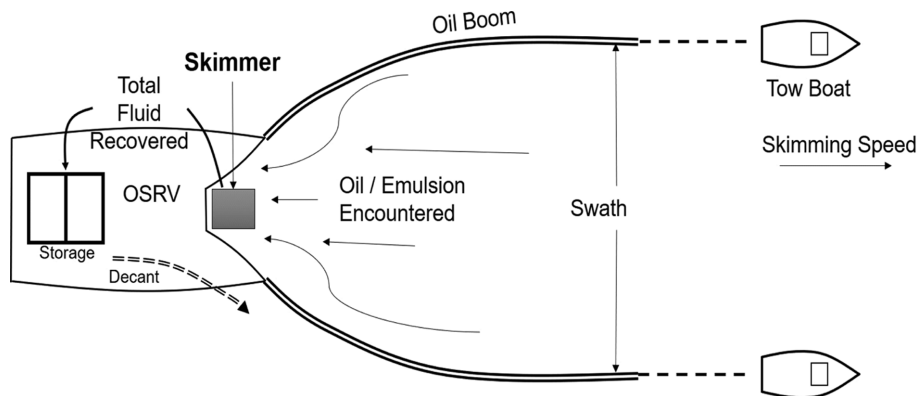


Fig. 1. Schematic of mechanical recovery system through the OSRV (Oil Spill Response Vessel) (ASTM[2010]).

식 (9)에 정의된 바와 같이 회수효율(RE)은 유회수기를 통해 회수된 총회수량 중, 해수를 제외한 기름/에멀전의 양을 나타낸다(ASM [2016a]). 이는 해상환경조건, 기름특성, 유회수기의 종류에 따라 달라진다. 유입되는 기름/에멀전의 양 대비 유회수기로 회수되는 양은 식 (10)에 나타난 바와 같이 처리효율(TE)로 정량화할 수 있다(ASM[2016a]). 처리효율은 사고 해역의 유속 및 유회수기가 설치되는 방제정의 속도(tow speed)에 따라 달라지며, 본 연구에서는 75%로 가정하였다.

유회수기의 명목 용량(nameplate recovery rate)은 잔잔한 해양 환경조건(calm sea state) 및 충분히 두꺼운 유막과 같이 이상적인 조건에서 회수할 수 있는 유회수기의 최대 용량으로 정의된다(ASM[2016b]). 본 연구에서는 총회수율(TFRR)이 유회수기의 명목 용량이 허용할 수 있는 한계치를 초과하게 되면, 총회수율은 명목 용량과 같다고 가정하였다.

방제정의 유회수기를 통해 수거한 기름은 폐유 저장 탱크에 저장되며, 가득 채워지면 해안 또는 저장 전용 바지선으로 하역하는 작업이 필요하다. 따라서 폐유 저장 공간을 사고에 동원된 방제정의 제원에 따라 각각 다르게 설정하고, 각 방제정의 폐유 하역작업을 위한 해안으로의 이동 및 하역시간을 1시간으로 가정하여 이 시간 동안은 방제작업이 중단되는 것으로 계산하였다.

2.2 유회수기 회수효율

본 연구의 목적인 유회수기의 회수능력 정량화를 위하여 유회수기의 회수효율을 분석하였다. 식 (9)에 정의된 바와 같이 회수효율은 유회수기를 통해 회수되는 총회수량 중, 해수를 제외한 회수되는 기름 에멀전 양만을 고려한 값이다. 예를 들어, 45%의 회수효율을 가지는 유회수기를 통해 총 100 kl 만큼 회수했다고 가정했을 때, 기름 및 에멀전의 양은 45 kl이며, 해수의 양은 55 kl이다. 따라서 유회수기의 회수효율이 높다는 의미는 같은 양의 유체를 유회수기를 통해 회수하였을 때, 회수되는 해수가 적다는 의미라고 할 수 있다.

본 연구에서는 유출유의 풍화과정을 반영한 회수능력 산정을 위하여 유출유의 점성 증가 및 해상환경 조건으로 인한 유회수기의 회수효율의 변화를 반영하였다. 유회수기는 기계적 특성 및 회수 원리에 따라 여러 종류로 나뉘며, 각각 다른 회수효율을 가진다(Schulze[1998]). 국내에서는 지역별로 다양한 종류의 유회수기를 보유하고 있으며 대부분 친유성(oleophilic) 흡착식 유회수기이다(KCG[2017]).

Fig. 2(a)와 (b)는 각각 점성과 풍속에 따른 유회수기의 회수효율의 변화를 나타낸다(Genwest[2012]). Fig. 2(a)와 같이 회수효율은 기름의 점성이 증가함에 따라 감소한다. 또한, 풍속이 증가함에 따라 Fig. 2(b)와 같이 회수효율이 감소하며, 약 20 knots 이상의 풍속에서는 유회수기를 통한 기계적 회수작업의 효율이 급격히 감소한다. 본 연구에서는 우이산호 사고 시나리오에서 시차별로 투입된 모든 유회수기가 친유성 흡착식 유회수기인 점을 고려하여(KCG[2015b]) 그룹 A의 회수효율을 적용하였다.

2.3 계산 조건

유회수기를 이용한 회수시스템의 회수능력을 산정하기 위한 사례로써 2014년 1월 31일에 여수에서 발생한 우이산호 유류오염사고를 적용하였다. Table 1에 실제 사고의 사고 발생 시간 및 해상 방제 기간, 유출량과 사고 당시 풍속을 정리하였다. 사고 선박은 원유 하역 차 여수 GS칼텍스 원유 2부두에 접안 중 돌핀잔교 송유관과

Table 1. Oil spill accident scenario of WuYiSan case (KCG[2015b])

Oil spill time	2014. 1. 31. 10:00
Recovery period	2014. 1. 31. 11:00~2014. 2. 4. 14:00
Spill volume	800~899 kl
Spilled oil (amount)	Crude Oil (483.9 kl)
	Naphtha (284.1 kl)
	Oily mixture (32~131 kl)
Wind speed	8~10 m/s

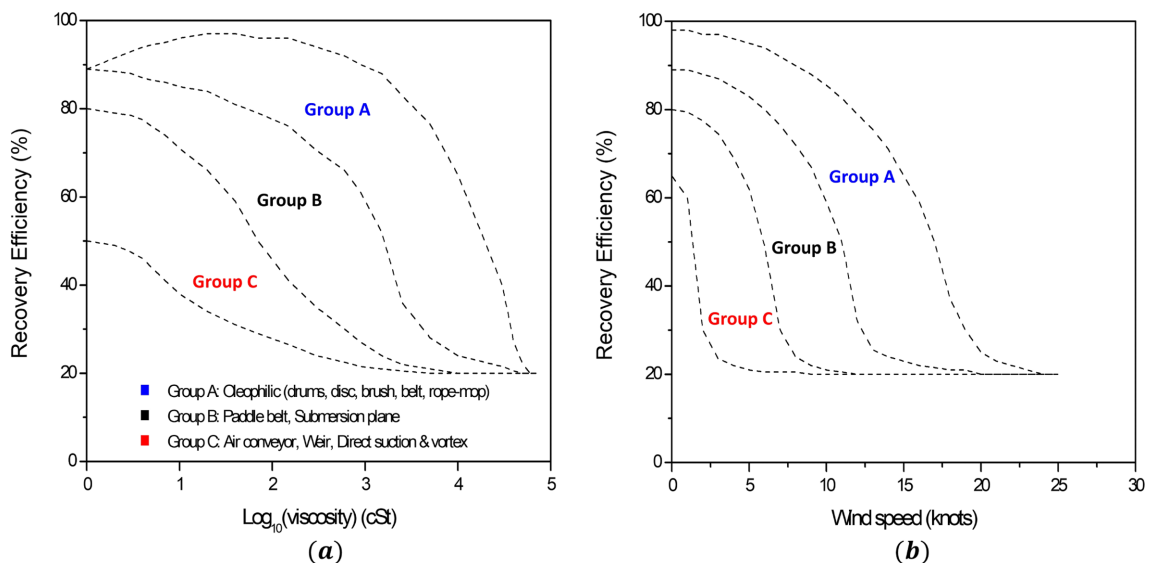


Fig. 2. Recovery efficiency vs. viscosity with calm sea condition (a) and wind speed (b) (Genwest[2012]).

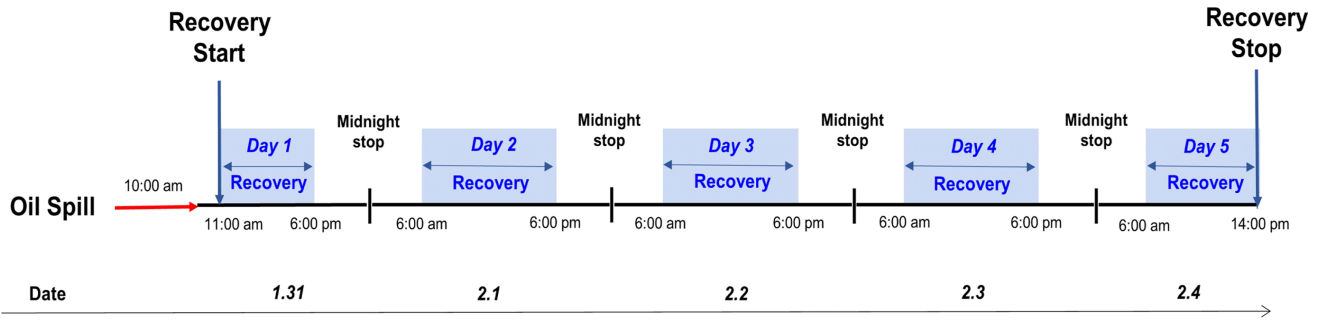


Fig. 3. Timetable of WuYiSan oil spill accident scenario.

충돌하여 송유관 내부에 있던 원유, 나프타 등 기름이 일시에 해상에 유출되었다. 유출된 기름은 원유 483.9 kl, 나프타 284.1 kl, 유성 혼합물 32~131 kl로, 총 800 kl에서 899 kl이 해상에 유출되었다 (KCG[2015b]). 사고 지역은 생태적 환경적 민감 해역으로, 유회수기를 통한 기계적 회수작업에 집중하였다(KCG[2015b]). 따라서 우이산호 사고는 기계적 회수시스템을 통한 회수능력 비교분석에 적합한 사고 사례라 판단된다.

사고 시나리오는 Fig. 3과 같이 실제 사고의 시차별 해상방제 조치에 따라 1월 31일 10:00에 해장에서 기름이 유출되어, 기름 유출 1시간 후인 11:00에 방제정의 유회수기를 통한 회수작업이 시행되었으며, 2월 4일 14:00에 해상방제가 종료되었다고 설정하였다. 기름은 일시에 유출되었으며, 해상 방제종료 시점까지 100시간 동안 해상에 기름이 존재한다고 가정하여 잔존유의 풍화 및 특성 변화를 계산하였다.

방제정 동원은 사고의 시차별 상황일지(KCG[2015b])에 근거하여 계산하였다. 오후 6시부터 익일 오전 6시까지는 일몰에 의한 시야 방해로 인해 방제작업이 불가능한 것으로 가정하여 일몰 시간을 제외한 총 51시간 동안 회수작업을 수행한 것으로 계산하였다. 회수시스템을 통한 회수량 분석을 위해 해안을 제외한 해상에서의 유출 기름만 수거한다고 가정하였다. 또한, 유처리제나 유흡착재를 제외한 유회수기를 통한 회수량만을 계산하였다.

실제 사고 조건(Table 1)을 반영하여 본 연구의 유출유의 풍화과정 및 방제 시나리오 계산을 위한 조건을 Table 2에 도시하였다. 사고 유출량은 실제 사고의 정보에 따라 원유 483.9kl 및 나프타 284.1 kl를 적용하였다. 그러나 유성 혼합물은 유류의 정확한 특성을 알 수 없고, 유출된 원유 및 나프타의 양에 비교해 비교적 소량이므로 풍화작용

및 회수능력 계산에서 제외하였다. 따라서 유출된 원유 및 나프타의 총량은 768 kl로 계산하였다. 사고 시 GS칼텍스의 송유관이 파손되어 관내에 흐르던 원유(Basrah light)와 나프타(Naphtha)가 유출되었으며, 유출유에 대한 풍화 및 회수능력을 계산 및 분석하였다. 방제작업 5일 동안 사고에 동원된 유회수기의 수량은 총 34대로, 여수지역의 방제 장비뿐만 아니라 인근 통영, 부산, 창원 등의 방제 장비가 포함된다. 동원된 유회수기 34대의 사양과 해상 방제정의 저장 탱크 용량을 참고문헌(KCG[2017])을 통해 개별적으로 고려하여 유회수기의 회수능력을 계산하였다. 계산에 적용된 환경조건은 사고 당시 해상환경을 반영하여 풍속은 8 m/s로 설정하였고, 해수 온도의 경우 국립해양조사원의 여수 조위 관측소의 2014년도 수온 자료를 활용하여 7°C로 설정하였다.

3. 계산 결과

3.1 풍화작용에 따른 유출유의 특성 및 잔존량 분석

해상에서 기름이 유출되어 유출유의 풍화작용이 진행되면 증발 및 자연 분산으로 유출유의 일부가 해수면에서 제거된다. 기름 유출 후 해상방제 종료 시까지 해상에 잔존하는 원유 및 나프타의 증발량을 식 (2)을 통해 계산하여 Fig. 4에 도시하였다. 나프타는 휘발성이 강해 유출 1시간 이내에 대부분이 증발하여 2시간 이내에 전량이 증발하는 것으로 계산되었다. 이는 전체 유출량 중 약 37%가 해상 방제 대응에서 제외될 수 있음을 의미한다. Basrah light는 비중 및 점성이 낮은 경질유의 특성을 가지며 유출 초기 1시간 이내에 약 83.0 kl 만큼 증발된다. 이는 전체 유출량의 약 10%에 달한다.

유출 초기 탄화수소 성분 중 비교적 휘발성이 강한 성분이 빠르게

Table 2. Calculation conditions of WuYiSan oil spill accident scenario

Calculation conditions	Input value
Spilled oil remaining time	100 h
Recovery time	51 h
Initial spill volume	768 kl (Crude Oil (483.9 kl), Naphtha (284.1 kl))
Crude oil type	Basrah Light (API 33.7)
Number of skimmers	34
Wind speed	8 m/s
Sea water temperature	7 °C

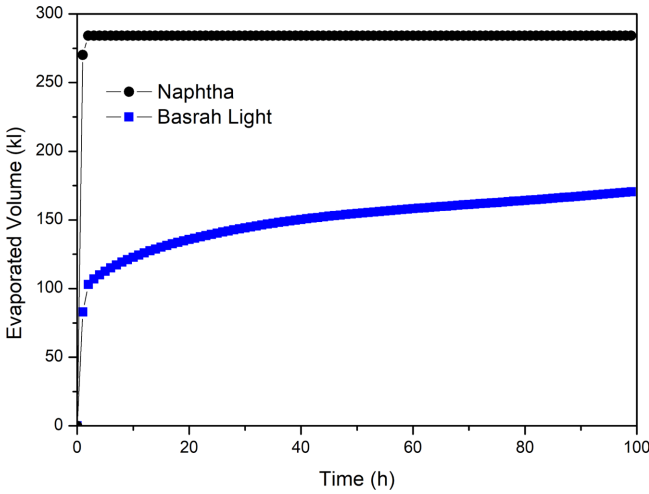


Fig. 4. Evaporated volume of spilled oil over the time.

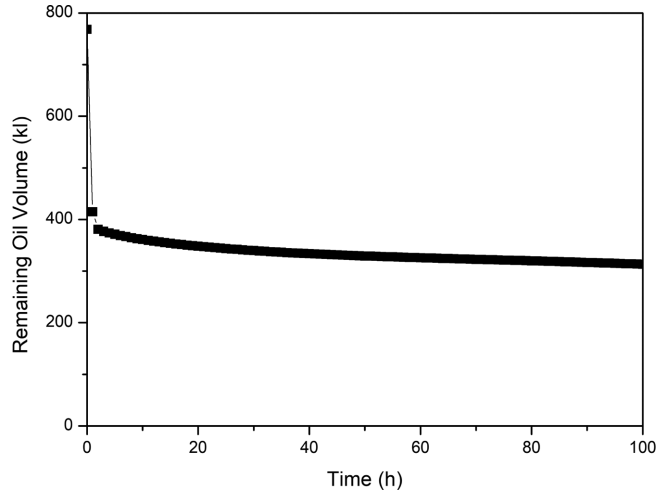


Fig. 6. Remaining oil volume over the time.

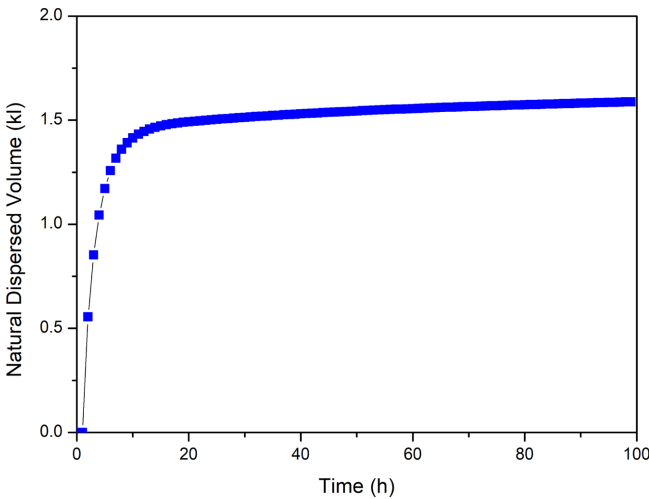


Fig. 5. Naturally dispersed volume of spilled oil over the time.

증발하면서 Fig. 4의 기울기가 급변하는 것으로 나타난다. Basrah light는 점성이 낮고 초기 확산 비율이 빠른 경질유의 특성에 의해 확산면적이 넓어져 빨리 증발하는 경향을 보인다. 이처럼 급격한 증발 및 확산은 유출유의 특성을 변화시키고 전반적인 회수시스템에 영향을 미칠 수 있다. Basrah light는 초기 1시간 이내에 급격한 증발 후 단위 시간당 증발량이 점차 적어져 100시간까지 최종 170.8 kl 만큼 증발한다. 이는 전체 유출량의 약 22.2%의 결과이다.

유출유의 자연 분산량을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 결과는 식 (3)에 의해 계산된 자연 분산량을 나타내며, 나프타는 초기에 전량이 증발하였기 때문에 계산 결과에 포함되지 않는다. 자연 분산량은 유류특성과 풍속에 기인한 해상에너지의 영향을 받는다. Basrah light는 8 m/s의 풍속 조건에서 최종적으로 1.6 kl가 자연 분산되는 결과를 보인다. 사고 초기인 10시간 이내에는 단위 시간당 자연 분산량이 큰 경향을 보인다. 그러나 이후 시간 경과에 따라 증발 및 유상화의 영향으로 유출유의 점성이 증가하면서 점차 감소한다. 계산된 원유의 자연 분산량은 전체 유출량의 1% 미만이며 증발량보

다 소량이다.

Fig. 6은 증발량 및 자연 분산량을 제외한 사고 경과에 따른 유출유의 해상 잔존량을 나타낸다. 초기 유출로부터 100시간 경과 후 증발량과 자연 분산량을 제외한 유출유의 해상 잔존량은 전체 유출량의 약 40%이다. 이는 방제 장비 동원 전략 관점에서 해상에서 방제해야 할 기름의 양을 의미한다. 즉 우이산호 사고의 경우, 방제전략 수립에 있어 초기 유출량의 40%(313.0 kl)에 해당하는 유출유에 대응할 수 있는 방제자원을 산정하는 것이 효율적인 방제 자원 동원 방안임을 나타낸다.

유출유의 유상화에 따른 기름의 수분 함량을 Fig. 7에 도시하였다. 유상화가 진행됨에 따라 기름은 물을 흡수한 에멀전을 형성하고 이는 유출유의 점성 증가를 가속화시킨다. 유출 초기에 기름의 동점성은 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이러한 결과는 급격한 초기 증발량과 에멀전 증가에 기인한다. 유상화가 진행됨에 따라 Basrah light는 20시간 이내에 약 6,500 cst까지 동점성이 상승한다. 기름의 수분 함량이 최대 90%에 도달한 이후 더 이상 유상화가 진

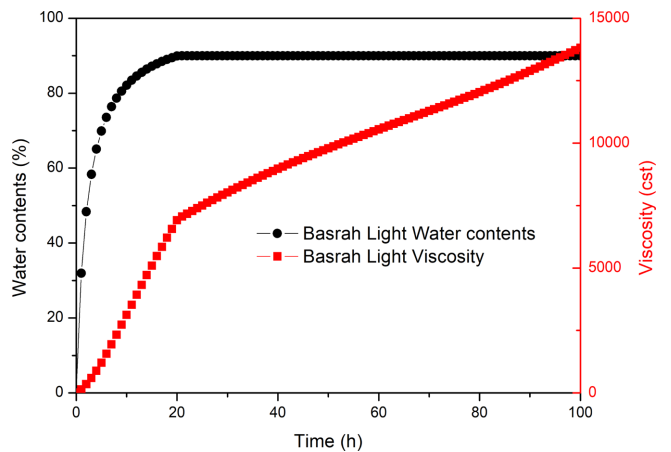


Fig. 7. Changes of water contents and viscosity of spilled oil over the time.

행되지 않으면서 동점성의 기울기가 작아진다. 20시간 이후로는 주로 증발에 의한 영향으로 해상방제 종료 시까지 최대 약 13,800 cst 까지 상승한다.

유출유의 증발과 유상화에 따른 유출유의 점성 증가는 방제작업의 효율을 저하시킬 수 있으며 이는 다음절에 언급될 회수효율의 저하에 영향을 미친다.

3.2 시간 경과에 따른 유회수기의 회수효율 및 회수량 분석

사고 후 풍화작용에 따른 점성 변화와 풍속에 기인한 유회수기의 회수효율(Fig. 2 참조) 변화의 범위를 Fig. 8에 나타내었다. 100시간 동안 Basrah light의 동점성이 약 13,800 cst 까지 상승함에 따라 점성에 의한 회수효율(RE Viscosity)은 감소하는 경향을 보인다. 사고 초기에 점성에 의한 회수효율은 약 78~96%의 큰 값을 나타낸다. 이후 점차 회수효율이 낮아지면서 최소와 최대의 범위가 커지는 경향을 보이며 유출유의 점성이 최대치까지 상승하였을 때 회수효율은 21~59%의 범위를 가진다. 풍속에 의한 회수효율의 범위(RE Wind speed)는 21~58%로 도출된다. 사고 시나리오에서 일정한 풍속(8 m/s)을 적용함으로써 시간 경과에 따라 회수효율의 범위가 달라지지 않는다. 본 연구에서는 시간 경과에 따른 점성에 의한 회수효율 범위의 중간값과 풍속에 의한 회수효율 범위의 중간값 중, 낮은 값을 반영하여 유회수기의 회수능력 계산에 적용하였다.

Fig. 8의 결과는 시간이 경과함에 따라 기름의 특성 변화가 유회수기를 통한 기계적 회수작업의 효율을 감소시킬 수 있으며, 이로 인해 유출유 회수량이 줄어들 수 있음을 의미한다. 또한, 일정한 풍속이 아닌 시간 경과에 따라 변하는 풍속을 반영할 경우, 회수작업 시간대에 따라 유회수기의 효율 변화를 반영한 유출유 회수량을 추정할 수 있다. 따라서 효율적인 방제자원 동원 전략을 위해서는 이와 같은 성능의 변화를 충분히 고려할 수 있어야 한다.

유출유의 풍화작용 및 회수효율을 반영한 유회수기의 회수량을 시간 경과에 따라 계산하고 실제 수거 실적과 비교 분석하였다. 실제 사고에 동원된 유회수기는 시차별 상황일지에 따라 수량 및 용량

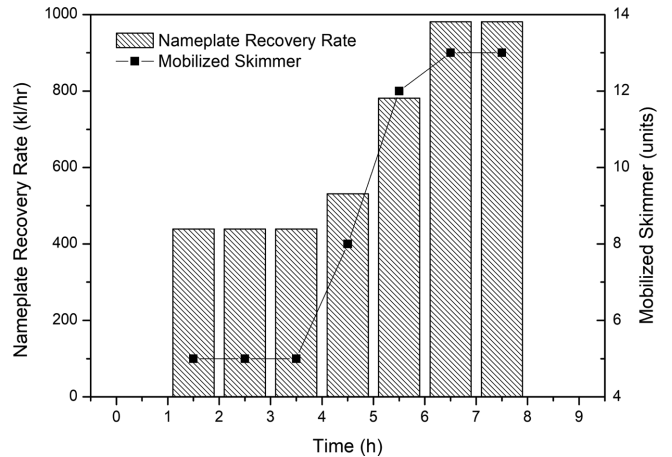


Fig. 9. The number of mobilized skimmers and nameplate capacity in the 1st day.

이 각각 다르게 투입되었다. Fig. 9는 사고 1일 차 중 시간 경과에 따라 동원된 유회수기의 명목 용량(nameplate recovery rate)과 수량을 나타낸다. 사고 1시간 경과 후 응급 초동 조치가 수행됨에 따라 방제정이 신속히 현장에 도착하여 유회수기 5대가 회수작업을 실시하였다. 이후 사고 4시간, 5시간, 6시간 경과 후 각각 3대, 4대, 1대가 추가로 동원되었으며, 사고 1일 차에 총 13대의 유회수기가 회수작업에 동원되었다. 유회수기가 추가 동원됨에 따라 명목 용량도 증가하였다.

사고의 주요 방제 조치 중 초동 조치에 대한 시차별 회수능력 분석을 위하여 1일 차 해상방제에 동원된 유회수기의 시간당 회수율 계산 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 상기 결과는 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 시차별로 동원된 유회수기의 조우율로부터 기름/에멀전 회수율(ERR)과 해수 회수율 및 기름 회수율(ORR)을 계산한 결과이다. 기름의 회수율('Oil' in Fig. 10)은 유회수기로 회수된 기름/에멀전에 포함된 수분 함량('Water contents of water-in oil emulsion' in

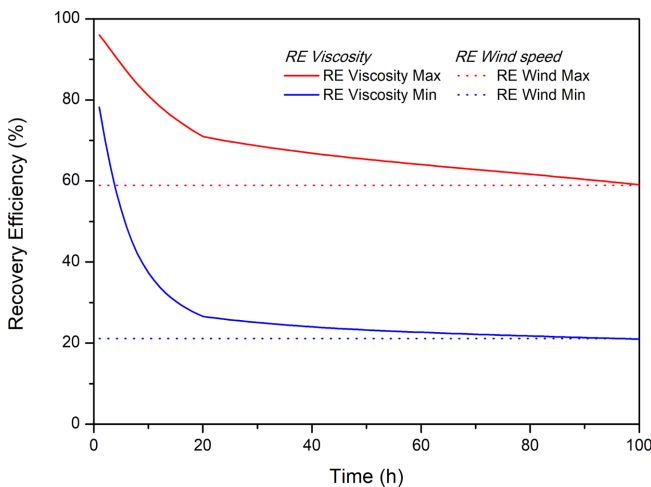


Fig. 8. Recovery efficiency variation with viscosity change and wind speed.

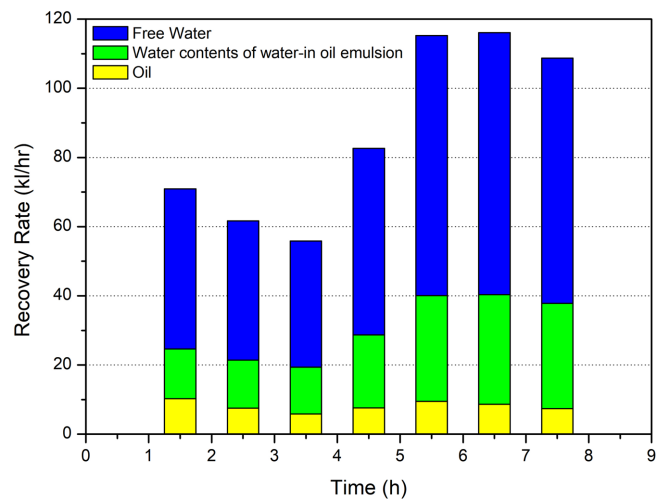


Fig. 10. Amount of recovered oil, water contents of water-in oil emulsion and free water using mobilized skimmers in the 1st day.

Fig. 10)을 제외한 순수 기름의 회수율이다. 계산된 회수율은 해상에 존재하는 기름만 회수한다고 가정하였기 때문에 해안에 부착되는 기름은 반영하지 않는다.

Fig. 10의 계산 결과는 사고 당일 10시에 기름이 유출되어 1시간 후부터 1일 차 회수종료 시점인 8시간 후까지 유회수기를 통한 회수결과를 나타낸다. 유출유를 회수할 경우, 사고 초기에 동원된 5대의 유회수기는 해수(free water)를 포함해 시간당 70 kl 이상의 회수능력을 보인다. 이후 유회수기가 추가로 동원되는 4시간 전까지 총 회수능력은 감소하는 경향을 보인다. 유출된 직후의 해상의 기름은 유막이 충분히 두꺼워 회수에 유리하지만, 시간 경과에 따라 기계적 회수작업은 유출유의 확산과 이에 따른 유막 두께의 감소에 의해 제약을 받는다. 이로 인해 시간 경과에 따라 유회수기 1대당 포집할 수 있는 기름 조우율이 감소하는 결과를 나타낸다. 5시간 이후에도 마찬가지로 유막 두께 감소의 영향을 받으나, 유회수기가 추가로 동원되므로 총 회수능력은 증가하는 결과를 보인다.

회수작업이 실시되는 동안 유출유의 총회수량 중, 회수되는 기름/에멀전의 비율은 약 34%로 나타났다. 이는 계산된 결과로부터 시간 경과에 따라 점성 및 풍속에 의한 회수효율이 반영된 결과이다. 이러한 결과는 사고 시나리오에서 회수효율을 감소시키는 주요 인자는 풍속이며, 유종과 해상환경조건에 따라 유회수기의 회수능력이 달라질 수 있음을 의미한다. 또한, 낮은 회수효율범위에서 동반 회수되는 해수의 비율이 커지는 결과를 고려하였을 때, 유종에 따른 회수능력 범위를 고려하여 요구되는 폐유 저장 탱크의 용량을 산정해야 함을 나타낸다.

사고 일자별 유회수기를 통한 기름/에멀전 회수량(Recovered oil/emulsion), 기름 회수량(Recovered oil)과 해수의 회수량(Recovered free water), 그리고 동원된 유회수기 누적 수량 및 명목용량과 실제 회수량을 Table 3에 도시하였다. 회수된 기름의 양은 기름/에멀전에 포함된 수분 함량(water contents of water-in oil emulsion)을 제외한 순수 기름만의 양을 나타낸 것이다. 해수의 회수량은 기름/에멀전에 포함된 수분 함량과 별개로 유회수기 운전 시 해상 잔존 유와 함께 수거된 표층 해수의 양을 나타낸 것이다. 사고 경과에 따라 동원되는 유회수기는 사고 1일 차에 13대에서 5일 차까지 총 34대로 증가한다. 계산된 유출유(Basrah light)의 기름/에멀전 회수량은 방제 1일 차에 212.4 kl이며, 수분 함량을 제외한 순수 기름의 회수량은 56.6 kl이다. 사고 2일 차에 작업시간이 증가함에 따라 기

름/에멀전의 회수량은 증가하지만, 이후 시간 경과에 따라 감소하는 결과를 나타낸다. 이는 유출유의 확산과 유회수기의 효율 저하에 기인하며 유회수기가 추가로 동원되어도 회수량은 감소하는 결과를 보인다. 회수효율의 저하는 회수되는 총 유체 중 해수가 증가되는 결과를 초래한다. 해수의 회수량은 유회수기 동원 수량이 늘어남에 따라 회수작업 2일 차까지 증가한다. 그러나 2일 차 회수작업 이후 유막 두께의 감소와 더불어 유회수기 회수성능의 저하 때문에 기름/에멀전 및 해수의 회수량이 모두 감소하는 거동을 보인다.

Table 3에 나타낸 실제사고 시 해상에서 수거된 폐유량은 사고 1일 차에 302.8 kl이며, 최종 수거 실적은 811.6 kl이다. 사고 시나리오를 통해 계산된 기름/에멀전의 총회수량은 사고 1일 차에 212.4 kl이며, 해상방제 종료 시인 5일 차까지 총 754.3 kl가 회수되는 것으로 계산되었다. 실제 수거 실적과 계산된 값은 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과를 통해 본 연구의 회수능력 추정 모델이 향후 해상 회수능력 산정 시 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 평가된다. 아울러 추후 유회수기 현장 운용방식 및 작업자의 숙련도 등의 구체적인 정보를 추가하고 이에 의한 효율 변화를 고려한다면 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 평가된다.

계산 결과를 통해 초기 방제작업이 시행된 사고 1일 차와 2일 차에 가장 많은 양의 폐유가 수거되었음을 알 수 있다. 또한, 동원 유회수기 대비 회수량 계산 결과는 초동 조치의 중요성을 나타낸다. 즉, 기계적 회수시스템이 사고 초기 방제작업에 적절히 활용된다면 많은 양의 기름/에멀전을 효과적으로 회수할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 계산 결과에서 기름/에멀전의 회수량보다 해수의 회수량이 큰 결과를 보이므로, 사고 초기에 기계적 회수작업의 효과를 극대화하기 위해서는 충분한 폐유 저장 탱크 또는 바지선을 확보해야 하고, 추가적인 폐유 저장 공간 확보를 위해 동반 회수되는 해수를 처리할 수 있는 설비가 갖춰지면 도움이 될 것이다.

우이산호 사고 사례 계산 결과에서 풍화작용에 의한 자연 제거량 및 유회수기에 의한 기계적 제거량을 고려한 유출유의 양적 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 유출유의 총증발량은 59%로, 상당 부분이 증발하였다. 남은 해상 잔존유 41% 중, 5일 차까지 동원된 34대의 유회수기에 의하여 110.8 kl의 기름이 회수되었다. 증발량 및 기계적 회수량을 제외한 최종 해상 잔존유는 202.2 kl이다. 이와 같은 결과는 동원된 34대의 유회수기에 의하여 유출량의 약 14.4%가 회수될 수 있음을 의미한다. 이는 증발량을 제외한 해상 잔존유의

Table 3. Calculation result of recovered volume of oil, emulsion and free water, number of mobilized skimmers and nameplate rate according to recovery time

Recovery time (date)	Recovered oil/emulsion (kl)	Recovered oil (kl)	Recovered free water (kl)	Number of skimmers (accumulation) (unit)	Mobilized skimmer nameplate rate (accumulation) (kl/hr)	Actual recovered amount (kl) (KCG[2015b])
1	212.4	56.6	398.7	13	981	302.8
2	235.9	23.6	442.8	14	1,181	N/A
3	173.9	17.4	353.0	30	3,045	N/A
4	97.5	9.7	224.3	34	3,445	N/A
5	34.6	3.5	89.0	34	3,445	N/A
Sum	754.3	110.8	1507.8	34	3,445	811.6

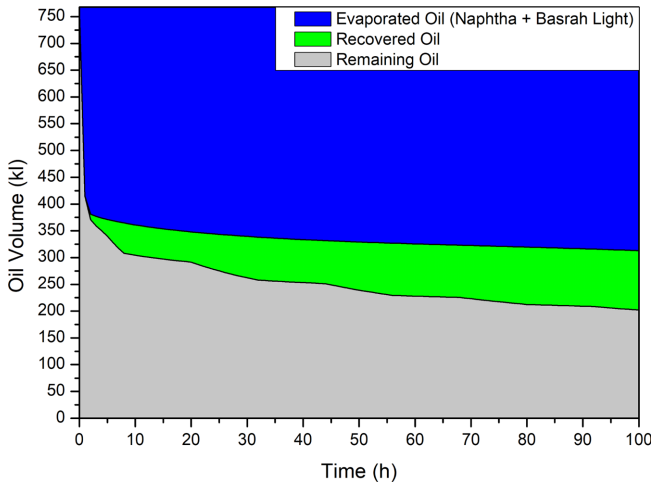


Fig. 11. Mass balance of spilled oil reflecting skimming and weathering.

35.4%이다. 따라서 이와 같은 계산 결과를 방제자원 산정을 위한 의사결정에 활용하는 경우를 가정할 때, 잔여 해상 잔존유인 64.6% 처리를 위해 유흡착재와 같은 다른 방제자원의 수량 산정에 도움이 될 것으로 판단된다.

3.3 유회수기를 이용한 해상 유출유 회수량 추정 비교분석

본 연구에서 계산된 기름 및 에멀전 회수량, 명목 용량(nameplate)에 따른 회수량, 그리고 서론에서 언급된 1일 유효기름 회수용량(EDRC)을 회수작업 일차에 따라 비교 계산한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 명목 용량, EDRC 및 본 연구의 모델을 이용한 계산 시 회수 일차에 따라 동일한 작업시간(회수 기간 5일 동안 총 51시간으로 Fig. 3 참조)을 적용하였다.

명목 용량 및 EDRC에 의한 회수량은 동원되는 유회수기 수량 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, 회수작업 5일 차에는 1일 작

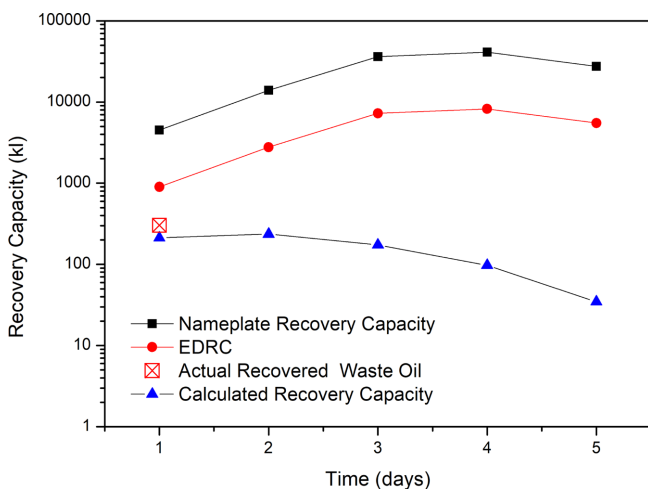


Fig. 12. Comparison of recovery capacity (nameplate, EDRC and calculation of present study).

업시간이 12시간에서 8시간으로 감소함에 따라 회수량이 감소하는 결과를 보인다. 동원된 유회수기 명목 용량에 의한 회수량은 Table 3의 사고 1일 차의 실제 수거량 302.8 kl 및 최종 해상 수거량 811.6 kl와 비교했을 때 과대 예측하는 경향을 보인다. EDRC 산정 방식은 효율 계수(0.2)가 적용되어 명목용량의 회수량보다 비교적 작은 값을 보인다. 그러나 EDRC의 회수량 결과도 명목 용량 회수량과 마찬가지로 실제 수거량보다 과대 예측하는 결과를 나타낸다. 반면에 본 연구의 모델을 이용한 계산 결과는 1일 차의 실제 수거량과 비교 시 비교적 유사한 결과를 보였다.

명목 용량은 방제자원 산정을 위한 지표로 사용되는 중요한 고려사항이지만, 유막이 충분히 두껍고 환경적으로 이상적인 조건일 때 산정된 용량이다. Fig. 12의 결과를 통해 명목 용량은 실제 사고 환경에서 발생하는 기름의 풍화작용과 각 유회수기의 회수성능 변화를 반영하지 못하기 때문에 효율적인 방제자원 산정을 위한 지표로는 한계가 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 유회수기의 회수능력 산정에 대한 수치 해석적 연구를 진행하였다. 결과의 비교분석을 위하여 2014년 여수 GS칼텍스 부두에서 발생한 우이산호 유류오염 사례를 대상으로 계산을 수행하였다. 계산 결과를 실제 방제 조치 결과와 비교 분석하였을 때, 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 유출유의 거동특성, 해양환경 조건과 장비의 효율이 반영된 유회수기의 회수능력을 시간 경과에 따라 수치 해석적으로 계산하였다. 회수량 산정은 유회수기를 포함한 회수시스템의 유출유 조우율을 기반으로 계산하였고, 시간 경과에 따른 기름의 두께, 점성 변화와 풍속에 따른 유회수기의 회수효율의 변화를 반영하였다.

2) 풍화과정과 회수량 산정에 대한 모델을 우이산호 사고 사례에 적용하여 수치 계산한 결과, 유출유의 대부분은 초기에 증발하였고 자연 분산량은 증발량보다 극히 적은 결과를 보였다. 100시간 경과 후 해상에 잔존하는 기름은 초기 유출량의 약 40%로 분석되었다. 방제전략 수립 측면에서 정확한 해상 잔존량 파악은 효율적인 방제자원 동원량 산정을 위한 자료로 활용될 수 있다.

3) 유회수기의 회수효율은 풍화작용에 의한 점성 증가와 해양환경 조건에 의해 영향을 받는다. 우이산호 시나리오 계산 결과 5일 동안 동원된 34대의 유회수기에 의하여 유출량의 약 14.4%가 회수될 수 있음을 알 수 있다. 이는 증발량을 제외한 잔존유의 35.4%이다. 이러한 결과를 통해 유회수기의 적정 투입 시기 및 수량, 그리고 이를 통한 회수량 추정이 가능함을 알 수 있다. 이는 효율적 방제전략 수립에 활용될 수 있을 것이다.

4) 유회수기 명목 용량, EDRC 및 본 연구의 모델을 이용하여 계산된 회수량 추정 결과를 비교하였을 때, 본 연구의 모델로 계산된 회수량이 실제 수거량 결과와 가장 유사한 결과를 보였다. 명목용량과 EDRC를 이용하여 추정된 회수량은 실제 값보다 과대 예측하는 경향이 있다. 이는 실제 사고 환경에서 발생하는 기름의 풍화

작용과 각 유회수기의 회수성능 변화를 반영하지 못하기 때문에 효율적인 방제자원 산정을 위한 지표로는 한계가 존재함을 의미한다. 따라서 합리적인 유회수기 동원량 산정을 위해서는 풍화과정 및 유회수기의 회수효율 변화를 구체적으로 고려하여야 한다.

5) 본 연구의 유회수기 회수능력 산정방법의 경우, 기름의 조우율을 기반으로 기름이 회수된다고 가정하며 회수효율과 처리효율에 따라 기름의 회수량을 계산한다. 이와 같은 계산 방식의 경우 작업자의 숙련도 및 유회수기의 현장 운용 조건에 의한 효율 변화 등을 고려하지 못하는 한계가 있다. 즉, 본 연구의 결과는 이상적으로 유회수기가 운용될 경우 얼마만큼의 해상 기름이 회수 가능한가를 예측하는 것이다. 따라서 회수용량을 과대 예측할 우려가 있다. 향후 작업자의 숙련도 및 현장 운용 조건에 의한 효율 변화 등을 추가로 고려한다면 보다 신뢰할만한 회수능력 산정방법 개발이 가능하리라 판단된다.

후 기

이 논문은 해양경찰청 재난안전기술개발사업단(KCG-01-2017-05)과 한국연구재단(2017R1E1A1A03070672)의 지원을 받아 수행하였습니다.

사용기호

A	= area of spilled oil
C_0	= constant of oil dissipation
C_1	= coefficient due to oil droplet horizontal mitigation
C_2	= windrow coefficient
C_{temp}	= temperature constant
C_{evap}	= constant of component change due to evaporation
C_{emul}	= impact from droplet size constant
D_{ba}	= dissipation of wave energy per unit surface area
d_o	= oil droplet size
d_w	= average water droplet diameter
F	= fraction of evaporation
F_{wc}	= fraction of breaking waves per unit time
K_i	= mass transfer coefficient
P_i	= partial pressure of each component
Q_e	= oil entrainment rate
R	= gas constant
S_c	= interfacial area of oil and water
S_{cov}	= fraction of sea surface covered by oil
T	= water temperature
T_0	= oil reference temperature
t	= oil thickness
V	= volume of remaining oil
$\frac{dV_e}{dt}$	= evaporation rate of total moles

V_i	= evaporation moles of each component
V_j	= evaporation volume of each component
\bar{V}_j	= molar volume
ν	= oil viscosity
ν_0	= oil reference viscosity
Y	= water contents

References

- [1] ASTM International, 2010, Annual Book of ASTM Standards: F1780-97 Standard Guide for Estimating Oil Spill Recovery System Effectiveness, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [2] ASTM International, 2016a, Annual Book of ASTM Standards: F631-15 Standard Guide for Collecting Skimmer Performance Data in Controlled Environments, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [3] ASTM International, 2016b, Annual Book of ASTM Standards: F2709-15 Standard Guide for Determining a Measured Nameplate Recovery Rate of Stationary Oil Skimmer System, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [4] Berry, A., Dabrowski, T. and Lyons, K., 2012, The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea, Marine Pollution Bulletin 64, 2489-2501.
- [5] Chun, J., Kang, B. and Kim, C.K., 2018, Comparison of Korea and World Marine Oil Spill Studies: Long-term Trend Analysis Through in-depth Literature Review, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 21(1), 30-39.
- [6] Dale, D., 2011, Response Options Calculator (ROC) - Users Guide
- [7] Delvigne, G.A.L. and Sweeney, C. E., 1988, Natural Dispersion of Oil, Oil & Chemical Pollution 4, pp. 291-310.
- [8] Eley, D.D., Hey, M.J., Symonds, J.D., 1988, Emulsions of Water in Asphaltene-Containing Oils 1. Droplets Size Distribution and Emulsification Rates, Colloids and Surfaces 32, pp. 87-101.
- [9] Fay, J.A., 1971, Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface, in proc. of International Oil Spill Conference, Vol. 1971, No. 1, pp. 463-467, American Petroleum Institute.
- [10] Fingas, M.F., 2004, Weather windows for oil spill countermeasures. Prince William Sound Regional Citizens' Advisory Council.
- [11] Fingas, M.F., 2011, Oil Spill Science and Technology, Gulf professional publishing.
- [12] Galt, J.A. and Overstreet, R., 2009, Development of Spreading Algorithms for ROC, Response Options Calculator(ROC).
- [13] Galt, J.A., 2014, Oil weathering technical documentation and recommended use strategies. Response Options Calculator (ROC).
- [14] Genwest, 2012, The EDRC Project Final Report. Genwest systems, Inc.
- [15] Hoult, D.P., 1972, Oil Spreading on the Sea, Annual Review of Fluid Mechanics, 4(1), 341-368.

- [16] ITOPF, 2011, Technical information paper, Use of booms in oil pollution response, Tech. Inf, Pap. 3, London:ITOPF.
- [17] Jones, R.K., 1997, A simplified pseudo-component oil evaporation model.
- [18] KCG, 2005, Oil Spill Area Contingency Plan Web Pages, <http://www.pagei.co.kr/area/index.html>, 2005 (accessed 2018. 06. 12)
- [19] KCG, 2011, Introduce Target of Marine Oil Spill Recovery for Securing Response Equipment.
- [20] KCG, 2015a, Marine Pollution Response Planning Division Equipment Operating Manual, pp. 6-20.
- [21] KCG, 2015b, Marine oil pollution response case report, pp. 105-121.
- [22] KCG, 2017, Oil response resources data.
- [23] Lehr, W., Jones, R., Evans, M., Simecek-Beatty, D. and Overstreet, R., 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. Environ. Model. Softw. 17, 189-197.
- [24] Mackay, D., Shiu, W.Y., Hossain, K., Stiver, W. and McCurdy, D., 1982, Development and Calibration of an Oil Spill Behavior Model. Toronto Univ (Ontario) Dept of Chemical Engineering and Applied Chemistry.
- [25] Schulze, R., 1998, Oil Spill Response Performance Review of Skimmers, ASTM Manual Series: MNL34
- [26] Sebastiao, P. and Soares, C.G., 1995, Modeling the fate of oil spills at sea. Spill Science & Technology Bulletin, 2(2-3), 121-131.
- [27] Spaulding M.L., 2017, State of the art review and future directions in oil spill modeling, Marine Pollution Bulletin, vol. 115, pp. 7-19.
- [28] USCG, 1997, Determining and Evaluating Required Response Resources for Vessel Response Plans, 33CFR154 and 33CFR155, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office. https://www.law.cornell.edu/cfr/text/33/appendix-B_to_part_155

Received 6 July 2018

1st Revised 13 October 2018, 2nd Revised 13 November 2018

Accepted 15 November 2018