



Original Article

국내외 해양 기름유출 연구 비교: 심층 문헌조사를 통한 장기 경향 분석

천정윤^{1,2} · 강보식¹ · 김충기^{1,†}
¹한국환경정책·평가연구원
²고려대학교 대학원 환경생태공학과

Comparison of Korea and World Marine Oil Spill Studies: Long-term Trend Analysis Through in-depth Literature Review

Joungyoon Chun^{1,2}, Bosik Kang¹, and Choong-Ki Kim^{1,†}

¹Korea Environment Institute, Sejong 30147, Korea

²Department of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

요 약

2010년 미국 멕시코만에서 발생한 딥워터 호라이즌 사고 이후 세계적으로 기름유출 연구 경향이 급변하고 있다. 따라서 본 연구는 지금까지 발표된 국내외 기름유출 관련 논문을 토대로 기름유출 연구 경향을 비교하였다. 분석 결과 전체 논문 수는 시간 흐름에 따라 국내외 모두 증가하였으나, 2014년부터 국내 논문은 감소 추세를 보였다. 국외의 경우 학문분야별로는 일정 패턴을 유지하였으나, 국내는 시간 변화에 따라 학문 비중이 변하였다. 국내외 모두 주요 유출사고에 따라 연구지역 비중이 급변하였지만, 유출량이 연구량을 대변하진 않았고, 상대적으로 적게 연구된 지역이 있었다. 연구 결과를 토대로 국내외 기름유출 연구 갭(gap)을 분석한 결과, 앞으로 우리나라에서는 1) 발생 빈도가 높고 소규모인 기름유출 및 동해 지역 연구, 2) 기름유출에 따른 지역주민과 방제작업자의 건강 영향 연구, 3) 우리나라 해양 및 연안 환경과 생태계에 미치는 기름유출 영향 연구가 필요한 것으로 분석되었다.

Abstract – Since the Deepwater Horizon incident in the Gulf of Mexico in 2010, the oil spill research trends of the world is rapidly changing. Therefore, this study compares the tendency of oil spill research based on the articles published so far on domestic and foreign countries oil spill. The total number of papers analyzing the results was increased both at home and abroad over time, the domestic paper showed a decline in 2014. Whereas foreign academic papers maintain a certain pattern, In Korea, the proportion of studies has changed with time. In both domestic and foreign countries, the proportion of the study area changed drastically due to major spill incidents, but the volume of spilled oil did not represent the research amount and there were relatively less studied areas. Based on the results of the study, we have analyzed the gap between domestic and overseas oil spill researches and found that 1) research on frequent and small oil spills and East Sea area, 2) research on the health impact of local residents and oil spill clean-up workers due to oil spill, And 3) research on the impact of oil spill on marine and coastal environment and ecosystem in Korea are needed.

Keywords: Oil spill(기름유출), Research trends(연구 경향), Hebei Spirit(허베이 스피리트), Research gap(연구 갭), Impact on marine and coastal ecosystem(생태계 영향), Health impact(건강 영향)

1. 서 론

해양에서 기름유출은 해양 환경 및 생태뿐만 아니라, 지역사회 및 경제, 나아가 지역주민의 건강 안전에 폭넓은 영향을 미친다(Teal and Howarth[1984]; Aguilera *et al.*[2010]; Fingas[2013]; Murphy *et*

al.[2016]). 우리나라도 최초의 국가재난 규모의 해양오염사고로 기록되고 있는 씨프린스호 사고(1995년, 4,970톤 유출)와 12,547 kl 가 유출되어 우리나라 최대 기름유출 사고로 기억되는 허베이 스피리트호 사고(2007년)를 겪으면서 기름유출이 환경과 지역사회에 가져오는 막대한 피해를 경험한 바 있다(MPSS[2017a]).

이처럼 기름유출의 영향이 다방면에 미침에 따라 생물학, 생태학, 해양학, 공학, 물리학, 화학, 사회과학 등 수많은 분야에서 매우

†Corresponding author: cckim@kei.re.kr

관심 있는 연구 주제로 다뤄져 왔다(Murphy *et al.*[2016]). 세계적으로는 1960년대 Torrey Canyon 사고로 기름유출 관련 연구가 촉발된 이래로(O'Sullivan and Richardson[1967]; Murphy *et al.*[2016]), 유처리제 사용에 따른 독성 영향(Portmann and O'Connor[1968]), 유출유 확산예측 등 물리 모델, 환경 민감 지도 작성(NOAA[2001]; IPIECA[2012]), 취약성 및 위해도 평가 등 수많은 연구가 이뤄져 왔고, 연구 결과를 방제정책 개선과 장비 개발, 방제 의사결정 지원에 활용해 왔다.

2010년 미국 역사상 최악의 기름유출 사고로 기억되는 딥워터 호라이즌(DWH) 사고 이후(Atlas and Hazen[2011]), 세계적으로 기름유출 관련 연구 동향이 급변하고 있다. 전체 과학 논문(SCI) 수의 증가 속도보다 기름유출 관련 연구 수의 증가 속도가 더 높은 것으로 나타난 가운데(Murphy *et al.*[2016]), 2010년 전후로 기름유출에 따른 주민 건강(public health) 관련 연구가 증가하고 있다(Murphy *et al.*[2016]; Kim *et al.*[2017a]). 2017년 5월 개최된 IOS 2017에서도 건강안전과 관련된 주제가 주요 이슈로 언급되고 있다.

우리나라 역시 1978년부터 해양오염방제 업무를 시작한 이래로(MPSS[2017a]), 정부와 학계 및 민간에서 기름유출과 관련한 다양한 연구가 추진되어 왔다. 특히 2015년부터 정부는 해양오염방제 국가 R&D를 통해 2020년까지 6개 과제, 360억 원의 예산을 투입하여 현장 방제능력 강화를 위한 각종 기술들을 개발하고 있다(MPSS[2017b]). 그러나 나노 구조체 및 로봇 기술을 활용한 긴급방제 기술 등 장비 개발에 치중하고 있다(Kim *et al.*[2017a]). 해외에서는 기름유출이 해양생물과 바닷새 등에 미치는 영향 등에 대해 수많은 연구가 이뤄져 왔지만, 우리나라는 관련 연구가 아직 부족한 실정이다. 허베이 스피리트호 사고 이후 한국해양과학기술원 남해연구소에서 기름유출에 피해를 입은 생물들의 회복에 대해, 태안환경보건센터 등에서 기름유출에 따른 지역주민 건강 안전 관련 연구를 추진하고 있다(Chu[2017]). 그러나 대부분 허베이 스피리트호 사고가 일어난 태안 지역에 관련된 연구로, 타 지역에 대한 연구 및 국가 규모의 연구로는 확산되지 못하고 있다.

올해는 허베이 스피리트호 기름유출 사고가 발생한 지 10주년이 되는 해이다(Kim *et al.*[2017]). 급변하는 방제 패러다임 변화를 정확히 파악하고, 세계적인 추세에 맞춰 뒤쳐진 분야는 없는지 점검이 필요한 시점이다. 이를 위해 본 연구에서는 해양오염방제의 많은 부분을 차지하는 기름유출에 대해 지금까지 국내 및 해외의 연구 경향을 비교 분석하고자 한다. 또한 국내와 해외의 연구 갭(gap)이 큰 분야가 무엇이고, 이를 극복하기 위해 어떠한 노력이 필요한지를 파악하였다. 본 연구를 통해 현재 진행되고 있는 해양오염방제 국가 R&D 과제 등 연구 추진 상황을 점검하고, 미래 해양오염방제 정책 개선방향을 도출하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 문헌조사 방법

본 연구에서는 학술논문 데이터베이스를 활용하여 국내외 문헌

비교 연구를 수행하였다. 전통적으로 심층 문헌 리뷰는 관련 분야의 학술지, 학회 발표자료 등을 심층 검토하여 시사점을 도출하는 방법을 택해왔다. 그러나 해외는 물론 국내에서도 연구자, 학술지, 학회, 논문의 급격한 증가로 관련 분야의 모든 문헌을 비교 및 검토하는데 한계가 있다. 반면 Web of Science, Science Direct, NDSL, RISS 등 국내외 학술논문 데이터베이스를 활용하면 매년 수많은 학술지와 학회가 업데이트 되고 있어 연구자가 인지하지 못한 학술지도 검토할 수 있다. 또한 웹 기반의 사용자 환경을 통해 저자, 학문분야, 핵심 키워드를 쉽게 검색할 수 있고, 검색 결과를 엑셀 등으로 저장할 수 있어 연구자가 시간 흐름에 따른 연구 경향을 파악하기 용이하다.

국내와 해외의 연구 경향을 대변하는 학술논문 데이터베이스로 해외는 SCI(Science Citation Index) 논문 검색 서비스를 제공하고 있는 Web of Science database (<https://webofknowledge.com>)를 활용하였다. 국내는 한국과학기술정보연구원이 운영하는 학술논문 데이터베이스인 NDSL(<http://www.ndsl.kr>)과 한국교육학술정보원에서 운영하는 RISS(<http://www.riss.kr>)¹⁾ 및 최근 증가하고 있는 국내 연구자가 국제학술지에 발표한 논문을 반영하기 위해 Elsevier 출판사가 운영하는 세계 최대 학술논문 데이터베이스인 Science Direct(<https://www.sciencedirect.com>)를 활용하였다.

2.2 분석 대상 문헌 선정

국내의 기름유출 연구 경향 분석을 위해 사용된 자료는 다음과 같다. 첫째, 해외 기름유출 논문 연구경향은 기존에 Murphy *et al.* (2016)이 수행한 결과를 활용하였다. 동 연구는 Web of Science database에 “oil spill”, “crude spill”, “hydrocarbon spill” 키워드를 입력하여 약 11,000개의 기름유출 관련 논문을 검색하였다. 그리고 이 중 1,255개의 논문을 대상으로 연구 동향 변화를 분석하여 시사점을 고찰하였다(Murphy *et al.*[2016]). 분석 대상논문의 출판 연도는 1968년부터 2015년까지이다.

국내 연구 경향 대상 논문은 NDSL과 RISS 및 Science Direct를 활용하여 본 연구진이 직접 검색·선정하였다. 먼저 비교 대상인 Murphy *et al.*(2016)이 사용한 “oil spill”, “crude spill”, “hydrocarbon spill” 중 oil spill의 의미로 국내에서 일반적으로 활용되는 용어인 “기름유출”과 “유류유출”을 NDSL과 RISS에 키워드로 입력하여 대상 논문을 선별하였다. 다음으로 Science Direct에 “oil spill(키워드) and Korea”를 입력하여 국내 연구자가 외국 저널에 발표한 논문을 추가하였다. 다만 Science Direct는 2007년 이후의 논문만 검색할 수 있어서 국내 연구자가 2006년 이전에 출판한 논문은 검색 대상에서 제외되었다. 이어서 학술발표, 잡지, 기고문 등은 제외하고, 심사를 거쳐 출판된 학술논문(peer-reviewed research paper)을 대상으로 선정하였다. 다음으로 기름으로 인한 토양 오염 등 해상 기름유출과 관계없는 논문 및 중복 선정된 논문을 제거하였다. 이

¹⁾이외에도 민간기업인 (주)누리미디어에서 운영하는 DBpia (<https://www.dbpia.co.kr>), 한국학술정보(주)에서 운영하는 KISS(<http://kiss.kstudy.com>)가 있으나, 전자는 민간에서 제공하는 검색 DB이고 후자는 논문 수가 타 기관에 비해 적어 본 연구의 분석 대상에서 제외하였다.

Table 1. Selected articles for analysis

Category		Analysis period	Number of papers searched	Number of papers analyzed	Percentage analyzed
World (Web of Science)		1968-2015	11,000 <	1,255	10% <
Domestic J. (NDSL, RISS)		1978-2017	533	339	64%
Korea	International J. (Science Direct)	2007-2018	64	46	72%
Total		-	597	385	65%

와 같은 과정으로 총 385개의 논문(국내 학술지 339개, 국제 학술지 46개)의 논문을 분석 대상으로 선정하였다(Table 1). 국내 논문의 분석 대상기간은 국내학술지가 1978년부터 2017년, 국제학술지가 2007년부터 2018년까지이다.

2.3 연구 경향 비교

연구 경향 비교는 3단계로 분석하였다. 첫째, 시간 변화에 따른 전체 연구 개수의 변화를 살펴보고, 해외와 국내 연구 경향을 비교하였다. 둘째, 학문 분야별로 시간 흐름에 따른 연구 경향을 분석하고, 해외 경향과 비교해 보았다. 학문 분야는 먼저 Murphy *et al.* (2016)이 분류한 것과 비교를 위해 생물학(biological), 화학(chemical), 물리(physical), 기술(engineering), 모델링(modelling)으로 나누었다. 다음으로 Murphy *et al.*(2016)이 리뷰(review)로 분류한 것과 대응하기 위해 법(law), 사회경제(socioeconomic), 정책(policy), 주민건강(public health)으로 나눠 분석하였다. 이처럼 분석 기준을 세분화한 것은 정책연구의 비중이 큰 국내 실정을 반영하고, 주민건강 등 최근 증가하는 연구 경향을 함께 분석하기 위함이다. 셋째, 지역(해역)별 연구 경향을 대형사고 등 주요사고 발생지역과 연계하여 분석하고, 해외 연구 경향과 비교해 보았다. Murphy *et al.*(2016)은 전 세계의 사고 발생 해역을 북태평양(North Pacific), 남태평양(South Pacific), 멕시코만(Gulf of Mexico), 북대서양(North Atlantic) 등 10개 지역으로 나누고, 지역별 연구 경향 변화를 분석한 바 있다. 본 연구에서는 우리나라 해역을 서해안, 남해안(제주도 인근 해역

포함), 동해안의 3개 지역으로 구분하고, 지역별 연구 경향 변화를 파악하였다.

3. 결 과

3.1 연구논문 수 변화

국내외에서 기름유출에 관한 전체 연구 논문 수 변화를 비교한 결과는 다음과 같다. 세계적으로는 시간 흐름에 따라 기름유출 관련 논문이 지속적으로 증가한 것으로 나타났다. 특히 전체 과학 논문(SCI)의 증가 속도보다 기름유출 관련 논문의 증가 속도가 더 높았다(Murphy *et al.*[2016], Fig. 1a). 우리나라는 씨프린스호 사고(1995년) 및 허베이 스피리트호 사고(2007년)를 기점으로 기름유출 관련 논문이 증가한 것으로 나타났다. 그러나 해외와 달리 시간 흐름에 따른 지속적인 증가 추세는 보이지 않았다. 반면에 씨프린스호 사고와 허베이 스피리트호 사고가 일어난 지 일정 시간이 지난 후 오히려 기름유출 관련 연구가 감소한 것으로 나타났다(Fig. 1b). 1978년 1건으로 시작하여 1994년까지 매년 1~2건의 논문이 검색되었지만, 1995년 씨프린스호 사고가 발생한 후 1995년 3건, 1996년 4건으로 관련 논문이 증가하였고, 이러한 경향은 2002년 13개, 2003년 11건으로 2000년대 초반까지 9년간 지속되었다. 이는 원유 등 5,035 kl가 유출된 씨프린스호 사고로 약 73.2 km의 해안이 오염되는 등 우리나라에서 최초로 발생한 대형 기름유출 사고로(MPSS[2017a]), 재난적 해양오염사고의 위험성에 대응하기 위

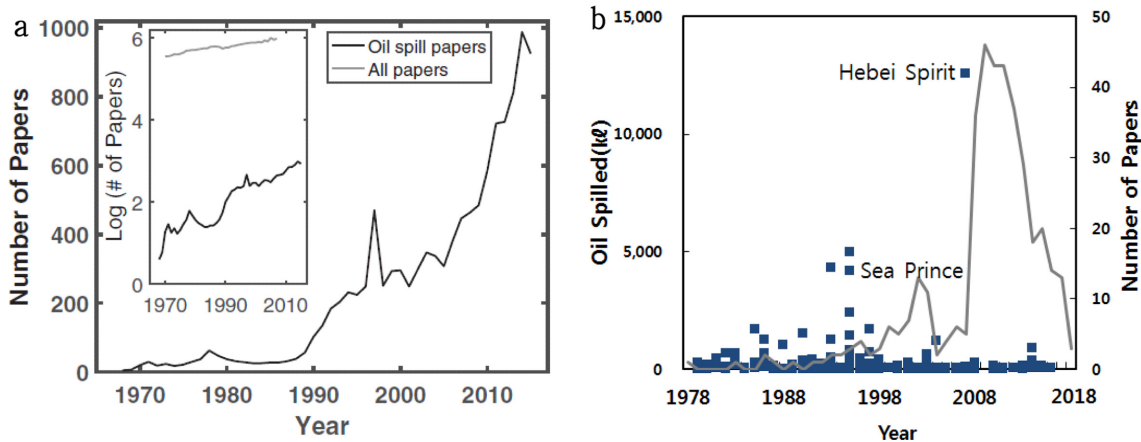


Fig. 1. Comparison of world and Korea research papers over time. a: Shows the number of world research papers published on oil spills over time period of 1968 to 2015. Inset shows semi-log plot of same data and growth of whole scientific literature (SCI) (Larsen and von Ins. [2010]; Murphy *et al.* [2016]). b: Left axis: Scatter plot of oil mass spilled from 1979 to 2016 (MPSS [2016]). Right axis: Shows the number of Korea research papers published on oil spills over time period of 1978 to 2018.

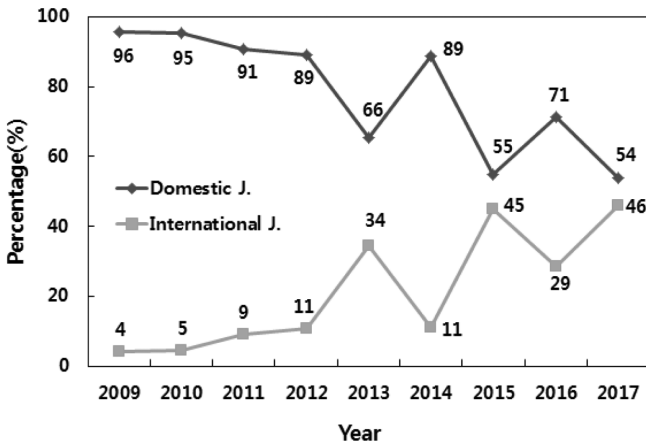


Fig. 2. Comparison of oil spill thesis published by Korean researchers in domestic and international academic journals over time (2009-2017).

한 연구가 많이 수행된 것으로 분석된다. 또한 2007년 12월, 허베이 스피리트호 사고가 발생한 이후 2008년 36건, 2009년 46건의 논문이 검색되어 사고 이전인 2007년 5건의 약 7~9배 정도로 증가하였고, 이러한 경향은 2013년 29건으로 약 6년간 지속된 것으로

나타났다. 그러나 2014년 이후로는 논문 수(2014년 18건, 2015년 20건, 2016년 14건, 2017년 13건)가 꾸준히 줄어들고 있다.

2009년 이후 국내 연구자가 국제학술지에 발표한 논문이 지속적으로 늘어나고 있다(Fig. 2). 2010년까지는 국제학술지에 발표된 논문 수가 4편(5%)에 불과하였으나, 2011-2012년 각 4편(9%, 11%)을 발표하였고, 2013년에는 총 10편(34%)이 국제학술지에 발표되어 최고치를 기록했다. 이후로는 연도별 편차가 있고 논문 개수로는 2013년에 필적하진 못했으나, 비중은 지속적으로 30-40%(2015년 45%, 2016년 29%, 2017년 46%) 수준을 기록한 것으로 나타났다. 이는 2014년 이후 국내학술지에 발표한 논문 수의 감소 폭(2009-2013년 176편에서 2014-2017년 44편)이 국제학술지에 발표한 논문 수의 감소 폭(2009-2013년 22편에서 2014-2017년 21편)보다 훨씬 큰 폭으로 감소하였기 때문으로 분석되었다.

3.2 학문분야별 연구 변화

국내외에서 연구된 학문 분야별 논문을 시간 흐름에 따라 비교하였다. 국외의 경우 학문 분야별 연구 비중이 시간 흐름에 따라 큰 변화 없이 일정한 패턴을 유지한 것으로 나타났다(Fig. 3a). 전 시기에 걸쳐 생물학적 연구(약 30% 이상)와 화학적 연구(25~30%)가

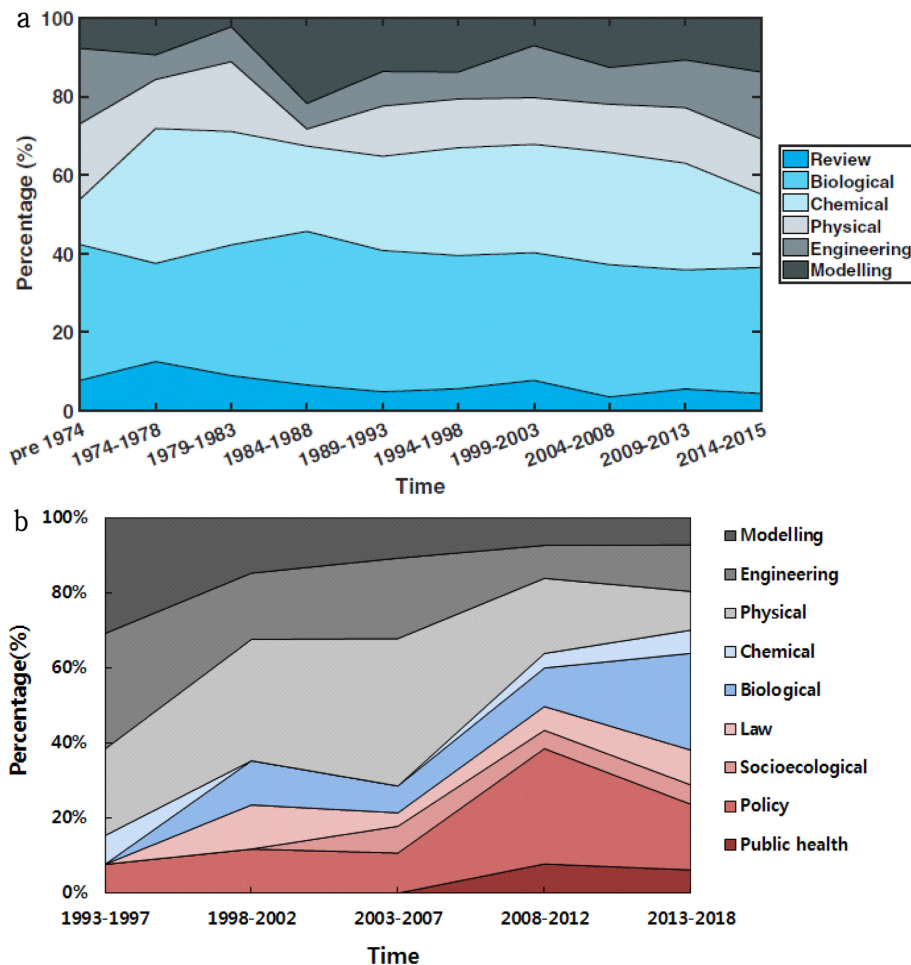


Fig. 3. Comparison of world and Korea research papers trends in various disciplines. a: Shows the trends of world research papers (Murphy et al. [2016]). b: Shows the trends of Korea research papers.

꾸준하게 높은 비율을 차지하였다. 물리적 연구(10~15%)와 기술적 연구(10~15%) 및 모델링(5~10%) 분야는 상대적으로 낮은 비율을 보였다(Murphy *et al.*[2016]). 2010년에 발생한 DWH 오염사고 이후 화학적 연구가 줄어드는 대신 기술적 연구와 모델링 연구가 늘어나는 경향을 보였다(Murphy *et al.*[2016]).

국내에는 1978년부터 1992년까지 상대적으로 적은 논문(385건 중 8건)이 발표되었던 기간을 제외하면 학문 분야별 연구 비중이 시기별로 변화하는 경향을 보였다(Fig. 3b). 먼저 모델링, 기술, 물리 관련 연구는 1993-1997년에 85%를 차지하였으나(모델링 31%, 기술 31%, 물리 23%), 점점 줄어들어 2013-2018년에는 29%(모델링 7%, 기술 12%, 물리 10%)까지 감소하였다. 생물학 관련 연구는 초기에는 연구 비중이 낮았으나, 2013년 이후 증가하는 경향을 보였다. 즉 1988-1997년에는 생물학 관련 연구가 0%, 1998-2002년 12%, 2003-2007년 7%를 차지하여 타 연구 분야에 비해 관심이 적었던 것으로 분석되었다. 그러나 허베이 스피리트호 사고가 발생한 이후인 2008-2012년 10%를 차지하였고, 2013-2018년에는 26%로 크게 증가하였다. 특히 2013-2018년에 발표된 생물학 관련 연구는 16건이 국제학술지에 발표되고 있어 연구의 질적 측면에서도 성과를 인정받고 있는 것으로 분석되었다. 법 및 정책 관련 연구는 1993-1997년에 8%(법 0%, 정책 8%)로 비중이 작았으나, 1998-2002년에 24%(법 12%, 정책 12%)까지 증가하였다. 특히 2007년 12월 허베이 스피리트호 사고를 기점으로 더욱 증가하여 2008-2012년에는 37%(2008-2012년 법 6%, 정책 31%)까지 증가했다. 그러나 2013-2018년에는 27%(법 9%, 정책 18%)로 비중이 다소 감소하였다.

허베이 스피리트호 사고가 발생한 후인 2008년부터 학문 분야별로 골고루 논문이 발표되기 시작했다. 기초 연구에 해당하는 화학 관련 연구는 초기부터 1997년까지 연구된 이후로 1998년부터 2007년까지 10년간 연구가 발표되지 않았으나, 2008-2012년 4%를 차지하면서 다시 연구되기 시작했고, 2013-2018년에는 6%까지 증가한 것으로 분석되었다. 또한 2003-2007년 7%를 차지하며 시작된 사회경제 관련 연구는 2008-2018년까지 5%를 점유하면서 기름유출 연구의 한 분야로 정착되고 있는 것으로 나타났다. 허베이 스피리트호 사고 이후 시작된 주민건강 관련 연구는 2008-2012년 8%, 2013-2018년 6%로 학계의 지속적인 관심을 받는 주제로 분석되었다.

3.3 지역별 연구 변화

지역별 기름유출 연구 경향은 국내외 모두 다음과 같이 세 가지 공통점이 있었다. 첫째, 대규모 기름유출 사고가 일어난 해역에 관련 연구가 급격히 증가하였다. 세계적으로는 1974년 이전에는 기름유출 관련 연구가 북태평양이 약 50%, 북대서양이 40%를 차지하였으나, Cadiz호 사고가 프랑스 인근에서 약 22만 톤을 유출한 이후 대서양 관련 연구들이 증가했다(약 70%). 마찬가지로 Ixtoc1(남태평양), 걸프전쟁(인도양과 홍해), Exxon Valdez, 허베이 스피리트호(북태평양), Braer, Prestige, Erika(북대서양), DWH(멕시코만) 사고들이 일어났을 때 해당 해역과 관련된 연구가 증가하였다(Fig. 4a). 국내의 경우 1993-2002년의 10년간 씨프린스호, 유일1

호, 오성3호, 호남 사파이어호, 금동 제5호 사고 등이 남해 지역에서 발생했고, 남해 지역과 관련된 연구들이 2/3 이상(1993-1997년 67%, 1998-2002년 88%, 2003-2007년 67%)을 차지하였다. 서해에서는 1993-1997년까지 33%의 연구가 수행되었으나, 허베이 스피리트호 사고 발생 이전인 1998-2007년까지는 서해 지역을 대상으로 진행된 연구가 없었던 것으로 나타났다. 그러나 허베이 스피리트호 사고 발생으로 인해 2008-2012년 95%, 2013-2017년 90%로 관련 연구가 크게 증가하였다(Fig. 4b).

둘째, 유출량과 연구 건수는 일정한 상관관계를 보이지 않았다. 세계적으로는 Cadiz호, Ixtoc1호, 걸프 전쟁, Braer호, Exxon Valdez호, Sea Empress호, Nakhodka호, Prestige호, Erika호, DWH호 등 10개 사고와 관련된 연구가 가장 많았다(Murphy *et al.*[2016]). 그러나 연구가 많이 이뤄진 이들 10개 사고가 유출량 상위 10개와 일치하지는 않았다(Fingas[2013]; Murphy *et al.*[2016], Fig. 4a). 예를 들어 1979-1983년 사이에 Nowruz, Castillo de Beliver, Atlantic Empress/Aegean Captain 등의 10만 톤 이상의 유출사고가 발생했지만 관련 연구는 많지 않았다. 국내 역시 비슷한 경향을 보였다. 총 385개의 연구 중 특정 기름유출 사고와 관련된 연구는 184건으로 허베이 스피리트호 169건, 씨프린스호 8건, 경신호 2건, 세월호 2건, 우이산호 1건, 여명7호 1건, 미국 DWH호 1건 등 총 7건의 사고와 관련된 것으로 나타났다. 하지만 1993-2012년 사이에 씨프린스호 사고 이외에도 유출량으로 볼 때 유일1호(5위), 오성3호(6위), 호남사파이어호(7위), 금동 제5호(8위), 코리아 비너스호(3위), Danita호(2위), 모닝 익스프레스호(9위) 등 1,000톤 이상의 대형 유출사고가 발생했지만 해당 유출사고와 관련된 연구는 발견되지 않았다(Fig. 4b).

셋째, 주요 유출사고가 발생하지 않았던 지역은 기름유출 관련 연구가 적은 경향을 보였다. 세계적으로 시간이 지남에 따라 연구 지역의 변화가 심하게 나타났지만(Murphy *et al.*[2016]), 대형 기름유출 사고가 발생했던 인도양과 홍해(Indian & Red Sea), 북대서양(North Atlantic), 멕시코만(Gulf of Mexico), 북태평양(North Pacific)과 관련된 연구가 전 기간(1974-2015년)에 걸쳐 약 2/3 이상을 차지한 것으로 나타났다. 그러나 적도(Equatorial), 남반구(Southern), 남대서양(South Atlantic) 등 주요 기름유출 사고가 발생하지 않았던 지역은 같은 기간 동안 15% 이하로 나타났다(Fig. 4a). 우리나라는 이러한 경향이 좀 더 심한 것으로 나타났다. 연구 대상 지역을 알 수 있었던 194건의 연구 중 씨프린스호와 허베이 스피리트호 등 주요 사고가 발생했던 서해와 남해에 해당하는 연구는 1993년부터 2017년까지 지속적으로 2/3 이상을 차지한 것으로 나타났다. 특히 허베이 스피리트호 사고가 일어난 이후 서해안 관련 연구는 2008-2012년 122건, 2013-2017년 43건으로 압도적인 비율을 차지하였다. 반면에 동해와 관련된 연구는 지금까지 총 3편이 발표된 것으로 분석되었다(Fig. 4b). 2003-2007년 동해안 대상 연구가 전체의 33%를 차지하였으나, 같은 기간 타 지역에서 2건의 연구가 이뤄지는 등 총 3건의 연구가 이뤄진 것에 비춰보면 많은 연구가 이뤄졌다고 할 수 없다. 또한 시간적으로 볼 때 2002년 1건,

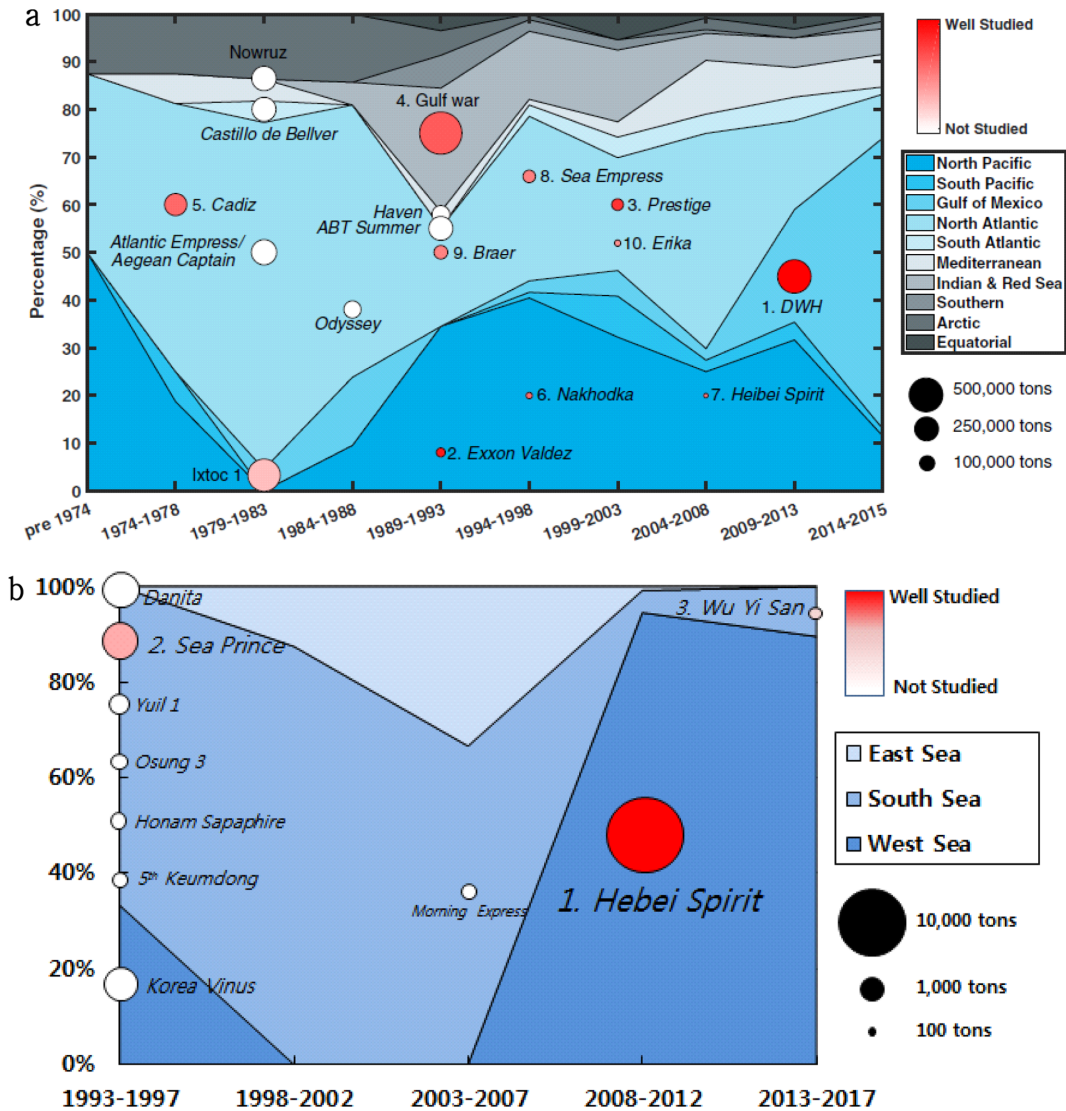


Fig. 4. Comparison of overseas (a) and domestic (b) research papers trends in various geographic regions. Percentage of oil spill research papers conducted in certain marine geographical regions over time. Plotted dots shows the 10 (overseas) and 3 (domestic) most studied oil spills and the 10 largest oil spills (Fingas [2013]; Murphy *et al.* [2016]). Spill size expresses to the dot size, dot color gradient corresponds to how well studied that spill is (Murphy *et al.*[2016]).

2006년 1건, 2012년 1건이 발표되어, 학계의 연구 대상으로 지속적 관심을 받지 못하고 있는 것으로 나타났다.

4. 고 찰

4.1 국내외 기름유출 연구 특징

기름유출 사고는 기름유출 관련 연구를 촉발하는 중요한 요인으로 작용하지만, 유출량이 기름유출 관련 연구의 결정적인 요인은 아닌 것으로 판단된다(Murphy *et al.*[2016]). 지정학적(geopolitic) 요인 또는 전쟁과 관련된 경우, 해안에 미친 피해가 적거나 피해를 입은 자원이 적은 경우, 언론이나 지역 사회의 관심이 부족한 경우 대형 유출사고라 하더라도 관련 연구는 적은 경향을 보였다(Schrope

[2010]; Murphy *et al.*[2016]). 반면에 인구가 밀집된 지역 또는 환경적으로 중요한 가치를 지닌 지역과 가까운 경우(프레스티지, 엑손 발테즈), 생업에 영향을 미칠 경우(허베이 스피리트호, DWH), 언론에 관심을 많이 받은 경우, 과학적 자원이 많거나 인적 자본이 피해를 입을 경우 상대적으로 많은 연구가 진행되었다(Murphy *et al.*[2016]). 같은 해(2014년)에 발생한 우이산호와 세월호 사고가 이러한 특징을 잘 보여주는 사례라 할 수 있다. 우이산호는 당시 899톤의 기름을 유출했고, 임해 산업시설에서 발생한 해양오염사고로 방제 패러다임을 바꿀 수 있는 중요한 사고로 볼 수 있다. 그러나 일반인에게 미친 피해가 크지 않았고, 관련 연구는 2건에 불과한 것으로 나타났다. 그러나 세월호 사고는 139톤으로 상대적으로 적은 기름을 유출했고, 해양오염 측면에서 별다른 이슈가 없었지만

수많은 인명피해가 발생했고, 정치적 이슈화를 포함한 언론의 집중적인 관심으로 인해 학계의 연구 대상으로 자주 선택되었고, 기름 유출에서도 우이산호와 동일한 2건이 연구되었다.

국내외 모두 특정 사고가 기름유출 연구의 전환점으로 작용하였다. 세계적으로는 엑손 발데즈호 사고 이후 북태평양 관련 연구가 1984-1988년 약 10%에서 1989-1993년 30% 이상으로 증가하였다. DWH 사고가 발생한 멕시코만은 이러한 경향이 훨씬 더 심했다. 멕시코만 관련 연구는 2004-2008년 2%에서 사고 발생 전후 2009-2013년 24%까지 증가했고, 2014-2015년엔 61%까지 증가하였다 (Murphy *et al.*[2016]). 국내에서는 허베이 스피리트호 사고가 기름 유출 연구의 전환점으로 작용하였다. 1978년에 기름유출 관련된 연구가 1건 발표된 이후 2007년까지 약 30년 동안 거의 매년 0~5건의 논문이 발표되었다. 그러나 전체 연구의 3/4(78%)이 허베이 스피리트호 사고 이후 2008-2017년에 수행되었다. 하지만 허베이 스피리트호 사고 후 5년이 지난 2014년 이후에는 연구 수가 지속적으로 감소하고 있어 연구에 대한 관심이 빠르게 감소하는 경향을 보였다(Fig. 1b).

4.2 허베이 스피리트호 사고 이후 국내 기름유출 연구 변화

국내 기름유출 연구는 허베이 스피리트호 사고를 기점으로 연구 분야가 다양화되고 있다. 전통적으로 수행되어 왔던 모델링, 기술, 물리, 화학, 생물학적 연구와 함께 법제도, 사회적 영향, 자원봉사자, 언론보도, 주민 건강에 대한 다양한 연구들이 시도된 것이 특징이다. 일례로 정책 부문에서는 1978-2007년까지 12건의 논문이 발표되었으나, 2008년부터 2018년 까지 11년간 총 80건이 발표되어 6배 이상 증가하였다. 2008년 이후 연구 내용으로는 사회갈등 8건, 자원봉사자 6건, 보상체계 5건, 사회영향 및 사회적 대응 4건, 언론보도 3건 등이 많았던 것으로 분석되었다. 그러나 같은 기간에 지역 정치 2건(Park[2009]; Sim and Park[2013]), 지역피해 2건(Song[2010]; Lee *et al.*[2011]), 삶의 질 2건(Yoo and Lee[2010]; Lee and Yoo[2010]), 분쟁조정 1건(Kang[2009]), 인식 1건(Jeong[2009]), 민감자원 1건(Roh and Kim[2016]) 등, 상대적으로 적게 연구된 부문도 있는 것으로 분석되었다.

기술 부문에서는 2008년 이후 총 28건이 연구되었다. 주로 연구된 분야는 유출유 탐지 9건, 해상 및 해안방제 기술 7건으로 분석되었다. 유출유 탐지 부문에서는 Kim *et al.*[2009]이 유출유의 형광물질을 활용한 잔존유 탐지, Koo *et al.*[2015]이 ITO 나노 결정을 활용한 수인성 유출유 센서, Kim *et al.*[2015]이 SAR 이미지를 이용한 허베이 스피리트호 유출유 탐지 및 시공간적 변화를 연구하였다. 해상 및 해안방제 부문에서는 Moon *et al.*[2011]이 오일붐 측정 프로그램(OBM Program)에 대해, Im *et al.*[2012]이 유화분산제의 연안 표착유 제거효율에 대해, Kim *et al.*[2016]이 DWH호 유출유 수치분석 모델의 국내 적용성에 대해 연구하였다. 한편 Pandey *et al.*[2009]은 태안 지역에서의 기름유출에 따른 대기 수는 오염에 대해, Yim *et al.*[2011]은 유지분 분석 및 유출유 풍화에 대해 연구하였다. 이밖에도 기름유출 대응을 위한 지도구축(Park *et al.*[2009])

및 지원정보시스템 개발(Kim[2013]), 해양구난(Choi *et al.*[2012]) 등이 연구된 것으로 분석되었다.

주민 건강 부문에서는 2008년 이후 총 22건이 연구되었다. 허베이 스피리트호 사고 직후 초기에는 Kim and Kwon[2008]이 태안 주민들의 심리적 건강을 연구하였으며, 아울러 급성 건강 영향이 3건 (Sim *et al.*[2010]; Gwack *et al.*[2012]; Na *et al.*[2012]) 연구되었다. 이밖에도 외상후 스트레스 장애 등 스트레스 관련 연구도 4건이 연구되었으며, 질병 관련 연구도 4건이 연구되었다. 최근에는 허베이 스피리트호 사고에 따른 중장기 건강영향이 6건(Jeong[2010]; Ha *et al.*[2012]; Choi[2014]; Noh *et al.*[2015]; Noh[2016]; Jung *et al.*[2017]) 발표되는 등 아직까지 연구 수는 적지만 기름유출에 따른 장기 건강 영향과 대응방안에 대한 연구들이 활성화되고 있는 것으로 분석되었다.

4.3 국내외 기름유출 연구 갭(gap)

발생 빈도가 높은 소규모 기름유출과 대형사고가 잘 일어나지 않는 지역에 대한 연구가 부족하였다. 유출량이 큰 대형 사고는 발생빈도가 작고(infrequent) 공간적으로 좁은 지역에서 발생하지만, 소규모 유출사고는 상대적으로 더 자주 발생하고, 광범위한 지역에서 일어난다(Anderson and LaBelle.[1994]; Murphy *et al.*[2016]). 그러나 소규모 기름유출의 환경과 건강에 대한 영향은 언론 및 학계의 관심 부족과 연구지원 부족으로 잘 연구되지 않았다(Murphy *et al.*[2016]). 특히 심해저 자원 채취와 해상풍력 등 신재생에너지 개발을 비롯한 해양이용 확대 정책으로 앞으로는 기름유출 사고가 더욱 빈번하게 다양한 곳에서 발생할 가능성이 높으나, 관련 연구는 이제 시작단계에 있다.

기름유출에 따른 건강 영향 관련 연구가 부족하다. 최근 방제작업자, 지역주민, 자원봉사자에 대한 안전, 독성건강 영향으로 인한 사회·경제적 피해 등이 기름유출에 따른 주요 문제로 보고되고 있다(Goldstein *et al.*[2011]). 그러나 대규모 기름유출 사고가 일어나면 자원봉사자와 지역주민이 많게는 수백만 명까지 방제작업에 투입되지만(Ha *et al.*[2012]), 이들에 대한 장기 건강 영향 연구는 부족한 실정이다(Murphy *et al.*[2016]). Exxon Valdez(1989년)와 MV Braer(1993년) 유출사고로 인해 건강 영향 연구가 시작되었으나, 전 세계적으로 1,255개의 기름유출 관련 연구 중 1% 미만(83건)이 건강 영향과 관련된 것이다(Murphy *et al.*[2016]). 우리나라도 비록 허베이 스피리트호 사고가 발생한 2008년 이후로 주민 건강과 관련된 연구가 많이 수행되었으나, 22건으로 전체의 6%에 불과하였다. 특히 국내학술지의 경우는 4% 만이 주민건강에 관련된 연구로 나타났다.

해외와 비교했을 때 국내연구의 가장 두드러진 차이점은 정책 및 기술과 관련된 연구는 많이 이뤄진 반면, 기초 연구, 특히 생태 및 환경 영향과 관련된 연구가 부족한 것으로 나타났다. 해외의 경우 1967년 토리 캐년 사고가 발생한 이후 기름유출이 생태계와 환경에 가져오는 피해에 중점을 두어 현장 조사(field study)를 중심으로 많은 연구가 수행되었다. 1970년대부터 1990년대까지 바닷새, 상

업 및 비상업 어종, 해양포유류, 이매패류, 저서생물 등을 중심으로 기름유출에 따른 치사율 등 생리, 생태적 피해에 대해 다양한 실증적 연구가 이뤄져 왔고, 유출 피해 관련 기록과 정보도 많이 축적하였다. 반면 우리나라는 해양오염방제정책 및 관련 법제도 구축, 유출유의 거동 및 확산 모델 개발, 효과적인 방제 방법 및 장비 개발 등 현장에서 필요로 하는 실용적이고 기술적인 연구가 많이 이뤄져 왔다. 비록 허베이 스피리트호 사고 이후 생물학 관련 연구가 35건 수행되었으나, 저서생태계에 관한 연구가 대부분이었다. 바닷새, 해양포유류 등 기름유출에 민감한 생물종의 취약성과 회복 능력, 유출유의 화학적 성질과 풍화 정도, 거동에 따른 민감 생물종의 위해도에 대한 연구는 부족한 실정이다. 이는 기름유출에 따른 생태계의 피해를 입증하기까지 시간과 비용이 많이 소요되지만, 실증적인 연구 중심의 연구 풍토와 연구비 지원의 비지속성, 언론과 학계의 관심이 부족에 기인한 것으로 파악된다. 또한 우리나라 연안은 비교적 좁은 공간에 관광자원, 어장과 양식장 등이 집중적으로 분포하고 있어 기름오염에 따른 사회·경제적 피해를 최소화하기 위한 방제 기술 연구가 생태계에 대한 영향 연구보다 중요하고 시급히 해결해야 하는 연구 주제였기 때문으로 분석된다.

4.4 향후 연구 분야 제안

발생 빈도가 높은 소규모의 기름유출 사고에 대한 연구가 필요하다. 1979년부터 2016년까지 우리나라에서 발생한 10톤 이상의 기름유출 사고 중 1,000톤 이상의 대형 유출사고는 총 13건(5%)에 불과하며, 나머지 95%는 소규모 사고였다(MPSS[2017c]). 그러나 직접적으로 드러난 피해가 적고, 언론과 민간의 관심이 적어 방제 당국의 정책 우선순위에서 배제되기 쉬웠던 것이 사실이다. 하지만 시간적, 공간적으로 대형 사고보다 훨씬 빈번하게 발생되고 있어 해양 생물, 어장, 연안 갯벌 등 민감 자원이나 생태계에 직간접적 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 소규모 기름유출로 인한 유출유의 거동 및 환경과 생태계에 대한 영향에 관한 연구가 필요하다.

동해 지역에서의 기름유출에 대한 연구가 필요하다. 2004년에서 2016년까지 발생한 사고를 해역별로 나누면 남해 2,030건(54.1%), 서해 919건(24.5%), 동해 802건(21.4%)이 발생하였다. 그러나 지금까지 수행된 대부분의 연구는 남해와 서해에 편중되어 왔다. 이는 동해 주변의 해류 이동과 편서풍대에 속한 지리적인 특성으로 인해 동해상에서 발생한 기름유출의 영향이 연안보다는 해양(open sea)으로 확산될 가능성이 높아 실제 큰 피해가 발생하기 어렵기 때문으로 분석된다. 그러나 최근 기술발전으로 그동안 접근이 어려웠던 동해 해저 지역에 대한 자원채취 및 석유개발 탐사가 늘어나고 있다. 이는 동해 지역, 특히 심해저 지역에서의 대규모 기름유출 사고가 언제든지 일어날 수 있는 가능성이 커졌음을 의미한다. DWH 사고 발생 시 많은 기름이 해저에서 유출되어 해중 및 해저 생태계에 막대한 영향을 끼친 것을 교훈삼아 우리나라 해중 및 해저 환경에 기름유출이 미칠 수 있는 영향에 대한 선제적 연구를 추진할 필요가 있다. 또한 기후변화에 따라 북극항로가 개통된다면 북극 및 알래스카 지역과 가까운 동해지역이 새로운 기름유출사고 위험지

역으로 떠오를 수 있다(Kim *et al.*[2017a]). 따라서 동해를 포함한 전 해역의 기름유출 사고 발생 위험도와 유출 사고에 따라 주변 환경에 미칠 수 있는 위해성을 주기적으로 재평가해야 한다. 한편 동해 지역에서의 사고는 심해저 및 육지에서 멀리 떨어진 원해에서 발생할 가능성이 높기 때문에 심해저 사고 대비 및 대응을 위한 기술 개발이 필요하다. 또한 심해저 기름유출에 따른 해저 및 해중 생태계와 어장에 대한 영향 연구가 필요하다. 아울러 원해 지역에서의 유처리제 사용 및 현장 소각에 대한 연구가 필요하다.

방제작업자, 지역주민, 자원봉사자의 기름유출에 따른 건강 영향 연구 강화가 필요하다. 미국은 DWH 사고 이후 NIEHS Gulf Long Term Follow Up(GuLF)연구를 통해 수천명의 방제작업자와 자원봉사자들에 대한 장기 건강 영향을 지속적으로 모니터링하고 있다(Murphy *et al.*[2016]). 우리나라는 허베이 스피리트호 사고 이후 환경부 등 관계부처의 지원과 학계의 관심으로 급성 건강영향과 관련된 연구를 다수 수행하였다. 또한 사고 지역의 어린이 알레르기 질환(Jeon *et al.*[2016]), 방제작업 참여주민 산화손상 변화(Kim *et al.*[2017b]) 등 중장기 건강 영향에 관한 연구도 일부 수행하고 있다. 그러나 관계기관의 지속적인 관심과 연구비 지원 부족으로 장기 건강영향 및 모니터링 연구가 지속적으로 수행되지 못하고 있다. 특히 유출유에 반복적으로 직접 노출되는 방제작업자와 오염원에 노출된 지역주민과 어린이 및 노약자 등 취약계층에 대한 건강 영향은 장기 모니터링 연구가 꼭 필요하다.

기름유출이 해양 및 연안 환경과 생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 세계적으로는 기름유출이 어류, 조류, 포유류, 저서무척추동물 등 다양한 생물군집에 미치는 영향이 수십 년간 연구되어 왔다. 또한 축적된 생태계 유형 및 분류군별 기름유출 피해 자료를 활용하여 합리적 생태 위해도 평가(Consensus Ecological Risk Assessment; CERA), 순 환경편익 평가(Net Environmental Benefit Analysis; NEBA), 오염피해 저감 분석(Spill Impact Mitigation Assessment; SIMA)을 실시하고, 분석 결과를 방제 의사결정에 활용하고 있다. 그러나 우리나라는 허베이 스피리트호 사고 이후 주로 태안 해안의 저서생태계 영향에 대한 연구들을 제외하면, 아직까지 기름유출이 우리나라 전역의 연안 및 해양 생태계와 다양한 종류의 생물군집에 미치는 영향이 충분히 연구되지 못하고 있다. 따라서 우리나라 연안 및 해양 생태계 여건을 고려한 생태계 유형 및 분류군별 기름유출 피해 실증 연구 및 장기 생태계 영향에 대한 연구가 필요하다. 또한 기름유출이 환경과 생태계 및 생물군집에 미치는 영향을 전문적으로 연구할 수 있는 연구자 육성도 필요하다. 미국은 DWH 사고 이후 멕시코만 연구 이니셔티브(Gulf of Mexico Research Initiative; GOMRI) 지원으로 401명의 박사, 307명의 석사 및 565명의 학사를 육성한 바 있다(Murphy *et al.*[2016]). 우리나라도 다양한 분야의 기름유출 연구 지원프로그램을 통해 관련 전문가를 육성하여 해양오염 방제 선진국으로 가기 위한 발판을 마련해야 할 때이다.

후 기

이 논문은 정부(해양경찰청)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행하였습니다(KCG-01-2017-05).

References

- [1] Aguilera, F., Méndez, J., Pásaro, E., Laffon, B., 2010, Review on the effects of exposure to spilled oils on human health, *J. Appl. Toxicol.*, 30, 291-301.
- [2] Anderson, C.M., LaBelle, R.P., 1994, Comparative occurrence rates for offshore oil spills, *Spill Sci. Technol. Bull.*, 1(2), 131-141.
- [3] Atlas RM, Hazen TC., 2011, Oil Biodegradation and Bioremediation: A Tale of the Two Worst Spills in U.S. History, *Environ. Sci. Technol.*, 45(16), 6709-6715.
- [4] Chu, Y.H., 2017, Marine oil pollution and public health impact – safety and environmental health, Presentation of Taean Environmental Health Center, 1-84.
- [5] Fingas, M., 2013, *The Basics of Oil Spill Cleanup*, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL.
- [6] Goldstein, B.D., Osofsky, H., Lichtveld, M., 2011, The gulf oil spill, *N. Engl. J. Med.*, 364(14), 1334-1348.
- [7] Ha, M., Kwon, H., Cheong, H.K., Lim, S., Yoo, S.J. et al., 2012, Urinary metabolites before and after cleanup and subjective symptoms in volunteer participants in cleanup of the Hebei Spirit oil spill, *Sci. Total Environ.*, 429, 167-173.
- [8] IPIECA, IMO, OGP, 2012, Sensitivity mapping for oil spill response, 1-33.
- [9] Jeon, Y.J., Jang, B.K., Lee, I.J., Lee, J.W., Son, B.S. et al., 2016, Impact of Allergic Diseases in Elementary School Students by the Hebei Spirit Oil Spill, *Korean Public Health Research*, 42(2), 57-68.
- [10] Kim, C.K., Chun, J.Y., Shin, Y.S., Hwang, S.I., Kang, B., et al., 2017a, A Preemptive Study on Marine Pollution Response Caused by Environmental Changes such as International Ship Fuel Oil Regulation, Ministry of Public Safety and Security, Sejong, Republic of Korea, 1-112.
- [11] Kim, J.A., Noh, S.R., Cheong, H.K., Ha, M., Eom, S.Y. et al., 2017b, Urinary oxidative stress biomarkers among local residents measured 6 years after the Hebei Spirit oil spill, *Sci. Total Environ.*, 580, 946-952.
- [12] Larsen, P.O., von Ins, M., 2010, The rate of growth in scientific publication and the decline in coverage provided by Science Citation Index, *Scientometrics*, 84, 575-601.
- [13] Ministry of Public Safety and Security, 2017a, Introduction to the Marine Pollution Control in Korea, Ministry of Public Safety and Security, 1-61.
- [14] Ministry of Public Safety and Security, 2017b, Status of National R&D Project on Marine Pollution Control Field, Ministry of Public Safety and Security, 1-15.
- [15] Ministry of Public Safety and Security, 2017c, Statistics on Oil Spill Incident (1979~2016), Ministry of Public Safety and Security.
- [16] Murphy, D., Gemell, B., Vaccari, L., Li, C., Bacosa, H., et al., 2016, An in-depth survey of the oil spill literature since 1968: Long term trends and changes since Deepwater Horizon, *Mar. Pollut. Bull.*, 113, 371-379.
- [17] National Oceanic and Atmospheric Administration, 2002, Environmental Sensitivity Index Guidelines Version 3.0, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 11, Seattle, Washington, 1-89.
- [18] O'Sullivan, A.J., Richardson, A.J., 1967, The Torrey Canyon disaster and intertidal marine life, *Nature* 214, 448-542.
- [19] Portmann, J.E., O'Connor, P.M., 1968, The toxicity of several oil-spill removers to some species of fish and shellfish, *Mar. Biol.*, 1(4), 322-329.
- [20] Return On Now, 2015 Search Engine Market Share By Country, <http://returnonnow.com/internet-marketing-resources/2015-search-engine-market-share-by-country/>, 2017(accessed 2018.02.14).
- [21] Park, D.G., 2009, The Response Problems of Local Politics in Korea - With the Case of Hebei Spirit Oil Spill, *KRCCEM*, 5(2), 1-14.
- [22] Sim, M.B. and Park, S.G., 2013, An Empirical Study on Restoration Methods of Local Community in Local Government - Focus on the Oil Spill Incident at Taean, *KLAR*, 10(2), 247-273.
- [23] Lee, M.S., Kwon, S.J., Park, S.H., 2010, A Study on Socio-economic Impact Assessment System for Marine Oil Spill, *Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 16(1), 49-55.
- [24] Yoo, H.J., Lee, J., 2010, Quality of Life in Taean Community after Hebei Spirit Oil Spill from the Viewpoint of Job, *KRCCEM*, 6(3), 63-85.
- [25] Lee, J., Yoo, H.J., 2010, Analyzing the Disaster Victim's Quality of Life in the Case of Hebei Spirit Oil Spill, *KRCCEM*, 6(2), 51-75.
- [26] Kang, Y.S., 2009, Improvements of ADR(Alternative Dispute Resolution) for Fishery Damage by Marine Pollution, Ph.D. dissertation, Graduate School of Jeonju University, Jeonju, Republic of Korea, 1-199.
- [27] Jeong, S.H., 2009, A Study on the Survey of Oil Pollution at Sea – Mainly on stranding of Oil Tankers, M.D. dissertation, Department of Port Logistics, Graduate School of Maritime Industry, Korea Maritime University, Busan, Republic of Korea, 1-92.
- [28] Roh, Y.H., Kim, C.K., 2016, Methodology for Selection and Sensitivity Index of Socio-economic Resources for Marine Oil Spill Incidents, *J. Environ. Impact Assess.* 25(6), 402-413.
- [29] Kim, M.K., Yim, U.H., Hong, S.H., Jung, J.H., Choi, H.W., et al., 2010, Hebei Spirit oil spill monitored on site by fluorometric detection of residual oil in coastal waters off Taean, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 60(3), 383-389.
- [30] Koo, J., Jung, J.Y., Lee, S.T., Lee, M.J., Chang, J.H., 2015, Development of waterborne oil spill sensor based on printed ITO

- nanocrystals, *Mar. Pollut. Bull.*, 98(1-2), 130-136.
- [31] Kim, T.S., Park, K.A., Li, X., Lee, M.J., Hong, S.W., et al., 2015, Detection of the Hebei Spirit oil spill on SAR imagery and its temporal evolution in a coastal region of the Yellow Sea, *Adv. Space Res.*, 56(6), 1079-1093.
- [32] Moon, J.H., Yun, J.H., Ha, M.J., Jeon, D.W., 2011, A Study on development of oil boom computation program (OBC Program) for mechanical oil clean-up, *J. Navig. Port Res.*, 35(6), 495-500.
- [33] Im, D.I., Cho, H.K., Park, D.K., Ra, D.G., Cheong, C.J., 2012, Experimental Research for Evaluation of Removal Efficiency of Stranded Oil Using Dispersant on Coastal Zone, *J. of the Korean Society for Environmental Technology*, 13(2), 81-87.
- [34] Kim, C.K., Oh, J.H., Kang, S.G., 2016, A review of Deepwater Horizon Oil Budget Calculator for its Application to Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 19(4), 322-331.
- [35] Pandey, S.K., Kim, K.H., Yim, U.H., Jung, M.C., Kang, C.H., 2009, Airborne mercury pollution from a large oil spill accident on the west coast of Korea, *J. Hazard. Mater.*, 164(1), 380-384.
- [36] Yim, U.H., Ha, S.Y., An, J.G., Won, J.H., Han, G.M., et al., Fingerprint and weathering characteristics of stranded oils after the Hebei Spirit oil spill, *J. Hazard. Mater.*, 197, 60-69.
- [37] Park, J.M., Choi, H.W., Yoon, H.J., 2009, GIS Mapping of Coastal Pollution Induced by Hebei Spirit Oil Spill, *Journal of the KAGIS*, 12(3), 164-178.
- [38] Kim, H.J., 2013, System Development and Information Construction for Supporting Oil Pollution Response based on Marine GIS, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea.
- [39] Choi, H.J., Kim, H.T., Nam, T.K., Jun, S.Y., Yu, J.S., 2012, Survey and Development Plan for Marine Salvage Technology, *The Society of Naval Architects of Korea*, 2012(5), 2325-2332.
- [40] Kim, K.H., Kwon, S.J., 2008, Psychological Impacts of the Hebei Spirit oil spill event on Taean Residents, *ECO*, 12(1), 83-107.
- [41] Sim, M.S., Jo, I.J., Song, H.G., 2010, Acute health problems related to the operation mounted to clean the Hebei Spirit oil spill in Taean, Korea, *Mar. Pollut. Bull.*, 60(1), 51-57.
- [42] Gwack, J., Lee, J.H., Kang, Y.A., Chang, K.J., Lee, M.S., Hong, J.Y., 2012, Acute health effects among military personnel participating in the cleanup of the hebei spirit oil spill, 2007, in taean county, Korea, *Osong Public Health Res Perspect*, 3(4), 206-212.
- [43] Na, J.U., Sim, M.S., Jo, I.J., Song, H.G., 2012, The duration of acute health problems in people involved with the cleanup operation of the Hebei Spirit oil spill, *Mar. Pollut. Bull.*, 64(6), 1246-1251.
- [44] Jeong, W.C., 2010, Health Environmental Research on Oil Spill : HEROS study, Vol. 2017, No. 5, *Ann. Occup. Environ. Med.* 45(2010), 87-94.
- [45] Choi, Y.H., 2014, Retrospective Mid and Long-term Follow Up Study on the Change of Hematological Parameters in the Highly Exposed Residents of Hebei Spirit Oil Spill, Taean, Korea, Ph.D. dissertation, Department of Public Health, The Graduate School, Konyang University, Daejeon, Republic of Korea, 1-89.
- [46] Noh, S.R., Cheong, H.K., Ha, M., Eom, S.Y., Kim, H., et al., 2015, Oxidative stress biomarkers in long-term participants in clean-up work after the Hebei Spirit oil spill, *Sci. Total Environ.*, 515-516, 207-214.
- [47] Noh, S.R., 2016, Long-Term Health Effects of the Hebei Spirit Oil Spill, Ph.D. dissertation, Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, 1-171.
- [48] Jung, D., Kim, J.A., Park, M.S., Yim, U.H., Choi, K., 2017, Human health and ecological assessment programs for Hebei Spirit oil spill accident of 2007: Status, lessons, and future challenges, *Chemosphere*, 173, 180-189.
- [49] Schrope, M., 2010, The lost legacy of the last great spill, *Nature*, 466, 304-305.
- [50] Teal, J.M., Howarth, R.W., 1984, Oil spill studies: a review of ecological effects, *Environ. Manag.*, 8(1), 27-44.
- [51] National Digital Science Library (NDSL), <http://www.ndsl.kr> (accessed 2018.2.20).
- [52] Research Information Sharing Service (RISS), <http://www.riss.kr> (accessed 2018.2.20).
- [53] Naver Academic, <http://academic.naver.com> (accessed 2018.2.20).
- [54] Google Scholar, <https://scholar.google.co.kr> (accessed 2018.2.20).

Received 7 November 2017

Revised 10 December 2017

Accepted 11 January 2018