

침강 HNS 유출사고 및 사고 후 모니터링 방법 및 고려사항

최기영^{*,*****} · 김창준^{**†} · 김영일^{***} · 김용명^{****} · 이문진^{*****}

* 한국해양과학기술원 해양환경연구센터 선임연구원, ** 한국해양과학기술원 해양환경연구센터 책임연구원,
 *** 한국해양과학기술원 동해연구소 책임연구원, **** 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 기술원,
 ***** 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 책임연구원,
 ***** 과학기술연합대학원대학교 한국해양과학기술원 스쿨 해양과학전공 겸임교수

Review on the Post-spill Monitoring Method of Sunken HNS and General Considerations

Ki Young Choi^{*,*****} · Chang Joon Kim^{**†} · Young Il Kim^{***} · Yongmyung Kim^{****} · Moonjin Lee^{*****}

* Senior Research Scientist, Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

** Principal Research Scientist, Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Busan 49111, Korea

*** Principal Research Scientist, East Sea Research Institute, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Uljin 36315, Korea

**** Full-time Research Specialist, Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

***** Principal Research Scientist, Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

***** Adjunct professor, Department of Ocean Science (Oceanography), KIOST School, University of Science & Technology (UST), Busan 49111, Korea

요 약 : 해양환경으로 유출된 침강 HNS에 대하여 환경영향 평가를 위한 사후 모니터링 수행은 다량의 오염 물질이 유출된 경우와 해양 환경에 영구적 또는 장기적인 영향을 주는 경우에 특히 필요하다. 침강 HNS의 유출은 해저면에 혐기성 환경을 만들거나 지형과 해류에 따라 이동하며 퇴적물에 섞이거나 흡착되고 또는 반응하여 오염물질을 방출하기도 한다. 이는 저서생태계와 관련된 해양환경에 영향을 줄 수 있으며, 불용성 침강 HNS는 해양 환경에 지속적으로 존재할 수 있다. 침강 HNS 유출 후 사후 모니터링은 사례연구를 통해 첫째, 모델링을 통한 유출물질의 영향을 예측하고, 둘째 원격탐사 등을 이용한 유출지역의 탐색 및 오염물질 유무를 확인하며, 셋째 수계 및 퇴적물 시료의 화학적 분석과 생물학적 분석을 통하여 해양환경을 평가하는 단계로 되어 있으며, 모니터링 결과는 복원(Restoration) 또는 피해 및 보상 평가 등의 계획을 수립하는데 활용되고 있다. 또한 사후모니터링 조사항목 중 해양환경기준에 명시되어 있는 항목은 그 기준을 적용하여 평가하는 것이 유출 사고 전과 후의 환경영향을 평가하는데 유용할 수 있다.

핵심용어 : 위험유해물질, HNS, 침강 HNS, 유출사고, 모니터링 기법

Abstract : Post-spill monitoring of hazardous noxious substances accidents is essential in the event of a spillage of significant quantities of pollutants and for the management of the marine environment resulting from the long-term effects of the persistent toxic substances. The accidental introduction of a sinker into the marine environment can create harmful anaerobic conditions in the benthic ecosystem and spread over the seafloor by the topography and currents. Through case studies, most post-spill monitoring includes modeling, remote sensing, and chemical analyses of the sediment and benthic organisms. The monitoring also evaluates the effectiveness of restoration and recovery activities and assesses damages and compensation.

Key Words : Hazardous substances, HNS, Sinker, Chemical spill incidents, Monitoring method

* First Author : kychoi@kiost.ac.kr, 051-664-3201

† Corresponding Author : kejj201@kiost.ac.kr, 051-664-3199

1. 서론

HNS(Hazardous and Noxious Substances)는 해양환경에 유출되면 인간의 건강, 생물자원 및 기타 해양생물에 위협적인 영향을 줄 수 있으며 해안시설 또는 편의시설 이용 등에 제한을 줄 수 있다(IMO, 2000). HNS는 다양한 물리화학적 특성으로 인해 환경 매체 및 해양생물에 대한 독성에서 광범위한 영향을 나타내고 있으며, 해양에 HNS 유출과 관련된 독성 및 위험에 대한 이해 수준은 다른 오염물질에 비해 제한적으로 알려져 있다(Neuparth et al., 2011).

해저로 침강하는 HNS는 해수보다 비중이 큰 물질로 침강하는 동안 수중으로 용해하며 해저면 침강활동이 동시에 발생하기도 한다. 침강 HNS의 유출은 해저면에 혐기성 환경을 만들거나 지형과 해류에 따라 이동하며 퇴적물에 섞이거나 흡착되고 또는 반응하여 오염물질을 방출하기도 한다. 이는 저서생태계와 관련된 해양환경에 영향을 줄 수 있으며, 불용성 침강 HNS는 해양환경에 지속적으로 존재할 수 있다.

이러한 해양 HNS 유출 사고로 인한 해양환경의 피해수준을 평가하기 위해서는 정교하고 즉시 실행 가능한 모니터링을 수행하여 효과적인 대응이 필요하다. 유출 사고가 주변 해양환경에 중대한 영향을 미칠 것으로 예상될 때는 사고 후 모니터링의 계획과 신속한 실행이 요구되며 이를 통해 효과적인 대응방법을 선정하고 대응방법의 이행과 관련된 의사결정 과정을 지원할 수 있어야 한다.

이에 본 연구에서는 국내외 자료의 조사 정리를 통해 침강 HNS 유출 사고 후 해수와 퇴적물 모니터링 수행 시 고려사항에 대해 요약하였다.

2. 재료 및 방법

HNS 유출사고 후 해양환경의 영향을 파악하기 위한 모니터링 기법을 문헌자료 및 연구 논문 등을 조사하였다.

사고 후 모니터링의 필요성, 평가의 목적, 고려사항 등은 Kirby and Law(2010), Kirby et al.(2018)의 자료를 주로 참고하였으며, 침강 HNS의 거동특성과 해양환경에서의 위해성은 ITOPF(2014), HELCOM(2002) 등의 자료를 조사하였다. 국내에서 침강 HNS 유출사고 발생 가능성이 높은 물질에 대해서는 Kim et al.(2015a; 2015b; 2016)이 제시한 논문에서 정리하였으며, 사고 후 모니터링 항목 설정은 국내 해양환경기준 등을 참고하였다.

3. 결과

3.1 해양환경에서의 HNS 거동 및 영향

해저로 침강하는 HNS는 해수보다 비중이 큰 물질로 침강

하는 동안 수중 용해 및 해저면 침강활동이 동시에 발생하기도 한다. 유럽 표준 분류 기준(The Standard European Behaviour Classification : SEBC)에서는 HNS의 수중에서의 거동을 바탕으로 12가지 그룹으로 분류하고 있으며 침강 HNS의 거동은 SD와 S에 해당하는 특성을 나타낸다(ITOPF, 2014)(Table 1).

Table 1. The Standard European Behaviour classification (SEBC) system for chemicals

| | Code | Property Group | Properties |
|-------------|------|-------------------------------|---------------------------------|
| Gases | G | gas | evaporate immediately |
| | GD | gas/dissolver | evaporate immediately, dissolve |
| Evaporators | E | evaporator | evaporate rapidly |
| | ED | evaporator/dissolver | evaporate rapidly, dissolve |
| Floaters | F | floaters | float |
| | FE | floaters/evaporator | float, evaporate |
| | FED | floaters/evaporator/dissolver | float, evaporate, dissolve |
| | FD | floaters/dissolver | float, dissolve |
| Dissolvers | D | dissolver | dissolve rapidly |
| | DE | dissolver/evaporator | dissolve rapidly, evaporate |
| Sinkers | SD | sinker/dissolver | sink, dissolve |
| | S | sinker | sink |

HNS사고와 관련해서 가장 높은 위험을 주는 20가지 화학물질을 IMO에서 지정하였으며 이에 포함된 침강 HNS는 황산, 염산, 수산화나트륨, 인산, 질산, 에틸렌글리콜, 질산암모늄, 요소가 있으며(ITOPF, 2014), 유럽 표준 분류 기준(SEBC)에서는 유럽에서 대량으로 해상 운송되는 100대 화학물 중에 페놀, 니트로벤젠, 황산, 당밀, 염화메틸렌, 클로로포름, 트리클로로에틸렌, 에피클로로하이드린, 테트라클로로메탄, 크레졸, 퍼클로로에틸렌이 침강 HNS로 분류되었다(AMRIE, 2005).

침강 HNS 유출의 거동에 영향을 미치는 매개변수가 많기 때문에 최종상태(fate)를 예상하는 것은 매우 어렵다. 침강 HNS의 밀도는 침강속도에 영향을 미치고 표면 장력과 용해도(매우 낮더라도)는 수면에서의 거동과 해저로 가라앉는 동안 해역에서의 분산 및 확산에 영향을 준다. 수심 및 화학물질의 밀도와 함께 해류는 유출 물질이 해저면에 닿기 전에 해류 방향으로 이동하는 거리에 대해 결정적인 요인으로 작용한다(HELCOM, 2002).

침강 HNS 유출사고 및 사고 후 모니터링 방법 및 고려사항

해저면에 유출된 화학 물질의 체류 시간은 용해도에 따라 달라지는데, 예를 들면 용해도가 1% 나 0.001%라는 차이는 용해도가 낮은 물질이 해저에서 분명히 체류 시간이 길 것이다. 또한 바닥에 가까운 해류의 존재도 체류 시간에 영향을 미친다. 유출된 물질은 퇴적물에 침투할 수 있으며, 침투 정도는 퇴적물의 특성과 구조에 따라 다르게 나타난다(HELCOM, 2002).

이와 같이 유출 사고 후 침강 HNS는 밀도로 인해 해저면으로 침강하여 특정시간 동안 해저면에 체류할 것으로 예상되며, 수중에 용존되지 않는 침강 HNS는 퇴적물에 침적되어, 표영생물들에게 이용될 가능성은 낮지만 저서생물들에게는 여전히 유해할 수 있다.

침강 HNS 노출 경로 및 생태계 영향을 고려해 보면 유출된 물질이 수생태 독성물질일 경우 인체로의 직접적 위험은 매우 낮으나, 해양환경에 유해하고 해양생물의 산란장이나 저서 어류와 이들의 포식자에 직접적 영향을 줄 수 있다. 포유류와 표영 어류는 오염 회피가 가능해 영향이 적고, 얕은 수역의 해안선과 연안에 서식하는 조류(새)에 영향을 줄 수 있다(FEI, 2018).

대량으로 침강 HNS가 유출되면 해저면과 그곳에 서식하는 저서동물을 피복할 가능성이 있으며 저서동물 대량 손실 영향은 연안 및 조간대 지역 먹이망의 생체량에 영향을 주고, 유출물질이 퇴적물로 침투 시 장기간 생물피해 발생이 가능하다.

이러한 직접적인 환경피해 외에 퇴적물과 상호작용하여 퇴적물에 흡착된 오염물질이 용출되어 해양환경에 악영향을 초래할 가능성이 있다.

3.2 HNS 유출 사고 후 모니터링 필요성

최근 수십년간 해상에서 유류와 화학물질 유출 사고의 발생빈도가 감소하는 추세이지만 여전히 우발적인 대규모 사고 발생 가능성과 심각한 지역적 영향을 유발할 수 있는 소규모 유출 사고의 발생 가능성은 간과할 수 없다(Kirby et al., 2018). 이러한 해양오염 사고들에 있어 사전 준비된 효과적인 사고 후 모니터링 계획이 필요한 이유를 다음과 같이 정리할 수 있다(Kirby and Law, 2010).

- ① **Primary impact:** 주요 이해관계자들에게 미치는 잠재적 환경 및 경제 영향에 대한 초기증거 제공
- ② **Wider effects:** 광역의 환경영향 및 자원들에 미치는 영향에 대한 적절하고 효과적인 모니터링 방법의 조사
- ③ **Best methods:** 단기적 영향을 평가할 뿐만 아니라 잠재적인 장기적 영향을 예측할 수 있는 영향 평가 방법론을 고려
- ④ **Efficient resource use:** 모니터링 수행 시 불필요한 절차

들을 피할 수 있도록 모니터링 자원의 효율적 활용 보장 및 잠재적 활용 가능 자원들의 고려

⑤ **Mitigation effectiveness:** 완화효과에 대한 평가 자료 제공 또는 분산제 사용과 같은 유출 대응 및 방제조치 효과 평가 자료 제공

⑥ **Compensation/liability:** 보상 결정과 필요하면 법적책임 문제의 근거자료로 모니터링 및 평가 결과 제공

3.3 HNS 유출 사고 후 모니터링 계획 및 고려사항

사고 후 모니터링은 정의된 환경의 상태와 질을 특성화하고 관찰하는 통합된 자료수집 활동의 집합이다. 모니터링 자료는 환경영향평가 준비에 필요한 관련 요인들의 시·공간적 변화를 비교·평가하는 데에도 이용될 수 있다(Kirby and Law, 2010). 현재 국내에는 다양한 해양환경 모니터링 프로그램이 진행되고 있는데, 이들 모니터링은 필요할 때 해양오염 사고 후 모니터링에 편입될 수도 있으며 항목별 샘플링 및 조사·분석 방법들을 사고 후 모니터링에도 활용할 수 있다.

사고 후 영향평가 및 모니터링 프로그램은 광범위한 환경 매체들에 적용될 필요가 있고 일반적인 분석 방법이 존재하지 않는 화학물질의 분석이나, 특정 지역에 국소적으로 존재하는 생물종이나 군집을 샘플링하는 것과 같은 특정한 상황을 고려할 수도 있다.

사고 후 모니터링 프로그램은 잠재적이고 가능한 많은 다양한 증거들이 고려될 수 있도록 유연성이 높게 설계될 필요가 있다. 이를 위해 모니터링 사항들을 가능한 표준화, 문서화해야 할 필요가 있으며, 모니터링 자원들을 효과적으로 활용하고 중요한 증거자료들이 배제되지 않도록 관리·조정 능력도 필수적이다(Kirby and Law, 2010).

HNS 사고 후 영향평가는 사고결과에 대한 진행과정, 핵심 변수의 모니터링이나 사고 이전 또는 정상적인 상태와 비교하는 과정이며 모니터링 대상의 변화유형, 규모, 중요성을 설정하고 가능한 한 정량화하는 것을 목적으로 한다(Radovicet al., 2012; FEI, 2018; Kirby et al., 2018).

대부분의 해외사례에서 HNS 유출사고 발생 후 유출된 HNS로 인한 오염의 공간적인 분포와 시간에 따른 변화를 살펴보기 위한 모니터링 계획을 수립한다. 모니터링 수행단계는 첫째, 모델링을 통한 유출물질의 영향을 예측하고, 둘째 원격탐사 등을 이용한 유출지역의 탐색 및 오염물질 유무를 확인하며, 셋째 퇴적물 시료의 화학적 분석과 생물학적 분석을 통하여 해양환경을 평가하는 단계로 되어 있으며, 세 가지 과학적 접근법(화학적 분석, 생물학적 반응 및 생태 모니터링)을 적용하는 모니터링 프로그램을 설정하고 있다(Radovicet al., 2012; FEI, 2018; Kirby et al., 2018).

또한 자연적 변동 및 만성 오염 등의 요인과 구별되는 유출에 의한 오염 영향만을 평가하기 위해서 기존에 구축된 데이터베이스를 활용하고 만약, 유출 전 배경자료가 부재할 경우에는 유출이 진행되기 전에 신속하게 선택적인 샘플링을 수행하거나 혹은, 비교 가능한 비오염 지역을 샘플링하여 체계적으로 분석해야 하며, 조사항목은 유출된 HNS의 종류 및 지역의 특성을 고려하여 설정하고 있다(Radovicet al., 2012; FEL, 2018; Kirby et al., 2018).

대서양 지역 연안 오염 대응(ARCOPOL platform: Atlantic Technological Platform for oil and HNS spill preparedness, response and mitigation)의 사후 환경 모니터링 지침서에서는 효과적인 모니터링의 8가지 원칙을 다음과 같이 제시하였다.

- ① Scientific Guidance: 다양한 환경 및 영양 단계(trophic level)에서의 영향 평가를 위한 과학적으로 적절한 전략 및 모니터링 접근 방식에 대한 지침
- ② Skills & Knowledge: 모니터링 프로그램을 수행할 수 있는 숙련된 인력
- ③ Equipment: 모니터링 수행을 위한 잘 준비된 일련의 장비
- ④ Funding: 모니터링 수행을 위한 비용
- ⑤ Responsibility & Management: 모니터링 시작 및 전반적인 관리 및 조정에 대한 의사 결정에 대한 단일화
- ⑥ Integration & Coordination: 다양한 조직들의 관련 활동을 효과적으로 통합하고 조정
- ⑦ Support & Buy-in: 여러 이해관계 당사자 및 기관에 대한 효과적인 지원 및 광범위한 수용
- ⑧ Practice: 실제로 모니터링 대응 훈련을 통해 프로세스가 잘 작동하도록 노력해야 함

3.4 국내 해상 HNS 운송 및 사고 현황에 따른 침강 HNS 우선고려 대상 물질

HNS 관리 우선순위 선정에 관한 해외 동향을 살펴보면 GESAMP에서는 해상 운송 화학물질의 유해성 평가절차를 개발하고 평가 결과를 제시하고 있으며(GESAMP, 2014; 2016), IMO에서는 HNS 사고 관련 가장 위험도가 높은 20가지 물질을 선정하여 제시한 바 있다(ITOPF, 2014). 또한, 유럽에서는 해상 HNS 관련 위해도 기반 우선순위 선정기법 개발 및 물질정보 데이터베이스를 구축하여 해양환경 보호를 위한 우선관리 HNS 23종을 제시한 바 있다(Neuparth et al., 2011; Neuparth et al., 2012; Harold et al., 2014; Cunha et al., 2014; Cunha et al., 2015).

최근 국내에서 HNS 관리물질 선정 사례는 Kim et al.(2015b; 2016)이 해양환경관리법상 유해액체물질 545종에

2014~2015년 해상운송이 확인된 물질 48종을 추가하여 총 593종을 대상으로 위해성 정보 데이터베이스를 구축하고 관리 우선순위 및 항만별 사고대비 물질군을 선정하였다(Kim et al., 2015b; Kim et al., 2016).

총 593종의 유해액체물질 중 2014~2015년 국내 유통되는 것으로 확인된 물질은 158종이었으며 상위 20종의 우선관리 HNS 위해성 정보를 Table 2에 나타내었다. Kim et al.(2016)은 우선관리 물질 158종을 사고대비 물질군으로 분류하기 위해 7개 기준(물동량, 오염분류(X/Y/Z), 사고이력, 국가긴급방재 계획 물질 여부, IMO 우선관리물질 여부, 불확도점수, CAS 번호 부재여부)을 선정하여 4개의 물질군을 0~3순위로 구분하였다.

Table 2. Risk information on top 20 substances in priority list of HNS (Kim et al., 2016)

| Rank | Chemical name | MARPOL Pollution Category | Physical Behavior | Traffic 2014+2015 Sum (10 ³ ton) |
|------|-------------------------------|---------------------------|-------------------|---|
| 1 | Phenol | Y | S | 1,158 |
| 2 | Ammonia aqueous(<28%) | Y | DE | 1,120 |
| 3 | Styrene monomer | Y | FE | 5,619 |
| 4 | Coal tar | X | S | 1,144 |
| 5 | Perchloroethylene | Y | S | 115 |
| 6 | Acrylonitrile | Y | DE | 2,681 |
| 7 | Benzene† | Y | E | 6,669 |
| 8 | Hexane(all isomers) | Y | E | 56 |
| 9 | Chloroform | Y | SD | 43 |
| 10 | Naphthalene(molten) | X | S | 6 |
| 11 | Acetone | Z | DE | 1,037 |
| 12 | Ethyl Alcohol | Z | D | 1,963 |
| 13 | Nonane(all isomers) | X | FE | 119 |
| 14 | Diphenylmethane diisocyanate | Y | S | 115 |
| 15 | Sulphuric acid | Y | D | 5,911 |
| 16 | Creosote(coal tar) | X | S | 100 |
| 17 | Nitrobenzene | Y | SD | 66 |
| 18 | S-Ethyl dipropylthiocarbamate | Y | F | 5 |
| 19 | Octane(all isomers) | X | FE | 3 |
| 20 | Epichlorohydrin | Y | D | 161 |

이중 침강 HNS는 158종 우선관리 HNS 중 상위 20위에서 8개를 차지하고 있으며, 2014년~2015년에 전체 해상 운송량의 9%(7,507 천톤)을 차지하고 있다(Table 3). 침강HNS는 총 3종의 X류 물질을 포함하고 있는데, 이중 콜타르는 X류 중

침강 HNS 유출사고 및 사고 후 모니터링 방법 및 고려사항

유일하게 백만 톤 이상 유통되고 있어 주의가 요구되며, 침강 HNS 유출 사고 후 모니터링에서 우선적으로 이들 8종, 페놀(Phenol), 콜타르(Coal tar), 퍼클로로에틸렌(Perchloroethylene), 클로로포름(Chloroform), 나프탈렌(Naphthalene(molten)), 디페닐메탄 디이소시아네이트(Diphenyl methane diisocyanate), 크레오소트(Creosote(coal tar)), 니트로벤젠(Nitrobenzene)에 대하여 우선적인 대비가 필요하다.

Table 3. The number of substances by HNS classification and maritime transportation of HNS in 2014 and 2015 (Kim et al., 2016)

| Physical Behavior | | Number of MARPOL Pollution Category | | | | | |
|-------------------|-----|--|--------|--------|----|--------------|--------|
| | | X | Y | Z | OS | Unclassified | Total |
| Dissolver | D | | 20 | 22 | 1 | 1 | 44 |
| | DE | | 4 | 5 | | | 9 |
| Evaporator | E | 1 | 9 | | | | 10 |
| | ED | | 3 | 1 | | | 4 |
| Floater | F | 2 | 7 | 3 | | | 12 |
| | FD | | 5 | 4 | | 1 | 10 |
| | FE | 3 | 9 | 3 | | 1 | 16 |
| | FED | | 5 | 1 | | | 6 |
| | Fp | 1 | 30 | | | 1 | 32 |
| Sinkers | S | 3 | 5 | 1 | | 1 | 10 |
| | SD | | 5 | | | | 5 |
| Total | | 10 | 102 | 40 | 1 | 5 | 158 |
| Physical Behavior | | Traffic 2014+2015 Sum(10 ³ ton) | | | | | |
| | | X | Y | Z | OS | Unclassified | Total |
| Dissolver | D | | 13,418 | 8,251 | 69 | 24 | 21,761 |
| | DE | | 9,544 | 1,881 | | | 11,425 |
| Evaporator | E | 52 | 12,014 | | | | 12,066 |
| | ED | | 3,027 | 702 | | | 3,729 |
| Floater | F | 98 | 1,358 | 100 | | | 1,557 |
| | FD | | 428 | 31 | | 5 | 465 |
| | FE | 137 | 25,201 | 904 | | 13 | 26,255 |
| | FED | | 732 | 161 | | | 894 |
| | Fp | 149 | 3,515 | | | 31 | 3,695 |
| Sinkers | S | 1,249 | 1,483 | 2,339 | | 16 | 5,088 |
| | SD | | 2,419 | | | | 2,419 |
| Total | | 1,686 | 73,139 | 14,370 | 69 | 90 | 89,354 |

3.5 침강 HNS 사고 후 모니터링 조사 항목

침강 HNS 유출로 인한 환경영향을 평가하기 위한 조사항목 중에서 수질평가항목 및 퇴적물 평가항목에 대하여 조사하였다. 저서생물에 대한 영향평가 및 해양생물에 미치는 생물독성 영향평가에 대한 항목은 선행연구(Kim et al., 2015b)가 제시되어 있어 제외하였다.

조사항목 중 해양환경기준에 명시되어 있는 항목은 그 기준을 적용하여 평가하는 것이 유출 사고 전과 후의 환경영향을 평가하는데 유용할 수 있다.

침강 HNS의 경우 해양환경 및 생물에 미치는 영향이 상대적으로 크고 장기적일 수 있기 때문에 수질항목을 평가할 경우, 해양생태계 보호기준과 사람의 건강보호기준 함께 고려하는 것이 필요하다. 침강 HNS 사후 모니터링 시 저층의 수질환경 변화에 대하여 세심한 조사가 필요하므로 저층 수질의 해양환경기준 적합 여부를 반드시 조사해야 한다.

퇴적물 조사항목은 해양환경기준에 명시되어 있는 항목이 중금속류에 한정되어 있어 불용성 침강 HNS로 영향을 받을 수 있는 지속성 유기오염물질에 대한 평가항목을 명시하고 있는 국내 기준을 조사한 결과 해양오염퇴적물 조사 및 정화 범위 등에 관한 규정과 준설물질의 오염도 기준에 제시된 항목을 참고하는 것이 필요하다. 국내에서 참고할 수 있는 침강 HNS 유출 사고 후 모니터링의 조사항목은 다음과 같다.

- 수질모니터링 항목(해양환경기준/해양수산부고시/제2018-10호)
 - ① 생활환경 기준: pH, 총대장균군, 용매추출유분
 - ② 생태기반 해수수질 기준: DO 포화도, Chl-a, 투명도, DIN, DIP
 - ③ 해양생태보호기준: 구리, 납, 아연, 비소, 카드뮴, 크롬, 수은, 니켈
 - ④ 사람의 건강보호기준: 6가크롬, 비소, 카드뮴, 납, 아연, 구리, 시안, 수은, PCBs, 다이아지논, 파라티온, 말라티온, 1,1,1-트리클로로메탄, 테트라클로로에틸렌, 트리클로로에틸렌, 디클로로메탄, 벤젠, 페놀, 음이온계면활성제
- 퇴적물 모니터링 항목
 - ① 해저퇴적물(해양환경기준/해양수산부고시/제2018-10호): 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 니켈, 납, 아연
 - ② 해양오염퇴적물 조사 및 정화 범위 등에 관한 규정(유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식/해양수산부고시/제2021-79호/별표1): 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 니켈, 납, 아연, PCBs, PAHs, 클로로데인(Chlordane), 딜드린(Dieldrin), 디디티(DDT), 유기주석화합물(TBT)

③ 활용할 수 있는 준설품질의 오염도 기준(해양폐기물 및 해양오염퇴적물 관리법 시행령/별표3): 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 수은, 니켈, 납, 아연, PCBs, PAHs, 총질소, 총인

해외사례의 경우, 입자크기, pH와 Eh, Total Organic Carbon (TOC) 등의 일반적인 항목과 유출된 오염물질과 분해산물 등을 추가 조사하고 있으며, 국외 해양환경기준을 참고하는 방법이 있으나, 침강 HNS에 대한 참고 자료는 미비한 실정이다.

4. 결 론

대량으로 침강 HNS가 유출되면 해저면과 그곳에 서식하는 저서생물을 피복할 가능성이 있으며 저서생물 대량 손실 영향은 연안 및 조간대 지역 먹이망의 생체량에 영향을 주고, 유출물질이 퇴적물로 침투 시 장기간 생물피해 발생할 수 있다. 이러한 직접적인 환경피해 외에 퇴적물과 상호작용하여 퇴적물에 흡착된 오염물질이 용출되어 해양환경에 악영향을 초래할 수 있다.

침강 HNS 유출 후 사후 모니터링은 사례연구를 통해 첫째, 모델링을 통한 유출물질의 영향을 예측하고, 둘째 원격 탐사 등을 이용한 유출지역의 탐색 및 오염물질 유류를 확인하며, 셋째 퇴적물 시료의 화학적 분석과 생물학적 분석을 통하여 해양환경을 평가하는 단계로 되어 있으며, 모니터링 결과는 복원 또는 피해 및 보상 평가 등의 계획을 수립하는데 활용되고 있다.

국내 유출 사고대비 물질군 선정에 관한 선행연구에서 제시된 상위 20종의 HNS 중에서 침강 HNS 8종에 대하여 우선적인 유출 사고 후 모니터링 대비가 필요하며, 침강 HNS 유출로 인한 환경영향을 평가하기 위한 조사항목 중에서 수질 및 퇴적물 항목에 대하여 국내 환경기준에 명시되어 있는 항목은 그 기준을 적용하여 평가하는 것이 유출 사고 전과 후의 환경영향을 평가하는데 유용할 수 있다.

사 사

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(20150340, 위험·유해물질(HNS)사고 관리기술개발/20210660, 해양산업시설 배출위험유해물질 영향평가 및 관리기술 개발). 이 논문을 심도 있게 심사해 주신 심사위원들께 감사드립니다.

References

- [1] AMRIE(2005), Monitoring of the flow of chemicals transported by sea in bulk and package form. Task 1 of HASREP “Responses of harmful substances spilled at sea”.
- [2] Cunha, I., T. Neuparth, S. Moreira, and M. M. Santos(2014), Management of Contaminated Marine Marketable Resources and HNS Spills in Europe, Journal of Environmental Management, Vol. 135, pp. 36-44.
- [3] Cunha, I., S. Moreira, and M. M. Santos(2015), Review on hazardous and noxious substances (HNS) involved in marine spill incidents-An online database, Journal of Hazardous Materials, Vol. 285, pp. 509-516.
- [4] FEI(2018), Monitoring and assessment of environmental impacts of chemical spills in the Baltic Sea, Finnish Environment Institute, Report No. 23, pp. 1-77.
- [5] GESAMP(2014), Revised GESAMP Hazard Evaluation (NLS) Procedure for Chemical Substances Carried by Ships (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP/INIDO/UNDP) Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, 2nd Edition, Rep. Stud. GESAMP No. 64, pp. 1-106.
- [6] GESAMP(2016), GESAMP composite list 2016.
- [7] Harold, P. D., A. S. de Souza, P. Louchart, D. Russell, and H. Brunt(2014), Development of a Risk-based Prioritization Methodology to inform Public Health Emergency Planning and Preparedness in case of Accidental Spill at Sea of Hazardous and Noxious Substances (HNS), Environment International, Vol. 72, pp. 157-163.
- [8] HELCOM(2002), HELCOM Manual on Cooperation in Response to Marine Pollution within the framework of the Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area, In Helsinki Convention, Vol. 2.
- [9] IMO(2000), Protocol on Preparedness, Response and Cooperation to Pollution Incidents by Hazardous and Noxious Substances (OPRC-HNS protocol), Attachment 1, pp. 1-11.
- [10] ITOPF(2014), TIP 17: Response to marine chemical incidents, Technical information papers, International Tanker Owners Pollution Federation, pp. 1-16.
- [11] Kim, T. W., Y. R., Kim, S. E., Cho, M. H. Son, M. J. Lee, and S. W. Oh(2015a), Marine Ecotoxicological Evaluation on HNS Spill Accident : Nitric Acid Spill Case Study, Journal of the Korean Society of Marine Environment & safety, Vol. 21, No. 6, pp. 655-661.

- [12] Kim, Y. R., T. W. Kim, M. H. Son, S. W. Oh, and M. J. Lee(2015b), A Study on Prioritization of HNS Management in Korean Waters, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & safety*, Vol. 21, No. 6, pp. 672-678.
- [13] Kim, Y. R., J. Y. Choi, M. H. Son, S. W. Oh, M. J. Lee, and S. J. Lee(2016), Prioritizing Noxious Liquid Substances (NLS) for Preparedness Against Potential Spill Incidents in Korean Coastal Waters, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & safety*, Vol. 22, No. 7, pp. 846-853.
- [14] Kirby, M. F. and R. J. Law(2010), Accidental Spills at Sea. Risk, impact, mitigation and the need for co-ordinated post-incident monitoring, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 60, pp. 797-803.
- [15] Kirby, M. F., J. Brent, J. Moore, and S. Lincoln(eds.)(2018), *PREMIAM-Pollution response in emergencies-Marine impact assessment and monitoring: Post-Incident impact assessment and monitoring: Post-incident monitoring guidelines*, second edition. Science Series Technical Report, CEFAS, Lowestoft, pp. 1-176.
- [16] Neuparth, T., S. M. Moreira, M. M. Santos, and M. A. Reis-Henriques(2011), Hazardous and Noxious Substances (HNS) in the Marine Environment: Prioritizing HNS that pose major Risk in a European Context, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 62, pp. 21-28.
- [17] Neuparth, T., S. M. Moreira, M. M. Santos, and M. A. Reis-Henriques(2012), Review of oil and HNS accidental spills in Europe: Identifying major environmental monitoring gaps and drawing priorities, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 64, pp. 1085-1095.
- [18] Radovic, J. R., D., Rial, B. P. Lyons, C. Harman, L. Vinas, R. Beiras, J. W. Readman, K. V. Thomas, and J. M. Bayona (2012), Post-incident monitoring to evaluate environmental damage from shipping incidents: Chemical and biological assessments, *Journal of Environmental Management*, Vol. 109, pp. 136-153.

Received : 2022. 10. 14.

Revised : 2022. 12. 13.

Accepted : 2022. 12. 28.