

해저침적 HNS 회수용 기계장치의 성능요건 기반 개념설계

황호진**

* 선박해양플랜트연구소 책임연구원

Conceptual Design of Mechanical System for Recovery of Seabed-Deposited Hazardous and Noxious Substances Based on Performance Requirements

Ho-Jin Hwang**

* Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약 : 위험유해물질(HNS, Hazardous and Noxious Substances)은 해상운송 과정에서 다양한 사고에 노출되어 있어 많은 양이 바다에 유출될 우려가 있다. HNS 유출에 따른 해양환경의 손상은 유류 유출에 의한 손상보다도 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. 특히 해저로 침강하여 침적되는 HNS는 해저생태계에 돌이키기 어려운 피해를 주게 되므로, 반드시 회수되어야 한다. 해저로부터 HNS를 회수하기 위해서는 해저침적 HNS에 대한 정확한 탐지, 안정화 처리 및 회수를 위한 절차와 장비가 필요하다. 그 중에서도 기계적 회수장치를 개발하기 위해서는 성능지표를 이용하여 성능요건을 선정하고, 이를 토대로 기계적 회수장치에 대한 개념설계가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 해저침적 HNS의 회수 절차에서 요구되는 기계적 회수장치에 대한 개념설계안을 제시하였다. 개념설계안으로 해저침적 HNS를 회수하기 위한 기본 시나리오를 제시하고, 자체적 밀폐 성능을 가지는 흡인 기초를 활용하는 방안을 채택하였다. 기계적 회수장치는 흡인 기초, 오염 방지, 펌프 시스템, 제어 시스템, 모니터링 장비, 위치정보 장비, 이송 장비, 탱크로 구성된다. 이러한 개념설계안은 기계적 회수장치의 부품 및 형상을 결정하는 기본설계에 반영되어 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 위험유해물질, 기계적 회수장치, 개념설계, 기본 시나리오, 시스템 구성

Abstract : Hazardous and noxious substances (HNS) may cause maritime incidents during marine transportation, which are liable to lead to a large amount of spillage or discharge into the sea. The damage to the marine environment caused by the HNS spill or discharge is known to be much greater than the damage caused by oil spill. Particularly dangerous is HNS, which is deposited or buried in the seabed, as it can damage the organisms that live on, in, and near the bottom of the sea, the so-called "benthos," forming the benthic ecosystem. Therefore, it is vital that the HNS deposited on the seabed be recovered. In order to do so, procedures and equipment are required for accurate detection, stabilization treatment, and recovery of HNS in subsea sediment. Thus, when developing a mechanical recovery system, the performance requirements should be selected using performance indices, and the conceptual design of the mechanical recovery system should be based on performance requirements decided upon and selected in advance. Therefore, this study was conducted to arrive at a conceptual design for a mechanical recovery system for the recovery of HNS deposited on the seabed. In the design of the system, based on the fundamental scenario, the method of suction foundation with the function of self enclosing was adopted for recovering the HNS sediment in the subsea sediment. The mechanical recovery system comprises the suction foundation, pollution prevention, a pump system, control system, monitoring device, location information device, transfer device, and tanks. This conceptual design is expected to be reflected and used in the basic design of the components and shapes of the mechanical recovery system.

Key Words : Hazardous and noxious substances, Mechanical recovery system, Conceptual design, Fundamental scenario, System configurations

† hjhwang@kriso.re.kr, 042-866-3645

1. 서론

위험유해물질(HNS, Hazardous and Noxious Substances)은 ‘인간의 건강과 해양 생명체 또는 생물체에 해로운 물질과 쾌적성을 손상시키거나 다른 합법적인 바다의 이용에 방해가 되는 기름을 제외한 물질’이라고 OPRC-HNS 의정서에서 정의하고 있다(Kim and Lee, 2017). 많은 양의 HNS가 해상 운송을 통해 이동하고 있으며, 다양한 사고에 노출되어 있는 실정이다. 유류 유출에 의한 해양환경의 손상보다도 HNS 유출에 의한 손상이 더 큰 것으로 알려져 있다. 생리적 기능에 영향을 미치게 되어 다양한 치사 효과를 일으키거나 세포 기능에 장애를 일으킴으로써 생태적 변화 및 피해를 엄청나게 유발하고 있다(Kim et al., 2015). 특히 해저로 침강하여 침적되는 HNS는 해저 생태계에 엄청난 피해를 줄 것으로 예상하고 있다. 이에 해저에 침적된 HNS는 반드시 정확히 탐지하고, 안정화 처리하고, 회수해야만 한다(Hwang and Lee, 2019). 이를 위해 해저침적 HNS 회수를 위한 기계장치의 성능요건이 제안된 바 있다. 본 연구에서는 우선 해저에 침적된 HNS를 탐지하고 처리하여 회수하는 절차적 관점에서의 HNS 처리 해저기술에 대해 소개하고, 이 중 해저에 침적된 HNS를 기계장치를 활용하여 회수, 처리하는 기술에 초점을 맞추었다. 해저침적 HNS 회수용 기계장치의 성능요건을 기반으로 하여, 기계장치에 대한 개념설계의 절차 및 그 결과에 대해 기술하였다. 해저침적 HNS를 회수하기 위한 기본 시나리오를 제시하고, 여러 조건들에 적합한 회수 방식 및 방안에 대해 분석하였다. 이를 토대로 성능요건을 만족시킬 수 있는 기계적 회수장치의 개념 구성(Configurations)을 제시하였다. 이러한 성능요건 및 구성안을 토대로 해저침적 HNS 회수용 기계장치에 대한 개념설계 수행 결과에 대해 검토하고 분석하였다. 개념설계안의 주요사항으로 자체적으로 밀폐된 공간을 형성하도록 하는 기초 구조물을 채택하고 크레인을 사용하여 회수장치를 해저에 투입하고 회수할 수 있는 방식을 사용한 것이다. 또한 기계장치의 구현에 필요한, 다양한 기계 장비를 구성하고 이들 간의 연결관계를 명세하였다. 이러한 개념설계의 결과는 기계적 회수장치에 대한 부품 및 형상(Geometry)을 결정하는 기본설계에 반영되어 활용될 것으로 기대된다.

2. HNS 처리 해저기술

해상 사고 등에 의해 유출된 HNS는 물리적으로, 화학적으로 다양하게 변화한다. 물질의 성질에 따라 이론적인 거동이 결정되며, SEBC(Standard European Behavior Classification)로 표현하는 것이 일반적이다(Jeong et al., 2017). HNS를 포함

하는 화학물질의 기화물질(Gas, Evaporator)들은 해수표면에서 증발되어 소멸한다. 일부 부유물질(Floater)들은 유류와 유사하게 해수면을 떠다니는 형태를 띄며, 항공탐색 등을 통해 추적 및 관찰이 가능하다. 문제가 되는 침강물질(Sinker)들은 물질의 특성 및 여러 상호작용에 의해 해저로 침강하는 물질이다(Jang et al., 2017). 특히 해저로 침강하여 침적되는 물질은 항공탐색이 어려워 제거 및 복원이 상당히 어려우며, 이에 많은 노력이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 침강 및 침적 물질들에 대한 처리를 목표로 한다.

해저로 침강하여 침적된 HNS를 가능한 신속하고 정확하게 탐지하고 처리하는 것이 해저 생태계의 피해 최소화를 위해 가장 중요하다. 해저에 침적된 물질들을 탐지하여 처리하기 위한 많은 연구들이 있었다. 대부분의 연구들이 절차적으로 체계화되지 못하고 국부적으로만 이루어진 경향이 있다. 이에 본 연구에서는 해저침적된 HNS를 처리하기 위한 개념 및 절차를 제시한다. ‘해저에 침강하여 침적된 HNS를 음향으로 탐색하여 탐지하고, 흡착제 처리를 통해 화학적으로 안정화시키고, 기계적 회수장치를 통해 수거 조치하는 일련의 과정’을 HNS 처리 해저기술로 지칭하여 정의한다. 즉 탐색(탐지)-화학적 처리-기계적 회수의 단계로써 처리 절차를 제시한다.

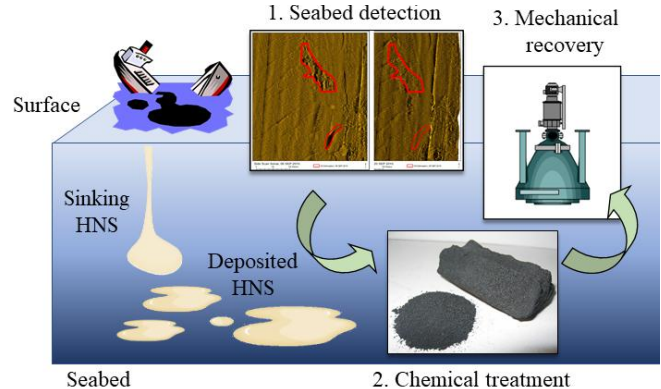


Fig. 1. Technologies for detecting, stabilizing, and recovering HNS.

HNS 처리 해저기술에서는 침적 HNS를 탐지하기 위해 음향을 활용하는 방식을 채택하고 있다. 측면주사음탐기(Side scan sonar)와 같은 센서 장비를 활용하여 해저면을 탐색하고, 음향을 통해 후방산란강도 및 반사계수를 이용하여 해저층에 침적되어 있는 HNS를 탐지하는 방식이다. 이를 위해 대표적인 HNS 물질을 선정하고 해당 물질에 대한 음향 특성 및 음속, 밀도, 감쇠계수 등의 변수들에 대한 데이터베이스를 구축하고 있다(Han et al., 2018). 이를 통해 해저침적 HNS들을 탐지할 수 있다. 탐지된 해저침적 HNS를 바로 직접 회수하게 되면, 화학물질들은 불안정한 상태가 되어 비

해저침적 HNS 회수용 기계장치의 성능요건 기반 개념설계

Table 1. Fundamental scenario of mechanical recovery system for seabed-deposited HNS

Phase	Process
Arrival and surrounding survey	- Moving recovery system to accident site - Surveying and collecting environmental information
HNS detection and recovery system access	- Detecting location of seabed-deposited HNS - Preparing and dispatching recovery system
Pollutant prevention	- Installing anti-pollution unit to prevent environmental pollution
Chemical treatment and mechanical recovery	- Stabilizing HNS with chemical treatment - Recovering HNS with mechanical system
Recovery system retrieval and post-treatment of substances	- Retrieving recovery system - Handling and transferring collected substances
Post-processing and return	- Adjusting and preparing to return - Returning recovery system from accident site

산할 가능성이 대단히 높다. 이에 화학적 대응방법을 통해 우선적으로 해당 물질들을 안정화 처리를 해야 한다. HNS 처리 해저기술에서는 흡착제를 통한 화학적 안정화 처리 방식을 채택하였으며, 이를 위해 흡착제의 비중 및 입자 크기 등을 비교/분석하여 크기 및 성능에 따른 효율성을 산출하였다 또한 해저침적 HNS의 물량에 따른 흡착제의 투입 물량을 산정하기 위한 시뮬레이션을 수행한다. 상기 사항에 대해 가장 적절한 흡착제로 활성탄소(Activated carbon)를 선정하였다(Kim et al., 2016). 즉 HNS에 활성탄소를 투입하여 반응하게 함으로써 물질의 상태를 안정화시켜 비산 등의 문제들을 방지할 수 있다. 활성탄이 오염물질 처리에 이용될 때는 흡착(Adsorption)의 원리가 적용이 된다. HNS와 같은 액상물질과 반응하게 되면 비가역적인 화학흡착이 많이 일어난다. 이러한 관점에서 활성탄소를 사용한 HNS 흡착 및 안정화 처리과정을 화학적 처리라고 지칭하고 있다. 화학적으로 안정화 처리된 HNS를 기계적 회수방법을 통해 해상으로 수거해야 한다. 기계적 처리를 위한 방식은 직접 회수 방식과 펌프 회수 방식이 있으며, 작업성, 안정성, 효율성 등을 고려하여 적절한 방식을 채택해야 한다. 기존 유사 사례를

분석한 결과 준설 장비와 유사한 형태의 기계장치를 활용하는 것이 타당하며, 여기에 펌프 회수장치들의 장점들을 활용할 필요가 있다(Clarke et al., 2018). 기계장치를 활용한 회수처리를 통해 해저침적된 HNS로부터 해저면의 생태계를 복원할 수 있는 기반을 마련할 수 있다. 해저에 침적된 HNS를 음향을 통해 탐지하고, 흡착제를 사용한 화학적 처리를 통해 안정화시키고, 오염물질 준설 장비와 유사한 기계적 회수장치를 활용하여 수거 처리를 수행한다. 이와 같은 HNS 처리 해저기술에 대한 일련의 과정 및 개념을 도식화한 것이 Fig. 1이다.

3. 기계적 회수 시나리오

3.1 회수 시나리오

해저면 물질의 기계 회수 방식 및 장치에 대한 사례 분석을 통해 성능지표를 선정하고, 이를 기반으로 해저침적 HNS 기계적 회수장치의 성능요건이 제안되었다. 이는 현존하는 기술 수준을 반영하여 해저침적 HNS의 기계적 회수장치에 요구되는 성능을 제시한 것으로 개념설계에 반드시 반영해

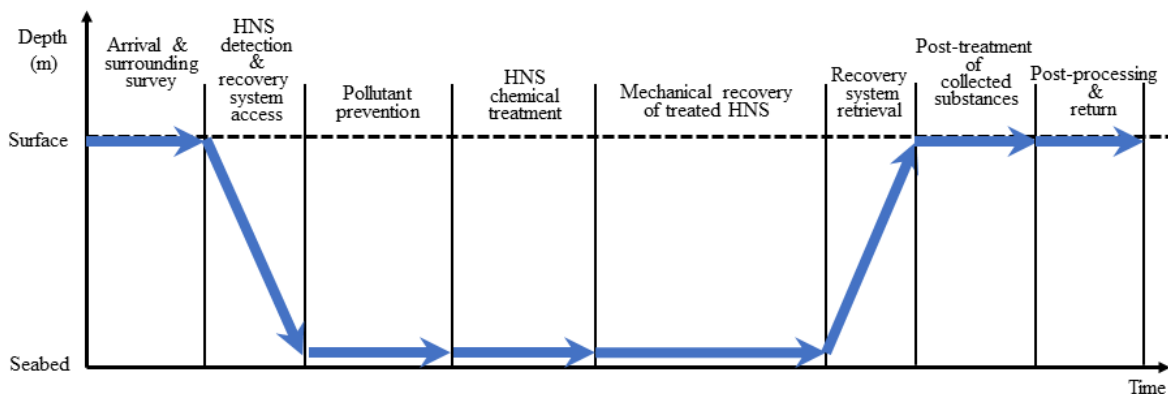


Fig. 2. Fundamental operation scenario for mechanical recovery system.

야 한다. 주요 성능요건은 운용 최대 수심은 50 m, 생산률은 50~300 m³/hr, 고형물은 10% 이상이며, 방제선 등에 탑재되어 사용하므로 선박이 운항 가능한 해상 환경(제한 파고 1 m, 제한 유속 3~5 knot)이라는 사항이다.

음향 기법을 통해 해저층에 침적되어 있는 HNS를 탐지하면, 해저침적 HNS를 화학적으로 안정화 처리하고 기계장치를 통해 회수해야 한다. 기계적 회수장치의 개념설계를 위해서는 탐지된 HNS를 회수하는 시나리오를 우선 결정해야 한다(Lee and Oh, 2014). 시나리오를 통해서 다양한 설계 변수들과 제한 조건들이 결정이 되며, 이를 개념설계에 반영함으로써 기본설계의 주요 규격(Specifications)으로 사용된다. 시나리오 구성을 위한 조건 중 하나가, 안정화 처리 및 기계 회수는 따로따로 작업할 수 있거나, 동시에 작업할 수 있어야 한다는 것이다. 이와 같은 운영 및 사용에 대한 절차 및 조건을 부여하는 것이 기본 시나리오이다.

기존의 준설 장비를 활용한 오염물질의 회수 과정을 참고하여, 해저침적 HNS를 기계장치를 사용하여 회수하는 기본 운영 시나리오를 개발하였다. Table 1은 해저침적 HNS의 처리 및 회수에 대한 기본 운영 시나리오를 단계별로 구체화한 내용이다. 이 기본 운영 시나리오를 바탕으로 기계적 회수장치의 개념설계가 가능하다. Fig. 2는 기본 시나리오에 수심을 반영한 주요 절차들을 시간에 따라 표시한 것이다. 사고해역에 도착하여 음향장비를 활용하여 HNS를 탐지하고, 탐지된 영역에 기계적 회수장치를 접근시킨다. 환경 오염 방지를 위한 절차를 수행하고, HNS에 흡착제를 투입하여 화학적으로 안정화 처리한다. 안정화된 물질을 기계적 회수장

치를 통해 회수한다. 회수가 완료되면 처리 물질을 육상으로 이송시켜 후처리를 하고 기계장치의 복귀를 준비한다. 모든 작업이 마치면 기계장치를 오염지역으로부터 회수한다.

3.2 조건 별 회수 방안

오염 지역의 여러 조건에 따라 효율성 등의 장점을 가지는 기계 회수 방식 및 장치들이 있다. 수심과 해저면의 상태(경도)가 대표적인 조건이다. 이 조건들을 활용하여 해당 조건에 적합한 회수 방식 및 장치를 분류하였다. 수심 조건은 국내에서 운용 중인 준설 장비들에 적용 가능한 수심인 28 m를 기준으로 설정하였다. 해저면의 상태는 경도에 따라 토사 등의 연질과 암반 등의 경질을 기준으로 설정하였다. 해저침적 HNS 기계 회수 방식을 수심과 해저면 상태의 조건들로 분류하여 나타낸 것이 Fig. 3이다. HNS 기계적 회수장치의 성능요건인 최대 수심 50 m를 만족하기 위해서는, 그랩(Grab), 호퍼(Hopper), 흡인(흡인, Suction) 방식이 적절하다는 것을 알 수 있다.

해저침적 HNS 기계적 회수장치는 해상에서 발생한 사고에 대한 처리 작업이다. 해상 작업에서 발생가능한 작업 제한 요소가 법규로 제한되어 있고, 또한 환경적인 지연 요소들도 존재한다. 따라서 Table 2와 같은 제한 조건이 설계에 반영되어야 한다. 선박작업을 제한하는 주요 조건은 파고 1.5 m 이상이거나 풍속이 10 m/s 이상인 경우이다. 작업이 지연되는 요소로는 10 mm/day의 강우, 기온이 -10℃ 이하, 가시거리가 90 m 이하이며, 이러한 경우에는 작업 지연이 불가피하다.

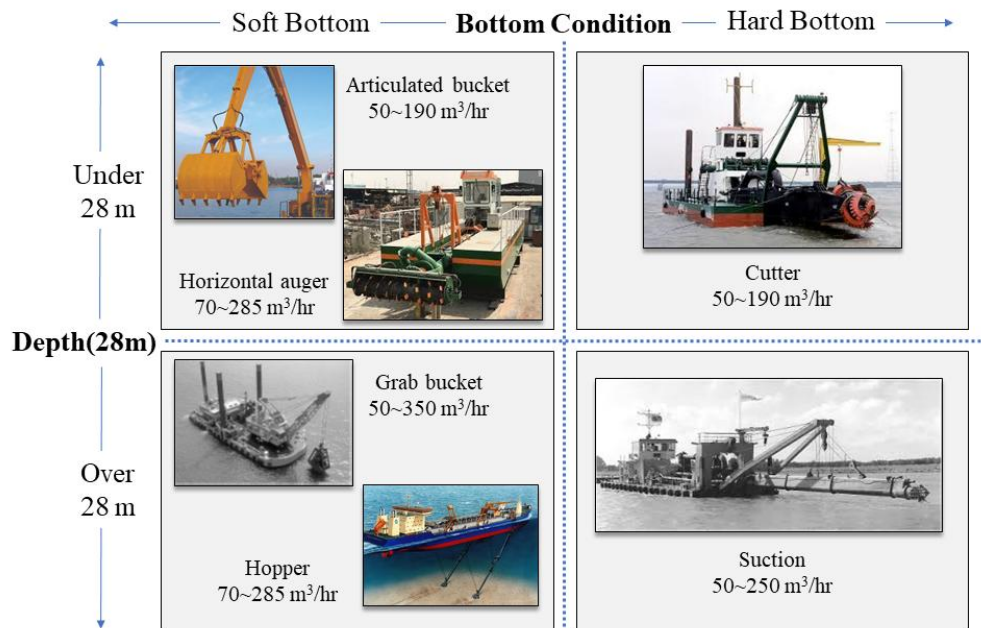


Fig. 3. Classification of mechanical recovery method with conditions.

Table 2. Design constraints by maritime regulations

Item	Constraints	Contents
Ship work limits	Limiting wave height	1.5 m during operation and work
	Limiting wind	10 m/s or more at 10 m above sea level
	Limiting current	1.2 m/s or more
Delay factors	Tidal range	Tide above design range
	Rainfall	10 mm/day or 1 mm/hour
	Frost	below -10°C
	Visibility	below 90 m due to rain, fog and snow
	Night work	Insufficient lighting

3.3 회수 방식의 선정

대표 조건인 수심과 해저면의 상태(경도)에 따라 기계적 회수장치의 성능요건에 적합한 방식을 선정해야 한다. 상기의 조건별 회수 방식을 고려해 볼 때, 그랩 버킷을 활용한 직접 회수 방식과 흡인 시스템을 활용한 펌프 회수 방식에 대해 비교 검토하는 것이 타당하다. 그랩을 활용한 직접 회수 방식은 현장투입 속도가 빠르고 높은 고형물의 장점이 있는 반면, 그랩에 의해 해양 오탁이 발생할 가능성이 굉장히 높다. 즉 작업 과정 중에 안정화된 HNS들이 비산할 가능성이 높다는 단점이 있다. 이와 달리 흡인 시스템의 펌프 회수 방식은 넓은 범위의 지반에 적용이 가능하고 물질의 회수와 동시에 수송이 가능한 장점이 있는 반면, 해역 조건에 민감하고, 고형물이 낮아 효율성 측면에서 다소 직접 회수 방식에 비해 떨어진다는 단점이 있다. 이 방식 역시 해양 오탁의 문제가 있지만, 적절한 형상으로 물질들을 가둬 놓고 흡인하는 방식으로 해결이 가능하다. 이러한 기계적 회수장치의 회수 방식에 따른 장단점을 비교한 표가 Table 3이다. 이와 같은 비교를 통해 펌프 시스템을 활용한 회수 방식이 해저침적 HNS의 기계적 회수장치에 적합한 방식으로 선정되었다.

Table 3. Comparison of the pros and cons for the recovery methods

Contents	Direct recovery	Pumping recovery
Type	Recovery with grab device	Recovery with pump system
Recovery device	Grab	Suction
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> - Fast site commitment - Many cases of field application - High percent solids 	<ul style="list-style-type: none"> - Applicable to a wide range of bottom conditions such as soil and rocks - Simultaneous ability with recovery and transferring
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> - Mandatory to install anti-pollution unit - Occurring marine pollution - Low recovery capacity 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensitive to marine conditions - Occurring marine pollution - Low percent solids - High operating cost

4. 기계적 회수장치 개념설계

4.1 흡인 기초(Suction Foundation) 개념 채택

HNS 기계적 회수장치의 개발을 위해서, 기존의 준설 장비의 개념을 활용하고 2차 오염 방지, 작업능률 향상, 불필요한 해수의 회수 지양 등을 해결하고 보완할 수 있는 방안이 요구된다. 해저면에 침적된 상태의 HNS를 회수하는 과정에서 발생할 수 있는 2차 오염을 방지하기 위해서, 수심 제한 등의 한계로 인해 기존의 오탁 방지막과 같은 방식은 사용하기 곤란하다. 이 문제는 기계장치 자체적으로 밀폐된 공간을 형성하게 함으로써 해결할 수 있다. 밀폐된 공간을 형성하는 것은 공정 특성 상 불필요하게 회수되는 해수를 억제할 수 있는 부가적인 효과도 얻을 수 있다. 기계장치 자체가 밀폐된 공간을 가지게 설계하기 위해서는 설비나 장비를 최소화하는 것이 타당하다. 이러한 관점에서 ‘흡인 기초(Suction foundation)’는 상당히 흥미로운 구조물이라 할 수 있다(Hogervorst, 1980).

흡인 기초는 구조물 내부의 물이나 공기와 같은 유체를 외부로 강제 배출하여 발생하는, 내부와 외부의 압력차를 이용하여 해저에 설치되는 구조물을 의미한다(Sparrevik, 2002). 주로 해양 플랫폼(Platform)의 기초로 많이 사용되며, 해상풍력 발전기의 기초로도 활용되고 있다(Wang et al., 2017). 일반적인 흡인 기초는 길이에 비해 폭이 상대적으로 큰 구조를 하고 있다. 이러한 흡인 기초는 구조물을 지반 속으로 관입하여 시공하는 방식이다(Tjelta, 2001). 수중펌프를 이용하여 내부의 해수를 뽑아내어 내외부의 수압차를 이용하여 기초를 관입하는 방식으로, 흡인 기초는 관입을 위한 별도의 대형장비가 필요하지 않고, 설치가 비교적 간단하고 시공속도가 빠르며 경제적인 기초공법으로 알려져 있다(Tjelta, 2015). 하지만 이러한 특징은 해저침적 HNS의 회수에는 적합하지 않을 수 있다.

해양 플랫폼은 강한 관입력으로 지반에 견고히 고정되어야 하는 반면, 해저침적 HNS를 회수하기 위해서는 적당한

Table 4. Configurations and functions for the mechanical recovery system with pumping method

Item	Sub item	Function	Technique
Suction enclosure	-	Forming of an enclosed space	- Structure design of suction enclosure
Pollution prevention	-	Prevention of environmental pollution	- Design of enclosed space - Installation of anti-pollution unit
Pump system	Submersible recovery pump	Recovery of substances on seabed	- Design of submersible pumps
	Pressure and transfer pump	Injection of HNS chemical treatment materials	- Design of submersible valves - Control of pumps and valves
Control system	Pump control device	Control of pump operation	- Control of recovery process
	Valve control device	Control of valve operation	
Monitoring device	-	Operation monitoring of pumps and valves	- Transmission of measuring data
Positioning device	-	Display of location for recovery system	
Lifting device	Crane	Installation and retrieval of system	
Tanks	-	Collection and storage of substances	

압력을 유지하여 밀폐 공간을 유지시키는 것이 중요하다. 따라서 기계장치의 깊이를 제한하여 회수 공간만을 형성할 수 있도록 설계해야 한다. 또한 회수장치의 동력인 펌프를 운전할 때 발생하는 흡인 압력(Suction pressure)을 제어할 수 있어야 한다.

4.2 기계적 회수장치 구성(Configurations)

이러한 흡인 기초 개념을 활용한 기계적 회수장치에 대한 주요 구성을 개발하였다. 흡인 기초, 오염 방지, 펌프 시스템, 제어 시스템, 모니터링 장비, 위치정보 장비, 이송 장비, 탱크(Tank)로 회수장치를 구성하는 방안을 제시한다. Table 4는 밀폐 공간을 형성하는 펌프 회수 방식 기계장치에 대한

주요 구성 및 그 기능에 대해서 서술하였다.

자체적으로 밀폐 공간을 가지게 하는 개념인 흡인 기초를 활용하고, 회수 효율을 높일 수 있는 펌프 회수 방식을 활용하여 해저침적 HNS의 기계적 회수장치의 개념설계안을 제안한다. 흡인 기초는 밀폐 환경을 형성하고, 오염 방지는 밀폐 환경에서의 오염을 방지하고, 펌프 장비는 물질을 회수하거나 화학적 안정화 처리 물질을 투입한다. 기계적 회수장치는 모선인 방제선에서 크레인을 활용하여 해저에 투입하고 회수하는 방식이 적절하다. 크레인을 사용하면 회수장치의 설치를 위한 부가적 설비가 필요하지 않으며, 장치의 운용 수심의 제약에서 벗어날 수 있다. 방제선에는 다양한 탱크들을 구비할 필요가 있다. HNS를 화학적으로 안정화 처

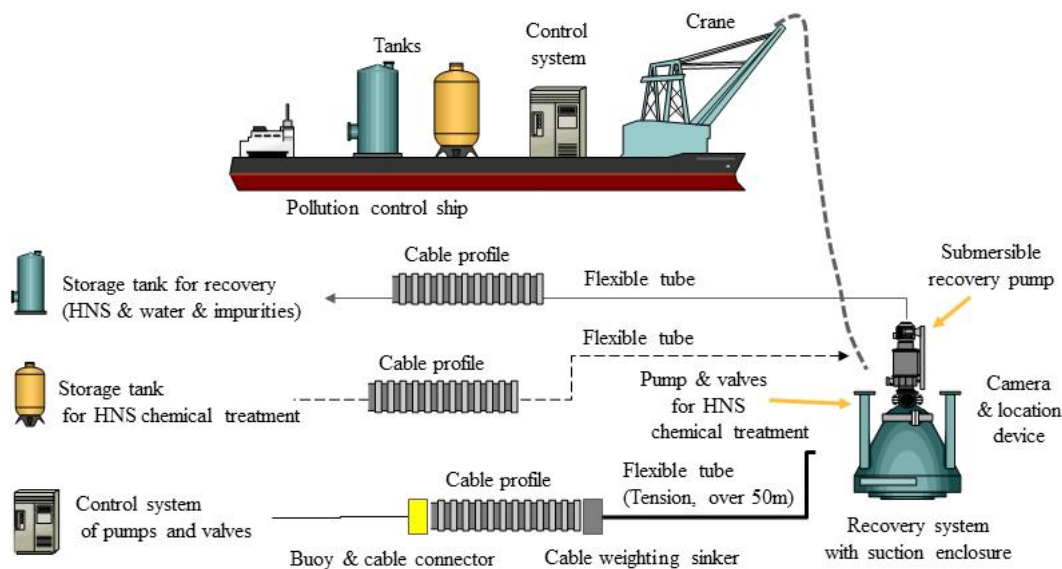


Fig. 4. Conceptual design of the mechanical recovery system with suction enclosure.

리하기 위한 흡착제인 활성탄소를 저장하는 탱크와 회수된 물질들을 저장하기 위한 탱크로 구성되어 있다. 회수물질 저장 탱크는 밀폐된 흡인 기초를 통해 흡인되는 화학처리된 HNS를 저장하는 탱크이다. 화학물질 저장 탱크와 회수물질 저장 탱크들은 해저의 흡인 기초와 유연한 관(Flexible tube)으로 연결되어 회수 작업에 활용된다. 방제선에는 수중의 밸브들과 펌프들을 제어하기 위한 제어 시스템을 구비해야 한다. 제어 시스템은 부이(Buoy)와 유연한 고장력 연성케이블 및 배관을 통해 해저에 위치한 펌프 및 밸브 장치에 연결한다. 조류에 의한 케이블의 이탈을 방지하기 위한 무게추도 사용할 수 있다. 해저의 흡인 장비에는 수중 회수 펌프, 승압 및 이송 펌프가 구성되어야 한다. 이외에도 해저의 장비들의 운전 및 운용 상태를 모니터링 할 수 있는 장비와 회수장치의 위치를 측정할 수 있는 위치정보 장비 등이 구성되어야 한다. 이와 같이 해저침적 HNS 기계적 회수장치의 구성에 대한 개념설계안을 나타낸 것이 Fig. 4이다.

4.3 주요 장비의 규격

4.3.1 수중 회수 펌프 장비 규격

해저침적 HNS 기계적 회수장치의 개념설계에서 가장 중요하게 결정해야 하는 사항이 수중 회수 펌프 장비에 대한 규격을 명세하는 것이다. 이 펌프 장비는 화학적 안정화 처리가 진행된 HNS를 회수하기 위한 펌프이다. 화학적으로 안정화 처리된 HNS와 더불어 모래, 진흙, 슬러지 등을 회수할 수 있는 기능 뿐만 아니라 흡인 기초의 운용을 위해 내부를 고압 상태로 만드는 기능도 담당한다. 원심 펌프가 이에 적합하며 펌프 회수 물질의 고흥률을 높이기 위한 규격이 필요하다. 선정된 원심형 수중 회수 펌프의 주요 규격을 Table 5와 같이 명세하였다. 대표적인 규격이, 유량은 500 m³/hr 이하, 양정(Total head)은 10~70 m, 고흥율은 10~70%이다. 회수된 물질에는 화학물질과 해수가 포함된다. 회수한 혼합물질들은 방제선에 구비되어 있는 회수물질 저장 탱크에 저장되고, 향후 화학적 처리 등을 거쳐 안전한 장소로 이송하게 된다.

Table 5. Specifications of submersible recovery pump

Item	Specifications
Liquid state	Mixture of sand, mud and sludge
Suction diameter	50 ~ 150 mm
Flow rate	under 500 m ³ /hr
Rotation speed	2200 ~ 3600 rpm
Discharge diameter	70 ~ 200 mm
Total head	10 ~ 70 m
Percent solids	10 ~ 70 %

4.3.2 흡인 기초의 주요 규격

기계적 회수장치의 전체 무게는 선상에서 운영하는 특징과 해상 상태를 고려하여 3 ton 이하로 개발되어야 하며, 이 조건 아래에서 모든 장비의 규격이 결정된다. 많은 부피와 중량을 가질 것으로 예상되는 흡인 기초의 격벽(Bulkhead)의 직경은 2 m 이하가 적당하다. 또한 해양에서의 작업에 사용되므로 스테인레스강 계열의 재료를 사용하여 내부식성에 대응하는 것이 타당하다. 이에 흡인 기초의 격벽의 재질은 SUS가 적절하며, 안전성 및 안정성을 고려하여 두께는 12 mm 이상이 되어야 한다.

4.3.3 이송 장비 규격

기계적 회수장치의 운용에 꼭 필요한 장비가 기계장치를 설치하고 회수하기 위한 이송 장비이다. 이송 장비로는 모선인 방제선의 갑판 크레인을 사용하는 것이 적합하며, 회수장치의 설치 및 회수하기 위한 크레인의 길이는 8 m 이상이 타당하다. 기계적 회수장치의 전체 무게를 고려할 때, 크레인의 용량은 20 ton 이상을 사용하는 것이 적절하다.

4.3.4 제어 및 모니터링 장비 규격

기계적 회수장치의 제어 및 상태 모니터링을 위해 필요한 장비들에 대한 규격도 명세할 필요가 있다. 해저 환경에서 운용되는 회수장치는 온도, 유량, 운전속도 등을 측정하는 센서들과 펌프 등 주요 장비들의 동작 상태를 파악하기 위한 소요 전력, 진압, 진동 등을 계측하는 센서들을 포함해야 한다. 유량, 압력 등의 정적 신호들과 진동 신호와 같은 동적 신호들을 모든 측정할 수 있도록 장비를 구성해야 한다. 측정 데이터를 분석하기 위한 데이터 연산처리 장치가 별도로 구성하였다. 상태 모니터링에서는 잡음(Noise) 영향을 막기 위한 기능이 필요하고, 각 측정 채널별로 보호(Isolation) 기능을 지니고 있어야 한다. 또한 24 비트 고해상도와 4 단계 게인(Gain) 조절 기능 등의 높은 분해능을 가지고 있어야 한다.

이와 같이 회수장치를 구성하는 각종 장비에 대한 주요 규격을 나타낸 것이 Table 6이다.

Table 6. Representative specifications of principal devices

Item	Specifications
Total system weight	under 3 ton
Diameter of suction bulkhead	under 2 m
Material of suction bulkhead	Stainless steel (SUS)
Thickness of suction bulkhead	over 12 mm
Crane arm length	over 8 m
Crane capacity	over 20 ton

5. 결론

많은 양의 HNS가 해상 운송을 통해 이동하고 있고, 다양한 사고에 노출되어 있다. HNS 유출에 따른 해양환경의 손상이 유류 유출에 의한 손상보다도 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. 특히 해저로 침강하여 침적되는 HNS는 해저 생태계에 돌이키기 어려운 피해를 주게 되므로, 반드시 회수되어야 한다. 이를 위해 해저침적 HNS를 정확히 탐지하고 안정화 처리하며 회수하는 절차와 장비가 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 회수 절차에서 요구되는 기계적 회수장치에 대한 개념설계에 초점을 맞추었다. 기계적 회수장치의 개발을 위해 성능지표를 활용한 성능요건이 제안된 바 있으며, 개념설계를 위한 기반 조건으로 활용하였다. 본 연구에서는 해저에 침적된 HNS를 탐지하고 처리하여 회수하는 절차적 관점에서의 HNS 처리 해저기술에 대해 소개하였다. 이 중 기계장치를 활용한 회수 방식 및 방안을 기반으로 개념설계를 제시하였다. 해저침적 HNS를 회수하기 위한 기본 시나리오를 제시하였고, 성능요건을 만족시키기 위한 기계적 회수장치의 개념인, 자체적 밀폐 성능을 가지는 흡인 기초를 활용하는 방안을 제시하였다. 외부격벽을 활용하여 자체적으로 밀폐된 공간을 형성할 수 있도록 설계된 기초 구조물인 흡인 기초를 주요 장비로 선정하였다. 회수장치는 흡인 기초, 오염 방지, 펌프 시스템, 제어 시스템, 모니터링 장비, 위치정보 장비, 이송 장비, 탱크로 구성된다. 이 회수장치는 크레인을 사용하여 해저에 투입하고 회수하는 방식으로 사용된다. 이뿐 아니라 성능요건과 구성안으로 기계적 회수장치의 기본 부품 및 구성을 제시하였고, 이들 간의 연결관계를 명세하였다. 또한 해저침적 HNS 기계적 회수장치의 핵심인 수중 회수 펌프에 대한 기본 규격도 명세하고 각종 장비에 대한 주요 규격을 명세하였다. 본 연구에서 제시한 개념설계안은 기계적 회수장치에 대한 부품 및 형상을 결정하는 기본설계에 반영되어 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(위험유해물질(HNS)사고 관리기술개발)이다.

References

- [1] Clarke, L. J., L. S. Esteves, R. A. Stillman and, R. J. Herbert(2018), Impacts of a novel shellfishing gear on macrobenthos in a marine protected area: pump-scoop dredging in Poole Harbour, UK. *Aquatic Living Resources*, 31, p. 5.
- [2] Han, D. G., H. C. Seo, J. W. Choi, and M. J. Lee(2018), Experiment and Simulation of Acoustic Detection for the Substitute for Sunken Hazardous and Noxious Substances Using the High Frequency Active Sonar, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 24, No. 4, pp. 459-466.
- [3] Hogervorst, J. R.(1980), Field trials with large diameter suction piles, In *Offshore Technology Conference*. *Offshore Technology Conference*, pp. 217-224.
- [4] Hwang, H. J. and M. J. Lee(2019), Introduction to submarine probe and treatment technologies of hazardous noxious substances, *Proceedings of the Society for Computational Design and Engineering Conference*, pp. 519-521
- [5] Jang, H. L., M. J. Ha, H. S. Jang, J. H. Yun, E. B. Lee, and M. J. Lee(2017), Design and Implementation of HNS Accident Tracking System for Rapid Decision-Making, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, No. 2, pp. 168-176.
- [6] Jeong, M. G., M. J. Lee, and E. B. Lee(2017), A Study on the Visualization of HNS Hazard Levels to Prevent Accidents at Sea in Real-Time, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, No. 3, pp. 242-249.
- [7] Kim, C. J., K. Y. Choi, Y. I. Kim, M. J. Lee, and S. W. Oh(2016), A Case Study on the Chemical behavior for Sinking HNS (Hazardous & Noxious Substance) in Marine Environment, *Proceedings of The Korean Society for Marine Environment & Energy*, p. 135.
- [8] Kim, K. S. and M. J. Lee(2017), A Study on the Improvement of the Education and Training System for Response to Marine Chemical Incidents in Korea - Based on the Comparison of Systems between Korea and Foreign Countries, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, No. 6, pp. 847-857.
- [9] Kim, Y. R., T. W. Kim, M. H. Son, S. W. Oh, and M. J. Lee(2015), 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.
- [10] Lee, M. J. and S. W. Oh(2014), Development of Response Scenario for a Simulated HNS Spill Incident, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 20, No. 6, pp. 671-684.

- [11] Sparrevik, P.(2002), Suction pile technology and installation in deep waters. In Offshore technology conference, Offshore Technology Conference, Paper OTC 14241.
- [12] Tjelta, T. I.(2001), Suction piles: Their position and application today. In The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, pp. 1-6.
- [13] Tjelta, T. I.(2015), The suction foundation technology, Frontiers in offshore geotechnics III, p. 85.
- [14] Wang, X., X. Yang, and X. Zeng(2017), Seismic centrifuge modelling of suction bucket foundation for offshore wind turbine, Renewable energy, 114, pp. 1013-1022.

Received : 2020. 09. 21.

Revised : 2020. 10. 12.

Accepted : 2020. 10. 28.