

항만 해저침적 위험유해물질(HNS) 회수용 기계장치의 성능요건 분석

황호진**

* 선박해양플랜트연구소 책임연구원

Analysis of Performance Requirements of Mechanical System for Recovery of Deposited Hazardous and Noxious Substances from Seabed around Seaport

Ho-Jin Hwang**

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

요 약 : 해상을 통하여 운송되는 화학물질은 6,000여종에 이르며, 이러한 화학물질에는 해양을 오염시키거나 해양생물에 해로운 HNS(Hazardous and Noxious Substances)가 포함되어 있다. 해상운송 과정에서 바다로 유출된 HNS는 해상 및 해중에서 물리적, 화학적 변화를 거치게 되는데, 어떤 종류의 HNS는 해저로 침강하여 퇴적되기도 한다. 해저에 침적된 HNS는 해저생태계에 커다란 악영향을 주기 때문에 해저침적 HNS를 탐지·처리하여 회수하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구는 해저침적된 HNS를 회수하기 위한 기계장치를 개발할 때, 최우선으로 고려해야 하는 성능요건을 제시하였다. 해저의 오염물질을 회수하기 위하여 현재 사용되는 다양한 방식의 준설장비에 대하여 조사하고, 준설장비의 방식별 성능지표를 분석함으로써 기계장치에 대한 10가지의 성능지표를 선정하였다. 이러한 성능지표를 활용하여 해저침적 HNS 회수용 기계장치의 개발을 위한 성능요건을 제안하였다. 국내 항만의 수심을 고려하여, 해저침적 HNS 회수용 기계장치의 성능요건을 생산율(50~300 m³/hr), 최대운용수심(50 m), 저질 종류(대부분의 저질 형태), 고형률(10% 이상), 수평 작업 정확도(±10 cm), 제한 유속(3~5 knot) 등으로 제안하였다. 이러한 성능요건은 해저침적 HNS 회수용 기계장치의 개념설계와 기본설계에 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 위험유해물질, 기계적 회수장치, 성능지표, 성능요건, 침적 HNS

Abstract : Approximately 6,000 chemicals are transported through the sea, including hazardous and noxious substances (HNS), which cause marine pollution and are harmful to marine life. The HNS discharged into the sea during the maritime transportation process undergoes physical and chemical changes on the sea surface and in seawater, and some types of HNS sink and are deposited on the seabed. The HNS deposited on the seabed adversely affects the benthic ecosystem, and hence, it is desirable to detect, treat, and recover the HNS on the seabed. Therefore, this study was conducted to analyze the performance requirements that should be considered as the top priority when developing a mechanical system for recovering the HNS deposited on the seabed. Various types of existing dredging devices used for collecting and recovering pollutants from river beds and seabeds were investigated, and 10 performance indices for the mechanical devices were selected. The new performance requirements for the development of the seabed-deposited HNS recovery system were proposed using performance indices. By considering the depth of water in domestic seaports, some of the performance requirements of the mechanical system for recovering deposited HNS from the seabed were obtained as follows: production rate (50 - 300 m³/hr), maximum operation depth (50 m), sediment type (most forms), percentage of solids (10% or higher), horizontal operating accuracy (±10 cm), limiting currents (3 - 5 knots). These performance requirements are expected to be useful in the conceptual and basic design of mechanical systems for recovering seabed-deposited HNS.

Key Words : Hazardous and noxious substances, Mechanical recovery system, Performance indices, Performance requirements, Deposited HNS

† hjhwang@kriso.re.kr, 042-866-3645

1. 서론

위험유해물질(HNS, Hazardous and Noxious substances)은 해양을 오염시키거나 해양생물에 해로운 오염물질을 뜻한다. 현대에는 나프타, 질산, 벤젠 등과 같은 6,000여종의 화학물질들이 해상을 통해 운송되고 있으며, 해상 운송의 특성 상 많은 양이 이동하고 있다. 우리나라 주변에서는 최근 상치호(SANCHI) 사고와 같이 충돌에 의한 화물(콘덴세이트) 유출 사고도 발생한 바 있다. 국제유조선선주오염연맹(ITOPF)에서는 HNS의 유출은 해양환경에 심각한 손상을 유발한다고 경고하고 있다. 그 메커니즘은 생리적 기능에 영향을 미치는 물리적인 질식, 치사, 아치사 효과를 일으키거나 세포 기능에 장애를 유발하는 화학적 독성, 생물 서식지 잠식과 같은 생태적 변화 등으로 알려져 있다(Kim et al., 2015). HNS는 충돌, 좌초 등의 다양한 사고에 노출이 되어 있으며, 다른 선박 사고와 달리, 일단 사고가 발생하면 선적된 HNS가 유출될 가능성이 높다(Park et al., 2016). 선적된 HNS가 유출이 되면, 유출된 물질들은 다양한 물리적, 화학적 변화가 발생한다. 해저로 침강하여 침적된 HNS는 해저면에 축적되어 생태학적으로 큰 악영향을 주고 있으므로(Han et al., 2018), 이를 반드시 탐지하고 처리하여 회수해야만 한다(Hwang and Lee, 2019).

본 연구에서는 해저에 침적된 HNS를 회수하기 위한 기술 개발에 초점을 맞추고, 기계적 회수장치 기술 개발에 최우선적으로 필요한 설계 변수를 선정하기 위하여 기계적 회수장치의 성능요건을 분석하고자 하였다. 성능요건 분석을 위해 기존의 강이나 바다의 바닥면에 축적되어 있는 오염물질을 수거하는 다양한 방식과 장치에 대해 조사하고 분석하였다. 기계장치들은 직접 회수 방식과 펌프 회수 방식으로 구분이 가능하며, 각 방식에 따른 다양한 장치들을 비교하여 분석하였다. 회수 방식과 장치에 대한 분석을 통해 기계적 회수장치에 대한 성능지표의 도출과 선정이 가능하다. 성능지표를 통해 각 방식들에 대한 특징 및 장단점의 비교가 가능하다. 성능지표를 활용한 분석을 기반으로 해저침적 HNS의 회수를 위한 기계장치의 성능요건들을 제안하였다. 이는 현존하는 기술들을 기반으로 하여 설계가 가능한, 구현이 가능한 요건들이다(Hwang et al., 2020). 제안된 성능요건은 기계적 회수장치의 개념설계와 기본설계를 수행할 수 있는 기반이 될 것이며, 이 성능요건을 만족시키는 기계적 회수장치를 개발하는 데에 이용될 것으로 기대된다.

2. 위험유해물질(HNS)

2.1 위험유해물질의 정의

위험유해물질(HNS)은 다양한 국제협약에서 정의하고 있다. 그 중 국제협약인 OPRC-HNS 의정서의 정의가 가장 널

리 사용되고 있다. 이 의정서는 위험유해물질 오염사고 대비 대응 및 국가 간 협력에 관한 의정서이다. 여기서 HNS는 ‘인간의 건강과 해양 생명체 또는 생물체에 해로운 물질과 쾌적성을 손상시키거나 다른 합법적인 바다의 이용에 방해가 되는 기름을 제외한 물질’로 정의하고 있다(Kim and Lee, 2017).

2.2 해저침적 HNS

해상 사고 등에 의해 유출된 화학물질들(HNS를 포함하는)은 다양한 물리적, 화학적 변화가 발생한다. 유출된 화학물질의 거동은 물과 접촉한 후 몇 시간 동안 변화한다. 물질의 물리적, 화학적 성질에 따라 이론적인 거동이 결정되는데 이를 SEBC(Standard European Behavior Classification)로 표현하고 있다. 대부분의 경우 물질은 하나의 단일 거동을 가지지 않고 자연과 환경(바람, 파도 등)으로 인해 여러 거동을 한다(Jeong et al., 2017). 그러나 SEBC 코드에는 한계가 있으며, 이는 물에서 20℃의 온도에서 순수 물질에 대한 실험실 시험을 기반으로 한다는 점이다. 이러한 조건은 해상에서 일어나는 사건과는 상당히 다르며, 물질의 실제 거동과 이론적 거동이 상당히 다를 수 있음을 의미한다.

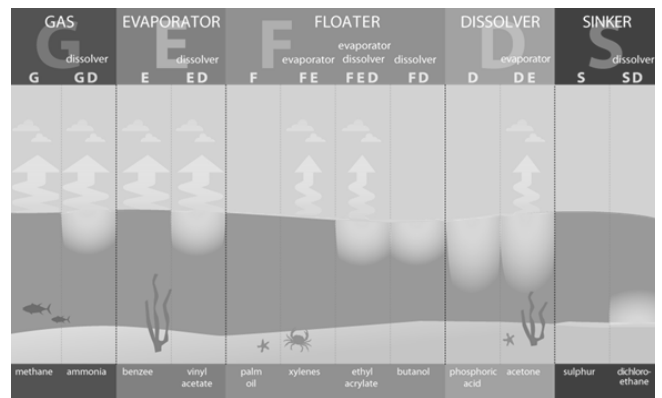


Fig. 1. SEBC code by behavior of the substances (Cedre).

Fig. 1은 오염원이 되는 물질의 거동에 따른 SEBC 분류를 나타낸다. 화학물질의 일부는 해수표면에서 증발되어 소멸되며, 이러한 경우 Gas(G, GD)에 해당한다. 어떤 물질들은 부유하는 퇴적물 입자들과 유기물 간의 상호작용을 통해 밀도가 높아지면서 해저로 침강하기도 한다(Jang et al., 2017). 침강에 의해 퇴적된 화학물질은 항공탐색으로 관찰이 어렵게 되어 제거 및 복원에 상당한 시간이 소요된다. 이와 같이 HNS가 해저로 가라앉는 경우가 Sinker(S, D)에 해당하며, 본 연구의 회수장치는 이 물질들을 대상으로 한다. 여러 HNS 중에서 해저로 침강하여 침적되는 대표적인 예가 클로로포름(Chloroform), 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene), 염화에틸

렌(Ethylene dichloride) 등이며, 해상운송이 많이 되어 주목하는 HNS이다. 본 연구의 기계적 회수장치는 해저침적된 이러한 물질들을 회수하는 것이 타당하다. 이외에도 황(Sulfur), 나프탈렌(Naphthalene) 등도 역시 해저에 침적되는 물질이나, 유동량 및 사고 발생 빈도가 낮아 본 연구의 우선대상에서 제외하지만, 이 물질들에도 적용이 가능하도록 하는 확장성에 대해서 검토하고 있다.

3. 오염물질 기계적 회수 방식

해저에 침강하여 침적되는 HNS를 회수하기 위해서 기존의 해저면에 퇴적 혹은 침적되어 있는 물질을 기계적으로 회수하는 방식에 대한 분석이 필요하다. 이러한 관점에서 해저의 퇴적물질을 회수하는 기계장치의 대표적인 예가 준설장비(Dredging system)이다. 준설장비의 분류는 해저 바닥면의 퇴적물을 그랩(Grab)이나 버킷(Bucket)과 같은 장치를 활용하여 회수하는 방식과 물리적으로 파쇄하고 펌프 시스템을 이용하여 흡입하는 방식으로 구분할 수 있다. 이러한 준설장비의 방식과 장단점의 분석이 필요하며, 이를 통해 해저침적 HNS를 회수하기 위한 기계장치가 가져야 하는 성능지표와 성능요건을 제시할 수 있으며, 제시한 성능요건을 기반으로 기계적 회수장치의 개념설계에 활용할 수 있다.

3.1 오염물질 처리 장치의 분류

일반적으로 강이나 바다의 바닥에 퇴적된 오염물질을 처리하는 방법으로는, 준설장비를 사용하여 오염물질을 회수한 후 이를 배관이나 바지선(Barge)을 이용하여 육상으로 이송 후 처리 시설에서 처리하는 방식이다(Montgomery and Leach, 1984). 강이나 바다의 바닥면의 오염물질을 기계적으로 회수하는 장치는 2종류로 분류한다. 그랩이나 버킷과 같은 장비를 활용하는 직접 회수 방식과 펌프 시스템을 이용하여 흡입하는 펌프 회수 방식으로 구분한다(Palermo et al., 2008). 펌

프 회수 방식의 기계장치는 휠(Wheel)과 스크류(Screw)를 활용하는 방식으로 세분화된다. Table 1은 준설 방식을 통해 오염물질의 회수 장치에 대한 분류를 나타낸다.

Table 1. Classification of systems for pollutant recovery

Recovery methods	Detailed types
Direct recovery	Grab bucket
	Articulated bucket
	Hydraulic crane
	Diver
Pumping recovery	Bucket wheel
	Cutter wheel
	Horizontal auger
	Hopper
	Scrap rotor
	Water pump

3.2 직접 회수 방식

직접 회수 방식은 기계장치를 활용하여 오염물질을 퍼 올려 토사 운반선에 싣는 방식으로 예전부터 일반적으로 사용하는 방식이다. 그랩을 이용한 회수장치는 표준형, 밀폐형 등으로 사용하는 예가 많으며 회수 용량은 그랩의 크기에 따라 1~200 m³/hr의 능력을 가지고 있다. Fig. 2는 널리 사용되고 있는 직접 회수 방식의 예시를 나타낸다. 그랩의 열람과 닫힘은 와이어 및 유압 실린더에 의해 제어되며, 크레인 이 와이어를 감아올리는 동안 모선이 회전하지 않도록 많은 윈치 앵커를 지니고 있어야 하는 특징이 있다. 직접 회수 방식은 다음과 같은 특징을 가지고 있다(Palermo, 1991).

- 1) 그랩으로 직접 오염물질을 퍼 올리므로 가장 확실한 회수가 가능하다.
- 2) 오염물질에 섞인 나무와 자갈 등의 장애물에 대해 다른 방식에 비해 그 영향이 적다.



(a) Grab bucket

(b) Articulated bucket

(c) Hydraulic crane

Fig. 2. Examples of recovery devices with direct recovery method.

- 3) 환경 개선을 목적으로 하는 오염물질 회수인 경우 표층 축적물에 대한 회수가 곤란하다.
- 4) 혼탁 및 확산을 방지하기 위해 오탍 방지막을 설치하여 운용하지만 용출 가능성과 작업성에 대한 기술적 한계가 존재한다.

3.3 펌프 회수 방식

펌프를 사용하여 오염물질을 회수하는 방식이다. 펌프에 의한 유속을 이용하여 오염물질을 흡인(吸引, Suction)한 후 이를 수상으로 이송한다. 오염물질 회수장치는 물의 유입을 최소화하기 위해 또는 오염물질의 부유를 막기 위해 최적의 흡입 장치를 설치한다. 그 예로 오염물질의 표면을 감지하여 표층에서 일정한 두께로 채집할 수 있는 장치, 확산 방지막 내에서 일정 장소에 모아 뒤섞음으로써 물질에 유동성을 주어 펌프로 흡입되기 쉬운 성질로 변화시키는 장치, 장해물을 제거하는 장치 등이 있다. 펌프 회수 방식은 다음과 같은 특징을 가지고 있다(Palermo, 1991).

- 1) 오염물질 흡인 중 혼탁 발생량이 직접 회수 방식에 비해 대단히 적다.
- 2) 펌프 회수 방식은 직접 회수 방식에 비해 구조가 복잡해지므로 주변 장애물에 의해 운전이 제한을 받을 수 있다.
- 3) 적용 토질에 있어서는 축적되는 오염물질의 성상은 균일하지 않고 굴삭 기구를 지니지 않는 경우에는 토질의 경도에 따라 흡인 능력이 변화하는 경향이 있다.

본 연구에서는 오염물질 회수와 관련한 실제 현장 적용 순위에 따라 펌프 회수 방식에 대한 회수장치에 대한 상세한 내용을 조사하고 분석하였다.

3.3.1 커터 타입 회수장치

커터(Cutter) 타입 회수장치는 흙이나 암석을 커터를 이용하여 굴삭, 파쇄, 제거한다. 지반 조건에 따라 5~6개의 강관으로 날을 구성하고 있으며 일반적인 커터의 예제를 나타낸 것이 Fig. 3이다(Palermo, 1991).

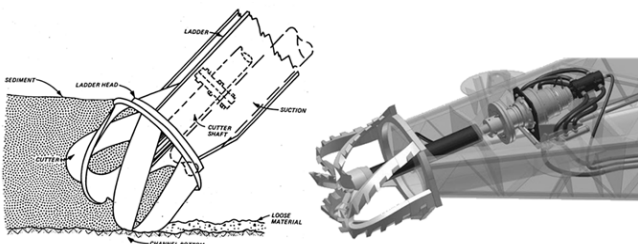


Fig. 3. Examples of recovery device with cutter.

커터 헤드는 전기나 유압에 의해 구동되며, 오염물질은 펌프의 원심력에 의해 흡입되어 파이프를 통하여 이송된다. 커터헤드의 흡입 펌프는 라더(Ladder, 사다리 모양의 구조물) 구조물의 선단에 위치하고 있다. 커터 헤드의 구동 모터는 라더의 선단에 설치되고, 대형 준설선의 경우에는 라더의 뒷부분에 설치되어 구동축에 의해 동력을 전달한다. 라더는 준설선의 가운데 부분에 상하 움직임을 할 수 있도록 고정되어 있다. 흡인 파이프는 고압에 견딜 수 있도록 되어 있으며, 회전이 가능하다(Zappi and Hayes, 1991).

3.3.2 버킷 타입 회수장치

버킷(Bucket) 타입 회수장치는 연약지반에서부터 연암과 같은 단단한 지반까지 다양한 지반 조건에서 사용되고 있다. 라더에 체인을 설치하여 버킷 등을 무한궤도로 구성하는 형태가 일반적이다. 체인에 설치된 버킷을 이용하여 오염물질의 분쇄 및 이송한다(Palermo, 1991). 버킷 타입의 일반적인 예제가 Fig. 4이다. 버킷 타입 회수장치는 다음과 같은 장점을 가진다.

- 1) 좌우 스윙 시에도 흡입되는 물질량이 일정하다.
- 2) 준설 시 굴삭된 흙과 흡입된 흙의 비율이 다소 높다.
- 3) 일반적으로 입자농도가 크다.
- 4) 모터에 작용하는 부하가 적다.
- 5) 중량이 크다.
- 6) 캐리지(Carriage)가 탑재된 가동 스퍼드(Spud)가 필요하다.
- 7) 하방굴착에 적합하지 않고, 버킷 휠의 지름의 50% 이하의 얇은 경우 능률이 떨어진다.

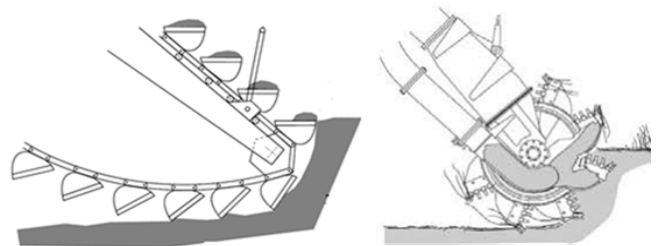


Fig. 4. Examples of recovery device with bucket.

3.3.3 흡인 펌프(Suction Pump) 타입 회수장치

라더에 펌프를 설치하여 오염물질을 회수하는 장치이다. 펌프 안을 진공 상태로 하여 오염물질을 흡입하고, 오염물질이 일정량에 도달했을 때 압축 공기를 가압하여 오염물질을 이송시킨다. 2개의 탱크를 서로 반복적으로 조정하여 운전함으로써 연속적으로 오염물질을 회수하여 이송하는 방식의 장치이다(Van Craenenbroeck et al., 1998). Fig. 5가 흡인 펌프 타입의 회수장치에 대한 예를 나타낸다.

항만 해저침적 위험유해물질(HNS) 회수용 기계장치의 성능요건 분석

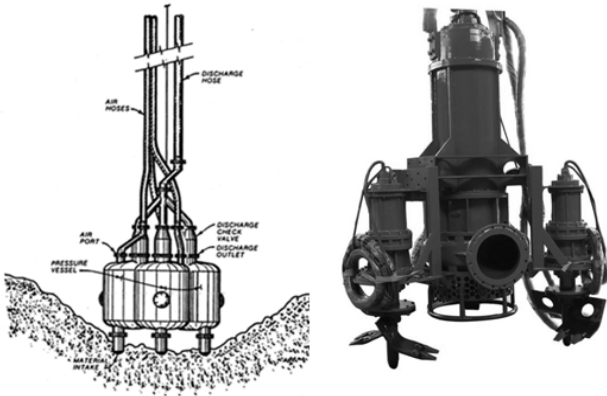


Fig. 5. Examples of recovery device with suction pump.

4. 성능요건 분석

4.1 성능지표 도출

준설장비들의 다양한 방식들은 HNS 회수를 위한 기계장치에 적용이 가능하다. 여러 방식들의 장점들을 활용하기 위해서는 기계장치에 필요한 성능지표를 도출하고, 해당 성능지표에 대한 요건을 분석하고 적절한 값들을 선정하여 반영해야 한다(Hwang et al., 2020). 이를 통해 기계적 회수장치에 대한 설계 변수(Design Parameter)들을 결정하고 이를 개념설계 및 기본설계에 반영해야 한다.

HNS 회수를 위한 기계장치의 성능지표는 현재 사용되는 다양한 방식의 준설장비에 대해 성능 및 운영 환경을 대표할 수 있는 조건들로 선정하였다. 준설장비의 준설방식에 따른 대표 성능들을 지표화함으로써 각 방식들의 장점들을 취하고자 하였다. 기계적 회수장치가 운영될 시나리오에 따

른 조건 및 제한요소들을 우선적으로 도출한 것이다. 성능지표는 제한 파고(Limiting wave height), 제한 유속(Limiting current), 최대 운용 수심(Maximum depth), 최소 운용 수심(Minimum depth), 생산률(Production rate), 고형률(Percent solid), 수직 작업 정확도(Operating accuracy(vertical)), 수평 작업 정확도(Operating accuracy(horizontal)), 저질 종류(Soil type), 지층 형태(Harden/rock bottom) 의 10가지 항목으로 선정하였다. 파고와 유속은 기계장치 운용 시 필요한 해상환경을 나타내는 요소이다. 최대 운용 수심과 최소 운용 수심은 기계장치의 규모(크기)에 의해 결정되는 운용 가능한 수심 정보이다. 생산율은 기계장치로부터 회수되는 오염물질의 시간당 총량이며, 고형률은 회수된 물질에서 액상과 고형물질의 비율이다. 정확도는 수직, 수평 방향으로 회수와 관련한 오차범위를 의미한다. 저질 종류와 지층 형태는 해당 방식에서 유리한 해저의 저질과 지층, 암반의 형태를 나타낸다. Fig. 6은 성능지표를 도식화하여 표현한 것이다.

4.2 성능지표 적용

기존의 오염물질 기계적 회수장치 및 방식에 대해 성능지표를 적용하여 그 특징들을 비교하였다. 직접 회수 방식과 펌프 회수 방식에 대해 각각 비교하여 분석하였다. Table 2는 직접 회수 방식에 대해 성능지표를 적용한 것이다. 다이버의 경우, 최대 운용 수심이 30m이고 고형률이 5% 이하로 가장 우수한 반면, 생산율이 15 m³/hr로 가장 낮다. 버킷 방식의 경우, 자갈, 흙, 진흙과 같은 부드러운 저질에 적합하고 지층 및 암반에는 부적합하다. 또한 80~90%의 다소 떨어지는 고형률을 가지며, 생산율은 50~190 m³/hr 정도이다. 이 방식 중 그랩 버킷은 케이블 길이에 따라 최대 운용 수심이

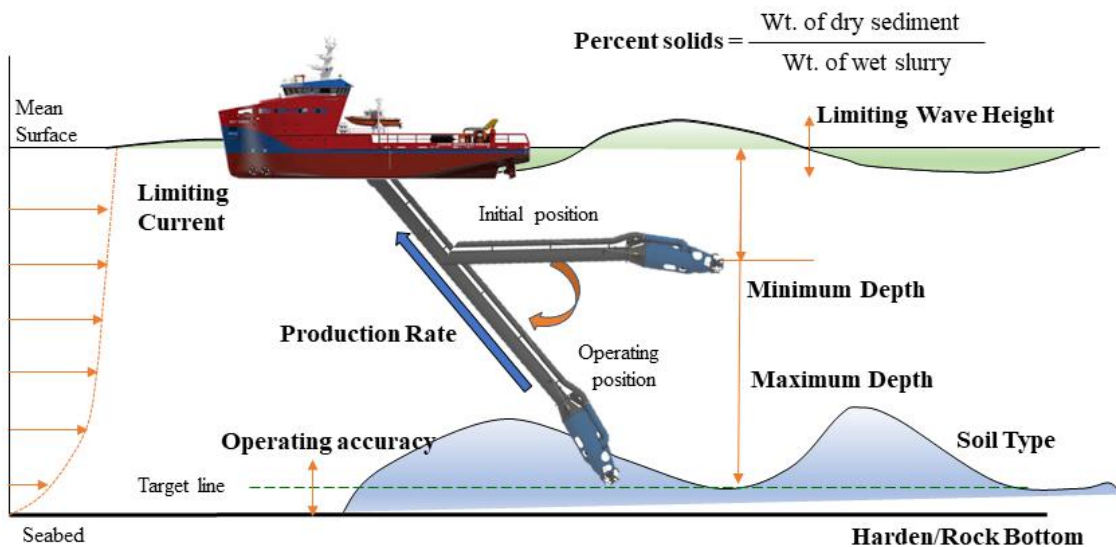


Fig. 6. Performance indices of mechanical recovery systems.

Table 2. Performance indices of direct recovery methods

Item	Diver	Grab bucket	Articulated bucket	Hydraulic crane
Production rate	15 m ³ /hr	50 ~ 190 m ³ /hr	50 ~ 190 m ³ /hr	Site-specific
Maximum depth	30 m	Depend on cable length	15 m	Limited stability
Minimum depth	0.5 m	0 m	0 m	0 m
Soil type	-	Soil, Gravel, Clay, Loose rock		
Harden/rock bottom	Very good	Bad	Bad	Bad
Percent solids(by weight)	< 5 %	80 ~ 90 %	80 %	80 %
Operating accuracy(vertical)	-	± 15 cm	± 5 cm	± 5 cm
Operating accuracy(horizontal)	-	± 10 cm	± 5 cm	± 5 cm
Limiting wave height	-	Depend on barge		
Limiting current	-	Depend on barge		

결정이 되는 반면, 굴절식 버킷은 최대 운용 수심이 15 m 정도로 제한되는 특징이 있다. 대부분의 직접 회수 방식의 경우 바지선이 운항할 수 있는 파고 및 유속 환경에서만 운영이 가능하다.

펌프 회수 방식에 대해 성능지표를 적용한 것이 Table 3이다. 펌프 회수 방식의 경우 직접 회수 방식과 달리 준설선에 장치가 탑재되어 있는 경우가 많다. 따라서 제한 파고와 제한 유속은 선박이 운항 가능한 해상 환경에 따르는 것이 일반적이다. 일반적으로 제한 파고는 1 m 미만이고, 제한 유속은 3 ~ 5 knot이다. 버킷 휠, 호퍼(Hopper), 워터펌프의 경우 30 ~ 40 m 수심에서 작업이 가능하며, 버킷 휠은 장치의 구조 특성 상 3 m 이상의 수심이 확보된 경우에만 운영이 가능하다. 호퍼, 워터펌프 방식만이 암반 지층에서 효과를 얻을 수 있다는 특징이 있다. 고품질의 경우 대부분의 장치들이 10 % 안팎으로 나타내어 직접 회수 방식에 비해 효율이 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 커터 휠, 호퍼, 수평 오우거(Auger)

의 경우 70 ~ 285 m³/hr의 생산률을 나타내며, 버킷 휠은 20 ~ 380 m³/hr의 생산률로 운영 환경에 따라 생산률의 변화가 크을 수 있다. 대부분의 장치가 수평, 수직 정확도에 있어 10 cm 안팎의 공차를 요구하는 것으로 나타났다.

4.3 성능요건 제안

상기와 같이 기존 기계적 회수장치 및 방식에 대해 선정된 성능지표를 적용하였다. 각 방식마다의 특징이 있지만, 기계적 회수장치의 실현 가능성 검토 및 성능지표, 성능요건의 제안을 위해 조사 결과를 바탕으로 성능지표를 최대값, 최소값, 평균값의 영역으로 구분하여 분석하였다. 이를 정리한 것이 Table 4이다.

해저면의 오염물질에 대한 기계 회수 방식 및 장치에 대한 사례 분석을 통해, 해저에 침적된 HNS를 기계적으로 회수하여 처리하기 위해 필요한 성능요건들을 선정하여 제안하였다. 단 여기서 현존하는 기술 수준에서 2차 해양 오탁을

Table 3. Performance indices of pumping recovery methods

Item	Bucket wheel	Cutter wheel	Hopper	Horizontal auger	Water pump
Production rate	20 ~ 380 m ³ /hr	70 ~ 285 m ³ /hr	70 ~ 285 m ³ /hr	70 ~ 285 m ³ /hr	Site-specific
Maximum depth	30 m	15 m	45 m	8 m	45 m
Minimum depth	3 m	1 m	1 m	0.5 m	1 m
Soil type	Soil, Gravel, Clay, Loose rock				
Harden/Rock bottom	Bad	Bad	Good	Bad	Good
Percent solids(by weight)	10 %	10 %	10 %	10 %	15 %
Operating accuracy(vertical)	± 10 cm	± 10 cm	± 15 cm	± 10 cm	± 15 cm
Operating accuracy(horizontal)	± 10 cm	± 10 cm	± 10 cm	± 10 cm	± 10 cm
Limiting wave height	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m
Limiting current	3 ~ 5 knot	3 ~ 5 knot	3 ~ 5 knot	3 ~ 5 knot	3 ~ 5 knot

발생시킬 수 있는 파쇄형 회수 방식은 배제하였다. 주요 시나리오는 항만 내에서 사고가 발생한 것으로 가정하였다. 항만 내 유출사고로 인해 해저침적된 HNS의 기계적 회수장치에 대한 성능요건을 나타낸 것이 Table 5이다.

Table 4. Analysis of performance indices

Item	Max	Average	Min
Production rate	20~380 m ³ /hr	45~330 m ³ /hr	70~285 m ³ /hr
Maximum depth	45 m	24 m	8 m
Minimum depth	0.5 m	1.5 m	3 m
Soil type	Soil, gravel, clay, loose rock		
Harden/rock bottom	Partially good		
Percent solids (by weight)	15 %	12.5 %	10 %
Operating accuracy (vertical)	± 15 cm	± 12.5 cm	± 10 cm
Operating accuracy (horizontal)	± 10 cm	± 10 cm	± 10 cm
Limiting wave height	< 1 m	< 1 m	< 1 m
Limiting current	3~5 knot	3~5 knot	3~5 knot

Table 5. Performance requirements of mechanical system for recovery of deposited HNS from the seabed

Item	Requirements
Accident area	Assumption: an accident in the port
Mechanical type	Grab or suction
Production rate	50~300 m ³ /hr
Maximum depth	50 m
Minimum depth	N/A (Depend on mechanical type)
Soil type	Soil, gravel, clay, loose rock
Harden/rock bottom	Partially available
Percent solids (by weight)	10 %
Operating accuracy (vertical)	± 10 cm ~ 15 cm
Operating accuracy (horizontal)	± 10 cm
Limiting wave height	< 1 m
Limiting current	3~5 knot

개발될 기계적 회수장치는 50~300 m³/hr의 생산률을 가지며, 고품률은 10% 이상, 수직 정확도는 ±10 cm~15 cm, 수평 정확도는 ±10 cm 이하이어야 한다. 대부분의 저질 형태에도 적용이 가능해야 하며, 암반에서도 일부 사용할 수 있어야

한다. 기계적 회수장치는 방제선 등에 탑재되어 사용하는 것이 타당하며, 이에 제한 파고 및 제한 유속은 선박이 운항 가능한 해상 환경인 1 m 미만, 3~5 knot가 적절하다. 회수 방식은 직접 혹은 펌프 회수 방식 중 성능요건에 적합한 방식으로 선정하는 것이 타당하다고 판단하였다. 가장 중요한 운용 수심은 국내의 항만 수심을 고려하여 최대 50 m까지에서도 사용할 수 있도록 설계되어야 한다. 최저 운용 수심은 회수 방식(직접 회수 방식, 펌프 회수 방식)에 따라 결정될 것이다. 이와 같은 성능요건을 만족시키기 위한 개념 설계 및 기본 설계가 이루어져야 하며, 이 성능 조건들을 만족시키는 기계적 회수장치를 개발할 예정이다.

5. 결론

현대의 해상에는 6,000여종의 화학물질들이 많은 양으로 운송되고 있다. 화학물질에는 해양을 오염시키거나 해양생물에 해로운 오염물질인 HNS도 포함하고 있다. 최근 상치호(SANCHI) 사고의 예와 같이 HNS의 유출은 해양환경에 심각한 손상을 유발할 가능성이 높으며 ITOPF는 이에 대해 경고하고 있다. 사고로 인해 선박에 선적된 HNS가 유출이 되면 다양한 물리적, 화학적 변화가 발생하며, 특히 해저로 침강하여 침적된 HNS는 해저면의 생태계에 커다란 악영향을 준다. 따라서 반드시 해저침적 HNS는 탐지하고 처리하여 회수해야 한다. 이러한 관점에서 본 연구는 해저에 침적된 HNS를 회수하기 위한 기계장치의 개발에 초점을 맞추고, 기계적 회수장치 개발에 최우선적으로 필요한 설계 변수들을 선정해야 하며, 이를 위해 필요한 기계적 회수장치가 반드시 가져야 할 성능요건을 분석하고자 하였다. 기존 준설장비들은 직접 회수 방식과 펌프 회수 방식으로 분류가 가능하며, 각 방식에 따른 다양한 장치들을 비교하여 분석하였다. 회수 방식과 장치에 대한 분석을 통해 기계적 회수장치에 대한 성능지표의 도출과 선정이 가능하다. 성능지표에 따라 기계적 회수장치의 특징을 비교하고 이를 활용하여 개발할 HNS 기계적 회수장치에 대한 성능요건들을 제안하였다. 항만 내에서의 사고로 가정하고 50 m의 깊이에서, 다양한 저질 환경에서, 50~300 m³/hr의 생산률을 가지며, 10%의 고품률을 가져야 한다는 성능요건을 제안하였다. 이러한 성능요건들은 현존하는 기술들을 기반으로 하는 설계 가능한, 구현 가능한 요건들이다. 이 성능요건들은 기계적 회수장치의 개념설계와 기본설계를 위한 주요 설계 변수들로 활용되며, 기계적 회수장치의 성능을 나타내는 지표로 활용될 것이다. 이러한 성능요건은 해저침적 HNS를 회수하기 위한 기계장치의 개발과 설계에 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

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

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Hwang, H. J., G. J. Son, and H. B. Jun(2020) Study on the Integrated Information Model for the Ship Lifecycle Data Exchange during Operation Phase, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 88-99.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Kim, T. W., Y. R. Kim, S. E. Jo, M. H. Son, M. J. Lee, and S. W. Oh(2015), 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.
- [8] Montgomery, R. L. and J. W. Leach(1984), *Dredging and Dredged Material Disposal*. American Society of Civil Engineers, p. 1115.
- [9] Palermo, M. R.(1991), Equipment choices for dredging contaminated sediments, *Remediation Journal*, Vol. 1, No. 4, pp. 473-492.
- [10] Palermo, M. R., P. R. Schroeder, T. J. Estes, and N. R. Francingues(2008), Technical guidelines for environmental dredging of contaminated sediments (No. ERDC/EL-TR-08-29), Engineer Research and Development Center Vicksburg MS Environmental Lab, pp. 58-128.
- [11] Park. M. O., H. S. Park, T. H. Kim, S. W. Oh, and M. J. Lee(2016), A Study on the Development of HNS Database for Response System of Marine Spill Accident in Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 22, No. 1, pp. 52-58.
- [12] Van Craenenbroeck, K., O. Duthoo, M. Vandecasteele, J. A. Eygenraam, and J. Van Oostveen(1998), Application of Modern Survey Techniques in Today's Dredging Practice. *Terra et Aqua*, pp. 3-9.
- [13] Zappi, P. A. and D. F. Hayes(1991), Innovative technologies for dredging contaminated sediments, Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Environmental Lab, pp. 12-18.

Received : 2020. 09. 01.

Revised : 2020. 10. 07.

Accepted : 2020. 10. 28.