

클로로폼 침적 유무에 따른 후방산란신호 측정 실험 및 분석

서힘찬* · 최지웅^{**,****†} · 김용명^{****} · 이문진^{****}

* 한양대학교 해양융합과학과 대학원생, ** 한양대학교 ERICA 해양융합공학과 교수

*** 한양대학교 ERICA 국방정보공학과 교수, **** 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구본부 연구원

Experiment and Analysis of Backscattering Signals According to Presence or Absence of Chloroform

Him Chan Seo^{*} · Jee Woong Choi^{**,****†} · Yongmyung Kim^{****} · Moonjin Lee^{****}

* Graduate Student, Department of Marine Sciences and Convergence Technology, Hanyang University, Ansan 15588, Korea

** Professor, Department of Marine Sciences and Convergence Engineering, Hanyang University-ERICA, Ansan 15588, Korea

*** Professor, Military information Engineering, Hanyang University-ERICA, Ansan 15588, Korea

**** Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34013, Korea

요 약 : 저층 침적 위험·유해물질(Hazardous and Noxious Substances)은 해저에 침적되는 위험·유해물질로 직접 및 광학 탐지 기법의 적용이 어렵기 때문에 수중에서 효과적인 음향 탐지 기법 적용이 요구된다. 본 연구에서는 저층 침적 위험·유해물질인 클로로폼(Chloroform)을 이용한 후방산란신호 측정 실험을 통해 저층 침적 위험·유해물질 음향 탐지 가능성을 확인하였다. 제작된 아크릴 수조 내에 지점도를 이용하여 웅덩이를 만든 후 Pan&Tilt를 이용하여 수평입사각을 90°에서 50°까지 0.5° 간격으로 변화시키며 클로로폼 유무에 따른 후방산란신호 측정이 수행되었다. 송수신기를 단상태로 주파수 200 kHz, 신호길이 25 μ s인 정현파 신호를 이용하여 송수신하였으며, 클로로폼 유무에 따른 후방산란신호를 측정하였다. 클로로폼이 침적된 경우 수평입사각 약 80°이하에서 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호 수신준위가 작아지는 것이 확인되었다. 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호 측정된 결과를 통해 저층 침적 위험·유해물질 음향 탐지 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 저층 침적 위험·유해물질, 후방산란, 반사, 음향 탐지, 클로로폼

Abstract : Because it is difficult to apply direct and optical detection techniques to sunken hazardous and noxious substances (HNS), effective acoustic detection techniques are required to detect sunken HNS in water. In this study, the possibility of acoustic detection of sunken HNS was investigated through backscattering signal measurement experiments using chloroform, a sunken HNS. After establishing a pool in an acrylic tank, backscattering signals were measured according to the presences or absence of chloroform by varying the grazing angle from 90° to 50° in 0.5° intervals using a pan&tilt system. A directional transducer transmitted and received sinusoidal signals with a frequency of 200 kHz and a pulse length of 25 μ s in a monostatic state. When chloroform was deposited, the received level of the backscattering signal at the interface between water and chloroform became low at a grazing angle of approximately 80° or smaller. Based on the backscattering signal results obtained at the interface between water and chloroform, the possibility of acoustic detection of sunken HNS was demonstrated.

Key Words : Sunken Hazardous and Noxious Substances, Backscattering, Reflection, Acoustic Detection, Chloroform

* First Author : shjcss@hanyang.ac.kr, 031-400-5818

† Corresponding Author : choijw@hanyang.ac.kr, 031-400-5531

1. 서론

위험·유해물질(Hazardous and Noxious Substances)이란 기름을 제외한 물질로 해양환경에 유입되면 인간의 건강과 해양생물자원 또는 생명체에 해로운 물질이며 쾌적성을 손상하거나 다른 합법적인 바다의 이용에 방해가 되는 물질로 정의된다. 화학물질의 위험성은 고유특성에 의해 좌우되며 다음의 5가지 특성 가연성, 폭발성, 독성, 부식성 및 반응성 중 한 가지 이상의 특성을 보인다. 최근 위험·유해물질의 해상 물동량이 매년 증가하는 추세이며, 그에 따라 위험·유해물질 사고 위험성 또한 증가되고 있다(ITOPF, 2014). 위험·유해물질은 소량의 유출로도 해양생태계와 인체에 치명적인 피해를 발생시킬 수 있으며, 위험·유해물질 유출 사고는 기름 유출 사고 대비 발생 빈도는 적으나 인명피해를 동반한 대형재난으로 발전할 가능성이 존재한다. 국제적으로는 위험·유해물질 유출 대응방법 마련을 위해 국제 해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2000년 3월 OPRC-HNS(Oil Pollution Preparedness, Response and Cooperation-HNS) 의정서를 채택하였으며 2007년 6월 국제적으로 발효되었다.

유럽표준분류기준(The Standard European Behavior Classification, SEBC)에 따르면 위험·유해물질은 거동 특성에 따라 가스, 가스/용해, 증발, 증발/용해, 부유/증발, 부유/증발/용해, 부유, 부유/용해, 용해/증발, 용해, 침강/용해, 침강으로 구분된다(ITOPF, 2014). 그 중 해저에 침적된 위험·유해물질은 직접 및 광학 탐지 기법의 적용이 어렵기 때문에 해양에서 효과적인 음향 탐지 기법 적용이 필요하다.

아직까지 해양에 침적된 위험·유해물질을 음향으로 탐지한 사례는 확인되지 않았다. 유사 사례로 저층 침적 위험·유해물질 대체물질인 피마자유를 고주파 능동소나를 이용해 음향 탐지 및 모의 실험을 한 사례(Han et al., 2018)와 유류사고 발생 시, 방제 및 사후관리 모니터링을 위해 음향탐사장비가 활용된 사례(API, 2016; Parthiot et al., 2004), 미국에서 출원된 특허에서 저층 침적 위험·유해물질인 사염화탄소의 유무에 따른 경계면 반향신호의 도달시간 차를 이용해 두께를

추정하는 사례가 확인되었다(Meyer et al., 1983). 따라서 본 연구에서는 저층 침적 위험·유해물질의 음향 탐지 가능성을 확인하기 위해 위험·유해물질 중 하나인 클로로폼(Chloroform)을 이용하여 후방산란신호 측정 실험이 수행되었다. 클로로폼 침적 유무에 따른 수평입사각별 후방산란신호 측정 실험 및 분석을 통해 저층 침적 위험·유해물질의 음향 탐지 가능성을 확인하였다.

2. 실험 재료 및 방법

클로로폼은 해양환경관리법상 유해액체물질로 지정된 물질에 대해 산정된 우선순위 물질 중 인체와 해양환경에 미치는 독성영향, 해상운송량 및 물리화학적 특성들이 고려된 위험·유해물질 관리우선순위 상위 10위권에 속하는 물질이다(Kim et al., 2015). 본 연구에서는 클로로폼을 사용하여 후방산란신호 실험이 수행되었다. 해저면 및 클로로폼의 후방산란신호 측정을 위해 아크릴 수조(140×50×50 cm, 350 L)에 지점토를 이용해 웅덩이가 존재하는 해저면이 구성되었으며, 웅덩이의 크기는 100×23×8 cm, 웅덩이의 부피는 약 16 L 구성되었다. 실험은 두 가지 경우로 나뉘어 수행되었다. 첫 번째는 클로로폼이 침적되기 전 물만 채워진 경우 Pan&Tilt (SS109, SIDUS) 장비를 이용하여 수평입사각을 90°에서 50°까지 0.5°간격으로 변화시키며 클로로폼이 침적되기 전 물과 해저면 경계면에서의 후방산란신호를 측정하였다(Fig. 1(a)). 두 번째는 클로로폼이 약 6 L 침적된 후 동일한 장비를 이용하여 수평입사각을 90°에서 50°까지 0.5°간격으로 변화시키며 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호를 측정하였다(Fig. 1(b)).

음향 센서는 7°의 빔폭을 갖는 200-7G(Simrad)가 단상태로 사용되었으며, Pan&Tilt 장비에 고정되어 각도가 제어되었다. 송신신호는 주파수 200 kHz, 신호길이 25 μ s인 정현파 신호를 사용하여 수평입사각마다 30 ping의 신호를 송수신하였으며, 총 30 ping의 수신 신호를 앙상블 평균하였다. Fig. 2의 파란색 실선은 물만 채워진 경우 결과이며 붉은색 실선은 클로로폼이 침적된 경우 결과이다. Fig. 2(a)은 수평입사각이

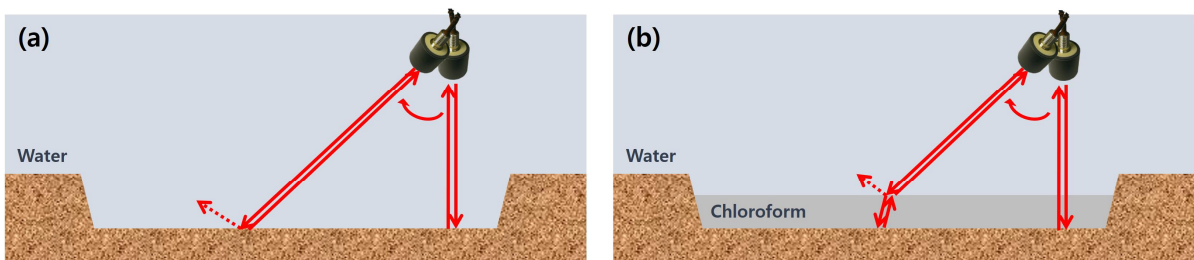


Fig. 1. Geometry of backscattering experiment for (a) water only and (b) sunken chloroform.

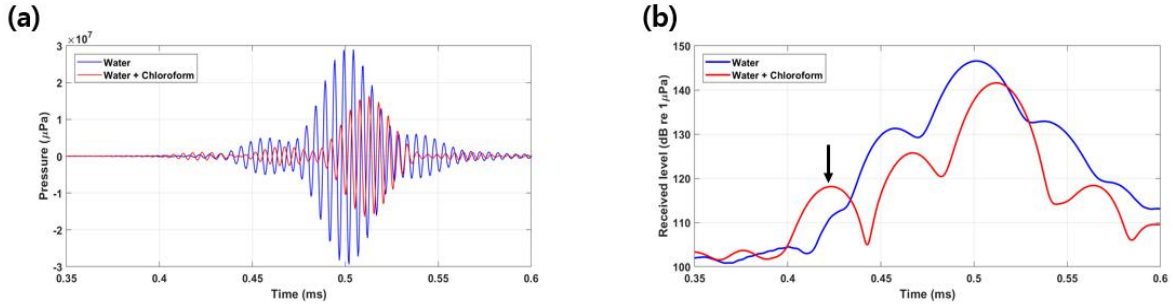


Fig. 2. Comparison of (a) Received signals and (b) Received levels.

90°인 경우 물만 채워진 경우와 클로로폼이 침적된 경우 총 30 ping의 수신 신호를 앙상블 평균하여 음압을 비교한 그림이며, Fig. 2(b)는 동일한 두 경우 총 30 ping의 수신 신호를 앙상블 평균하여 수신준위를 비교한 그림이다. Fig. 2(b)에서 물만 채워진 경우 물과 해저면 경계면 반사신호의 수신준위가 가장 강한 시간은 약 0.5 ms이며, 클로로폼이 침적된 경우 클로로폼과 해저면 경계면 반사신호 수신준위가 가장 강한 시간은 약 0.512 ms로 비교적 늦게 수신되었다. 각 수신준위 peak 전 후로 약 15 dB 작은 peak가 존재하는 것이 확인되며, 음향 센서의 특성인 부엽의 크기 또한 주엽에 비해 약 17 dB 작은 것으로 알려져 있다. 따라서 peak 전 후 작은 peak는 부엽에 의한 영향인 것으로 추정된다. 클로로폼의 음속은 20°C 인 경우 약 987.5 m/s로 동일한 온도에서의 물의 음속 약 1482.3 m/s와 비교했을 때 느리다고 알려져 있다(Kannappan et al., 2002; Grosso and Mader, 1972). 클로로폼과 물의 음속차 약 494.8 m/s와 음파 도달시간 차이 약 0.012 ms를 이용하여 클로로폼층의 두께를 계산하면 약 6 cm로 추정된다. 추정된 클로로폼 두께와 물의 음속을 이용하여 물과 클로로폼 경계면에서의 반사신호의 도달시간을 추정하였을 때 물과 해저면 경계면에서의 반사신호보다 약 0.08 ms 빠르게 수신되는 것으로 계산된다. 따라서 Fig. 2(b)의 붉은색 실선에 검정색 화살표로 표시된 약 0.42 ms에 수신된 신호가 물과 클로로폼 경계면에서의 반사신호인 것을 확인할 수 있다.

3. 실험 결과

Fig. 3은 물만 채워진 경우 물과 해저면 경계면에서의 수평입사각에 따른 후방산란신호 측정 결과이다. 수평입사각이 90°인 경우부터 5°간격으로 수평입사각이 70°인 경우 물과 해저면 경계면에서의 후방산란신호 수신준위를 나타내었다. 후방산란신호 측정 결과 수평입사각이 작아지면서 음파의 이동거리가 증가함에 따라 물과 해저면 경계면에서의 후방산란신호의 수신준위가 약 146.5 dB에서 112.4 dB까지 약

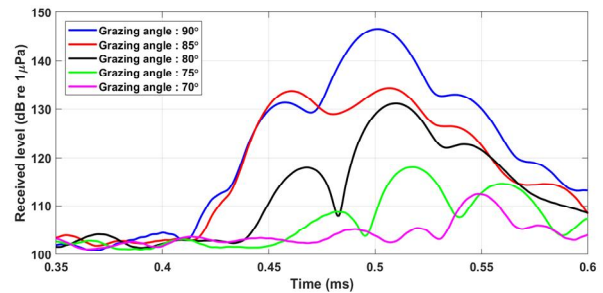


Fig. 3. Received levels of backscattering signal when acrylic tank filled only water by grazing angle at 90°, 85°, 80°, 75° and 70°.

34.1 dB 감소하였으며, 음파의 도달시간 또한 약 0.5 ms에서 약 0.55 ms까지 약 0.05 ms 늦어진 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 해저면 후방산란강도는 입도에 따른 변화 양상의 차이는 있지만 수평입사각이 감소함에 따라 후방산란강도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(APL-UW, 1994). 실험이 수행된 아크릴 수조는 근접장(near-field) 환경이며 클로로폼의 후방산란신호 측정 결과이기 때문에 해저면 후방산란강도와 직접 비교는 어렵다. 하지만 수평입사각이 감소함에 따라 해저면 후방산란강도가 감소하는 결과와 본 실험결과인 수평입사각이 감소함에 따라 측정된 클로로폼 후방산란신호의 수신준위가 감소하는 결과가 유사한 결과를 보였다. Fig. 4는 수평입사각을 90°에서 50°까지 0.5° 간격으로 변화시키며 측정된 후방산란신호의 수신준위를 시간과 수평입사각에 대해 표현된 그림이다. 해저면 평탄화가 완벽하게 이뤄지지 않아 물과 해저면 경계면에서의 후방산란신호가 불분명한 경우가 존재하였지만 수평입사각이 감소함에 따라 물과 해저면 경계면에서의 후방산란신호의 수신준위가 감소하는 경향을 보인다. 또한 수평입사각이 감소하면서 음파의 전달거리가 증가하므로 후방산란신호의 수신시간 약 0.5 ms에서 약 0.75 ms까지 늦어지는 것을 확인할 수 있다.

클로로폼 침적 유무에 따른 후방산란신호 측정 실험 및 분석

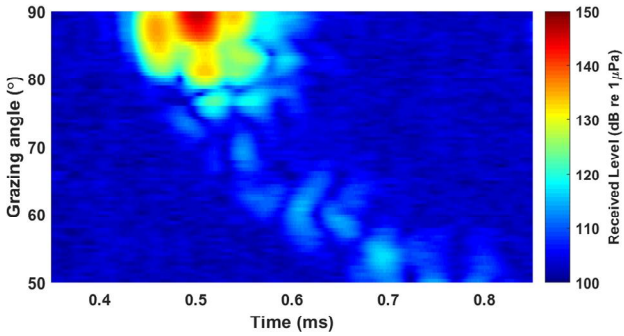


Fig. 4. Received levels of backscattering signal when acrylic tank is filled only water by grazing angle at 90° to 50°.

Fig. 5는 클로로폼이 침적된 경우 후방산란신호 측정 실험 결과이다. 수평입사각 90°부터 5°간격으로 70°까지 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호 수신준위를 표현하였다. 파란색 실선과 붉은색 실선은 각각 수평입사각 90°와 85°인 경우 후방산란신호 수신준위를 표현한 것이다. 파란색 실선과 붉은색 실선 각각 약 0.42 ms, 0.43 ms에 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호가 수신되었으며, 그 뒤로 각각 0.52 ms, 0.53 ms에 클로로폼과 해저면 경계면에서의 후방산란신호가 수신되었다. 수평입사각 80°이하에서는 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호가 수평입사각이 감소함에 따라 약 0.43~0.5 ms 사이에 수신될 것으로 추정되나 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호가 시스템 노이즈보다 작아 수신되지 않은 것으로 추정되며, 클로로폼과 해저면 경계면에서의 후방산란신호만 수신되었다.

APL-UW 후방산란강도 모델에 따르면 후방산란강도는 식 (1)과 같이 산란경계면의 거칠기와 산란 경계면 하부의 체적 산란에 의해 결정된다고 알려져 있다(APL-UW, 1994).

$$S_b(\theta) = 10 \log_{10} [\sigma_r(\theta) + \sigma_v(\theta)] \quad (1)$$

여기서 $S_b(\theta)$ = 산란단면적에서의 후방산란강도(decibel equivalent of the scattering cross section), $\sigma_r(\theta)$ = 산란 경계면 거칠기에 의한 단위면적당 단위입체각당 무차원 후방산란 단면적(dimensionless backscattering cross section per unit solid angle per unit area due to interface roughness), $\sigma_v(\theta)$ = 산란 경계면 하부의 체적 산란에 의한 단위면적당 단위입체각당 무차원 후방산란단면적(dimensionless backscattering cross section per unit solid angle per unit area due to volume scattering from below the interface).

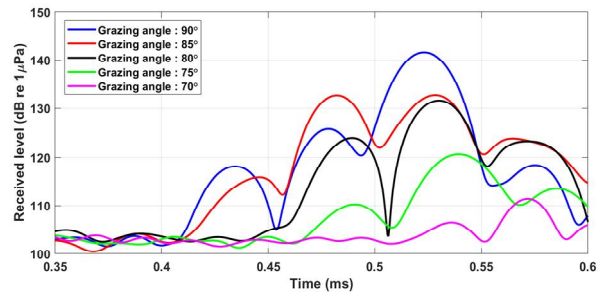


Fig. 5. Received levels of backscattering signal when chloroform is deposited by grazing angle at 90°, 85°, 80°, 75° and 70°.

물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란강도 또한 산란 경계면 거칠기와 산란 경계면 하부층의 체적 산란에 영향을 받을 것으로 예상된다. 액체인 물과 클로로폼의 산란 경계면은 매끄러울 것으로 예상되며, 경계면 하부의 체적 산란 또한 적을 것으로 예상됨에 따라 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란강도가 작을 것으로 예상된다. 본 연구에서 수행된 클로로폼 후방산란신호 측정 실험 결과에서 수평입사각이 감소함에 따라 후방산란신호 수신준위가 작아지는 영향이 물과 클로로폼 경계면의 거칠기와 산란 경계면의 하부층의 체적산란의 영향인 것으로 추정된다. Fig. 6은 수평입사각을 90°에서 0.5°간격으로 50°까지 변화시키며 측정된 후방산란신호의 수신준위를 시간과 수평입사각에 따라 표현된 그림이다. 수평입사각 90°부터 82°까지 약 0.42 ms에서 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호가 수신되는 것이 확인되었으며 수평입사각 80° 이하에서는 물과 클로로폼 경계면의 후방산란신호는 시스템 노이즈보다 신호의 크기가 작아 보이지 않는 것으로 추정되며, 클로로폼과 해저면 경계면에서의 후방산란 신호만 수신되었다. 물만 채워진 경우와 마찬가지로 수평입사각이 작아질수록 음파의 전달거리가 길어지기 때문에 클로로폼과 해저면 경계면에서의 후방산란신호의 수신준위가 작아지는 경향이 있으며, 후방산란신호 도달시간이 늦어지는 것이 확인된다.

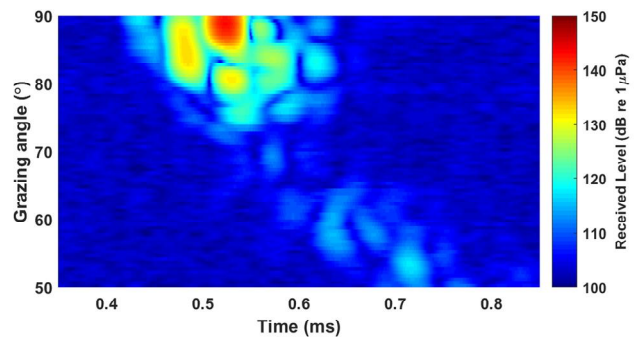


Fig. 6. Received levels of backscattering signal when chloroform is deposited by grazing angle at 90° to 50°.

4. 결론

본 연구에서는 저층 침적 위험·유해물질 유출사고 발생 시 수중에서 효과적인 음향 탐지 가능성을 확인하기 위해 고주파 능동소나를 이용하여 저층 침적 위험·유해물질 중 하나인 클로로폼 후방산란신호 측정 실험이 수행되었다. 클로로폼 침적 유무에 따른 후방산란신호 차이를 확인 및 검증 등을 통해 저층 침적 위험·유해물질 음향 탐지 가능성을 확인하였다. 물만 채워진 경우와 클로로폼이 침적된 경우 Pan&Tilt 장비를 이용해 수평입사각을 90°에서 50°까지 0.5° 간격으로 변화시키며 후방산란신호를 측정하였다. 수평입사각 90°인 경우 클로로폼이 침적되었을 때 물과 클로로폼 경계면에서의 반사신호가 수신되었으며, 수평입사각이 80° 이하로 작아지게 되면 물과 클로로폼 경계면에서의 후방산란신호가 시스템 노이즈보다 작아지게 된다. 또한 수평입사각이 작아짐에 따라 음파의 전달거리가 길어져 물과 해저면 경계면, 클로로폼과 해저면 경계면에서의 후방산란신호 수신준위가 작아지는 경향을 보였다. 상용화된 음향장비인 사이드스캔소나의 방사각을 고려하였을 때 클로로폼의 유무에 따른 후방산란신호 차이를 활용하여 음향 탐지 가능성을 확인하였다.

위험·유해물질에 대한 화학적 특성 및 해저면 음향 특성에 대한 선행연구는 비교적 많이 수행되었다. 하지만 위험·유해물질의 음향 특성에 대한 연구는 선행 연구가 부족하고 자료 획득이 제한적이다.

추후 다양한 저층 침적 위험·유해물질 음향 특성에 대한 연구가 수행되어야 하며, 실험실에서 측정된 결과를 기반으로 실해역에서 상용화된 음향장비를 이용한 저층 침적 위험·유해물질 음향 탐지 실험이 수행 및 음향 탐지 기법에 대한 연구 개발이 필요하다.

사 사

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20150340, 위험·유해물질(HNS)사고 관리기술개발).

References

[1] API(2016), Sunken Oil Detection and Recovery, Technical Report 1154-1.
 [2] APL-UW(1994), APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook, Technical Report 9407.

[3] Grosso, V. A. D. and C. W. Mader(1972), Speed of Sound in Pure Water, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 52, pp. 1442-1446.
 [4] Han, D. -G., Seo, H. C., Choi, J. W. and M. 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.
 [5] ITOPF(2014), Response to Marine Chemical Incidents, Technical Information Paper.
 [6] Kannappan, V., R. J. Santhi, and E. J. P. Malar(2002), Ultrasonic Studies on Charge Transfer Complexes of Cyclo Alcanones with Chloroform in n-Hexane Solutions, Physics and Chemistry of Liquids, Vol. 40, No. 4, pp. 507-525.
 [7] Kim, Y. R., T. W. Kim, M. H. Son, S. Oh, and M. 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.
 [8] Meyer, R. A., L. F. Marx, and J. E. Brugger(1983), Method and Apparatus for Detection of Insoluble Sinking Pollutants, United States Patent, 4,410,966.
 [9] Parthiot, F., E. de Nanteuil, F. Merlin, B. Zerr, Y. Guedes, X. Lurton, J. -M. Augustin, P. Cervenka, J. Marchal, J. P. Sessarego, and R. K. Hansen(2004), Sonar Detection and Monitoring of Sunken Heavy Fuel Oil on the Seafloor, Interspill 2004, Trondheim, Norway, No. 465.

Received : 2022. 10. 14.

Revised : 2022. 12. 14. (1st)

: 2022. 12. 27. (2nd)

Accepted : 2022. 12. 28.