

고주파 능동소나를 이용한 저층 침적 위험유해물질 대체물질 음향 탐지 실험 및 모의

한동균* · 서힘찬** · 최지웅***† · 이문진***

*, ** 한양대학교 해양융합공학과, *** 선박해양플랜트연구소 해양안전환경연구부

Experiment and Simulation of Acoustic Detection for the Substitute for Sunken Hazardous and Noxious Substances Using the High Frequency Active Sonar

Dong-Gyun Han* · Him Chan Seo** · Jee Woong Choi***† · Moonjin Lee***

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

*** Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 32, Yuseong-daero, 1312 Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

요약 : 위험유해물질은 해양에 유입되었을 때 인간의 건강 및 해양생태계에 막대한 영향을 미치는 물질로 정의된다. 최근 선박을 이용한 물동량이 증가되면서 위험유해물질 누출사고의 발생비율도 증가되는 추세이다. 이에 따라 위험유해물질 누출사고 대응기술개발의 관점에서 해저에 침적되는 물질들의 방제 및 모니터링 연구가 수행되어야 한다. 본 논문에서는 저층 침적 위험유해물질의 음향 탐지 가능성을 확인하기 위해 저층 침적 위험유해물질 대체물질의 반사손실 측정 실험이 수행되었다. 위험유해물질로 구분되는 클로로폼의 위험성을 고려하여 클로로폼과 임피던스가 유사한 피마자유가 대체물질로 사용되었으며, 200 kHz 고주파 신호를 송신하여 물과 피마자유 경계면에서 발생하는 반사손실을 측정하였다. 그리고 물과 피마자유의 임피던스를 측정 및 조사하여 반사계수를 모의하고 모의된 반사손실이 측정값과 유사함을 확인하였다. 또한 저층 침적 위험유해물질로 분류되는 클로로폼의 반사손실을 모의하고 모의 결과가 다양한 해저면 구성성분의 반사손실 모의결과와 차이를 나타냄으로써 해저면과 구분되는 저층 침적 위험유해물질의 음향 탐지 가능성을 예측하였다.

핵심용어 : 피마자유, 음향 탐지, 저층 침적 위험유해물질, 반사손실, 클로로폼

Abstract : Hazardous and Noxious Substances (HNS) are defined as substances that are likely to create a significant impact on human health and marine ecosystem when they are released into the marine environment. Recently, as the volume of HNS transported by ships increases, the rate of leakage accidents also increases. Therefore, research should be conducted to control and monitor sunken materials from the viewpoint of technology development for hazardous material leakage accident response. In this paper, acoustic detection experiments were carried out using HNS substitute materials in order to confirm the possibility of acoustic detection of sunken HNS on the sediment. The castor oil, which has a similar acoustic impedance with chloroform, is used as a substitute. 200 kHz high frequency signals were used to discriminate the reflected signals and measure reflection loss from the interface between water and castor oil. The reflection loss measured is in good agreement with the modeling results, showing a possibility of acoustic detection for sunken HNS.

Key Words : Castor oil, Acoustic detection, Sunken HNS, Reflection loss, Chloroform

* First Author : dghandg@hanyang.ac.kr, 031-400-4233

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

※본 논문은 2017년도 해양환경안전학회 추계학술발표회에서 발표되었던 내용을 일부 포함하고 있음(“저층 침적 위험유해물질 대체물질 음향 탐지 실험”, 2017년11월 23일, 한국해양수산연수원, p. 158).

1. 서론

최근 위험유해물질(Hazardous and Noxious Substances, HNS)의 해상 운송량이 지속적으로 증가되면서 선박사고로 인한 유출사고 사례가 증가하고 있다. 위험유해물질은 소량의 유출로도 해양생태계와 인체에 치명적인 피해를 발생시킬 가능성이 있기 때문에 운송관리 및 유출 시 대응방안에 대한 중요성이 부각되고 있다. 국제적으로 위험유해물질 유출에 대한 대응방법을 마련하기 위해 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2000년 3월 OPRC(Oil Pollution Preparedness, Response and Cooperation)-HNS 의정서를 채택하였으며, 이 의정서는 2007년 6월 국제적으로 발효되었다(Lee and Oh, 2014; Park et al., 2016). 더불어 위험유해물질에 의한 해양오염을 최소화하기 위해 사고대응체계 구축에 대한 연구도 전 세계적으로 활발히 수행되고 있다. 유럽표준분류기준(The Standard European Behaviour Classification, SEBC)에 따르면 화학물질은 물리, 화학적 거동에 따라 가스, 가스/용해, 증발, 증발/용해, 부유/증발, 부유/증발/용해, 부유, 부유/용해, 용해/증발, 용해, 침강/용해, 침강으로 구분된다(ITOPF, 2014). 이처럼 다양한 물리적 성질을 갖는 위험유해물질이 해양에 유출되었을 때 효과적인 대응전략을 수립하기 위해서는 거동특성에 따른 분류가 중요하고 분류된 특성에 적합한 대처방법이 강구되어야 한다. 특히 침강형 물질들은 유출되어 해저면 상부에 침적되므로 인공위성을 이용한 광학 관측기법이나 레이더를 활용한 원격탐사기법의 적용이 어렵기 때문에 사고규모 예측 및 효과적인 사고대응에 많은 어려움이 존재한다. 그러므로 해저에 침적된 위험유해물질을 효과적으로 탐지하기 위해서는 수중음향을 이용한 원격탐사기법의 적용이 요구된다. 표적 음향 탐지 연구는 주로 군사적인

목적으로 잠수함, 기뢰 등의 매질이 단단한 고체에 집중되어 수행되었으며, 최근에는 내부파(internal wave), 냉수괴, 소용돌이(eddy) 등과 같이 해수의 물성 변화가 음파전달양상 및 음향 탐지 성능에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되고 있다. 방제 및 환경모니터링 목적의 음향 탐지사례는 대부분 유류사고 발생 시, 방제 및 사후관리 모니터링을 위해 음향탐사장비가 활용된 사례들(API, 2016; Madsen, 2007; Parthiot et al., 2004)뿐이다. OPRC의정서 정의에 따르면 유류는 위험유해물질과 구분되며 국내 법률상으로도 관리, 대응방안에 차이점을 갖는다. 또한 위험유해물질과 물성의 차이를 보이며 음향학적 특성도 상이할 것으로 예측된다. 반면 저층 침적 위험유해물질의 실해역 탐지사례는 확인된 바 없었으며, 1983년 미국에서 출원된 특허(Meyer et al., 1983)는 저층 침적 위험유해물질의 두께 추정기법에 대한 내용으로 출원되었고 사업화탄소의 유무에 따른 경계면 반향신호의 도달시간차를 이용하여 두께를 추정하는 알고리즘을 제시하였다.

본 논문에서는 위험유해물질이 사용되었을 때 발생 가능한 관리의 제한사항들과 처리의 위험성 때문에 위험유해물질과 유사한 임피던스를 갖는 대체물질을 이용하여 반사손실 측정실험이 수행되었다. 반사손실은 수평입사각이 90°인 경우에서 측정되었으며 물과 대체물질로 사용된 피마자유의 음속과 밀도값으로 계산된 모의결과와 비교, 검증되었다. 대체물질로 사용된 피마자유는 대표적인 저층 침적 위험유해물질로 구분되는 클로로폼(Chloroform)과 유사한 임피던스를 갖는 것으로 알려져 있다. 두 물질의 임피던스는 약 $1.45 \sim 1.46 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m/s}$ 이며, 클로로폼의 음속과 밀도는 30°C에서 약 958 m/s, 1.52 g/cm³, 피마자유의 음속과 밀도는 20°C에서 약 1540 m/s, 0.95 g/cm³이다(Kinsler et al., 2000; Kannappan et al., 2002). 음향 탐지 실험은 물만 채워진 경우와 일부 물을

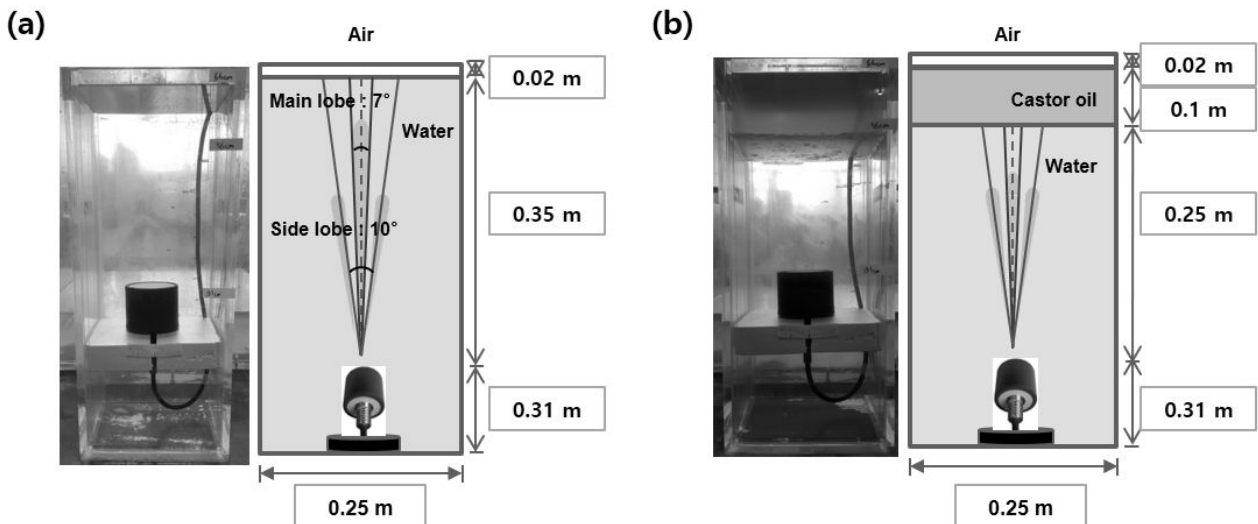


Fig. 1. Geometry of water-tank experiment for (a) water only and (b) 0.1 m thickness of castor oil on top.

피마자유로 교체한 경우로 구분하여 수행되었으며 경계면에서 반사된 신호를 측정하고 분석하였다. 또한 문헌조사에서 수집된 클로로폼의 음속과 밀도 정보를 이용하여 해저에 위험유해물질이 침적된 경우의 반사손실을 모의하고 해저면 반사손실 모의결과와 비교를 통해 음향 탐지 가능성을 확인하였다.

2. 피마자유 음향 탐지 수조 실험

피마자유 음향 탐지 실험은 아크릴로 가공된 소형수조 (0.25 × 0.25 × 0.68 m)에서 두 가지 경우에 대해 수행되었다. 첫 번째는 음향센서를 기준으로 담수만 0.35 m 채워진 소형수조에서 물과 공기의 경계면에서 반사된 기준신호(reference signals)를 측정하였으며(Fig. 1(a)), 두 번째는 첫 번째 실험환경에서 0.1 m의 물을 피마자유로 교체 후 물과 피마자유 경계면 반사 신호와 피마자유와 공기 경계면에서 반사된 신호를 측정하였다(Fig. 1(b)). 클로로폼의 밀도는 물보다 커 침강하는 반면 피마자유의 밀도는 물보다 작으므로 물위에 층을 이루며 부유된다. 그러므로 센서를 바닥면에 위치시킨 후 표층을 지향하여 물과 피마자유의 경계면 신호를 측정하였다. 음향 센서는 7°의 빔폭(3-dB down point)을 갖는 200-7G(Simrad)가 단상태로 사용되었으며 건축용 단열재(벽산, 아이소핑크)를 완충체로 사용하여 센서를 고정하였다. 송신신호는 주파수 200 kHz, 25 μs의 신호길이를 갖는 정현파를 사용하였다. 음향센서는 송신신호가 경계면에 수직으로 입사되도록 설치되었으며 빔폭이 7°이므로 첫 번째 실험환경을 기준으로 물과 공기의 경계면에 약 4 cm의 지름에 해당하는 면적으로 입사된다. 송신 빔패턴을 고려했을 때 주엽과 첫 번째 부엽의 반사 신호의 도달시간은 약 30 μs의 차이를 보이지만 에너지의 상대적인 차이(약 17 dB)를 고려했을 때 부엽의 반향신호는 무시 가능할 것으로 판단된다.

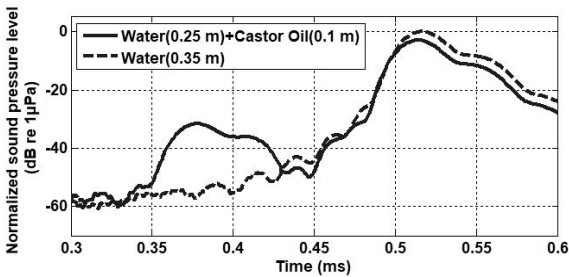


Fig. 2. Comparison of normalized received levels.

Fig. 2에서 점선은 물만 0.35 m 채워진 경우의 수신준위이며 실선은 물 0.1 m를 피마자유로 교체한 경우의 수신준위를

나타낸다. 총 두께는 0.35 m로 동일하지만 피마자유층 유무에 따른 수신준위의 변화를 정량적으로 비교하기 위해 두 경우 모두 물만 0.35 m 채워진 경우에 물과 공기 경계면 반사 신호의 수신준위로 정규화 하여 표현되었다. 물만 채워진 경우, 물과 공기 경계면에서 반사된 신호는 약 0.47 ms 이후에 수신되었다. 또한 물 0.1 m를 피마자유와 교체하여 수행된 실험의 경우, 약 0.35 ms 이후부터 물과 피마자유 경계면 반사 신호가 물과 공기의 경계면에서 반사된 신호보다 약 31 dB 작은 크기로 수신되는 것을 확인할 수 있다. 실험은 2017년 8월 한양대학교 수조실험실에서 이를 동안 총 6회 반복 수행되었으며 각 회마다 30 ping의 신호를 송수신하였다. 물은 25.2~25.4 °C, 피마자유는 24.9~25.6 °C의 온도변화가 발생되었으며 온도변화에 따라 각각 2회씩 측정되었다(Table 1). 물과 피마자유의 음속은 식(1), (2)와 같이 경험식으로 예측가능하며 여기서 C_w , C_o 는 물과 피마자유의 음속, T_w , T_o 는 물과 피마자유의 온도를 의미한다(Grosso and Mader, 1972; Timme, 1972). Fig. 3은 식(1), (2)로부터 계산된 온도변화에 따른 음속을 나타낸다.

$$C_w = 1402.388 + 5.03711T_w - 0.0581T_w^2 + 0.0003342T_w^3 \quad (1)$$

$$C_o = 1570(1 - 0.00215T_o + 0.000004T_o^2 + 0.0000025 \times 0.101T_o + 0.00222 \times 0.101 - 0.000003 \times 0.101^2) \quad (2)$$

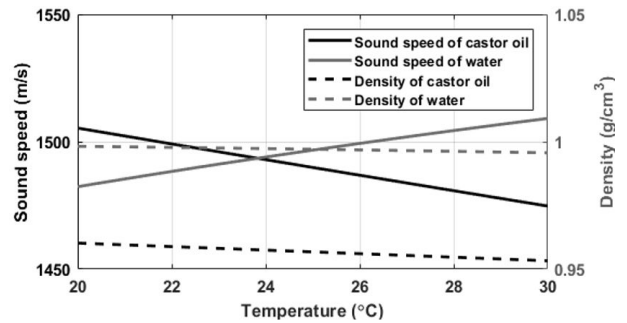


Fig. 3. Variations of empirical sound speed and density of water and castor oil as a function of temperature.

Fig. 3의 검정, 회색실선은 온도변화에 따른 피마자유와 담수의 음속변화를 나타내며 검정, 회색점선은 각각의 밀도변화를 나타낸다. 일반적으로 물은 온도가 높아짐에 따라 음속이 빨라지는 반면 피마자유의 음속은 온도가 높아지면서 감소하고 두 매질의 밀도는 온도가 높아짐에 따라 감소한다. 온도변화에 따라 피마자유와 물의 밀도가 동일한 경향을 나타내며 음속은 반대양상을 보이는 이유는 식(3)으로부터 해석된다(Potter et al., 2016).

Table 1. Sound speed variations of water and castor oil due to the temperature change during measurements (unit: m/s)

		Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
T_w (°C)		25.2	25.2	25.3	25.3	25.4	25.4
Water	Measured sound speed	1510.8 ±5.7	1510.8 ±5.7	1488.3 ±5.6	1488.3 ±5.6	1492.7 ±5.6	1492.7 ±5.6
	Predicted sound speed	1497.2	1497.2	1497.5	1497.5	1497.8	1497.8
Differences		13.6	13.6	9.2	9.2	5.1	5.1
T_o (°C)		24.9	24.9	25.5	25.5	25.6	25.6
Castor oil	Measured sound speed	1426.4 ±12.9	1416.3 ±12.7	1468.3 ±13.6	1468.3 ±13.6	1472.6 ±13.7	1472.6 ±13.7
	Predicted sound speed	1490.2	1490.2	1488.4	1488.4	1488.1	1488.1
Differences		63.8	73.9	20.1	20.1	15.5	15.5

Table 2. Density variations of water and castor oil due to the temperature change during measurements (unit: g/cm³)

		T_w (°C)	25.2	25.3	25.4
Water	Measured density		0.9959±0.0018	0.9938±0.0015	0.9941±0.0029
	Predicted density		0.9970	0.9970	0.9969
		T_o (°C)	24.9	25.5	25.6
Castor oil	Measured density		0.9557±0.0026	0.9580±0.0051	0.9590±0.0026
	Predicted density		0.9568	0.9564	0.9563

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (3)$$

식(3)은 이론적인 매질의 음속을 표현하며, 매질의 음속은 체적탄성률(K)의 제곱근에 비례하고, 밀도(ρ)의 제곱근에 반비례한다. 일반적인 액체는 온도가 증가함에 따라 밀도가 감소하고 체적탄성률도 감소한다. 이때 일정한 체적탄성률을 가정하면 밀도 감소에 따라 음속은 증가하게 된다. 하지만 온도변화에 따라 조사된 체적탄성률의 감소량은 밀도감소량에 비해 매우 크기 때문에 음속은 감소하게 된다. 또한 물의 경우, 예외적으로 50 °C 이하에서 온도가 증가함에 따라 체적탄성률에 영향을 미치는 분자운동이 활발해져 체적탄성률이 증가하게 된다. 50 °C 이상에서는 분자간 거리가 멀어지면서 활발한 분자운동에도 불구하고 체적탄성률이 감소하게 된다. 그러므로 피마자유는 온도가 증가함에 따라 음속이 감소하지만 물의 음속은 증가한다. 경계면에서 반사된 신호의 도달시간을 이용하여 물과 피마자유의 음속을 계산하고 경험식 음속과 비교한 결과는 Table 1과 같다. 물과 피마자유 경계면에서 반사된 신호의 도달시간과 왕복거리를 이용하여 물의 음속을 먼저 계산하고 물과 피마자유 공기의 경계면 반사 신호와 피마자유와 공기의 경계면에서 반사된 신호의 도달시간차, 피마자유의 두께를 이용하여 피마자유의 음속을 계산하였다. 반사 신호의 도달시간 기준점은 배경소음보다 높은 준위의 신호가 수신되는 시점으로 판단하여 반사

신호의 최대 피크 점으로부터 여덟 번째 빠른 피크 점에 해당하는 시간을 기준으로 설정하였다. Table 1에서 측정된 음속의 오차범위는 적용된 피크 점 기준 $\pm \frac{1}{4}$ 주기(1.25 μ s)로 계산되었으며 상대적으로 두꺼운 물에 비해 얇은 두께의 피마자유에서 계산된 음속이 큰 오차범위를 갖는다.

Fig. 4(a), (b)는 물 0.25 m와 피마자유 0.1 m가 채워진 경우의 반사 신호를 나타내며, 약 0.334, 0.468 ms의 점선은 경험식의 음속을 이용하여 계산된 각각의 경계면 반사 신호 도달시간을 의미한다. 원형심볼(○)은 경계면 반사 신호의 최대 피크 점을 기준으로 여덟 번째 이전 피크 점을 나타내며 경험식을 이용하여 계산된 도달시간과 유사함을 확인하였다. Fig. 4(c)는 0.25 m의 물과 0.1 m의 피마자유가 채워진 경우와 물만 0.35 m 채워진 경우의 수신신호를 물만 0.35 m 채워진 경우의 반사 신호를 기준으로 정규화 된 결과를 나타낸다. 경계면 반사 신호가 여덟 번째 피크값 이후부터 배경소음보다 높은 준위로 수신됨을 확인할 수 있다. 측정된 음속과 경험식 음속의 오차는 Set 1, 2가 Set 3~6에 비해 크게 발생되었는데, 이는 Set 1, 2가 실험이 시작되고 비교적 빠른 시간에 수행되었기 때문에 상대적으로 급격한 온도변화가 발생하는 불안정한 환경에서 측정된 반면 Set 3~6은 20시간 이상의 시간차를 두고 측정됨에 따라 발생한 차이로 판단된다. 또한 실험종료 후 마이크로피펫과 저울을 이용하여 피마자유와 물의 밀도를 측정된 결과는 Table 2와 같다. 해당

온도에서 각각 10회 측정된 평균값을 나타낸다. 3장에서 모의된 반사계수는 실측된 음속과 밀도, 경험식으로부터 계산된 음속과 밀도를 사용하여 두 경우로 수행되었다.

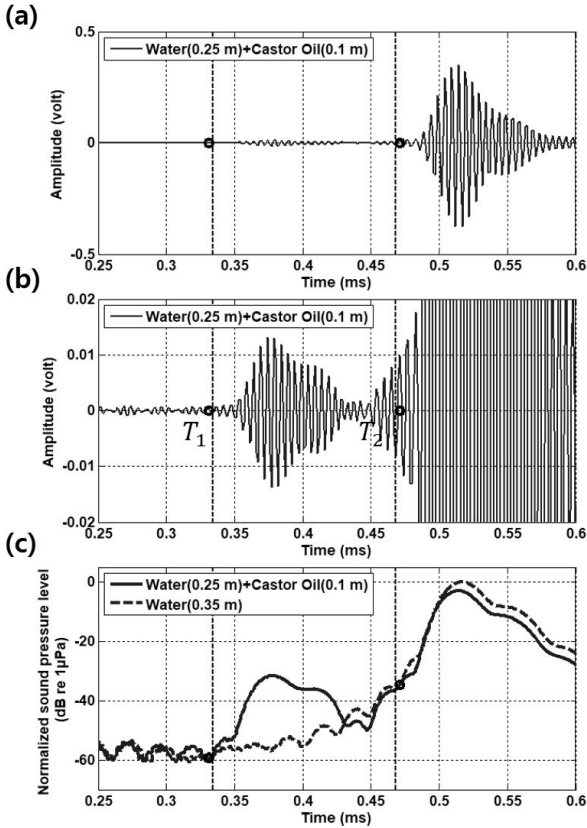


Fig. 4. (a) Received signals, (b) the same with an expanded vertical scale. (c) normalized received levels.

3. 물과 피마자유 경계면 반사손실

3.1 물과 피마자유 경계면 반사손실 측정

물과 피마자유 경계면에서 발생하는 반사손실을 계산하기 위한 소나방정식은 식(4)와 같이 전개할 수 있다. SL (Source Level)은 음원 준위, TL (Transmission Loss)는 음원으로부터 물과 피마자유 경계면까지 거리에 따른 전달손실, SPL (Sound Pressure Level)은 수신음압준위, RL (Reflection Loss)는 물과 피마자유 경계면에서 발생하는 반사손실을 의미한다.

$$RL = SL - 2TL - SPL \quad (4)$$

실험이 수행된 소형수조는 근접장(near-field)환경에 해당하며 근접장에서는 거리에 따른 전달손실의 변동성 및 음원준위 측정의 부정확성이 크다. 이를 개선하기 위해 $SL - 2TL$

값을 물과 피마자유 경계면까지의 거리와 동일한 0.25 m에 물과 공기 경계면 반사신호의 수신준위로 대체하여 계산하였다. 물과 공기의 임피던스차이가 매우 크기 때문에 수면에서 반사계수(R)는 -1로 전반사를 가정할 수 있으므로 $SL - 2TL$ 값을 물만 0.25 m 채워진 경우에 물과 공기의 경계면에서 반사된 신호의 수신음압준위로 대체할 수 있다. Fig. 5는 물만 0.25 m 채워진 경우(점선)와 물 0.25 m, 피마자유 0.1 m가 함께 채워진 경우(실선, Set 1)의 수신준위를 물만 0.25 m 채워진 경우에 물과 공기의 경계면 반사 신호의 수신음압준위로 정규화하여 표현되었다. 약 0.37 ms에 점선으로 표현된 신호가 물만 채워진 경우의 물과 공기 경계면 반사 신호이므로 해당신호의 준위가 $SL - 2TL$ 를 대체하는 값으로 사용되었다. Set 1의 경우에는 물과 피마자유 경계면에서 반사된 신호의 수신음압준위가 물과 공기의 경계면에서 반사된 신호의 수신준위보다 약 33.3 dB 낮게 수신되었으며 이 값은 반사손실을 의미한다. 6회 측정된 반사손실값의 평균은 33.9 dB이며 0.6 dB의 표준편차를 보였다.

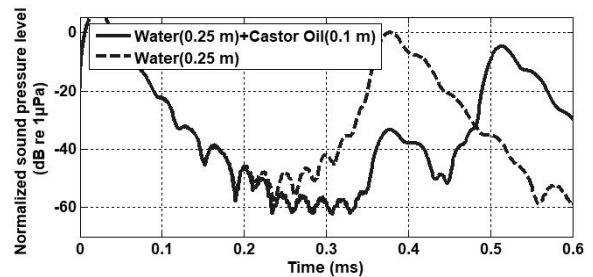


Fig. 5. Normalized received levels between water (0.25 m) only and castor oil on top (Set 1).

3.2 물과 피마자유 경계면 반사손실 측정값과 모의결과 비교

서로 다른 두 매질의 경계면에 음파가 입사되었을 때 반사, 굴절, 산란 등의 음파간섭 현상들이 발생된다. 이러한 현상들은 두 매질의 음속과 밀도 비율에 따라 변화된다. 두 매질의 경계면에서 발생하는 반사손실은 매질의 음속과 밀도, 수평입사각에 따라 변화하며 두 매질이 유체인 경우, 레일리 반사계수를 이용하여 계산될 수 있다. 물에서 피마자유로 입사될 때의 반사계수를 R 라고 정의했을 때 반사계수는 피마자유의 임피던스($Z_o = \rho_o c_o$), 물의 임피던스($Z_w = \rho_w c_w$), 수평입사각(θ_1)과 반사각(θ_2)의 관계식($R = \frac{Z_o \sin \theta_2 - Z_w \sin \theta_1}{Z_o \sin \theta_2 + Z_w \sin \theta_1}$)으로 정리될 수 있다. 이때 $-20 \log |R|$ 을 반사손실로 정의한다(Jensen et al., 1993).

수행된 실험환경은 센서의 고정 및 피마자유의 두께 조절을 위해 수평입사각과 반사각이 90°으로 고정된 제한적 환

경이었다. 물과 피마자유 의 음속과 밀도는 측정된 값과 경험식으로부터 계산된 값이 각각 적용되었고 측정횟수에 따른 물과 피마자유 경계면 반사손실 측정 및 모의 결과는 Fig. 6과 같다. 물과 피마자유 경계면 반사손실 측정 및 모의 결과는 온도에 따라 변화되었다. 하지만 물과 피마자유 의 온도변화가 크지 않았기 때문에 온도변화에 따른 측정된 반사손실의 명확한 변화는 확인하기 어려웠다. 측정횟수에 따른 반사손실 측정결과는 경험식으로부터 계산된 임피던스를 반영한 모의결과와 2 dB 이하의 작은 차이만을 보인 반면 측정된 임피던스를 반영한 모의결과와는 Set 1, 2에서 7.0, 7.8 dB의 큰 차이를 보였고 Set 3~6은 경험식의 임피던스를 이용하여 모의한 결과와 유사한 경향을 나타냈다. Set 1, 2에서 모의결과간의 차이는 측정된 피마자유 음속과 경험식기반 음속의 차이로 인해 발생되었으며, 이는 II 장에서 언급된 내용처럼 사용된 물과 피마자유는 실험수행에 앞서 상온에서 장시간 보관하며 일정한 온도의 안정적인 상태를 유지하였지만 실험이 시작되고 두 매질이 섞이면서 발생하는 급격한 온도변화가 음속 측정값의 오차로 반영되었기 때문에 실험이 수행되고 20시간 이상 안정화가 진행된 Set 3~6에 비해 온도변화가 빠르게 발생된 Set 1, 2에서 모의결과간의 오차가 비교적 크게 발생된 것으로 판단된다.

Fig. 6에서 측정값의 오차는 각각의 실험횟수에서 측정된 30 ping의 수신음압준위의 표준편차와 $SL - 2TL$ 값 적용 시물의 온도가 25.2 °C인 경우의 1회 측정값만 사용함에 따라 발생하는 오차를 모의하여 고려되었다. 측정된 임피던스를 적용한 반사손실 모의결과와의 오차는 Table 1, 2에서 계산된 밀도와 음속의 오차에 따라 발생하는 반사손실을 모의하여 계산되었다.

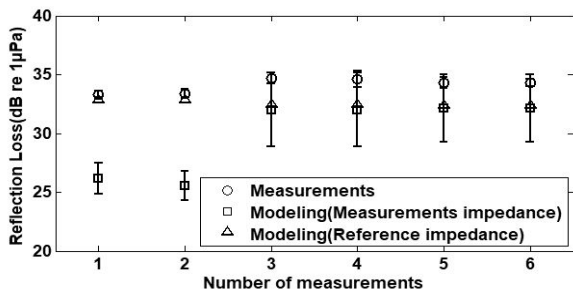


Fig. 6. Comparison of theoretical reflection loss of castor oil at normal incident angle and measurements.

3.3 물과 클로로폼 경계면 반사손실 모의

3.1장과 3.2장을 통해 대체물질의 반사손실 측정결과와 모의결과가 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다. 본 연구의 목표는 저층 침적 위험유해물질의 음향 탐지 가능성 확인이

므로 3.3장에서는 물과 저층 침적 위험유해물질로 구분되는 클로로폼의 경계면에서 반사손실을 0~90°의 수평입사각에 따라 모의하였다. 조사된 클로로폼의 음속(c , 958 m/s), 밀도 (ρ , 1.52 g/cm³), 감쇠계수(α , 0.138 dB/λ)(Uchida, 1968)를 대입하여 수평입사각에 따른 반사손실을 모의하고 다양한 해저면 구성성분(모래, 실트, 점토)의 반사손실 모의결과와 비교하였다(Fig. 7). 해수에 비해 비교적 음속이 빠른 모래층에서는 입계각 이하에서 전반사되며 입계각 이상에서는 수평입사각이 증가함에 따라 반사손실이 증가된다. 비교적 해수와 유사한 음속을 갖는 실트질에서는 수평입사각이 증가함에 따라 반사손실값이 증가되며 일정값으로 수렴하는 경향을 보인다. 해수에 비해 비교적 음속이 느린 점토질의 경우 특정각도에서 입사된 에너지가 모두 투과되는 전투과각(angle of intromission)이 발생되며 전투과각을 경계로 이하에서는 수평입사각이 증가함에 따라 반사손실이 증가, 이상에서는 수평입사각이 증가함에 따라 반사손실이 서서히 감소되며 일정값에 수렴하는 양상을 나타낸다. 반면 모의된 클로로폼의 반사손실은 수평입사각이 증가함에 따라 지속적으로 증가하며 수평입사각 90°에서 약 36.5 dB의 최대값을 보인다. 이는 기존에 알려진 다양한 해저면 구성성분들은 반사손실 특성(입계각, 전투과각 발생)과는 다른 특성을 보이며, 해저면과 구분되는 클로로폼의 음향 탐지 가능성을 확인하였다.

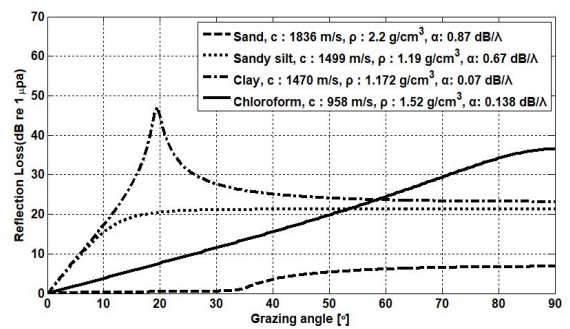


Fig. 7. Reflection loss as a function of grazing angle for various types of surficial sediment and chloroform.

위험유해물질 누출사고가 발생된 경우에는 위험유해물질이 해저면에 일정 두께로 침적되거나 일부 해저면으로 스며드는 등 복잡한 환경에서 탐지가 수행되어야 한다. 이러한 환경을 가정하여 추가로 모래층위에 클로로폼이 0.05, 0.1, 0.5, 1 m 두께로 침적된 4가지 환경에서 반사손실을 모의하였다. 사용된 주파수는 단일층 반사계수 모델과 동일하게 200 kHz를 적용하였고, Fig. 8은 이층 구조 레일리 반사계수 모델을 이용하여 계산된 반사손실 모의결과를 나타낸다. 이층 구조 레일리 반사계수는 서로 다른 세 매질 사이에 두 개

의 경계면이 존재할 때 두 경계면에 의해 발생하는 반사손실을 계산하기 위한 모델이며, 식(5)로 표현된다.

$$R_{13} = \frac{R_{12} + R_{23}e^{2ik_2hsin\theta_2}}{1 - R_{12}R_{23}e^{2ik_2hsin\theta_2}} \quad (5)$$

이때 R_{12} 은 첫 번째 매질에서 두 번째 매질로 음파가 입사될 때 매질의 경계면 반사계수, R_{23} 는 두 번째 매질에서 세 번째 매질로 음파가 입사될 때 매질의 경계면 반사계수이다. k_2 는 두 번째 매질의 음속과 주파수에 따른 감쇠계수가 고려된 파수, θ_2 는 $0\sim 90^\circ$ 의 수평입사각으로 음파가 입사되었을 때 상부경계면에서의 굴절각, h 는 두 번째 매질층의 두께를 의미한다. 침적 두께가 1 m 미만에서는 클로로폼과 모래층의 간섭에 의해 수평입사각이 증가함에 따라 반사손실이 진동하면서 증가하는 경향을 보인다. 그리고 침적 두께가 1 m 이상에는 상부에 침적된 클로로폼의 영향만 존재하며 진동 없이 수평입사각에 따라 반사손실이 증가하는 양상을 보인다. 저층 침적 위험유해물질은 다양한 형태와 두께로 해저에 침적되므로 추후 위험유해물질 유출사고에 적용하기 위해서는 주파수와 침적 두께에 따른 음향특성 고려도 필요 할 것으로 판단된다.

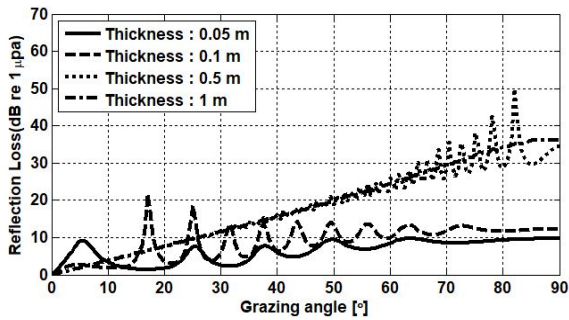


Fig. 8. Prediction of reflection loss as a function of grazing angle using two-layered model in case that chloroform is sunken on the sand.

4. 결론 및 토의

유출사고 발생 시 물질의 종류에 따라 다양한 특성을 갖는 위험유해물질의 효과적인 방제, 관리를 위해 물질의 거동특성이 고려된 적합한 탐사기법이 적용되어야 한다. 특히 해저면 상부에 침적된 위험유해물질은 광학탐지기법 적용에 한계가 있으므로 수중음향을 이용한 탐지기법 개발이 요구된다. 본 논문에서는 저층 침적 위험유해물질의 음향 탐

지 가능성을 확인하기 위해 200 kHz 고주파 능동소나를 이용하여 저층 침적 위험유해물질과 유사한 임피던스를 갖는 대체물질의 반사손실을 측정하였으며 모의결과와 비교를 통해 피마자유 음향학적 특성을 확인, 검증하였다. 서로 다른 두 매질의 임피던스 차이에 의해 물과 피마자유 경계면에서 약 33.9 dB의 반사손실이 발생되었으며 조사된 물과 피마자유의 밀도를 이용하여 수평입사각이 90° 인 환경에서 모의된 반사손실 결과가 측정결과와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 기존에 다양한 입도의 해저면 및 고체물질의 음향특성 연구는 비교적 많이 수행되었으며 선행연구결과를 토대로 검증이 수행되었다. 반면 화학물질의 음향 탐지 연구는 매질의 음속과 밀도를 이용한 이론적인 접근만 수행되었으며 비교적 연구사례가 부족하고 관련 자료의 획득이 매우 제한적이다. 특히 음속과 감쇠계수는 밀도에 비해 활용범위가 협소하기 때문에 자료획득의 제한성이 크다.

추후 다양한 저층 침적 위험유해물질에 대한 음속, 밀도, 감쇠계수의 조사 및 측정을 기반으로 반사손실, 후방산란강도와 같은 음향학적 특성에 대한 연구가 수행되어야 한다. 더불어 저층 침적 위험유해물질 누출사고 대응기술 개발의 측면에서 실험역의 환경변동성이 고려된 음향탐지 기법 및 알고리즘의 개발이 필요하다.

사 사

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(위험유해물질(HNS)사고관리기술 개발)이다.

References

- [1] API(2016), American Petroleum Institute, Sunken oil detection and recovery, Technical Report 1154-1.
- [2] Grosso, V. A. D. and C. W. Mader(1972), Speed of sound in pure water, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 52, No. 5, pp. 1442-1446.
- [3] ITOFP(2014), The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, Response to marine chemical incident, Technical Information Paper.
- [4] Jensen, F., W. Kuperman, M. Porter and H. Schmidt(1993), Computational Ocean Acoustics, American Institute of Physics, New York, pp. 40-46.
- [5] Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders(2000), Fundamentals of acoustics, 4th edition, Wiley, New York, pp. 526-528.

- [6] Kannappan, V., R. J. Santhi and E. J. P. Malar(2002), Ultrasonic studies on charge transfer complexes of cyclo alkanones with chloroform in n-Hexane solution, *Physics and Chemistry of Liquids*, Vol. 40, No. 4, pp. 507-525.
- [7] Lee, M. and S. 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. 677-684.
- [8] Madsen, M. N.(2007), Analyses of survey, modeling and remote sensing techniques for Monitoring and Assessment of environmental impacts of submerged oil during oil spill accidents final report, ASMA Final Report.
- [9] Meyer, R. A., T. Oaks, L. F. Marx and J. E. Brugger(1983), Method and apparatus for detection of insoluble sinking pollutants, United States Patent No. 4,410,966.
- [10] Park, M. O., H. -S. Park, T. Kim, S. Oh and M. 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.
- [11] 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 Proceeding*. No. 465.
- [12] Potter, M. C., D. C. Wiggert and B. H. Ramadan(2016), *SI Mechanics of Fluids*, 4th edition, CENGAGE Learning, p. 595.
- [13] Timme, R. W.(1972). Sound speed of castor oil, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 52, No. 3, pp. 989-992.
- [14] Uchida, N.(1968), Elastooptic Coefficient of Liquids Determined by Ultrasonic Light Diffraction Method, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 7, No. 10, pp. 1259-1266.

Received : 2018. 04. 06.

Revised : 2018. 06. 01. (1st)

: 2018. 06. 25. (2nd)

Accepted : 2018. 06. 27.