

원통형 산란체의 고주파 산란 특성

High Frequency Scattering from Cylindrical Scatterer

김기택*, 윤관섭*, 라형술*, 나정열*

(Kitaek Kim*, Kwan-Seob Yoon*, Hyoungsul La*, Jungyul Na*)

*한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실

(접수일자: 2005년 7월 19일; 수정일자: 2005년 9월 9일; 채택일자: 2005년 10월 11일)

수중에서 원통형 산란체의 산란 음장에서 발생하는 간섭 효과를 확인하기 위하여 한 개의 원통형 산란체와 동일한 두 원통형 산란체의 방위각에 따른 고주파 (120 kHz) 산란 패턴을 측정하였다. 실험은 가로, 세로, 높이가 각각 5m × 5m × 5m 수조에서 공기가 채워진 원통형 PVC (poly vinyl-chloride)로부터 1.5m 거리에 위치한 수중 청음기를 360° 회전시키면서 실시하였다. 실험 결과 한 개 원통은 후방에서 무지향성으로 산란하는 특성을 보였으나 두 개 원통에서는 방위각에 따른 표적 강도의 변동성 (fluctuation)이 나타났다. Stanton이 제안한 이론 식과 측정된 산란 패턴을 비교한 결과 유사한 경향을 확인할 수 있었다[9]. 두 개 원통의 산란 패턴에서 나타나는 표적 강도의 변동성은 두 산란체의 중심으로부터 청음기까지의 거리차로 인한 산란 음장의 간섭 때문이다. 또한 두 개 원통의 산란 이론으로부터 원통의 간격이 커짐에 따라 표적 강도의 변동성이 심해지는 현상을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 공기가 채워진 원통, 간섭, 양상태, 산란 패턴

투고분야: 수중음향 분야 (5.2)

This paper presents the changes of acoustic scattering pattern from a single cylinder and two identical cylinders in both theoretical calculations and experimental measurements. Bi-static scattering pattern by single cylinder and two parallel cylinders (length 2m, radius 30mm) was measured in 5m×5m×5m water tank using high frequency projector (120 kHz) and hydrophone. The results show similar agreement between experiment and theory. In case of single cylinder scattering, omni-directional pattern was observed in backward but there are fluctuations of target strength in forward. Interference between each cylinder's scattering fields produce fluctuations of target strength in all directions of two cylinders.

Keywords: Air-filled cylinder, Interference, Bi-static, Scattering pattern

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.2)

1. 서론

해수면과 해저면 뿐만 아니라 매질 내 체적에 의한 산란은 수중 음향학에서 주요한 관심 분야이다[1]. 체적 산란체의 음향학적 연구는 주로 어류 등과 같은 식량 자원의 탐사와 기뢰나 잠수함 등과 같은 군사적인 목표물의 탐지를 위하여 수행되었다. 수중 물체의 형태는 각기 다르지만 학자들은 체적 산란체의 음파 산란에 대한 해석의 편의를 위해서 수중의 물체를 구 (sphere)나 원통 (cylinder)의 형태로 묘사하여 산란에 대한 연구를 수행하였다. 원통에 의한 산란 이론은 1945년 Lord Rayleigh

등에 의해 제시되었다[3-5]. 그러나 Rayleigh의 이론은 원통의 크기가 파장에 비해 작을 경우에만 해당하는 것이었다. 그래서 1951년 Faran은 Rayleigh의 이론을 바탕으로 새로운 원통의 산란을 제안하고 실험 결과와 비교 하였다[4]. 또한 Twersky는 평행한 두 개 원통에 의한 산란을 계산한 바 있다[6]. 1960년 Barnard와 Mckinney가 고주파를 이용하여 강철 봉의 산란 패턴을 측정하였으나 이론적인 접근을 시도하지 않았다[7]. 1975년 Young과 Bertrand는 직접 계산한 산란 이론을 바탕으로 평행한 두 개 원통의 산란 강도를 측정하였으나 후방 산란 강도를 측정하는데 그쳐 방위각에 따른 원통의 산란 패턴을 확인하지 못했다[8]. 산란체가 군집을 이루고 있는 경우 개별 산란체들의 산란 음장 사이에서 발생하는 간섭을 확인하기 위해서는 방위각에 따른 산란 패

책임저자: 김기택 (ktkim55@ihanyang.ac.kr)
425-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271번지
한양대학교 해양환경과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-4233, 팩스: 031-502-6068)

턴을 측정해야 한다. 또한 원통 사이의 간격이 변화함에 따라 발생하는 간섭 효과가 산란 패턴에 어떠한 변화를 주는지 확인하여 원통의 산란을 정확히 이해할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 한 개 원통과 두 개 원통의 산란 패턴을 측정하여 원통 두 개가 평행하게 위치하고 있을 때 나타나는 산란 음장 사이의 간섭 효과를 확인하였다. 또한 Stanton이 제안한 공기가 채워진 무한 길이 원통의 산란 이론을 이용하여 두 개 원통의 이론적인 산란 패턴을 계산하고 원통의 간격이 변화에 따라 나타나는 산란 패턴의 변화를 확인하였다. 산란 패턴의 변화를 확인하기 위해서 120 kHz의 음원을 이용하여 수중 청음기를 회전시키면서 원통의 방위각에 따른 표적 강도를 측정하였고 산란 이론과의 유사성을 확인하였다. 여기서 무한 길이의 원통이란 원통의 길이 L이 수신기의 첫번째 프레넬 구역 (Fresnel zone), $\sqrt{\lambda R}$ (λ 는 입사파의 파장, R은 산란체까지의 거리) 보다 큰 경우를 의미한다 [9]. 실험에는 공기가 채워진 PVC가 사용되었는데 이 경우 물과 공기와의 임피던스 (impedance) 차에 반사 계수는 -1에 가깝기 때문에 공기에 의한 산란이 우세하다.

II. 원통의 산란 이론

원통의 산란 음장을 계산하는데 다음 네 가지를 가정하였다[9]. 첫 째, 원통이나 원통 주위의 매질에 의한 비선형 현상은 무시한다. 둘째, 원통의 전단파 (shear wave)는 고려하지 않는다. 셋 째, 원통 내부와 원통 간에 발생하는 다중 산란은 무시한다. 넷 째, 원통의 두께에서 발생하는 산란은 무시한다.

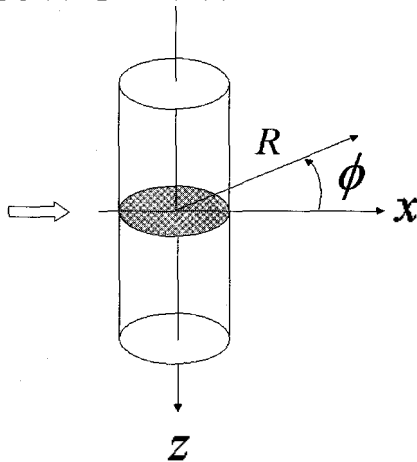


그림 1. 원통 좌표계
Figure 1. Cylindrical coordinate system.

2.1. 한 개 원통의 산란 이론

Stanton은 기존에 발표된 원통의 산란 이론을 이용하여 공기가 채워진 무한 길이의 원통에 의한 산란 이론을 제안하였다[3, 9, 11]. 그림 1에서와 같이 Z방향의 직각으로 P_0 의 크기를 가지는 음파가 입사했을 때 동차 음파 방정식을 이용하여 경계 조건을 만족하는 원통의 산란 음압을 구하면 식 (1)과 같다.

$$P_{scat} = -P_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k R}} e^{i(kR - \pi/4)} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m \frac{J_m(ka)}{H_m^{(1)}(ka)} \times \cos(m\phi) \quad (1)$$

여기서 R은 수신기와 원통의 기하학적 중심과의 거리, $J_m(ka)$ 는 m차 제1종 Bessel 함수, $H_m^{(1)}(ka)$ 는 m차 제1종 Bessel 함수 또는 m차 제1종 Hankel 함수로 $J_m(ka) + iN_m(ka)$ 로 정의되며 $N_m(ka)$ 은 제2종 Bessel 함수 (Neumann function)이다. $k(=2\pi/\lambda)$ 는 입사파의 파수, ϵ_m 은 Neumann의 수로 $m=0$ 일 때는 1이고 $m>1$ 이면 2이다. ϕ 는 입사파와 산란파가 이루는 방위각이고 $\phi=180^\circ$ 이 후방 산란 방향이다.

식 (1)을 구하기 위해 사용된 경계 조건은 $P_{inc}(a) + P_{scat}(a) = P_{im}(a)$ 이다. 여기서 $P_{inc}(a)$ 와 $P_{scat}(a)$ 그리고 $P_{im}(a)$ 는 각각 입사 (incident), 산란 (scattered), 내부 (internal) 음압을 의미한다. 공기가 채워진 원통의 경우 원통 내부 산란을 고려하지 않을 때 $P_{im}(a)=0$ 이다.

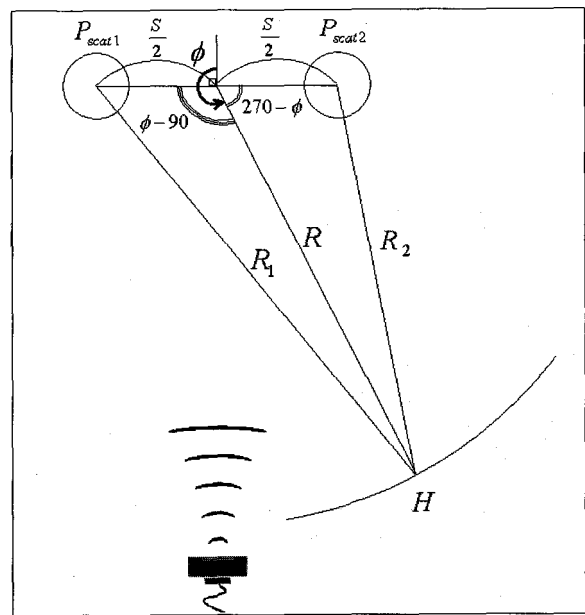


그림 2. 두 원통형 산란체에 의한 음압 계산
Figure 2. Geometry for formulating the problem of sound scattering from two infinite cylinders.

2.2. 두 개 원통의 산란 이론

그림 2는 간격이 S 인 두 산란체 P_{scat1} , P_{scat2} 가 Z 축 방향으로 평행하게 위치하고 있을 때 방위각 ϕ 에 따른 H 에서의 음압을 계산하기 위한 모식도이다. 여기서 R_1 과 R_2 는 두 산란체 P_{scat1} , P_{scat2} 의 기하학적 중심에서 H 까지의 거리이다.

식 (2), (3)은 R_1 과 R_2 의 방위각 ϕ 와 거리 R 그리고 산란체의 간격 S 에 따른 관계식으로, 제2코사인 법칙을 이용하여 계산하였다.

$$R_1(R, S, \phi) = \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + R^2 - SR \sin \phi} \quad (2)$$

$$R_2(R, S, \phi) = \sqrt{\left(\frac{S}{2}\right)^2 + R^2 + SR \sin \phi} \quad (3)$$

P_{scat1} 과 P_{scat2} 의 중심으로부터 거리 R 의 위치에서 청음기로 산란 된 음을 수신한다. 이 때 두 원통에 의해 산란 되는 음의 위상 차는 거리에 의해서만 발생한다. 따라서 각 원통에서 수신기까지의 거리 R_1 과 R_2 를 식 (1)에 대입하고 위상을 고려하여 각 원통에 의한 산란의 합을 구하면 식 (4)와 같다. 식 (4)에 식 (2)와 (3)의 R_1 과 R_2 를 대입하면 방위각에 따른 P_{total} 값을 얻을 수 있다.

$$P_{total} = -P_0 \sqrt{\frac{2}{\pi k}} e^{-\frac{\pi}{4}} \left(\frac{e^{i k R_1}}{\sqrt{R_1}} + \frac{e^{i k R_2}}{\sqrt{R_2}} \right) \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m \frac{J_m(ka)}{H_m^{(1)}(ka)} \cos(m\phi) \quad (4)$$

같은 방법을 이용하면 원통 n 개가 음원으로부터 임의의 거리에 위치하고 있을 때 각 원통의 산란 음장 사이

의 간섭으로 인한 방위각에 따른 표적 강도의 변화를 예측할 수 있다.

식 (1)과 (4)에서 원통의 산란 음장을 계산 시 모드를 제한 하였다. 모드가 커질수록 전체 음압에 대한 기여도가 작아지기 때문이다. 그림 3은 $ka=15.08$ 일 때 모드에 따른 음압의 절대값을 방위각 별로 나타낸 것이다. 모드 20 이상에서는 $|P|$ 값이 큰 의미를 가지지 못하고 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 그림 4에서 전체 음압의 95%가 되는 모드를 ka 값에 따라 계산하였다. 그 결과 ka 값이 증가함에 따라 모드의 제한 값이 지수함수 적으로 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서는 이론적인 산란 음장을 계산 시 모드 17 이상에 대해서는 고려하지 않았다.

III. 원통의 산란 패턴 측정

실험은 한양대학교 해양환경과학과 수조실험실에서 실시 하였다. 그림 5는 신호 발생과 수신 과정을 보여주고 있다. 가로, 세로, 높이가 각각 $5m \times 5m \times 5m$ 수조에서 그림 6에서와 같이 공기가 채워진 원통형 PVC의 산란 패턴을 측정하였다. 실험에 사용된 PVC의 반지름은 $30mm$ 이고 양 끝을 수밀 하였다. 입사파가 로테이터(rotator)의 회전 중심에 고정된 원통형 PVC에 의해 산란 되면 $1.5m$ 거리에 위치한 청음기(Hydrophone)가 회전하면서 방위각에 따른 산란 음압을 측정하게 된다. 이 때 회전에 대한 청음기의 안정성을 위하여 반대편에 납을 달아 무게 중심이 유지되도록 하였다. 실험에 사용

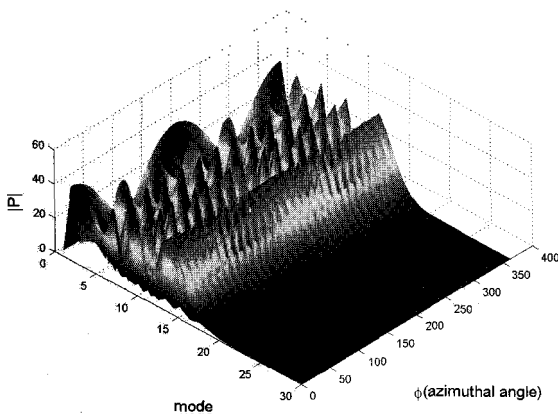


그림 3. 모드와 방위각에 따른 $|P|$ 값의 변화
Figure 3. The Absolute value of pressure as a function of mode and azimuthal angle.

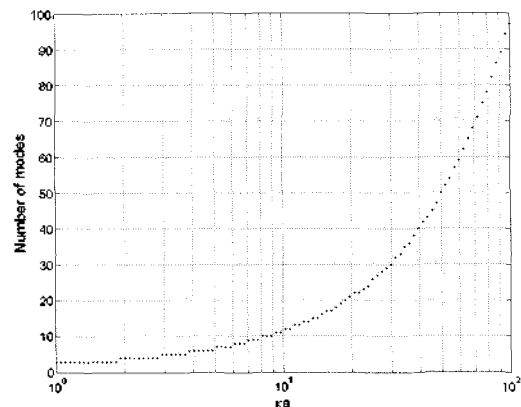


그림 4. ka 값에 따른 모드의 변화
Figure 4. Limitation of mode number as a function ka .

표 1. 실험에서 사용된 장비의 재원과 원통의 물리적 특성
Table 1. Specification of Cylinder and Equipments.

Dimension of cylinder		Projector (Neptune Sonar)		Hydrophone (Reson)
Element	Poly Vinyl-Chloride	Frequency	120 kHz	15 Hz ~ 490 kHz
IR*/OR*	27.5mm / 30mm	TVR*	174.9 dB	-
Length	2m	RVS*	-187 dB	-186 dB± 3 dB
Characteristic Impedance	$3.2 \times 10^6 Pa \cdot s/m$	Beam width	9.6°	Omni
		Pulse length	0.2ms / 0.4ms	-

*TVR: Transmitted Voltage Response *RVS: Receiving Voltage Sensitivity *IR: inner radius *OR: outer radius

된 로테이터의 회전 속도는 $3.27^\circ / sec$ 이다.

표 1은 실험에서 사용한 장비의 재원과 원통의 물리적 특성이다. 음원의 주파수는 120 kHz이고 지향성은 9.6° 이다. 음원과 원통 사이의 거리는 2.8m이므로 점유폭은 약 47cm가 된다. 펄스 (pulse)의 길이는 다중 산란 경로에 의해 청음기로 수신 되는 산란파를 고려하여 한 개 원통에서는 0.2ms, 두 개 원통의 실험에서는 0.4ms를 사용하였고 PVC 간격은 8.4° 로 고정하였다. 실험에 무지향성 청음기를 사용할 경우 수조내의 제한된 환경 때문에 부엽 (sidelobe)에 의한 산란이 원통의 산란 신호와

중첩되는 경우가 발생한다. 이를 방지하기 위하여 실리 콘 재질의 차폐 장치를 이용하여 청음기를 일부 차폐 시킨 결과 원통 방향으로 약 60° 의 지향성을 얻을 수 있었다. 실험에서 음원과 산란체까지의 거리는 2.8m로 $R_c = a^2 / \lambda \approx 25cm$ 보다 크므로 원거리 음장에 해당한다 [12]. 여기서 R_c 는 임계 거리 (critical range)이고 a 는 Projector의 반지름, λ 는 파장이다. 원통에 의한 산란 파도 $kR \gg 1$ 인 원거리에서 측정하였다[9, 10]. 산란 패턴의 측정은 평면파가 원통에 입사한 후 Z축에 대하여 직각으로 산란 된 음을 수신하는 경우로 제한되었다.

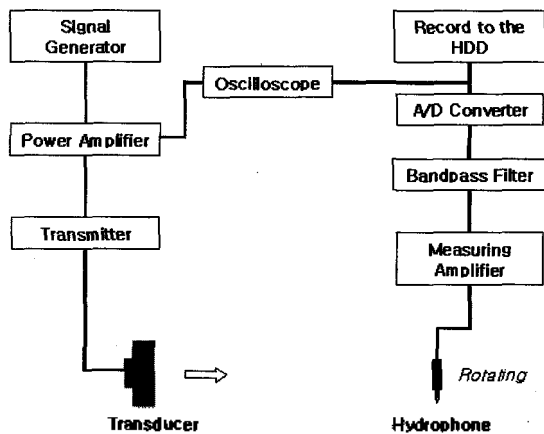


그림 5. 데이터 수신도
Figure 5. Data acquisition system.

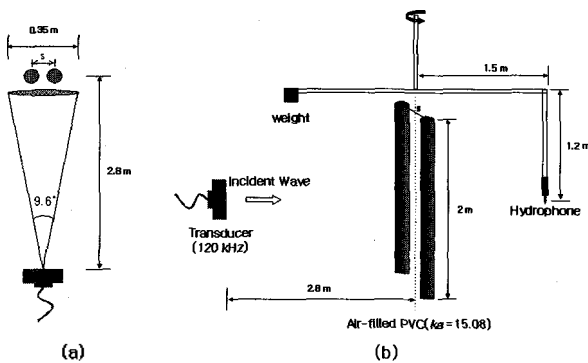


그림 6. 산란 패턴을 측정하기 위한 실험 모식도 (a) 음원의 지향성은 9.6° 이고 점유폭은 35cm이다. (b) 원통간의 간격 $S = 8.4^\circ$ 이고 수신기까지의 거리는 1.5m이다
Figure 6. Experimental geometry for sound scattering measurement (a) The beam width is 9.6° and insonified length is 35cm. (b) S is and the distance between cylinder and receiver is 1.5m.

IV. 실험 분석 및 이론과의 비교

그림 7은 청음기에 수신된 신호 중 후방 산란 영역 ($150^\circ \sim 210^\circ$)에서의 신호를 도시한 것이다. 신호는 4ms 까지 수신하였으며 1ms 부근에서는 음원으로부터의 직접파가 수신되었고, 2.8ms에서는 원통으로부터 산란된

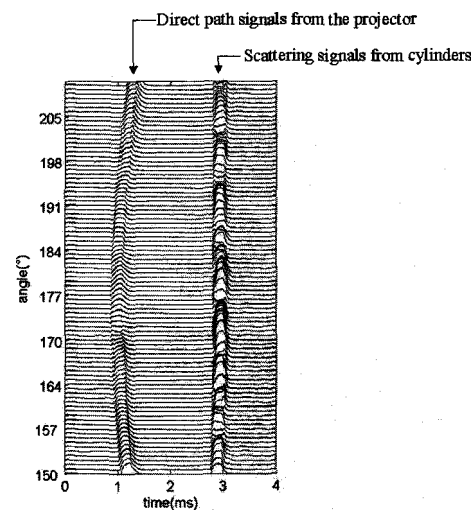


그림 7. 후방 산란($150^\circ \sim 210^\circ$) 방향에서의 신호 수신된 신호를 힐버트 변환하여 도시하였다. 1ms 부근에서는 음원으로부터의 직접파가 2.8ms에서는 원통으로부터의 산란 신호가 수신되었다
Figure 7. Scattering signals from 150° to 210° . The signals were Hilbert transformed. Direct path signals from the projector were received around 1ms and scattering signals from cylinders were received at 2.8ms.

신호가 수신되었다.

그림 8은 식 (1)로부터 계산한 한 개의 PVC의 이론적인 데시벨 (decibel) 값과 실험으로부터 구한 원통의 표적강도와 비교한 것이다. 실험에 의한 원통의 표적 강도는 식 (5)를 이용하여 계산하였다[10].

$$TS = RL - SL + 2TL \quad (5)$$

여기서 TS는 표적 강도 (dB re 1μ Pa at 1m), SL은 음원 준위 (dB re 1μ Pa at 1m)이며 TL은 음원에서 원통까지 그리고 원통에서 수신기까지의 전달 손실 (dB re 1m), RL 잔향음 준위 (dB re 1μ Pa)이다. 음원 준위 (SL)는 음원의 송신 음압에 송신기의 감도 (TVR: Transmitted Voltage Response, 174.9 dB)를 보상하여 계산하고 잔향음 준위 (RL)는 청음기의 수신감도 (RVS: Receiving Voltage Sensitivity, -189 dB)를 고려하여 산출한다.

한 개 PVC의 산란 패턴은 실험 결과와 이론 값 모두 150° ~ 210° 에서 1dB 이내의 일정한 값을 보이고 있고 측면으로 갈수록 그 차이가 조금씩 커지고 있다. 후방 영역은 전체적으로 무지향성으로 산란 하는 경향을 보이고 있으나 전방 영역에서는 표적 강도 값의 변화가 크게 나타나고 있고, 특히 60° ~ 300° 에서는 원통에 의한 산란파와 음원으로부터 수신된 직접음과의 근소한 시간차로 인하여 서로 간섭을 일으켰다. 이것은 제한된 수조 실험에서 발생하는 일반적인 현상으로 전방 영역에서의 산란 패턴은 정확성이 다소 부족하다[7]. 간섭이 발생한 부분에서의 음압은 PVC를 제거한 후 실시한 실험 (음원으로부터의 직접음을 수신)에서 얻은 신호와의 차로부터 획득하였다. 따라서 전방 영역에서 이론과 측정값의 차이가 나타나고 있다.

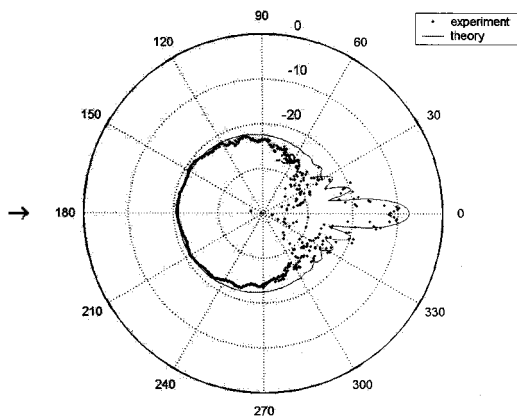


그림 8. 한 개 PVC 모델 과 실험 값 비교
Figure 8. Comparison between model and experiment data of single cylinder.

그림 9은 두 개 PVC의 산란에 대한 이론 값과 실험 값을 비교한 그림이다. 후방 영역에서의 이론적인 산란 패턴에서는 약 8.5° 간격으로 표적 강도의 값의 변화가 크게 나타나고 있다. 마찬가지로 실험에서 두 개의 원통에 의한 산란은 단일 원통의 산란과는 다르게 개별 산란체의 산란 음장 사이의 간섭 때문에 전체 방위각에서 표적 강도의 변화가 크게 나타났다. 후방 영역에서 표적 강도의 측정값은 -14 dB~-31 dB로 한 개 원통과 비교했을 때 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 수신기의 위치 H에서 각 산란체와 청음기 사이의 거리 차 때문에 위상차가 생기고 그로 인해 두 원통의 산란 음장 사이에 간섭이 발생하기 때문이다.

그림 10는 그림 2에서 원통 사이의 간격 S의 변화에 따른 산란 패턴의 변화를 식 (4)로부터 계산하여 도시한 것이다. 원통의 간격이 커진다 해도 후방(180°)과 전방에서 표적 강도의 값에는 차이가 없다. 하지만 원통사이의 간격이 커질수록 각 원통의 산란 음장 사이에 간섭으로 인하여 표적 강도의 변화가 많아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 다중 산란체의 표적 강도를 양상태로 측정할 경우 수신 위치에 따라 값의 변화가 있을 수 있다는 것을 의미한다.

V. 결론 및 토의

본 논문에서는 공기가 채워진 원통의 산란 패턴을 고주파를 이용하여 측정하였고 이론과 비교하였다. 단일 원통의 후방 산란은 방위각에 따른 표적 강도 값의 변화가 작은 반면 전방 부분에서는 많은 변동성이 나타났다.

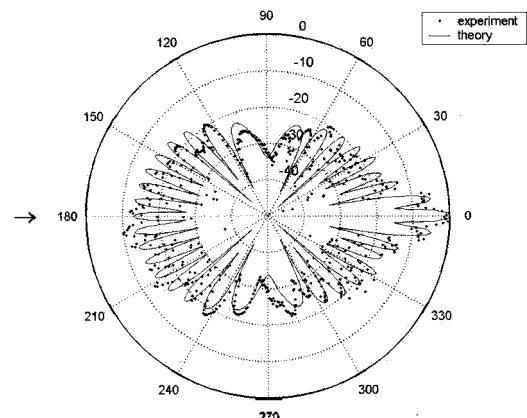


그림 9. 두 개의 PVC 모델 과 실험 값 비교
Figure 9. Comparison between model and experiment data of two cylinders.

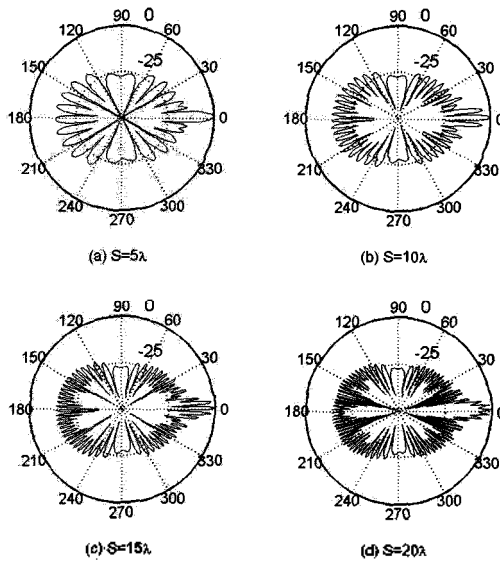


그림 10. 두 원통의 간격에 따른 산란 패턴의 모의
Figure 10. Scattering pattern according to spacing between two cylinders by theory.

이러한 결과는 Stanton이 제한한 이론적인 산란 패턴과 유사한 경향을 보였다. 또한 이 이론을 이용하여 일정 간격의 두 원통에 대한 산란 패턴을 계산한 결과 실험에서와 같은 표적 강도의 변화를 확인할 수 있었다. 이러한 표적 강도의 변화는 각 원통과 수신기 사이의 거리 차로 인해 발생하는 위상차가 원인이다. 따라서 수중에서 군집을 이루고 있는 물체로부터 산란 되는 음을 측정할 경우 개별 산란체의 산란 음장 사이에서 발생하는 위상차에 의한 간섭 때문에 측정 위치에 따라 표적 강도의 차이가 발생할 수 있음을 고려해야 할 것이다. 실험 결과를 보면 한 개 원통의 후방 산란에서 실험값과 이론값의 차이는 1dB 이내로 작지만 두 개 원통에서는 4~5dB의 차이를 보이고 있다. 이것은 원통 사이에서 발생하는 다중 산란과 원통 내부에서 발생하는 다중 산란 그리고 원통의 두께에 의한 영향을 이론에 고려하지 않아 발생하는 차이로 추정된다. 차후 연구에서 이점을 이론에 고려하여 ka 값에 변화와 원통의 자세각에 따른 산란 패턴 변화를 측정하고 이론식과의 타당성을 검증한다면 원통의 표적강도의 변화를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화연구센터 (UARC)의 지원으로 수행되었습니다

참고 문헌

1. 강돈혁, 황두진, 나정열, 김수암, "부러짐 가진 어류의 음향산란 강도에 관한 연구: 참돔의 길이 및 행동에 따른 산란강도," 한국음향학회지 20, 100-109, 2001.
2. 김은혜, 윤관섭, 나정열, "Experimental Study of Back-scattered Underwater Signals from Multiple Scatterers," 한국음향학회지, 23 (1E), 31-39, 2004.
3. Lord Rayleigh, *The theory of sound* (Dover, New York, 1945), Secs. 335 and 343.
4. J. J. Faran, Jr., "Sound Scattering by Solid Cylinders and Spheres," *J. Acoust. Soc. Am.*, 23, 405-418, 1951.
5. R. D. Doolittle and H. Überall, "Sound Scattering by Elastic Cylindrical Shells," *J. Acoust. Soc. Am.* 39, 272-275, 1966.
6. Vic Twersky, "Multiple scattering of Radiation by an Arbitrary Configuration of Parallel Cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.* 24, 42-46, 1952.
7. G. R. Barnard and C. M. McKinney, "Scattering of acoustic energy by solid and air-filled cylinders in water," *J. Acoust. Soc. Am.* 33, 226-238, 1961.
8. J. W. Young and J. C. Bertrand, "Multiple scattering by two cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.*, 58, 1190-1195 1975.
9. T. K. Stanton, "Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.* 83, 55-63, 1988.
10. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* (McGraw-Hill, New York, 1983), Chap. 8, pp. 237-290
11. P. M. Morse, *Vibration and Sound* (American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, New York, 1983), Secs. 29, 347-360.
12. Medwin and Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, (Academic Press, 1988).

저자 약력

• 김기택 (Kltaek Kim)



2001년 3월: 해군사관학교 경영학과(이학사)
2004년 3월~현재: 한양대학교 해양환경과학과(석사과정)
* 주관분야: 수중음향 산란

• 윤관섭 (Kwan-Seob Yoon)

한국음향학회지 제21권 제5호 참조

• 라형술 (Hyoungsul La)

한국음향학회지 제24권 제2호 참조

• 나정열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조