

해면 산란효과에 의한 선박 방사소음 추정치 오차 Error Characteristics of Ship Radiated Noise Estimation by Sea Surface Scattering Effect

박 규 칠*·박 지 현*·서 철 원*·최 재 용**·이 필 호**·윤 종 락†
Kyu-Chil Park, Jihyun Park, Chulwon Seo, Jae Yong Choi, Phil-Ho Lee
and Jong Rak Yoon

(Received April 19, 2013 ; Revised May 24, 2013 ; Accepted May 24, 2013)

Key Words : Ship Radiated Noise(선박방사소음), Acoustic Signature(음향징표), Source Level Estimation(음원준위 추정), Sea Surface Scattering(해면산란), Coherent Reflection Coefficient(간섭성 반사계수), Transmission Loss Anomaly(전달손실 변이)

ABSTRACT

The ship radiated noise level fluctuates by the interference between direct and reflected paths. The effect of sea surface reflection path on interference depends strongly on sea surface roughness. This paper describes error characteristics of ship acoustic signature estimation by sea surface scattering effect. The coherent reflection coefficient which explains a magnitude of sea surface scattering and its resultant interference acoustic field is analyzed quantitatively as a function of a grazing angle, effective surface height, frequency, source-receiver range and depths of source and receiver. Theoretical interference acoustic field is compared with experimental result for two different sea surfaces and five different frequencies by changing source-receiver range. It is found that both matches well each other and a magnitude of interference acoustic field is decreasing by increasing a grazing angle, effective surface height, frequency, and depths of source and receiver and decreasing source-receiver range. For given experimental conditions, the transmission anomaly which is a bias error of ship acoustic signature estimation, is about a range of 1~3 dB. The bias error of an existing ship radiated noise measurement system is also analyzed considering wind speed, source depth and frequency.

1. 서 론

선박의 수중 방사소음 음향징표인 1/3 옥타브 음원준위, 협대역 토널 주파수 음원준위는 수중 생물의 소음 폭로 피해나 군용 선박의 피아 식별 및 피

탐지 거리 등의 수준 평가에서 필수적인 요소이다.

선박의 기계 소음이나 공동 소음의 예측 및 경험적인 방사소음 준위 추정 모델이 제시되어 있고⁽¹⁻⁴⁾, 항만으로 통과하는 상선 방사소음 음원준위의 실측치와 이론치의 비교 연구⁽⁵⁾, 벌크선의 음원별 특징 주파수에 대한 연구 결과⁽⁶⁾ 및 천해의 방사소음 측

† Corresponding Author; Member, Dept. of Information and Communication Engr., Pukyong National University
E-mail : jryoon@pknu.ac.kr

* Dept. of Information and Communication Engr., Pukyong National University

** Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

정 연구^(7,8) 등이 있다. 측정 결과로부터 방사소음의 추정치에 대한 정확도를 높이기 위해 원거리 음장영역에서 측정한 자료에 포물선 방정식 모델로 음파 전달 손실을 보정하기도 한다⁽⁵⁾.

이들 연구 결과를 요약하면, 선박 방사소음 음원의 주파수와 위치, 선각의 진동모드, 접수 및 몰수의 경계조건을 이용한 음향 징표의 이론적인 예측은 불완전하여 실측에 의한 음향징표 추정이 병행된다. 그러나 실측치의 신뢰도는 해수면과 해저 경계면의 음향 물성, 선박 방사소음의 지향성, 선박 속력 및 기동 선박과 수신기간의 음파 전달 손실의 시공간 변동성 등에 좌우된다는 것이다. 결론적으로 실측에 의한 음향징표 추정치의 신뢰도를 높이기 위해서는 경계면 음장 특성을 고려한 측정방법, 측정 해석의 음파전달 특성 및 수신 신호 분석 방법이 규정되어야 한다.

ANSI(American National Standard Institute)와 미국 음향학회는 수상 선박 현측 방향의 1/3 옥타브 음원 준위를 추정하기 위한 측정 및 분석 기준을 제안하여⁽⁹⁾ 1.5 dB 이하의 추정치 정확도를 얻기 위한 측정 해석의 수심, 수신기 개수, 측정거리 등에 대한 기준과 분석 방법을 규정하고 있다. 또한 해면을 완전 반사 경계면으로 가정하여 음원 준위의 마이어스 오차 및 표준편차를 각각 3 dB와 1 dB 이하로 추정하기 위한 측정 및 분석 방법을 제시한 연구도 있다^(10,11).

ANSI와 미국음향학회가 제안하는 수상 선박의 음향 징표 측정 및 분석방법은 수상 선박의 음원이 해면에 위치하고 해면 반사와 영향이 없다는 가정에 기초하며 수중에 위치하는 수상 선박의 저주파수 프로펠러 음원 준위는 쌍극음원으로 가정하여 추정하고 있다. 그러나 최근의 기뢰전, 음향유도어뢰, SAS(Synthetic Aperture Sonar) 및 수중통신 등에서는 방사소음 관심 주파수가 증가되는 추세이고 또한 잠수함 등의 수중 음원의 음향 징표 추정이 포함된다. 따라서 고주파수와 수중음원에 상대적으로 크게 영향을 미치는 해면의 산란효과가 음향징표 추정에 고려되어야 한다.

이 연구에서는 해면 산란 효과에 의한 간섭 음장을 해석하고 고주파수 대역의 방사소음의 추정치 정확도를 제시하여, 신뢰성 있는 방사소음 음향 징표 측정/분석 시스템을 설계하는데 필요한 기초자료를

제공하고자 한다.

2. 해면 산란 음장

2.1 거울 면 반사 경로의 해면 반사 계수

무작위 교란 해면의 산란 음장은 HKF(Helmholtz Kirchhoff Fresnel) 이론에 의해 해석할 수 있다^(12,13). 거울 면 반사 경로 산란은 입사각과 같은 반사각에서 일어나는 산란으로 정의되며 이 경로의 산란은 입사음파와 일정한 위상관계를 보이는 간섭성 성분과 비 간섭성 성분으로 주어진다. 간섭성 성분은 해면의 파고 상태의 확률 밀도 함수, 비 간섭성 성분은 해면의 2차원 통계 특성과 송수신기의 기하학적 관계의 함수로 결정된다.

Fig. 1은 거친 해면의 순간 단면이다. 평면파가 AA에서 입사하고 물과 공기 경계면의 반사계수를 -1로 가정하고 $ka \gg 1$ 인 Kirchhoff 가정을 적용하면 거울 면과의 경로 차에 의한 위상차 $\Delta\phi$ 는 식 (1)과 같다.

$$\Delta\phi = k(2y\sin\theta) \tag{1}$$

여기서, a , k , y 및 θ 는 각각 경계면의 곡부 곡률반경, 파수, 순간 파고 및 입사각이다. 따라서 어떤 순간 직접파와 간섭하는 해면에서 반사되는 간섭성 반사 음압 p_{rgh} 는 식 (2)로 주어진다.

$$p_{rgh} = -p_{mirror}\cos(2ky\sin\theta) \tag{2}$$

여기서, p_{mirror} 는 해면이 거울 면과 같은 경우의 반사 음압이다.

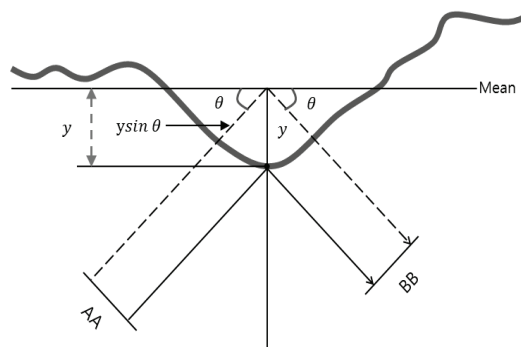


Fig. 1 Path difference of rough surface to mirror surface

식 (2)의 간섭성 반사음압은 시변 해면의 확률 밀도 함수를 구하여 평균적인 특성으로 평가해야 한다. 해면 파고의 확률 밀도 함수 $f(y)$ 는 풍향에 따라 달라질 수 있으나 풍향을 고려하지 않으면 식 (3)과 같이 정규분포로 가정할 수 있다.

$$f(y) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{h}\right)^2\right) \quad (3)$$

여기서 h 는 파고 유효치 이다. 간섭성 반사계수 R_{coh} 을 거울 면 반사음압에 대한 간섭성 반사음압의 평균치로 정의하면 R_{coh} 은 해면의 확률 밀도 함수 식 (3)을 이용하여 식 (4) 같이 주어진다.

$$R_{coh} = \left\langle \frac{P_{rgh}}{P_{mirror}} \right\rangle = - \int_{-\infty}^{\infty} \cos(2kysin\theta) \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{h}\right)^2\right) dy = - \exp\{-2(khsin\theta)^2\} = - \exp(-2R_{rgh}^2) \quad (4)$$

여기서 $khcos\theta$ 를 Rayleigh 거칠기 매개 변수 R_{rgh} 로 정의하며 주파수, 유효파고 및 입사각 함수이다. 식 (4)에서 보는 바와 같이 R_{rgh} 가 커질수록 $|R_{coh}|$ 은 작아지며, R_{rgh} 가 작아지는 초저주파수, 파고 유효치 0 m 및 입사각이 0°일 때 해면은 완전 반사면이다.

송수신기 거리가 작아지고 수신기의 깊이가 깊어질수록 해면 반사파 입사각이 커지게 된다. 이 경우는 $|R_{coh}|$ 이 작아져 해면 반사파의 영향을 적게 받는다. 아울러 음원의 주파수와 파고 유효치가 커지는 경우에도 해면 반사파의 영향을 적게 받게 된다.

2.2 간섭성 반사 음압에 의한 음장 특성

Fig. 2는 선박 방사소음을 무지향성 점 음원이라고 가정하고, 음원이 해면으로부터 파장에 비해 상대적으로 멀리 떨어진 경우($kl \gg 1$)로 프로펠러나 잠수함 등의 고주파수 수중 음원을 가정한 것이다. 방사소음을 측정하는 해역의 수심이 송수신간의 거리에 비해 상대적으로 깊고 해저의 반사계수가 낮은 경우 직접파 경로 R_1 에서 수신기 복소수 음압 P_T 및 원거리 음압 p_T 는 식 (5)와 (6)과 같이 간섭 음장이 된다.

$$P_T = \frac{P_o}{R_1} + \frac{R_{coh}P_o}{R_2} \exp(jw\tau) \quad (5)$$

$$p_T = |P_M| = P_o \left| \frac{1}{R_1} + \frac{R_{coh}}{R_2} \exp(jw\tau) \right| = \frac{P_o}{R_1} \left| 1 + \frac{R_1 R_{coh}}{R_2} \exp(jw\tau) \right| = \frac{P_o}{R_1} \left(\sqrt{1 + \frac{R_1^2 R_{coh}^2}{R_2^2} + 2 \frac{R_{coh} R_1}{R_2} \cos(w\tau)} \right) \quad (6)$$

여기서, P_o 와 τ 는 각각 음원에서 1 m 거리의 음압과 직접파와 반사파의 경로 시간차($\tau = (R_2 - R_1)/c = \Delta R/c$)이다.

방사소음 측정 시에 측정되는 원거리 간섭 음장 음압 준위 L_{pT} 는 식 (7)과 같다.

$$L_{pT} = 20\log(p_T) = 20\log(|P_M|) - 20\log(R_1) + 10\log\left(1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 R_{coh}^2 + 2\left(\frac{R_1}{R_2}\right) R_{coh} \cos(w\tau)\right) = 20\log(|P_M|) - 20\log(R_1) + \Delta TL \quad (7)$$

여기서 ΔTL 은 구면확산 손실과의 차이로 전달손실 변이(transmission loss anomaly)로 정의되며 해면의 간섭성 반사에 의한 바이어스 오차이다. 실제 해양에서 ΔTL 은 식 (7)과 같이 R_1/R_2 , 반사계수 R_{coh} 및 경로 차에 의한 위상차에 의해 결정된다.

2.3 연속순음을 이용한 해상 실험결과

해면 변동에 의한 입사음파의 간섭성 반사계수 R_{coh} 변화가 방사소음 평가에 주는 영향을 해석하기 위하여 2012년 8월 18일과 21일에 1.5, 2, 5, 10,

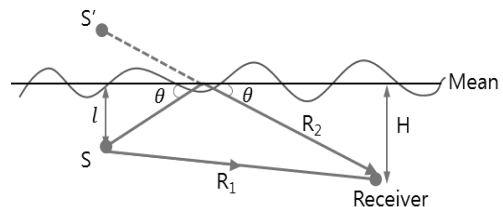


Fig. 2 Interference between direct and rough surface reflection paths

15 kHz의 연속 순음을 이용하여 Fig. 3과 같이 해상 실험을 수행하였다.

송신기(ITC- 1001)에서 송신된 5개 주파수의 연속 순음 신호는 깊이를 달리하는 5개의 수신기(B&K 8106)로 수신된다. 송수신기간의 거리를 변화시켜 해면 반사파 입사각도가 변화하도록 하였으

며 파고 유효치가 0.3 m와 0.6 m인 해상 상태에서 실험하였다. 송수신기 거리는 순 조류 방향에서는

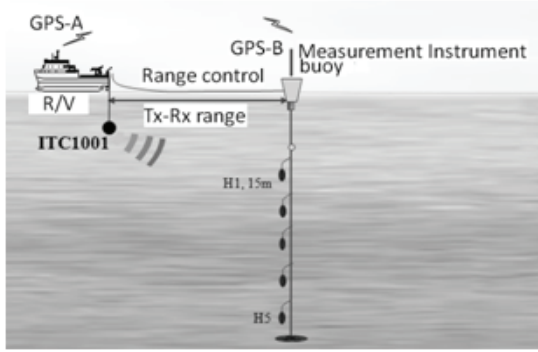


Fig. 3 Sea trial configuration using continuous sinusoidal signals

Table 1 Environmental conditions of sea trial

	2012. 08. 18	2012. 08. 21	Remarks
Depth(m)	900	900	
Bottom	Sandy mud	Sandy mud	
Critical angle of bottom(°)	~15	~15	
Wind speed(m/s)	4	8	Wind meter height: 15 m
RMS wave height(m)	0.3	0.6	
Tx-Rx horizontal range(m)	30-266	12-403	GPS used
Tx. depth(m)	10/17	14	
Rx. depth(m)	5, 15, 25, 35, 45	5, 15, 25, 35, 45	
Source frequency(kHz)	1.5, 2, 5, 10, 15	1.5, 2, 5, 10, 15	

Table 2 $|R_{coh}|$ variations with respect to sea surface grazing angle and frequency at each source depth, transmitter-receiver(Tx-Rx) range and Rx depth.

0	Date	Tx depth (m)	Tx-Rx initial ~final range (m)	Grazing angle range of each Rx.		$ R_{coh} $ range of each frequency				
				Rx. depth (m)	Grazing angle range(°)	1.5 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	15 kHz
Run #1	08.18	17	30-266	5	37-5	.32-.97	.13-.95	.00-.74	.00-.30	.00-.06
				15	47-7	.20-.95	.06-.91	.00-.56	.00-.09	.00-.00
				25	55-9	.15-.91	.03-.86	.00-.40	.00-.02	.00-.00
				35	60-11	.13-.88	.02-.80	.00-.24	.00-.00	.00-.00
				45	65-13	.11-.84	.02-.73	.00-.14	.00-.00	.00-.00
Run #2	08.18	10	52-187	5	16-5	.77-.97	.63-.95	.05-.74	.00-.03	.00-.00
				15	26-8	.53-.93	.32-.89	.00-.47	.00-.05	.00-.00
				25	34-11	.37-.88	.17-.80	.00-.24	.00-.00	.00-.00
				35	41-14	.27-.82	.10-.70	.00-.10	.00-.00	.00-.00
				45	47-16	.21-.77	.06-.63	.00-.05	.00-.00	.00-.00
Run #3	08.21	14	403-21	5	42-3	.25-.99	.09-.98	.00-.90	.00-.64	.00-.38
				15	54-4	.16-.98	.04-.97	.00-.82	.00-.46	.00-.17
				25	62-6	.12-.96	.02-.93	.00-.65	.00-.18	.00-.02
				35	67-7	.11-.94	.02-.91	.00-.56	.00-.10	.00-.00
				45	70-8	.10-.93	.02-.89	.00-.47	.00-.05	.00-.00
Run #4	08.21	14	12-401	5	58-3	.14-.99	.03-.98	.00-.89	.00-.64	.00-.37
				15	68-4	.10-.98	.01-.97	.00-.83	.00-.46	.00-.18
				25	73-6	.09-.96	.01-.93	.00-.65	.00-.18	.00-.02
				35	76-7	.09-.94	.01-.91	.00-.56	.00-.10	.00-.00
				45	78-8	.09-.93	.01-.88	.00-.47	.00-.05	.00-.00

자동 폴립으로, 역 조류 방향에서는 원치 감는 속도를 일정하게 유지하며 변화시켰다. 파고 유효치, 주파수, 해면 반사파 입사각도 변화에 따른 식 (4)의 간섭성 반사계수와 식 (7)의 수신음압 변동의 상관성을 분석하였다. 측정시간 간격은 약 3초 간격으로 각 측정 시각에서 GPS를 이용한 송수신기간의 거리를 측정하였으며 거리 변화는 약 0.1~1.0 m의 범위를 갖는다.

Table 1은 해상 실험 환경 조건이며 표에서 파고 유효치는 Pierson-Moskowitz의 풍속과 파고의 관계식으로 구한 값이다⁽¹²⁾. Table 2는 실험 내용 및 수신기별 해면 입사각 변화 범위와 식 (4)에 의한 주파수별 $|R_{coh}|$ 변화 범위이다. Table 2에서 보는 바와 같이 $|R_{coh}|$ 값의 전체적인 특성은 근거리, 고주파일수록, 수신기 수심이 깊을수록 작다. 고주파의 경우, 특히 10 kHz와 15 kHz의 값은 모든 실험 조건에서 0에 가까운 값을 갖는다.

파고 유효치가 0.3 m이고 송신기의 깊이가 17 m 인 Table 1의 Run #1 실험 조건에 대한 1.5, 5 및 15 kHz의 각 주파수의 수신기 거리(R_1)에 따른 5 개 수신기 깊이별 간섭 음장 음압 준위와 식 (7)에 의한 이론치를 비교한 결과는 각각 Figs. 4, 5 및 6과 같다.

Fig. 4의 1.5 kHz의 경우, 실험과 이론적인 결과의 간섭크기가 전체적으로 일치한다. 근거리에서는 간섭 크기가 작고 수신기 깊이가 크면 작아진다. Table 2의 5 m 깊이와 45 m 깊이 수신기의 $|R_{coh}|$ 변화 범위는 거리가 30 m에서 266 m로 증가할 때, 각각 .32-.97과 .11-.84로 수신기의 수신 거리가 작거나 깊이가 깊어지면 $|R_{coh}|$ 작아지는 결과와 일치한다. 간섭 형태가 정확히 일치하지 않는 것은 거리 오차 혹은 송신기의 지향성 등에 의한 오차로 판단된다.

Fig. 5의 5 kHz의 경우도 실험과 이론적인 결과의 간섭크기가 전체적으로 일치한다. 주파수가 커져 Table 2에서 보는 바와 같이 5 m 깊이와 45 m 깊이 수신기의 $|R_{coh}|$ 변화 범위는 송수신기 거리가 30 m에서 266 m로 증가할 때 각각 .00-.74와 .00-.14이며 $|R_{coh}|$ 의 크기가 1.5 kHz 보다 작아진다. 따라서 Fig. 4의 1.5 kHz에 비해 간섭의 강도가 약하며 45 m 깊이의 수신기는 입사각이 작은 원거리

에서도 수신신호는 간섭 음장을 보이지 않는다.

Fig. 6의 실험 최대 주파수인 15 kHz의 $|R_{coh}|$ 는 전체 거리 범위에서 모든 수신기에서 0에 가까운 값이다. 수신 음장은 간섭특성을 보이지 않으므로 직접파만의 음장이라 할 수 있다.

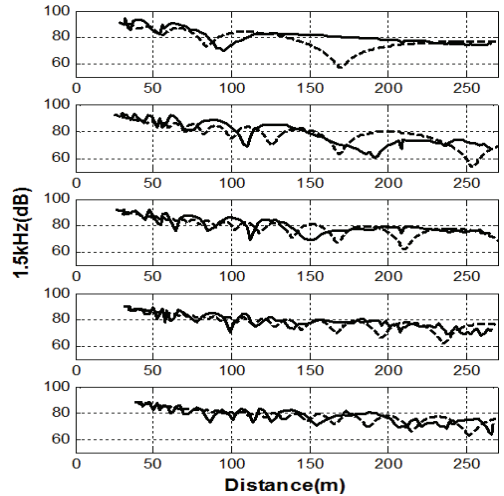


Fig. 4 Interference variation to distance(R_1) of 1.5 kHz frequency of Run #1: receiver depth = 5, 15, 25, 35, and 45 m; — measurement, - - - theory

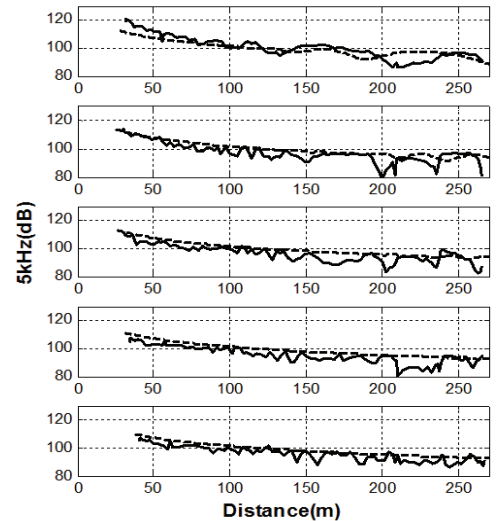


Fig. 5 Interference variation to distance(R_1) of 5 kHz frequency of Run #1: receiver depth = 5, 15, 25, 35, and 45m; — measurement, - - - theory

Run #1에 비해 파고 유효치가 2배인 0.6 m 이고 송신기의 깊이가 14 m인 Table 1의 Run #3 의 1.5, 5 및 15 kHz의 각 주파수의 수신기 거리(R_1)에 따른 5개 수신기 깊이별 간섭 음장 음압 준위와

식 (7)에 의한 이론 치를 비교한 결과는 각각 Figs. 7, 8 및 9와 같다. 실험과 이론적인 결과의 간섭 크기가 전체적으로 일치하지만 해면의 간섭성 반사계수가 작아져 간섭 크기는 Run #1에 비해 상대적

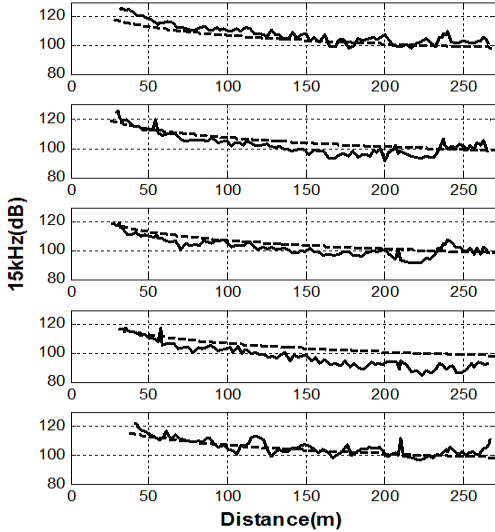


Fig. 6 Interference variation to distance(R_1) of 15 kHz frequency of Run #1: receiver depth = 5, 15, 25, 35, and 45 m; — measurement, --- theory

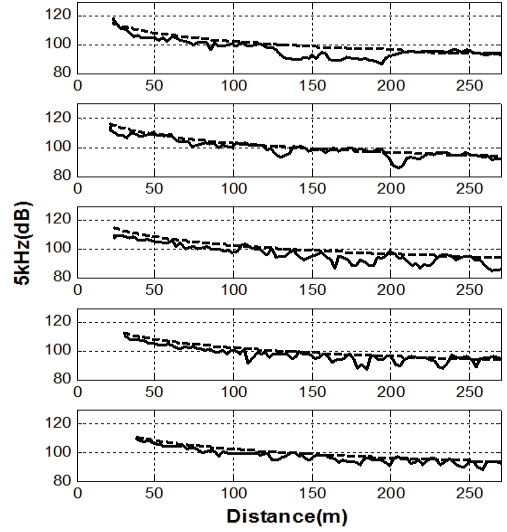


Fig. 8 Interference variation to distance(R_1) of 5 kHz frequency of Run #3: receiver depth = 5, 15, 25, 35, and 45 m; — measurement, --- theory

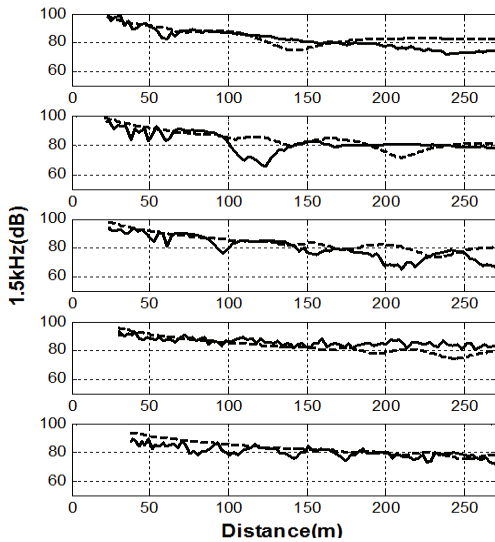


Fig. 7 Interference variation to distance(R_1) of 1.5 kHz frequency of Run #3: receiver depth = 5, 15, 25, 35, and 45 m; — measurement, --- theory

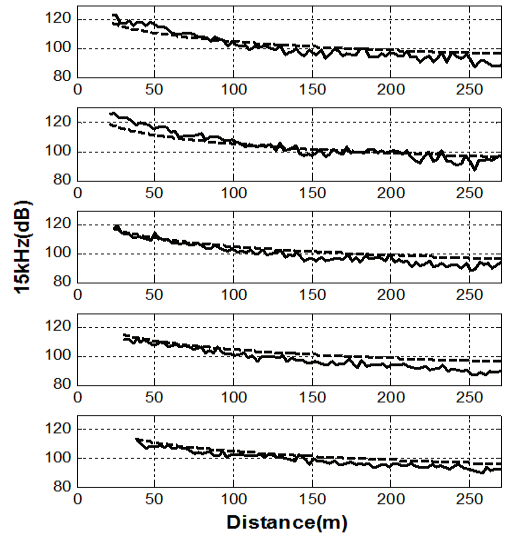


Fig. 9 Interference variation to distance(R_1) of 15 kHz frequency of Run #1: receiver depth = 5, 15, 25, 35, and 45 m; — measurement, --- theory

으로 약하게 나타난다.

결론적으로 식 (4) 와 Table 2에서도 알 수 있는 바와 같이 송수신기 거리가 작을수록, 수신기 깊이가 깊을수록, 파고 유효치 및 주파수가 클수록 상대적으로 간섭 크기는 작아져 직접파가 우세한 음장이 된다.

3. 해면 산란에 의한 방사소음 추정 오차

3.1 방사소음 추정 방법 및 오차

식 (7)의 이론적인 음압 준위의 전달 손실 변이 ΔTL 은 해면의 간섭성 반사에 의한 바이어스 오차이다. 간섭성 반사계수가 -1인 해면 산란이 없는 경우 한 개 수신기의 바이어스 오차 최대치는 6 dB이다. 그러나 ΔTL 은 식 (7)에서와 같이 R_1/R_2 , R_{coh} 및 경로 차에 의한 위상차에 의해 결정되며 원거리인 경우 경로차가 가장 지배적인 변수이다. 따라서 수신기를 수직으로 배열하여 경로차를 달리 하면 각 수신기에서 발생하는 간섭의 극대치가 거리에 따라 다르게 나타난다. 따라서 ΔTL 을 줄이기 위해 3개 이상의 배열 수신기의 세기를 평균하면 간섭성 반사계수가 -1인 해면 산란이 없는 경우 3 dB이 된다.

Fig. 10과 11은 각각 Run #1과 #3의 각 주파수

에 대한 5개 수신기의 세기를 평균한 수신 음압 준위 결과이다. ΔTL 특성을 해석하기 위하여 구면 확산 손실과 비교하였다.

1.5 kHz 주파수는 파고 유효치가 0.3 m(Run #1) 및 0.6 m(Run #3) 조건에서 거리 50 m 이내에서는 ΔTL 이 약 +1 dB이고 그 이상에서는 약 3 dB이다. 5 kHz 주파수는 거리 200 m 이내에서는 ΔTL 이 약 -1 dB이고 그 이상에서는 약 -3 dB이다. 15 kHz 주파수는 거리 증가에 따라 선형적으로 -6 dB까지 감소한다.

전체적으로 주파수가 커질수록 ΔTL 은 (+)값에서 (-)값으로 변화하고 거리, 파고 유효치 및 주파수가 커질수록 편차는 작아진다. 2장에서 기술한 바와 같이 1.5 kHz는 해면 산란 효과가 적어 $|R_{coh}|$ 가 크게 되어 ΔTL 은 약 3 dB로 판단되고 5 kHz는 입사각이 작아지는 200 m 이상에서 ΔTL 은 약 3 dB로 된다. 15 kHz는 전체 거리 영역에서 $|R_{coh}|$ 은 0이므로 직접파만의 음장으로 ΔTL 은 0 dB이다. ΔTL 의 선형적인 증가는 사용한 음원의 지향성, 흡수손실 및 거리오차 등에 의한 것으로 판단된다.

결론적으로 음원의 깊이, 수신기 깊이, 주파수, 해면 입사각 및 파고 유효치를 이용하여 $|R_{coh}|$ 을 구하고, 식 (7)에 의한 ΔTL 의 추정오차 방사소음

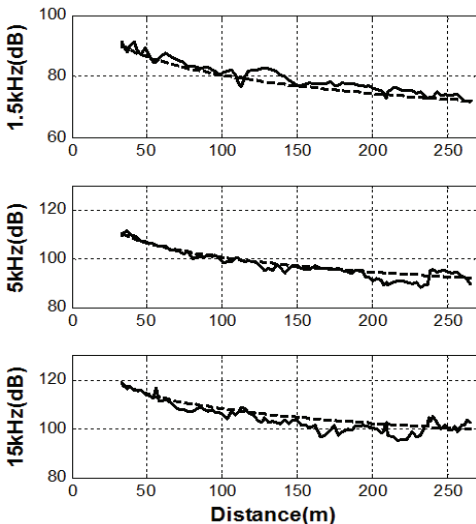


Fig. 10 Average intensity level of 5 receivers of three different frequencies of Run #1; — measurement, --- spherical spreading loss

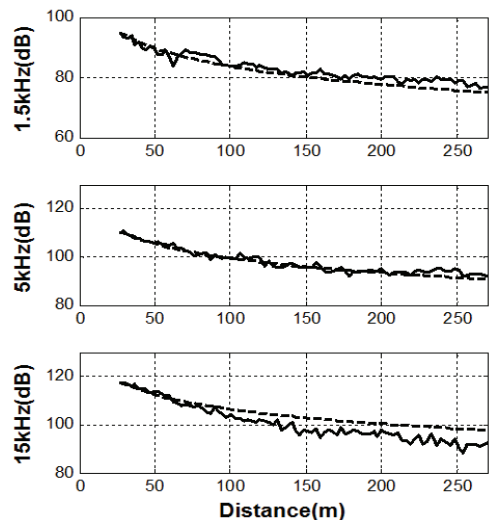


Fig. 11 Average intensity level of 5 receivers of three different frequencies of Run #3; — measurement, --- spherical spreading loss

Table 3 $|R_{coh}|$ variations with respect to sea surface grazing angle and frequency at each source depth, source-receiver range and receiver depth: wind speed = 5 m/s

Source	Source depth (m)	Source-reciever initial ~final range (m)	Grazing angle range of each receiver		$ R_{coh} $ range of each frequency: wind speed=5 m/s, h=.36 m				
			Receiver depth (m)	Grazing angle range(°)	1.5 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	15 kHz
Surface ship	2	225~260	30	8-7	.82-.85	.70-.76	.11-.18	0	0
			50	13-11	.59-.68	.40-.51	.00-.02	0	0
			70	18-15	.37-.50	.17-.29	0	0	0
			100	24-21	.18-.27	.05-.09	0	0	0
			110	26-23	.14-.21	.03-.06	0	0	0
Submerged vehicle	15	48~55	30	43-39	.00-.20	0	0	0	0
			50	53-50	0	0	0	0	0
			70	61-57	0	0	0	0	0
			100	67-64	0	0	0	0	0
			110	69-66	0	0	0	0	0

Table 4 $|R_{coh}|$ variations with respect to sea surface grazing angle and frequency at each source depth, source-receiver range and receiver depth: wind speed = 2.5 m/s

Source	Source depth (m)	Source-reciever initial ~final range (m)	Grazing angle range of each receiver		$ R_{coh} $ range of each frequency: wind speed=2.5 m/s, h=.18 m				
			Receiver depth (m)	Grazing angle range(°)	1.5 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	15 kHz
Surface ship	2	225-260	30	8-7	.95-.96	.91-.93	.57-.66	.11-.18	.01-.02
			50	13-11	.87-.91	.79-.85	.24-.36	.00-.02	0
			70	18-15	.78-.84	.64-.74	.07-.15	0	0
			100	24-21	.65-.72	.47-.56	.01-.03	0	0
			110	26-23	.61-.67	.41-.50	.00-.01	0	0
Submerged vehicle	15	48-55	30	43-39	.30-.36	.12-.17	0	0	0
			50	53-50	.19-.22	.06-.06	0	0	0
			70	61-57	.14-.16	.03-.04	0	0	0
			100	67-64	.11-.12	.02-.02	0	0	0
			110	69-66	.10-.12	.02-.02	0	0	0

추정치 오차의 해석이 가능하다.

3.2 기존 방사소음 측정 시스템의 오차

해면 산란 음장 해석 결과를 기존의 국방과학연구소 측정시스템에 적용하였다. 해상상태는 풍속 약 5 m/s와 2.5 m/s로 가정한다. 송수신기 수평거리

는 약 225 m와 약 48 m를 기준으로 하였다. 해저 반사파 영향은 무시한다.

Table 3과 4는 풍속 5 m/s와 2.5 m/s 해상상태에서 수신기 배열에 대한 $|R_{coh}|$ 특성이다. 풍속 5 m/s, 수상 선박 음원 깊이를 2 m로 가정하고 반사 계수가 0.6 이상일 때의 수신기의 바이어스 오차를 3 dB,

Table 5 Bias errors of radiated noise estimation

Source	Bias error		
Surface ship	Wind speed: 5 m/s	1.5 kHz: ~2 dB	Omnidirectional point source: 2 m depth Source-receiver range: 225~260 m
		2.0 kHz: ~1 dB	
		Above 5.0 kHz: 0 dB	
	Wind speed: 2.5 m/s	1.5 kHz: ~3 dB	
		2.0 kHz: ~2 dB	
		5.0 kHz: ~1 dB	
	Above 10 kHz: 0 dB		
Under-water vehicle	Wind speed: 5 m/s	Above 1.5 kHz: 0 dB	Omnidirectional point source: 15 m depth
	Wind speed: 2.5 m/s	Above 1.5 kHz: 0 dB	Source-receiver range: 48~55 m

그 이하에 대해서 0으로 가정하면 바이어스 오차의 유효치는 1.5 kHz는 약 2 dB, 2 kHz는 약 1 dB, 5 kHz 이상은 0 dB이다. 수중음원 깊이를 15 m로 가정하면 모든 수신기 및 주파수에서 반사계수는 0으로 근사되므로 바이어스 오차는 0 dB이다.

풍속 2.5 m/s의 해상상태에서 수상선박의 음원의 경우 1.5 kHz는 약 3 dB, 2 kHz는 약 2 dB, 5 kHz는 1 dB, 10 kHz 이상은 0이다. 수중음원 깊이가 15 m인 경우 모든 수신기 및 주파수에서 반사계수는 0으로 근사되므로 바이어스 오차는 0 dB이다.

Table 5는 이상의 결과를 요약한 것으로 국방과학 연구소의 측정시스템의 1.5 kHz 이상의 주파수 대역의 바이어스 오차 특성이다.

4. 결 론

이 연구에서는 해면 산란과 음장 특성을 해면에 대한 음파의 입사각도, 파고 유효치, 주파수, 송수신기의 거리와 깊이 함수로 해석하였다. 실 해역 실험 결과와 이론 치를 비교하고 산란 음장이 선박 방사소음 음원준위 추정치에 미치는 영향을 해석하였다.

송수신기간의 거리가 작아지고 수신기의 깊이가 깊어질수록 해면 반사파 입사각이 커지고 간섭성 반사계수 $|R_{coh}|$ 가 작아져 해면 반사파의 영향을 적게 받으며 음원의 주파수와 파고 유효치가 커지는

경우에도 해면 반사파의 영향을 적게 받게 된다.

파고 유효치가 0.3 m와 0.6 m인 해상 상태에서 1.5, 5.0 및 15 kHz의 연속 순음 신호를 이용한 간섭 음장 실험 결과는 이론적인 결과와 일치하여 송수신기 거리가 작을수록, 수신기 깊이가 깊을수록, 파고 유효치가 클수록 상대적으로 간섭 크기는 작아져 직접파가 우세한 음장이 된다. 해석 결과를 기존의 방사소음 추정 방법에 적용하여 1.5, 5.0 및 15 kHz의 전달 손실 변이의 오차 범위는 해상 상태, 송수신기간의 거리 및 주파수에 따라 약 1~3 dB 범위를 보였다. 이러한 결과를 현재 사용하고 있는 방사소음 측정 시스템에 적용하여 해면 산란 크기를 지배하는 풍속, 음원 깊이 및 주파수에 따른 방사소음 음원준위 추정치 오차의 크기를 제시하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 국방과학연구소 제6기술연구본부의 지원을 받아 수행한 연구입니다(UE12000 8DD).

References

- (1) Ross, D., 1976, *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press.
- (2) Urick, R. J., 1983, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw- Hill.
- (3) Gray, L. M. and Greely, 1980, Source Level Model for Propeller Blade Rate Radiation for the World's Merchant Fleet, the *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 67, pp. 516~622.
- (4) Trevorrow, M. V. and Vasiliev, B., 2008, Directionality and Maneuvering Effects on a Surface Ship Underwater Acoustic Signature, the *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123, No. 2, pp. 767~778.
- (5) Scrimger, P. and Heitmeyer, R. M., 1991, Acoustic Source-level Measurements for a Variety of Merchant Ships, the *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 2, pp. 691~699.
- (6) Arveson, P. T. and Vendittis, D. J., 2000, Radiated Noise Characteristics of Modern Cargo Ship,

the Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 107, No. 1, pp. 118~129.

(7) Matthews, D. N., Hall, M. V., Jessup, B. L., Mentjov, J. and Formby, P., 2000, Accurate Measurement of Ship Acoustic Signatures in Shallow Water, Conference Proceedings of Undersea Defence Technology.

(8) Carof, A., 2001, Acoustic Radiated Noise Measurement of Quiet Submarines in Very Shallow Water Conditions, Conference Proceedings of Undersea Defence Technology.

(9) ANSI/ASA S12.64-2009/Part1, 2009, American National Standard, Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships-Part I: General Requirements.

(10) Chotiros, N. P., 1988, Source Level Estimation of a Monopole Source at Rest in the Presence of Multipath, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84, No. 2, pp. 703~712.

(11) Lee, P. H. and Yoon, J. R., 2005, Ship Radiated Noise Measurement Methods and Accuracy Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 738~748.

(12) Medwin, H. and Clay, C. S., 1998, Fundamentals of Acoustical Oceanography, Academic Press, New York.

(13) Roux, P., Culver, R. L. and Walker, 2010, Application of the Coherent-to-incoherent Intensity Ratio to Estimation of Ocean Surface Roughness from High-frequency Shallow-water Propagation Measurements, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 127, No.3, pp. 1258~1266.



Kyu-Chil Park received the BS and MS degrees in Department of Electronic Engineering from Pukyong National University, Busan, Korea in 1993 and 1995, respectively and the PhD degree in Division of Science and Technology for Intelligence, Graduate School of Natural Science and Technology from Okayama University, Okayama, Japan in 2000. Since 2002, he

has been a Professor in Department of Information and Communications Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea. His research interests include Underwater Acoustic Signal Processing, Adaptive Signal Processing, Numerical Analysis, Optimization and Inverse Problem in Engineering.



Jihyun Park received the BS degree in Telematics engineering from Busan National University in 2000, and the MS and PhD degrees in Telematics Engineering from Pukyong National University in 2002 and 2008, respectively.

His current research interests include underwater signal processing and underwater acoustic communication system design.



Chulwon Seo received the BS degree in Dept. electronic and information and communications engineering from Pukyong National University. He is currently studying for an MS course at Pukyong National University. His

research interests are underwater acoustic communication and digital signal processing.



Jae Yong Choi received the BS and MS degrees in Department of Electronic Engineering from Kyungpook National University, Daegu, Korea, in 1994 and 1996, respectively. Since 1996, he has been a researcher at Agency for

Defense Development in Jinhae. His primary interests are underwater acoustic signal measurement, signal processing, analysis, and classification.



Phil-Ho Lee received the BS and MS degrees in Department of Physical Oceanography from Inha University, Incheon, Korea, in 1985 and 1987, respectively and the PhD degree in Electronic and Telecommunication Engineering

from Pukyong National University in 2005. Since 1990, he has been a researcher at Agency for Defense Development in Jinhae. His primary interests are underwater acoustics and underwater acoustic signal measurement, analysis, and classification.



Jong Rak Yoon received the MS and PhD degrees in ocean engineering from Florida Atlantic University in 1987 and 1990, respectively. From 1979 to 1985, he had worked at Agency for Defense Development as a re-

search scientist. Since 1990, he has been a faculty

member in Department of Information and Communication Engineering, Pukyong National University. His primary interests are underwater acoustics and acoustic signal processing, with emphasis on underwater acoustic signal measurement, analysis, classification and underwater acoustic communication.