

천해 수중소음의 수평적 상관관계

Horizontal Cross Correlation of Shallow Water Noise

* 이효근 (Lee, Hyo Keun)

** 김영선 (Kim, Young Sun)

*** 김성부 (Kim, Sung Boo)

(Abstract)

Experimental measurements of spatial correlation were made using the horizontal array in shallow water. The hydrophone outputs were passed through 1/3 octave filters of 63 to 315 Hz center frequencies. The experimental results were compared with the theoretical ones of Buckingham model. The agreement is good for frequency below 100 Hz but poor above 200 Hz. According to our results, shallow water noise model of Buckingham should not have disregarded the near-field sources because (1) experimental results for frequency above 200 Hz show the shift of zero-crossing point, (2) according to Kuperman and Ingenito, the near-field sources make a zero-crossing point shift, (3) the near-field contributions increase rapidly than do the far-field contributions as the sea state increase.

(요 약)

수심 65m의 해역에서 해면으로부터 10m 깊이에 수평 청음기 배열을 설치하여 수중소음의 상관관계를 측정하였다. 분석은 FFT(Fast Fourier Transformation) 방식을 이용하여 63Hz에서 315Hz까지의 저주파 영역에서 True 상관계수를 직접 얻었다. Buckingham의 천해 모델과 비교한 결과 160Hz 이하에서는 이론치와 거의 같았으나 200Hz 이상에서는 이론치와 많은 차이를 보였다. 이는 200Hz 이상에서 결과치의 Zero-Crossing point가 이동된 것을 보인면이나 Kuperman과 Ingenito의 천해 모델에서 near-field의 영향이 Zero-crossing point를 이동시킨다는 사실, 또 주파수가 높아질수록 해상상태의 영향을 받는다는 심해 수중소음의 상관관계에 대한 실험결과등을 비교해 볼때 near-field소음원의 영향을 무시한채 far-field 소음원의 영향만을 고려한 Buckingham의 천해 모델이 갖는 제한성을 나타낸 것이라 볼 수 있다.

I. 서 론

해양에서의 음파신호 탐지는 항상 소음속에서 이루어진다.

청음기들의 배열은 이들 소음에 대한 이득을 제공하며 이는 곧 배열이득(Array Gain)에 기여하게 된다. 배열이득은 신호 및 소음의 상관관계 함수에 관계되며 Array Processing에 큰 영향을 준다. 또한 이 상관관계 함수는 배열 형태와 소음원의 지향특성에 영향을 받는다. 이러한 상관관계의 연구는 1962년 Cron과 Sherman^{*)}이 심해 수중소음 모델을 발표함으로써 본격화 되었다. 해면과 해저로부터의 영향을 배제할 수 있는 비교적 이상적인 환경을 택한 이 모델은 많은 사람들에게 의해 수중소음원의 특성을 연구 하는데 이용되었다.^{1) 2) 3)} 그후 Liggett와 Jacobson은 이 심해 모델에서 해면소음원이 갖는 상관관계에 대하여⁴⁾ 또 H. Cox는 해면소음원의 지향성에 관한 발표를 함으로써⁵⁾ 심해 수중소음 모델을 발전시켰다. 다시 관심은 심해보다 좀더 많은 변수를 안고 있는 천해로 돌려졌다. 천해 수중소음은 해면과 해저의 경계면을 따라 mode를 형성하며 전달되므로 심해와는 달리 해저상태, 수심 등이 소음의 상관관계에 영향을 미치리라는 생각에서였다. Kuperman과 Ingerito⁶⁾의 천해 모델에 따르면 천해 수중소음은 near-field 소음원으로부터의 연속적인 mode와 far-field 소음원으로부터의 불연속적인 mode로 구성되어 있으며, Buckingham은 해저로부터의 손실이 적을 경우 수중소음의 상관관계는 주로 far-field 소음원의 영향을 받는다는 가정하에 천해 수중소음 모델을 발표하였다⁷⁾. 이러한 가정에서 출발한 천해 모델과 전술한바 있는 심해 모델, 그리고 실험결과를 비교함으로써 Buckingham의 천해 모델이 갖는 제한점 및 심해 모델과의 차이점을 살펴보고자 한다.

II. 이 론

A. Cron과 Sherman의 심해 모델^{*)}

Cron과 Sherman에 의해 발표된 심해 모델은 체적소음 모델과 해면소음 모델로 분류된다. 이들은 다 같이 통계적으로 독립적인 소음원을 가지며 이중 체적소음 모델은 소음원이 반경이 큰 구 내에 균일하게 분포되어 등방성 소음장을 만들고, 해면소음 모델은 소음원 각각이 수직선과 이루는 각 θ 에 대하여 $g(\theta) = \cos^n \theta$ 의 지향성을 갖는다는 가정하에 다음과 같은 모델을 만들었다.

1) 체적소음 (Volume Noise)

① 단일주파수일 때

$$\rho(x) = \frac{\sin 2\pi x}{2\pi x}$$

② Flat bandwidth 일때

$$\rho(x) = \frac{1}{2\pi x (b - \frac{1}{b})} [\text{Si}(2\pi x b) - \text{Si}(2\pi x / b)]$$

2) 해면소음 (Surface Noise)

① 단일 주파수일 때

$$\rho(x) = \frac{2^n n! J_n(2\pi x)}{(2\pi x)^n}$$

② Flat bandwidth^{*)} 일때

$$\rho(x) = \frac{2^n n!}{2\pi x (b - \frac{1}{b})} \int_{1/\pi x}^{b/\pi x} \frac{J_n(u)}{u^n} du$$

여기에서

$\rho(x)$: 수중소음의 상관계수

$x = d/\lambda_e$

d : 청음기 상호간의 간격

$b^2 = f_2/f_1$

$\lambda_e = C/\sqrt{f_1 f_2}$

$$\text{Si}(u) = \int_0^u \frac{\sin x}{x} dx$$

B. Buckingham의 천해 모델⁷⁾

심해 모델과는 달리 경계면에 의해 영향을 받는 천해 수중소음은 해저면으로부터의 손실이 적다고 가정하면 넓은 해면에 걸쳐 분포되어 있는 far-field 소음원에 의해 보다 많은 영향을 받는다.

리라는 가정하에 near-field의 영향을 무시한채 far-field만을 고려하였다. 이때의 far-field 소음은 경계면에 의해 normal mode를 형성하며 임계각 α_c 보다 크지 않은 각도로 입사하며, 이를 directional density function을 통해 유도된 상관관계는 다음식으로 표시된다.

$$\rho(x) = \frac{1}{M} \sum_{s=1}^M J_0 \left[2\pi x \left(1 - \left(\frac{S}{M} \right)^2 \sin^2 \alpha_c \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

특히 mode수 M이 10보다 클 경우

$$\rho(x) = J_0(2\pi x) + \left[\frac{2\pi x J_1(2\pi x)}{6} \right] \sin^2 \alpha_c + \left[\frac{(2\pi x)^2 J_2(2\pi x)}{40} \right] \sin^4 \alpha_c + \dots$$

로 전개 가능하다.

여기에서

$$x = d/\lambda_g$$

$$\lambda_g = c/\sqrt{f_1 f_2}$$

M : Mode수

α_c : 임계각 (critical angle)

J_n : Bessel 함수 1st kind, nth-order

다음은 Cron과 Sherman의 심해 모델과 Buckingham의 천해 모델을 비교한 것이다. 즉 그림 1, 2에서 보듯이 천해 모델은 $n=0$ 인 심해 모델과 유사하다. d/λ 가 클수록 다만 Zero-crossing point가 shift된다는 점이 다르다. 또 그림 3, 4는 mode수 M을 10이상으로 할때 천해 모델의 임계각에 따른 상관관계의 변화를 본 것이다. 임계각이 적을수록 천해 모델은 심해 모델 ($n=0$)에 가까워지며, 임계각이 크면 심해 모델과는 달리 천해 경계면의 영향을 많이 나타낸다고 볼 수 있다. Buckingham의 천해 모델은 임계각 α_c 를 40° 까지로 제한하고 있다.

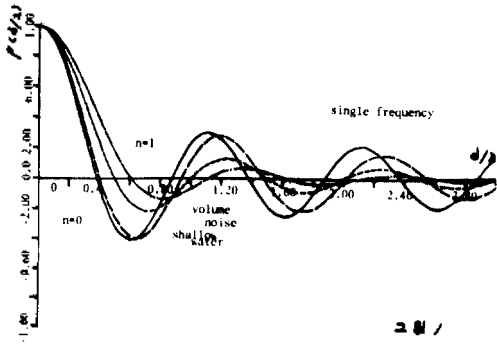


그림 1

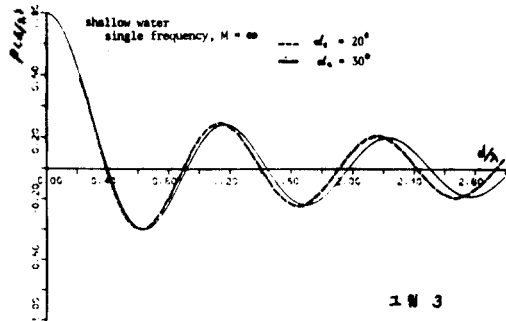


그림 3

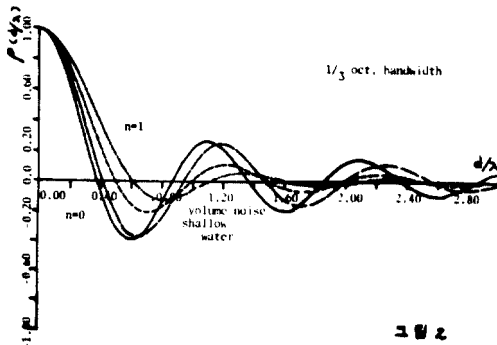


그림 2

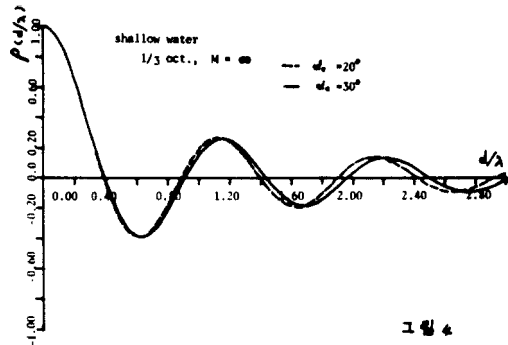


그림 4

C. 소음이득

N 개의 수중 청음기를 일정한 간격 d로 수평 배열할 경우 얻을 수 있는 소음이득은 다음과 같다.

$$G_N = \left[1 + 2 \operatorname{Re} \sum_{s=1}^M \frac{N-s}{N} \rho_s \exp(isk \cos \beta) \right]^{-1}$$

여기에서

N : 청음기 갯수

ρ_s : 수중소음의 상관계수

β : Steering Angle

M : mode 수

Re x : x 의 실수부

또 청음기 갯수를 무한히 많이 할 경우 윗식은 다음과 같이 변형된다.

$$G_{N \rightarrow \infty} = \frac{1}{2} kdM \left[\sum_{s=1}^M \left[\sin^2 \beta - \left(\frac{s}{M} \right)^2 \sin^2 \alpha_c \right]^{-\frac{1}{2}} \right]^{-1}$$

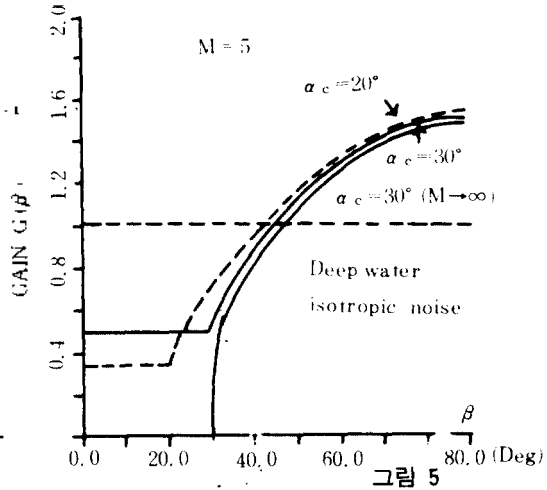
$$M = \begin{cases} E(M \sin \beta / \sin \alpha_c) & , \beta < \alpha_c \\ M & , \beta \geq \alpha_c \end{cases}$$

mode 수 M이 무한히 많다고 하면 윗식은 다시

$$G_{N \rightarrow \infty} = \begin{cases} \left(\frac{kd}{M} \right) \sin \alpha_c & , \beta < \alpha_c \\ \frac{\left(\frac{kd}{\pi} \right) \sin \alpha_c}{1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_c}{\sin \beta} \right)} & , \beta \geq \alpha_c \end{cases}$$

로 된다. 그림 5는 임계각 α_c 가 각각 20°, 30° 일 때 천해 모델로부터 얻을 수 있는 소음 이득을 Steering angle β 의 함수 꼴로 표시한 것이다. 여기에서 수평점선은 심해 체적소음 모델로부터 얻을 수 있는 소음이득으로 이제 이들로부터 다음과 같은 정보를 끌어낼 수 있다. Steering angle β 가 $\frac{\pi}{2}$ 일 때 천해 모델은 심해 체적소음 모델보다 약 2dB 정도 큰 소음이득을 가지며 이러한 소음이득의 증가는 임계각 α_c 가 작을수록 크게 나타난다.

환경에 따른 임계각과 mode 수는 소음이득에 이렇듯 하나의 변수를 작용하게 된다.



III. 실험방법 및 결과

A. 실험방법

1) 실험시 주위환경

- ① 해상상태 : 2
- ② 바닥상태 : Fine sand
- ③ 음속 수직분포 : -2.5°C/10m

2) 실험방법

앞에서 설명한 바와 같이 상관계수 ρ 는 수중 청음기 상호간의 간격 d의 함수이다. 한정된 갯수의 수중 청음기로 가장 많은 가지수의 간격 d를 얻기 위해서는 등간격이 아닌, 서로 다른 간격의 배열이 필요하다. 또 d/λ 가 3.0 이상에서는 상관계수 값으로부터 규칙성을 찾을 수 없기 때문에 d/λ 를 3.0 이하로 제한하였다.

해상에서 수중소음을 측정할 때 문제가 되는 Flow Noise, 조사선으로부터의 소음 등을 줄이기 위해 그림 6와 같이 청음기 배열을 조사선에서 약 30m 떨어뜨리고 배의 발전기를 정지 시킨채 함께 표류하였다.

그림 7에서 보인 것처럼 수중 청음기에 닿은 수중소음을 각각 Measuring Amplifier를 거쳐 다중채널 녹음기에 녹음시켰다. 또 녹음된 이질 수중소음을 1/3 octave 폭의 Filter를 통한 후

에 분석기에서 분석되었다.

이러한 방법으로 얻어진 상관계수 값을 앞서 설명한 이론적 모델들과의 비교를 위해 모델의 곡선위에 주파수별로 표시 하였다.

3) 사용장비

- ① 수중 청음기 : B & K 8101 hydrophone

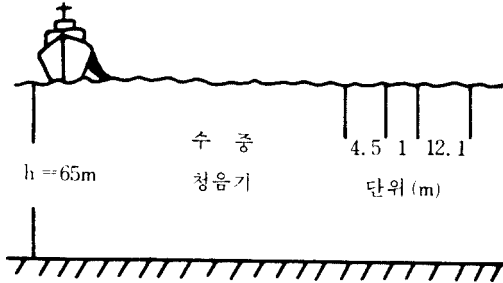


그림 6

B. 실험결과

그림 8, 9, 10에서 보인것 처럼 160Hz 이하에서는 실험치들이 천해 모델의 이론치 주위에 분포되어 있으나, 200Hz 이상에서는 이론치들로부터 크게 벗어나 있다. 즉 200Hz 이상의 수중소음을 Buckingham의 천해 모델로 설명하기에는 문제가 있다고 하겠다. 심해 수중소음의 상관관계에 대한 실험결과에 의하면 저주파 영역 (~ 수 100Hz)에서 주 소음원은 원거리에 있고 해상 상태에 많은 영향을 받으며 배열에 대한 입사각이 큰 소음의 영향이 증대된다¹¹⁾ 즉 주파수가 증가할수록 배열주위의 해면에 분포되어 있는 소음원이 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 200 Hz 이상의 주파수 영역에서 주 소음원은 해면에 분포되어 있으며 이들은 해상상태에 따라 Buckingham의 천해 모델이 적용 가능한 최대 임계각 40°보다 큰 입사각에서 연속적인 mode 형태의 near-field를 형성하며 배열에 와 닿는다. 이의 영향은 Zero-crossing point의 이동⁶⁾으로 나타나며 그림10에서 또한 이러한 경향을 볼 수 있다. 결국 Buckingham의 천해 모델은 160Hz 이하에

- ② 증폭기 : B & K 2610, 2607 Measuring Amplifier

- ③ 필터 : B & K 1617 Band pass Filter

- ④ 다중채널 녹음기 : Honeywell 5600c 14-channel Recorder

- ⑤ 분석기 : HP 5420 Digital Signal Analyzer

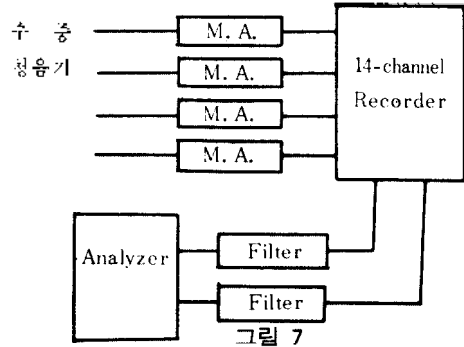


그림 7

서는 사용 가능하나 200Hz 이상에서는 near-field의 영향으로 인하여 적용하기 어렵다 하겠다.

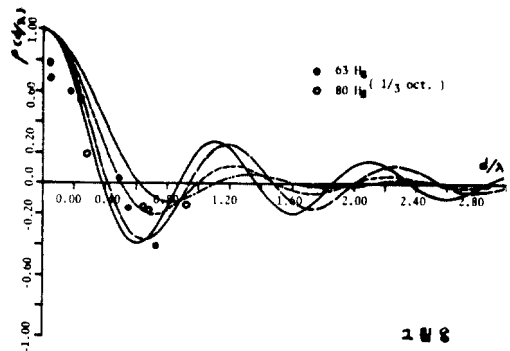


그림 8

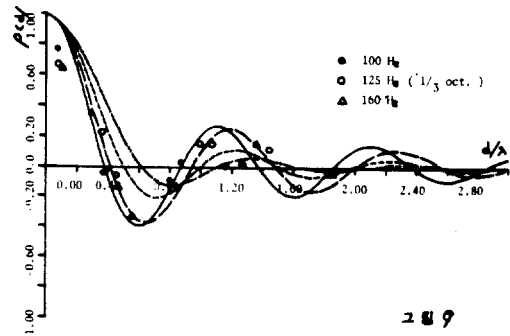


그림 9

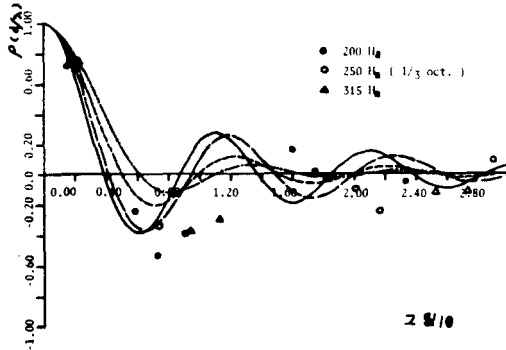


그림 10

IV. 결 론

Buckingham의 천해 모델은 160Hz 이하에서 천해 수중 소음의 상관관계를 잘 설명하고 있다. 그러나 200Hz 이상의 주파수 영역에 이를 적용하기에는 문제가 따른다. 이는 수중소음장에서 near-field부분을 제거한 때문으로 생각되며 이러한 제한성을 극복하기 위해서는 주파수 영역 및 해상상태에 따라 near-field부분도 함께 감안하는 새로운 접근방법이 있어야 한다.

V. 참고문헌

- 1) George R. Fox, "Ambient-Noise Directionality Measurements," J. Acoust. Soc. Am. 36, 1537-1540 (1964)
- 2) B. F. Cron, B. C. Hassell, and F. J. Kelton, "Comparison of Theoretical and Experimental values of Spatial Correlation," J. Acoust. Soc. Am. 37, 523-529 (1965).
- 3) E. H. Axelrod, B. A. Schooner, and W. A.

Von Winkle, "Vertical Directionality of Ambient Noise in the Deep Ocean at a Site near Bermuda," J. Acoust. Soc. Am. 37, 77-83 (1965).

- 4) W. S. Liggett, Jr., and M. J. Jacobson, "Covariance of Surface-Generated Noise in a Deep Ocean," J. Acoust. Soc. Am. 38, 303-312 (1965).
- 5) H. Cox, "Spatial correlation in arbitrary noise fields with application to ambient sea noise," J. Acoust. Soc. Am. 54, 1289-1301 (1973).
- 6) W. A. Kuperman, and F. Ingenito, "Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean," J. Acoust. Soc. Am. 67, 1988-1996 (1980)
- 7) M. J. Buckingham, "Spatial coherence of wind-generated noise in a shallow ocean channel," J. Acoust. Soc. Am. 70, 1412-1420 (1981)
- 8) B. F. Cron, and C. H. Sherman, "Spatial Correlation Functions for Various Noise Models," J. Acoust. Soc. Am. 34, 1732-1737 (1962).
- 9) E. M. Arase and T. Arase, "Correlation of Ambient Sea Noise," J. Acoust. Soc. Am. 40, 205-210 (1966).