

# 수중청음기 배열의 간격 및 깊이 변화에 따른 측정 소음준위 오차 Sound Source Level Error on Element Spacing and Depth of Hydrophone Array

윤종락\*  
Yoon, Jong-Rak

신현옥\*  
Shin, Hyun-Oak

노용주\*\*  
Rho, Yong-ju

## ABSTRACT

Ship radiated noise is an important parameter which determines Anti Submarine Warfare (ASW) countermeasure or passive Sonar detection and classification performance. Its measurement should be performed under controlled ocean acoustic environment.

In data reduction of the measured data from hydrophone array, the effect of ambient noise, surface reflection and bottom reflection etc. should be compensated to obtain the source level of the ship radiated noise. This study describes the measurement hydrophone array design criteria based on the analysis of transmission anomaly due to the surface reflection.

## 1. 서 론

선박방사소음의 측정은 크게 ①보조기계류의 방사소음측정과 ②선박기동중의 방사소음 측정으로 대별되고 ①은 선박의 주기관정지상태에서 각 보조기계들의 기계소음특성 및 기관공진특성을 측정하는 것으로 해저저질이 별인 조건에서 수심 10m 이상인 해역에서 측정하는 것으로 알려져 있고 측정목적은 기계류의 방사소음에 대한 기여도 및 기계류의 동작상태를 진단하는데 있다. ②는 추진기관 및 프로펠라소음의 측정으로 저속력에서는 추진기관의 Tonal(선스펙트럼) 특성, 고속력에서는 프로펠라의 캐비테이션소음특성 측정을 목적으로 하여 저질이 별인 조건에서 500m 이상의 수심에서 행한다. Fig. 1.1은 DTRC(David Taylor Research Center)에서 운용하고 있는 잠수함의 방사소음 측정시스템으로 측정된 방사소음 분석자료가 수동소나의 운용 및 선박상태에 대한 진단자료

로 활용할 수 있도록 배경소음, 해면반사파 효과(Lloyd Mirror 효과), 해저반사파 효과, 도플러 효과 및 측정시스템의 해류에 대한 영향(청음기의 mislocation) 등을 고려하여 수신된 처리는 후처리 과정을 거치게 된다.

본 연구는 이들 측정영향인자 중에서 해면반사파의 영향을 고려하여 신뢰성있는 선박방사소음의 소음준위를 측정하기 위한 배열구조를 제안한 내용이다. 배열구조를 결정하는 변수는 선박소음원의 깊이, 측정주파수대역, 배열과 피측정 선박과의 수평거리 및 배열의 청음기 갯수를 고려하였고 무지향성 연속과 선박소음원을 점음원으로 가정하여 해면반사파에 의한 음원준위 변동량을 최소화하기 위한 배열구조 및 측정자료분석 기준을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

해면과 해저로 경계지워져 있는 해양환경에서 선박소음과 같은 연속파 음원이 방사하는 경우 청

\* 부경대학교(구 부산수산대학교) 교수

\*\* 부경대학교 정보통신공학과 석사과정

음기에 수신되는 음은 직접파 및 복반사음이 합성되어 측정된다. 음원과 청음기가 수심에 비해 상대적으로 원거리에 위치하는 경우 음원준위를 측정하기 위해서는 음원과 청음기 간의 음파전달모델을 예측하여 측정자료에 상승적분의 역과정을 거쳐(Deconvolution) 음원준위가 예측될 수 있다. 그러나 음선이론이나 모드이론 등에 근거한 실제 해양환경에 대한 음파전달모델의 정확도는 해저의 음향적 특성변화, 경사도 등에 의해 모델링 자체가 간단하지 않다.

본 연구에서는 음원과 수중청음기 배열이 해저면에 비해 상대적으로 해면에 가까이 있다는 가정하에 수중청음기에 수신되는 음은 직접파와 해면에 의해 한번 반사되는 음파만으로 구성되는 측정환경을 고려하였다. 즉 해저에 의한 반사파 경로는 직접파 및 해면반사파 경로보다 상대적으로 크다는 가정이다. 이러한 사실은 미해군연구소에서 운용하고 있는 방사소음측정시스템이 대부분의 저질이 별인 500m 이상의 수심에서 운용되어 해저에 의한 반사파 영향을 무시하고 측정자료를 분석하고 있다는 사실과 일치한다.

이러한 경우 수중청음기 배열에 수신되는 음파 전달모식은 Fig.2.1.과 같다. 그림에서 i번째 수중청음기에 수신되는 음압은 다음식으로 주어진다.

$$P_i = \frac{A}{r_{di}} e^{j(\omega t - kr_{di})} - \frac{\mu A}{r_{si}} e^{j(\omega t - kr_{si})}$$

$$= A \left( \frac{e^{-jkr_{di}}}{r_{di}} - \frac{\mu e^{-jkr_{si}}}{r_{si}} \right) = A \phi_i e^{j\omega t}$$

$$= \hat{p} e^{j\omega t} \quad (1)$$

여기서 A : 소음원의 1m 위치에서 기준음압

$r_{di}$  : i번째 청음기의 직접파 경로

$r_{si}$  : i번째 청음기의 해면반사파 경로

$\mu$  : 해면의 음압반사계수

$\phi_i$  : 경로차에 의한 복소진폭변화량

$\hat{p}$  : i번째 청음기의 복소음압 진폭

식 (1)로 주어지는 측정음압 순시치로부터 계산되는 음압은 다음식으로 주어진다.

$$P_i = |\hat{p}| = A \sqrt{\left(\frac{1}{r_{di}}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_{si}}\right)^2 - \frac{2\mu}{r_{di}r_{si}} \cos \theta} \quad (2)$$

여기서,  $\theta = k(r_{di} - r_{si})$ 는 직접파와 반사파의 위상차이다.

또한,  $r_{di} = \sqrt{R^2 + (d-h_i)^2}$ ,  $r_{si} = \sqrt{R^2 + (d+h_i)^2}$

$\theta = \frac{2\pi f}{c} (\sqrt{R^2 + (d-h_i)^2} - \sqrt{R^2 + (d+h_i)^2})$  이므로,

결국 청음기에 측정되는 음압은 소음원과 수중청음기 배열간의 수평거리 R, 청음기 및 소음원의 깊이 d, 소음원의 주파수 f의 함수로 주어진다. 즉 동일한 음압을 갖는 소음원일지라도 주파수가 다른 경우  $\theta$  인자에 의해 측정되는 음압은 달라지게 된다. 따라서 측정자료로부터 소음원의 기준음압을 유도하기 위한 분석은 모든 주파수에 대해 일의적으로 행해질 수 없다. Fig.2.2는 R=200m, d=3m,  $\mu=1$ 인 경우 청음기의 깊이에 따른 음압 주파수별 변화특성을 보인다. 그림에서 보는 바와 같이 청음기 깊이에 따라 측정음압은 구배를 보이고 아울러 주파수에 따라 구배의 형태가 달라 동일한 음원준위(SL:Sound Level)를 갖는 경우에도 서로 다른 크기로 측정됨을 보인다.

실제의 측정자료로부터 요구되는 자료는 음원준위로 이 값은 다음식으로 정의된다.

$$SL = 20 \log \left( \frac{A}{P_{ref}} \right) \quad (3)$$

식 (2)의 음압준위(SPL:Sound Pressure Level)는 다음식으로 주어진다.

$$SPL = 20 \log \frac{A}{P_{ref}} + 10 \log \left( \frac{1}{r_{di}^2} + \frac{1}{r_{si}^2} - 2 \frac{\mu \cos \theta}{r_{di}r_{si}} \right)$$

$$= SL - TL \quad (4)$$

여기서 TL은 해면반사파가 있는 경우의 전파손실에 해당한다.

TL과 구면전파손실인  $10 \log \frac{r_{di}^2}{r_0^2}$  와 차이를 Transmission Anomaly  $\Delta$ 로 정의하면

$$\Delta = 10 \log \left( \frac{1}{r_{di}^2} + \frac{1}{r_{si}^2} - 2 \frac{\mu \cos \theta}{r_{di}r_{si}} \right) - 10 \log \frac{1}{r_{di}^2}$$

$$= 10 \log \left( 1 + \frac{r_{di}^2}{r_{si}^2} - 2\mu \frac{r_{di}}{r_{si}} \cos \theta \right) \quad (5)$$

Fig. 2.3은 Transmission Anomaly  $\Delta$ 의 청음기 깊이에 따른 변화특성이다.

실제 측정자료로부터 음원준위를 구하기 위해 구면파 전파손실특성을 적용한다면 그림에서 보는 바와 같이 청음기의 깊이에 따라 -40dB~6dB의

범위로 실제 음원준위와 다르게 예측될 것이다. 또한 특성의 수심, 예를 들면 50m 위치에 청음기가 있는 경우 500Hz의 경우는 6dB 높게 음원준위가 예측될 수 있으나 1000Hz의 경우는 실제보다 40dB 낮게 측정될 것이다. Fig. 2.4는 소음원과 수중청음기 배열간의 거리 200m, 소음원의 깊이 3m, 해면반사계수 1인 경우 소음원의 주파수와 청음기의 깊이의 변화에 따른 Transmission Anomaly  $\Delta$ 의 변화특성이다.

다음절에서는 이러한 주파수별 음원준위의 편이를 최소화하고 Transmission Anomaly  $\Delta$ 의 편차를 최소화하기 위한 청음기 배열에 대해서 기술한다.

### 3. 음원준위 측정모델 및 수중청음기 배열구조

2절에서 해석한 바와같이 측정자료로부터 음원준위를 산출하기위해 보상해야할 전달손실은 주파수  $f$ , 음원깊이  $d$ , 청음기깊이  $h$ , 수평거리  $R$ 의 함수로 측정환경의 다양성에 의해 일의적으로 적용할 수 없다. 따라서 특성의 선박소음을 측정하는 경우 소음원의 중심깊이는 일정하다고 가정하고 또한 수평거리  $R$ 은 파축정선박의 조종성 및 거리측정기의 정확도에 좌우되나 대체적으로 그 변화를 무시해도 좋을 것이다. 이러한 가정하에 수중청음기의 깊이 변화에 대한 측정자료의 변동성분은 청음기 배열을 사용하여 각 청음기의 수신신호를 조화평균함으로써 변동의 크기를 줄일 수 있다. 즉 Transmission Anomaly  $\Delta$ 의 크기를 최소로 할 수 있는 청음기배열구조 및 측정자료처리방법이 요구된다.

Chotiros의 연구에 의하면 음원준위를 예측하기 위한 각 청음기 출력신호의 조화평균 방법은 다음과 같이 4가지로 요약된다.

- 각 청음기 출력의 세기 평균 :

$$10 \log \left( \sum_{i=1}^M \frac{|\hat{p}_i|^2}{M \rho c} \right) \quad (6-1)$$

- 각 청음기 출력의 상용대수 세기 평균 :

$$10 \sum_{i=1}^M \log \left( \frac{|\hat{p}_i|^2}{\rho c} \right) / M \quad (6-2)$$

- 각 청음기 출력의 음압 평균 :

$$10 \log \left( \left| \sum_{i=1}^M \frac{\hat{p}_i / M}{\rho c} \right|^2 \right) \quad (6-3)$$

- 각 청음기 출력에 대한 직접음파의 위상보상평균 :

$$10 \log \left\{ \sum_{i=1}^M \frac{\hat{p}_i e^{-j\theta_i}}{M} \right\}^2 / \rho c \quad (6-4)$$

여기서  $M$ 은 배열의 갯수이다. Chotiros의 상기 식 (6)들에 대한 적용은 해저 및 해면에 의한 복반사음의 반사파 경로가 Rayleigh 확률분포특성을 갖는다는 가정과 각 경로는 통계적으로 독립이라는 가정을 적용하여 경로차에 의한 위상효과를 고려하지 않았다. 또한 청음기 배열간격에 대한 기준이 제시되지 않았다.

본 연구에서는 직접파와 해면반사파만을 고려하고 있고 식 (1)에서와 같이 이들 경로에 의한 위상차의 효과가 측정음압의 크기를 좌우하므로 경로차에 대한 예측이 가능하면 결정신호로서 상기식들의 해석이 가능하다. 식 (6-1)을 적용하면 Transmission Anomaly  $\Delta$ 는 다음식으로 주어진다.

$$\Delta = 10 \log \left( \sum_{i=1}^M \frac{|\phi_i|^2}{M} \right) - 10 \log \frac{1}{\bar{r}_d^2} \quad (7)$$

여기서,  $\bar{r}_d$ 는 각 청음기에 이르는 직접전달파 경로의 기하평균치이다. Fig. 3.1은 식 (7)에 의한  $\Delta$ 의 특성으로 배열의 폭, 배열청음기의 개수 및 주파수에 따른 특성이다. 그림에서 수직축은 청음기 배열에서 해면가까이에 위치한 첫 번째 청음기의 깊이를 나타낸다. Fig. 3.1-(a)를 단일청음기에 대한  $\Delta$  특성인 Fig. 2.3과 비교하면  $\Delta$ 의 변동폭은 약  $\pm 5$ dB 이내로 감소됨을 알 수 있다. 그러나 여전히 배열의 깊이에 따른 변동이 심하다. 이와 달리 Fig. 3.1-(b)는 특히 500Hz의 경우 Fig. 3.1-(a)에 비해 깊이에 따른 변동이 완화됨을 보이는데 이는 Fig. 2.3의 단일청음기에 대한 경우 500Hz의  $\Delta$  변동 구배폭이 약 120m를 보여 배열의 전체폭을 120m로 하여 각 청음기의 측정위치가  $\Delta$ 의 구배폭 범위에서 공간적인 조화평균을 하도록 한 결과로 판단된다. Fig. 3.1-(c) 및 (d)는 각각 Fig. 3.1-(a) 및 (b)의 경우에서 청음기 갯수를 증가시킨 결과로  $\Delta$ 의 변동범위는 0dB~5dB 이내

로  $\Delta$ 의 편차는 약 2~3dB 이내로 향상됨을 보이고 특히 배열의 전체폭이 단일 청음기의 구배폭보다 크고 청음기 갯수가 12개로 증대된 Fig. 3.1-(d)의 경우는 배열의 깊이에 따른  $\Delta$ 의 편차는 현저히 감소하는 특성을 보인다. 그러나 청음기 개수를 증가시키더라도  $\Delta$ 의 바이어스 오차는 약 2~3dB 정도로 그대로 존재함을 보인다.

결론적으로 수중청음기배열을 이용하여 소음준위를 측정하는 경우 측정주파수의 최저주파수에 대한 단일청음기의  $\Delta$  특성으로부터  $\Delta$ 의 구배폭을 결정하고 구배폭이상의 배열크기를 결정한 후 배열크기 이내에 다수 청음기를 배열하는 것이 요구된다. 청음기 개수에 따른  $\Delta$ 의 편차 및 바이어스 특성은 추후연구과제이다. 식 (6-3)의 모델을 적용하여 동일한 분석을 수행한 결과  $\Delta$ 의 편차는 개선되었으나 첫제식의 결과보다 불량한 결과로 해석되었다.

#### 4. 결 론

수중소나의 운용 및 선박상태의 진단자료로 활용될 수 있는 선박방사소음의 측정은 배경소음, 해면반사파 효과, 해저반사파 효과, 도플러 효과 및 해류 등의 영향을 받는다.

본 연구에서는 이들 측정영향인자 중에서 해면 반사파의 영향만을 고려하여 선박방사소음의 소음준위를 정확히 측정하기 위한 배열설계방법을 제안하였다. 연구결과에서 수중청음기 배열폭은 단일청음기 사용시 측정소음원의 최저주파수에 의해 결정되는 Transmission Anomaly  $\Delta$ 의 구배폭 이상의 간격으로 정하는 것이 정확하고 신뢰성 있는 소음준위를 측정할 수 있는 것으로 판단되었다.

추후과제로 Transmission Anomaly  $\Delta$ 의 특성향상을 위해 사용되는 수중청음기의 개수에 관한 연구와 해저반사파 효과와 해류의 영향 등을 고려한 해양환경에서 수중청음기 배열 구조의 최적화 방법에 관한 연구가 있어야 할 것이다.

#### 5. 후 기

본 연구는 서울대학교 수중음향특화연구센터의 연구비지원에 의한 결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 6. 참고문헌

- (1) 윤종락, "Lloyd Mirror Effect에 관한 연구", 한국음향학회 수중음향학분과 학술발표회, 1982
- (2) L. E Kinsler and A. R Frey, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., 1982
- (3) N. P Chotiros, "Source level estimation of a monopole source at rest in the presence of multipath", JASA, 84(2), 1988
- (4) D. R. Joy, The effects of sensor mislocation in vertical array, Master thesis, Florida Atlantic University, 1990
- (5) Program performance specification for the surface ship radiated noise measurement computer program, Naval Ocean System Center, 1983

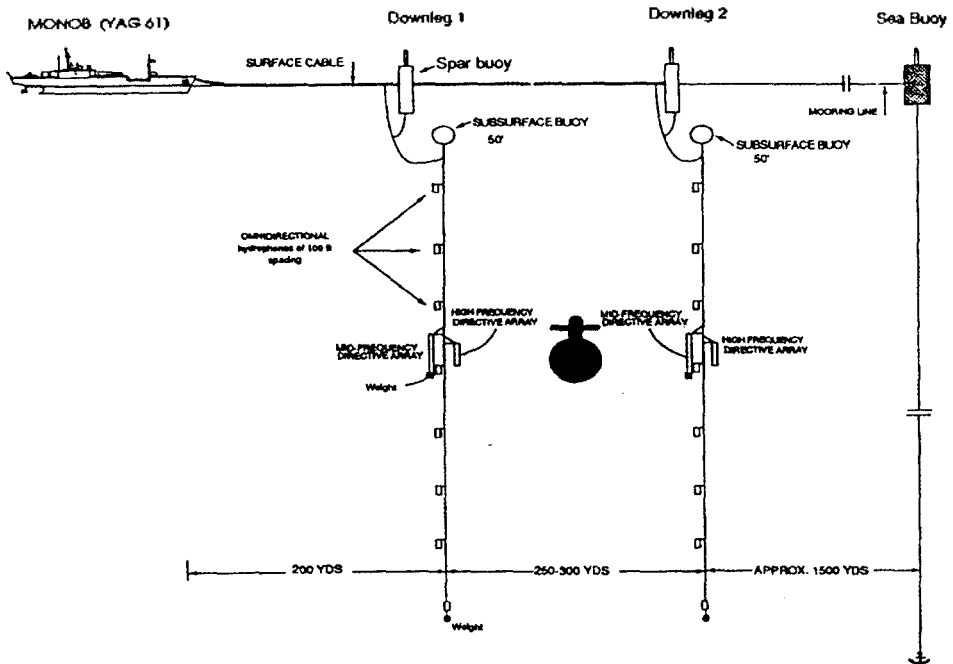


Fig. 1.1 Submarine radiated noise measurement system

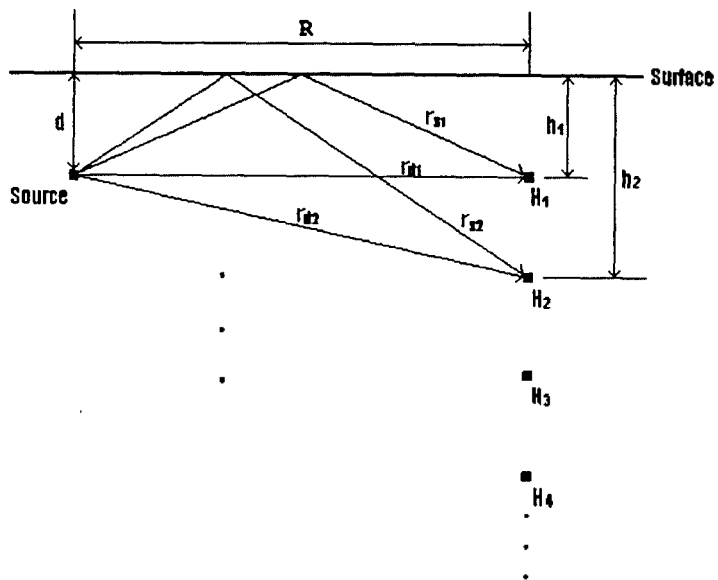
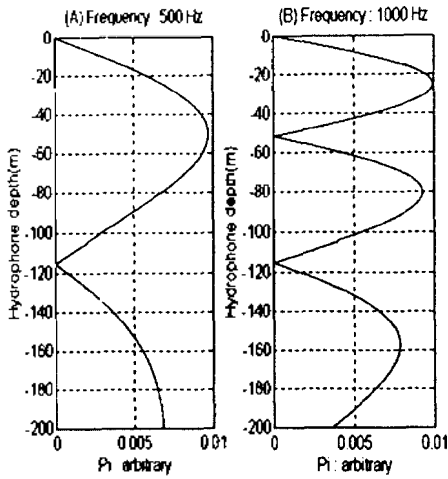
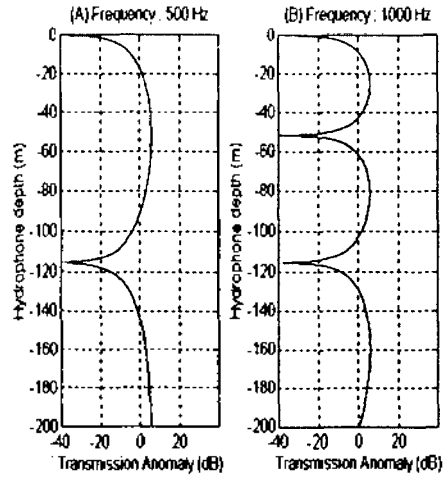


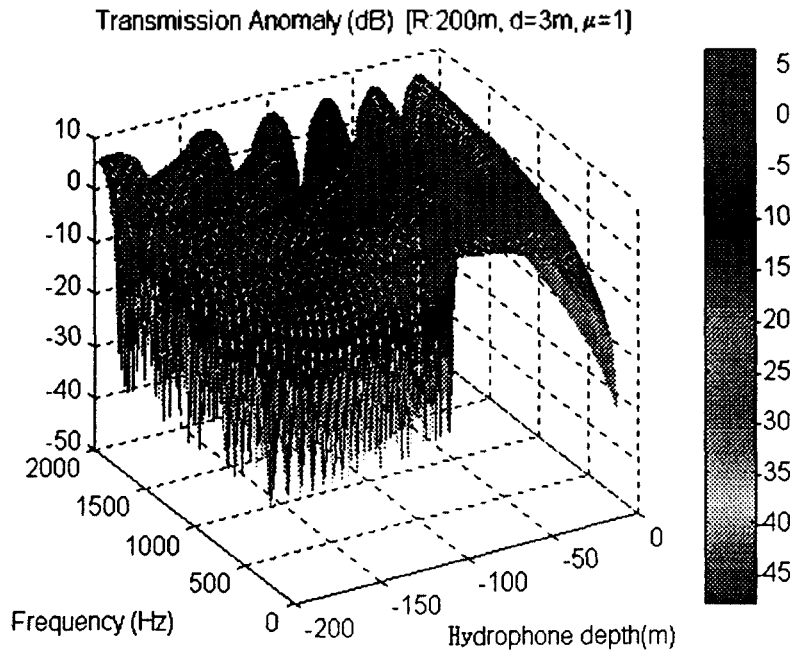
Fig. 2.1 Schematic diagram of source and hydrophone array in ship radiated noise measurement



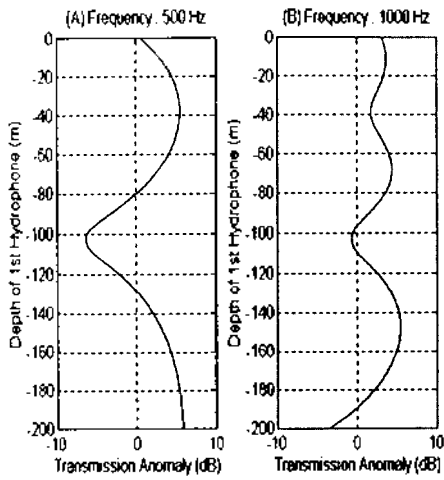
**Fig. 2.2** Hydrophone depth and frequency dependant characteristics of sound pressure measured by single hydrophone (R:200m, d:3m,  $\mu$ :1)



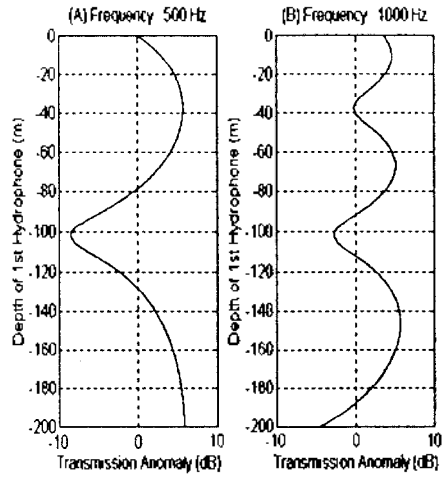
**Fig. 2.3** Hydrophone depth and frequency dependant characteristics of transmission anomaly in the case of single hydrophone (R:200m, d:3m,  $\mu$ :1)



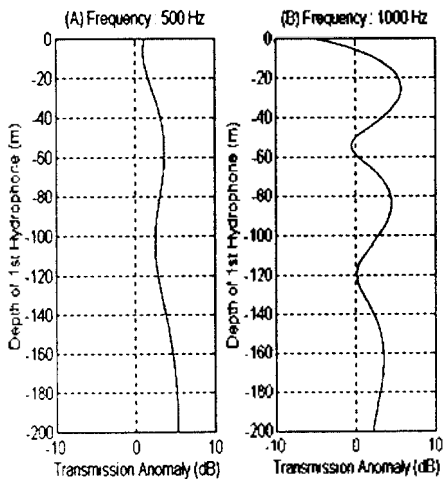
**Fig. 2.4** Hydrophone depth and frequency dependant characteristics of transmission anomaly in the case of single hydrophone (R:200m, d:3m,  $\mu$ :1)



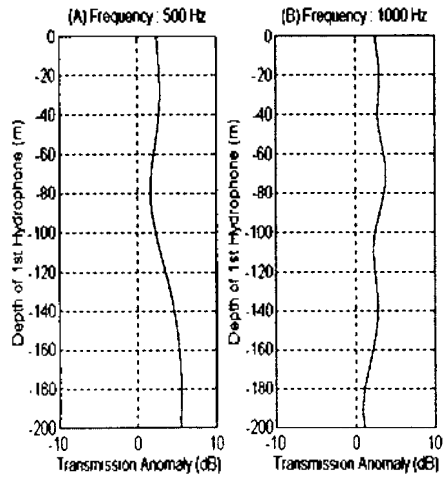
(a) Number of elements : 3  
Spacing : 15 m



(c) Number of elements : 12  
Spacing : 2.7 m



(b) Number of elements : 3  
Spacing : 60 m



(d) Number of elements : 12  
Spacing : 10.9 m

Fig. 3.1 Dependency of transmission anomaly on array depth and element spacing  
(  $R=200$  m,  $d=3$  m,  $\mu=1$  )