

# 해양 탄성과 탐사에서 슬리브건 배열의 방향 특성

## Directional Characteristics of Sleeve-gun Arrays in Marine Seismic Survey

유 해 수\*, 양 승 진\*\*  
Hai Soo Yoo\*, Sung Jin Yang\*\*

### 요 약

해양조사선 온누리호에 장착되어 있는 슬리브건 배열의 특성을 분석하였으며, 탐사 자료와 비교하였다. 주파수 영역에서 빔폭의 변화는 송이 배열인 경우, 814Hz까지는 179.5°로 일정하며 814-1631Hz 주파수 범위에서는 급격히 빔폭이 좁아진다. 반면에 길이 및 폭배열인 경우, 고주파수대로 갈수록 빔폭이 좁아지며 이때의 최적 주파수는 69Hz이다. 수직면 방향성에서 주엽은 위상 각도 0°에서 최대 진폭 0dB를 나타낸다. 부엽이 생성되지 않는 최적주파수 범위는 송이배열인 경우 1631Hz 미만이며, 길이 및 폭배열인 경우 108Hz 미만이다. 따라서 송이배열은 천부 지층의 고분해능 탐사에 적합하며, 길이 및 폭배열은 저주파수대 심부지질구조 탐사에 적합함을 나타낸다. 송이배열을 이용한 탄성과 단면도를 동일 측선에서 폭배열을 이용하여 획득한 탄성과 단면도와 비교하였다.

### ABSTRACT

Characteristics of sleeve-gun arrays installed on the R/V Onnuri were analyzed and compared with survey data. In the case of cluster array, the beam width in the frequency range up to 814Hz is constant as 179.5°, and rapidly narrows in the frequency range of 814-1631Hz. However, in the case of long and wide arrays, as the frequency increases, the beamwidth decreases. The optimal frequency is 69Hz. The main lobe of vertical inclination has its maximum amplitude at phase angle 0°. The optimal frequency of cluster array which produces little side lobe is less than 1631Hz, and those of long and wide arrays are less than 108Hz. As a result, the cluster array produces a good source for high-resolution seismic survey, while the long and wide arrays are suitable for the survey of deep structures. The final high-resolution seismic section with cluster array was compared with that of long and wide arrays.

### I. 서 론

해양 탄성과 탐사시 목적에 부합하는 야의 획득 변수(field acquisition parameters) 사용은 자료의 질을 결정하는 중요한 변수이다. 이를 위해서는 탐사 장비의 설계 특성을 정확히 이해하여 그 특성에 맞게 최적의 획득 변수를 적용하는 것이 필요하다. 일반적으로 탄성과 음원은 그룹이나 배열로 전개하여 사용하며, 이는 음원의 에너지를 증가시키고 잡음의 원인이되는 2차 펄스를 감소시키기 위함이다. 큰 음원을 단독으로 사용하는 것은 비현실적일 뿐만 아니라 밴드폭(bandwidth) 등 펄스의 특성이 변하기 때문에 일반적으로 사용하지 않는다. 이러한 특성을 이용하여 설치된 해양조사선 온누리호 음원

은 용량이 다른 음원을 종합하여 1차 펄스를 더욱 크게 향상시키는 조화배열(tuned arrays)로 되어 있는데 간격이 좁고 동일 용량의 송이배열(cluster array), 간격과 용량이 다른 길이배열(long array), 길이배열이 평행하게 이차원으로 나열된 폭배열(wide array) 등 3가지로 구성된다(그림 1 참조). 한편 이러한 음원들의 빔 패턴은 에너지원의 주엽(mainlobe)과 에너지 손실을 의미하는 부엽(sidelobe)으로 구성되며 주로 배열 길이 및 음원간격, 주파수, 용량분포 등에 따라 그 특성이 결정되는데 고주파수 일수록 부엽은 점차 커지며 상대적으로 주엽의 빔폭은 좁아진다. 따라서 부엽이 최소이고 주엽의 빔폭이 가장 좁은 상태의 최적주파수를 확인하는 것은 양질의 자료를 획득하는데 중요한 기초 자료가 될 수 있다.

음원배열의 방향 특성은 이웃하는 음원과의 상호작용(interaction effect)이 없다는 가정 하에서 논할 수 있으나, 음원배열에서는 필연적으로 상호작용이나 간섭 현상

\*한국해양연구소 지구물리연구그룹  
\*\*한양대학교 자원공학과  
접수일자: 1995년 9월 23일

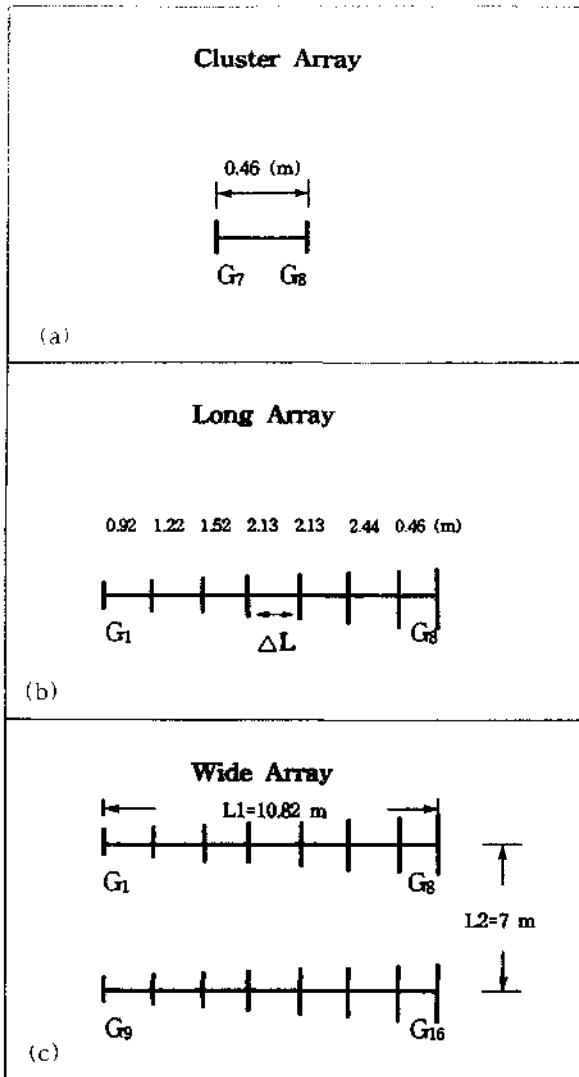


그림 1. 조사선 온누리호에 설치된 슬리브건의 전형적인 방향성 배열: (a) 송이배열 (b) 길이배열 (c) 폭배열.  
Fig 1. Directional arrays for typical (a) cluster array, (b) long array and (c) wide array of sleeve guns on the R/V Omnuri.

(interference effect) 등이 일어난다. 그러나 이러한 현상은 2차 버블펄스에 해당하며 Ziolkowski<sup>[17]</sup>, Giles 등<sup>[9]</sup>, Nooteboom<sup>[13]</sup> 등은 상호작용이 1차 펄스(primary pulse)에는 영향이 거의 없음을 입증하였다. 또한 방향성은 수심에 비하여 배열 길이가 상대적으로 큰 경우에는 방향 효과가 크지만 반대일 경우에는 효과가 적음도 밝혔다. 음원 배열과 관련하여 Schoenberger<sup>[16]</sup>는 배열의 최적화 설계에 대하여 논하였다. 한편 경사 지층이나 측면에서 반사되어 오는 sideswipe 및 후방 산란 잡음 등은 천부 층에서 반사 굴절된 합성 에너지를 상쇄시키는데 Lynn 등<sup>[11]</sup>은 폭배열이 이러한 잡음원과 sideswipe을 줄이는데 매우 효과적임을 보였다. Parkes 등<sup>[14]</sup>은 해수면 반사파(ghost)를 에너지원으로 이용하고 방향성을 이용하여 탄성과 기록에서 잡음을 효과적으로 감소시켰으며 배열

길이와 폭이 클수록 방향성이 커짐을 입증하였다. 한편 깊기 영<sup>[12]</sup>은 해수면하 2m 깊이에서 송이배열은 고해상 탐사에 적합한 원거리장 파형이 발생될 수 있음을 보인 바 있다. 음원 배열에 따른 방향성은 동해와 같이 경사 지층이 많은 해역에서 적용할 수 있는데 이는 빔 조종(beam steering)을 이용하여 일정 방향으로 에너지를 집중시키므로써 효율적인 탐사 자료를 획득할 수 있다.

이 연구에서는 음원 배열 특성이 무선 안테나 배열 특성과 동일하다는 이론적 배경(Johnson<sup>[10]</sup>)을 바탕으로, 온누리호에 장착된 슬리브건 배열에 대해 모형 시험을 통하여 방향성, 빔 폭, 빔 패턴 등을 분석하고자 한다. 이 분석 결과가 이에 준하여 획득한 탐사 자료 단면도와 일치하는가를 역시 확인하고자 한다. 특히 배열 특성을 결정하는 부엽의 크기가 최소화되고 주엽의 빔폭이 가장 좁은 경우의 최적 주파수를 모형 시험을 통해서 예측하고자 한다. 또한 빔 조종을 이용하여 획득된 실제 탐사 자료와 모형 시험 결과를 비교하여 방향성 여부를 확인하고 이러한 분석들을 통하여 배열 특성을 확인함으로써 탐사 효율을 높여 양질의 자료 획득에 활용하고자 한다.

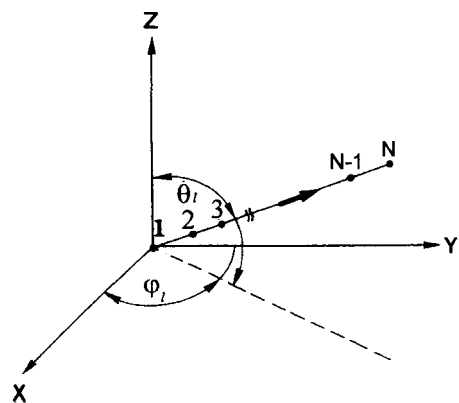
## II. 이론적 배경

### 1. 배열 이론

송이 및 길이 배열인 경우, 그림 2a에서 간격이 일정하지 않은 N개의 음원이 단위 벡터  $I(\theta_i, \phi_i)$ ,  $r_o(\theta, \phi)$ 으로 분포하는 배열 인자  $F(\theta, \phi)$ 는

$$F(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N |\beta_i| \exp[j2\pi(\sum_{k=0}^{i-1} d_k)(r_{\alpha k} l_x + r_{\beta k} l_y + r_{\alpha k} l_z) + \delta_i] \quad (1)$$

으로 나타나며 여기서 진폭과 위상은  $\beta_i = |\beta_i| e^{j\delta_i}$ 이다. 한편 그림 2b의 폭배열인 경우 한 평면에 음원이  $N=N_1 \times N_2$  이차원 배열로 되어 있으며 단위 벡터  $P(\theta_p, \phi_p)$ 에 수직인 평면으로 벡터  $P, l_1, l_2$ 는 상호 수직이다. 폭배열 인자  $F(\theta, \phi)$ 는



(a)

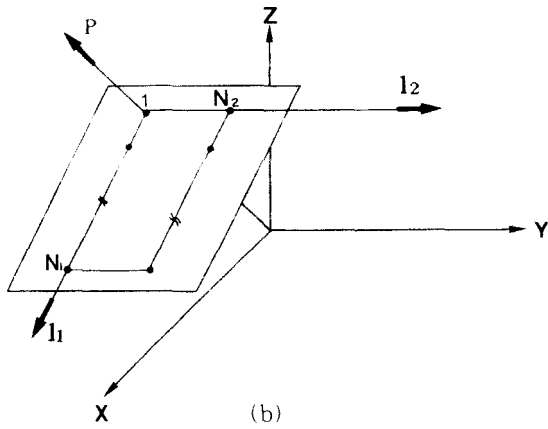


그림 2. (a) 길이배열과 (b)  $N_1 \times N_2$  선으로 된 2차원 폭배열.  
Fig 2. A (a) long arrays and (b) two dimensional wide arrays of  $N_1 \times N_2$  guns.

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} | \beta_{i,j} | \exp[ j(2\pi [ (\sum_{k=1}^{N_1} d_{1k})(r_{ox}l_{1x} + r_{oy}l_{1y} + r_{oz}l_{1z}) + (\sum_{k=1}^{N_2} d_{2k})(r_{ox}l_{2x} + r_{oy}l_{2y} + r_{oz}l_{2z}) ] + \delta_{i,j}) ] \quad (2)$$

이다 [2].

2. 해수면 반사파 영향

단일 음원에서 방출되는 파는 구형 대칭이며 원거리장 파형의 에너지는 약 절반이 해수면 반사파로부터 기원된

다. 일차파원과 해수면 반사파간의 시간 지연은 두 파장간의 기하 효과(geometrical effect)에 의해 생기는 각도의 함수로서 전달되며 방향성을 갖는다(그림 3 참조). 해수면 아래 H m에 위치한 음원 배열에서  $(\theta, \varphi)$  각도로 전파되는 일차파 전달 함수는 수직 성분 벡터  $\theta_0$  및 평면이 평면에 수직인 단위 벡터  $\rho_0$  성분으로 구성되며 직접파  $A_{0d}(\theta, \varphi)$ 는:

$$A_{0d}(\theta, \varphi) = f_{0d}(\theta, \varphi) \theta_0 + f_{0\phi}(\theta, \varphi) \rho_0 \quad (3)$$

으로 표현된다. 여기서  $f_{0d}(\theta, \varphi) \theta_0$ 와  $f_{0\phi}(\theta, \varphi) \rho_0$ 는 field 패턴이다. 한편  $\pi - \theta$ 와  $\varphi$  방향에서 전달되는 해수면 반사파는 단위 벡터  $\theta_0, \rho_0, \varphi_0$  성분을 이용하여 한 개의 수직 성분과 두개의 접선 성분의 함으로 표현될 수 있다. 이 합성 성분중 입사파  $A_{0s}(\pi - \theta, \varphi)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다 [2].

$$A_{0s}(\pi - \theta, \varphi) = f_{0s}(\pi - \theta, \varphi) \sin(\pi - \theta) \theta_0 + f_{0\phi}(\pi - \theta, \varphi) \cos(\pi - \theta) \rho_0 + f_{0\phi}(\pi - \theta, \varphi) \varphi_0 \quad (4)$$

여기서  $\rho_0 = \cos \phi \mathbf{X}_0 + \sin \phi \mathbf{Y}_0$ 이며  $\mathbf{X}_0, \mathbf{Y}_0$ 는 X, Y의 단위 벡터이다.

해수면에서 입사파와 반사파는 경계 조건  $A_r = A_{0r} + A_{0s} = 0$ 을 만족한다. 한편 공중에서 전달되는 전파는 일차 전파와 반사파에서 시간 지연 함수( $\tau = K_0 2H \cos(\theta)$ )로 반사된 전파의 합성 전파이다. 반면에 해양에서 구형 대칭으로 전달되는 음파는 일차파원과 해수면에서  $\tau = 2H$

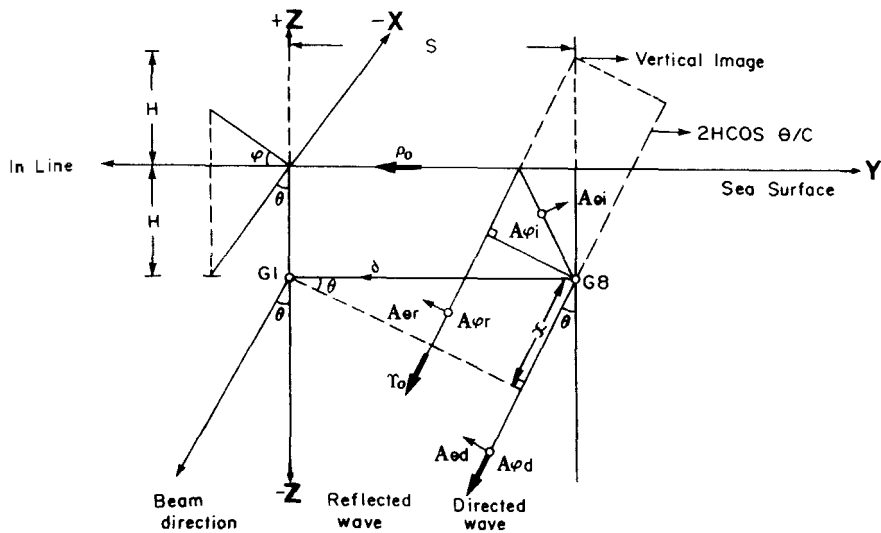


그림 3. 방위각  $\varphi$ 와 경사각  $\theta$ 의 정의. G8에서 오는 고스트 펄스는 1차펄스에 대하여  $2H \cos \theta / c$  만큼 시간 지연된다.

G1에서 G8 사이의 펄스간 시간 지연은  $x/c$ 이며  $\theta$ 의 함수이다.

Fig 3. Definitions of azimuth angles  $\varphi$ , and dip angle  $\theta$ . The ghost pulse from a G8 is delayed in time with respect to the primary pulse by  $2H \cos \theta / c$ .

The time delay between the pulses from G1 to G8 is  $x/c$  and a function of angle  $\theta$ .

$\cos(\varphi)/c$  함수식으로 시간 지연된 해수면 반사파의 합성 파로 방향성을 갖게 된다. 따라서 해수면 반사파  $A_{0r}(\theta, \varphi)$ :

$$A_{0r}(\theta, \varphi) = f_{0r}(\pi - \theta, \varphi) e^{\frac{-j2H\cos\theta}{c} \theta_0} - f_{0r}(\pi - \theta, \varphi) e^{\frac{-j2H\cos\theta}{c} \varphi_0} \quad (5)$$

이다. 여기서  $c$ 는 수중음파 속도인 1500m/sec 이다. 따라서 해수면 아래 선배열에 의해 전달되는 직접파와 해수면 반사파의 합성파는 총 빔 패턴 함수로 표현될 수 있다. 총 빔 패턴  $A_{0t}(\theta, \varphi)$ 는:

$$A_{0t}(\theta, \varphi) = A_d(\theta, \varphi) + A_r(\theta, \varphi) \\ = [F_\theta(\theta, \varphi) + F_\theta(\pi - \theta, \varphi) e^{\frac{-j2H\cos\theta}{c} \theta_0} + \\ [F_\varphi(\theta, \varphi) + F_\varphi(\pi - \theta, \varphi) e^{\frac{-j2H\cos\theta}{c} \varphi_0}] \varphi_0 \quad (6)$$

이며, 여기서  $F_{\theta/\varphi}(\theta, \varphi) = f_{0\theta/\varphi}(\theta, \varphi) F(\theta, \varphi)$ ,  $F_{\theta/\varphi}(\pi - \theta, \varphi) = f_{0\theta/\varphi}(\theta, \varphi) F(\pi - \theta, \varphi)$ 이다.

### 3. 방향성(directivity)

방향성 D는 선 배열에서 특정 방향으로 에너지를 집중시킬 수 있는 능력을 측정하는 것으로 방향성의 양호함을 나타내며 D는 (최대 음파 강도)/(평균 음파 강도)으로 정의된다.  $P(\theta, \varphi)$ 에 의한 파워와  $(\theta, \varphi)$  방향에서 전달되는 파워의 D는

$$D = \frac{4\pi P(\theta_i, \varphi_j) |_{\max}}{\frac{\Delta\theta\Delta\varphi}{9} \sum_{i=0}^{2N_i} \sum_{j=0}^{2N_j} P(\theta_i, \varphi_j) \sin\theta_i K_i K_j} \quad (7)$$

이다.<sup>12)</sup> 여기서  $K_i K_j$ 는

$$K_i = \begin{cases} 1 & i=0 \\ 3 - (-1)^i & 0 < i < 2N_i \\ 1 & i=2N_i \end{cases}$$

$$K_j = \begin{cases} 1 & j=0 \\ 3 - (-1)^j & 0 < j < 2N_j \\ 1 & j=2N_j \end{cases}$$

으로 나타난다. 한편 배열에서 방향성의 양호함을 나타내는 특성으로 빔각은 최대 방사 방향 에너지 크기의 1/2에 해당하는 에너지를 갖는 점의 빔폭 HPBP(half power beam point)를 적용하였다. 이 밖에 또다른 방향성의 양호함을 나타내는 특성으로 전후비 FB(Front to back ratio)는

$$FB = 20 \log_{10} (A_f/A_b) \text{ dB} \quad (8)$$

으로 나타내며<sup>1)</sup>, 여기서  $A_f$ 와  $A_b$ 는 각각 주엽 및 부엽의 강도를 뜻한다.

### 4. 방향성 표현(directivity displays)

에너지 방출 특성은 음원의 과정을 시간 영역(time domain)에서 진폭으로 표시되며 주파수 영역(frequency domain)에서는 위상과 신호 진폭으로 표현할 수 있다. 배열에서 빔 패턴은 배열길이와 신호 파장의 비에 의해 주로 결정되며 자료 처리에 사용된 각 음원들의 가중치(weighting)는 측정 결과 음원 부피에 따라 주 신호 진폭인  $P_a$ (peak-to-trough amplitude of primary)의 세기가 비례하지 않는다. 따라서 탐사에서 음원 부피에 따라 획득된 자료<sup>[1]</sup> 중  $P_a$  값을 사용하였다. 분석 대상은 탐사에 주로 사용되며 빔 방향이 해저에 수직하게 전달되는 수직면 방향성( $\varphi = 0^\circ$ ) 빔 패턴에 대하여 분석하였다.

## III. 시험 자료

### 1. 빔 조정 자료 획득

일반적으로 해양 탐사에서 사용하는 파원은 음원배열을 동시에 폭발시켜 수직 아래 방향에서 에너지가 최대가 되도록 한다. 그러나 경사진 지형이나 특정 방향으로 최대 에너지를 얻기 위해서는 음파가 목적물에 수직으로 방향성을 갖도록 해야 한다. 이는 음원 배열을 연속적으로 시간 지연 발파함으로써 인위적으로 dip moveout이 일어나도록 하는 방식 즉, 빔 조정(beam steering)을 하면 가능하다. 이번 연구에 이용된 빔 조정 탐사 자료는 한국해양연구소가 1994년 10월 동해에서 58채널 탄성과 탐사를 수행할 때 함께 획득하였다(표 1 참조). 조사 해역의 수심은 약 330m이며 탐사 지층이 0.9° 미만의 완만한 경사지형을 보였다. 사용된 음원은 은누리호에 설치된 길이 배열 11.310의 8개 건을 이용하였으며 일정한 방

표 1. 한국 동해에서 빔 조정 및 58채널 탄성과 탐사에 사용된 야외 변수

Table 1. Field parameters for the 58 channel seismic survey and beam steering in the East Sea of Korea.

Items	Long array (beam steering)	Cluster array	Wide array
Date	1994. 10	1993. 10	1992. 11
Channel Number	58 ch	96 ch	12 ch
Streamer depth	6.5 m	6 m	3.4 m
Gun depth	5.5 m	6 m	3.4 m
Gun volume	11.3 ℓ	11.3 ℓ	2 × 2.46 ℓ
Air pressure	112 bar.m	125 bar.m	125 bar.m
Streamer length	1400 m	2400 m	95 m
Shot interval	25 m	25 m	6.25 m
Recording length	5 sec	5 sec	1 sec
Sampling rate	2 ms	2 ms	1 ms
Near offset	33 m	122 m	90 m
Directivity	0°, ±3°	0°	0°

항성을 갖도록 순차적으로 반복을 하였다. 시간 지연은 빔 조정각을 0,  $\pm 3^\circ$  로 가정하였으며 분해능이 0.1ms인 음원 조정기(GCS90)를 이용한 변수는 표 2에 자세히 수록하였다.

표 2. 긴배열에서  $\pm 3^\circ$  각도로 빔 조정을 위한 기동 시간  
Table 2. Time delays for beam steering at an angle  $\pm 3^\circ$  on the gun arrays.

Gun no	Gun vol.	Distance	Delay
S1, P1	(%)	(m)	(ms)
8, 16	2.46	0.00	0.0
7, 15	2.46	0.46	0.0
6, 14	2.46	2.90	0.1
5, 13	1.64	5.03	0.2
4, 12	1.15	7.16	0.2
3, 11	0.66	8.68	0.3
2, 10	0.33	9.90	0.3
1, 9	0.16	10.82	0.4

2. 자료 처리

빔 조정 자료는 시간 및 주파수 영역에서의 분석을 위해서 검색, 편집 등의 처리를 실시하였으며 각각의 자료에서 4개의 shot 자료를 종합하였다(그림 4 참조). 배열 특성 분석을 위한 자료는 100Hz 간격으로 3000Hz까지 분석하였으며 송이배열은 식(1)을, 길이 및 폭배열은 식(2)를 이용하여 배열특성값을 구하였다. 이때 해수면 반사파의 영향은 식(6)을 적용하였다. 한편 방향성 및 FB 값은 각각 식(7)과 식(8)을 이용하여 특성을 구하였다.

모형시험 결과 확인을 위하여 송이 및 길이배열을 이용하여 획득한 자료의 처리도를 만들었으며 전산처리 과정은 통상적으로 상세히 기록되어 있다.

3. 자료 분석

표 3은 길이 배열의 음원을 해수면하 6.5m,  $\theta$  값이 0,  $\pm 3^\circ$ 의 방향성을 주어 빔 조종했을 때 얻은 모형 시험 결과이다. 이 결과에서 빔폭의 변화는 없으며 빔 조종각이  $+3^\circ$ 에서는  $0^\circ$ 에서 보다 좌측 부엽의 크기가 커졌으며 반면에 우측 부엽은 작아졌다.  $-3^\circ$ 에서는  $+3^\circ$  경우와는 반대로 좌측부엽은 작아졌으나 우측부엽은 커졌다. 한편 탐사 자료인 그림 4a-c는  $+3^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-3^\circ$  각도로 빔 조종한 경우이며 그림 4에서 화살표가 지시하는 첫 번째 반사파 진폭을 50번 채널까지 디지털값을 취하여 평균한 값은 각각 37.27mv( $+3^\circ$ ), 37.59mv( $0^\circ$ ), 39.37mv( $-3^\circ$ )으로 약 0.99:1:1.05의 비율을 나타냄으로써 빔 조정 효과가 미약하게 나타나고 있는데 탐사시 경사 지층에 대한 수심 변화를 감안하면 빔 조정 효과는 더욱 작은 것으로 생각된다. 한편 그림 4a의 40에서 50번 채널 부분의 사각형 표시에서 반사층이 짙은 진폭을 나타내는 것은 Tuning 현상, 즉 두개의 반사파가 중첩, 에너지가 합성되어 진폭이 강하게 나타나는 것으로 보인다. 그림 5는  $0^\circ$  방향에서 얻은 반사 자료의 진폭을 0으로 놓았을 때  $\pm 3^\circ$  빔의 상대적인 진폭 비율을 나타낸다. 길이배열 모델을 통해 얻은 결과와 실제 현장 자료에서  $\pm 3^\circ$ 의 작은 빔 조정 각 으로서는 큰 차이점을 나타나지 않는데 이는 배열길이에 비해 수심이 상대적으로 깊을 경우에 방향성 효과가 적

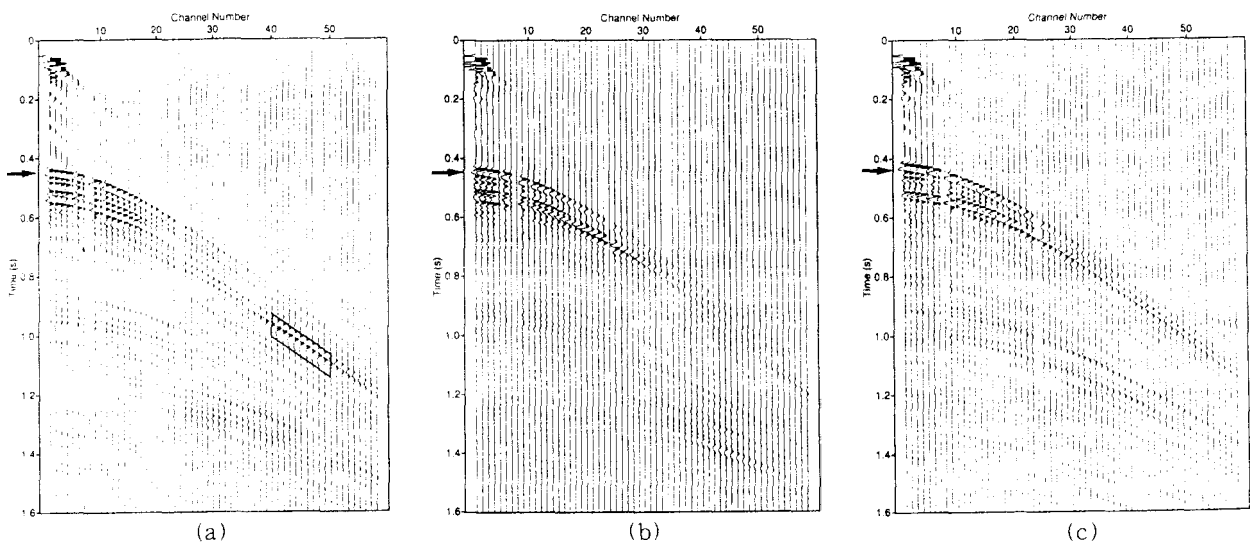


그림 4. 동해에서 빔 조정으로 획득된 58채널 공집점 종합 자료  
(a)  $+3^\circ$  빔 조정 종합 자료 (b)  $-3^\circ$  빔 조정 종합 자료 (c)  $0^\circ$  빔 조정 종합 자료.  
Fig 4. 58 channel stacked gather of the CDP data obtained for beam steering in East Sea : (a) Stacked gather of  $+3^\circ$  beam string, (b) that of  $0^\circ$  beam string, and (c) that of  $-3^\circ$  beam string.

게 나타나기 때문이다. 따라서 빔 조성 효과는 동해에서 수심이 얕고 남경사 지층에 잘 적용되리라 생각된다.

표 3. 길이배열에서 0, ±3° 각도로 빔 조정시 오른쪽 왼쪽 부엽의 크기

Table 3. Right and left sidelobe level of beam steering at an angle 0°, ±3° on the long arrays.

Beam steering angle	Left sidelobe (dB)	Right sidelobe (dB)	Beamwidth angle
+3°	-8.4	-9.66	38.5°
0°	-8.86	-8.86	-
-3°	-9.4	-8.63	-

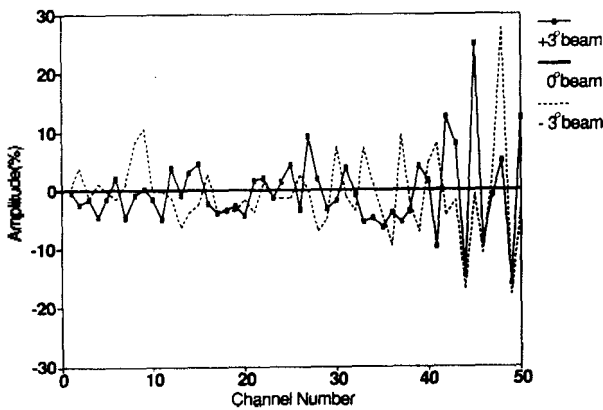


그림 5. 그림 4에서 0°, 3°, -3°로 빔 조정하여 획득한 자료의 채널당 진폭 비교.

Fig 5. Comparison of amplitude for channel number of data which has been steered at 0°, 3° and -3° beam in Fig. 4.

IV. 배열 특성 분석

1. 배열 효과

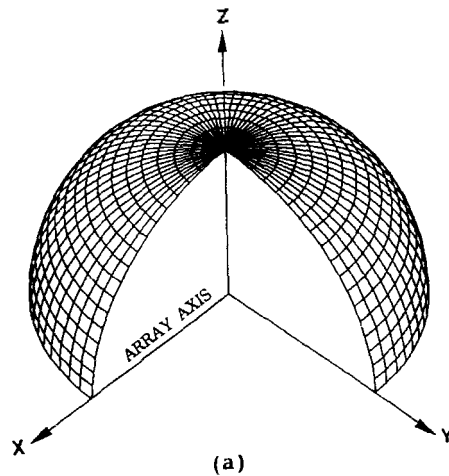
송이 및 길이배열에서 음원 간격이 ΔL일 때 효율이 최대가 되는 것 즉, 빔폭이 좁고 음파강도가 커지는 조건은 ΔL = λ/2로 표시되며<sup>[7]</sup> 배열 전체 길이(L1)에 대한 효율이 최대가 되는 주파수는 각각 1630Hz와 69Hz 이내이다. 이때 길이배열에서 이웃하는 음원에 대한 최대 효율 주파수 범위는 파장 λ와 주파수 f에 대해서 각각 0.92·21.64m, 352-1630Hz에 속하는 광대역 주파수이다.

폭배열인 경우 빔의 양상이 주파수별로 양호한 특성을 가지려면 준배열 간격(L2)은 λ/2 이상 되어야 한다.<sup>[10]</sup> 따라서 온누리호 좌현 및 우현의 준배열 간격이 7m으로 배열 효과를 얻는 시점 즉, 부엽이 나타나지 않는 시점의 주파수가 108Hz 미만이어야 한다. 일반적으로 폭배열에서 배열길이와 준배열 간격은 같게(L1 = L2) 사용된다.<sup>[14]</sup> 따라서 현재 배열길이가 10.82m, 준배열간격이 7m로 탐사 자료 획득 시에는 가능한 준배열 간격을 지금보다 3.82m 더 넓게 사용되어야 할 것으로 생각된다. 이것

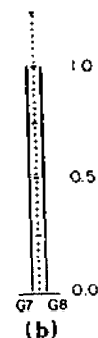
은 폭배열 중앙 λ/2 자점에서 음파 강도가 최대가 되며 MRA(main response axis)가 형성되는데 이때부터 빔 모양의 양호한 빔 패턴을 형성하기 때문이다. 특히 폭배열에서 길이 배열보다 주파수가 λ/2 보다 크거나 작은 주파수 사용은 부엽을 줄이는데 더 큰 효과가 있다.

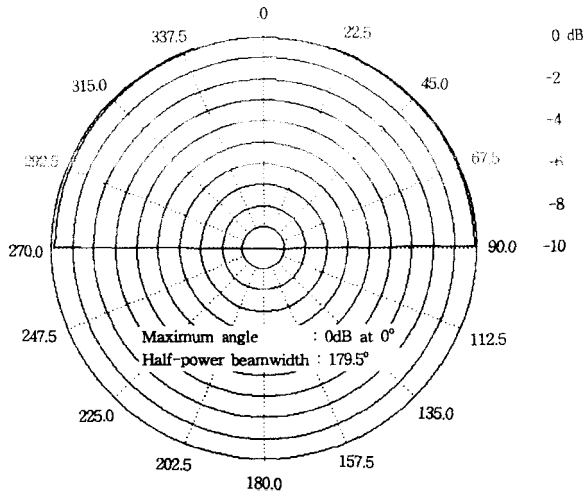
2. 3차원 에너지 분포

그림 6a, 7a, 8은 주파수가 154Hz인 경우 송이, 길이, 폭배열들을 0~-10dB까지 나타낸 3차원 에너지 분포도이며 이 주파수는 온누리호 기록 시스템에 고정된 고주파 필터이다. 이 때 식별이 용이하도록 θ(0°-180°), φ(0°-270°) 부분만 도시하였다. 그림 6b는 송이 배열을 그림 7b는 길이 및 폭배열의 빔 패턴을 구하기 위해 적용된 진폭 분포도이다. 한편 그림 6c는 그림 6a를 각각 수직면 방향성과 수평면 방향성의 빔 특성을 극그래프로 나타낸 것이며, 그림 7c는 그림 7a의 수직면 방향성의 빔 패턴이다. 특히 길이배열에서 수평면 방향성의 빔 패턴은 송이 배열의 빔 패턴인 그림 6c와 동일한 특성을 갖으며 길이 배열의 수직면 방향성을 나타내는 그림 7c는 역시 폭배열의 빔 패턴인 그림 8을 수직면, 수평면 방향성으로 분석 특성과 일치한다.



NORMALIZED WEIGHTING

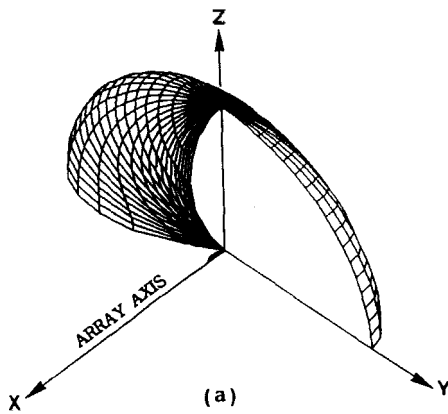




(c)

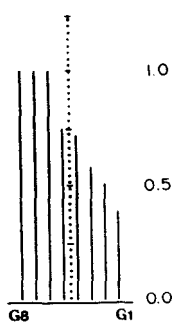
그림 6. 154Hz에서 같은 진폭 분포를 갖는 송이배열의 방사 패턴: (a) 3차원 빔 패턴, (b) 송이배열의 정식화된 가중치, (c) pattern cut 극그래프( $\theta$ -range:  $90^\circ, 0^\circ$ ), ( $\theta$ -range:  $0^\circ, 0^\circ$ ).

Fig 6. Radiation pattern for the cluster gun array with the distributions of same amplitude at 154Hz: (a) three-dimensional plot of the beam pattern, (b) normalized weighting of the cluster arrays, (c) polar graph of the pattern cut( $\theta$ -range:  $90^\circ, 0^\circ$ ), ( $\theta$ -range:  $0^\circ, 0^\circ$ ).

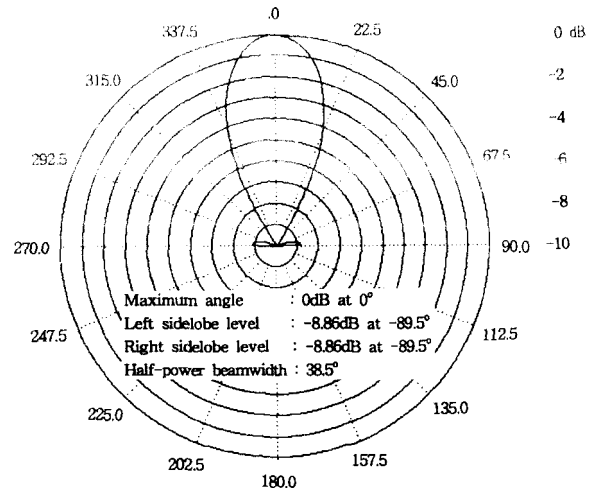


(a)

NORMALIZED WEIGHTING



(b)



(c)

그림 7. 154Hz에서 길이배열의 방사 패턴: (a) 삼차원 빔 패턴, (b) 길이배열의 정식화된 가중치, (c) pattern cut의 극그래프( $\theta$ -범위:  $0^\circ, 0^\circ$ )

Fig 7. Radiation pattern for the long arrays at 154Hz: (a) three-dimensional plot of the beam pattern, (b) normalized weighting of the long arrays, (c) polar graph of the pattern cut( $\theta$ -range:  $0^\circ, 0^\circ$ ).

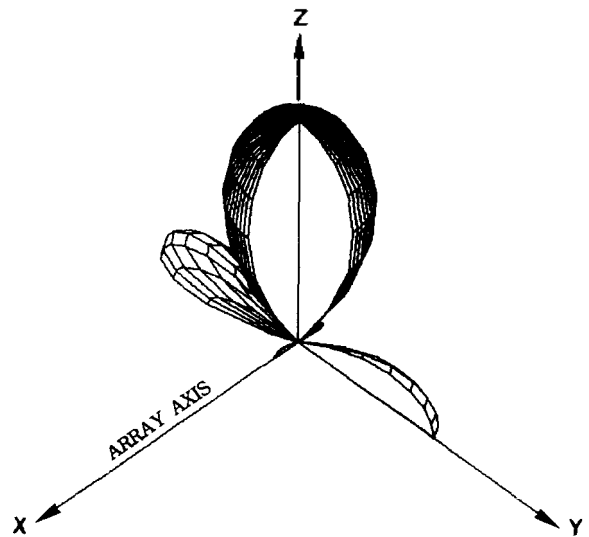


그림 8. 154Hz에서 길이배열과 동일한 진폭 분포를 갖는 폭배열의 삼차원 방사 패턴.

Fig 8. Three-dimensional radiation pattern for the wide arrays of the same amplitude distributions as long arrays at 154Hz.

### 3. 송이배열 특성

송이배열은 방위각  $\varphi$ 가  $0^\circ$ 이며 공간적인 연장이 기본적으로 in-line( $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$ ) 평면으로 구성된다(그림 1a, 2a 참조). 적용된 가중치는 동일한 진폭 분포로써 정규화(normalization) 시킨 수치이며(그림 6b 참조) 그림

송이배열의 빔폭은 179.5°로 넓게 생성되어 탄성과 탄사에 관한 높은 빔폭이 생성되지는 않는다. 그림 9는 송이배열에서 주파수에 대한 주엽의 빔폭을 표시하며 빔폭은 HPBP이다. 송이배열의 빔폭 특성은 814Hz까지는 179.5°의 일정한 빔폭을 보이다가 약 814-1631Hz 범위에서는 급격히 줄어드는 특성을 갖는다. 그러나 빔폭이 전반적으로 매우 넓어 방향성의 효과가 크게 기대되지는 않는다. 그림 10은 수직면 방향성(0°, 0°) 및 수평면 방향성(90°, 0°) 단면이 최대진폭값 0dB가 될 때, 각배열의 주파수별 최대 빔각도를 나타낸다. 송이배열 수직면 방향성에서는 0°에서 최대값이 되며 수평면 방향성에서는 특별한 양상을 보이지 않는다. 그림 11은 송이배열의 수직면 방향성에서 주파수별 부엽의 변화를 나타내는 3차원도이다. 고주파수로 갈수록 부엽의 크기가 증가하며 이때의 최대 위상 각도는 89.5°로 일정한 특성을 갖는다. 한편 송이배열의 특징은 1631Hz까지는 부엽이 생성되지 않았으므로 고분해능 탐사에 적합한 것으로 분석된다.

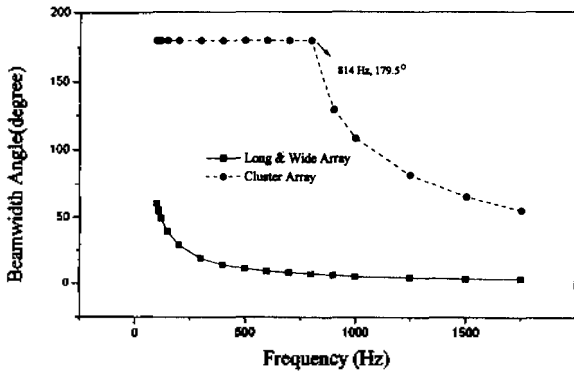


그림 9. 송이, 길이, 폭배열에서 주파수에 대한 주엽의 half-power beamwidth.

Fig 9. Half-power beamwidth of main lobe versus frequency for cluster, long and wide arrays configurations.

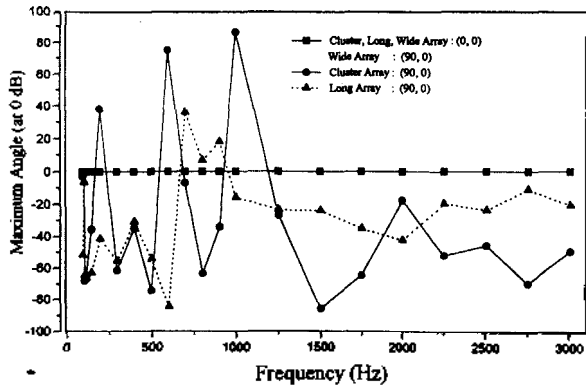


그림 10. 송이, 길이, 폭배열이 0dB에서 주파수에 대한 pattern cut의 최대각.

Fig 10. Maximum angle of the pattern cut versus frequency for cluster, long and wide arrays configurations at 0dB.

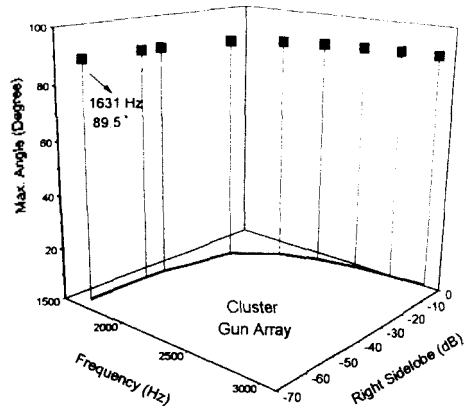


그림 11. 송이배열에서 주파수, 부엽, 최대각에 대한 삼차원도.  
Fig 11. Three-dimensional plot for maximum angle of the sidelobe versus frequency on the cluster arrays.

4. 길이배열 특성

송이배열과 같은 평면으로 음원 간격이 불규칙하며 길이 10.82m에 8개 슬리브건으로 구성된다(그림 1b, 2a 참조). 또한 에너지의 진폭은 이산 분포를 갖는다(그림 7b 참조). 그림 7c는 길이배열에서 수직면 방향성의 빔 패턴으로 주빔과 부엽은 각각 0°, ±90°에서 최대치를 나타내며 ±45°에서 부엽의 크기는 최소치가 된다. 한편 수직면 방향성에서 HPBP의 빔폭은 38.5°로 좁게 나타나며 반면에 수평면 방향성에서 빔 패턴은 송이배열의 그림 6c와 같이 179.5°의 넓은 빔폭을 나타낸다. 그림 9에서 길이배열의 빔폭 특성은 고주파로 갈수록 빔폭이  $125.3e^{-x/94} + 17.6e^{-x/1003}$ 의 함수 형태로 감쇄하는 양상을 보여 저주파수대에서 빔폭이 급격히 줄어진다. 그림 10에서 수직

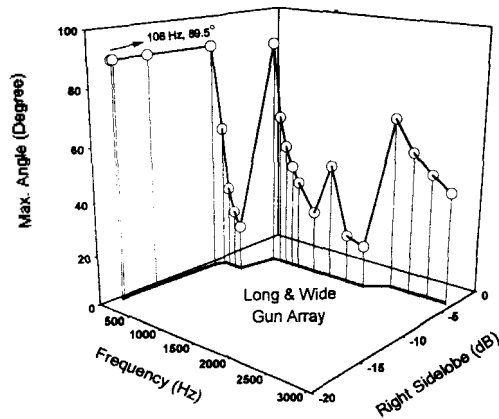


그림 12. 길이 및 폭배열이 주파수, 부엽, 최대각에 대한 삼차원도.

Fig 12. Three-dimensional plot for maximum angle of the sidelobe versus frequency on the long and wide arrays.



면 방향성이 빔폭은 위상각  $0^\circ$ 에서 최대 진폭 (0dB)를 나타내며 수평면 방향성에서는 불규칙적인 양상을 나타낸다. 그림 12는 길이배열 및 폭배열의 주파수에 따른 우측부엽의 변화를 나타내며 도시된 파와 같이 108Hz 이상부터 노엽과 생성되고 각 주파의 고주파수대역 진폭의 노엽의 크기는 더욱 커지는 양상을 보인다. 따라서 길이배열은 저주파수대 심부지층 탄성과 탐사에 적합한 것으로 분석되며 방향 특성을 나타내는 전후비 FB는 우엽강도가  $-8.86\text{dB}$ 로 약 1:0.36이다.

5. 폭배열 특성

일반적으로 폭배열 전개 방법은 가로 및 세로 길이가 같은 폭으로 설계(1)를 하는 것이 보통이나 온누리호 경우에는 설계 특성상 제한된 길이 7m×10.82m에 16개 선으로 구성된다(그림 1c, 2b 참조). 또한 두 개의 준배열은 길이배열과 같은 에너지 분포를 갖는다(그림 7b 참조). 폭배열의 빔 패턴을 나타내는 그림 8은 수평면 방향성의 모든  $\phi$  각도에서 상호 간섭이 일어나며 특히 수직면, 수평면 방향성의 빔 패턴은 길이배열의 수직면 방향성과 동일한 특성을 갖는다. 폭배열에서는 수평면, 수직면 방향성의 빔 패턴이 서로 매우 비슷한 양상으로 변하는 특성을 보인다. 따라서  $0^\circ$ 에서 방출빔이 좁고 최대의 빔을 만드는데 수직면 방향성에서 방출빔은 모든 방위각에 대하여 상대적으로 좁다는 parkes<sup>[15]</sup> 주장과 일치한다(그림 8 참조). 폭배열의 빔 패턴은 아래 방향으로 수직하며 주파수의 함수로 고주파수대에서 더욱 크게 나타나는 특성을 지닌다.

그림 9에서 폭배열의 빔폭 특성은 길이배열과 같은 양상을 보이며, 그림 10의 수직면 방향성에서는 길이배열과 마찬가지로 위상각  $0^\circ$ 에서 최대 진폭 0dB를 나타낸다. 반면에 수평면 방향성에서는 길이배열과는 달리 수직면 방향성일 경우와 동일하다. 주파수에 따른 우측부엽 특성을 나타낸 그림 12는 길이배열과 동일한 양상을 보이며 폭배열의 전후비 FB는 길이배열과 동일한 방향성을 나타낸다. 따라서 폭배열은 길이배열과 마찬가지로 저주파수대역 탄성과 탐사에 적합한 것으로 분석되며 항상 에너지가 수직 방향으로 방출됨으로써 경사 지층 탐사에서는 빔 소용이 효율적이다.

6. 단면도 분석

모형 시험을 확인하기 위해서 동해의 같은측선에서 송이배열을 이용하여 획득된 12채널 탐사 자료(그림 13a 참조)와 폭배열을 이용하여 획득한 96채널 탐사 자료(그림 13b 참조)에 대한 종합 단면도를 작성하였다. 그림 13(a)은 그림 13(b)보다 상대적으로 약한 에너지 차이 때문에 강한 지층구조가 나타나지는 않는 반면에 미세한 지층 구조를 잘 나타내 주고 있다. 이때 스트리머의 특성상의 차이점도 있으나 같은 특성의 수진기가 사용되었으며 음원특성의 큰 차이에 비하면 수진기 차이에서 오는 영

향은 매우 경미할 것으로 사료된다. 따라서 송이 배열의 탐사 방법은 길이배열이나 폭배열의 탐사 방법보다 고분해능 탐사 즉, 전부 지층 구조를 밝히는데 좋은 음원배열 방식이며 반면에 길이 및 폭배열 탐사 방법은 심부지층 구조를 밝히는데 적합한 방향 특성을 띠고 있다.

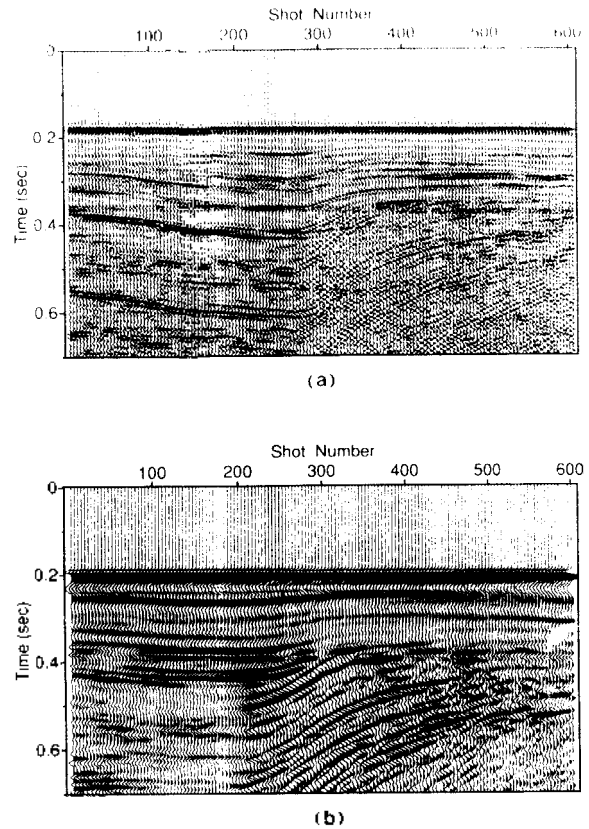


그림 13. (a) 송이배열을 이용하여 획득된 고해상도의 탄성과 탐사 자료의 종합단면도 (b) 송이배열 탐사측선에서 폭배열을 이용하여 획득된 탄성과 탐사 자료의 종합 단면도.

Fig 13. (a) Stacked section from high-resolution seismic data acquired using cluster arrays. (b) Stacked section from seismic data acquired using wide arrays for the same survey line as the seismic survey line of cluster arrays.

V. 결 론

본 논문에서는 모형 시험과 동해에서 획득한 탐사 자료를 이용하여 해양조사선 온누리호에 설치되어 있는 슬리브군 배열들의 방향 특성을 연구하였다. 배열 이론 적용시 수중에서의 음파 전달과 해수면 반사와 효과를 적용하였으며 동해에서 획득한 자료와 비교 분석 결과는 다음과 같다.

온누리호에 설치된 송이 및 길이배열에서 효율성이 최대가 되는 주파수는 각각 1631, 69Hz 이내 범위이며 광

배열 주파수를 갖는다. 특히 에너지는 분산사파는 부엽이 에너지원인 주엽에 영향을 주지 않는 최저 주파수는 송이배열의 최대 효율 주파수와 마찬가지로 1631Hz 미만이며 길이 및 폭배열에서는 108Hz 미만이다. 폭배열인 경우, 배열 효과를 얻기 위해서는 준배열 간격을 현재 7m 보다 3.82m 정도 더 넓게 하는 것이 요구되며 배열의 분해도를 높이기 위해서는 가능한 배열길이를 최대한 늘려야 할 것으로 생각된다. 각 배열에서 빙폭 특성을 분석해 보면, 수직면 방향성에서 송이배열은 814Hz까지는 빙폭이 179.5°로 일정하며 814-1631Hz 범위에서는 급격히 좁아지는 특성이 있으나 빙폭이 넓어 방향성 효과는 적을 것으로 생각된다. 반면에 길이배열과 폭배열은 교주파로 갈수록 빙폭이  $125.3e^{-x/34} + 17.6e^{-x/100}$ 의 함수 형태로 감쇄하는 양상을 나타냄으로써 송이배열 보다는 빙폭이 상대적으로 적어 방향성 효과가 큰 것으로 분석된다. 방향성의 양호함을 나타내는 전후비는 길이 및 폭배열 모두 154Hz에서 1:0.36을 나타내 같은 방향성 효과가 있음이 입증되었다. 한편 방향 특성을 이용한 빙 조정의 경우는 동해에서 획득된 탐사 자료 분석 결과, 길이 배열에서  $-3^\circ, 0^\circ, +3^\circ$  각도로 빙 조정 할 경우, 약 0.99:1:1.05의 미약한 빙 조정 효과가 나타난다. 이는 배열길이에 비해 수심이 상대적으로 깊고  $\theta$ 가 작은 각도에서는 방향성에 큰 변화가 없음을 의미한다. 송이, 길이, 폭배열에 대한 모형 시험 결과와 이에 준하여 획득된 실제 탐사 자료를 비교한 결과 송이배열 탐사 방법은 고분해능 천부지층 탐사에 적합하며 길이배열 및 폭배열 탐사 방법은 저주파 심부지층탐사에 알맞은 것으로 분석되었다.

(이 연구는 한국해양연구소 기본연구사업(PE00541)의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.)

### 참 고 문 헌

- 김기영, 유해수, 주형태, 김예동, "해저면 반사파를 이용한 슬러브건의 원거리장 파형 분석연구(I)-독립 발파의 경우를 중심으로-", 한국자원공학회지, Vol. 30, No. 4, pp. 327-340, 1993.
- 김기영, 주형태, 홍종국, 유해수, "전산 모형을 통한 고해상도 다중 채널 해양반사파의 획득 변수 결정," 한국지질공학회지, Vol. 2, No. 2, pp. 187-206, 1994.
- 김정기, "방송 안테나와 전파·전파." 우신출판사, 1994, pp. 135.
- 우만식, "안테나 공학." 크라운출판사, 1995, pp. 119.
- 홍종국, 김한준, 유해수, 김기영, 양승진, "은누리호의 12채널 탄상파 탐사시스템을 이용한 고해상 탄상파 탐사," 한국자원공학회지, Vol. 30, No. 1, pp. 81-86, 1995.
- Burdic, W.S., "Underwater acoustic system analysis." Prentice Hall, 1991, pp. 314.
- CGG, "Marine seismic source controller manual," 1991, pp. 33.
- Giles, B.F., and Johnston, R.C., "System approach to air-gun array design," Geophysical prospecting, Vol. 21, pp. 77-101, 1973.
- Johnson, D.H., and Dudgeon, D.E., "Array signal processing: Concepts and Techniques," PTR Prentice Hall, Inc, 1993, pp. 84-106.
- Lynn, W., and Lerner, K., "Effectiveness of wide marine seismic source arrays." Presented at the 45th Annual Meeting of the European Association of Exploration Geophysicists, Oslo, Norway, 1983.
- Mikavica, M., and Nestic, A., "CAD for linear and planar antenna arrays of various radiating elements." Artech house, INC, pp. 160, 1992.
- Nooteboom, J.J., "Signature and amplitude of linear airgun arrays," Geophysical prospecting, Vol. 26, pp. 194-201, 1978.
- Parkes, G.E., and Hatton, L., "The marine seismic source." D. Reidel Publishing Co, 1986, pp. 114.
- Parkes, G.E., Hatton, L., and Haugland, T., "Marine source array directivity: a new wide airgun array system," First break, Vol. 2, No. 7, pp. 9-15, 1984a.
- Schoenberger, M., "Optimization and implementation of marine seismic arrays," Geophysics, Vol. 35, pp. 1038-1053, 1979.
- Ziolkowski, A., "A method for calculating the output waveform from an air gun," Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 21, pp. 137-161, 1970.

#### ▲유 해 수(Hai Soo Yoo)



1982년 2월: 한양대학교 자원공학과(공학사)

1984년 2월: 한양대학교 자원공학과(공학석사)

1984년~1990년: 한국과학기술원 해양연구소(연구원)

1990년~1995년: 한국해양연구소 지구물리연구실(선임연구원)

1996년 2월: 한양대학교 자원공학과(공학박사)

1995년~현재: 한국해양연구소 지구물리연구그룹(그룹장)

#### ▲양 승 진(Sung Jin Yang)

1965년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학석사)

1976년: 미국 TEXAS AM(공학박사)

1983년: 한국자원연구소 책임연구원

1983년~현재: 한양대학교 자원공학과 교수