

불발 음원이 탄성파탐사 성능에 미치는 영향

Effect of Different Misfired Source on Seismic Survey Quality

유 해 수*, 장 재 경*, 양 승 진**

(Hai Soo Yoo*, Jae Kyeong Chang*, Sung Jin Yang**)

요 약

다중채널 탄성과 음원배열에서 불발 음원에 따라 탐사 성능에 미치는 영향을 확인하기 위하여 음원배열의 빔 패턴과 원거리장 파형 변화를 비교 분석하였다. 원거리장 파형의 주산호 진폭은 전체 건 부피의 약 40%에 해당하는 음원들이 불발일 경우, 탐사성능이 66% 정도 유지되는 것으로 확인되었다. 154Hz에서 같은 간격의 음원들이 불발 시에는 배열 형태와 관계없이 길이 및 폭배열의 빔 폭이 동일하게 나타난다. 길이배열의 빔 패턴에서는 불발된 음원의 부피가 증가됨에 따라 빔 폭이 41°에서 34°로 좁아지는 경향을 나타낸다. 따라서 부피가 작은 음원배열일수록 빔폭이 좁고 양호한 파형이 생성되므로 작은 에너지가 요구되는 천부 지층탐사에 적합한 것으로 확인되었다.

ABSTRACT

The beam patterns of source array and changes in the far-field signatures are compared and analyzed each other in order to identify the seismic capability affected by the misfired source at the multi-channel seismic source array. In the primary pulse amplitude of far-field signature, the 66% of seismic capacity are sustained if approximately 40% of source are misfired among whole gun volume. When the sources with the same distances are misfired at the 154Hz, the beam width of the long- and wide-array which is identical regardless of arraying pattern. The beam width has a tendency to narrow from 41 to 34 according to increase the volume of misfired source at the long-array beam pattern. Therefore, the source array of small volume are suitable for the shallow seismic survey because of producing adequate beam patterns with narrow beam width.

I. 서 론

해저 심부 지질구조나 해저광물자원을 확인하기 위하여 해상 탄성과 탐사자료를 획득하는 일은 막대한 경비가 소요되므로 현장 조사에서 문제가 발생 시에는 신속하게 처리해야 한다. 연속적인 탐사를 중단시킬 수 있는 상황을 빈번하게 일으키는 탄성과 음원은 직접적으로 탐사성능에 큰 영향을 준다. 따라서 탄성과 음원특성을 나타내는 원거리장 파형(far-field signature)과 빔 패턴은 사전 탐사성능을 확인하려는 목적과 이러한 상황 판단의 기초 자료가 된다.

일반적으로 음원배열은 크기와 간격을 다르게 배열하여 신호 대 버블(primary/bubble)의 비가 최대가 되도록 설계되는데 동시에 발파된 건(gun)들 사이의 간섭 현상은 매우 복잡한 문제로 나타난다. 따라서 그 동안 간섭현상에 대한 연구를 많이 시도하였으며[1,2,3], 크기가 120(in3)인

두 개의 건 간격이 12.2m 인 경우 일어나는 간섭 현상에 대해 확인하였다[4]. 간섭에는 크게 선형 간섭(linear interaction)과 비선형 간섭(non-linear interaction)으로 구분할 수 있다[5]. 간섭에 영향을 미치는 가장 중요한 인자중의 하나는 건 간격이며, 건 부피, 건 내부 압력, 건 주변의 수압 등도 간섭에 영향을 준다. 비선형 간섭은 건 사이의 거리가 매우 가까워 각 건에서 발생된 기포가 하나의 기포를 형성하는 합체(coalescence) 간섭 형태이다.

연구선 은누리호에 장착된 음원은 그림 1과 같이 16개 에어건으로 구성되는데 그 중 내용적이 11.31ℓ이며 8개 건으로 구성되어 있는 좌현 준배열상(port)의 건들을 이용하여 원거리장파형(Far-field signature)에 대한 연구를 실시하였다. 에어건들을 동시에 발파하거나 어떤 건을 불발시켰을 때 해저면에서 반사되어 오는 반사파를 이용하여 획득한 원거리장 파형을 시간 환경에서 분석하였으며, 탐사자료 획득 조건과 같은 가상 환경에서 빔 패턴 변화를 확인하였다.

본 연구는 해상 다중채널 탄성과 탐사 중에 발생하는 어떠한 음원의 불발이 탐사성능과 획득자료에 미치는 영

* 한국해양연구소 지질연구단

** 한양대학교 자원공학과

접수일자: 1999년 6월 4일

항을 사전에 정확히 파악하고 예측함으로써 문제 발생 시 신속하게 대처하여 탐사효율을 높이고자 한다.

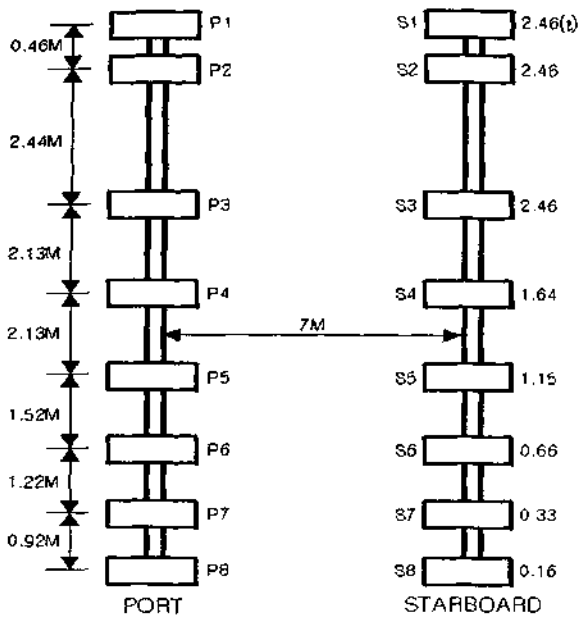


그림 1. 2 x 8개 준 배열로 구성된 음원
Fig. 1. The array is composed of two identical sub-arrays each of which has eight sleeve-guns.

II. 자료획득

2.1 시험자료획득

시험자료는 온누리호 다중채널 탄성파 음원이 하나 혹은 그 이상 불발되었을 때 탐사자료 획득 여부의 사전 지표를 마련하기 위하여 1993년 1월 그림 2의 남극 Drake 해협에서 원거리장파형 자료를 획득하였다. 이 해협은 원거리장파형을 측정하는데 필요한 수심이 약 4,000m 정도로 매우 깊고, 해저면이 평탄하며 반사도가 강한 특징을 갖는다. 수심과 탐사 목적에 따라서 음원의 깊이도 달라지는데 음원의 깊이를 증가시키면 해수면 반사파의 시간지연이 길어져 원거리장 파형에 현저한 변화가 생기며 깊어질수록 스펙트럼 범위가 좁아진다. 따라서 음원의 깊이 결정은 획득변수 결정에 있어서 가장 중요한 요소이며 구체적인 변수는 표 1에 요약하였다.

표 1. 자료획득 변수
Table 1. Acquisition parameters employed for the far-field signature tests.

Description	Antarctic survey
Record Length	10sec
Sampling Interval	2msec
Energy Source	11.31 ℓ sleeve-gun
Source Depth	6.5m
Frequency	154Hz
Gun Volume	0.16, 0.33, 0.66, 1.15, 1.64, 2.46 ℓ
Streamer Length	2400m
Number of Groups	96
Group Interval	25m

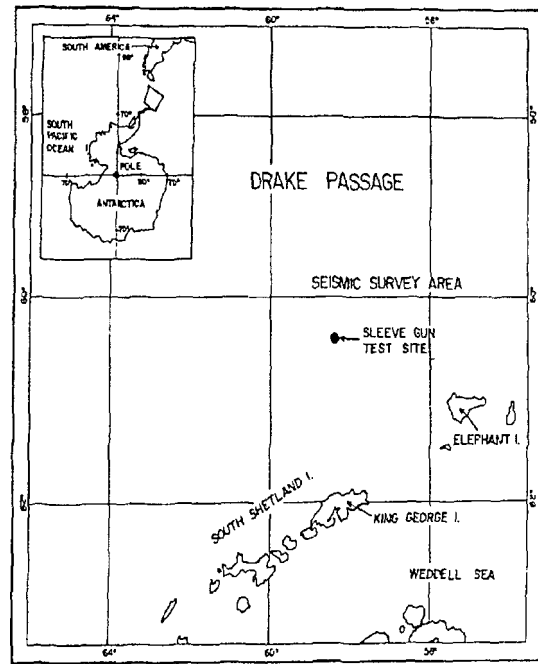


그림 2. 분석자료를 획득한 남극 해역
Fig. 2. Location map of the test site for far-field signature analysis.

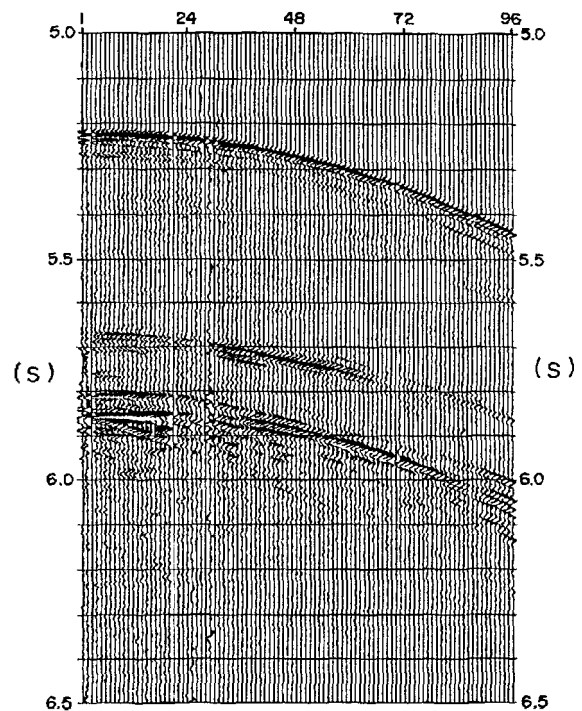


그림 3. 일정 이득을 적용한 공발점 모음자료
Fig. 3. Common shot gather with a constant gain applied.

그림 3은 남극해역에서 획득한 96채널 탄성파 탐사자료이다. 일정 이득(constant gain)만을 적용한 8개 음원의 공발점모음(common shot gather) 자료로 기록시간 5~6.5초 사이의 자료만을 도시하였다.

3.2 자료분석

획득한 탄성과 탐사자료는 제작된 단면도에서 해저면 반사파 도달 이후 400ms 까지의 자료만을 취하여 그림 4에 도시하였다. 그림 4의 (a)는 준 배열 상의 모든 음원들이 동시에 성공적으로 발파된 경우와, 불발된 건이 (b) P8, (c) P7, (d) P6, (e) P5, (f) P4, (g) P3, (h) P4, 5, (i) P3, 4, 6인 경우, 그리고 (j) P1, 2 음원 두 개로 구성되어있는 송이배열이 불발된 경우에 기록된 자료를 차례로 보여 준다. 전반적으로 주신호 진폭 P_s 는 불발된 건 부피와 비례하여 감소하는 경향을 보이며, 부피가 작은 (b), (c), (d)의 음원들이 불발된 경우 작은 잡음들이 많이 분포하는 것으로 보아 이러한 잡음들을 제거하는데 효과적인 것으로 보인다. 특히 (d)의 0.66 l 건이 불발일 경우에 일 반잡음이 많이 존재하며 이러한 잡음을 효과적으로 제거 하는 것으로 확인되었다. 그림 4의 분석결과에 대한 원거리 장 파형 특성을 표 2에 정량적으로 요약하였으며 불발 건의 주신호 진폭 G_{mr} (misfired gun), 불발건의 부피 V_{mf} (misfired gun volume), 준배열의 총 부피 V_t (total gun volume), 불발건의 주신호 진폭 P_{ms} (misfired primary pulse amplitude), 준배열 주신호 진폭 P_t (total primary pulse amplitude), 주신호 진폭 P_p (primary pulse amplitude) 등을 음원 부피 별로 구하였다.

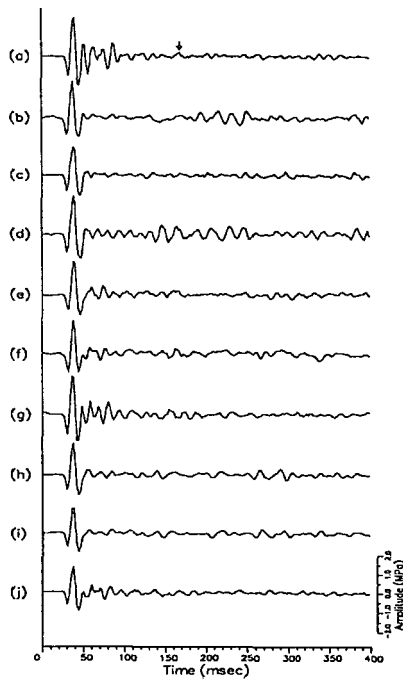


그림 4. 원거리장 파형의 수직중첩도
Fig. 4. Three-fold vertical stacks of the far-field signatures.

III. 배열이론 및 특성

3.1 배열 이론

해수면 아래 H m에 위치한 건 배열에서 θ 와 ϕ 각으로 전

달되며 구형 대칭 형태의 음파는 배열 이론식 [6]을 응용하여 표현할 수 있는데, 직접파와 $2H\cos\theta/c$ 로 시간 지연되는 해수면 반사파의 합성파는 총 빔 패턴 함수로 표현할 수 있다[7]. 총 빔 패턴 $A_{tot}(\theta, \phi)$ 는

$$A_{tot}(\theta, \phi) = A_d(\theta, \phi) + A_r(\theta, \phi) \\ = [F_p(\theta, \phi) + F_p(\pi - \theta, \phi)e^{-\frac{-jk_2 H \cos\theta}{c}}] \theta_0 \\ + [F_p(\theta, \phi) - F_p(\pi - \theta, \phi)e^{-\frac{-jk_2 H \cos\theta}{c}}] \phi_0$$

이며, 여기서 $F_{\theta\phi}(\theta, \phi) = F_{\theta\phi}(\theta, \phi)F(\theta, \phi)$

$F_{\theta\phi}(\pi - \theta, \phi) = f_{\theta\phi}(\theta, \phi)F(\pi - \theta, \phi)$ 이다. H는 건 길이이며 c는 수중 음파 속도이다. 길이 및 폭배열의 빔 패턴은 건 간격과 신호 파장의 비에 의해 많은 영향을 받는다. 일정 주파수에서 불발 건으로 인하여 생기는 빔 패턴을 식 (1)을 이용하여 그림 5에서와 같이 0~10dB까지 불발 건의 부피가 작은 순서대로 나타냈으며, 식별이 용이하도록 $\theta(0-180^\circ)$, $\phi(0-270^\circ)$ 부분만 도시하였다. 불발 건이 없는 경우의 (a)와 불발 건이 각각 (b) 0.16 l, (c) 0.33 l, (d) 0.66 l, (e) 1.15 l, (f) 1.64 l, (g) 2.46 l, (h) 2.79 l, (i) 4.76 l, (j) 4.92 l인 경우의 빔 패턴을 나타내며 빔폭 B_w (Bandwidth), 배열길이 A_s (Array length), 길이배열 L_s (Long array), 폭배열 W_s (Wide array) 등의 분석 결과를 표 2에 원거리장 파형과 같이 수록하였다.

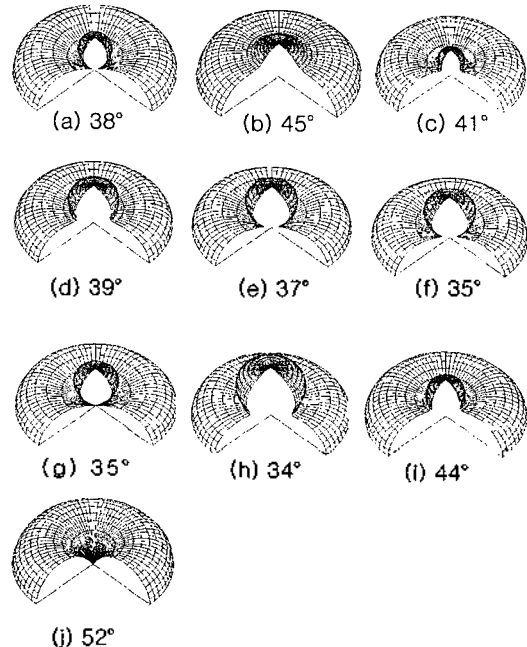


그림 5. 불발 음원의 3차원 빔 패턴
Fig. 5. 3-dimensional radiation pattern for the long array with a misfired gun.

표 2. 파형과 빔 패턴의 분석 변수

Table 2. Descriptive parameters for the farfield signatures and the beam patterns of the sub_array with or without misfires.

L_s, W_s G_{mf}	V_{mf}/V_i (%)	P_{ma} kPa-m	P_s, L_s kPa-m	P_s/P_i (%)	L_s, W_s B_w	A_i (m)
(a)P-0	0.0	0	3430	100	38°	10.8
(b)P-8	1.4	573	2857	83	45°	9.9
(c)P-7	2.9	840	2590	76	41°	10.8
(d)P-6	5.8	226	3204	93	39°	10.8
(e)P-5	10.2	725	2705	79	37°	10.8
(f)P-4	14.5	796	2634	77	35°	10.8
(g)P-3	21.7	154	3276	95	35°	10.8
(h)P-4.5	24.6	756	2674	78	34°	10.8
(i)P-3.4.6	42.0	1167	2263	66	44°	10.8
(j)P-1.2	43.4	1162	2268	66	52°	7.9

배열 길이가 다른 (b), (j)인 경우는 비교대상에서 제외시켰으며 이는 빔 패턴이 배열길이에 가장 큰 영향을 받고 있음을 확인한 바 있다[7]. 같은 배열길이에서는 불발건의 부피가 클수록 빔 폭이 44° - 34°로 좁아진다. 따라서 음원의 부피가 작을수록 에너지가 작은 반면에 빔 폭이 좁아져 천부 탄성과 탐사에 양호한 파형을 생성한다. 일반적으로 빔폭은 주엽의 -3dB 부분을 측정하며 빔폭이 작으면 주엽의 크기도 비례하여 작아지는데 (g), (h)의 경우는 외형상의 모양이 반대로 나타난다. 반면에 배열길이가 다른 (b), (j)는 빔폭이 넓어도 외형상 주엽이 거의 보이지 않아 불발 건과 배열길이에 따라 주엽의 빔 형태가 심하게 변함을 확인할 수 있다.

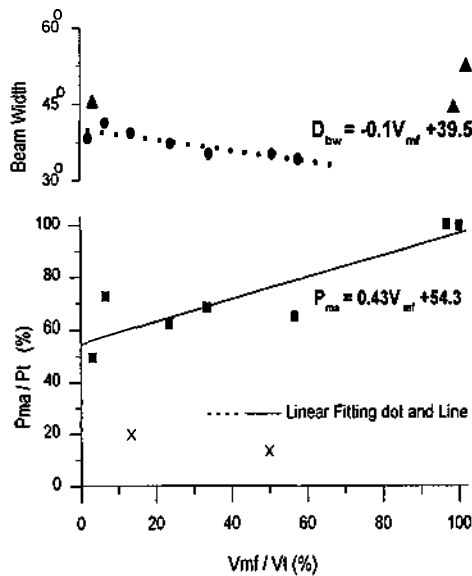


그림 6. 불발건의 수신호 진폭과 빔폭 변화도
Fig. 6. Variation in misfire amplitude and beam width with gun volume.

그림 6은 표 2에서 V_{mf} 와 P_{ma} 를 V_i 와 P_i 로 각각 나누어 구한 백분율을 대수 값으로 나타낸 것으로, 가로축 및 세로축은 각각 V_{mf}/V_i 와 P_{ma}/P_i 의 백분율 값을 나타낸다. V_{mf} 와 P_{ma} 의 상용 대수값 사이의 관계를 최소 자승법을 이용하여 구한 최적 일치함수는 식 (2)와 함께 그림에 굵은 실선

$$P_{ma} = 0.43 V_{mf} + 54.3 \quad (2)$$

으로 표시하였으며 “x” 표시는 주변값과 현저한 차이가 있어 분석 대상에서 제외시켰다. 굵은 점선으로 표시된 것은 각각에 대한 불발 건의 빔 폭 변화를 나타낸다. 최소 자승법을 이용하여 구한 최적 일치 함수는 식 (3)으로 나타내며

$$D_{bw} = -0.1 V_{mf} + 39.5 \quad (3)$$

불발 건의 부피가 클수록 빔 폭이 좁아지는 것을 확인할 수 있다. 특히 불발 건의 간격이 큰 (i)와 배열길이가 다른 (b), (j) 등 “▲”로 표시되는 자료는 제외시켰다.

그림 6과 표 2에서 온누리호에 설치되어 있는 준배열의 경우, 전체 건 부피의 43.4%에 해당하는 음원들이 불발을 일으킬 경우에도 수신호 진폭은 66% 정도 유지함을 알 수 있다.

주파수 영역에서의 분석 결과는 일부 건이 불발된 경우에 뚜렷한 차이를 보이지 않으며 마찬가지로 건 간격이 길이에 배열에서 사용된 간격과 같은 거리에 있는 10.8m x 7m의 폭 배열 건을 적용하여 본 결과 길이 배열과 동일한 빔 폭을 나타낸다는 것을 알 수 있다[8].

IV. 결론

8개 건 배열에서 임의의 건을 인공적으로 불발시켰을 경우에 획득된 탄성과 자료를 시간 및 주파수 영역에서 분석하였으며, 같은 조건의 가상환경에서 컴퓨터 모의과정과 배열이론에 의해 구한 길이 및 폭 배열의 빔 패턴을 분석한 결과는 다음과 같다.

10.8m 길이의 음원배열에서 원거리장 파형의 수신호 진폭은 전체 건 부피의 약 43%에 해당하는 건들이 불발을 일으킬 경우, 탐사성능이 66% 정도 유지하는 것으로 확인되었다. 한편 같은 조건의 환경에서 컴퓨터 모의과정에 의한 길이 및 폭 배열의 빔폭 변화는 배열형태와 무관하게 나타난다. 온누리호의 건 배열에서 불발 건의 부피가 증가됨에 따라 빔 폭 변화는 154Hz에서 41° - 34°로 좁아지는 경향을 나타낸다. 즉 불발 건의 부피가 클수록 에너지 크기가 작아지는 반면에 빔 폭이 좁아져 양호한 탄성과 신호를 얻을 수 있으므로 작은 부피의 건들은 천부 지층탐사에 적합한 것으로 확인되었다.

참고 문헌

1. Ziolkowski, A. M, 1970, A method for calculating the

- output waveform from an airgun : Geophys. J. R. Astr. Soc., 21, 137~161.
2. Giles, B.F., and Johnston, R.C., 1973, System approach to airgun array design : Geophysical Prospecting, 21, 77~101.
 3. Nootboom, J.J., 1978, Signature and amplitude of linear airgun arrays : Geophysical Prospecting, 26, 194~201.
 4. Lugg, R., 1979, Marine seismic sources, in developments in geophysical exploration methods : Ed. A.A. Fitch, Appl. Sci. Publ.
 5. Parkes, G.E., and Hatton, L., 1986, The marine seismic source : D. Reidel Publishing Co.
 6. Mikavica, M., and Nestic, A., "CAD for linear and planar antenna arrays of various radiating elements," Artech house, INC., pp. 160, 1992.
 7. 유해수, "다중채널 반사파탐사를 위한 획득장비 특성분석 및 야외변수 최적화 연구," 한양대학교 박사학위논문, pp. 188, 1995.
 8. 유해수, "건 간격에 따라 탄성파 탐사 성능에 미치는 영향," 한국음향학회, 17, 6, pp. 62-66, 1998.

▲ 유 해 수(Hai Soo Yoo)

한국음향학회지 15권 제1호 참조

현재 : 한국해양연구소 책임연구원(공학박사)

* 주관심분야 : 탄성파 탐사 및 수중음향

▲ 장 재 경(Jae Kyeong Chang)

한국음향학회지 17권 제6호 참조

현재 : 한양대학교 박사과정 수료

* 주관심분야 : 음향신호 분석

▲ 양 승 진(Sung Jin Yang)

1974년~1976년 : 미국 Texas A&M 지구물리학(박사)

1966년~1983년 : 한국자원연구소 연구원

1983년~현재 : 한양대학교 교수

* 주관심분야 : 탄성파탐사자료 처리