

# Sidescan Sonar용 Narrow Beam의 설계

이 종 무\* · 이 종 식\*\*

(1993년 2월 5일 접수)

## Design of the Narrow Beam for Sidescan Sonar

Chong-Moo Lee\* · Jong-Sik Lee\*\*

**Key Words :** 현측 탐지 소나(Sidescan Sonar), 비임 형상(Beam Pattern)  
송파기(Transducer), 배열(Array), 가중법(Weighting)

### Abstract

Sidescan sonar uses the fan type beam which has horizontally narrow and vertically somewhat wide beam pattern. To construct such a beam we will use an array of transducers. In case of using single transducer it must have a high frequency to have the fan type beam, but in case of using an array it dose'nt have to be high frequency. We are planning to use 30 kHz transducers for our sidescan sonar under development. This paper shows ways of designing a narrow beam for the sidescan sonar system by illustrating various shapes of the beam patterns.

### 1. 서 론

Sidescan Sonar는 해저의 지형이나 목표물을 탐지하기 위해 Sonar Beam을 이용하는 탐사장비이다. 이때 사용되는 Beam은 Sidescan Sonar가 탑재되는 Towed Fish나 ROV의 현측 방향으로 상당히 좁은 Beam 폭을 갖고 그 연직 방향으로 상대적으로 넓은 Beam 폭을 갖도록 설계되어야

한다. 이렇게 하여 생성된 Beam의 형태를 부채꼴 Beam 형태(Fan Beam Type)라 한다. 이러한 Beam은 일반적으로 좌우 양현 방향으로 형성되어 양쪽의 해저를 전진하면서 Scan하게 된다. 이 경우 Transducer는 송파기와 수파기의 역할을 번갈아 가면서 해야한다. Fig. 1은 Towed Fish에 탑재된 Sidescan Sonar의 운영 개념을 보여주고 있다.

Sidescan Sonar에 사용되는 이러한 좁은 Beam

\* 한국기계연구원, 선박·해양공학연구센터, 해양기술 연구부 연구원  
\*\* 한국기계연구원, 선박·해양공학연구센터, 해양기술 연구부 연구원 해양장비 개발실 실장

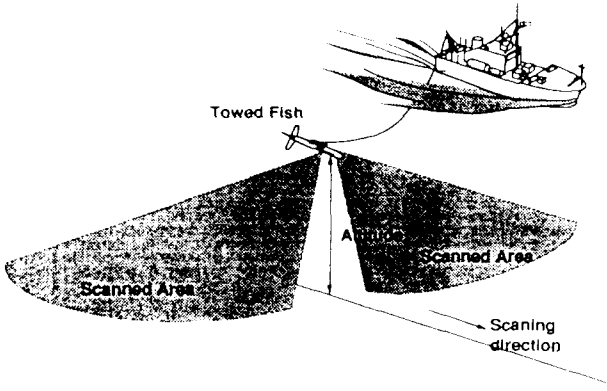


Fig. 1. General operating system of sidescan sonar

을 형성하기 위해서는 한개의 Transducer에 수파수가 아주 높은 음향신호를 사용하거나 상대적으로 낮은 주파수를 갖는 Transducer로 배열을 형성하여 Beam의 형태를 좁게 만드는 방법이 있다. 그런데 전자의 경우 그러한 Transducer만 따로 구입하기는 매우 어려운 실정이고 단일 Transducer를 사용하기 때문에 후자에서 가능한 배열 각종 기법등은 적용하기 힘들다. 후자의 방법을 Beam-Forming이라하는데 본 연구에서는 이 방법으로 Sidescan Sonar용 Beam을 설계하고자 한다. 단일 Transducer를 사용하는 것으로 추정되는 외국 제품의 경우 그 중심 주파수는 600kHz 이상인 경우가 대부분인데 본 연구에서는 중심 주파수가 30kHz인 Transducer를 사용하는 것으로 한다.

2. 단일 Transducer의 Beam Pattern

배열에 요소로 사용되는 각개 Transducer는 수 중에서 중심주파수 30kHz인 원형단면의 송파기이다. 송파기의 진동면의 진동에 의한 매질의 압력변화가 음향파를 형성한다고 할 때 진동면의 미세요소에 의한 압력항들을 원형인 전체 진동면에 대해 적분을 하면 전체의 압력변화에 대한 식은 다음과 같다.

$$p \sim 2 \int_{-a}^a y \cos(kx \sin\phi) dx$$

이식을 다시 극좌표계로 변환하면 다음과 같이

된다.

$$p \sim 2a^2 \int_0^\pi \cos(z \cos\theta) \sin^2 \theta \, 2d\theta$$

여기서 적분 안의 항을 제1종 Bessel 함수로 나타내면 압력변화에 대한 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$p \sim \pi a^2 \frac{2J_1(ka \sin \phi)}{ka \sin \phi}$$

위의 식에서 송파기의 중심축과 이루는 각도인  $\phi$ 의 함수로 나타난 부분을 우리는 지향성(directionality), D라고 하고 원형단면의 송파기에 대해서는 다음과 같이 주어진다.

$$D = \frac{2[J_1(ka \sin \phi)]}{ka \sin \phi}$$

여기서  $J_1$ 은 제1종 Bessel 함수이고  $k$ 는 파수(wave number),  $a$ 는 원형단면 송파기의 반경이다. 그런데 이렇게 주어진 지향성으로써 단일 송파기의 Beam Pattern을 그려보면 주어진 반경이 1cm일 때 거의 전방향성(omnidirectional) Beam 형상을 하고 있음을 알 수 있었다. 그러나 우리가 사용하려는 송파기의 구조상 그보다는 더 나은 지향성을 갖는 것으로 제작자의 사양에 나와있다.

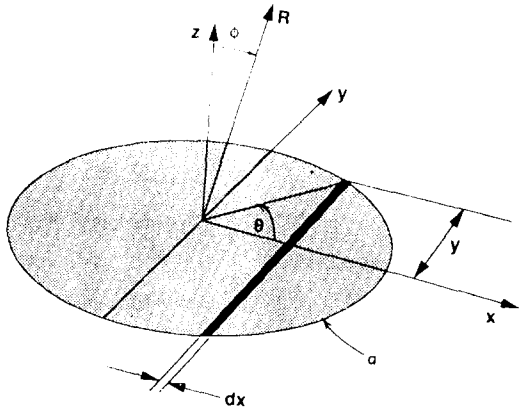


Fig. 2. Coordinate system for pressure due to circular piston

그래서 사양에 주어진 Beam폭을 위주로 하여 반

경을 조정한 지향성의 Beam Pattern을 구성한 결과 반경이 2cm인 송파기의 지향성과 거의 일치함을 알 수 있었다. 그 Beam pattern은 다음의 Fig. 3에 주어져 있다. Sidescan sonar의 경우 일종의 능동 소나 시스템이므로 송출된 신호가 목표물에 반사되어 돌아온 것을 다시 받아들여야 하므로 개개의 Transducer는 송파기와 수파기의 역할을 해야한다. 따라서 이후에 언급하게 되는 Beam Pattern들은 이 두가지 다를 포함하게 되며 송파기인 경우와 수파기인 경우의 Beam Pattern의 차이는 없다.

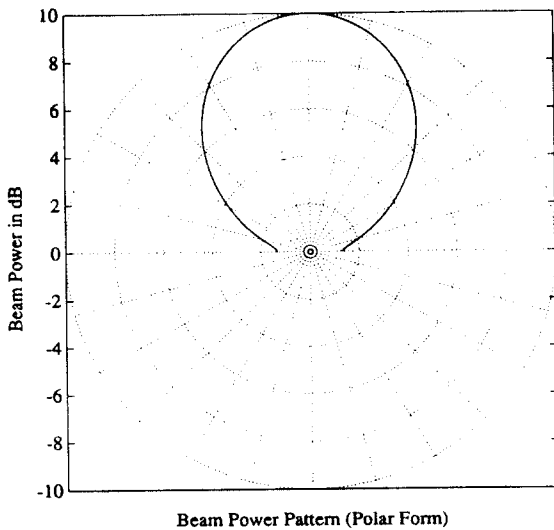


Fig. 3. Beam pattern of a transmitter with circular piston.

### 3. 송파기 배열에 의한 Beam Pattern

이제 계산의 단순화를 위해 앞서 언급한 각개의 송파기가 전방향성 송파기라 가정하고 배열에 의한 Beam Pattern을 구성하고 각개의 송파기가 지향성을 갖는 경우의 배열의 지향성 Pattern과 비교해보기로 한다.

먼저 배열의 길이를 L이라 하면 송파기의 총 개수가 M일 때 센서의 간격은 d이고 다음의 관계식이 성립할 것이다.

$$d = \frac{L}{M-1}$$

그리고 음향파는 매질의 밀도차이로 전달되는 소밀파이므로 n번째 송파기에 의한 밀도의 변화를  $\Delta\rho_n$ 이라 하면 거리 R에서의 밀도는 다음의 식으로 주어진다.

$$\Delta\rho_n = a \exp\left[ i\left(2\pi nft - kR + \frac{nkL \sin\phi}{M-1}\right) \right]$$

여기서  $\phi$ 는 앞서 언급한 바와 같이 송파기의 중심축과 이루는 각도인데 여기서는 배열에 대해서이므로 배열과 직각인 축을 배열의 중심축이라 했을 때 이 축과 이루는 각도가 된다. f는 음향파의 중심주파수이고 a는 비례상수이다.

그런데  $2\pi nft - kR$ 은 전진하는 음향파를 표현하는 것이므로 모든 송파기의 신호에 대해 공통이다. 따라서 이 부분을 분리하여 남은 부분을 다음과 같이 C라는 항으로 표현할 수 있다. 이때 급수항은 배열의 모든 송파기들의 신호에 대한 것이다.

$$\Delta\rho = a \exp[i(2\pi nft - kR)] \sum_{n=0}^{M-1} \exp\left(\frac{inkL \sin\phi}{M-1}\right)$$

$$C = a \sum_{n=0}^{M-1} \exp\left(\frac{inkL \sin\phi}{M-1}\right)$$

이 식은 유한등비 수열의 합을 의미하므로 그 합의 공식으로부터 구해낸 값을 삼각함수의 지수함수 형태로 바꾸어 주면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$C = Ma \left\{ \frac{\exp\left[ iMk \left( \frac{L}{2} \right) \frac{\sin\phi}{M-1} \right]}{\exp\left[ ik \left( \frac{L}{2} \right) \frac{\sin\phi}{M-1} \right]} \right\}$$

$$\frac{\sin\left[ Mk(L/2) \frac{\sin\phi}{M-1} \right]}{M \sin\left[ Mk(L/2) \frac{\sin\phi}{M-1} \right]}$$

우리가 구하고자하는 배열의 응답(directional response)은 위의 식에서 대괄호 안의 신호의 위상

변이 항을 제외한 것이므로 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{\text{Sin}\left(\frac{M}{M-1} \frac{kL}{2} \text{Sin}\phi\right)}{M \text{Sin}\left(\frac{M}{M-1} \frac{kL}{2} \text{Sin}\phi\right)}$$

이식은 먼저 언급한 바와 같이 각개의 송파기가 전방향성일 때에 해당하는 Beam Pattern을 제공한다.

각개의 Transducer가 지향성을 갖는 경우에 대해서는 Transducer의 곱의 정리에 의해 배열에 의한 지향성과 각개의 지향성을 곱한 형태로 나타내면 된다. 즉

$$D = D_A D_T$$

인데 D는 전체적인 지향성이고 D<sub>A</sub>와 D<sub>T</sub>는 각각 배열과 각개 Transducer의 지향성을 나타낸다.

실제 각개의 Transducer가 전체의 Beam Pattern에 주는 영향을 보기 위해 각 경우의 Beam Pattern을 다음의 Fig. 4.에 같이 도시하였다. Fig. 4.에서 Transducer의 개수 M은 40이고 중심주파수는 30 kHz, Transducer의 간격 d는 λ/2인 경우이다. Fig. 4.에서 실선은 지향성 송파기 배열인 경우이고 점선은 전방향성 송파기 배열인 경우이다.

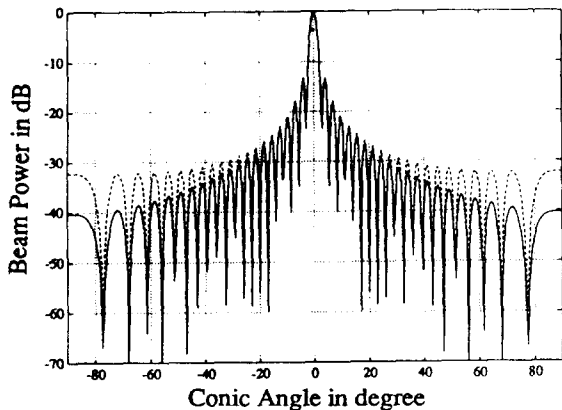


Fig. 4. Beam patterns of directional transmitter array and omnidirectional transmitter array

위의 그림에서 알 수 있듯이 각개의 Transducer의 지향성의 영향은 전체적인 Beam Pattern에서 main lobe의 폭 즉 Beam폭에는 영향을 주지 않고 side lobe의 level을 낮추어 준다는 것을 알 수 있다.

Beam폭을 좁혀주기 위해서는 배열의 길이를 늘이는 방법이 있다. 그런데 Transducer의 개수를 일정하게 하고 배열의 길이를 늘이면 요소간격 d가 커지게 되는데 이 경우는 다음의 Fig. 5.에서 알 수 있듯이 d가 λ/2를 넘어서게 되면 Beam폭은 줄어들지만 side lobe level 이 점차 증가되어 마침내는 end-fire beam이라 일컫는, φ = ±90°에서 크게 형성되는 side lobe가 발생하게 된다. 이러한 side lobe의 영향은 다시 설명하겠지만 우리가 원하는 방향(여기서는 φ = 0인 방향)이 아닌 다른 방향에서 들어오는 소음을 크게 받아들일 가능성을 높여준다. 따라서 결국 Beam폭을 줄이기 위해서는 요소간격 d를 일정하게 놓고 Transducer의 개수를 늘려주는 방법을 써야 할 것이다.

그러나 무조건 요소(Transducer)의 개수를 늘려줄 수는 없는데 그것은 배열을 감당해야 하는 amp.의 용량과 channel 수 또 배열이 구성되어 탑재되는 Vehicle의 크기와 Payload등이 고려되어야 하기 때문이다.

우리가 사용하고자하는 Transducer는 중심주파수가 30kHz이므로 음속을 1500m/sec으로 생각했을 때 파장 λ는 5cm이고 요소간격 d는 2.5cm 일 때가 가장 적합한 Beam Pattern을 형성하므로 요소 개수가 11개일 때는 배열의 길이가 25cm이고 21개일 때 50cm가 된다. 일반적으로 Beam폭은 지향성 응답의 제곱 즉 Beam Power를 도시했을 때 main lobe에서 Power가 반인 곳에서 반인 곳까지를 말하는데 이것은 각도로 표시된다. 또 이 값은 대략 최고치에서 -3dB 아래인 점까지와 일치하므로 3dB Beam 폭이라고도 한다. 배열의 길이가 파장보다 충분히 크다고 하면 일반적으로 3dB Beam 폭은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\phi_{3dB} \approx 50 \frac{\lambda}{L} \text{ deg.}$$

이 식을 이용하여 2에서 3° 정도의 Beam 폭을

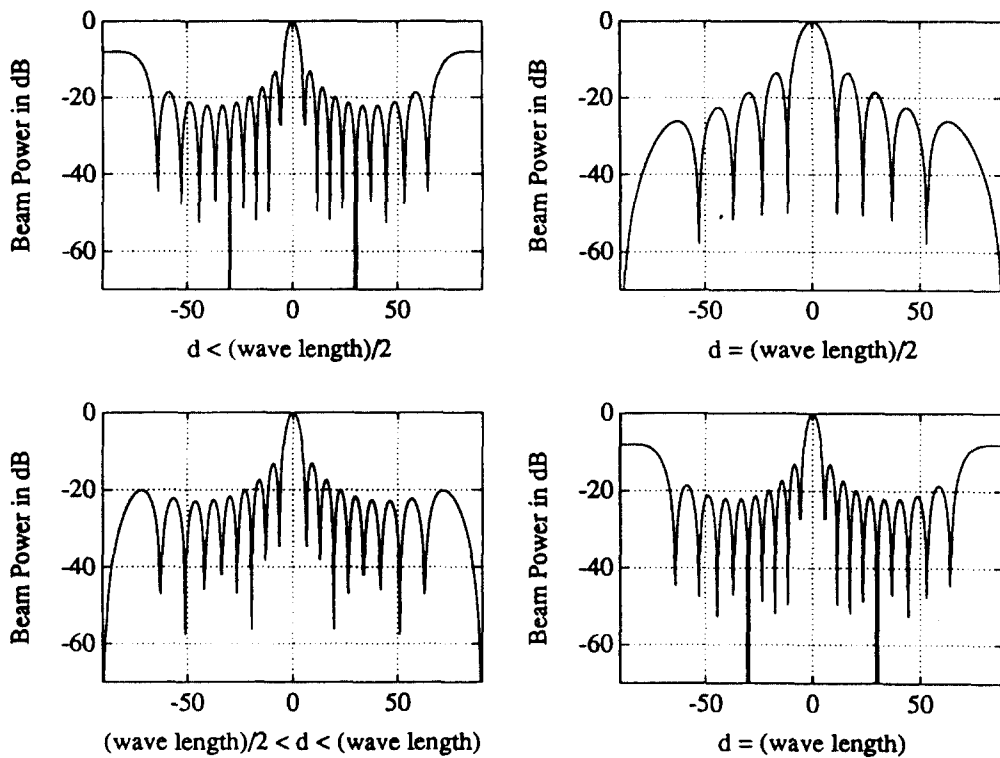


Fig. 5. Beam patterns for different element spacings

갖는 배열을 형성하려면 요소의 개수가 41에서 51개까지의 Transducer가 필요함을 알 수 있다. 그때 배열의 길이는 1에서 1.25m가 된다. Sidescan Sonar에서 이러한 좁은 Beam 폭이 요구되는 이유는 해상도를 높이기 위해서이다. 예를 들어 Sidescan Sonar의 도달거리가 200m라 하면 Beam 폭이 2°라 했을 때 scan 되는 폭은 거의 7m 가까이 된다. 따라서 나은 해상도를 얻기 위해서는 좁은 Beam 폭이 필요하게 되는 것이다. 다음의 Fig. 6.은 요소 개수가 41개 일 때의 Beam Pattern을 보여주고 있다.

#### 4. 각 배열요소에 대한 가중법

이제 까지 논의된 배열의 Beam Pattern은 aperture function이라 불리는 배열의 응답의 가중합수가 일정한, 사각 함수의 형태에 대한 것이었다.

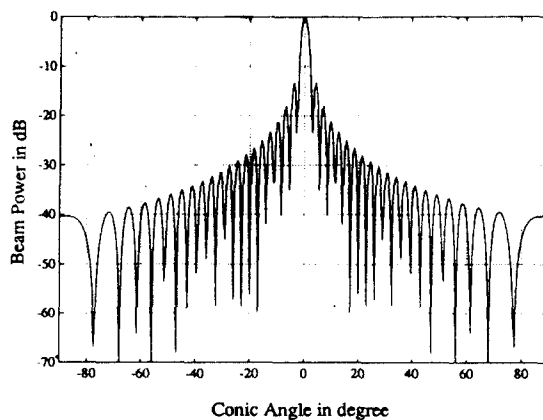
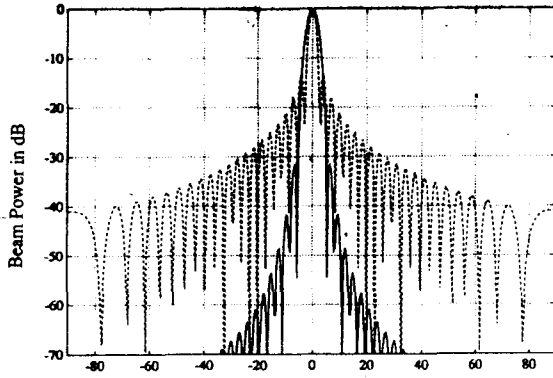


Fig. 6. Beam pattern of an array with 41 sensor elements

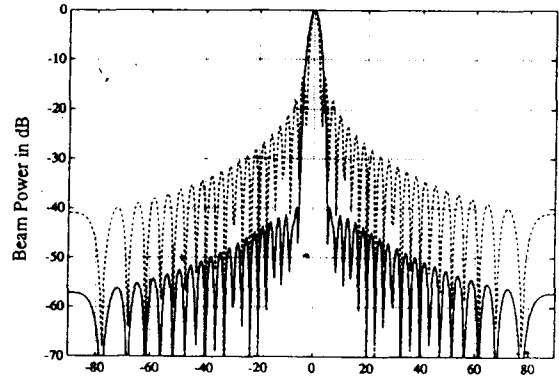
그러나 Beam Pattern의 main lobe 밖의 각도에서 들어오는 소음이 있을 때에는 side lobe의 level을

낮추는 것이 바람직 할 것이다. 그렇게 하기 위해서는 각 요소의 응답에 가중치를 다르게 주는 방법이 있는데 이러한 방법을 배열에 대한 가중법이라 한다. 보통 window라 불리는 여러 가지 가중함수들이 있는데 이러한 가중법을 쓰게 되면 side lobe의 level은 낮출 수가 있는 대신 main

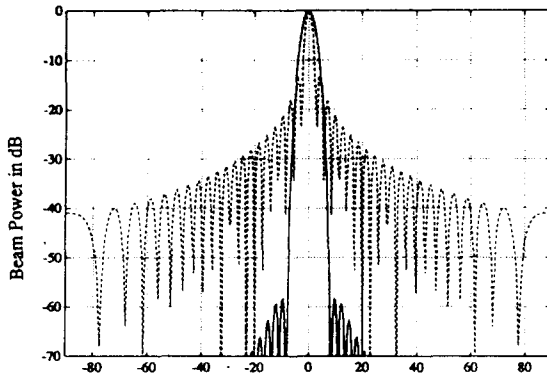
lobe의 폭, 즉 Beam 폭이 넓어지게 된다. 그 함수들은 Hann, Hamming, Blackman, Gaussian, Dolph-Chebyshev 등이 있다. Dolph-Chebyshev를 제외한 각 경우에 대한 Beam Pattern이 균일가중과 비교되어 Fig. 7.에 도시되어 있다.



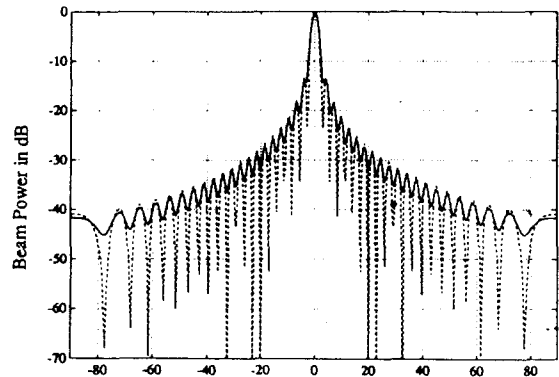
(a) Hann



(b) Hamming



(c) Blackman



(d) Gaussian

Fig. 7. Beam patterns for different array weighting

위의 Fig. 7.에서 Gaussian의 경우 그 형태를 조절할 수 있는 factor가 있는데 그 가중함수의 형태는 다음과 같이 표현되고 그 안의  $\alpha$ 가 바로 그 factor인데 여기서는  $\alpha = 3.5$  일 때의 경우이며 각 경우마다 개개의 Transducer의 지향성의 영향이 포함되어 있다.

배열에 대한 가중함수 중에 그 한 예로 Black-

man의 가중함수는 다음의 식과 같이 표현된다. 그 밖의 다른 가중함수들은 cosine을 포함하는 형태를 하고 있다.

$$w(n) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\alpha n}{M/2} \right)^2 \right]$$

## 5. 결 언

앞에서 보여준 여러 가지 경우의 Beam의 형태들로부터 종합하여 결론을 맺고자한다. 먼저 Beam 폭의 문제는 신호를 송출할 때는 보다 좁은 Beam 폭을 갖는 것이 좋으므로 가중법을 쓰지 않거나 비교적 Beam 폭의 증가가 작게 나타나는 Gaussian의 경우를 쓰고 수신하는 경우에는 소음의 효과를 줄이는 것이 유효하므로 Blackman등의 가중법을 쓰도록 시스템의 소프트웨어를 유연하게 구성하는 것이 바람직할 것이다. 또 Sidescan Sonar를 운영 중에도 여러 가지 환경에 놓이게 될 것이므로 소음의 영향이 작은 환경에서는 가중법을 쓰지 않고 소음장의 효과가 크게 되는 환경에서는 적합한 가중법을 쓸 수 있으므로 그렇게 하는 것이 유리할 것으로 본다. 다음 요소의 개수 문제는 우리가 구성하려고 하는 시스템의 scanning 범위를 고려하여 그 도달 거리가 200m를 넘는 경우라면 불가피하게 50개 이상의 요소 개수가 필요할 것이고 도달 거리가 그 이내라면 요소 개수가 30~40이 되어도 또는 아주 좁은 범위라면 그 이하의 개수라도 크게 문제가 되지 않을 것이다.

위에 언급한 문제를 해결할 수 있는 또다른 방법으로는 Transducer의 중심주파수가 보다 높은 것을 사용하는 방법이 있을 것이다. 그렇게 하면 보다 음향파의 파장이 짧아지므로 적은 개수의 Transducer를 사용할 수 있게 되고 상대적으로 좁은 Beam 폭을 갖는 Beam Pattern을 구성할 수 있다.

마지막으로 vertical 방향의 Beam 폭은 그 방향

으로 배열이 형성되어 있지 않으므로 원래의 Transducer가 갖고 있는 지향성을 갖게 된다. 그 각도의 범위는 90° 정도의 넓은 Beam 폭이다.

추후에 본 연구소의 선형수조에서 이렇게 해서 만들어진 배열을 이용한 Sidescan Sonar 시스템을 구성하여 실제 실험을 수행할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 1992년도 과학기술처에서 실행한 일반 출연 연구개발 사업 (과제명: 수중 통신 및 탐지를 위한 Beam Forming 기법 연구)의 일부임.

## 참 고 문 헌

1. William S. "Underwater Acoustic System Analysis" Prentice-Hall, Inc., 1984.
2. Richard O. Nielsen, "Sonar Signal Processing," Artech House, Inc., 1991.
3. Clarence S. Clay and Herman Medwin, "Acoustical Oceanography: Principles and Applications," John Willy and Sons, Inc., 1977.
4. Robert J. Urick, "Principles of Underwater Sound," McGraw-Hill Book Company, 1983.
5. Theodore F. Hueter and Richard H. Bolt, "Sonics," John Willy and Sons, Inc., 1955.
6. P. H. Milne, "Underwater Acoustic Positioning System," Gulf Publishing Company, 1983).