

## Development of the Side Scan Sonar Using the Multi-beam Sensors : Sensor Design

張維新<sup>†</sup> · 桂仲邑\* · 趙興紀\* · 李萬炯\*\*  
(Yu-Shin Chang · Joong-Eup Keh · Heung-Gi Jo · Man-Hyung Lee)

**Abstract** - The multi-beam side scan sonar system uses the towfish installed sonars, it is an equipment that search images of the bottom surface of the sea in real time. It is a typical equipment that is related to a sea investigation such as a geological survey, seabed communication cable and power line cable placing repair investigation, fish breeding ground investigation, sea purification, relic and mineral investigation, and mine and submarine search. Recently, it is used to sea purification and geological survey that require information of the correct surface of the seabed. Therefore, this research develops multi-beam sensors for a side scan sonar that supply various information with the fast scan speed and correct high resolution that is not a simple underwater investigation equipment.

**Key Words** : Side Scan Sonar, Multi-Beam, Towfish, Transducer, Underwater Investigation Equipment

### 1. 서 론

멀티빔(Multi-beam) 사이드 스캔 소나는 해저면의 영상을 실시간으로 탐색하는 장비로써 해양 탐사 및 지질 조사, 해저 통신 및 전력선 케이블 설치 보수 조사, 어초 조사 및 해양 정화 사업 활용, 해저 유물 및 광물 탐사, 기뢰 및 잠수정 탐색 등 해양 탐사와 관련한 대표적 장비라고 할 수 있다. 사이드 스캔 소나는 센서와 해저 사이에 해저와 목표물을 표시하기 위해 소나 플랫폼의 움직임을 사용한다. 동작 주파수 범위는 20KHz에서 500KHz이다. 이 주파수는 요구되는 깊이와 목표물의 크기에 의해서 결정된다. 소나는 수직으로 45°, 수평으로 2° 정도의 신호전파 방사각도폭을 가진다[1]. 최근에는 해양 탐사와 개발에 관심이 크게 고조되어 각 나라마다 해양관련 장비개발에 많은 투자가 이루어지고 있고, 빠른 스캔 속도와 정확한 정보, 고해상도의 영상을 획득하기 위하여 멀티빔 센서를 이용한 사이드 스캔 소나가 많이 이용되고 있다. 해양선진국에서는 시스템을 구축하여 자국의 해역을 물론 공동해역에 이르기까지 해양탐사를 성공적으로 수행하고 있으나, 그 기술 이전이 용이하지 않으며, 우리 나라 고유의 해양환경 및 지형적 특성을 고려할 때, 그들의 기술을 그대로 이용하는 것은 한계가 있다. 또한 국내에서는 지금까지 전량 수입에 의존하고 있어 고장 발생 시 수리 문제와 장비 운용에 어려움이 많아 장비 활용도가 크게 떨어지고 있다. 또한 싱글빔 사이드 스캔 소나

는 정밀한 해저의 영상을 획득하기 위해서는 탐사선의 속도를 아주 저속으로 운항해야 하는 단점이 있다. 예를 들어 15노트의 운항속도는 초당 약 7.5m를 탐사체가 전진하게 된다. 초음파의 간격은 100ms라고 가정했을 때 탐사체는 0.1초 간격으로 초음파를 발사하게 된다. 즉, 75cm 전진할 때마다 한번의 초음파를 발사하는 것과 같다. 이것은 75cm 보다 작은 물체는 초음파의 반사가 이루어지지 않아 영상에 나타나지 않을 가능성이 매우 높다. 그러므로 이러한 단점을 해결하기 위해 멀티빔 센서를 이용한다. 일직선으로 나열된 멀티빔이 싱글빔일 때 보다 작은 물체도 정확히 나타낼 수 있는 것이다. 또한 멀티빔의 개수에 따라 성능의 차이가 발생한다. 기존에는 4개의 멀티빔 센서를 이용하지만 본 논문에서는 5개의 멀티빔 센서를 이용한 사이드 스캔 소나의 개발로 보다 정확하고 빠른 운항 속도로 탐사를 할 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 멀티빔 센서를 이용한 사이드 스캔 소나의 국내 개발을 위한 선행 연구로서 사이드 스캔 소나 시스템에서 사용되는 멀티빔 센서인 전기신호를 수중압력파동인 소리로 변형시키는 역할을 하는 송신기 프로젝터(projector)와 그 반대의 역할을 하는 수신기 하이드로폰(hydrophone)의 기능을 수행하는 트랜스듀서(transducer, 변환기)를 설계 개발하는데 목적을 두고 있다.

본 논문의 구성은 제2장에서 멀티빔 센서의 특성을 규명하고 그 특성에 맞는 센서를 설계 제작한다. 그리고 제3장에서 제작된 멀티빔 센서를 이용한 사이드 스캔 소나의 해상 실험을 수행하고 결과를 보여준다. 마지막장에서 본 논문의 결과를 나타낸다.

† 교신저자, 學生會員 : 釜山大學校 工大 知能機械工學科 博士課程  
E-mail : yschang@pusan.ac.kr

\* 正 會 員 : 國防品質管理所 先任研究員 · 工博

\*\* 正 會 員 : 釜山大學校 工大 機械工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 12月 26日

最終完了 : 2005年 8月 23日

## 2. 멀티빔 센서 특성 규명 및 설계

트랜스듀서가 송신모드로 동작할 때는 프로젝터(projector)라고 한다. 이것은 송신 음향 펄스(transmitted acoustic pulse)의 음원레벨(source level)을 증가시키기 위해 여러 개 배열한다. 지향성(directionality)은 주어진 방향으로 송신음을 집중시킨다. 또한 트랜스듀서가 수신모드로 동작할 때는 하이드로폰(hydrophone)이라고 한다. 이것은 요구되는 방향에서 어레이의 응답을 향상시키기 위해 여러 개 배열한다. 즉, 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio : SNR)를 증가시키고 신호 음원의 방향을 알려준다[2].

트랜스듀서의 주요 부분은 압전 도기판(piezo-electric ceramic plate)으로서 전기장의 변화에 의하여 수축, 팽창하게 된다. 적절한 모양의 트랜스듀서 배열을 만들기 위해서는 특별한 모양의 많은 도기판 혹은 결정체(crystal)들이 하나의 선을 이룰 수 있도록 전기적으로 묶여 주어야 한다. 이 배열은 다시 반사체에 결합되어, 음향적으로 적당한 복합체에 담겨지게 된다. 소나의 트리거 전기 장치(triggering electronics)가 작동되면, 전기장은 도기판의 양면에 있는 얇은 은막을 통해서 전달된다. 이때 전압이 도기판에 걸리면, 이 판의 크기가 급작스럽게 변화한다. 트랜스듀서와 접촉하고 있는 물(수중)에 압력을 제공하여, 결국 음파를 투사하게 하는 것은 바로 이 판 모양의 변화이다. 몇 번의 변화 사이클이 지나가면, 이 도기판 배열은 다시 정지 상태로 돌아오게 된다. 해저면에서 반사된 파가 저진폭의 모양을 갖고 돌아와 다시 이 배열에 부딪치게 되면, 이는 다시 판 모양의 작은 변화를 만들어 낸다. 이 변화는 다시 전기적인 신호로 바뀌게 되며, 케이블을 따라 기록 장치로 전달되어 결과를 출력한다. 출력자료는 반사파의 모양, 빔의 모양, 펄스 시간(pulse length)에 좌우된다.[3, 4]

음파가 트랜스듀서로부터 발사되면, 매우 급격하게 에너지를 잃게 된다(attenuation). 수중에서의 물리적, 화학적 작용들은 투사파와 반사파의 세기를 약화시키는데, 이를 흡수(absorption)라고 한다.[5] 해수에서의 흡수는 담수에서의 흡수보다 훨씬 빨리 일어난다. 데시벨 단위로 측정했을 때, 반사파의 진폭은 흡수 과정을 통해서 거리에 따라 선형적으로 감소한다. 따라서 이 흡수 과정이 빔퍼짐(beam spreading), 산란(scattering) 등과 같은 에너지 손실 효과와 겹쳐질 때 반사되는 음파 에너지는 거리에 따라 기하급수적으로 감소한다. 그리고 트랜스듀서 배열의 크기를 매우 정밀하게 조절하면 음파의 모양을 정확하게 조절할 수 있는데 이를 빔 생성(beam forming)이라고 한다. 소나 빔은 수평적으로는 매우 좁은데, 각각의 투사 음파가 해수와 해저면의 매우 얇고 긴 조각 부분만을 통과하도록 하기 위함이다. 반면, 수직적으로는 매우 넓어서 한 번에 수주 전체를 통과할 수 있도록 되어 있다. 이 같은 부채꼴 모양의 빔으로 해수 표면으로부터 해저면에 이르기까지 가능한 모든 반사파에 대한 기록을 만들 수 있다.[6]

### 2.1 이론적 배경

선 음원의 중심을  $z_0$ 라하고  $\zeta = z - z_0$ 라 할 때 선 음원의 세기 함수를 그림 1에서 정의된 형태의  $t(\zeta)$ 라 하

면 음원의 중심  $(0, 0)$ 으로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 위치에서의 음장은 다음과 같다.[2]

$$dp = \frac{t(\zeta)}{l} e^{ikl} d\zeta$$

$$p = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{t(\zeta)}{l} e^{ikl} d\zeta \quad (1)$$

이 때 그림 2에서 보는 바와 같이  $l$ 은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$l \approx r + \zeta \sin \theta \quad (2)$$

식 (2)를 (1)에 대입하면 다중 음원에 의한 음장은 다음과 같다.

$$p \approx \frac{1}{r} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} t(\zeta) e^{ik(r + \zeta \sin \theta)} d\zeta$$

$$p \approx \frac{e^{ikr}}{r} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} t(\zeta) e^{ik\zeta \sin \theta} d\zeta \quad (3)$$

식 (3)에서  $\frac{\zeta}{\lambda} = a$ ,  $\lambda t(\zeta) = T(a)$ ,  $\sin \theta = s$ 라 하면 다음의 관계식이 성립한다.

$$B(s) = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} T(a) e^{i2\pi sa} da$$

$$T(a) = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} B(s) e^{-i2\pi sa} ds \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 음장은 다음과 같다.

$$p \approx \frac{e^{ikr}}{r} B(s) \quad (5)$$

식 (4)는 Fourier Transform의 형태이므로 다음의 성질을 만족한다.

$$T(a) e^{-i2\pi s_0 a} \Leftrightarrow B(s - s_0)$$

$$t(z) e^{-i2\pi \frac{\sin \theta_0}{\lambda} z} \Leftrightarrow B(\sin \theta - \sin \theta_0) \quad (6)$$

식 (6)으로부터 음을  $\theta_0$ 만큼 조향하기 위해서는 음원의

세기에  $e^{-i2\pi\frac{\sin\theta_0}{\lambda}\zeta}$  을 곱하면 되는 것을 알 수 있다. 위의 결과로부터  $\theta_0$  만큼 조향한 음원 함수는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$f^{(i)}(z) = f(\zeta) e^{-i2\pi\frac{\sin\theta_0}{\lambda}\zeta} \quad (7)$$

각각의 점 음원의 세기를  $A_i$ 라 하면 음원 함수는 다음과 같다.

$$f^{(i)}(z) = A_i e^{-i2\pi\frac{\sin\theta_0}{\lambda}(z-z_0)}$$

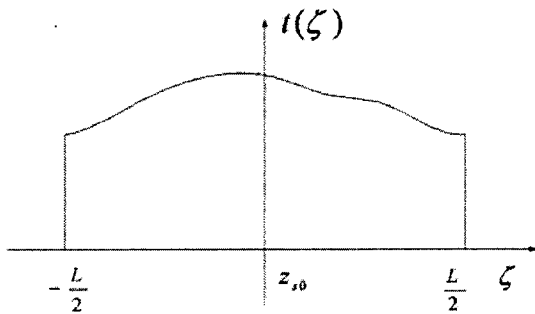


그림 1. 음원의 세기함수  
Fig. 1 Intensity function of sound source

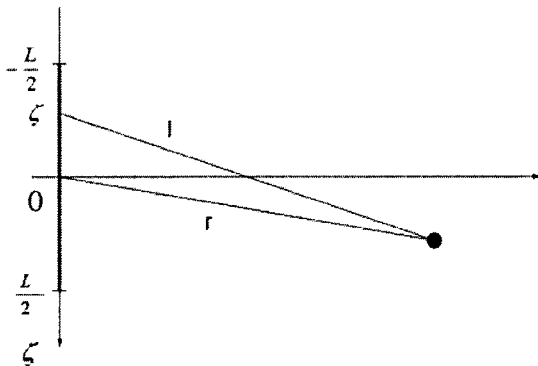


그림 2. 선음원  
Fig. 2 Ray sound source

2.2 센서 설계

멀티빔 사이드 스캔 소나는 싱글빔 사이드 스캔 소나보다 사용되는 트랜스듀서의 크기부터 차이가 난다. 트랜스듀서의 크기가 커지면 이에 따른 초음파 출력 특성과 수신 특성이 향상된다. 간단한 원리로서 초음파를 발신하는 면적이 넓음으로 인하여 출력이 많이 생성되고 수신하는 면적이 넓

음으로 수신하는 초음파의 양도 증가하게 된다. 이로 인하여 소나 이득이 증가하여 고속의 전인 시에도 싱글빔 보다 는 향상된 수신 특성을 보인다. 본 논문에서 빔스티어링(Beam Steering)은 송수신에 있어서 레시프로시티(reciprocity) 특성을 이용하여 수신 시에 빔스티어링을 수행 하며 이를 통하여 음의 수신 감도를 증가 시킨다. 멀티빔 사이드 스캔 소나는 빔스티어링을 통하여 싱글빔 사이드 스캔 소나에 비하여 빠른 속도로 주사(Scanning)를 수행 할 수 있다.

본 논문에서 사용하고자하는 멀티빔 트랜스듀서(Multi-beam Transducer)는 한 쪽 면에서 선(line) 배열로 형성되는 빔의 수가 5개, 공진 주파수가 430kHz에서 470kHz(중간 주파수 455kHz), 출력 1KW 이내, TVR 200dB 이상, OCR -170dB 이상, 수평의 빔의 각도 0.5도 이내, 수직 빔의 각도 55도 이내로 하는 기준을 정하여 위와 같은 성능이 발휘되도록 초기설계를 한다. 두 개의 트랜스듀서는 각각 6개씩 총 12개의 압전기(piezo-electric) 효과의 세라믹 sub-array 들로 구성되며, 자료의 송신 및 수신소자로서의 기능을 수행 한다.

중간주파수 455kHz 멀티빔 트랜스듀서의 18℃의 수중에서 캘리브레이션과 3dB 빔폭(39.8°)과 10dB 빔폭(92°)의 주파수 특성에 대해 그림 3과 4에 나타낸다.[9]

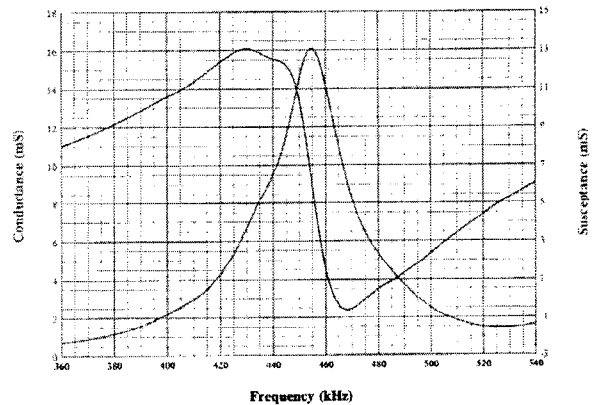


그림 3. 트랜스듀서의 캘리브레이션(수중)  
Fig. 3 Calibration of transducer in water

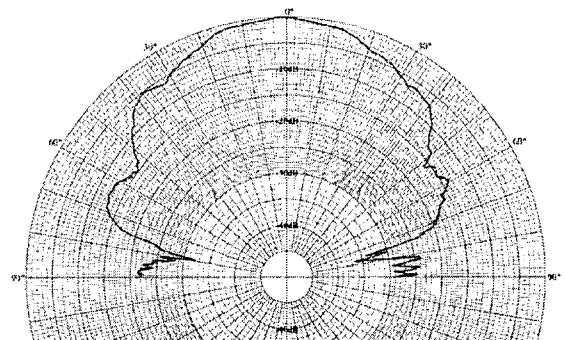


그림 4. 트랜스듀서의 주파수 특성  
Fig. 4 Frequency characteristic of transducer

위에 제시된 기준에 의하여 트랜스듀서를 그림 5의 도면과 같이 설계하여 그림 6과 같은 형태의 센서를 제작한다.



그림 5. 멀티빔 트랜스듀서 도면  
Fig. 5 Drawing of the multi-beam transducers

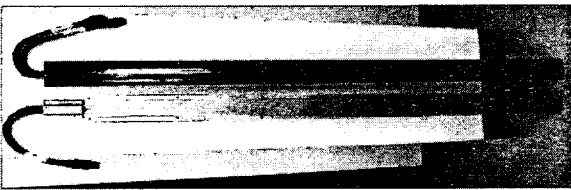


그림 6. 제작된 멀티빔 트랜스듀서 외관  
Fig. 6 Appearance of the multi-beam transducers

### 3. 멀티빔 사이드 스캔 소나 실험

#### 3.1 실험장비

본 논문에서 개발된 멀티빔 센서를 이용하여 사이드 스캔 소나 시스템의 실험을 수행하기 위한 장비를 구성한다. 먼저, 제작된 트랜스듀서를 좌현·우현에 장착한 수중예인체와 위치결정용 DGPS·예인케이블용 윈치(winch)가 구성된 사이드 스캔 소나 시스템의 실험 시스템 개념을 그림 7에 나타낸다. 전체 시스템의 구성은 초음파 신호를 송수신하여 디지털 변수로 변환하고 부착된 각종 센서로부터 데이터를 실시간으로 고속 전송하는 수중예인체(Towfish)부분과 수중탐사체로부터 고속 데이터를 수신하여 복원하고 각 조정 변수를 조정하고 FSK(Frequency Shift Keying) 통신 방식으로 탐사체에 전송하는 역할을 수행하는 Transceiver Processing Unit(TPU), TPU에서 고속 전송된 데이터를 복원하여 병렬 데이터로 변환된 신호를 수신하여 신호 처리 및 영상처리를 담당하는 Image Processing Unit(IPU) 부분으로 나누어진다(그림 8). 다시 말하면, TPU에서 전원과 트리거 펄스(trigger pulse)가 예인 케이블(multiconductor tow cable)을 통하여 수중예인체로 전달되고 수중예인체내에는 발진 전자 장치(firing electronics)가 있어서 트랜스듀서(transducer)로 하여금 소나 펄스를 내보내게 하여(outgoing sonar pulse), 이 펄스가 물체에 부딪친 후 되돌아오면(reflected echoes) 동일한 트랜스듀서로 수신되어 수신 전자 회로(receiver electronics)로 보내지게 된다. 수신된 신호는 시변 이득(Time Varied Gain : TVG) 조절 곡선에 의하여 증폭되고, 증폭된 신호는 케이블에 의하여 다시 TPU로 보내진다. 수중예인체의 작동개념도를 그림 9에 나타낸다.[7, 8]

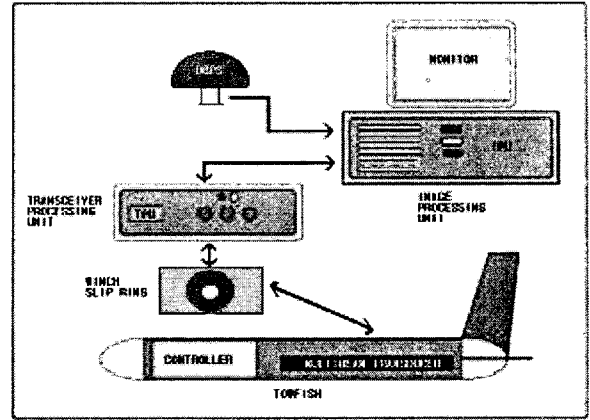


그림 7. 실험 시스템의 개략도  
Fig. 7 Schematic of a test system

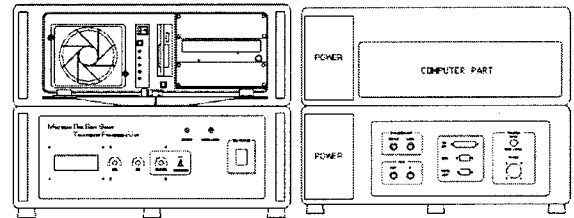


그림 8. TPU와 IPU의 전·후 도면  
Fig. 8 Drawing of TPU and IPU

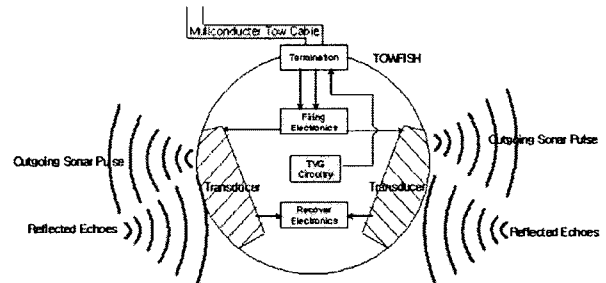


그림 9. 수중예인체의 작동 개념도  
Fig. 9 Schematic of towfish operating

#### 3.2 실험결과

제작된 멀티빔 센서를 이용하여 사이드 스캔 소나를 구성하여 실제 해상 실험을 수행한다. 좌현(Port)과 우현(Starboard) 각각 5개의 센서가 사용된다. 이와 함께 수중탐사체에 설치된 각종 센서에서 Pitch, Roll, Heading, Depth, Temperature에 대한 값들이 들어온다. Pitch는  $-25.0 \sim 25.0^\circ$ 의 값을 가지며 수중탐사체가 아래, 위로 흔들리는 정도를 나타낸다. Roll도  $-25.0 \sim 25.0^\circ$ 의 값을 가지며 수중탐사체가 좌, 우로 흔들리는 정도를 나타낸다. Heading은  $0 \sim 360^\circ$ 의 값을 가지며 수중탐사체가 바라보고 있는 각도를 나타낸다. Depth는 수중탐사체가 위치하는 수심 값이다.

Temperature는 수중탐사체의 온도 정보이다. 또한 Altitude는 해저면에서 수중탐사체까지의 거리로서 바닥에 닿지 않도록 일정 거리를 유지해야 하므로 중요한 정보가 된다. 그림 10과 11은 본 시스템을 이용하여 획득한 실제 해저 영상이다.

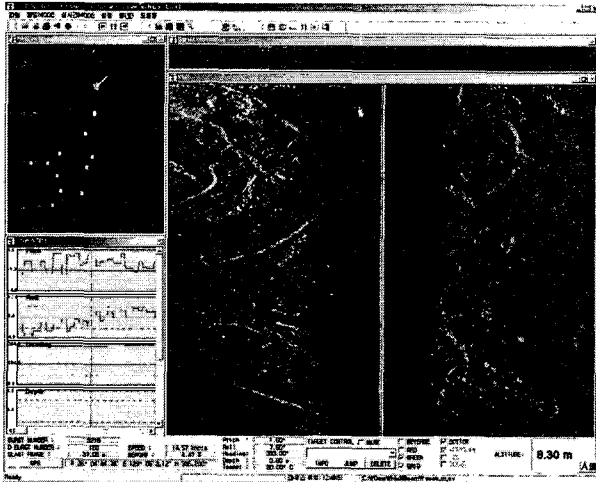


그림 10. 사이드 스캔 소나 실험 결과 영상(I)  
Fig. 10 Result image of side scan sonar test(I)

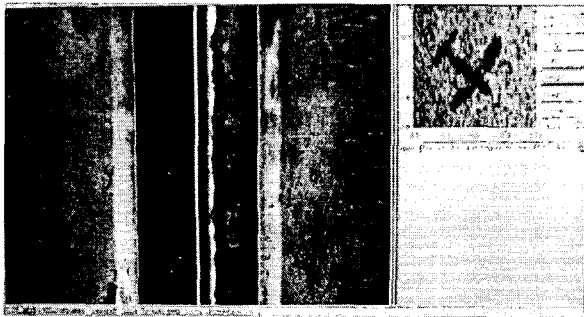


그림 11. 사이드 스캔 소나 실험 결과 영상(II)  
Fig. 11 Result image of side scan sonar test(II)

#### 4. 결 론

본 논문에선 다양한 정보를 제공하고 해양 탐사 개발에 다목적으로 이용될 수 있는 빠른 스캔 속도와 정확한 정보, 고해상도의 영상이 획득 가능한 멀티빔 센서 사이드 스캔

소나 개발을 위해 멀티빔 센서 개발에 관한 연구를 수행하였다. 사이드 스캔 소나에 적합한 멀티빔 트랜스듀서의 특성을 규명하고 설계하였다. 본 논문에서 개발된 멀티빔 트랜스듀서는 한 쪽 면에서 선배열로 형성되는 빔의 수가 5개, 공진 주파수가 430kHz에서 470kHz(중간주파수 455kHz), 출력 1KW 이내, TVR 200dB 이상, OCR -170dB 이상, 수평의 빔의 각도 0.5도 이내, 수직 빔의 각도 55도 이내로 하는 기준을 정하여 위와 같은 성능이 발휘되도록 설계 제작하였다. 두 개의 트랜스듀서는 각각 6개씩 총 12개의 압전기 효과의 세라믹 sub-array들로 구성되며, 자료의 송신 및 수신 소자로써의 기능을 수행한다. 제작된 멀티빔 센서를 이용하여 사이드 스캔 소나의 해상 실험을 수행하고 시제품으로써 만족할 만한 결과를 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A. D. Waite, "Sonar For Practising Engineers," John Wiley & Sons, LTD, 2002
- [2] Robert J. Urick, "Principles of Underwater Sound," Peninsula Publishing, 1983
- [3] John Perry Fish, H. Arnold Carr, *Sound Reflections: Advanced Applications of Side Scan Sonar Data*, Lower Cape Publication Co., 2001
- [4] John Perry Fish, H. Arnold Carr, *Sound Underwater Images : A guide to the generation and interpretation of side scan sonar data*, Lower Cape Publication Co., 1990
- [5] Albert W. Cox, "Sonar and Underwater Sound," Lexington Books, 1974
- [6] H. Paul Johnson and Maryann Helferty, "The Geological Interpretation of Side-Scan Sonar," *Reviews of Geophysics*, Vol. 28, No. 4, pp. 357-380, 1990
- [7] Pierre Cervenka and Christian de Moustier, "Sidescan Sonar Image Processing Techniques," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 108-122, 1993
- [8] Lord Rayleigh, *The Theory of Sound Vol. II*, Dover Publications Inc., NewYork, 1945
- [9] Foote, K. G. Chu, D. Hammar, T. R. Baldwin, K. C. Mayer, L. A. Hufnagle, L. C. Jech, J. M. , "Protocols for calibrating multibeam sonar," *Journal of Acoustical society of america*, Vol. 117 No. 4 , pp. 2013-2027, 2005

저 자 소 개



**장 유 신 (張 維 新)**

1972년 11월 21일생. 1996년 부산대학교 제어기계공학과 학사졸업. 1998년 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 석사졸업. 2000년 부산대학교 대학원 지능기계공학과 박사수료. 2000년~현재 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소 전임연구원.  
Tel : 051-510-1456  
Fax : 051-512-9835  
E-mail : yschang@pusan.ac.kr



**계 중 음 (桂 仲 邑)**

1960년 7월 29일생. 1989년 홍익대학교 학사졸업. 1996년 부산대학교 대학원 석사졸업. 2000년 부산대학교 대학원 박사졸업. 1989년~현재 국방품질관리소 선임연구원.  
E-mail : jekeh@dqaamil.kr



**조 흥 기 (趙 興 紀)**

1962년 3월 12일생. 1985년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사졸업. 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사졸업. 1990~현재 국방품질관리소 선임연구원.  
E-mail : hgcho@dqaamil.kr



**이 만 형 (李 萬 炯)**

1946년 10월 18일생. 1969년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1971년 부산대학교 대학원 전기공학과 석사졸업. 1983년 오리건 주립대학교 전기컴퓨터공학과 박사졸업. 1997년~2003년 부산대학교 POSCO 석좌교수. 2001년 IEEE ISIE General Co-chairman. 2004년 IEEE IECON2004 General Co-chairman. 2002년~2004년 부산대학교 공대학장. 2002년~2004년 한국공학한림원 기계공학분과 정회원. 2003년~현재 한국과학재단 과학기술 엠베서더. 1983년~현재 부산대학교 기계공학부 교수.  
E-mail : mahlee@pusan.ac.kr