

# Side Scan Sonar 실무이론과 현장조사에 적용

김성렬<sup>+</sup>·이용국<sup>++</sup>·정백훈<sup>+++</sup>

## Practical theory and ocean survey application of side scan sonar

Seong-Ryul Kim<sup>+</sup>, Yong-Kuk Lee<sup>++</sup> and Baek-Hun Jung<sup>+++</sup>

**Abstract :** In the side scan sonar method, use is made of the back-scattering, at low grazing angles of incidence to the seabed, of relatively high-frequency acoustic waves radiated in a fan-shaped beam from a transducer contained in a towed body. The fan beam is oriented so that the wider angle is in the vertical plane (scan range) and the narrower angle in the horizontal plane (beam width) with the axis of the beam normal to the ship track. The display of the returns is usually realized as a series of closely spaced intensity-modulated lines on a paper recorder or computer screen display. In this way a two-dimensional picture of the seabed is build up.

**Key words :** Side scan sonar(측면주사해저면 음향탐사기), Scan range(주사범위), Beam width(빔폭)

### 1. 서론

음파를 해저바닥에 비스듬히 보내서 그 반사파를 이용하여 해저면의 형태를 음향학적으로 영상화하는 해저면 음향영상 조사기술이다. 장비 이름에서 알 수 있듯이, 음파가 측면방향(side)으로 넓게 주사(scan)되는 음향장비(sonar)이다. 마치 육상지형을 항공사진으로 촬영 하듯이 해저면을 음파로 촬영하는데, TV 화면을 주사선으로 채우는 것과 비슷한 개념으로, 해저면을 얇고 긴 띠 모양으로 주사하여 연속적으로 모아 놓은 형태가 해저면으로 영상화된다. 따라서 침선, 장애물, 해저전선, 해저파이프라인, 여초 등의 해저면에 놓여 있는 물체나 구조물의 확인, 그리고 해저지형과 지질구조, 해저퇴적물의 분포형태와 범위 등의 해저지리·지형 정보를 조사하는 분야에서 사용된다<sup>[1]</sup>.

측면주사해저면 음향탐사기는 면개념의 탐사장비이므로, 협역(狹域)용과 광역(廣域)용으로 구분한다. 협역용은 100~500kHz의 고주파 음원을 사용하며, 25~500m 주사범위(scan range) 내에서 수심에 따라 적절히 선택할 수 있으며 주로 천해용으로 사용된다. 광역용은 12~50kHz의 저주파 음원을 사용하며, 주사범위는 5~30km 정도이고 주로 심해용으로 사용된다. 천해용은 본체와 수중예인체(tow-fish) 그리고 예인케이블로 간단히 장비가 구성되지만, 심해용은 수중예인체가 무거워지고 예인케이블이 길어지면 중대규모의 권상기(cable winch)가 필요하기 때문에, 소형선박으로는 장비의 탑재와 운영이 불가능하다. 주파수가 낮으면 해상력(resolution)이 떨어지기 때문에, 심해용의 경우 해상력을 높이기 위하여 주파수가 높은 음원을 채택하는 대신에 해저바닥 가까이로 내려서 탐사하는 심해예인형 측면주사해저면 음향탐사기(deep-tow side scan sonar system)도 개발되어 있다<sup>[2]</sup>.

음향측심기와 측면주사해저면 음향탐사기는 몇 가지 점에서 차이가 있다. 음향측심기는 수심측량이 목적이고, 해저지형의 수직면(vertical section profile)의 개념이며, 선박의 직하부에 대한 해저기복의 정보를 제공한다. 측면주사해저면 음향탐사기는 해저면의 모양과 형태가 목적이고, 해저지형의 수평면(horizontal area mapping)의 개념이다. 그리고 음파의 발수신체를 수중에서 예인하면서 탐사활동이 진행되므로, 해저면 음향영상을 실제의 위치로 보정하여 투영하고 여러 개의 탐사측선 자료를 한 개의 도면에 모아 놓은 결과가 모자이크 도면이다<sup>[3]</sup>.

### 2. 실무이론

#### 2.1 빔의 형태와 구조

해저면을 음향학적으로 영상화하기 위하여 변환기(transducer)로부터 출력되는 음파의 형태(beam pattern)는 부채꼴 모양을 하고 있다. 장비마다 차이는 있지만, 부채의 두께와 넓이에 해당되는 수평빔폭(horizontal beam width)과 수직빔폭(vertical beam width)은 각각 약 1~2°와 20~50° 정도이며, 퍼져나가는 음파가 해저면 쪽을 향하기 위하여 수중예인체에 부착되는 변환기의 설치경사각(depression angle)은 약 10~20° 정도를 적용하고 있다.

빔 형태가 두께는 얇고 폭은 넓은 부채꼴이므로, 변환기의 모양이 통상적인 개념으로는 크기가 작은 구형이거나 또는 말굽형일 것으로 생각되지만, 직선의 긴 막대형으로 디자인하게 된다. 여러 개의 작은 소자변환기(element transducer)들이 직렬로 배열되어 있으며, 출력되는 음파의 형태는 변환기의 길이와 각 소자들 간의 간격에 따라 달라진다<sup>[4]</sup>. 예를 들어 5개의 점 음원을 직렬로 배열하고 그 간격은 한 파장만큼씩 벌린 다음, 5회의 파동이 진행하는 동안 각각에 대한 진폭을 합성해 보면, 파동이 진행할수록 음향에너지는 점점 더 한 곳으로 집중되고 있음을 알 수 있다(Fig. 1). 이러한 원리 때문에 변환기는 막대형으로 길게 디자인하게 된다. 아래 가운데 그림은 광역해저면탐사장비(GLORIA)의 후원에서 수평방향으로 방사되는 음향에너지의 빔형태를 보여주고 있으며<sup>[5]</sup>, 오른쪽 그림은 소자변환기의 개수와 배열간격에 따라서 빔구조(beam formation)가 어떻게 달라지는지를 모식적으로 설명하고 있다<sup>[6]</sup>.

+ 김성렬(한국해양연구원 해양환경연구본부), E-mail: srkim@kordi.re.kr, Tel: 031)400-6270

++ 이용국, 한국해양연구원 해양환경연구본부

+++ 정백훈, 한국해양연구원 해양환경연구본부

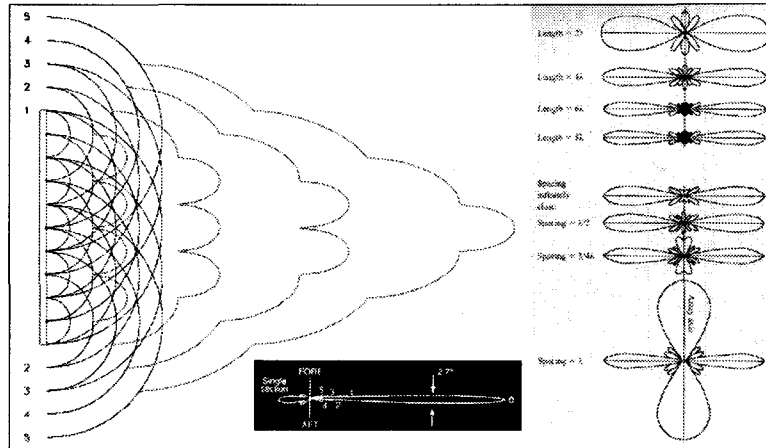


Fig. 1. Schematic experiment of side scan sonar beam pattern and beam formation from various length and spacing of transducer array.

## 2.2 음향조사역

해저면에서 후방산란으로 되돌아오는 반사파신호는 연속적인 음파(continues acoustic wave)이므로 음파가 해저면을 연속적으로 훑어(scanning)가지만, 우리가 처리하는 자료는 디지털로 처리되면서 샘플링 간격에 따라 일정한 시간간격의 불연속적인 자료로 바뀌게 된다. 음파가 해저면을 훑어간 지역을 음향조사역(音響照射域, insonified area)이라고 정의하며, 중앙부는 좁고 양측면으로 멀어질수록 넓어지는 사다리꼴 모양을 이룬다. 연속적으로 탐사하여 이것을 차례차례 모아 서 나열하면 해저면의 구조를 밝히게 되지만 날개의 해저면 탐사자료(one scanning data)만으로는 아무런 의미를 갖지 못한다. 그리고 디지털로 처리되는 각각 날개의 지역을 단위조사역(單位照射域, foot-print area,  $\Delta A$ )이라고 정의한다. 이때 각각의 단위조사역에서 수중예인체의 진행방향(y-direction)과 나란한 방향의 길이를 along-track resolution(ALTR), 수직방향(x-direction)의 길이를 across-track resolution(ACTR)으로 정의한다<sup>[7]</sup>. 이들의 모양과 크기를 일일이 차례차례 계산하여 실제의 위치에 투영하여 해저면 탐사자료를 도면화하게 된다(Fig. 2).

음파가 연속적일 때 넓게 어두운 부분인 사다리꼴 영역 전부가 음향조사역이 되지만, 탐사자료가 아날로그에서 디지털로 계수화 되면 짙게 어두운 부분인 단위조사역으로 음향조사역을 채우게 된다. 단위조사역은 중앙에서 양측으로 멀어질수록 ALTR은 증가하는 반면 ACTR은 점차적으로 감소하고 있다. 따라서 단위조사역 각각의 실제 크기를 계산하여 최종적인 해저면탐사 모자이크 도면을 만든다. 단위조사역은 빗금친 부분에 해당되며 이론적으로 그 계산이 가능하다(Fig. 2의 좌측 하단부). 해저면과 입사되는 음파가 이루는 각을  $\theta$ 라고 할 때 이 각은 단위조사역의 자료개수 만큼 필요한 변수이고,  $\alpha$ 는 수평빔폭으로  $1\sim 2^\circ$ 로 고정되어 있는 상수값이다.  $r$  역시 자료개수 만큼의 경사거리로서 변수이며,  $c$ 는 수중음속  $1,500\text{m/sec}$ 를 적용한다. 그리고  $dt$ 는 pulse length인데, 약  $0.1\text{msec}$  정도이며 사용하는 탐사장비의 고유특성값으로 고정되어 있다. 이상의 5가지 요소를 이용하여

$$\text{along-track resolution} = r \cdot \alpha \quad (1)$$

$$\text{across-track resolution} = dt \cdot c / 2 \cdot \cos(\theta) \quad (2)$$

로 각각 계산된다<sup>[8]</sup>. 여기서 단위조사역의 면적은, 모양을 사각형으로 간주하여, 식(1)과 식(2)의 곱으로 산출하게 된다.

ALTR과 ACTR의 변화형태를 좀더 구체적으로 살펴 보자(Fig. 2의 우측 하단부). 가로축은 경사거리(slant range)가 보정된 주사범위를, 세로축은 대수축척으로 음영화분해력(音映化分解力, insonification resolution)을 표시하고 있다. 숫자 10부터 100까지는 해저면에서 수중예인체까지의 높이(미터)를 의미한다. 일반적인 특징은 높이가 높아짐에 따라서 ALTR, ACTR,  $\Delta A$  모두 증가하면서 주사범위는 좁아지고 있다. 또한 중앙부에서는 변화폭이 심하지만, 멀어질수록 변화폭은 줄어들면서 대수함수의 곡선형태로 변하고 있다. ALTR의 경우, 수중예인체에서 멀어지면서 크기가 꾸준히 증가하고 있다. 그 결과 음향조사역이 사다리꼴 형태로 나타내게 된다. 수평빔폭이  $1\sim 2^\circ$ 로 고정되어 있기 때문이다. 그리고 높이가 높을수록 중앙부의 면적이 크게 시작하므로 해저면의 기록해상력은 떨어질 수 밖에 없다. 그러나 ACTR의 경우는 조금 다르다. 우선 수중예인체의 직하부에서는 상당히 크게 시작하지만 점점 멀어지면서 급격히 감소한 이후부터는 거의 비슷하거나 약간씩 감소하는 형태를 보여주고 있다. 또한 높이가 증가할수록 크게 시작되지만 그 감소비율은 다소 완만하게 진행되고 있음을 알 수 있다.  $\Delta A$ 의 면적변화는 높이에 무관하게 수중예인체 직하부 근처에서 급하게 감소하여 최소치를 보인 다음 점차적으로 증가하는 양상으로 나타나고 있으나, 최소치의 위치가 점차적으로 중앙부에서 멀어지면서 최소면적은 점차적으로 증가하고 있다.  $\Delta A$ 의 면적변화에 영향을 주는 요인은 ALTR 보다 ACTR의 영향이 더 크기 때문이다. 실제로 한 개의  $\Delta A$ 의 크기변화를 살펴보면 높이가 10m인 경우 약  $35 \times 22\text{cm}$ 에서 시작하여 약  $7 \times 470\text{cm}$ 까지 변화하고 있으며, 100m 높이에서는 약  $100 \times 200\text{cm}$ 에서  $9 \times 470\text{cm}$ 까지 변하고 있다.  $\Delta A$ 의 모양이 Fig. 2의 상단부에서 모식적으로 보던 것과는 달리 의외로 상당히 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 따라서 해저면 탐사자료의 도면작업에서 선이나 점이 아닌 면적의 개념을 도입할 필요가 바로 여기에 있다.

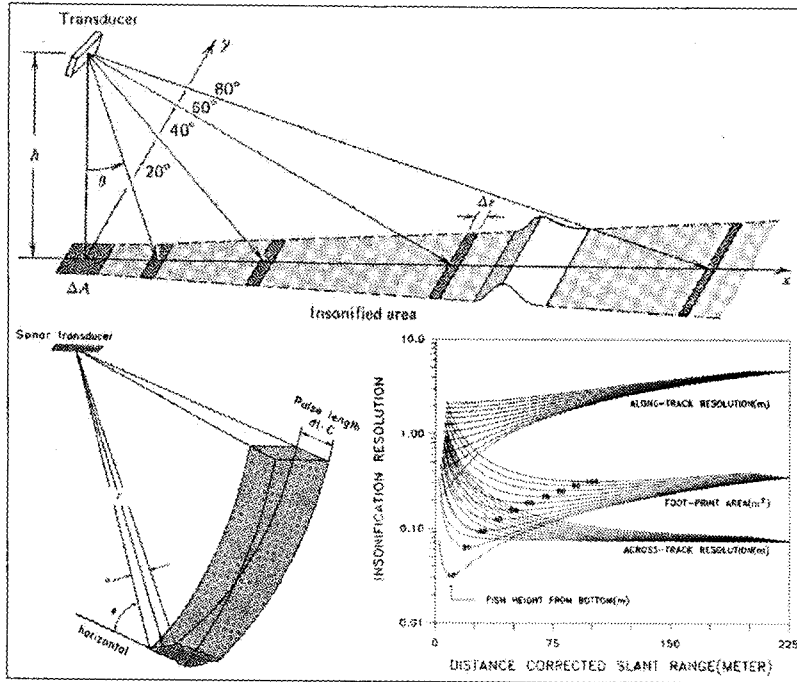


Fig. 2. Schematic drawing of along/across-track resolution(upper), geometrical conception on foot-print area(= $\Delta A$ ) calculation(lower left), and  $\Delta A$  variation according to fish height and scan range(lower right).

### 3. 현장조사에 적용

취득기록의 해상력을 높여려면, 탐사장비의 음파특성 중에서 변환기의 중심주파수가 고주파이어야 한다. 최근에는 대부분이 500kHz 대역의 장비가 일반적이며, 탐사선박의 항해속력이 빠르더라도 기록향상을 위하여 다중주사(multi-scan) 방식의 장비도 사용빈도가 점차 확대되고 있다. 그러나 근본적으로는 빔의 형태가 부채꼴이라는 점을 감안한다면, 결국 탐사기록의 해상력은 ALTR과 ACTR에 좌우된다(Fig. 3). 예를 들면, 해저면에 두개의 물체가 가까이 놓여 있다고 가정했을 때, 수중예인체에서 먼 거리에서는 두 물체가 구분되지만 직하부에서 하나로 인식되는 것은 ACTR 특성 때문이며, 반대로 먼 거리에서 하나로 인식되지만 직하부에서 두 물체가 구분되는 것은 ALTR 때문이다<sup>[9]</sup>. 그리고 이들은 수중예인체의 수중고도에 따라서 취득되는 영상기록의 해상력은 또 달라진다.

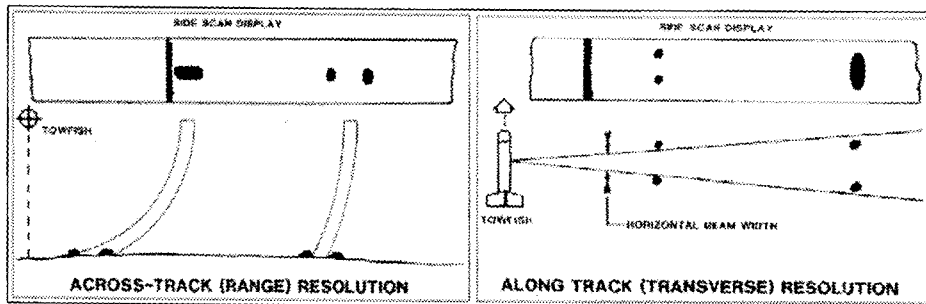


Fig. 3. Different side scan display when two targets are nearly separated on the sea-bottom due to across-track resolution and along-track resolution.

주사범위 100m에서 수중예인체의 적절한 예인고도(해저면에서 높이)를 결정하기 위하여 EG&G의 272 tow-fish의 특성을 적용해 보았다(Fig. 4). A 곡선은 변환기의 수직빔폭이  $50^\circ$ 이고 기울임각이  $20^\circ$ 인 경우이며, B 곡선은 수직빔폭이  $50^\circ$ 이고 기울임각이  $20^\circ$ 인 경우이다. 여기서 음파의 산란과 방사에 의한 에너지 손실은 고려하지 않고 기하학적인 입장에서만 검토하였다. C 곡선은 수중예인체의 고도가 점점 높아짐(즉, 해저면에서 점점 멀어짐)에 따른 최대 주사범위를 나타내고 있다. A1과 B1은 각각 C 곡선에서 A와 B를 뺀 나머지를 나타내고 있다. A와 A1은 19.7m에서 A와 C는 37.8m에서 교차하고 있으며, B와 B1은 9.6m에서 B와 C는 19.1에서 교차하고 있다. 수중예인체의 예인고도가 5m에서 50m까지 변하더라도 주사범위 100m의 해저면 음향영상을 얻을 수는 있으나, 기울임각이  $20^\circ$ 인 경우에는 19.7~37.8m 그리고  $10^\circ$ 인 경우에는 9.6~19.1m의 예인고도가 가장 적절한 수중예인체의 높이임을 알 수 있다<sup>[10]</sup>. 따라서 기울임각이 작을수록 수중예인체는 해저면에 가까이(즉, 더 깊게) 예인하여

야 취득기록의 해상력을 높일 수 있다.

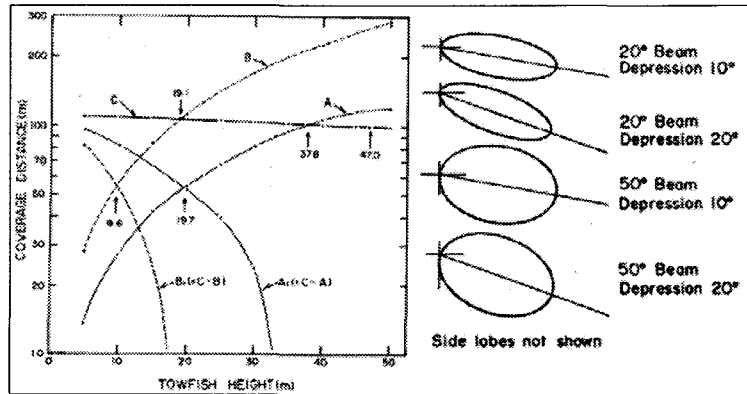


Fig. 4. Relation between coverage distance and tow-fish height from bottom for the cases of A(50° beam / 20° depression) and B(50° beam / 10° depression). C shows the maximum scan range when tow-fish height varies from 5m to 50m.

#### 4. 결 론

현장에서 취득한 영상자료의 해상력이 좋지 않으면, 아무리 훌륭한 후처리 s/w가 있고, 후처리에 많은 시간을 투자하더라도 결코 좋은 결과를 만들어 낼 수 없다. 결론적으로 탐사장비의 우월성과 현장조사에서의 경험과 노력, 이 두 가지 조건을 모두 만족하여야 해상력이 좋은 탐사기록을 얻을 수 있다. 이 두 가지 관점을 정리해 보면 아래와 같다(Table 1).

Table 1. Summary to get the best image of side scan sonar.

MAKING AT FACTORY	OPERATING AT FIELD
Transducer - High Frequency	Ship Speed - Slower
Pulse Length - Shorter	Survey Range
Beam Pattern	shorter
horizontal - narrower	overlap line interval design
vertical - wider	Towing Depth
Sampling Rate - Higher	optimal height
Ping Rate - Higher (multi-beam)	thermocline due to season
Onboard System	Cable Out - Enough Long
various functions	Weather Condition - Calmly
high speed processing	Ocean Current - Same Direction
Tow Fish	Electric Grounding - Must
Stable towing	Field Note - Must Logging
attitude sensors attached	Navigation System - More Accurate

#### 참고문헌

- [1] R. A. Geyer, CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea, CRC Press, Florida, 1983.
- [2] 김성렬, 이용국, 정백훈, "음파특성의 쉬운 이해와 해저탐사에 적용", 2005년도 한국마린엔지니어링학회 전기학술대회 논문집, pp. 630-636, 2005.
- [3] 김성렬, Side Scan Sonar 실무이론과 자료처리 -현장조사에서 Mosaic Mapping 까지-, 2005년도 대한지구물리학회 단기강좌 교재, (사)대한지구물리학회, 2005.
- [4] R. J. Urlick, Principles of Underwater Sound 3rd ed., McGraw-Hill, San Francisco, 1983.
- [5] E. J. W. Jones, Marine Geophysics, John Wiley & sons, London, 1999.
- [6] A. D. Waite, Sonar for Practising Engineers 3rd ed., John Wiley & sons, Chichester, 2002.
- [7] C. S. Clay and H. Medwin, Acoustical Oceanography: Principles and Applications, John Wiley & sons, New York, 1977.
- [8] A. Malinverno, M. H. Edwards, and W. B. F. Ryan, "Processing of SeaMARC swath sonar data", IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 15, No. 1, pp. 14-23, 1990.
- [9] C. Mazel, Side Scan Sonar Record Interpretation, Klein Associates, New Hampshire, 1985.
- [10] 한국해양연구원, 원격탐사기법을 이용한 해저면 영상처리 시스템 개발, BSPE 00089-150-5, 1987.