

초음파를 이용한 해저면 영상화 기법에서의 Gain Control에 관한 연구

이철원 · 오영석 · 우종식
대우조선공업(주) 선박해양기술연구소

한민구
거제대학 기계공학과

A Study on the Gain Control for Underwater Side Scan Sonar System

Chul-Won Lee, Young-Seock Oh, and Jong-Sik Woo
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.

Min-Ku Han
Koje College, Department of Mechanical Engineering

KEY WORDS: Side Scan Sonar, Time Varying Gain, Transmission Loss, Directivity, Beam Pattern, Heterodyne

ABSTRACT: This paper deals with the Gain Control in the processing of the underwater acoustic image obtained from side scan sonar(SSS) system. At first, this paper describes the principles of SSS that is a surveying equipment for the underground of the rivers or dams as well as sea floor. Then this paper analyzes the cause and effects of the time varying intensity from the view point of transmission loss and beam pattern. At last, the time varying gain filter that is adopted by the toufish is introduced.

1. 서 론

해양의 환경보존, 광통신 케이블의 매설, 해저 pipeline의 설치, 수중공간의 개발 등 21세기를 맞으면서 해양 특히 수중에 대한 관심과 연구활동이 활발해 지고 있다. 국가 중장기 해양 개발 계획에서도 심해저 광물자원개발, 해저 연구용 차세대 무인잠수정 개발, 바다목장사업 등이 가시화 되고 있다. 이러한 대형사업들의 초기 단계에서 해저의 조사작업이 매우 중요하다고 할 수 있는데 탁도에 영향이 적은 고 해상도의 초음파 조사기(Side Scan Sonar)가 큰 역할을 할 수 있을 것으로 본다.

일반적으로 Side Scan Sonar는 견인체의 양면에 각 1개씩의 Transducer Array를 이용하여 해저면에 가청 주파수 이상의 수중음을 방사 후 해저면으로부터 Scattered 신호를 수신하여 신호처리 후 해저면의 영상을 얻는 방식이다. 본 논문은 국내 연근해에서 이용 가능한 천해용 고해상도 Side Scan Sonar의 제작 중 발생한 Time Varying Intensity에 의한 영상 왜곡 현상의 원인 분석 및 해결방법 제시를 목적으로 한다. 일반적으로 Time Varying Intensity 현상은 두 가지 측면에서 악영향을 끼친다. 첫 번째는 신호의 수신에 어려움을 주는 요소로서 각 시간별 입력

되는 신호의 크기 분포가 너무 광범위하여 수신 신호의 이산화에 어려움을 주는 것이며, 두 번째는 취득된 신호를 영상화할 경우 각 시간에 따른 영상이 서로 다른 강도에서 비교되어 진다는 점이다. 우선 SSS의 일반적인 원리를 알아본 후 Time Varying Intensity의 원인을 각 시간별 음전달 경로에 기인한 Transmission Loss와 음향 수발신 센서인 Transducer의 특성에 기인한 Directivity Pattern에 의해서 알아본다. 마지막으로 이의 해결 방법으로서 자체 개발한 Time Varying Gain Filter인 Analog 회로와 신호처리 Program에서의 Time Varying Gain Filter를 소개하고 이를 이용한 SSS의 영상자료를 분석하고자 한다.

2. 초음파를 이용한 해저면 영상화 기법의 원리

2.1 발신 신호의 수치적 해석

Side Scan Sonar를 이용해서 각각의 물체를 구분해내기 위해서는 각 물체로부터 Scattered 신호가 서로 교차하지 않아야 한다. 따라서 송신신호의 폭은 가능한 작게 하여야 한다. 그러

나 Transducer의 특성상 송신 신호는 rising과 decay 시간을 필요로 하며 Pulse폭에는 어느 정도의 제한이 주어진다. 이를 고려할 때 송신 신호는 다음과 같은 Gaussian 형태로 나타내어질 수 있다.

$$h(t) = \exp\left[-\frac{t^2}{(\Delta t/2)^2}\right] \exp(i2\pi f_c t) \quad (1)$$

f_c : carrier frequency
 Δt : ping width

본 논문에 의해 개발된 발신신호 400kHz, pulse 폭 20 μ sec의 Side Scan Sonar의 발신신호의 수치 해석 결과는 다음과 같다.

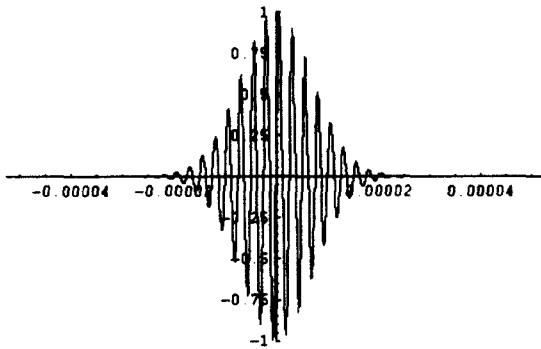


Fig.1 Emission Signal of SSS

2.2 주파수 영역에서의 수신 신호의 수치적 해석

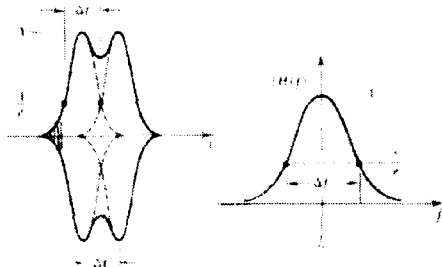


Fig 2. Resolution of a pair of Signals

ΔR 만큼 떨어져 있는 서로 다른 두 물체의 Scattered Signal의 Travel Time의 차를 Δt 라 할 때 이들의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t' = \frac{2\Delta R}{c} \quad (2)$$

만약 $\Delta t \ll \Delta t'$ 이면 각 물체의 Scattered Signal은 서로 구분되어진다. 물체가 서로 구분되어 질 수 있는 한계는 $\Delta t' = \Delta t$ 이며 이는 송신신호 $h(t)$ 의 Fourier Transform

에 의한 주파수 영역에서의 Band 폭과 관련이 있다. $h(t)$ 의 주파수 영역에서의 값은 다음과 같다.

$$H(f) = \int h(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (3)$$

$$= A \exp\left[\frac{-\pi^2(f-f_c)^2 \Delta t^2}{4}\right]$$

Eq.(3)에서 $\frac{\Delta f}{2} = \frac{2}{\Delta t \pi}$ 라 하면 Eq.(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(f) = A \exp\left[\frac{-(f-f_c)^2}{(\Delta f/2)^2}\right] \quad (4)$$

Carrier 주파수 400 kHz, Pulse 폭 20 μ sec의 수치 해석 결과는 다음과 같다.

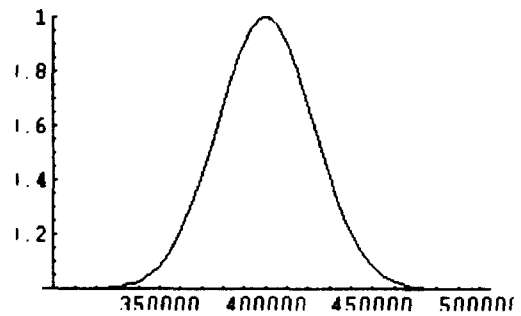


Fig. 3 Receiving Signal of SSS

Eq.(4)로부터 다음을 알 수 있다.

$$\Delta f = \frac{4}{\pi \Delta t} \approx \frac{1}{\Delta t} \quad (5)$$

그러므로 Eq.(2)와 Eq.(5)로부터 Side Scan Sonar의 해상도는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\Delta R = \frac{c \Delta t}{2} = \frac{c}{2 \Delta f} \quad (6)$$

2.3 Heterodyne Operation

Eq.(1)로부터 Side Scan Sonar의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

$$h(t) = E(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (7)$$

Side Scan Sonar 신호를 기록할 경우 신호의 정보는 오직 신호의 Envelop에만 저장되어 진다. 따라서 신호의 Carrier Frequency를 포함하는 전체 주파수 영역을 저장할 필요는 없으며 Heterodyne Operation을 통하여 Envelop에 해당하는 낮은 주파수 영역만 저장하면 된다. 이 때 Heterodyne 신호를 $h_h(t)$ 라하고 Heterodyne 주파수를 $f_h(t)$ 라 하면 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_h(t) = \cos(2\pi f_{II} t) \quad (8)$$

Side Scan Sonar의 수신 신호와 연속 신호인 Heterodyne 신호를 서로 곱하면 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} h_{II}(t) &= h(t) h_h(t) \\ &= E(t) \cos[2\pi f_h t] \cos[2\pi f_c t] \\ &= \frac{E(t)}{2} \{ \cos[2\pi(f_h - f_c)t] + \cos[2\pi(f_h + f_c)t] \} \end{aligned} \quad (9)$$

$h_{II}(t)$ 를 Low Pass Filter에 통과시키면 다음과 같은 Image 정보만을 포함하는 저주파수의 신호를 얻을 수 있다.

$$h_{II}(t) = \frac{E(t)}{2} \cos[2\pi(f_h - f_c)t] \quad (10)$$

2.4 Data acquisition and Processing

Heterodyne 과정을 거친 수신 신호의 정보는 신호의 Amplitude에 관련된 값이며 이는 신호의 Power Spectrum에 해당한다. 신호의 Power Spectrum을 시간 별로 순차적으로 기록하여 이를 대응되는 거리 영역에 표시하면 해저면 영상이 얻어진다. 신호의 Power Spectrum은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$S_{ss}(t) = \int_t^{t+\Delta t} |h_h(t)|^2 dt \quad (11)$$

본 연구에서의 Side Scan Sonar의 Power Spectrum 값은 Analog 회로에 의해서 연속적으로 구하여지며 이

값이 A/D Converter에 의해서 저장되어 영상화되어 진다. 그러므로 전체 신호 처리 과정은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} h(t) &\rightarrow \times \cos(2\pi f_h t) \\ &\rightarrow \frac{E(t)}{2} [\cos(2\pi(f_c - f_h)t) + \cos(2\pi(f_c + f_h)t)] \\ &\xrightarrow{LP} \frac{E(t)}{2} \cos(2\pi(f_c - f_h)t) \rightarrow S_{ss}(t) \end{aligned} \quad (12)$$

3. Time Varying Intensity

3.1 Transmission Loss

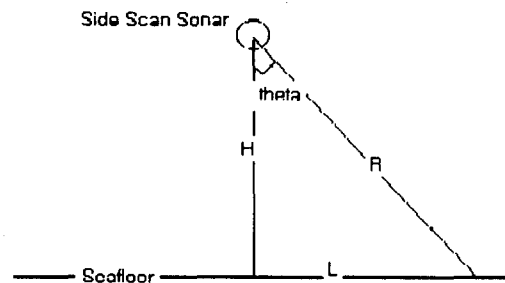


Fig.4 The Geometry of SSS

Fig. 4에서 송신된 신호의 해저면까지의 전달거리는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$R = \frac{H}{\cos\theta} \quad (13)$$

Side Scan Sonar로부터 수중음이 Spherically Spreading한다고 가정하면 Eq.(13)으로부터 전달 거리 R에 따른 TL(Transmission Loss)는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} TL(\theta) &= 20 \log R + aR \\ &= 20 \log \frac{H}{\cos\theta} + a \frac{H}{\cos\theta} \text{ dB} \end{aligned} \quad (14)$$

이때 a는 주파수에 관한 함수로서 Absorption Coefficient이다. 본 연구에서 Side Scan Sonar의 주파수는 400kHz이므로 이 주파수에서의 Absorption

Coefficient는 약 0.1이다.

3.2 Transducer의 Directivity Pattern

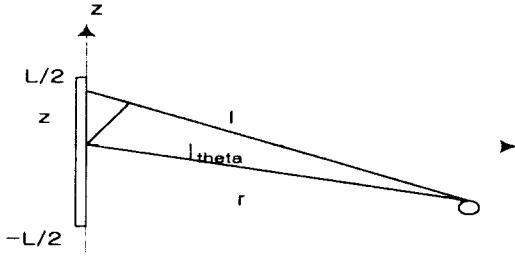


Fig. 5 Beam Pattern of SSS

Transducer로부터 송수신 되어지는 신호의 각에 대한 영향을 $B(\theta, \phi)$ 라 할 때 신호의 각에 따른 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(\theta) = \frac{A}{r} B(\theta) \quad (15)$$

Fig 5에서 미소 부분에 의한 음압을 dp 라 하면 다음을 만족한다.

$$dp = \frac{A}{L} dz e^{ikl} \quad (16)$$

$$l = r + z \sin \theta$$

식 16)으로부터 Transducer에서 송수신 되어지는 음압의 세기는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$P = \int_{-L/2}^{L/2} dp$$

$$= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{A}{L} e^{ikl} dz$$

$$= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{A}{L} e^{ik(r+z \sin \theta)} dz$$

$$= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{A}{L} e^{ikr} e^{ikz \sin \theta} dz$$

$$\approx \frac{A}{r} e^{ikr} \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} e^{ikz \sin \theta} dz$$

$$= \frac{A}{r} e^{ikr} \frac{\sin\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kL}{2} \sin \theta} \quad (17)$$

$$= \frac{A}{r} e^{ikr} \text{sinc}\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right)$$

Eq.(17)로부터 $B(\theta, \phi)$ 는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\therefore B(\theta, \phi) = \frac{\sin\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kL}{2} \sin \theta} \quad (18)$$

Eq.(18)로부터 각에 따른 DL(Directivity Loss)는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$DL(\theta) = 20 \log \frac{1}{B(\theta)} \quad (19)$$

$$= 20 \log \frac{\frac{kL}{2} \sin \theta}{\sin\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right)} \text{ dB}$$

3.3 Time Varying Intensity

Eq.(14)와 (19)로부터 Side Scan Sonar에 수신되어지는 신호의 세기는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$L_p(\theta) = SL - 2TL - 2DL + BS \text{ dB} \quad (20)$$

이때 BS는 Seafloor에서의 Backscattering Strength로서 다음과 같이 나타내어진다.

$$BS = S_B + 10 \log A$$

$$A = R\beta c\tau / (2 \cos(90 - \theta))$$

$$\tau : \text{Pulse Length}$$

$$\beta : \text{Horizontal Beam Width} \quad (21)$$

이때 S_B 는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$S_B = S_0 + 10 \log \sin^2(90 - \theta) \quad (22)$$

이때 S_0 는 해저면의 재질과 Roughness에 관계된 값으로서 이 값이 전 매질에 균일하다고 가정할 경우 SL(Source Level)에 의해서 normalize 되어진 각에 따른 음압의 세기는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L(\theta) &= -2TL - 2DL + BS \\
 &= -2 \left(20 \log \frac{H}{\cos \theta} + a \frac{H}{\cos \theta} \right) \\
 &\quad - 2 \left(20 \log \frac{\frac{kL}{2} \sin \theta}{\sin \left(\frac{kL}{2} \sin \theta \right)} \right) \\
 &\quad + 10 \log \frac{H}{2 \cos(90-\theta)} \beta c t + 10 \log \sin^2(90-\theta) \text{ dB}
 \end{aligned} \tag{23}$$

이때 본 연구에서 사용한 Side Scan Sonar의 주파수는 400kHz, Transducer 길이 1.22m, 운용 고도 20m, Transducer Vertical Depression Angle 10도, Pulse 폭 20 μ sec, Horizontal Beam Width 0.2도 임을 고려한 Normalized Pressure Level은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L(\theta) &= -2 \left(20 \log \frac{20}{\cos \theta} + 0.1 \frac{20}{\cos \theta} \right) \\
 &\quad - 2 \left(20 \log \frac{1022.0648 \sin(\theta - 1.3962)}{\sin(1022.0648 \sin(\theta - 1.3962))} \right) \\
 &\quad + 10 \log \frac{0.0021}{\sin 2\theta} + 10 \log \cos^2 \theta \text{ dB}
 \end{aligned} \tag{24}$$

이때 $\frac{\sin(1022.0648 \sin(\theta - 1.3962))}{1022.0648 \sin(\theta - 1.3962)}$ 는 sinc function으로서 무수히 많은 근을 포함하며 fluctuating 하므로 이를 Envelop로 근사시키면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{\sin(1022.0648 \sin(\theta - 1.3962))}{1022.0648 \sin(\theta - 1.3962)} \\
 &\approx \frac{-1}{1022.0648 \sin(\theta - 1.3962)}
 \end{aligned} \tag{25}$$



Fig. 6 Numerical Results of Eq.(25)

Eq.(24)와 (25)로부터 Normalized된 Time Varying Intensity는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L(\theta) &= -2 \left(20 \log \frac{20}{\cos \theta} + 0.1 \frac{20}{\cos \theta} \right) \\
 &\quad - 2 \left(20 \log \frac{1022.0648 \sin(\theta - 1.3962)}{-1} \right) \\
 &\quad + 10 \log \frac{0.0021}{\sin 2\theta} + 10 \log \cos^2 \theta \text{ dB}
 \end{aligned} \tag{26}$$

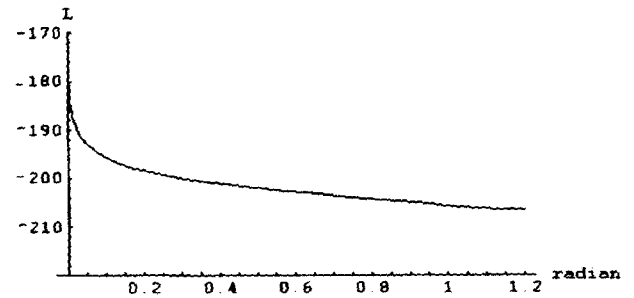


Fig. 7 Numerical Simulation of Time Varying Intensity

4. Time Varying Gain Filter

4.1 Hardware Filter

Fig 7과 같이 Time Varying Intensity는 각에 따라 약 20dB의 차가 발생한다. 이 신호를 A/D Convert할 경우 전체 신호의 값의 범위가 광범위하여 전체 신호를 저장하는데 문제가 발생하므로 본 논문에서는 A/D Convert 전에 신호를 자체 개발한 Analog Filter에 통과 시킴으로써 앞단의 신호는 감쇠 시키고 뒷부분의 신호는 증폭하여 전체 신호 범위를 좁히도록 하였다.

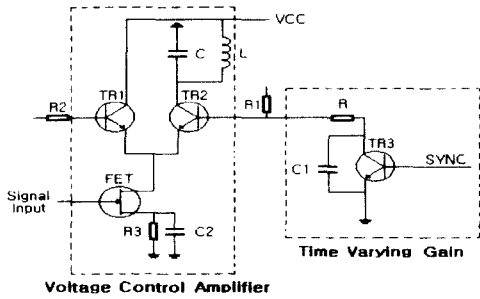


Fig. 8 Hardware Time Varying Gain Filter

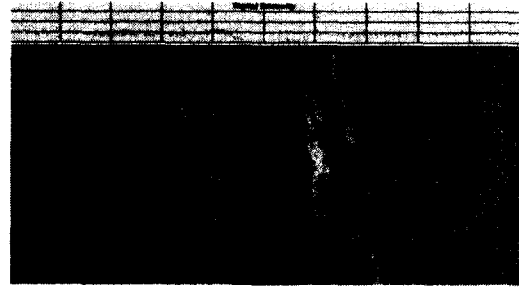


Fig. 11 Final Image By Time Varying Gain Filter

4.2 Software Filter

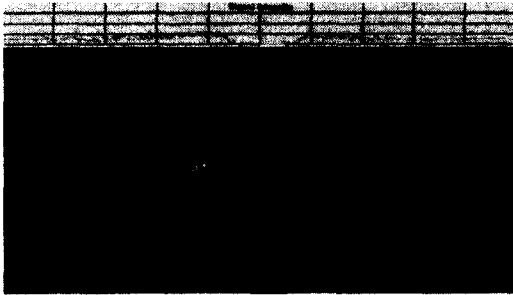


Fig. 9 Reference Image

Fig 8과 같은 Time Varying Gain Filter를 통과한 신호는 A/D Converter에 의해 Image Processing Computer에 의해 처리되어진다. 그러나 전체 Intensity가 Hardware Filter에서 정확히 처리되어지지 못하기 때문에 Fig 9와 같이 평탄한 지형임에도 불구하고 경사져 보이는 현상이 나타난다. 따라서 Fig 9와 같은 평탄한 지형에서의 신호를 기준으로 다시한번 프로그램에 의해 Time Varying Gain Filter를 통과 시킨다. Software Time Varying Gain Filter는 우선 평탄한 지형의 신호를 Low Pass Filter를 통과 시켜 전체 신호의 경향을 구한후 그 값이 시간 영역에서 일정한 값을 갖도록 Normalize 하는 형태로 구성하였다.



Fig. 10 Reference Image By Low Pass Filter

5. 결론

본 논문에서는 400kHz 대의 천해용 고 해상도 Side Scan Sonar System의 개발 중 발생한 Time Varying Intensity에 의한 신호 Sampling 문제와 영상의 왜곡 현상을 해결하고자 하였다. 이를 위해 Time Varying Intensity의 원인을 음전달 경로의 차이에 기인한 Transmission Loss, 수중음 송수신 센서인 Transducer의 특성에 기인한 Beam Pattern과 Seafloor Back-scattering Strength의 관점에서 수치적으로 검증하였으며, 이의 해결을 위해서 Hardware와 Software에서 각각의 Time Varying Gain Filter를 제시하였다. 향후에는 Eq.(26)을 실시간으로 직접 적용할 수 있는 Filter를 개발하고자 한다.

참고 문헌

- [1]E. Oran Brigham, The Fast Fourier Transform (Prentice Hall, 1974)
- [2]Jerry M. Mendel, Lessons In Estimation Theory For Signal Processing, Communications, And Control (Prentice Hall, 1995)
- [3]Finn B. Jensen, William A. Kuperman, Michael B. Porter And Henrik Schmidt, Computational Ocean Acoustics (AIP Press, 1994)
- [4]Clarence S. Clay And Herman Medwin, Acoustical Oceanography (John Wiley & Sons Inc., 1977)