

수중 잔향음신호를 이용한 경계면 상태 역추정 알고리즘

Inverse estimation of boundary characteristics by using underwater
reverberation signals

김 상 균, 나 정 열

한양대학교 지구해양과학과

요 약 문

천해에서 얻은 잔향음신호를 역추정 알고리즘으로 분석하여 자료수집 당시의 환경 변수인 해상풍의 세기와 해저면의 상태를 추정하는 방법에 대하여 기술하였다. 소오나 시스템과 잔향음신호 수집 당시의 환경 자료를 알고 있다면 음원에서 방사된 음파가 해수면에 처음 도달하는 시간과 수평입사각을 multipath eigenray model에 의해서 계산할 수 있고 이 정보를 이용하여 수신된 잔향음 신호를 분석하여 해수면에 의한 산란잔향음 준위와 시간을 계산할 수 있다. 해수면 후방산란강도는 수평입사각, 음원의 주파수, 해상풍의 세기 등에 의해 특징지어지며 계산된 잔향음 준위로부터 소오나 방정식을 이용하여 후방산란강도를 알아낼 수 있다. 이 후방산란강도를 입력자료로 하여 Method of Small Perturbation 이론과 Chapman과 Harris가 유도한 실험식을 사용하여 입력된 값과 일치할 때까지 후방산란강도를 계산하여 이때의 환경변수를 찾아내었다. 한편 해저면 잔향음신호는 표준화된 후방산란강도값들의 PDF를 만들어 그 분포양상을 분석하였다. 본 논문에서 사용된 알고리즘의 검증은 위해서는 보다 다양한 환경 하에서 실시된 많은 음향관측자료를 필요로 한다.

1. 서 론

해수중에서 방사된 고주파 음파가 다양한 전달경로를 거치며 해수면과 해저면 및 체적에 의해 산란되어 수신기에 되돌아 오는 음들의 합을 잔향음(reverberation)이라 한다. 이러한 잔향음은 그 발생원인에 따라 해수면 잔향음, 해저면 잔향음 그리고 체적 잔향음 등의 세 가지로 분류된다. 이 잔향음은 환경변수와 소오나 변수에 의해 그 음압강도가 변하며 환경변수로는 관측 해역의 수은 분포와 해상풍의 세기, 해저면의 거칠기 등이 있고 소오나 변수로는 송·수신 빔의 형태, 음원 펄스의 길이 등이 있다.

잔향음을 일으키는 산란현상을 후방산란이라 하며 해수면 산란은 음원의 주파수, 수평입사각, 해상풍의 속도의 함수로 주어지기 때문에 해수면 잔향음의 특징을 잘 나타낸다고 할 수 있으며

해지면 산란은 해저면의 거칠기에 따라 변한다. 이러한 산란강도의 특징을 이론과 실험식 등에 의해서 추정하고 실측 자료와 비교를 통하여 실험 당시의 환경변수들을 역으로 추정하고자 한다.

2. 해수면 산란이론

잔향음은 음원의 준위에 비해하고 시간에 따라 그 준위가 다르게 나타난다. 이러한 잔향음의 계산은 다음과 같은 가정 하에 이루어진다. ① 구형분산 이외의 음파손실은 없고 ② 산란체의 분포는 균일하며 ③ 산란된 음은 음원의 펄스가 도착한 후부터 끝날 때까지 만의 산란현상이고 ④ 다중산란은 무시된다는 것이다[1]. 잔향음 준위를 계산하는 소오나 방정식은

$$RL = SL - 40 \log r + S_s + 10 \log A \quad \text{이며}$$

이 때 $A = \frac{Cr}{2} \phi r$ 이며 RL은 잔향음 준위, SL은 음원준위, TL은 전달 손실을 나타내며

S_s 는 후방산란강도를 표시하고 A는 ensonified된 산란면적으로서 송·수신 빔의 형태와 펄스 길이에 의해 결정되는 값이다.

거친 해수면(rough surface)에 의해 산란된 음장을 계산하기 위하여 Rayleigh parameter($P = 2k \sigma \cos \theta$)를 이용하면 이 값이 1보다 작은 값을 갖기 위해서는 해수면이 평탄한 조건을 만족하거나 음파의 파수(k)와 주파수의 관계식 $k = 2\pi f/c$ 에 의해서 상대적으로 낮은 주파수의 적용이 요구된다. 이때 즉, 해수면이 평탄할 때의 산란음장계산의 기본 개념은 해수면 $z = \zeta(r)$ 에서의 경계조건을 ζ 의 멱급수로 전개하고 $z > \zeta$ 에서의 음장역시 ζ 의 멱급수로 전개하여 거친 해수면에서의 음파산란을 해수면에 음원이 분포되어 방사되는 문제로 전환시키는 MSP (Method of Small Perturbation)이론을 사용한다[2].

이 이론에 의해 유도된 후방산란강도 계수는 다음과 같다.

$$m_s = (2^{1/2} C/g^3)(k/x)^4 v \cos^2 \theta_0 \cos^2 \theta a^{-1/2} \exp(-1/a) K(\nu, a)$$

이때 $a = (2g)^{-1} x v^2$, v 는 단위가 m/sec인 해상풍의 속도이고 C는 $2.4 \text{ m}^2/\text{sec}^5$ 인 상수이고 k는 음파의 파수, x 는 해수면파의 파수를 나타내며 g 는 중력가속도이다. θ_0 는 입사각이고 θ 는 수평입사각이다. 고주파수 환경에서 $K(\nu, a)$ 는 해수면파 에너지의 각분포함수이다.

$K(\nu, a) = b \cos^2 \alpha$ 로 주어지며 표준화 조건인 $\int_0^\pi K(x, a) d\alpha = 1$ 로부터 a 가 0일 때 b는

(π^{-1}) 의 값을 갖는다. 이 때 α 는 해상풍과 해수면파의 진행방향이 이루는 각도이다.

해수면파의 파수인 x 는 $x = 4\pi^2/gT^2$ 의 관계에서 유도될 수 있고 이때 T는 해수면파의 주기이다. 해상풍에 의해 만들어진 해수면파에 대한 실측자료가 거의 없기 때문에 이를 해결하기 위하여 pierson-moscowitz의 스펙트럼에서 평균파고 계산식인 $\bar{H} = 1.34 \times 10^{-2} v^2$ 을 이용하여 $P < 1$ 인 조건을 만족시키는 \bar{H} 를 찾아 적용시킨다. 이러한 산란음의 이론적인 접근 외에도 Chapman과 Harris 등은 실험을 통하여 그 특성을 밝혀 실험식으로 유도하였다[3].

$$S_s = 3.3\beta \log_{10} \frac{\theta}{30} - 42.4 \log_{10} \beta + 2.6$$

이때, $\beta = 158 (vf^{1/3})^{-0.58}$, θ 는 수평 입사각을, v 는 knots로 표시되는 해상풍 속도이고 f 는 음원의 주파수이며 단위는 kHz이다.

해수면 산란의 주요 원인인 해상풍은 해수면의 거칠기를 야기시키는 한편 그 속도가 증가하면 쇄파(wave breaking)를 일으켜서 미세한 공기방울을 생성시킨다. 이렇게 발생한 미세한 기포는 공진현상을 일으켜 음파산란에 큰 기여를 하는 것으로 알려져 있다[4].

해저면 산란강도 진폭에 대한 누적분포를 통계적으로 분석하면 해저면의 상태에 따라 진폭변화가 서로 다른 PDF의 특징을 갖는 것을 이용하여 해저면의 상태를 추정하여 볼 수 있다. 해저면의 상태가 거친조건일 때 ($4k^2\sigma^2 \gg 1$)의 진폭 변화는 Rayleigh PDF(Probability Distribution Function)을 따르며

$$f_R(r) = \frac{r^2}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{\sigma^2}}$$

이때 r 은 진폭변화들, σ^2 은 분산을 나타낸다.

평탄한 조건일 때 ($4k^2\sigma^2 \ll 1$)는 Gaussian PDF의 특성을 갖는다[5].

$$f_G(r) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

이 Gaussian PDF의 평균은 0이고 분산은 σ^2 이다.

3. 잔향음 신호자료

본 논문에서 사용된 해수면 잔향음 자료는 여름철 남해에서 실시한 실험에서 획득한 자료로서 고주파수의 지향성 송수신기를 수심 20m의 천해에서 깊이 10m에 위치 시켜 실험한 자료이다. 실험 당시의 수온분포는 표 1에 나타난 것과 같이 거의 수직에 가까워 음파의 굴절을 해수면으로 향하게 하여 해수면 산란음을 감지하는데 좋은 환경을 제공하여 준다.

Environmental parameters			
D(m)	T.(°C)	windspeed	~4 knots
0	20.85	wave height	~0.5 m
3	20.85	bottom depth	21 m
6	20.84		
9	20.84	sediment type	mud
12	20.82		
15	20.82		
18	20.81		
21	20.80		

표-1. 실측자료 환경자료

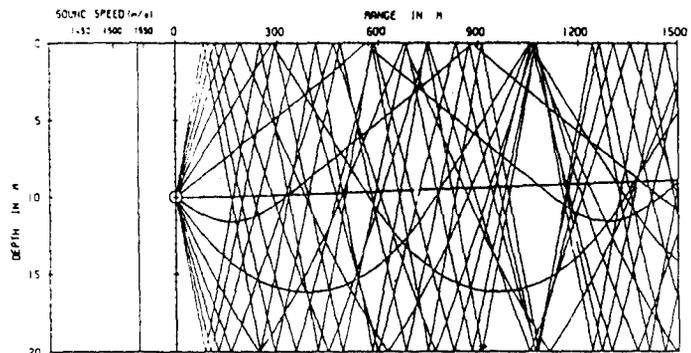


그림 1. Ray tracing

아날로그 형태로 녹음된 잔향음신호는 하나의 Ping 발사 후 4채널 수신신호를 녹음한 것으로 음원신호의 길이(pulse length)는 60 msec이다. 이중 해수면 산란신호의 채널을 8.5 khz의 sampling rate로 sampling하여 디지털 형태로 바꾼 뒤 TVG(Time Varying Gain)와 Pre-amplifier Gain, 그리고 수신감도를 고려하여 decibel scale로 변환시켰다.

한편, 해저면 잔향음 신호는 수심 70 m의 해역에서 수평범폭이 22° 인 wide-beam음원을 30m에 위치시키고 해저면을 향해 4° 기울여 50 msec의 음원길이로 발사하게 한 후 역시 wide-beam으로 수신하여 10240 Hz의 sampling rate로 2 초간 녹음한 자료이다.

해저면에 의한 산란영향만을 고려하기 위하여 수평입사각에 의한 효과를 제거하여 Normalization된 자료를 통세처리를 하여 누적분포를 만들었다.

4. 역추정 알고리즘 및 결과

해수면에 산란되어 되돌아오는 수신신호의 시간과 수평입사각을 알아내기 위하여 multi-path eigenray model을 이용하여 eigenray 정보를 얻는다. 이 eigenray 정보에는 산란면까지의 도달거리와 도달시간, 음원에서 발사각과 산란면으로의 입사각, 전달손실 등의 정보가 실려 있다. 도달시간과 전달손실준위정보 등은 음원에서 산란면까지 한 방향으로 진행될 때 얻은 값들인 반면에 실측으로 얻은 잔향음 신호의 시간과 전달손실은 왕복된 상황 하에서 얻어진 값들을 고려해야 한다. 각 eigenray의 도달시간을 산란되어 돌아온 잔향음신호의 피크(peak)와 비교하여 그 도달시간에서의 잔향음 준위를 도출해 낸다. 이 값들을 소오나 방정식에 대입하여 후방산란강도 준위를 계산할 수 있고 이 시간에서의 입사각은 eigenray정보에 의해 알아낼 수 있다. 실측 잔향음신호를 얻을 당시의 환경은 해상풍의 속도가 4 knot정도로 해수면은 잔잔한 상태였기 때문에 Rayleigh parameter가 1 보다 적은 경우를 적용하여 MSP 이론을 적용하였다. 또한 해상풍의 속도가 작기 때문에 해수면 산란에 기여하는 기포의 발생을 무시하고 수평입사각에 따라 후방산란강도를 구하였다. 몇 가지의 다른 해상풍의 속도를 주었을 때 MSP에 의해 계산된 후방산란강도준위의 그래프와 Chapman and Harris의 실험식에 의해 계산된 그래프를 만들었다. Error bar가 표시된 값들은 실측신호의 후방산란강도 값들이다(그림 2, 3).

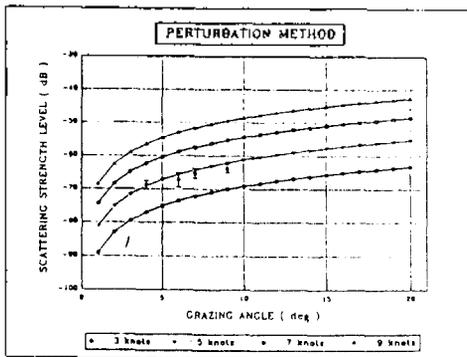


그림 2. 후방산란강도 VS. 수평입사각 (MSP 이론)

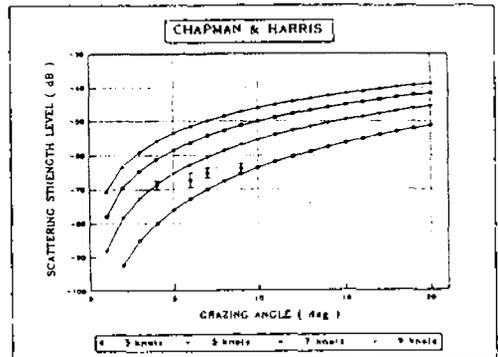


그림 3. 후방산란강도 VS. 수평입사각 (Chapman & Harris 실험식)

이 값들은 해상풍의 속도가 5knot일 때의 그래프에 근접함을 보여주고 있다. 따라서 실측신호를 분석하여 계산된 후방산란강도로부터 역으로 해상풍의 속도를 추정할 수 있음을 나타내고 있다.

해저면의 상태를 추정해 보기 위하여 해저면 성분이 우세한 잔향음 자료를 이용하였다. 같은 환경자료를 입력한 multipath eigenray model을 이용하여 해저면 잔향음이 우세한 시간대를 밝혀 낸다. 이 시간에 해당하는 실측 잔향음자료의 표준화된 후방산란강도를 계산한다. 계산된 후방산란강도의 진폭의 변화를 누적분포로 만들어 이 누적분포의 모양으로부터 해저면의 상태를 역으로 추정한다. 이 분포의 모양이 Rayleigh PDF(Probability Distribution Function)을 따르므로 해저면은 거친 조건($4 k^2 \sigma^2 > 1$)을 만족한다고 할 수 있다.

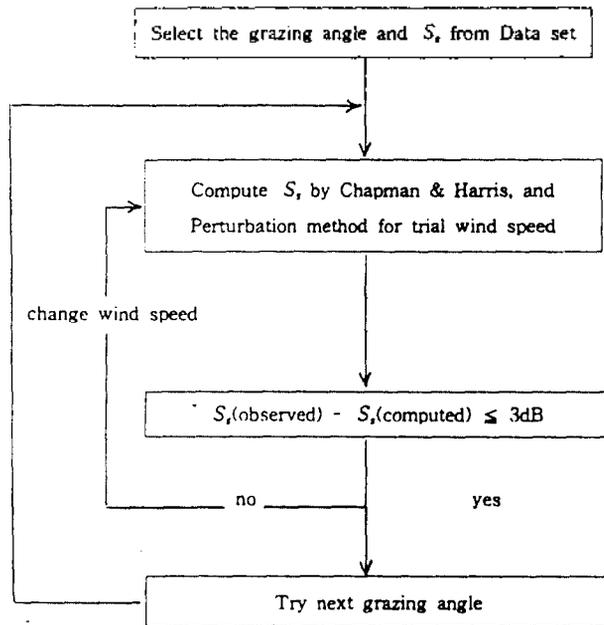


그림 4. 역추정 알고리즘 흐름도

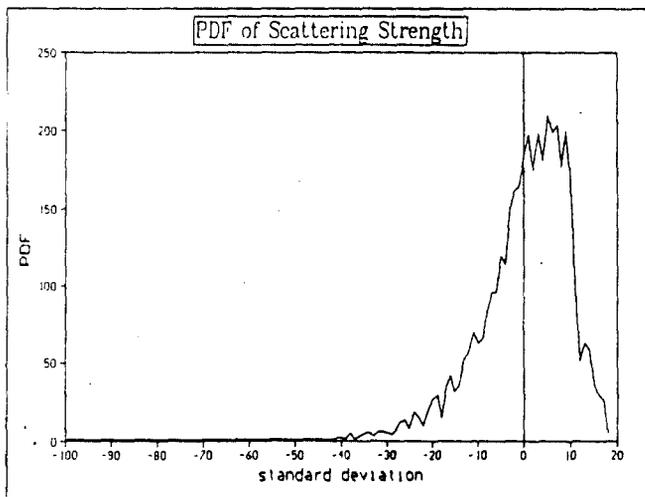


그림 5. 해저면 산란강도 PDF

5. 결 론

실측 잔향음의 특성을 나타내는 후방산란강도들 이론식을 통해 비교하여 음파산란에 영향을 미치는 환경변수를 역으로 추정하여 보았다. 해수면 잔향음의 경우 산란에 큰 영향을 미치는 해상풍의 속도를 추정하였으며 Perturbation이론에 의한 결과가 실험식으로 추정한 것 보다 좀더 잘 맞는 결과를 보여 주었으며 해저면 잔향음신호는 산란강도진폭의 분포양상을 분석해 봄으로써 해저면의 상태를 추측해 볼 수 있었다.

이러한 역추정 알고리즘의 검증은 위해서는 보다 다양한 환경 하에서 실시된 많은 잔향음 자료가 필요하며 해저면의 경우 sidescan 소오나 자료와 해저 지질 자료의 확보가 병행되어야 한다.

6. 참고문헌

- [1] Urick, R.J., "Principles of underwater sound : 3rd edition", 249-271, 1983.
- [2] L. Brekhovskikh and Yu. Lysanov, *Fundamentals of ocean acoustics*, Springer - Verlag, Newyork, pp. 250, 1982.
- [3] Chapman, R. P., and Harris, J. H., "Surface backscattering strengths measured with explosive charges", *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, pp. 1592 - 1597, 1962.
- [4] Suzanne T. McDaniel, "Sea surface reverberation : A review", *J. Acoust. Soc. Am.*, 94(4), pp. 1905 - 1920, 1993.
- [5] Stanton T. K., "Echo fluctuations from the rough sea floor: Predictions based on acoustically measured microrelief properties", *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(2), pp. 715-721, 1985.