

동결된 소양호에서의 지하투과레이다 시험탐사

김기영^{1,*} · 홍명호¹ · 손호웅² · 이주한³

¹강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

²배재대학교 건설환경철도공학과

³한국해양연구원 부설 극지연구소

요 약

호수퇴적물 조사에 적합한 지하투과레이다 안테나의 특성을 파악하기 위해서, 소양호 빙표면에서 중심주파수 50, 100, 250 MHz인 안테나를 사용하여 시험자료를 얻었다. 이 주파수별로 수직분해능은 호저면에서 0.17, 0.08, 0.03 m, 퇴적층 내에서 0.30, 0.15, 0.06 m로 계산되며, 1차 프레넬대 반경은 5 m 깊이에서 1.30, 0.91, 0.58 m 정도이다. 물의 감쇠상수는 각각 1.04, 1.17, 1.19 dB/m로 비교적 일정하게 구해지며, 전기전도도는 0.049, 0.056, 0.057 S/m로 낮은 값을 보여서 깨끗한 담수임을 지시한다. 수심 5 m인 호저 퇴적층의 가탐심도는 50, 100 MHz 안테나 경우, 호저면 하부에서 각각 5.11과 3.36 m 정도로 분석된다.

주요어: 지하투과레이다, 주파수, 감쇠상수, 전기전도도, 분해능, 가탐심도, 프레넬대, 호저 퇴적물

Ki Young Kim, Myung Ho Hong, Howoong Shon and JooHan Lee, 2006, Experimental Ground Penetrating Radar survey on the frozen Soyang Lake. Journal of the Geological Society of Korea. v. 42, no. 2, p. 273-282

ABSTRACT: To understand characteristics of Ground Penetrating Radar antenna for studying lacustrine sediments, experimental data were recorded on the frozen Soyang Lake using three antennas with center frequencies of 50, 100, and 250 MHz. For the three center frequencies, the vertical resolution of reflected signals is 0.17, 0.08, and 0.03 m at the lake bottom and 0.30, 0.15, and 0.06 m in the bottom sediments, respectively. The corresponding radii of the first Fresnel zone are computed to be 1.30, 0.91, and 0.58 m at the lake bottom. The attenuation factors and bulk conductivity for the water are obtained as 1.04, 1.17, and 1.19 dB/m and 0.049, 0.056, and 0.057 S/m, respectively. Such low conductivities indicate that the water is fresh and clean. The penetration depths into the bottom sediments are approximately 5.11 and 3.36 m for 50 and 100 MHz antennas, respectively.

Key words: GPR, frequency, attenuation factor, conductivity, resolution, penetration depth, Fresnel zone, lacustrine sediments

(*Ki Young Kim and Myung Ho Hong, Dept. of Geophysics, Kangwon National University, 192-1 Hyoja-2-dong, Chunchon, Gangwon-do, 200-701, Korea; Howoong Shon, Dept. of Civil, Env. and Railroad Eng., Paichai University, 14 YeonJa 1 Gil, Seo-gu, Daejeon, 302-735, Korea; JooHan Lee, Korea Polar Research Institute, KORDI, Ansan P.O. Box 29, 425-600, Korea*)

1. 서 론

전자기파를 지구물리학적 조사에 처음 적용한 예는 연속적 신호를 이용하여 난파선을 탐지하는데 사용한 것으로(Hulsmeyer, 1904), Hulsbeck (1926)에 의해 펄스신호를 이용하는 방법으로 발전하였다. 10 MHz 내지 수 GHz 대역의 전자기 펄스를 주로 사용하

는 지하투과레이다(Ground Penetration RADAR, 혹은 GPR) 탐사는 1960년대부터 빙하두께 탐사(Cook, 1960; Evans, 1965; Watts *et al.*, 1975; Grasmueck *et al.*, 2002), 빙하층 하부 자원탐사(Hammond and Sprenke, 1991) 및 빙하층 환경탐사(Daniels *et al.*, 1995; Pettersson *et al.*, 2003) 등의 극지연구 분야에 활발히 사용되고 있다. 또한 최근에

* Corresponding author: Tel. +82-33-250-8584, E-mail. kykim@kangwon.ac.kr

는 분해능이 높고 비파괴적이라는 장점 때문에 공학분야(Huggenberger *et al.*, 1994)와 고고학 분야(Bevan, 1991)에도 적용사례가 급속히 증가하는 추세이다.

GPR 탐사는 매우 높은 공간분해능을 가지며, 담수 환경에서는 높은 상대유전율($\epsilon_r=81$)에 기인한 낮은 감쇠율로 수층 하부의 퇴적층서 조사에 유리한 조건을 제공한다. 이에 따라 최근 호수에서 GPR 탐사를 실시하여 호저면의 지질학적 특성 및 교량공사 등의 토목공사를 위한 기반암 깊이를 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. 또한 표면이 물로 덮여 있는 경우는 그렇지 않은 경우보다 가탐심도가 크게 증가한다고 보고된 바 있다(Nobes *et al.*, 2006). 고위도 지역에서는 주로 호수가 동결되는 겨울철에 조사가 이루어지는데(Monica *et al.*, 2004; Heather *et al.*, 2005), 이는 평탄한 얼음 표면이 장비 이동에 용이한 환경을 제공하기 때문이다. GPR 탐사방법은 얼음으로 덮인 담수호 하부의 퇴적층서 조사에 최대 27 m 까지 유용하게 사용될 수 있다고 보고된 바 있으나(Mellett, 1993), 안테나 중심주파수와 물에 혼합되어 있는 부유물의 양과 종류 등에 따라 가탐심도와

분해능 등이 현저히 달라지기 때문에 담수호 퇴적물 조사에 사용하기 위해서는 호수의 깊이, 조사대상 퇴적층의 두께, 부유물의 종류와 양 등을 고려하여 GPR 안테나의 중심주파수를 선택해야 한다.

이 연구에서는 동결된 소양호 표면에서 획득한 지하투과레이다 시험탐사자료를 분석하여, 호수퇴적물 조사에 적합한 안테나의 주파수 대역 결정에 필요한 수층에서의 레이더파 감쇠특성과 전기전도도, 주파수별 안테나의 분해능과 가탐심도 등을 구하고자 한다.

2. 자료 획득

호수퇴적물 조사에 적합한 안테나의 주파수 대역을 결정하기 위한 시험조사는 강원도 인제군 소양호 상류 부근으로서(북위 $38^{\circ}00'8.5'' \sim 38^{\circ}00'20.5''$, 동경 $128^{\circ}06'25.6'' \sim 128^{\circ}06'23.0''$), 2006년 1월에 소양호를 가로지르는 폭 375 m의 측선을 따라 50, 100, 250 MHz 안테나로 시험자료를 기록하였다(Fig.1). 이 시험장소는 1973년 소양댐 건설로 생성된 인공호수의 상류지역으로, 주변 기반암은 선캠브리아기의



Fig. 1. Location map of the study area. The experimental GPR data were recorded along the 375 m profile on the frozen Soyang Lake.

호상편마압류로 구성되어 있으며(김정찬 외, 2001), 호수 주변 저지대는 현생 퇴적물로 덮여 있다.

사용한 기록장비는 스웨덴 RAMAC사 제품으로 0.5 s 간격으로 신호를 발생시켰으며, 50 MHz와 100 MHz 안테나 기록자료는 샘플주파수 약 900 MHz로 500 ns 길이만큼, 250 MHz 안테나 기록자료는 샘플주파수 3460 MHz로 240 ns 길이만큼 각각 16 비트(bit) 정수로 기록하였다(Table 1). 따라서 각 트레이스(trace) 내의 최대 절대진폭 크기는 32768이며, 각 트레이스들은 정규화(normalize)된 형태로 기록된다. 시험에 사용한 안테나는 모두 차폐형(shielded)이며, 특히 50 MHz 산악지형용 안테나는 총길이 9.25 m로서 거친 지표환경에서 사용이 용이하도록 고안되어 있다. 안테나의 송·수신기 간격은 50, 100, 250 MHz의 경우 각각 3.50, 0.50, 0.36 m로 고정되어 있다(Table 1).

3. 자료의 일반적 특성

Fig. 2는 상기한 3개 중심주파수를 갖는 안테나로 수신된 자료의 일부를 보여준다. 수치형태로 기록된 자료들은 최대 신호진폭의 1.5%에 해당하는 비교적 작은 직류성분이 남아있어서 원시자료에서 트레이스별 평균값을 빼줌으로써 직류성분을 제거하였다. 모든 획득자료의 50 ns 이전의 초기시간대에는 공기 중으로 전달된 직접파와 얼음과의 간섭에 의한 효과가 중첩되어 진한 띠 모양으로 기록되어 있으며, 반사신호는 기록시간이 증가함에 따라 에너지가 감쇠되어 약해지는 양상을 보인다. 얼음층 내부에서 볼 수 있는 대부분의 회절파들은 반복적으로 얼고 녹는 과정에서 형성된 얼음층 내의 균열이나 낚시구멍에서 발생된 것으로 판단되며, 일부 호저면의 급경사 부분에서도 관찰된다.

하부시간대의 반사파 신호를 증폭시키기 위하여, 전파거리에 비례하는 이득을 곱하는 프로그램 이득 조절(Programmed Gain Control, PGC)을 적용하였다(Fig. 3). 이득조절 후, 50 MHz (Fig. 3a) 및 100 MHz (Fig. 3b) 안테나 자료는 원점으로부터의 거리(이하 '거리') 50~242 m 구간에 얼음층 하부의 구하도(paleo channel) 모습과 300 ns 부근의 호저면 경계뿐만 아니라 원시자료에서 미약하거나 나타나지 않던 300~400 ns의 호저면 하부 반사면이 뚜렷하게 나타난 모습을 보여준다. 호저면은 거리 50 m 부근부터 북북서 방향으로 급격히 깊어져서 가장 깊은 곳은 축선의 중앙부분에서 최대 5.2 m에 이른다. 중심주파수 50, 100 MHz의 안테나 자료에서 호수 바닥은 폭 약 190 m 정도로 평탄하게 나타나지만, 250 MHz 자료는 기록시간(240 ns)이 짧아서 기록되지 않았다.

4. 수층의 감쇠 특성

레이다 반사파의 수신진폭 A_r 은

$$A_r = A_s \cdot G \cdot A_b \cdot T \cdot R \quad (1)$$

의 형태로 발생신호의 진폭(A_s), 구형발산효과(G), 흡수효과(A_b), 투과손실(T), 반사계수(R)의 곱으로 표현할 수 있다. 모든 수치 기록자료는 트레이스별로 정규화 되어 상대진폭이 기록되나, 공기 중으로 전달된 신호와 비교적 일정한 두께를 갖는 얼음층 간섭파의 합으로 이루어진 울림신호가 모든 트레이스에서 가장 큰 진폭을 가지며 그 크기가 거의 일정하므로, 각 트레이스의 진폭은 상대적 참진폭을 나타낸다고 볼 수 있다. 호저반사면은 위치에 따라 반사계수가 차이를 보일 수 있으나, 호저퇴적물의 종류가

Table 1. Acquisition parameters for the radar experiment.

Center frequency (MHz)	50	100	250
Antenna type	Shielded	Shielded	Shielded
Recording interval (s)	0.5	0.5	0.1
Record length (ns)	500	500	240
Sampling frequency (MHz)	899.8	891.6	3460.1
Antenna separation (m)	3.50	0.50	0.36

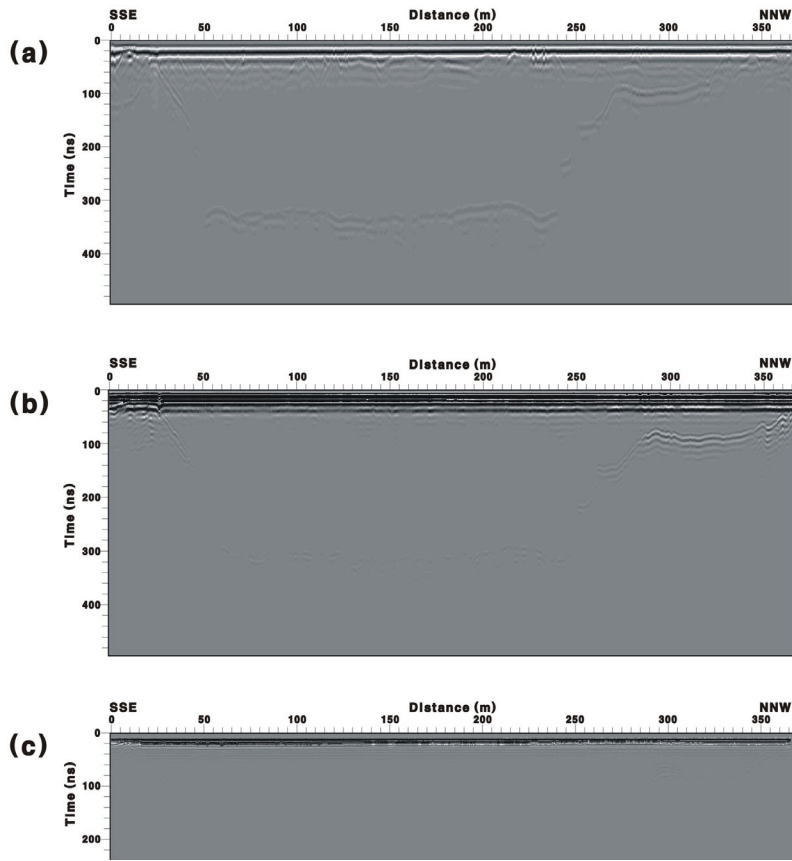


Fig. 2. Raw radar sections obtained with (a) 50, (b) 100, and (c) 250 MHz antennas, respectively.

비슷하다고 가정할 경우에는 동일한 반사계수(R)를 갖는다. 또한 비교적 일정한 두께를 갖는 얼음층 내의 흡수와 얼음/물 경계면에서의 투과손실은 일정하다고 볼 수 있으므로, 거리(즉, 물의 깊이)에 비례하는 이득조절을 적용하여 구형발산효과(G)를 보정한 자료(Fig. 3)를 이용하면, 식 (1)로부터 수층에 의한 흡수(A_b)항을 구할 수 있다.

거리 x 만큼 떨어진 곳에서의 진폭세기 A_x 는 발신신호 진폭 A_0 로부터 지수함수 형태로 감소하게 되므로,

$$A_x = A_0 \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

이 되며, 여기서 α 는 dB/m로 표시한 감쇠상수(attenuation factor)이다.

호저 반사면이 표층 울림신호와 중첩되지 않는 거

리 30~330 m 구간의 구형발산 보정자료(Fig. 3)에서 호저반사파 진폭을 안테나별로 측정하였다. 조사지의 얼음 두께는 실제로 측정한 결과, 0.27 m로 거의 일정하였으며, 얼음과 물에서의 레이더파 속도를 각각 0.150 m/ns과 0.033 m/ns으로 가정하고 호저면의 깊이를 구하였다. 안테나별 신호진폭을 깊이에 대해 도시한 후, 식 (2) 형태의 최적 지수함수를 최소자승법으로 구하였다(Fig. 4). 이렇게 구한 감쇠상수는 중심주파수가 50, 100, 250 MHz인 안테나에서 각각 1.04, 1.17, 1.19 dB/m로 비교적 일정하다.

5. 수층의 전기전도도

전자기파의 감쇠상수(α)는 신호의 각주파수(ω), 전기전도도(σ), 유전율(ϵ), 투자율(μ)의 함수로,

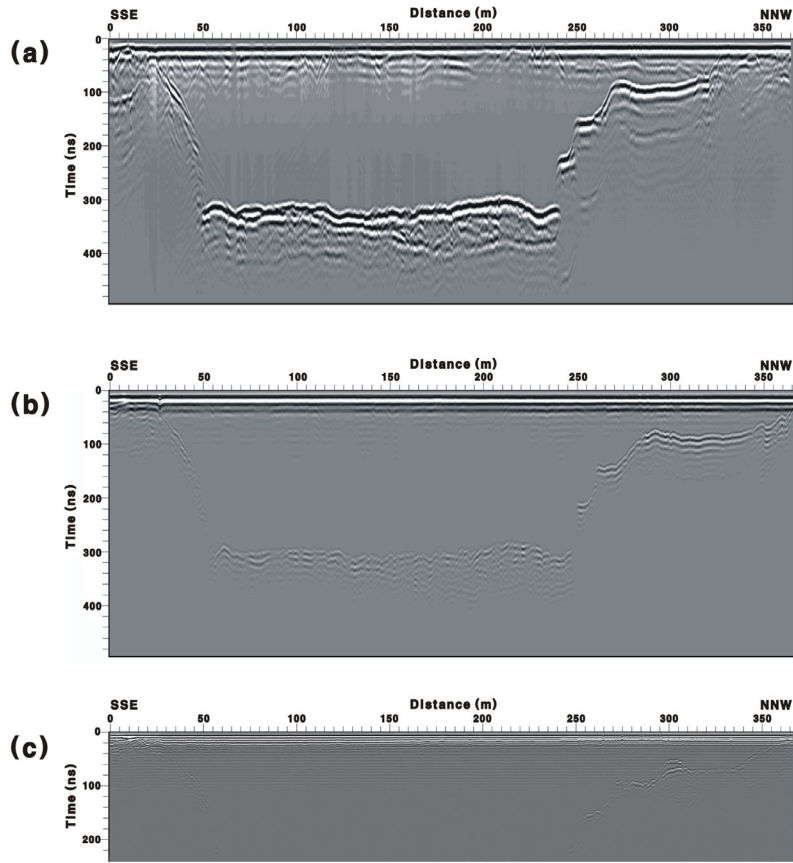


Fig. 3. Gain-applied radar sections for (a) 50, (b) 100, and (c) 250 MHz antenna data, respectively.

$$\alpha = \omega \left\{ \left(\frac{\mu \epsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 유전율 ϵ 과 투자율 μ 는 비자성 매질 내에서 일정하다고 가정할 수 있다(Reynolds, 1997; 손호웅 등, 2000). 일반적으로 GPR 탐사는 고주파 대역을 사용하므로 변위전류가 우세한 전파영역($\sigma \ll \epsilon \omega$)에 속하게 되어 식 (3)은,

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (4)$$

과 같은 근사식을 사용할 수 있다. 따라서 감쇠상수는 매질의 전기전도도(σ)가 크고 유전율(ϵ)이 작을수록 커지지만 주파수에는 무관하다. 그러나 전파영역 내에서도 전기전도도(σ)가 큰 매질이거나 중

심주파수가 낮은 안테나를 사용할 경우 유도영역에 가까워지므로, 식 (4)를 이용하여 구한 결과의 오차는 커지게 된다.

담수의 전기전도도는 계절 및 불순물의 농도에 따라 큰 변동범위(0.03~0.20 S/m)를 보이는 것으로 알려져 있다(Sharma, 1997; 송영수, 1995; 손호웅 등, 2000; 이태섭 등, 1996). 레이더파의 주파수와 전기전도도가 각각 10~1000 MHz, 0.01~0.30 S/m의 범위에서 식 (3)을 이용하여 감쇠상수를 계산하였다(Fig 5). 50, 100, 250 MHz 중심주파수를 갖는 레이더파들은 0.20 S/m 이하의 전기전도도를 갖는 매질에서 중심주파수에 상관없이 전기전도도별로 감쇠상수가 거의 일정한 양상을 나타낸다. 또한 전기전도도가 증가함에 따라 감쇠상수도 선형으로 비례하여 증가하는 양상을 보여서, 담수 환경에서는 식 (4)의 근사식을 사용할 수 있음을 나타낸다.

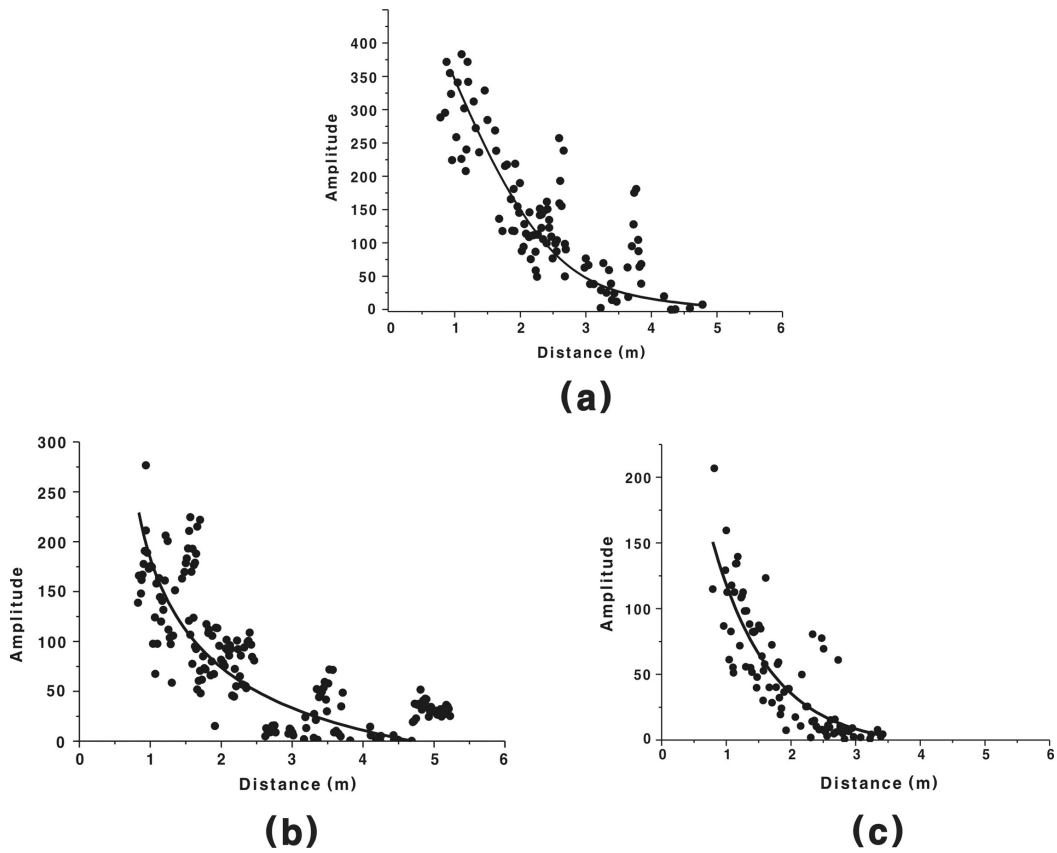


Fig. 4. Amplitude variations with depth of reflection events from the lake bottom recorded using (a) 50, (b) 100, and (c) 250 MHz antennas, respectively. The corresponding attenuation factors of the water are obtained through fitting exponential curves as (a) 1.04, (b) 1.17, and (c) 1.19 dB/m, respectively, assuming a constant reflectivity at the water-bottom.

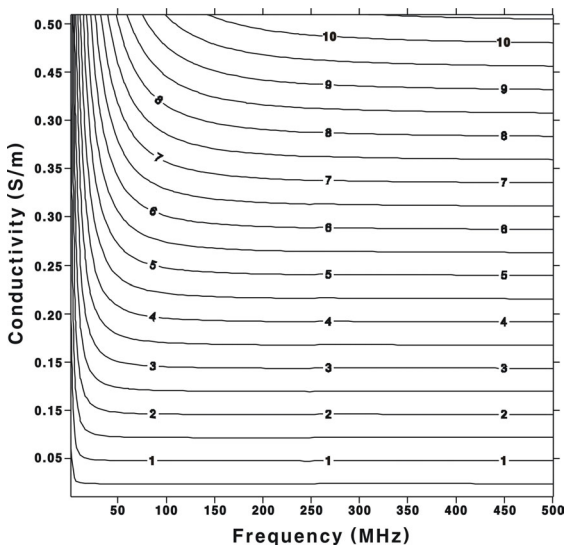


Fig. 5. Theoretical attenuation factor (AF) of the water computed using Equation (3) in the text, indicating that radar signals have almost a constant AF where conductivity is less than 0.2 S/m.

중심주파수에 따라 계산된 감쇠상수(Fig. 4)와 식 (3)을 이용하여 구한 소양호 물의 전기전도도는 주파수가 50, 100, 250 MHz인 경우에 각각 0.049, 0.056, 0.057 S/m로 각각 계산된다. 이렇게 낮은 전기전도도는 시험자료를 획득한 겨울철 상류지역의 소양호 물이 부유물이 적은 깨끗한 담수임을 지시한다.

6. 분해능 및 가탐심도

수직분해능을 중심 파장의 1/4로 계산할 경우 (Yilmaz, 1987), 속도 0.033 m/ns인 물에서 50, 100, 250 MHz의 중심주파수를 갖는 안테나들의 이론적 수직분해능은 각각 0.17, 0.08, 0.03 m 정도이며, 수평분해능을 나타내는 1차 프레넬대(the first Fresnel Zone, Yilmaz, 1987) 반경은 수심 5 m에서 각각 1.30, 0.91, 0.58 m 정도이다. 조사지 부근 소양호의

저면 퇴적물은 모래 성분이 50% 이상을 구성하고 있으므로(김기영 외, 2004), 젖은 모래의 상대유전율 25를 적용할 경우에 미고화된 저면 퇴적층 내의 수직분해능은 각각 0.30, 0.15, 0.06 m 정도로 계산된다. 실제로 50 MHz에서 잘 구분되지 않던 주시 330 ns, 거리 100 m 부근의 천부 반사면(Fig. 6a)은 100 MHz에서 2개의 층으로 잘 구분되어 나타난다(Fig. 6b).

레이다파의 가탐심도는 전파매질, 반사체의 종류, 장비 특성, 배경잡음의 크기 등 여러 가지 요소에 의하여 결정되며, 신호/잡음의 진폭비는 진폭 포락선(envelope)이라 불리는 순간진폭(instantaneous amplitude) 개념을 사용하면 효과적으로 비교할 수 있다. 실제 기록자료 $r(t)$ 의 순간진폭 $e(t)$ 는

$$e(t) = \{ r(t)^2 + q(t)^2 \}^{1/2} \tag{5}$$

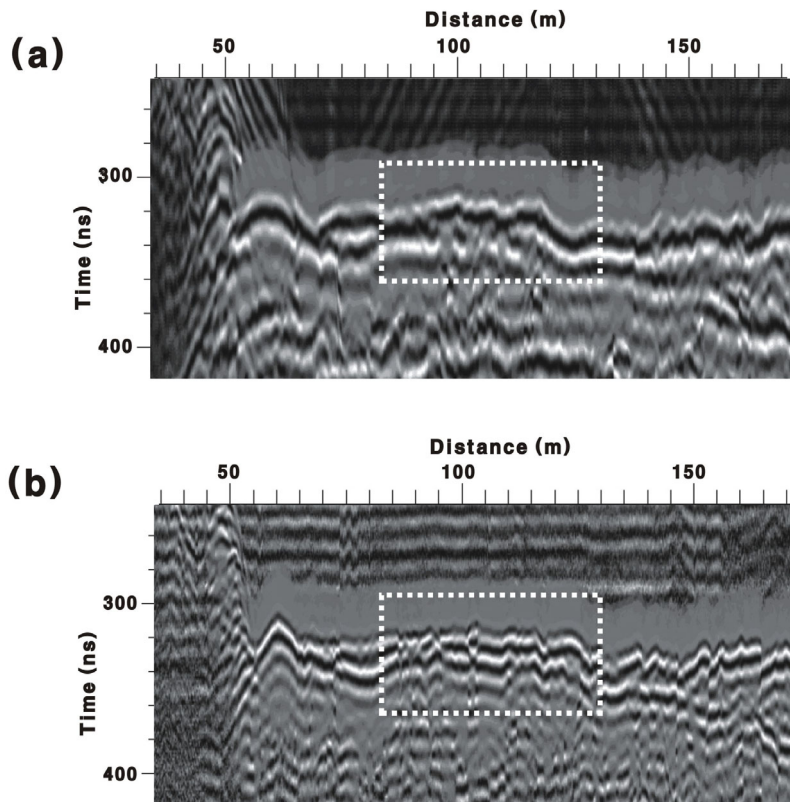


Fig. 6. Enlarged sections to show difference in resolution between (a) 50 and (b) 100 MHz antenna data. The reflection events near 330 ns in two-way travel time at distance of 100 m are clearly separated in the 100 MHz section while those events are undistinguishable in the 50 MHz section.

으로 표시되며, 여기서 $q(t)$ 는 $r(t)$ 를 힐버트변환 (Hilbert transform)하여 얻은 이상트레이스이다. Fig. 7은 시간과 공간에 따른 진폭 변화를 비교하기 위하여 구형발산 효과를 보정한 중심주파수 50 MHz(Fig. 3a)와 100 MHz(Fig. 3b) 자료로부터 구한 순간진폭 단면으로, 전체적으로 구형발산 보정자료와 유사한 양상으로 보이거나 모두 0보다 큰 수로 기록되어 있다.

소양호 조사지역에서의 중심주파수별 가탐심도를 구하기 위하여, 호저지형이 비교적 평탄한 거리 50~242 m 구간 830개 트레이스들의 순간진폭을 구하고 호저면과 일치시킨 후, 중합하였다(Fig. 8). 중합된 순간진폭의 최대치는 50 MHz를 사용한 자료가 100 MHz를 사용한 자료보다 4배 이상 크게 나타나며, 약 17 ns 정도 지연된 양상을 보인다. 이 지연은 신호파형이 혼합위상이며 주파수가 낮을수록 신호길이가 더 길기 때문에 발생한 것이다. 대략 50 MHz 안테나의 경우 178 ns, 100 MHz 안테나의 경우 119 ns 정도부터 배경잡음 수준에 이르러 조사지역에서의 가탐심도는 젓은 모래층에서의 레이다파 속

도 57 m/ns를 적용하여 계산하면 각각 5.11 m, 3.36 m 정도 될 것으로 분석된다.

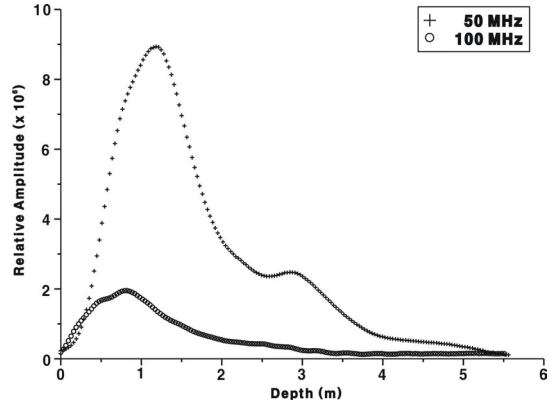


Fig. 8. Horizontally stacked instantaneous amplitude of the reflection events in lacustrine sediments in the distance range of 50~242 m. The maximum value in the data of 50 MHz center frequency is more than four times greater than that in the 100 MHz data. The approximately 17 ns relative delay of the peak is due to the mixed-phase source signatures.

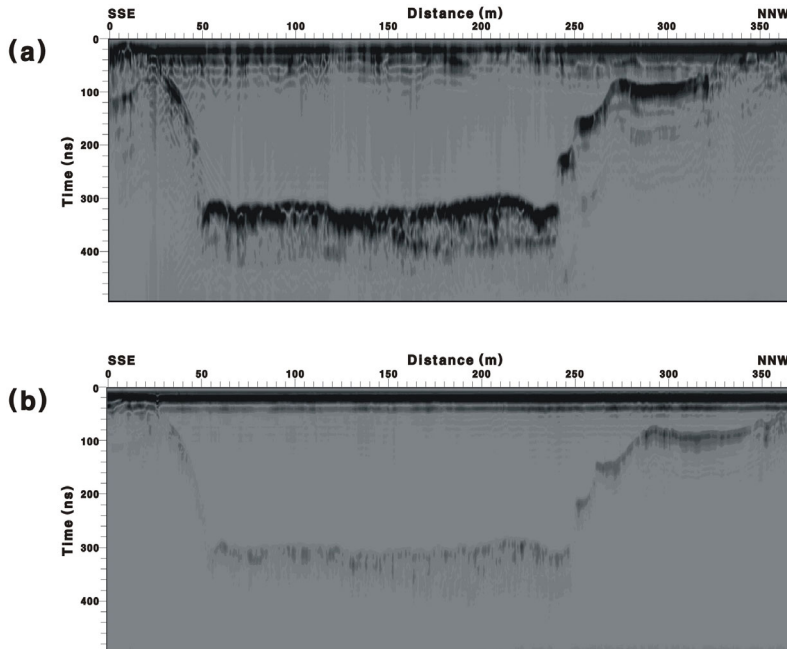


Fig. 7. Instantaneous amplitude sections for data obtained using (a) 50 and (b) 100 MHz antennas, respectively. These sections show both temporal and spatial variation of the instantaneous amplitude.

7. 결과 및 토의

동결된 소양호 표면에서 중심주파수가 50, 100, 250 MHz인 안테나를 이용하여 기록한 시험자료를 이용하여 수층의 감쇠상수, 전기전도도, 호저 퇴적층의 분해능 및 가탐심도 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 사용한 안테나 주파수 대역에서의 감쇠상수는 이론적으로 전기전도도가 각각 0.20 S/m 이내인 매질에서 거의 일정하며, 깊이에 따라 변하는 호저반사파 진폭으로부터 구한 감쇠상수는 각각 1.04, 1.17, 1.19 dB/m로 비교적 일정하다.
- (2) 소양호 물의 전기전도도는 사용한 안테나 주파수별로 각각 0.049, 0.056, 0.057 S/m로 계산되며, 이렇게 낮은 전기전도도는 시험자료를 획득한 겨울철 상류지역의 소양호 물이 깨끗한 담수임을 지시한다.
- (3) 수직분해능은 사용한 안테나 주파수별로 호저면에서는 0.17, 0.08, 0.03 m, 미고화된 호저면 퇴적층 내에서는 0.30, 0.15, 0.06 m 정도이고, 수심 5 m인 호저면에서의 1차 프레넬대 반경은 1.30, 0.91, 0.58 m 정도로 계산된다.
- (4) 순간진폭 변화로부터 구한 호저 퇴적층의 가탐심도는 50, 100 MHz 안테나를 사용할 경우, 수심 5 m 정도인 호저면 하부에서 각각 5.11 및 3.36 m 정도인 것으로 분석된다.

사 사

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-5201)의 지원으로 수행되었습니다. 논문에 관하여 좋은 의견을 주신 강원대학교 이훈열 교수님과 추운 겨울 얼은 호수 위에서 현장시험자료 획득에 도움을 주신 세코지오 안영돈 차장, 이대근 과장, 심민철 대리님과 강원대학교 탄성파탐사 실험실 이소영, 이창민, 황윤구 대학원생, 그리고 전광민, 이재훈 학생들에게 감사드립니다.

참고문헌

김기영, 조수제, 임정학, 정대교, 황인영, 2004, 음파탐사를 이용한 소양호 저층퇴적물 조사, 세계 물의 날 기념 심포

- 지엄 논문집, 311-317.
- 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 한국 지질도(1:250,000), 강릉속초 지질도폭 및 설명서, 한국 지질자원연구원, 76 p.
- 손호웅, 김지수, 송영수, 윤왕중, 김인수, 서만철, 김기영, 조인기, 김학수, 2000, (개정증보판) 지반환경물리탐사, 시그마프레스, 751 p.
- 송영수, 1995, 해수침입에 의한 지하수 오염지역에서의 전기비저항 및 유도분극 탐사, 자원공학회지, 32, 400-408.
- 이태섭 등, 1996, 지구물리, 지구화학적 오염영역 탐지 및 감시기술개발 연구(III), 한국자원연구소, KR-96(T)-10, 166-175.
- Bevan, B.W., 1991, The Search for Graves, *Geophysics*, 56, 1310-1319.
- Cook, J.C., 1960, Proposed monocycle-pulse very-high-frequency radar for air-borne ice and snow measurement, *AIEE Comm. Electron.*, 51, 588-594.
- Daniels, J.J., Roberts, R., Vendl, M., 1995, Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminations, *J. Appl. Geophys.* 33, 195-207.
- Evans, S., 1965, Dielectric properties of ice and snow: a review, *Journal of Glaciology*, 5, 773-792.
- Grasmueck, M. and Weger, R., 2002, 3D GPR reveals complex internal structure of Pleistocene oolitic sandbar, *TLE*, July 2002, 634-639.
- Hammond, W.R. and Sprenke, K.F., 1991 Radar detection of subglacial sulfides, *Geophysics*, 56, 870-873.
- Heather Best, James P. McNamara, Lee Liberty, 2005, Association of ice and river channel morphology determined using Ground penetration radar in the Kuparuk River, Alaska, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, 157-162.
- Huggenberger P., Meier E., Pugin A., 1994, Ground-probing radar as a tool for heterogeneity estimation in gravel deposits: advances in data-processing and facies analysis, *Journal of Applied Geophysics*, 31, 171-184.
- Hulsenbeck & Co., 1926, German patent Number 489434.
- Hulsmeyer, C., 1904, German Patent Number 165546.
- Mellet, J.S, 1993, Bathymetric Studies of Ponds and Lakes Using Ground Penetrating Radar, in Proc. of Second Government Workshop on GPR, Columbus, Ohio, Oct., 26-28.
- Moldoveanu-Constantinescu, M. and Stewart, R., 2004, 3D ground penetration radar surveys on a frozen river lagoon, *Recorder*, 29, 34-36.
- Nobes, D.C., Rother, H., Kruk, J., and Jol, H.M., 2006, Radar 'lensing' by a small river: Can a layer of surface water improve the signal?, *Near Surface Geophysics*, 4, 69-74.
- Pettersson, J.K. and Nobes, D. C., 2003, Environmental geophysics at Scott Base: ground penetrating radar and

- electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research base, *Cold Regions Science and Technology*, 37, 187-195.
- Reynolds, J.M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 796 p.
- Sharma, P. V., 1997, *Environmental and Engineering Geophysics*, Cambridge Univ. Press, 475 p.
- Watts, R.D., England, A.W., Vickers, R.S. and Meier, M.F., 1975, Radio-echo sounding on South Cascade Glacier, Washington, using a long-wavelength, mono-pulse source, *Journal of Glaciology*, 15, 459-461.
- Yilmaz, O., 1987, *Seismic data processing*, SEG, 526 p.
-

투 고 일 : 2006년 3월 3일
심 사 일 : 2006년 3월 15일
심사완료일 : 2006년 5월 20일