

# 신호파형 역대합을 통한 지중레이다 자료의 수직해상도 향상

김기영\* · 홍명호\* · 손호용\*\* · 이주한\*\*\*

\*강원대학교 자연과학대학 지구물리학과

\*\*배재대학교 건설환경철도공학과

\*\*\*한국해양연구원 부설 극지연구소

## Enhancement of Vertical Resolution of GPR data through Signature Deconvolution

Ki Young Kim\* · Myung Ho Hong\* · Howoong Shon\*\* · JooHan Lee\*\*\*

\*Dept. of Geophysics, Kangwon National University

\*\*Dept. of Civil, Env. and Railroad Eng., Paichai University

\*\*\*Korea Polar Research Institute, KORDI

**요 약** : 지중레이다 신호의 울림현상을 제거하고 수직분해능을 높이기 위한 연구의 일환으로, 소양호에서 100 MHz 안테나로 기록한 지중레이다 자료를 대상으로 신호파형 역대합을 시험 적용하였다. 호저면에서 반사된 파를 중합하여 추출한 신호파형을 이용한 결정론적 역대합 결과를 기존의 Wiener 역대합 방법과 비교하였다. 두 가지 역대합 방법을 적용시킨 시험 자료는 모두 수직 분해능이 높아졌으며, 입력자료 상에서는 한 개의 층으로만 해석되던 퇴적층 내에서 3개층 이상을 인지할 수 있다. 그러나 Wiener 필터 적용 결과는 분별력이 낮아서, 울림현상이 심한 자료 사이에 존재하는 반사면 존재를 객관적으로 인식하기 어려운 점이 있다. 신호파형 역대합 적용 결과는 분별력과 수직분해능이 모두 높아서 퇴적층 경계뿐만 아니라 각 층 내부의 세밀한 층서상태까지 보여준다. 이 역대합 방법은 반사시간별로 신호파형 추출이 가능하며, 시간에 따라 신호파형이 심하게 변하는 특성을 가진 지중레이다 자료에 효과적으로 적용시킬 수 있다.

**주요어** : 지중레이다, 수직분해능, 신호파형, 역대합, Wiener, 분별력

**ABSTRACT** : To remove ringing and increase vertical resolution of GRP data, signature deconvolution was applied to GPR data obtained using a 100 MHz antenna in the Soyang Lake. The signature was extracted through stacking reflection signals from the lake bottom. Results of this deterministic deconvolution was compared with those from the conventional Wiener method. Due to increased vertical resolution, both deconvolution methods are able to resolve three or more layers in an apparent single layer on the input data. However, identification of reflection boundaries from ringing is not easy due to poor definition in the output data of the Wiener filter. On the contrary, the signature deconvolution greatly enhances both vertical resolution and definition of reflection boundaries, showing detailed internal stratigraphic features of the three sedimentary layers. Since extraction of signature at various depths is possible, this deconvolution method can be applied effectively to unstationary GPR data.

**Key words** : GPR, vertical resolution, signature, deconvolution, Wiener, definition

### 1. 서 론

지중레이다(Ground Penetration RADAR, 혹은 GPR) 탐사는 10 MHz 내지 수 GHz 대역의 전자기파 펄스를 주로 사용하는 시간 및 공간분해능이 매우 높은 지구물리

학적 조사방법이다. GPR 자료는 신호의 울림(ringing) 현상이 매우 심한 특성이 있으며, 중심주파수를 높일수록 감쇠가 심해져서 가탐심도가 급격히 감소하는 특성이 있다. 탄성파 자료의 경우, 신호의 울림현상을 제거하고 수직 분해능을 높이기 위해서는 역대합(deconvolution)이란 자

료처리 방법이 흔히 사용된다. 그러나 GPR 신호는 최소 위상(minimum phase)이 아니므로 가장 보편적으로 사용되는 Wiener 최소자승필터(Yilmaz, 1987)를 적용하여 좋은 결과를 얻기 어렵다. Wiener 필터 외에도 예측 오류필터(prediction error filter)에는 시변성(time varying)이 강한 자료에 효과적인 칼만(Kalman)필터나 Burg 시변필터 등의 방법이 제안된 바 있으나, 신호파형이 혼합위상인 경우 모두 바람직한 결과를 보여 주지 않는다(Jurkevics and Wiggins, 1983).

혼합위상인 GPR 자료를 역대합하는 여러 가지 방법들이 제안되었다. 신호가 혼합위상인 경우, 통계적 방법에 기초한 필터는 예측(anticipation)성분의 유인성(causal) 부분과 기억(memory)성분의 비유인성 부분으로 구성된 양면(two-sided)이어야 한다(Robinson and Treitel, 1980). Porsani and Ursin(1996)는 유인성(causal) 파형요소를 최소지연(minimum delay)과 최대지연(maximum delay) 성분으로 분해하고, 유인성 성분과 반유인성 성분의 역필터들을 대합(convolution)한 바 있다. 결정론적 접근 방법으로는 기록한 신호파형을 이용하여 신호파형 역대합(signature deconvolution)을 구하기도 하는데(Ziolkowski, 1991), 신호가 시간에 따라 변하지 않는다는 가정 하에 실시하게 되므로 실제로 신호가 시간에 따라 급격히 변하는 GPR 자료의 경우에 좋은 결과를 기대하기 어렵다(Xia *et al.*, 2001). 최근 파동방정식에 근거한 신호파형 역대합 방법이 소개되기도 하였으나(Loewenthal and Jakubowicz, 1983), 속도뿐만 아니라 가속도도 함께 기록해야 하는 제약조건으로 아직 널리 활용되지 못하고 있는 실정이다.

GPR 신호의 수직분해능을 높이기 위한 연구의 일환으로, 이 논문에서는 소양호에서 획득한 GPR 자료상의 동일한 반사면에서 반사된 레이다파를 중합하는 방식으로 신호파형을 간단히 추출하고 신호파형 역대합(signature deconvolution)을 적용시킨 결과를 기존의 Wiener 필터방법과 비교하여 소개한다.

## 2. 자료 획득 및 전처리

시험자료는 강원도 인제군 소양호 상류 부근(북위 38°00′ 8.5″ ~ 38°00′ 20.5″, 동경 128°06′ 25.6″ ~ 128°06′ 23.0″)에서 2006년 1월에 소양호를 가로지르는 폭 375 m의 측선을 따라 100 MHz 안테나로 획득

하였다(Fig. 1). 이 시험장소는 1973년 소양댐 건설로 생성된 인공호수의 상류지역으로, 주변 기반암은 선캠브리아기의 호상편마암류로 구성되어 있으며(김정찬 외, 2001), 호수 주변 저지대는 현생 퇴적물로 덮여 있다.

사용한 기록장비는 스웨덴 RAMAC사 제품으로 0.5 s 간격으로 신호를 발생시키고, 송·수신기 간격이 0.5 m로 고정되어 있는 100 MHz 차폐형 안테나로 수신하였으며, 샘플주파수 약 900 MHz로 500 ns 길이만큼을 16 비트(bit) 정수로 기록하였다. Fig. 2는 측선의 북북서쪽 일부 자료를 보여준다. 50 ns 이전의 초기시간대에는 공기 중으로 전달된 직접파와 얼음과의 간섭에 의한 효과가 중첩되어 진한 띠 모양으로 기록되어 있으며, 반사신호는 기록시간이 증가함에 따라 에너지가 감소되어 약해지는 양상을 보인다. 담수에서의 레이다파 속도 0.033 m/ns를 가정하고 계산한 전파거리에 비례하는 프로그램 이득조절(Programmed Gain Control, PGC)을 적용하였다(Fig. 2b). 이득조절 후에는 시간에 따라 진폭이 대략 일정하여 참진폭이 회복된 모습을 보인다.

## 3. 신호 파형 추출

잡음이 제거된 GPR 트레이스  $T(t)$ 는 신호파형  $S(t)$ 가 반사계수  $R(t)$ 과 대합된 모델로 설명할 수 있다.

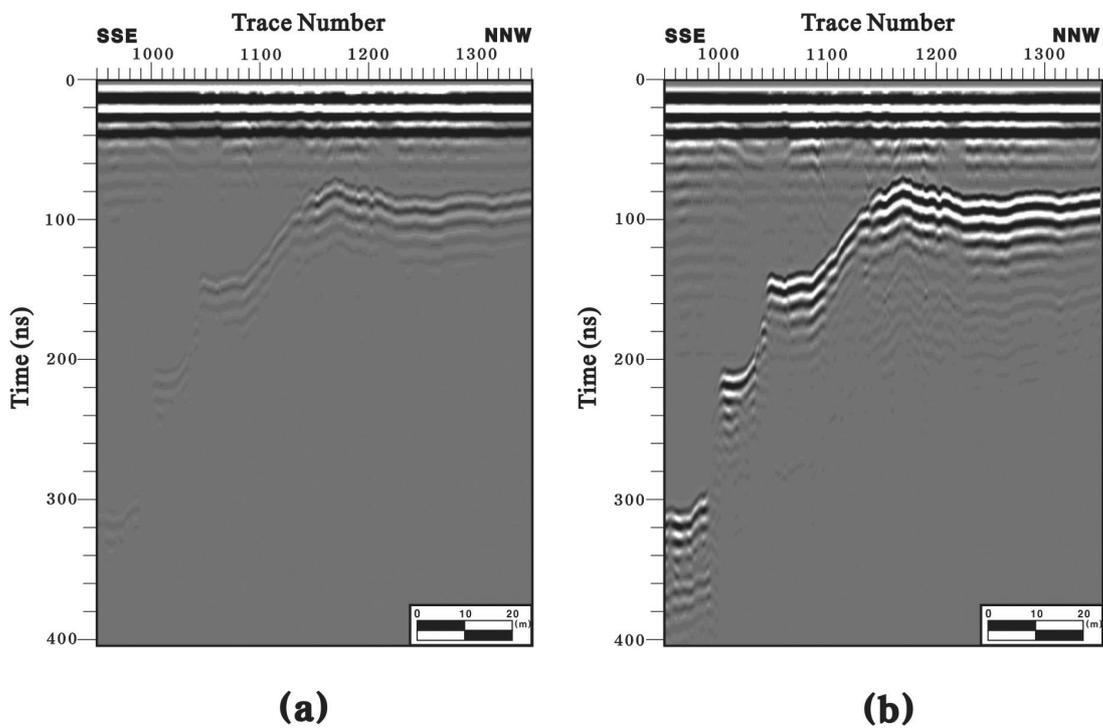
$$T(t) = S(t) * R(t)$$

여기서 신호파형  $S(t)$ 이 일정하다고 가정하면, 주어진 GRP 트레이스  $T(t)$ 의 파형변화는 지속시간 동안의 반사계수  $R(t)$ 의 시간적 변화에 대한 정보를 포함하고 있다. 따라서 주 반사면 하부에 놓여 있는 반사 경계면들의 깊이가 측방으로 변할 경우, 주어진 반사면 상의 여러 트레이스들을 평균하면 반사계수의 수직방향 변화의 영향이 감소되어 원래 신호파형에 가까워진다. 이렇게 개략적으로 구한 신호파형  $S'(t)$ 를 이용하여 GRP 트레이스  $T(t)$ 를 역대합하면 신호파형의 위상이 혼합인 경우에도 해상도가 높은 반사파 단면을 구할 수 있다.

시험측선의 북북서쪽 측점 1233~1379번 사이의 147개 트레이스 상에 화살표로 표시한 80 ns 부근 호저면 반사파를 시험목표로 선정하였다. 이 반사파를 정렬하고 수평중합한 후, 44.8 ns 길이만큼(40 샘플)을 신호파형으로 택하고 푸리에변환을 위하여 자료 끝부분에 0을



**Fig. 1** Location map of the study area. The test GPR data were recorded on the NNW part of the 375 m profile on the frozen Soyang Lake.



**Fig. 2** The test GPR sections recorded with a 100-MHz antenna: (a) before and (b) after application of a programmed-gain control to compensate the geometrical spreading effect.

추가하여 1024개 샘플로 만들었다(Fig. 3a). 또한 비교 목적으로 100 MHz의 동일한 안테나로 허공에서 기록한 신호도 동일한 방법으로 준비하였다(Fig. 3b). 이렇게 추출한 신호를 푸리에변환하여 주파수 영역에서 진폭 및 위상 스펙트럼을 작성하였다. 진폭 스펙트럼은 추출한 반사파 신호의 최대 진폭이 87.7 MHz 정도에서 나타나며, 공기 중에서 기록한 자료의 경우는 이보다 작은 70.2 MHz에서 최대값을 갖는다. 신호의 -10 dB 대역폭은 반사파의 경우 58.8 MHz로서 공기중에서의 기록 101.1 MHz 대역폭보다 훨씬 좁으며, 레이다파는 유전율이 81 정도로 매우 큰 물질(Reynolds,1997)에서 조차 시변성이 매우 강한 모습을 보인다. 두루말린(wrapped) 현상을 보여주는 위상 스펙트럼은 두 자료 모두 전형적인 혼합위상임을 나타낸다.

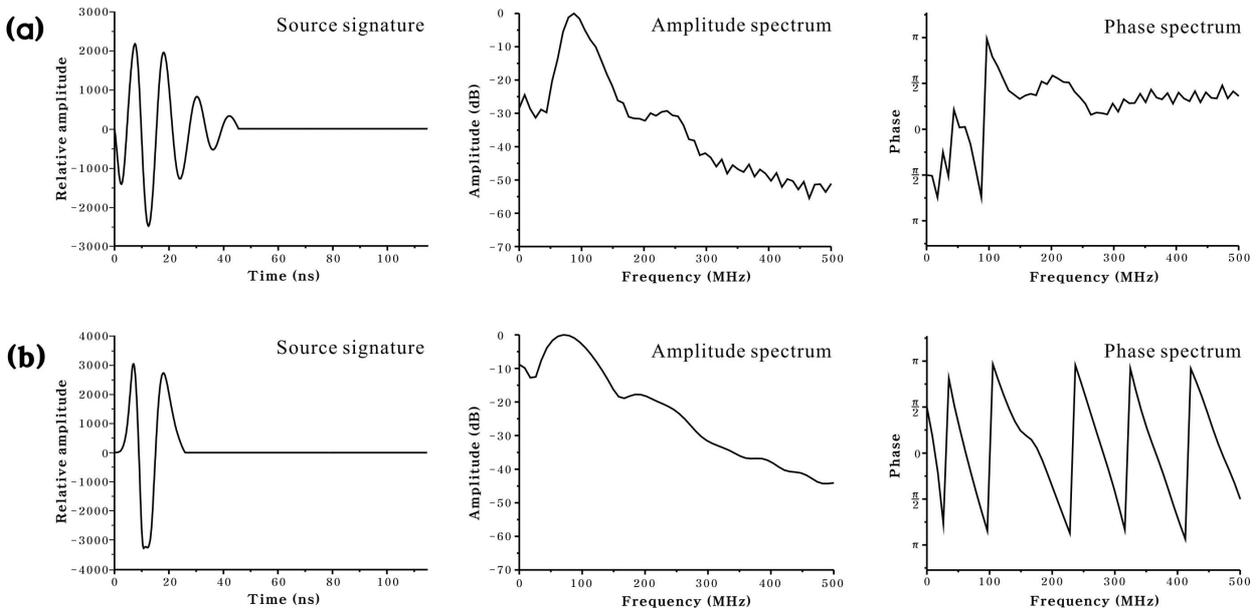
#### 4. 신호파형 역대합

기하학적 보정을 위해서 이득조절된 자료의 자기상관도를 분석하여, Wiener 필터의 연산자 길이를 50 ns 으로 결정하고 최소자승법에 기초하여 단위 예측거리를 갖는 스파이크 역대합을 실시하였다. 기반암 상부의 미

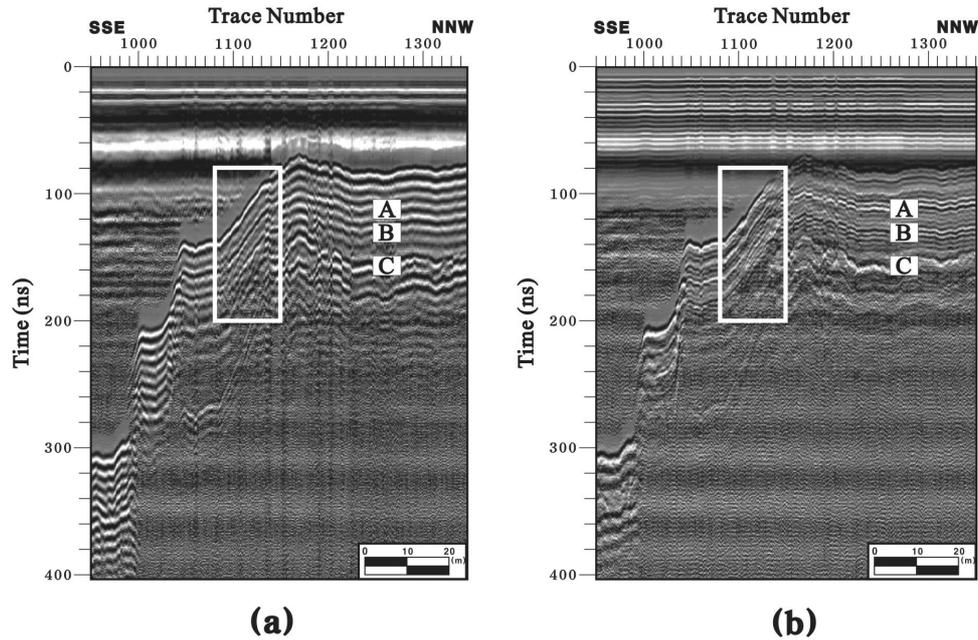
고결 퇴적층군을 3개 퇴적층으로 구분할 수 있으나, 울림현상으로 인하여 신호의 구분이 모호하게 되어 만족스럽지 못하다(Fig. 4a). 이에 비하여 앞에서 기술한 방법의 신호파형 역대합하여 얻은 결과(Fig. 4b)는 수직해상도가 매우 향상되고 분별력(definition)이 좋은 바람직한 결과를 보인다.

측점번호 1080~1150번, 시간 80~200 ns 부분만을 확대한 Fig. 5의 GPR 단면은 이런 현상을 더욱 잘 나타낸다. 소양댐에 의해서 수몰되기 이전의 하천(paleo-channel) 경계 부근의 퇴적층 내부의 층서가 역대합 이전 단면(Fig. 2b)에서는 전혀 인지되지 않는다. Wiener 필터 적용 후(Fig. 5a)에는 3개 층 정도로 구분이 가능하며, 신호파형 역대합 결과(Fig. 5b)에서는 3개 이상의 주요 층경계 뿐만 아니라 이 층 내부의 세밀한 층서상태까지도 해석이 가능하다. 실제로 측점 1140번에서 구한 레이다그램의 평균 진폭스펙트럼(Fig. 6)은 역대합 자료처리 이후에 평탄하고 대역폭이 넓어진 양상을 보인다. 특히 파형신호 역대합 후에는 진폭의 최대치가 250 MHz 부근까지 높아진 모습을 보여서, 수직분해능이 향상되었음을 개관적으로 입증한다.

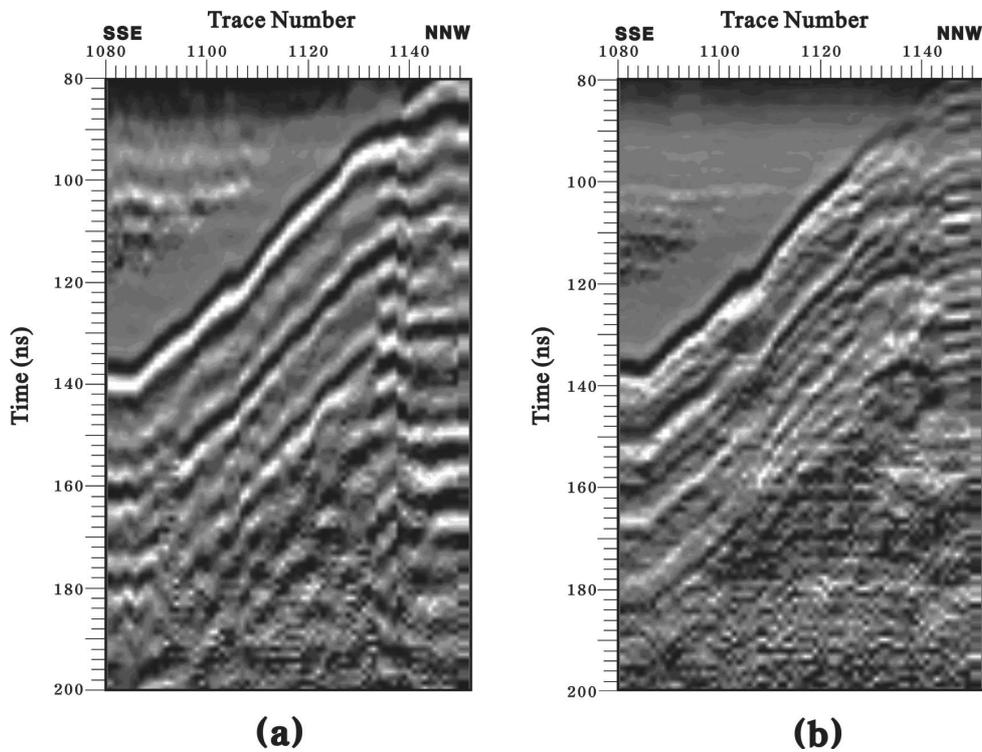
종합적으로 볼 때, 동일한 경계면서 반사된 레이다파



**Fig. 3** Signatures (a) extracted from reflection signals and (b) recorded in the air using the same 100 MHz antenna. The width of dominant frequency in the middle figure of (b) is wider than that of (a). Both phase spectra indicate the signatures are of mixed phase.



**Fig. 4** Deconvolved output sections using (a) the Wiener filter and (b) the signature deconvolution. Both deconvolution methods increased vertical resolution so that an apparent single layer in Figure 2 is resolved into three (A, B, and C) or more sedimentary layers. Definition of boundary is greatly enhanced in (b) compared with the output from the Wiener filter in (a). For display purposes, an automatic gain control with a 30 ns length was applied. The radar data in the box are enlarged in Figure 5.



**Fig. 5** Enlarged sections of the deconvolved output. The signature deconvolution greatly enhanced both vertical resolution and definition so that detailed stratigraphic features inside each sedimentary unit can be interpreted. For display purposes, an automatic gain control with a 30 ns length was applied.

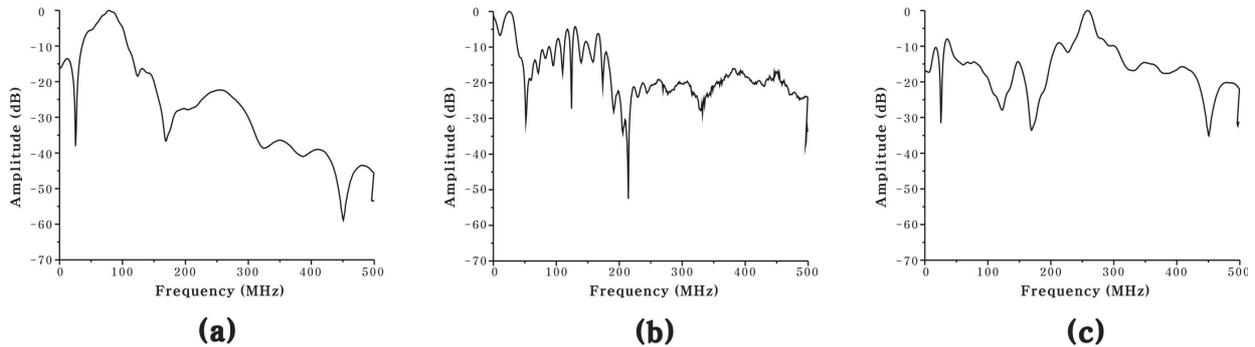


Fig. 6 Amplitude spectra of (a) the input data, and the outputs of (b) the Wiener deconvolution and (c) the signature deconvolution.

를 중합하는 매우 간단한 방법으로 추출한 신호파형을 이용한 역대합 결과는 신호파형의 위상 형태를 가정하지 않으므로, 최소위상을 가정하는 Wiener 필터보다 분해능과 분별력 모두 크게 향상된 좋은 결과를 보인다. 이 방법은 관심 대상인 일부 특별한 부분을 정확히 해석하는데 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 반사시간별로 신호파형을 별도로 추출함으로써, 시간에 따라 신호파형이 심하게 변하는 특성을 가진 GPR 자료에 효과적으로 적용시킬 수 있다.

## 5. 결과 및 토의

동결된 소양호 표면에서 중심주파수 100 MHz인 안테나를 이용하여 기록한 시험자료에서 추출한 신호파형을 이용한 역대합 결과를 기존의 Wiener 역대합 방법과 비교하였다. 호저면 반사파의 Wiener 필터 적용 결과는 한 개의 층으로만 인지되던 입력자료보다 수직해상도가 높아져서 3개 층까지도 해석할 수 있으나, 신호파형이 최소위상이 아닌 데서 발생하는 낮은 분별력으로 울림현상이 심한 자료 사이에서는 반사면 존재를 객관적으로 인식하기 어려운 문제가 있다. 호저면 반사파를 정렬하고 수평중합하여 구한 개략적 신호파형을 이용한 역대합은 분별력이 높아서 호저면 부근 퇴적층이 3개 이상의 주요 층으로 구성되어 있는 모습을 명확히 보여 줄 뿐만 아니라, 수직분해능이 높아서 각 층 내부의 세밀한 모습까지 보여준다. 파형신호 역대합 후의 진폭스펙트럼은 주파수 대역이 크게 넓어져서 수직분해능이 향상된 모습을 보인다. 이 역대합 방법은 반사시간별로 신호파형을 별도로 추출함으로써, 시간에 따라 신호파형이 심하게 변하는 특성을 가진 레이다파에 효과적으로 적용시킬 수 있다.

## 사 사

이 논문은 강원대학교 자원개발연구소의 지원으로 수행된 연구 결과임을 밝히며, 추운 겨울 얼은 호수 위에서 현장시험자료 획득에 도움을 주신 세코지오 안영돈 부장, 이대근 과장, 심민철 대리과 강원대학교 탄성파탐사 실험실 이소영, 이창민, 황윤구 대학원생, 그리고 전광민, 이재훈 학생들에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김정찬, 고희재, 이승렬, 이창범, 최성자, 박기화, 2001, 한국지질도(1:250,000), 강릉속초 지질도폭 및 설명서, 한국지질자원연구원, 76 p.
- Jurkevics, A. and Wiggins, R., 1983, A comparison of source deconvolution methods, 53th Annual International Meeting: Society of Exploration Geophysicists, 431-433.
- Loewenthal, D. and Jakubowicz, H., 1983, Wave equation-based source signature deconvolution, 430-431.
- Porsani, M.J. and Ursin, B., 1996, Mixed-phase deconvolution of seismic and ground penetrating radar data: Annual Meeting Abstracts, Society of Exploration Geophysicists, 1603-1606.
- Reynolds, J.M., 1997, An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 796 p.
- Robinson, E.A. and Treitel, A., 1980, Geophysical Signal Analysis, Prentice Hall.
- Turner, G., 1994, Subsurface radar propagation deconvolution, Geophysics, 59, 215-223.
- Xia, J., Weis, T., Franseen, E., and Miller, R., 2001, Deterministic deconvolution of ground-penetrating-radar data at a limestone quarry, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Denver, Colorado, 1-12.
- Yilmaz, O., 1987, Seismic data processing, SEG, 526 p.
- Ziolkowski, A., 1991, Why don't we measure seismic signatures?, Geophysics, 56, 190-201.