

3차원 Kirchhoff 구조보정을 이용한 지표레이다자료의 영상화

조동기¹⁾ · 서정희²⁾ · 최윤경²⁾

Imaging of Ground Penetrating Radar Data Using 3-D Kirchhoff Migration

Dong Ki Cho¹⁾, Jung Hee Suh²⁾ and Yoon Kyoung Choi²⁾

요 약 : 구조물의 안전진단을 위한 비파괴 검사 분야에 사용되는 지표레이다 자료를 정밀하게 영상화시켜줄 수 있는 3차원 구조보정기법을 살펴보았다. 이 연구에서는 탄성과 자료처리를 위해 개발된 3차원 Kirchhoff 중합전 심도구조보정기법을 이용하여 구조물 안전진단시 중요대상체인 콘크리트 내의 철근, 균열 등을 3차원적으로 영상화시켰다. 철근과 공동 대상체가 동시에 존재하는 경우 물성차이의 구분이 가능토록 영상화되었고, 여러 가지 크기의 철근이 존재하는 경우 XX배열법에 의한 영상이 YY배열법보다 더 높은 분해능을 보여주었다. 따라서 보다 정밀한 정보를 얻기 위해서는 일반적인 YY배열 외에 XX배열법의 영상화 결과를 연계하여 분석하는 것이 필요하다. 마지막으로 주향이 교차하는 두 개의 철근이 다른 심도에 존재하는 경우에는 상부의 철근은 정확하게 영상화되나 철근의 높은 전도도로 인하여 하부의 철근은 실제크기보다 좀 더 크게 영상화되는 한계를 보여주었다.

주요어 : 지표레이다, Kirchhoff 중합전 심도구조보정, YY배열, XX배열

Abstract : We made a study of 3-D migration which could precisely image data of GPR (Ground Penetrating Radar) applied to NDT (Non-Destructive Test) field for the inspection of structural safety. In this study, we obtained 3-D migrated images of important targets in structuresurvey (e.g. steel pipes, cracks) by using 3-D Kirchhoff prestack depth migration scheme developed for seismic data processing. For a concrete model consisting of steel pipe and void, the targets have been well defined with opposite amplitude according to the parameters of the targets. And migrated images using Parallel-Broadside array (XX configuration) have shown higher resolution than those using Perpendicular-Broadside array (YY configuration) when steel pipes had different sizes. Therefore, it is required to analyze the migrated image of XX configuration as well as that of general YY configuration in order to get more accurate information. As the last stage, we chose a model including two steel pipes which cross each other. The upper pipe has been resolved clearly but the lower has been imaged bigger than the model size due to the high conductivity of the upper steel.

Keywords : Ground Penetrating Radar (GPR), 3-D Kirchhoff prestack depth migration, Parallel Broadside, Perpendicular Broadside

서 론

지표레이다(Ground Penetrating Radar) 탐사법은 수십 내지 수백 MHz의 전자기파를 송신원으로 쓰는 탐사방법으로 탐사가 간편하고 해상도가 뛰어나 지하 매설물 탐사, 천부 지반 조사를 비롯하여 각종 건축 및 토목 구조물의 안전진단을 위한 비파괴검사에 널리 이용되고 있다.

지표레이다 자료의 해석은 이득제어, 대역통과필터링 등 간단한 자료처리후 얻어지는 레이다그램으로부터 육안으로 지하 구조를 규명하는 방법이 주로 이루어지고 있으나, 이상체의 심도나 크기에 대한 정확한 해석을 위해서는 정밀하면서도 신속한 자료처리방법이 요구된다. 또한 공간분해능 및 신호대 잡음

비를 향상시켜 이상체의 위치 및 크기를 정확히 탐지하기 위한 3차원 탐사 및 구조보정 기법의 필요성도 날로 증가하고 있다.

레이다 탐사는 원리상 탄성과 탐사와 마찬가지로 파동의 전파, 반사 및 굴절 성질 등을 이용하므로, 탄성과 자료처리시 사용되는 각종 구조보정기법의 적용이 가능하다. 탄성과 탐사의 자료처리방법을 적용함으로써 지표레이다 자료를 향상시킨 예는 이미 여러 연구를 통해 증명되었으며(Fisher *et al.*, 1992, 1994), 최근에는 컴퓨터 기술의 발달로 많은 메모리와 계산시간을 필요로 하는 탄성과 자료처리 기술 또한 그 적용이 활발하게 연구되고 있다. Carl Leuschen and Richard Plumb(1999)은 matched-filter를 기반으로 한 역시간 구조보정기법을 지표

*2002년 7월 9일 접수

1) (주)쓰리텍이엔지

2) 서울대학교 지구환경시스템공학부

레이다 자료에 적용하였고, Hideki Hayakawa and Akira Kawanaka(1998)는 매질의 속도를 자동으로 결정하는 알고리즘을 이용한 파수-주파수 구조보정을 통하여 지하의 철근을 영상화하였다. 또한, Lehmann and Green(2000)은 불규칙 지형을 고려한 구조보정을 통해 기존자료처리보다 향상된 영상을 얻을 수 있음을 보여주었고, Moran et al.(2000)은 쌍극자 안테나의 방사패턴을 고려한 Kirchhoff 구조보정을 2차원 및 3차원 지표레이다 자료에 적용하였다.

이러한 연구의 연장으로 이 연구에서는 Kirchhoff 중합전 심도구조보정기법을 3차원 GPR 모형반응계산자료에 적용시켜 그 적용가능성 및 효용성을 알아보려고 하였다. 여러 자료처리 기법중 Kirchhoff 중합전 심도구조보정기법은 정확한 속도모델이 주어질 경우 다른 기법에 비해 정확한 구조보정이 가능하며 유한차분을 이용한 파동방정식구조보정에 비해 적은 기억용량을 필요로 한다는 장점으로 3차원 GPR자료에 적합하다.

이 연구에서는 토목 및 건설 현장에서의 구조물 안전진단을 고려하여, 철근 및 공동대상체가 있는 콘크리트 모형을 상정하여, 모형반응계산을 통해 3차원 자료를 얻은 뒤 3차원 Kirchhoff 중합전 심도구조보정을 적용하였다. 한편 GPR탐사에 사용되는 안테나는 방향성을 가지므로 여러 가지 배열법의 사용이 가능하며 배열에 따라 모형반응도 차이를 보이게 되는데, 이러한 안테나 배열에 따른 구조보정효과를 고찰해보기 위하여 다양한 크기의 철근을 포함하는 콘크리트 모형에 대하여 YY배열(Perpendicular-Broadside)과 XX배열(Parallel-Broadside)의 두 가지 자료를 계산하여 구조보정을 적용시켜 보았다. 또한 보다 실질적인 적용가능성을 알아보기 위하여 각기 다른 심도에 주향이 교차하는 두 개의 철근이 있는 모형에 대하여 모형반응계산을 실시하고 Kirchhoff 중합전 심도구조보정을 적용하였다.

이 론

Kirchhoff 구조보정식은 다음의 스칼라 파동방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \psi = 0 \tag{1}$$

여기서, c 는 매질의 속도를 ∂_t 는 시간에 대한 편미분을 나타낸다.

경계조건에 무관하게 음원과 관측자 좌표계에 의해 결정되는 그린함수를 다음 방정식의 해로 정의한다.

$$\nabla^2 \Gamma - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 \Gamma = -4\pi \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t') \tag{2}$$

식 (2)의 양변에 ψ 를 곱하고 파동방정식 (1)에 Γ 를 곱한

후에 빼주면 다음 식을 얻는다.

$$4\pi \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t') \psi = \Gamma \nabla^2 \psi - \psi \nabla^2 \Gamma + \frac{1}{c^2} (\Gamma \partial_t^2 \psi - \psi \partial_t^2 \Gamma) \tag{3}$$

식 (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$4\pi \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t') \psi = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \psi - \psi \nabla \Gamma) + \frac{1}{c^2} \partial_t (\Gamma \partial_t \psi - \psi \partial_t \Gamma) \tag{4}$$

델타함수를 제거하기 위해 양변을 공간 및 시간에 대하여 적분하면

$$\xi(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Omega} \nabla \cdot [\Gamma \nabla \psi - \psi \nabla \Gamma] dv' dt' + \frac{1}{c^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Omega} \partial_t [\Gamma \partial_t \psi - \psi \partial_t \Gamma] dv' dt', \quad \forall \mathbf{r} \in \mathfrak{R}^3 \tag{5}$$

여기서 $\xi(\mathbf{r})$ 의 값은 \mathbf{r} 이 Ω 의 안쪽에 있는 경우 4π , 바깥쪽에 있는 경우 2π 이며 그 외의 경우에는 0이다.

식 (5)의 우변 첫 번째 적분항은 다이버전스 이론에 따라 $\partial\Omega$ 에 대한 면적분으로 변환된다. 두 번째 적분항은 시간에 대한 부분적분을 이용하여 다음과 같이 정리된다.

$$\left[\int_{\Omega} \Gamma \partial_t \psi - \psi \partial_t \Gamma dv' \right]_{-\infty}^{\infty} \tag{6}$$

파가 전파되기 이전인 $t' = 0$ 까지 ψ 와 $\partial_t \psi$ 가 0이라고 가정하면 적분구간의 아랫부분은 0이 된다. 또한 그린함수가 일정한 순간 전까지는 존재하지 않고 에너지가 유한한 조건을 만족하고 Sommerfeld 방사조건을 가정하면 적분구간의 윗부분도 0이 된다. 이를 이용하여 식 (5)를 정리하면 다음의 Kirchhoff 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\xi(\mathbf{r}) \psi(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\partial\Omega} [\Gamma \nabla \psi - \psi \nabla \Gamma] \cdot \mathbf{n} da' dt', \quad \forall \mathbf{r} \in \mathfrak{R}^3 \tag{7}$$

Kirchhoff 적분이론을 이용하면 경계에서의 ψ 와 그 미분값이 주어진다면 공간상의 모든 점에서의 파동방정식의 해 ψ 를 구할 수 있게 된다. 경계에서의 ψ 를 f' , 미분값을 g 라고 하고 경계면에서 0이 되는 그린함수를 정의한다면 식 (7)은 다음과 같이 간단해진다.

$$\psi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\infty} \int_{\partial\Omega} f(\mathbf{r}', t') \partial_n \Gamma(\mathbf{r}, t; \mathbf{r}', t') da' dt' \tag{8}$$

지하구조의 속도를 상속도로 가정하면, 경계면에서의 값이 0이 되는 그린함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Gamma(\mathbf{r}, t; \mathbf{r}', t') = \frac{\delta(t - t' + R/c)}{R} - \frac{\delta(t - t' + R/c)}{R'} \tag{9}$$

여기서

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \text{ 이고}$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2} \text{ 이다.} \quad (10)$$

이 그린함수를 식 (8)에 대입하면,

$$\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \int_{z'} f(\mathbf{r}', t') \partial_{z'} \frac{\delta(t-t'+R/c)}{R} da' dt' \quad (11)$$

델타함수의 특성을 이용하여 시간에 대하여 적분을 하면,

$$\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{2\pi} \partial_z \int_{z'=0} f(\mathbf{r}', t+R/c) da' \quad (12)$$

와 같이 정리되는데 이것이 Schneider의 Kirchhoff 구조보정식이다(Schneider, 1978).

Kirchhoff 구조보정은 지하의 모든 격자점을 회절점으로 가정하여 수신기에 기록된 자료를 심도단면상에서 주시가 같게 되는 모든 회절점에 중합하는 구조보정기법이다. 매질이 균질할 때, 한 시점의 관측된 자료를 구조보정하면 2차원의 경우 송신원과 수신기를 초점으로 하는 타원체적을 이루며, 3차원의 경우에는 타원체(ellipsoid) 모양을 이룬다.

결과 및 고찰

이 연구에서는 Kirchhoff 구조보정의 타당성 및 효용성을 고찰하기 위하여 유한차분을 이용한 3차원 수치모형반응계산(최윤경, 2001) 알고리즘으로 구해진 자료에 3차원 Kirchhoff 구조보정을 적용하였다.

실험모형으로는 구조물의 안전진단에 사용되는 지표레이다 탐사를 가정하여 구조물에서 많이 볼 수 있는 콘크리트 매질에 철근이나 균열에 해당되는 공동이 있는 모형을 선정하였다. 또한 대상체의 크기 및 안테나 배열에 따른 구조보정효과를 알아보기 위해 여러 가지 굵기의 철근을 포함하는 콘크리트 구조물에 대해서도 구조보정을 수행하였다.

마지막으로 구조보정의 3차원 효과를 살펴보기 위해 각기 다른 심도에 주향이 교차하는 두 개의 철근이 있는 콘크리트 구조물에 대한 반응계산 및 구조보정을 실시하여 결과를 고찰하였다.

물성에 따른 구조보정 효과 고찰

대상체의 물성에 따른 반응 결과를 고찰하기 위해 콘크리트 구조물에 철근과 빈 플라스틱 관이나 균열에 해당될 수 있는 공동 대상체가 있는 모형을 선택하였다(Fig. 1). 대상체의 직경은 철근, 공동 모두 3 cm이며 심도 15 cm에 위치하고 있다. 배경매질인 콘크리트는 전기전도도가 16.78 mS/m, 상대유전율이 9.473이며, 철근은 10⁶ S/m, 상대유전율이 2이고 공동대상체의 물성은 공기중과 동일하게 상대유전율이 1.0, 전기전도도가 0 S/m이다.

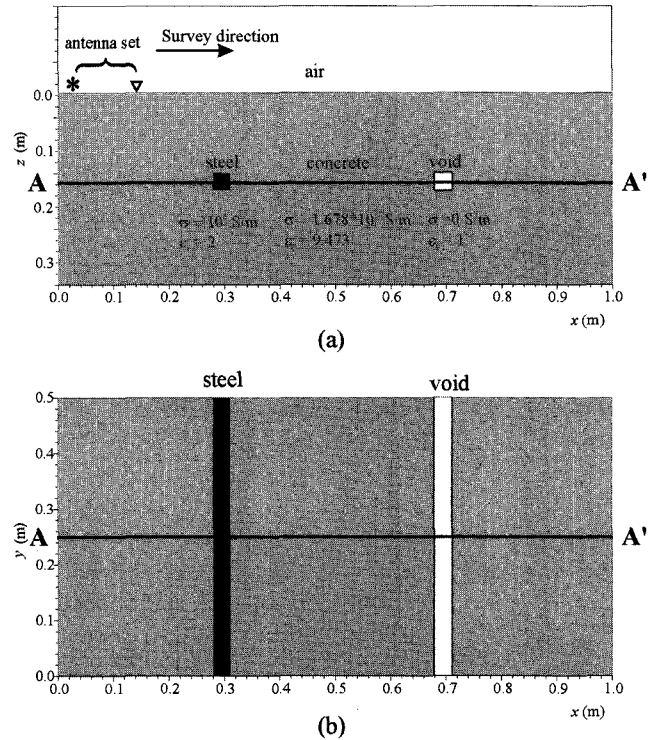


Fig. 1. Sectional (a) and plane (b) views of a model consisting of a buried steel pipe and a rod shape void. The shooting line is perpendicular to the strike of the pipes.

일반적인 GPR 탐사법인 탐사측선에 송수신 안테나가 모두 직교하는 YY 배열로 16.5 cm 길이의 안테나를 사용하였으며 첫 번째 송신 안테나의 x방향 위치는 0.02 m, 송수신 안테나의 간격은 0.12 m, 탐사 간격은 0.02 m로 수행되었다. 또한 탐사측선은 y=0.1 m부터 시작하여 0.02 m 간격으로 0.49 m까지 총 25개 측선으로 구성되었다. 반응 계산 결과인 시간 단면(Fig. 2)을 살펴보면 두 대상체에 의한 회절효과 전체적으로는 비슷한 양상을 보이나, 철근에서 반사된 파의 위상과 공동에서 반사된 파의 위상이 반대가 됨을 알 수 있었다. 이는 점송신원인 경우 수평층 가정하에 콘크리트/철근간 반사계수와 콘크리트/공동대상체간 반사계수의 부호가 반대인 것과 일치한다(Ward and Hoffmann, 1988).

계산된 모형 반응 결과를 이용하여 3차원 Kirchhoff 구조보정을 수행한 영상을 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3(a)의 xz 단면도에서 두 개의 이상체가 정확한 위치에 정확한 크기로 영상화되었다. 시간 단면도에서는 정확히 파악할 수 없는 심도 및 이상체의 크기를 심도 단면도에서는 정확히 해석하는 것이 가능하였다. 또한 시간단면의 회절곡선에서 위상이 반대로 나타난 것과 마찬가지로 구조보정된 단면에서도 왼쪽의 이상체와 오른쪽 이상체의 위상이 반대가 되게 에너지가 중합되어 나타나므로 쉽게 대상체의 물성차이를 알 수 있었다. Fig. 3(b)에 도시된 z=0.15m에서의 xy 평면도를 통하여 두 대상체를 더욱 명확히 구분할 수 있었으며, 철근의 직경도 실제 모형상의 철

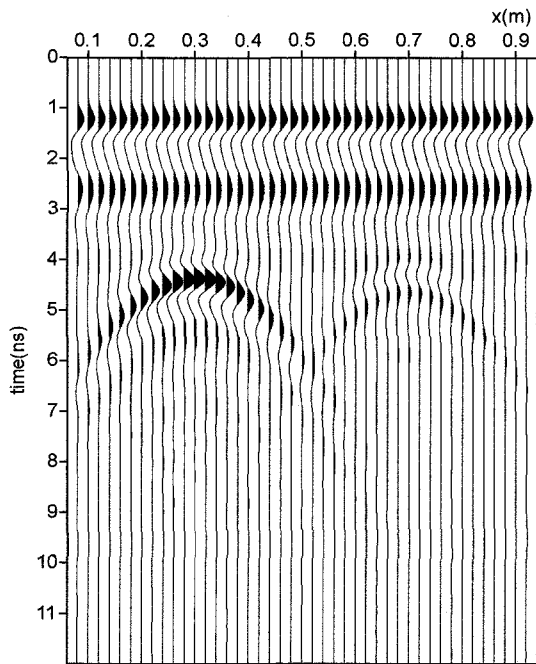


Fig. 2. Radargrams of YY configuration for the model shown in Fig. 1. The diffractions from the steel pipe have positive amplitude but those from the void have negative one.

근 직경과 거의 동일하게 영상화되었다. 단면도 및 평면도상의 철근의 중심을 통과하는 직선 AA'을 따라 중합된 진폭을 정규화하여 도시하였는데(Fig. 3(c)), 대상체의 물성에 따라 진폭의 부호가 반대임을 확인할 수 있었다.

안테나배열에 따른 구조보정효과 비교

구조물 안전 진단시, 설계도와 시공 상황을 비교하려면 사용된 철근의 굵기가 정보가 될 수 있다. Fig. 4와 같이 콘크리트 구조물에 여러 굵기의 철근이 있는 경우 모형을 선정하여 모형 반응을 계산하였다. 또한 안테나 배열법에 따라 다른 정보를 제공해 줄 수 있으므로 XX배열과 YY배열 두 가지 배열법으로 자료를 얻어 각각에 구조보정을 적용시켜 그 결과를 비교분석하였다.

YY배열의 경우

YY배열법에 의해 계산된 모형반응 시간단면을 Fig. 5에 도시하였다. 레이더그램을 살펴보면 3개의 철근으로 인한 회절곡선의 양상은 동일하며 철근의 굵기에 따라 회절되는 에너지의 차이로 인하여 진폭의 미세한 차이가 보이나 회절곡선만으로는 철근의 굵기를 판단할 수는 없다.

이 자료에 대하여 3차원 구조보정후 xz 단면도와 심도 z=0.155m에서의 xy 평면도를 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 각각 도시하였다. 단면도에서 볼 수 있듯이 세 개의 철근 모두 정확한 심도 및 x 축상 위치에 영상화되었으며 4cm의 철근과 2cm의 철근은 영상화된 에너지에 있어서 확실한 차이를 보인다. 그러

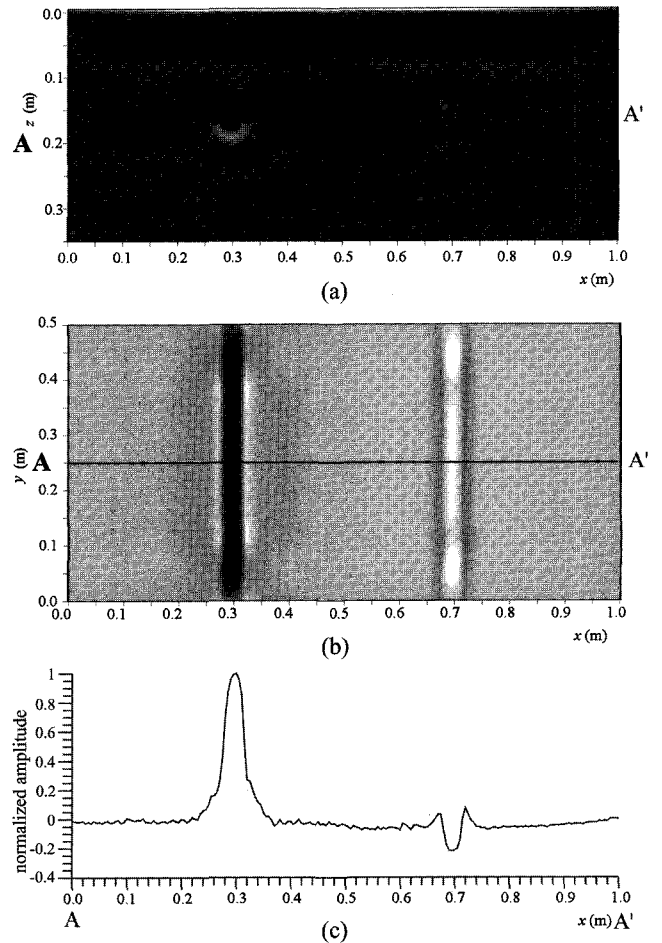


Fig. 3. Kirchhoff migrated images of for the model shown in Fig. 1. (a) xz section image at y=0.25m. (b) depth-sliced image at the depth of 0.165m. (c) The normalized amplitude vs. distance along the line AA'. Strong positive sign indicates the position of steel pipe and weak negative sign shows the location of the void.

나 1cm의 철근과 2cm의 철근은 영상에 큰 차이를 보이지 않는데 이는 분해능의 한계 때문인 것으로 판단된다. xy 단면도의 경우에도 4cm의 철근과 2cm의 철근은 에너지가 집중된 정도가 달라 구분이 어느 정도 가능하나 1cm의 철근과 2cm의 철근은 거의 동일한 크기로 영상화되었다. 직선 AA'를 따라 진폭을 도시한 결과(Fig. 6(c))를 살펴보면 각 철근의 중심 위치에서 진폭은 최대치를 보이므로 철근의 위치는 정확히 판단할 수 있지만, 실제 철근의 크기보다 넓게 분포되어 있어 철근의 크기를 정확히 결정할 수 없었다.

XX배열의 경우

지표레이더 탐사에 사용되는 쌍극자 안테나는 방향성이 존재한다. 즉 동일한 지하구조라 할지라도 안테나배열에 따라 그 반응이 달라지게 된다.

모형반응계산시 XX 배열을 이용한 경우 반사에너지의 차이로 인하여 YY 배열과는 상이한 결과가 나타났다. Fig. 7의 레

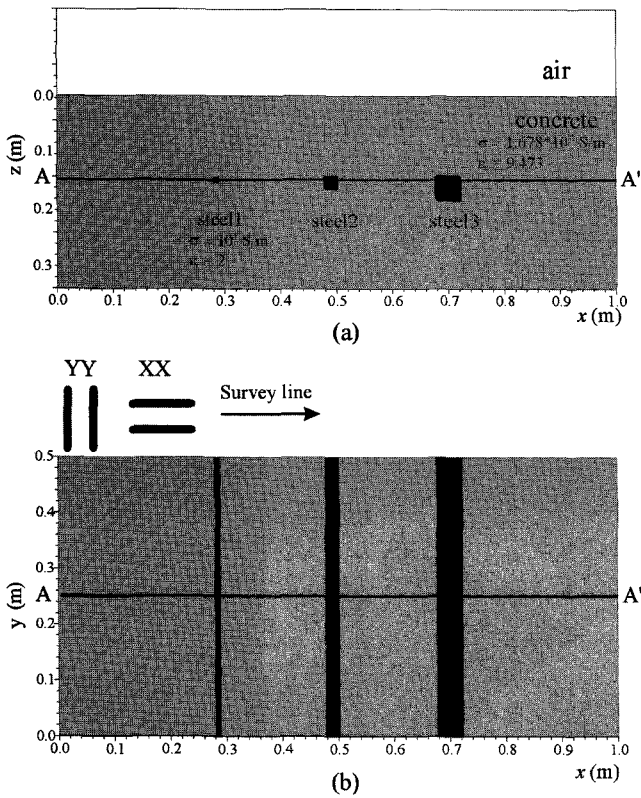


Fig. 4. Sectional (a) and plane (b) views of a model including three buried steel pipes with different size. The widths of the pipes are 1 cm, 2 cm, and 4 cm, respectively.

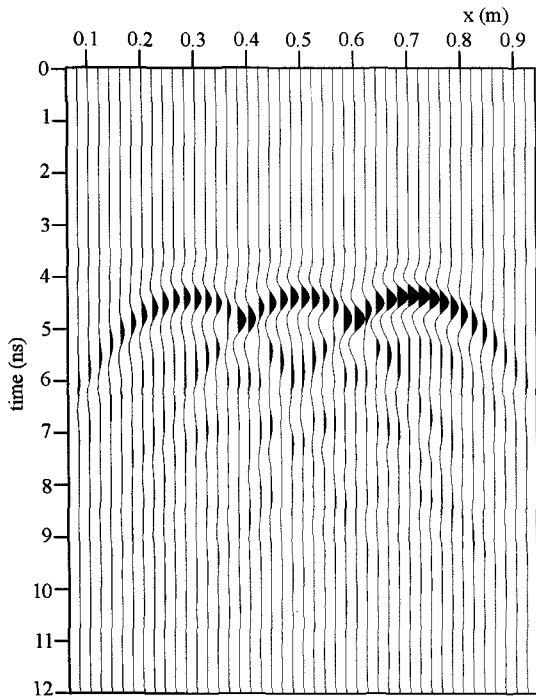


Fig. 5. Radargrams of YY configuration for the model shown in Fig. 4. There are three hyperbolas from the different size steel pipes.

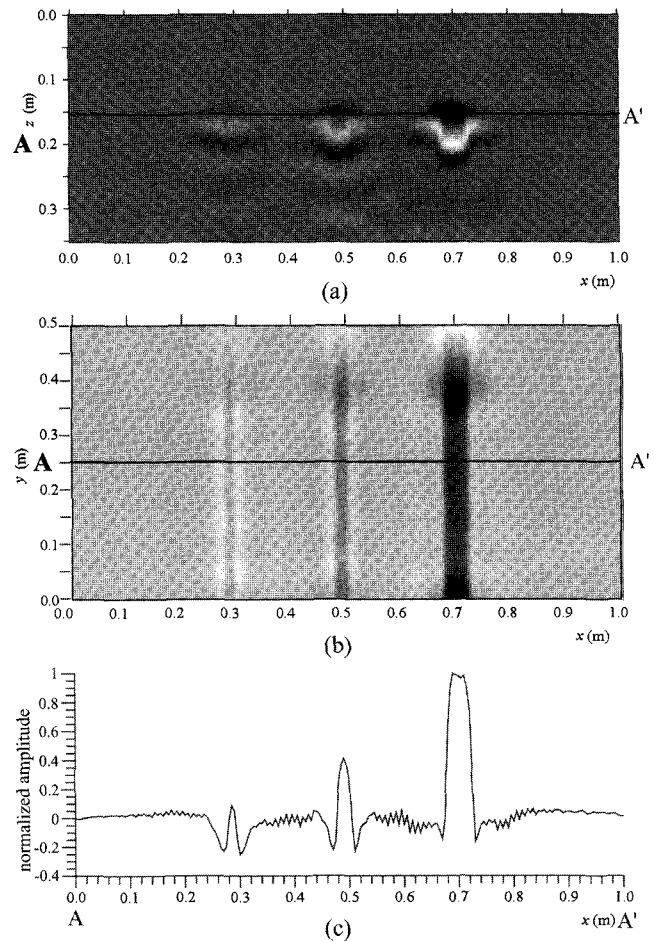


Fig. 6. Kirchhoff migrated images of the radargram shown in Fig. 5. (a) xz section image at $y=0.25\text{m}$. (b) depth-sliced image at the depth of 0.155m . (c) The normalized amplitude vs. distance along the line AA'. It shows three peaks caused by steel pipes.

이다그램에서 보여주듯이 YY배열에 비해 회절곡선이 좀 더 편평하며 좁으며 첫 번째 회절곡선 윗부분에 ringing이 나타남을 확인할 수 있었다. 전도체의 경우 전기장이 전도체인 철근을 만나면 투과하지 못하며 철근에서 유도된 전류로 인해 전자기파가 대상체 주변을 도는 현상이 생기는데, 이것은 마치 안테나 양 끝점에서 계속 반사되는 효과와 비슷하다(최윤경, 2001).

구조보정을 실시한 xz 단면도(Fig. 8(a))를 살펴보면 YY 배열과 마찬가지로 철근이 정확한 위치에 영상화되었다. 차이점은 YY 배열에서 철근이 실제 모양과 달리 원형으로 영상화된 것에 비해 XX배열시는 실제 모양과 가까운 사각형으로 영상화된 것이다. 또한 YY배열시보다는 1cm 굵기의 철근과 2cm 굵기의 철근의 구분이 용이했다. 레이다그램에 나타나는 ringing은 매질에서의 전자기파의 속도와 대상체의 반경에 따라 달라지게 되는데 구조보정시 이러한 철근 반경에 의한 효과가 정보로 반영된 것으로 생각된다. 심도 $z=0.155\text{m}$ 에서

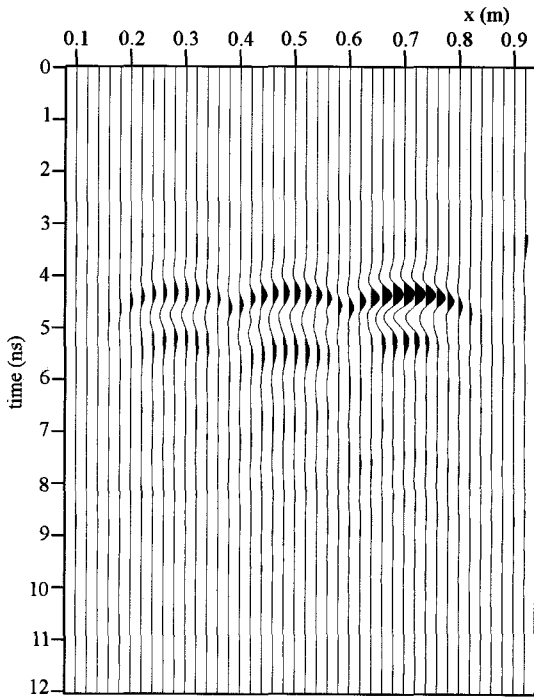


Fig. 7. Radargrams of XX configuration for the model shown in Fig. 4. Three hyperbolas show different reflection energy.

의 xy 평면도(Fig. 8(b))에서는 진폭의 차이가 더욱 분명하여 YY 배열시에는 거의 구분이 어려웠던 1 cm의 철근과 2 cm 철근의 구분이 가능하였다. 직선 AA'를 따라 중합된 진폭을 살펴보면(Fig. 8(c)) YY배열시와 달리 철근의 크기에 따라 진폭의 차이를 보인다. 즉 YY배열시에는 철근의 크기에 무관하게 진폭의 최대치가 거의 비슷하였지만 XX배열시에는 진폭이 철근의 크기에 비례하여 나타났다. 뿐만 아니라 최대치를 중심으로 한 진폭의 분포양상으로부터 철근의 크기를 정확히 판명할 수 있었다. 이로부터 XX배열법이 비록 YY배열법에 비해 그 반응의 크기는 작지만 구조보정시 보다 높은 분해능을 보임을 확인할 수 있었다.

직교하는 두 개의 철근을 포함하는 모형

이상체의 주향과 탐사축선이 직교할 경우에는 이상체의 상부에 회절곡선이 나타남으로써 이상체의 측정이 가능하나 여러 방향으로 이상체가 존재하는 경우 회절곡선이 복잡하게 나타나므로 그 해석이 어려워지며 3차원탐사가 필수적으로 요구된다.

현장에서의 이러한 경우를 상정하여 Fig. 9와 같이 심도에 차이가 있고 주향이 서로 직교하는 두 개의 철근이 존재하는 모형에 대하여 모형반응을 계산하고 구조보정을 실시하였다.

두 개의 철근 중 위쪽에 위치한 y축과 평행한 철근은 지표로부터 0.165 m 하부에 위치하고 있으며 반지름은 1.5 cm이다. 아래쪽에 위치한 x축과 평행한 철근은 0.295 m 하부에 있으며

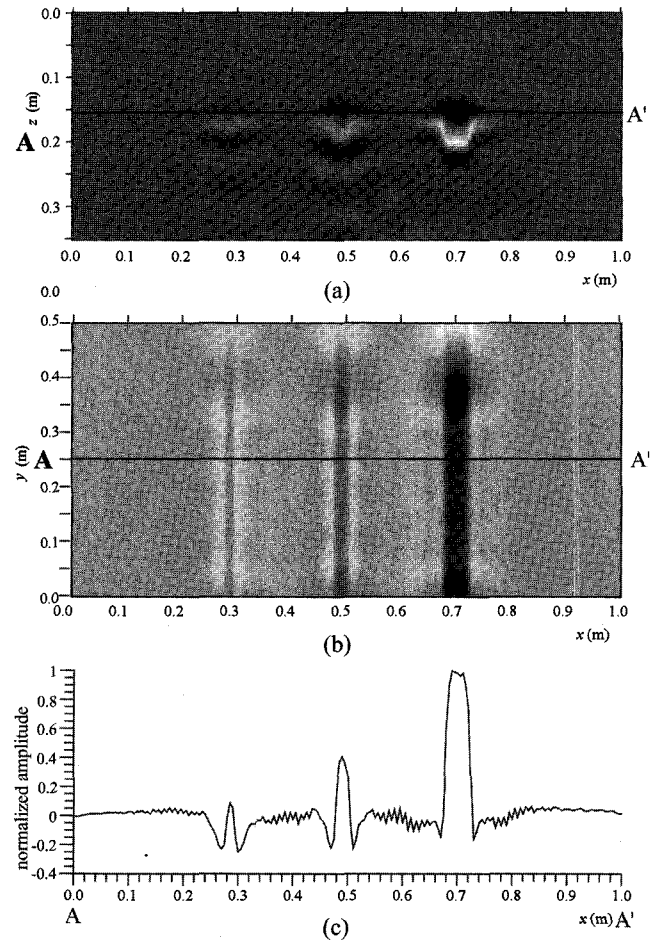


Fig. 8. Kirchhoff migrated images of the radargram shown in Fig. 7. (a) xz section image at $y=0.25m$. (b) depth-sliced image at the depth of 0.155m. (c) The normalized amplitude vs. distance along the line AA'. It shows different amplitude depending on the size of teal pipe.

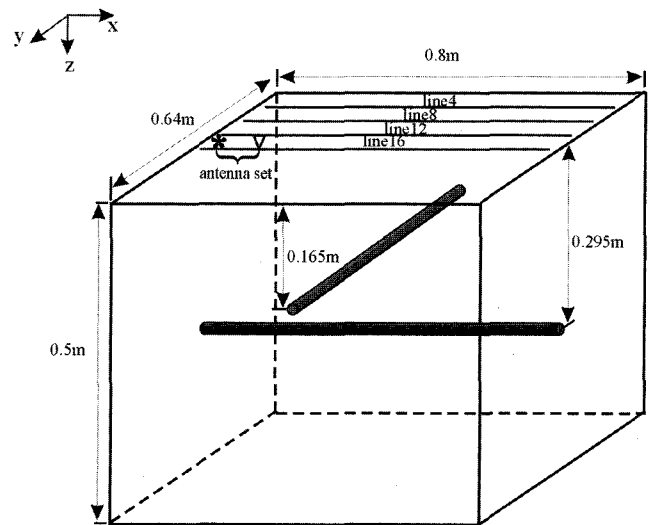


Fig. 9. A concrete model consists of two steel pipes which are perpendicular each other. The upper y-directional pipe located at the depth of 0.165m and the lower x-directional pipe located at the depth of 0.295m. Other model parameters are same as Fig. 4.

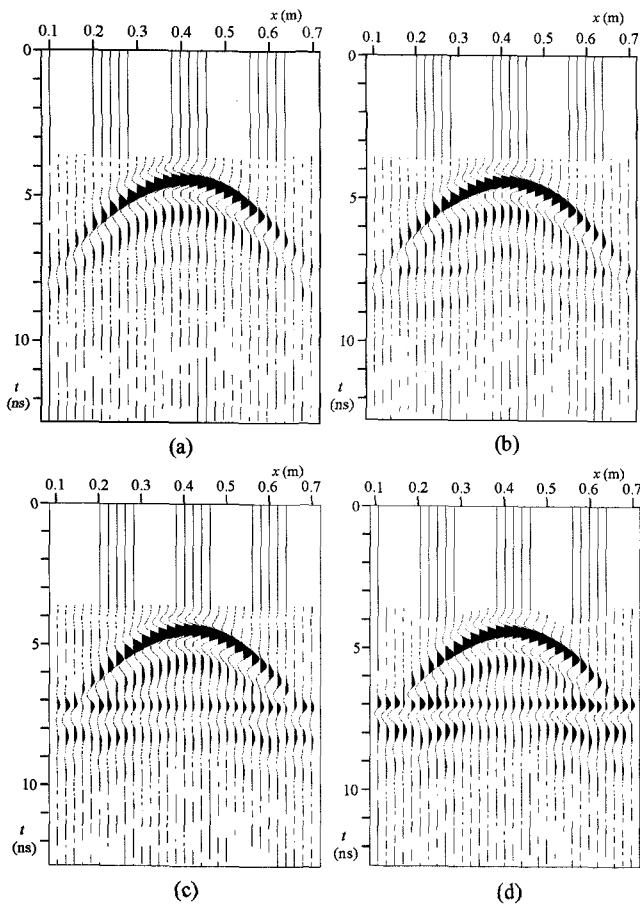


Fig. 10. Radargrams for the line4, line8, line12, and line16 shown in Fig. 9. The y-coordinates are (a) 0.08m, (b) 0.16m, (c) 0.24m, and (d) 0.32m, respectively.

반지름은 동일하게 1.5 cm이다.

모형반응계산은 앞의 모형과 마찬가지로 16.5 cm 길이의 안테나로 수행되었으며 배열은 YY배열, 측정 간격은 0.02 m이고 탐사측선간격은 0.02 m로서 측정 간격과 동일하며 총 31개 측선에 대하여 측선 별로 31개씩의 측정점을 가지므로 총 961개의 트레이스가 계산되었다.

Fig. 10에 차례로 측선4, 측선8, 측선12, 측선 16의 레이더그램을 도시하였다. $y=0.08$ m 위치에서 측정된 레이더그램(Fig. 10(a))을 살펴보면 y 축에 평행한 상부의 철근으로부터 발생하는 회절곡선이 뚜렷하게 나타났지만, 하부의 x 축에 평행한 철근으로부터 오는 신호는 상대적으로 미약했다. 그러나 탐사측선이 x 축에 평행한 철근의 직상부로 근접해감에 따라 (Fig 10(c), (d)) y 축에 평행한 철근으로 인해 생기는 회절곡선하부에 x 축에 평행한 철근으로 인한 연속적인 이벤트가 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 모형반응계산자료를 3차원 Kirchhoff 구조보정한 결과이다. Fig. 11(a)에 도시된 $y=0.32$ m에서의 xz 단면도를 보면 심도 0.15 m에 y 축과 평행한 철근이 정확하게 영상화되

었고, 그 하부에 x 축에 평행한 철근도 뚜렷하지는 않지만 비교적 정확한 심도에 영상화되었다. 단면도에서 심도 0.35 m 부분에 나타난 영상은 모형반응계산의 ringing으로 인하여 나타난 것이다. Fig. 11(c)는 $z=0.165$ m에서의 xy 평면도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 y 축 방향의 철근이 정확한 크기로 영상화되었다. 그러나 하부에 위치한 x 축 방향의 철근은 Fig. 11(d)에서 볼 수 있듯이 실제 철근의 약 두 배 정도의 크기로 영상화되었다. 이것은 상부의 철근에 따른 산란 및 회절로 인해 하부 철근까지 전자기파의 전파가 잘 되지 못하므로 그로부터 오는 신호가 미약하여 왜곡되어 일어나는 현상으로 보인다.

결론

이 연구에서는 최근 건설 및 산업부문에서 콘크리트 구조물의 안전진단 등에 널리 사용되고 있는 지표 레이더(GPR) 자료 처리에 적용할 수 있는 3차원 Kirchhoff 중합전 심도구조보정기법에 대하여 살펴보았다. 구조보정을 위한 지표레이더 자료로는 유한차분을 이용한 3차원 수치모형반응계산 알고리즘을 이용하였고 모형은 철근 및 공동 대상체가 있는 콘크리트 매질을 사용하였다.

1. 지하에 물성이 다른 철근과 공동 대상체가 존재하는 경우 레이더그램에서 회절곡의 위상이 반대로 나타나나 여러 대상체가 복합적으로 존재하는 경우 그 차이를 분명하게 규명하기 어렵다. 이 경우 구조보정을 통하여 물성이 다른 두 대상체가 뚜렷하게 구분됨을 확인하였고, 정확한 위치에 실제 모형과 거의 동일한 크기로 영상화할 수 있었다.

2. 콘크리트 내에 여러 가지 크기의 철근이 존재하는 경우 일반적인 GPR탐사법인 YY배열법에 의한 레이더그램에서는 철근에 의해 발생하는 회절곡선으로부터 철근의 크기를 추정하기 어려운 반면 동일모형에 대하여 XX배열법을 사용한 레이더그램에서는 회절에너지의 차이가 보다 분명하게 관찰되었다. 이 두가지 배열에 의한 레이더그램을 각각 구조보정하여 그 결과를 고찰한 결과 YY배열시에는 2cm와 4cm의 철근의 영상은 큰 차이를 보이나 1cm와 2cm의 철근은 구분이 가능할 만큼 큰 차이를 보이지 않았다. 반면에 XX배열에 의한 모형반응을 구조보정한 결과를 보면 2cm와 4cm의 철근 뿐만 아니라 1cm의 철근과 2cm의 철근도 구분이 가능하였다. 그 차이는 xy 평면도에서 더욱 명확하게 확인할 수 있었으며, 이로부터 XX배열법이 반응의 크기는 작지만 지하에 대한 유용한 정보를 갖고 있음을 알 수 있었고, 따라서 YY배열과 XX배열을 연계하여 사용함으로써 철근구조물에 대한 해석을 보다 정확히 할 수 있으리라 판단된다.

3. 서로 다른 심도에 주향이 교차하는 두 개의 철근이 존재하는 경우 레이더그램만으로는 하부에 위치하는 철근의 위치나 크기를 판단하기 어려웠다. 구조보정을 실시한 결과 상부의 철근은 실제 모형과 동일하게 영상화되었으며, 하부에 위치한

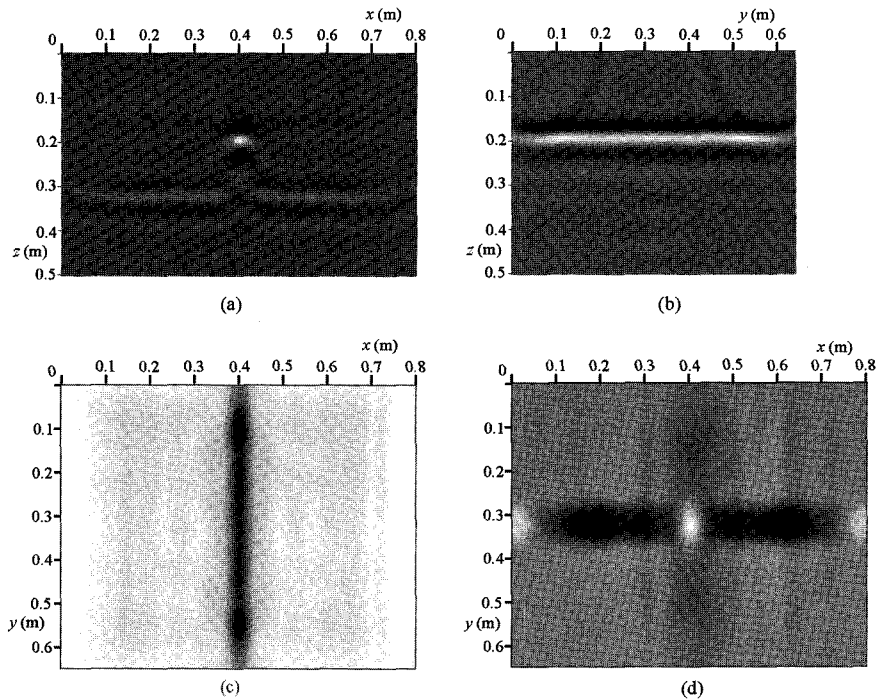


Fig. 11. The result of the 3D Kirchhoff migration for the model shown in Fig. 9.

(a) The xz section at $y = 0.32\text{m}$ and (b) yz section at $x = 0.4\text{m}$. (c) Depth-sliced image at the depth of 0.165m and (d) 0.295m . The upper steel pipe is well defined, but the lower pipe is imaged broader than the model.

철근의 경우 위치는 비교적 정확하였지만 철근의 폭보다 더 넓게 영상화되었다. 이것은 상부철근에 의한 전자기파의 산란 및 회절에 의한 영향으로 생각된다.

이상과 같은 연구로 3차원 Kirchhoff 중합전 심도구조보정 기법이 지표레이다탐사자료에 훌륭히 적용될 수 있으며, 모형 반응계산자료로부터 고분해능의 영상화가 가능함을 확인하였다. 향후 구조물 안전진단 및 천부지반조사에 3차원 지표레이다탐사가 수행되었을 경우 본 구조보정기법을 적용함으로써 이상체의 위치 및 크기 결정, 경계면의 주향 및 경사 결정 등 그 해석에 큰 도움을 줄 수 있다. 향후 지표레이다 안테나에서 발생된 전자기파는 탄성파와 달리 방향성을 가지므로 이를 고려한 구조보정기법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- 최윤경, 2001, 쌍극자 안테나를 고려한 지표 레이더 탐사의 3차원 모델링: 서울대학교 공학박사 논문.
- 김학수, 임해룡, 배성호, 1999, GPR에 의한 지반 구조물 탐사, 한국지구물리탐사학회 1999년도 제 2회 학술발표논문집, 한국지구물리탐사학회, 서울교육문화회관, 1999년 8월 27일, 65-91.
- 김근영, 1998, 회절지오토모그래피를 이용한 지표레이더 자료의 영상화: 서울대학교 공학석사 논문.
- Annan, A. P., 1992, Ground Penetrating Radar Workshop notes,

Sensors & Software Inc.

- Carlton, J., Leuschen, Richard G. Plumb, 2001, A Matched_Filter-Based Reverse-Time Migration Algorithm for Ground-Penetrating Radar Data: *Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 929-936.
- Elizabeth Fisher, George A. McMechan, A. Peter Annan, and Steve W. Cosway, 1992, Examples of reverse-time migration of single-channel ground-penetrating radar profiles: *Geophys*, **57**, 577-586.
- Hideki Hayakawa, and Akira Kawanaka, 1998, Radar imaging of underground pipes by automated estimation of velocity distribution versus depth: *J. of App. Geophys*, **40**, 37-48.
- John A. Scales, 1997, Theory of Seismic Imaging: *Samizdat Press*.
- John C. Bancroft, 1998, A Practical Understanding of Pre-and Poststack Migrations Vol. 2: *Society of Exploration Geophysics*.
- Mark L. Moran, Roy, J., Greenfield, Steven A. Arcone, and Allan, J. Delaney, 2000, Multidimensional GPR array processing using Kirchhoff migration: *J. of App. Geophys*, **43**, 281-295.
- Ozdogan Yilmaz, 1987, Seismic data processing: *Society of Exploration Geophysics*.
- William A. Schneider, 1978, Integral Formulation for Migration in Two and Three Dimensions: *Geophysics*, **43**, 49-76.