

현장타설콘크리트말뚝의 건전도 평가를 위한 geotomography의 적용 연구

Geotomography Applied for the Integrity Test of Cast-in-place Piles

이 재 경¹ Lee, Jae-Kyung

박 종 남² Park, Jong-Nam

Abstract

Recently, geophysical prospecting methods have played very important roles in civil and environmental engineering problems. Technical advances in geophysical instruments and computer system made it possible to get underground images with very high resolution for purposes to resolve those problems. It was possible partly due to ever increasing demand for development of technologies needed to precisely detect polluted areas and prevent ground-related accidents. Based on the same demand, integrity tests of cast-in place piles draw more attention and development of accurate test procedures is required. Ultrasonic methods is one of most advanced non-destructive procedures. In the paper, a geotomography method is employed for the cast-in place pile integrity test using ultrasonic waves. The image of pile interior is scanned and scrutinized for better and more accurate decision in the cast-in place pile integrity. In this study, we firstly examined the accuracy for tomography program with idealized synthetic models built in water tank: their position and size were changed in the tank and each case was studied. In the next stage, real concrete pile models were fabricated and images of anomaly areas inside the pile were scanned to successfully locate those areas.

요 지

최근 물리탐사 분야에서는 토목 및 환경 분야에 적용을 목적으로 하는 정밀 물리탐사가 새로운 개척분야로 급부상하고 있다. 이는 측정장비의 정밀화, 컴퓨터의 대용량화 등과 같은 기술적 용인과 국내외적으로 증대되고 있는 환경오염의 조사 기술 및 각종 지반사고예방 기술의 개발에 대한 요구와 같은 사회적 요인에 기인한다. 이러한 사회적 요구에 맞추어 현장타설 말뚝의 건전도 시험법에 대한 관심이 증대되고 있으며, 정밀한 시험법이 요구되고 있다. 특히 비파괴 검사의 방법 중 초음파를 이용한 시험법은 매우 실용적이다. 초음파를 이용한 파일건전도 시험법에 Geotomography 기법을 적용하여 현장타설 말뚝 내부를 영상화함으로써 보다 정밀한 자료를 통하여 구조물의 안전성 판단에 정확도를 기하고자 하였다. 본 연구에서는 이상모델을 설정하여 토모그래피 프로그램의 정확성을 점검하였고, 수조실험을 통하여 인위적으로 이상체 형태와 위치를 변화기시켰으며, 최종적으로 실제 콘크리트 파일 모형을 제작하여 파일 내부의 이상체를 영상화하였다. 실험의 결과 모형 파일 내부의 영상화를 통해 이상체의 위치를 비교적 정확하게 확인할 수 있었다.

Keywords : Cast-in-placed pile, Cross-hole sonic logging, Geotomography, Pile integrity test

1 정회원, 동아대학교 지구환경공학부 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, Division of Geo Environmental Engr., Dong-A Univ., jklee0908@paran.com)

2 동아대학교 지구환경공학부 교수 (Prof., Division of geo Environmental Engr., Dong-A Univ.)

1. 서론

Cross-hole sonic logging 시험법은 현장타설 말뚝 시공시 미리 튜브(steel or PVC)에 초음파 송·수신장치를 설치하여 콘크리트를 통과하는 초음파의 도달시간을 분석하여 말뚝의 건전도를 검사하는 시험법이다. 시험을 위해 튜브 속에 물을 채운 후, 튜브 속에 초음파의 발생장치인 송신기와 수신장치인 수신기를 넣고 일정한 속도로 송·수신기를 동시에 끌어올린다(그림 1). 송신기에서 발생한 초음파는 물-튜브-콘크리트-튜브 물의 순서로 통과되고, 수신기에 초음파의 도달시간이 기록된다. 기록된 초음파의 도달시간이 기록된다. 기록된 초음파의 도달시간은 수직적인 변화에 주목하여 분석된다. 이러한 경우 말뚝의 결함부위의 종류, 크기 및 형태의 분석은 불가능하다. Cross-hole sonic logging은 하나의 말뚝에 튜브의 개수에 따른 여러 개의 단면을 검사하여 말뚝내부의 콘크리트 품질을 검사한다. 이 시험법은 결함부위의 수직적인 위치는 비교적 정확히 분석이 가능하지만 결함의 수평적 위치나 크기 및 형태의 분석은 어렵다. 본 연구에서는 지구물리탐사의 토모그래피 방법을 적용하여 말뚝 내부를 영상화하여 결함의 위치를 규명하고자 하였다.

본 연구에서는 건설현장에서 현장타설말뚝 건전도 평가를 위해 일반적으로 사용되는 Cross-hole sonic logging 검사장치로써 송신부의 발생 주파수는 50kHz이며 데이터는 내장된 프린터와 디지털데이터로 저장 가능한 CSL(Cross hole sonic logging) 장비이다. 검사장비는 일반적으로 송·수신장치부를 동시에 끌어올리려 검사를

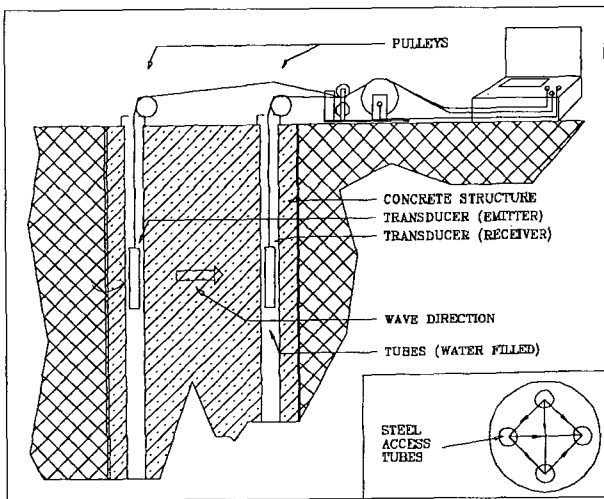


그림 1. The schematic diagram of the system setup

수행하지만 본 연구에서는 토모그래피 자료 취득을 위해 송신부를 고정하고 수신부만 이동하여 자료를 취득하였다. 이러한 자료 취득 방법은 기존의 토모그래피 방법을 적용하기 위해 인위적으로 뇌관 등의 탄성과 발생장치를 콘크리트 표면에 부착하는 방법과는 구별된다.

시험의 과정은 먼저, 가상의 모형을 가정하고 토모그래피 프로그램의 정밀도를 점검하였다. 다음으로 인위적인 결함의 변경이 용이한 수조에서 실험을 실시하였고, 마지막으로 실제모형을 제작하여 실험을 하였다. 본 연구에서는 각 단계의 주시역산을 통해 구해진 단면을 제시하였으며, 최종적으로 실제모형의 단면을 토모그래피를 적용하여 분석하고, 현장적용 가능성을 검토하고자 하였다.

2. Geotomography의 이론적 배경

주시 토모그래피는 지하 구조의 물성 중에서 속도를 구하는 방법으로 속도와 파선의 길이 파의 도달시간을 이용하여 지배방정식을 구성하게 된다. 지배방정식은 (1)식과 같이 표현할 수 있다.

$$t = \int_s w ds \quad (1)$$

이들을 이산치의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$t_i = \sum_{j=1}^M l_{ij} w_j \quad (2)$$

여기서 t_i 는 i 번째 파선의 주시를, w_j 는 j 번째 요소의 역속도(slowness)를, 그리고 l_{ij} 는 i 번째 파선이 j 번째 요소를 지나는 파선의 길이를 각각 나타낸다. 이는 행렬식으로 다음과 같이 표현된다.

$$t = Lw \quad (3)$$

여기에서 L 는 w 의 함수로 우리가 다루고자하는 지배방정식은 비선형 함수임을 보여준다. 이를 선형화시키기 위해 기준 모델 L_0 에 대해 Taylor 시리즈를 전개한 후 첫 번째 오차 항만을 취하면 다음과 같이 선형문제로 근사 될 수 있다.

$$\Delta t = L_0 \Delta w \quad (4)$$

위의 식을 이용하여 주시 잔차 Δt 로부터 기준 모델 L_0 에서의 역속도 보정치 Δw 를 구하는 선형 토모그래

피를 수행하게 된다. 한편, 구해진 역속도 보정치를 고려해 기준모델을 개선하고 변화된 역속도 모델에 대하여 위의 선형 토모그래피를 반복적으로 수행하게 된다.

비선형 주시 토모그래피를 적용하기 위해서는 반복적으로 주어진 속도 구조에서 송신원에서 수신기까지의 도달 시간과 경로를 계산하여야 한다. 본 연구에서는 Vidale(1988)의 유한 차분법을 파면 확장법(wavefront expanding method)으로 개선한 Qin et al.(1989)의 알고리즘을 이용하였다. 파면 확장법은 일정한 시간을 설정하고 이들 시간 내에 해당하는 영역 내에서 각 지점의 최소 주시를 찾는 방법이다.

식 (4)와 같이 주어지는 주시 잔차 Δt 로부터 기준 모델 L_0 에서의 역속도 차이 Δw 를 구하는 선형 토모그래피를 수행하기 위해서는 역산이 요구된다. 토모그래피에서의 필요한 역산에 있어서 특이치 분해(SVD)와 같은 직접적 방법들은 수행시 방대한 기억장치가 필요하므로 이를 줄이기 위해 SIRT(simultaneous iterative reconstruction techniques)법과 같은 반복적 역산 방법이 적용되고 있다.

SIRT법은 Kaczmarz(1937)가 제시한 사영법(projection method)에 기초를 둔 ART(Algebraic Reconstruction Techniques)법을 변형한 것으로 모든 파선에 대한 각 격자의 보정치를 구하여 이들의 평균치로 보정하는 방법이다. k 번째 반복에서 j 번째 요소의 역속도를 w_j^k 라 하면 도달 시간의 오차 Δt_i^k 로부터 역속도 보정치 Δw_j^k 는 다음과 같이 얻게된다(Dines and Lytle, 1979).

$$\Delta w_j^k = \frac{1}{N_j} \sum_i \frac{\Delta t_i^k}{L_i} \quad (5)$$

여기서 N_j 는 j 번째 요소를 통과하는 파선의 개수를, L_i 는 i 번째 파선의 길이를 각각 나타냈다. 본 연구에서의 Fresnel 영역을 고려한 역산은 파의 격자를 지나는 면적을 식 (5)에서와 같이 전체 면적을 구하여 파선이 지나는 파선이 지나는 면적을 파선의 길이로 나누면 각 파선이 지나는 파선의 면적은 파선의 길이로 표현할 수 있으며, 이는 파선의 길이로 표현 할 수 있으므로 파선 토모그래피에서와 마찬가지로 똑 같은 방법을 적용할 수 있다.

3. 토모그래피를 위한 자료취득 방법

본 연구에 사용된 Cross-hole sonic logging의 장비는 현장타설 말뚝의 건전도 평가를 위해 일반적으로 사용

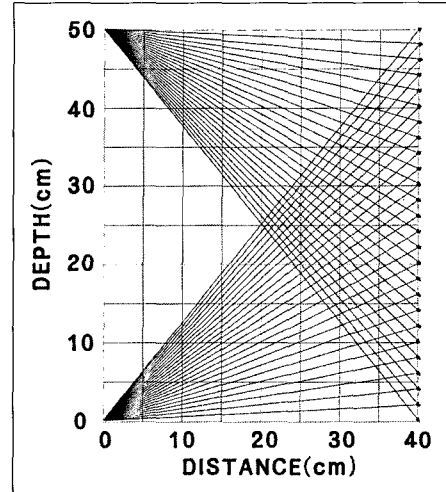


그림 2. Survey geometry for the tomography

되는 것으로 본 장비는 송수신기를 동시에 이동시켜 동일 높이에서의 초음파의 도달시간을 측정하여 매질의 속도를 분석한다. 출력되는 자료는 일반적인 Cross-hole sonic logging에서의 결과와 동일한 형태이다. 결과데이터의 전산처리를 위해 정확한 전달시간을 계산하고, 이를 통하여 속도를 분석하였다.

먼저, 결합의 수직적인 위치를 분석하기 위하여 송수신기를 동시에 이동하여 수직적인 속도변화를 측정하였다. 다음으로 그림 2와 같이 토모그래피를 위해 송수신기를 고정하고 수신기만 이동하여 자료를 취득하였다. 송·수신기와 이동간격을 각각 2cm로 하여 50cm의 높이에 대하여 625(25×25)의 주시자료를 취득하였다.

4. 이상모델에 대한 토모그래피 적용

이상모델의 토모그래피는 본 연구에 사용된 토모그래피 프로그램의 정밀도 검증을 위한 것이다. 이상모델에서는 내부 이상체를 다양한 형태와 위치로 변화시켜 정밀도 검증을 위한 것이다. 이상모델에서는 내부 이상체를 다양한 형태와 위치로 변화시켜 각 경우의 단면 해석의 정밀도를 검증하였다. 그림 3은 현장타설 말뚝에 크랙이 존재할 경우의 이상모델이다. 크랙의 각도를 각각 0°, 30° 및 45°로 가정하였다. 그림 4는 현장타설 말뚝의 내부에 공동이 존재하고 있을 경우를 가정한 것이다. 가정한 이상체는 두 개이며 그 간격을 5cm, 10cm 및 20cm로 변화를 주었다. 크랙을 가정한 이상모델(그림 3)에서는 토모그래피를 적용하여 취득된 단면의 이상체가 각도의 변화에 따라 비교적 정확히 나타난다. 공

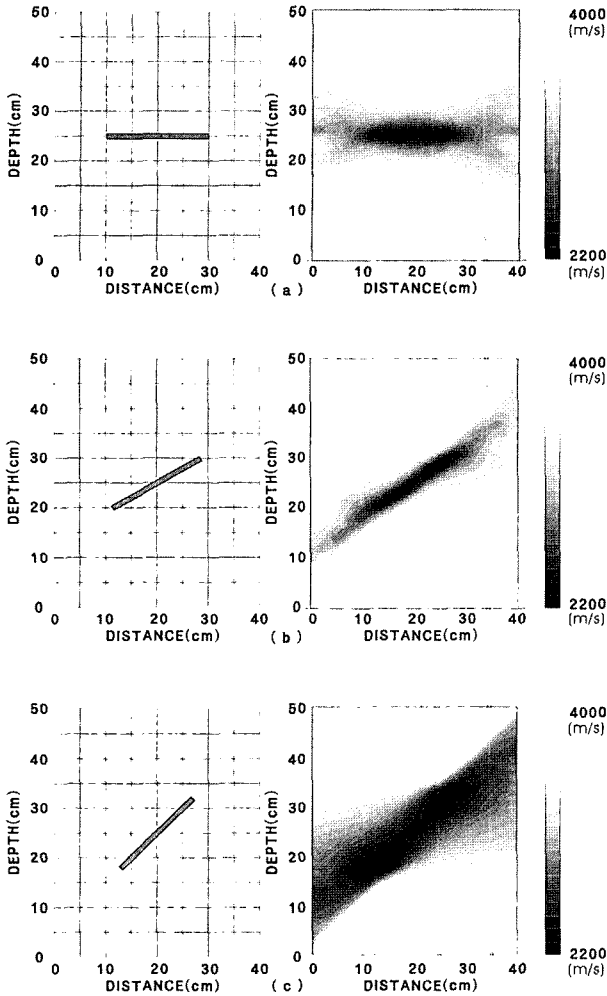


그림 3. Synthetic models with varying distance of anomalous rocks (a) 5cm (b) 10cm (c) 20cm

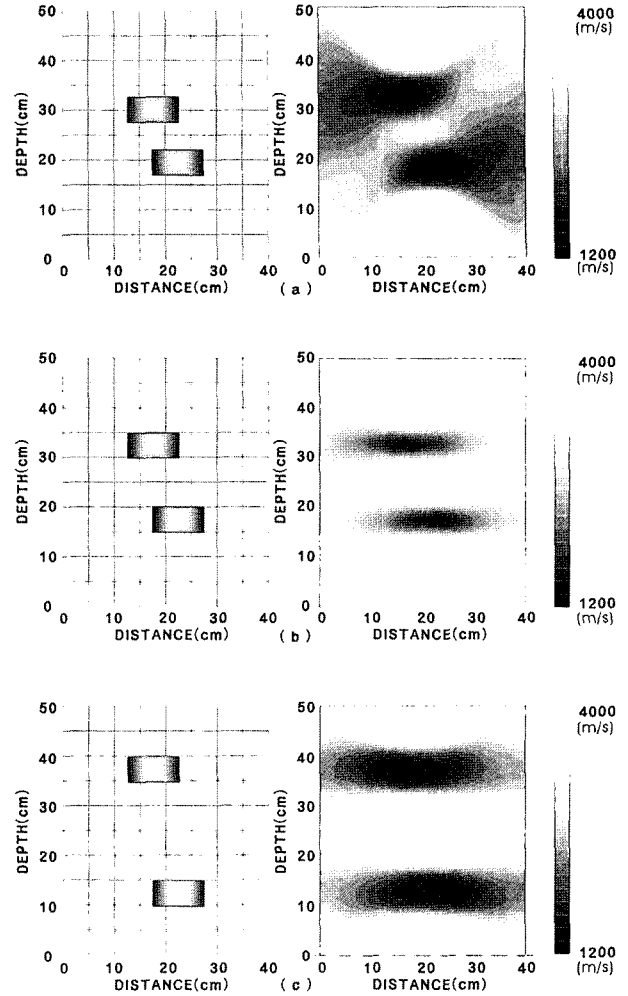


그림 4. Synthetic models with varying angles to (a) 0° (b) 30° (c) 45°

동으로 가정한 이상모델(그림 4)에서도 이상체의 위치와 간격이 비교적 정확히 분석되었다.

5. 수조실험을 통한 분석

수조실험에서는 인위적인 이상체의 종류, 위치 및 형태의 변경이 용이하다는 장점이 있으므로 실제모형의 제작을 위한 예비 실험으로 실시하였다. 수조실험에서는 튜브(steel)사이의 거리를 40cm, 측정 깊이를 50cm로 하여 이상모델과 동일한 형태의 실험을 하였다. 수조실험에서는 이상모델의 크랙의 경우 아크릴을 사용하였으며, 각도의 변화도 동일하게 0°, 30° 및 45°로 변화를 주었다. 또한, 공동의 경우 직육면체의 아크릴통(200×90×100mm) 두 개를 제작하여 그 간격을 5cm, 10cm 및 20cm로 변화를 주었다.

크랙을 가정한 결함의 수조실험 결과는 그림 5에 나

타내었다. 그림 5에서 크랙의 각도변화에 따른 토모그래피 해석 결과를 보면 0°, 30° 및 45°에서 이상체의 위치는 대체적으로 파악되나 각도의 변화는 명확히 나타나지 않는다. 그림 5의 결과만으로 이상체의 종류와 크기의 판단은 어렵다.

현장타설말뚝에서 발생이 가능한 결함으로 공동이 존재하는 유형으로 두 개의 직육면체 아크릴통을 사용하였다. 두 개의 아크릴 모형은 간격을 변화시켜 수조실험을 실시하였고 실험의 결과 취득된 주시자료를 통한 토모그래피 해석결과는 그림 6과 같다. 이 경우의 실험에서는 처음 5cm의 간격의 변화를 주었을 경우 두 개의 이상체가 분리되지 않고 하나의 이상체로 나타난다. 차츰 간격을 10cm와 20cm로 증가시키자 두 개의 이상체가 분리되어 나타난다.

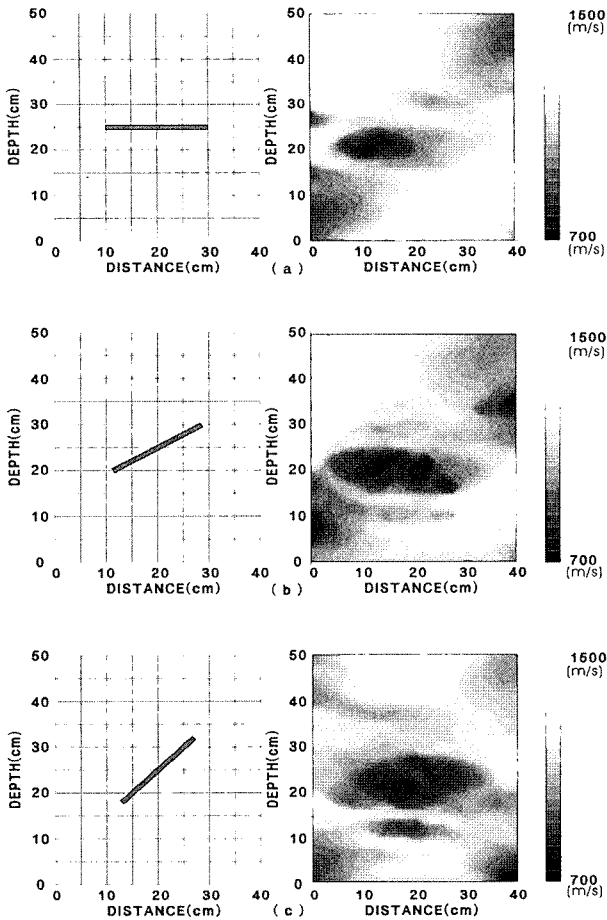


그림 5. Crack models with varying angles in water (a) 0° (b) 30° (c) 45°

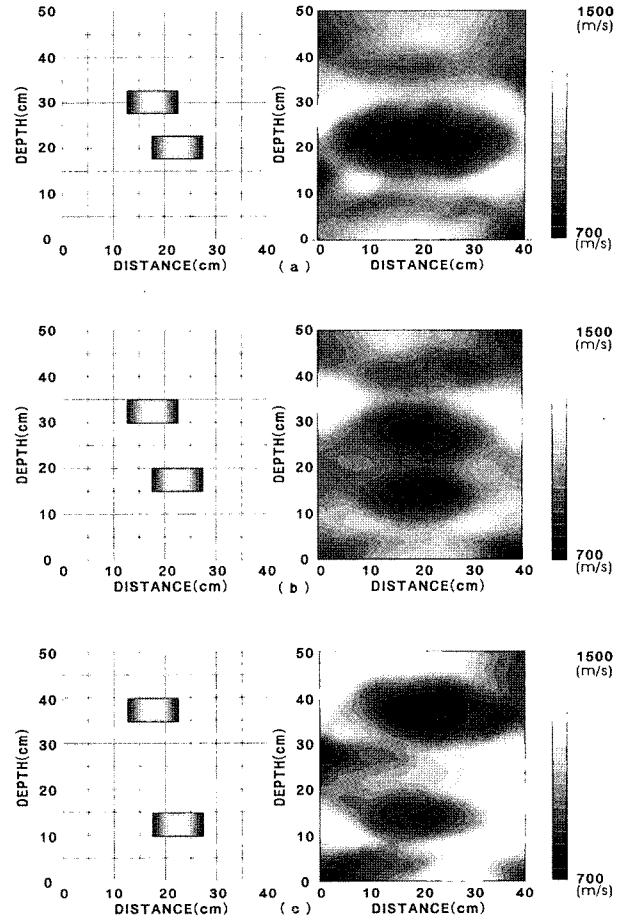


그림 6. Rock models with varying distance in water (a) 5cm (b) 10cm (c) 20cm

6. 실제모형을 통한 토모그래피의 역산해석

실제모형은 원통형으로 직경이 60cm, 높이가 80cm로 시멘트와 모래의 비율을 1:2 혼합하여 제작하였다. 수조 시험에서 사용된 동일한 튜브(steel)를 설치하고 각 튜브 사이에 이상체를 삽입하여 양생하였다. 제작된 실제모형에서는 총 6개의 단면측정이 가능하다. 2개의 단면은 이상체를 설치하지 않은 순수한 모래와 시멘트만 존재한다. 나머지 4개의 단면은 이상체를 삽입하였다.

실제모형의 제작도는 그림 7과 같다. 먼저, 실제모형의 중앙에는 수조시험에서 사용된 직육면체의 아크릴 통(200×90×100mm)을 설치하고, 2번 튜브와 3번 튜브 사이에는 모형제작시 $\phi 60\text{mm}$ PVC를 삽입하고 양생 후 이를 제거하여 공동을 만들었다. 3번 튜브와 4번 튜브 사이에도 동일한 방법으로 공동을 만들었다. 시험의 방법은 우선 일반적인 Cross-hole sonic logging 방법으로 송·수신기를 동시에 끌어올리면서 삽입한 이상체의 수직적인 위치를 파악하였다. 다음으로 수조실험에서의 방법

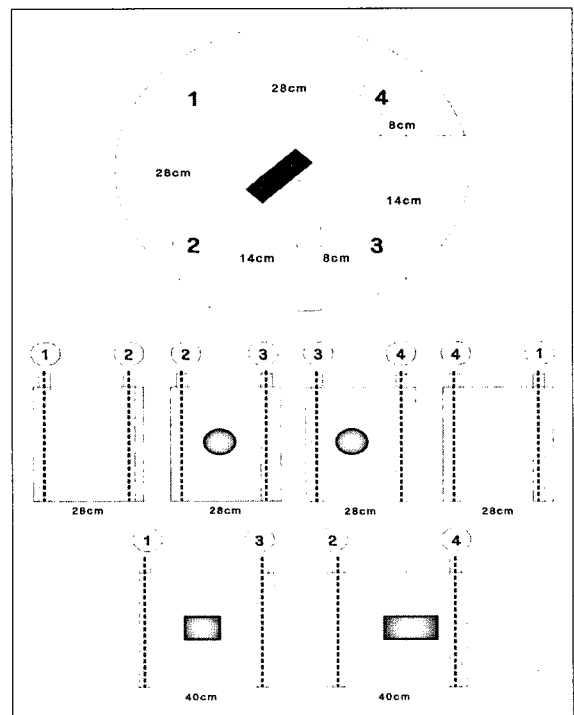


그림 7. Synthetic of the concrete model

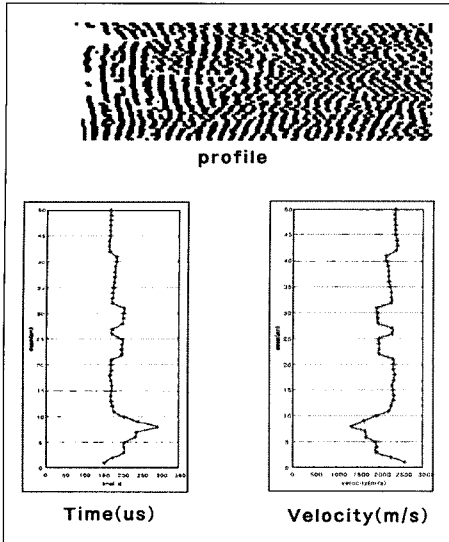


그림 8. Profile, time and velocity in concrete model (1-3)

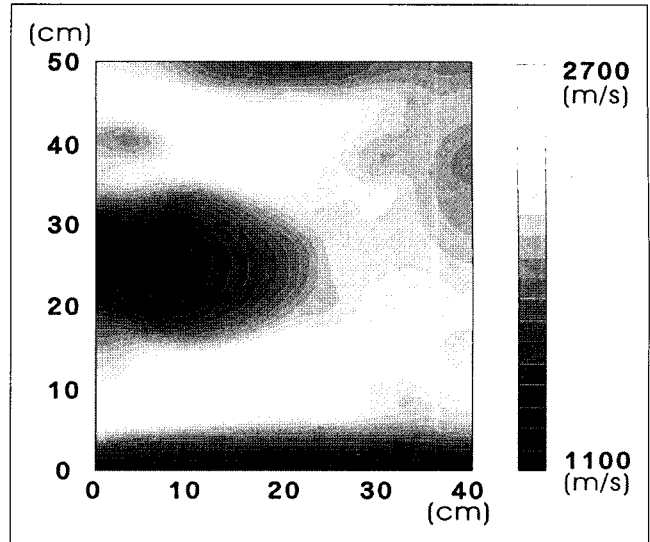


그림 9. A Result of tomography in concrete model (1-3)

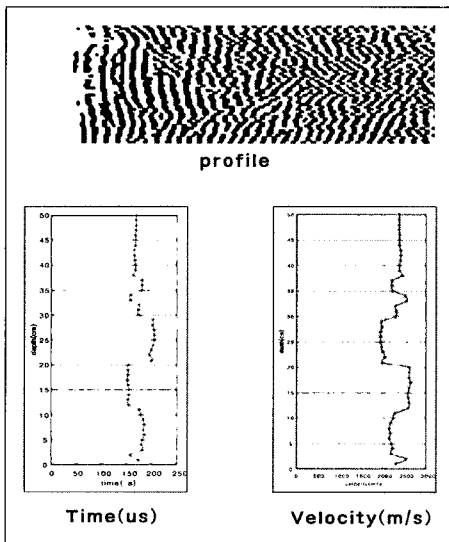


그림 10. Profile, time and velocity in concrete model (2-4)

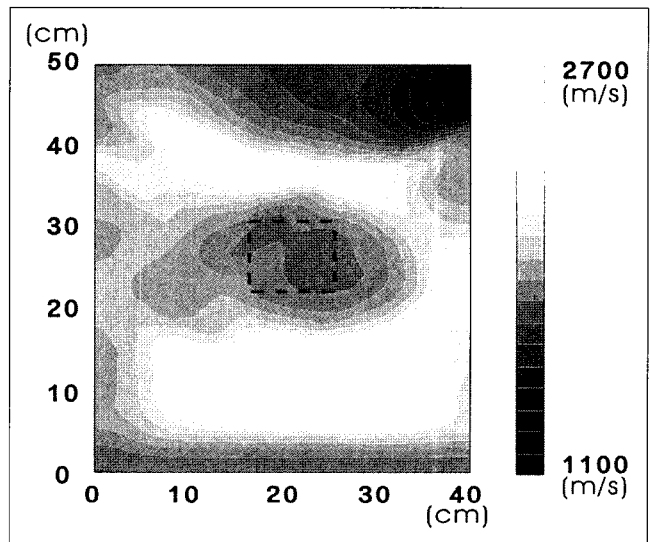


그림 11. A Result of tomography in concrete model (2-4)

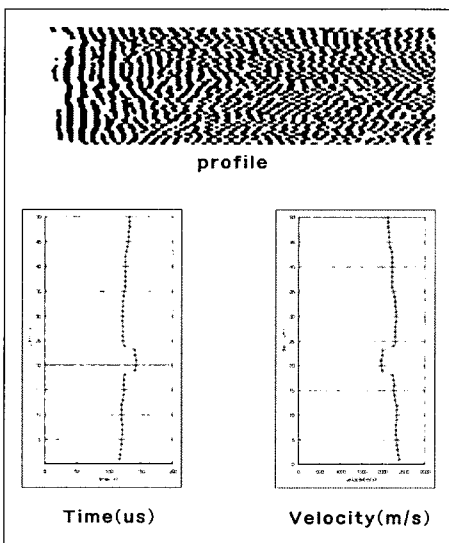


그림 12. Profile, time and velocity in concrete model (1-2)

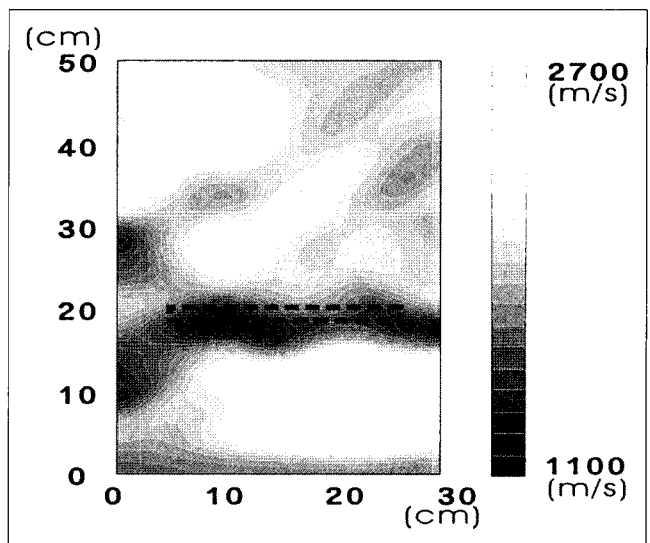


그림 13. A Result of tomography in concrete model (1-2)

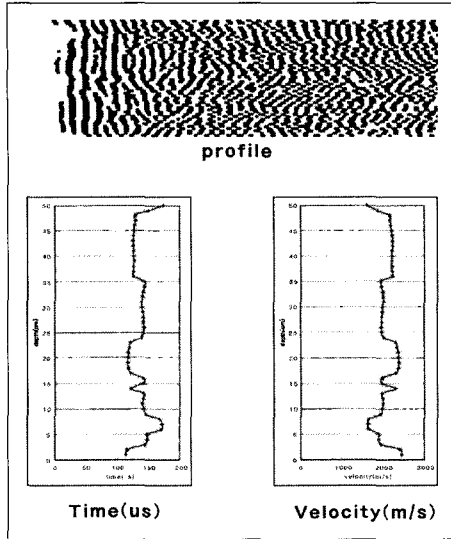


그림 14. Profile, time and velocity in concrete model (2-3)

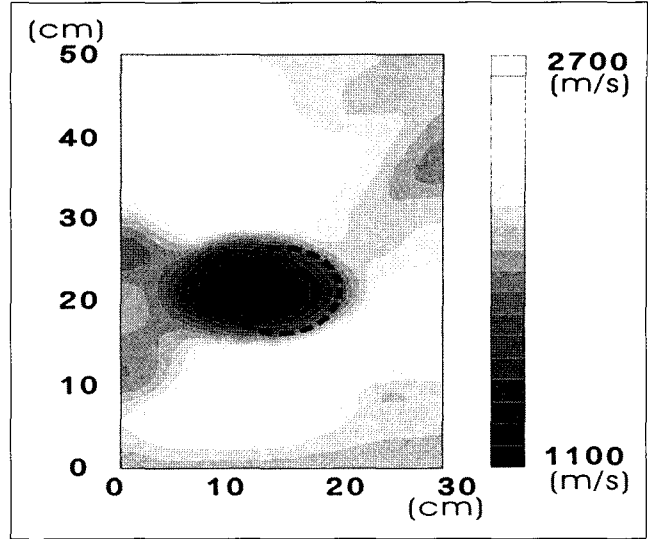


그림 15. A Result of tomography in concrete model (2-3)

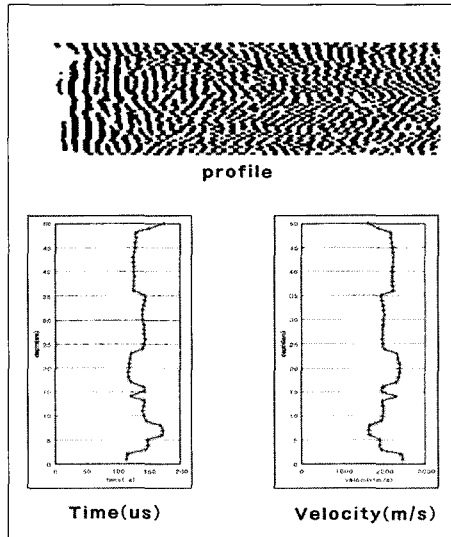


그림 16. Profile, time and velocity in concrete model (3-4)

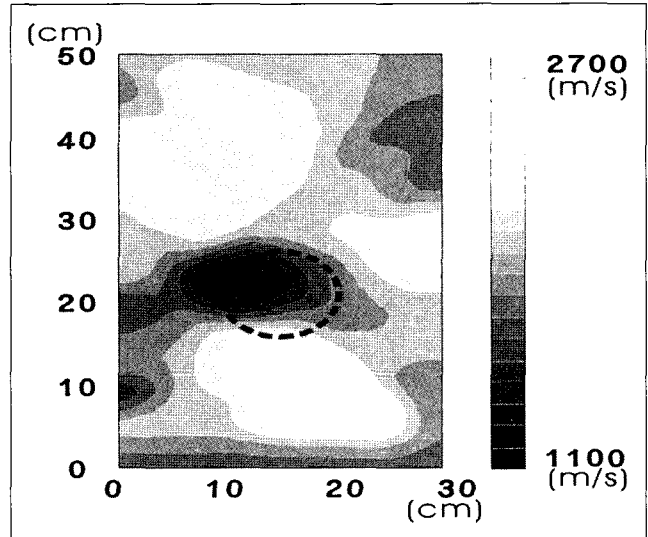


그림 17. A Result of tomography in concrete model (3-4)

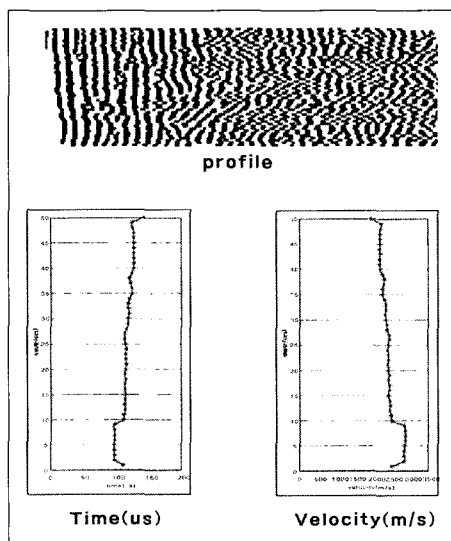


그림 18. Profile, time and velocity in concrete model (4-1)

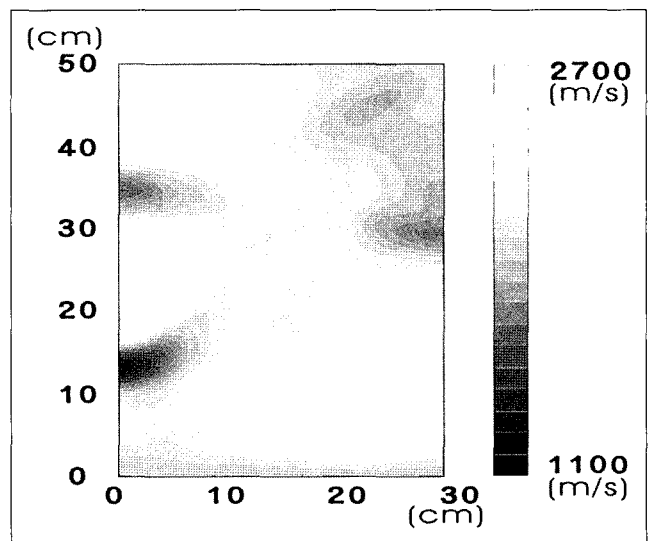


그림 19 A Result of tomography in concrete model (4-1)

과 동일한 방법으로 토모그래피를 위한 자료를 취득하였다.

실제 콘크리트 모형에서는 총 6개의 토모그래피 단면 해석이 가능하다. 먼저, 송·수신기를 동시에 끌어올려 결함으로 가정한 이상체의 수직적인 위치를 파악하고자 하였다. 그 결과는 일반적인 Cross-hole sonic logging의 결과인 profile, time 및 velocity의 형태로 나타내었다(그림 8, 그림 10, 그림 12, 그림 14, 그림 16, 그림 18). 송·수신기를 동시에 끌어올리는 경우 실제 모형의 결함 부위에서 속도감쇠가 나타난다. 이것은 일반적인 현장 타설콘리트 말뚝의 건전도 시험에서와 같이 결함의 존재 여부는 판단할 수 있으나 결함의 종류, 크기, 위치 및 형태의 판단이 불가능하다.

다음으로 토모그래피를 위하여 그림 4와 같은 방법으로 자료를 취득하고 토모그래피 역산을 실시하였다. 그림 9와 그림 11에서는 육면체의 공동으로 가정한 아크릴통이 삽입된 1-3과 2-4 경로의 토모그래피 역산의 결과이고, 그림 15와 그림 17은 원형 PVC 공동으로 만들어진 2-3과 3-4 경로의 토모그래피 역산의 결과이다. 4개의 결과를 비교하면 이상체의 형태는 다르나 결과는 유사한 원형으로 나타난다. 이것으로 결함의 크기, 종류 및 형태의 정확한 분석은 불가능하였으나 결함의 수평적인 위치의 분석은 가능하였다. 이러한 시험의 결과는 일반적인 현장타설말뚝의 건전도시험에서 수평적 위치 판단의 단점을 보완할 수 있을 것으로 사료된다. 그림 13은 크랙으로 가정한 아크릴판이 위치한 1-2 경로의 토모그래피 역산의 결과로서 수평적인 결함의 양상을 보이지만 정확한 결함의 형태의 판단은 어려웠다. 그림 19는 결함이 없는 4-1 경로의 토모그래피 역산의 결과이다.

7. 결론

본 연구에서는 Cross-hole sonic logging의 시험법에 지구물리탐사의 Geotomography를 적용하여 현장타설 말뚝의 내부를 영상화하고자 하였다. 실험의 과정은 이상모형을 가정하여 프로그램의 정확성을 검토하였고, 다음으로 인위적인 이상체의 변화를 위해 수조실험을 실시하였으며, 마지막으로 수조실험과 유사한 실제모형을 제작하여 실험을 실시하였다.

(1) 현장타설말뚝에서의 Cross-hole sonic logging 시험법은 결함의 수직적인 위치에 대하여는 비교적 정

확한 분석이 가능하다. 그러나 결함의 크기와 형태에 대한 판단은 불가능하였다.

- (2) 본 연구에 사용된 토모그래피 프로그램의 정확성을 검토하기 위하여 이상모형을 설정하여 적용한 결과 정확한 위치 및 개략적인 형태의 분석이 가능하였다.
- (3) 인위적으로 이상체 위치를 변화시키기 위하여 수조 실험을 실시하였으며, 크랙을 가정한 수조실험의 결과 이상체의 각도 및 형태의 정확한 분석은 어려웠다.
- (4) 수조실험의 두 개의 이상체 간격변화에서 토모그래피 결과를 보면 5cm에서는 하나의 이상체로 나타나며 그 간격이 10cm 이상으로 떨어질 때 두 개의 이상체로 해석되었다.
- (5) 현장타설말뚝에서 발생 가능한 결함을 가정하기 위하여 수조실험 결과를 바탕으로 실제모형을 제작하였다. 실제모형에서 각 단면에 이상체를 삽입하고, 각 단면에 대하여 토모그래피를 적용하였다. 각 단면에 대한 토모그래피 역산 결과 이상체의 형태 및 종류는 정확한 분석은 어려웠으나 이상체의 존재 및 개략적인 위치 분석은 가능하였다.
- (6) 본 연구를 통하여 Cross-hole sonic logging 시험법에 토모그래피 방법을 적용함으로써 Cross-hole logging 시험법의 단점인 수평적인 결함의 위치의 판단은 가능하였다.

감사의 글

본 연구는 동아대학교 교내연구과제로 실시하였습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. M J Turner BSc MSc Ceng MICE FGS (1997), Integrity testing in piling practice., construction industry research and information., pp.208-229 .
2. Vidale, J., 1998, Finite-difference calculation of traveltimes: Bull. Seis. son. Am., 78, 2062-2076.
3. Qin, F., Olsen, K. B., Cai, W. and Schuster, G. T., 1989, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts: Geophysics, 57, 478-487.
4. Kaczmarz, S., 1937, Angen herte Aufl sung von Systemen linearer Gleichungen: Bull. Acad. Polon. Sci. Lett. A., 35, 355-357.
5. Dines, K. A. and Lyttle, R. J., 1979, Computerized geophysical tomography : Proc. IEEE, 67, 1065-1073.

(접수일자 2004. 5. 22, 심사완료일 2005. 6. 19)