

탄성파 초동주시를 이용한 콘크리트 구조물의 결함 탐지

서백수¹⁾ · 장선웅²⁾ · 김석현³⁾ · 서정희⁴⁾

Investigation of Concrete Flaw Using Seismic First Arrival

Baek-Su Suh, Sun-Woong Jang, Seock-Hyun Kim and Jung-Hee Suh

Abstract. The purpose of this study is to investigate concrete flaw using seismic first arrival and various inversion method. Seismic wave propagation was calculated using finite element method in theoretical modelling and tomogram was made using various inversion methods in theoretical and experimental modelling. Five steps of seismic first arrival were selected from FEM results and these data were used to calculate seismic velocity section. According to the results, exact seismic first arrival picking method was proposed and experimental modelling was conducted.

Keywords: finite element method, inversion method, first arrival time, tomogram.

초 록. 연구의 목적은 콘크리트 결함 발견을 위하여 탄성파를 사용하여 구조물의 속도전파 단면도를 영상화시키고 그 결과를 분석하고자 하였다. 탄성파의 전파 양상을 유한요소법을 이용하여 이론모형에서 계산하고, 그 이론을 실험실의 구조물 모형에 적용하여 토모그램을 작성하였다. 또한 초동 주시를 5개 단계로 선택하여 역산을 행하였으며, 계산된 탄성파 속도전파 단면도를 비교하여 가장 편리하고 정확한 초동주시 발체법을 제시하였으며, 이러한 초동주시에 의해서 모형실험을 행하였다.

핵심어: 유한요소법, 역산, 초동주시, 토모그램

1. 서 론

최근 예기치 않은 사고의 발생으로 인하여 기존구조물의 유지관리 및 안정성의 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다. 구조물을 항상 안전하고 사용 가능한 상태로 유지하기 위해서는 구조물을 정기적으로 점검하고 평가하여 문제가 일어나기 전에 미리 조치를 취하여야 한다. 따라서, 콘크리트 구조물의 품질 및 손상평가, 안정성 확보를 위한 효과적인 비파괴 검사기법의 개발 및 적용이 필요한 실정이다. 비파괴 시험은 구조물이 대형화로 되어감에 따라 그 중요성이나 필요성이 크게 대두되고 있다. 그럼에도 불구하고 국내에서 콘크리트 구조물의 결함조사나 강도평가에 비파괴 기법은 제한적으로 이루어지고 있고, 다양한 비파괴검사기법에 대한 이해가 부족한 형편이다.¹⁾

콘크리트의 결함은 균열, 함몰, 공동 등 여러 가지 형태가 있으나 본 연구에서는 이론모형 실험과 쉽게 비교할 수 있는 공동 모형을 선택하였다. 우선 탄성파의 전파양상을 유한요소법을 이용하여 이론모형에서 계산하고, 실험실의 구조물 모형에 적용하여 그 결과를 분석하고자 한다.²⁾ 매질의 탄성파 속도 분포를 얻고자 하는 주시 토모그래피의 경우 역산을 수행하는데 있어서 초동 주시가 가장 중요한 입력값이다. 이런 초동 주시의 선택을 위하여 탄성파 속도단면을 상호간 비교하였다. 이론 모형에서 유한요소법으로 계산한 탄성파 트레이스에서 다섯 부분으로 분류하여 초동값을 선택하였으며, 그 초동값을 역산 알고리즘에 입력하여 구조물 내부의 탄성파 속도분포를 영상화하였다. 또한, 다섯 부분의 역산결과를 비교하여 그 결과가 구조물과 가장 동일한 초동주시 부분을 다음 단계에서 수행될 실험실 구조물 모형의 충격실험에 의한 주시 토모그래피의 입력값으로 선택하여 그 결과를 비교하였다.^{3,4)}

¹⁾정희원, 강원대 지구환경시스템공학과 교수

²⁾정립실업(주) 총무과

³⁾강원대 기계메카트로닉스공학부 교수

⁴⁾서울대 지구환경시스템공학과 교수

접수일 : 2001년 1월 17일

심사 완료일 : 2001년 4월 2일

2. 역산법의 이용

콘크리트 측면에 부착된 파동원(센서)으로부터 탄성

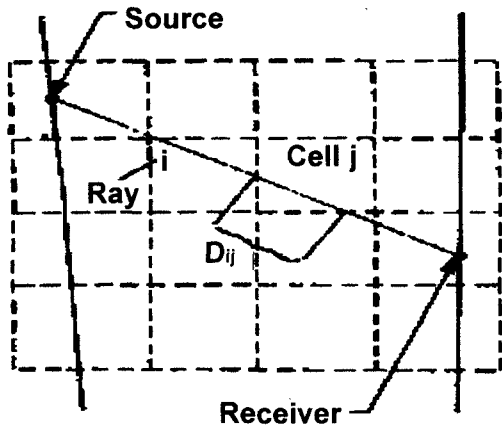


Fig. 1. Penetrating wave into the pixel.

파를 발생시켜 콘크리트 내부를 전파하여 다른 측면에 부착된 센서에 제일 먼저 도착하는 시간(초동, first arrival time)을 측정하게 되며 여러 가진원과 수신기로 부터 많은 파선경로에 따라 초동자료를 얻게 된다. 토 모그래피 해석방법은 가진원과 수신기 사이의 간격을 여러 개의 요소로 나눈 후, 하나의 요소 안에서는 속도가 일정하다는 가정하에 초동자료로부터 가장 부합하는 요소들의 속도 구조를 얻게된다.

진파속도의 역수(slowness)를 $X(r)$ 라 하면 수신기에서의 측정치인 파도달시간 b_i 는

$$b_i = \int_{C_i} X(r) dr \quad (1)$$

이 되며 이 b_i 는 경로 C_i 를 따른 $X(r)$ 의 투영 (projection)이 된다.

따라서, 모든 파선에 대해 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$B = AX \quad (2)$$

여기서 A 는 $M \times N$ 의 행렬로 그 요소 a_{ij} 는 i 번째 파선이 j 번째 요소를 통과하는 길이를 나타내며 하나의 파선이 통과하는 요소의 개수는 매우 작으므로 A 는 변수가 작은 행렬이 된다. 측정된 시간 b_i 와 이론계산치 b_p 의 차이를 잔여오차 Δb 라고 하면

$$\Delta b = A\Delta X \quad (3)$$

가 되며 대부분의 역산 알고리즘은 이 값을 최소화 하는데 목적을 두고 있다. 만약 N 개의 파동이 통과한다고 할 경우 각각의 격자에서의 평균 보정은

$$\Delta X_i^n = \frac{1}{M_i} \sum_{k=0}^n \Delta X_{k,i} \quad (4)$$

이 된다. 이때, M_i 는 격자 i 를 통과하는 파동의 수이다.

본 연구에서 사용된 역산기법으로는 각 셀(cell)에 임의의 속도를 부여하고 계산된 파선의 주행시간과 측정된 주행시간의 오차를 계산하여 모든 파선에 대해 반복적으로 수행하여 오차를 줄여가는 방법인 ART (Algebraic Reconstruction Technique)법과, 주어진 영역을 통과하는 모든 파선에 대한 보정값을 동시에 계산하는 즉, 모든 영역에 대한 보정값이 계산되면 이를 각 영역에 대해 일시에 보정하는 기법인 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)법, 비선형 문제를 해결하는 반복적 역산기법인 LSQR(Least Square Method)법 등을 사용하였다.^{5,8)}

3. 이론모형 계산

본 연구에서 사용되는 주시 토모그래피에 의한 구조물 속도영상 재구성방법은 파동의 도달시간에 관련된 것으로, 이는 파동이 가진원으로부터 발생하여 수신기에 도달하는 최초의 시간인 초동시간을 이용하여 구조물 내의 탄성과 속도 이상대를 파악하여^{9,10)} 탄성과 속도 영상화 단면 상에서 서로 다른 속도분포를 나타내는 영역을 진단하여 구조물의 안전진단에 이용하는 방법이다.¹¹⁾

탄성과 주시 해석에 있어서 가장 중요한 관점은 가진원으로부터 전파되어 기록된 탄성과 신호 중에서 가장 먼저 기록된 신호 즉, 주시곡선 상에서 탄성과 자료의 해석에 사용되는 초동시간을 어느 부분으로 설정하는 문제에 따라 해석결과에 많은 차이가 있다는 것이다. 또한, 탄성과 자료의 해석에 있어서 정확한 기준이 확립되어 있지는 않지만, 결과된 주시곡선이 지하의 불균질한 물질 또는 구조물 내부의 미지의 불연속면에 의하여 많은 영향을 받기 때문에 초동을 선택하는 과정에 있어서 상당부분 경험적이고 주관적인 측면이 많이 적용되는 것이 현재의 실정이다. 따라서, 주시곡선 상의 초동을 설정하는 문제를 정성적으로 해석하고자 탄성과 자료해석에 다섯 부분을 초동주시로 선택하여 역산을 수행하여 그 결과를 비교하고자 한다.

초동의 구분은 Fig. 2와 같이 first, 1/3 max, peak 1, peak 2, max 등 총 다섯 부분으로 행하여졌다. 이와 같이 다섯 가지의 기준점을 선택한 것은 탄성과 주시곡선

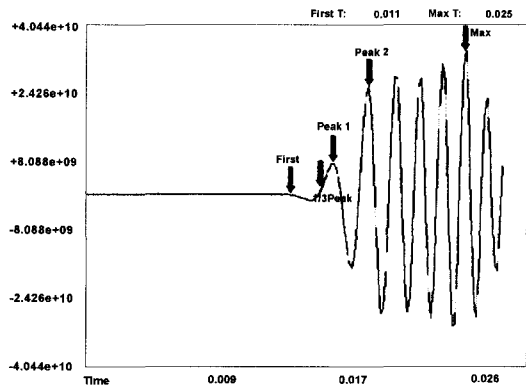


Fig. 2. The classification of first arrival time on seismic trace.

상에서 초동시간은 거리가 상대적으로 멀어지거나 또는 속도분포가 서로 다른 매질을 파동이 전파해감에 따른 시간의 지연에 그 의미를 두고 있다. 따라서, 초동시간 지연의 의미를 광역화하여 다섯 종류의 기준을 정함으로써 초동에 대한 정성적인 의미를 산정해 보고자 한다. 또한, 탄성과 속도의 재구성 단면 결과에서 합리적인 초동을 선택하여 다음에 수행될 충격응답시험 (impact response testing)에 응용하고자 한다.

3.1 유한요소해석

파선법의 이용에 있어 직선 토모그래피는 각 파동원과 수신기 사이에 파선이 항상 존재하고 있음을 가정한다. 그러나 파선의 진로가 직선이라는 가정은 탄성과 속도 분포가 균질하다는 것을 의미하게 된다. 만약 불균질하다고 가정하여 파선의 진로가 곡선이라고 생각하여 모형계산을 할 경우에는 직선의 경우보다 약 300배 이상의 계산시간이 요구되므로 큰 모형 계산에서는 거의 불가능한 실정이다. 이러한 문제점들 때문에 파동의 전파양상을 방정식으로 계산한 파동방정식을 유한요소법을 사용하여 계산하였다.

3.2 프로그램의 구성

프로그램의 구성은 Fig. 3의 계산 흐름도와 같이 3개의 블록으로 나누어지며 각각 2~4개의 부프로그램을 가지고 있다. 블록 1에서는 모델링을 만드는 프로그램이며 전체요소 및 절점수를 지시하며 입력시킨다. 가로 요소의 수는 40개, 세로 요소의 수는 130개로 하였다. 파동원의 주파수는 4.5×10^5 Hz로 하였으며 각 요소마다 P파 및 S파의 속도, 밀도 등을 입력시킨다. 이 때 매질은 콘크리트로서 밀도는 2.3 g/cm^3 로 하였고 P파의 속도는 3.7 km/sec , S파의 속도는 2.6 km/sec 로 하였다. 공

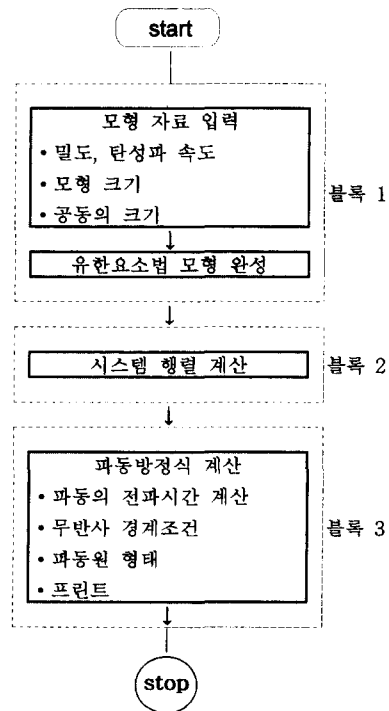


Fig. 3. The flow chart of calculation.

동에서는 공기로 가득 채워졌다고 가정하고 밀도 0.0023 g/cm^3 , P파의 속도는 0.37 km/sec , S파의 속도는 0.026 km/sec 로 입력하였다.

블록 2는 시스템 행렬을 만드는 프로그램이며 입력 자료에 의해서 강성행렬과 질량행렬을 만든다. 또한 탄성계수 및 모양함수를 사용하고 좌표변환을 시도하여 복잡한 형태의 요소에서도 계산이 가능하도록 하였다. 블록 3은 블록 1, 2에서 만들어진 전체 행렬을 푸는 작업이다. 여기에는 파동의 전파시간, 무반사 경계조건, 파동원 형태 등이 입력되며 필요한 자료의 형태로 출력시킨다.

3.3 이른모형의 역산결과

초동주시 발체 (first break picking)는 바로 주시역해 결과 (tomogram)에 대한 신뢰도와 직결되어 있는 매우 중요한 문제이다. 이런 초동주시 발체를 다각적으로 검증하고 정성적으로 해석하기 위하여 다섯 부분으로 초동주시를 분류하여 역산한 결과는 다음과 같다.

first peak의 자료에 의한 역산 결과는 Fig. 4~6에서 볼 수 있으며 공동의 모양이 ART, SIRT, LSQR 등 역산 방법에 따라 크게 달라짐을 볼 수 있다.

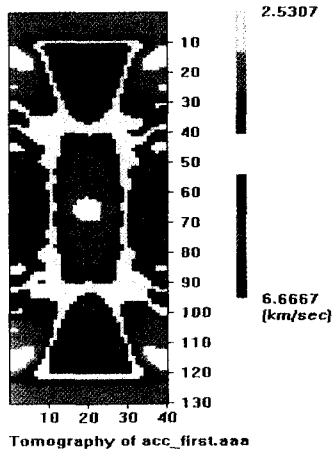


Fig. 4. Result of inversion at first peak using ART.

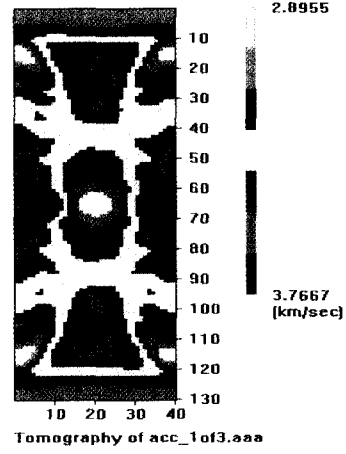


Fig. 7. Result of inversion at 1/3 peak using ART.

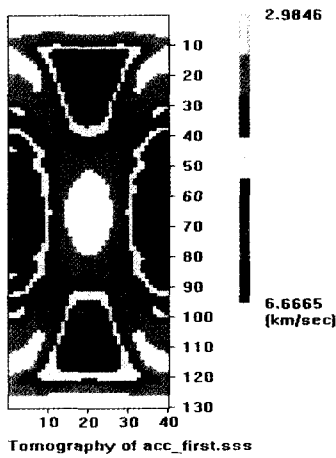


Fig. 5. Result of inversion at first peak using SIRT.

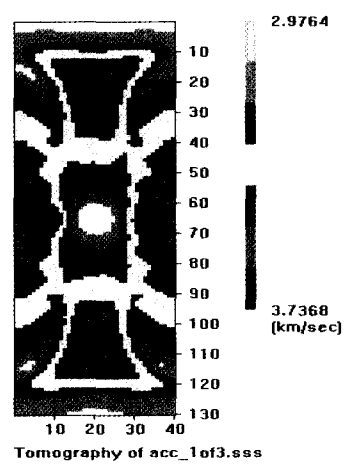


Fig. 8. Result of inversion at 1/3 peak using SIRT.

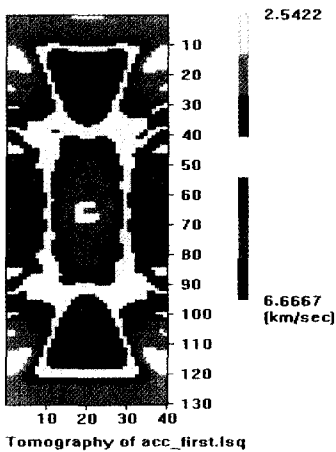


Fig. 6. Result of inversion at first peak using LSQR.

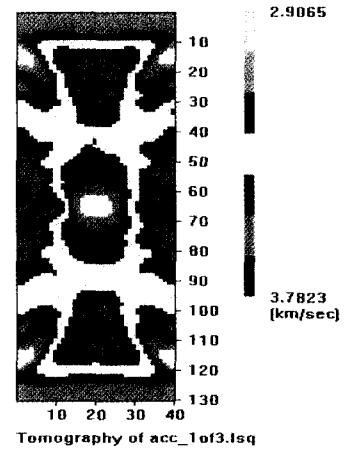


Fig. 9. Result of inversion at 1/3 peak using LSQR.

1/3 peak의 자료에 의한 역산 결과는 Fig. 7~9에서 볼 수 있으며 3 가지 역산법에 의해서도 공동의 위치 및 모양이 잘 나타나고 있다.

peak 1의 자료에 의한 역산 결과는 Fig. 10~12에서 볼 수 있으며 공동의 위치 및 모양이 1/3 peak 자료처럼 3가지 역산법에서 잘 나타남을 볼 수 있다.

peak 2의 자료에 의한 역산 결과는 Fig. 13~15에서 볼 수 있으며 상하로 2개의 공동이 존재하는 것처럼 나타난다.

max peak의 자료에 의한 역산 결과는 Fig. 16~18에서 볼 수 있으며 역산 결과는 모형과는 아주 다른 결과를 보이고 있다.

다섯 부분에서 수행된 주시 토모그래피에서 max지점과 peak 2지점에서의 결과는 모형과는 상이하게 다른 모형을 탄성과 영상화 단면상에서 나타내었으며, 첫 번째 진폭지점, 즉 peak 1지점에서의 영상화 단면은 가장 뚜렷하고 다른 영상화 단면보다 상대적으로 모델에 대한 저속도 이상지역의 범위가 의도한 결과와 가장 잘 부합된다는 것을 확인할 수 있다. 또한 first peak 와 1/3 peak 지점보다는 초동주시 발체가 한결 쉽다는 장점도 있다. peak 1지점에서의 영상화 단면은 다음에 수행될 충격실험에 의한 주시 토모그래피에 적용되었다.

3.4 RMS 오차

위에 상기된 바와 같이 역산법을 수행한 결과로 얻어진 탄성과 속도 영상화 단면의 상태는 RMS 오차의 값에서도 확인할 수 있다. Fig. 19에서와 같이 각각 선택된 다섯 부분의 초동주시 역산 방법의 RMS 오차에서도 peak 1 부분에서의 오차가 다른 부분의 오차보다 상대적으로 작았으며, 공동의 부분을 표현하지 못한 max 부분은 오차에 있어서도 상당히 높은 값을 나타내었다.

4. 모형실험

유한요소법의 결과를 토대로 하여 다음과 같이 실험실 수준의 구조물 모형을 제작하여 실험을 수행하였다.

4.1 실험모형 제작

유한요소법으로 역산법을 수행한 구조물과 동일한 모양으로 실제 충격시험을 수행하기 위하여 실험실 수준의 구조물 모형을 제작하였다. 모형은 내부에 공동의 모양을 재현하기 위하여 인공적으로 정육면체(6 cm×6 cm×6 cm)의 공동을 삽입하였고 공동은 반사나 회절이 일어날 수 있는 최적의 조건을 형성하기 위하여 공

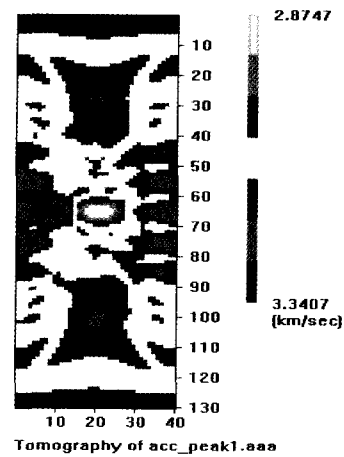


Fig. 10. Result of inversion at peak 1 using ART.

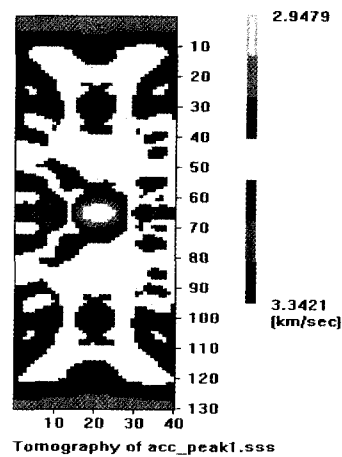


Fig. 11. Result of inversion at peak 1 using SIRT.

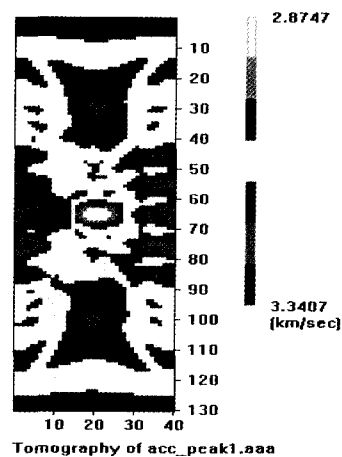


Fig. 12. Result of inversion at peak 1 using LSQR

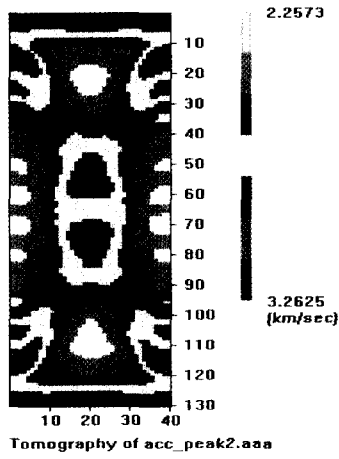


Fig. 13. Result of inversion at peak 2 using ART.

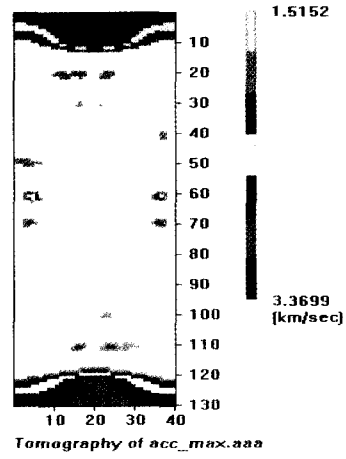


Fig. 16. Result of inversion at max peak using ART.

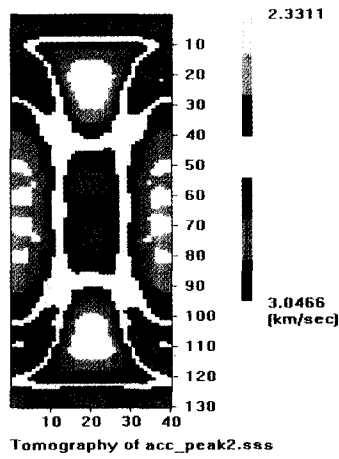


Fig. 14. Result of inversion at peak 2 using SIRT.

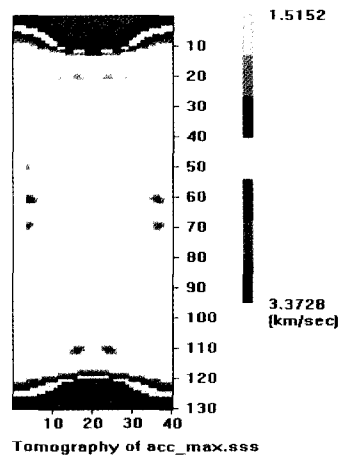


Fig. 17. Result of inversion at max peak using SIRT.

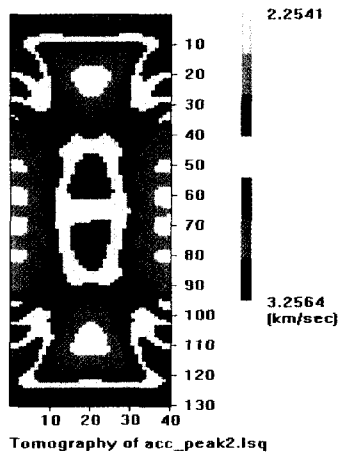


Fig. 15. Result of inversion at peak 2 using LSQR.

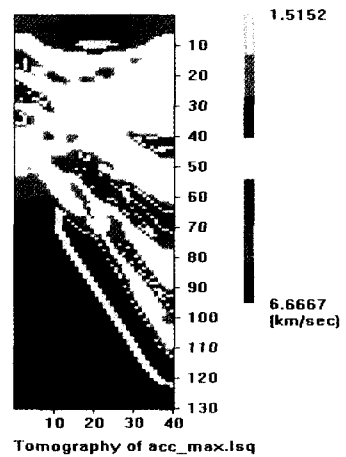


Fig. 18. Result of inversion at max peak using LSQR.

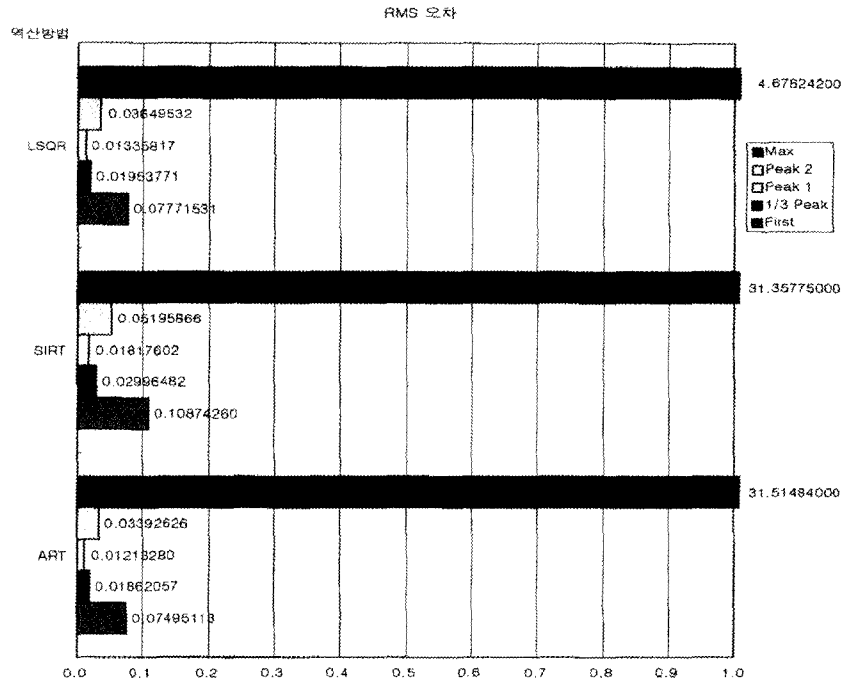


Fig. 19. RMS error comparison diagram between inversion methods.

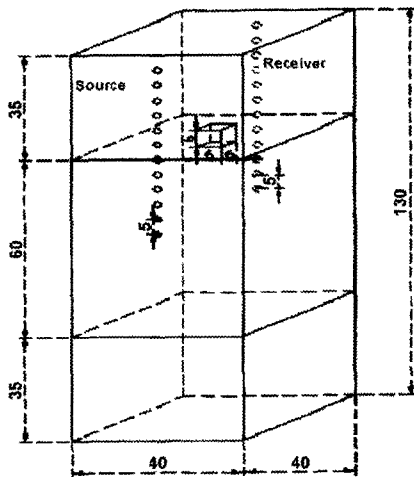


Fig. 20. Schematic illustration of impact test specimen (top).

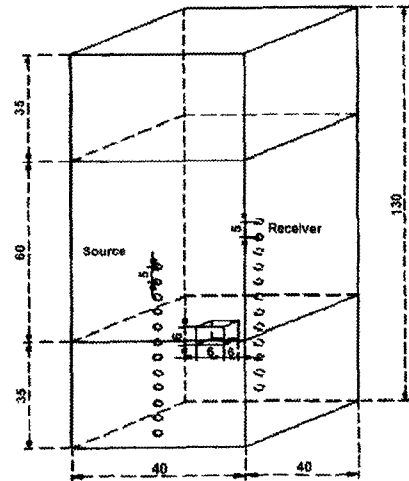


Fig. 21. Schematic illustration of impact test specimen (bottom).

기로 채워져 있고, 구조물의 상하에 Fig. 20, 21과 같이 위치하고 있다.

4.2 시험방법

실험은 Fig. 20, 21과 같이, 상부와 하부로 나누어서 실시하였다. 상부 부분은 구조물의 오른쪽에 파동원을

두고 왼쪽에 수신기를 위치하여 실험을 수행하였다. 각각의 진원과 수신기의 간격은 5 cm이며, 진원과 수신기는 12 개씩 위치하여 총 144 번의 실험을 수행하였다. 수신기는 충격에 의하여 발생한 탄성파가 모형을 전파한 후 최적으로 탄성파를 감지할 수 있도록 접착용 오

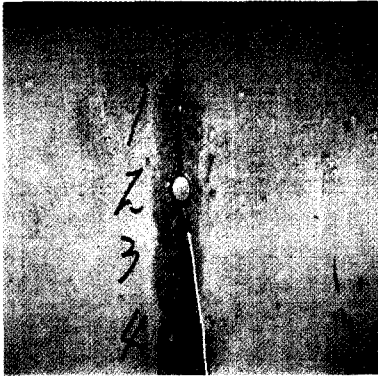


Fig. 22. Accelerometer for impact test.

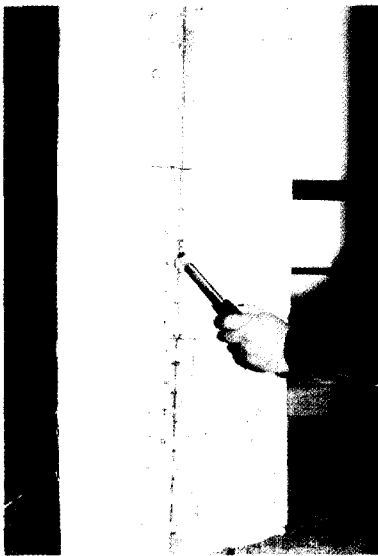


Fig. 23. Hammer for impact test.

일을 사용하여 면과 밀착시켰다. 파동원은 망치모양을 하고 있고, 머리(head) 부분에 콘크리트 구조물의 특성에 맞도록 금속 tip을 설치하여 실험을 수행하였다. 이때 Fig. 22는 가속도계의 설치를 보여주며 Fig. 23은 진원으로 사용하는 망치를 보여준다.

4.3 시험장비

시험에 사용되어진 시스템은 Fig. 24와 같다. 그림에 서와 같이 탄성파를 발생시킬수 있는 파동원(impact-hammer)과 그것에 의하여 발생되어진 파형을 감지할 수 있는 수신기(가속도계)와 A/D변환기, 자료 저장 및 처리 장치이다.

System 구성도

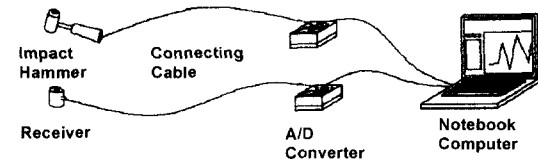


Fig. 24. Schematic illustration of test configuration.

파동원은 망치의 형태를 가지고 있으며, 그 재원은 미국 DYTRAN사의 모델 5800A4이고 타격부위에 force sensor가 내장되어 있는 tip이 설치되어 있다. 타격하는 세기의 범위(force range)는 0~500 lbf이고 최대세기는 1000 lbf이다. 민감도(voltage sensitivity)는 10.1 mV/lbf이다. 진동을 측정하기 위한 일축 가속도계(single-axis accelerometer)는 미국 DYTRAN사의 모델 3100D24를 사용하였으며, 민감도는 1,030 mV/g이다. 가속도계에서 측정된 신호는 A/D 변환기를 통하여 디지털 자료로 컴퓨터에 저장된다. A/D 변환기는 미국 DYTRAN사의 모델 4102C이다.

노트북 컴퓨터의 PCM CIA 소켓에 삽입하여 사용되는 FFT PC card는 파동원에서 입력되어진 힘의 크기와 그것에 의하여 반대편에 위치한 수신기에서 반응하는 힘의 크기를 자동적으로 푸리에 변환하여 그래프로 표시하여 준다. FFT PC card의 설정은 시간에 대한 진폭의 변화를 가장 자세히 관찰하기 위하여 최대 샘플링 간격을 선택하였다. 즉, 0.08 sec 동안에 0.00002 sec 간격으로 샘플링하였다. $0.8/0.00002 = 4,000$ 이므로 0.8 sec 동안에 4,000개의 data를 취득할 수 있도록 설정하였다. 또한, 동일한 파동원을 사용하였을 때, 수신기의 거리가 멀어짐에 따라 진폭의 변화를 관찰하고, 내부 공동의 위치에서 진폭의 변화를 관찰하기 위하여 파동원의 범위를 0~495.0195 lbf, 그에 반응하는 수신기의 범위는 0~4.85437 g를 적용하였다.

4.4 구조물 모형의 탄성과 속도 측정

유한요소법에서의 이론 구조물 탄성과 속도를 설정하기 위하여, 구조물 모형실험에서 탄성과 속도를 측정하였으며, 이 때 평균 속도값인 3.7 km/sec를 이용하였다. 탄성과 속도 측정에 사용되어진 기기는 초음파를 사용하여 속도를 측정하는 기기인 TICO(Proceq사, Model : ISO9001)를 사용하였다. 시험방법은 구조물 모형의 한 측면에 송신용 센서를 위치시키고 그 반대편에 수신용 센서를 설치하여 초음파의 전파시간을 전파거리

Table 1. Calculated data (P-wave velocity).

위치	거리(cm)	시간(μ s)	탄성과 속도(m/s)
10	40	109.5	3653
20	40	108	3704
30	40	111.8	3578
40	40	99.7	4012
50	40	103.1	3880
60	40	104.8	3817
70	40	107.8	3711
80	40	111.5	3587
90	40	115.9	3451
100	40	101.1	3956
110	40	103.9	3850
120	40	101.5	3941
평균		106.55	3762

로 나누어 탄성파를 계산하였다. 센서의 이동거리는 각각 10 cm 간격이며 그 결과는 Table 1 과 같다.

이론 모형에서의 탄성과 속도의 설정은 3.7 km/s 이므로, 실제 구조물 모형에서의 계산된 탄성과 속도 약 3.762 km/s는 이론모형에서의 설정과 유사하다고 사료된다.

4.5 구조물 모형 충격시험

콘크리트로 제작한 구조물 모형에 대하여 앞에서 기술한 방법을 적용하여 공동의 위치를 찾기위한 실험을

실행하였다. 수신기를 3번 위치에 고정하고 진원을 5 cm 간격마다 12개로 충격을 주었을 경우의 주시곡선들은 Fig. 25에서 볼 수 있다. 이 곡선들에서 초동주시를 발췌할 수 있으며, 이 그래프에서는 시간의 차이가 미세하므로 확대하여 시간의 차이를 알아낼 수 있다. 충격시험에서는 이론 모형실험에서 행한 각각 다섯 부분의 초동주시중 공동의 부분을 탄성과 속도 영상화 단면상에서 가장 잘 표현한 peak 1 지점을 선택하여 역산을 수행하였다.

Fig. 26~31은 콘크리트 구조물 모형실험에서 peak 1 지점의 주시시간을 이용하여 역산한 영상화한 그림이다. Fig. 26~28은 각각 상부 공동모형에 대한 ART, SIRT, LSQR법에 의한 역산 결과이며 Fig. 29~31은 하부 공동모형에 대한 각각의 역산 결과이다.

ART, SIRT법에 의한 역산 결과는 공동의 위치가 비슷하게 나타나지만 LSQR법의 경우에는 많은 잡음이 있음을 보여준다. 이것은 측정자료의 역산에 의한 수렴 과정이 다른 방법들과는 상이함에 따른 결과로 추론된다. 상기 계산 결과를 검토해보면 이론 모형과는 상이하게 공동이 위치한 지점이 과장되게 표현되기는 하지만 훌륭하게 저속도 이상지역을 단면상에서 표현함을 관찰할 수 있다. 이 결과에서 공동의 부분이 과장되게 표현되는 것은 초동주시 발췌에 있어서 정확성을 저해하는 요인의 존재 때문이라고 사료된다. 그 첫 번째 요인은 탄성과 잡음(noise)이다. 이 방법에서 발췌되는 주시시간은 파동원에서 입력된 신호가 이론 모형과는 달

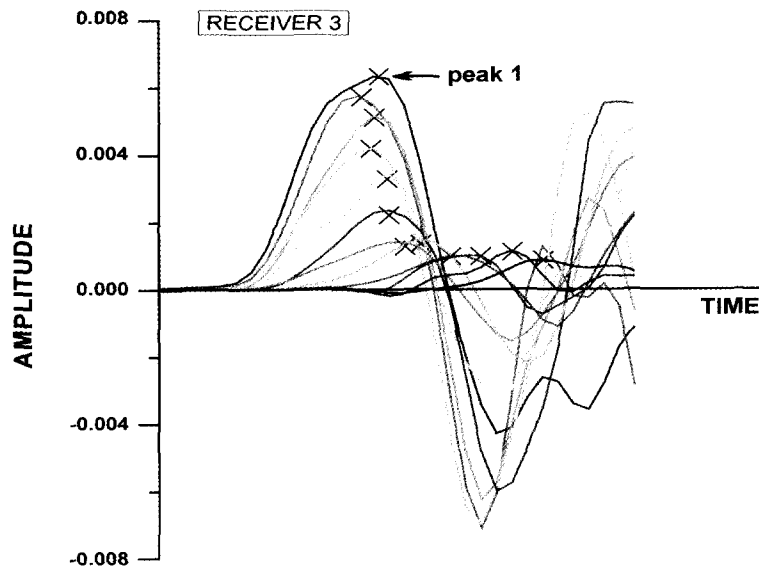


Fig. 25. Seismic traces when receiver is located at No.3 position.

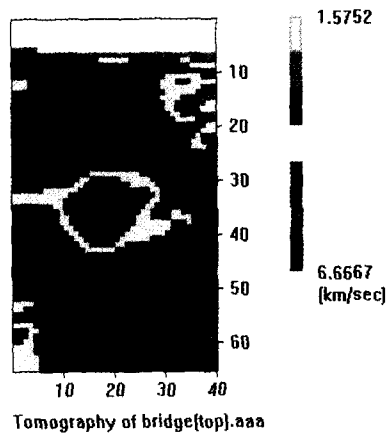


Fig. 26. Result of inversion at Peak 1 using ART(impact test, top).

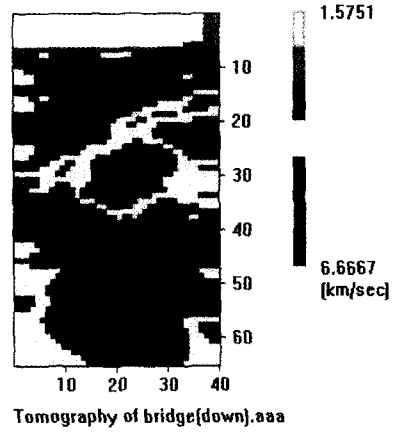


Fig. 29. Result of inversion at peak 1 using ART(impact test, bottom).

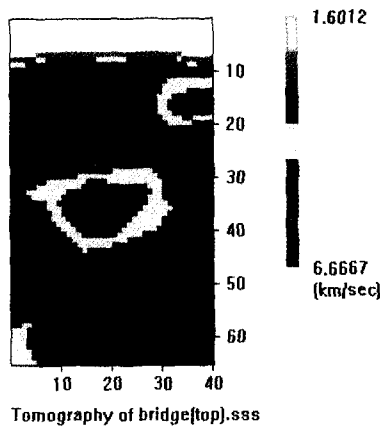


Fig. 27. Result of inversion at Peak 1 using SIRT(impact test, top).

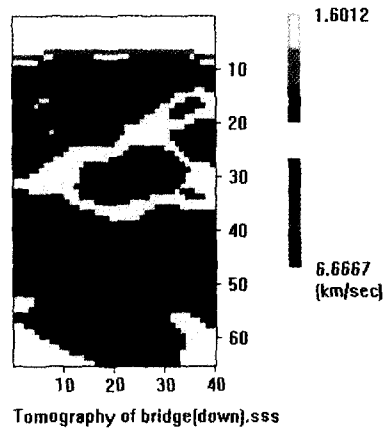


Fig. 30. Result of inversion at peak 1 using SIRT(impact test, bottom).

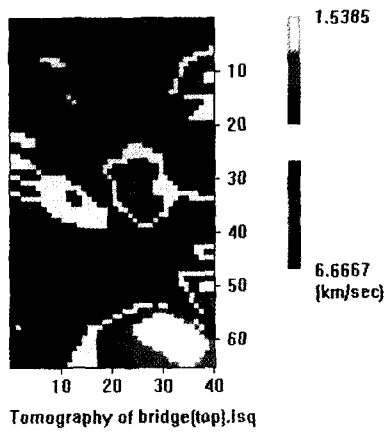


Fig. 28. Result of inversion at peak 1 using LSQR(impact test, top).

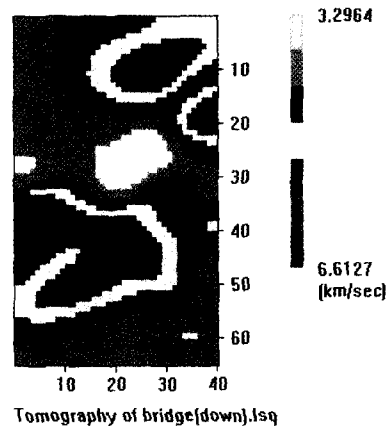


Fig. 31. Result of inversion at peak 1 using LSQR(impact test bottom).

리 구조물 내부에 포함되어 있는 여러 가지 불연속면 즉, 양생시기의 공극이나 균열에 의하여 예상하지 못했던 잡음에 의한 초동주시의 발체오류가 토모그램(tomogram) 분해능의 한계를 초과할 수 있다는 것이다. 또한, 제작 당시 세 부분으로 분리하여 제작하였기 때문에 세 부분을 접합하는 방법에서 많은 오류가 발생하였을 것으로 사료된다.

두 번째 요인으로써 결과된 탄성과 주시곡선은 탄성과 회절(diffraction) 및 굴절(refraction)에 의해 파가 가진원-수진기간에 이르는 직접파(transmission wave)보다 주시적으로 다소 빨리 도착하거나 혹은 상호 중첩되어 직접파의 초동이 다소 왜곡되게 나타난다는 것이다. 이와 같은 초동인식의 오류는 토모그램상에서 속도 분포도가 상대적으로 과장되게 표현되는 주된 요인이라고 사료된다.

5. 결 론

유한요소법에 의한 파동의 전파시간 계산 및 여러 가지 역산법을 이용한 이론적인 모형계산과 콘크리트 모형 실험에 의해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유한요소법에 의해서 계산된 탄성과 해석자료의 초동 선정을 다섯 개로 분류하여 역산한 결과 다섯 부분 중에서 1/3 peak 지점, first 지점, peak 1 지점은 중앙에 위치하고 있는 공동의 위치를 속도 영상화 단면에서 실제 모형과 가까운 형태를 나타내었다. 세 부분 중에서도 peak 1지점에서의 역산이 구조물 모형과 가장 유사한 형태를 나타내었으며, 그 결과는 RMS오차에서도 확인할 수 있었다.

2. 초동 peak 1을 선택하여 이론모형과 동일한 구조물 모형에서의 충격실험 결과는 중앙의 위치를 비교적 정확하게 나타내고 있으나 실제의 크기보다 과장되게 표현되고 있음을 볼 수 있었다. 이것은 탄성과 회절 및 굴절에 의한 파가 가진원-수진기 간에 이르는 직접파보다 주시적으로 다소 빨리 도착하거나 혹은 상호 중첩되어 직접파의 초동 인식이 실제 직접파와는 달리 많이 왜곡되는 것으로 사료된다.

3. 파동의 도착시간을 이용하여 구조물의 결함을 발견하는 역산 해석법과 병행하여 주파수 영역에 의한 해석법의 연구도 앞으로 연구하여야 할 과제라고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-133-003-3) 지원으로 수행되었으며 관계기관에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 박형준, 1995, 충격반향기법과 표면파기법을 이용한 콘크리트 부재의 결함 검사, 한국과학기술원 토목공학과 대학원 석사학위논문, 5-14.
2. 서백수, 1987, 유한요소법에 의한 지하 공동 탄성과 탐사에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1-27.
3. 김학수, 1994, 변형된 Born근사를 이용한 회절 지오토모그래피에 관한 연구, 서울대학교 자원공학과 대학원 박사학위논문, 23-37.
4. 윤왕중, 1991, 대수적 영상재구성법에 의한 탄성과 지오토모그래피의 연구, 서울대학교 자원공학과 대학원 박사학위논문, 15-18.
5. 이호영, 1990, CG, SIRT와 DLSQ방법에 의한 지오토모그래피의 역산, 한국자원공학회지, Vol. 27, 222-233.
6. Jupp, D.L.B., and Vozoff, K., 1975, Stable iterative methods for the inversion of geophysical data, Geophy. J. R. Astr. Soc., Vol. 42, 957-976.
7. Lines. L. R. and Treitel. S., 1984, A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems, Geophysical Prospecting 32, 180-194.
8. Mason. I. M., 1981, Algebraic reconstruction of a two-dimensional velocity inhomogeneity in the High Hazles seam of Thores by colliery, Geophysics, 46(3), 298-304.
9. 현병구, 임해룡, 이호영, 1992, 지하단면의 영상재구성을 위한 탄성과 직선파선 토모그래피의 적용성, 한국자원공학회지, Vol. 29, 245-254.
10. Sven Ivansson, 1985, A study of methods for tomographic velocity estimation in the presence of low velocity zones, Geophysics, 50(6), 969-988.
11. 이의중, 이주석, 1999, 비파괴 검사공학, 423-441.

서 백 수



1976년 서울대학교 자원공학과 공학사
1980년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1988년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel : 033-250-6254
E-mail : bssuh@cc.kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 지구환경시스템
공학과 교수

장 선 웅



1998년 강원대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2001년 강원대학교 대학원 지구시스템공학
과 공학석사
Tel : 033-541-4541
E-mail : sungwoong2@hanmail.net
현재 청림실업(주) 총무과

김 석 현



1980년 서울대학교 공과대학 기계설계공학
과 공학사
1982년 서울대학교 대학원 기계설계공학과
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 기계설계공학과
공학박사
Tel : 033-250-6372
E-mail : seock@cc.kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 기계메카트로
닉스공학부 교수

서 정 희



1964년 서울대학교 공과대학 광산공학과
공학사
1971년 미국 Colorado School of Mines,
공학석사
1973년 미국 Colorado School of Mines,
공학박사
Tel : 02-880-7220
E-mail : suh@GPL.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템
공학과 교수