

소규모 탐사단면에 대한 탄성파 토모그래피의
현장 적용 한계성 연구
A Study on the Limitations in the Field Application of
Seismic Mini-tomography

김 중 열 (Kim, Jung-Yul)
김 유 성 (Kim, Yoo-Sung)
현 혜 자 (Hyun, Hye-Ja)
김 기 석 (Kim, Ki-Seog)

한국자원연구소
한국자원연구소
한국자원연구소
희송지오택

요약/Abstract

국내 현장탐사에서 관찰되는 탄성파의 주파수 내용은 대부분의 경우 4kHz(파장 약 1m 내외)을 넘지 않고 있다. 이러한 한정된 주파수 내용은 탄성파를 이용한 토모그래피 응용 측면에서 우선 탐사단면에 대한 규모가 제한될 뿐만 아니라 토모그램(주시역해결과) 분해능에서도 근원적인 제약을 수반하게 하는 것이다. 따라서 본 논문은 현장실험을 통하여 이와 같은 소규모 단면 측정에서 대두되는 제반 문제점(예 : 트리거 주시지연 현상, 수진기 수의 극대화, 샘플링의 고분해화(1/32ms 이내), 발생원 구사의 일관성, 타당한 격자 크기 선정)을 구체화하고 있으며 동시에 그에 따른 현장응용 실패를 보여주고 있다. 국내 현장실험은 콘크리트 구조물 철타교각을 대상으로 수행되었으며 그 결과는 독일 성당 종각 석조 기초구조물을 대상으로 얻어진 탐사결과와 상호 비교하였다.

Frequency content of seismic waves observed in field seismic survey in Korea has almost not exceeded 4kHz(wave length 1m). The limited frequency content not only restricts the minimum size of objects which can be surveyed in seismic tomographic application, but also makes a fundamental limit in the resolution of tomogram. This paper shows the reasonable result obtained by confirming and resolving the problems which can be occurred in measuring procedure for the small-sized section through field application. Seismic tomographic field survey was performed for a concrete construction for railroad bridge in Korea, and to this the tomographic measurements for the stone-build foundation construction for a bell house of church in Germany were compared.

서 론

최근 탄성파 토모그래피 기법은 임의의 제한된 지질단면에 표출되는 물성(탄성과 속도)을 규명함으로써 암반 상태(파쇄대, 압층 분리 등)를 파악할 수 있는 하나의 유력한 첨단 물리탐사법으로 간주되고 있다(김중열 외, 1992). 여기서 탐사 대상 단면 크기는 대체로 100m×100m 미만이 되고 있으며 일반적으로 단면 크기가 작을수록 암반에 대한 보다 정확한 정보가 기대된다. 그러나 현장탐사에서 주어지는 탄성과 주파수 내용 및 측정기기 분해능은 우선 탐사단면에 대한 가탐성(김중열 외, 1991)을 규정하기 때문에 탐사이전 이에 대한 충분한 배려가 선행되어야 하는 것이다. 본 논문은 현장실험을 통하여 탄성파 토모그래피 응용이 어느 정도로 작은 탐사단면에 대해서도 그 실효성을 거둘 수 있는가를 보여주고 있으며 동시에 응용에 따른 제반 문제점들을 구체화하고 있다. 우선, Fig. 1은 하나의 보기로써 탐사에 따른 근원적인 문제를 나타내고 있다. 즉, 간격이 1.55m에 불과한 거리에서 서로 다른 암반을 통과한 탄성파의 주시는 각각 0.443ms(3,500m/s 속도층), 0.517ms(3,000m/s 속도층)이다. 이 때 주시역산을 위해 고려되는 상대적인 주시차는 단지 0.0738ms가 되며 만약 기록과정에서 측정기기의 샘플링 간격(sampling interval) 선정이 1/32ms(고분해능에 해당함)이라도 주시차 0.0738ms는 3샘플 미만에 불과하게 된다. 본 실험에서 만약 암반의 속도를 각각 6,000m/s, 5,000m/s로 변화시킨다면 상대적인 주시차는 0.052ms(< 2samples)가 되어 이때에는 토모그래피 기능이 한계에 도달되었다고 할 수 있는 것이다. 그러나 Fig. 1에서 단지 발생원-수진기 간격을 10배 정도(15.5m) 확장시킨다면(단면측정이 약 10배 확대) 0.738ms(~24samples)에 달하는 주시차가 발생하기 때문에 기록에서는 주시의 변화가 확연히 인식됨과 동시에 바람직한 토모그래피 응용이 기대될 수 있는 것이다. 따라서 Fig. 1에 나타난 소규모 단면에 대한 탐사를 위해서는 무엇보다 다음과 같은 사전 배려가 토모그래피의 기능을 극대화시킬 수 있는 것이다. 즉,

- 적절한 발생원 선정 및 그에 따른 트리거시점의 일관성
- 수신기 선정
- 측정기기의 고분해능화

○ 전산처리 과정에서 타당한 격자크기 선정
 다음은 현장응용 사례를 통하여 상기 문제를 극복하는 과정을 서술하고 있다.

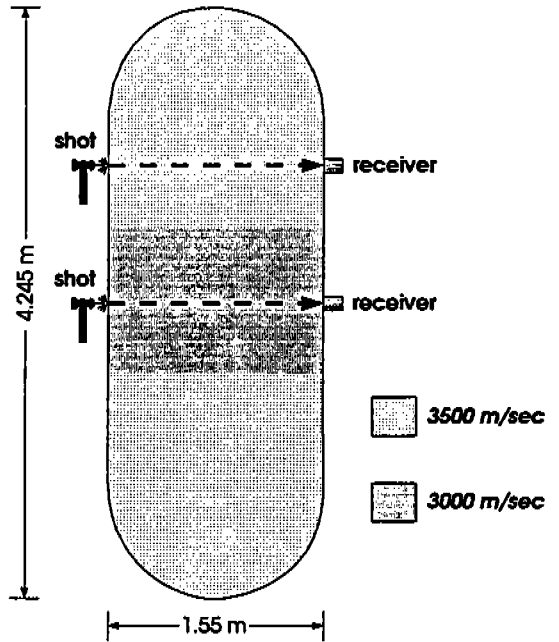


Fig. 1. Mini-tomography. Cross section of a bridge pier was simulated.

현 장 실험

발생원 위치에서 탄성파가 생성되는 시점(trigger time)을 포착하는 장치는 그 기능에 따라 상호 미소한 주시차를 보여주고 있다. Fig. 2에는 동일한 발생원 위치에서 다양한 트리거 장치에 의해 반복하여 측정된 기록을 상호 대조하고 있다. 전체적으로 전기 쇼트를 이용한 트리거장치는 10번 반복측정에서 대체로 일관성을 띤 초동주시를 보여주고(Fig. 2(c) 참조) 있는 반면 압전소자를 사용한 서로 다른 유형의 트리거장치에서는 측정이 반복됨에 따라 초동주시의 일관성이 상대적으로 다소 떨어지고 있음이 관찰된다(Fig. 2(a),(b) 참조). 경험에 의하면 압전소자 펄스에 의한 트리거 시점은 충격의 크기, 충격면의 견고성, 트리거장치 내부구조 및 압전소자의 특성

Minitomography trigger test
Piezoelectric trigger type 1

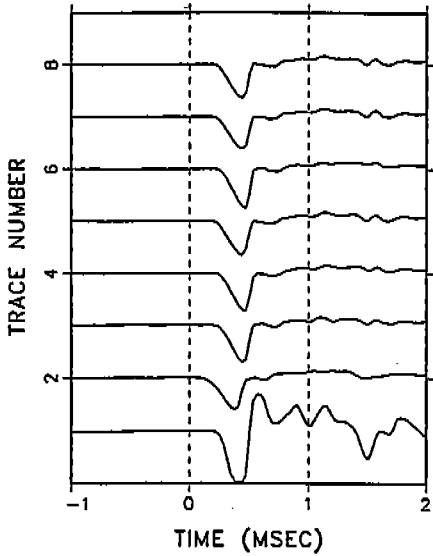


Fig. 2. Triggering time test.
(a) Using piezoelectric triggering device (type 1).

Minitomography trigger test
Contact trigger

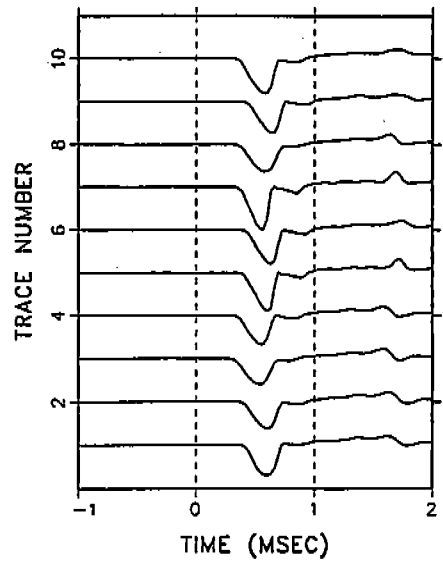


Fig. 2. (continued).
(c) Using contact triggering device.

Minitomography trigger test
Piezoelectric trigger type 2

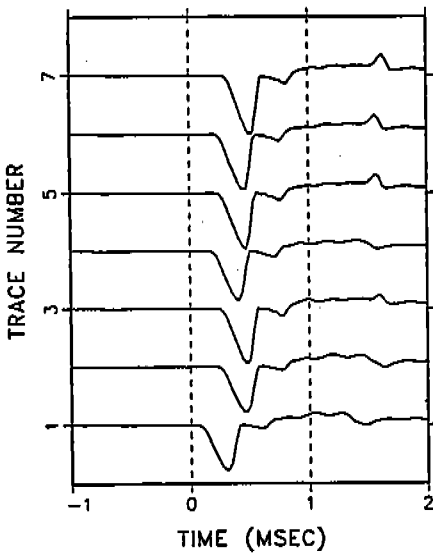


Fig. 2. (continued).
(b) Using piezoelectric triggering device (type 2).

에 따라 다소 달라지고 있음이 관찰되었다. 따라서 본 현장실험에서는 쇼트 트리거 장치가 사용되었으며 또한 측정의 일관성을 위해 특별히 개발된 발생원 장치에 의해 트리거 오차가 1sample(1/32ms) 미만에 달하도록 하였다.

탐사대상으로는 대전 근교에 위치한 하나의 철로 교각이 선정되었으며 측정을 위해 선정된 단면 테두리에는 Fig. 3에 표기된 지점(station No.1~53)에

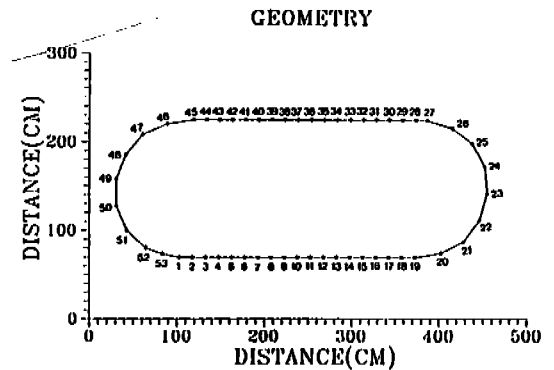


Fig. 3. Geometry of station numbers for the source and receiver locations.

발생원 및 수진기가 적절하게 배열되었다. 우선 단면 측정 이전 두개의 서로 다른 수진기의 진동감지 기능을 상호 비교하였다. 즉, Fig. 4는 지표 탄성파탐사에서 상용되는 속도 수진기(velocity geophone : OYO 28Hz)에 의해, Fig. 5는 가속도 수진기에 의해 획득한 탄성파기록과 그에 대한 주파수 내용을 보여주고 있다. 여기서, 속도 수진기의 경우 도달되는 시그널(Fig. 4(a))의 주 주파수는 약 1,300Hz이나 (Fig. 4(b) 참조) 가속도 수진기를 사용하였을 때에는 도달되는 시그널(Fig. 5(a) 참조)의 주 주파수(Fig. 5(b) 참조)가 약 3,000Hz에 달한다. 따라서, 소규모 단면측정을 위해서는 가속도 수진기의 응용이 토모그램 분해능 측면에서 불가피한 것이다. 참고로 Fig. 6은 하나의 수진기(가속도 수진기 위치 station No.14)에 대해 발생원(contact triggering, special type of Hammer)이 28번 이동되면서(station No.22~50) 측정된 탄성파 기록(샘플링 간격 1/32ms)을 나타내고 있다. 여기서 초동 파형이 대체로 일관성을 잃고 있는 것은 교각매질의 불균질성과 또한 자유면에 의한 반사파의 중첩현상에 기인된 것으로 판단된다. 본 단면측정으로 인한 데이터량은 도합

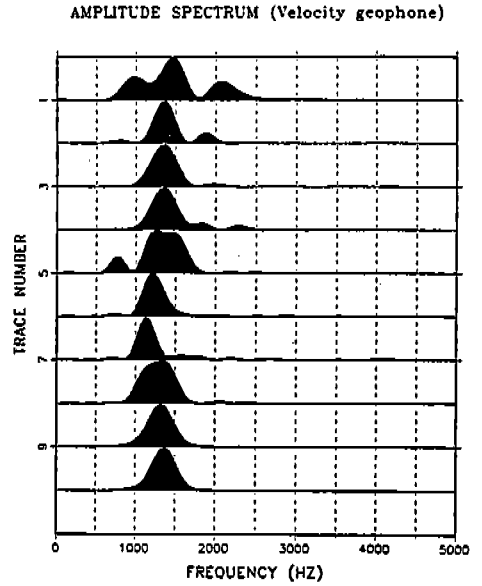


Fig. 4. (continued).
(b) Frequency content derived from the velocity geophone.

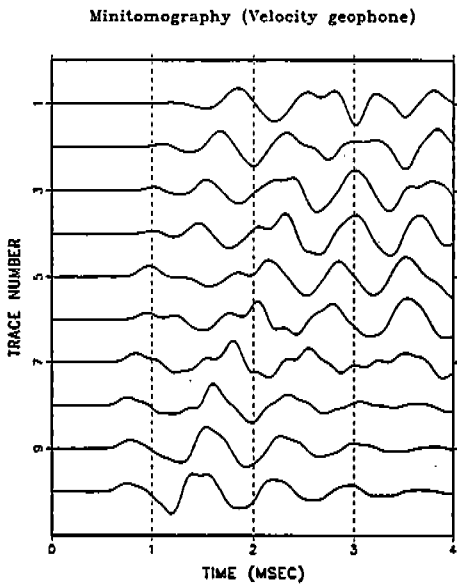


Fig. 4. Frequency content test.
(a) An example of cross section data using velocity geophone. Receiver point : station No.53, shot points : station No.29-46.

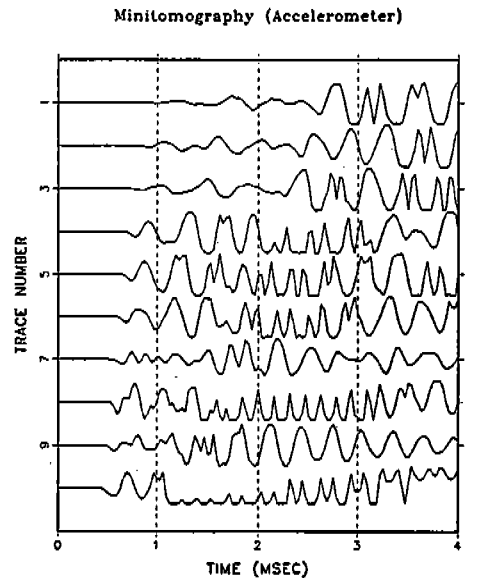


Fig. 5. Frequency content test.
(a) An example of cross section data using acceleration geophone. Receiver point : station No.53, shot points : station No.29-46.

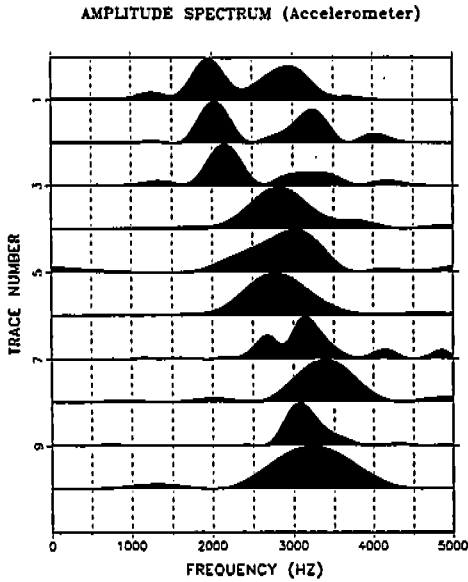


Fig. 5. (continued).
(b) Frequency content derived from the acceleration geophone.

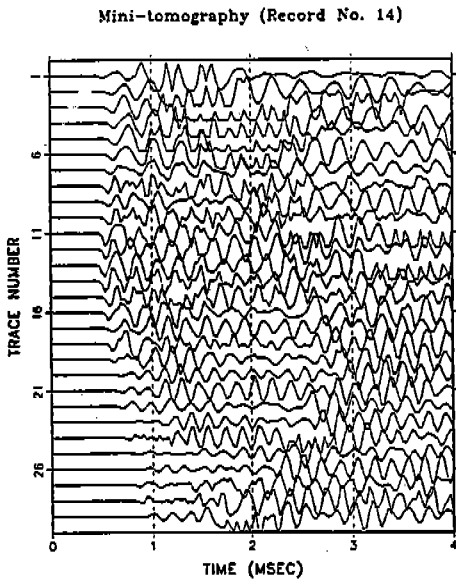


Fig. 6. An example of cross section data (sampling interval=1/32ms). Source locations : station No.22-50, receiver location : station No.14.

777 트레이스(trace : single source—single receiver seismogram)이며 그로부터 발췌된 초동주시들은 다시 Fig. 7에 나타난 초동주시—파선길이 상관도로 표현됨으로써 일차적으로 발췌된 내지 매질의 불균질성을 개략적으로 판단하게 된다(김중열과 김유성, 1995). 단면 테두리가 탐사를 위해 거의 활용될 수 있었기 때문에 발췌된 주시들은 대체로 폭넓은 파선길이에 대해 골고루 분포되고 있으며 또한 그들이 대각선 주위로 흐트러진 상태는 바로 매질의 불균질성을 대변하는 것이 되겠다.

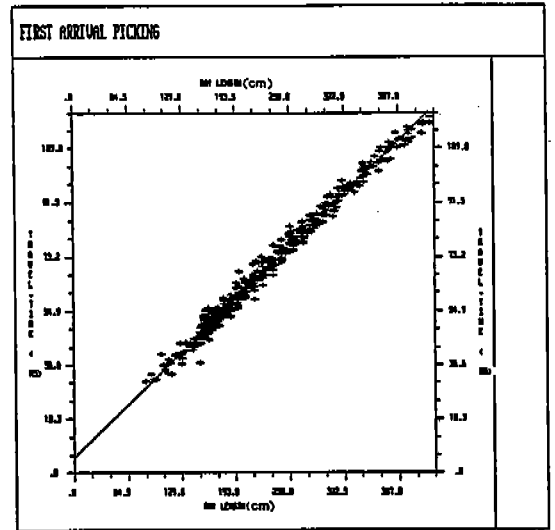


Fig. 7. Plot of traveltime versus ray length. The first onsets were derived from the cross section data.

상기 발췌된 주시치들은 발생원 및 수신기 위치에 대한 정보와 더불어 주시역산(travel time inversion)을 위해 입력되었으며 그 결과(흔히 토모그램이라고 함)는, Fig. 8에서 나타난 바, 단면에 대한 탄성과속도 분포로 표현되었다(반복적 역해기법 SIRT(Simultaneous Iterative Reconstruction Technique)—straight ray가 사용됨(iteration 10, cell size 20cm×20cm) : 김중열 외, 1992). 본 탐사대상이 콘크리트 구조물(철근 포함)이라는 것을 고려하면 여기서 보여준 탄성과 속도범위(3,100m/s~3,500m/s)는 전체적으로 구성물의 양호함을 시사하는 것이 되겠다. 그러나 교각 표면 가까이에서는 산발적으로 습기로 인해 풍화가 시작된 부분들이 관찰되었

으며 이는 상대적으로 낮은 탄성파속도를 보여주었다.

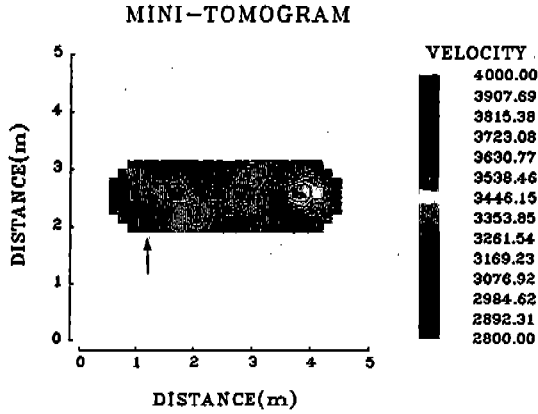


Fig. 8. Geotomographic velocity distribution of the pier cross section.

상기 소규모 단면에 대한 탄성과 토모그래피의 응용은 이미 한 독 국제공동연구(과기처 특정과제) 차원에서 하나의 연구대상이 된 바 있다. 다음은 독일 Hattingen 소재 St. George 성당 종각 기초구조물(석조)을 대상으로 탐사한 결과를 소개하고 있다(Lehmann, 1993). Fig. 9는 탐사단면을 보여주고 있으며 그에 따른 발생원-수진기 배열은 Fig. 10 (× : 발생원 위치, ○ : 수신기 위치)에 나타나 있다. Fig. 11은 하나의 측정데이터(5 traces)를 나타내고 있으며(발생원 : 해머, 수신기 : acceleration geophone) 전체 데이터양은 도합 441 트레이스이다. 여기서 초동주시 발췌는 뚜렷한 탄성파의 도달로 인하여 쉽게 이루어질 수 있음을 볼 수 있으며 그로부터 전산처리(SIRT-straight ray, 20 iteration, cell size 30cm×30cm)된 결과(Fig. 12)는 폭넓은 속도분포(1,500m/s~4,200m/s)에 걸쳐 석조구조물 상태를 훌륭하게 반영할 수 있었다. 즉, zone 1에는 가열기가 설치되었기 때문에(Fig. 9 참조) 상대적으로 높은 탄성파속도가 관찰되었다. 반면, 표면에서 풍화된 상태를 보여주는 zone 2 및 3은 토모그램에서도 역시 상대적으로 대단히 낮은 탄성파 속도분포로 표현되었다. 다행히 석조 구조물 내부는 대체로 미소한 속도차를 나타내기 때문에 그래도 매질의 균질성이 보존된 것으로 판단되었다.

Masonry tomography
Geometry

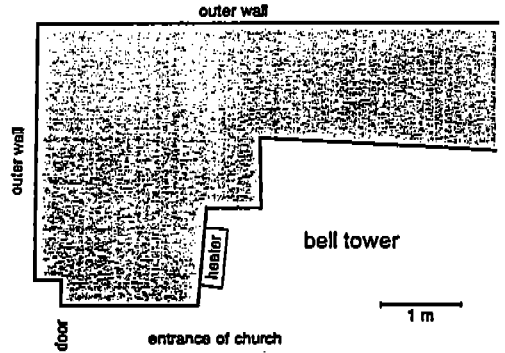


Fig. 9. Shown is the cross section of a ground pillar (St. George-Kirche in Hattingen, Germany).

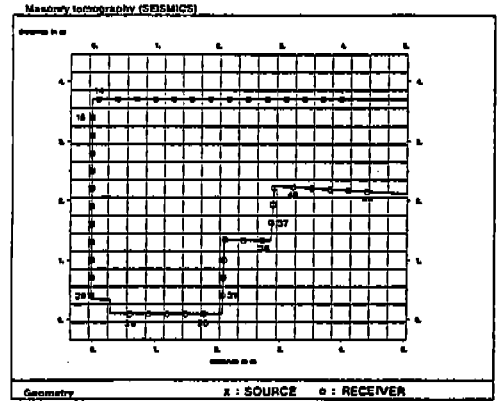


Fig. 10. Source(x) and receiver(o) locations are shown.

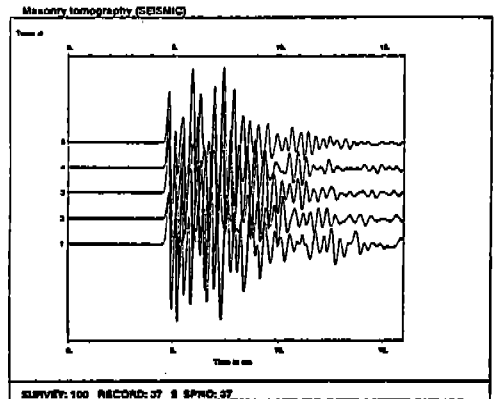


Fig. 11. An example of cross section data was shown.

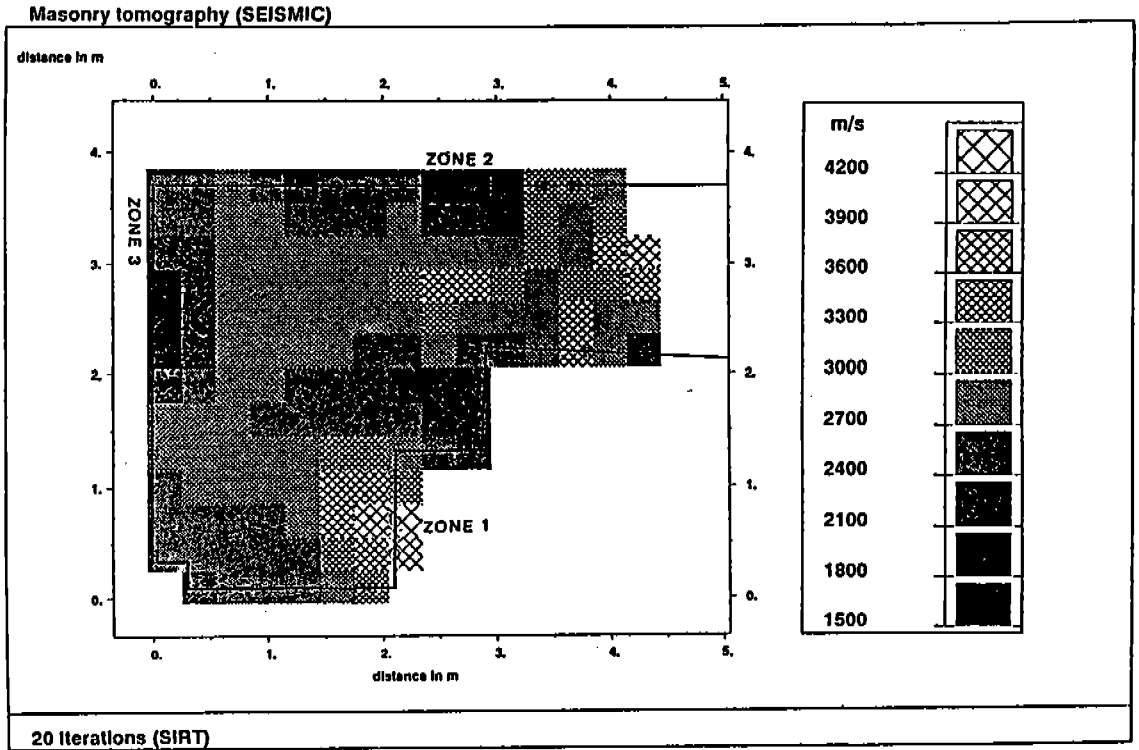


Fig. 12. Geotomographic velocity distribution (tomogram) of the cross section of a ground pillar.

결 론

국내 현장탐사에서 관찰되는 탄성과의 주파수 내 용은 대부분의 경우 4kHz(파장 약 1m 내외)를 초 과하지 않기 때문에 본 현장실험의 탐사대상은 탄성 파 토모그래피 응용성에 비추어 거의 한계에 도달된 탐사 규모로 간주될 수 있었다. 따라서 본 논문은 이 와 같은 소규모 단면측정에서 대두되는 제반 문제점 (예 : 트리거 주시지연 현상, 수신기능의 극대화, 샘플링의 고분해화(1/32ms 이내), 발생원 구사의 일 관성, 타당한 격자크기 선정)을 구체화하고 또한 극 복함으로써 바람직한 결과를 얻게 되는 과정을 보여 주었다.

대전 근교 철로교각(콘크리트 구조물)에 대한 단 면측정결과(토모그램)는 탄성파속도 3,100m/s~3, 500m/s 범위의 속도 분포를 보여주고 있으며 특히, 상대적으로 높은 속도를 띠는 단면 내부가 전체적으 로 미소한 속도차를 나타내기 때문에 구조물 내부는

전고한 것으로 판단되었다. 한편, 교각 표면에 이 르는 부분에서는 국부적으로 다소 풍화된 것으로 관찰 (육안)되었으나 토모그램 상의 탄성파속도에 비추어 그래도 그곳의 풍화 정도는 아직 미약하다고 볼 수 있었다.

독일 성당 종각 기초구조물(석재)에 대한 탐사결 과(토모그램)는 상기 국내 실험결과와는 달리 폭넓 은 속도분포(1,500m/s~4,200m/s)를 보여주었다. 여기서 가열기에 의해 습도가 조절된 부분에서는 대 체로 석재 자체의 탄성과 속도(약 3,600m/s)를 나 타내고 있는 반면, 표면 가까이 육안 관찰로도 풍화 가 이미 심화된 부분들은 상대적으로 낮은 속도분포 (약 1,500m/s~2,400m/s)를 보여주었다.

상기 현장실험 결과들은 비록 그 나름대로 소기의 탐사목적에 상당히 근접될 수 있었다. 그러나 선정된 격자 크기(cell size)가 탄성파전달 측면에서 그나마 최대한의 분해능이 된다는 것은 무엇보다도 소규모 탐 사단면 크기에 비추어 탄성파를 이용한 토모그래피

기법의 응용한계를 의미하는 것이 되겠으며 이로부터 보다 정밀한 단면 분석은 초음파(탄성파) 탐사 기법에 의해 쉽게 접근될 수 있다고 하겠다.

참 고 문 헌

- 김중열, 현혜자, 김기석, 김유성, 성낙훈, 1991, Geotomography에 의한 암반구조 연구(I) : 한국자원연구소, 과학기술처, 262p.
- 김중열, 장현삼, 김유성, 현혜자, 김기석, 성낙훈, 1992, Geotomography에 의한 암반구조 연구(II) : 한국자원연구소, 과학기술처, 215p.
- 김중열, 김유성, 1995, 탄성파 토모그래피 응용에서 대두되는 문제점 및 한계성 : 한국자원공학회지, v.32, p.151-162.
- Lehmann, B. 1993 : Bauwerksdiagnose (Messbeispiel : St. George-Kirche in Hattingen, Bericht, Deutsche Montan Technologie, Bochum.

김중열, 김유성, 현혜자
한국자원연구소
대전광역시 유성구 가정동 30
TEL : 042-868-3178
FAX : 042-861-9716

김기석
희송지오틱
대전광역시 서구 월평동 1484
TEL : 042-488-2374
FAX : 042-488-2375