

# 탄성파 탐사 기술 의 응용성

Seismic Exploration

김 중 열

한국동력자원연구소 탄성파탐사팀장

## 1. 서 론

탄성파탐사(Seismic Prospecting)는 암석 특유의 물성, 즉 탄성(Elasticity)을 이용하여 지하 지층구조 규명 및 부존된 유용광물(석유, 석탄, 금 등)을 탐지하는 방법으로 지난 60여년간 물리탐사(Geophysical Prospecting)에서 하나의 핵심적인 탐사분야로 되고 있다. 여기서 암석은 하나의 탄성체로 간주되어 물리학에서 서술하는 외부 응력(Stress), 변형률(Strain) 및 탄성상수(Elastic Constants)가 상관되는 후크의 법칙이 성립된다는 것이다. 현실적으로 암석에 충격을 가하면 하나의 진동이 관찰되며 이는 이론에서 알려진 바 미시적 측면에서 암석내부의 입자 움직임이 인접으로 파급되는 진동현상 즉, 소위 탄성파전달(Propagation of Elastic Wave)로 서술되는 것이다. 이때 생성된 탄성파는 구체적으로 상호 그의 입자움직임을 달리하는 두개의 독립된 파 즉, 파의 진행과 평행하는 P파(종파)와 대체로 그에 수직인 S파(횡파)로

분리되어 관찰된다. 탄성파 수신기(육상 : Geophone, 해상 : Hydrophone)는 바로 상기 입자움직임을 수직 혹은 수평성분으로 감지하며 이를 전기 에너지로 전환하여 하나의 탄성파기록(Seismogram)으로 출력하게 하는 것이다. P파는 S파보다 전달되는 속도가 항상 크기 때문에 주시적으로 빨리 도착되어 지진 관측에서는 흔히 초동파라고도 한다.

탄성파탐사 측면에서 인접하는 두 암석이 상호 이질적이라는 것은 각 암석의 임피던스(=탄성파속도×밀도)가 서로 다르다는 뜻이다. 즉 임피던스가 다른 인접된 암석은 상호 경계면(지층경계면)을 이루게 되며 전달되는 탄성파는 상기 경계면에서 그의 진로와 에너지 변화를 일으킨다. 이러한 변화를 타당한 방법으로 취합, 분석하여 그 지층경계면을 규명할 수 있다는 것이 바로 탄성파탐사의 근본원리인 것이다. 현실적으로 이로부터 얻은 지층구조 단면도는 시추 데이터와 잘 부합되기 때문에 선진국에서는 지하 수 km에 부존된 석유 및 금속광물은 물론 토목

공사의 지반조사 및 지하수 탐사에도 탄성파탐사가 널리 사용되고 있는 것이다.

국내 탄성파탐사 응용은 선진국과 비교하여 또 다른 문제점을 안고 있다. 우선 대부분 탐사 지역이 고저가 심한 산악지대에 위치하고 있으며 또한 탐사 가능한 지역이 협소하여 재래의 방법 응용에 큰 제한이 있다는 점이다. 한편 탄성파발생원으로 흔히 사용되는 화약(Explosive Sources)은 재해문제 등으로 인하여 거의 이용될 수 없다는 것이다. 무엇보다 가장 큰 문제는 극심한 단층 및 습곡작용으로 인한 지층구조의 복잡성에 있으며 이에 대한 탄성과 전달 연구는 이론적인 측면에서도 크게 미치지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 우선 재래식의 탄성파탐사 기술을 최첨단화하고 나아가서 상기 서술된 어려움을 극복하는 데 중점을 두고 있다. 이를 위한 하나의 큰 연구 결실은 국내에서 독자적으로 개발된 모형실험 측정 시스템(김중열외, 1988)이다. 이는 실험실에서 지층구조의 한 부분을 유사 모형화(Physical Modeling)하여 현장탐사에서와 같이 탄성과 발생원-수진기 배열에 의해 측정함으로써 탄성파의 물리적인 전달현상을 연구하는 것이다. 상기 시스템에는 IEEE 488 단자를 통한 각 기기의 자동제어 Software 개발, P점원 개발(Kim and Behrens, 1986), 파형재생법 개발(Kim, 1989), 복잡한 지층구조에 대한 모형제작 및 지금까지 연원으로 되어온 암석의 파쇄대 모형제작을 가능하게 한 특유의 컴퓨터 수치 제어장치(CNC-Machine)개발(김중열외, 1989) 등의 첨단기술이 내포되어 있다. 이러한 실험장치는 지하공동탐지를 가능하게 한 P빔 발생원 개발(Kim, 1989) 및 새로운 탄성과 S\* 발견(Kim and Behrens, 1986) 등 다양한 기술 축적을 가능하게 함으로써 그의 연구 활성화는 세계적이라 할 수 있다.

탄성파탐사 현장응용 기술에서는 Telemetry System에 기반을 둔 현장 탄성파탐사 측정 시스템 SEAMEX 85(서독 DMT 연구소 개발) 및 방대한 데이터를 처리할 수 있는 PC형 Micro MAX 전산처리 시스템(Advance Geophysical, U. S. A.)에 제반 Hardware 및 Software 처리 기술들이 확립되었으며(탄성파탐사 기술정보 제 1호) 특히 탄성과 발생원 측면에서는 Weight Drop형 “봄저”(지하 약 300m 심도까지 응용: KIER-SEIS-4), “타구”(지하 약 1.5km까지 응용: KIER-SEIS-5) 및 S 발생원 “중축타”(KIER-SEIS-6)가 개발되어 그 응용성이 입증되고 있다.

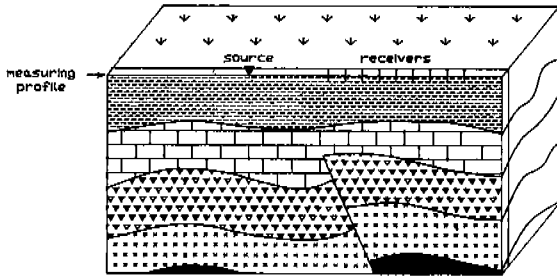
상기 첨단 기술축적은 탐사조건 및 탐사대상에 비추어 지금까지 탐사가 부적합하거나 아니면 거의 불가능한 것을 점진적으로 가능하게 하는데 큰 기여를 할 수 있었다. 다음 장에는 지난 2년간 국내에서 수행한 탐사실례를 바탕으로 기술이 개발된 현황과 나아가서 그의 응용성을 요약하고자 한다.

## 2. 탄성파탐사의 응용

탄성파탐사 기술은 탐사대상 및 목적에 따라 다방면으로 세분화되고 있다. 본 장에서는 응용도가 빈번한 방법들을 편의상 탄성파전달 현상에 따라 분류함으로써 탐사의 유용성과 또한 그의 한계성을 서술하고자 한다.

### 가, 반 사(Reflection Seismics)

그림 1은 일반적인 탐사원리를 나타내고 있다. 탄성과 발생원과 수진기 배열은 보통 일직선을 나타내며(흔히 탐사축선이라고 함) 생성된 탄성파는 각 지층 경계면에서 반사되어 지표에 놓여 있는 수진기에 감지된다. 반사되는 에너지는 경계면에서의 임피던스 대조로 유래되는 반사계수

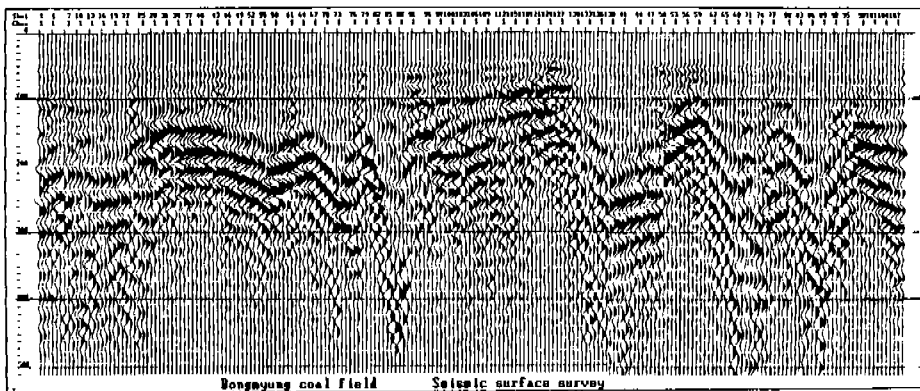


〈그림 1〉 탄성파탐사기술-반사법

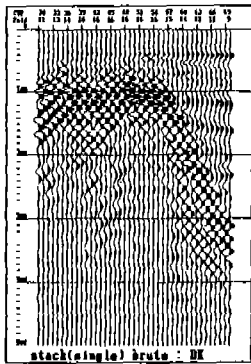
와 상관되며 심부 지층경계면에서의 반사는 단순히 탄성과 발생원의 에너지 크기에 따라 조정된다. 탐사결과는 그 측선에 수직인 지층구조단면도로 나타나게 된다. 그로부터 임의의 찾고자 하는 광맥의 위치와 그 경계면이 구체화되며 또한 그의 연장상태(예: 습곡 및 단층상태) 및 매장량 추정이 가능하게 될 뿐만 아니라 특히, 시추결정과 채광설계에서는 상기 단면도가 대단히 중요한 정보로 간주되고 있는 것이다. 이러한 탐사효율성 때문에 지난 반세기 동안 많은 지구물리학자들은 그 분해능을 높이고자 방대한 전산처리기술은 물론 현장탐사 기술개발에도 부단

한 노력을 아끼지 않았던 것이다.

그림 2는 국내 문경소재 봉명탄전 지표에서 약 800m 측선으로부터 얻은 데이터를 전산처리한 결과이다. 여기서 짙게 나타난 부분은 탄층의 연장상태를 나타내고 있으며 그들의 극심한 단층 및 습곡상태가 여실히 관찰되고 있다. 탄성파탐사가 일반적으로 심부 약 3km에 부존된 석유를 찾는 데에도 유용하게 응용되고 있으나 지표에 가까운 지층구조 규명에는 그 탐사효율성이 크게 떨어지는 경우가 흔히 있다. 예를 들면 그림 3 (a)는 대관령 목초지 약 100m 측선 상에서 얻은 천부 지층구조단면도(심도 약 100m 미만)이다. 왼쪽부분에서 흐트러진 부분은 지표에 따라 전달되는 표면파에 의해 유래된 것으로 이는 탐사 분해능을 크게 저하시키는 요인이 되고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 개발된 것이 바로 P빔 발생원(Kim, 1989)이다. 우선 상기 결과를 초래한 탄성과 발생원의 에너지 전달상태(Radiation Pattern)를 살펴보기로 한다. 그림 4 (a)는 그에 대한 P파 및 S파의 방사각에 따른 에너지 크기를 나타내고 있다. 즉, P파는 연직방향에서, S파는 약 45°, 135°에서 그의 에너지가 극값을 갖고 있다. 이론적으로 상

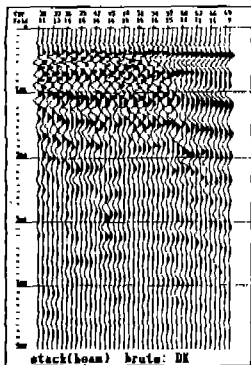


〈그림 2〉 탄성파탐사기술-반사법 문경소재 봉명탄전 탄층구조탐사



단일 발생원

(a) 단일발생원 응용



P빔 발생원

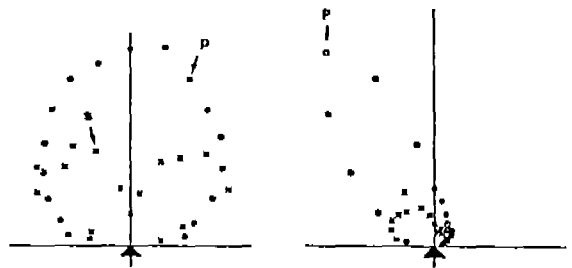
(b) P빔 발생원 응용



지 질

(그림 3) 탄성파탐사기술-반사법

기 대등한 P파 및 S파는 상호 연쇄되어 큰 진폭의 표면파를 초래한다. 그림 4 (b)는 P빔 발생원의 방사형으로써 이는 S파의 에너지가 극소화된 반면 P파는 좁은 방사각 범위에서 집중적으로 그의 에너지가 전달되기 때문에 표면파의 약화를 근본적으로 달성할 수 있는 것이다. 그림 3 (b)에 나타난 결과는 이에 대한 현장입증으로써 이는 천부 지층구조 규명에 밝은 전망을 약속할 수 있는 연구결실이라 할 수 있다.



(a) 단일발생원

(b) P빔 발생원

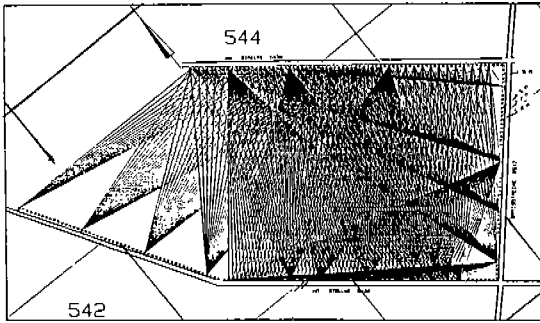
(그림 4) 탄성파탐사기술-탄성과 방사형

탄성파탐사가 지층의 단층과 습곡상태를 있는 그대로 묘사할 수 있다는 그 자체만으로도 채광 경비를 격감하게 할 수 있을 뿐만 아니라 지하수 및 온천탐사에도 결정적인 정보가 될 수 있는 것이다. 현실적으로 선진국에서는 상기 지층구조 단면도에 의해 광산계획이 수립되고 있는 실정이며 나아가서 토목공사 및 구조물 부지선정에도 지층구조에 대한 정보가 선제조건이 되고 있는 것이다.

#### 나. Transmission : Geotomography

탄성파 지오토포그래피 (Geotomography)는 최근 의학에서 널리 사용되고 있는 Tomography 법에 기반을 둔 하나의 최첨단 기술로서 지금까지 숙제로 되어 오고 있던 암반의 파쇄대 규명을 가능하게 하고 있다. 암반의 균열조직, 즉 파쇄대는 그 암석과 대단히 근소한 탄성파 속도차 (약 5~15%)를 띠고 있기 때문에 파쇄대 경계면에서의 반사계수는 대단히 작다. 따라서 상기 반사법은 반사되는 탄성파 에너지 측면에서 그 응용도가 근본적으로 떨어지는 것이다.

그림 5는 지오토포그래피의 기본 원리를 나타내고 있다. 발생원은 상기 반사법과는 달리 수진기 배열선상에 위치하지 않기 때문에 그로부



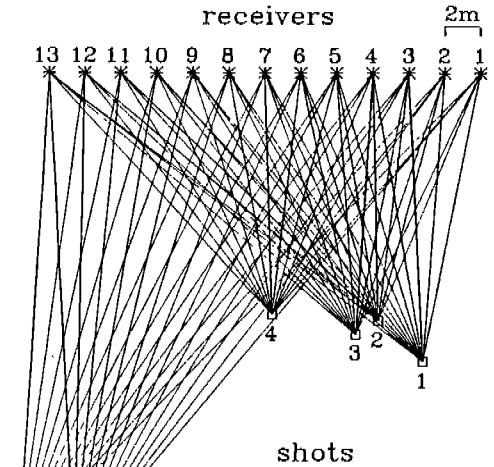
〈그림 5〉 탄성파탐사기술-지오토폴로그래피 측정원리

터 수신기에 도달하는 초동의 주시는 파쇄대를 통과할 때와 비교하여 미소한 주시차가 관찰된다. 이러한 주시변화에 대한 역해 (Inversion)는 파쇄대의 형상을 재현시키는 것으로서 그의 분해능은 발생원 배열과 수신기 배열사이의 기하학적인 배치가 중요한 요인이 된다.

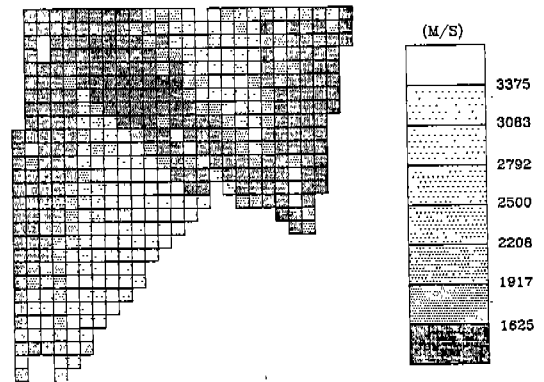
지난 3년간 지오토폴로그래피 기술의 꾸준한 축적은 탄성파 모형실험에 의한 연구(김중열외, 1989)는 물론 현장탐사에서 그 결실을 보게 되었다. 그림 6은 남해 섬의 암반일부에 내재된 불균질성을 조사하기 위한 지오토폴로그래피 측정 과정을 나타내고 있다. 여기서 지오토폴로그래피 분해능을 위한 발생원 수는 대단히 미흡하지만 그림 7에 나타난 탐사결과는 불균질성의 식별을 위한 그의 효율성을 크게 입증하고 있는 것이다.

국내에서 현실적으로 상기 지오토폴로그래피 기술의 불가피한 응용은 무엇보다 핵폐기물 저장을 위한 암반 균열조직 규명과 석재산업에서 대두되는 파쇄대 규명에 있다. 한편 파쇄대는 하나의 수로(水路)가 되기 때문에 이의 규명은 갯내 유수문제, 수향의 안정성, 지하공동탐지, 산업폐기물 저장부지 선정 및 지하수 탐사에도 직접적인 기여가 약속되는 것이다.

#### 다. 회 절(Diffraction Seismics)



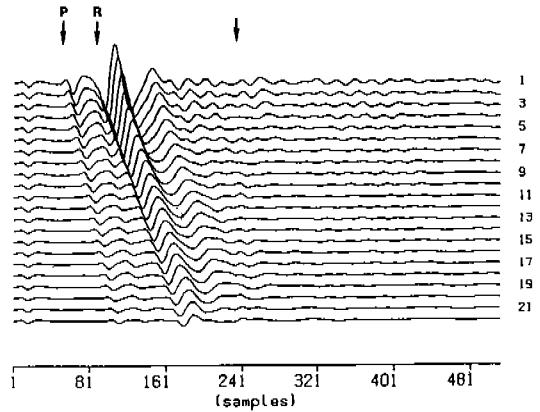
〈그림 6〉 탄성파탐사기술-지오토폴로그래피 현장탐사의 발생원-수진기 배열



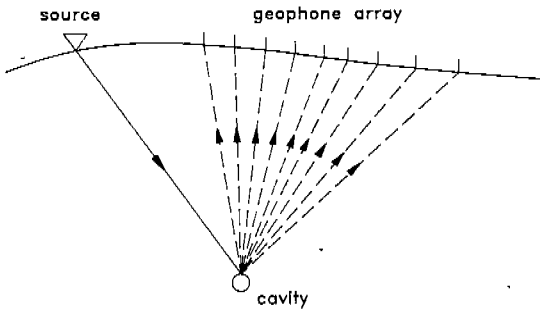
〈그림 7〉 탄성파탐사기술-지오토폴로그래피 전산처리 결과

탄성파 회절 (Seismic Diffraction)은 불균질성 매질의 규모가 탄성파 파장에 비해 작을 경우 그 매질이 입사된 탄성파에 대해서 하나의 점원으로 반응되는 현상이다(그림 8 참조). 여기서 소규모 지하공동은 이에 대한 하나의 대표적

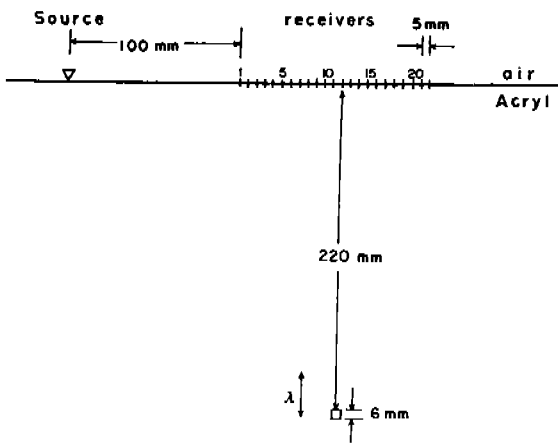
인 보기가 된다. 지표에서 탄성과 반사법에 의한 소규모 공동탐지는 아직까지 그 결실을 보고 있지 않을 뿐만 아니라 이론에서조차 그 규명이 대단히 어려운 것으로 간주되어 왔었다. 이에 대한 핵심적인 요인을 탄성과 모형실험에 의해 예시해 보도록 한다. 그림 9는  $1/6.5\lambda$  ( $\lambda$ : 탄성과 파장) 규모의 공동에 대한 측정과정을 나타내고 있다. 지표의 발생원-수진기 배열로 인한 탄성과 기록은 그림 10에 나타나 있으며 여기서 큰 진폭으로 발달한 파의 도달은 표면파(발생원으로부터 지표면을 따라 수진기에 도달



〈그림 10〉 탄성파탐사기술-Diffraction Seismics  
단일발생원에 의해 측정된 탄성파탐사 기록



〈그림 8〉 탄성파탐사기술-Diffraction Seismics



〈그림 9〉 탄성파탐사기술-Diffraction Seismics  
지하공동 유사모형의 측정과정

한 탄성과)이다. 예상되고 있는 공동반응 즉, 공동에 의해 회절된 탄성과의 도달(화살표로 표시)은 표면파의 발달로 인하여 대단히 미약하게 나타나고 있다. 이러한 실험결과는 바로 재래의 탐사기술이 공동탐지에 현실적으로 전혀 기여할 수 없음을 시사하는 것이다.

이미 언급한 P빔 발생원은 애당초 상기 공동을 탐지하기 위해 개발된 것으로서 그의 효과는 그림 11에 나타나 있다(Kim, 1989). 여기서 표면파는 크게 약화된 반면 회절된 파의 도달은 뚜렷한 양상을 띠고 있다. 그림 12는 그들의 도달을 취합하여 역해를 구한 것으로서 그 결과는 실제 공동의 위치와 훌륭하게 근접되고 있음을 볼 수 있다.

지하 공동은 여러 분야에서 별다른 문제를 제시하고 있다. 갱내의 공동은 유수문제를 야기시켜 작업지연 내지 인명피해를 초래하고 있는가 하면 토목공사에서 지반에 형성된 공동은 흔히 구조물의 안정성에 저해 요인이 되고 있다. 인위적인 지하 터널, 예를 들면 땅굴은 군사적 측면에서 하나의 침공통로로 되고 있는 현실이며 그 외 석회암 동굴, 금광지역의 공동, 히틀러

벙커, 보물의 매장, 광산에서 버려진 갱도 등은 대단한 흥미의 대상이 될 수 있는 것이다.

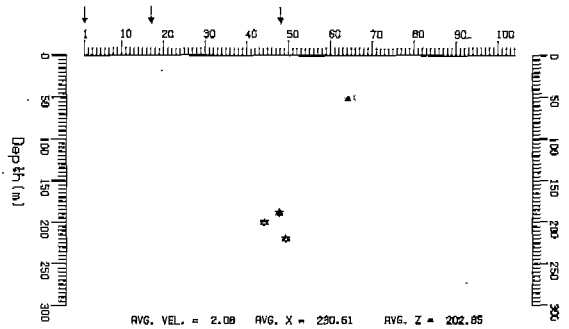
라. Shear Wave Seismics

이미 언급한 바 탄성과 발생원은 항상 P파와 S파를 동시에 생성한다. 그들의 탄성과 속도는 대체로 탄성계수  $\lambda$ ,  $\mu$  및 밀도  $\rho$ 에 의해 표현된다.

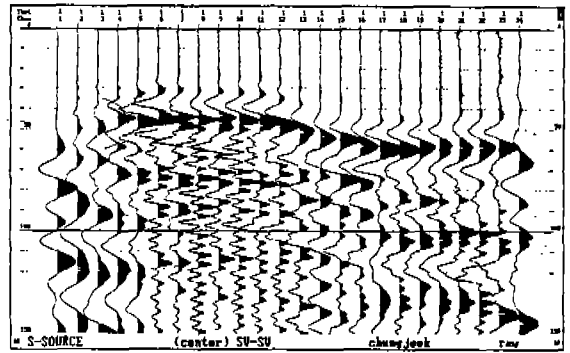
$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$\alpha$  : P파의 속도,  $\beta$  : S파의 속도

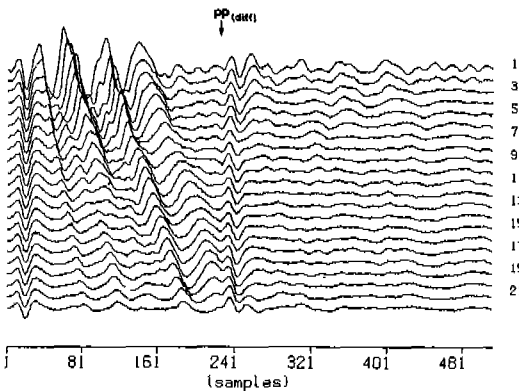
상기식에서  $\mu$ 는 강성률(Rigidity)로서 특히 수중에서는  $\mu = 0$ 가 된다. 이는 S파가 수중에서 전파되지 않는다는 뜻이다. 그 응용측면에서 살펴보면 예를 들어 수로가 되고 있는 파쇄대는 P파보다 S파가 대단히 민감하게 반응된다는 것이다. S발생원 “중축타”(KIER-SEIS-6)는 에너지 측면에서 S파를 크게 생성하고자 개발된 것으로서 그의 국내 현장응용 실례는 그림 13에 나타나 있다. 수진기(채널) 위치 6-11에서는 파의 도달이 전체적으로 크게 왜곡되어 있음이 관찰되며 이는 그 이하 암석내부에서 자연



〈그림 12〉 탄성파탐사기술-Diffraction Seismics  
회절된 파의 도달로부터 역해를 구한 결과



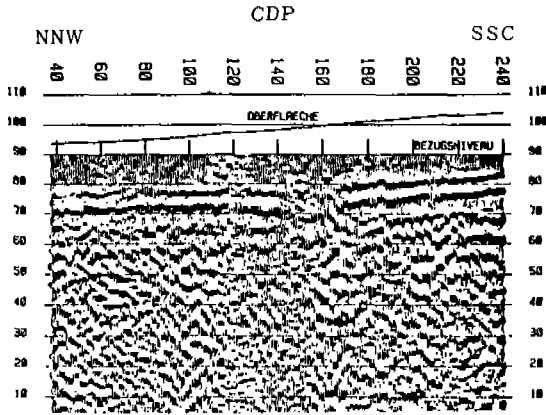
〈그림 13〉 탄성파탐사기술-Shear wave seismics  
단일 탄성파탐사 기록



〈그림 11〉 탄성파탐사기술-Diffraction Seismics  
P 빔 발생원에 의해 측정된 탄성파탐사 기록

적 혹은 인위적인 파쇄현상으로 해석될 수 있는 것이다. 선진국에서 수행된 현장실례를 살펴보자. 그림 14는 지표에서 약 200m 축선상에서의 수직 지층구조단면도를 나타내고 있으며 특히 지표로부터 약 40m 미만을 중점적으로 다루었다. 그 결과는 CDP영역 120-165, 180-190과 210에서 천부 지층의 팔목할만한 파쇄대 상태를 보여주고 있다.

상기 방법은 무엇보다 산업폐기물처리 부지선정에 유용하게 응용될 것이 기대되며 또한 토목공사 지반조사, 지하수 및 온천탐사 등에 상당



(그림 14) 탄성파탐사기술-Shear wave seismics  
굴절파탐사에 의한 공심점중합 결과  
(Rueter and Elsen, 1989)

한 기여를 할 수 있겠다.

### 3. 맺음말

지하 지층구조단면도를 얻을 수 있는 유일한 방법은 탄성파탐사 기술이다. 그러나 그 단면도의 선명도는 무엇보다 탐사조건 및 지층구조의 형태와 밀접한 관계가 있다. 본 연구 성과는 보다 바람직한 단면도를 얻기 위하여 국내의 불리한 탐사조건을 극복하기 위한 노력의 결실이라

할 수 있으며 이는 바로 재래의 기술로서는 불가능한 탐사를 점진적으로 가능하게 하는 여건을 부여하는 것이다. 국내 독자적으로 완성한 탄성과 모형실험 시스템은 탐사에 따른 제반 문제점을 구체화하며 나아가서 새로운 방법을 창출하는데 무한한 가능성을 던져주고 있다. 예를 들면 P빔 발생원 개발은 보다 명확한 지층구조 단면도를 얻게할 뿐 아니라 지금까지 난제로 여겨온 지하공동탐사에도 밝은 전망을 던져 주게 되었다. 한편 탄성과 발생원 “분저”, “타구” 및 “중축타”는 화약사용이 불가능한 탐사지역에도 응용될 수 있을 뿐 아니라 P빔 발생원 구사에서 필수적인 발생원이기도 한 것이다.

최근 하나의 큰 문제로 대두되고 있는 암반의 파쇄대 규명은 무엇보다 원자력 핵폐기물 저장과 석재산업에서 선제조건이 되고 있는 바 지난 3년동안 축적한 지오토모그래피 탐사기술 확립은 선진국의 기술의존도로부터 탈피할 수 있다는 데 큰 의의가 있겠다. 한편 컴퓨터 수치제어 장치에 의해 파쇄대 유사모형이 제작될 수 있다는 그 자체만으로도 향후 국내 지오토모그래피 방법의 활성화를 위한 강력한 기초연구의 산실이 될 것이다.

본 연구는 주로 파기처 특정과제사업(1987~1990) 수행의 일환으로 이루어졌다.

### 참고문헌

- 1) Kim, J. Y. and J. Behrens, 1985 : The existence of the  $S^*$  wave experimentally proved by means of model-seismic investigation, Seismic shear Waves, vol. 15 part B : application, 254-271, Geophysical press, Amster dam.
- 2) Kim J. Y. and J. Behrens, 1986 : Experimental evidence of  $S^*$  wave, Geophys. Prospect. 34, 100-108.
- 3) Kim, J. Y., 1989 : Detectability of underground cavities by a special seismic source-array, 51, EAEG-Meeting, Berlin, June.
- 4) 김중열 외, 1988 : 탄층연속성 조사를 위한 채널파의 연구, 한국동력자원연구소, 특정과제보고서, 과학기술처.
- 5) 김중열 외, 1989 : 탄층연속성 조사를 위한 채널파의 연구(II), 한국동력자원연구소, 특정과제보고서, 과학기술처.