

초음파의 매질 투과성을 이용한 시추공 케이싱 배면의 암상 및 절리구조 조사 연구

Use of Ultrasonic beam transmissivity for investigating the structural features in plastic pipe cased borehole

김중열¹⁾, Jung-Yul Kim, 김유성¹⁾, Yoo-Sung Kim

¹⁾ 한국지질자원연구원 책임연구원, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

SYNOPSIS : Boreholes that are drilled in soft or unconsolidated materials such as gravels and coals are prone to collapse. To maintain the hole, some kinds of casing pipes are needed. If thereby a plastic pipe e.g. PVC is used for the casing, Televier tool is still capable of detecting structural features such as fractures in the borehole wall behind the pipe, whereas other borehole-imaging logging devices such as BIPS (Borehole Image Processing System) and FMS(Formation Micro Scanner) won't provide any information about that. Televier's primary component is a piezoelectric transducer centered in the hole. It acts as both a transmitter and receiver, and sends an ultrasonic beam. That is reflected, in the same manner as the seismic wave propagation, from the both sides(inner and outer surfaces) of the casing pipe, transmits through the pipe and then reflected from the borehole wall. With an appropriate choice of time-windowing, it is possible to capture the returning signals from both the borehole wall and the outer side of casing pipe as well. A suite of laboratory tests were performed on various physical models composed of plastic pipes with different diameters. Although the amplitudes of returning signals were reduced to about half the usual value due to the transmission loss, the dynamic range of Televier tool was sufficient to observe the structural features behind the casing pipe. Besides, several representative case studies at various research areas in our country are presented. The results demonstrate the usefulness of the transmissivity of Televier acoustic beam, which will assist in further structural interpretation.

Key words : Ultrasonic beam transmissivity, plastic pipe, Televier, cased borehole

1. 서 론

텔레뷰어는 초음파 빔 발생원을 이용하여 공벽을 스캐닝하는 일종의 첨단 검층기법이다(김중열 외, 1995 ; 김중열, 2000). 즉, 발생원은 시추공 축상에서 한 번 회전하는 동안 공벽을 향하여 144(혹은 244)차례나 초음파 빔을 방사한다. 이러한 과정에서 매번 방사될 때마다 공벽으로부터 반사되어 다시 발생원 위치에 도달하는 초음파 빔의 진폭치 및 주시치는 마이크로 프로세서에 의해 자동 발체된다. 이러한 측정치는 다시 발생원이 시추공 축상의 상·하로 이동될 때마다 반복되어 결국은 방위각-심도에 대한 진폭이미지 및 주시이미지를 얻게된다. 만약, 초음파 빔이 절리틈새에 입사되면 산란현상에 의해 공벽으로

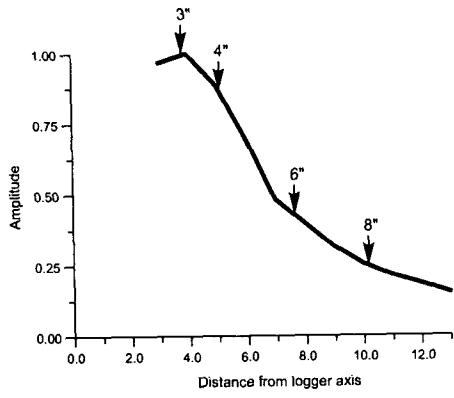
부터 되돌아오는 초음파의 진폭은 그만큼 낮게 되어 진폭이미지에서 크게 차별화되는 것이다. 이러한 초음파의 물리적인 산란현상은 바로 텔레뷰어가 어느 물리검층기법(예: BIPS, FMS)보다 절리 그 자체에 대한 정확한 판단을 하게 할 수 있는 바탕이 되는 것이다. 더구나, 텔레뷰어 측정시스템 중 하나인 FACSIMILE-40-20(독일 DMT사)의 센서장치는 오목거울에 의해 기존 초음파 빔을 더욱 초점화하여 비교적 먼 거리에도 빔의 spot size를 최소화하게 하였다. 그림 1에는 실내실험을 통하여 상기 초점화된 센서장치에 의해 방사되는 초음파 빔의 에너지를 전달거리에 따라 상대적으로 나타내고 있다. 여기서, 빔의 진폭치는 비교적 큰 물통 중간에 텔레뷰어 센서장치를 위치한 후 일정 방향(N, E, S, W)으로 알루미늄판을 1cm 간격으로 옮기면서 그로부터 반사되는 초음파를 측정하여 얻게 되었다. (a)는 전달거리(시추공 규격으로 환산)에 따른 진폭치의 상대적인 감소를 정량적으로 보여주고 있으며, (b)에는 시각적인 효과를 위해 그를 입체화하여 나타내고 있다. 대체로 3" 와 4" 시추공에서는 거의 대등한 진폭치를 보여주고 있으며, 8" 시추공에서는 3" 시추공에 대한 진폭치의 약 1/4정도로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 실험결과는 바로 8" 시추공에서도 텔레뷰어의 기능이 충분히 발휘될 수 있음을 시사하는 것이 된다. 한편, 텔레뷰어가 갖고 있는 또 다른 큰 기능은 초음파 빔이 매질경계에서 반사할 뿐만 아니라 또한 굴절(투과)한다는 데 있다. 이러한 초음파의 투과성은 바로 시추공에 케이싱이 되어 있더라도 공벽을 스캐닝 할 수 있는 가능성을 부여하는 것이다. 그림 2는 흔히 대두될 수 있는 시추공 케이싱의 배면 상태를 예시하고 있다. (a)는 대체로 연약한 암반에서 시추공 유지를 위해 케이싱한 경우이며, (b)는 흔히 오염된 지하수를 차폐하기 위해 케이싱과 공벽 사이를 특수매질(예: 시멘트)로 채워진 상태를 나타내고 있다. (c)와 (d)는 대부분 해상시추에서 케이싱 외벽에 자갈이나 모래가 밀착된 경우에 해당한다. 일반적으로 (a) 및 (b)의 경우는 공벽 반사에, (c)와 (d)는 케이싱 외벽반사에 초점을 두게 된다. 본 논문의 주요내용은 초음파 센서장치의 초점화 기능과 또한 그의 투과성을 바탕으로 상기 사례에 대한 텔레뷰어 이미지를 관찰함으로써 케이싱 배면 상태를 파악할 수 있는 한계를 규명하는데 있다. 이를 위해 다양한 실내 및 현장 실험이 수행되었다. 다음은 우선 케이싱 배면구조에 대한 수치 반사 모형실험(numerical reflection modeling)을 요약하고 있다.

2. 수치 반사 모형실험

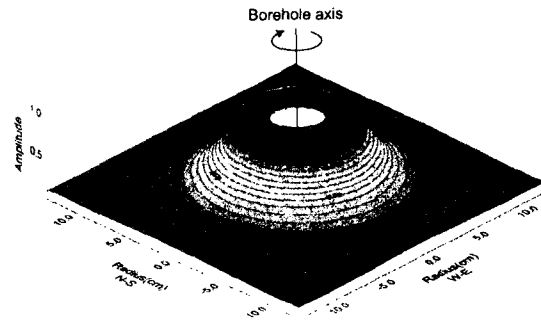
그림 3의 상단에는 PVC 케이싱(두께 3mm)-물-경암에 대한 수치모형을 나타내고 있다. 텔레뷰어 초음파 빔을 케이싱이나 공벽에 거의 수직으로 입사되고 또한 공내에는 물로 채워져 있기 때문에 수신되는 반사파의 도달은 단지 P파의 도달로 단순화될 수 있으며 더구나 그의 진폭은 각 경계면의 반사계수와 투과계수에 의해 결정된다. Silvia and Robinson(1979)은 상기 모형류에 대한 제반 탄성파도달을 구할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며 이를 바탕으로 전산화(김중열, 1983)한 결과는 그림 3에 예시하고 있다. 우선, 각 경계면의 반사계수 R은 다음과 같다. 즉, $R(\text{물}/\text{PVC}) \approx 0.374$, $R(\text{물}/\text{경암}) \approx 0.8$ 이며, 특히 케이싱 재질이 steel인 경우의 $R(\text{물}/\text{steel})$ 은 거의 0.93에 달하게 된다. 그림 3에서 첫 번째 트레이스는 초음파 발생 시점의 파형요소 $w(n)$ 을, 두 번째 트레이스는 발생원 위치로부터 케이싱 및 공벽에 이르는 왕복거리를 왕복주시로 전환한 후 그 곳에 반사계수치를 나타낸 결과 즉, $r(n)$ (reflector series)을, 세 번째 트레이스는 $r(n)$ 으로부터 모든 다중 반사(multiple)를 고려한 결과인 $p(n)$ (impulse response)을 나타내고 있다. 이 때 케이싱 및 공벽으로부터 반사되는 모든 초음파의 도달 $s(n)$ (reflection response)은 $w(n)$ 과 $p(n)$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$s(n) = w(n) * p(n) \quad , \quad * \text{convolution}$$

$s(n)$ 으로부터 케이싱 반사는 주시간격 약 $42\mu\text{s} \sim 50\mu\text{s}$ 에서, 공벽반사는 주시간격 약 $62\mu\text{s} \sim 70\mu\text{s}$ 에서 관찰되고 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 공벽 반사파의 진폭이 케이싱의 것보다 오히려 크게 나타나고 있다. 텔레뷰어는 상기 주시 영역을 적절히 선정함으로써 원하는 반사파의 도달을 쉽게 포착하게 하는 측정기능을 갖고 있다. 그런데, 케이싱 재료로써 steel이 사용된다면 그의 높은 반사계수($R \approx 0.93$)로 인하



(a)



(b)

그림 1. 초점화 된 텔레뷰어 센서 장치에 의해 방사되는 초음파 빔의 에너지를 전달 거리에 따라 상대적으로 나타내고 있다.

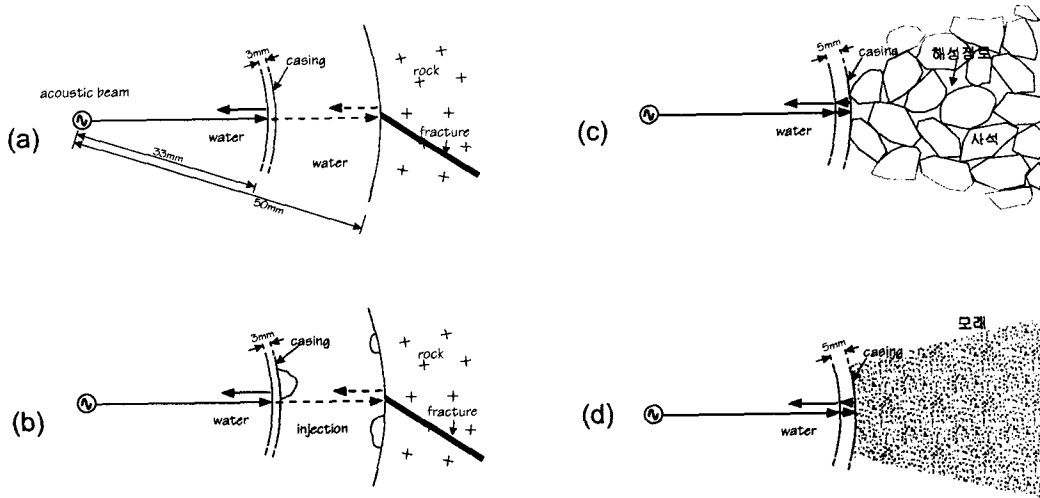


그림 2. 텔레뷰어 초음파 빔의 투과성을 이용하여 시추공 케이싱 배면의 매질 물성 변화를 파악할 수 있는 다양한 사례.

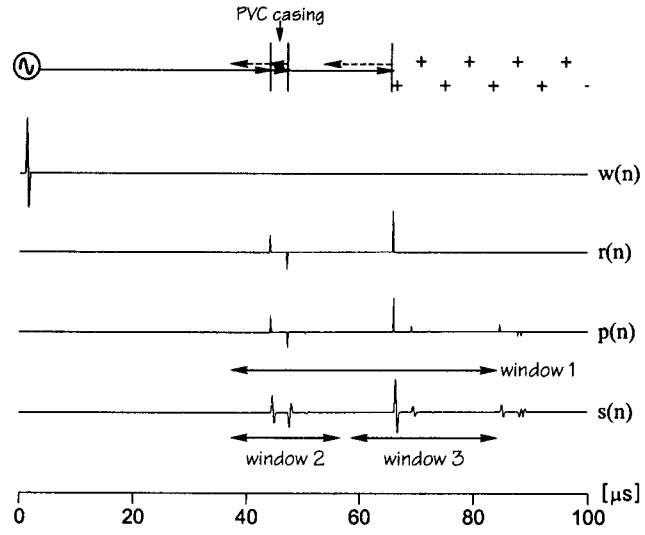


그림 3. 시추공 케이싱 배면 구조에 대한 수치 반사 모형실험.

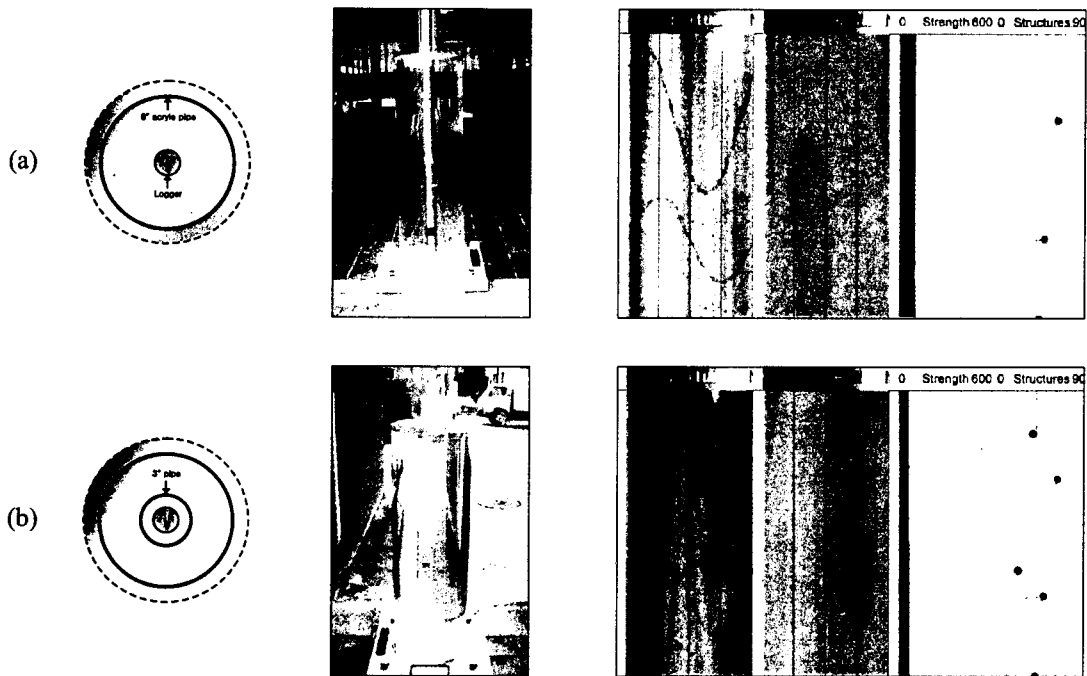


그림 4. 초음파 빔의 투과성 연구를 위한 실내 실험.

여 공벽 반사에 대한 정보는 전혀 기대될 수 없었다. 다음은 상기 수치모형실험결과를 바탕으로 실내 실험한 결과를 예시하고 있다.

3. 실내 실험

그림 4는 8" 아크릴 파이프((a)참조)와 8" 아크릴 파이프에 3" 파이프를 삽입한 경우((b)참조) 측정된 텔레뷰어 진폭이미지와 그에 따른 절리 분석결과(arrow plot)를 나타내고 있다. 여기서 3" 파이프와 8" 파이프에는 각각 특유의 절리모양(sine signature)이 천공(직경 약 2mm)되었다. 단지 8" 파이프에서 인식된 정현곡선은 3" 파이프가 내삽된 경우에도 역시 뚜렷이 인식되며 더구나 3" 파이프에 천공된 정현곡선도 동시에 나타나고 있다. 즉, 3" 파이프를 투과한 초음파 빔은 8" 파이프 내벽에 형성된 절리를 규명하는데 충분히 기여할 수 있음을 보여주는 것이다. 여기서 괄목할 점은 초음파가 3" 파이프를 투과하였을 경우 측정된 진폭치(reflectivity)가 투과하지 않았을 때의 결과보다 대체로 2/3 수준에 달하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 실험결과는 바로 이전의 수치모형실험결과를 대변하는 것이 되며 동시에 초음파 빔의 매질 투과성은 무엇보다 케이싱과 공벽사이의 제반 정보(예: 충전 상태)도 현실적으로 얻을 수 있음을 시사하는 것이 되었다. 다음은 상기 실험결과를 입증할 만한 다양한 현장응용사례를 소개하고 있다.

4. 현장응용사례

그림 5는 NX규격 시추공에 직경 60mm의 PVC파이프(두께 3mm)를 삽입한 경우(서울근교 실험시추공) 얻어진 텔레뷰어 이미지를 나타내고 있다. (a)는 케이싱 반사파에, (b)는 공벽반사에 초점을 둔 주시영역 선정에 의해 측정된 진폭이미지를 상호 대조하고 있다. 비록, 초점화된 초음파 빔이 케이싱을 두 차례나 투과하는 동안 상당한 에너지를 잃게 되었음에도 불구하고 측정된 데이터의 폭넓은 dynamic range는 공벽에 표출된 절리 발달상태를 훌륭하게 표현((b)참조)하고 있음을 볼 수 있다.

그림 6은 천공 후 시추공이 전혀 유지될 수 없는 상황(예: 사석구조)에서 PVC파이프(두께 5mm)를 삽입한 후 파이프 외벽에 밀착된 매질(그림 2의 (c) 및 (d)의 경우)을 텔레뷰어 이미지를 통하여 식별할 수 있음을 보여주고 있다. 여기서 사용된 PVC파이프 두께(약 5mm)는 파이프 내벽 및 외벽에 의한 반사파를 주시적으로 분리할 수 있는 여건을 마련한 것이기 때문에 적절한 주시영역 선정(window2)에 의해 PVC 외벽 반사파를 포착할 수 있다. 한편, window1은 파이프 내벽 및 외벽 반사파를 동시에 측정할 수 있는 주시영역이다. 그림에서 window1 및 2에 의한 진폭이미지 사이에는 주시이미지로부터 전환된 3D caliper log을 나타내고 있다. 물이 없는 사석, 물 및 해성점토로 채워진 사석, 소량의 모래를 포함한 해성점토, 모래층(S.C.P: Sand Compaction Pile)의 경계가 window2 선정에 의해 뚜렷하게 식별되고 있음(흑색 화살표로 표시)을 볼 수 있으며, 또한 파이프 외벽에 밀착된 사석도 쉽게 확인(흰 화살표로 표시)되고 있다. 이러한 텔레뷰어 분석결과는 지금까지 난제로 되어온, 연안에서 투하되는 사석량 산출을 위한 하나의 귀중한 정보가 된다. 또한, 해상시추에서 식별이 어려운 여러 가지 형태의 박층(예: sandy mud)도 역시 파이프 외벽 반사파 분석을 통해 순수한 해성점토와 차별화되어 관찰될 수 있다.

5. 결 론

초점화된 초음파 빔과 그에 따른 전달거리의 연장, 초음파의 투과성, 공벽 및 케이싱 내 외벽 반사파를 분리할 수 있는 측정기술 등은 우선 텔레뷰어의 응용성을 또 한층 넓힐 수 있는 계기를 마련한 것이 되었으며 나아가서 지금까지 난제로 되어온 사석량 산출, 케이싱된 시추공에서의 절리 발달상태 파악 및 해성점토내의 여러 가지 박층 연구 등에도 귀중한 정보를 제시할 수 있었다.

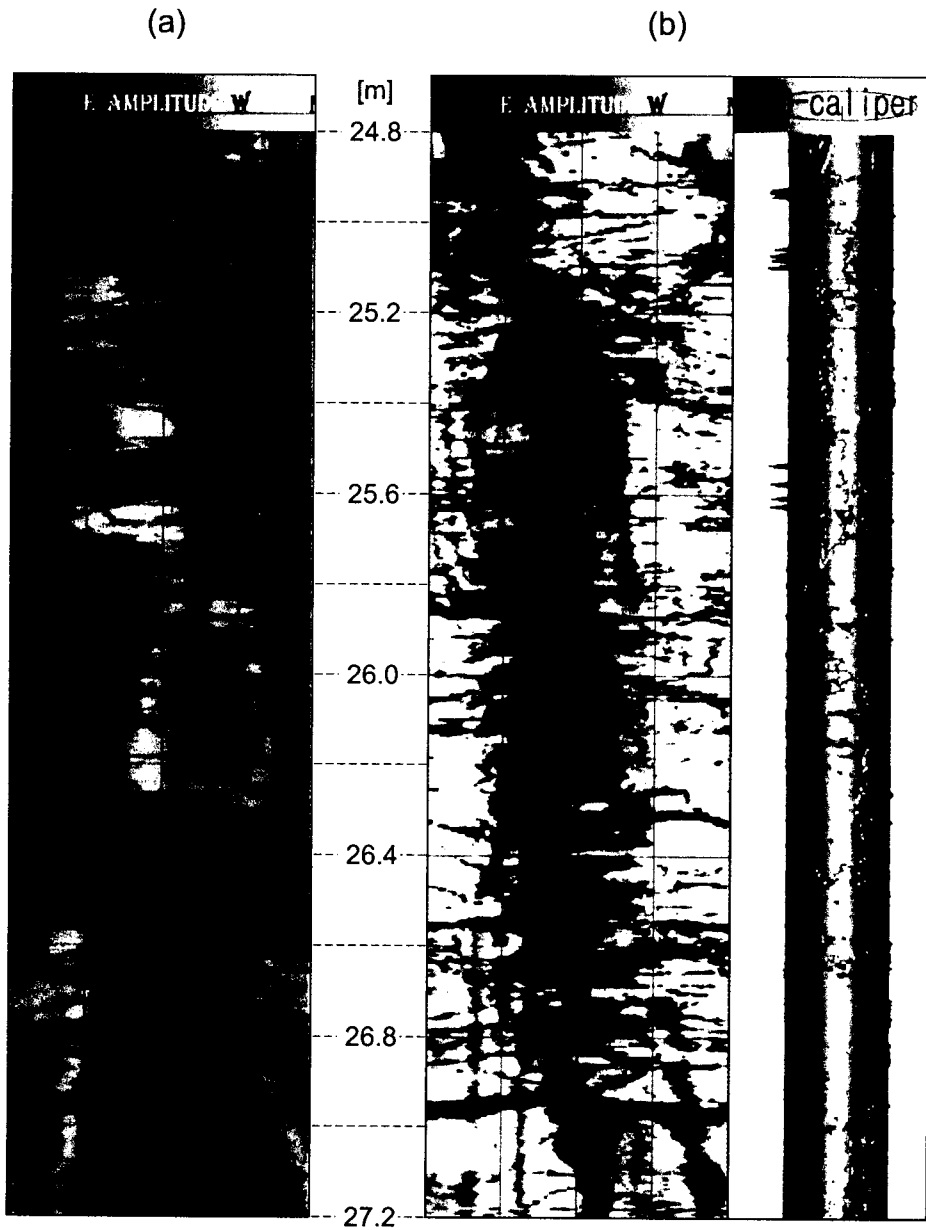


그림 5. PVC 파이프(내경 60mm, 두께 3mm)로 케이싱 된 시추공의 공벽 (NX 규격)을 스캐닝한 텔레뷰어 이미지. (a) 파이프 내벽 반사에 초점을 둔 이미지, (b) 공벽 반사에 초점을 둔 이미지.

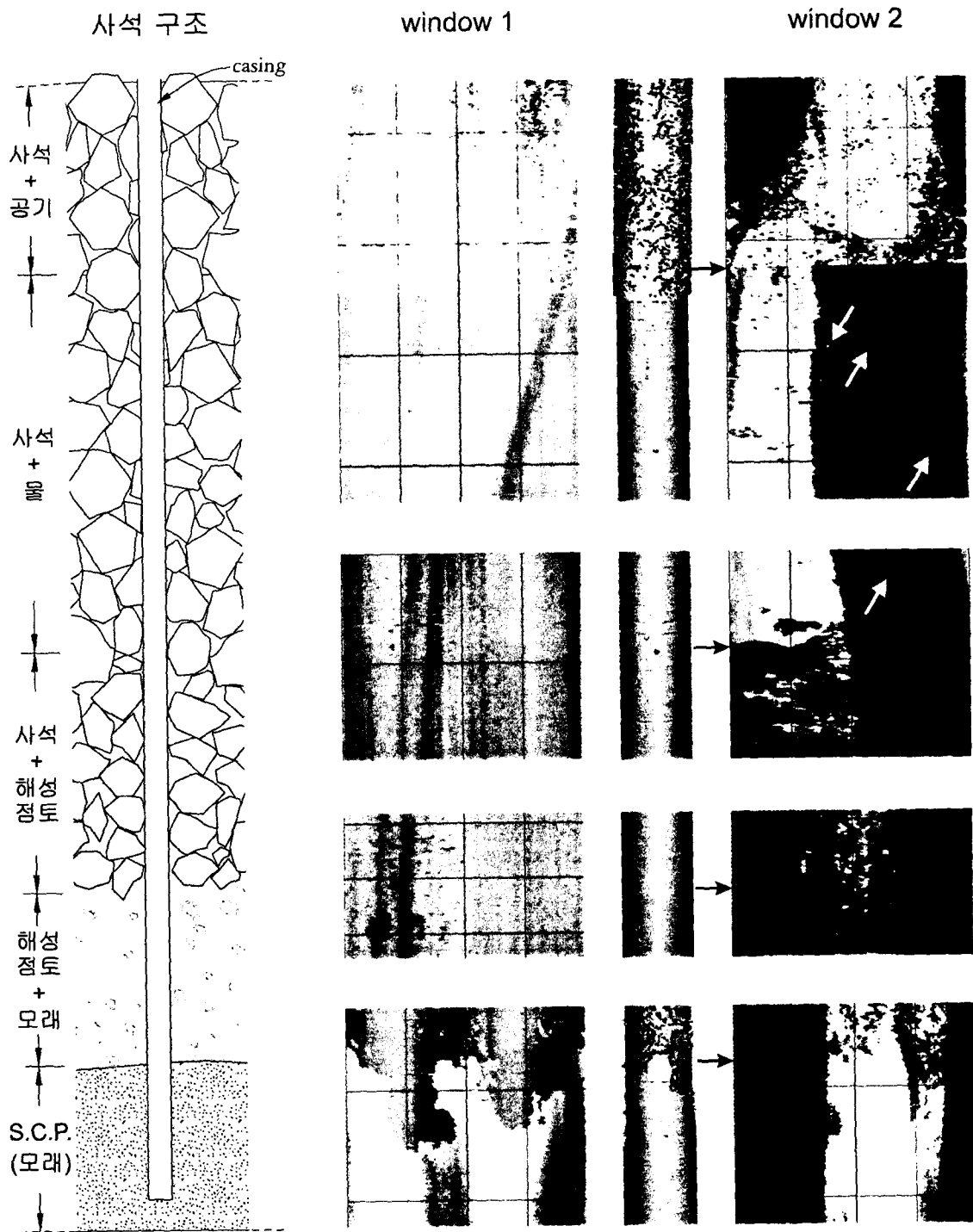


그림 6. PVC 파이프 외벽 반사를 이용하여 파이프 외벽에 밀착된 매질의 물성 변화를 파악하는 텔레뷰어 현장 실험.

6. 참고문헌

1. 김중열(1983), "Feinstrukturuntersuchung in der seismik mit hilfe der shot-time homomorphen analyse", Ph D. thesis, Berlin University
2. 김중열, Schepers, R.(1995), "고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능", *대한지질공학회지*, 제 5권, 제 3호, pp. 277-288.
3. 김중열(2000), "텔레뷰어 탐사의 원리 및 지반공학 분야에서의 실제적용", *새로운 지반조사 및 평가, 분석기술 국제 심포지움 논문집*, 한국건설기술연구원, pp. 191-254.
4. Silvia and Robinson(1979), *Deconvolution of geophysical time series in the exploration for oil and natural gas*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York.