

충격 반향 기법을 이용한 슛크리트 배면 접착 상태 평가에 관한 수치해석적 연구

송기일¹, 조계춘^{2*}, 장석부³

Evaluation of bonding state of tunnel shotcrete using impact-echo method - numerical analysis

Ki-Il Song, Gye-Chun Cho, Seok-Bue Chang

Abstract Shotcrete is one of the main support materials in tunnelling. Its bonding state on excavated rock surfaces controls the safety of the tunnel: De-bonding of shotcrete from an excavated surface decreases the safety of the tunnel. Meanwhile, the bonding state of shotcrete is affected by blasting during excavation at tunnel face as well as bench cut. Generally, the bonding state of shotcrete can be classified as void, de-bonded, or fully bonded. In this study, the state of the back-surface of shotcrete is investigated using impact-echo (IE) techniques. Numerical simulation of IE technique is performed with ABAQUS. Signals obtained from the IE simulations were analyzed at time, frequency, and time-frequency domains, respectively. Using an integrated active signal processing technique coupled with a Short-Time Fourier Transform (STFT) analysis, the bonding state of the shotcrete can be evaluated accurately. As the bonding state worsens, the amplitude of the first peak past the maximum amplitude in the time domain waveform and the maximum energy of the autospectral density are increasing. The resonance frequency becomes detectable and calculable and the contour in time-frequency domain has a long tail parallel to the time axis. Signal characteristics with respect to ground condition were obtained in case of fully bonded condition. As the ground condition worsens, the length of a long tail parallel to the time axis is lengthened and the contour is located in low frequency range under 10 kHz.

Keywords: Shotcrete, bonding condition, IE method, time-frequency analysis, numerical analysis

요 지 슛크리트는 터널에서 사용되는 중요한 지보재이다. 슛크리트와 암반의 접착상태는 터널의 안정성 및 사용성에 큰 영향을 끼치는 중요한 평가 요소이다. NATM공법을 이용한 터널 굴착시 굴착면 및 벤치부에서 발파에 의해 슛크리트가 부착력을 잃고 암반으로부터 탈락되거나 공동이 형성되는 경우 슛크리트 자체의 파괴뿐만 아니라 터널의 전체적인 안정에도 악영향을 미친다. 슛크리트의 접착상태는 완전 접착, 접착력 상실, 그리고 공동으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 비파괴 시험인 충격반향기법(Impact-Echo)을 이용하여 슛크리트와 암반의 접착상태를 평가하고자 하였다. 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 충격반향시험에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석으로부터 획득된 신호를 시간영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서 각각 해석하여 슛크리트와 암반의 접착상태에 따른 신호특성을 분석하였다. 분석결과 능동적 신호 처리 기법인 Short-Time Fourier Transform(STFT)을 이용하여 슛크리트 배면의 접착상태를 효과적으로 예측할 수 있었다. 슛크리트 배면의 접착상태가 불량할수록 시간영역 신호의 최대 진폭 이후 첫 진폭이 커지며, 주파수 영역에서 최대 에너지가 커진다. 또한 뚜렷한 공진 주파수가 나타나므로 슛크리트의 두께의 역산이 가능해진다. 시간-주파수 영역에서 윤곽선은 시간축에 평행한 형상을 나타낸다. 또한 완전 접착조건에서 지반 종류에 따른 신호특성도 분석하였다. 지반조건이 불량할수록 시간-주파수 영역에서 시간축과 평행한 윤곽선의 길이가 길어지며 그 주파수 대역은 10 kHz 이하의 저주파수 영역에서 나타난다.

주요어: 슛크리트, 접착 상태 평가, 충격 반향 기법, 시간-주파수 해석, 수치해석

1. 서 론

NATM 형식의 터널에서 주지보재로 적용되는 슛크

리트는 터널의 안전한 시공 및 유지 관리를 위해 시공 관리 및 품질관리를 필요로 한다. 일반적으로 슛크리트는 지반과의 부착 및 자체적인 전단 저항효과로 슛크리트에 작용하는 응력을 지반에 분산시키고, 터널 주변의 붕락 하기 쉬운 암괴를 지지하며, 굴착면 가까이에 지반 아치가 형성될 수 있도록 한다. 또한 지보재에 의해 지반변위가 구속되는 현상으로 인해 굴착면에 내압을 가

¹KAIST 건설 및 환경공학과 대학원 박사과정

²정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 부교수

³정회원, (주)유신코퍼레이션 터널부 이사

*교신저자: 조계춘 (gyechun@kaist.edu)

함으로써, 굴착면 주변지반을 3축 응력 상태로 유지시켜 지반 강도 저하를 방지하며, 강지보재 또는 록볼트에 지반 응력을 전달하는 기능을 한다. 이러한 숏크리트의 시공 시 및 시공 이후 품질관리는 안전한 터널 시공을 위해서는 필수적인 요소이다. 그러나 숏크리트의 품질관리를 위해서 일반적으로 시추조사를 수행하여 구조적 파괴 및 경제적 손실을 유발한다. 또한 시추조사를 수행한다 하더라도 숏크리트 구조의 전체적인 상태를 대변한다 할 수도 없다. 따라서 비파괴 시험기법을 도입하여 보다 경제적으로 신속하게 숏크리트 품질을 평가할 수 있는 기술의 개발이 시급하다. 특히 콘크리트 라이닝으로 마감되는 터널뿐만 아니라 싱글셀로 설계되는 터널의 경우에는 숏크리트의 상태 및 품질을 평가하는 것은 더욱 중요하다.

특히, NATM 공법 시공중에는 굴착면 및 벤치부에서의 발파에 의해 굴착면 후방에 타설된 숏크리트가 응력파에 의한 충격을 받게되면 접착되어 있던 숏크리트가 지반과의 접착력을 상실하거나 공동을 형성하여 사용상의 문제를 야기할 수 있다. 또한 시공 이후 내부 부식, 좌굴, 파쇄, 내부 공동 등이 발생하여 사용 및 안전성에 영향을 미친다. 숏크리트는 발파에 의해 형성되는 여굴에 의해 불규칙한 암반 표면에 시공되는 특징이 있고, 리바운드에 의해 상당한 두께 변화가 존재하게 된다. 따라서, 숏크리트의 정확한 타설 두께 검사와 숏크리트 배면의 접착상태를 비파괴 시험법을 이용하여 평가하는 것은 터널의 안전한 시공 관리, 품질관리 및 유지관리에 있어서 핵심적인 요소라 할 수 있다. 현재까지 국내에서는 콘크리트 라이닝의 품질을 평가하기 위한 비파괴 시험법이 개발 및 상용화 되어 있으나 굴착면 후방에서의 숏크리트의 접착상태를 평가할 수 있는 비파괴 기법은 제안되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 숏크리트의 표면에서 충격반향시험의 시뮬레이션을 수행하여 접착조건에 따른 가속도 신호를 시간 영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서 해석하여 숏크리트 배면의 접착상태에 따른 신호특성을 분석하고자 하였다. 또한 숏크리트 배면의 지반조건에 따른 충격반향 시험 신호를 획득하여 그 신호특성을 분석하였다.

2. 충격반향기법(Impact-Echo Method)

2.1 충격반향기법의 기본 원리

충격반향시험은 응력파의 전파 특성을 이용해 콘크리트 구조물의 결함 탐지를 위해 널리 사용되고 있는 비파괴 시험 기법으로 대상 구조물의 표면에 충격을 가하여 발생된 응력파의 전파 특성을 획득하여 불연속면이나 이질 매질 층간의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아오는 파형 및 공진 주파수를 해석하여 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 균열 및 공동 탐사 등에 적용되는 방법이다.

시험 대상 구조물의 표면에 가진원에 의해 발생하는 응력파는 시험체 내부의 균열, 공동과 같은 결함에 의한 불연속면이나 내부 및 외부의 이질 매질층 사이의 경계면 등과 같은 다양한 경계조건에 의해 반사 또는 굴절되어 표면으로 돌아온다. 따라서 응력파가 발생한 표면과 내부 결함 또는 외부 경계면 사이에는 다중 반사에 의한 공진 상태가 유발된다. 이때 표면에서 감지기가 가진원 근처에 위치하면 반사된 P파에 의한 표면 변위가 S파에 의한 표면변위보다 훨씬 크므로, 감지되는 파형은 P파에 의한 파형으로 볼 수 있다. 다음 그림 1은 충격반향기법의 개요도를 나타낸 것이다.

가속도계로부터 측정된 시간영역 신호를 그대로 분석하거나 시간영역 신호를 고속 푸리에 변환(FFT)을 통해 주파수 영역으로 변환하여 다중반사에 의한 주파수 특성을 획득하여 구조물의 내적 결함 및 품질 등을 평가 분석할 수 있다. 충격반향기법의 적용 시 첫 번째 모드 파장과 두께 사이의 관계는 경계조건에 의해서 결정되는데, 이러한 경계 조건은 크게 양단 자유단 조건과 자유단-고정단 조건이다. 양단 자유단 조건은 구조물 내부에 공동 및 균열이 있는 경우이고, 자유단-고정단 조건은 매질 내부에 매질에 비해 현저하게 강성도가 큰 이질 매질이 존재할 때의 조건으로 콘크리트가 콘크리

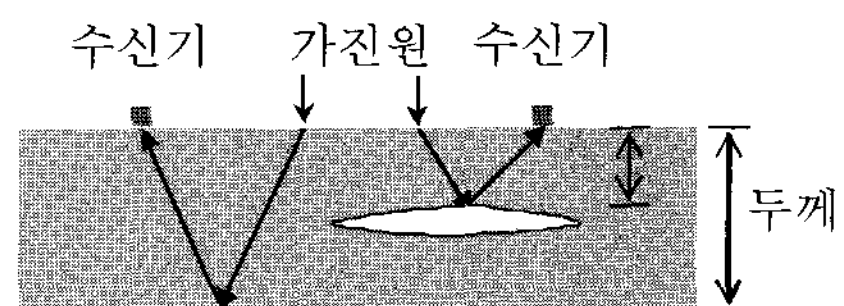


그림 1. 충격반향기법의 개요

트보다 임피던스가 큰 철근이나 극경암과 같은 매질에 접해있는 경계조건이다.

2.2 지하구조물에 대한 충격반향기법의 적용

초기 충격반향기법은 가진원에 의해 발생된 응력파가 방향성 없이 매질 내부로 전파되므로 파의 전파를 원하는 방향으로 모을 수 있는 말뚝과 같은 깊은 기초에 수동적으로 적용되었다. 말뚝은 응력파가 전파될 수 있는 충분한 길이 때문에 시간영역 상에서 반사파의 도달시간을 감지할 수 있다. 그러나 슬라브나 벽체와 같이 상대적으로 두께가 얇은 구조물에서는 반사파의 도달 주기가 짧아 시간영역에서의 분석은 불가능하다. 이를 극복하기 위하여 Carino & Sansalone(1992), Sansalone & Streett(1997) 등은 고속 푸리에 변환(FFT)을 통하여 획득한 시간 영역 신호를 주파수 영역 신호로 변환하고 최대 진폭에 해당하는 공진주파수를 찾아내어 반사파의 도달시간을 추정하고자 하는 반능동적인 해석 기법을 도입하였다. 이를 통해 슬라브나 벽체 등 유한경계의 매질에서 두께 등을 추정할 수 있었다. 그러나, 충격반향시험으로부터 획득하는 신호는 표면파의 영향, 경계 조건에 따른 반사파의 영향, 잡음 등이 혼재된 신호, 고속 푸리에 변환에 따른 시간정보의 손실 등의 영향으로 인해 신뢰성 있는 공진 주파수의 추정이 불가능한 경우가 빈번하게 발생한다.

최근 충격반향시험을 이용하여 슬라브 형태의 부재 안에 기지의 위치에 공동, 균열, 불량 콘크리트, 철근, 접착이완면 등 손상을 유발시키고 이들을 탐지하고자 하는 연구가 수행되었다(Maierhofer *et al.*, 1998; Hassani & Momayez, 2000; Ohtsu & Watanabe, 2002; Davis, 2003; Davis *et al.*, 2005). 또한 라이닝의 배면 공동 탐사 및 균열 탐사 등에 적용되고 있으며 수직구 라이닝의 품질 평가에도 적용되었다(Hassani, *et al.*, 1997). 또한 락볼트의 건전도 검사에도 적용된 사례가 있다(Jaeger *et al.*, 1996). Kim *et al.*(2006)은 표면파 기법인 SASW를 통해 콘크리트 슬라브의 P파 속도를 획득하여 충격반향시험기법에 적용하는 IE-SASW기법을 제안하였다. 그러나 슛크리트와 같이 배면에 암반과 같은 무한매질이 존재하는 경우 그 신호 특성이 난해하므로 본 연구에서는 보다 능동적인 해석 기법인 시간-주파수 영역 해석을 통해 신호 특성을 분석하고자 하였다.

3. 시간-주파수 해석의 기본 개념

푸리에 변환 및 웨이블릿 변환은 신호처리에 있어 가장 널리 쓰이는 강력한 기법으로서, 제측된 신호를 각기 다른 주파수 성분을 갖는 여러 개의 정현파 및 웨이블릿으로 나누는 방법이다. 이러한 변환기법은 제측된 신호의 총 주기 내에서 평균적인 주파수 특성을 평가하게 되므로 시간에 따라 주파수 특성이 변화하는 신호에 대해서는 시간 정보를 손실하게 된다. 즉, 시간에 따른 주파수의 변화 특성을 규명하기 위한 방법으로는 적합하지 않다. 이러한 한계를 극복하기 위해 신호의 시간 정보 및 주파수 정보를 동시에 능동적으로 해석 할 수 있는 시간-주파수 해석 기법이 도입되었다(Gabor, 1946; Santamarina & Fratta, 1998; etc.).

본 연구에서 적용된 시간-주파수 해석 기법은 Short-Time Fourier Transform(STFT)으로 시간에 따른 주파수 특성을 나타내기 위하여 시간 대역별로 윈도우 함수를 적용하여 구간화 및 필터링된 함수를 얻고 그에 대한 푸리에 변환을 수행하는 기법이다. 충격반향시험의 시물레이션을 통해 획득된 가속도 신호에 대한 STFT는 다음과 같은 절차를 따라 신호처리 하였다. 해석을 통해 얻은 가속도 신호는 이산신호이므로 STFT는 유한 주기를 갖는 이산 신호에 대하여 적용하게 된다. 식 (1)과 같이 k 번째 윈도우 중심에서 시간신호에 대한 구간화 및 필터링된 신호 $y_i^{<k-th>}$ 를 획득한다. 식 (2)는 구간화 및 필터링에 적용된 해닝 윈도우 함수이다.

$$y_i^{<k-th>} = w_i \cdot x_{i+k \cdot q} \tag{1}$$

$$w_k = 0.5 - 0.5 \cos\left(2\pi \frac{k}{N_w}\right), \quad k = 0, \dots, N_w - 1 \tag{2}$$

여기서, x 는 시간 영역 신호, w 는 해닝 윈도우, N_w 는 해닝 윈도우의 데이터 포인트 개수이다. 각각의 구간화 및 필터링된 신호에 대하여 식 (3)과 같이 이산신호에 대한 푸리에 변환(DFT)을 수행한다.

$$Y^{<k-th>} = DFT(\underline{y}^{<k-th>}) \tag{3}$$

이산영역의 푸리에 변환 신호를 식 (4)와 같이 행렬 (Y)에 조합한다. 행렬 (Y)의 k 번째 열은 k 번째 신호의

DFT가 된다. 결국 신호 x 에 대한 STFT가 행렬 (Y)로 나타나게 된다. 따라서, k 행렬의 u 번째 요소 ($Y_{u,k}$)는 $\omega_u = u \cdot 2\pi / (M \cdot \Delta t)$ 에 상응하는 푸리에 계수이며 중심 시간은 $t_k = k \cdot \Delta t$ 이다.

$$\underline{Y} = STFT(x) \quad (4)$$

이러한 과정을 거쳐 각 시간 단계에서의 주파수 특성을 획득하고, 윈도우 함수의 시간대역을 이동하며 앞의 과정을 반복하게 된다. 결과적으로 STFT는 윈도우 함수가 적용된 영역의 신호에 대한 주파수 성분만을 구하게 되고, 윈도우 함수 시간대역을 옮겨감으로써 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 평가할 수 있게 된다. 여기서, 윈도우 폭의 결정은 시간-주파수 해석의 중요한 요소이다. 윈도우의 폭이 좁을수록 신호의 국부적인 주파수 특성만을 평가할 수 있는 장점이 있지만, 윈도우 내에 포함된 시간 신호 정보의 양 및 주기가 줄어들게 되므로 주파수 해상도가 감소되는 경향을 나타낸다. 반면 윈도우 폭이 넓을수록 평가하는 시간의 대역이 늘어남으로 국부적인 시간에 대한 평가가 어려운 반면 주파수의 해상도는 늘어나는 경향을 보인다.

본 연구에서는 IE 실험을 구현한 유한요소 모델의 해석을 통하여 획득된 1024개의 이산 신호 데이터를 이용하여 시간영역 해석, 주파수 영역 해석을 수행하였고, 측정된 신호의 총 주기에 대하여 16개의 구간으로 나누어, 각 구간 중심에서 128개의 윈도우 데이터 포인트에 대하여 STFT를 통한 시간-주파수 해석을 수행하였다.

4. 수치해석 모델의 구축

4.1 유한요소 모델의 파라메타 결정

숏크리트와 암반의 접촉 상태 평가를 위한 충격반향시험 기법을 수치해석적으로 모델링 하기 위하여 본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 유한요소법을 적용하여 동적 해석을 수행하기 위하여 다양한 파라메타 즉, 하중의 재하 시간, 유한요소의 크기 및 해석시간의 증분을 최적화 하여야 한다.

충격반향시험기법은 숏크리트 표면에서 강철구와 같은 가진원에 의한 응력파의 발생 및 전파를 이용하므로 이를 수치해석으로 모사하기 위해서는 강철구가 숏크리트에

가하는 힘과 접촉시간을 결정해야 한다. 강철구의 종류에 따라 찾을 수 있는 결함의 크기 및 위치가 결정되기 때문에 접촉시간은 충격반향시험에서 중요한 파라메타이다. 가진원의 선택은 성공적인 충격반향시험을 위해 반드시 선행되어야 할 문제이다. Sansalone & Carino(1986)는 강철구의 자유낙하에 의해 발생하는 접촉시간을 Hertz의 탄성해로부터 다음 식 (5)와 같이 유도하였다.

$$t_c = 5.97[\rho_s(\delta_s + \delta_p)]^{0.4} \frac{R}{H^{0.1}} \quad (5)$$

여기서, $\delta_p = (1 - \nu_p^2) / E_p$ 및 $\delta_s = (1 - \nu_s^2) / E_s$ 이며, ρ_s =강철구의 밀도, R =반경, H =높이, ν_p =콘크리트의 포와송비, ν_s =강철구의 포와송비, E_p =콘크리트의 탄성계수, E_s =강철구의 탄성계수이다. 숏크리트 표면에 강철구가 낙하할 때 접촉시간은 다음과 같은 식 (6)으로부터 계산할 수 있다.

$$t_c = \frac{0.00858 \cdot R}{H^{0.1}} \quad (6)$$

본 연구에서는 강철구의 직경이 9.5 mm이고 낙하높이가 1 m라고 할 때 접촉시간은 강철구의 접촉시간은 0.04 ms이며, 하중은 7.3 N이다.

탄성파의 전파에 관한 문제를 수치해석적으로 해결하기 위하여 유한요소의 크기는 최소 탄성파 속도에 대한 최대의 주파수에 대하여 선정하여야 한다. 유한요소의 크기가 너무 크면 고주파수 대역이 나타나지 않으며 반면, 유한요소의 크기가 너무 작으면 해석시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라 불안정한 해석결과를 야기한다 (Villiappan & Murti, 1984; Saenger *et al.*, 2000). Zerwer(2002)에 따르면 최적의 요소크기(Δx)는 다음과 같은 식 (7)에 의해 결정할 수 있다.

$$\Delta x \leq \chi \cdot \lambda_{\min} \quad (7)$$

여기서, $\lambda_{\min} = V_{R_{\min}} / f_{\max}$,로 λ_{\min} 는 최소 파장, χ 는 질량행렬 상수이다. 본 연구에서는 사용한 가진원에 대한 최대 주파수(f_{\max})는 40 kHz 정도이며 숏크리트의 재령 28 일에 대한 표면파의 속도를 약 2000 m/s로 P파 속도를 4088 m/s로 가정하였을 때 최소파장은 0.05 m 이다. 유

한요소해석 시 구성방정식이 집중질량행렬을 적용하는 경우 χ 는 0.2이고, 일관질량행렬을 사용하는 경우 χ 는 0.25를 적용한다. 본 연구에서 이용한 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS는 일관질량행렬을 기본적으로 사용하므로 적용 가능한 최대 요소 크기는 0.013 m이다. 따라서, 본 해석에서는 한 변의 길이가 0.01 m인 정사각 축대칭 요소를 적용하였다.

동적 유한요소 해석 시 시간증분(Δt)은 수치해석의 신뢰도와 안정성 확보를 위한 중요한 결정 파라메타이다. 시간증분이 너무 크면 해석이 수렴하지 않고 발산하게 되며 시간증분이 너무 작은 경우 Gibb's 현상에 의해 스푸어리스 진동이 나타나기 때문에 해석상 불안정한 상태가 될 수 있다. 따라서, Villiappan & Murti(1984)이 제안한 식 (8)에 따라 유한요소의 크기(Δx)와 P 파의 속도(V_p)로부터 시간증분을 최적화 하여야 한다.

$$\frac{\Delta x}{10 \cdot V_p} \leq \Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_p} \quad (8)$$

이러한 공간적 Nyquist 한계뿐만 아니라 시간적 Nyquist 한계 또한 만족하는지 검토하여야 한다. 즉, 시간증분은 식 (9)와 같은 시간적 Nyquist 한계를 만족하여야 한다.

$$\Delta t < \frac{1}{2 \cdot f_{\max}} \quad (9)$$

본 연구에서는 사용한 요소의 크기와 P파 속도를 고려하여 시간증분은 4 μ s로 최적화하였다. 이 시간증분은 공간적 및 시간적 Nyquist한계를 동시에 만족한다. 그리고 모든 경우에 대하여 0.08 sec까지 해석을 수행하였다.

스�크리트 및 암반의 감쇠비의 결정도 중요하다. 변형률에 따른 암반 지반의 전단탄성계수와 감쇠비를 결정

하기 위하여는 공진주시험, 진동삼축압축시험 또는 비틀전단시험을 수행하여야 한다. 그러나 암반의 감쇠비 결정에 관한 연구는 또 다른 중요한 연구 과제이며 현재까지는 절리 암반의 감쇠비를 결정하는 것은 어렵다. 따라서, 향후 절리암반에 대한 공진주 시험 및 비틀전단시험 기법이 개발되면 이를 이용하여 절리가 있는 암반에 대한 보다 정확한 감쇠비의 결정 및 수치해석에의 적용이 가능할 것이다. 일반적으로 슛크리트에 대한 충격반향시험의 결과는 고주파수 영역에서 나타나며 고주파수 영역에서는 강성비례형 감쇠가 지배적이므로 본 연구에서는 Rayleigh 감쇠에서 강성비례형 감쇠계수(β_R)만이 고려되었고 지반의 P파 속도에 따른 Rayleigh 강성 비례형 감쇠계수를 표 1과 같이 가정하여 적용하였다. 강성비례형 감쇠계수를 적용함에 따라 시간증분도 감소되어야 하나 해석에서 적용한 시간증분은 안정적인 동적 해석을 만족하는 수준이므로 앞서 결정한 시간증분을 그대로 적용하여도 무방하다.

4.2 충격반향기법의 수치해석 모델

충격반향시험을 구현한 유한요소 모델의 해석을 위해 슛크리트층과 암반층을 모델링 하였고, 실제와 같은 점하중을 구현하면서 효율적인 해석을 위해 2차원 축대칭 요소를 적용하였다. 또한 슛크리트층과 암반층의 우측에 무한요소를 적용하여 반사파의 발생을 제어하였고, 지반층의 바닥에도 무한요소를 적용하여 실제 터널 구조물과 유사한 모델을 구성하였다. 유한요소해석을 위해 구성된 모델은 그림 2와 같다.

실제 현장에서 슛크리트의 배면에는 다양한 지반조건이 존재한다. 따라서, 지반조건에 따른 충격반향 시험의 신호특성을 획득하기 위하여 풍화토, 풍화암, 연암, 경암에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 특히, 본 연구의 목

표 1. ABAQUS 해석에 적용한 물성치

구성재료	Vp (m/s)	Vs (m/s)	밀도 (kg/m ³)	강성비례형 Rayleigh 감쇠계수 (sec)	포와송비	동적 탄성계수 (Pa)
스�크리트	4088	2450	2400	1.0E-6	0.20	3.5E+10
경암	4500	2755	2600	5.0E-7	0.20	4.7E+10
연암	3000	1732	2500	5.0E-4	0.25	1.9E+10
풍화암	2000	1670	2260	5.0E-3	0.30	6.7E+09
풍화토	1000	480	1890	5.0E-2	0.35	1.2E+09

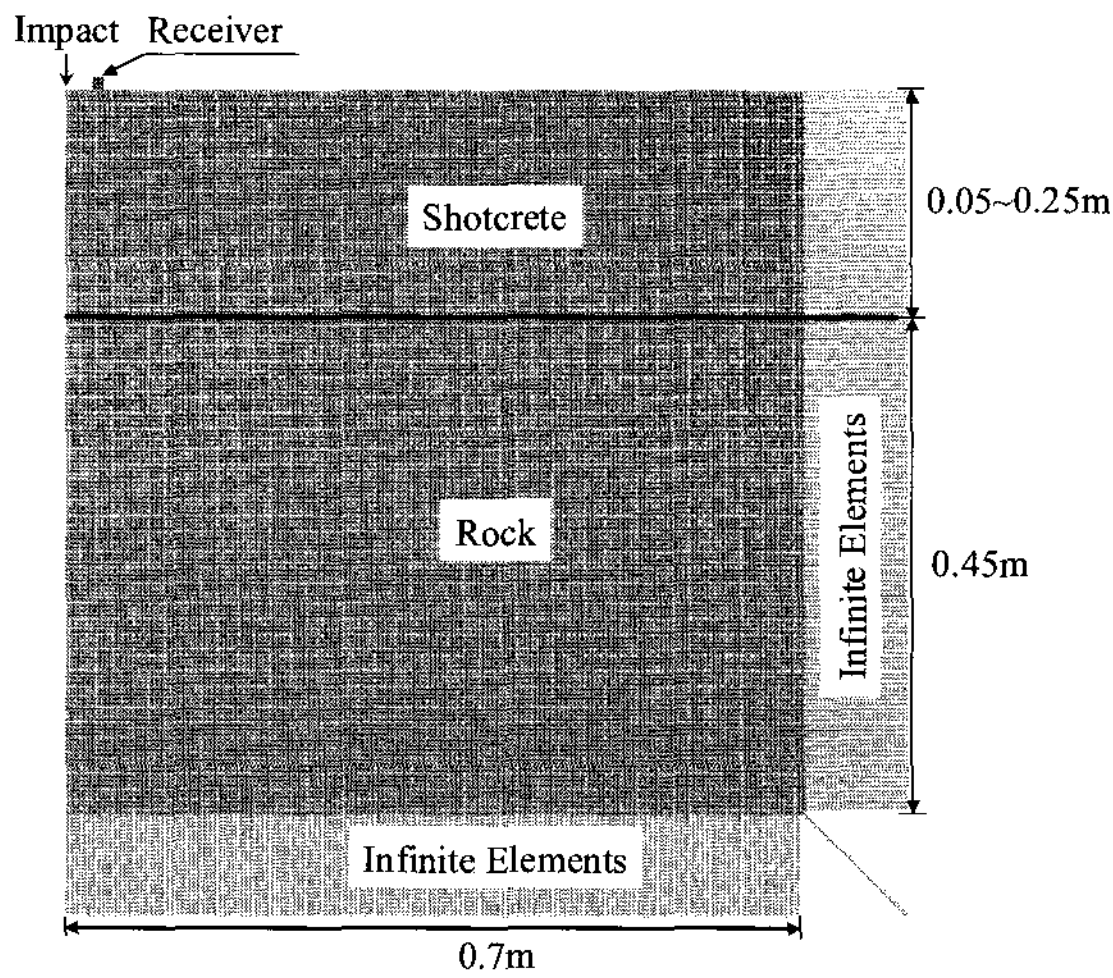


그림 2. 슛크리트와 암반으로 구성된 유한요소망

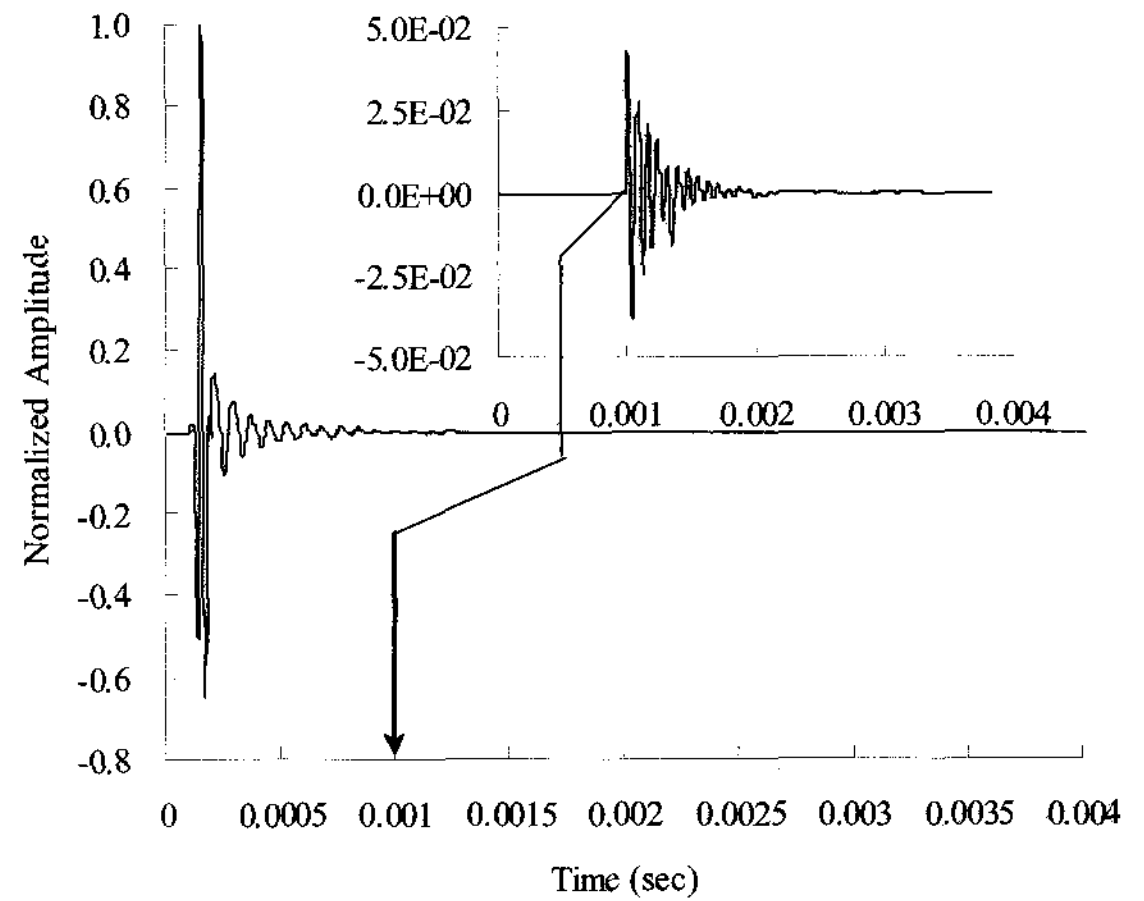


그림 3. 슛크리트 표면에 대하여 연직방향 가속도 측정 결과 (경암 지반에서 접착력 상실 조건의 획득 신호)

적은 슛크리트와 암반 및 토사와의 부착상태를 평가하는 것이므로 접착, 접착력 상실 및 공동 조건에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 감지점은 가진원으로부터 2 cm 거리에 위치하도록 하였다. 해석에 적용한 물성치는 다음 표 1과 같다.

5. 수치해석에 의한 충격반향 신호특성 분석

유한요소 해석에 의한 감지점에서의 연직방향 가속도 측정 결과는 다음 그림 3과 같다. 측정 초기 시점부터 표면파가 감지점을 지나가는 동안은 고주파수의 표면파와 P파의 공진이 동시에 나타나므로 경계조건에 따른 신호특성만을 분석하기 위하여 표면파가 감지점을 지나간 이후 P 파의 공진만이 존재하는 시점부터 가속도 결과를 획득하여 신호처리를 수행하였다. 따라서, 모든 경

우에 대하여 동일한 시점부터 P파의 공진에 대해 유효한 시간 영역 신호로 획득하여 고려하였다.

5.1 슛크리트의 접착조건에 따른 충격반향시험 신호특성 분석

5.1.1 시간영역 및 주파수 영역의 충격반향시험 신호특성 분석

스�크리트의 접착조건에 따른 충격반향시험 신호특성에 대한 해석은 15 cm의 슛크리트가 경암에 완전 접착, 접착력 상실 및 공극이 존재하는 모델에 대하여 수행하였다. 그림 4는 ABAQUS를 이용하여 충격반향시험을 구현하여 획득한 가속도 결과이다. 슛크리트가 암반에 완전 접착된 경우는 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 응력파가 암반으로 전달되어 반사되는 에너지는 거의 나타나지 않는다. 반면 접착력이 상실되어 슛크리트와 암반이 접촉된 경우

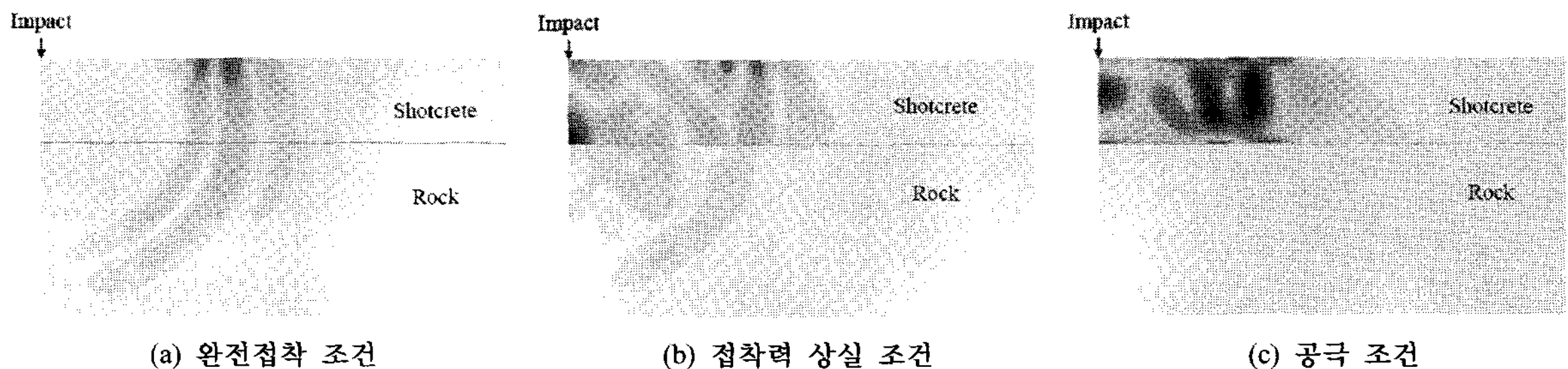


그림 4. ABAQUS 해석에 의한 접착 상태와 접착력 상실 상태에 대한 해석 결과(가진후 0.00018 sec 시점)

에는 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 암반으로 전파되는 에너지와 슛크리트의 경계면에서 반사되어 슛크리트 내부에 갇혀있는 에너지가 공존하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(c)와 같이 공동이 존재하는 경우는 양단 자유단의 거동으로 암반으로 에너지가 전달되지 못하고 경계면에서 반사파가 형성되어 슛크리트안에 응력파가 갇힌다.

그림 5는 충격반향시험의 유한요소 해석을 통해 접촉 조건에 따라 획득한 시간영역(좌측) 및 주파수 영역(우측)에서의 신호이다. IE 신호를 최대 진폭으로 정규화하여 시간영역에서 나타난 결과를 서로 비교하여 보면 슛크리트와 암반이 완전 접촉된 조건(그림 5(a)의 경우 시간영역상에서 최대 진폭 이후 첫 번째 정규화 진폭은 0.5 정도로 나타나고, 접촉력 상실 조건(그림 5(b)에서는 동일 위치의 정규화 진폭 값이 0.6 정도로 증가하게 된다. 슛크리트와 암반 사이에 공동이 있는 경우(그림 5(c)는 0.7의 정규화 진폭을 나타낸다. 즉, 접촉상태가 나빠짐에 따라 최대 진폭 이후 첫 번째 나타나는 정규화 진폭이 점차 증가하게 되는 것을 확인 할 수 있다.

충격반향시험의 시간영역 신호에 대한 고속 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 해석한 결과, 슛크리트가 암반과 완전히 접촉된 경우(그림 5(a))에는 autospectral density의 최대값이 56 정도로 나타나며 주파수의 밴드가 전체 주파수 영역에 걸쳐 30 kHz까지 펼쳐져 넓게 분포하는 특성을 볼 수 있다. 즉, 주파수의 대역폭이 넓고 완만하게 형성되어 최대 고유 진동수를 찾기가 힘들며 주파수의 강도도 약하게 나타나는 특징이 있다. 접촉력 상실 조건(그림 5(b))에서는 완전 접촉상태 조건의 고유 진동수보다 대역폭이 더 좁게 형성되며 autospectral density의 최대값이 접촉 조건에 비해 4배 가량 크게 나타나므로 10.3 kHz의 최대 고유 진동수를 확인 할 수 있다. 이 경우는 자유단과 고정단 조건(즉, 자유단 조건, $\alpha =$

2; 고정단 조건, $\alpha = 4$)의 중간적 조건이 형성되므로 다음과 같은 식 (10)에서 접촉력 상실 조건 시 계수, α 는 2.6으로 나타난다.

$$\alpha = \frac{V_p}{f_n \cdot T} \tag{10}$$

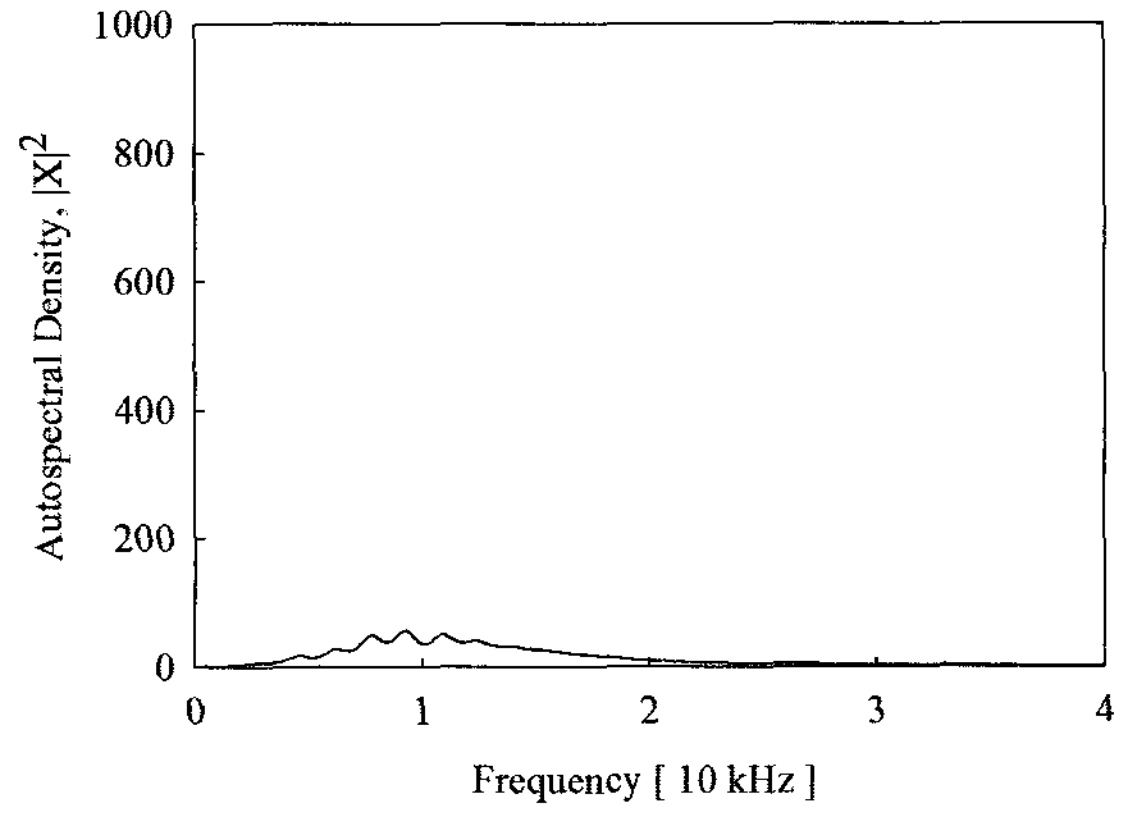
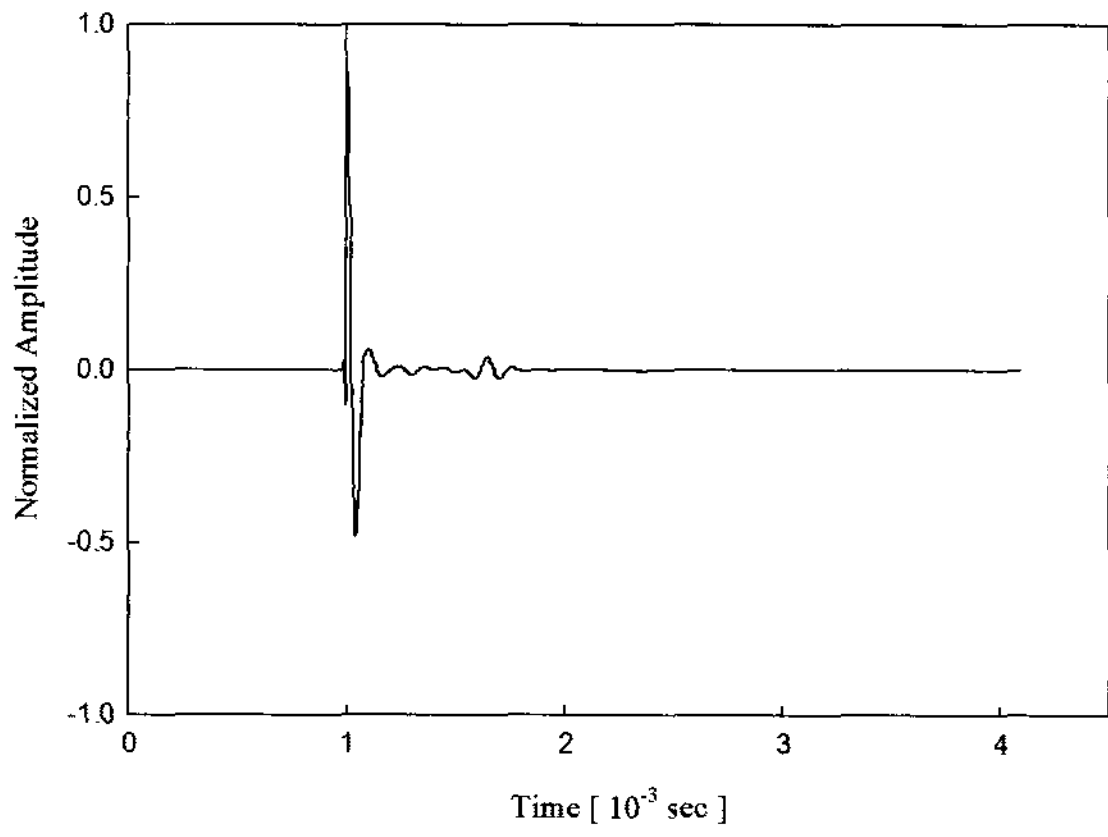
여기서, T 는 슛크리트의 두께, V_p 는 P파 속도, f_n 은 공진 주파수이다.

공동이 존재하는 경우는 슛크리트 내에서 공진이 발생되어 뚜렷한 공진 주파수를 획득할 수 있다. 공동이 있는 경우는 응력파의 반사면까지의 거리가 짧고 이상적인 양단 자유단의 거동을 보이기 때문에 뚜렷한 공진 주파수가 나타나는 것이다. 공동이 존재하는 경우 공진 주파수 대역폭이 접촉력 상실 조건 보다 더 좁고 날카롭게 형성되며 autospectral density의 값이 완전 접촉조건에 비해 15배 이상으로 나타난다. 즉, 접촉 조건이 불량해질수록 주파수 응답에 대하여 공진 주파수 대역폭이 좁아지고 진폭은 증가하게 되며 이는 결국 기하학적 감쇠비의 감소를 의미한다. 수치해석으로부터 획득한 공진주파수는 12695 Hz이며 이 최대 공진 주파수를 공동이 존재하는 경우의 대표 공진주파수로 가정한다면 28 일 재령의 P파 속도가 4088 m/s 이므로 슛크리트 두께를 Sansalone & Streett(1997)이 제안한 식 (11)에 따라 역산한 결과 표면으로부터 공동까지의 슛크리트 두께는 15.5 cm로 나타난다. 이는 실제 수치해석모델에서 구성한 슛크리트 두께와 상당히 유사한 수준까지 예측할 수 있음을 시사한다.

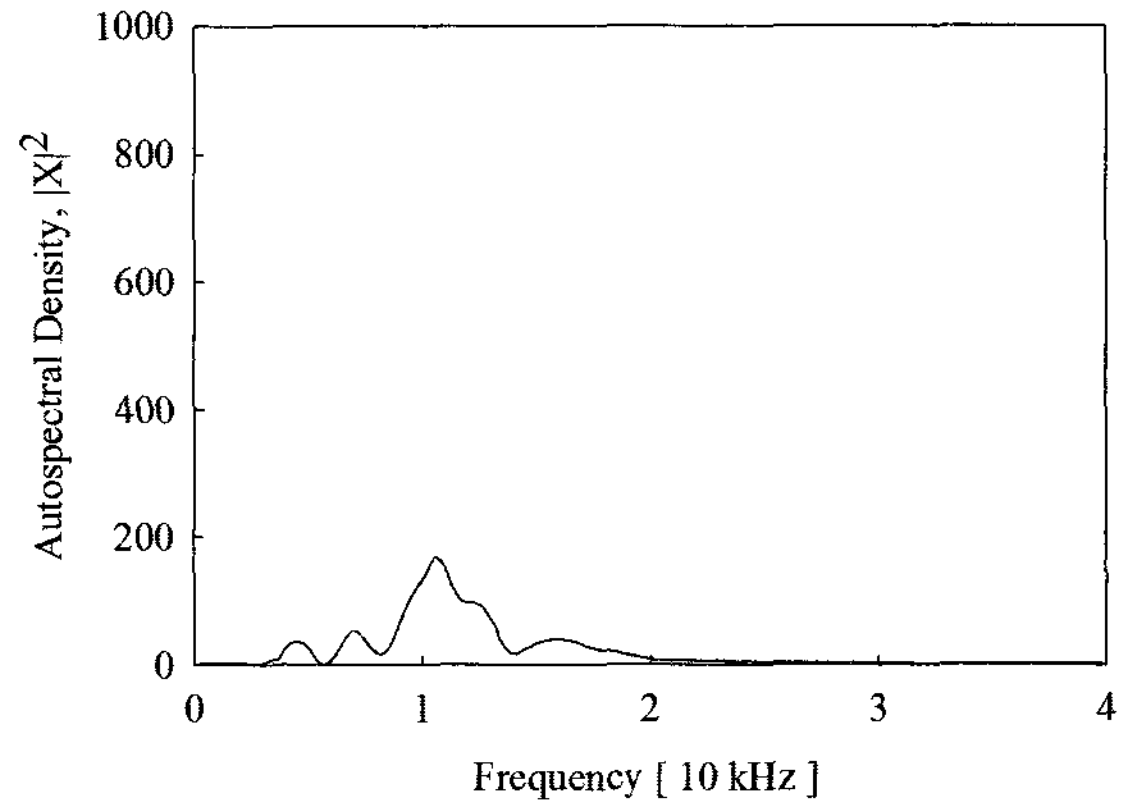
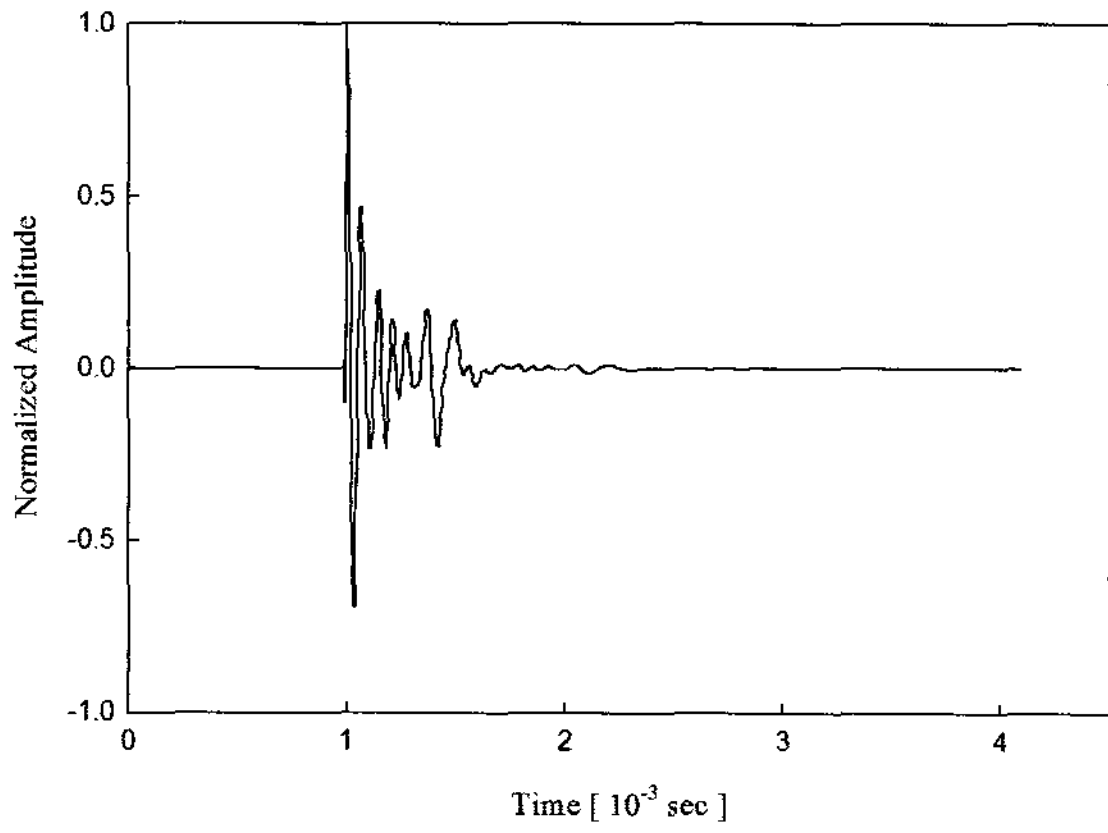
$$T = \frac{0.96 \cdot V_p}{2 \cdot f_n} \tag{11}$$

표 2. 유한요소 해석을 통해 획득한 슛크리트의 두께

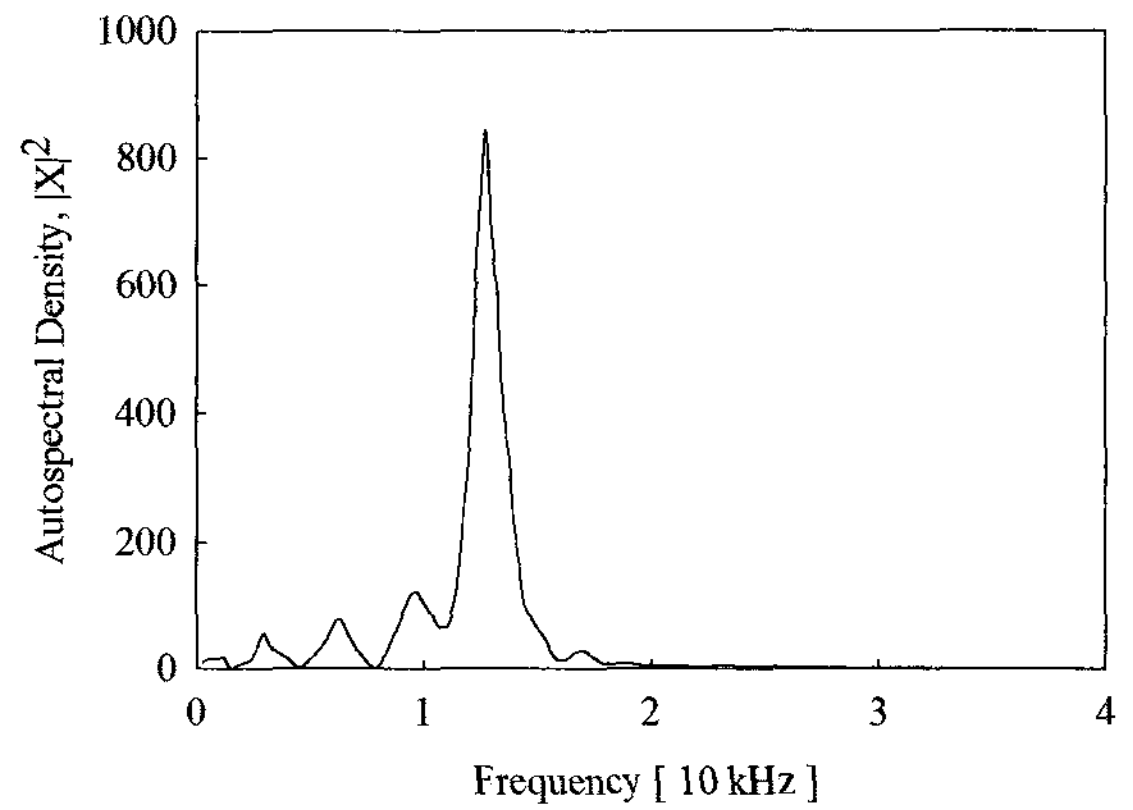
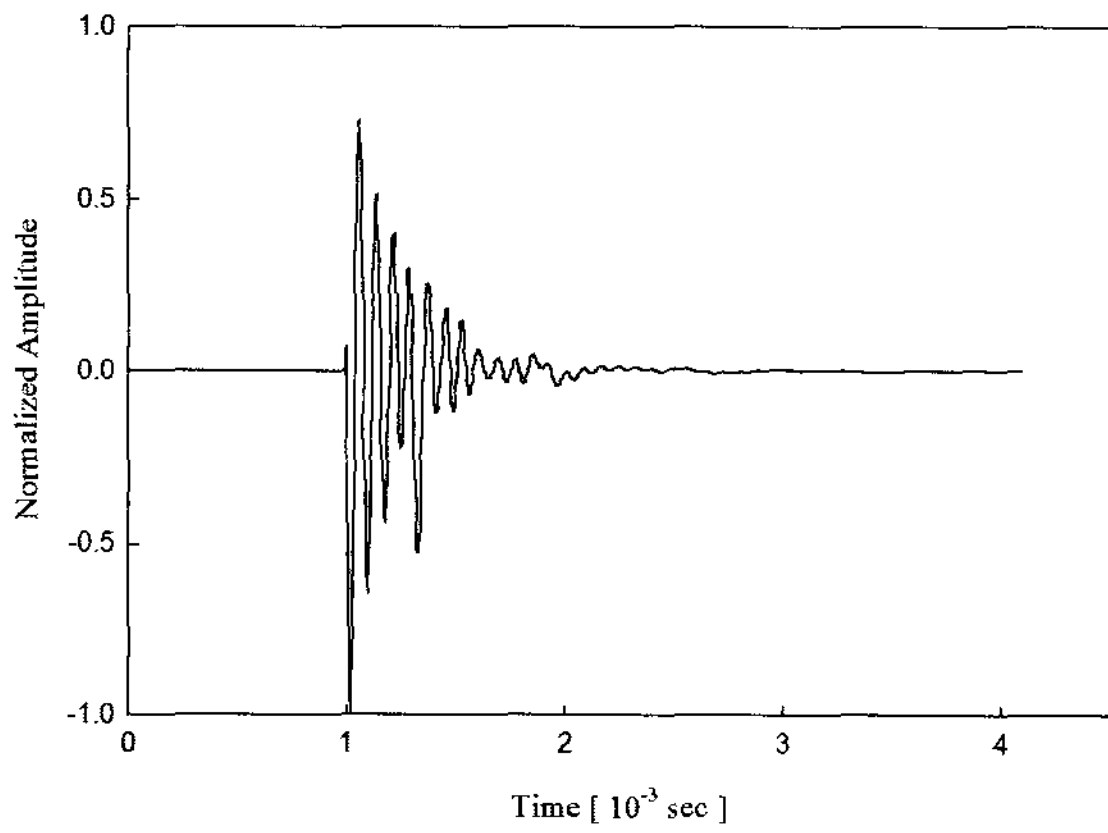
모델의 슛크리트 두께(m)	공진주파수(Hz)	ABAQUS 해석에 의한 슛크리트 두께(m)
0.05	35156	0.056
0.10	18799	0.104
0.15	12695	0.155
0.20	9521	0.206
0.25	7812	0.251



(a) 완전 접촉 조건



(b) 접촉력 상실 조건



(c) 공동 조건

그림 5. 접촉 조건에 따른 시간영역 및 주파수 영역의 IE 신호 특성

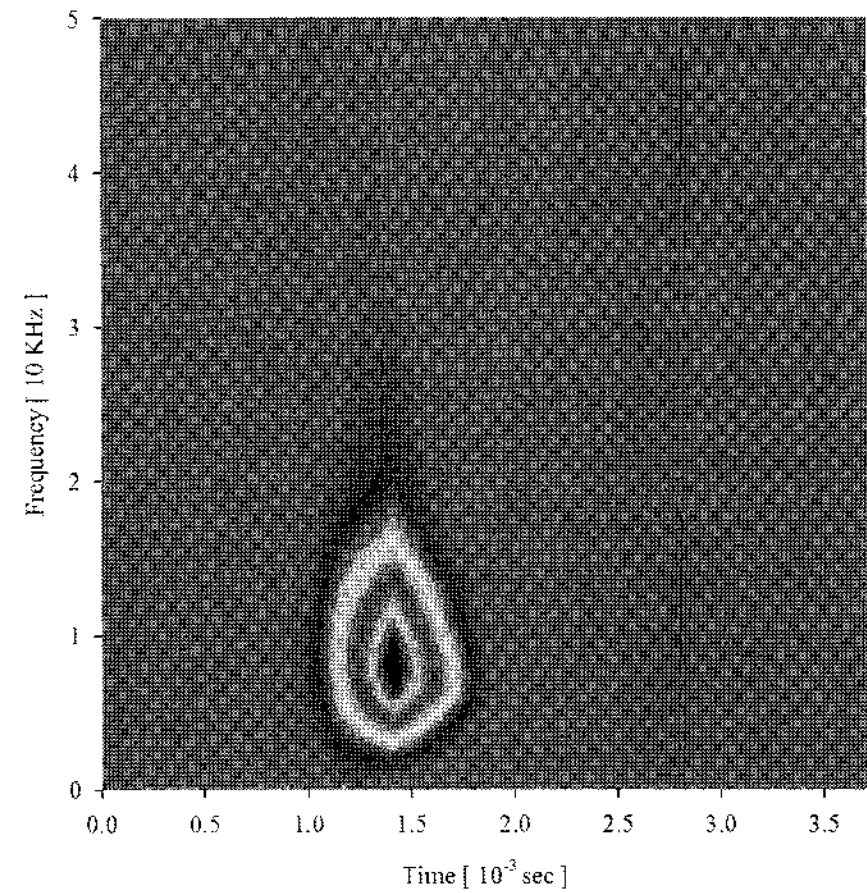
유한요소 해석의 타당성을 검증하기 위하여 슛크리트 배면에 공동이 존재하는 경우 슛크리트의 두께에 따른 충격반향시험을 모사하였다. 슛크리트 배면에 공동이 존재하는 경우 슛크리트는 양단 자유단의 이상적인 상태가 되고 지반의 종류에 상관없이 슛크리트 두께에 따른 정확한 공진주파수가 나타나게 된다. 슛크리트 두께에 따른 유한요소 해석 결과를 고속 푸리에 변환을 통해 획득한 공진주파수 및 Sansalone & Streett(1997)가 제안한 식 (11)에 의해 역산된 슛크리트의 두께를 표 2에 정리하였다. 유한요소 해석을 통해 공동이 있는 경우 슛크리트의 두께에 따른 공진주파수를 획득할 수 있고, 이를 역산하여 슛크리트의 두께를 거의 정확하게 획득할 수 있음을 알 수 있다.

5.1.2 시간-주파수 영역에서의 충격반향시험 신호 특성 분석

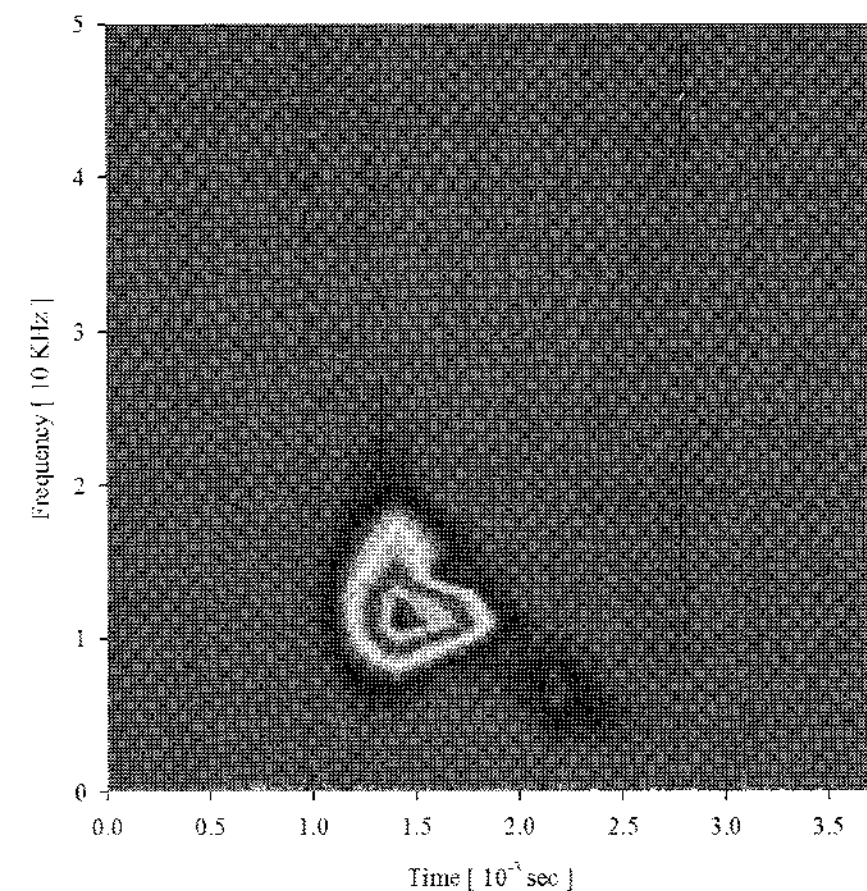
그림 6은 수치해석에 의해 획득한 충격반향시험 신호를 STFT를 기반으로 시간-주파수 영역에서 해석한 결과이다. 접착 조건의 경우(그림 6(a)) 윤곽선은 주파수축 방향으로 길게 형성된다. 윤곽선의 진동시간은 0.8 ms 이고 주파수 대역이 30 kHz까지 형성된다.

접착력 상실 조건의 경우(그림 6(b)) 윤곽선이 원형으로 형성되고, 시간축과 주파수축 방향으로 약한 꼬리모양을 형성한다. 이러한 특성은 공동 조건과 완전 접착 조건의 중간적인 상태로 볼 수 있다. 이 경우 윤곽선의 진동시간은 1 ms 정도로 완전 접착 조건보다는 약간 길어진다.

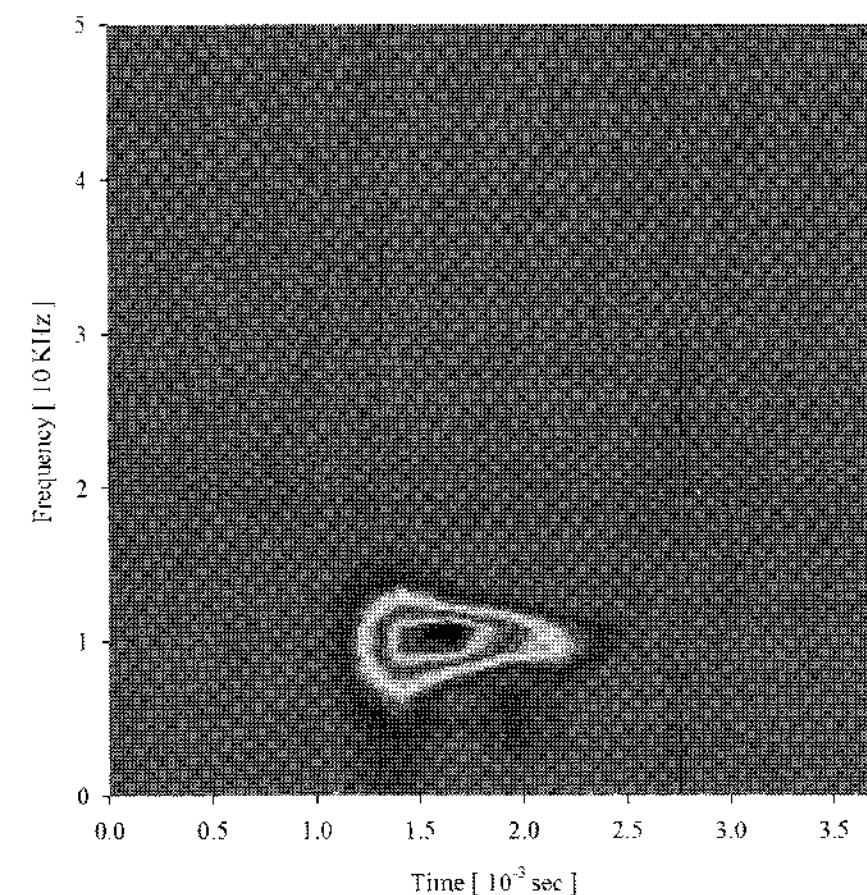
스�크리트와 암반 사이에 공동이 존재하는 경우(그림 6(c)) 윤곽선이 주파수 축에 대하여는 일정한 범위를 갖고 시간축을 따라서 길게 꼬리를 형성하는 형상이 나타난다. 시간-주파수 영역상에 나타난 주파수의 공진시간은 그림 6(c)의 경우 1.3 ms 이다. 이는 슛크리트의 음향학적 임피던스가 공동의 음향학적 임피던스보다 크기 때문에 충격에 의해 발생된 응력파의 에너지가 지반으로 전달 또는 굴절되지 않고 거의 모두 반사되어 에너지의 소산이 늦어지기 때문에 결국 공진주파수에 해당하는 에너지가 잔류하는 시간이 더 길어지게 됨을 알 수 있다. 이때 에너지의 감쇠는 슛크리트의 재료감쇠에 의해 결정된다.



(a) 완전 접착 조건



(b) 접착력 상실 조건



(c) 공동 조건

그림 6. 접착조건에 따른 시간-주파수 영역의 IE 신호 특성

5.2 완전 접촉시 지반 조건에 따른 충격반향시험 신호특성 분석

5.2.1 시간영역 및 주파수 영역에서의 충격반향시험 신호특성 분석

터널 내부에 타설되는 슛크리트의 배면에 공동이 존재하는 경우 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서 그 존재여부를 분명하게 알아낼 수 있다. 또한 접촉상태가 양호한 경우도 시간-주파수 영역에서 그 특성이 확실히 나타난다. 그러나 슛크리트의 배면에는 다양한 조건의 암반 및 토사가 존재하므로 배면 지반조건에 따른 시간영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서의 특성을 규명하여야 현장 시험 시 적용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 슛크리트의 두께를 15 cm로 고정하고 슛크리트 타설후 28일 경과시의 신호특성을 각 지반조건에 따라 분석하였다. 슛크리트의 재령 7일 이후부터는 P파 속도의 증가율이 급격히 작아지며 28일 재령의 P파 속도에 대해 93% 정도에 해당하므로 초기재령이 중요한 경우를 제외하면 일반적으로 28일의 탄성계수를 적용해도 무방할 것이다.

그림 5(a)로부터 슛크리트가 경암 이상 강성의 암반에 완전히 접촉되어 있는 경우 가진원에 의한 응력파는 슛크리트와 암반 사이의 이질층을 통과하여 대부분 암반으로 전달되며 이는 자유단-고정단의 상태로 볼 수 있다. 이 경우 슛크리트 표면에서 획득한 시간영역의 신호는 기하학적 감쇠에 의해 급격히 소멸된다. 그러나 그림 7에서 보는 바와 같이 슛크리트보다 Rayleigh 감쇠비가 큰 연암 이하의 암반 및 풍화토에 완전히 접촉되어 있는 경우는 슛크리트와 지반의 경계면에서 반사되어 대부분의 에너지가 슛크리트 내부에 갇히게 된다. 따라서 슛크리트 표면에서 획득한 시간영역 신호는 감쇠되지 않고 다소 공진하게 된다.

주파수 영역 신호로부터 지반의 강성이 작아질수록 공진 주파수가 확실히 나타나며, autospectral density는 연암의 경우 722, 풍화암의 경우 1491, 풍화토의 경우 2845로 지반 조건이 불량할수록 주파수 영역에서 나타나는 에너지의 크기가 커짐을 알 수 있다.

스�크리트 표면에서 발생된 체적파는 슛크리트를 지나 지반에 전달된다. 그러나, 지반에 전달된 대부분의 체적파는 지반과 슛크리트가 접한 표면으로부터 수 cm의 깊이에서 반사된다. 즉, 감쇠가 큰 지반은 일종의 쿠션역할

을 하여 가상의 자유단 경계면을 형성하게 되고, 슛크리트와 지반의 이중층으로 이루어진 자유단 구조물의 거동 양상을 나타내게 된다. 지반내 가상 자유단의 깊이는 Sansalone & Streett(1997)가 제시한 식 (12, 13)에 의하여 계산할 수 있다.

$$f_n = \frac{1}{\frac{2 \cdot T_1}{V_{p1}} + \frac{2 \cdot T_2}{V_{p2}}} \quad (12)$$

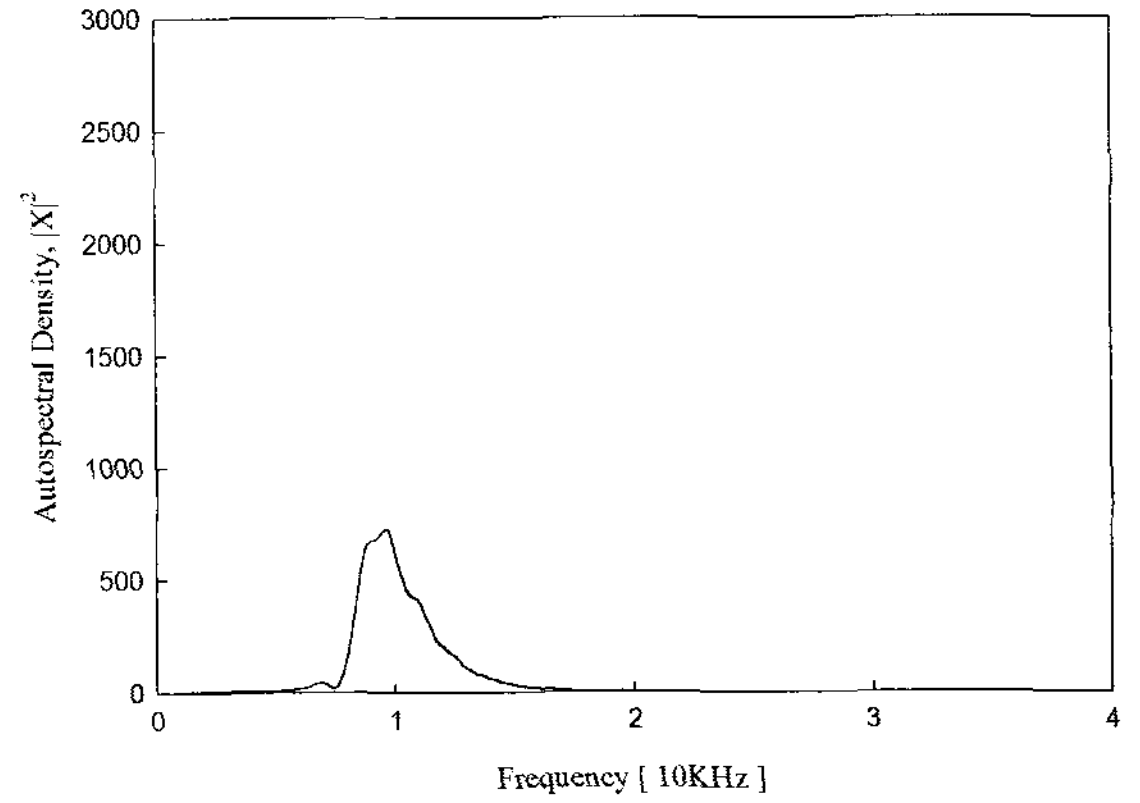
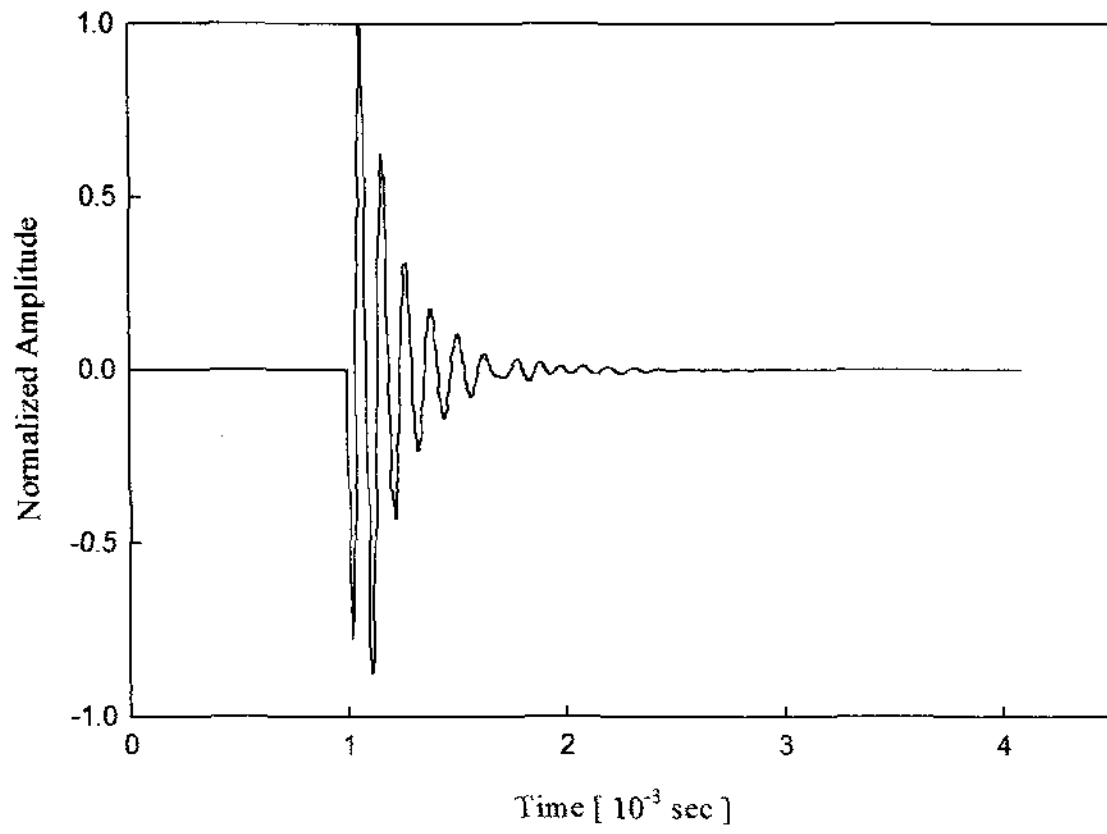
$$\text{따라서, } T_2 = V_{p2} \left(\frac{1}{2 \cdot f_n} - \frac{T_1}{V_{p1}} \right) \quad (13)$$

여기서, T_1 은 슛크리트의 두께, V_{p1} 은 슛크리트의 P파 속도, T_2 는 접촉 지반의 가상 자유단 두께, V_{p2} 는 지반의 P파 속도, f_n 은 이중층의 공진주파수이다. 본 연구에서 획득한 각 조건의 공진주파수는 연암의 경우 9519 Hz, 풍화암의 경우 8447 Hz, 풍화토의 경우 7073 Hz이므로 가상 자유단의 깊이는 연암의 경우 4.7 cm, 풍화암이 4.5 cm, 풍화토가 3.4 cm로 각각 나타났다. 즉, 감쇠비가 작아질수록 가상 자유단의 깊이도 작아짐을 알 수 있다.

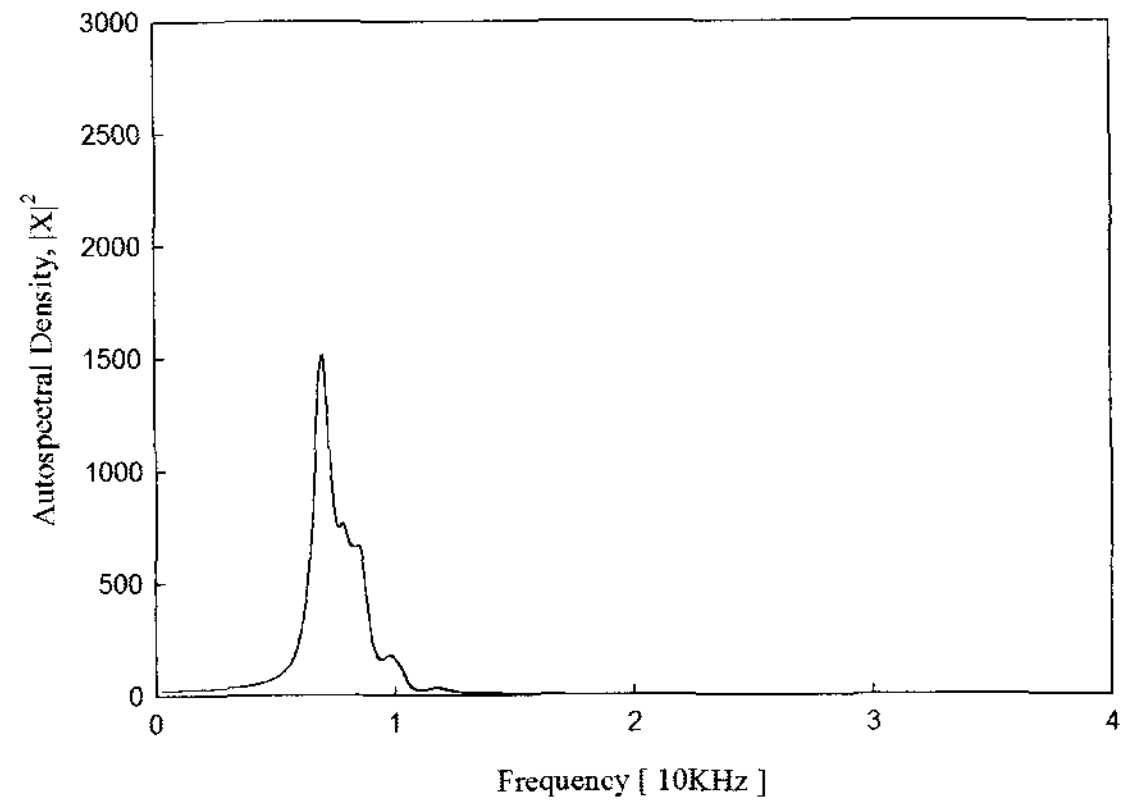
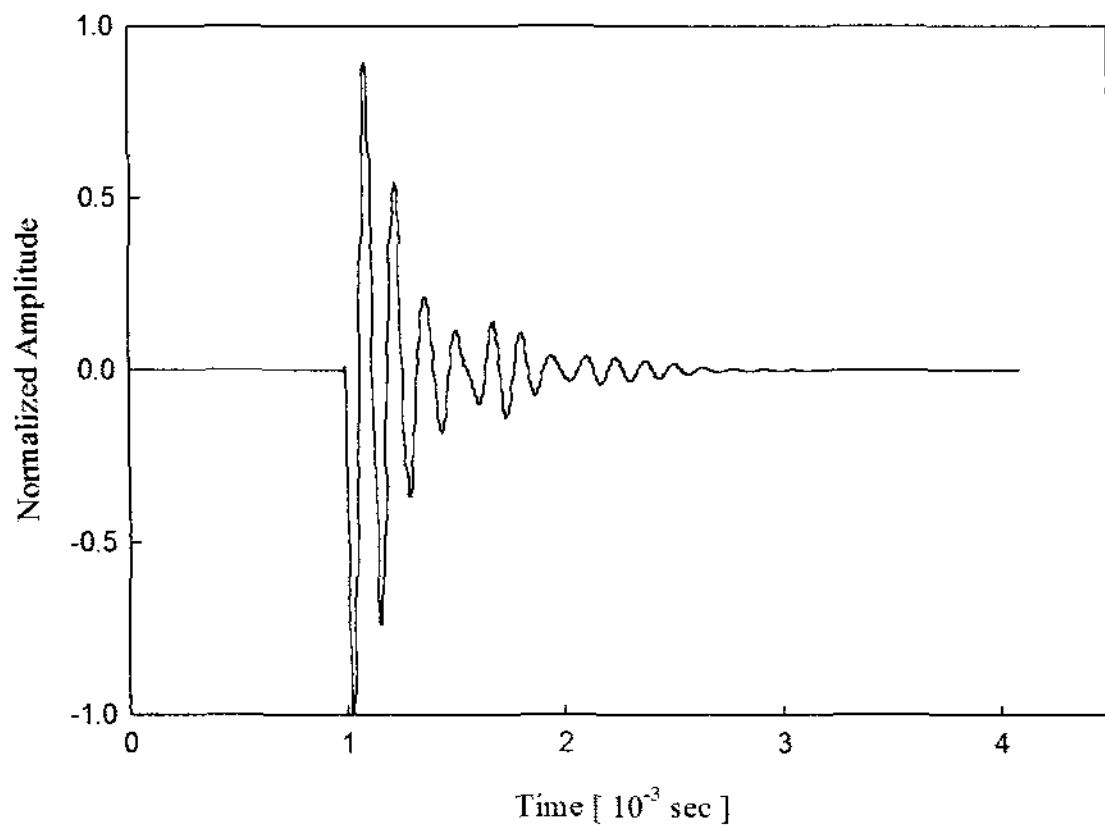
5.2.2 시간-주파수 영역에서의 충격반향시험 신호특성 분석

완전 접촉시 지반조건에 따른 충격반향시험 해석 신호를 STFT를 통해 시간-주파수 영역에서 해석하여 그림 8에 나타내었다. 해석결과로부터 주파수대역에는 큰 차이가 없지만 모든 경우 동일하게 시간축과 평행한 윤곽선이 시간-주파수 영역상에 나타난다. 그림 6(a)로부터 슛크리트 배면에 경암이 존재하는 경우의 공진시간은 대략 0.8 ms이고, 연암이 존재하는 경우(그림 8(a))는 공진시간이 1.5 ms 정도로 나타났다. 그리고, 풍화암(그림 8(b)) 및 풍화토(그림 8(c))로 지반 강성이 작아짐에 따라 공진시간도 2 ms에서 2.5 ms까지 길어진다. 즉, 슛크리트 표면에서 발생된 응력파의 에너지는 강성이 작은 지반에 접할수록 지반에 전파되지 못하고 슛크리트 내부에서 공진하게 되며 결국 에너지의 소산이 늦어진다는 것을 의미한다.

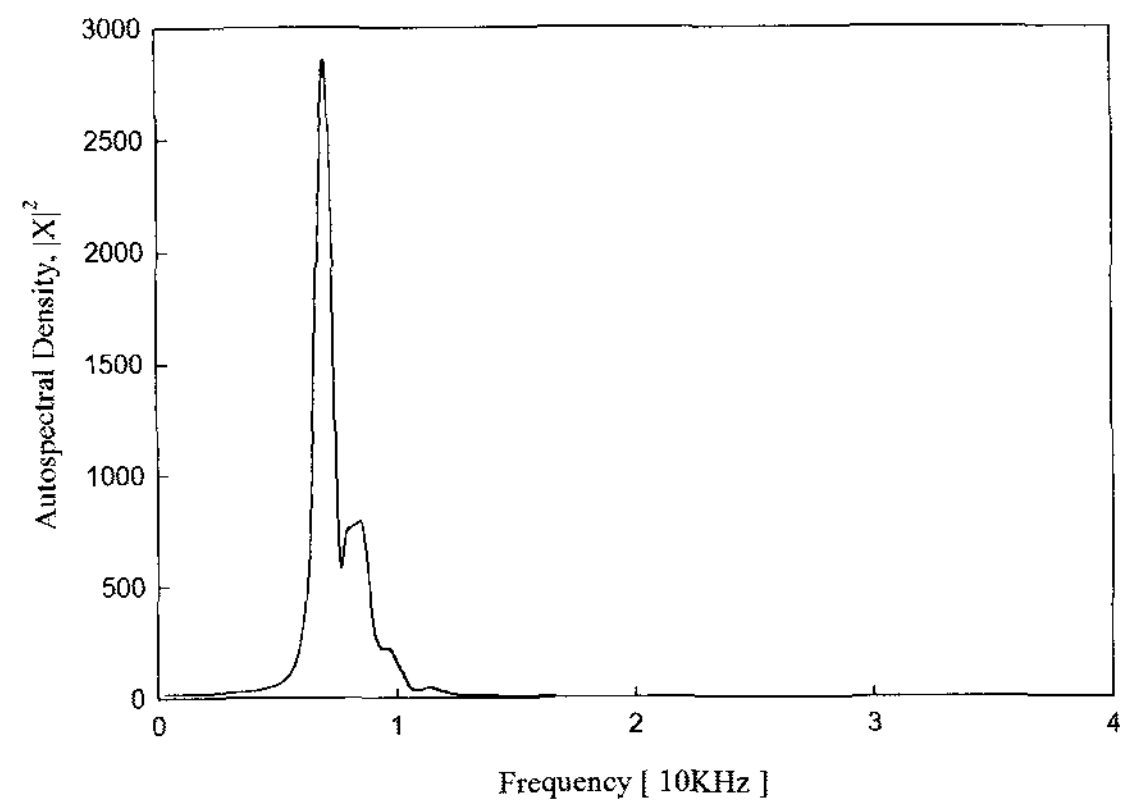
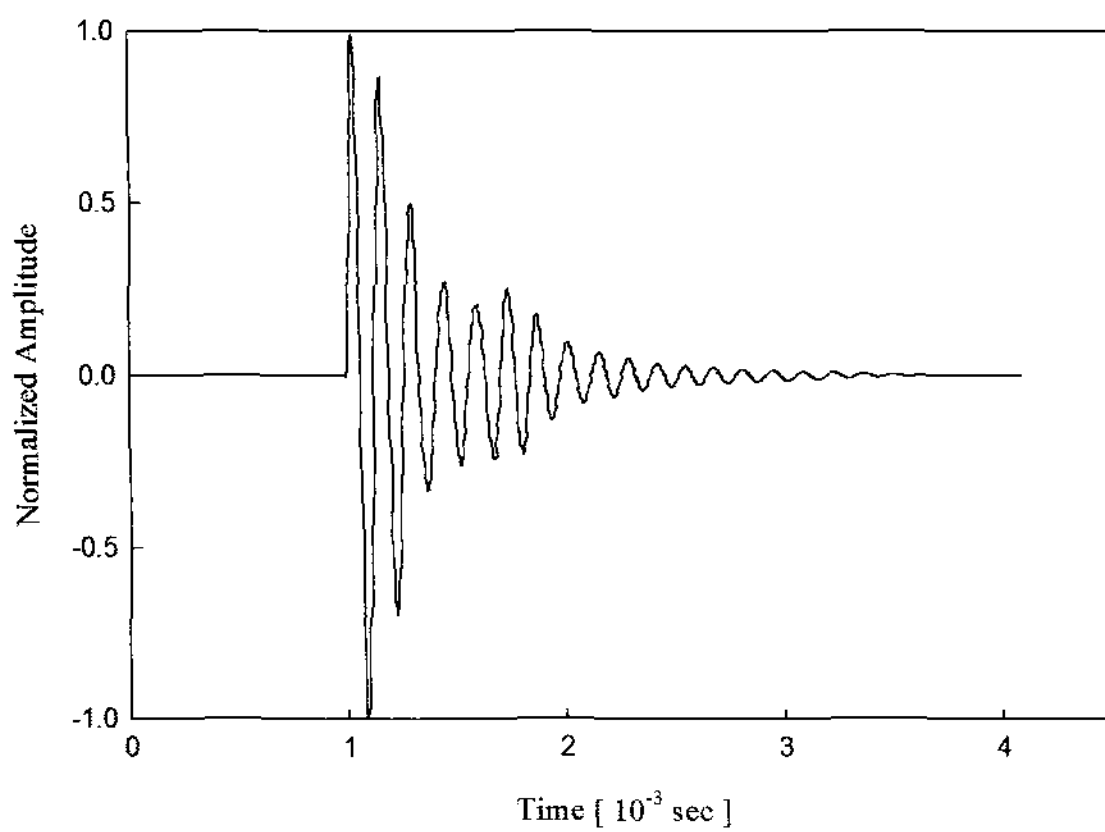
공동이 존재하는 경우와 불량한 지반조건에 완전 접촉되어 있는 경우 공통적으로 공진 주파수가 뚜렷하게



(a) 연암 조건

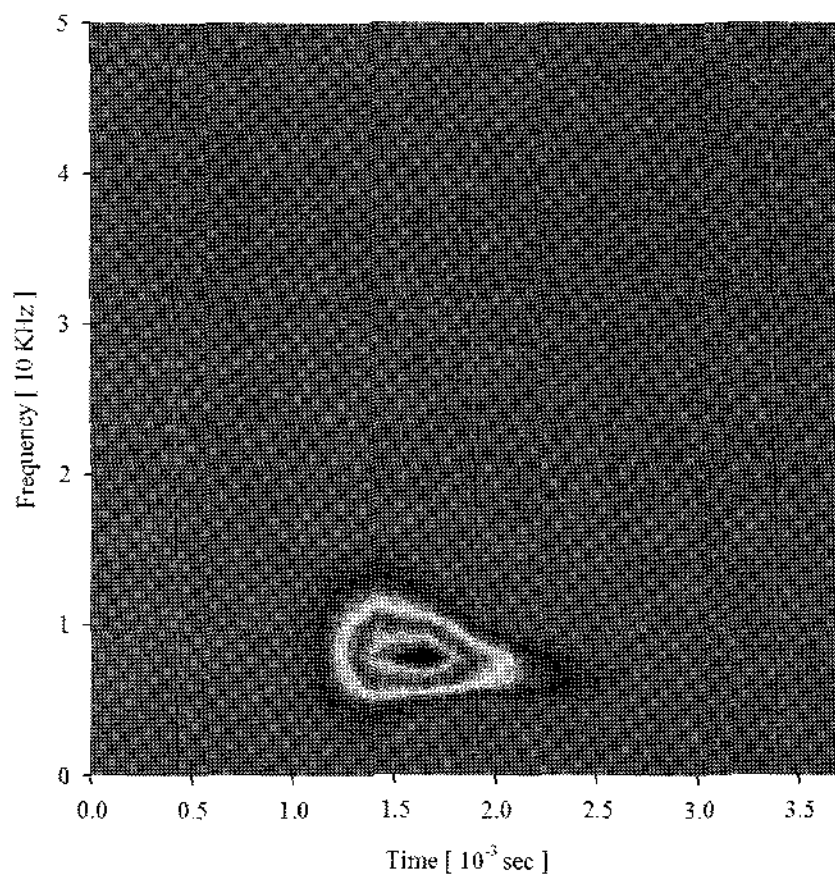


(b) 풍화암 조건

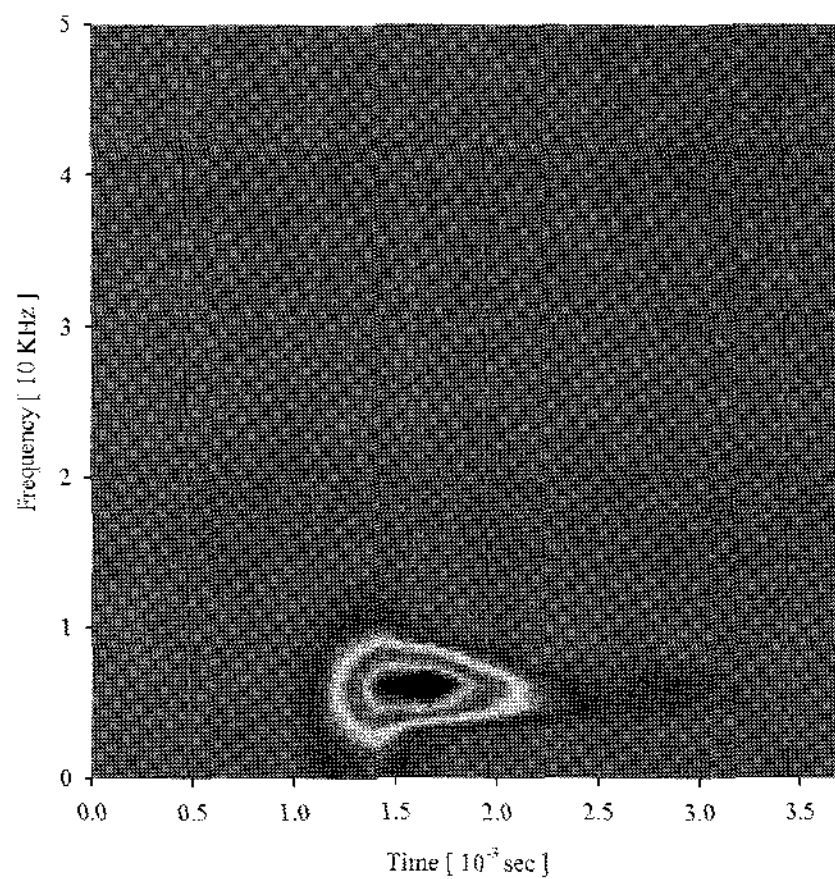


(c) 풍화토 조건

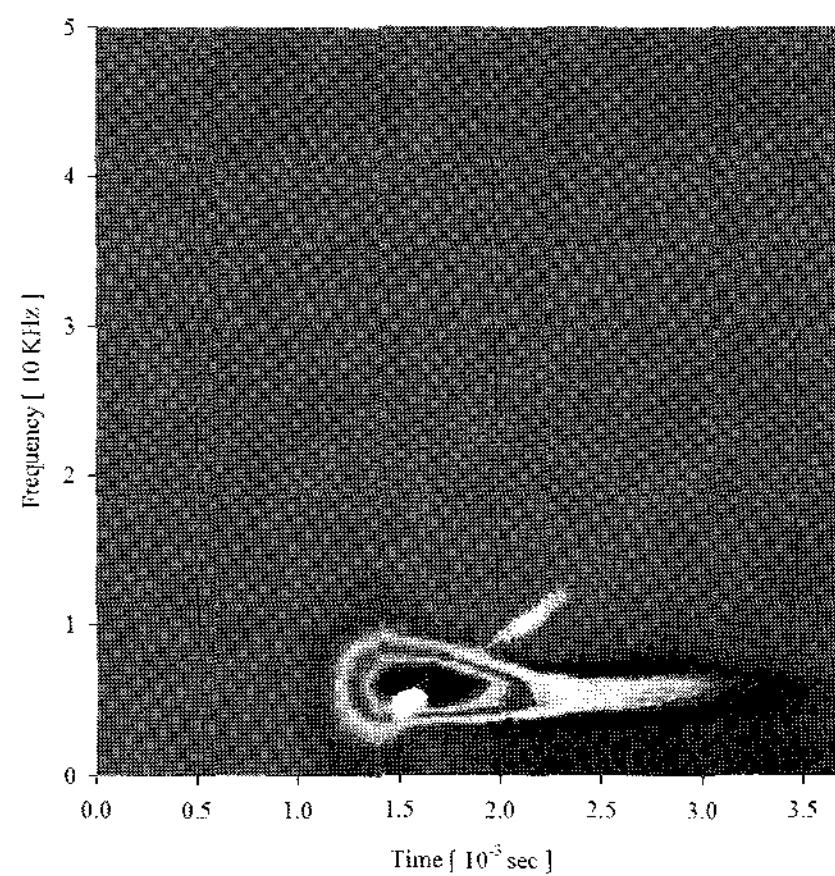
그림 7. 완전 접촉시 지반 조건에 따른 시간영역 및 주파수 영역의 IE 신호 특성



(a) 연암 조건



(b) 풍화암 조건



(c) 풍화토 조건

그림 8. 완전 접촉시 지반 조건에 따른 시간-주파수 영역의 IE 신호 특성

나타나고 시간-주파수 영역에서 시간축에 평행한 윤곽선이 나타난다. 공동이 존재하는 경우 시간-주파수 영역에서 윤곽선의 길이가 길어질수록 솟크리트의 두께는 감소되고, 이러한 경우 주파수 영역에서 10 kHz 이상의 고주파수에 위치하게 된다. 그러나 완전 접촉시 지반조건의 변화에 의해 윤곽선이 길어지는 경우는 주파수 영역에서 10 kHz 이하의 저주파수 대역에 위치하게 된다. 따라서 솟크리트의 접촉상태와 지반 조건을 서로 구별하여 해석 할 수 있다. 즉, 시간-주파수 영역에서도 윤곽선의 주파수 축에 대한 위치가 10 kHz를 기준으로 위에 존재하느냐 또는 아래 존재하느냐에 따라 접촉상태와 지반 조건을 구별해 낼 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 충격반향시험 모사하였고, 솟크리트의 접촉상태에 따른 신호특성을 시간영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서 각각 분석하였다. 또한 완전 접촉시 주변 지반의 조건에 따른 신호특성을 분석하였다. 시간영역의 해석 결과만으로 솟크리트 배면의 접촉상태를 예측하는 것은 힘들다. 그러나 주파수 영역 해석과 시간-주파수 영역과 같은 능동적인 해석 기법을 적용하여 종합적으로 고려하면 비파괴 시험을 통해 솟크리트 배면의 접촉상태 및 지반 조건을 평가할 수 있다. 수치해석 연구결과 다음과 같은 특징들을 규명하였다.

- 1) 시간영역에서 최대 진폭 이후의 진폭의 크기가 작을수록 접촉상태가 양호하다.
- 2) 주파수 영역에서 autospectral density가 작고 주파수 대역폭이 넓을수록 접촉상태가 양호하다.
- 3) 공동이 존재하면 공진주파수가 명확하게 나타나며 이 경우 솟크리트의 두께를 역산하여 구할 수 있다.
- 4) 솟크리트와 암반의 접촉상태가 양호할수록 기하학적 감쇠비가 증가한다.
- 5) 시간-주파수 영역에서 윤곽선의 형상 및 공진시간 특성: 솟크리트 배면에 공동이 존재하는 경우 윤곽선이 시간축 방향으로 길게 형성되고 솟크리트의 두께가 얇을수록 공진시간이 길게 형성된다. 솟크리트가 암반에 잘 접촉되어 있으면 주파수축 방향

으로 길게 윤곽선이 형성되며 고주파수 성분이 포함된다.

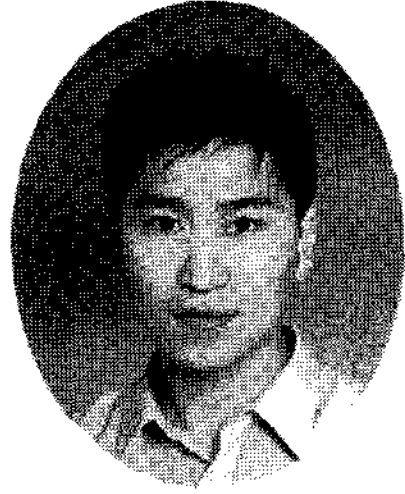
- 6) 슛크리트 배면 지반의 강성이 작아질수록 주파수의 에너지는 크게 나타나고 시간-주파수 영역에서 시간축과 평행한 윤곽선이 저주파수 대역에서 길게 나타난다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 07첨단도시개발사업(과제번호: 07도시재생A03)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)에 의해 수행되었습니다.

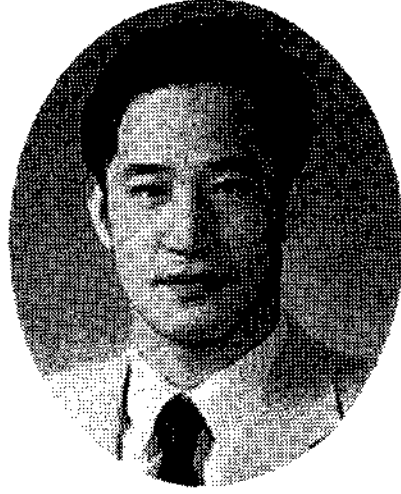
참고문헌

1. ABAQUS/Standard Ver. 6.5 User Manual, Finite element software package. Hibbitt, Karlsson and Sorenson, Inc.
2. Carino, N.J. and Sansalone, M. (1992), "Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method", *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 3, pp. 296-303.
3. Davis, Allen G. (2003), "The nondestructive impulse response test in North America: 1985-2001", *NDT & E International*, Vol. 36, pp. 185-193.
4. Davis, Allen G., Malcolm, K. Lim and Petersen, C.G. (2005), "Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods", *NDT & E International*, Vol. 38, pp. 181-186.
5. Gabor, D. (1946), "Theory of Communication", *J.IEE (London)*, Vol. 93, pp. 429-457.
6. Hassani, F.P., Sadri, A. and Momayez, M. (1997), "A Miniature seismic reflection system for evaluation of concrete linings", *Pure appl. Geophys.* Vol. 150, pp. 677-691.
7. Hassani, F.P. and Momayez, M. (2000), "Using NDT for thickness measurement of shotcrete rock support systems in underground mines", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Vol. 19, AIP Conference Proceedings*, Vol. 509, pp. 1701-1707.
8. Jaeger, Barbara J., Mary J. Sansalone and Randall W. Poston (1996), "Detecting Voids in Grouted Tendon Ducts of Post-Tensioned Concrete Structures Using the Impact-Echo Method", *ACI structural journal*, Vol. 93, No. 4, pp. 462-473.
9. Kim, D.S., Seo, W.S. and Lee, K.M. (2006), "IE-SASW method for nondestructive evaluation of concrete structure", *NDT&E International*, Vol. 39, pp. 143-154.
10. Maierhofer, Ch., Krause, M. and Wiggenhauser, H. (1998), "Non-destructive investigation of sluices using radar and ultrasonic impulse echo", *NDT & E International*, Vol. 31, No. 6, pp. 421-427.
11. Ohtsu, M. and Watanabe, T. (2002), "Stack imaging of spectral amplitudes based on impact-echo for flaw detection", *NDT & E International*, Vol. 35, pp. 189-196.
12. Saenger, E.H., Gold, N. and Shapiro, S.A. (2000), "Modeling the propagation of elastic waves using a modified finite-difference grid", *Wave Motion*, Vol. 31, No. 1, pp. 77-92.
13. Sansalone, M. and Carino, N.J. (1986), "Impact-Echo: A Method for Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves", *NBSIR 86:3452*, National Bureau of Standards.
14. Sansalone, M. and Streett, W.B. (1997), "Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry", New York: Bullbrier Press.
15. Santamarina, J.C. and Fratta, D. (1998), "Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering", ASCE Press, 1801 Alexander Bell Drive Reston, Virginia.
16. Villiappan, S. and Murti, V. (1984), "Finite element constraints in the analysis of wave propagation problem", UNICV report NO. R-218, the University of New South Wales, The school of civil engineering.
17. Zerwer, A., Cascante, G. and Hutchinson, J. (2002), "Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 250-261.



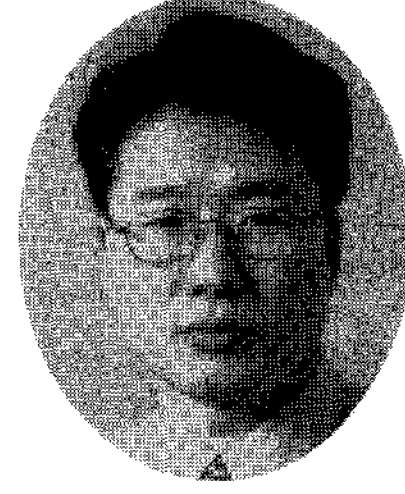
송 기 일

KAIST
건설 및 환경공학과
대학원 박사과정
E-mail: kiilsong@kaist.ac.kr



조 계 춘

KAIST
건설 및 환경공학과
부교수
E-mail: gyechun@kaist.edu



장 석 부

(주)유신코퍼레이션
터널부
이사
E-mail: sbchang@yooshin.co.kr
