

## 비파괴 시험 기법을 이용한 슛크리트 배면 접착상태 평가에 관한 실험적 연구

송기일<sup>1</sup>, 조계춘<sup>2\*</sup>, 장석부<sup>3</sup>, 홍은수<sup>4</sup>

### Evaluation of bonding state of shotcrete lining using nondestructive testing methods - experimental analysis

Ki-Il Song, Gye-Chun Cho, Seok-Bue Chang, Eun-Soo Hong

**Abstract** Shotcrete is an important primary support for tunnelling in rock. The quality control of shotcrete is a core issue in the safe construction and maintenance of tunnels. Although shotcrete may be applied well initially onto excavated rock surfaces, it is affected by blasting, rock deformation and shrinkage and can debond from the excavated surface, causing problems such as corrosion, buckling, fracturing and the creation of internal voids. This study suggests an effective non-destructive evaluation method of the tunnel shotcrete bonding state applied onto hard rocks using the impact-echo (IE) method and ground penetration radar (GPR). To verify previous numerical simulation results, experimental study carried out. Generally, the bonding state of shotcrete can be classified into void, debonded, and fully bonded. In the laboratory, three different bonding conditions were modeled. The signals obtained from the experimental IE tests were analyzed at the time domain, frequency domain, and time-frequency domain (i.e., the Short-Time Fourier transform). For all cases in the analyses, the experimental test results were in good agreement with the previous numerical simulation results, verifying this approach. Both the numerical and experimental results suggest that the bonding state of shotcrete can be evaluated through changes in the resonance frequency and geometric damping ratio in a frequency domain analysis, and through changes in the contour shape and correlation coefficient in a time-frequency analysis: as the bonding state worsens in hard rock condition, the autospectral density increases, the geometric damping ratio decreases, and the contour shape in the time-frequency domain has a long tail parallel to the time axis. The correlation coefficient can be effectively applied for a quantitative evaluation of bonding state of tunnel shotcrete. Finally, the bonding state of shotcrete can be successfully evaluated based on the process suggested in this study.

**Keywords:** Shotcrete, bonding condition, IE method, GPR, time-frequency analysis, experimental study

**요 지** 슛크리트는 터널에서 적용되는 중요한 지지보재이다. 슛크리트의 품질평가는 터널의 안전한 시공과 효과적인 운영을 위한 핵심 요소이다. 슛크리트가 암반에 적절히 타설되었다 하더라도, 막장 및 벤치부에서의 발파, 수축, 지반의 변형 등으로 인해 슛크리트 균열발생 및 배면공동 등의 문제를 야기한다. 본 논문에서는 비파괴 시험인 충격 반향 기법 (Impact-Echo) 및 지하레이다 탐사(GPR)를 이용하여 경암에 타설된 슛크리트 배면의 접착상태를 평가하고자 하였다. 기존의 수치해석 연구에 대한 검증과 더불어 현장 적용성에 대한 검토를 위해 실험적 연구를 수행하였다. 슛크리트의 접착상태는 완전 접착, 접착력 상실 및 공동 조건으로 구분할 수 있다. 실내 실험체 시편에 이 세가지 슛크리트 접착상태를 모사하였다. 충격반향시험으로부터 획득된 신호는 시간영역, 주파수 영역, 및 시간-주파수 영역에서 각각 분석되었다. 능동적 신호 처리 기법인 Short-Time Fourier Transform(STFT)을 이용하여 슛크리트 배면의 접착상태를 효과적으로 예측할 수 있었으며, 그 결과는 기존의 수치해석 연구로부터 획득한 신호특성과 잘 부합 하였다. 슛크리트 배면의 접착상태가 불량할수록 다음과 같은 특징들을 나타낸다. 즉, 주파수 영역에서 자기스펙트럼밀도가 커지며, 기하학적 감쇠비는 감소하고, 시간-주파수 영역에서 윤곽선은 시간축에 평행한 형상을 나타내며, 슛크리트 두께가 얇을수록 그 공진시간이 길어진다. 또한 본 연구에서 제시한 상관계수를 이용하여 슛크리트의 접착상태를 정량적으로 평가할 수 있다. 본 연구 결과를 바탕으로 슛크리트의 접착상태를 평가할 수 있는 평가 기법 및 평가 기준을 제안하였다.

**주요어:** 슛크리트, 접착 상태 평가, 충격 반향 기법, 지하레이다 탐사, 시간-주파수 해석, 실험적 연구

<sup>1</sup>정회원, UTM 토목공학과 조교수 (E-mail: songkiil@gmail.com)

<sup>2\*</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 부교수 (E-mail: gyechun@kaist.edu)

<sup>3</sup>정회원, (주)유신코퍼레이션 터널부 상무 (E-mail: sbchang@yooshin.co.kr)

<sup>4</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 연구교수 (E-mail: esoohong@yahoo.co.kr)

## 1. 서 론

천공 및 발파에 의해 암반을 굴착해 나가는 NATM 공법 또는 선행굴착 및 후행굴착으로 이루어지는 2arch 형식의 터널 시공 시 막장 및 벤치부에서의 발파에 의해 막장 후방에 타설된 슛크리트가 응력파에 의한 충격을 받게 되면 접착되어 있던 슛크리트가 지반과의 접착력을 상실하거나 공동을 형성하여 시공상의 안정성 문제 및 사용상의 문제를 야기할 수 있다(Ansell, 2004). 또한 지반의 변형과 슛크리트 자체의 수축에 의해 부착력이 상실되어 탈락하거나 공동이 형성되기도 한다(Malmgren, 2005). 따라서, 슛크리트의 시공 시 및 시공 이후 품질관리는 안전한 터널 시공을 위해서는 필수적인 요소이다. 그러나 슛크리트의 품질관리를 위해서 일반적으로 시추조사를 수행하게 되므로, 이로 인한 슛크리트의 구조적 파괴 및 경제적 손실이 야기된다. 또한 시추조사를 수행한다 하더라도 슛크리트 구조의 전체적인 상태를 대변한다 할 수도 없다. 따라서 슛크리트의 정확한 타설 두께 검사와 슛크리트 배면의 접착상태를 비파괴 시험법을 이용하여 평가하는 것은 터널의 안전한 시공 관리, 품질관리 및 유지관리에 있어서 핵심적인 요소이며 이러한 비파괴 시험기법을 도입하여 보다 경제적으로 신속하게 슛크리트 품질을 평가할 수 있는 기술의 개발이 시급하다.

현재까지 국내 및 국외에서는 콘크리트 라이닝의 품질을 평가하기 위한 비파괴 시험법이 개발 및 상용화 되어 있다. 특히, 슬라브나 벽체와 같이 두께가 얇은 구조물에서 공동, 균열 및 두께 등과 같은 품질 평가를 위하여 Carino and Sansalone(1992), Sansalone and Streett(1997)등은 충격반향시험을 적용하였다. 이들은 시간영역의 가속도 신호를 고속 푸리에 변환(FFT)을 통하여 주파수 영역 신호로 변환하고 최대 진폭에 해당하는 공진주파수를 찾아내어 반사파의 도달시간을 추정하고자 하는 반능동적인 해석 기법을 도입하였다. 그러나, 암반에 접착되어 있는 슛크리트는 경계면이 한정되어 있는 일반 슬라브 구조물과는 달리 무한 매질인 암반에 접착되어 있으므로 그 신호특성을 분석하기가 난해하며, 굴진면 후방에서의 슛크리트와 암반의 접착상태를 평가할 수 있는 비파괴 기법은 전무한 실정이다.

본 연구에서 이용된 비파괴 시험기법은 충격반향시험

(IE, Impact-Echo)과 지하레이더 탐사(GPR, Ground Penetrating Radar)이다. 충격반향시험은 응력파의 전파 특성을 이용해 콘크리트 구조물의 결함 탐지를 위해 널리 사용되고 있는 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. 지하레이더 탐사는 6~1800 MHz의 전자파를 송신기에 의하여 지하 또는 구조물로 방사시켜, 전기적 물성이 서로 다른 매질의 경계면에서 반사되는 파를 수신기로 수집하여 기록한 뒤, PC에 의한 자료처리와 해석과정을 거쳐 지하(또는 인공의 구조물)의 구조와 상태를 규명하여 영상화하는 매우 간편한 비파괴 지층 탐사 기법이다. 지하레이더 탐사에 크게 영향을 주는 지하매질의 물리적인 특성은 상대유전율과 전기전도도인데, 전자파의 전파속도는 유전율에 의해, 파의 감쇠는 주로 전기전도도에 크게 영향을 받는다(김영근 등, 1997).

본 연구에서는 실대형 실내 실험 모델에 충격반향시험을 수행하여 획득한 신호를 고속 푸리에 변환과 Short-Time Fourier 변환을 적용하여 접착조건에 따른 가속도 신호를 시간 영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서 해석하여 경암 지반에 타설된 슛크리트의 접착상태에 따른 신호특성을 분석하고자 하였다. 또한 지하레이더 시험을 적용하여 슛크리트 접착상태에 따른 신호특성을 충격반향시험과 비교 분석하였다. 실내 실험 연구를 통해 앞서 발표된 수치해석 연구(송기일 등, 2008)의 타당성을 검증하였고 슛크리트 배면의 접착상태 평가를 위한 시험 및 해석 기법과 정량적 평가 기준을 본 연구 논문에서 제시하고자 하였다.

## 2. 신호처리 기법

### 2.1 기하학적 감쇠비

일자유도계 시스템에서 감쇠비를 획득하기 위해 주파수 응답에 대한 공진 신호를 최적화하는 기법에는 다양한 방법이 있으나 본 연구에서는 식 (1)과 같이 감쇠비와 공진주파수로 구성된 전달 함수  $H(f)$ 를 적용하여 최소제곱법을 기반으로 기하학적 감쇠비를 획득하였다.

$$H(f) = \frac{1}{k \left[ 1 + j \cdot 2D_G \cdot \frac{f}{f_n} - \left( \frac{f}{f_n} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

여기서,  $D_G$ 는 기하학적 감쇠비이고,  $f$ 는 주파수,  $f_n$ 은 공진 주파수,  $j$ 는 허수단위이다. 본 연구에서 획득된 감쇠비는 매질자체의 감쇠비가 아닌 슛크리트와 암반을 포함한 구조적 시스템의 응답으로부터 획득한 감쇠비로써 기하학적 감쇠비로 간주할 수 있다. 특히, 슛크리트 자체의 감쇠비는 일반적으로 1% 미만이므로(Malmgren and Nordlund, 2006) 본 연구의 기하학적 감쇠비 획득 시 무시할 수 있는 수준이다.

### 2.2 STFT(Short-Time Fourier Transform)

충격반향시험으로부터 획득한 신호와 같이 시간에 따라 주파수 특성이 변화하는 신호를 분석하기 위해 신호의 시간 정보 및 주파수 정보를 동시에 능동적으로 해석할 수 있는 시간-주파수 해석 기법을 도입하였다(Gabor, 1946). 본 연구에서 적용한 시간-주파수 해석 기법은 Short-Time Fourier Transform(STFT)으로 시간에 따른 주파수 특성을 나타내기 위하여 시간 대역별로 Hanning window 함수를 적용하여 windowing 된 함수를 얻고 그에 대한 푸리에 변환을 수행하는 기법이다. 이산신호에 대한 STFT는 다음과 같은 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$G_\phi f(b_n, \omega_n) \approx h \sum_{k=0}^{N-1} f(t_k) \phi(t_k - b_n) e^{-j\omega_n t_k} \quad (2)$$

여기서,  $t_k = b + kh$ ,  $k = 0, \dots, N-1$ ,  $\omega_n = \frac{2\pi n}{Nh}$ ,  $n = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}$ ,  $h$ 는 신호의 측정주기,  $N$ 은 시간대역의 개수를 나타낸다.  $G_\phi f$  함수는 시간영역신호  $f(t)$ 와 window 함수  $\phi(t)$ 의 곱에 대한 Fourier 변환을 의미하며 STFT 함수 또는 Gabor함수로 불린다.

특정 시간대역에서의 주파수 특성을 획득하고, window 함수의 시간대역을 이동하며 앞의 과정을 반복하게 된다. 결과적으로 STFT는 window 함수가 적용된 영역의 신호에 대한 주파수 성분만을 구하게 되고, window 함수 시간대역을 옮겨감으로써 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 평가할 수 있게 된다. 따라서, 측정된  $N$ 개의

시간대를 중심으로, 국부적인 주파수 특성을 시간-주파수 평면에 도시할 수 있다.

본 연구에서는 충격반향시험을 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 window 데이터 포인트에 대하여 STFT를 통한 시간-주파수 해석을 수행하였다.

### 3. 실내 실험 모델

기존에 발표된 수치해석 연구결과(송기일 등, 2008)는 충격반향시험기법을 통해 획득된 신호를 시간-주파수 영역 해석을 통해 효과적으로 분석하면 슛크리트의 접착상태를 평가할 수 있음을 밝혔다. 본 논문에서는 슛크리트의 배면 접착 상태 평가에 대한 기존의 수치해석적 연구를 검증하기 위하여 실내 모델 시험을 수행하였다. 특히, 경암에 타설된 슛크리트의 접착상태를 평가하기 위하여 본 연구에서는 화강암을 기반암으로 선택하였다. 충격반향시험에 의한 신호의 시간영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역의 신호 특성을 획득하여 그 특성을 각각 분석하였다.

#### 3.1 접착조건에 따른 실험 구성

실내시험은 그림 1과 같이 접착조건에 따라 3개의 시험 영역으로 조성하여 수행하였다. (A) 영역은 공동조건을 시뮬레이션하기 위하여 스티로폼을 슛크리트와 암반 사

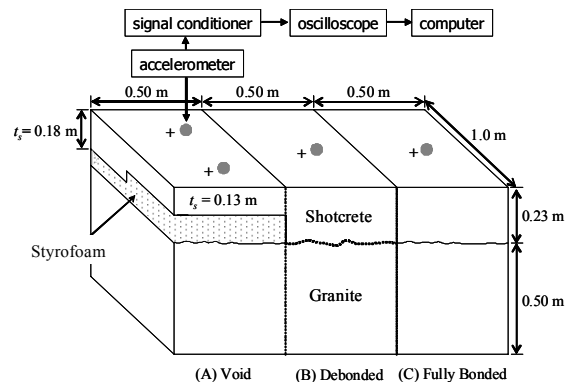


그림 1. 시험 모델의 영역별 접착 조건

이에 삽입하여 슛크리트의 두께( $t_s$ )가 각각 13 cm와 18 cm가 되도록 하였다. (B) 영역은 암반과의 접착력 상실 조건을 모사하기 위하여 얇은 플라스틱 필름을 슛크리트와 암반 사이에 설치하였다. (C) 영역은 완전 접착 조건을 시뮬레이션 하기 위하여 슛크리트를 암반의 표면에 그대로 타설하였다. 각각의 영역은 0.5 m의 폭 및 0.23 m의 슛크리트 두께로 구성하였다. 기반암은 0.5 m 두께의 화강암으로 가로 1.5 m, 세로 1 m이다. 충격반향시험을 위해 가속도계(PCB 352C22)와 오실로스코프(Agilent 545622D) 및 시그널 컨디셔너(PCB 482A16)의 신호 측정 시스템을 구축하였다. 10 mm 직경의 강철구를 가진원으로 사용하여 슛크리트 표면의 각 영역 중심부에서 응력파를 발생시켰다. 가속도계는 가진원으로부터 2 cm 떨어진 위치에서 다중 반사되는 P 파의 연직방향 응답을 획득하였다. 시그널 컨디셔너를 이용하여 획득한 신호를 10배 증폭시켜 오실로스코프로 저장하였고 컴퓨터를 이용하여 신호처리를 수행하였다.

타설된 슛크리트 시편은 작업성을 위해 급결제를 생략하였다. 사용된 슛크리트는 포틀랜드 시멘트 19.6%, 모래 71.8%, 물 8.6%으로 배합하였다. 일반적으로 현장에서는 강섬유 보강 슛크리트가 많이 적용되고 있고, Hassani 등(2000)의 연구 결과 강섬유 보강 슛크리트는 무보강 슛크리트 보다 9% 정도의 P파 속도 증가 효과를 발휘한다. 그러나 P파 속도는 강섬유 혼합비율, 물시멘트비, 골재의 크기 및 재령 등에도 영향을 받으므로 현장 적용을 위해서는 이러한 영향 인자에 대한 정량화

및 보정이 반드시 선행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 기초 연구로서 무보강 슛크리트에 대한 실내 모델시험을 수행하였다. 본 연구에서는 재령 28일의 실험결과만을 이용하여 해석을 수행하였다.

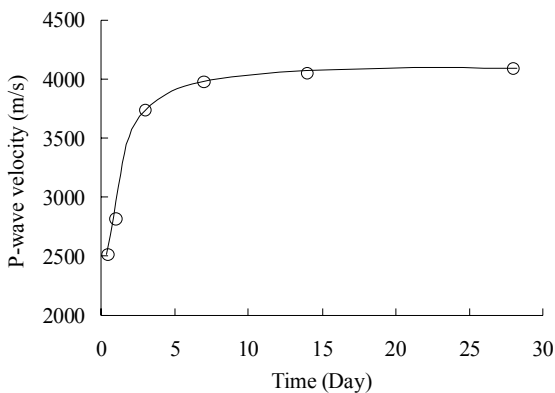
### 3.2 기타 실내 실험

직경 0.1 m, 높이 0.2 m의 원통형 공시체 15개를 제작하여 재령에 따른 일축압축강도와 P파 속도를 측정하였다. 핀 관입 시험을 통해 슛크리트의 압축강도를 측정하여 일축압축강도 실험 결과와 비교 분석하였다. 그림 2는 시간에 따른 슛크리트 재료의 변화 특성을 나타낸다. 그림 2a로부터 P파 속도가 시간에 따라 증가하며 7일 이후에는 거의 4088 m/s로 수렴된다. 그림 2b는 시간에 따른 압축강도의 변화를 도시하였다. 일축압축 강도 시험 결과는 핀 관입 시험(Iwaki *et al.*, 2001)을 통해 획득한 압축강도와 거의 일치하는 것으로 나타난다. 또한 화강암의 평균 P파 속도는 4000 m/s로 측정되었다. 위와 같은 실험들을 통하여 슛크리트 재료의 시간에 따른 특성 변화를 획득하여 주파수 영역 및 시간-주파수 해석 시 적용하여 보다 정확한 해석 결과를 획득할 수 있다.

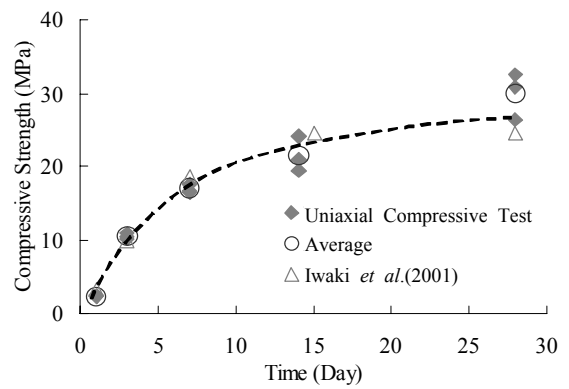
## 4. 접착 조건에 따른 충격반향시험 결과 분석

### 4.1 시간 영역 및 주파수 영역에서의 신호 특성 분석

그림 3에서 슛크리트와 암반의 세가지 접착조건에 따

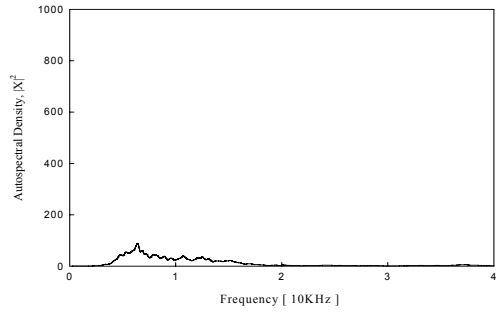
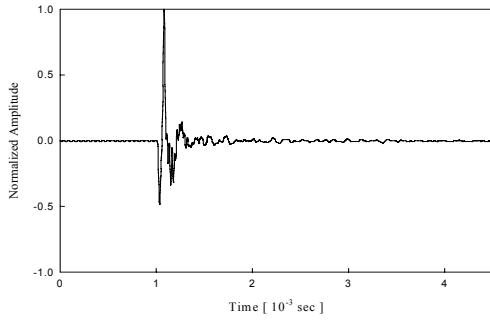


(a) P파 속도

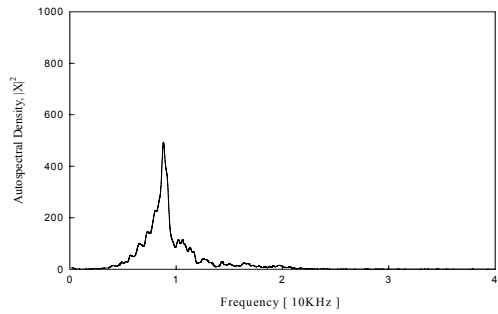
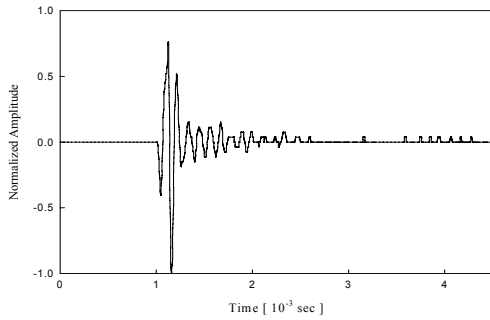


(b) 압축강도

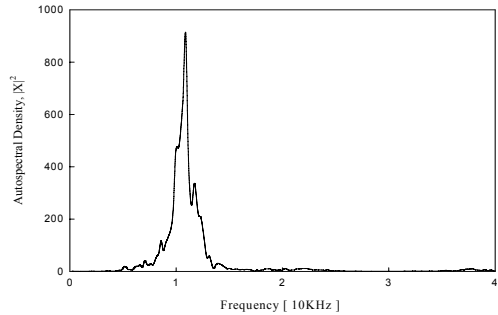
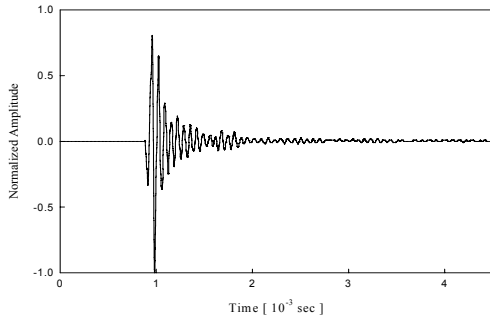
그림 2. 시간에 따른 슛크리트 재료의 특성 변화



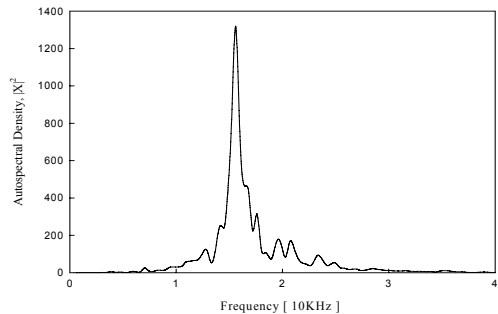
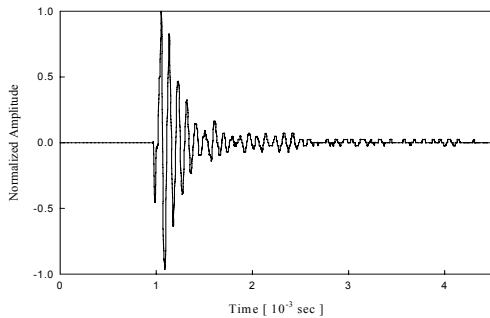
(a) 완전 접촉 조건



(b) 접촉력 상실 조건



(c) 공동 조건(스츛크리트의 두께( $t_s$ ) = 18 cm)



(d) 공동 조건(스츛크리트의 두께( $t_s$ ) = 13 cm)

그림 3. 시간영역 및 주파수 영역에서의 신호 특성

www.kci.go.kr

라 충격반향시험을 통해 획득한 신호를 시간영역 및 주파수 영역에서 각각 해석한 결과를 종합적으로 나타내었다. 충격반향시험으로부터 획득한 신호를 최대 진폭으로 정규화하여 시간영역에서 나타낸 결과를 서로 비교하여 보면 슛크리트와 암반이 완전 접촉된 조건(그림 3a)의 경우 시간영역상에서 최대 진폭 이후 첫 번째 정규화 진폭은 0.3 정도로 나타나고, 접착력 상실 조건(그림 3b)에서는 동일 위치의 정규화 진폭 값이 0.5 정도로 증가하게 된다. 슛크리트와 암반 사이에 공동이 있는 경우(즉, 그림 3c, 3d)는 0.8이상의 정규화 진폭을 나타낸다. 즉, 접착상태가 불량해질수록 최대 진폭 이후 첫 번째 나타나는 정규화 진폭이 점차 증가하게 되는 것을 확인 할 수 있다.

충격반향시험으로부터 획득한 신호에 대한 고속 푸리에 변환 및 주파수 해석 결과, 슛크리트가 암반과 완전히 접촉된 경우(그림 3a)에는 자기스펙트럼 밀도의 최대 값이 87 정도로 작게 나타난다. 완전 접촉 조건의 경우, 주파수의 대역폭이 넓고 완만하게 형성되어 최대 고유진동수를 찾기가 힘들며 주파수의 강도도 약하게 나타나는 특징이 있다. 접착력 상실 조건(그림 3b)에서는 자기스펙트럼 밀도의 최대값이 접촉 조건에 비해 5배 가량 크게 나타나고 최대 고유진동수도 획득 할 수 있다. 그림 3c와 3d의 우측 그림은 슛크리트의 두께가 각각 18 cm와 13 cm인 공동 상부에서 획득한 주파수 영역 해석 결과이다. 주파수 응답으로부터 최대 진폭의 공진 주파수는 각각 10.9 kHz와 15.6 kHz이다. 이 최대 공진 주파수를 공동이 존재하는 경우의 대표 공진주파수로 가정한다면 시료의 28일 P파 속도가 4088 m/s 이므로 슛크리트 두께를 Sansalone and Streett(1997)가 제안한 식 (3)에 따라 역산한 결과 표면으로부터 공동까지의 슛크리트 두께는 17.9 cm와 12.6 cm로 나타나고 이는 실제 실험모델에서 구성한 슛크리트 두께와 상당히 유사한 수준으로 예측할 수 있음을 시사한다.

$$t_s = \frac{0.96 \cdot V_p}{2 \cdot f_n} \quad (3)$$

여기서,  $t_s$ 는 슛크리트의 두께,  $V_p$ 는 P파 속도,  $f_n$ 은 1차 모드 공진주파수이다.

공동이 있는 경우 응력파의 전파 거리가 짧고 이상적인 자유단과 유사한 거동을 보이기 때문에 뚜렷한 공진

주파수가 나타나는 것이다. 공동이 존재하는 두 경우 모두 공통적으로 주파수 응답은 접착력 상실 조건의 경우보다 더 샤프하게 형성되며 자기스펙트럼 밀도의 값이 완전 접촉조건에 비해 10배 이상으로 나타난다. 즉, 접촉 조건이 불량해질수록 주파수 응답에 대하여 자기스펙트럼 밀도가 증가하게 되며 이는 결국 기하학적 감쇠비의 감소를 의미한다. 이러한 실내 실험결과는 기존의 수치해석 연구결과로부터 획득한 접착상태에 따른 신호 특성과 매우 잘 부합하는 것으로 나타난다.

그림 4는 접착상태가 다른 영역에서 10회 이상 반복 시험하여 획득한 기하학적 감쇠비의 분포 양상이다. 완전 접촉 조건의 기하학적 감쇠비는 최소 26%에서 최대 40% 사이에서 존재하며 실험 결과 기하학적 감쇠비 평균은 33%로 나타났다. 이는 슛크리트와 암반과의 완전 부착에 의해 에너지가 슛크리트로부터 암반으로 전달되므로 두 매질의 경계면으로부터 반사되어 돌아오는 에너지는 감소하게 되는 응력과 전달 메커니즘에 기인한다. 접착력 상실 조건의 기하학적 감쇠비는 최소 18%에서 최대 30% 사이에서 존재하며 실험 결과 기하학적 감쇠비 평균은 접촉 조건보다 10% 작은 23%로 나타났다. 공동이 존재하는 영역의 기하학적 감쇠비는 최소 11%에서 최대 15% 사이에 존재하는 것으로 나타나며 평균적으로 13%의 감쇠비를 보이는 것으로 평가된다. 슛크리트와 암반 사이에 공동이 존재하면 충격파에 의한 에너지가 슛크리트 매질 내에 갇혀 덜 소산되게 되므로 슛크리트와 암반이 완전 접촉되어 있는 경우에 비해 확연히 작은 기하학적 감쇠비가

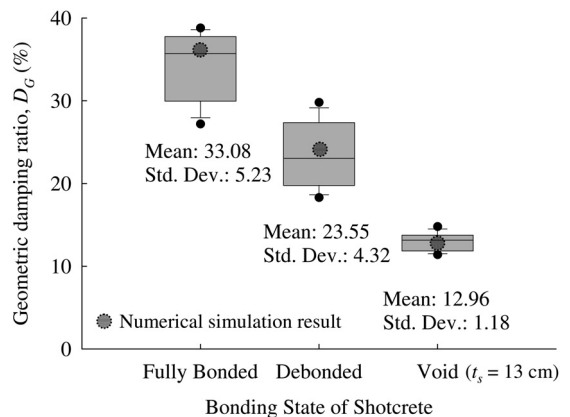


그림 4. 슛크리트의 접착 조건에 따른 기하학적 감쇠비 특성 분포

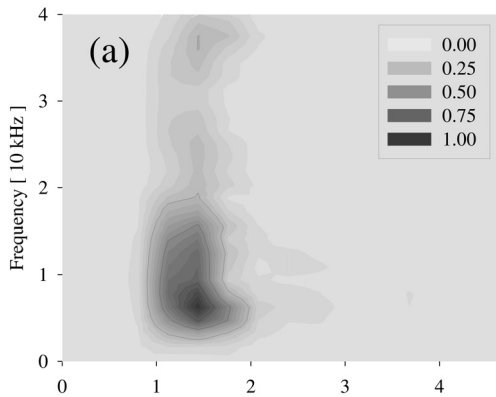
나타난다. 따라서 기하학적 감쇠비는 공동 및 접착력 상실 조건의 경우 완전 접촉되어 있는 경우보다 작게 나타나며 접촉 조건이 불량할수록 기하학적 감쇠비가 작아지는 특성을 확인할 수 있으며 이러한 특성은 무한 매질인 암반에 접촉되어 있는 슛크리트만의 기하학적 구조에 기인하는 것으로 해석할 수 있다.

기존에 발표된 수치해석 연구 결과(송기일 등, 2008)를 통해 획득한 주파수 신호로부터 기하학적 감쇠비를 획득하여 실내실험 결과와 동시에 그림 4에 도시하였다. 수치해석 결과 완전 접촉, 접착력 상실 및 공동 조건에서의 기하학적 감쇠비는 각각 38%, 25% 및 13%로 실험결과와 잘 부합하는 것으로 나타난다.

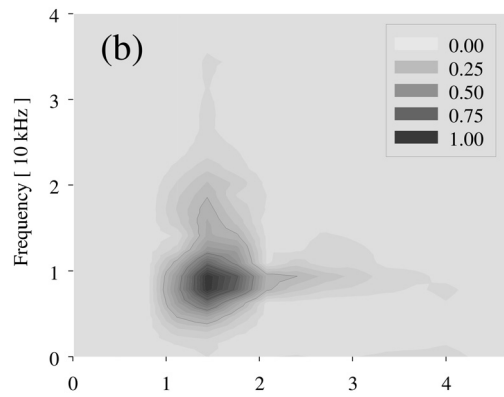
#### 4.2 시간-주파수 영역에서의 신호 특성 분석

그림 5는 충격반향시험으로부터 획득한 시간영역 신호를 STFT를 기반으로 시간-주파수 영역에서 해석한 결과이다. 접촉 조건의 경우(그림 5a) 윤곽선은 주파수축 방향으로 길게 형성된다. 윤곽선의 공진시간은 0.8 ms이고 주파수 대역이 30 kHz까지 형성되고 30 kHz 이상의 고주파수 성분도 발생됨을 알 수 있다.

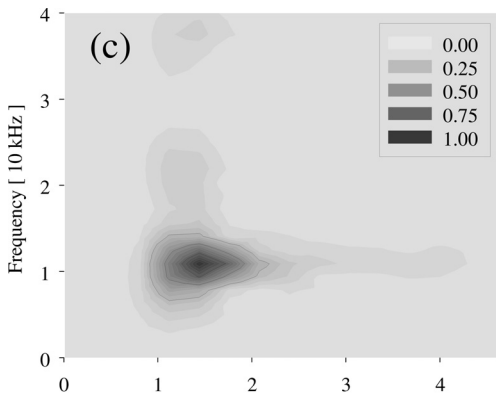
접착력 상실 조건의 경우(그림 5b) 윤곽선이 원형으로 형성되고 시간축과 주파수축 방향으로 동시에 약한 꼬리모양을 형성한다. 이러한 특성은 공동 조건과 완전 접촉조건의 중간적인 상태로 볼 수 있다. 이 조건에서 공진시간은 1.3 ms로 완전 접촉조건의 경우보다 증가되며, 주파수의 범위



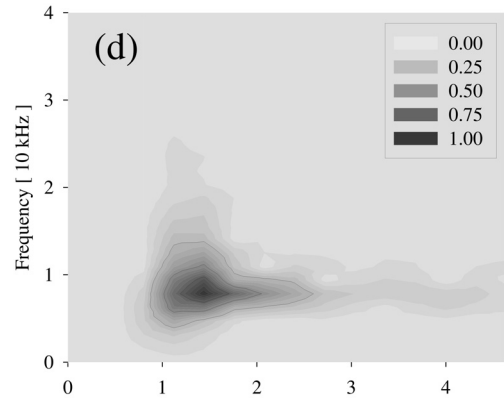
(a) 완전 접촉 조건



(b) 접착력 상실 조건



(c) 공동 조건(스�크리트의 두께( $t_c$ ) = 18 cm)



(d) 공동 조건(스�크리트의 두께( $t_c$ ) = 13 cm)

그림 5. 시간-주파수 영역 해석 결과

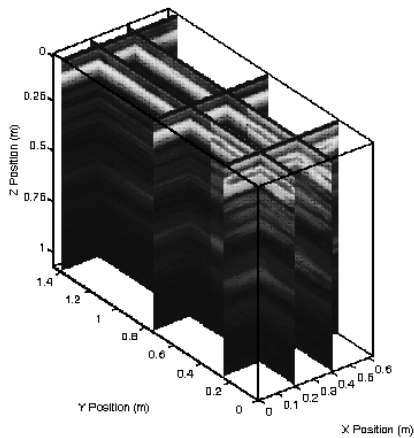
는 20 kHz 이내로 완전 잡착조건인 경우보다 감소한다.

숏크리트와 암반 사이에 공동이 존재하는 경우(그림 5c, 5d), 두 경우 모두 윤곽선이 주파수 축에 대하여는 일정한 범위를 갖고 시간축을 따라서 길게 꼬리를 형성한다. 시간-주파수 영역상에 나타난 주파수의 공진시간은 그림 5c의 경우 1.35 ms 이고, 그림 5d의 경우 1.8 ms 이다. 즉, 숏크리트의 두께가 얇을수록 꼬리의 길이가 더 길게 나타난다. 이는 숏크리트의 음향학적 임피던스가 공동의 음향학적 임피던스보다 크기 때문에 충격에 의해 발생된 응력파의 에너지가 지반으로 전달 또는 굴절되지 않고 거의 모두 반사되어 에너지의 소산이 늦어지기 때문이다. 그리고, 숏크리트의 두께가 얇을수록 매질에 의한 감쇠가 덜 발생하여 반사파의 에너지가 덜 감소하게 되고, 결국 공진주파수에 해당하는 에너지가

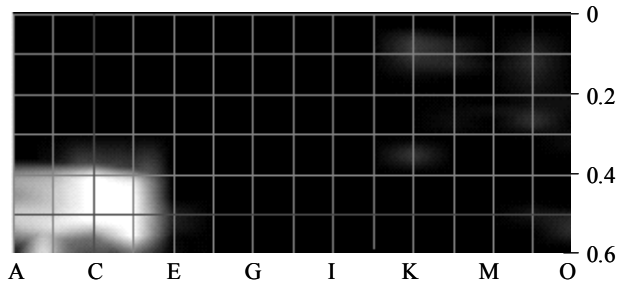
잔류하는 시간이 더 길어지게 됨을 알 수 있다. 실내실험으로 획득한 시간-주파수 윤곽선의 특성은 기준에 발표된 수치해석으로부터 획득한 접착조건에 따른 신호 특성과 잘 부합한다. 따라서, 수치해석 결과 및 실험 결과로부터 충격반향시험 및 STFT(IE-STFT)를 통해 숏크리트 접착상태를 효과적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 지하레이다 탐사를 이용한 숏크리트 접착 상태 평가

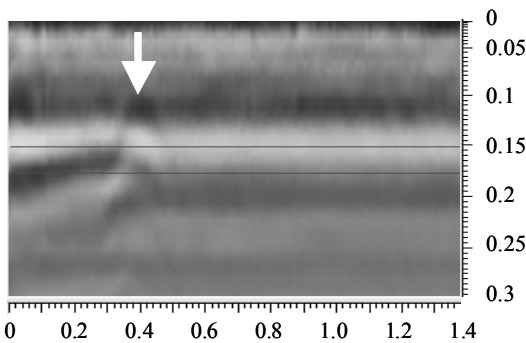
충격반향기법과 지하레이다 시험과의 효율성 비교를 위하여 Conquest사의 상용 GPR 장비를 이용하여 숏크리트 시험체 표면에서 비파괴 시험을 수행하였다. 지하



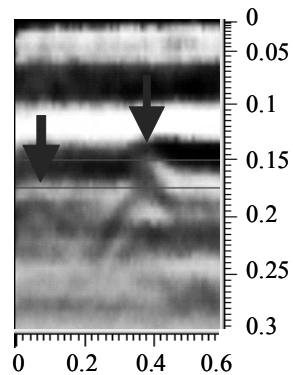
(a) 지하레이다의 3차원 영상



(b) 2차원 평면 지하레이다 영상(깊이가 0.15~0.175 m 인 경우)



(c) 측면 지하레이다 영상



(d) 정면 지하레이다 영상

그림 6. 지하레이다 탐사에 의한 시험체 내부 영상(단위 [m])



레이다 시험은 시험초기부터 28일까지 연속적으로 측정하였으나 7일 이후부터는 시험결과의 차이가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그림 6은 지하레이다 장비를 이용하여 28일 경과 후 측정된 시험결과 영상이다. 그림 6a는 시험체의 3차원 영상으로 슛크리트와 암반의 경계를 분명하게 나타내고 있으며 공극조건의 탐지는 가능하나 부착력 상실조건은 구별하기 어렵다. 그림 6b는 시험체의 0.15~0.175 m 깊이의 평면 영상으로 슛크리트 표면으로부터 0.13 m 깊이 이후부터 공동이 존재하기 때문에 주변과 비교하여 뚜렷한 명암 차이를 확인할 수 있다. 그러나 평면영상으로는 접촉력 상실 조건 및 완전 접착을 구별해내기는 힘들었다.

그림 6c와 6d는 시험체의 측면 및 정면에서 나타나는 지하레이다 영상이다. 측면 영상으로부터 기준점으로부터 0.4 cm 거리, 0.13 m 깊이에 공동이 존재함을 알 수 있다. 또한 기준점으로부터 0.4 m 이상에 대하여 시험체 0.23 m 깊이에 접촉력 상실 조건과 완전 접착 조건이 존재하나 지하레이다로 영상의 차이점을 거의 구별할 수 없었으나, 슛크리트와 암반의 경계면을 찾아 낼 수는 있었다. 정면 지하레이다 영상으로부터 중앙을 기준으로 좌측에는 0.18 m 깊이에, 우측에는 0.13 m 깊이에 공동이 존재하는 것으로 평가할 수 있다.

상용화된 지하레이다 장비나 연구용으로 구축된 충격반향시험장비를 이용하여 공동조건인 경우는 두 기법 모두 양호한 탐사능력을 나타냈다. 그러나 충격반향시험기법을 이용하여 신호처리를 한 경우 슛크리트의 접착상태가 접촉력 상실인 조건인 경우도 구별해 낼 수 있었으나, 지하레이다 시험의 경우는 접촉력 상실이나 완전 접착의 상태를 구분할 수 없었으며 단지 이질층의 깊이를 구별해낼 수 있었다. 슛크리트가 암반에 완전 접착된 경우 슛크리트의 두께를 확인하기 위해서는 지하레이다 시험이 효과적일 것이고, 세부적인 접착조건을 평가하기 위해서는 충격반향기법을 적용하는 것이 효율적일 것이다.

## 6. 정량적 평가 기법 및 가이드라인 제안

### 6.1 상관계수를 이용한 정량적 평가 기법

시간-주파수 영역에서 나타나는 윤곽선은 수치영상이다. 수치영상 사이의 상관관계를 평가하기 위하여 기

식 상관관계방법 또는 최소제곱정합법(Forstner, 1982) 등이 사진 측량학에서 적용되어 왔다. 본 연구에서는 슛크리트의 접착상태를 정량적으로 평가하기 위하여 충격반향기법으로부터 획득한 시간-주파수 영역에서 나타나는 수치영상들에 대한 상관계수( $\rho$ )를 도입하였다.

$$\rho = \frac{\sigma_{BS}}{\sigma_B \cdot \sigma_S} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_S$ ,  $\sigma_{BS}$ 는 각각 완전 접착상태의 영상의 표준편차, 임의 평가 영상의 표준편차, 완전 접착 상태와 임의 평가 영상 사이의 공분산(covariance)이다. 시간-주파수 영역에서 나타나는 두 영상을 영상함수  $g_B(x, y)$ ,  $g_S(x, y)$ 라 하면 영상함수의 평균은 다음 식 (5)와 식 (6)과 같이 획득할 수 있다.

$$\bar{g}_B = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_B(x_i, y_j)}{n \cdot m} \quad (5)$$

$$\bar{g}_S = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m g_S(x_i, y_j)}{n \cdot m} \quad (6)$$

또한 영상함수의 표준편차 및 공분산은 식 (7), 식 (8) 및 식 (9)와 같이 획득할 수 있다(Schenk, 1999).

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_B(x_i, y_j) - \bar{g}_B)^2}{n \cdot m - 1}} \quad (7)$$

$$\sigma_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (g_S(x_i, y_j) - \bar{g}_S)^2}{n \cdot m - 1}} \quad (8)$$

$$\sigma_{BS} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_S(x_i, y_j) - \bar{g}_S)(g_B(x_i, y_j) - \bar{g}_B))}{n \cdot m - 1} \quad (9)$$

여기서, 두 수치 영상의 상관계수는 -1부터 1까지의 값으로 대응되는 영상소의 밝기값 그 자체보다는 전체적인 밝기값의 분포가 비슷한 경우 더 높은 값을 나타낸다. 따라서, 완전 접착상태로부터 획득한 시간-주파수 영역의 영상을 기준영상으로 설정하고 시험으로부터 획득한 여러 접착상태의 시간-주파수 영역의 영상과의 상관관

계를 분석하여 현장 적용 시 불량 접촉상태를 상관계수를 이용하여 정량적으로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 수치해석으로부터 획득한 완전 접촉시의 시간-주파수 영상과 실내시험으로부터 획득한 시간-주파수 영상과의 상관관계를 분석하였다. 그림 7에서 나타나는 바와 같이 완전 접촉인 경우의 상관계수는 0.958로 수치해석결과와 실험결과가 서로 잘 부합되는 것으로 나타났다. 반면 접촉력 상실 경우와 공동조건인 경우 상관계

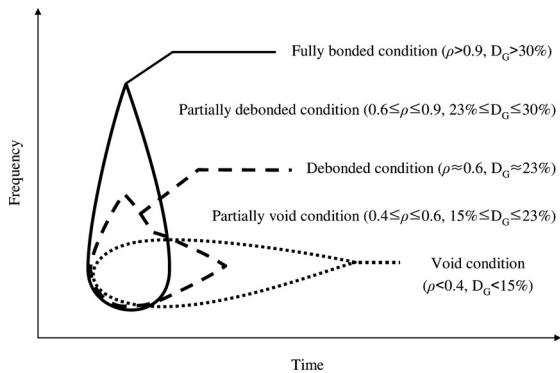


그림 7. 상관계수를 이용한 슛크리트 부착상태의 정량적 평가

수는 0.626과 0.388로 접촉조건이 불량할수록 상관계수가 작아지는 것을 알 수 있다.

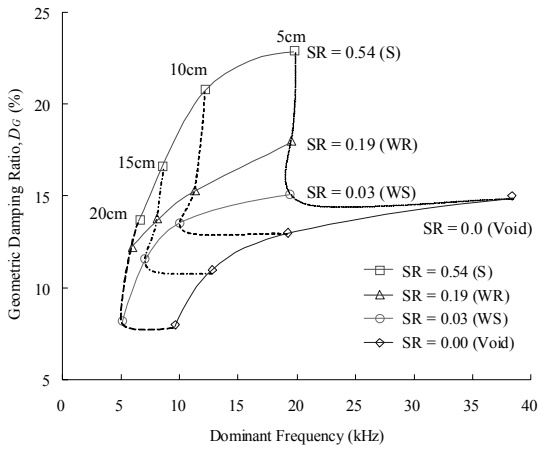
## 6.2 수치해석 연구 결과의 종합

앞서 실험 연구결과와 수치해석 연구결과와의 검증을 수행하였고 슛크리트가 경암 지반에 시공된 경우 본 연구에서 제시한 기법이 효과적임을 입증하였다. 그러나, 배면 지반의 종류 및 슛크리트의 두께에 따라서 IE-STFT 신호특성이 경암 지반 조건의 경우와 상이하게 나타나므로 이에 대한 추가적인 수치해석적 연구가 필요하다. 따라서, 완전접촉조건에서 슛크리트 배면지반의 강성 및 슛크리트 두께에 따른 추가적인 수치해석을 수행하였고 그 신호특성에 대하여 종합적으로 연구하고자 하였다. 즉, 슛크리트 배면의 지반의 종류는 연암(S), 풍화암(WR), 풍화토(WS)로 구분하였고, 슛크리트의 두께는 5, 10, 15, 그리고 20 cm로 변화하였다. 수치해석에 적용된 유한요소 모델 및 물성치는 송기일 등(2008)의 값과 동일하다. 수치해석을 통해 획득한 IE-STFT의 신호특성(중심주파수, 자기스펙트럼 밀도, 기하학적 감쇠비, 및 공진시간)을 표 1에 정리하였다.

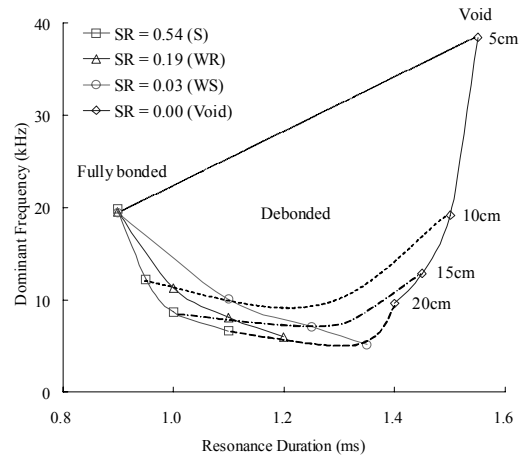
표 1로부터 획득한 정보를 토대로 중심주파수와 기하

표 1. 슛크리트의 두께 및 지반종류에 따른 IE-STFT 신호 특성 분석( $f_n$ 는 중심주파수, ASD는 자기스펙트럼 밀도,  $D_G$ 는 기하학적 감쇠비,  $T_R$ 는 공진시간)

Cases	$f_n$ (Hz)	ASD	$D_G$ (%)	$T_R$ (ms)
H5	9765	124	32.5	0.80
H10	9524	88	33.4	0.80
H15	9277	76	35.0	0.80
H20	7568	75	38.8	0.80
S5	19780	110	22.9	0.90
S10	12207	595	20.8	0.95
S15	8620	722	16.6	1.00
S20	6591	1642	13.7	1.10
WR5	19531	131	18.0	0.90
WR10	11300	897	15.3	1.00
WR15	8047	1491	13.8	1.10
WR20	5950	1970	12.2	1.20
WS5	19431	166	15.1	0.90
WS10	10011	1060	13.5	1.10
WS15	7073	2845	11.6	1.25
WS20	5127	3236	8.2	1.35



(a)



(b)

**그림 8.** IE-STFT 신호를 이용한 숏크리트의 품질평가 차트 - 숏크리트의 두께, 접촉상태 및 배면 지반 강성(여기서, SR = 지반강성( $E_{ground}$ )/숏크리트강성( $E_{shotcrete}$ ))이다. S는 연압, WR은 풍화암, WS는 풍화토, Void는 공동조건이다. 본 연구에서 적용된 숏크리트의 강성은  $3.5E10$  Pa이다.)

학적 감쇠비는 숏크리트 두께와 지반강성과 상관관계가 있음을 알 수 있고 이를 그림 8a에 도시하였다. 또한, 중심주파수와 공진시간은 숏크리트의 두께와 접촉상태와 상관관계가 있으며 그 특성을 그림 8b와 같이 도시할 수 있다.

### 6.3 숏크리트 품질 평가 기법

수치해석적 및 실험적 연구 결과로부터 IE-STFT 신호를 통한 숏크리트의 품질 평가를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 절차를 제안하고자 한다.

그림 7로부터 시간-주파수 영역에서 윤곽선의 모양은 크게 세가지로 분류할 수 있다. 즉, 1) 주파수축과 평행한 윤곽선인 경우, 2) 주파수축과 시간축에 동시에 평행한 원형의 윤곽선이 나타나는 경우, 3) 시간축과 평행한 윤곽선이 나타나는 경우이다. 여기서, 1)과 2)의 경우는 숏크리트가 배면 지반이 숏크리트보다 강한 압반에 완전 접촉 및 접촉력 상실된 상태의 경우이다. 이때 숏크리트의 두께는 중심 주파수로부터 식 (3)을 이용하여 획득할 수 있다. 윤곽선이 시간축과 평행한 경우는 숏크리트가 약한 지반에 완전 접촉 또는 접촉력 상실되어 있는 경우나 공동이 존재하는 경우에 나타난다(송기일 등, 2008). 이 경우, IE-STFT 신호로부터 중심주파수, 기하학적 감쇠비, 및 공진시간에 대한 정보를 획득하여야 한

다. 그림 8a로부터 중심주파수와 기하학적 감쇠비를 이용하여 숏크리트의 두께와 배면 지반의 종류를 숏크리트가 완전 접촉되어 있는 경우 평가할 수 있다. SASW(Kim *et al.*, 2006)등의 표면파 기법을 이용하여 숏크리트의 강성을 획득하므로 지반의 강성을 최종적으로 획득할 수 있다. 또한, 공진시간과 중심주파수를 이용하여 그림 8b로부터 숏크리트의 두께와 접촉상태를 확인할 수 있다. 본 논문에서 제시된 숏크리트 평가 기법(IE-STFT)을 이용하여 숏크리트의 두께와 접촉 상태, 및 배면 지반의 강성 등의 숏크리트 품질평가를 종합적으로 수행할 수 있다.

충격반향시험기법은 국부적인 영역을 평가할 수 있는 비파괴시험 기법이다. 따라서, 충격반향시험결과는 국부적인 지반조건 및 굴착표면의 상태 등에 영향을 받는다. 그러므로, 터널에 타설된 숏크리트의 접촉상태 및 품질평가를 위해서는 관심영역에서 여러번 시험을 수행하여야 전체적으로 신뢰성 있는 진단이 가능할 것이다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 충격반향시험을 통해 숏크리트의 접촉 상태에 따른 신호특성을 시간영역, 주파수 영역 및 시간-주파수 영역에서 각각 분석하였다. 또한 충격반향시험

과 지하레이다 시험을 병행하여 현장 적용 시 보다 효율적인 비파괴 시험기법을 제안하고자 하였다. 시간영역의 해석 결과만으로 슛크리트 배면의 접착상태를 예측하는 것은 힘들다. 그러나 주파수 영역 해석과 시간-주파수 영역과 같은 능동적인 해석 기법을 적용하여 종합적으로 고려하면 비파괴 시험을 통해 슛크리트 배면의 접착상태를 평가할 수 있다. 특히, 정량적 평가기준의 도입을 위해 상관계수를 이용하여 슛크리트의 접착상태를 효과적으로 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 연구 결과 다음과 같은 특징들을 규명하였고 제안된 기법과 평가 기준에 근거하여 슛크리트의 두께, 접착상태 및 배면지반의 상태를 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

1. 시간영역에서 최대 진폭 이후의 진폭의 크기가 작을수록 접착상태가 양호하다.
2. 주파수 영역에서 자기스펙트럼 밀도가 작을수록 접착상태가 양호하다.
3. 공동이 존재하면 공진주파수가 명확하게 나타나며 이 경우 슛크리트의 두께를 역산하여 구할 수 있다.
4. 슛크리트와 암반의 접착상태가 양호할수록 기하학적 감쇠에 의해 감쇠비가 증가한다.
5. 시간-주파수 영역에서 윤곽선의 형상 및 공진시간 특성: 공동이 존재하는 경우 윤곽선이 시간축 방향으로 길게 형성되고 슛크리트의 두께가 얇을수록 공진시간이 길게 형성된다. 슛크리트가 암반에 잘 접착되어 있으면 주파수축 방향으로 길게 윤곽선이 형성되며 고주파수 성분이 포함된다.
6. 지하레이다 시험으로부터 획득한 영상은 공동의 유무와 완전 접착상태에서 슛크리트의 두께를 평가하는데 효율적인 것으로 판단되지만 슛크리트와 암반의 접착상태를 세밀하게 평가하는 데는 한계가 있는 것으로 나타났다.
7. 충격반향시험기법으로부터 획득한 IE-STFT 신호로부터 무보강 슛크리트와 경암 지반의 접착 상태를 적절히 평가하였다. 기존의 수치해석결과와 실험실 내 실험 결과는 서로 잘 부합하였으며 이를 통해 제시된 IE-STFT 기법의 타당성을 검증하였다.
8. 시간-주파수 영역 신호간의 상관계수를 도입하여 완전 접착 조건에 대하여 접착조건이 불량해질수록 상

관계수가 감소하는 것으로부터 슛크리트의 접착상태를 정량적으로 평가할 수 있다.

9. 제안된 평가 차트(그림 7과 그림 8)로부터 중심주파수, 기하학적 감쇠비, 공진시간을 이용하여 슛크리트의 품질(스�크리트 두께, 접착상태) 평가를 효과적으로 수행할 수 있다. 더불어 배면 지반의 강성도 평가할 수 있다.

본 연구는 중심주파수, 공진시간, 기하학적 감쇠비를 통해 슛크리트의 품질을 평가할 수 있는 핵심 기술 및 그에 관한 근본적이며 체계적인 이론과 현장에 적용할 수 있는 응용기술이다. 제안된 시험기법 및 평가 차트의 신뢰성 확보를 위해 추가적인 현장시험이 향후 필요하다. 더불어, 가진원으로 사용되는 강철구의 직경이나 충격에너지 등의 영향, 지반의 거칠기나 굴착면 기복 등의 지반 특성에 대한 영향, 슛크리트에 첨가되는 골재나 강 섬유 등의 영향 및 접착 강도의 영향에 대하여는 향후 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌다.

## 참고문헌

1. 김영근, 이용호, 정한중, 신상범, 조철현 (1997), “지하레이다(GPR)를 이용한 터널 라이닝 비파괴시험에 관한 연구”, 터널과 지하공간, Vol. 7, pp. 274-283.
2. 송기일, 조계춘, 장석부 (2008), “충격반향기법을 이용한 슛크리트 배면 접착 상태 평가에 관한 수치해석적 연구”, 터널기술, Vol. 10, No. 2, pp. 105-118.
3. Ansell, A. (2004), “In situ testing of young shotcrete subjected to vibrations from blasting”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 19, pp. 587-596.
4. Malmgren, L., Nordlund, E. and Rolund, C. (2005), “Adhesion strength and shrinkage of shotcrete”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, pp. 33-48.
5. 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.
6. 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.
  7. Forstner, W. (1982), "On the Geometric precision of digital correlation", IAPRS CommIII, Vol. 24, pp. 176-189.
  8. Gabor, D. (1946), "Theory of Communication", J.IEE (London), Vol. 93, pp. 429-457.
  9. 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.
  10. Iwaki, K., Hirama, A., Mitani, K., Kaise, S. and Nakagawa, K. (2001), "A quality control method for shotcrete strength by pneumatic pin penetration test", NDT & E International, Vol. 34, pp. 395-402.
  11. Malmgren, L. and Nordlundb, E. (2006), "Behaviour of shotcrete supported rock wedges subjected to blast-induced vibrations", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, pp. 593-615.
  12. Sansalone, M. and Streett, W.B. (1997), "Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry", New York: Bullbrier Press.
  13. Schenk, T. (1999), Digital Photogrammetry, Ohio: Terra-Science.