

유도초음파를 이용한 강관보강다단 그라우팅의 건전도 평가

홍영호¹ · 유정동² · 변용훈² · 장현익³ · 유병철⁴ · 이종섭^{5*}

¹비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

²비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

³비회원, 한국도로공사 책임연구원

⁴비회원, 한국도로공사 울산포항건설사업단 단장

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Integrity evaluation of grouting in umbrella arch methods by using guided ultrasonic waves

Young-Ho Hong¹, Jung-Doung Yu², Yong-Hoon Byun², Hyun-Ick Jang³, Byung-Chul You⁴, Jong-Sub Lee^{5*}

¹Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Senior Researcher, Korea Expressway Corporation

⁴Chief of Construction Office, Korea Expressway Corporation

⁵Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

ABSTRACT: Umbrella arch method (UAM) used for improving the stability of the tunnel ground condition has been widely applied in the tunnel construction projects due to the advantage of obtaining both reinforcement and waterproof. The purpose of this study is to develop the evaluation technique of the integrity of bore-hole in UAM by using a non-destructive test and to evaluate the possibility of being applied to the field. In order to investigate the variations of frequency depending on grouted length, the specimens with different grouted ratios are made in the two constraint conditions (free boundary condition and embedded condition). The hammer impact reflection method in which excitation and reception occur simultaneously at the head of pipe was used. The guided waves generated by hitting a pipe with a hammer were reflected at the tip and returned to the head, and the signals were received by an acoustic emission (AE) sensor installed at the head. For the laboratory experiments, the specimens were prepared with different grouted ratios (25 %, 50 %, 75 %, 100 %). In addition, field tests were performed for the application of the evaluation technique. Fast Fourier transform and wavelet transform were applied to analyze the measured waves. The experimental studies show that grouted ratio has little effects on the velocities of guided waves. Main frequencies of reflected waves tend to decrease with an increase in the grouted length in the time-frequency domain. This study suggests that the non-destructive tests using guided ultrasonic waves be effective to evaluate the bore-hole integrity of the UAM in the field.

Keywords: Fast fourier transform, Guided ultrasonic waves, Impact reflection method, Umrella arch methods, Wavelet transform

초 록: 강관보강다단 그라우팅은 터널공사에 널리 적용되는 공법으로, 터널지반의 안정성 증대 및 차수효과를 얻을 수 있다. 본 연구의 목적은 유도초음파를 이용한 강관보강다단 그라우팅의 건전도 평가 기법을 제시하고, 현장 적용성을 평가하는 것이다. 강관의 그라우팅 충전률에 따른 주파수 변화를 파악하기 위해 실내실험(자유구속조건 및 지중근입조건)을 수행하였으며, 건전도 평가시스템의 현장 적용성을 검증하기 위해 현장실험을 수행하였다. 강관의 두부를 해머로 타격하여 유도초음파가 발생되며, 발생된 유도초음파는 선단에서 반사되어 두부로 되돌아 온다. 반사된 유도초음파는 두부에 설치된 AE센서에 의해 수신된다. 강관보강다단 그라우팅의 건전도

*Corresponding author: Jong-Sub Lee

E-mail: jongsu@korea.ac.kr

Received April 5, 2013; Revised May 2, 2013;

Accepted May 8, 2013

평가 모델은 충진률 25 %, 50 %, 75 %, 100 %로 제작되었으며, 자유구속조건 및 지중근입조건인 실내실험으로 수행되었다. 신호처리를 위해 고속 푸리에 변환과 웨이브렛 변환을 수행하였다. 실내실험 결과, 유도초음파의 전파속도 변화는 크지 않았으나, 그라우팅 충진률에 따른 주 주파수의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 강관보강다단 그라우팅의 충진률이 증가할수록 반사파의 주 주파수의 크기가 감소했다. 현장실험은 이미 설치된 강관보강다단 그라우팅에 대해 수행되었으며, 실내실험과 동일한 기법으로 분석하였다. 현장 조건의 실험체에서도 유도초음파의 반사파를 쉽게 수집할 수 있었으며, 이에 대한 주파수 영역에 대한 분석도 가능했다. 본 연구의 결과는 유도초음파를 이용한 주파수 분석 기법은 강관보강다단 그라우팅 건전도 평가에 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여준다.

주요어: 강관보강다단, 고속 푸리에 변환, 유도초음파, 웨이브렛 변환, 해머타격 반사법

1. 서 론

최근 지하공간 활용에 대한 수요가 증가함에 따라 지하철, 통신구, 지하차도 등 지하구조물의 건설이 많이 이루어지고 있으며, 이로 인해 지하구조물의 안전성이 점차 중요해지고 있다. 도시 밀집지역에서의 지하구조물 건설은 구조물 자체의 안정성 확보라는 주 목적 이외에도, 지반의 응력변화에 따른 인접구조물의 손상가능성에 대한 고려가 필요하다. 현재, 국내에서는 지반자체를 터널의 주지보재로 이용하는 NATM (New Austrian Tunneling Method) 시공방법을 이용하여 강관, 록볼트, 슛크리트 등 다양한 터널 보조공법들이 적용되고 있으며, 이러한 터널 보강재에 대한 정확한 안정성평가가 요구되고 있다.

터널 보조공법 중 강관보강다단 그라우팅 공법은 기존 터널 보조공법들의 문제점을 보완한 공법으로 국내 터널공사현장에서 널리 사용되고 있다. 강관보강다단 그라우팅 공법은 주입재의 침투로 인한 주변 지반의 이완 및 변형을 방지하며, 점성토, 사질토, 풍화토 및 풍화암 등 다양한 지반에 적용가능하다는 장점이 있다. 한편, 그라우팅 주입에 의한 천공홀의 시공품질은 전체 구조물의 안정에 큰 영향을 끼칠 수 있으므로 이에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다. 실제 현장에서는 그라우팅 주입량으로 강관보강다단 그라우팅 천공홀의 건전도를 평가한다. 그러나, 이는 시공자의 경험과 숙련도에 따라 크게 좌우되며 실제로 천공홀이 잘 충진되어 그라우팅이 주변 지반으로 적절히 침투되었는지 확인할 수 있는 방법이 없다.

터널 구조물의 안정성을 평가하기 위해, 여러가지

비파괴 탐사기법을 활용한 연구가 수행되어 왔다. Kim et al. (1997)과 Park et al. (2006)은 지하레이더 (GPR)를 활용한 라이닝의 두께조사와 배면공동 존재 여부 파악에 대한 연구를 수행한 바 있다. Zou et al. (2008)과 Lee et al. (2007)은 록볼트의 길이방향 결함에 대해 각각 주파수와 유도초음파의 에너지 속도변화를 이용하여 록볼트의 건전도를 평가하였다. 이와 유사한 연구로 비파괴 탐사를 이용한 강관에서 유도초음파의 전파특성 및 결함평가에 관한 연구(Rose, 2003; Sun, 2003; Barshinger, 2004), 유도초음파를 이용한 그라우팅된 텐던과 볼트에 대한 건전도 평가 연구(Beard, 2003)가 수행된 바 있다. 특히, Yu et al. (2013)에서는 록볼트를 대상으로 자유구속, 지중근입 조건으로 나누어 실내실험을 실시하였으며, 웨이브렛 변환과정을 통해 록볼트의 결함비율과 속도의 관계를 도식화하였고 이 결과를 현장에 적용하였다. 그러나 비파괴 탐사기법을 활용한 강관보강다단 그라우팅의 건전도 평가는 아직까지 수행된 바 없다.

본 연구에서는 강관보강다단 그라우팅의 건전도를 평가하기 위해 유도초음파를 이용한 비파괴 탐사기법을 제시하고자 한다. 본 논문은 푸리에 변환 및 웨이브렛 변환에 대한 이론, 실내실험 및 현장실험 내용과 그 결과를 포함한다.

2. 신호 처리

2.1 푸리에 변환

푸리에 변환은 시간에 관한 정보를 주파수 공간의

정보로 변환하며, 이에 다시 역변환을 수행하여 주파수에 관한 정보를 다시 시간정보로 복원할 수 있다. 푸리에 급수는 일정한 시간에 대하여 서로 다른 주기의 사인, 코사인 함수들의 급수로 표현된다(Kreyszig, 2007).

이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)을 유도하기 위하여 복소 푸리에 계수 합으로 표시하는 근사값을 구한다. 구간 $[0, P]$ 를 길이가 P/N 인 부분 구간 $[jP/N, (j+1)P/N]$ 으로 나누고, $j=0, 1, \dots, N-1$ 에 대하여 $t_j=jP/N$ 이라 하면, 다음과 같은 리만합을 복소 푸리에 계수 d_k 의 근사값이라 할 수 있다.

$$d_k \approx \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f(t_j) e^{-2\pi i k j / N} \quad (1)$$

여기서, $K=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 이다.

N 이 양의 정수이고 $x = \{x_j\}_{j=0}^{N-1}$ 이 복소수열이라 하면, x 에 대한 이산 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$X_k = \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-2\pi i j k / N} \quad (2)$$

이산 푸리에 변환은 푸리에 변환이나 푸리에 급수의 부분합의 근사값으로써, 효과적이거나 시간이 비교적 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 대한 필요로 고안된 것이 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)이다. 푸리에 변환에 대한 이산 푸리에 변환의 근사값을 구하기 위하여, 식 (2)를 사용하면 $2N^2$ 번의 연산이 필요하나 $N=2^n$ 인 경우에 대하여 고속 푸리에 변환을 이용하면 $n \cdot 2^{n+3}$ 번 이하의 연산과정을 통하여 푸리에 변환의 근사값을 계산할 수 있다(Cooley et al. 1965). 고속 푸리에 변환은 많은 이산 푸리에 변환 계산을 빠르고 효과적으로 계산할 수 있으며, 신호에서 주파수 성분을 찾는 데 효과적으로 이용된다(Kim and Melhem, 2003).

2.2 웨이브렛 변환

푸리에 변환은 시간에 따라 주파수가 변화하는 멀티스케일 특성을 갖는 신호의 주파수 정보를 효과적으로 표현하지 못한다. 푸리에 변환은 시간영역에서의 주파수 분포 및 특성에 관한 정보를 얻을 수 없으며(Kumar and Foufoula-Georgiou, 1994), 비파괴탐사에서의 손상영역 탐지에는 멀티스케일 특성을 지닌 신호가 주로 나타나므로 적절한 방법이라 할 수 없다(Kim and Melhem, 2003).

웨이브렛 변환은 신호에 포함된 스케일에 대한 뛰어난 분해능을 지니고 있으며, 이에 따라 “시간-스케일” 변환이라고도 불리운다. 웨이브렛 변환은 분산성을 갖는 신호나 비정상신호를 분석하는데 적합하고 매우 효과적이며(Lee et al., 2007), 그 목적에 따라 여러 분야에 적용 및 사용되고 있다. 멀티스케일의 특성을 지닌 신호의 시간영역에서 측정된 신호파에 대하여 시간-주파수 특성을 파악하기 위한 웨이브렛 변환식은 아래와 같이 표현된다(Grossman and Molet, 1984).

$$WT(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{u,s}^*(t) dt \quad (3)$$

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (4)$$

여기서 $f(t)$ 는 측정된 원신호이고, 함수 $\psi(t)$ 는 모웨이브렛 함수(mother wavelet function)이며, $\psi^*(t)$ 는 모웨이브렛 함수 $\psi(t)$ 의 복소 공액(complex conjugate)을 의미한다. 식 (3)과 (4)에서 u 는 시간영역의 모웨이브렛 함수를 u 만큼 평행이동시키는 기능을 하며, s 는 함수의 신축을 나타내는 변수로 임의의 축척(scale)으로 모웨이브렛을 팽창 또는 압축시키는 기능을 한다(Fig. 1). 따라서, 웨이브렛 변환시 시간(또는 주파수) 스케일이 신호의 주파수 대역에 따라 압축 또는 팽창되어 높은 해상도와 정확성을 갖는 결과를

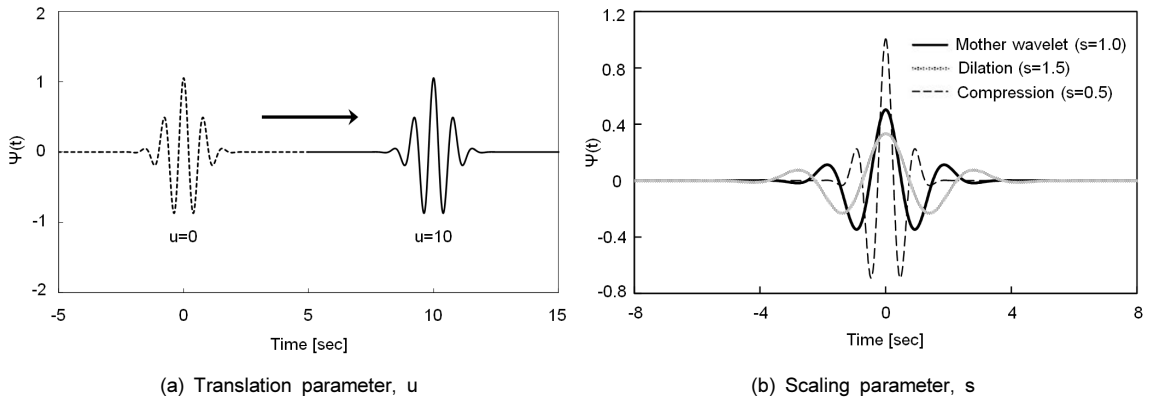


Fig. 1. Translation and scaling parameter in wavelet transform

얻을 수 있으며, 신호가 포함하는 모든 스케일 성분을 하나의 공간에 표현할 수 있다.

3. 실험 구성

3.1 실내 실험

본 연구에서는 실제 현장에서의 강관보강다단 그라우팅 건전도를 평가하기에 앞서, 실내실험을 수행하였다. 실내실험은 자유구속조건 및 지중근입조건으로 수행되었다. 강관은 실제 강관보강다단 그라우팅 시공에 사용되는 길이 6 m의 KS D 3566 구조용 탄소강관을 사용하였다. 그라우트재는 일반적으로 터널현장에서 사용되는 LW 그라우트재를 사용하였다. 실험에 사용된 강관의 제원과 그라우팅의 배합비

는 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 강관보강다단 그라우팅 축소모형의 길이는 6 m이며, 길이방향의 그라우팅 충전률에 따른 유도초음파의 변화 양상을 관찰하기 위해 그라우팅 반경을 100 mm로 동일하게 유지한 채, 길이방향 그라우팅 충전률을 25%, 50%, 75%, 100%로 변화하여 제작하였다. 충전률은 Fig. 2와 같이 천공된 전체 길이에 대한 충전된 그라우팅 길이의 비로 나타낸다. 충전률이 100%이면 충진이 완전히 이루어진 상태이고, 충전률 0%는 빈 강관을 의미한다.

3.1.1 자유구속조건

모형체는 자유구속조건 상태를 구현하기 위해 Fig. 3과 같이 공기 중에 거치한 후, 그라우팅 주입 및 양생을 실시하였다. 현장의 조건을 모사하기 위해 10°

Table 1. Dimensions of steel pipes

	External diameter	Thickness	Unit weight	Length
Lab test	50.8 mm	4.0 mm	4.62 kg/m	6 m
Field test	60.5 mm	3.8 mm	5.57 kg/m	12 m

Table 2. Mixing proportions of grout materials

Amount of injection	Liquid A		Liquid B		
	Silicate of soda	Water	Cement	Water	W/C
1,000 L	250 L	250 L	250 kg	420 L	168 %

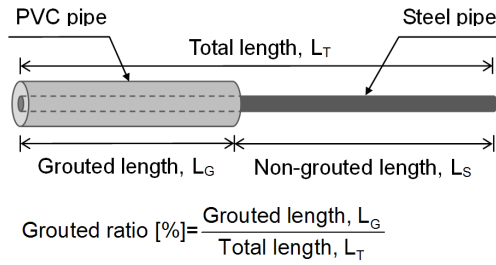


Fig. 2. Definition of grouted ratio

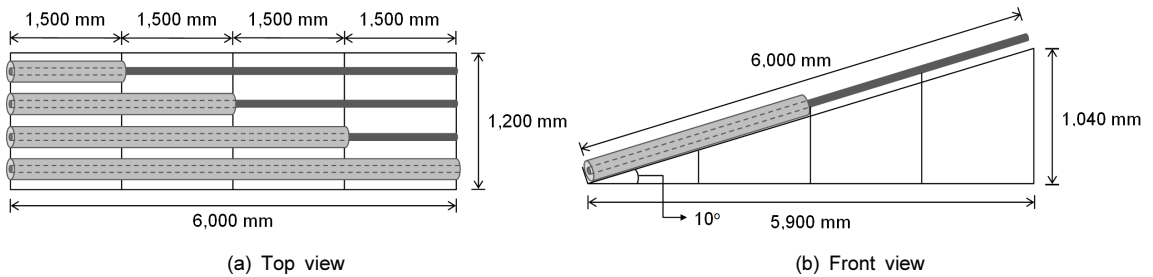


Fig. 3. Specimens under a free boundary condition

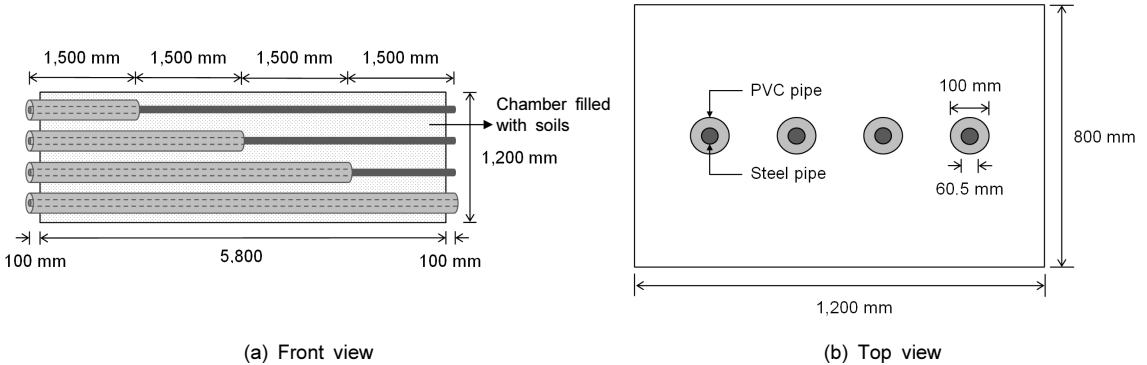


Fig. 4. Specimens under an embedded condition

기울여 아래쪽을 두부로, 위쪽을 선단부로 모사하였다. 센서를 설치하기 위해 두부에서 그라우트를 10 cm 제거하여 타격 및 신호의 획득이 가능하게 하였다.

3.1.2 지중근입조건

실제 현장에서의 조건을 모사하기 위하여, Fig. 4와 같이 6 m 길이의 강관보강다단 그라우팅 모형체를 길이 5.8 m, 폭 1.2 m, 높이 0.8 m의 토조에 근입시켰다.

이때, 모형체는 그라우팅을 주입하여 약 10일간의 양생기간을 거친 후, 모형틀을 제거하여 토조 안에 근입시켰다. 또한, 자유구속조건에서와 마찬가지로 강관을 10 cm 토조 외부에 노출시켜 센서의 설치 및 강관의 타격이 가능하게 하였다. 그 후, 서울시 ○○현장에서 채집된 풍화토로 토조를 채우고 다짐을 실시하여 지중근입조건 상태를 모사하였다.

3.2 현장 실험

본 연구에서 제안하는 강관보강다단 그라우팅 건전도 평가기법의 적용성을 검토하기 위해, 포항시 △△ 터널의 갱구부에 위치한 6개의 실험체를 대상으로 실험을 진행하였다. 대상현장의 지반조건은 풍화의 발달정도가 불규칙하며, 기존에 이미 붕락이 이뤄졌던 만큼 지질조건이 열악한 상태였다. 실험을 수행하기 전 갱구부는 터널단면 굴착전 상태로 강관보강다단 그라우팅, 록볼트, 슛크리트 등으로 보강작업이 이루어진 상태였다. 강관보강다단 그라우팅 보강범위

120°인 두 줄의 아치형태로 시공되었으며, Table 1의 외경 60.5 mm, 길이는 12 m 단본의 강관이 사용되었다. Fig. 5와 같이 1, 2, 3번 실험체는 아랫줄에, 4, 5, 6번 실험체는 윗줄에 위치하였다. 아랫줄과 윗줄의 그라우팅 주입일은 4일 차이났으며, 아랫줄의 경우 주입일로부터 16일 경과, 윗줄의 경우 12일 경과된 시점에 실험이 수행되었다. 센서의 설치 및 해머의 타격을 위하여 돌출된 강관 표면에 남아있는 슛크리트를 제거하고 강관을 약 10 cm정도 외부로 노출시켰다. Fig. 6과 같이 센서 및 측정시스템을 구축한 후, 실내실험과 동일한 방식으로 실험을 수행하였다.

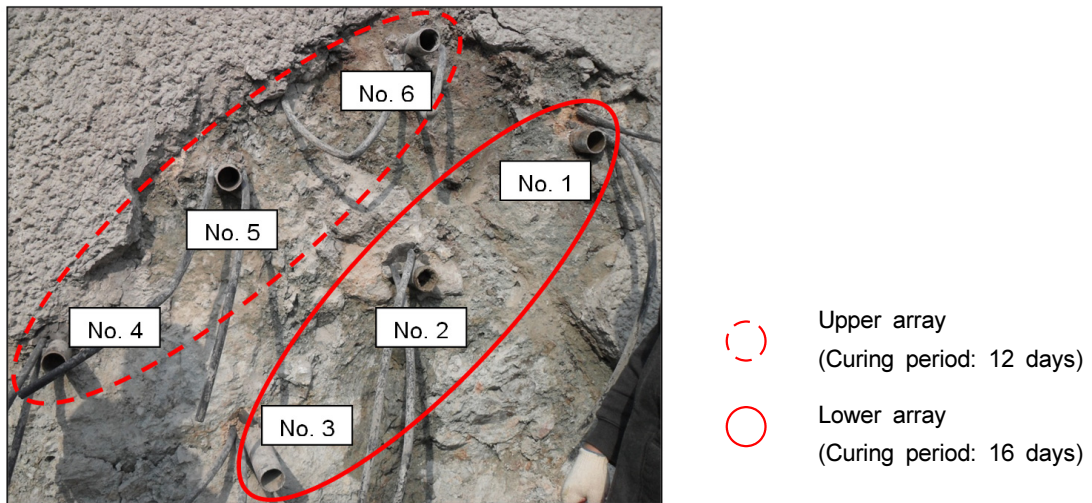
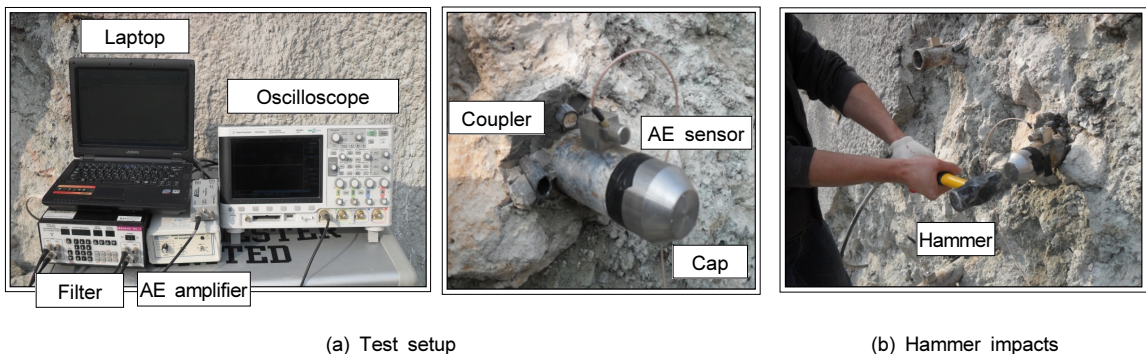


Fig. 5. Specimens in the field tests



(a) Test setup

(b) Hammer impacts

Fig. 6. Field test: (a) Test setup

3.3 실험 방법

본 연구에서는 해머타격 반사법을 이용하여 강관보강다단 그라우팅의 건전도를 평가하였다(Yu et al., 2008). Lee et al. (2006)과 Han et al. (2009)에서 수행된 유도파의 분산성 분석결과에 따라, 20-110 kHz 대역의 음향방출(Acoustic Emission, AE) 센서를 선택하였다. 강관보강다단 그라우팅 건전도 평가를 위한 측정시스템을 Fig. 7과 같이 구성하였다. 해머로 강관 두부의 캡을 직접 타격하여 가진시키고, 발생된 유도초음파는 강관 선단부에서 반사되어 다시 두부로 되돌아오며, 이 신호는 강관 두부에 설치된 AE 센서에 의해 수신된다. 수신된 신호는 신호증폭기에서 증폭되어 필터를 거친 후, PC와 오실로스코프를 통해 기록된다. 이때, 필터에서는 고주파통과 및 저주파통과 필터링을 각각 5 kHz, 100 kHz로 설정하여 잡음을 제거하였다. AE 센서의 검출방향과 유도초음파의 진행방향을 서로 나란히 하도록 커플러를 제작하였으며, 나사로 고정하여 강관과 커플러를 완전 결속시켰다. 또한, 해머타격에 의한 에너지가 강관의 단면에 균질하게 전달되고, 유도초음파의 진행방향과 동일하게 가진하기 위해 캡을 설치하였다. 획득된 신호에서 반사파가 검출되는 시간을 측정하여 유도초음파의

속도를 분석하였고, 그 결과를 바탕으로 유도초음파에 대하여 웨이브렛 변환을 실시하였다.

4. 실험 결과

본 연구에서는 강관보강다단 그라우팅의 건전도 평가를 위해 충진률에 따른 실내실험 및 현장실험을 수행하였고, 실험 결과에 대하여 고속 푸리에 변환 및 웨이브렛 변환을 적용하였다. 강관보강다단 그라우팅 시스템에서 전달되는 유도초음파는 광역의 주파수가 중첩된 파의 형태를 나타내고 있다. 시간영역 및 주파수 영역 해석, 그리고 시간-주파수 영역에서의 해석을 수행하였으며, 이를 통해 그라우팅 충진률에 따라 변화하는 반사파의 주파수 변화를 파악하고자 하였다.

4.1 시간영역 해석

자유구속조건과 지중근입조건에서 각각의 충진률에 따라 획득된 신호에 대하여 시간영역에서 분석하여 그라우팅 충진률에 따른 유도초음파의 속도변화를 관찰하였다. 시간영역 해석결과, Fig. 8(a)와 같이 약 3 ms에서 충진률에 관계없이 거의 동일하게 반사파가

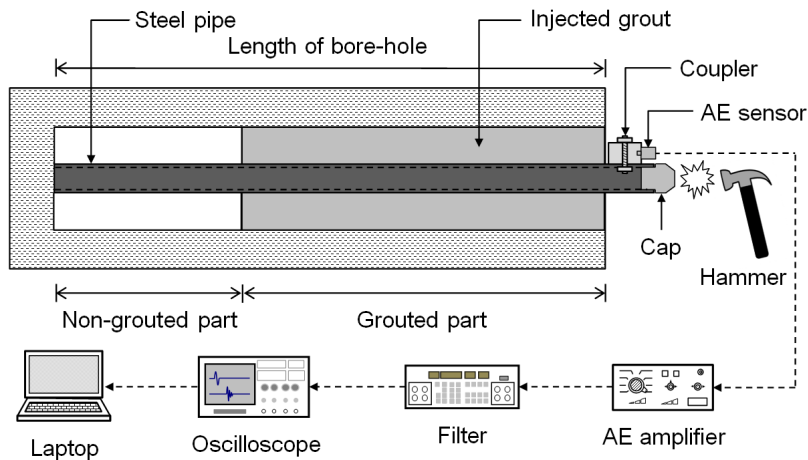
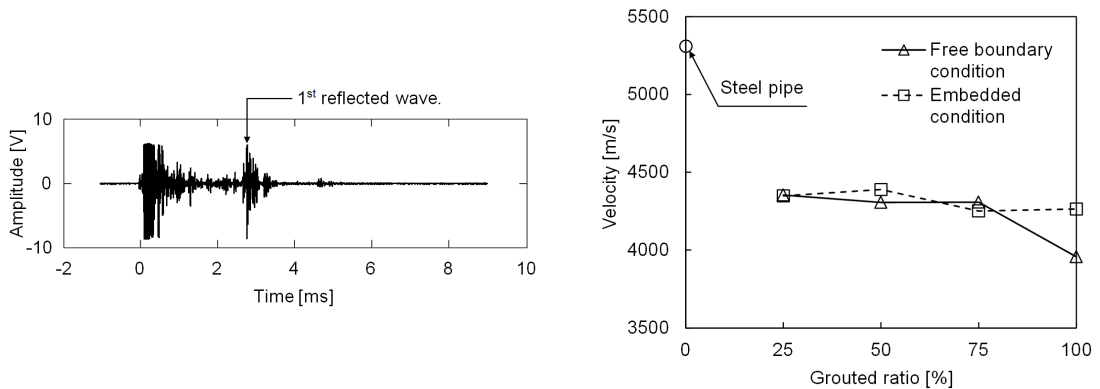


Fig. 7. Measurement system for the guided waves



(a) Sample signal (embedded condition, 25 % of grouted ratio)

(b) Grouted ratio - velocity relationship

Fig. 8. Time domain analysis of laboratory tests

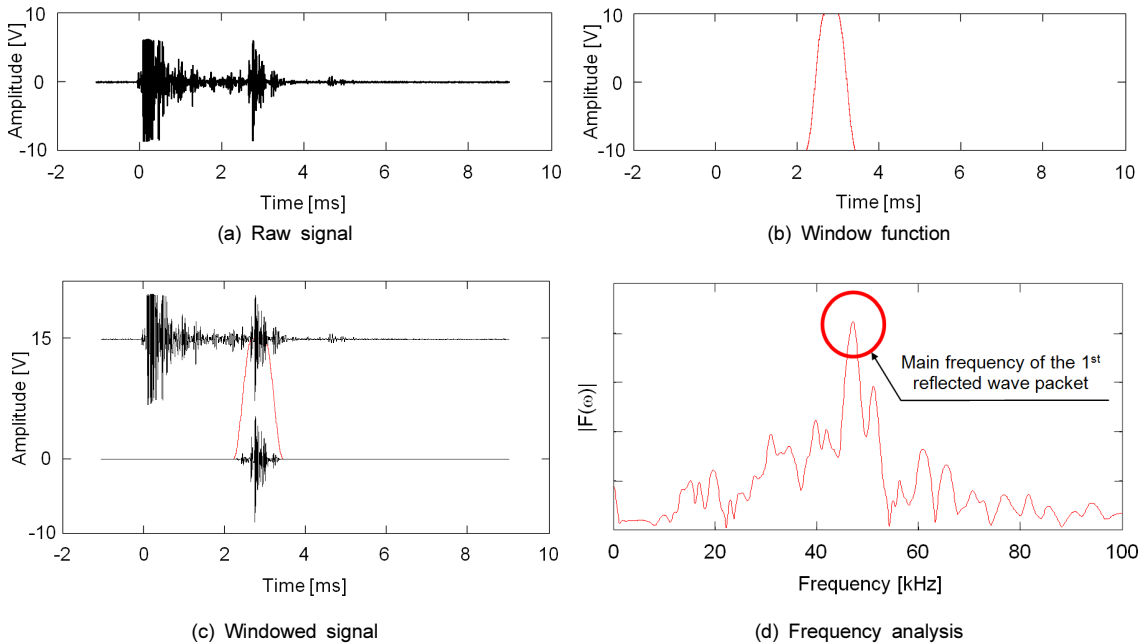


Fig. 9. Signal processing for FFT (embedded condition, 25 % of grouted ratio)

나타났으며, 속도는 Fig. 8(b)와 같이 약 4,000~4,400 m/s 사이로 산정되었다(실내실험 강관의 길이 6 m). 충전률 0%, 즉 빈 강관에서의 속도 5,300 m/s와 비교하여 확연히 감소하였으나, 각 충전률에 따른 속도의 변화는 작았다. 이는 강관 외부의 길이방향 충전률에 관계없이 강관의 내부는 모두 그라우팅으로 꽉 채워진 상태로 제작되었기 때문에 사료된다. 현장실험

의 시간영역 해석결과, 약 6 ms에서 반사파가 관찰되었으며, 실내실험과 마찬가지로 유도초음파의 속도는 약 4,000 m/s로 실내실험의 결과와 유사하였다(현장 실험 강관의 길이 12 m). 이와 같이, 시간영역 해석을 통하여 반사파의 속도를 산정하였으나, 실내실험 및 현장실험에서 모두 충전률에 따른 속도 변화는 매우 작았다.

4.2 주파수 해석

강관보강다단 시스템에서 전달되는 유도초음파, 특히 가진 후 반사파가 잡히기전까지의 유도초음파 신호는 비정상신호로써 광역의 주파수 성분을 갖는 파들이 중첩된 파군형태이다. 그러나 고속 푸리에 변환을 적용한 결과, 강관을 타고 전파되어 강관 선단부에서 반사되어 돌아오는 반사파의 경우, 일정한 주파수 대역에서 큰 진폭값을 갖는 경향을 관찰하였다. 실내실험과 현장실험에서 측정된 신호의 첫번째 반사파군에 대하여 윈도우(windowing)를 적용하여, 고속 푸리에 변환에 의한 주파수 분석을 실시하였다. 먼저 원신호에서 첫번째 반사파군의 시간영역을 선택하고, 그 반사파군 신호에 대하여 윈도우를 적용하여 가중치를 주었고, 변환된 신호를 고속 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역으로 나타내어 반사파군에서 가장 큰 진폭을 갖는 주파수(주 주파수, main frequency)를 관찰하였다. 자유구속조건의 길이방향 충진률이 25%, 50%, 75%, 100%인 경우, 각각 55.5 kHz, 34.0 kHz, 31.6 kHz, 31.5 kHz에 반사파의 주 주파수가 나타났다. 한편, 지중근입조건의 결과에서, 길이방향 충진률이 25%, 50%, 75%, 100%인 경우 각각 47.5 kHz, 34.9 kHz, 30.8 kHz, 27.2 kHz로 나타났다. 이와 같이, 실내실험에서 반사파군의 주파수 분석결과, Fig. 10(a)와 같이 길이방향 충진률이 증가함에 따라 반사파

군의 주파수가 낮아짐을 관찰하였다. 현장실험결과, Fig. 10(b)와 같이 1번, 2번, 3번 실험체의 경우 각각 15.8 kHz, 18.5 kHz, 17.8 kHz에서 주 주파수가 나타났으며, 4번, 5번, 6번 실험체에 대해서는 26.7 kHz, 30.7 kHz, 25.1 kHz에서 주 주파수가 관찰되었다.

4.3 시간-주파수영역 해석

웨이블릿 변환을 통해 시간-주파수영역에 대한 분석을 실시하여 반사파에서 주로 나타나는 주파수와 그라우팅 충전률과의 관계를 도식화하여, 강관보강다단 그라우팅의 건전도를 평가하였다. 실내실험에서는 자유구속조건, 지중근입조건하에 서로 다른 길이방향 충진률을 갖는 강관보강다단 그라우팅 모형체에서 측정된 신호에 대한 웨이블릿 변환을 수행하였다. Fig. 11(a)와 (b)는 각각 자유구속조건과 지중근입조건의 길이방향 충진률에 따른 시간-주파수영역의 해석 결과이다. 웨이블릿 변환시 앞의 시간영역 해석결과에서 획득한 반사파가 나타나는 시간대에서의 주파수를 관찰하였다. 각각의 길이방향 충진률에 따라 최대에너지를 갖는 주파수가 변화하였다. 현장실험에서의 웨이블릿 변환 결과는 Fig. 11(c)에 나타내었다.

자유구속조건의 길이방향 충진률이 25%, 50%, 75%, 100%인 경우에 반사파의 주파수는 각각 57 kHz, 36 kHz, 33 kHz, 31 kHz로 측정되었다. 지중근입

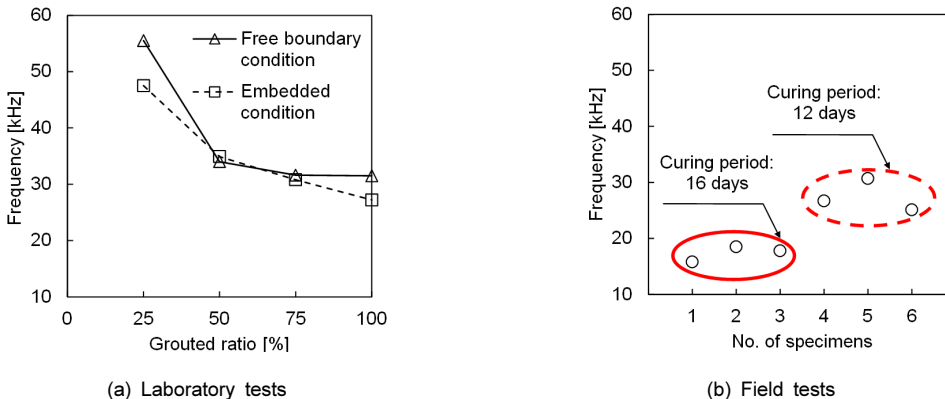


Fig. 10. Grouted ratio - frequency relationship of FFT

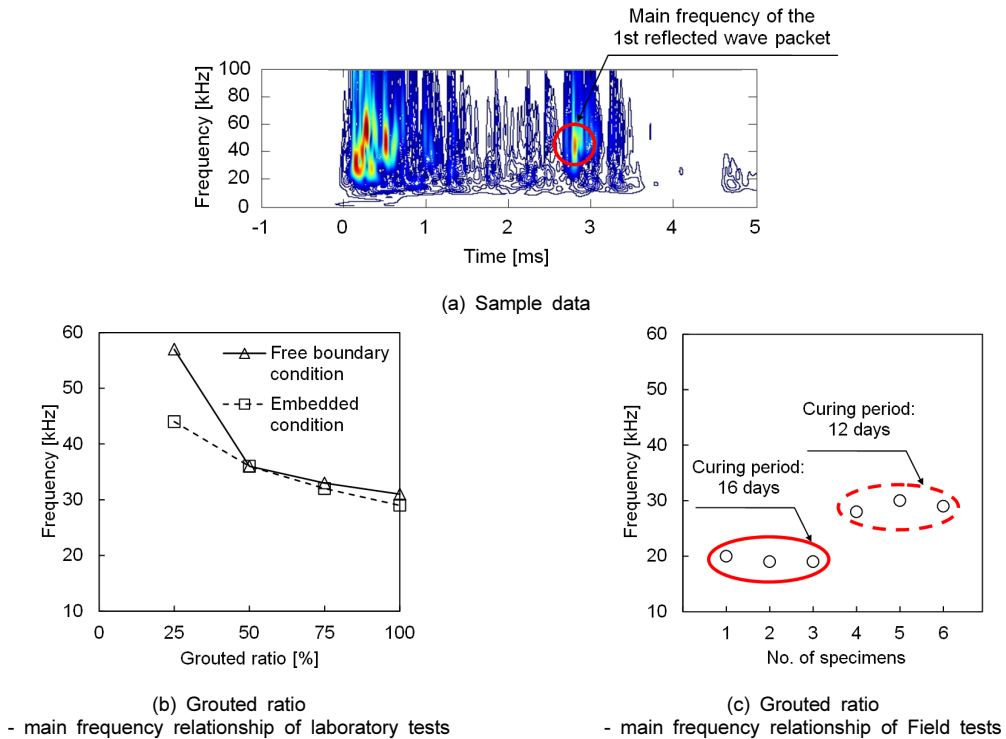


Fig. 11. Time-frequency domain analysis

조건의 결과, 길이방향 충전률이 25%, 50%, 75%, 100%인 경우에 반사파의 주파수는 각각 44 kHz, 36 kHz, 32 kHz, 29 kHz로 나타났다. 한편, 현장 실험의 경우, 1, 2, 3번 실험체는 약 20 kHz의 주파수 부근에서 반사파의 세기가 크게 나타난 반면 4, 5, 6 번 실험체는 약 29 kHz 부근에서 크게 나타났다.

4.4 분석결과

실내실험에서 획득한 데이터에 대해 고속 푸리에 변환과 웨이블릿 변환을 이용하여 주파수 분석을 실시한 결과, 길이방향 충전률이 증가함에 따라 주파수가 감소하는 경향을 나타내었으며, 100% 충전률에 가까워질수록 약 30 kHz에 수렴하였다(Fig. 12(a), (b)). 한편, 현장 실험체에 대한 분석결과는 Fig. 12(c)와 같이 두 개의 주파수 대역으로 나타났다. 1, 2, 3번 실험체는 약 15~20 kHz의 주파수 부근에서 반사

파의 세기가 크게 나타난 반면, 4, 5, 6 번 실험체는 약 25~30 kHz에서 크게 나타났다. 실내실험에서는 현장과 비교했을시 상대적으로 작은 스케일로써 풍화토로 토조를 채워 넣어 현장조건을 모사하였으나, 실제 풍화암 현장 지반에서의 구속조건 및 상재하중에 대한 영향은 훨씬 클 것으로 판단된다. 따라서, 현장에서 그라우팅 충전이 잘 이루어졌다면 실내실험결과의 주파수보다 작을 것으로 판단되므로, 약 20 kHz의 주파수를 갖는 1, 2, 3번 실험체는 충전이 잘 되었다고 판단할 수 있다. 그러나, 윗줄에 위치한 4, 5, 6번 실험체의 경우, 아랫줄에 위치한 1, 2, 3번 실험체의 주파수보다 높은 약 30 kHz의 주파수를 나타내었고, 이 결과는 실내실험에서의 충전률 100%의 경우와 비슷한 주파수를 나타내었다. 이러한 차이는 양생기간이 서로 다르기 때문에 발생된 것으로 고려된다. 양생이 진행될수록 그라우팅과 강관의 결합이 단단해져 강관내의 유도초음파의 고주파수 성분이 그라우팅

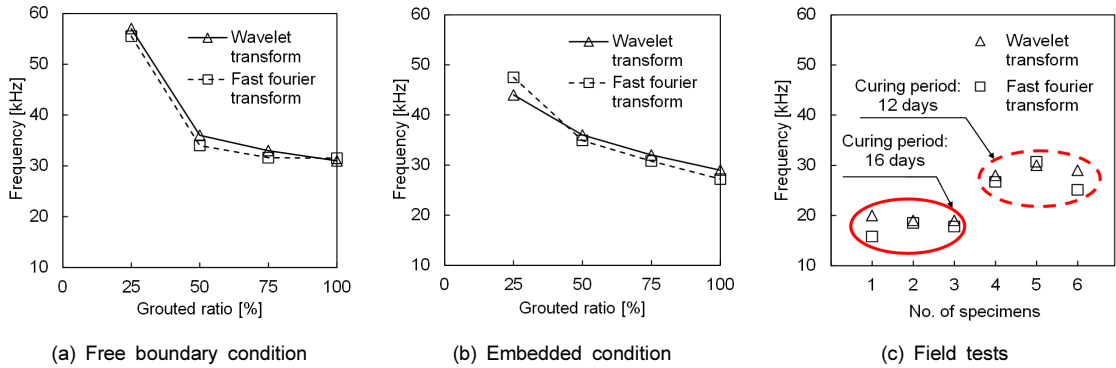


Fig. 12. Comparison of FFT and wavelet transform

과 강관의 결합에 의해 제어되었기 때문에 사료된다. 아랫줄의 실험체가 윗줄보다 양생 기간이 4일 앞서기 때문에 아랫줄의 실험체가 더 낮은 주파수 대역을 보이는 것으로 판단된다. 실내실험과 현장실험에서의 주파수 차이는 현장 지반의 구속조건과 상재하중이 실내실험보다 더 큰 영향으로 작용하기 때문으로 사료된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 강관보강다단 그라우팅의 건전도를 평가기법을 개발하기 위하여 실내실험을 수행하였으며, 현장실험을 수행하여 적용성을 평가하였다. 실내 실험에서는 유도초음파를 이용한 해머타격 반사법을 적용하여 길이방향 충전률이 각각 25%, 50%, 75%, 100%인 실험체에 대한 유도초음파의 전파속도를 측정하였다. 또한, 각각의 실험결과를 고속 푸리에 변환과 웨이브렛 변환을 적용하여 길이방향 충전률에 따른 반사파군의 주파수 변화특성을 파악하였다. 현장 실험에서는 현장에 이미 시공되어 있는 6개의 대상에 대한 실험을 수행하였으며, 신호처리는 실내실험에서와 같은 방법으로 수행하였다.

1. 시간영역 분석을 통하여 자유구속조건 및 지중 근입조건하에 길이방향 충전률에 따른 유도초음파의 속도를 산정한 결과, 반사파가 속도가

4,000~4,400 m/s로 나타났다. 유도초음파의 속도 변화가 매우 작기 때문에 이를 이용한 그라우팅 충전률의 평가는 어려웠다.

2. 고속 푸리에 변환을 사용한 주파수 분석의 결과, 실내실험시 길이방향 충전률이 높아질수록 반사파에서 주 주파수 대역이 감소하였다. 현장실험의 결과는 1번, 2번, 3번 실험체의 경우 15~18 kHz의 주 주파수 결과를 얻었으며, 4번, 5번, 6번 실험체에서는 25~30 kHz의 주 주파수를 획득하였다. 이는 양생 기간이 더 긴 1~3번 실험체에 전파되는 유도초음파의 고주파수 성분이 강관과 그라우팅의 결합에 의해 제어되었기 때문으로 사료된다. 실내실험과 현장실험에서의 주파수 차이는 현장 지반의 구속조건과 상재하중이 실내실험보다 더 큰 영향으로 작용하기 때문으로 사료된다.
3. 웨이브렛 변환을 통하여 시간-주파수영역으로 실내실험 데이터를 해석한 결과, 길이방향 충전률이 증가할수록 반사파에서의 주 주파수가 감소하여 30 kHz에 수렴하였다.
4. 현장실험데이터의 웨이브렛 변환 결과, 반사파에서 나타나는 주파수는 실험체마다 다소 차이가 있었다. 이는 대상 지반의 구속조건 및 그라우팅의 양생일수의 차이로 인해 발생한 것으로 판단된다.
5. 고속 푸리에 변환은 웨이브렛 변환보다 신호처

리 시간이 비교적 단축된다는 장점이 있지만, 별도의 윈도잉을 통한 추가 신호처리가 요구된다. 웨이브렛 변환은 고속 푸리에 변환보다 신호 처리 시간은 길지만 결과로부터 주 주파수를 즉시 확인할 수 있는 장점이 있다.

6. 유도초음파는 전단파와 압축파가 경계면에서 다중 반사되어 중첩 및 합성에 의해 매우 복잡한 양상으로 전파한다. 또한 경계면의 조건에 따라 그 양상은 더 복잡해진다. 따라서 본 연구에서는 강관의 경계면 즉, 그라우팅의 결합부를 선단에 집중시켜 형상을 단순화하여 해석하였다. 그라우팅이 강관의 양 끝단에 집중되어 결합이 중앙에 위치한 경우, 매우 복잡한 전파 양상을 가진다. 이에 대한 연구는 현재 진행중에 있다.
7. 본 연구에 대한 후속 연구로 근입깊이, 구속조건, 지반물성, 그라우팅 배합비 및 양생일수에 따른 반사파의 주파수 변화에 대한 연구가 이루어진다면 현장 적용을 위한 더욱 우수한 강관보강다단 그라우팅 건전도 평가 가이드라인을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사의 “강관보강다단 그라우팅 천공홀 건전성 평가” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Barshinger, J.N., Rose, J.L. (2004), “Guided wave propagation in an elastic hollow cylinder coated with a viscoelastic material”, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, No. 11, pp. 1547-1556.
2. Beard, M.D., Lowe, M.J., Cawley, P. (2003), “Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendons and bolts”, Journal of materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 3, pp. 212-218.
3. Cooley, J.W., Tukey, J.W. (1965), “An algorithm for the machine computation of complex Fourier series”, mathematics of computation, Vol. 19, pp. 297-301.
4. Grossman, A., Morlet, J. (1984), “Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape”, SIAM Journal on Mathematical Analysis, Vol. 15, No. 4, pp. 723-736.
5. Han, S.J., Lee, I.M., Lee, Y.J., Lee, J.S. (2009), “Evaluation of rock bolt integrity using guided ultrasonic waves”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 1, pp. 31-38.
6. Kim, H., Melhem, H. (2003), “Fourier and wavelet analyses for fatigue assessment of concrete beams”, Experimental Mechanics, Vol. 43, No. 2, pp. 131-140.
7. Kim, Y.G., Lee, Y.H., Jeong, H.J., Sin, S.B., Cho, C.H. (1997), “Non-destructive test for tunnel lining using ground penetrating radar”, Journal of Korean Society for Rock Mech., Vol. 7, pp. 274-283.
8. Kreyszig, E. (2007), “Advanced engineering mathematics 9th edition”. John Wiley & Sons, pp. 1094.
9. Kumar, P., Foughla-Georgiou, E. (1994), “Wavelet analysis in geophysics: an introduction, wavelet analysis and its application volume 4 - Wavelets in Geophysics”, Foughla-Georgiou and Kumar eds., Academic Press., New York, pp. 381.
10. Lee, I.M., Kim, H.J., Han, S.I., Lee, J.S. (2007), “Guidedwave-induced rockbolt integrity using fourier and wavelet transforms”, Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 4, pp. 403-413.
11. Lee, J.S., Lee, Y.J., Eom, T.W., Han, S.I., Lee, I.M. (2006), “Estimation of rockbolt integrity by using non-destructive testing techniques(I) - numerical and experimental of applicability -”, Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association, Vol. 8, No. 1, pp. 3-12.
12. Park, S.K. (2006), “An experimental study on estimation of size and thickness of cavitation

- (voids) under concrete slabs and tunnel linings using low frequency type radar (GPR)”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 10, No. 6, pp. 95-104.
13. Rose, J.L., Sun, Z., Mudge, P.J., Avioli, M.J. (2003), “Guided wave flexural mode tuning and focusing for pipe testing”, *Materials evaluation*, Vol. 61, No. 2, pp. 162-167.
 14. Sun, Z., Rose, J.L., Song, W.J., Hayashi, T. (2003), “Non-Axisymmetric wave focusing in pipe inspection”, The Pennsylvania State University.
 15. Yu, J.D., Bae, M.H., Han, S.I., Lee, I.M., Lee, J.S. (2008), “Defect ratio evaluation of the rock bolt grouting using the reflection method of guided ultrasonic waves”, *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 10, No. 3, pp. 221-232.
 16. Yu, J.D., Bae, M.H., Lee, I.M., Lee, J.S. (2013), “Nongrouted ratio evaluation of rock bolts by reflection of guided ultrasonic waves”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol. 139, No. 2, pp. 298-307.
 17. Zou, D.H., Cui, Y., Madenga, V., Zhang, C. (2008), “Effects of frequency and grouted length on the behavior of guided ultrasonic waves in rock bolts”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 44, No. 6, pp. 813-819.