

# 유도파에 대한 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용한 록볼트의 건전도 평가

이인모<sup>1\*</sup>, 김현진<sup>2</sup>, 한신인<sup>3</sup>, 이종섭<sup>4</sup>

## Guidedwave-induced rockbolt integrity using Fourier and wavelet transforms

In-Mo Lee, Hyun-Jin Kim, Shin-In Han, Jong-Sub Lee

**Abstract** As rock bolts become one of the main support systems in tunnels and underground structures, the integrity of the rock bolts affects the safety of these types of structures. The purpose of this study is the evaluation of rock bolt integrity using Fourier and wavelet transforms of the guided ultrasonic waves. After five rock bolt specimens with various defect ratios are embedded into a large scale concrete block, guided waves are generated by a PZT (lead zirconate titanate) element and measured by an acoustic emission (AE) sensor. The captured signals are analyzed in the frequency domain using the Fourier transform, and in the time-frequency domain using the wavelet transform based on a Gabor wavelet. The spectrum obtained from the Fourier transform shows that a portion of high frequency contents increases with increase in the defect ratio. Peak values in the time-frequency domain represent the interval of travel time of each echo. The energy velocities of the guided waves increase with the defect ratio. This study shows that the spectrum ratio and the energy velocity may be indicators for the evaluation of rock bolt integrity.

**Keywords:** Energy velocity, Fourier transform, guided wave, non-destructive test, spectrum, wavelet transform

**요 지** 터널과 같은 지하공간 구조물에 있어서 록볼트는 슛크리트와 함께 주요 지보재 중의 하나이며, 그러므로 록볼트 시공품질 정도에 따라 이러한 지중구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구의 목적은 록볼트를 따라 전파되는 유도파에 대하여 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용하여 록볼트의 건전도를 평가하는데 있다. 각기 다른 결함비율을 가진 다섯 개의 록볼트 시험체를 제작하여 콘크리트 블록에 매설한 후, PZT(Pb[Zr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>]O<sub>3</sub>: lead zirconate titanate) 엘리먼트로 유도파를 발생시키고 AE(acoustic emission) 센서를 이용하여 신호를 측정하였다. 수집된 신호는 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역에서 분석하였고, 가버 웨이브렛을 사용한 웨이브렛 변환을 이용하여 시간-주파수영역에서 분석하였다. 푸리에 변환을 이용하여 얻은 스펙트럼을 분석하면 록볼트의 결함비율이 증가함에 따라 고주파 대역 에너지의 비율이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 시간-주파수 영역에서의 각 파군별 최대 에너지가 나타나는 지점의 시간차는 각 반사파군 간의 이동 시간차를 나타내며, 이를 통해 계산된 유도파의 에너지 속도는 록볼트의 공동결함비율이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구는 스펙트럼 비와 에너지 속도가 록볼트의 건전도 평가에 있어서 하나의 지표가 될 수 있음을 보여준다.

**주요어:** 에너지 속도, 푸리에 변환, 유도파, 비파괴 시험, 스펙트럼, 웨이브렛 변환

### 1. 서 론

터널 시공에 있어서 슛크리트와 함께 록볼트는 주요 지보재로 널리 사용되고 있다. 록볼트에 결함이 있을 경우 시공중 또는 시공후에도 낙석이나 붕괴와 같은 심각한 문제를 초래할 수 있으므로, 신뢰성 있는 록볼트의

건전도 평가 방법은 터널의 안전성 확보에 있어서 필수적이라 할 수 있다. 특히, 천정부에 시공된 록볼트의 경우 시멘트 모르타르 그라우트가 양생되기 전에 중력의 영향으로 인해 밖으로 흘러나오는 경우가 발생한다. 이러한 현상으로 인해 천정부에 설치된 록볼트의 경우 선단부에 그라우트가 완벽하게 충전되지 않을 수 있다. 이와 같이 천정부에 설치된 록볼트에는 전통적으로 록볼트의 품질확인을 위해 사용되고 있는 인발시험도 적용할 수 없기 때문에, 새로운 평가 방법의 필요성이 대두되고 있다.

국내외적으로 초음파를 이용한 많은 비파괴 조사방법

<sup>1</sup>정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수

<sup>2</sup>고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정

<sup>3</sup>정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정

<sup>4</sup>정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 조교수

\*교신저자: 이인모 (inmolce@korea.ac.kr)

들이 연구되어 왔으며, 그러한 조사 방법들은 콘크리트에 근입된 록볼트나 그라우트에 둘러싸인 Tendon에 대한 것이었다(Thurner, 1988; Beard 등, 2003; Zhang 등, 2006; Han 등, 2006). 이러한 연구들은 기본적으로 시간영역의 신호에 대한 분석연구가 이루어졌다. Thurner (1988)는 유도파의 반사파들의 진폭을 비교하였지만, 반사파의 진폭은 감지기와 록볼트의 접촉상태에 매우 민감하게 반응하기 때문에 큰 실험오차가 발생하며 정확한 결과를 얻기 어렵다. Beard 등(2003)은 저주파와 고주파의 두 가지 감지기를 이용하여 초음파를 측정한다. 시간영역에서 신호를 분석하여 강봉의 결함을 조사하였다. Zhang 등(2006)은 그라우팅 구속조건과 자유구속조건의 두 가지 조건하의 록볼트를 이용하여 유도파의 속도와 진폭을 비교하였다. Han 등(2006)은 시간영역에서의 신호를 분석하여 유도파의 속도를 정확하게 계산하였으며, 그라우팅 충전 길이별로 파의 속도를 비교하였다.

시간영역에서 표현되는 신호는 주파수 영역이나 시간-주파수 영역과 같은 다른 영역에서도 구현될 수 있으며, 주파수 영역과 시간-주파수 영역에서의 정보는 푸리에 변환과 웨이브렛 변환을 이용하여 얻을 수 있다. 하지만 푸리에 변환의 경우 시간에 따라 주파수가 변화하거나 멀티 스케일 특성을 지니고 있는 신호의 주파수 정보를 효과적으로 나타내지 못한다. 특히, 이러한 변조 신호가 주로 나타나는 손상영역 탐지에 있어서는 적절한 방법이라 할 수 없고(Kim and Melhem, 2003), 초음파를 이용하여 록볼트 시스템과 같은 손상영역 분석을 할 경우에는 다른 변환기법이 필요하다고 할 수 있다.

그러므로 록볼트 시스템에 대하여 시간영역에서의 그라우팅 공동결함(그라우팅 충전길이별) 유도파의 초동속도(first arrival velocity) 분석을 수행한 일차 연구 단계(Han 등, 2006)에 이어서, 본 연구에서는 분산적이며 비정상신호특성을 띠는 신호파에 대하여 보다 적절한 분석방법으로 웨이브렛분석(시간-주파수영역 분석) 기법을 이용하여 신호파의 에너지속도를 연구하였다.

적용된 웨이브렛 변환은 분산성이 있는 신호의 분석에 있어서 매우 적절한 방법이기 때문에, 여러 분야에서 구조물 또는 재료의 건전도 평가에서 현재 널리 적용되고 있다. 웨이브렛 변환은 분산성이 있는 매개체를 통해 전파되는 비정상적인 신호를 효과적으로 분석할 수 있

다(Onsay and Haddow, 1994). Kishimoto 등(1995)과 Inoue 등(1996)은 보의 중심에 충격을 가한 후 단순 지보에서 발생된 분산성을 가진 파의 분석시 웨이브렛 변환을 이용하였다. Jeong and Jang(2000)은 다수의 감지기를 이용하여 파의 도달시간을 측정하는데 있어서 웨이브렛 변환 계수의 극대값을 이용하였다. 또한, Douka 등(2003)과 Hong and Kim(2004)은 웨이브렛 변환을 이용하여 보의 결함 위치를 파악하였다.

웨이브렛 변환을 이용하여 분산성이 있는 파를 분석함에 있어서 여러 가지의 웨이브렛이 사용되었다. Onsay and Haddow (1994)와 Kim and Melhem(2003)은 모렛 웨이브렛을 사용하였고, Kishimoto 등 (1995)과 Inoue 등 (1996), Jeong and Jang (2000), Kim and Kim(2001), 그리고 Lee 등(2004)은 가버 웨이브렛을 사용하였으며, Newland(1993)는 하모닉 웨이브렛을 사용하였다. 웨이브렛 변환은 웨이브렛의 모양이 중요한 역할을 하며, 가버 웨이브렛은 시간-주파수 성분의 파를 분석하는데 효과적이다(Kishimoto 등, 1995).

본 연구의 목적은 록볼트에서 측정된 유도파에 대한 푸리에 및 웨이브렛 변환 기법의 적용성 확장과 그것들을 이용한 새로운 록볼트의 건전도 평가 기법의 개발에 있으며, 따라서 본 논문은 푸리에 및 웨이브렛 변환 기법에 대한 검토와 록볼트 시험체에 대하여 초음파를 이용한 실험 방법과 측정된 신호에 대해 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용한 분석을 포함한다. 록볼트의 결함비율을 푸리에 변환을 이용하여 얻은 스펙트럼 크기 비와 웨이브렛 변환의 결과로부터 계산한 에너지 속도를 이용함으로써 평가하였다.

## 2. 푸리에 및 웨이브렛 변환

### 2.1 푸리에 변환

시간 영역에서의 신호  $f(t)$ 의 주파수 특성은 푸리에 변환을 통해 나타낼 수 있다. 푸리에 변환은 신호  $f(t)$ 에  $\exp(-i\omega t)$ 를 곱하여  $t=-\infty \rightarrow \infty$ 까지의 적분을 통해 얻을 수 있으며, 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\exp(-i\omega t)dt \quad (1)$$

여기서,  $F(\omega)$ 는  $f(t)$ 의 푸리에 변환,  $i$ 는  $\sqrt{-1}$ , 주파수

변수  $\omega$ 는 각주파수이다.

푸리에 변환은 역변환도 가능하며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (2)$$

여기서, 식 (1)과 (2)는 푸리에변환의 쌍이다.

푸리에 변환  $F(\omega)$ 는 신호  $f(t)$ 와 다양한 주파수를 갖는 사인파들의 내적을 의미하므로, 신호를 각각 다른 주파수로 분해할 수 있다. 따라서 푸리에 변환을 이용하면 신호의 주파수 성분을 찾을 수 있다. 또한, 주기를 가진 대부분의 신호는 각각 다른 주파수와 크기, 위상을 가진 사인파들의 합으로 나타낼 수 있기 때문에 푸리에 변환은 신호의 주기적인 형태를 분석하고 감지하는데 적용될 수 있다. 하지만, 푸리에 변환은 이러한 주파수의 시간영역상의 위치 정보를 포함하지 않기 때문에(Kumar and Foufoula-Georgiou, 1994), 변조신호에 대해서는 적합하지 않다(Kim and Melhem, 2003). 예를 들기 위하여 그림 1에 두 가지 신호를 나타내었다. 첫 번째 신호는 같은 시간구간에서 주파수가 다른 두 가지 신호가 겹쳐져 있고, 두 번째 신호는 다른 시간구간에서 두 가

지 주파수가 분리되어 있는 신호이다.

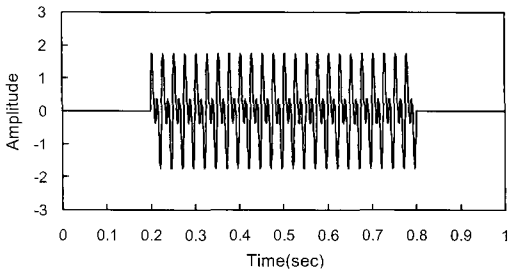
그림 1의 두 가지 신호에 대하여 푸리에 변환을 수행하였으며, 주파수에 대한  $|F(\omega)|$ 를 도시한 스펙트럼을 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 서로 다른 신호의 푸리에 변환 결과가 거의 같다는 것을 나타내며, 따라서 주파수 영역에서는 이와 같은 시간 영역에서 다르게 나타나는 신호를 구별할 수 없다.

푸리에 변환의 대안으로 주파수의 시간영역에서의 위치에 대한 정보를 얻기 위하여 short time fourier transform (STFT)이 소개되었다. 신호  $f(t)$ 의 STFT는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

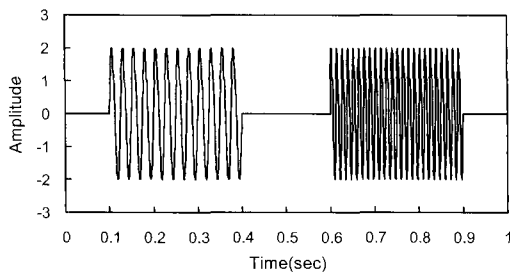
$$STFT = F(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)h(t-\tau)\exp(-i\omega t) dt \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 창함수이다.

STFT는 시간영역에서 신호  $f(t)$ 와 창함수를 곱하여 창문화 된 신호를 얻은 후에 푸리에 변환을 적용한다(Santamarina and Fratta, 2005). 따라서, STFT는 시간-주파수 공간에서 정보를 생성하며, STFT의 주파수 해상도는 시간창의 넓이에 의존하기 때문에 고정된 해상

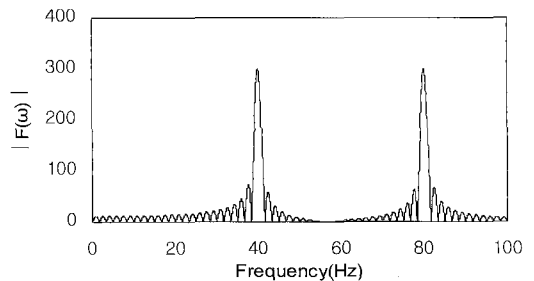


(a) superimposed signal

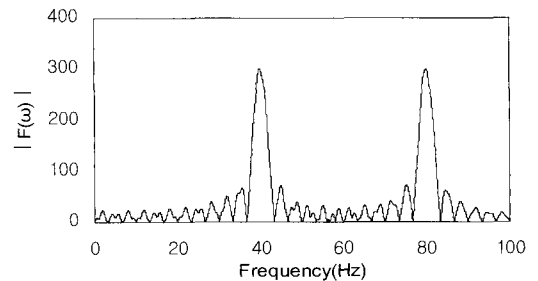


(b) separated signal

그림 1. 시간영역에서의 두 가지 신호



(a) superimposed signal



(b) separated signal

그림 2. 주파수영역에서의 두 가지 신호

도를 나타낸다. 그러므로, STFT는 시간대역을 아주 작게 하지 않는 한 고주파영역에서는 시간에 관한 정보를 잘 나타내지 못하는 단점을 가지고 있다.

## 2.2 웨이브렛 변환

그림 3에 웨이브렛 변환의 예를 나타내었다. 푸리에 변환에 의해서는 두 가지 다른 신호가 구분될 수 없지만, 그림 3에서 볼 수 있듯이 웨이브렛 변환을 이용하면 푸리에 변환에서는 구분되지 않았던 두 가지 신호를 명확하게 구분할 수 있다.

시간영역에서 측정된 신호  $f(t)$ 의 시간-주파수의 특성들은 웨이브렛 변환에 의해 구별될 수 있다. 신호  $f(t)$ 의 웨이브렛 변환은 다음 식 (4)와 같다.

$$WT(u,s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\overline{\psi_{u,s}(t)} dt \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\overline{\psi\left(\frac{t-u}{s}\right)} dt$$

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (5)$$

여기서,  $f(t)$ 는 시간 영역에서의 신호이며 함수  $\psi(t)$ 는 모(또는 기저)웨이브렛 함수이고,  $\overline{\psi(t)}$ 는  $\psi(t)$ 의 복소 공액이다.  $u$ 와  $s$ 는 이동과 팽창 파라미터이다. 함수  $\psi(t)$ 는 두 가지 조건을 만족해야한다. 첫 번째 조건은 모웨이브렛 함수의 적분값은 0이 되어야 한다는 것이며,

다음 식(6)에 나타내었다.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = 0 \quad (6)$$

앞의 식(6)은 모웨이브렛 함수가 진동한다는 것을 의미한다. 두 번째로 모웨이브렛 함수는 admissibility 조건을 만족해야하며, 다음 식 (7)에 나타내었다.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (7)$$

여기서,  $\Psi(\omega)$ 는  $\psi(t)$ 의 푸리에 변환이며 다음 식(8)과 같이 정의된다.

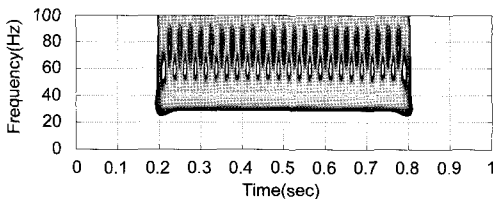
$$\Psi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)\exp(-i\omega t)dt \quad (8)$$

식 (7)은 모웨이브렛 함수의 진동이 유한한 기간에 제한된다는 것을 의미하며, 모웨이브렛 함수의 전형적인 예는 다음 그림 4에 나타내었다.

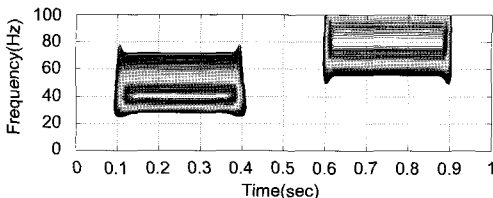
식 (4)와 (5)에서 첫 번째 파라미터  $u$ 는 시간영역을 따라 모웨이브렛의 이동을 결정하는 이동 파라미터이다(그림 5(a)). 그리고 두 번째 파라미터  $s$ 는 모웨이브렛의 팽창과 압축에 관계되는 스케일 파라미터이다(그림 5(b)). 높은 스케일은 저주파수에 대응하고, 낮은 스케일은 고주파수에 대응한다. 따라서, 웨이브렛 변환은 고주파수에서는 압축되고 저주파에서는 팽창하는 유연한 시간-스케일 창을 제공한다. 결론적으로 그림 5(c)와 같이 이동과 스케일 파라미터의 조합으로 나타낸다.

식 (4)와 같이 나타낸 웨이브렛 변환은 신호  $f(t)$ 와 모웨이브렛 함수  $\psi(t)$ 사이의 상호상관으로 나타낸다.

따라서, 모웨이브렛의 스케일이 변화하고 이동하기 때



(a) superimposed signal



(b) separated signal

그림 3. 시간-주파수 영역에서의 두 가지 신호

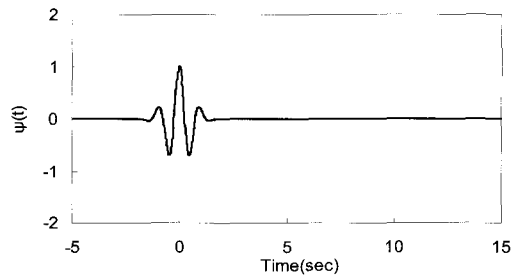


그림 4. 모웨이브렛의 예 ( $u=0, s=1$ )

문에 신호와 모웨이브렛 함수 사이의 유사성이 나타난다(그림 3). 웨이브렛 변환 계수는 선택된 스케일에서의 모웨이브렛 함수에 대한 신호의 유사성을 나타낸다. 본 연구에서는 시간-주파수 해상도가 가장 좋다고 알려진 그림 4에 나타난 가버 웨이브렛을 채택하였다(Inoue 등 1996). 가버 웨이브렛  $\psi_g(t)$ 는 가우시안 함수(gaussian function)로 창문화되었으며, 다음 식 (9)와 같다(Sato, 1991; Inoue 등, 1996).

$$\psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (9)$$

또한, 가버 웨이브렛의 푸리에 변환  $\Psi_g(\omega)$ 은 다음 식

(10)과 같이 나타낸다.

$$\Psi_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp\left[-\frac{(\gamma/\omega_0)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \quad (10)$$

여기서,  $\omega_0$ 와  $\gamma$ 는 양의 상수이다. 가버 웨이브렛(식 9)은 중심이  $t=0$ 인 가우시안 창함수이며 그것의 푸리에 변환(식 10)은 중심주파수가  $\omega_0$ 이다. 함수  $\psi_g((t-u)/s)$ 는 중심이  $t=u$ 이며 그것의 푸리에 변환은 중심이  $\omega = \omega_0/s$ 이다. 가버 웨이브렛을 이용한 WT(u,s)는  $t=u$ 와  $\omega = \omega_0/s$  위치에서의 신호 f(t)의 시간-주파수 성분을 나타낸다.

시간영역에서 신호 f(t)와 모웨이브렛 함수  $\psi(t)$ 의 상호상관인 웨이브렛 변환은  $\psi(t)$ 와 f(t)의 tail-reversed version의 합성적과 같다. 그러므로 웨이브렛 변환은 주파수 영역에서 주파수 위치별로 곱함으로서 효과적으로 계산된다. 따라서 식 (4)는 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$WT(u,s) = \frac{\sqrt{s}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \overline{\Psi(s\omega)} \exp(iu\omega) d\omega \quad (11)$$

웨이브렛 변환  $|WT(u,s)|$ 의 최대값은 웨이브렛 변환의 기울기가 0인 곳이다. 만약  $|WT(u,s)|$ 의 값이 중심 각주파수  $\omega_c = \omega_0/s$ 에서 극대값을 가진다면 군속도는 다음 식 (12)와 같다(Jeong and Jang, 2000; Wang, 2004).

$$V_g = \frac{L}{u} \quad (12)$$

여기서, u와 L은 각각 웨이브렛 변환의 극대 값에 대응하는 이동 파라미터와 이동거리이다. 시간 간격 u는 파군의 이동시간 간격이고 L은 각 파군이 진행한 거리이다. 그러므로 식 (12)는  $|WT(u,s)|$ 의 값의 분포상에서 가장 높은 위치는 각 위치의 주파수  $\omega_c = \omega_0/s$ 에서의 군속도( $V_g$ )의 이동시간을 나타낸다.

### 3. AE 센서를 이용한 투과법 실험

#### 3.1 록볼트 시험체 제작

본 연구에서 사용한 록볼트 시험체는 길이 3.1 m, 직경 25.4 mm의 실제 현장에서 사용되는 록볼트 철근을 이용하였으며, 결합비율이 각각 다른 다섯 종류로 제작

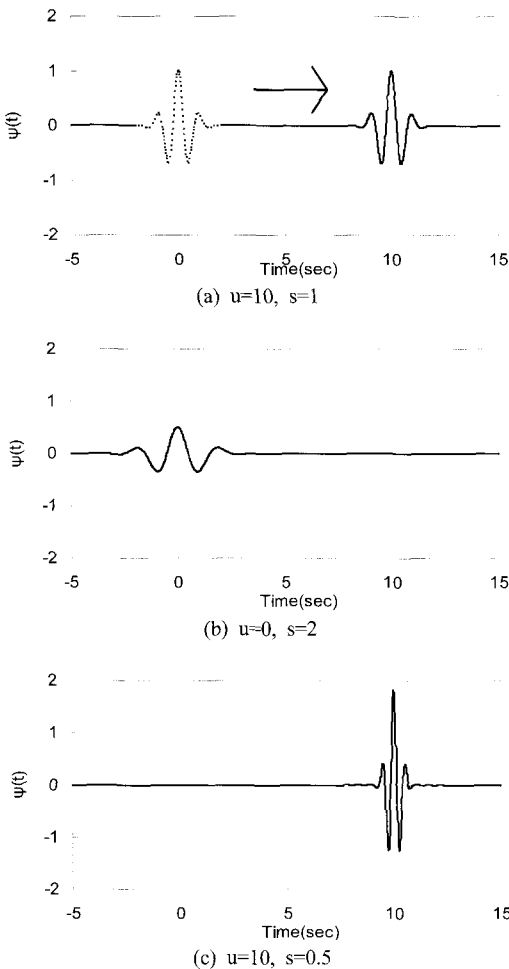


그림 5. 웨이브렛의 이동과 팽창

하였다. 본 연구에서는 결함비율(defect ratio)을 DR(%)로 정의하였으며, 전체 록볼트 철근의 길이( $L_T$ )와 그라우팅 피복이 되지 않은 부분의 길이( $L_S$ )의 비로 나타내었다. DR(%)을 정의한 식과 실험장비 구성을 각각 식 (13)과 그림 6에 나타내었다.

$$DR(\%) = \frac{L_S}{L_T} \times 100 \quad (13)$$

그라우팅 피복이 있는 록볼트는 결함비율 0%, 25%, 50%, 75%의 네 종류와 그라우팅 피복을 하지 않은 결함비율 100%인 록볼트 철근 한 개를 준비하였다. 록볼트 시험체의 재료는 결함비율별로 표 1에 요약하였으며, 그라우트는 시멘트, 모래, 물의 중량비 1:1:0.4인 시멘트 모르타르를 사용하였다. 록볼트 철근을 둘러싸고 있는 시멘트모르타르 그라우트의 직경은 40 mm내외의 크기로 제작하였다. 제작한 5개의 록볼트 시험체를 실제 현장의 지중 압반을 모사한 콘크리트 블록에 그림 7과 같이 매설하였다. 콘크리트 블록은 길이 3.0 m, 높이 0.8 m, 폭 0.9 m의 크기로 제작하였다.

록볼트 시험체의 전체 길이 3.1 m에서 콘크리트 블록에 근입된 최대 그라우팅 길이는 3.0 m, 그리고 신호차 수신위치로써 0.1 m의 길이로 철근이 돌출된 록볼트두부를 가진다. 록볼트 철근과 시멘트 모르타르, 콘크리트 블록의 물성치는 다음 표 2에 나타내었다.

### 3.2 장비구성 및 실험방법

유도파를 발생시키기 위하여 PZT 엘리먼트를 사용하였다. PZT 엘리먼트(Kang-seo EST, BPE-20C)를 양면

테이프를 이용하여 록볼트 선단부에 부착하여 실험하였다. PZT 엘리먼트의 발진부의 직경은 14 mm이며, 전체 직경은 20 mm, 두께는 0.45 mm이다.

본 연구에서 사용한 감지기는 AE 센서(Physical Acoustics, A3)이며, A3 AE 센서는 주파수 범위 0~100 kHz에서 민감도가 60~80 dB이다. 감지기의 선택에 있어서 록볼트 시스템의 경우 L1 mode에서 주파수 범위가 20~70 kHz일 때 최대 에너지 속도가 나타난다는 본 연구

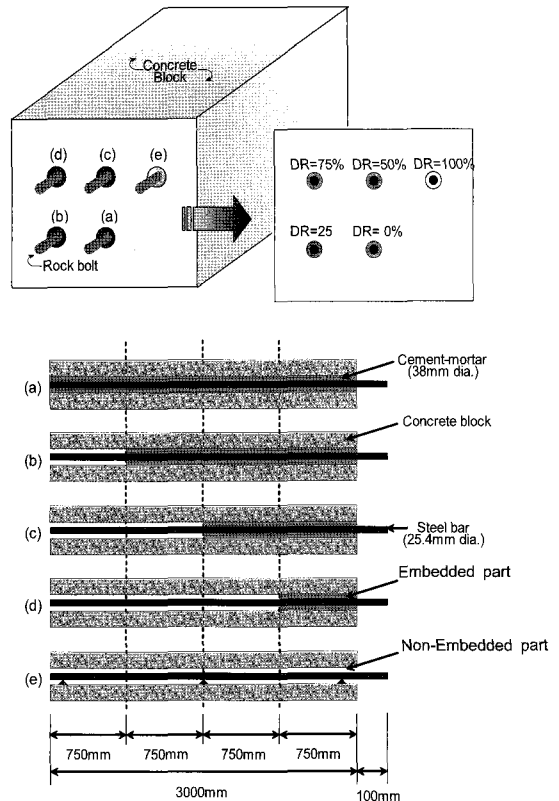


그림 7. 콘크리트 블록 모식도

표 1. 록볼트 시험체의 제원

DR(%)	Length of steel bar $L_T$ [m]	Length of embedded part $L_c$ [m]	Length of non-embedded part $L_s$ [m]
0%	3.00	3.00	0.00
25%	3.00	2.25	0.75
50%	3.00	1.50	1.50
75%	3.00	0.75	2.25
100%	3.00	0.00	3.00

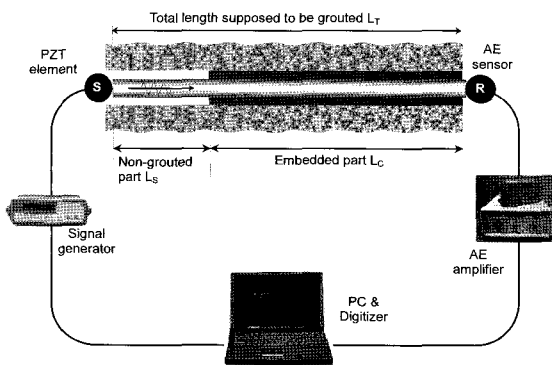


그림 6. 실험 장비 구성

표 2. 시험체의 물성치

물성	록볼트 철근	시멘트 모르타르 그라우트	콘크리트 블록
직경 [mm]	25.4	38.0	-
Young's modulus [GPa]	192	24	25
Constraint modulus [GPa]	258	31	30
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	7.80	2.19	2.29

진의 분산성 분석을 이용한 최근 연구에 근거를 두었다. 직경 16 mm인 A3 AE 센서를 록볼트 두부에 나사로 고정하였기 때문에, PZT 엘리먼트의 진동 방향과 AE 센서는 서로 평행하며 록볼트의 단면과는 수직을 이룬다.

록볼트 선단부에 부착되어 있는 PZT 엘리먼트는 신호 발생기(Agilent, 33220A)에서 발생된 사각파를 이용하여 작동시켰다. PZT 엘리먼트에 의해 발생된 유도파는 록볼트, 시멘트 모르타르와 콘크리트 블록을 통해 전파되며 록볼트 두부에 고정되어 있는 AE 센서에 의해 감지된다(그림 6). 감지된 유도파를 증폭기 (pre-amplifier - Physical Acoustics: 2/4/6; post-amplifier - Physical Acoustics: AE2A)를 이용하여 증폭한 후, 오실로스코프 (National Instruments, PXI-5112)로 디지털화 하여 저장하였다. 본 록볼트 시스템과 관계없는 고주파의 잡음을 제거하기 위해 1000~2000개의 신호를 평균하였다.

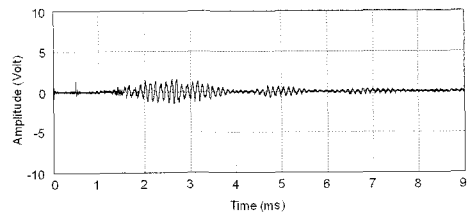
### 3.3 실험결과 및 분석

#### 3.3.1 시간영역에서의 결과

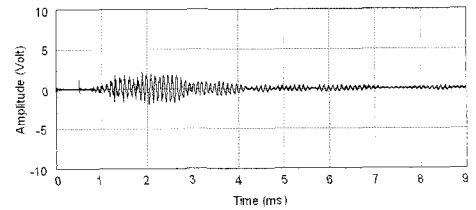
결함비율에 따라 측정된 신호를 다음 그림 8에 나타내었다. 그림 8을 살펴보면 그라우팅 피복의 길이가 늘어날수록 감쇠가 커지기 때문에 결함비율이 커질수록 즉, 그라우팅 피복의 길이가 줄어들수록 신호의 진폭이 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 결함비율이 커질수록 신호의 앞부분에서 고주파 영역이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 록볼트 시스템에서는 둘러싼 재료의 탄성계수가 커질수록 유도파의 진폭이 줄어든다는 연구결과와 일치하는 것을 알 수 있다(Beard and Lowe, 2003).

#### 3.3.2 주파수 영역에서의 분석(푸리에 변환)

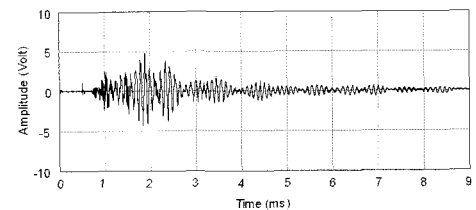
주파수 영역에서의 분석은 푸리에 변환을 이용하여



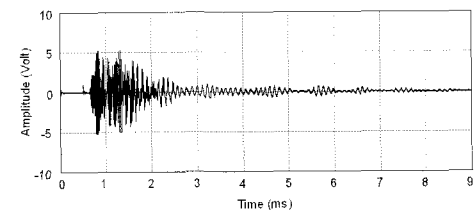
(a) DR=0%



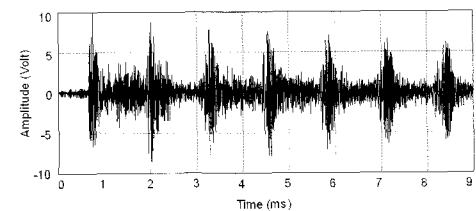
(b) DR=25%



(c) DR=50%



(d) DR=75%



(e) DR=100%

그림 8. 시간영역에서의 결과

수행하였으며, 스펙트럼을 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 그라우팅 피복이 있는 시험체의 경우 주로 나타나

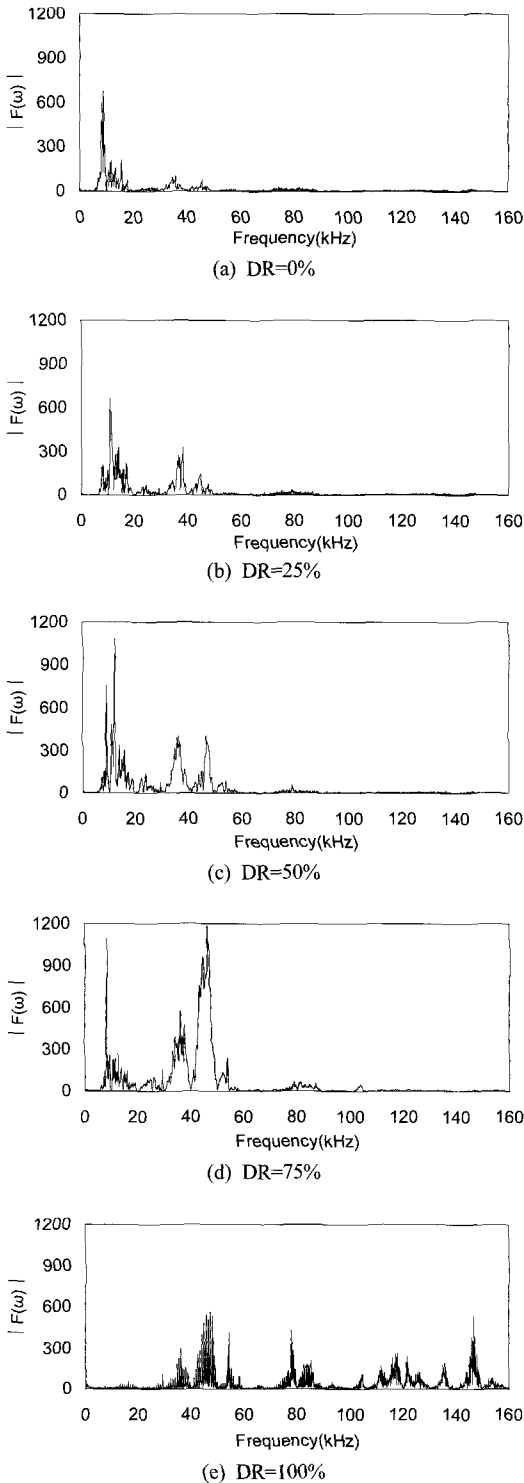


그림 9. 주파수 영역에서의 결과

는 주파수 대역이 5~100 kHz인 것을 알 수 있다.

주요 주파수는 5~20 kHz의 저주파대역과 30 kHz이상의 고주파대역의 두 부분으로 나타난다. 저주파 대역인 5~20 kHz범위를 살펴보면 스펙트럼이 결합비율에 따라 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 30 kHz 이상의 고주파 대역에서는 결합비율의 증가에 따라 스펙트럼이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 록볼트 철근만을 따라 전파되는 유도파는 주로 고주파 대역(30 kHz 이상)에 존재하며, 철근과 시멘트모르타르, 콘크리트 블록의 혼합체를 모두 통과하는 유도파는 저주파 대역(20 kHz 이하)에서 나타난다고 할 수 있다. 따라서, 록볼트 시스템에서 유도파의 감쇠와 주파수는 록볼트 철근과 이를 둘러싸고 있는 시멘트 모르타르와 콘크리트블록에 영향을 받는다고 할 수 있다.

주파수 영역에서는 결합비율을 스펙트럼의 면적비를 이용하여 산정하였다. 특정 주파수대역의 스펙트럼의 면적( $A_S$ )을 전체주파수대역의 스펙트럼의 면적( $A_T$ )로 나누었다. 이러한 비를 스펙트럼 비(magnitude spectrum ratio, MSR)이라 정의하였으며, 다음 식 (14)에 나타내었다.

$$MSR(\%) = \left( \frac{A_S}{A_T} \right) \times 100 \quad (14)$$

본 연구에서는  $A_S$ 를 30~60 kHz대역의 스펙트럼의 면적,  $A_T$ 를 0~160 kHz대역의 면적이라 하였다. 결합비율에 따른 MSR은 그림 10에 나타내었다.

그림 10에 나타난 바와 같이 MSR은 결합비율이 증가함에 따라 증가한다. 건전한 록볼트(DR=0%)일 경우 MSR이 27% 정도이며 록볼트 철근만의 경우 MSR이 약 95%이다. 결합비율이 0%에서 25%로 증가할 때

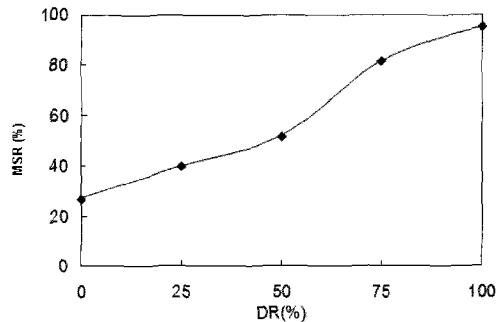


그림 10. 결합비율에 따른 MSR(%)



MSR은 27%에서 40%로 증가한다(약 48% 증가).

### 3.3.3 시간-주파수 영역에서의 분석 (웨이브렛 변환)

그림 8에 나타난 시간영역상의 신호를 살펴보면 결합 비율이 증가함에 따라 초동시간이 빨라지는 것을 알 수 있다. 이는 파의 이동 속도가 빨라진다는 것을 의미한다. 그러나, 시간영역에서 초동시간을 정확하게 찾는 것은 쉽지 않으며, 특히 이동 거리가 짧기 때문에 초동시간을 이용한 속도 계산은 많은 오차를 가진다. 더욱이, 록볼트 시스템의 유도파는 두 가지 지배 주파수를 가지기 때문에, 파의 속도 계산에 대한 또 다른 접근이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 웨이브렛 변환을 이용하여 새로운 파의 속도 계산 방법을 제시하였다. 그림 11에 록볼트 철근만의 웨이브렛 변환의 크기를 시간-주파수 영역에서 3차원으로 도시하였다. 그림 11에서 약 45 kHz의 지배 주파수를 가진 연속된 반사파가 나타나는 파군을 명확히 볼 수 있으며, 유도파의 감쇠는 거의 없다는 것을 알 수 있다.

그림 9에서 볼 수 있듯이 철근과 시멘트모르타르와 콘크리트 블록을 포함한 록볼트 시스템을 반영하는 유도파의 주파수 대역은 저주파대역(20 kHz이하)이기 때문에, 파군의 속도인 에너지 속도의 계산을 위하여 저주파 대역에 대하여 웨이브렛 변환을 수행하였다. 웨이브렛 변환시에는 스케일 파라미터를 조절함으로써 주파수 대역을 선택할 수 있으므로, 특별히 필터링은 수행하지 않았다. 파군의 속도는 군속도라 불리며, 파군에서 감쇠가 있다면 에너지 속도 또한 군속도라고 할 수 있다.

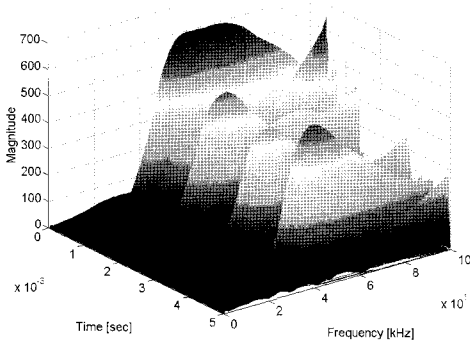


그림 11. 록볼트 철근의 웨이브렛 변환 결과(3D)

그림 12에 유도파의 저주파대역에 대한 웨이브렛 변환 결과를 나타내었다. 웨이브렛 변환을 contour map으로 나타내었으며, 도시된 등고선은 록볼트 시스템의 지배 주파수 대역(10~15 kHz)에서의 연속된 반사파를 나타내는 파군을 명확하게 보여준다.

웨이브렛 변환 수행시 각 파군의 최대에너지를 나타내는 contour map의 극대점을 쉽게 찾을 수 있다. 그림 12에 나타난 첫 번째 최대에너지, 두 번째 최대에너지, 세 번째 최대 에너지는 상대적으로 첫 번째, 두 번째, 세 번째 파군의 최대에너지 지점을 나타낸다. 에너지 속도는 반사파의 이동거리( $2 \times L_r$ )와 반사파의 이동시간( $\Delta t$ )을 측정함으로써 간단하게 계산할 수 있다. 이동시간  $\Delta t$ 는 첫 번째 최대에너지와 두 번째 최대에너지 사이의 시간차  $\Delta t_{1,2}$ 이거나 두 번째 최대에너지와 세 번째 최대

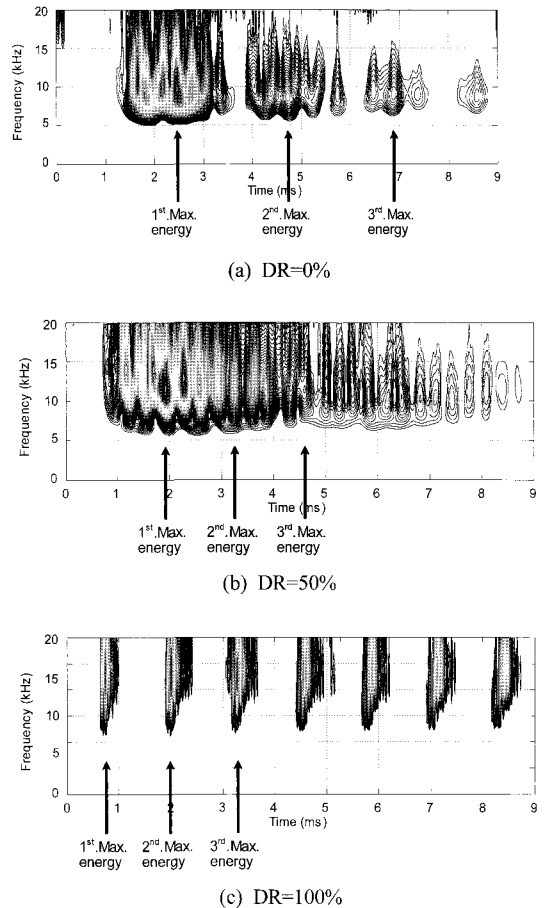


그림 12. 웨이브렛 변환 해석결과

에너지 사이의 시간차  $\Delta t_{2,3}$ 이다. 본 연구에서 반사파군의 이동시간을  $\Delta t_{1,2}$ 와  $\Delta t_{2,3}$ 의 평균으로 결정하였다. 위와 같은 방법으로 계산한 에너지 속도를 결합비율에 대하여 그림 13에 나타내었다.

에너지속도는 결합비율에 따라 포물선 모양으로 증가하는 것을 알 수 있으며, 결합비율이 0%에서 25%로 증가함에 따라 에너지속도는 2800 m/sec에서 4000 m/sec로 약 79%증가한다. 하지만, 결합비율이 50%에서 100%로 증가할 때의 에너지 속도는 4650 m/sec에서 4880 m/sec로 단지 230 m/sec 증가한다. 실제 현장에 시공된 록볼트의 결합비율은 25%미만인 경우가 대부분일 것으로 예상되는 바, 이와 같이 결합비율이 25%미만인 경우에 에너지 속도의 민감한 변화는 높은 현장 적용성을 갖는다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 록볼트의 건전도를 평가하기 위하여 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용하였다. 0%에서 100%까지 다른 공동결합비율을 가진 다섯 개의 록볼트 시험체를 콘크리트 블록에 설치하였다. 록볼트 선단부에 설치한 PZT 엘리먼트로 발생시킨 유도파는 록볼트를 통해 전파되어 AE 센서를 이용하여 록볼트 두부에서 측정하였다.

푸리에변환을 이용하여 얻은 스펙트럼 결과는 록볼트를 통해 전파된 유도파의 주파수가 저주파 대역(5~20 kHz)과 고주파 대역(30 kHz이상)의 두 종류의 지배 주파수 대역을 가지는 것으로 나타났다. 전체주파수대역에 대한 고주파수 대역의 면적비인 스펙트럼비가 공동결합비율이 증가함에 따라 증가하였다. 스펙트럼가 결합비율이 0%에서 25%로 증가함에 따라 약 48% 증가하였다.

가버 웨이브렛을 이용한 웨이브렛 변환은 시간-주파수 영역에서 웨이브렛 변환 계수를 contour map으로 표현되며, 각 파군에서의 극대값은 쉽게 찾을 수 있었다. 웨이브렛 변환 계수의 각 파군별 극대값을 이용하여 산정한 에너지 속도는 결합비율이 증가함에 따라 포물선의 형태로 증가한다. 결합비율이 0%에서 25%로 증가할 때 에너지 속도는 약 79% 증가하였다.

본 연구결과에 기초하여 터널 시공시 주지보재로 사

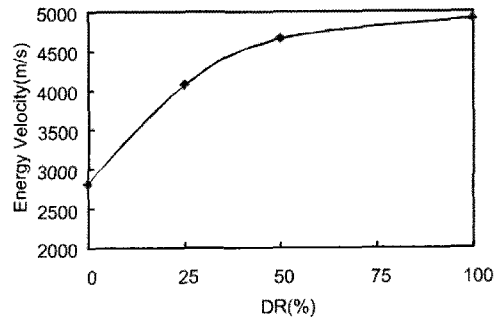


그림 13. 결합비율에 따른 에너지 속도

용되고 있는 록볼트의 건전도 평가 방법에 대한 적정성과 현장적용 가능성을 확인할 수 있었다. 현재는 보다 신뢰성 있고 현장 적용성이 높은 록볼트 건전도 평가 기술 연구를 위하여 실제현장시험 적용을 통한 지속적인 연구와 반사법을 이용한 실험방법 등의 연구를 진행 중에 있다.

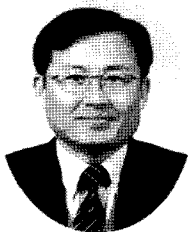
#### 감사의 글

본 연구는 고려대학교 특별과제 연구비(2단계 두뇌한국 21 대응)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Beard, M. D., Lowe, M. J. S., Cawley, P. (2003), "Ultrasonic guided waves for inspection of grouted tendon and bolts.", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 3, pp. 212-218.
2. Douka, E., Loutridis, S., Trochidis, A. (2003), "Crack identification in beams using wavelet analysis.", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 3557-3569.
3. Han, S. I., Lee, I. M., Lee, Y. J., Lee, J. S. (2006), "Integrity evaluation of rockbolts encapsulated by cement-mortar grouting using ultrasonic guided waves.", *Proc., 27th Symposium on Ultrasonic Electronic*, 27, Nagoya, pp. 177-178.
4. Hong, J. C., Kim, Y. Y. (2004), "Determination of the optimal Gabor wavelets shape for the best time-frequency localization using the entropy concept.", *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 4, pp. 387-395.
5. Inoue, H., Kishimoto, K., Shibuya, T. (1996), "Experimental wavelet analysis for flexural waves in beams.", *Experimental Mechanics*, Vol. 36, No. 3, pp. 212-217.

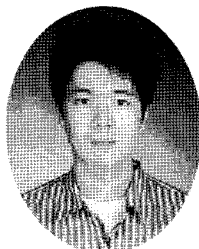
6. Jeong, H. J., Jang, Y. S. (2000), "Fracture source location in thin plates using the wavelet transform of dispersive waves.", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 47, No. 3, pp. 612-619.
7. Kim, H., Melhem, H. (2003), "Fourier and wavelet analyses for fatigue assessment of concrete beams.", Experimental Mechanics, Vol. 43, No. 2, pp. 131-140.
8. Kim, Y. Y. and Kim, E. H. (2001), "Effectiveness of the continuous wavelet transform in the analysis of some dispersive elastic waves.", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 110, No. 1, pp. 86-94.
9. Kishimoto, K., Inoue, H., Hamada, M., Shibuya, T. (1995), "Time-frequency analysis of dispersive waves by means of wavelet transform", Journal of Applied Mechanics, Vol. 62, pp. 841-846.
10. Kumar, P., Fofoula-Georgiou, E. (1994), "Wavelet analysis in geophysics: An introduction, Wavelet analysis and its application", Volumn 4 - Wavelets in Geophysics, Fofoula-Georgiou and Kumar eds., Academic Press. New York.
11. Lee, I. M., Bae, G. J., Lee, S. W., Lee, J. G. (2004), "Soundness evaluation of a tunnel concrete lining by using the hammer impact-induced sound wave.", Key Engineering Materials, Vol. 270-273, pp. 1500-1505.
12. Newland, D. E. (1993), "Harmonic wavelet analysis.", Proc., Mathematical and Physical Science, Vol. 443, No. 1917, pp. 203-225.
13. Onsay, T., Haddow, A.G. (1994), "Wavelet transform analysis of transient wave propagation in a dispersive medium.", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 95, No. 3, pp. 1441-1449.
14. Santamarina, J. C., Fratta, D. (2005), "Discrete signals and inverse problems: An introduction for engineers and scientists", Wiley, New York.
15. Sato, M. (1991), "Mathematical foundation of wavelets.", Journal of Acoustical Society of Japan, Vol. 47, No. 6, pp. 405-423 (in Japanese).
16. Thurner, H. F. (1988), "Boltometer-instrument for non-destructive testing of grouted rock bolts.", Proc., 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Sakurai(ed.), Rotterdam, pp. 135-143.
17. Wang, L. (2004), "Elastic wave propagation in composites and least-square damage location technique", MSc Thesis, North Carolina State University, NC.
18. Zhang, C. S., Zou, D. H., and Madenga, V. (2006), "Numerical simulation of wave propagation in grouted rock bolts and the effects of mesh density and wave frequency.", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, No. 4, pp. 634-639.



**이 인 모**

고려대학교 공과대학  
건축사회환경공학과  
교수

E-mail: inmolee@korea.ac.kr



**김 현 진**

고려대학교 공과대학  
건축사회환경공학과  
석사과정

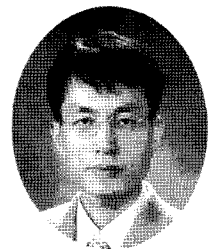
E-mail: hilggm@hotmail.com



**한 신 인**

고려대학교 공과대학  
건축사회환경공학과  
박사과정

E-mail: sihan@korea.ac.kr



**이 종 섭**

고려대학교 공과대학  
건축사회환경공학과  
조교수

E-mail: jongsub@korea.ac.kr