

# 유도파를 이용한 시간-주파수 영역 해석을 통한 록볼트 건전도 실험의 경암지반 현장 적용성 평가

## Rock Bolt Integrity Assessment in Time-Frequency Domain : In-situ Application at Hard Rock Site

이 인 모<sup>1</sup> Lee, In-Mo

한 신 인<sup>2</sup> Han, Shin-in

민 북 기<sup>3</sup> Min, Bok-ki

이 종 섭<sup>4</sup> Lee, Jong-Sub

### 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 structures. The purpose of this study is the evaluation of rock bolt integrity using wavelet transforms of the guided ultrasonic waves by using transmission test in the field. After several rock bolts with various defect ratios are embedded into a large scale concrete block and rock mass, guided waves are generated by a piezo disk element and measured by an acoustic emission (AE) sensor. The captured signals are analyzed in the time-frequency domain using the wavelet transform based on a Gabor wavelet. 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 an increase in the defect ratio. The suitable curing time for the energy velocity analysis is proposed by the laboratory test, and in-situ tests are performed in two tunnelling sites to verify the applicability of rock bolt integrity tests performed after proposed curing time. This study proves that time-frequency domain analysis is an effective tool for the evaluation of the rock bolt integrity.

### 요 지

록볼트는 터널과 지하공간 구조물의 시공에 있어서 주요 지보재 중 하나이며, 이러한 록볼트의 건전도가 전체 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 되었다. 본 연구의 목적은 실제 현장에서 투과법을 적용하여 록볼트를 따라 전파되는 유도파를 통해 록볼트의 건전도를 평가하는 것이다. 비파괴 실험의 각기 다른 결함비율을 가진 록볼트 시험체를 제작하여 콘크리트 블록 및 실제현장에 매설한 후, 피에조 디스크 엘리먼트로 유도파를 발생시키고 AE(acoustic emission) 센서를 이용하여 신호를 측정하였다. 수집된 신호는 가버 웨이브렛을 사용한 웨이브렛 변환을 이용하여 시간-주파수 영역에서 분석하였다. 시간-주파수 영역에서의 각 파군별 최대 에너지가 나타나는 지점의 시간차는 각 반사파군 간의 이동 시간차를 나타내며, 이를 통해 계산된 유도파의 에너지 속도는 록볼트의 결함비율이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 실험에 적합한 양생기간을 제안하였으며 그에 따른 두 번의 현장 실험을 통해 록볼트 건전도 실험의 현장 적용성을 검토하였고, 제안된 실험방법이 록볼트의 건전도 평가에 있어서 유용한 평가방안임을 확인하였다.

**Keywords :** Curing time, Defect ratio, Energy velocity, Time-frequency domain, Wavelet transform

1 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수 (Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., inmolee@korea.ac.kr, 교신저자)

2 (주)서영엔지니어링 지반터널설계실, 공학박사 (Ph. D. Geotechnical & Tunneling Division, Seoyoung Engrg. Co. Ltd.)

3 (주)현대건설 터널환경사업본부 설계부분, 공학석사 (Hyundai Engrg. and Construction Co. Ltd.)

4 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

국내의 지하공간 건설기술은 1980년대 본격적으로 시작되어 현재까지 많은 발전이 있었다. 현재 국내의 지하공간의 개발의 대부분을 차지하는 터널의 시공 시, 록볼트는 슛크리트와 함께 주요 지보재로서 사용되고 있으며, 전통적으로 이러한 록볼트의 품질확인을 위해 록볼트 인발 실험을 일상계측 항목의 하나로 설정하여 시행하도록 규정되어있다. 그러나 이러한 인발 실험의 경우 많은 시간과 예산이 소요되며, 실험 시 록볼트가 파괴될 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서 록볼트의 시공 품질확인 및 확보기술 개발에 대하여 현장에서의 사용이 간편하고 신뢰성이 높은 새로운 비파괴 장비와 시스템 개발이 지하공간 건설사업에서 필수적인 과제라 할 수 있다.

최근 진행된 비파괴 조사방법 중 가장 일반적인 것은 암석이나 콘크리트에 둘러싸인 록볼트나 그라우팅된 tendon에 대한 것이 대부분이었다(Thurner 1988, Beard 등 2003, Han 등 2006, Zhang 등 2006). 시간영역에서의 신호분석을 이용하여 강봉의 결함을 측정하거나(Beard 등 2003), 그라우팅의 구속조건 변화에 따른 록볼트에서의 유도파의 속도와 진폭을 비교하였고(Zhang 등 2006), Han 등(2006)은 시간영역에서의 신호를 분석하여 그라우팅 충전 길이별로 파속도를 정확하게 계산해 내었다. 그러나 시간영역에서 표현되는 신호는 주파수 영역이나 시간-주파수 영역과 같은 다른 영역에서도 구현될 수 있으며, 특히 웨이브렛 변환을 통한 시간-주파수 영역에서의 해석은 분산성이 있는 신호의 분석에 있어서 적절한 방법이기 때문에 건전도 평가에 널리 적용되고 있다. Han 등(2007)은 투과법을 통해 그라우팅 충전 길이별 에너지 속도의 변화를 계산하고 그에 따라 록볼트의 건전도를 평가하는 연구를 수행하였다.

본 연구의 목적은 록볼트의 건전도 평가 기법의 실제 현장에서의 적용 가능성 파악에 있다. 따라서 본 논문은 웨이브렛 변환 기법에 대한 검토 및 실제현장에서 시공한 록볼트 시험체에 대하여 투과법을 적용하고, 측정된 신호에 대해 웨이브렛 변환을 이용한 분석을 수행하였다.

## 2. 웨이브렛 변환

일반적으로 신호처리에서 사용되는 푸리에 변환의 경우에는 시간영역의 특성을 반영할 수 없다. 이러한 시간영역에서 측정된 신호  $f(t)$ 의 시간-주파수의 특성들은

웨이브렛 변환에 의해 구별될 수 있다. 신호  $f(t)$ 의 웨이브렛 변환은 다음 식 (1)과 같다.

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

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

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{t}}\psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (2)$$

여기서,  $f(t)$ 는 시간 영역에서의 신호이며 함수  $\psi(t)$ 는 모(또는 기저) 웨이브렛 함수이고,  $\overline{\psi(t)}$ 는  $\psi(t)$ 의 복소공액이다.  $u$ 와  $s$ 는 이동 및 스케일 파라미터이다.

높은 스케일은 저주파수에 대응하고, 낮은 스케일은 고주파수에 대응하므로 웨이브렛 변환은 고주파수에서는 압축되고 저주파에서는 팽창하는 유연한 시간-스케일 창을 제공한다. 따라서, 모웨이브렛의 스케일이 변화하고 이동하기 때문에 신호와 모웨이브렛 함수 사이의 유사성이 다음 그림 1과 같이 나타난다.

웨이브렛 변환 계수는 선택된 스케일에서의 모웨이브렛 함수에 대한 신호의 유사성을 나타낸다. 본 연구에서는 시간-주파수 해상도가 가장 좋다고 알려진 가버 웨이브렛을 채택하였다(Inoue 등 1996). 가버 웨이브렛  $\psi_g(t)$ 는 가우시안 함수(Gaussian function)로 창문화되었으며, 다음 식 (3)과 같다(Sato 1991; Inoue 등 1996).

$$\psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (3)$$

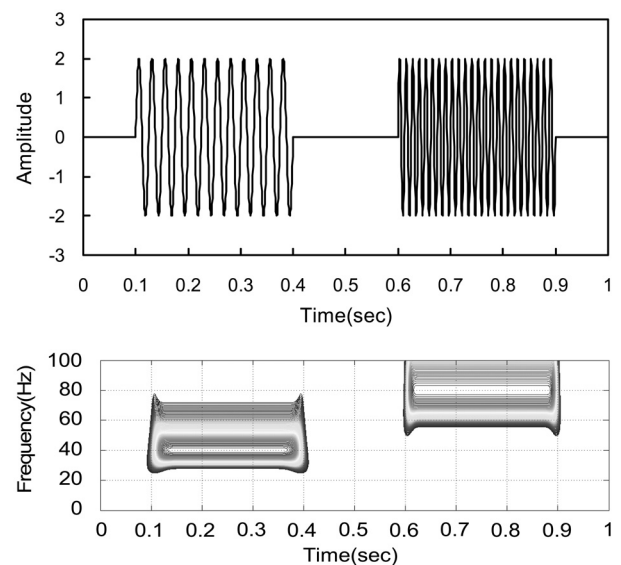


그림 1. 시간-주파수 영역에서의 변환결과

또한, 가버 웨이브렛의 푸리에 변환  $\Psi_g(\omega)$ 은 다음 식 (4)와 같이 나타낸다.

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

여기서,  $\omega_0$ 와  $\gamma$ 는 양의 상수이다.

가버 웨이브렛(식 (3))은 중심이  $t=0$ 인 가우시안 창 함수이며 그것의 푸리에 변환식(식 (4))의 경우 중심 주파수가  $\omega_0$ 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  $\omega = \omega_0/s$  주위에서의 신호  $f(t)$ 의 시간-주파수 성분을 나타낸다.

시간영역에서 신호  $f(t)$ 와 모웨이브렛 함수  $\psi(t)$ 의 상호 상관인 웨이브렛 변환은  $\psi(t)$ 와  $f(t)$ 의 tail-reversed version의 합성적과 같다. 그러므로, 웨이브렛 변환은 주파수 영역에서 주파수 위치별로 곱함으로써 효과적으로 계산된다. 따라서, 식 (1)은 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$WT(u,s) = \frac{\sqrt{s}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \overline{\Psi(s\omega)} \exp(iu\omega) d\omega \quad (5)$$

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 (6)와 같다(Jeong and Jang 2000; Wang 2004).

$$V_g = \frac{L}{u} \quad (6)$$

여기서,  $u$ 와  $L$ 은 각각 웨이브렛 변환의 극대값에 대응하는 이동 파라미터와 이동거리이다. 시간 간격  $u$ 는 파군의 시간 간격이고  $L$ 은 각 파군이 진행한 거리이다. 그러므로, 식 (6)은  $|WT(u,s)|$ 의 값의 분포상에서 가장 높은 위치는 주파수  $\omega_c = \omega_0/s$ 에서의 군속도 ( $V_g$ )의 이동시간을 의미한다.

### 3. 투과법을 이용한 실내실험

#### 3.1 장비구성 및 실험방법

유도파를 발생시키기 위하여 피에조 디스크 엘리먼트(Kang-seo EST, BPE-20C)를 록볼트 선단부에 부착하여 실험하였으며, 실험에 사용한 감지기는 AE센서(Physical

Acoustics, A3)이다. 센서를 록볼트 두부에 나사로 고정하였기 때문에, 피에조 디스크 엘리먼트의 진동 방향과 AE 센서는 서로 평행하며 록볼트의 단면과는 수직을 이룬다.

감지기의 선택에 있어서 록볼트 시스템의 경우 L1 mode에서 주파수 범위가 20~70kHz일 때 최대 에너지 속도가 나타난다는 본 연구진의 분산성 분석을 이용한 최근 연구에 근거를 두었다(Han 등 2007). L1 mode는 파가 발생되어 전파되는 형태 중 길이 방향으로 전파되는 특성을 지닌 첫 번째 파를 의미한다.

록볼트 시험체는 길이 3.1m, 직경 25.4mm의 실제 현장에서 사용되는 록볼트 철근을 이용하였으며, 결함비율이 각각 다른 다섯 종류로 제작하였다. 이러한 결함비율(Defect Ratio)을 DR(%)로 정의하였으며, 전체 록볼트 철근의 길이( $L_T$ )와 그라우팅이 되지 않은 부분의 길이( $L_S$ )의 비율로 나타내었다. DR(%)은 다음 그림 2에서 확인할 수 있으며 식 (7)과 같이 정의한다.

$$DR(\%) = \frac{L_S}{L_T} \times 100 \quad (7)$$

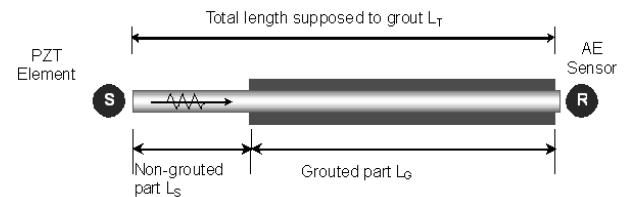


그림 2. 실험 장비 구성

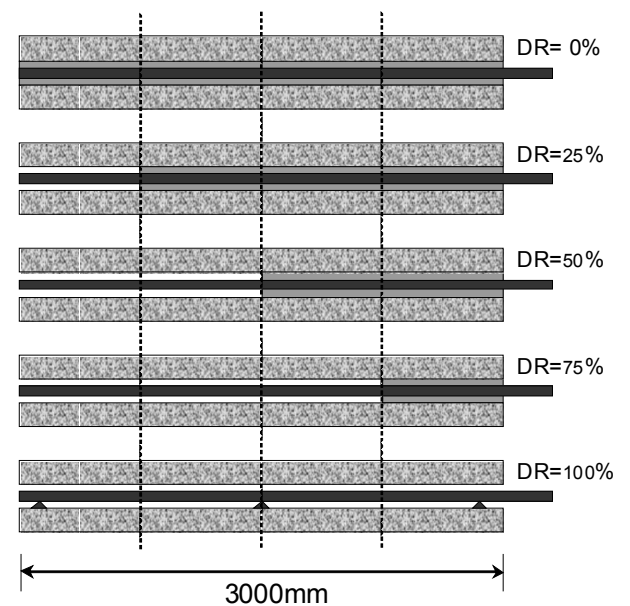


그림 3. DR(%)별 시공체 상세도

록볼트 시험체의 그라우팅은 시멘트, 모래, 물의 중량 비 1:1:0.4인 시멘트 모르타르를 사용하였다. 록볼트 철근을 둘러싸고 있는 그라우팅의 직경은 실제 록볼트 시공시 사용되는 천공경인 38mm로 제작하였으며 제작한 록볼트 시험체를 실제 현장의 지중 암반을 모사한 콘크리트 블록에 그림 2와 같이 매설하였다. 콘크리트 블록은 길이 3.0m, 높이 0.8m, 폭 0.9m의 크기로 제작하였다. 그림 3에서는 실험장비 구성에 대한 간략한 개요도가 나타나 있다.

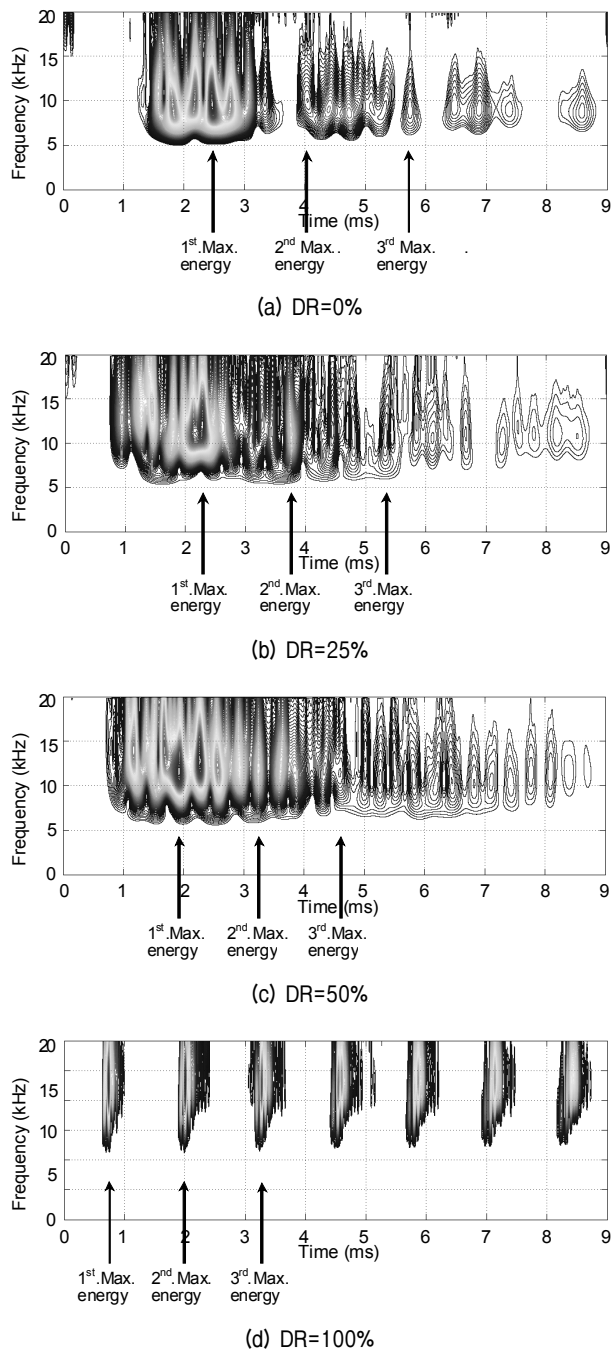


그림 4. 실내실험 웨이브렛 변환 결과

### 3.2 지중모사 실험결과 및 분석

그림 4에 유도파의 저주파대역에 대한 웨이브렛 변환 결과를 나타내었다. 웨이브렛 변환의 3차원 결과를 웨이브렛 계수의 분포에 따른 등고선으로 나타내었으며, 도시된 등고선은 철근 및 그라우팅과 콘크리트 블록으로 구성된 록볼트 모사 시험체의 지배 주파수 대역(5~20kHz)에서의 연속된 반사파를 나타내는 파군을 명확하게 보여준다.

그림 4에 나타난 첫 번째, 두 번째, 세 번째 최대 에너지는 상대적으로 첫 번째, 두 번째, 세 번째 파군의 최대 에너지 지점을 나타낸다. 에너지 속도는 반사파의 이동거리( $2 \times L_T$ )와 반사파의 이동시간( $\Delta t$ )을 측정함으로써 간단하게 계산할 수 있다.

이동시간  $\Delta t$ 는 각 최대에너지 사이의 시간차이다. 본 연구에서는 반사파군의 이동시간을 최대 에너지 사이의 시간차이 값의 평균치를 적용하였다. 위와 같은 방법으로 계산한 에너지 속도를 결함비율에 대하여 그림 5에 나타내었다.

Defect Ratio의 증가는 철근 공동부 길이의 증가를 의미하므로 공동부 비율이 클수록 파의 전파속도가 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 충전재에 의한 유도파의 굴절 또는 반사가 적게 일어난다는 것을 의미한다. 또한 Defect Ratio=100% 일때는 철근의 자유 구속상태를 나타내며 이때의 에너지속도는 약 5000m/s 이고 이 값은 순수 록볼트의 에너지속도 상한값이 된다.

### 3.3 양생기간 진행의 영향 분석 및 결과

결함비율에 따른 에너지 속도의 계산 이외에도 그라

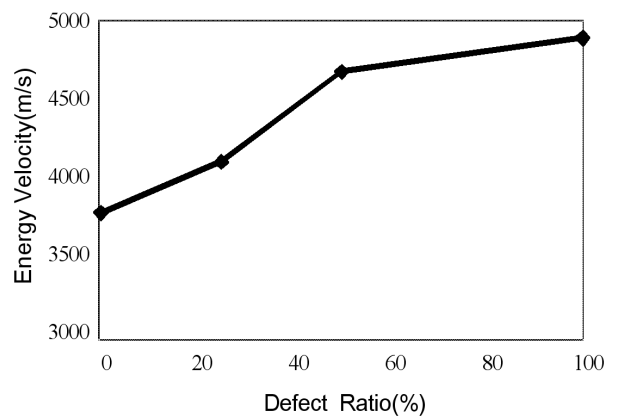
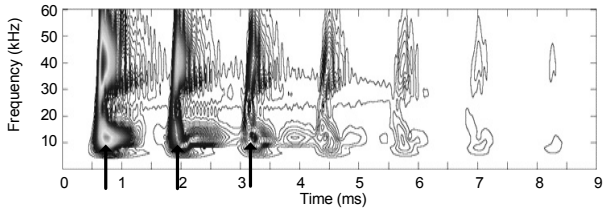
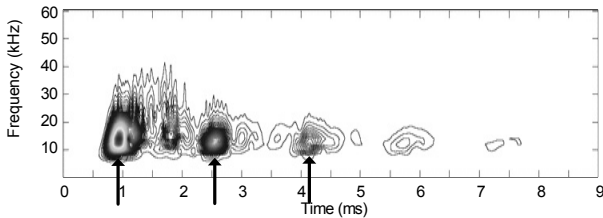


그림 5. 결함비율에 따른 에너지 속도

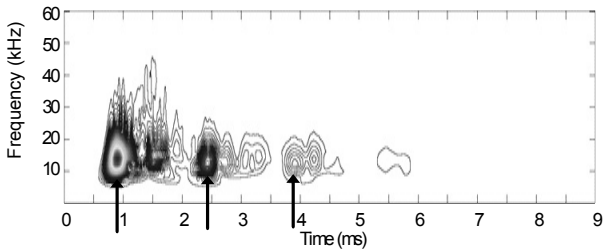
우팅 양생기간에 따른 에너지 속도의 변화를 계산하기 위하여 실험을 수행하였다. DR=0%인 3.1m의 록볼트를 통해 양생기간의 경과에 따른 에너지 속도의 변화를 계산하였으며, 그라우팅 재료는 시멘트밀크(w/c=50%)를 사용하였다. 양생기간의 진행에 따른 데이터의 웨이브렛 분석 결과는 다음 그림 6에 나타내었다. 각 그림은 시간-주파수영역 해석을 수행한 결과를 웨이브렛 계수



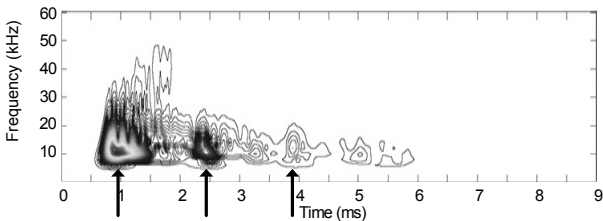
(a) 1시간 경과



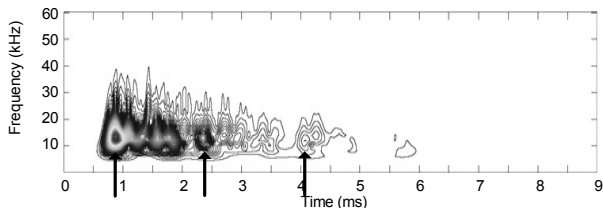
(b) 2일 경과



(c) 5일 경과



(d) 7일 경과



(e) 14일 경과

그림 6. 양생기간에 따른 웨이브렛 변환 결과

분포의 등고선 형태로 나타낸 것이다.

양생초기(약 2일정도)에는 그라우팅 재료 사이의 상호반응으로 인해 속도분포가 불규칙하게 나타나는 것으로 여겨지며, 시간이 흐른 뒤 약 5일이 경과된 이후부터는 양생기간이 경과함에 따라 에너지 속도가 감소하는 경향이 나타났다. 그림 7을 통해 양생기간의 진행에 따른 에너지 속도 분포를 나타내었으며, 양생이 7일 경과 후에 에너지 속도의 변화경향이 매우 작아지고, 14일이 경과된 이후에는 에너지 속도가 변화하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실제 현장에 투과법을 통한 록볼트 건전도 평가 시에는 약 7일 이후에 시행을 하는 것이 적합한 것으로 판단되었으며, 양생기간의 진행에 따른 그라우팅의 강도 증진이 에너지 속도를 감소시키는 요인임을 확인하였다.

## 4. 현장 실험 결과 및 분석

### 4.1 현장실험 결과 및 분석

1차 현장실험은 본 연구에서 제안된 실험 장비의 현장 적합성 판단 및 록볼트 비파괴 건전도 평가 시스템의 현장 적용성 예측을 위하여 수행되었다. 판교부근의 고속도로 현장에서 경암층인 암반사면에 그림 8과 같이 록볼트 시험체를 시공하였다.

취득한 유도파에 대한 웨이브렛 변환 결과를 다음 그림 9에 나타내었다. 도시된 등고선은 웨이브렛 계수의 분포로서, 주파수 대역 약 20kHz~35kHz에서의 연속된 반사파를 명확히 보여준다. 또한 분석한 데이터는 시공 후 19일이 경과된 시점에서의 결과이므로 그라우팅 양생에 의한 영향은 받지 않는 것으로 판단되었다. 또한

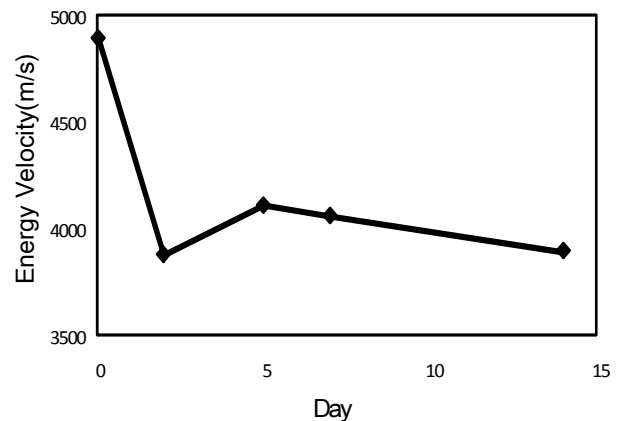


그림 7. 양생기간에 따른 에너지 속도

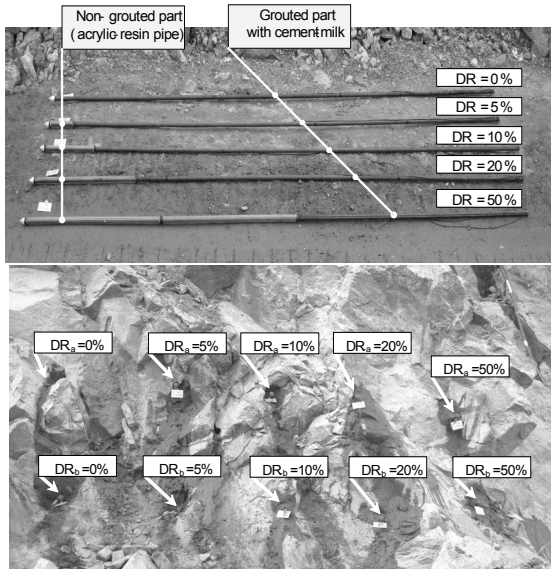


그림 8. 1차 현장실험 시공사진

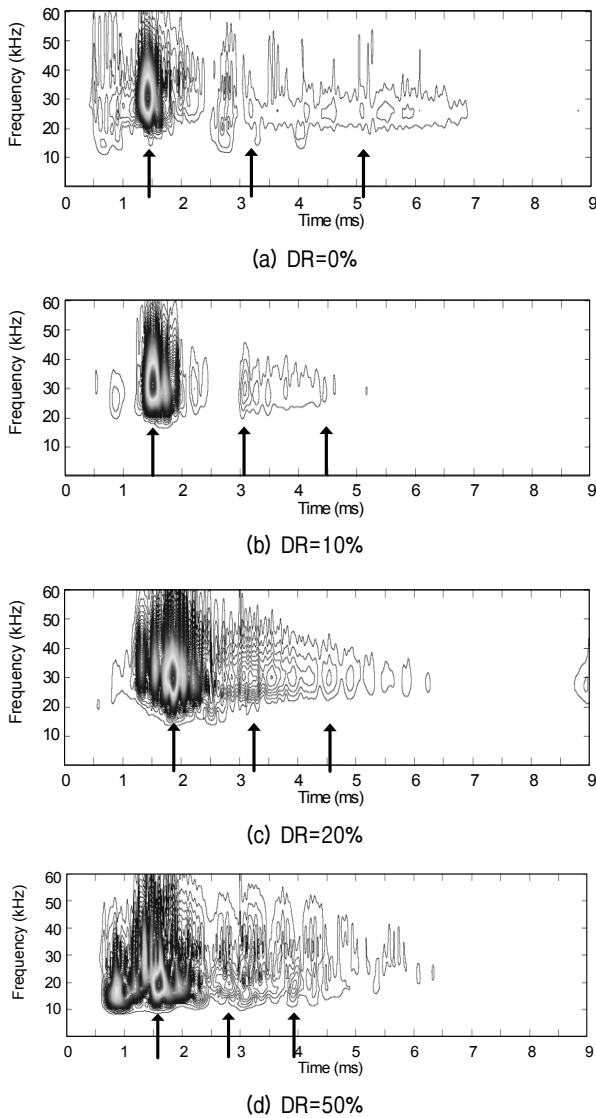


그림 9. 1차 현장실험 웨이블릿 분석결과

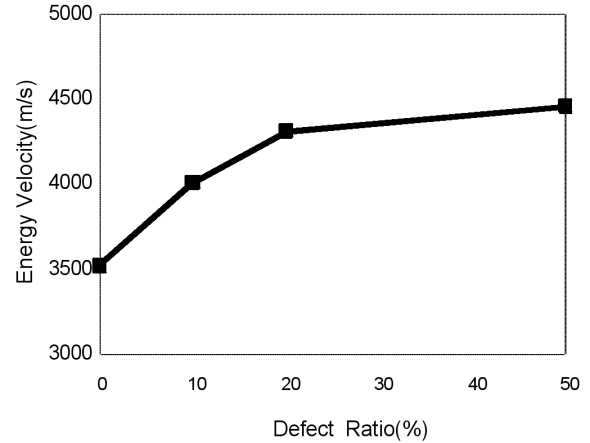


그림 10. 1차 현장실험 에너지속도 분포

록볼트 철근의 공동비율이 증가할수록 에너지 최대값 사이의 시간간격이 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 에너지 속도가 감소하는 것을 알 수 있으며 그 경향은 다음 그림 10과 같이 나타난다.

#### 4.2 2차 현장실험 결과 및 분석

2차 현장실험은 실내실험 및 1차 현장실험과의 결과 비교를 통해 록볼트 비파괴 시험의 비교 및 실용성에 대한 판단을 하기 위해 시행되었다. 수원부근의 고속도로 현장에서 경암층인 터널내부에서 시행하였으며, DR(%)의 현실성을 고려하기 위해 DR=50%를 DR=33%로 교체하여 수행하였다.

취득한 유도파에 대한 웨이블릿 변환 결과를 다음 그림 11에 나타내었다. 도시된 등고선은 주파수 대역 약 10kHz~25kHz에서의 연속된 반사파를 명확히 보여준다. 또한 양생기간에 대한 영향을 받지 않기 위해 시험체 제작 후 14일 후에 데이터를 취득하였다. 1차 현장실험과 마찬가지로 DR(%)의 증가에 따라서 에너지 최대값 사이의 간격이 줄어들고 있음을 확인할 수 있으며, 2차 현장실험에서의 에너지 속도의 분포는 그림 12와 같이 나타난다.

실내실험의 경우 시멘트와 잔골재 그리고 물을 중량비 1:1:0.4로 혼합하여 D25 이형철근에 그라우팅 하였다. 록볼트의 암반 근입을 모사하기 위해 그라우팅된 록볼트 실험체에 호칭강도 21MPa의 콘크리트를 타설하였다. 철근을 포함한 그라우팅된 록볼트 실험체의 직경은 38mm이며, 콘크리트 원주체의 직경은 150mm이다. 또한 현장실험의 경우 1차 실험현장의 암석강도가 36.3

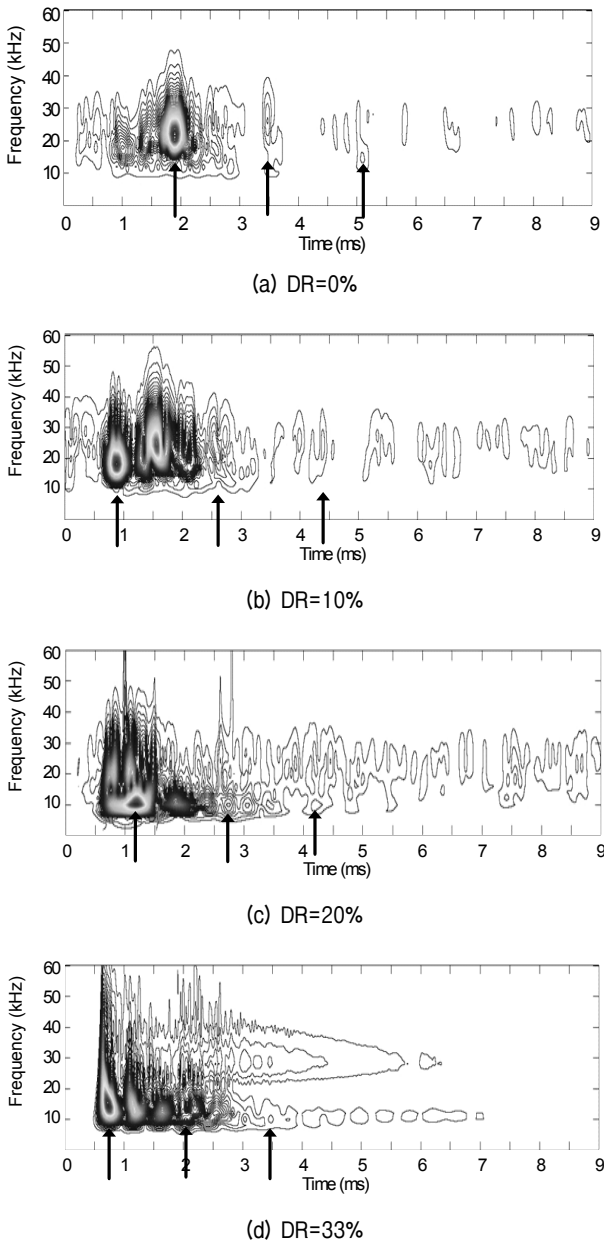


그림 11. 2차 현장실험 웨이블릿 분석결과

~140.2MPa인 경압층이었으며 2차 실험현장의 경우 암석강도가 39.7~180.0MPa인 경압층에 그라우팅 직경은 45mm이었다.

주목할 만한 사항은 경압층에서 실시한 두 현장실험의 경우 에너지속도의 분포가 거의 유사하게 나타났으며, 강도가 약한 실내실험의 경우 에너지속도가 현장실험의 경우보다 높게 측정되었다. 따라서 암반의 강도의 증가에 따라 에너지속도가 감소하는 것을 파악할 수 있다. 하지만 속도 분석의 결과를 보면 대상암반의 강도보다는 공동부의 크기의 차이가 더 주요한 영향인자임을 판단할 수 있다. 그림 13에서 실내 및 현장 실험에 대한

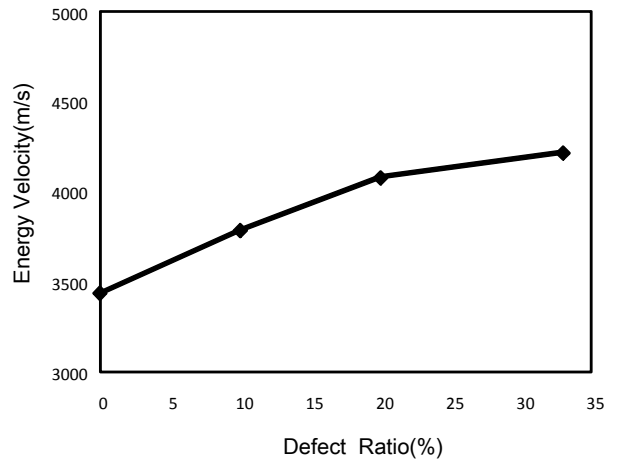


그림 12. 2차 현장실험 에너지속도 분포

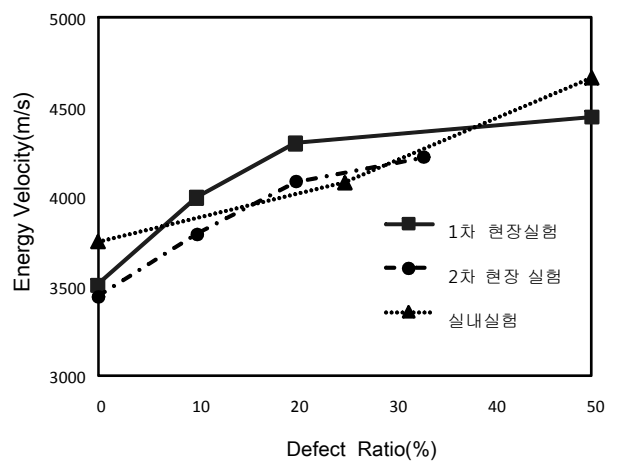


그림 13. 실내 및 현장실험 에너지 속도분포

에너지 속도 분포를 도시하였으며, 실내실험 및 현장실험에서의 에너지 속도 분포의 경향을 확인할 수 있다.

전체결과를 분석하면, 실내 및 현장 실험의 에너지 속도는 DR(%)의 변화에 따라 약 3500m/s~4500m/s 사이에 분포하는 것으로 판단되었으며, 특히 DR(%)이 20% 이하일 때 에너지 속도가 민감하게 변화하였다. 실제 현장에서 시공된 록볼트의 경우 DR(%)이 20%이하인 경우가 대부분일 것으로 예상되므로, 경압층을 대상으로 하는 록볼트 시공현장에서의 적용성이 우수할 것으로 판단된다.

또한 에너지 속도의 분포 경향이 양생시의 평균온도 및 습도가 같다고 가정하였으므로 그라우팅의 양생 후 강도는 유사할 것이며, 그에 따라 DR(%)의 변화와 대상 지반의 강도가 에너지 속도를 결정하는 주요 인자로 판단되었다. 그러나 위의 그림에서 보여지는 것처럼, 지반을 콘크리트로 모사한 실내실험과 경압층에 시공을 실

시한 실제 현장에서의 에너지 속도 분포가 유사한 것을 확인할 수 있다. 따라서 시공 대상 지반의 강도차이 보다는 DR(%)의 변화가 에너지 속도를 결정짓는 주요인자라고 판단할 수 있다. 이외에도 공동부의 비율은 같으나 공동부가 연결되지 않은 경우에 대한 연구와 연암이나 토사등을 대상으로 하는 에너지속도 분석 등이 추가적인 연구과제가 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 투과법을 이용한 록볼트 건전도 평가 방법의 현장 적용성을 검토하였다. 록볼트 선단부에 설치한 피에조 디스크 엘리먼트로 발생시킨 유도파는 록볼트를 통해 전파되어 AE 센서를 이용하여 록볼트 두부에서 측정하였으며, 여러 종류의 결합비율을 가진 록볼트 시험체를 콘크리트 블록 및 실제 현장에 설치하여 실험을 수행하였다.

실내 실험을 통하여 공동 결합 비율에 따라 에너지 속도가 변화하고, 양생기간이 경과함에 따라 에너지 속도가 감소하는 것을 파악하였다. 또한 양생 후 7일 이후에는 에너지 속도의 변화가 잘 발생하지 않으며, 14일 이후에는 변화가 일어나지 않음을 확인하였다.

두 번의 현장 실험을 통해 실내실험에서 분석한 결과들을 확인할 수 있었으며, 대상 지반의 종류보다는 공동 비율의 변화가 에너지 속도에 더 큰 영향을 미치는 것을 파악하였다. 또한 제안된 실험방법이 20% 이하의 낮은 공동비율에서 에너지 속도와 민감하게 반응하므로 현장에서의 적용성이 우수한 것으로 판단되었다.

본 연구에 기초하여 터널 시공시 주시보재로 사용되고 있는 록볼트의 건전도 평가 방법에 대한 현장 적용성을 확인할 수 있었다. 이 후 록볼트 인발 실험 데이터와의 비교 분석을 통해 실제 현장에 적용할 데이터 베이스의 구축이 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로, 본 연구에서 제안된 실험에서 사용되는 모든 장비는 전기를 사용하므로 합선이나 감전 등의 안전사고에 항상 유의하여야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)포스코건설 “록볼트 비파괴 시스템의 실용화를 위한 현장시험” 용역의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Beard, M. D. and Lowe, M. J. S. (2003), “Non-destructive testing of rock bolts using guided ultrasonic guided waves”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.40, pp. 527-536.
2. Beard, M. D., Lowe, M. J. S., and 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.
3. Han, S. I., Lee, I. M., Lee, Y. J., and 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, 177-178.
4. Han, S. I., Lee, J. S., Min, B. K., Yu, J.D., Lee, Y.J., and Lee, I. M. (2007), “Non-destructive evaluation for rock bolt integrity using time-frequency analysis of guided ultrasonic dispersive waves”, *Proc., International symposium on tunnelling for urban development*, Pattaya, Thailand, 439-448.
5. Inoue, H., Kishimoto, K., and Shibuya, T. (1996), “Experimental wavelet analysis for flexural waves in beams”, *Experimental Mechanics*, Vol.36, No.3, pp.212-217.
6. Jeong, H. J. and 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. Sato, M. (1991), “Mathematical foundation of wavelets”, *Journal of Acoustical Society of Japan*, Vol.47, No.6, pp.405-423 (in Japanese).
8. 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.
9. Wang, L. (2004), “Elastic wave propagation in composites and least-square damage location technique”, MSc Thesis, North Carolina State University, NC.
10. 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.

(접수일자 2009. 3. 11, 심사완료일 2009. 12. 10)