

## 유도초음파의 반사법과 투과법 비교를 통한 록볼트 건전도 평가 Rock bolt integrity evaluation using reflected and transmitted guided ultrasonic waves

이종섭<sup>1)</sup>, Jong-Sub Lee, 유정동<sup>2)</sup>, Jung-Doung Yu, 한신인<sup>3)</sup>, Shin-In Han, 배명호<sup>4)</sup>, Myeong-Ho Bae, 이인모<sup>5)</sup>, In-Mo Lee

- 1) 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 2) 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 3) (주)서영엔지니어링 지반터널설계실, 공학박사, Ph.D., Geotechnical & Tunneling Division, Seoyeong Engineering Co. Ltd.
- 4) 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
- 5) 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수, Professor, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University.

**SYNOPSIS** : To evaluate rock bolt integrity, destructive test such as pull-out test has been commonly carried out. This method is known as time consuming, expensive, and inaccurate procedure. To improve destructive method, non-destructive techniques using transmitted guided ultrasonic waves were suggested. Note for the transmission method, the source for the generation of ultrasonic waves should be installed during the rock bolt construction. The purpose of this study is to investigate the reflection method using reflected guided ultrasonic waves to evaluate the integrity of the rock bolt grouted, and to compare the results evaluated by the reflection and transmission methods. The guided waves are generated by PZT element and received by AE sensor. The measured signals are analyzed by the wavelet transform. The results show that the energy velocities of guided ultrasonic waves increase with the defect ratio in both transmission and reflection method. The reflection method produces the lower velocity in all defect ratio. This research demonstrates that the reflection method may be suitable and easier method for the field tests.

Key words: Guided ultrasonic waves, Reflection method, Rock bolts, Transmission method, Wavelet transform

### 1. 서 론

한정된 국토에 반해 인구와 기반시설의 요구량이 증가함에 따라 지하공간 활용의 중요성은 더욱 커지고 있으며, 증가하는 교통량의 원활한 소통과 효율적인 분배 및 구조물 건설 시 초래되는 생태계 파괴를 최소화하기 위한 대안으로써 터널이 큰 비중을 차지하고 있다. 널리 적용되고 있는 터널 건설 공법으로 록볼트와 슛크리트를 주 지보재로 사용하는 NATM 공법이 있으며, 록볼트만을 주 지보재로 사용하는 Single-Shell 공법 개념을 도입하려는 추세도 보이고 있다. 일반적으로 록볼트 시공시 천공된 터널 천정부부를 그라우팅재로 충전할 경우, 중력으로 인해 그라우팅이 흘러내릴 수 있다. 이는 록볼트의

건전도에 직접적인 영향을 주며 터널의 안정성에 부정적인 조건을 안겨준다.

그동안 록볼트의 구조적 결함 여부를 조사하기 위한 방법으로 인장시험이 실시되어 왔다. 하지만 록볼트에 직접적으로 외력이 전달되는 인장시험의 경우 그 방법에 있어서 많은 시간과 노동력을 필요로 하며 작업 또한 용이하지 않다는 단점이 있다. 최근에는 장석재 등(2006)에 의해 록볼트 인발시험 도해 방법이 지반의 특성이 고려되지 않았다는 점과, 발주기관별 시방기준 또한 명확하지 않은 부분에 대한 연구가 이루어지기도 했다. 이러한 문제점들을 개선하기 위한 대안으로 비파괴 조사 기법을 이용한 사례가 최근 발표되고 있다. 김현배 등(2005)은 가속도계와 해머의 타격(hammer impact)를 이용하여 그라우팅의 유무에 따른 전달된 파의 감쇠특성을 발표하였으며, 한신인 등(2006)은 그라우팅된 철근의 공동결함비율에 따른 수진된 파의 초동속도를 측정하는 실내실험을 실시하였다. 이인모 등(2007)은 신호 분석을 위하여 웨이브렛 변환 기법을 적용하여 철근의 그라우팅 정도에 따른 에너지 속도 변화를 제시하여 초기 도달 시간 산정에 어려움이 있었던 기존의 기법을 개선하였다. 하지만 지금까지 시행되었던 비파괴 조사기법들은 철근 두부에서 가진된 파를 반대쪽 선단에서 수진하는 투과법으로 전개되었다. 따라서 센서와 함께 관입되지 않은 록볼트나 이미 시공된 록볼트에 대해서는 평가가 불가능하기 때문에 새로운 방법의 모색이 요구되어왔다.

본 연구에서는 철근 선단으로부터 반사된 유도초음파의 웨이브렛 변환 해석을 통해 록볼트의 건전도를 평가하고, 이를 투과법을 통해 얻은 결과와 비교함으로써 반사법의 현장적용 가능성을 제시하고자 한다. 본 논문은 웨이브렛 변환의 이론적 접근, 실험구성과 측정방법, 실험방법, 웨이브렛 변환을 이용한 해석 결과, 그리고 마지막으로 결론으로 구성되었다.

## 2. 웨이브렛 변환

푸리에 변환은 시간의 함수와 주파수의 함수를 서로 변환할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 시간에 따른 주파수나 그 역의 상황을 파악할 수 없는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위한 방법으로 국소 푸리에 변환이 도입되었다. 국소 푸리에 변환은 푸리에 함수에 시간에 의존하는 가중함수를 적용하여 시간의 변화에 따른 주파수 정보를 나타내며, 가중함수로 가우시안 함수를 이용한 것을 가보 변환이라고 한다. 하지만 가보 변환은 주파수 영역과는 독립적인 가중함수를 사용한다. 따라서 신호가 시간에 따라 변화하는 주파수를 가지고 있을 경우 여러 개의 가중함수를 이용해야한다는 점에서 효율적인 분석이 어렵다는 단점이 있다.

웨이브렛은 주파수의 변화에 따라 그 크기가 함께 변하기 때문에 웨이브렛 변환을 통한 신호 분석이 유용하다고 할 수 있다. 즉, 웨이브렛 변환은 멀티스케일의 특성을 지닌 신호에 대해 여러개의 창함수를 이용한 푸리에 변환을 해야하는 번거로움을 해소하여 한 번의 연산으로 신호가 포함하고 있는 모든 스케일 성분을 하나의 공간에 표현한다. 웨이브렛 변환은 모 웨이브렛을 이용해서 연속 웨이브렛 변환이 다음 식 (1)과 식 (2)로 정의된다(Grossman and Morlet, 1984; Daubechies, 1988).

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

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

여기서  $f(t)$ 는 원신호(original signal)이다. 함수  $\psi(t)$ 는 모 웨이브렛 또는 기저 웨이브렛 함수(Mother or base wavelet function)이며 \*는 복소 공액(complex conjugate)을 나타낸다.  $u$ 는 전이 파라미터(translation parameter)로 그림 1과 같이 모 웨이브렛 함수를 시간축을 따라 좌우로 이동하는 위치에 관한 정보를 제공한다.  $s$ 는 스케일 파라미터(Scaling Parameter)로 그림 2와 같이 압축과 팽창에 의한 모 웨이브렛 함수의 폭에 관한 정보를 제공한다. 스케일 파라미터가 큰 저주파 영역에서는 웨이브렛의

크기가 증가하며 반대로 스케일 파라미터가 작은 고주파 영역에서는 웨이브렛의 크기가 감소한다. 이로 인해 한번의 연산으로 멀티 스케일 신호에 대한 분석이 가능하다.

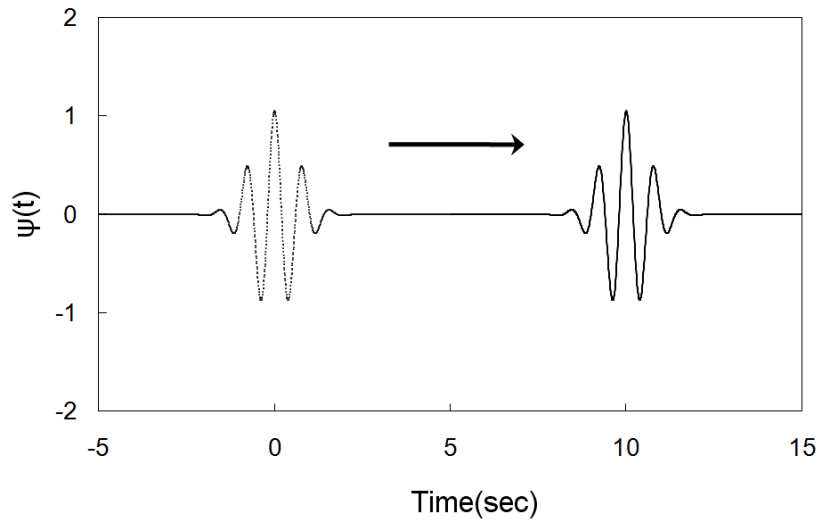


그림 1. Translation Parameter

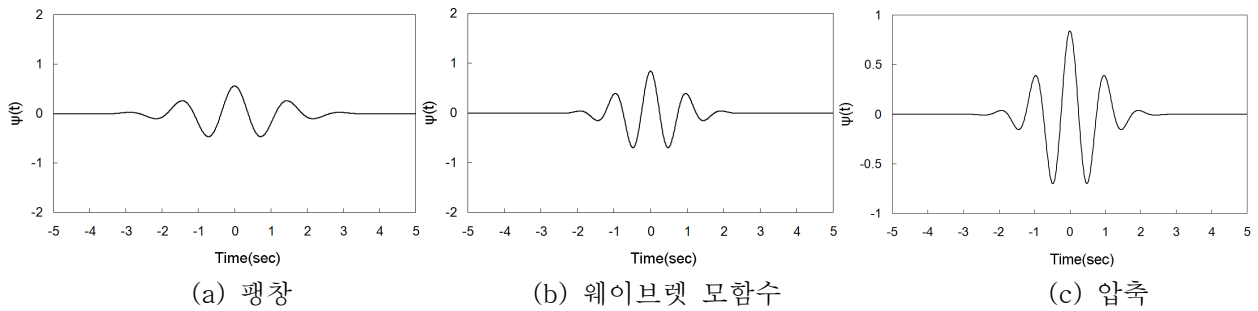
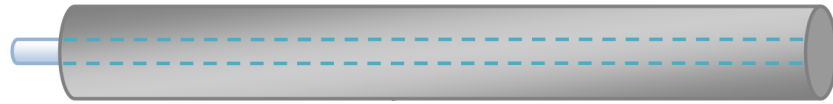


그림 2. Scaling Parameter

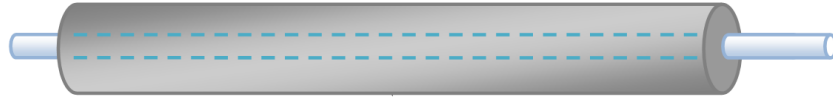
### 3. 실험 방법

#### 3.1 실험 구성

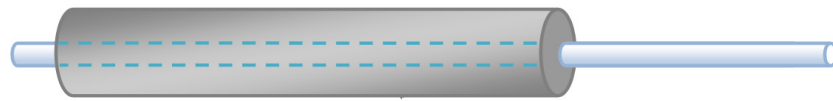
본 연구에서는 터널에 시공된 록볼트 그라우팅의 결함 여부를 모사하기 위해 그림 3과 같은 자유구속 조건의 시험체를 제작하였다. 록볼트 그라우팅의 결함 정도(Defect Ratio; DR)는 피복된 그라우팅의 길이와 철근의 길이와의 비로 나타내었다. 시험체는 결함 정도에 따라 0%, 10%, 30%, 50%, 100%(Free Steel) 비율로 제작되었다. 실내 실험의 제약상 록볼트 철근의 길이는 2.1m로 제한하였으며, 두부의 10cm는 그라우팅을 하지 않고 센서를 부착하도록 하였다. 현장에서 주로 쓰이고 있는 록볼트와 동일한 조건을 모사하기 위해 직경 25.4mm의 철근을 사용하였고 시멘트, 모래, 물을 중량비 1:1:0.4로 혼합하여 직경 38mm의 시멘트모르타르로 철근을 피복하였다.



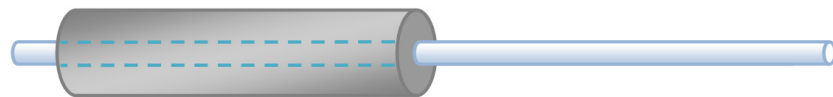
(a) DR=0%



(b) DR=10%



(c) DR=30%



(d) DR=50%

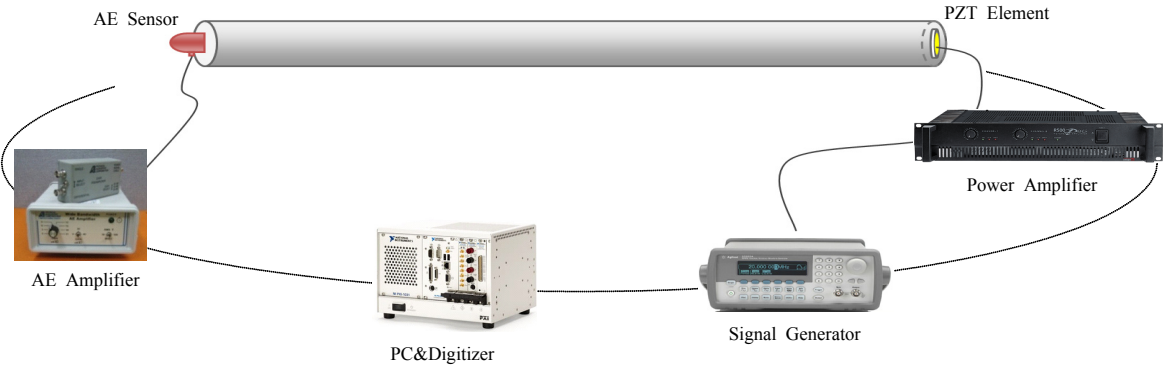


(e) DR=100%

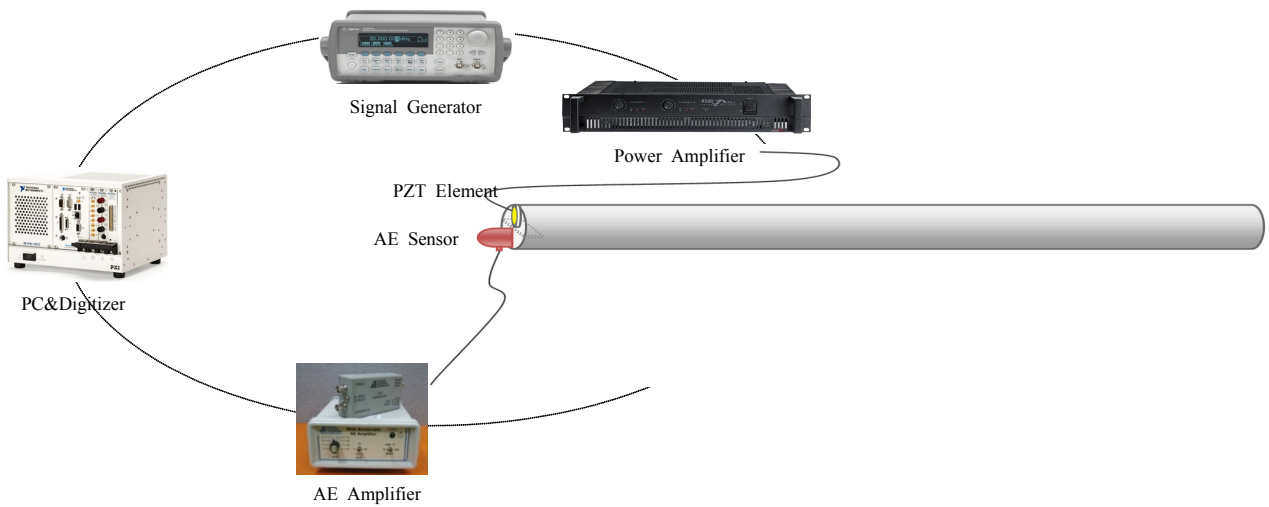
그림 3. 록볼트 시험체

### 3.2 측정 방법

유도초음파 신호를 발생시키기 위해, 직경 20mm이며 발진부의 직경이 14mm인 PZT 엘리먼트를 적용하였다. 신호발생기에서 발생된 전기적 신호가 PZT 엘리먼트에 가해지면 압전 세라믹이 주기적으로 진동하여 유도초음파를 발생시키게 된다. 투과법의 경우 그림 4(a)와 같이 가진된 파는 신호증폭기에 의해 증폭된 후 록볼트를 따라 진행하고 반대쪽 선단에서 AE 센서에 의해 수신된다. 수신된 투과파는 AE 증폭기에 의해 증폭된다. 가진된 신호의 파형과 수신된 신호는 NI사의 PXI-5112 Digitizer와 LabVIEW 프로그램에 의해 수집하였다. 반사법의 경우 그림 4(b)와 같이 철근 한쪽면에 PZT 엘리먼트와 AE 센서를 동시에 설치하였다. 또한 그라인더 작업을 통해 PZT 엘리먼트와 AE 센서 사이에 틈을 만들어 PZT 엘리먼트로부터 가진된 파가 AE 센서에 수신되는 신호에 직접적으로 영향을 주는 것을 최소화하여 반사파만 수신하도록 하였다.



(a) 투과법



(b) 반사법

그림 4. 측정방법

## 4. 실내 실험 결과 및 해석

### 4.1 수진 신호

결함비율(DR)이 0%, 10%, 30%, 50%, 100%인 자유구속상태의 록볼트에 대하여 투과법과 반사법을 이용하여 유도초음파 측정하여 그림 5에 나타내었다. 투과법의 경우 그라우팅의 결함 정도가 커짐에 따라 수진된 신호의 초동시간이 줄어드는 것을 확인 할 수 있으며, 철근 선단에서 반사되어 되돌아오는 파군의 형태도 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다. 또한 투과법의 경우 철근 두부의 PZT 엘리먼트로 가진된 신호가 철근의 반대쪽 선단에 설치된 AE 센서에 도달할 때까지 걸린 시간 만큼 후에 첫 번째 신호가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 반사법을 통해 얻은 신호의 경우 PZT 엘리먼트의 진동과 동시에 가진된 파가 AE 센서에 수진되어 첫번째 반사파군의 초동의 산정이 불가능하였다. 또한 이 신호로 인해 다음에 형성되는 신호가 영향을 받아 노이즈가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 록볼트 선단에서 유도초음파가 반사되는 것을 확인할 수 있다.

## 4.2 웨이브렛 변환 분석

측정된 유도초음파의 초동속도 계산에 있어서 초동시간을 파악하기란 쉽지 않다. 특히 반사법의 경우 PZT 엘리먼트 가진과 동시에 생성된 직접파의 영향으로 인해 반사된 파의 초동시간을 파악하기란 거의 어렵다. 따라서 웨이브렛 변환을 이용해 수신된 신호를 해석하였으며, 전체 주파수에 대한 웨이브렛 변환 결과를 나타내면 그림 6과 같다. 투과법의 경우 가장 처음 나타나는 최대에너지를 가진 파군의 시간이 공동결함비율이 증가함에 따라 줄어드는 것을 볼 수 있고 각 파군의 간격도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 반사법의 경우 초기의 직접파 다음부터 유도초음파의 파군이 형성되는 것을 볼 수 있으며, 직접파 다음으로 두 번째 나타나는 최대에너지를 가진 파군이 가장 처음 반사된 반사파군으로 선정할 수 있다. 반사법의 웨이브렛 변환 결과 역시 투과법의 경우처럼 공동결함비율이 증가함에 따라 첫 번째 반사된 유도초음파의 시간이 줄어들며 각 파군의 간격이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

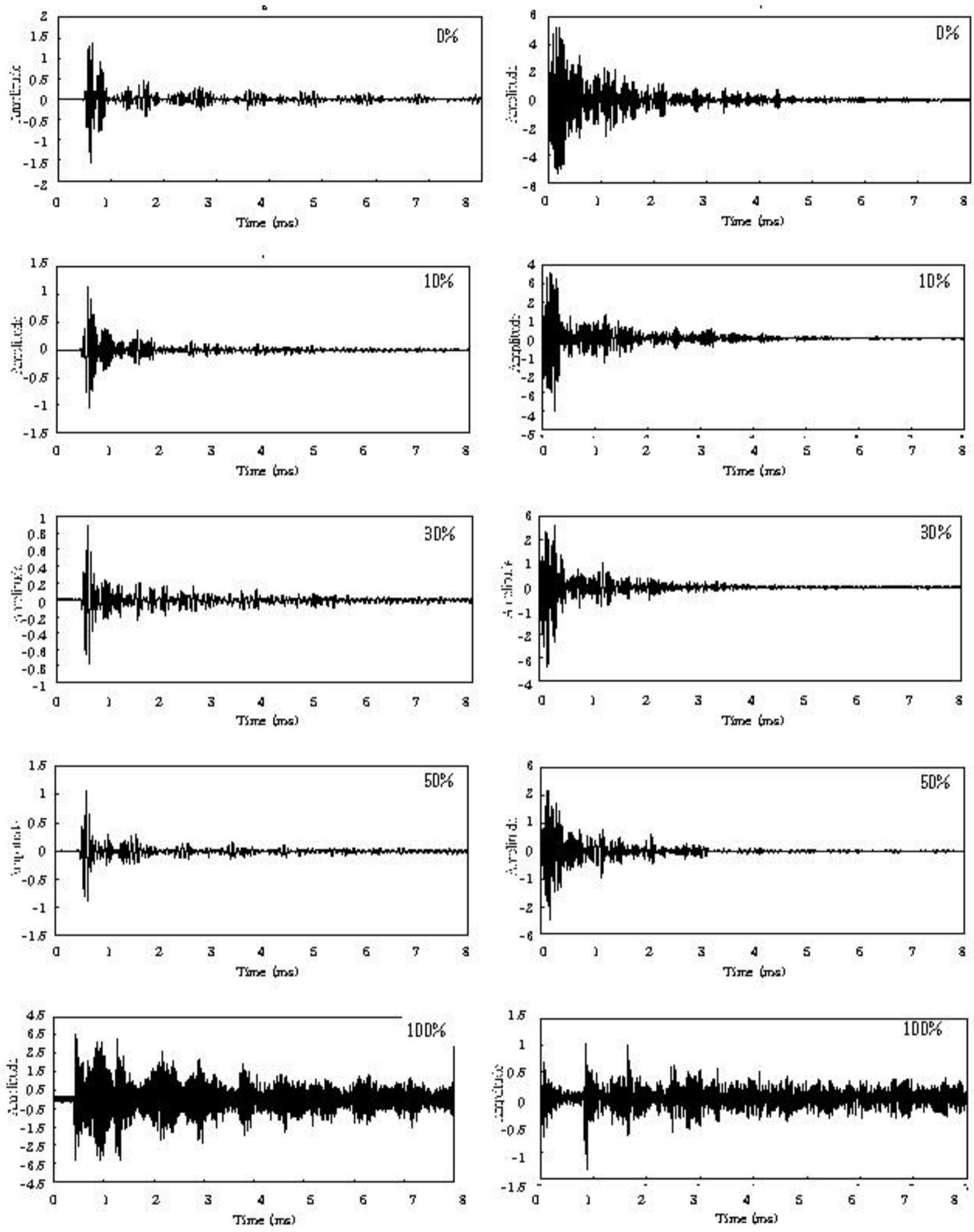
## 4.3 투과법과 반사법의 에너지 속도 비교

그림 6에서 보는 바와 같이 50kHz 이상의 주파수 대역에서는 유도초음파의 에너지가 크게 감소되어 반사파 군을 파악하기 어렵고 주로 10kHz~40kHz에서 큰 에너지를 가진 유도초음파의 반사파군을 확인할 수 있다. 따라서 10kHz~40kHz 주파수 대역에서의 공동결함비율에 따른 유도초음파의 최대 에너지 발생 시점을 선정하였다. 투과법과 반사법 실험 결과 측정된 유도초음파의 에너지 속도는 웨이브렛 변환 결과 나타난 유도초음파의 파군간의 시간간격을 구함으로써 산정하였고, 그 결과를 나타내면 그림 7과 같다. 그림 7에서 보는 바와 같이 유도초음파의 에너지 속도는 공동결함비율이 증가함에 따라 선형으로 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 투과법에서 초동을 이용하여 록볼트의 건전도를 평가한 한신인 등(2006) 결과와 매우 유사한 경향을 나타낸다. 투과법 실험 결과 측정된 유도초음파의 에너지 속도는 반사법 실험 결과 얻어진 유도초음파의 에너지 속도보다 큰 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 록볼트 그라우팅의 건전도 평가의 비파괴 기법으로 반사법의 적용 가능성을 제시하기 위하여 공동결함별로 록볼트 그라우팅 시험체를 제작하여 자유구속조건에서 실내 실험을 실시하였다. 실내실험에서는 반사법과 투과법을 동시에 실시하여 두가지 방법을 비교 분석하였다. 측정된 유도초음파는 웨이브렛 변환 해석을 통해 유도초음파의 에너지 속도를 산정하였다.

투과법의 경우 처음 도달하는 에너지 파군의 초동을 산정할 수 있는 반면, 반사법의 경우 발신기에서 수신기로 직접 도달하는 직접파의 영향으로 다음 첫 번째 반사파군의 초동의 산정이 불가능하였으나 반사파군은 비교적 명확하게 나타났다. 투과법과 반사법을 통해 얻어진 신호의 웨이브렛 변환 해석 결과로부터 얻어진 유도초음파의 에너지 속도는 공동결함비율에 따라 비교적 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 투과법의 초동 속도와의 경향이 일치하는 것으로 나타났다. 반사법을 통해 얻어진 신호의 유도초음파 에너지 속도보다 투과법을 통해 얻은 유도초음파의 에너지 속도가 약간 크게 산정되었다. 한편 본 연구의 결과는 반사법 또한 록볼트 그라우팅의 건전도 평가에 적용 가능성을 보여준다.

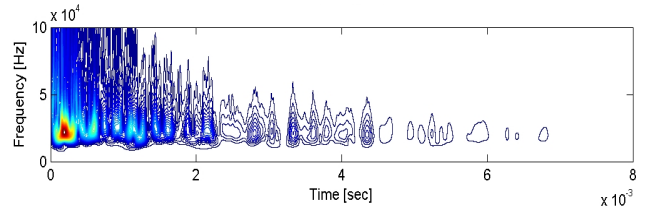
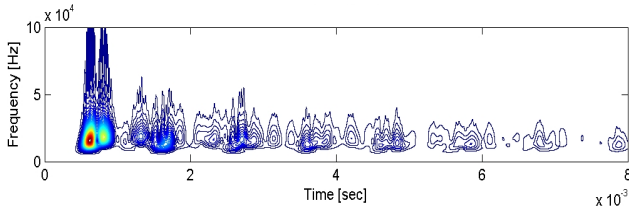


(a) 투과법

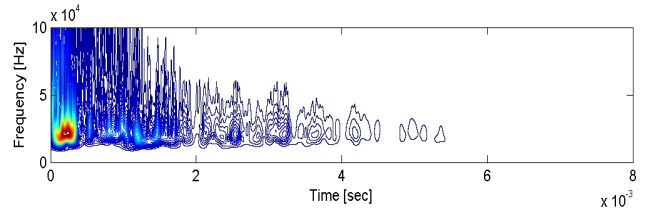
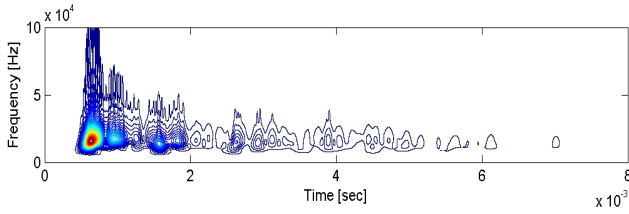
(b) 반사법

그림 5. 자유구속 조건에서 공동결합비율에 따른 유도초음파 측정결과

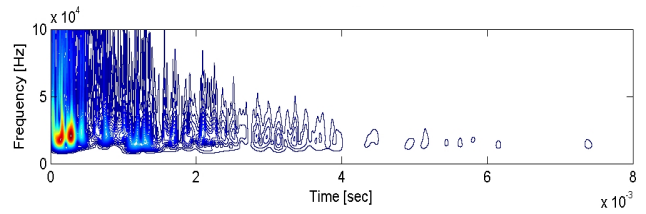
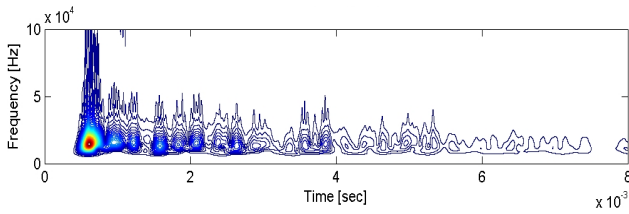
DR=0%



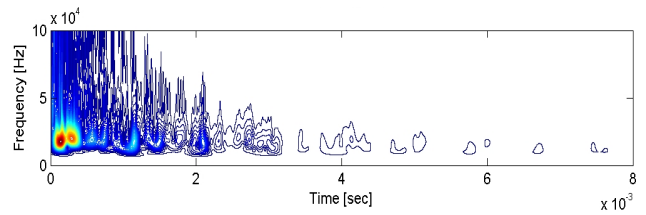
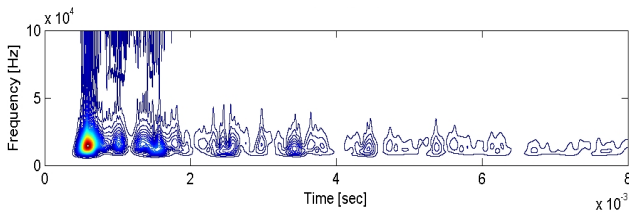
DR=10%



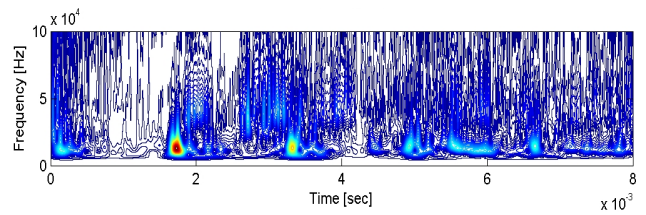
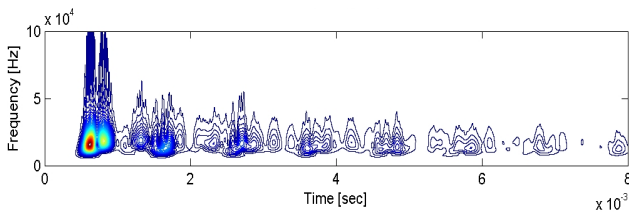
DR=30%



DR=50%



DR=100%



(a) 투과법

(b) 반사법

그림 6. 공동결함비율에 따른 유도초음파의 웨이브렛 변환 결과



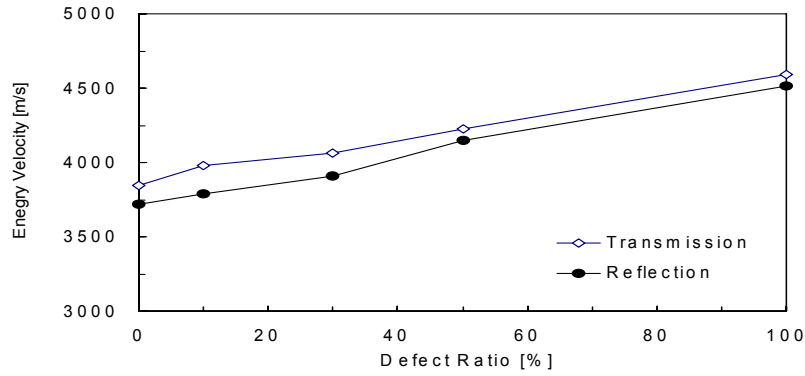


그림 8. 자유구속 록볼트의 공동결합비율에 따른 유도초음파 속도 변화

## 참고문헌

1. 김현배, 이용준, 한신인, 엄태원, 이종섭, 이인모 (2005), “록볼트 그라우팅 시공품질에 대한 비파괴조사·건진도평가 기술에 관한 연구”, **2005 한국암반공학회 추계 학술발표회 논문집**, pp. 115~126.
2. 이인모, 김현진, 한신인, 이종섭 (2007) “유도파에 대한 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용한 록볼트 건진도 평가”, **한국터널공학회 논문집**, 제 9권, 제 4호, pp. 403~413
3. 장석재, 곽수정, 김두준 (2006), “철도 터널 공사용 록볼트 인발 시험의 문제점과 개선방안에 관한 연구”, **한국철도학회 논문집**, 제 9권, 제 1호, pp. 89~94.
4. 한신인, 이종섭, 이용준, 안동근, 이인모 (2006) “비파괴 시험기법을 이용한 록볼트그라우팅의 공동결합평가”, **2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집**, pp. 538~541.
5. Daubechies, I.(1988), "Orthonormal bases of compactly supported wavelet", **Communications in Pure and Applied Mathematics**, Vol. 41, pp.909~996.
6. Gabor, D.(1946), "Theory of Communication", **Journal of IEE**, Vol. 93, No. 26, pp.429~457.
7. Grossman, A. and 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.