

해머 타격 반사법을 이용한 현장 록볼트 건전도 평가

유정동¹, 배명호², 이용준³, 민복기⁴, 이인모⁵, 이종섭^{6*}

Integrity evaluation of rock bolts in the field by using hammer-impact reflection method

Jung-Doung Yu, Myeong-Ho Bae, Yong-Jun Lee, Bok-Ki Min, In-Mo Lee, Jong-Sub Lee

Abstract Rock bolts and shotcrete play a crucial role as a main support system in the underground space. Thus, the safety of the underground space may be affected by the defect of rock bolts. In order to evaluate the rock bolt integrity by using non-destructive technique, the transmission method of the guided ultrasonic waves, which are generated by using the piezo disk elements has been successfully performed. The energy generated by the piezo disk elements, however, is not enough for the rock bolts in the field. In addition, the piezo disk elements should be installed at the end of the steel bar during construction of the rock bolts. The purpose of this study is the development of the reflection method, which may generate enough energy, and the application in the field rock bolts. Both laboratory and field tests are carried out. The guided ultrasonic waves with high energy are generated by the hammer impact with the center punch, and the AE sensor is used to measure the reflected guided waves. The received guided waves are analyzed by the wavelet transform. The peak value of the wavelet transform produces the energy velocity, which is used for the evaluation of the rock bolt integrity. The energy velocity increases with an increase in the defect ratio in both laboratory and field rock bolts. This study demonstrates that the hammer-impact reflection method may be a suitable method for the evaluation of the rock bolt in the field.

Keywords: Energy velocity, field test, guided ultrasonic wave, non-destructive method, reflection method

요 지 록볼트는 숏크리트와 함께 지하구조물의 주지보재로서 중요한 역할을 수행한다. 따라서 록볼트에 발생된 공동결함은 지하구조물의 안정성에 영향을 줄 수 있다. 최근 록볼트 건전도 평가를 위한 비파괴 검사 방법들 중 피에조 디스크 엘리먼트와 음향방출센서를 사용하는 유도초음파의 투과법과 반사법이 우수한 결과를 보여 주었다. 하지만 피에조 디스크 엘리먼트에서 발생하는 파는 현장에 적용하기에 부족한 에너지의 크기를 가진다. 또한 투과법의 경우 현장에서 록볼트 시공시 피에조 디스크 엘리먼트를 철근 끝단에 설치하여 시공하여야 한다. 본 연구의 목적은 충분한 에너지를 발생시킬 수 있는 유도초음파의 반사법을 개발하고 이를 현장에 시공된 록볼트의 건전도를 평가에 적용하는 것이다. 본 연구는 실내실험과 현장실험으로 수행되었다. 충분한 에너지를 갖는 유도초음파를 록볼트 두부에 자극정을 대고 해머로 타격하여 발생시켰으며, 이를 음향방출센서로 수신하였다. 측정된 신호의 분석을 위해 웨이블릿 변환을 이용하였다. 웨이블릿 변환의 최고점으로부터 에너지 속도를 산정하여 록볼트의 건전도를 평가하였다. 유도초음파의 에너지 속도는 실내에 설치된 록볼트 실험체와 현장에 시공된 록볼트의 결함비율이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 해머 타격방법이 현장에서 록볼트 건전도 평가에 유용한 방법이 될 수 있음을 보여 준다.

주요어: 에너지 속도, 반사법, 비파괴 검사, 유도초음파, 현장 록볼트 건전도 평가

1. 서 론

건설에 있어 국내 도심의 개발은 점점 포화상태에 이르고 있고, 도심의 상주인구와 유동인구를 모두 수용하기에는 공간적 제약이 따른다. 이러한 측면에서 지하공

간의 활용은 인구 고밀화의 지하로의 재분배라는 의의를 지닌다. 또한 터널과 같은 지하구조물의 건설은 효율적인 국토 활용 및 교통의 흐름에 있어 중추적인 역할을 수행하며, 생태계 유지에 이로운 효과를 준다.

록볼트는 숏크리트와 함께 지하구조물의 주지보재로

¹고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정 (E-mail: noorung2love@paran.com)

²고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정 (E-mail: best726@hanmail.net)

³(주)포스코 건설기술 연구소 (E-mail: civilyj@poscoenc.com)

⁴(주)현대건설 (E-mail: bkmin@hdec.co.kr)

⁵정희원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

⁶정희원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 부교수 (E-mail: jongsub@korea.ac.kr)

써 널리 사용되고 있다. 록볼트의 시공은 천공된 암반면에 철근을 근입시킨 후 그라우팅재로 충전 함으로써 이루어진다. 록볼트를 경사진 암반면이나 천장부에 시공할 경우, 그라우팅재의 자중으로 인해 중력 방향으로 흘러내릴 수 있다. 이는 록볼트 선단부에 공동결함을 발생시켜며, 구조물의 안정성에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 지하구조물의 보수 및 재시공은 전체 공기와 추가적인 공사비용에 영향을 준다. 따라서 지하구조물에 시공된 록볼트의 정확한 건전도 평가가 이루어져야 한다.

현장에서 주로 사용되는 록볼트 건전도 평가 방법으로 인발실험이 수행되어 왔다. 하지만 많은 시간과 비용을 필요로 하며, 실험 중 주변 지반의 손상을 초래할 수 있다. 또한 이미 인발된 록볼트가 기능을 제대로 수행하지 못하는 가능성도 배제할 수 없다. 장석재 등(2006)은 지반특성이 고려되지 않은 인발실험 도해법을 지적하기도 하였다.

최근 구조물의 안전성 평가 및 유지·관리를 위해 비파괴 검사 기법들이 지속적으로 연구·개발되고 있다. 특히 얇은 판재나 판, 봉과 같은 형상의 재료에서는 유도초음파가 발생되어 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유도초음파는 체적파와 달리 비교적 낮은 주파수에서 생성되어 에너지 감쇠 없이 비교적 먼 거리를 전파하는 특성을 지니고 있다. 이와 같은 이유로 유도초음파는 철근 또는 철봉의 건전도 평가에도 널리 이용되고 있다. 콘크리트로 피복된 철봉에 대한 주파수 영역에서의 분석이 수행된 사례가 있으며(Na 등, 2002), 김현배 등(2005)는 록볼트의 그라우팅 유무에 따른 파의 감쇠특성을 연구하였다. 한신인 등(2006)은 유도초음파의 투과법을 이용하여 초동속도를 산정함으로써 록볼트 건전도 평가를 수행하였다. 이인모 등(2007)은 웨이브렛 변환을 통해 유도초음파 신호의 정확한 분석을 연구하였다. 이를 통해 많은 잡음을 수반하는 유도초음파 신호의 초동속도 산정의 어려움을 개선하였다. 이종섭 등(2008)은 유도초음파의 반사법을 개발하여 자유구속조건의 록볼트에 대해 건전도 평가를 수행하여, 센서와 함께 시공되지 않았거나 이미 시공된 록볼트에 대한 평가가 불가능했던 투과법의 단점을 개선하였다. 추후 연구로 지중 근입조건의 록볼트 실험체에 대해 반사법을 적용하여 실내실험이 수행되었다(유정동 등, 2008). 현재까지 연구된 유도초음파의 투과법 및 반사법은 피에조 디스크

엘리먼트를 이용하여 록볼트 철근에 파를 가진하였다. 하지만 피에조 디스크 엘리먼트는 록볼트 철근에 충분한 에너지를 전달하지 못하기 때문에 에너지 감쇠가 심한 현장 조건의 경우 적용하기 어렵다는 평가를 받아왔다. 따라서 현장에서도 적용하기에 충분한 에너지 전달력을 가진 새로운 반사법 기법이 요구되어 왔다.

본 연구에서는 공동결함비율이 0%-100%인 록볼트 실험체를 제작하여 기존에 제시된 여러 가지 비파괴 탐사법의 한계를 극복한 새로운 방법(해머 타격 반사법)을 이용한 실내실험 및 현장실험을 수행하였으며, 그 우수성을 제시하고자 한다. 획득된 신호는 웨이브렛 변환을 이용해 분석되었으며, 에너지 속도를 산정하였다. 본 논문은 웨이브렛 변환의 이론, 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 실내실험과 현장실험의 결과, 해머 타격 반사법을 이용한 실내실험과 현장실험의 결과, 웨이브렛 변환 분석 후 산정된 에너지 속도 변화, 그리고 결론으로 구성된다.

2. 웨이브렛 변환

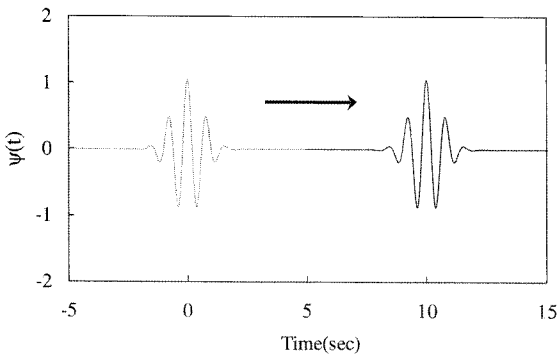
웨이브렛 이전의 신호 변환 방법은 푸리에 변환을 기초로 하였다. 푸리에 변환은 신호 $f(t)$ 에 대한 시간상의 정보를 주파수상의 정보로 변환하는 방법이다. 하지만 신호 $f(t)$ 에 대한 전체적인 변환이기 때문에 신호의 부분적인 정보에 대한 주파수 특성을 알 수 없다. 신호 $f(t)$ 가 멀티 스케일 특성을 지니거나 비정상(non-stationary) 특성을 지닐 경우 푸리에 변환은 정확한 정보를 제공하지 않는다. 웨이브렛 변환은 원신호에 빠른 접근, 신호의 평탄성 분석 측면 등에서 우수하다(이남용과 김윤영, 1999). 웨이브렛 변환은 신호의 형상에 관계없이 신호가 지닌 모든 스케일 성분을 하나의 “시간-스케일” 공간에 표현할 수 있다. 웨이브렛 변환은 멀티스케일의 특성을 지닌 신호에 대하여 신호가 포함하고 있는 모든 스케일 성분을 하나의 공간에 표현하기 때문에 유도초음파와 같이 분산성을 지닌 신호에 매우 유용하다(이인모 등, 2007). 신호 $f(t)$ 에 대해서 웨이브렛이라 불리는 함수를 이용한 연속 웨이브렛 변환은 다음 식 (1)과 식 (2)로 정의된다(Grossman and Morlet, 1984; Daubechies, 1988).

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

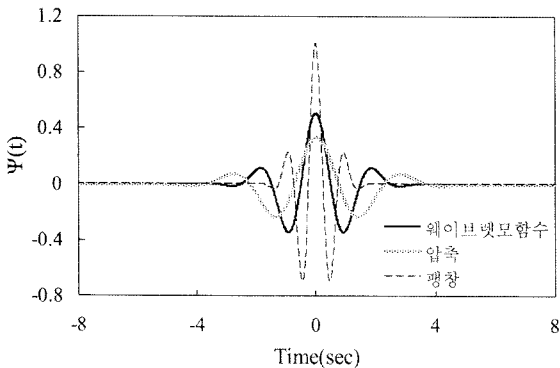
$$= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\frac{1}{\sqrt{s}}\psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right)dt$$

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

여기서 $f(t)$ 는 원신호(original signal), 함수 $\psi(t)$ 는 모 웨이브렛 또는 기저 웨이브렛 함수(Mother or base wavelet function)이다. *는 복소 공액(complex conjugate)을 나타낸다. u 는 전이계수(translation parameter)로 그림 1(a)와 같이 웨이브렛 변환시 모 웨이브렛 함수를 시간축에 따라 이동시키는 역할을 한다. s 는 압축계수(scaling parameter)로 그림 1(b)와 같이 모 웨이브렛 함수를 압축과 팽창시키는 역할을 한다. s 는 웨이브렛 변환에 있어서 매우 중요한 역할을 하며 웨이브렛 변환은 결국



(a) 전이계수, u



(b) 압축계수, s

그림 1. 웨이브렛의 전이계수 및 압축계수

압축계수 s 에 의한 신호의 성분 분석이라 정의할 수 있다. 압축계수가 큰 저주파 영역에서는 웨이브렛의 크기가 증가하며, 반대로 압축계수가 작은 고주파 영역에서는 웨이브렛의 크기가 감소한다. 결국 s 는 웨이브렛의 크기, 즉 주파수를 변화하는 역할을 한다. 즉, 해상도는 주파수 대역에 따라 일정한 규칙을 지니고 변하며, 신호의 거동을 파악하는데 유리하다. 이 같은 주파수 대역에 따른 해상도의 변화가 웨이브렛 변환만이 지닌 점이며, 이로 인해 한 번의 연산으로 신호가 지닌 멀티 스케일 신호에 대한 분석이 가능하다.

3. 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법

유정동 등(2008)은 그라우팅재로 피복된 록볼트 철근을 콘크리트 원주체로 제작하여 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 록볼트 건전도 평가에 대한 연구를 실내실험으로 수행하였다. 본 연구에서는 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 현장 적용을 시도하였다.

3.1 측정 장비의 구성

피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법은 그림 2와 같은 측정 시스템으로 구성된다. 신호발생기(Signal Generator)로부터 발생된 전기적 신호를 전압증폭기(Power Amplifier)로 증폭시킨 후 피에조 디스크 엘리먼트를 가진시키며, 발생된 유도초음파는 록볼트 철근을 따라 선단에서 반사되어 음향방출(Acoustic Emission)

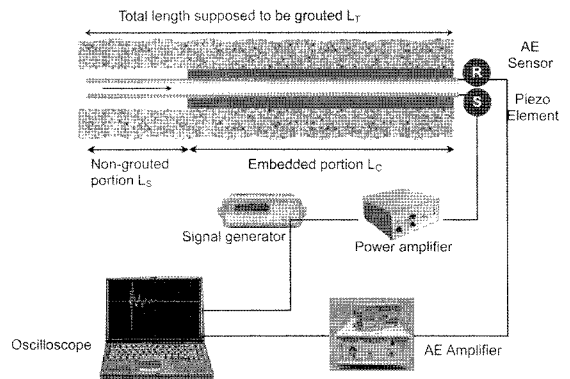


그림 2. 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 유도초음파 측정방법

센서에 의해 수신된다. 수신된 신호는 음향방출 증폭기(AE Amplifier)에 의해 증폭되며 음향방출센서에 측정된 고주파수의 잡음을 제거하기 위한 약 1,000개의 신호를 평균하여 오실로스코프에 기록된다.

3.2 실내실험 개요 및 결과

실험에 사용된 록볼트 실험체는 그림 3(a)와 같다. 시멘트와 물을 중량비 1:0.5로 혼합하여 D25 이형철근에 그라우팅 하였다. 록볼트의 암반 근입을 모사하기 위해 그라우팅된 록볼트 실험체에 호칭강도 21 MPa의 콘크리트를 타설하였다. 철근을 포함한 그라우팅된 록볼트 실험체의 직경은 38 mm이며, 콘크리트 원주체의 직경은 150 mm이다.

피복된 그라우팅의 길이와 철근의 길이비로 정의된 공동결함비율(DR: defect ratio)이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 100%(철근자재)인 록볼트 실험체에 대하여 실험을 수행하였다. 이 중 결함비율이 0%, 40%, 100%인 실험체에 대하여 측정된 유도초음파 신호를 그림 3(b)에 나타내었으며, 웨이브렛 변환 결과를 그림 3(c)

에 나타내었다. 웨이브렛 변환 결과로부터 반사된 파군의 최대 에너지 발생 지점을 쉽게 파악할 수 있다. 하지만 공동결함비율이 100%인 록볼트 실험체의 경우 다수의 반사파군이 나타나지만 피복된 록볼트의 경우 그라우팅 및 콘크리트로의 에너지 유실(energy leaking)로 인해 2-3개의 반사파군만 나타나는 것을 볼 수 있으며 시간에 따라 에너지의 크기도 감소되는 것을 볼 수 있다.

3.3 현장실험 개요 및 결과

피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 현장 적용을 위해 현장에 시공할 록볼트 실험체를 그림 4와 같이 제작하였다. 록볼트의 공동결함은 선단부에 존재하도록 하였으며, 록볼트 캡과 아크릴 관을 씌워 그라우팅재로 피복되는 것을 차단하였다. 록볼트와 록볼트 캡, 아크릴 관의 연결부는 에폭시를 사용하여 결합한 후 방수처리를 실시하였다. 그림 4와 같이 현장 록볼트 실험체는 공동결함비율 0%, 10%, 20%, 50%로 제작되었으며, 암반 비탈면에 시공되었다. 그라우팅은 실내

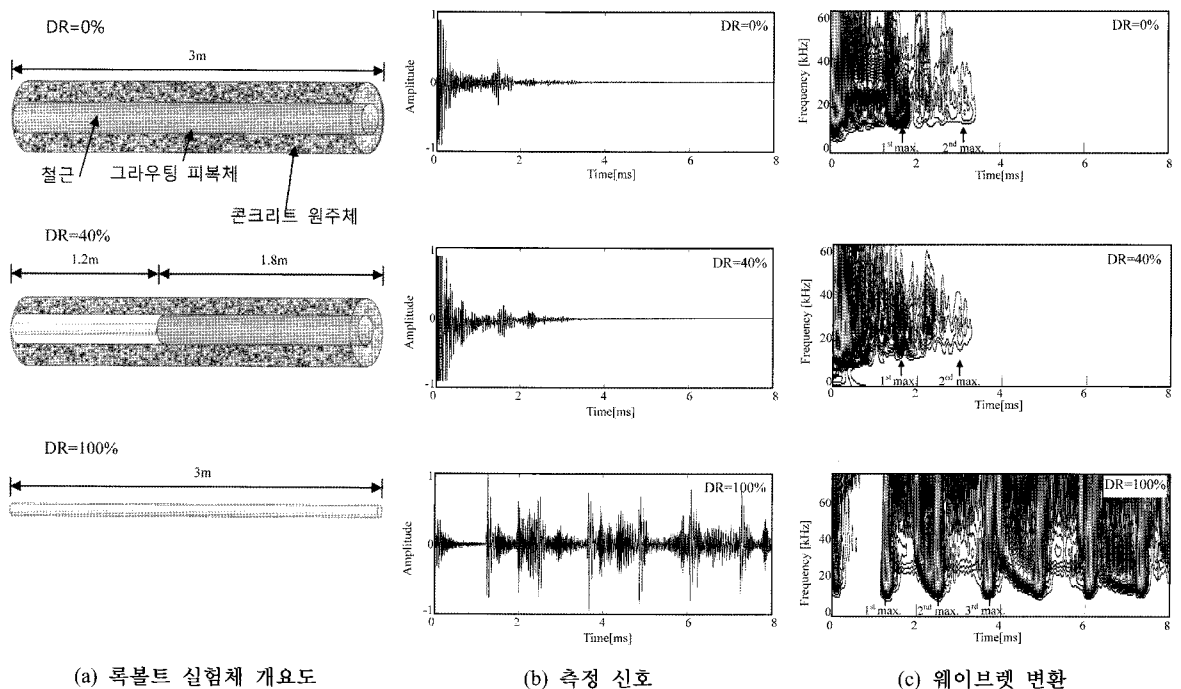
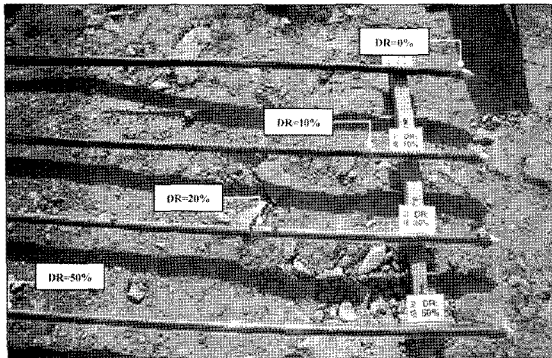


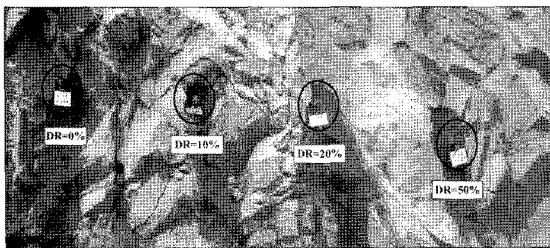
그림 3. 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법 - 실내실험. 이형철근의 직경: 25 mm, 그라우팅피복체 직경: 38 mm, 콘크리트 원주체의 직경: 150 mm

실험과 동일한 시멘트-물 혼합비 1:0.5의 재료를 사용하였다.

그림 5는 현장 록볼트 건전도 평가를 위한 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 측정 시스템을 나타



(a) 제작된 록볼트 실험체



(b) 시공된 록볼트 전경

그림 4. 현장에 시공된 록볼트 실험체: 이형철근 직경 25 mm, 길이 3 m

낸다. 유도초음파의 가·수진을 위해 피에조 디스크 엘리먼트와 음향방출센서를 사용하였다. 가·수진된 유도초음파는 음향방출 신호증폭기에 의해 증폭되어 오실로스코프에 기록되도록 하였다. 직접파의 영향을 최소화하기 위해 피에조디스크 엘리먼트와 음향방출센서 사이를 분리하였다.

피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 현장실험 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)에서와 같이 초기 직접파 이후에 반사파군이 나타나지 않는 것을 볼 수 있으며, 이는 그림 6(b)에 나타난 웨이브렛 변환 결과에서도 찾아보기 어렵다. 이와 같은 이유는 록볼트를 따라 전달된 유도초음파가 그라우팅재와 주위 암반으로 에너지 유실이 크게 발생하여 반사파군의 측정이 어려웠기 때문이다. 유도초음파는 코팅이나 기타 외부 매질에 접촉된 피검사체 내에서 주파수 변화 및 에너지 유실에 따라 그 전파거리가 현저하게 달라질 수 있다(조운호, 2001). 특히, 현장에 시공된 록볼트의 경우, 주변 암반으로의 에너지 유실이 크게 발생하여 실내실험에서 보다 더 큰 에너지 감쇠를 보인다. 따라서 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법은 현장 적용에 있어 한계를 지니고 있다. 현장에 시공된 록볼트에 대해 해머 타격 반사법을 이용하여 록볼트에 큰 전파 에너지를 전달함으로써 기존 피에조 디스크 엘리먼트를 적용한 방법의 한계를 극복할 수 있는 방법이 요구되었다.

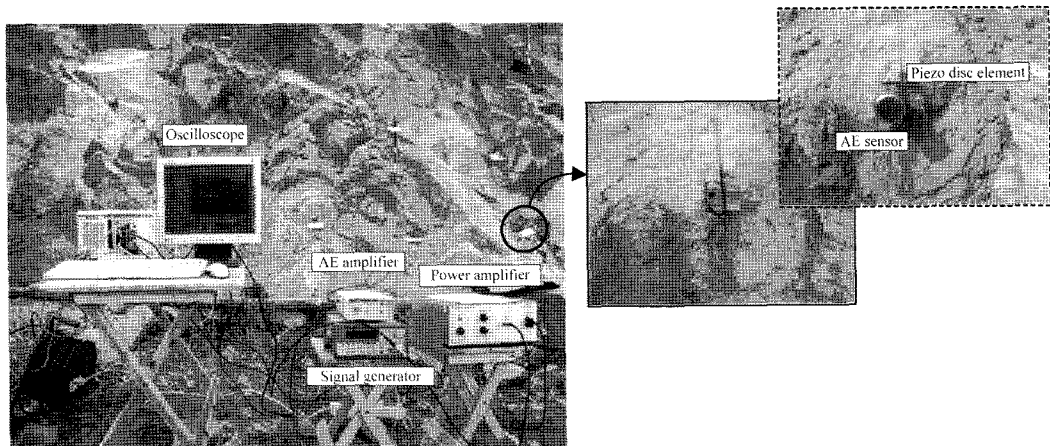


그림 5. 현장 록볼트 검측 시스템

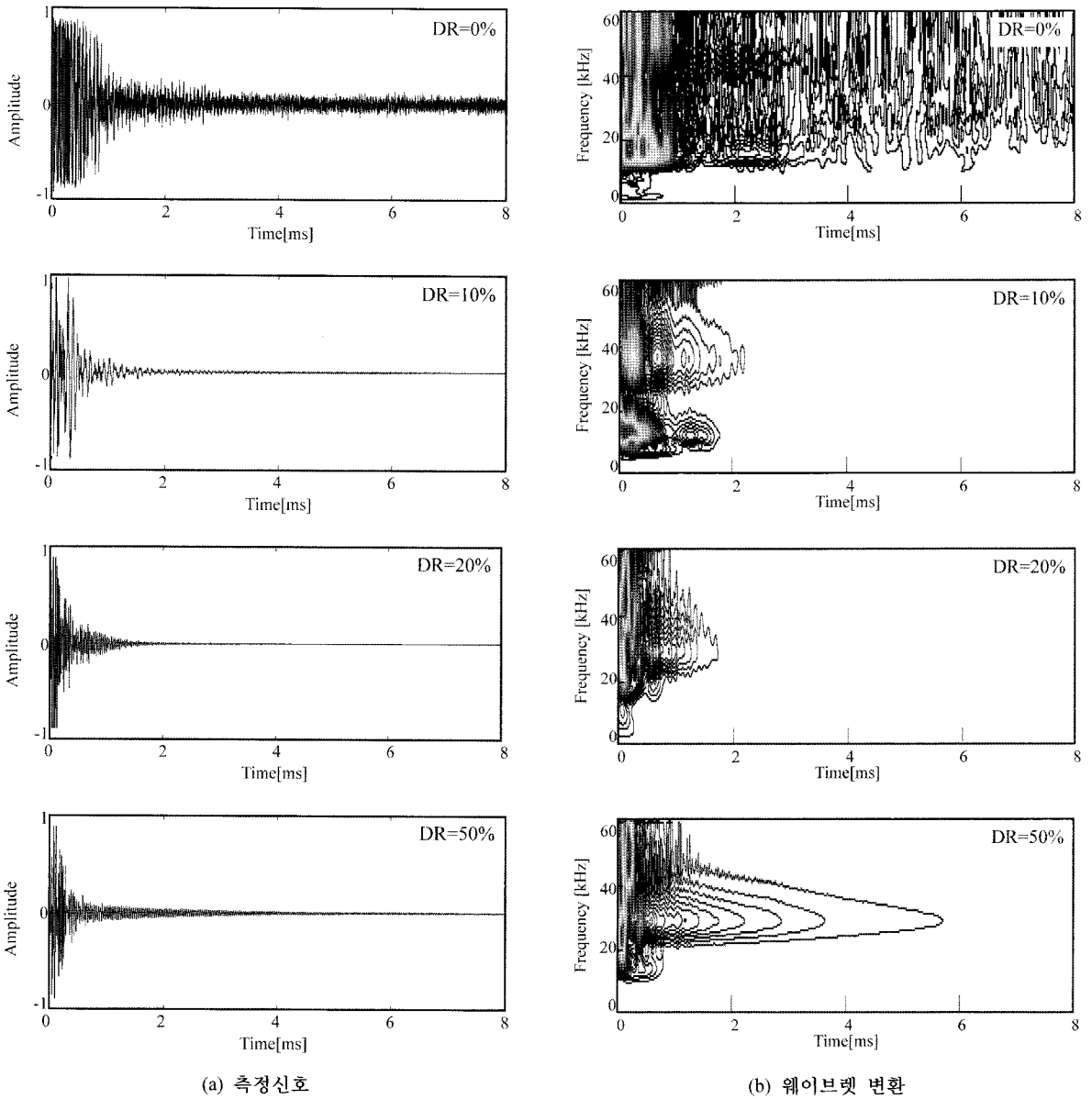


그림 6. 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법 - 현장실험

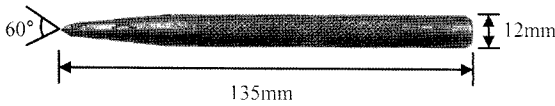
4. 해머 타격 반사법을 이용한 록볼트 건전도 평가

본 연구에서는 록볼트에 충분한 에너지 전달을 위해 해머 타격 반사법을 적용하였다. 해머 타격 반사법의 적용성을 입증하기 위해 우선 실내실험을 수행한 후 현장

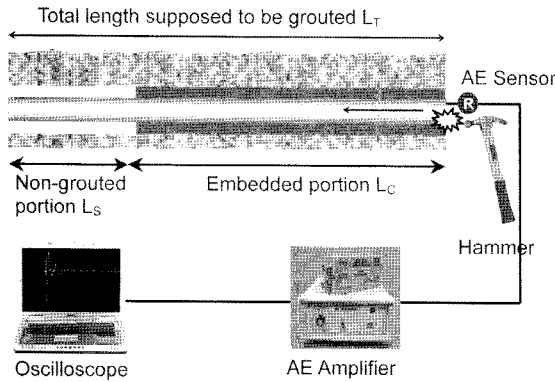
실험을 수행하였다.

4.1 측정 장비의 구성 및 실험 방법

충분한 에너지를 지닌 유도초음파를 발생시키기 위해 해머 타격 반사법을 적용하였으며, 충격 전달 장비로 그림 7(a)와 같은 전장 135 mm, 굵기 12 mm, 첨단각(tip



(a) 자국정



(b) 신호 측정 시스템



(c) 해머 타격 반사법

그림 7. 해머 타격 반사법의 개요

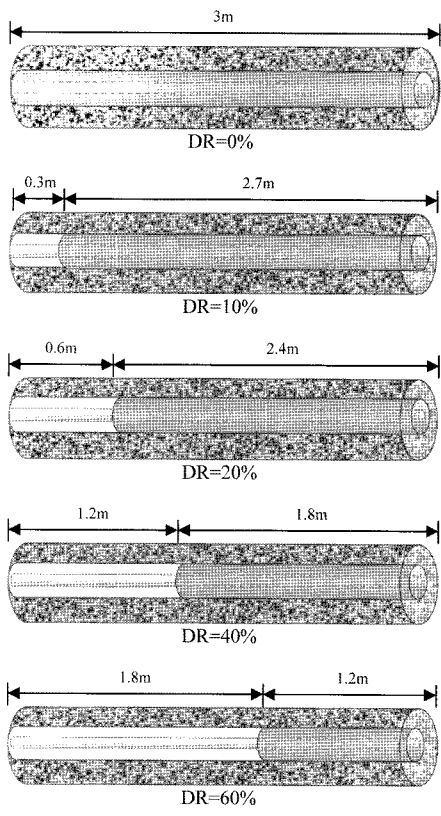
angle) 60°의 자국정(center punch)을 사용하였다. 그림 7(b)는 해머 타격 반사법의 신호 측정 시스템을 나타낸다. 해머의 타격으로부터 발생된 유도초음파는 록볼트 철근 선단부에서 반사되어 두부에 위치한 음향방출센서에 수신되며, 수신된 신호는 음향방출 증폭기에 의해 증폭되어 오실로스코프에 기록된다. 본 방법을 적용할 경우 피에조 디스크 엘리먼트를 적용하는 방법과 달리 신호발생기와 전압증폭기가 필요하지 않다. 또한 1개의 신호만을 획득하여 분석하므로 실험에 소요되는 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 유도초음파는 그림 7(c)에 나타난 것과 같이 록볼트 철근 두부에 자국정을 대고 해머로 충격을 가해 발생된다.

4.2 실내실험 개요 및 결과

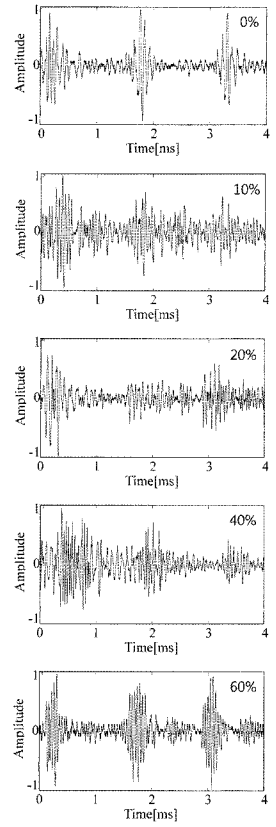
해머 타격 반사법을 이용한 실내실험에서 사용된 록볼트 실험체는 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 실내실험과 동일한 것을 사용하였다. 즉, 록볼트 실험체를 그림 8(a)와 같이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%로 구성하였다(그림 3(a)의 실험체와 동일한 재원). 해머 타격법을 적용하여 측정된 신호를 그림 8(b)에 나타내었다. 측정된 신호를 보면 뚜렷한 형태의 반사파군이 세 개가 나타나는 것을 볼 수 있고, 시간에 따른 에너지 감소도 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 실내실험에서의 결과(그림 3(b))와 비교하여 볼 때 매우 양호한 결과를 보여준다. 측정된 신호에 대해 웨이브렛 변환을 수행하여 그림 8(c)에 나타내었다. 웨이브렛 변환 결과를 보면, 반사된 파군의 최대 에너지 지점이 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 주파수 대역은 주로 10 kHz-30 kHz 범위에 분포하는 것을 볼 수 있다. 또한 시간에 따른 유도초음파 에너지의 감쇠 정도도 크지 않은 것을 볼 수 있다. 최대 에너지 지점간의 시간 간격은 공동결함비율이 증가함에 따라 줄어드는 것을 볼 수 있다.

4.3 현장실험 개요 및 결과

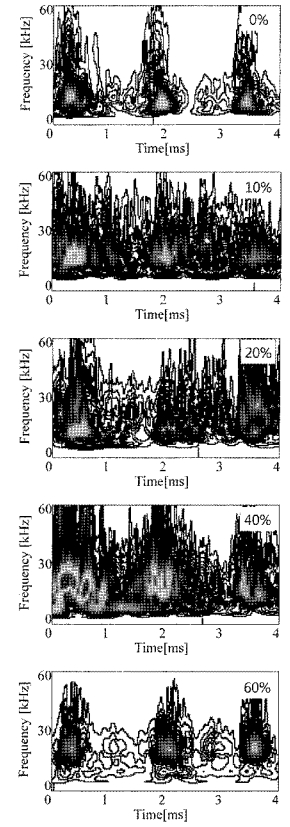
록볼트 건전도 평가를 위한 해머 타격 반사법의 현장 실험을 실시하였다. 현장실험은 기 수행된 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법 실험과 동일한 곳에서 수행하였다. 측정 장비는 앞 절 4.1과 동일하며, 암반에 근입된 록볼트 두부에 자국정을 대고 해머로 타격하여 유도초음파를 발생시켰다. 그림 9(a)는 해머 타격 반사법 실험의 전경을 나타낸다. 해머 타격 반사법을 이용하여 현장에서 획득한 신호를 그림 9(c)에 나타내었고, 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하여 실시한 현장실험의 신호를 그림 9(b)에 나타내었으며 그 결과를 서로 비교하였다. 해머 타격 반사법에 의해 측정된 신호를 보면 세 개의 뚜렷한 반사파군이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그 크기 또한 감쇠가 적은 것을 볼 수 있다. 이는 현장에서 피에조 디스크 엘리먼트를 이용하여 실시한 실험의 결과와 매우 대조적이다. 해머 타격 반사법에 의해 현장에서 측정된 신호에 대해 웨이브렛 변환을 수행하였으며 이를 그림 9(d)에 나타내었다. 웨이브렛 변환 결과를 보면, 10 kHz-30 kHz의 주파수 대역에서 반사된 파군



(a) 록볼트 실험체



(b) 측정신호



(c) 웨이블릿 변환

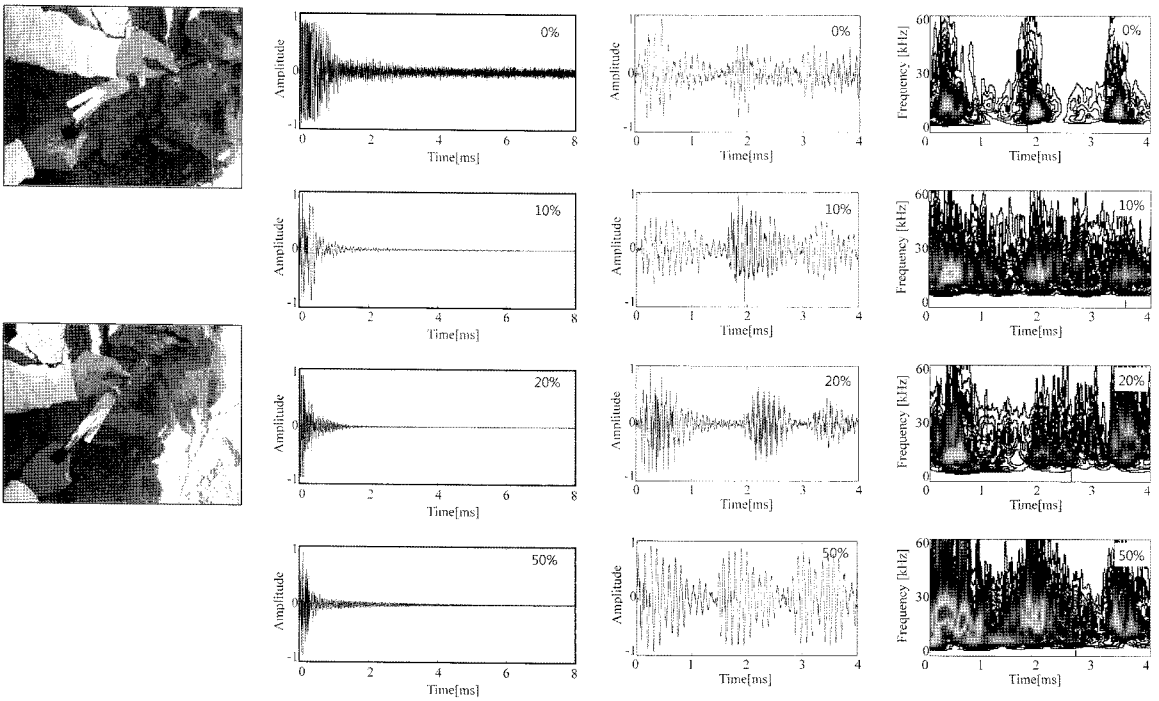
그림 8. 해머 타격 반사법을 이용한 반사법 - 실내실험

의 최대 에너지 지점이 나타나고, 록볼트 주변 암반으로 에너지 유실이 발생할 가능성이 큼에도 불구하고 큰 에너지를 가진 반사파군이 나타남을 볼 수 있다. 에너지 감쇠가 작은 이유는 해머타격법은 1타의 신호만을 획득한 경우이며, 피에조 디스크 엘리먼트를 적용한 경우는 1000개의 신호를 평균하여 이용하므로 각 신호에서 약간의 phase의 차이가 서로 에너지를 감쇄시켰기 때문으로 판단된다. 각 반사파군이 가지는 최대 에너지 발생 시점간의 간격은 공동결합비율이 증가함에 따라 줄어드는 것을 보여준다.

5. 유도초음파의 에너지 속도 변화

유도초음파의 에너지 속도는 록볼트에 전파되는 파의

왕복거리를 웨이블릿 변환 결과에 나타나는 각 파군의 최대 에너지 지점간의 시간간격으로 나누어 산정할 수 있다. 실내실험과 현장실험에 의해 획득된 신호의 웨이블릿 변환 결과로부터 에너지 속도를 산정하였고 이를 그림 10에 나타내었다. 그림 10을 보면 공동결합비율이 증가함에 따라 에너지 속도가 증가하는 경향을 보이며, 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 실내실험과 해머 타격을 이용한 실내실험의 결과가 거의 흡사함을 볼 수 있다. 실내실험의 에너지 속도는 현장실험 보다 빠르게 나타난다. 유도초음파는 피실험체의 외부 경계면에서의 경계조건에도 크게 영향을 받게 되어 복잡하고 다양한 모드의 유도초음파가 신호가 발생한다(Cho and Rose, 1996). 피실험체의 자유표면조건에서 전파된 유도초음파는 피복조건인 피실험체에서 에너지 유실과 더불어



(a) 해머 타격 장면 (b) 측정신호(PZT) (c) 측정신호(해머타격) (d) 웨이블릿 변환

그림 9. 해머 타격 반사법을 이용한 반사법 - 현장실험

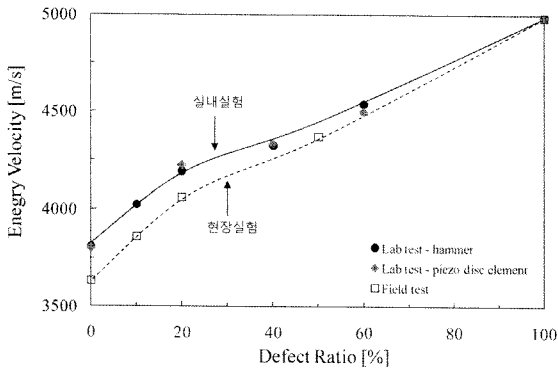


그림 10. 에너지 속도

주파수 변화를 일으키며, 이로 인해 피실험체의 경계면에서 다중 반사되는 유도초음파 간의 간섭 및 합성에 의해 새로운 유도초음파 신호가 발생된다. 록볼트 철근의 공동결함비율에 따른 에너지 속도의 변화는 이러한 과정으로부터 기인했을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 현장에 시공된 록볼트의 건전도를 평가하기 위해 유도초음파의 반사법을 적용하였고, 록볼트의 공동결함비율에 따른 에너지 속도를 산정하였다. 본 연구는 해머 타격 반사법을 이용하여 각각 실내실험과 현장실험으로 수행되었으며, 그 결과를 기 수행된 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 연구 결과와 비교·분석하였다.

실내실험은 공동결함비율이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 100%인 지중근입조건의 록볼트 실험체에 대해 실시되었다. 실험 결과, 뚜렷한 반사파군을 지닌 양질의 신호를 획득할 수 있었으며, 각 반사파군의 에너지 감쇠는 시간이 지나도 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 큰 에너지 감쇠를 보이는 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법의 신호 보다 우수한 결과를 보여준다. 측정된 신호에 대해 웨이블릿 변환을 수행하였으며 그 결과, 약 10 kHz-30 kHz의 주파수 대역에서 반사파군의 최대 에

너지가 나타났으며, 공동결합비율이 증가함에 따라 각 파군의 최대 에너지 지점의 시간 간격이 줄어드는 것으로 나타났다.

현장에 공동결합비율이 0%, 10%, 20%, 50%인 록볼트 실험체를 시공하여 실험을 실시하였다. 실험 결과, 큰 에너지를 가지며 감쇠도 적은 양질의 반사파군을 획득할 수 있었으며, 이에 대해 웨이브렛 변환을 수행하였다. 그 결과 약 10 kHz-30 kHz의 주파수 대역에서 최대 에너지를 지닌 반사파군이 나타났으며, 공동결합비율이 증가함에 따라 각 반사파군의 최대 에너지 지점의 시간 간격이 줄어드는 것으로 나타났다.

실내실험과 현장실험에서 측정된 신호의 웨이브렛 변환 결과로부터 쉽게 에너지 속도를 산정할 수 있었으며 그 결과, 공동결합비율이 증가함에 따라 에너지 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 피에조 디스크 엘리먼트를 이용한 반사법과 해머 타격을 이용한 반사법의 실내실험 결과, 두 방법으로 산정된 에너지 속도는 거의 흡사하게 나타났다.

본 연구의 결과는 현장 록볼트 건전도 평가에 있어 해머 타격 반사법이 유용한 방법이 될 수 있음을 보여준다. 실내실험 및 현장실험에 사용된 록볼트 실험체의 결함은 선단부에 발생된 것으로 조사되었다. 록볼트의 중간부에 결함이 발생하였을 경우, 결함부에서 발생하는 파의 다중 반사로 인해 더욱 복잡한 신호 양상을 보이게 될 것이다. 따라서 에너지 속도를 이용한 접근은 어려울 것으로 판단되므로 록볼트 중간부 결함에 대한 향후 연구가 요구된다.

감사의 글

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

1. 김현배, 이용준, 한신인, 엄태원, 이종섭, 이인모 (2005), “록볼트 그라우팅 시공품질에 대한 비파괴조사 건전도 평가 기술에 관한 연구”, 2005 한국암반공학회 추계 학술발표회 논문집, 춘천, pp. 115-126.
2. 유정동, 배명호, 한신인, 이인모, 이종섭 (2008), “유도 초음파의 반사법을 이용한 록볼트 그라우팅의 결합비율 평가”, 터널기술-한국터널공학회논문집, 제 10권, 제 3호, pp. 221-232.
3. 이남용, 김윤영 (1999), “웨이브렛이란”, 한국소음진동 공학회지, 제 9권, 제 5호, pp. 867-875.
4. 이인모, 김현진, 한신인, 이종섭 (2007), “유도파에 대한 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용한 록볼트 건전도 평가”, 한국터널공학회 논문집, 제 9권, 제 1호, pp. 403-413.
5. 이종섭, 유정동, 한신인, 배명호, 이인모 (2008), “유도 초음파의 반사법과 투과법 비교를 통한 록볼트 건전도 평가”, 2008 한국지반공학회 봄 학술발표회, 2008 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집 pp. 42-50.
6. 장석재,곽수정, 김두준 (2006), “철도 터널 공사용 록볼트 인발 실험의 문제점과 개선방안에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제 9권, 제 1호, pp. 89-94.
7. 조윤호 (2001), “유도초음파에 대한 이해와 응용”, 한국비파괴검사 학회지, 제 21권, 제 4호, pp. 446-460.
8. 한신인, 이종섭, 이용준, 안동근, 이인모 (2006), “비파괴 실험기법을 이용한 록볼트그라우팅의 공동결합평가”, 2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 538-541.
9. Cho, Y. H. and Rose, J. L. (1996), “A boundary element solution for a mode conversion study on the edge reflection of lamb waves”, Journal of Acoustical Society of America, Vol. 99, No. 4, pp. 2097-2109.
10. Daubechies, I. (1998), “Orthonormal bases of compactly supported wavelet”, Communications in Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, pp. 909-996.
11. 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.
12. Na, W. B., Kundu, T. and Ehsani, M. R. (2002), “Ultrasonic guided waves for steel bar-concrete interface testing”, Materials Evaluation, Vol. 60, No. 3, pp. 437-444.