

유도초음파의 반사법을 이용한 록볼트 그라우팅의 결함비율 평가

유정동¹, 배명호², 한신인³, 이인모⁴, 이종섭^{5*}

Defect ratio evaluation of the rock bolt grouting using the reflection method of guided ultrasonic waves

Jung-Doung Yu, Myeong-Ho Bae, Shin-In Han, In-Mo Lee, Jong-Sub Lee

Abstract Rock bolts have been installed into rockmass as a main support system. In order to evaluate the rock bolt integrity using non-destructive technique, the transmission method of the guided ultrasonic wave has been successfully performed. For the transmission method, however, the source for the generation of guided ultrasonic waves should be installed at the end of the steel bar during construction of the rock bolt in the field. The purpose of this study is to suggest a reflection method that the source and the receiver are installed on the head of the steel bar. The reflection method is compared with the transmission method using non-embedded rock bolts and rock bolts embedded in concrete block. In this experiment, the piezo disc element is used as the source and the AE sensor is used as the receiver. The wavelet transform is applied to determine the energy velocity. The experimental studies show that the reflection method produces almost identical value of the transmission method, and the energy velocity increases with the defect ratio. This study suggests that the reflection method of the guided ultrasonic wave may be a suitable method for the rock bolt integrity evaluation in the field.

Keywords: Rock bolt, non-destructive technique, guided ultrasonic wave, reflection method, rock bolt-embedded condition

요지 록볼트는 지하구조물의 주지보재로 적용되고 있다. 록볼트 전전도 평가를 위한 비파괴 방법으로 유도초음파의 투과법을 이용한 기법이 우수한 결과를 보여주고 있다. 하지만 투과법은 철근의 양 끝단에 센서를 부착하기 때문에 암반에 이미 설치되어 있는 록볼트의 건전도 평가는 불가능하다. 본 연구의 목적은 록볼트 철근 두부에 가진센서와 수진센서를 나란히 설치하여 선단에서 반사되어 오는 파를 측정하는 반사법을 자유구속조건 및 지중근입조건에 적용하며, 이를 투과법과 비교하는데 있다. 유도초음파의 가진과 수진을 위해 피에조 디스크 엘리먼트와 AE 센서를 사용하였으며, 측정된 신호로부터 웨이브렛 변환을 통하여 에너지 속도를 산정하였다. 실험결과, 반사법의 결과가 투과법과 거의 일치하였으며, 결함비율이 증가함에 따라 에너지 속도가 증가하는 것으로 나타났다. 본 논문은 유도초음파의 반사법이 록볼트 전전도 평가에 있어 현장 적용 가능성 있는 방법이 될 수 있음을 보여준다.

주요어: 록볼트, 비파괴기법, 유도초음파, 반사법, 지중근입조건

1. 서 론

지하공간의 활용은 한정된 국토의 지하로의 확장 뿐 아니라 효율적인 시설관리, 환경적 요인, 지리적 이점의 공략 등에 있어 무한한 의미를 지니고 있다. 도시 인프라 구축, 교통의 효율적 소통을 위한 분배, 미사일 기지 및 지하벙커와 같은 군사시설 등을 지하공간의 활용이 더 이상 국토의 활용을 위한 차선책이 아니라는 것을

보여준다.

현재 국내의 주된 터널시공개념은 NATM(New Austrian Tunneling Method)으로 록볼트와 함께 콘크리트를 주요 지보재(primary support system)로 적용하면서 2차 복공 라이닝을 일반적으로 설치하고 있다. 그러나 점차 현장타설 콘크리트라이닝의 무용성과 시공 중 적용에 따른 문제점 발생으로 인하여 무라이닝공법 도입여부가 제기 되고 있다. 이와 같이 2차라이닝을 설치하지 않는 싱글쉘(Single-Shell) 터널공법 개념이나, 특히 대형대 단면터널 건설의 경우 록볼트 역할은 매우 중요하여 터널안정성 측면에서 록볼트지보재의 기능성 확보는 필수적이다. 록볼트의 시공은 천공된 대상 지반에 록볼트를 근입시킨 후 그라우팅재로 총진시켜 록볼트를 고정하는

¹고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정

²고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정

³정회원, (주)서영엔지니어링 연구소 상무

⁴정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수

⁵정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 부교수

*교신저자: 이종섭 (jongsu@korea.ac.kr)

것으로 이루어진다. 하지만 천정부나 경사진 벽면에 시공할 시 그라우팅재가 자중으로 인해 중력방향으로 흘러내려 록볼트에 결함이 발생할 수 있다. 이는 터널의 안정성에 부정적인 영향을 초래할 수 있으므로 이에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다.

록볼트에 발생한 공동결함을 평가하기 위한 전통적인 방법으로 인발시험이 실시되어 왔다. 하지만 록볼트에 직접 외력을 가하는 인발시험의 경우 록볼트의 인장이 발생할 수 있어 인장된 록볼트에 대한 재평가가 불가피하며, 록볼트 주위의 지반이 파괴될 수도 있다. 또한 인발시험은 작업이 용이하지 않고 많은 시간과 노동력이 필요하다는 단점이 있다. 최근에는 록볼트 인발시험 도해방법이 지반의 특성이 고려되지 않았다는 점과 발주 기관별 시방기준 또한 명확하지 않다는 연구가 발표되기도 했다(장석재 등, 2006).

최근 인발시험의 문제점들을 개선하기 위해 록볼트 건전도 평가에 비파괴기법을 적용하는 사례가 연구되고 있다. 김현배 등(2005)은 록볼트를 해머로 타격하여 가속도계로 측정하는 실험을 통해 그라우팅 유무에 따른 파의 감쇠특성을 발표하였다. 한신인 등(2006)은 록볼트의 공동결합비율에 따른 파의 초동속도를 측정하는 실험을 실시하였다. 하지만 유도초음파의 경우 고주파수 성분을 많이 포함하고 있을 뿐 아니라 노이즈에 대한 영향이 커서 정확한 초동을 파악하기 쉽지 않다. 이를 개선하기 위해 이인모 등(2007)은 정확한 파의 속도를 측정하기 위해 웨이브렛 변환을 수행하여 록볼트 건전도 평가에 적용하였다. 하지만 위에 수행된 비파괴기법들은 록볼트 선단에서 가진된 파를 반대쪽 두부에서 수진하는 투과법으로 실시되어 이미 시공된 록볼트나 센서와 함께 시공되지 않은 록볼트에 대해서는 그 평가가 어렵다는 단점이 있다. 이종섭 등(2008)은 자유구속조건(non-embedded 또는 free-restricted condition)의 록볼트 시험체를 제작하여 록볼트 두부에 가진센서와 수진센서를 나란히 설치하여 록볼트 두부에서 파의 가진과 수진을 할 수 있는 반사법을 고안하였다. 하지만 이 연구는 록볼트에 그라우팅만 피복된 자유구속조건의 록볼트 시험체에 대해 이루어졌기 때문에 암반에 근입된 지중근입조건의 록볼트 시험체에 대한 반사법의 적용이 요구되어왔다.

본 연구에서는 공동결합비율에 따른 자유구속조건

및 지중근입조건의 록볼트 시험체를 제작하여 반사법으로 측정된 유도초음파의 웨이브렛 변환 해석을 통해 에너지 속도를 산정하여 록볼트의 건전도를 평가하고, 이를 투과법의 결과와 비교함으로써 반사법의 현장 적용 가능성을 제시하고자 한다. 본 논문은 웨이브렛 변환의 이론적 접근, 자유구속조건과 지중근입조건에서 수행된 실험의 개요 및 결과, 그리고 결론으로 구성된다.

2. 웨이브렛 변환

웨이브렛 분석은 주파수의 조절이 용이하므로, 측정된 신호의 주파수가 시간영역상에서 계속 변화할 경우 매우 유용하다(이인모 등, 2007). 즉, 웨이브렛 변환은 멀티스케일의 특성을 지닌 신호에 대하여 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).

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

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

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

여기서 $f(t)$ 는 원신호(original signal)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 1(a)와 같이 모 웨이브렛 함수를 시간축을 따라 좌우로 이동하는 위치에 관한 정보를 제공한다. s 는 스케일 파라미터(scaling parameter)로 그림 1(b)와 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.

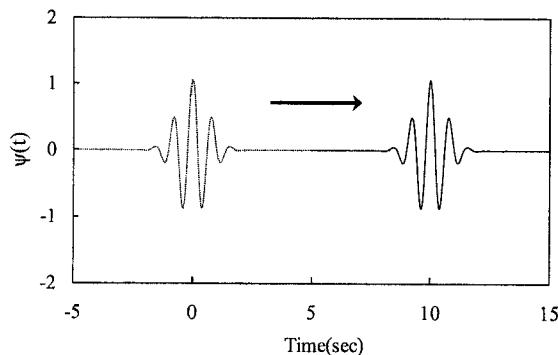
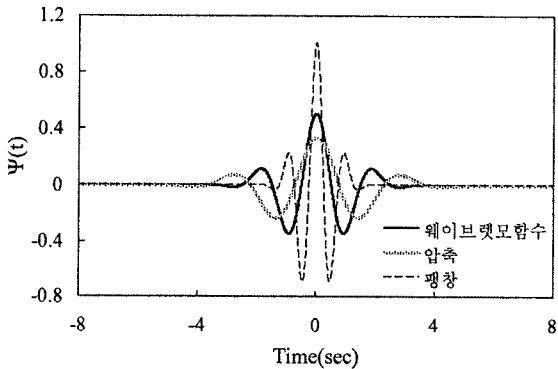
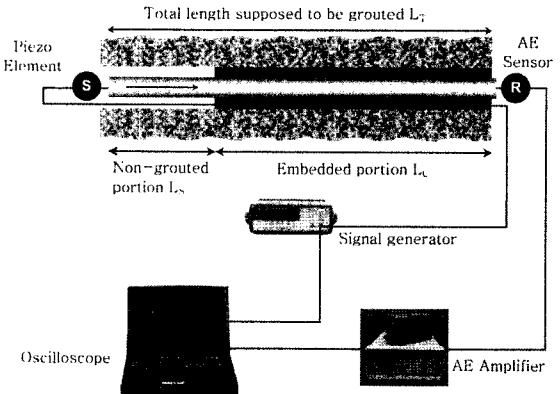
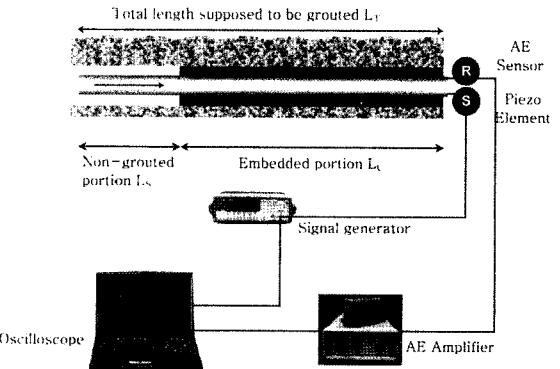
(a) Translation parameter, u (b) Scaling parameter, s

그림 1. Translation & Scaling parameter



(a) 투과법



(b) 반사법

그림 2. 록볼트의 전선도 평가를 위한 유도초음파 측정방법

3. 자유구속조건

본 연구에서는 암반에 근입된 록볼트의 전선도 평가를 수행하기에 앞서, 유도초음파의 적용성 검증을 위해 자유구속조건(록볼트에 그라우팅 페이스트만 피복)에서 실험을 실시하였다.

3.1 장비구성 및 실험방법

본 실험은 그림 2와 같이 투과법과 반사법으로 실시되었다. 투과법의 경우 철근 선단에 피에조 디스크 엘리먼트를 부착하여, 반대쪽 철근 두부의 AE 센서에 의해 유도초음파를 수진하도록 하였다. 반사법은 철근 두부에 피에조 디스크 엘리먼트와 AE 센서를 함께 설치하여, 피에조 디스크 엘리먼트에 의해 발생된 파가 반대쪽 선단에서 반사되어 다시 AE 센서에서 수진되도록 하였다.

또한 그리인더 작업을 통해 피에조 디스크 엘리먼트와 AE 센서 사이에 틈을 만들어 피에조 디스크 엘리먼트로부터 발생된 파가 AE 센서에 수진되는 신호에 직접적인 영향을 주는 것을 최소화시켰다.

유도초음파를 발생시키기 위한 가진용 센서로 직경 15 mm, 발진부 직경 10 mm인 피에조 디스크 엘리먼트를 사용하였다. 신호발생기에서 발생된 일정한 주파수의 전기적 신호가 피에조 디스크 엘리먼트에 전달되면 압전 세라믹의 주기적인 진동에 의해 철근을 따라 유도초음파가 발생되고 이를 AE 센서가 수진하도록 하였다. 가진된 신호와 수진된 신호의 증폭을 위해 신호증폭기를 사용하였다. 수진된 신호는 오실로스코프에 의해 수집되었다.

3.2 자유구속조건 록볼트 시험체의 제작

본 연구에서 사용된 록볼트 철근은 현장에서 주로 쓰이는 D25 이형철근 규격을 따랐으며, 길이는 실내실험

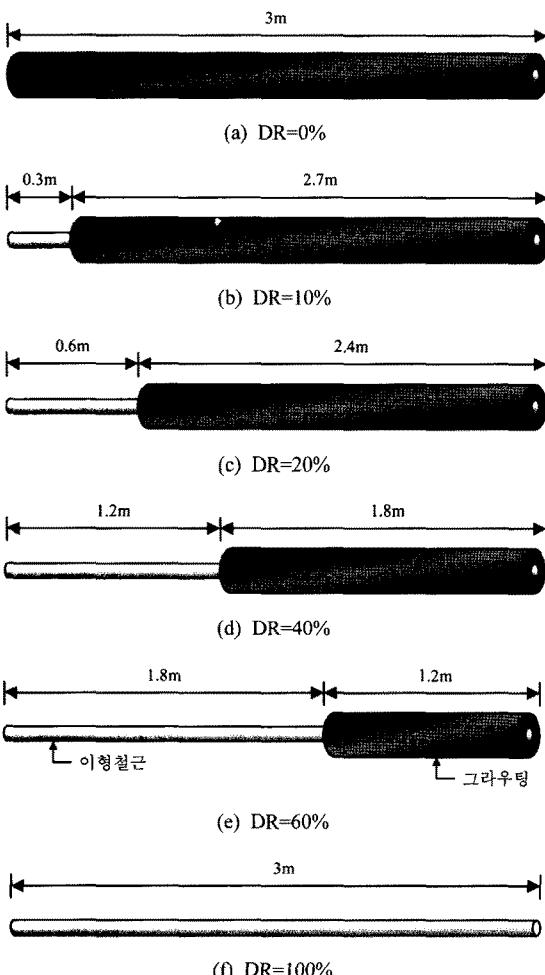


그림 3. 자유구속조건 록볼트 시험체 개요도. 이형철근의 직경: 25 mm, 그라우팅피복체 직경: 38 mm

표 1. 재료의 물성치

구분	철근	그라우팅	콘크리트
영계수(GPa)	206	15	30
포아슨비	0.3	0.27	0.25
밀도(g/cm ³)	7.9	2.1	2.4
P-파 속도(m/s)	5000	2500	3500
비고	DR=100%, D25 록볼트 철근	Cement paste	호칭강도 21MPa

의 제약상 3 m로 제한하였다. 시공시 발생한 록볼트의 공동결합을 모사하기 위해 그림 3과 같은 록볼트 시험체를 제작하였다.

록볼트 그라우팅의 결합 정도(DR: defect ratio)는 피복된 그라우팅의 길이와 철근의 길이와의 비로 나타내었다. 시험체는 결합 정도에 따라 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 100%(철근자체)의 비율로 제작되었다. 또한 시험체의 결합은 선단부에 발생된 것으로 모사하였다. 그라우팅 재료는 시멘트와 물을 중량비 1:0.5로 혼합하여 철근을 포함한 직경 38 mm로 제작되었다. 사용된 재료의 물성치는 표 1에 나타내었다.

3.3 자유구속조건 유도초음파 신호 측정

공동결합비율이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 100%인 록볼트에 대해 투과법과 반사법을 적용하여 실험을 실시하였다. 측정된 신호는 그림 4와 같다. 투과법에 의해 측정된 신호의 경우 그림 4(a)와 같이 공동결합비율이 증가함에 따라 수진된 신호의 초동시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 또한 각 파군의 형태가 뚜렷해지며 그 간격도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 반사법에 의해 측정한 신호를 나타낸다. 반사법을 통해 측정한 신호의 경우 초기에 발생하는 직접파의 영향으로 초동의 파악이 불가능하지만, 직접파 이후 록볼트 선단에서 반사되어 나타나는 반사파군의 형태를 확인할 수 있다. 반사법에서 측정된 신호는 공동결합비율이 증가함에 따라 반사파군의 형태가 뚜렷해지며, 그 간격 또한 줄어들어 투과법의 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

3.4 자유구속조건 웨이브렛 변환 분석 결과

파의 속도를 산정하는데 있어 초동시간을 이용하는 방법이 널리 사용되고 있다. 하지만 유도초음파의 경우

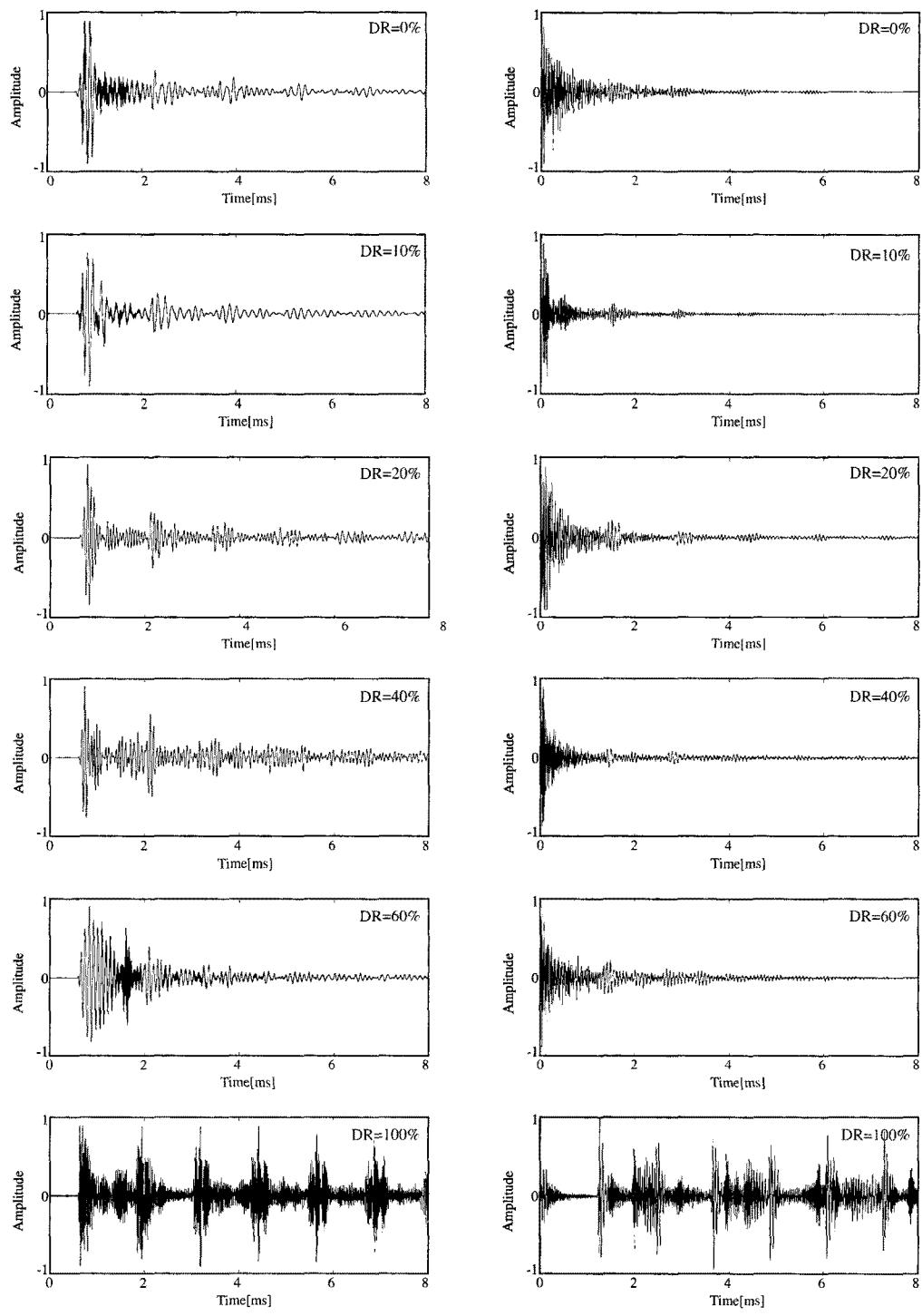
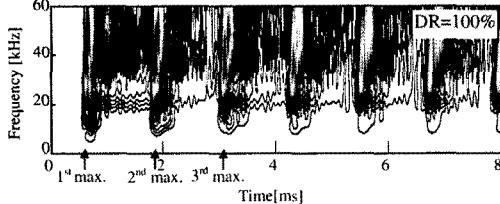
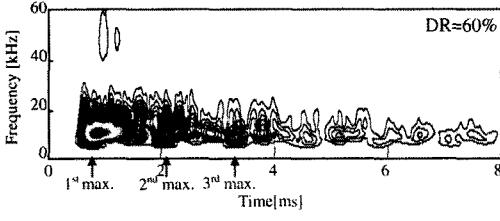
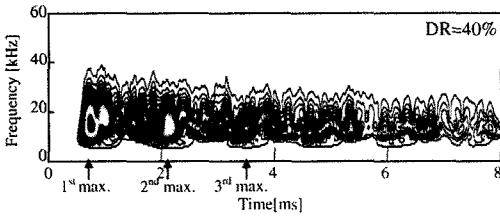
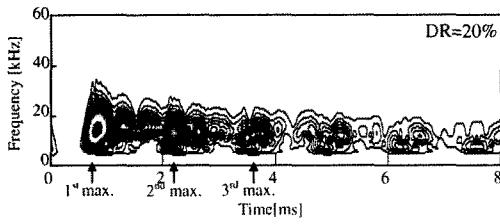
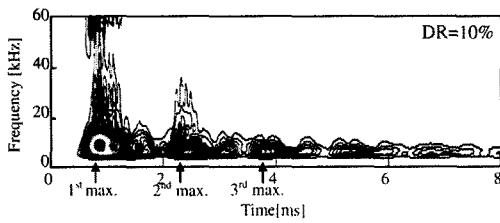
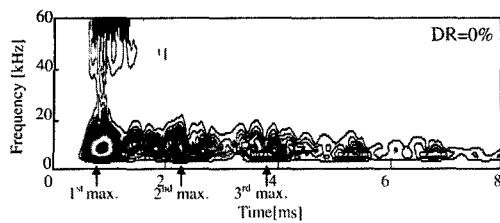
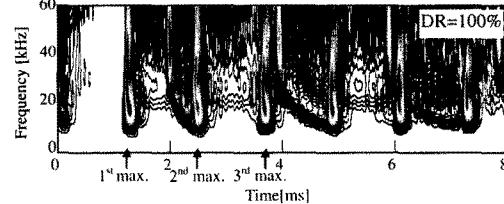
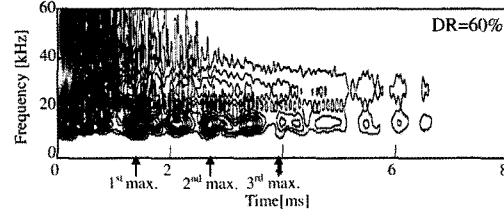
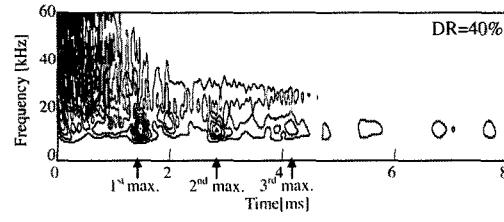
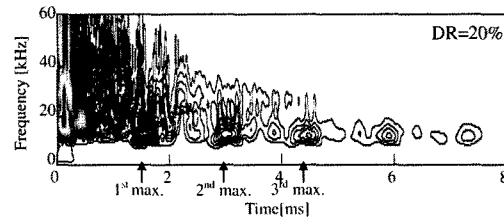
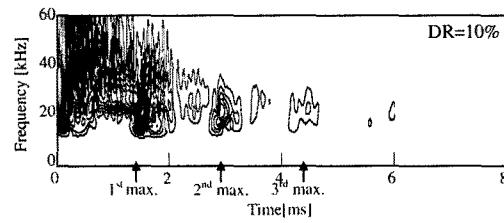
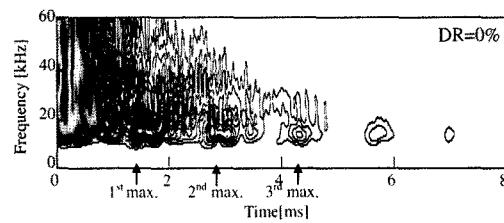


그림 4. 측정신호 - 자유구속조건



(a) 투과법



(b) 반사법

그림 5. 웨이브렛 변환 - 자유구속조건

고주파수 성분을 많이 포함하고 있을 뿐 아니라 노이즈에 대한 영향이 커서 정확한 초동을 파악하기 쉽지 않다. 노이즈의 제거를 위해 과도한 주파수 필터링을 수행할 시 초동시간이 바뀌는 문제 또한 간과할 수 없다. 본 연구에서는 파의 속도를 산정하기 위해 전체 주파수에 대한 웨이브렛 변환을 수행하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)와 같이 투과법에 의해 측정된 신호에 대한 웨이브렛 변환 결과, 공동결합비율이 증가함에 따라 첫 번째 최대 에너지를 가진 파군이 나타나는 시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 에너지를 가진 각 파군의 간격도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)은 반사법에 의해 측정된 신호에 대한 웨이브렛 변환 결과를 보여준다. 이 경우, 초기의 직접파 이후에 록볼트 선단에서 반사된 최대 에너지를 가진 반사파군들이 나타나는 것을 볼 수 있다. 웨이브렛 변환 결과 공동결합비율이 증가함에 따라 투과법과 유사하게 최대 에너지를 가진 각 반사파군들의 간격이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

3.5 자유구속조건 에너지 속도 산정

록볼트를 따라 전파되는 유도초음파의 에너지 속도는 록볼트 건전도 평가의 한 지표가 될 수 있다. 결합부가 존재하는 록볼트의 경우 주변 그라우팅 및 암반으로 에너지 손실이 적으므로 피복된 경우보다 유도초음파의 전파속도가 크게 된다. 따라서 록볼트 결합부의 비율이 높을수록 유도초음파의 전파속도는 증가하게 된다. 유도초음파의 에너지 속도(V_E)는 그림 5와 같이 각 파군의 최대 에너지 지점간의 시간간격(Δt)과 록볼트 철근의 길이(L)로부터 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_E = \frac{2L}{\Delta t} \quad (3)$$

록볼트의 건전도 평가를 위해 웨이브렛 변환 결과로부터 에너지 속도를 산정하였다. 그림 5에 나타난 바와 같이 50 kHz 이상의 주파수 대역에서는 유도초음파의 에너지가 크게 감쇠되어 반사파군을 파악하기 어렵고, 주로 5 kHz-30 kHz 주파수 대역에서 큰 에너지를 가진 유도초음파의 반사파군을 확인할 수 있다. 따라서 5 kHz-30 kHz 주파수 대역에서 유도초음파 반사파군의 최대 에너지 발생 지점을 선정하였다. 에너지

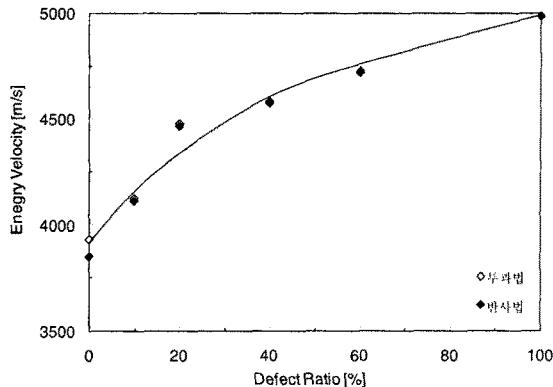


그림 6. 에너지 속도 - 자유구속조건

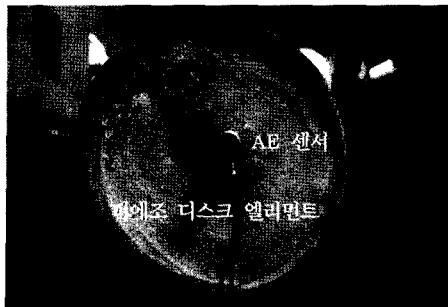
속도는 록볼트 철근의 왕복거리를 최대 에너지 파군들 간의 시간 간격으로 나누어 계산하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 유도초음파의 에너지 속도는 공동결합비율이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보이며, 투과법과 반사법이 서로 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 투과법에서 초동을 이용하여 록볼트의 건전도를 평가한 한신인 등(2006) 결과와 매우 유사한 경향을 나타낸다.

4. 지중근입조건

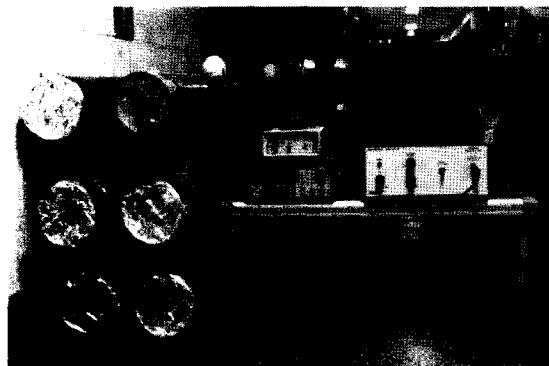
암반에 근입된 록볼트를 모사하기 위해 공동결합비율에 따라 그라우팅으로 피복된 록볼트에 콘크리트를 타설하여 지중근입조건의 록볼트 시험체에 대한 건전도 평가를 실시하였다.

4.1 장비구성 및 실험방법

지중근입조건의 록볼트 시험체에 대한 실험이 실시되었으며, 건전도 평가를 위한 장비구성 및 실험방법은 3.1 절에 명시된 내용과 동일하다. 그림 7은 지중근입조건의 록볼트 시험체를 보여준다. 반사법의 적용을 위한 피에조 디스크 엘리먼트와 AE 센서의 설치는 그림 7(a)와 같다. 피에조 디스크 엘리먼트와 AE 센서 사이는 직접파 차단을 위한 틈을 만들기 위해 그라인더 작업을 수행하였다.



(a) 피에조 디스크 엘리먼트와 AE센서 - 반사법



(b) 록볼트 시험체 전경 - 지중근입조건

그림 7. 지중근입조건 록볼트 시험체

4.2 지중근입조건 록볼트 시험체의 제작

암반에 근입된 록볼트를 모사하기 위하여 3.1절에 명시된 조건의 그라우팅으로만 피복된 록볼트 시험체에 호칭강도 21MPa의 콘크리트를 타설하여 그림 8과 같은 지중근입조건의 록볼트 시험체를 제작하였다. 콘크리트 블록은 공동결합비율 0%, 10%, 20%, 40%, 60%에 따라 직경 15cm, 길이 3m의 원기둥모형으로 총 5개가 제작되었다. 직경 15cm는 유도초음파의 전파 영향범위(한신인 2008)를 고려하여 결정하였다. 공동결합비율이 100%인 록볼트 시험체는 콘크리트 피복이 필요하지 않으므로, 기 제작된 록볼트 시험체를 사용하였다.

4.3 지중근입조건 유도초음파 신호 측정

공동결합비율이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%인 지중근입조건의 록볼트에 대해 투파법과 반사법을 적용하여 실험을 실시하였다. 측정된 신호는 그림 9와 같다. 투파법으로 측정된 결과는 그림 9(a)와 같으며, 지중근입조

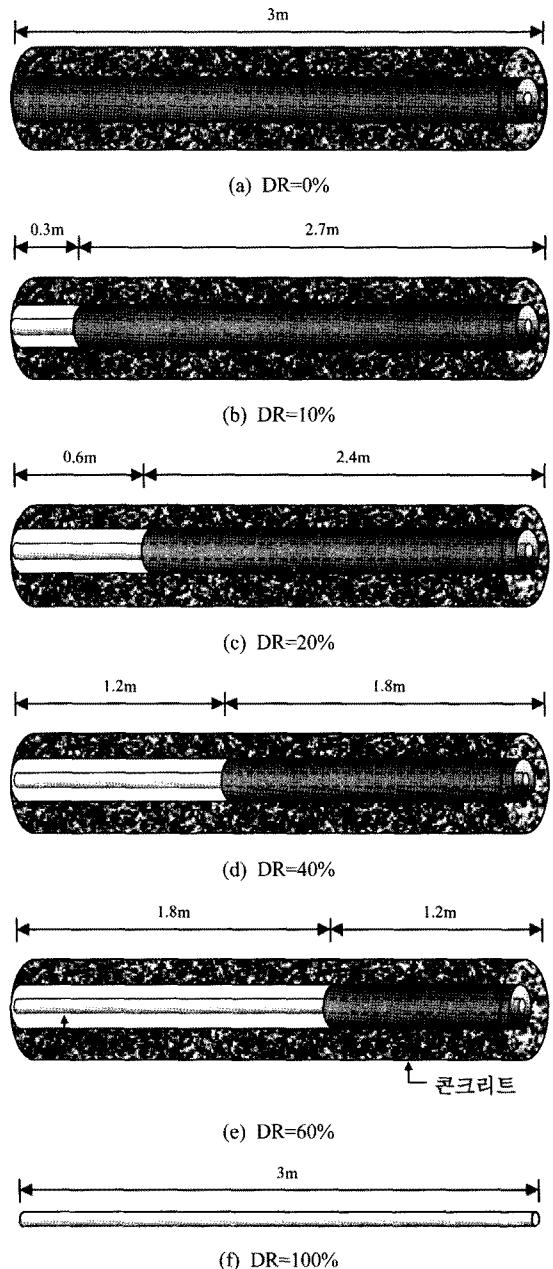


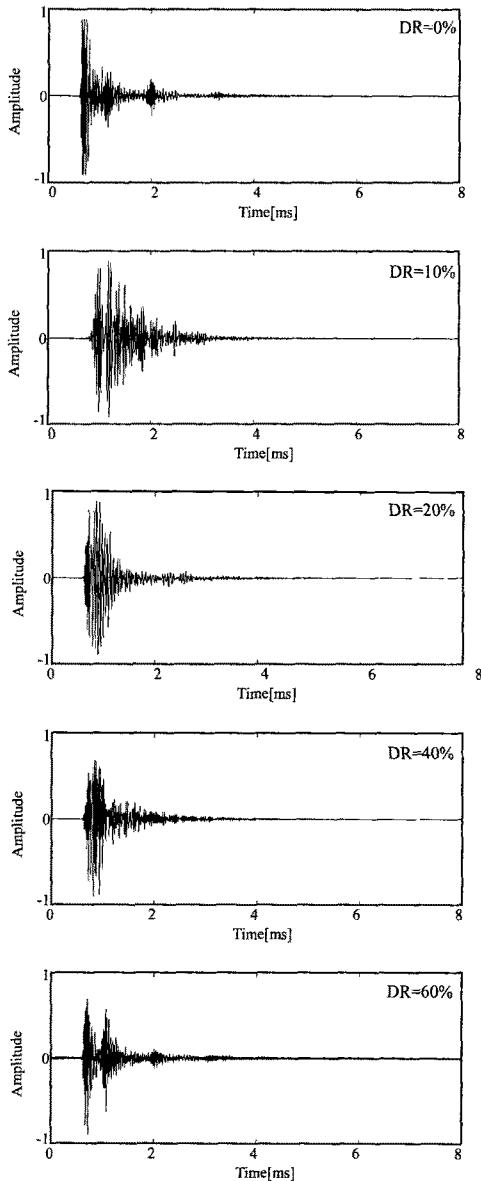
그림 8. 지중근입조건 록볼트 시험체 개요도. 이형철근의 직경: 25 mm, 그라우팅피복체 직경: 38 mm, 콘크리트 원주체의 직경: 150 mm

건의 록볼트 시험체의 공동결합비율이 증가함에 따라 수진되는 신호의 초동 시간이 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 공동결합비율이 증가함에 따라 각 반사파군의

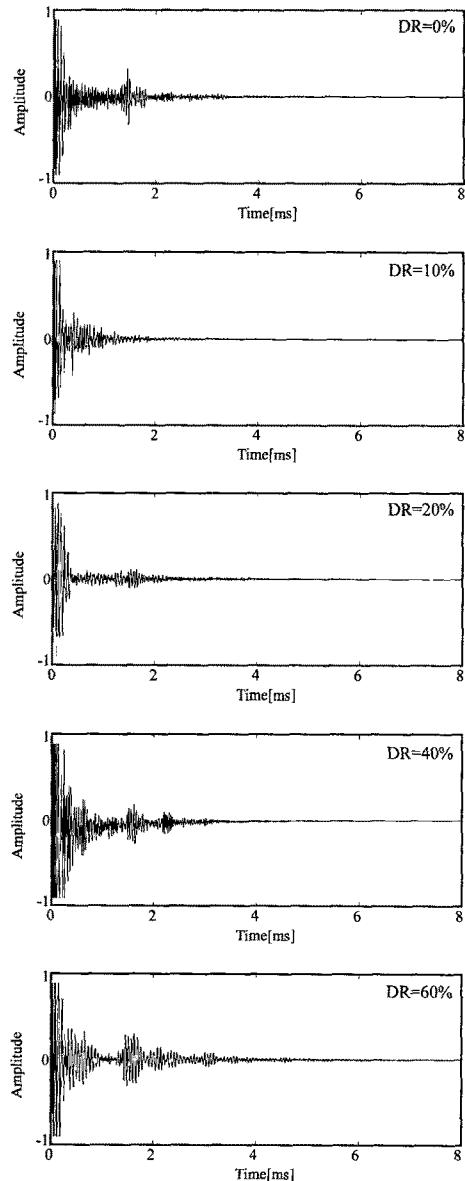
간격이 줄어들며 그 형태도 뚜렷해지는 것을 볼 수 있다. 반사법의 경우 그림 9(b)와 같이 초기의 직접파가 수진된 이 후 록볼트 선단에서 반사된 첫 번째 반사파가 나타나며, 공동결합비율이 증가함에 따라 첫 번째 반사파가 나타나는 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 공

동결합비율이 증가함에 따라 각 반사파군의 간격이 줄어들며 그 형태도 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다.

그림 4와 그림 9가 보여주는 바와 같이 지중근입조건의 록볼트에 대해 투과법과 반사법으로 측정하여 수진된 신호는 피복된 콘크리트로의 에너지 손실로 인해 자



(a) 투과법



(b) 반사법

그림 9. 측정신호 - 지중근입조건

유구속조건에서 측정된 신호 보다 선단에서 반사되어 돌아오는 파군의 형태가 뚜렷하지는 않다. 그러나 공동 결합비율이 증가함에 따라 파군의 형태가 뚜렷해지며 웨이브렛 변환을 수행할 시 반사파군의 최대 에너지 발생부의 파악이 용이할 것으로 보인다.

4.4 지중근입조건 웨이브렛 변환 분석 결과

공동결합비율이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%인 지중근입조건의 롤볼트 시험체로부터 측정된 신호에 대한 웨이브렛 변환을 수행하였고 그 결과는 그림 10과 같다. 그림 10(a)에 나타낸 투과법의 결과를 보면 공동결합비

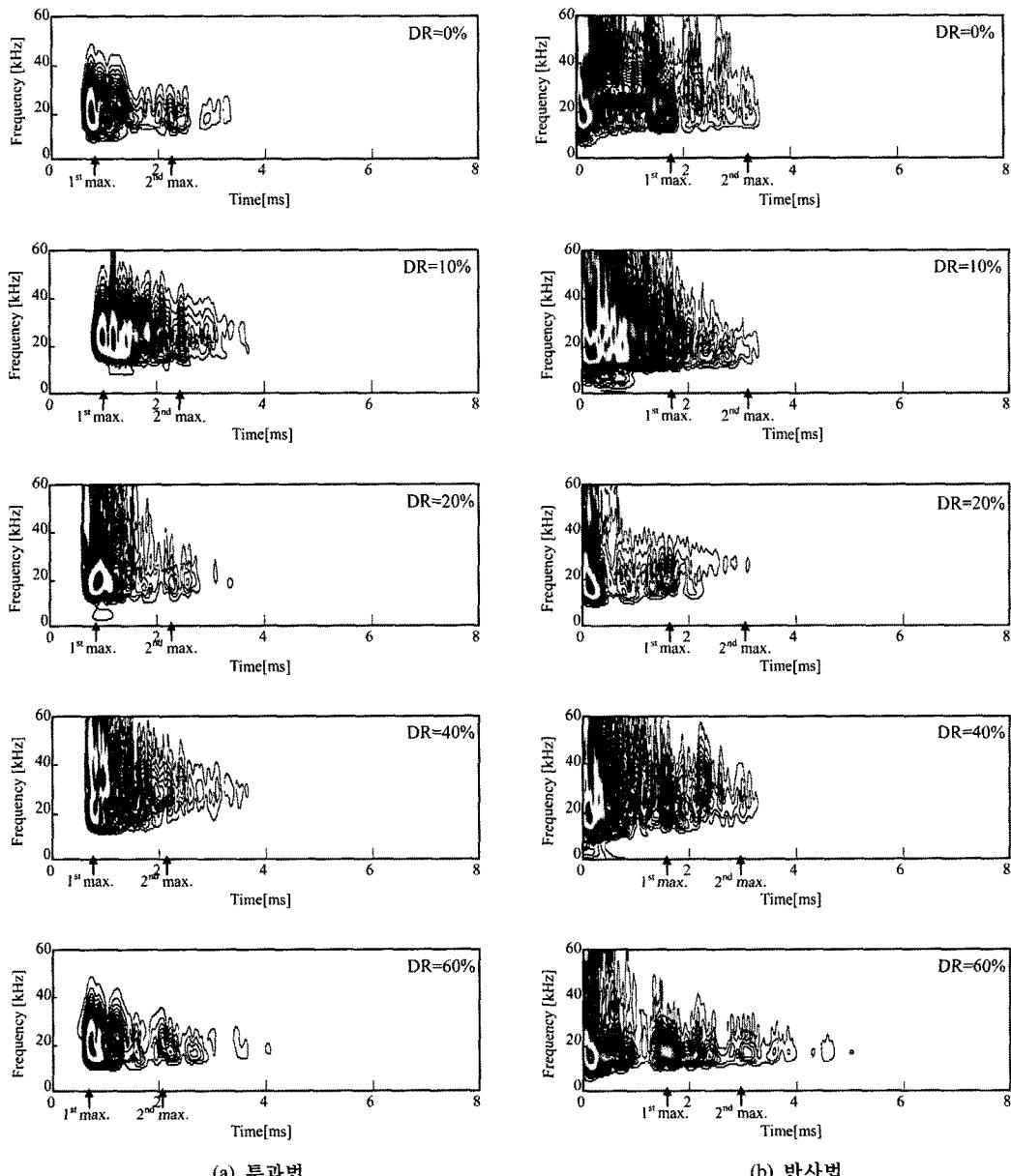


그림 10. 웨이브렛 변환 - 지중근입조건

율이 증가함에 따라 최대 에너지를 가진 첫 번째 반사파군이 나타나는 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있으며 각 반사파군의 간격 또한 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림 10(b)에 나타낸 반사법의 경우도 투과법과 비슷한 경향을 나타내었으며, 초기의 직접파 이후에 최대 에너지를 가진 첫 번째 반사파군이 나타나는 것을 볼 수 있다. 공동결합비율이 증가함에 따라 최대 에너지를 가진 첫 번째 반사파군이 나타나는 시간이 줄어들고 롤볼트 철근 선단에서 반사되어 돌아오는 각 반사파군의 간격 또한 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

유도초음파의 투과법과 반사법을 통해 지중근입조건의 롤볼트 시험체에 측정된 신호로 웨이브렛 변환을 수행한 결과, 자유구속조건에서 얻어진 신호 보다 반사파군의 형태가 뚜렷하지는 않지만 웨이브렛 변환을 통해 최대 에너지를 가진 반사파군의 위치를 파악할 수 있었다. 이 결과는 에너지 속도를 산정하는 데 있어 웨이브렛의 효용성을 보여준다.

4.5 지중근입조건 에너지 속도 산정

지중근입조건의 롤볼트 시험체에 대한 웨이브렛 변환 수행 결과, 그림 10과 같이 50kHz 이상의 주파수 대역에서는 유도초음파의 에너지가 크게 감쇠되어 롤볼트 철근 선단에서 반사되어 오는 반사파군을 파악하기 어렵다. 하지만 10kHz-40kHz의 주파수 대역에서 큰 에너지를 가진 유도초음파의 반사파군을 확인할 수 있다. 따라서 10kHz-40kHz의 주파수 대역에서 유도초음파 반사파군의 최대 에너지 발생 지점을 선정하였다. 3.5절에 명시된 방법으로 에너지 속도를 산정하여 나타내면 그

림 11과 같다. 그림 11에서 보는 바와 같이 공동결합비율이 증가함에 따라 에너지 속도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

5. 자유구속조건 vs. 지중근입조건

자유구속조건과 지중근입조건에서 산정한 에너지 속도를 그림 11에 그 결과를 비교하였다. 그림 11을 보면 자유구속조건과 지중근입조건에서 모두 롤볼트 시험체의 공동결합비율에 따라 증가함에 따라 에너지 속도가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 자유구속조건에서의 에너지 속도가 지중근입조건에서의 에너지 속도보다 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 유도초음파의 에너지가 콘크리트 블록에 의해 손실되는 것으로부터 기인한다(한신인 2008).

6. 결 론

본 연구에서는 롤볼트의 건전도 평가를 위해 유도초음파를 적용하였으며, 자유구속조건과 지중근입조건의 공동결합비율이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 100%인 롤볼트 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체에 대하여 롤볼트 건전도 평가의 현장 적용 가능한 방법으로 반사법을 실험에 적용하였고 이를 투과법의 결과와 비교하였다. 투과법과 반사법을 통해 얻은 신호로부터 웨이브렛 변환을 수행하여 에너지 속도를 산정한 결과, 서로 비슷한 경향을 나타낸다. 즉, 공동결합비율이 증가함에 따라 유도초음파로부터 산정된 에너지 속도는 두 방법 모두에서 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 자유구속조건에서의 에너지 속도가 지중근입조건에서의 에너지 속도 보다 크게 나타났다. 이는 콘크리트 블록으로 유도초음파의 에너지 손실이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구는 유도초음파를 이용한 롤볼트 건전도 평가에 있어 반사법의 유용성과 현장 적용 가능성을 보여준다. 롤볼트의 결합은 선단부에 발생된 것으로 모사하였고, 롤볼트 중간부에 발생된 결합에 대한 평가는 파의 다중반사로 인해 에너지 속도를 이용한 접근이 어려울 것으로 사료된다. 따라서, 향후 롤볼트 중간부 공동결합 평가에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

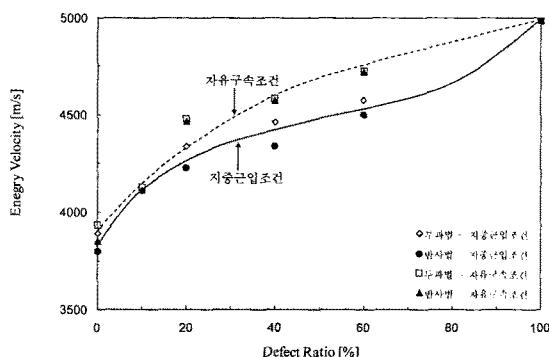


그림 11. 에너지 속도 - 자유구속조건 vs. 지중근입조건

감사의 글

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

참고문헌

1. 김현배, 이용준, 한신인, 엄태원, 이종섭, 이인모 (2005), “록볼트 그라우팅 시공품질에 대한 비파괴조사-건전도 평가 기술에 관한 연구”, 2005 한국암반공학회 주제 학술발표회 논문집, 춘천, pp. 115-126.
2. 이인모, 김현진, 한신인, 이종섭 (2007), “유도파에 대한 푸리에 및 웨이브렛 변환을 이용한 롱볼트 건전도 평가”, 한국터널공학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 403-413.
3. 이종섭, 유정동, 한신인, 배명호, 이인모 (2008), “유도 초음파의 반사법과 투과법 비교를 통한 롱볼트 건전도 평가”, 2008 한국지반공학회 봄 학술발표회, 2008 한국 지반공학회 봄 학술발표회 논문집 pp. 42-50.
4. 장석재, 꽈수정, 김두준 (2006), “철도 터널 공사용 롱볼트 인발 시험의 문제점과 개선방안에 관한 연구”, 한국 철도학회 논문집, 제9권, 제1호, pp. 89-94.
5. 한신인, 이종섭, 이용준, 안동근, 이인모 (2006), “비파괴 시험기법을 이용한 롱볼트그라우팅의 공동결합평가”, 2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 538-541.
6. 한신인 (2008), “시간-주파수 분석기법을 이용한 롱볼트 건전도와 유도파 전파특성에 관한 연구”, 박사학위논문, 고려대학교, pp. 81-85.
7. Daubechies, I. (1998), “Orthonormal bases of compactly supported wavelet”, Communications in Pure and Applied Mathematics, Vol. 41, pp. 909-996.
8. 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.



유 정 동

고려대학교 공과대학
건축사회환경공학과
석사과정

E-mail: noorung2love@paran.com



배 명 호

고려대학교 공과대학
건축사회환경공학과
석사과정

E-mail: best726@hanmail.net



한 신 인

(주)서영엔지니어링
연구소
상무

E-mail: sihan@seoyeong.co.kr



이 인 모

고려대학교 공과대학
건축사회환경공학과
교수

E-mail: inmolee@korea.ac.kr



이 종 섭

고려대학교 공과대학
건축사회환경공학과
부교수

E-mail: jongsuh@korea.ac.kr