

초음파 투과법을 이용한 록볼트 그라우팅의 건전도 평가

한신인^{1*}, 이종섭², 이용준³, 남석우⁴, 이인모⁵

Integrity evaluation of rock bolt grouting using ultrasonic transmission technique

Shin-In Han, Jong-Sub Lee, Yong-Jun Lee, Seok-Woo Nam, In-Mo Lee

Abstract As one of the main support systems, rock bolts play a crucial role in the reinforcement of tunnels. Numerical and experimental studies using a transmission method of ultrasonic guided waves are performed to evaluate the integrity of rock bolts encapsulated by grouting paste. Numerical simulations using "DISPERSE" are carried out for the selection of the optimal experimental setup, i.e. non-destructive testing (NDT) system of the rock bolt. Based on results of the numerical simulation, the calculated frequency range for NDT testing is between 20kHz and 70kHz with the first longitudinal L(1) mode. Laboratory transmission tests are performed by attaching the piezo electric sensor at the tip of the rock bolt before embedding. Both of analytical and experimental results show that the amplitude of signals as well as the wave velocity increases with increase in the defect ratio of grouting paste. The defect in grouting paste means that the space around the rock bolt is not fully filled with the grouting paste. Experimental results also show that the increase of the wave velocity is more sensitive to the defect ratio increase than that of the amplitude. This study demonstrates that the transmission technique of ultrasonic guided waves may be a valuable tool in the evaluation of the rock bolt integrity.

Keywords: Rock bolt, non-destructive test, guided wave, dispersion, defect ratio, AE (acoustic emission)

요 지 본 연구의 목적은 록볼트의 건전도를 평가하기 위하여 록볼트의 비파괴시험을 기술하고 비파괴시험의 적용성을 조사하는 것이다. 록볼트 자체와 그라우팅재를 포함한 록볼트의 건전도를 평가하기 위하여, 수치해석 및 실험적 방법을 이용한 두 가지 방법이 적용되었다. 수치해석적 방법에서는 "DISPERSE" 프로그램을 이용하여 록볼트 시스템에서 유도파 전달시의 분산성분석을 수행하였다. 분산선도 곡선은 지중근입되어 있는 록볼트에 대하여 주변압반과 그라우팅재의 강성에 따라 신호파의 진폭감쇠정도와 주파수변화대비 전파속도의 영향을 보여준다. 이로 부터 록볼트의 건전도 시험을 위한 최적의 주파수를 추정할 수 있으며, 그 결과 L(1) 모드에서 20~70 kHz가 최적의 주파수대역으로 선정하였다. 실험적 방법에서는 시험체를 제작한 후 현장조건을 모사하여 실내비파괴시험을 실시하였다. 비파괴 실험기법으로는 록볼트 선단부에 가진 센서를 부착, 매입하여 전기신호 가인에 의한 투과법을 적용하였다. 그라우팅과 주변압반에 의해 신호파의 전파속도와 진폭에 영향을 있으며, 그라우팅과 주변압반으로의 leaking 등에 의하여 신호파의 진폭이 감쇠하는 것으로 나타났다. 또한 시험체가 그라우팅으로 피복되어 있을 경우 자유구속 및 지중근입 조건에서 공동결함 크기가 증가함에 따라 무결함부에 비하여 진폭이 증가하였다. 그리고 수신된 신호파의 초동시간이 감소하여 전파속도는 전반적으로 선형적 증가 경향을 보였으며, 진폭변화에 비하여 전파속도가 공동결함비율 변화에 더 민감한 반응을 보였다. 본 연구는 록볼트의 건전도 평가시에 비파괴시험이 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있었다.

주요어: 록볼트, 비파괴조사, 유도파, 분산성, 공동결함비율, 음향방출

1. 서 론

생활공간 고밀도화와 생활수준향상 등에 의하여 새로운 공간의 확보가 요구되고 있으며, 교통·문화시설이나

발전소, 폐기물처리장 등과 같은 산업기간시설을 지하에 대단면 터널로 건설함으로써 환경훼손을 저감하고 건설추진시의 민원발생을 최소화할 수가 있다. 현재 국내의 주된 터널시공개념은 NATM으로 록볼트와 함께 슛크리트를 주요지보재(primary support system)로 하면서 2차복공 lining를 설치하고 있으나, 점차적으로 Single-Shell공법 개념을 도입하려는 추세가 나타나고 있으며 이에 따라 록볼트 지보재의 중요성이 재인식되고 있다.

¹고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정

²고려대학교 건축사회환경공학과 조교수

³(주)포스코 건설기술 연구소

⁴삼성물산(주) 건설부문 토목사업본부 과장

⁵고려대학교 건축사회환경공학과 교수

*교신저자:이인모 (inmolee@korea.ac.kr)

일반적으로 터널구조물 등에서 암반보강용 록볼트를 타설하기 위하여 직경 38mm의 천공홀을 조성하고 그라우팅충진과 함께 철근을 근입시공한다. 그러나 수평방향에 대하여 상향의 록볼트를 시공할 경우, 충전된 그라우팅은 양생전에 중력에 의하여 시멘트모르타르가 흘러내릴 가능성이 크다. 따라서 록볼트 지중선단부에서 그라우팅충진 불량이 초래하게 되며, 이러한 록볼트지보재의 전형적인 구조적 결함은 구조물 시공전후의 안정성에 악영향을 미칠 수 있다.

록볼트 그라우팅에 대한 전통적인 품질확인 방법으로 시공중 인발시험을 계측항목중의 하나로 설정하여 수행하고 있으나, 인발시험은 일반적으로 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 따라서 이러한 문제점을 개선하면서 록볼트의 시공 품질확인을 할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 이에 대하여 현장에서 사용이 간편하고 신뢰성이 높은 새로운 기법으로 비파괴조사 (non-destructive testing) 방법이 그 대안이 될 수 있다.

문헌 및 기술 현황조사에 의하면 록볼트, 콘크리트내의 근입철근, 말뚝 등과 같은 원주상 구조체 (cylindrical structure)에 대한 건전도 평가연구가 해외에서 수행되고 있는 것으로 조사되었다. 영국 등의 일부 지역에서 유도초음파 (guided ultrasonic wave)를 이용하여 콘크리트보강용 tendon (Beard 등, 2003)이나 록볼트 철근 (Beard and Lowe, 2003)의 건전성 평가 등 유사한 연구 개발이 이미 진행 중에 있는 것으로 파악되었다. 최근에 Madenga 등(2006)은 록볼트에서의 그라우팅 양생시간에 따른 전파속도와 주파수특성 변화를 연구하였고, Zhang 등(2006)은 이에 대하여 수치해석 및 실내실험으로부터 주파수에 따른 전파속도와 진폭특성을 분석하였다. 또한 유도파의 진폭특성을 이용하여 록볼트 그라우팅의 피복건전도를 파악하는 조사장치를 상용화한 개발 사례가 있었고 (Turner, 1988), 콘크리트내 철근의 건전도 평가 연구 (Na 등, 2002)나 말뚝과 같은 원주상 구조체에 대한 품질평가 연구 (Chao, 2002) 등이 수행되었다. 이러한 연구에서 사용하는 비파괴조사기법은 주로 반사법 (empact-echo method) 또는 투과법 (transmission method)이며, 원주상 구조체 자체 또는 경계부에서의 건전도 평가에 대하여 유도파의 적용성 연구에 초점이 맞추어 있다.

본 연구의 목적은 그라우팅으로 피복된 록볼트에 대

하여 초음파를 이용한 건전도를 평가와 그 적용성에 있다. 본 논문은 유도파 특성고찰 및 수치해석에 의한 분산성분석, 투과법을 사용한 록볼트 자유구속조건 및 지중근입조건에서의 실내실험과 분석, 그리고 마지막으로 결론으로 구성되었다.

2. 록볼트에서의 유도파 분산성

2.1 유도파(Guided wave)와 분산성(Dispersion)

무한 등방 탄성매질내에 중력과 같은 body force을 고려하지 않은 조건에서 입자운동을 벡터로 표현하면, 식 (1)의 운동방정식으로 전개할 수 있다(Kolsky, 1963).

$$\rho \frac{\sigma \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

여기서, λ 와 μ 는 Lamé 상수이고, ρ 는 요소의 밀도 (density), \mathbf{u} 는 x, y 및 z방향 변위벡터, t는 시간, ∇ 는

vector operator, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{e}_x, \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{e}_y, \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_z \right)$ 이고, ∇^2 는 La-

placian operator, $\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ 이다.

변위장(displacement field)에서, 식 (1)에서 표현된 변위벡터, \mathbf{u} 는 Helmholtz decomposition을 도입하여 식 (2)와 같이 scalar potential, ϕ 와 vector potential, \mathbf{H} 의 관계로 나타낼 수 있다(Graff, 1975).

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$c_1^2 \nabla^2 \phi = \partial^2 \phi / \partial t^2 \quad (3)$$

$$c_2^2 \nabla^2 \mathbf{H} = \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 \quad (4)$$

여기서, c_1 과 c_2 는 다음과 같다.

$$c_1 = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$c_2 = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2} \quad (6)$$

탄성매질 조건에서 식 (5) 및 (6)에 표현된 c_1 과 c_2 는 실수값을 가지며, 그 크기는 각각 종파(longitudinal bulk wave) 및 횡파(shear bulk wave)의 속도와 같다. 또한 여러 층으로 구성된 원주상 구조체에서 경계면상 작용응력과 변위의 연속조건, 평형조건을 만족하는 파전달 특성방정식을 유도할 수 있다. 이 특성방정식의 해를 그래프로 나타내어 주파수변화 대비 군속도나 에너지속도 변화 등, 즉 분산성을 파악할 수가 있다. 그러므로 분산성 해석을 통하여 임의의 피검체 시스템에 대하여 파전달 주파수변화에 따른 속도변화, 그리고 발생된 중첩파들의 형상(mode)변화 등을 파악할 수가 있다.

2.2 분산성 분석

2.2.1 분석 개요

록볼트와 같은 피검체내에서 발생된 유도파는 파전달 시 주변 암반으로 에너지가 손실되는 경향이 있으며, 이러한 에너지 손실에 의한 유도파의 감쇠특성은 유도파를 이용한 비파괴실험시 매우 중요한 파악 인자중의 하나이다. 에너지 감쇠에 의하여 록볼트 매질내에서 파가 전파됨에 따라 파의 진폭이 감소하고, 주파수의 변화에 따라 위상속도와 군속도가 변화한다.

록볼트그라우팅 건전도평가 비파괴실험을 위해서는 분석대상인 파에 대하여 보다 적절한 파의 선정과 감쇠 정도의 파악 및 사용주파수대역의 선택이 필요하다. 이를 위하여 영국의 Imperial College에서 개발한 “DISPERSE”라는 프로그램(Pavlakovic and Lowe, 2003)을 사용하여 유도파의 분산성을 분석하였다.

록볼트 시스템에 대한 해석모델링은 그림 1과 같이 원주상 구조체(cylindrical structure)로 모사하여 주변 암반층, 시멘트 모르타르 그라우팅 피복층, 그리고 철근 강봉 등 3개의 층으로 적용하였다. 각 구성층 재료의 특성을 나타내는 탄성계수(영계수), 포아손비와 밀도, 그리고 각 구성층의 두께가 사용되며, 적용치는 표 1과 같다.

2.2.2 록볼트 분산성 분석결과

그라우팅 피복상태에서의 자유구속조건 및 지중근입

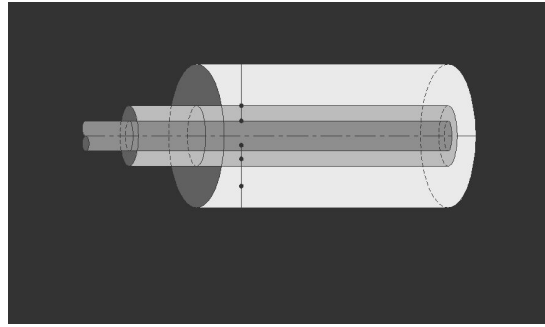


그림 1. 록볼트 시스템 모델링

표 1. 파전달에 따른 분산성분석 적용물성치

구분	철근	그라우팅	암반
영계수 (GPa)	206	10	20
포아손 비	0.30	0.27	0.25
밀도 (g/cm ³)	7.9	2.1	2.4
두께 (mm)	12.5	6.5	infinite
비고	D25	cement mortar	

조건에 대한 분산성 분석결과는 그림 2 및 그림 3과 같다. 여기서 기호 L과 F는 각각 종방향 모드(longitudinal mode)와 횡방향 모드(flexural mode)를 의미하며, 괄호 내의 숫자는 주파수증가에 따른 일련의 순서(mode number)를 나타낸다. 분석결과 종방향 모드 L(1)의 파가 약 20~70kHz 주파수대역에서 에너지속도가 최대값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이에 비하여 횡방향 모드는 보다 작은 에너지속도를 나타내어 파전파시에 더 큰 진폭감쇠가 발생할 것으로 예상된다. 그러므로 본 연구에서는 종방향 모드 L(1)를 분석대상으로 사용하였다.

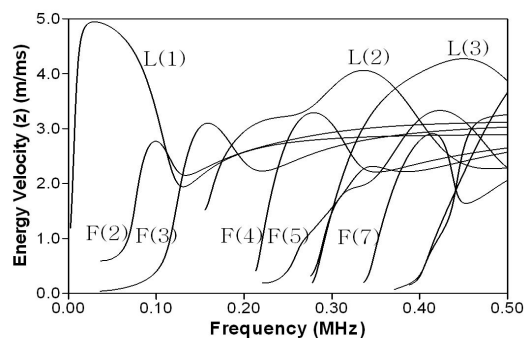


그림 2. 자유구속 상태의 그라우팅피복 록볼트에 대한 에너지

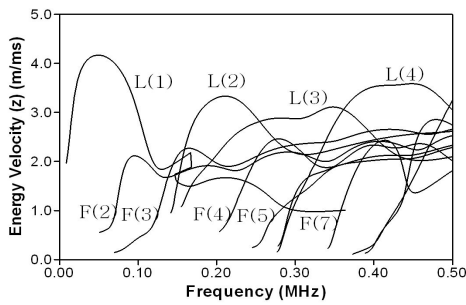


그림 3. 지중근입 상태의 그라우팅피복 록볼트에 대한 에너지 속도 분포

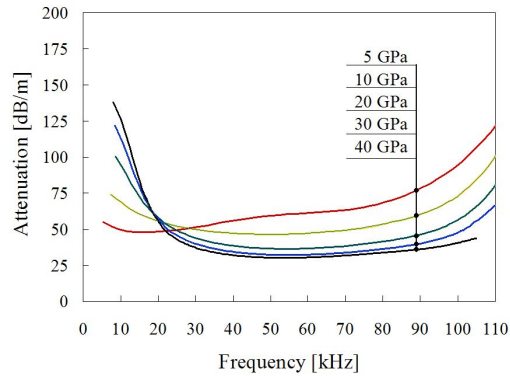
현장에서 록볼트를 설치하는 경우는 보통 풍화암 이상의 조건에서 암반보강용으로 사용하며 주로 연·경암 조건에서 시공한다. 그리고 록볼트 철근에 피복된 그라우팅의 강성에 따라 주파수에 따른 신호파의 감쇠정도가 달라질 수 있다. 그러므로 본 비파괴조사실험에서 선정된 L(1) 모드 신호파에 대하여, 실제 주변암반과 피복 그라우팅의 강성변화에 따라 주파수대비 감쇠특성변화를 파악하였고, 수치해석을 통하여 경우별 민감도 분석을 수행하였다. 피복그라우팅의 강성(탄성계수, Young 계수)이 10GPa인 조건에서 주변암반은 5~40GPa의 강성변화를 주었고, 주변암반 강성이 20GPa인 조건에서 피복그라우팅을 6~16GPa로 강성변화를 적용하였다.

주변암반 강성변화에 따른 감쇠정도 분석결과는 그림 4(a)와 같다. 분석결과, 약 20kHz의 주파수대역에서 주변암반 강성변화에 큰 영향이 없을 것으로 나타났다. 또한 30~110kHz의 주파수대역에서 주변암반 강성이 커질수록 감쇠가 작아지는 경향을 보였다.

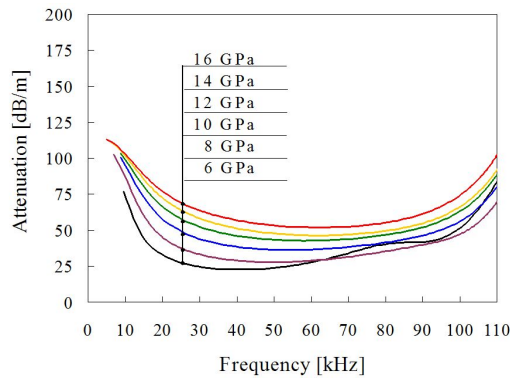
그리고 피복그라우팅의 강성변화에 따른 감쇠영향은 그림 4(b)와 같다. 전반적으로 그라우팅재료의 강성이 클수록 수신신호파의 감쇠정도가 커지는 것으로 나타났다. 감쇠정도는 대략 30~110kHz영역의 주파수대역에서 약 25~70dB/m 값을 보였다.

3. AE-Sensor에 의한 Transmission 실험

수치해석결과를 기초로 하여 비파괴조사에 의한 신호파 분석용 주파수는 약 20~100 kHz의 저주파 대역 초음파로 선정하였다. 이에 따라 록볼트 철근내로 종방향 탄성파(longitudinal elastic wave)를 진동가진하고, 신



(a) 주변암반의 강성에 따른 감쇠영향



(b) 그라우팅의 강성에 따른 감쇠영향

그림 4. 주변암반과 피복그라우팅의 강성변화에 따른 감쇠특성 -L(1) mode

호파수진을 위하여 가청주파수를 포함한 저주파초음파 대역의 진동수진에 적절한 음향방출 감지기(AE sensor: acoustic emission sensor)를 적용하였다.

실내실험은 우선, 첫째로 결합크기 변화에 따른 피복 그라우팅 영향만을 파악하기 위하여, 시멘트모르타르로 그라우팅된 록볼트 시험체를 근입시키지 않고 공기중에 수평으로 매달아 자유구속(non-embedded condition) 및 자유단(free end) 조건으로 실험하였다. 둘째로 현장에서 지중암반에 록볼트를 근입시킨 조건과 같이 콘크리트 블럭체내에 그라우팅된 록볼트시험체를 타설하여 지중근입 상태(embedded condition)에서의 공동결합크기 별 영향을 조사실험하였다.

3.1 록볼트 시험체 제작

실험에 사용된 시험체는 실제 현장에서 사용하는 직

경 25.4mm, 길이 3.1m의 록볼트 철근을 사용하여, 시멘트, 모래 및 물 중량비 1:1:0.4의 시멘트모르타르를 직경 38mm의 크기로 피복시켜 제작하였다. 그리고 공동결함을 모사하기 위하여 그림 5 및 식(7)과 같이 전체 그라우팅 길이, LS에 대비 공동결함 길이, LD의 비를 공동결함 비율, DR로 설정하여 록볼트 시험체를 조성하여 제작하였다. 자유구속조건에서 시험체의 공동결함은 0%부터 100%까지 공동결함비율(DR)을 10%의 크기로 증가시켜 제작하여 시험하였고, 지중근입 조건의 경우는 DR=0%, 25%, 50%, 75% 그리고 100%(철근)의 5개의 시험체를 사용하였다. 지중근입 시험체는 그림 6과 같이 길이 3.0m, 폭 0.9m, 높이 0.8m의 콘크리트 블록체내에 지중근입용 록볼트 시험체를 근입, 설치하여 제작하였다.

$$DR(\%) = \left(\frac{L_S - L_G}{L_S} \right) \times 100 \quad (7)$$

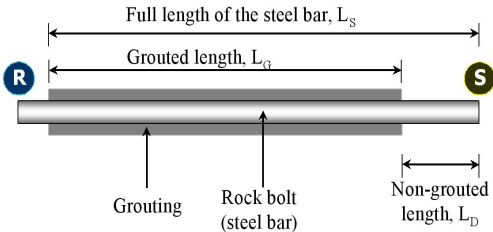


그림 5. 그라우팅 피복 록볼트 시험체에서의 공동결함 모식도

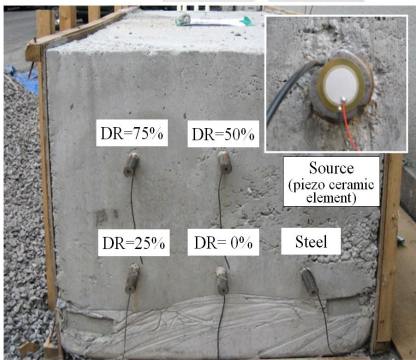


그림 6. 지중근입조건에서 공동결함비율별 록볼트가 타설된 콘크리트블록 시험체

3.2 장비구성 및 실험방법

가진용 센서는 그림 6에 보인 바와 같이 일종의 PZT-

element로써 직경 20mm, disk type의 piezo-ceramic element를 사용하였다. Triggering과 수진을 함께 할 수 있는 수진용 감지기는 Physical Acoustics사의 AE (Acoustic emission) sensor, model A3를 이용하였다. 그리고 장비제어와 신호수집 및 처리를 위하여 NI (National Instrument)사에서 개발한 LabView 프로그램을 이용하였다. 발생과 수진시에는 적절한 sampling rate의 선정이 필요하며, noise처리를 위하여 averaging 등을 적용하였다.

실험과정은 우선 록볼트 지중선단에 해당하는 철근 일단에 가진용 센서를 에폭시 등으로 부착시킨 후, 파발생기(signal generator)를 이용하여 전기신호로 진동가진한다. 발생된 진동은 록볼트 철근을 따라 전파하게 되고 록볼트 두부에 설치된 수진용 감지기를 이용하여 신호파를 수진한다. 그리고 수진신호는 amplifier를 거쳐 PC에 장착된 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer)를 통하여 저장하게 된다.

3.3 실내 시험 결과 및 해석

자유구속조건에서 측정된 파의 신호는 그림 7과 같다. 실험 결과 결함비율이 증가함에 따라 수집된 신호파의 진폭이 증가하고 초동시간이 짧아지며, 지속적으로 반복하여 왕복전파하는 신호파의 파군형태가 점차 뚜렷해짐을 알 수 있다.

신호파의 전파속도는 수집된 신호에 대하여 피검체 철근길과 초동전파시간을 이용하여 구할 수 있다. 분석결과 공동결함비율 이 커짐에 따라 전반적으로 신호파의 전파속도가 증가 경향을 보였으며, 계산결과를 그림으로 나타내면 그림 8과 같다. 록볼트 시스템은 가진부로부터 발생파가 그라우팅 피복된 철근을 따라 전파될 때, 철근과 그라우팅의 복합매질(composite materials)에서의 전파거동을 보일 것이며, 이는 복합매질의 물성에 따라 전파속도 등의 파전달특성이 변화할 것으로 예상된다. 그러므로 복합매질의 등가속도(equivalent velocity)를 식 8과 같이 설정하여 시험결과와 비교분석하였다.

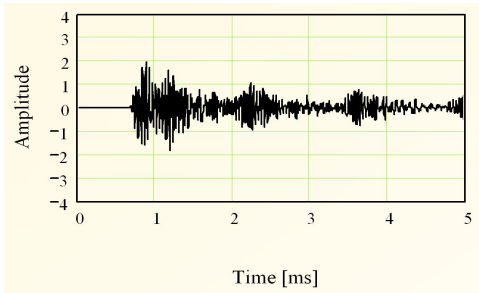
$$V_{eq} = \sqrt{\frac{E_{eq}}{\rho_{eq}}} = \sqrt{\frac{A_s \rho_s V_s^2 + A_c \rho_c V_c^2}{A_s \rho_s + A_c \rho_c}} \quad (8)$$

여기서, E는 탄성계수, A는 구성 재료별 단면적, ρ는

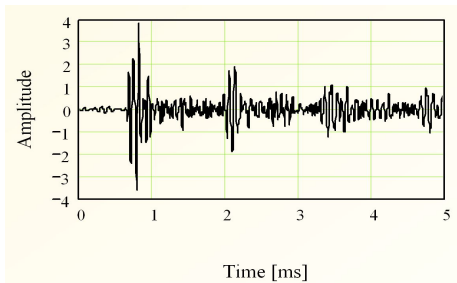
질량이고, 아래 첨자 eq, s, c는 각각 equivalent, steel, cement-mortar을 의미한다.

자유구속조건에서 산정된 등가속도를 실험측정결과와 함께 그림 8에 나타내었으며, 측정된 전파속도와 전반적으로 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

지중근입 조건에서 결합비율에 따른 시간대비 신호파



(a) DR = 0%에서의 시간-진폭 측정결과



(b) DR = 50%에서의 시간-진폭 측정결과

그림 7. 자유구속조건에서의 신호파 측정결과

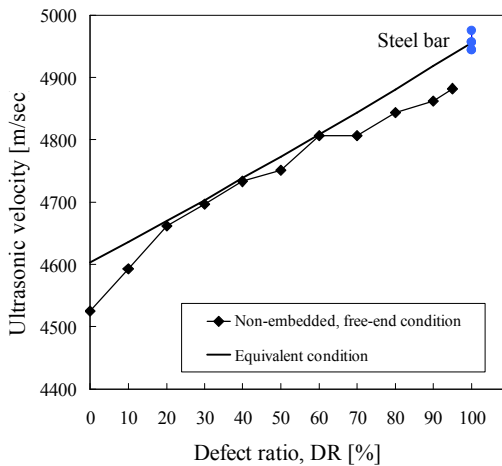
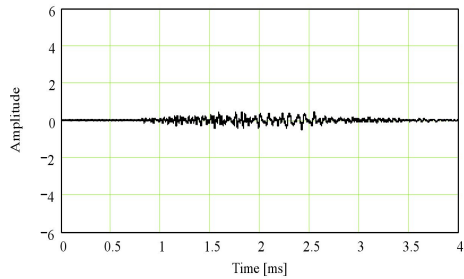


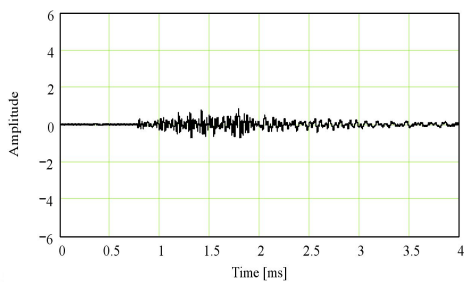
그림 8. 자유구속조건에서 공동결합비율별 신호파 초동전파 속도

의 진폭 측정결과는 그림 9와 같고 결합비율 대비 초동 속도변화는 그림 10과 같다.

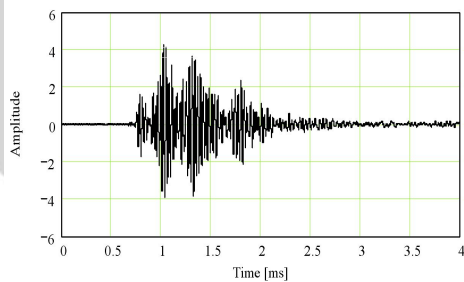
분석결과, 지중근입 조건의 경우에도 자유구속조건과 마찬가지로 공동결합비율이 커질수록 파의 진폭은 커지



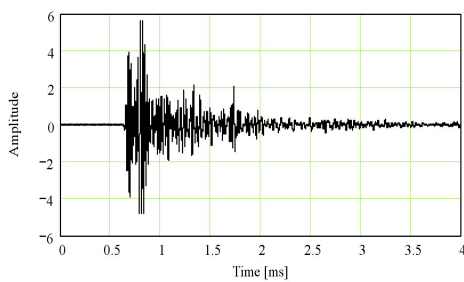
(a) DR=0%에서의 시간-진폭 측정결과



(b) DR=25%에서의 시간-진폭 측정결과



(c) DR=50%에서의 시간-진폭 측정결과



(d) DR=75%에서의 시간-진폭 측정결과

그림 9. 지중근입 조건에서의 신호파 측정결과

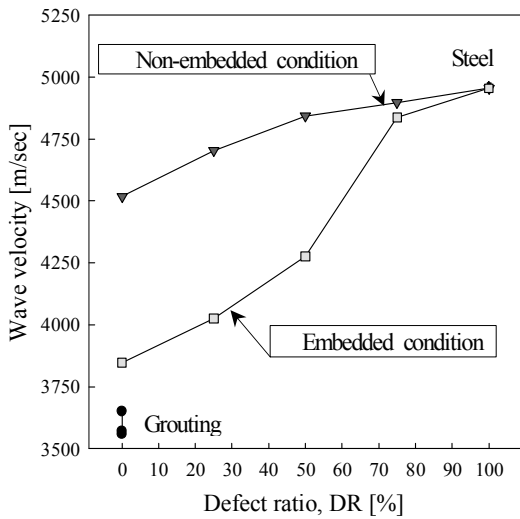


그림 10. 지중근입 조건에서 공동결함비율별 신호파 초동전파속도

고 초동시간은 감소하여 초동속도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 공동결함이 있거나 그 크기가 커질수록 경계면 및 주변암반으로 신호파의 에너지 leaking이 적어지고, 외부 피복층으로 인한 파전파 저항 또는 구속효과가 감소하는 것으로 추정할 수 있다.

또한 지중근입 조건의 경우가 자유구속조건에 비하여 결함비율에 따른 신호파의 초동속도 변화폭이 보다 큰 경향을 보였다. 즉, 이러한 결과는 록볼트의 지중근입 상태가 자유구속상태 조건보다 전파속도변화를 이용한 결함크기 파악이나 조사방법의 적용성이 좋다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 록볼트 그라우팅의 건전도 평가를 위하여, 유도초음파를 이용한 투과법을 적용하여 공동결함 분포정도에 따라 전파속도와 속도특성변화 등을 수치적, 실험적 및 해석적 방법을 이용하여 파악하였다. 연구 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- 1) 수치해석을 통한 유도파 분산성 검토결과, 록볼트 시험체에서 주변암반의 영향이 작고 시험목적에 적합한 파의 모드는 L(1)으로서 적정 주파수 대역은 대략 20~70 kHz의 저주파수 대역일 것으로 나

타났다.

- 2) 그라우팅과 주변암반에 따라 신호파의 전파속도와 진폭에 영향이 있으며, 수치이론적인 분석결과 그라우팅과 주변암반으로의 leaking 등에 의하여 신호파의 진폭이 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 실내축소모형 시험결과, 시험체가 그라우팅으로 피복되어 있을 경우 자유구속 및 지중근입 조건에서 무결함부에 비하여 공동결함크기가 증가함에 따라 진폭이 증가하고 신호파의 초동시간이 감소하여 전파속도는 전반적으로 선형적 증가 경향을 보였다.
- 4) 가진 신호파에 대하여 록볼트는 철근과 그라우팅의 복합체로 거동을 보일 것으로 예상되며, 전파속도의 감소현상은 그라우팅을 포함한 외부 구성층에 의하여 파전달에 대한 구속 또는 저항 등으로 군속도(group velocity)의 지연효과가 있는 것으로 사료된다.

본 연구결과에 기초하여 현장에서 암반보강용 주요지보재로 사용하고 있는 록볼트의 공동결함에 대한 건전도 평가를 위한 적정성과 그 가능성을 확인할 수 있었다. 그러므로 보다 신뢰성 있는 록볼트 건전도 평가기술연구를 위하여 추후 전파신호에 대한 주파수 및 진폭감쇠 특성분석 또는 실제현장시험을 통한 지속적인 연구 등이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Beard, M. D., Lowe, M. J. and Cawley, P. (2003), "Ultrasonic Guided Waves for Inspection of Grouted Tendons and Bolts", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 3, pp. 212-218.
2. Beard, M. D. and Lowe, M. J. S. (2003), "Non-destructive Testing of Rock Bolts Using Guided Ultrasonic Waves", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 40, pp. 527- 536.
3. Chao, H. C. (2002), "An Experimental Model for Non-destructive Evaluation on Pile Foundations Using Guided Wave Approach", Ph.D. Dissertation, Northwestern University.
4. Graff, K. F. (1975), "Wave Motion in Elastic Solids", Oxford University Press.
5. Kolsky, H. (1963), "Stress Wave in Solids", Dover Publications, Inc., New York.
6. Madenga, V., Zou, D. H. and Zhang, C. (2006),

- “Effects of Curing Time and Frequency on Ultrasonic Wave Velocity in Grouted Rock Bolts”, Journal of Applied Geophysics, Vol. 59, No. 1, pp. 79-87.
7. Na, W. B., Kundu, T. and Ehsani, M. R. (2002), “Ultrasonic Guided Waves for Steel Bar Concrete Interface Testing”, Materials Evaluation, Vol. 60, pp. 437-444.
 8. Pavlakovic, B. and Lowe M. (2003), DISPERSE User’s Manual (version 2.0), Non-destructive Testing Lab., Imperial College, London.
 9. Thurner, H. F. (1988), “Boltometer -instrument for Non-destructive Testing of Grouted Rock Bolts”, 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Sakurai (ed.), pp. 135-143.
 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.



한 신 인

고려대학교
건축사회환경공학과
박사과정

E-mail:sihan@korea.ac.kr



이 중 섭

고려대학교
건축사회환경공학과
조교수

E-mail:jongsub@korea.ac.kr



이 용 준

(주)포스코
건설기술 연구소

E-mail:civilyj@poscoenc.com



남 석 우

삼성물산(주) 건설부문
토목사업본부
과장

E-mail:seokwoo.nam@samsung.com



이 인 모

고려대학교
건축사회환경공학과
교수

E-mail:inmolee@korea.ac.kr