

비파괴 시험기법을 이용한 록볼트의 건전도 평가(I) -수치해석 및 실험적 적용성 평가-

Estimation of Rockbolt Integrity by Using Non-Destructive Testing Techniques(I) -Numerical and Experimental of Applicability-

이종섭*¹, 이용준², 엄태원³, 한신인⁴, 이인모⁵

Lee, Jong-Sub · Lee, Yong-Jun · Eom, Tae-Won · Han, Shin-In · Lee, In-Mo

Abstract

The purpose of this study is to describe the Non-Destructive Testing(NDT) of the rockbolt and investigate the applicability of the NDT methods to estimate the integrity of the rockbolt. To examine the rockbolt integrity including rockbolt itself and grouting material, two methods are adopted: numerical and experimental methods. In the numerical method, the numerical code `DISPERSE` is used to analyze the dispersion of the rockbolt. The dispersion curve shows the effects of the thickness and stiffness of grouted materials on the embedded rockbolt. Therefore, the optimal frequency for the integrity test of the rockbolt is obtained: 20~120kHz in L(1,0) mode. In the experimental methods, destructive and non-destructive tests are carried out in a laboratory. In the non-destructive test, the low frequency mode generated by an impact and the high frequency mode generated by an ultrasonic transducer seem to characterize the rockbolt condition readily. The experimental results show that the guided waves attenuate more significantly when the stiffness of the grouted material increases and/or the zone of the defect increases. Meanwhile, the ultimate capacity of rockbolt was evaluated through the pull-out tests and is compared to the NDT results. This study demonstrates that the NDT is a valuable tool for the rockbolt integrity evaluation.

Keywords: Rock bolt, non destructive test, dispersion analysis, guided wave

요 지

본 연구의 목적은 록볼트의 건전도를 평가하기 위하여 록볼트의 비파괴시험을 기술하고 비파괴시험의 적용성을 조사하는 것이다. 록볼트 자체와 그라우팅제를 포함한 록볼트의 건전도를 평가하기 위하여, 수치해석 및 실험적 방법을 이용한 두가지 방법이 적용되었다. 수치해석 방법에서는, 분석은 `DISPERSE` 프로그램을 이용하여 록볼트의 분산선도를 해석하였다. 분산선도 곡선은 지중근입되어 있는 록볼트에 대한 그라우팅제의 두께와 강성에 대한 영향을 보여준다. 이로 부터 록볼트의 건전도 시험을 위한 최적의 주파수를 추정할 수 있으며, 그 결과

*1 정희원, 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 조교수 (ongsub@kroea.ac.kr)

2 정희원, (주)포스코 건설기술 연구소

3 비희원, (주)SK건설 토목사업부 Geotask팀

4 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정

5 정희원, 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수

L(1,0) 모드에서 20~120kHz가 최적의 주파수로 선정되었다. 실험적 방법에서는 실험실에서 시료를 제작하여 파괴 및 비파괴시험을 실시하였다. 비파괴 실험에서는 타격을 이용한 저주파수 모드와 초음파 트랜스듀서를 이용한 고주파수 모드를 통하여 록볼트의 상태를 조사할 수 있다. 실험실에서 수행된 비파괴시험으로부터, 유도파는 주변의 그라우팅제의 강도가 증가하거나 (또는 증가하고) 결합부 영역이 증가할 때 감쇠가 커짐을 알 수 있었다. 그리고 인발시험으로부터 록볼트의 극한지지력을 추정하였다. 본 연구는 록볼트의 건전도 평가에 비파괴시험이 매우 유용한 방법임을 보여준다.

주요어: 록볼트, 비파괴검사, 분산성분석, 유도파

1. 서론

지하공간의 개발이 점차 활발하게 이루어지고 있다. 교통시설이나 문화시설, 발전소, 쓰레기소각장, 오 폐수 처리장 등의 산업기간시설을 지하에 대단면 터널로 건설함으로써 건설추진시의 민원발생을 최소화할 수가 있고 환경훼손저감, 운영상의 경비절감 등을 충분히 기대할 수가 있다.

현재 국내의 주된 터널시공개념은 록볼트와 함께 숏 크리트를 주요 지보재로 하는 NATM공법이다. 앞으로는 소위 Single Shell 공법로 개념을 도입하려는 추세가 점차적으로 나타나고 있다. 록볼트 지보재의 중요성이 더더욱 인식되고 있다.

전통적으로 록볼트 그라우팅의 품질확인인 인발시험을 수행하여 실시하였다. 그러나, 인발시험은 많은 비용과 시간을 필요로 한다.

따라서 이러한 문제점을 개선하면서 록볼트의 시공 품질확인 및 확보기술 개발에 대하여 현장에서의 사용이 간편하고 신뢰성이 높은 새로운 비파괴조사 (non-destructive testing) 방법을 사용한 록볼트의 건전성 평가를 하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 본 연구의 주요내용은 이전의 비파괴 조사 연구 및 유도파의 전달 특성과 그 이론적 고찰, 분산성분석, 실내실험 및 분석 결과, 그리고 마지막으로 토의 및 결론으로 구성하였다.

2. 터널구조물 안전진단과 비파괴조사

국내의 문헌 및 기술적 현황조사에 의하면 영국 (Beard 등, 2003) 등의 일부 해외지역에서 록볼트 품질에 대한 유사한 연구개발이 이미 진행 중에 있는 것으로 파악되었고, 휴대용 hammer 타격에 의한 유도파를 발생시켜 말뚝-지반 영향에 대하여 신호처리해석, 건전도평가 연구 (Chao, 2002) 등이 이루어진 것으로 조사

되었다.

국내의 경우는 지반조사분야에서 물리탐사 검층을 통한 지층분석과 연약대파악 등을 위하여 매우 활발하게 수행되고 있고, 이를 설계 및 시공에 적극 반영하고 있다. 그리고 최근에 구조물이나 지보재의 품질관리를 위하여 또는 구조물 안전진단을 위하여 비파괴조사 기법을 점차 도입하고 있는 추세이다. 이에 대한 연구사례로써 터널구조물에서 터널라이닝의 품질이나 기능성 평가를 위하여 음향 또는 탄성파를 이용한 비파괴조사기법 적용성 연구 (고려대학교 등, 2002), GPR 탐상과 함께 결합, 손상 등 터널변상 요인에 대한 자료처리와 software 측면에서의 라이닝의 건전도에 대한 평가연구 (김영근, 백기현, 2001) 등이 있었다.

그러나 터널구조물 안정성 또는 품질평가를 위한 국내의 비파괴탐상 조사 기술수준은 아직까지는 초기단계라 할 수 있다.

3. 유도파 (Guided Wave)

3.1 유도파 전달특성과 이론적 모델링

비파괴조사시 사용수단인 유도파 (guided wave)에 대한 이해를 돕고, 유도파 분산성분석과 타당한 적용을 위하여 유도파에 대한 기본이론을 전개하였고 분산성 및 분산선도의 의미를 고찰하였다. 또한 유도파이론에 근거한 분산성해석 프로그램을 이용하여 록볼트그라우팅 구조체를 모델링한 후, 수치해석적인 방법에 의하여 조건별 분산성분석을 수행하였다. 수치해석결과와 실제 실내 외 실험과 연계하여 보다 타당한 조사기법과 구성장비를 선정, 적절한 사용주파수의 결정 등을 위하여 록볼트그라우팅이나 주변압반 강성조건별로 민감도

분석 수행과 그 영향을 검토하였다.

탄성매질에서 직각좌표계의 임의의 평행육면체 요소 (rectangular parallelepiped)에서의 각 작용면에서 응력항을 표현하면 그림 1과 같다. 또한 직각좌표축 벡터 (x, y, z)에 대하여, x축방향의 응력과 관성 (inertia force) 성분을 분리할 수 있으며, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z = \rho (\delta x \delta y \delta z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서, ρ 는 등방 탄성체요소의 밀도(density)이고, u 는 변위벡터 $\mathbf{u}=(u, v, w)$ 에서의 x방향 성분이다. 식 (1)을 정리하면 아래와 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2)$$

식 (2)를 “탄성매질에서의 운동방정식”이라 한다 (단, 중력과 같은 body force 미고려).

Hooke의 법칙 등을 이용하여 응력 및 변형률 성분을 식으로 표현하면 등방 탄성매질에서의 입자운동을 아래 식 (3)과 같이 전개할 수 있다 (Kolsky, 1963). 여기서 λ 와 μ 는 Lamé 상수이다.

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (3)$$

그리고 각각의 x, y, z 방향에 대하여 벡터로 표현하면

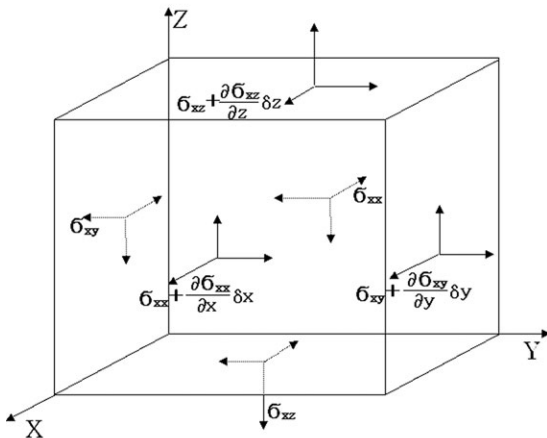


그림 1. 직각좌표계 임의의 요소내 응력성분 변화

아래 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (4)$$

여기서, ∇ : vector operator,

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{e}_x, \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{e}_y, \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{e}_z \right)$$

∇^2 : Laplacian operator,

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

그리고 변위장 (displacement field)에서, 식 (4)에서 표현된 변위벡터, \mathbf{u} 는 Helmholtz decomposition을 도입하여 아래 식 (5)와 같이 scalar potential, ϕ 와 vector potential, \mathbf{H} 의 관계로 나타낼 수 있다 (Graff, 1975).

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$c_1^2 \nabla^2 \phi = \partial^2 \phi / \partial t^2 \quad c_2^2 \nabla^2 \mathbf{H} = \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 \quad (6)$$

$$c_1 = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}, \quad c_2 = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \quad (7)$$

탄성매질에서의 평면파는 파전달시 두가지의 입자운동 양상으로 전달되는데, 체적변형 (dilatation)에 관계되고 파진행 방향에 평행한 종파 (longitudinal wave)와 체적 변형에 상관없이 파진행 방향과 수직인 횡파 (shear wave)로 구성된다. 탄성매질 조건에서 식 (7)에 표현된 상수, c_1 과 c_2 는 실수값을 가지며, 그 크기는 각각 종파 (longitudinal bulk wave) 및 횡파 (shear bulk wave) 속도의 크기와 같다.

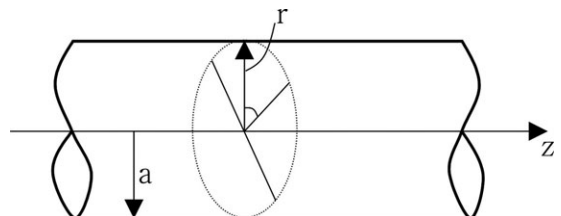


그림 2. 원주 (cylindrical) 좌표계 (r, θ , z)

그림 2와 같은 원주좌표계 (r, θ , z)에서 원주상 강봉체의 경계면 작용응력, (σ_{rr} , $\sigma_{r\theta}$, σ_{rz})와 변위, (u_r , u_θ , u_z)는 연속적이면서 평형을 이루는 경계조건을 만족한다.

그리고 z방향 조화파 (harmonic wave)에서 Helmholtz 식의 scalar potential, Φ vector potential, $\mathbf{H}=(H_r, H_\theta, H_z)$ 의 구성성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi &= f(r)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\ H_r &= -g_r(r)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\ H_\theta &= -ig_\theta(r)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\ H_z &= -ig_3(r)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \end{aligned} \quad (8)$$

근입된 원주상 구조체에서 식 (6)과 식 (8)로부터 변위장에서의 임의 위치 변위성분을 구하고, Hooke의 법칙을 이용하여 응력성분을 구하면 다음 식 (9)와 같다 (Pavlakovic and Lowe, 2003).

$$\begin{aligned} u_r &= \left(f + \xi g_1 + \frac{n}{r} g_3\right)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\ u_\theta &= i\left(\frac{n}{r} f - \xi g_1 + g_3\right)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\ u_z &= i\left(\xi f + \frac{(n+1)}{r} g_1 + g_3\right)e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\ \sigma_{rr} &= \mu\left(-\frac{\lambda}{\mu}(\xi_1^2 + \xi_2^2)f + 2f'' + 2\xi g_1' - 2\frac{n}{r^2} g_3 + \frac{2n}{r} g_3'\right) \\ \sigma_{r\theta} &= i\mu\left(-\frac{2n}{r^2} f + \frac{2n}{r} f' + \frac{(n+1)\xi}{r} g_1 - \xi g_1' + 2g_3'' + \xi_2^2 g_3\right) \\ \sigma_{r0} &= i\mu\left(2\xi f + \left(\frac{n}{r} \frac{n+1}{r} + \xi^2 - \xi_3^2\right)g_1 + \frac{n}{r} g_1' + \frac{n}{r} \xi g_3\right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, f , g_3 , g_r , g_θ 는 원주좌표계(r, θ , z)에서의 임의의 함수이고, ω 는 각 진동수(circular frequency), ξ 는 파수 (wave number), n은 상수이다. 그리고 이를 아래와 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\{US\} = [D]\{A_{LS}\} \quad (10)$$

여기서, $\{US\}$ 는 변위 또는 응력 벡터로써 $\{u_r, u_\theta, u_z, \sigma_{rr}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{rz}\}^T$ 이고, $\{A_{LS}\}$ 는 진폭에 관계된 상수 벡터, 행렬 $[D]$ 는 상수 (ξ, ω), 변수 r, Bessel 함수 등으로 이루어진 6 \times 6 크기의 행렬로써, 임의의 층경계에서의 응력과 변위를 반영한다. 그리고 여러 층으로 구성된 원주상 구조체에서의 전체적인 응력, 변위관계를 경계조건으로부터 전개할 수 있으며, 아래 식 (11)과 같은 특성방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[G]\{A\} = 0 \quad (11)$$

위 식에서 $\{A\}$ 는 진폭에 관계된 상수 벡터이고, 행렬 $[G]$ 는 구성 층의 진동이나 파전달 특성이 반영되어 경계면에서의 응력 및 변위 연속조건과 평형조건을 만족한다. 그리고, 파전달 특성방정식, 식 (11)이 해를 가지기 위하여 행렬 $[G]$ 의 determinant가 "0"이 되어야 한다. 이 때의 해를 그림으로 나타내어 주파수 대비 위상속도 또는 군속도 등의 graph로 표현할 수 있으며, 이러한 graph를 "분산선도 (dispersion curve)"라 한다. 그러므로, 분산성 해석 및 분산선도를 분석함으로써 임의의 피검체 시스템에 대하여 파전달 주파수변화에 따른 속도 변화, 그리고 발생된 중첩파들의 형상 (mode) 변화 등의 분산성을 파악할 수가 있다.

3.2 유도파 분산성 분석

3.2.1 분석 개요

록볼트와 같은 피검체내에서 발생된 유도파는 파전달시 주변 암반으로 에너지가 손실되는 경향이 있으며, 이러한 에너지 손실에 의한 유도파의 감쇠특성은 유도파를 이용한 비파괴시험시 매우 중요한 파악 인자중의 하나이다.

본 록볼트그라우팅 시스템의 비파괴시험에서 사용될 파에 대하여 보다 적절한 파의 선정과 감쇠정도의 파악 및 사용주파수대역의 선택을 위하여 영국의 Imperial College에서 개발한 "DISPERSE"라는 프로그램을 사용하여 유도파의 분산성을 분석하였다.

해석을 위한 록볼트 시스템에 대한 모델링은 다음 그림 3과 같이, 주변지반을 모사한 암반층, 시멘트 모르타르 그라우팅피복, 그리고 철근 강봉 등 3개의 층으로 적용하였으며, 구성층에 적용시킨 해석물성은 표 1과 같다.

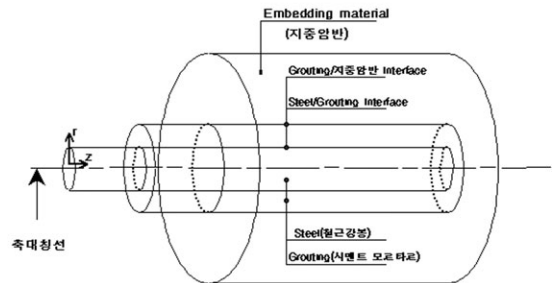


그림 3. 록볼트시스템 모델링

표 1. 파전달에 따른 분산성분석 적용물성치

구 분	철근	그라우팅	암반
영계수 (GPa)	206	10	40
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
비 고	D25	cement mortar	

3.2.2 록볼트 분산성 분석결과

(1) 자유구속 상태

자유구속상태의 그라우팅 피복상태의 분산성 분석결과는 그림 4와 같다. 주파수 0.1MHz 이하의 저주파 대역에서 에너지감쇠가 가장 작은 것으로 나타났으며, 특히 약 40kHz 주파수에서 에너지속도가 최대값을 보이고 있다.

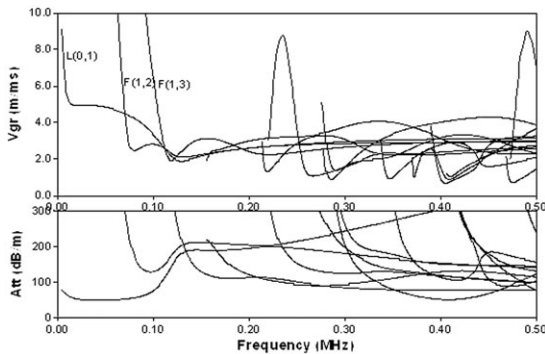
(2) 암반근입 조건

지중 암반지반에 근입조건에서의 분산성 해석결과는 그림 5와 같다. 주파수에 따른 신호파 모드별 감쇠변화와 에너지속도의 변화를 보여주고 있다. 그림 5 (a)의 감쇠 특성을 볼 때, 주파수변화에 따라 각 모드별 감쇠정도가 커지고 최소감쇠 크기를 보이는 최소정점의 크기도 커짐을 알 수 있다. 또한 감쇠특성이 최저값을 보이는 주파수대역에서 발생파의 에너지속도가 최대침두값을 나타내었다.

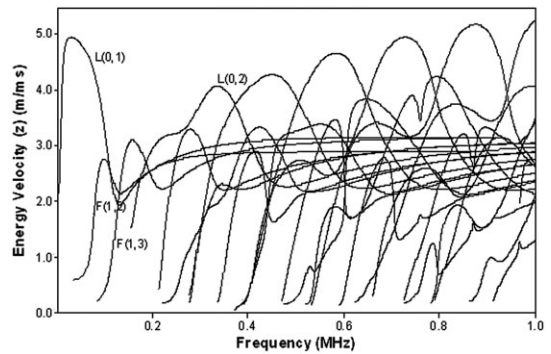
(3) 유도파의 감쇠특성 분석

주변암반의 강성과 그라우팅의 두께 및 강성변화에 따른 주파수대비 감쇠특성에 대한 분석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

자유구속 조건에서 그라우팅피복을 하지 않은 강봉(철

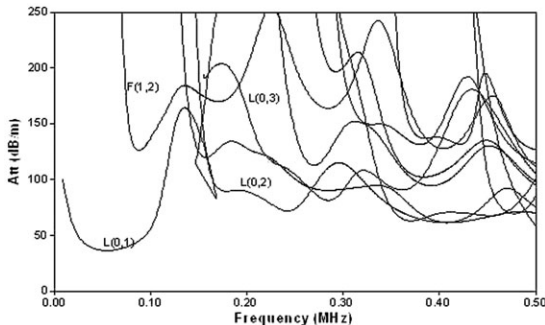


(a) 군속도와 감쇠특성 분포

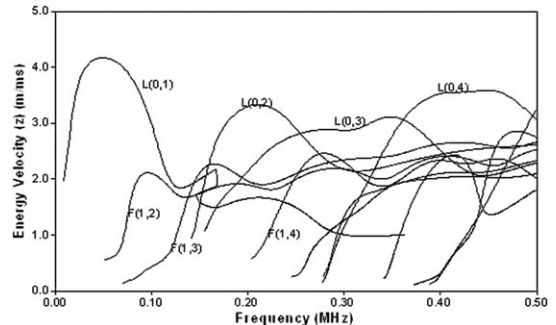


(b) 에너지 속도 분포 (energy velocity)

그림 4. 자유구속 상태의 그라우팅피복 강봉에 대한 속도분포



(a) 감쇠특성 분포



(b) 에너지속도 분포 (energy velocity)

그림 5. 지중암반 근입상태의 강봉에 대한 감쇠특성과 에너지속도 분포

근)에 가진된 발생파는 파전달 에너지가 크고, 감쇠특성이 작은 것으로 나타났고, 그 반면에 그라우팅피복을 한 강봉의 경우는 그라우팅 피복을 하지 않은 경우에 비하여 에너지손실 (leaking)에 의한 감쇠가 상대적으로 크게 나타나 피검체내에서 보다 멀리 파가 전달되지 못할 것으로 예상된다.

그림 6에 나타낸 바와 같이 분산성 분석결과, 비파괴조사실험에 적절한 파의 mode는 L(0,1) 으로서, 약 20 kHz 의 주파수대역이 주변암반의 강성변화에 큰 영향이 없을 것으로 나타났으나, 그림 5의 결과에 의하면 감쇠정도가 가장 작고 에너지속도가 커서 파전달 거리가 가장 클 것으로 예상되는 주파수 대역은 약 50kHz내외일 것으로 예상할 수 있다. 그리고 대략 20~110kHz영역의 주파수대역에서의 전반적으로 감쇠치가 약 50~25dB/m 값의 비교적 일정한 값을 나타내었다.

4. 햄머에 의한 Impact-echo 실험 및 분석

4.1 비파괴 조사 장비 구성

비파괴조사장치는 탐사대상인 피검체, triggering과

수진을 함께 할 수 있는 1개의 감지기 (accelerometer), 신호파 수신 및 처리장치인 digitizer, 장비제어시스템 (software 및 PC)으로 구성된다. 장비제어와 신호수집 및 처리를 위하여 NI (National Instrument)사에서 개발한 LabView 프로그램을 이용하였고, 이산신호처리 (discrete signal processing)를 위하여 적절한 sampling rate 선정, noise처리를 위하여 필요시 auto-correlation 을 하였다.

실험은 광대역 주파수를 갖는 감지기 (accelerometer)를 예폭시를 이용해서 철근 두부 표면에 부착시켜 hammer로 충격하중을 가하였고, 발생한 진동을 감지하여 획득한 신호를 동적 신호 분석기 (dynamic signal analyzer)를 통해 저장하고 분석하였다

실험에 사용된 실험체는 공동결함의 유무와 위치, 그라우팅의 강도에 따라 구분하여 제작하였고, 실험에 사용된 그라우팅의 물성은 표 2와 같고 실험체별 형상을 각각 표 3 및 그림 7에 나타내었다.

실험에 사용된 가진방법은 강철구를 이용한 구경별 hammer, pointed hammer, 진자운동 pointed rod, 6mm 플라스틱 구슬을 발사 가진 할 수 있는 gun을 사용하였다.

실험결과, hammer에 의한 가진파는 가능한한 frequency는 크고 amplitude가 작은 파 (wave)일수록 반사 수진된 신호파의 결과가 뚜렷하였으며, 그 적용성이

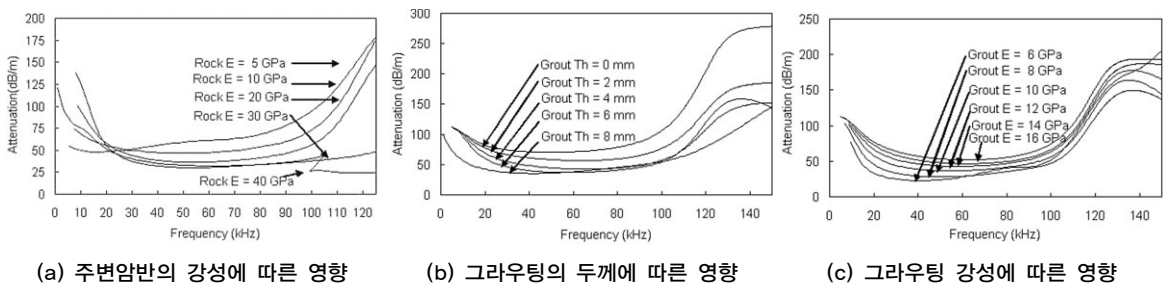


그림 6. 주변암반의 강성과 그라우팅의 두께 및 강성변화에 따른 감쇠특성

표 2. 그라우팅 물성

구 분	단위중량 (kN/m ³)	동탄성계수 (GPa)	일축압축강도 (MPa)	배합비 (시멘트:모래:물)
고강도	20,830	29,72	37,15	1 : 1 : 0,4
저강도	20,781	24,73	27,32	1 : 2 : 0,6

표 3. 실험체별 형상구분

구 분	공동결합부 형상	결합부 크기	비 고
Case 1	철근 강봉	그라우팅피복 없음	-
Case 2	공동결합부 없음	-	고, 저강도
Case 3	무작위 공동결합(random)	철근연장 50% 이상	고, 저강도

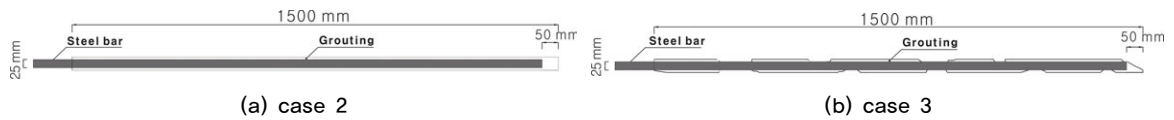


그림 7. 공동 결합부에 따른 실험체 형상

좋은 것으로 나타났다. 따라서, hammer를 이용한 impact-echo 실험 방법에서 진자운동 pointed rod를 가진 원으로 선정하였다.

4.2 실내 축소모형실험에 대한 Wave 신호처리 결과 및 해석

록볼트 건전도 평가에서 그라우팅의 강도는 록볼트와 주변지반간의 부착력과 밀접한 관계가 있으며, 보통 강도가 클수록 (탄성계수가 클수록) 부착력이 크다. 그러므로 그라우팅강도에 따른 발생신호파의 특성 분석을 위하여 배합비를 다르게 함으로써 실험체의 강도변화를 주었다. 또한, 공동 결합에 따른 파특성 분석을 위해 철근연장 50% 이상의 무작위 공동결합을 모사하여 실험을

하였고, hammer에 의한 impact-echo 실험 신호처리 결과는 그림 8과 같다.

철근만의 실험 결과를 보면 시간이 지남에 따라 감쇠가 나타나기는 하나 그라우팅피복이 되어 있는 실험체에 비하여 감쇠의 정도가 상대적으로 작게 나타났다. 그림 8의 결과를 보면 고강도일수록 감쇠정도가 크고, 공동결합부 상태에 따른 실험결과는 무작위 공동결합부 실험체의 경우가 강도변화에 의한 경우보다 감쇠가 큰 것으로 나타났다. 이는 실험체 공동부가 균질하지 않게 분포하는 경우로써 파전달시 leaking 외에 반사와 굴절 등으로 인하여 상대적으로 감쇠가 커진 것으로 예상된다.

또한, 그림 9의 지중근입 조건 시에도 그라우팅의 강도가 증가할수록 결함이 있을수록 감쇠가 큰 것으로 나타났다.

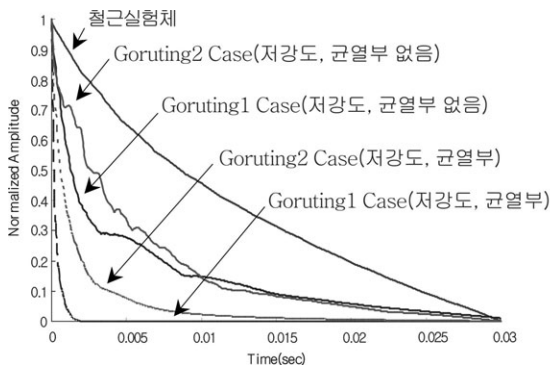


그림 8. 자유 구속 상태의 그라우팅상태별 실험체 감쇠특성 결과 (철근길이 1500mm)

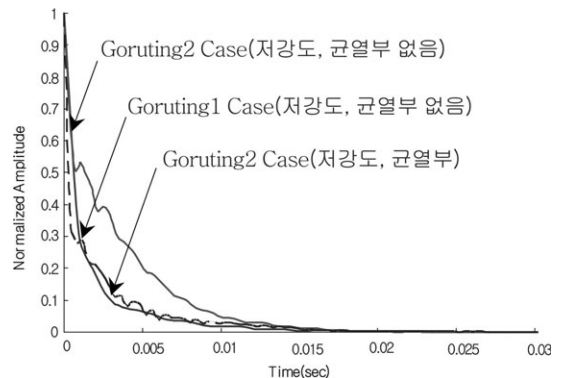


그림 9. 지중근입 상태의 그라우팅 상태별 실험체 감쇠특성 결과 (철근길이 450mm)

5. 초음파에 의한 Impact-echo 실험 및 인발실험 분석

5.1 비파괴 조사 장비 구성

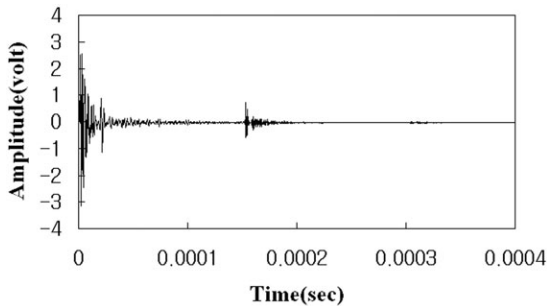
비파괴조사장치는 탐사대상인 피검체, triggering과 수진을 함께 할 수 있는 1개의 감지기 (transducer), 신호파 수신 및 처리장치인 digitizer, 장비제어시스템 (software 및 PC)으로 구성된다. 장비제어와 신호수집 및 처리를 위하여 NI (National Instrument)사에서 개발한 LabView 프로그램을 이용하였다.

사용 감지기 (transducer)는 PANAMET RICS사의 V318-SU로서 중심 주파수가 500 kHz인 초음파센서를 이용하였다.

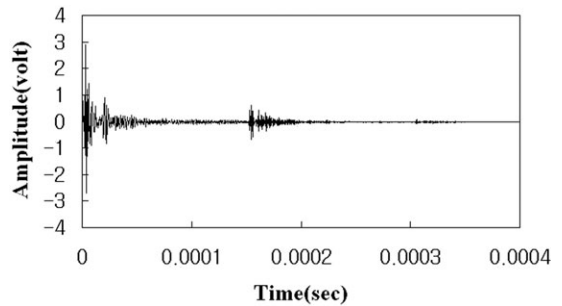
5.2 실내 축소모형실험에 대한 Wave 신호처리 및 해석

분석결과에 의하면, grouting 강도차이에 따른 반사파의 속도나 amplitude 변화는 미미한 것으로 나타났다. 그림 10의 지중 관입조건 결과를 보면 결함여부에 대하여 실험체의 속도에서도 큰 차이를 보이지 않았으나, 저주파수 대역의 초음파 실험 시 균열부가 있을수록 amplitude가 작게 나타나는 결과가 나타남을 알 수 있다. 그러나 고주파수 대역의 초음파 실험은 amplitude에 의한 감쇠특성보다는 길이에 대한 특성을 파악하는데 용이 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 transducer는 상대적으로 고주파를 발생시키는 가진 수단이다. 분산선도 해석을 통해서

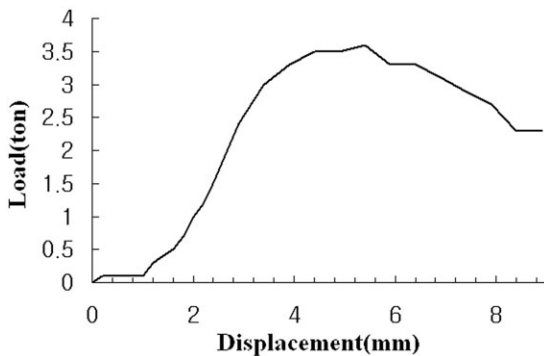


(a) 저강도, 공동부 없는 경우의 실험체 결과

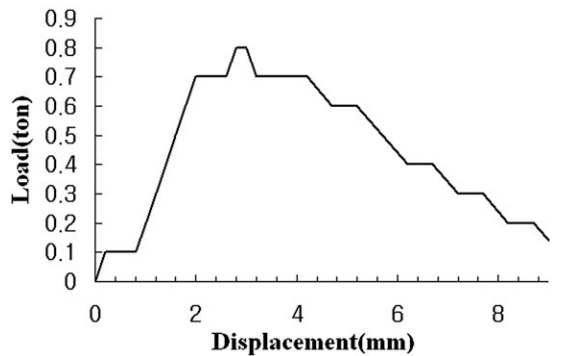


(b) 저강도, 공동부 있는 경우의 실험체 결과

그림 10. 지중 근입조건 실험체에 대한 초음파 실험결과 (500kHz, 철근길이 450mm)



(a) 저강도, 공동부 없는 경우의 실험체 결과



(b) 저강도, 공동부 있는 경우의 실험체 결과

그림 11. 지중 근입조건 실험체에 대한 인발 실험 결과 (철근길이 450mm)

표 4. 지중 근입조건 실험체 Amplitude 및 인발력 결과

구 분		첫 번째 반사파 Amplitude	주면 마찰력 (MPa)
공동부 없음	500kHz	0.73	7.16
공동부 있음 (50%이상결함부)	500kHz	0.60	1.59

구해진 20kHz~120kHz의 주파수 대역의 transducer를 사용하여 실험을 한다면 실제 록볼트의 길이에서도 균열부에 그라우팅의 건전여부를 판명 할 수 있을 것으로 예상된다.

지중근입 조건 실험체의 록볼트 인발 실험을 통하여 그림 11과 같은 결과를 얻었다.c

반사파의 위상값과 최대 인발력을 구한 표 4의 결과를 통하여 반사파의 amplitude는 감소하면 인발실험을 통하여 구해진 주면마찰력 또한 감소하는 것으로 나타났다. 500kHz의 실험결과를 보면 공동부의 발생에 따라 amplitude가 0.83배 감소하고, 주면 마찰력은 0.22배 감소함을 알 수 있다. 그러나 여기서 구해진 값은 충분한 데이터를 습득 이후에 구해진 결과가 아니므로 일반적인 결과로 보기는 어렵다.

6. 토의 및 결론

국내외 비파괴조사 기술분석 결과, 해외의 경우는 공학적·이론적인 바탕아래 효율적이고 안전한 장비개발과 연구가 상당히 진전되어 있으나 국내의 경우는 시공 중 품질관리측면에서 비파괴조사에 대한 저변인식과 평가기준 체계화가 아직까지는 되어 있지 않은 것으로 조사되었다.

유도파와 파전달에 따른 분산성에 대한 이해와 타당한 적용을 위해 파(wave)의 기본이론을 고찰하였고, 프로그램을 이용하여 해석조건별 민감도 분석과 분산성 검토를 하였으며, 검토결과 주변압반의 영향이 작고 실험목적에 적합한 파의 mode는 L(0,1)으로써 적정 주파수 대역은 대략 20kHz~110kHz의 저주파수 대역일 것으로 나타났다. 록볼트에 대한 비파괴조사 실험은 록볼트의 지중근입 조건을 고려하여 반사파를 이용한 impact-echo 방법을 사용하였다.

파감쇠특성은 주변매질의 음향학적 임피던스의 차이

가 작을수록 커지는 것이 일반적이며, 이는 록볼트 철근 주변의 매질이 단단함을 의미한다. 자유구속조건의 실험결과와 지중근입조건의 실험결과에서 모두 다 고강도 그라우팅 실험체의 진폭감쇠가 저강도 그라우팅 실험체 경우보다 크게 나타나고 공동결함부 실험체의 경우가 무결함 실험체의 경우보다 파의 감쇠가 큰 것으로 나타났다. 이는 그라우팅강도가 증가함에 따라 에너지손실 (또는 leaking) 현상이 커져 감쇠가 크게 나타나고 공동결함부의 분포에 의하여 파전달시 leaking외에 반사, 굴절현상 등이 발생하여 상대적으로 감쇠효과가 보다 크게 나타난 것으로 추정된다.

또한, 초음파 실험결과를 통하여 저주파수 대역 실험에 의한 록볼트 건전성여부의 판단 가능성을 볼 수 있었다.

본 연구의 중요한 결과로써 가진된 입력파에 대하여 그라우팅의 경연정도, 특히 결합부의 분포정도에 따라 파특성의 변화가 있었고 감쇠특성변화 등을 해석적 및 실험적 결과를 통하여 파악할 수 있었다.

이러한 연구결과는 터널구조물의 주지보재중의 하나인 록볼트에 대하여 시공품질 즉, 시공전후의 구조물안정성과 내구성 확보를 위한 비파괴조사기법 활용의 기초적인 성과로써, 보다 구체적인 록볼트 그라우팅 건전도에 따른 평가나 평가기준의 설정 등에 대한 2차적인 후속연구가 이루어져야 할 것으로 생각한다. 이를 위하여 타격에 의한 탄성파 외에 초음파 등의 적합성에 대한 연구가 추가로 이루어 질 것이며, 또한 보다 타당한 적합한 주파수의 선택, 장비의 구성 및 실내외실험과 연계함으로써 종합적이고 실용적인 연구결과를 추후에 발표하고자 한다.

참고문헌

1. 고려대학교 등, 2002, 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사기술개발, 건설교통부.

-
2. 김영근, 백기현 (2001), 터널 유지관리를 위한 안전진단시스템 개발에 관한 연구, 한국터널공학회논문집, 제 3권, 제1호, 37-50.
 3. 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, 212-218.
 4. Chao, H. C. (2002), An Experimental Model for Non-destructive Evaluation on Pile Foundations

Using Guided Wave Approach, Ph.D. Dissertation, Northwestern University

5. Graff, K. F. (1975), Wave Motion in Elastic Solids, Oxford University Press
6. Kolsky, H. (1963), Stress Wave in Solids, Dover Publications, Inc., New York
7. Pavlakovic, B. and Lowe M. (2003), DISPERSE User's Manual (version 2.0), Non-destructive Testing Lab., Imperial College, London.



이종섭

정회원, 고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 조교수
ongsub@kroea.ac.kr



이용준

(주)포스코 건설기술 연구소
civilyj@poscoenc.com



엄태원

(주)SK건설 토목사업부 Geotask팀
98tw@kroea.ac.kr



한신인

고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
sihan@kroea.ac.kr



이인모

고려대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수
inmolee@kroea.ac.kr
