

록볼트 그라우팅 시공품질에 대한 비파괴조사·건전도평가 기술에 관한 연구

김현배, 이용준 (주)포스코건설 기술연구소)
한신인, 엄태원, 이종섭, 이인모 (고려대학교 사회환경시스템공학과)

1. 서 론

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. 국내의 경우 장기적 대책사업의 일환으로 “대형·대단면 지하공간창출”을 위한 지하공간건설기술 개발을 적극적으로 추진 중에 있다.

이상과 같은 지하공간 개발사업에서 우선적으로 확보되어야 할 요소로는 건설기술이다. 또한 현재까지 국내의 주된 터널시공개념은 샷크리트(shotcrete)를 주요 지보재(support system)로 하는 NATM인 반면에, 앞으로는 록볼트(rock-bolt)를 주지보재로 하는 NMT(Single Shell 공법) 개념을 도입하려는 추세가 점차적으로 나타나고 있다. NMT개념에 의한 지하공간 건설계획시에는 무라이닝(unlining)공법 또는 PCL(Prefabricated Concrete Lining)공법이 적용되는 것이 일반적이고 시공 중에도 현장타설 콘크리트라이닝 적용에 따른 여러 가지 문제점으로 인해 무라이닝공법 도입여부가 종종 제기 되고 있어 이에 따라 록볼트 지보재의 중요성이 재인식되고 있다.

국내의 설계기준 및 시방서에서는 록볼트의 품질확인 기준으로 인발시험(rock-bolt pullout test)을 일상계측항목중의 하나로 설정하여 연장 20m마다 또는 1회/50분의 빈도로 시행토록 규정되어 있다(건설교통부, 2000). 그러나, 인발시험을 수행하지 않은 록볼트, 특히 전면접착형 록볼트의 그라우팅이 불량 시공되었을 경우, 이에 대한 확인 및 대책수립이 불가능한 실정이다. 더욱이 록볼트 시공품질이 확보되지 않았을 때, 단기적으로는 시공 중 터널붕락사고를, 장기적으로는 터널주변지반이 이완되어 추가적인 장기하중이 유발됨으로써 구조물안전성에 악영향을 미칠 수 있다는 점을 감안하면 시공중의 록볼트의 품질 확보·확인

방안 개발이 필수적인 과제라 할 수 있다.

따라서 이러한 문제점을 개선하면서 록볼트의 시공 품질확인 및 확보기술 개발에 대하여 현장에서의 사용이 간편하고 신뢰성이 높은 새로운 비파괴조사(non-destructive testing) 시스템을 개발, 활용하기 위해 본 연구를 수행하였다. 본 논문의 주요내용은 서론에 이어서 우선 터널구조물에 대한 안전진단과 비파괴조사기법에 대한 국내외 기술현황을 조사하였고, 유도파의 전달특성과 그 이론적 고찰, 분산성분석, 실내시험 및 분석결과, 그리고 마지막으로 토의 및 결론으로 구성하였다.

2. 터널구조물 안전진단과 비파괴조사

터널건설시에 지반자체의 강도와 지보능력을 최대한 활용하여 효율적인 터널시공을 유도하고, 시공중 또는 운영중의 장단기적인 안정성검증 및 평가를 위하여 터널계측이 필수적이다. 그러나, 현재 국내의 터널계측기술은 도로, 철도분야 등에서 급격한 터널건설의 증가로 양적인 발전은 이루었으나, 유지관리계측으로의 연계성과 같은 질적인 활용도가 낮고, 록볼트나 슛크리트 등 지보재의 품질관리측면에서 그 평가기술발달이 저조한 실정이다. 지보재의 품질관리는 터널 시공 중의 안정성확보 외에 효율적인 보강방법 설정을 통하여 경제적인 효과를 동시에 얻을 수 있다.

국내외 문헌조사, 기술적 현황조사에 의하면, 해외의 경우 영국 등의 일부 해외지역에서 록볼트품질에 대한 유사한 연구개발이 이미 진행 중에 있는 것으로 파악되었고, 최근에 유도초음파(guided ultrasonic wave)를 이용한 록볼트 철근이나 콘크리트 보강용 Tendon의 건전성 평가연구(Beard 등 2003), 휴대용 Hammer타격에 의한 유도파를 발생시켜 말뚝-지반 영향에 대하여 신호처리해석, 건전도평가 연구(Chao, 2002)) 등이 이루어진 것으로 조사되었다.

이에 대하여 국내의 경우는, 지반공학분야 특히, 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 공용중 구조물 안전진단을 위하여 비파괴조사 기법을 점차 도입하고 있으며, 연구사례로써 터널구조물에서 터널라이닝의 품질이나 기능성 평가를 위하여 음향 또는 탄성파를 이용한 비파괴조사기법 적용성 연구(고려대 등, 2002), GPR 탐상과 함께 결합, 손상 등 터널변상 요인에 대한 자료처리, Software 측면에서의 라이닝의 건전도에 대한 평가연구(김 등, 2001) 등이 있었다.

정부산하 부처나 건설관련 지방서 등에서도 시공 또는 유지관리를 위하여 법규로 규정함으로써 시설물에 대한 안전진단지침을 설정하거나 비파괴 조사방안을 도모하고 있다. 특히, 터널구조물에 대한 유지관리의 효과적 수행과 안전성을 확보하기 위하여, 터널의 안전 점검 및 진단은 "시설물의 안전관리에 관한 특별법" 등에 의거하여 시행토록 터널표준시방서(건설교통부, 1999)상에서 규정하고 있다. 그러나 실제적으로는 구조물안전진단 분야에서 운영

중 지중터널구조물의 기능성, 안정성 평가를 위하여 공기 중에 노출되어 있는 콘크리트 라이닝을 주된 검사대상으로 한다. 그리고 비파괴 조사를 수행한다 하더라도 구조물에 대한 안정성을 평가할 수 있는 정밀안전진단이 아니라 주로 외관조사에 의존하거나, 구조물 안정성 평가에 대한 체계와 평가기준이 정립되지 않은 실정이다. 그러므로 터널구조물 안정성 또는 품질평가를 위한 국내의 비파괴탐상·조사 기술수준은 그 기술개발단계가 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 수행하였고, 수치해석결과와 실제 실내·외 시험과 연계하여 보다 타당한 조사기법과 구성장비를 선정하기 위하여 록볼트그라우팅이나 주변암반 강성조건별로 민감도분석 수행과 그 영향을 검토하였다.

무한 탄성매질에서 직각좌표계의 임의의 평행육면체 요소(rectangular parallelepiped)를 취한 후, 각 작용면에서의 응력항을 표현하면 그림 1과 같다. 또한 직각좌표축 벡터 (x, y, z)에 대하여, x축방향의 응력 및 관성력(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 무한 등방 탄성체에서의 요소의 밀도(density)이고, u 는 변위벡터 $\mathbf{u}=(u, v, w)$ 에서의 x방향 성분이다. 식(1)을 정리하면 아래와 같다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x_x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x_y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x_z} \quad (2)$$

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

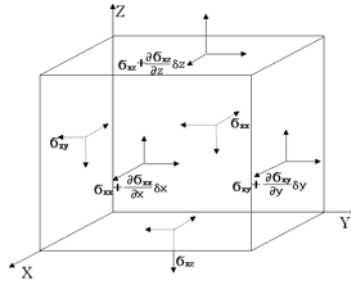


그림 1. 직각좌표계 임의 요소내 응력성분 변화

Hooke의 법칙 등을 이용하여 응력 및 변형률 성분을 식으로 표현하면 등방 탄성매질에서의 입자운동을 나타내는 “Navier equation”이라 하는 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 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.

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

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

무한 탄성매질에서의 평면파는 파진달시 두가지의 입자운동 양상으로 전달되는데, 체적 변형(dilatation)에 관계되고 파진행 방향에 평행한 종파(longitudinal wave)와 체적변형에 상관없이 파진행 방향과 수직한 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 2와 같은 원주좌표계(r, θ, z)에서 원주상 강봉체의 경계면 작용응력, ($\sigma_{rr}, \sigma_{rz}, \sigma_{r\theta}$) 과 변위, (u_r, u_θ, u_z)는 연속적이면서 평형을 이루는 경계조건을 만족한다.

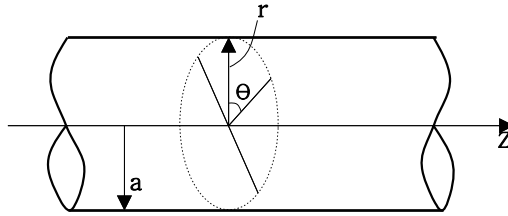


그림 2. 원주(cylindrical) 좌표계 (r, θ, z)

그리고 z 방향 조화파(harmonic wave)에서 Helmholtz 식의 Scalar potential, ϕ 과 Vector potential, $\mathbf{H} = (H_r, H_\theta, H_z)$ 의 구성성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 등, 2003).

$$\begin{aligned}
u_r &= \left(f' + \xi g_1 + \frac{n}{r} g_3 \right) e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\
u_\theta &= i \left(\frac{n}{r} f - \xi g_1 + g_3' \right) e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\
u_z &= i \left(\xi f + \frac{(n+1)}{r} g_1 + g_1' + 0 \right) e^{i(n\theta + \xi z - \omega t)} \\
\sigma_{rr} &= \mu \left(-\frac{\lambda}{\mu} (\zeta_1^2 + \xi^2) f + 2f'' + 2\xi g_1' - 2\frac{n}{r^2} g_3 + \frac{2n}{r} g_3' \right) \\
\sigma_{r\theta} &= i\mu \left(-\frac{2n}{r^2} f + \frac{2n}{r} f' + \frac{(n+1)\xi}{r} g_1 - \xi g_1' + 2g_3'' + \zeta_2^2 g_3 \right) \\
\sigma_{rz} &= i\mu \left(2\xi f' + \left(\frac{n}{r} \frac{n+1}{r} + \xi^2 - \zeta_2^2 \right) g_1 + \frac{n}{r} g_1' + \frac{n}{r} \xi g_3 \right)
\end{aligned} \tag{9}$$

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), n 은 상수이다. 그리고 이를 아래와 같이 행렬 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{US\} = [D]\{A_{LS}\} \tag{10}$$

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 등), 변수 r , Bessel 함수 등으로 이루어진 6×6 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.

$$[G]\{A\} = 0 \tag{11}$$

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, 이 Graph를 "분산선도(dispersion curve)"라 한다. 그러므로, 분산성 해석 및 분산선도를 분석함으로써 임의의 피검체 시스템에 대하여 파전달 주파수변화에 따른 속도변

화, 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 선정, 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 총 3개의 층으로 적용하였으며, 구성층의 해석물성은 표 1과 같다.

표 1. 파전달에 따른 분산성분석 적용물성치

구 분	철근	그라우팅	암반
영계수 (GPa)	206	10	40
포아슨 비	0.30	0.27	0.25
밀도 (g/cm ³)	7.90	2.1	2.4
두께 (mm)	12.5	6.5	Infinite
비 고	D25	Cement mortar	

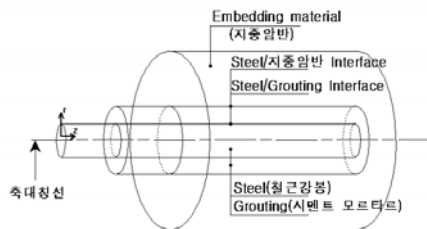
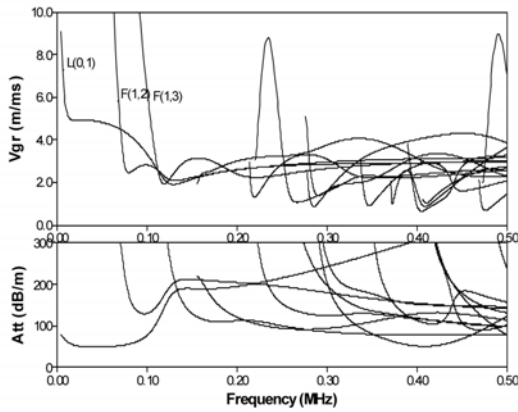


그림 3. 록볼트시스템 모델링

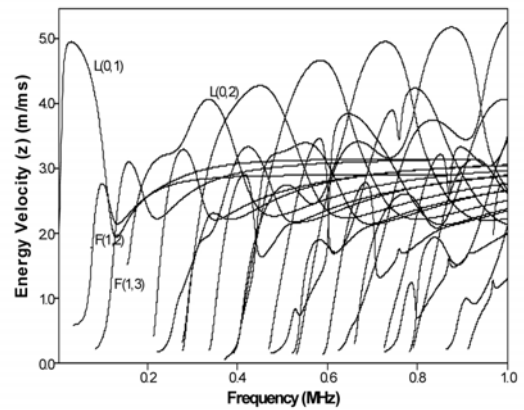
3.2.2 록볼트 분산성 분석결과

(1) 자유구속 상태

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



(a) 군속도와 감쇠특성

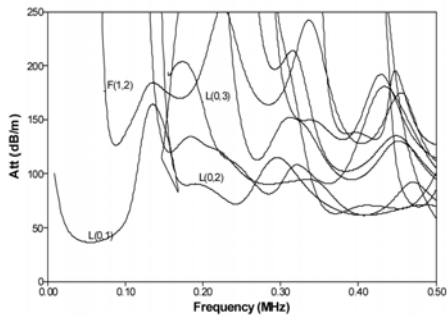


(b) 에너지 속도특성

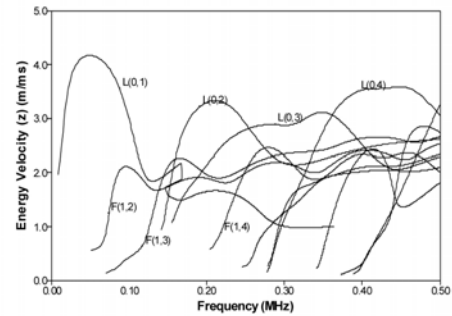
그림 4. 자유구속 상태의 그라우팅피복 강봉에 대한 속도분포

(2) 암반근입 조건

지중의 암반지반에 근입조건에서의 분산성 해석결과는 다음 그림 5와 같다. 그림 5(a)의 감쇠 특성을 볼 때, 주파수변화에 따라 각 모드별 감쇠정도가 커지고 최소 감쇠 크기를 보이는 최소정점의 크기도 커짐을 알 수 있다. 또한 감쇠특성이 최저값을 보이는 주파수대역에서 발생파의 에너지속도가 최대침두값을 나타내었다.



(a) 감쇠 특성 분포

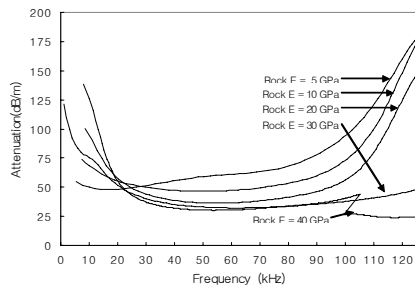


(b) 에너지속도 분포(energy velocity)

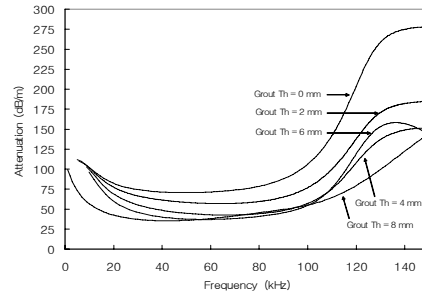
그림 5. 지중암반 근입상태의 강봉에 대한 감쇠특성과 에너지속도 분포

(3) 유도파의 감쇠특성 분석

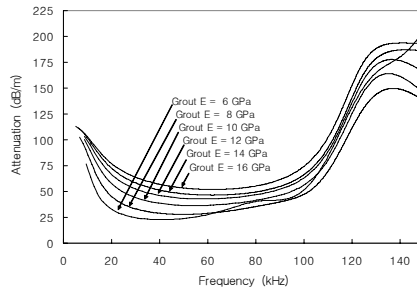
주변암반의 강성과 그라우팅의 두께 및 강성변화에 따른 주파수대비 감쇠특성에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.



(a) 주변암반의 강성에 따른 영향



(b) 그라우팅의 두께에 따른 영향



(c) 그라우팅 강성에 따른 영향

그림 6. 주변암반의 강성과 그라우팅의 두께 및 강성변화에 따른 감쇠특성

자유구속 조건에서 그라우팅피복을 하지 않은 강봉(철근)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 나타난 바와 같이 분산성 분석결과, 비파괴조사시험에 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 50 kHz내외일 것으로 예상할 수 있다. 그리고 대략 20~110 kHz영역의 주파수대역에서의 전반적으로 감쇠치가 약 50±25 dB/m 값의 비교적 일정한 값을 나타내었다.

4. 실내시험 및 분석

4.1 비파괴 조사 장비 구성(Hammer에 의한 Impact-echo 시험)

비파괴조사장치는 탐사대상인 피검체, Triggering과 수진을 함께 할 수 있는 1개의 감지기(accelerometer), 신호파 수신 및 처리장치인 Digitizer, 장비제어시스템(software 및 PC)으

로 구성된다. 장비제어와 신호수집 및 처리를 위하여 NI(National Instrument)사에서 개발한 LabView 프로그램을 이용하였고, 이산신호처리(discrete signal processing)를 위하여 적절한 Sampling rate 선정, Noise처리와 필요시 High-pass 등의 필터링을 하였다.

시험은 광대역 주파수를 갖는 감지기(accelerometer)를 에폭시(epoxy)를 이용해서 철근 두부 표면에 부착시켜 Hammer로 충격하중을 가하였고, 발생한 진동을 감지하여 획득한 신호를 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer)를 통해 저장하고 분석하였다. 실내시험의 전체적인 전경은 그림 7과 같다.



그림 7. Hammer에 의한 Impact-echo 시험 전체 전경

시험에 사용된 시험체는 공동결함의 유무와 위치, 그라우팅의 강도에 따라 구분하여 제작하였고, 시험에 사용된 그라우팅의 물성은 표 2와 같고 시험체별 형상을 각각 표 3 및 그림 8에 나타내었다.

표 2. 그라우팅 물성

구 분	단위중량 (ton/m ³)	동탄성계수 (kg/cm ²)	일축압축강도 (kg/cm ²)	배합비 (시멘트:모래:물)
고강도	2.12	2.972×10 ⁵	371.5	1 : 1 : 0.4
저강도	2.12	2.473×10 ⁵	273.2	1 : 2 : 0.6

표 3. 시험체별 형상구분

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

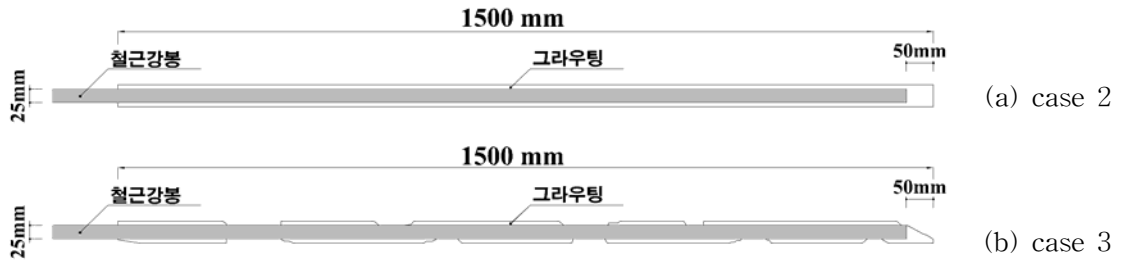


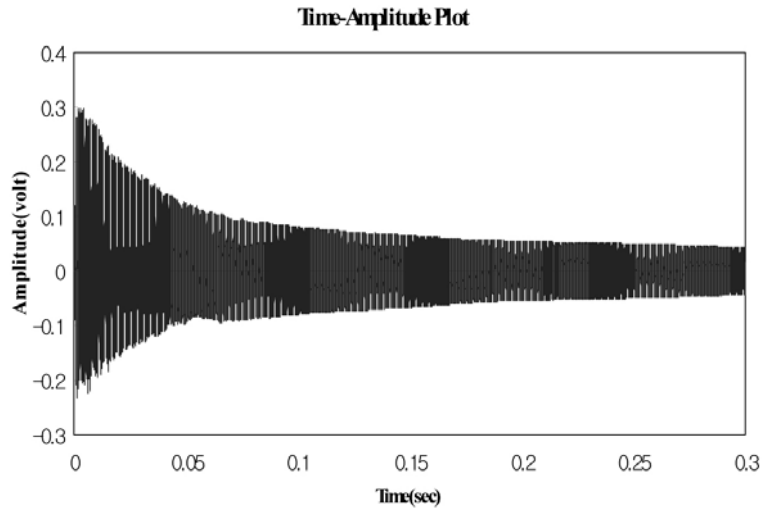
그림 8. 공동 결함부에 따른 시험체 형상

시험에 사용된 가진방법은 강철구를 이용한 구경별 Hammer, Pointed hammer, 진자운동 Pointed rod, 6mm 플라스틱 구슬을 발사 가진 할 수 있는 Gun을 사용하였다. 시험결과, Hammer에 의한 가진파는 가능한 Frequency는 크고 Amplitude가 작은 파(wave)일수록 반사 수신된 신호파의 결과가 뚜렷하였으며, 그 적용성이 좋은 것으로 나타났다. 따라서, Hammer를 이용한 Impact-echo 시험 방법에서 진자운동 Pointed rod를 가진원으로 선정하였다.

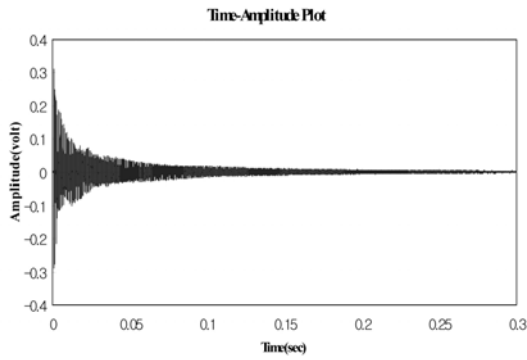
4.2 그라우팅강도와 결함 유무에 따른 시험결과

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 시험체의 강도변화를 주었다. 또한, 공동 결함에 따른 파특성 분석을 위해 철근 연장 50% 이상의 무작위(random) 공동결함을 모사하여 시험을 하였고, 배합비에 따른 Impact-echo시험결과는 그림 9와 같다.

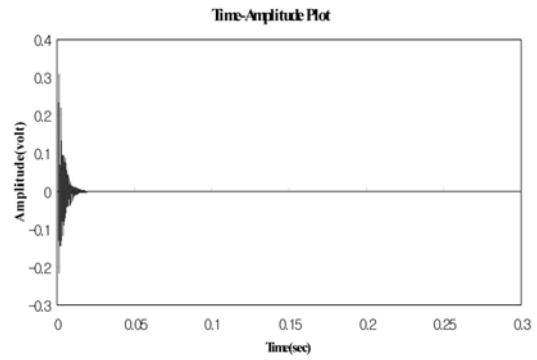
철근만의 시험 결과를 보면 시간이 지남에 따라 감쇠가 나타나기는 하나 그라우팅피복이 되어 있는 시험체에 비하여 감쇠의 정도가 상대적으로 작게 나타났다. 그림 9의 (b)와 (c) 또는 (d)와 (e)의 결과를 보면 고강도일수록 감쇠정도가 크고, 공동결함부 상태에 따른 시험결과는 무작위 공동결함부 시험체의 경우가 강도변화에 의한 경우보다 뚜렷하게 감쇠가 큰 것으로 나타났다. 이는 시험체 공동부가 균질하지 않게 분포하는 경우로써 파전달시 Leaking외에 반사와 굴절 등으로 인하여 상대적으로 감쇠가 커진 것으로 예상된다.



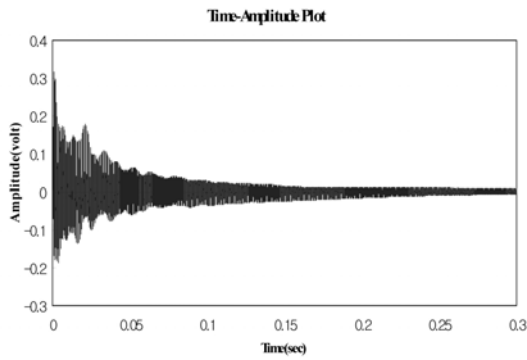
(a) 철근 시험체의 결과



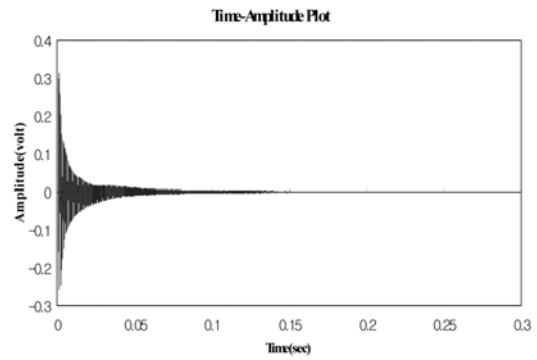
(b) 고강도 피복시험체 결과(결함부 없음)



(c) 고강도 피복시험체 결과(무작위 공동결함)



(d) 저강도 피복시험체 결과(결함부 없음)

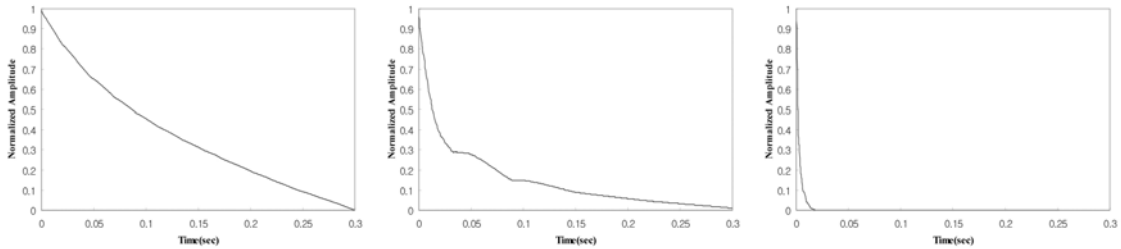


(e) 저강도 피복시험체 결과(무작위 공동결함)

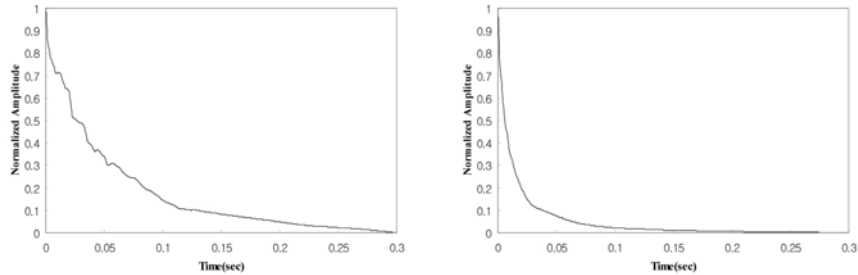
그림 9. 그라우팅 강도에 따른 시험결과

4.3 실내 축소모형시험에 대한 Wave 신호처리 및 해석

각각의 그라우팅 피복여부와 결합상태에 따른 시험 결과를 Auto-correlation 등의 신호처리 후 분석해보면 그림 10과 같다.



(a) 철근 시험체 결과 (b)고강도시험체 (결합부 없음) (c)고강도시험체(공동결합)



(d) 저장도 시험체 결과(결합부 없음) (e) 저장도 시험체 결과(공동결합)

그림 10. 그라우팅 상태별 시험체 감쇠특성 결과(auto-correlation)

그림 10 (a)는 철근만의 시험결과이며 발생 파가 일정하게 감쇠하고 있고, 다른 그라우팅 피복 시험체의 경우 철근만 있는 경우에 비하여 감쇠가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 그라우팅피복강도에 따른 감쇠결과에서는 그 차이가 작으나 고강도 시험체가 저장도 시험체보다 감쇠가 크게 나타났다. 이는 그라우팅강도가 증가함에 따라 Leaking현상이 커져 감쇠가 크게 나타나는 것으로 예상된다. 또한 그라우팅 피복조건에서 공동결합이 있는 시험체의 경우가 다른 무결합 시험체보다 감쇠가 큰 것으로 나타났다.

5. 토의 및 결론

국내외 비파괴조사 기술분석결과, 해외의 경우는 공학적·이론적인 바탕아래 효율적이고 안전한 장비개발과 연구가 상당히 진전되어 있으나, 국내의 경우는 구조물 운용시의 안전진단차원에서 부분적으로 수행하고 있고, 시공중 품질관리측면에서 비파괴조사에 대한 저변인식과 평가기준 체계화가 아직까지는 되어 있지 않은 것으로 조사되었다.

유도파와 파전달에 따른 분산성에 대한 이해와 타당한 적용을 위하여 파(wave)의 기본이

론을 고찰하였다. 프로그램을 이용하여 해석조건별 민감도 분석과 분산성 검토를 하였으며, 검토결과 주변압반의 영향이 작고 시험목적에 적합한 파의 Mode는 L(0,1)으로써 적정 주파수 대역은 대략 20 kHz~110 kHz의 저주파수 대역일 것으로 나타났다.

록볼트에 대한 비파괴조사 시험은 록볼트의 지중근입 조건을 고려하여 반사파를 이용한 Impact-echo 방법을 사용하였고, 적용 가진원은 Hammer타격에 의한 탄성파를 이용하였다.

파감쇠특성은 주변매질의 음향학적 임피던스의 차이가 작을수록 커지는 것이 일반적이며, 이는 록볼트철근 주변의 매질이 단단함을 의미한다. 시험결과에서도 고강도 그라우팅 시험체의 진폭감쇠가 저강도 그라우팅 시험체 경우보다 크게 나타났음을 알 수 있었다. 이는 그라우팅강도가 증가함에 따라 에너지손실(또는 leaking) 현상이 커져 감쇠가 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 시험체가 그라우팅으로 피복되어 있을 경우, 공동결함부 시험체의 경우가 다른 무결함시험체 경우보다 반사파의 감쇠가 크게 나타났다. 이는 공동결함부의 분포에 의하여 파진달시 Leaking외에 반사, 굴절현상 등이 발생하여 상대적으로 감쇠효과가 보다 크게 나타난 것으로 예상된다.

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

이러한 연구결과는 터널구조물의 주지보재중의 하나인 록볼트에 대하여 시공품질 즉, 시공후의 구조물안정성과 내구성 확보를 위한 비파괴조사기법 활용의 기초적인 성과로써, 보다 구체적인 록볼트그라우팅 건진도에 따른 평가나 평가기준의 설정 등에 대한 2차적인 후속연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 이를 위하여 타격에 의한 탄성파 외에 초음파(ultrasonic wave) 등의 적합성에 대한 연구가 심화되어야 하고, 또한 보다 타당한 적합한 주파수의 선택, 장비의 구성 및 실내외시험과 연계함으로써 종합적이고 실용적인 연구개발이 지속되어야 할 것이다.

■ 참고문헌 ■

1. 고려대학교 등, 2002, 음향분석기법을 이용한 지하구조물 비파괴조사기술개발, 건설교통부
2. 건설교통부, 1999, 터널표준시방서
3. 건설교통부, 2000, 도로설계편람(I)
4. 김영근, 백기현, 2001, 터널 유지관리를 위한 안전진단시스템 개발에 관한 연구, 한국터널공학회논문집, 제3권, 제1호, .37-50
5. 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
6. Chao, H. C., 2002, An Experimental Model for Non-destructive Evaluation on Pile Foundations Using Guided Wave Approach, Ph.D. Dissertation, Northwestern University

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