

# 음파를 이용한 암반사면에 설치된 록볼트의 건전도 평가

이종섭<sup>1</sup> · 유정동<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

<sup>2</sup>정회원, 전북대학교 토목공학과 조교수

## Integrity evaluation of rock bolt installed in rock slope using sound waves

Jong-Sub Lee<sup>1</sup> · Jung-Doung Yu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

<sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Jeonbuk National University

\*Corresponding Author : Jung-Doung Yu, jungdoung@jbnu.ac.kr

### Abstract

Rock bolts play a crucial role in reinforcing rock slopes. However, a poorly grouted rock bolt occasionally occurs, potentially compromising the stability of a rock slope. The purpose of this study is to evaluate the integrity of a rock bolt using sound waves. In experiments, a total of five rock bolts are prepared, one of which is intact while the other four are poorly grouted. The grouted ratios of four poorly grouted rock bolts are 80%, 70%, 60%, and 50%, respectively, and nongrouted sections are introduced at the upper part of the rock bolts. Rock bolts are installed in a concrete block to simulate rock bolts embedded in a rock slope. Sound waves are generated by impacting the head of the rock bolt and measured using the built-in microphone of a smartphone. Measured sound waves are analyzed in frequency domain through Fourier transform. Results show that the predominant frequency of sound waves decreases as the grouted ratio decreases. This study suggests that the predominant frequency of sound waves can be an effective indicator for evaluating the integrity of the rock bolt.

**Keywords:** Integrity, Predominant frequency, Rock bolt, Smartphone, Sound waves

### 초 록

록볼트는 암반사면을 보강하는데 중요한 역할을 한다. 하지만, 그라우트 충전 상태가 불량한 록볼트가 발견되는 사례가 종종 발생하고 있으며, 이는 암반사면의 안정성에 악 영향을 줄 수 있다. 본 연구는 음파를 이용하여 록볼트의 건전도를 평가하기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 총 다섯 개의 록볼트 시험체를 준비하였으며, 이 중 하나는 그라우트로 완전히 충전된 록볼트이며, 네 개는 그라우트 충전 상태가 불량한 록볼트로 준비

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
26(5)385-401(2024)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.5.385>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 1, 2024

Revised May 20, 2024

Accepted May 29, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

하였다. 그라우트 충전이 불량한 부분은 록볼트의 두부에 모사하였으며, 그라우트 충전비율은 80%, 70%, 60%, 50%로 준비하였다. 제작한 록볼트 시험체는 콘크리트 블록 내에 설치하여 암반에 근입되어 있는 환경과 유사하게 조성하였다. 록볼트의 두부를 해머로 타격하여 음파를 발생시켰으며, 스마트폰에 내장되어 있는 마이크로 음파를 측정하였다. 측정된 음파는 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 분석하였다. 그 결과, 록볼트의 그라우트 충전비율이 낮을수록 측정된 음파의 우세주파수가 감소하였다. 본 연구는 스마트폰의 내장 마이크를 이용하여 측정된 음파의 주파수 특성이 록볼트의 건전도를 평가하는 데 있어 유용한 지표가 될 수 있음을 보여준다.

**주요어:** 건전도, 우세주파수, 록볼트, 스마트폰, 음파

## 1. 서론

록볼트는 터널과 암반사면을 보강하는 데 널리 사용되고 있다. 록볼트는 재료, 시공방법, 하중지지 특성 등 여러 기준에 따라 다양하게 분류되고 있으며, 정착방법에 따라서는 일반적으로 선단정착형, 전면접착형, 혼합형 록볼트로 분류할 수 있다(Kim et al., 2009). 선단정착형은 록볼트의 선단을 암반에 정착시킨 후 암반과 록볼트의 선단에 축력을 작용시켜 불안정한 암반에 압축을 가해 암반을 보강하는 방법이다. 전면접착형은 록볼트와 암반의 전면을 시멘트, 레진과 같은 그라우트재를 이용하여 접착하거나 팽창형 강관 같은 재료를 이용하여 암반과의 기계적 마찰을 이용하여 암반을 보강하는 방법이다. 혼합형은 선단정착형과 전면접착형의 장점을 살리도록 고안된 방법으로 선단을 기계식 또는 그라우트를 이용하여 정착시키고 록볼트에 프리스트레스를 가하여 암반의 안정성을 증진시킨다. 본 연구는 암반사면에 설치된 전면접착형 록볼트를 대상으로 한다.

록볼트는 일반적으로 암반의 천공된 홀에 록볼트 철근을 삽입하고, 홀 내부를 그라우트재로 충전함으로써 설치된다. 하지만, 그라우트재의 흘러내림, 불충분한 물-시멘트 비, 부적절한 펌핑(pumping), 블리딩(bleeding) 등으로 인해 그라우트가 불량하게 충전될 수 있다. 또한, 암반의 파쇄대(fracture zone), 절리(joint), 균열(crack) 등과 같은 불연속면으로 그라우트재가 스며들면 록볼트가 완전히 그라우트되지 않을 수 있다. 설계된 양만큼 충분히 그라우트재가 주입되기 전에 주입 과정이 중단되는 경우에도 충전이 불량하게 된다. 이와 같이 그라우트가 불량하게 충전된 부분은 록볼트-그라우트, 암반-그라우트 간의 부착강도(bond strength)에 악영향을 주게 된다. 실제로 설치된 록볼트의 그라우트 품질이 불량하 사례가 다수 보고되어 왔다. Kelly and Jager (1996)에 의하면 남아프리카의 광산에서 설치된 록볼트 중 최대 50%의 록볼트가 그라우팅이 제대로 되지 않은 것으로 조사되었다. Thurner (1996)는 스웨덴에 설치된 록볼트를 조사하였고, 이 중 최대 50%가 좋지 않은 성능을 보였으며, 일부는 매우 좋지 않은 품질을 지녔다고 보고하였다. Hartman et al. (2010)은 오스트레일리아 광산에 설치된 191개의 록볼트에 대해 건전도 평가를 위한 비파괴시험(nondestructive test, NDT)을 수행하였고, 이 중 144개의 록볼트(75.4%)의 그라우트 상태가 불량하였고, 51개의 록볼트(26.7%)는 제대로 기능을 수행하지 않는다고 보고하였다. 특히, 암반사면에 설치된 록볼트의 경우, 일반적으로 파괴가능면(potential failure surface)에 수직이 아닌 더

낮은 각도로 설치된다(Wyllie, 2017). 이 경우, 중력의 영향으로 그라우트재가 흘러내려 Fig. 1과 같이 록볼트 두부에 그라우트가 충전되지 않은 부분이 생길 수 있다. 또한, 암반에 존재하는 틈과 같은 불연속면으로 그라우트재가 스며드는 경우나 그라우트 블리딩 등도 록볼트 두부에 그라우트가 충전되지 않은 부분을 발생시키는 요인이다. Thurner (1988)는 록볼트가 횡방향으로 암반사면에 설치될 때 그라우트가 절반만 충전되는 사례가 빈번하게 일어난다고 하였다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 암반사면에 설치된 록볼트의 두부에 그라우트가 불량하게 충전된 부분을 모사하였다.

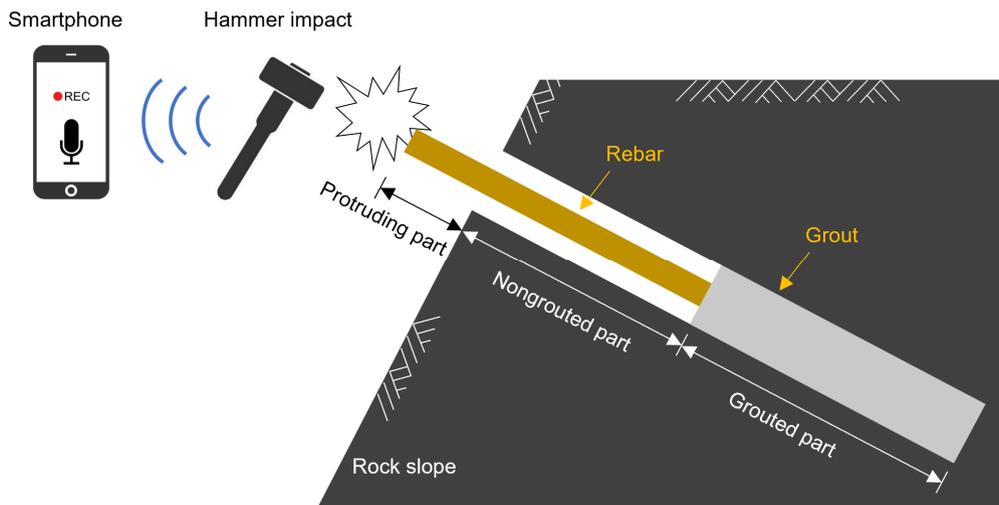


Fig. 1. Sound wave measurement for the rock bolt installed on the rock slope

록볼트의 건전도를 평가하기 위해 전통적으로 오버코어링(overcoring) 및 인발시험(pull-out test)이 수행되어 왔다. 오버코어링 방법은 그라우트, 록볼트, 암반의 상태를 현장에서 직접 시각적으로 확인하기 위해 실시되어 왔다(Sundholm, 1987). 인발시험은 일반적으로 ISRM standard에 따라 수행되며, 설치한 록볼트 중 최소 5% 이상 시험이 수행되어야 한다고 제안하고 있다(Bačić et al., 2019). 하지만, 이러한 방법들은 시간과 비용이 많이 소요되며, 파괴적인 방법(destructive method)이므로 다수의 록볼트를 조사하기에는 한계가 있다(Zou, 2004; Madenga et al., 2006).

기존의 록볼트 건전도 평가 방법의 단점을 극복하고자 다양한 비파괴시험법이 제안되었다. 이 중 탄성파를 이용한 시험방법은 그라우트 품질에 따라 전파특성이 뚜렷하게 변하기 때문에 가장 널리 사용되고 있다. Zou et al. (2007)은 좋은 건전도를 지닌 록볼트일수록 탄성파의 에너지 감쇠가 크며, 가진 진동수(excitation frequency)에 영향을 받음을 보였다. 많은 연구들이 탄성파의 속도는 록볼트의 그라우트 충전율에 따라 달라짐을 보였다(Wu et al., 2012; Yu et al., 2013; Zima and Rucka, 2017; Yu et al., 2019). 특히, 암반사면에 설치된 록볼트의 경우, 두부에 발생된 그라우트 충전율의 길이에 따라 록볼트의 고유진동수가 변화함은 가장 널리 알려진 현상이다(Godfrey

and Kuchar, 1977; Holland, 1993; Milne, 1999; Ivanović and Neilson, 2013). 하지만, 탄성파를 이용한 기법은 가속도계, AE센서, 초음파 트랜스듀서, 시그널컨디셔너, 신호증폭기, 오실로스코프 등과 같은 고가의 계측장비가 필요하다. 최근 전자기파를 이용하여 록볼트의 건전도를 평가하는 방법들이 새롭게 제안되고 있지만, 기법의 우수성과는 별개로 고가의 전자기파 송수신 장비가 필요하다(Yu and Lee, 2020; Lee and Yu, 2024). 이와 같은 이유로 휴대가 간편하고 경제적인 록볼트 건전도 평가 방법에 대한 연구가 요구되어 왔다.

본 논문에서는 기존의 비파괴시험법의 단점을 보완하기 위해서 휴대성이 좋고 비교적 저렴한 스마트폰을 이용하여 록볼트의 건전도를 평가하는 방법을 제시한다. 해머를 사용하여 록볼트의 두부에 충격을 가하여 음파를 발생시켰으며, 발생한 음파를 스마트폰의 내장 마이크를 이용하여 측정하였다. 측정된 음파의 주파수 분석을 위해 푸리에 변환(Fourier transform)을 수행하였다. 록볼트의 건전도는 그라우트 충전율에 따른 우세주파수 변화를 이용하여 평가하였다. 본 논문의 나머지 부분은 이론적 배경, 실험방법, 결과 및 분석, 요약 및 결론으로 구성된다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 록볼트의 종진동

록볼트의 진동은 경계조건과 하중조건에 따라 다양한 식으로 표현되어 왔다(Milne, 1999; Ivanović et al., 2001; Giurgiutiu, 2014; Bačić et al., 2020). Fig. 2와 같이 두부에 그라우트 충전율이 불량한 부분이 있는 록볼트의 두부를 축방향으로 타격하여 충격을 주었을 경우, 록볼트의 길이를 따라 종진동(longitudinal vibration)이 발생한다. 만약 록볼트의 두부와 선단을 각각 자유단과 고정단으로 가정한다면, 두부의 그라우트 충전율이 불량한 록볼트의 종진동은 균질한 탄성봉(uniform elastic bar)의 종방향 자유진동(free longitudinal vibration)으로 설명될 수 있다(Bačić et al., 2020).

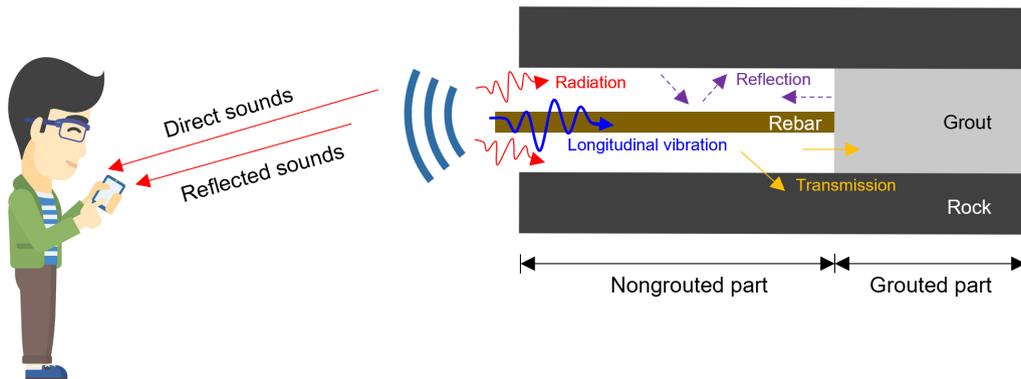


Fig. 2. Sound wave propagation

길이  $l$ , 탄성계수  $E$ , 밀도  $\rho$ , 단면적  $A$ 를 갖는 균질한 탄성봉을 고려해 보자. 거리  $x$ 와 시간  $t$ 에서 봉의 한 작은 요소(element)의 단면에 작용하는 축력  $P(x,t)$ 는 다음과 같다(Rao, 2011; 2019).

$$P = \sigma A = EA \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$ 는 축응력,  $u$ 는 축방향 변위,  $\partial u / \partial x$ 는 축방향 변형률이다. 이로부터 봉의 종진동에 대한 운동 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x,t) + f(x,t) = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x,t) \quad (2)$$

위 식에서 외력  $f=0$ 인 경우, 다음과 같이 종방향 자유진동에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$c^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

여기서,  $c$ 는 봉에 전파하는 종파 속도로  $E/\rho$ 의 제곱근으로 정의된다. 본 연구에서 측정된  $c$ 는 5,034 m/s이다. 식 (5)의 완전해(complete solution)는 다음과 같다.

$$u(x,t) = U(x) \cdot T(t) \equiv \left( \tilde{A} \cos \frac{\omega x}{c} + \tilde{B} \sin \frac{\omega x}{c} \right) \left( \tilde{C} \cos \omega t + \tilde{D} \sin \omega t \right) \quad (4)$$

여기서,  $\omega$ 는 각주파수 또는 각진동수(angular frequency)이며,  $U(x)$ 는 탄성봉의 고유진동수(natural frequency)와 모드형상(mode shape)에 대한 정보를 지닌 기본방정식(fundamental equation)을 나타내며,  $T(t)$ 는 조화운동(harmonic motion)을 나타낸다.  $\tilde{A}$ 와  $\tilde{B}$ 는 경계조건에 관한 상수이고,  $\tilde{C}$ 와  $\tilde{D}$ 는 초기조건에 관한 상수이다. 만약 봉이  $x=0$ 에서 고정되고,  $x=l$ 에서 자유롭다면, 경계 조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u(0,t) = 0, \quad t \geq 0, \quad \text{고정 단} \quad (5)$$

$$\text{axial force} = AE \frac{\partial u}{\partial x}(l,t) = 0, \quad \text{자유 단} \quad (6)$$

또는,

$$\frac{\partial u}{\partial x}(l, t) = 0, \quad t \geq 0 \quad (7)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하면  $A = 0$ 이 되고, 식 (6)을 사용하면, 다음과 같은 주파수 방정식을 도출한다.

$$B \frac{\omega}{c} \cos \frac{\omega l}{c} = 0 \quad \text{or} \quad \cos \frac{\omega l}{c} = 0 \quad (8)$$

따라서, 고유진동수 ( $\omega_n$ )는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_n = \frac{(2n + 1)\pi c}{2l}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

여기서,  $n$ 은 다양한 진동 모드를 나타내며,  $n = 1$ 일 때를 기본모드(fundamental mode)라 하고,  $\omega_1$ 은 기본주파수(fundamental frequency) 또는 기본진동수라고 한다.

불량한 그라우트 충전율로 인해 록볼트가 암반에 완전히 접촉되지 않은 경우, 이 부분에서의 종방향 진동은 주변 공기 분자를 번갈아 압축하고 팽창시켜서 공기 압력의 주기적인 변화를 일으키게 되며, 이로 인해 음파(소리)가 발생한다. 따라서, 록볼트의 종방향 진동에 의해 발생된 음파의 주파수는 록볼트의 그라우트 충전율에 따라 달라지게 된다.

## 2.2 공기의 종진동

본 연구에서는 록볼트 두부를 축방향으로 충격을 가해 소리를 발생시키고, 불량한 그라우트 충전율로 인해 생성된 암반과 록볼트 사이의 빈 공간에 존재하는 공기를 통해 이동하는 음파의 특성을 이용하여 건전도를 평가한다. 이 시스템은 한쪽 끝이 열려 있고 다른 쪽 끝이 닫혀 있는 폐관(closed pipe) 내에서 발생된 소리의 정상파(standing wave) 특성과 유사하다. 폐관의 열린 쪽 끝에서는 공기 분자의 변위가 가장 크지만, 압력은 주변 압력과 동일해야 한다. 즉, 변위가 발생하더라도 압력은 일정해야 한다. 따라서, 압력 변화는 0이기에 진동은 발생하지 않는다. 폐관의 닫힌 쪽 끝에서는 공기 분자의 변위는 가장 작다. 하지만, 압력은 최대가 되고, 최소 압력이 될 때 튕겨서 가장 큰 진동이 발생하게 된다(Kinsler et al., 2000; Rossing et al., 2013; Fahy and Thompson, 2015; Photinos, 2017). 따라서, 폐관에서의 정상파는 열린 곳은 배(antinode), 닫힌 곳은 마디(node)를 갖게 되며, 폐관의 길이는 파장(wavelength)의 4분의 1과 같다.

$$\frac{1}{4}(2n-1)\lambda_n = L, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

여기서,  $L$ 은 폐관의 길이,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다. 그리고,  $n$ 번째 모드의 고유진동수는 다음과 같이 표현됩니다.

$$\omega_n = \frac{(2n-1)\pi c_0}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

여기서,  $c_0$ 는 온도 20°C, 대기압에서 공기 중 음파의 속도로 343 m/s이다. 이론상으로는 폐관의 열린 쪽 끝에서는 압력이 일정하게 유지되고, 음향 임피던스(acoustic impedance)가 0이 되어야 한다. 그러나, 실제 폐관에서는 음파가 폐관 밖의 주변 매질(공기)로 방사되며 전파하기 때문에 음향 임피던스가 0이 아니게 된다. 따라서, 폐관의 열린 쪽 끝에서 소리가 발생하지 않고, 폐관의 열린 쪽 끝에서 약간 멀리 떨어져 압력이 0이 되는 곳까지 공기가 밖으로 밀려나와 공기기둥을 형성하여 소리가 발생한다. 이 때, 압력이 0이 되는 곳까지의 거리, 즉, 폐관 밖에 형성된 공기기둥의 길이와 폐관의 길이의 합을 유효 길이( $L_{eff}$ )라고 한다(Kinsler et al., 2000; Rossing et al., 2013; Fahy and Thompson, 2015). 반경  $r$ 의 원통형 폐관의 경우,  $L$ 은  $L_{eff} = L + 0.61r$ 로 보정된다. 이 보정을 말단보정(end correction)이라고 한다. 말단보정을 적용하면, 식 (11)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\omega_n = \frac{(2n-1)\pi c_0}{2(L+0.61r)}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

### 3. 실험방법

#### 3.1 록볼트 시험체 제작

록볼트 제작에 사용된 철근의 직경과 길이는 25.4 mm, 3.01 m이다. 그라우트는 시멘트 페이스트로 물-시멘트 비 0.5로 배합하였다. 직경 25.4 mm인 철근을 삽입하기 위해 암반에 천공되는 홀의 직경이 일반적으로 38 mm이므로, 그라우트의 두께는 6.3 mm로 하였다. 음파의 측정이 용이하도록 록볼트 두부의 10 mm는 그라우트를 하지 않고 공기 중에 노출시켰다. 따라서, 완전히 그라우트된 건전한 록볼트의 길이는 3.01 m이며, 그라우트된 길이는 3.0 m이다. 실험은 Fig. 3과 같이 길이 3.01 m인 다섯 개의 록볼트에 대해 수행되었으며, 그라우트되지 않은 길이가 각각 1.5 m, 1.2 m, 0.9 m, 0.6 m인 네 개의 록볼트와 건전한 록볼트 한 개를 포함한다. 본 연구에서는 록볼트 그라우트의 충전 정도를 충전율(grouted ratio, GR)로 나타냈으며, 그라우트된 길이를 건전한 록볼트의 그라우트된 길이(3.0 m)로 나누어 표현하였다. 따라서, 그라우트되지 않은 길이가 1.5 m, 1.2 m, 0.9 m, 0.6 m인 록볼트의 충전율은 50%, 60%, 70%, 80%이며, 건전한 록볼트의 충전율은 100%이다. 제작된 록볼트는 암반에 근입된 조건을 모사하기 위해 Fig. 4와 같이 폭, 높이, 길이는 각각 1.1 m, 1.1 m, 3.0 m인 콘크리트 블록 안에 설치하였다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 그라우트된 록볼트를 제작한 후에 이를 거푸집에 설치하였고, 거푸집 안을 콘크리트로 채워서 Fig. 4와 같은 시험체를 완성하였다. 따라서, 그라우트 충전상태를 육안으로 확인하면서 시험체를 준비하였다. 건전한 록볼트는 콘크리트 블록의 중심이 위치시키고, 충전율이 불량한 록볼트는 건전한 록볼트로부터 255 mm 간격을 두고 원형배치 하였다. 충전이 불량한 록볼트 간의 간격은 195 mm이다. 측정을 위해 공기 중에 노출된 길이 10 mm를 제외하면, 록볼트의 콘크리트 블록에 근입된 길이는 3.0 m이다. 측정은 콘크리트 양생 28일 후에 수행되었으며, 제작된 콘크리트의 28일 압축강도는 35 MPa이다. Fig. 4의 시험체는 전자기파를 이용하여 록볼트의 그라우트 충전율을 평가하는 연구에도 사용된 바 있다(Lee and Yu, 2024). 본 연구에서는 그라우트 충전이 불량한 록볼트에서 발생하는 음파를 측정하고 분석하는 데 사용되었다.

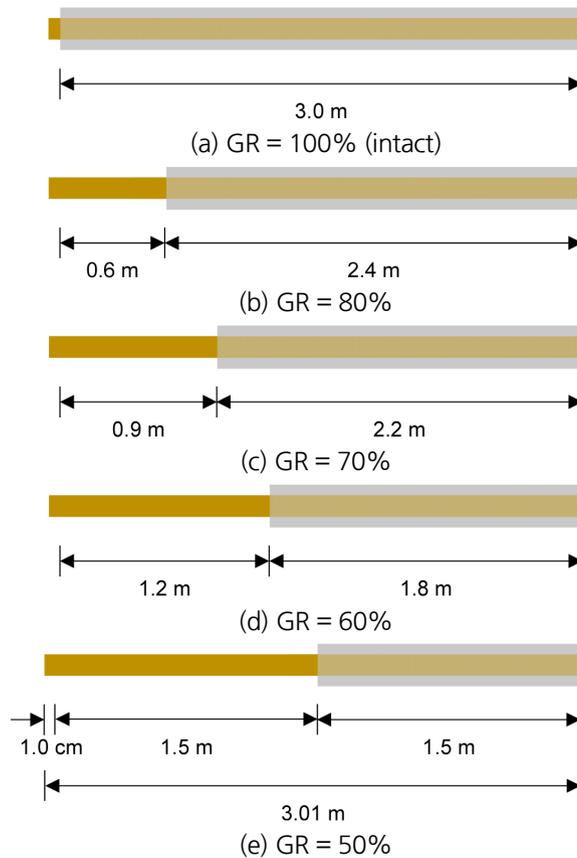


Fig. 3. Rock bolt specimens

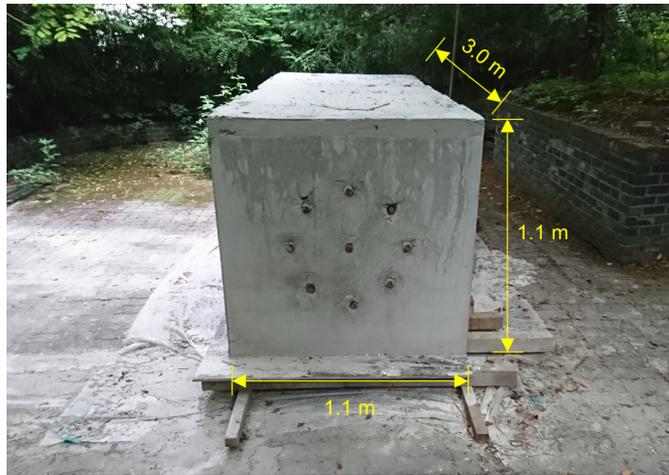


Fig. 4. Concrete block with rock bolts

### 3.2 음파 측정방법

탄성봉에 발생하고 있는 종진동과 횡진동(transverse vibration)은 각각 축방향과 횡방향 변위를 일으킨다. 따라서, 종진동은 원주 방향으로 형성된 결함(circumferential defect)을 감지하는 데 적합하고, 횡진동은 축방향 결함을 감지하는 데 주로 사용된다(Godfrey and Kuchar, 1977; Giurgiutiu, 2014). 본 연구에서는 실험을 위해 제작된 록볼트 두부에 모사된 그라우트가 충전되지 않은 부분의 형상을 고려하여 종진동을 이용하였으며, 종진동을 발생시키기 위해 록볼트 두부를 무게 500g의 스틸 해머(steel hammer)를 이용하여 축방향으로 타격하였다. 록볼트의 그라우트가 충전되지 않은 부분에 노출된 철근의 종진동으로 생성된 음파는 스마트폰의 내장 마이크를 이용하여 44.1 kHz의 샘플링 빈도로 측정하였다. 가청 영역인 20 Hz~20 kHz 범위에서 정현파 신호(sinusoidal signal)의 주파수를 10초 동안 선형적으로 증가시키며 내장 마이크에 대한 주파수 소인(frequency sweep)을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 내장 마이크는 작동하며, 1.0~2.0 kHz에서 가장 민감하고 상대적으로 일정한 주파수 반응(flat response)을 보이는 것으로 나타났다. 측정에 사용한 스마트폰은 애플사의 iPhone XS이다. 측정된 음파는 웨이브 오디오 포맷(waveform audio format)인 wav파일로 PC에 저장하였고, MATLAB을 이용

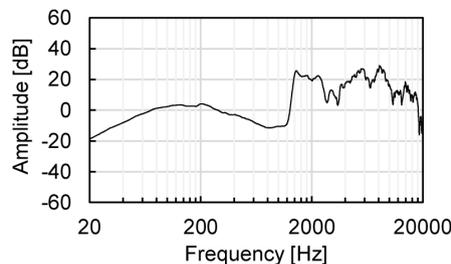


Fig. 5. Frequency response of the built-in microphone

하여 시간영역의 디지털 신호로 변환하였다. 변환된 시간영역의 신호는 푸리에 변환을 이용하여 주파수영역의 신호로 변환하였다.

음파의 주파수 반응은 해머 팁의 재질, 해머의 에너지, 타격 방향 등에 영향을 받을 수 있다. 실험에서는 해머 팁의 재질을 스틸로 일정하게 사용하였기에 팁 재질에 대한 영향은 고려하지 않아도 되었다. 하지만, 해머의 무게는 일정하지만 타격 속도를 일정하게 유지하기 어렵기에 타격 에너지는 일정하지 않았다. 또한, 타격 방향이 완벽하게 록볼트의 축방향이 되도록 하기는 어려웠다. 본 연구에서는 이러한 요인이 측정 음파의 주파수 반응에 영향을 주는 것을 다수의 실험을 통해 관찰할 수 있었다. 하지만, 우세주파수(predominant frequency)에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 이와 같은 이유로 타격 에너지와 방향을 일정하게 유지하기 위한 장치나 후처리를 수행하지 않아도 일정한 값을 나타내는 우세주파수를 분석하였다.

#### 4. 결과 및 분석

본 연구에서는 음원(sound source)으로 해머 충격이 사용되었다. 록볼트의 두부를 해머로 타격하여 소리가 생성되었고, 주변의 공기와 그라우트가 충전되지 않아 생긴 빈 공간으로 방사되었다. 이 때, 음원으로부터 발생된 소리가 주변 공기를 통해 마이크로 바로 전달되는 소리를 직접음(direct sound)이라고 한다. 그라우트가 충전되지 않은 빈 공간에서의 음파는 주변 콘크리트나 철근과는 음향 임피던스가 다르기 때문에 반사 특성을 보인다. 음파의 고유주파수는 식 (12)에 나타난 것과 같이 대부분 그라우트가 충전되지 않은 길이에 영향을 받고, 홀의 직경(즉, 그라우트가 충전되지 않은 빈 공간의 직경)에도 다소 영향을 받는다. 그라우트가 충전되지 않아 노출된 철근의 종진동(해머 타격에 의한)은 식 (9)와 같이 철근의 길이뿐만 아니라 철근의 탄성계수와 밀도와 관련된 탄성파의 속도에도 영향을 받는다. 철근의 종진동은 주변 공기의 압축과 팽창을 야기하고, 결국 철근 종진동의 고유주파수에 따라 음파가 발생한다. 이렇게 발생된 음파는 철근과 주변 콘크리트에서 반사된다. 결국, 그라우트가 충전되지 않은 빈 공간에서는 해머 충격으로 발생한 음파와 철근의 종진동으로 발생한 음파의 중첩과 간섭으로 생성된 음파가 존재하게 된다. 따라서, 스마트폰의 내장 마이크로 측정된 직접음 이후에 측정되는 소리는 이렇게 그라우트가 충전되지 않아 생긴 빈 공간에서 중첩되고 간섭된 음파가 반사되어 온 것이다. 이와 같이 스마트폰 내장 마이크로에는 직접음과 빈 공간에서 생성된 반사음(reflected sound)이 함께 측정된다.

반사음의 첫 번째 그룹은 초기반사음(early reflection) 또는 에코(echo)이며, 이후에 나타나는 반사음은 잔향음(reverberant sound)에 해당한다(Rossing et al., 2013). 잔향음은 에코 이후에도 나타나는 반사음으로 음원으로 인한 진동이 끝난 후에도 주변 물체로 인한 반사가 지속되어 발생한다. 즉, 음향 공간 내의 물체나 경계조건으로 인해 나타나는 다중반사(multiple reflection)가 시간이 지남에 따라 에너지의 크기가 줄어들며 존재하는 반사음이다. 본 연구에서는 그라우트가 충전되지 않은 부분 내의 철근과 주변 콘크리트로 인해 반사음의 다중반사가 나타났으며, 원음(original sound)과 합쳐졌다.

마이크에 측정된 음파를 Fig. 6에 나타내었다. 측정된 음파를 보면, 가장 처음 나타난 음향 이벤트(sound event)

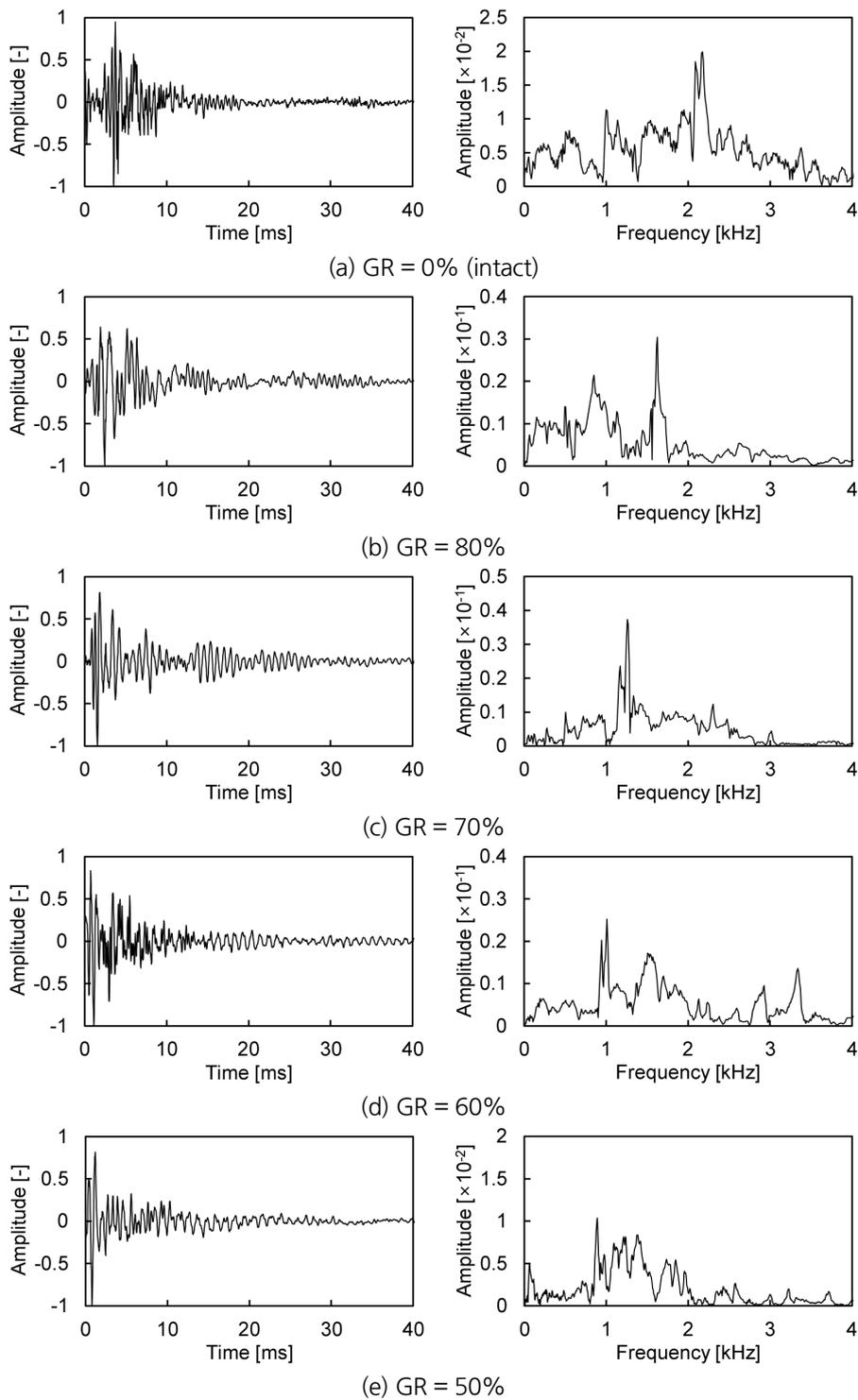


Fig. 6. Measured sound waves (left) and frequency spectrum (right)

가 가장 큰 진폭을 가지고 있다. 이 이벤트는 해머가 록볼트 두부에 부딪혀 발생한 충격음에 해당한다. 이후 나타나는 이벤트들은 반사음에 해당한다. 그리고, 이 반사음의 지속시간은 충전율이 낮을수록 더 오래 지속되는 것을 볼 수 있다. 측정된 음파를 푸리에 변환을 통해 주파수 신호로 변환하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 건전한 록볼트의 경우, 가장 큰 에너지를 가지고 있는 주파수인 우세주파수는 2.17 kHz이다. 그라우트 충전율이 80%, 70%, 60%, 50%인 록볼트의 우세주파수는 1.63 kHz, 1.26 kHz, 1.01 kHz, 0.89 kHz로 Fig. 7과 같이 충전율이 증가할수록 우세주파수는 증가하였다.

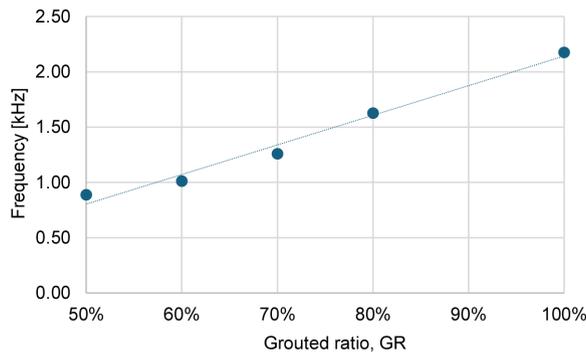


Fig. 7. Variation in the predominant frequency according to the grouted ratio

그라우트 충전율이 불량한 록볼트의 기본진동수와 음파의 기본진동수를 식 (9)와 식 (12)를 이용하여 계산하였고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, Fig. 9에 마이크로 측정된 음파의 우세주파수와 비교하였다. 충전율 80%, 70%, 60%, 50%인 록볼트의 종진동에 대한 기본진동수는 2.10 kHz, 1.40 kHz, 1.05 kHz, 0.84 kHz이며, 음파에 대한 기본진동수는 0.14 kHz, 0.09 kHz, 0.07 kHz, 0.06 kHz이다. 측정된 음파의 충전율에 따른 우세주파수의 감소 경향과 마찬가지로 록볼트의 종진동과 음파에 대한 기본진동수 모두 충전율이 감소함에 따라 감소하는

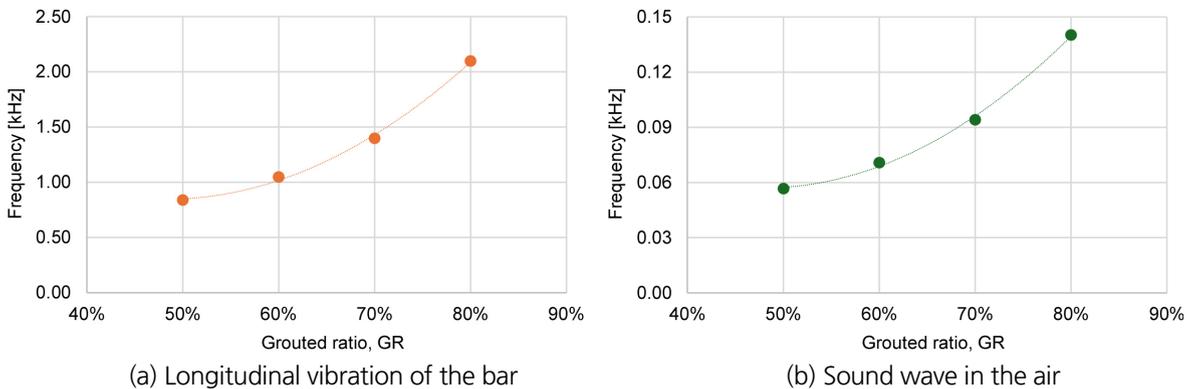


Fig. 8. Variation in the fundamental frequency according to the nongrouted part

경향을 보여준다. 하지만, Fig. 9에 나타난 것과 같이 록볼트 종진동에 대한 기본진동수는 충전율이 50%~70%일 때 측정된 음파의 우세주파수와 비슷한 값을 보인다. 음파의 기본진동수는 모두가 측정된 음파의 우세주파수보다 훨씬 낮은 주파수를 보여준다. 이는 그라우트가 충전되지 않은 부분에서의 음파가 록볼트의 종진동에 의해 발생된 음파에 더 큰 영향을 받았음을 보여준다. 이러한 차이가 나타난 이유는 록볼트 종진동에 의해 발생된 음파와 해머 충격으로부터 발생된 음파가 그라우트가 충전되지 않은 부분의 빈 공간에서 다중반사와 중첩, 간섭 등을 겪고 스마트폰의 내장 마이크로 전달되었기 때문이다.

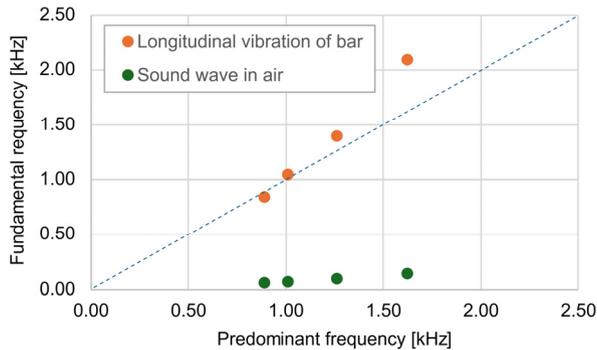


Fig. 9. Comparison of predominant frequency and fundamental frequency

록볼트의 그라우트가 충전되지 않은 부분의 노출된 철근의 종진동은 록볼트의 재료적 특성에 영향을 받는다. Ivanović et al. (2001)과 Ivanović and Neilson (2008)은 그라우트의 강성이 종진동의 기본진동수에 영향을 줌을 증명하였다. 본 연구에서는 물-시멘트비 0.5인 시멘트 페이스트를 그라우트재로 사용하였다. 식 (9)를 이용하여 산정된 기본주파수는 그라우트의 강성에 대한 영향을 고려하지 않았다. 이 또한 측정된 음파의 우세주파수와 차이가 발생한 원인으로 사료된다. 전면접착형 록볼트의 경우, 시멘트 페이스트, 몰탈, 및 에폭시와 같은 다양한 재료를 그라우트재로 사용한다. 따라서, 이를 고려한 추가적인 연구가 필요하다.

음파의 고유주파수는 공간의 음향 임피던스에 영향을 받으며, 공간의 기하학적 형태와 표면(또는 경계면)의 강성은 중요한 영향 요소이다(Fletcher and Rossing, 1998; Kinsler et al., 2000; Raichel, 2006; White and White, 2014; Bennett, 2018). 본 연구에서는 록볼트에 그라우트가 충전되지 않아 생긴 빈 공간의 단면적 변화, 콘크리트의 재료적 특성이 음파 에너지의 흡수와 반사 특성에 영향을 주었다. 이러한 요인도 측정된 음파의 우세주파수와 식 (12)로부터 산정된 고유주파수와의 차이에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 실제 현장에서는 설계조건에 따라 록볼트 철근의 길이 및 직경, 천공홀의 직경, 그라우트 배합비 등이 달라질 수 있으며, 암반의 종류도 다양하다. 따라서, 그라우트가 충전되지 않아 생긴 빈 공간의 형상 및 암반의 재료적 특성이 음파의 우세주파수에 미치는 영향을 조사하기 위한 더 많은 연구가 필요하다.

음파를 이용한 측정을 현장에서 적용할 시 다양한 주변음의 영향에 영향을 받을 수 있으며, 특히 터널과 같이

폐쇄된 공간 내에서는 그 규모에 따라 음파와 반사와 그에 따른 공명 등 다양한 요인에 영향을 받을 수 있다. 따라서, 정확한 측정을 위해 2채널 이상의 다중채널로부터 음파를 수신해야 하며, cross-correlation과 wavelet transform과 같은 다양한 신호처리 기법의 적용이 요구된다.

본 연구에서 실험한 록볼트 모형에는 지압판이 설치되지 않았다. 이는 실험 모형을 단순화하기 위해서다. 특히, 전면접착형 록볼트는 전면이 암반과 접착되어 있으므로 두부에 프리스트레스(prestress)를 가하지 않고, 단단한 암일 경우 그 효과가 크지 않아 지압판이 생략되기도 한다(Kim et al., 2009; Ivanović and Neilson, 2013; Masoudi et al., 2019). 하지만, 지압판과 프리스트레스가 적용되면, 록볼트의 강성 및 임피던스에 영향을 줄 수 있다. 특히, 록볼트 두부에 그라우트가 충전되지 않은 부분이 있고, 지압판이 존재할 시에는 양쪽 끝이 닫혀 있는 폐관이 되어 본 연구에서 제시하는 음파의 주파수 특성과 크게 달라질 수 있다. 현장실험 시 지압판을 제거하고 실험하는 것은 안전상 위험이 따를 수 있으므로 지압판과 프리스트레스가 음파의 주파수에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

암반이나 그라우트가 지하수에 영향을 받거나 그라우트가 충전되지 않아 생긴 빈 공간이 지하수로 채워져 있을 경우, 음파의 에너지 감쇠를 야기할 수 있으며, 주파수 특성에도 영향을 줄 수 있다. 따라서, 지하수가 음파의 주파수에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 측정된 음파와 분석한 우세 주파수는 록볼트 두부가 그라우트가 충전되지 않아 발생한 빈 공간이 두부에 존재해야 적용할 수 있다. 이와 같은 이유로 암반사면에 시공된 록볼트를 대상으로 한다. 만약, 터널 벽면에 수직으로 설치된 록볼트와 같이 그라우트 충전이 불량한 부분이 선단부에 발생할 가능성이 큰 경우나 지하수 침투, 공벽의 붕괴 등과 같은 요인으로 록볼트 중간에 그라우트 충전이 불량한 부분이 발생한 록볼트에 대해서는 전자기파 측정기법 또는 초음파센서, AE센서, 가속도계 등을 이용하여 탄성파를 측정하는 기존의 방법을 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구는 음파를 이용하여 암반에 설치된 록볼트의 건전도를 평가하는 기법의 적용성 조사하기 위하여 수행되었다. 암반에 설치된 록볼트를 모사하기 위해 콘크리트 블록에 록볼트를 설치하였다. 실험은 건전한 록볼트와 두부의 그라우트 충전 상태가 불량한 충전율이 80%, 70%, 60%, 50%인 록볼트에 대해 수행되었다. 록볼트의 두부를 해머로 타격하여 음파를 발생시켰고, 이를 스마트폰의 내장 마이크로 측정하였다. 측정된 음파에 대해 푸리에 변환을 수행하였으며, 충전율에 따른 우세주파수 변화를 관찰하였다. 실험결과로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 스마트폰의 내장 마이크로 측정된 음파는 록볼트의 두부를 타격하여 발생된 충격음이 그라우트 되지 않은 부분으로 인해 생긴 빈 공간으로 전파되고, 록볼트 종진동에 의해 발생된 음파와 중첩, 간섭되며, 빈 공간 내에서

다중반사된 결과이다.

2. 탄성봉 종진동과 공기 중 음파의 기본주파수는 각각 봉과 공간의 길이에 반비례한다. 따라서, 록볼트 충전율이 증가할수록 측정된 음파의 우세주파수가 증가하였다.
3. 측정된 음파의 우세주파수는 충전율이 70% 이하일 때, 이론식으로부터 산정된 종진동에 의한 기본주파수와 매우 유사하게 나타났다. 이론식으로 산정된 공기 중 음파의 기본주파수는 측정된 음파의 우세주파수보다 매우 낮게 나타났다. 하지만, 충전율에 따른 주파수 감소 양상은 유사하게 나타났다.
4. 그라우트가 충전되지 않아 생긴 빈 공간에 전파하는 음파의 우세주파수는 철근, 그라우트의 재료적 특성에 영향을 받는다. 또한, 빈 공간의 기하학 형상과 콘크리트 또는 암반의 재료적 특성으로 인한 에너지 흡수 및 반사도 우세주파수에 영향을 준다. 이에 측정된 음파의 우세주파수와 이론식으로 산정된 기본주파수와 차이가 발생한 것으로 사료된다.
5. 본 연구의 결과는 음파의 우세주파수가 록볼트의 건전도를 평가하기 위한 유용한 지표가 될 수 있음을 보여준다. 하지만, 록볼트의 재료적 특성, 주변 암반의 영향, 현장 소음 및 터널환경, 해머 타격 방법, 지하수 조건, 지압판과 프리스트레스 여부 등이 음파의 우세주파수에 영향을 미칠 수 있으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다(NRF-2021R1A5A1032433 & NRF-2021R1C1C2005687).

## 저자 기여도

이종섭은 원고 작성, 데이터 수집 및 분석을 하였고, 유정동은 연구 개념 및 설계, 원고 검토를 하였다.

## References

1. Bačić, M., Gavin, K., Kovačević, M.S. (2019), "Trends in non-destructive testing of rock bolts", *Građevinar*, Vol. 71, No. 10, pp. 823-831.
2. Bačić, M., Kovačević, M.S., Jurić Kaćunić, D. (2020), "Non-destructive evaluation of rock bolt grouting quality by analysis of its natural frequencies", *Materials*, Vol. 13, No. 2, 282.
3. Bennett, W.R. (2018), *The Science of Musical Sound*, Springer, New York, p. 440.
4. Fahy, F., Thompson, D. (2015), *Fundamentals of Sound and Vibration*, CRC Press, London, p. 516.
5. Fletcher, N.H., Rossing, T.D. (1998), *The Physics of Musical Instruments*, Springer-Verlag, New York, p. 756.

6. Giurgiutiu, V. (2014), *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, Elsevier, Amsterdam, p. 1024.
7. Godfrey, D.E., Kuchar, N.R. (1977), Method of testing the integrity of installed rock bolts, U.S. Patent No. 4,062,229, U.S. Patent and Trademark Office, pp. 1-7.
8. Hartman, W., Lecinq, B., Higgs, J., Tongue, D. (2010), "Non destructive integrity testing of rock reinforcement elements in Australian mines", *Proceedings of the Underground Coal Operators' Conference*, University of Wollongong, Australia, pp. 161-170.
9. Holland, D.C. (1993), *The behaviour of resin bonded rock bolts and other anchorages, subjected to close proximity blasting*, Doctoral Dissertation, University of Aberdeen, p. 224.
10. Ivanović, A., Neilson, R.D. (2008), "Influence of geometry and material properties on the axial vibration of a rock bolt", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45, No. 6, pp. 941-951.
11. Ivanović, A., Neilson, R.D. (2013), "Non-destructive testing of rock bolts for estimating total bolt length", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 64, pp. 36-43.
12. Ivanović, A., Neilson, R.D., Rodger, A.A. (2001), "Lumped parameter modelling of single-tendon ground anchorage systems", *Geotechnical Engineering: Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 149, No. 2, pp. 103-113.
13. Kelly, A.M., Jager, A.J. (1996), Critically evaluate techniques for the in situ testing of steel tendon grouting effectiveness as a basis for reducing fall of ground injuries and fatalities, *Safety in Mines Research Advisory Committee*, GAP 205, p. 65.
14. Kim, T.G., Lee, S.W., Jang, S.H. (2009), "Design and construction of support system: rock bolt and cable bolt", *Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 11, No. 1, pp. 9-29.
15. Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V. (2000), *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New Jersey, p. 548.
16. Lee, J.S., Yu, J.D. (2024), "Nondestructive evaluation of grout defect in rock bolt using electromagnetic waves", *Developments in the Built Environment*, Vol. 17, 100365.
17. Madenga, V., Zou, D.H., 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.
18. Masoudi, R., Sharifzadeh, M., Ghorbani, M. (2019), "Partially decoupling and collar bonding of the encapsulated rebar rockbolts to improve their performance in seismic prone deep underground excavations", *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 409-418.
19. Milne, G.D. (1999), *Condition monitoring & integrity assessment of rock anchorages*, Doctoral Dissertation, University of Aberdeen, p. 239.
20. Photinos, P. (2017), *Musical Sound, Instruments, and Equipment*, Morgan & Claypool Publishers, San rafael, CA, p. 166.
21. Raichel, D.R. (2006), *The Science and Applications of Acoustics*, Springer, New York, p. 660.
22. Rao, S.S. (2011), *Mechanical Vibrations*, Prentice Hall, New Jersey, p. 1084.
23. Rao, S.S. (2019), *Vibration of Continuous Systems*, Wiley, New Jersey, p. 816.
24. Rossing, T.D., Moore, R.F., Wheeler, P.A. (2013), *The Science of Sound*, Pearson, London, p. 776.

25. Sundholm, S. (1987), "The quality control of rock bolts", Proceedings of the 6th ISRM Congress, Montreal, pp. 1255-1264.
26. Thurner, H. (1996), Rock bolting - Reference bank, Report No. AMFO 84-0847, Translated by the Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Courtesy of Sweden, Geodynamik AB, Stockholm, p. 33.
27. Thurner, H.F. (1988), "Boltometer - Instrument for non-destructive testing of grouted rock bolts", Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Kobe, pp. 135-143.
28. White, H.E., White, D.H. (2014), Physics and Music: The Science of Musical Sound, Courier Corporation, North Chelmsford, MA, p. 448.
29. Wu, R., Xu, J., Li, C., Zhou, B., Ma, Q., Wang, Z. (2012), "Stress wave propagation in supporting bolts: a test for bolt support quality", International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 567-571.
30. Wyllie, D.C. (2017), Rock Slope Engineering: Civil Applications, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 620.
31. Yu, J.D., Bae, M.H., Lee, I.M., Lee, J.S. (2013), "Nongrouted ratio evaluation of rock bolts by reflection of guided ultrasonic waves", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 2, pp. 298-307.
32. Yu, J.D., Byun, Y.H., Lee, J.S. (2019), "Experimental and numerical studies on group velocity of ultrasonic guided waves in rock bolts with different grouted ratios", Computers and Geotechnics, Vol. 114, 103130.
33. Yu, J.D., Lee, J.S. (2020), "Smart sensing using electromagnetic waves for inspection of defects in rock bolts", Sensors, Vol. 20, No. 10, 2821.
34. Zima, B., Rucka, M. (2017), "Non-destructive inspection of ground anchors using guided wave propagation", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 94, pp. 90-102.
35. Zou, D.H., Cui, Y., Madenga, V., Zhang, C. (2007), "Effects of frequency and grouted length on the behavior of guided ultrasonic waves in rock bolts", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 44, No. 6, pp. 813-819.
36. Zou, D.H.S. (2004), "Analysis of in situ rock bolt loading status", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. Supplement 1, pp. 762-767.