

# 발파시 터널 슛크리트의 최대입자속도와 부착상태평가 분석

홍의준<sup>1\*</sup>, 장석부<sup>2</sup>, 송기일<sup>3</sup>, 조계춘<sup>4</sup>

## Analysis of the peak particle velocity and the bonding state of shotcrete induced by the tunnel blasting

Eui-Joon Hong, Seok-Buc Chang, Ki-il Song, Gye-Chun Cho

**Abstract** Bonding strength of shotcrete is a significant influential factor which plays the role of collapse prevention of tunnel crown and of debonding prevention of shotcrete induced by the blasting vibration. Thus, the evaluation of the shotcrete bonding state is one of the core components for shotcrete quality control. In this study, the peak particle velocities induced by blasting were measured on the shotcrete in a tunnel construction site and its effect on the bonding state of shotcrete is investigated. Drilling and blasting technique was used for the excavation of intersection tunnel connecting the main tunnel with the service tunnel. Blast-induced vibrations were monitored at some points of the main tunnel and the service tunnel. The shotcrete bonding state was evaluated by using impact-echo test coupled with the time-frequency domain analysis which is called short-time Fourier transformation. Analysis results of blast-induced vibrations and the time-frequency domain impact-echo signals showed that the blasting condition applied to the excavation of intersection tunnel hardly affects on the tunnel shotcrete bonding state. The general blasting practice in Korea was evaluated to have a minor negative impact on shotcrete quality.

**Keywords:** Blast-induced vibration, bonding state, shotcrete, time-frequency domain analysis, impact-echo test

**요 지** 슛크리트의 부착강도는 천정부의 낙반방지와 발파진동에 의한 슛크리트 탈락방지에 중요한 역할을 하는 요소이다. 따라서, 슛크리트의 부착상태평가는 품질관리의 주요 요소가 될 수 있다. 본 연구는 터널 내 발파에 의하여 슛크리트에 미치는 최대 입자속도를 예측하고, 발파 진동에 의한 슛크리트의 부착상태를 평가하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 현재 시공중인 터널현장에서 피난연락갱의 발파시 본선부 및 서비스 터널의 발파진동을 측정하였으며 충격반향시험을 수행하여 슛크리트-암반의 부착상태를 평가하였다. 충격반향시험 신호분석을 위하여 시간-주파수 영역 해석 기법을 도입하였으며 평가결과, 국내에서 일반적으로 시행되는 발파조건에서는 슛크리트와 암반의 부착력 손실(들뜸 현상)은 거의 발견되지 않았으며, 슛크리트 부착력 손상 가능성은 낮은 것으로 판단되었다.

**주요어:** 발파진동, 부착상태, 슛크리트, 시간-주파수 영역 해석, 충격반향시험

### 1. 서 론

대형지하공간은 단면 규모상 안정성 및 시공성 측면에서 중소규모 터널과 다른 특징을 가지고 있다(문상조 등, 1999). 대형지하공간의 굴착면은 반경이 큰 곡선들로 구성되어 아치효과가 저하되고 다분할 발파굴착이 적용됨으로써 지하공간의 가장 중요한 지보재인 슛크리트는 축력저항 효과가 감소하고 발파에 의한 진동영향을 받게 된다. 이러한 조건에서 슛크리트 부착강도(adhesive strength or bonding strength,  $f_{ad}$ )는 천정부

의 낙반방지와 발파진동에 의한 슛크리트 탈락방지에 중요한 역할을 하게 된다(Ansell, 2004; Melbye, 2001). 따라서, 슛크리트의 부착상태평가는 품질관리의 주요 요소가 될 수 있다.

스�크리트의 부착강도가 터널 안정성에 미치는 연구는 상대적으로 미비한 편인데, 안경철 등(2004)은 슛크리트의 부착박리, 전단파괴, 휨파괴, 인발전단파괴 등의 다양한 파괴기구에 따른 지보패턴별 안전율을 평가하였으며, 장석부 등(2005)은 수치실험을 통하여 절리암반의 슛크리트 파괴기구에 대한 상세한 검토를 수행하여 부착강도의 크기에 따른 슛크리트의 지지능력을 평가한 사례가 있다.

스�크리트 부착력의 상실여부를 측정하는 기법은 측정 구조물의 매질이 무한매질이므로 그 신호특성을 분석하

<sup>1</sup>정회원, (주)유신 터널부 차장

<sup>2</sup>정회원, (주)유신 터널부 상무이사, 공학박사

<sup>3</sup>정회원, UTM 토목공학과 조교수, 공학박사

<sup>4</sup>정회원, KAIST 건설 및 환경공학과 부교수, 공학박사

\*교신저자: 홍의준 (E-mail: y12865@yooshin.co.kr)

기가 난해하다. 이러한 이유로 부착력의 측정기법을 연구한 사례는 많지 않으며 최근 충격반향시험 신호에 대한 시간-주파수 영역 해석 기법을 도입하여 슛크리트와 암반의 부착상태를 효과적으로 평가한 사례가 있다(Song and Cho, 2009)

전술한 바와 같이, 슛크리트의 부착상태 평가는 품질 관리의 주요 요소임을 감안하여 본 연구에서는 터널 내 발파에 의하여 슛크리트에 미치는 최대 입자속도를 예측하고, 발파 진동이 슛크리트에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 기존 발파진동기준 및 시험사례

### 2.1 각국의 발파허용기준

스웨덴의 국립 도로국(National Road Administration)에서 1995년과 1999년에 발간된 보고서에 따르면 슛크리트는 발파에 노출될 때 충분한 강도발현이 된 상태이어야 하며 압축강도는 최소 6 MPa 이상으로 규정하고 있다. 반면에, 스웨덴 국립철도국(National Rail Administration)에서는 최소근접발파거리를 50 m로 제한한 사례가 있다. 스웨덴 광업회사 중 하나인 Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag (LKAB)에서는 5시간 이후에는 거리에 상관없이 발파가 가능하다고 규정하고 있다. 핀란드의 기준에 따르면 슛크리트의 양생시간에 따라 진동치를 규정하고 있다. 그러나, 이러한 규정들은 공학적인 근거는 없으며 단지 경험적으로 결정된 기준이다(Ansell, 2002).

### 2.2 슛크리트의 발파진동시험

Kendorski (1973)는 409 kg의 ANFO폭약을 이용하

여 발파진동을 발생시키고 주변 양생된 슛크리트에 파괴양상을 조사하였다. 이 실험에서 부착력의 상실은 발생하지 않았다. 폭원으로부터 16.5 m 이격거리에서 슛크리트의 균열이 발생하였으며 12.2 m 이격거리에서 라이닝의 기능이 심각하게 손상되었다. 그러나, 시험중 진동치를 측정하지 않아 발파진동과 슛크리트의 상관관계를 비교하기에는 부족함이 있었다.

Nakano et al. (1993)은 쌍굴터널에서 발파진동시험을 수행하였으며 양생이 완료된 슛크리트의 파괴양상을 조사하였다. 최대 발파진동치는 1450 mm/s이었으며 발파지점과 슛크리트와의 이격거리는 최소 1.0 m이었다. 이 실험에서는 700 mm/s 이상에서 슛크리트 표면에 균열이 발생하였다.

Wood and Tannant (1994), Tannant and McDowell (1993) 및 McCreath et al. (1994) 등의 연구자들은 캐나다의 금광지역에서 발파진동과 슛크리트의 상관성을 규명하는 시험들을 수행하였다. 최대입자속도 1500 mm/s ~ 2000 mm/s 정도에서도 강섬유 슛크리트에 손상이 발생하지 않음을 확인하였으며, 강섬유보강 슛크리트보다 와이어메쉬로 보강된 슛크리트가 진동에 더욱 강함을 확인하였다. 또한 부분적으로 균열만 발생하고 슛크리트 슬래브의 변형이나 탈락은 발생하지 않는 것을 확인하였다. 해머테스트로 확인한 결과 슛크리트와 암반사이의 들뜸현상이 심각하게 발생하지는 않았으며 슛크리트-암반의 부착력 상실도 없는 것을 확인하였다. 최대입자속도 2000 mm/s ~ 6000 mm/s 까지 발파진동을 주었을 경우에도 와이어메쉬 보강 슛크리트는 부분적으로 그 기능을 수행할 수 있음을 확인하였다.

양생중인 슛크리트의 발파진동영향을 시험한 경우는

표 1. 국외 허용발파진동 기준(Ansell, 2002)

	Shotcrete age	Max. PPV	Min. distance	Min. $\sigma_c$
Sodra Lanken (Road Tunnel)	-	-	50 m	-
Swedish Guidelines	$\geq 9$ hrs.	-	-	6 MPa
LKAB (Swedish Mining Company)	$\geq 5$ hrs.	-	-	-
Finnish Guidelines	$\geq 24$ hrs.	-	-	30 MPa
	$\geq 12$ hrs.	-	-	-
	0-3 days	10 mm/s	-	-
	3-7 days	35 mm/s	-	-
	> 7 days	110 mm/s	-	-

스웨덴의 Ansell (2004)의 연구결과가 있다. 이 연구에서는 양생중인 (30 min ~ 25 hr) 일반스�크리트에 대하여 발파시험을 수행하여 슛크리트의 손상을 평가하였다. 발파진동에 노출된 일반 슛크리트의 초기 압축강도를 측정하였으며 해머테스트를 수행하여 슛크리트 암반 손상상태를 측정하였다. 연구결과 최대 입자속도 500 mm/s 이하에서는 슛크리트의 손상이 발생하지 않았으며 500 mm/s ~ 1000 mm/s에서 약간의 들뜸현상이 발생하였다. 또한 1000 mm/s 이상에서는 낙석이 발생하였다. 이러한 실험적 결과를 수치해석으로 검증한 결과, 타설후 24 시간 사이에서 발파에 부착력이 가장 취약한 시간대가 발생함을 확인하였으며 24 ~ 72 시간 사이에 adhesion 파괴가 발생하지 않도록 주의해야 필요가 있다고 제안하였다. 이 연구에 의하면 발파에 의한 주요 파괴 매커니즘은 슛크리트-암반의 부착력 상실(debonding)이 지배적이라는 결론을 제시하였다.

### 3. 발파에 의한 슛크리트-암반의 손상상태 분석

#### 3.1 발파진동의 예측

발파에 의한 지반진동의 세기에 영향을 주는 변수들은 화약의 종류와 장약량, 발파원으로부터 측정지점까지의 거리, 암반의 역학적 구조적 특성, 천공패턴, 장약 방법, 점화 순서 등의 발파방법이 있다.

지반진동의 세기를 나타내는 진동의 진폭은 변위, 속도, 가속도 등으로 나타낼 수 있으나 구조물에 대한 영향평가와 관련해서는 진동속도에 의한 척도를 사용하는 것이 가장 합리적인 것으로 알려져 있다.

발파진동을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 폭원으로부터의 거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

$$PPV = k R^a Q^c \quad (1)$$

여기서, PPV (Peak Particle Velocity) 는 최대입자속도 (mm/sec), R은 폭원으로 부터의 거리 (m), Q는 지발당 최대 장약량 (kg), k, a, c는 각각 자유면 상태, 화약의 성질, 압질 등에 따라 결정되는 상수이다.

위의 일반식은 거리를 장약량으로 환산한 형태로서

표시하면 다음과 같다.

$$PPV = k \left( \frac{R}{Q^b} \right)^n \quad (2)$$

여기서, n는 감쇠지수, b는 장약량지수이다.

#### 3.2 슛크리트-암반 부착력의 정량적 평가방법

콘크리트 구조물의 건전도를 평가하기 위하여 임펄스 반응(impulse responses; Davis et al., 2005), 임펄스 레이더(impulse radar; Xie et al., 2007), 음향 에너지(acoustic energy; Cartwright et al., 2001) 등의 다양한 기법들이 적용되고 있다. 본 연구에서는 간단하며 신속한 비파괴 평가 기법인 충격반향시험기법을 이용하여 슛크리트의 부착상태를 평가하였다.

충격반향시험은 응력파의 전파 특성을 이용해 콘크리트 구조물의 결합 탐지를 위해 널리 사용되고 있는 기법으로 대상 구조물의 표면에 충격을 가하여 발생된 응력파의 전파 특성을 획득하여 불연속면이나 이질 매질 층간의 경계면에서 반사되어 표면으로 돌아오는 파형에 대한 분석 및 공진 주파수를 비롯한 여러 가지 신호특성으로부터 구조체의 품질 판정, 두께 측정, 균열 및 공동 탐사 등에 적용되는 시험 기법이다.

Carino and Sansalone (1992) 및 Sansalone and Streett (1997) 등은 슬래브나 벽체와 같이 두께가 얇은 구조물에서 충격반향시험으로부터 획득되는 응답신호를 다중 반사되는 P파로 해석하여 콘크리트 구조물내의 공동, 균열 및 두께 등과 같은 품질 평가를 위하여 고속 푸리에 변환을 통하여 획득한 시간 영역 신호를 주파수 영역 신호로 변환하고 최대 진폭에 해당하는 공진주파수를 찾아내어 반사파의 도달시간을 추정하고자 하는 반 능동적인 해석 기법을 도입하였다. 그러나, 최근 이러한 판상형 구조물에서 충격반향시험으로부터 획득되는 시스템의 응답은 Lamb wave로 해석되고 있으며(Gibson and Popovics, 2005), 암반에 부착되어 있는 슛크리트는 경계면이 한정되어 있는 일반 슬라브 구조물과는 달리 무한 매질인 암반에 부착되어 있으므로 그 신호특성을 분석하기가 난해하다. 이러한 기하학적 경계조건의 난해성을 극복하고 막장 후방에서의 슛크리트와 암반의 부착상태를 효과적으로 평가하기 위하여 Song and Cho

(2009)는 충격반향시험 신호에 대한 시간-주파수 영역 해석 기법을 도입하였다.

본 연구에서 적용한 시간-주파수 해석 기법은 Short-Time Fourier Transform (STFT)으로 시간에 따른 주파수 특성을 나타내기 위하여 시간 대역별로 Hanning window 함수를 적용하여 windowing된 함수를 얻고 그에 대한 푸리에 변환을 수행하는 기법이다. 이로써 특정 시간대역에서의 주파수 특성을 획득하고, 윈도우 함수의 시간대역을 이동하며 앞의 과정을 반복하게 된다. 결과적으로 STFT는 윈도우 함수가 적용된 영역의 신호에 대한 주파수 성분만을 구하게 되고, 윈도우 함수 시간대역을 옮겨감으로써 시간에 따른 주파수 성분의 변화를 평가할 수 있게 된다. 따라서, 시간에 따른 주파수 특성의 변화를 시간-주파수 영역상에서 획득할 수 있다.

송기일 등(2008)은 수치해석을 통하여 지반의 강성, 슛크리트의 두께, 가진원의 특성, 부착상태 등이 시간-주파수 영역 신호특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 실내실험(송기일 등, 2009)을 통해 슛크리트가 경암 지반에 시공된 경우 부착상태에 따른 시간-주파수 영역 신

호특성을 분석, 검증하였다. 또한 기존의 수치해석 및 실내실험 결과를 바탕으로 중심주파수와 기하학적 감쇠 비와의 관계 및 중심주파수와 공진시간과의 관계를 통해 시험 대상 슛크리트의 두께, 배면지반의 강도 및 슛크리트의 부착상태를 평가할 수 있는 차트를 제안하였다.

## 4. 현장시험

### 4.1 현장시험 개요

국내의 발파에 대한 슛크리트의 발파진동식을 추정하기 위하여 춘천지역의 OO터널 현장에서 터널 내 발파진동을 측정하였다. 발파진동의 측정과 동시에 슛크리트-암반의 부착상태를 평가하기 위하여 충격반향시험과 해머 테스트를 함께 수행하였다. 진동측정위치는 폭원에 근접한 양생이 완료된 슛크리트 표면이며, 피난연락갱의 발파시에 본선에서 측정을 하는 경우와 반대편의 서비스터널에서 측정하는 경우에 대하여 측정하였다. 발파진동의 최소 측정거리는 2.65 m이며 발파진동측정의 계측위치 및 충격반향시험 위치는 그림 1과 같다.

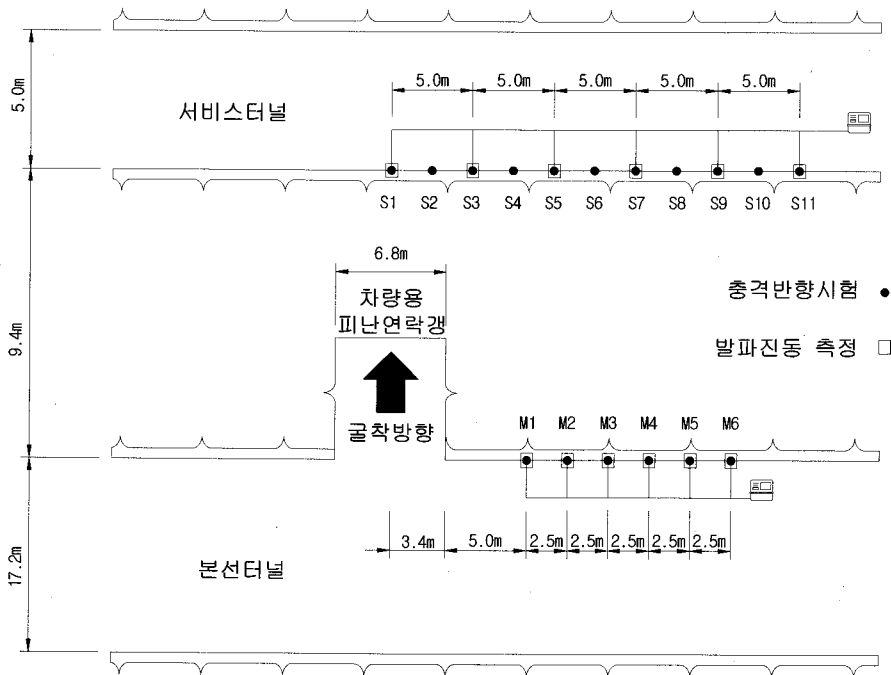


그림 1. 발파진동측정 및 충격반향시험 위치

### 4.2 현장 정보

현장시험을 수행한 터널은 현재 2차로의 본선과 서비스터널을 시공중이다. 시험을 수행한 위치의 압중은 흑운모 화강암이며 변형계수 30 GPa의 경암반으로 구성되어 있다. 시험지역에는 본선부에 설계강도  $f_b = 4.5$  MPa의 강섬유 보강 슛크리트가 10 cm 두께로 타설되었으며, 서비스터널에는 설계강도  $f_{ck} = 20$  MPa의 일반 슛크리트가 5 cm 두께로 타설되었다.

모든 시험은 피난연락갱의 발파시에 측정된 것이며 피난연락갱의 굴진에 따라 폭원과의 거리가 변화하게 되어 다양한 거리에서의 발파진동 데이터를 취득할 수 있었다. 피난연락갱의 단면적은 33.588 m<sup>2</sup>, 굴진장은 2.0 ~ 2.8 m이었다. 피난연락갱의 지발당 최대 장약량은 4.36 ~ 7.5 kg이었다.

### 4.3 계측장비

발파진동 계측기는 주로 건설현장에서 발생하는 진동 및 소음을 측정하기 위하여 개발된 장비이다. 장비의 구성은 본체, 진동센서, 및 연결케이블로 구성되어있으며 진동센서를 벽면에 고정시키기 위한 스파이크가 함께 구성되어 있다. 전원은 내장된 충전지를 통해 공급된다.

발파진동의 측정과 함께 슛크리트-암반의 부착상태를 평가하기 위하여 충격반향시험 (Impact echo)을 수행하였다. 시험을 위하여 가속도계(PCB 353B16)와 오실로스코프(Agilent MSO6014A) 및 시그널 컨디셔너(PCB F482A16)의 신호측정 시스템을 구축하였다. 가진원으로는 쇠구슬 막대를 이용하여 일정한 응력파를 발생시키도록 하였다. 가속도계를 이용하여 가진원으로부터 2 cm 떨어진 위치에서 시스템의 진동 응답 특성을 획득하였다. 시그널 컨디셔너를 이용하여 획득한 신호를 증폭시켜 오실로스코프에 저장하였고 컴퓨터를 이용하여 신호처리를 수행하였다.

충격반향기법은 국부적인 영역을 평가하는 비파괴시험 기법이다. 따라서, 충격반향시험결과는 국부적인 지반조건 및 굴착표면의 상태 등에 영향으로 받는다. 이에 대한 보안을 위하여 해머테스트를 동시에 수행하였다. 테스트에 사용한 해머는 암석용 해머로, 직접 슛크리트 표면에 타격을 가하여 슛크리트-암반의 부착상태를 정성적으로 평가하였다.

### 4.4 현장시험수행

현장시험에서는 다음과 같은 일련의 과정을 매 발파시 반복적으로 수행하여 진동계측 및 슛크리트-암반의 부착상태를 측정하였다.

- ① 본선 및 서비스터널 시험위치 설정
- ② 시험위치에 슛크리트 타설
- ③ 발파진동계 설치 및 비파괴시험 위치 결정
- ④ 피난연락갱 발파 및 진동측정 : 발파시 매 회 측정하여 다양한 크기의 진동 획득
- ⑤ 충격반향시험 수행 : 발파진동 측정후 다음 발파 이전에 수행
- ⑥ 해머테스트 추가 수행 : 발파진동 측정범위 전 구간에 걸쳐 수행
- ⑦ ③ ~ ⑥을 발파 종료까지 반복적으로 수행

## 5 시험결과 분석

### 5.1 발파진동

본선부 시험시 폭원과 계측위치간의 거리는 10.32 ~ 27.58 m이었으며 발파시 지발당 최대 장약량은 7.50 kg이었다. 서비스 터널의 시험시 폭원과 계측위치간의 거리는 2.65 ~ 28.32 m이었으며 발파시 지발당 최대 장약량은 4.36 kg이었다. 본선터널 및 서비스터널에서 측정된 발파 진동 계측 분석 결과를 그림 2에 도시하였다. S7의 경우는 S9 및 S11과 같이 발파원으로 부터 더 멀리 위치한 계측지점에서의 최대 입자속도보다 더 큰 최대 진동 속도가 나타났다. 이것은 S7 위치에 슛크리트에 부착력 상실을 동반하는 국부적인 손상이 존재함을 의미한다. 그러나, 최초 측정 시점인 이격거리 20 m 이상인 경우부터 최대 진동 속도의 값이 크게 나타나기 때문에 이는 슛크리트의 손상이 발파에 기인한다기 보다는 근접 발파 이전부터 존재하는 시공상의 문제로 판단된다.

### 5.2 발파진동식 분석

현장시험으로부터 측정된 발파진동치를 이용하여 회귀분석을 수행하였다(그림 3). 서비스 터널의 경우에는 앞 절에서 기술한 바와 같이 S7에서 측정된 결과는 이상 값으로 간주하여 분석에서 제외하였다. 본선부 측정과 서비스터널 측정은 약 20 m 이내의 근접발파를 측정된 결과이지만 발파진동의 전파방향이 반대인 경우이다.

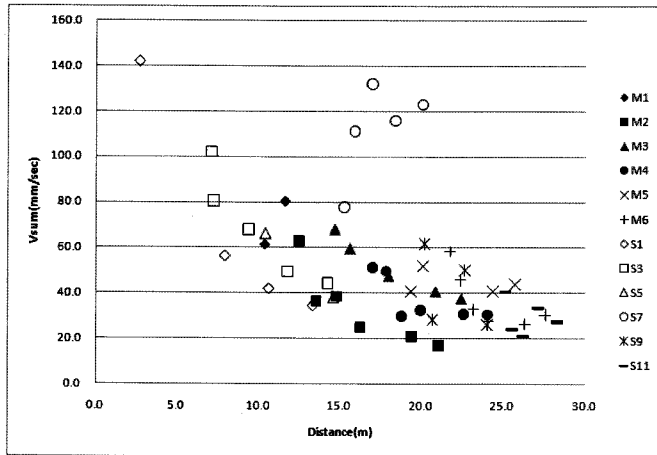
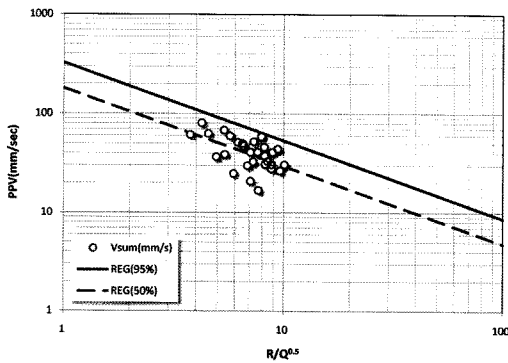
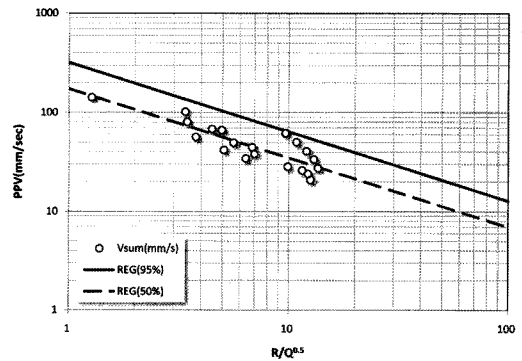


그림 2. 이격거리에 따른 최대 진동 속도 변화 특성



(a) 본선터널



(b) 서비스터널

그림 3. 현장시험 회귀분석결과 (R : 폭원으로부터의 거리, Q : 지발당 최대 장약량)

회귀분석은 제곱근식으로 수행하였으며 계측데이터의 95%를 추세선 아래에 위치하게 하는 95% 수준의 발파 진동식을 구하였다.

$$PPV_{(전방)95\%} = 319.21(R/Q^{0.5})^{-0.699} \text{ (mm/sec)} \quad (3)$$

$$PPV_{(후방)95\%} = 326.00(R/Q^{0.5})^{-0.787} \text{ (mm/sec)} \quad (4)$$

서비스 터널(막장 전방)과 본선부(막장 후방)의 회귀 식(식 (3), 식 (4))을 비교한 결과 발파진동의 전파방향이 막장 전방으로 진행될 때 진동의 감소정도가 더 적은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 발파진동이 전방으로 전파되는 경우에는 균일한 매질을 통과하게 되지만 후

방으로 전파되는 경우에는 이미 굴착이 되어, 공간이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 두 식이 극단적인 차이를 보이는 것은 아니므로 하나의 식으로 적용하는 것이 사용에 유용할 것으로 판단된다. 따라서, 종합한 자료에 대하여 회귀분석을 다시 수행하였으며(식 (5)) 기존의 시공현장에서 측정된 터널내 발파진동 자료와 함께 비교하였다(그림 4).

$$PPV_{95\%} = 300(R/Q^{0.5})^{-0.7} \text{ (mm/sec)} \quad (4)$$

본 연구에서 분석한 발파진동식은 특정한 암반에서 타설된 슛크리트에 전달되는 발파진동식으로 다양한 암반에서의 현장시험을 통한 추가연구로 좀 더 일반화된

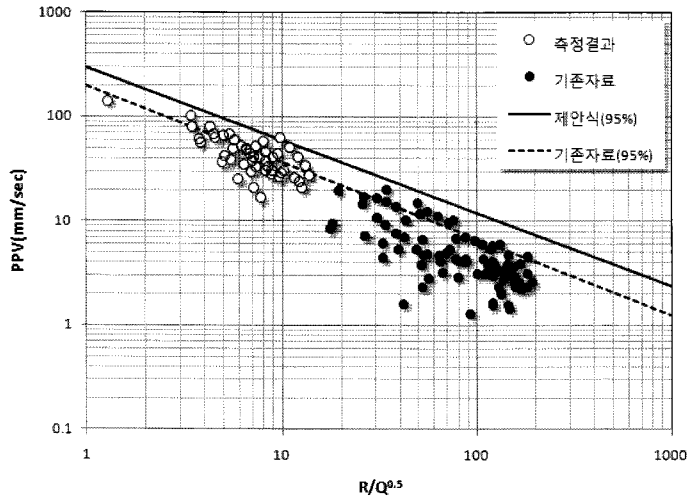


그림 4. 분석결과와 기존자료의 비교

표 2. 충격반향시험을 이용한 슛크리트 부착상태 평가 결과

Case	$f_n$ [Hz]	$D_G$ [%]	$T_R$ [ms]	$t_s$ [m]	Bonding state	Impedance ratio
S5	4000	11.9	1.3	>0.20	Void	Abnormal
S6	16000	13.1	1.35	0.07	Debanded	$Z > 1.0$ (경압)
S7	17400	15	1.3	0.06	Debanded	$Z > 1.0$ (경압)
S8	19720	32.5	1.1	0.06	Debanded	$Z > 1.0$ (경압)
S9	7556	31.1	0.85	0.05	Fully bonded	$Z > 1.0$ (경압)
S10	17440	20.7	0.95	0.065	Fully bonded	$Z = 0.6$ (연압)
S11	18780	23.9	0.95	0.06	Fully bonded	$Z = 0.7$ (연압)
M1	8722	34.4	0.85	0.14	Fully bonded	$Z > 1.0$ (경압)
M2	8000	31.8	0.8	0.15	Fully bonded	$Z > 1.0$ (경압)
M3	8000	25.9	0.8	0.15	Fully bonded	$Z > 1.0$ (경압)
M4	12400	33	0.9	0.1	Debanded	$Z > 1.0$ (경압)
M5	9900	20.6	0.8	0.11	Fully bonded	$Z > 1.0$ (경압)
M6	9600	34.5	0.85	0.12	Fully bonded	$Z > 1.0$ (경압)

식으로 개선될 수 있으리라 판단된다. 또한 참고자료의 회귀분석 결과와 비교하여 볼 때, 기울기의 경향이 비슷하여 제안식의 신뢰도를 높여준다.

### 5.3 충격반향시험 분석

본 연구에서는 차량용 피난연락갱 시공시 발생한 발파진동이 발파 영역에 근접한 본선 및 서비스 터널에 시공된 슛크리트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Song and Cho (2009)에서 제시된 해석 기법을 적용하

여 슛크리트의 상태를 종합적으로 평가하였다.

충격 반향 시험은 차량용 피난 연락갱의 관통 이후의 서비스 터널과 본선 터널 13개소에 대하여 수행하였으며(그림 1), 각 시험 위치에서 획득한 신호처리결과를 표 2에 나타내었다.  $f_n$ 은 중심 주파수,  $D_G$ 는 기하학적 감쇠비,  $T_R$ 은 공진 시간,  $t_s$ 는 송기일 등 (2009)의 슛크리트 평가 차트로부터 획득한 슛크리트의 두께, Impedance ratio는 슛크리트와 지반과의 임피던스 비( $Z = Z_{ground} / Z_{shotcrete}$ )를 의미한다. 주파수 영역 해석으로부터 중심

주파수( $f_n$ )와 기하학적 감쇠비( $D_G$ )를 구하였으며, 시간-주파수 영역 해석 (Short-Time Fourier Transform)으로 부터 공진 시간( $T_R$ )을 획득하였고, 평가차트를 이용하여 슛크리트 두께( $t_s$ ), 부착 상태 및 임피던스 비( $Z = Z_{ground} / Z_{shotcrete}$ )를 획득하였다.

평가 결과, 본선 터널의 경우 부착상태가 대부분 양호하며 슛크리트의 두께는 10 cm에서 15 cm 정도로 나타났다. 슛크리트의 두께는 굴착면의 거칠기, 시공상의 오차, 시험시 표면 정리에 따라 유발되는 오차 등에 따라 영향을 받는다. 슛크리트 배면 지반의 강성은 슛크리트보다 강한 경암 지반으로 나타났다. 분석결과 본선 터널에서는 피난연락갱에서의 발파 진동이 슛크리트 부착상태에 손상을 미치지 않은 것으로 나타났다.

서비스 터널에서의 슛크리트의 두께는 5 cm에서 7 cm에 분포하는 것으로 나타났다. 서비스 터널에서는 발파 굴착에 의한 관통으로 피난연락갱으로부터 10 m 이내의 근접 지역에서 슛크리트가 국부적으로 손상을 받은 것으로 나타났으나 슛크리트의 기능 수행에 문제가 되지는 않는 수준인 것으로 사료된다. 즉, 피난연락갱에서 발파에 의한 진동치의 크기는 양생이 완료된 슛크리트에 대하여 균열 발생 및 지보재 기능의 상실을 유발하지 않는 수준으로 판단된다. 이러한 슛크리트의 국부적 품질 저하는 시공 품질의 영향, 발파진동에 의한 영향, 발파에 의한 압반 균열 발생 및 굴착으로 인한 지반 변형 등이 관통 근접지역에 중첩되어 발생되기 때문이다.

#### 5.4 해머테스트

해머테스트는 매 발파가 끝난 직후 수행하였으며 총 7회의 해머테스트를 수행하였다. 발파진동계측기가 설치되어 있는 25 m 전 구간에 걸쳐 광범위하게 해머테스트 수행하였다. 그러나 계측기가 설치되어있는 구간과 계측기와 계측기 사이의 구간을 중점적으로 측정하였다 (2.5 m 간격).

테스트 결과, 마지막 발파 후, 폭원에서 가장 근접한 부근(폭원과의 이격거리 2.65 m)에 약간의 들뜸 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 그 이외의 부분에서는 특이할만한 균열이나 들뜸 현상은 발견되지 않았다. 들뜸이 발생한 부분의 진동 테이터는 모든 방향성분에서 진동치가 높게 측정이 되었으며 이는 슛크리트-암반의 부착방향으로의 발파진동이 부착력 상실에 영향을

미치는 인자가 될 수 있음을 예상할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 터널 내 발파에 의하여 슛크리트에 미치는 최대 입자속도를 예측하고, 발파 진동이 슛크리트에 미치는 영향을 분석하기 위하여 현장시험을 수행하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구에서는 현장시험결과 및 참고자료를 비교 분석하여 95% 수준의 발파진동식을 작성하였다.

$$PPV_{95\%} = 300(R/Q^{0.5})^{-0.7} \text{ (mm/sec)}$$

2. 본 연구에서 도출한 발파시 진동예측식은 터널 내에서 슛크리트에 작용하는 발파진동을 분석하는 경우에만 적용이 가능할 것으로 판단된다.
3. 본 연구의 발파조건에서 슛크리트에 전달되는 발파진동은 최대 150 mm/sec 로 예상이 되며 충격반향 시험 및 해머테스트 결과, 이러한 진동에 의하여 슛크리트의 기능을 상실할 정도의 균열이나 슛크리트와 암반의 부착력 손실(들뜸 현상)은 발견되지 않았다. 이러한 발파진동치는 Ansell (2002)이 제안한 허용진동치(500 mm/sec)보다 낮은 수치이므로 국내현장에서 일반적으로 적용되어온 발파조건에서 발파진동에 의한 슛크리트 부착력 손상 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04핵심기술C01)에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 문상조, 장석부, 정준화 (1999), "지하철 대단면 터널의 설계와 시공관리 사례", 한국지반공학회 1999년 봄학술 발표회 논문집, pp. 265-292.
2. 송기일, 조계춘, 장석부 (2008), "충격 반향 기법을 이용



- 한 슛크리트 배면 접착 상태 평가에 관한 수치해석적 연구”, 한국터널공학학회논문집 터널기술, 제9권, 제2호, pp. 109-120.
3. 송기일, 조계춘, 장석부, 홍은수 (2009), “비파괴 시험 기법을 이용한 슛크리트 배면 접착상태 평가에 관한 실험적 연구”, 한국터널공학학회논문집 터널기술, 제11권, 제1호, pp. 71-83.
  4. 안경철, 신재근, 김재동, 원광연, 김택곤 (2004), “스프리트의 부착강도 측정을 통한 지보설계”, 한국암반공학회춘계학술발표회, pp. 31-45.
  5. 장석부, 홍의준, 문상조 (2005), “대단면 암반터널의 안정성에 미치는 슛크리트 부착강도의 영향에 관한 연구”, 한국터널공학학회논문집 터널기술, 제7권, 제4호, pp. 305-312.
  6. Ansell, A. (2002) “A literature review on the vibration resistance of young and early age concrete”, Structural Engineering Royal Institute of Technology (KTH).
  7. Ansell, A. (2004) “In situ testing of young shotcrete subjected to vibration from blasting”, Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 19, pp. 587-596.
  8. Carino, N.J. and Sansalone M. (1992), “Detection of voids in grouted ducts using the impact-echo method”, ACI Mater J, Vol. 89, No. 3, pp. 296-303.
  9. Cartwright, P., Clifford, B., Armanen, E. and Vuori, A. (2001), “Application of the acoustic energy meter for assessment of tunnel lining condition”, Proceeding of the ISRM regional symposium EUROCK, Espoo, Finland, pp. 333-338.
  10. Davis, A.G., Malcolm, K.L. and Petersen, C.G. (2005), “Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods”, NDT & E International, Vol. 38, pp. 181-186.
  11. Gibson, A. and Popovics, J.S. (2005), “Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis”, J Eng Mech., Vol. 131, No. 4, pp. 438-443.
  12. Kendorski, F.S., Jude, C.V. and Duncan, W.M. (1973), “Effect of blasting on shotcrete drift linings”, Min. Eng., Vol. 25, pp. 38-41.
  13. McCreath, D.R., Tannant, D.D. and Langille, C.C. (1994), “Survivability of shotcrete near blasts”, Nelson, Laubach, (Eds.), Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, pp. 277-284.
  14. Melbye, T. (2001), “Sprayed concrete for rock support”, MBT International, pp.154-155
  15. Nakano, K., Okada, S., Furukawa, K. and Nakagawa, K. (1993), “Vibration and cracking of tunnel lining due to adjacent blasting”, Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu, Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, Vol. 462, pp. 53-62. (in Japanese, Abstract in English).
  16. Sansalone, M. and Streett, W.B. (1997), Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry. New York, Bullbrier Press, pp. 338.
  17. Song, K.I. and Cho, G.C. (2009), “Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied onto hard rocks using the impact-echo method”, NDT & E International, Vol. 42, pp. 487-500.
  18. Tannant, D.D. and McDowell, G.M. (1993), “Dynamic testing of shotcreted drifts”, GRC Internal Report 93-12-IR, GRC, Laurentian University, Sudbury, pp. 20.
  19. Wood, D.F. and Tannant, D.D. (1994), “Blast damage to steel fibre reinforced shotcrete”, Fiber Reinforced Concrete-Modern Developments, UBC Press. pp. 241-250.
  20. Xie, X., Liu, Y., Huang, H., Du, J., Zhang, F. and Liu, L. (2007), “Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the Shanghai Metro Line, China”, J. Geophys. Eng., Vol. 4, pp. 253-261.

접수일(2010.3.31), 수정일(2010.5.6), 게재확정일(2010.5.26)