

# 발파진동이 양생중인 라이닝 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구

## A Study on the Effect of Blast-Vibration on Curing Lining-Concrete

신 일 재\*  
이 정 인\*\*

Shin, Il-Jae  
Lee, Chung-In

### Abstract

Most recent studies on the effect of vibration on curing concrete have performed in such a way that a concrete specimen or block was set up under a condition of vibration induced by impact-vibration or vibration table. In this study, impact-vibration experiments in laboratory and blast-vibration tests in tunnel were performed in order to examine the effect of blast-vibration on curing lining concrete. Impact-vibration with 100~300Hz of dominant frequency which is similar to that of blast-vibration was applied to the mortar lining model after 3, 7 and 12 hours of casting. As a result, particle velocity of 2 cm/sec increases P-wave velocity of mortar lining but particle velocity of 5 cm/sec, 10 cm/sec can decrease P-wave velocity of mortar lining. Compressive strength of the lining concrete to which vibration velocity under 2.5cm/sec was applied during curing was higher than that of reference one to which vibration was not applied. Compressive strength and seismic wave velocity of vibrated concrete by small scale test blasting after 5 hours of casting was compared with that of reference one. As a result, the vibration level which can decrease compressive strength and seismic wave velocity of curing lining concrete was 3~4 cm/sec.

### 요 지

현재까지 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향을 알아보기 위해 수행된 대부분의 연구에서는 콘크리트 공시체나 콘크리트 블록에 대해 100Hz 미만의 주주파수를 가지는 충격진동이나 진동테이블을 이용한 진동을 가한 후 콘크리트의 강도 변화를 평가하는 방법이 사용되었다. 이 연구에서는 발파진동이 양생중인 라이닝 콘크리트에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험실 충격진동 시험과 터널현장에서의 발파진동 시험을 수행하였다. 터널발파진동과 유사한 100~300Hz의 주주파수를 가지는 충격진동을 각각 재령 3, 7, 12시간에 가한 실험실 시험 결과 2cm/sec의 진동속도는 모르타르 라이닝의 P파속도를 증가시키지만, 5cm/sec, 10cm/sec의 진동은 모르타르 라이닝의 P파속도를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 양생기간 동안 2.5cm/sec 이하의 발파진동이 가해진 양생중인 라이닝 콘크리트는 진동을 가하지 않고 양생시킨 콘크리트 공시체에 비해 압축강도가 더 큰 값을 나타내었다. 재령 5시간에 콘크리트 라이닝에 대한 소규모 시험발파로 발파진동을 가한 콘크리트 시료와 진동을 가하지 않고 터널 내에서 양생시킨 공시체에 대해 압축강도를 비교한 결과 콘크리트의 강도 및 탄성파 속도를 저하시킬 수 있는 진동수준은 3~4 cm/sec인 것으로 나타났다.

**Keywords :** Curing, Concrete lining, Impact-vibration, Blast-vibration, Particle velocity, Dominant frequency, Compressive strength, Seismic wave velocity

\*1 정희원, 서울대학교 공학연구소 특별연구원

\*\*2 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수

# 1. 서론

현재까지 국내에서는 대부분의 터널공사가 암반굴착을 위한 발파작업이 완료된 이후에 콘크리트 라이닝의 타설작업이 이루어지는 공정으로 수행되어 왔으나, 최근에 일부 대단면 장대터널 현장에서 암반굴착 작업과 라이닝 타설작업을 병행하여 총 공사기간을 단축시킬 수 있는 작업공정을 검토하고 있다. 발파작업과 라이닝의 타설작업이 동시에 이루어질 경우 예상되는 가장 큰 문제점으로는 발파진동에 의해 라이닝 콘크리트의 강도가 저하되거나 균열이 발생하는 경우를 들 수 있다.

따라서 터널공사시 암반굴착을 위한 발파작업과 라이닝의 타설작업을 병행하기 위해서는 발파진동이 라이닝 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구가 선행되어야 한다. 또한 이 같은 연구는 한쪽 터널에서는 발파작업이 이루어지고, 나머지 한쪽 터널에서는 라이닝 타설작업이 이루어지는 병렬터널 현장이나, 라이닝 타설작업이 수행되는 시기에 환기를 위한 수직갱의 발파작업이 이루어지는 터널 현장의 경우에도 꼭 필요한 연구이다.

그러나 현재까지 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향을 규명하기 위해 수행된 국내외의 여러 연구에서는 대부분 콘크리트 공시체나 콘크리트 블록을 대상으로 시험을 수행하였고, 실제 가해진 진동도 터널 내부에 타설되는 라이닝 콘크리트가 받게되는 발파진동의 주파수보다 낮은 수준의 주파수 특성을 가지는 충격 진동이나 진동테이블을 이용한 진동이었다. 따라서 터널공사시 암반굴착을 위한 발파작업과 라이닝의 타설작업을 병행하여 시공할 경우 라이닝 콘크리트는 28일 설계 강도가 발현되기 이전인 양생기간동안 암반층을 전파해온 100Hz 이상의 주

주파수를 가지는 발파진동을 받게 되므로, 기존의 연구 결과를 이와 같은 경우에 그대로 적용하기는 어렵다.

# 2. 연구 현황 및 진동 허용 기준

## 2.1 연구 현황

표1과 표2는 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향을 규명하기 위해 수행된 국외 및 국내의 연구 결과들을 정리한 것이다.

진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 이상의 여러 연구결과들을 종합적으로 검토해 보면, 양생중인 콘크리트에 가해진 진동의 종류, 진동이 가해진 시점과 시간 및 주파수 특성에 따라 많은 차이를 보이고 있는데, 특히 외국에서 수행된 연구결과가 5cm/sec 이상의 비교적 큰 진동에 대해서도 별다른 영향이 없는 것으로 결론을 내리고 있는 것에 비하여 국내에서 수행된 연구결과는 약 0.5cm/sec 이상의 진동을 가한 콘크리트의 강도저하 현상을 보고하고 있다.

그러나 현재까지 이루어진 대부분의 연구는 터널내에 타설되는 콘크리트 라이닝과 같은 구조물의 형태가 아니라 콘크리트 공시체나 콘크리트 블록에 대해 인공적인 충격진동이나 진동 테이블을 이용한 진동을 발생시킨 후 그 영향을 검토한 것으로 이때 각 시험체에 가해진 진동의 주파수 대역은 대부분 100Hz 이하이다.

또한 실제 발파진동을 진동원으로 해석이 수행된 경우도 터널발파시 터널내에서 측정되는 진동주파수보다 낮은 대역의 주파수 특성을 가지는 지표면에서의 시험발파시 발생한 진동의 크기를 해석 변수로 하였다.

표 1. 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 국외 연구 결과

연구자	콘크리트 형태	진동원	주요 결과
Bastian (1970)	파일	항타진동	* 3일동안 최대 7.6cm/sec의 진동 가함 * 압축강도 4% 증가
Esteves (1978)	블록	충격진동	* 재령 5~20시간, 블록면에 직접 타격 * 15.2~20.32cm/sec --> 횡균열 발생
Howes (1979)	블록	충격진동	* 타설후 일주일동안 최대 12.7cm/sec * 주파수 : 20~50Hz * 압축강도 변화 없음.
Hulshizer (1984, 1996)	블록	진동테이블	* 재령 24시간 이내, 최대 40cm/sec * 8% 이내의 압축강도 저하 * 고주파일수록 강도저하가 크게 나타남.
	빔, 벽체	발파진동	* 재령 4, 14시간, 최대 32cm/sec * 부착강도의 변화 없음

표 2. 진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 국내 연구 사례

연구자	콘크리트 형태	진동원	주요 결과
권영웅 등 (1990)	블록	진동테이블	* 최대 4.8cm/sec * 재령 3~5시간 : 압축강도의 저하 현상
오병환 등 (1998)	블록	진동테이블	* 재령 12시간 이내, 30분동안 * 주파수 10Hz * 0.5~4.2cm/sec : 강도 5~11% 저하 * 0.25cm/sec : 강도 증가
임한욱 등 (1994, 1995)	블록	충격진동	* 0.5cm/sec, 30Hz 미만인 80% * 30초동안 3회 또는 6회 * 압축강도 및 인장강도 5~10% 저하 * 재령 2~8시간이 진동에 가장 민감
	블록	지표면 발파진동	* 최대 10cm/sec, 1회 * 0.5cm/sec 이상 : 최대 5% 압축강도 저하 * 재령 6~8시간이 진동에 가장 민감.

표 3. 미국 토목학회의 양생중인 콘크리트에 대한 재령별 진동허용기준

콘크리트 재령	0~12시간	12~24시간	1~5일	5일 이후
진동허용기준 (cm/sec)	0.25	1.27	1.27~5.08	5.08

표 4. Hulshizer에 의해 제안된 양생중인 콘크리트에 대한 재령별 진동허용기준

콘크리트 재령	0~3시간	3~11시간	11~24시간	1~2일	2일 이후
진동허용기준 (cm/sec)	10.16	3.81	5.08	10.16	17.78

표 5. 미국 교통국의 양생중인 콘크리트에 대한 재령별 진동허용기준

콘크리트 재령	0~4시간	4~24시간	1~3일	3~7일	7~10일	10일 이후
진동허용기준 (cm/sec)	5.08	0.63	2.54	5.08	12.70	25.40

아치 형태로 폐압된 구조를 가지는 실제 터널 라이닝의 경우 암반 또는 숏크리트층과 밀착된 바깥쪽면을 통해 탄성파 형태로 진동이 전파되지만 현재까지 대부분의 연구는 콘크리트 공시체나 블록을 지표면 또는 진동 테이블에 한 면만을 고정시킨 상태로 시험이 수행되었다.

### 2.2 양생중인 콘크리트에 대한 진동허용기준

표 3, 표 4, 표 5는 각각 미국 토목학회, Hulshizer, 미국 교통국에 의해 제안된 콘크리트의 재령별 진동 허용기준이다.

양생중인 콘크리트에 대한 진동허용기준으로 제안된 이상의 자료들과 표 1과 표 2에 제시한 현재까지의 연구결과를 종합하여 검토하면, 강도저하와 같은 진동에 의한 피해가 우려되는 가장 위험한 시기는 콘크리트 타설 후 3시간에서 12시간 사이인 것으로 판단된다.

## 3. 모형 모르타르 라이닝에 대한 충격진동 시험

### 3.1 시험체의 제작

터널 내부에 타설되는 라이닝을 모사하기 위한 모형 모르타르 시험체를 실험실에서 제작하였다. 그림 1은 굴착된 원형터널을 모사한 두가지 형태의 암석블록, 방수포 역할을 하는 디자인 시트, 거푸집 역할을 하는 외경 80mm인 아크릴 파이프, 터널방향으로의 거푸집 역할을 하도록 디자인된 EPA 재질의 내경 78mm, 외경 107mm, 두께 15mm인 원형고리 2개 등으로 모형 원형 터널 라이닝의 타설을 위한 준비물들이다.

암석블록은 포천 화강암으로 폭, 높이, 길이가 각각 30cm x 30cm x 30cm(이하 30B), 30cm x 30cm x 50cm(이하 50B)인 두가지 형태로 각 암석블록의 중앙부에 외경이 10cm인 비트로 코어링을 실시하여, 직경이 약 10.5cm인 원형터널을 모사하였는데, 30B 블록은 암석블록을 관통하도록 코어링을 하였고 50B 블록은 길이 방향으로 약 30cm까지 코어링을 하였다.

모형 라이닝은 거푸집 역할을 하는 아크릴 파이프와 방수포 역할을 하는 디자인 시트의 사이에 모르타르를 타설하여 제작하였는데, 모형 라이닝의 길이는 약 150mm, 두

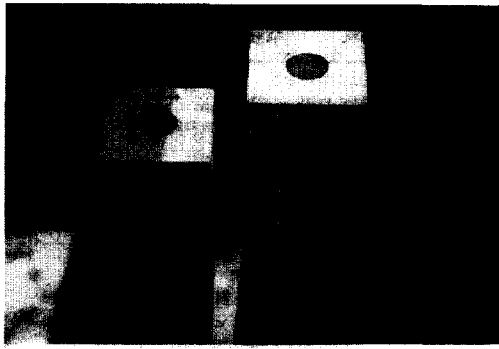


그림 1. 모형 모르타르 라이닝 시험체

께는 약 12mm 이다.

### 3.2 모르타르의 강도와 P파속도

시멘트와 모래, 물의 배합으로 구성되는 모르타르나 이 모르타르에 굵은 골재가 추가되는 콘크리트는 양생기간 즉 재령에 따라 강도나 P파속도가 증가하다가 일정시간이 지난 후 특정한 값으로 수렴해가는 특성을 가진 재료들이다.

그림 2는 모형 모르타르 라이닝의 재령별 압축강도와 P파속도의 관계를 보여주는 그림으로 상관계수는 0.97로 높은 상관관계를 보이며, 직선 회귀분석식의 기울기는 3.11로 나타났는데, 이는 압축강도가  $10\text{kgf/cm}^2$  증가할 때 P파속도가  $31.1\text{m/sec}$  증가한다는 것을 의미하는 것이다. 따라서 진동에 의한 모르타르 라이닝 압축강도의 증가 및 감소 양상을 P파속도의 증가 및 감소 양상으로 평가할 수 있는 것으로 사료된다.

이 연구의 충격진동 시험에 사용된 모형 모르타르 라이닝의 두께가 12mm 정도로 압축강도의 측정이 불가능하여 충격진동이 모형 라이닝에 미치는 영향을 모르타르 라이닝의 P파속도 측정결과를 이용하여 분석하였다.

### 3.3 시험 방법

모형 터널 라이닝에 대한 충격진동 시험에서는 라이닝이 타설된 암석블록을 고정장치를 이용하여 좌우측 및 진동발생원 반대쪽을 고정시키고, 해머를 이용하여 충격진동을 가하였으며 24시간이 지난 시점에 모르타르 라이닝을 암석블록으로부터 분리한 후 천단부 및 바닥부 라이닝 시료에 대해 각 재령별로 OYO사 Sonic Viewer 770 장비를 이용하여 P파속도를 측정하였다.

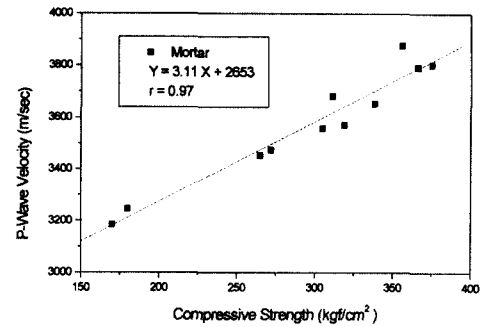


그림 2. 모형 라이닝 모르타르의 압축강도와 P파속도의 상관관계

암석블록 내에 타설한 모르타르 모형 라이닝에는 각 충격진동 시험시 진동속도 벡터합  $2\text{cm/sec}$ ,  $5\text{cm/sec}$ ,  $10\text{cm/sec}$  크기의 충격진동을 가하였는데, 때 시험시 동일한 크기의 암석블록 4개를 사용하였다. 모형 라이닝이 타설된 4개의 암석블록 중에서 한 개는 진동을 가하지 않았고, 나머지 3개는 각각 재령 3시간, 7시간, 12시간에 진동을 가하였다.

그림 3은 30B 및 50B 암석블록에 대한 충격진동시험시 총 6곳의 진동측정 위치(R, P<sub>1</sub> ~ P<sub>5</sub>)를 보여주는 그림으로 충격진동은 가속도계와 발파진동측정기를 이용하여 측정하였는데, 이 연구에서는 기준위치인 R 위치에서 측정된 진동속도 벡터합을 실제 모형 모르타르 라이닝에 가해진 진동의 크기로 사용하였다.

터널 발파진동을 모사하기 위해 이 연구에서는 진동장비의 바닥을 해머로 5초동안 6~7회 타격하는 과정을 5회 실시함으로써 충격진동을 가하였는데, 이때 측정된 충격진동의 주 주파수는 터널발파시 막장면으로부터 10~300m 떨어진 위치에서 측정되는 발파진동의 주 주파수와 유사한 약 100~300Hz의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

### 3.4. 충격진동 시험 결과

그림 4의 (a)-(f)는 모르타르 라이닝 모형을 타설한 후 충격진동을 가한 시점과 충격진동 시험 후 암석블록으로부터 분리한 모르타르 라이닝 시험편에 대해 재령 28일에 측정된 P파속도를 천단부 및 바닥부 시료로 구분하여 나타낸 것으로, 각 그래프의 측정값에 괄호로 표시된 비율은 진동을 가하지 않은 기준(N) 시험편에 대한 해당 시험편의 P파속도 증가 또는 감소비율이다.

$2\text{cm/sec}$ 의 충격진동이 30B 블록의 모르타르 모형 라이닝에 가해진 그림 4(a)의 경우 3, 7, 12 시간인 진동이 가해

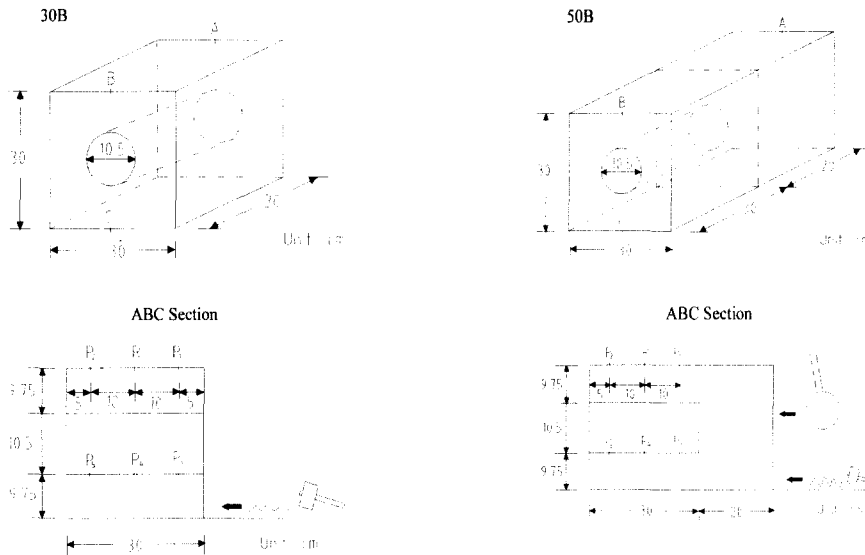


그림 3. 충격진동 시험시 진동 측정 위치

진 시점에 관계없이 진동을 받은 모든 라이닝 시험편의 P파속도가 진동을 가하지 않은 시험편보다 2.0~3.4% 더 큰 값을 보이고 있다. 50B 블록에 타설된 모르타르 모형 라이닝에 대한 시험 결과인 그림 4(b)에서도 그림 4(a)와 동일한 P파속도 증가현상을 보이고 있는데, 여기서의 P파속도 증가비율은 1.4~4.1%로 나타났다.

초기재령 12시간 이내의 진동이 가해진 시점에 관계없이 2cm/sec의 진동속도는 모르타르 라이닝의 P파속도를 증가시켰고, 따라서 강도도 진동을 받지 않은 시험편보다 크게 나타날 수 있는 것으로 판단된다.

5cm/sec의 충격진동이 30B 블록의 모르타르 모형 라이닝에 가해진 그림 4(c)의 경우, 진동이 가해진 시점이 재령 7시간일 때 천반부의 라이닝이 진동을 가하지 않은 기준 시험편보다 1.8% 작은 값을 보인 반면, 바닥부의 라이닝은 기준시험편과 같은 값을 보이고 있다. 50B 블록에 타설된 모르타르 모형 라이닝에 대한 시험 결과인 그림 4(d)에서는 진동이 가해진 시점이 재령 12시간인 경우 바닥부의 라이닝 시험편이 기준시험편에 비해 1.8% 작은 P파속도를 보이고 있고, 나머지 시험편들도 기준시험편에 비해 작은 P파속도를 보이고 있다.

이 결과로부터 초기 재령인 12시간 이내에 가해진 5cm/sec의 진동이 모르타르 라이닝의 P파속도를 증가 또는 감소시킨다는 결론을 도출하기는 어려우나, 2cm/sec의 진동이 가해진 경우의 결과와 비교할 때 강도와 높은 상관관계를 보이는 P파속도를 증가시키지는 못하는 것으로 보인다.

10cm/sec의 충격진동이 30B 블록의 모르타르 모형 라

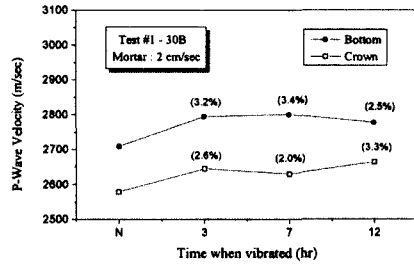
이닝에 가해진 그림 4(e)의 경우, 진동이 가해진 시점이 재령 12시간일 때 바닥부의 라이닝이 진동을 가하지 않은 기준 시험편보다 2.8% 작은 P파속도를 나타낸 반면, 동일한 재령에 같은 크기의 진동을 가한 바닥부의 라이닝은 기준 시험편보다 오히려 0.4% 더 큰 P파속도를 보이고 있다. 50B 블록에 타설된 모르타르 모형 라이닝에 대한 시험 결과인 그림 4(f)에서는 바닥부 라이닝은 모두 기준 시험편보다 작은 P파속도를 보인 반면, 진동이 가해진 시점이 재령 3시간인 경우 천반부의 라이닝은 기준시험편보다 1.5% 더 큰 P파속도를 나타내었다.

그림 4(c)~(f)의 각 그래프에서 같은 크기의 진동이 가해졌을 때 P파속도가 가장 작은 값을 보인 횟수는 진동을 가한 시점이 재령 3시간인 경우가 1회, 재령 7시간인 경우가 4회, 재령 12시간인 경우가 2회로 나타났으나, 모르타르 시험체의 강도와 상관성이 높은 P파속도에 가장 큰 영향을 미치는 시점을 재령 7시간이라고 제시하기는 어렵다.

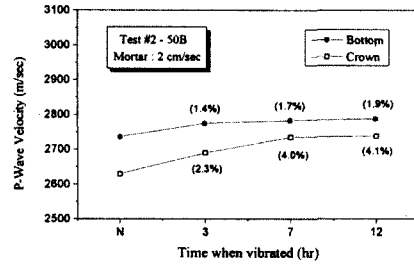
#### 4. 터널 콘크리트 라이닝에 대한 발파진동 시험

##### 4.1 시험 현장 개요 및 모형 라이닝의 타설

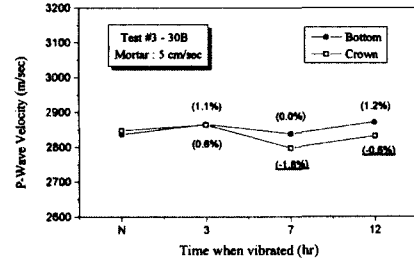
현장 시험은 대구와 춘천을 연결하는 중앙고속도로의 제 9공구 죽령터널 종점부 하행선에서 실시하였는데, 이 터널은 경북 풍기와 충북 단양을 연결하는 연장 4,520m의 쌍굴 도로터널이다. 죽령 터널 현장은 국내 고속도로 터널



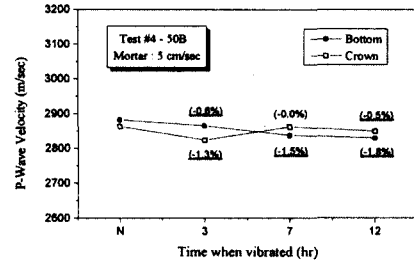
(a)



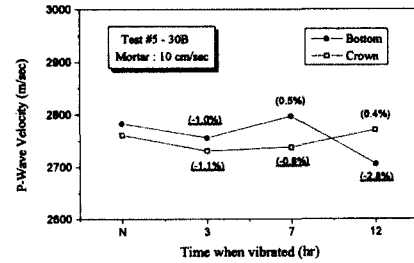
(b)



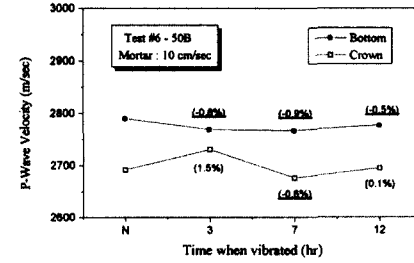
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 4. 충격진동 시험 후 각 라이닝 시료의 P파 속도

공사로는 처음으로 전단면 굴착기(tunnel boring machine)로 원형 터널을 선진 굴착한 이후 발파작업으로 최종 굴착면까지 확대 굴착하는 방법을 채택하여 암반굴착이 이루어지고 있는 현장이다. 2차선 고속도로 터널인 이 현장의 기반암은 선캠브리아기에 생성된 것으로 추정되는 소백산 편마암 복합체인 흑운모 화강암질 편마암, 미그마타이트질 편마암 등으로 구성되어 있다.

이 터널의 표준단면은 단면폭이 11.6m, 천단부까지의 높이가 8.03m이고, 아치형태의 콘크리트 라이닝이 천단부와 벽면부에 30cm 두께로 타설되며, 바닥부에는 포장 콘크리트가 타설된다.

현장시험이 수행된 시점은 전단면 굴착기에 의해 직경 5m인 원형 터널의 굴착을 완료한 이후, 터널의 양쪽 입구부 4개의 막장면에서 확공 발파작업이 진행중인 시점이었다.

현장시험에서는 전단면굴착기로 선진 굴착된 원형터

널(이하 TBM 터널)과 상부반단면 확공발파가 완료된 주 터널(이하 main 터널)에 막장면으로부터의 거리에 따라 콘크리트 라이닝 모형을 설치하였다.

상부 반단면에 대한 확공발파가 진행중인 막장면의 후방에 해당하는 전단면굴착기로 선진굴착된 TBM 터널의 내부 바닥면 2곳과 상부 반단면 확공발파가 완료된 main 터널의 하단부 모서리 4곳에 거푸집을 제작한 후 실제 현장의 라이닝 콘크리트와 동일한 배합조건으로 콘크리트 모형 라이닝을 타설하였다.

그림 5는 터널의 진행방향 단면도와 각 구간별 터널 단면 및 설치된 라이닝 모형의 구조를 나타내는데, 그림 5(a)는 전단면 굴착이 완료된 구간의 단면으로 설계된 2차선 도로터널의 표준단면이다.

그림 5(b)는 상부반단면 확공발파가 완료된 main 터널 구간으로 막장면으로부터 거리가 각각 40m, 80m, 120m, 160m 떨어진 4군데의 위치에 콘크리트 라이닝 모형이 설

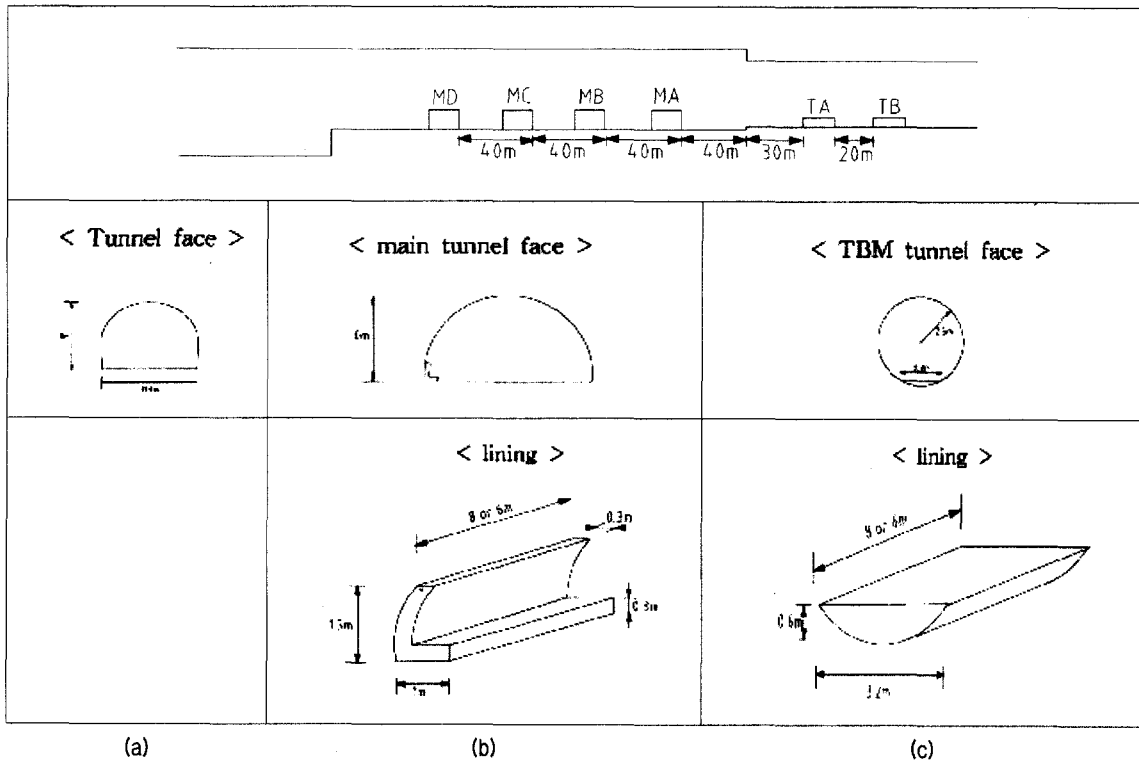


그림 5. 시험 터널 현장의 단면도 및 모형 라이닝 모식도

치되었는데, 각 라이닝 모형의 명칭은 막장면으로부터 가까운 거리 순서로 각각 MA, MB, MC, MD 라이닝이다. 이곳에 설치된 라이닝은 바닥부와 벽면부로 구성되는 L자 형태인데, 바닥부의 경우 폭이 1.3m이고, 벽면부의 경우 높이가 1.8m이며, 두 경우 모두 두께는 0.3m이다.

그림 5 (c)는 전단면굴착기로 선진굴착된 직경 5m인 TBM 원형터널 구간으로 막장면으로부터 거리가 각각 30m, 58m 떨어진 2군데의 위치에 콘크리트 라이닝 모형이 설치되었는데, 각 라이닝 모형의 명칭은 막장면으로부터 가까운 거리 순서로 각각 TA, TB 라이닝이다. 이곳에 설치된 라이닝은 바닥부만으로 구성되는데, 터널 방향으로의 길이는 TA 라이닝이 8m이고, TB 라이닝은 6m이며, 폭은 3.2m로 동일하다.

TBM 터널 내에 바닥부 라이닝 콘크리트의 타설은 파이프 라인을 이용하였는데, 막장면으로부터 거리가 먼 TB 라이닝을 먼저 타설하였고, 두 개의 바닥부 라이닝 타설에는 약 3시간이 소요되었다.

main 터널내에 제작한 바닥부 및 벽면부 라이닝 거푸집에는 레미콘 트럭을 이용하여 콘크리트를 타설하였고, 4 곳에 설치한 각 라이닝은 벽면부를 타설할 때 바닥부가 밀리는 현상을 방지하기 위하여 바닥부를 먼저 타설한 후 약 2시간이 경과한 이후에 벽면부를 타설하였다.

#### 4.2 터널 발파작업 및 발파진동 측정 결과

이 연구가 수행되는 기간 동안 터널 현장에서 수행한 상부 반단면 확공발파 작업 내용은 다음과 같다. 점보드릴을 이용한 천공작업시 1회 천공장은 약 2.5m, 발파공 직경은 42mm, 총 천공수는 76공이고, 사용된 화약은 제품명이 Himite 5500으로 개당 중량이 0.375kg인 다이나마이트이며, 최외곽공에는 개당 중량이 0.1kg인 제품명 Finex-1이 최종굴착면의 여굴 및 손상을 방지하기 위해 사용되었다. 화약의 기폭을 위한 뇌관으로는 각단간의 지연시차가 100msec인 LP뇌관을 1번에서 19번까지 사용하였고, 같은 번호의 뇌관이 사용된 4공은 다단식 발파기를 이용하여 두 공씩 기폭되었다.

라이닝 콘크리트를 타설한 이후 하루 2회씩 상부 반단면에 대한 확공 발파작업을 수행하였으므로 발파작업이 수행되는 막장면으로부터 각 라이닝 콘크리트까지의 거리는 연구기간 중 지속적으로 변한다. 즉 TBM 터널 내에 타설한 라이닝 콘크리트는 막장면으로부터의 거리가 계속 가까워지지만 main 터널 내에 설치한 라이닝 콘크리트의 경우는 막장면으로부터의 거리가 계속 멀어지게 되므로, TA 및 TB 라이닝은 시간이 지남에 따라 더 큰 발파진동을 받게 되는 반면, MA~MD 라이닝은 타설 후 첫 번째

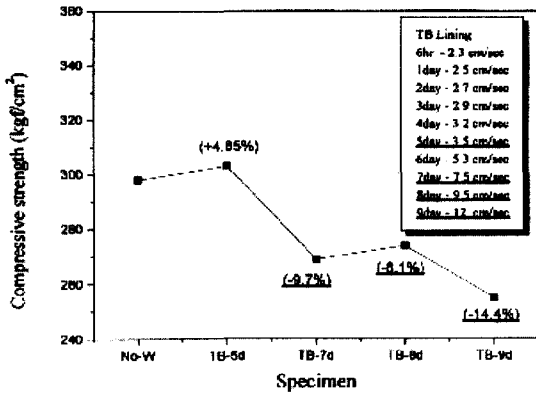


그림 6. TB 라이닝 콘크리트 시료의 진동이력에 따른 압축강도 변화

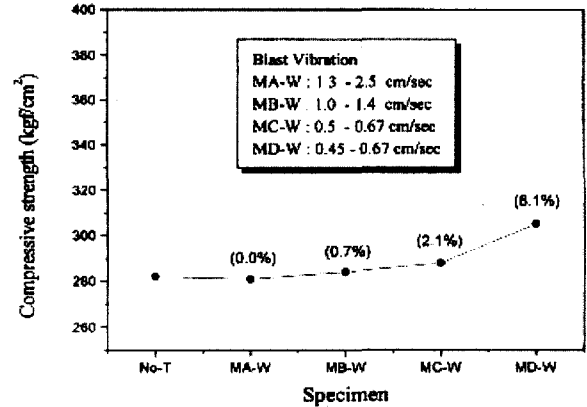


그림 7. main 터널내 각 라이닝 콘크리트 벽면부의 진동이력과 압축강도

발파작업에서 가장 큰 발파진동을 받고 시간이 지남에 따라 라이닝에 가해지는 발파진동은 점차적으로 작아지게 된다.

콘크리트 라이닝을 타설한 이후의 매회 발파작업시 각 라이닝의 표면에서 발파진동을 측정하였는데, 측정에 사용된 장비는 발파진동측정기인 SSU 2000DK 1대, SSU 2000DK 를 이용해 측정자료의 저장 및 분석이 가능한 Micro-seismograph 5대, 그리고 Blastmate 0774대이다.

식 (1)은 TBM 터널 내에 타설한 라이닝에서 측정된 발파진동속도 벡터합 자료 총 27개를 회귀분석하여 구한 발파진동전파식이고, 식 (2)는 main 터널 내에 타설한 라이닝에서 측정된 벡터합 자료 총 45개로부터 구한 발파진동전파식인데, 폭원으로부터 10~300m 떨어진 위치에서 측정된 발파진동의 주주파수 대역은 150Hz 이상으로 나타났다.

$$V = 2124 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-2.13} \quad (1)$$

$$V = 309 \left( \frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.28} \quad (2)$$

여기서 V : 진동속도 벡터합 (cm/sec)

D : 발파지점으로부터의 거리 (m)

W : 최대 지발당 장약량 (kg)

#### 4.3 시험 결과

그림 6은 진동을 가하지 않고 수중 양생시킨 공시체와 TB 콘크리트 라이닝에서 코어링한 시료의 28일 압축강도

평균값을 비교한 그림으로 수중 양생시킨 공시체의 압축강도값을 기준으로 각 시료의 강도 증가 및 감소 비율이 팔호 속에 표시되어 있고, 각 양생 시기별로 TB 콘크리트 라이닝에 가해진 진동속도 벡터합이 나타나 있다.

라이닝 콘크리트를 타설한 후 5일이 지난 시점에 코어링한 TB-5d 시료의 경우 진동을 가하지 않은 No-W 시료보다 더 큰 압축강도값을 보이는 반면, 라이닝 타설 후 각각 7일, 8일, 9일이 지난 시점에 코어링한 TB-7d, TB-8d, TB-9d 시료들의 경우는 기준 시료인 No-W 시료보다 8% 이상 최고 14.4% 까지 더 작은 압축강도값을 나타내고 있다.

이 결과를 TB 콘크리트 라이닝이 양생중에 받은 진동속도의 크기와 함께 해석해보면, 라이닝 콘크리트 타설 후 6시간이 지난 시점에 가해진 진동속도 2.3cm/sec의 발파진동은 콘크리트의 압축강도를 저하시키지 못한 반면에, 5일이 경과한 이후에 가해진 진동속도 3.7cm/sec 이상의 발파진동은 콘크리트의 강도를 저하시킬 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 진동을 가하지 않고 터널내에서 양생시킨 No-T 시료와 main 터널 내에 설치한 4군데 콘크리트 라이닝의 각 벽면부에서 코어링한 시료의 28일 압축강도 평균값을 비교한 그림으로, 양생기간 중에 각 라이닝에 가해진 발파진동의 진동속도 수준이 나타나 있다.

MA-W, MB-W, MC-W, MD-W 시료의 압축강도가 진동을 가하지 않은 No-T 시료의 압축강도값 이상으로 나타났다. 특히 MD-W 시료의 경우에는 8.1% 더 큰 압축강도값을 보이므로, 양생기간 동안 진동속도 2.5cm/sec 이하의 발파진동을 받은 콘크리트 라이닝의 벽면부에서는 적어도 압축강도의 저하가 일어나지 않음을 알 수 있다.

한편 그림 8은 진동을 가하지 않은 No-T 시료와 main 터



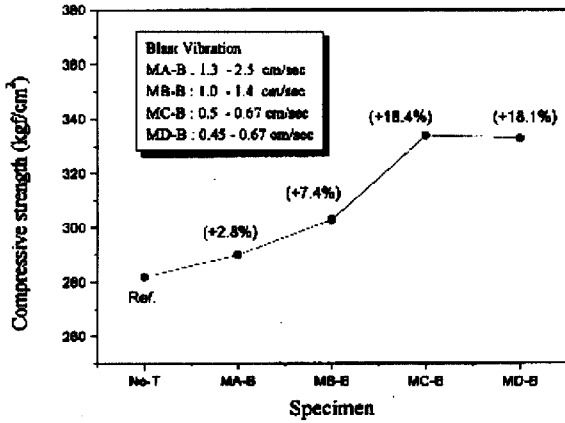


그림 8. main 터널내 각 라이닝 콘크리트 바닥부의 진동이력과 압축강도

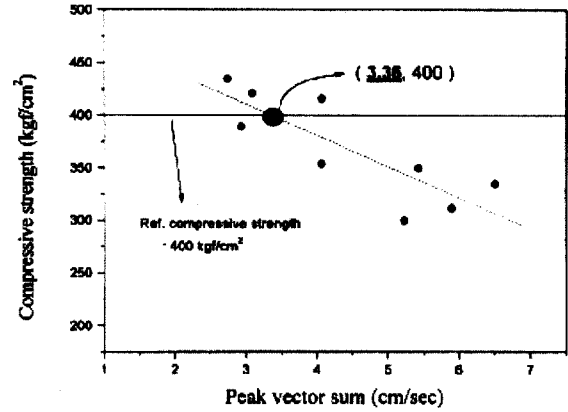


그림 9. 콘크리트 시료가 재령 5시간에 받은 진동수준과 압축강도

널 내에 설치된 4군데 콘크리트 라이닝의 각 바닥부에서 코어링한 시료의 28일 압축강도 평균값을 비교한 그림이다.

그림 7에 나타난 벽면부 라이닝 콘크리트와 같이 바닥부에서 코어링한 시료의 경우도 양생조건이 비슷한 No-T 시료보다 모두 더 큰 압축강도값을 나타내고 있는데, 특히 양생기간 동안 0.67cm/sec 이하의 진동을 받은 MC-B와 MD-B 시료의 경우 No-T 시료보다 약 18% 정도 더 큰 압축강도 값을 보이고 있다. 따라서 MC, MD 라이닝에 가해진 것과 같이 진동속도 0.45~0.67cm/sec의 발파진동을 라이닝 콘크리트가 양생기간 중 받게 될 경우, 바닥부에서는 약 10% 이상의 압축강도 증가효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 라이닝 콘크리트에 대한 시험발파 결과

양생초기인 재령 5시간에 2회의 발파진동을 가한 콘크리트의 28일 압축강도, 탄성파속도의 변화를 해석하기 위하여 콘크리트 라이닝에 대한 소규모 시험발파를 수행하였다. main 터널내 콘크리트 라이닝 바닥부에서 코어 채취를 하면서 생긴 직경 12cm, 깊이 25cm의 구멍에 콘크리트를 타설하고 5시간이 경과한 시점에 콘크리트 라이닝에 대한 소규모 시험발파를 수행하였다.

그림 9는 각 콘크리트 시료가 재령 5시간에 2회의 시험발파시 받은 진동수준별로 28일 압축강도를 나타낸 그림으로 진동을 받지 않은 기준시료 No2의 압축강도값인 400kg/cm<sup>2</sup>에 대해 회귀분석한 직선이 진동수준 3.36cm/sec에서 만나고 있다.

이것은 3.36cm/sec 이상의 발파진동을 양생초기인 재령 5시간에 받는 경우 강도가 저하될 수 있음을 보여주는 결과로 재령 5시간에 콘크리트의 압축강도를 저하시킬 수 있는 발파진동수준은 3~4cm/sec 정도인 것으로 판단된다.

그림 10은 라이닝 콘크리트에 대한 시험발파시 각 시료들이 받은 진동수준과 P파 및 S파속도를 나타낸 그림이다. 진동을 가하지 않은 기준시료 No2의 탄성파 속도값보다 더 작은 값을 가지는, 즉 그래프상에서 x축에 평행한 직선보다 아래쪽에 위치하는 자료들이 진동속도 3~4cm/sec 수준을 기준으로 그 이상에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

발파진동이 재령 5시간에 가해진 경우 콘크리트의 탄성파속도를 저하시킬 수 있는 진동수준이 3~4cm/sec라는 것은 압축강도를 저하시킬 수 있는 진동수준을 구한 그림 9의 내용과 동일한 결과로 판단된다.

### 6. 결론

- (1) 모형 라이닝 모델의 제작에 사용된 모르타르의 경우 재령에 따른 P파속도가 강도와 상관계수 0.97의 매우 높은 상관관계를 보이므로, 양생중인 모르타르에 진동이 가해진 경우 강도의 증가 및 감소 양상을 P파속도의 증가 및 감소 양상으로 평가할 수 있는 것으로 나타났다.
- (2) 실험실 충격진동 시험결과 각각 재령 3, 7, 12시간에 100~300Hz 범위의 주파수 대역을 가지는 2cm/sec의 충격진동을 가한 모형 라이닝 시료들은 진동을 가하지 않은 시료보다 P파속도가 크게 나타나는 경향을

## 감사의 글

시험 현장 제공, 터널 내 콘크리트 라이닝 타설 등이 연구의 현장 시험에 큰 도움을 주신 죽령터널 공사 현장의 도로공사, 코오롱 건설(주), (주)한양, 코오롱 건설 기술연구소 관계자 여러분께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

1. 권영웅 외(1990), "진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향", 대한주택공사 주택연구소 기술보고서, pp.28~62
2. 오병환, 송해급, 조재열(1998), "진동이 양생 초기 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구", 콘크리트학회지, 제10권, 제5호, pp.81~87
3. 임한욱, 정동호, 이상은(1994), "인공진동의 크기가 양생콘크리트의 강도와 물성에 미치는 영향", 한국암반공학학회지, 제4권, 제1호, pp.31~37
4. 임한욱, 박근순, 정동호, 이상은(1995), "발파진동의 크기가 양생콘크리트의 강도와 물성에 미치는 영향", 한국암반공학학회지, 제5권, 제2호, pp.134~143
5. 오병환 외(1998), "양생중에 진동을 받는 콘크리트의 강도 및 역학적 특성 실험적 연구", 서울대학교 에너지자원기술연구소, pp.44~72
6. Bastian C. E.(1970), "The Effect of Vibrations on Freshly Poured Concrete", Foundation Facts, Raymond International, Vol.VI, No.1, pp.14~17
7. Hows E. V.(1979), "Effect of Blasting Vibrations on Curing Concrete", Proceedings of the 20th U.S. Symposium on Rock Mechanics, University of Texas, Austin, Texas., pp.455~460
8. Esteves, J. M.(1978), "Control of Vibrations Caused by Blasting", Baboratorio De Engenharia Civil, Memoria, No.409, Lisbon, Portugal, pp.3~11
9. Allen J. Hulshizer, Ashok J. Deasi(1984), "Shock Vibration Effects on Freshly Placed Concrete", Journal of Construction Engineering and Management, Vol.110, No.2, pp.266~285
10. Allen J. Hulshizer(1996), "Acceptable Shock and Vibration Limits for Freshly Placed and Maturing Concrete", ACI Material Journal, Vol.93, No.6, pp.524~533

(접수일자 2000. 7. 11)

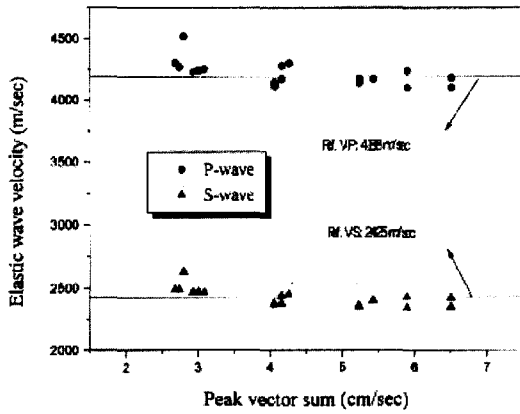


그림 10. 콘크리트 시료가 재령 5시간에 받은 진동수준과 탄성파속도

보였으나, 5cm/sec와 10cm/sec의 충격진동을 가한 모형 라이닝 시료는 진동을 가하지 않은 시료보다 P파속도가 작게 나타내는 경우가 더 많았다.

- (3) 터널 발파작업시 막장면으로부터 10~300m 떨어진 터널 내부에서 측정된 진동의 주주파수 대역은 지표면에서의 발파작업이나 향타작업에서 발생하는 진동의 주주파수 대역보다 높은 150Hz 이상으로 나타났다.
- (4) 재령별로 서로 다른 크기의 발파진동을 가한 각 라이닝에서 코어링한 시료의 28일 압축강도와 진동을 가하지 않고 터널 내에서 양생된 공시체의 압축강도를 비교한 결과 양생기간동안 2.5 cm/sec 이하의 발파진동을 가한 모든 시료의 압축강도가 진동을 가하지 않고 양생시킨 시료보다 더 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 양생중인 라이닝 콘크리트의 강도를 저하시킬 수 있는 발파진동의 크기는 진동속도 2.5cm/sec 이상으로 판단된다.
- (5) 재령 5시간에 콘크리트 라이닝에 대한 소규모 시험발파로 2회의 발파진동만을 가한 콘크리트 시료와 진동을 가하지 않고 터널 내에서 양생시킨 공시체에 대해 압축강도를 비교한 결과 콘크리트의 강도를 저하시킬 수 있는 진동수준은 3~4 cm/sec인 것으로 나타났다. 또한 이 시료들의 압축강도와 P파 및 S파속도를 비교한 결과 높은 상관관계를 보이고 있으며, 진동을 가한 시료의 P파 및 S파속도를 진동을 가하지 않고 터널 내에서 양생시킨 공시체의 값과 비교한 결과 콘크리트의 P파 및 S파속도를 저하시킬 수 있는 진동수준은 강도를 저하시킬 수 있는 진동수준과 동일한 값인 3~4cm/sec인 것으로 나타났다.