

터널발파구조물 병행시공을 위한 영향평가 연구

류 창하¹⁾, 최 병희¹⁾, 김 양균²⁾, 유 정훈²⁾

A Case Study on the Construction of Concrete Structures in Parallel with Tunnel Blasting

Chang-Ha Ryu, Byung-Hee Choi, Yang-Kyun Kim and Jeong-Hoon Ryu

ABSTRACT. An experimental study was carried out in order to reduce the period and cost of construction of Missiryung tunnel, which is a relatively long one 3.6 km long. An allowable vibration level for curing concrete was established based on the extensive case studies done over the world, and assessment was performed on the possibility of constructing concrete structures like lining during tunnel blasting. Attenuation relationships were obtained by processing more than 130 measurement data from a series of tunnel blasting in the site. A Guideline for safe construction work was suggested. To verification, four small concrete blocks with a constant standoff distance were installed in the floor of the tunnel. After the blocks were exposed to blast vibrations for 28 days, compressive strength tests were performed on 20 specimens taken from the blocks. It was shown that the suggested guideline was appropriate for the safe construction work at the site.

Key words : tunnel blasting, curing concrete, parallel construction, vibration effect, safe distance

초 록

3.6km 장대터널인 미시령터널의 시공기간 단축과 공사비 절감을 위해 터널 발파와 콘크리트 구조물 병행시공 평가 연구를 수행하였다. 이를 위해 기존에 제시된 양생중인 콘크리트 구조물에 대한 진동허용기준을 분석하여 본 현장에 적합한 기준을 제시하였고, 10여회의 발파계측을 통해 약 130점 이상의 계측자료를 획득하여 대상 현장에서의 진동추정식을 도출하였다. 그 결과 발파와 콘크리트 구조물 병행시공을 위한 안전한 작업 지침으로서, 발파시 지발당 최대 장약량에 따라 타설이 가능한 막장으로부터의 안전이격거리가 제시되었다. 이에 대한 실제 검증을 위해 터널내 4곳에 일정한 거리마다 콘크리트 블록을 타설한 후 지속적인 발파 진동을 받게 한 후 28일 강도시험을 실시하였으며 제시된 지침의 타당성을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 터널발파, 양생 콘크리트, 병행시공, 진동영향, 안전이격거리

1. 서 론

최근 들어 건설수요가 급속히 증가하고 있는 장대터널의 시공에 있어서 가장 중요한 관심사항은 공기 단축 및 공사비 절감 문제이므로 이를 해결할 수 있는 적절한 방안이 절실히 필요한 시점이다.

장대터널의 시공에 있어서 공기상 가장 큰 비중

을 차지하는 것이 굴착이라고 할 수 있으며, 굴착이 완료된 후에는 도로터널의 경우 원활한 차량의 통과와 환기 등에 사용되는 부대시설의 용이한 설치를 위해 콘크리트라이닝이 설치되고 있다.

즉, 지금까지는 국내의 도로터널공사 현장에서는 공동구나 콘크리트 라이닝과 같은 콘크리트 구조물의 타설은 발파작업에 의한 암반굴착이 완료된 후 이루어져 왔는데, 이 같은 작업공정은 발파작업에서 발생하는 발파진동이 타설되는 콘크리트라이닝에 균열을 발생시키거나 강도를 저하시킬 수도 있으므로 이를 예방하기 위한 것이 주된 이유 중의 하나였다. 특히 터널 발파와 콘크리트 타설 시

1) 한국지질자원연구원

2) 코오롱건설 주식회사

접수일 : 2003년 11월 18일

기의 상호 관계에 따라서는 양생중인 콘크리트에 미세균열이 발생하고 이로 인한 콘크리트 강도 저하의 가능성이 있다.

그러나 대단면과 장대터널이 늘어나고 있는 추세인 요즈음 암반굴착작업이 끝난 후 터널 내부의 콘크리트 구조물 시공이 시작되는 경우 공사기간이 상당히 지연될 수밖에 없다. 또한 콘크리트 구조물의 품질에 영향만 없다면 굴착과 동시에 구조물을 시공하는 것은 공기단축과 공사비 절감을 위해 바람직한 공정관리라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 도로터널에서 반드시 설치되는 콘크리트 구조물의 시공과 관련하여 공기와 공사비의 감축을 위해 터널굴착발파가 진행중인 상황에서 콘크리트라이닝을 동시에 진행시켰을 때 발파진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향을 평가하고 콘크리트 품질에 영향을 미치지 않는 막장으로부터 콘크리트 구조물 타설지점까지의 안전거리를 도출하고자 하였다.

2. 기존 사례 고찰

발파작업과 라이닝 등 본체 구조물의 타설작업이 동시에 이루어질 경우 예상되는 가장 대표적인 문제점으로는 발파진동에 의해 라이닝 콘크리트의 강도가 저하되거나 균열이 발생하는 경우이다.

양생중인 콘크리트는 경화가 완료된 콘크리트와는 다른 범주에서 영향평가가 되어야 하지만 국내 허용기준치는 아직 정립되어 있지 않다.

콘크리트는 암석과 달리 타설된 시점부터 재령에 따라 강도, 탄성계수, 관성파속도 등이 증가하다가 일정한 시점이 지난 후에 수렴하는 특성을 가진 재료이므로 동일한 크기의 진동에 대해서도 재령에 따라 서로 다른 영향을 보이게 되는데, 많은 연구결과에 의하면 타설후 시간대에 따라 초기 재령에서 진동을 받은 경우가 가장 위험한 것으로 알려져 있다.

표 1에서와 같이, 1970년도에 ASCE(미국양회학회)에서 포틀랜드 시멘트에 대한 허용진동수준을 제안한 바 있는데 이에 의하면 가장 예민한 시간

대를 타설후 0~12시간까지로 보고 진동수준을 0.254 cm/sec로 하고 있다. (R.V. WHitman & B.B. Seed, 1970)

표 1. 미국양회학회가 제안한 허용진동수준

타설후 시간	PPV (cm/s)
0 ~ 12 시간	0.254
12 ~ 24 시간	1.27
1 ~ 5 일	1.27 ~ 5.08
5 일 이상	5.08

그러나 미국 양회학회에서 제안하였던 수준은 너무 낮은 수준으로 많은 논란이 있었으며 그 후 Seabrook Nuclear Station project와 관련하여 허용수준에 대한 검토를 위해 일련의 체계적인 실험이 수행되었다.¹⁾ 표 2는 실험 결과로서 콘크리트 타설후 3~11시간이 가장 진동에 예민한 것으로 나타났다.

표 2. 양생콘크리트에 대한 진동허용수준 (Source: Hulshizer & Desai, 1984)

타설후 경과시간	PPV (cm/s)
0 ~ 3 시간	10.16
3 ~ 11 시간	3.81
11 ~ 24 시간	5.08
24 ~ 48 시간	10.16
48 시간 이상	17.78

미국 교통국 산하 National Highway Institute의 간행물에 제시된 수준은 표 3과 같다.(Rock Blasting and Overbreak Control, NHL, Publication No. FHWA-HI-92-001, 1991)

또한 Esteves(1978)는 콘크리트 타설후 5시간에서 20시간까지 해머에 의한 진동영향을 실험적으로 관찰한 결과 11~16시간 사이의 외부진동은 강도저하를 가져올 수 있는 것으로 보고하고 있다.²⁾

표 3. 미국 교통국의 양생콘크리트에 대한허용진동 수준 지침 (1991)

타설후 경과시간	PPV (cm/s)
0 ~ 4 시간	5.08
4 ~ 24 시간	0.63
1 ~ 3 일	2.54
3 ~7 일	5.08
7 일 ~10 일	12.7
10 일 이상	25.4

강도저하를 가져올 수 있는 시간대로서 여러 조건 하에서 관찰된 예를 보면, Vibratech사³⁾는 타설 후 12시간까지로, 권영웅⁴⁾등은 타설후 3~5시간으로, 정동호⁵⁾는 타설후 3~12시간으로 기술하고 있다. 시간대에는 약간의 차이가 있지만 이러한 결과들을 종합하여 보면, 콘크리트 양생시 초기진동은 수화반응을 촉진시켜 다짐효과를 주기 때문에 오히려 강도 면에서 유리하며, 어느 시간대 이후에는 응결되는 시멘트 입자간에 새로운 균열의 발생원이 될 수 있으므로 강도를 저하시킬 수 있는 것으로 해석된다.⁶⁾

국내 적용사례를 보면, 아직 국내 기준이 없는 상황하에서 보수적인 수준으로서, 미국 교통국에서 제안된 허용진동수준 지침에서 진동에 예민한 시간대를 3~24시간으로 수정한 안이 채택된 예가 있다.⁷⁾

1997년 영동고속도로 확장공사시에는 상행선터널 굴착후 라이닝 타설작업과 하행선 터널 굴착 시공시기가 중복됨에 따라 발파진동에 의한 영향 문제가 대두된 바 있다. 당시 영향 검토 결과는 상행선 내부 라이닝이 굳은 상태와 양생중인 상태로 구분하여 굳은 상태인 경우 1.0 cm/sec, 양생중인 상태의 경우 0.63 cm/sec의 허용수준을 설정한 것으로 조사되었다.

또한 죽령터널에서는 1999년 본 연구에서와 유사한 실험을 실시하였는바, 양생중인 콘크리트 라이닝에 대한 진동 허용치로 0.2cm/s를 적용한 바 있으며 실험결과 양생초기인 5시간 후에 4cm/sec 이상의 발파진동을 받은 콘크리트 시료의 경우 압축강도의 저하 및 탄성파속도의 감소현상이 발생

하는 것으로 나타났다.⁸⁾

3. 현장실험

발파와 콘크리트 구조물 병행시공을 위한 현장 실험을 실시하였다. 전체적인 수행 순서 및 세부 내용은 표 4와 같다.

3.1 현장 개요

실험은 강원도 속초부터 인제를 연결하는 미시령터널건설공사 현장에서 실시되었다. 미시령터널은 국가지원 지방도 56호선 15.7km구간 중 민간 투자사업으로 건설되는 3.6km 2차선 쌍굴 도로터널이며 미시령을 통과하는 기존 도로의 도로 폭이 협소하고 평면 및 종단선형이 불량하여 동절기 강설 및 동결에 의한 교통 통제 및 교통사고의 위험 해소와 안전하고 경제적이며 미래지향적인 보조간선도로 건설을 위해 시공되는 터널이다(그림 1).

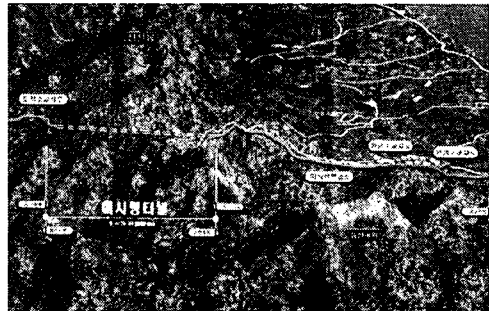


그림 1. 현장 위치도

본 지역은 옥천변성대 북측에 해당하여 대보화강암과 대보화강암의 관입시 변성작용을 받은 화강암질 호상 편마암이 기반암으로 분포하고 있다.

- 위 치 : 강원도 인제군 북면 용대리(시점) ~ 강원도 고성군 토성면 원암리(종점)
- 터널 길이 : 3.565 km
- 공사 기간 : 2001. 7 -2006. 7
- 터널 제원 : 10.8m(폭) × 8.3 m(높이)

표 4. 실험 순서 및 내용

항 목	내 용
허용 수준 설정	<ul style="list-style-type: none"> • 국내의 기준, 기존 연구사례를 토대로 라이닝 등 구조물과 양생 콘크리트에 영향을 미치지 않는 허용 진동 한계치 설정
현장계측 및 자료획득 (발파 및 진동계측)	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 터널 발파시 진동계측 및 자료획득 • 발파진동 전파양상을 파악할 수 있도록 최소 30측점 이상
자료처리 및 진동전파식 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 획득된 계측자료의 회귀분석 • 진동전파식(예측식) 도출
영향권 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 도출된 진동추정식을 이용하여 허용 수준을 만족시킬 수 있는 라이닝 타설지점까지의 최대 이격거리(안전거리), 이격거리에 대한 최대 지발당 장약량 조건 등의 산정
검증을 위한 모형 라이닝 타설	<ul style="list-style-type: none"> • 영향권 분석 결과를 토대로 콘크리트 타설 위치 설정 • 막장으로부터 일정한 지점에 소규모의 라이닝을 타설 • 현장에서 사용될 성분과 동일하게 라이닝 콘크리트 배합 • 타설시 진동을 받지 않은 콘크리트의 강도를 확인하기 위해 몰드 5개에 콘크리트 양생
발파진동 재하 및 콘크리트 강도 시험	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 타설후 가장 예민한 시간대에 진동을 받도록 발파 실시 • 첫 번째 발파후 각 콘크리트에서 5개씩 코어링한 후 28일 동안 터널내에서 양생(진동을 받지 않는 곳에 보관) • 28일동안 지속적인 진동을 받는 콘크리트의 최종 강도 시험
산정된 이격거리에 대한 타당성 확인	<ul style="list-style-type: none"> • 28일 후 콘크리트 강도가 설계강도를 만족시키는지 평가
시공지침 제시	<ul style="list-style-type: none"> • 발파-구조물 병행시공을 위한 조건, 시공 지침 및 안전확보 대책 제시

• 실험 위치 : 종점측 상행선

한 동시에 발파에 의해 발생하는 발파풍압을 측정할 수 있는 계측장비이다.

3.2 진동계측

(1) 계측기 종류

진동측정에 사용된 계측장비는 캐나다 Instantel사의 MiniMate Plus, 미국 Geosonics사의 SSU2000DK, SSU3000LC 등이었다. 본 기기들은 발파진동 전용 장비로서 지반진동을 측정하고 또

(2) 계측 방법

현장의 발파 조건 및 지반 조건이 동일하지 않으므로 가능한 다양한 조건을 반영할 수 있도록 공사 진행 상황 및 조건에 따라 총 4차로 나누어 10회의 계측을 실시하여 자료를 획득하였다.

계측 장비는 이격거리별로 터널 내부의 여러 개

소를 선정하여 발파에 의한 진동 수준의 전파 양상을 분석할 수 있는 자료를 얻을 수 있도록 설치하였는데, 굴진 중인 상·하행선 종점부의 터널 바닥 및 측벽에 측정시마다 5~17개의 장비를 적절한 간격을 두어 설치하였다. 전체적으로 총 133측점에서 진동을 계측하였으나 측정값에 오류가 있거나 미계측된 것을 제외한 실제 유용한 계측결과 는 82측점이었다.

그림 2와 3에서와 같이 진동센서의 설치 시에는 부득이한 경우를 제외하고는 모두 터널바닥을 이루는 암반 중에 핸드드릴을 사용하여 천공한 후 스파이크를 사용하여 센서가 암반에 단단히 부착되도록 하였다. 마찬가지로 측벽의 경우에도 타설되어 있는 슛크리트에 천공한 후 스파이크를 사용함으로써 센서와 측벽이 일체화되도록 하였다.



그림 2. 터널 바닥부에 설치된 진동계측기

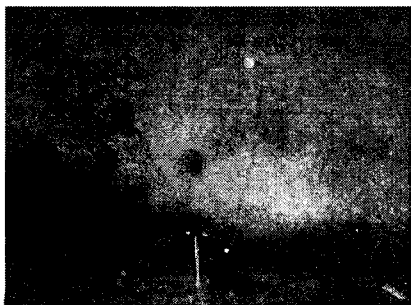


그림 3. 측벽부에 설치된 진동계측기

3.3 계측결과 분석

(1) 계측결과

계측결과를 정리하면 표 5와 같다. PPV는 측정에서 폭원방향성분, 연직방향성분, 수평방향성분의 최대 벡터합을 나타낸다. 한편, 이들 각 진동성분들의 최대값을 보이는 파동의 우세/탁월 진동주파수(Hz) 및 폭풍압(dB)은 필요에 따라 주파수분석 및 소음분석시 사용되나 본 연구에서는 제외하였다.

여러 가지 요인에 의해 설치된 계측기에서 진동이 측정되지 않는 경우도 있었으나 이런 경우 대부분은 그 측정에서의 진동수준이 계측기에 설정된 트리거 수준보다 낮아 진동이 감지되지 않았기 때문으로 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 경우에는 해당 측정에서의 진동수준을 계측기의 트리거 수준(여기서는 0.5-0.7 mm/s) 이하인 것으로 간주할 수도 있다

(2) 진동수준 예측식

발파진동 전파특성을 나타내는 예측식은 계측된 현장 자료로부터 회귀 분석을 통하여 각각의 상수를 구한 후 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 계측자료를 제공근 환산거리 및 세제공근 환산거리로 자료를 처리한 후 적합도가 높은 식을 예측식으로 사용하였으며, 그 결과를 그림 4에 보였다.

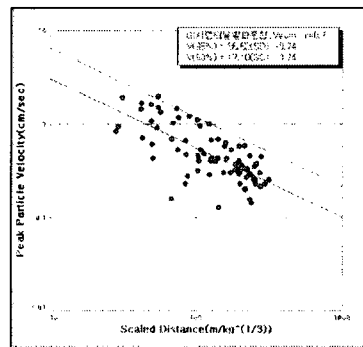


그림 4. 벡터합 진동의 회귀분석

$$PPV(sum)_{95\%} = 36.52 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-0.74}$$

$$PPV(sum)_{50\%} = 17.10 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-0.74}$$

(단위 : PPV = cm/sec, D = m, W = kg)

처리 결과는 제곱근 환산식과 세제곱근 환산식이 거의 유사하였으나 적합도가 약간 더 높은 세제곱근 환산거리를 이용한 식을 선택하였다.

진동의 평균수준을 나타내는 식(50% 신뢰구간)과 95% 신뢰구간을 갖는 예측식을 도출하였으며

이중 보수적인 영향평가를 위해 95%신뢰수준의 식을 본 현장의 진동예측식으로 사용하였다.

(3) 진동허용기준 설정

구조물의 발파진동에 대한 허용수준은 구조물의 종류에 따라서 다르며 같은 종류의 구조물이라도 구조물의 상태나 지반조건에 따라서 달라진다.

본 연구에서는 대상 구조물이 반영구적으로 유지해야 할 터널인 점을 감안하여 터널의 안정성 확보를 최우선적으로 고려하여야 하므로 가급적 보수적인 적용기준을 설정하는 것으로 하였는데

표 5. 진동측정 결과

회	1차			2차			3차								
	막장부터 이격거리 (m)	PPV (mm/s)	지발당 최대장약량 (kg)	막장부터 이격거리 (m)	PPV (mm/s)	지발당 최대장약량 (kg)	막장부터 이격거리 (m)	PPV (mm/s)	지발당 최대장약량 (kg)						
1	131.6	13.5	12.0	77.3	8.3	19.5	125	4.3	19.5						
	175.5	11.7		1	147.6		9.0	1		215	2.8				
	247.0	9.5			540.2		3.1			305	2.9				
	364.4	5.8			590.2		2.0			354	1.3				
	403.6	5.3			79.3		9.4			114	14.5				
	447.5	3.4			115.6		16.7			150	19.8				
567.3	2.5	149.6			15.2		184			1.6					
2	170.1	14.7		14.63	189.7		10.2	14.63		242	12.2	14.63			
	248.7	5.4			2		503.5			3.2, 3.7	2		277	11.1	
	303.0	4.1					548.5			3.6			280	4.6	
	373.4	4.2					603.5			2.7			307	4.8	
	547.0	2.9					647.5			1.4			332	10.1	
	631.2	3.1	692.5			2.3	382		6.9						
3	124.1	6.1	4차			747.5	2.2		4차	432			6.4	4차	
	185.2	5.3			1	797.5	2.3			1	532		4.1, 5.8		
	210.6	4.7				847.5	2.5				582		3.3, 5.9		
	253.3	3.2									637		1.6, 4.6		
	308.1	4.1									680		3.5		
	336.4	4.1				147.0	7.6				14.63		85		19.1
	381.6	3.1	150.0	5.2		117	7.1								
	4	424.7	3.1	198.0	3.8	135	10.8, 16.2								
		493.9	2.3	202.0	4.6	185	6.9								
		551.0	3.4	458.0	1.5	231	2.3, 6.7								
		635.0	3.8	462.0	1.6	285	4.1								
		5	689.4	4.5	545.0	3.8	343	4.3, 6.8							
				550.0	3.2	385	4.3								

• PPV가 2개씩 인 것은 동일지점에 2개의 계측기 설치

기존 자료들을 종합하여 과거 저자들이 채택한 바 있는 미국 교통국에서 제안된 허용진동수준 지침에서 진동에 예민한 시간대를 3~24 시간으로 수정한 안인 표 6과 같은 수준을 적용수준으로 설정하였다.

표 6. 양생콘크리트에 대한 평가기준 설정

타설후 경과시간	PPV (cm/s)
0 ~ 3 시간	5.08
3 ~ 24 시간	0.63
1 ~ 3 일	2.54
3 ~ 7 일	5.08
7 일 ~ 10 일	12.70
10 일 이상	25.40

4. 발파 영향권 분석

본 실험현장에서 주로 적용되고 있는 폭약류는 다이너마이트와 정밀폭약이며, 표 7과 같이 압질등급 및 발파조건에 따라 지발당 최대 12 kg, 14.63 kg, 19.50 kg의 폭약을 사용하고 있다.

각 장약량 별로 가장 민감한 시간대의 양생중인 콘크리트 허용수준 0.63 cm/sec에 대한 영향권은 표 8과 같이 계산되었다.

실제 계측된 파형을 분석해 보면 최대 진동 수준은 주로 심폐기 발파시 발생하므로 상기의 지발당 최대 장약량은 심폐기 및 확대공 부분의 장약 패턴에 적용할 수 있으며 외곽공 및 바닥공의 장

표 7. 현장 시험시 장약량표 (Type 3)

구분	전기 번호	공 수	공당장약량						계									
			MEGAMITE φ32×375g		MEGAMITE φ25×100g		FINEX I φ17×100g		MEGAMITE φ32×375g		MEGAMITE φ25×100g		FINEX I φ17×100g					
			*400mm		*200mm		*500mm		*400mm		*200mm		*500mm					
			ea	kg	ea	kg	ea	kg	ea	kg	ea	kg	ea	kg				
심발공	0																	
	2	8	4	1.500					32	12.00								
심발 확대공	3			0.375														
	4	3	1	0.750					3	1.13								
	5	6	2	0.750					12	4.50								
	6	8	2	0.750					16	6.00								
	7	6	2	0.750					12	4.50								
	8	6	2	0.750					12	4.50								
	9	8	2	0.750					16	6.00								
	10	13	2	0.750					26	9.75								
	11	4	2	0.750					8	3.00								
	12	4	2	0.750					8	3.00								
	13	5	2	0.750					10	3.75								
	14	3	2	0.750					6	2.25								
	15	5	2	0.750					10	3.75								
	16	5	2	0.750					10	3.75								
굴착선공	17	10	1	0.375			3	0.100	10	3.75					30	3.0		
	18	13	1	0.375			3	0.100	13	4.88					39	3.9		
	19	13	1	0.375			3	0.100	13	4.88					39	3.9		
바닥공	④	6	3	1.125					18	6.75								
	⑤	8	3	1.125					24	9.00								
	⑥	2	3	1.125					6	2.25								
합계		136							265	99.375				108	10.8			

• 천공장: 2.5 m, 굴진장: 2.0 m, 단면적: 86.20 m²

약량은 더 많아도 허용수준을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

표 8. 허용수준(0.63cm/sec)을 만족시키기 위한 막장으로부터 타설지점까지 이격거리

지발당 최대장약량 (kg)	95% 신뢰구간	현장 적용
12.0	553 m	555m
14.6	590 m	590m
19.5	650 m	650m

발파패턴이 변화되어 장약량 조건이 바뀔 경우 이격거리 산정을 용이하기 위해서는 환산거리를 이용한 기준을 사용할 수 있다. 가장 민감한 시간대의 양생중인 콘크리트 허용수준, 0.63 cm/sec을 만족시키기 위한 거리 및 장약량의 조건을 환산거리로 표현하면 다음과 같다.

$$SD = D / W^{1/3} = 241.37$$

D = 터널막장으로부터 타설지점까지 이격거리, m

W = 지발당 최대 장약량, kg

5. 양생콘크리트에 대한 검증 실험

영향권 분석을 통하여 산정된 안전 이격거리의 타당성을 검증하기 위하여 그림 5~7과 같이 발파 진동을 받는 실험용 콘크리트 블록을 터널 막장부터 일정한 거리를 두고 4지점에 타설하였다. 병행 시공시 확보하여야 할 안전 이격거리의 산정은 측정된 자료들의 벡터합 성분을 사용함으로써 안전율을 충분히 고려하였으므로 진동에 가장 예민한 시간대에 발파 진동을 가한 조건 하에서 타설된 콘크리트 블록중 일부가 설계 강도를 만족시킨다면 충분히 안전성을 제공한다고 판단할 수 있다.

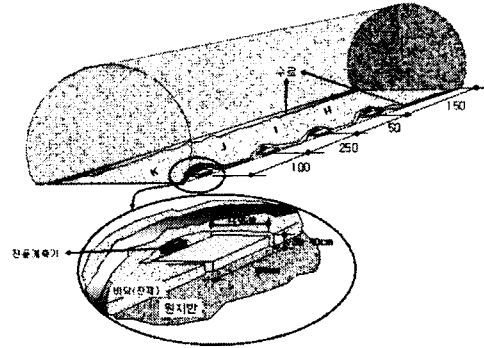


그림 5. 양생 콘크리트 타설실험 모식도



그림 6. 콘크리트 타설후 Vibrating



그림 7. 타설후 최초진동 측정

5.1 실험 방법

터널 막장으로부터 150m, 200m, 450m, 550m지점의 터널측벽부에 1.2m × 1.2m × 0.4m규격의 콘크리트 블록을 타설하였으며, 콘크리트 설계강도는 240kg/cm²이었다. 또한 진동을 받지 않은 콘크리트의 강도값을 확인하기 위하여 콘크리트 블록 제

작과 동일한 시간 및 재료를 이용하여 직경 10cm × 높이 20cm규격의 표준 원형몰드 5개를 제작한 후 28일 강도시험시까지 수중에서 양생하였다(그림 8). 한편 콘크리트 블록은 터널내에서 지속적인 진동을 받게 하였고 타설 24일후 직경 10cm 코어비트를 사용하여 각 블록마다 5개씩 코어채취를 하였다. 이후 코어의 상하면 성형과 2일 동안의 수중 보관을 거쳐 28일째 강도시험을 실시하였다(그림 9, 10).

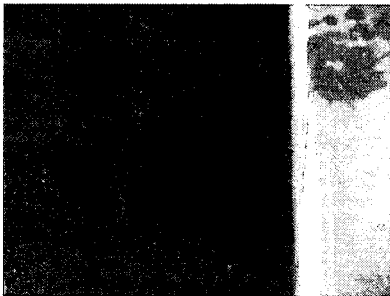


그림 8. 진동을 받지 않은 공시체



그림 9. 콘크리트 코어 채취 장면



그림 10. 채취 및 성형된 코어

콘크리트 타설 약 5시간 후에 첫 발파를 실시하였으며 이때 발생한 발파진동은 다음 표 9와 같다.

표 9. 콘크리트 블록에 대한 최초 진동측정 결과

콘크리트 블록기호	막장으로부터의 이격거리(m)	벡터합 PPV (mm/s)
H	150	5.28
	147	7.56
I	198	3.78
	202	4.59
J	458	1.52
	462	1.60
K	550	3.24
	545	3.76

• 지발당 최대장약량 = 14.63 kg

5.2 강도시험 결과

강도 측정 결과, 터널 막장으로부터 150 m, 200 m, 450 m 이격된 거리에 타설한 콘크리트의 경우 (표 10) 정상치 평균 236, 246, 248 kg/cm² 로서 150m지점을 제외하고 진동을 받지 않은 공시체(표 11)에 대한 정상치 평균 242 kg/cm²을 상회하고 있었다. 그 결과를 그림으로 도시한 것이 그림 11이다.

아울러 표 8에서 나타난 바와 같이 지발당 장약량 14.63 kg에 대한 이격거리로 제시된 590 m는 설계강도 240 kg/cm²을 만족시킬 수 있는 충분한 안전 이격 거리인 것으로 판단할 수 있었다.

그러나 550 m에 타설한 콘크리트 블록의 경우 양생중 장비 기사의 실수로 인하여 외부 충격을 여러 차례 받아 그 결과 강도는 설계강도 수준 이하로 나타났다. 이는 터널 막장으로부터의 이격 거리에 관계없이 콘크리트 타설 및 양생중 시공관리를 철저히 해야 할 필요가 있음을 보여준다.

표 10. 콘크리트 블록 강도시험 결과

위치	항목	회수	압축강도 (kg/cm ²)	이격 거리	
H	측정값	1	239	150 m	
		2	278		
		3	224		
		4	215		
		5	246		
	평균치	5개전체	240		
		정상치	10%상단		264
			10%하단		216
			상하2개제외		236
		상위3개	254		
I	측정값	1	240	200 m	
		2	186		
		3	259		
		4	270		
		5	238		
	평균치	5개전체	239		
		정상치	10%상단		263
			10%하단		215
			상하2개제외		246
		상위3개	256		
J	측정값	1	247	450 m	
		2	253		
		3	266		
		4	218		
		5	245		
	평균치	5개전체	246		
		정상치	10%상단		270
			10%하단		221
			상하2개제외		248
		상위3개	255		
K	측정값	1	222	550 m	
		2	216		
		3	221		
		4	181		
		5	206		
	평균치	5개전체	209		
		정상치	10%상단		230
			10%하단		188
			상하2개제외		214
		상위3개	220		

표 11. 진동을 받지않은 공시체 시험결과

구 분	수중양생		
	기호	압축강도 (kg/cm ²)	
측정값	NW-1	241	
	NW-2	239	
	NW-3	247	
	NW-4	245	
	NW-5	221	
평균치	전체	238	
	정상치	10% 상단	262
		10% 하단	215
		상하 2개 제외	242
	상위 3개	244	

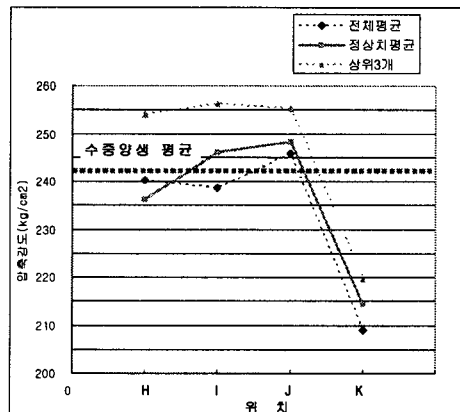


그림 11. 콘크리트 강도시험 결과

6. 결론

본 연구에서는 터널 굴착을 위한 발파와 본체 구조물(공동구, 라이닝 등)을 병행 시공할 경우, 발파시 발생하는 진동이 구조물에 미치는 영향 여부를 검토하여 발생할 수 있는 문제점을 사전 파악하고, 시공시 발파작업으로부터의 안전성을 확보할 수 있는 발파작업 및 시공 지침을 마련하기 위한

목적으로 수행되었다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 발파-구조물 병행시공을 위한 콘크리트 타설 시 양생중인 콘크리트에 대한 적용기준은 국내외 기준과 기존 자료들을 종합하여 보수적인 수준으로서 진동에 가장 예민한 시간대를 3~24 시간으로 하는 기준을 설정하였다.

2) 대상 터널 현장에서 발생하는 발파진동 발생 특성을 평가하기 위하여 총 10 회의 굴진발파에 대하여 130 개소 이상의 측정에서 계측작업을 실시하였으며 계측자료들을 처리한 결과 발파시 발생하는 최대진동수준을 예측하기 위한 식은 다음과 같이 유도되었다.

$$PPV(sum)_{95\%} = 36.52 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-0.74}$$

$$PPV(sum)_{50\%} = 17.10 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-0.74}$$

여기서, PPV = cm/sec(벡터합진동 수준)

D(거리) = m, W(장약량) = kg

상기 식중 대상 구조물이 반영구적으로 유지해야 할 도로터널인 점을 감안하여 터널의 안정성 확보를 최우선적으로 고려하여야 하므로 보수적인 적용기준으로서 벡터합 진동의 95% 신뢰구간 식을 채택하였다.

3) 미시령 터널 건설 현장에서 주로 적용되고 있는 현행 발파 패턴 별로 가장 민감한 시간대의 양생중인 콘크리트 허용수준, 0.63 cm/sec을 만족시키기 위한 이격거리를 산정하면 다음과 같다.

지발당 장약량	허용수준을 만족시키기 위한 이격거리 (터널막장으로부터 타설지점까지)
12.0 kg	555 m
14.6 kg	590 m
19.5 kg	650 m

4) 영향권 분석을 통하여 산정된 안전 이격거리의 타당성을 검증하기 위하여 발파진동을 받는 실험용 콘크리트 블록을 터널 내 4개소를 선정하여 설치하고, 진동에 가장 예민한 시간대에 발파 진동을 가한 조건 하에서 타설된 콘크리트 블록의 28일 후 강도를 측정하였다. 강도 측정 결과, 1개소를 제외하고 이격거리 이내의 콘크리트 블록 모두 설계강도 240 kg/cm²을 만족시킬 수 있는 것으로 나타나고 있어 충분한 안전 이격 거리인 것으로 판단할 수 있었다.

참 고 문 헌

- Hulshizer, A.J. & Desai, A.J., 1984, Shock Vibration Effects on Freshly Placed Concrete, J. Construction Engineering & Management, v.110, n.2, ASCE
- Esteves, J.M., 1978, Control of Vibrations Caused by Blasting, Baboratorio De Engenharia Civil, Memoria No.498, Lisboa
- Vibratech, 1980, Vibration Study
- 권영웅 외, 1990, 진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향, 대한주택공사 주택 연구소 기술보고서
- 정동호, 1994, 발파진동이 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향, 박사학위논문, 강원대학교
- Double & Hellowell, 1977, The Hydration of Cement, Nature, v.261
- 권광수, 류창하 외, 1996, 발파진동이 콘크리트 구조물의 건축에 미치는 영향평가 및 발파설계 지침 수립연구, 현대산업개발(주)&한국자원연구소
- 신일재, 이정인, 김양균, 안형준, 1999, 발파진동이 양생중인 라이닝콘크리트의 강도에 미치는 영향에 관한 실험 연구, 제 73회 학술발표회