

터널굴착시 발파-라이닝 병행시공을 위한 실험 연구

유정훈, 김양균, 안형준, 유진오 (코오롱건설(주))

최병희 (한국지질자원연구원)

1. 서 론

국토의 3/4이상이 산악지형으로 이루어진 우리나라 현실에서 국토의 균형있는 발전과 급증하는 물류수송량의 수용, 산업 및 여가활동 인구의 이동범위 확대 등의 이유로 도로, 철도, 터널과 같은 사회 간접시설의 건설이 꾸준히 증가하고 있다.

최근 들어서는 도로건설에 따른 주변 자연환경 훼손 최소화를 위한 환경친화적 고속도로 건설 정책 추진으로 자연훼손을 최소화 할 수 있는 1km 이상의 장대터널 건설이 급격히 증가하고 있다. 이러한 장대터널의 건설은 산악지 절개나 도로의 곡선화를 방지하여 안전하고 환경친화적인 도로건설을 위해서는 필수적인 요소이다.

그러나 터널시공의 특성상 길이에 따른 공기의 증가와 공사비의 증대가 큰 부담이 되고 있으며 장대터널의 시공과정에서 각종 민원, 설계변경 등으로 인하여 공사지연이 발생하는 경우가 많다. 이러한 장대터널의 공사지연은 개별 현장의 문제에 그치는 것이 아니라 전체 사업의 일정에 막대한 영향을 미치게 되고 커다란 경제적 손실을 야기하게 된다. 따라서 공사지연에 대비한 다양한 공기단축기법의 개발이 장대터널의 주요한 이슈가 되고 있는 실정이다.

현재 NATM으로 시공되는 장대터널의 공정은 크게 발파굴착, 라이닝 타설, 설비 및 포장의 3 단계로 구분할 수 있다. 특히 터널의 3대공정 중 발파굴착과 라이닝 타설 공정은 전체 터널공사 기간의 70% 이상을 차지하므로 이 두공정을 동시에 병행시공이 가능하다면 터널공사기간을 크게 단축할 수 있다. 하지만 지금까지 국내의 도로터널공사에서는 발파작업에 의한 암반굴착이 완료된 후 콘크리트 라이닝 시공이 이루어져 왔는데, 이같은 작업공정은 발파작업에서 발생하는 발파 진동이 타설되는 콘크리트 라이닝에 균열을 발생시키거나 강도를 저하시킬 수도 있으므로 이를 예방하기 위한 것이 주된 이유중의 하나였다.

따라서 본 연구의 목적은 터널굴착을 위한 발파와 라이닝 등 본체 구조물을 병행시공 할 경우 터널발파시 발생하는 진동이 콘크리트 라이닝 등 구조물에 미치는 영향 여부를 알아보고 발파작업으로부터 안전성을 확보하기 위한 안전이격거리 확보방안 및 병행시공 실적용시 작업환경개선을 통해 시공성을 확보할 수 있는 방안을 소개하고자 한다.

2. 연구사례 고찰

터널굴진과 터널내 라이닝 및 본체 구조물을 병행시공할 경우 터널발파로 인해 발생하는 지반 진동이 구조물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 국내·외 허용기준, 관련사례 및 자료들을 조사하였다. 특히 병행시공이라는 특수한 상황은 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 대한 평가를 필요로 한다.

콘크리트의 강도에 영향을 미치는 요소로는 성분, 재료의 취급, 타설방법, 양생방법, 강도시험방법 등이 있다. 이중 가장 기본적인 요소로는 성분, 즉 주요재료인 시멘트, 골재, 물, 혼화제 등과 같은 콘크리트 구성성분의 공극성에서부터 물-시멘트 비와 같은 정량적인 배합비, 혹은 배합의 결과로써 나타나는 수화정도 등을 들 수 있다. 강도의 발현에서 이와같은 재료의 개별적인 특성 및 배합비의 특성이 가장 중요하며 진동의 영향은 콘크리트를 구성하는 성분들이 조직화되어 경화되는 과정에서 발생한다고 볼 수 있다.

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

일반적으로 진동이 양생중인 콘크리트에 주는 영향은 콘크리트의 양생시점이나 가해진 진동속도의 크기에 따라 다르게 나타난다. 따라서 각각의 연구결과를 바탕으로 제안된 양생중인 콘크리트에 대한 진동허용기준은 다음과 같다.

표 1은 미국양회학회에서 제시하고 있는 양생 시간대별 콘크리트에 대한 허용진동속도 기준으로, 0-12 시간 사이의 허용진동속도가 가장 낮은 0.254cm/sec로 제시되어 있다(R.V. WHitman & B.B.Seed, 1970).

또한 미국 교통국 산하 National Highway Institute에서 발파진동을 포함하는 진동에 대해 제시한 양생중인 콘크리트에 대한 허용기준이 표 2에 제시되어 있는데, 가장 낮은 허용기준이 제시된 재령은 4-24 시간으로 허용진동속도는 0.63cm/sec이다.

표 1. 미국양회학회가 제안한 허용진동수준

타설 후 경과시간	최대진동속도(cm/sec)
0 - 12 시간	0.254
12 - 24 시간	1.27
1 - 5일	1.27 - 5.08 (타설 후 시간과 비례하여 증가)
5일 이상	5.08

표 2. 미국 교통국의 양생 콘크리트에 대한 허용진동수준 지침(1991)

타설 후 경과시간	최대진동속도(cm/sec)
0 - 4 시간	5.08
4 - 24 시간	0.63
1 - 3 일	2.54
3 - 7 일	5.08
7 - 10 일	12.7
10 일 이상	25.4

국내에는 아직까지 양생중인 콘크리트의 재령에 따른 허용진동기준이 제안되어 있지는 않으나, 한국자원연구소에서는 표 2에 제안된 허용기준을 채택하여 연구를 수행한 바 있으며, 보수적인 수준으로서 미국 교통국에서 제안된 허용진동수준 지침에서 진동에 예민한 시간대를 3-24 시간으로 수정한 안이 채택된 예(류창하 등, 1996)가 있다.

본 연구에서는 병행시공을 위한 허용진동수준을 미국 교통국과 국내 국책연구기관에서 제시한 허용수준을 반영하여 최소치인 0.63cm/sec로 설정하였다.

3. 현장실험

현장실험은 우선 국내의 기준, 기존 연구사례를 토대로 발파진동이 라이닝 등 구조물과 양생 콘크리트에 영향을 미치지 않는 허용 진동한계치를 설정한 후, 실제 터널발파시 나타나는 진동을 계측한 데이터를 회귀분석을 통해 진동추정식을 산출하고 이를 이용하여 허용수준을 만족시킬 수 있는 라이닝 타설지점까지의 최대이격거리(안전거리)를 산정하게 된다.

또한 발파영향권 분석을 통하여 산정된 안전이격거리의 타당성을 검증하기 위해 터널내부에 일정한 거리별로 4개의 모형라이닝을 타설한 후 진동에 가장 예민한 시간대에 최초 발파를 실시하고 계속해서 28일 동안 일상적인 발파작업하에서 양생한다. 28일 강도 시험을 위해 모형라이닝에서 코어를 채취한 후 표준공시체와 함께 실험을 실시하여 안전이격거리에 대한 타당성을 검증한다.

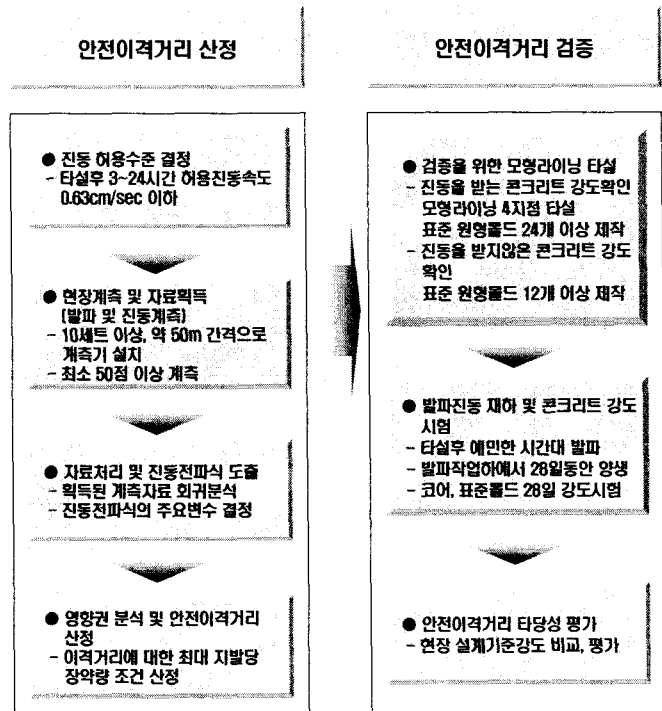


그림 1. 실험순서 및 내용

3.1 현장개요

본 실험은 국도 1호선 두마-반포간 도로확장 및 포장공사 중 계룡터널에서 실시되었다. 계룡터널은 대부분 계룡산 국립공원을 통과하며 기술적, 경제적, 환경적 측면에서 유리한 선형을 선정하는 과정에서 계획된 터널로서 합리성 및 경제성 등의 관점에서 터널공법을 검토하여 안전하고 편리한 교통을 제공할 수 있기 위해 시공되는 도로터널이다(그림 2).

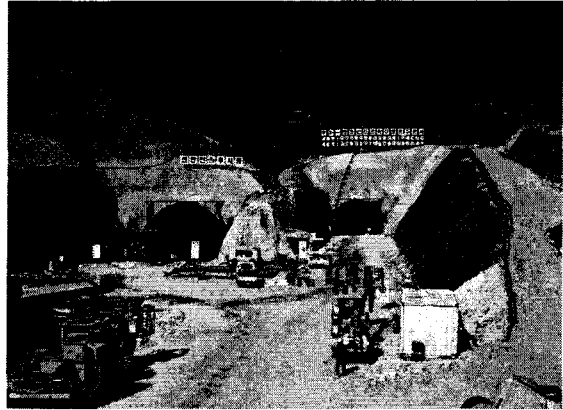


그림 2. 현장전경

본 지역의 지질은 주로 선캄브리아기의 변성암류와 시대미상의 변성심성암류, 그리고 이들을 관입한 중생대의 화강암류 내지 제 3기의 각종 맥암류로 분류되고 이들을 부정합으로 덮은 신생대 제 4기의 충적층이 현 하천 주변을 따라 발달되어 있다.

- 터널 길이 : 계룡터널 2,600m
- 공사 기간 : 2003. 07 - 2006. 12
- 터널 제원 : 10.406m(폭) × 8.688m(높이)
- 실험 위치 : 시점측 두마방향

3.2 현장계측 및 영향권 분석

실험용 모형라이닝 타설지점을 결정하기 위하여 터널 막장으로부터 일정한 거리마다 진동측정기를 설치하여 진동을 측정하였다. 현장의 발파조건 및 지반조건이 동일하지 않으므로 가능한 다양한 조건을 반영할 수 있도록 공사 진행 상황 및 조건에 따라 총 3차로 나누어 계측을 실시하여 자료를 획득하고자 계획하였다.

굴진중인 상·하행선 시점부의 터널 바닥을 대상으로 각 발파별로 10개에서 11개 측정점을 적절한 간격(평균 50m 간격)으로 두었으며 전체적으로 총 12차례의 굴진발파에 대하여 총 123 측정점에서 진동을 계측하여 진동예측식을 도출하였다.

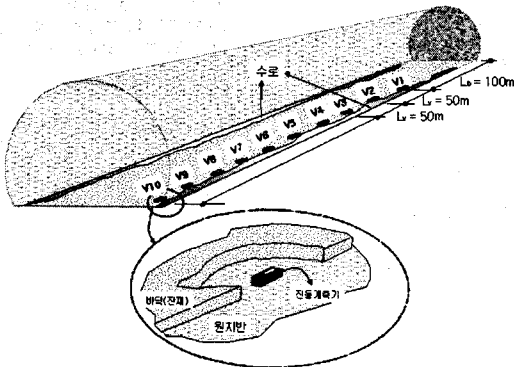


그림 3. 현장계측방법

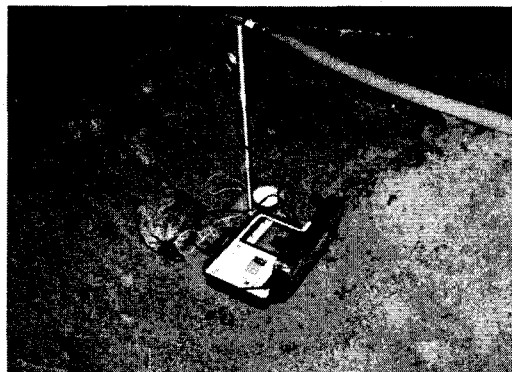


그림 4. 터널바닥부에 설치된 진동계측기

발파진동 전파특성을 나타내는 예측식은 계측된 현장 자료로부터 회귀분석을 통하여 각각의 상수를 구한 후 적합도가 높은 세계급 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. 다음 그림 5는 벡터합 진동의 회귀분석을 나타낸 그림이며, 그림 6은 도출된 진동예측식이다.

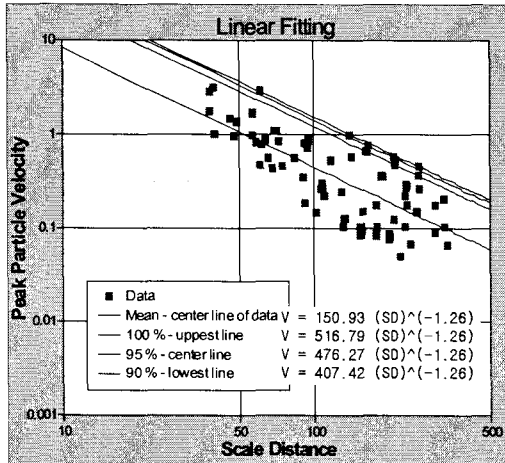


그림 5. 벡터합 진동의 회귀분석

$$PPV(sum)_{95\%} = 476.27 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.26}$$

$$PPV(sum)_{50\%} = 150.93 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.26}$$

(단위: $PPV = cm/sec$, $D = m$, $W = kg$)

그림 6. 벡터합 진동수준 예측식

본 실험현장에서 주로 적용되고 있는 현행 발파패턴에 의하면 폭약류는 다이너마이트와 정밀폭약이며, 발파조건에 따라 지발당 최대 10.5kg의 폭약을 사용하고 있다. 따라서 지발당 최대장약량에 따라 가장 민감한 시간대의 양생중인 콘크리트 허용수준 0.63cm/sec에 대한 영향권을 계산하면 허용진동수준을 만족시킬 수 있는 영향권은 422m로 분석되었다.

표 3. 허용수준(0.63cm/sec)을 만족시키기 위한 막장으로부터 타설지점까지 이격거리

지발당 최대장약량 (kg)	50% 신뢰구간 (평균진동예측식 사용)	95% 신뢰구간	현장 적용
10.5	169 m	422 m	500 m

표 4. 환산거리 기준 ($V = 0.63cm/sec$ 을 만족시키기 위한 조건)

$$SD = D/W^{1/3} = 192.55$$

$D =$ 터널막장으로부터 타설지점까지 이격거리, m
 $W =$ 지발당 최대 장약량, kg

3.3 모형라이닝 검증실험

도출된 진동추정식을 이용하여 영향권 분석을 통해서 산정된 안전이격거리의 타당성을 검증하기 위해 발파진동을 받는 실험용 콘크리트 모형라이닝을 터널내에 설치하였다. 설치지점은 기존의 사례 분석을 토대로, 본 연구에서 제시한 양생중인 콘크리트에 영향을 주지 않는 지점과 피해

여부를 확인하기 위한 지점으로 분류하여 총 4곳에 콘크리트 모형라이닝을 제작하였다.

3.3.1 양생콘크리트 실험조건

타설지점은 전단면 발파가 진행중인 막장면의 후방에 해당하는 터널의 하단부 우측부분 4곳에 거푸집을 제작한 후 발파 4시간 전까지 콘크리트 모형라이닝을 타설하였다. 그림 7은 계룡터널 표준설계단면도에 모형라이닝을 표현한 그림이다.

타설지점 및 모형라이닝 제원은 표 5와 같으며 콘크리트 거푸집의 크기는 차후 충분한 수량의 코어채취와 현장 굴착작업에 영향이 없도록 제작하였다.

표 5. 모형라이닝 타설지점 및 제원 (계룡터널)

기호	막장으로부터 타설지점 (m)	콘크리트 모형라이닝 제원
A	145	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 모형라이닝 크기 : 3m×3m×2m (가로×세로×높이) ▪ 타설두께 : 30cm ▪ 설계강도 : 240kg/cm²
B	245	
C	445	
D	545	

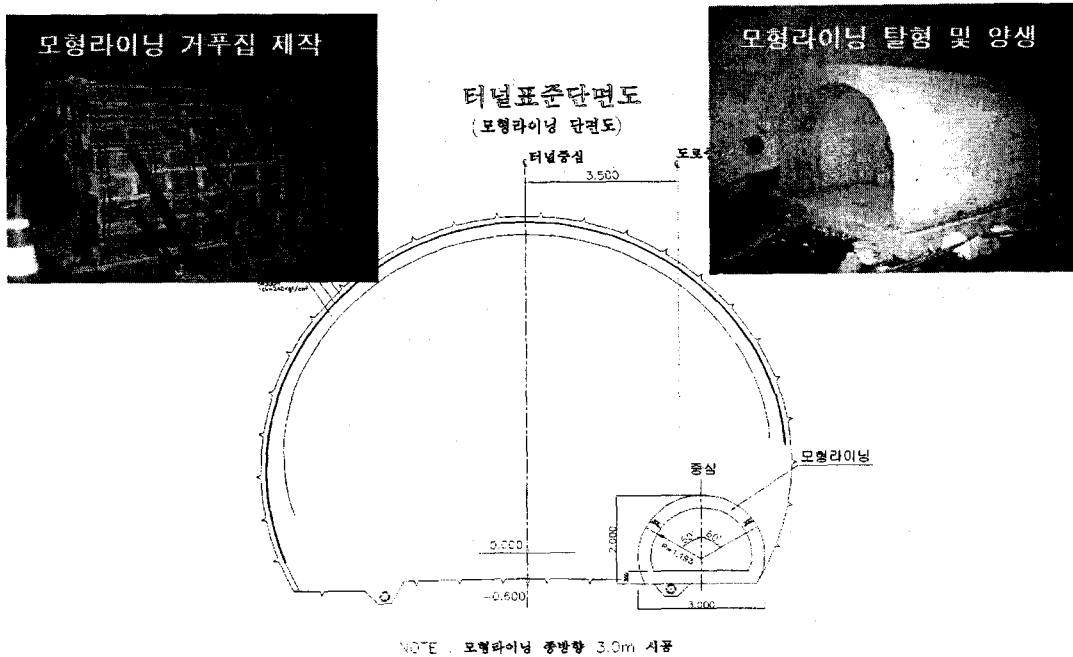


그림 7. 모형라이닝 단면도

한편 현장에서 모형라이닝 타설작업이 진행되는 동안 모형라이닝에서 코어링을 통해 채취한 시료들과 비교분석할 목적으로 타설하는 콘크리트 레미콘에서 일부를 이용하여 원형 표준몰드를 제작하였다. 표준몰드는 발파진동 영향을 받는 몰드와 진동을 받지 않은 몰드로 구분하여 발파진동 영향을 받는 몰드인 경우 터널내부 모형라이닝당 10개씩 총 40개의 공시체를 각각의 모형라이닝

내부에 양생하였다.

또한 진동을 받지 않은 기준시료로 사용하기 위해 제작된 총 21개의 몰드 가운데 14개는 수중양생 하였고, 나머지 7개는 터널내 진동의 영향을 받지 않도록 막장면으로부터 1km 이상 떨어진 지점에 보관하여 양생하였다.

3.3.2 모형라이닝 발파진동 측정

콘크리트 모형라이닝 타설이 완료된 다음, 4시간 경과후에 최초발파를 실시하였으며 진동계측은 라이닝 타설후 4시간, 20시간, 28일 발파진동을 측정하였다.

발파진동측정기 설치는 타설된 모형라이닝 바닥부에 암석용 드릴로 구멍을 천공한 후, 진동측정기 바닥에 있는 3개 또는 4개의 스파이크를 끼워서 고정시켜 측정을 실시하였다.

3.3.3 콘크리트 강도시험

콘크리트 타설후 27일째 되는 날 터널내 타설된 4개의 콘크리트 모형라이닝에서 각각 7개씩 모두 28개의 코어를 채취하여 압축강도시험을 실시하였다.

우선 발파진동 영향을 받지 않고 시험실내에 수중양생한 공시체인 경우, 28일 압축강도 평균값은 279kg/cm²로 현장 라이닝 설계기준강도 240kg/cm² 대비 약 116%로 더 크게 나타났다.

콘크리트 타설후 28일동안 일상적인 발파작업 상태에서 콘크리트 모형라이닝 내부에 양생시킨 표준공시체인 경우 28일 강도를 시험한 결과, C지점 및 D지점에서의 표준공시체는 설계기준강도보다 10%-25% 크게 나타난 반면 A지점과 B지점에서 양생시킨 표준공시체 강도는 설계기준강도 보다 작게 나왔다. 이는 타설된 지점의 진동영향과 A지점과 B지점 모형라이닝 거푸집 제거 당시 내부에서 양생하던 몰드에 외부충격으로 인해 강도가 저하된 것으로 판단되므로 터널막장으로부터의 안전이격거리 확보 및 콘크리트 타설과 양생중 시공관리를 철저히 해야 할 필요가 있음을 보여준다(그림 9).

한편 모형라이닝에서 채취한 코어 28일 압축강도 결과를 보면 평균값에 있어서 최대 및 최소값의 차이가 약 15kg/cm² 정도이며 전체적으로 유사한 강도값을 나타내고 있다. 터널막장으로부터 이격된 거리별로 보면 A지점(145m), B지점(245m), D지점(545m) 콘크리트 압축강도는 현장코어 채취에 의한 강도 기준대비 평균강도 이상으로 나타났으며 C지점(445m)에 타설한 모형라이닝 코

표 6. 모형라이닝에 대한 진동측정 결과

모형라이닝 기호	측정일시	막장으로부터 이격거리(m)	PPV (cm/sec)
A	타설후 4시간	146.6	0.881
	타설후 20시간	150.7	0.824
	타설후 28일	322.0	0.468
B	타설후 4시간	246.6	0.695
	타설후 20시간	250.7	0.557
	타설후 28일	422.0	0.359
C	타설후 4시간	446.6	0.322
	타설후 20시간	450.7	0.367
	타설후 28일	622.0	0.152
D	타설후 4시간	546.6	0.154
	타설후 20시간	550.7	0.165
	타설후 28일	722.0	0.095

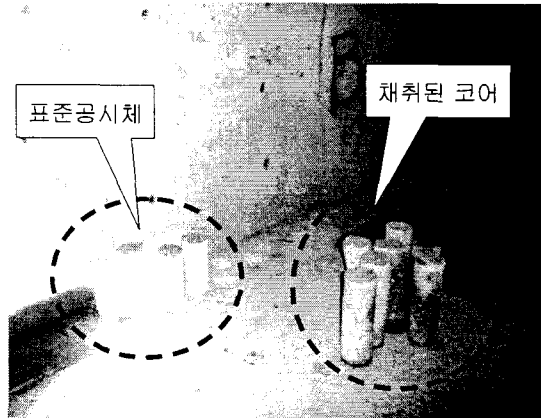


그림 8. 표준공시체 및 채취된 코어

어강도인 경우 설계강도에 다소 못미치는 결과를 보였는데 이는 현장코어 채취과정에서 일부 공시체의 선형과 형상 등이 압축강도에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다(그림 10).

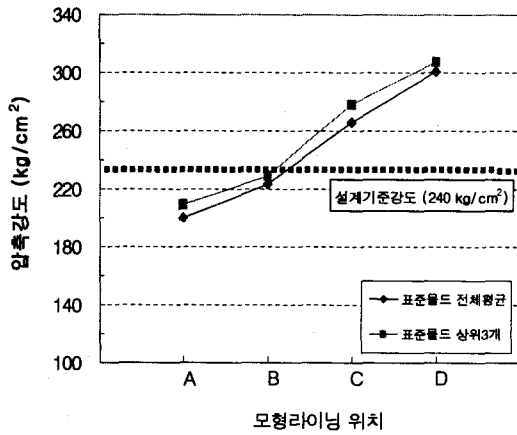


그림 9. 표준몰드 압축강도시험 결과

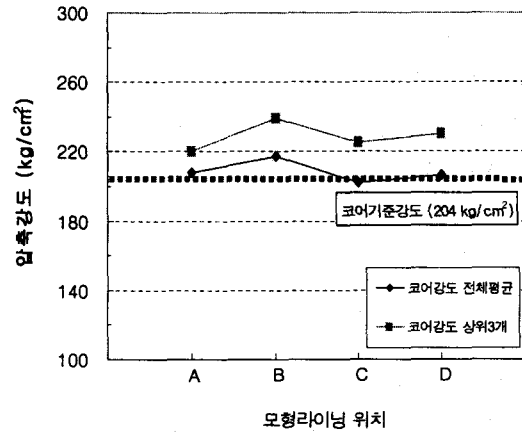


그림 10. 코어 압축강도시험 결과

표 7. 강도시험 결과 (표준몰드, 코어강도)

구 분	A		B		C		D		표준몰드	
	145m		245m		445m		545m			
	표준 몰드	코어 강도	표준 몰드	코어 강도	표준 몰드	코어 강도	표준 몰드	코어 강도	수증양생	
28일 강도 (kg/cm ²)	1	214	200	233	242	266	185	303	199	277
	2	189	211	216	211	268	182	291	230	274
	3	214	184	219	227	277	247	305	182	278
	4	199	219	224	208	247	234	305	224	283
	5	185	216	230	247	268	195	311	238	289
	6	198	200	215	204	289	182	291	175	269
	7	200	225	224	182	245	187	299	199	282
	평균	200	208	223	217	266	202	301	207	279
	기준강도	240	204	240	204	240	204	240	204	240
	기준대비	83%	102%	93%	107%	111%	99%	125%	101%	116%
참 고	<ul style="list-style-type: none"> ■ 현장 콘크리트 라이닝 설계기준강도 : 240kg/cm² ■ 코어 채취에 의한 강도인 경우 - 설계기준강도는 다음과 같다. <ul style="list-style-type: none"> ▶ 출처 : 콘크리트 구조설계기준 2.3.3(4) ▶ 평균강도 = 설계강도의 85%(204kg/cm²) 이상일 것 									

4. 현장적용

병행시공을 위한 발파영향권 분석 및 모형라이닝 검증실험을 통해 제시된 안전이격거리를 토대로 시공중인 터널에서 발파-라이닝 병행시공을 실시하였다. 이격거리는 최대 지발당 장약량이 10.5kg에서는 최소 약 500m 이상으로 하였다.

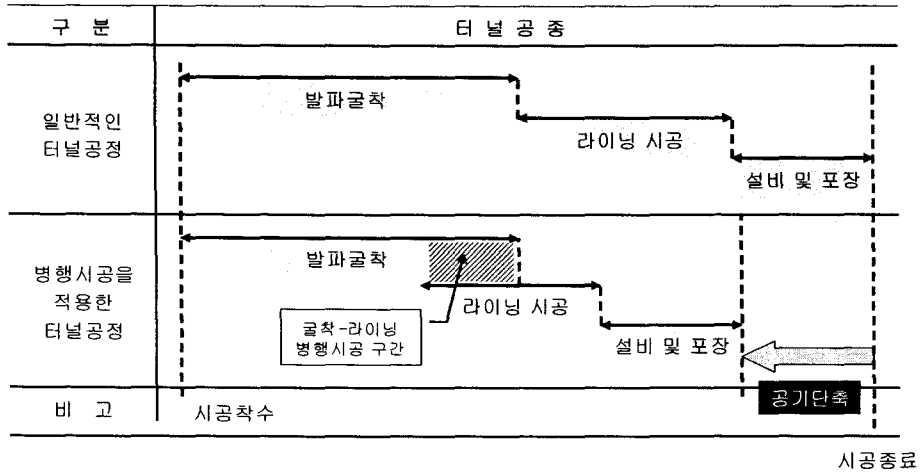


그림 11. 터널공정 비교분석

굴착과 라이닝 병행시공은 라이닝 시공 중에도 막장에서는 발파굴착이 이루어지므로 굴착시 필요한 환기 및 급수, 전기설비 등 터널내 설비의 운용이 중요하다. 콘크리트 라이닝 시공을 위해서는 시공하고자 하는 구간에 부직포와 방수시트를 붙이고 라이닝 폼을 설치한 후, 콘크리트 라이닝을 타설하는데 이때 터널 굴착시 필요한 터널벽면을 따라 기설치되어 있는 환기를 위한 급기덕트, 급수관, 전기배선을 제거하여야 한다. 막장 굴착작업을 위하여 필요한 상기의 부속설비는 횡갱과 반대편 터널을 이용하여 이동 설치하며, 환기의 효율성을 증대시키기 위하여 집진기를 설치하였다. 막장후방에서의 콘크리트 구조물 시공시 쾌적한 작업환경을 확보하기 위하여 추가로 차단막을 설치하여 공사중 발생하는 분진 및 매연의 흐름을 차단하였다(그림 12).

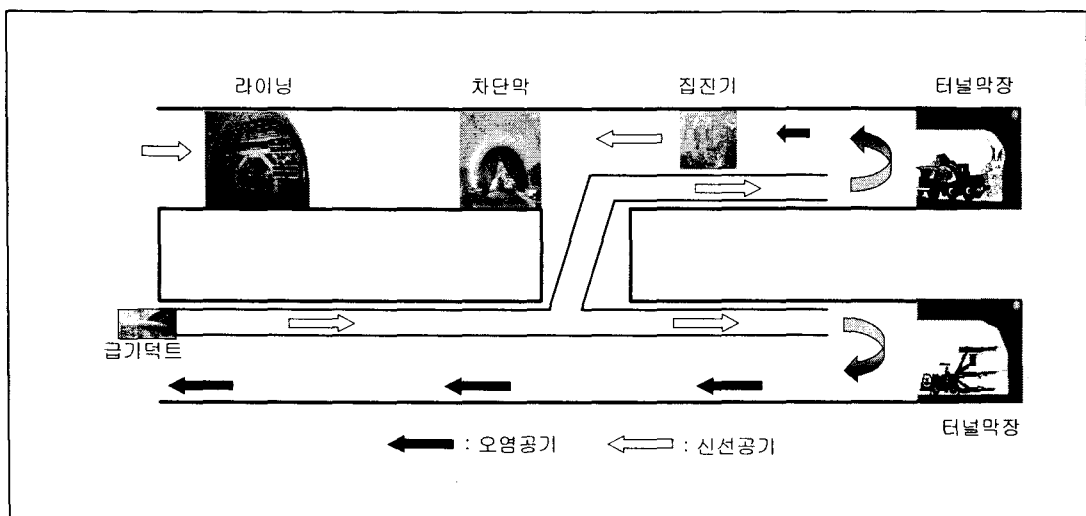


그림 12. 병행시공시 환기방식

5. 결 론

본 연구는 계룡터널 발파-라이닝 병행시공과 관련하여 터널 굴착을 위한 발파와 라이닝 등 본체 구조물을 병행시공할 경우 터널 발파시 발생하는 진동이 구조물에 미치는 영향에 대하여 현장 실험을 수행하였으며 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 국내외 연구 및 시공사례를 분석한 결과, 병행시공시 양생중인 콘크리트에 영향을 미치지 않는 허용진동수준은 0.63cm/sec로 설정하였으며, 현장발파에 대한 진동속도 예측식을 도출하기 위해 총 12회의 굴진발파에 대하여 123 측정점을 계측하였다.
- 2) 도출된 진동예측식과 지발당 최대장약량 10.5kg을 적용하였을 경우 허용진동수준을 만족시킬 수 있는 영향권은 422m로 분석되었다.

지발당 최대 장약량	허용수준을 만족시키기 위한 이격거리 (터널막장으로부터 타설지점까지)
12.0 kg	441 m
10.5 kg	422 m
8.0 kg	385 m

- 3) 진동에 가장 예민한 시간대에 발파 진동을 가한 조건하에서 타설된 모형라이닝 강도시험결과 표준공시체인 경우 모형라이닝 타설된 지점에 따라 터널막장으로부터 250m 이하 지점에서 제작하여 양생한 공시체는 진동영향과 외부충격으로 강도가 저하되는 경향이 나타났으며 400m 이상에 제작한 공시체는 설계강도 기준대비 만족하는 것으로 나타났다. 또한 모형라이닝에서 채취한 코어 28일 압축강도는 타설지점에 따라 전반적으로 유사한 강도값을 보였으며 1개소를 제외하고 이격거리 이내의 콘크리트 라이닝 모두 기준대비 만족시킬 수 있는 것으로 나타나고 있어 충분한 안전이격거리인 것으로 판단할 수 있었다.
- 4) 병행시공 현장적용시 터널내 환기문제와 부속설비 처리는 횡갱(피난연결통로)을 이용하여 이동, 설치하였으며 추가적으로 집진기와 차단막을 설치하여 작업환경을 개선하였다.

현재 병행시공과 관련하여 현장 라이닝 실제 시공현황을 살펴보면, 실험결과에서 산정한 안전이격거리를 기준으로 각 공정의 상호간섭을 최소화할 수 있는 라이닝 시공 착수시점을 선정하여 병행시공을 실시한 결과 현장 터널 발파굴착 완료시점이 2006년 2월이었으나 2005년 11월부터 라이닝을 시공함으로써 콘크리트 라이닝 시공시기를 약 3개월 정도 단축할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 05건설핵심 D03)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

■ 참고문헌 ■

1. 권광수, 류창하 외, 1996, 발파진동이 콘크리트 구조물의 건축에 미치는 영향평가 및 발파설계 지침 수립연구, 현대산업개발(주) & 한국자원연구소.
2. 신일재, 이정인, 김양균, 안형준, 1999, 발파진동이 양생중인 라이닝 콘크리트의 강도에 미치는 영향에 관한 실험 연구, 한국자원공학회 추계학술발표회 논문집, pp. 67-70.
3. 류창하, 최병희, 김양균, 유정훈, 2003, 터널발파-구조물 병행시공을 위한 영향평가 연구, 대한화약발파공학회지, 제21권, 제4호, pp. 11-21.
4. 유지오, 2005, 공사중 환기설비, 한국터널공학회지 터널기술 vol.7, No.1, pp. 12-31.
5. 미시령터널 굴진발파-구조물 병행시공 영향평가 연구보고서, 2003, 한국지질자원연구원.
6. 계룡터널 발파-구조물 병행시공을 위한 실험 연구보고서, 2005, 코오롱건설(주).