

NATM터널 굴착 · 라이닝 동시시공 공법

Construction Method of Concrete Lining in Parallel with Excavation in NATM tunnel

김장득* · 유영선** · 이태언***, 손종철****, 강상윤***** · 유성진***** · 심상운***** · 김찬수*****
Kim, Jang Deuk · Ryoo, Young Sun · Lee, Tae Eon · Son Jong Chul · Kang, Sang Yoon · Yoo, Sung Jin · Sim, Sang Woon · Kim, Chan Soo

1. 서론

우리나라는 국토의 대부분이 산악지형으로 구성되어 있으며 도심지역은 개발에 따른 기존 건물의 보상 문제 등으로 인해, 도로·철도 등의 SOC사업을 수행함에 있어 터널의 중요성이 부각되고 있다. 최근 주행성을 확보하고 친환경적인 도로를 건설하기 위하여 3km 이상의 장대터널 건설이 급증하고 있으며, 특히 최근 서울시와 경기도에서 계획 중인 대심도 철도(GTX)와 도로 등을 건설하기 위해서는 연장이 수십 km에 이르는 장대 터널의 건설이 요구된다. 또한 장대터널은 주행속도를 향상시키기 위하여 노선을 직선화하고 산악지 절개 등을 통한 산림자원의 훼손을 방지하기 위하여 필수적인 요소이다.

그러나 터널 시공의 특성 상 연장이 증가함에 따라 공기 및 공사비가 크게 증가하게 되고 이는 전체 사업의 일정 및 경제적 측면에 막대한 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 시공 중에 발생하는 각종 민원 및 이용자의 불편함과 경제적 손실은 공사 기간이 늘어날수록 증가하게 된다. 이에 따라 장대터널 시공의 공기단축이 중요한 이슈로 떠오르고 있다.

우리나라에서 일반적으로 건설되는 NATM터널은 굴착 완료 후 라이닝 콘크리트 타설을 하고 있다. 순차 시공의 경우 굴착 완료 후 라이닝 시공을 위해 별도의 공기가 소요되며, 또한 라이닝 시공 전까지 터널 입·출구 및 취약 지반구간의 안정성 확보에 어려움이 있다. 따라서 굴착·라이닝 동시 시공법은 굴착 후 라이닝 시공까지의 시간을 감소시켜 공기를 단축할 수 있을 뿐만 아니라 시공 중 터널의 안정성을 향상시킬 수 있으며, 한편으로 장대화 되고 있는 국제적 터널 trend에 맞는 선진 기술을 확보하는데 도움이 될 것이다. 그러나 굴착과 라이닝을 동시에 시공하기 위해서는 작업차량의 진출입 및 안전을 위한 라이닝 폼을 제작하고, 근로자의 쾌적한 작업 여건을 위하여 환기 설비를 개선할 필요가 있다.

본 고에서는 경주-감포2국도건설공사 현장의 굴착·라이닝 동시시공 계획 및 기술적 검토 사항에 대하여 소개하고자 한다. 굴착·라이닝 동시시공 시 라이닝 폼, 환기설비, 라이닝 콘크리트 타설 이격 거리 및 변위 수렴판단 등이 검토되어야 한다. 따라서 굴착·라이닝 동시시공 공법을 적용하여 시공 중·후에 발생하는 문제점을 분석하고 시공방법을 개선한다면, 향후 건설되는 도로 현장의 굴착·라이닝 동시시공 공법을 적용하는데 있어 경제적, 기술적으로 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

2. 굴착·라이닝 동시시공 사례 연구

일반적인 NATM터널에서는 굴착을 완료한 후에 콘크리트 라이닝 타설 작업을 착수한다. 이는 라이닝 폼에 의하여 굴착 장비 및 버력처리 장비 등의 통행이 불가능하고 갱내의 오염된 공기로 인한 후방작업의 어려움과 발파 진동으로 인한 라이닝 구조체의 손상을 방지하기 위해서 굴착을 완료한 후 라이닝 콘크리트를

* 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 경주-감포2국도건설공사 현장대리인(E-mail : jdk8703@samsung.com) -발표자
** 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 경주-감포2국도건설공사 공사팀장(E-mail : arang11@samsung.com)
*** 정회원 · (주)수성엔지니어링 경주-감포2국도건설공사 책임감리원
**** 정회원 · 부산지방국토관리청 도로시설국장, 도로공사과장, 지원업무수행자, 계획업무수행자
***** 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 토목공사파트장

순차적으로 시공을 한다고 보면 되겠다. 본 공법에서 갱내 작업여건은 라이닝 폼을 특수제작하고 갱내 오염 물질을 정화시킴으로서 모든 터널에 적용이 가능하겠으나 발파 진동이 라이닝 구조체에 영향을 미치지 않는 적절한 이격 거리가 확보 되어야하므로, 일반적으로 1km 미만의 짧은 터널에서는 이격 거리를 감안하면 공기 단축 효과가 미미하여 경제성을 고려하면 순차적으로 시공하는 것이 더 효과적인 것이다. 하지만 연장이 4.35km에 이르는 양북터널은 굴착과 라이닝을 동시에 시공함으로써(그림 1. 참조) 순차적으로 시공할 경우보다 공기를 획기적으로 단축시킬 수 있으며, 취약 지반구간의 안정성을 확보할 수 있다.

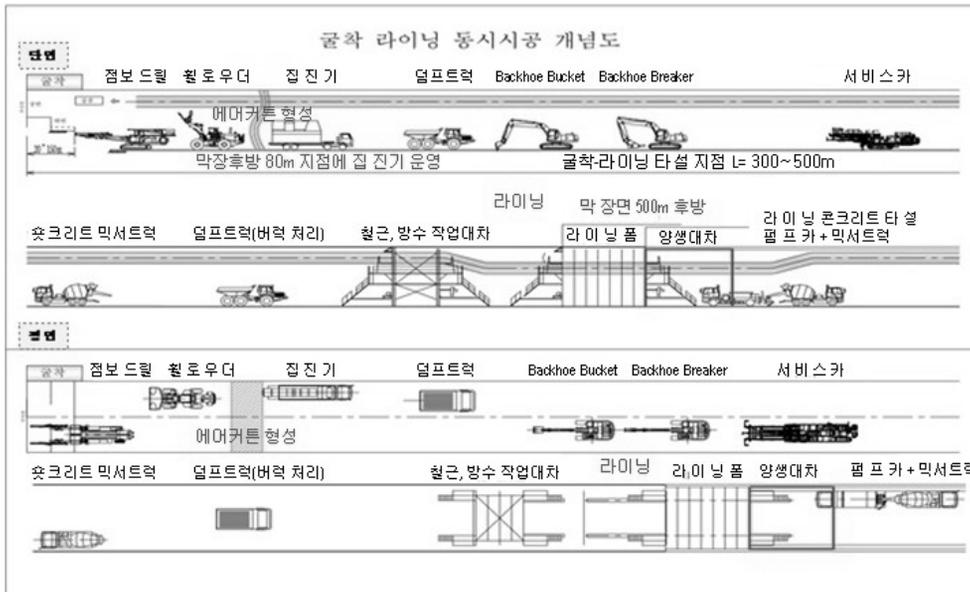


그림 1. 굴착라이닝 동시시공 개념도

2.1 발파에 의한 구조물 진동영향 연구 사례

굴착과 라이닝 시공을 동시에 진행하게 되면 발파에 의하여 라이닝 콘크리트에 진동이 가해지므로 이격 거리에 따른 진동 변화 및 진동에 의한 콘크리트 강도변화를 검토해야한다. 콘크리트 강도 저하를 유발시킬 수 있는 진동 시간대는 여러 사람들에 의하여 연구되었는데, Vibratech(1980)사는 타설 후 12시간 까지, 권영웅 등(1990)은 타설 후 3~5시간 그리고 정동호(1994)는 타설 후 3~12시간으로 기술하고 있다. 이처럼 재령에 따라 진동이 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 정도가 다르기 때문에 재령별 발파진동에 대한 허용 기준을 미국 양회학회, Hulshizer & Desai(1984), 미국 교통국 산하 National Highway Institute 등에서 표.1과 같이 제시하였다.

국내에서는 아직 양생중인 콘크리트의 재령에 따른 허용진동 기준이 정립되어 있지 않으나, 보수적으로 미국 교통국에서 제안된 허용진동 수준에서 진동에 예민한 시간대를 3~24시간으로 수정한 안이 채택된 예가 있다(한국자원연구소, 1996). 류창하 등(2003)은 미시령터널에서 수행된 연구에서 병행시공을 위한 허용진동 수준을 한국지질자원연구원과 미국 교통국에서 제시한 기준을 반영하여 3~24시간의 범위에서는 0.63cm/sec 이하가 되도록 설정한 바 있다.

표 1. 진동치 허용 기준

타설 후 경과시간	최대 진동 속도(cm/sec)		
	미국 양회학회	Hulshizer & Desai(1984)	미국 교통국
~3시간	0.254	10.16	5.08
4시간		3.81	
11시간			5.08
12시간			
24시간	1.27	10.16	2.54
2일	1.27~5.08 (시간에 비례)	17.78	
3일			
5일			
7일	5.08		5.08
10일			12.7
10일~			25.4

삼성물산(주)는 능동터널 시공 시 수치해석을 이용하여 발파 type별 거리에 따른 발파 진동의 영향을 검토하였다. 양생시간에 따른 콘크리트의 적용 진동 기준을 0.25cm/sec로 하면 그림2.에서와 같이 type-1은 120m, type-2는 100m, type-3은 80m, type-4와5는 40m에서 발파 시 허용 진동기준을 만족하는 것으로 판단되었다. 따라서 발파 시 발생하는 비석 등의 영향을 고려하고 안전치를 두어 약 200m 정도의 이격 거리를 유지하면 라이닝 콘크리트가 발파에 의한 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었다.

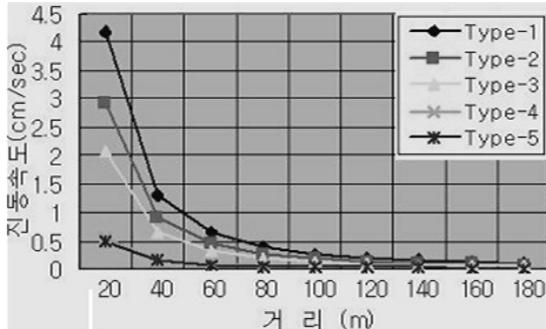


그림 2. 거리별 진동치(능동터널)

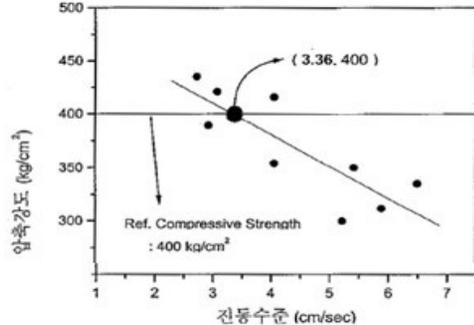


그림 3. 진동치 별 압축강도(죽령터널)

그 외에도 코오롱 건설(주)는 죽령터널 시공 시 진동에 따른 압축강도의 변화를 연구하였다. 터널 내에서 진동을 받지 않은 라이닝 콘크리트와 양생 중 진동을 받은 콘크리트의 압축강도를 비교한 결과 타설 후 5시간 후에 진동을 받은 콘크리트는 그림과 같이 발파진동 3cm/sec 이하에서는 강도감소 현상이 발생하지 않았으나, 4cm/sec 이상에서는 강도가 감소하였다(그림3. 참조).

2.2 시공 사례

국내에서는 국도 1호선 두마-반포간 도로확장 및 포장공사 중 계룡터널에서 굴착과 라이닝을 병행하여 시공하였고 이에 따른 연구가 수행되었다(유정훈 등,2006). 그러나 계룡터널에서 수행된 공법은 라이닝 폼과 작업 대차는 순차시공과 동일하며, 그림4.와 같이 피난 연락갱을 이용하여 라이닝 타설 구간의 굴착 작업을 진행시킨 사례로서, 본 공법과는 굴착과 라이닝을 동시에 시공한다는 점에서 차이가 있다. 계룡터널의 경우에는 한 방향의 라이닝 콘크리트 타설이 될 때까지 다른 쪽 라이닝은 시공할 수 없으므로 시공 중 터널의

안정성은 확보할 수 있으나 공기 단축의 효과는 없다고 할 수 있겠다. 따라서 공기를 획기적으로 단축시키기 위해서는 라이닝 폼, 작업 대차를 특수제작하고 갱내 환기설비 개선을 통하여 양방향 동시에 시공할 수 있는 공법의 적용이 필요하다.

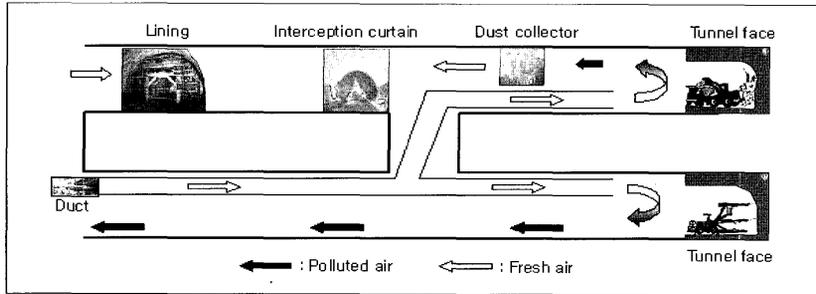


그림 4. 피난 연락관을 이용한 라이닝 시공법(유정훈 등.2006)

3. 현장 적용

3.1 현장개요

경주-감포2국도건설공사는 경주시 진현동에서 양북읍 장항리를 연결하는(그림5. 참조) 국도건설 사업으로 토함산 자락을 터널로 통과하여 평면 및 종단 선형이 불량한 기존의 4번 국도의 선형을 개선함으로써 두 지역 간 이동 시간을 단축시키고 주행 안정성을 확보하였다.

위치 : 경주시 진현동(시점) ~ 경주시 양북면 장항리(종점)

터널 길이 : 4.35km

공사 기간 : 2004.2~2012.12

터널 제원 : 폭 12.127m, 높이 8.42m



그림 5. 위치도

해당 지역은 경상분지 남동부에 위치하며, 흑색 셰일로 구성된 하양층군이 주를 이루며 이를 불국사 화강암류가 관입한 후 신생대 제 3기 역암층이 부정합으로 자리하고 있어 단층이 발달되어 있다. 본 현장의 양북터널은 총연장이 4.35km에 이르는 장대 터널로서 굴착구간의 상당부분이 풍화토층, 역암층, 셰일층으로 이루어져 있어(그림 6.참조) 터널의 변형, 낙반사고 및 과도한 여굴이 발생할 우려가 있다. 그리고 단층 파쇄대가 심한 불국사 단층대를 통과하여 터널 내로 많은 양의 지하수가 유입되고 있다. 또한 경주시 장항리로 이전하게 되는 한국수력원자력 본사 및 월성 방폐장 등으로의 접근성 향상과 동해권 관광개발 사업과 연계

된 지역 주민의 조기개통에 대한 열망이 그 어느 때보다 높게 나타나고 있다. 따라서 굴착·라이닝 동시시공 공법을 적용하여 시공 중 터널의 안정성을 확보하고 공기를 단축해야하는 과제를 안게 되었다.

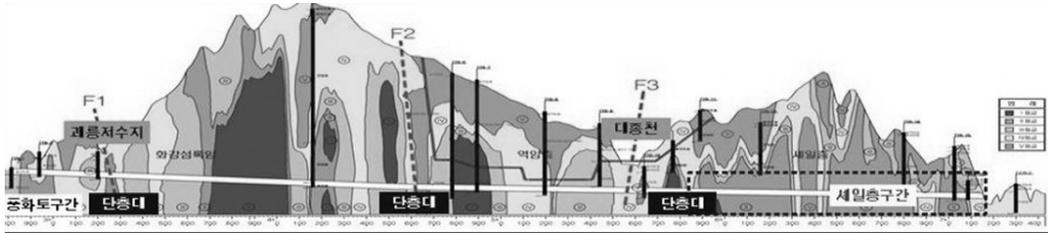


그림 6. 지질 현황

3.2 라이닝 폼 및 작업대차

라이닝 폼은 콘크리트 타설을 위한 거푸집 역할을 하는 구조체로서 설치 시 고려해야할 사항은 타설 시 콘크리트 하중지지 뿐만 아니라 환기 등 각종 설비 라인의 통과 공간 확보 및 작업차량을 하부로 통과시킬 수 있어야한다. 순차시공의 경우 작업차량의 통행을 고려하지 않아도 되기 때문에 강성이 약한 부재를 사용하여 트러스 구조로 지지할 수 있으며(그림7. 참조), 급·배수관 및 환기설비 등의 설비라인이 철거된 후에 라이닝이 시공되기 때문에 이런 설비라인 등의 설치를 고려할 필요가 없다. 그러나 동시시공의 경우 작업차량의 통행을 고려하여야 하기 때문에 강성이 큰 부재를 사용하여 라멘 구조로 라이닝 폼을 제작할 필요가 있으며(그림 8. 참조), 굴착 작업에 따라 수반되는 설비라인의 설치를 위한 공간 확보도 필요하다. 순차시공과 동시시공에 대한 라이닝 폼의 제원 및 특징은 표2와 같다.

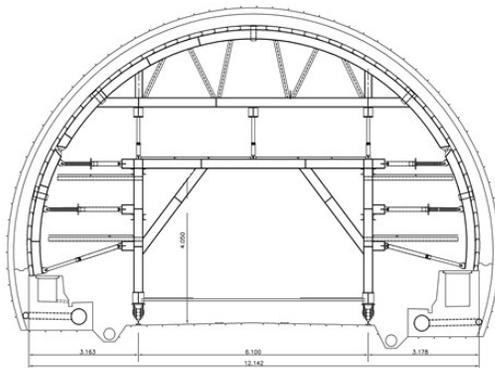


그림 7. 순차시공용 라이닝폼

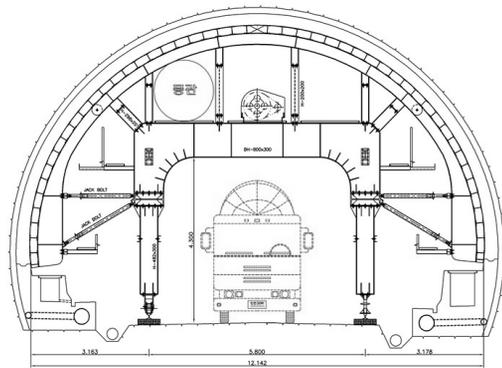


그림 8. 동시시공용 라이닝폼

표 2. 라이닝 폼 비교

구 분	순차시공	동시시공
폼 부 재	Girder(H-250×250)	Girder(H-800×300)
환풍구 공간 확보	공간 확보 미비	공간 확보(Φ1,800)
타설·양생 시 차량 통행	버팀대 설치로 차량 통행 불가	점보드릴, 덤프트럭 등 통행가능
상부 arch와 연결 상태	상부 arch와 대차의 구조적 분리	상부 arch와 대차의 일체구조로 안전한 구조

본 현장의 라이닝 폼은 작업 차량 통행이 가능하도록 폭 5.5m 및 하부통과 높이 4.3m를 확보하고 어깨부는 급기덕트(φ1800)가 통과하도록 별도의 공간을 확보하였으며, 상부 아치와 대차를 일체화 한 견고한 구조로서 라이닝 폼 측벽과 상부에는 천막을 설치하여 통로 안전성을 확보하였다(그림9. 참조). 또한 철근 및 방수 작업을 선행할 수 있도록 철근 및 방수 작업 대차도 동일하게 개선하였다(그림10. 참조). 그리고 접근이 편리한 폼 측벽에는 검사창을 설치하여 콘크리트를 다짐할 수 있도록 하였고(그림11. 참조), 천단부에는 타격식 바이브레이터 6기를 장착하여 천단부의 콘크리트 다짐을 원활히 할 수 있도록 하였다(그림12. 참조).



그림 9. 라이닝 폼



그림 10. 철근 방수대차



그림 11. 검사창



그림 12. air 타격식 바이브레이터

3.3 환기설비

터널 굴착 공사 중에는 발파에 의한 분진 및 유해가스, 작업장비의 매연 및 슛크리트 분진 등이 발생하므로 작업자의 안전 및 가시거리 확보를 위해서 오염된 공기를 외부로 배출하고 외부의 신선한 공기를 공급하는 환기설비가 필요하다.

국내 대부분의 터널 현장에서는 신선한 공기를 공급하는 급기식이 적용되고 있으나 터널연장이 길어질수록 갱내환기문제가 발생되어 급기+집진기 방식을 적용하게 된다. 하지만 대부분 국내 현장에서는 채래식 집진기 사용으로 굴착연장이 약 800m 이상에서는 분진으로 인한 가시거리 저하가 심각하고 작업에 어려움이 있는 실정이다(그림13. 참조). 하지만 굴착.라이닝 동시시공 시에는 막장면 뿐만 아니라 라이닝 타설 작업 구간에도 신선한 공기 공급이 필요하므로 환기설비 개선이 필요하다(그림14. 참조). 본 현장에서는 자동청소가 가능한 대용량 흡입식 집진시스템으로 전 연장에 걸쳐 쾌적한 환경을 유지하였다. 순차시공과 동시시공의 환기 설비에 대하여 비교한 결과는 표3.과 같다.

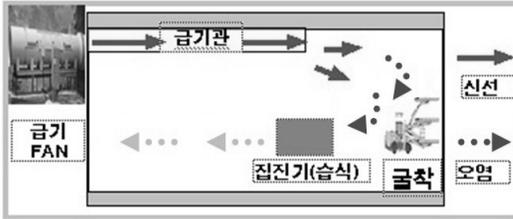


그림 13. 순차시공 환기방식

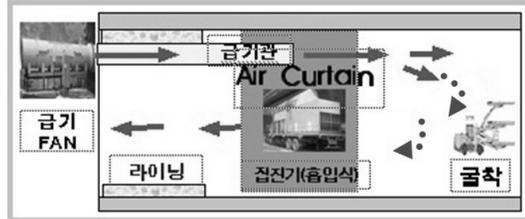


그림 14. 동시시공 환기방식

표 3. 환기 방식 비교

구분	순차시공	동시시공
환기 시스템	-금기 방식+집진기(습식) -막장 작업구간만 신선한 공기 필요	-금기 방식+집진기(흡입식) -후방 구조물작업에 따른 오염공기 개선
차이점	-채래식 습식 집진기 적용 -소용량 집진 설비로 오염물질 일부만 제거 -필터 청소의 어려움으로 집진효율 저하	-소요송풍량보다 20%이상 용량의 집진기설치로 집진기 주위 AIR CURTAIN 형성 (오염물질 완전 제거) -자동방식의 주기적 청소로 고효율 유지

본 현장에서는 금기와 집진기를 하나의 SYSTEM으로 검토하여 환기설비를 계획하였으며, 송기량은 여러 가지 유해물질 예상 발생량을 산출하여 갱구에서 주입하고 발과 분진과 슛크리트 분진은 집진기가 모두 처리하도록 용량을 산정하여 집진시스템을 설계하였다(그림15. 참조). 또한 송기와 배기량을 조화롭게 운영하여 집진기 주위에 AIR CURTAIN이 형성되도록 하여 막장의 오염 물질이 모두 집진기를 통과하여 완전 제거되도록 하였다.



그림 15. 집진 설비

오염공기 정화량은 작업자의 호흡과 갱내풍속을 고려하여 1,485m³/min를 기준으로 하여 설비를 계획하였다. 소요 송풍량 1,485m³/min, 압력 손실 0.8kPa에서 누풍을 고려하여 송풍설비의 제원을 계산하였고 흡입량 1,892m³/min, 압력손실 1.3kPa을 기준으로 하여 집진기의 제원을 계산하였다. 환기 설비의 제원은 이보다 여유 있게 현장에 적용하였으며 그 결과는 표4.와 같다.

표 4. 송풍 설비 및 집진기 제원

구 분	계 산 치	현 장 적 용
덕트 직경(mm)	1,800	1,800
팬 용량(m ³ /min)	2,000	2,520
팬 동력(kW)	110	150
팬 풍압(kPa)	2	3
집진기 처리 풍량(m ³ /min)	1,782	1,800

이와 같은 환기 시스템은(그림16. 참조) 갱내 발생 가스로 인한 오염 공기를 처리하는데 필요한 1,485m³/min의 신선한 공기를 갱구에서 송기팬을 이용하여 주입하면 공기 흐름이 발생하게 된다. 집진기 처리 용량이 1,800 m³/min이므로 굴착면에서 분진을 함유하고 흘러나온 공기 1,485m³/min를 흡입하고 모자라는 315m³/min는 후방에서 흡입한다. 이렇게 되면 집진기 근처는 AIR CURTAIN이 형성되어 굴착면에서 발생된 분진을 집진기로 모두 처리하여 분진이 제거된 맑은 공기만 갱구 방향으로 배기되어 후방에서 라이닝 작업이 가능하도록 하였다.

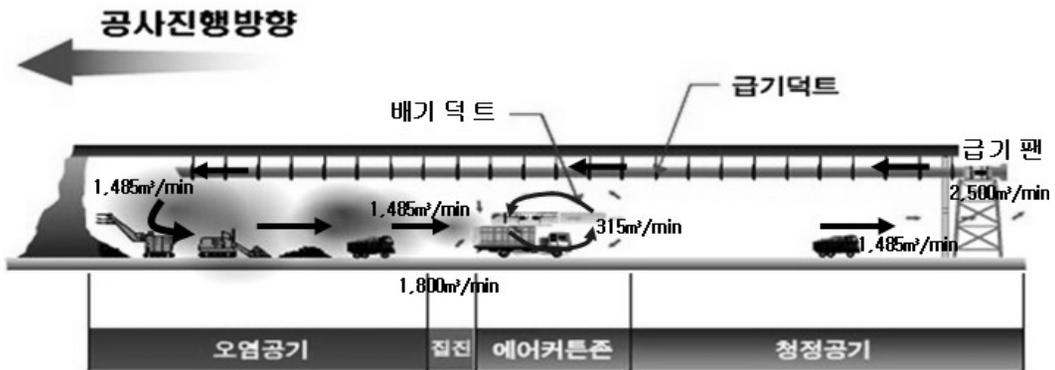


그림 16. 환기 시스템

3.4 발파에 의한 진동영향을 고려한 구조물 이격 거리 산정

굴착.라이닝 동시시공에 있어서 안전에 가장 큰 영향을 미치는 것은 굴착 지점과 라이닝 콘크리트 타설 지점의 이격 거리로서 충분한 이격 거리를 확보하지 않으면 발파 진동이 라이닝 콘크리트 강도에 영향을 줄 수 있다. 반면 이격 거리가 너무 먼 경우에는 공기 단축의 효과가 작아지기 때문에 발파규모 및 작업 속도 등이 고려된 적절한 이격 거리를 산정하여 시공계획을 세울 필요가 있다. 당 현장에서는 라이닝 콘크리트 품질 검증을 위하여 거리에 따른 진동치 및 진동에 따른 콘크리트의 압축강도 변화에 대하여 분석하였다.

3.4.1 발파진동 측정결과

본 현장에서는 이격 거리에 따른 진동치를 측정하기 위하여 그림17.과 같이 발파지점으로부터 후방으로 50m, 100m, 150m, 200m, 250m, 300m, 400m, 500m를 이격하여 굴착된 터널바닥의 공동구 위치에 콘크리트를 타설하고 속도계를 설치하여 표5.와 같이 장약량을 조절하여 실제 발파 작업에 의한 진동을 측정하였다(그림 18,19. 참조).

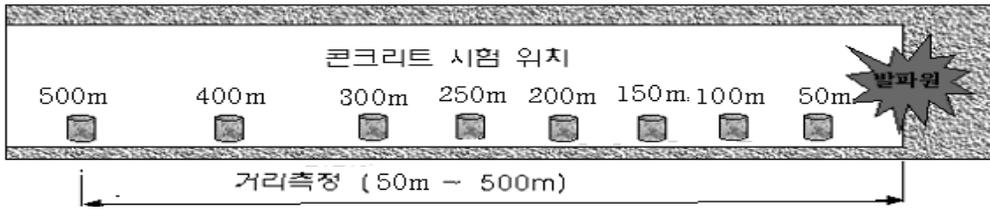


그림 17. 진동측정 위치

표 5. 시험발파 지발당 장약량

구 분	천공경	천공장	천공수	공당약량	지발당약량	장약량
1 회	45mm	1.3m	70공	0.3~0.75 kg	0.5~1.5 kg	40 kg
2 회	45mm	1.3m	74공	0.3~0.75 kg	0.5~1.5 kg	57 kg
3 회	45mm	1.7m	85공	0.5~1.125 kg	0.5~2.25 kg	60 kg



그림 18. 공동구 콘크리트 타설



그림 19. 발파 진동계측

발파에 의한 각 지점별 진동속도를 측정된 결과는 표6.과 같으며 이를 그래프로 나타내면 그림20.과 같다. 이격 거리가 멀어질수록 진동속도가 급격히 작아지는데 이는 주로 기하학적 감쇠에 의한 것으로 판단된다. 그리고 장약량이 많을수록 진동속도가 큰 것을 알 수 있다.

표 6. 발파진동 측정 결과

계측장소	진동속도 PPV(mm/sec)			비고
	1회	2회	3회	
50m	3.87	3.52	6.19	
100m	1.76	2.67	3.64	
150m	1.56	2.14	3.30	
200m	1.30	1.83	2.33	
250m	1.17	1.46	2.29	
300m	0.714	1.24	2.08	
400m	0.730	0.984	1.13	
500m	0.603	0.905	1.05	

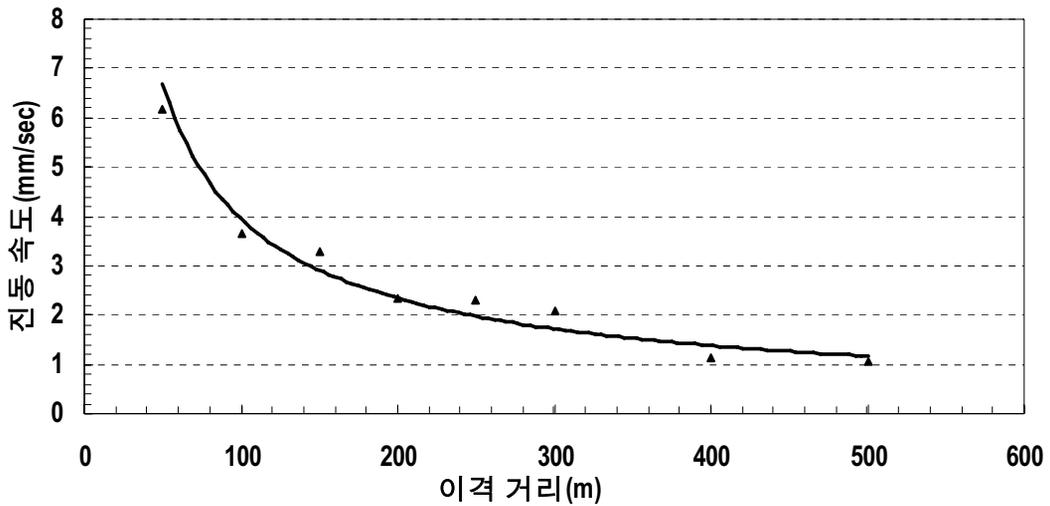


그림 20. 이격거리별 진동속도(3회)

측정 결과에 대한 회기분석 결과 장약량 및 거리에 대한 진동속도를 식(3.1)과 같이 표현할 수 있었다.

$$V = 11.8 \left(\frac{D}{1} \right)^{-0.744} \dots\dots\dots \text{식(3.1)}$$

$$W^2$$

여기서, V : 발파진동속도(cm/sec)
 D : 폭원으로부터의 거리(m)
 W : 지발당 허용 장약량(kg/delay)

3.4.2 발파원 이격거리별 콘크리트 구조물 압축강도 측정 결과

진동의 영향을 받는 콘크리트 압축강도 변화를 알아보기 위하여 터널 내부에 타설된 시험용 콘크리트 28일 코어압축강도를 측정하였다(그림21, 22. 참조).



그림 21. 코어 채취

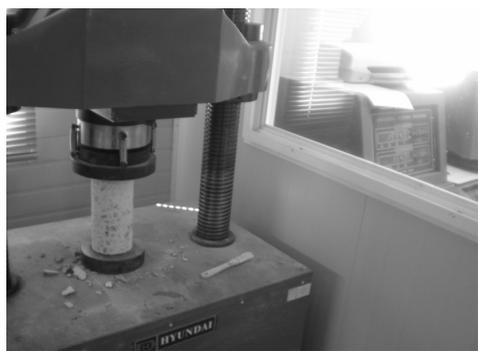


그림 22. 코어 압축강도 시험

코어 채취 결과 측정된 콘크리트의 압축강도 실험 결과는 표7.과 같다. 이격 거리와 압축강도의 관계는 그림23.과 같으며, 각 이격 거리별 진동속도와 압축강도의 관계는 그림24.와 같다. 이격 거리가 증가할수록 압축강도가 큰 경향을 보이는데 이는 진동에 의한 영향을 덜 받았기 때문으로 판단된다. 약 120m 정도의 이격 거리에서는 라이닝 콘크리트의 필요 압축강도 발현에 문제가 없는 것으로 판단되며, 진동속도와와의 관계를

비교했을 때 4.2mm/sec 이하에서 필요 압축강도를 발현할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 실험적 오차를 고려하고 굴착 작업(2~3m/일)과 라이닝 콘크리트 타설 작업(5m/일)의 추진 속도 차이를 고려하면 500m 이상 이격하여 시공하는 것이 경제적이고 안정적인 것이다.

표 7. 거리별 압축 강도의 비교

이 격 거 리(m)	50	100	150	200	250	300	400	500
진동속도(mm/sec)	6.19	3.64	3.30	2.33	2.29	2.08	1.13	1.05
압축 강도(MPa)	23.21	24.04	24.39	24.97	24.54	26.73	26.78	26.37

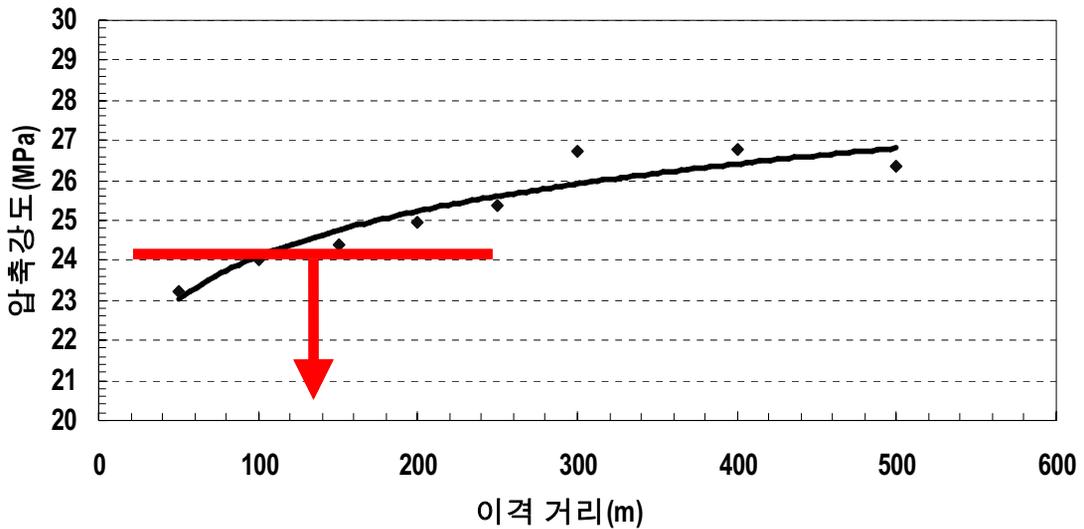


그림 23. 이격거리별 압축강도

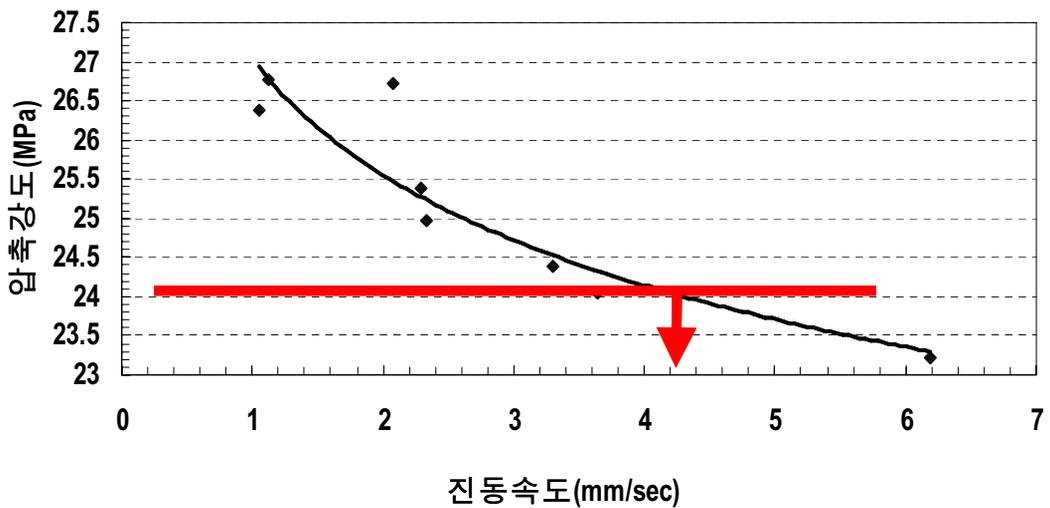


그림 24. 진동속도 별 압축강도

실제 시공 시에는 라이닝 콘크리트의 발파에 의한 영향 검토를 하여 실제 진동이 허용치 이내인지를 확인할 필요가 있다. 아울러 실제 라이닝콘크리트의 필요 강도 발현 여부도 비파괴 기법 등을 통하여 확인할 필요가 있다. 이를 통하여 지반 여건에 따른 지발당 장약량 조절 및 콘크리트 라이닝의 안전 이격 거리를 재산정 할 수 있을 것이다. 이 실험은 추후 라이닝 콘크리트 타설 작업이 착수된 이후에 시행할 계획이다.

3.5 변위 수렴 판단

NATM 터널에서 라이닝 콘크리트를 타설 하기 전에 확인해야할 사항으로 굴착 후 터널의 내공 및 천단 변위의 수렴 여부를 확인하여야 한다(요시오 미타라시 등, 2009). 당 현장에서는 계측기를 설치하고 내공 변위 및 천단 침하를 지속적으로 측정하였다. 계측기의 설치 수량과 측정 빈도는 표8.과 같다. 수렴 기준은 1mm/주 이내로 당 현장에서는 굴착 후 약 1개월 정도 경과한 후 수렴되는 것으로 나타났으며(그림 25.참조) 이때 이격 거리는 약 100m 정도이다. 이는 계획 이격 거리인 500m보다 400m 정도 여유가 있으므로 라이닝 타설 시 변위에 의한 영향은 없을 것으로 판단된다.

표 8. 계측기 설치 현황 및 측정 빈도

계측 항목	계측기 설치		측정 빈도		
	간격	수량(개)	0~15일	15~30일	30일~수렴
천단침하계	10~30m	367	1~2회/일	1회/일	1회/주
내공변위계	10~30m	1,074	1~2회/일	1회/일	1회/주

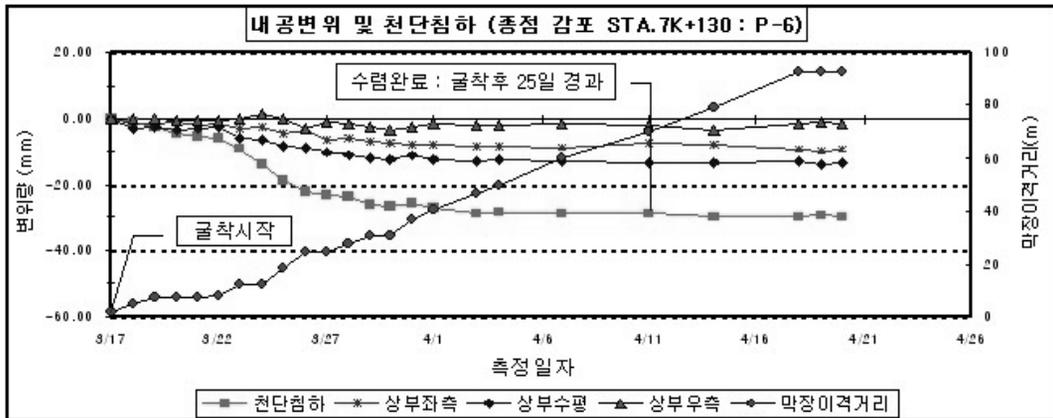


그림 25. 시간에 따른 내공변위 및 천단침하

실제 시공 시에는 지속적인 계측관리로 수렴여부를 확인 후 라이닝 콘크리트를 타설하고, 미 수렴 구간 발생 시에는 그라우팅과 라이닝 콘크리트 구조 보강 대책을 수립하여 콘크리트를 타설할 계획이다.

4. 결 론

본 고에서는 NATM터널에서 굴착과 라이닝 동시시공 시에 고려해야할 사항에 대하여 검토하고 경주-감포2국도 건설공사 현장 양북터널에 적용한 사례를 들었다. 주요 사항을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 라이닝 폼 및 작업대차는 점보 드릴, 덤프트럭 등 굴착 작업에 필요한 장비 및 작업차량이 통과할 수 있도록 하부 공간 확보뿐만 아니라 환기 및 배수 등의 설비 라인들도 설치할 수 있는 공간을 확보할 수 있도록 특수제작하여 현장에 적용하였다.

둘째, 환기 방식은 막장 뿐만 아니라 후방 라이닝 작업 공간에도 신선한 공기 공급이 필요하므로 집진기를 이용한 급기+흡입식 집진기 방식을 적용하였다. 송풍 설비의 제원은 덕트직경 1,800mm, 팬용량 2,520m³/min, 동력 150kW, 풍압 3kPa이며, 집진기는 흡입식으로 송풍용량 1,800m³/min을 적용한 결과 1.1km 굴착한 현재 쾌적한 터널환경을 확보하였다.

셋째, 발파 진동에 의한 콘크리트 라이닝의 강도 저하를 방지하기 위하여 적절한 이격 거리를 산정하였다. 적절한 이격 거리를 산정하기 위하여 실제 터널 내부에 시험용 콘크리트를 타설하여 실제 발파에 의한 진동치를 측정하였으며 28일 코어압축강도를 측정하였다. 그 결과 약 120m 정도 이격될 경우 라이닝 콘크리트의 설계기준 강도인 24MPa이 발현되는데 크게 문제가 없는 것으로 판단되었다. 그러나 시공적인 측면과 실험적 오차를 고려하여 굴착과 라이닝을 500m 이상 이격하여 시공하기로 계획하였다.

마지막으로 내공변위 및 천단 침하의 지속적인 계측을 통하여 굴착으로부터 약 1개월 정도 지난 후 변위가 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 막장과와의 이격 거리는 약 100m 정도로 계획 이격 거리 이내에 있으므로 라이닝 타설 시에 변위에 의한 영향은 없을 것으로 판단할 수 있었다.

세계적인 추세는 앞서 언급한 바와 같이 지하공간을 활용한 개발이 증가할 것이며 이로 인해 장대터널 시공이 급격히 늘어날 것이다. 국내에서는 경주-감포2국도건설 공사에서 최초로 굴착.라이닝 동시시공공법을 적용하였으며, 당 현장에서 습득하게 될 기술적 경제적 경험이 향후 세계로 뻗어나갈 우리의 기술력 향상에 이바지할 것으로 확신한다. 더 나아가 기술력 제고를 통해 세계 시장에서 우리나라 건설 산업의 입지를 굳히는데 많은 도움이 되었으면 한다.





감사의 글

본 현장의 굴착·라이닝 동시시공 공법 벤치마킹에 도움을 주신 일본의 북해도 신칸센 건설현장의 구마가이 건설, 북해도 횡단도로 건설현장의 미쯔이 스미토모 건설에 감사의 말씀을 전합니다. 또한 집진기 설치에 참여한 유기 엔지니어링 그리고 라이닝 폼, 작업 대차 제작에 참여한 이화기공과 현장에서 동시시공을 성실하게 수행하고 있는 (주)태아건설에 또한 깊은 감사의 말씀을 전합니다. 마지막으로 현장에서 굴착·라이닝 동시시공 공법을 적용함에 있어 본사와 현장을 오가며 지속적으로 기술 지도를 해준 T.A팀의 미타라시 고문과 문용 과장에게 고마운 마음을 전합니다.

참고 문헌

1. 권광수, 류창하 등(1996). “발파진동이 콘크리트 구조물의 건축에 미치는 영향평가 및 발파설계 지침 수립 연구.” 현대산업개발(주) & 한국자원연구소.
2. 권영웅 등(1990). “진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향.” 대한주택공사 주택 연구소 기술보고서, 대한주택공사.
3. 류창하, 최병희, 김양균, 유정훈(2003) “터널발파-구조물 병행시공을 위한 영향평가 연구”, 화약·발파, 대한 화약발파공학회, 제21권, 제4호, pp 11-21.
4. 요시오 미타라시, 문용, 김영근(2009) “NATM 터널에서의 콘크리트 라이닝 시공 시 유의점과 대책에 대한 고찰”, 자연, 사람 그리고 터널, 한국 터널 공학회, 제11권, 제1호, pp 60-77
5. 유정훈, 안형준, 유진오, 최병희(2006) “장대터널 굴착시 발파-라이닝 병행시공 사례연구”, 화약·발파, 대한 화약발파공학회, 제24권, 제1호, pp 39-48
6. 정동호(1994). “발파진동이 양생콘크리트의 강도에 미치는 영향.” 박사학위 논문, 강원대학교.
7. Vibratech, Vibration Study, 1980