

석탄층을 협제한 연암을 대상으로 한 도로터널 시공사례

김주화, 김선기, 신경진
대림산업주식회사

<요지>

동북터널의 현장지질은 편마암과 석탄층(Coal Beds)이 협제한 암질이 매우 불량한 편암으로 구성되어 있으며, 설계 시에는 석탄층의 발달이 확인되지 않아 그 영향을 충분히 고려되지 않았다. 석탄층(두께 2~8m)은 편암의 Rock Cleavage와 같은 방향과 45~55도의 경사를 가지며 pinch out and swelling 형태로 발달이 불규칙하다. 하행선굴착 중 약 290m구간에 걸쳐 석탄층이 나타났으며, 90m 구간은 천단 및 측벽부에서 집중 발달되어 최대일변위가 20mm이상인 지점이 발생하는 등 상반굴착 시 111.2mm의 수평방향 내공변위가, 하반굴착 시에는 최대 127.8mm의 내공변위가 발생하였고 하반관통이후 수렴되었다. 내공변위 과다발생에 대한 대책으로 지보타입을 하향 조정하였고 측벽부는 하향 록볼트를 포함한 추가 록볼트 보강을 실시하였다. 한편 터널 바닥부의 석탄층은 도로포장 후 침하문제가 예상되어 인버트를 기존 강지보공과 H-beam으로 연결·폐합한 후 콘크리트로 치환(140m구간)하여 추가변위를 최소화하였으며 무근콘크리트로 설계된 라이닝은 철근콘크리트 라이닝으로 변경 시공하였다.

주요 용어 : 석탄층(Coal Beds), Rock Cleavage, 내공변위, 인버트폐합, 철근콘크리트라이닝

1. 서론

동북터널 하행선 굴착 중 설계 당시에는 예상하지 못했던 석탄층(Coal Beds)이 Sta.3+860~4+150 구간에서 노출되었고, 특히 Sta.3+950~4+040 구간에서는 좌우측벽부 및 천단부에 지속적으로 발달하였다. 상반굴착 시 Sta.4+100 지점에서는 SL에서 50mm 내외의 내공변위가 발생하여 원설계의 지보패턴을 하향 적용하였으며 측벽부에 록볼트를 추가로 타설하였다. 그러나 상반굴착 중 석탄층의 측벽 및 천단부 발달면적이 증가하면서 추가보강에도 불구하고 약 60m 구간에서 100mm 이상의 누적변위가 발생하여, 하반굴착 시에는 지보패턴과 추가보강을 굴착 전부터 계획하여 SL에서의 내공변위 발생을 최소화시키려 하였지만 최대 127mm의 내공변위가 발생하였다. 한편 맹암거 설치를 위한 추가굴착과 터널 바닥부의 연약한 석탄층을 치환하기 위해 바닥부 굴착 전 인버트 폐합구조를 검토하였으며, 내공변위 다량 발생구간은 라이닝 철근 보강안을 검토하였다.

2. 공사개요

2.1 현장개요

동북우회도로는 정주-순천간(국도22호선) 노선 중 동북면 소재지를 우회하는 간선도로로서, 공사구간은 전라남도 화순군 읍애리 ~ 화순군 유천리 사이이며, 연장은 5.80km(4차로 B=20.0m)로서 교량 4개소(435m)와 터널 1개소(420m)가 포함되어 있다.

2.2 터널공사개요

동북터널은 2차선 병설터널로 연장은 상행선 386m, 하행선 420m이며, NATM공법을 적용하였고, 굴착방법은 현장지질조건에 따라 전단면굴착 및 상·하반단면 분할굴착으로 계획하였으며, 평면 및 종단면도, 표준지보패턴은 그림 1, 표 1과 같다.

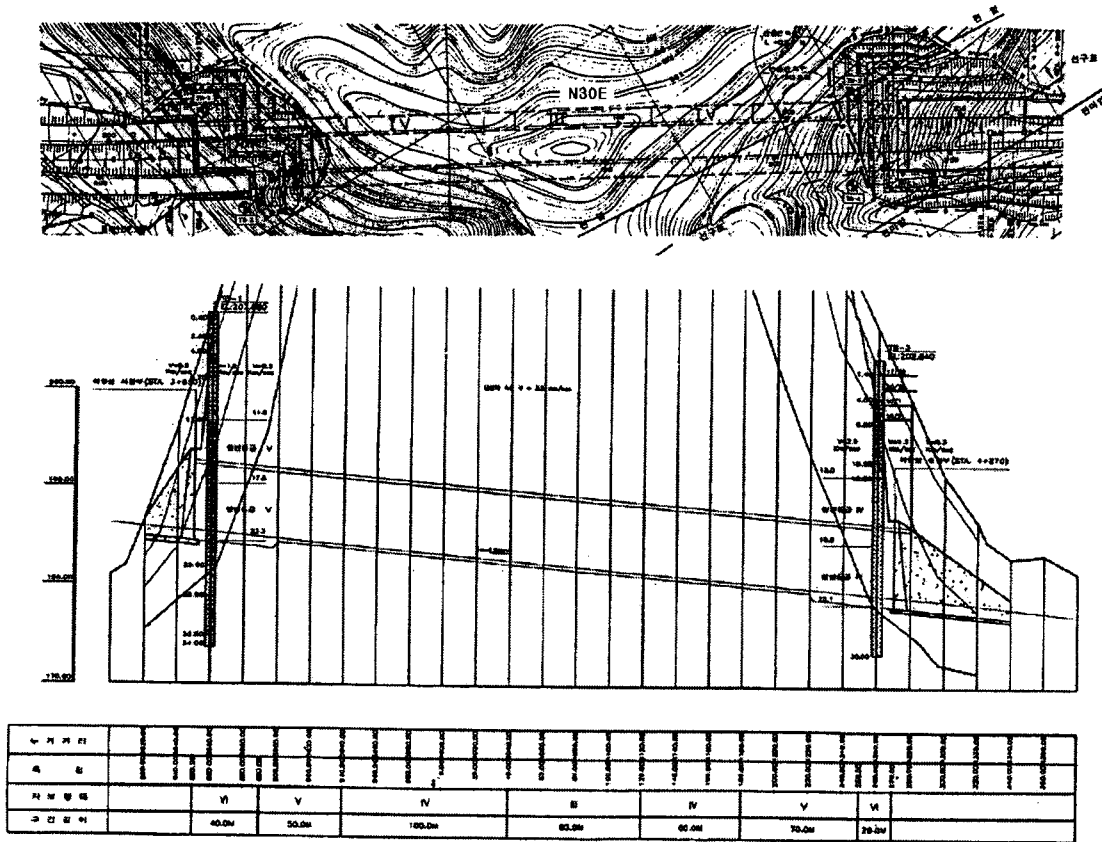
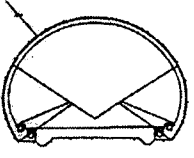


그림 1. 동북터널의 평면도 및 하행선 종단면도

표 1. 동북터널의 표준지보패턴

구 분		TYPE - I	TYPE - II	TYPE - III	
표준단면도					
RMR 암반분류		등급 I (81~100)	등급 II (61~80)	등급 III (41~60)	
굴착	굴착공법	전단면굴착	전단면굴착	전단면굴착	
	1회굴진장/지보설치길이	3.0m/6.0m	3.0m/3.0m	2.0m/2.0m	
지보공	숫크리트		5cm	5cm	10cm
	목발트	길이	3.0m	3.0m	4.0m
		간격	종방향	RANDOM	3.0m
	횡방향		RANDOM	1.5m	1.5m
	강지보	강재규격	-	-	-
설치간격		-	-	-	
라이닝 콘크리트	두께	30cm	30cm	30cm	
	철근배근	-	-	-	
구 분		TYPE - IV	TYPE - V	TYPE - VI	
표준단면도					
RMR 암반분류		등급 IV (21~40)	등급 V (20 이하)	갱구보강용	
굴착	굴착공법	반단면 굴착	반단면 굴착	반단면 굴착	
	1회굴진장/지보설치길이	(상부)1.5m/1.5m (하부)3.0m/3.0m	(상부)1.2m/1.2m (하부)1.2m/1.2m	(상부)1.2m/1.2m (하부)1.2m/1.2m	
지보공	숫크리트		15cm	20cm	20cm
	목발트	길이	4.0m	3.0m	4.0m
		간격	종방향	1.5m	1.2m
	횡방향		1.5m	1.5m	1.5m
	강지보	강재규격	H-100×100×6×8	H-100×100×6×8	H-100×100×6×8
설치간격		1.5m	1.2m	0.6m	
라이닝 콘크리트	두께	30cm	30cm	30cm	
	철근배근	-	-	D22 @150	

2.3 지형 및 지질개요

1) 지형

동북우회도로현장은 서쪽에 용성산(△572.8m)과 천왕산(△424.2m)을 잇는 비교적 완만한 경사를 나타내는 산계가 남북으로 길게 발달되어 있고, 동쪽으로는 밤실산(△597.9m), 운월산(△660m), 모후산(△918.8m)을 잇는 해발 500m 이상의 고봉들이 남북방향으로 발달하고 있다. 본 건설공사 구

간을 흐르는 동북천은 북에서 남으로 흐르고 있으며, 동측으로부터 모후산~밤실산 능선을 분수령으로 서류하는 많은 지류들과, 서측에서는 무등산 능선을 분수령으로 하여 동류하는 지류들이 합류한다 (1:50,000 독산지형도 참조).

2) 지질

동북우회도로 현장의 지질계통은 표 2와 같으며, 현장암반은 시대미상의 화강암질편마암과 고생대의 천운산층의 편암 및 천매암으로 구성되어 있으며 Pinch out and Swelling type의 석탄층(Coal Beds)이 다소 불규칙하게 협재 발달하고 있다. 협재 Coal Beds는 수 cm~수 m 폭으로 터널 갱구부를 비롯하여 공사구간 내 절취비탈면에서 비탈면 파괴활동은 물론 하행선 터널굴착 중 터널 주변암반의 안정성을 저해하는 주요 원인이 되고 있다.

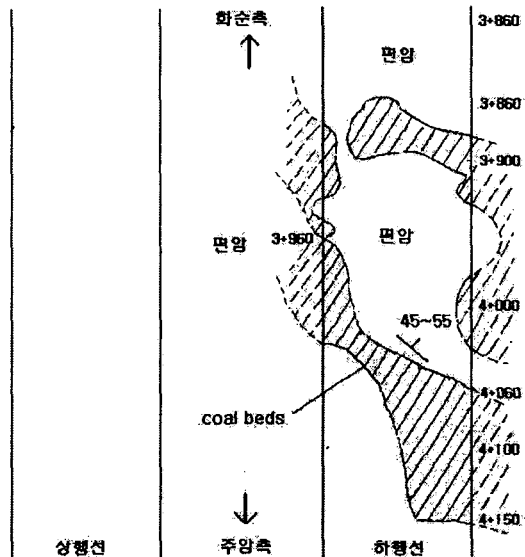
동북터널 하행선 Sta.4+150 부근에서 확인되기 시작한 석탄층은 막장진행방향(주암측에서 화순측, N30E방향)을 기준으로 터널 우측벽에서 노출되어 약 35~45°사교하여 터널 좌측벽으로 연장·발달하는 주향을 갖고 막장측으로 약 45~55°경사져 발달하는바, 기반암 Rock Cleavage의 주향 및 경사(NS~N30E/50~54SE)와 거의 일치하며 약 2~8m폭을 보여준다(그림 3 참조).

기반암인 편암은 수 cm~0.5m 간격으로 Rock Cleavages가 발달하며 완전풍화~보통풍화 상태의 풍화정도를 갖는데, 현장암반은 weak~very weak의 매우 불량한 상태이다. 또한 대부분의 Rock Cleavages는 open 상태에서 붉은 산화점토 또는 Coaly materials로 충전된 상태이며 이들과 같은 상태의 Random Joint가 불규칙하게 발달하고 있다. 특히 석탄층 발달구간은 터널우측으로 폭 약 5m의 수직계열의 파쇄대가 발달하는 등 더욱 불량한 암질로 RMR은 최대 30 미만, 평균 17 정도의 값을 갖는 것으로 확인되었다.

표 2. 지질계통표

제 4 기	—	층 적 층 ~ 부 정 합 ~
백 악 기	□	변성석영반암 - 관입 -
	□	장동용회암록암 ~ 부 정 합 ~
	□	천운산층 ~ 부 정 합 ~
고생대말	□	오산리층
	- - -	점이적 - - -
시대미상	—	화강암질편마암

그림 2. 하행선 석탄층(Coal beds) 발달상태



3. 터널시공

3.1 굴착 및 지보현황

동북터널의 굴착은 시·중점측에서 각각 시작하여 시점 부근에서 관통하는 것으로 계획하였으며, 굴착공법은 현장지질조건에 따라 반단면(TYPE I ~ III) 및 전단면 굴착(TYPE IV ~ VI)공법을 적용하였다. 설계시의 지보패턴별 연장은 표 3과 같다.

표 3. 지보패턴 현황 및 연장

표준지보패턴	TYPE III	TYPE IV	TYPE V	TYPE VI	계	
연장 (m)	상행선	70	110	166	40	386
	하행선	80	160	120	60	420
	합계	150	270	286	100	806

표 4. 하행선 터널의 보강현황

구 간	3+850 ~ 890	3+890 ~ 4+143	4+143 ~ 180	4+180 ~ 250	4+250 ~ 270
원 설 계	VI	III ~ IV	IV	V	VI
보강현황	VI	V	IV	V	VI
구간길이	40 m	253 m	37 m	70 m	20 m

석탄층은 하행선 터널의 Sta.4+150 지점부터 약 290m 구간에 걸쳐 기반암 내 협재 및 포획상태로 발달하고(그림 2 참조), 앞서 언급한 바와 같이 기반암의 Rock Cleavage와 같은 주향 및 경사를 가지며, 특히 Sta.4+040 지점부터 90m 구간은 측벽부 및 천단부에 집중 발달하여 내공변위값이 최고 127 mm 까지 발생하였다.

한편, 하행선 터널은 전단면굴착(TYPE III)으로 설계된 구간이 있었으나 막장관찰 결과, RMR 값이 20내외로 암반조건이 불량하여 TYPE IV 이하의 반단면 굴착으로 변경 시공하였으며, 측벽 및 천단부에 석탄층이 발달하는 구간(Sta.3+890~4+143)은 TYPE V로 지보패턴을 변경하였다(표 4 참조). 그리고 굴진장은 0.8~1.0m/day를 유지하였으며 보조공법을 이용한 사전보강공 설치-굴진-지보공 설치작업을 반복하여 시행하였다. 하행선 터널에서 지보패턴의 대부분을 차지하는 TYPE V의 보강패턴은 그림3과 같다.

3.2 계측결과

막장관찰결과에 의하면, Sta.3+896~4+130 구간의 터널주변암반은 불량에서 매우 불량한 암질로 풍화암에서 풍화토 사이의 특성을 보이며, 14~24의 RMR 값을 갖는다. 주절리의 방향은 NS~N30E/50~54SE이며 절리사이에 세립질점토, 탄질점토 등의 충전물질이 혼재하고 있다. 또한 현장암반은 심한 풍화, 심한 파쇄, 변질을 동반하여, 하반굴착 시 측정된 SL의 내공변위는 최저 19.90mm에서 최고 127.84mm까지 변화가 크고, 석탄층 발달구간에서도 큰 편차를 보이고 있다(표 5 참조).

석탄층 발달구간 중 상반 굴착 시 내공변위량이 크게 발생한 지점에 대해 내공변위를 거의 매일 측정하였으며 다음과 같이 3회에 걸쳐 분석하였다(표 6 참조).

- ① 2000년 6월 20일 전후 (하행선 대부분 상반굴착완료상태, 중점측 일부 하반굴착 진행 중)
- ② 2000년 7월 25일 전후 (하행선 하반굴착이 완료된 상태)
- ③ 2000년 9월 15일 (하행선 관통 후)

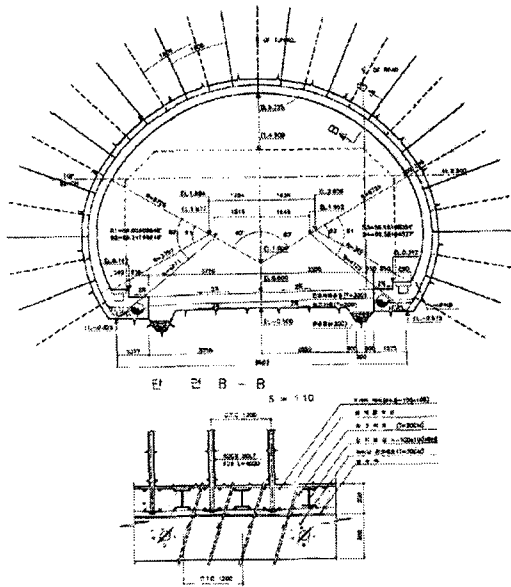


그림 3. 표준지보패턴 V

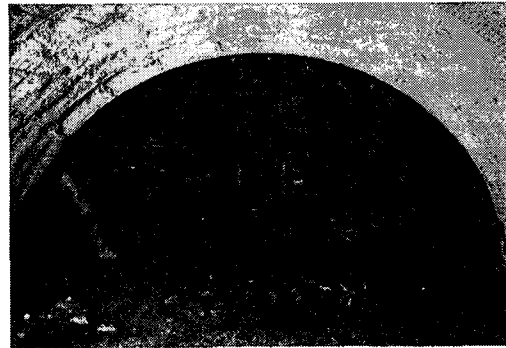


그림 4. 측벽부의 석탄층 발달현황

표 5. 석탄층노출구간의 계측결과 (2000.9 15 현재)

내공변위계측			막장관찰		
위치	변위량 (mm)	계측기간 (일)	RMR	암질	막장상태
3k+896	19.90	101	14	풍화토, 탄질 및 점토질	막장전체에 탄질 및 점토질 협재
3k+920	55.90	157	18	풍화암~풍화토	전체적으로 풍화가 심하여 강도취약, Rock cleavage 발달
3k+949	126.00	169	24	풍화암~풍화토	전체적인 풍화, 파쇄심함, 좌측부 풍화토, Rock cleavage 발달
3k+973	127.84	180	22	풍화암~풍화토	전체적 풍화심함, Rock cleavage 발달
3k+985	123.35	336	16	풍화암~풍화토	심한풍화로 강도취약, 좌측부 탄질, 백색점토대, Rock cleavage 발달
3k+998	112.88	342	16	풍화암~풍화토	전체적인 파쇄 및 심한 블록화, 좌측부 탄질대, Rock cleavage 발달
4k+005	110.71	419	17	풍화암~풍화토	심한풍화로 암질내부까지 변질, 좌측부 탄질대, Rock cleavage 발달
4k+020	89.45	435	17	연암~풍화토	풍화 세일대 발달, Rock cleavage 발달
4k+040	56.50	445	15	풍화암~풍화토	풍화 세일대 발달
4k+060	70.96	425	16	풍화암~풍화토	좌측부 블록화, 풍화대발달
4k+080	60.43	467	15	풍화암~풍화토	풍화대 발달, 파쇄대 형성
4k+100	54.03	476	18	연암~풍화암	우측 풍화암대, 좌측 블록화
4k+130	44.08	437	18	연암~풍화암	전체적 파쇄, 블록화

※ 석탄층 발달구간 : 3+860~4+150, 계측기간 : 1999.5.10~2000.9.15

표 6. 내공변위 계측결과 (mm)

위 치	3+949	3+973	3+985	3+998	4+005	4+020	비고
내공변위 (상반)	-103.54	-111.16	-106.97	-102.70	-108.47	-87.65	6/20 현재
	-127.83	-127.65	-122.64	-111.65	-110.10	-88.38	7/25 현재
	-126.00	-127.84	-123.35	-112.68	-110.71	-89.45	9/15 현재
내공변위 (하반)	-4.47	-3.96	-4.89	-4.85	-3.95	-10.07	7/25 현재
	-7.21	-6.72	-6.19	-6.45	-5.45	-11.47	9/15 현재
하반굴착 일시	6/25	7/1	7/1	6/29	6/28	6/7	

※굴진방향 (시점)



(종점)

주로 석탄층 발달구간에서 집중 수행된 계측결과는 일반적인 터널계측결과보다 크게 발생하여, 상반굴착 완료 후 SL의 수평방향 내공변위는 55.91~111.16mm이었다. 한편 하반굴착 후 13일(2000년 6월 20일)이 경과한 Sta.4+020 지점은 내공변위가 55.91mm(21일 경과 후 측정값)에 비해 87.65mm로 약 1.5배 증가하였다.

하행선 모든 구간에서 하반굴착이 완료된 2000년 7월 25일은 상반굴착 후 대부분 수렴상태이던 SL 지점의 내공변위가 위치별로 8.95~24.29mm가 증가하였다. 각 위치별 계측결과를 살펴보면 Sta.4+020과 Sta.4+005지점은 SL 지점의 내공변위(R1-L1)가 하반굴착에 의해 큰 영향을 받지 않았으나, Sta.3+998부터 Sta.3+949 구간은 하반굴착에 의한 영향으로 상반굴착 후 안정되었던 SL의 내공변위가 추가로 최대 24.29mm까지 발생하였다. 특히 하반굴착 3~4일전부터 SL의 내공변위 증가 폭이 커져서 하반굴착에 선행하는 변위임을 알 수 있다. 한편 하반의 R2-L2 내공변위는 하반관통 후 25일이 경과하였는데 대부분 5mm 이내로 상반에 비해 내공변위발생이 크지 않으나 안정상태에는 도달하지 못한 것으로 판단된다(그림 5 참조).

터널 하반관통 후 터널내공변위를 지속적으로 측정하였으며, 약 45일이 지난 2000년 9월 15일의 내공변위 측정결과를 보면 하행선 SL의 수평방향 내공변위는 거의 수렴상태로 판단되나, 하반의 수평변위는 최대 11mm 정도로 크지 않으나 수렴상태에 도달하지 않은 것으로 판단되어 인버트에 대한 보강을 검토하였다.

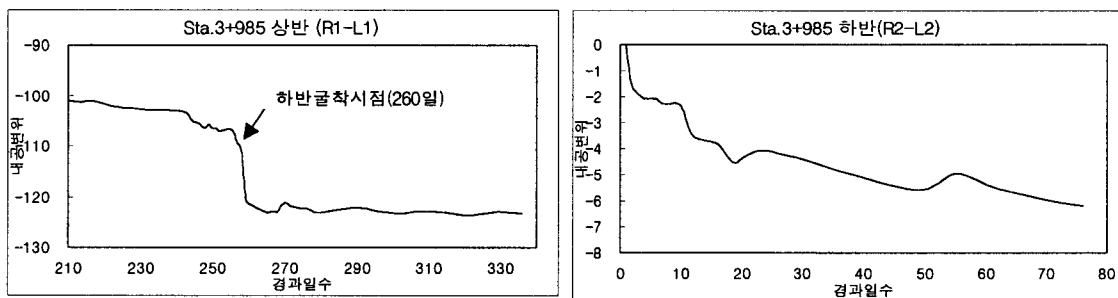


그림 5. 대표단면(Sta.3+985) 계측현황

4. 터널안정성 검토

4.1 계측결과분석

1) 내공변위 계측기준

터널의 내공변위측정은 일련의 현장 계측 중에서 가장 간단하면서 빈번히 수행되는 것으로 터널의 안정성에 대한 판정 자료로 가장 유용하게 활용될 뿐만 아니라 록볼트의 보강, 2차 슛크리트 타설 유무와 인버트 폐합 유무와 그 시기 등의 판단자료로 사용된다. 터널 안전도 판정의 기준으로는 내공변위량, 변위속도 등이 기준이 되고 있으며, 표 7은 일본비도건설의 직경 10m의 터널에서 적용하는 지반조건별 내공변위 관리기준이다.

표 7. 내공변위에 의한 시공 관리기준(일본비도건설, 직경 10m 정도의 터널)

관리기준 지반		주의 수준 I		주의 수준 II
		내공변위	변위속도	내공변위
경 압 지 반		2~3 cm	5 mm/일이 3일간 계속	3~5 cm
애 추 지 반		3~5 cm	5 mm/일이 3일간 계속	5~7 cm
토사계 지 반	사질토	2~3 cm	5 mm/일이 3일간 계속	3~5 cm
	점성토	3~5 cm	1 cm/일이 3일간 계속	5~7 cm
팽창성 지반		10 cm	3 cm/일이 3일간 계속	20~30 cm
대 응 책		계측 결과, 현장 상황을 종합적으로 판단하고 대책을 결정, 계측 회수를 많이 하고 주의해서 시공		대책 강구(시공법의 변경, 보조 공법 추가나 지보 부재의 추가 등)

표 8. 일본 장대 터널의 관리 기준치 (京滋 도로 터널, D:10.6m H:8m)

주의 Level		주의 level 1	주의 level 2	주의 level 3
작 업 내 용		굴착작업지속	주 의	굴착 정지 대응책 시공
내공 변위 (mm)	상반 수렴치 (1D 변위)	34 이하 (24 이하)	34~45 (24~31)	45 이상 (31 이하)
	최종 수렴치	68 이하	68~90	90 이상
	최대변위속도 (mm/day)	10 이하	10~20 또는 3~5가 3일 이상 지속	20 이상 또는 5 이상이 3일 이상 지속
내 용 설 명		·탄성변형으로 문제시되는 이완은 발생되지 않음. ·극단적으로 변형량이 작을 경우에 지보공을 감소시켜 시공.	·소성변형 발생의 위험이 있음. ·계측 및 갱내관찰 빈도수를 증가시킴. ·변형의 원인을 추정, 보강 대책 마련.	·한계상태에 도달하여 있으며, 과도한 이완영역이 발생되어 있다. ·즉시 보강공을 실시하고 지보 Pattern를 변경한다.

2) 계측결과검토

동북터널 하행선의 내공변위 계측 결과를 종합하면 2000. 9. 15 현재 하반굴착 후 SL에서 내공변위가 최대 127mm 발생하였으며, 이와 같은 절대 변위량은 앞에서 언급한 내공변위 기준과 비교하여 볼 때 상당히 큼을 알 수 있다.

본 검토에서 적용한 계측관리기준은 표 7과 표 8과 같다. 총내공변위에 의한 기준은 표 7을 적용하였는데, 풍화암 지반에서 5~7cm, 토사계지반(풍화토)에서 3~7cm의 변위발생을 '주의 수준 II'으로 보고 이를 초과 시 보강대책을 강구하도록 되어 있다. 본 구간의 암질이 풍화가 심한 편암계열이므로 총내공변위 5~7cm를 기준으로 보강이 필요한 것으로 판단하였다. 최대변위속도와 상반에서의 내공변위발생량은 표 8을 적용하였으며, 주의 level 3은 최대변위속도가 20mm/day 이상 또는 5mm/day 이상 3 일간 계속 발생할 경우, 또는 상반 수렴치가 45mm이상인 경우, 1D에서의 상반 수렴치가 31mm 이상인 경우로서 터널주변지반이 한계상태에 도달한 것으로 판단, 즉시 보강공을 실시하고 지보패턴을 변경하여야 하는 것으로 판단하였다.

터널계측자료를 변위속도와 1D에서의 내공변위량, 총내공변위량 등을 기준으로 검토하였다. 변위속도 기준으로 검토한 결과, 최대일변위속도가 20mm/day 이상을 나타내는 지점 : Sta.3+949, Sta.3+998, Sta.4+005, 변위속도가 5mm/day 이상 3일간 계속 나타나는 지점 : Sta.3+949, Sta.3+973, Sta.4+020으로 Sta.3+949~Sta.4+020구간(연장 : 71m)은 즉시 보강공을 실시하고 지보패턴을 변경해야 하는 구간으로 판단되었다.

1D에서의 내공변위량을 기준으로 검토한 결과, Sta.3+920 지점의 경우는 1D 굴착 시 상반에서 24.52mm의 내공변위가 발생하였고 Sta.4+060 지점에서는 27.47mm, Sta.4+080 지점에서는 9.32mm, Sta.4+100에서는 2.36mm로 나타났다. 따라서 Sta.3+920~Sta.3+949 구간, Sta.4+020~Sta.4+060 구간은 표 8의 주의 level 2에 해당하므로 보강대책이 필요한 것으로 판단된다.

총내공변위량을 기준으로 검토한 결과, 총내공변위량이 5cm 이상 발생구간은 하행선 Sta.3+920~Sta.4+100 구간(연장 : 180m)이었다.

위의 결과를 종합하면, Sta.3+920~Sta.4+060 구간(연장 : 140m)은 추가보강대책이 필요한 구간으로 판단되며, Sta.4+060~Sta.4+100 구간은 총내공변위가 5cm 이상이나 내공변위속도가 크지 않아 추가보강대책이 필요하지 않은 구간으로 판단되었다.

계측결과분석에 의해 추가보강대책이 필요하다고 판단된 구간 중 일부는 터널굴착 중 표준지보공 이외에 석탄층이 발달되는 측벽부에 대해 추가로 록볼트 길이를 증가시켜서 기존 지보사이에 시공하고 보강숏크리트를 실시하였으며, 하반 굴착 전 상반 SL 부근에서 하반측 방향으로 사전 추가경사 록볼트를 시공하여 변위억제 및 터널안정을 도모하였다.

4.2 수치해석에 의한 터널안정 검토

석탄층 발달구간에 대해 상·하반 굴착완료 후와 터널 바닥부 맹암거 및 치환을 위한 굴착 후의 안정성을 수치해석을 통해 검토하였다.

1) 지반물성

터널안정 검토를 위해 사용한 지반물성은 현장 암반의 RMR로 추정하였다. 상행선 터널의 암질은 RMR이 24~36 (평균 31)이고 하행선은 RMR이 14~22 (평균 17)로 나타나지만 모암인 편암의 암질은 대동소이하였다. 하행선 터널의 경우는 우측에 석탄층을 포함한 파쇄대의 영향으로 인해 RMR이 감소한 것으로 판단되어 편암의 RMR 값은 평균 31을 적용하였으며, 협재석탄층과 우측에 발달하는 파쇄대(약 5m 두께)는 별도의 지반물성치를 적용하여 모델링하였다. 편암의 탄성계수는 Bieniawski(1978)의 경험식을 이용하여 RMR 값이 50 미만인 암반이므로 아래 관계식을 사용하였다.

$$E_m = 10^{(R.M.R-10)/40} \text{ (GPa)} \quad (50 > RMR)$$

기타 암반 물성은 원설계 물성을 이용하였다(표 9 참조).

표 9. 실시설계에서 적용한 지반물성

구 분	단위중량 (t/m ³)	탄성계수 (10 ⁴ t/m ²)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (°)	포아송비	축압계수
토사	2.0	0.1	0.0	25	0.30	0.40
풍화암	2.3	2.0	3.0	25	0.30	0.40
연암	2.6	10.0	15.0	30	0.25	0.70
경암	2.74	40.0	50.0	41	0.20	1.50

석탄층의 물성은 터널 내에서 실시한 계측자료(내공변위)를 응력-변형관계식, 기존자료 등을 이용하여 추정하였다. 터널굴착 중 최대폭 10.6 m에 대해 약 127mm의 내공변위가 발생하여, 탄성거동을 가정하여 추정한 석탄층의 변형계수는 62500 kPa(0.0625 GPa, 상부 토피 50~55m)이며, 이 값을 최초값으로 실측된 내공변위량과 비교하면서 변형계수를 조정하였다. 최종적으로 석탄층의 지반물성은 변형계수가 7500 kPa, 점착력 3 t/m², 내부마찰각 25°이다(점착력이 3 t/m² 미만일 경우 터널은 붕괴되는 것으로 나타남).

2) 해석개요

동북터널 하행선은 석탄층이 터널진행방향(N30°E)과 사교하는 NS~N30°E의 주향을 가지고, 45~55°SE(약 50°SE)의 경사를 가지고 발달하고 있어, 터널해석단면의 모델링에서도 50°경사를 가진 석탄층(Coal Beds)이 발달하는 것으로 모델링하였다(화순에서 주암층 방향기준). 터널 변위와 이완 및 소성영역, 파괴영역의 유무 및 분포에 대해 검토하였다.

3) 해석결과

기반암과 석탄층의 지반물성을 이용하여 해석을 실시한 결과, 상·하반 굴착 및 보강 시 내공변위가 최대 44mm 발생하였다. 터널에서 실측된 최대내공변위 127mm와는 큰 차이를 보이고 있는데 이는 터널주변의 지반이 탄성거동에 의해서 일부 변위가 발생하고 나머지는 소성거동에 의해 점진적으로 변위가 발생한 것으로 판단되며, 석탄층 분포영역에서 변위가 크게 발생하여 대부분 이완된 상태로 판단된다. 한편 터널 바닥부의 연약한 석탄층을 치환하기 위해 굴착할 경우에는 상·하반 굴착 후와 비교, 내공변위가 약 51% 증가하였으며, 이완 및 소성영역이 더욱 확대되어 터널의 안정성에 불리한 영향을 주는 것으로 예상할 수 있었다(그림 6 참조).

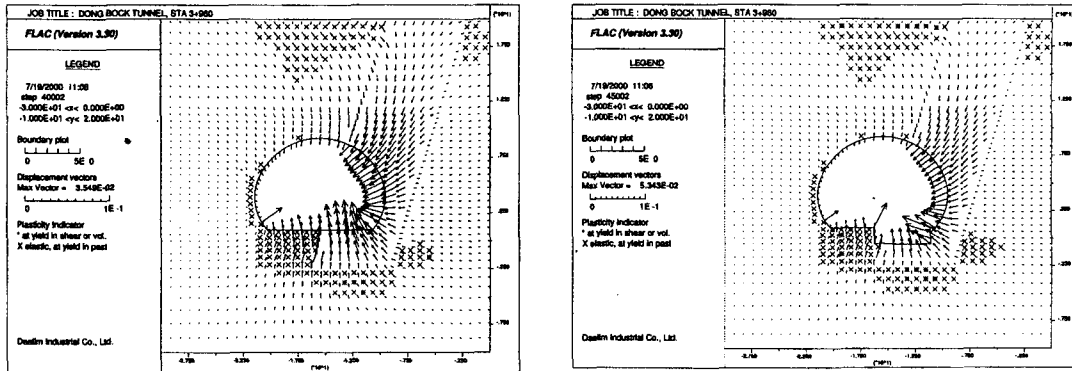


그림 6. 터널 상·하반 굴착 후(좌), 바닥부 굴착 후(우) 변위, 소성 및 이완영역 분포도

5. 터널보강방안

동북터널 하행선의 석탄층 발달구간에 대해서는 내공변위 발생량을 고려하여 계측기간 및 빈도를 증가시켜 터널저동을 관찰하였다. 굴착 및 보강과정에서는 현장조건을 반영하여 굴진장 조정과 구간별 지보타입의 하향적용 및 추가보강을 실시하였으며, 추가지보공은 기존 지보공을 이용하였다. 그러나 터널하반 굴착 후 내공변위량이 최대 127mm로 크게 증가하여, 내공변위 자료를 분석한 결과 Sta.3+920~Sta.4+060구간(연장 : 140m)은 보강대책이 필요한 것으로 판단되었으며, 수치해석에 의한 검토 역시 추가굴착에 의해 내공변위가 최대 51% 까지 증가함을 보여주었다. 따라서 동북터널 하행선은 인버트 보강 및 라이닝 철근보강을 포함한 전체적인 터널보강대책을 수립할 필요성이 있는 것으로 나타났다.

5.1 터널 상·하반 굴착 시 보강

1) 지보타입 하향적용

터널지보패턴은 현장에서 작성한 RMR 분류를 근거로 결정하였다. 하행선의 Sta.4+150~Sta.3+890 구간의 현장암반은 대부분 편암으로 Rock Cleavage를 따라 석탄층이 좌우 측벽부 및 천단부에 발달하였으며, 암질은 대부분 RMR 기준 14~36 사이로 표준지보패턴 IV~V에 해당되어 지보패턴을 TYPE V로 하향 적용하였다(표 4 참조).

2) 계측빈도 및 지속기간 증가

일반적으로는 상반굴착 후 막장이 진행됨에 따라 내공변위가 수렴되어 계측이 종료되어야 하는데, 하행선터널의 경우는 내공변위가 지속적으로 조금씩이라도 발생하여 석탄층이 노출되는 구간에 대해 계측빈도 및 기간을 계측기 설치 시부터 하반 관통 후까지 거의 매일 실시하였다.

3) 록볼트 추가보강

하행선 석탄층 발달구간은 상반막장 관찰 결과, 암반조건이 불량하고 석탄층의 발달로 인해 내공변위가 51~110mm가 발생하여 추가보강이 필요한 것으로 판단되어 상반굴착 시 측벽부에

TYPE-A, TYPE-B의 록볼트 보강을 추가로 실시하였다.

하반굴착시에도 석탄층이 지속적으로 발달되는 구간은 최대 127mm까지 내공변위가 발생하여 터널 안정성 확보를 위해 좌우측벽부의 상반에 1개/1.2m, 하반에 1~2개/1.2m의 추가 록볼트 보강 (TYPE -C)을 실시하였다.

표 10. 석탄층 발달구간의 록볼트 추가보강현황

구분	위 치	연장(m)	록볼트 추가보강개수	보강형식
1 구간	4+045~4+015 (좌측벽)	30	62 개	TYPE-A
2 구간	4+015~3+890 (좌측벽)	125	156 개	TYPE-B
3 구간	3+890~4+045 (좌측벽)	155	324 개	TYPE-C
4 구간	4+890~4+033 (우측벽)	143	299 개	TYPE-C
계		453	841 개	

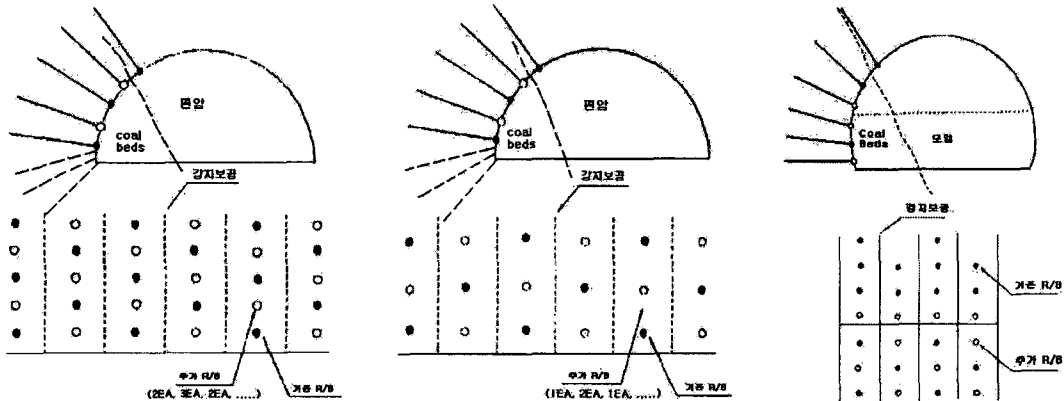


그림 7. 록볼트 추가보강(TYPE-A, TYPE-B, TYPE-C)

5.2 터널 바닥부 보강방안

터널 바닥부 석탄층은 침하대책의 일환으로 치환의 필요성이 요구되고, 맹암거 설치를 위해 바닥부 굴착이 필요하기 때문에 인버트 보강이 선행되어야 할 것으로 판단되었다.

터널보강방안은 터널 SL에서 수평변위가 과다하게 추가로 발생하면 강지보와 슛크리트의 변형이 발생하여 지보재의 기능이 감소될 것으로 예상되므로, 항구적으로는 터널 인버트를 기존 지보재와 일체화(폐합)하는 방안이 요구되었다. 인버트 폐합방법은 강지보 설치방안과 콘크리트 타설 방안이 있는데, 이미 내공변위가 많이 발생하였고 추가변위 발생의 우려도 있기 때문에 가능한 한 변위발생을 억제할 수 있는 인버트 강지보 설치방안(그림 8 참조)이 적절한 것으로 판단되었다. 인버트 강지보는 Sta.3+960~4+060 구간(연장 140m)에 설치하였으며 시공 중 내공변위의 추가발생은 2~5mm 이하로 미미하였는바 변위가 수렴된 후 치환콘크리트를 타설하여 터널 바닥부 보강을 완료하였다.

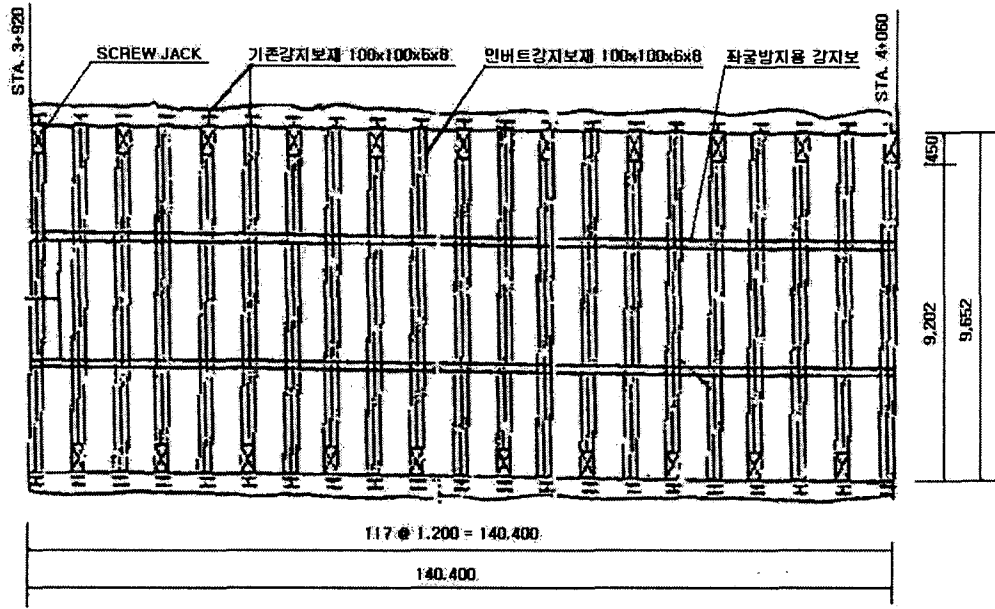


그림 8. 터널 바닥부 강지보 폐합 및 콘크리트 보강

5.3 라이닝 보강 검토

동북터널 하행선에 대해 라이닝 타설을 위해 내공현황측량을 실시한 결과, 일부구간에서 설계두께인 30 cm가 확보되지 않았다. 일반적으로 터널에서 지반불량에 따른 내공변위 과다발생으로 라이닝 두께가 부족한 경우가 발생시, 부분적인 돌출에 대해서는 설계두께의 1/3 또는 10 cm 정도를 허용 한도로 하고 있으나(도로공사 도로설계요령 4 권 터널편 라이닝의 설계 참조), 동북터널의 경우는 라이닝 두께 부족구간이 대부분 석탄층 발달구간과 일치하는 것으로 나타나(표 11 참조), 석탄층 발달에 의한 내공변위의 과다발생, 일부 지보재의 변형발생, 석탄층의 역학적 특성을 고려 시 일부구간은 철근보강이 필요한 것으로 판단되었다.

표 11. 내공변위 현황

구분	a-a	c-c	비고
라이닝 두께(30cm) 부족구간	3k+985~4k+020	3k+975~4k+035	
부족두께	6~86mm	7~98mm	

터널라이닝 철근보강검토는 콘크리트의 설계강도는 $\sigma_{ck}=240 \text{ kg/cm}^2$, 철근피복은 5cm 이며, 라이닝에 작용하는 단면력은 수치해석결과를 적용하고 하중조합은 $U=1.5(D1+D2) + 1.8Q$ ($D1$: 이완 하중, $D2$: 자중, Q : 잔류수압)을 적용하였다. 라이닝 콘크리트 철근 보강결과를 요약하면 표 12와 같다. 한편 라이닝 설계두께가 부족한 구간에 대해서는 기시공된 숏크리트 일부를 제거하여 설계두께

를 만족시켜 시공하였다.

표 12. 라이닝 철근 보강

적용구간	설 계 강 도	철근피복	외측 주철근 (shotcrete 측)	내측 주철근 (터널측)
Sta.3+970~4+020	$\sigma_{ck}=240 \text{ kg/cm}^2$	5 cm	D22@150	D19@150

6. 결론

동북터널 하행선의 석탄층 발달구간(Sta.3+860~4+150)에 대한 내공변위 계측자료를 분석한 결과, 상반굴착시 지보패턴 조정과 추가보강에도 불구하고 상당량의 내공변위가 발생하였으며 하반굴착시에 추가로 10~24mm의 변위가 발생하였다. 그러나 현장지질조건, 변위량 분석, 수치해석 등을 이용한 검토를 종합하여 매 Round 지보공 설치 및 추가 지보공 설치를 실시하는 등 상·하반굴착과정 중의 충분한 사전 및 사후 보강으로 굴착 후 수렴상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 터널 바닥부에 맹암거 설치 및 석탄층에 대한 치환의 필요성을 고려 시, 충분한 제검토와 인버트 보강 공등의 추가 보강이 필요한 것으로 판단되었다.

즉, 하행선에서 수행한 계측결과를 내공변위속도, 내공변위량의 계측기준으로 검토한 결과, Sta.3+920~Sta.4+960 구간(연장 140m)은 보강대책이 필요한 것으로 판단되었으며, 터널 수치해석에 의한 안정검토에서도 터널 굴착 후 주변지반의 상당부분에 이완 및 소성영역이 형성되었고 지보재에도 파다한 응력이 작용하는 것으로 나타났으며, 향후 맹암거 굴착, 석탄층 굴착으로 인해 안정성이 더욱 저하되는 것으로 나타났다.

하행선 석탄층 발달구간에 대한 보강은 굴착 중에는 지보패턴 III,IV에서 지보패턴 V로 변경하였으며 측벽부 보강을 위해 상반굴착 시 218개, 하반굴착 시 623개의 추가 록볼트를 타설하였다. 한편 터널 바닥부 Sta.3+920~4+060 구간(연장 : 140m)에 대해 기존 강지보와 H-beam을 이용 인버트를 폐합하였고, 석탄층 발달구간을 콘크리트로 치환하였으며 이 과정에서의 추가변위의 발생은 매우 미미하였다. 라이닝은 내공변위가 다량 발생한 50m 구간에 대해 철근 콘크리트 라이닝으로 변경하였으며 설계두께 확보를 위해 기 보강된 슛크리트 일부를 제거하였다.

현재 동북터널은 라이닝 공사까지 완료된 상태이며 석탄층 발달구간의 추가변형은 인지되지 않고 있으나 지속적인 조사 및 관찰이 필요한 것으로 생각된다.

끝으로 본 과업기간중 제반 협조를 아끼지 않으신 관련 발주처 및 감리단의 모든 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 동북우회도로 축조 및 포장공사, 종합보고서
2. 동북우회도로 축조 및 포장공사, 지반조사보고서
3. 동북우회도로 축조 및 포장공사, 동북터널수치해석보고서
4. 도로설계요령 제 4권 터널, 한국도로공사, pp91~96, pp121~129
5. 지반공학시리즈 7 터널, 한국지반공학회, pp440~443
6. 고속도로 터널설계 실무 자료집, 한국도로공사, pp247~264
7. 터널설계에서의 조사·계측의 평가와 이용