

NATM시공 산악터널에서 암반분류 및 계측에 의한 지보공 선정 사례연구

김 영 근, 장 정 범, 정 한 중
(주)대우 건설기술연구소

1. 서론

터널은 긴 선상구조물로서 사전지질조사에 의해 설계에 필요한 정보를 정밀도 높게 구하는 것이 매우 어렵다. 따라서 터널시공중 암반 및 지질상황을 관찰하고, 터널주변 지반의 거동을 계측하여 지반에 적합한 지보공을 설계·시공하는 것이 필수적이다.

이를 위해서 터널시공중 정량적인 암반분류와 계측(일상관리계측과 대표단면계측)이 주기적으로 실시되고 있지만, 이러한 결과를 어떻게 시공에 반영하느냐는 터널의 합리적인 시공에 있어 매우 어려우면서도 중요한 문제라 할 수 있다.

본 논문은 NATM공법으로 시공된 산악터널에서 암반분류와 계측결과에 의한 지보공 선정 및 변경에 대한 적용사례이다. 이러한 적용사례를 통하여 NATM 터널에서의 암반분류와 계측의 공학적 의미를 평가하고자 하였다. 또한 지보패턴별 계측변위의 경향을 분석하므로써 암반상태와 계측결과와의 관련성을 평가하고자 하였다. 특히 경암지반에 굴착된 NATM 터널에서의 계측의 유용성을 고찰하였다.

2. 설계와 시공

본 연구대상지역은 경부고속철도 구간에 NATM 공법으로 시공중인 길이 4.02 km, 단면적 105m² 인 대단면 장대터널로서 경암지반을 관통하는 산악터널이다.

2.1 지질조사

지표지질조사와 시추조사를 실시하여 암종과 절리의 발달, 암석코아에 대한 코아회수율(Total Core Recovery)와 RQD를 구하였고, RMR 분류를 이용하여 암반을 분류하였다. 또한 탄성파탐사를 실시하여 지하지질상태를 추정하였다.

본 지역의 지질은 선 캄브리아기에 속하는 편마암류인 안구상편마암(Augen Gneiss)와 호상편마암(Banded Gneiss) 등이 주로 분포하고 있다. 터널시점에서 Sta.108K 750지점까지는 안구상 편마암이 나타나고 있으며 그 이후로는 호상편마암으로 변하고 있다. 그리고 암맥류인 각섬석과 석회암층이 부분적으로 분포한다(그림 2.1(a)).

암종의 분포상태는 변성작용의 정도와 상변화에 의하여 호상편마암 및 안구상편마암의 기반암과 관입암체로 이루어지며, 시추조사결과 나타난 지층상태는 풍화암, 연암 및 경암의 순으로 형성 분포하고 있다.

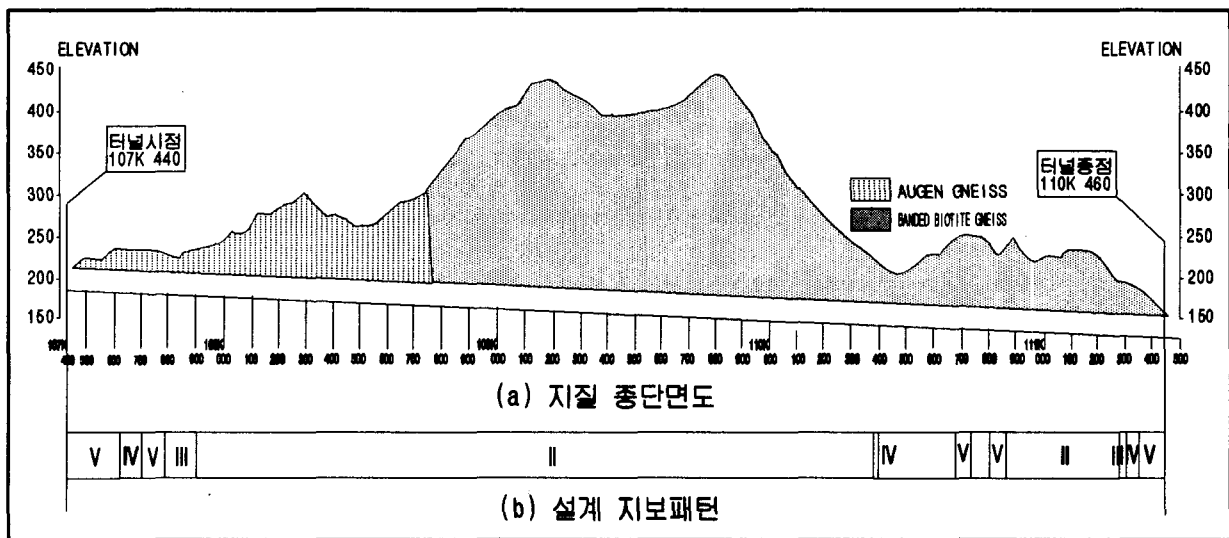


그림 2.1 터널 종방향 지질도 및 설계지보패턴

2.2 설계

터널단면은 한국고속철도 건설공단에서 제시된 복선반원형 표준단면으로 설계하였으며 궤도중심간격은 5.0m로 NATM공법을 적용하여 설계하였다. 터널막장의 지반상태와 시공성을 고려하여 5종의 표준지보패턴으로 구분, 설계 하였으며 지보패턴 I ~ IV까지는 상하반단면 굴착공법으로 하고 지보패턴 V는 다단면 굴착공법으로 설계하였다. 본 터널구간에 적용된 지보패턴별 특성은 그림 2.2에 나타나 있다.

표준지보설계단면에 대하여 설계제원에 대한 타당성을 검토하기 위하여 지반해석용 프로그램인 FLAC을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 터널 굴착 해석단계에 따라 터널 내부의 천단침하 및 내공변위를 정리하면 표 2.1과 같다. 수치해석결과를 계측 1차 관리치로 활용하기 위하여 계측이 수행되기 전의 변위인 굴착시 변위를 제외하여 산정하였다. 계측 1차 관리치로 활용하기 위한 변위량은 천단침하 19.2 mm, 내공변위 5.25mm 로 나타났고, 전체적으로 소성영역은 나타나지 않았다.

표 2.1 터널 수치해석 결과

굴착단계 항목	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	굴착내용 및 하중분담률
천단침하	-11.43	-19.85	-28.02	-30.67	-29.87	1단계: 상부반단면굴착 (40) 2단계: Soft SC 및 RB시공 (30) 3단계: Hard SC (30)
(계측관리치)	0.0	-8.42	-16.59	-19.24	-18.44	
내공변위	2.65	4.66	6.73	-2.32	-2.60	
(계측관리치)	0.0	2.01	4.08	-4.97	-5.25	4단계: 하부반단면굴착(50) (50) 5단계: Hard SC (50)

2.3 시 공

본 터널의 시공은 NATM 공법에 의해 시공되었으며, 굴착 공법으로는 막장을 상·하반 분할하여 굴착하는 Long Bench Cut 공법을 사용하였다. 굴착은 동구와 서구로 구분하고, 각각을 시발점으로 하여 터널동구측에서는 Sta. 107K 440에서 상반 굴착을 시작하여 Sta. 109K 460 지점까지 굴착거리 2020m를, 터널서구측에서는(이하 운주서구) Sta. 110K 460에서 터널을 굴착하여 Sta.109K 460 지점까지 총굴착거리 2000 m를 관통하여 굴착을 완료하였다.

또한 기계화 시공에 의한 터널 안전시공 및 품질보증을 위하여 Jumbo Drill(2-Boomer, 3-Boomer), 이동식 대차, 습식 Shotcrete 타설기(T.A.S.S), 자주이동 유압식 Lining Form, 송풍식 대규모 FAN, 최신 터널측량기기(Geodimeter, Laser Beam) 등을 사용하였다.

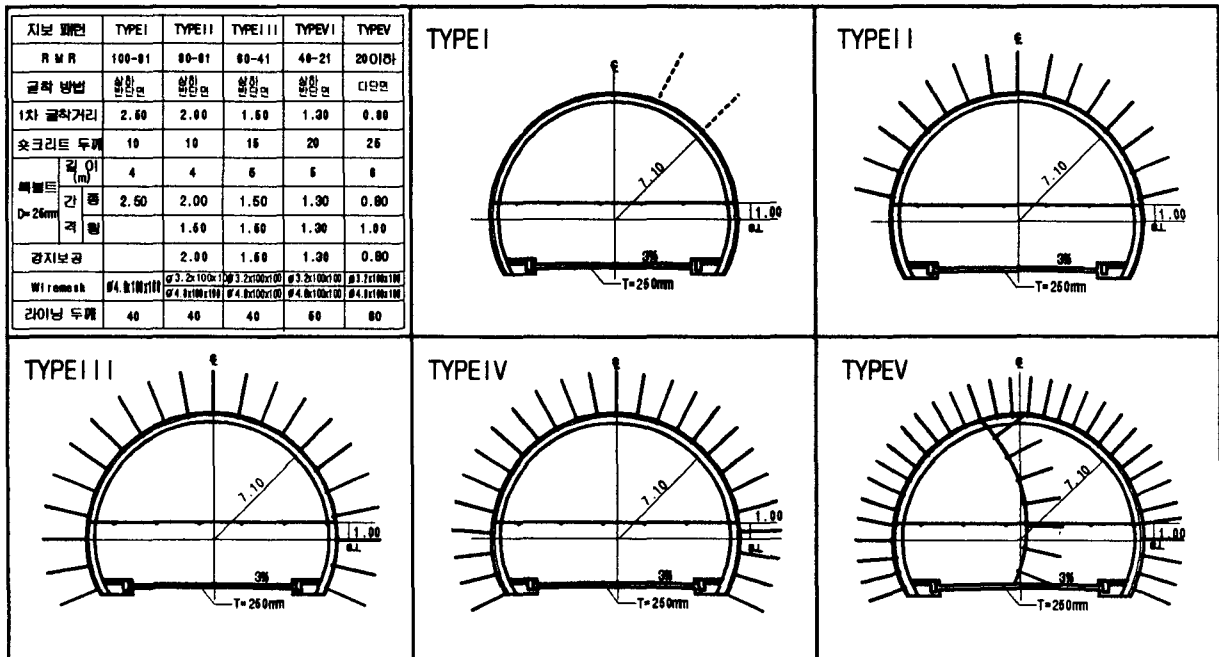


그림 2.2 표준지보 패턴

3. 암반평가 및 계측

3.1 암석시험 및 암반분류

지보패턴별 암석물성의 특성을 조사하기 위하여 각 구간에서 채취한 암석시료에 대한 물성시험과 강도시험을 실시하였으며 그 결과는 표 3.1에서 보는 바와 같다. 지보패턴이 TYPE II에서 TYPE V로 변화함에 따라 공극률은 점점 증가하였고, P파 및 S파 속도는 점점 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 단축압축강도는 지보패턴이 TYPE V로 변화함에 따라 점점 감소하고 있으며, 영률, 인장강도, 점착력에서도 같은 경향을 보여주고 있다. 특히 TYPE V에서 크게 감소하였다.

표 3.1 지보패턴별 암석시험결과

지보패턴 암석물성	TYPE II	TYPE III	TYPE IV	TYPE V
단위중량(g/cm ³)	2.68	2.70	2.60	2.59
공극률(%)	0.61	0.71	1.63	3.27
P파 속도(m/sec)	4820	4860	4220	2370
S파 속도(m/sec)	2690	2500	2240	1480
단축압축강도(kg/cm ²)	1287	1064	889	421
인장강도(kg/cm ²)	95	88	82	32
영률(kg/cm ²)	5.88	5.01	4.67	1.22
포아송비	0.24	0.22	0.24	0.24
점착력(kg/cm ²)	200	199	192	92
내부마찰각(°)	52	50	46	22

암반분류는 RMR분류법을 이용하였다. 암석강도는 슈미트해머와 점하중시험으로부터 구하였으며, 매막장마다 암반평가의 객관성을 확보하기 위하여 화상처리기법(Image processing technique)에 의한 막장관찰도를 작성하였다(그림 3.1).

3.2 계측

① 계측내용 및 현황

일상관리계측(A계측)항목인 내공변위 및 천단침하의 측정은 갱구부에서 15m~20m 간격,

중심부에서는 30m~40m 간격으로 설치하였고, 총 내공변위 측정위치는 145개소 290지점이며 천단침하는 145개소 145지점이다. 대표단면계측(B계측)인 록볼트측력, 지중변위 및 슛크리트 응력 측정은 총 10개소 50지점에서, 그리고 지표, 지중침하측정에서는 2개소에서 실시하였다, 그림 3.2에는 계측기 설치단면을 보여주고 있다.

② 계측 관리 기준

본 현장은 상하반 분할 굴착하는 공법이 적용되었으므로 내공변위는 초기치 측정이 늦어져 천단침하를 위주로 계측관리를 수행하였다.

일상관리계측에 대해서는 수치해석 결과를 1차 계측 기준치로 설정하였고, 계측 결과가 시공방법, 지보공 시공시기 및 크기, 지하수량, 보조공법 등에 따라 다양한 변화를 보이므로 변위속도 및 지보재 시공 전·후 형상 등을 검토하여 변위속도는 3mm/일 이상, 지보재 Crack 발생시 2차 계측기준으로서 대책을 수립하여 시공에 반영되도록 관리하였다.

또한 Shotcrete 응력은 허용 휨 압축응력으로 84kg/cm²(설계기준강도 210kg/cm²), 록볼트 축력은 록볼트 인발내력을 고려하여 10ton/본을 관리 기준으로 설정하였다.

분류요소	측 정 값		평균값	등급	RMR	암반분류
암석강도	반발계수	44, 48, 50, 40, 64, 45, 55, 49	53.8	S6	10.81	III FAIR ROCK
	kg/cm ²	34, 42, 47, 55, 38, 46	1232			
절리간격	수평방향 (cm)	136, 42, 99, 104, 47, 16, 26, 109, 28, 78, 114, 47, 52, 73, 78, 16, 166, 161	48	Medium	7.86	
	연직방향 (cm)	54, 80, 38, 48, 90, 48, 48, 78, 18, 30, 54, 36				
RQD	절리빈도		80.9	Medium	12.07	
	Joint Set 1	8.7				
	Joint Set 2	6.9				
	Joint Set 3	5.8				
절리상태	Persistence	3-10 m	Roughness	거침	17	
	Aperture	1-5 mm				
	Infilling	없음				Weathering
지하수상태	습윤 (Damp)				10	
절리방향	S50E/30, S80E/43, S60W/60, S68W/63, S40W/72, N14W/60, N30W/45, N10W/80, N22W/73, N18W/68		유리	-5	52.83	

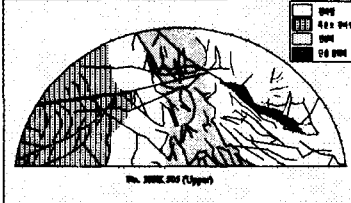
 <p>○ 불연속면</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 우측에 Fault ■ 중앙에 Random Joint ■ 일부 Foliation <p>○ 암 종</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 안구상 면마암과 호상 면마암 존재 ■ 우측상부에 단층활동대 ■ 중앙에 변성대 발달 <p>막장 관찰도</p>
--

그림 3.1 암반분류 및 막장관찰도

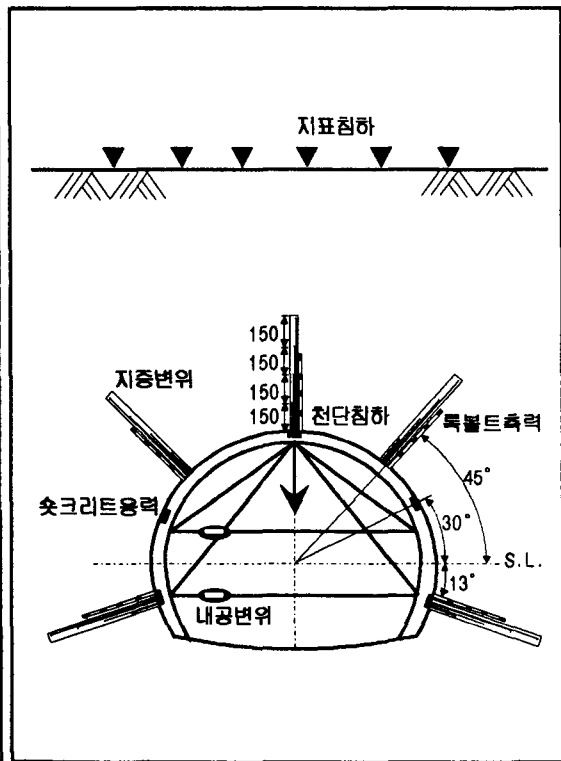


그림 3.2 계측기 설치단면

4. 지보공 선정

4.1 지보패턴 변경

터널시공중 터널주변에 대한 암반분류결과를 바탕으로 시공지보패턴을 결정하였으며 시공 후 계측결과로부터 터널안정성을 확인하였다. 그림 4.1은 본 터널에서 설계지보패턴이 변경되어 시공된 지보패턴을 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 터널시점부에서 불량한 암반구간이 설계보다 길어져 TYPE V, TYPE IV로 변경시공하였으며, 터널중점부에서는 불량한 암반구간인 TYPE V구간이 실제로는 나타나지 않아 무지보로 시공하였다.

4.2 무지보공 시공

본 터널은 지보패턴 TYPE II인 경우 암반의 RMR 값이 61~80에 해당하는 우수한 암반으로 지보공은 슛크리트, 록볼트, 강지보공으로 설계되어 있다.

그러나 터널중심부로 갈수록 암반의 상태가 비교적 양호해짐에 따라 지보공중 강지보공을 제외하여 시공하였다. 이러한 무지보공은 정확한 암반분류결과를 기초로 RMR 분류에 의한 지보공 선정기준과 일본 신간선 터널을 참고로하여 결정하였으며, 이후 지보구간과 무지보구간에서의 지속적인 계측결과의 비교로부터 무지보구간의 안정성을 확인할 수 있었다.

이와같이 강지보공을 제거한 무지보 구간은 그림 4.1에서 보는 바와 같이 터널입구 부분을 제외한 2800m(터널길이의 70%)로 굴착공정의 감소로 효율적인 굴착이 수행되었으며, 공사비도 절감할 수 있었다.

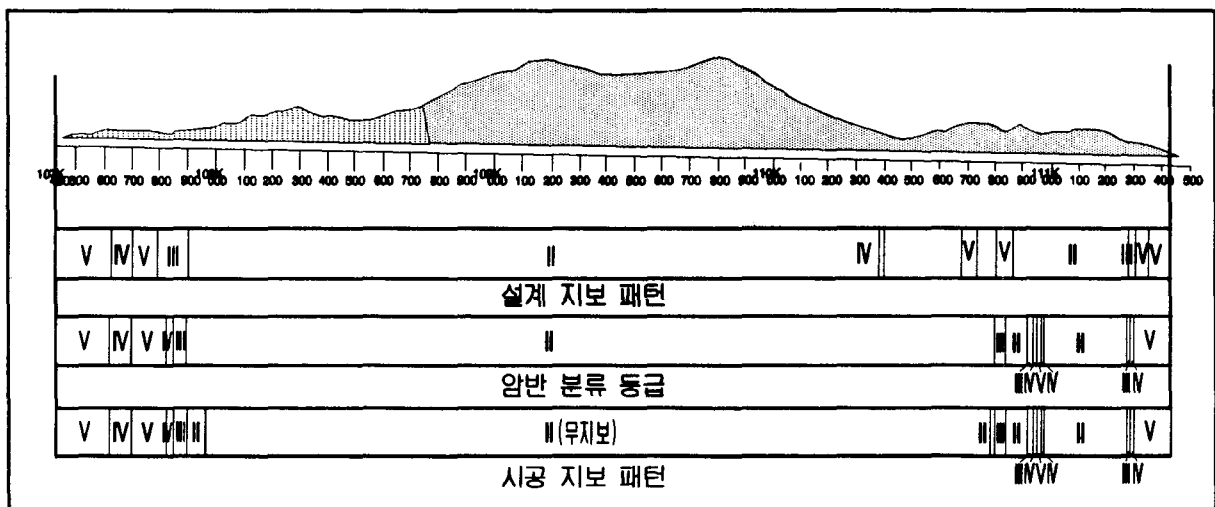


그림 4.1 설계지보패턴과 암반등급 및 시공지보패턴

5. 계측결과분석 및 평가

5.1 내공변위 및 천단침하

지보패턴별 내공변위와 천단침하의 변화양상이 그림 5.1과 그림 5.2에 나타나 있다. 좌측에는 상반최종내공변위(CV1-U)를 우측에는 하반최종내공변위(CV4-U)를 도시하였다. 그림에서 보는바와 같이 TYPE II는 무지보 구간인 TYPE II-1과 큰 변화를 보이지 않으며 TYPE V로 갈수록 내공변위가 크게 나타났고, 천단침하에서도 같은 경향을 보이고 있다.

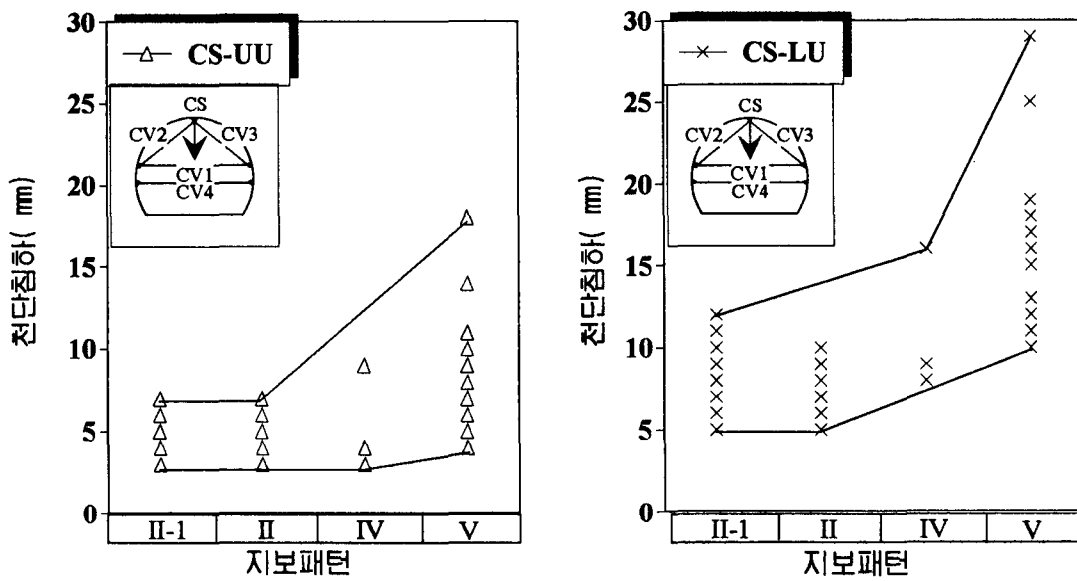


그림 5.1 지보패턴별 내공변위

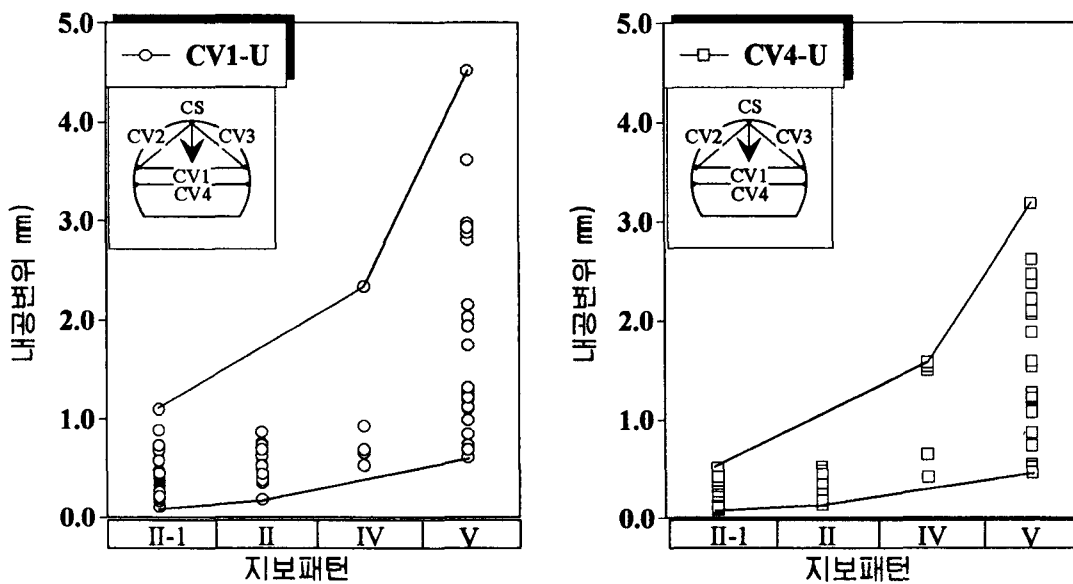


그림 5.2 지보패턴별 천단침하

5.2 지중변위, 슛크리트응력 및 록볼트축력

B계측결과, 지중변위의 경우 최대 7.03mm 로 나타났으나(TYPE V), 대부분 천단부 및 상하반 좌우측 모두 1mm 이하의 매우 작은 변위가 발생하였다. 이것은 터널굴착에 따른 터널 주변 지반의 이완이 매우 작게 일어났음을 것으로 판단된다. Shotcrete 응력은 반경방향 응력(σ_r)이 최대 22kg/cm²,이 하 접선방향응력(σ_t)이 최대 18.46 kg/cm²의 인장력이 발생하였으나(TYPE V), 대부분 10kg/cm² 이하로 Shotcrete에 지반이완에 따른 하중이 거의 작용하지 않고 있는 것으로 나타났다. Rockbolt 축력은 천단부에서 최대 2.48ton 대부분 1ton이하로 Rockbolt의 최대 허용하중에 비해서는 매우 작은 값을 나타내었다.

이러한 결과로부터 터널굴착에 따른 지반 이완량이 매우 작으며 적절한 지보시공에 의하여 안정된 구조를 형성하고 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

NATM공법으로 시공되는 산악터널에서 암반분류와 계측을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) RMR에 의한 암반분류 및 계측결과로 부터 지반에 적합한 지보패턴을 선정 시공하였다. 또한 우수한 암반에서는 강지보만을 제거한 무지보공을 시공하였는데 계측결과로부터 터널의 안정성을 확인할 수 있었다.
- 2) A계측결과 갱구부근을 제외하고는 내공변위 및 천단침하가 매우 작은 변위를 나타냈으며, B계측결과 지반이완의 크기가 작고, 지보재에 작용하는 하중도 매우 작게 나타났다. 이는 적절한 지보 또는 과지보에 의한 결과로 판단된다.
- 3) 이러한 계측결과로부터 경암지반에서 계측은 큰 의미가 없으며, 따라서 계측계획도 지반상태에 따라 적절히 변경해야 할 것으로 사료된다. 또한 합리적인 지보공 선정을 위해서는 보다 정확한 암반분류·평가, 체계적인 계측관리기법의 확립이 요구된다.

참고문헌

1. (주)대우건설기술연구소, 1995, 경부고속철도 제4-3공구 노반신설공사 종합계측보고서.
2. 한국고속철도건설공단, 1992, 서울-부산간 경부고속철도 제4공구 실시설계기타 - 지질조사보고서(I).
3. (주)대우건설기술연구소, 1995, 터널 합리화 시공을 위한 암반평가시스템 연구.
4. (주)대우건설기술연구소, 1995, 터널 암반분류·평가 지침서.