

Shield 및 TBM 터널의 유지관리계측 관리기준 설정에 관한 연구

Establishment of Maintenance and Monitoring Standards for Shield and TBM Tunnels

우종태*

Jong-Tae Woo*

Professor, Department of Civil Engineering using Drone, Kyungbuk University, Namyangju, Republic of Korea

*Corresponding author: Jong-Tae Woo, jtwoo@kbu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The objective of this study was to improve the tunnel maintenance and monitoring technology by establishing the maintenance, management, and monitoring standards for shield and TBM tunnels, which had been applied more in recent years. **Method:** This study comprehensively analyzed and compared the data and model simulations of Seoul Subway Lines 7 and 9 and Bundang Line, shield and TBM tunnels in South Korea, tunnels in France and Japan, and Channel Tunnel in the UK. **Result:** This study set maintenance and monitoring standards when there was no design estimate based on numerical analyses such as section design and section analysis regarding the maintenance and monitoring section of shield and TBM tunnels. **Conclusion:** It is necessary to determine safety by comprehensively considering not only each monitoring item but also the changing trend and correlation of all items and compensation of the tunnel.

Keywords: Shield & TBM Tunnels, Management Monitoring Standards, Segment Concrete Lining, Channel Tunnel, Tunnel Model Experiments, Results of Numerical Analysis

요약

연구목적: 본 연구는 최근 들어 적용이 확대되고 있는 Shield 및 TBM터널의 유지관리계측 관리 기준을 설정하여 터널 유지관리계측 관리기술을 향상시키고자 한다. **연구방법:** 국내 Shield 및 TBM터널인 서울지하철 7호선, 9호선, 분당선, 국외의 프랑스, 일본, 영국의 채널터널 자료와 국내외의 터널 모형실험 사례를 종합적으로 분석하여 상호 비교를 실시한다. **연구결과:** Shield 및 TBM 터널의 유지관리계측 단면 중 단면설계나 단면해석 등의 수치해석 결과에 의한 설계 예상치가 없는 경우의 유지관리계측 관리 기준을 설정한다. **결론:** 계측 관리기준 적용 시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의 변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상 등을 종합적으로 고려하여 안전성 여부를 판정하여야 한다.

핵심용어: Shield 및 TBM터널, 유지관리계측 관리기준, 세그먼트 콘크리트 라이닝, 채널터널, 터널 모형실험, 수치해석 결과

Received | 13 November, 2023

Revised | 26 December, 2023

Accepted | 2 January, 2024

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

터널공법은 크게 개착식, 굴착식, 특수터널식으로 구분하고, 굴착식에는 인력굴착, 발파굴착, 기계굴착으로 나누며, 기계식에는 Shield터널공법과 TBM터널공법으로 구분한다(Woo et al., 2015).

Shield터널은 강재로 된 원통을 지중에 밀어 넣어 그 내부에서 토사의 붕괴를 방지하면서 안전하게 굴착하고 동시에 쉴드 뒷부분에서 터널라이닝 세그먼트를 설치하는 공법을 말하고, TBM(Tunnel Boring Machine)터널공법은 굴착에서 버력처리까지 기계시스템화 되어 있는 대규모 굴착기계를 말하며, 일반적으로 개방형TBM과 쉴드TBM으로 구분한다. Shield TBM터널공법은 주변지반을 지지할 수 있는 보호강관이 부착되어 있는 TBM을 말한다.

일반적으로 터널공사에서의 계측은 공사계측과 유지관리계측으로 구분하며, 공사계측은 주로 설계의 불확정성 요소 등을 보완하고 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성을 확인하고 경제성을 확보할 목적으로 수행되며(Woo, 2017), 유지관리계측은 이미 완공된 구조물에 대하여 공용 중에 지속적으로 구조물의 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 공학적 판단자료를 제공하여 효율적이고 경제적인 구조물 유지관리에 기여하는 것을 목적으로 수행되고 있다(Woo, 2013; 2021).

터널 유지관리계측 관리기준은 효율적인 안전관리를 위해 계측항목별로 1차 기준(안전), 2차 기준(주의), 3차 기준(정밀 분석)으로 구분하며, 지반의 거동상태와 역학적인 조건 및 현장여건 등을 고려하여 결정하여야 한다(Woo et al., 2012).

본 논문은 Shield 및 TBM터널의 유지관리계측 관리기준 설정을 위해 계측 초기에 설정된 국내 Shield 및 TBM 터널 계측 관리기준인 서울지하철 9호선 909공구와 지하철 7호선 연장 703공구 및 704공구, 분당선 3공구 한강하저터널 계측자료를 분석하였다. 또한 국외의 프랑스, 일본, 영국 채널터널 자료 및 국내외의 터널 모형실험 사례를 종합적으로 분석하여 Shield 및 TBM터널의 유지관리계측 관리기준 설정을 통하여 터널 유지관리계측 기술발전에 기여하고자 한다.

국내 Shield 및 TBM 터널의 유지관리계측 관리기준 분석

서울지하철 9호선 909공구 Shield 터널 분석

지하철 9호선 909공구 Shield터널의 세그먼트 콘크리트 라이닝은 외경이 7.4m, 내경이 6.7m, 두께가 0.35m, 콘크리트 설계 기준강도(f_{ck})는 45MPa, 철근 항복강도(f_y)는 400MPa이며, 세그먼트 콘크리트 라이닝의 응력 및 변위 관리기준은 Table 1과 같고, 세그먼트 콘크리트 라이닝의 응력계는 35단면에 3개씩 총 120개가 설치되었으며, 세그먼트 콘크리트 라이닝의 천단 및 내공변위는 3단면에 설치되었다(Kim et al., 2007).

Table 1에서 세그먼트 콘크리트 라이닝의 응력과 천단침하의 2차 관리기준은 3차기준의 80~100%, 1차 관리기준은 3차 기준의 80%값으로 설정하였다. 반면에 세그먼트 콘크리트 라이닝의 내공변위 2차 관리기준은 3차기준의 39%, 1차 관리기준은 3차기준의 31%의 낮은 값으로 설정하여 큰 차이를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

서울지하철 7호선 연장 703공구 Shield 터널 분석

지하철 7호선 연장 703공구의 Shield터널의 세그먼트 콘크리트 라이닝은 외경이 7.2m, 내경이 6.6m, 두께가 0.3m, 콘크리트 설계기준강도(f_{ck})는 42MPa, 철근 항복강도(f_y)는 400MPa이며, 세그먼트 콘크리트 라이닝의 계측관리 기준 설정은 서

Table 1. Seoul Subway Line 9 Section 909 of stress and displacement management criteria for segment concrete lining

a. Stress management standards for segmented concrete linings (Unit: MPa)				
항목	1차 기준(80%)	2차 기준(80~100%)	3차 기준(100%)	비고
세그먼트응력 (MPa)	14.4	14.4~18.0	18.0	허용 휨 압축응력 $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck} = 0.4 \times 45 = 18.0$
b. Criteria for crown settlement (Unit: mm)				
항목	1차 기준(80%)	2차 기준(100%)	3차 기준(100%)	비고
천단침하 (mm)	19.9	25.0	25.0 이상	터널 수치해석 결과(19.9mm)
c. Criteria for inner displacement (Unit: mm)				
항목	1차 기준(31%)	2차 기준(39%)	3차 기준(100%)	비고
내공변위 (mm)	7.8	9.7	25.0 이상	터널 수치해석 결과(7.8mm)

울특별시 지하철건설본부 지하철건설 계측관리요령(SMSCH, 2002)을 기준으로 하되 수치해석 기준치, 기타 현장의 계측 결과 및 관리기준, 굴착 전과 직후의 약 30%의 선행변위 등을 고려하여 현장에서 계측한 결과와 비교 분석함으로써 현장에 맞는 계측관리 기준을 설정하였으며, 세그먼트 콘크리트 라이닝 계측관리 기준은 Table 2와 같다.

Table 2. Seoul Subway Line 7 Section 703 of segment concrete lining monitoring management standard

계측항목	1차 기준(50%)	2차 기준(75%)	3차 기준(100%)	비고
내공변위(mm)	8	12	16	터널 수치해석 결과(16mm)
천단침하(mm)	8	12	16	터널 수치해석 결과(16mm)
세그먼트 인장철근 인장력(tonf)	2.8	4.2	5.7	인장철근의 허용치(5.7톤)
세그먼트 이음부 변위(mm)	2	3	4	방수성 실험 결과(4mm)

Table 2에서 내공변위 및 천단침하 관리기준은 터널 수치해석 보고서상의 수치해석 결과가 가장 큰 값인 16mm를 3차 관리기준으로 설정하였으며, 2차 관리기준은 3차 관리기준의 75%, 1차 관리기준은 3차 관리기준의 50%값으로 설정하였다. 세그먼트 인장철근 인장력 관리기준은 세그먼트 인장철근의 허용치인 5.7tonf를 3차 관리기준으로 설정하였으며, 2차 관리기준은 3차 관리기준의 75%, 1차 관리기준은 3차 관리기준의 50%값으로 설정하였다.

세그먼트 이음부의 변위 관리기준은 세그먼트 방수성 실험에서 만족하는 4mm 값을 3차 관리기준으로 설정하였으며, 2차 관리기준은 3차 관리기준의 75%, 1차 관리기준은 3차 관리기준의 50%값으로 설정하였다

서울지하철 7호선 연장 704공구 Shield 터널 분석

지하철 7호선 연장 704공구 Shield터널의 세그먼트 콘크리트 라이닝은 외경이 7.1m, 내경이 6.5m, 두께가 0.3m, 콘크리트 설계기준강도(f_{ck})는 48MPa, 철근 항복강도(f_y)는 400MPa이며, Shield터널의 건물 건전도 관리기준은 Table 3과 같고, 계측관리 단계별 대처방안은 Table 4와 같다.

Table 3. Seoul Subway Line 7 Section 704 of shield tunnel building soundness management standards

구분	경험적 기준치	해석결과(최대값)	설계 적용
각 변 위($w\theta$)	1/500	1/1,408	1/500
최대 침하량 ($\delta \max$)	40mm	5.931mm	40mm
부등 침하량 ($\Delta \max$)	0.003S	0.001S	0.003S
수평 변형률 (εh)	1/2,000	1/3,074	1/2,000

Table 4. Seoul Subway Line 7 Section 704 of shield tunnel monitoring management step-by-step countermeasures

구분	관리 등급	관리기준	조치사항
Level I	주의 수준	· 변위속도 5mm/day 이상	· 계측빈도 증가
Level II	경고 수준	· 변위속도 10mm/day 이상	· 지반보강 등의 추가공법 적용
Level III	위험 수준	· 변위속도 지속적인 증가	· 시공보류 및 추가보강, 시공법 수정

분당선 3공구 한강하저 Shield TBM터널 분석

분당선3공구 한강하저 Shield TBM터널의 세그먼트 콘크리트 라이닝은 외경이 7.8m, 내경이 7.0m, 두께가 0.4m, 콘크리트 설계기준강도(f_{ck})는 45MPa, 철근 항복강도(f_y)는 400MPa이며, 콘크리트 허용응력을 보면 허용휨 압축응력(f_{ca})은 $0.4 \times f_{ck} = 18.0\text{MPa}$, 허용 인장응력(f_t)은 $0.13 \sqrt{f_{ck}} = 0.87\text{MPa}$, 허용 전단응력(v_a)은 $0.08 \sqrt{f_{ck}} = 0.54 \text{MPa}$ 이다.

Shield TBM터널의 유지관리계측 관리기준은 세그먼트 콘크리트 라이닝에 대한 응력 기준은 없고, Table 5와 같이 변위 및 속도 기준만 설정되어 있고, Shield TBM터널 통과부의 암반등급은 III등급이 주종을 이루고 있으며, Table 6과 같이 일본 터널기술협회(JTTA, 1983) 암반등급 분석자료를 근거로 하여 다음과 같이 설정되었다.

Table 5. Bundang Line 3 Section Han River Lower Shield TBM tunnel of segment concrete lining monitoring management standard

계측항목	구분 (암반III 등급기준)	1차 기준 (80% 이하)	2차 기준 (80~120%)	3차 기준 (120% 이상)	비고
내공변위	내공변위(mm)	12mm 이하	12~18mm	18mm 이상	일본터널기술협회 분석자료 - 암반등급III기준 : 최종변위량 15mm, 변위속도3.5mm/day 적용
	속도(mm/day)	2.8 이하	2.8~4.2 이하	4.2 이상	
천단침하	천단침하(mm)	12mm 이하	12~18mm	18mm	
	속도(mm/day)	2.8 이하	2.8~4.2 이하	4.2 이상	

Table 6. Japan Tunnel Technology Association bedrock grade analysis data

구분	암반등급 I	암반등급 II	암반등급 III	암반등급 IV	암반등급 V
최종변위량(mm)	4.3	5.3	15.0	26.0	68.0
변위속도(mm/day)	0.7	1.0	3.5	5.0	7.5

국내 Shield 및 TBM터널 유지관리계측 관리기준 분석결과

세그먼트 콘크리트 라이닝의 내공변위 및 천단침하 계측 관리기준

서울시 도시기반시설본부에서 발주한 서울지하철 9호선 909공구와 7호선 703공구 및 704공구, 국가철도공단 수도권본부에서 발주한 분당선 3공구 한강하저터널의 Shield 및 TBM터널 세그먼트 콘크리트 라이닝의 내공변위 및 천단침하의 계측 관리기준을 요약 정리하면 Table 7과 같다.

Table 7. Monitoring management standards for inner displacement and crown settlement of domestic shield and TBM tunnel segment concrete linings (Unit : mm)

공구별	계측항목	1차 기준 (안전)	2차 기준 (주의)	3차 기준 (정밀분석)	비고	
서울 지하철	909공구 (터널내경 6.7m)	내공변위	7.8(31%)	9.7(39%)	25.0(100%)	·터널 수치해석결과 적용(7.8mm)
		천단침하	19.9(80%)	25.0(100%)	25.0(100%)	·터널 수치해석결과 적용(19.9mm)
	703공구 (터널내경 6.6m)	내공변위	8.0(50%)	12.0(75%)	16.0(100%)	·터널 수치해석결과 적용(16.0mm)
		천단침하	8.0(50%)	12.0(75%)	16.0(100%)	·터널 수치해석결과 적용(16.0mm)
분당선	분당선 3공구 (터널내경 7.0m)	내공변위	12.0(80%)	12.0~18.0 (80~120%)	18.0(120%)	·일본터널기술협회 분석자료(암반등급 Ⅲ일 때 최종변위량 15mm)
		천단침하	12.0(80%)	12.0~18.0 (80~120%)	18.0(120%)	·일본터널기술협회 분석자료(암반등급 Ⅲ일 때 최종변위량 15mm)

Table 7에서 서울지하철 Shield터널 세그먼트 라이닝 변위 계측관리기준은 대부분 터널해석보고서와 수치해석 결과를 기준으로 정도의 차이는 있으나, 1차 관리기준은 수치해석 결과인 설계예상치의 31~80% 범위, 2차 관리기준은 39~100% 범위, 3차 관리기준은 100%를 적용하고 있는 것으로 분석되었다.

지하철 9호선 909공구는 여의도 셋강 하부 통과구간으로 주로 모래층과 모래질 자갈층으로 터널해석 결과 터널라이닝의 최종 내공변위 및 천단침하량이 25mm를 기준으로 하였으며, 지하철 7호선 703공구는 매립층 및 풍화토 지반으로 터널수치해석결과 터널 라이닝의 최종 내공변위 및 천단침하량 16mm를 관리기준으로 적용하였다.

분당선 3공구 한강하저 Shield TBM 터널은 RMR지수가 30~35, Q값이 4.25~9.65로 균열 및 절리가 다소 발달된 양호한 암질로 암반등급이 Ⅲ~Ⅳ이며, 한강하저터널 구간임을 감안하여 안전측인 암반등급Ⅲ을 적용하여 Table 7과 같이 일본터널기술협회 분석자료와 터널 수치해석 결과를 적용하여 세그먼트 라이닝의 최종 변위량과 변위속도를 정하였다.

분당선 3공구 한강하저 Shield TBM 터널의 1차 관리기준은 80% 이하, 2차 관리기준은 80~120% 범위, 3차 관리기준은 120%인 18mm를 적용한 것은 암반등급이 Ⅲ인 경우 최종변위량은 15mm이고, 암반등급이 Ⅳ인 경우 최종변위량은 26mm로 이들 값의 대략 평균값인 20mm 수준을 관리기준으로 설정한 것으로 분석되었다.

세그먼트 라이닝의 계측 관리기준

서울지하철 9호선 909공구와 7호선 703공구 및 704공구, 분당선 3공구 한강하저터널 등의 Shield 및 TBM 터널 세그먼트

라이닝의 응력 계측 관리기준을 요약 정리하면 Table 8과 같으며, 1차 관리기준은 수치해석 결과인 설계예상치의 50~60% 범위, 2차 관리기준은 80% 범위, 3차 관리기준은 100%를 적용하고 있는 것으로 분석되었다.

Table 8. Domestic of segment concrete lining monitoring management standard

공구별	계측항목	1차 기준	2차 기준	3차 기준	비고
909공구	변형률계(MPa)	14.4 (0.6 f_{ca})	14.4~18.0 (0.8 f_{ca})	18.0 (1.0 f_{ca})	· 터널 수치해석 결과 적용 · 허용휨 압축응력 $f_{ca}=0.4f_{ck}=0.4 \times 45=18.0\text{MPa}$
703공구	인장철근의 인발내력(tonf)	2.8 (0.5 p_a)	4.2 (0.8 p_a)	5.7 (1.0 p_a)	· 터널 수치해석 결과 적용 · 세그먼트 라이닝응력 관리기준 없음 · 인장철근의 인발내력 15.5톤의 45% 수준인 5.7톤 적용
704공구 분당선 3공구	-	-	-	-	· 세그먼트 라이닝 응력 관리기준 없음

국외 Shield 및 TBM 터널의 유지관리계측 관리기준 분석

프랑스 차탈랏(Chatalet) 지하철 정거장터널 분석

차탈랏 지하철 역사의 신규 노선 증설공사 시 역사의 안전성 여부를 지속적으로 관찰하기 위해 광섬유센서를 이용한 유지관리계측이 채택되었으며, 차탈랏 지하철 정거장터널의 내공폭은 12m, 내공높이는 8m로 계측기는 15m 광섬유 변형센서를 10개소에 설치하였고, 관리기준치는 축선장 15m당 $\pm 5\text{mm}$ 를 관리기준으로 설정하고 있으며, 변형률로 계산하면 0.0003(5/15,000)을 적용하고 있는 것으로 분석되었다.

일본 세이칸(Seikan) 터널 분석

세이칸 본선터널은 외경이 11.1m, 내경은 9.7m, 두께는 0.7m이며, 내공변위량 관리기준치는 축선장 10m에서 $\pm 3\text{mm}$ 로 설정하고 있으며(Maeda et al., 1992), 변형률로 계산하면 0.0003(3/10,000)을 적용하고 있는 것으로 분석되었다. 대표단면 계측인 내공변위 광파기 측정은 80단면에 각 6개 라인 총 480개 라인 측정 결과 대부분 1~2mm의 변위가 측정되었고, 최대 변위는 9m길이에 대해 최대 신장량은 2.2mm, 최대 수축량은 3.5mm로 터널 육안조사 결과 아무런 징후를 발견하지 못하였으며, 터널 상태는 양호한 것으로 판정되었다.

영국과 프랑스의 채널(Channel) 터널 분석

채널터널 굴착공사 완료 후 대표단면 계측지점을 선정하여 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 제작 시에 유지관리 계측기기를 설치하였으며(Moore et al., 1996), 육지부 보조터널에 대해 계측결과 분석을 실시하였다. 보조 터널의 세그먼트 라이닝의 외경은 5.6m, 내경은 4.8m, 두께는 0.4m이며, 육지부 보조터널 세그먼트 라이닝의 유지관리계측 결과는 Table 9와 같고, 계측결과를 경시도로 정리하면 Fig. 1과 같다.

계측결과와 경시도에서 천단 콘크리트 라이닝 응력은 외면에서 압축응력이 초기부터 계측 경과일 300일 이전에는 최대 3.82MPa 범위이며, 내면에서는 압축응력이 최대 1.28Pa 범위를 보이다가 근접시공이 시행된 경과일 300일 이후에는 인장

응력으로 전환되어 최대 12.24MPa로 국내 콘크리트의 휨 인장강도(파괴계수) $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 0.63 \sqrt{40} = 4.0\text{MPa}$ 를 크게 초과하여 천단 콘크리트 라이닝에 균열이 발생되었다. 또한, 우측 중앙벽체 콘크리트 라이닝 응력은 외면에서 압축응력이 계측 경과일 300일 이전에는 최대 2.93MPa이며, 내면에서는 압축응력이 최대 6.12MPa를 보이다가 근접시공이 시행된 경과일 300일 이후에는 최대 14.79MPa로 급격하게 증가되었다.

콘크리트 라이닝의 변위를 보면 천단은 최대 9.2mm가 감소하였는데 근접시공이 시행된 경과일 300일에는 2.0mm에서 5.2mm, 경과일 390일에는 5.2mm에서 7.2mm로 급격하게 감소하였으며, 중앙 내공변위는 최대 9.8mm가 증가하였는데 근접 시공이 시행된 경과일 300일에는 2.2mm에서 4.3mm, 경과일 390일에는 4.3mm에서 8.3mm로 급격하게 증가되어 천단 변화량과 유사한 값을 보였다.

콘크리트 라이닝에 균열발생은 경과일 390일에 육지부 보조터널 천단부에서 발생하였는데, 이 때 천단외면의 콘크리트 라이닝 압축응력은 7.65MPa, 천단내면의 인장응력은 9.43MPa, 천단은 7.2mm가 감소하였으며, 우측 중앙벽체 외면의 콘크리트 라이닝 압축응력은 3.01MPa, 내면의 압축응력은 14.02MPa, 중앙 내공변위는 8.3mm가 증가하여 국내 유지관리계측 관리기준인 콘크리트 라이닝의 휨 인장강도(파괴계수) 약4MPa(프리캐스트 세그먼트 설계기준강도 40~45MPa)와 변위 5mm와는 큰 차이가 발생한 것을 확인할 수 있다.

Table 9. Maintenance monitoring results of Channel tunnel land part auxiliary tunnel segment lining

계측 경과일	프리캐스트 콘크리트 라이닝 응력(MPa)				변위(mm)		비고
	천 단(C)		우측 중앙벽체(Rc)		천단	중앙 내공	
	외면평균	내면평균	외면평균	내면평균			
0	0	0	0	0	0	0	<p>(육지부 보조터널)</p>
30	2.55	1.28	2.17	4.72	(-)1.3	1.1	
60	3.06	0.92	2.37	5.35	(-)1.4	1.2	
90	3.17	0.83	2.45	5.46	(-)1.4	1.5	
180	3.49	0.54	2.69	5.82	(-)1.7	1.8	
270	3.82	0.26	2.93	6.12	(-)1.8	2.0	
300	4.33	(-)0.51	3.31	9.94	(-)2.0	2.2	
360	6.12	(-)1.35	3.19	10.45	(-)5.2	4.3	
390	7.65	(-)9.43	3.01	14.02	(-)7.2	8.3	
450	7.90	(-)10.83	3.06	14.27	(-)8.3	9.0	
540	8.41	(-)11.73	3.19	14.53	(-)9.0	9.6	
630	8.67	(-)12.24	3.65	14.79	(-)9.2	9.8	

- 응력 : 압축(+), 인장(-) 변위 : 증가(+), 감소(-)
- 근접 시공영향 : RTN통과(°90.7.15), RTS통과(°90.10.2)
- 극한 인장응력(파괴계수) : $0.5 \sqrt{f_{ck}} = 0.5 \sqrt{40} = 4.0\text{N/mm}^2 = 4.0\text{Mpa}$
- 계측경과일 390일에 터널 천단에서 균열발생(인장응력 9.43MPa, 변위 7.2mm)

채널터널 프리캐스트 콘크리트 라이닝의 균열발생 시 응력 및 변위 비교 현황은 Table 10과 같고, 여기서 균열발생 시 콘크리트 라이닝의 최대 압축응력은 우측 중앙벽체 내면에서 14.02MPa로 설계기준강도 $f_{ck}=40\text{MPa}$ 의 35%로 허용응력 설계법으로 환산하면 $f_{ca}=0.4 f_{ck}=0.4 \times 40=16\text{MPa}$ 의 $0.58f_{ca}$ 가 된다. 최대 인장응력 천단내면에서 11.73MPa로 $f_t = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 4.0\text{MPa}$ 의 2.93 f_t 로 큰 값을 나타냈는데 이는 철근콘크리트 프리캐스트 라이닝으로 인한 보강효과가 크게 작용된 것으로

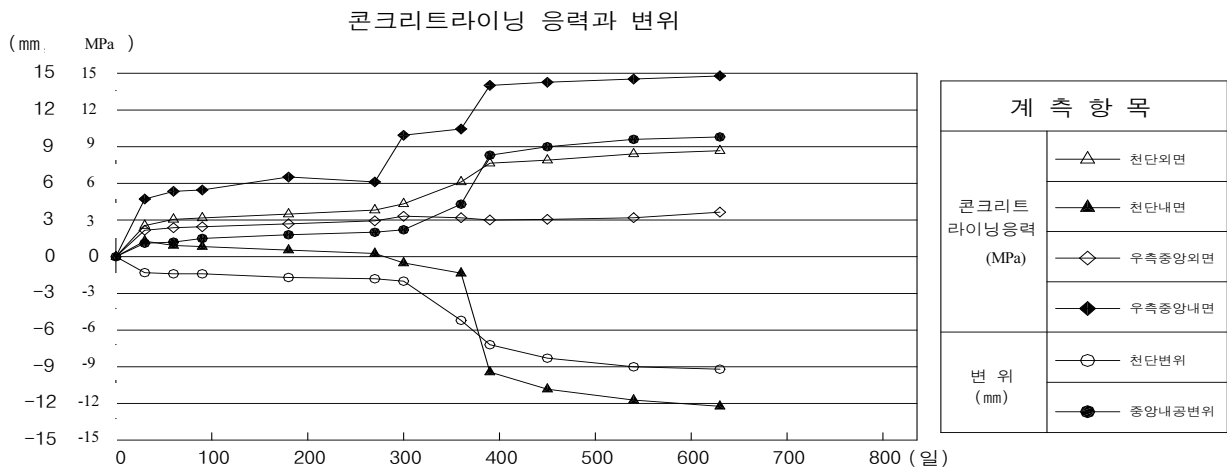


Fig. 1. Stress and displacement monitoring gradient of Channel tunnel land part auxiliary tunnel segment lining

판단된다.

변위는 균열 발생 시 천단에서 7.2mm, 중앙 내공에서 8.3mm가 감소되어 터널내면의 직경이 4.8m로 수직변형률은 0.0015(0.72/480)이며, 중앙 내공변위는 8.3mm로 수평변형률은 0.0017(0.83/480)로 수직변형률과 비슷하게 나타내고 있으며, 콘크리트의 극한변형률 0.003의 58%가 발생된 것으로 분석되었다.

채널터널의 콘크리트 라이닝은 프리캐스트 세그먼트 구조로 힌지 구조계이나, 우리나라의 대부분의 콘크리트 라이닝은 현장타설 콘크리트 구조이므로 균열발생 시의 변위 7.2~8.3mm를 국내 변위기준으로 적용하는 것은 적정하지 않은 것으로 판단된다.

Table 10. Comparison of stress and displacement at the occurrence of cracks in precast concrete linings

구분	프리캐스트 콘크리트 라이닝 응력(MPa)				변위(mm)		비고
	천단(C)		우측 중앙벽체(RC)		천단	중앙내공	
	외면	내면	외면	내면			
360일	6.12	-1.35	3.19	10.45	5.2	4.3	· 터널 직경 4.8m · 라이닝 두께 0.41m · $f_{ck}=40\text{MPa}$ · $f_r=0.63\sqrt{f_{ck}}=4.0\text{MPa}$ · 극한변형률(ϵ) 0.003 · 균열발생 시 변위량 7.2~8.3mm
390일	7.65	-9.43	3.01	14.02	7.2	8.3	
540일	8.41	-11.73	3.19	14.53	9.0	9.6	
경시도 수렴단계	0.21 f_{ck}	2.93 f_r	0.08 f_{ck}	0.36 f_{ck}	$\epsilon=0.0019$	$\epsilon=0.0020$	

- 압축 · 증가 +, 인장 · 감소 -

국외 Shield 및 TBM터널 유지관리계측 관리기준 분석결과

세그먼트 콘크리트 라이닝의 내공변위 및 천단침하 계측 관리기준

프랑스 차탈랏 지하철터널, 일본 동경교통국 및 세이칸 터널, 영국과 프랑스를 연결하는 채널터널의 세그먼트 라이닝 계

측 관리기준을 요약정리하면 Table 11과 같다.

국외 세그먼트 콘크리트 라이닝은 영국과 프랑스를 연결하는 채널터널의 내공 4.8m의 서비스 터널에서 공사 중에 균열이 발생한 사례가 있으며, 균열발생 전 변위량은 4~5mm로 변형률은 0.0010이고, 균열발생 시는 7~8mm로 변형률이 0.0017 정도가 발생하였다. 또한 균열발생 후 수렴단계에서 변위량은 9~10mm로 변형률은 0.0021로 콘크리트 최대 변형률인 0.002와 같은 수준의 값을 보였다. 현장 타설 철근 콘크리트 라이닝의 내공변위 및 천단침하 계측관리기준은 프랑스와 일본에서 대체로 측선장 15m당 ±5mm이며, 변형률은 0.0003을 적용하고 있는 것으로 분석되었다.

Table 11. Monitoring management standards for inner displacement and crown settlement of oversea tunnel segment concrete linings

	구분	계측항목	계측관리기준	비고
프랑스	차탈렛 지하철터널 (터널내경 8.0m)	내공변위 천단침하	· 측선장 15m당±5mm	· 변형률(ϵ)=0.0003(0.003%)
	샤모아 주도로터널 (터널내경 5.5m)	내공변위	· 6mm	· 변형률(ϵ)=0.0010(0.100%)
	동경교통국	내공변위 천단침하	· 측선장 15m당±5mm	· 변형률(ϵ)=0.0003(0.003%)
일본	세이칸터널 (터널내경 9.7m)	내공변위 천단침하	· 측선장 10m당±3mm	· 변형률(ϵ)=0.0003(0.003%)
	일본터널기술협회 암반 등급별 기준	내공변위 천단침하	· 암반등급 I : 4.3mm · 암반등급 II : 5.3mm · 암반등급 III : 15mm · 암반등급 IV : 26mm · 암반등급 V : 68mm	· 분당선 3공구 한강하저 터널은 암반등급 III인 15mm를 계측관리기준으로 설정 · 변형률(ϵ)=15mm/7m=0.002(0.20%) (콘크리트 최대변형률)
	영국-프랑스 채널터널 (서비스 터널 내경4.8m)	내공변위 천단침하	· 균열발생 전: 4~5mm · 균열발생 시: 7~8mm · 균열발생 후 수렴단계: 9~10mm	· 균열발생 전 ϵ =5mm/4.8m≒0.0010(0.10%) · 균열발생 시 ϵ =8mm/4.8m≒0.0017(0.17%) · 균열발생 후 ϵ =10mm/4.8m≒0.0021(0.21%)

터널 모형실험 사례분석

국내와 국외의 터널 콘크리트 라이닝에 대한 모형실험 및 수치해석 사례를 정리 분석하면 다음과 같다.

터널건전도 평가를 위한 라이닝 모델시험(Kim, 1998)에 의하면 원심재하기(Centrifuge)를 이용한 터널 무근 콘크리트 라이닝을 대상으로 균열하중에서 최대 처짐량은 12mm가 발생하였다.

터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성(Lee, 1998)논문에서 원형터널 무근 콘크리트 라이닝을 대상으로 균열발생 한계 처짐량이 천단의 경우 12mm가 발생되었다.

여기서 균열하중은 라이닝에 균열이 발생하기 시작할 때의 상재하중, 파괴하중은 균열하중 이후에 구조적으로 붕괴될 때의 상재하중, 최대 처짐은 균열하중에서의 라이닝의 변형량으로 정의하였다. 연구결과 균열하중은 철근보다는 콘크리트의 인장강도와 관련이 있고, 파괴하중은 철근의 인장력으로 인해 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Table 12. Concrete lining generation displacement by tunnel model experiment

구분	균열시 변위량(mm)	비고
원심재하시험	12	무근 콘크리트 라이닝
직접재하시험	12	무근 콘크리트 라이닝
변상터널 설계지침	한계변형률 0.0035(0.035%)	무근 콘크리트 라이닝

일본철도종합기술연구소의 변상터널 설계지침과 터널내 변상 콘크리트 라이닝의 해석(Ki, 1999)에서 균열단면 모델링시 압축손상(압축 가장자리에서의 변형)은 한계변형률($3,500 \mu = 3,500 \times 10^{-6} = 0.0035$)이며, 콘크리트의 극한변형률에 도달)에 이르는 것이며, 압축응력을 받고 있는 콘크리트의 압축변형 한계치를 의미한다. 여기서 압축손상은 부재의 내력을 완전히 잃지 않은 상태이며, 압축파괴는 압축손상 상태의 부재 가운데 내력을 완전히 잃은 상태로 정의하였다.

터널 모형실험에 의한 콘크리트 라이닝 발생변위 사례를 정리하면 Table 12와 같다.

Shield 및 TBM 터널의 유지관리계측 관리기준 설정

서울시 도시기반시설본부에서 발주한 서울지하철 9호선 909공구와 7호선 703공구 및 704공구, 국가철도공단 수도권본부에서 발주한 분당선 3공구 한강하저터널의 Shield 및 TBM터널 세그먼트 콘크리트 라이닝의 응력 계측관리기준과 프랑스, 영국, 일본 등의 해외 계측관리기준, 국내외의 터널 콘크리트 라이닝에 대한 모형실험 및 수치해석 사례 등을 종합적으로 검토한 결과 1차 관리기준(안전)은 허용응력이나 콘크리트 최대 변형률의 60%, 2차 관리기준(주의)은 허용응력이나 콘크리트 최대 변형률의 80%, 3차 관리기준(정밀분석)은 허용응력이나 콘크리트 최대 변형률의 100%하여 설정한 Shield 및 TBM 터널의 유지관리계측 단면 중 단면설계나 단면해석 등의 수치해석 결과에 의한 설계 예상치가 없는 경우 유지관리계측 관리 기준은 Table 13과 같으며, 계측 관리기준 적용 시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의 변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상 등을 종합적으로 고려하여 안전성 여부를 판정하여야 한다.

Table 13. Shield and TBM tunnel maintenance monitoring management standards

계측항목	계측 관리 기준			비고
	1차 기준(안전)	2차 기준(주의)	3차 기준(정밀분석)	
세그먼트 라이닝 휨 압축응력	$0.60 \times f_{ca}$	$0.80 \times f_{ca}$	$1.0 \times f_{ca}$	허용 휨 압축응력 $f_{ca} = 0.4f_{ck}$ (MPa)
세그먼트 라이닝 휨 인장강도	$0.60 \times f_r$	$0.80 \times f_r$	$1.0 \times f_r$	휨인장강도(파괴계수) $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$ (MPa)
세그먼트 라이닝 철근응력	$0.60 \times f_{sa}$	$0.80 \times f_{sa}$	$1.0 \times f_{sa}$	허용응력 $f_{sa} = 0.5f_y$ (MPa)
세그먼트 라이닝 천단침하	$0.60 \times \epsilon_c$	$0.80 \times \epsilon_c$	$1.0 \times \epsilon_c$	탄성범위 내에서 콘크리트 최대변형률 $\epsilon_c = 0.002$ (0.2%)
및 내공변위 침하 및 변위 기준	$0.60 \times \Delta$	$0.80 \times \Delta$	$1.0 \times \Delta$	유로터널 균열발생 시 변위 기준치 $\Delta = \pm 7$ mm
세그먼트 라이닝 균열(mm)	0.3이하	0.3~0.5	0.5이상	터널 라이닝 균열 평가기준 (C등급) 적용: 0.3~0.5mm

결론

본 논문은 Shield 및 TBM터널의 유지관리계측 관리기준 설정을 위해 국내 Shield 및 TBM 터널 계측 관리기준인 서울 지하철 9호선 909공구와 지하철 7호선 연장 703공구 및 704공구, 분당선 3공구 한강하저터널 계측자료를 분석하였으며, 국외의 프랑스, 일본의 터널과 영국 채널터널 자료 및 국내외의 터널 모형실험 사례를 종합적으로 분석하여 Shield 및 TBM터널의 유지 관리계측 관리기준 설정을 통하여 터널 유지관리계측 기술발전에 기여하고자 연구를 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 서울지하철 Shield터널 세그먼트 라이닝 변위 계측 관리기준은 대부분 터널해석보고서와 수치해석 결과를 기준으로 정도의 차이는 있으나, 1차 관리기준은 수치해석 결과인 설계예상치의 31~80% 범위, 2차 관리기준은 39~100% 범위, 3차 관리기준은 100%를 적용하고 있는 것으로 분석되었다.
- (2) 분당선 3공구 한강하저 Shield TBM 터널 세그먼트 라이닝 변위 계측 관리기준에서 1차 관리기준은 80% 이하, 2차 관리기준은 80~120% 범위, 3차 관리기준은 120% 이상인 18mm를 적용한 것은 암반등급이 III인 경우 최종변위량은 15mm이고, 암반등급이 IV인 경우 최종변위량은 26mm로 이들 값의 대략 평균값인 20mm를 관리기준으로 설정한 것으로 분석되었다.
- (3) 국내 Shield 및 TBM 터널 세그먼트 라이닝의 응력 계측관리기준에서 1차 관리기준은 수치해석 결과인 설계예상치의 50~60% 범위, 2차 관리기준은 80% 범위, 3차 관리기준은 100%를 적용하고 있는 것으로 분석되었다.
- (4) 국외 세그먼트 콘크리트 라이닝은 영국과 프랑스를 연결하는 채널터널의 내공 4.8m의 서비스 터널에서 공사 중에 균열이 발생한 사례가 있으며, 균열발생 전 변위량은 4~5mm로 변형률은 0.0010이고, 균열발생 시는 7~8mm로 변형률이 0.0017정도가 발생하였다. 또한 균열발생 후 수렴단계에서 변위량은 9~10mm로 변형률은 0.0021로 콘크리트 최대 변형률인 0.002와 같은 수준의 값을 보였다. 현장 타설 철근 콘크리트 라이닝의 내공변위 및 천단침하 계측관리기준은 프랑스와 일본에서 대체로 축선장 15m당 $\pm 5\text{mm}$ 이며, 변형률은 극한 변형률인 0.0003을 적용하고 있는 것으로 분석되었다.
- (5) 국내와 국외의 터널 콘크리트라이닝에 대한 모형실험 및 수치해석 사례에서 터널건전도 평가를 위한 라이닝 모델시험에 의하면 원심재하기를 이용한 터널 무근 콘크리트 라이닝 균열하중에서 최대 처짐량은 12mm가 발생하였으며, 터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성에서 원형터널 무근 콘크리트 라이닝을 대상으로 균열발생 한계처짐량이 천단의 경우 12mm로 확인되었다.
- (6) Shield 및 TBM터널의 유지관리계측 단면 중 단면설계나 단면해석 등의 수치해석 결과에 의한 설계 예상치가 없는 경우 유지관리계측 관리기준은 1차 관리기준(안전)인 경우 허용응력이나 콘크리트 최대 변형률의 60%, 2차 관리기준(주의)인 경우 허용응력이나 콘크리트 최대 변형률의 80%, 3차 관리기준(정밀분석)인 경우 허용응력이나 콘크리트 최대 변형률의 100%로 하여 Table 13과 같이 제시하였으며, 계측 관리기준 적용 시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의 변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상 등을 종합적으로 고려하여 안전성 여부를 판정하여야 한다.

References

- [1] Japan Tunnel Technology Association(JTTA) (1983). Monitoring Management Standards for Tunnel Construction. Tokyo, Japan.
- [2] Ki, J.S. (1999). "Analysis of compensation concrete lining in tunnel." Korean Institute for Structural Inspection, Vol. 3, No. 1, pp. 58-69.
- [3] Kim, H., Kang, M.G. (2007). "Analysis of TBM excavation and drainage management case of the Seoul Subway Section 909." Proceedings of the 8th Tunnel Mechanization and Construction Technology Symposium, Korean Tunnelling and Underground Space Association, Seoul, Korea, pp. 141-152.
- [4] Kim, Y.G. (1998). Lining Model Test for Tunnel Health Evaluation. Daewoo Construction Technology Research Center, Seoul, Korea.
- [5] Lee, D.H. (1998). Mechanical Behavior and Crack Characteristics of Tunnel Concrete Lining. Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Korea.
- [6] Maeda, K., Obata, T. (1992). "The monitoring of the behavior at the undersea portion of the Seikan tunnel." Journal of Japanese Tunnelling Association, Vol. 2, pp. 143-148.
- [7] Moore, D., Crease, A. (1996). Tunnel Instrumentation, Engineering Geology of the Channel Tunnel, Gage Technique Ltd, England, pp.287-294.
- [8] Seoul Metropolitan Subway Construction Headquarters(SMSCH) (2002). Improvement Plan of Seoul Subway Monitoring Management. pp. 70-80.
- [9] Woo, J.T., Lee, K.I. (2012). "A study on establishment of measurement and analysis frequency of maintenance monitoring in tunnel." Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 2, pp. 117-129.
- [10] Woo, J.T. (2013). "A study on trends analysis of the loss and damage ratio of tunnel maintenance monitoring sensors." Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 25-31.
- [11] Woo, J.T. (2017). "A study on behavior of the earth retaining structure by field measurement and numerical analysis." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 13, No. 3, pp. 286-295.
- [12] Woo, J.T. (2021). "An analytical study on the durability standard of ground structures monitoring sensors." Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol. 17, No. 1, pp. 53-59.
- [13] Woo, J.T., Lee, R.C. (2015). Construction Monitoring Basic Practice. CIR Publishing Co., Korea.