변형 3-ARCH 터널의 굴착 단계별 거동 특성 검토

The Study of Behavior Characteristics during Sequential Excavation and Stability of modified 3-Arch tunnel

박현식*, 오정호*†

Sik-Hyun Park*, Jeong-ho Oh*†

Abstract 3-Arch tunnel is recently applied to the underground railway station in case of the width of tunnel became too wide such as Metropolitan Train Express between Samsung-Dongtan. Typical 3-Arch tunnel is divided and excavated by the pilot tunnel and the left (or right) tunnel in stages. In this paper, the numerical analysis was conducted to investigate the responses of the modified 3-Arch tunnel in which the excavation of the pilot tunnel is omitted versus typical 3-Arch tunnel . In addition, field monitoring data was analyzed to confirm the numerical analysis results. As a result, as long as the design and construction is properly executed, modified 3-Arch tunnel has an advantage of shortening construction period even though slightly higher tunnel convergence and crown settlement are predicted than those of typical 3-Arch tunnel based on numerical analysis which may not be critical for the safety of the tunnel.

Keywords **:** Modified 3-Arch tunnel, Pilot tunnel, Numerical Analysis, Field Data

초 록 최근 삼성~동탄 광역급행철도 등 도심지 철도건설 시 정거장 폭이 증가할 경우 3-Arch 터널이 적용되는 사례가 있으며 일반적으로 PILOT, 좌, 우 터널을 단계별로 굴착하게 된다. 본 연구에서는 이러한 3-Arch 터널 시공단계에서 공기단축을 위해 PILOT 터널 굴착을 생략한 변형 3-Arch 터널의 적용사례를 통해 굴착 단계별 계측 데이터를 분석하여 기존 및 변형 3-Arch 터널의 시공성 및 제한적 수치해석을 통해서 지반거동 및 안정성을 비교, 검토하였다. 연구결과 변형 3-Arch 터널 시공방식이 기존 방식에 비해 공기적인 측면에서 유리하며, 수치해석과 현장 계측분석 결과 기존 방식에 비해 천단 및 내공변위가 다소 크게 발생하였으나 그 차이는 미미하여, 안정성에는 문제가 없는 것으로 검토되었다.

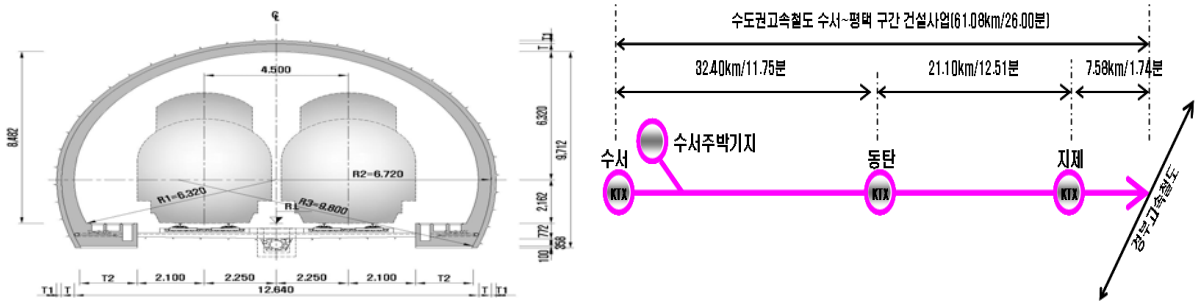
주요어 : 3-Arch 터널, 시공성, 안정성, 공기

1. 서 론

수도권고속철도(수서~평택) 건설사업의 경우 전체 노선 61.8Km 중 약 55Km 구간이 터널로 설계되었으며 성남, 분당, 용인등의 도심지 통과 구간은 평균 토피고 h=40.0m 이상(h=30.0m ~ 55.0m)의 대심도 터널로 설계되었다. 당초 수도권고속철도 노선은 **Fig. 1**과 같이 계획되었으나 제25차 철도산업위원회에서 “삼성~동탄간 광역급행철도 동시시공 추진방안” 이 결정됨으로 인해 **Fig. 2**와 같이 변경되었다.

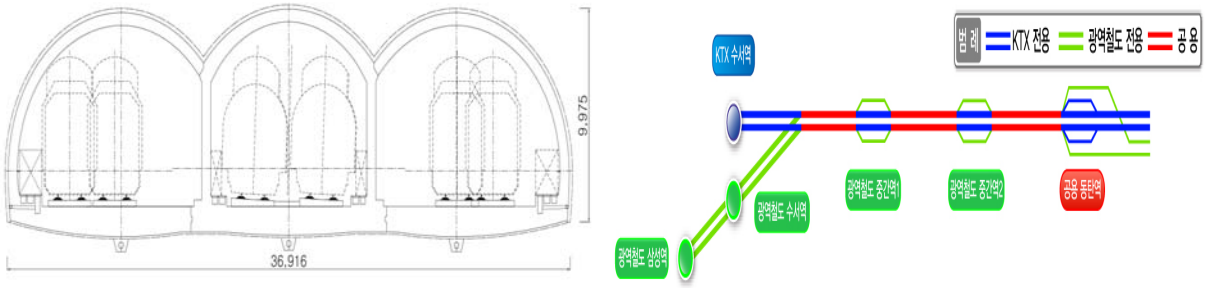
† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도시설공학과 (j-oh@ut.ac.kr)

* 한국교통대학교 교통대학원 글로벌철도학과(y1hour@naver.com)



(a) Tunnel cross-section view (b) Route of KTX in Seoul Metropolitan Area

Fig. 1 Tunnel cross-sectional view and route of KTX in Seoul Metropolitan Area (Metropolitan High-speed Railway)



(a) Cross –sectional view of Seong-Nam Station (b) Route of MTX between Samsung and Dongtan

Fig. 2 Cross –sectional view of 3-Arch tunnel and route of MTX between Samsung and Dongtan

2. 본 론

2.1 기존 3-Arch 터널과 변형 3-Arch 터널

2.1.1 표준단면 비교

Fig. 3은 신분당선에 적용된 3-Arch 터널 표준단면이며, **Fig. 4**는 성남정거장에 적용된 변형 3-Arch 터널 표준단면이다.

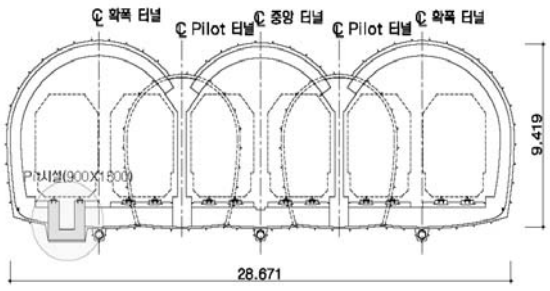
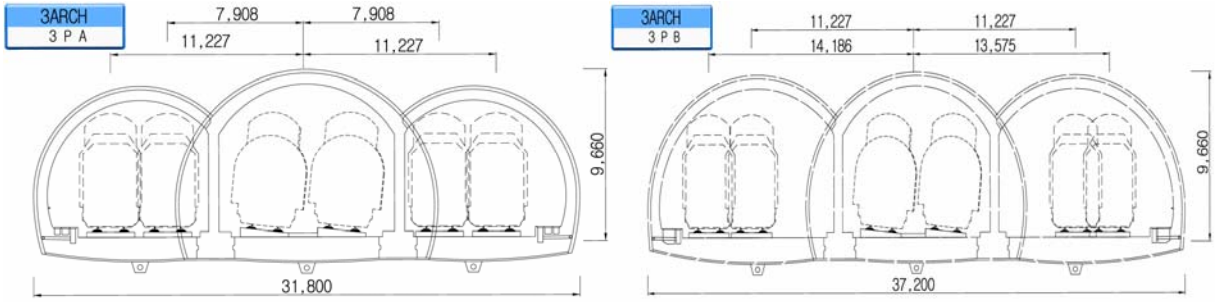


Fig. 3 Standard cross-section of typical 3-Arch tunnel of Shinbundang line



(a)3 PA (b)3PB

Fig. 4 Standard cross-section of modified 3-Arch tunnel of Seong-Nam Station

2.1.2 지보패턴 비교

지반 RMR값 21~40 기준 기존 3-Arch 터널의 지보패턴은 **Fig. 5** 와 같으며, 변형 3-Arch 터널의 지보패턴은 **Fig. 6** 과 같다.

기존 3-Arch 터널의 경우 Pilot 터널 및 중앙기둥 구조물 선시공에 따른 안정성 확보로 일반적인 터널 지보공 외에 별도의 보강공법을 적용하지 않았으나, 변형 3-Arch 터널의 경우 Pilot 터널을 생략하므로써 중앙터널의 단면이 커짐으로 인해 굴착중 터널 안정성 확보를 위해 중앙 터널 및 좌,우터널 상부에 대구경 강관보강 그라우팅(L=12.0m, C.T.C 0.5m)가 적용되었다.

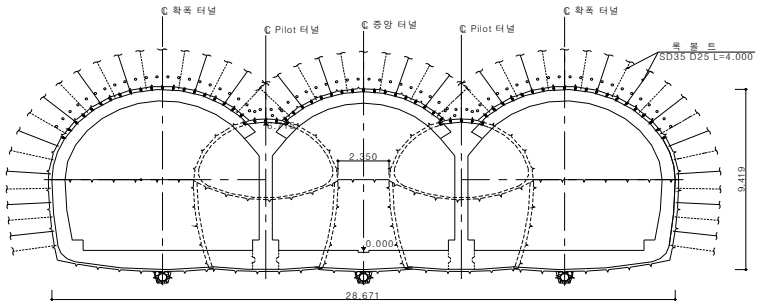
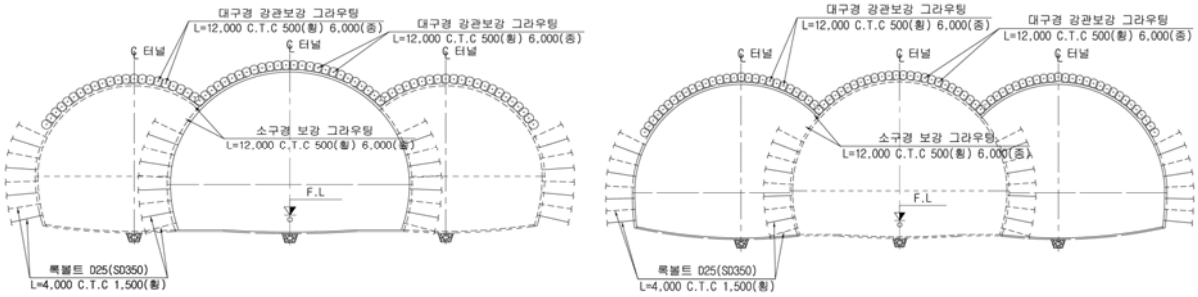


Fig. 5 Support pattern of typical 3-Arch tunnel of Shinbundang line

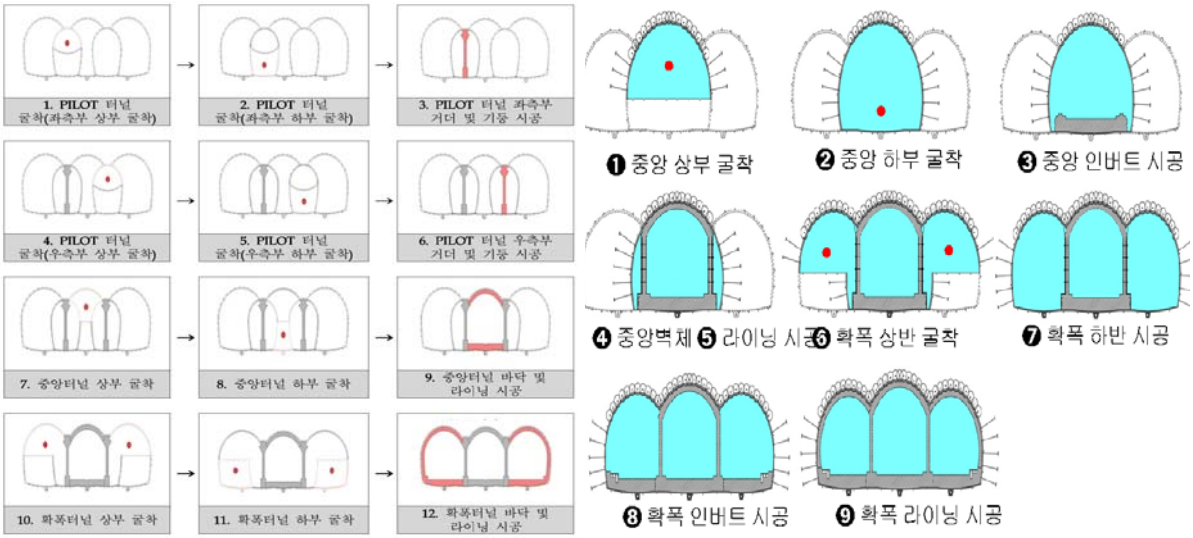


(a)3 PA (b)3PB

Fig. 6 Support pattern of typical 3-Arch tunnel of Seong-Nam Station

2.1.3 시공성 비교

일반적으로 3-Arch 터널 시공방식은 **Fig. 7(a)**와 같이 좌, 우 PILOT 터널을 선행 굴착 후 중앙 기둥 구조물을 설치한 뒤 좌, 우 터널 및 중앙 터널 순서로 시공하게 되는데, 이러한 경우 터널 굴착 시 안정성 확보에 유리하나 분할 시공에 따른 공기 소요가 불가피하다. 삼성~동탄 광역급행철도 성남정거장 동시시공 구간의 3-Arch 터널방식은 **Fig. 7(b)**와 과 같이 좌, 우 PILOT 터널을 생략하는 변형 방식이 적용되었으며, 시, 종점부 각 112m구간에 대한 공정을 비교 검토한 결과 변형 3-Arch 터널 방식이 기존 방식에 비해 약 9개월 정도 공기단축이 가능한 것으로 검토되었다.



(a) Construction sequence of typical 3-Arch tunnel (b) Construction sequence of modified 3-Arch tunnel

Fig. 7 Construction sequence of typical and modified 3-Arch tunnel of Seong-Nam Station

2.2 안정성 검토

2.2.1 수치해석

본 연구에서는 MIDAS/GTS 해석프로그램을 이용하여 변형 3-Arch 방식으로 시공하였을 때와 동일 단면에 PILOT 터널을 선 시공하는 기존 3-Arch 방식을 적용하였을 때의 제한적 수치해석을 통해서 설계 시 예측자료와 지반거동 및 안정성을 비교검토하였다.

변형 3-Arch 터널 방식은 18STEP으로 기존 3-Arch 터널 방식은 32STEP으로 구분하여 수치해석을 시행하였으며, 수치해석에 적용된 물성치는 **Fig. 8**과 같으며 해석영역은 좌, 우측 경계조건 4.0D로 적용하였으며, 하중분배율은 **Fig. 9**와 같이 적용하였다.

구 분		단위중량 (kN/m³)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (MPa)	포아송비	투수계수 (cm/sec)
매립층	사질토	18.0	0.010	28.0	25.0	0.35	4.26×10^{-3}
퇴적층	사질토(모래)	18.0	0.010	28.0	30.0	0.35	4.26×10^{-3}
	사질토(자갈)	19.0	0.000	32.0	40.0	0.33	1.09×10^{-2}
풍화토	사질토	19.0	0.025	28.0	50.0	0.32	2.95×10^{-4}
풍 화 암		21.0	0.034	31.0	270.0	0.30	4.02×10^{-5}
지층별	단층파쇄대	21.0	0.06	31.0	650.0	0.32	1.56×10^{-4}
	연 암	23.0	0.30	34.0	1,600	0.28	2.04×10^{-4}
	경 암	25.0	3.00	41.0	8,300	0.23	8.03×10^{-6}
등급별	Ⅰ등급	27.0	4.30	45.0	12,600	0.22	6.19×10^{-7}
	Ⅱ등급	26.0	3.00	42.0	7,400	0.23	3.60×10^{-6}
	Ⅲ등급	25.0	0.80	38.0	5,000	0.25	2.09×10^{-5}
	Ⅳ등급	23.0	0.30	35.0	2,000	0.28	1.22×10^{-4}
	Ⅴ등급	21.0	0.10	31.0	800	0.33	1.12×10^{-4}

Fig. 8 Geotechnical Parameters for Design of Seong-Nam Station

지보패턴	단면	지반조건	편마암류			비고
			굴착단계	1차숏크리트 단계	2차숏크리트 단계	
3PA-4	중앙상반	4등급	55	15	30	
	중앙하반	4등급	55	15	30	
	좌우상반	4등급	55	25	20	
	좌우하반	4등급	55	30	15	
3PA-6	중앙상반	파쇄대	50	15	35	
	중앙하반	파쇄대	50	20	30	
	좌우상반	파쇄대	50	30	20	
	좌우하반	파쇄대	50	30	20	
3PB-5	중앙상반	5등급	50	15	35	
	중앙하반	5등급	50	20	30	
	좌우상반	5등급	50	20	30	
	좌우하반	5등급	50	25	25	
3PB-6	중앙상반	파쇄대	50	15	35	
	중앙하반	파쇄대	50	20	30	
	좌우상반	파쇄대	50	20	30	
	좌우하반	파쇄대	50	25	25	

Fig. 9 Load Distribution Ratios in section of 3-Arch Tunnel

2.2.2 변형 3-Arch 터널 및 기존 3-Arch 터널 시공법 적용 시 거동 예측

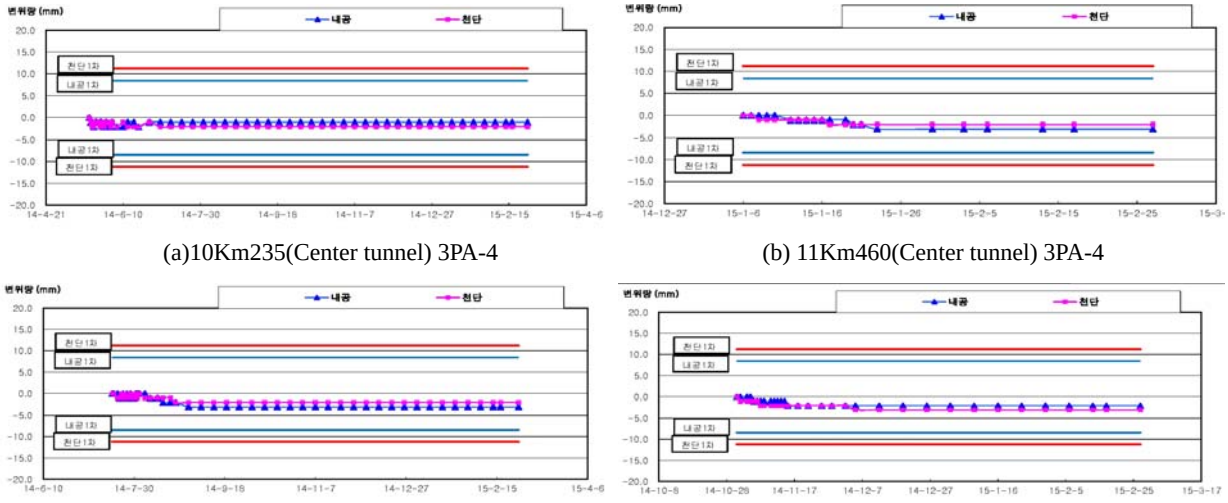
4개의 대표구간(10Km236.0, 277.0, 11Km364.0, 456.0)을 선정하여 변형 3-Arch 터널 방식과 PILOT 터널을 선굴착하는 기존 방식 적용 시에 대해 수치해석 한 결과 **Table 1** 과 같이 기존 3-Arch 터널 방식이 변형 방식과 비교하여 변위가 적게 발생하는 것으로 해석되었는데, 이는 기존 3-Arch 터널 시공방식이 변형방식과 비교하여 터널 단면을 분할함으로써 Arching에 유리하고, PILOT 터널의 중앙 기둥을 선시공함으로써 안정성 확보에 유리하기 때문으로 판단된다.

Table 1 Numerical analysis result of modified and typical 3-Arch tunnel

Station	Modified 3-Arch tunnel		Typical 3-Arch tunnel		Note
	Crown settlement	Tunnel convergence	Crown settlement	Tunnel convergence	
10Km236.00	7.354	5.040	6.612	2.811	
11Km456.00	11.389	10.953	9.969	6.567	
10Km277.00	11.600	10.467	10.486	5.963	
11Km364.00	7.460	6.633	6.445	3.386	Unit: mm

2.2.3 현장 계측결과 분석

4개의 대표구간(10Km235.0, 275.0, 11Km380.0, 460.0)을 선정하여 현장 계측을 시행한 결과 Fig. 10과 같이 천단변위 1.00 ~ 4.00mm, 내공변위 1.00 ~ 4.00mm 로 측정되었으며, 이는 7.354 ~ 11.600mm, 내공변위 5.040 ~ 10.953mm 발생할 것으로 예측되었던 수치해석 결과와 차이를 보이는 데, 일반적으로 터널 현장에서 발파 굴착 이후 계측기기가 설치되기까지 약 1일 이상 시간이 소요되는데 굴착 직후부터 계측기기가 설치되어 측정되기까지 미 측정된 초기변위 손실로 인한 차이로 사료된다.



(a)10Km235(Center tunnel) 3PA-4 (b) 11Km460(Center tunnel) 3PA-4

(a)10Km275(Center tunnel) 3PB-4 (b) 11Km380(Center tunnel) 3PB-5

Fig. 10 Field monitoring result of modified 3-Arch tunnel of Seong-Nam Station

3. 결 론

(1) 본 연구구간을 대상으로 기존 3-Arch 터널과 변형 3-Arch 터널의 시공성을 비교하였을 때 좌, 우 PILOT 터널 생략으로 인한 공종의 간소화로 9개월 정도의 공기가 단축된 것으로 검토되었으며, 실제 현장 시공시 기존 3-Arch 터널 방식에 비해 획기적인 공기단축 효과가 있는 것으로 확인되었다.
(2) 본 연구구간의 변형 3-Arch 터널 수치해석 결과 천단변위 7.354mm ~ 11.600mm, 내공변위 5.040mm ~ 10.953mm로 나타났으며, 동일 조건하에서 좌, 우 PILOT 터널을 시공하는 기존 3-Arch 터널의 시공방법의 조건 부여시 천단변위 6.445mm ~ 10.486mm, 내공변위 2.811mm ~ 6.567mm로 해석되었다. 이는 기존 3-Arch 터널방식이 변형 방식과 비교하여 굴착 단면을 분할함으로써 Arching에 유리하고, PILOT 터널 중앙기둥을 선시공하여 지반 변위에 대한 억지력을 높임으로써 나타난 결과라고 판단된다.
(3) 본 연구구간의 현장 계측분석 결과 천단 및 내공변위가 1.00mm ~ 4.00mm로 변위가 발생한 것으로 측정되었으며, 수치해석을 통한 거동예측보다 변위가 적은 것으로 나타났다. 이는 실시공 중 변위가 적게 발생된 것이 아니라 발파 굴착 이후 계측기기가 설치되기 전까지 물리적으로 측정이 불가한 초기변위 손실로 인한 차이로 판단된다.
(4) 본 연구구간 내 변형 3-Arch 터널은 현재까지 이상변위등 특이사항이 발생하지 않았는데 이는 지표면으로부터 30m 이상 이격된 대심도의 비교적 양호한 연암층 지반에 시공되었기에 가능했던 것으로 판단된다.
(5) 변형 3-Acrh 터널 시공방식은 PILOT 터널을 선시공하는 기존 방식과 비교하여 공사기간 및 공사비 절감 측면에서 매우 효율적이고 경제성있는 시공방식으로 판단되어지나, 기존 3-Arch 터널 시공방식을 대신하여 국내·외 3-Arch 터널현장에 적용시키기 위해서는 다양한 지반 조건에서의 안정성에 대한 많은 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] Korea rail network authority (2015), *Detail design of tunnel for Metropolitan High-Speed Railway, Section 2*

[2] Shinbundang Railroad Co. Ltd. (2006), *Detail design of tunnel for Sinbundang line between Gangnam and Jeongja*