

도심지에서 효율적인 무도갱 2-Arch 터널의 설계사례

A case study on efficient non pilot 2-Arch Tunnel in the urban

윤일병¹⁾, Il-Byung Yoon, 강희준²⁾, Hee-June Kang, 김홍대³⁾, Hong-Dae Kim, 김동식⁴⁾, Dong-Sik Kim

¹⁾ 도담 이앤씨 상무, Managing Director, Dodam Engineering and Construction CO. Ltd

²⁾ 도담 이앤씨 과장, Manager, Dodam Engineering and Construction CO. Ltd

³⁾ KCC 건설 팀장, Team Leader, KCC Engineering and Construction CO. Ltd

⁴⁾ KCC 건설 이사, Director, KCC Engineering and Construction CO. Ltd

SYNOPSIS : Due to increase in urban tunnelling as urban population and traffic volume increase, problems related with site security and civil appeal also increase.

This paper presents a comparative analysis between conventional 2-arch tunnel method and non-pilot 2 arch tunnel method, which were performed in the basic design of Wie-Rae region.

According to the analysis results, non-pilot 2-arch tunnel method is more efficient in terms of stability, constructability, and economic aspect. It is authors' wish that design procedure and method presented in this paper could help the design and construction of non-pilot 2-arch tunnel that should be planned in the near future.

Keywords : conventional 2-arch tunnel method, non-pilot 2 arch tunnel method

1. 서론

국토의 대부분이 산악지형인 우리나라의 도로터널은 경제성 및 안정성에 유리한 병설터널 형식을 주로 적용하였으나 도심인구 및 교통량의 증가로 인하여 철도, 도로 등의 산악구간이나 도심지 등의 다양한 지역을 통과하게 되었고, 최근들어 터널건설시 용지매입의 제한, 환경훼손의 최소화, 선형분리 곤란 등의 문제를 수반하게 되었다. 이러한 문제의 해결방안으로 근래 2-Arch 터널의 계획 및 시공이 점차 증가하는 추세에 있다.

본 연구에서는 위례지구 복정사거리 입체화시설 건설공사 기본설계사례를 토대로 기존 2-Arch터널의 형식을 비교하여 새로운 무도갱 2-Arch터널형식을 소개하고 기존형식과 비교검토를 수행하였으며 현장 적용성을 고려하여 근접터널의 이격거리에 따른 안정성과 효율적인 시공방안, 터널단면에 따른 경제성 분석을 통해 무도갱 2-Arch터널의 적정성을 검증하였다. 여기에 적용된 설계과정 및 기법 등을 소개함으로써 향후 계획될 2-Arch터널 설계 및 시공에 도움이 되고자 한다.

2. 현황

2.1 노선현황

본 과업구간의 기본설계는 수도권외곽의 교통량 분산 및 대규모 택지개발 사업에 따른 교통서비스의 수준 향상과 지역균형발전을 목적으로 하며, 주요 구조물로는 지하차도(U-Type구간 + Box구간)과 터널 및 도로구간을 포함한 총연장(L) 2,341m의 왕복 4차로의 도로건설사업이다. 위례지역의 과업구간 현황은 그림 1.과 같다.

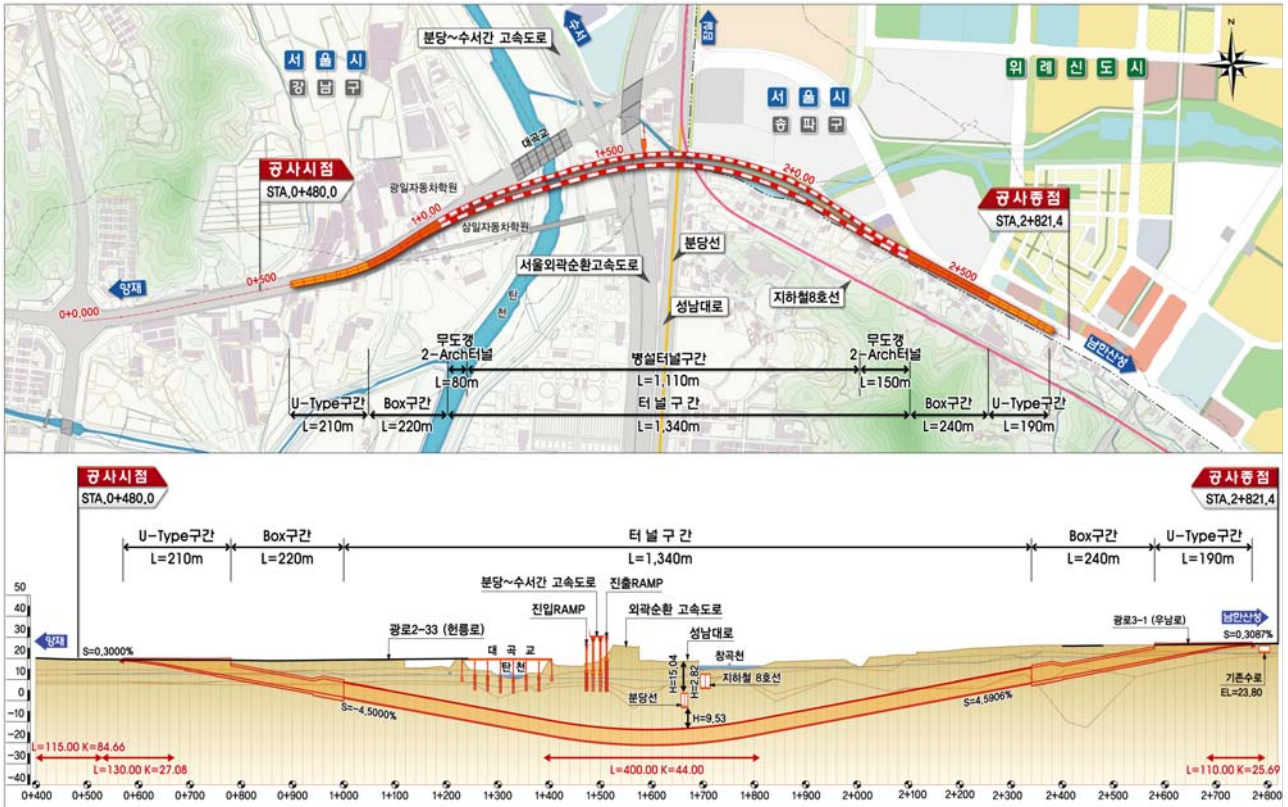


그림 1. 과업구간 현황도

2.2 지질현황

과업구간은 북북동방향으로 추가령구조대에 의한 수조의 단층선계곡들이 형성되어 있으나, 본 단층대에 의한 영향은 없는 것으로 파악되었고, 지질은 경기 편마암 복합체로 대부분 선캠브리아기 호상흑운모 편마암류로 구성되어 있다. 과업구간의 지질평면현황은 그림 2.와 같고 지질종단면도 현황은 그림 3.과 같다.

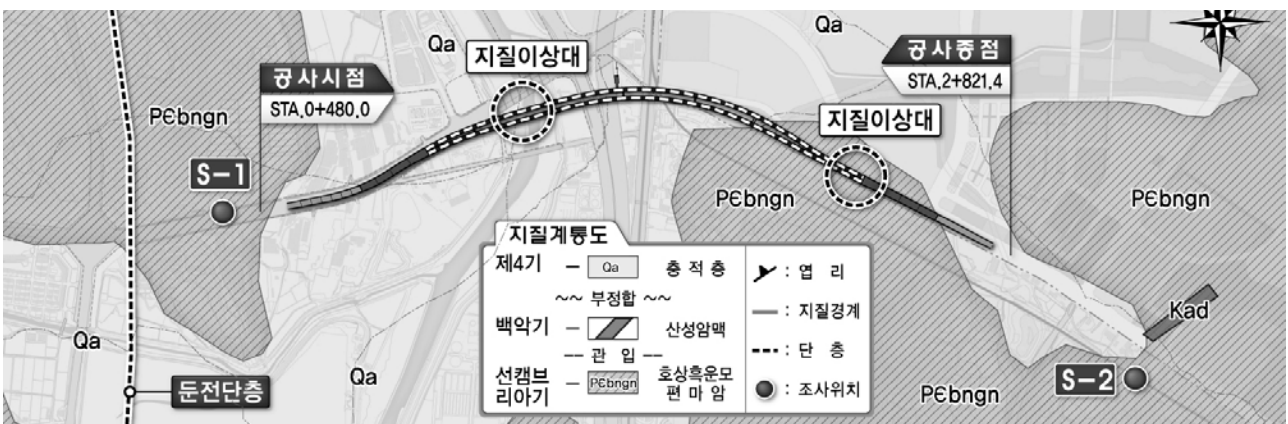


그림 2. 과업구간의 지질평면 현황

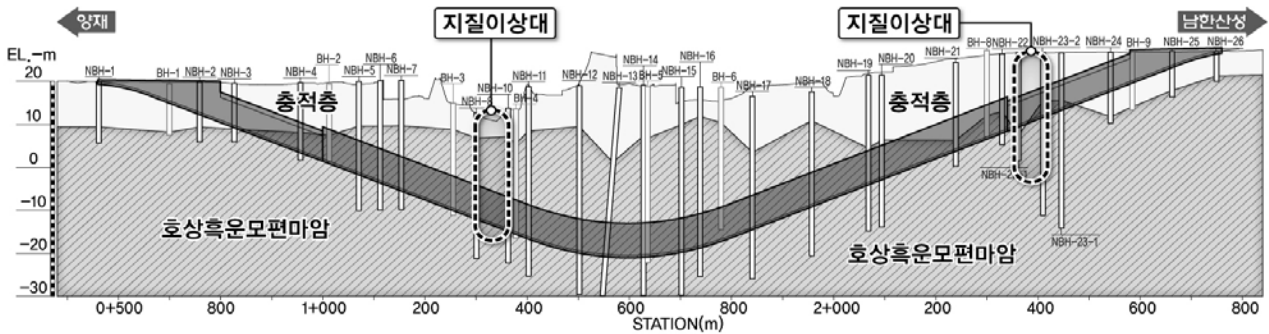
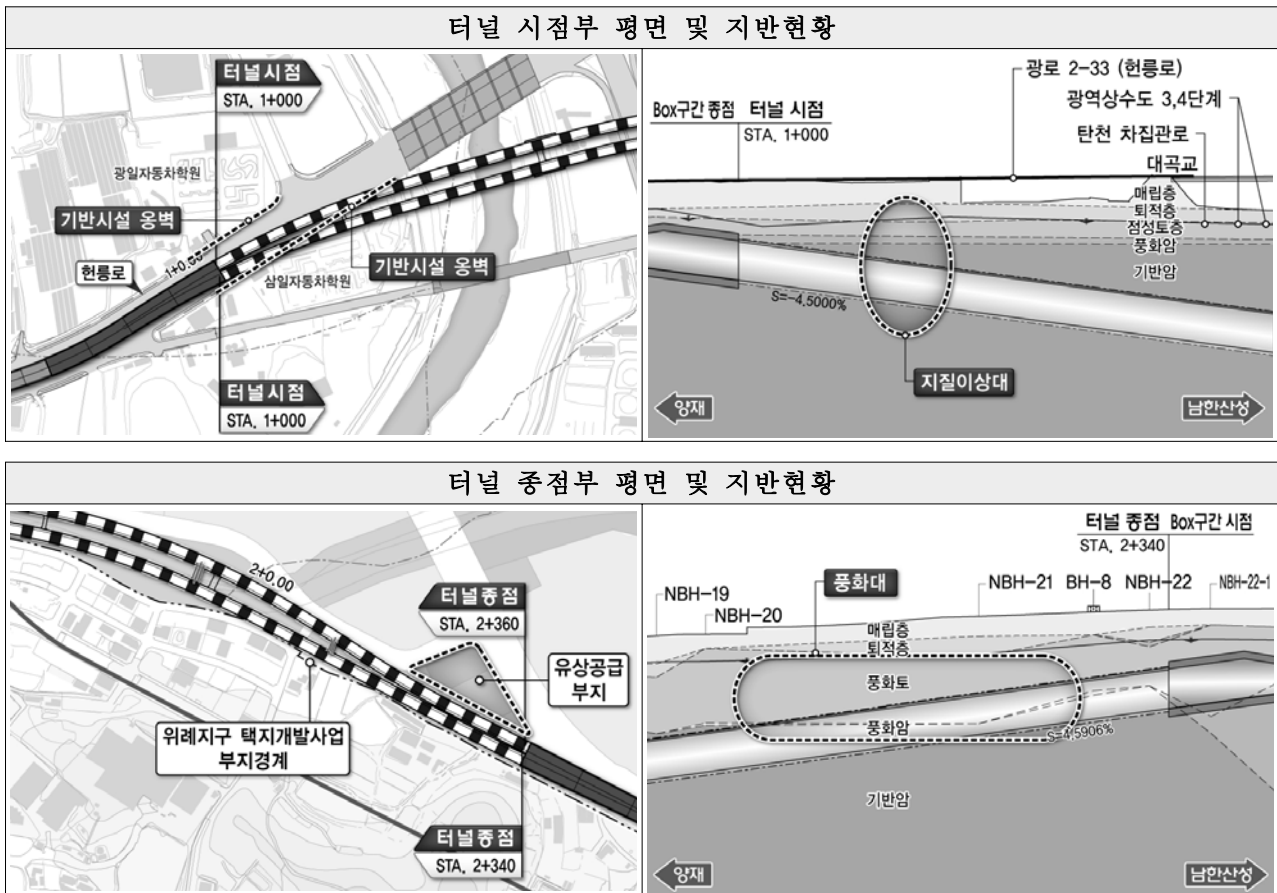


그림 3. 과업구간의 지질 종단면도 현황

2.3 과업구간 중점고려사항

과업구간의 터널시점부의 선형 및 지반조건은 기반암의 출현심도는 G.L.-12.0m 내외로 균일한 지층분포를 보이며 일부 지질이상대(RQD 0~10%)가 분포하는 것으로 파악되었다. 지장물로는 터널상부의 지방도와 시점갱구부의 도로옹벽이 저축되고 있으며 탄천을 횡단하는 대곡교 하부를 통과하고 있다. 중점부는 암반등급이 III~IV구간으로 양호하고 상부에 풍화대가 넓게 분포하며, 위례지구 택지개발 사업 부지경계 및 유상공급부지를 근접 통과하고 있다. 이러한 과업구간의 주변현황은 위례지하차도 시공시 현재 운영중인 도로 및 지방도에 대한 교통처리대책이 필요하게 되었고 터널의 시·중점부는 지장물 및 유상공급부지 저축제한으로 선형조건상 근접터널계획이 필요하게 되었다. 터널 시중점부 평면 및 지반현황은 표 1.과 같다.

표 1. 터널 시중점부 평면 및 종단현황



3. 터널형식의 선정

3.1 기존 2-Arch터널의 문제점 분석

2-Arch터널은 충분한 이격거리를 확보한 병설터널과 달리 터널 상호간에 미치는 영향이 크다고 할 수 있으며, 터널형상에 있어서도 일반적인 병설터널에 비해 중앙상부의 안정성이 취약하므로 중앙벽체를 설치하여 구조적 안정성을 확보하는 형태를 보이고 있다. 기존 2-Arch 터널은 방수슈트 및 중앙벽체 시공의 복잡성에 기인한 누수문제와 누수에 따른 동절기시 중앙벽체의 동파문제, 접이음 철근에 의한 방수막 손상과 시공성 불량에 따른 중앙벽체 콘크리트 타설 및 거더부 철근 맞이음의 시공성 불량의 소지등 여러 가지 문제점이 있다. 따라서 본 과업구간의 근접터널계획에 따라 시공성, 환경성, 누수문제등의 기존 2-Arch 터널의 문제점을 보완하여 합리적인 2-Arch터널 설계방안을 제시하게 되었다. 기존 2-Arch터널의 문제점은 표 2.와 같다.

표 2. 기존 2-Arch터널의 문제점

	시공성 불량	① 중앙터널 협소로 장비운영 곤란 ② 중앙벽체 콘크리트 타설 곤란 ③ 거더부 철근 맞이음 시공성 곤란
	누수 발생	④ 본선터널 발파, 숏크리트 타설시 방수막 손상 ⑤ 접이음 철근에 의한 방수막 손상 ⑥ 방수막 꺾임부 접합불량, 배수관 설치 곤란

3.2 터널형식 적용

본 과업구간의 터널계획 현황에 따라 시점부 지장물 및 종점부의 위례지구 택지개발사업을 반영하고, 환경 및 이용자의 안전과 유지관리 등을 고려하여 병설터널과 무도갱 2-Arch터널을 계획하였다. 또한 시공성과 경제성 및 공기단축을 위해 터널 필라폭 6.0m~9.0m(0.75D미만)의 구간은 Tie-bolt 보강을 이용한 병설터널을 적용하고 터널 필라폭 6.0m이하의 구간에는 무도갱 2-Arch터널을 적용하여 근접 지장물의 저축을 피하고 터널구간의 안정성을 확보하였다. 과업구간 터널형식 적용은 표 3.과 같다.

표 3. 과업구간 터널형식의 적용

구분	병설터널	무도갱 2-Arch 터널
표준단면		
시공성	<ul style="list-style-type: none"> • 편경사별 통합단면 및 최적굴착단면으로 공기단축 실현 	<ul style="list-style-type: none"> • 중앙터널이 존재하지 않으므로 시공성 향상 및 공기단축 실현
유지관리	<ul style="list-style-type: none"> • 오픈수 분리시스템 • 안전난간 설치를 이용한 유지관리 편의성 • 측벽배수관 관경증대 	<ul style="list-style-type: none"> • 발파 및 숏크리트 타설시 방수막 손상 없음 • 이음철근에 의한 방수막 손상 없음 • 병설터널 접목으로 유지관리 효율성 극대화
보강대책	<ul style="list-style-type: none"> • 3중 보강계획 수립(필라폭 6~9m구간) 	<ul style="list-style-type: none"> • 6중보강계획 수립
적용구간	<ul style="list-style-type: none"> • 필라폭 6.0m 이상 구간 -이격거리에 따른 안정해석 결과 반영 -본선터널(L) = 1,110m 	<ul style="list-style-type: none"> • 필라폭 6.0m 이하 구간 -시공사례 및 자문결과 반영 -시점부 80m, 종점부 150m

3.3 국내외 연구사례 조사

무도개 2-Arch터널의 국내 연구사례는 터널공학회에서 수행한 “대형·대단면 지하공간 창출을 위한 건설기술”이 있으며 이 연구를 통해 2007년 “2아치터널 시공방법” 특허(등록번호 제 10-07178495호)등록 사례가 있다. 일본의 경우 문화재 및 중요지장물 보호와 보상비 절감을 위해 무도개 2-Arch터널을 적용하고 있으며 시공성 및 경제성 향상을 위해 최근 무도개 2-Arch터널의 증가추세에 있다. 일본 내 근접 2-Arch터널의 시공실적으로 히야곤 터널을 비롯하여 40개소 이상되는 것으로 파악되었으며 일본의 근접터널 적용사례는 표 4.와 같다.

표 4. 일본의 근접터널 적용사례

터널명	시공장소	연장(m)	토피고(m)	지질조건	준공
이시카와	우루마시	322	20	천매암, 석회암	1994
히야곤	오키나와	259	25	사암, 이암, 이암호층	2007
토미구스쿠	토미구스쿠시	331	45	이암, 석회암	2007

히야곤 터널의 표준단면	토미구스쿠 터널의 표준단면
일본의 무도개 2-Arch터널	

본 과업구간의 무도개 2-Arch터널의 적용에 따라서 일본내 “도로건설 컨설턴트”에 과업구간의 지반 및 시공조건에 따른 자문을 얻어 설계에 참조하였으며 그에 따른 결과는 표 5.와 같다.

표 5. 일본 도로건설 컨설턴트 자문내용

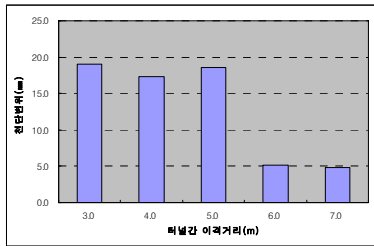
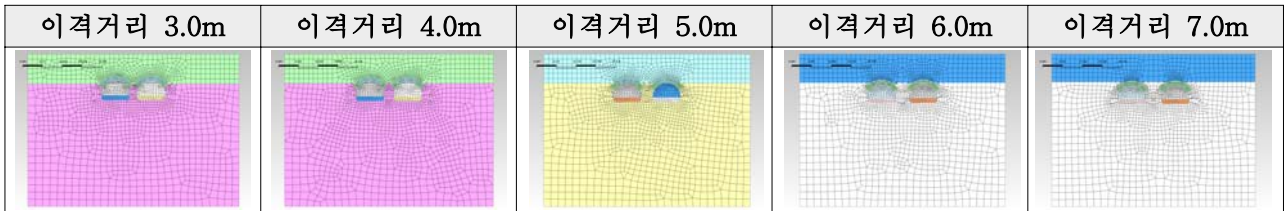
구분	내용
자문목적	• 근접터널 시공시 간섭효과 저감 및 안정성 확보방안
측벽보강	• 선행 및 후행 터널의 굴진장을 일치시킨 시공계획 수립 → 인접터널과의 응력균형 유지
보강두께	• 측벽보강 두께는 60cm 이상 적용하여 안정성 확보
보강재료	• 측벽보강은 고강도 숏크리트 또는 콘크리트 보강 실시
굴착 및 계측	• 발파시 보강콘크리트 허용진동치는 30cm/sec로 설정 • 선행터널과 이격거리 1.6m 이상 발파, 1.6m 이내는 기계굴착 적용 • 선행터널 측벽에 계측기를 설치하여 확인
라이닝 두께	• 라이닝 두께는 일반적으로 30cm를 적용, 토피고가 2.0D 이하인 구간은 35cm 적용

4. 무도갱 2-Arch터널의 적정성 검증

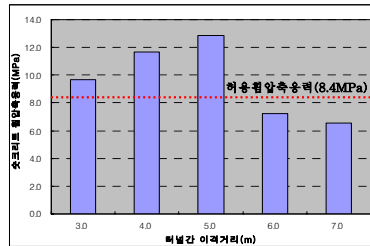
4.1 터널간 이격거리 검토

시중점부의 단지계획과 지장물 현황으로 인하여 터널의 평면선형계획에 따라 이격거리가 좁아지므로 병설터널의 터널간 이격거리를 검토하여 안정성이 확보되지 않는 이격거리 이하는 무도갱 2-Arch터널을 적용하고 그 이상의 이격거리는 병설터널로 적용하여 경제적인 터널설계에 대한 검토를 수행하였다. 검토를 위해 2차원 유한요소 해석프로그램인 MIDAS-GTS, ver 3.0을 사용하였고, 갱구부임을 감안하여 지반등급 5등급을 적용하고 최적의 이격거리 도출을 위해 병설터널간 이격거리를 3.0m~7.0m로 매개변수해석을 수행하였다. 검토결과, 이격거리 6.0m를 기준으로 변위 및 지보재의 안정성을 확보하였으며, 따라서 본 과업구간의 병설터널 및 무도갱 2-Arch터널의 최소이격거리의 적용은 6.0m를 기준으로 설계를 수행하였다. 표 6.은 매개변수 해석 모델링도이며 그림 4.는 이격거리에 따른 변위 및 지보 부재력이다.

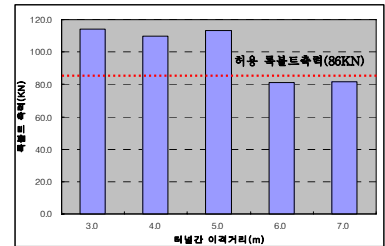
표 6. 매개변수 해석 모델링도



(a) 변위 발생경향



(b) 숏크리트 휨압축응력 발생경향

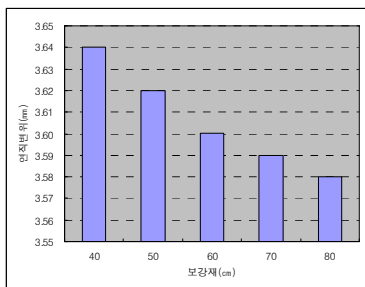


(c) 록볼트 축력 발생경향

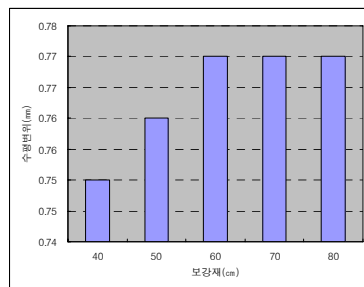
그림 4. 이격거리에 따른 변위 및 지보 부재력

4.2 무도갱 2-Arch터널의 보강벽체 두께산정

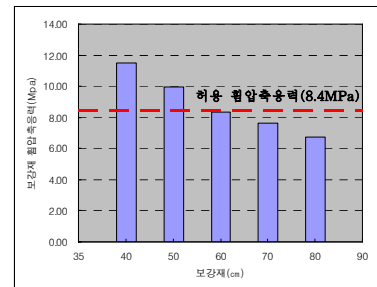
무도갱 2-Arch 터널에서 선행터널 굴착 및 중앙부 보강 후 후행터널을 굴착하면 후행터널의 굴착으로 인한 응력이 선행터널로 전이되어 선행터널에 추가적인 응력이 발생한다. 이러한 원인은 무도갱 2-Arch



(a) 연직변위 발생경향



(b) 수평변위 발생경향



(c) 휨압축응력 발생경향

그림 5. 보강재 두께에 따른 변위 및 지보 부재력 변화양상

터널의 안정성을 결정하는 중요한 요소로 중앙 보강벽체의 두께를 들 수 있다. 본 사례에서는 무도갱 2-Arch터널의 보강벽체두께 산정을 위한 안정성 검토를 수행하였으며 그 결과, 그림 5.에서 보는바와 같이 중앙부의 보강벽체 두께가 증가 할수록 연직변위는 감소하고 수평변위는 증가하지만, 그 변위량 증가는 60cm를 기준으로 증가폭이 극히 미소하며, 보강벽체의 휨압축응력은 60cm이상일 경우, 허용기준 이내로 만족하는 것을 알 수 있다.

4.3 무도갱 2-Arch터널 보강계획

무도갱 2-Arch터널은 중앙터널을 생략함으로써 시공성 확보에 용이하지만, 터널의 안정성 확보를 위해 터널 근접시 보강계획이 필요하며 이에 따라 무도갱 2-Arch터널구간의 중앙보강벽체에 대한 6중 보강계획을 수립하였다. 보강계획으로 발파굴착에 따른 진동저감을 위해 굴착면에 철판을 시공하고 H형강 지보를 통해 초기굴착의 안정성을 확보하였다. 또한 고정볼트와 보강콘크리트를 타설하고 후행터널 굴착시 굴착영향범위에 해당하는 1.7m이내는 기계굴착을 적용하여 굴착면에 대한 안정성을 확보하였으며, 40cm의 라이닝 타설로 근접구간의 안정성을 확보하였다. 표 7.은 무도갱 2-Arch터널의 보강계획을 나타낸다.

표 7. 무도갱 2-Arch 터널구간의 보강계획

보강 단면	보강순서
	<ol style="list-style-type: none"> ① 철판시공 ⇒ 발파굴착시 진동저감 ② H-150 형강 지보 ⇒ 초기굴착 안정성 확보 ③ 고정볼트 + 거푸집 시공 ⇒ 측벽과 보강콘크리트 결합 ④ 보강콘크리트 두께 80cm 타설 ⇒ 근접터널 측벽 안정성 확보 ⑤ 후행터널 굴착시 영향범위 1.7m이내 기계굴착 적용 ⇒ 허용 진동치 25.4cm/sec (한국자원연구소, 미국교통국) ⑥ 라이닝 콘크리트 타설(두께 40cm)

4.4 무도갱 2-Arch터널 보강 안정성 검토

본 과업구간의 무도갱 2-Arch터널시공에 따른 보강 안정성 검토결과, 시점부 및 종점부의 터널중앙벽체 생략으로 굴착시 변위가 14.9mm~18.6mm로 발생하지만 슛크리트 휨압축응력 및 록볼트 축력은 허용치 이내로 안정성을 확보하고, 주철근 D19@250, 배력철근 D13@200, 전단철근 D13@400의 배근으로 무도갱 2-Arch터널의 라이닝 안정성을 확인할 수 있었다. 그러므로 수치해석 결과에 따라 병설터널 이격거리 6.0m이하 구간은 무도갱 2-Arch터널을 적용하여 중앙벽체의 6중보강계획을 수립하였고 굴착 및 라이닝 타설에 대한 안정성을 확보하였다. 그림 6.은 무도갱 2-Arch터널 적용구간의 굴착시 최대변위 및 최대 지보재 응력 검토결과이며 그림 7.은 무도갱 2-Arch터널 적용구간의 라이닝 안정성 검토결과이다.

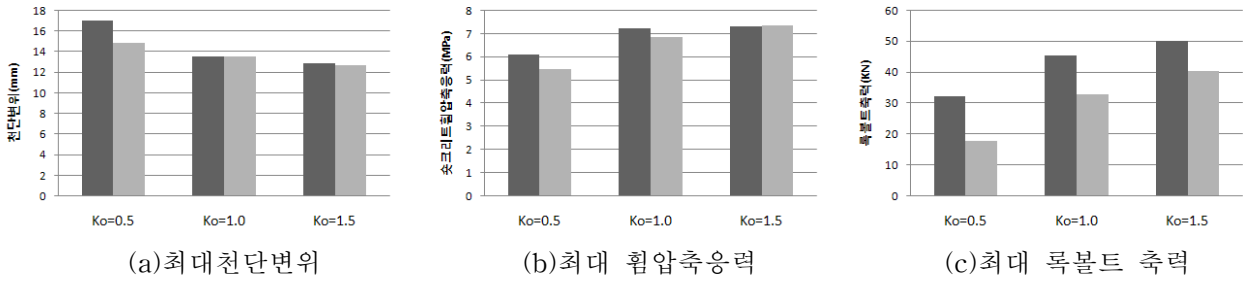


그림 6. 무도갱 2-Arch터널 적용구간의 굴착시 최대변위 및 최대 지보재 응력 검토결과

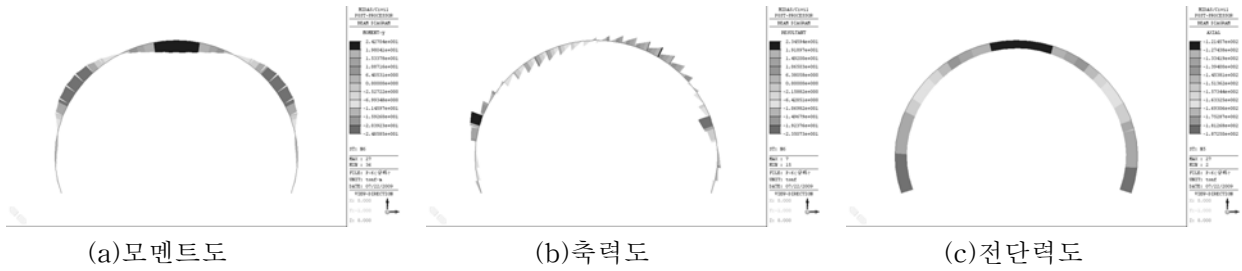


그림 7. 무도갱 2-Arch터널 적용구간의 라이닝 안정성 검토결과

5. 무도갱 2-Arch터널 시공계획

무도갱 2-Arch터널의 시공방안으로 후행터널 굴착시 선행터널 필라부 변위여부를 확인하며 선·후행터널의 안전을 고려한 적정 이격거리를 확보하는 것에 주안점을 두었다. 시공방안의 첫단계로 선행터널 굴착 후 천단보강 및 지보설치를 하고 발파진동을 고려한 이격거리 확보 및 양생기간을 준수하여 보강콘크리트를 타설한다. 다음으로 보강콘크리트 강도를 확인하고 후행터널의 굴착이 이루어진 후, 양방향 라이닝 콘크리트 타설 및 보강을 한다. 그림 8.은 무도갱 2-Arch터널 시공순서를 나타낸다.

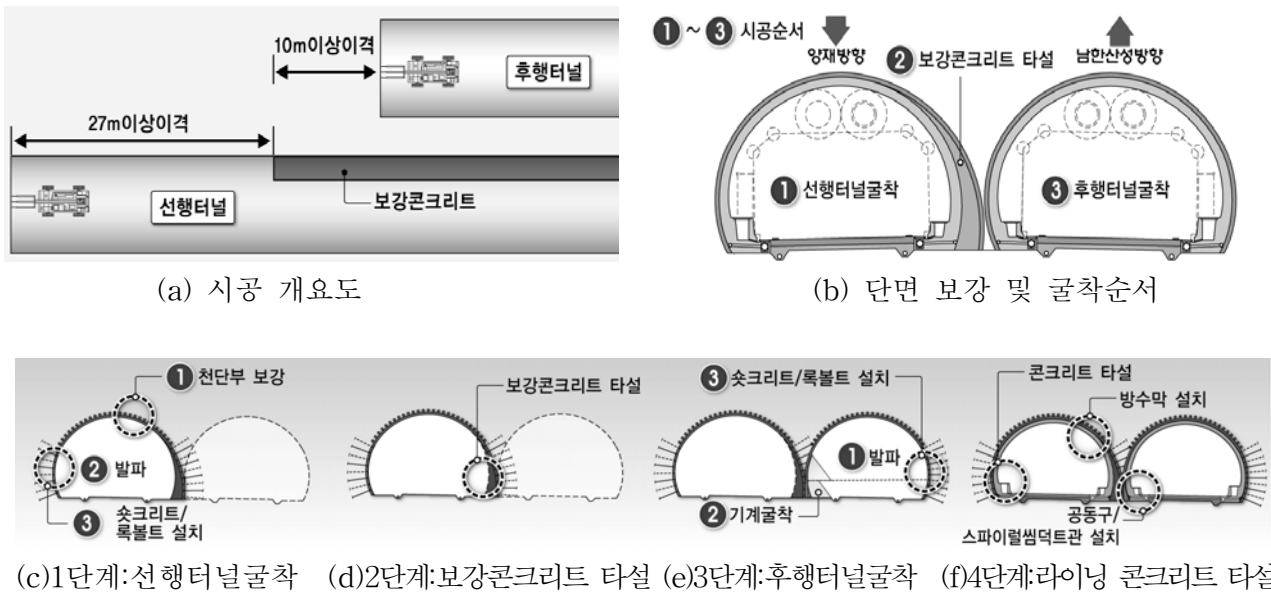


그림 8. 무도갱 2-Arch터널의 시공방안

6. 무도갱 2-Arch터널 계측계획

무도갱 2-Arch터널의 경우, 터널 필라폭 이격거리가 6m이하의 근접터널로 터널의 안정성을 확보하는 보강벽체 콘크리트의 계측이 시공 중이나 시공 후 확인이 필요하다. 따라서 본 과업에서는 후행터널 굴착시 선행터널 보강콘크리트 측면에 계측기를 설치한 후 진동계측을 수행하여 발파에 대한 계측관리를 수립하여 보강벽체 콘크리트의 안정성을 확보하였다. 그림 9.는 무도갱 2-Arch터널의 계측계획이다.

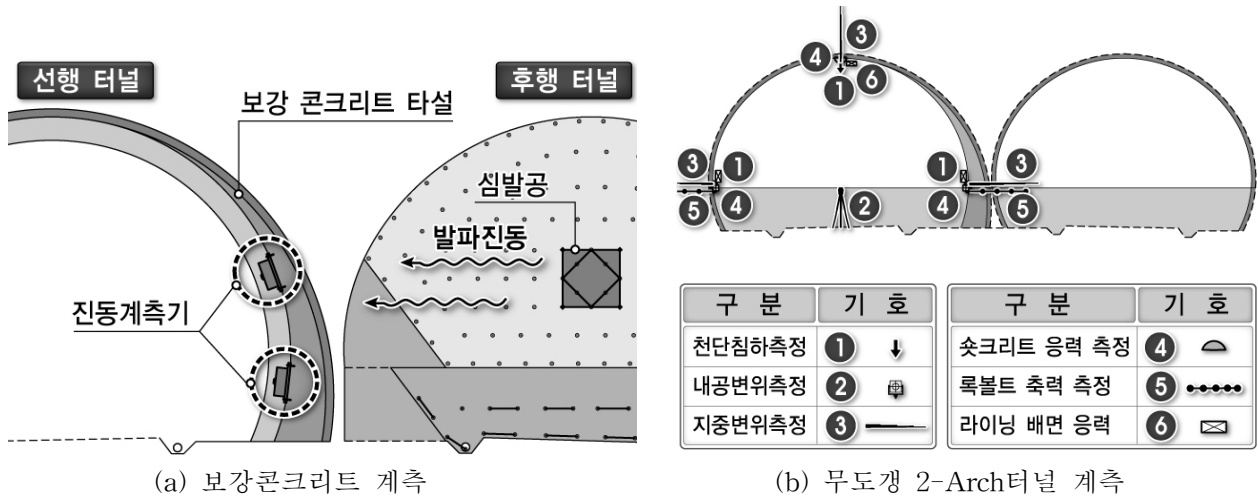


그림 9. 무도갱 2-Arch터널의 계측계획

7. 경제성 분석

본 과업구간의 경제성 분석을 위해 터널시공 기본공정에 따른 기존 2-Arch터널과 무도갱 2-Arch터널의 공사비를 분석하였다. 무도갱 2-Arch터널의 위치가 시종점부 입을 감안하여 지반등급 5등급을 적용하였으며 그에 따른 기존 2-Arch터널의 직접공사비는 2,076만원/m이며, 무도갱 2-Arch터널의 경우 1,637만원/m로 무도갱 2-Arch터널의 직접공사비가 기존 2-Arch터널의 직접공사비에 비해 약 21%의 절감효과가 있는 것으로 분석되었다.

표 8. 기존 2-Arch터널과 무도갱 2-Arch터널의 단위 m당 직접공사비 비교

구 분	기존 2-Arch터널	무도갱 2-Arch터널
1. 굴착 및 버려처리	616만원	537만원
2. 보강 및 안정 (Rock bolt 및 지보)	353만원	121만원
3. 터널 라이닝 (-shotcrete, 콘크리트라이닝)	916만원	743만원
4. 배수 및 방수 (공동구 및 배수구)	192만원	237만원
터널 직접공사비 합계	2,076만원	1,637만원

8. 결론

본 연구를 통해 위례지구 복정사거리 입체화시설 건설공사 기본설계사례를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존 2-Arch터널의 문제점에 해당하는 중앙터널의 장비운영 문제를 비롯하여 중앙터널의 벽체콘크리트 타설시 어려움을 해결하고 발파 및 슛크리트 타설시 방수막 손상에 따른 누수문제를 해결하는 무도갱 2-Arch터널의 적용은 굴착공정의 단순화를 통한 시공성 향상 및 시공공기 단축에 유리할 것으로 판단된다.
- (2) 병설터널과 무도갱 2-Arch터널의 적용 분기점은 터널 필라부 이격거리 6.0m를 기준으로 안정성을 확보하며 나뉘어지는 것을 확인할 수 있었으며, 무도갱 2-Arch터널의 시공시 중앙벽체의 시공은 중앙벽체 두께가 60cm이상일 경우, 수평변위는 증가하지만 증가의 정량적인 수준은 극히 미소하고 보강벽체의 응력이 허용기준 이내로 안정성을 확보하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 기존 2-Arch터널과 무도갱 2-Arch터널의 직접공사비 비교에 따르면 약 21%이상 무도갱 2-Arch터널이 우수하여 공사비 측면에서도 경제성 확보에 유리할 것으로 판단된다. 또한, 국내의 경우, 무도갱 2-Arch터널의 시공사례는 없으나, 해외(일본)사례의 경우 시공성 및 경제성이 유리한 무도갱 2-Arch터널의 적용이 활성화 되고 있음을 확인할 수 있었다.
- (4) 최근 도심지 개발로 인한 지상 및 지하도로계획은 지장물과 인근 주변구조물 및 택지개발계획으로 인해 제약이 따르지만, 무도갱 2-Arch터널의 적용시 기존 2-Arch터널에 비해 용지면적 및 부지사용을 최소화하여 민원이나 지장물로부터의 안정성을 확보하는데 우수할 것으로 판단된다.
- (5) 본 연구는 위례지역의 현장현황 및 지반조건을 토대로 지장물 및 민원의 최소화를 확보하기 위해 설계된 사례로서, 향후 타 지역의 적용시 주요현황 및 지반조건에 맞는 적용성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 앞으로 도심지 천층터널의 개발 및 근접터널로써 무도갱 2-Arch터널의 설계사례와 시공경험, 해석 그리고 계측 등의 자료를 데이터화하여 설계 및 시공방안을 더 발전시켜야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1999) “도로설계편람” 제6편 터널
2. 한국도로공사(2000~2005) “설계실무자료집”
3. 왕이완(2001), “도로에서 2Arch 터널의 적용성”, 대한터널협회 정기학술발표회, pp. 141~152
4. 유태호, 권오근(2002), “2-Arch 터널(소래터널) 누수 발생에 관한 고찰”, 도로와 공항, 제9권 2호, pp.38~44
5. 김상균, 박동욱(2003), “수치해석적 접근을 통한 2-Arch 터널의 거동양상 고찰”, 한국지반공학회 봄 학술발표회, pp. 225~232
6. 이상덕, 전은숙(2004), “사질토지반에서 2Arch 터널의 거동”, 한국터널공학회 논문집 제6권 제2호, pp. 171~182
7. 남명우, 김영준(2006), “대단면 2-Arch 터널 설계사례(영덕~오산 광역도로 건설사업 1공구)”, 한국토질 및 기초기술사회 가을기술발표회, pp356~363