

❖ 굴착 및 지보 기술위원회

Annual Technical Report

2023. 12



사단
법인 **한국터널지하공간학회**
Korean Tunnelling and Underground Space Association

꺄 굴 착 및 지 보 기술위원회

Annual Technical Report

Part 1. 격자형 지하공간 개발을 위한 고성능 합성지보재 성능평가

Part 2. 국내 최초 TBM 선굴진 2-Arch터널 설계사례

2023

터 널 지 하 공 간 학 회

굴 착 및 지 보 기 술 위 원 회

Annual Technical Report(Part 1)

**“격자형 지하공간 개발을 위한 고성능
합성지보재 성능평가”**

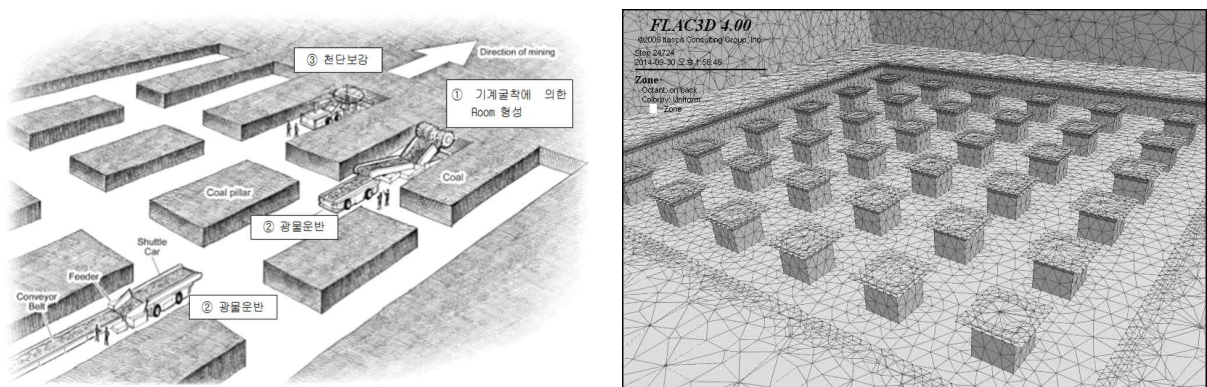
2023

**터 널 지 하 공 간 학 회
굴 착 및 지 보 기 술 위 원 회**

1. 운용 중 확장을 고려한 격자형 지하공간 개요

지하구조물은 동일한 형태의 시설물이라고 하더라도 모든 면에서 동일한 사업은 존재하지 않는다. 즉 지반조건에 대한 고유성과 비 반복성의 특성을 가지고 있으며, 사업수행 과정에서 많은 불확실성과 다양한 변수들의 발생 가능성을 가지고 있기에 공정을 계획함에 있어 충분한 사전조사와 체계적이고 과학적인 분석에 근거한 계획의 수립과 수행 그리고 이를 통한 생산성의 향상을 필요로 한다. (지하복합플랜트연구단, 2022)

광산분야에서 주방식 공법은 지형, 광물의 매장 분포 형태, 굴착방식에 따라 굴착공정을 달리 적용 하지만 공간이용을 목적으로 하는 주방식 공법의 굴착공정은 다음과 같다. (지하복합플랜트연구단, 2022)



(a) : 주방식 굴착공정 사례

(b) : 해석 모델링

[그림 1.1] 격자형 지하공간을 위한 주방식 구조 형태(지하복합플랜트연구단, 2022)

통상 연속성 채굴장비를 이용하여 채굴방향으로 ① 룸 굴착 → ② 광물 운반 → ③ 천단보강의 순으로 압주와 룸을 순차적으로 만들어 간다. 연속성 채굴장비(Continuous miner)를 적용함으로써 굴착진동을 최소화 하고 장비 이동거리를 최소화하여 룸 굴착 후 이웃 룸을 굴착하는 방식을 적용한다. 참고로, 기계식(연속성 채굴장비) 굴착방식 기술은 전 세계적으로 널리 활용되고 있으나 커팅헤드의 기술은 전 세계적으로 약 6개국에만 보유하고 있는 최첨단 기술로, 국내 기술은 전무한 상태이다.(지하복합플랜트연구단, 2022)

본 연구에서는 주방식 굴착공정의 최적 설계를 위하여 발파공법을 가정한 계획공정별 안정성을 검토했으며 세부 검토항목은 표 1.1과 같다.(지하복합플랜트연구단, 2022)

<표 1.1>세부 검토항목(지하복합플랜트연구단, 2022)

구분	세부 검토 항목
굴착공법	발파굴착
계획부지	120m×120m
지반조건	Type 2
굴착높이(H)	6.0m(물류 창고형 공간)
압주 형상비(W/H)	1.0(6.0m)
룸 형상비(S/H)	2.0(12.0m)
굴착 이격거리	3S(36.0m)

2. 격자형 지하공간을 위한 고성능 합성지보재 설계

본 연구의 지하공간 활용 도시기반 복합플랜트 시설의 증설(확장)을 고려한 격자형 지하공간을 구성하기 위한 고성능 합성지보재는 그림 2.1과 같이 숯크리트와 뿔철 방수 멤브레인으로 구성된다. 고성능 합성 지보재는 설계 패턴에 따라 역할이 다르지만, 일반적으로 뿔철 방수 멤브레인은 숯크리트나 지반에 부착되어 차수와 방수 성능을 확보해야 하고 숯크리트는 지하공간을 굴착 후 지반에 발생하는 변위나 응력을 억제하기 위해 재령별 기준에 적합한 압축강도와 휨강도가 요구되며, 영구지보재로 고려되는 경우 고강도 및 내구성을 확보되어야 한다.

[ALT1]



(a) : 숯크리트 또는 라이닝 마감

[ALT2]



(b) : 멤브레인 마감

[그림 2.1] 고성능 합성 지보재 설계 패턴

2.1 고성능 합성지보재용 슛크리트 개요

스�크리트는 1970년대 NATM 공법이 국내에 도입되면서 적용되기 시작했으며, 타설 방법에 따라 건식 공법과 습식 공법으로 구분된다. 건식 공법은 물 이외의 재료(시멘트, 모래, 자갈, 등)를 혼합하여 압축 공기로 노즐까지 보낸 후 노즐에서 물과 함께 뿜어 붙이는 공법이다. 습식 공법은 물을 포함한 모든 재료를 배치 플랜트(batch plant)에서 혼합한 후 압축 공기를 이용해 노즐에서 뿜어 붙이는 공법이다. 1990년대 초까지는 일반적으로 건식 공법에 의한 슛크리트 시공이 이루어졌으나, 높은 리바운드율과 분진 발생 등의 문제로 현재는 대부분 습식 공법으로 시공이 이루어지고 있다.

1989년 설립된 유럽의 EFNARC에서는 1991년에 슛크리트 기술위원회를 발족하여 1996년 유럽 통합 기준인 “European Specification for Sprayed Concrete Guidelines” 을 제정했다. 이 기준을 통해 실리카흄과 고성능 감수제와 같은 고성능 슛크리트의 구성 재료, 강도 및 내구성에 대한 기준, 배합 설계, 슛크리트 타설, 품질 관리와 각종 시험 방법, 그리고 인체의 건강과 안전성에 미치는 영향 등을 제시했다.

최근 슛크리트의 품질과 균일성이 향상됨에 따라 슛크리트를 영구적인 라이닝으로 사용하는 경우가 증가하고 있으며, ITA(2003)에 따르면 슛크리트에 의한 무라이닝 터널은 고성능 슛크리트는 기존 슛크리트의 강도 기준을 상향하여 국가별로 자국 특성에 맞게 14개국 168개의 터널에서 610 km 가량 시공되었다.

고성능 슛크리트는 기존 슛크리트의 강도 기준을 상향하여 국가별로 자국 특성에 맞게 적용되고 있으며, 시멘트와 골재의 혼합으로 구성된 혼합물을 기반으로 기술적 특성 및 내구성 등이 향상된 복합체를 의미한다(Bernardo et al., 2015). 향상된 슛크리트는 화학적 혼합물, 실리카 폼(Silica fume), 플라이 애쉬(Fly ash), 강화 섬유 등이 추가적으로 함유된 형태로 구성되어 있다.

2.2 고성능 합성지보재용 슛크리트 배합

본 연구에서는 고성능 합성지보재를 구성하는 슛크리트의 배합 조건별 성능을 검토하기 위해 표 2.1과 같이 일반강도 슛크리트, 고강도 슛크리트, 고성능 슛크리트로 구분하여 배합설계를 실시하였고 각 권장 배합을 기준으로 현장 여건에 적합하게 배합을 조정하여 공시체를 제작하여 성능 시험을 실시할 계획이다.

본 연구와 관련된 고성능 슛크리트 기술은 건설신기술 제 685호 “고성능 분체 혼화재 및 조기강도형 알칼리 프리계 급결제를 사용한 습식 슛크리트 공법” 과 관련된 기술로

현재까지 여러 고속도로와 철도 공사 현장 등에 활용되고 있는 기술이다.

-shotcrete의 고성능화를 위한 품질관리 측면에서 물-바인더비(W/B)는 35~40%로 준수해야 하며 이를 위해 고성능 감수제의 사용량은 $B \times 1 \sim 1.5\%$ 를 사용하는 것을 권장한다. 잔골재율(S/a)은 60~75%로 현장 골재의 특성과 함수율을 고려하여 실제 현장 타설 전, 현장 시험실 시험을 통해 골재 사용량을 결정해야 한다. 높은 조기강도 발현과 장기강도 저하를 최소화하기 위해 알칼리 프리계 급결제는 $B \times 5 \sim 10\%$, 내구성 향상을 위한 고성능 분체 혼화제는 $B \times 5\%$, 즉 24 kg/m^3 을 시멘트 대비 치환해 사용한다.

<표 2.1> 배합 조건별 shotcrete 권장 배합비

배합조건	G Max	S/a (%)	W/B (%)	W	단위중량(kg/m ³)						알칼리 프리계 급결제 ³⁾ (B*%)
					Binder		S	G	강 섬유 유 ²⁾	고성능 감수제 ²⁾ (B*%)	
					C	HPA ¹⁾					
일반강도 shotcrete (LF3000)	10	65 (60~75)	42 (35~50)	202	480	-	1,050	564	37	1 (1~1.2)	8 (5~10)
고강도 shotcrete (LF5000)	10	65 (60~75)	38 (35~40)	182	(480~500)		1,079	580	37	1.2 (1~1.5)	8 (5~10)
					480	-					
고성능 shotcrete (HPA, LF5000)	10	65 (60~75)	38 (35~40)	182	(480~500)		1,079	580	37	1.2 (1~1.5)	8 (5~10)
					456	24					

- 1) HPA : 실리카흙과 플라이애쉬 등을 혼합한 고성능 분체 혼화제 ROADCON[®]-HPA(BC), 영구지보재 개념의 고성능 shotcrete에 사용되며 하자 및 해저 터널 등 shotcrete의 수밀성이나 내구성을 확보하기 위함.
- 2) 고성능 감수제 : 폴리카르복실산계를 주성분으로 하는 ROADCON[®]-PEMA-SR3000, 골재 상태에 따라 사용량을 증감할 수 있음.
- 3) 알칼리 프리계 급결제 : 알칼리 함량($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \text{K}_2\text{O}$) 1% 이하인 급결제로 일반강도용 ROADCON[®]-LF3000, 고강도용 ROADCON[®]-LF5000으로 구분하며, 급결제 사용량은 시멘트 중량의 5~10%를 표준으로 하며, 기온·지반·용수 조건 등에 따라 증감할 수 있음.

2.3 고성능 합성지보재용 뿔칠 멤브레인

본 연구에서 고성능 합성지보재를 구성하는 뿔칠 멤브레인으로 해외의 여러 제품들을 검토했으며, 특히 본 연구에서 아래 그림과 같이 Mock-up 시험을 통해 시공성까지 확인했던 글로벌 기업인 S社의 제품 M을 이용하여 타설면에 대한 부착강도와 수밀성 테스트를 실시하고 향후 파일럿 테스트 부지에서 시험 시공 및 현장 시험을 진행할 계획이다.



(a) 건식 뿔칠 장비
(MAYCO社, PICOLLA)

(b) Mock up test

(c) 뿔칠 멤브레인 제품
(S社, ‘제품 M’)

[그림 2.2] 고성능 합성 지보재용 뿔칠 멤브레인]

S社의 제품 M은 분말 1성분 재료로 건식 뿔칠 장비를 이용해 노즐에서 물과 혼합되어 압축공기로 뿔어 붙이는 형태로 시공하며, 제조사가 제공하는 제품의 일반적인 물성은 아래 표와 같다.

<표 2.2> 뿔칠 멤브레인 제품 물성

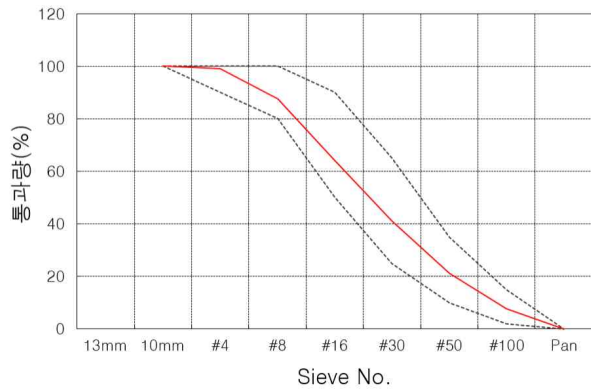
[TECHNICAL DATA]	
Form	Powder
Colour	Light brown
Water pressure resistance	15 bar
Bulk density (+20 °C)	590 g/l ± 100g/L
Consumption, per mm of thick-ness	0.72 kg/m ²
Application thickness	3 - 10mm
Failure strain at 28 days (at 20° C)	>100%
Bond strength at 28 days	1.2 ± 0.2 MPa
Shore hardness	80 ± 5
Flammability	Non-flammable

3. 고성능 합성지보재 성능 평가용 시험체 제작

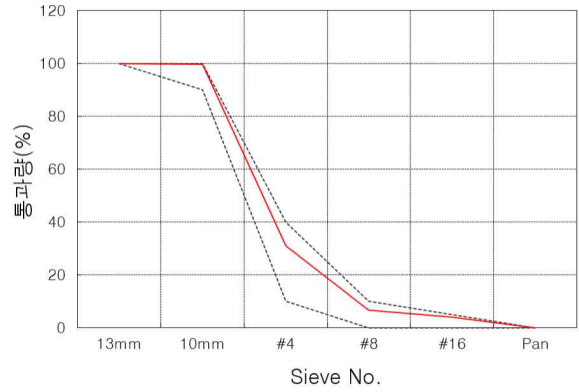
3.1 예비 시험

본 연구에서 합성지보재 성능 평가용 시험체를 제작하기 위해 현장에서 슛크리트 타설 장비를 이용하여 공시체를 제작하기 전 현장 조건과 유사한 조건으로 실험실에서 예비 시험을 진행했다. 현장에서 채취한 골재의 합성 입도를 분석하기 위해 <KS F 2502>에

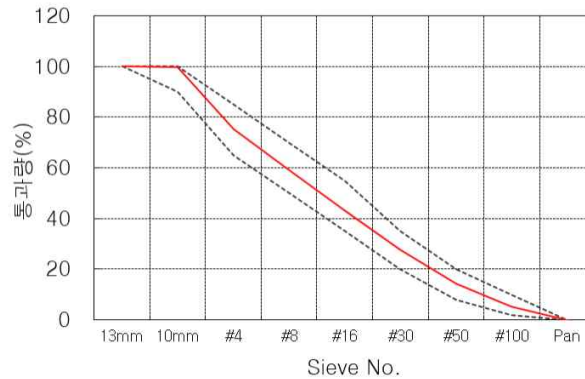
따라 체가름 시험을 수행했으며, 그림 3.1(a), (b)와 같이 세골재 및 조골재의 조립을 시험결과 골재의 표준 입도 품질기준을 통과했으며 3.1(c)와 같이 현장 배합에 따른 골재의 합성입도(S/a)=65%가 표준입도곡선에 만족하는 것을 확인했다.



(a) 세골재 표준 입도



(b) 조골재 표준 입도



(c) 합성입도(S/a)=65% 표준입도곡선

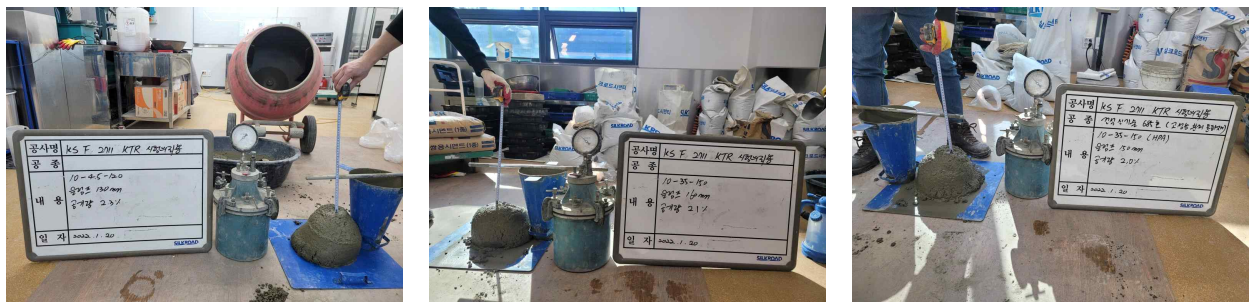
[그림 3.1] 현장 골재 품질 시험 결과

예비시험에 사용된 재료와 배합은 표 3.1과 같으며, 실험실에서 이동식 소형 믹서를 이용해 콘크리트를 혼합하기 때문에 급결제가 첨가되지 않았다. 예비시험을 통해 제작된 공시체는 구조물의 염화물 등의 침투성 정도를 파악하기 위한 시험으로 염소이온 침투저항성 시험을 수행할 계획이고 <KS F 2711>에 따라 수행되는 시험은 염소이온 침투에 대한 저항성을 전기 전도도를 이용하기 때문에 강섬유를 첨가하지 않았다.

각 배합의 굳지않은 콘크리트는 그림 3.2와 같이 슬럼프와 공기량을 측정하고 실린더형(100x200mm) 공시체를 제작했으며, 굳지않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량 시험결과는 표 3.2와 같이 슛크리트 품질기준에 적합하였다.

<표 3.1> 실험실 예비시험 쏘크리트 배합비

구 분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)						고성능 감수제 (B*%)	급결제 (B*%)	
			W	Binder		S	G	강섬유			
				C	HPA						
실험실 제작	일반강도 쏘크리트 10-4.5-120	43	65	206	480	0	1,054	572	-	1	-
	고강도 쏘크리트 10-35-150	39	65	187	480	0	1,086	590	-	1.5	-
	고성능(HPA) 쏘크리트 10-35-150	39	65	187	456	24	1,086	588	-	1.5	-



(a) 일반강도 쏘크리트 배합 (b) 고강도 쏘크리트 배합 (c) 고성능 쏘크리트 배합

[그림 3.2] 예비 시험용 콘크리트 공시체 제작

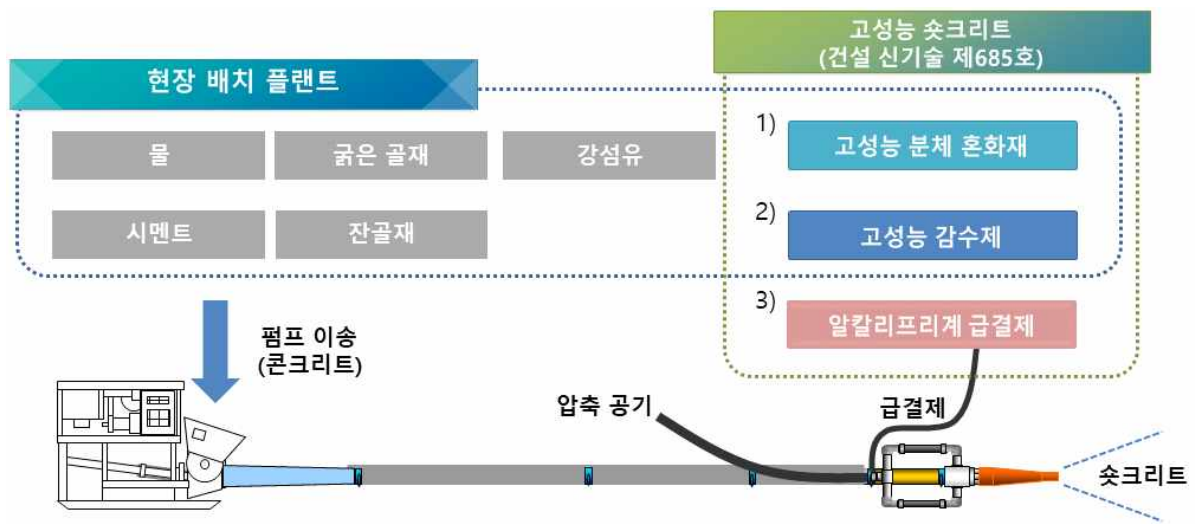
<표 3.2> 예비 시험용 콘크리트 품질 시험 결과

구 분	슬럼프(mm)	공기량(%)	
실험실 제작	일반강도 쏘크리트 10-4.5-120	130	2.3
	고강도 쏘크리트 10-35-150	160	2.1
	고성능(HPA) 쏘크리트 10-35-150	150	2.0

3.2 공시체 제작

(1) 시험 개요

본 연구의 합성지보재 성능시험을 위한 휨강도용 빔형 공시체 제작에 사용된 고성능 슛크리트의 개념도는 그림 3.3과 같으며, 고성능 합성지보재를 구성하는 슛크리트의 배합 조건별 성능을 검토하기 위해 예비시험과 같이 일반강도 슛크리트(LF3000), 고강도 슛크리트(LF5000), 고성능 슛크리트(HPA, LF5000)로 구분하였고 각 배합비는 표 3.3과 같다.



[그림 3.3] 고성능 슛크리트 개념도

<표 3.3> 현장시험 슛크리트 배합비

구 분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m ³)							고성능 감수제 (B*%)	알칼리 프리계 급결제 (B*%)
			W	Binder		S	G	강섬유			
				C	HPA						
현장 제작	일반강도 슛크리트 (LF3000)	43	65	206	480	0	1,054	572	37	1	8
	고강도 슛크리트 (LF5000)	39	65	187	480	0	1,086	590	37	1.5	8
	고성능 슛크리트 (HPA, LF5000)	39	65	187	456	24	1,086	588	37	1.5	8

(2) 고성능 숯크리트 현장 공시체 제작

그림 3.4와 같이 현장에서 배치플랜트를 이용해 각 배합별 숯크리트를 2m³씩 생산했고 레미콘 트럭을 이용해 운반 후 성능 시험을 고려해서 그림 3.5와 같이 전용 타설 장비를 이용하여 각 배합별 빔형(15×15×55cm) 공시체를 17개씩 총 51개 제작했다.



(a) 현장 배치플랜트

(b) 레미콘 트럭 / 숯크리트 타설장비

[그림 3.4] 공시체 제작에 사용된 설비 및 장비



(a) 횡강도용 빔형 공시체

(b) 숯크리트 공시체 면 다짐

[그림 3.5] 숯크리트 공시체 제작

숯크리트의 높은 조기강도 발현과 장기강도 저하를 최소화하기 위해 일반강도 숯크리트는 일반강도용 알칼리프리계 액상 급결제 ROADCON[®]-LF3000을 사용했고, 고강도 및 고성능(HPA) 숯크리트는 고강도용 알칼리프리계 액상 급결제 ROADCON[®]-LF5000을 사용했으며 사용량은 B×8%로 모노펌프를 이용해 노즐에서 첨가되었다.

현장 상황을 고려하여 바인더량을 결정하여 배합하였고 재료 분리를 방지하고 강도 확보를 위한 감수율을 감안하여 고성능 감수제의 사용량을 결정하였다. 특히 내구성 향상을 위한 고성능 분체 혼화재는 B×5%, 즉 24 kg/m³을 시멘트 대비 치환해 사용했고 현장 배치플랜트에서 인력으로 투입하여 슛크리트를 생산했다.

그림 3.6과 같이 각 배합별 슛크리트 현장 품질 시험을 실시했으며, 결과는 표 3.4와 같이 슬럼프와 공기량은 기준치 이내로 측정되었다.



[그림 3.6] 현장 품질 시험(슬럼프 및 공기량)

<표 3.4> 현장 시험용 슛크리트 품질 시험 결과

구 분		슬럼프(mm)	공기량(%)
현장 제작	일반강도 슛크리트 (LF3000)	110	2.6
	고강도 슛크리트 (LF5000)	150	2.2
	고성능 슛크리트 (HPA, LF5000)	170	2.0

현장에서 각 배합별로 제작된 슛크리트 공시체는 그림 3.7과 같이 공시체가 건조하지 않게 비닐을 덮어서 현장에서 재령 1일까지 보양했으며, 공시체 이동 후 몰드를 탈형하고 온도 20±2℃의 양생수조에서 수중양생을 실시했다.



[그림 3.7] 숯크리트 보양 및 양생

(3) 뿔칠 멤브레인 공시체 제작

뿔칠 멤브레인의 부착강도와 수밀성 테스트를 위해 분말 1성분 재료인 S社의 제품 M을 이용했고 굴착면 표면에 직접 뿔칠하는 재료지만, 공시체 제작을 위해 제품과 제품 중량의 혼합 수 약 50%를 아래 그림의 핸드 믹서를 이용해 혼합한 후 콘크리트 밀판에 도포하는 형태로 제작했다.

국제터널지하공간학회의 ITAtech(2013)에서는 두께 약 5 mm의 뿔칠 멤브레인을 통해 지하수 유입이 발생하지 않도록 규정하고 있어 멤브레인 공시체 두께를 약 5 mm로 제작했고 온도 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 및 습도 $50 \pm 5\%$ 의 항온항습 챔버에서 양생했다.



(a) 멤브레인 혼합

(b) 멤브레인 도포

(c) 멤브레인 공시체 양생

[그림 3.8] 멤브레인 공시체 제작

4. 고성능 합성지보재 성능 시험

4.1 고성능 슛크리트의 역학적 성능 시험

합성지보재의 역학적 성능 시험을 위해 현장에서 제작된 슛크리트 공시체를 이용하여, 재령 3시간, 1일, 7일, 28일 압축강도 시험과 재령 1일, 7일, 28일 휨강도 시험을 수행했고 슛크리트의 조기강도 추정을 위해 그림 4.1과 같이 화약총을 이용한 핀 관입 시험을 현장에서 실시하여 슛크리트의 재령 3시간 압축강도를 측정했다.



(a) 콘크리트 타정용 화약총



(b) 핀 관입 형태

[그림 4.1] 배합조건별 조기강도 추정을 위한 핀 관입시험

공시체의 재령 1일, 7일 압축강도와 휨강도 시험은 실험실에서 자체적으로 수행했으며, 슛크리트의 휨강도와 등가휨강도를 동시에 측정하기 위해 그림 4.2(a)와 같이 휨인성 시험을 실시했다.

압축강도는 재령 1일의 경우 공시체 코어링이 어렵기 때문에 휨인성 시험 후 그림 4.2(b)와 같이 파괴된 공시체를 이용해서 시험을 실시했고 재령 7일은 코어링을 통해 압축강도 시험을 실시했다.



(a) 빔형 공시체 휨인성 시험



(b) 빔형 공시체 압축강도 시험

[그림 4.2] 슛크리트 역학적 성능 시험(자체 수행)

숏크리트 공시체의 재령 28일 역학적 성능 시험은 공인기관에 시험을 의뢰해서 진행했다. 그림 4.3과 같이 압축강도는 <KS F 2405>, 탄성계수/포아송비는 <KS F 2438>에 따라 시험을 실시했고 그림 4.4와 같이 휨인성/휨강도/등가휨강도 시험은 <KS F 2566>에 따라 시험을 실시했다.



(a) 코어 공시체 압축강도 시험



(b) 탄성계수 측정용 센서 시트

[그림 4.3] 압축강도/탄성계수/포아송비 시험 의뢰



(a) 빔형 공시체 휨인성 시험



(b) 휨인성 시험 후 파단면

[그림 4.4] 휨인성/휨강도/등가휨강도 시험 의뢰

4.2 고성능 숏크리트의 내구성 시험

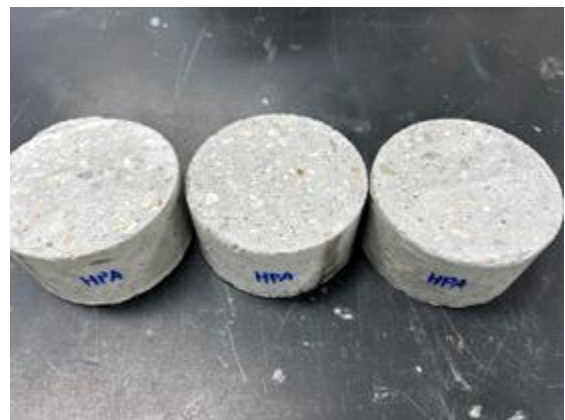
일반적으로 숏크리트의 내구성에 대한 시험 항목은 염소이온 침투 저항성 시험, 동결융해 저항성 시험, 촉진 탄산화 시험 등이 있으며, 그림 4.5, 4.6, 4.7은 각 시험에 사용되는 장비와 공시체 형태를 나타내고 있다.

쏿크리트의 내구성에 대한 시험은 공인기관에 의뢰하여 진행했고 현장에서 각 배합별로 제작한 공시체를 재령 28일 이후 충분히 양생한 후에 각 시험에 적합하게 가공했으며, 염소이온 침투 저항성 시험은 강섬유가 포함되지 않은 예비시험을 통해 제작된 공시체를 이용했다.

염소이온 침투 저항성 시험은 콘크리트에서 염소이온 침투에 대한 저항성을 전기 전도도를 이용하는 시험으로 <KS F 2711>에 따라 실시했고 동결융해 저항성 시험은 콘크리트의 안정성과 내구성을 판정하기 위해 얼렸다가 녹이는 과정을 반복하는 시험으로 <KS F 2456>에 따라 300cycle 실시했다. 촉진 탄산화 시험은 8주 동안 탄산화 촉진 후 탄산화 깊이를 측정하는 것으로 <KS F 2584>에 따라 실시했다.



(a) 시험 장비



(b) 시험용 공시체

[그림 4.5] 염소이온 침투 저항성 시험(KS F 2711)



(a) 시험 장비



(b) 시험용 공시체

[그림 4.6] 동결융해 저항성 시험(KS F 2456)



(a) 시험 장비



(b) 시험용 공시체

[그림 4.7] 촉진 탄산화 시험(KS F 2584)

4.3 뿔칠 멤브레인의 물성 시험

본 연구에서 고성능 합성지보재를 구성하는 뿔칠 멤브레인의 부착강도 시험과 수밀성 시험의 시험방법과 성능 기준을 국제터널지하공간협회의 ITAtech(2013)을 따라 수행했다.

뿔칠 멤브레인의 부착강도를 측정하고자, 그림 4.8과 같이 BS EN 1542(1999)에서 제시하고 있는 인발시험을 실시하였다. 콘크리트 밀판 위에 두께 약 5 mm의 멤브레인을 피복하고 직경 50 mm의 원형 돌리(dolly)를 에폭시 접착제를 이용해 멤브레인과 고정시킨 후, 아래 그림과 같이 오버코어링(overcoring)을 실시하고 인발시험기를 사용하여 부착강도 시험을 실시했다.



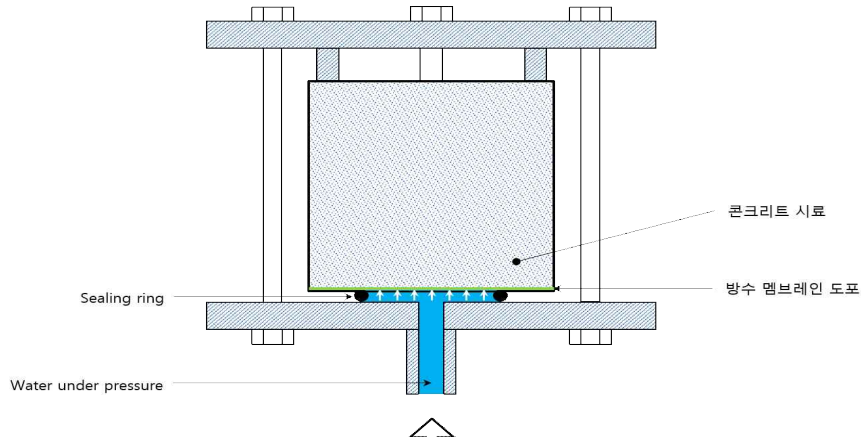
(a) 시험 장비



(b) 시험용 공시체

[그림 4.8] 부착강도 시험(BS EN 1542)

본 연구에서 뿔칠 멤브레인의 수밀성 시험을 ITAtech(2013)에서 제시한 그림 4.9와 같은 투수시험기를 이용해 작용 수압(=500±50 kPa)의 유지시간을 28일 유지하여 수행했다.



[그림 4.9] 뿔칠 멤브레인 투수시험기 개요(ITAtech 2013)

뿔칠 멤브레인의 수밀성 평가를 위한 투수시험에 투수성을 가진 콘크리트 시험체 3개에 뿔칠 멤브레인을 각각 도포한 후 아래 그림과 같이 멤브레인 면에 28일간 500±50 kPa의 수압이 작용하도록 하고 시험 중에 멤브레인의 파괴(failure)에 의해 물이 유출될 경우, 실린더의 눈금을 통해 유출된 물의 양을 확인할 수 있도록 시험을 진행했다. 수압은 각 시험체 옆에 설치되어있는 실린더에 에어 콤프레서(air compressor)를 사용하여 500 kPa를 일정하게 유지했다.



[그림 4.10] 뿔칠 멤브레인의 수밀성 평가에 사용된 투수시험기 및 공시체

5. 성능 시험 결과

5.1 역학적 성능 시험 결과

숏크리트의 조기강도 추정을 위해 핀 관입 시험을 현장에서 실시했고 그림 5.1의 압축강도 계산 매뉴얼을 이용하여 숏크리트의 재령 3시간 압축강도를 측정했다. 시험은 표 5.1과 같이 배합별 총 10회 측정하여 평균값을 구했으며, 일반강도 숏크리트의 경우 1.2MPa, 고강도 숏크리트의 경우 1.5MPa, 고성능 숏크리트의 경우 1.7MPa로 모든 배합의 3시간 압축강도는 1MPa이상을 만족했지만, 현장 여건상 측정결과가 달라질 수 있을 것이라 예상된다.

Operating instructions: DX 450-SCT

Calculation of concrete compressive strength

DX 450-SCT: Standard-method, Green cartridge, power setting 1

Appendix 1

Date:	Powder-actuated test tool: Type and serial number:	Air temperature:	Mix temperature:	Test by:
Gallery/tunnel:	Station:	Location:	Tensile tester:	
Aggregate size:	Cement:	Accelerator:	Time of completing spraying, $t_0 =$	

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Time [h : min.]	Time after spraying completed (1) - t_0 [h : min.]	Stud type und Total length L_{tot} [mm]	Standoff NVS [mm]	Penetration h_{nom} = $L_{tot} - NVS$ [mm]	Pullout load N_d Reading, [N]	Actual pullout load N_d^{***} [N]	N_d/h_{nom} [N/mm]	Mean value N_d/h_{nom} ($\Sigma N_d/h_{nom} / 10$) [N/mm]	Concrete cube strength Calibr. curve Appendix 3
All measurements and calculations in the same order as studs driven									
$t =$									

Calibration curve - Standard-method DX 450-SCT, Green cartridge, Power setting 1

$f_c = 7.53 A_d - 2.7$
 $R = 0.99$
 $A_d = \frac{f_c + 2.7}{7.53}$

*) Green 1 for standard equipment of the tool DX 450-SCT. In case a tool DX 450 with a piston guide L125 is used, the power setting amounts to 1.625.
**) this column is reserved for corrected pullout loads, only necessary in case the former HiB Tester 4 is used. If the tester Mark 5 respectively.

Early strength of sprayed concrete with Hilti DX 450-SCT, Edition 12/2011

[그림 5.1] 핀 관입 시험용 압축강도 계산 매뉴얼

<표 5.1> 재령 3시간 편 관입 시험 측정 시트

구분	Time t[h:min]	Time afre spray ing completed t - t ₀ [h:min]	Stud type und Total length L _{tot} [mm]	standoff NVS[mm]	penetration h _{nom} =L _{tot} -NV S[mm]	Pullout load N _u reading	Actual pullout load N _u [N]	N _u /h _{nom} [N/mm]	Mean value N _u /h _{nom} (ΣN _u /h _{nom})/10 [N/mm]	Concrete cube strength calibr. Curve Appendix 3
일반강도 숏크리트 (LF3000)	10:20	13:20	X-M6-8-95	23	80	530		6.6	6.9	1.2
			103mm	20	83	570		6.9		
				25	78	550		7.1		
				23	80	550		6.9		
				24	79	530		6.7		
				22	81	570		7.0		
				23	80	550		6.9		
				21	82	580		7.1		
				22	81	570		7.0		
				24	79	520		6.6		
Σ=								68.7		
고강도 숏크리트 (LF5000)	11:00	14:10	X-M6-8-95	29	74	630		8.5	8.6	1.5
			103mm	30	73	630		8.6		
				28	75	670		8.9		
				33	70	610		8.7		
				31	72	640		8.9		
				29	74	650		8.8		
				28	75	650		8.7		
				32	71	610		8.6		
				30	73	630		8.6		
				29	74	550		7.4		
Σ=								85.8		
고성능 숏크리트 (HPA, LF5000)	15:00	X-M6-8-95	33	70	710		10.1	10.1	10.0	1.7
			103mm	31	72	730		10.1		
				30	73	740		10.1		
				35	68	650		9.6		
				32	71	710		10.0		
				31	72	740		10.3		
				34	69	730		10.6		
				32	71	690		9.7		
				33	70	670		9.6		
				31	72	730		10.1		
Σ=								100.3		

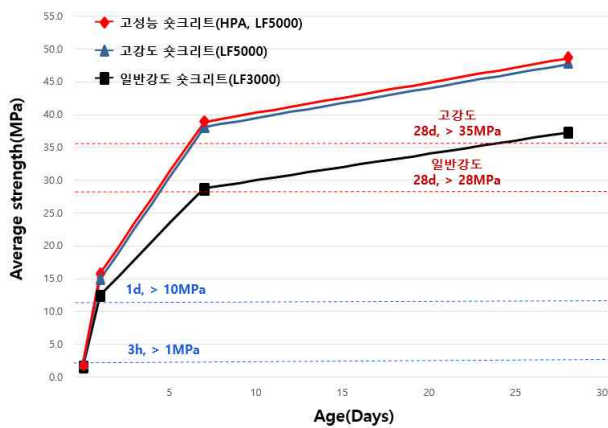
숏크리트의 역학적 성능 시험으로 압축강도와 휨강도 시험의 재령 1일, 7일은 실크로드티앤디가 보유중인 유압식 UTM으로 직접 실험을 실시했고 재령 28일은 압축강도, 정탄성계수, 포아송비, 휨강도, 등가휨강도 시험에 대해 공인기관에 의뢰하여 수행했으며, 그 결과 값은 표 5.2와 표 5.3과 같으며, 시험결과에 대한 그래프는 그림 5.2와 그림 5.3과 같다.

<표 5.2> 압축강도 시험 결과

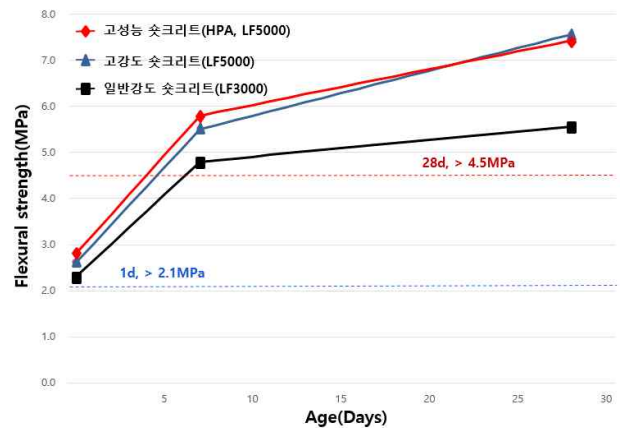
연 번	시료명		단 위	시험 방법	시험 결과	
1	일반강도 숏크리트 (LF3000)	압축강도	3시간	MPa	편 관입시험	1.2
			1일	MPa	KS F 2413 : 2000	12.5
			7일	MPa	KS F 2405 : 2010	28.8
			28일	MPa		37.3
		정탄성계수	28일	MPa	KS F 2438 : 2017	2.79×10^4
		포아송비	28일	-		0.189
1	고강도 숏크리트 (LF5000)	압축강도	3시간	MPa	편 관입시험	1.5
			1일	MPa	KS F 2413 : 2000	14.9
			7일	MPa	KS F 2405 : 2010	38.1
			28일	MPa		47.7
		정탄성계수	28일	MPa	KS F 2438 : 2017	3.01×10^4
		포아송비	28일	-		0.206
1	고성능 숏크리트 (HPA, LF5000)	압축강도	3시간	MPa	편 관입시험	1.7
			1일	MPa	KS F 2413 : 2000	15.8
			7일	MPa	KS F 2405 : 2010	38.9
			28일	MPa		48.6
		정탄성계수	28일	MPa	KS F 2438 : 2017	3.08×10^4
		포아송비	28일	-		0.194

<표 5.3> 휨강도 시험 결과

연 번	시료명		단 위	시험 방법	시험 결과	
1	일반강도 숏크리트 (LF3000)	휨강도	1일	MPa	KS F 2408 : 2016	2.3
			7일	MPa		4.8
			28일	MPa	KS F 2566 : 2014	5.6
		등가휨강도	28일	MPa		4.0
2	고강도 숏크리트 (LF5000)	휨강도	1일	MPa	KS F 2408 : 2016	2.6
			7일	MPa		5.5
			28일	MPa	KS F 2566 : 2014	7.6
		등가휨강도	28일	MPa		5.8
3	고성능 숏크리트 (HPA, LF5000)	휨강도	1일	MPa	KS F 2408 : 2016	2.8
			7일	MPa		5.8
			28일	MPa	KS F 2566 : 2014	7.4
		등가휨강도	28일	MPa		5.9

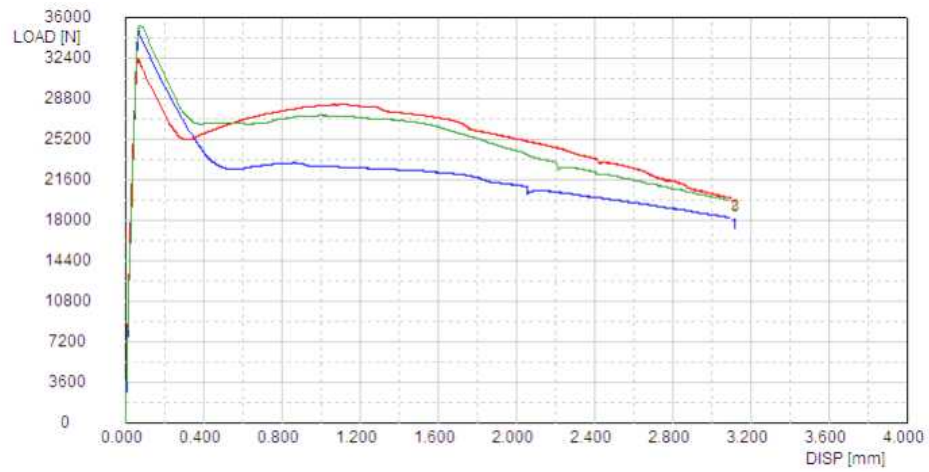


(a) 재령별 압축강도 시험결과

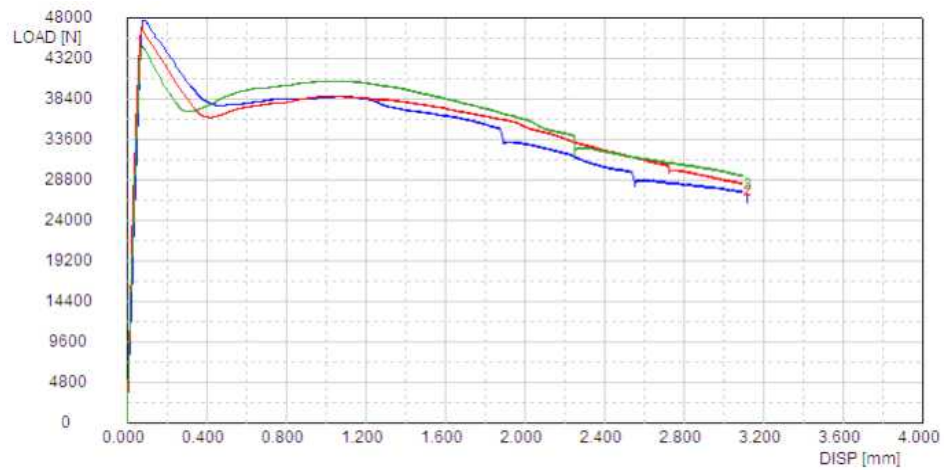


(b) 재령별 휨강도 시험결과

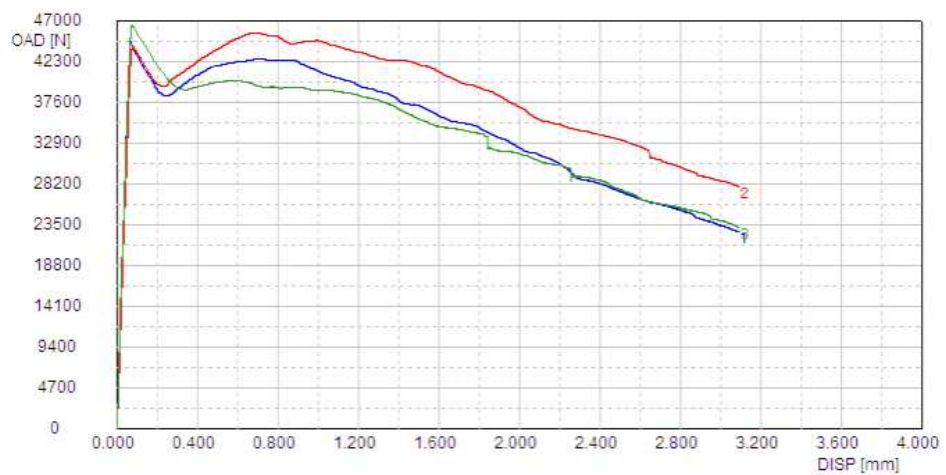
[그림 5.2] 숏크리트 압축강도 및 휨강도 시험결과



(a) 일반강도 슛크리트 배합



(b) 고강도 슛크리트 배합



(c) 고성능(HPA) 슛크리트 배합

[그림 5.3] 재령 28일 슛크리트 휨인성 시험결과 그래프

국내 숏크리트의 압축강도 기준은 터널 표준 시방서와 콘크리트 표준 시방서에서 표 5.4와 같이 규정하고 있으며, 휨강도 대한 기준은 표 5.5와 같다. 일반강도(LF3000), 고강도(LF5000), 고성능(HPA, LF5000) 배합으로 제작했던 공시체의 각 배합별 재령 1일과 재령 28일에 대한 압축강도와 휨강도 시험결과는 기준에 모두 만족했으며, 특히 고강도(LF5000)와 고성능(HPA, LF5000) 배합은 재령 28일 고강도 숏크리트 압축강도 기준 35MPa를 만족했다.

<표 5.4> 일반 및 고강도 숏크리트 압축강도 기준(시방서)

구 분		터널 표준 시방서		콘크리트 표준 시방서	
		일반	고강도	일반	고강도
압축강도 (MPa)	3시간	-	-	1~3	1~3
	1일	10이상	10이상	5~10	5~10
	28일	21이상	35이상	21이상	35이상

<표 5.5> 한국도로공사 숏크리트 품질 시험 기준

구 분	1일		28일		비고
	설계 기준강도	코어 강도 (감소율)	설계 기준 강도	코어 강도 (감소율)	
압축강도 (MPa)	10	8.5(15%)	28 ¹⁾	23.8(15%)	직경 75mm이상
		8.0(20%)		22.4(20%)	직경 55mm
휨강도(MPa)	2.1		4.5		강섬유 보강
휨인성(28일)	등가휨강도 3.0MPa				강섬유 보강

1)터널 표준시방서 및 콘크리트 표준시방서와 달리 재령 28일 압축강도 기준이 기존 21MPa에서 28MPa로 상향되었음.

5.2 고성능 숏크리트의 내구성 시험 결과

합성지보재의 내구성 시험을 위해 일반강도(LF3000), 고강도(LF5000), 고성능(HPA, LF5000) 배합에 대해 공시체를 제작하여 재령 28일까지 수중양생 후 공인기관에 의뢰하여 시험을 진행했다. 시험 항목은 염소이온 침투 저항성 시험(KS F 2711), 동결융해 저항성 시험(KS F 2456), 촉진 탄산화 시험(KS F 2584)으로 각 시험에 대한 결과는 표 5.6과 같다.

<표 5.6> 내구성 시험 결과

시험 항목	단 위	시 험 결 과			시 험 방 법	
		일반강도 숏크리트 (LF3000)	고강도 숏크리트 (LF5000)	고성능 숏크리트 (HPA,LF5000)		
염소이온 침투저항성능	28일	Coulombs	6,735	5,389	1,486	KS F 2711 : 2017
동결융해 저항성	300 Cycle	%	83.1	85.2	88.9	KS F 2456 : 2019
축진탄산화	8주	mm	6.1	2.8	측정불가 ¹⁾	KS F 2584 : 2010

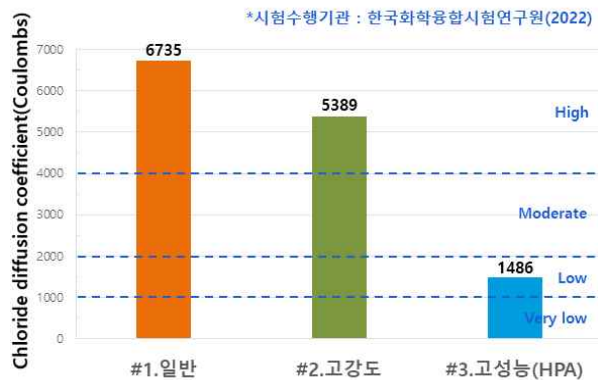
* 축진 탄산화 기간: 8주(이산화탄소 농도: $5 \pm 0.2\%$, 온도: $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도: $60 \pm 5\%$)

* 1) 축진 탄산화 8주 축진결과 탄산화가 진행되지 않아 탄산화 깊이를 측정할 수 없음.

내구성에 대한 시험 항목 중 염소이온 침투저항성능에 대한 시험은 전기전도도에 의해 공시체의 통과 전하량에 따라 염소이온 침투성의 높고 낮음을 판단하는 것으로 그 통과 전하량에 따른 염소이온 침투성의 기준은 표 5.7과 같으며, 그림 5.4과 같이 일반강도(LF3000)와 고강도(LF5000) 배합은 염소이온 침투성이 높고, 고성능(HPA, LF5000) 배합은 염소이온 침투성이 낮음으로 염소이온 침투 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

<표 5.7> 통과 전하량에 따른 염소이온 침투성 기준

통과 전하량(c)	염소이온 침투성
>4000	높 음
2000~4000	보 통
1000~2000	낮 음
100~1000	매우 낮음
<100	무시



[그림 5.4] 배합별 염소이온 침투 저항성 시험결과

동결융해 저항성 시험으로 각 cycle에 따른 상대동탄성계수는 표 5.8과 같으며, cycle 횟수가 늘어남에 따라 점차적으로 상대동탄성계수는 낮아지며, 300cycle 기준으로 고성능(HPA, LF5000) > 고강도(LF5000) > 일반강도(LF3000) 순으로 나타났다.

축진탄산화 시험의 탄산화 깊이는 탄산화가 진행된 것을 나타내는 상대적인 지표로써 일반강도(LF3000) 배합보다 고강도(LF5000) 배합이 내구성이 우수한 것으로 나타났으며 특히, 고성능(HPA, LF5000) 배합은 탄산화가 진행되지 않아 탄산화 깊이를 측정할 수 없었다.

<표 5.8> 동결융해저항성 시험에 따른 상대동탄성 계수

구분	Cycle수	1차 공명주파수(A)				상대동탄성계수(%)
		1회(Hz)	2회(Hz)	3회(Hz)	평균(Hz)	
일반강도 숏크리트 (LF3000)	0	2,256	2,282	2,267	2,268.3	100.0
	30	2,249	2,268	2,240	2,251.3	98.5
	60	2,227	2,198	2,238	2,221.0	95.9
	90	2,215	2,177	2,219	2,203.7	94.4
	120	2,196	2,153	2,216	2,188.3	93.1
	150	2,163	2,142	2,201	2,168.7	91.4
	180	2,154	2,128	2,173	2,151.7	90.0
	210	2,137	2,109	2,156	2,134.0	88.5
	240	2,118	2,076	2,132	2,108.7	86.4
	270	2,099	2,058	2,104	2,087.0	84.7
300	2,081	2,036	2,086	2,067.7	83.1	
고강도 숏크리트 (LF5000)	0	2,284	2,262	2,271	2,272.3	100.0
	30	2,276	2,259	2,269	2,268.0	99.6
	60	2,268	2,250	2,261	2,259.7	98.9
	90	2,272	2,242	2,253	2,255.7	98.5
	120	2,267	2,229	2,239	2,245.0	97.6
	150	2,254	2,211	2,220	2,228.3	96.2
	180	2,226	2,196	2,206	2,209.3	94.5
	210	2,168	2,184	2,175	2,175.7	91.7
	240	2,149	2,167	2,156	2,157.3	90.1
	270	2,082	2,139	2,141	2,120.7	87.1
300	2,055	2,129	2,107	2,097.0	85.2	
고성능 숏크리트 (HPA, LF5000)	0	2,323	2,309	2,287	2,306.3	100.0
	30	2,318	2,286	2,275	2,293.0	98.8
	60	2,310	2,278	2,259	2,282.3	97.9
	90	2,299	2,283	2,250	2,277.3	97.5
	120	2,285	2,271	2,246	2,267.3	96.6
	150	2,276	2,247	2,237	2,253.3	95.5
	180	2,268	2,229	2,229	2,242.0	94.5
	210	2,251	2,206	2,217	2,224.7	93.0
	240	2,234	2,197	2,208	2,213.0	92.1
	270	2,213	2,181	2,196	2,196.7	90.7
300	2,198	2,157	2,169	2,174.7	88.9	

5.3 뿔칠 멤브레인의 물성 시험 결과

본 연구에서 뿔칠 멤브레인의 물성 시험을 위해 분말 1성분 재료인 해외 S社의 제품 M을 이용했고 아래 표와 같이 국제터널지하공간협회의 ITAtech(2013)에서 뿔칠 멤브레인에 대한 요구 성능 중 ‘타설면에 대한 부착’ 과 ‘수밀성’ 에 대한 성능 시험을 수행했다.

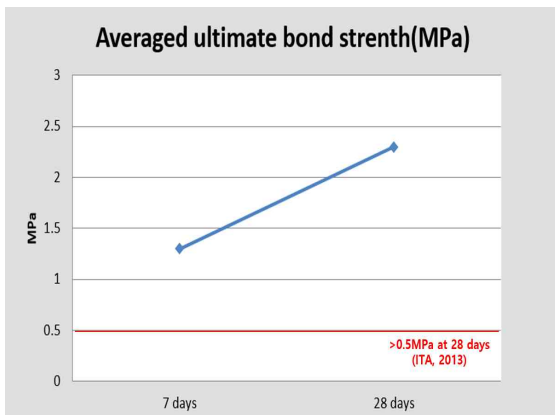
<표 5.9> 뿔칠 멤브레인의 요구 성능 (ITAtech, 2013)

특성	시험방법	최소 요구성능
타설면에 대한 부착 (bond to substrate)	ASTM 1583/C 1583M (인발시험) 또는 EN ISO 4624 (그러나, 50mm 돌리 사용) 또는 EN 1542	멤브레인 적용 후 28일 이내 0.5 MPa
타설면과 내부 라이닝에 대한 이중결합(double bond). 이중 결합된 멤브레인의 경우만	ASTM 1583/C 1583M (인발시험)	최종 콘크리트 라이닝 시공 후 28일 이내 0.5 MPa
수밀성 (watertightness)	EN 12390-8 준용: 뿔칠 멤브레인이 포함되도록 수정(그림 1, 부록 A-2) EN 14891 준용: 콘크리트 배합 설계에 대한 Part A7	멤브레인을 통과하는 침투수 없음 (Zero penetration of water)
크랙브리징 (crack bridging)	EN 1062-7 Method A: C1 정적인장시험(20° C)	Class A5 최소 2.5 mm
인화성 (flammability)	EN ISO 11925-2	Class E EN 13501-2+A1에 정의
화학적 저항성 (chemical resistance)	EN 14414: Method A(산성용액), Method B(알칼리용액). 내염화성(@염화물농도 10%). EN 14414 Method A 또는 B에 기반한 시험은 설계자가 지정한 지하수 화학조건에 따라 시행되어야 한다.	a) 지하에 대한 시각적 표시가 없어야 함 b) 대조군 샘플(control sample)과의 인장특성(인장강도 및 파괴 시의 신장율) 비교. 허용기준은 대조군 샘플과 비교하여 인장강도와 파괴 시 신장율의 최대 변화가 25% 이내이어야 한다.
리칭 저항성 (resistance to leaching)	EN 14415: 온수(Method A), 수성 알칼리액체(Method B)	a) 지하에 대한 시각적 표시가 없어야 함 b) 대조군 샘플(control sample)과의 인장특성(인장강도 및 파괴 시의 신장율) 비교. 허용기준은 대조군 샘플과 비교하여 인장강도와 파괴 시 신장율의 최대 변화가 25% 이내이어야 한다. c) 샘플의 중량 손실이 대조군과 비교하여 5%보다 커서는 안된다.
수밀성 (watertightness)	EN 12390-8 준용: 뿔칠 멤브레인이 포함되도록 수정(그림 1, 부록 A-2) EN 14891 준용: 콘크리트 배합 설계에 대한 Part A7	멤브레인을 통과하는 침투수 없음 (Zero penetration of water)

뿔칠 멤브레인의 부착강도와 방수 성능은 고성능 합성지보재의 내구성에도 기여하며, 특히, 1차 라이닝인 숏크리트와 뿔칠 멤브레인 사이의 부착력이 충분하면, 멤브레인의 박리가 방지되고, 결과적으로 유입수의 움직임은 뿔칠 멤브레인의 배면으로 제한되기 때문에 매우 중요한 특성이다.

그림 5.5와 같이 뿔칠 멤브레인 제품 M의 부착강도는 ITAtech(2013)에서 멤브레인에 대해 규정하고 있는 재령 28일의 최소 부착강도인 0.5 MPa를 재령 7일에도 1.3 MPa로 충분히 상회하는 것으로 나타났고 재령 28일 평균 부착강도는 2.3 MPa로 나타났다.

뿔칠 멤브레인의 수밀성 평가를 위해 아래 그림의 투수시험 시험체의 멤브레인 면에 28일간 500±50 kPa의 수압을 작용했다. 그 결과 실린더의 눈금을 통해 물의 유출되지 않음을 확인할 수 있었고 뿔칠 멤브레인 제품 M에 대해 ITAtech(2013)에서 규정하고 있는 ‘멤브레인을 통과하는 침투수 없음(Zero penetration of water)’ 을 확인할 수 있었다.



(a) 재령별 부착강도 시험결과

(b) 투수시험 시험체(28일 후)

[그림 5.5] 뿔칠 멤브레인 물성 시험결과

6. 결론

- ① 본 연구의 지하공간 활용 도시기반 복합플랜트 시설의 증설(확장)을 고려한 격자형 지하공간을 구성하기 위한 고성능 합성지보재는 고성능 숏크리트와 뿔칠 방수 멤브레인으로 구성된다. 일반적으로 뿔칠 방수 멤브레인은 숏크리트나 지반에 부착되어 차수와 방수 성능을 확보해야 하고 숏크리트는 지하공간을 굴착 후 지반에 발생하는 변위나 응력을 억제하기 위해 재령별 기준에 적합한 압축강도와 휨강도가

요구되며, 영구지보재로 고려되는 경우 고강도 및 내구성을 확보해야한다.

- ② 본 연구에서는 고성능 합성지보재를 구성하는 숏크리트의 배합 조건별 성능을 검토하기 위해 일반강도 숏크리트(LF3000), 고강도 숏크리트(LF5000), 고성능 숏크리트(HPA, LF5000)로 구분하여 배합설계를 실시하였고 각 권장 배합을 기준으로 현장 여건에 적합하게 배합을 조정하여 공시체를 제작하여 성능 시험을 실시했다.
- ③ 합성지보재용 고성능 숏크리트의 역학적 성능 시험을 위해 현장에서 제작된 숏크리트 공시체를 이용하여, 재령 3시간, 1일, 7일, 28일 압축강도 시험과 재령 1일, 7일, 28일 휨강도 시험을 수행했고 내구성에 대한 시험은 염소이온 침투 저항성 시험, 동결융해 저항성 시험, 촉진 탄산화 시험을 수행하였다.
- ④ 고성능 숏크리트의 역학적 성능 시험결과 각 재령에 따른 숏크리트의 압축강도 및 휨강도에 대한 품질 기준을 모두 만족했으며, 특히 고강도 숏크리트(LF5000)와 고성능 숏크리트(HPA, LF5000) 배합은 영구지보재 개념으로 사용이 충분한 것으로 나타났고 내구성 시험결과 배합별 내구성의 우수한 정도는 고성능(HPA, LF5000) > 고강도(LF5000) > 일반강도(LF3000) 배합으로 나타났으며, 특히 염소이온 침투저항성과 촉진탄산화에서 그 차이가 명확했으며, 이는 고성능 숏크리트 배합에 첨가하는 포졸란 재료 첨가물인 HPA(고성능 분체 혼화재)의 특성으로 인해 나타난 결과로 판단된다.
- ⑤ 뿔칠 멤브레인의 물성 시험을 위해 국제터널지하공간협회의 ITAtech(2013)에서 제시한 뿔칠 멤브레인에 대한 요구 성능 중 ‘타설면에 대한 부착’ 과 ‘수밀성’ 에 대한 성능 시험을 수행했고 재령 28일의 최소 부착강도인 0.5 MPa를 재령 7일에도 1.3 MPa로 충분히 상회하는 것으로 나타났다. 뿔칠 멤브레인의 수밀성 평가 결과 제품 M에 대해 ITAtech(2013)에서 규정하고 있는 ‘멤브레인을 통과하는 침투수 없음(Zero penetration of water)’ 을 확인할 수 있었다.
- ⑥ 숏크리트는 일반적으로 W/C나 바인더량을 조절하여 고강도 숏크리트의 품질기준을

확보할 수 있지만, 뿔칠 멤브레인과 복합적으로 사용되는 고성능 합성지보재에서 슛크리트의 성능은 고강도 뿐만 아니라 우수한 내구성을 확보할 수 있어야 하며, 이는 본 연구에서 제시한 고성능(HPA, LF5000) 슛크리트 배합이 적합하며, 뿔칠 멤브레인의 우수한 부착강도와 수밀성으로 해외 S社의 제품 M이 적합한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 ‘지하공간 활용 도시기반 복합플랜트 실증연구 사업’의 “환경 기초 복합플랜트 지하공간 활용 기술, RS-2020-KA157945” 과제에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 지하복합플랜트연구단 (2022). 환경기초 복합플랜트 지하공간 활용기술, 복합플랜트 시설의 증설(확장)을 고려한 격자형 지하공간 설계기술 개발, 3차년도 연구개발 주요내용
2. 지반안전연구단 (2020). 지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 3세부 최종보고서 p85
3. EFNARC (1999), European Specification for Sprayed Concrete Guidelines, pp.1~15
4. 한국건설기술연구원 (2020), 해외 고성능 지보재 성능평가 기준 조사
5. Bernardo, G., Guida, A. and Mecca, I. (2015) Advancements in shotcrete technology. WIT Transactions on The Built Environment, 153, pp. 591-602.
6. 건설신기술 685호, 고성능 분체혼화재 및 조기강도형 알칼리프리계 급결제를 사용한 습식 슛크리트 공법
7. 최명식, 김진태 (2020). 친환경알칼리프리계 급결제와 고성능 분체 혼화재를 이용한 고강도 및 고내구성 슛크리트 공법, 콘크리트공학회, 32(3): 39-45.
8. HILTI (2011), Operating instructions : DX 450-SCT
9. 국토교통부 (2015), 터널 표준시방서 pp.35~53
10. 국토교통부 (2016), 콘크리트 표준시방서 pp.227~237
11. 한국도로공사 도로교통연구원 (2017), 터널 슛크리트 압축강도 기준 및 품질관리 개선방안, pp.13~19

Annual Technical Report(Part 2)

**“국내 최초 TBM 선굴착 2-Arch
터널 설계 사례”**

2023

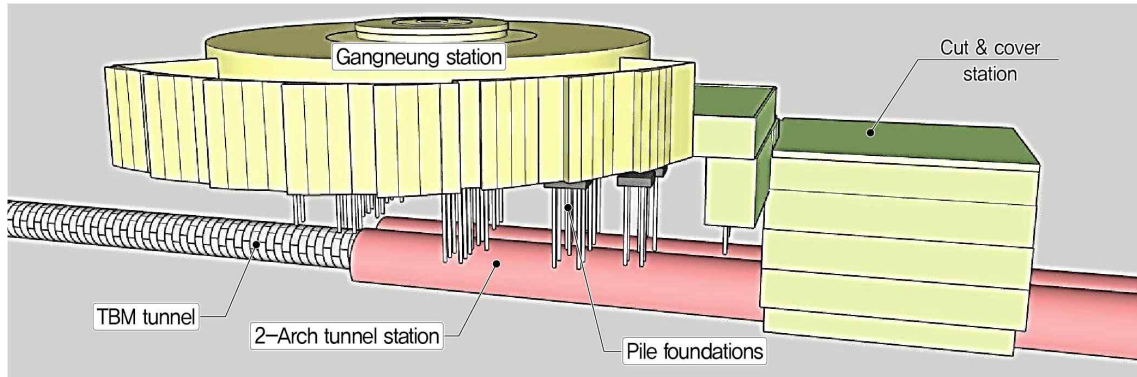
**터널 지하 공간 학회
굴착 및 지보 기술 위원회**

1. 개요

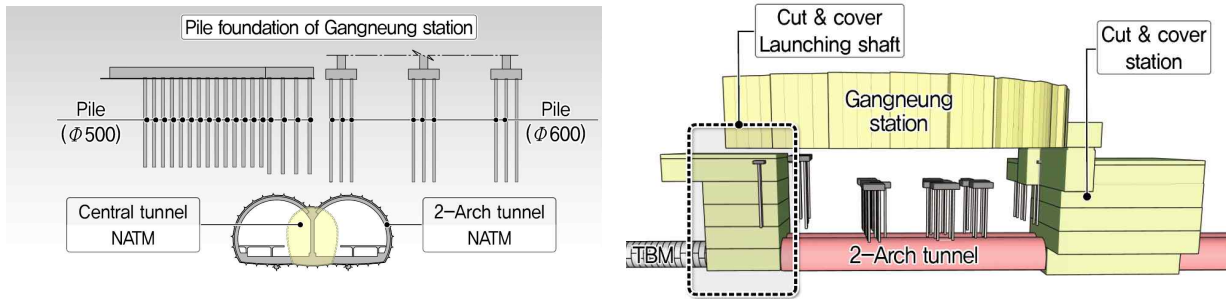
근래 들어 밀집된 도심지를 활성화시키고 자연환경을 보존하면서 지속적인 지역발전을 도모하기 위해 터널을 비롯한 지하공간 중심의 도심지 개발이 활발히 이뤄지고 있다. 특히 도심지의 불량한 지반조건과 소음진동으로 인한 환경민원 최소화를 위해 쉘드TBM 적용사례가 증가하고 있다. 도심지에 적용되는 쉘드TBM은 대부분 지하정거장을 활용한 TBM 발진계획을 수립하게 된다. 이때, 개착정거장을 TBM 발진구로 활용하는 경우에는 별다른 제약이 없으나 개착 면적을 최소화한 2-Arch터널 정거장을 TBM 발진구로 활용할 때에는 큰 제약이 발생하게 된다. 기존 NATM형식의 2-Arch터널 구간에서는 쉘드TBM과의 구조적 간섭으로 인해 TBM 굴진이 불가하여 시공연계성 확보가 안되는 문제점을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 쉘드TBM과 2-Arch터널 정거장의 상호 간섭 문제점을 극복하기 위해 국내 최초로 적용한 TBM선굴진 2-Arch터널의 주요설계사항에 대하여 기술하고 수치해석을 활용한 안정성 검토를 수행하여 TBM선굴진 2-Arch터널의 설치효과를 검증하고자 한다.

2. 현황 및 문제점

본 연구는 「강릉~제진 단선전철 00공구」으로 도심지구간 중 일부인 강릉역 하부통과구간에 대하여 기술하였다. 해당과업은 열차가 운행 중인 강릉역 하부에 계획된 정거장 터널로서 말뚝 기초와 약 1.9 m 이격된 근접조건을 고려하여 2-Arch터널 정거장으로 계획하였고, 본선터널 막장면 일부에서 풍화암이 출현될 것으로 예상되는 불량한 지반조건을 고려하여 지반 안정성 확보에 유리한 쉘드TBM 공법으로 계획하였다(그림 2.1). 그러나 기존 NATM 형식의 2-Arch터널은 중앙터널 굴착 시 말뚝기초 하부지반의 이완이 과다하게 발생하여 터널 상부구조물 안정성이 저하되고, 쉘드TBM 발진시 2-Arch터널과 간섭되므로 별도의 발진구를 추가 설치하도록 요구되므로 지역민원 및 환경훼손이 증가할 것으로 예상되었다(그림 2.2). 이러한 문제점들을 극복하여 지반 안정성을 확보하고 민원 및 자연훼손을 저감시킬 수 있는 추가적인 대책방안이 요구되었다.



[그림 2.1] Original design condition of station tunnel (2-Arch NATM)



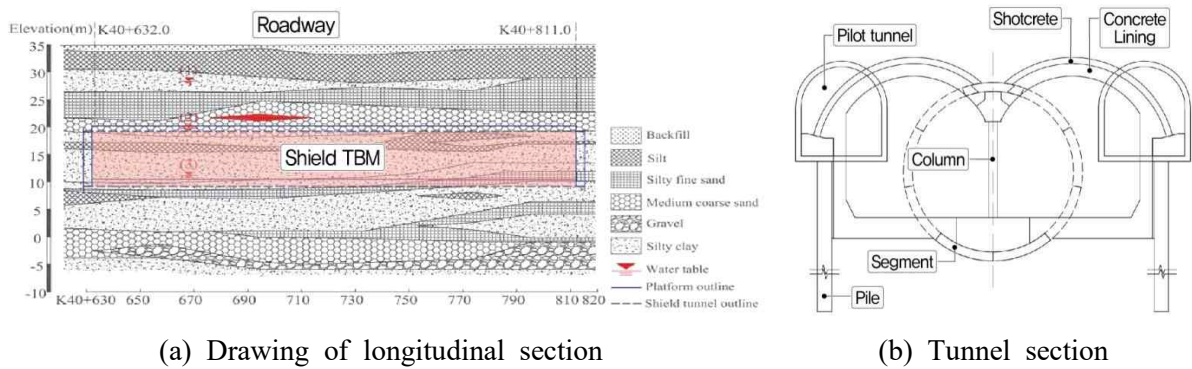
(a) Decreased stability of existing structures (b) Interference with the 2-Arch tunnel

[그림 2.2] Anticipated problem analysis of 2-Arch tunnel

3. 유사사례 검토

베이징에 위치한 장타이역(Jiangtai station)은 현재 운영중인 14호선 지하철 정거장 터널이다(Liu et al., 2015). 본선터널은 그림 3.1(a)와 같이 직상부에 차량 운행 중인 도로가 존재하는 현황조건과 터널 계획심도까지 모두 토사층으로 구성된 지반조건을 고려하여 쉴드TBM 공법을 적용하였고, 정거장은 지상의 복잡한 교통현황 등을 고려하여 개착구간 면적 최소화를 위해 2-Arch터널 정거장을 계획하였다. 이때, 2-Arch터널 정거장은 본선터널의 굴착공법인 쉴드TBM과의 시공연계성 확보가 가능한 TBM선굴진 2-Arch터널을 세계 최초로 적용하였다(그림 3.1(b)). TBM선굴진 2-Arch터널은 중앙터널을 쉴드TBM으로 선굴진하고 고강도 세그먼트로 보강하는 형식으로서 슛크리트 및 록볼트로 보강하는 기존 NATM 형식 대비 지반안정성을 향상시킬 수 있는 공법이다. 또한 본선터널과 동일한 굴착공법을 적용하므로 시공연계성이 우수하여 TBM 장비 해체 및 조립 등을 위한 추가적인 확폭터널 계획이 불필요한 장점이 있다. 이러한 TBM선굴진

2-Arch터널의 우수성이 인정되어 장타이역에 인접한 가오자위안역(Gaojiayuan station)도 TBM선굴진 2-Arch터널을 적용한 것으로 조사되었다(Cao et al., 2018).

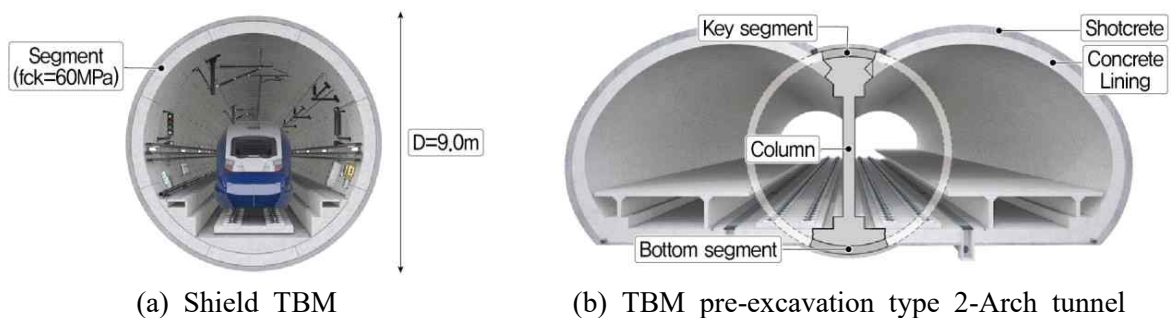


[그림 3.1] Construction stages of Jiangtai station

4. TBM 선굴진 2-Arch터널 주요설계사항

4.1 TBM 선굴진 2-Arch터널 단면계획

본 연구에서 다룰 강릉역 하부 터널통과구간은 말뚝기초와 매우 근접한 시공조건과 불량한 지반조건을 고려한 정거장 터널계획이 요구되었다. 이러한 문제점을 극복할 수 있도록 장타이역에 적용되었던 TBM선굴진 2-Arch터널을 국내 최초로 적용하고자 하였다. 당초 본선터널 굴착공법인 쉴드TBM과 연계시공이 불리했던 기존 NATM형 2-Arch터널의 문제점을 극복하여 지반안정성과 시공연계성을 확보할 수 있는 터널 형식이다. TBM선굴진 2-Arch터널 단면계획시 대구경 쉴드TBM(D=9.0m)이 적용된 본선터널 단면을 고려하여 연계시공이 가능하도록 단면을 계획하였다(그림 4.1).

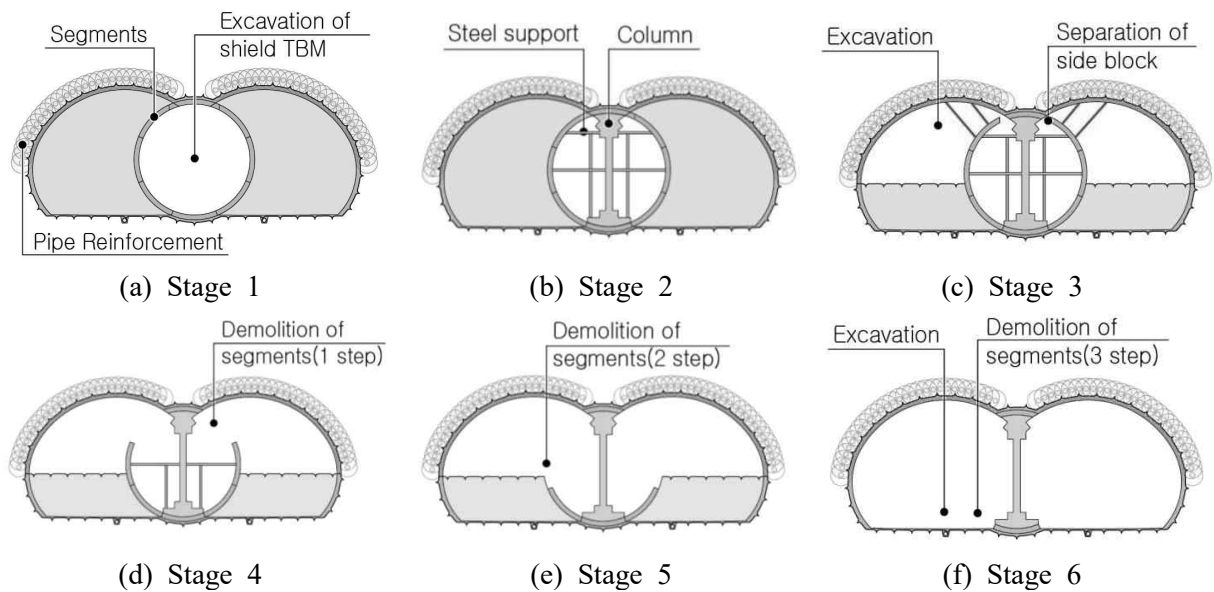


[그림 4.1] Tunnel section

4.2 TBM 선굴진 2-Arch터널 시공계획

TBM선굴진 2-Arch터널의 시공순서는 그림 4.2와 같다. 운행 중인 강릉역의 안정성 확보를 위해 2-Arch터널 천단부를 대구경 강관($\phi 216\text{mm}$)으로 선보강하였다. 가장 먼저 굴착되는 2-Arch 중앙터널은 쉴드TBM으로 굴착과 동시에 고강도(60MPa) 세그먼트로 라이닝 보강한다. 중앙터널 시공완료 후 2-Arch터널 안정성 확보를 위해 중앙기둥과 강지보재를 설치하고 2-Arch 좌우터널의 상반을 굴착하게 된다. 이때, 상반굴착 시 세그먼트의 안정성 확보를 위해 세그먼트를 임시 고정한다. 상반굴착 완료 후 해당 부분의 세그먼트와 강지보재를 단계별로 해체하고 하반굴착을 통해 TBM선굴진 2-Arch터널을 완공하게 된다. 이러한 일련의 단계별 시공계획을 통해 지반변위 발생을 최소화하고 터널 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

앞서 언급한 바와 같이 TBM선굴진 2-Arch터널은 좌우터널 굴착 시 중앙기둥과 연결된 Key 세그먼트와 바닥부 세그먼트를 제외한 모든 세그먼트를 해체하게 된다. 독립적으로 세그먼트를 영구히 설치되는 본선터널과 달리 터널정거장은 세그먼트 해체와 좌우터널 확폭이라는 추가적인 시공단계를 고려해야 할 필요가 있다. 즉, TBM선굴진 2-Arch터널의 세그먼트 설계 시 중앙기둥과의 연결관계를 고려하여 세그먼트 상세계획을 수립하여야 한다.

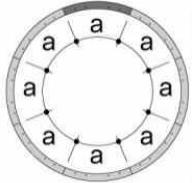
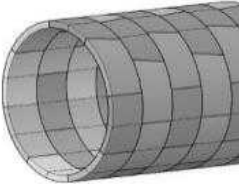
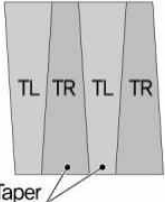
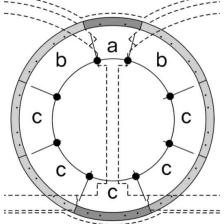
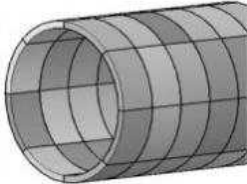
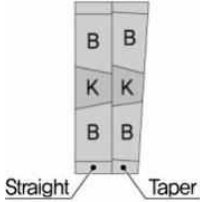


[그림 4.2] Construction stages of TBM pre-excavation type 2-Arch tunnel

4.3 쉘드TBM 세그먼트 설치계획

쉘드TBM 세그먼트 설계 시 주요 계획항목으로 세그먼트 분할, 조합방식 및 테이퍼형식 계획으로 구분할 수 있다(표 4.1). 본선터널에 적용되는 세그먼트와 달리 TBM선굴진 2-Arch터널의 세그먼트는 임시적인 지보재로서 공사 중 안정성은 확보하되 중앙기둥과의 연결 관계를 고려하여야 한다. 세그먼트 조합방식 결정시 본선터널구간은 조립 시공성은 다소 불리하나 연결부 구조 안정성이 우수한 지그재그 방식을 적용하고, TBM선굴진 2-Arch터널은 중앙기둥 연결 및 세그먼트 해체의 시공성을 고려하여 스트레이트 방식을 적용하였다.

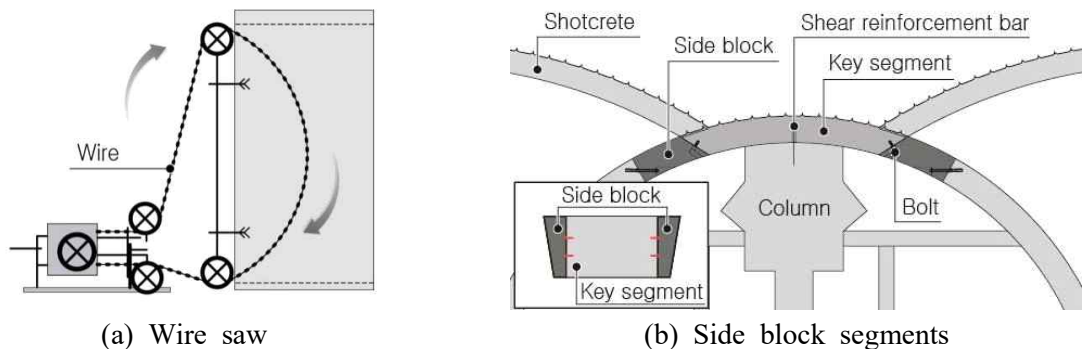
<표 4.1>Segment design according to TBM pre-excavation type 2-Arch tunnel

Sort	Division of segment	Combining method	Taper type
Main Tunnel	 <p>Equal division</p>	 <p>Zigzag</p>	 <p>Universal ring</p>
Station Tunnel	 <p>Unequal division</p>	 <p>Straight</p>	 <p>Straight+tapered ring</p>

세그먼트 분할계획의 경우 본선터널구간은 제작 및 품질관리가 용이하고 다수의 적용사례가 있는 균등분할을 적용하고, TBM선굴진 2-Arch터널 구간은 중앙기둥과의 연결을 고려하여 불균등분할(Key 세그먼트 규격축소)을 적용해야 한다. 또한 사행 수정시 적용되는 테이퍼의 경우, 본선터널은 반경 및 수정량에 따라 산정된 테이퍼를 반영하는 유니버설 타입을 적용하고, TBM선굴진 2-Arch터널은 중앙기둥 설치를 고려한 스트레이트 타입을 적용하되 사행수정시 테이퍼 세그먼트를 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

4.4 쉘드TBM 세그먼트 설치계획

TTBM선굴진 2-Arch터널은 좌우터널 굴착 시 Key 세그먼트 및 바닥부 세그먼트를 제외한 모든 세그먼트를 해체하여 터널 내공을 확보하게 된다. 쉘드TBM 시공시 설치된 세그먼트는 압축링상태로 연결되어 있으므로 세그먼트의 품질과 시공성을 고려한 적절한 해체계획을 수립하는 것이 중요하다. 그림 4.3(a)는 다이아몬드 팁이 박힌 와이어를 통해 세그먼트를 절단하는 방안이다. 국내 지하철 환승구간에 적용사례가 다수 있으나, 절단중 분진이 다량 발생하고, 와이어 관통용 구멍 천공 및 와이어 설치 등의 작업공정이 다소 복잡하다. 반면, 그림 4.3(b)는 세그먼트 해체용 사이드 블록(볼트체결)을 활용하는 방안으로 본 연구에서 참조한 장타이역에 적용한 방식이다(Xu et al., 2020). 이 방법은 볼트 해체를 통해 세그먼트를 해체하므로 작업공정이 단순하고, 고강도 세그먼트 절단이 불필요하여 시공이 용이하다. 그러나 세그먼트 해체방안 선정시 구조물 안정성, 시공성 및 경제성을 종합적으로 고려하여 적용구간 현황에 적절한 해체방안을 선정하는 것이 매우 중요할 것으로 사료된다.



[그림 4.3] Demolition plan of lining segments

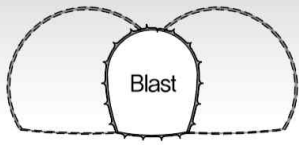
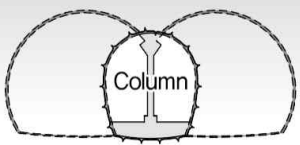
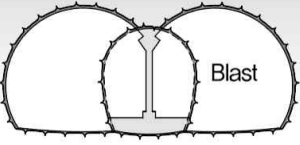
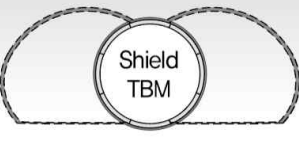
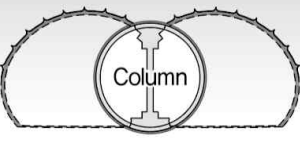
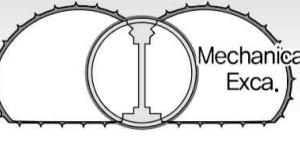
5. 수치해석을 통한 적용효과 검증

5.1 TBM선굴진 2-Arch터널 적용효과 해석검증

TBM선굴진 2-Arch터널과 기존 NATM 형식 2-Arch터널의 가장 큰 차이점은 표 5.1과 같이 선시공되는 중앙터널의 형식에 있다. 기존 NATM 형식 2-Arch터널은 중앙터널 굴착 후 1차 지보재인 슛크리트와 록볼트로 임시 보강을 수행한 후 2차 지보재인 콘크리트 라이닝을 타설하지 않고 좌우터널을 굴착하게 되므로 주변 지반의 이완이 과다하게 발생하게 된다. 반면 TBM선굴진 2-Arch터널은 2차 지보재 개념인 세그먼트 라이닝으로 선보강하게 되므로 기존 NATM 형식의 2-Arch터널 대비 주변 지반의 이완을

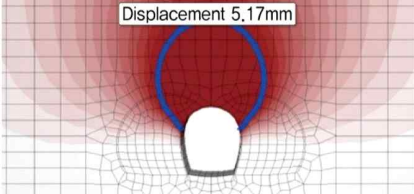
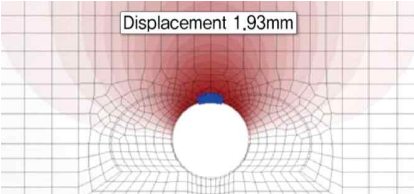
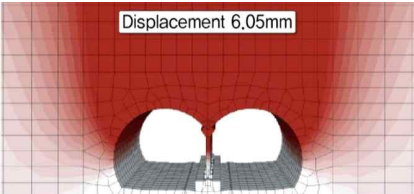
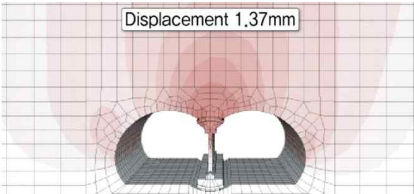
최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 2-Arch 중앙터널 시공조건별 3차원 안정성 검토를 수행하여 TBM선굴진 2-Arch터널의 효과성을 검증하였다. 이때, 수치해석은 유한차분법(FDM)을 이용한 지반범용 해석프로그램인 FLAC 3D를 적용하였다. 해석모델은 Mohr-Coulomb에 근거한 탄소성모델을 적용하여 지반과 구조물을 모델링하였으며, 굴착공법별 지보재 특성을 고려하여 기존 NATM형 2-Arch터널의 숏크리트는 연속모델을 적용하고 TBM선굴진 2-Arch터널의 세그먼트는 불연속모델을 적용하여 세그먼트 이음부의 거동을 모사하였다.

<표 5.1>Construction sequence for each excavation method

Sort	[Step1]Central Tuunnel	[Step2]Column Tuunnel	[Step3]Enlarged Tuunnel
Generic NATM Type	 shotcret (t=120mm)/rockbolt	 Column	 shotcret/rockbolt/lining
TBM TYPE	 segment (t=350mm, lining)	 Column	 shotcret/rockbolt/lining

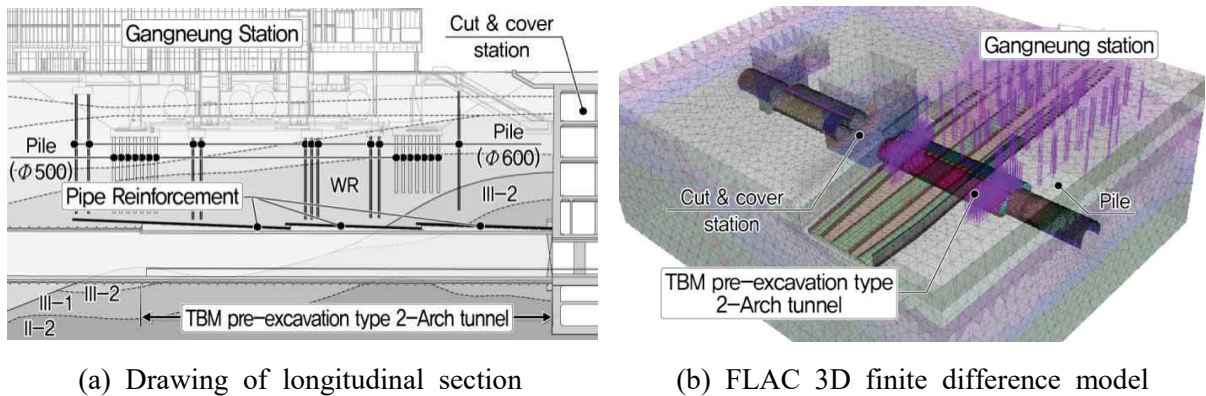
TBM선굴진 2-Arch터널의 지반변위가 약 77% 감소하고 지반의 이완영역도 현저히 축소된 것을 확인할 수 있었다(표 5.2). 따라서 기존 NATM형 2-Arch터널 대비 TBM선굴진 2-Arch터널 적용시 터널 구조물 안정성 향상이 가능할 것으로 사료된다.

<표 5.2>Stability results for each excavation method

Sort	Generic NATM type 2-Arch tunnel	TBM Pro-excavation type 2-Arch tunnel
Central Tunnel	 Displacement 5.17mm	 Displacement 1.93mm
Enlarged Tunnel	 Displacement 6.05mm	 Displacement 1.37mm

5.2 TBM선굴진 2-Arch터널 안정성 검토

강릉역 하부통과구간의 터널정거장은 풍화암~암반Ⅲ등급의 지반에 위치하고 강릉역 말뚝기초와 이격거리 약 1.9m로 매우 근접한 시공조건을 가지고 있다(그림 5.1(a)). 이러한 현황에 적용된 TBM선굴진 2-Arch터널의 안정성 검토를 수행하고자 하였다. 검토구간의 지반특성과 기존 구조물의 현황을 고려하여 그림 5.1(b)와 같이 3차원 모델링을 수행하였고, TBM선굴진 2-Arch터널에 대한 굴착공법 특성을 수치해석으로 모사하였다. 이때 적용된 쉘드TBM 및 2-Arch터널의 단면제원은 그림 4.1과 같으며, 2-Arch터널 기둥은 구조검토를 통해 산정한 종방향 길이 2.0m(C.T.C 4.0m)로 적용하였다. 시공중 신설터널에 대한 안정성 검토를 위해 터널 변위 및 지보재 응력(숏크리트 휨압축응력 및 록볼트 축력)을 검토하고, 기존 운행선인 강릉역의 구조물 안정성 검토를 위해 구조물 사용성(부등침하, 각변위 등)과 운행안정성(궤도틀림)에 대한 검토를 수행하였다.

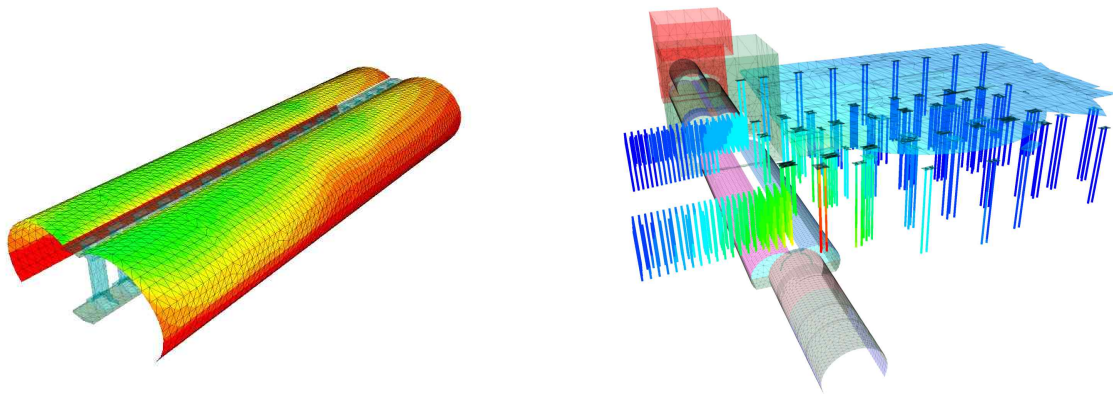


[그림 5.1] Modeling of TBM pre-excitation type 2-Arch tunnel

TBM선굴진 2-Arch터널의 시공단계를 고려한 수치해석 결과를 그림5.2 및 표 5.3과 같이 정리하였다. 불량한 지반조건임에도 불구하고 신설터널에서 발생하는 변위가 수렴하고 지보재에 발생한 응력은 모두 허용기준 이내로 산정되어 신설터널의 안정성 확보가 가능할 것으로 사료된다. 또한 TBM선굴진 2-Arch터널 굴착으로 인해 기존 구조물인 강릉역에 미치는 영향을 분석한 결과 최대 변위 및 부등침하 등 기존 구조물에 발생하는 변위가 미소하고 허용기준 이내로 산정됨에 따라 기존 구조물의 사용성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

열차가 운영중인 강릉역을 고려하여 운행안정성을 검토하기 위해 궤도틀림을 분석하였다. 여기서, 궤도틀림 허용기준은 국가철도공단(2020)의 선로유지관리지침을 참조하여 보수적인

검토기준을 선정하였다. 궤도틀림 검토결과, TBM선굴진 2-Arch터널 굴착으로 인해 궤도에 발생하는 변위가 미소하고 방향틀림 등 산정된 모든 궤도틀림이 허용기준 이내로 산정됨에 따라 운행안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) TBM pre-excitation type 2-Arch tunnel

(b) Pile foundation

[그림 5.2] Displacement distribution for each structure

<표 5.13> Summary of stability results

TBM pre-excitation type 2-Arch Tunnel	Displacement(mm)		Flexural compressive stress(Mpa)	Shear stress(Mpa)
	Crown	Convergence		
	13.47	6.57	5.01<14.00(O.K)	0.34<0.47(O.K)
Station & pile foundation	Maximum subsidence (mm)	Differential settlement (mm)	Angular displacement	Horizontal strain
	7.70<25.0 (O.K)	2.30<90.0 (O.K)	1/7,626<1/500(O.K)	1/76,923<1/2,000(O.K)
Trak irregularity	Longitudinal level (mm)	Aligment (mm)	Cross level (mm)	Gauge (mm)
	2.35<3.0 (O.K)	0.079<3.0 (O.K)	0.658<0.3 (O.K)	0.089<0.3 (O.K)

6. 결 론

기존 NATM형 2-Arch터널은 중앙터널을 NATM공법으로 굴착하여 상부 구조물의 기초지반에 과도한 이완을 유발시켜 안정성을 저하시키고, 쉘드TBM 발진시 2-Arch터널과 간섭되어 발진구(개착) 추가설치가 요구되며 이에 따른 민원과 환경훼손을 증가시키는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 기존 2-Arch터널의 한계를 극복하기 위해 TBM선굴진 2-Arch터널을 국내 최초로 제안하였다. 이는 쉘드TBM과 2-Arch터널을 조합한

형식으로써 중앙터널을 쉘드TBM으로 굴착하면서 고강도 세그먼트로 선보강하여 안정성이 우수하고 본선 쉘드TBM 터널과의 시공연계성이 우수한 터널 형식으로 판단된다. 본 연구에서 TBM선굴진 2-Arch터널에 대한 주요설계항목을 기술하고 안정성 검토를 통한 해당기술의 적정성을 검증하였다.

TBM선굴진 2-Arch터널은 좌우터널 굴착 시 중앙기둥과 연결되는 Key 세그먼트와 바닥부 세그먼트를 제외한 모든 세그먼트가 공사 중 해체되는 임시 세그먼트이다. 따라서 해당구간 세그먼트 계획시 설치 해체의 편이성 및 중앙기둥과의 연결 관계를 고려하여 스트레이트 방식의 세그먼트 조합, 불균등분할 세그먼트 분할 및 스트레이트 타입의 표준형 세그먼트를 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 또한 세그먼트 해체방안에 대하여 사이드 블록 세그먼트 및 와이어 쏘어 해체공법을 활용한 단계적 해체방안을 소개하였다. 임시 세그먼트 해체시 작업공정이 단순하고 절단이 불필요한 사이드 블록을 활용하는 방안이 시공성 측면에서 우수할 것으로 사료된다.

TBM선굴진 2-Arch터널 적용에 따른 적정성을 평가하기 위해 수치해석을 통한 안정성 검증을 수행하였다. 검토결과 TBM선굴진 2-Arch터널 적용시 지반변위가 약 77% 감소되었으며 지반 이완영역이 축소됨에 따라 기존 구조물의 안정성을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 주요현황을 고려한 3차원 안정성 검토결과, 지반조건이 불량하고 기존 구조물의 말뚝기초와 매우 근접한 시공조건임에도 터널 및 기존 구조물에 발생하는 변위가 미소하고 지보재 응력이 허용치 이내로 산정되었다.

본 연구에서는 국내 최초 TBM선굴진 2-Arch터널을 적용한 설계사례를 기술하였으며 본선터널과의 시공연계성이 우수하고 중앙터널 세그먼트 선보강을 수행하므로 안정성이 우수한 공법으로 판단된다. 추후 시공중 계측결과를 활용한 터널의 실제 거동을 분석하여 TBM선굴진 2-Arch터널의 임시 세그먼트 설치계획에 대한 구조물 안정성을 검토하고 현장적용에 따른 설치계획의 적정성을 평가하여 추가적인 개선방안 검토가 필요할 것으로 사료된다. 또한 압축링 상태로 연결되어있는 세그먼트 해체에 따른 어려움이 예상되는 바, 본 연구에서 제안한 세그먼트 해체공법의 현장적용성 검토와 더불어 구조물 안정성 및 시공성에 효과적인 세그먼트 해체공법에 대한 추가 검토가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Cao, L., Fang, Q., Zhang, D., Chen, T., 2018, Subway station construction using combined shield and shallow tunnelling method : Case study of Gaojiayuan station in Beijing, Tunn. Undergr. Space Technol, 82, pp.627-635.
2. Korea National Railway(KR), 2020, Track Maintenance Guidelines.
3. Liu, J., Wang, F., He, S., Wang, E., Zhou, H., 2015, Enlarging a large-diameter shield tunnel using the pile-beam-arch method to create a metro station, Tunn. Undergr. Space Technol, 49, pp.130-143.
4. Xu, X., Li, Z., Fang, Q., Zheng, H., et al, 2020, Challenges and countermeasures for using pile-beam-arch approach to enlarge large-diameter shield tunnel to subway station, Tunn. Undergr. Space Technol, 98.