

Unlined Tunnel 공법 지보재의 설계 및 시공 기준 고찰 A Study on the Design/Construction Standard of Unlined Tunneling Method

서영화¹⁾ Young-Hwa Seo, 김성구²⁾ Seong-Koo Kim, 나승훈³⁾ Seung-Hoon Ra

¹⁾ LG건설 기술본부장, Executive Vice President, Technical Division, LG E&C Corp.

²⁾ LG건설 지하공간팀 부장, Senior Manager, Geosystem Engineering Team, LG E&C Corp.

³⁾ LG건설 지하공간팀 과장, Manager, Geosystem Engineering Team, LG E&C Corp.

SYNOPSIS : Tunneling is a very dangerous and expansive work. Especially, the concrete lining works need many long hours and much cost. As an alternative, the unlined tunneling methods including NMT have been developed in various country. These methods have advantages in cost, time and quality. In Korea, many considerations have been conducted to apply the unlined tunneling method in comparatively good rock. Since primary reinforcements play the role of the final supporting system in unlined tunnels, the initial stiffness and long term durability of reinforcements are very important for tunnel safety. To establish the reinforcements standard suitable to Korea, we investigated the foreign standards and construction cases, comparing geological and construction conditions of foreign land and Korea. As the result, we have proposed the standard of primary supporting system for unlined tunnel in aspects of material, design, construction and quality control etc.

Key words: unlined tunneling, reinforcement standard, the initial stiffness and durability

1. 서론

우리나라 터널은 1980년대 초 이후로 대부분 NATM에 의해 시공되고 있다. NATM은 터널공법이라기 보다는 터널의 지보원리에 해당하는 것으로, 원지반의 변형을 최대한 억제하기 위해 강지보재 위주로 보강하던 채래식 터널 공법과 달리 터널 주변 암반 자체를 주지보재로 하여 암반의 보강이 필요할 경우, 록볼트, 슛크리트 등의 지보 시스템을 적용한다. 우리나라에서는 보통 NATM 적용시 위 두 가지의 지보체계와 보조공법을 적용하여 지반을 안정화시킨 후 최종적으로 콘크리트 라이닝을 설치하여 터널을 마감한다. 그러나 현장타설 콘크리트 라이닝은 공기 및 공사비 부담이 많다. 1970년대부터 노르웨이 등 주로 암반이 양호한 북유럽 국가를 중심으로 개발되어온 Unlined Tunnel 공법은 경제성, 시공성, 유지보수면에서 장점을 지녀 세계 각국으로 확대되고 있고 우리나라에서도 적용여부가 활발히 논의되고 있다.

산악이 많은 한국 지형의 특성상 터널공사는 많은 비중을 차지하고있다. 요즘 발주되는 고속도로 및 철도의 경우 환경보존을 위해 터널의 비중이 계속 증가하는 실정이다. 터널공사는 대표적인 고리스크, 고비용 공정이며, 복잡하고 오랜 공사기간으로 인해 전체 공사의 공기를 좌우한다. 특히 NATM에 의해 시공되는 터널에서 콘크리트 라이닝은 굴착 후 지반변위가 수렴된 이후 시공되므로 전체 터널공기를 지연시키는 결과를 초래한다. 더우기 국내 터널공법에서 콘크리트 라이닝은 그 기능이 불명확한 상태에서 안전 측의 설계 개념을 일률적으로 적용하여 과다하게 설계되는 경향이 있다. 이에 따라 안전하고 경제

적이며 신속한 터널공법에 대한 요구가 대두되고 있다.

그러나 어느 특정 지역의 지반조건과 시공기술에 맞게 발달되어온 터널 공법이 다른 상황 및 여건에서도 적용되기 위해서는 적용 조건에 대한 검토와 논증이 필요하다. 특히 지보재의 경우 Unlined Tunnel의 안정성을 위한 핵심기술로서 일반 구조물과 달리 기후, 지반조건, 재료, 시공여건 등에 많이 좌우되므로 국내 상황에 맞는 Unlined Tunnel의 지보재 공법을 정착시키기 위해서는 Unlined Tunnel 공법의 실체를 정확히 이해하고 세계 각국에서 어떻게 변형 적용되고 있는지를 파악한 후 국내 적용시 해결해야 할 과제를 규정하고 이에 대한 해법을 제시하는 과정이 필요하다. 본고에서는 이와 같은 과정을 통해 Unlined Tunnel 공법의 지보재 적용기준을 제시하고자 한다.

2. Unlined Tunnel 공법 개요

2.1 개념

Unlined Tunnel 공법은 양호한 암반 터널에서 암반의 자립력과 1차 지보재(Rockbolt & Shotcrete)에 의한 보강으로 충분히 암반을 안정화시킬 수 있다는 전제하에 2차 지보재(콘크리트 라이닝)를 생략하는 공법이다. 본고에서 Unlined Tunnel 공법이란 라이닝을 생략한 형태의 터널공법 전체를 이르는 말로서 포괄적 의미를 가지며 노르웨이 등지에서 발달되어온 이른바 NMT(Norwegian Method of Tunneling) 또는 SPTL(Single Pass Tunnel Lining method) 공법(Melbye and Garshol, 1994) 등을 포함하며 상대적으로 연약한 지반에서 발달되어온 Single Shell 공법(윤지선, 김선명, 2002)까지 포함한 개념이다.

그림 1은 Unlined Tunnel 공법의 개념을 그린 것이다. 라이닝이 생략되어 있는 대신 마감재(PC-Panel 등)가 숏크리트 보강 단면과 일정간격 이격 되어 설치되고, 그 사이에 방수막이 앵커볼트에 의해 고정되도록 시공되어진다. 이 경우 마감재는 구조재로서 작용하지 않고 미관이나 배수 목적으로 활용된다. 특히 암반이 아주 양호한 경우에는 1차 지보재마저도 생략하는 터널이 증가하고 있다.

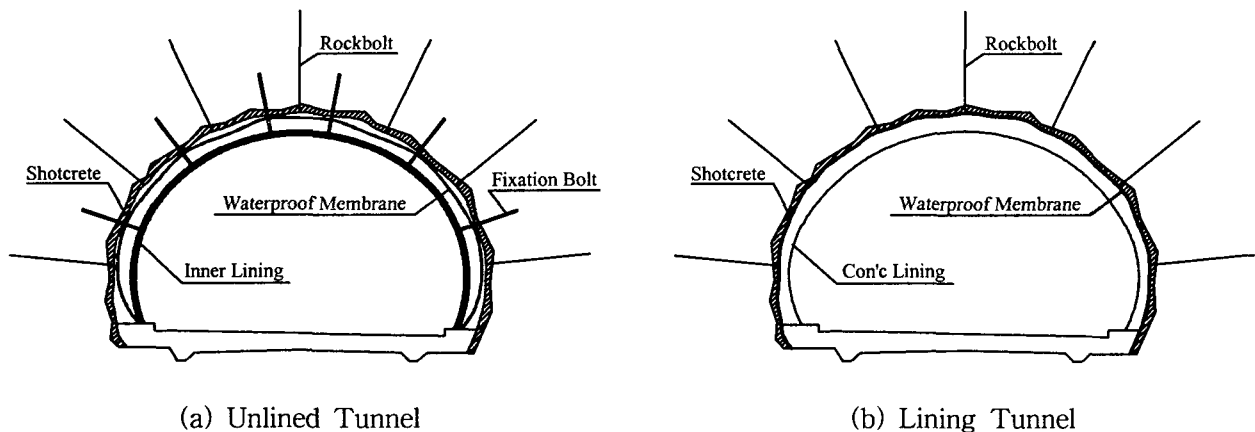


그림 1. Unlined Tunnel과 Lining Tunnel의 개념도

2.2 Unlined Tunnel의 특징

Unlined Tunnel 공법은 원지반을 주지보재로 이용하는 NATM의 이론을 이용하는 것으로 2차 지보재인 콘크리트 라이닝 대신 미관확보나 유도배수의 목적으로 PC-Panel 등의 마감재를 이용하거나, 양호한

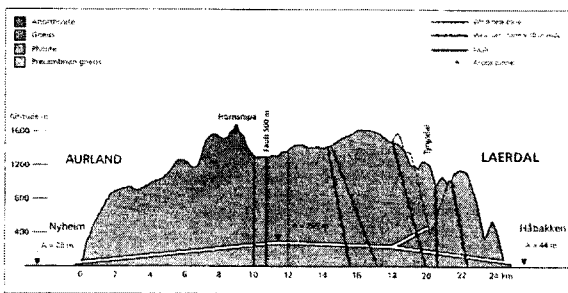
암반조건에 따라 마감재를 생략하기도 한다. 마감재는 공장에서 제작되어 현장에서 조립되어지는 것으로 기존의 현장 타설 라이닝 공법에 비해 공기 측면에서 유리하다. 라이닝 공법에서는 1 Span(9m) 시공 시 3일이 소요되는데 비하여 Unlined Tunnel 공법에서는 2 set(약 10m) 설치가 1일에 가능하여, 라이닝 공정이 전체 터널공정에 20~30% 정도를 차지하는 것을 감안하면 공기 단축이 15~20%에 이를 것으로 추산된다. 마감재는 공장 제작으로 균질한 품질이 유지될 수 있어 균열 발생의 우려가 적으며 파손 시에도 신속한 교체 및 보수가 가능하다. 또한 원지반의 균열 발생 시에도 라이닝 공법에 비해 보강이 간편한 장점이 있다.

또한 보통의 라이닝 공법에서 지하수가 완전히 배수되지 않으면 잔류 수압이 발생하고, 이것이 설계에 고려되지 않았을 경우 라이닝에 추가 하중으로 작용하여 균열의 원인이 될 수 있다. 그러나 Unlined Tunnel 공법에서는 마감재와 슛크리트 면 사이가 이격되어 터널 내부로 침투되는 지하수를 효과적으로 터널 외부로 유도배수 할 수 있어 지하수 처리에 보다 유리하다.

그렇지만 이러한 Unlined Tunnel이 완벽한 안정성을 유지하기 위해서는 1차 지보재가 영구 지보재의 역할을 담당할 수 있을 정도의 고품질이 요구된다. Unlined Tunnel에서 1차 지보재는 최종지보재의 역할을 해야하며, 경우에 따라 최종 마감재로서도 작용해야 하기 때문이다. Unlined Tunnel에서는 기존의 현장타설 콘크리트 라이닝에 의한 추가적, 잠재적인 안전을 확보가 안되기 때문에 대상터널이 1차 지보재로 충분한 안정성을 확보할 수 있는지에 대한 검증이 먼저 이루어져야 하며, 이후 장기내구성 확보를 위한 1차 지보재의 성능 향상과 이를 위한 시공 측면이 고려되어야 한다. 또한 1차지보재가 최종마감재로 작용하기 위해서는 슛크리트의 박리, 박락에 의한 낙반 가능성, 터널내 화재에 대한 내화성, 배기 가스 중 포함된 이산화탄소에 의한 중성화, 노면에서 비산되는 제설용 염류(염화칼슘 등)에 의한 염해에 대한 검증이 필요하다.

3. 해외 Unlined Tunnel 적용 현황

현재 노르웨이에 건설된 도로 터널은 약 700여 개, 총연장이 약 600km에 달하며 이중 3%의 구간만 현장타설 콘크리트 라이닝이 설치될 정도로 Unlined Tunnel 공법이 일반화되어있다. 또한 매년 15~20km의 도로터널이 시공 중에 있고, 그 중에서 현장 타설 콘크리트 라이닝이 설치되는 구간은 매년 500m 미만이다. 2001년에 완공된 24.5km에 달하는 세계 최장의 도로터널인 Laerdal Tunnel의 경우 역시 터널 심도가 최대 1400m임에도 불구하고 대부분의 구간에 슛크리트나 암반면이 그대로 노출되고 마감재가 없는 Unlined Tunnel 공법을 적용하였다(그림 2).



(a) Laerdal 터널 종단면도



(b) Laerdal 터널 내부전경

그림 2. Laerdal 터널

Romeriksporten Tunnel(13.9km), Bekkedalshogda Tunnel(1.5km) 등 시속 200km 이상의 고속철도 구간 터널 공사에서도 0.5~2%에 해당하는 구간만 현장타설 콘크리트 라이닝으로 시공된 사례가 있으며,

해저 터널 역시 7.23km의 세계최장 해저 도로 터널인 Oslo Fjord Tunnel, Alesund Tunnel, Freifjord Tunnel의 시공사례 등 철도 및 해저 터널에서도 Unlined Tunnel 공법은 일반화되어 적용되고 있다.

노르웨이에서는 1916년도부터 수력발전소를 건설하였고, 현재 약 200여개의 발전소를 보유하고 있다, 이들은 안정성과 비용절감의 이유로 90% 이상이 지하에 라이닝이 없는 상태로 건설되었으며, 지금까지 단 한번의 사고사례도 보고되지 않았다.

그리고, 지하저장시설에 대해서도 원유, 가스, 혹은 디젤 등의 정제된 석유의 저장을 위해 8개의 대규모 Unlined Cavern이 건설되어 현재 가동 중에 있다. 또한 이외에도 농수산물의 보관을 위한 지하 냉동 저장시설을 보유하고 있으며 주민 체육시설로서 비상시에는 방공호로 이용할 수 있는 지하 시설물들이 Unlined Tunnel 공법으로 도시 곳곳에 건설되었다. 국내에도 많이 알려진 Gjovik Olympic Mountain Hall이 대표적 사례이다. 이와 같이 도로 및 철도 터널을 비롯하여 발전소, 저장시설 등의 산업시설은 물론 체육시설도 Unlined Tunnel이 적용되고 있는 실정이다. 표 1은 노르웨이에서 건설된 각종 지하 시설물의 대표적인 사례이다.

표 1. 노르웨이의 Unlined Tunnel 공법 시공사례

터널 종류	터널명	완공년도	규모
도로, 철도, 해저 터널	Nordby 터널	-	연장 8000m
	Bomla 피요르드 터널	-	연장 7881m
	Tromsoysund 터널	-	연장 6380m
	Eik-Helland II 터널	-	연장 5450m
	Hitra 터널	-	연장 5610m
	Raelingen 터널	-	연장 3443m
석유저장시설	Mongstad Bergen	1975	(폭 × 높이(m)) 22 × 30
	Ekeberg II, Oslo	1978	15 × 10
	Namsen	1983	17 × 30
	Rafsnes, Porsgrunn	1977	19 × 22
기타 지하시설물	Odda, sport hall	1972	27,000m ³ (최대폭 25m)
	Gjovik, swimming pool	1975	17,000m ³ (최대폭 20m)
	Skaarer, sport hall, swimming pool	1981	25,600m ³ (최대폭 25m)
	Holmen, sport hall (enlarged)	1981 1988	35,000m ³ (최대폭 25m)
	Holmlia, sport hall & swimming pool	1983	53,000m ³ (최대폭 25m)
	Gjovik Olympic Mountain Hall	1993	160,000m ³ (최대폭 61m)

노르웨이 이외의 국가에서도 Unlined Tunnel 공법이 적용된 사례가 다수 있다. 표 2에서처럼 도로, 철도, 지하철에 이르기까지 적용대상이 다양하고, 국가별로 특성에 맞게 적용하였다. 체코의 예처럼 슛크리트의 강도를 증가시키기보다 두께를 증가시킨 경우가 있고 오스트리아의 예처럼 초고강도를 적용한 예가 있다.

표 2. 각 국의 Unlined Tunnel 공법 적용사례(Naoki Tomisawa, 2002)

터널	국가	용도	준공년도	길이(m)	단면크기 (m ²)	스측크리트두께 (cm)	스측크리트강도 (kgf/cm ²)
Hall Stadt	Austria	도로	1966	1063-1203	24	15	290-690
Brandberg-Tyrol	Austria	도로	1976	2130	-	10	300
BC rail	Canada	철도	1983	640	47	10	400
Bohuslavice	Czech	도로	1995	68	59	40	200
Praha	Czech	지하철	1998	140	41-61	45	200 이상
Bielefeld	Germany	지하철	1988	104	33.3	10+15	-
Egeyama	Japan	철도	1995	251	43.9	5+15+10	-
S.Antonio -Muralto	Switzerland	철도	1987	1154	40	25	-
Disentiser	Switzerland	철도	1999	346	36.9-85.1	30-45	344-472
Norra	Sweden	도로	1991	630		2.5-10	350 이상
Sodra	Sweden	도로	1998	16600		6-9	400 이상

4. Unlined Tunnel 공법의 지보재 설계/시공 기준 제안

국내에서도 에너지 비축기지로 활용하기 위한 대규모 지하 Cavern이나 지하농수산물 저장창고의 경우 이미 Unlined Tunnel로 설계, 시공된 사례가 있다. 지금까지 국내에 건설된 유류나 LPG 비축기지는 총 12 곳으로 대부분 대심도, 대단면의 터널에 해수가 유입되어 공사가 불리한 환경조건 하에 건설되었으며 대부분 안정성에 문제없이 운영되고 있다. 국내에서 에너지 비축기지나 농수산물 저장고 등의 지하공간 공사 사례는 향후 교통 수송용 터널의 Unlined Tunnel 공사에 중요한 경험으로 작용할 것이다. 다만 교통수송용 터널의 경우 인명에 직접적인 영향을 미치게 되므로 구조물의 안정성을 더욱 고려해야 한다. 이에 따라 우리나라의 터널 설계개념과 지반조건 및 시공여건에 적합한 Unlined Tunnel 공법을 위한 설계/시공 기준을 검토하였다.

4.1 국내에 타당한 Unlined Tunnel 공법의 선정

같은 Unlined Tunnel이라도 설치되는 마감재의 종류에 따라 1차지보재의 역할, 특히 최종마감재로서의 역할이 상이하므로 우선적으로 국내 터널에 적합한 터널 마감재의 종류를 선정하였다.

Unlined Tunnel 공법에서는 라이닝 대신에 단열, 방/배수, 운전자의 시각적 안정성 및 미관, 조명/환기/방재 시설의 설치 목적으로 마감재를 설치한다. 마감재는 시공성 및 경제성을 고려한 다양한 형식이

있으며 그 종류를 대별하면 단열된 샌드위치 패널 시공법, PE-Foam+솟크리트 시공법 그리고 PC-Panel 시공법으로 나눌 수 있으며 특징은 표 3과 같다.

표 3. 마감재 특징

라이닝 대체재	적용터널	장점	단점	비용(노르웨이 기준)
샌드위치 패널	외곽의 소규모 터널	· 시공이 간편 · 곡률이 300m도 가능	· 강성이 약함 · 재료비가 비쌌	재료 USD 850/m 시공 USD 100/m
PE-Foam+ 솟크리트	상대적으로 교통량이 적은 대규모 터널	· 대단면 터널에도 경제적으로 시공	· 솟크리트가 열화되어 떨어지는 현상이 발생 · 방화성능이 떨어짐	재료 USD 400/m 시공 USD 1400/m
PC-Panel	도심의 교통량이 많은 대규모 터널	· 외관상 가장 안정적 · 방수, 방화성능이 우수	· 시공비용이 높고 설치시 특별한 장비가 필요	재료+시공 USD 2500/m

샌드위치 패널 시공법은 유리섬유보강 폴리에스터 사이에 단열재인 폴리우레탄을 사용하는 공법이다. 샌드위치 마감재는 50mm의 단열 층과 양측으로 2mm의 유리섬유보강 폴리에스터로 구성된다. 단열재료와 폴리에스터의 선택에 있어서 중요한 점은 방화성능이다. 샌드위치 판넬은 여러 형상의 터널에 적용 가능하며, 그 폭은 보통 1500에서 2400mm이다. 패널 사이의 접합은 터널의 곡률이 300m 정도까지 가능하다.

PE-Foam + 솟크리트 시공법(Ekeberg type)은 방수와 동결방지를 위한 PE-Foam 외벽에 솟크리트를 시공하는 방법이다. PE-Foam은 방수와 동결방지를 위해 매우 유용하고 낮은 수분 흡수력과 유연성 그리고 인장강도를 가지고 있으며, 이 점은 재료의 성질로서 매우 중요하다. 이 방법의 가장 큰 약점은 슈트를 통과하여 볼트를 설치해야 한다는 점이다. 또한 PE-Foam은 가연성의 플라스틱 계열의 재료이다. 현재까지 노르웨이에서의 연구에 따르면 화재 발생 시 가스와 매연에 의한 위험은 화재 자체에 의한 위험과 거의 비슷한 것으로 판단되었다. 따라서 유독 가스를 발생할 수 있는 재료는 판넬에서 제거되어야 한다.

PC-Panel 시공법은 터널 전단면에 걸쳐 단열 및 방화 성능이 우수한 콘크리트 엘레먼트를 시공하는 공법이다. 공장에서 콘크리트로 만들어지는 PC-Panel은 그 시공 현장의 여건에 따라서 단열 및 비단열로 구분되며 이는 동결 여부에 의해서 결정된다. PC-Panel의 크기 및 형상은 터널의 단면, 운반장비, 양중 장비 등을 고려하여 PC-Panel을 분할하고, Wall Element와 Roof Element의 크기를 결정해야 한다. 일반적으로 안정성의 향상을 위해서 Wall Element의 크기를 키우는 경향이 있다.

Norwegian Public Road Administration(1990)에 의하면 터널 마감재의 형식은 터널 교통량에 따라 결정한다(그림 3). 이는 Unlined Tunnel의 오랜 시공 및 유지관리 경험에 의한 것이다. 이 시방규정에 의하면 일년 평균 하루 교통량(AADT, Average Annual Daily Traffic)이 8,000대 이상인 터널을 전단면 PC-Panel을 시공하도록 추천하고 있다. 이는 교통량이 많은 터널에 높은 안전율을 부여하기 위한 규정이다. 전단면 PC-Panel공법은 동결융해에 대한 방지책으로 가장 적당하며, 방·배수공을 시공하기도 좋고, 풍동압에 대한 안정성이 가장 좋은 형식이고, 차량 충돌시 원지반에 손상이 가지 않도록 상충하는 작용을 하며 방화성능 또한 뛰어나다. 현재 우리나라 도로 터널의 AADT는 98년 기준으로 고속도로는 43,000대, 일반국도는 12,000대로서 모두 8,000대 이상으로 전단면 PC-Panel 공법이 적합하다.

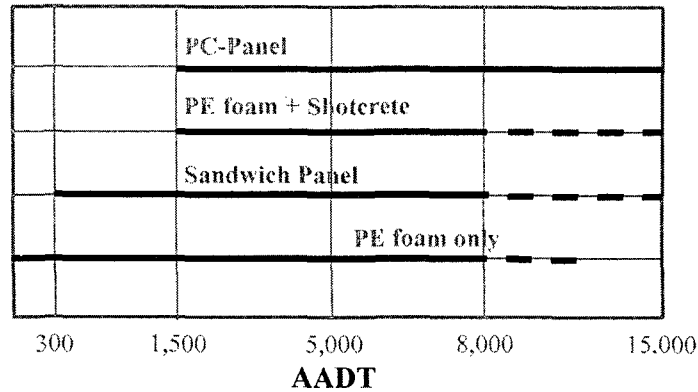


그림 3. 교통량에 따른 마감재 선택기준

4.2 표준지보패턴

터널의 표준지보체계는 통계적인 지보체계와 유사 지반조건을 가진 현장에서의 경험을 기반으로 결정되고 수치해석적으로 검증하여 적용된다. 통계적인 지보체계는 우리나라의 경우 통상 RMR과 Q-System이 적용되고 있다. 이중 Q-System은 Grimstad와 Barton(1993)에 의해 수정제시되었는데, 이것은 노르웨이의 교통터널, 수로터널, 통신터널 등 1000개소 이상의 현장계측자료에 의거해 구성된 Chart로서 NMT 공법의 지보패턴을 규정하는 대표적 지표이다. 따라서 Unlined Tunnel의 통계적 지보체계는 Unlined Tunnel 공법을 근간으로 정립되어온 Q-System을 적용하는 것이 타당하다. 다만 Unlined Tunnel 공법의 경우 우리나라 암반조건에서 시공실적이 없는바, 충분한 시공경험이 축적되기까지는 상대적으로 양호한 암반에서 시공하여 지반조건에 따른 경험을 기반으로 표준지보패턴을 수정해 나가야 할 것이다.

4.3 숏크리트

Unlined Tunnel 공법에서 숏크리트는 필요한 초기강도 및 장기내구성을 확보하여야 한다. 내구성의 지표는 압축강도, 휨강도, 부착력 등이며 온도변화, 지하수침투, 화학적 위해 물질의 작용 등으로 저하될 수 있다. 강도가 저하된 숏크리트는 투수성이 높아져 Leaching 현상과 화학작용에 의한 2차 열화로 또 다시 강도가 저하되는 악순환을 겪게된다. 또한 굴착초기 지반의 직접분사되어 지반의 지보능력을 최대한 발휘하게 하는 가축성 지보재로서의 숏크리트의 시공 목적상 초기강도를 증진시킬 필요가 있다. 여기에서는 Unlined Tunnel 공법에 적합한 숏크리트 적용기준을 제시하였다.

4.3.1 재료

(1) 시멘트

숏크리트용 시멘트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것을 원칙으로 한다. 포틀랜드 시멘트는 4가지 수화광물의 강도발현, 수화열, 화학저항성, 수화속도 특성이 각기 다르므로 이들 특성을 고려하여 용도에 맞게 조절하여 5가지 포틀랜드 시멘트로 구분될 수 있다. 숏크리트에 요구되는 재료의 가장 중요한 특징은 강도로서 조강 시멘트를 제외하고는 강도 수준은 거의 대동소이하다. 따라서 가장 일반적으로 토목·건축공사에 적용되는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하는 것을 원칙으로 한다.

(2) 골재

골재의 입도는 고르게 분산되어야 한다. Norwegian Concrete Association(1999)에서 제안한 입도분포 한계곡선은 그림 4와 같다. 골재의 입도분포는 슛크리트의 강도 특성 및 작업성에 큰 영향을 미치므로 가능한 고른 분포가 되도록 하여야 한다.

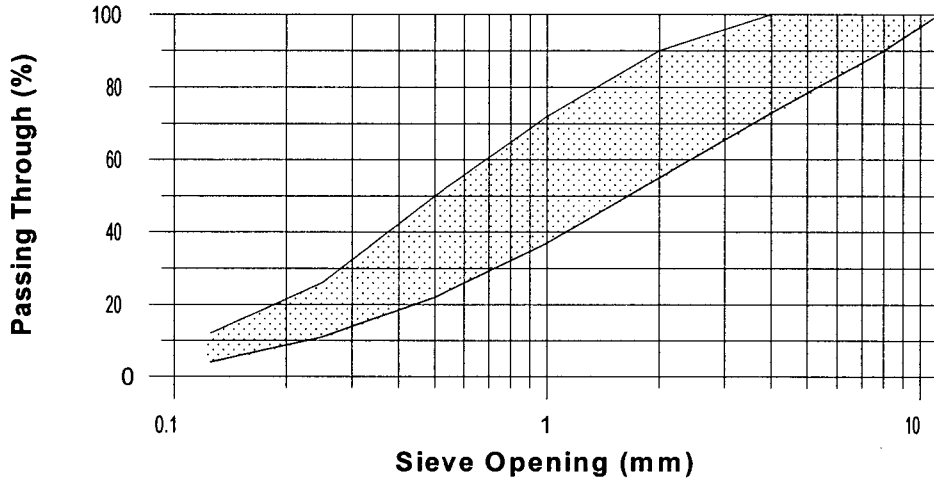


그림 4. 혼합골재의 입도분포도

강섬유 보강 슛크리트의 경우 골재의 입도분포 중 작은 골재의 비율이 증가하여야 한다. 강섬유는 시공 중 굵은 골재와 같은 거동을 하여 콘크리트의 유동성이 저하되므로 상대적으로 무근 슛크리트에 비해 작은 골재의 비율이 증가할 필요가 있다. 또한 굵은 골재의 최대 크기는 강섬유 길이의 2/3 이하인 것을 사용한다. 일본 SFRC 구조설계시공연구회(1995)에 의하면 굵은 골재의 최대크기가 강섬유의 1/2일 때 강섬유보강 슛크리트의 휨강도는 최대인 것으로 보고되었으며, 물리적/경제적 측면에서 강섬유 길이의 2/3 이하의 골재를 사용한다.

(3) 급결제

내구성 증진을 위해 급결제의 종류 및 첨가량에 주의하여 사용하여야 한다. 급결제는 액상 Ca^{+2} 이온을 증가시켜 수화물($Ca(OH)_2$) 형성을 촉진시키는 작용을 한다. 이때 자칫 급결제 종류에 따라 슛크리트의 장기강도 저하 또는 알칼리 반응이 유발 될 수 있으므로 주의하여야 한다. Unlined Tunnel 공법을 위한 급결제는 액상의 Alkali-Free 급결제를 사용한다. Alkali-Free 급결제는 알칼리의 양이 1% 미만인 급결제를 지칭한다. 장기강도의 저하가 없으며 불투수성이 좋고 수산화칼슘의 침식이 없어 Leaching 현상이 발생할 가능성이 거의 없다. 설령 적정 첨가량을 초과했다하더라도 치명적인 강도저하를 유발하지는 않는다.

(4) 혼화제

AE제는 가능한 사용을 피한다. AE제는 유동성과 동결융해 저항성을 크게 하는 작용을 하지만 AE제 사용으로 공기량이 1% 증가함에 따라 압축강도는 4~6%, 휨강도는 2~3%, 탄성계수는 약 $7\sim 8 \times 10^3$ kg/cm² 정도 감소하고 강섬유와 부착강도가 적어지는 단점이 있으므로 강섬유보강 슛크리트를 기본으로 하는 Unlined Tunnel 공법에서는 적용하기에 부적절한 혼화제이다.

감수제(Plasticising Agent) 역시 가능한 사용을 피한다. 감수제는 경화 지연효과로 인해 슛크리트의 조기강도에 나쁜 작용을 하므로 가급적 같은 작용을 하는 다른 혼화제를 사용한다. 슛크리트의 유동성 및 고강도 발현을 위해 고성능 감수제(Super Plasticising Agent)의 사용이 권장된다. 고성능 감수제는

시멘트의 응결 지연성 및 공기연행성 없이 물/시멘트비를 저감시켜 강도를 증진시킬수 있고 작업능력이 뛰어난 콘크리트를 제조할 수 있어 숏크리트 혼화제로 적합하다.

(5) 첨가제

숏크리트의 강도 발현을 위한 포졸란제로는 실리카 흙을 사용한다. 같은 포졸란제 역할을 하는 플라이애쉬 등은 뛰어난 콘크리트 성질 향상에도 불구하고 응결시간 지연효과로 초기강도 발현에 지장을 주므로 숏크리트에는 부적당하다. 이에 반해 실리카 흙은 담배연기 정도의 초미립분말이기 때문에 초기재령에서 포졸란 반응이 발생한다. 또한 실리카 흙은 숏크리트의 유동성은 좋게 하면서도 점도를 향상시켜 반발율을 작게 함으로써 배합설계 시 급결재 또는 경화 촉진제의 사용량을 줄여서 숏크리트의 성질을 향상시킬 수 있다. 실리카 흙은 시멘트량과 수산화칼슘(Ca(OH)₂)량을 감소시켜 황산염에 대한 저항성을 내황산염 시멘트 수준으로 향상시키는 특성이 있고 숏크리트내의 작은 공극 형성에 의한 내동해성향상으로 궁극적으로 숏크리트의 내구성을 향상시키는 작용을 한다.

4.3.2 설계

(1) 배합

숏크리트의 배합은 소요의 강도를 얻도록 현장에서 시험시공을 통해 현장배합을 결정한다. 다만 Unlined Tunnel 공법에서는 소요강도 이외에 내구성 측면까지 고려하여 재료의 배합비율을 결정하여야 한다.

일반적으로 강섬유가 혼입된 습식 숏크리트의 경우 슬럼프치가 4~8 cm 일 때 표면에 잘 붙어 리바운드가 적은 것으로 알려졌으며 슬럼프치가 10 cm를 초과할 경우 숏크리트의 Sloughing 현상이 발생되고 리바운드량이 많아지게 된다. 이 현상을 막기 위해 급결재를 다량 혼입할 경우 장기강도 저하 현상이 발생할 우려가 크다. 강섬유가 혼입되면 무근 숏크리트 보다 펌핑능력(Pumpability)이 좋아져 슬럼프를 작게 할 수 있으므로 슬럼프는 혼화제 혼입 후 8 cm가 추천된다.

물·시멘트비는 45 % 이하로 한다. 보통, 숏크리트의 물·시멘트비는 40%~60%에서 용도에 맞게 결정된다. 중요한 사실은 물·시멘트비가 숏크리트의 품질, 특히 내구성과 관련한 중요한 결정요소라는 점이다. 물·시멘트비가 낮으면 숏크리트는 강도가 증진되고 내구성이 증대된다. 따라서 1차 지보재에 의한 구조적 안정성이 증시되는 Unlined Tunnel에서는 물·시멘트비가 45 % 이하인 것이 적절하다.

(2) 강도

숏크리트의 강도는 초기강도 뿐만 아니라 장기내구성을 위한 지표가 된다. Davik(1996)에 의하면 노르웨이 도로국(Norwegian Public Road Administration) 주관으로 1985년부터 1996까지 진행된 숏크리트 열화 정도 조사에서 숏크리트의 강도등급과 두께가 가장 중요한 내구성 지표로 나타났다. 실제로 초기강도가 낮은 터널에서 열화진행 속도와 정도가 컸고, 비록 강도가 큰 경우에도 소요 두께가 확보되지 않은 경우 열화가 상당히 진행된 것이 확인되었다. 실제로 숏크리트 열화의 직접적인 원인인 Leaching 현상은 숏크리트의 강성 및 수밀성과 직결되는데 초기강도가 큰 숏크리트는 강성이 클 뿐아니라 투수계수가 작아 숏크리트의 내구성을 크게 한다. 두께는 균열 발생 및 화학반응에 의한 열화에 대한 공통저항요소로서 작용하여 수cm 정도로 두께가 얇은 숏크리트인 경우 박리, 박락 현상이 많이 관측되었다.

표 4. 숏크리트 강도 Class(Norwegian Concrete Association, 1999), 단위 Mpa

압축강도 등급	C30	C35	C40	C45	C50	C55
최소압축강도(Cube, Cast Specimen)	30	35	40	45	50	55
최소압축강도(Cylindrical, In-Situ Coring)	19.2	22.4	25.6	28.8	32.0	35.2
휨인장강도	3.8	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0

노르웨이에서는 압축강도와 투수계수, 휨인장강도, 전단강도의 상관성에 근거하여 슛크리트 강도 등급을 표 4와 같이 구분한다. 이에 따라 터널의 형상, 용도, 위치, 환경조건에 따라 적절한 압축강도 등급을 적용한다.

노르웨이에서는 슛크리트에 가해지는 환경하중의 영향을 고려하도록 규정하고 있다. 노르웨이에서는 콘크리트 구조물이 노출되는 환경의 정도에 대하여 약간 열악한 경우(somewhat aggressive, NA), 좀더 열악한 경우(more aggressive, NMA), 아주 열악한 경우(very aggressive, MA), 극히 열악한 경우(highly aggressive, MMA)로 구분하여 환경등급(environmental class)을 설정하고 이에 따라 콘크리트의 배합비, 압축강도 등을 달리 제안한다(Norwegian Concrete Association, 1999). 교통터널의 경우에는 터널구조물이 처한 환경의 등급을 앞의 4개 등급중 '매우열악(very aggressive, MA)' 하다고 규정하고 있는데 이는 콘크리트 구조물이, 염수의 비산을 받는 경우, 유해가스나 염류 혹은 다른 화학물질에 노출되는 경우 및 습윤상태에서 동결융해를 받는 경우나 해당되는 강도 높은 환경등급이다. 이 보다 더한 극히 열악한 경우(MMA)는 염수의 침입을 직접 받는 해저터널로서 1990년대 이후에는 모두 C45 등급의 슛크리트가 시공되고 있다.

국내 산악터널의 경우 노르웨이 기준 MA 환경 등급을 적용하는 것이 타당하다고 판단되며 이에 따라 국내 Unlined Tunnel 공법을 위한 슛크리트는 노르웨이의 C40과 C45의 중간을 적용하여 일축압축강도는 350 kg/cm^2 , 휨인장강도는 45 kg/cm^2 을 제시한다.

(3) 두께

스�크리트의 설계두께는 표준지보패턴에 의한다. 단 Unlined Tunnel의 경우 전술한 바와 같이 슛크리트의 강도와 함께 두께가 가장 중요한 내구성 유지 요소이므로 지보재로 사용되는 슛크리트의 두께는 최소 5 cm 이상으로 하여야 한다. 대부분의 슛크리트 박리현상은 두께가 얇은 (1~3 cm) 부분에서 발생하고(Davik, 1996) 대부분의 강섬유 제품은 3 cm 이상이므로 슛크리트의 내구성 측면에서 볼 때 최소 5 cm 이상의 두께를 확보하는 것이 필요하다.

4.3.2 시공

(1) 슛크리트 타설 방법 및 타설기계

로봇 형식의 슛크리트 기계를 위해서 Compressor는 적어도 $12 \sim 16 \text{ m}^3/\text{min}$ 의 용량을 가지며, 타설압은 7 bar(70 kPa) 이상의 값을 유지할 수 있어야 한다. 이 이하의 타설압은 슛크리트의 Compaction을 나쁘게 한다. 다만 지나치게 고압으로 분사될 경우 물이 콘크리트로부터 분리되어 Bleeding 현상을 유발할 수 있다.

Alkali-Free 급결재를 사용하기 위해 급결재 Tank, 급결재 압송펌프, 압송관은 Stainless Steel 또는 플라스틱을 사용하여야 한다. Alkali-Free 급결재는 산성이 강하여 (pH 2~4) 물유리계 급결재(pH 11.5)를 사용할 때와는 사용 환경이 다르다. Alkali-Free 급결재가 저장되어 있거나 이동하는 통로는 부식이 방지된 재질을 사용하며 노즐은 사용 후 바로 세척하여야 한다.

(2) 슛크리트 타설 작업

타설면에 이물질이 붙어 있는 경우 이를 깨끗이 제거해야 한다. 타설면에 굴착과정에서 형성된 점토층이 있는 경우 슛크리트의 부착력을 현저히 떨어뜨리므로 이를 제거해 주어야 한다. 분사노즐을 통해서 물과 공기의 혼합유체를 분사해주는 방법이 효과적이며 Norwegian Concrete Association(1999)에 의하면 최소 공기압력은 7 bar, 최소 공기량은 $10 \text{ m}^3/\text{min}$, 최소 물의 양은 $300 \text{ liter}/\text{min}$ 이 추천된다.

스�크리트 1회 타설 두께는 10cm를 초과하지 않도록 한다. Alkali-Free 급결재를 사용하는 경우 1회에 약 50~70cm 두께까지 타설할 수도 있으나 타설물의 낙하가 크게 발생하여 작업원이나 장비에 위해를 가할 수 있으므로 1회 타설 두께를 제한한다.

(3) 숏크리트의 양생 작업

숏크리트는 양생시 적절한 수분이 계속 유지되어야 한다. 양생과정은 뿔어붙이기 작업 이후부터 바로 시작된다. 양생작업은 숏크리트의 품질 및 내구성에 큰 영향을 줄 수 있다. 숏크리트는 다음과 같은 이유로 인해 건조상태에 취약하고 이는 건조수축으로 나타날 수 있다.

- 숏크리트는 얇은 층으로 타설된다.
- 숏크리트는 결속력을 강화 시키기 위한 다량의 미립자들을 포함한다.
- 터널은 일반적으로 환기시스템을 작동하므로 공기 흐름이 빠르다.

건조수축이 발생하면 숏크리트의 수밀성이 떨어져 Leaching 현상이 발생할 수 있고 이로 인해 숏크리트의 내구성이 약화된다. Unlined Tunnel 공법에 있어 1차 지보재는 최종적 영구 지보재로서 내구성이 더욱 요구되는바 적절한 양생작업을 수행해야 한다. 숏크리트 타설면에 수분을 유지시켜 주는 방법에는 물을 뿔어주는 방법, 램브레인을 씌우는 방법, 화학적 첨가제를 넣어주는 방법이 있다. 물을 직접 살포해 주는 방법의 경우, 최소 4일 이상 젖은 상태를 유지하도록 해야 한다.

(4) 현장품질관리

숏크리트 시공 시는 표 5와 같이 현장 품질관리를 수행하여야 한다. 시험빈도의 결정은 프로젝트의 종류(붕괴 시의 결과), 공사의 난이도(품질등급 및 환경조건), 공사기간 등에 따라 결정한다. 시험 빈도의 단위가 숏크리트 타설 면적이 아닌 부피인 것은 숏크리트 품질은 매번의 배합 및 타설량에 따라 변화하므로 이에 기준하여 관리를 하는 것이 적합하기 때문이다.

표 5. 현장 품질관리 사항

종별	관리항목	관리내용 및 시험	시험 빈도			
			간략시험	일반시험	정밀시험	
일상 관리	배합	배합비 및 사용량 검사	매타설시	매타설시	매타설시	
	시공상태	숏크리트의 부착, 성장, 반발, 분진발생 관찰	매타설시	매타설시	매타설시	
	두께	핀 등에 의한 육안 검측	매타설시	매타설시	매타설시	
	변상	변형 및 균열 관찰	매타설시	매타설시	매타설시	
	숏크리트 온도	온도 검측	매타설시	매타설시	매타설시	
	반죽질기	슬럼프 시험 수행	매타설시	매타설시	매타설시	
정기 관리	두께	숏크리트 두께 검측	250 m ³	100 m ³	매타설시	
	급결재 온도	온도 검측	250 m ³	100 m ³	50 m ³	
	급결재 양	급결재 첨가량 검사	250 m ³	100 m ³	매타설시	
	Water/Binder Ratio	Water/Binder 측정	250 m ³	100 m ³	매타설시	
	강도	재령 1일 압축강도(빔 거푸집)	재령 1일 압축강도(빔 거푸집)	250 m ³	100 m ³	50 m ³
			재령 28일 압축강도(빔 거푸집)	250 m ³	100 m ³	50 m ³
			재령 28일 휨강도, 휨인성(빔 거푸집)	-	1000 m ³	500 m ³
			재령 28일 코아 압축강도	500 m ³	250 m ³	100 m ³
Bond	숏크리트/암반의 결합상태 확인	500 m ³	250 m ³	100 m ³		
밀도	숏크리트 밀도 측정	500 m ³	250 m ³	100 m ³		
강섬유 혼입량	강섬유 혼입량 측정	500 m ³	250 m ³	100 m ³		
특별 관리	강도	압축강도 및 휨강도	- 공사 착수 전 - 골재원(骨材原), 급결재 및 현장 배합 설계가 바뀔 때마다 - 그외 필요 시			
	반발율	반발율의 측정				

휨강도 및 휨인성 시험은 표준시험체에 의한 Beam Test에 의한다. Beam Test는 휨강도 측정을 위해 가장 일반적으로 적용되는 방법으로서 본 공법에서도 채택한다. 이외에 록볼트와 슛크리트 상호작용이라는 현장상황을 잘 모사하기 위한 Slab/Plate Test가 있으나 이 방법은 공시체의 제작 및 장비 정확도의 요구 조건이 까다로워 채택하지 않는다. 표준시험체 크기는 강섬유의 길이가 40mm 초과 시에는 150×150×550mm, 40mm 이하일 경우 100×100×400mm 이다. 이와 대비되는 시험체로서 EFNARC(125×75×550mm) 공시체가 있으나 값의 차이는 오차범위 이내인 것으로 밝혀졌다(박홍용, 2001).

부착성 시험은 망치 등으로 두드리는 방법을 이용하여 부착상태를 평가한다. 부착성 시험은 슛크리트 타설 후 7일에서 28일 사이에 진행 한다. 망치나 Crow bar 등을 이용하여 두드림으로서 타격을 감별하여 부착상태를 진단한다. 슛크리트와 암반면이 잘 결합되어 있지 못할 때 둔탁한 소리가 난다. 1차 시험에서 기준에 미달된 구간은 좌우 일정구간(5 m 정도)에서 2차 시험을 시도하여 부착성이 안 좋은 경우 재시공한다.

스�크리트 온도는 강도 및 부착성 등의 품질에 영향을 끼치므로 일반적으로 타설 온도는 15 °C 이상을 유지해야 한다. 슛크리트의 밀도는 품질에 대한 매우 신뢰성 있는 지표로써 낮은 밀도의 슛크리트는 높은 투수성을 갖게되므로 주의해야 한다.

4.4 록볼트

Sundholm 과 Forsén(1995)은 록볼트에 대한 부식시험을 통하여 시멘트 그라우트는 부식을 방지할 수 있는 보호층의 역할을 수행하나 균열의 존재시 그 특성이 상당히 감소한다고 보고하였으며, 이러한 견해는 Ground Anchor 技術協會(1992)의 견해와 일치한다. 또한 철근이 콘크리트로 완전히 피복되어 있을 경우라도 부식물질의 국부적 영향에 대한 영구적인 보호는 불가능한 것으로 보고하고 있다.

터널에 설치된 록볼트에 대한 장기적인 계측결과에 대한 자료가 많지 않으므로 설치된 록볼트가 장기적으로 몇 퍼센트 정도가 제 역할을 하고 있는지 판별하는 것은 어렵다. 그러나, 국내에서 주로 사용되는 전면접착식 록볼트가 부식에 대하여 매우 양호한 구조체 임에도 불구하고 국부적인 충전재의 균열과 설치불량, 유해한 주변환경의 영향으로 인하여 부식속도가 빨라질 가능성은 충분한 것으로 여겨진다. 따라서 록볼트의 내구성을 위하여서는 전면접착식 록볼트의 완전충진이 중요하며, 부식에 대비한 방식처리가 필요하다.

4.4.1 재료

(1) 재질

록볼트는 직경 25mm(SD35) 이상의 이형강봉을 사용한다. 록볼트의 부식이 우려되는 경우(동결융해, 염해, 황산염, 산성수, 중성화 등) 안전막을 형성하기 위해 에폭시 코팅 또는 아연도금 등 방식처리를 한다.

(2) 정착재료

록볼트의 정착재료는 시멘트 모르터를 사용한다. 록볼트의 내구성을 위하여 시멘트 모르터를 전면접착용 재료로 주입한다. 시멘트 모르터에 의한 전면접착형 록볼트는 앵커볼트형 록볼트 또는 레진 접착형 록볼트에 비해 훨씬 내구적인 지보재이다. 이때 시멘트 모르터가 가져야할 기본 물성은 다음과 같은 기준을 적용한다.

- 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용한다.
- 모르터의 일축압축강도는 360 kg/cm² 이상이어야 한다.
- 시멘트 모르터의 배합은 소요강도가 발현될 수 있도록 현장에서 결정하나 수밀성을 위하여 물/시멘트비가 40~50% 가 되도록 한다.

- 모르터용 모래의 최대 직경은 0.5 mm 이하로 입도분포가 좋아야 한다.

4.4.2 설계

록볼트의 길이 및 중·횡간격은 표준지보패턴에 의한다. 또한 시멘트 모르터 전면접착식 록볼트의 경우 내구성 지표는 밀실한 충전에 있으므로 터널 천단부 시공시 충전재의 흘러내림을 방지할 수 있는 장치를 적용하여 주입재가 완전충진 되도록 하여야 한다. 실제로 완전충진 여부는 록볼트 부식에 중요한 변수이며 Sundholm 과 Forsén(1995)의 실험이 이를 증명해 주고 있다.

4.4.3 시공

(1) 시공방법

천공홀 내의 이물질과 볼트에 부착된 이물질은 부착강도 저하의 원인이므로 청소를 해주어야 한다. 천공홀은 물 또는 압축공기를 이용하여 청소하며, 볼트는 기름이나 흙 등이 묻어 있지 않도록 깨끗이 닦아준다.

(2) 록볼트 품질관리

록볼트의 품질관리를 위한 시험은 육안관찰, 인발시험, 비파괴 시험 등으로 이루어 진다. 육안관찰과 인발시험은 기존 국내시험방법에 준하여 실시한다. 특별히 인발시험에 보조하여 비파괴 시험을 실시해서 충전여부를 확인한다.

인발시험은 록볼트의 충전 및 부착력 정도를 평가하는 직접 시험이다. 이 시험은 제한된 수의 록볼트에서만 시행할 수 있다. 따라서 이의 단점을 극복하고자 초음파를 이용한 비파괴 시험이 권장된다. 비파괴 시험은 이동 가능한 장비로 초음파를 록볼트 두부에 쏘아서, 돌아오는 반사파의 성질을 해석하여 록볼트의 길이 및 충전여부를 확인하는 시험이다(그림 5). 반사된 파의 크기로 충전 정도를 평가할 수 있으며 반사파의 반사시점으로부터 록볼트의 길이를 산정할 수 있다. 록볼트의 충전 여부는 내구성과 직결되는 사항이므로 본 공법에서는 많은 수의 록볼트를 이 방법에 의해서 조사하여 록볼트 시공 품질을 높인다. 이때 비파괴 조사는 인발시험과 상호 연동하여 시험 횟수를 정한다.

인발시험 결과 소요의 인발내력이 얻어지지 않은 경우 비파괴 시험 결과를 참조하여 록볼트를 추가 시공한다. 설계된 인발내력이 얻어지지 않은 경우 그 록볼트로 대표되는 구간에 비파괴 시험을 개개별로 시행하여 불량한 록볼트는 그 수만큼 추가 시공한다.

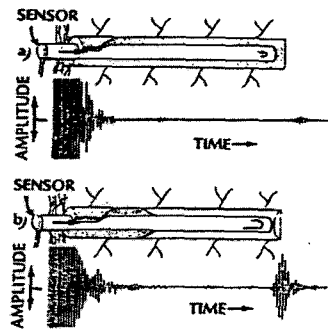
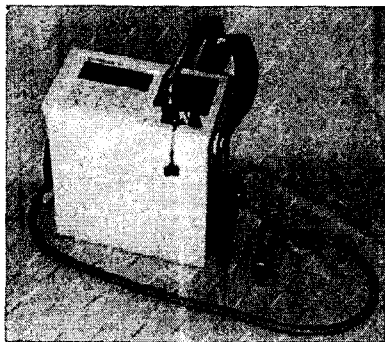


그림 5. 비파괴 시험기기(Boltometer®)

5. 결론

전 국토의 70% 이상이 산악인 우리나라의 도로 및 철도는 필연적으로 터널구간이 많이 발생하며, 고속·직선화로 인해 장대터널의 비율은 점증적으로 증가하는 추세이다. 국내 산악지역의 기반암은 견고한 결정질 암석이 주류를 이루고 있어 지반상태로 보아 Unlined Tunnel 공법을 적용하기에 좋은 것으로 국내외 전문가에게 평가받고 있다.

하지만 Unlined Tunnel 공법은 많은 장점에도 불구하고 지반을 대상으로 하는 터널공법의 보수적 특성상 적용이 쉽게 이루어지지 않고 있다. 이에 본 고에서는 외국에서 태동되어 발달되어온 Unlined Tunnel 공법을 지반조건 및 시공여건이 상이한 국내에 적용하기 위한 방안을 제시하고자 외국의 시공 사례 및 시공기준과 국내 상황을 고려하여 Unlined Tunnel 공법 지보재의 설계/시공 기준을 제시하였다. 우선적으로 이 공법이 국내 시공사례가 없는 만큼 양호한 지반과 환경조건에서 굴착되는 터널에 적용되어 장기적으로 계측 자료 및 지보재의 강도 변화 등이 모니터링 되어야 할 것이고 시공시 발생하는 크고 작은 문제점과 해결책 등이 Feedback 되어야 할 것이다. 본 고에서 제시된 기준은 실제 국내 시공 사례를 통해 지속적으로 수정되어 나가야 할 것이다.

Unlined Tunnel 공법은 외국에서는 해수의 침입을 받는 해저터널 또는 Rock Burst 현상이 발생할 수 있는 대심도 터널에서도 적용되고 있는 공법이니 만큼, 국내에서도 터널 건설의 경제성과 시공성을 고려하여 신중하게 적용을 검토할 시기라고 생각한다.

참고문헌

1. 박홍용, 2001, 강섬유 보강 슛크리트 강도특성 시험연구보고서, 호남고속도로 광주시 우회도로 건설 공사 제 1공구 설계보고서 부록I
2. 윤지선, 김선명, 2002, Single Shell NATM의 설계(I), 터널기술 제4권 제1호 pp73~85.
3. 일본 SFRC 구조설계시공연구회, 1995, 강섬유보강 슛크리트 설계시공 매뉴얼
4. Ground Anchor 技術協會, 1992, 그라운드앵커공법, 구미서관, pp.169~191.
5. Davik, K. I, 1996, Durability of Sprayed Concrete in Subsea Road Tunnels, The Proceedings of the Second International Symposium on Sprayed Concrete.
6. Grimstad, E. and Barton, N., 1993, "Updating of Q-System for NMT". Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes, Oslo
7. Melbye, T. and Garshol, K. F., 1994, Sprayed Concrete for Rock Support, MBT International Underground Construction Group, Zurich, Switzerland
8. Naoki Tomisawa, 2002, List of permanent Shotcrete Lining, ITA Working Group 12(Shotcrete Use) Internet Site
9. Norwegian Concrete Association, 1999, Sprayed Concrete for Rock Support
10. Norwegian Public Road Administration, 1990, Road Tunnels
11. Sundholm, S. and Forsén, O., 1995, Corrosion of Rock Bolts Cement Mortar as Corrosion Protection for Rock Bolts, Resesrch Report; TKK-KAL-A-15, Helsinki Univ. of Tech., Finland