

Annual Technical Report(Part 2)

**액상 및 분말 혼합형 박층 폴리머 라이너
재료 및 시공기술 개발 사례**

2016

**터널 지하공간학회
굴착 및 지보기술위원회**

■ 목 차 ■

1. 서론.....	1
2. TSL 재료의 성능평가를 위한 실험방법.....	1
2.1 TSL 실험조건 및 준비.....	1
2.2 TSL의 직접인장 시험방법.....	1
2.3 TSL의 부착강도 시험방법.....	2
2.4 EFNARC(2008)의 TSL지지력 성능평가 방법.....	2
2.5 TSL 완성품의 성능평가를 위한 시험타설 방법 및 예비타설.....	3
3. TSL 최종 완성품 제작 및 성능평가.....	5
3.1 TSL 최종 완성품의 제작조건.....	5
3.2 TSL 완성품의 직접인장시험 성능평가 결과.....	5
3.3 TSL 완성품의 부착강도 성능평가 결과.....	6
3.4 EFNARC(2008)의 TSL 지지력 성능평가.....	6
3.5 TSL 완성품의 시험 타설을 통한 시공성 검토.....	8
4. 결론	10
참고문헌.....	10

■ 표 목 차 ■

<표 1> TSL 타설장비의 주요 제원.....	4
<표 2> TSL 완성품 시험체의 제작 조건.....	5

■ 그림 목 차 ■

[그림 1] ASTM D638에서 지정된 인장강도 시험편의 규격.....	2
[그림 2] EFNARC(2008)에서의 TSL지지 성능 평가 시험법	3
[그림 3] TSL 완성품의 성능평가에 사용된 타설장비 및 스프레이건	3
[그림 4] TSL 완성품의 직접인장강도 시험결과	6
[그림 5] TSL 완성품의 부착강도 시험결과	6
[그림 6] TSL의 선형내하력(Linear Load Capacity, LLC) 시험결과.....	7
[그림 7] TSL 완성품의 선형내하력 및 안전율 성능평가 결과.....	8
[그림 8] TSL 타설장비용 부속 액세서리.....	8
[그림 9] TSL 두께 측정 도구.....	9
[그림 10] TSL 타설 시스템의 구성 및 타설 순서.....	9

1. 서론

2000년대 들어서 광산터널에서 지보와 차수의 복합기능을 발휘할 수 있는 박층 폴리머 라이너(Thin Spray-on Liner, 이하 TSL)가 개발 및 적용이 되고 있다. TSL은 타설 직후에 뛰어난 지보성능의 발현이 가능하고 차수·방수 성능이 우수한 신개념의 지보재이다. 현재 광산에서 적용되고 있는 일반적인 타설 두께는 3~5mm이며 최대 10mm미만으로서 슛크리트와 비교할 때 두께가 매우 얇기 때문에 경제성과 시공성면에서 우수하다. 또한 조기 안정성 확보가 가능하여 슛크리트와 철망을 대체하면서 낙반을 방지할 수 있으며, 폴리머 기반 재료 특성상 방수성능이 우수하여 지하수 유입을 방지하고 암반을 보강할 수 있는 장점과 탄성특성 및 부착력이 매우 우수하여 시간에 따른 장기 열화가 거의 없다는 장점을 갖고 있다. 아직까지 지보 목적으로 TSL을 터널과 같은 토목구조물에 적용한 사례는 없으며 TSL에 의한 암반 지보 설계과정과 방법이 구체적으로 제시되어 있지 않는 상황이다. 따라서 토목구조물 특히 주방식 공법(Underground Room and Pillar Method, 이하 URPM)에 적합한 방수기능의 새로운 지보재로서 TSL 재료, 설계 및 성능평가 방법의 개발이 필요하다 (한국건설기술연구원, 2015; ㈜실크로드티앤디, 2016).

2. TSL 재료의 성능평가를 위한 실험방법

TSL의 다양한 지보 거동 및 파괴 메커니즘을 고려하기 위해 재령 7일, 14일 및 28일에 직접인장시험, 부착강도시험, EFNARC(2008)의 지지 성능평가 시험을 수행하였다.

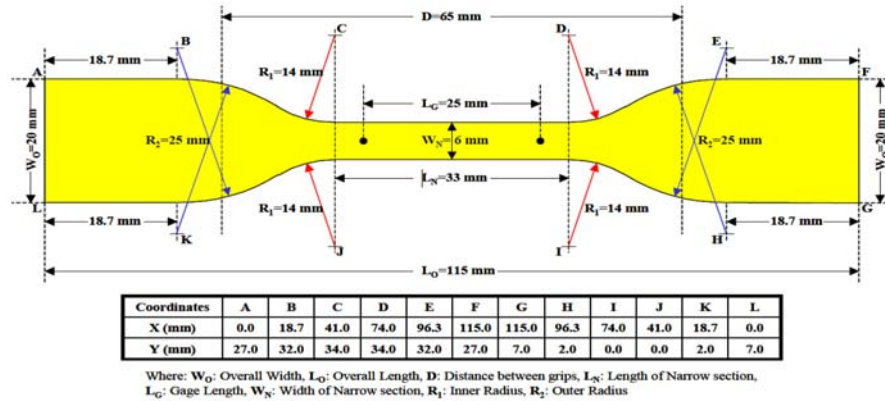
2.1 TSL 실험조건 및 준비

본 연구는 액상 폴리머와 분체시료를 2:1의 비율(wt%)로 고정하여 배합하였다. 실험은 대기조건에서 시행하였으며, 양생 조건은 항온항습챔버에서 23 ± 2 °C 습도 50 ± 5 %로 양생하였다. 또한 재료의 혼합은 핸드믹서로 1분 30초간 1단으로 믹싱한 후 1일 양생 후에 커터 및 커터날을 이용하여 시험편을 제작 하였다.

2.2 TSL의 직접인장시험 방법

EFNARC(2008)에서는 TSL의 인장강도를 측정하기 위해서 ASTM D638 또는 DIN 53504 Type S2에서 규정하고 있는 [그림 1]과 같은 시험편을 제작하여 시험방법을 따르도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 ASTM D638의 시험방법을 준용하였으며

EFNARC(2008)의 지지 성능평가 시험방법과 동일하게 TSL의 두께를 3mm로 적용하였다. 인장시험은 만능재료시험기를 사용하여 재하속도 50 mm/min로 실시되었다.



[그림 1] ASTM D638에서 지정된 인장강도 시험편의 규격

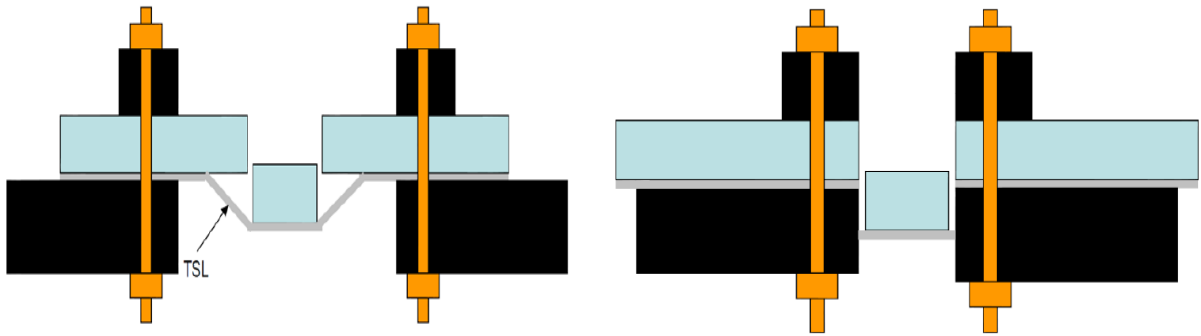
2.3 TSL의 부착강도 시험방법

TSL의 중요한 특성 중의 하나인 부착강도를 측정하기 위해서 EFNARC(1996)에서 숏크리트에 대해 제시하고 있는 인발시험 방법을 적용하였다. 모르타르 블록을 충분히 양생한 후, 콘크리트 블록의 상단에 배합된 TSL을 두께 3mm로 도포하여 양생하였다. 시험 시에는 TSL 표면에 5×5cm의 정사각형 면적의 격자를 설정하고 부착강도 측정기로 인발시험용 브래킷과 TSL표면을 에폭시로 접합한 후 인장력을 재하 하여 최대 인장력을 부착강도로 산출하였다. 인발 시험 시의 하중 재하속도는 1~3MPa/min의 범위로 실시하였다.

2.4 EFNARC(2008)의 TSL지지력 성능평가 방법

EFNARC(2008)에서는 구조체 또는 비구조체로서 사용할 수 있는 TSL에 대한 규정과 지침을 제시하고 있다. 또한 EFNARC(2008)에서는 지보재로서의 성능을 평가하기 위한 시험방법으로 Linear Block Support Test, 이하 LBS 시험과 Gap Shear Load Test, 이하 GSL 시험을 제시하고 있다[그림 2]. LBS시험은 록볼트 설치간격 사이에서의 낙반 형상을 기하학적으로 단순화하여 TSL의 지지 성능을 추정하기 위한 방법으로서 암반 블록에 하중이 가해져서 궁극적으로 TSL과 암반 블록 사이에서 부착파괴가 발생하는 현상을 모사한 것이다. 반면 GSL시험은 TSL과 암반 블록사이에서 부착 파괴가 발생하지 않고 순수하게 전단응력에 의해서 파괴가 발생하는 조건의 고유지지 성능을 평가하기 위한

것이다. 이상과 같이 EFNARC(2008)에서 제시하고 있는 지지 성능평가 시험을 위한 시험체 제작을 위하여 한번에 3개의 시험체를 제작하고 TSL의 피복 두께를 3mm로 조절할 수 있도록 아크릴 형틀을 제작 및 사용하였다.



(a) TSL의 LBS 시험

(b) TSL의 GSL 시험

[그림 2] EFNARC(2008)에서의 TSL지지 성능 평가 시험법>

2.5 TSL 완성품의 성능평가를 위한 시험타설 방법 및 예비타설

TSL 완성품과 타설 장비와의 적합성, 시공성 등을 확인하기 위해 Mock-up test를 위한 간이 실험공간을 제작하였으며, Mock-up test room 벽면 나무 합판에 타설함으로써 외관으로 확인할 수 있는 타설 면의 형태와 두께 등을 체크하였다. [그림 3]과 같이 해외에서 사용되고 있는 TSL 타설 장비를 섭외하여 스프레이건 노즐 형태와 사이즈, 콤프레샤 공기압 등 다양한 조건에서 완성품과의 적합성 테스트를 실시하였다. 액상 및 분말 재료의 혼합 시 균질성 및 시공성을 확보하기 위해 고성능 믹서기를 사용하여 시험 타설을 진행하였다.



(a) TSL 타설 장비



(b) 스프레이건

[그림 3] TSL 완성품의 성능평가에 사용된 타설장비 및 스프레이건

앞서 기술한 바와 같이 본 연구에서 검토 및 적용을 수행하였던 타설장비는 직경이 16 mm인 노즐 팁을 가지며 [그림 3] (b), <표 1>과 같은 제원을 가진다.

장비 중량 및 호퍼 체적은 각각 85 kg 및 70 L로서, 역시 이동성과 시공성이 양호한 조건이다. 또한 전기 대신에 압축공기로 구동을 시키는 형식이기 때문에 별도의 전원을 필요로 하지 않고 컴프레서(compressor)에 연결하여 사용이 가능하다. 또한 호퍼에 믹서(mixer)가 연결되어 있기 때문에 별도의 믹싱 장비가 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다.

그러나 역시 TSL 완성품의 예비 배합 재료에 의해 시험타설을 수행한 결과, 최소 6 bar에서 15 m³/min의 토출량이 가능한 컴프레서가 필요한 것으로 나타났으며 2 inch 이상의 에어 호스(hose)가 필요하였다. 또한 타설 시에 공기압의 조절이 매우 중요함을 알 수 있었다. 따라서 이상과 같은 문제점을 개선하기 위하여 일정한 토출이 가능하도록 액츄에이터(actuator)를 연결하여 적정한 토출압의 제어를 용이하게 하였으며, 노즐 팁의 관경을 16, 13 및 10 mm로 변경하면서 균일한 두께의 타설이 가능한 적정 관경의 노즐 팁을 도출하였다. 호퍼에 연결되어 있는 믹서가 연결되어 있기는 하지만 믹서의 믹싱 효율이 좋지 못하여 연속 타설이 어려운 단점이 나타나 별도의 믹서기를 준비하였다. 이상과 같은 예비 시험타설 결과들을 바탕으로 TSL 완성품 재료에 적합한 노즐 팁의 관경은 10 mm이며 액츄에이터의 토출압은 3.0~3.5 bar로 나타났다.

<표 1> TSL 타설장비의 주요 제원

TSL 타설장비 주요 제원	
Output pressure	80 bar
Minimum input pressure	4~8 bar
Mixing speeds	30~160 rpm
Mixing capacity	70 L
Weight	approximately 85 kg
Length × Width × Height	1555 × 750 × 1300 mm

이상과 같이 개조한 TSL 타설장비에 의해 별도로 구축한 mock-up 시험장에서 시험타설을 진행한 결과, 핀홀 등의 시공 불량에 관찰되지 않고 균질한 TSL의 타설이 가능하였다.

3. TSL 최종 완성품 제작 및 성능평가

3.1 TSL 최종 완성품의 제작조건

TSL 최종 완성품으로 <표 2>와 같이 직접인장시험, 부착강도시험, TSL 지지 성능평가 시험의 총 4가지 시험을 진행하였고 각각의 시험의 재령은 7, 14, 28일로 재령별 3개의 시험체를 제작하였다.

<표 2> TSL 완성품 시험체의 제작 조건

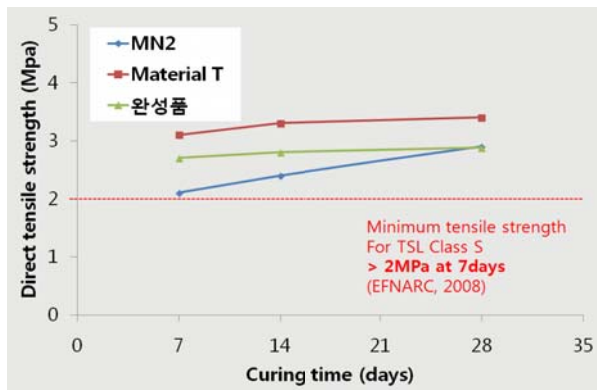
시험 종류		재령조건	시험체 개수	시험체 총 개수
직접인장시험		7일, 14일, 28일	재령별 3개씩	$3 \times 3 = 9$ 개
부착강도시험(인발시험)			재령별 3개씩	$3 \times 3 = 9$ 개
TSL	GSL 시험		재령별 3개씩	$3 \times 3 = 9$ 개
지지성능평가	LBS 시험		재령별 3개씩	$3 \times 3 = 9$ 개
총 개수				재료별 36개

TSL 완성품은 시작용 MN2의 배합을 바탕으로 초기재령에서의 낮은 인장강도 발현을 개선하기 위한 최적 배합을 도출하였고, Mock-up test room에서 시험 타설한 결과 제품 혼합 및 타설에 소요되는 시간이 발생함에 따라 지연제의 첨가량을 증가시켰다.

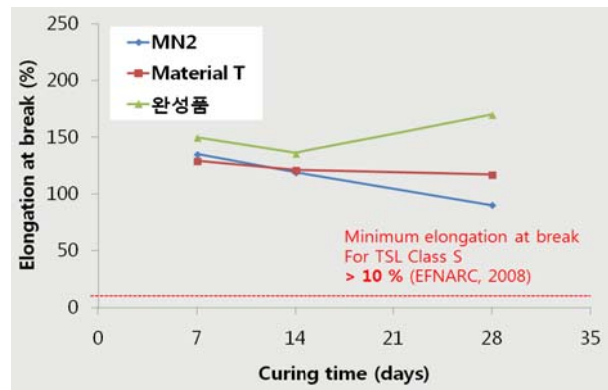
타설 장비와의 적합성 및 시공성을 고려하여 핀홀 및 흘러내림 현상을 방지하기 위해 증점제를 첨가하였고 재료의 공극을 채워주는 소포제를 첨가하였다.

3.2 TSL 완성품의 직접인장시험 성능평가 결과

이상과 같이 제작된 TSL 완성품은 재령 7일 인장강도 2MPa를 초과하여 EFNARC(2008)에서 규정한 Class S의 기준을 충족하였지만, 제품 T에 비해 약간 열위에 있음을 알 수 있었다. 하지만 시작용 MN2과 비교하여 초기 재령에서의 인장강도가 크게 개선되었고, MN2와 제품 T에 비해 파괴 시 신장율이 증가됨을 알 수 있었다. [그림 4]



(a) 직접 인장강도

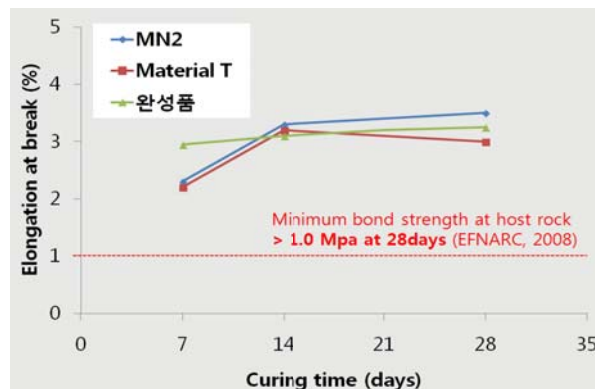


(b) 파괴 시 신장율

[그림 4] TSL 완성품의 직접인장강도 시험결과

3.3 TSL 완성품의 부착강도 성능평가 결과

완성품의 부착강도는 EFNARC(2008) 기준인 1MPa 이상 기준을 재령 7일에 상회 하였으며, 특히 초기 재령에서 MN2와 제품 T보다 높은 부착강도를 발현하였다.[그림 5]



[그림 5] TSL 완성품의 부착강도 시험결과

3.4 EFNARC(2008)의 TSL 지지력 성능평가

선형블록지지시험(Linear Block Support test, LBS)은 록볼트 설치 간격 사이에서의 낙반 형상을 기하학적으로 단순화하여 TSL의 지지력을 추정하기 위한 방법으로서, 암반 블록에 하중이 가해져서 궁극적으로 TSL과 암반 블록사이에서 부착파괴가 발생하는 현상을 모사한 시험으로 제품 T보다 높은 내하력을 발현하였다 [그림 6] (a).

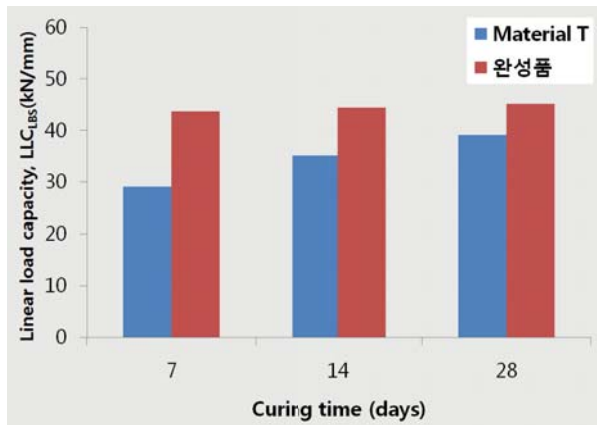
비중첩전단시험(Gap Shear Load test, GSL)은 TSL과 암반사이에서 부착파괴가 발생하지 않고 순수하게 전단응력에 의해 파괴가 발생하는 조건에서 TSL의 고유 지지력을

평가하기 위한 시험으로 제품 T에 비해 다소 낮은 내하력을 발현하였다 [그림 6] (b).

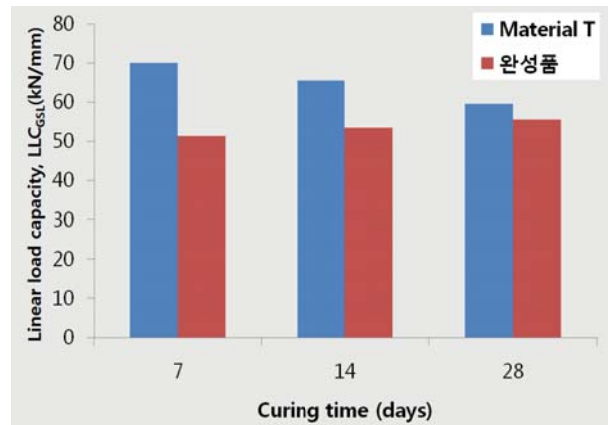
EFNARC(2008)에서는 LBS, GSL의 2가지 실험결과로부터 TSL의 안전율(Safety Factor)을 산정하는 방법을 제시하고 있다. 첫째로 TSL의 LLC는 각 시험에서 얻어진 최대하중과 터널에서 발생할 수 있는 최대 암반블록의 주변길이(perimeter, e)로, 계산되며 TSL의 잠재적인 내하력을 평가하는데 사용된다.

$$S.F. = \frac{LLC_{GSL}}{LLC_{LBS}} \quad (1)$$

시험 시에 부착파괴가 발생하면 TSL의 두께는 충분한 것으로 보기 때문에, TSL의 두께를 추가적으로 증가시켜도 최대 하중의 증가효과는 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 GSL시험에서 얻어지는 순수전단파괴 조건의 LLC와 LBS시험에서 얻어지는 부착파괴가 발생하는 조건의 LLC의 비율은 시험에 적용된 두께에 대한 안전율로 정의할 수 있다.



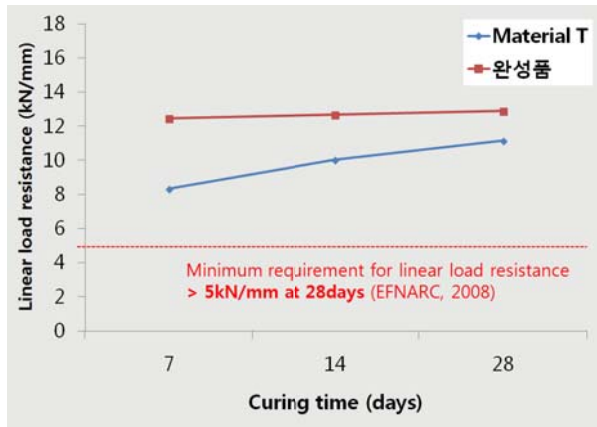
(a) 선형블록지지시험 (LBS 시험) 결과



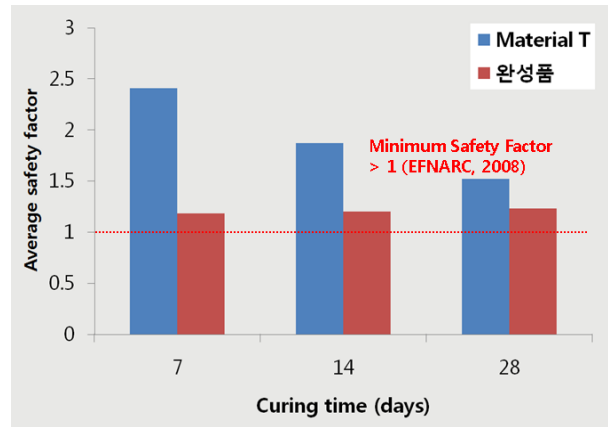
(b) 비중첩전단시험 (GSL 시험) 결과

[그림 6] TSL의 선형내하력(Linear Load Capacity, LLC) 시험결과

식 (1)의 안전율은 GSL시험의 내하력이 LBS보다 상대적으로 커야 안전율 측면에서 유리한데 각 채령에서 GSL이 제품 T에 비해 상대적으로 낮은 내하력을 발현하여 안전율에서는 상대적인 열위에 있으나 EFNARC(2008) 기준 “안전율 > 1”은 만족하며 선형 내하력 성능평가에서는 제품 T에 비해 상대적으로 높은 내하력을 발현함을 알 수 있다 [그림 7].



(a) 선형 내하력 성능 평가



(b) 안전율 성능 평가

[그림 7] TSL 완성품의 선형내하력 및 안전율 성능평가 결과

3.5 TSL 완성품의 시험 타설을 통한 시공성 검토

TSL 완성품의 시험 타설을 Mock-up test room에서 진행하였고 타설 장비와 TSL 완성품 재료의 적합성을 향상시키고 시공성을 높이기 위해 [그림 8] (a)와 같이 다양한 사이즈 및 길이의 스프레이건 노즐을 제작하여 균일한 두께의 타설이 가능한 노즐 환경(10mm) 및 길이(25cm)를 도출하였고 [그림 8] (b)와 같이 재료의 일정한 토출량이 가능하도록 장비 펌프에 공기압 조절용 액추에이터를 장착하였다.



(a) 스프레이건 노즐



(b) 액추에이터

[그림 8] TSL 타설장비용 부속 액세서리

TSL 타설장비의 호퍼에 별도의 믹서가 장착되어 있지만 mixing 효율이 낮아 고점도 재료인 TSL 완성품에 적합하지 않기 때문에 [그림 10] (a)와 같이 고성능 믹서기로 분말 및 액상 재료를 약 90초 동안 혼합한 후에 mixing된 재료를 호퍼에 투입하여 TSL 완성품의 시험 타설을 진행하였다.

TSL 완성품의 타설 중에 [그림 9] (a)의 습식 도막 두께 측정기로 타설 두께를 측정하여 3~5mm의 적정 시공 두께를 타설하였고 건조된 후 [그림 9] (b)의 건식 도막 두께 측정기로 TSL 완성품의 건조된 두께를 측정하였다.



(a) 습식 도막 두께측정



(b) 건식 도막 두께측정

[그림 9] TSL 두께 측정 도구

TSL 완성품 타설 장비의 보완과 첨가물을 통한 재료적 개선으로 인하여 [그림 10] (d)와 같이 타설 면에 핀홀, 흘러내림 등 결함 발생을 방지 할 수 있었고 일정한 재료 토출량으로 균질하게 타설함으로써 3~5 mm의 적정 시공 두께를 타설 할 수 있었다.



(a) 재료 믹싱



(b) 믹싱 재료의 호퍼 투입



(c) 시험타설



(d) 타설면

[그림 10] TSL 타설 시스템의 구성 및 타설 순서

4. 결론

본 연구에서 완성한 TSL 완성품은 지보재로 사용될 수 있는 EFNARC(2008)의 “Class S” TSL 성능기준을 만족하며, 시판중인 외국산 제품 T에 비해 우위인 평가항목도 있고, 상대적으로 열위인 항목도 존재한다. 예를 들어, 인장강도는 제품 T와 비교하여 상대적으로 낮지만 시작품 MN2 배합보다 초기재령에서 높은 인장강도를 발현하였고, 파괴 시 신장률 부분에서는 MN2나 제품 T보다도 높은 신장률을 발현 하였다. 부착강도는 초기재령에서 높은 부착력을 발현하였고 선형 내하력 또한 제품 T보다 높은 내하력을 발현하였다. 하지만 안전율에서는 제품 T에 비해 낮은 안전율을 보이고 있지만, EFNARC(2008) 기준 “안전율 > 1”은 만족하며 이는 완성품의 GSL 내하력 보다 LBS 내하력이 월등히 높은 것에서 기인하였다.

본 연구는 해외 제품분석 및 시작품의 성능 평가를 바탕으로 제품을 개선하였으며 타설 장비와의 적합성, 시공성 등을 고려한 완성품을 제작 하였다.

참고문헌

- 한국건설기술연구원(2015), 도심지 공간확장형 지하굴착 핵심 솔루션 개발 (III), 2015년도 주요사업 단계보고서(기관고유임무형), KICT-2015-148-1, 2015년 12월.
- ㈜실크로드티앤디(2016), 액상 및 분말 혼합형 박층 폴리머 라이너 재료의 완성품 제작, 한국건설기술연구원 일반용역 2016-020, 2016년 10월.
- Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunnelling, EFNARC, 2008
- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D 638 - 10
- Pull-off Adhesion strength of coatings on Concrete Using Portable Pull-off Adhesion Testers, ASTM D7234-12
- The application of GRP and Thin Spray Liner support products in a typical block cave mining method to enhance safety and productivity, PH Ferreira and A Piroddi, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 6th Southern African Base Metal conference, 2011
- Thin Spray-on Liners for Underground Rock Support, D.D.Tannant, 2001, International Mining Congress and Exhibition of Turkey
- The performance of mesh, shotcrete and membranes of surface ground support, E.C. Morton and A,G,Thompson and E.Villaescusa, 2009, Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium

Shotcrete and other surface support liners, L.Lacerda, 2004, SME Annual Meeting