터널 지보재로서의 적용성 검토를 위한 박층 뿔칠 라이너의 부착성능과 지보성능의 평가

한진태¹ · 이규필² · 박영택² · 최순욱³ · 황귀성⁴ · 최명식⁵ · 장수호^{6*}

¹비회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 GEO-인프라연구실 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 GEO-인프라연구실 수석연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 GEO-인프라연구실 전임연구원

⁴비회원, (주)실크로드티앤디 주임연구원

⁵정회원, (주)실크로드티앤디 상무이사

⁶정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 GEO-인프라연구실 연구위원

An experimental study on bonding and bearing capacities of thin spray-on liner to evaluate its applicability as a tunnel support member

Jin-Tae Han¹, Gyu-Phil Lee², Young-Taek Park², Soon-Wook Choi³, Gwi-Sung Hwang⁴, Myung-Sik Choi⁵,
Soo-Ho Chang^{6*}

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

²Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Specialist

⁴SILKROAD T&D, Senior Research Engineer

⁵SILKROAD T&D, Executive Engineer

⁶Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

ABSTRACT: The use of Thin Spray-on Liner (TSL) as an alternative to shotcrete has drastically increased since 1990s when it was first developed and introduced to mines. In this study, tensile strength test, bond strength test, compression test with specimens coated by TSL, and two kinds of bending tests proposed by EFNARC (2008) were performed with two kinds of TSLs with different material compositions in order to evaluate their support capacities. As a result, both TSLs were shown to be satisfactory for the minimum performance requirements for a structural rock support suggested by EFNARC (2008) and tensile strength of a TSL was shown to increase as its content of polymer was higher. In contrast, its bond strength was shown to increase proportional to the content of a cementitious component especially at the early age.

Keywords: Thin spray-on liner, Polymer, Bearing capacity, Bonding, Tensile strength

초 록: 박층 뿔칠 라이너(Thin Spray-on Liner, TSL)는 1990년대에 개발되어 광산에 처음 적용된 이후로 슛크리트의 대체 재료로서의 활용이 증가하고 있다. 본 연구에서는 폴리머 함량이 다른 두 가지 TSL 재료에 대하여 인장강도시험, 부착강도시험, TSL 코팅 시험편에 대한 압축강도시험 및 EFNARC(2008)에서 제안한 TSL의 지지 성능평가 시험을 수행하여 지보재로서 사용하기 위한 TSL의 역학적 성능을 평가하였다. 실험결과, 본 연구에서 사용된 두 가지 재료 모두 지보재로서의 최소 성능 규정은 만족하는 것으로 나타났으며, 특히, 폴리머 성분이 높을수록 인장강도가 증가하는 반면, 시멘트계 성분이 높을수록 상대적으로 초기 재령에서 부착강도가 크게 나타남을 실험적으로 확인하였다.

주요어: 박층 라이너, 폴리머, 지지 성능, 부착력, 인장강도

***Corresponding author:** Soo-Ho Chang

E-mail: sooho@kict.re.kr

Received October 23, 2013; **Revised** October 29, 2013;

Accepted November 4, 2013

Copyright ©2013, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

전 세계적으로 숏크리트는 터널, 지하공간 및 사면에서 암반을 지지하기 위한 주지보재로서 활용되고 있다. 1910년대에 건식 숏크리트가 최초로 개발된 이래로, 1990년대 들어서 친환경적이고 성능이 우수한 알칼리프리계 급결제와 높은 감수효과를 나타내는 고성능 감수제가 개발되는 등 숏크리트의 성능은 지속적으로 향상되고 있다(Clements, 2002). 그러나 불량한 지반조건에서는 타설량이 증가하며, 10% 내외의 리바운드, 다량의 분진 및 낮은 부착강도 등으로 인해 숏크리트를 대체할 수 있는 새로운 지보재의 개발이 요구되고 있다. 이러한 이유로 최근 들어 박층 뿔칠 라이너(Thin Spray-on Liner, 이하 TSL)가 지보 및 차수의 복합 기능을 발휘할 수 있는 지보재로서 주목받고 있는데, 특히 TSL은 3~5 mm의 얇은 두께로 암반면에 뿔어 붙여지는 폴리머(polymer) 기반의 유기화합물 재료로 구성되어 비교적 양호한 암반 조건에서 숏크리트와 철망을 대체할 수 있는 신개념의 지보재이다(Roberts, 2001). 1980년대 후반에 캐나다의 Queen's University에서 최초로 TSL에 대한 연구를 수행한 이후로, 2004년 기준으로 전 세계적으로 50개 이상의 광산에서 활용되고 있는 실정이다(Povin et al., 2004).

TSL은 신속한 타설이 가능하고 높은 초기 안정성으로 인해 숏크리트와 철망을 대체하면서 낙반을 방지할 수 있으며, 방수성능과 주입성능이 우수하여 지하수 유입을 방지하고 암반을 보강할 수 있는 효과를 가지고 있다. 특히, 탄성 특성과 부착력이 매우 우수하며 시간에 따른 장기 열화가 거의 없다는 장점을 가지고 있다(Lau et al., 2008; Tannant, 2001).

또한 TSL은 재료의 반응성에 따라 반응성 라이너(reactive liner)와 비반응성 라이너(non-reactive liner)로 구분할 수 있다. 반응성 라이너는 타설 후 10분 이내에 초기 반응과 응결이 발생하는 것을 특징으로 하며, 상온에서 1시간 이내에 극한 인장강도의 최소

75% 발현하는 것으로 정의된다. 반면, 비반응성 라이너는 숏크리트나 폴리머/시멘트계 혼합물 등을 의미하는 것으로서, 양생시간이 더 길고 시간경과에 따라 감수현상과 강도 증진이 수반된다. 하지만 일반적으로 반응성 라이너와 비교할 때 상대적으로 가격이 저렴하다는 장점이 있다(Povin et al., 2004).

위와 같이 TSL은 다양한 장점이 있으나, 아직까지 TSL에 의한 암반 지보설계 과정과 방법이 확립되어 있지 않으며, 특히 숏크리트와 같이 주로 힘압축응력을 받는 아치 구조체로 설계하는 일반적인 방법을 두께가 얇은 TSL에 적용하기가 어렵다(Povin et al., 2004). 또한, 현재 전 세계적으로 약 20여개의 TSL 재료가 개발 및 상용화되어 있으나, TSL의 역학적 특성에 대한 평가 자료는 극히 부족한 실정이다.

따라서 TSL을 터널과 같은 토목구조물의 지보재로 적용하기 위해서는 기존의 TSL 재료에 대한 역학적 특성 평가가 선행되어야 한다. TSL의 역학적 특성을 평가하기 위한 다양한 시험방법들이 제시 및 시도되고 있지만, 가장 대표적으로 EFNARC (2008)에서는 TSL의 성능을 평가하기 위하여 두 가지 종류의 지지 성능평가 시험법을 제시하고 있으며 터널과 광산에서 사용하기 위한 TSL 재료의 역학적 최소 성능들을 규정하고 있다. 이외에도 코어 사이의 부착강도, TSL의 편칭(punching) 시험, TSL로 코팅된 암석 코어의 압축시험, 인발시험 등이 수행되고 있으나 상세한 시험결과들이 좀처럼 공개되고 있지 않다(Chang et al., 2013).

이에 본 연구에서는 TSL의 성능을 크게 좌우하는 폴리머 함량이 상이한 두 가지 종류의 비반응성 라이너 재료에 대하여 직접인장시험, 인발시험, TSL 코팅 시험편의 압축시험 및 EFNARC (2008)에서 제안한 TSL의 지지 성능평가 시험과 같은 다양한 실험실 시험을 수행하여 재령에 따른 TSL 재료들의 역학적 특성들과 이에 따른 TSL의 지보 성능을 실험적으로 평가하고자 하였다.

Table 1. Main characteristics of two TSL materials used in this study(Chang et al., 2013)

Material name	Application	Composition	Color	Polymer content (estimated)	Note
T	Support member	Liquid/Power	Beige	< 30%	Pot life: 30 minutes
M	Sprayable membrane	Powder (mixed with water)	light grey	approx. 30%	Curing time: 4-6 hours

2. TSL의 성능 평가를 위한 시험방법

Chang et al. (2013)은 초기재령에서의 TSL 특성 평가를 위하여 재령 7일에 직접인장시험, 부착강도시험 및 EFNARC (2008)의 지지 성능평가 시험을 수행하였다. 본 연구는 상기 연구의 후속 연구이므로 상기 논문에서 소개하였던 시험방법들에 대해서는 간략히 설명하고자 하며, 추가적으로 실시한 TSL 코팅시험 편의 압축시험에 대해서는 자세히 소개하고자 한다. 이때 성능평가 대상도 Chang et al. (2013)의 연구에서 검토하였던 두 가지 TSL 재료를 대상으로 하였으며 각 재료의 주요 특성은 다음의 Table 1과 같다.

2.1 TSL의 직접인장 시험방법

EFNARC (2008)에서는 TSL의 인장강도를 측정하

기 위해서 ASTM D638 또는 DIN 53504 Type S2에서 규정하고 있는 시험방법을 따르도록 규정하고 있다 (Fig. 1). 본 연구에서는 ASTM D638의 시험방법을 준용하였으며, 이때 앞선 EFNARC (2008)의 지지 성능평가 시험방법과 동일하게 TSL의 두께를 3 mm로 적용하였다. 본 연구에서는 두께가 3 mm인 ASTM D638의 Type 1 시험체를 제작할 수 있도록 탈부착이 가능한 아크릴 형틀을 활용하여 시험체를 제작하여 시험에 사용하였다(Chang 등, 2013).

2.2 TSL의 부착강도 시험방법

TSL의 중요한 특성 중의 하나인 부착강도를 측정하기 위해서 EFNARC (1996)에서 슛크리트에 대해 제시하고 있는 인발시험 방법을 적용하였다. 우선 50×50×7 cm 크기의 모르타르(설계강도 40 MPa) 블

Coordinates	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
X (mm)	0.0	18.7	41.0	74.0	96.3	115.0	115.0	96.3	74.0	41.0	18.7	0.0
Y (mm)	27.0	32.0	34.0	34.0	32.0	27.0	7.0	2.0	0.0	0.0	2.0	7.0

Where: W_0 : Overall Width, L_0 : Overall Length, D : Distance between grips, L_N : Length of Narrow section, L_G : Gauge Length, W_N : Width of Narrow section, R_1 : Inner Radius, R_2 : Outer Radius

Fig. 1. Dimensions of a tensile strength test specimen specified by ASTM D638 (Type 1)

(a) Brackets glued onto TSL surface

(b) Pull-out test

Fig. 2. Specimen preparation and pull-out test to evaluate TSL bond strength (Chang et. al., 2013)

목을 충분히 양생한 후, 콘크리트 블록의 상단에 배합된 TSL을 두께 3 mm로 도포하여 양생하였다. 시험 시에는 TSL 표면에 4×4 cm의 정사각형 면적의 격자를 설정하고 인발시험용 브래킷(bracket)과 TSL 표면을 에폭시로 접합한 후 인장력을 재하여 최대 인장력을 부착강도로 산출하였다(Fig. 2). 인발시험 시의 하중 재하속도는 1~3 MPa/min의 범위로 실시하였다.

2.3 EFNARC (2008)의 TSL 지지 성능평가 시험방법

EFNARC (2008)에서는 광산과 터널에서 구조체 또는 비구조체로서 사용할 수 있는 TSL에 대한 규정과 지침을 제시하고 있다. 특히, EFNARC (2008)에는 Table 2와 같이 TSL의 최소 성능들과 관련 시험법들을 규정하고 있다.

또한, EFNARC (2008)에서는 TSL의 지보재로서의 성능을 평가하기 위한 시험방법으로서 선형블록지지시험(Linear Block Support Test, 이하 LBS시험)과 비중첩전단시험(Gap Shear Load Test, 이하 GSL시험)을 제시하고 있다(Chang et al., 2013). LBS시험은 록볼트 설치 간격 사이에서의 낙반 형상을 기하학적으로 단순화하여 TSL의 지지 성능을 추정하기 위한 방법으로서, 암반 블록에 하중이 가해져서 궁극적으로 TSL과 암반 블록 사이에서 부착 파괴(de-bonding)

가 발생하는 현상을 모사한 것이다(Fig. 3). 반면, GSL 시험은 TSL과 암반 블록 사이에서 부착 파괴가 발생하지 않고 순수하게 전단응력에 의해서 파괴가 발생하는 조건의 고유 지지 성능을 평가하기 위한 것이다(Fig. 4).

이상과 같이 EFNARC (2008)에서 제시하고 있는 지지 성능평가 시험을 위한 시험체 제작을 위하여, 한번에 3개의 시험체를 제작하고 TSL의 피복 두께를 3 mm로 조절할 수 있도록 21×3.3×3 cm 크기의 아크릴 형틀을 제작 및 사용하였다. 형틀에 모르타르 블록(설계강도 40 MPa)들과 알루미늄 판들을 설치한 후에 실험실에서 배합된 TSL을 도포하였으며, 상온에서 제작·보관된 TSL 시험체의 응결이 완료된 후, 형틀에서 3개의 시험체를 절단하여 분리하였다(Chang et al., 2013).

2.4 TSL로 코팅된 시험편의 압축시험

TSL의 지보효과를 파악하기 위한 또 다른 방법으로서, 일반적인 일축압축시험에 사용되는 원통형 암석 시험편의 상하부 가압면을 제외하고 일정한 두께의 TSL로 도포한 코팅 시험편의 압축시험(coated core compression test)을 실시할 수 있다(Archibald, 2004; Povin 등, 2004). 본래 TSL로 코팅된 시험편의 압축시험은 서로 다른 종횡비를 가지는 암주(rock pillar)에

Table 2. Performance requirements for TSLs (EFNARC, 2008)

	Performance characteristic	Specified test method	Class B ³	Class S ⁴
A ¹	Tensile strength	DIN 53504 Type S2 or ASTM D638		> 2 MPa at 7 days
B ²	Rate of strength development: (Time to reach a Tensile Strength of 2MPa at 50 ± 5% rh and 80 ± 5% rh at 23°C)	DIN 53504 Type S2 or ASTM D638		< 7 days at 50 ± 5% rh < 14 days at 80 ± 5% rh
A	Linear load resistance	TSL Linear Block Support Test		> 5 kN/m (equivalent to a 2 ton block - DSK ⁵ requirement)
A	Tensile E-modulus	Stress/strain on DIN 53504 Type S2 or ASTM D638 specimens		> 0.02 GPa
A	Elongation at break	DIN 53504 Type S2 or ASTM D638		> 10%
A	Shear strength	EN 1373 or ASTM D732 on sawn granite		> 0.25 MPa at 24 hours
A	Ultimate bond strength	EN 1542 to EN 1766 (type MC 0.40) concrete grit blasted to SA 2 ^{1/2}	Bonds to host rock	> 1 MPa
A	Fire classification	EN 13823 under conditions of EN 13501-1:2002	Reaction to fire behavior B or better. Smoke index sl. Flaming particles/droplets d0	Reaction to fire behavior B or better. Smoke index sl. Flaming particles/droplets d0
A	Flammability	ASTM E84 (surface spread of flame and smoke index development)	Class 1	Class 1
A	Products of combustion	NES 713	Pass as suitable for underground use	Pass as suitable for underground use
B	Crack bridging	DIN EN 1062-7		> 1 mm
B	Tear strength @ 28 days	DIN ISO 34-1 DIN 53515		> 20 N/mm
B	Water tightness	EN 1928 or DIN 1048		No water leakage after 28 days at 7 bar
B	Freeze thaw resistance	e.g. SN 73 1326 or SS 13 72 44		> 50 cycles
B	Permeability to water vapour, methane, radon etc	DIN 52615, DIN 16726 or SN 021582		Water vapour < 1.10 ⁻⁶ m/s Methane < 1.10 ⁻¹⁶ m/s Radon < 1.10 ⁻⁹ m/s
B	Surface Electrical resistance	DIN 22107 Part 6	10 ⁹ Ω/cm	10 ⁹ Ω/cm
B	Electrostatic charge transfer	EN 13463 Part 1	It must not be possible to charge the TSL	It must not be possible to charge the TSL

¹A - Mandatory requirement for all intended uses

²B - Special requirement for particular situations

³Class B(Basic) - principally used as an anti-weathering coating

⁴Class S(Standard) - used to permanently stabilize the integrity of rock structures whilst accommodating the stresses associated with strata movement

⁵DSK - Deutsche Steinkohle (German Coal Mines)

대한 TSL의 지보 효과와 최적의 두께를 평가하기 위해 제안된 것이다. 또한 Archibald (2004)는 일반적인 일축압축조건의 암석 시험편과 비교할 때 TSL로 코팅된 시험편의 최대 및 잔류 강도가 크게 증가하는 것으로 보고하고 있으나, TSL에 의한 압축강도 증가 효과에 대한 정량적인 분석 자료와 TSL의 재료 특성 및 재령에 따른 다양한 조건의 실험결과들이 제시되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 TSL로 코팅된 암석 코어 시험편들을 제작하고 실험을 실시하여, 상기 2가지 TSL에 대해 재령에 따른 TSL의 지보효과를 실험적으로 파악하고자 하였다. 이때 TSL의 코팅 두께는 앞선

직접인장시험 조건과 EFNARC (2008)에서 규정하고 있는 시험들의 조건과 동일하게 3 mm로 설정하였다.

TSL 코팅 시료를 제작하기 위하여 직경 54 mm의 암석 코어를 길이 100 mm로 절단 및 연마한 후, TSL의 피복 두께를 3 mm로 제작하기 위한 몰드(내경 60 mm)를 제작사용하였다. 이때 몰드의 하단에는 암석 코어 축의 중심을 몰드 축과 일치시킬 수 있도록 내경 54 mm의 홈을 가공하였으며, TSL의 원활한 탈형을 위하여 몰드 내면에 구리스를 얇게 사전에 도포하였다. 배합된 TSL을 몰드 내면에 충분히 도포하고 몰드를 고정시킨 후, 몰드의 상단으로 흘러나오는 TSL을 깨끗하게 닦아내었다. 마지막으로 이상과 같이 제작

(a) Fixed test sample before load is applied

(b) Loaded sample with de-bond as the major failure mechanism

Fig. 3. Setup for TSL linear block support test (EFNARC, 2008)

Fig. 4. TSL gap shear load test (EFNARC, 2008)

(a) Specimen preparation

(b) TSL-coated specimen before compression tests

Fig. 5. Specimen preparation for TSL-coated core compression tests

된 TSL 코팅 시험체들을 제작 후 1일이 경과된 후에 탈형하여 시험에 사용하였다(Fig. 5).

본 연구에서 사용된 암석은 포천화강암으로서 평균 일축압축강도는 135.7 MPa이었으며, 1 mm/min의 속도로 변위제어를 실시하여 하중을 재하하였다. 또한 TSL의 표면에 십자형(+) 변형률게이지를 부착하여 TSL과 암석의 복합 시험체에 대한 축방향 및 횡방향 변형률을 1초당 10개씩 하중 데이터와 함께 실시간으로 자료를 획득하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 TSL의 재령별 인장강도

두 가지 TSL재료에 대해 재령별로 3회씩 측정된 인장강도의 평균값은 Fig. 6 및 Table 3에 정리하였다. Table 3으로부터 재료 M의 평균 인장강도가 재료

T보다 크게 측정된 것을 확인할 수 있으며, 특히, 재령 7일에는 두 재료의 인장강도 차이가 약 10%였으나, 재령 14일 이후에는 약 50%로 차이가 더욱 증가하였다. 이는 인장강도 발현에 큰 영향을 미치는 폴리머 성분이 재료 T에 비해 재료 M에 상대적으로 높은 비율로 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 두 재료 모두 EFNARC (2008)에서 재령 7일의 최소 인장강도로 제시하고 있는 2 MPa보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 인장파괴 시의 신장률(elongation)은 재료 T가 재료 M에 비해 약 2배 이상 크게 나타났는데, 재료 T는 항복 이후에도 100% 이상의 변형이 일어날 때까지 어느정도의 인장 저항력을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 두 가지 TSL재료에 대해 측정된 신장률 역시 EFNARC (2008)에서 제시하고 있는 파괴 시의 신장률 기준인 10% 이상을 충분히 상회하는 것으로 나타났다.

Fig. 6. Average tensile strengths of TSLs at different curing ages

Table 3. Direct tensile strength and its corresponding elongation of two kinds of TSL materials

Material name	Curing Time (Day)	Average tensile strength (MPa)	Average elongation at break (%)
T	Day 7	2.72	132.1
	Day 14	2.91	113.0
	Day 28	3.24	111.7
M	Day 7	3.02	71.0
	Day 14	4.29	43.6
	Day 28	4.82	51.4

3.2 TSL의 재령별 부착강도

두 가지 TSL재료에 대해 재령별로 측정된 부착강도는 다음의 Fig. 7과 같다. 재료 T의 평균 부착강도가 재료 M보다 크게 측정된 것을 확인할 수 있으며, 특히 재령 7일에서 재료 T의 평균 부착강도는 1.25 MPa로서 구조적인 역할을 하는 재령 28일 숏크리트의 콘크리트면에 대해 EFNARC (1996)에서 제시하고 있는 부착강도 기준이자 역시 EFNARC (2008)에서 제시하고 있는 재령 28일 TSL의 부착강도 기준인 1.0 MPa를 모두 상회하여 조기재령부터 높은 부착강도를 발현함을 확인하였다. 재령 14일과 재령 28일에도 재료 T의 평균 부착강도가 재료 M보다 약 13~26%

크게 나타났다(Fig. 7).

하지만 부착강도 실험결과와 편차(Fig. 7)를 고려한다면 재령 14일과 재령 28일에는 유사한 수준의 부착강도가 얻어졌다고 볼 수 있다. 이는 TSL과 모르타르 사이의 인터페이스에서 완전한 부착 파괴가 발생하지 않고, 부착강도 측정을 위해 TSL면과 브래킷 사이에 접착하였던 에폭시가 분리된 결과가 포함되었기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 8). 즉, TSL의 부착 특성이 일부 반영되었긴 하지만, 부착강도가 1 MPa를 상회하는 재령 14일과 재령 28일에는 실험에 사용된 에폭시의 부착력이 크게 반영된 것으로 고려할 수 있다. 따라서 본 연구에서 측정한 재령 14일과 재령 28일의 TSL의 부착강도는 다소 과소평가된 것으로 사료되며,

Fig. 7. Bond strength of TSLs to a mortar substrate at different curing ages

(a) De-bonded between a TSL and a substrate (TSL material M, Day 7)

(b) De-bonded between a TSL and a bracket (TSL material T, Day 14)

Fig. 8. De-bonding patterns after TSL pull-out tests at different curing ages

향후에는 높은 부착강도를 발현하는 TSL의 성능 평가를 위해 에폭시 접착방식이 아니라 하부의 모르타르 면까지 철판을 사전에 삽입한 후 이를 시험체와 함께 인발시키는 시험방법 등의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 TSL 코팅 시험편의 재령별 최대강도

시험편 제작에 사용된 암석인 포천화강암의 평균 일축압축강도(135.7 MPa)와 비교할 때, 두께 3 mm의 TSL 코팅으로 인해 TSL과 화강암의 복합시험편에 대한 최대강도의 증가 효과가 확실하게 관찰되었다(Fig. 9). 또한 TSL 코팅 시험편의 최대강도는 재령이

경과될수록 더욱 증가하는 경향을 나타내었다. 재령 7일에는 최대강도의 증가율이 9~17%이었으나, 충분한 경화가 진행된 후인 재령 28일의 최대강도 증가율은 암석의 일축압축강도 대비 평균 33~50%에 달하였다. 특히, 재료 T의 경우가 최대강도의 증가폭이 상대적으로 크게 나타났다(Fig. 9). 이는 앞선 3.2절에서 측정된 바와 같이 재료 T가 암석에 대한 부착력이 크기 때문에 하중 재하에 따른 암석의 변형에 대해 상대적으로 높은 수준의 구속력(confinement)을 가했기 때문으로 판단된다.

이러한 결과는 파괴 후의 시험체 형상으로부터도 유추할 수 있다. 예를 들어, 재령 7일의 조기재령 조건에서 부착력과 강성이 상대적으로 낮으며 폴리머의

Fig. 9. Peak strengths of TSL-coated cores at different curing ages

(a) Failure with expansion and de-bonding of TSL (Material M)

(b) Failure of a rock core bonded by TSL (Material T)

Fig. 10. Typical failure patterns of TSL-coated core specimens (Day 7)

함량이 높은 재료 M의 경우에는 암석의 측방향 변형(팽창)에 따라 재료 M의 표면이 함께 변형 및 팽창하였고 암석면과 TSL 사이에서는 부착파괴가 발생한 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 10a). 반면, 재료 T의 경우에는 재령 7일부터 상대적으로 높은 부착력과 강성으로 인해 파괴 이전까지 암석의 측방향 변형에 대해 높은 구속력을 작용하다가 암석의 파괴 시에 TSL이 암석에 거의 부착된 상태로 함께 찢어지는 경향을 나타내었다(Fig. 10b). 즉, 시멘트성 경화체 성분이 포함된 재료 T는 암석에 대해 상대적으로 높은 부착력과 구속력을 작용하여, TSL과 암석 복합체의 최대강도와 강성을 크게 향상시켰음을 알 수 있다(Fig. 11). 특히, Fig. 11으로부터 동일한 응력수준에서 일반적인 암석 시험체와 비교할 때 TSL의 구속력에 의해 TSL과 암석 복합체의 변형률이 매우 낮은 수준으로 제한됨을 확인할 수 있다. 이상과 같이 TSL에 의한 최대강도와 강성의 향상 효과를 확인할 수 있었으며, 향후 암주와 같은 암반 굴착면에 TSL을 타설 및 피복하게 되면 얇은 두께로도 암반의 강도 증진효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다. 단, 본 연구에서 수행한 시험 조건에서는 최대강도 도달 후에 TSL 코팅 시험체가 급격히 파괴되어 잔류강도 등의 파괴 후 거동을 관찰

할 수 없었다. Archibald (2004)가 언급한 TSL 코팅 시험편의 잔류강도 증진효과와 파괴 후 거동을 관찰하기 위해서는 압축강도가 상대적으로 낮은 암석에 대해 보다 정밀한 변위제어 시험을 실시하거나 TSL의 두께를 증가시켜야 할 것으로 판단된다.

3.4 TSL의 지지성능 평가 결과

Fig. 12와 같이 EFNARC (2008)에서 제시한 시험 방법들에 의해 두 가지 TSL재료에 대해 재령별로 측정된 지지 성능 특성은 Fig. 13 및 Table 4와 같다. GSL 시험 결과로부터 재료 M의 평균 최대하중이 재료 T보다 크게 측정된 것을 확인할 수 있는데, 이는 순수하게 TSL의 전단응력에 의해서만 파괴가 발생하는 GSL 시험의 특성으로 인해 인장강도의 영향을 크게 받은 것으로 예상할 수 있다. 따라서 폴리머 성분을 재료 T에 비해 상대적으로 많이 함유하여 인장강도가 크게 나타난 재료 M의 평균 최대하중이 재령 28일에는 약 21% 이상 크게 나타났다.

TSL과 암반 사이에서 부착 파괴를 모사하는 LBS 시험 결과, 재령 7일 시에는 3.2절에서 부착강도가 작은 것으로 나타난 재료 M이 약 38% 정도 평균

Fig. 11. Stress-strain curves of a rock core and TSL-coated core specimens

최대하중이 작게 평가되었다. 그러나 재령 14일에는 시험결과의 편차를 고려하면 두 재료의 평균 최대하중이 유사한 것으로 나타났다. 재령 28일에는 재료 T의 평균 최대하중이 재령 14일 결과와 유사하게 나타난 반면, 재료 M은 평균 최대하중이 재령 14일에

비해 약 23% 증가하여 재료 T보다 재료 M의 최대하중이 크게 산출되었다. 특히, 파괴 시까지 발생한 변위를 살펴보면 재료 M에서 상대적으로 더 큰 변위가 발생된 후에 파괴가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 재령에 따라 감수가 되면서 강도가 느리게 증진되는 폴리머

(a) Gap shear load test

(b) Linear block support test

Fig. 12. EFNARC (2008) suggested tests to evaluate the bearing capacity of TSL

Fig. 13. Average peak loads obtained from GSL and LBS tests at different curing ages

Table 4. Experimental results of TSL tests proposed by EFNARC(2008)

Material name	Curing time	Gap shear load test		Linear block support test	
		Average peak load, Fmax (N)	Average displacement at peak (mm)	Average peak load, Fmax (N)	Average displacement at peak (mm)
T	Day 7	453.9	6.46	356.1	6.85
	Day 14	458.4	6.02	396.7	6.24
	Day 28	570.3	5.21	384.6	6.14
M	Day 7	486.0	6.44	220.9	9.36
	Day 14	582.0	6.82	417.9	9.45
	Day 28	689.6	6.47	515.5	8.86

의 특성에 의해, 폴리머의 함량이 큰 재료 M이 장기재령에서는 부착파괴에 대한 저항성이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 사료된다. 특히 재료 M의 경우에는 시험체 제작 후에 시간이 경과됨에 따라 재료 내부에 포함되었던 수분이 빠져나가면서, 재령 7일과 14일 사이에 LBS시험에 의한 최대하중의 증가율이 약 189%로 나타나 이 재령 기간에 내하력이 가장 급격하게 상승하는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터, 재령 7일의 초기재령에서는 시멘트 성분의 함량이 높은 TSL재료가 지보력 발현에 유리하지만, 재령이 경과될수록 폴리머 내부의 수분이 감소하면서 장기재령의 지보력 발현에는 폴리머 함량이 높은 TSL재료가 효과적일 수 있는 것으로 판단된다. 향후에는 TSL의 핵심 구성재료의 함량에 따른 이상의 특성들을 고려하여 터널 지보재로서 적합한 최적의 TSL 개발이 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리머 함량이 상이한 두 가지 TSL 재료에 대해 직접인장시험, 인발시험, TSL 코팅시험편에 대한 압축시험 및 EFNARC (2008)에서 제안한 TSL의 지지 성능 평가 시험들을 수행하여 지보재로서 TSL의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

시험결과, 폴리머 함량이 높은 TSL의 평균 인장강도가 폴리머 함량이 상대적으로 낮은 TSL보다 크게 나타났으며, 재령이 경과될수록 인장강도 차이가 더욱 증가하였다. 하지만, 두 재료 모두 EFNARC (2008)에서 규정하고 있는 재령 7일의 최소 인장강도인 2 MPa를 상회하였다.

반면, 시멘트계 성분의 함량이 많은 TSL의 평균 부착강도가 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 폴리머 재료와 비교할 때 시멘트계 성분의 빠른 경화로 인해 초기재령부터 부착력이 크게 발현된 것으로 사료된다. 하지만 역시 두 가지 TSL재료의 부착강도는 EFNARC (1996)에서 재령 28일 쏫크리트에 대해 제

시하고 있는 1.0 MPa 이상으로 측정되었다. 또한 부착강도가 2 MPa 이상인 고부착 재료에 대해서는 에폭시의 부착파괴가 먼저 발생할 수 있으므로, 에폭시를 사용하는 일반적인 인발시험이 아닌 높은 부착강도를 측정할 수 있는 특수 인발시험의 수행이 필요할 것으로 나타났다.

TSL로 코팅한 암석 시험편에 대한 일축압축시험 결과, 재령 28일에 두께 3 mm의 TSL 코팅에 의한 최대강도 증가율은 암석의 일축압축강도 대비 33~50%로서 TSL로 인한 최대강도의 증가 효과가 뚜렷이 관찰되었다. 특히, 시멘트계 성분이 상대적으로 많이 포함된 TSL 재료의 압축강도 증진효과가 크게 나타났는데, 이는 암석에 대한 부착력과 강성이 초기재령부터 상대적으로 크게 발현되어 하중 재하에 따른 암석의 변형에 대해 높은 수준의 구속력을 가했기 때문으로 판단된다.

순수 전단파괴 조건인 GSL시험에서는 인장강도가 큰 TSL재료의 최대하중이 모든 재령에서 크게 나타났으며, 부착파괴 조건인 LBS시험에서는 폴리머의 감수가 충분히 이루어지지 않은 재령 7일에서 폴리머의 함량이 낮은 TSL재료의 최대하중이 상대적으로 컸으나 재령 14일부터는 폴리머의 감수에 따른 강도 증진 효과로 인해 폴리머의 함량이 높은 TSL재료의 최대하중이 크게 나타났다.

이상의 결과로부터, 본 연구의 시험대상인 두 가지 TSL재료 모두 EFNARC (2008)에서 규정하고 있는 최소 성능기준들을 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 초기재령에서는 시멘트 성분의 함량이 높은 TSL재료가 지보력 발현에 상대적으로 유리하며, 재령이 경과될수록 폴리머 내부의 수분이 감소하면서 장기재령의 지보력 발현에는 폴리머 함량이 높은 TSL재료가 효과적일 수 있는 것으로 나타났다. 향후에는 TSL 핵심 구성재료들의 구성비에 따른 이상의 특성들을 고려하여 터널 지보재로서 적합한 최적의 TSL 개발이 이루어져야 할 것이다. 또한 폴리머 함량이 높으며 분말 단일성분으로 구성된 TSL은 타설면의 수분 조건

에 따라 경화 특성이 좌우되고 상대적으로 분진 발생이 크게 발생할 수 있기 때문에, 구성 재료에 따른 TSL의 시공성도 함께 고려해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. ASTM (2010), Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, D638-10.
2. Archibald, J.F. (2004), “Chapter 4. canadian laboratory and field testing”, Surface Support in Mining, Y. Povin, D. Stacey and J. Hadjigeorgiou (eds), Australian Centre for Geomechanics, pp. 73-87.
3. Chang, S.-H., Lee, G.-P., Han, J.-T., Park, Y.-T., Choi, S.-W., Hwang, G.-S., Choi, M.-S. (2013), “An experimental study on the evaluation of Early-age mechanical properties of Polymer-based thin Spray-on liners”, Tunnel and Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics,

Vol. 23, No. 5, pp. 413-427.

4. Clements, M.J. (2002), “The future of fibre reinforced sprayed concrete”, Proc. the 4th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, pp. 73-81.
5. EFNARC (1996), European Specification for Sprayed Concrete.
6. EFNARC (2008), Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunnelling.
7. Lau, V., Saydam, S., Cai, Y., Mitra, R. (2008), “Laboratory investigation of support mechanism for thin Spray-on liners”, Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, pp. 1381-1388.
8. Povin, Y., Stacey, D., Hadjigeorgiou, J., Yilmaz, H. (2004), “Part 1: thin Spray-on liners(TSLs)-A quick reference guide”, Surface Support in Mining, Y. Povin, D. Stacey and J. Hadjigeorgiou (eds), Australian Centre for Geomechanics, pp. 3-43.
9. Roberts, R. (2001), “Time to look below the surface of membranes”, Australian Mining Monthly, August, pp. 62-63.
10. Tannant, D.D. (2001), “Thin Spray-on liners for underground rock support”, Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey - IMCET 2001, pp. 57-73.