

분말형 박층 뿜칠 라이너 시작품의 제작과 성능평가

장수호, 이규필, 한진태*, 최순욱, 황귀성, 최명식

Development of a Powder-type Thin Spray-on Liner and Its Performance Evaluation at Different Curing Ages

Soo-Ho Chang, Gyu-Phil Lee, Jin-Tae Han*, Young-Taek Park,
Soon-Wook Choi, Gwi-Sung Hwang, Myung-Sik Choi

Abstract Thin Spray-on Liner (TSL) has been considered as a new rock support to replace shotcrete as well as wire mesh. However, the development of its original production technology is highly in demand since it is not open to the public. Therefore, two kinds of powder-type TSL prototypes were developed as the first development stage. Then, their mechanical properties were experimentally compared with those of a two-component foreign TSL material including both of liquid and powder components. From a series of experiments, the first TSL prototype mixing condition satisfied every TSL performance requirements specified by EFNARC (2008), and showed much higher tensile and bond strengths than those of the two-component foreign TSL, even though the other TSL prototype cannot be used as a support member since its elongation at break is much lower than its corresponding EFNARC (2008) performance criterion. In addition, a further study to increase the ductility of the first TSL prototype might be necessary to guarantee its higher applicability to field conditions.

Key words Thin spray-on liner, Powder typer, Support, Prototype, Mechanical properties

초 록 박층 뿜칠 라이너(TSL)는 슛크리트와 철망을 대체하는 새로운 암반 지보재로서 고려되고 있다. 하지만 아직까지 TSL의 핵심 제작기술이 공개되지 않은 관계로 독자적인 TSL 개발이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 TSL의 개발을 위한 첫 번째 단계로서, 2가지의 경제적인 분말형 TSL 시작품 배합조건들을 도출하였고 이들을 액상 및 분말 재료가 혼합되는 2성분 외국산 TSL의 역학적 성능들과 실험적으로 비교하였다. 실험결과, 1가지 TSL 시작품 배합조건은 파괴 시의 신장률이 낮게 나타나 지보재로서의 활용이 어려운 것으로 나타났으나, 나머지 TSL 시작품 배합조건은 기존 외국산 TSL보다 큰 인장강도와 부착강도를 발휘하는 등 우수한 성능을 나타내었으며 유럽 EFNARC(2008)의 모든 성능기준을 만족하여 지보재로서 활용이 가능한 것으로 검증되었다. 단, 외국산 2성분 TSL과 비교할 때 TSL 시작품의 연성을 추가적으로 향상시키기 위한 보완이 필요한 것으로 나타났다.

핵심어 박층 뿜칠 라이너, 분말형, 지보, 시작품, 역학적 성능

1. 서 론

박층 뿜칠 라이너(Thin Spray-on Liner, 이하 TSL)는 폴리머(polymer) 유기화합물의 기반 재료를 바탕으로 암반 보강과 차수를 위해 암반 표면에 뿜어 붙여지는 피복재이다(EFNARC, 2008; Chang et al., 2013).

TSL은 암반면에 대한 부착강도, 인장강도 등의 재료적인 특성이 우수하고 신속한 지보효과를 발휘하므로 자원개발 분야에서 슛크리트와 철망을 대체하기 위한

Received: Jun. 8, 2015

Revised: Jun. 22, 2015

Accepted: Jun. 23, 2015

***Corresponding Author:** Jin-Tae Han

Tel) +82319100259, Fax) +82319100561

E-Mail) jimmyhan@kict.re.kr

Korea Institute of Construction Technology Ilsanseo-gu,
Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

지보재로 적용되고 있다(Roberts, 2001; Lau et al., 2008, Tannant, 2001). 특히, 일반적인 TSL의 타설 두께는 3~5 mm이며 최대 10 mm미만으로서 슛크리트와 비교할 때 두께가 매우 얇은 것이 특징이다(EFNARC, 2008).

또한 TSL은 레디믹스(ready-mix)형태로 포장되어 타설장비의 호퍼(hopper)에 투입되기 때문에 슛크리트와 달리 배치플랜트(batch plant)가 필요 없으며, 낮은 압력의 압축공기로도 타설시공이 가능하기 때문에 타설장비도 매우 소형이다. 또한 암반면에 대한 부착력이 우수하기 때문에 타설 중의 분진과 리바운드를 저감시키고 암반 붕락과 누수를 방지할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Povin et al., 2004; Saydam, 2008; Chang et al., 2013)

기능에 따라서 TSL은 지보재로서의 활용뿐만 아니라, 암반의 풍화 등의 방지하기 위한 코팅재(비구조재)로서 활용되거나 굴착 암반면에 대한 뽐칠 방수재(sprayable waterproofing membrane)로도 활용되고 있다(EFNARC, 2008; ITAtech, 2013). 최근 들어서는 2차 콘크리트 라이닝이 설치되지 않은 조건에서 노후화된 세그먼트 라이닝의 구조적인 보강과 내화성능 확보를 위해 TSL을 적용하기 위한 연구도 이루어지고 있다(Ahn, 2011).

그러나 폴리머 재료를 사용하기 때문에 TSL의 재료적인 단가는 슛크리트와 비교할 때 고가이며, 타설 두께가 두꺼울 경우에는 경제적인 측면뿐만 아니라 폴리머 재료로부터의 감수(dewatering)가 원활히 이루어지지 않기 때문에 조기에 지보성능을 발현하기 어려울 수 있다. 무엇보다도 TSL의 재료제작과 관련된 연구논문이나 특허 등이 거의 공개되지 않은 상황으로서 일부 외국 제작사에서만 TSL을 상용화하여 판매하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 TSL의 국산화 개발을 위한 첫 번째 단계로서 재료적으로 분말 재료만을 사용하는 분말형 TSL 시작품을 제작하였다. 또한 직접인장시험, 인발시험, TSL 코팅 시험편의 압축시험 및 EFNARC(2008)에서 제안한 TSL의 지지 성능평가 시험과 같은 다양한 실험실 시험을 수행하여 기존 외국산 TSL 재료의 특성과 비교·검토하고 향후 재료적인 개선사항을 도출하고

자 하였다.

2. 분말형 TSL 시작품의 제작

2.1 혼합방식에 따른 TSL의 장단점

TSL을 재료적인 혼합방식에 따라 구분하면 분말 1성분, 분말과 액상이 혼합되는 2성분, 그리고 2가지의 다른 액상이 혼합되는 2성분으로 구분할 수 있다. 일반적으로 2성분 액상/분말 재료의 경우에는 분말 성분을 혼합하기 전에 액상 성분을 먼저 믹서에 투입하며, 분말 1성분의 경우에는 시멘트계 재료를 첨가하기 전에 물과 분말 폴리머를 먼저 배합해야 한다(EFNARC, 2008). 이상과 같은 혼합방식에 따른 TSL의 장단점을 분석하면 다음의 Table 1과 같다. 아무래도 고가의 액상 2성분 TSL을 사용하게 되면 응결이 빠르고 분진과 리바운드를 극소화할 수 있다는 장점은 있으나, 재료적인 개발이 분말과 비교할 때 상대적으로 어렵고 경제적인 측면에서 불리하기 때문에 본 연구에서는 TSL 개발의 1 단계로서 분말 1성분 TSL 시작품의 제작을 목표로 설정하였다.

2.2 TSL의 예비 배합시험

본 연구에서는 분말형 시작품의 최적 재료배합 조건을 도출하고자, Chang et al. (2013)이 해외의 2개 TSL 재료에 수행한 성분분석 결과를 바탕으로 총 11개의 시험배합을 1차적으로 선정하였고 그 가운데 비교적 상대적으로 배합효율이 양호하였던 총 4개의 배합조건을 예비시험 조건으로 선정하였다(Table 2).

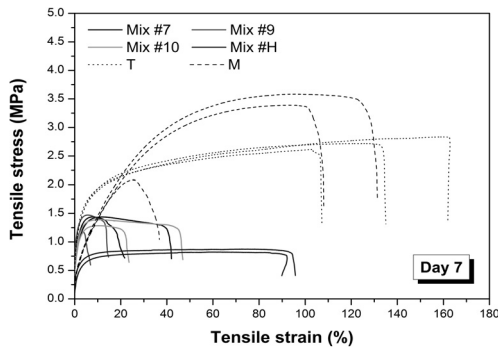
예비 배합시험에서는 폴리머의 함량을 60~65%로 변화시켰으며 조기강도 발현을 촉진하기 위해 CSA(Calcium Sulfo-Aluminate)와 무수석고(anhydrous gypsum)를 첨가하였다. 또한 TSL의 성능 발현을 위한 보조 재료로서 폴리머 유화제인 콜레마나이트(colemanite), 증점제인 웰란검(Welan gum), 강도 보정용 혼화제인 옥살산(oxalic acid) 등을 소량 첨가하였다. 무기질 결합경화제로는 일반포틀랜드시멘트(OPC)와 알루미나시멘트를 첨

Table 1. Pros and Cons of TSLs with different mixing types

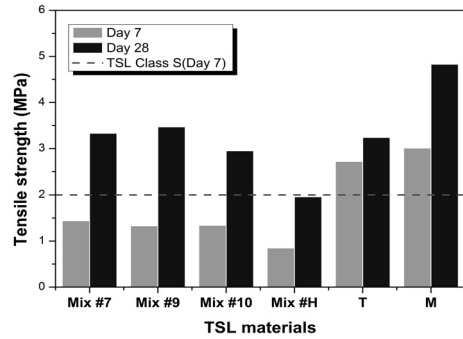
Mixing type	Pros	Cons
Single component (powder)	Simple and easy in spraying	Increase in dust and rebound
Two components (powder+liquid)	Decrease in dust and rebound Increase in mechanical properties	3~5 minutes necessary for mixing Slow setting
Two components (liquid+liquid)	No dust Rapid setting	Expensive

Table 2. Preliminary TSL mixing conditions for batch tests

Mixing conditions		#7	#9	#10	#H
Materials (wt. %)	Polymer	65%	61%	61%	60%
	Colemanite	2%	2%	2%	2%
	Oxalic acid	1%	1%	1%	-
	CSA	16%	17%	17%	-
	Anhydrous gypsum	7%	8%	8%	-
	OPC	8%	10%	-	-
	Alumina cement	-	-	10%	1%
	HPA	-	-	-	25%
Welan gum	1%	1%	1%	12%	



(a) Stress-strain curves at 7 days



(b) Average tensile strengths

Fig. 1. Results of direct tensile tests for preliminary mixing conditions

가하였다. Table 2에서 배합조건 H의 경우에는 알루미늄 나시멘트 성분을 1%로 줄이는 대신에 숏크리트의 고성능화를 위해 실리카폼(silica fume)의 대체 재료로 사용되고 있는 HPA(High-Performance Admixture)를 25%로 치환하여 시험을 실시하였다.

TSL의 여러 가지 역학적 특성을 평가하기 위한 시험 방법들 가운데 가장 대표적인 직접인장시험(ASTM D638)을 Table 2의 예비 배합시험 조건들에 대해 실시하였다. 시험결과, 2개의 외국산 TSL재료(Fig. 1의 T 및 M)와 비교할 때 7번, 9번 및 10번 배합조건에 대해서는 연성(ductility)을 보다 향상시킬 필요가 있는 것으로 나타났다. 배합조건 H의 경우에는 상대적으로 파괴 후의 연성 특성은 크게 나타났으나 인장강도가 가장 낮게 평가되었다(Fig. 1a). 반면, 7번, 9번 및 10번 시험배합 조건들의 재령 28일 인장강도는 외국산 TSL 재료 가운데 T의 경우와 유사하였으나, 모든 예비 배합조건들이 EFNARC (2008)에서 지보재 용도의 TSL에 대해 규정하고 있는 재령 7일 최소 인장강도인 2 MPa 미만을 발휘하는 것으로 나타나 요구성능을 만족하지 못하였다(Fig. 1b)

2.3 분말형 TSL 시작품의 배합조건 도출

앞선 2.2절과 같이 수행된 예비 배합시험 결과로부터, 조기재령의 TSL 인장강도와 연성 특성을 향상시킬 필요가 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 이를 보완한 2가지의 시작품 배합조건을 Table 3과 같이 도출하였다. 이때 TSL의 연성 향상을 위하여 폴리머의 함량을 65%로 증가시켰으며, 재령 7일의 인장강도를 증가시키기 위하여 시멘트, CSA 및 무수석고의 배합비를 수정하였다. 특히, N2 배합조건과 비교할 때 N1 시작품 배합조건에 대해서는 시멘트 비율을 1% 증가시켰고 점도 향상을 위해 웰란검을 1%로 적용하였다. N2 시작품 배합조건인 경우에는 조기 인장강도 향상을 위해 CSA의 사용비율을 상대적으로 2% 증가시키는 대신, CSA로 인해 재료의 가사시간(pot life)이 짧아지므로 증점제인 웰란검과 강도 보정용 혼화제인 옥살산을 사용하지 않았다. 또한 인성 향상을 위해 폴리머 유화 및 가교 역할을 위한 콜레마나이트의 사용량을 N2 시작품 배합조건에서 1% 증가시켰다.

Table 3. Two prototype mixing conditions for powder-type TSLs

Mixing condition	Polymer	Colemanite	Oxalic acid	CSA	Anhydrous gypsum	OPC	Welan gum
N1	65%	2%	1%	16%	6%	9%	1%
N2	65%	3%	-	18%	6%	8%	-

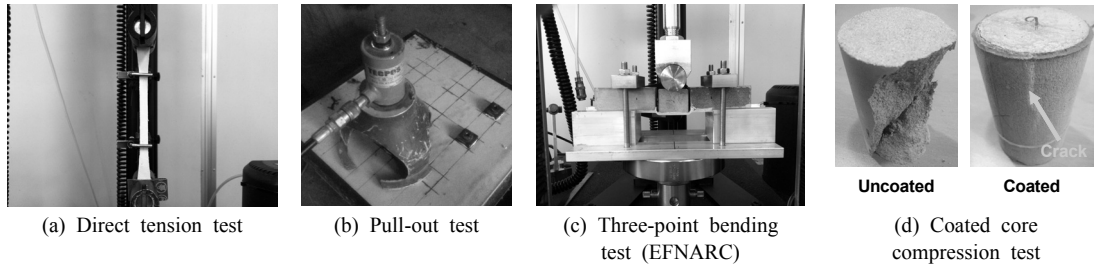


Fig. 2. Tests to evaluate mechanical properties of TSLs at different curing ages

3. 분말형 TSL 시작품의 성능평가 시험

3.1 TSL 성능평가 시험방법

TSL의 역학적 특성을 평가하기 위한 다양한 시험방법들이 제시 및 시도되고 있지만(Stern et al., 2007, Yilmaz, 2007), EFNARC(2008)에서 제시하고 시험방법들을 제외하면 표준화된 시험방법은 없으며 관련 시험결과들도 좀처럼 공개되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 Han et al.(2013)이 TSL의 지보 성능을 평가하기 위해 수행하였던 EFNARC(2008)의 TSL 지지력 평가 시험방법, 직접인장시험 및 부착강도를 측정하기 위한 인발시험에 의해 TSL 특성을 평가하고자 하였다. 이와 더불어 TSL에 의한 암반의 구속효과를 모사하기 위한 TSL 코팅 시험편의 압축시험(TSL coated core compression test)을 병행하였다(Archibald, 2004; Chang et al., 2013; Han et al., 2013).

3.2 TSL 성능평가용 시험체 제작방법

본 연구에서 도출한 2가지의 TSL 시작품은 분말형인 관계로 분말 재료와 물을 중량비 기준으로 2:1의 비율로 혼합하여 시험체들을 제작하였다. 반면, 2.2절에서 비교 대상으로 선정하였던 2개의 외국 TSL 재료 가운데 T제품이 상대적으로 우수한 지보력을 발휘하는 것으로 선행 연구로부터 분석되었다(Han et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 외국산 TSL재료인 T제품을 본 연구의 시작품에 대한 성능 비교 대상으로 선정하였다. T제품은 라텍스계(latex) 폴리머가 포함된 액상과 분말로 이루어진 2성분 제품으로서 본 연구의 시작품과 달리 물을 혼합하지 않고 액상과 분말 재료들만을 혼합하

여 시험체들을 제작하였다. 또한 모든 시험방법들에 대해 EFNARC(2008)에서 제시하고 있는 바와 같이 TSL의 두께를 3 mm로 일정하게 하여 시험체들을 제작하였다. 이상과 같이 제작된 시험체들을 사용하여 각 시험방법별로 재령 7일, 14일 및 28일 조건에서 최소 3회 이상의 시험을 실시하고 그 결과들을 분석하였다(Fig. 2).

3.3 직접인장강도 측정결과

본 연구에서 도출된 2가지 TSL 시작품 배합조건의 재령 7일 인장강도는 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 2 MPa을 크게 상회하는 것으로 나타났다. 특히, 모든 재령에서 비교 대상으로 설정한 외국산 T제품보다도 월등한 인장강도를 발현하였다(Fig. 3). 그러나 시작품 배합 가운데 N2배합의 파괴 시 신장률(elongation at

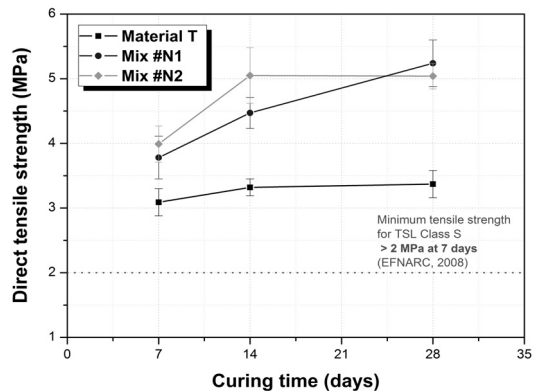
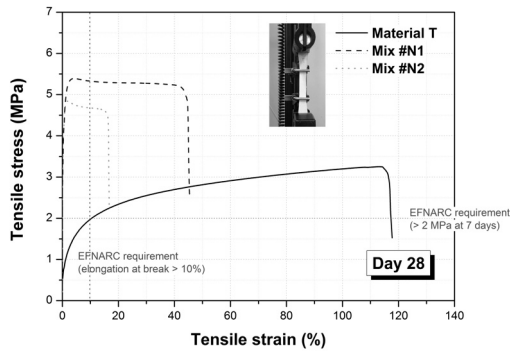
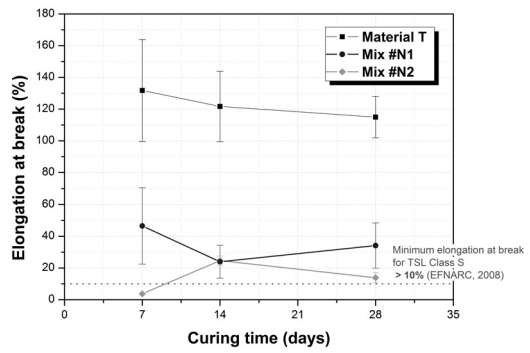


Fig. 3. Average direct tensile strengths of TSLs at different curing ages



(a) Typical tensile stress-strain curves



(b) Average elongation at break

Fig. 4. Elongations at break obtained from direct tension tests of TSLs

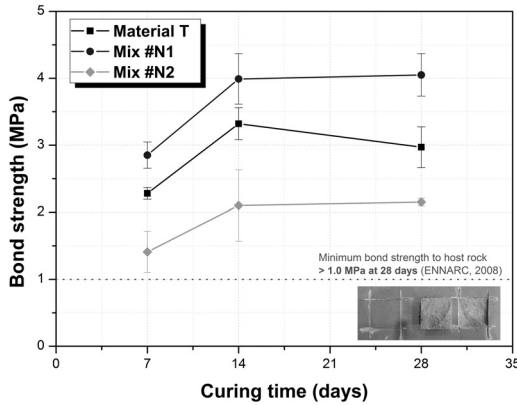


Fig. 5. Average bond strengths of TSLs at different curing ages

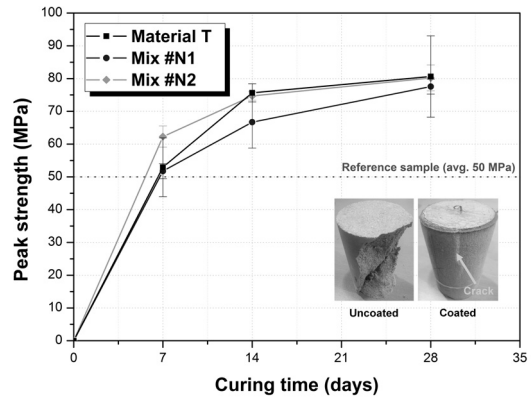


Fig. 6. Average compressive strengths of TSLs at different curing ages

break)은 EFNARC(2008)에서 지보재 용도로 규정하고 있는 Class S TSL 기준인 10% 이상을 만족하지 못하였으며, N1배합의 경우에는 신장률이 10% 이상으로 나타나긴 하였지만 외국산 T제품과 비교할 때 상대적으로 열위에 있는 것으로 나타났다(Fig. 4).

3.4 부착강도 측정결과

두 가지의 분말형 TSL 시작용 배합조건 및 외국산 T 제품 모두 EFNARC(2008)에서 제시하고 있는 재령 28일 부착강도인 1 MPa를 크게 상회하였다. 특히, 재령 7일에 EFNARC(2008)의 재령 28일 부착강도 기준을 상회하였다(Fig. 5). 본 연구에서 검토된 세 가지 재료 가운데 N1 시작용 배합의 부착력이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 특히, TSL이 부착된 부착면(모르타르)이 떨어져 나올 정도로 높은 부착강도가 발현되었음을 확인할 수 있다(Fig. 5).

3.5 TSL 코팅 압축시험 결과

TSL로 코팅이 되지 않은 비교 대상 시험체(reference)로서 설계강도가 40 MPa인 모르타르를 제작하였으며, 실제 재령 28일의 평균 압축강도는 약 50 MPa로 나타났다. 이와 같이 제작된 모르타르에 두께 3 mm로 TSL 재료를 피복한 후 재령별로 압축시험을 실시한 결과, 재령 경과에 따라 코팅을 하지 않은 모르타르 시험체들과 비교할 때 TSL의 구속력(confinement)에 의해 압축강도의 증진 효과가 뚜렷하게 나타났다. N1 시작용 배합의 구속효과가 상대적으로 다소 떨어지는 것으로 나타났으나 모든 재료에 대한 실험결과는 서로 오차범위에 해당하는 것으로 나타나 유사한 결과로 판단된다(Fig. 6).

특히, TSL에 의한 구속효과로 인해 재령 7일에 무코팅 모르타르 시험체의 재령 28일 평균 압축강도를 상회하였으며, 재령 28일에는 무코팅 모르타르 압축강도 대

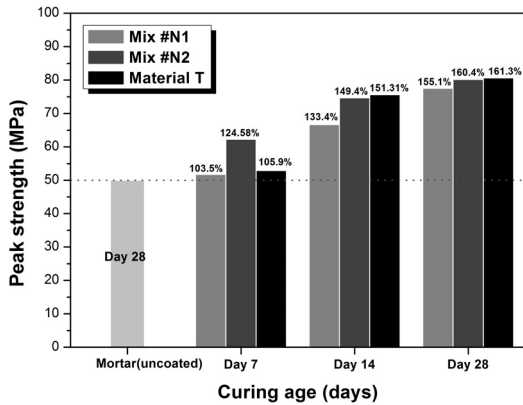


Fig. 7. Comparisons between average peak strengths from un-coated and TSL-coated specimens

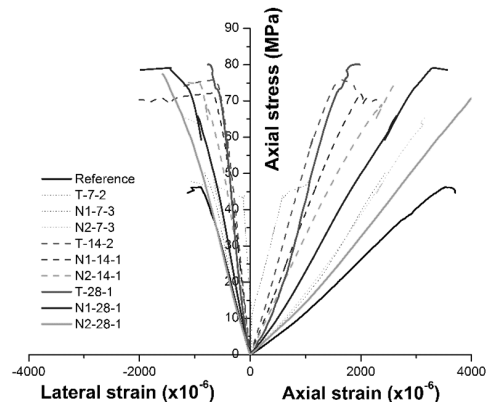


Fig. 8. Examples of stress-strain curves obtained from compression tests

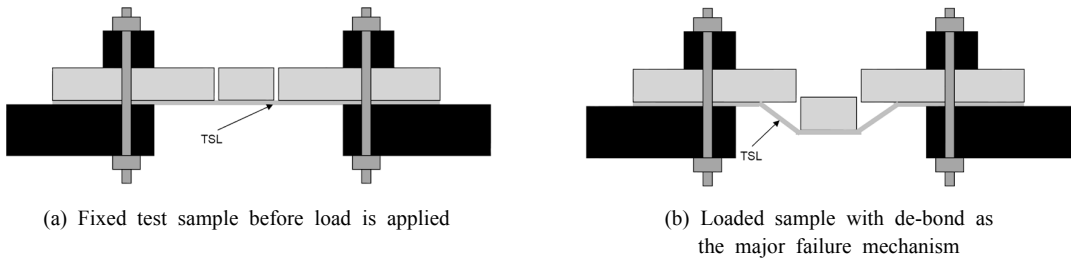


Fig. 9. Setup for TSL Linear Block Support Test

비 155% 이상의 강도 증진효과가 확인되었다(Fig. 7). 또한 TSL의 구속력으로 인해 코팅 시료의 강성이 무코팅 시료 대비 크게 향상되었음을 응력-변형률 곡선으로부터도 확인할 수 있었다(Fig. 8).

3.6 TSL의 지지력 평가시험 결과

EFNARC(2008)에서는 TSL의 지지력을 평가하기 위한 시험방법으로서, 선형블록지지시험(Linear Block Support Test, 이하 LBS시험)과 비중첩전단시험(Gap Shear Load Test, 이하 GSL시험)을 제시하고 있다. LBS시험은 록볼트 설치 간격 사이에서의 낙반 형상을 기하학적으로 단순화하여 TSL의 지지력을 추정하기 위한 방법으로서, 암반 블록에 하중이 가해져서 궁극적으로 TSL과 암반 블록 사이에서 부착 파괴(debonding)가 발생하는 현상을 모사한 것이다(Fig. 9). 반면, GSL시험은 TSL과 암반 블록 사이에서 부착 파괴가 발생하지 않고 순수하게 전단응력에 의해서 파괴가 발생하는 조건의 고유 지지력을 평가하기 위한 것이다(Fig. 10).

본 연구에서 적용된 두 가지의 TSL 시작품 배합과 외국산 재료에 대해 재령별로 6개씩의 시험체를 제작하여,

LBS시험과 GSL시험에 각각 3개씩 사용하였다. 시험 시에는 TSL이 하부에 위치하도록 하여 EFNARC에서 제시한 시험 지그(jig)에 고정시킨 후, 파괴 시까지 중간 모르타르 블록에 압축 하중을 16 mm/min의 변위속도로 재하 하였다. GSL시험 시에는 시험 지그의 하단 블록과 좌·우측 모르타르 블록 사이에 틈이 없도록 시험체를 설치한 반면, LBS시험 시에는 블록 사이의 0.3 cm 틈을 포함하여 지간(span)이 12.6 cm이 되도록 시험체를 설치하였다(Fig. 11).

LBS시험을 실시한 결과, 재령 28일에 5 kN/m 이상

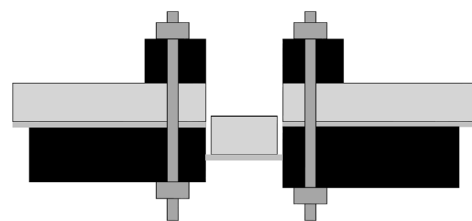
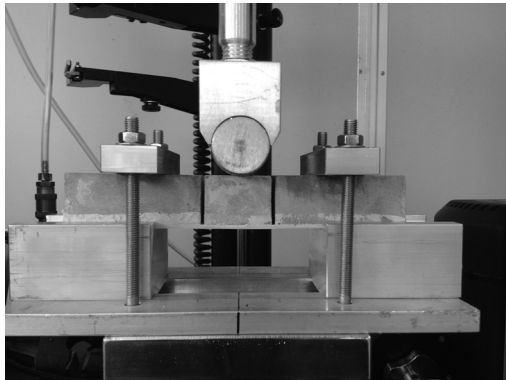
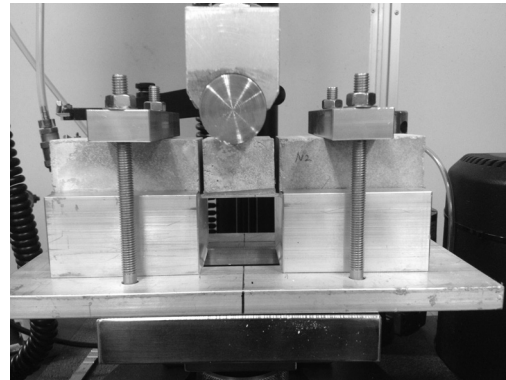


Fig. 10. TSL Gap Shear Load Test



(a) Linear block support test



(b) Gap Shear Load Test

Fig. 11. Three-point bending tests of TSL-coated beam specimens specified by EFNARC (2008)

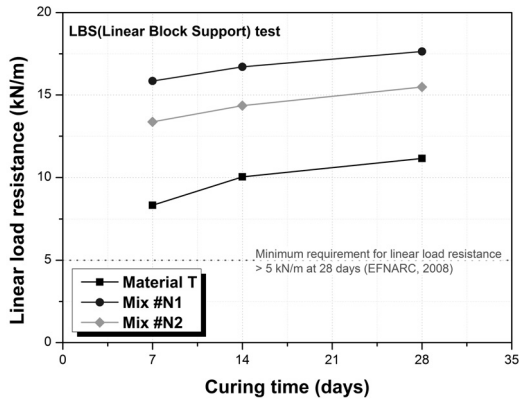
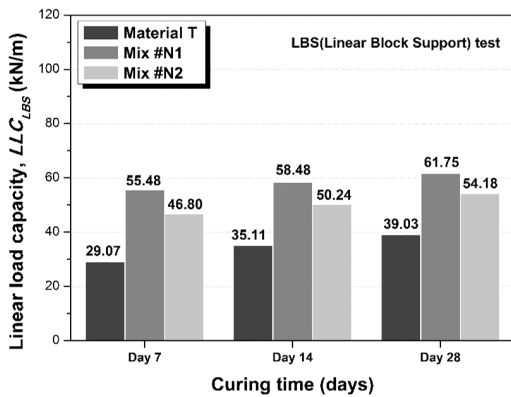


Fig. 12. Linear load resistance of TSLs from Linear block support tests

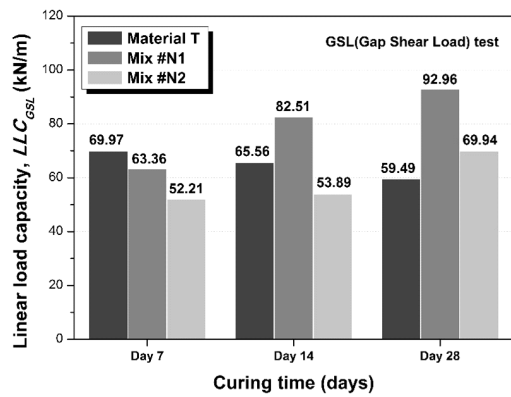
으로 규정하고 있는 EFNARC(2008) 기준을 재령 7일에 모두 상회하였으며, 특히 N1 시작품 배합의 선형 내하력(linear load resistance)이 가장 우수한 것으로 나타났다(Fig. 12). 또한 TSL과 암반 블록 사이에서 부착 파괴가 발생하지 않고 순수 전단파괴가 발생하는 조건을 모사하여 TSL의 고유 지지력을 평가하기 위한 GSL시험에서도 전반적으로 N1 시작품 배합의 지지력이 가장 크게 나타났다(Fig. 13).

ENNARC(2008)에서는 이상과 같은 LBS시험 및 GSL시험에서 얻어진 선형 내하력의 비율을 다음의 식 (1)과 같이 TSL의 안전율로 제시하고 있다.

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



(a) LBS test



(b) GSL test

Fig. 13. Average linear load capacities of TSLs obtained from two kinds of bending tests

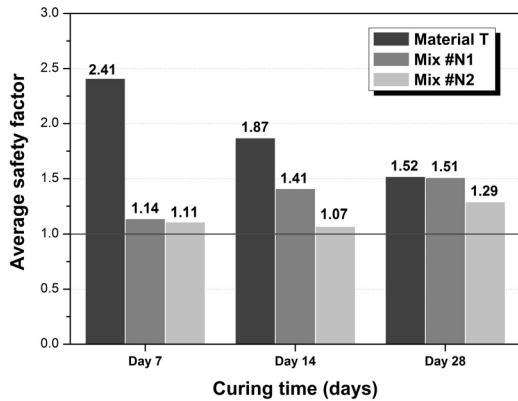


Fig. 14. Safety factors of TSLs at different curing ages

여기서 $S.F$ 는 TSL의 안전율, LLC_{GSL} 과 LLC_{LBS} 는 각각 GSL 및 LBS 시험으로부터 측정된 선형 내하력이다.

즉, 식 (1)로부터 GSL시험의 내하력이 LBS시험의 내하력보다 상대적으로 커야 TSL의 안전율 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다. 이것은 TSL에서 파단이 발생하지 않고 부착 파괴가 발생하면 해당 TSL의 두께가 충분한 것으로 EFNARC(2008)에서 고려하고 있기 때문이다. 따라서 GSL시험과 LBS시험에서 얻어진 내하력의 상대적인 비율을 안전율로 정의하는 것이다.

Fig. 13의 측정결과로부터 식 (1)에 의해 TSL의 안전율을 산정한 결과, 모든 재료에 대해 안전율이 1이상으로 나타났으나, 3.3절의 직접인장강도 측정 결과에서 확인한 바와 같이 외국산 T제품 대비 시작품들의 낮은 연성으로 인해 안전율이 상대적으로 낮게 나타났다. 특히

초기재령에서의 안전율의 차이가 크게 나타났다(Fig. 14).

3.7 TSL 성능평가 결과의 종합분석

EFNARC(2008)에서는 TSL의 등급을 Class S와 Class B로 구분하고 있다. 여기서 Class S는 영구적인 지보재와 코팅재로 사용할 수 있는 TSL을 의미하며, Class B는 비구조체인 풍화 방지용 코팅재로만 사용할 수 있는 TSL을 의미한다.

본 연구의 성능평가 결과에 따르면, 분말형 TSL인 N1 시작품 배합은 Class S의 TSL 성능기준을 모두 충족한 반면, N2 시작품 배합은 인장시험에서 파괴 시의 신장율 기준을 만족하지 못하여 Class B로 구분되었음을 알 수 있다(Table 4). 이상과 같은 결과는 앞선 3.3절의 인장시험 결과에서 살펴본 바와 같이, 외국산 T제품 대비 상대적으로 낮게 나타난 연성(신장율)에 의한 것으로 판단된다. 따라서 향후에는 분말형 N1 시작품 배합의 연성을 보다 향상시키기 위한 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 새로운 암반 지보재로 고려되고 있는 TSL의 국산화를 위한 첫 번째 단계로서, 기존 TSL 재료들의 성분분석 결과와 예비 배합시험 결과를 바탕으로 두 가지 배합조건의 분말형 TSL 시작품들을 제작하고 각각 성능들을 실험적으로 평가하였다.

TSL의 가장 기본적인 역학적 특성인 직접인장강도와 부착강도를 측정된 결과, 모든 시작품 배합조건들이 유럽 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 성능 기준들을

Table 4. Classification of two kinds of TSL prototypes based on EFNARC(2008) criteria

Performance categories	Requirements for a "Class S" TSL (EFNARC, 2008)	Tested TSL Materials			Performance comparison
		Prototype N1	Prototype N2	Product T	
Tensile strength	> 2 MPa (at 7 days)	O.K	O.K	O.K	$N1 > N2 > T$
Elongation at break (from tension test)	> 10% (at 28 days)	O.K	N.G	O.K	$T \gg N1 > N2$
Bond strength	> 1 MPa (at 28 days)	O.K	O.K	O.K	$N1 > T > N2$
Linear load capacity(LLC)	5 kN/m (at 28 days)	O.K	O.K	O.K	$N1 > N2 \gg T$
EFNARC bending test	LLCLBC	-	-	-	$N1 > N2 > T$
	LLCGSL	-	-	-	$N1 > T > N2$
Safety factor (from bending tests)	> 1	O.K	O.K	O.K	$T > N1 > N2$
Confinement	-	O.K	O.K	O.K	$N1 \approx T \approx N2$

크게 상회하였다. 하지만 액상과 분말이 혼합되는 2성분 외국산 TSL과 비교할 때, 인장파괴 시의 신장률이 상대적으로 작게 발현되어 이에 대한 보완이 필요한 것으로 나타났다.

TSL에 의한 압박의 구속효과를 간접적으로 파악하기 위한 TSL 코팅 압축시험 결과, TSL 재료들에 의한 모르타르 시험체의 압축강도 증진효과는 유사한 것으로 나타났다. 재령이 경과할수록 TSL에 의한 압축강도의 증진효과가 더욱 증가하였으며, 특히, 본 연구의 재령 28일에 측정된 TSL에 의한 압축강도 증가율은 무코팅 모르타르 시험체 대비 최소 155% 이상으로 나타났다.

EFNARC(2008)에서 제시하고 있는 TSL에 대한 두 가지 종류의 지지력 평가시험 결과, N1 시작품 배합조건이 가장 큰 지지력을 발현하였다. 하지만 상대적으로 연성이 큰 외국산 TSL보다는 TSL의 안전율이 작게 평가되었다.

본 연구에서 얻어진 이상의 결과들을 종합적으로 판단하면, 두 가지 TSL 시작품 배합 가운데 N2 배합은 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 파괴 시의 신장률 기준을 만족하지 못하여 비구조체인 코팅재료만 사용할 수 있는 것으로 나타났다. 반면, N1 배합은 본 연구의 비교대상인 외국산 TSL재료와 비교하여 상대적으로 큰 인장강도와 부착강도를 발현하는 등 모든 EFNARC 기준들을 만족하여 영구적인 지보재로 활용이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구에서 제작한 TSL은 경제적인 분말형인 관계로 상대적으로 고가인 외국산 2성분 TSL의 성능과 직접 비교하는 것이 어려울 수 있으나, 앞서 기술한 바와 같이 TSL의 성능을 보다 향상시키기 위해서는 연성에 대한 추가적인 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

또한 향후에는 TSL 시작품의 실제 현장타설에 의한 최종적인 성능검증 연구와 더불어 액상 재료의 사용을 고려한 2성분 TSL의 개발 연구도 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Ahn, Taesang, 2011, Thermal and mechanical studies of Thin Spray-on Liner (TSL) for concrete tunnel linings, Ph.D. dissertation, University of Western Ontario, Canada.
- ASTM, 2010, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, D638-10.
- 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, 73-87.
- Chang, S.-H., G.-P. Lee, J.-T. Han, Y.-T. Park, S.-W. Choi, G.-S. Hwang and M.-S. Choi, 2013, An Experimental Study on the Evaluation of Early-Age Mechanical Properties of Polymer-Based Thin Spray-on Liners, Tunnels & Underground Space, Vol. 23, No. 5, 413-427.
- EFNARC, 2008, Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunnelling.
- Han, J.-T., G.-P. Lee, Y.-T. Park, S.-W. Choi, G.-S. Hwang, M.-S. Choi and S.-H. Chang, 2013, An experimental study on bonding and bearing capacities of thin spray-on liner to evaluate its applicability as a tunnel support member, J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 6, 571-583.
- ITAttech, 2013, ITAttech design guidance for spray applied waterproofing membranes, ITAttech Activity Group Lining and Waterproofing, ITAttech Report No. 2.
- Lau, V., S. Saydam, Y. Cai and R. Mitra, 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, 1381-1388.
- Povin, Y., D. Stacey, J. Hadjigeorgiou and H. Yilmaz, 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, 3-43.
- Roberts, R., 2001, Time to look below the surface of membranes, Australian Mining Monthly, August, 62-63.
- Saydam, S., 2008, Ground Control - Use of Liner Support in Mining, Presentation file, MINE4300 - GEOTECHNICAL ENGINEERING, School of Mining Engineering, University of New South Wales.
- Stern, J., R.J. Gerber, A.T. Harrison and P.H. Ferreira, 2007, Investigation of the characteristics of thin spray liners(TSL's) and their use as an additional support medium in block cave mining, Proceedings of the 1st international Symposium on Block and Sub-level Caving, South Africa, 217-238.
- 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, 57-73.
- Yilmaz, H., 2007, Shear-bond strength testing of thin spray-on liners, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 107, 519-530.

1. Ahn, Taesang, 2011, Thermal and mechanical studies of Thin Spray-on Liner (TSL) for concrete tunnel linings,



장수호

1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2002년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 031-910-0661
E-mail: sooho@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구소
연구위원



한진태

1999년 서울대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2001년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

Tel: 031-910-0259
E-mail: jimmyhan@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구소
수석연구원



황귀성

2009년 단국대학교 공과대학 공학부
신소재공학과 공학사
2011년 단국대학교 대학원
신소재공학과 공학석사

Tel: 041-672-8877
E-mail: oddeye27@silkroadent.co.kr
현재 실크로드티앤디 연구개발팀 대리



이규필

1994년 한양대학교 공과대학 토목공학과
공학사
1997년 한양대학교 대학원 토목공학과
공학석사
2004년 한양대학교 대학원 토목공학과
공학박사

Tel: 031-910-0522
E-mail: freely@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구소
수석연구원



최순욱

1997년 건국대학교 공과대학 토목공학과
공학사
2004년 연세대학교 공학대학원 공학석사
2014년 연세대학교 대학원 토목환경공
학과 공학박사

Tel: 031-910-0243
E-mail: soonugi@kict.re.kr
현재 한국건설기술연구원 지반연구소
전임연구원



최명식

1993년 동국대학교 이과대학 화학과
이학사
1993년~2002년 코리아마스터빌더스

Tel: 011-1701-6571
E-mail: terminator@silkroadent.co.kr
현재 실크로드티앤디 상무