

Part II. 박층 뿜칠라이너 (Thin Spray-on Liner, TSL) 공법 - 굴착 및 지보기술위원회 -

1. 서론

박층 뿜칠 라이너(Thin Spray-on Liner, 이하 TSL)는 암반면에 뿜어 붙여지는 폴리머(polymer) 계열의 재료로 구성되며 비교적 양호한 암반 조건에서 숏크리트와 철망을 대체할 수 있는 새로운 지보재로서 고려되고 있다(Roberts, 2001). 현재 광산에서 적용되고 있는 TSL의 일반적인 타설 두께는 3~5mm이며 최대 10mm 미만으로서 숏크리트와 비교할 때 두께가 매우 얇은 것이 특징이다(EFNARC, 2008).

1980년대 후반에 캐나다의 Queen's University에서 최초로 TSL에 대한 연구를 수행한 이후로, 1990년대 말부터 새로운 TSL 제품들이 개발되면서 본격적으로 광산에 적용되기 시작하였다. 특히, 2000년대에 들어서 TSL에 대한 관심과 적용이 급증하여 2004년 기준으로 전 세계적으로 50개 이상의 광산에서 활용되고 있으며 계속 증가 추세에 있다(Povin 외, 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 외, 2008, Tannant, 2001).

하지만 TSL에 의한 암반 지보설계 과정과 방법이 확립되어 있지 않으며, 특히 숏크리트와 같이 주로 압축력을 받는 아치 거동을 하는 구조체로서 설계하는 일반적인 방법을 두께가 얇은 TSL에 적용하기가 어렵다(Povin 외, 2004). 따라서 TSL의 지보 성능을 평가하기 위한 가장 명확한 방법은 현장 및 실험실 시험을 통해 TSL의 특성을 파악하는 것이다(Tannant, 2004).

TSL의 역학적 특성을 평가하기 위한 다양한 시험방법들이 제시 및 시도되고 있지만(Stern 외, 2007, Yilmaz, 2007), EFNARC(2008)에서 제시하고 있는 두 가지 종류의 휨시험법을 제외하고는 표준화된 시험방법은 없으며 관련 시험결과들도 좀처럼 공개되지 않고 있다. EFNARC(2008)에서는 광산뿐만 아니라 토목분야의 터널에도 적용될 수 있는 것으로 보고하고 있으나 아직까지 터널에 적용된 사례는 파악되지 않고 있으며, 더욱이 우리나라에서는 TSL이 소개 또는 적용된 사례가 전무한 실정이다.

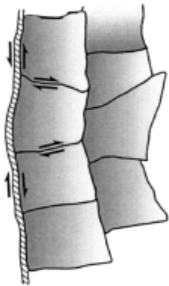
2. TSL의 개념과 특징

2.1 TSL의 지보 메커니즘

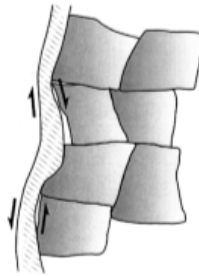
TSL의 특성 및 지보 성능 평가를 위한 시험을 실시하기 위해서는 지보의 다양한 거동 메커니즘을 고려할 필요가 있다. 이러한 지보의 거동 메커니즘은 그림 1에 정리된 단일 거동 또는 복합적인 거동으로 설명될 수 있다.

일반적으로 지보는 암반을 느슨하지 않은 상태로 유지하는 것이 주된 역할이다. 특히, 암반에 대한 TSL의 높은 부착력과 인장강도로 인해 암반 불연속면에서의 전단력 발생과 암반 블록의 회전을 방지할 수 있다(그림 1(a)). TSL과 암반 사이의 인터페이스 형상의

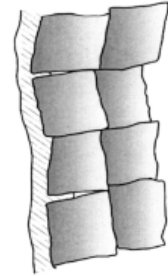
불규칙성으로 인해 부착력이 좋지 못한 경우에도, 인터페이스에서 전단 강도가 발현되어 암반면을 봉합하는 역할을 하며(그림 1(b), 침투성능이 우수하여 TSL 재료가 절리나 암반 균열 내로 들어가서 암반을 보강하는 효과도 기대할 수 있다(그림 1(c)). 상대적으로 두꺼운 슛크리트의 경우에는 전단 저항에 의해 암반 블록의 이동을 방지하지만(그림 1(d)), 높은 부착성을 가지는 박층의 TSL에 의해서는 TSL과 암반 사이의 인터페이스에서 인장력이 발생하게 되어 암반 블록의 이동을 방지한다(그림 1(e)). 또한 TSL의 뛰어난 기밀성(air tightness)으로 인해 갭내로부터의 공기 유입을 차단할 수 있어, 결국 암반의 팽창(dilation)을 방지하여 안정성 향상에 기여할 수 있다(그림 1(f)). 이와 더불어 슛크리트 라이닝과 마찬가지로 아치 효과에 의한 지보 성능과 폴리머 재료의 특성으로 인해 뛰어난 내구성을 가지고 있다. 이외에도 TSL에 발생할 수 있는 파괴 메커니즘으로는 전단파괴, 휨파괴, 좌굴(buckling) 등을 들 수 있다(그림 1(g)~1(i)).



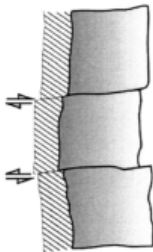
(a) Shear and rotational resistance with a bonded membrane



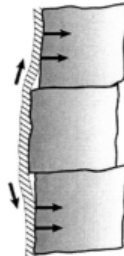
(b) Physical shear interlock with poorly bonded membrane



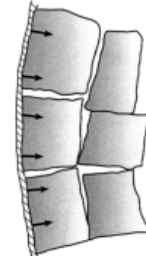
(c) Plugging of open joints and fractures



(d) Shear resistance of thicker shotcrete membrane



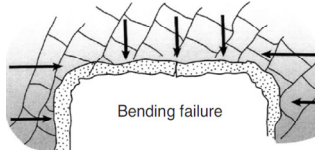
(e) Tension in membrane and bond strength



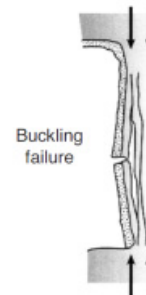
(f) Airtight membrane promoting 'suction' support pressure



(g) Shear failure of stiff/brittle membranes



(h) Bending failure of stiff/brittle membranes



(i) buckling failure of stiff/brittle membranes

〈그림 1〉 Mechanisms of surface support behavior(modified from Stacey, 2001)

2.2 TSL의 주요 구성 재료

TSL에 사용될 수 있는 폴리머(polymer)에는 폴리우레탄(polyurethane), 폴리요소(polyurea), 메타크릴(methacrylate) 및 이소시아네이트(isocyanate)가 해당된다. 이러한 폴리머의 사용으로 인해 빠른 응결 특성과 방수성능을 발휘할 수 있다. 또한 타설면에 대한 부착력, 인성, 내구성, 탄성, 충격저항성 등이 매우 우수하며, 슛크리트와 비교할 때 분진이 크게 감소되어 시공성이 향상된다. 하지만 폴리머 재료 가운데 이소시아네이트는 건강과 안전 측면에서 자주 논란이 되는 재료로서 대부분의 광산에서는 사용하지 않는 재료이다(Povin 외, 2004). 하지만 이소시아네이트로 인해 작업자들의 건강과 안전을 저해할 수 있다는 우려가 현재 TSL이 널리 활용되지 못하고 있는 이유 중의 하나가 되고 있다, TSL에 사용되는 재료는 화학적으로 인체의 건강과 안전과 관련된 제반 규정들을 만족해야 하기 때문에 실제로는 그렇지 않다. TSL의 활용을 저해하는 또 다른 이유로는 작업자들이 슛크리트와 록볼트의 사용에 익숙해져 있기 때문이기도 하다(Povin 외, 2004).

TSL의 혼합 방식에 따라 분말 단일형 또는 액상/액상형, 액상/분말형 등의 2성분으로 구분되며, 제조사 고유의 재료와 혼합 방식을 적용하고 있다(표 1). 제품에 따라 다소 차이는 있지만 응결이 빨라서 조기재령에서 매우 높은 인장강도를 발휘하는 것을 알 수 있다.

재료의 반응성에 따라 TSL을 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, 상온(20°C)에서 1시간 이내에 극한 인장강도의 최소 75% 발휘하는 것으로 정의된다. 폴리우레탄, 폴리요소, 메타크릴계 제품 등의 폴리머 재료가 이용되며, 일반적으로 2성분으로 구성되어 있다. 반면, 비반응성 라이너는 슛크리트나 폴리머/시멘트계 혼합물 등을 의미하는 것으로서, 양생시간이 더 길고 시간경과에 따라 감수현상과 강도 증진이 수반된다. 일반적으로 단일 성분의 펌프를 사용(액상, 분말형 또는 액상/액상)하며 반응성 라이너와 비교할 때 상대적으로 가격이 저렴하다(Povin 외, 2004).

이외에도 Spearing(2003)은 TSL의 강성에 따라 TSL의 성능 분류를 표 2와 같이 제시한 바 있다.

혼합방식에 따라 약간의 차이는 있으나, 슛크리트와 비교할 때 TSL의 타설장비는 매우 소형이며 낮은 압력의 압축공기로도 시공이 가능하다. 특히, TSL 재료를 타설장비의 호퍼(hopper)에 바로 투입하여 타설을 하기 때문에, 슛크리트와 달리 외부의 배치플랜트(batch plant)가 필요하지 않다는 점도 TSL의 또 다른 장점이다. 앞서 설명한 바와 같이 TSL의 재료 특성 상 빠른 응결과 높은 부착력으로 인해 조기 안정성 확보에 유리할 뿐만 아니라 타설 시 분진 발생이 슛크리트보다 적다. 일반적으로 TSL의 색상은 흰색 또는 밝은 회색 계열로서 갱내의 시인성이 향상된다는 장점도 있다(그림 2).

〈표 1〉 Comparison of physical attributes of spray-on area support coatings(Archibald & Nicholls, 2001)

Feature	Product B	Product C	Product D	Product E	Product F
Mix type	liquid/liquid (polyurethane)	liquid/liquid (hybrid polyurea/polyurethane)	liquid/liquid (polyurea)	liquid/liquid (methacrylate)	liquid/powder (latex-based)
Tensile strength (MPa)	10~18 (@ 1hour)	14~16 (@ 1hour)	18,5 (@ 1hour)	> 2,0 (@ 1hour)	> 1,0 (@ 8hours) & 3,0 @ 28days
Set time	10seconds	10seconds	10seconds	< 3minutes	N/A
90~95% cure time	10minutes	10minutes	10minutes	N/A	N/A

〈표 2〉 TSL performance categories(Spearing, 2003)

Category	Time to achieve 1MPa tensile strength	Tensile strength (at 1day)	Elongation (at 28days)
Non-reactive and rigid	> 1hour	> 1.0MPa	< 5%
Non-reactive and flexible	> 1hour	> 1.0MPa	> 5%
Reactive and rigid	< 1hour	> 1.0MPa	< 5%
Reactive and flexible	< 1hour	> 1.0MPa	> 5%
Reactive, high strength and rigid	< 1hour	> 5.0MPa	< 5%
Reactive, high strength and flexible	< 1hour	> 5.0MPa	> 5%



(a) Batching and mixing of TSL



(b) TSL spraying



(c) TSL after spraying

〈그림 2〉 General TSL spraying procedures(Saydam, 2008)

2.3 TSL의 특성

일반적인 슛크리트와 TSL의 특성을 비교하면 다음의 표 3과 같다. TSL의 구성 재료에 따라 다소 차이는 있지만 양생 시간이 매우 짧으며, 특히 TSL의 리바운드는 5% 미만으로서 슛크리트와 매우 큰 차이를 보인다. 또한 얇은 두께의 박층 시공이 이루어지기 때문에 슛크리트 대비 TSL의 시공속도는 10배 내외로 향상되고 재료비용 역시 폴리우레탄계 TSL을 제외하면 슛크리트의 50% 수준 이하로 평가된다(Saydam, 2008).

〈표 3〉 Comparisons between Shotcrete and TSLs(Saydam, 2008)

Criteria	Shotcrete	Reinforced shotcrete	Bolts and Straps	Polyurethane TSL	Cementious TSL	Acrylic TSL	Sealant
Material cost(AU%)	15~35	25~55	7~15	20~50	7~12	6~9	2~5
Application rate(m ² /min)	0.14~0.33	0.12~0.2	0.11~0.15	1.77~2.32	2~2.5	1.8~2	0.45~1.0
Average labour required	3	3	2	2	2	2	2
Rebound (%)	Wet	10~25	10~25	< 1	< 5	< 3	< 3
	Dry	10~30	10~30				
Rock-feature visibility	poor	poor	good	fair-good	poor	fair-good	fair-good
Cure time(full strength)	days	days	-	minutes	1hr	minutes	minutes

Steyn 외(2007)가 슛크리트와 TSL의 특징을 비교한 결과에서도, 1개 재료를 제외하고는 16.5% 이상의 시공비용 절감을 기대할 수 있으며 타설 시간도 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다(표 4).

〈표 4〉 Comparisons of construction cost, time and construct ability between shotcrete and TSLs(Steyn et al., 2007)

Description (thickness)	Shotcrete (± 25mm)	TSL A (± 3mm)	TSL B (± 5mm)	TSL C (± 5mm)	TSL D (± 5mm)
Approximate factory product cost per m ² *	R 65,63	R 105,64	R 75,11	R 55,34	R 75,11
Approximate dedicated labour cost per m ² *	R 90,25	R 55,00	R 55,00	R 55,00	R 55,00
Approximate total cost per m ² *	R 155,88	R 160,64	R 130,11	R 110,34	R 130,11
Rebound	Poor	Average	Excellent	Excellent	Excellent
Bags per m ²	3,5	0,33	0,5	0,5	0,5
kg per m ²	88	6,5	12,5	12,5	12,5
Ease of application	Cumbersome	difficult	Easy	Easy	Easy
Time to cover 45m ²	150minutes	65minutes	55minutes	55minutes	55minutes
Equipment	Large	Small	Small	Small	Small
Interference with development cycle	High	Minimal	Minimal	Minimal	Minimal

*R: Rand(Currency of Republic of South Africa)

그러나 앞서 설명한 바와 같이 TSL의 재료, 혼합방식 등에 따라 발현되는 성능은 차이가 있으며, Steyn 외(2007)는 TSL의 제반 강도 특성에 따라 TSL을 표 5와 같이 세 등급으로 분류하였다.

〈표 5〉 Classification of TSL characteristics(Steyn et al., 2007)

Material properties	Strong TSL	Average TSL	Weak TSL
Uniaxial compressive strength(MPa)	> 30	20	10
Tensile strength(MPa)	5	3	1
Shear strength(MPa)	15	10	5
Tensile adhesive strength(MPa)	4	2	1
Shear bond strength(MPa)	5	3	1

3. TSL의 기술개발 현황

유럽의 EFNARC에서는 지난 2008년에 자원개발 분야뿐만 아니라 터널 공사시에도 활용할 수 있는 TSL에 대한 시방/가이드라인을 제시하였으며, ITA에서도 최근 적용이 급증하고 있으며, TSL의 일종인 뿔칠 방수 멤브레인에 대한 가이드를 제시하고 있으며, 세계적인 기업인 BASF, MINOVA 등의 재료회사에서도 관련 재료를 개발 및 상용화 준비 중에 있다.

국내의 경우 토목분야의 지하공간 건설에 적합한 TSL재료 개발 및 성능검증 연구를 건설기술연구원에서 수행하였으며, 2017년 7월 현장적용 및 기술이전을 완료하였다.

참고문헌

1. 장수호, 최순욱*, 이철호, 강태호, 황귀성, 김진태, 최명식(2016), 균질한 품질 확보와 분진 저감을 위한 2성분 박층 뿔칠 라이너의 개발과 성능평가, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제26권 제5호, pp. 441~453.
2. 이철호*, 장수호, 이기철, 김동욱(2015), 접촉 거동을 고려한 TSL(Thin Spray-on Liner)의 수치해석 연구, 한국터널지하공간학회논문집, 제17권 제6호, pp. 665~674.
3. 장수호, 이규필, 한진태*, 최순욱, 황귀성, 최명식(2015), 분말형 박층 뿔칠 라이너 시작품의 제작과 성능평가, 터널과 지하공간, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제25권 제3호, pp. 293~302.
4. 한진태, 이규필, 박영택, 최순욱, 황귀성, 최명식, 장수호*(2013), 터널 지보재로서의 적용성 검토를 위한 박층 뿔칠 라이너의 부착성과 지보성능의 평가, 한국터널지하공간학회논문집, 제15권 제6호, pp. 571~583.
5. 장수호, 이규필, 한진태*, 박영택, 최순욱, 황귀성, 최명식(2013), 폴리머 기반 박층 라이너의 초기재령 특성 평가를 위한 실험적 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제23권 제5호, pp. 413~427.
6. Archibald, J.F. and T. Nicholls, 2001, Comparison of Reinforcement Benefits of Spray-on Linings in Side-by-Side Unconfined Compression Failure Tests on Rock, Proceedings of the 103rd Annual General Meeting of the CIM, Quebec, Canada, 13-25.
7. EFNARC, 1996, European Specification for Sprayed Concrete.
8. EFNARC, 2008, Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunnelling.
9. 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.
10. Lee, G.-P., D.-G. Kim, G.-J. Bae and S.-H. Chang, 2005, Test Methods of Adhesion Strength of Shotcrete for Quality Control, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 25, 125-131.
11. 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.
12. Roberts, R., 2001, Time to look below the surface of membranes, Australian Mining Monthly, August, 62-63.
13. Spearing, A.J.S., 2003, Proposed thin support liner definitions: performance categories, and test methods, Proceedings of the 3rd International Seminar on Surface Support Liners: Thin Sprayed Liners, Shotcrete and Mesh, Section 11, Quebec, Canada.
14. 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.
15. Stacey, T.R., 2001, Review of membrane support mechanisms, loading mechanisms, desired membrane performance, and appropriate test methods, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, October 2001, 343-352.
16. 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.
17. 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.
18. Tannant, D.D., 2004, Thin Spray-on Liners for Underground Rock Support - Testing and Design Issues, Surface Support in Mining, Y. Povin, D. Stacey and J. Hadjigeorgiou(eds), Australian Centre for Geomechanics, 51-59.
19. Tannant, D.D., G., Swan, S. ESPLEY and C. Graham, 1999, Laboratory test procedures for validating the use of thin sprayed-on liners for mesh replacement, Proceedings of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum 101st Annual General Meeting, Calgary, Alberta, published on CD-ROM, p.8.
20. 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.