

RESEARCH ARTICLE

실물 재하실험에 의한 뿔칠 방수 멤브레인이 타설된 세그먼트 라이닝의 역학적 성능 평가

강태호¹, 최순욱¹, 이철호^{1,2}, 박병관², 김진태³, 최명식³, 장수호^{1,2*}

¹한국건설기술연구원 지반연구소, ²과학기술연합대학원대학교(UST) 스마트도시·건설융합전공, ³실크로드티앤디 태안공장

Evaluation of Mechanical Performance of a Segment Lining coated by a Sprayed Waterproofing Membrane by a Full-scale Loading Test

Tae-Ho Kang¹, Soon-Wook Choi¹, Chulho Lee^{1,2}, Byungkwan Park², Jintae Kim³, Myung-Sik Choi³, and Soo-Ho Chang^{1,2*}

¹Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Smart City&Construction Engineering, University of Science and Technology (UST)

³Taeon Factory, Silkroad T&D Co., Ltd.

*Corresponding author: sooho@kict.re.kr

Received: January 31, 2018

Revised: February 5, 2018

Accepted: February 5, 2018

ABSTRACT

The application of sprayed waterproofing membrane with high adhesion and ductility is considered to be promising as a measure for repair and reinforcement of a tunnel structure. Therefore, a powder-type and one-component membrane prototype with high tensile and bond strengths was made in this study. Then, its reinforcement effect on a shield segment was evaluated by carrying out a series of full-scale loading tests of segment specimens on which the membrane was sprayed. From the tests, it was confirmed that the initial cracking loads increased by approximately 34% due to cracking retardation by membrane coating. Even though the increase of failure loads were not so high as cracking loads, the strain-softening behaviors were observed from specimens coated by the membrane. Therefore, it is expected that the membrane coated on the inner surface of a lining might be effective in preventing its brittle failure.

Keywords: Spray-applied waterproofing membrane, Segment, Lining, Full-scale test, Tunnel, Reinforcement

초록

뿔칠 방수 멤브레인이 가진 높은 부착력과 연성 특성으로 인해 터널 구조물의 보수·보강 목적으로 멤브레인을 적용하는 방안이 고려되고 있다. 따라서 본 연구에서는 인장강도와 부착강도가 향상된 분말 1성분 멤브레인 시제품을 제작하였고, 이를 실물 세그먼트의 내측에 타설하여 실물 실험체를 제작하고 실물 재하실험을 통해 멤브레인의 보강효과를 파악하고자 하였다. 실험결과, 멤브레인의 코팅으로 인해 세그먼트의 균열 발생이 지연되어 세그먼트의 초기 균열발생하중이 평균적으로 약 34% 증가하였다. 반면, 멤브레인 코팅에 의한 파괴하중의 증가율은 상대적으로 크지 않았다. 단, 멤브레인의 코팅으로 인해 파괴하중 이후에 변형을 연화 현상이 관찰되어, 멤브레인으로 라이닝 내측을 코팅하게 될 경우에는 라이닝의 취성 파괴를 방지하는데 효과가 있을 것으로 추정된다.

핵심어: 뿔칠 방수 멤브레인, 세그먼트, 라이닝, 실물 실험, 터널, 보강



서론

뿔칠 방수 멤브레인(sprayed waterproofing membrane)은 기존의 시트 방수 멤브레인(sheet waterproofing membrane)을 대체하기 위해 비교적 최근에 개발된 재료이다(ITAtech, 2013). 특히, 뿔칠 방수 멤브레인은 타설면(substrate)에 대해 높은 부착력을 발현하기 때문에, 타설면인 콘크리트 또는 숏크리트 라이닝과 일체화되어 복합 구조체(composite structure)로서 기능을 발현하여 싱글셸(single-shell) 터널 구조를 형성할 수 있고 이로 인해 라이닝의 두께를 줄일 수 있는 효과도 기대할 수 있다(Chang *et al.*, 2016; Holter, 2016; Makhlof & Holter, 2008; Thomas, 2009).

또한 유럽을 중심으로 노후한 터널 구조물의 보수보강과 복원에 대한 이슈가 증대되고 있다. 특히, 공용 중인 터널 구조물에 대한 반복적인 보수보강이 이루어질 경우, 터널의 내공 단면적이 축소되는 문제점이 있다. 이에 노후한 터널 구조물을 보수보강하면서도 두께가 얇은 박층 시공에 의해 터널 단면적의 축소를 최소화할 수 있는 암반 지보재인 TSL(Thin Spray-on Liner)나 뿔칠 방수 멤브레인의 활용성에 대한 검토가 이루어지고 있다(Ahn, 2011; Chang *et al.*, 2016a; Chang *et al.*, 2015; Makhlof & Holter, 2008). 뿔칠 방수 멤브레인에 대한 설계 가이드라인과 성능기준을 제시하고 있는 ITAtech(2013)에서는 멤브레인을 지보 또는 보강 목적으로 사용하는 개념이 포함되어 있지는 않으나, 폴리머(polymer) 재료를 기반으로 하며 타설두께가 3~5 mm 내외라는 점에서 암반 지보재인 TSL과 유사한 부분이 있다. 이에 Chang *et al.*(2016b)의 연구에서도 TSL과 비교할 때 인장강도와 강성은 상대적으로 열위에 있으나 뿔칠 멤브레인을 지보재로 활용할 수 있는 가능성에 대해 보고한 바 있다. Ahn(2011)은 콘크리트 휨시험체 하부에 TSL을 3~4 mm의 두께로 피복하였을 때 최대 휨강도가 증가한다고 보고하였다. 콘크리트 라이닝 하부에 뿔칠 방수 멤브레인을 코팅한 경우에 대한 수치해석적 연구 사례에서도 멤브레인의 적용으로 인해 최대 휨강도가 증가하는 경향이 보고되었다(Lee *et al.*, 2017). 하지만 앞서 기술한 바와 같이 뿔칠 방수 멤브레인은 방수 목적으로 적용되기 때문에, 주로 멤브레인의 방수성과 물리·역학적 특성에 대한 연구가 주를 이루고 있으며(Choi *et al.*, 2017a, b; Holter & Geving, 2016), 실제 터널 라이닝 구조에 대한 실물 실험 등을 통해 뿔칠 방수 멤브레인의 구조적 보강효과를 검증한 연구 사례가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실물 실험을 통해 터널 구조체의 하나인 쉴드터널의 세그먼트 라이닝에 타설된 뿔칠 방수 멤브레인의 보강 효과를 파악하고자 하였다. 내측에 멤브레인이 타설된 실물 세그먼트에 대해 휨시험을 실시하여, 세그먼트의 초기균열하중, 최대 하중 그리고 파괴 이후의 거동을 분석하여 뿔칠 방수 멤브레인을 보강 목적으로 적용할 수 있는 가능성에 대한 검토를 실시하였다.

뿔칠 방수 멤브레인의 기본성능 평가

멤브레인 시제품의 배합조건과 성능평가 시험 개요

뿔칠 방수 멤브레인과 TSL은 재료의 구성에 따라 분말재료로만 구성된 1성분(one-component)과 액상+분말 또는 액상+액상으로 구성된 2성분(two-component)으로 구분된다(Chang *et al.*, 2016; Tannant, 2001). 뿔칠 방수 멤브레인의 타설 두께는 일반적으로 약 3~5 mm이며, 폴리머를 포함한 재료를 타설 장비의 호퍼(hopper)에서 혼합하여 노즐(nozzle)에서 분사되는 방식으로 시공된다. 분말 1성분 재료의 경우에는 투입 재료와 물이 노즐에서 혼합되어 분사된다. 본 연구에서 적용된 뿔칠 방수 멤브레인은 분말 1성분의 시제품으로서 재료에 대한 배합조건은 Table 1과 같다. 이상의 분말 재료와 물은 1:3의 중량비로 혼합되어 멤브레인을 형성한다.

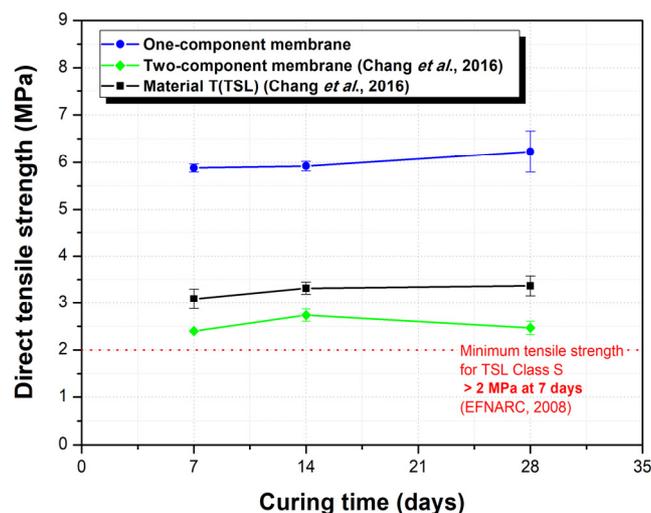
Table 1. Mixing condition of the one-component powder membrane material

Materials	Weight percentage (%)
Alumina cement	15
Calcium carbonate	14.1
Anhydrous gypsum	5
Aluminum hydroxide	10
Thickener	0.85
Promoter	0.05
Polymer (vinyl acetate and ethylene, powder-type)	55

실물 파괴실험에 의한 뿔칠 방수 멤브레인의 구조적인 보강효과를 검토하기에 앞서, 이상과 같은 분말 1 성분 시제품의 기본적인 역학적 특성을 평가하기 위한 실험실 시험들을 실시하였다. 기본적으로 ITAtech(2013)와 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 인장강도, 파괴 시의 신장율(elongation at break) 및 부착강도(bond strength)에 대한 평가를 실시하였다. 특히, 본 연구에서는 멤브레인을 보강 목적으로 적용하는 검토 연구를 실시하게 되므로, 암반 지보재인 TSL에 대한 EFNARC(2008)의 성능 기준을 함께 적용하였다. 또한 ITAtech(2013)와 EFNARC(2008)에서 규정한 품질관리 대상의 성능지표는 아니지만 멤브레인의 시공성(Stubberfield, 2016)을 간접적으로 파악하기 위하여 쇼어경도(shore hardness)를 재령별로 함께 측정하였다.

직접전단강도 및 파괴 시의 신장율

본 연구에서는 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 ASTM(2010)의 시험방법에 따라 뿔칠 방수 멤브레인 시제품의 직접인장강도를 측정하였다. 시험결과, 본 연구에서 적용한 분말 1 성분 방수 멤브레인의 재령 7일 인장강도는 평균 5.9 MPa로서 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 2 MPa를 크게 상회하는 것으로 나타났다(Fig. 1). 본 시험결과를 Chang *et al.*(2016)이 2종류의 TSL과 방수 멤브레인에 대해 수행한 시험결과와 비교한 결과, 본 연구에서 적용한 분말 1 성분 멤브레인 시제품의 인장강도가 기존 유사 재료들의 인장강도보다 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 반면, 직접인장강도가 향상된 만큼, 파괴 시의 신장율은 약 60% 수준으로서

**Fig. 1.** Direct tensile strength of the waterproofing membrane at different curing ages

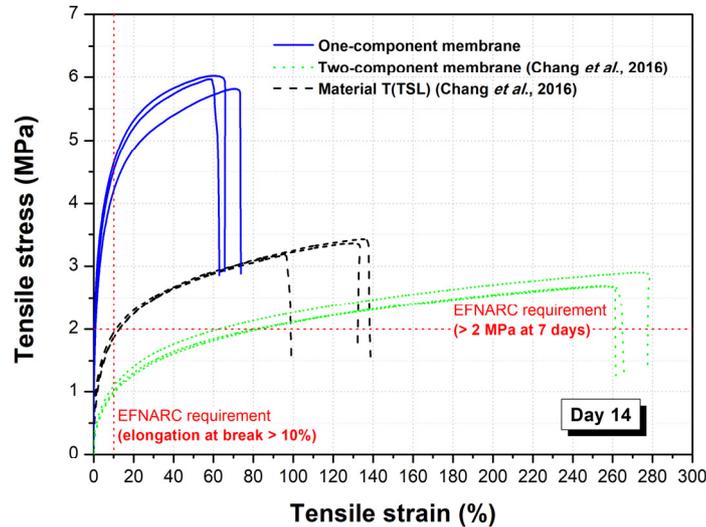


Fig. 2. Tensile stress-strain curves for the waterproofing membrane (Day 14)

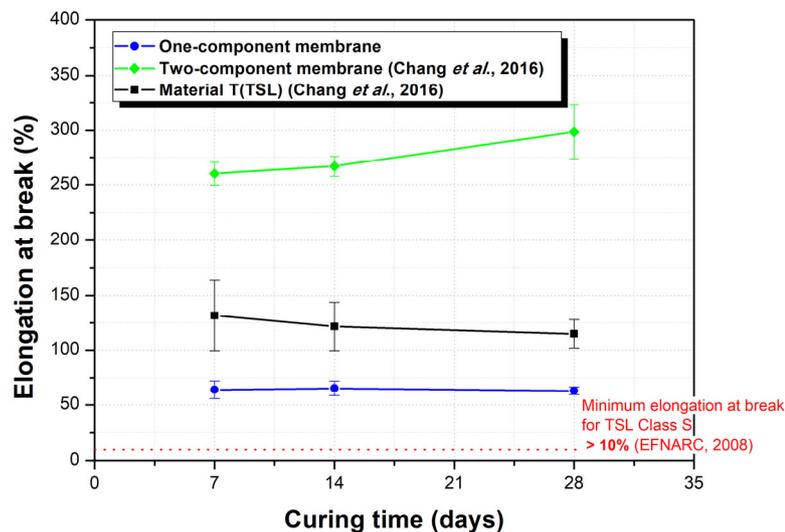


Fig. 3. Elongation at break of the waterproofing membrane at different curing ages

기존 유사 재료들보다 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이러한 경향은 직접인장시험에서 얻어진 인장응력-인장변형률 곡선에서도 확인할 수 있다(Fig. 2). 하지만 본 연구에서 제작한 분말 1 성분 멤브레인의 재령 7일~28일 신장율은 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 파괴 시의 신장율 기준인 10%를 모두 상회하였다(Fig. 3).

쇼어경도

ASTM(2015)에서 제시한 표준시험법에 따라 멤브레인 시제품의 쇼어경도(Shore A hardness)를 측정하였다. 본 연구에서 제작한 멤브레인 시제품의 쇼어경도를 측정한 결과, 재령 6일 이후에는 쇼어경도값이 약 95 정도로 수렴하는 것으로 나타났으며, 뿔칠 방수 멤브레인의 추가 타설이 가능한 쇼어경도 수준(Chang *et al.*, 2016; Stubberfield, 2016)인 25는 제작 후 약 4시간에 발현되는 것으로 나타났으며, 숯크리트의 후속 타설이 가능한 수준인 쇼어경도 50는 약 6시간 후에 도달하였다. 부착강도 측정을 위한 인발

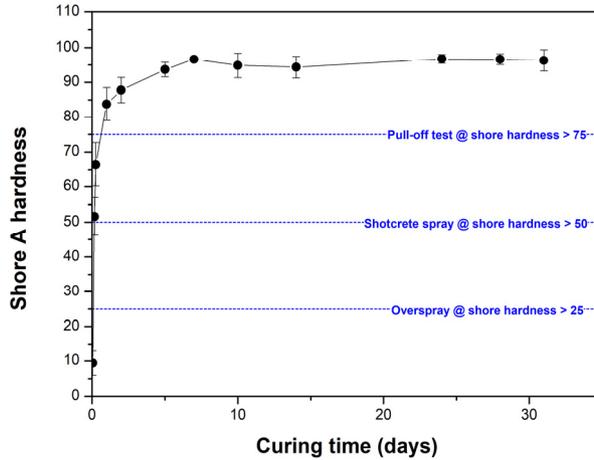


Fig. 4. Shore A hardness of the waterproofing membrane at different curing ages

시험(pull-off test)이 가능한 수준인 쇼어경도 75는 약 2일 후에 발현되었다 (Fig. 4).

부착강도

멤브레인 시제품의 부착강도를 측정하기 위하여 BS EN 1542(1999)에서 제시하고 있는 표준시험법에 의한 인발시험을 실시하였다. 인발시험 결과, 멤브레인 시제품의 재령 7일 부착강도는 평균 2.86 MPa로서 ITAtec (2013)과 EFNARC(2008)에서 각각 멤브레인과 TSL에 대해 규정하고 있는 재령 28일의 최소 부착강도인 0.5 MPa 및 1 MPa를 크게 상회하였다. 재령 28일의 평균 부착강도는 3.89 MPa로 기록되어 재령에 따라서 소폭 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이상의 실험실 시험들을 통해, 본 연구에서 제작한 분말 1 성분 멤브레인 시제품은 ITAtech(2013)과 EFNARC(2008)에서 규정하고 있는 뿔칠 방수 멤브레인과 TSL의 역학적인 성능기준들을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

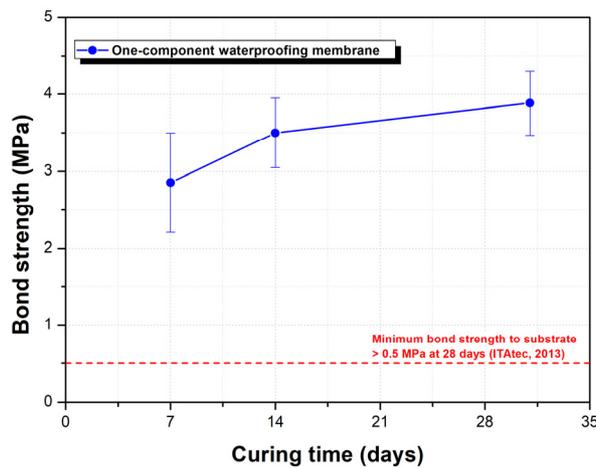


Fig. 5. Average bond strength of the waterproofing membrane at different curing ages

실물 재하실험용 실험체 제작 및 실험방법

세그먼트 실험체

본 연구에서는 ○○빛물배수터널 현장에서 실제 사용된 외경 4.8 m, 폭 1.2 m 및 두께 0.25 m인 쉘드터널용 세그먼트 라이닝의 A타입(Type A) 세그먼트를 실물 재하실험을 위한 실험체로 사용하였다. ○○빛물배수터널에 사용된 세그먼트에는 설계강도가 40 MPa인 콘크리트와 항복강도가 400 MPa인 철근(SD400)이 적용되었으며, 특히 공칭직경이 16 mm인 철근들이 주철근으로서 총 6개가 배근되었다(Fig. 6 및 Table 2).

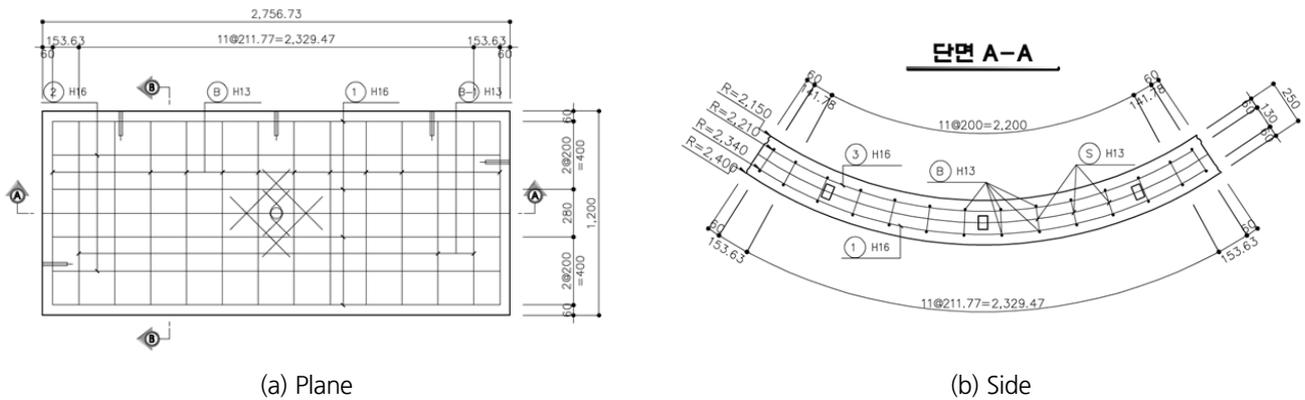


Fig. 6. Dimension and shape of a segment specimen (unit: mm)

Table 2. Segment preparation condition

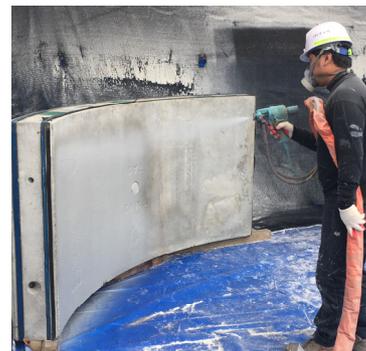
Design compressive strength of concrete	Rebar (SD 400)	
	Arrangement	Reinforcement amount (A_s)
40 MPa	D16 @ 200 mm (6 EA)	1191.66 mm ²

세그먼트 실험체에 대한 뽁칠 방수 멤브레인의 타설

본 연구에서는 터널 라이닝 내측에 피복되는 뽁칠 방수 멤브레인의 구조적인 보강 효과를 파악하기 위하여, 3.1 절에서 기술한 실물 세그먼트 실험체의 내측에 앞선 2장에서 설명한 분말 1 성분 멤브레인 시제품을 타설하였다. 타설 시에는 분말 1 성분 멤브레인 타설에 사용되는 Meyco사의 Piccola 장비를 사용하였으며, 앞선 실험실 시험에서와 마찬가지로 분말 재료와 물의 중량비를 1:3의 비율로 하여 타설을 실시하였다. 본 연구에서는 멤브레인의 두께에 따른 보강 효과의 차이를 파악하고자, 멤브레인의 타설 두께를 3, 5, 7 mm로 설정하였으며 각각의 타설 두께 조건별로 실험체를 3개씩을 제작하였다(Table 3 및 Fig. 7). 또한 비교 대상으로서 멤브레인을 타설하지 않은 무피복(uncoated) 세그먼트와 주로 건축물 분야에서 방수 목적으로 많이 적용되고 있는 기존 폴리우레아(polyurea) 재료를 타설한 세그먼트를 각각 3개씩 추가로 제작하였다(Table 3 및 Fig. 8). 이때 폴리우레아는 고압 스프레이 장비를 통해 구조물 벽면, 내부, 철판 등의 대상에 직접 분사되어, 이로써 도막을 형성하는 방수 및 코팅 시스템으로 사용되며 내화학적으로 우수하다. 폴리우레아의 도막 작업은 고온상태($\geq 60 \sim 70^\circ\text{C}$)의 주체와 경화제를 작업현장에서 직접 혼합하고 기압된 상태에서 분사하는 방식으로 빠른 경화특성을 가지고 있어 습도가 낮을 때는 큰 영향을 받지 않으나, 다소 습도가 높을 경우에는 상대적으로 재

Table 3. Segment specimen conditions for sprayed waterproofing membrane

	Specimen condition	Thickness	Sprayed material
1	No membrane (uncoated)	-	-
2	Waterproofing membrane coating	3 mm	One-component membrane
3	Waterproofing membrane coating	5 mm	One-component membrane
4	Waterproofing membrane coating	7 mm	One-component membrane
5	Polyurea coating	1 mm	Kangnamchem, KA690


Fig. 7. Spraying the one-component waterproofing membrane on the segment specimens

Fig. 8. Equipment and materials (A and B) for polyurea coating

료의 부착에 어려움이 있다. 본 연구에서 적용된 폴리우레아 재료 물성은 Table 4와 같으며(Kangnamchem, 2018), 본 연구에서 제작된 멤브레인 시제품과 비교할 때 가격이 고가이고 상대적으로 타설속도가 느리지만 인장강도와 신장율이 모두 높은 재료임을 알 수 있다.

Table 4. Physico-mechanical properties of polyurea used in this study (Kangnamchem, 2018)

Materials	Mixing ratio (Vol%)	Tack-free drying time (sec)	Initial curing time (25°C/min)	Shore A hardness	Tensile Strength (MPa)	Tearing strength (N/mm)	Elongation (%)
Polyurea (KA690)	100	20 ~ 30	3~5	95±5	≥ 18	≥ 50	≥ 300

실물 재하실험 방법

본 연구에서는 실물 세그먼트의 휨실험 시에 실험체 상부의 재하를 위하여 실대형 재하 시스템의 중앙부에 설치된 유압 서보제어 액추에이터(최대 재하용량: 100톤, 최대 스트로크: 300 mm)를 사용하였다. 실물 세그먼트에 대한 기존 연구사례들(Lee *et al.*, 2014; 2013; 2012)을 참고하여 상부 액추에이터 하부에는 지간이 450 mm인 2개의 선하중 재하판을 부착하였고(Fig. 9), 실험체 하부에는 Fig. 10과 같이 본 연구에 적용된 세그먼트의 치수와 형상에 적합하도록 제작한 롤러 베이스를 설치하여 세그먼트 실물 실험체에 대해 4점 휨실험(four-point bending test)을 실시하였다. 본 연구에서 제작한 세그먼트들에 대한 모든 실험 시에는 서보 제어에 의한 변위제어 실험을 실시하였으며, 이때 재하점을 기준으로 하여 변위속도를 5 mm/min으로 설정하였다. 또한 Fig. 9와 같이 세그먼트 시험체 하부에 하중-변위 분석을 위한 변위계(LVDT)를 설치하였고, 재하 하중 단계별로 세그먼트 표면의 균열 발생을 측정하기 위한 영상처리용 사진기를 설치하였다. 이상과 같은 영상처리기법에 의해 하중 재하를 통해 발생하는 균열 폭을 0.1 mm 정밀도로 확인하였다(Lee *et al.*, 2013).



Fig. 9. Panoramic view of a full-scale bending test on a segment specimen



Fig. 10. Roller base for a full-scale bending test

멤브레인이 타설된 세그먼트의 실물 휨실험 결과분석

세그먼트 하부에 타설을 하지 않은 Specimen 1번 세그먼트(Table 3 참조)의 휨실험을 3회 실시한 결과, 초기 균열발생 하중은 151.90~179.34 kN로 나타났으며 파괴하중은 412.58~464.52 kN로 기록되었다(Figs. 11~12 및 Table 5). 이때 초기 균열발생 하중은 앞선 3.3절에서 설명한 바와 같이, 실물 휨실험 시에 세그먼트 하부에 설치한 카메라로 촬영한 영상에서 균열이 발생하기 시작하는 시점들을 분석하여 확인하였다. 실제로 하중-변위 곡선에서도 최대하중의 약 40~50% 수준에서 균열 발생으로 인해 하중-변위 곡선 상에서 기울기가 변화하는 변곡점이 공통적으로 나타남을 확인할 수 있다(Figs. 11~16). 파괴 후에 관찰된 Specimen 1번 세그먼트 실험체들에서는 휨응력 발생으로 인해 연직하중과 평행한 방향으로 다수의 균열들이 발생하였고, 파괴 이후에도 재하가 계속 이루어짐으로 인해 상부 양측 하중 재하점 사이의 압축측 콘크리트에는 압괴 파괴가 발생한 것으로 나타났다(Fig. 12b).

멤브레인과 폴리우레아가 타설되어 세그먼트 내측이 코팅된 실험조건들(Specimen 2~5번 조건, Table 3 참조)에서는 두께가 얇음에도 불구하고 높은 부착력과 인성 특성으로 인해 초기 균열하중과 파괴하중이 증가된 것을 확인할 수 있었다(Table 5 및 Figs. 13~16). 이때 멤브레인의 두께가 7 mm로 타설된 실험체(Specimen 4번 조건)들에 대한 실물시험 시에는 1개 실험체가 운반 과정에서 파손되어 나머지 2개의 실험체에 대해서만 실험이 실시되었다.

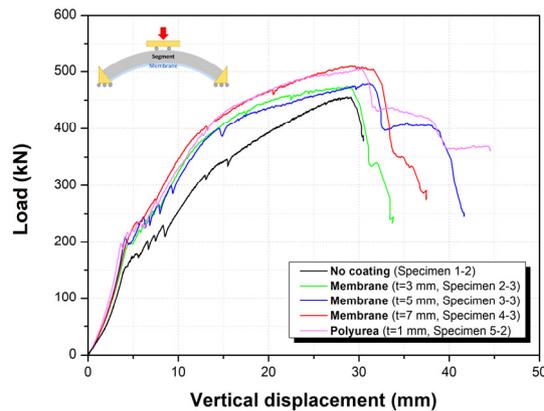
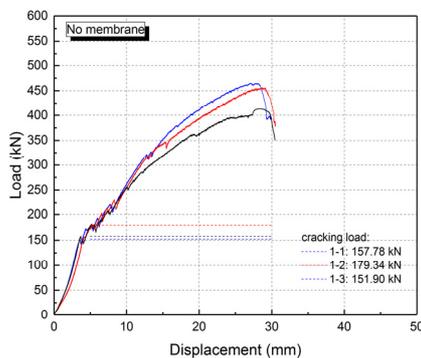


Fig. 11. Examples of load-displacement curves obtained from full-scale bending tests



(a) Load-displacement curve

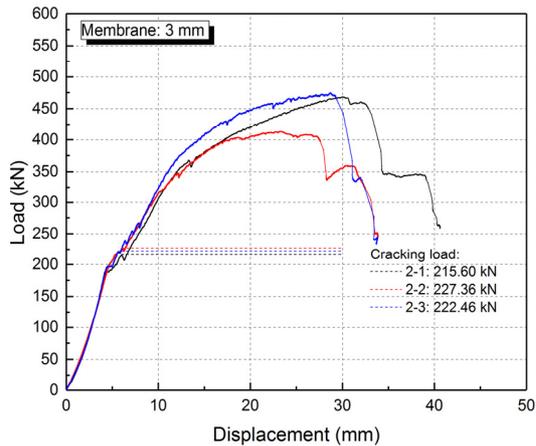


(b) Center line view after failure

Fig. 12. Full-scale bending test results for Specimen 1 condition (no coating)

Table 5. Summary of full-scale test results: cracking and failure loads

Specimen condition	Load (kN)	Test results				
		1	2	3	Average	Rates of increase
1. No membrane	Initial cracking load	157.78	179.34	151.90	163.01 ± 14.45	-
	Failure load	412.58	455.70	464.52	444.27 ± 27.79	-
2. Membrane (t = 3 mm)	Initial cracking load	215.60	227.36	222.46	221.81 ± 5.91	36.07% ↑
	Failure load	468.44	413.56	474.32	452.11 ± 33.51	1.76% ↑
3. Membrane (t = 5 mm)	Initial cracking load	200.90	200.90	208.74	203.51 ± 4.53	24.85% ↑
	Failure load	461.58	424.34	479.22	455.05 ± 28.02	2.43% ↑
4. Membrane (t = 7 mm)	Initial cracking load	-	226.38	236.18	231.28 ± 6.93	41.88% ↑
	Failure load	-	508.62	509.60	509.11 ± 0.69	14.60% ↑
5. Polyurea (t = 1 mm)	Initial cracking load	213.64	196.98	219.52	210.05 ± 11.69	28.86% ↑
	Failure load	481.18	504.70	488.04	491.31 ± 12.10	10.59% ↑

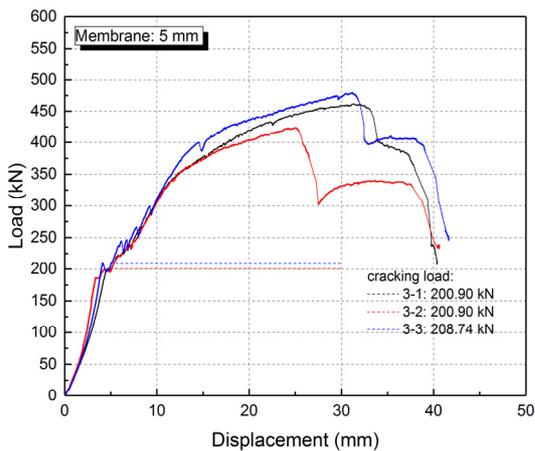


(a) Load-displacement curve



(b) Center line view after failure

Fig. 13. Full-scale bending test results for Specimen 2 condition (membrane, t = 3 mm)

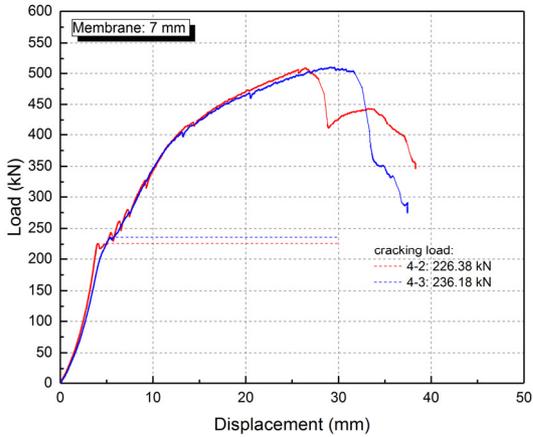


(a) Load-displacement curve



(b) Center line view after failure

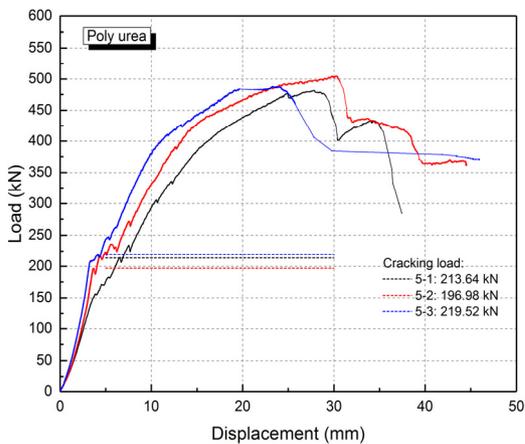
Fig. 14. Full-scale bending test results for Specimen 3 condition (membrane, t = 5 mm)



(a) Load-displacement curve



(b) Center line view after failure

Fig. 15. Full-scale bending test results for Specimen 4 condition (membrane, $t = 7$ mm)


(a) Load-displacement curve



(b) Center line view after failure

Fig. 16. Full-scale bending test results for Specimen 5 condition (polyurea, $t = 1$ mm)

특히, 초기 균열발생 하중에 대한 실험결과를 통계적으로 분석한 결과에서도 무코팅 세그먼트 실험결과와 비교할 때 멤브레인과 폴리우레아 코팅에 의해 유의미한 초기 균열발생하중의 증가를 확인할 수 있었다(Fig. 17a 및 Table 2). 단, 멤브레인 두께 증가에 따른 균열하중의 뚜렷한 증가는 관찰되지 않았다. 반면, 본 연구에서 제작한 멤브레인 시제품과 기존 폴리우레아 재료들이 코팅된 경우들에 대한 초기 균열발생하중의 측정결과들은 서로 오차 범위에 해당하여 유사한 수준으로 파악된다(Fig. 17a).

파괴하중의 경우에도 무코팅 세그먼트와 비교할 때 멤브레인과 폴리우레아 코팅에 의해 파괴하중의 평균값이 약 6% 증가하는 것으로 나타났으나, 초기 균열발생 하중의 경우와 비교할 때 파괴하중의 증가폭이 크지 않고 오차 범위에 해당하여 코팅에 의한 파괴하중의 증가율은 크지 않은 것으로 판단된다(Fig. 17b). 이상과 같이 멤브레인과 폴리우레아 코팅은 콘크리트 구조물의 균열검토 설계 시에 중요한 입력조건인 균열발생하중을 평균적으로 약 34% 증가시키는 효과가 있기 때문에(Fig. 17a), 터널 라이닝의 내하력 증가와 노후 라이닝의 균열 발생에 대한 저항성을 높이는데 효과가 있을 것으로 판단된다.

멤브레인과 폴리우레아로 코팅된 세그먼트 실험체들에 대한 파괴 후 균열발생 경향을 살펴보면, 무코팅 세그먼트 실험체와 유사한 경향을 나타내었으나 전반적으로 재하 방향과 평행한 인장균열들이 상대적으로 일정한 간격으로 뚜렷하게 발생하였다(Figs. 12

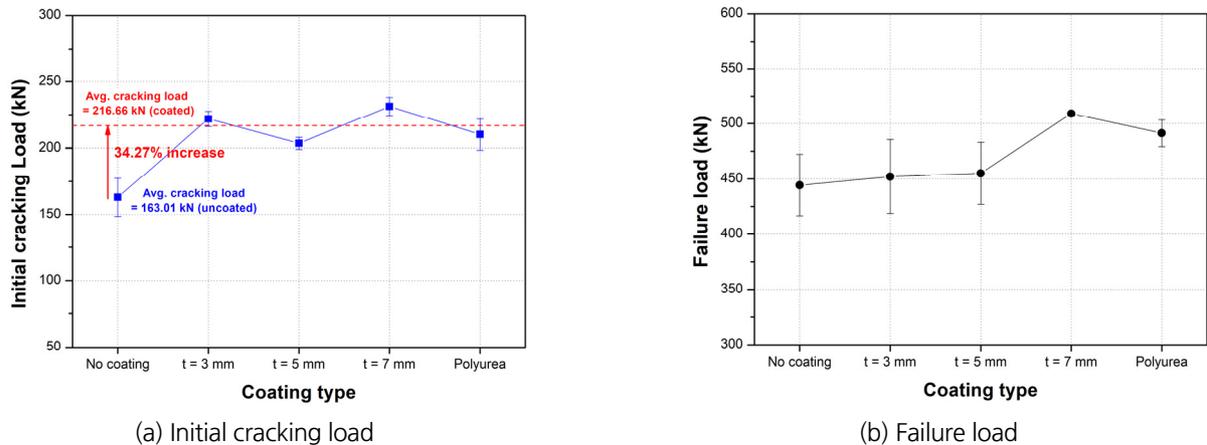


Fig. 17. Cracking and failure loads from uncoated and coated segment specimens

~16). 또한 균열이 멤브레인과 폴리우레아를 관통하여 외측의 세그먼트 내부로 성장한 것으로 나타나, 4점 휨실험에서 휨인장응력이 가장 크게 발생하는 세그먼트 내측에 코팅된 멤브레인과 폴리우레아에서 균열이 먼저 발생한 후에 세그먼트 내부의 콘크리트를 관통한 것으로 파악된다. 따라서 앞서 살펴본 바와 같이 콘크리트와 비교할 때 인장강도와 부착강도가 높으며 연성 거동을 보이는 멤브레인과 폴리우레아에 의해, 하중 재하 초기 단계에서의 균열발생이 무코팅 세그먼트와 비교할 때 지연되어 결론적으로 앞서 기술한 바와 같이 내측이 코팅된 세그먼트의 균열하중이 증가한 것으로 파악된다.

멤브레인과 폴리우레아로 코팅된 세그먼트 실험체들의 파괴 후 거동 역시, 일부 실험체들을 제외하고는 무코팅 세그먼트와 비교할 때 파괴 하중 이후에 급격한 취성파괴가 발생하지 않고 일정한 잔류강도가 유지되는 현상을 나타내었다(Figs. 12~16). 이는 역시 멤브레인과 폴리우레아가 가지는 높은 부착강도와 연성에 의한 것으로 사료되며, 멤브레인으로 라이닝 내측을 코팅하게 될 경우에는 라이닝의 급격한 취성 파괴를 방지하는데도 효과가 있을 것으로 추정된다.

결론

본 연구에서는 뿔칠 방수 멤브레인의 높은 부착력과 연성 특성을 활용하여 멤브레인을 터널 라이닝의 구조적인 보강 목적으로 적용하기 위한 가능성을 검토하기 위하여 실물 파괴실험을 실시하였다. 이상과 같이 수행된 주요 연구결과들을 정리하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 제작한 분말 1성분의 뿔칠 방수 멤브레인은 ITAtch(2013)과 EFNARC(2008)에서 각각 방수 멤브레인과 TSL에 대해 규정하고 있는 인장강도, 파괴 시의 신장률 및 부착강도의 최소 성능기준을 크게 상회하는 것으로 나타나 방수 멤브레인과 TSL로의 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 멤브레인의 시공성에 대한 척도로 사용되는 쇼어경도를 측정된 결과, 재령 6일 이후에는 쇼어경도가 약 95 수준으로 수렴하였으며 슛크리트의 후속 타설이 가능한 쇼어경도 50 수준은 제작 후 약 6시간에 발현되었다.
2. 본 연구에서 제작한 분말 1성분의 뿔칠 방수 멤브레인에 의한 구조적 효과를 파악하고자, 실제 쉴드터널에서 사용된 세그먼트의 내측면에 멤브레인의 두께를 달리하며 타설을 실시하였다. 이때 비교 대상으로 구조물의 외부 방수 목적 등으로 사용되는 기존

의 폴리우레아 타설을 병행하였다.

3. 이상과 같이 제작된 실물 세그먼트 실험체들에 대해 4점 휨실험을 실시한 결과, 무코팅 조건과 비교할 때 멤브레인으로 내측이 코팅된 세그먼트들의 균열하중과 파괴하중이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 멤브레인의 높은 인장강도와 부착강도로 인해 세그먼트의 균열 발생이 지연되어 세그먼트의 초기 균열발생 하중이 평균적으로 약 34% 증가하였다.
4. 파괴하중의 경우에도 무코팅 세그먼트와 비교할 때 멤브레인 코팅에 의해 파괴하중이 평균적으로 약 6% 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 파괴하중의 증가폭이 크지 않고 오차 범위에 해당하여 코팅에 의한 파괴하중의 증가율은 크지 않은 것으로 판단된다. 단, 멤브레인의 코팅 효과로 인해, 파괴하중 이후에 급격한 취성파괴가 발생하지 않고 대체로 일정한 잔류강도가 유지되다가 최종적으로 파괴되는 현상이 나타났다. 따라서 멤브레인으로 라이닝 내측을 코팅하게 될 경우에는 라이닝의 급격한 취성 파괴를 방지하는데 효과가 있을 것으로 추정된다.
5. 멤브레인의 두께에 따른 초기 균열발생 하중과 파괴하중의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않아 본 연구에서 적용된 멤브레인의 두께 범위인 3~7 mm 조건에서는 유사한 보강효과를 나타내는 것으로 파악되며, 역시 본 연구에서 수행한 실험조건에서는 멤브레인 인과 폴리우레아의 보강효과는 유사했던 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(지반함몰 발생 및 피해저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·보강 기술개발, 15SCIP- B108153-02)의 일환으로 작성되었습니다.

References

- Ahn, T., 2011, Thermal and Mechanical Studies of Thin Spray-On Liner (TSL) for Concrete Tunnel Linings, Ph.D. Thesis, University of Western Ontario, Canada.
- ASTM, 2010, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, D638-10.
- ASTM, 2015, Standard Test Method for Rubber Property Durometer Hardness, ASTM D2240-15.
- BS EN 1542:1999, 1999, Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Measurement of bound strength by pull-off.
- Chang, S.-H., G.-P. Lee, J.-T. Han, S.-W. Choi, G.-S. Hwang and M.-S. Choi., 2015, Development of a Power-type Thin Spray-on Liner and Its Performance Evaluation at Different Curing Ages, Tunnel & Underground Space, Vol. 25, No. 3, 293-302.
- Chang, S.-H., S.-W. Choi, C. Lee, T.-H. Kang, G.-S. Hwang, J. Kim and M.-S. Choi., 2016a, Development and Performance Evaluation of a Two-component Thin Spray-on Liner to Guarantee Its Homogeneous Qualities and to Reduce Dust, Tunnel & Underground Space, Vol. 26, No. 5, 441-453.
- Chang, S.-H., T.-H. Kang, S.-W. Choi, C. Lee, G.-S. Hwang and M.-S. Choi., 2016b, An Experimental Study on Fundamental Properties of a Sprayable Waterproofing Membrane, Tunnel & Underground Space, Vol. 26, No. 3, 220-234.

- Choi, S.-W., T.-H. Kang, S.-H. Chang, C. Lee, J. Kim and M.-S. Choi, 2017a, A preliminary study of watertightness and salt water resistance of spray-applied membrane”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 2, 283-299.
- Choi, S.-W., T.-H. Kang, S.-H. Chang, C. Lee, M.-S. Choi and K. Kim, 2017b, Analysis of Water Penetration through Pores in Spray-applied Waterproofing Membrane Using X-ray CT Images, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 16, No. 4, 211-219.
- EFNARC, 2008, Specification and Guidelines on Thin Spray-on Liners for Mining and Tunnelling.
- Holter, K.G. and S. Geving, 2016, Moisture Transport Through Sprayed Concrete Tunnel Linings, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 49, 243-272.
- Holter, K.G., 2016, Performance of EVA-Based membranes for SCL in hard rock, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 49, 1329-1358.
- ITAtch, 2013, ITAtch design guidance for spray applied waterproofing membranes, ITAtch Activity Group Lining and Waterproofing, ITAtch Report No. 2.
- Kangnamchem, 2018, <http://kangnamchem.com/eng/product/polyurea/>
- Lee, C., K. Lee, D. Kim, S.-W., Choi, T.-H. Kang and S.-H. Chang, 2017, Numerical study on structural reinforced effects of concrete lining by spray-applied waterproofing membrane, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 19, No. 3, 551-565.
- Lee, G.-P., G.-J. Bae, D.-Y. Moon, T.-S. Kang and S.-H. Chang, 2013, Evaluation of steel fiber reinforcement effect in segment lining by full scale bending test, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, 215-223.
- Lee, G.-P., G.-J. Bae, T.-S. Kang, S.-H. Chang and S.-W. Choi, 2014, Analysis of segment lining cracking load considering axial force by varying boundary condition, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 2, 173-180.
- Lee, G.-P., Y.-T. Park, S.-W. Choi, G.-J. Bae, S.-H. Chang, T.-S. Kang and J.-S. Lee, 2012, An experimental study on mechanical behavior of shield segment with high-strength concrete and high-tension bar, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 3, 215-230.
- Makhlouf, R. and K. Holter, 2008, Rehabilitation of concrete lined tunnels using a composite sprayed liner with sprayed concrete and sprayable waterproofing membrane, *Proc. of ITA World Tunnel Congress 2008, Agra, India*, 1175-1182.
- Stubberfield, K., 2016, Masterseal 345® Application Course – Lecture Material, *Tunnelling & Underground Construction Academy (TUCA)*, London, April 13, 2016.
- 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.
- Thomas, A., 2009, *Sprayed Concrete Lined Tunnels*, Taylor & Francis, London.