



유리섬유를 이용한 하수관의 고강도 현장경화 비굴착 보수 공법 재료의 개발 및 물성 특성 연구

Study of structural properties and development of high strength Cured-In-Place Pipe (CIPP) liner for sewer pipes using glass fiber

지현욱¹·Dan Daehyun Koo²·유성수¹·강정희^{1*}
Hyon Wook Ji¹·Dan Daehyun Koo²·Sung Soo Yoo¹·Jeong-Hee Kang^{1*}

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부

²Indiana University-Purdue University Indianapolis, Department of Engineering Technology

¹Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Department of Engineering Technology, Indiana University-Purdue University Indianapolis

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

ABSTRACT

Cured-in-place-pipe(CIPP) is the most adopted trenchless application for sewer rehabilitation to extend the life of the existing sewer without compromising both direct construction and indirect social costs especially applied in the congested urban area. This technology is globally and domestically known to be the most suitable for partial and full deteriorated pipe structure rehabilitation in a sewer system. The typical design of CIPP requires a significant thickness of lining to support loading causing sewage flow interruption and increasing material cost. This paper presents development of a high strength glass fiber composite lining material for the CIPP application and structural test results. The test results exhibit that the new glass fiber composite lining material has 12 times of flexural strength, 6.2 times of flexural modulus, and 0.5 Creep Retention Factor. These test results can reduce lining design thickness 35% at minimum. Even though taking into consideration extra materials such as outer and inner films for actual field applications, the structural capacity of the composite material significantly increases and it reduces 20 percent or more line thickness as compared to the conventional CIPP. We expect that the newly developed

Received 14 February 2020, revised 26 March 2020, accepted 31 March 2020.

*Corresponding author: Jeong-Hee Kang (E-mail: kangjeonghee@kict.re.kr)

• 지현욱 (박사후연구원) / Hyon Wook Ji (Postdoctoral Researcher)

경기도 고양시 일산대로 283, 10223

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

• Dan Daehyun Koo (Associate Professor)

Indiana University-Purdue University Indianapolis, 799W. Michigan St. ET 314J, Indianapolis, IN 46202, USA

• 유성수 (수석연구원) / Sung Soo Yoo (Senior Researcher)

경기도 고양시 일산대로 283, 10223

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

• 강정희 (박사후연구원) / Jeong-Hee Kang (Postdoctoral Researcher)

경기도 고양시 일산대로 283, 10223

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

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.

CIPP lining material lowers material costs and minimizes flow capacity reduction, and fully replaceable to the conventional CIPP lining materials.

Key words: Trenchless technology, Sewer rehabilitation, CIPP, Glass fiber reinforced plastic, Creep test

주제어: 비굴착공법, 하수도 갱생, 현장경화관, 유리섬유강화플라스틱, 크리프 테스트

1. 서 론

하수도의 목적은 도시 침수 예방과 시민의 보건 향상이며, 이를 위하여 표면 우수를 신속하게 배제 및 운송하고 오수를 처리장까지 운반하는 역할을 한다. 하수관은 지하에 매설되어 있어 눈에는 직접 보이지 않으나 지상의 시설물들처럼 준공 이후 지속적인 교통 및 지반 하중, 지하수의 영향, 사용상의 노후화로 인하여 서서히 파손된다. 노후화된 하수관은 균열을 발생시키고, 그 균열을 통하여 토사 및 나무뿌리, 지하수 등이 침입하여 관내 흐름을 방해하거나, 반대로 하수가 유출되어 토양을 오염시키거나 싱크홀의 원인이 되는 등 내외부적 문제를 발생시킨다 (Buttrick and Van Schalkwyk, 1998). 이러한 문제를 예방 혹은 해결하기 위해서 적절한 시기에 보수나 교체가 필요하다.

노후화된 하수관은 교체되어야 하지만 일반적인 굴착공사는 도로 교통과 시민의 통행을 방해하고, 장시간 하수도 사용에 불편을 주는 등의 사회적 비용을 발생시키기 때문에 가능하면 비굴착 공법으로 보수하여 사용연한을 증가 시키는 것이 바람직하다. 비굴착공사는 굴착공사에 비해 교통 통제가 없고(Gangavarapu et al., 2003), 민원과 환경 영향이 적으며(Cohen, 2013), 사고 위험이 적고(Kamat, 2011), 생산성(Jung and Sinha, 2007)과 경제성이 높은(Najafi and Kim, 2004) 장점을 가지고 있다. 비굴착 선진국에서는 비굴착 보수 및 갱생 공법으로 pipe bursting, slip-lining, modified

cross section liner 등 다양한 방법들이 활용되고 있으나 (McKim, 1997), 국내에서는 현장경화관(Cured-In-Place-Pipe; CIPP)을 주로 사용한다. CIPP란 열경화성수지(Thermosetting resin)로 함침시킨 라이너 튜브를 하수관에 넣고 열을 가하여 현장에서 경화시키는 공법이다 (Kampbell, 2007; Syachrani et al., 2010).

시공방법을 단계별로 살펴보면 크게 공장 제작 공정과 현장설치 공정으로 구분할 수 있다. 공장에서는 하수관의 사이즈에 맞게 라이너 튜브를 제작한다. 그리고 현장에서는 CCTV를 이용하여 관의 상태를 점검하고, 관내부를 청소한 후 함침이 된 라이너 튜브를 삽입, 경화, 냉각, 마무리 작업을 수행한다. CIPP 라이너 튜브를 하수관에 삽입하는 공법은 견인 공법과 반전 공법이 있다. 견인 공법은 튜브의 끝에 와이어를 체결하여 건너편 맨홀에서 당김으로써 하수관 내부로 라이너 튜브를 삽입한다 (Fig. 1(a)). 반전 공법은 튜브에 공기압이나 수압을 가하여 반전하면서 하수관 내부로 라이너 튜브를 삽입한다 (Fig. 1(b)). 작업시간 측면에서 보면 라이너 튜브제작에는 재료의 준비부터 제작까지 수일이 걸리지만, 국내 현장에서는 한 팀이 하루 동안 대략 100 m 길이 이상의 CIPP 라이너의 설치 및 마무리가 가능하다. 시공속도는 현장 조건, 시공방법, 숙련도 등에 따라 매우 상이할 수 있으나 굴착공사와 비교하였을 때 상대적으로 공사 기간 및 굴착에 의한 교통방해를 획기적으로 감소시키는 장점을 가지고 있어 도심 하수관로 갱생에 있어 매우 유용한 기술이다.

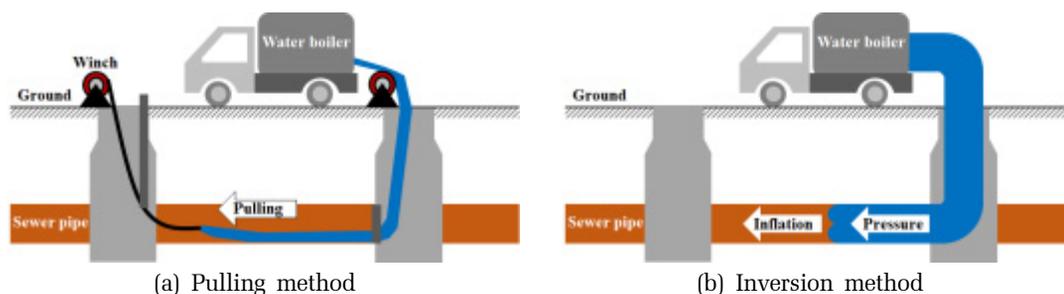


Fig. 1. Cured-In-Place Pipe (CIPP) installation.



기존 하수관로 내부에 라이너를 설치하는 공법의 특성상 지반 및 교통 하중에 대항하는 높은 강도를 만족하기 위하여 라이너의 두께를 증가시킬수록 관 내부의 공간이 감소하여 통수능이 감소할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 국내에서 제작 및 시공하고 있는 CIPP 튜브는 주로 불포화폴리에스터 수지(Unsaturated polyester resin), 폴리에스터 펠트, 폴리에스터나 폴리우레탄 코팅 필름으로 구성된다. 이 재료들은 CIPP 개발 초기부터 지금까지 전통적으로 사용해온 재료로서 경제적이지만 일반적으로 장·단기 강도 특성이 우수하지 못하다. NASTT (2015)에 의하면 불포화폴리에스터 수지로 만든 라이너는 장기 강도가 50%까지 저하하고, 에폭시 수지를 사용하면 장기 강도가 70%까지만 감소한다고 알려져 있다. KS와 ASTM F1216에서는 장기 재하에 따른 강도 감소를 50%로 사용하고 있다.

낮은 단기 및 장기 강도는 라이너의 두께 설계에 직접적인 영향을 준다. CIPP 라이너가 하수관이 받는 지반 하중과 교통하중 등을 충분히 부담하기 위해서 라이너의 설계두께를 높여야 하고, 이러한 하중조건을 충족하는 두꺼운 라이너는 하수관의 통수능력을 감소시킨다.

통수능력의 손실을 막고, 더 안전한 라이너를 만들기 위해 비굴착 공법 선진국에서는 유리섬유 혹은 고강도 합성재료를 활용한 연구를 진행하고 있다 (Lancaster and Zarghamee, 2019; Sedgeman et al., 2019). 특히 유리섬유를 이용한 CIPP는 자외선 경화 방식과 결합하여 국외에서 사용이 증가하고 있는데, 햇빛에 노출을 방지해야 하므로 현장에서의 시공품질 유지가 비교적 쉽지 않다는 단점이 있다. 그러나 보일러의 사용이 필요 없고, 경화시간이 짧은 장점이 있다. 유리섬유를 이용한 CIPP 기술은 국내에서 개발 초기 단계이고, 기존과 전혀 다른 라이너의 제작 방식과 시공 방식이 도입되는 것은 단기간에 이루어지기 힘들다. 하수관로 연장이 14만 km (Ministry of Environment, 2017)나 되는 국내 하수관로는 장기적으로 갱생의 수요가 매우 높으며 보다 향상된 품질의 CIPP 시공기술이 도입되어 보다 많은 사회적 비용을 저감하는 것이 사회경제적 측면에서 바람직하다.

CIPP는 기존의 관로가 완전히 파괴되기 전 형태를 유지하고 있는 경우 구조적 갱생(Rehabilitation)을 통하여 관로의 기능을 복구 시킨다. 구조적 갱생이란 구조적인 성능을 복구시켜 수명을 증대 시킨다는 의미이며, 보수와 보강의 의미를 담고 있다. ASTM F1216(ASTM

International, 2009)은 기존관의 상태가 토압과 상재하중에 충분한 지지력을 가지고 있는 경우에 적용하는 부분 파손관 조건(Partially Deteriorated Gravity Pipe Condition)과 기존관이 구조적으로 양호하지 못하여 토압과 활하중을 지지할 수 없을 정도로 파손의 정도가 심한 경우에 적용하는 전체파손관 조건(Fully Deteriorated Gravity Pipe Condition)으로 구분하여 CIPP의 두께 설계공식을 제공한다. 기존 관로의 형태를 유지하고 있다면 다소 파손되었거나 변형이 진행된 하수관로라도 CIPP로 보수 및 보강하여 사용할 수 있다는 의미이다.

국내 CIPP 적용 기준은 변형이 관경의 10% 이내인 경우에만 한정하고 있어서, 실질적으로 파손 정도가 경미한 경우에 대해서 CIPP를 주로 적용하고 있다. 국내에서도 CIPP 갱생 공법을 전체파손관까지 확대하면 교통통제, 민원, 태풍 및 장마의 영향으로 인한 공사기간 연장 등의 사회적 비용과 실질적 비용을 절감할 수 있을 것이다. 그러나 기존의 제품을 그대로 사용하면서 적용조건을 변경하는 것은 인식을 바꾸는 것이기 때문에 쉽지 않다. 본 연구는 CIPP의 구조적 특성에 대한 KS나 ASTM의 최소기준 대비 높은 구조적 특성을 갖는 라이너를 개발하여 CIPP의 적용 범위를 넓히고자 한다.

새로운 CIPP 라이너 개발의 방향은 기존의 CIPP 시공 장비를 사용하면서 CIPP 라이너의 성능을 향상시킬 수 있도록 하는 것이 실용적이다. 현재 국내의 일반적인 CIPP 라이너의 사용은 불포화폴리에스터 수지와 펠트를 이용한 튜브의 제작과 온수 혹은 스팀을 이용한 전통적인 경화 기술을 사용하고 있다. 본 연구는 기존의 온수 및 스팀 양생 장비를 최대한 활용하고 동시에 월등히 향상된 강도를 가진 CIPP 라이너의 개발을 지향한다. 본 연구는 상기 서술한 목표를 달성하기 위해 기존 재료에 유리섬유를 다양한 조합으로 첨가하였고, 규격화된 시험을 통하여 이 재료들의 구조적 강도와 특징을 검토하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 단기특성시험

단기 특성 시험에서 사용된 CIPP 라이너 시편은 주재료인 isophthalic 계열의 불포화폴리에스터 수지에 Table 1에서 제시한 재료들을 다양하게 조합하고, 적

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159

Table 1. Composite CIPP sample materials for short-term tests (Ji et al., 2018)

Materials	Abbreviation	Thickness (mm)	Unit Weight (g/cm ³)
Unsaturated Polyester Resin	N/A	N/A	1.13
Thin Polyester Woven Fabric	TF	<0.5	0.637
Polyester Needle Felt	F	2.0	0.306
Coating Polyester Needle Felt	CF	1.5	0.469
Thin Roving Cross Glass Fiber Mat	TG	0.5	0.9
Roving Cross Glass Fiber and Chopped Strand Mat	G	1.0	0.96

층 및 함침하여 제작하였다. Ji et al. (2018)은 유리섬유를 포함한 다양한 재료를 이용하여 단기특성을 시험하였고, 본 연구는 그 중 Table 1의 재료를 사용하여 단기 및 장기특성 시험을 수행하였다.

펠트는 두께 및 함침의 품질에 영향을 주어 라이너의 물성치를 변화시키기 때문에 다양한 두께의 펠트를 준비하였다. 펠트는 평균 두께 0.5 mm 이하로 직조된 얇은 폴리에스터 펠트(Thin polyester woven fabric; TF)와 평균 두께 2 mm의 일반적인 폴리에스터 니들 펠트(Polyester needle felt; F)를 사용하였다. CIPP 라이너의 겹면에 사용하는 펠트는 외부에 코팅이 되어 수지를 가두고 외부로부터 물의 침투와 레진의 유출을 차단하는 불투수막의 역할을 하는데, 코팅을 포함하는 라이너의 물성치를 고려하기 위하여 코팅펠트(Coating polyester needle felt; CF)를 사용하였다.

유리섬유는 두 종류를 사용하였다. 평균 두께 0.5 mm 유리섬유(Thin roving cross glass fiber mat; TG)는 격자로 짜여진 E-Glass 소재의 유리섬유 1 겹으로 이루어져 있다. 굵은 격자형태로 짜여있어 섬유의 모양을 잘 잡아주지는 않지만 방향성이 없고 다중으로 적층할 수 있어 수지와 결합하여 복합재료가 되면 유리한 특성을 가질 수 있다.

두께 1 mm의 유리섬유(Roving cross glass fiber and chopped strand mat; G)는 격자로 짜여진 유리섬유 1겹과 잘게 잘라져서 부직포처럼 붙어있는 1겹이 붙어 있으며, E-Glass 소재로 만들어졌다. 이 유리섬유는 2겹으로 부착되어 라이너 제작 및 취급 시 섬유의 구조가 흐트러지지 않는다. 두께가 비교적 두껍고 세로와 가로 방향에 따른 구조성능의 변화가 적은 장점도 있다. 본 연구에서는 최적의 구조적 특성을 찾기 위해 위의 재료들을 다양하게 배합하여 실험을 실시하였다.

일반적인 CIPP 라이너는 열경화성플라스틱과 펠트를 결합한 복합재료이다. 최소 강도 기준은 가장 범용적으로 사용되는 ASTM F1216(ASTM International,

2009)에서 제시하는 최소굽힘강도(Flexural Strength) 31 MPa, 굽힘탄성계수(Flexural Modulus) 1,724 MPa이다. 국내 KS M 3550-9(Korean Standards Association, 2016) 에서도 같은 강도를 최소값으로 규정한다. 국내에서는 주로 불포화폴리에스터 레진과 폴리에스터 펠트, 코팅펠트를 혼합해서 이용하는데, 굽힘강도가 약 50 MPa, 굽힘탄성계수가 약 2,500 MPa이다. 굽힘강도와 굽힘탄성계수는 두께 대비 굽힘에 대해 저항하는 힘의 크기를 나타내며, ASTM D790(ASTM International, 2010)에 제시된 3점 굽힘 시험에 의해서 구할 수 있다. 시험방법은 제시된 규격의 막대 형태 시편을 제작하고, 시편이 파괴될 때까지 하중을 증가시키며, 그에 따른 수직 변위를 측정한다. 굽힘강도와 굽힘탄성계수는 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (2)$$

σ_f 는 굽힘응력(Flexural Stress, MPa)이고 굽힘변형률(Flexural Strain) 5% 이전의 최대 굽힘응력이 굽힘강도(MPa)이다. P는 하중(N), L은 지점간격(mm), b는 시편의 넓이(mm), d는 시편의 두께(mm), E_B 는 굽힘탄성계수, m은 하중-변형률 곡선에서 초기 기울기(N/mm)이다.

2.2 장기특성시험

CIPP 라이너가 지지 가능한 최대 외부 하중의 크기는 CIPP 라이너 재료의 강도 특성과 이에 따른 라이너의 두께에 의해서 결정된다. 라이너의 두께는 외부 하중에 대한 라이너의 변형특성에 대한 이론을 바탕으로 ASTM F1216(ASTM International, 2009)에서 제시하는 공식을 사용하여 결정되며, 그 공식은 기존 하수관이 충분히 외력을 담당할 수 있는 경우에 사용하는



부분 보수공법에 대한 식 3과 기존 하수관이 구조적인 성능을 더이상 유지하지 못하는 상황을 전제로 하는 전체 보수공법에 대한 식 4이다.

$$t = \frac{D}{\sqrt[3]{\frac{2KE_L C}{PN(1-v^2)} + 1}} \quad (3)$$

$$t = 0.721D \sqrt[3]{\frac{\left(\frac{Nq_t}{C}\right)^2}{E_L R_w B' E'_s}} \quad (4)$$

t 는 CIPP 라이너의 두께(mm), D 는 하수관의 내경(mm), K 는 지지항상계수, $E_{L,50}$ 은 CIPP 라이너의 50년 장기탄성계수(Long-term Modulus of Elasticity, MPa), C 는 형상감소계수, P 는 지하수압(MPa), N 은 안전계수, v 는 프아송비, q_t 는 파이프에 가해지는 총 외압(MPa), R_w 는 물의 부력계수, B' 는 탄성지지계수, E'_s 는 토양 반력계수(MPa)다.

$E_{L,50}$ 은 이론적으로 50년 사용 후에 남아 있는 탄성계수(E_L)이다. 시험방법은 단기탄성계수를 기준으로 하여 장기 재하 시험을 시행한다. 재하 시간에 따른 변형량의 추이를 측정하고 계산하여 장기적인 탄성계수의 값을 유추한다. E_L 은 식 5와 같이 일정 하중이 주어졌을 때의 굽힘응력(식 1)과 굽힘변형률의 비로 결정된다. 그리고 굽힘변형률은 식 6과 같다.

$$E_L = \frac{\sigma_f}{r} \quad (5)$$

$$r = \frac{6D_e f d}{L^2} \quad (6)$$

r 은 굽힘변형률(mm/mm)이고, D_e 는 처짐량(mm)이다.

3점 굽힘 시험에 따른 굽힘 강도와 굽힘 탄성계수 시험 방법은 하중을 서서히 변화시켜감에 따라 변화하는 처짐을 측정하고 굽힘응력을 계산하지만, 장기 탄성계수 시험에서는 고정된 하중 조건에서 시간이 지남에 따라 변화하는 처짐을 측정하고 회기 곡선을 이용하여 E_L 을 유추한다. 시험방법은 ASTM D2990 (ASTM International, 2001)과 ASTM D790(ASTM International, 2010)에서 규정한 3점 굽힘 시험 및 샘플규격을 따른다.

장기 탄성계수 시험 시 사용하는 장기 재하 하중의 무게는 ASTM과 KS에 규정되어 있지 않아 WIS

4-34-04 (Water Industry Specification, 1995) 에서 제시하는 방법(식 7)을 이용한다.

$$M = \frac{bd^2 S}{14.71L} (kg) \quad (7)$$

M 은 장기 재하 하중(kg), S 는 굽힘강도(MPa)이고 굽힘탄성계수 E_B 에 0.0025를 곱한 값으로 정의한다.

장기 탄성계수 시험은 일반적으로 10,000시간 동안 수행할 것을 권장하며(Guice et al., 1994), 시험 데이터를 바탕으로 log 스케일에서 50년(438,000시간)에서의 장기탄성계수를 추정 하여 장기탄성계수를 구하고, 그 값을 $E_{L,50}$ 로 사용한다. 10,000시간은 1년이 넘는 장기시험이기 때문에 쉽게 시행할 수 없다. 그 대안으로 실질적으로는 1,000시간 동안 수행하는 경우가 많다. 본 연구는 시험 수행 시간에 따른 차이를 알아보기 위해서 1,000시간 및 5,000시간의 데이터를 비교하여 각각 장기탄성계수를 비교하였다. 처짐의 측정 간격 및 횟수는 1분씩 30회, 30분씩 9회, 1시간씩 45회, 10시간씩 45회, 25시간씩 20회, 50시간씩 80회로 총 5,000시간을 측정하였다.

장기탄성계수의 평가는 식 8과 같이 장기탄성계수와 굽힘탄성계수의 비인 creep retention factor(CRF; CL)를 계산하고 각 시편의 장기 강도 특성을 비교 평가한다.

$$C_L = \frac{E_{L,50}}{E_B} \quad (8)$$

ASTM과 KS에서 채택한 일반적인 CRF값은 0.5(Polyester resin in non-woven felt), 0.2(epoxy in woven hose), 0.7(epoxy in fiberglass matrix)이다 (NASTT, 2015). CRF가 1에 가까울수록 장기 하중에 따른 단기 탄성값의 변화가 적어 장기적으로 구조적 성능이 우수한 재료라고 판단할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단기강도특성

단기굽힘특성인 굽힘강도와 굽힘탄성계수를 측정하기 위해 각 그룹당 최소 5개에서 최대 10개의 시험편을 준비하였고, 총 96개의 시험편을 이용하여 Fig. 2과 같이 3점 굽힘시험을 수행하였다. Table 2는 굽힘강도와 굽힘탄성계수의 결과를 보여준다. Group no. 1

은 불포화폴리에스터 수지에 유리섬유만 첨가하였고, 굽힘탄성계수의 평균이 12 GPa이고 가장 크다. Group no. 2는 두께 1 mm 펠트를 아래위로 두 장 추가하였고, 굽힘탄성계수의 평균이 9.4 GPa이다. Group no. 3는 두께 1 mm와 2 mm 펠트를 아래위로 각 한 장씩 추가하였고, 굽힘탄성계수의 평균이 5.6 GPa이다. Group no. 4는 두께 2 mm 펠트를 아래위로 두 장을 추가하였고, 굽힘탄성계수가 4 GPa이다.

굽힘강도의 평균은 Group no. 1이 338 MPa, Group no. 2가 325 MPa, Group no. 3가 195 MPa, Group no. 4가 132 MPa이다. 펠트의 종류에 따라 굽힘강도가 변화하며, 두꺼운 펠트를 많이 사용할수록 굽힘탄성계수와 굽힘강도가 작아지는 경향이 있다.

각 재료의 연성을 파악하기 위해 최대 하중을 받을 때 굽힘변형률을 보았다. Group no. 1부터 4까지 순서대로 굽힘변형률의 평균이 3.3%, 4.2%, 4.7%, 6.7% 이다. 펠트의 두께가 늘어날수록 연성이 증가하여 변형의 허용 범위가 늘어난다. Group no. 4는 변형률이 대략 7%까지 늘어난다. 일반적으로 펠트가 주재료로 사용된 기존의 CIPP 라이너의 경우 평균적으로 변형률 5% 부근에서 최대 하중을 받는 최대 강도가 나타난다. CIPP 라이너로 적절한 연성 재료는 굽힘 변형률을 어느정도 확보해야 장기적인 구조적 안정성을 확보할 수 있다.

반면 유리섬유 적층의 증가로 인한 두께의 증가는 라이너 복합 재료의 물성치에 큰 영향을 주지 않고 균일한 경향을 보인다. 각 그룹에서 유리섬유의 적층수를 다양하게 변경하고 실험한 결과 굽힘탄성계수와 굽힘강도는 거의 일정하여 하중에 따른 라이너 두께 설계가 용이하다고 판단된다.



Fig. 2. Test for short-term flexural properties.

CIPP 튜브 제작 시 함침의 용이함과 현장 시공성을 증가시키기 위하여 높은 점성을 가진 액체상태의 수지를 라이너 구조체에 가두는 불투수층 막이 필요하다. 튜브를 보관, 이동, 설치 시 구부리거나 접어야하기 때문에 CIPP 튜브는 충분한 탄성과 변형에 대한 유연성을 가지고 있어야 한다. 또한 기존관 내부에 설치되는 특성상 바닥과 연결관에 잔존하는 하수에 노출되면 양생 시 경화 온도의 편차로 인한 불완전 양생의 가능성이 있고, 표면 경화 품질이 하락할 수 있는 가능성이 있어 레진의 양생에 주의가 필요하다. 그런 의미에서 Group no. 1은 실험한 샘플 중 굽힘에 가장 강하지만, 실질적으로 수지를 구속하는 불투수층이 없어 현실적으로 현장 적용이 힘들다.

시공성이 좋은 샘플은 Group no. 5 이다. 안과 밖으로 코팅펠트가 배치되어 있어서 Fig. 1과 같은 반전과 견인 공법으로 사용이 가능하고 온수 혹은 스팀양생 방법에 적용 할 수 있다. 코팅필름은 수지를 전혀 흡수하지 않아 강도 발현에 도움이 되지 않는다. 안과 밖으로 배치된 코팅펠트로부터 필름의 두께 1 mm를 제외한 굽힘탄성계수는 4.59 GPa, 굽힘강도는 149 MPa로 시공성을 높인 대신 두께 대비 굽힘특성이 감소하였다.

이 시편들의 구조적 특성을 ASTM F1216(ASTM International, 2009)의 기준과 비교하면, 굽힘탄성계수가 가장 작은 Group no. 4가 최소 2배에서 Group no. 1이 최대 7.4배까지 높다. 굽힘강도는 Group no. 4가 최소 3배에서 Group no. 1이 최대 12배까지 높다. NASTT (2015)에서 제시한 실험 데이터에 의하면 북미 지역에서 사용하고 있는 펠트(Non-woven felt)와 폴리에스터 레진으로 만든 CIPP 라이너의 굽힘강도 및 굽힘탄성계수는 각각 59 MPa, 3,590 MPa 정도로 제시되며, 국내 제품은 대략 50 MPa와 2,500 MPa 내외이다. 이와 비교했을 때 유리섬유는 구조적 특성을 획기적으로 증가시킨다.

여러 샘플의 구조적 특성을 시험하였고, 그 결과로부터 재료의 함량비 보다는 재료의 종류가 구조적 특성에 더 많은 영향을 준다는 것을 유추하였다. Fig. 3은 유리섬유 함량비율과 굽힘탄성계수의 관계를 보여주는데, R^2 이 0.69로 상관성이 높지 않은 것으로 보아 앞의 추론은 타당하다. 이와 유사한 추론은 탄소섬유에 의한 강화플라스틱 연구에서도 살펴볼 수 있다. Summerscales and Short (1978)은 섬유강화플라스틱 내 탄소의 함량비율에 따른 굽힘강도 변화를 테스트 하였는데, 비례하지 않았으며, 40% 이상에서는 굽힘강도가 일정했다. 굽힘특성은 식 3과 식 4와 같이 두께

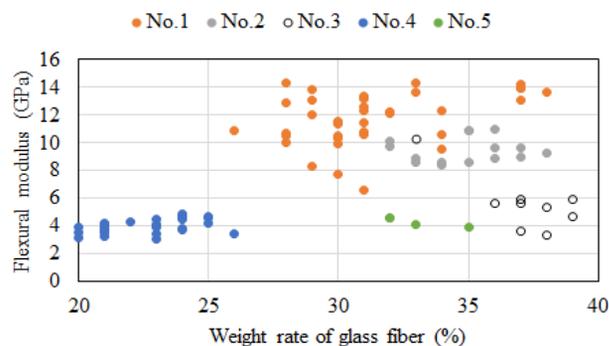
**Table 2.** Summary of mechanical property test results

Group No.	Top and Bottom layer	Thickness and the Number of Layer of Glass Fiber (mm / layers)	Thickness (mm)	Flexural Modulus (Gpa)	Flexural Strength (Mpa)	Flexural Strain at maximum load (mm/mm)
1	Only Glass Fiber	1 / 4	5.61	12.83	304	0.033
		1 / 5	6.12	12.86	371	0.031
		1 / 6	8.49	10.51	319	0.034
		1 / 7	9.05	10.88	357	0.036
2	1 & 1 mm Felt	1 / 4	5.84	9.00	297	0.042
		1 / 5	6.35	9.88	353	0.042
3	2 & 1 mm Felt	1 / 4	6.97	5.60	218	0.047
	1 & 2 mm Felt	1 / 4	7.07	5.60	172	0.046
4	2 & 2 mm Felt	1 / 2	7.31	3.59	91	0.080
		1 / 3	8.07	3.78	136	0.067
		1 / 4	9.71	4.59	158	0.062
		1 / 5	13.07	4.00	141	0.059
5	1.5 & 1.5 mm Coating felt	1 / 3	5.98	4.29	149	0.054

대비 하중의 비율을 나타내기 때문에 함침의 품질이 일정하다고 가정하면 적층 수에 따라서 두께와 하중이 함께 증가하기 때문에 값이 일정하게 된다.

Fig. 3에서는 굽힘탄성계수는 두께보다는 복합재료 구성에 따라 그룹이 나누어지는 경향이 있다. 같은 재료를 사용하면 layer 수에 관계없이 특정 범위의 유리섬유 함량과 굽힘탄성계수를 갖는다. 유리섬유와 레진은 모든 샘플에 동일한 제품이고, 펠트의 종류가 그룹에 따라 변화한다. 펠트를 사용하지 않은 경우, 1 mm felt, 2 mm felt, 1.5 mm coating felt에 따라 CIPP 라이너의 굽힘특성이 서로 다르다.

재료의 종류가 구조적 특성을 결정한다는 결과는 다른 연구에서도 찾아볼 수 있다. Riahi (2015)는 재료의 종류에 의한 단기 및 장기특성의 변화를 보여주었다.

**Fig. 3.** Weight ratio of glass fiber vs. flexural modulus.

3가지 유리섬유와 3가지 비닐에스터수지를 9가지 조합으로 구성하였고, 그 조합에 따라 굽힘탄성계수가 5,000~12,000 MPa로 크게 변화하였다. NASTT (2015)도 펠트의 사용 여부, 수지의 종류(불포화폴리에스터, 비닐에스터, 에폭시)등 재료의 조합에 의한 구조적 특성 차이를 확연하게 보여주었다.

3.2 장기강도특성

시험결과 불포화폴리에스터 수지에 유리섬유만 섞는 경우 E_B 가 높게 나타났다. 하지만 시공 편의성을 높이는 코팅펠트를 추가할 경우에 E_B 가 다소 감소할 수밖에 없다. 장기 재하 시험은 Table 2에서 E_B 가 가장 높은 샘플인 불포화 폴리에스터 수지와 유리섬유를 조합한 것(Group no. 1) 중에서도 유리섬유를 4장 사용하여 만든 샘플과 시공성이 좋은 샘플인 수지, 유리섬유, 코팅펠트를 조합한 것(Group no. 5) 두 가지에 대한 시험을 수행하였다. 시험을 위하여 group당 2개씩 총 4개의 샘플을 준비하였다.

Group no. 1과 5의 E_B 는 각각 12.8 GPa, 4.59 GPa이고, 식 7을 이용해서 장기 재하 하중(M)을 계산하면 장기 재하 하중 M은 각각 10 kg, 4.5 kg이다 (Table 3). 이에 해당하는 추를 시편의 가운데에 올리고, 그 위에 변위 측정기를 올려서 처짐을 측정하고(Fig. 4), data logger로 설정한 시간 간격마다 기록하였다.

본 연구에서 장기 하중 재하시험에서 처짐의 측정

시간은 최대 5,000시간이다. 측정시간을 log scale로 변환하여 x-y에 대한 그래프를 그렸다 (Lee and Ferry, 2007). Fig. 5 (a)는 Group no. 1의 측정결과를 보여준다. 5,000시간 동안 측정된 데이터를 모두 사용하여 추세선을 그리면 그 식은 식 8과 같다. 50년에 해당하는 438,000시간을 넣으면, $E_{L,50}$ 은 6,386 MPa이다. 식 5를 이용해서 CRF를 구하면 0.50이다. 현재 하중 조건이 50년 동안 지속된다면, 50년 후 탄성계수가 50% 남는다고 해석할 수 있다. 1,000시간 동안만의 데이터를 이용하여 추세선을 그리면 식 9와 같고, 50년 후의 추정되는 장기탄성계수 $E_{L,50}$ 은 6,740 MPa, CRF는 0.53이다.

$$y = -544.9 \ln(x) + 13821 \quad (8)$$

$$y = -572.4 \ln(x) + 13824 \quad (9)$$

Fig. 5 (b)는 Group no. 6의 측정 결과를 보여준다. 5,000시간 동안 측정된 데이터를 모두 사용하여 추세선을

Table 3. Mechanical properties of samples for long-term modulus tests

	Average Thickness (mm)	EB, Flexural modulus (GPa)	M, Mass (kg)
1	5.13	12.8	10
5	5.96	4.29	4.5



Fig. 4. Creep test loading.

그리면 그 식은 식 10과 같고, 50년 후에 유지하고 있을 것으로 추정되는 장기탄성계수 $E_{L,50}$ 은 2,256 MPa, CRF는 0.49이다. 1,000시간 동안 측정된 데이터를 사용하여 만든 추세선은 식 11과 같고, $E_{L,50}$ 은 2,324 MPa, CRF는 0.51이다.

$$y = -220 \ln(x) + 5183.2 \quad (10)$$

$$y = -225.5 \ln(x) + 5186 \quad (11)$$

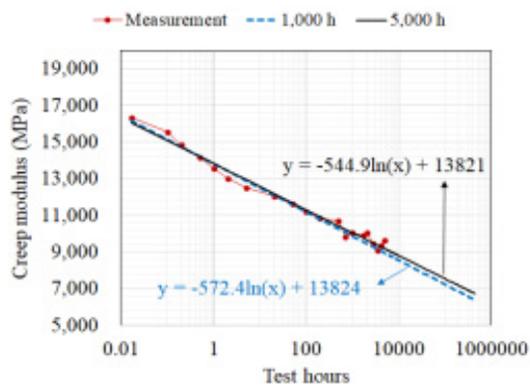
계측 시작 후 1시간까지는 데이터가 추세보다 상향에 있었고, 1,000시간 전까지 데이터는 하락하는 추세에 있었으나, x축 간격이 log scale로 인해 조밀해지면서 탄성계수의 하락이 감소함에 따라 그래프가 수평에 가깝게 변화하였다. 그 결과 1,000시간 이후의 데이터까지 이용한 경우 기울기가 상대적으로 완만하여 더 높은 장기탄성계수 결과를 예측하게 하였다. Table 4는 장기탄성계수 시험결과를 요약하였다.

장기 하중 재하 시험으로부터 다음을 유추할 수 있다.

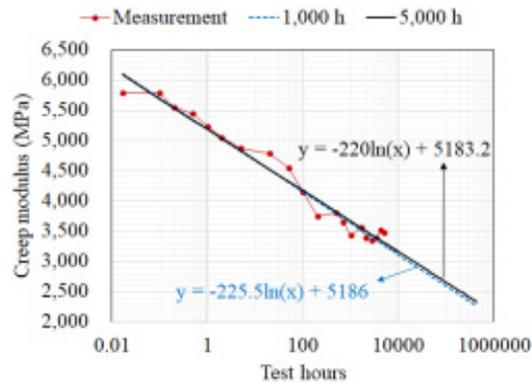
첫 번째, 장기탄성계수의 증가로 라이너의 설계 두께가 감소할 수 있다. NASTT (2015)에 의하면 보수용 천과 불포화폴리에스터 수지를 이용하여 만든 샘플의 단기 굽힘탄성계수는 3,590 MPa, CRF는 0.5이고, 따라서 50년 장기탄성계수는 1,795 MPa 이다. 이에 비해 Group no. 1과 6의 $E_{L,50}$ 은 각각 3.6배, 1.3배 높다. 식 3과 식 4에 의하면 라이너의 두께는 $E_{L,50}$ 의 1/3승에 반비례하기 때문에 각각 두께를 35%, 9% 감소시킬 수 있다.

두 번째, 유리섬유로 강화한 불포화폴리에스터의 CRF는 전통적인 CIPP 라이너와 비슷한 수준이다. Lee and Ferry (2007), NASTT (2015), Riahi (2015) 등의 문헌에 제시된 값이 0.5이고, 본 실험에서 이와 유사한 값이 보여졌다. 유리섬유는 단기 특성을 강화하지만, 장기 특성의 강화는 상대적으로 약한 것으로 보인다. 그럼에도 단기특성이 높기 때문에 같은 비율로 강도가 약화된다고 해도, 더 높은 강도를 유지하고 있을 수 있다.

세 번째, 장기 재하 시험은 하중 재하 시간에 영향을 받는다. 외삽법(Extrapolation)은 많은 데이터를 가지고 있을수록 정확도가 높아진다. 게다가 장기 재하 시험은 50년 후의 결과를 예측하는 시험방법이다. 약 한 달의 데이터로 그 후의 50년을 예측하는 것은 그 정확도가 매우 낮을 수밖에 없다. 그러니 되도록 1년 이상



(a) Group no. 1



(b) Group no. 5

Fig. 5. Creep Modulus vs. Time.

Table 4. Results of long-term modulus tests

Group No.	Test hours	EL,50, Long-term modulus (GPa)	CL, Creep retention factor
1	1,000	6.39	0.50
	5,000	6.74	0.53
5	1,000	2.26	0.49
	5,000	2.32	0.51

(10,000 시간)의 데이터를 축적하는 것이 외삽법의 불확실성을 낮추는 방안이다. 그 보다 더 오랜 기간 동안 실험을 수행한다면 더 정확한 예측이 될 것이다.

이 외에도 문헌에 따르면 같은 시간을 측정하더라도 측정 간격 및 선택 시간에 따라 측정 결과의 차이가 매우 크다. Riahi (2015)는 초기의 데이터를 포함하여 모든 자료를 사용한 경우와 오직 1,000시간 단위로 기록된 데이터만 사용하여 50년 장기탄성계수의 예측값을 비교하였다. 그 결과 대략 4배의 차이가 났다. 외삽법 예측 기간이 길어질수록 부정확도가 높아지기 때문에 이를 보완하기 위해서 되도록 많은 데이터를 축적하는 것이 도움이 된다.

네 번째, log scale을 이용한 선형 방정식에 의한 예측은 50년 장기탄성계수 및 CRF를 과소평가하고 있을 가능성이 있다. Fig. 5의 추세를 보면 시간이 지날수록 탄성계수의 시간에 대한 기울기가 증가하는 경향을 가진다. 즉 어느 정도의 시간이 지나면 탄성계수의 하락이 거의 없어서 그래프의 기울기가 수평에 가깝게 변화할 것으로 예측된다. Riahi (2015)는 전통적인 CIPP 라이너의 장기탄성계수 시험을 1,000시간 하였을 때 CRF가 0.5였는데, 7년에 걸친 장기 시험 결과는 0.7~0.9 사이였다. 이것으로 보아 현재의 장기 탄

성계수 시험법은 CRF를 과소평가하고 있다고 볼 수 있다. 좀 더 현실적으로 예측할 수 있는 방안이 필요하다.

4. 결론

본 연구는 하수도의 비굴착 보수공법 중 유리섬유를 사용하여 강도특성을 강화한 CIPP 튜브 라이너를 개발하고자 불포화폴리에스터 수지를 기반으로 유리섬유와 여러 종류의 펠트를 다양하게 조합하였고, 각각의 경우에 대한 구조적 특성을 분석하였다. 본 연구에서 분석한 라이너는 기존의 온수 혹은 스팀 경화 방법과 장비를 그대로 사용하면서 복합 재료의 구성으로 높은 강도를 발현하는 것이 특징이다.

유리섬유와 불포화폴리에스터 수지만 사용하는 경우 ASTM F1216(ASTM International, 2009) 최소 기준 대비 굽힘강도가 12배, 굽힘탄성계수가 7.4배 나왔으며, NASTT (2015)에서 제시한 일반적인 CIPP 라이너의 평균적인 강도에 비하여 굽힘강도가 6.2배, 굽힘탄성계수가 3.6배 되는 결과를 보여주었다. 그러나 시공성을 고려하여 불투수필름이 부착된 코팅펠트까지 첨가하면 굽힘강도 149 MPa, 굽힘탄성계수 4.59 GPa로 하락하지만, 기존 라이너에 비하면 월등한 성능을 보여준다.

50년 장기탄성계수는 유리섬유와 불포화폴리에스터 수지만 사용하는 경우 약 6.74 GPa, 코팅펠트가 더해지는 경우 2.32 GPa이다. 50년 후 잔존 강도의 비율인 CRF는 약 0.52이다. NASTT (2015)에서 제시한 불포화폴리에스터 수지와 펠트를 사용한 전통적인 CIPP

라이너와 유사하다. 장기탄성계수는 CIPP 라이너의 설계 두께에 직접적인 영향을 주는데, 본 연구에서 사용한 샘플의 경우 NASTT (2015) 에서 제시한 기존의 CIPP 라이너에 비해서 두께를 최대 35%까지 절감할 수 있다.

선행 연구 결과에서 보여주는 전통적인 CIPP 라이너의 단기 및 장기 특성에 비교하여 유리섬유는 CIPP 라이너의 구조적 특성을 효과적으로 강화한다. 그리고 불포화 폴리에스터 수지와 유리섬유를 고정적으로 사용하고, 펠트의 종류를 변경하여 구조적 특성이 다양하게 변화하였다. 유리섬유를 이용한 CIPP 라이너를 설계할 때 복합 재료로 사용되는 펠트의 종류가 중요한 요인이 된다.

국내 CIPP 시공은 주로 온수 혹은 스팀경화를 사용하기 때문에, 기존의 경화 방법을 유지하면서 높은 강도를 가질 수 있는 재료가 현실적으로 적합하다. 본 연구에서 제시한 라이너는 코팅펠트와 유리섬유의 복합재료로 개발되어 스팀 및 온수 경화가 가능하고, 탄성계수가 높아 구조적으로 더 안전하다. 현재 유리섬유의 경제성이 매우 향상되어 재료비 및 전체 공사비가 절감되는 효과가 기대된다. 본 연구를 통하여 입증된 강도 증가 및 두께 감소효과는 통수능력을 최대한 확보하고 라이너의 무게를 감소시켜 현장 시공성 및 경쟁 효과를 증가시킨다.

사 사

본 연구는 환경부 환경정책기반공공기술개발사업으로 한국환경산업기술원(과제번호 : 2017-0007-00001)의 지원을 받았습니다.

References

- ASTM International. (2001). *Annual Book of ASTM Standards - Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics (ASTM D2990)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM International. (2010). *Annual Book of ASTM Standards - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D790)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM International. (2009). *Annual Book of ASTM Standards - Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube (ASTM F1216)*.
- ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM International. (2010). *Annual Book of ASTM Standards - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D790)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Buttrick, D. and Van Schalkwyk, A. (1998). Hazard and risk assessment for sinkhole formation on dolomite land in South Africa, *Environ. Geol.*, 36(1-2), 170-178.
- Cohen, A. (2013). Applications of maxi rig horizontal directional drilling for municipal sewer/water markets, *ICPTT 2013: Trenchless Technol.*, 535-544.
- Gangavarapu, B.S., Najafi, M., and Salem, O. (2003). Quantitative analysis and comparison of traffic disruption using open-cut and trenchless methods of pipe installation, *New Pipeline Technol., Secur., Saf.*, 1714-1724.
- Guice, L.K., Straughan, W.T., Norris, C.R., and Bennett, R.D. (1994). Long-term structural behavior of pipeline rehabilitation systems, *Technical Report #302*, Trenchless Technology Center, Louisiana Tech University, Ruston, Louisiana, USA.
- Ji, H.W., Yoo, S.S., Kim J., and Koo, D.D. (2018). The mechanical properties of high strength reinforced cured-in-place pipe (CIPP) liner composites for urban water infrastructure rehabilitation, *Water*, 10(8), 1-12.
- Jung, Y.J., and Sinha, S.K. (2007). Evaluation of trenchless technology methods for municipal infrastructure system, *J. Infrastruct. Syst.*, 13(2), 144-156.
- Kamat, S.M. (2011). Comparison of dust generation from open cut and trenchless technology methods for utility construction.
- Kampbell, N.E. (2007). "Waterline Rehabilitation: The Objectives and The Technologies", *North American Society for Trenchless Technology (NASTT) No Dig 2007 Conference*, 16-19 April, 2007, San Diego CA, USA.
- Korean Standards Association. (2016). Cured-in-place thermosetting resin tube for renovation of sewer piping system, *KS M 3550-9*.
- Lancaster, I. and Zarghamee, M. (2019). "The Evolution of Carbon Fiber CIPP (CFCIPP) for Small Diameter Potable Water & Fire Suppression Systems", *North American Society for Trenchless Technology (NASTT) No Dig 2019 Conference*, 17-20 March, 2019, Chicago



- IL, USA.
- Lee, R.K., and Ferry, S. (2007). Long-term cured-in-place pipe (CIPP) performance and its design implications, *Water Pract.*, 1(6), 1-12.
- McKim, R.A. (1997). Selection method for trenchless technologies, *J. Infrast. Syst.*, 3(3), 119-125.
- Ministry of Environment. (2017). Statistics of sanitary sewer 2016, 3-7, <https://www.me.go.kr/home/web/index.do?menuId=130>(March 29, 2019).
- Najafi, M., and Kim, K.O. (2004). Life-cycle-cost comparison of trenchless and conventional open-cut pipeline construction projects, *Pipeline Eng. Construct.*, 1-6.
- NASTT. (2015). *Nastt's Cured-in-Place (Cipp) Good Practices Guidelines*. North American Society for Trenchless Technology, Cleveland, OH, USA, Chapter 4.
- Riahi, A.M. (2015). Short-Term and Long-Term Mechanical Properties of Cipp Liners, Master's thesis, University of Waterloo.
- Sedgeman, A., Schmidt, M., Ehsani, M., and Murphy, M. (2019). "Water Flows Uphill in Colorado: Rehabilitation of 54-inch Irrigation Siphon", *North American Society for Trenchless Technology (NASTT) No Dig 2019 Conference*, 17-20 March, 2019, Chicaga IL, USA.
- Summerscales, J., and Short, D. (1978). Carbon fibre and glass fibre hybrid reinforced plastics, *Composites*, 9(3), 157-166.
- Syachrani, S., Jeong, H.S.D., Rai, V., Chae, M.J., and Iseley, T. (2010). A risk management approach to safety assessment of trenchless technologies for culvert rehabilitation, *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 25(6), 681-688.
- Water Industry Specification. (1995). Specification for renovation of gravity sewers by lining with cured-in-place pipe, WIS 4-34-04.

pp. 093-104

pp. 105-114

pp. 115-125

pp. 127-137

pp. 139-147

pp. 149-159