

운영중인 철도비탈면 보호를 위한 초속경 복합매트의 강도 및 내구성 실험

Strength and Durability Test of Rapid Hardening Composite Mat for Protect Railway Slope in Operation

유현상¹, 강태희², 정혁상^{3*}, 백인철⁴

Hyun-Sang Yoo¹, Tae-Hee Kang², Hyuk-Sang Jung^{3*}, In-Chul Back⁴

¹Nonmember, Senior Manger, Dept. of Audit&Inspection, 240 Jungang-ro, Dong-gu, Deajun 34618, Republic of Korea

²Nonmember, Graduate Student (Master Course), Dept. of Railroad Construction and Safety Engineering, Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do 36040, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Railroad Construction and Safety Engineering, Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do 36040, Republic of Korea

⁴Nonmember, Senior Research, Dept. of Technology Reserch, 240 Jungang-ro, Dong-gu, Deajun 34618, Republic of Korea

ABSTRACT

Recently, the frequency of damage to slopes for highways, railways, and complexes has been increasing according to abnormal climates such as heavy rainfall or snowfall. Rapid Hardening Composite Mat (RHCM) could be a satisfactory alternative because it has the advantages that large-scale earthwork is not essential and the period for restoration is minimized. Also, this method does not require heavy machines and a phase of maintenance for slopes against the shotcrete method or planted slope protection, which are representative slope protection methods. Furthermore, the curing time is shorter than Geosynthetic Concrete Composite Mat (GCCM). Therefore, RHCM could be useful for emergency restoration work. Thus, in this study, the strength and duration of RHCM are estimated, compared, and analyzed with GCCM. As a result of the laboratory test, the strength of RHCM is greater 51%, and the duration is larger 69% than GCCM.

요 지

최근 폭우, 폭설 등과 같은 이상기후로 인해 도로, 철도 및 단지에 적용된 비탈면의 국부적 파괴 또는 손상 빈도가 점차 증가하고 있다. 초속경 복합매트(Rapid Hardening Composite Mat, RHCM)은 대규모 토공이 불필요하고 수해복구시간을 최소화할 수 있는 장점이 있어 대안으로 고려될 수 있다. RHCM은 대표적인 비탈면 보호공법인 슛크리트 공법 및 식생공 공법에 비해 증장비 설비가 불필요하고 유지관리가 용이하며, 기존 Geosynthetic Concrete Composite Mat(GCCM)에 비해 경화시간이 짧은 긴급복구가 가능하다는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 실내시험을 통해 RHCM의 강도 및 내구성을 측정하고 GCCM과 비교·분석하였다. 실내시험 결과 RHCM의 강도는 기존 GCCM에 비해 약 51% 높은 것으로 나타났으며, 내구성 또한 69% 높은 것으로 나타났다.

Keywords : Railway slope, Rapid hardening composite mat, Formation level, Rapid construction backfill, Emergency restoration

1. 서 론

우리나라는 기후 특성상 주로 우기에 성토노반 비탈면

유실이 집중적으로 발생되며, 성토노반 비탈면 유실의 주요 원인은 태풍 및 집중호우 같은 기상이변이다. 성토노반 비탈면 유실 발생 시 복구작업 및 유지보수를 위해 작업자들이 현장에 투입되어야 하지만 작업로 확보가 곤란하며 철도 차단 시간에만 작업이 가능해 많은 비용과 기간이 소요되어 작업자들의 안전이 위협받고 있다. 실제로 작업자들의 사고 원인을 분석한 결과 공사 중 사고 비율이 59%

Received 23 Nov. 2022, Revised 9 Dec. 2022, Accepted 19 Dec. 2022

*Corresponding author

Tel: +82-54-630-1726; Fax: +82-54-630-1308

E-mail address: yoricom@dyu.ac.kr (H.-S. Jung)

로 다른 사고 비율에 비해 가장 높게 나타났으며(Kwak et al., 2004), 1995년~2001년 동안 조사한 철도재해 피해액 및 복구비용과 2002년~2007년 동안 조사한 비용을 비교 분석한 결과 1995년~2001년에는 피해액과 복구비용의 차이가 미미하였으나 2002년~2007년에는 복구비용이 피해액에 비해 약 4 배 정도 증가해 집중호우나 태풍으로 인한 피해액이 증가하고 있는 것으로 확인되었다(Choi et al., 2008).

Bhang(2007)은 이러한 문제를 해결하고자 친환경적 개량재를 사용하여 다짐을 실시한 후 식생으로 마무리 하는 공법을 제안하였지만 철도 현장은 철도 구조물이 밀집되어 있고, 협소한 궤도 현장 등으로 인해 중장비의 투입이 제한되어 이 공법을 철도 비탈면에 적용하는 것은 곤란하다.

최근 해외 현장에서는 GCCM(Geosynthetic Concrete Composite Mat) 공법을 사용 중이며, 이 공법은 비탈면 및 배수로 같은 다양한 현장에 적용되고 있다. 별도의 장비가 필요하지 않고 물만 있으면 시공이 가능하여 간편하다는 특징이 있는 GCCM은 철도현장에 적용한 사례는 없는 것으로 나타났다(Kim, 2016). 철도 현장은 다른 공공시설에 비해 긴급복구의 속도가 느려 철도 비탈면 유실등의 큰 피해가 발생하기 때문에 급속시공이 가능한 공법이 필요한 상황이며, 기존 GCCM은 철도 비탈면 보호 용도로 개발된 것이 아니기 때문에 철도 비탈면 현장에 적용하기 어려운 실정이다. RHCM은 철도 비탈면 보호를 위해 개발된 GCCM으로 기존 GCCM에 비해 초기 강도의 발현이 빠르기 때문에 작업시간이 제한되어 있는 철도 현장에 적용하였을 때의 시공성이 뛰어나다는 장점이 있다. 기존 문헌 분석결과 국내에서는 GCCM의 일축압축강도 및 굽힘강도에 관한 연구는 이루어진 것으로 확인되었으나 인장강도 및 내구성에 대한 연구는 이루어지지 않았으며, 국외에서는 GCCM의 강도에 관한 연구는 이루어진 것으로 확

인되었으나 내구성에 관한 연구는 이루어지지 않은 것으로 확인되었다. 또한 국내외 모두 RHCM에 대한 성능 분석이 부족한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 철도 현장에 적용하기 위해 개발된 GCCM인 초속경 복합매트(Rapid Hardening Composite Mat, RHCM)의 강도 및 내구성 분석을 위하여 다양한 실내시험을 수행하였으며, 기존 GCCM과 비교·분석을 통하여 RHCM의 강도 및 내구성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 GCCM(Geosynthetic Concrete Composite Mat)

GCCM은 토목섬유 및 건조모르타르, 시멘트 등을 활용하여 제작한 제품으로 토목섬유 사이에 건조모르타르, 시멘트가 존재하여 사면이나 배수로 등 원하는 현장에 펼쳐서 거치한 후 물을 살수하여 경화시키는 구조로 구성되어 있다. 해외에서는 이미 실용화되어 현장에서 많이 사용되고 있으며, 대표적으로 영국의 콘크리트 캔버스사는 토목섬유와 건조모르타르를 이용하여 개발한 GCCM을 2011년에 개발하였고, 살수 후 경화시키는 급속시공법을 이용하여 비탈면 보호뿐만 아니라 배출구 및 배수로, 배수로 라이닝 등에 적용 중이다(Jun et al., 2020). 콘크리트 캔버스사의 GCCM 특징으로는 살수 후 1일 이내에 내부 건조모르타르의 압축강도가 40 MPa에 이르는 고강도를 확보 가능하고 방수성을 보증하기 위해 GCCM 한쪽 면에 불투수성 재료인 PVC로 코팅되어 있다. 또한 자외선 및 고온, 저온에 대한 저항성이 우수한 제품이며 화재 예방도 가능한 내화학성 제품이다(Kim, 2016). Fig. 1은 콘크리트 캔버스사의 GCCM의 현장적용 모습을 보여주고 있다.



(a) Application of railway lining



(b) Application of railway slopes

Fig. 1. Field application of concrete canvas (Shibi, 2017)

2.2 RHCM(Rapid Hardening Composite Mat)

국내에서 개발한 GCCM은 해외에서 사용되는 GCCM 대비 경화속도를 향상 시킨 제품으로 RHCM 이라고 한다. 상하단의 표면은 부직포 섬유로 이루어져 있으며 중간층은 초속경 시멘트로 이루어져 있다. 또한 초속경 시멘트와 부직포 섬유사이 직포섬유로 인해 방수성과 인장성능을 향상시켰다. RHCM은 물을 살수하면 경화하는 3차원 섬유구조물로 6시간 이내에 35MPa 이상의 강도가 확보 가능하다. Fig. 2는 RHCM의 구조 및 단면을 보여주고 있다.

RHCM은 물만 사용하여 경화하는 제품이기 때문에 대규모 장비가 불필요하며, 시공기면을 경제적으로 확보할 수 있어 작업자의 안전 확보가 가능하다. 또한 식생의 성장을 원천적으로 차단함으로써 유지관리가 편리할 뿐만 아니라 RHCM 시공 시 노반에 반영구적인 배수로의 확보가 가능하여 집중호우 발생 시 우수의 침투를 최소화 할

수 있어 노반의 비탈면 안전성을 확보 할 수 있다. 비탈면이 유실된 경우 급속시공용 채움재를 사용함으로써 토공량 복구를 최소화 및 신속한 복구가 가능하며, RHCM과 급속시공용 채움재로 복구된 비탈면은 재유실을 원천적으로 방지할 수 있다. RHCM는 기존의 비탈면 유실 방지 공법인 슛크리트 공법과 비교하였을 때 중장비가 필요하지 않고, 리바운드 폐기물이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 많이 이용되고 있는 콘크리트 캔버스사의 GCCM과 비교하였을 때는 물을 살수하면 경화가 되어, 빠른 시간내에 강도를 발휘한다는 공통점이 있지만 기존 GCCM 대비 RHCM의 경화시간이 더 빠르며, 초기 재령에서의 강도발현이 빨라 긴급 복구가 가능하다. 또한 급속시공용 채움재를 사용하여 유실된 비탈면의 신속한 복구 및 토공량 복구를 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. RHCM의 장점은 Table 1과 같다. RHCM의 시공 순서는 ① 철도 노반 비탈면의 유실 발생 시 ② RHCM 가이드를 먼저 설치한 후에

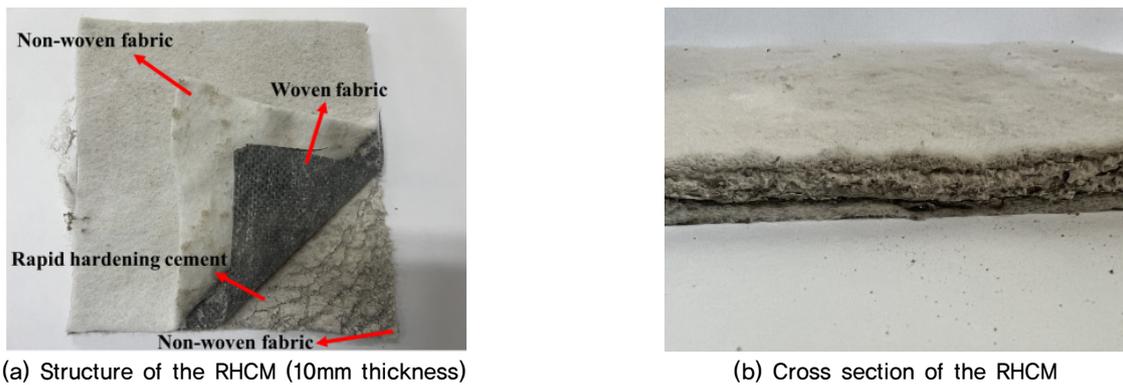


Fig. 2. Structure and cross section RHCM

Table 1. Features of RHCM (Kang, 2021)

Advantage	Content
Economics	Maintenance cost is reduced due to good ability to suppress vegetation ability
Strength	6 hours 35 MPa or more
Constructability	Compared to other methods, large-scale equipment is not required
Safety	The penetration of rainwater can be minimized by constructing a semi-permanent drainage channel

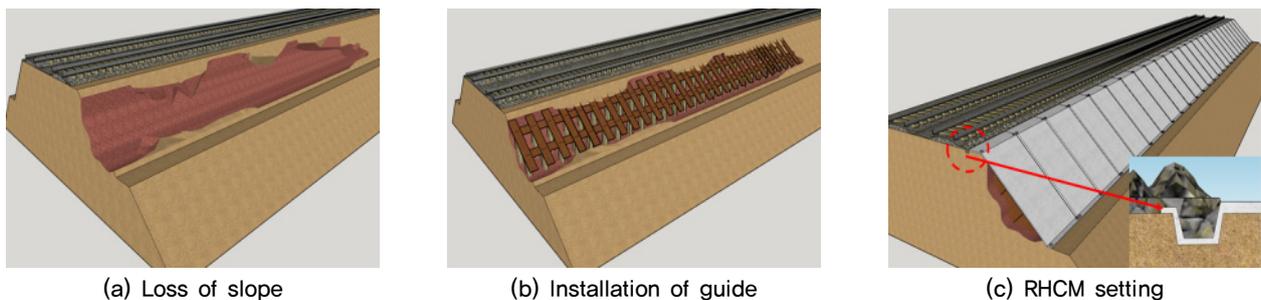


Fig. 3. RHCM construction sequence (Kang, 2021)

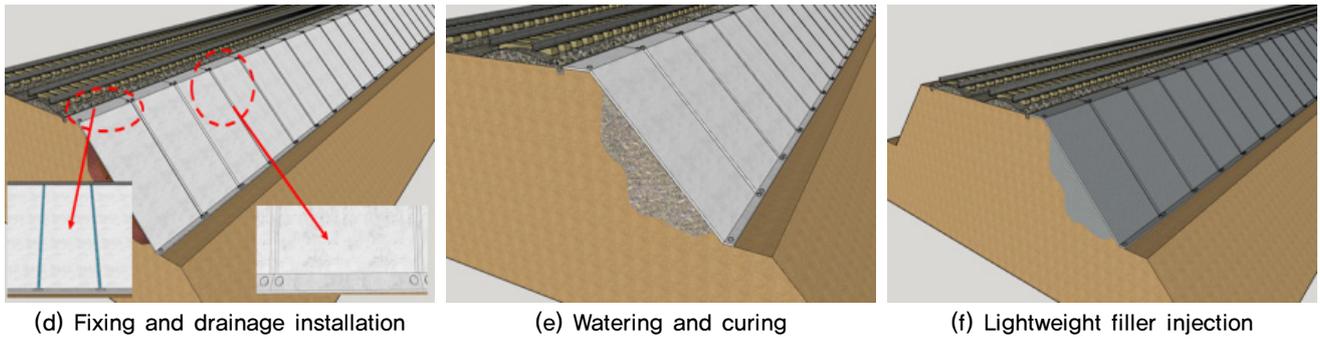


Fig. 3. RHCM construction sequence (Kang, 2021) (continued)

Table 2. Details of testing specimenst

Type	Standards		Specimen dimension	Curing time							
Unconfined compressive strength	KS L 5105		50 mm × 50 mm × 50 mm	1d	3d	7d	28d				
3-point bending strength	ASTM D 8058		40 mm × 160 mm	1d	3d	7d	28d				
Tensile strength	KS K 0743	Non-woven fabric	101,6 mm × 203,2 mm	-							
	KS K ISO 10319	Woven fabric	200mm × 370mm > 270 mm × 370 mm	-							
		RHCM			1hr	2hr	4hr	12hr	24hr	3d	7d
Chemical resistance test	BS EN 14414		40 mm × 160 mm	10d							
Freezing-heating test	BS EN 12467		40 mm × 160 mm	10d							
Abrasion resistance test	ASTM C 1353		Diameter 100 mm	6hr							

③ RHCM를 가이드 위에 거치한다. ④ 이후 RHCM를 고정한 다음 배수로를 설치하고 ⑤ RHCM에 물을 살수한 후 양생을 한다. ⑥ 마지막으로 내부의 공극이 생길시 급속시공용 채움재의 충전 순으로 진행된다. Fig. 3은 RHCM의 시공을 보여주고 있다.

3. 실내시험

3.1 개요

RHCM의 성능을 분석하기 위해 실내시험을 수행하였다. RHCM의 구성 요소인 초속경 시멘트의 강도 분석을 위해 일축압축강도 시험을 수행한 후 기존에 사용하고 있는 GCCM 제품과 비교하여 일축압축강도 성능을 분석하였으며, RHCM의 강도를 평가하기 위해 휨강도 시험을 수행한 후 기존 GCCM 제품과 비교하여 휨성능을 분석하였다. 또한 인장강도 시험을 통해 RHCM의 인장성능을 분석하였으며, 내화학적 시험, 동결-융해 저항성시험, 내마모성 시험을 통해 RHCM의 내구성을 분석하였다. GCCM의 강도는 Jongvivatsakul et al.(2018)이 수행한 결과 값을 인용

하였으며, GCCM의 내구성은 Concrete Canvas Ltd(2022)가 수행한 결과 값을 인용하였다. 실내시험 목록은 Table 2와 같다.

3.2 만능재료시험기

RHCM 및 RHCM의 구성 요소인 초속경 시멘트의 실내시험 수행을 위해 일축압축강도, 휨강도, 인장강도 시험 수행이 가능한 만능재료시험기를 제작하였다. 만능재료시험기의 최대 용량은 10t이며, 최대 변위 측정량은 100mm이다. 만능재료시험기와 같이 일축압축강도, 휨강도, 인장강도 시험 수행이 가능한 지그도 제작하였으며, Fig. 4는 만능재료시험기 및 일축압축강도, 휨강도, 인장강도 지그의 전경을 보여주고 있다.

3.3 일축압축강도 시험(KS L 5105)

일축압축강도 시험은 RHCM의 구성 요소인 초속경 시멘트의 강도를 평가하기 위해 수행하였으며, KS L 5105(2022) 시험법에 의거하여 시험을 수행하였다. 공시체의 크기는

50mm × 50mm × 50mm의 정육면체의 공시체로 제작하였으며, 일축압축강도의 측정은 3개의 공시체 일축압축강도 평균 값을 측정하였다. 초속경 시멘트의 시편은 재령 별로 양생하여 제작하였으며, 재령 시간에 따른 일축압축강도 측정을 하였다. Fig. 5는 일축압축강도 시험 과정을 보여주고 있다.

RHCM의 재령 1일 일축압축강도는 50MPa로 측정되었

으며, Jongvivatsakul et al.(2018)이 수행한 GCCM의 재령 1일 일축압축강도 시험 결과에 비해 약 1.25 배 높게 나타났으며, RHCM은 기존 GCCM 대비 더 빠른 시간에 높은 강도를 발휘하는 것으로 나타났다. RHCM의 재령 7일, 28일의 일축압축강도는 각각 52MPa, 54MPa로 측정되어 기존 GCCM대비 약 0.87 배, 0.72 배 낮은 것으로 나타났으나 재령 28일까지의 강도는 증가하는 것으로 나타났다.



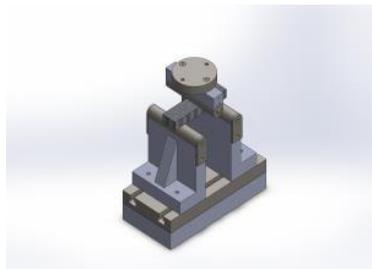
(a) Inside of test machine



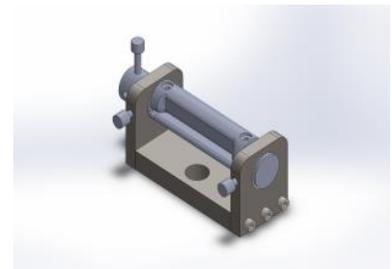
(b) Test machine view



(c) Unconfined compressive strength jig



(d) 3-point bending strength jig

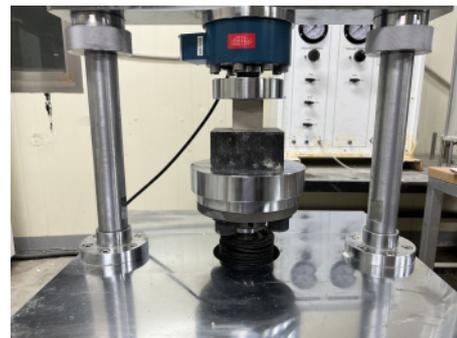


(e) Tensile strength jig

Fig. 4. Universal testing machine and test jig



(a) Dry curing



(b) Strength measurement

Fig. 5. Unconfined compressive strength

Table 3. Result of unconfined compressive strength

Type		GCCM	RHCM	
		Unconfined compressive strength (MPa)	Unconfined compressive strength (MPa)	Average unconfined compressive strength (MPa)
Curing time	1d	40	49	50
			50	
			50	

Table 3. Result of unconfined compressive strength (continued)

Type	GCCM		RHCM	
	Unconfined compressive strength (MPa)	Unconfined compressive strength (MPa)	Unconfined compressive strength (MPa)	Average unconfined compressive strength (MPa)
Curing time	3d	54	50	51
			51	
			52	
	7d	60	50	52
			52	
			54	
28d	75	53	54	
		55		
		56		

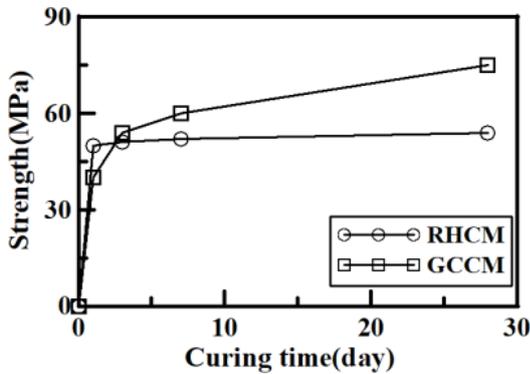
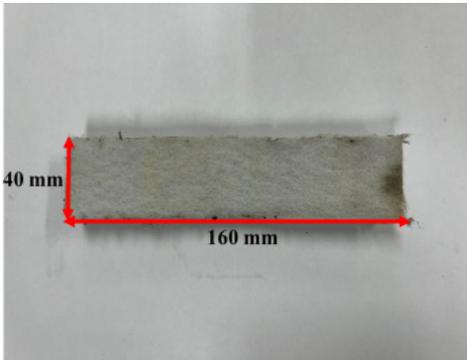
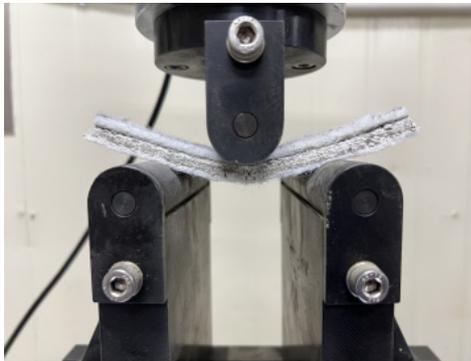


Fig. 6. Unconfined compressive strength curves



(a) Rapid hardening composite mat specimen



(b) Specimen after testing

Fig. 7. 3-point bending strength test

RHCM은 기존 GCCM에 비해 초기 강도를 빠르게 확보할 수 있어 작업 시간이 제한되어 있는 철도 현장에서 신속한 시공이 가능할 것으로 판단된다. 일축압축강도 시험 결과 및 기존 GCCM의 일축압축강도는 Table 3과 같으며, Fig. 6은 재령일에 따른 일축압축강도 결과를 보여주고 있다.

3.4 휨강도 시험(ASTM D 8058)

휨강도 시험은 RHCM의 휨성능을 분석하기 위해 수행하였으며, GCCM 제품의 휨강도 시험방법인 ASTM D 8058(2017)에 의거 하여 3점 휨강도 시험을 수행하였다. RHCM에 물을 살수하여 경화시킨 후 40mm × 160mm의 크기로 시편을 제작하였으며, 3점 휨강도 지그가 장착되어 있는 만능재료시험기를 사용하여 시편의 파단이 일어날 때 까지 시험을 수행하였다. 휨강도 시험 수행 시 하중의 재하속도는 2mm/min 이며, 휨강도 측정은 3개의 시편의 평균값을 측정하였다. RHCM 시편은 재령별로 양생하여 제작하였으며, 양생방법은 기건양생으로 진행하였다. Fig. 7은 휨강도 시험 시편과 전경을 보여주고 있다.

Jongvitsakul et al.(2018)이 수행한 기존 GCCM의 재령 1일 휨강도는 4 MPa, 재령 28일 휨강도는 7.71MPa로 재령 28일까지의 휨강도는 증가하는 것으로 나타났다. RHCM의 재령 1일 휨강도는 2.25MPa, 재령 28일 휨강도는 6.50MPa로 기존 GCCM과 같이 재령 28일까지의 휨강도는 증가하는 것으로 측정되었다. 기존 GCCM의 두께는 8mm, RHCM의 두께는 10mm이며, GCCM의 통상적인 두께는 8mm에서 13mm로 생산되고 있다. GCCM은 기성품으로 생산되고 있는 제품이기 때문에 동일한 두께에서 RHCM의 휨강도 비교는 불가능하였으며, 최대한 두께 차이가 나지 않는 제품군을 비교·분석하였다. RHCM은 기

Table 4. Result of 3-point bending strength test

Type	GCCM		RHCM	
	3-point bending strength (MPa)		3-point bending strength (MPa)	Average 3-point bending strength (MPa)
Curing time	1d	4.00	2.20	2.25
			2.26	
			2.29	
	3d	7.00	2.81	2.86
			2.85	
			2.89	
	7d	7.63	3.84	3.86
			3.85	
			3.88	
	28d	7.71	6.47	6.50
			6.48	
			6.55	

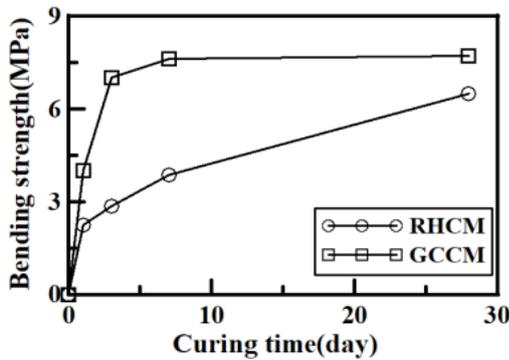


Fig. 8. 3-point bending strength curves

존 GCCM에 비해 재령 1일의 휨강도는 낮은 것으로 나타났으나 재령 28일에서의 휨강도는 유사하게 수렴하는 것으로 보아 철도 비탈면에 적용하는 것은 무리가 없을 것으로 판단된다. RHCM의 휨강도시험 결과는 Table 4와 같으며, Fig. 8은 재령일에 따른 휨강도 그래프를 보여주고 있다.

3.5 인장강도 시험(KS K 0743, KS K ISO 10319)

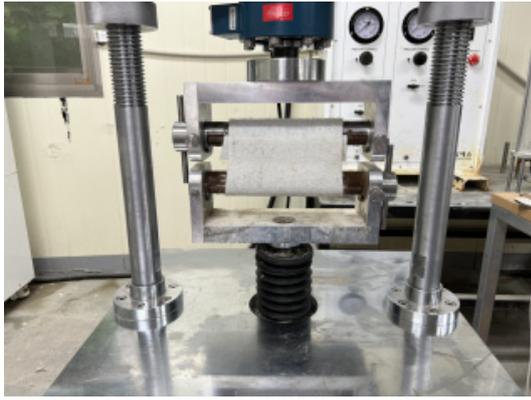
인장강도 시험은 RHCM의 인장성능을 검토하기 위해 수행하였으며, RHCM의 구성 요소인 부직포 섬유, 직포 섬유 및 RHCM의 인장강도 시험을 수행하였다. 인장강도 시험은 국내에서 많이 사용되는 시험방법인 KS K 0743(2021) 시험법과 KS K ISO 10319(2021) 시험법에 의거하여 수행하였으며, 부직포섬유는 101.6mm × 203.2mm의 직사각형 시편을 300±10mm/min의 속도로 인장강도 시험을 수행하였고, 직포 섬유와 RHCM의 인장강도는 200mm × 370mm의 직사각형 시편을 조 사이 간격을 100mm 확보한 시험기에 20±5%/min의 변형 속도로 시험을 수행하였다. RHCM

Table 5. Case type of tensile strength test

Type	Test methods	Case
Non-woven fabric	KS K 0743	-
Woven fabric	KS K ISO 10319	-
RHCM	KS K ISO 10319	1hr
		2hr
		4hr
		12hr
		24hr
		3d
		7d
		28d

의 시편 제작은 초기재령 1시간에서 24시간별 양생기간에 따라 제작하였으며, 인장강도의 측정은 3개 시편의 인장강도 평균값을 측정하였다. 시험 조건은 Table 5와 같으며, Fig. 9는 인장강도 시험 전경을 보여주고 있다.

인장강도 시험 결과 부직포 섬유의 평균 인장강도는 9.54kN/m, 변형률은 38.43%로 측정되었으며, 직포 섬유의 평균 인장강도는 30.6kN/m, 변형률은 20.45%로 측정되었다. 부직포 섬유는 직포 섬유에 비해 변형률이 약 88.6% 높게 측정되었으며, 직포 섬유는 부직포 섬유에 비해 인장강도가 220.8% 높게 측정되었다. 부직포 섬유가 직포 섬유에 비해 인장 신율은 더 뛰어나지만 인장 강도는 약한 것으로 나타났으며, 직포 섬유는 부직포 섬유에 비해 인장강도는 뛰어나나 인장 신율은 약한 것으로 나타났다. 재령 1시간 RHCM의 변형률 6% 까지 인장강도는 나머지 시험 조건의 변형률 6% 까지 인장강도에 비해 약 87% 정도 낮게 측정되었으나 최종 인장강도는 모든 시험 조건에서 유사한 값이 측정되었다. RHCM의 인장강도는 직포



(a) Non-woven fabric specimen



(b) Woven fabric specimen



(c) RHCM specimen



(d) Spraying water on the specimen



(e) Tensile strength measurement

Fig. 9. Tensile strength test

Table 6. Result of tensile strength test

Type	Tensile strength (kN/m)	Average tensile strength (kN/m)	Strain (%)	Average strain (%)
Non-woven fabric	9,55	9,54	38,64	38,43
	9,53		38,05	
	9,54		38,60	
Woven fabric	30,32	30,6	20,28	20,45
	30,79		20,64	
	30,61		20,42	
RHCM	1hr	30,51	30,53	24,89
			30,51	24,88
			30,50	24,89
	2hr	31,20	31,25	24,43
			31,04	23,36
			31,30	25,49
	4hr	31,32	31,30	25,15
			31,31	25,16
			31,35	25,20
12hr	31,41	31,40	25,38	
		31,41	25,41	
		31,43	25,50	
24hr	31,52	31,50	25,81	
		31,53	25,94	
		31,53	25,89	

Table 7. Result of tensile strength RHCM and GCCM

Type		GCCM	RHCM	
		Tensile strength (kN/m)	Tensile strength (kN/m)	Average tensile strength (kN/m)
Curing time	3d	21.1	31.6	31.9
			31.8	
			32.3	
	7d	21.9	31.9	32.1
			32.0	
			32.5	
	28d	26.6	32.3	32.5
			32.5	
			32.7	

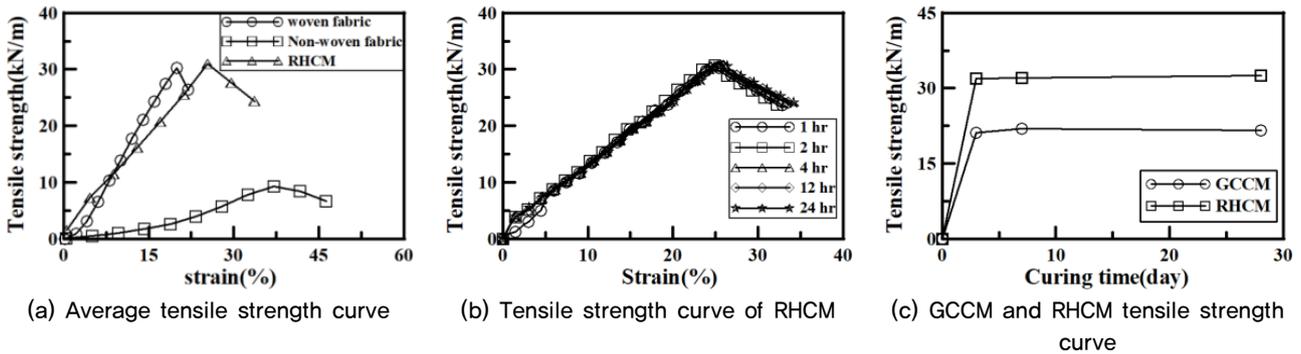


Fig. 10. Result of tensile strength curve

섬유의 인장강도와 유사하게 측정되었으며, RHCM의 인장강도의 큰 영향을 끼치는 것은 직포 섬유인 것으로 나타났다. RHCM의 변형률은 직포 섬유에 비해 약 23% 높게 측정된 것은 직포 섬유에 비해 인장신률이 높은 부직포 섬유가 영향을 끼친 것으로 판단된다. 또한 Jongvivatsakul et al.(2018)이 수행한 기존 GCCM의 인장강도 시험결과에 비해 RHCM은 모든 재령에서 인장강도가 높은 것으로 나타났으며, RHCM을 철도 비탈면에 적용할 시 높은 인장강도로 인해 비탈면의 지지력이 증가하여 증가된 지지력으로 인해 비탈면 유실 방지 또한 뛰어날 것으로 판단된다. 인장강도 시험 결과는 Table 6과 같으며, Table 7은 GCCM과 RHCM의 재령별 인장강도를 나타내고 있다. Fig. 10은 인장강도 시험 결과를 보여주고 있다.

3.6 내화학성 시험(BS EN 14414)

내화학성시험은 RHCM의 화학적 침식 영향을 분석하기 위해 수행하였으며, 관련 제품의 내화학성 시험방법인 BS EN 14414(2004)에 의거하여 시험을 수행하였다. 물을 살수하여 10일 경화시킨 40mm × 160mm RHCM 시편을 10% 황산나트륨(Na₂SO₄) 용액과 4% 황산마그

네슘(MgSO₄) 용액에 28일 침지하였으며, 균질한 용액을 유지하기 위하여 용액을 교반하였다. 28일 후 용액에 침지시킨 시편의 휨강도 시험을 수행하였으며, 용액에 침지시키지 않은 시편의 휨강도와 비교 분석하여 RHCM의 강도 변화를 확인하였다. 내화학성 시험은 3개 시편의 평균값을 측정하였으며, 그림 Fig. 11은 황산마그네슘 및 황산나트륨 용액에 침지시킨 시편의 모습과 휨강도를 측정하는 전경을 보여주고 있다.

내화학성시험 결과 재령 10일에서 RHCM의 휨강도는 6.5MPa로 측정되었으며, 4% 황산나트륨 용액에 침지시킨 RHCM의 휨강도는 6.1MPa로 측정되어 화학적 용액에 노출되지 않은 휨강도 대비 6%의 강도저하가 나타났다. 10% 황산마그네슘 용액에 침지시킨 RHCM의 휨강도는 6.1MPa로 측정되었으며, 4% 황산나트륨 용액과 같이 화학적 용액에 노출되지 않은 휨강도 대비 6%의 강도저하가 나타났다. 모든 시편의 편차는 0.1MPa로 측정되었다. 내화학성 시험 결과 RHCM은 내화학성이 뛰어난 것으로 나타났으며, 화학적 침식에 의한 강도저하는 적게 나타날 것으로 판단된다. Table 8은 재령시간과 화학 용액에 따른 내화학성시험 결과를 나타내고 있다.

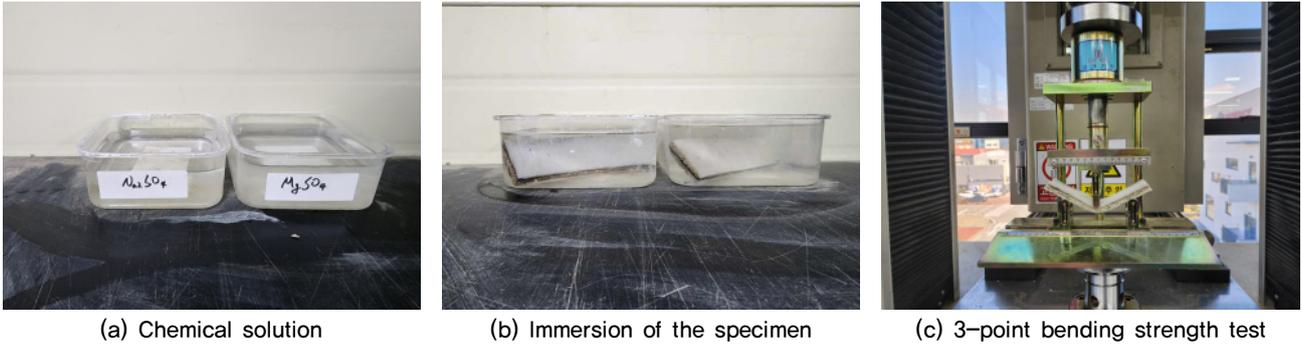


Fig. 11. Chemical resistance test

Table 8. Result of chemical resistance test

Type	3-point bending strength (MPa)	Average 3-point bending strength (MPa)
RHCM (Curing time 10d)	6.5	6.5
	6.5	
	6.6	
Immersion of the specimen Na ₂ SO ₄ 4% (Curing time 10d + Immersion 28d)	6.0	6.1
	6.1	
	6.1	
Immersion of the specimen MgSO ₄ 10% (Curing time 10d + Immersion 28d)	6.0	6.1
	6.1	
	6.2	

3.7 동결-융해 저항성시험(BS EN 12467)

동결-융해 저항성시험은 RHCM의 기후영향에 따른 강도변화를 확인하기 위해 수행하였으며, 관련 제품의 시험방법인 BS EN 12467(2012)에 의거하여 시험을 수행하였다. 물을 살수하여 10일 경화시킨 40mm × 160mm 크기의 RHCM 시편을 총 10개 제작하였다. 동결-융해 저항성 시험기에 온도는 동결 시 $-20 \pm 4^{\circ}\text{C}$, 가열 시 $20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였으며, 영하의 온도에서 시편을 1시간 동결시킨 후 영상의 온도에서 시편을 1시간 가열하는 것을 1 Cycle로 하였다. 총 250 Cycle 반복수행한 후 초속경 복합매트 시편 3개의 휨강도를 측정 후 평균값을 산정하여 동결-융해를 반복하지 않은 휨강도와 비교 분석하여 강도변화를 분석하였다. Fig. 12는 동결-융해 저항성시험 전경을 보여주고 있다.

동결-융해 저항성시험 결과 동결-융해 전 RHCM의 휨강도는 6.5MPa로 측정되었으며, 동결-융해 후 RHCM의 휨강도는 6.2MPa로 측정되어 휨강도의 감소율은 4.6%로 나타났다. Concrete Canvas Ltd(2022)가 수행한 GCCM의 동결-융해 전 휨강도는 4MPa로 측정되었으며, 동결-융해 후 GCCM의 휨강도는 3.4MPa로 측정되어 GCCM의 휨강도 감소율은 15%로 나타났다. RHCM은 기존 GCCM에



(a) Freezing-heating machine

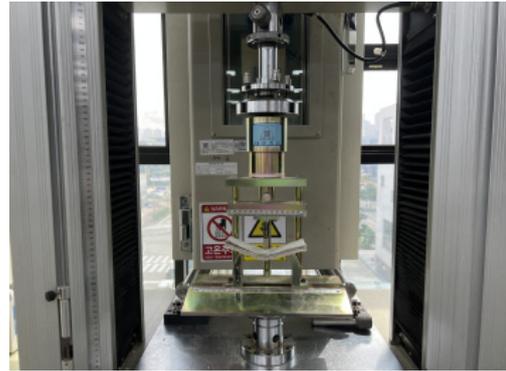


(b) Heating of specimen

Fig. 12. Freezing-heating test



(c) Freezing of specimen

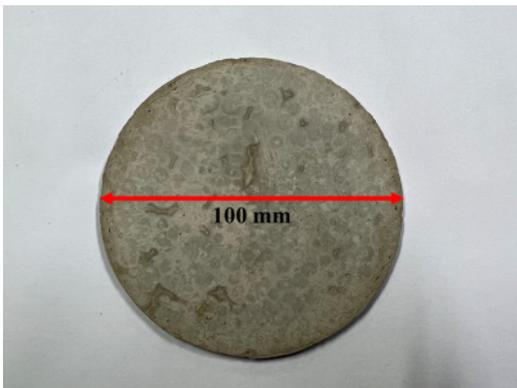


(d) 3-point bending strength test

Fig. 12. Freezing-heating test (continued)

Table 9. Result of freezing-heating test

Type	3-point bending strength (MPa)				Decrease rate (%)
	Freezing-heating before		Freezing-heating after		
GCCM	4		3.4		15
RHCM	Case	Average	Case	Average	4.6
	6.3	6.5	6.0	6.2	
	6.6		6.2		
6.6	6.3				



(a) Diameter 100 mm specimen



(b) Abrasion resistance measurement

Fig. 13. Abrasion resistance test

비해 동결-융해 저항이 약 3.3 배 큰 것으로 나타났으며, GCCM 보다 RHCM이 동결-융해에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다. RHCM은 동결-융해에 따른 강도 저하가 매우 적게 일어나 철도 비탈면에 적용 시 기후영향에 따른 강도변화가 거의 일어나지 않을 것으로 판단된다. Table 9는 동결-융해 저항성 시험 결과를 나타내고 있다.

3.8 내마모성 시험(ASTM C 1353)

내마모성 시험은 재료가 마모에 저항하는 성질을 분석하기 위해 수행하였으며, ASTM C 1353(2020) 시험법에

의거하여 시험을 수행하였다. RHCM의 구성요소인 초속경 시멘트의 100 mm 원형 시편을 제작하였으며, 소수점 셋째자리까지 측정이 가능한 저울을 이용하여 원형 시편의 무게를 측정하였다. 내마모성 시험기에 연마 휠을 장착한 후 원형 시편을 내마모성 시험기에 고정하였으며, 연마 휠의 회전속도를 70RPM으로 1000회 회전수를 가하여 시험을 수행하였다. 회전이 끝난 뒤 시편의 무게를 측정하여 시험을 수행하기 전 측정된 시편의 무게와 비교하여 내마모성을 분석하였다. 내마모성 시험은 3개 시편의 평균값을 측정하였으며 그림 Fig. 13은 내마모성 시험 과정을 보여주고 있다.

Table 10. Abrasion resistance test

Type	Weight (mgf)				Decrease rate (%)
	Abrasion resistance before		Abrasion resistance after		
GCCM	11,700		9,450		19.2
RHCM	Case	Average	Case	Average	1.7
	56,852	56,986	56,010	56,025	
	56,980		56,023		
	56,999		56,043		

내마모성시험 결과 초속경 시멘트의 내마모성 시험 전 시편 무게는 56,986mgf 이며, 내마모성 시험 후 시편 무게는 56,025mgf로 초속경 시멘트의 감소율은 1.7%로 나타났다. Concrete Canvas Ltd(2022)가 수행한 내마모성 시험 결과는 시편의 마모된 두께를 측정하였으며, 마모된 두께 만큼의 무게를 환산하여 무게 비교를 수행하였다. GCCM의 내마모성 시험 전 시편 무게는 11,700mgf 이며, 내마모성 시험 후 시편 무게는 9,450mgf로 GCCM의 감소율은 초속경 시멘트보다 11.3 배 큰 19.2%로 나타났다. GCCM에 비해 RHCM의 내마모성이 우수한 것으로 나타났으며 마모에 따른 강도 저하는 거의 일어나지 않을 것으로 판단된다. Table 10은 내마모성 시험 결과를 나타내고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 철도 현장에 적용할 수 있도록 개발된 RHCM의 강도 및 내구성에 대한 내용을 다루었다. 강도 및 내구성 분석을 위해 일축압축강도, 휨강도, 인장강도, 내화학성, 동결-융해 저항성, 내마모성 시험을 수행하였으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 일축압축강도 시험을 수행한 후 기준에 사용되었던 GCCM과 RHCM를 비교·분석하였을 때 RHCM의 일축압축강도 발현 및 경화 시간이 약 1.25 배 빠른 것으로 나타났으며, 작업시간이 한정적인 철도현장에서 RHCM을 사용할 시 강도를 빠르게 확보할 수 있어 신속한 시공이 가능할 것으로 판단된다.
- (2) 휨강도 시험을 수행하여 기준에 사용되었던 GCCM과 RHCM을 비교·분석하였을 때 RHCM의 휨강도는 기준에 사용되었던 GCCM에 비해 약 1.2 배 낮은 것으로 측정되었으나 재령 28일의 강도는 기준 GCCM에 수렴하는 것으로 나타났으며, RHCM을 철도 비탈면

에 적용하게 무리가 없을 것으로 판단된다.

- (3) RHCM의 인장성능을 평가하기 위한 인장시험 결과 초기 인장강도는 초속경 시멘트의 영향을 받는 것으로 나타났으나, 최종 인장강도는 직포 섬유와 유사한 경향으로 측정되었다. RHCM의 인장성능의 큰 영향을 끼치는 것은 직포 섬유이며, 부직포 섬유는 변형률에 23% 영향을 끼치는 것으로 나타났다. RHCM을 철도 비탈면에 적용할 시 높은 인장강도로 인해 비탈면의 지지력이 증가하여 증가된 지지력으로 인해 비탈면 유실 방지 또한 뛰어난 것으로 판단되며, 추후 초기 휨강도의 증가를 위한 RHCM의 개선이 필요할 것으로 사료된다.
- (4) RHCM의 내구성을 평가하기 위한 동결-융해 저항성 시험, 내마모성 시험 결과 기준 GCCM에 비해 동결-융해 저항성은 약 3.3 배, 내마모성은 11.3 배 큰 것으로 나타나 RHCM을 철도 비탈면에 적용할 시 기후에 의한 강도 저하 및 마모에 의한 강도저하는 적게 일어날 것으로 판단된다. 또한 내화학성 시험 결과 6%의 강도 저하가 발생하여 화학적 침식에 의한 강도 저하도 적게 일어날 것으로 판단된다.
- (5) RHCM의 강도 및 내구성은 실내시험을 통한 결과이므로 추후 현장시험을 통한 RHCM의 강도 및 내구성 분석과 기존 비탈면 보호 공법과의 비교하는 과정이 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 22TBIP-C161320-02).

References

1. ASTM D 8058 (2017), “Standard test method for determining the flexural strength of a geosynthetic cementitious composite mat (GCCM) using the three-point bending test”, ASTM, pp.1-5.
2. ASTM C 1353 (2020), Standard test method using the taber abraser for abrasion resistance of dimension stone subjected to foot traffic, ASTM, pp.1-2.
3. Bhang, I. H. (2007), “A study on the technology related to the control and rehabilitation of slope surface erosion”, Master’s Thesis, JeonBuk University.
4. BS EN 14414 (2004), Geosynthetics - screening test method for determining chemical resistance for landfill applications, BS, pp.5-10.
5. BS EN 12467 (2012), Fibre-cement flat sheets - product specification and test methods, BS, pp.6-56.
6. Choi, C. Y., Lee, J. W., Shin, M. H. and Lee, S. Y. (2008), “Analysis on disasters pattern of the railroad caused by heavy rainfall (2002~2007)”, *Korean Society For Railway*, Proceedings of the 2008 Fall Conference of the Korea Railroad Association, pp.88-92.
7. Concrete Canvas Ltd. (2022), “CC civil brochure”, pp.2-4.
8. Jongvivatsakul, P., Ramdit, T., Ngo, T. P. and Likitlersuang, S. (2018), “Experimental investigation on mechanical properties of geosynthetic cementitious composite mat (GCCM)”, *Construction and Building Materials*, Vol.166, pp-956-965.
9. Jun, Z., Wei, X., Xingzhong, W., Peiwei, G., Zhihua, Y., Lihai, S. and Jiang, W. (2020), “Application and research status of concrete canvas and its application prospect in emergency engineering”, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, Vol.15, pp.1-11.
10. Kang, T. H., Jung, H. S., Kim, J. H. and Back, I. C. (2021), “Reinforcement effect of rapid hardening composite mat for protect railway slope in operation”, *Korean Geosynthetics Society*, Vol.20, No.4, pp. 151-163.
11. Kim, J. S. (2016), “An experimental study on protection performance improvement of concrete of military facilities using concrete canvas”, Master’s Thesis, HanYang University.
12. KS K ISO 10319 (2021), “Geosynthetics - wide-width tensile test”, KS, pp.1-14.
13. KS K 0743 (2021), “Test method for breaking strength and elongation of geotextiles : grab method”, KS, pp.1-5.
14. KS L 5105(2022), “Test method for compressive strength of hydraulic cement mortar”, KS, pp.1-5.
15. Kwak, S. L., Cho, Y. O. and Wang, J. B. (2004), “Risk assessment case study for the track worker safety”, *Korean Society For Railway*, Proceedings of the 2004 Spring Conference of the Korea Railroad Association, pp.95-101.
16. Shibi (2017), “Concrete Cloth”, Civil Engg Seminar, pp.1-4.