

철도에서의 동상방지를 위한 모형시험에서 XPS 및 PE골재의 설치 효과

Effect of XPS and Polyethylene Aggregates in Model Tests for Prevention of Frost Heave in Railroad Track

김 동 관¹⁾ · 윤 여 원[†] · 김 영 진²⁾
Donggwon Kim · Yeowon Yoon · Youngchin Kim

Received: January 9th, 2014; Revised: February 3rd, 2014; Accepted: August 12th, 2014

ABSTRACT : In this research, in order to study insulation effect of commercial XPS and recycled PE aggregates for prevention of frost heave in the roadbed of railroad track from the freezing temperature, model tests were carried out in the large freezing room. For this, thermal conductivities were measured for various dry densities, water contents, temperatures and mixing ratios of PE aggregates. From the tests, it can be seen that thermal conductivities of roadbed decrease with the increase of the ratio of mixed PE aggregates. However it was sensitive to the changes of temperature and water content due to the amount of water in the voids. From the model test of railroad track, it can be seen that the time to reach 0 °C was longer for XPS than that for the PE aggregates. Also the test shows best insulation effect can be achieved when XPS board was installed above the PE aggregate layer rather than the opposite order.

Keywords : Railroad, Frost heave, Thermal conductivity, Insulation, XPS, PE aggregates

요 지 : 본 연구에서는 철도노반에서의 동결융해로 인한 피해를 줄이고자 뛰어난 단열효과와 강도를 가진 XPS(eXtruded PolyStyrene)와 PE골재(polyethylene aggregates)를 사용하여 동상을 억제하는 방법을 연구하고자 대형동토실에서 모형시험을 수행하였다. 이를 위해 노반과 PE골재의 혼입비율을 변화시켜 건조밀도와 함수비, 온도에 따른 열전도율을 측정하였다. 시험결과 노반에 혼입된 PE골재 비율에 비례하여 단열효과가 증가하였지만, 간극의 함수비와 온도변화에 민감하였다. 또한 철도노반을 모사한 모형시험에서 각 단열재의 두께와 설치순서를 다르게 한 후 단열효과를 비교 결과, XPS의 단열효과가 우수한 것으로 나타났으며 XPS판자가 상부, PE골재가 하부에 설치될 때 그 반대의 경우보다 단열효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

주요어 : 철도, 동상, 열전도율, 단열, XPS, PE골재

1. 서 론

동절기의 동상은 선로구조물의 용기를 유발하여 철도차량의 운행에 위협요소로 작용하고, 해빙기의 융해(thawing)는 선로의 침하를 유발시켜 선로구조물의 수명을 단축시키며 유지비의 증가를 수반하게 된다. 또한 동결융해의 반복으로 인한 분리의 발생은 노반의 강도를 저하시키고 배수를 저하시켜 구조물의 유지보수를 필요로 한다. 이러한 동상으로 인한 위험을 줄이기 위한 연구(Lee et al., 2010; Kim & Hong, 2006)가 수행된 바 있으나 그 수는 많지 않은 편이다.

도로 및 철도의 동상방지 목적으로 EPS(Expanded PolyStyrene) 등의 단열재 활용은 일본, 핀란드 등에서 활용된 바 있으며(Gandahl, 1996; Takashi, 2012; Nurmikolu, 2011), 본 연구에서는 현장시험에 선행하여 XPS와 폐비닐을 가공하여 만

든 PE골재를 단열재로 활용하여 노반의 동결시간과 속도 및 지연효과를 고찰하기 위하여 동결실(freezing chamber)에서 모형시험을 통한 연구를 수행하였다. 이를 통해 철도에서의 동상과 융해로 인한 피해를 감소시키는데 그 목적이 있다. XPS는 가열·용융시킨 폴리스티렌에 가스를 혼합하여 겔로 만든 후 성형장치에 발포한 것을 롤러로 압출한 것이며, PE골재는 폐비닐을 용융한 후 물에서 식혀 내부에 기포를 포함하도록 만든 골재로서 두 단열재 모두 단열성과 강도가 우수하다.

2. 철도에서의 동상과 방지대책

국내에서 철도노반에 동상이 발생하는 장소는 주로 강원,

1) Seohyeon Engineering

† Department of Civil Engineering, Inha University (Corresponding Author : yoonyw@inha.ac.kr)

2) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

충북북부, 경북북부, 경기동부 지역이며, Table 1에 나타낸 바와 같이 2011년도에 190개소, 총연장 약 8 km 구간에서 동상이 발생하였다. 이러한 동상 대책으로 매년 동절기 이전에 도상의 자갈 치환, 염화칼슘 살포 등을 시행하고 있으며, 배수시설의 개선에도 노력을 기울이고 있다. 하지만 이러한 동상방지 대책들은 지속적인 효과가 미약하며 매년 반복해야 하는 단점이 있기 때문에 다양한 재료를 사용하여 동상을 예방하는 연구가 해외에서도 이루어지고 있다.

현재 국·내외에서 동상 방지를 위해 연구하고 있는 재료는 페타이어 조각, EPS, 토목섬유 등이 있다. 국내에서는 Kim & Kang(1998)이 도로 동상방지층에 페타이어 조각을 포설, 동결깊이 감소효과를 실험적으로 구명하였고, Lee et al.(2010)은 페타이어 조각을 동상이 발생하는 개소에 다양한 방법으로 설치하여 동상량을 감소시키는 방법에 대해 연구하였다. 또한 Han et al.(2011)은 페타이어 조각을 활용하여 동상팽창압을 흡수하는 방안을 모색하였다. 그러나 페타이어 조각의 혼합 이용은 아직도 폐기물관리법(Ministry of Environment, 2005)에서 허용하지 않고 있어 사용에 제약이 따르고 있다.

핀란드 등 북부유럽의 도로 및 철도에서는 EPS 판자를 동상방지층 재료로 상당량 활용하고 있다. Gandahl(1996)은 스웨덴 북부지역의 도로 포장체에 10 cm 두께의 EPS 판자를 동상방지층으로 포설하였다. 현장 계측결과, 동결깊이가 일반 도로에 비해 현저히 감소한 것을 확인하였다. 또한 Nurmikolu(2011)는 철도노반과 도상 사이에 XPS를 설치하여 동상감소효과를 확인하였다. 모관상승 억제를 통한 동상 방지를 위하여 토목섬유를 활용한 사례는 외국뿐만 아니라 국내에도 있다. Lee et al.(2005)은 철도노반을 토목섬유와 Geocomposite로 보강하여 분리를 억제하는 연구를 수행한 바 있다.

3. 시험 재료의 기본특성

3.1 XPS와 PE골재

압출폴리스티렌(Extruded PolyStyrene, XPS)은 비슷한 성질을 갖는 발포폴리스티렌(Expanded PolyStyrene, EPS)

에 비해 단열성(Kim & Yoon, 2013) 및 강도가 우수하고, 어느 정도의 투습저항을 갖고 있으며, 완충성, 내수성, 단열성, 방음성, 경량성 등의 특성을 가진다(Nurmikolu, 2011). 다른 단열재에 비해 장기간 보온하고 고강도의 압축 강도를 가지며 부식, 내구성이 매우 우수하다(Lee, 1998). Fig. 1에서 볼 수 있듯이 XPS는 일축압축시험에서 응력-변형 관계 곡선의 상태는 급하며, 정점의 강도에서 변형률도 작다.

열차하중과 같은 동적 반복하중에 대한 EPS의 특성은 건설재료로서 중요한 요소이다. 일본에서 수행된 EPS에 대한 과거의 시험 결과(Fig. 1, 2)를 보면, EPS 블록에 대해 단위 체적 0.16 kN/m³를 최대 100만 회 일축반복재하시험을 실

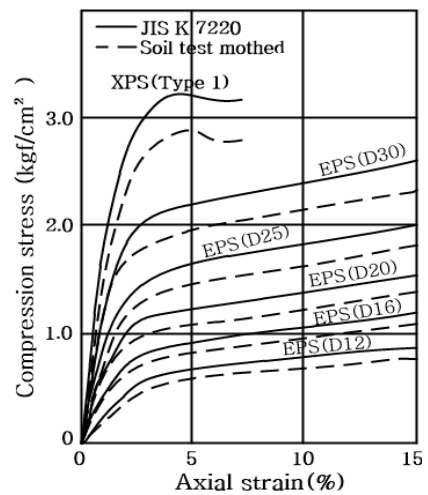


Fig. 1. Compressive strength of XPS (Lee, 1998)

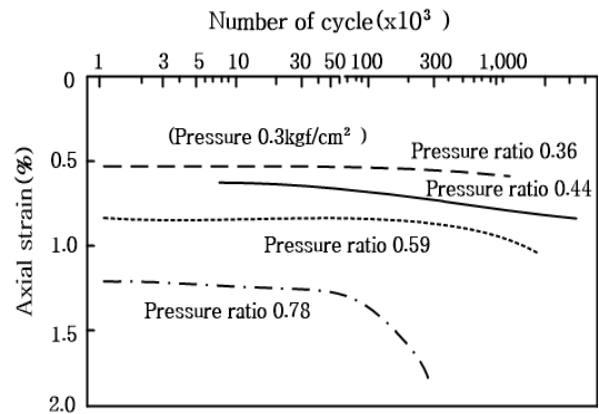


Fig. 2. Variation of axial strain with number of cycles (Lee, 1998)

Table 1. Recent frost heave in Korea (Han et al., 2011)

Classification	Gyeong-bu	Gyeong-ui	Gyeong-won	Chung-buk	Gyeong-chun	Chung-ang	Yeong-dong	Tae-baek	Etc.	Total	
2009	Location	-	-	-	3	-	33	55	23	15	129
	Length (m)	-	-	-	120	-	1,668	1,420	508	194	3,910
2011	Location	14	10	7	20	53	54	9	13	10	190
	Length (m)	955	377	140	775	1,105	2,069	134	1,514	790	7,859

시한 결과, 일축압축강도에 대한 동적재하응력의 비가 0.4 이하의 경우에는 100만 회 이상의 재하에도 거의 변형이 축적되지 않다가 재하비가 0.4를 초과하는 경우 EPS는 점차 항복하는 것을 알 수 있다(Lee, 1998). XPS는 EPS에 비해 허용압축응력이 훨씬 크므로 동적강도 또한 이에 비례하여 커질 것으로 사료된다.

국내에서 PE골재는 Kim(2000)이 연구를 목적으로 처음 제작하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 PE골재(Fig. 3)에 대하여 물성치를 측정된 결과, 단위중량은 7.2 kN/m³로 일반적인 골재의 단위중량인 18~20 kN/m³의 35~40 %로 나타나 경량 재료라고 할 수 있고, PE골재의 최대 크기(직경)는 19 mm이다. 열전도율은 평균 0.107 W/mK으로 국내 동상방지 연구에서 단일 재료로 많이 사용되는 페타이어 조각의 열전도율 0.400 W/mK보다 작은 값을 나타내었다.

또한 PE골재의 단열효과를 확인하기 위해 한국건설기술연구원 내에 조성한 모형도로의 동상방지층에 PE골재를 20 cm 포설하고, 같은 높이의 자갈층과 동상방지층 하부의 온도를 비교하였다. 2년 동안 측정된 결과, 동상방지층 하부의 최저온도가 자갈을 동상방지층에 포설할 때에 비해 최대 1.8 °C 차이를 보임을 확인하였다.

Table 2에는 PE골재의 특성을 나타내었으며, Table 3에서 보여 주고 있는 PE골재는 본 연구에서 사용한 PE골재로서 Kim(2000)이 사용한 것과 같은 과정을 거쳐 생산된 것이

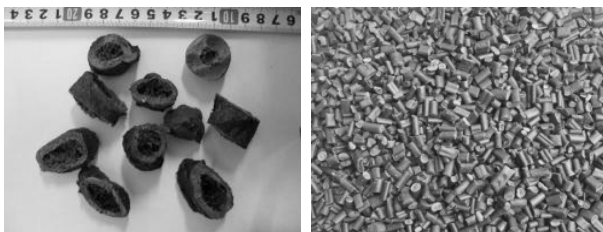


Fig. 3. Polyethylene aggregates (Kim, 2000)

다. Table 3에서 그 성질을 보여주고 있는 XPS는 압출발포법이라는 생산 특성상 입형이 아닌 판형이므로 XPS 판자 자체를 그대로 사용하였다. XPS 판자는 1호 규격을 사용하였으며, 시험 결과 열전도율이 KS M 3808에 제시된 값과 0.008 W/mK의 차이를 보였으나 그 값이 매우 미미하다. 또한 연구에 사용된 PE골재의 열전도율은 건조된 흙과 비슷한 0.113 W/mK으로 나타났다.

3.2 흙 시료의 기본 물성

Table 4에서 보는 시료는 실제 동상이 발생하였던 경기도 연천지역의 철도노반에서 채취한 흙 시료이다. 채취한 흙 시료를 통일분류법(Holtz & Kovacs, 1981)의 경계선 부근에 위치하여, 경계선 분류에 의하면 SC로서 투수계수가 비교적 낮아 배수가 원활하지 못한 것으로 나타났다. 이를 미 공병단에서 사용하는 동결토군 분류(TM 5-818-2, 1985)에 따라 분류하면 가장 동결하기 쉬운 F4 군에 속하는 것으로 나타났다.

3.3 열전도율

실제 열차하중 작용 시, 판형인 XPS는 그 넓이로 인해



Fig. 4. Thermal conductivity test apparatus (K-D2-P)

Table 2. Engineering properties of PE aggregates (Kim, 2000)

USCS	Abrasion rate (%)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	Gs	γ_d (kN/m ³)	λ (W/mK)
GP	2.36	12	56.1	1.08	7.2	0.107

Table 3. Properties of insulating material

Insulating material	USCS	G_s	γ_d (kN/m ³)	λ (W/mK)
PE aggregates	GP	1.08	6.62	0.113
XPS board	No. 1	-	0.27	0.036

Table 4. Soil properties for this test

USCS	Passing No.200 (%)	LL (%)	PI	Gs	γ_{dmax} (kN/m ³)	w_{opt} (%)	$k_{15^\circ C}$ (cm/sec)	Frost group
SC	14.92	23.45	4.65	2.62	18.0	13.6	1.48×10^{-5}	F4

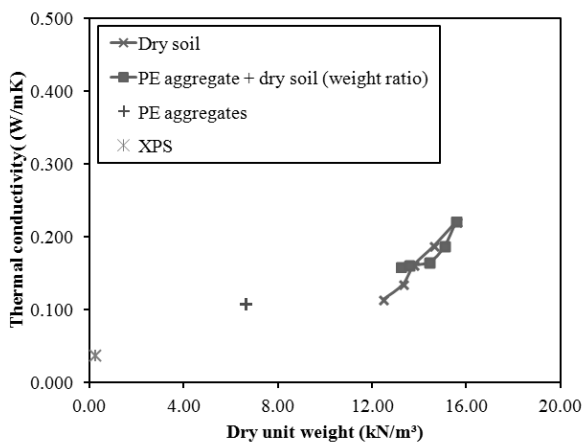
노반에 관입되지 않지만, 자갈과 같이 입상인 PE골재는 철도 차량의 운행으로 인한 반복하중과 용해로 인한 노반의 연약화로 인해 노반에 일부 혼입될 수 있다. 이때 PE골재 사이의 공극에 열전도율이 매우 낮은 공기 대신 흙이 메워짐으로써 열전도율이 변할 수 있다. 따라서 PE골재와 흙의 혼합비에 따른 열전도율을 측정하기 위해 A형 몰드에 PE골재를 6 %, 13 %, 21 %, 28 %의 중량비로 흙과 혼합하여 다짐도 90 %로 다진 공시체를 만들어, 휴대용 탐침식 열전도 측정기(K-D2-P, Fig. 4)를 사용하여 열전도율을 측정하였다. 또한 이들 시료에 최적함수비에 해당하는 3.6 %, 8.6 %, 13.6 %와 최적함수비를 초과한 18.6 %의 함수비 상태로 만들어 PE골재의 혼합이 함수비에 따라 열전도율에 영향을 주는지에 대해 분석한 후, -10~10 °C의 온도 범위 내에서의 열전도율 변화를 측정하였다.

3.3.1 건조밀도 및 중량비에 따른 열전도율 시험 결과

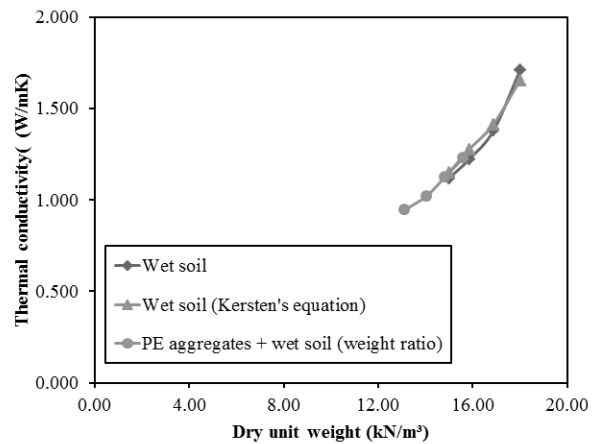
Fig. 5에는 ‘건조 흙+PE골재’ Fig. 5(a)와 ‘습윤 흙+PE골재’ Fig. 5(b)의 건조밀도에 따른 열전도율 측정결과를 나타내었다. 모든 공시체에서 건조밀도가 증가할수록 열전도율이 상승하는 결과를 나타내고 있으며, 이는 구성 재료의 접

촉에 의한 자연스런 결과이다. 먼저 건조 흙에서 PE골재의 유·무에 따른 열전도율의 차이는 매우 작았으며, 건조 흙에서는 PE골재의 비율이 증가함에도 ‘건조 흙’ 공시체의 열전도율 결과와 거의 비슷하였다. 이러한 결과는 PE골재의 열전도율이 0.107 W/mK으로 건조 흙 시료의 열전도율과 거의 비슷하기 때문으로 판단된다.

Fig. 5(b)에는 습윤토와 PE골재와 습윤토의 혼합토에 대한 열전도율을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 건조 흙의 혼합토의 건조 상태에서는 PE골재 유·무에 관계없이 거의 비슷한 건조밀도를 보이나, Fig. 5(b)에서 최적함수비의 흙과 PE골재 혼합공시체를 비교한 결과 원형기호로 표시한 혼합공시체의 건조밀도와 열전도율이 삼각형 기호로 나타낸 습윤토보다 더 작게 나타났다. 이러한 결과는 낮은 다짐도로 다졌을 때 흙 간극 중 공기로 인한 단열효과를 PE골재가 대신하는 것으로 판단되며, Table 5에 제시한 다양한 조건에서의 열전도율 시험결과 PE골재의 비율이 12 % 미만일 때에는 큰 단열효과를 기대할 수 없으며, 더 큰 혼합비에서 PE골재로 인한 단열효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 결과도 PE골재로만 된 공시체의 열전도율 0.113 W/mK에 비해 1.000 W/mK에 가까운 큰 차이를 보이므로



(a) Thermal conductivities at dry condition



(b) Thermal conductivities at wet condition

Fig. 5. Variation of thermal conductivities with dry unit weight

Table 5. Ratio of mixture for thermal conductivity test

Classification	Materials	Remarks
Dry unit weight	Dry soil	
	PE aggregates + Dry soil	PE aggregates 0, 6, 13, 21, 28 % (Weight ratio)
	PE aggregates + Wet soil + OMC	PE aggregates 6, 12, 17, 23 % (Weight ratio)
	Wet soil (OMC)	Degree of compaction 85, 90, 85, 100 %
Water contents (3.6~18.6 %)	PE aggregates + Wet soil	PE aggregates 6, 12, 17, 23 % (Weight ratio)
Temperature (-10~10 °C)	PE aggregates 6 % + Wet soil	Water contents 0, 8.6, 18.6 %
	PE aggregates 28 % + Wet soil	Water contents 0, 8.6, 18.6 %

노반으로의 혼입을 막기 위한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

3.3.2 함수비에 따른 열전도율 시험 결과

함수비에 따른 열전도율 측정결과, 수분의 유·무에 따라 같은 건조밀도에서도 큰 열전도율 차이를 보였다. Fig. 5(a)의 ‘건조 흙’ 공시체의 최대 건조밀도 값과 Fig. 5(b)의 다짐도 90 %로 제작된 ‘습윤 흙’ 공시체의 최소 건조밀도 값은 15 kN/m^3 정도로 거의 비슷하지만, 열전도율에서는 1.004 W/mK 의 차이를 보인다. 또한 ‘건조 흙+PE골재’(Fig. 5(a))와 ‘습윤 흙+PE골재’(Fig. 5(b))도 같은 건조밀도 범위에서 최대 1.006 W/mK 의 차이를 보였다. 이러한 차이는 건조한 흙에서 건조밀도 증가에 따른 열전도율 차이 0.107 W/mK 의 약 9배, 최적 함수비로 혼합된 습윤상태 흙에서의 열전도율 차이인 0.589 W/mK 의 약 1.7배에 해당한다. 따라서 같은 조건일 때 공극에 공기 대신 물이 얼마나 차지하는지, 즉 함수비가 얼마나 크지에 매우 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 PE골재와 흙 시료의 중량비와 함수비에 따른 열전도율의 측정결과를 나타낸 것이다. Fig. 6으로부터 PE골재 배합비율이 0%로부터 28 %로 증가함에 따라 열전도율은 약 0.22 W/mK 정도 감소하며, 중량비에 관계없이 열전도율은 함수비가 커짐에 따라 열전도율이 증가하다 최적함수비 부근에서 증가율이 둔화되는 경향을 보이고 있다. 또한 모든 중량비에서 최대·최소 함수비의 열전도율 차이가 평균 0.861 W/mK 으로 PE골재 배합비율에 의한 차이인 0.217 W/mK 에 비해 약 4배 크게 나타났다. 이 차이는 함수비 3.6~18.6 %의 범위 내에서의 차이이므로 물의 유입으로 함수비가 18.6 %보다 커지면 0.861 W/mK 보다 더 커질 수 있다.

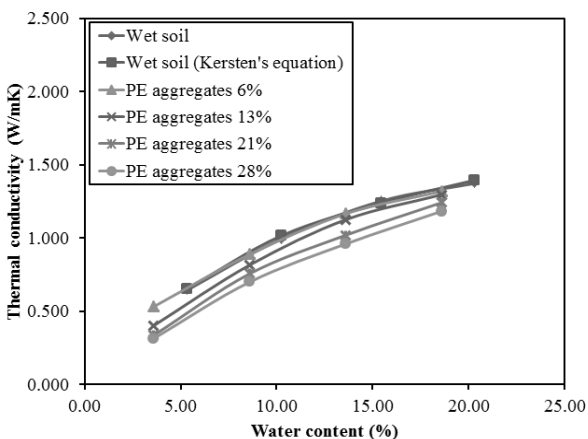


Fig. 6. Variation of thermal conductivity with water content

3.3.3 온도에 따른 열전도율 시험 결과

Fig. 7은 PE골재의 혼합율과 함수비가 다른 재료에 대하여 온도변화에 열전도율 시험결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 함수비 0 %인 건조 흙에서 온도에 따른 열전도율 변화는 없었지만, 물이 포함된 공시체에서는 열전도율이 0.6 W/mK 인 물이 2.24 W/mK 의 얼음으로 상변화되어 0°C 이하의 온도에서 열전도율이 더 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7을 보면 PE골재의 비율이 같을 때 함수비가 커짐에 따라 영상과 영하의 열전도율 차는 크게 나타났는데, 이는 영하의 온도에서 열전도율이 큰 얼음으로 변화되는 물의 양에 영향을 받기 때문으로 판단된다. 또한 PE골재의 비율이 증가함에 따라 물의 양이 줄어들어 열전도율이 감소하는 것도 볼 수 있으나 그 차이가 함수비 감소로 인한 열전도율 감소보다 비교적 작다. 따라서 PE골재를 사용하여 열전도율 감소를 얻음과 동시에 외부에서 노반으로의 물 공급이 되지 않도록 하는 차수대책이 필요할 것으로 판단되며 이는 XPS 판자를 혼용하면 일부 가능할 것으로 사료된다.

4. 모형 시험

4.1 모형 시험 개요

본 연구에서는 경기도의 한 동상발생 개소에서 채취한 시료를 사용하여 철도의 자갈도상(Fig. 8)을 모사하고 도상하부에 XPS, PE골재의 두께를 각각 5, 7.5, 10 cm로 설치하되 설치순서를 다르게 한 별도의 모형을 제작한 후, 영하 10°C 의 온도를 주었을 때 시간에 따른 노반시료의 온도변화를 T-type thermocouple과 Grant를 이용해 측정하는 시험을 실시하였다.

몰드는 열전도율이 0.29 W/mK , 직경 30 cm, 길이 1 m의 PE이중벽관을 사용하였고 그 안에 최적함수비로 섞은 흙을

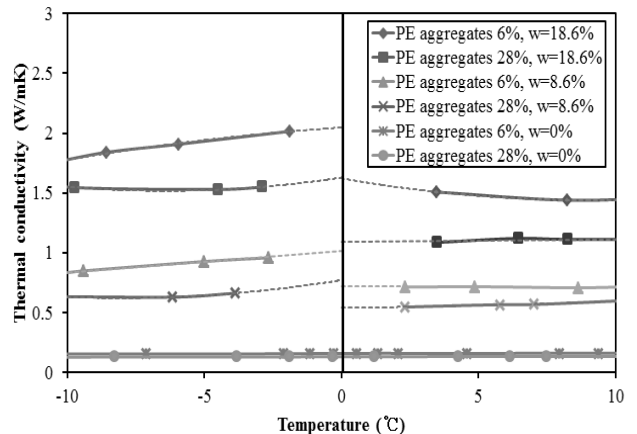


Fig. 7. Variation of thermal conductivity with temperature

다짐봉을 사용하여 다짐도 90 %로 다져 넣었다(Fig. 9). XPS와 PE골재를 종류와 두께, 설치순서를 다르게 하여 흙을 포함한 높이가 45 cm가 되도록 한 후, 그 위에 직경 5 cm 이

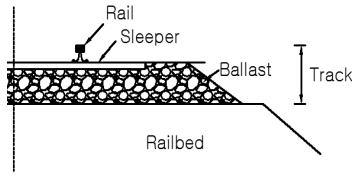


Fig. 8. Railroad track

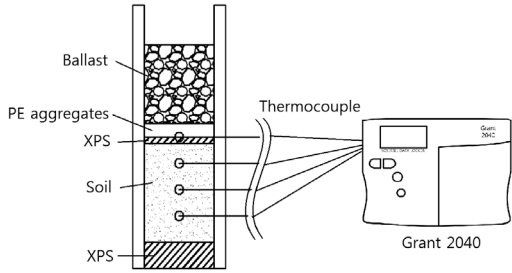


Fig. 9. Schematic of the model test

상의 자갈을 30 cm로 다져 넣어 자갈도상을 모사하였다. 대기에서 공시체로의 1차원적인 열 이동을 위하여 PE 이중벽 관에 열반사단열재를 5 cm 두께로 두르고, 공시체의 하단부에 XPS 10 cm를 빈틈없이 설치하였다. 몰드 내 온도변화의 측정은 공기온도와 자갈도상 하부 각각 5 cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm 깊이에서 측정하였다.

4.2 모형 시험 결과

Fig. 10에는 각 모형시험의 모식도를 나타내었으며, 단열재의 두께와 설치순서에 따른 모형시험의 결과는 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 위로부터 XPS+PE골재의 경우를 보면 대기온도의 변화를 제외하면 모든 모형에서 노반의 온도가 시작온도인 25 °C 부근부터 완만하게 내려가다 0 °C 부근에서 온도 기울기의 변화가 생기고 그 후 영하 이하의 온도로 매우 느리고 완만하게 내려가는 것을 알 수 있다. Fig. 11(a)에서 XPS 5 cm 하부에서의 측정온도와 더 깊은 15 cm, 25 cm, 35 cm에서의 측정치와는 큰 차이가 없으며

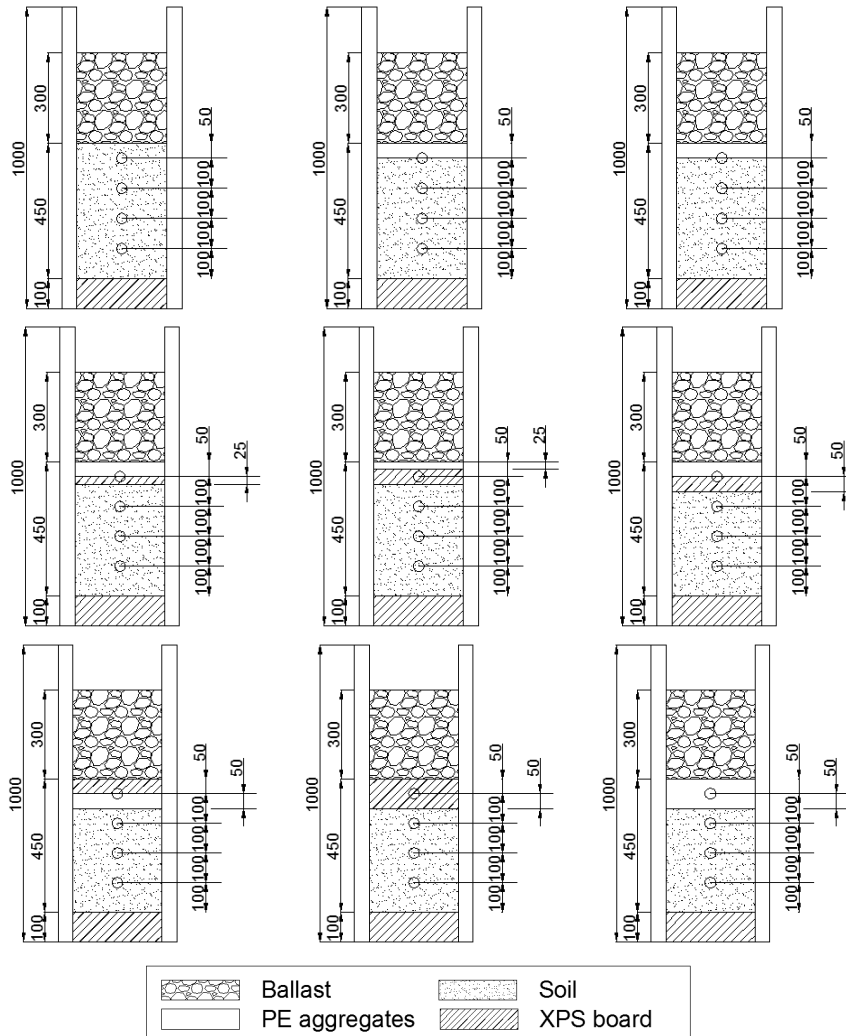
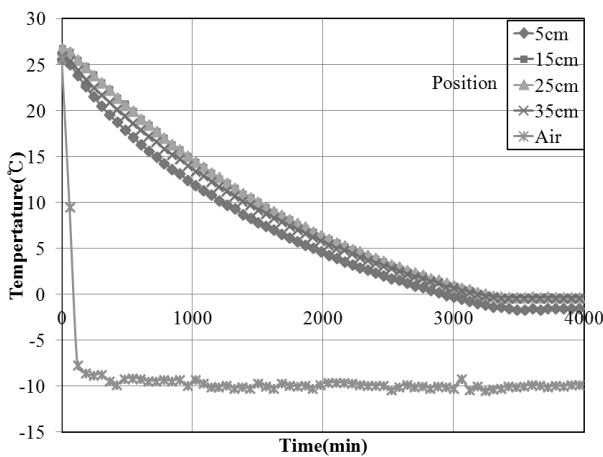


Fig. 10. Schematic of each model test

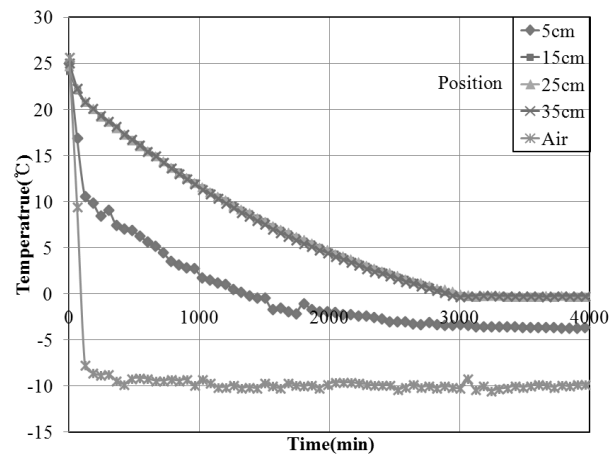
0 °C 도달시간이 XPS하부 5 cm 위치에서 약간 빠름을 알 수 있다. 반면에 PE골재 5cm 하부에서 측정된 온도는 Fig. 11(a)의 XPS 5 cm 하부에서 보다 온도강하가 더 급히 일어남을 알 수 있는데, 이는 PE골재의 열전도율이 XPS보다 크기 때문이다. 그럼에도 PE골재와 XPS를 통과한 부분의 온도 차는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

Fig. 11(c), (d)는 각 단열재를 10 cm 설치하고 토사 내의 온도 측정위치를 달리한 것으로서, XPS 5 cm 설치한 경우와 비교하여 0 °C 도달시간이 더 길어짐을 알 수 있으며, XPS 10 cm와 PE골재 10 cm를 비교하면 XPS 10 cm의 도달시간이 훨씬 길게 나타남을 알 수 있다. Table 6은 T-type Thermocouple을 설치한 단일재료 혹은 조합 10 cm 재료의 모든 층이 0 °C가 되는데 소요된 시간을 단열재별로 정리한 것이다. 여기서 단열재의 두께를 최대 10 cm로 한 것은 외국의 실제 적용사례가 10 cm(Takashi, 2012)임을 감안한 것이다. 시험 결과, 동결온도 도달시간은 노반에서 2,100분이 걸려 가장 빠르게 나타났으며, 'XPS 10 cm'가 3,330분이 소요되어 가장 뚜렷한 단열효과를 보였다.

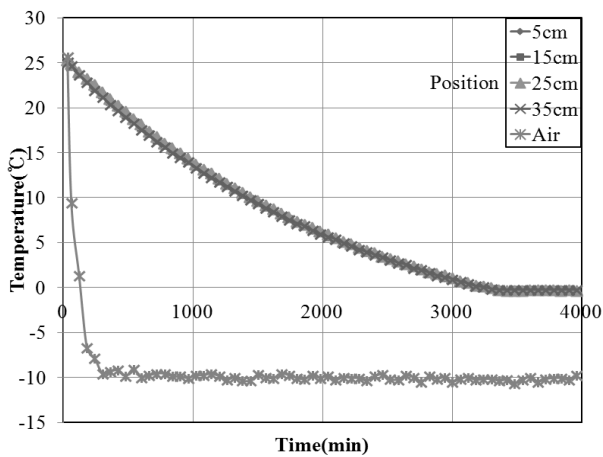
'XPS 5 cm + PE골재 5 cm'와 'PE골재 5 cm + XPS 5 cm'는 설치 순서만이 다를 뿐이지만 0 °C가 되는데 소요된 시간이 각각 3,270분, 2,970분으로 큰 차이를 보였다. 이는 PE골재를 XPS 상부에 설치할 경우 PE골재가 입경이 큰 자갈의 간극 사이에 침투하여 밀도가 높아지고, 자갈 내부의 간극사이의 공기가 지니고 있는 단열효과를 감소시키기 때문으로 판단된다. 또한 XPS 판자 아래 PE골재가 설치된 경우, XPS 판자가 대기와 PE골재 사이의 공기를 차단하여 대류와 전도로 인한 온도변화를 둔화시켜 'XPS 5 cm + PE골재 5 cm'의 0 °C 도달시간이 더 오래 소요되는 것으로 사료된다. 이 결과로부터 동결온도로 내려가는 단열층 두께는 XPS 5 cm(Fig. 11(a)), PE골재 5 cm(Fig. 11(b), (c))일 경우이며, 단열재의 두께가 이보다 두꺼운 10 cm에서는 같은 종류 혹은 혼합사용 모두 단열효과가 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 11(c)는 XPS에 대한 시간별 온도변화로서 XPS의 단열효과가 우수하여 본 온도 설정범위에서는 Fig. 11(a)와 비교할 때 작은 깊이 차이에 따른 온도변화는 거의 없는 것으로 판단된다.



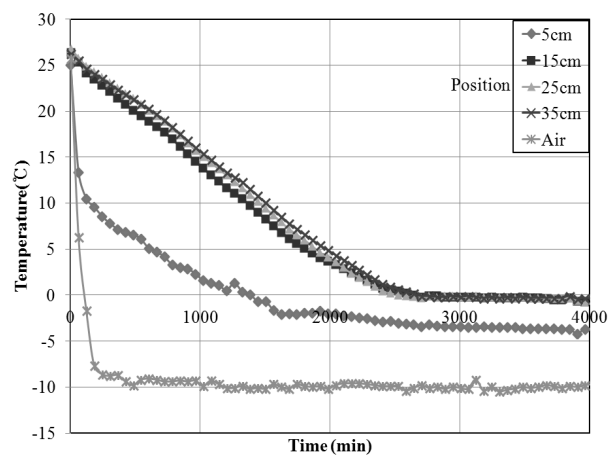
(a) XPS 5 cm + PE aggregates 5 cm



(b) PE aggregates 5 cm + XPS 5 cm



(c) XPS 10 cm



(d) PE aggregates 10 cm

Fig. 11. Results of model tests

Table 6. Time to reach 0 °C for different combinations

No.	Classification (upper + lower)		Time to reach 0 °C (min)
1	Soil 10 cm	Soil 10 cm	2,100
2	Insulator 5 cm + Soil 5 cm	XPS 5 cm + Soil 5 cm	2,550
3		PE aggregates 5 cm + Soil 5 cm	2,280
4	Insulator 7.5 cm + Soil 2.5 cm	PE aggregates 5 cm + XPS 2.5 cm	2,670
5		PE aggregates 2.5 cm + XPS 5 cm	2,740
6	Insulator 10 cm	XPS 5 cm + PE aggregates 5 cm	3,270
7		PE aggregates 5 cm + XPS 5 cm	2,970
8		XPS 10 cm	3,330
9		PE aggregates 10 cm	2,700

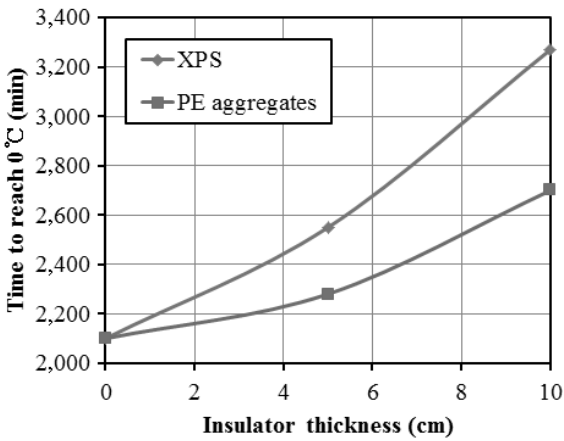


Fig. 12. Variation of time to reach 0 °C with thickness

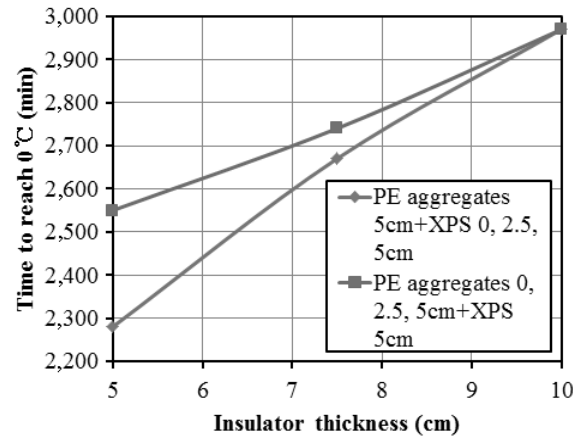


Fig. 13. Variation of time to reach 0 °C for different combination of insulator thickness

Fig. 12는 Table 6의 결과를 단열재와 두께별로 구분하여 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 XPS 판자와 PE골재 모두 두께가 증가함에 따라 0 °C 도달시간이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 같은 두께일 때 XPS 판자가 PE골재에 비해 0 °C 도달시간이 훨씬 크게 나타났고, 두께가 두꺼워짐에 따라 그 차이가 더욱 커졌는데 이는 XPS 판자의 열전도율이 PE골재에 비해 낮기 때문이다.

PE골재가 상부에 설치되어 있고 하부에 XPS 판자가 설치되었을 때 각 단열재의 두께 변화에 따른 0 °C 도달시간을 Fig. 13에 나타내었다. 시험 결과에 따르면 ‘XPS 5 cm+PE골재 5 cm’와 ‘XPS 10 cm’도 0 °C 도달시간이 각각 3,270 분, 3,330분으로 40분의 근소한 차이를 보였다. 따라서 XPS 판자가 상부에 위치함으로 인한 PE골재 5 cm의 공기 보온 효과가 XPS 판자 5 cm와 비슷할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 철도노반의 동상을 방지하기 위해 PE골재와 XPS 판자의 배열 및 두께에 따른 온도변화 특성을 실험하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) PE골재가 흙에 혼입되는 양이 많아짐에 따라 열전도율이 낮아졌으나 PE골재만으로 된 단열층에 비해 열전도율이 비교적 크게 나타났다. 따라서 PE골재 사용 시에는 노반의 혼입방지를 위해 분리하는 것이 효과적일 것으로 나타났다.
- (2) 단열재의 조합 시 동일한 단열재 두께를 사용하더라도 설치순서에 따라 0 °C에 도달하는 시간에 큰 차이를 보였다. XPS 판자가 상부, PE골재가 하부에 설치된 경우 그 반대의 경우보다 0 °C에 도달하는데 오랜 시간이 소요되는 것으로 나타났다.
- (3) PE골재와 XPS 두 단열재의 0 °C 도달시간이 같을 때 깊이 1~10 cm 범위 내에서 PE골재층의 두께가 XPS 판자에 비해 1.5~3배 더 필요한 것으로 나타났는데, 그 비율은 0 °C 도달시간이 커짐에 따라 감소하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 미래철도기술개발사업 “철도구조물의 동해방지공법 및 설계·시

공·유지관리지침 개발’ 연구(12PRTD-C060001-02)의 연구
비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Gandahl, R. (1996), Polystyrene foam as a frost protection measure on national roads in sweden, Swedish National Road and Transport Research Institute, pp. 74~75.
2. Han C. Y., Lee J. S. and Cho K. H. (2011), The study about reduction of frost-heaving in railway small structures, The Korean Society for Railway Conference & Fall National Conference, pp. 1129~1135 (in Korean).
3. Holtz R. and Kovacs, W. (1981), An introduction to geotechnical engineering, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 58~59.
4. Kim, Y. C. (2000), Preliminary study on recycling of plastic (vinyl) waste with construction aggregates, Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 48, No. 6, pp. 81~87 (in Korean).
5. Kim Y. C. and Kang B. H. (1998), The control of the ground frost heave by using the scrap tire, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 14, No. 1, pp. 49~58 (in Korean).
6. Kim Y. C. and Hong S. S. (2006), Waste vinyl recycled aggregates as anti-frost layer in pavements, 2006 Annual Conference of Korean Geo-Environmental Society, pp. 339~348 (in Korean).
7. Kim Y. C and Yoon Y. W. (2013), Development of anti-freeze method, design, construction and maintenance manual for railway structure, Korea Institute of Construction Technology, p. 28 (in Korean).
8. Lee J. W., Choi C. Y., Lee S. H. and Lee S. U. (2005), Analysis on the situation mud pumping of railroad roadbed through actual condition in Korea, The Korean Society of Civil Engineers Conference, pp. 5080~5083 (in Korean).
9. Lee K. B. (1998), EPS construction method, Science and Technology, pp. 25~59 (in Korean).
10. Lee S. Y., Kim Y. C., Kim N. H. and Kim M. S. (2010), Experimental study about reduction of frost-heaving in railway roadbed which using wasted tire chips, Proceedings of The Korean Society for Railway Fall Conference, Vol. 1, pp. 633~639 (in Korean).
11. Ministry of Environment (2005), Wastes management act, pp. 211~212 (in Korean).
12. Nurmikolu Antti (2011), Routa ratarakenteissa, Invited lecture, KICT, pp. 5~11.
13. Takashi Ono (2012), Frost heave protection techniques in Japan, Invited Lecture, KICT, pp. 11~18.
14. U.S. Army Corps of Engineers (1985), TM 5-818-2, Pavement design for seasonal frost conditions, Departments of the Army and the Air Force, Washington D. C., pp. 2~5.