

동상방지재료를 활용한 온도에 따른 매설관 거동 특성에 대한 연구 Mechanical Behavior of Buried Pipe Line with Frost Prevention Materials

강재모¹⁾, Jae-Mo Kang, 김학승¹⁾, Hak-Seung Kim, 김영석²⁾, Young-Seok Kim, 이장근²⁾, Jang-Keun Lee, 홍승서¹⁾, Sung-Seo Hong,

¹⁾ 한국건설기술연구원 전임연구원, Researcher, Dept. of Infrastructure Research, KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 수석연구원, Senior Researcher, Dept. of Infrastructure Research, KICT

SYNOPSIS : Seasonal frozen ground affects structural behavior in South Korea. Frost and heaving of seasonal frozen ground results in the critical damage of roadway, railroad, and buried pipeline. It has been widely used to substitute frost susceptible soils with granular soils. This paper presents experimental investigation on the effectiveness of soil-shredded tire and soil-expanded polystyrene (EPS) mixtures to reduce frost depth and force around a buried pipeline. Experimental data such as measured temperature profile and the deformation of buried pipeline were carefully observed and provide the evidence of the effectiveness of soil mixtures.

Key words : frozen ground, frost heave, shredded tire, EPS, buried pipe line

1. 서 론

우리나라는 계절동토 지역에 속하는 관계로 겨울철 일부 남쪽 지방을 제외하고는 지반이 동결되는데, 이때 동결토의 특성은 지반구조물의 거동에 상당한 영향을 미친다. 겨울철 및 봄철에 우리나라에서는 도로, 철도, 매설관 등이 동상이나 융해로 인하여 구조물에 피해가 발생하게 된다. 지금까지 국내에서는 동상을 방지하기 위한 방안으로 동상성(frost susceptibility)인 흙을 비동상성 재료인 자갈이나 쇄석으로 치환하는 방법을 이용하여 왔다.

본 논문에서는 기존의 자갈을 대체할 수 있는 재료로써 단열효과가 우수하고, 환경 친화적인 페타이어 조각과 발포스티렌(EPS, Expanded PolyStyrene) 조각을 흙에 일정 비율 혼합하여 매설관 뒷 채움재로 사용하여, 외부로의 찬 공기가 침투되는 것을 차단해서 동결깊이 및 매설관에 작용하는 동결하중을 감소시킬 수 있는 방안을 제안해 보았다.

흙의 동결하중은 토압보다 훨씬 크게 작용하지만 현재까지 경험적인 방법을 제외하고는 동결하중을 추정하는 것은 쉽지 않다. 동결하중이란 흙이 0℃ 이하로 냉각되는데 따른 지반이 동결함에 따라 발생하는 하중의 증가를 말하며, 동결팽창압(동결토압)이라고도 부른다. 이때 발생하는 지반의 동결팽창은 수평방향뿐만 아니라 수직방향으로도 작용하며, 도로나 매설관이 파손되는 원인이 된다(Andersland and Ladanyi, 2004).

국내에서는 동결 지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 실험적 연구가 christ et al(2009)에 의해 이루어졌고, 동토지역 흙 시료의 기본적인 동결 거동을 확인하기 위한 실험적 연구도 김영진 등(2008)에 의해 수행된 바 있지만, 페타이어나 EPS 조각을 흙과 혼합하여 좀 더 복잡한 구성을 가지는 혼합토의

동결 거동을 확인하고 비교한 연구는 현재까지는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 동상방지층용 자갈의 대체 재료로서 단열효과가 큰 페타이어조각과 EPS를 흙과 일정 비율 혼합한 지반에 매설관을 설치하고 깊이에 따른 지중 온도변화 및 매설관의 변형을 측정하여, 동상방지 효과를 확인하고자 하였다.

2. 시료의 기본 물성

2.1 흙 시료의 기본 물성

본 연구에 사용된 흙 시료의 토질 공학적 특성을 파악하기 위하여 기본 물성 실험을 실시하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

표 1. 흙 시료의 기본성질

	실험결과		실험결과
비중	2.646	소성지수	12.4
최적함수비(%)	11.74	극률계수	22.22
γ_{dmax} (g/cm ³)	1.91	균등계수	0.50
액성한계(%)	35.2	통일분류법	SC
소성한계(%)	22.8		

2.2 시료의 열전도 특성

열의 전도란 물질의 이동을 수반하지 않고 고온부에서 저온부로 열이 전달되어 가는 현상을 말한다. 열전도에 의한 물체 내부에서의 열의 전달속도는 물질 내부에서의 온도기울기에 비례하지만, 물질의 종류에 따라 큰 차이가 있다. 일반적으로 그 값은 온도에 따라 다소 달라지는데, 물질의 종류에 따라 거의 정해진 값을 가지는 물질상수로 보아도 좋다(Halliday et al, 2001).

본 연구에서는 페타이어와 EPS 조각을 흙시료와 혼합하여 사용할 때 각각의 재료의 열전도율을 확인하고 적절한 혼합비율을 도출하기 위해 열전도 시험을 실시하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

표 2. 시료의 열전도율

시료	열전도율(W/(m · K))	비고
흙 시료	1.224	
페타이어 조각	0.102	
EPS 조각	0.033	시험성적서

열전도 시험은 크기가 25×25×10cm인 측정상자에 각각의 시료를 최대건조밀도의 90%로 다져 넣고, QTM식 프루브를 시료 상부에 놓고, 열전도율을 5회 측정하여 평균값을 이용하였다. 단 EPS 조각의 경우 다짐에 따른 체적변화로 이러한 방식으로 열전도율을 측정하기에 문제가 있어, 시험 성적서상의 EPS 판넬의 열전도율을 참조 하였다.

페타이어 조각의 열전도율은 흙 시료의 열전도율과 비교해 약 10배 정도 작은 값을 보였고, EPS의 경우 흙 시료에 비해 약 30배 이상 작은 값을 보였다.

3. 페타이어 및 EPS조각 혼합시료 배합비 산정

페타이어 조각과 EPS조각을 흙과 혼합하여 매설관 뒤채움재로 활용할 경우, 페타이어 조각과 EPS 조

각의 단열 특성으로 인해 동상방지효과와 토압감소 효과가 기대된다. 이 중 EPS 조각의 경우 흙과 혼합하여 사용할 경우 EPS 자체의 체적 감소가 커서 감소폭 만큼 흙의 비율이 많아져 효과를 기대하기 힘든 것으로 나타났다.

페타이어 조각과 EPS 조각 혼합토의 거동을 비교하기 위해 페타이어 조각이 15% 함유된 혼합토의 온도에 따른 열전도율 거동을 파악하고, EPS 조각을 20%, 25%, 30% 체적비로 흙과 혼합하여 EPS 혼합토의 열전도율의 변화 추이를 온도의 변화에 따라 확인하여, 페타이어 조각 15% 혼합토와 비슷한 경향을 보이는 혼합비를 역으로 추적하였다.

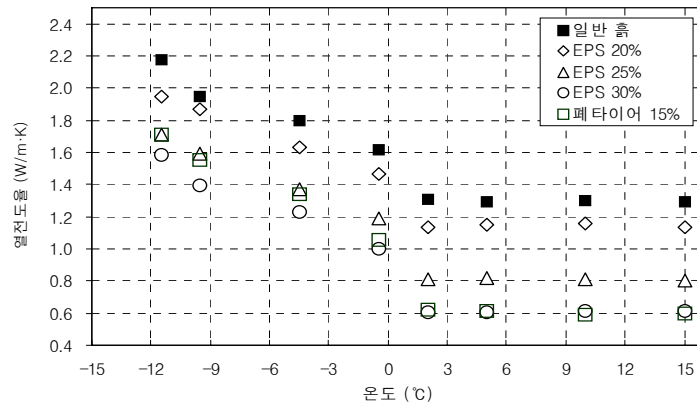


그림 1. 페타이어 및 EPS 조각 혼합토의 열전도율

온도에 따른 혼합토의 열전도율 거동은 그림 1과 같이 나타났으며, 페타이어 조각이 15% 함유된 혼합토와 EPS 조각이 30% 함유된 혼합토의 온도별 열전도율 거동이 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 EPS 재료 자체 물성 보다는 EPS 혼합토의 다짐으로 인한 EPS의 체적변화에 따른 것으로 판단된다.



그림 2. 페타이어 조각 혼합토(15%)

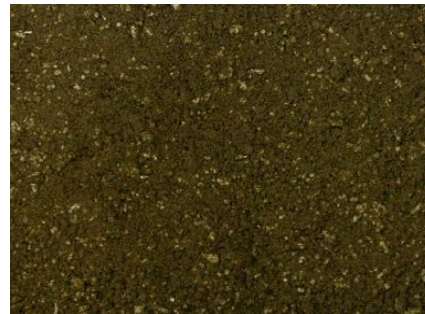


그림 3. EPS 조각 혼합토(30%)

4. 페타이어 및 EPS 조각 혼합토를 활용한 매설관 거동 시험

4.1 시험 방법

모형시험에 사용된 토조는 400(폭)×400(너비)×400mm(높이) 크기로 토조 내부에 매설관을 설치하고, 5cm 간격으로 총 9개의 온도센서를 설치하였다(그림 4 참조). 매설관 주변부에는 그림 5과 같이 90° 각도로 스트레인게이지를 설치하여 온도변화에 따른 매설관의 변위를 측정하고자 하였다.

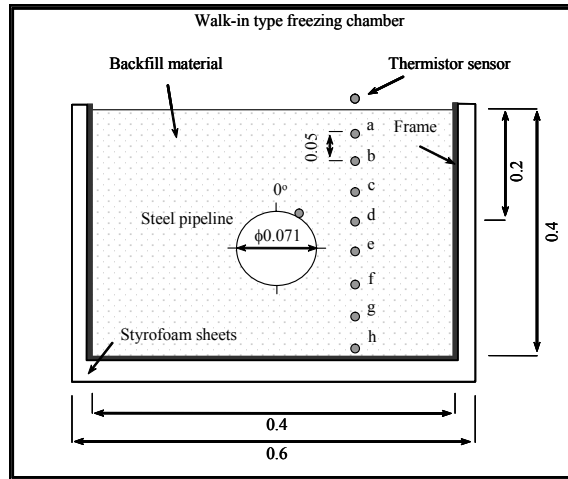


그림 4. 모형토조 내부의 온도센서 설치 단면

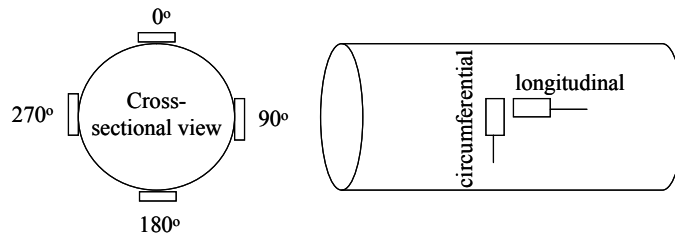


그림 5. 스트레인게이지의 부착위치 및 방향

실험은 일반 흙, 페타이어 조각 혼합토(15%), EPS 조각 혼합토(30%)를 대상으로 총 3회를 실시하였으며, 토조를 냉동챔버에 넣고, 챔버의 온도를 -14°C 로 일정하게 유지하면서 시간 경과에 따른 토조 내부의 온도 분포 및 매설관 거동을 확인 하였다.

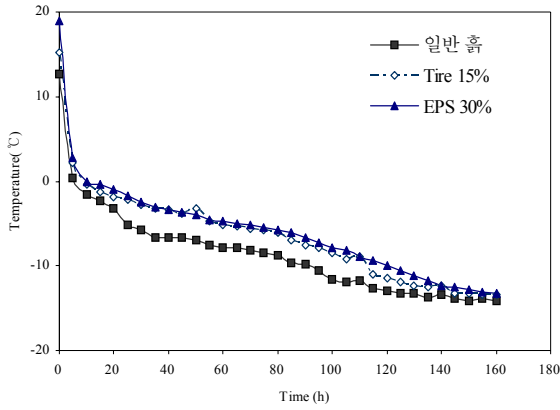
일반 흙과 페타이어 및 EPS 혼합토를 토조에 채우기 위해 각각의 시료에 대한 다짐실험을 실시하여 최대건조단위중량의 90%로 다짐 하였으며, 다짐 높이는 매층 5cm로 하여 실시하였다. 실험에 사용된 채움재의 특성은 표 3과 같다.

표 3. 일반 흙과 페타이어 및 EPS 혼합토의 시료 특성

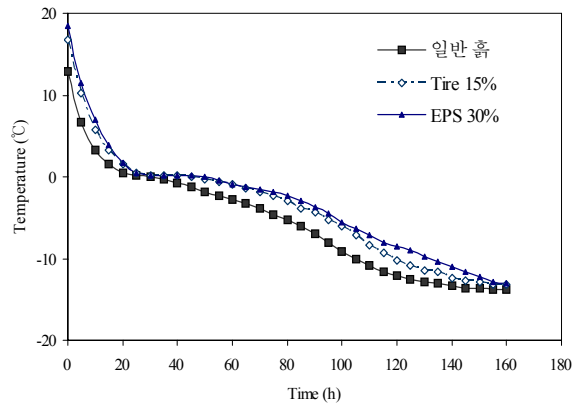
시료	함수비(%)	γ_{dmax} (g/cm^3)	사이즈
흙 시료	18.5	1.91	
페타이어 혼합토	18.7	1.41	4cm 크기로 파쇄
EPS 혼합토	19.2	1.56	2~5cm 크기로 파쇄

4.2 시험 결과

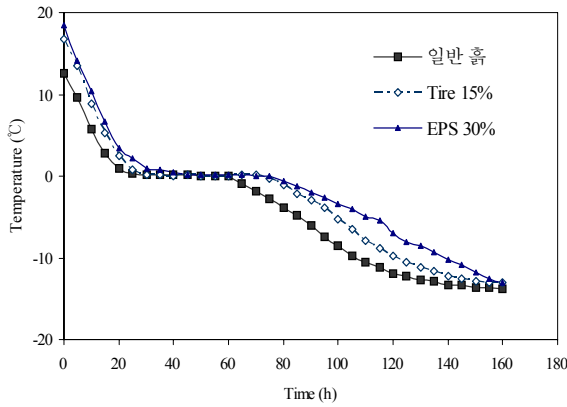
본 시험에서는 각각의 채움재에 대한 시간에 따른 깊이별 온도변화(그림 6 참조)를 확인하였으며, 시간에 따라 지반의 수직방향(상부에서 하부)으로 동결면을 형성하는 과정을 모니터링 하였고(그림 7 참조), 채움재에 따른 매설관의 시간에 따른 변위도 확인 하였으며 그 결과는 표 4~6과 같다.



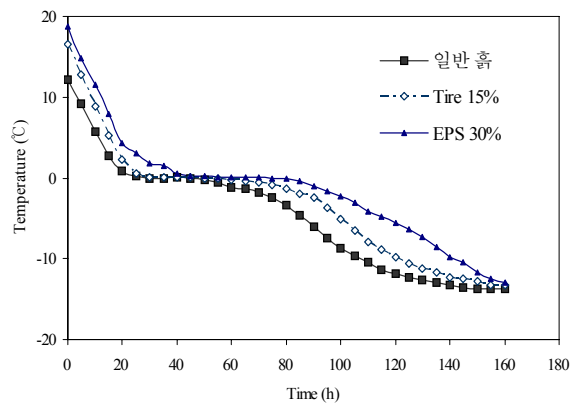
(a) 5cm 깊이에서 온도변화



(b) 15cm 깊이에서 온도변화



(c) 30cm 깊이에서 온도변화



(d) 40cm 깊이에서 온도변화

그림 6. 깊이에 따른 성토재료별 온도변화 비교

시간에 따른 깊이별 매설관 주변 지반 온도 분포(profile)를 살펴보면 표면으로부터 깊이가 깊을수록 온도저하 속도가 감소하는 것을 알 수 있고, 일반 흙에 비해 페타이어와 EPS 혼합토의 온도 저하 속도가 더 느린 것으로 나타났다. 특히, 유사한 열전도 거동을 보였던 페타이어 15% 혼합토와 EPS 30% 혼합토는 외부 온도에 따라 지반 내 온도가 감소하는 거동도 거의 유사한 경향을 보였지만, 각 성토재의 동결면 하향시간 비교했을 때 함유량이 많은 EPS 조각 혼합토의 동결면 하향시간이 느리게 나타나는 것으로 나타났다.

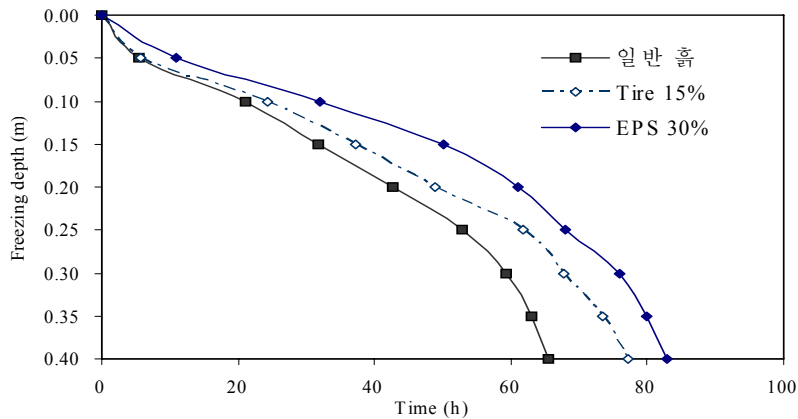


그림 7. 성토재료의 종류에 따른 동결면 하향시간 비교

열전도율이 낮은 페타이어와 EPS 조각을 혼합하여 매설관 뒤 채움재로 활용할 경우 지반 온도 저하를 감소시키고, 지반 동결로 인해 매설관에 작용하는 토압을 경감시킬 수 있을 것으로 기대되지만, 페타이어와 EPS 조각의 배합비에 따른 단일 효과의 변화는 각 재료의 체적변화, 혼합토의 열적 특성 변화 등 다양한 요소가 작용하므로 향후 페타이어 및 EPS 조각 혼합토의 현장 적용을 위해서는 이 부분에 대한 연구가 더 필요할 것을 판단된다.

채움재에 상관없이 각각의 매설관의 변형은 온도 변화에 따라 유사한 거동을 보였다. 매설관 주변 지반의 온도가 낮아짐에 따라 매설관의 변형은 더욱 증가하는 경향을 보였으며, 전체적으로 일반 흙 시료에 비해 페타이어나 EPS를 혼합한 지반에서 온도저하에 따른 매설관의 변위가 작은 것으로 나타났다.

표 4. 일반 흙 시료로 성토된 파이프의 시간에 따른 스트레인

시간 (h)	온도 (°C)	원주방향 변형				축방향 변형			
		0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
0	10.5	-5	-8	-19	-4	-21	-17	-27	-15
40	0.1	-171	-45	-69	-20	-78	-101	-128	-86
100	-8.2	-308	-53	-157	93	-142	-75	-189	-71
160	-13.7	-313	-76	-211	53	-194	-127	-247	-124

표 5. 페타이어 혼합토로 성토된 파이프의 시간에 따른 스트레인

시간 (h)	온도 (°C)	원주방향 변형				축방향 변형			
		0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
0	15.2	1	10	-25	-42	-4	-11	7	-12
40	0.1	-141	-62	-102	-19	-59	-129	-78	-12
100	-4.6	-154	-41	-116	-73	-106	-124	-143	-57
160	-12.9	-150	-54	-148	-108	-143	-159	-183	-94

표 6. EPS 혼합토로 성토된 파이프의 시간에 따른 스트레인

시간 (h)	온도 (°C)	원주방향 변형				축방향 변형			
		0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
0	18.6	-3	-18	-9	-30	-3	-15	-7	-11
40	0.2	-134	-57	-87	-12	-48	-122	-65	-12
100	-4.3	-147	-53	-111	-64	-84	-117	-124	-63
160	-12.9	-142	-61	-129	-102	-126	-142	-166	-87

5. 결 론

본 연구는 단일효과가 큰 페타이어와 EPS 조각을 흙 시료와 일정 체적비로 혼합하여 매설관 뒤채움재로 활용 하였을 때, 혼합토의 온도에 따른 지반 안정화 효과 및 변형 감소효과를 확인 하기위해 모형 매설관 실내 실험을 하였으며, 그 결과는 다음과 같았다.

1. 온도 저하에 따라 매설관의 변형이 커지는 것을 알 수 있었으며, 일반 흙 시료에 비해 혼합토를 뒤채움재로 활용하였을 때 매설관의 변형이 작은 것으로 나타났다.
2. 일반 흙에 비해 페타이어와 EPS 혼합토의 온도 저하 속도가 더 느리게 나타났으며, 동결면 하향 시간도 일반 흙에 비해 혼합토가 더 느린 것으로 나타났다.
3. EPS 조각 30% 혼합토의 동결면 하향 시간이 가장 느린 것으로 나타났으며, 이는 단순히 EPS 조각의 혼합 비율이 높았기 때문이라고 단정하기 보다는 각 재료의 혼합에 따른 입자의 체적변화, 열적

특성변화 등의 다양한 인자에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년 국토해양부의 R&D 연구과제인 “시베리아 동토지역 진출을 위한 미래건설 기술개발”과제와 2010년 한국건설기술연구원의 주요연구개발사업인 “극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발” 과제의 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. 김영진, 신재원, 김현기(2008), “남극 및 시베리아 흙의 동토공학적 분석”, 2008한국지반공학회 학술발표회, pp. 894~904
2. Andersland, O.B. and Ladanyi, B.(2004), "Frozen Ground Engineering", ASCE Press, pp. 20~54
3. Christ, M., Kim, Y.C. and Park, J.B(2009), "The influence of temperature and freezing-thaw cycling on mechanical properties of frozen soils", KSCE Journal of Civil Engineering, 13(3), pp. 153~159
4. Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J.(2001), Fundamentals of Physics, Sixth Edition, John Willy & Sons, pp. 304-305