

# 재활용 PET 재료를 이용한 골재의 동상저감 효과 분석 및 경제성 평가

## Analysis of Frozen Reduction Effect and Economic Evaluation of Recycled PET-Soil

신은철<sup>1</sup>, 신희수<sup>2\*</sup>, 김기성<sup>3</sup>

Eun Chul Shin<sup>1</sup>, Hui Su Shin<sup>2\*</sup>, Gi Sung Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>2</sup>Non-Member Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119, Academyro, Yeonsu-gu, Incheon, 406-772, Republic of Korea

### ABSTRACT

During the winter and spring seasons in Korea, structures such as buried water supply pipelines, roads, railways are frequently damaged due to frost heaving and thawing. Until now, the method of substituting the frost susceptible soil with the gravel or rubbles those are non-frost susceptible materials have been employed in Korea to prevent frost heaving. A series of laboratory soil tests and indoor frozen soil engineering experiments, as well as laboratory frost heaving tests were conducted for seeking the means of utilizing recycled PET bottles as substitute material.

### 요 지

가

PET 가  
가

PET 가  
가

**Keywords** : Frost heave, PET aggregate, Recycled PET, Frost reduction effect

## 1. 서 론

일반적인 흙의 성질은 영하의 온도와 충분한 수분의 공급이 지속되면 간극수의 동결로 인한 체적 팽창이 일어나게 된다. 특히 부등한 상태의 지하수위가 존재하면 모세관 상승에 의해 수분이 흙의 표면을 따라 상승하게 되어 영하의 온도에 영향을 받는 상부로 유입되면 지표면의 동결을

일으킨다. 겨울철 동결과 봄철 해빙의 반복적 발생은 지반의 침하를 발생시키고 이로 인해 사회 중요 시설물인 도로, 철도 및 지중 매설관에 대한 피해가 발생하고 있다. 이러한 피해를 방지하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 동상방지 재료도 개발되고 있다.

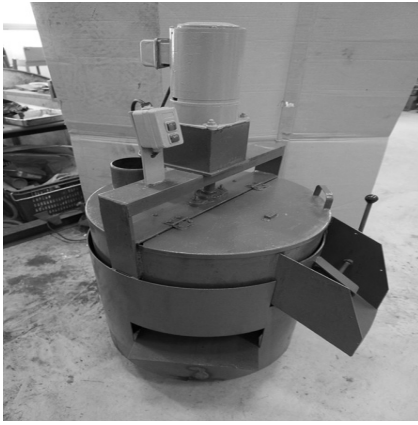
최근 건설현장에서 사용되는 모래, 골재 등의 재료비가 상승하고 재료를 재취하기 위한 자연훼손이 심각해짐에 따라 재활용 재료를 이용하는 연구와 시공사례가 증가하고 있다. 따라서 폐 PET를 가공하여 토립자와 부착시킨 인공 골재(이하 PET골재)를 동상방지 재료로 활용하고자

Received 29 May. 2014, Revised 18 Nov. 2014, Accepted 12 Dec. 2014

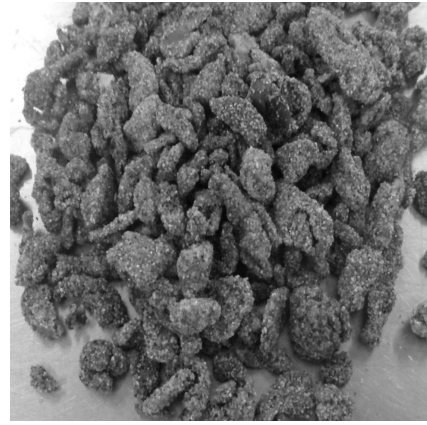
\*Corresponding author

Tel: +82-32-835-4243; Fax: +82-32-835-0775

E-mail address: shin0942@nate.com (H. S. Shin)



(a) PET aggregate mixer equipment



(b) PET coated aggregate

Fig. 1. View of mixing equipment and PET coated aggregate.

연구를 수행하였다. 플라스틱은 석유, 천연가스, 석탄으로부터 분자량이 작은 단량체(monomer)를 만들고 이를 고분자화한 유기화합물을 통칭하여 말한다. 원료별로 보는 플라스틱의 종류는 매우 많고 다양하지만 가장 보편적으로 사용되어지는 원료별 플라스틱의 종류는 약 30가지 이내이며, 그중에서 가장 많이 사용되어 생활폐기물의 90% 이상을 차지하는 것은 6대 범용플라스틱(PE, PP, PVC, PS, PET, ABS)이다. PET는 서로 입체적으로 망상 결합을 하고 있는 공간망상구조의 열경화성 특성을 갖는 수지이다(Kim, 2010).

재활용가능자원 분리배출량은 플라스틱류 1,377.5ton/일, 페타이어의 경우 31.4ton/일이며, PET를 포함한 플라스틱이 페타이어보다 약 44배 이상 배출되므로 건설현장의 재활용 재료로써 가치가 충분하다고 할 수 있다(Ministry of Environment, 2013).

## 2. 실험방법 및 내용

### 2.1 PET골재의 제조

청량음료나 각종 조미료를 등을 담는 용기로 흔히 사용되는 페트병(poly ethylene terephthalate)은 가열, 가압 또는 이 두 가지의 방법에 의해서 성형이 가능한 열경화성 물질이다. 열경화성 플라스틱은 저렴하며 가공이 쉽고, 변형 후 단단해지는 특성이 있어 열적재활용(thermal recycling) 시스템을 통한 재활용이 가능하다(Shin et al., 2013).

수거된 페트병을 재활용하기 위해서는 소정의 가공 과정을 거쳐야 한다. 가공 과정으로는 라벨 및 오염물질 등을 제거하기 위한 세척단계와 탈수 건조단계 및 한 번의

크기가 30mm 이하인 사각형 형태의 조각으로 분쇄하는 단계로 나눌 수 있다. PET의 가공은 인력으로 하기 어렵기 때문에 기 가공된 재료를 구입하여 사용하였고, PET골재의 생산을 위해 특수 장비를 제작하였다. Fig. 1(a)는 대량의 PET골재를 만들기 위하여 제작한 PET 골재 제조기이고 Fig. 1(b)는 제조된 PET골재를 나타낸 것이다.

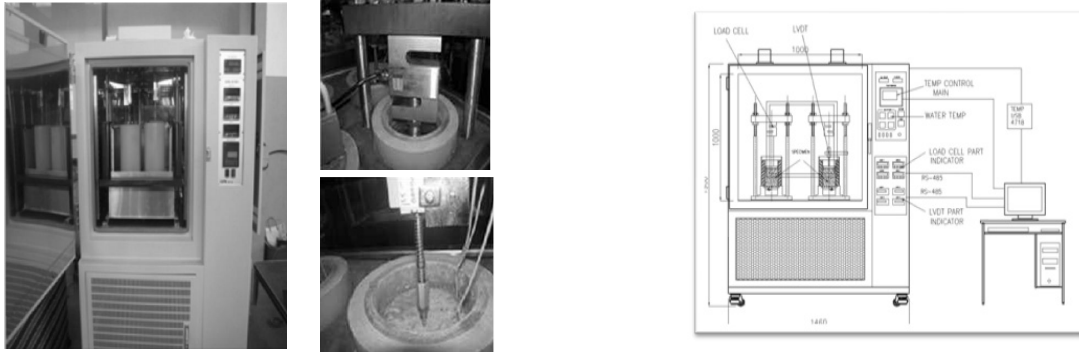
제작된 특수장비는 깨를 볶는 자동볶음 솥을 개조하여 만들었으며 크기는 580×880×1350(가로\*세로\*높이/mm), 처리용량은 50kg/h, 무게 250kg, 전기용량은 12KW이다. 제작된 장비에 가공된 PET조각을 넣고 일정시간 열처리를 한 후 일정한 입도의 토립자와 결합시키는 방식으로 PET골재를 제작하게 된다.

## 2.2 실내 동상 실험

### 2.2.1 동상실험기의 개요

동상실험기는 영국 TRRL(Transport and Road Research Laboratory) 동상실험기와 동일한 원리에 의하여 동상팽창량, 동상팽창압 및 부동수분을 측정할 수 있도록 제작하였다(Fig. 2(a)). 시료를 적재하는 적재부에는 총 4개의 공시체가 들어갈 수 있으며, 원형 공시체 아크릴 셀의 윗부분과 측벽에 실험기 벽체로부터 찬 공기가 계속 공급되어 시료를 동결시킨다. Fig. 2(b)는 동상실험기의 모식도를 나타낸 것이다.

원형 아크릴 셀 하단의 구멍과 몰드 바닥에 뚫린 구멍을 통해 물을 지속적으로 공급시키며 실험기 외부에는 물을 공급하기 위한 수조가 설치되어 있다. 물탱크 내에는 냉각선이 설치되어 있어 물의 온도를 항상 4℃로 일정하게 유지시킬 수 있고, 최저 -70℃에서 최고 100℃까지 임의로



(a) Indoor experimental equipment and measuring instrument (b) Equipment mimetic diagram

Fig. 2. Frost heaving indoor experimental testing equipments (TRRL standard)

Table 1. Optimum water content and maximum dry unit weight according to the mixing ratio of PET coated aggregate

Mixing ratio (%)	Optimum water content (% , $W_{opt}$ )	Maximum dry unit weight ( $kN/m^3$ , $\gamma_{d(max)}$ )	Remark
0	14.7	16.4	10.37 $G_s$ : 2.67 USCS: SC
2	14.9	16.8	
4	14.8	17.0	
6	14.9	17.2	
8	13.9	17.3	
10	12.6	17.5	
20	11.5	17.7	
30	10.4	18.0	
40	10.1	18.1	

Table 2. Temperature boundary conditions

Condition	Temperature inside the testing equipment (°C)	Temperature of influent water (°C)
Before freezing of below 1cm the top soil	-12°C	4°C
After freezing of below 1cm the top soil	-3°C	4°C

온도의 크기, 지속시간 등을 조정할 수 있다.

### 2.2.2 실험조건

Table 1은 0%~40% 혼합비로 구성된 PET골재 혼합토의 최적함수비와 최대건조단위중량을 나타낸 것이다. 동상시험기 내에 정치할 몰드는 KS F 2312의 기준의 D다짐 방법을 통하여 동상시험기내에 몰드를 위시 시켰다.

수분공급시스템은 지하수위가 높아 동상에 취약한 지역의 현장상태로 가정하여 개방형 시스템을 사용하였다. 개방형 시스템은 공시체가 동결하는 동안 인위적으로 바닥층의 하부에서 상부로 압력을 통하여 지속적인 물의 공급을 받는다. 5층으로 다져진 공시체는 4일 동안 수침시켜 포화상태를 유도하였으며 TRRL 시험 기준에 따라 시료 상부 1cm의 온도가 0°C가 될 때 까지 시험기 내부온도를 -12°C로 유지시킨 후, 시험기 내부온도를 -3°C로 변화시켜

시험 시작 후 120시간까지 시험을 진행하였다. 또한 유입수의 온도를 4°C로 유지시켰다. Table 2는 시험의 경계조건을 나타낸 것이다.

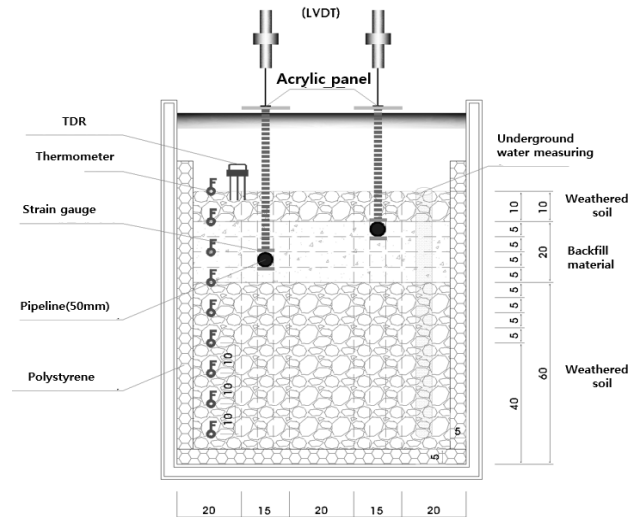
### 2.3 실대형 모형실험

채움재의 종류별 실제 지반에서 시간에 따른 동상팽창량과 동결면의 이동을 분석하기 위하여 상수도관 주위의 모래, 화강풍화토, PET골재를 포설한 모형토조를 구성하였다. Fig. 3(a)는 모형토조에 계측기를 장착한 장면을 나타낸 것이고, Fig. 3(b)는 모형토조의 구성도를 나타낸 것으로 실제 상수도관을 매립한 후에 채움 재료를 포설하여 모형토조를 구성한 것이다.

상수도관은 스테인리스강관을 사용하였으며 동결에 의한 동상저동을 모사하기 위하여 상부로부터 30cm 이하에

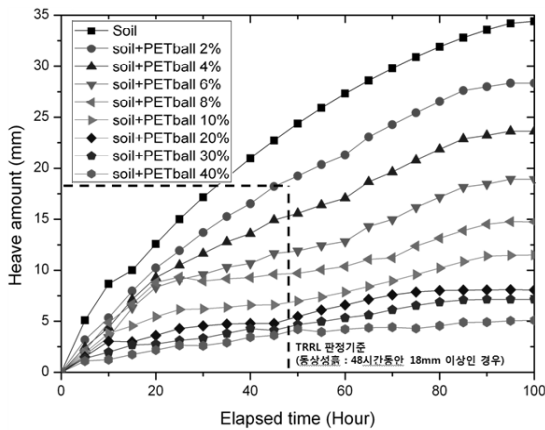


(a) Measurement of heave amount

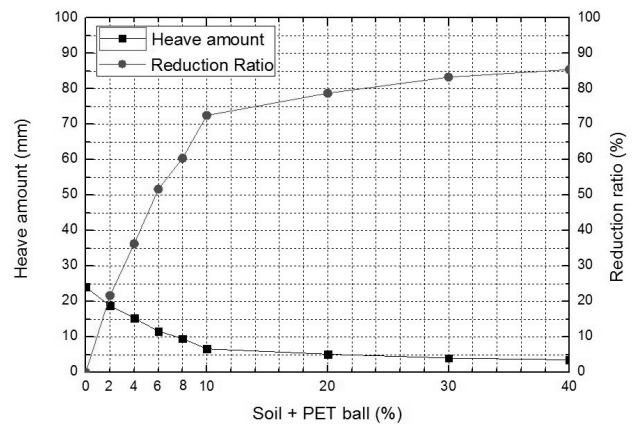


(b) Cross-section of model test

Fig. 3. Indoor model experiment using freezing chamber



(a) Heave amount of weathered soil



(b) Reduction rate of heave amount

Fig. 4. Heave amount and reduction ratio of PET coated aggregate mixed soil

관을 매설하였고 상부로부터 10cm~30cm 사이에 화강풍화토, 모래, PET골재를 혼합한 토사를 포설하였다. 또한 표면에서 10cm는 화강풍화토를 이용하여 90%의 상대다짐도로 다짐하여 지반을 모사하였다. 다짐 후에 실제 현장에서 지하수나 침투수에 의한 영향을 모사하기 위하여 지면으로부터 수분을 공급하여 지반을 포화상태로 유지하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 혼합비율에 따른 동상팽창량 분석

동상 팽창량은 흙의 동상 특성을 파악하기 위한 대표적인 지표로서 동상민감성 판정에 이용하는 동상비(frost heave rate)의 산정에 이용되는 중요한 정수이다. 일반적으로 흙

은 영하의 일정한 온도에서 충분한 수분의 공급이 지속되면 동상 팽창량이 점차 증가한다. 이러한 동상 특성은 시료의 종류에 따라 단위시간 동안의 동상 팽창량을 의미하는 동상비에 의존하게 되며 이는 동상 민감성을 판단하는 지표로 사용된다.

기존 연구에 의하면 동상팽창을 방지하기 위해 약 2%의 페타이어가루를 혼합한 경우 최적함수비에서 96시간 이후 최대 15mm의 팽창이 발생한다고 발표하였다(Kim and Kang, 1998). Fig. 4(a)는 PET 골재 혼합토의 혼합비별 동상 팽창량을 나타낸 것으로 TRRL 기준으로 지속시간 48시간 이내에 18mm의 팽창량이 발생하면 동상에 민감한 흙으로 분류할 수 있다(Cronev and Jacob, 1967). Fig. 4(b)는 48시간 기준으로 화강풍화토의 팽창량 대비, 각각의 혼합토에 대한 팽창량의 감소율을 나타낸 것으로 결과

Table 3. Heave amount and reduction ratio of PET coated aggregate mixed soil

Mixing ratio of Recycled PET (%)	Heave amount (mm)	Reduction ratio of expansion (%)
Soil	24	0.0
Soil+PETball 2%	18.8	21.67
Soil+PETball 4%	15.3	36.25
Soil+PETball 6%	11.6	51.67
Soil+PETball 8%	9.5	60.42
Soil+PETball 10%	6.6	72.5
Soil+PETball 20%	5.1	78.75
Soil+PETball 30%	4	83.3
Soil+PETball 40%	3.5	85.42

를 종합하면 Table 3과 같다.

각각의 PET골재 혼합토를 TRRL 기준에 따라 동상에 민감 여부를 분석한 결과 0%~2%의 PET 골재를 혼합하였을 때 48시간이내 18mm이상 동상 팽창량이 발생하므로 동상에 민감한 토질로 분류할 수 있다. 혼합비가 4%이상부터는 TRRL기준으로 48시간이내에 동상 팽창량이 18mm이상 도달하지 않기 때문에 동상에 민감하지 않다고 볼 수 있으며, 동상에 민감하였던 화강풍화토가 PET골재와의 혼합으로 인하여 개선이 이루어 졌음을 알 수 있다. 또한 PET 골재를 혼합하지 않은 상태의 동상팽창량으로 부터 각각의 혼합비에 따른 동상팽창량 감소율은 혼합비 4%에서 약 36%의 감소율을 보이며, 혼합비 10%부터는 감소율의 증가폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.

### 3.2 실대형 모형 실험 결과

PET 골재 혼합토를 포설한 Section-3의 경우, 동상민감성 실험을 통하여 TRRL 기준 동상팽창량이 48시간 이내에 18mm에 도달하지 않는 최초의 혼합비인 4%로 지반을 구성하였다. 토조를 냉동챔버에 넣은 후 온도를 최초 -15°C로 세팅 후, -14°C에서 -15°C 사이로 유지하였다.

#### 3.2.1 실대형 모형 실험에 의한 동상팽창량

각각의 Section별 동상 팽창량을 측정한 결과 Section-1은 40시간 이후 최대 22.16mm의 팽창량을 보였으며, Section-2는 48시간 이후 최대 19.86mm의 팽창량을 보였고, Section-3은 44시간 이후 최대 17mm기록하였다.

PET골재 혼합토의 경우 다른 흙에 비하여 큰 간극을 갖고 있으므로 모세관현상을 일으키지 않고 간극수를 적게 갖고 있기 때문에 다른 지반에 비하여 동상 팽창량이

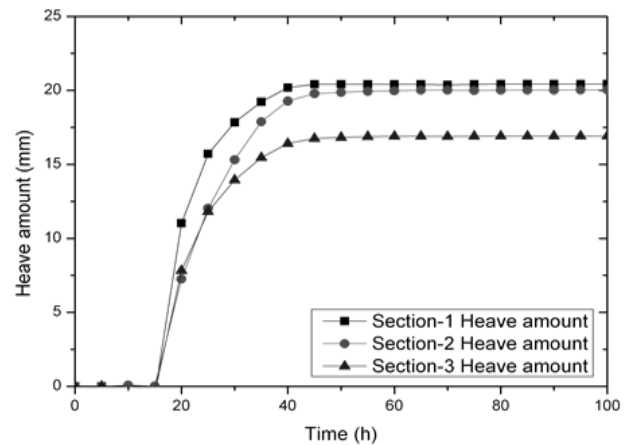


Fig. 5. Heave amount according to the type of soil

적게 발생한 것으로 판단된다. 따라서 PET골재를 혼합한 토사를 사용하면 다른 흙에 비하여 동상 팽창이 적게 발생할 것으로 판단된다.

#### 3.2.2 실대형 모형실험에 의한 동결깊이

상수도관 매립 지반의 온도분포를 확인하기 위하여 지중에 10cm 간격으로 90cm의 온도센서를 설치하였으며, 온도센서에서 측정된 대상 지반의 온도분포는 시간이 지나면서 차가운 공기가 하단으로 침투하면서 동결면이 하단으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과 각 Section별로 상수도관을 매설한 30cm까지 동결면이 도달하는 시간은 심도가 깊어질수록 길어지는 것으로 나타났다. 그러나, 상수도관 이하 하부지반은 Section에 따른 구성조건에 차이가 없으므로 동결면 도달시간의 차이는 더 이상 길어지지 않았다. Fig. 6의 Section-1은 화강풍화토, Section-2는 모래, Section-3은 PET 골재 혼합토의 동결 깊이를 나타낸 것이다.

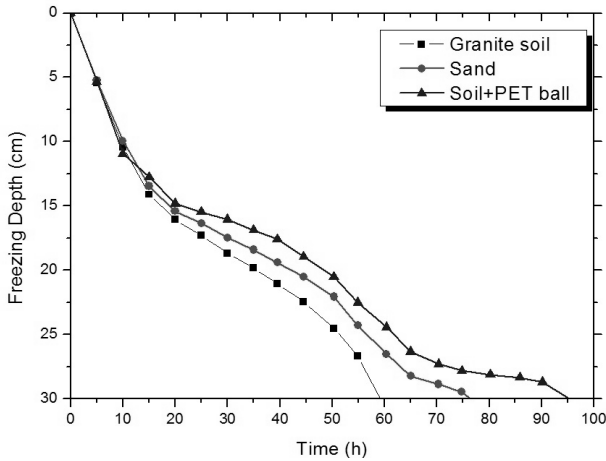


Fig. 6. Freezing depth according to the type of soil

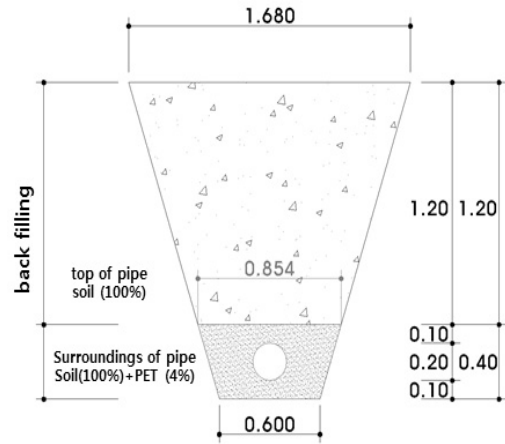


Fig. 7. Standard of calculation quantity (Unit : m)

Table 4. Present condition of statistics of recycling waste by type

Recycling waste type	Total : Recycling Waste quantity (ton/year)	Quantity of transaction (ton/year)	Total Transaction (1000W)
tires	413,237	217,483	44,857,368
PET	58,398	45,562	37,506,090

#### 4. PET 재료의 경제성 평가

실내동상실험과 대형 냉동 챔버를 이용한 동상 민감성 실험을 분석한 결과 PET골재를 사용하면 기존 재료에 비해 동상이 적게 발생하나 동상 저감에 대한 효과가 있다고 하더라도 PET골재를 실제 현장에서 적용할 때에 재료비가 크다면 그 적용성은 매우 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 본 절에서는 동상채움재로서 기존에 상수도관 채움재로 사용하는 모래, 동상채움재로서 페타이어칩 효과에 대하여 수행된 기존의 연구 자료를 바탕으로 PET골재를 상수도관 1m를 매설하는데 드는 비용을 비교하여 경제성 평가를 수행하고자한다. 페타이어칩의 경우 “철도 시설물 동상저감방안 효과분석에 대한 연구”를 바탕으로 토사에 대한 무게비 20%에 대하여 경제성 평가를 할 때 비교할 수 있는 자료로 활용하였다(Han, 2012).

##### 4.1 수량산출 적용구간 및 단가

단면조건은 1680mm×1400mm×1000mm(폭\*깊이\*길이)이며 총 터파기량은 1.824m<sup>3</sup>이다. 일위대가목록은 공중명으로 터파기, 되메우기 및 다짐, 잔토처리를 기준으로 수량을 산출 하였다(MLIT, 2014). Fig. 7은 200mm 상수도관 1m당 공사시의 수량산출을 위한 기준을 나타낸 것이

다. Table 4는 국가통계포털 2012년 자료를 기준으로 폐기물 종류별 재활용 현황을 나타낸 것이다. 허가 판매량과 허가 판매총액을 참고하여 수량 산출 시에 재료별 단가를 산정하였다. 모래는 20000KRW/m<sup>3</sup>, 페타이어 칩은 823 KRW/m<sup>3</sup>, PET는 206KRW/m<sup>3</sup>으로 산출되었다(KECO, 2012).

##### 4.2 각 재료별 공사단가 산출

Fig. 7의 물량산출 기준을 통하여 상수도관 1m를 시공하는데 필요한 재료의 양을 계산하면 Table 5와 같고, 물량산출 단면과 물량을 기준으로 상수도관 1m 시공할 때 소요되는 공사비는 모래의 경우 5,180원, PET골재는 11,571원, 페타이어칩 골재는 13,101원이다. PET 골재와 페타이어칩을 이용할 경우 일반 모래를 사용할 때보다 공사단가가 높지만, 동상저감효과를 고려하여 PET골재를 사용하면 페타이어 칩을 사용할 때 보다 약 11.4%(1490원)

Table 5. Production quantity of materials

Type of material		Quantity (m <sup>3</sup> )
Sand		0.26
Mixing Soil	Sand (96%)	0.25
	PET aggregate (4%)	0.01

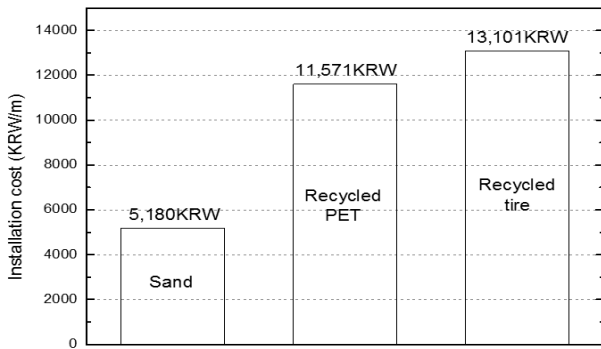


Fig. 8. Installation cost of materials

의 재료비 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다. Fig. 8은 물량산출 단면과 물량을 기준으로 상수도관 1m 시공시 공사비 단가를 나타낸 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 폐 PET를 재활용 하여 제작한 PET골재를 이용하여 실내실험을 통한 동상실험 및 경제성분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 화강풍화토의 TRRL 기준에 의한 동상민감성 판정 결과, 48시간 이내에 18mm이상 동상 팽창량이 발생하지 않는 최초의 PET골재 혼합율은 4%로 나타났으며, 8%의 혼합비 이상부터 PET골재를 혼합하지 않았을 때와 비교하여 50%이상의 동상팽창량 감소율을 나타내었다.
- (2) 실내모형실험을 통한 동결깊이 확인한 결과, 같은 동결깊이에 도달 하는 데에 걸리는 시간은 PET골재 혼합토가 가장 길었으며, 또한 동상에 의한 지표의 팽창은 화강풍화토가 가장 크고, PET골재 혼합토가 가장 작으므로 PET골재를 혼합하였을 시 동상량이 감소되는 효과가 있는 것으로 판단된다.
- (3) 열경화성수지인 PET는 열에 의한 화학반응을 일으켜서 굳으면 가열하여도 재차 연화되지 않고 단단해지

는 특징이 있으므로 결합재에 따른 강도특성과 안전성에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

- (4) 기존에 수행된 연구에서 동상저감재료로 사용된 폐타이어칩과 PET혼합골재의 경제성 분석 결과, PET골재 혼합토를 사용하였을 시에 1m 배관 공사당 약 11.4% (1490원)의 공사비 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.

## Acknowledgement

This research was supported by a Grant (11 Technology Innovation F01) from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by The Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean Government.

## Reference

1. Croney, D. and Jacobs, J. (1967), The Frost Susceptibility of Soils and Road Materials, TRRL Report, LR 90, Crowthorne, pp.68-72.
2. Han, C. Y. (2012), The study on reduction Effect of Frost-heaving in Railway Facilities, Master's degree Thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp.57-58.
3. KECO (2012), "Current state of recycling waste".
4. Kim, Y. C. and Kang, B. H. (1998), "The Control of the Ground Heave by Using the Scrap Tire", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.14, No.1, pp.49-58.
5. Kim, Y. W. (2010), A study on characteristic of Pyrolysis gasification of thermoplastic resin, Master's degree Thesis, Jeon Ju University, pp.5-6.
6. Ministry of Environment (2013), "National Wastes Generated and Treatment Status", p.56.
7. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2014), "2014 Construction standard yardstick", pp.103-117.
8. Shin, E. C., Kim, B. S. and Kim, G. S. (2013), "Frost Heaving Sensitivity of Recycled PET bottles Mixed soil Through Laboratory Freezing Test", Conference of Korea Geosynthetic society, Vol.2013, No.11, pp.121-124.