

폐비닐 골재 혼합토의 기본 성질에 관한 연구

A Fundamental Study on the Waste Polyethylene Chips Mixed with Soil

김영진¹⁾, Young-Chin Kim, 김현민²⁾, Hyun-Min, Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 수석 연구원 Research Fellow, Civil Eng. Dept., KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원 Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

SYNOPSIS : It was investigated whether the waste polyethylene chips can be recycled as construction materials in geotechnical engineering field. The standard Proctor test, the hydraulic conductivity test, the large box direct shear test, the thermal conductivity test, the frost heaving test and the time domain reflectometry test were performed on weathered granite soil mixed with variable amount of the waste polyethylene chips.

The experimental results showed that the hydraulic conductivity and the shear strength of weathered granite soil increase with increasing the amount of the waste polyethylene chips. On the other hand, the thermal conductivity, the amount of frost heaving and the unfrozen water contents of weathered granite soil decrease with increasing the amount of the waste polyethylene chips.

Keywords : waste polyethylene chips, frost heave, thermal conductivity, unfrozen water

1. 서론

최근 영농기술의 발전과 4계절 작물재배 농가의 증가로 인하여 해마다 생산되는 농업용 비닐류 (HDPE, LDPE)의 양이 연간 약 44만 톤에 달하고 있다. 산자부의 집계에 의하면 이러한 농업용 비닐 중에서 연간 약 9만 5천 톤 이상의 폐비닐이 발생하고 있으나, 폐비닐 재활용은 최대 재활용 기관인 한국자원재생공사에서 펠렛 등의 제조에 재활용하는 양 3만 4천 700톤(1998년 기준)과 영세업체에서 폐비닐을 이용한 정화조나 모래적재 상자 제조를 전부 합쳐도 폐비닐 발생량의 50% 미만이다. 이러한 폐비닐이 산이나 들에 방치되어 있으면 자연 경관을 해칠 뿐만아니라 반영구적으로 썩지 않으며, 폐비닐을 소각할 경우 다이옥신의 발생으로 공기오염을 일으켜 새로운 환경문제를 야기하게 된다.

본 연구에서는 농촌에서 수거한 폐비닐을 흙이나 자갈 대신 건설골재로 활용할 수 있는지 알아보기 위하여 각종 토질시험을 실시하였다.

2. 실험

2.1 시료의 성질

2.1.1 폐비닐 골재

본 연구에서 사용된 폐비닐 골재는 주로 비닐하우스에서 사용하다가 폐기한 비닐을 수집하여 약 250℃이상의 온도에서 녹여 재성형시킨 후 정화조를 만드는 공장에서 자투리를 수집하여 분쇄기로 갈아 1.5~2cm 정도의 크기로 만들었다. 여기서, 폐비닐 골재의 크기는 분쇄기의 체 크기를 조절하여 사용목적에 따라 원하는 크기로 만들 수 있다. 이렇게 하여 만들어진 폐비닐 골재는 비중이 1.1이고, 모양은 각이 많이 지고, 표면은 거칠며 미세한 구멍이 많이 존재하였다.

2.1.2 흙 시료

본 연구에서 폐비닐 골재와 혼합한 흙은 경기도 파주시 통일동산에서 채취한 화강풍화토로서 비중이 2.65이고, 균등계수가 7.4이며 곡률계수가 0.9로 통일분류법상 SP에 해당되었다.

2.2 시험방법

폐비닐 골재 혼합토의 기본 성질을 알아보기 위하여 환경공학측면으로 용출실험, 물리적인 측면으로 다짐시험, 대형직접전단시험, 투수시험, 동토관련시험으로서 열전도시험, 동상시험 및 부동수분량시험을 수행하였다. 또한, 실내 축소 모형도로 시험을 수행하여 포장체 내부에서 폐비닐 골재의 단열효과를 조사하였다.

2.2.1 용출시험

용출시험은 폐비닐을 용출용 시료로 조제하기 위하여 다짐기로 분쇄하여 2mm이하의 크기로 만들어 이들 용출용 시료를 국내 환경오염공정시험법상의 용출실험 방법에 의거하여 수행하였다.

2.2.2 다짐시험

다짐시험은 화강풍화토에 폐비닐 골재를 중량비로 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100%가 되도록 혼합하여 KS F 2312 규정에 따라 A 다짐방법으로 건조법과 비반복법으로 조합하여 수행하였다.

2.2.3 대형직접전단시험

직접전단시험은 각각의 폐비닐 골재 혼합토를 최대건조단위중량의 90%로 대형전단상자(30×30×20cm)에 다져 넣은 후 ASTM D 3080-90 규정에 따라 수행하였다. 이때 수직응력을 4가지 조건(0.2kg/cm², 0.4kg/cm², 0.6kg/cm², 0.8kg/cm²)으로 하였으며, 전단속도를 1mm/min로 유지하였고 수직, 수평변위 및 전단응력을 측정하였다.

2.2.4 투수시험

투수시험은 각각의 폐비닐 골재 혼합토를 최대건조단위중량이 되도록 공시체를 제작하여 KS F 2322 규정에 따라 시험하였다. 이때 폐비닐 골재의 함유량이 0, 10, 20, 30, 40%인 것은 대형 변수위 투수시험을 하였으며, 50%인 것은 대형 정수위 투수시험을 하였다.

2.2.5 열전도시험

열전도시험은 각각의 페비닐 골재 혼합도를 최대건조단위중량의 80%로 열전도 측정상자에 다져 넣은 후 QTM 열전도율 Probe를 상자 윗면에 놓고 열전도율을 5회 측정하여 평균값을 구하였다.

2.2.6 동상시험

동상시험은 흙 시료에 페비닐 골재를 중량비로 0, 2, 4, 8, 10, 12% 섞은 후 다짐시험을 실시하여 각 경우의 최적함수비와 최대건조밀도를 구하였다. 그후 각 페비닐 골재 혼합도를 최적함수비 상태에서, 직경 10cm, 높이 15cm되는 공시체를 만들었다. 이 공시체를 미리 제작된 황동제 몰드에 넣은 후 이러한 몰드 9개를 적재 상자에 담아서 동상시험기에 설치하였다. 공시체를 황동제 몰드에 담기 전에 몰드 바닥에는 미리 porous stone을 깔며, 공시체 윗면에는 tufnol disk를 놓는다. tufnol disk에 황동 막대를 연결하는데 황동 막대는 동상시험기 밖에까지 연결되어 있고 이 황동 막대의 바깥부분에는 다이얼 게이지가 설치되어 있어 소요 시간이 경과된 후 다이얼 게이지를 읽으면 그 때까지의 동상량을 알 수 있게 된다(그림 1참조).

본 연구에서는 영국 TRRL(Transportation and Road Research Laboratory)의 동상성 판정기준⁽²⁾을 적용하여 공기의 온도를 -17°C 로 하였고, 공급되는 물의 온도는 4°C 를 기준으로 하였으며 동상지속시간은 96시간을 기준으로 하였다. 즉, 영국의 TRRL에서는 공기온도 -17°C , 물의 온도 4°C 상태에서 48시간 동안 흙 시료에 대한 동상시험을 실시하였을 때 동상량이 18mm이상이면 그 흙은 동상성 흙이고, 18mm미만이면 비동상성 흙으로 판정하고 있다.

2.2.7 부동수분량 시험

흙이 동결하여도 동토 중에는 얼지 않고 남아 있는 부동수(unfrozen water)가 존재한다⁽³⁾. 그래서, 본 시험에서는 온도 변화 및 흙에 페비닐 골재를 혼합한 비율에 따라서 부동수분의 양이 어떻게 달라지는지 규명하기 위해서 통일동산에서 채취한 흙과 페비닐 골재를 각각 5, 10, 20, 50, 100%의 중량비로 혼합하여 시료를 만들었다. 이들 시료를 직경 10cm, 높이 15cm되는 투수시험용 몰드에 넣고 강제 포화시켜 공시체를 만든 후 이 공시체에 부동수분량 측정 TDR(Time Domain Reflectometry) probe 및 온도 측정용 센서를 삽입하였다. 그리고, 이 공시체를 TRRL 동상시험기 속에 넣은 후 동상시험기의 온도를 약 -20°C 로부터 약 -0.5°C 까지 단계별로 변화시키면서 해당 온도에서의 부동수분량을 측정하였다.

2.2.8 실내 축소 모형도로 시험

TRRL 동상시험기 내부에 그림 2와 같은 축소 모형도로를 만들어 설치하였다. 먼저 폭 60cm×길이 60cm×높이 45cm 규격의 윗뚜껑 없는 나무상자를 동상시험기 내에 설치하였다. 상자의 맨 밑바닥은 도로의 노상에 해당되는 부분으로서 화강토를 자연함수비 상태에서 잘 다져, 4cm 두께로 포설하였다. 그 바로 윗층은 동상방지층에 해당되는 부분으로 한쪽은 크기 40mm되는 자갈을 15cm 두께로 깔고 진동 해머(vibrator hammer)로 잘 다졌으며, 다른 한쪽은 30~40mm되는 페비닐 골재를 역시 15cm 두께로 포설한 후, 진동 해머로 잘 다졌다.

밑에서 세 번째 층은 양쪽 모두 직경 25mm되는 자갈을 15cm 두께로 깔고 역시 진동 해머로 잘 다졌다. 맨 위 표층에 해당되는 부분은 도로공사 현장에서 구해 온 아스콘을 10cm 두께로 포설하였다. 모형도로의 각층 경계선부분과 표층 위에는 정밀 온도 센서를 설치한 후, 동상시험기에 설치된 기록 장치(data logger)로 매시간의 온도 변화를 기록하였다.

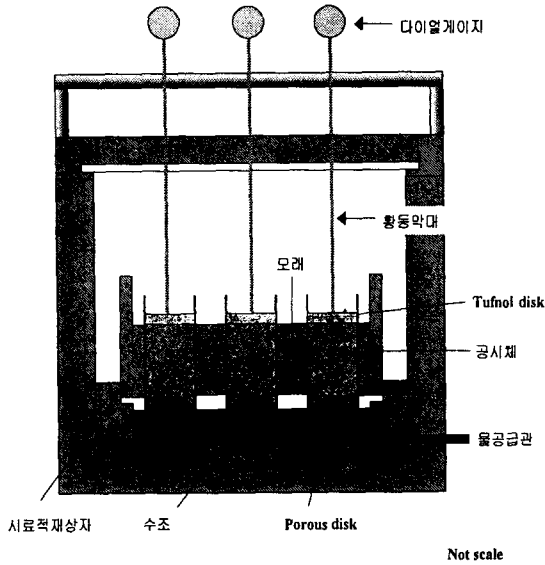


그림 1. 개방형 동상시험기의 개요도

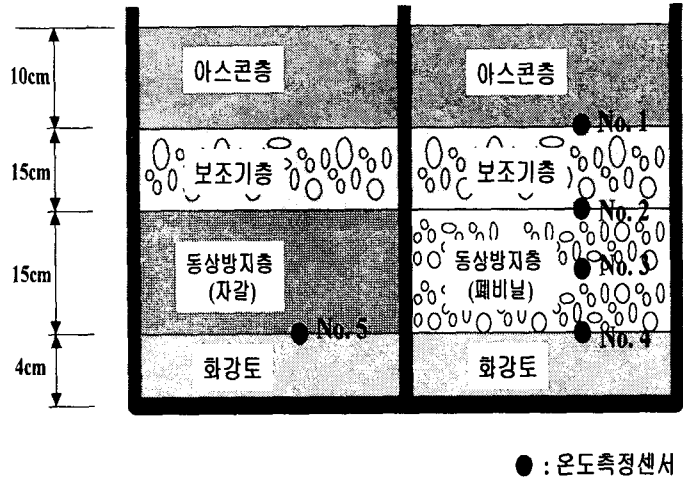


그림 2. 실내 축소 모형 도로 단면의 모습

2.3 시험결과

2.3.1 용출시험 결과

용출시험을 수행하여 얻은 결과를 표 1과 같이 폐기물 관리법에서 제시하고 있는 유해성 판정기준⁽¹⁾과 비교하여 살펴보면 구리는 0.09mg/l로 기준치 3.0mg/l 보다 낮게 나타났으며, 나머지 항목에서는 유해성분이 검출되지 않았다. 따라서, 폐비닐 골재 혼합토는 지반환경공학적으로 무난함을 알 수 있었다.

표 1. 국내 폐기물 관리법상의 유해성 판정기준 및 실험결과

오염물질 항목	기준치 (mg/l)	실험결과 (mg/l)
납(Pb)	3.0	검출안됨
카드뮴(Cd)	0.3	검출안됨
구리(Cu)	3.0	0.09
비소(As)	1.5	검출안됨
시안(CN)	1.0	검출안됨
수은(Hg)	0.005	검출안됨
6가 크롬(Cr ⁺⁶)	1.5	검출안됨
트리클로로에틸렌	0.3	검출안됨
테트라클로로에틸렌	0.1	검출안됨
유기인화합물	1.0	검출안됨

2.3.2 다짐시험 결과

화강풍화토에 폐비닐 골재를 중량비가 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100%가 되도록 혼합하여 다짐시험을 수행한 결과를 표 2와 그림 3에 나타내었다.

그 결과, 폐비닐 골재의 혼합비가 증가할수록 최대건조밀도는 감소하였다. 또한, 최적함수비는 폐비닐 골재의 혼합비가 30%까지 증가할수록 조금씩 증가하였다. 그러나, 폐비닐 골재의 혼합비가 40%이상이면 다짐특성은 함수비에 관계없이 일정한 경향을 보이고 있다. 이것은 폐비닐 골재의 혼합비가 40% 이상이면 화강풍화토의 양이 폐비닐 골재에 비하여 상당히 작아 흙의 다짐특성이 나타나지 않기 때문

으로 판단된다.

표 2. 페비닐 골재 혼합에 따른 다짐특성 비교

페비닐 골재의 혼합율(%)	최적함수비 $W_{opt}(\%)$	최대건조밀도 $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$
0	13.1	1.94
10	13.3	1.71
20	13.5	1.56
30	14	1.45
40	-	1.22
50	-	1.06
100	-	0.72

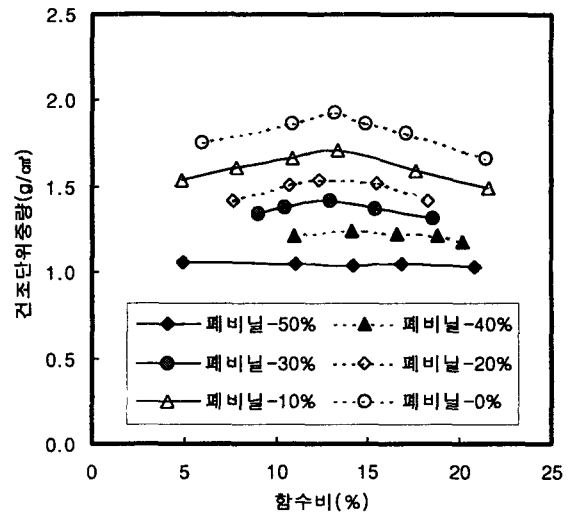


그림 3. 페비닐 골재 혼합율에 따른 다짐곡선

2.3.3 전단시험 결과

화강풍화토에 페비닐 골재를 중량비가 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100%로 혼합한 시료의 직접전단시험 결과를 표 3에 나타내었다.

그 결과, 페비닐 골재의 혼합비가 증가할수록 내부 마찰각이 증가하였다. 그러나, 점착력은 페비닐 골재의 혼합비에 따라 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 화강풍화토에 적당한 양의 페비닐 골재를 혼합하면 내부 마찰각을 증가시키고, 이에 따라 흙의 전단강도를 증가시킬 뿐만아니라 주동토압계수를 감소시켜 공학적으로 유용하게 이용할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

2.3.4 투수시험 결과

화강풍화토에 페비닐 골재를 중량비가 0, 10, 20, 30, 40, 50%로 혼합한 시료의 투수시험 결과를 표 4에 나타내었다.

그 결과, 페비닐 골재의 혼합비가 증가할수록 혼합토의 간극(void)이 증가하여 투수계수가 증가함을 알 수 있었다.

표 3. 페비닐 골재 혼합비에 따른 c, ϕ 값 비교

페비닐 골재의 혼합율(%)	점착력 $c (kg/cm^2)$	내부마찰각 $\phi (^{\circ})$
0	0.06	35.9
10	0.12	41.8
20	0.12	49.3
30	0.10	50.1
40	0.10	51.2
50	0.12	52.3
100	0.12	56.1

표 4. 페비닐 골재 혼합비에 따른 투수계수(k, cm/sec)

페비닐 골재의 혼합율(%)	최종 투수계수 결과	평균 투수계수 결과
0	9.02×10^{-1}	1.13×10^{-6}
10	2.39×10^{-6}	2.64×10^{-6}
20	3.43×10^{-6}	3.76×10^{-6}
30	5.97×10^{-6}	7.54×10^{-6}
40	1.43×10^{-3}	1.46×10^{-3}
50	3.93×10^{-3}	4.04×10^{-3}

2.3.5 열전도시험 결과

그림 4에 통일동산에서 채취한 흙 시료에 페비닐 골재를 중량비로 10, 20, 30, 40, 50% 섞은 시료 및 페비닐 골재 100%에 대한 열전도율 측정값을 나타내었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 페비닐 골재의 함유량이 증가할수록 열전도율은 감소하고 있다. 즉, 페비닐 골재의 열전도율이 흙의 열전도율보다 작음을 알 수 있었다.

2.3.6 동상시험 결과

그림 5에서는 동상시험을 실시한 결과를 보여주고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 페비닐 골재의 혼합비가 증가할수록 동상량은 감소하고 있으며, 페비닐 골재를 중량비로 각각 10%와 12% 섞은 시료는 TRRL 기준에서 정하고 있는 비동상성 시료로 나타났다. 이것은 열전도 시험을 통해서 알 수 있었던 것과 같이 페비닐 골재의 열전도율이 흙의 열전도율보다 작기 때문에 동상량이 감소한 것으로 판단된다. 따라서, 그림 4와 그림 5에 나타난 결과로부터 페비닐 골재 혼합토를 도로의 동상방지층으로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

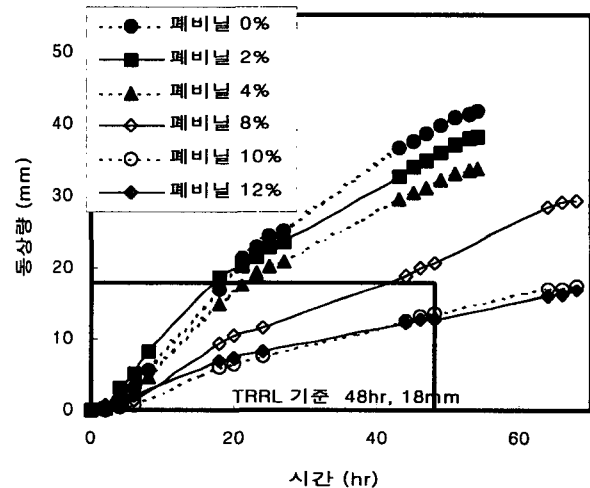
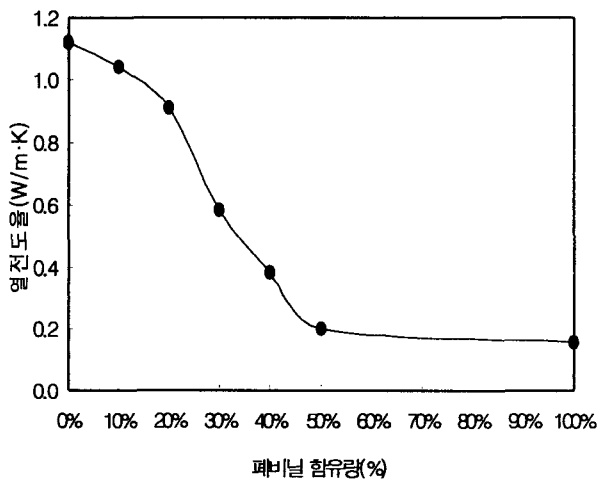


그림 4. 페비닐 골재 혼합율에 따른 열전도의 변화

그림 5. 페비닐 골재 혼합율에 따른 동상량 변화

2.3.7 부동수분량시험 결과

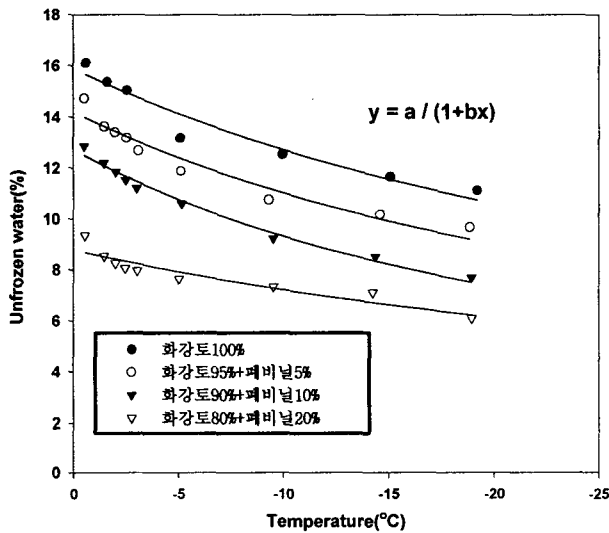
화강풍화토에 페비닐 골재를 중량비가 5, 10, 20, 50, 100%로 혼합한 시료의 부동수분량 시험 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5에서 보는 바와 같이 온도가 낮아질수록 어느 시료든 부동수분량이 줄어들고 있으며, 동일한 온도에서는 페비닐 골재의 혼합량이 많은 시료일수록 부동수분량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히 페비닐골재의 혼합량이 중량비로 50%이상이 되면 -0.5°C 에서부터 부동수분량이 전혀 존재하지 않는다.

또한, 그림 6은 표 5의 결과를 그림으로 표시한 후 페비닐 골재 혼합율이 다른 시료 각각에 대해 동결온도(t)와 부동수분량(W_u)의 상관 관계식을 나타낸 것이다.

표 5. 각 시료에 대한 온도별 부동수분량의 변화

흙 100%		흙 95%+ 페비닐 5%		흙 90%+ 페비닐 10%		흙 80%+ 페비닐 20%		흙 50%+ 페비닐 50%		페비닐 100%	
온도 (°C)	부동수분량 (%)	온도 (°C)	부동수분량 (%)	온도 (°C)	부동수분량 (%)	온도 (°C)	부동수분량 (%)	온도 (°C)	부동수분량 (%)	온도 (°C)	부동수분량 (%)
-19.19	11.12	-18.86	9.67	-18.9	7.7	-18.93	6.10	-19.06	0	-18.33	0
-15.08	11.66	-14.61	10.18	-14.37	8.5	-14.26	7.10	-15.06	0	-14.84	0
-9.98	12.54	-9.31	10.76	-9.53	9.23	-9.55	7.33	-9.84	0	-10.03	0
-5.10	13.18	-5.12	11.89	-5.14	10.6	-5.01	7.65	-4.99	0	-4.98	0
		-3.10	12.68	-3.01	11.21	-3.03	7.97				
-2.56	15.04	-2.54	13.19	-2.49	11.52	-2.46	8.06	-2.51	0	-2.55	0
		-1.98	13.40	-2.02	11.85	-2.00	8.25				
-1.62	15.37	-1.47	13.63	-1.46	12.20	-1.46	8.53	-1.49	0	-1.50	0
-0.60	16.11	-0.53	14.73	-0.53	12.85	-0.56	9.35	-0.52	0	-0.51	0



	상관관계식	R
화강토100%	$W_u = 15.9 / (1 - 0.025t)$	0.94
화강토95%+페비닐5%	$W_u = 14.2 / (1 - 0.029t)$	0.94
화강토90%+페비닐10%	$W_u = 1.69 / (1 - 0.112t)$	0.94
화강토80%+페비닐20%	$W_u = 8.78 / (1 - 0.022t)$	0.87

그림 6. 페비닐 골재 혼합비별 시료의 동결온도와 부동수분량과의 관계

2.3.8 실내 축소 모형도로 시험 결과

실내 축소 모형도로 시험 결과, 그림 7에서 보는 바와 같이 시간이 경과할수록 도로 각 층의 온도가 낮아지기 시작하였으며, 대체적으로 하부층보다 상부층의 온도가 낮게 나타났다. 그러나, 그림 2에 나타난 No. 4 센서와 No. 5 센서는 다같이 동상방지층과 노상토의 경계면에 설치되어 있으나, 76시간이 경과했을 때, 페비닐 골재 동상방지층 밑부분 No. 4지점의 온도가 자갈 동상방지층 밑부분 No. 5지점보다 3°C 이상 높게 나타났다. 이것은 페비닐 골재 동상방지층이 자갈 동상방지층보다 더 단열효과가 높다는 것을 의미하는 것이다.

이 실험 결과를 통해 페비닐 골재를 도로의 동상방지층에 포설할 경우 자갈 동상방지층보다 동상방지층의 두께를 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

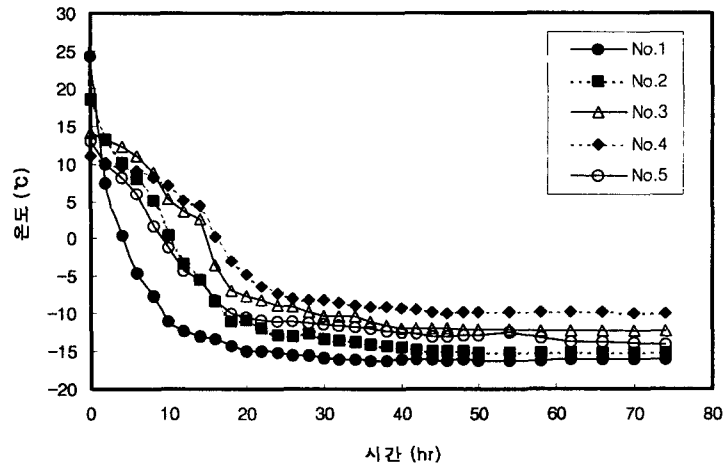


그림 7. 실내 축소 모형도로 층에서의 온도분포 상태

3. 결론

농촌 비닐하우스 등에서 발생하는 폐비닐을 건설골재로 활용할 수 있는지 알아보기 위해서 기본실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용출시험을 한 결과 지반을 오염시킬 수 있는 중금속이나 유기물 성분이 기준치보다 적거나 검출되지 않아 지반환경적으로도 무난함을 알 수 있었다.
2. 폐비닐 골재는 비중이 1.1로서 흙이나 자갈보다 가볍고, 투수계수가 크게 나타났으며, 내부마찰각도 흙보다 월등히 크게 나타나기 때문에 폐비닐 골재를 옹벽이나 축대의 뒷채움재로 사용할 경우 토압을 경감시키고 배수성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다.
3. 동상량 감소효과와 열전도율 감소효과, 부동수분량 감소효과가 나타났으며, 실내 축소 모형도로를 만들고 폐비닐 골재를 동상방지층에 포설한 것과 자갈을 동상방지층에 포설한 경우에 대해 찬 외부기온 차단효과(단열효과)를 비교한 결과 폐비닐 골재 포설쪽의 단열효과가 높게 나타났다.

4. 참고문헌

1. 환경부, 폐기물관리법시행규칙 제2조(지정폐기물의 유해물질함유 기준) ③항.
2. Poe, P. G. and Webster, D. C.(1984), "Specification for the TRRL Frost-Heave Test", TRRL Supplement Report 829, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport Crowthorne, Berkshire.
3. Anderson, D. M. and Tice, A. R.(1972), "Predicting Unfrozen Water Content in Frozen Soils from Surface Area Measurement", Highway Research Record, 393,