

폐비닐 골재의 기본특성에 관한 연구

An Experimental Study on the Waste Polyethylene Aggregate for Construction Materials

김영진*

Kim, Young-Chin

Abstract

The aggregate out of waste polyethylene was made in order to recycle waste polyethylene wasted in the country side. Many physical and mechanical experiments which include leaching test, specific gravity test, compaction test, LA abrasion test, large-scaled shear test, and permeability test were performed for the waste polyethylene aggregate. The thermal conductivity test, unfrozen water content test and frost heave test were also performed. The temperature distribution for both gravels and waste polyethylene aggregate, which were constructed in the frost heave layer in the field, was measured in winter season of continuous 2 years and compared.

Keywords : Waste polyethylene aggregate, Leaching test, Unfrozen water content, Ultrasonic wave velocity, Thermal conductivity, Frost heave amount

요 지

농촌 비닐하우스 등에서 발생하는 폐비닐을 재활용하기 위한 방법의 하나로 폐비닐을 이용하여 골재를 만들었다. 이 골재에 대하여 용출시험, 비중시험, 다짐시험, LA마모시험, 대형전단시험, 투수시험 등 물리적, 역학적 시험을 실시하였다. 또한 폐비닐골재에 대한 열전도시험, 부동수분시험, 동상시험을 실시하였으며, 현장에서 폐비닐골재와 자갈을 도로 동상방지층에 포설한 후 두 해 겨울철에 걸쳐 각각의 온도분포를 측정하여 그 결과를 비교하였다.

주요어 : 폐비닐 골재, 용출시험, 부동수분, 초음파시험, 열전도율, 동상량

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원

1. 서론

산업의 발달과 4계절 영농기술이 활성화되면서 비닐(polyethylene)의 사용량이 급격히 증가하고 있다. 이에 따라 산업현장 및 농촌 비닐하우스 등에서 발생하는 폐비닐의 양도 매년 증가하고 있다. 즉 1999년 기준 연간 약 44만톤 이상의 산업용비닐류(HDPE, LDPE)가 생산되고 있으며, 연간 발생하는 폐비닐의 양도 약 9만 5천톤에 달하고 있다.

국내에서 폐비닐을 재활용하는 분야와 재활용량에 대해 살펴보면, 우선 국내 최대 재활용기관인 한국자원재생공사에서 펠릿(pellet)의 제조에 약 3만 4천 700톤(1998년 기준)을 재활용하고 있고, 정확한 통계는 어렵지만 폐비닐 재활용 중소기업들이 단독주택용 정화조나, 도로 미끄럼 방지용 모래적재상자, 과수목 받침대, 기와 등으로 재활용하는 양을 전부 합쳐도 현재 재활용량은 발생량의 50% 미만이다.

폐비닐이 산이나 들에 방치되어 있으면 자연경관을 해칠 뿐만 아니라 반영구적으로 썩지 않으며, 폐비닐을 소각할 경우 다이옥신의 발생 등으로 공기오염을 일으켜 새로운 환경문제를 야기한다.

폐비닐의 재활용율을 높이기 위해서는 제품생산 절차가 간단하고 경제성이 높아야 하는데, 현재 한국자원재생공사나 중소기업에서 폐비닐 재활용제품을 생산하는 절차를 살펴 보면 먼저 폐비닐에 묻은 흙을 일일이 제거하고, 물로 세척한 후, 120~150℃로 용융한 다음, 실 모양으로 길게 늘이고 이를 다시 펠릿 등으로 잘게 부수는 등 그 공정이 매우 복잡하다. 따라서 경제성도 상대적으로 떨어지는 실정이다.

한편, 최근 대형건설공사가 급증하면서 모래나 자갈 같은 천연골재가 점차 고갈되어 가고 있는 실정이다. 한국골재협회의 조사에 의하면 2000년도 전국의 골재 채취 허가량은 139,734,000m³으로 1999년의 179,330,000m³보다 22.1% 감소하였고, 외환위기 이전인 1997년도의 206,988,000m³보다는 32.5% 감소하였다. 2000년도 골재 채취량은 112,365,000m³로서 1999년의 119,133,000m³보다 5.7% 감소하였고, 1997년도에 비해서는 16.1% 감소하였다.

이러한 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 농촌에서 발생하는 폐비닐을 흙이 묻은 채 그대로 녹

여 자갈이나 모래 크기로 절단한 후 새로운 개념의 골재로 사용하는 방법을 개발함으로써 폐기물도 처리하고, 골재난에도 대처하고자 하였다.

2. 폐비닐 골재의 제조

2.1 폐비닐과 혼합할 흙의 성질

농촌 비닐하우스에서 수집한 폐비닐에는 흙이 묻어있는데, 흙이 중량비로 얼마만큼 묻어있느냐에 따라서 폐비닐 골재의 성질이 달라질 것으로 판단되어 본 연구에서는 비닐하우스에서 채취한 비닐을 물로 씻은 후 경기도 파주시 통일동산에서 채취한 화강풍화토를 중량비로 혼합하였다. 시험에 사용한 화강풍화토의 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1에서 보는 바와 같이 통일동산의 화강풍화토는 비소성(non plastic)으로 나타났으며, 비중은 2.67로 일반적인 화강풍화토의 범주에 속함을 알 수 있었다. 또한, 입도 분석 결과 균등계수가 34.5이며, 곡률계수가 3.4로 통일분류법상 SM에 해당함을 알 수 있다. 폐비닐 골재 제작시 사용한 화강풍화토는 No. 40체를 통과한 작은 입자의 흙을 사용하였으며, 기타 시험에 사용한 흙은 No. 4체를 통과한 흙을 사용하였다.

표 1. 화강풍화토의 물리적 성질

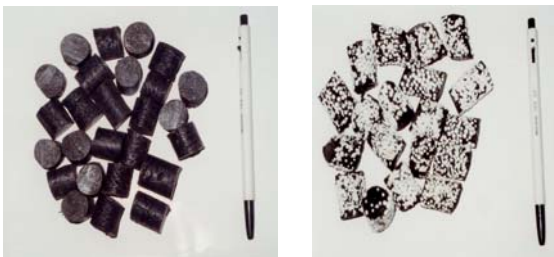
소성지수	균등계수	곡률계수	비중	통일분류법
NP	34.5	3.4	2.67	SM

2.1.1 폐비닐 시료

본 연구에서는 한국자원재생공사에서 수집한 멀칭용 폐비닐(HDPE)을 이용하여 폐비닐 골재를 제작하였다. 폐비닐에 포함된 이물질을 분석하기 위하여 먼저 수집된 폐비닐을 4분법으로 나눈 후 무게를 측정하였다. 그 후 건조로에 집어넣은 후 건조무게를 측정하여 폐비닐에 포함된 수분량을 측정하였다. 건조된 폐비닐을 깨끗이 씻은 후 다시 건조시켜 폐비닐에 포함된 흙의 양을 측정하였다. 그 결과 수집된 폐비닐은 순수한 폐비닐 50%, 흙 30%, 물 19%, 기타 1%로 이루어져 있음을 알 수 있었다.

2.1.2 페비닐 골재 제작

먼저 페비닐을 약 50cm정도의 크기로 자른 후, 흙의 함유량에 따라 페비닐 골재의 성질이 어떻게 달라지는지 알아 보기 위하여 세척을 통하여 이 물질을 깨끗이 제거한 다음 페비닐 조각과 흙을 몇몇 비율로 혼합하였다. 다음에 가래떡 제조시설과 같이 생긴 장치에 페비닐 조각을 집어 넣고 약 150~175℃의 온도로 녹였다. 페비닐 용융물 출구에서 가래떡 모양으로 나오는 페비닐을 2~3cm 길이로 잘라 페비닐 골재를 제조하였다. 페비닐 골재의 모습과 종류별 혼합비를 그림 1 및 표 2에 나타내었다.



(a) 페비닐+흙 (b) 페비닐+흙+EPS
그림 1. 페비닐 골재의 모습

표 2. 페비닐 골재의 종류와 혼합비
(단위 : 중량%)

시료명 재료	STD	S10	S20	S30	SE01	SE31
페비닐	100	90	80	70	99	69
soil		10	20	30	-	30
EPS					1	1
합계	100	100	100	100	100	100

여기서, STD : Standard, S : soil, E : EPS

3. 환경공학적 시험

3.1 용출시험

페비닐 골재를 실제 도로에 포설했을 때 페비닐 골재 중에 함유되어 있는 화학성분이나 유기물이 지반오염이나 지하수 오염을 시킬 가능성이 있는지 알아 보기 위하여 용출 시험(leaching test)을 실시하였다.

3.1.1 시험방법

본 시험은 화학시험연구원에 분석/의뢰하였는데, 시험방법은 페비닐 시료 100g과 미네랄성분을 제거시킨 증류수 (0.1N HCl 용액을 가하여 pH 5.8~6.3으로 조정) 1000ml를 2000ml 삼각플라스크에 넣고 상온, 상압에서 진탕기의 회전수를 200rpm, 진폭을 4~5cm로 하여 6시간 연속 진탕한 다음, 1.0 μ m의 유리섬유 여지로 여과하고 여과액을 추출하여 분석하는 방법이었다.

3.1.2 시험 결과

페비닐에 대한 용출시험 결과와 지정폐기물의 유해물질 함유기준을 표 3에 나타내었다. 표 3의 용출시험 결과를 보면 구리가 0.10ppm으로 나타났고 환경부장관이 정하여 고시하는 물질 중의 하나인 기름성분이 0.92% 나타났다. 그러나, 폐기물 공정 시험법에 규제물질로 정하고 있는 Pb, As, Hg, Cr, CN, Cd, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 유기인은 전혀 검출되지 않는 것으로 나타났으며, 구리, 기름성분은 검출되었으나 허용기준보다 아주 낮게 나타났다.

표 3. 용출시험 측정결과와 허용기준

오염물질 항목	허용 기준	용출시험 결과
납(Pb)	3.0mg/ℓ	불검출
카드뮴(Cd)	0.3mg/ℓ	불검출
구리(Cu)	3.0mg/ℓ	0.10mg/ℓ
비소(As)	1.5mg/ℓ	불검출
시안(CN)	1.0mg/ℓ	불검출
수은(Hg)	0.005mg/ℓ	불검출
6가 크롬(Cr ⁶⁺)	1.5mg/ℓ	불검출
트리클로로에틸렌	0.3mg/ℓ	불검출
테트라클로로에틸렌	0.1mg/ℓ	불검출
유기인	1.0mg/ℓ	불검출
기름성분	5%	0.92%

4. 페비닐 골재의 물리·역학적 시험

4.1 비중시험

4.1.1 시험방법

본 연구에서 제조한 페비닐 골재의 비중을 알아보기 위하여 KS F 2503에 따라 비중 시험을 수행하였다. 페비닐 골재를 완전히 씻어 이물질들을 제거한 후 80℃의 온도로 건조시키고 1~3시간동안 실내온도로 냉각시킨 다음, 24시간 동안 실내온도의 물에 침수시켰다. 물 속에서 시료를 꺼내어 눈에 보이는 수막이 없어질 때까지 페비닐 골재를 일일이 닦았다. 표면건조 포화상태 동안 페비닐 골재의 구멍에서 물이 증발되는 것을 막은 후 표면건조 포화상태의 무게를 측정하였다. 그 후 표면건조 포화상태의 페비닐 골재를 철망태에 넣어 밀도 0.997±0.002의 수중에서 무게를 측정하였다. 침수중에 무게를 달기 전에 용기를 흔들어 갇힌 공기를 조심스럽게 제거하였다.

4.1.2 시험결과

표 4에 페비닐 골재와 일반 건설재료의 비중을 함께 나타내었다. 표 4를 보면 알 수 있듯이 페비닐 골재의 비중은 약 1.1~1.4 정도로 아스팔트의 비중과 유사함을 알 수 있다. 그러나 기타 재료와 비교하면 약 2배 이상 가벼운 것을 알 수 있다.

표 4. 페비닐 골재의 비중

시료명	비중
S10	1.15
S20	1.28
S30	1.35
SE01	1.11
SE31	1.20

4.2 체분석 시험

4.2.1 시험방법

페비닐 골재의 입도분포를 알기 위하여 KS F 2502 규

정에 따라 체분석 시험을 수행하였다. 페비닐 골재를 물로 깨끗이 씻은 다음 80±5℃의 온도에서 항량(恒量)이 될 때까지 건조시켰다. 그 다음 건조된 페비닐 골재를 No.12, No.8, No.4, No.3½, 10, 20, 25, 40, 50, 60 및 80mm체로 체가름을 한 후 각 체에 남은 페비닐 골재의 무게를 측정하였다.

4.2.2 시험결과

페비닐 골재의 체분석 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보는 바와 같이 각 페비닐 골재의 입도분포가 거의 유사하며, 페비닐 골재의 입경이 대부분 15~25mm 사이에 분포하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 각 페비닐 골재의 균등계수(C_u)는 약 1.4이고 곡률계수(C_c)는 약 1.0, 평균 입경(D_{50})은 약 20mm임을 알 수 있었다.

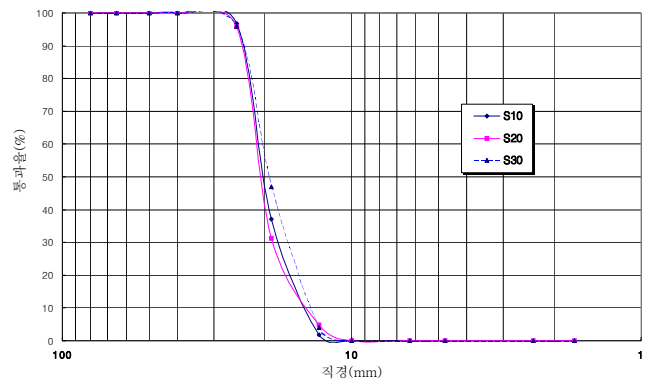


그림 2. 페비닐 골재의 입도분도분포 곡선

4.3 LA 마모시험

4.3.1 시험방법

페비닐 골재의 마모에 대한 단단함 정도를 분석하기 위하여 KS F 2508 규정에 따라 LA 마모시험을 수행하였다. 페비닐 골재의 입도분포 결과를 LA 마모시험의 시료등급과 비교해 보면 A급에 해당함을 알 수가 있다. 따라서, 크기가 10~15mm, 15~20mm, 20~25mm, 25~40mm인 페비닐 골재를 각각 1250g을 측정(시료 전체의 무게 5000g)하여 철구 12개와 함께 LA 마모시험기에 넣고 500회 회전시켜 마모율을 측정하였다.

4.3.2 시험결과

LA 마모시험의 결과를 표 5에 나타내었다. 그 결과를 보면 페비닐 골재 마모율은 2% 이내임을 알 수가 있었다. 도로포장용 자갈의 마모율이 35%이하이고, 댐 콘크리트용 자갈의 마모율이 40%이하임을 감안할 때 페비닐 골재의 마모율은 상당히 작은 것을 알 수 있다.

표 5. LA 마모시험 결과

시료명	시험전 무게(g)	시험후 무게(g)	마모율(%)
S10	5000	4912	1.76
S20	5000	4921	1.58
S30	5000	4928	1.44

4.4 다짐시험

4.4.1 시험방법

화강풍화토에 페비닐 골재를 중량비가 각각 0, 4, 7, 10, 15%가 되도록 혼합하여 KS F 2312 규정에 따라 다짐시험을 수행하였다. 여기서, 사용한 페비닐 골재는 흙을 혼합하지 않은 순수한 페비닐 골재(STD)이다. 본 시험에서는 시료 전량을 최적함수비가 얻어지는 함수비까지 건조하고 다질 때 물을 가하여 필요한 함수비로 조정하는 건조법을 사용하였다. 또한 한번의 다짐시험이 끝난 후에는 다짐 램머에 의한 시료의 입자의 손상을 고려하여 새로운 시료를 사용하는 비반복법을 이용하였다.

4.4.2 시험결과

화강풍화토에 페비닐 골재를 혼합한 혼합토의 다짐시험 결과를 그림 3에 나타내었다. 그 결과, 페비닐 골재의 혼합율이 증가할수록 최대건조단위중량값이 감소하였으나, 최적함수비는 변화가 거의 없었다. 페비닐 골재의 혼합율이 증가할수록 최대건조단위중량이 감소하는 것은 비중이 큰 흙 대신에 비중이 작은 페비닐 골재로 치환되기 때문이며, 최적함수비가 변화하지 않는 것은 함수비가 흙의 다짐 특성에는 영향을 미치지나 페비닐 골재의 다짐특성에는 영향을 미치지 않기 때문이다.

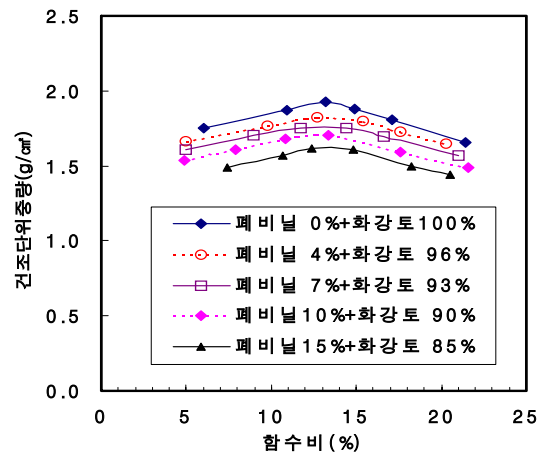


그림 3. 페비닐 골재의 혼합율에 따른 다짐곡선 비교

4.5 직접전단시험

4.5.1 시험방법

본 연구에서 제작한 페비닐 골재의 전단 특성을 알아보기 위하여 각 페비닐 골재를 최대건조밀도의 90%로 전단상자에 다져 넣은 후 ASTM D 3080-90 규정에 따라 직접전단시험을 수행하였다.

본 시험에서 사용한 직접전단시험기는 동아시아시험기에서 제작한 대형 전단시험기로 전단상자, 수직하중 재하장치, 전단하중 재하장치, 조절장치로 크게 4가지 부분으로 구성되어 있다. 전단상자 내부의 크기는 30cm×30cm×30cm, 최대 전단 변위는 6cm이다. 또한, 수직응력은 지렛대원리를 이용한 사하중으로 작용된다. 수직응력을 0.5kg/cm², 1.0kg/cm², 1.5kg/cm², 2.0kg/cm²로 하고, 전단시 전단속도를 1mm/min로 하여 전단시험을 수행하였다.

4.5.2 시험결과

본 연구에서 제작한 페비닐 골재의 직접전단시험결과를 표 6에 나타내었다. 그 결과, 페비닐 골재에 혼합되는 흙의 양이 증가할수록 내부마찰각이 증가하지만, EPS를 혼합한 페비닐 골재의 내부마찰각은 표준페비닐시료(STD)와 거의 같은 값을 보이고 있다. 이와 같이 첨가되는 흙의

함량이 증가함에 따라 전단강도가 증가하는 것은 용융된 페비닐 속에서 흙이 시멘트처럼 두 물질을 강하게 결합시키기 때문으로 풀이된다. 반면, EPS조각을 혼합한 페비닐 골재의 경우 내부마찰각이 증가하지 않는 것은 페비닐 골재를 둘러싸고 있는 EPS조각이 전단시험시 완충작용을 하여 전단응력을 일부 흡수하기 때문으로 판단된다.

표 6. 페비닐 골재의 전단특성

	STD	S10	S20	S30	SE01	SE31
내부마찰각(°)	39.0	41.5	43.4	45.9	39.9	40.0
접착력(kg/cm ²)	0	0	0	0	0	0

4.6 초음파시험

4.6.1 측정장비

본 시험에서 사용된 측정장비는 일본 초음파공업(주)에서 생산된 제품으로 초음파 발생장치인 Sing Around Unit은 액체가 담긴 box에 측정할 시료를 넣는 AC-M2형 cell, 수신 파형을 모니터 하는 oscilloscope, 초음파의 주기를 읽을 수 있는 time counter로 구성되어 있다. 이 장비는 -50°C~80°C까지 사용이 가능하며 발신 주파수는 2MHz를 표준으로 한다. 초음파 발생장치의 송·수신자 사이의 최대이동거리는 50mm이고 최소 5/1000mm까지의 이동거리를 측정할 수 있다. 시료를 설치하는 샘플홀더(sample holder)는 송·수신자측을 기준으로 ±60°평면방향으로 회전이 가능하고, 최소 1/10°의 회전각을 측정할 수 있다(그림 4 참조). Sing Around 초음파 시험기의 원리 및 시험방법에 대해서는 김영진 등(2002)이 자세히 설명한 바 있다.

4.6.2 공시체 제작 및 측정방법

공시체 제작은 페비닐 골재를 제작했을 때와 같이 페비닐에 노건조시킨 화강풍화토를 중량비로 10, 20, 30%로 혼합하여 약 200°C 온도로 용융시켰다. 그 후 용융된 페비닐을 직경 35mm, 두께 5.8mm의 몰드에 넣고 4개의 볼트를 이용하여 상하면을 완전히 고정시켜 압축시켰다. 이것을 공기 중에서 천천히 냉각하여 시료에 균열이 생기는 것을 방지하였다. 이러한 방법으로 초음파시험용 페비닐

골재 시료를 혼합비별로 각각 4개씩 제작하였다. 이렇게 제작된 시료를 홀더에 설치하고 상온에서 페비닐 골재의 초음파 속도를 측정하였다.

4.6.3 시험결과

페비닐골재 S10, S20, S30의 초음파시험결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 Vp는 종파속도이고, Vs는 횡파속도를 나타낸다.

시험 결과, 페비닐에 혼합된 화강풍화토의 함량이 증가할수록 초음파속도가 증가하였다. 일반적으로 어느 재료의 초음파속도는 그 재료의 강도와 비례하므로 화강토를 혼합한 페비닐골재에서 화강토의 함량이 증가함에 따라 강도도 증가하였음을 판단할 수 있다.



그림 4. Sing Around 초음파 속도 측정장비

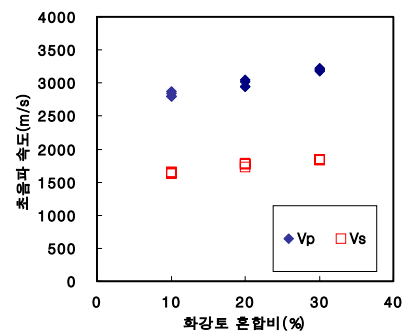


그림 5. 혼합비에 따른 초음파속도의 변화

5. 동토공학적 실험

5.1 열전도시험

페비닐 골재와 기타 건설재료의 열전도율을 분석하여 페비닐 골재의 단열효과를 규명하기 위하여 열전도시험을 수

행하였다.

열전도란 물질의 이동을 수반하지 않고 고온부에서 이것과 접하고 있는 저온부로 열이 전달되는 현상을 말한다. 예를 들어 금속막대의 한쪽 끝을 가열하면 가열되는 부분부터 점차적으로 뜨거워지는 경우나, 온도가 다른 물체끼리의 접촉에 의해 열의 이동이 일어나는 경우가 이에 해당한다. 액체나 기체 내부에서의 열의 이동은 주로 대류(對流)에 의해 일어나지만, 고체 내부에서는 주로 전도에 의해서 열이 이동한다. 열전도에 의한 물체 내부에서의 열의 전달 속도는 물질 내부에서의 온도기울기(단위길이당의 온도차)에 비례하지만, 물질의 종류에 따라 큰 차이가 있다. 예를 들면, 구리나 철과 같은 전기의 양도체에서는 열도 매우 빠르게 전달되지만, 황이나 플라스틱과 같은 전기적으로 절연체인 물질에서는 늦게 전달된다.

5.1.1 측정장비

본 연구에서는 Kentherm QTM-D3(신속 열전도율계)을 이용하여 페비닐 골재의 열전도율을 측정하였다. 열전도를 측정하는 방법 중 열선법에 의한 방법은 가열선을 2장의 시료편으로 잡고서 측정하므로 측정도를 높이기 위해서는 시료표면을 가열선에 밀착시켜야 한다는 문제점을 가지고 있으나, QTM식 Probe는 이미 열전도율을 알고 있는 물질의 표면에 가열선과 열전대가 배치된 상태로 시료면과 잘 밀착되게끔 만들어졌다. 또한, QTM-D3은 마이크로 컴퓨터를 응용한 전용 연산 표시회로 등의 방법으로 측정결과를 직접 열전도율 단위로 표시한다. 측정시간은 약 60초에서 120초 가량 걸린다(그림 6 참조).

5.1.2 시험결과

페비닐 골재의 열전도시험결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7을 보면 알 수 있듯이 페비닐 골재에 혼합되는 흙의 양이 증가할수록 열전도율이 증가함을 알 수 있다. 특히, 순수한 페비닐 골재(STD)보다 흙 30%를 혼합한 페비닐 골재(S30)의 열전도율이 2배정도 증가되었다. 반면, 페비닐 골재에 EPS를 첨가할 경우 EPS를 첨가하지 않은 페비닐 골재보다 열전도율이 감소함을 알 수 있다. 특히, S30과 SE31의 열전도율을 비교하면 열전도율이 2배정도 감소함을 알 수가 있다.



그림 6. 열전도 시험기

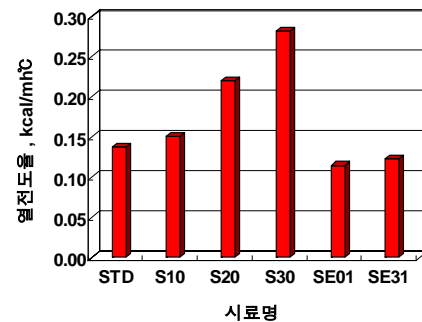


그림 7. 페비닐 골재의 열전도율

5.2 부동수분 시험

5.2.1 부동수의 정의

동토 중에는 0°C 이하에서도 얼지 않는 수분이 존재하는데 이를 부동수(unfrozen water)라고 부른다. 동토 중의 부동수분은 흙의 비표면적 및 입자배열 상태, 온도 등에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다(김영진, 1997). 따라서 부동수분의 양에 따라 동토의 투수계수, 강도, 열전도율 등이 달라지므로 자연지반의 동결심도를 구한다거나, 인공 동결공법에서 동결된 지반의 강도를 알고자 할 때, 또는 영하 165°C 상태의 LNG 저장탱크의 주변 지반이 동결에 의해 얼마만큼 팽창할 것인지 알고자 할 때 온도변화에 따른 동토의 부동수분을 파악하는 것은 매우 중요하다.

5.2.2 시험장비

본 시험에 사용한 TDR 시험기는 네덜란드의 Eijkelkamp 사 제품(Trime FM-3)으로 측정용 프로브(probe)를 시료 속에 삽입한 후, 전자파를 발생시켜 전자파의 속도를 계산하

여 흙의 유전율(dielectric constant)을 구하고, 흙을 구성하는 요소인 토립자, 얼음, 간극수, 공기 등의 유전율이 서로 다른 원리를 이용하여 동토의 체적함수비(부동수분)를 도출하는 장치이다(그림 8 참조). TDR을 이용한 부동수분 측정원리 및 방법에 대해서는 김영진 등의 논문에 상세히 설명되어 있다(김영진 외, 2002).

5.2.3 공시체 제작 및 시험방법

공시체 제작시 우선 페비닐과 흙 시료를 노건조시킨 후, 직경 15cm, 높이 18cm되는 몰드에 각 조건별로 혼합된 시료를 채워 넣고 다짐하여 제작하였다. 공시체의 밀도와 함수비는 페비닐 골재에 종류에 따른 특성을 분석하기 위하여 다짐시험에서 도출된 최대건조단위중량의 90%를 기준으로 하여 페비닐 골재의 혼합비별 건조단위중량을 일정하게 하여 제작하였다.

시험방법은 TDR probe와 온도측정용 센서를 공시체 속에 삽입한 후 냉동챔버 속에 넣고, TDR probe 연결선과 온도측정용 센서를 냉동챔버 외부로 연결하여 시료 내부의 온도와 부동수분을 측정하였다. 공시체의 온도는 $-0.1^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 까지 단계별로 변화시켰다.

5.2.4 시험결과

페비닐 골재와 화강풍화토를 혼합한 혼합토의 부동수분 측정 결과를 그림 9에서부터 그림 11까지 나타내었다.



그림 8. 부동수분 측정장비 TDR

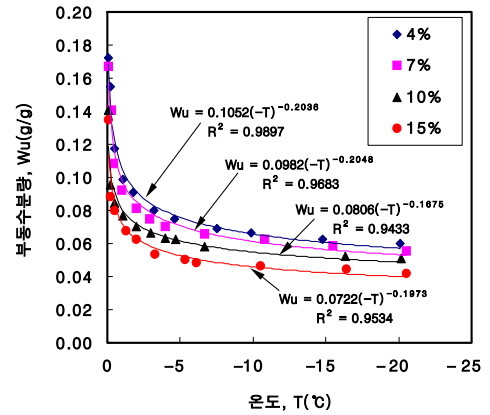


그림 9. S10 혼합토의 부동수분 변화

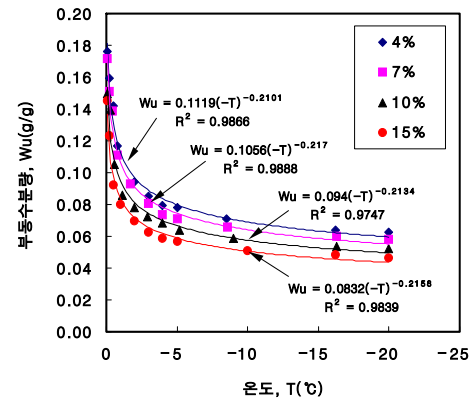


그림 10. S20 혼합토의 부동수분 변화

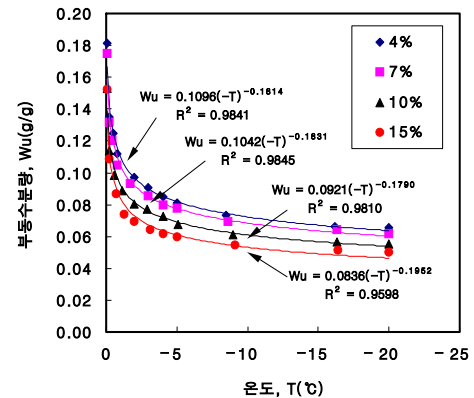


그림 11. S30 혼합토의 부동수분 변화

그 결과를 보면 페비닐 골재가 많이 포함된 혼합토일수록 부동수분이 감소하고 있으며, 동결온도(T)와 부동수분량(W_u) 사이에는 정도 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이처럼 페비닐 골재가 많이 포함된 혼합토일수록 부동

수분이 감소하는 이유는 흡착수를 가지는 화강풍화토 대신에 흡착수가 없는 페비닐 골재로 치환되었기 때문이다.

5.3 동상시험

5.3.1 동상의 원리

기온이 0°C이하로 장기간 계속되면 지표면 부근의 흙의 간극수가 차츰 얼기 시작한다. 이때 모세관현상에 의해 얼지 않은 지중으로부터 수분이 동결면으로 이동하면서 빙정(ice lenses)이 생기고, 이 빙편이 점점 커지면서 수량도 증가하여, 지반이 팽창하는 현상을 동상(frost heaving)이라고 한다. 이러한 현상으로 도로 포장에 파손되기도 하고 철도, 매설관, 주택 등이 융기하기도 하는 등 피해를 일으킨다.

5.3.2 시험방법

겨울철 도로나 공항과 같은 구조물에서 실제로 발생하는 동상현상을 실험실에서 축소 재현하여 흙의 동상성을 평가하는 방법으로 개방형 동상시험(Open System)장치가 사용되고 있다.

그림 12에서는 본 연구에 사용한 개방형 동상시험기의 개요도를 보여 주고 있다.

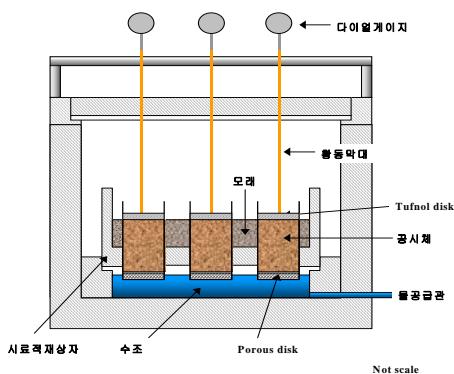


그림 12. 개방형 동상시험기의 개요도

공시체 적재상자에는 직경 112mm, 높이 150mm의 공시체를 9개 넣을 수 있도록 되어 있으며, 공시체 적재상자 윗부분 측벽으로부터 찬 공기가 공급되어 시료를 동결시킨

다. 공시체 밑바닥에는 두께 13mm, 직경 101.6mm, 최대세공 110microns의 세라믹 porous disk가 놓이고 윗부분에는 두께 5mm, 직경 95mm의 tufnol disk가 놓인다. 공시체 적재상자의 밑부분은 직경 112mm의 구멍이 9개 뚫려 있으며, 이 구멍을 통해 하부의 수조에서 물이 계속 공급된다. 수조의 물은 시험기 외부에 설치된 물탱크로부터 공급되며 수조내에는 heat coil이 설치되어 있어 물의 온도를 항상 일정하게 유지할 수 있다(통상 3~4.5°C). 시험기 상부에는 동상량을 측정할 수 있는 다이얼게이지가 9개, 동상력을 측정할 수 있는 로드셀(load cell)이 1개 설치되며 다이얼게이지 및 로드셀은 직경 6mm, 길이 750mm의 황동 막대에 의해 공시체 윗면과 연결된다.

5.3.3 공시체 제작과 시험방법

동상시험용 공시체는 부동수분량 시험과 같은 조건으로 직경 10cm, 높이 15cm의 몰드에 각 조건별로 다짐을 하여 제작하였다. 그 후 공시체를 황동제 몰드에 넣고 동상시험기에 설치한 다음, 공시체 주위에 모래를 채워 찬 공기가 1차원적으로 상부에서만 침투하게 하였다.

영국 TRRL(Transportation and Road Research Laboratory)의 동상성 판정기준을 적용하여 공기의 온도를 -17°C로 하였고, 공급되는 물의 온도는 4°C를 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.

5.3.4 시험결과

화강풍화토에 본 연구에서 제작한 페비닐 골재를 중량비로 각각 4%, 7%, 10%, 15%를 혼합한 혼합토의 동상시험결과를 그림 13에서부터 그림 16까지 나타내었다.

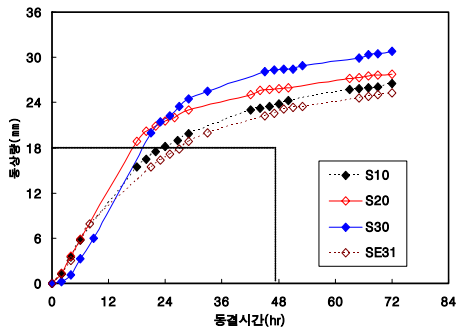


그림 13. 페비닐 골재 4%+화강토 96%

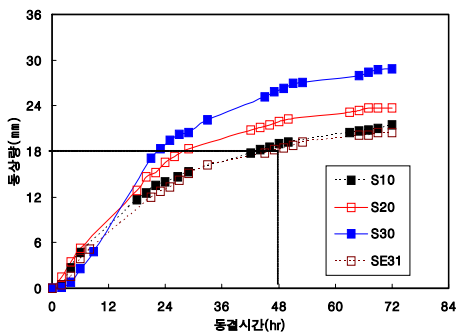


그림 14. 페비닐 골재 7% + 화강토 93%

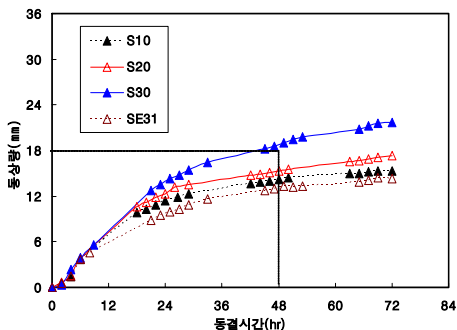


그림 15. 페비닐 골재 10% + 화강토 90%

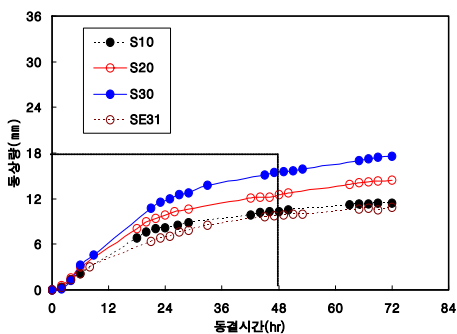


그림 16. 페비닐 골재 15% + 화강토 85%

그 결과를 보면 페비닐 골재의 혼합율이 증가할수록 동상량이 감소하고 있으며, 같은 혼합비에서는 S10보다는 S20이 S20보다는 S30을 포함한 혼합토의 경우가 동상량이 크게 나타나고 있다. 여기서, 특이할만한 것은 화강풍화토에 모든 페비닐 골재를 15%만 혼합하여도 모두 TRRL 기준에서 정하고 있는 비동상 시료로 나타나고 있다는 것이다. 또한, 페비닐 골재 S30을 혼합한 혼합토가 각 혼합비별로 가장 동상량이 크게 나타나지만, 페비닐 골재 S30에 1%의 EPS만을 혼합하여도 동상량이 상당히 감소된 것을 알 수 있다.

5.4 실내모형도로 시험

본 연구에서 제작한 페비닐 골재의 동상방지효과를 규명하기 위하여 실내에 모형도로를 제작하여 대형 냉동 챔버 속에 집어넣고 온도분포를 측정하였다.

5.4.1 시험방법

1m×1.2m×1.5m 크기의 토조를 4등분하여 바닥에서부터 노상층(20cm), 동상방지층(20cm), 보조기층(20cm), 아스팔트층(20cm)을 차례대로 시공한 후 각 깊이별로 온도센서(thermocouple)를 설치하였다. 이때 실제 도로와 같이 찬기운이 상부에서만 일차원적으로 침투하도록 하기 위하여 두께 5cm의 스티로폼을 측면과 바닥면에 설치하였다. 동상방지층에 본 연구에서 제작한 페비닐 골재 S10, S20, S30과 일반적으로 실제 도로에서 사용하고 있는 자갈을 각각 포설하였다. 이때 페비닐 골재와 자갈을 최대건조단위중량의 90%로 다져 넣었다. 이렇게 제작된 모형도로를 내부 크기가 1.8m×2.4m×1.8m인 대형 냉동 챔버에 집어넣고 온도를 -10℃로 설정하여 1시간별로 각각의 온도를 측정하였다.

5.4.2 시험결과

실내모형도로의 시험결과를 그림 17에 나타내었다.

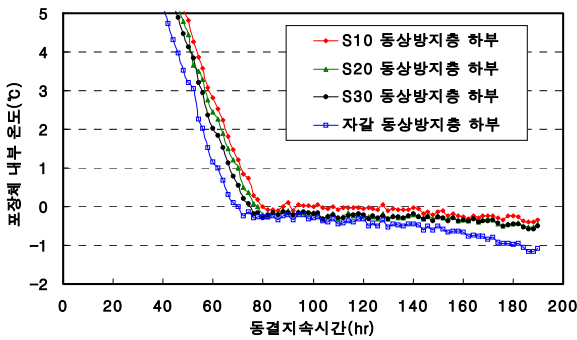


그림 17. 동상방지층 아래의 온도 분포

그 결과를 보면, 동결시간이 지속됨에 따라 모형도로의 내부온도가 급격히 감소되다가 동결지속시간이 약 80시간 이후에는 완만하게 변화하고 있다. 특히, 아스팔트층의 온도변화가 다른 층에 비하여 급격히 변화하고 있는데 이것은 아스팔트층의 열전도율이 다른 층에 비하여 크기 때문이라고 판단된다. 동상방지층 하부의 최저 온도를 비교해보면, 페비닐 골재 S10을 포설한 동상방지층의 최저 온도가 -0.3°C 로 가장 높고 자갈을 포설한 동상방지층의 최저 온도가 -1.3°C 로 가장 낮게 나타났다.

5.5 현장모형도로시험

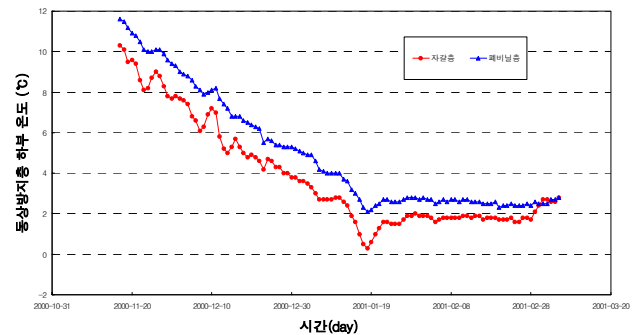
5.5.1 시험방법

페비닐 골재의 동상방지효과를 규명하기 위하여 한국건설기술연구원내에 모형도로를 조성하고 도로단면에 깊이 별로 온도센서를 설치하여 동절기의 도로내부온도 분포변화를 측정하였다.

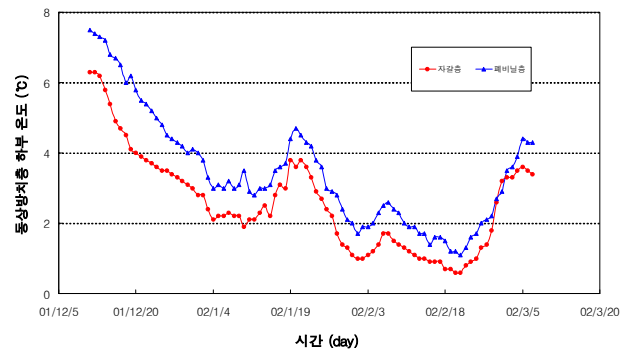
현장모형도로는 길이 240cm×폭 120cm×깊이 100cm로 구성되었다. 먼저 굴착기를 이용하여 깊이 100cm까지 지반을 굴착한 후, 바닥에서부터 노상층(20cm), 동상방지층(20cm), 보조기층(20cm), 아스팔트층(20cm)을 차례로 시공하였다. 이 모형도로는 2개구간으로 나누어 한 곳에는 페비닐 골재를 다른 한 곳에는 자갈을 포설하였다. 각 층에는 온도센서(thermocouple)를 설치하였고 지표상부로부터 10cm 위치한 곳에 온도센서를 설치하여 포장체 내부와 대기 온도를 1시간 간격으로 측정하였다.

5.5.2 시험결과

모형축소도로의 온도 측정(00/11/17~01/3/10, 01/12/11~02/3/10)을 한 결과를 그림 18에 나타내었다. 동상방지층 하부의 온도분포를 살펴보면, 2000년 11월 17일~2001년 3월 10일 사이에는 2001년 1월 18일에 페비닐 골재를 포설한 층의 최저온도가 2.1°C 이고, 자갈층의 최저온도는 0.3°C 로 측정되었다. 또한, 2001년 12월 11일~2002년 3월 10일 사이에는 2002년 2월 21일에 페비닐 골재층의 최저 온도가 1.1°C 이고 자갈층의 최저 온도가 0.6°C 로 측정되었다.



(a) 측정기간(00/11/17~01/3/10)



(b) 측정기간(01/12/11~02/3/10)

그림 18. 동상방지층 하부의 온도분포비교(야외시험)

6. 결론

농촌 비닐하우스 등에서 발생하는 페비닐을 건설골재로 재활용할 수 있는지 알아 보기 위해서 기본실험을 실시한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

1. 농촌에서 수거한 흙이 묻은 폐비닐에 대한 용출시험 결과 지반을 오염시킬 수 있는 중금속이나 유기물 성분이 기준치보다 적거나 검출되지 않아 폐비닐 골재를 자갈대신 사용하여도 지반환경적으로 무난함을 알 수 있었다.
2. 폐비닐 골재의 비중은 1.1~1.4로서 흙이나 자갈보다 가볍고, 내부마찰각도 흙보다 월등히 크기 때문에 폐비닐 골재를 옹벽이나 축대의 뒷채움재로 사용할 경우 토압을 경감시킬 수 있을 것으로 판단되었다.
3. 폐비닐 골재에 대한 LA마모시험결과 마모율이 2% 이하로서 포장콘크리트 시방서 상에 규정되어 있는 “도로 포장용 자갈이나 쇄석의 마모율 35% 이하여야 한다.”는 조건을 충분히 만족하였다.
4. 폐비닐 골재 제조시 폐비닐에 혼합하는 화강토의 함량이 증가할수록 초음파속도가 증가하여 폐비닐 골재가 더욱 단단해짐을 알 수 있었다. 그러나 화강토의 함유량이 증가할수록 열전도율도 증가하여 단열효과 측면에서는 화강토를 많이 섞는 것이 불리하였다. 단지 폐비닐에 화강토를 섞을 때 EPS조각을 중량비로 1%만 혼합하여도 열전도율이 감소하고, 내부마찰각은 폐비닐만으로 만든 골재와 비슷한 결과를 나타내어 도로동상방지층 재료로 사용하기에 유리하다는 사실을 알 수 있었다.
5. 본 연구에서 제조한 어떠한 폐비닐골재든 화강토와 혼합하면 화강토의 부동수분이 감소하여 결국 동상현상을 감소시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.
6. TRRL 개방형 동상실험 결과 동상을 일으키는 화강토에 어떠한 폐비닐 골재든 중량비로 15%만 혼합하여도 48시간 경과후의 동상량이 18mm미만으로 나타나 비동상성 흙으로 변하는 것을 알 수 있었다.
7. 대형 Freezing Chamber내에 축소 모형도로를 만들고 폐비닐 골재와 자갈을 각각 동상방지층에 포설하였을 때 시간경과에 따른 온도변화를 측정된 결과 폐비닐골재 포설 동상방지층의 온도가 자갈포설 동상방지층의 온도보다 더 많은 시간이 경과한 후 낮아짐을 알 수 있었다. 즉 단열효과가 더 높게 나타났다.
8. 2년 연속 겨울철에 실시한 야외 축소도로모형실험 결과 폐비닐 골재를 동상방지층에 포설할 경우 자갈을 동상방지층에 포설할 때에 비해 온도가 높게 나타났다. 따라서 폐비닐 골재를 도로 동상방지층에 포설할 경우 자갈보다 단열효과가 높아 동상방지층의 두께를 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

(접수일자 : 2003년 7월 1일)

참 고 문 헌

1. 고의찬(1998) 혼합 페플라스틱 재활용기술 개발, 한국자원재생공사.
2. 김동호, 김재환, 허탁 (1996) 재생 폴리우레탄을 이용한 폴리우레탄 복합재료의 특성, 한국고분자학회, Vol. 20, No.2, pp. 364~377.
3. 김정호(1994) 페플라스틱의 재활용 기술 현황, 화학공업과 기술, 한국화학공학회, Vol.12, No.1, pp. 46~51.
4. 김영진(1997) 부동수가 동토의 성질에 미치는 영향, 건설기술정보, Vol.15, No.5, 한국건설기술연구원.
5. 김영진, 배정호, 송원근(2002) 동결토의 온도변화에 따른 부동수분과 초음파속도의 변화에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집 Vol. 22, No. pp. 210-212.