

폐 Styrofoam 혼합토의 다짐 및 용출 특성

Compaction and Leaching Characteristics of the Light Weight Soil Used Recycled Styrofoam Beads and Disposal soils

신방웅* · 이봉직** · 이종규***

Shin, Bang-Woong · Lee, Bong-Jik · Lee, Jong-Kyu

Abstract

This paper presents the engineering property of light weight soil made of soil mixed with recycled Styrofoam and stabilizer. Recycled Styrofoam is widely used for lightweight fill material because it has important geotechnical characteristics which are light, adiabatic, and effective for vibration interception. It is very easy to get the disposal styrofoam.

For this study, dynamic compaction test, static compaction test and pH and leaching tests were performed.

Based on the test results, it is concluded that the static compaction method is recommended to prevent from crushing materials and pH values of embankment materials are satisfied with these of domestic and RCRA configuration.

Keywords : Light weight soil, Recycled Styrofoam, Stabilizer, Compaction, Leaching test

요 지

본 논문은 폐 Styrofoam과 현장발생토를 활용하여 경량 성토재로서의 특성을 파악하고자 하는데 목적이 있다. 폐 Styrofoam 입자는 가볍고 단열성이 좋으며 진동차단효과도 우수하기 때문에 경량 성토재로서의 활용이 가능하다. 특히 Styrofoam은 1996년 재활용 품목으로 선정되어 토공재료로서의 적합성만 확인된다면 체계적인 공급이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 폐 Styrofoam 혼합토의 동적 다짐시험, 정적 다짐시험, pH 및 용출실험을 하였으며, 그 결과 효율적인 다짐관리를 위해서는 정적 다짐방식으로 다짐관리가 이루어져야 하며, 경량 성토재의 환경적 위해성 평가결과 pH는 지정폐기물 판정 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

주요어 : 경량토, 폐 Styrofoam, 안정재, 다짐, 용출시험

* 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수
** 정회원 · 충주대학교 건설도시공학과 조교수
*** 정회원 · 충북대학교 토목공학과 조교

1. 서론

최근 급속한 산업화에 따라 발생하는 폐기물을 처리하기 위하여 각국에서는 소극적으로는 폐기물의 생산량을 줄이는 폐기물 감량화 정책을 펴는 한편 발생하는 폐기물을 재활용하여 가용자원화하는 적극적인 정책을 병행하여 실시하고 있다.

여러 폐기물 중 폐 Styrofoam은 무게는 가볍지만 부피가 크기 때문에 수송의 어려움으로 수거를 기피하는 현상이 발생하고 있으며, 매립될 경우 매립지의 부족, 소각을 하면 공해문제를 야기할 수 있어 근본적인 재활용 방안이 요구되는 폐기물이다.

이러한 폐 Styrofoam을 공학적 측면에서 평가하면 가볍고 단열성이 좋으며 진동차단효과도 우수하기 때문에 경량 성토재료로서의 활용이 가능하다. 더욱이 1996년 이후로 재활용 품목으로 선정되어 있어 토공재료로서의 적합성만 확인된다면 원활한 공급이 가능하다.

건설 잔토 역시 난개발과 지반조건이 불량한 지역에서의 공사가 많아짐에 따라 날로 증가하고 있는 추세에 있다. 대한건설협회에서 조사한 바에 의하면 건설 폐기물 중 건설 잔토의 비율이 89%에 이르고 있어 건설 잔토를 효과적으로 재활용하기 위한 대책방안이 절실하다.

따라서, 폐 Styrofoam과 건설 잔토를 활용하여 경량 성토재료로 활용할 수 있다면 자원의 재활용과 동시에 지반처리비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

폐 Styrofoam 입자를 흙과 혼합한 경량 성토재는 폐 Styrofoam의 혼합율에 따라서 단위중량과 강도의 조절이 가능하며, 경량 성토재료로서 이용하기 위한 공학적인 특성이 우수한 것으로 기존의 연구에서 보고되고 있다¹⁾.

하지만 기존의 연구¹⁾에 의하면 동적다짐시험을 통하여 다짐관리를 실시할 경우 폐 Styrofoam 입자의 파쇄에 따라 다짐관리가 용이하지 않으며, 또한 환경적 위해성에 대한 평가가 이루어지지 않고 있어 실제 현장에 적용하기 위해서는 적절한 다짐관리방안과 환경적 위해성에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 우리나라에서 가장 널리 분포하고 있는 화강풍화토를 대상으로 폐 Styrofoam 혼합율을 변화시켜가며 동적 및 정적 다짐특성을 고찰하였으며, 유해한 중금속 성분의 용출 가능성을 평가하고자 경량 성토재의 pH를 측정하고, 용출 시험을 통하여 중금속 용출에 따른 위해성을 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 다짐시험

흙의 다짐은 토공 구조물을 안전하게 축조하기 위한 현장 관리기준을 수립하거나, 사질토의 다짐특성을 파악하기 위하여 실시한다. 실내 다짐시험은 충격에 의한 다짐방법이 일반화되어 있으며, 이는 Proctor에 의해 제시된 시험방법으로 흙을 3층 내지 5층으로 나누어 흙을 투입한 후 각 층마다 소정의 회수로 다진다.

동적 다짐시험의 경우 분무기에 눈금을 부착하여, 함수비를 일정하게 증가시켜가며 실험을 실시하였으며, 다짐에 사용된 시료를 재사용하였을 경우 발생할 수 있는 오차와 동적 다짐으로 인한 Styrofoam 입자의 파쇄를 최소화하기 위하여, 다짐에 사용된 시료를 재사용하지 않았다.

하지만 동적 다짐시험은 현장과는 달리 공시체에 대한 동적인 에너지를 가함으로써 다짐을 하게된다. 따라서, 흙이 아닌 폐 Styrofoam을 혼합할 경우, 과다한 다짐 에너지로 인하여 폐 Styrofoam 입자가 크게 변형을 일으킬 우려가 있다. 또한, 현장의 다짐작업은 일반적으로 전압에 의하여 다짐을 실시하므로 동적 다짐에 비해 입자의 파쇄가 줄어들 것으로 예측된다. 특히 파쇄성재료인 폐 Styrofoam 입자의 경우 동적 다짐시험에 의한 다짐관리가 현장에 부적합하다.

따라서, 본 연구에서는 정적 다짐시험장치를 이용하여 정적 다짐시험도 병행하여 실시하였다. 정적 다짐시험의 경우 시료의 배합은 동적 다짐시험과 동일하게 하였으며 하중은 CBR 시험기를 이용하여 동적 다짐 시 소요되는 각 층당 하중을 계산하여 10초간 가압하였으며, 가압판은 몰드 직경과 동일한 철판으로 보강된 다공석판을 이용하였다⁶⁾.

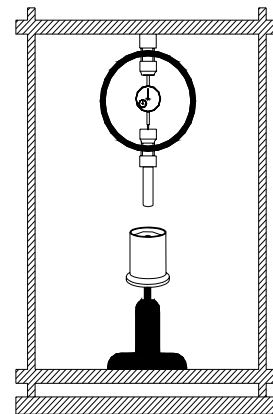


Fig. 1. A schematic diagram of static compaction device

일반적으로 동적 다짐에 의해 시료에 가해지는 다짐 에너지는 식 (1)과 같다.

$$E_c^* = \frac{\overline{W} \cdot h_r \cdot n_b \cdot n_n}{\overline{V}} \quad (1)$$

여기서, E_c^* : 다짐 에너지 (kgf · cm/cm³)

n_b : 각 층당 다짐회수

h_r : 래머의 낙하고 (cm)

n_n : 다짐 층수

\overline{V} : 몰드의 체적 (cm³)

\overline{W} : 래머의 중량 (kgf)

따라서, A다짐법의 경우 각 층당 에너지는 149.935 (kgf · cm/cm³) 이며 정적하중은 다짐에너지를 이용하여 산출하였다. 물론 동적인 다짐에너지를 정적다짐 에너지로 적용하는데 있어서 역학거동 자체가 상이하나 혼합토의 특수성으로 볼 때 Styrofoam의 파쇄 감소효과에 따른 적절한 다짐장비의 선정과 합리적인 현장 다짐관리 안의 제시에는 의미가 있다고 판단되었다.

다짐 실험항목을 요약하면 Table 1과 같다.

Table 1. Test plan for compaction characteristics

	Test series	Stabilizer type	RSB_c (%)	S_c (kN/m ³)
Test series A	Dynamic	Bentonite cement quicklime	50	0.69
Test series B	Dynamic	Cement	0, 40, 50, 60	0.69, 0.98, 1.47
	Static	Cement	0, 40, 50, 60	0.69, 0.98, 1.47
	Compaction energy	Cement	50	0.69, 0.98, 1.47
	Surfactants additions	Cement	40, 50, 60	0.98

2.2 pH 및 용출 시험

본 연구에서의 용출 시험은 독성용탈시험(Toxicity Ch-

aracteristic Leaching Procedure: TCLP)방법을 이용하였으며 본 시험은 가장 최근에 개발된 회분식 용출 시험법으로서 시료의 특성에 따라 두가지의 다른 용출액을 사용한다. 용출액으로는 준비된 시료의 pH값이 5.0 이상일 때는 용출액 1을 사용하고 5.0이하일 경우에는 용출액 2를 사용한다. 용출액 1은 pH 값이 4.93±0.052로서 증류수에 5.7ml의 Glacial acetic acid와 54.3 ml의 1N NaOH를 넣고 1000ml로 하여 제조하며, 용출액 2는 pH 2.88±0.05 증류수에 5.7ml의 Glacial Acetic Acid를 주입하여 1000ml로 희석하여 제조한다. 준비된 시료와 용출액은 중량비 1 : 20의 비율로 혼합한 뒤 22±3°C에서 2rpm으로 18±2 시간동안 진탕한다. 진탕하는 동안 15분, 30분, 또는 60분마다 진탕을 잠시 멈추고 마개를 개방하여 용기내부의 압력을 제거하여 준다.

진탕이 끝나면 혼합액을 여과하고 적당량을 취하여 검정용으로 한다. TCLP 시험은 한국의 시험법에서는 용매의 pH가 5.8~6.3인데 비하여 TCLP 시험은 용출액 1이 4.93±0.05, 용출액 2가 2.88±0.05이다. 이러한 시험방법의 차이로 인하여 동일한 항목에 대하여 RCRA 기준치가 우리나라 기준치보다 더 높게 규정되어 있다.⁴⁾

Table 2. Test plan for leaching test

Item	Domestic configuration	RCRA
Pb (mg/l)	3.0	5.0
Cd (mg/l)	0.3	1.0
Cr (mg/l)	1.5	5.0
Cu (mg/l)	3.0	-
Hg (mg/l)	0.005	0.2
As (mg/l)	1.5	5.0
Ba (mg/l)	-	100.0

우리나라 환경오염 공정 시험법상의 유해성 판정기준 및 중금속류에 관한 RCRA 규제항목은 Table 2와 같다. TCLP 시험을 통하여 용출된 용액은 유도결합플라즈마분광계를 이용하여 중금속함량을 조사하였다.

본 연구에서는 유해성 물질을 정량적으로 평가하기 위하여 토사로서 실험에 사용된 점성토, 화강풍화토를 사용하였으며, 혼합토로서 혼합율 50%, 안정재의 양 0.98kN/m³의 유

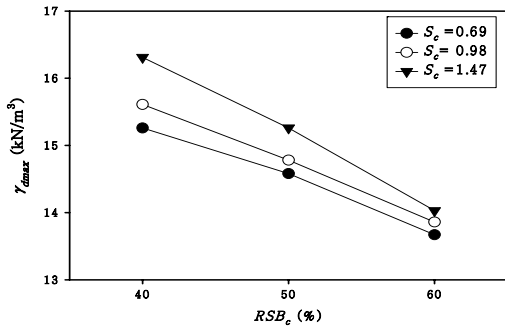


Fig. 3. Maximum dry unit weight using dynamic compaction test

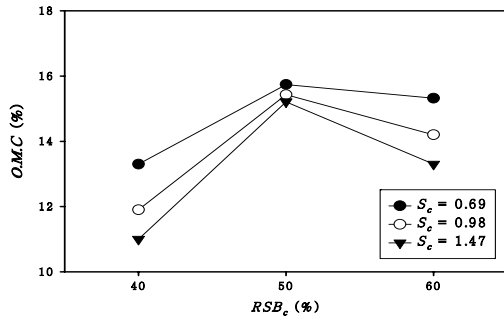


Fig. 4. O.M.C using dynamic compaction test

그러나, 최적함수비의 경우 폐 Styrofoam 혼합을 50% 이상에서는 일반적인 흙의 다짐 특성과는 다른 경향을 나타내었다. 이는 흙이 차지하는 영역이 줄어들어 따라 흙 자체의 역학적 성질이 감소하며 동적 다짐으로 인한 폐 Styrofoam 입자의 파쇄가 주 원인으로 판단된다. Fig. 3과 4는 폐 Styrofoam 혼합율에 따른 최대건조단위중량 및 최적함수비를 나타낸 것이다.

4.2 정적 다짐특성

정적 다짐시험법은 몰드 속에 시료를 투입하여 피스톤에 의하여 정적인 하중을 가하여 다지는 방법으로 폐 Styrofoam 입자가 포함된 시료와 같이 입자가 파쇄되기 쉬운 시료의 경우 동적인 하중에 의한 파쇄영향이 크기 때문에 기존의 동적 다짐시험 방법으로는 일정한 다짐특성을 얻을 수 없는 것으로 나타났다. 유(1997)에 의하면 현장

에서의 다짐방법은 충격식이기 보다는 진동롤러 등의 건설 기계를 이용하기 때문에 깃이김 다짐방식을 취하고 있어 현장과 실내 다짐의 메카니즘 차이에 따라 현장과 실내다짐시험 결과가 다른 거동을 보이고 있는 것으로 알려져 있다.

따라서, 본 연구에서는 정적 다짐시험이 동적 다짐시험에 비하여 입자의 파쇄영향을 줄이고 현장 다짐방식과 일치성을 찾을 수 있는 점을 고려하여 동적 다짐과 함께 정적 다짐시험 방법을 통하여 다짐특성을 비교하였다.

정적 다짐시험 결과 폐 Styrofoam 혼합율이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 감소하였다. 최적함수비는 폐 Styrofoam 혼합율이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 동적 다짐시험과 비교했을 때 최대건조단위중량이 작은 값을 보이는데 동적 다짐에너지에 비하여 상대적으로 작은 다짐에너지가 가해졌기 때문으로 판단된다.

Table 6. Test results of static compaction test

S _c \ RSB _c (%)	γ _{dmax} / O.M.C		
	0.69	0.98	1.47
40	11.90/19.34	12.52/20.24	12.85/23.4
50	10.63/20	11.69/22.34	12.06/23.5
60	9.93/23	11.25/24.13	11.40/24.5

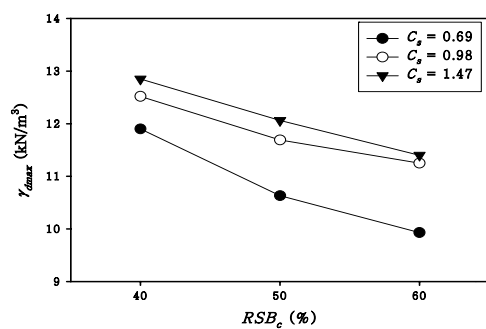


Fig. 5. Maximum dry unit weight with recycled styrofoam beads content (RSB_c)

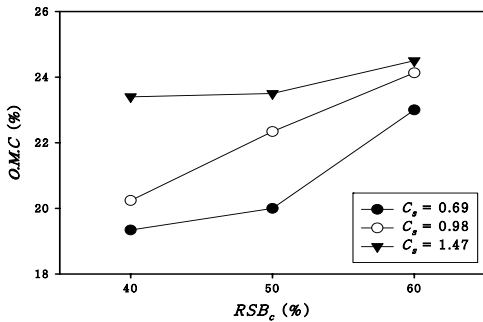


Fig. 6. O.M.C with RSB_c

Fig. 5는 폐 Styrofoam 혼합율에 따른 최대건조단위중량 특성을 도시한 것으로 폐 Styrofoam 함유량이 증가할수록 최대건조단위중량이 감소하는 경향을 보였으며, 최적함수비의 경우 안정재의 양(S_c)에 따라 변화하지만 폐 Styrofoam 입자의 함유율이 증가할수록 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났다.

정적 다짐으로 구한 최대건조밀도는 동적 다짐으로 구한 것에 비해 작으며 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 6).

4.3 다짐방법에 따른 다짐특성

동적 다짐시험시 발생할 수 있는 입자파쇄의 영향을 줄일 수 있고 현장에서의 다짐방식과 일치성을 얻을 수 있는 정적 다짐시험을 병행하여 실시하고 그 결과를 비교하였다.

최대건조단위중량의 경우 동적 다짐을 이용하여 구한 값에 비하여 정적 다짐방식으로 구한 단위중량이 작게 분포하며 최적함수비의 경우 동적 다짐방식으로 구한 최적함수비가 정적 다짐방식으로 구한 최적함수비에 비하여 작게 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

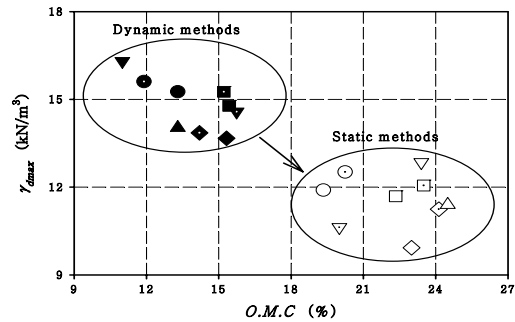


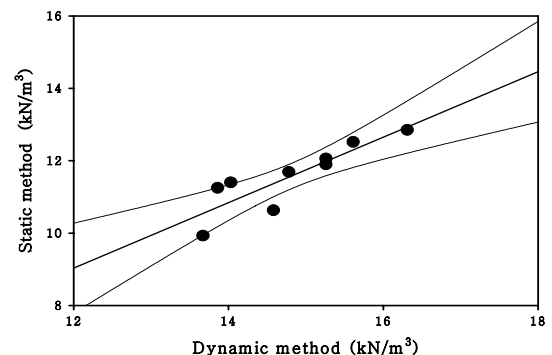
Fig. 7. Compaction characteristics with compaction method

다짐방법에 따른 다짐특성을 비교하기 위하여 폐 Styrofoam 혼합율과 안정재의 양 등 혼합조건이 같은 경우에 정적 다짐시험과 동적 다짐시험으로 구한 최대건조밀도 및 최적함수비를 도시하면 Fig. 8과 같다.

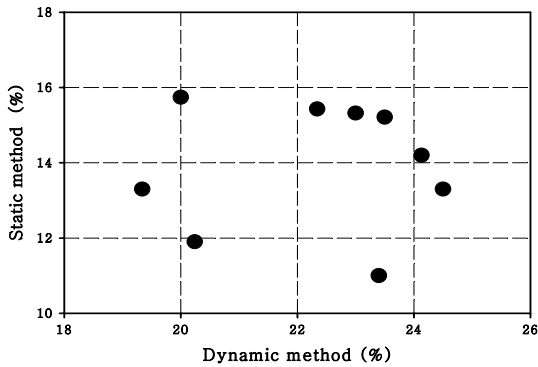
그림에서처럼 다짐방법에 따른 최대건조밀도는 어느 정도 관련성을 가지고 있으나 최적함수비의 경우 일정한 관련성을 찾기 어려웠다.

이는 동적 다짐시험으로 구한 최적함수비가 혼합율의 증가에 따라 일정한 경향을 보이지 않는데서 그 원인이 있는 것으로 판단된다.

따라서, 동적 다짐방식으로 구한 다짐특성과 정적 다짐방식으로 구한 다짐특성간에는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 다짐시 발생하는 입자의 파쇄와 다짐에너지의 차이로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.



(a) γ_{dmax}



(b) O.M.C

Fig. 8. Comparison between dynamic and static method

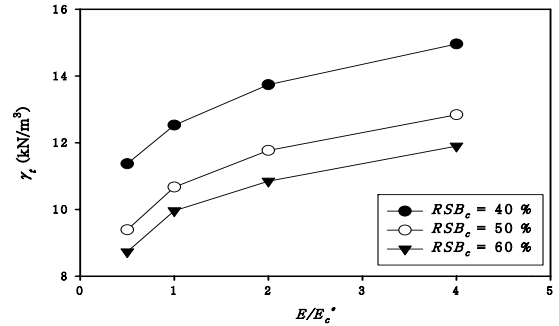
상기의 결과를 종합하여 볼 때 경량 성토재의 입자파쇄 영향을 배제하기 위해서는 정적 다짐방식으로 다짐을 관리하는 것이 바람직하며, 동적 다짐에너지와 정적 다짐에너지간에 발생하는 차이를 보정하기 위해서는 현장에서 적용되는 다짐장비의 중량을 고려하여 대표적인 다짐장비의 단위면적당 하중을 계산한 후 이 값에 근거하여 정적 다짐을 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4.4 다짐에너지에 따른 다짐특성

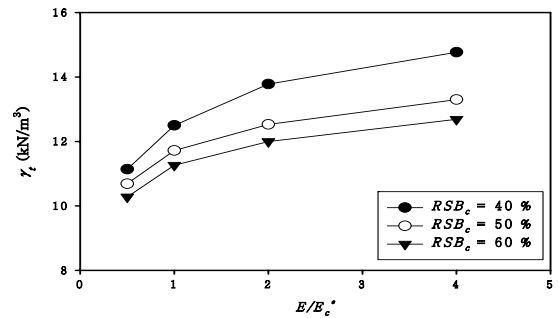
정적 다짐시험과 동적 다짐시험을 비교하여 볼 때 동적 다짐방식을 이용하여 다짐을 실시하였을 경우 폐 Styrofoam 입자의 파쇄가 심한 것으로 나타났으며 이로 인하여 폐 Styrofoam 혼합율에 따른 최적함수비 산출이 어려운 것으로 나타났다. 정적 다짐방식은 이와 같은 문제점을 상당 부분 해결할 수 있는 것으로 나타났으나 동적 다짐에너지와 정적 등가다짐에너지의 역학적인 차이에 따라 단위중량 및 최적함수비가 상이한 것으로 나타났다.

따라서, 현장조건과 다짐특성이 상이한 기존의 동적 다짐시험 방법을 실시하기보다는 현장에서 실제 적용하고 있는 대표적인 몇 종류의 다짐장비에 대한 단위면적 당 하중을 계산한 후 이 값에 근거한 정적 다짐방식이 합리적일 것으로 판단된다. 이에 따라 본 절에서는 몰드와 다짐층수(3층)은 일정하게 유지하고 가압하중을 조절하여 다짐에너지비 (E/E_c^*)를 변화시켜가며 건조단위중량 특성을 분석하였다. 이를 위하여 A1 다짐법에 의한 다짐에너지에 0.5~

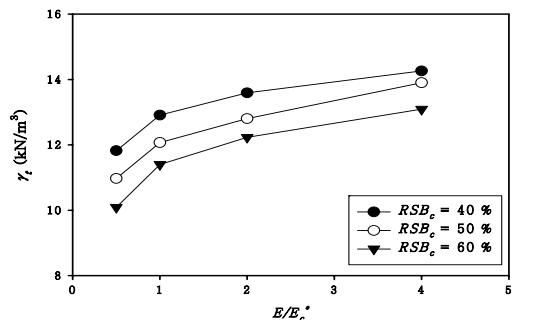
4배까지 변화시켜가며 정적 다짐을 실시하고 건조단위중량을 측정하였다.



(a) $S_c = 0.69$ (kN/m^3)



(b) $S_c = 0.98$ (kN/m^3)



(c) $S_c = 1.47$ (kN/m^3)

Fig. 9. Variation of total unit weight with compaction energy

실험 결과 다짐에너지 증가에 따른 건조밀도의 변화는 2 Ec까지는 비교적 일정하게 증가하지만 이후로는 다짐 에너지 증가에 따른 건조밀도 변화가 완만해지는 것으로 나타났다(Fig. 9). 따라서, 사전에 현장의 다짐장비의 중량을 계산한 후 정적 등가에너지의 2배에 해당되는 하중을 적용하여 다짐을 실시하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

4.5 계면활성제 첨가에 따른 다짐특성

경량 성토재의 경우 다짐에너지가 작용할 경우 폐 Styrofoam 입자의 탄성적 영향에 따라서 다짐초기에는 다짐효과가 적은 것으로 나타났다. 따라서, 성토재를 사용하기 위해서는 충격식 다짐으로 인한 폐 Styrofoam 입자의 파쇄 영향 고려와 더불어 다짐효과를 높이기 위한 방안이 필요한 것으로 나타났다.

이와 관련하여 화강풍화토의 경우 계면활성제를 이용하여 다짐효과의 증대효과를 얻은 것에 착안하여, 경량 성토재에 계면활성제를 첨가하여 이에 따른 다짐효과를 분석하고자 하였다.³⁾

계면활성제는 두 물질사이에 존재하는 표면장력을 감소시킴으로써 다짐시에 보다 적은 함수비에서 비교적 높은 다짐효과가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 비교적 입수가 용이하며 지반내의 미생물에 의해 30일에 90% 이상이 분해되는 것으로 알려져 있는 Polyoxyethylenenonylphenol ether를 계면활성제(무게비 1%)로 사용하였다.

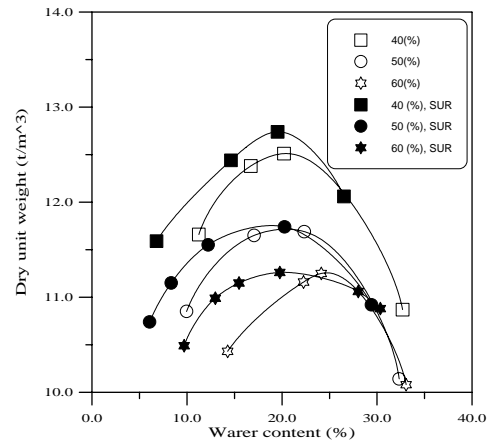


Fig. 10. Variation compaction characteristics with surfactants addition

사용하지 않고 경량 성토재의 다짐시험결과와 비교하여 볼 때 폐 Styrofoam 혼합물에 따라서 최대건조밀도의 증가효과는 미미하지만 최적함수비의 경우 최대 10%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다

따라서, 계면활성제를 첨가하였을 경우 최적함수비는 감소하고 최대건조밀도는 증가하는 것으로 나타나 다짐 증대효과를 확인 할 수 있었다. 따라서, 다짐의 증대를 위해서는 경량 성토재에 대한 계면활성제의 효과가 있는 것으로 판단된다.

하지만 계면활성제를 화강풍화토에 적용한 기존의 연구결과와 비교하여 볼 때 다짐효율의 증대효과가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 이는 경량 성토재의 점착력 성분이 화강풍화토에 비하여 크에 따라 계면활성제의 영향이 감소되는데에서 그 이유를 찾을 수 있다.

4.6 환경적 유해성 평가

경량 성토재의 환경적 유해성을 평가하기 위하여 pH 시험과 용출 시험을 실시한 결과 풍화토의 경우 pH 6.16, 점토의 경우 pH 7.79, 풍화토 경량 성토재 pH 11.05, 점토 경량 성토재의 경우 pH 10.82로 나타났다. 이상의 실험결과로부터 토사에 비하여 안정재의 첨가에 따른 pH는 증가하는 것으로 나타났으며 실험의 모든 경우에서 지정폐기물 판정기준(pH 12.5)을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 7. Compaction test results with surfactant addition

Item	RSB _c		
	40 %	50 %	60 %
γ_{dmax} (kN/m ³)	12.65	11.74	11.27
O.M.C (%)	19.53	20.27	20.01

실험결과, 폐 Styrofoam 혼합물 40%일 경우 최적함수비 19.53%, 최대건조단위중량 12.65kN/m³, 50%일 경우 최적함수비 20.273%, 최대건조단위중량 11.74 kN/m³, 60%일 경우 최적함수비 26.54%, 최대건조단위중량 11.27 kN/m³로 나타났다. 이는 계면활성제를

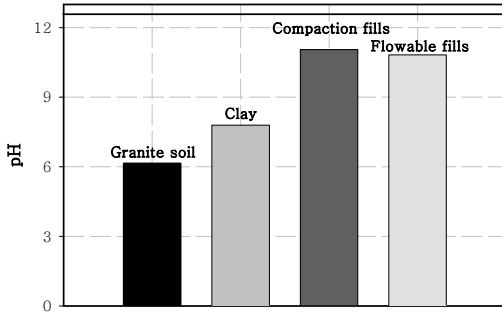


Fig. 11. pH test results

Table 8. Comparison between heavy metal concentration standards and measured value

Item	Domestic configuration	RCRA	Test results
Pb (mg/l)	3.0	5.0	Safe
Cd (mg/l)	0.3	1.0	Safe
Cr (mg/l)	1.5	5.0	Safe
Cu (mg/l)	3.0	-	Safe
Hg (mg/l)	0.005	0.2	Safe
As (mg/l)	1.5	5.0	Safe
Ba (mg/l)	-	100.0	Safe

또한, 용출 시험 결과 국내기준 및 RCRA 기준치와 비교하여 볼 때 측정대상항목 모두에서 유해성 물질의 함유량이 기준치 이내인 것으로 나타났으며 혼합으로 인한 유해성분 증가 역시 미미하였다. 따라서, 경량 성토재의 환경적 위해성은 기준치 이내인 것으로 측정되었다(Table 8).

5. 결론

폐 Styrofoam과 건설잔토를 활용하여 성토재로서의 활용 가능성을 평가하기 위하여 다짐특성과 환경적 위해성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존의 동적 다짐방법은 입자의 파쇄영향과 현장시공과의 역학적인 거동차이로 인하여 정확한 다짐특성 구현이 어려운 것으로 나타났다.
2. 효율적인 다짐관리를 위해서는 정적 다짐방식으로 다짐관리가 이루어져야 하며 계면활성제 첨가를 통하여 최적함수비의 감소 효과를 얻을 수 있었다.
3. 경량 성토재의 환경적 위해성 평가결과 pH는 지정폐기물 판정기준(pH 12.5)을 만족하는 것으로 나타났으며, 용출 시험 결과 국내기준 및 RCRA 기준치와 비교하여 볼 때 측정대상항목 모두에서 유해성 물질의 함유량이 극소량으로 나타났으며 혼합으로 인한 유해성분 증가 역시 미미하였다
4. 향후 경량 성토재를 이용한 현장실험이 이루어 진다면 실용화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

(접수일자 : 2002. 3.19)

참 고 문 헌

1. 강성(1997), "파쇄된 발포폴리스티렌을 이용한 경량혼합토의 다짐특성에 대한 연구", 서울대학교 대학원 석사학위논문, pp. 5~36.
2. 김홍택, 방윤경(1996), "지오그리드-페 EPS 조각 혼합 경량토의 마찰 특성", 한국지반공학회지, 제12권 제6호, pp. 163~185.
3. 박준범, 윤현석, 김준섭, 박종화(1998), "다짐효율향상을 위한 계면활성제의 역할", 한국지반공학회 봄학술발표회, pp. 315~320.
4. 신방웅, 박홍규(1997), "토질시험법", 구미서관, pp. 166~173.
5. 어수미(1994), "폐기물 용출시험에 관한 연구", 한국환경위생학회지, 제20권 4호, pp. 72~79.
6. 유기현(1997), "정적다짐법에 의한 노반재의 특성 평가에 관한 연구", 영남대학교 대학원 석사학위논문
7. Bauer, G. E., and Collins, P. S.(1999) "Geotechnical Properties of Lightweight Fill Materials", Civil and Environmental Engineering Conference, pp. II-77~II-84.
8. Otani, J., Mukunoki, and Kikuchi, Y.(1999) "Evaluation of Engineering Property on Light Weight Air Form using X-ray CT Scanner", Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 57~60.
9. Parkkinen, E.(1997), "Utilization of Industrial By-products to Strengthen Soft Clayed and Organic Soils", Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 1701~1704.
10. Head, K. H.(1982), "Manual of Soil Laboratory Testing", Vol. 2, pp. 469~508.
11. 山田純男, 長坂勇二, 西田 登, 白井忠雄(1989), "發泡スチロール片と砂とを混合した輕量土", 土と基礎, Vol. 37, No. 2, pp. 25~30.