

인산석고와 폐 EPS Beads를 혼합한 경량토의 공학적 특성 Engineering Properties of the Light Weight Soil Mixed with Phosphogypsum and Recycled EPS Beads

서동은¹⁾, Dong-Eun Suh, 김영상²⁾, Young-Sang Kim, 이우범³⁾, Woo-Bum Lee,
김원봉¹⁾, Won-Bong Kim, 유봉선⁴⁾, Bong-Sun Yu

1) 전남대학교 건설·환경공학부 석사과정, Graduate Student, Div. of Civil & Env. Eng., Chonnam National University

2) 전남대학교 건설·환경공학부 조교수, Assistant Professor, Div. of Civil & Env. Eng., Chonnam National University

3) 전남대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Div. of Civil & Env. Eng., Chonnam National University

4) 남해화학(주) 영선관리팀 차장, Manager, Namhae Chemical Corp.

SYNOPSIS : The objective of this research is an investigation of engineering properties of weathered granite soil mixed with Phosphogypsum and recycled EPS beads as a light-weighted soil. A series of geotechnical laboratory tests including physical index test, compaction test, CBR test and direct shear test were performed for various mixing ratios. Based on the laboratory test results, it was found that the maximum dry unit weight of the light weight soil ranges 1.46~1.61g/cm³ and the maximum dry unit weight decreases about 11~19.3% with the increase of amount of the recycled EPS beads and the optimum moisture content increase. Since the CBR values of the light weight soil ranges 10.4~18.4%, the light weight soil mixed with Phosphogypsum and recycled EPS beads can be used as a light weight backfill material on the soft soil.

Key words : light weight soil, phosphogypsum, recycled EPS beads

1. 서 론

산업혁명 이후, 생활수준의 향상과 물질적인 풍요로 인하여 보다 나은 삶의 질을 추구하게 되었다. 보다 나은 삶의 질을 추구하기 위하여 지난 수십년동안 산업화와 공업화가 급속하게 진행되어 놀라운 경제성장을 이루게 되었다. 그러나 이러한 경제발전과정에서 자연환경의 훼손 그리고 무절제한 부존자원의 이용으로 인하여 자원의 고갈과 각종 폐기물의 증가를 초래하게 되었다. 부존자원의 고갈과 각종 폐기물의 증가는 자연재해의 증가 그리고 주변환경의 오염 등으로 생태계 파괴를 이르게 되어 국내·외에서 많은 심각한 문제를 야기하고 있다. 이에 대한 해결방법으로 자원의 순환이용이 증가되고 있으며, 산업 부산물의 재활용 및 자원화기술이 개발되고 있다. 비료생산과정에서 산업부산물로 발생하는 인산석고는 전세계적으로 약 15,000만톤, 국내에서는 약 157만톤/년이 발생되고 있다. 현재 인산석고는 시멘트 및 석고보드의 원료에만 제한적으로 재활용되며 생산량의 약 50%가 미활용 단계에 있어 대부분이 석고장에 적치되고 있는 실정이다(남해화학, 2001). 인산석고의 재활용 방안과 관련한 그간의 연구로, 이용수 등(2001)은 인산석고의 공학적·환경적 특성파악을 위한 제반 실험들을 수행하고, 인산석고를 해안매립재, 성토재, 도로노반재, 폐기물매립시설 복토재 등 지반재료로서의 활용가능성에 대한 연구를 수행한

바 있다. 그 결과, 폐기물관리법에 준하여 일반토사류와 인산석고를 중량비 7:3이하로 혼합하여 활용할 경우 환경적으로 유해한 영향이 적으며, 건설재료로 활용이 가능한 것으로 보고하고 있다.

본 연구에서는, 인산석고의 대량이용이 가능하다고 예상되는 도로 및 교대의 성토재료, 각종 뒷채움재 분야로의 활용방안에 대한 실험연구를 수행하였다. 이를 위해 인산석고와 화강풍화토, 폐 EPS 입자를 다양한 비율로 혼합하여 경량혼합토를 제작하였고, 기본물성시험, 다짐시험, CBR시험, 전단강도시험 등의 일련의 실내시험을 실시하여 제작된 경량혼합토에 대한 공학적 특성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 흙시료는 국내에서 가장 널리 분포하고 있는 화강풍화토로 공사가 진행중인 여수 00지역에서 채취하였으며 그 물리적 특성은 표 1에 요약하였다. 인산석고 시료는 석고 매립장에 야적되어 있는 것을 사용하였으며, 이에 대한 기본적인 특성은 기존의 연구결과를 참조하였다. 폐 EPS beads는 기 사용된 EPS 블록을 파쇄하여 직경 0.5~5.0mm 정도의 구형입자 크기로 상품화한 것을 사용하였으며, 단위중량은 0.015~0.026g/cm³ 정도이다. 경량혼합토 실험을 위해 사용된 화강풍화토, 인산석고와 EPS beads의 입도분포 곡선은 그림 1과 같다.

표 1. 실험재료의 물리적 특성

항 목	화강풍화토	인산석고
비중	2.69	2.47
함수비 (%)	10.21	18.17
최대건조밀도 (g/cm ³)	1.81	1.32
최적함수비 (%)	15.24	25.74
균등계수	3.62	3.59
곡률계수	0.87	2.61
통일분류	SP	ML

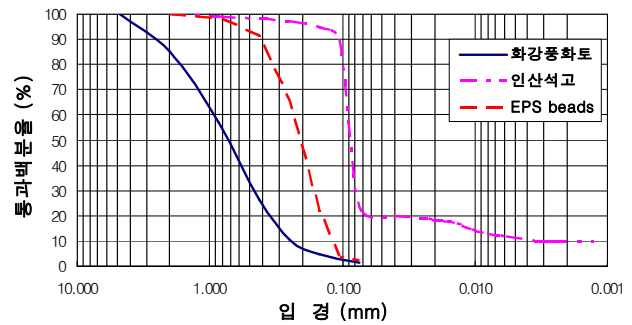


그림 1. 실험재료의 입도분포곡선

2.2 실험방법

본 연구에서는 인산석고, 화강풍화토 및 폐 EPS beads를 각각 다양한 비율로 혼합하여 경량혼합토를 제작하였고, 제작된 시료가 성토재료로 적합한지에 대한 판단을 하기 위하여 공학적 역학특성 분석을 실시하였다. 경량혼합토의 배합비는 폐기물관리법에 준하여 화강풍화토와 인산석고를 중량비 7:3의 비율로 혼합하였다. 폐 EPS beads를 활용한 경량성토재에 관련한 기존의 연구로, 김홍택 등(1996, 2004)과 신방웅 등(2001)은 화강풍화토와 폐 EPS beads를 혼합한 혼합토의 각종 특성시험 등을 통하여 경량성토재료로서의 활용가능성을 제시한 바 있다. 폐 EPS beads의 혼합비는, 그간의 연구결과 및 다양한 예비시험 결과를 참고로 하여 중량비 0.05~0.2%의 범위

표 2. 혼합비별 실험항목

혼합비 (화강풍화토:인산석고)	폐 EPS beads	시험항목
1 : 0	-	다짐시험, CBR시험, 전단시험
7 : 3	-	
	0.05%	
	0.1%	

로 혼합하여 사용하였다. 경량혼합토는 실내다짐시험 결과 얻어진 최대건조단위중량의 95%를 산정하여 CBR시험, 전단시험을 실시하였으며, 함수비는 최적함수비 $\pm 1\%$ 범위 내에서 시료량을 계산하여 시험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 혼합비별 시험항목은 표 2와 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 폐 EPS beads 혼합비율에 따른 다짐특성

본 연구에서 제작된 경량혼합토의 다짐특성을 파악하기 위하여 D다짐을 실시하였다. 그림 2와 표 3은 폐 EPS beads를 일정한 비율로 혼합한 재료에 대한 다짐곡선과 다짐시험 결과를 나타내며, 그림 3과 4는 폐 EPS beads 혼합비에 따른 최대건조밀도 변화, 최적함수비 변화를 도시한 것이다. 시험결과, 최대건조밀도의 범위는 $1.46 \sim 1.61 \text{ g/cm}^3$, 최적함수비의 범위는 $21.91 \sim 24.23\%$ 로 각각 나타났으며, 폐 EPS beads 혼합비율이 증가할수록 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났다. 또한 표 3으로부터 폐 EPS beads 0.2%를 혼합한 경량혼합토의 경우, 순수한 화강풍화토에 비하여 최대건조밀도가 약 19.3% 감소하고 최적함수비는 약 59% 증가하는 것으로 나타났으며, 화강풍화토와 인산석고를 7:3으로 혼합한 시료에 비해서는 최대건조밀도가 약 11% 감소하고 최적함수비는 18.1% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 인산석고만을 혼합하는 경우에도 건조밀도의 감소효과가 나타나지만, 폐 EPS beads에 의한 혼합토의 건조밀도 감소량이 더욱 크게 나타내는 것을 의미한다. 본 연구의 경량혼합토의 경우, 화강풍화토 및 인산석고를 혼합비 7:3(화강풍화토:인산석고)으로 혼합한 경우에 비하여 약 11~19.3% 정도의 하중경감의 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 3. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 다짐시험결과

혼합비 (화강풍화토:인산석고)	폐 EPS beads	$\gamma_{d_{max}}$ (g/cm^3)	OMC (%)
1 : 0	-	1.81	15.24
7 : 3	-	1.64	20.51
	0.05%	1.61	21.91
	0.1%	1.56	22.80
	0.2%	1.46	24.23

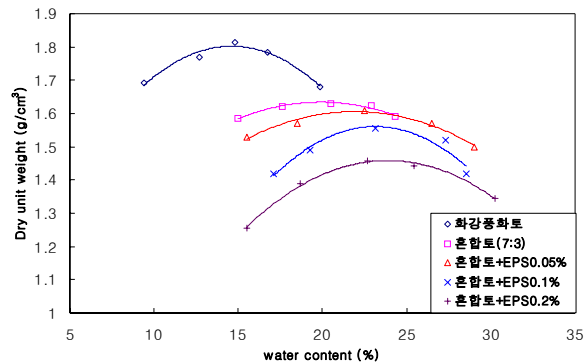


그림 2. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 다짐 곡선

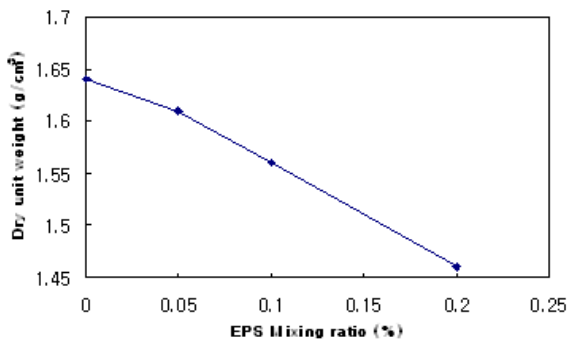


그림 3. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 최대건조단위중량 변화

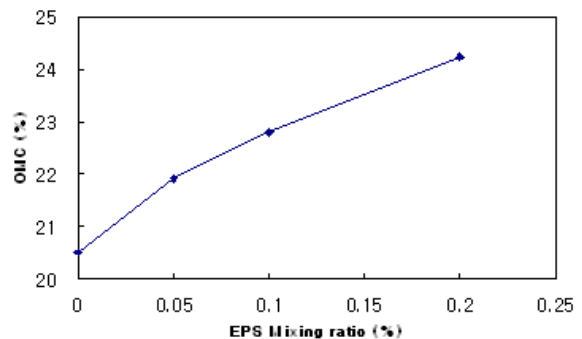


그림 4. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 최적함수비 변화

3.2 폐 EPS beads 혼합비율에 따른 CBR특성

본 연구에서 제작된 경량혼합토를 성토재료 및 뒷채움재로서 활용 가능성을 평가하기 위하여 실내 CBR시험을 수행하였다. 표 4는 폐 EPS beads 혼합비율에 따른 수정 CBR값을 나타내고 있고, 그림 5는 수정 CBR값의 변화경향을 도시하였다. 표 4에서 수정 CBR값을 살펴보면 약 8~18.4%의 범위로 나타났으며, 폐 EPS beads 혼합비율이 증가할수록 수정 CBR값은 감소하는 경향을 나타내었다. 성토재료 및 뒷채움재에 대한 수정 CBR 기준을 살펴보면, 도로설계편람(2000) 및 도로설계기준(2001)에서는 상부노상의 경우 10%, 하부노상은 5%, 뒷채움재의 경우는 10% 이상으로 각각 명시되어 있다. 본 연구에서 대상으로 시험한 경량혼합토들은 모두 수정 CBR값이 10이상으로 나타나 한국도로교통협회(2001)의 기준에 따라서는 성토재료 및 뒷채움재로 충분히 활용이 가능한 것으로 판단된다.

표 4. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 CBR값

혼합비 (화강풍화토:인산석고)	폐 EPS beads	수정 CBR (%)
1 : 0	-	24.0
7 : 3	-	20.1
	0.05%	18.4
	0.1%	15.3
	0.2%	10.4

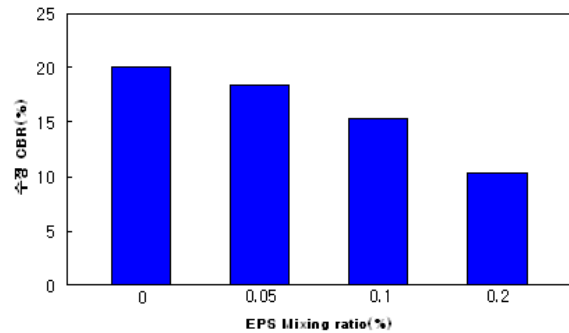


그림 5. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 수정 CBR값 변화

3.3 폐 EPS beads 혼합비율에 따른 전단강도특성

경량혼합토를 대상으로 수행한 직접전단시험의 결과는 표 5와 그림 6에 나타냈으며, 그림 7, 8에는 폐 EPS beads 혼합비율에 따라 점착력과 내부마찰각의 변화를 도시하였다. 표 5에서 화강풍화토와 이에 인산석고를 혼합하였을 때의 시험결과를 살펴보면 점착력 0.28kg/cm²에서 0.21kg/cm²으로 내부마찰각은 39.1°에서 38.8°로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 점착력의 감소효과는 내부마찰각의 감소효과보다 크게 나타나며 이는 인산석고가 실트질 특성을 강하게 나타내기 때문인 것으로 판단된다. 폐 EPS beads를 혼합한 경우 점착력은 0.11~0.19kg/cm², 내부마찰각은 35.4~37.2°의 범위를 나타내고 있고, 그림 7, 8에서 나타난 바와 같이 폐 EPS beads의 혼합비가 증가할수록 점착력 및 내부마찰각은 감소하는 경향을 나타내고 있고 김홍택 등(1996, 2004)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내었다.

표 5. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 직접전단시험 결과

혼합비 (화강풍화토:인산석고)	폐 EPS beads	점착력 (kg/cm ²)	내부마찰각 (°)
1 : 0	-	0.28	39.1
7 : 3	-	0.21	38.8
	0.05%	0.19	37.2
	0.1%	0.14	36.8
	0.2%	0.11	35.4

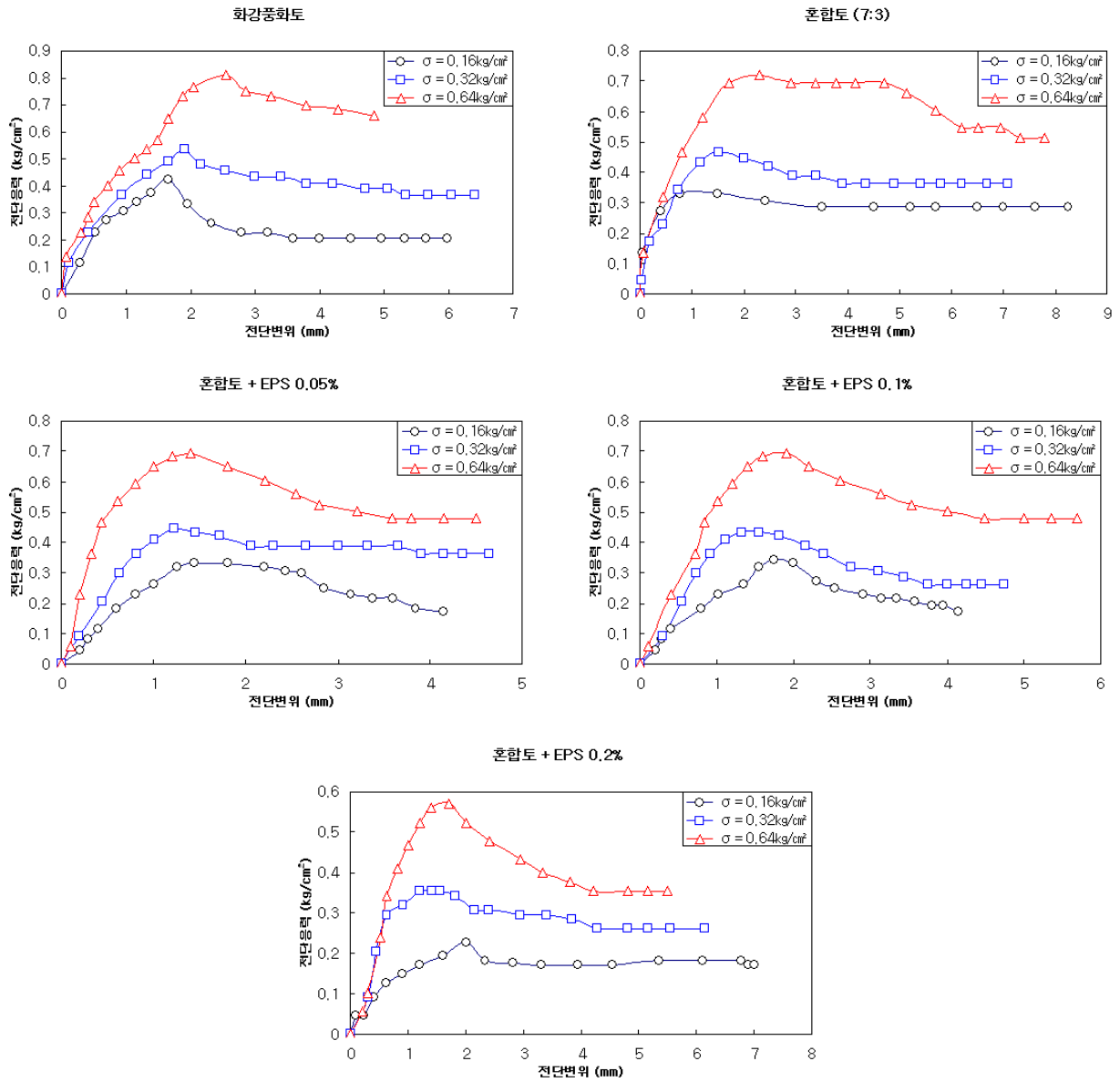


그림 6. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 직접전단시험

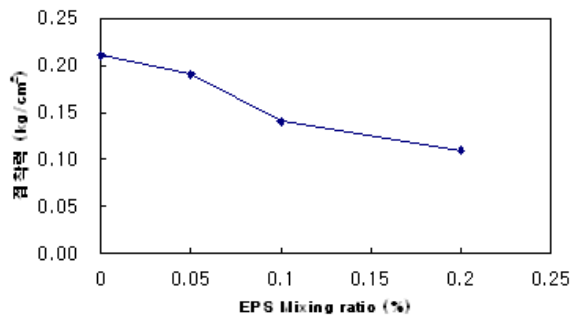


그림 7. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 점착력 변화

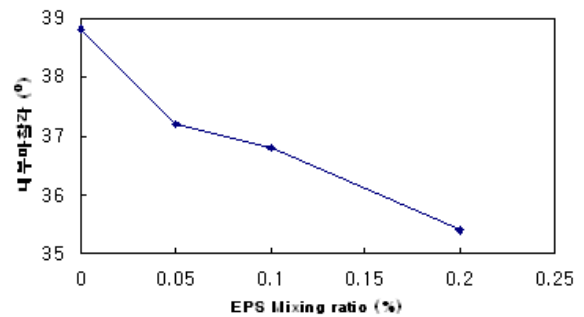


그림 8. 폐 EPS beads 혼합비에 따른 내부마찰각 변화

4. 결론

본 연구에서는 인산석고, 화강풍화토 및 폐 EPS beads를 혼합하여 제작된 경량혼합토를 성토재료 및 뒷채움재로서의 활용 방안에 대하여 공학적 특성을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 화강풍화토와 인산석고의 혼합토에 폐 EPS beads를 혼합하여 제작한 경량혼합토의 최대건조밀도는 약 $1.46\sim 1.61\text{g/cm}^3$ 로 나타났으며, 화강풍화토 및 인산석고 혼합토에 비하여 최대건조밀도가 약 11~19.3%정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 경량혼합토를 성토재료 및 뒷채움재 등으로 활용하였을 경우 하중경감의 효과가 나타날 것으로 판단된다.
- (2) 경량혼합토의 수정 CBR값은 10.4~18.4% 범위로 나타나며 노상 및 뒷채움재로서의 국내 규정을 충족시키는 것으로 나타나 실제 경량 성토재료 및 뒷채움재로 연약지반에서 효과적으로 활용이 가능한 것으로 판단된다.
- (3) 경량혼합토의 직접전단시험 결과, 점착력은 $0.11\sim 0.19\text{kg/cm}^2$, 내부마찰각은 $35.4\sim 37.2$ 를 나타내고 있으며 폐 EPS beads의 혼합비가 증가할수록 화강풍화토에 비해 점착력 및 내부마찰각이 감소하는 경향을 나타낸다. 경량혼합토의 경우, 인산석고의 실트질 특성으로 인해 점착력 감소의 효과가 두드러진 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 남해화학 주식회사와 전남대학교 전남지역환경기술개발센터(EIP)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김홍택, 방윤경(1996), “지오그리드-폐 EPS 조각 혼합경량토의 마찰특성”, 한국지반공학회지, 제 12권 6호, pp.163~183.
2. 김홍택, 방윤경, 윤창진, 박민용(2004), “석회부산물 및 폐 EPS beads를 활용한 지반재료의 공학적 특성에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 20권 2호, pp.97~105.
3. 남해화학주식회사(2001), “인산부산물석고의 매립성토재 및 지반재료로서 유효활용에 관한 연구”.
4. 신방용, 박중서, 이봉직, 이종규(2001), “폐 스티로폴을 활용한 경량성토재의 공학적 특성”, 대한토목학회논문집, 제 21권 2호, pp169~176.
5. 이용수, 정형식, 정하익(2001), “성토재료로서 인산석고의 공학적·환경적 특성”, 한국지반공학회논문집, 제 17권, 4호, pp.331~339.
6. 한국도로교통협회(2001), “도로설계기준”, pp.98~104.