

페타이어 분말을 이용한 혼합경량토의 압축특성 연구

Compression Characteristics of Waste Tire Powder-Added Lightweight Soil

강효섭¹⁾, Hyo-Sub Kang, 김윤태²⁾, Yun-Tae Kim

¹⁾ 부경대학교 해양공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

²⁾ 부경대학교 해양공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

SYNOPSIS : The purpose of this study was to research on compressibility characteristics of waste tire powder-added lightweight soil(TLS) for recycling dredged soil, bottom ash and waste tire. The TLS used in this experiment consists of dredged soil, cement, waste tire powder and bottom ash. Test specimens were prepared with various content of waste tire powder ranged from 0% to 100% at 25% intervals by the dried weight of dredged soil. Several series of one-dimensional consolidation tests were carried out. Based on the experimental results, as the waste tire powder increased, the swelling index of TLS increased. The compression index and swelling index of the TLS with bottom ash content showed lower value than without bottom ash. Then, compressibility characteristics of TLS were strongly influenced by mixing conditions of waste tire powder content and bottom ash content.

Keywords : compressibility, dredged soil, lightweight soil, one-dimensional consolidation test, recycling, waste tire powder

1. 서론

최근 전세계적으로 환경적, 사회적으로 문제가 되고 있는 산업폐기물을 지반공학적 재료로 재활용하기 위한 관심이 선진국을 중심으로 증대되고 있는 추세이다. 따라서 국내에서도 천연골재의 부족과 가격상승으로 인해 산업폐기물을 재활용할 수 있는 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 특히 준설토와 페타이어, 석탄회 등은 발생량이 매년 증가하고 있다. 페타이어는 경량성토재로 활용될 수 있으며, 석탄회는 강도보강 측면에서 지반공학적 재료로 활용 가능성이 입증되었다(Pierce과 Blackwell, 2003; Cetin 등, 2006; 김윤태 등, 2007).

준설토는 국내의 연안 해안을 중심으로 대규모 개발공사가 진행되고 있으며, 이와 관련하여 해마다 많은 양의 준설토가 발생되고 있다. 아울러 통항로 확보를 위한 항로 유지준설과 오염해역의 환경복원을 위한 청소준설로 인하여 준설토는 지속적으로 발생량이 증가할 것으로 예상된다. 또한 산업의 고도 성장과 국민 경제생활의 향상과 더불어 자동차수는 매년 증가하고 있으며, 이에 따라 우리나라에서는 매년 약 2000만본의 타이어가 발생되어 약 70%가 회수되고 있는 것으로 나타났다. 회수된 페타이어의 70%가 재활용 되고 있으나, 회수나 처리되지 못한 페타이어들은 환경적인 사회문제를 야기하고 있다. 따라서 페타이어를 다방면에 재활용할 수 있는 연구가 절실히 요구되고 있다. 한편 화력발전소에서 부산물로 발생하는 석탄회량도 증가하여 2010년경에는 발생량이 약 600만 톤에 이를 것으로 예상되며, 이 중에 저회(bottom ash)는 일부만 대체 잔골재 등으로 재활용되고 대부분은 단순매립 및 투기되는 실정이다(김윤태 등, 2007). 앞으로 에너지의 수요는 더욱 증가하고 석탄은 국내 유일의 화석연료이기 때문에 석탄회 발생량은 계속 늘어날 전망이므로 저회를 재활용할 수 있는 방안이 요구되어진다.

기존의 경량토 연구에서는 경량성을 확보하기 위하여 기포를 이용한 연구가 많이 진행되어 왔으나, 기포는 배합재료와 배합시간, 양생조건 등에 따라서 소포되는 문제점을 야기할 수 있다. 또한 시공전에 현장에서 직접 발포해야 하는 공간적인 제약이 있다. 따라서 본 연구에서는 경량성을 확보할 수 있는 재료인 페타이어와 준설토 및 저회를 동시에 재활용할 수 있는 방안을 모색하였다. 김운태와 강효섭(2008a, 2008b)은 페타이어 분말을 이용한 페타이어 혼합경량토를 제작하여 일축압축시험, 탄성파시험 및 실내시험 등을 통하여 역학적 특성에 대한 연구를 수행하였고, 또한 중금속 오염에 대한 환경적 영향에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다.

이러한 페타이어를 이용할 경우 페타이어가 가지고 있는 압축성 및 탄성적인 특성과의 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 페타이어 분말이 혼합된 페타이어 혼합경량토에 대한 압축특성에 대하여 파악하고자 하였다. 이를 위해 압밀시험을 통해 페타이어 분말의 혼합 함량에 따른 압축특성과 저회의 혼합유무에 따른 페타이어 혼합경량토의 압축특성을 파악하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 시험재료 및 특성

본 연구에 사용된 준설토는 부산신항 배후부지에서 채취된 것으로 기본적인 물리적 특성은 실내 물성 시험을 통해 파악하였다. 준설토 물성결과는 표 1과 같으며, 비중은 2.62로 통일분류법(USCS)으로 분류하면 CL로 나타났다. 그림 1의 입도분석 결과에서 보듯이 준설토 시료는 No.200 체 통과율이 81.2%로 점토성분에 실트가 함유된 실트질 점토로 나타났다.

표 1. 준설토의 물성시험 결과

초기 함수비 (%)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	No.200체 통과율(%)	USCS
57.5	39.2	18.5	2.62	81.2	CL

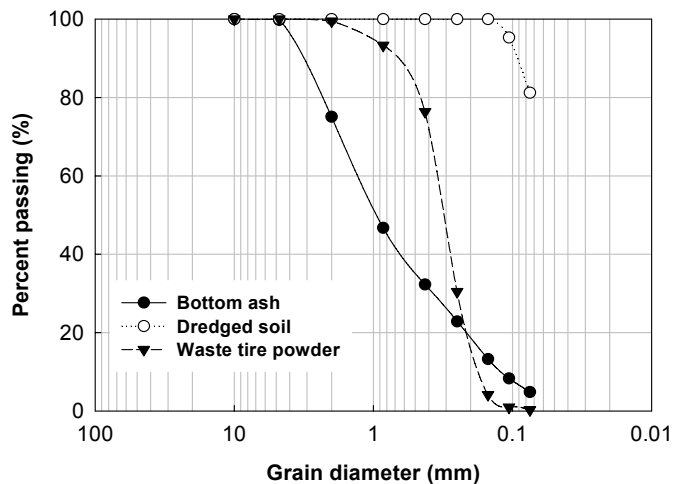


그림 1. 각 재료의 입도분포곡선

저회는 삼천포 화력발전소에서 발생한 것으로 균등한 공시체 제작을 위해 No.4 체에 통과시켜 자갈크기의 입자를 배제시켜 이용하였다. 또한 XRF(X-ray Fluorescence)와 XRD(X-ray Diffractogram)를 통

해 저회의 화학성분 분석 및 주요 결정상을 파악하였다. 표 2는 XRF 분석 결과로부터 구한 저회의 화학적 성분을 나타낸 것으로 주요성분이 실리카(SiO_2)와 알루미나(Al_2O_3)성분이 크게 함유된 것으로 확인되었다. 또한 그림 2와 같이 XRD분석 결과로부터 얻은 주요결정상은 Quartz(SiO_2)와 Mullite($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)로 나타났다. 저회의 특성은 연소되는 석탄의 종류와 연소조건 등에 의존하며, 같은 발전소에서 발생한 저회라도 발생한 시간이 다르면 성분이 다른 특징이 있다(Kumar과 Stewart, 2003). 저회의 화학적 구성성분 중 가장 많은 양을 차지하는 SiO_2 는 일반적으로 시멘트 수화시 생성되는 수산화칼슘과 상온에서 결합하여 불용성의 안정된 규산칼슘을 생성시켜 장기압축강도를 증진시킨다. 이처럼 저회의 함량과 재령일에 따른 일축압축강도 시험을 실시한 결과에서 재령일과 저회의 함량이 증가함에 따라 일축압축강도가 증가하는 것으로 연구된 바 있다(김윤태 등, 2007).

표 2. 저회의 화학성분(단위: %)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	SO_3	K_2O	TiO_2
49.8	18.2	10.4	13.9	3.52	0.69	0.55	1.17	0.96

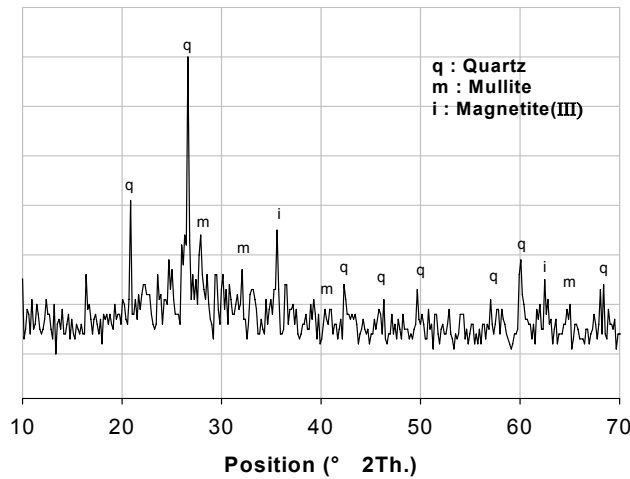


그림 2. XRD분석 결과

페타이어 분말은 C사에서 제조된 타이어 분말로서 상온에서 절단 분쇄된 타이어 조각을 동결조(Freezer, -120°C)에 투입하여 유리온도($T_g = -68^\circ\text{C}$) 이하에서 동결 분쇄한 것이다. 그림 3과 같이 실물 사진과 50배 확대한 SEM 분석을 통해 나타내었다. 입도분포를 통해 나타낸 입자의 크기는 $0.2 \sim 0.8\text{mm}$ 이다. 페타이어 분말의 비중은 1.13이며, 단위중량은 5.39kN/m^3 으로 나타났다. Federal Highway Administration(1998)은 페타이어의 형태와 입경크기에 따라 Shredded tire, Chipped tire, Ground rubber 및 Crumb rubber로 분류하고 있다. 본 연구에서 이용한 페타이어 종류는 Crumb rubber에 해당된다.

2.2 시험조건 및 방법

저회의 혼합유무와 페타이어 분말 함량에 따른 압축 특성을 파악하기 위해 표 3과 같이 시험조건 및 배합비율을 달리 적용하였으며, 이때의 재료별 함량은 건조된 준설토 중량을 기준으로 하여 결정되었다. 준설토 초기 함수비, 시멘트 및 저회의 함량은 단위중량 및 유동특성을 고려한 예비시험 결과를 바탕으로 결정되었으며, 저회의 혼합유무에 따라 페타이어 분말 함량을 0%에서 100%까지 25%씩 증가시켜 페타이어 혼합경량토 공시체를 제작하였다. 그림 4는 페타이어 분말 함량에 따른 단위중량을 나타낸다. 저

회가 혼합된 페타이어 혼합경량토의 단위중량은 페타이어 분말의 함량에 따라 약 $15\text{kN/m}^3 \sim 12\text{kN/m}^3$ 의 범위를 나타내고 있고, 저회 혼합되지 않은 경우에는 약 $14\text{kN/m}^3 \sim 11\text{kN/m}^3$ 로 선형적으로 감소한다. 저회 혼합유무에 따라 약 1kN/m^3 의 단위중량 차이를 보이며, 페타이어 분말 함량이 0%에서 100%로 증가함에 따라 약 20%의 단위중량이 감소하는 것으로 나타났다.

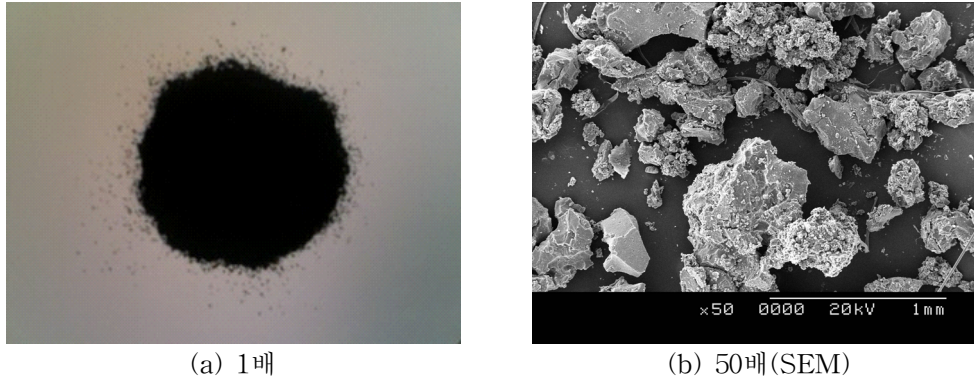


그림 3. 페타이어 분말

표 3. 시험조건 및 배합비율(건조 준설토 중량 기준)

시험 조건	배합 비율
준설토 초기 함수비(Wi)%	140
시멘트 함량(Ci)%	20
저회 함량(BAi)%	0, 100
페타이어 분말 함량(WTi)%	0, 25, 50, 75, 100
양생기간(day)	28
공시체 양생조건	대기 양생

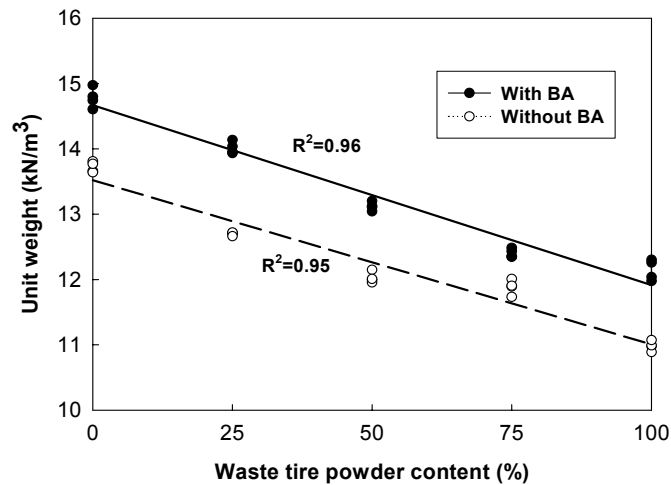


그림 4. 페타이어 분말 함량에 따른 단위중량 관계

저회의 혼합유무와 페타이어 분말 함량에 따른 압축특성을 파악하기 위해 일차원 표준압밀시험을 실시하였다. 압밀시험용 공시체는 지름 60mm, 높이 20mm인 압밀링을 이용하여 제작하였다. 그림 5는 본 연구에 사용된 표준압밀시험기의 개념도로서 변위와 간극수압의 측정이 가능하고 자료는 자동적으로 컴퓨터에 저장되고 측정할 수 있다.

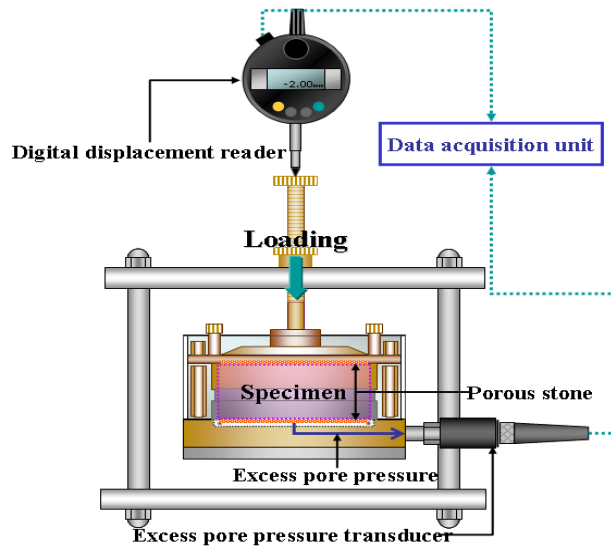
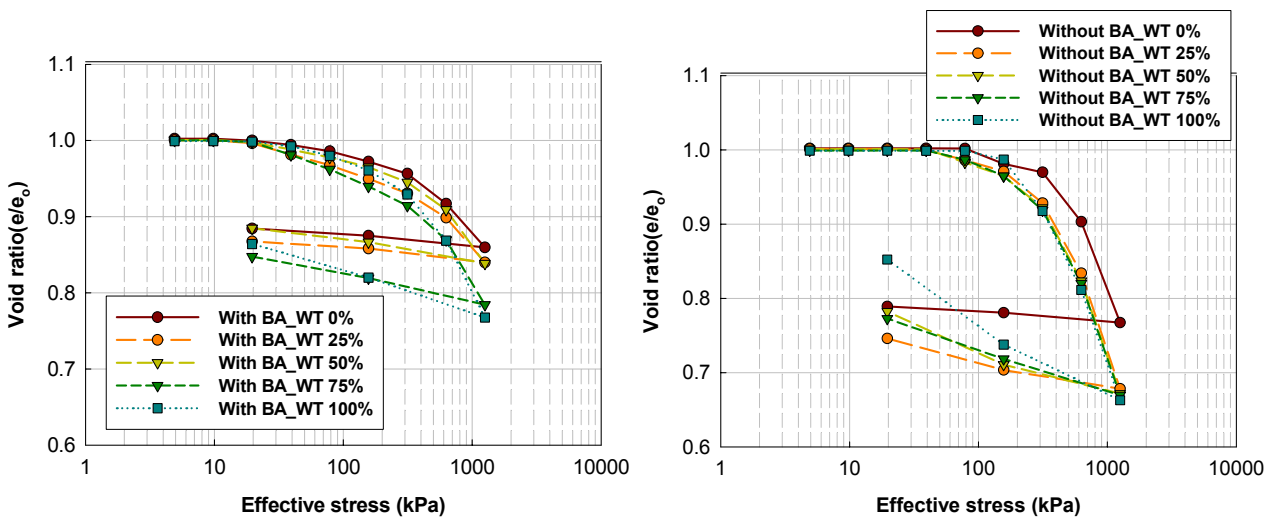


그림 5. 표준압밀시험기 개념도

3. 시험 결과 및 분석

3.1 간극비-하중 곡선

그림 6은 압밀시험을 통해 얻어진 페타이어 혼합경량토의 $e-\log\sigma$ 곡선을 나타내고 있다. 페타이어 혼합경량토의 간극비를 초기간극비로 나누어 간극비의 변화를 정규화 하였다. 그림 6(a)은 저회가 혼합되지 않은 경우의 $e-\log\sigma$ 곡선을 나타내고 있고, 그림 6(b)은 저회가 혼합된 경우의 $e-\log\sigma$ 곡선을 나타내고 있다. 그림 6(a)의 저회가 혼합된 경우를 살펴보면, 페타이어 분말 함량이 증가함에 따라 페타이어 혼합경량토의 $e-\log\sigma$ 곡선이 하향으로 이동하며, 간극비의 변화폭이 커짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 그림 6(b)의 저회가 혼합되지 않은 경우에서도 동일하게 나타나고 있다. 또한 전체적으로 저회가 혼합되지 않은 경우 $e-\log\sigma$ 곡선의 간극비 변화폭이 저회가 혼합된 경우 보다 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 페타이어 혼합경량토의 $e-\log\sigma$ 곡선을 통해 페타이어 분말 함량과 저회의 혼합유무에 따라 압축특성에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 페타이어 혼합경량토(With Bottom Ash)

(b) 페타이어 혼합경량토(Without Bottom Ash)

그림 6. 페타이어 혼합경량토의 $e-\log\sigma$ 곡선

3.2 압축특성

그림 7은 저희의 혼합유무와 페타이어 분말 함량에 따른 페타이어 혼합경량토의 압축지수 관계를 나타내고 있다. 저희가 혼합된 페타이어 혼합경량토의 경우 페타이어 분말 함량이 증가함에 따라 압축지수는 0.12~0.18의 범위를 보이며, 저희가 혼합되지 않은 페타이어 혼합경량토의 압축지수는 0.60~0.40의 범위를 나타내었다. 저희가 혼합되지 않은 경우가 혼합된 경우보다 전체적으로 약 3.5배 큰 압축지수를 갖는 것으로 나타났다. 저희의 혼합이 압축특성 개선에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 저희의 조립질적인 입자의 특성과 저희 속에 포함된 실리카(SiO_2) 성분의 화학적 반응으로 인해 압축특성 개선에 영향을 주는 것으로 판단된다.

그림 8은 저희의 혼합유무와 페타이어 분말 함량에 따른 페타이어 혼합경량토의 팽창지수를 나타내고 있다. 페타이어 분말 함량에 따른 팽창지수는 저희가 혼합된 경우 0.01~0.03의 범위를 나타내고 있고, 저희가 혼합되지 않은 경우에는 0.02~0.06의 범위를 나타내고 있다. 페타이어 분말 함량이 증가함에 따라 팽창지수는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 저희가 혼합되지 않은 경우가 혼합된 경우에 비해 평균적으로 약 50% 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 페타이어 분말 혼합 함량이 팽창지수에 영향을 주는 것으로 나타났으며, 저희의 혼합으로 인해 페타이어 혼합경량토의 팽창거동을 억제하는 효과를 가져다주는 것으로 나타났다.

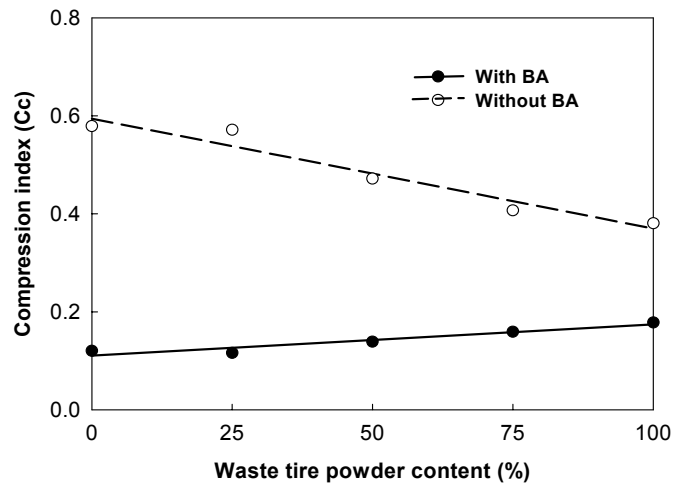


그림 7. 페타이어 분말 함량에 따른 압축지수 관계

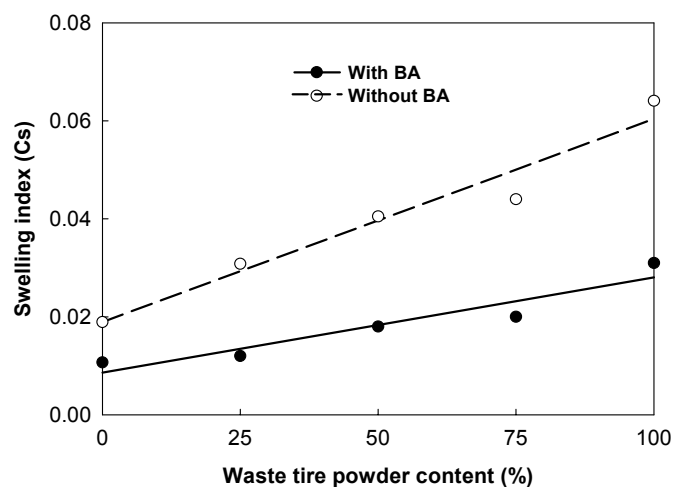


그림 8. 페타이어 분말 함량에 따른 팽창지수 관계

Seda 등(2007)은 흙과 페타이어 분말을 혼합한 혼합토의 압축지수와 팽창지수는 페타이어 분말이 혼합되지 않은 흙에 비해 증가하며, 팽창압은 감소한다고 나타내었다. 일반적으로 페타이어 분말을 혼합할 경우 압축성이 증가한다. 또한 시멘트로 처리된 혼합토는 시멘트의 고화작용에 의해서 압축성이 감소한다. 모래, 시멘트 및 페타이어 분말을 혼합한 혼합토의 연구결과에서 압축지수는 0.08~0.15, 팽창지수는 0.006으로 작은 값을 나타내었다(Wu과 Tsai, 2009).

표 4는 본 연구에서 사용된 준설풀토의 채취지역과 동일한 지역에서 채취한 부산점토의 압축지수 및 팽창지수를 페타이어 혼합경량토와 비교하여 나타낸 결과이다. 부산점토에 비해 압축지수와 팽창지수는 작은 값을 나타내었다. 페타이어 분말 혼합으로 인해 압축성이 증가되지만, 시멘트의 고화작용으로 인해 압축성 개선에 영향을 주고 있음을 나타내고 있다.

표 4. 부산점토와 페타이어 혼합경량토의 압축 및 팽창지수 비교

분류	압축지수(C_c)	팽창지수(C_s)
부산점토	0.30~1.20	0.03~0.08
페타이어 혼합경량토(저회 포함)	0.12~0.18	0.01~0.03
페타이어 혼합경량토(저회 미포함)	0.40~0.60	0.02~0.06

3.3 투수계수

그림 9는 페타이어 혼합경량토의 압밀시험을 통해 얻어진 저회의 혼합유무와 압밀하중에 따른 투수계수를 나타내고 있다. 저회가 혼합되지 않은 경우가 혼합된 페타이어 혼합경량토에 비해 투수계수는 전체적으로 약 40% 큰 투수계수 값을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같이 조립질인 저회가 포함된 페타이어 혼합토의 투수계수가 더 작게 나타난 이유는 페타이어 혼합경량토의 간극이 저회의 화학적 반응 즉, 포졸란 반응으로 인해 저회가 포함되지 않은 경우보다 더 견고해졌기 때문인 것으로 판단된다.

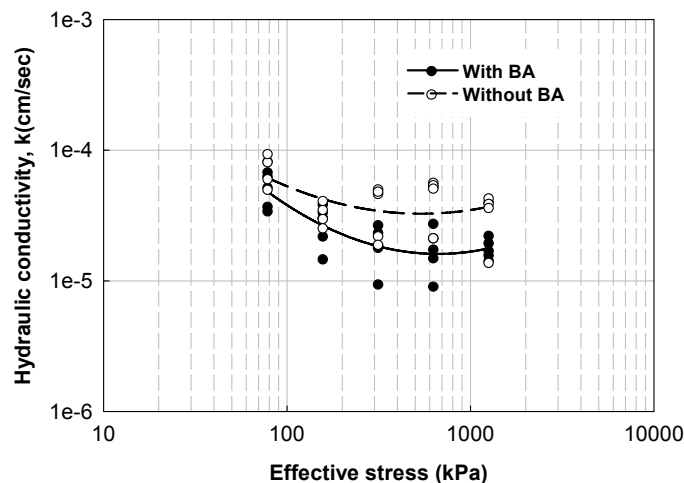


그림 9. 페타이어 혼합경량토의 투수계수

4. 결론

본 연구에서는 페타이어 분말을 혼합한 페타이어 혼합경량토를 제작하여, 저회의 혼합유무와 페타이어 분말 함량에 따른 압축특성을 파악하기 위해 일차원 압밀시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 페타이어 분말 함량이 증가함에 따라 페타이어 혼합경량토의 $e - \log \sigma$ 곡선은 하향으로 이동하며, 간극비 변화폭이 커지는 것으로 나타났다. 또한 저회가 혼합되지 않은 경우 $e - \log \sigma$ 곡선의 간극비의 변화폭이 저회가 혼합된 경우 보다 더 크게 나타났다.
- (2) 페타이어 혼합경량토의 압축지수는 저회가 혼합되지 않은 경우가 혼합된 경우에 비해 전체적으로 약 3.5배 큰 값을 나타내었다. 저회의 조립질적인 입자의 특성과 저회 속에 포함된 실리카 성분의 화학적 반응으로 인해 압축특성개선에 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (3) 페타이어 혼합경량토의 팽창지수는 일반적인 점토에 비해 작은 값을 나타내었으며, 페타이어 분말 함량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 저회가 혼합되지 않은 페타이어 혼합경량토가 혼합된 경우에 비해 약 50% 큰 팽창지수를 나타내었다.
- (4) 페타이어 혼합경량토의 투수계수는 저회가 미혼합된 페타이어 혼합경량토가 혼합된 경우에 비해 약 40% 큰 투수계수를 갖는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었으며(KRF-2006-311-D00877), 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김운태, 한우중, 정두회(2007), "준설토와 Bottom Ash 재활용을 위한 복합지반재료 개발", **한국지반공학회 논문집**, 제 23권, 제 11호, pp.77~85.
2. 김운태, 강효섭(2008a), "페타이어 분말을 이용한 혼합경량토의 역학적 특성 연구", **대한토목학회 논문집**, 제 28권, 제 4C호, pp.247~253.
3. 김운태, 강효섭(2008b), "유동성 뒷채움재인 페타이어 혼합경량토에 대한 실험적 연구", **한국해양공학회지**, 제 22권, 제 5호, pp.112~118.
4. Cetin, H., Fener, M. and Gunaydin, O.(2006), "Geotechnical Properties of Tire-Cohesive Clayey Soil Mixtures as a Fill Material", *Engineering Geology*, 88, pp.110~120.
5. Federal Highway Administration(FHWA)(1998), "User Guidelines for Waste and Byproduct materials in pavement construction", FHWA-RD-97-148, *Federal Highway Administration*, Washington, D. C. (<http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/index.htm>).
6. Kumar, S. and Stewart, J.(2003), "Evaluation of Illinois Pulverized Coal Combustion Dry Bottom Ash for Use in Geotechnical Engineering Applications", *Journal of Energy Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp.42~55.
7. Pierce, C. E. and Blackwell, M. C.(2003), "Potential of Scrap Tire Rubber as Lightweight Aggregate in Flowable Fill", *Waste Management*, 23, pp.197~208.
8. Seda, J. H., Lee, J. C. and Carraro, J. A. H.(2007), "Beneficial Use of Waste Tire Rubber for Swelling Potential Mitigation in Expansive Soils." *New Peaks in Geotechnics: Proc. of sessions of Geo-Denver 2007*, ASCE, GSP No. 235, pp.5~13.
9. Wu, J. Y. and Tsai, M. (2009), "Feasibility study of a soil-based rubberized CLSM", *Waste Management*, Vol. 29, No. 2, pp.636~642.