

페타이어 분말을 이용한 혼합경량토의 역학적 특성 연구

Mechanical Properties of Waste Tire Powder - Added Lightweight Soil

김윤태* · 강효섭**
Kim, Yun Tae · Kang, Hyo Sub

Abstract

This paper investigates the mechanical characteristics of waste tire powder-added lightweight soil in which dredged soils, waste tire powder and bottom ash were reused. In this study, 5 groups of soil samples were prepared with varying contents of waste tire powder ranged from 0% to 100% at 25% intervals by the dredged soil weight. The mixed soil samples were subjected to unconfined compression and elastic wave tests to investigate their unconfined compressive strengths and dynamic properties. Test results showed that the unconfined compressive strength and unit weight decreased as the waste tire powder contents increased, but axial strain at failure increased. Also stress-strain relationship of waste tire powder-added lightweight soil showed a ductile behavior rather than a brittle behavior. The result of elastic wave tests indicated that the higher waste tire powder content, the lower elastic wave velocity and the lower shear modulus (G).

Keywords : waste tire powder, dredged soil, bottom ash, unconfined compression test, elastic wave test

요 지

본 연구에서는 준설토, 페타이어 분말 및 저회(bottom ash)를 재활용한 페타이어 분말 혼합경량토의 역학적 특성을 고찰하였다. 본 실험에서 페타이어 분말의 함량은 건조 준설토 중량대비 0%에서 100%까지 25%간격으로 변화시켜 5개의 공시체를 준비하였다. 혼합된 공시체는 일축압축시험, 탄성과 시험을 수행하여 강도와 지반정수들을 구하였다. 실험결과 페타이어 함량이 증가함에 따라 일축압축강도와 단위중량은 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 파괴시 축변형률은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 페타이어 분말의 함량이 증가할수록 페타이어 혼합경량토의 응력-변형률 곡선은 취성적 거동보다는 연성적 거동을 나타내었다. 탄성과 시험에서는 페타이어 함량이 증가함에 따라 탄성과 속도와 전단탄성계수는 감소하는 성질을 나타내고 있다.

핵심용어 : 페타이어 분말, 준설토, 저회, 일축압축 시험, 탄성과 시험

1. 서 론

최근 환경적으로 문제가 되고 있는 폐기물을 지반공학적 재료로 재활용하기 위한 관심이 선진국을 중심으로 증대되고 있는 추세이며, 우리나라에서도 천연골재의 부족과 가격 상승으로 인해서 폐자원의 재활용이 시급한 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 연안개발 및 항만건설 등의 대규모 개발공사, 선박의 대형화로 인한 항로준설과 해양생태계 환경복원 및 조성 등으로 인하여 지속적으로 증가할 것으로 예상된다(김윤태 등, 2005). 산업의 고도성장과 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 재생타이어 재조용, 시멘트 킬른 등의 열 이용, 건류소각용, 고무분말, 토목공사 매립용 등으로 사용되어지고 있으나, 회수나 처리되지 못한 페타이어들은 환경적인 사회문제를 야기하고 있다. 따라서 페타이어를 다방면에 재활용할 수 있는 연구가 절실히 요구되고 있다. 또한 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 전망이다. 그러므로 저회를 재활용할 수 있는 방안이 요구되어진다.

*정회원 · 교신저자 · 부경대학교 해양공학과 조교수 (E-mail : yuntkim@pknu.ac.kr)
**부경대학교 대학원 해양공학과 석사과정 (E-mail : monkle0@hanmail.net)

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. 이를 위해 낙동강 하구 지역에 발생하는 준설토에 화력발전소 부산물인 저회와 분쇄된 페타이어 분말을 이용하여 페타이어-저회 혼합경량토를 제작하여, 일축압축시험과 탄성파시험 등을 수행함으로써 단위중량, 응력-변형률, 압축강도, 할선탄성계수, 탄성파속도 등과 같은 페타이어-저회 혼합경량토의 역학적 특성을 고찰하였다.

2. 국내외 준설토, 페타이어 및 석탄회의 활용 및 연구현황

폐자원 활용에 대한 국외의 연구를 살펴보면 Tsuchida 등(1996)은 경량혼합토 성토재료에 대한 연구와 수중에서 타설된 경량혼합토의 거동을 연구하였고, Otani 등(2002)은 X-ray CT scanner를 통하여 SGM(Super Geo-Material)에 대한 특성을 연구한 바 있다. 준설토 재활용기술이 발달한 선진국에서는 준설토를 단순 매립하기 보다는 해양환경 복원 및 인공서식지 조성, 친환경적인 친수개발 등의 건설재료로 적극 재활용하고 있다. 그 한 예로 1996년 일본에서 고베항의 Port Island에 대규모 복원사업의 일환으로 준설토를 이용한 약 20,000m³의 경량혼합토를 적용한 바 있다. 저회의 재활용에 관한 국외 연구동향을 살펴보면 저회를 아스팔트 포장 충전재, 콘크리트 잔골재, 또는 건설공사 시 성토재 등과 같이 저회를 단순건설재료로 재활용하기 위한 연구(Churchill과 Amirkhani, 1999; Ghafouri과 Buchloc, 1996; Kim 등, 2005)들이 수행되었다. 페타이어 재활용에 관한 연구를 살펴보면, Pierce과 Blackwell (2003); Cetin, 등(2006), Foose 등(1996)은 일축압축, 직접전단, 투수시험 등을 통해 흙과 페타이어 조각을 혼합한 혼합토를 경량성이 확보된 유동성 뒤채움재료나 교대 뒤채움, 도로 충전재 등으로 재활용할 수 있다고 밝히고 있다. Lok 등(2006)은 모래와 타이어 혼합토에 대한 삼축시험 결과와 쌍곡선 모델해석 결과를 비교함으로써 최적배합 비율을 제시한 바 있다. 또한 Tatlisoz 등(1998)은 전단시험과 Pull-out test 통하여 토목공사에서 보강재로 쓰이는 토목섬유와 페타이어 혼합토의 상관성과 특성을 살펴보았다. Lee 등(1999)은 페타이어 혼합토에 대하여 여러 실험과 유한요소해석을 바탕으로 페타이어 혼합토를 경량성 뒤채움재료로 사용할 수 있음을 밝히고 있다. 미국에서는 최근 30년 동안 연약지반 위에 도로성토 시공에 있어서 안정성을 확보하기 위해서 페타이어를 사용해 왔으며, 미네소타의 경우 50개소 이상의 성공적인 시공실적을 보유하고 있다.

전 세계적으로 폐자원을 재활용하기 위한 관심이 고조되는 상황에서 국내의 경우 준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도특성에 관한 연구(김수삼 등, 2002), 준설토를 활용한 경량 혼합토의 역학적 특성 연구(윤길림과 김병탁, 2002) 등이 수행되었다. 준설토와 기포를 이용한 경량혼합토에 대한 연구(김주철과 이종규, 2002; 윤길림 등, 2004)를 통하여 인공지반의 개량특성에 관한 연구가 수행된 바 있다. 석탄회에 대한 연구를 보면, 저회를 대체골재로 활용한 연구(김동환 등, 2004)와 저회를 이용한 그라우팅재 연구(도영근 등, 2006) 등이 수행되었다. 조호영 등(2007)은 PH 농도에 따른 저회 용출시험을 수행하여 환경적인 영향을 평가하였다. 시험결과 중금속 오염에 대한 국내·외 수질기준과 비교하여 저회를 건설재료로 이용할 때 환경오염에 대한 영향이 미미한 것으로 나타났다. 또한 도영근 등(2006)도 용출시험을 통해 중금속 오염농도가 오염물질 배출허용 기준치에 적합한 것으로 나타났다.

페타이어 재활용에 대한 연구를 살펴보면, 김진만 등(2004)은 페타이어 조각을 옹벽 뒤채움재의 활용방안에 대한 연구를 하였고, 엄준길 등(1998)은 페타이어를 이용해 탄성과 투수성을 갖는 포장재로서의 활용할 수 있는지에 대한 연구한 바 있다. 또한 김진만 등(2006)은 철도진동저감 방안으로 페타이어 조각을 이용해 진동감소 효과를 평가하기 위한 실험모형실험을 실시하였고, 손기상(2005)은 페타이어를 레미콘에 혼합하여 건설자재로서 재활용하기 위한 압축, 인장, 휨강도시험을 실시하였다. 이러한 폐 재료의 지반공학적 재료의 이용에 관심이 증대되고 있는 추세이지만 선진국에 비해 대규모 활용에 관한 연구나 시공실적은 아직 미미한 실정이다.

3. 시험재료 및 물리적 특성

3.1 준설토

본 연구에서 사용된 준설토 시료는 부산신항 배후부지에서 채취된 준설토로서 기본적인 물리적 특성은 실내 물성실험을 통하여 파악되었다. 그 결과는 표 1에 나타난 바와 같이 준설토의 액성한계는 39.2%, 준설토의 현장함수비 54.7%, 비중은 2.60, 소성지수는 18.5%로서 준설토를 통일분류법(USCS)으로 분류하면 CL로 나타났다. 입도분석 결과는 그림 1(a)와 같으며, No.200 체 통과율이 81.2%로 점토성분에 실트가 함유된 실트질 점토로 확인되었다.

3.2 저회(bottom ash)

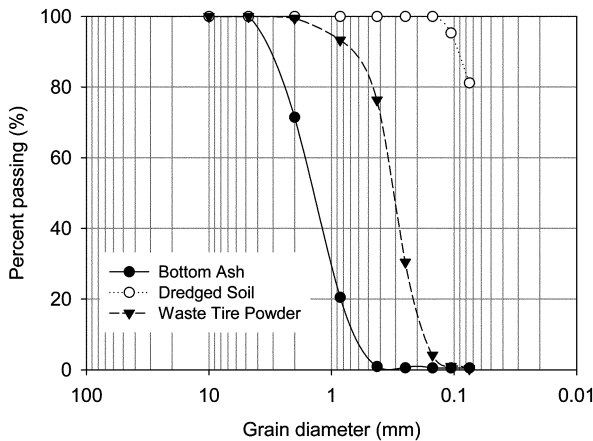
저회는 화력발전소에서 발생된 석탄회 중 바닥에 남은 재료로서 입도분포는 일반적으로 자갈에서 모래까지 분포하며 실트와 점토 크기의 입자는 매우 드물다. 저회의 특성은 연소되는 석탄의 종류와 연소조건 등에 의존되며 같은 발전소에서 발생한 저회라도 발생한 시간이 다르면 성분이 다른 특징이 있다(Kumar과 Stewart, 2003). 본 연구에서 사용한 저

표 1. 준설토의 물성시험 결과

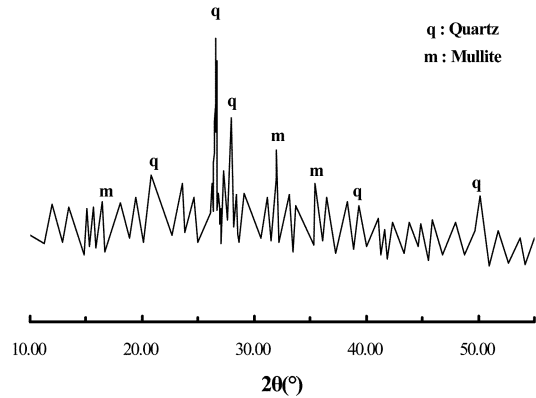
초기 함수비 (%)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	비중	No.200체 통과율(%)	USCS
54.7	39.2	18.5	2.60	81.2	CL

표 2. 저회의 화학성분

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
49.8	18.2	10.4	13.9	3.52	0.69	0.55	1.17	0.96



(a) 입도분포곡선



(b) X-ray Diffractogram

그림 1. 각 재료의 입도분포곡선 및 저회 XRD 분석 결과

회는 삼천포 화력발전소에서 발생한 것으로서 공시체 제작을 위해 #4번 체에 통과시켜 자갈크기의 입자를 배제시켰으며 입도 분포곡선은 그림 1(a)와 같으며, 유효입경이 0.6mm, 균등계수(C_u)는 2.42, 곡률계수(C_c)는 1.15로서 통일 분류법에 의하면 입도분포가 불량한 모래로 나타났다.

본 연구에서는 XRF(X-ray Fluorescence)와 XRD(X-ray Diffractogram)를 통하여 저회의 화학성분 분석 및 주요 결정상을 조사하였다. 표 2는 XRF 분석 결과로부터 구한 저회의 화학적인 구성성분을 나타낸 것이다. 또한 XRD 분석 결과로부터 그림 1(b)와 같이 주요 결정상이 Quartz(SiO₂)과 Mullite(Al₂O₃ · 2SiO₂)임을 알 수 있었으며, 약 27°(2θ)에서 최대 광학값을 나타내는 형태이다. 포틀랜드 시멘트의 수화 반응으로 생겨난 수산화칼슘(Ca(OH)₂)과 Silica(SiO₂) 성분이 결합하여 불용성 화합물 C-S-H(Calcium Silica Hydrate) 비율을 증가시키게 되어 강도증가의 원인이 된다. 저회에 함유된 Silica(SiO₂) 성분은 포졸란 반응을 하여 장기강도에 영향을 주며, Alumina(Al₂O₃) 성분은 초기강도에 영향을 미친다(구봉근 등, 1992).

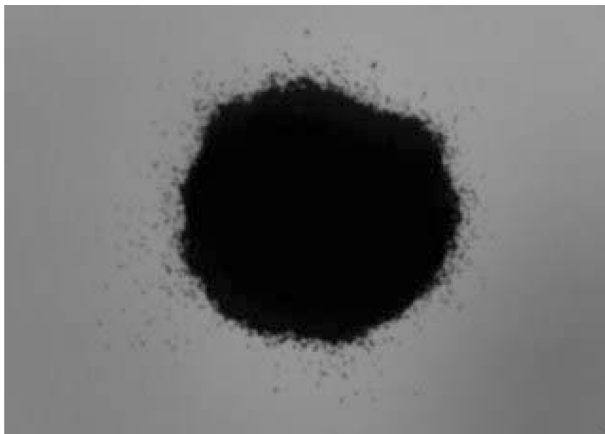


그림 2. 페타이어 분말

3.3 페타이어 분말

타이어 분말은 C사에서 만든 타이어 분말로서 상온에서 절단 분쇄된 타이어 조각을 동결조(Freezer, -120°C)에 투입하여 유리온도($T_g = -68°C$) 이하에서 동결 분쇄한 것이다. 본 연구에 사용된 타이어 분말은 그림 2와 같이 입자의 크기는 0.2~0.8mm이다. 타이어 분말의 비중은 1.13이며, 단위중량은 5.39kN/m³으로 나타났으며, 그림 1(a)에 타이어 분말의 입도 분포를 나타내고 있고, 유효입경이 0.18 mm, 균등계수(C_u)는 2.16, 곡률계수(C_c)는 0.94이다.

4. 실내시험 방법

4.1 공시체 제작

페타이어-저회 혼합경량토의 거동 특성을 분석하기 위하여 직경 72mm, 높이 148mm의 공시체를 제작하였다. 배합특성에 따른 거동 특성을 파악하기 위해 본 연구에 앞서 수행된 예비실험 결과를 바탕으로 단위중량, 흐름값 등을 고려하여 표 2와 같이 초기 함수비는 140%, 시멘트 함량은 20%, 저회 함량은 100%이다. 페타이어 함량에 따른 거동 특성을 파악하기 위해서 페타이어 분말의 함량을 건조 준설토 중량 대비 0%, 25%, 50%, 75% 및 100%로 변화시켜 공시체를 제작하였다.

표 3. 시험조건 및 배합비율(건조된 준설토 중량 기준)

시험조건	일축압축, 탄성과 시험
준설토의 초기 함수비 %	140
시멘트 함량 %	20
저회 함량 %	100
페타이어 분말 함량 %	0, 25, 50, 75, 100
양생기간(day)	28
공시체 양생조건	대기 양생

4.2 일축압축강도 시험

다양한 배합조건에 따라 제작된 경량토 공시체를 양생시킨 후 페타이어 함량에 따른 응력-변형률 거동 특성을 파악하기 위해서 일축압축강도 시험(KS F2314)을 수행하였다. 일축압축강도 시험은 변형률 제어가 가능한 D사의 시험기를 사용하였으며, 이때의 축 변형률은 1%/min로 제어하였다.

4.3 탄성과 시험

페타이어-저회 혼합경량토의 탄성과 속도를 측정하기 위해 그림 3과 같이 탄성파 시험을 실시하였다. 탄성파는 흙 입자의 강성과 밀도에 연관된다. 트랜스듀서는 한쪽(source)에서 다른 한쪽(receiver)방향으로 파를 발산한다. 이때 전단파의 이동거리와 전단파의 도착시간을 사용하여 전단파 속도를 구하게 된다. 시험시편의 매질에 따라 전단파 속도가 달라지므로 전단파 속도에 의한 지반특성 파악은 매우 효과적인 방법이다. 본 연구에서는 탄성파 시험을 통하여 페타이어-저회 혼합경량토의 압축파(P wave) 속도, 전단파(S wave) 속도를 구하고 이를 이용하여 지반정수와의 상관성을 보고자 하였다.

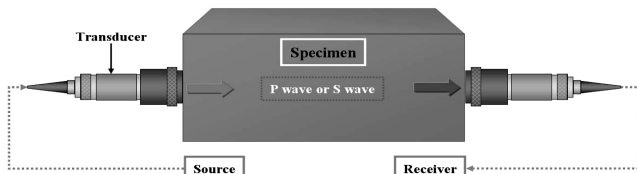


그림 3. 탄성파시험 개념도

5. 실험결과 및 분석

5.1 단위중량 특성

페타이어-저회 혼합경량토를 성토재, 뒤채움재 등의 건설재료로 사용할 경우 토압경감에 의한 측면방향의 변위를 저감시키고 하중에 의한 지반의 침하 및 구조물의 변위를 방지하기 위해 단위중량 특성은 매우 중요하다. 이를 위해서 페타이어 함량에 따른 단위중량의 특성을 분석하였다. 그림 4는 페타이어 함량에 따른 단위중량 변화를 나타낸 것으로 페타이어 함량이 증가할수록 단위중량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 페타이어 분말의 단위중량이 준설토와 저회보다 현저하게 낮기 때문인 것으로 판단된다. 건조된 준설토 중량대비 페타이어의 함량이 0에서 100%로 증가됨에 따라 단위중량은 15.09kN/m³에서 12.05kN/m³으로 선형적으로 감소한다.

기존의 기포 경량혼합토는 기포 소포의 문제점과 현장에서 직접 발포해야 되는 공간적인 제약이 있으나, 본 연구에서 제안한 페타이어 분말 혼합경량토는 이러한 문제점을 줄일 수 있어 시공성에서 장점을 가져다 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 페타이어 분말 혼합경량토는 경량성으로 인한 토압경감, 침하억제, 측방변위 발생억제 등과 같은 장점을 기대할 수 있다.

5.2 응력-변형 거동 특성

페타이어-저회 혼합경량토의 일축압축강도 시험 결과로부

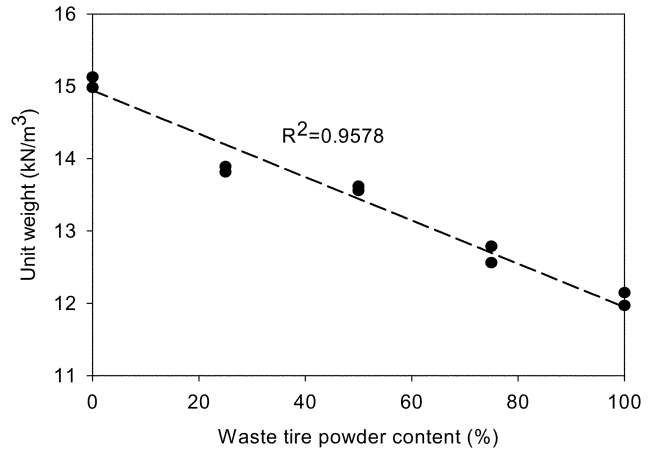


그림 4. 페타이어 분말의 함량에 따른 단위중량 변화

터 구한 페타이어 함량에 따른 응력-변형 거동 특성을 그림 5와 같다. 페타이어 함량이 증가함에 따라 일축압축강도와 초기 응력-변형곡선의 기울기가 감소하고 있음을 보여주고 있다. 또한 페타이어 분말의 함량이 증가할수록 최대강도 이후 거동은 대부분 연성적인 거동을 나타내었다.

그림 6은 페타이어 함량의 변화에 따른 파괴시 축 변형률을 나타낸 것으로 페타이어 함량이 증가함에 따라 파괴시 축 변형률은 증가하는 양상을 보이고 있다.

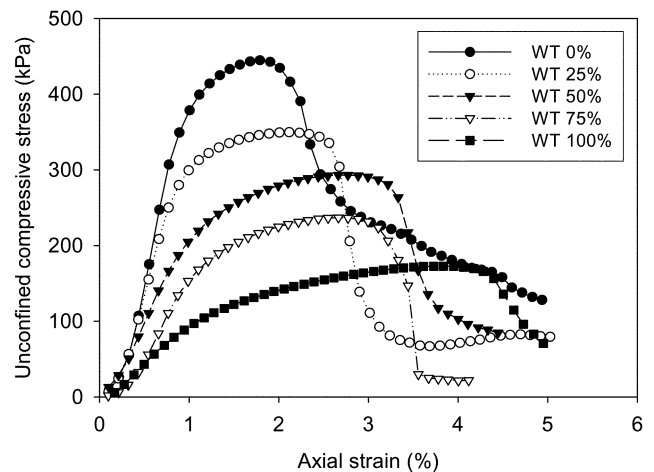


그림 5. 페타이어 분말의 함량에 따른 일축압축 응력-변형 거동

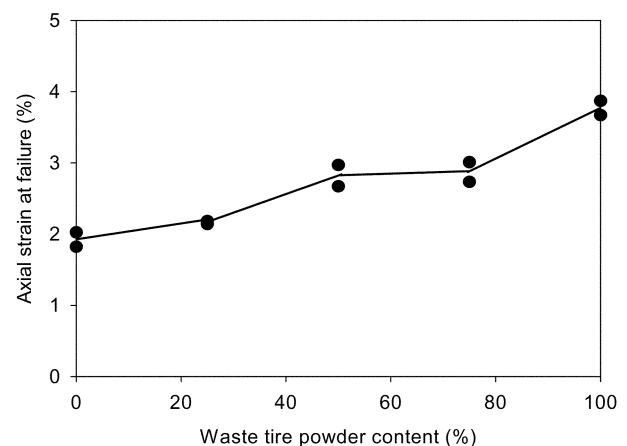


그림 6. 페타이어 분말의 함량에 따른 파괴시 축 변형률

5.3 압축강도 특성

그림 7은 페타이어 함량 변화에 따른 일축압축강도의 변화를 나타낸 것이다. Al-Tabaa와 Aravinthan(1998)은 점토 시료에 페타이어를 혼합했을 때 약 40%의 강도감소를 가져 온다고 밝히고 있다. 배합비와 페타이어 입자의 크기에 차이는 있지만 본 연구에서도 페타이어 함량이 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 페타이어 함량이 0%에서 100%로 증가됨에 따라 일축압축강도는 445kPa에서 172kPa로 약 40% 감소하였다.

그림 8은 페타이어 함량 변화에 따른 할선탄성계수의 변화를 나타낸 것으로서 페타이어 함량이 증가할수록 할선탄성계수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 기존의 경량혼합토에서 기포 함량에 따른 일축강도 특성에서 기포 함량이 증가할수록 할선탄성계수가 감소하는 경향을 나타내듯이 본 연구에서도 페타이어 함량이 변화함에 따라 비슷한 경향을 나타내고 있다. 경량화를 위해 혼합한 기포와 페타이어 분말은 가벼운 단위중량 특성에는 긍정적인 효과를 주고 있지만, 일축압축강도에는 다소 부정적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

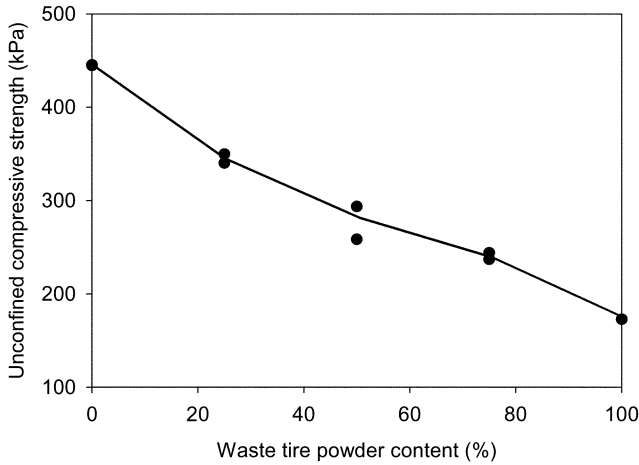


그림 7. 페타이어 분말의 함량에 따른 일축압축강도 변화

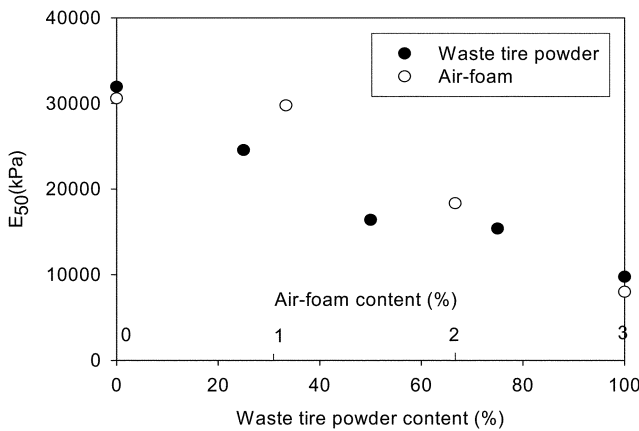


그림 8. 페타이어 분말의 함량에 따른 할선탄성계수(E_{50})의 변화

그림 9는 일축압축강도와 할선탄성계수(E_{50})의 관계를 나타내고 있다. 페타이어 혼합토의 할선탄성계수는 압축강도의 약 87-172배 정도의 범위를 갖는 것으로 나타났다. Tang

등(1996)은 기포를 혼합한 경량혼합토의 할선탄성계수는 압축강도의 40-260배 정도의 일반적인 범위를 제시하였다. 또한 낙동강 준설토에 기포를 혼합한 경량혼합토의 할선탄성계수는 압축강도의 44-128배 정도의 범위를 가진다(김윤태 등, 2005). 페타이어 혼합경량토의 할선 탄성계수는 기포 혼합 경량토 보다 더 큰 값을 나타내고 있으며, 일반적인 할선탄성계수 범위 안에도 포함되어 있다. 이는 기포제를 대신하여 페타이어 분말을 사용해도 강성도 특성에는 큰 차이를 보이고 있지 않고 있음을 나타내고 있다.

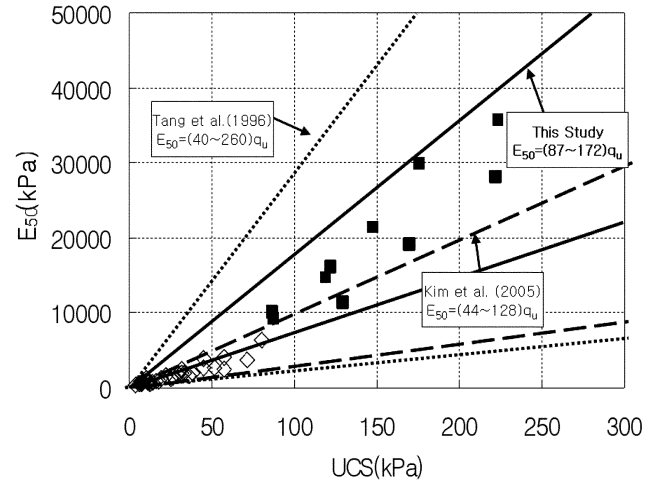


그림 9. 일축압축강도와 할선탄성계수(E_{50})와의 관계

5.4 탄성과 속도

탄성파는 시간지연(time delay), 감쇄(attenuation), 분산(dispersion), 반사(reflection), 굴절(refraction) 그리고 간섭(interference)과 같은 파동현상들을 같이 겪는다. 흩에서 파 전달의 속도와 감쇄는 흩의 고유특성에 의존한다. 즉 밀도(mass density), 체적강성(bulk stiffness), 전단강성(shear stiffness)과 같은 지반정수들은 탄성과 전달에 영향을 미친다. 그림 10은 페타이어 분말의 함량에 따른 탄성과 속도 측정결과를 나타내고 있으며, 일반적으로 압축파 속도가 전단파의 속도보다 빠른 결과를 보여주고 있다. 페타이어 분말이 혼합되지 않은 혼합토와 비교해 보았을 때 탄성과 속도는 압축파(P), 전단파(S) 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 페타이어 혼합으로 인해 압축파 및 전단파의 진행을

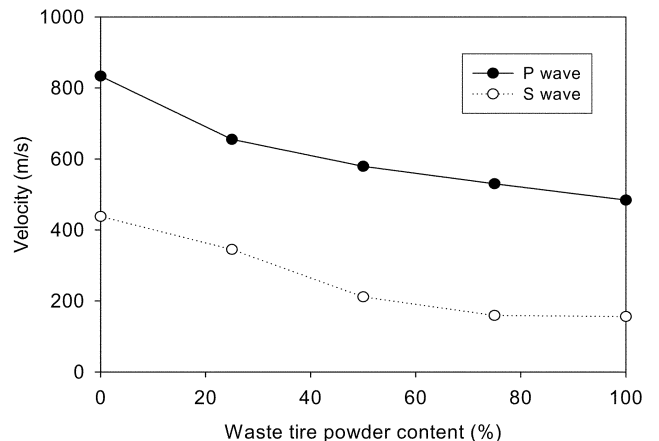


그림 10. 페타이어 함량에 따른 탄성과 속도 관계

간접하기 때문인 것으로 판단된다.

흙의 동적, 정적 해석에 있어서 중요한 물성으로 사용되고 있는 흙의 전단탄성계수 값은 식 (1)과 같이 탄성과 속도를 이용하여 산정할 수 있다. 그림 11은 페타이어 함량에 따른 전단탄성계수를 나타낸 것으로서 페타이어 함량이 증가할수록 전단탄성계수의 값은 크게 감소하는 경향을 나타내고 있다.

$$G = \rho_{soil}(V_s)^2 \quad (1)$$

여기서, ρ_{soil} =흙의 밀도, G =전단탄성계수

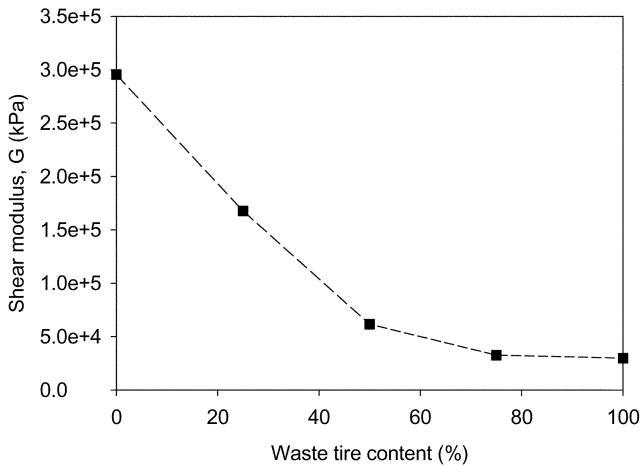


그림 11. 페타이어 함량에 따른 전단탄성계수와의 관계

또한 압축과 전단과의 속도 비율 관계식은 식 (2)과 같이 표현되며(조계춘 등, 2002), 이로부터 미소변형률의 포아송비(ν)를 식 (3)과 같이 산정할 수 있다.

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2)$$

$$\nu = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

탄성과 시험을 통해 얻어진 압축과 속도와 전단과 속도의 관계를 이용하여 얻어진 포아송비를 그림 12에 나타내었다. 페타이어 함량이 준설토 중량대비 0%에서 100%로 증가함에 따라 포아송비는 0.31에서 0.45로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

탄성과 시험을 통하여 얻어진 포아송비(ν)와 전단탄성계수(G)를 식(4)에 적용하여 탄성계수(E)를 구하였다. 탄성과 시험으로부터 얻어진 탄성계수(E)와 일축압축시험을 통하여 구한 할선탄성계수(E_{50})를 비교한 그래프는 그림 13과 같으며, 평균적으로 E 가 E_{50} 보다 15배 크게 나타나고 있다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

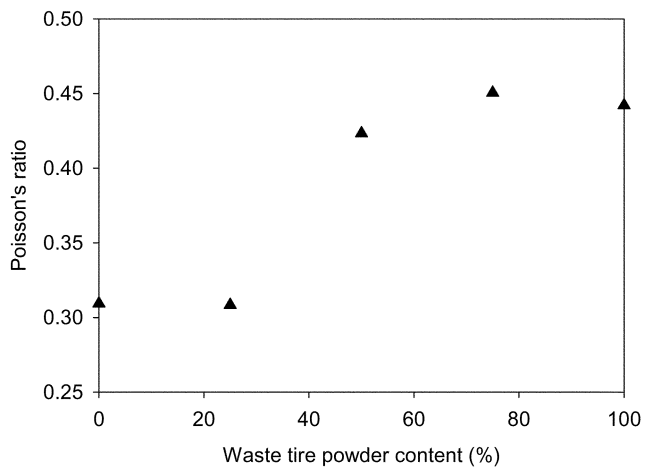


그림 12. 페타이어 분말의 함량에 따른 포아송비 관계

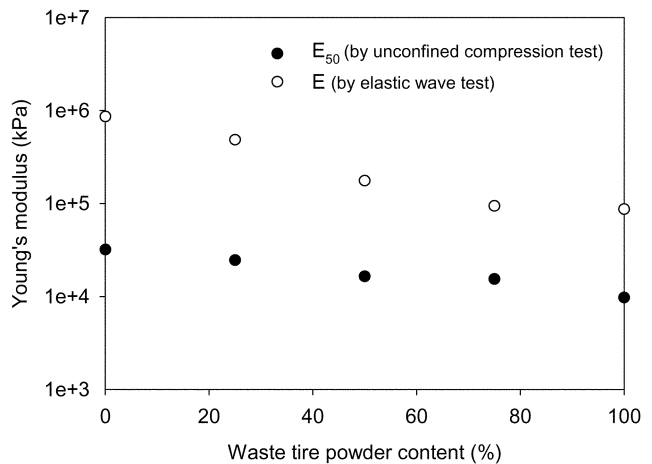


그림 13. 일축압축과 탄성과 시험에서 얻어진 탄성계수 비교

6. 결 론

본 연구에서는 환경적으로 문제가 되고 있는 폐 재료를 지반공학적 재료로 재활용하기 위해 준설토, 페타이어 분말, 저회를 이용하여 페타이어-저회 혼합경량토를 제작하였으며, 일축압축강도 시험과 탄성과 시험을 통하여 응력-변형거동 특성, 압축강도특성, 탄성과 속도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 페타이어-저회 혼합경량토의 단위중량은 페타이어 분말의 함량에 따라 크게 의존하며, 페타이어 함량이 증가할수록 단위중량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 단위중량은 건조된 준설토 중량대비 페타이어의 함량이 0에서 100%로 증가됨에 따라 단위중량은 15.09에서 12.05의 범위를 나타내고 있다. 따라서 페타이어 분말은 혼합경량토의 경량성 확보에 도움을 줄 수 있다.
2. 페타이어-저회 혼합경량토의 응력-변형거동 특성에서 페타이어 함량이 증가함에 따라 최대강도와 초기 응력-변형곡선의 기울기는 감소하고 연성적인 거동을 나타내었다.
3. 페타이어 분말의 함량이 증가함에 따라 할선탄성계수는 감소하는 경향을 보이고 있고, 일축압축강도의 약 87-172 배의 범위를 나타내었다. 기존의 기포를 혼합한 일반적인 할선탄성계수 범위 안에 포함되어 있으며, 기포제 대신

페타이어분말을 사용해도 강도특성에는 큰 차이를 보이고 있지 않고 있다.

4. 페타이어 분말의 함량이 증가함에 따라 압축과 및 전단파 속도가 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 페타이어 분말의 혼합으로 인해 압축파와 전단파의 진행을 간섭하기 때문이 것으로 판단된다.
5. 페타이어-저회 혼합경량토의 초기 전단탄성계수는 페타이어 함량이 증가함에 따라 크게 감소하였으며, 포아송비는 0.31-0.45의 범위를 타나내고 있다.

감사의 글

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

참고문헌

구봉근, 김수석, 김치원, 장기중(1992) **신편 토목재료학**, 대우출판사, pp. 245-346.

김윤태, 한우중, 정두희(2007) 준설토와 Bottom Ash 재활용을 위한 복합지반재료 개발, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제23권, 제11호, pp. 77-85.

김윤태, 권용규, 김홍주(2005) 준설토 재활용을 위한 무보강 및 보강 경량토의 압축거동특성 비교, **한국해양공학회지**, 한국해양공학회, 제19권, 제6호, pp. 44-49.

김수삼, 김병일, 한상재, 신현영(2002) 준설토와 EPS를 혼합한 경량혼합처리토의 강도 특성, **한국철도학회지**, 한국철도학회, 제5권, 제2호, pp. 61-69.

김주철, 이종규(2002) 준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제18권, 제4호, pp. 309-317.

김동환, 임종욱, 임남웅(2004) 화력발전소 Ash Pond에 매장되어 있는 Bottom Ash를 잔골재로 이용한 고성능 시멘트 모르타의 물성연구, **한국폐기물학회 춘계학술연구회 발표논문집**, 한국폐기물학회, pp. 69-74.

김진만, 조삼덕, 이용수, 백영식(2004) 옹벽뒤채움재로서 페타이어 조각의 활용 방안 연구, **한국폐기물학회지**, 한국폐기물학회, 제21권, 제2호, pp. 117-126.

김진만, 이광우, 조삼덕, 오세용(2006) 페타이어의 철도진동 저감 효과에 대한 실험적 연구, **한국환경복원녹화기술학회지**, 한국환경복원녹화기술학회, 제9권, 제1호, pp. 31-40.

도영근, 권혁두, 이송(2006) Bottom Ash를 이용한 그라우팅재의 환경적 연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제22권 제11호, pp. 5-11.

손기상(2005) 페타이어 입자혼입 콘크리트의 강도별 특성 실험, **한국안전학회지**, 한국안전학회, 제20권, 제2호, pp. 84-90.

윤길립, 김병탁(2002) 준설토를 활용한 경량혼합토의 역학적 특성 연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제20권, 제4호, pp. 5-13.

윤길립, 채광석, 김병탁, 김대학(2004) 준설토와 기포를 혼합한 인공지반의 연약지반개량 적용성 평가, **ISSMGE ATC-7 SYMPOSIUM 2004년 9월**, pp. 139-150.

엄준길, 정경호, 홍영근, 주강(1998) 페타이어 분말을 이용한 탄

성 투수성 도로포장재에 관한 연구, *Elastomer*, Vol. 33, No. 4, pp. 290-296.

조계춘, 이인모(2002), 탄성파를 이용한 흙의 특성연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제18권, 제6호, pp. 83-101.

Al-Tabbaa, A. and Aravinthan, T. (1998) Natural clay-shredded tire mixtures as landfill barrier materials, *Waste Management*, Vol. 18, pp. 9-16.

Cetin, H., Fener, M., and Gunaydin, O. (2006) Geotechnical properties of tre-chesive cayey soil mixtures as a fill material, *Engineering Geology*, Vol. 88, pp. 110-120.

Churchill, E.V. and Amirkhanian, S.N. (1999) Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 295-301.

Foose, G, Benson, C., and Bosscher, P. (1996) Sand reinforced with shredded waste tires, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 9, pp. 760-767.

Ghafoori, N. and Bucholc J. (1996) Investigation of lignite-based bottom ash for structural concrete, *Journal of Material in Civil Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 128-137.

Jo. H., Min. S., Lee. T., Ahn. H., Lee. S., and Hong. J. (2008) Environmental feasibility of using coal ash as a fill material to raise the ground level, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 154, pp. 933-945.

Kim, B.J., Prezzi, M., and Salgado, R. (2005) Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 7, pp. 914-924.

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.

Lok, M.H. and Yu, H.J. (2006) Laboratory study on the mechanical behavior of tire chip-sand mixture, *Pavement Mechanics and Performance*, ASCE, pp. 157-164.

Lee, H.J., Salgado, R., Bernal, A., and Lovell, W.C. (1999) Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 2, pp. 132-141.

Otani, J., Mukunoki, T., and Kikuchi, Y. (2002) Visualization for engineering property of in-situ lightweight soils with air foams, *Soil and Foundations*, Vol. 4, No. 3, pp. 93-105.

Pierce, C.E. and Blackwell, M.C. (2003), Potential of scrap tire rubber as lightweight aggregate in flowable fill, *Waste Management*, Vol. 23, pp. 197-208.

Tsuchida, T., Takeuchi, D., Okumura, T., and Kishida, T. (1996), Development of lightweight fill from dredgings, *Proc. of Environmental Geotechnics*, Balkema, pp. 415-420.

Tatlısoz, N., Edil, B., and Benson, H. (1998) Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 11, pp. 1109-1119.

Tang, Y.X., Tsuchida, T., Shirai, A., Ogata, H., and Shiozaki, K. (1996) Triaxial compression characteristics of super geo-material cured underwater, *Proceedings of 31st Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 2493-2494.

(접수일: 2008.5.9/심사일: 2008.6.13/심사완료일: 2008.6.13)