

폐기물을 첨가한 경량혼합토의 배합설계와 목표강도 결정

Determination of Mix Design and Target Strength for Lightweight Soils using Recycled material

윤길림¹⁾, Gil Lim Yoon, 배윤신²⁾, Yoon-Shin Bae

¹⁾ 한국해양연구원 책임연구원, Senior Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute

²⁾ 한국해양연구원 연수연구원, Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute

SYNOPSIS : 최근 국내에서 연약지반개량을 위하여 적극 도입되기 시작한 차세대 지반처리기술인 경량혼합토공법의 배합설계에 대한 고찰을 하였다. 경량혼합토는 건설잔토나 준설토 및 현장에서 발생하는 점토나 실트질 흙을 사토처리 하지 않고 현장에서 유용할 수 있는 매우 경제적이고 환경적인 공법으로서 일본에서는 지난 10여년에 연간 수백만톤의 경량혼합토를 생산하여 건설현장에 적용한 실적을 보유하고 있다. 특히 폐자원(폐타이어가루, 왕겨)을 경량혼합토에 첨가하여 건설재료 재활용을 위한 역학적 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 경량혼합토를 제작하기 위해 필요한 배합설계변수인 원료토의 중량, 함수비 및 기포재와 첨가할 물의 양, 그리고 강도를 발현하기 위하여 필요한 고화재로서 시멘트첨가량에 대한 최적의 배합설계에 대한 분석을 하였다. 지금까지 제안된 시멘트함유량은 초기의 경량혼합토 목표강도가 주어지면 원료토의 조건에 따라 원하는 비중과 강도를 토대로 적절하게 현장에 적합하게 결정하는 단계에 있으나 일부 현장에서 지나친 목표강도 설정으로 과대한 시멘트를 사용하는 사례가 많아 국가적으로 막대한 손실을 초래하고 있다. 본 논문에서는 경량혼합토의 목표강도를 분석하고 그에 따른 최적의 시멘트함유량을 제시하고자 한다.

Keywords : 경량혼합토, 배합설계, 고화재, 목표강도, 건설재료

1. 서론

연약한 지반을 시멘트 혼합처리공법으로 지반 개량시키는 Soil-Cement 공법에는 심층처리공법, 천층처리공법, 경량혼합토공법, 그라우팅공법 등이 있다. 이러한 공법은 지반의 종류 및 개량목적에 따라서 적절히 설계 반영된다. 고화재를 이용한 지반개량시 목표 강도는 뒷채움재나 도로성토지반용 천층처리공법, 경량혼합토공법은 일반적으로 $2\text{kgf/cm}^2(200\text{kPa})$ 을 사용하며 상부하중이 큰 경우는 심층처리공법과 그라우팅공법에서는 대략 $5\text{kgf/cm}^2(500\text{kPa})$ 을 사용한다. 설계기준강도에는 이미 안전율을 포함하여 결정된 것이므로 설계기준을 목표강도로 하는 경우에는 안전율을 설계에 반영하지는 않는다. 현재 국내에서는 시멘트 혼합처리공법으로 연약지반을 개량할 경우 명확한 설계기준이 확립되어 있지 않다. 본 연구에서는 다양한 폐기물(폐타이어분말, 왕겨)을 활용하여 차세대 시멘트 혼합기술인 경량혼합토공법의 배합설계에 대한 고찰을 하였다. 다양한 배합설계변수인 원료토의 중량, 함수비 및 기포재와 첨가할 물의 양, 그리고 최대의 강도 및 목표강도를 발현하기 위하여 필요한 고화재로서 시멘트첨가량에 대한 배합비에 대한 분석을 실시하였다.

2. 시 험

2.1 재료 및 배합시험

본 연구에서는 원료토로 양산물금지구 지구외도로 [대1-5호선] 부산지하철 2호선 인접구간에서 채취한 점성토를 사용하였으며 조사지역 점성토층의 자연함수비, 액성한계, 소성한계는 각각 52.7%, 49.5%, 23.7%이며 현장에서 발생한 흙을 유용하게 사용하기 위하여 경량혼합토를 제작하였다. 경량혼합토는 제작 직후에는 유동성을 나타내나 고화재의 반응에 따라 최종적으로는 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도특성을 가지는 고화처리토가 된다. 보통의 토사에 비해 가벼워 지반이나 구조물 등에 미치는 하중을 경감할 수 있다. 또한 유동성이 높아 펌프압송에 의한 타설이 가능해 시공이 용이하다. 더욱이 진흙 등의 저품질 토양도 이용할 수 있어 건설폐기물을 줄일 수 있는 등 장점이 큰 공법이다.

최근들어 폐기물을 건설재료로 재활용하기 위한 관심이 국내외적으로 고조되는 가운데 페타이어 분말과 왕겨(Rice husk ash)를 활용한 토질안정처리공법이 연구된 바 있다(김윤태 등, 2008; 민덕기 등, 2002). 본 실험에 사용된 페타이어 분말은 G사에서 제조하였으며 입자의 크기는 0.3mm이며 단위중량은 0.4 g/cm³이며 왕겨는 벼의 품종 및 발생지역에 따라 약간의 차이는 있으나 SiO₂의 함량이 90%내외이다. 그림 1은 경량혼합토에 첨가된 페타이어 분말과 왕겨의 사진이다.



그림 1. 페타이어 분말과 왕겨

경량혼합토와 페타이어분말 및 왕겨를 첨가한 경량혼합토의 거동 특성을 분석하기 위하여 직경 5cm, 높이 10cm의 공시체를 제작하였다. 표 1은 시험조건 및 배합비율을 보여준다. 시멘트비는 건조 시료 중량 대비 8%, 12%, 16%, 20%이다. 페타이어 및 왕겨첨가에 따른 거동 특성을 파악하기 위하여 페타이어 분말은 건조 시료 중량 대비 3%, 6%, 12%, 25%, 50%로 변화시켰으며 왕겨는 3%, 9%, 12%로 배합하였다.

표 1. 시험조건 및 배합비율

시험종류	경량혼합토	폐기물을 첨가한 경량혼합토	
		페타이어분말	왕겨
준설토초기함수비(%)	70	70	70
시멘트비(%)	8, 12, 16, 20	12	12
폐기물함량(%)	-	3, 6, 12, 25, 50	3, 9, 12
양생기간(day)	7, 14, 28	7, 14, 28	7, 14, 28
양생조건	대기 및 수중양생	대기 및 수중양생	대기 및 수중양생

2.2 경량혼합토 배합비

경량혼합토 배합 단위중량은 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 시멘트량을 1m^3 당 44kg, 65kg, 85kg, 104kg의 4가지로 구분하여 실험하였다(황중호 등, 2009). 표 2는 시멘트비 12%인 경우 경량혼합토 배합비로 중량 및 부피기준으로 산정하였다. 그림 2는 산정된 배합식에 근거한 시멘트비(8%, 12%, 16%, 20%)에 관한 체적당(1m^3) 성분중량(kg)을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 배합단위중량을 만족하기 위해서는 시멘트비가 증가할수록 원료토 및 물의 구성비는 감소하며 기포제는 대략 비슷함을 알 수 있다.

표 2 경량혼합토 배합비(시멘트비 12%)

중량(kg)					체적(m^3)				
원료토	물	시멘트	기포제	합계	원료토	물	시멘트	기포제	합계
718.5	204	65	12.5	1000	0.435	0.204	0.02	0.341	1

2.3 페타이어가루를 첨가한 경량혼합토 배합비

페타이어분말을 첨가한 경량혼합토 배합 단위중량은 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 시멘트비는 12%이고 페타이어분말 함유량은 3%, 6%, 12%, 25%, 50%로 변화시켰다. 각각의 페타이어함유량에 따른 시멘트량은 1m^3 당 64kg, 63kg, 61kg, 57kg, 51kg의 5가지로 구분하여 실험하였다. 표 3은 페타이어분말 혼합비 12%인 경우 페타이어 분말을 첨가한 경량혼합토 배합비로 중량 및 부피기준으로 산정하였다. 그림 2는 산정된 배합식에 근거한 시멘트비 12%, 페타이어 분말비(3%, 6%, 12%, 25%, 50%)에 관한 체적당(1m^3) 성분중량(kg)을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 배합단위중량을 만족하기 위해서는 페타이어분말비가 증가할수록 원료토, 시멘트 및 물의 구성비는 감소하며 기포제는 대략 비슷함을 알 수 있다.

표 3. 페타이어분말을 첨가한 경량혼합토 배합비(페타이어분말 혼합비 12%)

중량(kg)					체적(m^3)				
원료토	물	시멘트	기포제와 페타이어분말	합계	원료토	물	시멘트	기포제와 페타이어분말	합계
672	191	61	76	1000	0.407	0.191	0.019	0.383	1

2.4 왕겨를 첨가한 경량혼합토 배합비

왕겨를 첨가한 경량혼합토 배합 단위중량은 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 이며 시멘트비는 12%이고 왕겨 함유량은 3%, 6%, 9%, 12%로 변화시켰다. 각각의 왕겨함유량에 따른 시멘트량은 1m^3 당 64kg, 63kg, 62kg, 61kg의 4가지로 구분하여 실험하였다. 표 4는 왕겨 혼합비 12%인 경우 왕겨를 첨가한 경량혼합토 배합비로 중량 및 부피기준으로 산정하였다. 그림 2는 산정된 배합식에 근거한 시멘트비 12%, 왕겨 혼합비(3%, 6%, 9%, 12%)에 관한 체적당(1m^3) 성분중량(kg)을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 배합단위중량을 만족하기 위해서는 왕겨함유량 증가할수록 원료토, 시멘트 및 물의 구성비는 감소하며 기포제는 대략 비슷함을 알 수 있다.

표 4. 왕겨를 첨가한 경량혼합토 배합비(왕겨 함유량 12%)

중량(kg)					체적(m^3)				
원료토	물	시멘트	기포제와 왕겨	합계	원료토	물	시멘트	기포제와 왕겨	합계
674	192	61	73	1000	0.409	0.192	0.019	0.38	1

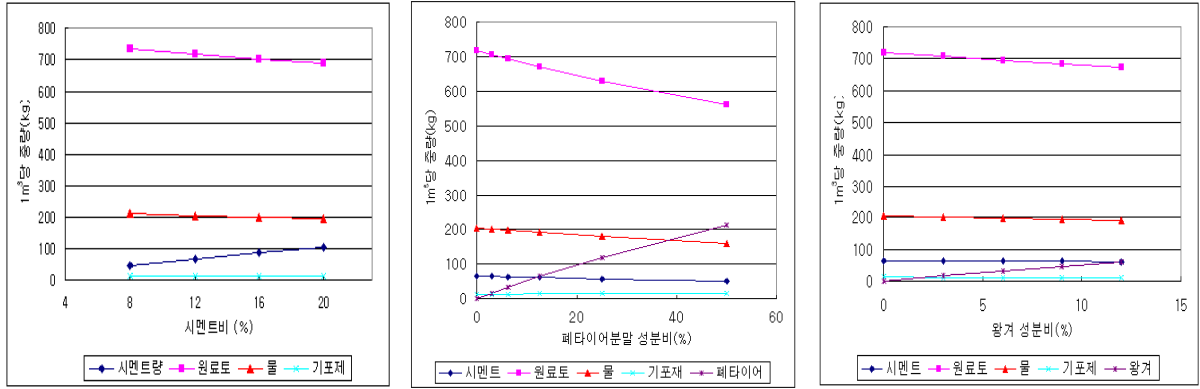


그림 2. 시멘트 및 폐기물 함유량에 따른 시멘트, 원료토, 물, 기포제의 단위체적(m³)당 중량(kg)

3. 결과 및 분석

3.1 일축압축시험에 의한 응력-변형 거동

그림 3는 재령기간 28일 후의 경량혼합토 응력-변형거동을 나타내고 있다. 그림에서 일축압축강도는 시멘트 함유량이 많을수록 강도는 크게 나타나고 시멘트비 8%를 제외한 모든 시멘트 함유량(12%, 16%, 20%)에 대하여 뚜렷한 파괴 양상을 보여주고 이러한 취성파괴 거동은 시멘트 함유량이 클수록 현저함을 보이고 있다. 파괴시 변형률(ϵ_f)을 초과한 후 응력이 감소하는 변형연화 현상이 나타나고 있다. 파괴시 변형률은 시멘트 함유량 8%를 제외하면 거의 비슷하여 대략 1.5~2% 정도이며 시멘트 함유량과 무관함을 알 수 있다. 박성식 등(2009)은 파괴시 축변형률은 시험방법이나 공시체 제작 및 양생방법에 따라 결과가 다를 수 있다고 하였다. 또한 응력의 증가에 따른 변형율의 증가는 시멘트 함유량이 증가할수록 감소하였다.

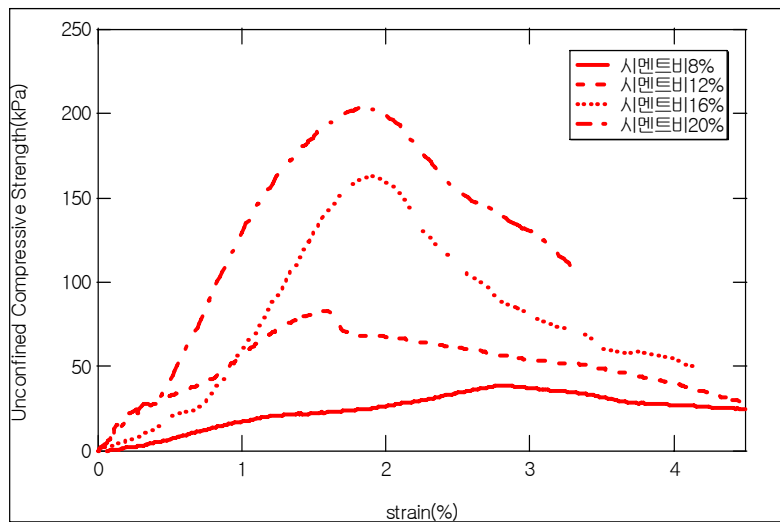


그림 3. 경량혼합토의 응력-변형거동(공기중 28일 양생)

그림 4은 재령기간 28일 후의 페타이어가루를 첨가한 경량혼합토 응력-변형거동을 나타내고 있다. 시멘트비는 12%로 고정하였다. 그림에서 일축압축강도는 페타이어가루 함유량이 많을수록 강도는 감소하고 페타이어가루 함유량 12%에서 최대강도를 나타내었다. 반면 페타이어가루 함유량 12%의 경우 페

타이어가루를 첨가하지 않은 경우와 거의 비슷한 강도를 보여주며 파괴시 변형율(ϵ_f)은 다소 증가함을 알 수 있다. 모든 경우에 대하여 뚜렷한 파괴 양상을 보여주고 있다. 파괴시 변형률(ϵ_f)을 초과한 후 응력이 감소하는 변형연화 현상이 나타나고 있다. 파괴시 변형률은 페타이어가루 함유량 6%를 제외하면 거의 비슷하여 대략 3% 정도이며 페타이어가루 함유량과 무관함을 알 수 있다.

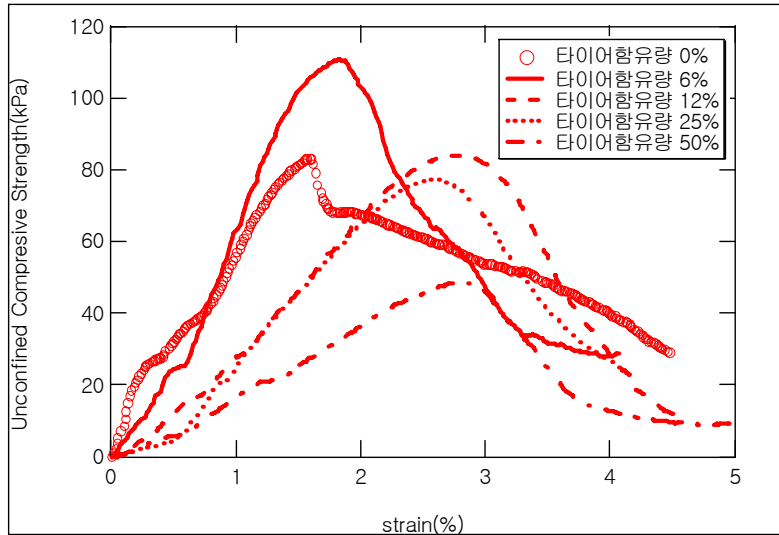


그림 4. 페타이어가루를 첨가한 경량혼합토의 응력-변형거동(공기중 28일 양생)

3.2 경량혼합토 및 폐기물을 첨가한 혼합토의 실험결과 비교분석

그림 5는 경량혼합토의 일축압축강도에 미치는 시멘트 함유량의 영향을 나타내고 있다. 시멘트 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 증가함을 알 수 있다. 채령기간 7일과 28일에 대한 일축압축강도 증가는 시멘트 함유량이 8%에서 20%까지 증가함에 따라, 약 5.2배의 강도 증가를 보이고 있으며 채령기간 14일에 대한 강도 증가율은 약 4.4이다 .

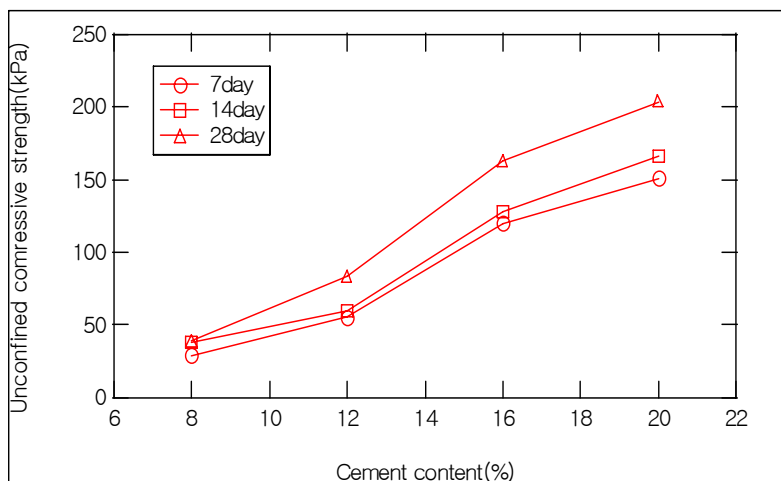


그림 5.시멘트 함유량에 따른 혼합토의 일축압축강도(공기중 28일 양생)

그림 6 및 표 5와 6은 혼합토의 일축압축강도에 미치는 폐타이어가루 및 왕겨 함유량의 영향을 나타내고 있다.

재령일 28일을 기준으로 폐타이어가루를 첨가한 경량혼합토의 경우 폐타이어 함량이 3%인 경우 최대의 강도값을 보여주며 폐타이어가루 함량이 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 폐타이어 함량이 3%, 6%인 경우 첨가하지 않은 경우와 비교해보면 강도가 증가율이 각각 16%, 7% 증가하였으며 폐타이어 함량이 12%인 경우는 강도가 거의 비슷하며 그 이상 함량에서는 강도가 오히려 감소하였다. 본 실험에서 알 수 있듯이 경량혼합토에 폐타이어 가루를 적절히 첨가할 경우 강도를 증대시킬 수 있으며 이는 폐자원을 활용하는 경제적 이익을 얻을 수 있을 것이다. 이와 같이 강도가 증가된 원인은 흙시료의 공극을 첨가물(폐타이어가루)이 채우면서 입자간 맞물림 효과로 인한 마찰력 증대에 기인한 것으로 보이며 과도한 첨가물은 오히려 강도를 저하시킬 수 있다. 현재 이러한 강도증대 효과를 규명하기 위하여 SEM(전자현미경)을 이용한 연구가 진행 중에 있다.

재령일 28일을 기준으로 왕겨를 첨가한 경량혼합토의 경우도 왕겨 함량이 3%인 경우 최대의 강도값을 보여주며 왕겨 함량이 증가할수록 강도는 급격히 감소함을 알 수 있다. 최대 강도증가율은 5%로 폐타이어가루를 첨가한 최대 강도증가율(16%)보다 강도증진 효과는 크지 않았다. 왕겨를 혼합한 경량혼합토의 경우도 적절하게 첨가할 경우 강도를 증대시킬 수 있지만 혼합비율은 실내시험을 결과를 분석한 후 신중하게 선택해야 할 것이다.

서술한 바와 같이 고화재를 이용하여 뒷채움재나 도로성토지반용 천층처리공법, 경량혼합토공법지반개량시 목표 강도를 2kgf/cm²(200kPa)로 설정할 경우 본 실내시험 결과에서 알 수 있듯이 재령일 28일 기준으로 시멘트비가 20%인 경우 기준강도를 만족하며 시멘트비 20%에서 최대의 강도효과 폐기물 함유량을 찾아 적절히 첨가하면 보다 경제적이고 합리적인 배합 설계를 할 수 있다.

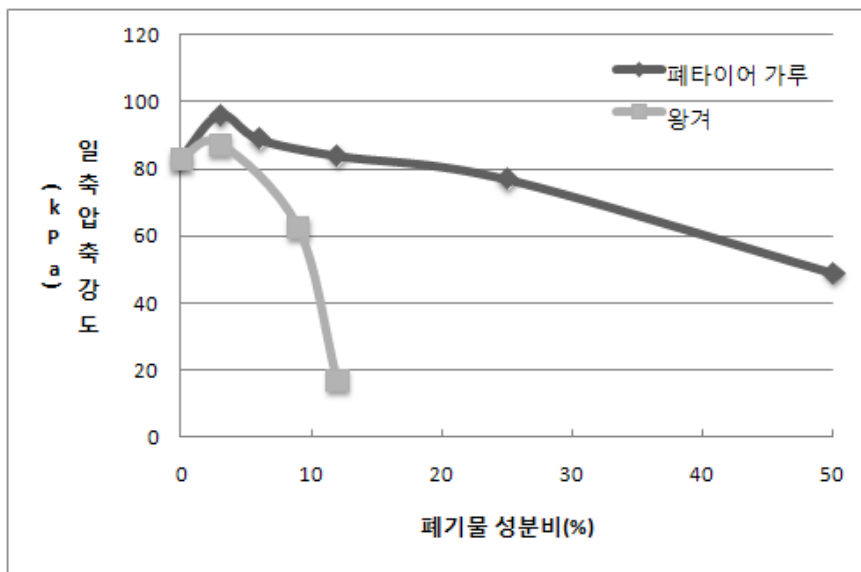


그림 6. 폐기물 함유량에 따른 혼합토의 일축압축강도(시멘트비 12%, 공기중 28일 양생)

표 5. 폐타이어가루를 첨가한 경량혼합토의 일축압축강도(kPa) (시멘트비12%)

함유량	0%	3%	6%	12%	25%	50%
재령일						
28일	83	96.2	89	84	77	49

표 6. 왕겨를 첨가한 경량혼합토의 일축압축강도(kPa) (시멘트비12%)

함유량 재령일	0%	3%	9%	12%
28일	83	87.5	62.75	17.2

4. 결 론

본 연구에서는 친환경 고화처리 공법인 경량혼합토에 폐자원(페타이어가루 및 왕겨)을 혼합한 공시체를 제작하여 일축압축시험을 수행하였다. 목표단위중량을 설정한 후 배합설계변수인 원료토의 중량, 함수비 및 기포재와 첨가할 물의 양, 그리고 강도를 발현하기 위하여 필요한 고화재로서 시멘트첨가량에 대한 최적의 배합설계에 대한 분석을 수행하였다. 또한 페타이어가루와 왕겨를 경량혼합토에 혼합하면 강도증진 효과를 기대할 수 있으며 현장에서 설계기준강도를 만족하기 위한 시멘트비와 폐기물을 적절히 혼합하면 합리적이고 경제적인 배합비를 산출할 수 있다.

참고문헌

1. 김윤태, 강효섭 (2008), 페타이어 분말을 이용한 혼합경량토의 역학적 특성연구, *대한토목학회 논문집* 제28권, 제4C호.
2. 민덕기, 황광모, 김현도, 황택진 (2002), Rice husk ash를 이용한 토질안정처리, *한국지반공학회 논문집* 제18권, 제5호.
3. 황중호, 황웅기, 이영준, 박이근, 이성철, 김태형 (2009), 도로성토체로 사용된 경량기포토의 특성, 2009 *대한토목학회 정기학술대회*, pp.2881~2885.
4. 박성식, 김기영, 최현석, 김창우 (2009), 양생방법에 따른 시멘트 혼합토의 일축압축강도의 특성, *대한토목학회 논문집* 제29권, 제5C호.