

양생온도가 경량기포토의 강도에 미치는 영향

Effect of Curing Temperature on the Strength Characteristics of Lightweight Air-Trapped Soil

이 민 아 ¹	Lee, Min-Ah	김 성 원 ²	Kim, Seong-Won
최 대 경 ³	Choi, Dae-Kyung	박 이 근 ⁴	Park, Lee-Keun
김 태 형 ⁵	Kim, Tae-Hyung		

Abstract

There are many factors that can cause problems in the application of the lightweight air-trapped soil in the field. Temperature is one of them. However, the effect of temperature on the characteristics of lightweight air-trapped soil has not been studied. Thus, this experimental study is conducted. This study considers three different unit weights of lightweight air-trapped soils, 6, 8, and 10 kN/m³ which are mostly applied to the field. The lightweight air-trapped soil specimens are cured in the condition of different temperatures based on the characteristic of temperature of Korea. The unconfined compression tests are conducted on the prepared specimens. The settlement behavior of lightweight air-trapped soil on temperature is observed. A photograph is taken using SEM to determine the transformation of air-foams inside the lightweight air-trapped soil on curing temperature. As the results, the effect of curing temperature on the characteristics of lightweight air-trapped soil including compressive strength, settlement, and formation of air-foams is confirmed. Finally, based on this study, the allowable curing temperature of 8°C~25°C which can guarantee the quality of lightweight air-trapped soil is proposed.

요 지

경량기포토의 현장 적용에 있어 많은 요인들이 문제를 유발시킬 수 있다. 특히 온도가 경량기포토의 거동이나 강도에 상당한 영향을 미칠 수 있으나 아직까지 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 가장 많이 적용되고 있는 6, 8, 10kN/m³ 3가지 단위중량으로 경량기포토 공시체를 제작하여 한국의 기온 특성에 맞는 다양한 온도에서 양생시켰다. 준비된 공시체에 대해 일축압축강도시험을 실시하고, 침하거동도 같이 관찰하였다. 양생온도에 따른 경량기포토내의 공기방울의 형태 변화를 알아보기 위해 SEM을 이용한 사진촬영도 이루어졌다. 그 결과 강도, 침하, 공기방울형성 등 경량기포토의 특성에 양생온도가 영향을 미침을 확인하였다. 마지막으로 본 연구결과를 바탕으로 경량기포토의 품질을 확보할 수 있는 허용양생온도 8°C~25°C가 제안되었다.

Keywords : Air-foam, Allowable curing temperature, Compressive strength, Lightweight air-trapped soil, Settlement

1 정회원, 한국해양대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea Maritime Univ.)

2 정회원, 해솔이엔씨 이사 (Member, Director, HAESOL Engineering & Construction.)

3 정회원, 부산광역시 도로계획담당관실 사무관 (Member, Deputy Director, Department of Road Management, Busan Metropolitan City)

4 정회원, (주)지오알앤디 대표이사 (Member, Chief Executive Officer, Geotechnical Research & Development Co.)

5 정회원, 한국해양대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반에 구조물을 건설하는 경우 성토하중에 의해 지반의 침하가 발생된다. 만약 기존 구조물에 근접하여 이러한 시공이 이루어진다면 침하발생으로 인한 기존구조물에 큰 피해를 줄 것이다. 연약지반에 성토로 인한 침하량을 최소화함으로써 축조된 기존 도로에 피해가 없이 시공하는 방안으로 경량성토공법이 대안으로 제시되고 있다. 또한 기존구조물을 확장 시 부지가 협소한 경우나 내륙 산악지대 및 급경사지에 도로를 축조하거나 확장하는 경우에도 절토사면을 최소화하거나 자연환경 훼손을 최소화 할 수 있는 방안으로도 경량성토공법이 제시되고 있다. 따라서 이미 이에 대한 연구가 이루어져 선진국에서는 다양한 형태로 경량성토공법을 발전하여 활발하게 적용되고 있다(Satoh et al., 2001; Tsuchida et al., 2000, 2001).

국내에서도 경량성토공법 중의 하나인 경량기포혼합토가 사용되고 있다. 경량기포혼합토는 경량으로 인한 하중경감과 유동성, 시공성 등의 장점으로 일반적인 흙으로는 시공이 곤란한 장소에서의 시공에 적합하다(일본도로공단, 1996; 土田孝 등, 1996). 그러나 윤길림 등(2004)과 송준호(2009), 황중호(2010) 등은 경량기포혼합토가 초기함수비 및 점토, 모래, 실트 등 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것을 밝혀냈다. 이에 따라 현장적용에서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 필요하다. 따라서 이러한 경량기포혼합토의 단점이 보완된 품질이 균질한 대체 경량기포재료의 개발이 요구되고 있다.

황중호(2010)는 원료토로 준설토를 사용하는 경량기포혼합토의 단점을 보완하기 위하여 공장에서 생산된 균질한 품질의 모래를 사용하였으며 이를 통해 만들어진 경량기포토를 개발하였다. 기초적인 연구로 균질한 품질의 경량기포토의 압축특성을 검토하였다. 연구 대상은 모래가 전혀 포함되지 않은 경량기포토와 품질이 균질한 모래를 포함한 경량기포토에 대해 시험이 실시되었다. 총 16가지의 재료배합을 설정하였고, 역학적 특성인 압축강도에 대한 분석을 실시하였다. 이를 통해 소요 단위중량에 대한 압축강도 및 변형 특성을 파악하여 최적의 경량기포토에 대한 기초자료를 제시하였다.

이영준(2011)은 경량기포토가 기존 구조물에 인접해서 시공되는 경우 진동의 영향을 받는 경우가 종종 발생

되고 있는 점에 주목하여 진동장치를 이용한 실험을 실시하였다. 이를 통해 기포슬러리 상태에서 진동속도, 진동시점, 진동지속시간이 경량기포토에 미치는 영향 등에 관한 기초적인 자료를 제시하였다.

그러나 현재까지 경량기포토의 현장적용에 있어 문제가 될 수 있는 요인에 비해 검토는 폭넓게 이루어지지 않았다. 그 요인들은 여러 가지가 있을 수 있는데, 그중 하나가 온도로 우리나라와 같이 계절적 변화가 뚜렷한 지역의 경우 경량기포토에 미치는 온도의 영향은 매우 클 것으로 예상된다. 일반 콘크리트는 온도에 따라 한중콘크리트와 서중콘크리트로 나누어 온도에 대한 검증 방법과 허용기준이 있어 양생시의 피해를 최소화시킬 수 있지만 경량기포토의 온도에 대한 구체적인 기준이 없어 실무적용에 어려움을 겪고 있어 이에 대한 연구의 필요성이 제기되고 있다.

2. 실내시험

2.1 재료

본 연구에서는 KS L 5201의 규정에 적합한 H사 제품인 보통포틀랜드시멘트를 사용하였다. 품질이 비교적 균일한 경량기포토의 제작을 위해 균질하게 생산되는 모래를 사용하였으며, 모래의 물리적 특성은 표 1과 같다.

현재 국내에서 사용되는 기포제는 식물성기포제, 동물성기포제, 고분자기포제 등이 있으며 콘크리트의 양생과 장기적인 사용에 악영향을 주지 않는 것을 사용해야 한다. 본 연구에서는 동물성기포제를 사용하였다. 동물성기포제는 단백질계 기포제로서 단백질의 원료로는 동물의 혈액, 유제성분인 카세인, 동물의 뼈, 쌀의 분말인 젤라틴 등이 있다. 이들은 여러 종류의 아미노산으로 구성되어 있고 이것을 알칼리로 가수분해하여 중화 후 여과한 것을 철염이나 방부제를 첨가한 기포제이다. 동물성기포제의 일반적인 화학적 성분은 표 2와 같다(이수형, 2005).

동물성기포제는 그림 2에서 보는 바와 같이 기포의 형태가 식물성기포제인 그림 1에 비하여 균질한 기포 상태를 유지하고 있으며, 각각의 기포는 독립형태를 유지하고 식물성기포제에 비하여 경량기포토 적용시 안정적인 골격을 유지하여 보다 더 효율적으로 압축강도를 발휘할 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서 사용된 H사의 동물성단백질계 기포제는 동물의 잔재물인 뼈,

발톱, 털 등을 가수분해한 후 단백질을 추출하여 제조한 제품으로 친환경적인 기포제로 물리적 특성은 표 3과 같고 납, 카드뮴, 수은 등의 중금속 검출시험 결과 모든 중금속이 불검출 되어 환경에도 무해함을 알 수 있다(표 4).

2.2 배합계획

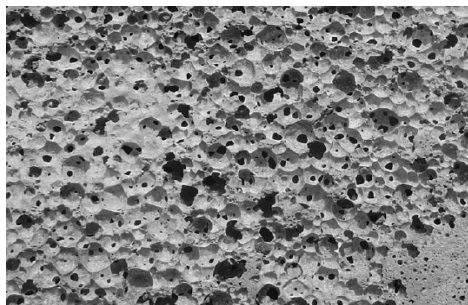
본 연구에서는 황중호(2010)가 경량기포토에 대해 실시한 배합 중에서 3가지를 연구대상으로 선택하였다(표 5).

표 1. 모래의 물리적 특성

입경(mm)	흡수율(%)	단위중량(kN/m ³)	비 중
0.6 이하	1.18	16.86	2.65

표 2. 동물성 기포제의 화학적 성분 (단위 : %)

H ₂ O	Protein	NaCl	NH ₄ Cl	CaCl ₂	MgCl ₂	FeSO ₄
36	32	10	1	6	5	10

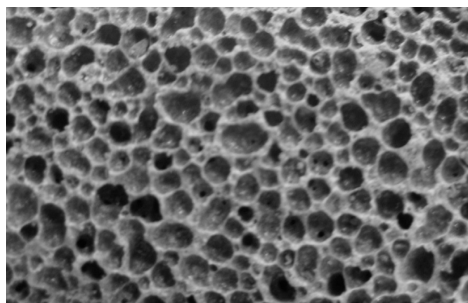


(a) 기포상태

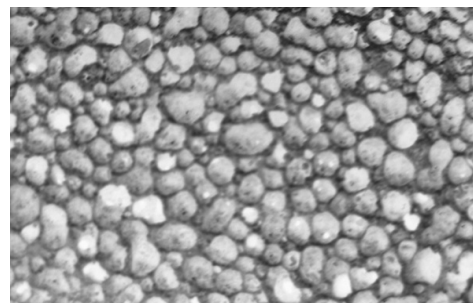


(b) 기포상태(역광)

그림 1. 식물성기포제



(a) 기포상태



(b) 기포상태(역광)

그림 2. 동물성기포제

표 3. 동물성 기포제의 물리적 특성

비중	점도(cP [*])	고형분(%)	pH	기포군 단위중량(kN/m ³)
1.18	37.3	39.1	6.29	0.541

*cP는 점도의 단위로 centi poise(1cP=1mPa·s)

표 4. 동물성기포제의 중금속 검출시험결과

(단위 : mg/kg)

항목	검출한계	결과	시험방법	분석장비
납(Pb)	5	불검출	EPA 3050B	ICP-AES
카드뮴(Cd)	1	불검출	EPA 3050B	
수은(Hg)	1	불검출	EPA 3050B	
6가 크롬(Cr6+)	1	불검출	USEPA 3060A	UV-VIS

표 5. 경량기포토 배합표

(단위 : kg)

No.	구 분 γ-C-S	슬러리(kg)			시멘트 슬러리 중량:①	기포균(kg)			기포슬러리 밀도:①+② (kN/m³)
		시멘트	잔골재	수량		기포제	희석수량	기포균중량:②	
2	6-1-0	380	0	190	570	0.55	27.02	27.57	6
6	8-1-1	294	294	194	782	0.46	22.45	22.91	8
11	10-1-2	253	506	227.7	986.7	0.36	17.68	18.04	10

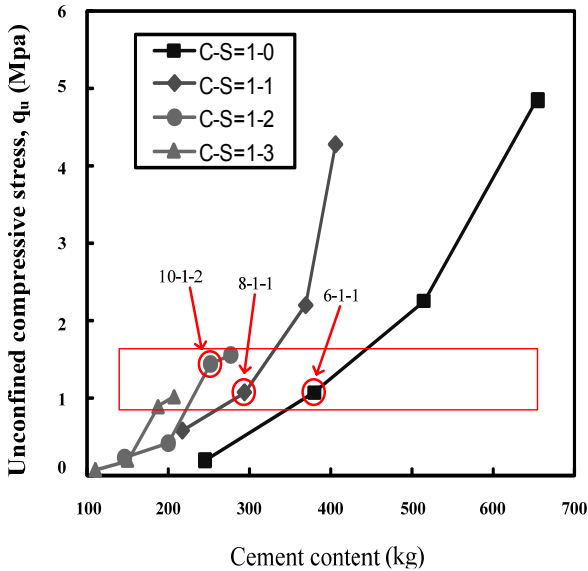


그림 3. 시멘트함유량에 따른 일축압축강도

이들 배합은 현장에서 가장 많이 사용되는 경우에 해당된다. 목표압축강도는 1000kPa을 기준으로 하였다. 경량기포토의 기존연구를 비롯해 현장 시공사례를 보았을 때, 주 적용분야가 연약지반 상의 도로 성토재인 것을 알 수 있다. 보통의 경우 도로의 성토하중과 교통하중을 고려한 하중조건은 500kPa 내외의 값을 가진다. 이 값에 안전율을 고려하여 1000kPa을 기준강도로 선택하였다(그림 3).

표 5의 배합표는 시멘트, 잔골재, 물 및 기포균의 비중에 따른 최적설계를 바탕으로 구성되어 있다. 구체적으로 물의 비중 1을 기준으로 하여 시멘트의 비중 3.15, 잔골재의 비중 2.1, 기포균의 비중 0.04를 고려하여 배합설계를 실시하였으며, 수량은 시멘트-모래비에 따라 다른 비율로 첨가되었다.

2.3 공시체 제작

기포는 소정의 희석비율이 되도록 물로 희석한 기포제를 압축공기와 함께 발포장치에 넣어 넣고 소정의 발

포비율이 되도록 공기압을 조절하여 제조한다(하이그레이드소일 연구컨소시엄, 2005). 본 연구에서는 실내 실험용 공시체의 제작을 위해 소규모의 기포발생장치를 제작하여 사용하였고, 기포발생장치를 통해 발생된 기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 선기포 방식을 사용하였다.

공시체는 시멘트와 모래 등의 원료토사와 물을 핸드믹서를 사용하여 혼합한 슬러리와 물로 희석된 기포제를 기포발생장치를 통해 기포를 발생 시킨 후 시멘트 슬러리와 다시 혼합하는 과정으로 제작한다. 발생된 기포는 경량기포토의 강도에 매우 큰 영향을 주므로 기포제에 따라 적절한 압력으로 발포한 후 단위중량을 확인하여야 한다. 본 시험에 사용된 동물성 기포제는 400~450kPa의 압력으로 발포하였고 기포균의 단위중량은 0.5±0.05kN/m³으로 공시체를 제작하였다. 이 시험에서는 양생온도에 따른 경량기포토 특성에 미치는 영향을 확인하고자 단위중량 6kN/m³, 8kN/m³, 10kN/m³으로 설정된 직경 5cm, 높이 10cm 공시체를 제작하였다.

콘크리트는 온도에 대한 기준으로 서중콘크리트와 한중콘크리트로 나뉘 온도에 대한 적정 양생기준을 마련하여 건설현장에 적용하고 있는 반면 경량기포토에 대한 적정양생온도에 대한 기준이 없다. 따라서 서중콘크리트와 한중콘크리트의 온도 범위를 고려하여 시험범위를 -5℃, 0℃, 5℃, 20℃, 40℃로 설정하였다. 외부조건 영향을 받지 않고 온도에 의한 특성변화만을 규명하고자 28일 동안 일정하게 해당 온도를 유지시켜 양생한 후 시험을 실시하였다. 즉, 온도가 양생 중인 경량기포토에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험변수를 양생온도, 양생시간, 배합비 등으로 나누어 경량기포토의 일축압축강도 및 소포량을 측정하였다.

각각의 온도에 대한 양생을 하기 위하여 고온양생기와 저온양생기를 사용하였다. 양생온도가 -5℃~0℃의 저온 시료의 양생에는 저온양생기를 20℃~40℃ 양생에는 고온양생기를 사용하였다.

2.4 시험

2.4.1 일축압축시험

각 배합비 별로 제작된 공시체에 대하여 계획된 양생 온도로 저온양생과 고온양생을 시작하여 7일과 14일, 그리고 28일 동안 온도를 유지한 시료에 일축압축시험을 실시하였다. 배합조건에 따른 경량기포토의 응력-변형 특성과 단위중량과 일축압축강도와와의 관계를 조사하였다. 시험 방법은 흙의 일축압축시험방법인 KS F 2314에 따라 일축압축시험기를 이용하여 실시하였다.

2.4.2 소포량 관찰시험

시멘트의 수화열과 주변의 온도영향에 의한 콘크리트의 변화는 구조물에 있어서 크게 문제가 된다. 이러한 온도에 따른 변화는 콘크리트의 내구성과 재료 역학적 성질 등에 영향을 미치고 구속에 의한 온도균열을 발생시키며, 특히 신축과 수축을 통하여 구조물의 균열을 발생시키기도 한다. 이런 문제점을 개선하고자 콘크리트에서는 서중콘크리트와 한중콘크리트로 나누어 각각의 온도에 적합한 양생방법을 강구 하고 있다.

콘크리트와 같이 경량기포토도 온도변화에 대하여 구조적으로 취약한 형태를 가지고 있다. 단위체적당 40%~60%에 달하는 기포균으로 인하여 양생초기의 온도 변화에 따라 기포의 수축, 팽창 및 소포에 의한 체적변화와 강도변화를 유발할 수 있다. 따라서 소포량 관찰 시험이 계획되었다. 소포량 관찰시험은 단위중량별 각각의 양생온도에서 28일 동안 등온양생을 실시하여 공시체의 체적변화량을 확인하고 SEM 촬영을 통한 기포의 형태 변화를 같이 관찰 하였다.

2.4.3 사진촬영

경량기포토의 단위중량별 각각 온도양생에 의한 경량기포토 공시체의 표면과 내부, 기포의 크기, 배열, 부피를 산정하기 위해 실체현미경과 전자현미경(SEM) 촬영을 통해 획득한 영상을 판독하였다. 각 장비에 대한 구체적인 사양은 표 6과 같다.

표 6. 분석장비 사양

장비명	제조회사	특징
Scanning Electron Microscope(SEM)	일본○○사	- Electron gun: Tungsten Filament type - Resolution: 4.0nm - EDS: Horiba
Microscope	일본△△사	- 배율: 20, 40, 80, 160, 200

3. 시험결과 및 분석

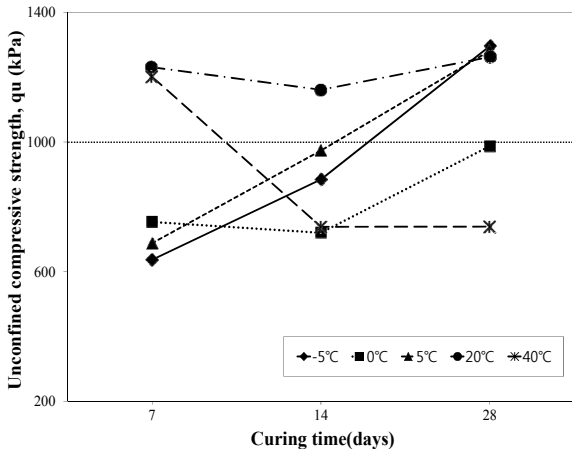
3.1 일축압축강도

그림 4는 각 단위중량별 양생온도에 대한 양생기간에 따른 일축압축강도 관계를 나타낸 것으로 점선은 목표 일축압축강도 1000kPa를 의미한다. 각 단위중량별 재령 28일 압축강도를 확인한 결과 -5, 0, 5, 20℃에서 목표일축압축강도인 1000kPa은 비교적 만족하는 것으로 나타났다으며, 고온인 40℃에서 양생된 공시체만 목표일축압축강도를 만족하지 못하였음을 확인하였다.

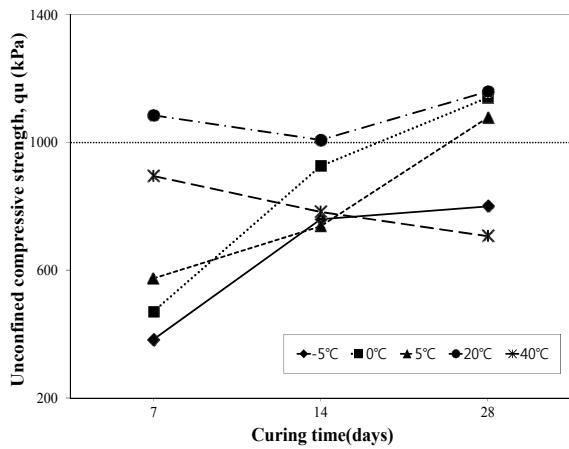
단위중량 6, 10kN/m³에서는 그림 4(a),(c)와 같이 저온인 -5℃~5℃ 양생된 공시체는 재령이 증가할수록 압축강도가 증가하여 목표압축강도에 도달함을 관찰할 수 있었다. 단위중량 8 kN/m³에서는 그림 4(b)와 같이 0℃와 5℃에서는 재령에 따른 강도가 꾸준히 증가함을 확인할 수 있었던 반면에 -5℃에서는 재령 14일 이후 강도 증가가 둔화됨을 확인할 수 있었다. 이에 반해 40℃에서 양생된 모든 단위중량 공시체는 초기재령 7일을 기준으로 압축강도가 재령이 증가할수록 감소하여 목표 압축강도에 도달하지 못하였고 가장 적은 압축강도를 나타내었다. 이는 고온의 온도조건이 시멘트의 수화반응을 급격하게 진행시켜 시멘트의 조직변화와 함께 기포의 불규칙한 외형변화로 균질한 형태의 포막을 형성하지 못함에 따른 결과로 판단된다.

그림 5는 각 단위중량별 각 온도에 따른 28일 일축압축강도 관계를 나타낸 것이다. 양생온도 20℃에서 양생된 공시체의 일축압축강도의 값이 기존의 연구(황중호, 2010)에 대한 일축압축강도 결과 값과 유사하게 나타남을 확인하였다. 이를 바탕으로 20℃ 양생온도 공시체의 일축압축강도를 기준으로 각 온도별 일축압축강도의 강도 감소율을 표 7에 나타내었다.

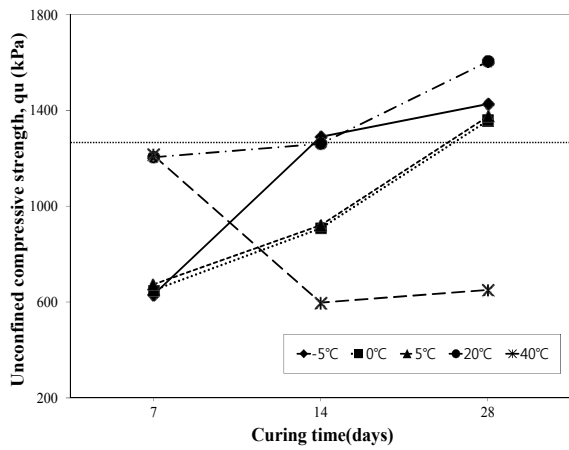
각 단위중량 양생온도에 대한 압축강도 변화를 살펴보면, 저온인 -5℃에서의 강도감소율은 기준양생온도인 20℃에 비하여 -3~35%의 비교적 적은 감소율을 확인할 수 있었다. 반면에 고온인 40℃에서의 강도 감소율은



(a) 단위중량 6kN/m³



(b) 단위중량 8kN/m³

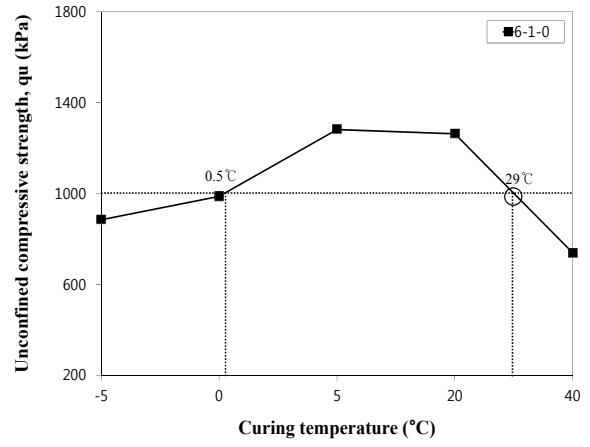


(c) 단위중량 10kN/m³

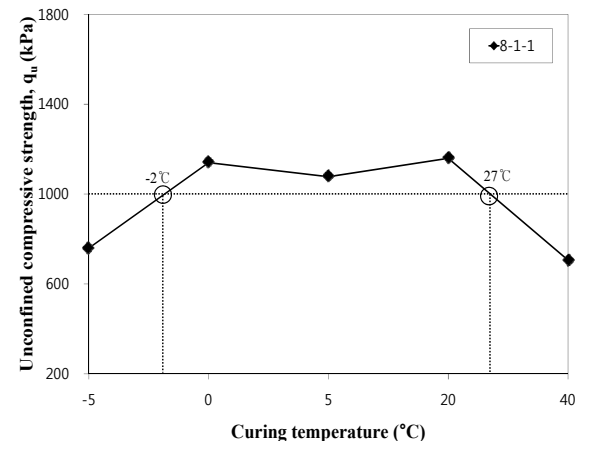
그림 4. 일축압축강도와 양생기간의 관계

모든 단위중량에서 39~59%에 달하는 높은 강도 감소율을 확인 할 수 있었다.

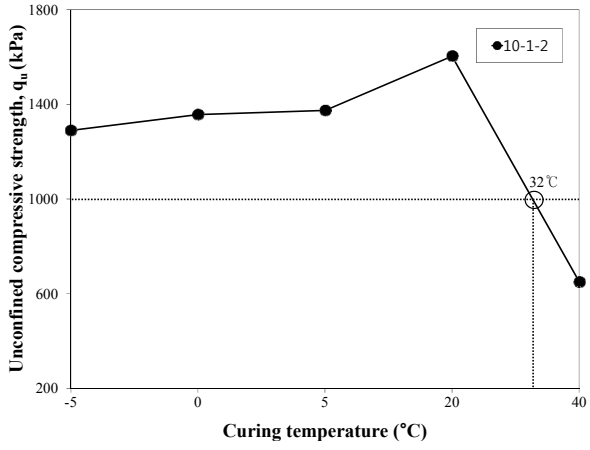
이렇듯 저온에서 온도가 증가할수록 강도가 점진적으로 증가함을 볼 수 있었던 반면에 일정 온도를 넘어서면서 부터는 급격한 강도 감소가 진행됨을 확인 하였다. 그러나 그림 5에서 보는바와 같이 -5°C에서 각각의 단



(a) 단위중량 6kN/m³



(b) 단위중량 8kN/m³



(c) 단위중량 10kN/m³

그림 5. 일축압축강도와 양생온도의 관계(양생28일)

위중량별 압축강도를 보면 때론 가장 적합한 양생조건이라고 생각되어지고 있는 20°C의 압축강도 보다 더 높은 강도를 보였다. 이는 현재 정확한 이유를 이번 시험을 통하여 확인할 수는 없었으나 다만 -5°C에서 양생시킨 파괴된 공시체를 확인한 결과 공시체 주변에 물기가 비치는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 슬러리 상태인

표 7. 일축압축강도의 강도감소율(양생 28일)

단위중량 (x-C-S)	경량기포토			강도감소율(%)*
	양생기간(일)	양생온도(°C)	평균일축압축강도(kPa)	
6	28	-5	1296	-3
		0	987	22
		5	1282	-2
		20	1263	0
		40	739	42
8	28	-5	759	35
		0	1140	2
		5	1077	7
		20	1159	0
		40	706	39
10	28	-5	1289	20
		0	1357	15
		5	1374	14
		20	1603	0
		40	651	59

*강도감소율(%) = $\frac{q_u(28day) - q_u(7,14day)}{q_u(28day)} \times 100$, $q_u(28day)$: 28일 양생온도 공시체의 일축압축강도
 $q_u(7,14day)$: 7, 14일 양생온도 공시체의 일축압축강도

공시체가 양생온도 -5°C에서 28일 동안 양생됨으로 인해 일부 수분이 동결된 상태에서 압축강도 시험이 이뤄지므로 인하여 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

이런 결과를 통해 향후 현장에서 이뤄질 경량기포토의 시공에서는 적정 양생온도를 유지하여 시공이 이루어져야 할 것이다. 이때 모든 단위중량에 적용할 수 있는 양생온도로는 5°C~25°C에서의 온도가 경량기포토의 가장 좋은 압축강도를 확보할 수 있는 양생온도로 여겨진다. 이외의 온도에 대해서는 적합한 양생방법을 통하여 상기 온도가 유지될 수 있도록 관리하여야 할 것을 제언해 본다.

3.2 공시체의 소포량 및 외형변화

기본적으로 단위중량에 상관없이 5°C 이하의 양생온도에서는 그림 6(a)와 같이 공시체가 수축되는 외형변화를 나타냈다. 고온인 40°C에서 양생시킨 공시체의 경우 그림 6(b)와 같이 공시체가 부풀어 오르는 외형변화를 나타냈다. 이때 공시체의 시멘트 함량이 많을수록, 기포의 체적이 많을수록 부풀어 오름이 증가되는 현상을 확인할 수 있었다.

소포량 측정은 28일 양생이 완료된 후 실시하였고,



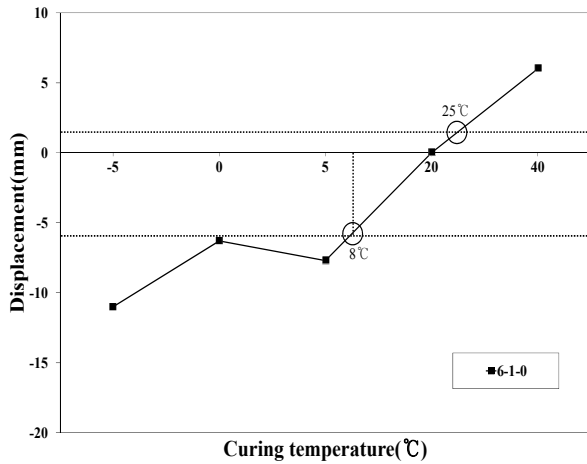
(a) 양생온도 0°C(수축현상)



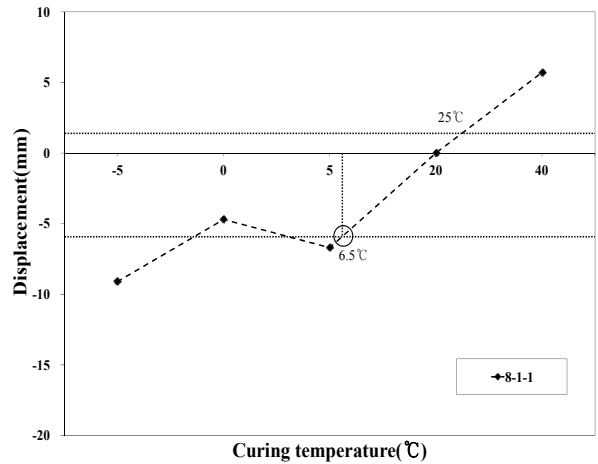
(b) 양생온도 40°C(부풀음현상)

그림 6. 공시체 외형변화

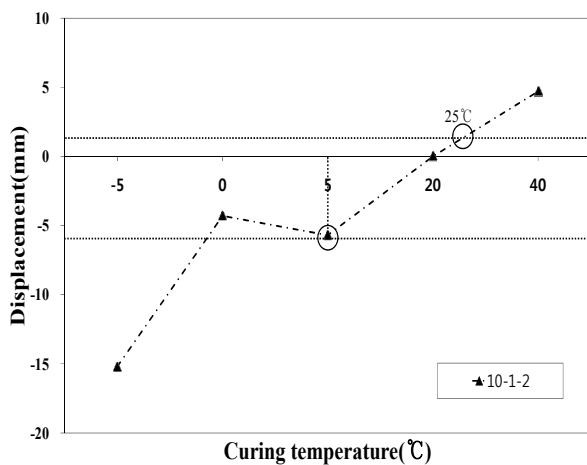
소포에 대한 침하량 기준은 양생된 기포콘크리트 규정(주택공사시방서, 2010)에 따라 -6mm 이하를 기준으로 비교 하였다. 공시체의 부풀음에 대한 그 어떤 기준도



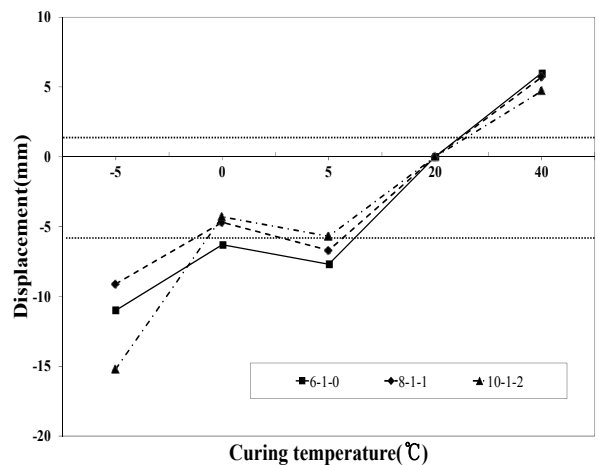
(a) 단위중량 6kN/m³



(b) 단위중량 8kN/m³



(c) 단위중량 10kN/m³



(d) 단위중량 6kN/m³, 8kN/m³, 10kN/m³

그림 7. 양생온도에 따른 공시체 침하량

마련되어있지 않기 때문에 앞서 압축강도시험에서 경량기포토의 양생온도에 대한 기준으로 제시된 25°C에 대한 교점을 부풀음에 대한 기준으로 하여 비교하였다. 그 기준에 대한 표시는 체적변화 그림의 상, 하단 점선으로 표시하였다(그림 7).

단위중량별 소포량을 살펴보면 그림 7에서 6kN/m³, 8kN/m³, 10kN/m³은 각각 8°C, 6.5°C, 5°C에서 소포에 의한 침하량의 기준 값인 -6.0mm를 만족하였고, 20°C를 넘어서면서 팽창에 따른 외형변화가 나타남을 확인할 수 있었다.

기준치를 만족하지 못하는 저온환경에서의 결과를 살펴보면 5°C에서는 단위중량이 10kN/m³인 공시체만이 침하량을 만족하였고, 0°C에서는 비교적 소포에 따른 침하량 기준치를 미미하게 만족하는 경향을 확인할 수 있었다. 반면 -5°C에서는 모든 공시체가 많은 소포량이 발생하여 기준치에 못 미치는 결과를 확인하였다. 이

는 슬러리 상태의 공시체가 수화반응이 일어나기 전 영하의 양생온도에 의한 동결현상이 진행하여 초기의 급속한 소포현상으로 많은 침하량이 발생된 것으로 보인다.

이와 달리 5°C에서는 다소 낮은 온도이기는 하지만 0°C보다 더 침하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 동결에 의한 침하량으로 보는 것보다 동결온도와 수화반응에 적합한 온도 사이에 위치해 있기 때문에 수화반응에 따른 양생이 지연되고 슬러리 상태의 지속시간이 길어짐에 따른 영향으로 판단된다.

그림 8은 단위중량 6kN/m³의 경량기포토에 대한 SEM 촬영사진으로 양생온도에 따른 경량기포토의 골격구조와 기포의 분포 및 형태를 확인할 수 있다. 그림 8(a)를 보면 0°C에서의 공시체는 수화반응 지연으로 기포가 균질하게 분포가 이루어지지 않았고, 기포와 기포의 결합으로 인한 기포간 사이의 독립적인 골격구조가 유지하지 못하여 공시체가 침하되는 것으로 판단된다. 그림

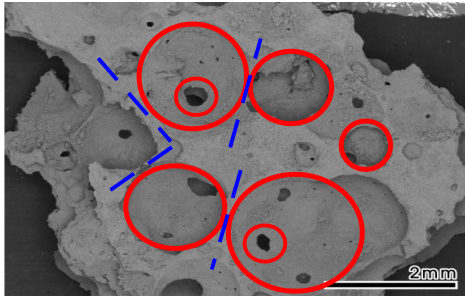
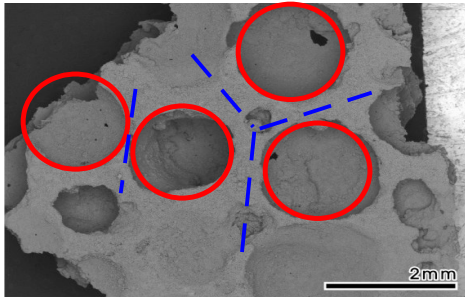
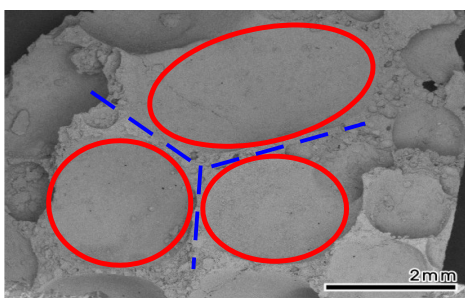
이미지	특징
 <p>(a) 0°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> -기포의 크기와 형태가 불균질하게 분포됨 -기포와 기포간의 부착으로 골격구조 파괴 -기포와 기포간의 하중을 지지하는 골격구조의 약화
 <p>(b) 20°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> -균질한 기포셀 형성 -기포와 기포간의 안정적인 골격구조 형성
 <p>(c) 40°C</p>	<ul style="list-style-type: none"> -불균질한 기포셀 형성 및 20°C에 비하여 체적이 커진 기포셀의 형태 -기포간의 부착으로 인한 골격구조의 파괴현상은 없었으나 불안정한 골격구조 형성

그림 8. 온도에 따른 기포 형태 SEM Image-×40(단위중량 6kN/m³)

8(c)와 같이 40°C에서의 공시체는 기포와 기포간의 결합되는 현상이 저온일 때 보다 적게 나타났다. 그러나 20°C에 비하여 다소 얇은 골격구조를 형성하였고, 기포 자체의 크기도 20°C에 비하여 팽창된 모습을 확인할 수 있다.

그림 9은 각 단위중량별 양생온도에 따른 경량기포토의 골격구조와 기포의 분포 및 형태로 20°C이하의 온도에서는 소포가 일어나고, 20°C 이상의 온도에서는 팽창되어지는 현상을 재차 확인할 수 있다. 이것은 동일한 기포의 발포방식이여도 시멘트량이 적어지고 골재첨가에 따른 단위중량 증가에 따라 기포의 크기가 변화하는 모습을 확인할 수 있다. 또한 시공시 침하량 역시 중요한 관리항목을 소포량 및 외형변화 관찰시험을 통하여 확인하였다.

3.3 양생온도 관리기준

경량기포토의 양생온도 관리기준은 압축강도와 소포에 따른 침하량 기준을 모두 만족하는 범위를 고려하여 결정하였다. 압축강도에 의한 허용범위 5°C~25°C를 나타나고, 소포에 따른 침하량을 만족하는 허용범위는 8°C~25°C로 나타났다. 두 기준은 모두 만족시키는 중첩되는 양생 온도범위는 8°C~25°C임을 알 수 있다.

따라서 본 관찰시험을 통해 얻어진 경량기포토의 양생 온도범위는 8°C~25°C임을 제안해 본다. 다만 경량기포토의 특성상 온도와 주변여건에 의한 품질의 변동요소가 많기 때문에 추가적인 시험을 통하여 보다 더 공용화할 수 있는 범위가 설정되어야 할 것으로 판단된다.

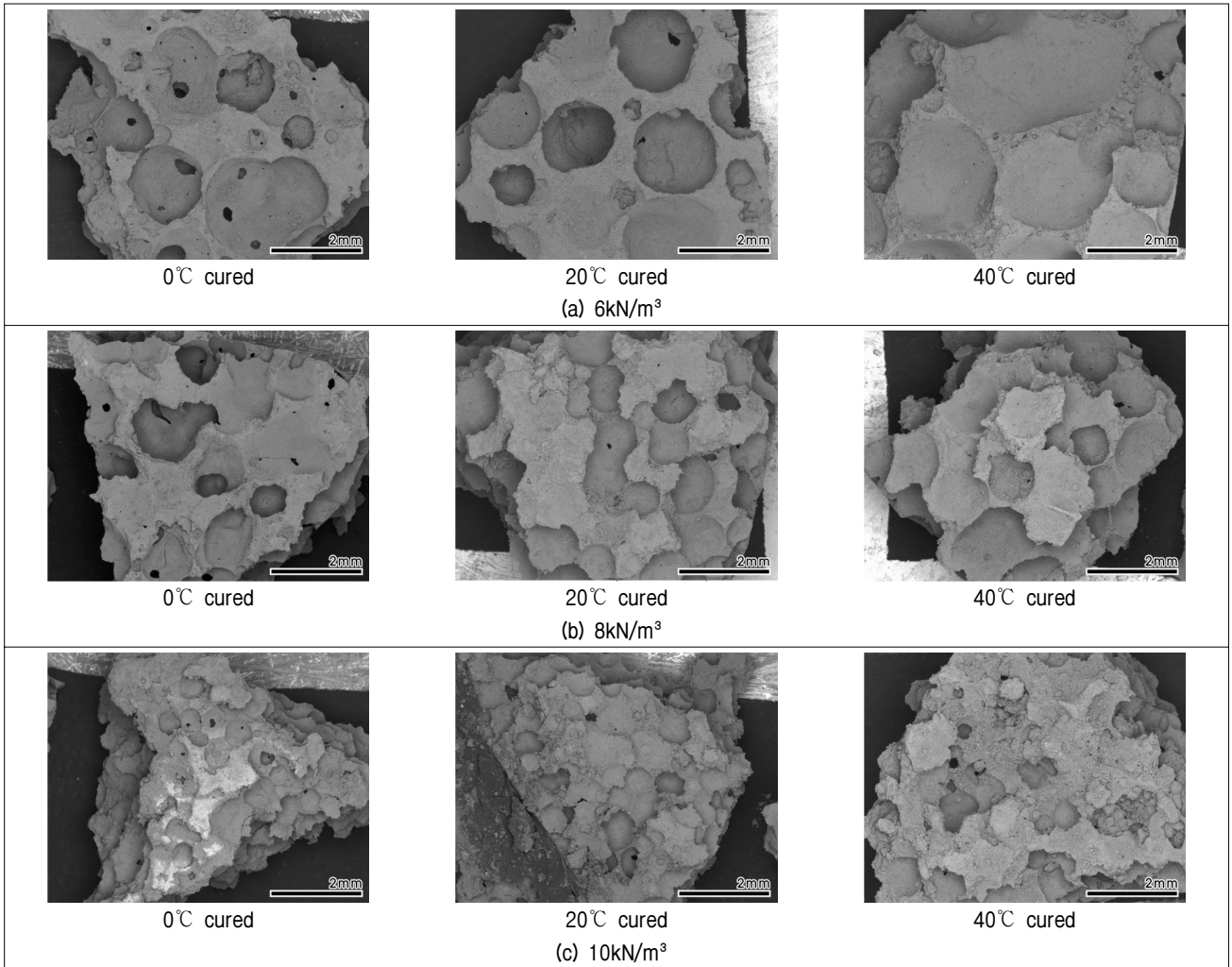


그림 9. 단위중량별 기포형태 SEM Image-×40

4. 결론

경량기포토는 재료적인 측면에서는 연구가 계속해서 이루어지고 있으며 설계 및 시공에 경량기포토의 적용이 증가되고 있다. 하지만 경량기포토의 현장타설 직후 양생온도에 의한 관련된 연구는 매우 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 경량기포토의 양생온도에 따른 일축압축강도의 변화와 양생온도에 따른 단위중량별 특성 변화를 검토하여 적합한 양생온도 관리기준을 제시하였다.

양생온도에 따른 28일 일축압축강도 확인결과 목표 일축압축강도인 1000kPa은 단위중량 6kN/m³에서는 0.5°C~29°C에서 만족하였다. 단위중량 8kN/m³에서는 -2°C~27°C, 단위중량 10kN/m³에서는 -5°C~32°C에서 만족하는 것으로 나타났다.

일축압축강도를 볼 때 적정양생온도를 고려하여 시

공이 이루어져야하므로 각각의 단위중량별 목표압축강도 값을 모두 만족하는 적정 양생온도로 5°C~25°C의 온도범위가 경량기포토의 가장 좋은 압축강도를 확보할 수 있는 양생온도임을 알 수 있다.

양생온도에 따른 소포량 및 외형변화 시험결과, 각각의 단위중량별 결과를 살펴보면 기포로 인해 간극률이 가장 많은 단위중량 6kN/m³의 공시체에서의 체적변화가 가장 많이 일어나고, 8°C 이상에서 설정된 기준 값을 모두 만족하였다. 단위중량 10kN/m³는 비교적 적은 체적변화를 나타내고, 5°C 이상에서 소포량 기준을 만족함을 보였다. 아울러 저온에서는 다소 많은 소포량으로 인해 침하량이 많이 나타남을 확인하였고, 고온 일 때에는 이와 달리 공시체가 부풀어 오르는 현상을 확인할 수 있었다. 허용침하량을 만족시키는 온도의 허용범위는 8°C~25로 나타났다.

압축강도시험에서 제안된 5°C~25°C의 양생온도범

위와 소포에 의한 침하량 관찰시험에서 제안된 8°C~25°C를 모두 만족하는 범위인 8°C~25°C의 양생범위를 경량기포토의 가장 적합한 양생범위로 볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

1. 황중호 (2010), “경량기포토의 역학적 특성”, 석사학위논문, 한국해양대학교.
2. 윤길립, 유승경 (2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성”. 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제 20권, 9호, pp.125-131.
3. 송준호 (2009), “원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석”, 석사학위논문, 부산대학교.
4. 이영준 (2011), “진동이 경량기포토의 강도에 미치는 영향”, 석사학위논문, 한국해양대학교.
5. 이수형 (2005), “석분을 혼입한 경량기포혼합토의 역학적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 건국대학교.
6. 이영준, 김성원, 박이근, 김태형 (2010), “경량기포토의 압축 및 인장 특성”, 한국지반공학회 논문집, 제 26권, 9호, pp.59-69.
7. 일본도로공단 (1996), “기포혼합경량토를 이용한 경량 성토공법의 설계·시공 지침서”.
8. 하이그레이드소일 연구컨소시엄 (2005), “기포혼합토공법 기술자료”.
9. Satoh, T., Tsuchida, T., Mitsukuri, K. and Hong, Z (2001): Field placing test of lightweight treated soil under seawater in Kumamoto Port, Soils and Foundations, Vol.41, No.5, pp.145-154.
10. Tsuchida, T., Fujisaki, H., Makibuchi, M., Shinsya, H., Nagasaka, Y. and Hikosaka, M (2000): Use of light-weight treated soils made of waste soil in airport extension project, Journal of JSCE, No.644, VI-46, pp.13-23.
11. Tsuchida, T., Kikuchi, Y., Yamamura, K., Funada, K and Wako, T. (2001): Slice Method for Earth Pressure Analysis and its Application to Light-Weight Fill, Journal of the Japanese Geotechnical Society, Vol.41, No.3 (in Japanese).
12. 土田孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田滙夫(1996), “山本實:岸壁の裏込め材として打設されそ輕量混合處理土の土質特性”, 港灣技研ニ資料, No.833.

(접수일자 2011. 10. 4, 심사완료일 2012. 4. 9)