

경량기포토의 압축 및 인장 특성

Compression and Tensile Characteristics of Lightweight Air-Trapped Soil

이 영 준¹ Lee, Young-Jun 김 성 원² Kim, Sung-Won
박 이 근³ Park, Lee-Keun 김 태 형⁴ Kim, Tae-Hyung

Abstract

This study is experimentally investigated for characteristics of lightweight air-trapped soils with uniform quality. Previously, EPS (Expanded PolyStyrene) blocks are often used as lightweight embankment, but many problems such as the level difference and cracks were caused by plastic (creep) deformation. So, a new material development is urgent. By means of alternatives, lightweight air-mixed soil using in-situ soils has been developed and applied to fields. In comparison with EPS block, lightweight air-mixed soil has less plastic (creep) deformation in long period, but the strength characteristics are different according to the soils where they are obtained. Therefore, the quality management of lightweight air-mixed soil is very difficult. Therefore in this study, characteristics of lightweight air-trapped soil using a manufactured sand with uniform quality are investigated. To found out the compression and tensile characteristics of lightweight air-tapped soils, unconfined compression test and splitting tensile test are conducted on the specimens prepared with different unit weight, cement-sand ratio and air-pore.

요 지

본 연구는 균질한 품질을 가지는 경량기포토의 특성을 파악하기 위해 실시되었다. 이전에는 경량성토재로서 EPS (Expanded PolyStyrene)가 주로 사용되었지만, EPS의 소성변형으로 인한 단차 및 균열과 같은 문제가 발생되어 새로운 재료의 개발이 시급한 실정이다. 대체 공법으로 현장의 준설토를 활용한 경량기포혼합토가 개발되고 현장에 적용되었다. 경량기포혼합토는 EPS공법에 비해 장기적인 소성변형이 더 적은 장점이 있지만, 채취되는 준설토의 위치에 따라 서로 상이한 강도특성을 지니고 있어 품질관리에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 공장에서 생산된 균질한 품질의 모래를 혼합한 경량기포토의 특성을 파악하였다. 즉, 경량기포토의 압축 및 인장특성을 파악하기 위해 단위중량과 시멘트-모래비 및 기포량을 달리한 공시체에 대하여 일축압축시험과 간접인장강도시험이 실시되었다.

Keywords : Creep, EPS, Lightweight air-trapped soil, Splitting tensile test, Unconfined compression test

1. 서 론

국내에서는 경량성토를 필요로 하는 곳에 EPS가 주

재료로 이용되어 왔으나, EPS가 갖는 소성변형(크리프)으로 인한 문제점이 노출되기 시작하면서 최근에는 원료토에 물과 시멘트를 첨가하여 유동화한 것에 기포를

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

2 정회원, (주)무성토건, 차장 (Member, Deputy General Manager, MUSUNG Construction Co., LTd)

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

4 정회원, 한국해양대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신처자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

혼합하는 경량기포혼합토를 적용시키고자 많은 연구가 이루어지고 있다. 경량기포혼합토는 물과 시멘트와 같은 고화재를 혼합하여 유동화 시킨 것에 기포를 주입하여 제작한 것으로, 일반 토사에 비해 가벼우며 지반 등에 미치는 하중을 경감할 수 있다. 또한 유동성이 높으므로 펌프를 이용하여 압송에 의한 타설이 가능하므로 시공이 용이하다. 게다가 진흙 등의 저품질 토양을 유효하게 활용할 수 있다. 또한 혼합 직후에는 유동성을 나타내나 고화재의 반응에 따라 최종적으로는 양질의 토양재료와 같거나 그 이상의 강도특성을 가지는 고화처리토가 될 수 있는 장점을 가지고 있다. 그래서 경량기포혼합토는 일반적인 흙으로는 시공이 곤란한 장소에서의 시공에서도 적합하다(일본도로공단, 1996; 土田孝 등, 1996).

경량기포혼합토의 구체적인 용도를 살펴보면, 가옥이나 일반도가 근접하는 장소에서의 도로의 신설이나 확폭을 하는 경우에 근접지나 시설 성토로의 성토 하중의 저감을 도모할 수 있고 단기간에 저소음, 저진동으로 연직성토가 가능하다. 지반활동이 예상되는 사면의 두부에 이용함으로써 성토하중을 저감하고, 지반활동 대책경감을 도모할 수 있다. 교대나 옹벽 등의 구조물 뒷채움부에 이용함으로써 구조물 배면에 작용하는 토압을 경감할 수 있어 구조물 변형과 하부지반의 변형을 감소시킬 수 있고 기초 말뚝 등의 구조물의 규모를 작게 하는 것이 가능하다. 산악도로 등 급경사지에서 연결성토에 이용함으로써 공사용 진입로나 재료 운반을 경감할 수 있다. 또한 절성토량을 감소시킬 수 있다. 경량기포혼합토는 또한 유동성이 우수하기 때문에 발판 아래의 공동이나 지하 매설물의 내부의 충전 등에도 적합하다(古谷俊明 등, 1988).

경량기포혼합토의 압축강도에 영향을 미치는 인자에 대한 국내 연구로서 김주철과 이종규(2002)에 의해서 시료의 초기함수비, 시멘트 함유율, 기포의 함유율 및 양생방법 등이 주요 인자로 알려졌으며, 이후 윤길림과 김병탁(2004)에 의해 이러한 영향인자들을 이용하여 경량기포혼합토의 임의 배합에 따른 일축압축강도를 추정하는 기법이 해양연구원에 의해 개발되었다. 이후 윤길림과 유승경(2004)의 연구에서는 현장발생토의 초기함수비, 시멘트 첨가량, 기포첨가량을 고려한 정규화계수로 표현되는 일축압축강도의 적절한 회귀식을 제시하였으며, 원료토의 채취지역에 따라 이 정규화계수가 달라지는 것을 지적하였다. 원료토의 채취지역에 따

라 경량기포혼합토의 일축압축강도가 달라지는 이유는 원료토를 구성하고 있는 모래, 실트, 점토의 함유량에 따라 각각의 상호작용과 기포의 형성을 방해하는 소포현상의 영향에 의한 것으로, 그 결과로 인해 경량기포혼합토의 단위중량, 강도, 변형특성 모두에 영향을 미친다는 것을 밝혔다(송준호 등, 2008; 송준호, 2009). 이와 같이 경량기포혼합토는 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라, 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 어려움이 있는 것이 사실이므로 현장적용에 있어서는 이들에 대한 철저한 시공관리가 요구되는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 경량기포혼합토의 단점이 보완된 품질이 균질한 대체 경량기포재료의 개발이 요구된다. 이를 위해 먼저 원료토를 포함하지 않은 경량기포토에 대한 기초적인 특성 연구가 필요하고, 아울러 균질한 특성을 가진 공장에서 생산된 재료를 혼합한 경량기포토의 특성에 대한 연구도 요구된다.

그래서 본 연구에서는 먼저 기초적인 연구로 균질한 품질의 경량기포토의 압축 및 인장강도특성에 대해 검토하고자 한다. 연구 대상은 흙을 전혀 포함하지 않은 경량기포토와 공장에서 생산된 품질이 균질한 모래를 포함한 경량기포토에 대해 시험이 실시되었다. 본 연구를 통해 소요 단위중량에 대한 압축강도 및 변형, 인장강도 특성을 파악하여 경량기포토에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

아울러 본 논문에서는 경량기포혼합토와 경량기포토 용어를 구분하여 사용하였다. 경량기포혼합토는 재료의 경량화를 위하여 액성한계 이상으로 조정하여 슬러리화 된 준설토나 건설발생토 등의 원료토에 시멘트와 같은 고화재 및 경량화 재료인 기포제를 첨가·혼합해서 만들어진 재료이고, 경량기포토는 재료특성이 불균질한 원료토를 제외한 시멘트 고화재와 기포제가 결합된 재료나 또는 공장에서 생산된 균질한 재료특성을 가진 모래와 시멘트 고화재, 기포제가 결합된 재료이다.

2. 실내시험

2.1 재료특성

본 연구에서는 경제성을 고려하여 일반적인 제조 및 시공에 이용되는 보통 포트랜드시멘트를 고화재로 사용하였고, 품질이 균질한 경량기포토의 제작을 위해 공장에서 생산된 모래를 사용하였다. 또한 여러 종류의 기

포제 중 경량기포토의 파포, 소멸, 강도 특성을 고려하여 동물성 기포제를 사용하였다. 시험에 사용된 각 재료들에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

2.1.1 시멘트

본 연구에서는 KS L 5201의 규정에 적합한 H사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 물리적 성질은 표 1과 같다.

2.1.2 모래

본 연구에서는 품질이 비교적 균일한 경량기포토의 제

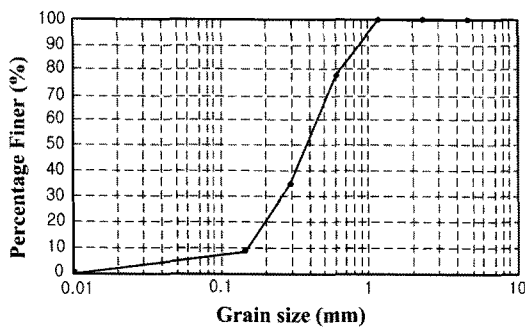


그림 1. 모래의 입도분포곡선

표 1. 포틀랜드 시멘트의 물리적 특성

비중	분말도	응결		안정도 (%)	압축강도(MPa)		
		초결(분)	종결(분)		3일	7일	28일
3.15	3,354	205	275	0.09	28.8	39.1	52.2

표 2. 모래의 물리적 특성

입경(mm)	흡수율(%)	비 중
0.6이하	1.18	2.65

표 3. 동물성기포제의 화학적 성분(이수형, 2005)

(단위 : %)

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

표 4. 동물성기포제의 물리적 특성

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

표 5. 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(Cr ⁶⁺)	1	불검출	USEPA 3060A	UV-VIS

작을 위해 균질하게 생산되는 모래를 사용하였으며, 입도 포곡선은 그림 1과 같으며 유효입경(D10)은 약 0.15mm이다. 또한 모래의 물리적 특성은 표 2와 같다.

2.1.3 기포제

동물성기포제는 단백질계 기포제로서 단백질의 원료로는 동물의 혈액, 유제성분인카세인, 동물의 뼈, 꿀의 분말인 젤라틴 등이 있다. 이들은 여러 종류의 아미노산으로 구성되어 있고 이것을 알칼리로 가수분해하여 중화한 후 여과한 것을 철염이나 방부제를 첨가하여 제작되었다. 동물성기포제의 일반적인 화학적 성분은 표 3과 같다(이수형, 2005).

본 시험에 사용된 H사의 동물성 단백질계 기포제는 동물의 잔재물인 뿔, 발톱, 털 등을 가수분해한 후 단백질을 추출하여 제조한 제품이며, 이 폐기물은 처리하는데 막대한 연료비와 발생하는 유해물로 인하여 매연과 지하수 오염을 유발하므로 매우 친환경적인 기포제로서 물리적 특성은 표 4와 같다.

또한, 동물성기포제의 환경오염 가능성을 알아보기 위해 본 시험에 사용된 기포제에 대한 중금속 검출시험

을 실시하였다. 시험결과 표 5와 같이 모두 기준에 만족한 결과를 얻었다.

2.2 배합표

경량기포토의 역학적 특성 및 강도발현에 영향을 미치는 영향을 분석하고, 차후 강도나 단위중량에 따른 제품 생산 시에 적용을 위한 최적배합을 도출하기 위하여 16가지의 배합비를 설정하였다. 우선 기본적으로 단위중량에 따른 경량기포토의 특성을 파악하기 위하여 4~11kN/m³까지 변화시키며 배합비를 설정하였다. 시료 번호 1~4번은 모래를 포함하지 않은 상태에서의 강도를 측정하여 모래의 첨가량에 따른 변화를 알아보기 위한 배합이며, 5~16번은 시멘트-모래의 비를 1 : 1에서 1 : 3까지 변화시켜 시멘트-모래비에 따른 변화를 알아보기 위해 설정하였다(표 6).

2.3 장치 및 공시체 제작

물로 희석한 기포제를 압축공기와 함께 발포장치에 넣어 넣고 소정의 발포비율이 되도록 공기압을 조절하여 제조한다. 본 연구에서는 실내 실험용 공시체의 제작을 위해 소규모의 기포발생장치를 제작하여 사용하였다. 또한, 본 연구에서는 기포발생장치를 통해 발생된

기포를 시멘트 슬러리에 혼합하는 선기포방식을 적용하였다.

공시체는 시멘트와 모래, 물을 핸드믹서를 사용하여 혼합한 시멘트슬러리에 기포발생장치를 통해 발포된 기포와 혼합하여 제작하게 된다. 시멘트슬러리와 기포가 혼합된 기포슬러리는 미리 제작되어진 PVC관(일축 : 직경 5cm, 높이 10cm, 인장 : 직경 5cm, 높이 3cm)에 성형하게 된다. 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 기포군의 단위중량은 0.5±0.05kN/m³으로 공시체를 제작하였다.

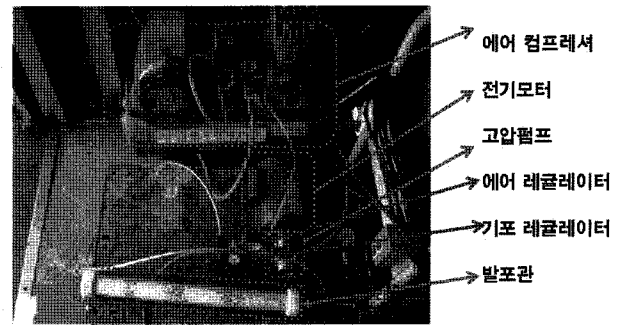


그림 2. 기포발생장치

표 6. 배합비

(단위 : kg)

구분	슬러리	시멘트 슬러리				기포군			기포슬러리 밀도: ①+② (kN/m ³)	
		No.	γ-C-S	시멘트	잔골재	수량	물/시멘트	시멘트 슬러리 중량: ①		기포제
1	4-1-0	245	0	122.5	0.50	367.5	0.64	31.35	31.99	4
2	6-1-0	380	0	190	0.50	570	0.55	27.02	27.57	6
3	8-1-0	515	0	257.5	0.50	772.5	0.46	22.7	23.16	8
4	10-1-0	655	0	327.5	0.50	982.5	0.37	18.21	18.58	10
5	6-1-1	217	217	143.2	0.66	577.2	0.55	26.83	27.38	6
6	8-1-1	294	294	194	0.66	782	0.46	22.45	22.91	8
7	10-1-1	370	370	244.2	0.66	984.2	0.37	18.12	18.49	10
8	11-1-1	407	407	268.6	0.66	1082.6	0.33	16.01	16.34	11
9	6-1-2	147	294	132.3	0.90	573.3	0.54	26.7	27.24	6
10	8-1-2	200	400	180	0.90	780	0.45	22.19	22.64	8
11	10-1-2	253	506	227.7	0.90	986.7	0.36	17.68	18.04	10
12	11-1-2	278	556	250.2	0.90	1084.2	0.32	15.55	15.87	11
13	6-1-3	110	330	132	1.20	572	0.54	26.6	27.14	6
14	8-1-3	150	450	180	1.20	780	0.45	21.88	22.33	8
15	10-1-3	188	564	225.6	1.20	977.6	0.36	17.49	17.85	10
16	11-1-3	208	624	249.6	1.20	1081.6	0.31	15.18	15.49	11

2.4 소포율 및 플로우

2.4.1 소포율(침하량)

침하량의 측정은 KS F 4039 “현장타설용 기포 콘크리트”의 시험방법에 준하여 시험하였으며, 시험편 성형 후 곧바로 표면을 수평으로 컷팅한 후 24시간 경과 후 컷팅된 표면에서의 침하된 깊이를 그림 3과 같이 측정하였고, 측정된 결과는 표 7과 같다.

2.4.2 플로우

플로우 시험은 그림 4와 같이 KS F 4039에 규정된 방법에 준하여, 크기 350mm×350mm 유리판에 안지름 80mm, 높이 80mm의 원통형 몰드를 놓고 기포콘크리트를 채운 후 몰드를 들어 올려 시료가 퍼진 후 4곳의 지름을 측정하고 그 평균값을 플로우로 하였다. 이 값 역시 3회 시험의 평균치를 측정할 값으로 한다.

2.5 시험내용 및 방법

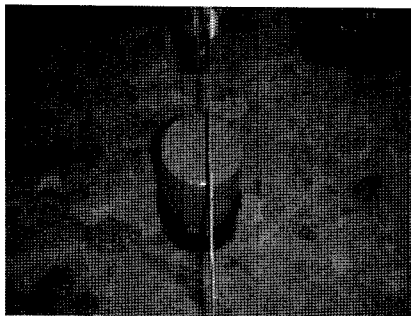
2.5.1 일축압축시험

배합조건에 따른 경량기포토의 강도-변형 특성과 단

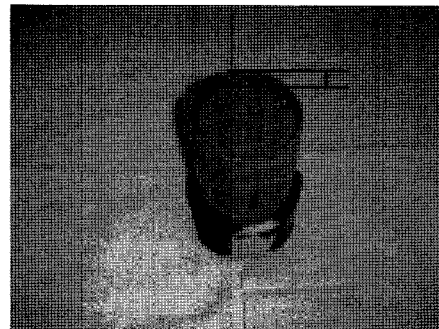
위중량 및 시멘트-모래 비의 관계를 조사하기 위해 일축 압축시험을 실시하였다. 일축압축시험은 측압이 없는 상태에서 상하로 축하중을 주어 시료를 파괴시키는 방

표 7. 침하량 및 플로우 측정결과

No.	구분	침하량(mm)	플로우(mm)
	γ -C-S		
1	4-1-0	10	220
2	6-1-0	0	220
3	8-1-0	0	275
4	10-1-0	0	280
5	6-1-1	2	210
6	8-1-1	0	230
7	10-1-1	0	250
8	11-1-1	0	275
9	6-1-2	2	210
10	8-1-2	0	225
11	10-1-2	0	255
12	11-1-2	0	265
13	6-1-3	0	195
14	8-1-3	0	220
15	10-1-3	0	265
16	11-1-3	0	280

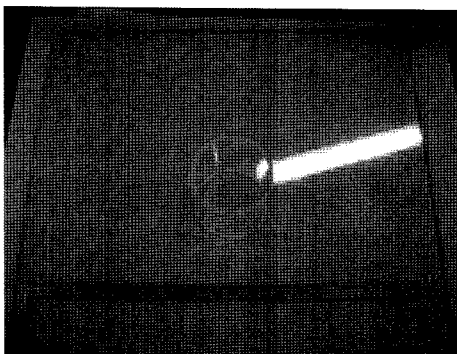


(a) 시험편 성형 후 표면 컷팅

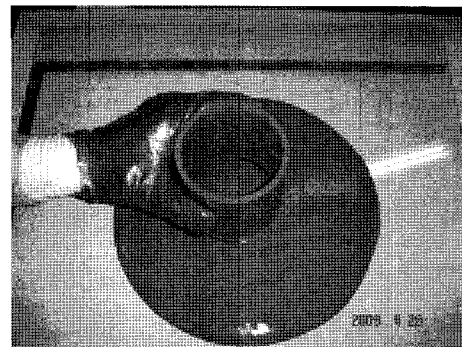


(b) 24시간 경과 후 침하량 측정

그림 3. 침하량 측정방법



(c) 플로우 시험 콘 및 스케일



(d) 플로우 측정

그림 4. 플로우 측정방법

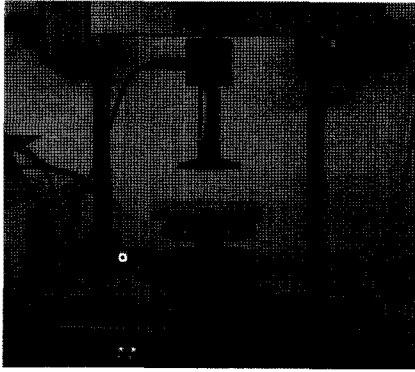


그림 5. 일축압축시험장치

법으로 비배수 삼축압축시험에서 구속압력이 0인 경우의 시험에 해당한다. 시험 방법은 KS F 2314에 따라 그림 5와 같은 일축압축시험기를 이용하여 실시하였고, 공시체는 내경 5cm, 길이 10cm이다.

2.5.2 간접인장강도시험

경량기포토의 인장강도는 일축압축강도와 더불어 역학적 특성을 나타내는 중요한 요소로서 성토재 뿐만 아니라 기타 토목 및 건축 재료로 적용성을 판단하는 조건이 된다. 따라서 본 연구에서는 KS F 2423 콘크리트의

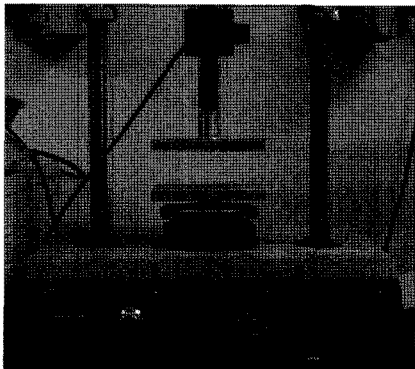


그림 6. 인장강도시험장치



(a) 단위시멘트량, 단위중량이 높은 경우

조깅 인장강도 시험방법에 따라 간접인장강도시험을 실시하였고, 시험에 사용되는 공시체는 직경 5cm, 길이 3cm이다. 시험 장비는 그림 6과 같은 일축압축시험기를 이용하여 간접인장강도시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 분석

본 장에서는 앞에서 소개된 시험방법으로 경량기포토에 대해 실시된 시험결과를 분석하였다. 구체적으로 여러 단위중량에 대한 모래첨가의 유무에 따른 일축압축강도 및 간접인장강도 특성 등이 파악되었다.

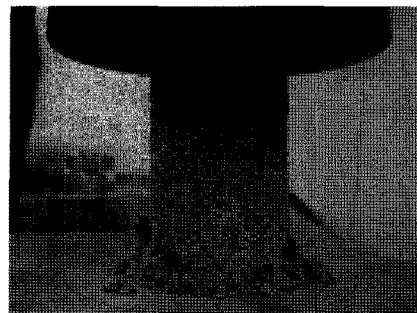
3.1 일축압축강도

시멘트-모래비에 따라 단위중량을 달리하여 설정한

표 8. 일축압축강도 시험결과표

(단위 : kPa)

No.	구분	양생 기간
	($\gamma - C - S$)	28일
1	4-1-0	191
2	6-1-0	1085
3	8-1-0	2292
4	10-1-0	4940
5	6-1-1	584
6	8-1-1	1089
7	10-1-1	2239
8	11-1-1	4363
9	6-1-2	234
10	8-1-2	419
11	10-1-2	1456
12	11-1-2	1572
13	6-1-3	65
14	8-1-3	192
15	10-1-3	908
16	11-1-3	1040



(b) 단위시멘트량, 단위중량이 낮은 경우

그림 7. 공시체의 파괴형태

배합비로 제작된 공시체를 각각 3회씩 일축압축시험을 실시하여 얻어진 평균값을 요약한 결과는 표 8와 같다.

경량기포토는 그림 7(a)와 같이 시멘트 함유율이 높고(모래 함유율 낮고) 단위중량이 증가할수록 전단파괴면이 수직에 가까운 취성적 거동을 보이며 파괴되었다. 반면에 시멘트 함유율이 낮고(모래 함유율 높고) 단위중량이 감소할수록 그림 7(b)와 같이 뚜렷한 전단파괴면을 보이지 않고 선단부분에서 스펀지처럼 압축되며 연성적으로 파괴되는 거동양상을 보였다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 육안으로도 두 시료의 특징을 확연히 구분할 수 있다. 이것은 고화체의 강도에 중요한 역할을 하는 모래, 시멘트와 기포의 양에 의한 것으로 아래 “시멘트-모래비의 영향”, “기포함유율을 영향”, “양생조건의 영향”에서 자세히 언급되어 있다.

3.1.1 응력-변형 거동

경량기포토의 응력-변형특성을 고찰하기 위해 구성요소인 시멘트-모래비에 따른 거동을 분석하였다. 그림 8은 모래를 포함하지 않은 공시체에 대한 응력-변형곡선으로, 2번 공시체의 경우 압축변형률의 증가에 따른 뚜렷한 최대 강도 값을 보이지 않고 그림 7(b)에서 같이 뚜렷한 전단파괴면 없이 선단부분에서 스펀지처럼 압축되며 연성적으로 파괴되는 거동양상을 보였다. 이는 공시체 내의 기포의 영향으로 판단된다. 즉, 슬러리화된 시멘트의 단위중량을 작게 만들수록 첨가되는 기포의 양은 증가하기 때문에 이로 인해 파괴 시 전반적인 파괴가 진행되는 것이 아니라 선단(상부 또는 하부)에서 국부적인 파괴가 발생하게 되는 것으로 판단된다. 이와 달리 4번 공시체의 경우 강도-변형거동은 변형률이 증가함에 따라 최대강도값이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수

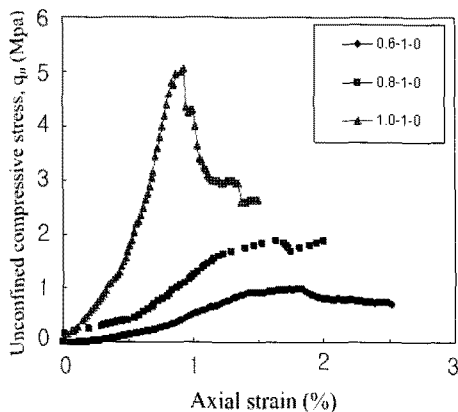


그림 8. 단위중량에 따른 응력-변형곡선

있다. 그리고 압축변형률 1%이내에서 전반적인 파괴가 발생하며 파괴 후 급격한 응력저감 양상이 보이는 것을 알 수 있다. 시험 후 파괴형태는 그림 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같은 뚜렷한 전단파괴면을 가진 파괴모습을 보여준다.

3.1.2 시멘트-모래비의 영향

경량기포토는 균질한 품질확보를 위해 공장에서 생산된 모래를 혼합하여 제작하게 된다. 물론 시멘트의 혼합량을 많이 사용하는 것이 압축강도 측면에서 유리하지만, 경량기포토의 경제성을 확보하기 위해서는 고화체의 양을 최대한 줄이면서 소요강도를 얻는 것이 중요하다. 그림 9에서 보는 바와 같이 동일한 시멘트량을 사용하여 만들어진 공시체의 경우 모래의 비율이 높은 공시체의 강도가 높게 나오는데 이것은 모래가 경량기포토를 만들 때 골격역할을 하는 재료로서 사용되어 외부 하중에 저항하는 요소로 작용하기 때문으로 판단된다. 모래의 사용 이유가 경제적인 이유에서도 필요하지만 경량기포토의 역학적 성질 개선 측면에서도 필요함을 보여주는 자료이다. 따라서 적정 시멘트함유율을 결정하는 것은 경량기포토의 특성과 경제성을 판단하는 측면에서 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

그림 9는 시멘트-모래비에 따른 단위중량과 일축압축강도사이의 관계를 나타내고 있다. 기존의 연구에서와 같이 시멘트함유량이 증가할수록 압축강도도 같이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 강도 증가 비율은 시멘트-모래비에 따라 서로 다른 경향을 보이고 있다. 시멘트함유량이 높은 경우(즉, 모래 함유율이 낮은 경우 C-S

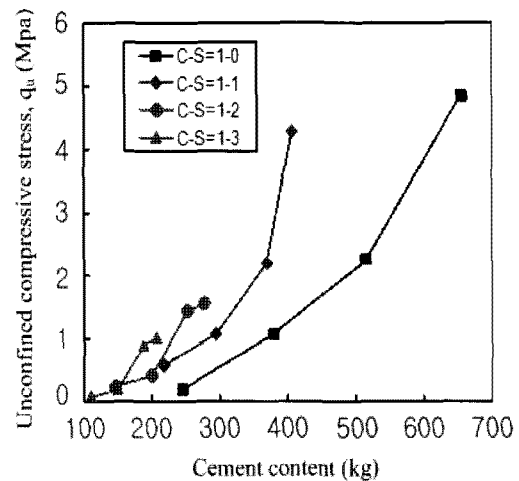


그림 9. 일축압축강도와 시멘트함유량과의 관계

= 1-0과 1-1) 단위중량이 증가할수록 강도가 수직에 가까운 기울기를 보이며 증가하고, 최대강도 또한 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 시멘트함유량이 낮은(즉, 모래 함유율이 높은 경우 C-S = 1-2과 1-3) 경우에는 단위중량이 증가할수록 강도의 증가가 시멘트함유량이 높은 경우에 비해 낮고 최대강도도 낮게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이것은 시멘트가 고화재로 경량기포토의 고화와 강도 증진에 역할을 하는데 있어 혼합된 모래의 양에 따라 그 역할의 크기가 다르기 때문이다.

3.1.3 기포함유율의 영향

그림 10은 기포함유율과 일축압축강도와와의 관계를 나타낸 그래프이다. 본 그림에서 기포함유율은 배합표상에서 기포균중량을 체적으로 환산하여 전체 체적에 대한 비로써 나타내었다. 경량기포토는 경량화를 위해 혼합한 기포로 인해 압축강도의 감소가 예상되는데 그림에서 보는 바와 같이 기포함유량이 증가할수록 압축강도가 감소함을 알 수 있다. 이것은 동일한 시멘트-모래비에 대해 낮은 단위중량을 가진 경량기포토를 만들기 위해서는 많은 양의 기포를 혼입해야 하고 많은 기포를 가진 고화된 공시체는 그림 7(b)에 보는 바와 같이 외부 하중에 대해 기포부분의 저항이 상대적으로 약해 강도의 감소를 초래하는 것이다. 강도의 감소 비율은 시멘트-모래비에 따라 서로 다른데 시멘트 함유율이 높은 경우가 기포의 함량에 따라 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 모래가 경량기포토에서 골격 역할을 통해 강도에 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 앞 절에서 언급한 바와 같이 모래가 경량기포토의 역학적 성질 개선 측면에서 필요함을 보여주는 자료이다. 적정량의 기포 혼입은 경량기포토에 매우 중요한데 기포함유율이 낮

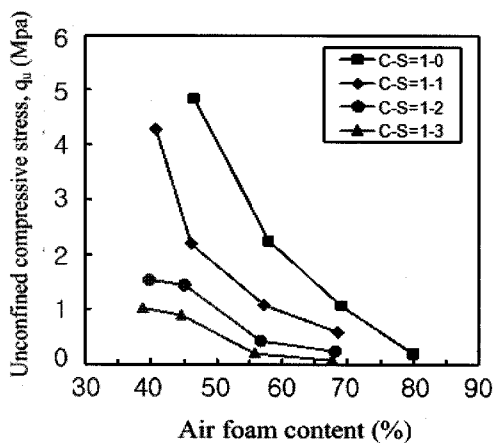


그림 10. 기포함유율과 일축압축강도와와의 관계

을수록 압축강도 측면에서는 유리하지만, 경량기포토의 경제성을 확보하기 위해서는 최대한 기포함유율을 높이는 것이 필요하므로 적정량의 기포 혼입은 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

3.1.4 양생조건의 영향

경량기포토를 몰드에 타설한 후 48시간 이내에 탈형하여 후 물 속에서 7일 및 28일 수중양생 시킨 공시체와 28일 습윤양생 시킨 공시체에 대하여 일축압축시험을 한 결과는 표 9와 같다. 공기 중에서 양생한 28일 공시체의 경우 일축압축강도는 습윤양생한 경우에 비하여 약 8.5~12.6% 정도의 감소율을 보이는 것을 알 수 있다 (그림 11). 이것은 경화에 따른 수축이 공기 중에 양생하는 것이 습윤양생에 비해 크기 때문이다. 수중양생된 공시체의 경우 공기건조나 습윤양생 공시체에 비해 강도가 낮게 산정되었는데 이것은 물속에서 시멘트의 강도 발현이 거의 일어나지 않았기 때문에 발생한 결과로 볼 수 있다. 또한 수중양생된 공시체의 경우 시멘트-모래비에 상관없이 거의 일정한 강도 값을 가지고 있는 반면 공기건조나 습윤양생된 공시체는 시멘트-모래비가 증가함에 따라 강도 감소되고 결국, 모래의 비율이 높은 시료 14번(C-S = 1:3)의 경우 수중양생된 공시체가 건조나 습윤양생된 공시체의 강도 값이 거의 같음을 알 수 있다. 이것은 경량기포토에서 시멘트 양이 감소함에 따

표 9. 양생조건에 따른 일축압축강도 (단위 : kPa)

No.	구분 ($\gamma - C - S$)	양생기간		
		수중양생		습윤양생
		7일	28일	28일
1	4-1-0	149	158	191
2	6-1-0	195	204	1085
3	8-1-0	236	288	2292
4	10-1-0	311	419	4940
5	6-1-1	241	278	584
6	8-1-1	291	309	1089
7	10-1-1	217	279	2239
8	11-1-1	327	324	4363
9	6-1-2	146	256	234
10	8-1-2	189	208	419
11	10-1-2	289	326	1456
12	11-1-2	293	407	1572
13	6-1-3	210	202	65
14	8-1-3	205	258	192
15	10-1-3	363	414	908
16	11-1-3	534	594	1040

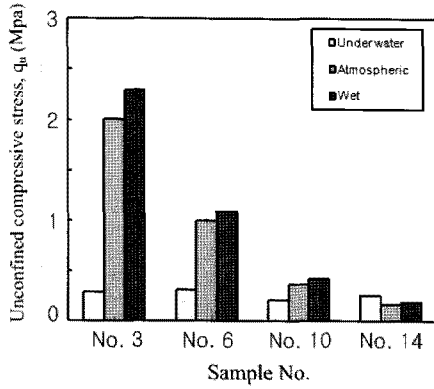


그림 11. 양생조건에 따른 일축압축강도(28일 양생된 공시체)

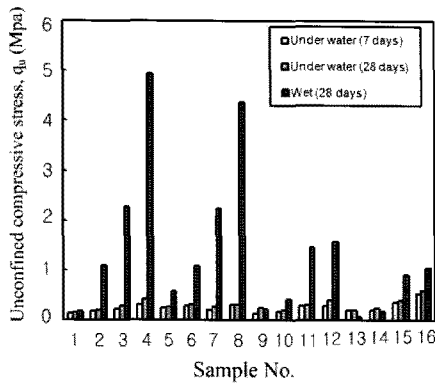


그림 12. 양생기간에 따른 일축압축강도

라 기포토에서 골격역할을 하는 모래의 영향이 시멘트의 영향에 비해 상대적으로 증가되었기 때문이다.

그림 12는 각각 7일 및 28일 동안 수중양생한 공시체의 일축압축강도와 28일 습윤양생된 공시체의 일축압축강도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 습윤양생에 비해 7일 및 28일동안 수중양생된 공시체의 경우 강도의 차이가 적은 것으로 보아 시멘트의 강도발현이 거의 되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 경량기포토를 수중에 타설해야 하는 경우에는 차수 처리를 하거나 별도의 첨가제나 혼화제가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 모래의 함유량이 많을수록 수중 양생된 공시체의 강도가 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 경량기포토에서 모래의 골격역할에 의한 것으로 판단된다. 또한 경량기포토를 수중 양생하는 경우에는 수압에 의한 소포량의 증가가 예상되므로 이를 고려한 수정 배합이 필요할 것으로 보인다. 이에 대한 연구는 추후 진행을 하고자 한다.

3.1.5 변형계수(E50)

변형계수는 재료의 거동을 설명하는 중요한 요소 중

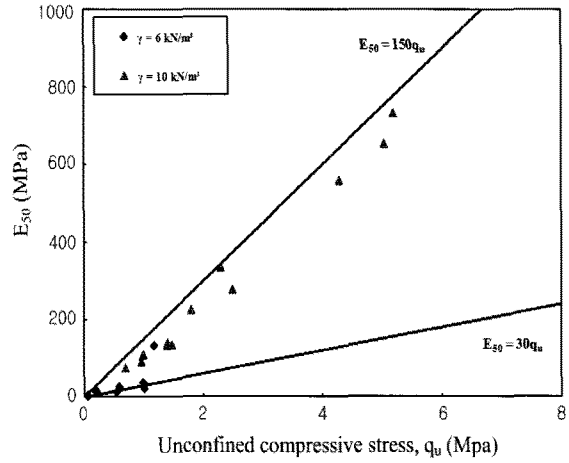


그림 13. 단위중량에 변형계수

표 10. 단위중량에 따른 일축압축강도와 변형계수의 관계

단위중량(kN/m ³)	관계식
6	$E_{50} = 56.36q_u$
10	$E_{50} = 129.49q_u$

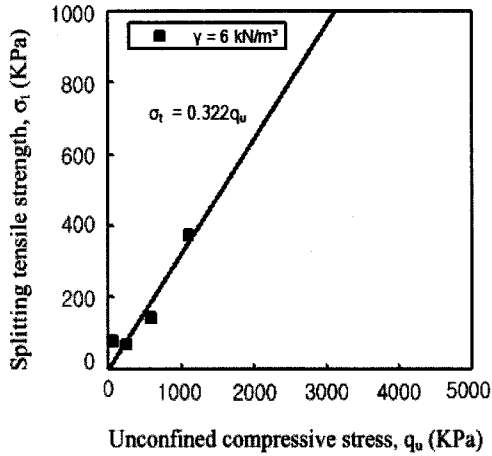
하나로 본 연구에서는 28일 습윤양생된 경량기포토를 기준으로 일축압축강도와 변형계수의 상관관계를 산정하고 분석하였다(그림 13). 공시체 2번, 5번, 9번 13번과 4번, 7번, 11번, 15번에 대하여 분석한 결과 제시된 범위는 식 (1)과 같다.

$$E_{50} = (30 \sim 150) \times q_u \quad (1)$$

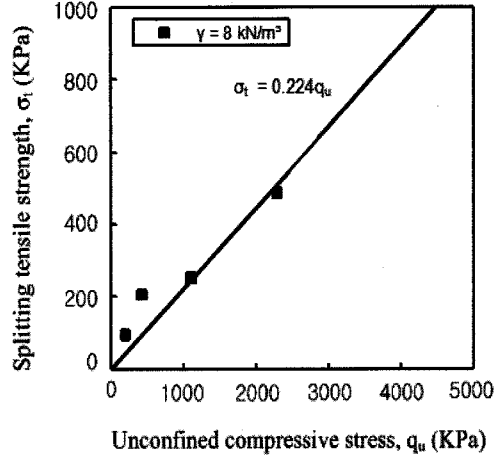
표 10은 단위중량에 따른 E₅₀의 관계를 정리한 것으로, 경량기포토의 단위중량이 증가할수록 변형계수는 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 동일한 하중을 받는 경량기포토가 단위중량이 커질수록 더 작은 변형을 유발하는 것을 나타낸다.

3.2 간접인장강도시험(일축압축강도와의 관계성)

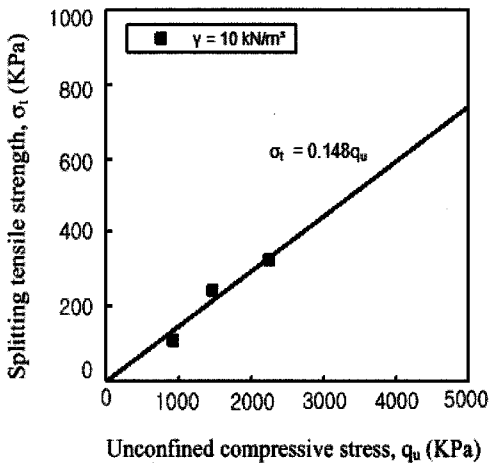
경량기포토의 간접인장강도는 일축압축강도와 유사한 경향을 보이는데, 단위중량이 증가하고, 양생기간이 증가함에 따라 강도가 증가하였으며 같은 단위중량 조건에서 모래의 함유량이 높아질수록 간접인장강도가 감소하는 것으로 나타났다. 간접인장시험 결과를 표 11에 요약하였고, 전체 간접인장강도와 일축압축강도의 관계를 알아보기 위하여 두 시험 결과를 그림 14와 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 단위중량이 증가할수록 일축압축강도에 대한 인장강도의 비율이 점점 작



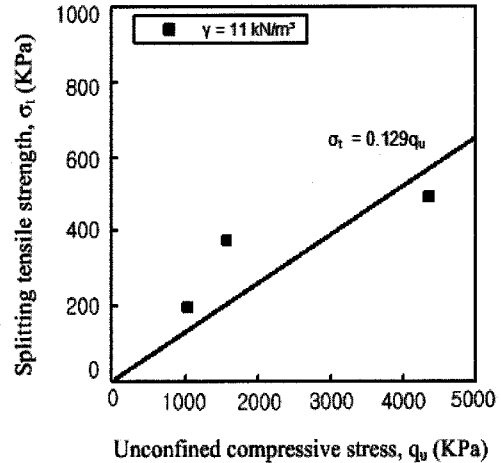
(a) 단위중량 6kN/m³



(b) 단위중량 8kN/m³



(c) 단위중량 10kN/m³



(d) 단위중량 11kN/m³

그림 14. 일축압축강도와 간접인장강도의 관계

표 11. 인장강도시험결과(습윤양생)(단위 : kPa)

구 분		양생기간
No.	(γ -C-S)	28일
1	4-1-0	125
2	6-1-0	373
3	8-1-0	485
4	10-1-0	487
5	6-1-1	140
6	8-1-1	250
7	10-1-1	324
8	11-1-1	490
9	6-1-2	69
10	8-1-2	203
11	10-1-2	241
12	11-1-2	374
13	6-1-3	77
14	8-1-3	94
15	10-1-3	107
16	11-1-3	196

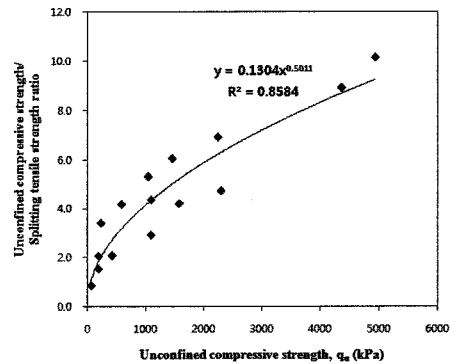


그림 15. 일축압축강도와 일축강도/인장강도의 관계

아지는데, 이는 경량기포토 내의 기포량에 따라 인장강도와 일축압축강도의 관계가 서로 상이하다는 것을 보여주는 것으로 적절한 배합을 통하여 대상 구조물에 요구되는 목표일축압축강도와 목표인장강도를 고려한 설계가 필요할 것으로 판단된다.

그림 15는 일축압축강도와 일축압축강도/인장강도비

의 관계를 나타낸 그래프이다. 일축압축강도 1000kPa까지는 일축강도/인장강도비가 급격히 증가하지만 그 이후에는 일정한 기울기로 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 EPS 공법을 보완한 경량기포토공법의 품질 확보 및 관리가 어려운 점을 극복하기 위해 균질한 품질로 대량생산이 가능한 모래를 사용함으로써, 경량기포토의 설계와 시공에 필요한 기초자료의 제시를 목적으로 하고 있다. 이를 위해 다양한 조건의 배합비를 설정하여 실내 시험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 경량기포토의 일축압축강도는 단위중량, 시멘트 함유량이 증가함에 따라 높아지는 경향을 나타냈다. 또한 단위중량이 크고 강도가 큰 공시체에서는 응력-변형률 곡선의 기울기가 크고 뚜렷한 파괴점이 나타나며 축방향에 가까운 균열을 보이며 취성적인 거동이 나타났다. 단위중량이 작고 강도가 작은 경우에는 뚜렷한 파괴점이 나타나지 않고 스펀지처럼 축방향으로 압축되며 연성적인 거동을 나타냈다.
- (2) 수중에서 양생한 경우의 일축압축강도는 시멘트량에 관계없이 낮은 값을 가지며, 이것은 시멘트의 강도 발현이 되지 않았기 때문으로 판단된다.
- (3) 변형계수의 값은 단위중량이 증가함에 따라 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.
- (4) 경량기포토의 간접인장강도는 일축압축강도와 유사한 경향을 보이는데, 단위중량, 시멘트 함유량이 증가할수록 높은 값을 가지는 것으로 나타났다. 압

축강도와 인장강도의 관계는 경량기포토의 단위중량이 증가할수록 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 감소하였는데 이는 기포량에 따라 관계가 서로 상이하다는 것을 나타내는 것으로 이를 고려한 설계가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고 문헌

1. 김주철, 이종규 (2002), “준설토를 이용한 경량기포혼합토의 역학적 특성 연구”, *한국지반공학회논문집*, 한국지반공학회, 제18권, 4호, pp.309-317.
2. 송준호, 임종철, 홍석우 (2008), 원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석. *한국지반공학회논문집*, 한국지반공학회, 제24권, 11호, pp.1-10.
3. 송준호 (2009), “원료토의 특성에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 영향인자 분석”, *석사학위논문*, 부산대학교.
4. 윤길림, 김병탁 (2004), 경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구. *한국지반공학회논문집*, 한국지반공학회, 제20권, 4호, pp.5-13.
5. 윤길림, 유승경 (2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합토의 강도 및 변형특성”, *한국지반공학회논문집*, 한국지반공학회, 제20권, 9호, pp.125-131.
6. 일본도로공단 (1996), “기포혼합경량토를 이용한 경량 성토공법의 설계·시공 지침서”.
7. 이수형 (2005), “석분을 혼입한 경량기포혼합토의 역학적 특성에 관한 연구”, *석사학위논문*, 건국대학교.
8. 古谷俊明, 山内豊聰, 浜田英治 : 氣泡シメントモルタルの力學特性 (기포시멘트모르타의 역학특성) : *土木學會西部支部研究發表會講演概要集*, P.406-407, 1988. 3.
9. 土田孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田隆夫 (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 2010. 4. 26, 심사완료일 2010. 9. 25)