

## 수중양생 및 수압조건을 고려한 경량기포혼합토의 거동

### Behaviors of Lightweight Foamed Soils Considering Underwater Curing and Water Pressure Conditions

윤길림<sup>1</sup> Yoon, Gil-Lim

유승경<sup>2</sup> You, Seung-Kyong

#### Abstract

Lightweight Foamed Soil (LWFS) could be the substitute of normal soils used in backfill to earth structures and embankment materials for soft ground improvement in port and harbor project because of its effectiveness in settlement reduction and earth pressure decrease due to its lightness. A series of triaxial and unconfined compression tests were performed to investigate behaviors of LWFS composed of dredged soils, cement and air foam, and cured at underwater conditions. The density of LWFS will increase if LWFS is cured at underwater conditions because high water pressure makes air foam disappear or demolish during the curing compared with LWFS cured at normal air conditions. This paper is to find the mechanical behaviors of LWFS cured at seawater depth of 5.0 m and 10.0 m, respectively, which simulates underwater curing conditions by underwater pressure simulator chamber developed during this study. In addition, new normalized factor formula, which takes account of mixing design conditions determining compressive strength of LWFS, was proposed to consider mixing design factor for LWFS.

#### 요 지

경량기포혼합토는 경량성으로 인하여 지반내 응력증가에 따른 침하, 활동 파괴, 측방 유동 등의 지반공학적 문제를 해결할 수 있다. 최근 지반개량 및 보강을 위한 경량기포혼합토공법은 육상공사 및 해상공사에 그 적용이 확대되고 있다. 일련의 삼축 및 일축압축강도시험을 수중양생된 경량기포혼합토에 대하여 그 거동 특성을 파악하기 위하여 수행하였다. 특히 수중에 타설하는 경우에 수압에 의해서 경량기포혼합토내에 생성된 기포가 수축되기 때문에 대기중에 타설된 경우와 비교하여 경량기포혼합토의 밀도가 커질 수 있다. 따라서 경량기포혼합토공법을 하천 저면이나 해저에 적용하기 위해서는 수심에 의한 양생압력에 대한 경량기포혼합토의 역학적 특성을 규명해야 한다. 본 논문에서는 수중에 타설되는 경량기포혼합토의 역학적 성질을 조사하기 위해서 양생압력 조절이 가능한 수중양생 시뮬레이션 시스템을 이용하였다. 즉, 수중 5미터와 10미터의 양생조건을 가정하여 경량기포혼합토의 역학적 특성을 조사하였으며 배합인자들에 의한 경량기포혼합토의 압축강도 변화를 모두 고려할 수 있는 정규화계수(Normalized Factor,  $NF$ )와 압축강도와의 관계를 제시하였다.

**Keywords :** Dredged soil, Lightweight foamed soil, Underwater curing, In-situ soil, LWFS

1 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원 (Member, Principal researcher, Coastal & Harbor Engrg. Lab, Korea Ocean Research & Development Institute, glyoon@kordi.re.kr)

2 정회원, 명지전문대학 토목과 조교수 (Member, Assistant prof., Dept. of Civil Engrg., Myongji College)

## 1. 서론

최근 국내에서 수행되고 있는 산업시설의 확충과 항만, 택지개발 등과 같은 기반시설의 신설 및 확장사업은 토지의 가용면적 증대를 필요로 하며, 그에 따른 매립 및 성토공사에 사용되는 양질의 기반재료의 확보가 요구된다. 부산 신항만 건설공사, 광양만 개발공사, 서해안 고속도로 공사 등 최근 국책사업이 활발히 진행되면서 매립, 성토재료로서 대량의 토사를 사용하고 있지만, 환경보존의 중요성과 경제성 등을 감안하면 계속적으로 대량의 육상토나 해사를 사용하는 것은 어려운 실정이다. 따라서 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 대체 기반재료의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 한국해양연구원에서는 최근 대규모로 실시되고 있는 해양개발로 인해 대량으로 발생하는 해양 준설토를 재활용하여 새로운 건설재료를 개발하고자 하는 연구를 활발히 진행하여 왔다(해양수산부, 2000, 2001, 2002, 2003). 특히, 해양 준설토와 시멘트와 같은 소요의 강도를 발휘하게 하는 고화재 및 재료의 경량화를 꾀할 수 있는 기포제를 혼합한 경량기포혼합토의 개발을 중점적으로 수행하였다. 이러한 연구들을 통하여 해양준설토의 처리를 위한 대규모 부지확보 및 주변 환경오염 발생 등의 문제점들을 해결할 수 있으며, 폐기물을 이용한 새로운 건설재료의 확보라는 커다란 성과를 얻을 수 있다고 판단된다.

연약지반상에서 일반적인 토사를 대신하여 경량기포혼합토를 성토나 뒷채움 재료로 할 경우, 지반내 응력증가에 따른 침하, 활동 파괴, 측방 유동 등의 지반공학적인 문제를 보완·해결할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 기존의 준설토 재활용에 관한 국내외의 연구에서는 제한된 지역에서 채취한 준설토를 혼합한 경량기포혼합토를 대상으로 그 역학적 특성을 연구함에 따라 연안에 다양한 입도로 분포하고 있는 준설토를 재활용하기 위한 연구 자료로서는 불충분한 실정이라 할 수 있다. 또한, 경량기포혼합토를 적용하는 시공현장의 조건을 고려한 연구결과도 아직 미흡한 상황이다. 최근 연약지반 개량을 위한 경량기포혼합토공법은 육상공사에서 뿐만

아니라 해상공사에 그 적용이 확대되고 있으며, 특히 수중에 타설하여 해저지반개량효과를 기대하는 경우가 증가하고 있다. 이러한 경우 수면 이하 깊이에 따른 수압에 의해서 경량기포혼합토내에 생성된 기포가 수축되기 때문에 대기중에 타설된 경우와 비교하여 경량기포혼합토의 밀도가 커질 수 있음을 예상할 수 있다. 따라서 경량기포혼합토공법을 하천 저면이나 해저에 적용하기 위해서는 수심에 의한 양생압력에 대한 경량기포혼합토의 적용성과 그 역학적 특성을 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 서해안 영흥지역에서 채취된 점토질 준설토를 이용하여 경량기포혼합토 공시체를 제작하고, 준설토의 초기함수비, 시멘트 함유율의 변화가 압축강도에 미치는 영향 및 응력-변형 거동 특성을 기존의 연구결과와 비교하여 경량화된 기반재료로서 갖는 다양한 역학적 특성을 조사하였다. 또한 수중에 타설되는 경량기포혼합토의 역학적 성질을 조사하기 위해 양생압력 조절이 가능한 수중양생 시뮬레이션 시스템을 개발(윤길림과 유승경, 2003b)하여 경량기포혼합토 공시체를 제작하고 그 역학적 특성을 조사하였다. 최종적으로 각 배합인자들에 의한 경량기포혼합토의 압축강도 변화를 모두 고려할 수 있는 정규화계수(Normalized Factor, *NF*)와 압축강도와의 관계를 고찰하였다.

## 2. 경량기포혼합토의 구성재료 특성과 배합조건

본 연구에서 사용한 해양 준설토 시료는 서해안 영흥지역에서 채취하였다. 실내 물성실험을 통하여 채취한 준설토의 기본적인 물리적 특성을 파악하였으며, 그 결과는 표 1에 나타낸 바와 같다. 사용된 준설토를 통일분류법에 근거하여 분류하면 CL에 해당하였으며, 그림 1에 입도분포를 나타내었다. 표 1과 그림 1에는 지역에 따른 준설토의 물리적 특성의 비교를 위해 전라남도 광양해역 중마항 지역의 준설토에 대한 실험결과(윤길림 등, 2003)도 함께 나타냈다.

또한, 본 연구에서는 환경 친화적인 식물성 기포제를 사용하였으며, 경량기포 혼합토의 강도증대를 위하여

표 1. 준설토의 물성시험 결과

항목	시료	비중 Gs	액성한계 LL(%)	소성한계 PL(%)	소성지수 (PI)	균등계수 (Cu)	곡률계수 (Cg)	USCS
영흥		2.61	40.34	22.42	17.92	11.05	1.60	CL
중마항		2.60	43.67	21.88	21.79	50	0.32	CL

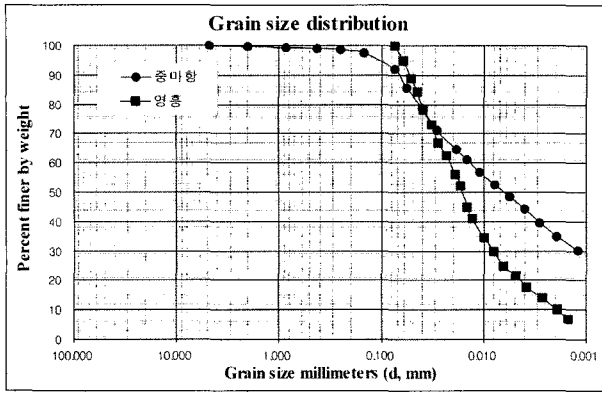


그림 1. 사용한 준설토의 입도분포곡선

표 2. 경량기포혼합토의 배합 조건

항목	배합 및 시험 조건
준설토의 초기함수비, $w_f$ (%)	125, 150, 200
시멘트 함유율, $C_i$ (%)	9, 12, 18
경량기포혼합토의 습윤단위중량, $\gamma_r$ ( $t/m^3$ )	1.2

사용한 고화재는 1종 보통포틀랜드(portland) 시멘트를 사용하였다. 한편, 본 연구에서는 다양한 배합조건에서 경량기포혼합토의 역학특성을 조사하기 위해 해양연구원에서 개발한 배합장치(윤길림 과 김병탁, 2003a, 윤길림 등, 2003)를 사용하여 공시체를 제작하였으며, 배합에서는 준설토의 초기 함수비( $w_f$ ), 시멘트 함유율( $C_i$ ), 기포의 함유율( $A_i$ )의 각 요소들의 조건을 달리하여 배합설계치를 산정하였다. 본 연구에서 사용한 경량기포혼합토의 구성재료 특성과 배합장치에 대한 상세한 사항은 윤길림과 김병탁(2003a)과 윤길림 등(2003)의 참고문헌에 제시되어 있다. 표 2는 본 실험에서 제작한 경량기포혼합토 공시체의 배합 조건을 나타내고 있다. 양생일은 경량혼합토의 강도는 현장여건을 반영하고자 공시체 제작 후 28일이 지난 후의 강도를 기준으로 공시체를 양생 제작하였다.

### 3. 수중양생 시뮬레이션 시스템에 의한 공시체 제작

#### 3.1 수중양생 시뮬레이션 시스템

본 논문에서는 수중양생 압력조건에 따른 경량기포혼합토의 공시체를 제작하기 위하여 수중양생 시뮬레이션 시스템을 자체적으로 개발하여 제작하였다. 그림 2에서 그림 5까지 나타냈듯이 수중에서의 타설조건과 양생조건을 모사하기 위하여 고안한 양생압력 조절장

치와 시료주입장치를 이용하여 경량기포혼합토 공시체를 제작하였다. 그리고 28일 양생일이 지난 후에 일축압축시험을 실시하여 양생압력에 대응하는 경량기포혼합토의 역학적 특성을 조사하였다. 본 시스템에서의 공시체 제작은 다음과 같다. 즉, 준설토, 고화재 및 기포의 배합단계는 경량기포혼합토 앞절에서 설명한 바와 같다. 양생압력토조 및 압력몰드의 조립단계로서 양생압력토조는 토조내에서의 경량기포혼합토의 주입과정과 공시체 생성과정을 관찰하기 위하여 투명 아크릴을 사용하여 그림 2에 나타난 바와 같이 내경 400mm, 높이 500mm의 원통형으로 제작하였다. 그리고 압력몰드는 양생압력 토조내에서 공시체가 생성된 후, 성형과정 없이 그대로 일축 및 삼축압축시험을 실시하기 위하여 내경 50mm, 높이 130mm의 규격으로 제작하였다. 또한 공시체의 양생 중 양생압력 토조내에 작용하는 소정의 정수압을 공시체 측방에도 작용시키기 위해 압력몰드

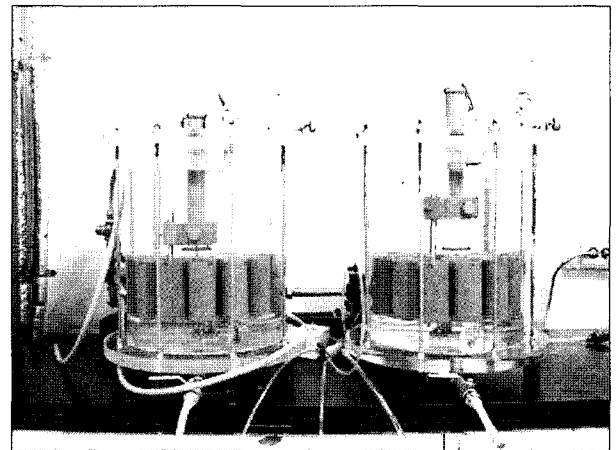


그림 2. 수중양생 재현용 압력토조(윤길림과 유승경, 2003b)

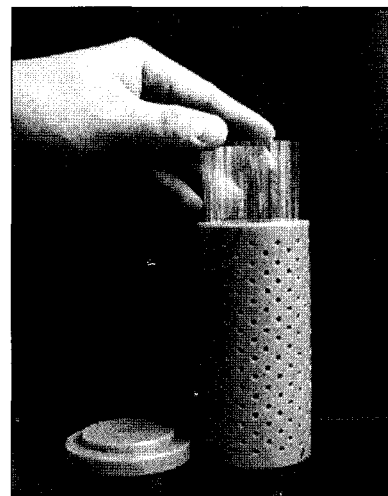


그림 3. 공시체 성형용 압력몰드

벽면에 지름 2.5mm의 구멍을 천공하였다. 이러한 구멍들을 통하여 작용하는 정수압을 공시체에 균일하게 작용시키기 위하여 그림 3과 같이 압력몰드내에 OHP 필름으로 제작한 원통형의 가압재를 삽입하였다.

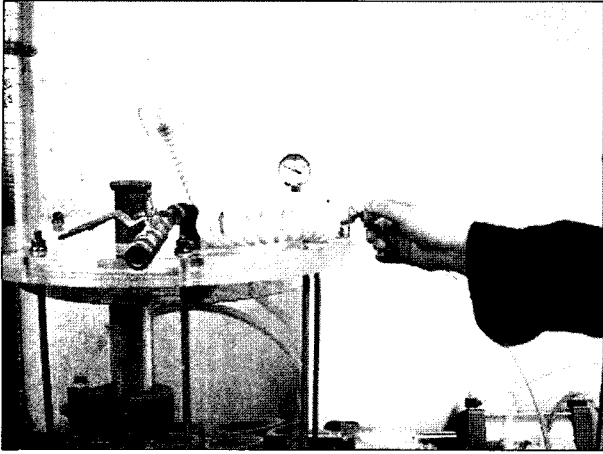


그림 4. 양생압력 토조내 정수압력 공급

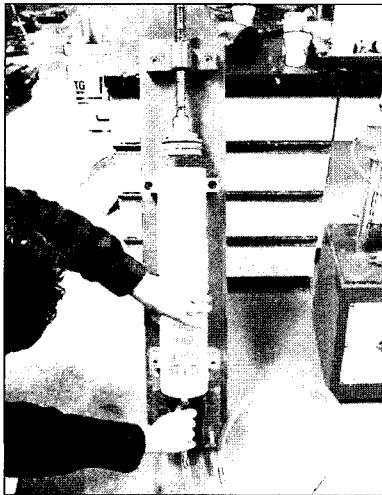


그림 5. 경량기포혼합토 주입장치

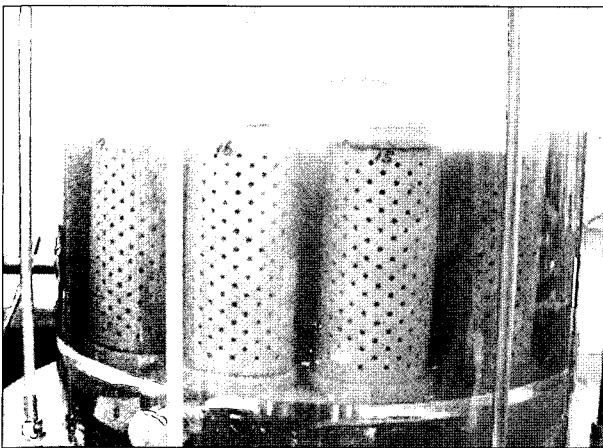


그림 6. 경량기포혼합토가 몰드 내에 충전된 모습

양생압력 토조 내 정수압력 공급단계는 압력몰드의 설치 후, 양생압력 토조 내에 충분히 물을 채우고 압력 토조의 뚜껑을 닫은 후, 에어 컴프레셔(air compressor)를 이용하여 양생압력 토조 내에 수심에 따른 깊이에 대한 소정의 압력(참조, 1기압 = 수심 10m = 100kPa)을 가하였다. 그림 4는 양생압력 토조내에 소정의 압력을 가하기 위한 공기압 밸브의 조절 상황을 나타내고 있다.

공시체 주입장치를 이용한 경량기포혼합토의 압력몰드내 충전단계는 수심에 따른 소정의 정수압이 작용하고 있는 양생압력 토조 내의 압력몰드 안으로 경량기포혼합토를 성형하기 위해서 배합시료를 주입하기 위해서는 이미 가해진 토조내 압력으로 인한 몰드 내에 작용하는 정수압보다 큰 압력으로 시료를 주입하여야 한다. 따라서, 이러한 여건을 고려하여 그림 5에 나타낸 바와 같은 특별한 주입장치를 고안하여 토조내의 압력몰드 안에 경량기포혼합토를 충전하였다. 그림 6은 압력몰드 안에 경량기포혼합토의 충전된 모습을 보여주고 있다.

### 3.2 경량기포혼합토 공시체

본 논문에서는 배합장치 및 수중양생 시뮬레이션 시스템을 이용하여 준설토와 고화재, 기포를 소정의 배합비로 혼합하여 실내실험을 위한 경량기포혼합토 공시체를 제작하였다. 제작된 경량기포혼합토 입자의 형상 분석을 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope)사진 분석을 실시하였다. 그림 7~10은 각각 준설토, 준설토와 고화재를 혼합한 공시체, 준설토와 고화재, 기포를 혼합한 공시체를 촬영하여 비교한 그림이다. 본 촬영에 사용한 공시체는 모두 서해안 영흥에서 채취한 준설토를 사용하였다. SEM사진을 촬영한 결과, 그림 7에 보이는 것과 같이 순수 준설토의 경우에 일반적인 점토입자의 구조를 보이고 있다. 그림 8의 준설토와 고화재만을 혼합한 공시체의 구조는 고화재의 고화(Cementation)작용에 의해 점토입자의 원래 모습은 선명히 보이지 않고 고화재와 점토입자가 서로 잘 결합된 미끈한 면의 형상으로 보이고 있다. 한편, 그림 9와 10은 각각 준설토와 고화재, 기포를 혼합한 공시체 중 양생압력이 50kPa(수중 5.0m)인 경우와 100kPa(수중 10.0m)인 경우의 공시체 모습을 나타내고 있다. 서로 다른 양생압력에 대한 경량기포혼합토의 공시체에서 기포의 분포형상이 두가지 모두 발견되고 있음을 확인하였다. 그러나 양생압력이 높은 경우(100kPa)의 공시체 내부구조가 낮은 경우

(50kPa)보다 비교적 조밀한 입자구조를 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 압축강도시험 개요

본 논문에서는 전술한 배합조건과 양생조건에서의 경량기포혼합토의 응력-변형특성과 강도특성을 파악하기 위하여 일축압축시험과 삼축압축시험을 실시하였다. 준설토의 초기함수비와 시멘트 함유율을 변화시킨 경량기포혼합토 공시체를 제작하였으며, 수중 시공 상태를 재현하기 위한 양생압력은 보통 수중에서 시공되는 지반의 깊이가 수심 약 10m 정도이므로 그 범위에서 적용하였다. 삼축압축시험의 경우는 공시체에 적용하는 구속압은 토조 내에서의 양생압력과 일치하도록 결정하였으며 비압밀-비배수 조건의 시험을 실시하였다. 표 3은 각각의 시험조건을 나타내고 있다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

##### 5.1 경량기포혼합토의 응력-변형거동

그림 11과 12는 각각 일축압축시험과 삼축압축시험에 의한 경량기포혼합토의 응력-변형거동을 나타내고 있다. 그림 속의 W150은 함수비 150%, C12는 시멘트 함유율 12%, P05는 수중 5m의 양생압력을 의미한다. 그림에서 알 수 있는 것은 함수비 일축 및 삼축압축시험에 의한 결과 모두 시멘트 함유량과 양생압력이 클수록

표 3. 경량기포혼합토 시험 조건

항목	시험 조건	
	일축압축시험	삼축압축시험
양생압력, $P$ (kPa)	50, 100	50, 100
구속압, $\sigma_c$ (kPa)	0	50, 100
양생기간, $T_c$ (day)	28	28

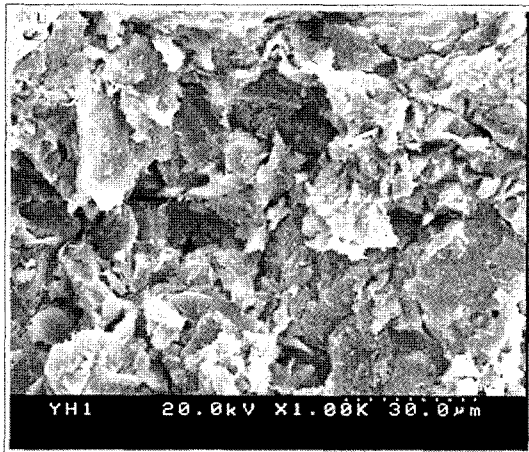


그림 7. 순수 준설토인 경우

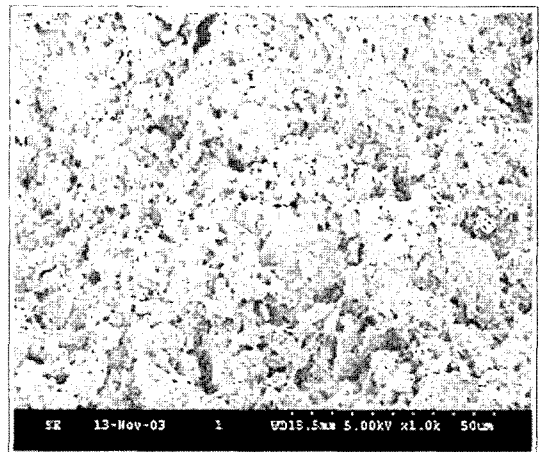


그림 9. 준설토+고화재+기포(양생압력 50kPa)

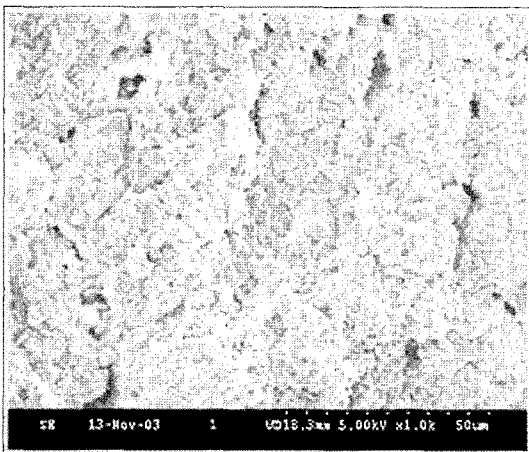


그림 8. 준설토와 고화재의 경우

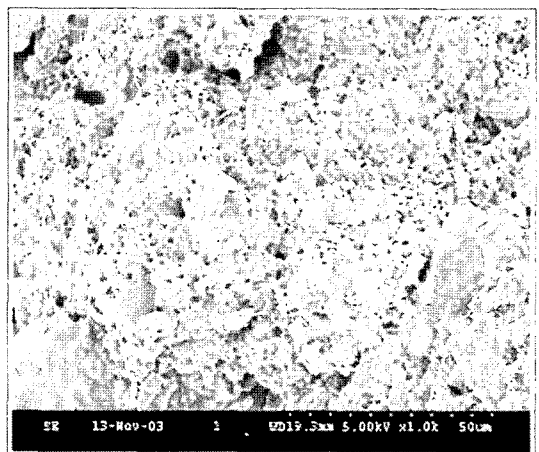


그림 10. 준설토+고화재+기포(양생압력 100kPa)

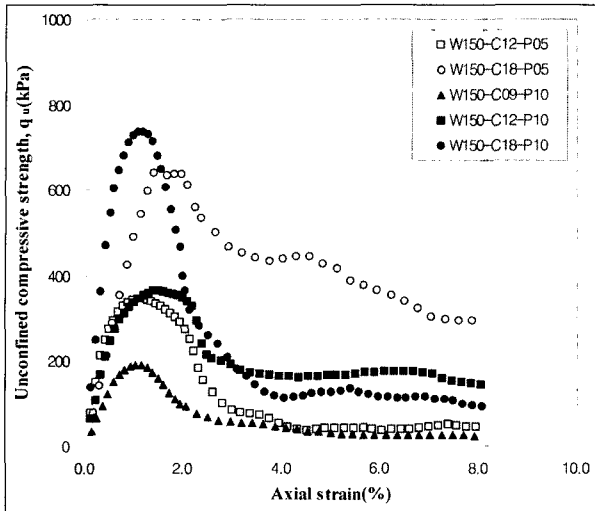


그림 11. 일축압축시험에 의한 응력-변형거동

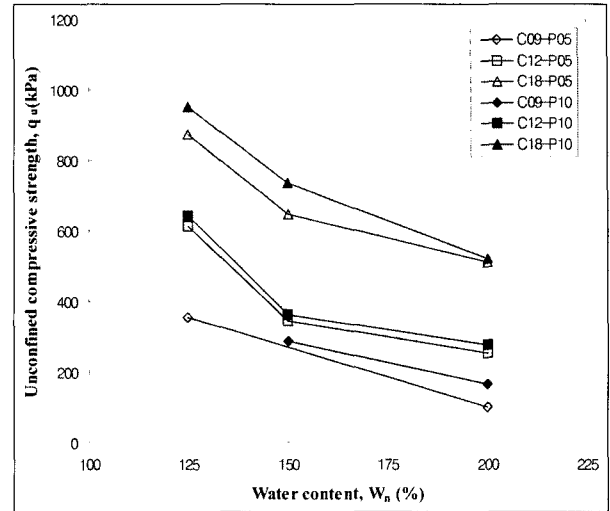


그림 13. 일축압축강도에 미치는 초기함수비의 영향

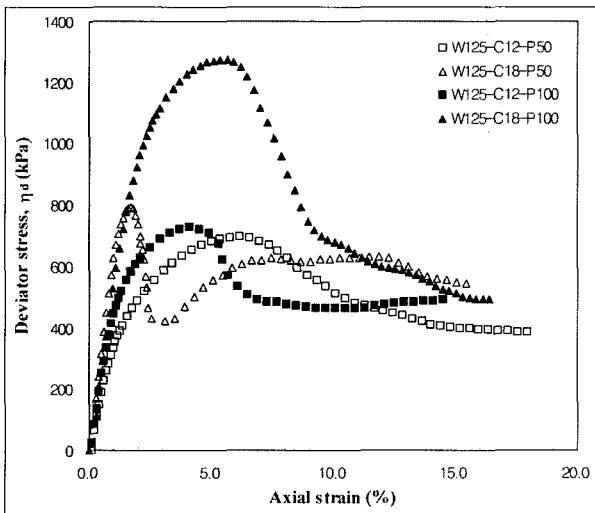


그림 12. 삼축압축시험에 의한 응력-변형거동

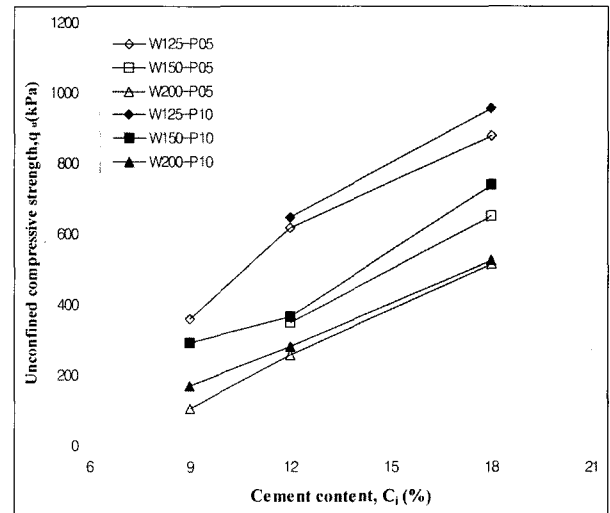


그림 14. 일축압축강도에 미치는 시멘트 함유량의 영향

압축강도가 크며 취성적인 파괴양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 시멘트 함유량 12% 이하에서는 양쪽 모두 양생압력의 크기에 관계없이 뚜렷한 파괴양상이 나타나지 않는 흙시료와 유사한 응력-변형거동을 보이고 있다.

### 5.2 경량기포혼합토의 구성요소에 따른 압축강도특성

그림 13은 경량기포혼합토의 일축압축강도와 준설토의 초기함수비의 관계를 나타내고 있다. 양생압력과 시멘트 함유량에 관계없이 초기함수비가 증가할수록 일축압축강도는 감소하고 있다. 양생압력이 50kPa인 경우의 일축압축강도는, 준설토의 초기함수비가 125%에서 200%까지 증가함에 따라, 시멘트 함유량이 9%, 12%,

18%인 경우에 대하여 각각 약 70%, 60%, 42%의 일축압축강도 감소를 보이고 있다. 또한, 양생압력이 100kPa인 경우에는 시멘트 함유량 12%와 18%에 대하여 각각 60%, 45%의 일축압축강도 감소를 보이고 있다. 따라서 준설토의 초기함수비 증가에 따른 일축압축강도의 감소율은 양생압력의 크기에 관계없이 시멘트 함유량이 증가할수록 작아짐을 알 수 있다.

그림 14는 경량기포혼합토의 일축압축강도와 시멘트 함유량의 관계를 나타내고 있다. 양생압력과 초기 함수비에 관계없이 시멘트 함유량이 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 있다. 양생압력 50kPa인 경우 시멘트 함유량이 9%에서 18%까지 증가함에 따라, 초기함수비 125%와 200%인 경우에 대하여 각각 약 250%와 500%의 강도증가를 보이고 있으며, 양생압력이 100kPa인 경

우에는 초기함수비 150%와 200%인 경우에 대하여 각각 약 250%와 310%의 강도증가를 보이고 있다. 따라서 양생압력의 크기에 관계없이 준설토의 초기함수비가 높을수록 시멘트 함유량의 증가에 따른 강도증가율이 커짐을 알 수 있다.

### 5.3 양생압력에 따른 경량기포혼합토의 강도특성

그림 15는 경량기포혼합토의 일축압축강도와 양생압력의 관계를 나타내고 있다. 초기 함수비와 시멘트 함유율에 관계없이 양생압력이 증가할수록 일축압축강도는 증가하고 있다. 즉, 양생압력이 50kPa에서 100kPa까지 증가함에 따라 경량기포혼합토의 일축압축강도는 약 3%~14%의 일축압축강도 증가율을 나타냄을 알 수 있

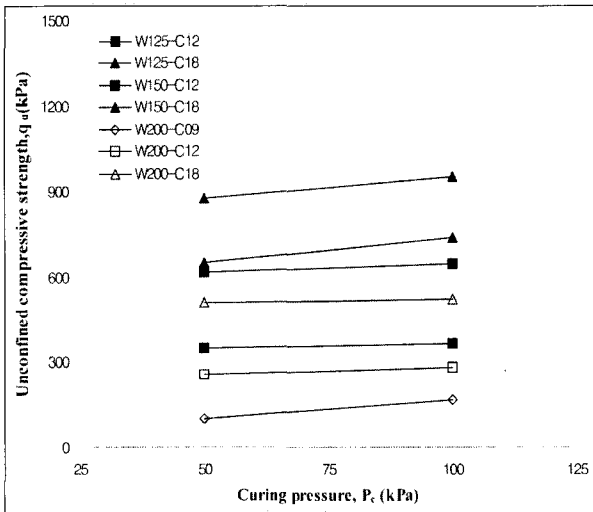


그림 15. 양생압력에 따른 일축압축강도의 변화

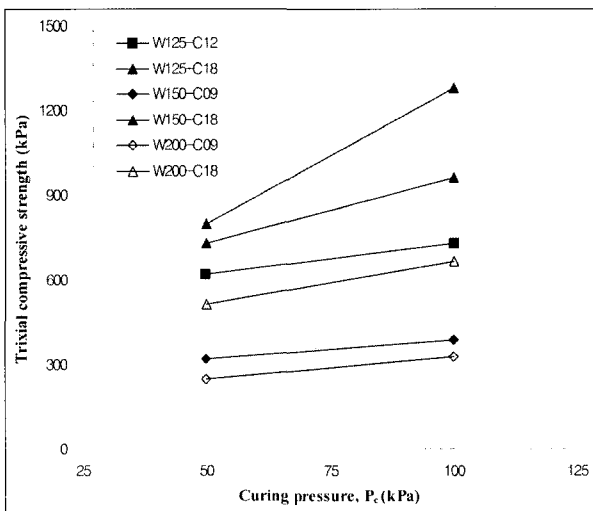


그림 16. 양생압력에 따른 삼축압축강도의 변화

다. 한편, 그림 16은 경량기포혼합토의 삼축압축강도와 양생압력의 관계를 나타내고 있다. 양생압력이 50kPa에서 100kPa까지 증가함에 따라 삼축압축강도는 극단적인 경우(W125-C12)를 제외하면 18%~32%의 증가율을 나타냄을 알 수 있다. 이 결과는 같은 양생압력변화의 범위에서 일축압축강도 증가율과 비교하여 큰 값임을 알 수 있다.

### 5.4 경량기포혼합토의 변형계수와 일축압축강도의 관계

그림 17은 시험결과로부터 얻은 경량기포혼합토의 변형계수( $E_{50}$ )와 압축강도의 관계를 나타내고 있다. 그림에는 준설토 채취지역에 따른 특성의 차이를 비교하기 위해 부산 신항만 건설지역의 준설토에 대한 시험결과(윤길림 등, 2003)와 일본의 항만기술연구소에서 수행한 실험결과(土田, 1996), 전라남도 광양해역 중마항 지역의 준설토에 대한 시험결과(윤길림 등, 2003)를 함께 도시하였다.

본 논문의 실험결과에 의한 경량기포혼합토에 대한  $E_{50}$ -압축강도의 관계를 함수식으로 표현하여 표 4에 정리하였다. 본 실험의 결과로부터 일축압축실험에 의한  $E_{50}$ -압축강도 관계는 중마항 시료의 재령 7일에 대한 관계(윤길림 등, 2003)와 유사한 관계를 나타내고 있다. 그리고 삼축압축실험에 의한  $E_{50}$ -압축강도 관계는 부산시료에 대한 실험결과와의 하한계측에 분포함을 알 수 있다. 이는 준설토의 물리적 특성이 지역에 따라 어느정도 차이가 있어서 발생한 결과라고 판단된다.

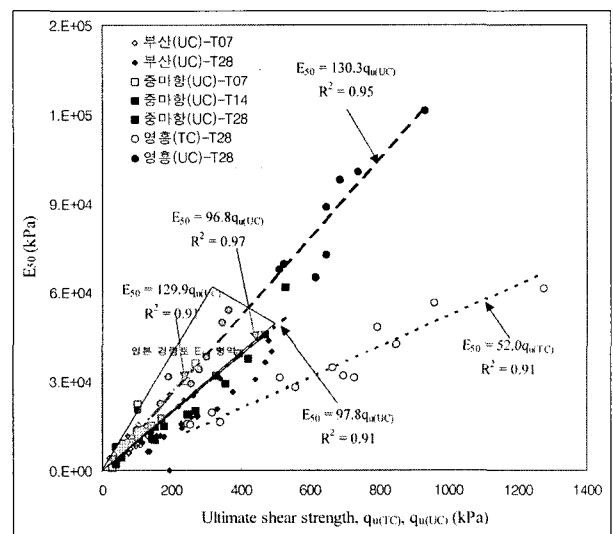


그림 17. 경량기포혼합토의 변형계수-일축압축강도 관계

표 4. 경량기포혼합토의 변형계수( $E_{50}$ )와 압축강도관계

준설토 채취지역	실험방법	공시체 양생일	$E_{50}$ -압축강도 관계식	결정계수( $R^2$ )
영흥	일축압축시험	28일	$E_{50} = 130q_u(UC)$	0.95
	삼축압축시험		$E_{50} = 52q_u(TC)$	0.91

### 5.5 경량기포혼합토의 정규화계수-일축압축강도의 관계

최근 한국해양연구원에서는 경량기포 혼합토의 구성 요소(준설토의 초기함수비, 시멘트 함유율, 기포함유율) 들에 의한 다양한 배합조건 비에 상응하는 압축강도를 추정할 수 있는 정규화계수(Normalized Factor,  $NF$ )를 식 (1)과 같이 제시한 바 있다(윤길림과 김병탁, 2003a; 윤길림 등, 2003).

$$NF = \frac{W_n \times A_r}{C_i} \quad (1)$$

여기서,  $W_n$ 는 준설토의 초기함수비,  $A_r$ 은 기포의 중량 비,  $C_i$ 는 시멘트의 중량비를 나타내고 있다. 그림 18은 본 연구의 결과로부터 얻은 양생 28일 압축강도와  $NF$ 와의 관계를 나타내고 있다. 시료 각각의 결과를 회귀분석한 결과, 모두 정규화계수가 커짐에 따라 압축강도는 지수함수의 형태로 감소하는 것으로 나타낼 수 있었으며 그 결정계수( $R^2$ )는 0.91 이상으로 얻어졌다. 그리고 준설토 시료의 채취지역에 따라 그 관계는 어느 정도 차이

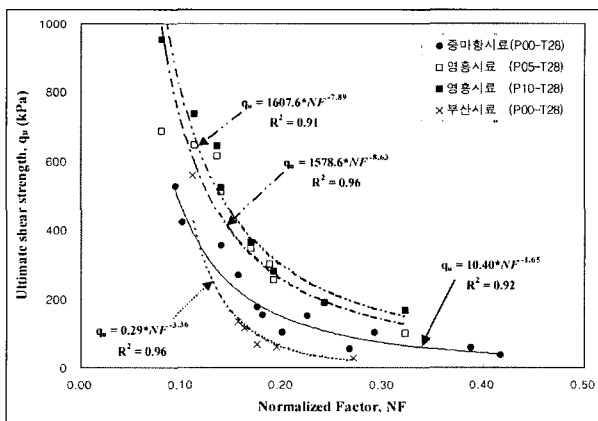


그림 18. 정규화계수와 압축강도(재령 28일)의 관계

표 5. 정규화계수( $NF$ )와 압축강도(재령 28일)와의 회귀분석 결과

준설토 시료	양생압력(kPa)	정규화계수( $NF$ )와 압축강도와의 회귀분석식	결정계수( $R^2$ )
영흥	50	$q_u = 1578.6 \times NF^{-8.63}$	0.96
	100	$q_u = 1607.6 \times NF^{-7.89}$	0.91
부산	0	$q_u = 0.29 \times NF^{-3.36}$	0.96
중마항	0	$q_u = 10.40 \times NF^{-1.65}$	0.92

를 보이고 있으나 그 경향은 일치하는 것을 알 수 있다. 채취지역에 따라 다른 이유는 준설토의 물리적 특성이 지역에 따라 차이가 있기 때문이라고 판단된다. 특히, 본 연구에서 실시한 영흥시료에 대한 수중양생 압력시험의 결과, 다른 일반 실험결과들에 비교하여 큰 압축강도를 보였다. 따라서, 수중공사에 경량기포혼합토를 적용할 경우, 수심에 따른 정규화계수와 압축강도의 관계를 검토하여 설계에 반영하여야 할 필요성이 있다고 판단된다. 표 5는 각각의 경우에 해당하는 회귀분석식을 나타내고 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 준설토를 채취하여 시멘트 고화재 그리고 기포를 혼합한 경량기포혼합토를 다양한 조건으로 배합하여 경량기포혼합토의 응력-변형거동, 압축강도특성, 양생압력의 영향 등을 분석하였다. 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 경량기포혼합토는 시멘트 함유량과 양생압력이 클수록 압축강도가 크게 발현된다. 그리고 경량기초 혼합토의 파괴거동은 취성적인 거동양상을 보였다. 또한 시멘트 함유량 12% 이하에서는 일축압축 및 삼축압축시험 모두가 준설토의 초기함수비 및 양생압력의 크기에 상관없이 뚜렷한 파괴양상은 나타나지 않았으며 일반토사인 자연흙과 유사한 응력-변형거동을 보였다.
- (2) 준설토의 초기함수비 증가에 따른 경량기포혼합토의 압축강도 감소율은 양생압력의 크기에 관계없이 시멘트 함유량이 증가할수록 작게 나타났다. 또한,



시멘트 함유량의 증가에 따른 강도증가율은 양생압력의 크기에 관계없이 준설토의 초기함수비가 높을수록 크게 나타났다.

- (3) 경량기포혼합토는 양생압력이 50kPa에서 100kPa까지 증가함에 따라 일축압축강도는 3%~14%의 강도 증가율을 보였으나 삼축압축강도는 18%~32%의 강도 증가율을 나타냈다. 이는 구속압의 증가에 따른 압축강도의 증가현상 및 공시체의 양생 초기 과정에서부터 양생기간이 완료될 때까지 공시체의 표면에 작용하는 소정의 정수압력의 결과라고 판단된다. 즉, 슬러리 상태의 양생 초기부터 공시체의 표면에 작용한 정수압으로 인해 공시체 구성요소의 하나인 기포가 압축되어 공시체의 밀도가 증가됨으로써 최종 공시체의 압축강도가 증가됐다고 판단되며, 경량기포혼합토의 타설 지점에 작용되는 정수압이 클수록 즉, 타설 현장의 수심이 증가할수록 발현되는 압축강도는 증가된다고 판단된다.
- (4) 경량기포혼합토의 변형계수( $E_{50}$ )는 시멘트 함유량이 증가하면서 그 크기도 증가하나 준설토의 초기함수비가 클수록 작게 나타났다. 즉, 경량기포혼합토에서 압축강도가 증가하면 변형계수도 이와 함께 증가함을 알 수 있었다. 또한, 일축압축 및 삼축압축시험 실험결과에 의한 압축강도와 변형계수의 관계는 재령 28일의 경우,  $E_{50} = 130q_u(UC)$ 와  $E_{50} = 52q_u(TC)$ 로 나타났다.
- (5) 경량기포혼합토의 임의의 배합비에 대한 재령28일에 대한 압축강도를 구하고자 구성요소를 모구 고려한 정규화계수( $NF$ )를 제시하였으며, 그 결과 정규화계수와 압축강도의 적절한 회귀식을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 정규화계수와 압축강도의 관계는 준설토 시료의 채취지역에 따라 차이를 보였

다. 이는 준설토의 물리적 특성이 지역에 따라 차이가 있어 발생한 결과라고 판단되었다.

- (6) 경량기포혼합토 배합설계를 위한 정규화계수와 압축강도의 관계는 양생압력조건에 따라 차이를 보였다. 그러므로 수중공사에 경량기포혼합토를 적용할 경우에는 수심에 따른 정규화계수와 압축강도의 관계를 검토하여 설계에 반영하여야 할 필요성이 있다고 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2000년부터 2003년까지 해양수산부 국책과제인 “준설토 재활용 방안연구”를 수행하면서 도출된 연구결과의 일부임을 밝힙니다. 연구가 가능하도록 재정지원을 해주신 항만국 기술안전과장님을 비롯한 관계자 여러분에게 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 윤길립, 김병탁 (2004), “경량기포혼합토의 압축 및 강도특성 연구,” 한국지반공학회 논문집, 제20권, 4호, pp.5-13.
2. 윤길립, 유승경 (2004), “현장발생토를 활용한 경량기포혼합의 강도 및 변형특성, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 제9호, pp.125-132.
3. 윤길립, 유승경, 김병탁 (2003), “연약지반개량을 위한 경량기포혼합토의 역학특성,” 대한토목학회 학술발표회 지반분야, pp.242.
4. 윤길립, 김병탁 (2003a), “경량기포혼합토의 제조방법 및 지반개량공법”, 한국 특허출원서(no. 2003-33130호), 특허청.
5. 윤길립, 유승경 (2003b), “경량기포혼합토 수중시물레이션 시스템”, 한국 특허 및 일본 특허출원서(no. 2003-92965호), 특허청.
6. 해양수산부 (2000, 2001, 2002, 2003), “준설토 재활용 방안 연구”, 한국해양연구원 연구보고서.
7. 土田 (1996), 港灣空港事業における輕量混合處理土工法の開發と適用事例. 運輸省港灣技術研究所.
8. 土田 (1999), 建設發生土を活用した輕量混合處理土の空港事業への適用, 運輸省港灣技術研究所.

(접수일자 2004. 9. 15, 심사완료일 2005. 6. 1)