

# 준설토를 이용한 E.P.S. 경량혼합처리토의 활용성에 관한 연구

## Development of Light-Weight Soil Mixed With E.P.S. Using Dredged Soil

신현영\* 김병일\*\* 김용수\*\*\* 김수삼\*\*\*\*  
Shin, Hyun-Young Kim, Byung-Il Kim, Yong-Su Kim, Soo-Sam

### ABSTRACT

The strength properties of Light-Weighted Soils(LWS) mixed with Expanded Polystrene(E.P.S.) using uniaxial and triaxial tests are studied. Test results show that when the initial water contents of dredged soils are under 135% and the cement contents are above 1%, Light-Weight Soils are in the appropriate strength range of 2.0 to 4.0kg/cm<sup>2</sup>. However, E.P.S contents had a little effects on the strength properties of LWS.

### 1. 서론

지난 1976년 이후, 해안 매립과 항로 확보를 위해 발생하는 준설토의 양이 꾸준히 증가하는 추세를 보여 1999년 현재 발생량은 연간 9억톤을 넘어서고 있으며, 2000년대에는 그 양이 11억톤을 초과하고 그 처리비용 역시 600억원을 상회할 것으로 추정됨에 따라 적절한 처리 방안이 강구되고 있다(그림.1). 이러한 요구에 부응하여 본 연구에서는, 준설토에 발포폴리스티로폴(이하 E.P.S.) 입자를 혼합하여 시멘트계 고화재로 고결시킨 E.P.S. 경량혼합처리토를 개발하는데 목표를 두고 배합조건별 일축압축시험과 삼축압축시험을 실시하여 혼합토의 강도특성을 살펴보고 요구되는 조건별 배합비를 선정해보고자 하였다.

E.P.S.는 폴리스티렌수지에 펜탄이나 부탄과 같은 발포제를 첨가시켜 가열 경화시킴과 동시에 기포를 발생시켜 발포수지로 만든 것으로서 스틸렌모노머(SM)을 중합시켜 제조하는데, 경량성에 탁월한 효과를 볼 수 있는 제품이다. 현재 국내에서도 E.P.S. 블록을 이용한 하중경감공법과 토압경감공법이 실용화되어 있지만, 혼합처리토의 경우에는 일본을 비롯하여 일부 국가를 제외하면 연구실적이 거의 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구 결과에 의해 준설토의 효과적인 재활용은 물론 개발된 경량혼합처리토를 사용한 각종 경량화 공법의 발전에 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대된다.

---

\* 중앙대학교 박사과정, 정회원  
\*\* 중앙대학교 석사과정, 정회원  
\*\*\* 중앙대학교 박사과정, 정회원  
\*\*\*\* 중앙대학교 교수, 정회원

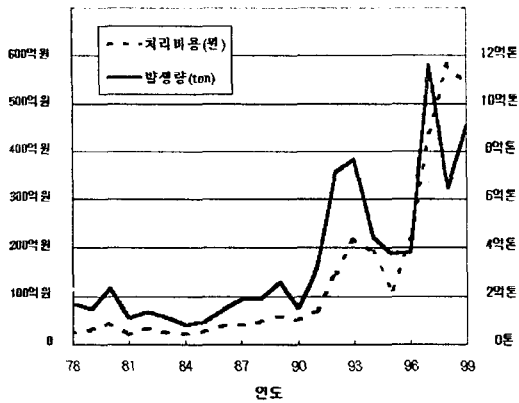


그림.1 준설토 발생량과 처리비용

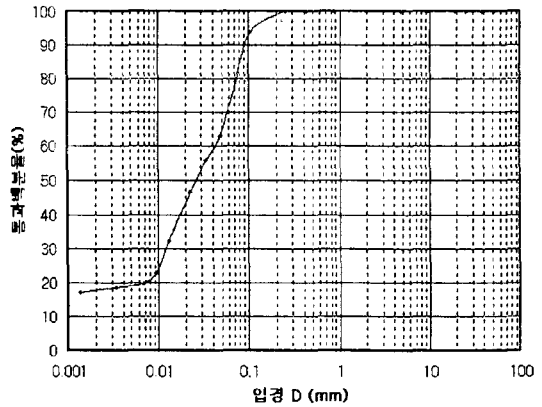


그림.2 준설토의 입도분포곡선

## 2. 실험

### 2.1 시료의 준비

본 연구에서 사용한 시료는 전남 ○○ 지역에서 채취한 준설토로 표 1 에는 KS F 2306, KS F 2303, KS F 2304, KS F 2308 기준에 의해 5회씩 실시한 물성시험의 평균치를 제시하였고, KS F 2302 기준에 의해 실시한 입도분포 양상은 그림.2 와 같다.

표 1 시료의 기본 물성

초기함수비	액성한계	소성한계	소성지수	비중	#200 통과량
132.5%	44.5%	23.6%	21	2.661	93.29%

시료의 배합은 각각 3kg의 준설토에 대해, 초기함수비, E.P.S. 함량 및 발포배율, 고화재 함량을 조절하여 중량비로 배합하였으며 그 배합 조건은 표 2 와 같다.

표 2 시료 배합조건

배합 조건	시료명	준설토의 초기함수비	E.P.S. 함량	E.P.S. 직경	고화재함량
준설토 함수비	W90	90(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	W135(E2,B2,C1)	135(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	W180	180(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	2%
E.P.S. 함량	E1	135(±5%)	1%	NO.2 (약35배)	2%
	E2	135(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	E3	135(±5%)	3%	NO.2 (약35배)	2%
E.P.S. 직경 (발포배율*)	B1	135(±5%)	2%	NO.1 (약25배)	2%
	B2	135(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	B3	135(±5%)	2%	NO.3 (약45배)	2%
	B4	135(±5%)	2%	NO.4 (약60배)	2%
고화재 함량	C1	135(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	1%
	C2	135(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	2%
	C3	135(±5%)	2%	NO.2 (약35배)	3%

(각 배합비는 준설토의 중량에 대한 백분율)

\* B1과 B4, B2와 B3는 각각 서로 다른 두 가지의 비드 원료로부터 발포된 입자임.

배합된 시료는 P.V.C. 몰드에 채워 상·하부를 캡핑한 후 각각 1일, 3일, 7일, 15일, 28일간 양생시켰는데, 삼축시험시 구속압과 양생압의 효과를 구분하여 살펴보고자, 일부 시료는 원통형 압밀셀 내부에서 0.5, 1.0, 2.0, 3.0kg/cm<sup>2</sup>의 압을 가한 상태로 양생시켰다.

본 연구에서는 예비실험 과정을 통해, 혼합토를 느슨한 배합 상태로 여러 개의 몰드에 채워 넣어, 중량 범위가 5g 이내에 들어오는 시료들만을 선택하여 양생시키는 방법을 사용하였다. 혼합토는 초기에 함수비가 커서 작업성을 확보할 수 없기 때문에 느슨한 상태로 타설하여야 하는데, 이처럼 느슨한 상태의 시료를 사용함으로써 실제 현장 타설 조건을 함께 구현할 수 있을 뿐만 아니라, E.P.S. 입자 자체가 갖는 압축성을 흐트러뜨리지 않는 방법으로 사료되었다.

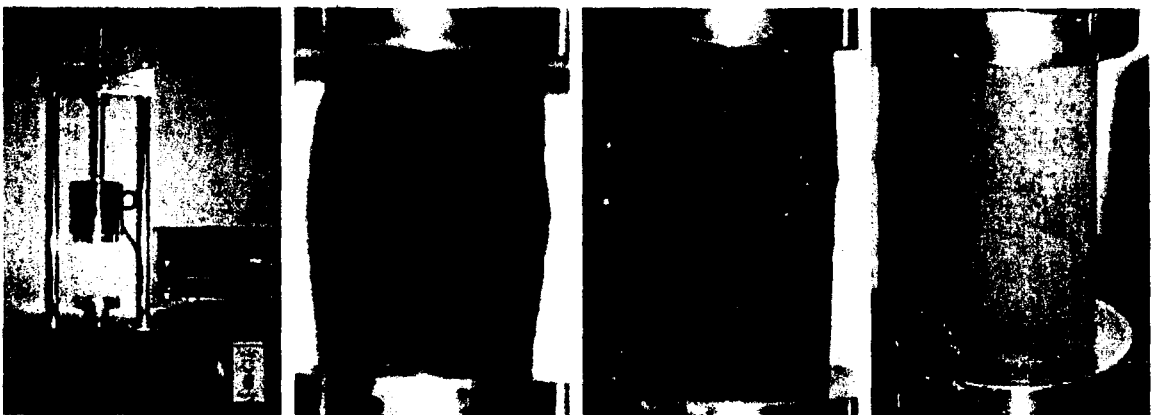
## 2.2 일축압축시험

KS F 2314 기준에 의거하여 배합 조건별 양생일 1일, 3일, 7일, 15일, 28일 경과시료에 대해 1.0%/min의 변형속도로 각각 3회의 일축압축시험을 실시하였다. 시료는 양생 초기에 비해 상당한 체적 수축이 발생하게 되므로, 몰드 시료와 코어 시료는 모두 시험 직전에 버니어 캘리퍼를 사용하여 상부와 중앙, 하부에서의 직경과 높이를 측정하였고, 이를 이용하여 양생 시작시점에 대한 체적 수축 정도를 판단하였다.

## 2.3 삼축압축시험

삼축압축시험은 KS F 2346 기준에 의해 실시하였다. 일정기간 양생된 공시체의 경우 응력이 변하더라도 함수비와 체적에는 큰 변화가 발생하지 않으므로 시험 조건은 비압밀 비배수 조건(UU)을 선택하였다.

삼축시험을 실시함에 있어 시료의 포화를 위해 예비실험 과정에서 공시체를 셀에 안착시킨 상태로 배압을 가하여 3일을 방치하였고, 이 때의 포화도를 최적 조건으로 산정하였다. 그 이유는 E.P.S. 자체가 실제적으로 흡수성이 없기 때문에 일반 점토시료에 대해 적용되는 98% 정도의 포화도를 얻기 어렵기 때문이다. 그 결과, 배합조건(E.P.S. 입자가 차지하는 공간의 크기)에 따라 다소 포화도의 차이는 있었지만, E.P.S. 입자의 공간 점유율이 가장 낮은 W90-B1-E1-C3 배합으로부터 공간 점유율이 가장 큰 W90-B4-E3-C1 배합에 이르기까지 포화도의 범위는 92%에서부터 86% 정도로 제시되었다.



(a) 시험기 전경

(b) 부플립 파괴

(c) 저부파괴

(d) 측면 대각선 파괴

그림.3 일축시험기 및 일축압축시험에 의한 파괴 양상

### 3. 혼합처리토의 특성 분석

#### 3.1 파괴양상

일축압축시험을 통한 혼합처리토의 파괴 양상은 그림.3 에 제시한 것과 같이 크게 3 가지로 나타났다. 양생이 완료되지 않아 함수비가 큰 상태의 혼합토는 축방으로 (b)에서처럼 크게 부풀림이 발생하여 명확한 파괴라인을 형성하지 않아 변형률 15%에 도달시 하중 값을 기준으로 파괴강도를 설정하였다. 또한, 일정기간 양생 후의 시료는 (c)와 같은 저부파괴라인을 형성하였으며, 공시체의 탈수가 거의 종료된 시료의 경우 (d)와 같은 명확한 대각선 파괴라인을 보였다.

#### 3.2 체적변화특성

그림.4 ~ 그림.7 에는 조건별 체적변화 양상을 제시하였다. 재령일수 경과에 따른 체적수축의 정도는 초기함수비가 클수록, E.P.S 함량이 작을수록, 고화재 함량이 많을수록 크게 나타났으며, 동일한 원료비드로부터 발포된 입자의 경우 입경이 작을수록 체적수축이 크게 발생하는 것으로 제시되었다. 이로부터, 공시체의 체적 수축에 영향을 미치는 주 요소는 단위체적당 함유되어 있는 준설점토와 고화재의 양이라는 결론에 도달할 수 있다.

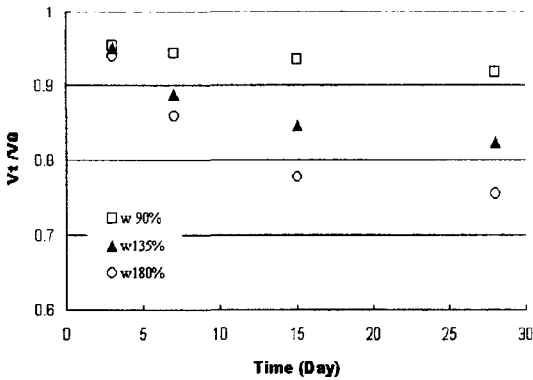


그림.4 함수비에 따른 체적변화

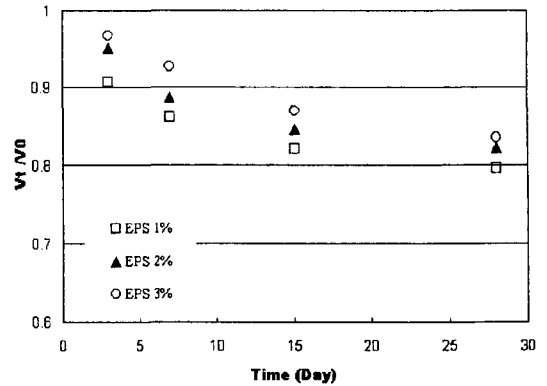


그림.5 E.P.S. 함량에 따른 체적변화

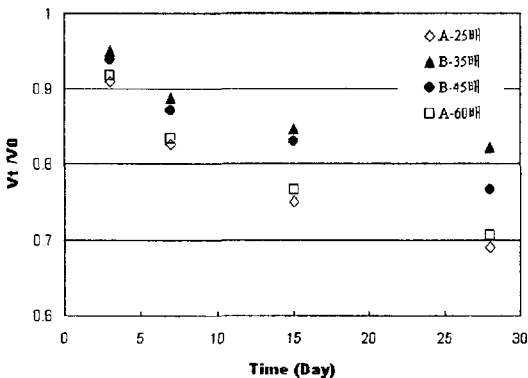


그림.6 발포배율에 따른 체적변화

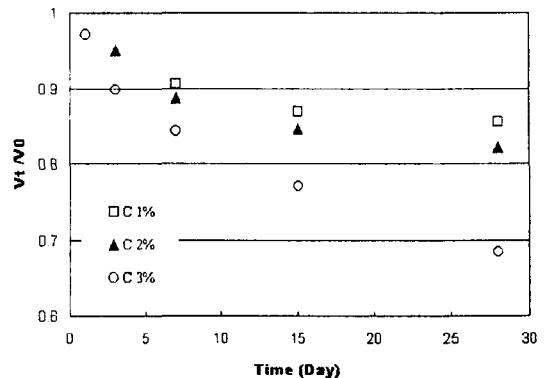


그림.7 고화재 함량에 따른 체적변화

### 3.3 초기함수비에 따른 강도변화

준설토의 초기 함수비가 증가할수록 강도는 저하하고 있으며, 경량재로 사용 가능한 목표강도 값을 2.0kg/cm<sup>2</sup>으로 본다면(일본, 운수성함탄기술연구소기준, 1996), 135% 이하의 함수비에 대해 재령 15일 이상이 경과한 상태에서 목표강도가 발현됨을 알 수 있다. 또한, 동일한 조건의 기준배합시료(함수비 135%, 35배 E.P.S. 2%, 시멘트 2%)에 대해서 삼축압축강도는 일축압축강도에 비해 다소 크게 발현되었다.

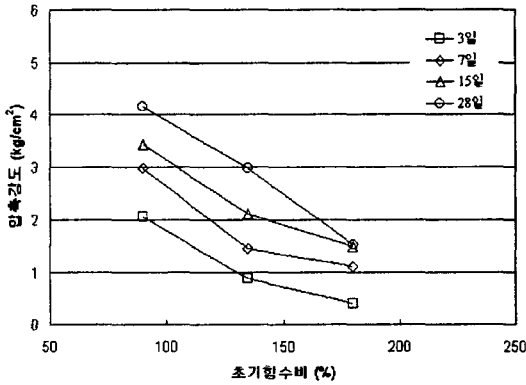


그림.8 초기함수비에 따른 일축강도 변화

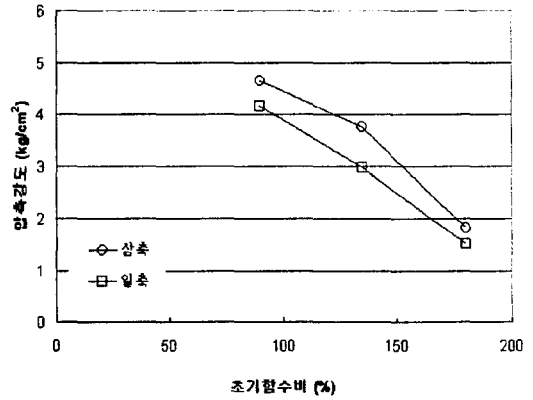


그림.9 일축강도와 삼축강도의 비교(기준배합시료)

### 3.4 E.P.S. 함량에 따른 강도변화

E.P.S. 함량이 증가할수록 강도는 감소하고 있으며, 기준배합시료에 대해서는 삼축강도가 일축강도보다 큰 경향성을 보이고 있다. 목표강도를 만족하는 범위는 모든 E.P.S. 함량에 대해 재령 15일 이상이 경과된 상태의 시료임을 알 수 있었다.

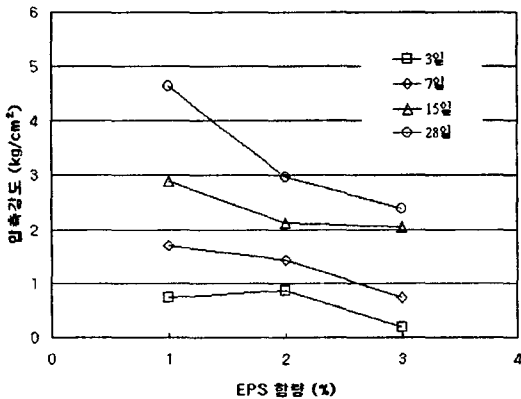


그림.10 E.P.S. 함량에 따른 일축강도 변화

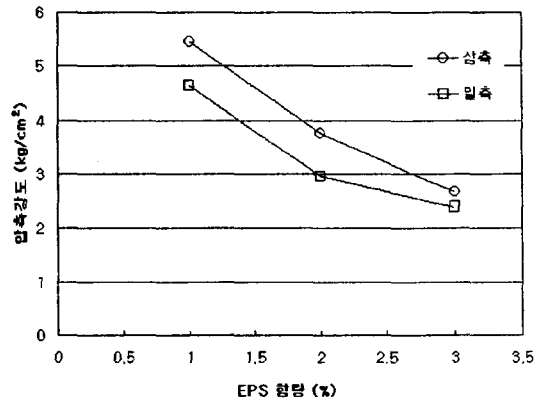


그림.11 일축강도와 삼축강도의 비교(기준배합시료)

### 3.5 E.P.S. 발포배율에 따른 강도변화

본 연구에서 사용한 E.P.S. 입자는 2 종류의 서로 상이한 원료비드로부터 발포된 것으로, 동일한 원료비드에서 발포된 입자를 기준으로 보면 발포배율이 클수록, 즉 E.P.S. 입자의 입경이 클수록 혼합토의 강도는 작게 발현되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 삼축시험의 결과 값이 일축시험에 비해 다소 크게 산정되고 있으나 일정하지 않은 경향을 보이는 경우도 있어, 혼합처리토의 강도 특성이 E.P.S. 입자의 압축성 자체에 의해 상당한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

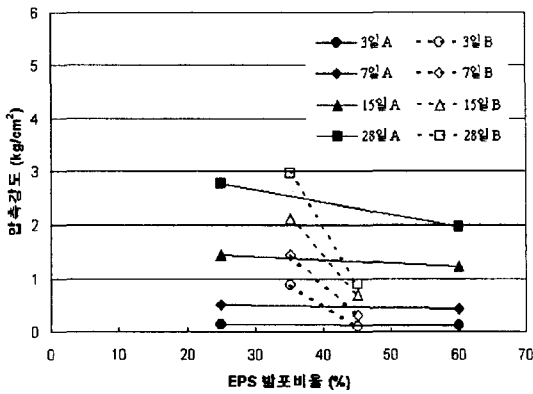


그림.12 발포배율에 따른 강도 변화

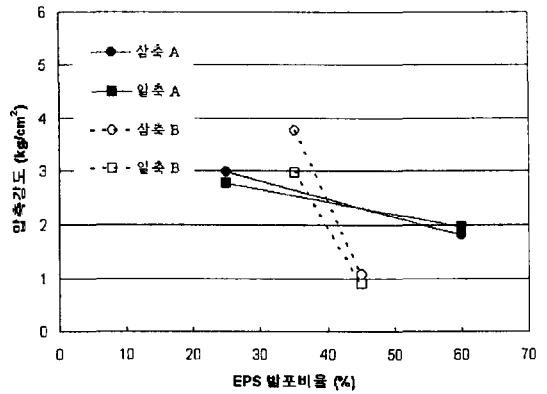


그림.13 일축강도와 삼축강도의 비교(기준배합시료)

### 3.6 고화재 함량에 따른 강도변화

실험결과 고화재 함량이 증가할수록 강도는 크게 발현되었으며, 이는 삼축시험의 경우 보다 더 크게 제시되었다. 또한, 재령 15일 이상이 경과한 시료에 대해서는 고화재 함량과 관계 없이 목표강도를 초과하고 있어, 실제로 고화재의 함량은 양생 기간의 단축 이외에는 혼합토의 적용성에 있어 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 제시되었다.

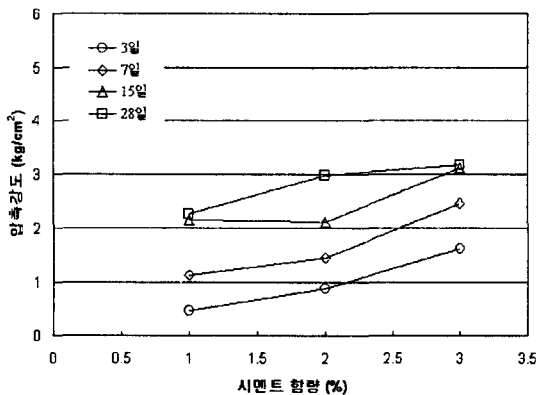


그림.14 고화재 함량에 따른 강도 변화

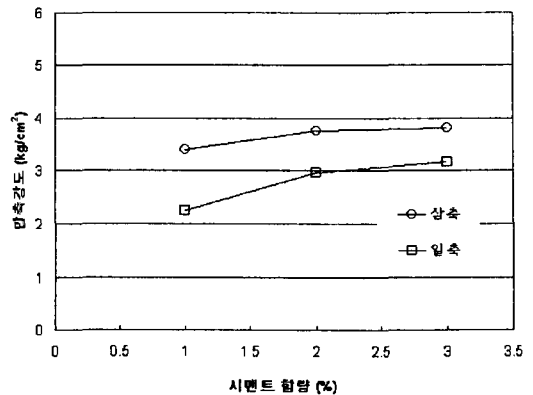


그림.15 일축강도와 삼축강도의 비교(기준배합시료)

### 3.7 재령일수에 따른 강도 변화

그림.16 은 재령일수에 따른 일축압축강도 변화와 그 증가 추세를 제시한 것으로  $qu = 0.9172\ln(\text{day}) - 0.306$ 의 경향을 보이며 강도가 증가하는 것으로 제시되었다. 또한, 목표강도를 초과하는 시료들에 대해서는  $qu = 0.4826\ln(\text{day}) + 1.3913$ 의 경향을 보였다. 그림.17에서는 기준배합시료와 함께 이들의 관계를 도시한 것으로 기준배합시료가 전체 시료에 대한 값을 대표하고 있어, 예비실험을 통한 기준배합비 산정이 적절하였음을 알 수 있다.

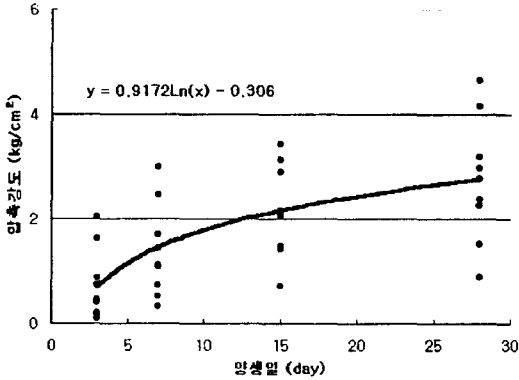


그림.16 재령일수에 따른 일축압축강도 변화

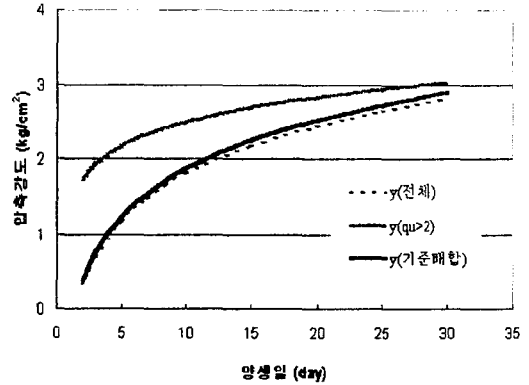


그림.17 조건별 양생일의 영향

### 3.8 구속압과 양생압의 영향

그림.18 은 삼축시험시 구속압의 변화에 따른 강도변화를 도시한 것으로 강도분포 범위는 다소 차이가 있으나 평균값이 일정하게 제시되어 구속압이 강도에 미치는 영향은 작은 것으로 제시되었다.

그림.19 는 구속압과 동일한 양생압이 가해진 상태에서 양생시킨 시료에 대한 삼축시험 결과이다. 구속압과는 달리  $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하에서 강도가 저하하다가  $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$  이상부터 점차 증가하는 양상을 보이는데, 이는 E.P.S. 입자의 체적변형특성(그림.20 참조)이 혼합토의 강도발현에 상당한 역할을 하고 있음을 제시한다고 할 수 있다. 즉, E.P.S. 입자는  $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$  이상의 압력을 받게 되면 급격한 체적 변화를 수반하지만, 혼합토의 경우 이 압력 수준에서의 밀도 증가에 의한 강도 증가가 발포비드의 크리프 변형에 의한 강도 발현 감소보다 우세하게 되기 때문에 강도가 증가하게 된다. 또한, 이러한 결과는 土田(1998)이 제시한 결과(그림.21)와도 잘 일치하고 있다.

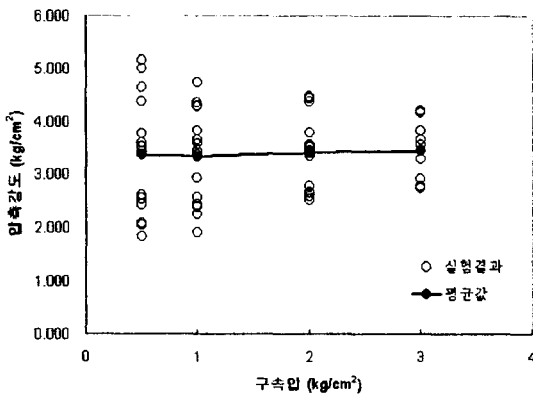


그림.18 구속압과 강도의 관계

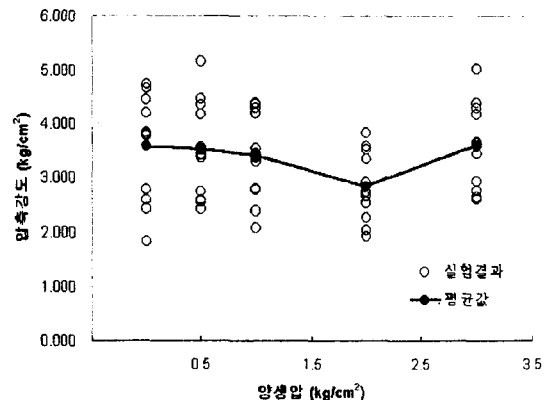


그림.19 양생압과 강도의 관계

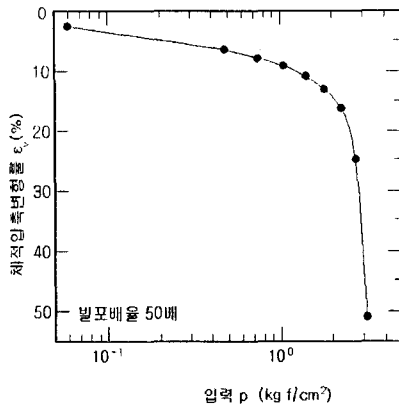


그림.20 E.P.S.의 압축변형 (土田, 1998)

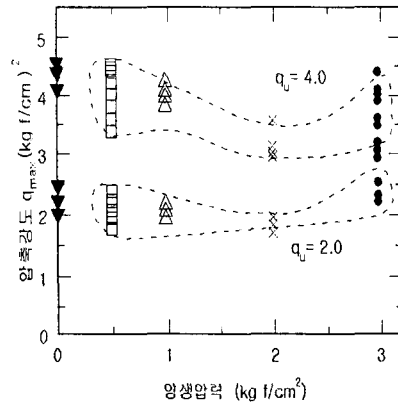


그림.21 압축강도와 양생압력의 관계 (土田, 1998)

#### 4. 결론

- (1) E.P.S. 경량혼합처리토는 재령 일수 경과에 따라 서로 다른 수준의 체적압축이 발생하게 되는데, 이때 체적수축에 가장 큰 역할을 하는 것은 원료인 준설풍토의 초기함수비인 것으로 제시되어, 초기 준설풍토의 적절한 함수비 저감 방안이 요구된다.
- (2) E.P.S. 경량혼합처리토의 강도는 초기 함수비, E.P.S. 함량과 발포배율, 고화재 함량 등에 의해 영향을 받으며, 함수비, E.P.S. 함량과 발포배율이 작을수록 그리고, 고화재 함량이 많을수록 큰 강도가 발견되었다. 이상의 실험결과로부터 원하는 수준의 강도에 해당하는 배합비를 선정할 수 있을 것으로 기대된다.
- (3) E.P.S. 혼합처리토의 강도는 구속압에 의해서는 상대적으로 영향을 받지 않는 것으로 제시되었으나, 양생압의 경우 E.P.S. 입자 자체의 체적압축 특성으로 인하여 2.0kg/cm<sup>2</sup>이하의 양생압에서는 강도 저하가 발생하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 이상의 결과를 바탕으로 혼합처리토의 적정 배합비를 산정하면 함수비 135%(자연함수비 상태) 이하, 발포배율 35배 이하, E.P.S. 함량 1% 이하, 고화재 함량 1% 이상인 것으로 제시되었다.

#### 5. 감사의 글

본 연구는 한국해양연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 윤길림 박사님을 비롯하여 해양연구소 담당자 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

#### 6. 참고문헌

- (주)미원유화(김수삼 감수, 1993.12), 'Expanded Polystyrene Construction Method : 발포폴리스티렌을 이용한 超輕量盛土工法'.
- 김용수(1995), "발포스티로폼을 사용한 경량안정처리토의 강도특성에 관한 연구", 중앙대학교 석사학위논문, 1995.
- 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
- 湯怡新, 土田孝(1996), "輕量混合處理土の 三軸試驗結果と考察", No.845 運輸省港灣技術研究所.