

## 표층/심층혼합처리용 굴패각 고화재의 고화성능 평가

### Stabilizing Capability of Oyster Shell Binder for Soft Ground Treatment

윤길림<sup>1</sup> Yoon, Gil-Lim

김병탁<sup>2</sup> Kim, Byung-Tak

#### Abstract

An experimental study was carried out to investigate the stabilizing capability of oyster shell binder, which was developed using waste oyster shell inducing environmental pollutions by piling up out at the open or the temporary reclamation. The purpose of this paper is to compare stabilizing capability of oyster shell binder and cement binder with treated soils. For this, a series of compressive laboratory tests were performed to evaluate strength characteristics of treated soils by both oyster shell binder and cement binder with varying water content of dredged soils, different mixing rates of binder and curing days. Based on test results, eco-friendly binder manufactured by oyster shells showed more stabilizing capacity than cement binder and is estimated as good resource materials for soft soil improvements.

#### 요지

무단 매립이나 일시 야적으로 환경오염을 유발하는 굴패각을 활용한 친환경 굴패각고화재의 고화성능을 평가하는 일련의 실험연구를 수행하였다. 연구목적은 연약지반개량에 적용하기 위하여 고화재의 고화능력을 평가하고 지반개량 효과를 규명하는 것이다. 이를 위하여 굴패각 고화재 및 시멘트 고화재를 가지고 준설토사에 적용하여 양생기간 및 물/고화재 비를 다르게 변화하면서 일축압축실험을 수행하여 상호 비교하였다. 실내모형 실험을 수행한 결과, 굴패각 고화재는 표층이나 천층 및 심층혼합처리공법으로 연약지반을 개량하는 경우에 시멘트 고화재 보다 고화성능이 우수한 것으로 나타났다.

**Keywords :** Binder, Cement, Dredged soil, Oyster shell, Soil, Stabilizing agent

#### 1. 서론

연약지반의 개량공법을 원리별로 분류하면 물리적 개량공법과 화학적 개량공법으로 구분된다. 이 두가지 공법을 병행하여 시행하는 경우도 있지만, 천층개량공법은 대체적으로 화학적 개량공법이 많이 쓰이고 있으며, 특히 시멘트계 고화재를 이용한 방법은 도로의 노상, 노반토량의 소일시멘트(soil-cement)공법에 시초가 되는 공법이다. 소일시멘트 공법의 경우, 대상토의 함수

비가 일반적으로 소성한계 부근의 함수비이기 때문에 시멘트는 분체 그대로도 균일한 혼합이 가능하다. 그러나 함수비가 소성한계를 넘어 액성한계보다도 큰 흙의 경우, 시멘트 분체로는 균일한 교반을 할 수 없다. 이에 시멘트를 슬러리 상태에서 고함수비의 연약토와 균일하게 하는 공법이 1965년경부터 시험적으로 실시되었으며, 현재에는 하천, 운하 등에 퇴적된 도로의 고화처리, 준설매립지에서의 시공성 확보를 위해 적용되고 있다.

1 정회원, 한국해양연구원, 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute, glyoon@kordi.re.kr, 교신저자)

2 정회원, GS건설, 과장 (Member, Manager, GS Engineering & Construction)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

한편 고화재로써 시멘트 이외에 석회, 슬래그 등의 산업부산물도 많이 이용되어 왔으며, 최근에는 굴 양식으로 인해 연간 30여만톤 규모로 발생하는(굴수하식양식수산협동조합, 2002, 한국해양연구원, 2003) 굴껍질 폐기물의 재활용 차원에서 친환경 굴패각 고화재가 개발되어 연약지반 안정처리를 위한 개량재의 다양한 이용을 가능케 하였다. 건설재료로써 굴패각 재활용과 관련된 국내외의 연구를 살펴보면, 굴패각 모르타르의 혼합토에 대한 연구, 굴패각 혼합토의 비배수 전단강도 특성, 굴패각이 혼합된 해성점토를 매립재료로 활용하는 방안 등을 들 수 있다(윤길림외 3인, 2001). 또한 일본 경우에는 연약지반에 대한 도로광폭공사의 노상재료에 응용하는 연구와 굴패각을 파쇄하여 모래대체재로 사용한 연구 등이 있다(Miyamoto, M, et al, 2001, Miyaji Y. and Okumura T. 2000).

본 논문은 이미 발표된 굴패각 고화재의 고화능력 및 환경성을 검증한 논문(윤길림외 3인, 2005)의 연구결과를 현실적으로 확대한 내용이다. 즉, 현장에 적용하는 경우에 설계기준강도를 만족하는 문제를 고려하기 위하여 고화재의 함유량, 물/시멘트비 변화 및 양생일과의 관계를 고려하면서 수행한 실험내용이다.

굴패각 고화재는 이미 한국 특허청에 등록(registered no. 0464666)이 되어있으며 연약지반의 표층처리, 천층 혼합처리나 심층혼합처리공법에 대한 현장적용성을 평가하기 위하여 개발 특허 고화재의 물리·화학적 특성, 혼합토 제조 후, 강도특성을 규명하고 그 고화능력을 시멘트계 고화재와 비교하는 연구를 수행하였다.

## 2. 굴패각 고화재와 시험 대상토 시료

### 2.1 굴패각 고화재

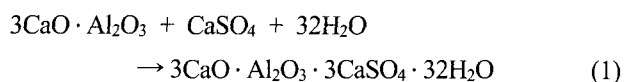
굴패각을 수직으로 파단하여 단면을 살펴보면, 치밀한 판상구조인 sheet layer와 비표면적이 큰 다공성 구조의 bulky layer로 구성되어 있다. 이 두 층의 화학조성과 미구조가 다른 점을 이용하여 bulky layer 부분만 탈탄산함으로서 silica와의 수열 처리시 tobermorite, xonotlite와 같은 결합상을 형성하도록 하였다. 탈탄산이 되지 않은 sheet layer 부분은 미반응 Silica와 함께 경화체에 남아 골재역할을 하도록 한 것이 굴패각 고화재이다.

굴패각은 방해석 구조의 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)으로서 주 성분과 광물상이 천연 석회석과 동일하다. 염분제거 단



그림 1. 시멘트계 고화재(사진 왼쪽)와 굴패각 고화재(사진 오른쪽)의 모습

계에서는 굴패각을 수집하여 물세척을 통하여 염소 이온(Cl<sup>-</sup>)을 제거함과 동시에 악취와 분진도 함께 제거하게 된다. 전처리 단계는 염분이 제거된 굴패각을 연소시켜 산화칼슘이나 수산화칼슘을 생성하는 것이다. 전처리된 산화칼슘이나 수산화칼슘을 이용하여 지반개량형 고화재를 제조하는 과정은 굴패각과 고로슬래그, 플라이애쉬, 석고 등이 혼합되어 사용된다. 고로슬래그는 제철공장의 고로 작업 시에 철광석의 불순물 등이 섞인 주성분인 압질 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 화합하여 고온에서 용융상태로 부유된 물질이고, 플라이애쉬는 석탄화력 발전소의 보일러에서 나오는 gas중에 포함된 재의 미분입자로 이산화규소와 산화알루미늄으로 구성된 것이며, 석고(CaSO<sub>4</sub>)는 비료공장에서 발생하는 인산염의 부산물이다. 전처리된 굴패각(CaO)은 플라이애쉬(SiO<sub>2</sub>)와 석고 등과 에트링자이트(Ettringite) 반응을 하여 고품물질을 생성하게 되며, 그 반응 화학식은 식 (1)과 같다. 수화에 의해 에트링자이트라는 침상결정이 생성되어 공극이 감소하기 때문에 콘크리트의 건조수축에 의한 균열이 감소함과 동시에 장기강도 향상 및 방수의 효과가 있다.



또한 전처리된 굴패각(CaO, (CaOH)<sub>2</sub>)은 플라이애쉬(SiO<sub>2</sub>)와 석고(CaSO<sub>4</sub>) 및 산화철(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 포졸란(pozzolan) 반응을 하여 고품물질을 생성한다. 즉, 포졸란은 그 자체만으로는 시멘트성 반응성이 없지만 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 반응하여 C-S-H를 형성하게 되는 것으로 화학식은 식 (2)에 나타내었다. 고로슬래그는 시멘트 및 물과 같이 존재할 경우 잠재수경성 반응을 일으키고, 플라이애쉬는 그 자체로서의 수화반응성은 없지만 가

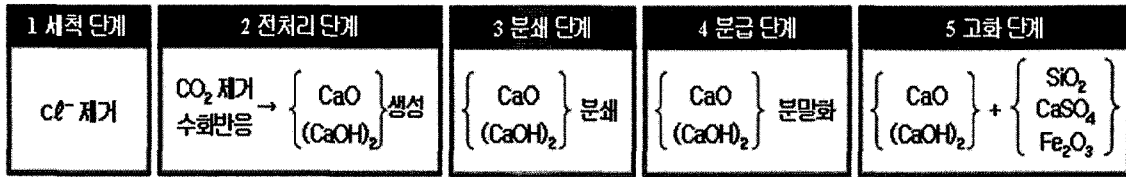
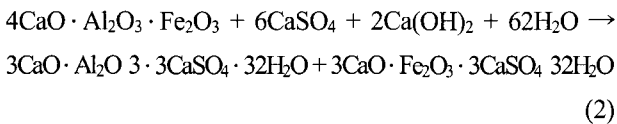


그림 2. 굴패각 고화재 제조과정

표 1. 대상토의 토성시험 결과

비 중	2.555	최대날지름(mm)	19.0	40번체통과율(%)	93.1
자연함수비(%)	50.26	60%날지름(mm)	0.0042	200번체통과율(%)	86.9
액성한계(%)	48.8	10%날지름	-	통일분류	CL
소성한계(%)	25.8	균등계수	-	습윤단위중량(tf/m <sup>3</sup> )	1.515
소성지수	23.0	10번체통과율(%)	98.1	염분농도	-

용성의 실리카 등이 시멘트 수화시 생성되는 수산화칼슘과 상온에서 서서히 반응하여 불용성의 안정한 규산칼슘 수화물 등을 생성하며 작업성과 펌프성을 개선시키는 효과가 있다. 굴패각 고화재의 제조공정을 5단계로 정리하면 그림 2와 같다.



## 2.2 혼합토 공시체 제작을 위한 시료

굴패각 고화재의 제작을 위한 기초 대상토로서 경남 해안지역에서 채취된 점토 시료를 이용하였다. 채취한 자연점토의 비중, 자연함수비, 액성한계, 소성지수 및 입자날지름 분석 등 토성시험을 KS F 2301, KS F 2306, KS F 2324 기준에 의하여 실시하였다. 본 시료는 실내 입도분석 시험결과, 0.01mm 이하의 통과율이 50% 이상으로 입자가 미세하며, 소성지수가 20% 이상으로 소성이 커 외부하중에 매우 민감한 흙으로 나타났다. 따라서 이러한 연약지반에서 각종 건설공사를 수행하기 위해서는 장비의 주행성(trafficability)을 고려한 연약지반의 표층 지지력이 우선적으로 확보되어야 한다. 그 방법으로 주로 천층처리나 표층처리공법을 사용하게 된다. 그러므로 표층처리재로서 사용되는 시멘트계열의 고화재가 있지만 보다 환경적으로 친화적인 굴패각 고화재를 표층처리나 심층혼합처리공법에 대한 현장 적용성을 평가하기 위하여 배합조건 및 재령에 따른 강도특성을 시멘트계 고화재와 함께 비교, 고찰하였다. 연구용 대상토에 대한 각종 토성시험의 실내시험을 통하여 얻은 결과는 표 1과 같다.

## 3. 굴패각 고화재의 물리·화학적 특성평가

시멘트계 고화재 및 굴패각 고화재에 대한 성분분석과 결정구조분석을 통하여 고화재 원소 및 주 결정의 성분비를 파악하였다. 그리고 굴패각 고화처리 전·후의 주사전자현미경(SEM) 관찰을 통하여 고화처리에 따른 미세구조 변화를 확인하였다.

### 3.1 X-선 형광(XRF)에 의한 성분분석

X-선 형광(X-Ray Fluorescence)분석은 시료에 X-선을 조사할 때 발생하는 형광 X-선을 보통 분광결정에 의하여 분광하여 그 강도를 검출기로 측정함으로써 유기물 및 무기물 원소를 정성 또는 정량적으로 분석하는 비파괴 분석방법이다.

표 2에 고화재별 화학분석결과를 정리하였다. 유기물 함량을 나타내는 강열감량(Ignition loss)이 시멘트계 고

표 2. 고화재 종류별 화학성분 비교

화학성분	시멘트계 고화재 (일반 시멘트)	굴패각 고화재 (굴패각 활용)
MgO	1.16	1.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.89	3.95
SiO <sub>2</sub>	16.96	10.38
CaSO <sub>4</sub>	16.20	14.42
K <sub>2</sub> O	0.77	0.19
CaO	52.89	62.54
TiO <sub>2</sub>	0.61	0.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-
Ig loss(%)	3.52	6.52

화재 3.52%, 굴패각 고화재 6.52%로 개발된 굴패각 고화재가 높았으며, 이는 굴패각의 CaCO<sub>3</sub> 성분이 CO<sub>2</sub>로 분해된 것으로 판단할 수 있다(윤길림 외 3인, 2005).

### 3.2 X-선 회절(XRD)에 의한 결정구조분석

X-선 회절(X-Ray Diffraction)분석은 지반 공학에서 세립토내 광물(minerals)의 확인과 그 결정구조(crystal structure)를 연구하는데 가장 보편적으로 이용되는 방법이다. 이 방법으로 유·무기물 및 결정·비정질 재료 등 다양한 종류와 형태의 시료를 정성적으로 분석할 수 있다. 시멘트계 및 굴패각 고화재를 X-선 회절분석한 결과는 그림 3과 같다. 시멘트계 고화재에서는 C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S의 주 결정상이, 굴패각 고화재에서는 CaCO<sub>3</sub> 성분이 peak로 나타나 물리적 특성면에서도 차이가 있음을 알 수 있다.

### 3.3 주사전자현미경(SEM)에 의한 미세구조 관찰

고화처리된 대상토의 미세구조를 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 관찰하였다. 그림 4(a)에 나타난 바와 같이 고화처리 전 자연상태의 대상토는 미세공극이 많이 관찰된 반면, 그림 4(b)의 고화처리 후 대상토는 내부구조가 비교적 치밀하게 채워진 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 에트링자이트(Ettringite) 반응의 침상결정과 C-S-H gel 상의 수화물에 의한 활발한 포졸란(Pozzolan) 반응의 결과로 판단되었다.

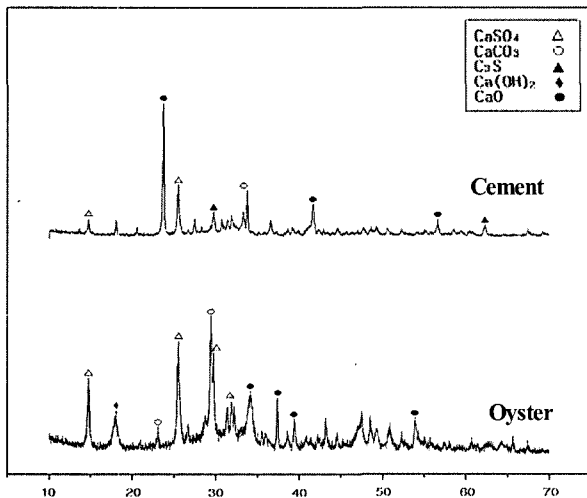


그림 3. 시멘트계 고화재와 굴패각 고화재의 X-선 회절분석 결과

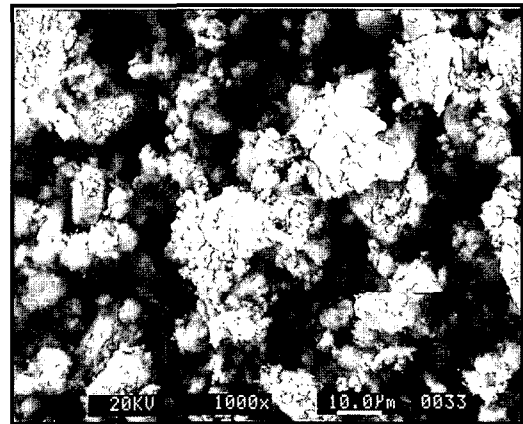
## 4. 굴패각 고화재의 역학적 고화능력 평가

연약지반의 표층처리, 천층처리공법 및 심층혼합처리공법에 굴패각 고화재를 사용하는 경우에 고화능력을 평가하여야 한다. 그 고화능력을 역학적으로 파악하기 위하여 고화재 혼합토를 제작하여 일축압축시험을 실시하였으며, 동시에 시멘트계 고화재를 이용한 혼합토와도 그 강도특성을 구하여 상호 비교하였다.

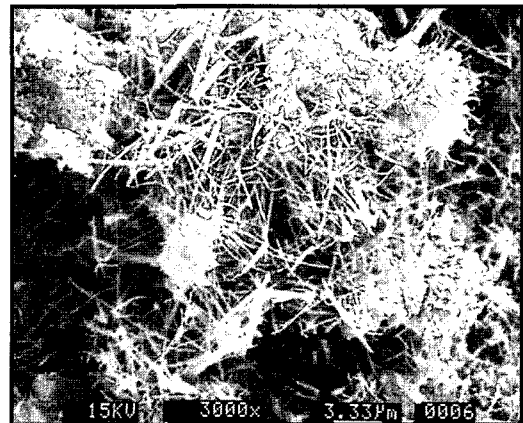
### 4.1 공시체의 제작

고화재 혼합토의 강도특성 평가를 위한 공시체 제작은 한국산업규격(KS F 2329)에서 제시하는 방법에 따라 다음과 같이 수행하였다.

- (1) 물:고화재 비는 굴패각 및 시멘트계 고화재에 대하여 각각 0.8:1, 1:1, 1.2:1의 3가지 조건으로 배합하여



(a) 굴패각 고화처리 전



(b) 굴패각 고화처리 후

그림 4. 굴패각의 고화처리 전과 후의 SEM 사진

함수량에 따른 강도변화를 비교하였다.

- (2) 고화재의 함량은 공시체의 중량비에 따라 각각 5, 10, 15, 20, 25%로 변화시켜 공시체를 제작하였으며, 함량은 다음 식에 의해 결정하였다.

$$\text{고화재 함량}(\%) = \frac{\text{고화재 중량}}{(\text{고화재 중량} + \text{물중량} + \text{흙중량})} \times 100$$

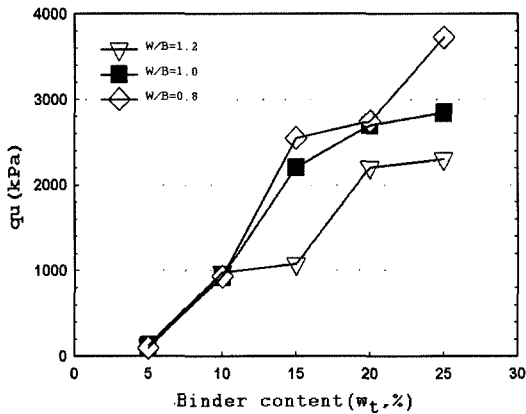
- (3) 공시체는 물/고화재 비, 고화재 함량 및 양생일에 따른 강도특성을 파악하기 위하여 PVC관을 이용하여 일축압축시험에 적합한 규격(직경 5cm, 길이 10cm)으로 제작하여 사용했다. 그리고 표면건조를 방지하기 위해 필름을 사용하여 대기중에서 24시간 방치 후 수증양생 하였다. 수증양생시 수온은 20±2℃로 일정하게 유지하여 온도변화에 따른 영향을 최소화하였다.

## 4.2 일축압축강도 특성

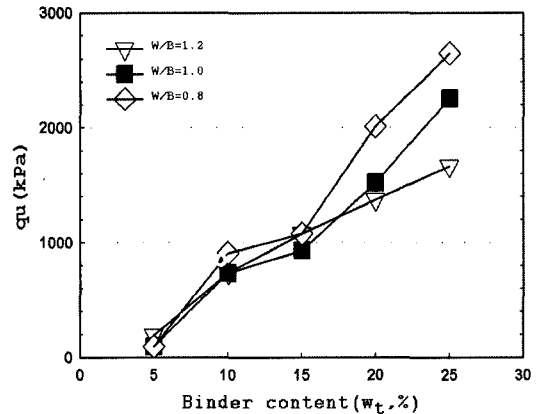
시멘트계 고화재와 굴패각 고화재의 일축압축강도 특

성을 확인하기 위하여 고화재 함량이 5, 10, 15, 20, 25% 일 때, 물/고화재 비를 각각 0.8:1, 1:1, 1.2:1로 변화시켜 재령 7일과 28일 양생한 후 일축압축강도를 측정하였다. 그 결과 그림 5와 6에 나타난 바와 같이 일축압축강도는 고화재 함량이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 양상을 보였고, 물/고화재 비가 작을수록 강도는 증가하였다.

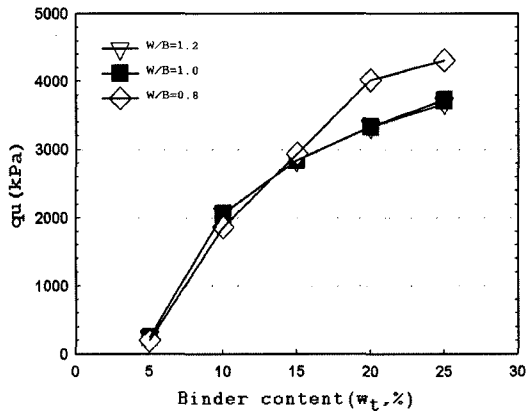
재령 7일 최대 압축강도는 시멘트계 고화재 약 3,727 kPa, 굴패각 고화재의 경우 2,648kPa로서 시멘트계 고화재가 71%가량 높게 나타났다. 반면, 재령 28일 최대 압축강도는 시멘트계 고화재 약 4,315kPa를 굴패각 고화재 6,276kPa가 약 69%가량 초과하여 완전히 반전된 양상을 나타내었다. 즉, 굴패각 고화재의 초기강도는 시멘트계 고화재 보다 낮은 강도특성을 보였으나, 28일 양생후에는 초기강도와 거의 같은 비율로 시멘트계 고화재를 능가하였다. 이는 굴패각 고화재의 원재료가 가지고 있는 슬래그 반응성에서 기인한 것으로 보이며, 28일 양생후에는 잠재수경성 반응이 일어나면서 강도가 증



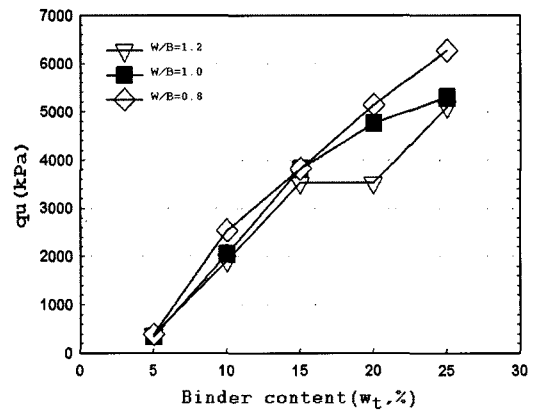
(a) 시멘트계 고화재(Ct=7days)



(b) 굴패각 고화재(Ct=7days)

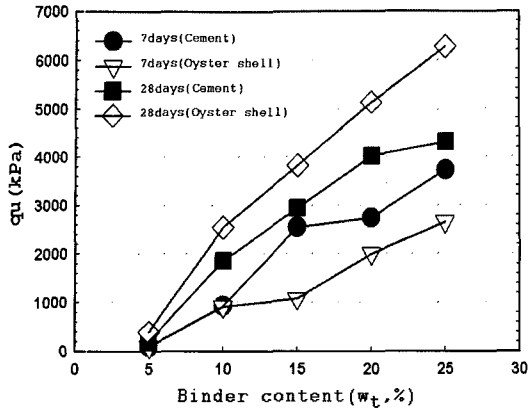


(c) 시멘트계 고화재(Ct=28days)

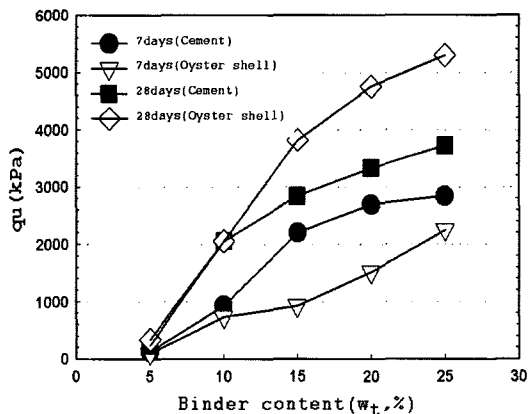


(d) 굴패각 고화재(Ct=28days)

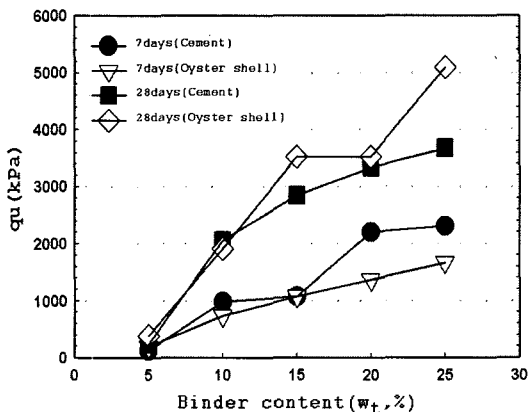
그림 5. 재령일(7일과 28일)에 따른 고화재 혼합토의 일축압축강도 변화



(a) 물 : 고화재 = 0.8 : 1 인 경우



(b) 물 : 고화재 = 1 : 1 인 경우



(c) 물 : 고화재 = 1.2 : 1 인 경우

그림 6. 물/고화재 비에 따른 고화재 함유량에 대한 일축압축강도 변화

가된 것으로 판단된다.

그리고 물/고화재 비가 낮을때 대체적으로 강도가 증가함을 알 수 있었으며, 특히 고화재 함량이 함께 증가할수록 강도차이는 더욱 크게 나타났다.

이러한 고화능력을 활용한다면 시멘트, 석회 등 기존의 고화재를 대신하여, 해양에서 배출되는 굴패각을 이용한 고화재를 연약지반 표층처리공법에 적용할 수 있

을 것으로 판단된다. 그 경우, 해양폐기물 처리의 환경적 측면은 물론, 시멘트계 고화재와 비교할 때 시간경과에 따른 강도증가가 우수하므로 공학적 측면에서도 매우 유용성이 높다고 할 수 있다. 그러므로 현장 지반의 함수비와 토질특성에 따라 고화재 함량과 혼합두께 등을 결정함으로써 충분한 적용성이 있을 것으로 판단되었다. 추후 시험시공을 통하여 사전에 운용될 장비의 용량에 따른 내하력 검증이 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

연약지반 개량을 위한 표층처리, 천층혼합처리공법이나 심층혼합처리공법에 적용하는 경우에 굴패각 고화재의 물리적 고화능력 및 화학적 특성을 조사하기 위하여 현장에서 채취한 연약점토를 이용하여 일련의 실내모형실험으로 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) X-선 형광분석 결과 굴패각 고화재의 강열감량(Ignition loss)이 6.52%로 시멘트계 고화재 3.52% 보다 높았으며, 이는 굴패각의  $\text{CaCO}_3$  성분이  $\text{CO}_2$ 로 분해된 것으로 추측된다. 그리고 X-선 회절분석 결과, 시멘트계 고화재에서는  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ 의 주 결정상이, 굴패각 고화재에서는  $\text{CaCO}_3$  성분이 peak로 나타나 서로 상이한 결정구조 분포를 가지고 있음을 확인하였다.
- (2) SEM에 의한 미세구조 관찰결과 고화처리 전 자연상태의 대상토는 미세공극이 많이 관찰된 반면, 고화처리된 대상토는 내부구조가 비교적 치밀하게 채워진 것을 확인할 수 있었다. 이는 에트링자이트(Ettringite) 반응의 침상결정과 C-S-H gel 상의 수화물에 의한 활발한 포졸란(Pozzolan) 반응의 결과로 판단되며, 압축강도의 증대에 영향을 미칠 것으로 판단된다.
- (3) 시멘트계 및 굴패각 고화재의 함량, 물/고화재 비, 재령에 따른 시험결과, 일축압축강도는 시멘트계 및 굴패각 고화재 함량이 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 양상을 보였고, 물/고화재 비가 작을수록 강도는 증가하였다.
- (4) 굴패각 고화재의 초기강도는 시멘트계 고화재 보다 71%가량 낮은 강도특성을 보였으나, 28일 양생후에는 시멘트계 고화재 보다 69%가량 향상되었다. 이는 굴패각 고화재의 원재료가 가지고 있는 슬래그 반응성 및 28일 양생후에는 잠재수경성 반응이 일어나면

서 강도가 증가된 것으로 판단된다. 또한 물/고화재 비가 낮을때 대체적으로 강도가 증가함을 알 수 있었으며, 특히 고화재 함량이 증가할 수록 강도차이는 더욱 크게 나타났다.

- (5) 굴폐각 고화재는 친환경 고화재로서 이미 2005년 해양수산부에서 발간한 “항만 및 어항 설계기준서 및 전문시방서”에 반영된 제품이다. 굴폐각 고화재를 활용하는 경우에 주변 토양, 지하수 및 해양오염을 최소화하면서 연약지반개량이 가능한 장점이 있다. 그러므로 항만구조물 건설과 택지조성 등에 필요한 지반개량공사인 표층처리공법 및 심층처리공법으로 충분히 활용될 수 있으리라 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 한국해양연구원 기관고유 연구사업인 “하구역의 관리 및 기능회복 기술개발, No. PE97101” 연구지원으로 가능했음을 밝힙니다.

### 참고 문헌

1. 굴수하식양식수산업동조합 (2002), 굴양식현황 및 폐각처리 대책 보고서.
2. 윤길림, 김병탁, 김준형, 채영수, 서승남, 심재설 (2001), “굴폐각 혼합한 모르타르 혼합토의 강도특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제17권 5호, pp.51-60.
3. 윤길림, 채광식, 백승철, 윤여원 (2006), “친환경 굴껍질 고화재 개발”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.21, No.3, pp.79-86.
4. 한국해양연구원 (2004), “굴폐각을 이용한 지반개량형 고화재 제조방법”, 한국특허 등록번호; 0464666.
5. 한국해양연구원 (2000-2004), 굴폐각 혼입 특수콘크리트개발, 해양수산부 연구보고서.
6. Miyamoto, M., Taniguchi, K., Yamada, M. and Hana, S. (2001), “Reuse of Oyster shell Resources of civil engineering materials”, *Japan Ishigawa Industry Reports (IRI)*, Vol.51, pp.1-5.
7. Miyaji Y. and Okumura T. (2000), “Geo-material properties of wasted oyster shell-sand mixture and its application as material for sand compaction pile”, *Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, Nakase & Tsuchida (Eds.), Rotterdam, pp.675-680.

(접수일자 2006. 8. 25, 심사완료일 2006. 10. 25)