

## 굴폐각 고화재를 혼합한 준설토의 전단특성

### Shear Strength Characteristics of Dredged Soil with Oyster Shell Binder

이 상 진<sup>1)</sup> · 윤 길 립<sup>2)</sup> · 이 윤 규<sup>3)</sup> · 이 기 동<sup>4)</sup> · 강 인 규<sup>5)</sup> · 김 홍 택<sup>6)</sup> · 백 승 철<sup>†</sup>

Lee, Sangjin · Yoon, Gillim · Lee, Yoongyu · Lee, Kidong · Kang, Ingyu · Kim, Hongtaek · Baek, Seungcheol

**ABSTRACT** : Trafficability for construction equipments in soft ground should be secured by improving the surface course. For this situation, the ground improvement technique has been used with stiffening agent, but the improvement cement has been mostly used so far. However, oyster shell has been developed and used as the stiffening agent to expand the chance of recycling oyster shell, which is regarded as solid waste. In this research, it was confirmed mechanical characteristics of oyster shell as stiffening agent by analyzing the strength characteristic such as mixing rates, water contents, and curing days of that to the dredging soil.

**Keywords** : Ground improvement, Strength characteristics, Oyster shell, Dredged soil

**요 지** : 연약지반과 관련된 공사에서는 표층을 개량하여 교통성을 확보하여야 한다. 이를 위해 고화재를 이용한 지반개량공법이 이용되고 있으나, 지금까지 사용된 고화재는 시멘트를 개량한 제품을 이용하였다. 그러나 현재 폐기물로 인정되는 굴폐각의 재활용 기회를 확대하기 위해 굴폐각을 이용한 고화재를 개발하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 준설토를 대상으로 굴폐각 고화재의 혼합율, 함수비, 양생일에 따른 강도 특성을 분석하여 굴폐각 고화재의 역학적 특성이 우수함을 확인하였다.

**주요어** : 지반개량, 강도특성, 굴폐각, 준설토

## 1. 서 론

현재 국내에서 대규모 신항만 건설이 진행되고 있으며 이와 더불어 많은 양의 준설토가 발생하고 있다. 이렇게 발생된 준설토는 대규모 투기장을 마련하여 단순 투기하거나, 매립에 의해 방법으로 처리하고 있는 실정이다. 그러나 선진국에서는 신기술 또는 신공법의 개발로 모래질 성분이 포함된 준설토를 방파제나 안벽 및 호안 시공에 건설재료로 이용하는 기술 등을 개발하여 준설토의 적극적인 활용을 방안을 강구하고 있다(한국해양연구원, 2002). 따라서 국내에서도 단순 투기 또는 매립에 대한 소극적 방법보다 준설토를 건설재료로 활용할 수 있는 방법을 강구할 필요가 있다.

굴폐각은 국내 연안의 굴양식으로 연간 약 30만톤이 발생하고 있으나, 발생량의 50% 이상은 재활용되지 못하고 매립이나 주변에 적재하는 형식으로 처리되고 있는 실정이다(윤길립 등, 2005). 특히 해안가에 적재하거나 공유수

면에 임시매립 등으로 처리되어 누출수에 의한 환경피해와 환경오염의 근원지가 되고 있다(윤길립 등, 2004). 이러한 문제를 해결하기 위하여 비료, 사료, 인공갈축 등 굴폐각의 재활용 방안이 이루어지고 있지만 그 활용도는 미미한 실정이다. 일본의 경우 굴폐각을 모래 대체 재료로 활용연구(Okumura et al., 1996; Miyaji et al., 2000)와 연약지반 도로공사의 노상재료 활용연구(Miyamoto et al., 2001)를 수행한 바 있다.

지금까지 연약지반을 개량하기 위해 고결의 원리를 적용한 석회와 시멘트를 이용하였다. 그러나 유기질토와 초고함수토 등 적용 대상토가 다양해짐에 따라 자원의 한계성과 경제성의 문제가 있다고 생각된다. 이에 최근 준설토의 활용과 굴폐각의 재활용 차원에 개발된 굴폐각 고화재가 개발되었으나, 기초지반 안정처리에의 활용가치를 규명하여야 할 과제가 남아 있다. 따라서 본 연구에서는 서·남해 연안의 환경문제를 가지고 있는 굴폐각을 혼합한 고화재와 연약지반인 준설토를 혼합하여 그 강도특성을 규명

1) 정회원, 안동대학교 대학원

2) 정회원, 한국해양연구원 책임연구원

3) 정회원, 건국대학교 건설공학부 조교수

4) 정회원, 안동대학교 지구환경과학과 교수

5) 정회원, 브니엘컨설턴트 대표이사

6) 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

† 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수(E-mail : civilb@andong.ac.kr)



0.22% 정도 굴패각 고화재에 더 많이 포함된 것으로 확인되었다.

또한 대상토의 미세한 점토 입자는 시멘트의 수화반응을 억제하고 대상토에 유기물질이 포함된 경우에는 유기물 속에 함유되어있는 후민산을 흡착하고 거기에 점토입자 자체가 칼슘이온을 흡착해버리는 반응이 있기 때문에 액상이 pH 10이상의 알카리 용액으로 되지 않고 후민산 석회를 만들며 일시적으로만 고화시키는 경향을 나타낸다. 특히 굴패각 고화재에 비해 2.24% 정도 많은 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 함유한 시멘트 고화재의 경우 대상 준설토와 혼합하면 이러한 반응이 뚜렷이 나타날 것으로 판단된다.

### 3. 실험방법

굴패각 고화재의 혼입율과 대상토의 함수비, 양생일에 따른 공시체의 응력-변형거동을 조사하기 위하여 혼입율은 중량비 3%, 6%, 9%, 12%로 변화시켰으며, 함수비 50%, 100%, 150%, 양생일 7일, 14일, 28일에 대한 일축압축 및 삼축압축(비배수비압밀)시험을 수행하였다. 실험에 사용된 공시체는 각 실험인자를 고려하여 준설토와 고화재 일정비를 혼합 후 PVC관 모울드로 성형하였다. 고화재 혼합토의 전단특성 평가를 위해 공시체 제작과정은 다음과 같다.

- ① 공시체 제작을 위한 함수비는 여수 여천공단 조성공사에서 채취한 준설토의 중량에 대한 함수비를 측정 한 후 고화재(굴패각 및 시멘트 고화재)를 첨가하여 공시체를 제작하였다.

- ② 고화재의 혼입율은 공시체의 중량비에 따라 3%, 6%, 9%, 12%로 변화시켜 제작하였으며, 혼입율은 다음 식에 의해 결정하였다.

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

- ③ 공시체 제작 함수비는 준설토의 자연함수비 50%를 기준으로 현장 상태를 고려할 수 있는 100%, 150%까지 증가시켜 제작하였다. 이때 함수비 증가를 위해 해수를 사용하였다.
- ④ 공시체는 고화재 혼입율, 함수비, 양생일에 따른 강도특성을 알아보기 위해 일축 및 삼축압축시험의 공시체는 직경 5cm, 높이 10cm로 제작하였으며, 직접 전단시험을 위한 시편은 직경 6cm, 높이 2cm로 제작하였다. 이를 위해 PVC관을 이용하였으며 표면의 건조를 막기 위해 필름을 사용하여 대기 중에서 약 48시간 방치 후 수증 양생하였다.

## 4. 개량 준설토의 역학적 특성

### 4.1 일축압축강도시험

굴패각 고화재와 시멘트 고화재를 혼합한 준설토에 대해 혼입율, 함수비, 양생일에 따른 일축압축강도 특성 실험 결과를 표 5와 표 6에 제시하였다.

표 5는 굴패각 고화재를 혼합한 혼합토의 양생일, 함수비, 혼입율에 따른 일축압축강도를 나타내었다. 함수비 변화에 따른 일축압축강도는 전반적으로 함수비가 낮을수록,

표 5. 굴패각 고화재를 혼합한 준설토의 일축압축강도

(단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

양생(일)	7			14			28			
	함수비(%)	50	100	150	50	100	150	50	100	150
3	혼입율(%)	50	100	150	50	100	150	50	100	150
3		0.185	0.151	0.126	0.288	0.195	0.152	0.351	0.228	0.164
6		2.73	1.87	1.20	3.52	1.68	1.42	4.29	2.41	1.66
9		7.50	3.90	1.91	10.40	4.85	2.48	11.73	5.57	2.59
12		8.35	3.99	2.43	15.53	6.44	4.34	17.69	7.99	5.13

표 6. 시멘트 고화재를 혼합한 준설토의 일축압축강도

(단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

양생(day)	7			14			28			
	함수비(%)	50	100	150	50	100	150	50	100	150
3	혼입율(%)	50	100	150	50	100	150	50	100	150
3		0.16	0.15	0.11	0.39	0.24	0.18	0.50	0.30	0.18
6		2.09	0.91	0.42	3.31	1.43	0.78	3.61	2.05	1.02
9		3.88	1.19	0.65	6.38	1.77	1.10	8.38	2.63	1.50
12		2.92	0.67	0.34	4.34	1.36	0.49	6.83	1.83	1.07

혼입율이 높을수록 크게 나타나고 있다. 특히 고화재 혼입율 12%에서는 높은 강도를 나타내었으나, 혼입율 9%에 비해 함수비 감소에 따른 전체적인 강도증가율은 낮게 나타났다. 양생일에 따른 강도 변화는 양생 14일까지 양생 28일 강도의 70~80% 발현되고 있으며, 혼입율 12%의 경우에는 그러한 경향이 명확하게 나타나고 있다.

표 6에 시멘트 고화재 혼입율에 따른 강도는 혼입율 9%까지는 증가하는 경향을 보이고 있으나, 혼입율 12%의 경우 오히려 감소하였다. 또한 양생일이 증가할수록 함수비 50%의 경우 혼입율 9% 까지 강도 증가율이 크게 나타났다. 함수비에 따른 강도는 함수비 50%만이 양생일 및 혼입율에 따라 큰 증가를 나타내며 함수비가 큰 경우에는 강도증가율이 크게 증가하지 않았다.

서로 다른 고화재를 혼합한 준설토의 파괴시 일축압축강도비(굴패각 고화재 혼합 준설토의 일축압축강도와 시멘트 고화재 혼합 준설토의 일축압축강도 비)를 비교한 것을 표 7에 제시하였다. 표 7에서 혼합율 3%인 경우, 굴패각 고화재를 혼합한 혼합토와 시멘트 고화재를 혼합한 혼합토의 강도비는 양생 7일에서는 거의 비슷하나 양생 14일 이후 시멘트 고화재를 혼합한 혼합토의 강도가 크게 나타났다. 그러나 혼합율 6% 이상에서는 굴패각 고화재를 혼합한 혼합토의 강도가 미소하게 크게 나타났다. 또한 혼입율 9%에서는 모든 양생일에서 함수비 100%인 경우 시멘트 고화재를 혼합한 혼합토에 비해 굴패각 고화재를 혼

합한 혼합토의 강도가 다른 함수비의 경우보다 강도 차이가 크게 나타났다.

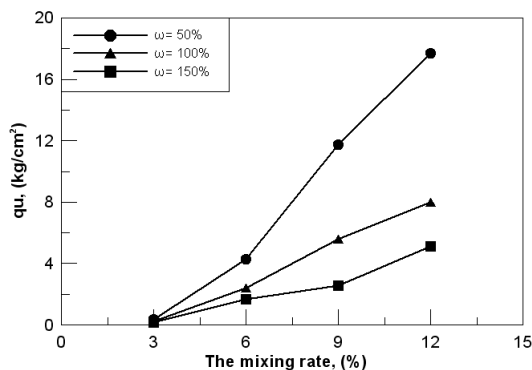
시멘트 고화재의 혼입율이 12%인 경우에는 혼입율이 9%인 경우보다 준설토의 일축압축강도가 낮은 특성을 나타내므로 굴패각 고화재를 혼합한 혼합토가 최대 8.86배 정도의 큰 강도를 나타내었다. 특히 혼입율 12%의 경우에는 함수비가 높아질수록 시멘트 고화재에 의한 강도보다 굴패각 고화재를 혼합한 혼합토의 강도가 크게 나타났다.

그림 2(a)는 양생 28일에서 함수비와 굴패각 고화재 혼입율의 변화에 따른 강도특성을 보여주고 있다. 함수비가 100% 이하인 경우, 굴패각 고화재 혼입율이 6~9% 사이에서 강도 증가는 현저히 일어남을 알 수 있다. 또한 함수비 50%에서는 고화재의 혼입율이 클수록 강도 증가는 현저한 것으로 나타났으며, 특히 양생일이 길어질수록 이러한 경향은 뚜렷하게 나타나고 있다. 함수비 변화에 따른 강도 변화 범위는 양생 28일의 경우 5.13~17.69kg/cm<sup>2</sup>로 함수비가 낮을수록, 고화재의 함유율이 클수록 큰 차이를 나타낸다.

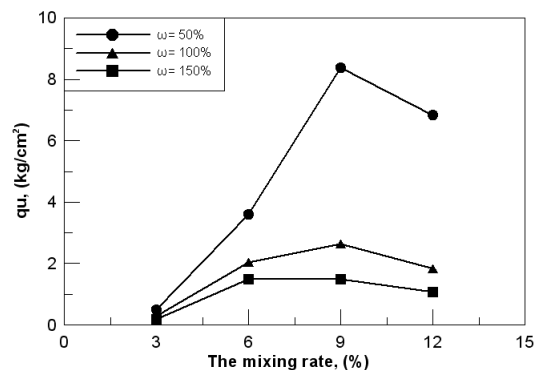
그림 2(b)는 양생 28에서 시멘트 고화재를 혼합한 경우의 강도 변화를 나타내었다. 그림에서 대체적으로 시멘트 혼입율 9%에서 12%가 되면 강도가 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 함수비 50%의 경우 혼입율 9%가 넘으면 급격한 강도 감소를 나타내고 있다. 또한 함수비 50%에서 혼입율 9%까지는 강도가 거의 선형적인 증가를 보였으

표 7. 굴패각 혼합토와 시멘트 혼합토의 강도비

양생(day)	7			14			28			
	함수비(%)	50	100	150	50	100	150	50	100	150
3	혼입율(%)	1.16	1.01	1.15	0.74	0.81	0.84	0.7	0.76	0.91
6		1.31	2.05	2.86	1.06	1.17	1.82	1.19	1.18	1.63
9		1.93	3.28	2.94	1.63	2.74	2.25	1.40	2.12	1.73
12		2.86	5.96	7.15	3.58	4.74	8.86	2.59	4.37	4.79



(a) 굴패각 고화재



(b) 시멘트 고화재

그림 2. 혼입율에 따른 일축압축강도(양생 28일)

며, 함수비가 높아지고 고회재 혼입율이 증가할수록 증가율이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

#### 4.2 비배수비압밀 삼축압축강도시험

그림 3은 굴패각 고회재를 혼합한 준설토의 함수비 변화에 따른 응력-변형을 곡선을 나타내고 있다. 동일조건하의 함수비가 다른 아래 결과에서 함수비가 100% 이하인 경우 파괴시 변형율은 2% 내외인 반면 함수비 150%의 공시체는 파괴시 변형율이 3~4% 내외로 증가한 것을 알 수 있다. 또한 저 함수비에 굴패각 고회재를 많이 혼합한 시료의 경우에는 파괴시 압축강도까지 급한 기울기를 보이며 증가하고, 파괴 후에는 소성적 거동을 보이며 큰 강도저하를 나타내고 있다. 그러나 함수비가 점점 커질수록 낮은 압축강도이지만 일정 변형을 동안 유지하고 있으며, 큰 강도저하를 보이지 않았다. 특히 함수비 150%의 경우 변형율 8% 이후에 거의 일정한 잔류강도 상태를 나타내고 있다.

그림 4는 시멘트 고회재를 혼합한 준설토의 함수비에 따른 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 함수비가 낮을수록 소성적 응력-변형 거동을 나타내고 있으며, 함수비가 증가할수록 강도 감소율이 감소함을 알 수 있다. 특히 함수비 150%의 경우 첨두강도와 잔류강도의 차는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 함수비가 증가할수록 초기 변형율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 구속압 150kPa에서 함수

비 50%, 혼입율이 9%인 경우 축차응력의 크기가 굴패각 고회재가 시멘트 고회재의 경우보다 약 2배 정도 증가하였다.

#### 4.3 직접전단시험

표 8 및 그림 5는 굴패각 고회재 혼입율에 따른 혼합토의 직접전단시험 결과에 의한 강도정수 변화를 나타낸 것이다. 혼입율이 3%인 경우에는 공시체가 자립하지 못하여 혼입율 6%, 9%, 12%에 대한 토질정수 변화를 나타내었다. 혼입율 변화에 따른 내부마찰각 및 점착력은 혼입율이 증가할수록 대체적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 혼입율 6%와 9%인 경우, 내부마찰각은 실험적 오차를 고려할 때 거의 같은 값을 나타내었으며 혼입율 12%에서 타혼입율에 비해 6.51° 큰 내부마찰각을 나타내었다. 또한 혼입율이 증가할수록 점착력도 증가하였으며, 특히 혼입율 9%에서 0.83kg/cm<sup>2</sup>의 큰 증가를 보였으나 그 증가율은 혼입율이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다.

표 8. 혼입율에 따른 강도정수

구분	혼입율(%)	6	9	12
강도정수	c(kg/cm <sup>2</sup> )	0.62	1.45	1.57
	φ(deg)	17.36	17.49	23.91

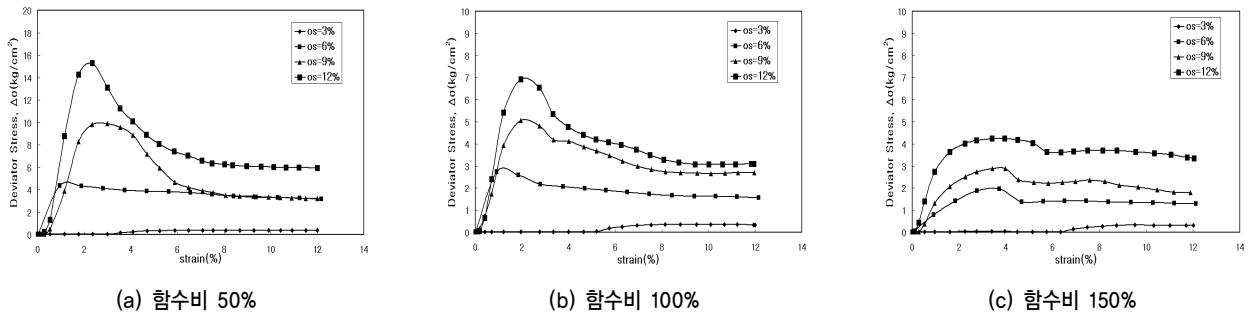


그림 3. 굴패각 고회재 혼합 준설토의 응력-변형을 거동(구속압 150kPa)

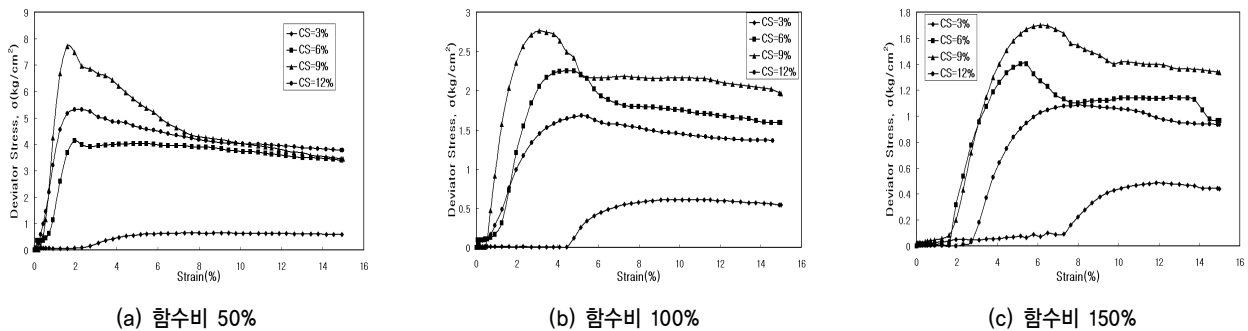


그림 4. 시멘트 고회재 혼합 준설토의 응력-변형을 거동(구속압 150kPa)

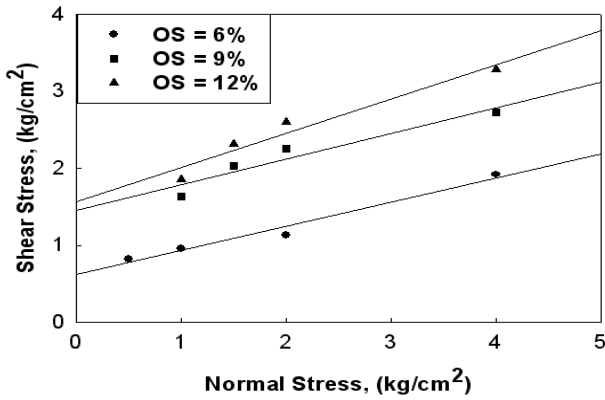


그림 5. 굴폐각 혼합 준설토의 직접전단시험 결과

## 5. 결 론

굴폐각 고화재를 혼합한 준설토와 시멘트 고화재를 혼합한 준설토에 대해 일축압축시험, 삼축압축시험 및 직접전단시험을 수행하여 강도특성을 위한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일축압축시험 결과 굴폐각 고화재를 혼합한 준설토의 경우 함수비가 낮을수록, 굴폐각 고화재의 혼입율이 높을수록 강도 증가율이 크게 나타나고 있으며, 양생 14일까지 28일 강도의 70~80%까지 발현되었다. 시멘트 고화재의 경우 혼입율이 증가할수록 강도가 증가하나 혼입율 9%에서 12%로 증가하면 강도가 감소하며, 준설토의 함수비 50%인 경우 약 18%의 강도가 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 굴폐각 고화재와 시멘트 고화재를 혼합한 준설토의 일축압축강도비를 비교한 결과 혼입율 3%와 9%에서는 변화의 차이가 미소하나, 혼입율 9% 이상에서는 굴폐각 고화재 혼합 준설토의 강도가 시멘트 고화재를 혼합한 준설토보다 강도가 크게 나타남을 확인하였다.
- (3) 비압밀비배수 삼축압축시험 결과 고화재의 종류와 관계없이 함수비가 낮을수록 취성파괴, 함수비가 높을수록 소성파괴가 발생하였으며, 함수비가 150%인 경우 함수비 100% 이하보다 파괴시 변형율이 약간 증가하

였다. 그러나 축차응력의 크기는 함수비 50%, 혼입율 9%인 경우 굴폐각 고화재가 시멘트 고화재의 경우보다 약 2배 정도 증가하였다.

- (4) 굴폐각 고화재로 개량된 준설토의 직접전단시험 결과 혼입율이 6%에서 12%로 증가하면 점착력은 약 153%, 내부마찰각은 약 38%가 증가하여 굴폐각 고화재의 혼입율이 증가할수록 개량 효과가 우수함을 확인하였다.
- (5) 시멘트 고화재는 굴폐각 고화재와 비교하여  $Fe_2O_3$  함유량이 2.24% 정도 많아 준설토의 미세 점토입자가 시멘트의 수화반응을 억제하여 굴폐각 고화재를 혼합한 준설토의 상대강도가 시멘트 고화재를 혼합한 준설토보다 큰 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2004학년도 안동대학교 특별학술연구지원사업의 지원을 받아 연구되었으며, 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 한국해양연구원(2002), *준설토 재활용 방안연구(II)*, 해양수산부, pp. 1~2.
2. 윤길림, 채광석, 백승철, 윤여원(2005), 친환경 굴껍질 고화재 개발, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 제3호, pp. 79~85.
3. 윤길림, 채광석, 유한규(2004), 굴폐각-모래 혼합토의 실험적 특성 연구, *대한토목학회논문집*, 제24권, 제5C호, pp. 283~288.
4. Miyamoto, M., Taniguchi, K., Yamada, M. and Ilana, S.(2001), *Reuse of Oyster Shell Resources of Civil Engineering Materials*, Japan Ishigawa Industry Report, Vol. 51, pp. 1~
5. Miyaji, Y. and Okumura, T.(2000), Geo-material Properties of Wasted Oyster Shell-sand Mixture and its Application as Material for Sand Copraction Pile, *Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, Editor Nakase & Tsjioda, Rotterdam, pp. 675~680.
6. Okumura, T. and Kobayashi, M.(1996), Oyster Shell-sand Mixture as Material of Sand Compaction Pile, *Proc. of Environmental Geotechnics*, Editor Kamon, Rotterdam, pp. 863~868.

(접수일: 2006. 11. 3 심사일: 2006. 11. 3 심사완료일: 2006. 12. 12)