

# 굴패각 (Oyster Shell) 의 지반공학분야에서의 활용

박준범<sup>\*1</sup>, 이기호<sup>\*2</sup>, 윤현석<sup>\*3</sup>

## 1. 서론

굴양식은 남해 청정 해역을 중심으로 수산 양식업의 주요 고소득 사업으로 경제적인 측면에서 높이 평가되어 왔다. 그러나 굴 생산에서 부수적으로 발생하는 굴패각(Oyster Shell)은 폐기물 발생이라는 점에서 많은 문제점을 야기해 왔다. 국내 굴 생산량의 90% 이상은 통영, 거제, 고성 지역을 중심으로 집중적으로 생산되고 있고, 이로 인해 부산물로 발생하는 굴패각은 연간 약 28만톤이 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 이중 13만톤을 재활용하고 나머지 15만톤은 매립 및 방치되는 것으로 확인되었다. 따라서 연간 약 15만톤의 굴패각이 계속 누적되고 있는 실정이다. 이들 지역에서 발생하는 굴패각의 처리 현황을 구체적으로 살펴보면 재활용량 중에는 실제적으로 채료로써 사용하는 굴패각도 새로운 굴 양식에 사용된 후 다시 부산물로 남게 되므로 최종적으로는 굴패각 발생량이 추가 발생하게 되는 것으로 추정할 수 있다. 그림 1은 발생된 굴패각이 야적되어 있는 모습이다. 일본의 경우 굴패각을 연약지반개량제, SCP(Sand Compaction Pile)공법에서 샌드 파일 재료 모래와 혼합하여 사용하고자 하는 연구가 진행되고는 있지만 사용되는 양은 극히 제한적으로 알려져 있다(이기호와 한종욱, 2001). 국내에서는 칼슘 공장 및 비료공장 등이 건설되어 재활용하고자 하는



그림 1. 굴패각 야적 현장

노력이 시도되고 있으나, 아직 적절한 처리방안이 제시되고 있지 못한 실정이다.

본 글은 폐기물로써 방치되고 있는 굴패각을 재활용하여 지반공학 분야에 적용하기 위한 대안을 제시하고자 최근 서울대학교 지반 및 지반환경연구실에서 수행되고 있는 내용을 중심으로 정리하였다.

## 2. 굴패각의 재료적 특성

### 2.1. 굴패각의 성분 분석

굴패각은 경남의 통영에서 채취하였고, 본 굴패각은 주성분이  $CaCO_3$ (약 90%)이고 그 외 단백질 성분이 소량 함유되어 있다. 굴패각의 성분구성은 X선 형광분광분석(XRF: X-Ray Fluorescence Spectrometry) 시험을 통하여 파악할 수 있다. XRF

\*1 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수

\*2 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사후과정

\*3 정희원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사과정

표 1. Results of XRF Analysis of Oyster Shell(%)

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.I.*	Total
Oyster shell	0.62	0.01	0.32	0.78	52.94	0.93	0.03	0.17	44.02	99.81

L.I.\* : loss of ignition



그림 2. 원형 굴패각 사진

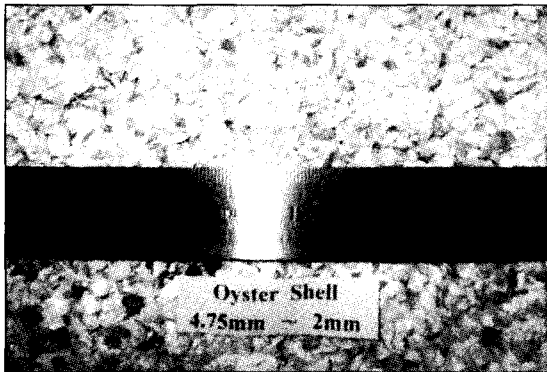


그림 3. 굴패각 입자 사진(입경 4.75mm-2mm)

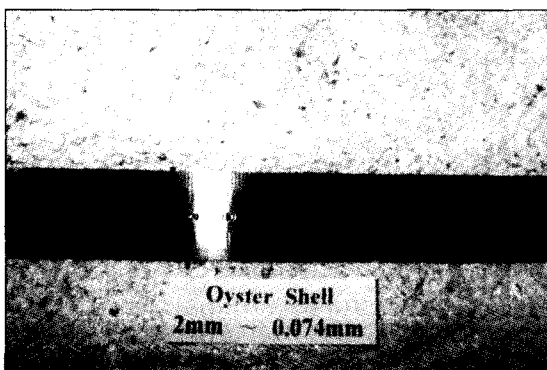


그림 4. 굴패각 입자 사진(입경 2mm-0.074mm)

실험을 위해서는 발생 원형의 굴패각(그림 2)을 햇볕에 일주일 이상 말려 수분을 충분히 없앤 후 솔로 불순물을 제거하고 파쇄하여 200번체를 통과할 정도의 분말로 만들어야 한다.

굴패각의 XRF 실험 결과를 표 1에 정리하였다.

## 2.2. 굴패각의 파쇄 입자 특성

굴패각을 건조시킨 후 파쇄하여, 분쇄된 굴패각 입자를 만들었으며, 이를 다시 체분리하여 굴패각 입자의 크기별로 9.5mm-4.75mm, 4.75mm-2mm, 2mm-0.074mm으로 구분하여 그 활용성을 평가하였다. 그림 3은 굴패각 입자가 4.75mm-2mm인 것을 나타내며, 그림 4는 입자가 2mm-0.074mm인 작은 입자 굴패각의 사진이다. 일반적으로 파쇄된 굴패각의 입자 형태는 타원형의 입자형태를 나타내고 박편화 되는 경향을 보이며, 비중은 입자별 크기에 따라 큰입자는 2.38, 작은 입자는 2.41 정도의 값을 나타내며, 이는 일반적인 토사에 비해 작기 때문에 일반적인 파쇄 상태에서 굴패각은 경량 재료로 판정할 수 있다.

그림 5는 작은 입자 굴패각(SOS, 입경 2mm-

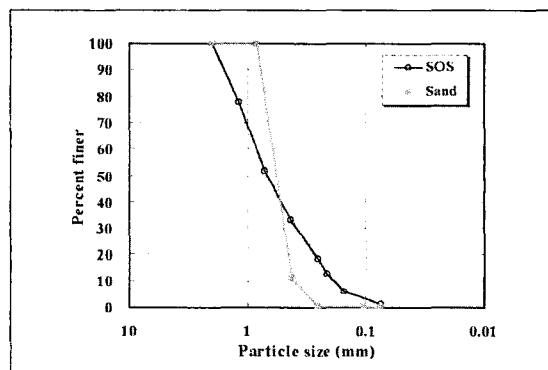


그림 5. 주문진 표준사와 굴패각 작은 입자(SOS)의 입도 분포 곡선

0.074mm)의 입도분포를 주문진 표준사와 비교하기 위하여 함께 도시한 것이다. 입도분포곡선에서 주문진 표준사의 균등계수( $C_u$ )는 1.53, 곡률계수( $C_g$ )는 0.94, 굴폐각 작은입자의 균등계수는 4.67, 곡률계수는 1.01로 나타났다. 그리고 유효 입경( $D_{10}$ )은 주문진 표준사는 0.4mm, 작은 입자 굴폐각은 0.18mm 였다.

### 3. 굴폐각 혼합토의 압밀 특성

굴폐각을 지반공학적으로 활용하기 위한 대안으로 단독으로 사용하기 보다 준설편토와 혼합하여 지반 개량재로써 활용성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 준설편토와 혼합한 혼합토에 대하여 압밀 특성을 평가하였다.

굴폐각과 준설편토를 섞은 혼합토는 간극수, 점토 토립자, 굴폐각 입자로 구성되어 있다. 이 때문에 일반적으로 흙의 고체 부분에 해당하는 토립자와 간극수의 질량비 관계로 표현하는 함수비의 개념은 사용하기 어렵다. 왜냐하면, 동일한 초기함수비를 갖는 점토에 다른 양의 굴폐각을 혼합시킨 경우, 굴폐각을 토립자에 포함시켜 함수비를 계산하는 경우와 굴폐각을 포함시키지 않는 경우의 함수비는 다르기 때문이다. 굴폐각 입자를 점토 토립자와 구별하여 혼합토의 구성요소의 정의를 나타내면 그림 6과 같다.

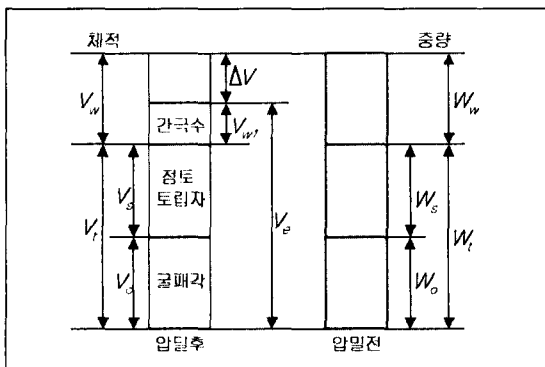


그림 6. 혼합토의 구성요소의 정의

여기에서, 아래첨자 o, s, w는 각각 굴폐각, 점토 토립자, 그리고 간극수를 나타낸다. 혼합토의 포화도를 100%로 하고, 파쇄한 굴폐각의 함수비를 0%라고 가정한다면 혼합토의 체적과 질량의 관계는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V = V_o + V_s + V_w \quad (1)$$

굴폐각 혼합률 R은 다음의 식 (2)와 같이 정의된다.

$$R = \frac{W_o}{W_s} \times 100 \quad (2)$$

또한, 혼합토의 체적변화량은 선행압밀응력에 의한 기질부분(점토)의 체적 변화로써 평가된다.

본 연구에서 사용한 점토는 준설편토로 자연함수비는 90%이고 기타 기본 물성은 표 2에 나타내었다.

혼합토의 구성 성분인 굴폐각은 파쇄된 입자의 분포를 큰입자부터 작은입자까지 균등하게 하여 혼합하였다. 굴폐각 혼합토의 압밀 특성을 검토하기 위해 내부가 테프론(teflon)으로 구성된 직경 100mm, 높이 200mm 이상의 대형 압밀몰드를 이용하여 상하 양면배수 조건으로 실험을 실시하였고 시료 중심부에서 간극수압계를 통해 간극수압을 측정하였으며, 선행압밀응력은 98kPa이었다. 그림 7은 혼합토의 체적 변화율을 나타낸 것이다.

그림 7에서 압밀시간의 경과하면서 굴폐각의 혼합율이 증가할수록 체적 체적변화율은 작게 되고, 침하

표 2. 준설편토의 물성치

물성치		준설편토
비중		2.53
액성한계		87
소성지수		54
입도분포(%)	점토	28.0
	실트	52.5
	모래	16.5
	자갈	3.0

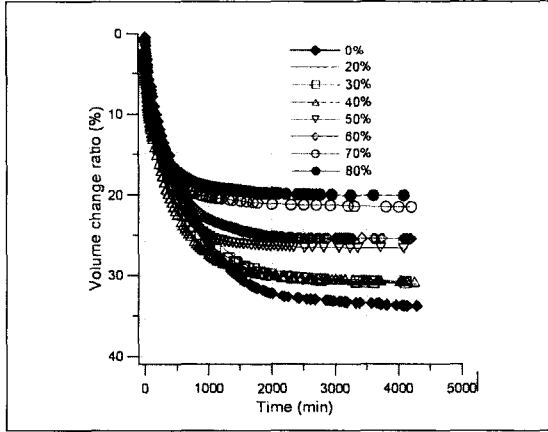


그림 7. 혼합토의 체적변화율

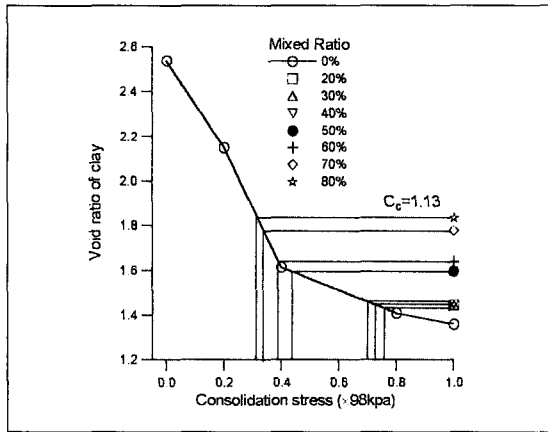


그림 8. 점토에 작용하는 응력의 산정방법

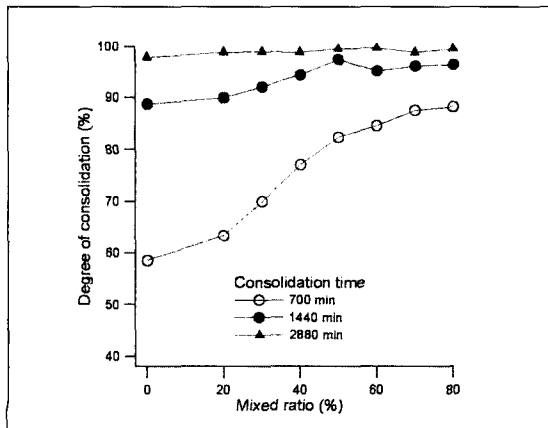


그림 9. 압밀도

속도는 빠르게 증가함을 알 수 있다. 이는 압밀응력의 일부를 굴패각 입자의 골결구조가 부담함으로써 실제 기질부분에 작용하는 압밀응력은 굴패각 혼합율이 증가할수록 작아지는 것으로 사료된다. 이와 같이 응력분담률의 개념을 이용하여 혼합물의 압밀 특성을 설명하고자 하는 연구는 大嶺 聖 등에 의해서도 제안되었다(大嶺 聖 등, 1999). 그러나 굴패각 혼합토는 일반 기계재료와 달리 탄성계수와 포아송비가 응력조건, 퇴적구조, 재하방향, 재하속도 등에 따라 변화하기 때문에 구성재료 각각의 탄성계수와 포아송비를 결정하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 점토의 압밀실험 후 최종간극비를 이용한 개념을 이용하여 이에 상응하는 압밀응력을 하중-간극비의 관계로부터 산정하였다. 그림 8은 혼합비에 따른 점토에 작용하는 응력의 산정 방법을 나타낸 것이다.

이 결과로부터 굴패각 혼합률이 증가하면 할수록, 점토의 응력분담률이 작아지는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 굴패각 혼합률 80%의 경우, 점토가 받는 응력은 약 31kPa로써 초기압밀응력을 기준으로 해서 약 0.32% 밖에 작용하지 않음을 알 수 있다.

그림 9는 굴패각 혼합률과 점토의 임의시간의 압밀도의 관계를 나타낸 것이다.

그림 9에서 굴패각 혼합률이 증가할수록 최종 침하량을 기준해서 구한 압밀도가 증가함을 알 수 있다. 따라서, 굴패각 혼합에 의해 점토의 침하가 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

#### 4. 굴패각 혼합토의 전단 특성

굴패각이 혼합된 혼합토의 전단특성을 구하는 목적은 흙의 안정문제에 있어 여러 가지의 응력 조건하에서 혼합토가 발휘하는 전단저항이나 변형상태를 정량적으로 고찰하고 혼합률에 따른 변화거동을 예측하려는데 있다.

삼축실험의 공시체의 크기는 직경이 100mm, 높

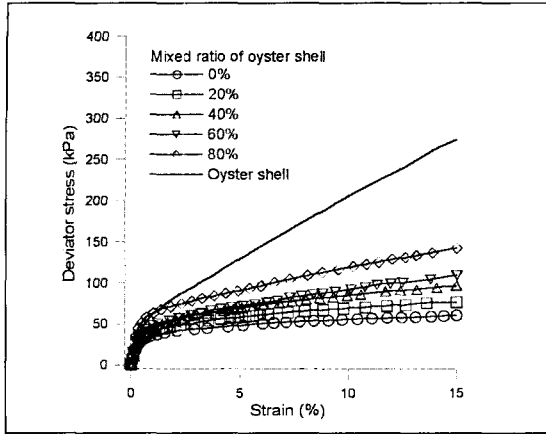


그림 10. 응력-변형률관계(선행압밀응력 49kPa)

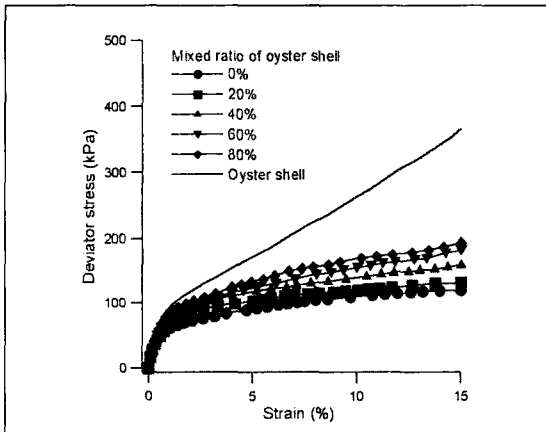


그림 11. 응력-변형률관계(선행압밀응력 98kPa)

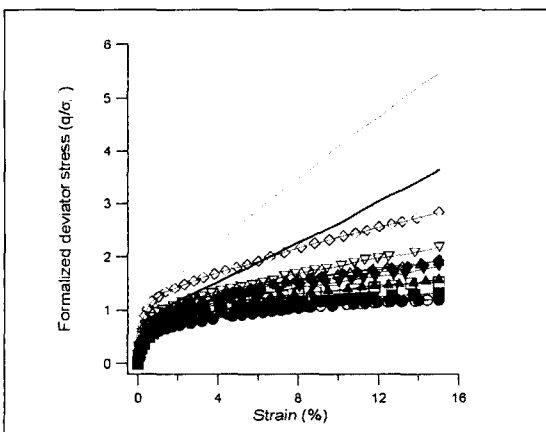


그림 12. 정규화된 응력-변형률관계(범례는 그림 11과 동일)

이가 200mm이고, 실험과정에서 재하방법은 공시체 하부를 고정된 상태에서 공시체 상부가 상하로 움직이도록 재하 하였다.

예비압밀응력은 49kPa와 98kPa의 2종류로 하였다. 그 이유로 본 실험에서는 매립지반이 받는 하중을 지중 5-15m 정도의 상재하중을 받는 현장을 대상으로 했기 때문이다.

실험조건은 등방압밀비배수(cu)이며, 삼축셀에 공시체를 설치 시 등방압밀은 19.6kPa, 전단속도는 0.5%/min로 하였다.

그림 10은 예비압밀응력 49kPa, 그림 11은 98kPa의 삼축압축실험으로부터 구한 점토, 굴폐각, 혼합토의 응력-변형 관계를 나타낸 것이다. 혼합토와 점토의 변형곡선을 비교하면, 굴폐각 혼합물이 증가하면 같은 축변형에서 축차 응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 굴폐각만의 응력-변형관계의 변화경향도 점토 및 혼합토의 변화경향과 유사하지만, 굴폐각만의 전단강도는 점토의 강도보다 수배 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

그리고, 예비압밀응력의 차이가 혼합토의 응력-변형관계에 미치는 영향을 조사하기 위해 초기 등압예비압밀응력으로 정규화한 응력-변형관계는 그림 12에 나타내었다. 점토의 응력-변형관계는 초기압밀응력으로 정규화하면 하나의 선으로 표현된다. 그러나, 굴폐각 및 혼합토의 경우는 예비압밀응력이 작은 경우(49kPa)가 축차응력이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 관계로부터 굴폐각을 포함한 혼합토는 순수 점토와 달리 예비압밀응력으로 인한 구속압에 의해 발생하는 토립자의 마찰저항에 지배되지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 굴폐각 입자에 의해 형성된 골격구조의 저항에 의한 영향인 것으로 판단된다.

또한, 이 결과를 공학적 관점으로 판단할때, 준설 점토를 굴폐각 입자와 혼합해 매립하는 경우, 매립심도가 얇은 지반일수록 혼합에 의한 전단강도의 증대 효과를 기대할 수 있다는 것을 의미한다.

### 5. 굴패각 혼합콘크리트공시체의 강도 특성

굴패각을 콘크리트용 잔골재로 활용할 수 있는 가능성을 평가하기 위하여 관련 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 시멘트-굴패각으로 혼합된 공시체를 제작하여 일축압축강도시험을 통해 이들 혼합체의 강도발현시 나타나는 역학적 특성을 규명하고자 하였다. 시멘트-굴패각 혼합체의 결과를, 같은 조건의 시멘트-주문진표준사 혼합체와 비교하였다. 공시체의 배합은 몰시멘트 비를 1:1로 하고, 시멘트 페이스트내에 모래 또는 입자크기에 따라서 구분된 굴패각을 시멘트의 중량을 기준으로 100%, 150%, 200% 혼합하였다. 일축압축강도 시험은 KS F2314 규정에 준하여 실시되었으며 변형률 제어 방식으로 1mm/min의 속도로 연직하중과 연직변위를 측정하였다. 공시체의 규격은  $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 를 사용하였다. 양생기간에 따른 압축강도의 특성을 파악하기 위해, 양생기간은 7일(초기강도), 28일(설계기준강도), 60일(장기강도)로 하였다.

각 재령별 압축강도를 기준으로, 굴패각 또는 모래의 혼합비(100, 150, 200%)에 따른 재령별 압축실험 결과를 그림 13에 나타내었다. 그림에서 사용된 기호는 PCP는 시멘트페이스트, LOM은 굴패각 입자 4.75mm-2mm, 그리고 SOM은 2mm-0.74mm

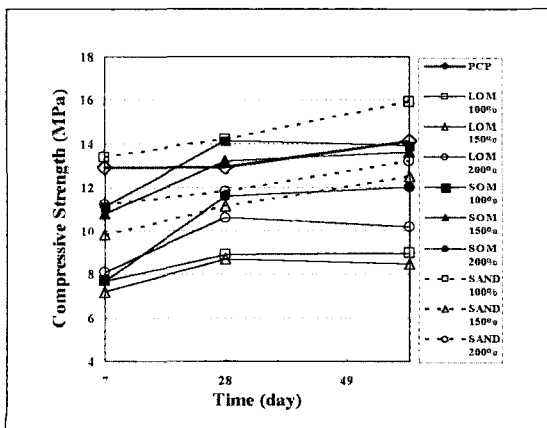


그림 13. 재령과 혼합비에 따른 압축강도비

의 굴패각 입자를 나타낸다. 그림에서 SOM과 모래는 혼합비 100%에서 그리고 LOM은 혼합비 200%에서 최대값을 가진다. LOM의 압축강도가 상대적으로 낮은 값을 가지는 반면 SOM의 압축강도는 모래의 경우와 거의 유사한 값을 나타내나, 28일 강도에서는 더욱 큰 값을 나타냈다. 모래와 SOM은 혼합비가 증가할수록 압축강도가 감소하는 경향을 보이지만 LOM은 반대의 경향을 나타내었다. 따라서 강도변화는 혼합비 증가에만 의존하지는 않는 것으로 판단된다. 모래는 재령에 따라 압축강도가 지속적으로 증가하고 있지만 굴패각은 입자의 크기와 무관하게 재령 7일에서 28일까지 비교적 큰 폭의 강도증진을 보이다가 재령 60일에서는 강도의 증가가 둔화되는 경향을 보인다. 따라서 굴패각을 콘크리트용 모래의 대체 재료로 사용하기 위해서는 이러한 장기강도(60일 강도)의 개선문제가 해결되어야 함을 알 수 있다.

### 6. 굴패각의 지반환경에서의 적용성

지반환경분야에서 굴패각의 활용성을 평가하기 위하여 오염물질과의 반응성을 고찰하였다. 본 연구에서는 대표적 유기화합물질인 BTE(Benzene, Toluene, Ethylbenzene)과 중금속으로 카드뮴(Cd), 납(Pb), 구리(Cu)에 대한 굴패각 입자의 흡착기작에 대하여 실험을 통해 평가하였다.

BTE의 흡착 특성의 다음의 선형 흡착 분배 계수의 관계식을 이용하여 평가하였다.

$$K_d = \frac{C_s}{C_e} \tag{3}$$

여기서,  $K_d$  = linear equilibrium partition coefficient ( $L^3/M$ )

BTE에 대한 굴패각의 흡착 특성을 선형 흡착(Linear Sorption Isotherm) 모델을 이용하여 평가

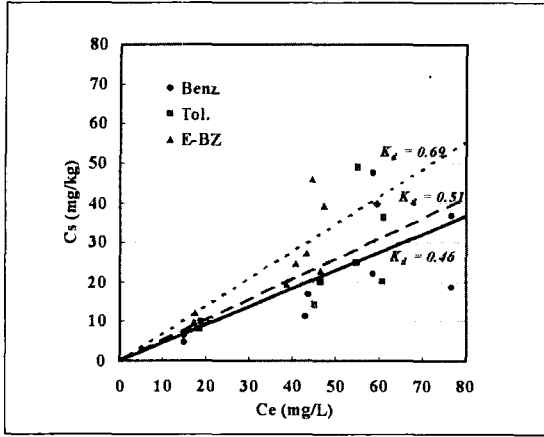


그림 14. BTE에 대한 굴패각의 Linear sorption isotherm

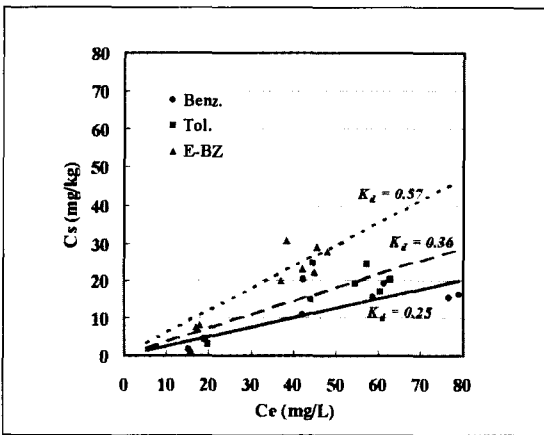


그림 15. BTE에 대한 화강풍화토의 Linear sorption isotherm

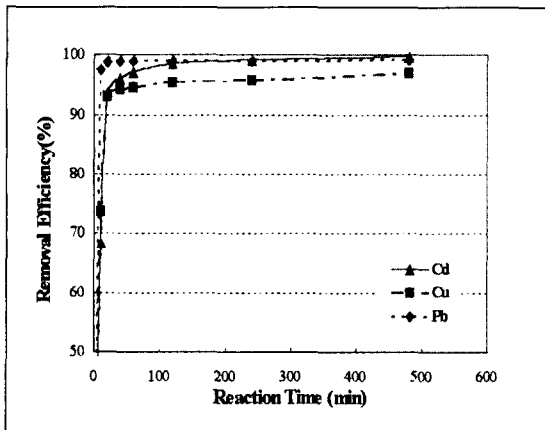


그림 16. 시간에 따른 굴패각에 의한 중금속 흡착률

하였으며, 그 결과를 그림 14에 나타내었다. 또한 유기화합물에 대한 흡착능을 비교 평가하기 위하여 우리나라 대표 흙인 화강풍화토에 대한 흡착특성을 그림 15에 도시하였다.

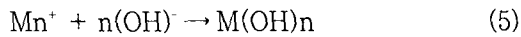
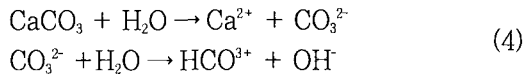
그래프에서 직선의 기울기가 각각의 오염물질에 대한 각 시료의 분배계수  $K_d$  값을 나타내며, 오염물질은 두개의 상인 물과 시료가 혼합되어 있는 시스템에 오염물질이 누출된 경우  $K_d$  값이 커짐에 따라 대상 시료로 이동하려는 경향성이 크다는 것을 의미한다.

실험결과 굴패각의  $K_d$ 의 값이 BTE 전반에 걸쳐 화강풍화토 보다 크게 나타났다.

한편 굴패각이 중금속 이온을 제거하는데 소요되는 시간을 알아보기 위하여 40mg/L 농도의 Cd, Pb, Cu 이온 30mL에 굴패각 시료 0.3g을 각각 첨가하여 일정시간 이후 용액의 중금속 이온 잔류 농도를 측정하여 시간에 따른 굴패각의 중금속 제거율을 그림 16에 나타내었다.

각 중금속에 대한 굴패각의 흡착 정도는 Cd>Pb>Cu 와 같은 순서로 나타났다.

이처럼 굴패각의 중금속 제거율이 높은 이유로는 pH의 영향을 들 수 있는데, pH에 따라 제거효율이 달라지는 이유는 낮은 pH에서 중금속 제거율은 교환점(exchange site)에서 주입된  $H^+$ 와 중금속과의 경쟁에 의하여 제거율이 감소되는 것으로 판단되며, 높은 pH에서는 중금속 이온과  $H^+$ 간의 경쟁 감소 및 중금속의 수산화물의 형성으로 인한 침전 때문에 높은 중금속 제거효율을 나타내는 것으로 보인다. 그러나 높은 pH에서는 흡착과 침전과정이 동시에 일어나기 때문에 중금속의 흡착과 침전을 구별하기는 사실상 어려운 것으로 사료된다. 굴패각의 실험결과 초기 pH가 2.5에서 교반 후 pH가 최종적으로 7~8.5 까지 상승하는 것을 확인할 수 있는데 이와 같이 굴패각이 용액중에서 높은 pH값을 가지는 것은, 식(4)와 같이 굴패각의 주성분인  $CaCO_3$ 의 용해에 의하여  $Ca^{2+}$ 이온의 석출과  $CO_3^{2-}$ 이온 농도의 증가와 함께 pH가 상승하게 되는 것으로 판단된다.



굴패각을 중금속이온 제거제로 사용할 경우  $\text{CaCO}_3$ 의 흡착, 이온교환반응 등의 표면 화학적인 작용 및 pH상승효과로 인하여 높은 pH에서는 식(5)의 형태로 산화물에 의한 수화착물의 형성으로 침전을 생성하게 되고 낮은 pH에서는 이온교환이나 표면 침착 등에 흡착현상이 일어나게 될 것으로 보아 우수한 중금속이온의 제거제로서 활용될 수 있다고 판단된다.

## 7. 결론

이상으로 실험과 고찰을 통해 굴패각을 지반공학 분야에 적용성을 평가하고 그 가능성을 제시하고자 하였다. 이 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 굴패각을 혼합한 혼합토의 압밀 실험 결과 굴패각 혼합율이 증가하면 점토의 체적 변형량이 작게 발생하는 것을 알았다. 이는 혼합율이 작은 경우 굴패각 입자와 점토 사이의 마찰저항에 의해, 혼합율이 큰 경우는 굴패각 골격구조가 형성되어 점토에 작용하는 압밀하중의 일부를 분담해 받기 때문이라고 판단된다.
- (2) 굴패각 혼합에 의한 강도 개선 효과는 선행압밀응력이 작은 49kPa에서 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 혼합토의 전단강도 발현 메커니즘이 보통 흙과 같이 구속압에 기인한 마찰력에만 의존하지 않는다는 것을 의미한다. 그리고, 이 결과를 공학적으로 판단하

면, 준설점토를 굴패각과 혼합해서 매립할 경우, 얇은 지반일수록 혼합에 의한 전단강도의 증가효과를 기대할 수 있음의 의미한다.

- (3) 굴패각/시멘트 혼합체의 일축압축강도시험 결과, 작은입자 굴패각이 큰입자 굴패각보다 강도면에서 우수하였으며 모래와 비슷한 범위의 강도를 나타냈다.
- (4) 굴패각을 이용한 중금속 처리는 흡착반응에 적합한 인위적인 pH조절이 필요 없을 뿐만 아니라, 양호한 흡착능으로 인해 중금속 제거제로 활용하기에 문제점이 없을 것으로 판단된다. 또한 BTE의 흡착기작에 있어서도 대표적 흡인 화강풍화토에 비하여 흡착능이 높은 것으로 나타났다.

## 참고 문헌

1. 윤현석, 박준범, 이기호, 홍승철, (2002) "산업부산물에 대한 BTE(Benzene, Toluene, Ethy-benzene)의 흡착 특성", 한국폐기물학회논문집, Vol.19, No.3, pp.356-364
2. 윤현석, 이기호, 박준범, (2002) "에틸벤젠에 의한 굴패각 혼합공시체의 압축강도 변화 특성", 한국지반공학학회논문집, Vol.18, No.6, pp.1-14
3. 이기호, 박준범, (2001) "굴패각을 포함한 혼합토의 전단 변형 특성 평가를 위한 균질화법의 적용", 한국지반공학학회논문집, Vol.17, No.4, pp.183-190
4. 이기호, 한종욱, (2001) "굴패각 혼합토의 압밀 및 투수 특성", 대한토목학회논문집, Vol.21, No.4-C, pp.375-384
5. 大嶺 聖, 落合英俊 (1992) "二種混合體の應力—ひずみ關係と混合土の一次元壓縮特性への適用", 土木學會論文集, No.448/Ⅲ-19, pp.121-130