

모래다짐말뚝(SCP) 재료로서 파쇄 굴패각의 특성조사

Characteristics of Crushed Oyster-shell as a Substitute of Sand for Sand Compaction Pile

윤길림*¹ Yoon, Gil-Lim

윤여원*² Yoon, Yeo-Won

채광석*³ Chae, Kwang-Seok

권오순*⁴ Kwon, O-Soon

Abstract

In order to investigate recycling possibility as a construction material of oyster-shells, the geotechnical characteristics including permeability, confined compression and shear strength of crushed oyster shell were quantitatively examined in terms of fineness modulus and relative density of crushed oyster-shell. Experimental results show that the crushed oyster-shells are lighter than sand in weight, and have similar characteristics on permeability and shear strength to sandy soils. The oyster-shell can be considered as highly crushable material but not much crushable with existing high loads. Based on the laboratory test results, it is highly judged that the crushed oyster-shell can be a substitute of sand as SCP materials.

요지

굴패각을 대규모로 처리할 수 있는 방법인 건설재료로서 재활용하기 위해 패각원형을 1차파쇄한 상태에서의 굴패각의 파쇄특성과 지반공학적 특성을 고찰하였다. 파쇄된 굴패각의 조립률과 상대밀도에 따른 투수특성과 구속압축특성 그리고 전단특성을 정량적으로 검토하였다. 파쇄 굴패각은 일반 모래에 비해 경량이며 투수특성과 전단특성이 모래와 유사하며, 파쇄 가능성은 크지만 실제적인 파쇄는 크지 않은 것으로 나타났다. 본 연구에서의 실험결과, 파쇄 굴패각의 파쇄정도에 따른 지반공학적 특성의 정량적인 파악이 가능하며, 모래다짐말뚝공법의 모래 대체재로서 매우 유용하다고 판단된다.

Keywords : Confined compression, Crushability, Oyster shell, Permeability, Shear strength

1. 서론

국내 남해안 일대에서 굴양식업으로 발생하는 굴패각은 연간 약 30만 톤에 달하며, 채모 및 비료 등으로 일정량이 재활용되고 있기는 하지만, 재활용 가능량의 양적 한계 및 처리시의 집하장 확보, 굴패각의 농토 살포 후 토질응결 및 처리의 경제성 등의 문제점이 거론되

어 재활용의 활성화가 지연되고 있다. 따라서 양식되는 대부분의 굴패각은 재활용되지 않고 매립하거나 주변에 불법으로 적재하는 형식으로 처리되고 있는 실정이다. 굴패각을 매립 또는 적재할 경우 매립지의 확보가 곤란하고, 심각한 악취와 매립에 따른 누출수에 의한 환경피해 및 환경오염의 근원지가 되고 있다.

연약지반 개량공법 중에서 Sand Drain공법 및

*1 정희원, 한국해양연구원, 연안항만공학연구본부 선임연구원 (Member, Korea Ocean Research & Development Institute, Coastal harbor Engrg. Lab.)

*2 정희원, 인하대학교, 환경토목공학과 부교수 (Member, Inha Univ., Civil & Environmental Engrg.)

*3 정희원, 한국해양연구원, 연안항만공학연구본부 Post-doc연구원 (Member, Korea Ocean Research & Development Institute, Coastal harbor Engrg. Lab., kschae@kordi.re.kr)

*4 정희원, 한국해양연구원, 연안항만공학연구본부 선임연구원 (Member, Korea Ocean Research & Development Institute, Coastal harbor Engrg. Lab.)

SCP공법은 시공 실적이 많고, 오랜 역사를 가진 공법으로 장래에도 많은 현장에서 사용될 것으로 판단된다. 지반개량공법에서 사용되는 재료는 일반적으로 모래를 사용하고 있으며, 연약지반상에 도로를 개설할 경우에는 공사에 사용되는 모래는 성토재의 다음으로 많은 양이 소요된다. 그러나 모래는 가격이 비싸고 수급 또한 용이하지가 않기 때문에 대체할 수 있는 재료에 대해 연구가 이루어져 왔다. 굴폐각을 모래의 대체재로서 가능성을 확인함으로써 해서 지금까지의 매립 또는 적재에 필요한 경비의 절감은 물론 건설재료의 확보 및 이에 따른 관련산업의 발전 등으로 풍요로운 환경조성을 예상할 수 있으며 사회적 안정을 기대할 수 있을 것이다.

굴폐각을 활용하기 위한 연구 예는 기초연구로서 굴폐각의 물리화학적 특성조사연구(윤길림 외 3인, 2003)이 있으며 굴폐각을 혼합한 해성점토를 매립재료로 활용하는 방안(이기호 외 1인, 2001년), 굴폐각 혼합토의 비배수 전단강도 특성(김영수 외 2인, 2002년), 굴폐각 모르타르의 혼합토에 대한 강도특성(윤길림 외 3인, 2001년) 등이 있다. 그리고 일본에서는 굴폐각을 모래 대체재로서의 가능성을 조사한 연구(Okumura, 2000)과 폐기물의 재자원화, 지역한정적인 자원에 대한 운송과 가공경비의 최소화를 만족시킨다는 관점에서, 연약지반에 대한 도로광폭공사의 노상재료로서의 응용(Miyamoto, 2001년) 등이 있다.

본 연구는 자연 모래의 고갈에 대비한 대체 자원을 개발하여 건설재료로 이용하고자 굴폐각의 물리적 특성에 대한 고찰 및 투수실험과 구속압축, 전단강도 실험을 통하여 대체재로서의 가능성에 대하여 굴폐각 원형을 1차 파쇄한 상태에서의 굴폐각의 파쇄특성과 지반공학적 특성을 고찰하였다.

2. 파쇄 굴폐각의 물리적 특성 및 파쇄특성

2.1 사용시료 및 물리적 특성

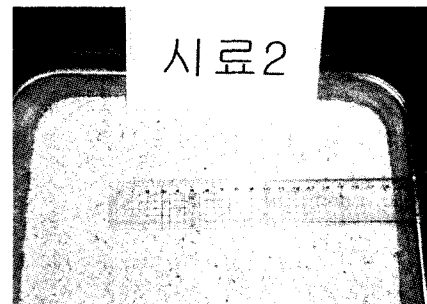
SCP공법에서 모래의 대체재로서의 가능성을 평가하기 위해서, 굴폐각을 임의 파쇄하여 모래입도의 범위로 조정하여 실내실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시료는 사진 1에 있으며 굴폐각을 세척하여 자연건조 후에 임의파쇄를 실시하여 #4번체를 통과한 굴폐각 중에서, #10번체에 걸러진 시료(시료 A)와 #20번체에 걸러진 시료(시료B)의 2종류를 대상으로 하였다. 또한 시료A과 시료B에 대하여 상대밀도를 50%와 70%로 다르게 조정하여, 투수특성 및 전단특성을 비교, 검토하였다.

2가지 형태의 입도분포를 가지는 굴폐각을 대상으로 비중시험, 최대 및 최소건조단위중량시험, 투수시험, 구속압축시험 및 대형직접전단시험을 실시하였다. 또한 직접전단시험 전후에 체분석실험을 실시하여, 전단 실험 중의 파쇄정도를 파악하였다. 구속압축시험 및 직접전단시험은 시료가 자연건조상태에의 함수비를 수시로 측정하여 1-2%를 유지하도록 하였다. 파쇄 굴폐각의 비중시험 결과, 비중은 파쇄정도에 따라 2.46(시료 A), 2.49(시료 B)로 약간 다르게 나타났다. 파쇄정도가 클수록, 즉 입경이 작아질수록 굴폐각의 비중은 증가하였다.

표 1에서 알 수 있듯이, 파쇄 굴폐각의 최소건조단위중량은 $7.0\text{-}7.5\text{kN/m}^3$ 이며, 최대건조단위중량은 $9.3\text{-}9.8\text{kN/m}^3$ 로 일반적인 모래의 값보다는 상당히 작은 값을 나타냈으며, 파쇄정도에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 굴폐각의 최대, 최소 건조단위중량비는 1.31-1.33으로, 일반적인 모래의 중량비와 비슷한 값을 나타냈다.



(a) 시료 A



(b) 시료 B

사진 1. 파쇄된 굴폐각 시료

표 1. 굴패각의 최소 및 최대 건조단위중량

	Minimum dry density (kN/m ³)	Maximum dry density (kN/m ³)	Ratio of unit weight
Sample A	7.495	9.839	1.31
Sample B	7.063	9.359	1.33

2.2 파쇄 굴패각의 파쇄특성

파쇄 굴패각에 대한 입도시험의 결과를 그림 1과 표 2에 비교하여 나타내었다. 상대밀도를 조정하는 과정에서 시료A, 시료B에 대해 약 13.0-11.4% 정도의 추가 파쇄가 발생하였다. 직접전단시험 후의 굴패각의 파쇄성을 파악하기 위해, 초기상태의 입도분포와 직접전단시험 후의 입도분포의 변화를 비교하였다. 실험과정 중 변화된 입도분포곡선으로부터 유효입경, 균등계수 및 곡률계수의 변화를 알 수 있다. 본 실험에 사용된 굴패각 시료의 경우는 균등계수가 1.80-2.95, 곡률계수는 0.98-1.31의 범위를 나타내었으므로 통일분류법에 의해 입도분포는 SP로 분류할 수 있다.

굴패각은 보통의 흙 입자 형상과는 다른 판상 구조를 가지고 있으며, 부분적으로 단단한 부위와 무른 부위로 구성되어 있기 때문에 일반적인 흙에 비해 쉽게 파쇄되는 특징을 지니고 있다. 따라서, 직접전단시험 전후의

입도분포를 비교하여 굴패각 시료의 파쇄특성을 고찰하였다.

본 연구에서는 그림 2에서 나타낸 것과 같이, Hardin (1985)이 제안한 조립질 흙의 파쇄성에 대한 정의로서 파쇄가능성지수 B_p 와 전체파쇄지수 B_t 를 이용한 상대파쇄지수 B_r 를 이용하여 굴패각의 파쇄정도를 판정하였다. 예를 들어, B_p 가 큰 값을 갖더라도 B_r 가 작다면 파쇄가능성은 높지만 실제 입자의 파쇄가 일어나는 정도는 작다고 할 수 있다.

$$B_r = \frac{B_t}{B_p} \quad (1)$$

일반적으로 파쇄 특성이 뚜렷한 현무암질, 장석류 또는 조립질 토사에서 측정된 B_p 는 1.00-2.89의 범위에 나타난다. 표 3에서 제시한 것과 같이, 파쇄 굴패각의 B_p 가 2.67-3.56으로 상당히 높은 파쇄가능성으로 나타났다. 그러나 실제 파쇄정도를 나타내는 B_r 는 측정결과 2.0-8.0%로 나타났으며, 이것은 표 4에서 알 수 있듯이 기존 연구에서 측정된 파쇄성 조립토에서 나타나는 값에 비해 상당히 작은 값으로 굴패각이 실제 구조물의 사용하중조건에서는 파쇄가 크게 발생하지 않는 것을 의미한다.

파쇄 상태에 따른 굴패각의 항복하중을 구하기 위하여 Tavenas(1979)가 제안한 변형률에너지의 다음 식을

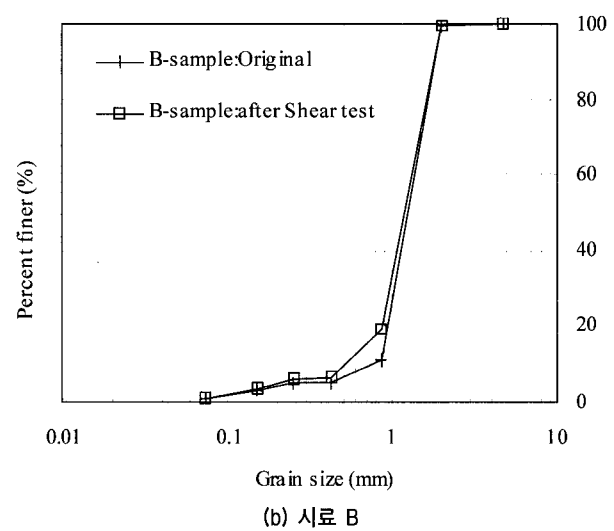
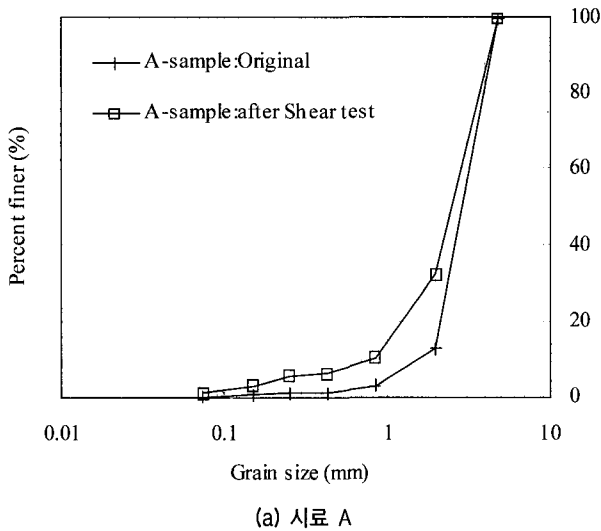
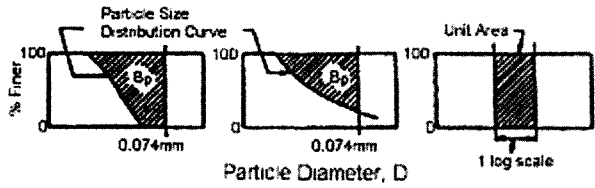


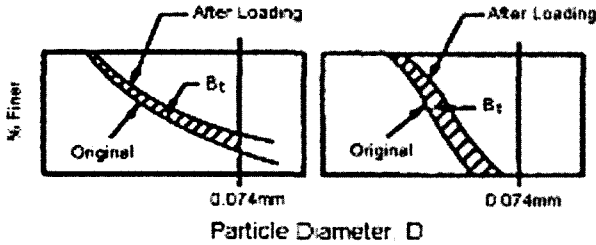
그림 1. 굴패각 시료의 입도분포곡선

표 2. 파쇄 굴패각의 입도분포특성

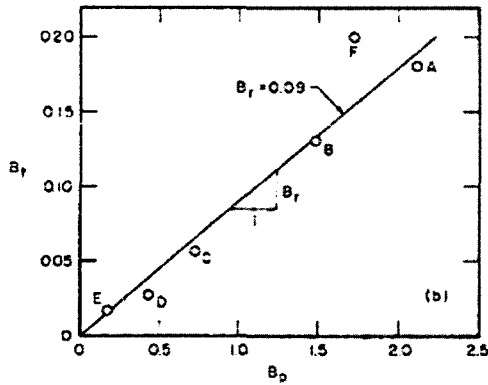
	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	U _c	Percent finer(%)	
						#10(2.00mm)	#20(0.85mm)
Sample A	4.58	2.20	3.12	1.98	0.98	13.00	2.90
Sample B	0.72	1.01	1.31	1.82	1.08	99.50	11.40



(a) 파쇄가능성지수(B_p)



(b) 전체파쇄(B_t)



(c) 상대파쇄지수(B_r)

그림 2. 파쇄지수(Hardin, 1985)

표 3. 파쇄 골파각의 파쇄지수

	Sample A	Sample B
B_p	3.56	2.67
B_t	0.30	0.04
$B_r(\%)$	8.00	2.00

이용하였다.

$$W_v = \sum \frac{p_i + p_{i+1}}{2} (v_{i+1} - v_i) \quad (2)$$

여기서, W_v : 변형률에너지,

P' : 평균유효주응력,

$$D = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta\varepsilon} \quad (3-a)$$

표 4. 파쇄지수의 예 (Hardin, 1986)

	Principal stress ratio	Void ratio	B_p	$B_r(\%)$
Rock fills (Marachi, Chan, Seed and Duncan, 1969)	4.39 - 8.41	0.422 - 0.433	1.52	2.4 - 20.0
Gravelly Soils (Leslie, 1963)	2.94 - 7.40	0.365 - 0.698	2.41	4.2 - 17.1
Crushed Granite (Hardin, 1985)	1.00 - 2.80	0.422 - 0.433	1.47	3.0 - 20.0

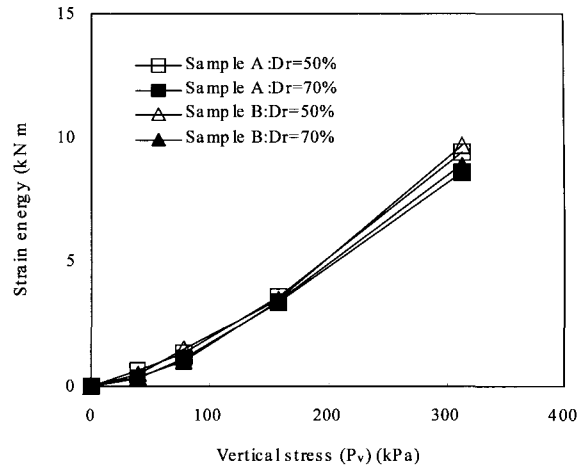


그림 3. 변형률에너지 곡선

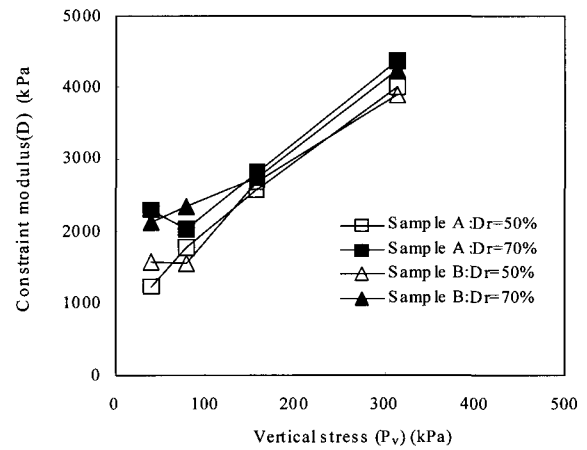


그림 4. 구속탄성계수 곡선

ν : 부피변형률

그림 3의 변형률에너지곡선에서 확인되는 것과 같이, 각 시료의 변형률에너지 곡선은 급격한 곡선의 변화가 나타나지 않은 것으로 보아 항복하중에는 도달하지 않은 것을 알 수 있다.

표준압밀시험기에서 조립질 흙의 압축특성은 다음 식에서 구해지는 구속탄성계수 D 로 표현된다. 구속탄성계수 D 와 탄성계수 E 의 관계는 다음과 같다.

$$E = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} D \quad (3-b)$$

여기서, $\Delta\sigma'$: 연직응력 증분,

$\Delta\varepsilon$: 축변형률 증분,

ν : 포아송비

그림 4의 구속탄성계수곡선에서 나타나는 것과 같이, 각 파쇄골패각 시료는 낮은 하중범위에서는 약간의 차이를 나타내지만, 하중의 증가에 따라 D 가 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

2.3 파쇄 골패각의 투수특성

파쇄 골패각의 입경크기와 상대밀도에 따른 투수계수변화를 분석하기 위해 투수시험을 실시하였다. 여기서, 실제 시공 중에 발생할 수 있는 골패각의 파쇄를 고려하기 위해, 골패각의 미립분을 제거하지 않고 투수계수를 구하였다. 그림 5의 투수시험의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 입경크기가 작아질수록, 상대밀도가 클수록 투수계수는 작아졌다. 골패각의 투수계수는 약 $2.1 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위로, 일반적인 모래의 투수계수($10^{-3} - 10^{-1} \text{cm/sec}$)와 비교해 볼 때 충분한 투수성을 가지고 있다고 판단된다.

일반적으로 흙의 투수성은 침투수의 성질과 토질에 따라 다르다. 전자는 수온의 변화에 의한 물의 점성에 의해 대표적으로 영향을 받고, 후자는 흙의 입도와 간극비에 의해 영향을 받는다. Taylor(1948)는 흙 속의 침투수의 흐름과 모세관 중에서의 물의 흐름을 비교하여 흙 입자를 직경의 구면체로 가정하여 투수계수를 유도하

였다. 또한, Hazen(1930)이나 Terzaghi(1967)에 의해 제안된 사질토에 대한 투수계수의 실험식은 간극률 n 의 증가함수로, 10%의 체가름의 통과율에 상응하는 입경의 2승에 비례하여 투수계수가 증가한다. 즉, 투수계수에 지배적인 영향을 미치는 것은 미립입자의 입경이며 조립입자의 입도특성은 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서, 간극비가 동일하여도 미립자를 제거하여 간극의 크기가 커질수록 투수성이 커진다고 할 수 있다.

$$k = C_k (0.7 + 0.03T) D_{10}^2 \quad (\text{Hazen, 1930}) \quad (4)$$

$$k = \frac{C_t}{\mu} \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 D_{10}^2 \quad (\text{Terzaghi, 1967}) \quad (5)$$

여기서, k : 투수계수(cm/sec),

D_{10} : 중량통과율10%에 해당하는 입경크기(cm),

n : 간극률,

μ : 물의 점성계수(dyn sec/cm²),

$T(^{\circ}\text{C})$: 온도,

C_t, C_k : 정수

그림 5의 (a), (b)는 투수계수 k 와 D_{10} 의 2승으로 나눈 정규화된 투수계수 k/D_{10}^2 에 대한 간극비 e 의 관계이다. $k - e$ 관계상에서는 일정한 규칙성을 갖지 못하고 분산된 관계이지만, $k/D_{10}^2 - e$ 의 정규화 투수계수는 간극비에 선형적으로 비례하는 것을 알 수 있다. 그러므로 파쇄 골패각에 대한 간극비와 투수계수의 상관관계를 다음의 식을 제안 할 수 있다.

$$k = \frac{\gamma_w}{\mu} \alpha e^\beta D_{10}^2 = \alpha_1 \sqrt{e} D_{10}^2 \quad (6)$$

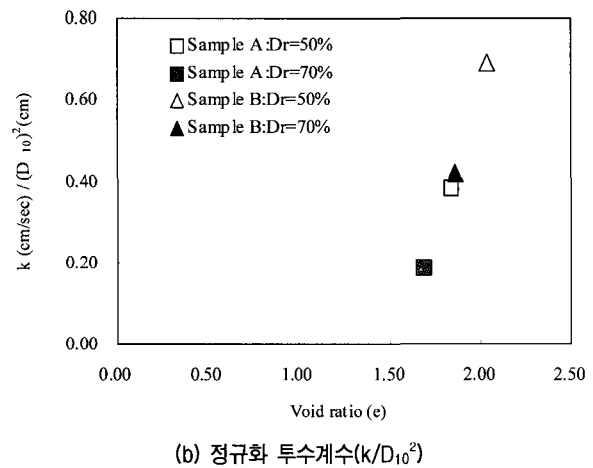
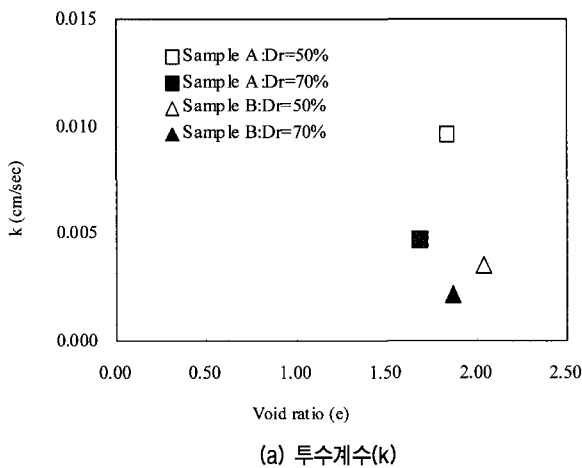


그림 5. 파쇄 골패각의 투수계수와 간극비의 관계

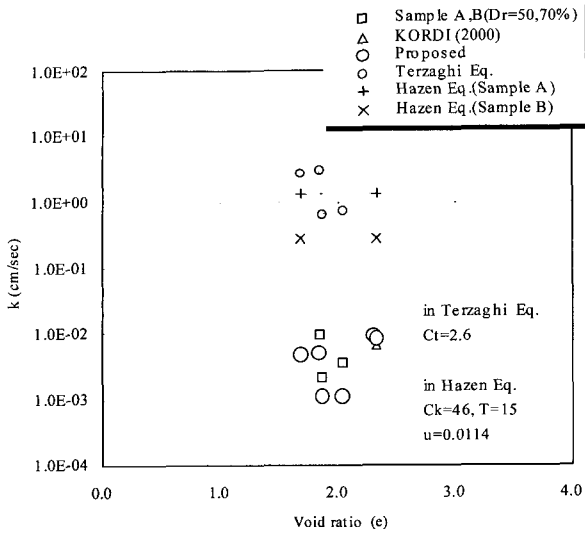


그림 6. 투수계수와 간극비의 관계(실험 결과와 제안식의 비교)

여기서, $\alpha_1 = 0.15$

그림 6에는 본 실험에서 얻은 결과와 과거의 실험결과 (윤길림, 2000년)을 나타냈다. 또한, 본 연구에서 제안하는 실험식(Proposed)과, Terzaghi와 Hazen의 제안된 경험식 결과를 비교하였다. 실험결과에 대해 Terzaghi와 Hazen의 경험식은 파쇄특성이 있는 굴폐각의 투수계수를 과대평가하는 것을 알 수 있으며, Hazen의 경험식에서는 간극비의 변화에 의한 투수계수에 영향을 무시하고 있다. 이에 따라, 파쇄 굴폐각의 투수계수를 예측하는데 있어, 본 연구의 제안식이 유효함을 할 수 있다.

2.4 파쇄 굴폐각의 압축특성

굴폐각은 일반적인 모래에 비하여 간극이 크고 파쇄가 되기 쉬운 재료이기 때문에, 하중의 증가에 따른 압축성이 클 것으로 추정된다. 따라서, 구속압축시험을 실시하여 연직하중의 증가에 따른 침하량을 측정하고, 연직하중 P_v 과 간극비 e 의 관계를 비교하고 분석하였다.

구속압축시험은 시료A와 시료B를 초기상대밀도 50%와 70%로 하여, 초기시료높이 19cm의 대형직접전단상자에 시료를 조성하고 연직하중(39.2, 78.5, 157.0, 313.0 kPa)을 증가시키면서 침하량을 관찰하였다. 하중재하시간은 각 하중 20분으로 하여 침하량을 기록하였으며, 초기침하 이후에 발생하는 잔류침하에 대해서는 침하가 거의 발생하지 않았으므로 무시하였다. 침하량 S 와 연직하중 P_v 의 관계를 그림 7에 나타내었는데, 연직하중의 증가에 따라 침하량이 증가함을 알 수 있으며 하중증

가분에 대한 침하량의 증가분은 점차 감소함을 알 수 있다. 또한, 파쇄 굴폐각의 다짐 정도를 나타내는 상대 밀도는 침하량에 대해 크기 영향을 미치며, 시료 A와 시료 B의 실험곡선으로부터 입자크기의 영향은 거의 무시할 수 있다고 볼 수 있다.

그림 8은 구속압축시험 결과를 간극비 e 와 연직하중

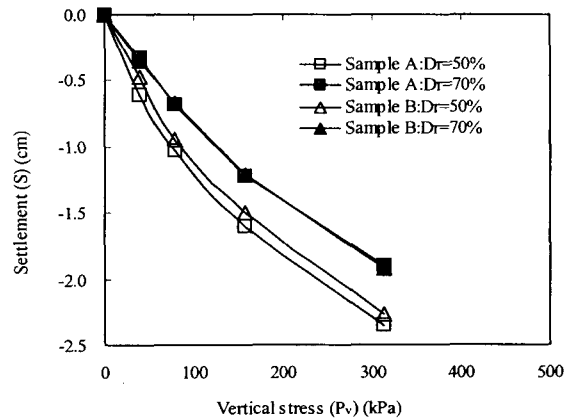


그림 7. 침하량과 연직하중의 관계

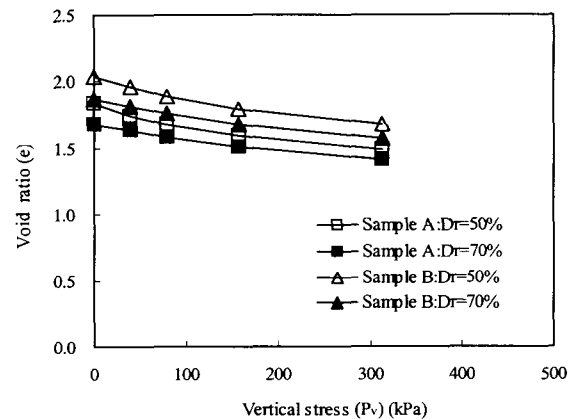


그림 8. 간극비와 연직하중의 관계

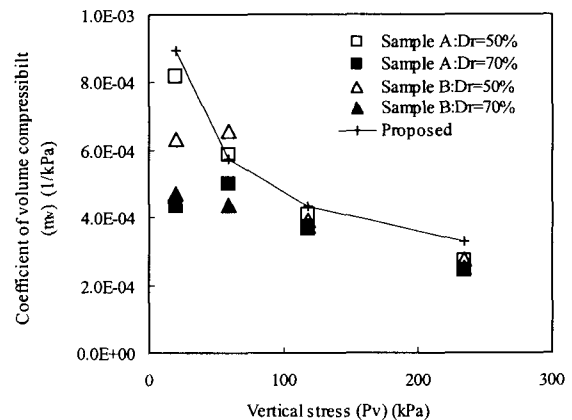


그림 9. 체적압축계수와 연직하중의 관계

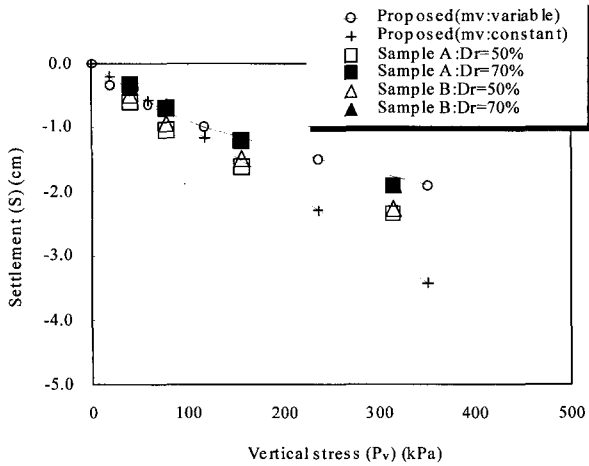


그림 10. 침하량과 연직하중의 관계(실험값과 제안식의 비교)

P_v 의 관계를 도시한 것이다. 서로 다른 초기간극비에 대해 각 시료의 곡선의 기울기는 일정한 것을 알 수 있다.

$e - P_v$ 곡선의 기울기인 체적압축계수 m_v 와 연직하중 P_v 의 관계를 그림 9에 나타내었다. 또한, 각 시료의 상대 밀도를 고려하여 다음과 같은 제안식(Proposed)에 적용

하고, 그 결과도 함께 제시하였다.

$$m_v = \alpha \left(\frac{1}{p_v} \right)^\beta \quad (7)$$

여기서, $\alpha = 0.003$, $\beta = 0.4$

체적압축계수는 초기 간극비의 영향을 크게 받는 낮은 하중범위에서는 서로 다르지만, 하중이 100kPa보다 클 경우에는 거의 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

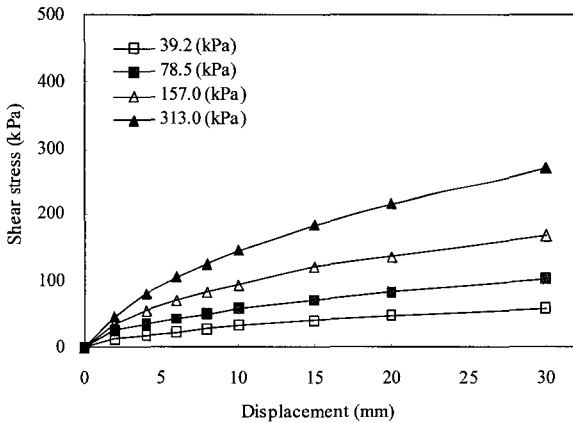
그림 10은 파쇄 골패각의 구속압축실험에서 측정된 침하량(그림 7)과 위의 제안식 (7)에 의해 추정된 m_v 값으로부터 아래의 식과 같이 추정된 침하량을 비교하였다.

$$S = \sum_{i=1}^n m_{vi} H_i \Delta p \quad (8)$$

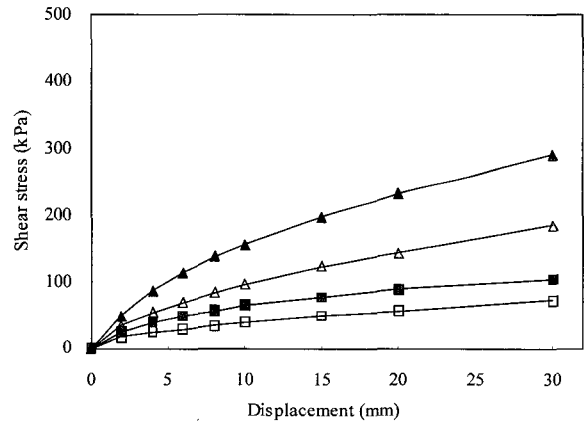
여기서, m_{vi} : 체적압축계수,

H_i : 시료의 두께,

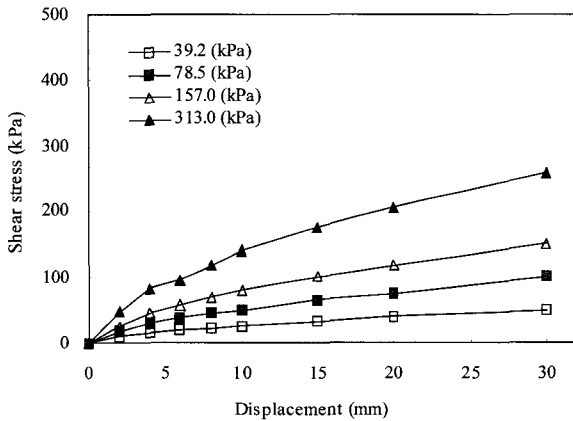
Δp : 하중증분



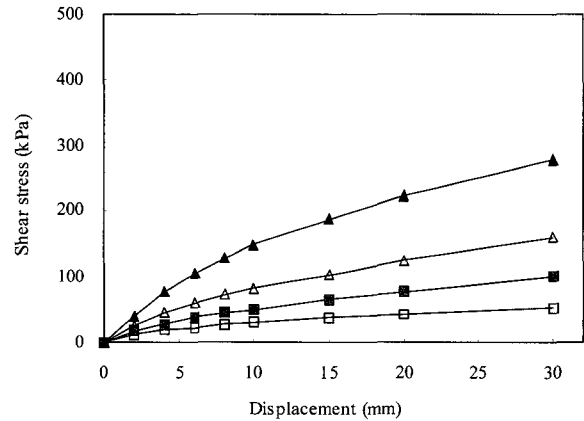
(a) Sample A ($D_r=50\%$)



(b) Sample A ($D_r=70\%$)



(c) Sample B ($D_r=50\%$)



(d) Sample B ($D_r=70\%$)

그림 11. 직접전단실험을 통한 수평변위와 전단응력의 관계

여기서, 각 하중단계에서 다른 체적압축계수 값을 적용한 경우(m_v :variable)와 하중에 대한 의존성을 고려하지 않고 전하중에 대해 일정한 값을 사용한 경우(m_v :constant)의 침하량 예측곡선을 구분하여 제시하였다. 상대밀도가 높은($D_r=70\%$)상태의 실험결과(m_v :variable)에 대해서는 비교적 일치하는 경향이고, 상대밀도가 낮은($D_r=50\%$)은 경우(m_v :constant)에는 일치성이 좋은 것을 알 수 있다.

2.5 파쇄 굴패각의 전단특성

파쇄 굴패각에 대한 직접전단시험에서 얻어진 전단응력 - 수평변위의 곡선을 그림 11에 제시하였다. 전단응력은 수평변위의 증가에 대해 뚜렷한 첨두점이 나타나지 않고 점차적으로 강도가 증가하는 경화특성을 보였다. 일반적으로 느슨한 모래의 경우, 전단응력 - 수평

변위 관계에서는 첨두점이 발생하지 않고 변위의 증가와 함께 완만하게 전단강도가 증가하므로 파쇄 굴패각은 느슨한 모래의 전단거동과 유사하다고 볼 수 있다.

그림 12에는 최대전단응력과 수직응력의 관계를 제시하였다. 본 실험에서는 뚜렷한 첨두점이 발생하지 않았으므로, 최대전단응력은 전단면적감소를 15%에 해당하는 수평변위 30mm의 값을 최대전단응력으로 정하였다. 전단시험결과에서 내부마찰각 ϕ 은 약 41-45도의 범위를 나타내며, 시료의 입자가 클수록 상대밀도가 클수록(조밀한 상태)일수록 내부마찰각은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 파쇄 굴패각은 SCP공법에서 사용하는 모래의 입도분포와 유사한 상태에서 내부마찰각이 모래에 비하여 크므로 굴패각은 모래대체재로서 활용가능성이 충분하다고 판단된다.

수직응력 P_v 과 간극비 e 의 증가에 의한 내부마찰각의 변화를 그림 13(a), (b)에 나타내었다. P_v - ϕ 의 관계

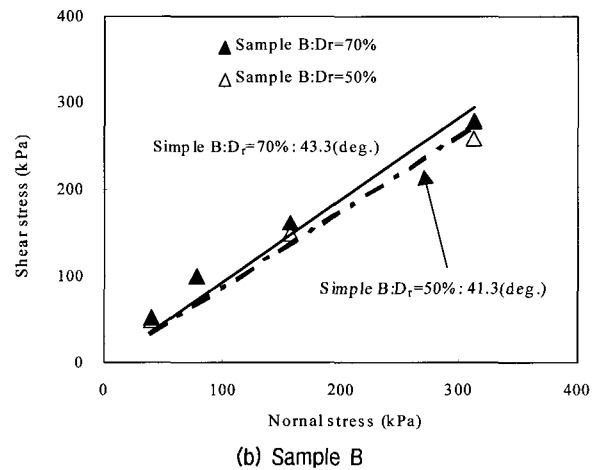
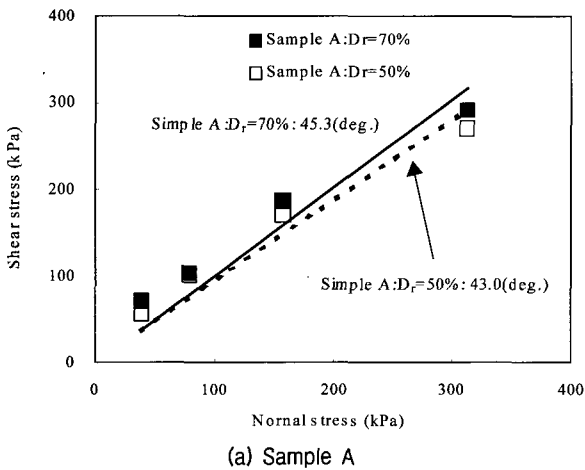


그림 12. 파쇄 굴패각의 전단강도

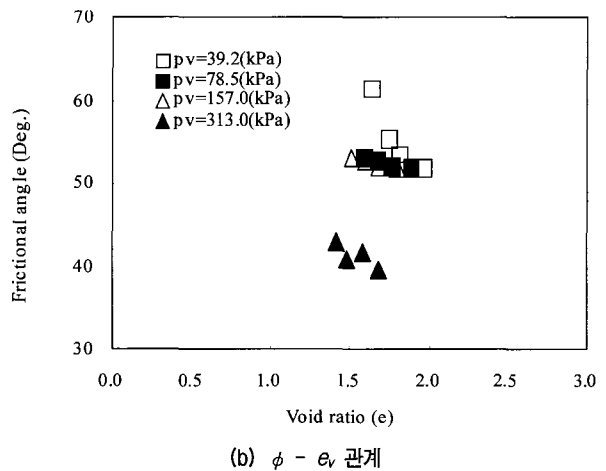
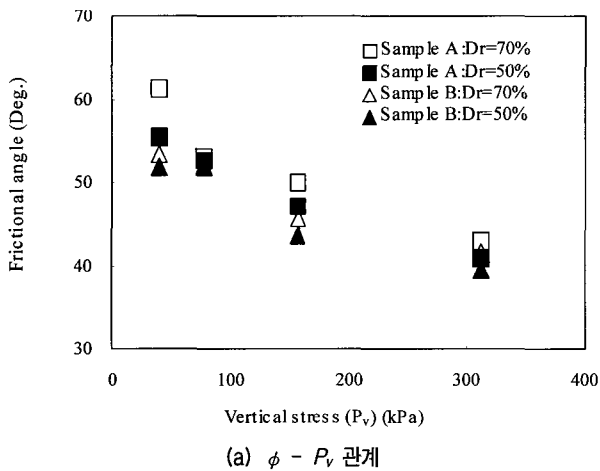


그림 13. 수직응력과 간극비의 증가에 대한 내부마찰각의 변화

에서 수직응력이 증가함에 따라, 내부마찰각 값은 점진적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, $e - \phi$ 의 관계에서는 낮은 하중상태(39.2kPa)이하에서는 간극비 값의 증가에 대해 내부마찰각이 감소하는 경향을 보이지만, 일정 하중(78.4kPa)이상에서는 간극비 값과 무관한 일정한 내부마찰각 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 파쇄 굴폐각의 부서짐 특성으로 기인한다고 판단된다. 왜냐하면 파쇄 굴폐각의 입도분포곡선에서 알 수 있듯이 부서짐 특성이 있으면 굴폐각의 내부마찰각이 일정한 상태로 유지되는 특성이 있다는 것과 상통한다.

3. 결론 및 향후 연구과제

굴폐각이 모래다짐공법의 모래대체재로서 사용 가능성을 검토하기 위하여 다른 크기의 2종류의 시료를 대상으로, 상대밀도를 50% 및 70%로 변화시켜 투수실험, 구속압축실험 및 직접전단실험을 실시하여 그 결과를 분석하였다. 굴폐각의 특징인 하중에 의한 파쇄가능성을 전단시험 및 상대밀도 시험 전후에 입도분포 시험을 실시하여 고찰해 본 결과, 파쇄가능성은 크지만 현실적인 하중조건에서는 파쇄가 크게 발생하지 않는 것을 알 수 있었으며 건설재료로서의 충분한 역학특성을 가지고 있다고 판단된다. 연구실험 분석을 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 전단시험 전후의 입도분포로부터 파쇄지수를 산출한 결과, 파쇄 굴폐각은 파쇄성이 높지만, 실제 파쇄 정도는 일반 파쇄성의 조립토에서 나타나는 값에 비해 작아서 사용하중 조건에서 파쇄는 크게 발생하지 않을 것으로 판단되었다.
- (2) 파쇄 굴폐각의 투수계수는 $2.1 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위로, 일반적인 모래의 투수계수($10^{-3} - 10^{-1} \text{cm/sec}$)와 비교해도 투수성은 좋다. 또한 투수계수에 지배적인 영향을 미치는 것은 미립입자의 입경이며 조립입자의 입도특성은 거의 영향을 미치지 않는다는 모래와 유사한 투수특성을 갖는 것을 알 수 있다.
- (3) 파쇄 굴폐각의 침하량은 입자크기의 대소에 비해, 다짐 정도를 나타내는 상대밀도에 대해 크게 영향을 받는다. 또한, 간극비-연직하중의 관계에서 곡선의 기울기인 체적압축계수는 초기 간극비의 영향을 크게 받는 낮은 하중범위에서는 서로 다르지만, 일정 하중의 범위에서는 일정한 값을 갖는 것을 알 수

있다.

- (4) 파쇄 굴폐각의 전단응력 - 수평변위 관계는 느슨한 모래와 같은 변형률인 경화현상을 보인다. 또한 내부마찰각은 41-45도의 범위이며 굴폐각의 입자크기가 클수록, 상대밀도가 클수록 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (5) 굴폐각은 작은 수직하중 하에서도 파쇄가 발생하여 압밀침하와 유사하게 장시간에 걸친 압축변위를 나타낸다. 건설재료로서의 굴폐각을 사용할 경우, 굴폐각과 모래를 혼합한 굴폐각의 압밀특성과 표준관입시험 등의 강도에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 연안항만공학본부에서 2000년3월부터 수행하고 있는 해양수산부 국책과제인 “굴폐각 혼입 특수콘크리트 개발-환경친화적 굴폐각 고화재 개발”의 연구결과의 일부임을 밝혀드립니다. 또한 본 연구에 적극적인 지원을 해주신 항만국 기술안전과 담당자에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김영수, 손영진, 문홍득, 김기영 (2002), “K₀ 압밀실험에 의한 굴폐각 혼합토의 비배수 전단강도 특성”, 대한토목학회 학술발표회, pp.243-246.
2. 윤길림, 김병탁, 김순호, 한상훈, 권오순 (2000), 굴폐각을 혼합한 특수 콘크리트 및 건설재료 개발 (2000), 한국해양연구원보고서, 해양수산부, pp.70-97.
3. 윤길림, 권오순, 임영준, 양은익 (2001), “굴폐각 재활용을 위한 공학적 특성 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권, pp 421-431.
4. 윤길림, 김병탁, 김백운, 한상훈 (2003), “Chemical-Mechanical Characteristics of Waste Oyster Shell”, *International Journal of Waste Management*, Vol.23, Elsevier, pp.1-12.
5. 이기호, 한종욱 (2001), “굴폐각 혼합토의 압밀 및 투수 특성”, 대한토목논문집, 제21권, pp.375-384.
6. 橋立洋一, 福田定治, 奥村樹郎, 小林正直(1993a), “カキ殻混り砂の工学的特性について”, 第28回 日本土質工學研究發表會, pp.869-872.
7. 橋立洋一, 福田定治, 奥村樹郎, 小林正直(1993b), “カキ殻混り砂の特性とサンドコンパクションパイルへの適用”, 第29回 日本土質工學研究發表會, pp.717-720.
8. 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.
9. Hardin, B. O. (1985), “Crushing of Soil Particles”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.10, pp.1177-1192.
10. Hazen, A. (1930), Water supply, in American civil engineers handbook, Wiley, New York.

11. 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.
12. Okumura T. and Kobayashi M. (1996), "Oyster shell-sand mixture as material of sand compaction pile", *Proc. of Environmental Geotechnics*, Kamon (ed.), Rotterdam, pp.863-868.
13. Taylor, D.W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, pp.110-111.
14. Tavenas, F., DesRosier, J. P., Leroueil, S., LaRouchelle, P. and Roy, M. (1979), "The Use of Strain Energy as a Yield and Creep Criterion for Lightly Overconsolidated Clays", *Geotechnique*, Vol.29, No.3, pp.285-303.

(접수일자 2003. 7. 2, 심사완료일 2003. 10. 10)