

시화지역 퇴적층의 퇴적환경과 압밀특성에 관한 연구

An Experimental Study on Depositional Environments and Consolidation Properties of Shihwa Deposits

원 정 윤¹ Won, Jeong-Yun

장 병 욱² Chang, Pyoung-Wuck

김 동 범³ Kim, Dong-Beom

손 영 환⁴ Son, Young-Hwan

Abstract

Consolidation properties of Shihwa deposits were analysed by means of depositional environments. Depositional environments including particle size distributions, sediment structures, geochemical properties, porewater chemistries and carbon age dating were analysed using undisturbed samples retrieved successively from a boring hole in the study area. Laboratory oedometer tests and anisotropic consolidated triaxial tests (CKoUC) for undisturbed samples were performed to examine the overconsolidation phenomena. Based on the results of analysis of depositional environments, it was found that the upper silt/clay mixed layer was deposited under marine condition while underlying sand and clay layers were deposited under fluvial condition. Planar laminated structures of silts and clays were dominant in marine deposits. Although there was no clear evidences that geological erosion had occurred in marine deposits, overconsolidation ratios of the upper marine samples were greater than unity. Stress paths of the upper marine samples behaved similarly to those of normally consolidated clays. Data plotted in stress state charts showed that the marine deposits were normally consolidated in geological meaning. These apparent overconsolidation of the marine deposits can be explained by the structures i.e. chemical bonding due to the difference of the rate of deposition, not by geological erosions and ground water fluctuations.

요 지

시화지역 퇴적층의 퇴적환경을 분석하여 압밀특성을 연구하였다. 퇴적환경은 입도분석, 퇴적구조, 지화학특성, 간극수 화학분석, 탄소동위원소분석을 통해 분석하였으며 조사지점에서 연속적으로 채취한 불교란 시료에 대해 압밀시험과 이방압밀삼축시험(CKoUC)을 수행하여 과압밀현상을 조사하였다. 퇴적환경 분석 결과 상부의 실트/점토 혼합층은 해성환경에서 퇴적되었으며 하부의 모래층과 점토층은 하성환경에서 퇴적된 것으로 밝혀졌다. 해성퇴적층에서는 실트와 점토의 수평층리에 의한 퇴적구조가 우세하게 나타난다. 해성퇴적층 내에서 지질학적 침식이 발생했다는 뚜렷한 증거가 없음에도 불구하고 상부 해성퇴적층의 과압밀비는 1보다 크게 나오고 있다. 상부 해성퇴적층은 삼축 응력경로에서 정규압밀 점토와 동일한 거동을 보이며, 응력상태선도에서도 지질학적 의미의 정규압밀 영역에 도시된다. 해성퇴적층의 이러한 겉보기 과압밀 현상은 퇴적속도의 차이에 의해 발생하는 연약층의 구조, 즉 입자간 화학적 결합력에 의해 발생된 것으로 설명할 수 있다.

Keywords : Cementation, Depositional environment, Marine clay, Overconsolidation, Structure

1 정희원, 서울대학교 생물자원공학부 공학박사 (Member, Ph.D. School of Bio. Res. & Mat. Engrg., Seoul Nat'l Univ., jy9007@empal.com)

2 정희원, 서울대학교 생물자원공학부 교수 (Member, Prof., School of Bio. Res. & Mat. Engrg., Seoul Nat'l Univ.)

3 정희원, 삼안건설기술공사 이사 (Member, Managing Director, Saman Engrg. Co. Ltd.)

4 정희원, 서울대학교 생물자원공학부, 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Bio. Res. & Mat. Engrg., Seoul Nat'l Univ.)

1. 서론

서해안에 넓게 분포하고 있는 조간대는 오랜 기간 동안 농업활동을 위해 간척되어 왔으며, 역사적 기록을 보면 A.D. 1248년 최초로 간척이 수행된 것으로 나타나 있다(최영준, 1997). 최근에는 농업 목적 이외에도 항만, 도로, 철도, 산업단지와 택지조성 등 다양한 목적으로 조간대 또는 간척지의 개발이 진행되고 있다. 서해안의 조간대는 대부분 실트 또는 점토층으로 구성된 연약층으로서 지반의 침하, 안정성과 같은 각종 공학적 문제를 야기하게 된다(Won, 2004).

흙의 거동은 매우 복잡하며 퇴적층의 지질학적 이력에 의존한다. 지질학적 이력은 흙 입자의 크기, 형상, 조성, 입자의 조밀도와 함께 퇴적물이 겪었던 응력이력, 그리고 간극수 등의 요인을 들 수 있다. 흙이 퇴적될 때 물의 염분농도, 침강속도, 퇴적속도(Wroth, 1984), 그리고 퇴적 후 환경변화, 즉 풍화(Chandler, 1972), leaching(Torrance, 1974), 재하와 제하 등은 연약 점토층의 역학적 거동에 큰 영향을 끼친다. 외국의 자연 점토에 대해 많은 연구자들(Bjerrum, 1973; Cox, 1968; Hanzawa, 1983)이 지적한 것과 유사하게 서해안 주변의 일부 해성점토층은 현재 상재하중보다 큰 하중을 겪지 않았음(Chough, 1983; Cox, 1968; Park & Bloom, 1984)에도 불구하고 과압밀비(OCR)가 1보다 큰 값을 보이는 경우가 있다. 이와 같은 현상에 대해 퇴적속도, 자연압밀, cementation, 점토의 구조, 지하수위 변동 등 다양한 원인들이 제시되어 있다(Won, 2004).

서해안의 조간대는 동남아의 연약층이나 여타 다른 나라의 연약층과 퇴적환경의 측면에서 다소 다른 조건을 가지고 있는데, 광물조성, 지형학적 위치, 기후, 유역의 형상, 높은 조위차 등을 들 수 있다(Lim, 2001). 이러한 퇴적환경의 차이로 인해 서해안 연약층의 역학적 특성은 외국의 연약층과 차이를 보일 수 있다. 따라서 서해안의 독특한 퇴적환경에 의해 형성된 조간대에서 발견되는 과압밀 현상의 원인을 고찰하고 퇴적환경에 따른 역학적 특성을 연구하는 것은 의미 있는 일이라 할 수 있다. 본 연구에서는 서해안의 경기만에 위치한 시화호 주변 퇴적층에 대해 퇴적환경을 분석하고 과압밀의 발생원인을 고찰하고자 한다. 이를 위하여 현장조사와 함께 퇴적환경과 관련된 일련의 분석을 수행하였으며, 불교란 시료를 이용하여 실내 역학시험을 수행하였다.

2. 퇴적환경과 압밀 특성

2.1 퇴적환경

한반도 서해안은 전형적인 리아형 해안으로, Holocene 해수면 상승 동안 침수되어 형성된 크고 작은 만, 염하구 및 조수분지 등 다양한 연안 해양환경을 가지고 있다. 서해안의 대조차 환경과 개방형 지형 특성에도 불구하고 서해안 조간대는 동수역학적 에너지 수준이 낮으며, 입도와 퇴적구조의 변화폭이 매우 좁다(Frey et al., 1989). 서해안 해수면 변동에 관한 장진호(1995)의 연구에 의하면 7,000yr BP의 평균 해수면은 현재의 6.5m 아래에 있었으며, 4,000yr BP에는 4m 아래, 그리고 2,000yr BP에는 약 2.5m 아래에 위치하였다. 최대 빙하기(LGM, last glacial maximum) 이후 Holocene 해수면은 지난 5,000yr BP까지 빠르게 상승(1.8 mm/yr)하다가 5,000~2,000yr BP 사이에 매우 완만하게 상승(0.5 mm/yr)하였으며, 2,000yr BP 이후에 다시 빠르게 상승(1.2 mm/yr)하였다. 장진호(1995)와 Park & Bloom (1984)에 의하면 7,000yr BP 이후 해수면은 진동 없이 지속적으로 상승했으며 해수면이 현재보다 더 높았던 적은 없었다고 한다. 외국의 Holocene 조간대의 퇴적물과 달리 한반도 조간대는 후퇴성 상향 조립화의 입도조적을 보인다. Holocene 해침 동안, 조간대의 계속적인 후퇴에 의해 발생하는 상향 조립화의 입도구조는 느린 해수면 상승속도와 느린 퇴적속도에 의해 발생된다(Kim et al., 1999). 자연점토의 퇴적과정에서 점토 구조(structure)의 형성에 가장 큰 영향을 주는 것은 퇴적속도이다. 퇴적속도가 느릴 때에는 면모화로부터 기원한 구조가 거의 변형되지 않은 상태로 유지되며, 2차압축을 거치면서 입자간 결합력이 강하게 된다. 반면, 퇴적속도가 상대적으로 빠르게 되면 상재하중이 빠르게 증가하여 cementation에 의한 입자간 결합력이 잘 발생되지 못하게 된다. 퇴적속도가 빠르게 되면 점토 퇴적층은 구조화되지 못하고 낮은 구조화 정도를 보이게 된다(Mitchell, 1993). 또한 지질학에서는 일반적으로 퇴적속도가 감소하면 물리적으로 층서가 있는 구조에서 균일한 구조로 바뀐다고 설명하고 있다.

2.2 압밀 특성

연약층의 선행압밀하중은 입자간 결합력의 붕괴와

입자간 변위와 같은 전반적인 구조적 변화가 발생하기 시작하는 하중으로 정의되며(Terzaghi et al., 1996), 연약 점토층에서 압밀과정 동안의 체적변화, 응력이완, 간극수압기동, 강도, 시간의존적 강도 등과 같은 다양한 흙의 거동을 지배하는 가장 중요한 특성 중 하나이다. 선행압밀하중은 미소변형의 탄성영역과 대변형의 소성영역의 경계로 나타나며, 대부분의 구조화된 점토에서 이 하중은 과거 최대하중과 연관되어 있지 않기 때문에 최근에 이 용어는 항복하중(yield stress, σ_v')으로 점차 교체되고 있다(Burland, 1990). 만약 어떤 흙이 선행하중의 제거에 의하지 않고 과압밀 상태에 놓이게 되었을 때, 이 선행압축의 효과를 길보기 선행압밀 또는 준선행압밀(apparent or quasi-preconsolidation)이라 부른다. 자연점토의 과압밀 원인은 다양하다. Won(2004)은 여러 연구자들이 제시한 과압밀이 발생하는 원인을 종합하여 침식이나 제하 등에 의한 전응력의 감소, 간극수압의 변화, 점토 구조의 변화, 퇴적환경의 변화 등을 제시한 바 있다. Hanzawa(1983)는 지질학적 이력이 없음에도 불구하고 과압밀 상태에 놓여진 NC aged clay는 지질학적 과압밀토와 달리 정지토압계수 K_0 , 파괴시 변형률, 강도이방성이 과압밀비와 독립적으로 나타난다고 하였다.

3. 재료 및 시험방법

3.1 조사지역 및 현장시험

본 연구지역은 서해안의 경기만 남동부에 위치하고 있는 시화간척지이다. 시화호 일대는 평균조차가 5.6m에 이르는 대조차 환경으로서, 1994년 시화방조제 축조 후 해수 유입이 차단되었다가 1997년에 다시 해수화되었다. 시화지역은 개방형 해안인 만 환경으로서 파랑의

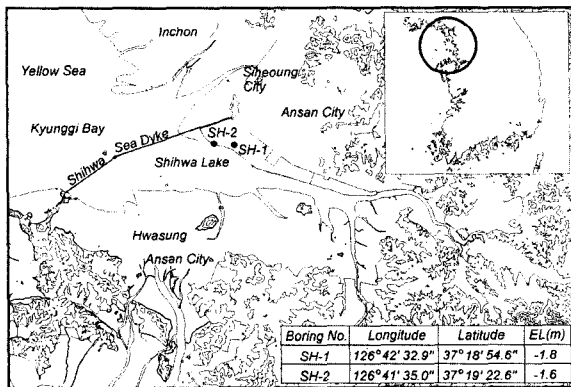


그림 1. 연구지역 위치

영향이 상대적으로 크며 표층 퇴적물은 실트분이 주를 이루고 있다(Won, 2004). 연구지역의 지층분포를 파악하기 위하여 기존 시추조사 자료를 분석하고 대표적으로 2개소에 대해 시추조사와 함께 연속적으로 불교란 시료를 채취하였다. 본 연구에서 수행한 시추조사 및 시료채취 지점을 그림 1에 나타내었다.

3.2 퇴적환경 관련 시험

현장에서 채취한 불교란 시료는 실험실로 곧바로 이동하여 추출한 뒤 역학시험에 사용할 시료를 10cm 길이로 잘라 파라핀으로 코팅하고 나머지 시료는 절반으로 절개하여 코아 육안관찰 및 각종 분석에 사용할 부시료를 채취하였다. 육안관찰시 soil color chart를 이용하여 색조를 기록하였다. 부시료 채취 후 잔여 시료에 대해 fall cone 시험을 수행하였으며, 별도의 간극수 추출장치(ASTM D 4592)를 이용하여 시료 내에 존재하는 간극수를 압력을 가하여 추출하였다. 추출된 간극수는 원심분리기로 토립자를 분리시켰으며, pH-meter를 이용하여 염분농도와 pH를 측정하고, ICP-MS를 이용하여 간극수 화학분석을 수행하였다. 토립자의 지화학분석은 ICP-MS를 이용하여 분석하였으며, 대자율은 Bartington사의 MS-2 대자율 측정기를 이용하였다. 퇴적물 내에 존재하는 폐각류를 이용하여 서울대학교 공동기기원의 AMS 장치를 이용하여 탄소동위원소 분석을 수행하였다. 퇴적물의 구조를 파악하기 위하여 자연상태에서 동결건조시킨 시료를 이용하여 주사전자현미경(SEM)으로 입자배열형태를 조사하였으며, 간극의 분포를 측정하기 위하여 AutoPore IV9500 기기를 이용하여 수은기공도 분석(MIP, mercury intrusion porosimetry)을 수행하였다.

3.3 역학특성 시험

흙의 액성한계와 소성한계는 fall cone 시험을 통해 결정(Koumoto & Houlsby, 2001)하였으며, 자연함수비 상태에서부터 공기건조 또는 증류수를 가하면서 실험하였다. 입도분석은 X-ray의 원리를 이용하여 입도를 측정하는 SediGraph를 이용하였다. 세립분이 많은 흙은 입도분석시 공기건조나 노건조 상태에서 시험을 수행하면 입도분석의 결과가 달라질 수 있기 때문에 자연함수비 상태에서 과산화수소수로 유기물을 수차례 제거한 뒤 헥사메타인산나트륨으로 시료를 분산시켰다. 입

도분석결과는 $\phi = (-)\log_2 D$ (D는 mm)로 나타내었다. 압밀시험은 불교란 시료(d=63mm, h=20mm)에 대해 하중 증가비=1, 하중 지속시간=24h인 표준방식으로 수행하였으며 항복하중은 Casagrande 방법으로 구하였다. 현장 전단강도 특성 및 응력경로 거동을 통해 지반의 과압밀 여부를 판단하기 위해 GDS 삼축시험기를 이용하여 이방압밀삼축시험(CKoUC)을 수행하였다. 이때 Bjerrum (1973)이 제안한 recompression 방법으로 현장 상재하중까지 횡방향 변위가 없도록 하중을 자동 조절하여 Ko 상태로 시료(d=50mm, h=100mm)를 압밀시켰으며 전단속도는 0.05%/min을 적용하였다. 상재하중은 불교란 시료의 습윤단위중량이 포화단위중량과 같고 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 계산하였다. 시험 초반의 급격한 변화를 방지하기 위하여 시료의 측면 filter paper는 사용하지 않았다.

4. 결과 및 고찰

4.1 퇴적환경

시화지역 퇴적물에 대한 입도분석, 표준관입시험, Atterberg

한계, 간극수 염분농도와 pH, 그리고 대자율 측정결과를 그림 2에 나타내었다. 조사지점 SH-1,2 모두에서 상부 점토층(SH-1 GL-10.5m, SH-2 GL-13.6m까지)의 입도분포는 모래 함량의 변화에 의해 톱니모양의 변화를 보이며 평균입경으로 보면 대부분 모래에 가까운 실트로 분류된다. 이 지층은 실트/점토의 혼합층으로 구분할 수 있다. 하부의 모래층, 점토층과 달리 상부 실트/점토 혼합층의 입도분포가 규칙적인 톱니모양을 보이는 것은 조류 또는 파랑의 영향으로 보인다. 즉 흙 입자가 퇴적될 때의 에너지 환경은 주기적인 증감이 반복된 것으로 판단할 수 있다. 또한 평균입경이 모래에 가까운 실트로 분류되는 것은 퇴적당시 에너지 환경이 상대적으로 높았던 것으로 볼 수 있다. Fall cone으로 결정한 액성한계와 자연함수비는 지층변화에 따라 뚜렷한 변화를 보이며, 상부 실트/점토 혼합층 내에서도 상부와 하부는 입도분포의 차이에 의해 Atterberg 한계가 차이를 보이고 있다. 실트/점토 혼합층의 상부는 하부에 비해 상대적으로 실트분 함량이 높아 액성한계(LL)와 소성지수(PI)가 작게 나타내며 하부는 상대적으로 점토분 함량이 높아 액성한계와 소성지수가 큰 값을 보이고 있다. 간극수의 염분농도와 pH는 실트/점토 혼합층 하부 모래층을 경계

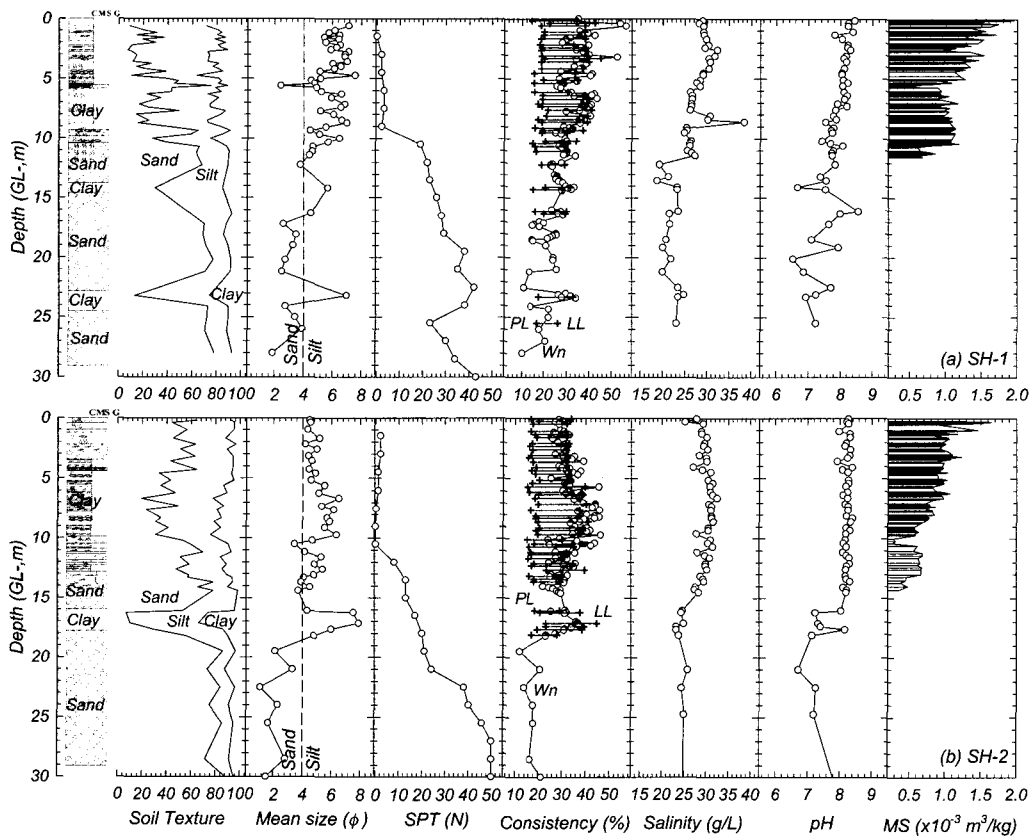


그림 2. 퇴적환경 분석 결과 종합 그래프 (a) SH-1, (b) SH-2

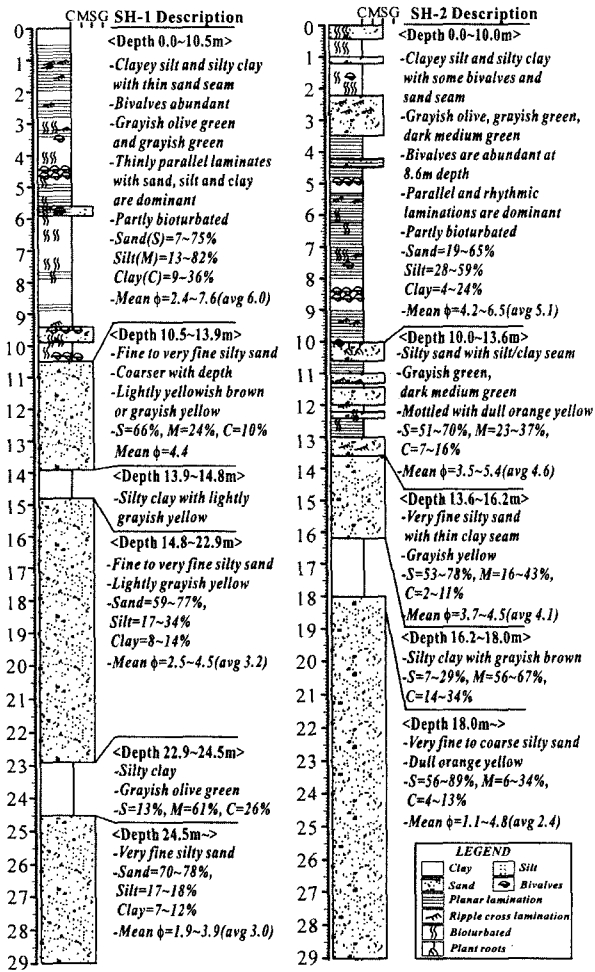
(SH-1은 GL-11m, SH-2는 GL-15m 부근)로 급격하게 감소하고 있다. 간극수 pH의 변화는 염분농도와 유사하며

상부 실트/점토의 pH는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 지층의 대기노출, 풍화 등의 급격한 환경변화에 의해 대자율은 급격한 변화를 보이게 되는데, 대자율 측정 결과 조사지점에서 이러한 급격한 환경변화는 없었던 것으로 판단된다. 심도에 따른 대자율의 변화는 평균입도와 유사하게 나타나고 있어 입도의 영향을 많이 받고 있다고 볼 수 있다.

입도분석, Atterberg 한계, 간극수 염분농도와 pH, 그리고 대자율 측정 결과를 바탕으로, 상부의 실트/점토의 혼합층과 하부의 모래층, 점토층 사이에는 뚜렷한 경계가 존재하며, 이 경계는 퇴적환경의 변화를 지시한다고 볼 수 있다. 실트/점토 혼합층 하부의 모래층, 점토층은 색조와 더불어 강도에서도 상부층과 현격한 차이를 보이고 있다. 또한 실트/점토 혼합층은 그 내에서 상부와 하부의 특성이 다소 다르게 나타나고 있다. 그림 2의 액성한계 분포와 입도분포에서 확인할 수 있듯이 실트/점토 혼합층은 실트가 우세한 상부지층과 점토가 우세한 하부지층으로 세분할 수 있다. 입도분포, Atterberg 한계, 코아 관찰기록, 시추조사 결과를 종합하여 지층을 분류하고 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 4에 시화지역 퇴적물에 대해 X-radiography 촬영 결과를 일부 나타내었다. 상부 실트/점토 혼합층의 퇴적물은 다양한 퇴적구조를 보이는데, 수평 또는 물결 모양의 층리구조(그림 4(a), (b))가 전반적으로 발달되어 있으며 패각과 잔자갈이 혼재(그림 4(c))되어 있는 것이 특징이다. 층리구조는 주로 모래 또는 실트와 점토의 반복적인 구조를 보이며 그 두께는 최대 1~2cm 정도이다. 층리구조는 조류의 반복 흐름에 의한 것으로서 창조와 낙조시의 조류속의 주기적인 변화와 그에 따른 퇴적물의 입경의 변화가 낳은 결과로 보인다. 이러한 층리구조는 외국의 varved clay와 매우 유사한 것으로서 압밀 특성과 강도특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 층리구조에 대한 육안관찰 결과 층리구조를 지배하는 것은 모래와 실트 크기의 입자이다.

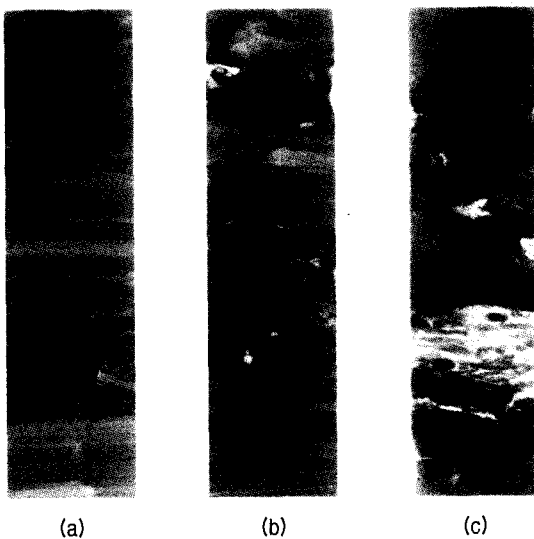
그림 5에서는 SH-2 지점에 대한 SEM 사진과 수은기공도(MIP) 분석결과를 나타내었다. 상부 실트가 우세한 지층(SH-2 1.5m시료)에서는 점토 입자가 실트 또는 모래 입자 주변에 달라붙어 있는 형태를 보이며 SH-2 5.2m 시료에서 볼 수 있듯이 전반적으로 실트가 역학적 거동을 지배할 것으로 판단된다. 하부의 점토 우세층(SH-2 7.1m시료)은 실트 크기의 입자는 별로 없으며 점토 크기의 입자가 불규칙한 형태로 분포하고 있다. MIP



(a) SH-1

(b) SH-2

그림 3. 시추주상도



(a)

(b)

(c)

그림 4. X-radiography 결과

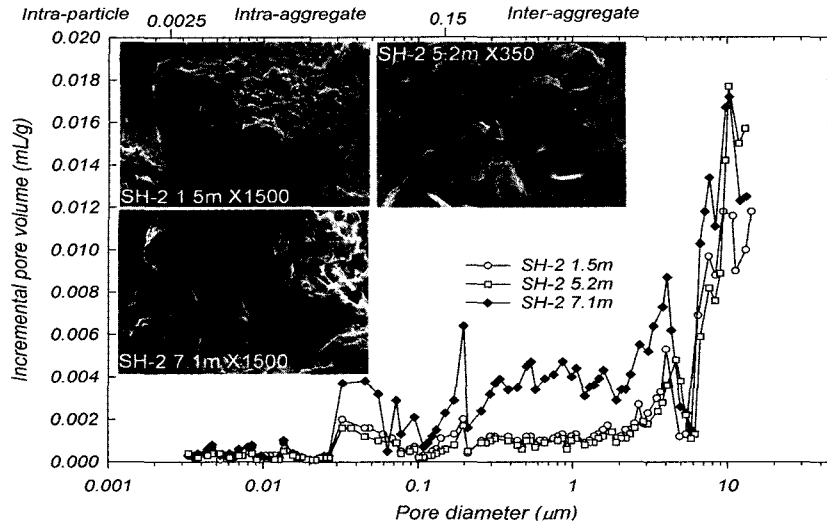


그림 5. 주사전자현미경(SEM) 사진 및 수은기공도(MIP) 분석 결과

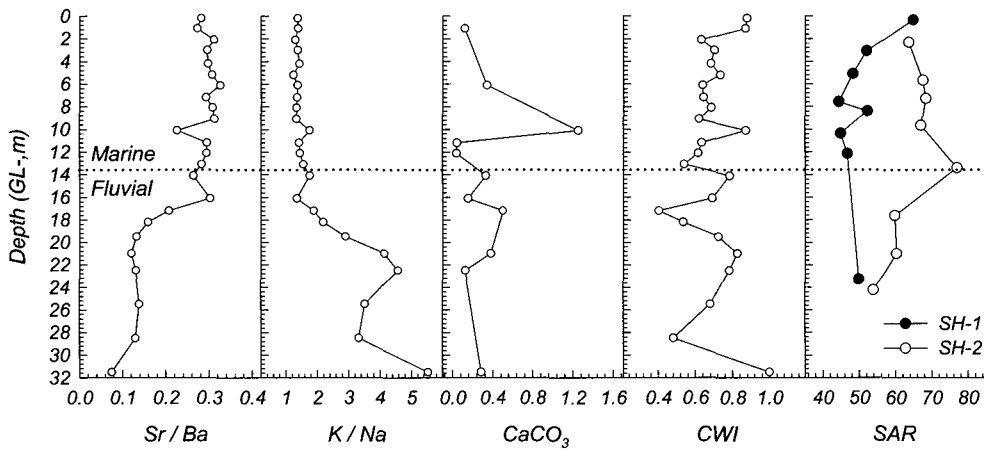


그림 6. 지화학분석 및 간극수 화학분석 결과

결과에서도 실트 우세층(SH-2 1.5m, 5.2m)의 시료에서는 inter-aggregate pore(>0.15 μm)에서 하부의 점토우세층(SH-2 7.1m 시료)과 간극분포에서 큰 차이를 보이지 않으나, 6 μm 이상의 간극에서는 별다른 차이를 보이지 않고 있다.

그림 6에서는 토립자에 대한 지화학분석 결과와 간극수 이온분석 결과를 나타내었다. Sr/Ba 비(Lim, 2001)와 K/Na 비(Bjerrum, 1967), 그리고 화학적 풍화지수

(CWI)는 퇴적환경을 지시하는 유용한 지표이며, 나트륨흡착비(SAR)는 흙 입자와 간극수의 결합력(Won, 2004), CaCO_3 함량은 cementation 정도(Jamiolkowski et al., 1985)를 지시한다. 그림 6에서 SH-2 지점의 13.6m를 경계로 급격한 퇴적환경의 변화가 있었음을 알 수 있다. 탄소동위원소 분석결과를 정리한 표 1에서와 같이 SH-1 9.5m 심도 패각의 ^{14}C 연대가 5,730yr BP이고

표 1. 시화지역 퇴적물의 탄소동위원소 분석 결과

| Boring No. | Depth(m) | | Laboratory code | Sample type | Carbon age (yr, B.P.) |
|------------|----------|--------|-----------------|-------------|-----------------------|
| | GL(-) | EL | | | |
| SH-1 | 3.60 | -5.40 | SNU 03-532 | Shell | 1,560±40 |
| | 5.45 | -7.25 | SNU 03-533 | Shell | 4,760±30 |
| | 9.50 | -11.30 | SNU 03-534 | Shell | 5,730±50 |
| SH-2 | 1.70 | -3.30 | SNU 03-535 | Shell | 640±40 |
| | 10.53 | -12.13 | SNU 03-539 | Shell | 4,420±40 |
| | 12.75 | -14.35 | SNU 03-540 | Shell | 4,810±80 |

SH-2 12.8m심도 패각의 ^{14}C 연대가 4,810yr BP인 점으로 보아 이 심도(SH-2 13.6m)를 경계로 상부는 서해안 해수면 상승시기 동안 퇴적된 해성퇴적층이며, 그 하부는 하성퇴적층임을 알 수 있다. 이러한 지층별 퇴적환경은 경기만 반월 조간대에 대한 박용안 등(2000)의 연구결과와도 일치하고 있다. 본 연구지점에서 해성퇴적층의 심도는 SH-1은 GL-10.5m, SH-2는 GL-13.6m이다.

4.2 압밀특성

불교란 시료에 대해 수행한 표준압밀시험 결과를 그림 7과 8에, 그리고 삼축압축시험(CKoUC)으로 구한 응력경로를 그림 9에 나타내었다. 그림 7에서 심도는 해성퇴적층의 두께로, 그리고 하중은 항복하중으로 정규화하였다. 압밀시험 시료에 대해 Andresen & Kolstad

(1979)가 제안한 SQD를 계산한 결과 대부분 C 등급 이상으로 다소 교란된 상태로서 항복하중을 과소평가 할 수 있지만 과소평가된 항복하중으로 계산한 OCR이 1보다 크다는 사실은 과압밀현상이 분명히 존재한다는 것을 의미한다. 두 조사지점 모두에서 해성퇴적층 상부($z/H=0.5$ 까지)는 OCR이 1보다 크게 나오며 하부는 OCR이 1부근의 값을 보이고 있다. 시료 교란의 영향으로 항복하중이 과소평가된 것을 감안하면 과압밀 심도는 더 깊을 것으로 예상된다. 초기간극비와 압축지수는 심도에 따라 거의 일정한 값을 보이고 있다. 그림 8에서는 해성퇴적층 시료에 대해 표준압밀시험으로 구한 압축성과 투수성의 변화를 항복하중으로 정규화한 하중에 대해 나타내었다. 해성퇴적층의 압축성과 투수성은 항복하중 부근의 급격한 변화를 보이지 않고 있으며 그 결과 압밀계수는 하중에 대해 일정한 값을 보이고 있다.

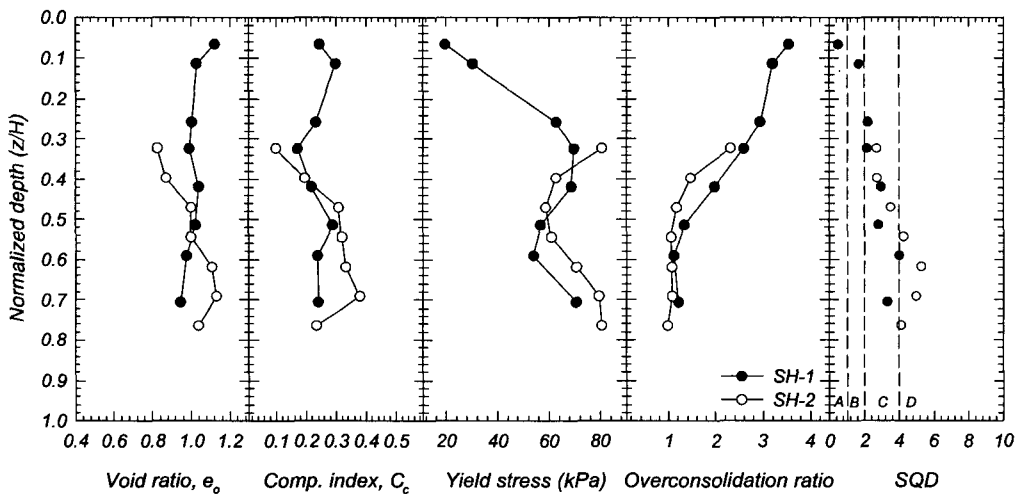


그림 7. 압밀시험결과

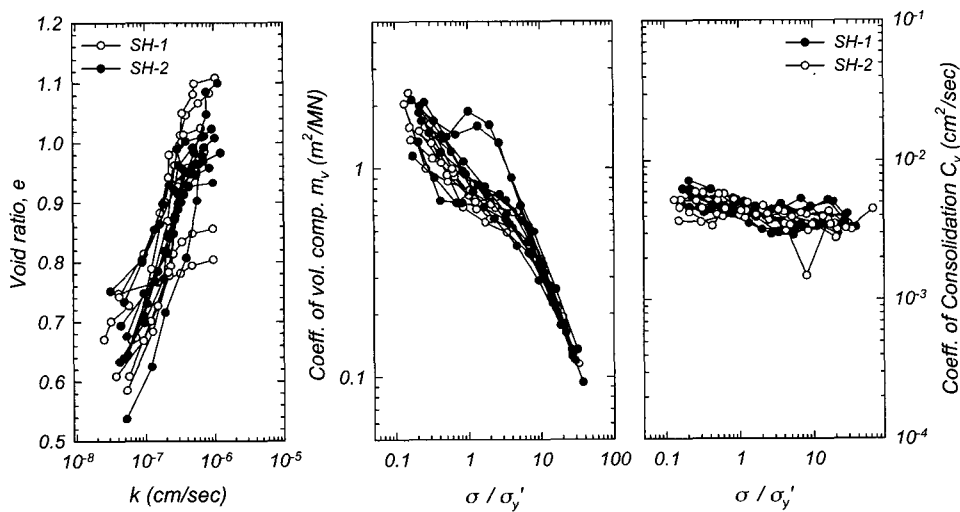


그림 8. 간극비와 하중변화에 따른 압축성과 투수성 변화

이는 해성퇴적층의 평균입도가 모래에 가까운 실트로 나타나는 등 상하부 퇴적층에서 실트분 함량이 높기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 해성퇴적층 상부 실트 우세층과 하부 점토 우세층은 압축성과 투수성에서 뚜렷한 차이를 보이지 않고 있다.

4.3 과압밀원인

이상의 퇴적환경 관련 시험과 역학시험 결과를 바탕으로 연구지역의 퇴적환경을 정리하면, 퇴적층은 해성/해성으로 구분되며 해성퇴적층 내에서도 퇴적당시 에너지 환경에 따라 상부의 에너지가 상대적으로 컸던 실트 우세층과 상대적으로 작은 에너지 환경의 하부 점토 우세층으로 세분된다. 불교란 시료에 대한 압밀시험결과 상부 해성퇴적층은 입도와 Atterberg 한계에서 하부 점토 우세층과 차이를 보이고 있으며 과압밀 현상($OCR > 1$)을 보이고 있다. 이러한 과압밀현상의 원인은 크게 해수면변동에 의한 침식, 지하수위 변동, cementation 영향으로 볼 수 있다.

장진호(1995), Chough(1983), Lim(2001) 그리고 Park & Bloom(1984)의 연구에 의하면 Holocene 동안 한반도의 해수면은 지속적으로 상승하였으며, 서해안 지역에서 해성퇴적층이 형성되는 과정에 해수면 하강과 그로

인한 침식 또는 용기와 같은 지질학적 사건은 없었던 것으로 알려져 있다. 또한 본 연구 결과 최상부층을 제외한 해성퇴적층은 퇴적 후 leaching, 대기노출, 풍화 등의 환경변화는 겪지 않았던 것으로 나타났다. 해성퇴적층에서 지질학적 의미의 하중제거로 인한 과압밀이 없었다는 것은 그림 9와 그림 10에서도 확인할 수 있다. 그림 9에서 연구지역 해성퇴적층 시료에 대한 삼축압축시험(CKoUC) 결과를 K_0 압밀하중(σ_{vo}')으로 정규화한 응력경로로 나타내었는데, 상부의 $OCR > 1$ 인 시료의 삼축 응력경로 거동은 과압밀상태의 응력경로 거동을 보이며 그 하부 시료는 정규압밀거동을 보인다. 즉 상부 해성퇴적층은 $OCR > 1$ 인 상태에서도 지질학적 의미의 과압밀도와 다른 전단거동을 보이고 있다. Burland (1990)는 여러 자연점토의 응력경로를 제시하면서 그림 9와 유사한 응력경로를 제시한 바 있다. 그림 10에서는 Burland(1990)가 제안한 응력상태선(ICL, SCL)을 수정하여 제시한 Chandler(2000)의 응력상태선도에 역학시험결과 구한 간극비와 액성한계를 이용하여 간극지수를 계산하여 나타내었다. 그림에서 대부분의 점들은 정규압밀 영역에 위치하고 있으며, carbonate clay의 영역에 위치하고 있는 점들은 해성퇴적층 중 하부의 점토가 우세한 지층의 시료들이며 패각의 영향으로 그림 6의 $CaCO_3$ 함량에서도 높은 값을 보이는 시료들이다. 그림

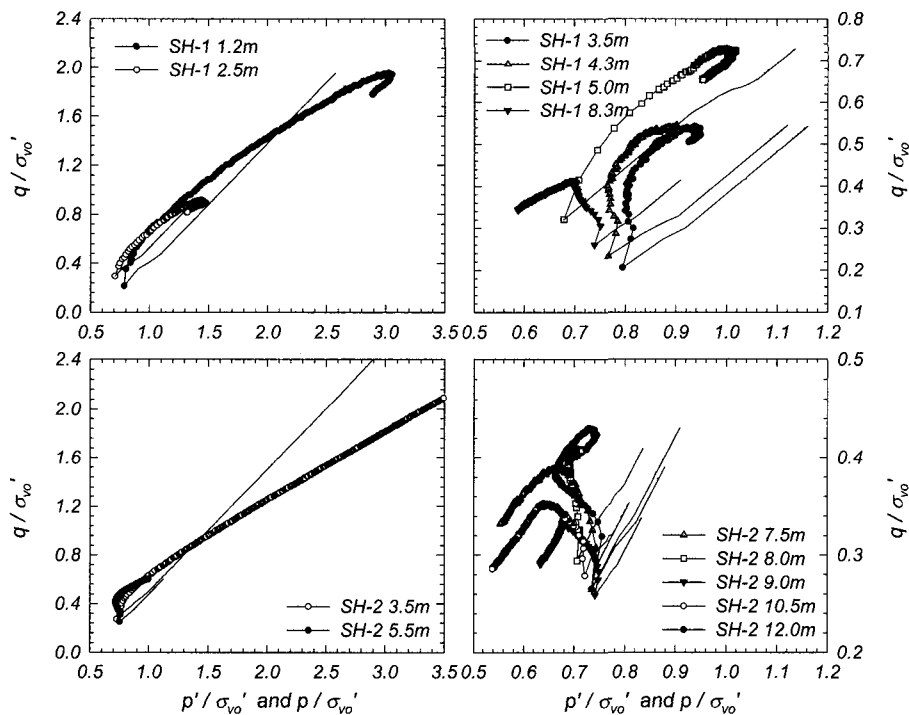


그림 9. 이방압밀삼축시험(CKoUC) 응력경로

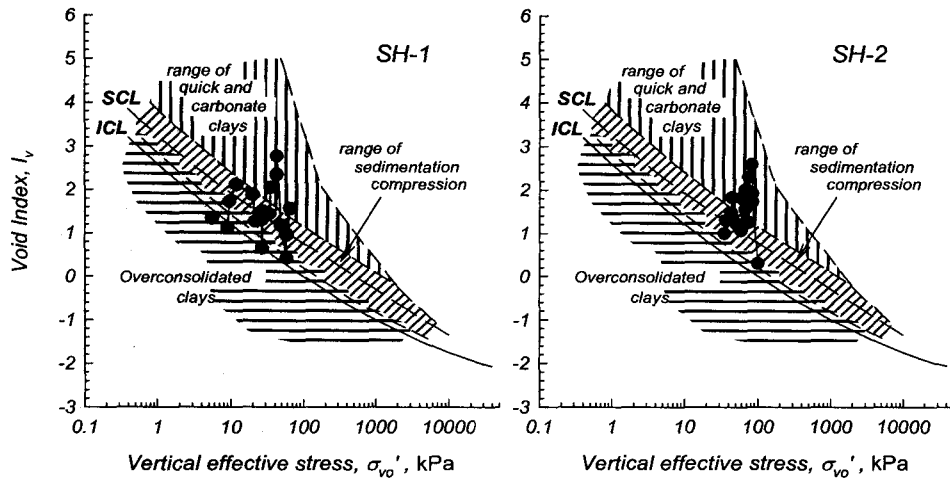


그림 10. 응력상태도(Chandler, 2000)

9에서 과압밀토의 유효응력경로 거동을 보이는 시료들은, 그림 10에서도 하중의 제거에 의한 과압밀 영역과 정규압밀 영역의 경계에 위치하고 있다. 즉, 해성퇴적층의 최상부를 제외한 상부 시료들($z/H=0.2\sim0.5$)은 지질학적 의미의 정규압밀토이지만 과압밀현상을 보이고 있다.

본 연구지역은 조간대 환경으로서, 지하수위변동 크지 않았을 것이며 지층 전체에 걸쳐 영향을 줄 정도의 지하수위변동은 없었다고 볼 수 있다. 즉 주기적으로 해수면과 접하고 있었던 지역으로 장기간에 걸친 지하수위의 하강과 그로 인해 과압밀이 발생했다고 보기는 힘들다. 그림 9와 10에서 SH-1의 최상부 시료가 과압밀 거동을 보이는 것은 지표 부근의 국부적인 풍화 또는 지하수위의 일시적인 변동에 의한 것으로 판단된다.

Won(2004)은 서해안 조간대에 대한 연구에서 최상부층을 제외한 해성퇴적층 상부의 과압밀 현상 원인을 퇴적속도의 차이에 의한 cementation 영향으로 제시한 바 있다. Won(2004)이 제시한 퇴적속도 곡선에 의하면, 해성퇴적층의 상부는 하부에 비해 상대적으로 느린 퇴적속도로 인해 점토 구조가 충분히 형성되었으며 cementation 효과가 발생하였다고 한다. 시화지역 해성퇴적층에서 확인되는 과압밀 현상은 지질학적 침식이나 지하수위 변동에 의한 응력이력에 의한 것이 아니라 점토 구조 즉 cementation에 의한 것으로 보아야 한다. 향후 해성퇴적층의 과압밀 원인으로 예상되는 cementation에 대한 다양한 실험적 규명과 함께 그에 따른 역학적 특성에 대한 규명이 필요하다.

5. 결론

서해안의 개방형 만 환경을 가지는 시화지역 퇴적층에 대해 불교란 시료를 이용하여 각종 실험으로 퇴적환경을 분석하고 압밀특성을 연구하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연구지역인 시화지역 퇴적층은 크게 해성퇴적층과 하성퇴적층으로 구분되며, 퇴적환경을 지시하는 Sr/Ba, K/Na, Atterberg 한계와 염분농도의 값들은 뚜렷한 경계를 보인다.
- (2) 해성퇴적층은 상부 실트우세층과 하부 점토우세층으로 세분되며 상부 해성퇴적층은 수평 또는 물결 모양의 층리구조가 잘 발달되어 있다.
- (3) 압밀시험결과 상부 해성점토층은 과압밀($OCR>1$)로 나타나며 항복하중 부근에서의 압축성, 투수성, 압밀계수의 급격한 변화를 보이지 않고 있다.
- (4) 해수면 변동에 대한 연구결과와 연구지역이 조간대라는 점에서 해성퇴적층은 지질학적 침식이나 하중 제거 또는 급격한 지하수위 변동을 겪지 않았을 것으로 보인다.
- (5) 삼축시험(CKoUC) 응력경로 거동이나 응력상태선도에서도 최상부를 제외한 상부 해성퇴적층은 지질학적 의미에서의 정규압밀토로 나타나고 있다.
- (6) 이러한 걸보기 과압밀현상의 원인은 퇴적속도의 차이에 의한 cementation 영향으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 박용안, 임동일, 김수정 (2000), "한국 서해 경기만 반월 조간대 (상부조간대) 퇴적층의 제4기 후기 층서와 부정합", *한국제4기 학회*, 제14권, 제2호, pp.125-135.
2. 장진호 (1995), *한국 서해안 곶소만 조간대의 퇴적작용*, 박사학위논문, 서울대학교, 192p.
3. 최영준 (1997), *국토와 민족 생활사*, 한길사, pp.175-227.
4. Andresen, A., and Kolstad, P. (1979), "The NGI-54mm Samplers for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser Materials", *Proceedings of International Symposium on Soil Sampling*, Singapore, pp.13-21.
5. Bjerrum, L. (1967), "Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings", *Geotechnique*, Vol.17, No.2, pp.83-117.
6. Bjerrum, L. (1973), "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays", *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol.3, pp.111-159.
7. Burland, J. B. (1990), "On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays", *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.329-378.
8. Chandler, R. J. (1972), "Lias Clay: Weathering Processes and Their Effect on Shear Strength", *Geotechnique*, Vol.22, No.3, pp.403-431.
9. Chandler, R. J. (2000), "Clay Sediments in Depositional Basins: the Geotechnical Cycle", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Vol.33, pp.7-39.
10. Chough, S. K. (1983), *Marine Geology of Korean Seas*, International Human Resource Development Corporation Publisher, 157p.
11. Cox, J. B. (1968), *A Review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in South East Asia*, Research Report No.6, Asian Institute of Technology, Bangkok, 272p.
12. Frey, R. W., Howard, J. D., Han, S. J., and Park, B. K. (1989), "Sediments and Sedimentary Sequences on a Modern Macrotidal Flat, Inchon, Korea", *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol.59, pp.28-44.
13. Hanzawa, H. (1983), "Undrained Strength Characteristics of Normally Consolidated Aged Clay", *Soils and Foundations*, Vol.23, No.3, pp.39-49.
14. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R.(1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", *Proceedings of the 11th International Conferences of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.57-153.
15. Kim, Y. H., Lee, H. J., Chough, S. K., Chun, S. S., and Han, S. J.(1999), "Holocene Transgressive Stratigraphy of a Macrotidal Flat in the Southeastern Yellow Sea: Gomsu Bay, Korea", *Journal of Sedimentary Research*, Vol.69, pp.328-337.
16. Koumoto, T., and Houlby, G. T. (2001), "Theory and Practice of the Fall Cone Test", *Geotechnique*, Vol.51, No.8, pp.701-712.
17. Lim, D. I. (2001), *Late Quaternary Stratigraphy and Sedimentology of Tidal-flat Deposit: Kyunggi Bay, Namyang Bay, Cheonsu Bay, Hampyung Bay and Haenam Bay, Western Coast of Korea*, Ph. D. thesis, Seoul National University, 304p.
18. Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 437p.
19. Park, Y. A., and Bloom, A. L. (1984), "Holocene Sea-level History in the Yellow sea, Korea", *The Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.20, No.3, pp.189-194.
20. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1996), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp.103-104.
21. Torrance, J. K. (1974), "A Laboratory Investigation of the Effect of Leaching on the Compressibility and Shear Strength on Norwegian Marine Clays", *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.155-173.
22. Won, J. Y. (2004), *An Experimental Study on Overconsolidation and Mechanical Properties of the Reclaimed Area*, Ph. D. thesis, Seoul National University, 174p.
23. Wroth, C. P. (1984), "The Interpretation of In-situ Soil Test", *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.449-489.

(접수일자 2004. 5. 31, 심사완료일 2004. 7. 5)