

저소성 실트의 비배수 전단거동 특성과 예측

The Characteristic for Undrained Shear Behavior of in Low-Plastic Silt and its Prediction

김 대 만[†]

Kim, Daeman

ABSTRACT : In this study, undrained triaxial (CU) tests were performed on low-plastic silt of Nakdong River in order to investigate the undrained shear behavior of low-plastic silt. In experimental results, the deviator stress showed the hardening behavior after reaching its yield stress like the tendency of common sand, and the pore water pressure was gradually decreased to critical state after the maximum value. In the effective stress paths, regardless of consolidation stress or overconsolidation ratios, both a critical state line (CSL) and a phase transformation line (PTL) exist in the effective stress path that is similar to the case of sand. The behavior of low-plastic silt was predicted by the Modified Cam-Clay (MCC) model, the Jordan and the Elman-jordan model that is artificial neural network model. According to predicted results, the overall undrained shear behavior of low-plastic silt could not be predicted with the MCC model, but the Jordan and Elman-Jordan model showed well-matched experiment results.

Keywords : Low-plastic Silt, CU test, Modified cam-clay model, Artificial neural network

요 지 : 본 연구는 저소성 실트의 비배수 전단거동특성을 파악하기 위해서 낙동강 중류에서 채취한 저소성 실트를 이용하여 비배수 삼축압축시험을 수행하였다. 시험 결과 축차응력은 항복응력에 도달한 후 사질토의 거동인 경화현상이 나타났으며, 간극수압은 최대값 이후 감소하여 한계상태에 도달하였다. 유효응력경로에서는 압밀응력이나 과압밀비에 상관없이 사질토와 같이 한계상태선(CSL)과 상태전이선(PTL)이 존재하였다. 저소성 실트 거동에 대해 Modified Cam-Clay(MCC) 모델과 동적인공신경망 모델인 Jordan과 Elman-Jordan 모델을 적용하여 예측을 실시하였다. 예측결과, MCC model은 저소성 실트의 전반적인 거동을 예측할 수 없었으나, Jordan과 Elman-Jordan 모델은 모두 저소성 실트의 거동을 비교적 잘 예측하였다.

주요어 : 저소성 실트, CU 시험, 수정 Cam-clay 모델, 인공신경망

1. 서 론

인구의 증가와 산업의 발달로 국토의 효율적인 활용 및 사회간접자본 확충측면에서 부족한 부지 확보 등을 위한 해안이나 육상매립지 혹은 하천유역 등의 연약지반개발이 점차 증대되어 보다 안전하고 합리적인 설계 및 시공을 위하여 각종 흙의 전단거동특성과 예측에 대한 연구가 요구되어 왔다. 이러한 요구에 의하여 흙의 전단거동특성에 관한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 현재에도 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 이에 대한 대부분의 연구는 주로 점토와 모래에 대하여 이루어졌으며, 실트 또는 실트질 흙의 경우 점토와 모래에 비하여 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.

실트에 대한 이전 연구로는 살펴보면 Wang & Vivatrat (1982)는 Alaska OCS silt에 대한 토질특성을 연구한 결과

실트의 전반적인 거동양상은 양적인 차이는 있지만 사질토와 유사한 점이 많고 점토의 거동과는 다르다고 발표하였으며, Fleming & Duncan(1990)은 Alaskan silt의 응력-변형률 특성에 대해 연구한 결과 사질토와 같이 변형률이 증가함에 따라 체적팽창에 의해 응력이 계속적으로 증가한다고 하였으며, 점성토와는 다르게 creep 강도 저하는 매우 적게 나타나고 점토에 비해 교란이 되기 쉽다고 발표하였다. 그 외의 실트의 전단거동특성에 관한 연구는 Penman(1985), Schultze & Horn(1965), Borgesson(1982), Konrad(1985), Ladd et al.(1985) 등에 의해 수행되어 왔다. 국내의 실트에 대한 연구로는 정상섭(1993a), (1993b)은 실리카 분말을 사용하여 연구한 결과 점토와 같이 유일한 파괴선이 존재하며, 사질토에서 나타나는 상태전이선도 존재한다고 하였으며, 김영수 등(2007)은 모래질 실트에 대한 전단거동 연구에서 모래질 실트의 응력-변형률 곡선은 초기에는 압축되

[†] 정회원, 경북대학교 토목공학과 연구원(E-mail : ksmans11@hanmail.net)

지만 최종적으로 팽창이 나타나 점토와 모래에 비하여 거동특성을 묘사하기가 어렵다고 하였다. 현재 국내외적으로 실트질 층에 많은 구조물들이 건설되고 앞으로도 많은 시공이 예상되는바 실트의 전단거동 특성과 그 거동에 대한 정확한 예측을 할 수 있는 모델이나 해법이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 낙동강 중류지역 주변에 분포하는 실트를 재성형하여 등방 정규압밀, 과압밀 상태에서의 비배수 전단시험을 수행한 후 저소성 실트의 전단거동 특성을 분석하고, 그 결과의 정확한 예측을 위하여 소성이론에 근거하여 점성토의 거동예측에 널리 사용되고 있는 Modified Cam-Clay 모델 그리고, 최근 지반공학 분야에서 적용되고 있는 동적 인공신경망 중 대표적인 Jordan 모델과 Elman-Jordan 모델을 적용하여 저소성 실트의 거동예측에 대한 적합성을 평가하였다.

2. 시료 및 시험방법

2.1 시료특성

본 연구에서 사용된 실트는 낙동강 중류지역인 경상북도 구미시 일대에서 채취하여 실내에서 재성형하여 사용하였으며, 현장에서 채취된 실트는 KSF 규정에 의거하여 비중, 입도 및 액소성 시험을 수행하였다. 또한 X선 회절 시험(XRD)를 실시하여 분석한 결과 실트의 주성분은 전체의 80%를 차지하고 비점토광물인 quartz와 feldspar로 나타났다. 그 외에 점토광물인 illite와 kaolinite로 구성되어 있다. 본 연구에 사용된 실트의 기본 물성시험의 결과와 입도곡선, 그리고 X선 회절시험(XRD)결과는 각각 표 1,

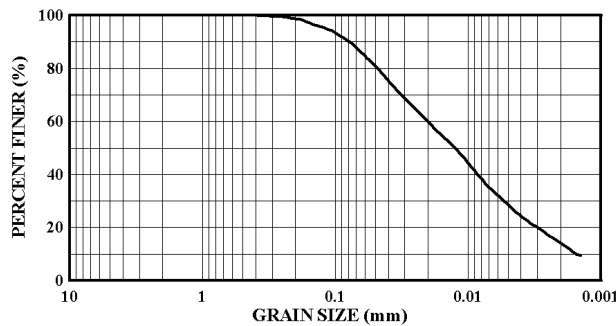


그림 1. 실트 입도분포 곡선

표 1. 저소성 실트 시료의 물리적 특성

비중 (Gs)	액성한계, LL (%)	소성지수, PI	200번 체 통과율 (%)	입경에 따른 분류 (AASHTO)			통일분류 (USCS)	XRD 분석 결과(%)			
				모래(%)	실트(%)	점토(%)		Feldspar	Illite	Kaolinite	Quartz
2.678	37.71	6.52	89.5	10.5	75.8	13.7	ML	20	10	10	60

그림 1, 2와 같다.

2.2 시료성형

채취된 실트를 자연 건조시켜 40번 체로 거른 다음 물과 혼합하여 Slurry 상태로 수일간 교반시킨 후 Slurry 상태의 시료를 그림 3과 같이 예비압밀 토조(직경 28cm×높이 50cm)에서 7.5, 15, 30, 60kPa의 압력으로 단계 압밀시켰다. 예비압밀이 완료된 후 채취한 시료는 함수비의 변화를 방지하기 위해 파라핀으로 밀봉하여 항습기에 보관하였으며, 직경 5cm, 높이 10cm로 트리밍하여 재성형된 공시체에 대해 실내시험을 실시하였다.

본 연구에 사용된 삼축시험기는 two-way 방법으로서 미국 GEOCOMP사에서 제작된 것으로 등방압밀, K_0 압밀,

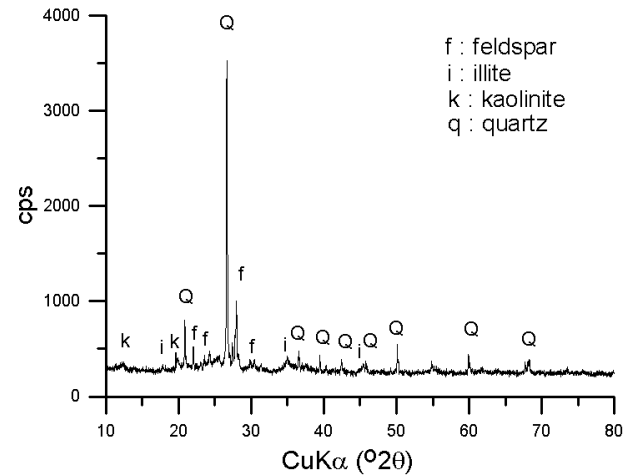


그림 2. XRD 실험 결과



그림 3. 시료성형을 위한 예비압밀

이방압밀, 삼축투수시험, 그리고 일축 및 CBR시험이 가능한 다기능 시험장치로서 그림 4와 같으며, 하나의 자동 하중장치(Load Trac-II)와 2개의 독립된 압력장치(Flow Trac-II)로 구성되어있다. 비배수 시험시 시료의 포화정도는 비배수 전단시험 결과에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 145kPa까지 점차적으로 서서히 가하면서 최종적으로 B계수가 0.95 이상 되도록 하였으며, 포화된 시료에 대해서는 각 조건별 등방정규압밀과 등방과압밀을 실시하였다. 등방정규압밀은 최종 유효수직응력이 100, 200, 300, 400kPa이 되도록 압밀



그림 4. 삼축시험장치

표 2. 시험조건 및 시료초기상태

압밀유형	OCR	최종압밀응력 (kPa)	초기함수비 (%)	간극수압계수 (B-value)
등방 정규압밀 (CIU-NC)	1	100	49.09	0.97
		200	49.62	0.98
		300	49.78	0.98
		400	49.23	0.95
등방 과압밀 (CIU-OC)	2	200	49.27	0.96
	4	100	49.66	0.98
	8	50	49.07	0.97

을 시켰으며, 등방 과압밀은 유효수직응력을 400kPa로 등방정규압밀 시킨 후 유효수직응력을 200, 100, 50kPa로 제하시켜 과압밀비(OCR)가 2, 4, 8이 되도록 압밀시켰다. 등방정규압밀과 등방과압밀이 종료된 시료에 대해서는 0.1%/min 재하물의 변형률 제어 방법으로 축차응력을 증가시켜 비배수 전단시험을 실시하였다. 표 2에서 각 시험의 조건과 시료의 초기상태를 나타내었다.

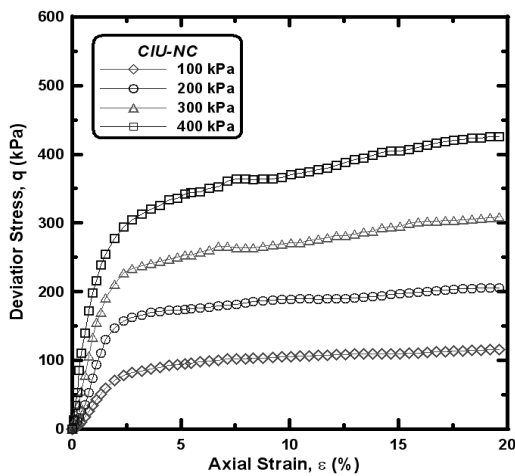
3. 시험 결과 및 분석

3.1 축차응력-변형률 관계

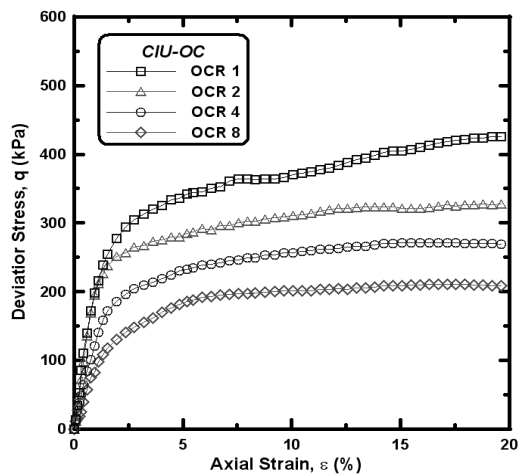
그림 5는 비배수 전단시험의 축차응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 그림 5(a) 정규압밀시료의 경우 항복응력 이후 정규압밀 점토와 다르게 축차응력이 증가하는 경화현상을 나타내고 있다. 그림 5(b)에서 나타난 과압밀시료는 정규압밀시료와 같이 항복응력 이후에도 변형률이 증가함에 따라 축차응력이 증가하는 경화현상을 나타내고 있지만, 변형률 15%이상에서 정규압밀시료와 다르게 최대 축차응력을 보인 후 일정하게 수렴하고 있다. 이러한 최대 축차응력 이후 일정한 강도를 유지하는 과압밀 실트의 축차응력 거동은 과압밀 점토의 거동과도 다소 유사하였다.

3.2 간극수압-변형률 관계

그림 6은 비배수 전단시험의 간극수압-변형률 관계를 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서 정규압밀시료의 간극수압은 약 5%의 변형률에서 최대값을 나타낸 후 다소 감소하는 경향을 보였으며, 약 15%이상의 변형률에서 일정하게 수렴하여 한계상태에 도달하는 것으로 나타났다. 이러한 간



(a) 정규압밀시료



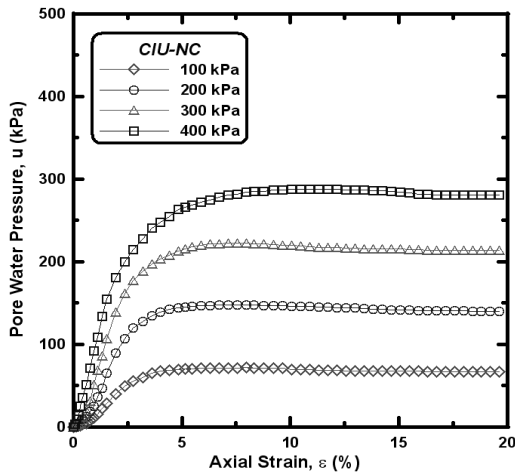
(b) 과압밀시료

그림 5. 축차응력-변형률 관계

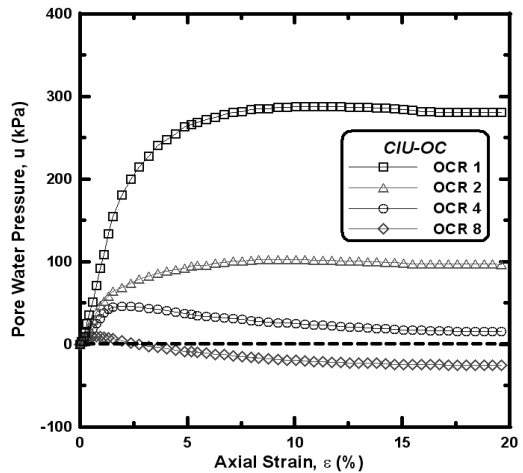
극수압의 감소는 정규압밀된 점토의 간극수압과는 다소 다른 양상으로 실험 시료에서도 체적팽창현상이 발생하는 것으로 판단되었으며, 축차응력의 경화현상과 깊은 관계가 있는 것으로 판단된다. 그림 6(b)에서 비교적 작은 과압밀비(OCR=2) 시료의 간극수압-변형률 관계는 정규압밀(OCR=1) 시료와 같이 최대값을 나타낸 후 체적팽창현상이 발생하여 간극수압이 다소 감소하는 경향을 보였다. 그러나 $OCR \geq 4$ 의 큰 과압밀비 시료에서는 간극수압의 감소현상이 더욱 발전되어 전단초기 약 2%의 변형률 이내에서 체적팽창현상이 발생하였다. Lambe & Whitman(1969)은 과압밀비가 4이상인 점토에서는 부의 간극수압이 발생한다고 제시하였으며, 크게 과압밀된 실트의 간극수압 결과는 과압밀비가 4이상인 점토의 간극수압거동과 다소 유사하게 나타났다.

3.3 응력경로

그림 7은 유효응력경로를 나타낸 것으로 그림 7(a) 정규압밀시료를 보면 다른 초기 유효응력조건을 갖는 응력경로이지만 모든 시료의 극한상태를 연결할 때 유일한 선인 한계상태선(Critical State Line, CSL)에 도달하였다. 이는 유효압밀응력이나 과압밀비 등에 관계없이 유일하게 존재하는 흙의 고유한 특성으로서 한계상태선의 기울기 $M_c (=q/p')$ 는 1.62로 나타났다. 유효응력경로에 대한 또 다른 특징은 한계상태선에 도달하기 전 체적압축경향이 체적팽창경향으로 바뀌는 상태전이선(Phase Transformation Line, PTL)이 존재하고 있다는 것으로, 이는 점성토와 달리 사질토에서 나타나는 거동특성으로 실트에서도 상태전이선이 존재하였다. 이러한 상태전이선의 존재는 전단초기부터 상태전이선까지는 평균주응력(p')이 감소하는 경향을 보이며, 상태전이선에 도달하면서 평균주응력이 다시 증가하여 유효응

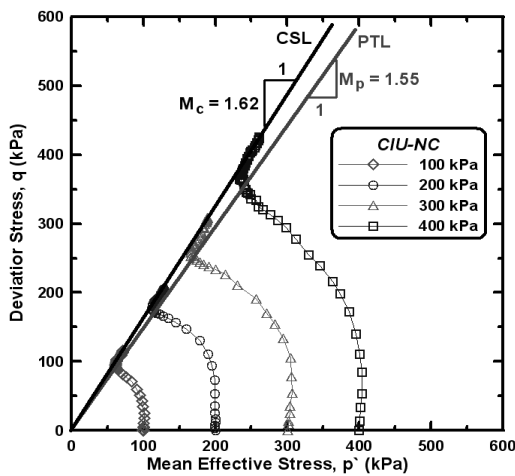


(a) 정규압밀시료

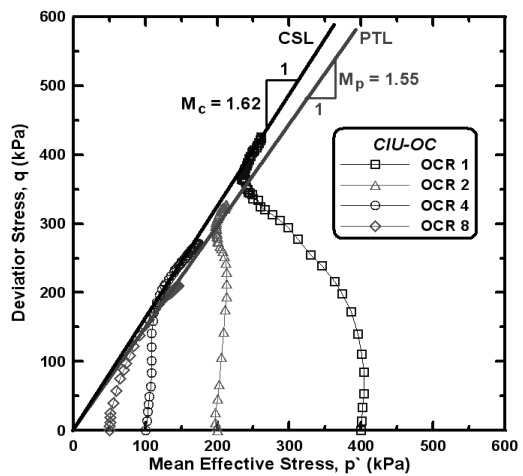


(b) 과압밀시료

그림 6. 간극수압-변형률 관계



(a) 정규압밀시료



(b) 과압밀시료

그림 7. 유효응력경로

력경로는 한계상태선을 따라 파괴되었다. 상태전이선의 기울기 $Mp(=q/p)$ 는 1.55로 산정되었다.

그림 7(b) 과압밀시료의 유효응력경로는 정규압밀시험의 유효응력경로보다 다소 불분명하지만 정규압밀시험과 같이 흙의 고유한 특성인 한계상태선과 사질토에서 나타나는 상태전이선이 존재하고 있으며, 작은 과압밀비($OCR \leq 2$)시료의 유효응력경로는 상태전이선까지 평균주응력(p')의 큰 변화 없이 연직으로 상승하다 정규압밀시료의 유효응력경로와 유사하게 상태전이선을 지나면서 체적팽창으로 평균주응력(p')이 다시 증가하여 파괴에 이르는 것을 볼 수 있다. Atkinson(1978)에 따르면 과압밀비가 큰 점토의 유효응력경로는 작은 과압밀비($OCR \leq 2$)시료에서 관측되는 것과 같이 상태전이선까지 거의 연직으로 상승하게 된다고 하였으며, $OCR=4$ 인 시료의 유효응력경로는 상태전이선까지 $OCR=2$ 시료와 유사하게 거의 연직으로 상승하였다.

4. Modify Cam-Caly(MCC) 모델에 의한 거동 예측

4.1 MCC 모델의 매개변수 산정

본 절에서는 Roscoe(1968)에 의해 개발된 Modified Cam-Clay(이하 MCC) 모델을 적용하여 실트의 축차응력-변형률, 간극수압-변형률, 그리고 유효응력경로를 시험결과와 비교함으로써 실트에 대한 MCC 모델의 예측 정확성을 평가하고자 하였다. 본 연구에서 적용된 MCC 모델의 매개변수에는 압밀특성을 반영하는 정규압밀선의 기울기(λ), 팽윤선의 기울기(κ), 전단직전의 초기간극비(e_0) 등이 필요하며, 전단시 한계상태선의 기울기(Mc)를 결정하기 위한 한

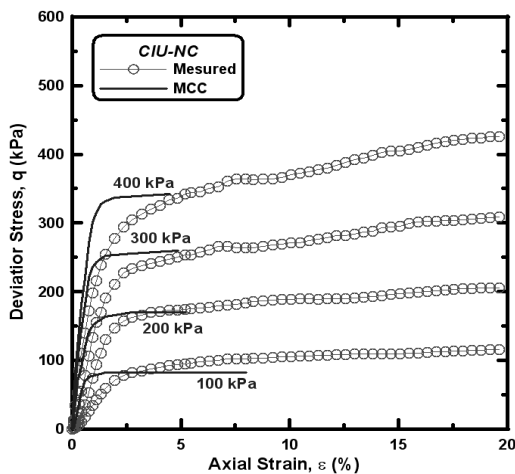
계상태시의 내부마찰각인(Φ_{cs}), 전단탄성변형률 산정을 위한 전단 탄성계수(G) 및 포와송비(ν) 등이 있다. 비배수 삼축압축시험에 대한 결과로부터 MCC 모델의 적용을 위한 실트의 모델 매개변수를 산정한 결과는 표 3과 같다.

4.2 축차응력-변형률

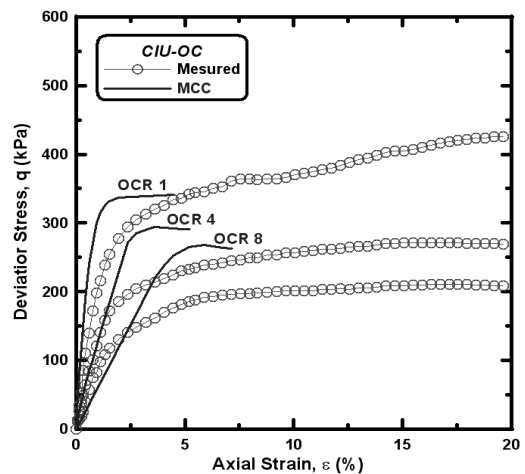
그림 8은 정규압밀과 과압밀시료의 축차응력-변형률 시험결과와 MCC 모델의 예측 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 정규압밀시료의 MCC 모델의 예측결과는 시험결과에 비해 최대축차응력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 주로 점성토의 축차응력-변형률 관계를 적절히 예측하는 것으로 알려진 MCC 모델은 점성토와 다른 거동인 실트의 경화현상을 예측하지 못하였으며, 또한 과압밀시료의 경우 $OCR=2$ 인 시료에 대한 MCC 모델의 예측결과는 파괴까지의 항복 경로를 예측할 수 없었고, 크게 과압밀된 시료($OCR \geq 4$)에 대한 MCC 모델의 예측결과는 시험결과에 비해 최대축차응력을 과대평가하고 있다. 이러한 결과의 원인은 MCC 모델이 항복면 내부의 탄성영역을 예측하지 못하기 때문

표 3. MCC 모델의 매개변수

시료종류	매개변수						
	e_0	λ	κ	Mc	ν	$\Phi_{cs}(^\circ)$	
등방 정규압밀	100kPa	1.17	0.161	0.021	1.62	0.3	39.5
	200kPa	1.06					
	300kPa	0.99					
	400kPa ($OCR=1$)	0.95					
등방 과압밀	$OCR=2$	0.96					
	$OCR=4$	0.98					
	$OCR=8$	0.99					

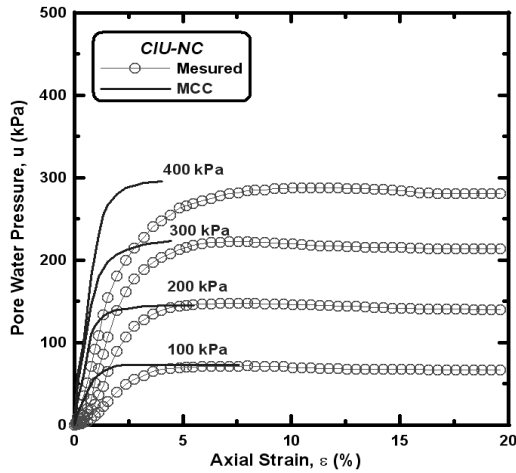


(a) 정규압밀시료

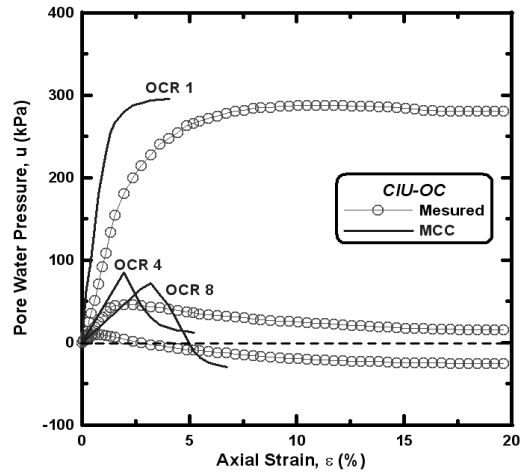


(b) 과압밀시료

그림 8. MCC 모델의 축차응력-변형률 예측결과



(a) 정규압밀시험



(b) 과압밀시험

그림 9. MCC 모델의 간극수압-변형을 예측결과

이라 생각된다. 따라서 MCC 모델에 의한 실트의 축차응력-변형을 거동에 대한 예측은 정확도에서 다소 문제가 있는 것으로 판단되었다.

4.3 간극수압-변형을

그림 9는 간극수압-변형을 관계를 시험의 결과와 MCC 모델의 예측 결과를 비교하여 나타낸 것이다. MCC 모델의 예측결과 최대간극수압은 시험결과와 비교적 잘 일치하였으나 초기 선형구간에서 변형을 다소 과소평가하고 있으며, 최대간극수압 이후에 나타나는 간극수압의 감소현상은 예측하지 못하여 저소성 실트의 간극수압거동이 점토의 간극수압거동과는 다소 차이가 있었다. OCR=2인 시험에 대한 간극수압-변형을 관계 역시 MCC 모델의 예측은 불가능하였으며, 크게 과압밀된 시험(OCR≥4)에 대한 MCC 모델의 예측결과는 시험결과에 초기의 간극수압을 상당히 과대평가하는 것으로 나타났다. 또한, 심하게 과압밀된 시험에서 나타나는 체적팽창에 의한 간극수압의 감소는 나타났지만 정확한 예측이라고는 볼 수 없었다.

4.4 응력경로

그림 10은 시험결과와 MCC 모델에 의한 유효응력경로 예측을 나타낸 것이다. 정규압밀시험에 대한 예측결과를 살펴보면 상태전이선 이전까지의 유효응력경로는 시험결과와 비교적 잘 일치하고 있으나 상태전이선 부근에서부터 어긋나 바로 한계상태선으로 가는 것을 볼 수 있다. 이는 상태전이선이 나타나는 사질토 전단거동의 특징을 MCC 모델에서는 예측이 불가능하기 때문인 것으로 생각된다. 과압밀된 시험에 대한 MCC 모델의 예측결과는 앞서 축차응

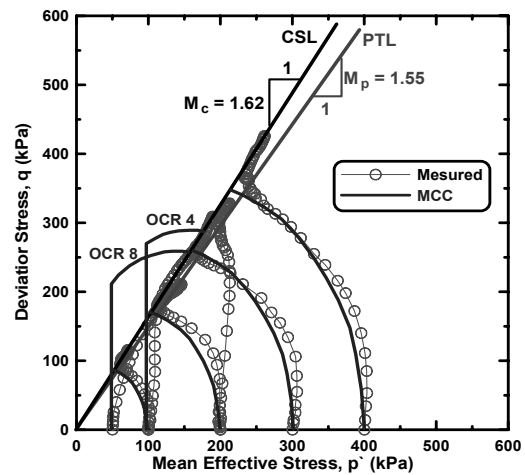


그림 10. MCC 모델의 응력경로 예측결과

력과 간극수압의 예측결과에서 나타난 바와 같이 초기항복면의 크기를 과도하게 산정함으로써 초기 선형탄성 거동구간을 시험결과보다 매우 크게 예측하고 있음을 알 수 있다.

5. 인공신경망 모델에 의한 거동 예측

5.1 순환형 인공신경망

5.1.1 Jordan 모델

Jordan 모델은 출력층의 출력값을 입력층으로 피드백하는 과정에 있어서 연속성을 구현할 수 있는 신경망 모델이다. 이 모델의 입력층은 plan units와 state units로 구성되어 있으며 학습과정에서 입력변수는 은닉층에 들어가게 되고 출력변수로 나오거나 다음단계로 가게 된다. 이러한 과정을 연속적인 입력패턴이 끝날 때까지 반복학습을 하

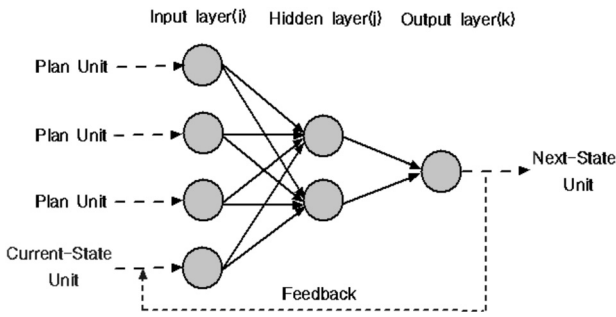


그림 11. Jordan 모델

게 된다. State units는 전부 혹은 부분적으로 역전파 신호를 받으며 관성과 기억작용을 갖는다. 그림 11은 Jordan 모델의 구조를 나타낸 것이다.

5.1.2 Elman-Jordan 모델

Elman-Jordan(이하 E-J) 모델은 출력값이 다음 단계의 입력값으로 되어 출력층 뉴런들과 피드백(feedback)되는 입력층 뉴런들은 동적 뉴런 형태가 된다. 출력층에서 피드백 형태의 학습과정은 첫 번째 계산단계에서의 초기값을 입력하여 주고 출력층에서 계산된 결과값은 두 번째 단계의 입력값이 된다. 따라서 입력변수로 사용하기 위한 값은 학습과정 또는 예측과정에서 단지 목표값으로만 사용된다. 그림 12는 E-J 모델의 구조를 나타낸 것이다.

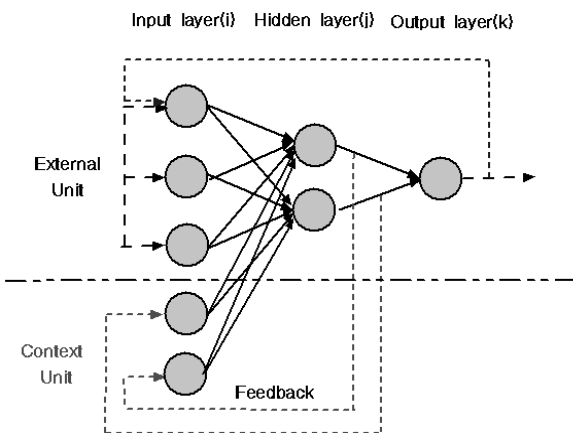


그림 12. Elman-Jordan 모델

표 4. 입력변수 및 상관성 결과

model	입력변수											sum (%)	상관성
	σ'_h	$\varepsilon_{1,i}$	C_c	C_u	G_s	clay (%)	sand (%)	e_0	OCR	q_i	u_i		
Jordan	9.19	12.10	11.56	9.52	9.80	10.79	-	10.03	7.95	12.35	6.72	100	2.40
Elman-Jordan	8.95	8.96	10.89	9.91	11.44	10.66	-	9.03	8.57	11.73	9.85	100	1.52

5.2 인공신경망 입력변수 및 설계

본 연구에서는 동적신경망 형태 중 대표적인 Jordan 모델 및 E-J 모델을 이용하여 압밀 응력비 및 과압밀비를 고려한 최적신경망 구조를 선정하고 시험결과와 비교함으로써 실트의 비배수 전단거동 예측을 위한 적용성을 평가하였다.

실트를 구분하는 물리적 특성으로 비중(G_s), 곡률계수(C_c), 균등계수(C_u), 점토함유율(%) 및 모래함유율(%)를 고려하였으며, 압밀조건으로는 정규압밀과 과압밀을 구분하기 위한 과압밀비(OCR), 구속압의 크기를 구분하기 위한 유효구속응력(σ'_h) 및 압밀종료 후 간극비(e_0)를 고려하였다. 또한 전단시 조건으로 현단계의 축변형률($\varepsilon_{1,i}$)과 현단계의 축차응력(q_i) 및 간극수압(u_i)을 고려하여 다음 단계의 축차응력(q_{i+1})과 간극수압(u_{i+1})을 예측하였다. 전체 시험자료 중 정규압밀시료 100, 200, 400kPa과 과압밀시료 OCR=2, 8에 해당하는 실험결과를 학습자료로 사용하였고, 학습에 관여하지 않은 정규압밀시료 300kPa 및 과압밀시료 OCR=4의 전단거동을 예측하였다. 학습패턴수는 280개이고, 예측 패턴수는 112개이다.

신경망 모델의 예측능력을 비교하기 위하여 Jordan 모델과 E-J 모델을 적용하였을 때 입력변수의 수에 따른 영향을 분석하고자 6~11개로 입력변수를 조정하여 case별 입력변수 조건에서 각각 입력변수의 상관성을 평가하기 위해 Garson(1991)이 제시한 인공신경망의 sensitivity 해석기법을 적용하였다. 입력변수 상관성 결과 표 4와 같이 10개의 변수로 이루어진 case에서 가장 좋은 상관성을 나타내었다.

은닉층 노드수의 영향을 평가하고자 학습률과 모멘텀상수를 각각 0.3, 0.7로 고정시킨 후 입력층 노드수의 1~4배까지 은닉층 노드수를 변화시키고, 학습시 제한오차에 의한 영향을 평가하기 위하여 오차범위를 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ 까지 변화시켰다. 학습종료 조건은 각 조건별 주어진 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$ 까지의 제한오차에 수렴했을 경우와 학습 횟수가 100만회에 도달하였을 때로 선정하였고 학습이 종료된 후 최적구조를 선정하기 위한 조건으로는 학습에 관여하지 않은 예측자료를 적용한 예측결과로부터 예측결정계수를

산정하여 예측결정계수가 가장 높은 경우를 최적구조로 선정하였다. Jordan 모델과 E-J 모델의 최적예측결정계수를 산정한 결과, Jordan 모델의 경우 제한오차 1×10^{-4} , 조건에서 은닉층 노드수 30일 때, 그리고 E-J 모델의 경우 제한오차 5×10^{-4} , 은닉층 노드수 10의 조건에서 예측결정계수가 가장 높게 나타났다.

따라서, 실트의 비배수 전단거동 예측을 위한 최적의 신경망 구조는 Jordan 모델의 경우 학습률 0.3, 모멘텀 상수 0.7, 입력층과 은닉층의 형태가 10×30 인 구조이고, E-J 모델은 학습률 0.3, 모멘텀 상수 0.7, 입력층과 은닉층의 형태가 10×10 인 구조로 하여 학습을 수행하였다.

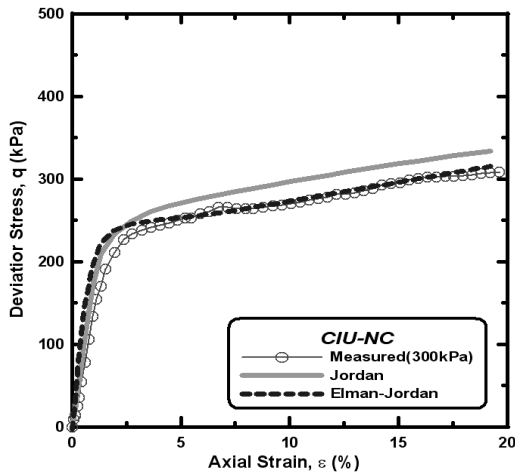
5.3 축차응력-변형률

그림 13은 등방압밀응력으로 300kPa로 정규압밀시료와 OCR=4의 과압밀시료의 축차응력-변형률 거동에 대한 신

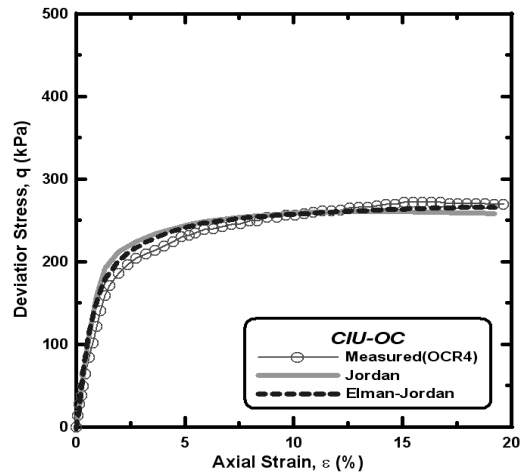
경망 예측결과를 나타낸 것이다. 그림 13(a) 정규압밀시료의 경우 Jordan 모델에서는 전체적으로 과대평가 되는 경향을 보였으나 E-J 모델은 변형률 5% 이후에서 실제의 거동과 유사함을 알 수 있어 전체적으로 E-J 모델이 Jordan 모델보다 비교적 더 정확한 예측을 하는 것으로 나타났다. 그림 13(b) OCR=4인 과압밀시료의 예측결과에서는 두 모델의 변형률 8%이전에서 과대평가 되는 경향이 나타났으나 전반적으로 거동예측이 정확한 것을 볼 수 있다.

5.4 간극수압-변형률

그림 14는 간극수압-변형률 거동을 나타낸 것으로 정규압밀시료에서는 두 모델 모두 실제의 거동과 유사하게 예측을 하나 전체적으로 E-J 모델이 Jordan 모델보다 좀 더 정확한 예측을 하였다. 그러나 그림 14(b)의 과압밀시료의 경우는 두 모델 모두 변형률 5%까지 과소평가하는 경향을

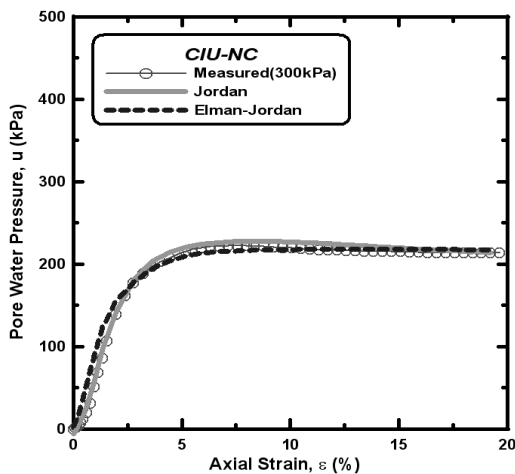


(a) 정규압밀시료

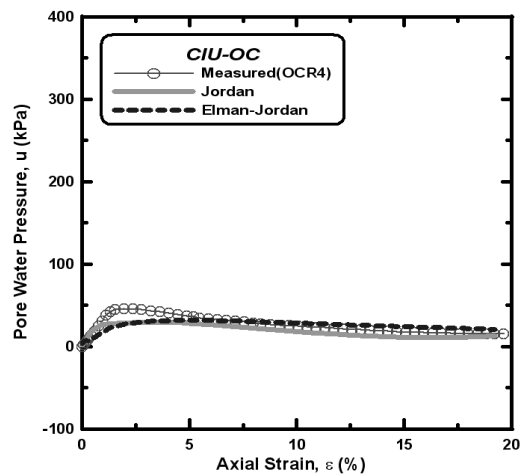


(b) 과압밀시료

그림 13. 신경망 모델의 축차응력-변형률 예측결과



(a) 정규압밀시료



(b) 과압밀시료

그림 14. 신경망 모델의 간극수압-변형률 예측결과

나타내었으나 이후 변형률 구간에선 실제의 거동과 잘 일치하였다. 변형률 5%이전까지의 불일치에 대한 원인으로서는 과압밀시료는 부의 간극수압이 발생함에 따라 비선형적인 거동을 나타내고 또한 간극수압이 압밀응력에 따라 비례적으로 증가하지 않는 형태를 나타내어 신경망 데이터 상에서 어떠한 규칙성을 발견할 수 없기 때문으로 생각된다.

5.5 응력경로

그림 15는 신경망 모델에 의한 응력경로의 예측을 나타낸 것이다. 그림 15(a)의 정규압밀시료에서 실측치의 상태전이선과 한계상태선보다 다소 과대평가 되는 경향이 나타났으나 비교적 실제의 응력경로와 유사한 경향으로 잘 예측하였는데, 일반적으로 정규압밀상태의 전단시 유효응력경로의 특징은 서로 다른 유효구속응력으로 압밀되었다라든 전단시의 축차응력을 최종압밀응력으로 정규화시키면 하나의 곡선군으로 표현할 수 있으며 이러한 정규화 특성으로 인해 정규압밀시료의 거동특성이 인공신경망으로 잘 표현된 것으로 생각된다. 그림 15(b)의 과압밀시료의 예측한 결과 초기 탄성구간이 실제의 거동과 상이하게 나타났으나 전반적으로 상태전이선과 한계상태선의 기울기는 거의 일치하였다.

6. 결론

본 연구는 저소성 실트의 비배수 전단거동 특성을 연구하기 위하여 낙동강 중류지역에서 채취한 실트를 실내에서 재성형하여 등방정규압밀과 등방과압밀상태로 비배수

전단시험을 수행하였다. 시험결과인 축차응력-변형률, 간극수압-변형률 그리고 유효응력경로를 통하여 저소성 실트의 전단거동 특성을 분석하였으며, 또한 이를 바탕으로 비선형 응력거동 모델인 Modified Cam-Clay 모델과 인공신경망의 대표적인 형태인 Jordan 모델과 E-J 모델을 적용하여 저소성 실트의 거동예측에 대한 적합성을 평가하여 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 저소성 실트의 축차응력은 정규압밀시료와 과압밀시료 모두에서 항복응력에 도달한 후 점성토와 다르게 사질토의 경향인 경화거동이 나타났다. 간극수압은 정규압밀시료에서는 유효압밀응력에 관계없이 최대값을 나타낸 후 사질토의 거동과 유사하게 다소 감소하며 한계상태에 도달하였으나, 과압밀시료의 간극수압은 OCR=8 이상에서 부의 간극수압이 발생하여 과압밀점토의 간극수압 거동과 다소 유사하게 나타났다.
- (2) 저소성 실트의 응력경로상에서는 유효압밀응력이나 과압밀비(OCR) 등에 관계없이 한계상태선에 도달한 후 한계상태선을 따라 파괴되었으며, 또한 응력경로상에 상태전이선이 나타났는데 이는 점성토와 달리 사질토에서 나타나는 거동특성으로 저소성 실트에서도 존재하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 일반적으로 점성토의 거동 예측에 많이 사용되는 MCC 모델을 이용한 예측결과에서는 저소성 실트의 경화현상과 최대간극수압이후의 나타나는 간극수압의 감소현상을 예측하지 못하였으며, 또한 응력경로상의 상태전이선 부근에서 시험결과와 많은 오차가 확인되었다.
- (4) 동적 인공신경망인 Jordan과 E-J 모델을 적용하여 정규압밀 및 과압밀 상태 저소성 실트의 전단거동 예측

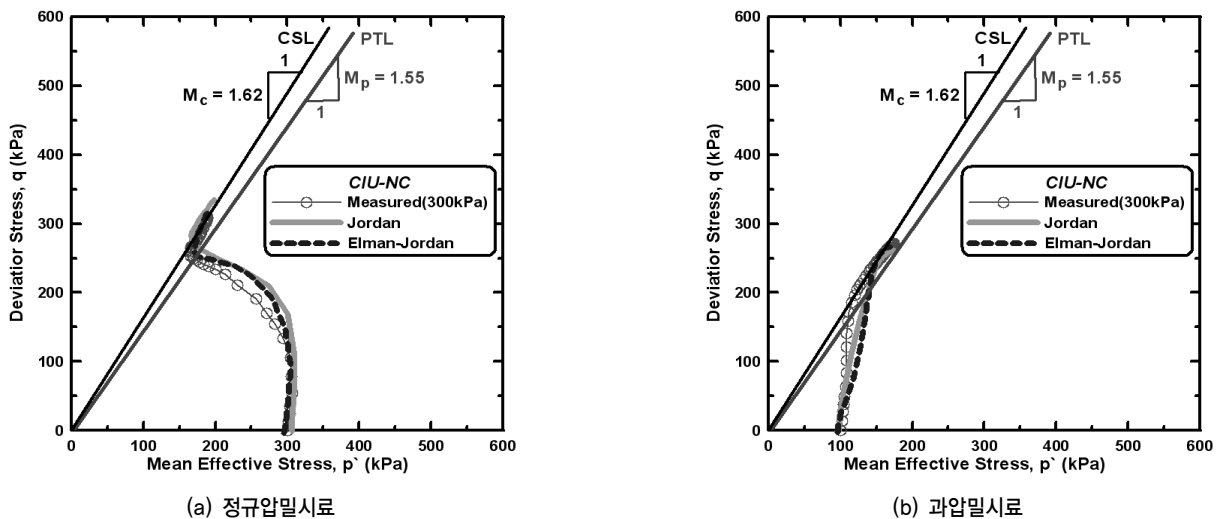


그림 15. 신경망 모델의 응력경로 예측결과

결과 두 모델 모두 전반적으로 저소성 실트의 비배수 전단거동을 비교적 잘 예측하였다. 그러나 과압밀시료의 간극수압 예측시 정규압밀시료에 비하여 다소 부정확한 것으로 나타났는데, 이는 과압밀비에 따른 거동 특성이 비선형적이고 어떤 규칙성이 없이 상이함에 따른 것으로 유추된다.

참 고 문 헌

1. 김영수, 톨킨스웨, 김대만 (2007), 재성형된 낙동강 모래질 실트의 전단거동 특성, *대한토목학회논문집*, 제23권, 제3호 pp. 41~50.
2. 정상섭 (1993a), 체적변형 경향에 따른 실트의 거동, *대한토목학회논문집*, 제13권, 제5호, pp. 255~260.
3. 정상섭 (1993b), 사질토 및 점성토와 비교한 순수 실트의 응력-변형률 거동, *한국지반공학회지*, 제9권, 제4호, pp. 27~35.
4. Atkinson, J. H. and Bransby, P. L. (1978), *The mechanics of soils*. McGraw-Hill, London, pp. 210~233.
5. Borgesson, L. (1982), Shear strength of inorganic silty soils, *Interdisciplinary Conference on Mechanisms of deformation and Fracture*, Lulea, Sweden, pp. 567~572.
6. Fleming, L. N., and Duncan, J. M. (1990), Stress-Deformation characteristics of Alaskan silt, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 3, pp. 377~393.
7. Garson, G. D. (1991), *Interpreting neural-network connection weight*, *AI Expert*, Vol. 6, No. 7, pp. 47~51.
8. Konrad, J. M. (1985), Undrained cyclic behavior of Beaufort Sea silt, *Proc. of the Conf. Arctic Offshore*, ASCE, San Francisco, CA, pp. 830~837.
9. Ladd, C. C., Weaver, J. S, Germaine, J. T., and Sauls, D. P. (1985), Strength-deformation properties of Arctic Silt, *ASCE Specialty Conference*, ARCTIC '85, San Francisco, Calif., pp. 820~829.
10. Lambe, T. W., and Whitman, R. V. (1969), *Soil mechanics. SI version*, MIT/Wiley & Sons, New York, N. Y., pp. 423~494.
11. Penman, A. D. M. (1985), Shear Characteristics of a Saturated Silt, Measured in Triaxial Compression, *Geotechnique*, Vol. 3, No. 4, pp. 312~328.
12. Roscoe, K. H., and Burland, J. B. (1968), *On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay*, Cambridge Univ. press, Cambridge, England, pp. 535~609.
13. Schultze, E. and Horn, A. (1965), The shear strength of silt, *Proceedings, 6th International Conference on soil Mechanics and Foundation Eng.* Vol. 1, pp. 350~353.
14. Wang, J. L. and Vivatrat, V. (1982), Geotechnical properties of Alaskan OCS marine silts, *proc. 14th Annual Offshore Tech. Conf.*, Houston, Texas, pp. 415~420.

(접수일: 2008. 8. 12 심사일: 2008. 8. 21 심사완료일: 2008. 9. 22)