

Aging 효과에 따른 낙동강 모래의 비배수 반복전단거동 특성

Characteristics of Undrained Cyclic Shear Behavior for the Nak-dong River Sand Due to the Aging Effect

김 대 만¹ Kim, Dae-Man

김 영 수² Kim, Young-Su

정 성 관³ Jung, Sung-Gwan

서 인 식⁴ Seo, In-Shik

Abstract

It was known that the aging effect of sands is insignificant in comparison with clays, and hence the study on this effect had seldom been performed prior to the early 1980s. However, field tests for this effect have been actively carried out since it was investigated that penetration resistance of reformed sands increased with the lapse of time. Recently, the aging effect of sands has also been examined in laboratory testings. In this study, undrained static triaxial tests were performed to evaluate the effect on the Nak-dong River sands, with different relative densities (D_r), consolidation stress ratios (K_c), and consolidation times. As a result of the tests, it was proved that the undrained cyclic shear strength (R_f) increased with the aged time on the sands. The in situ range of R_f on the sands, which is applicable to the magnitude of earthquake in the Nak-dong River area, was proposed by using the test results.

요 지

모래의 aging 현상은 점성토에 비하여 무시할 정도로 매우 작아서 1980년대 초까지는 거의 연구되지 않았다. 그러나 퇴적이나 교란 후 시간경과에 따라 관입저항치의 증가가 관찰되면서 현장시험을 중심으로 모래의 aging 효과에 대하여 활발한 조사가 이루어졌고, 최근에는 현장시험뿐만 아니라 실내시험에서도 여러 연구자들에 의해 모래의 aging 효과가 규명되어지고 있다. 본 연구에서는 모래의 비배수 반복전단거동에 대한 aging 효과를 살펴보기 위해 낙동강 모래를 이용하여 상대밀도(D_r), 압밀응력비(K_c) 그리고 압밀시간을 달리하여 비배수 반복삼축압축시험을 실시하였다. 시험결과, 비배수 반복전단강도(R_f)는 압밀시간에 따라 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 본 시험결과에서 나타난 aging에 따른 R_f 증가율을 이용하여 낙동강 모래지반의 지진규모별 비배수 반복전단강도의 현장적용 범위를 제안하였다.

Keywords : Aging effect, Consolidation stress ratio, Consolidation time, The Nak-dong River sand, Undrained cyclic shear strength

1. 서 론

지구상의 모든 물체는 대부분 시간에 따라 원래의 고유한 특성이 변화되며 흠도 마찬가지로 시간이 지

남에 따라 여러 가지 특성들이 변화된다. 시간경과에 따라 지반내의 수직·수평응력이 변화하고, 지하수위가 변동하여 흠은 수분흡수에 의해 팽창하거나 건조되고, 온도변화에 따라 동결되거나 용해되며 또한

1 정회원, 경북대학교 토목공학과 박사 (Member, Ph.D. Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ., ksmans11@hanmail.net)

2 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.)

3 정회원, 경북대학교 조경학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Landscape Architecture, Kyungpook National Univ.)

4 정회원, 경동정보대학 토목과 교수 (Member, Prof., Dept of Civil Engrg., Kyungdong College of Techno-information)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다. 단, 건전한 토의 문화 정착을 위하여 학회에서 내용을 조정할 수 있음을 알려드립니다.

지반속의 유기물질의 부패, 화학적 풍화, 침전, 용탈(leaching), 지진, 지각변동 등에 의하여 변화가 발생된다. 이와 같이 비교적 짧은 시간(짧게는 며칠에서 길게는 100년 정도의 기간)에 따라 흙의 공학적 특성이 변화되는 것을 공학적 aging 효과라 하며, 본 논문에서는 간단히 aging 효과라 한다.

이러한 흙의 특성에 대한 aging 효과는 여러 학자들에 의해 연구되었는데, 특히 점성토에서는 과잉간극수압이 소산된 이후의 계속된 압밀을 2차 압밀이라 하며, 이와 같은 aging 효과는 전체 압밀에 있어서 중요한 요소로서 심각한 변형이나 흙의 특성변화 때문에 많은 연구가 수행된 반면, 모래에서는 일정한 응력하에서 간극수압이 빠르게 소산되어 1차 압밀 이후의 변형은 무시할 정도로 매우 작아서 시간경과에 따른 2차압밀의 영향은 1980대 초까지 거의 연구되지 않았다. 그러나 모래지반에서 퇴적이나 교란 후 시간경과에 따라 관입 저항치의 증가가 현장시험에서 관찰되면서 모래의 aging 효과가 점점 여러 연구자들에 의하여 활발하게 연구되기 시작했다.

지금까지 실내 및 현장시험을 통하여 연구된 aging 효과에 의한 모래의 공학적 특성 향상으로는 선형압밀하중의 증가, 액상화 저항강도를 포함한 전단강도의 증가, 전단 및 탄성변형계수의 증가, 간극수압의 지속적인 소산, 그리고 항타말뚝의 지지력 증대 등을 들 수 있다. 이와 같은 aging에 의한 모래 개량효과의 원인을 규명하여 정확한 예측이 가능하다면 모래지반에 시공되는 구조물의 설계와 시공시 보다 경제적이고 합리적인 시공을 할 수 있을 것으로 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 낙동강 중류의 모래지반에 대하여 느슨하고 중간상태의 시료를 성형한 후 다양한 압밀응력비에서 aging 효과를 관찰하기 위해 10, 100, 1000, 10000분 동안 압밀된 시료를 비배수 반복삼축시험을 실시하여 일정한 응력상태하에서의 aging 효과로 인한 비배수 반복전단거동의 특성을 연구하였다.

2. 이론적 배경

2.1 모래의 aging 효과

Mitchell과 Solymar(1984)는 모래 지반에 다짐을 실시한 후 시간의존적인 관입저항의 증가를 관찰하였으며, 관찰된 현상에 대한 가능한 메커니즘으로 입자표

면의 실리카 구성에 기인하는 입자내부의 결속력 때문이라고 제안하였으며, 또한 Mitchell(1986)은 이러한 시간에 경과에 따른 흙의 aging 효과에 대하여 지반 공학적 관점에서 긍정적인 면과 부정적인 면을 다루었다.

Charlie(1992)은 폭파에 의한 지반개량 후 시간경과에 따른 큰 관입 저항의 증가를 언급하였으며, Schmertmann(1991)은 동다짐 후 시간경과에 따른 관입저항치의 증가를 통하여 모래의 aging 현상을 규명하였는데, 그 원인으로 분산된 입자의 방향성이 시간이 지남에 따라 모이게 되어 마찰력의 증가를 야기하면서 결과적으로 변형계수(modulus)와 강도의 증가를 가져온다고 제안하였다. 또한 그는 여러 실내 및 현장의 aging 효과에 대한 충분한 시험결과를 토대로 하여 시간경과에 따라 흙 입자의 분산적인 이동과 내적 응력전이에 의해 흙의 공학적 특성이 약 50~100%정도 향상된다고 하였다.

Seed(1979)는 모래의 액상화에 대한 실내 및 현장시험을 실시한 결과 aging 시간에 따라 반복전단강도의 증가가 크게 발생하는 것을 확인하고, 실내시험에 의해 결정된 반복전단강도를 현장에 적용시 대략적으로 50~100%정도 증가시켜 사용할 것을 제안하였다.

또한 Mersi 등(1990)은 모래에서 aging에 의하여 증가된 마찰저항은 입자의 미세맞물림(micro-interlocking)과 입자 입자거칠기의 미세맞물림을 유발시킨다고 하였다. 그리고 Whitman 등(1964)은 모래의 aging 영향을 연구하기 위해 건조한 석영 모래에 대하여 압밀시험을 수행하였고, Anderson과 Stokoe(1978) 또한 공진주시험장치를 이용하여 정수응력조건하에서의 공기 건조된 Ottawa sand의 전단변형계수에 대한 aging 효과를 연구한 결과 10,000분 동안의 대수눈금의 시간에 대한 전단변형계수의 선형적인 증가가 관측되었다. Shozen(2001)은 Fraser River sand의 응력-변형 반응에 대한 aging 영향에 대하여 연구하였는데, 그는 전단변형단계의 0.03%($G_{s0.03}$)와 0.15%($G_{s0.15}$)에 상응하는 전단변형계수가 1000분까지의 aging 기간에 따라 증가함을 밝혔으며, 더욱이 전단변형계수가 aging 시간의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가한다는 것을 보였다.

최근 국내에서 김영수와 김대만(2004)은 낙동강 모래를 이용한 비배수 정적삼축시험을 통하여 0.05% 미소변형률 구간에서의 탄성계수가 압밀시간 경과에 따라 증가하는 aging 효과를 관찰하는 등 현재까지 많은 연구

가 수행되고 있다.

2.2 모래의 반복전단특성

Lee와 Seed(1967) 등은 반복삼축시험을 통하여 수평한 면 위에 초기정적전단응력(q_{st})이 존재하는 이방압밀비($K_c = \sigma_{1c}' / \sigma_{3c}'$)가 1보다 큰 이방압밀시료를 시험실에서 재현하였다. 이 연구에서 임의의 수직응력을 가지는 평면위의 초기정적전단응력이 증가할수록 비배수 반복강도는 증가하는 것으로 나타났다.

Yoshimi와 Ohoka(1975) 등은 링 비틀림 전단장치를 이용하여 초기정적전단응력이 작용하는 포화된 모래의 반복거동을 연구하였고, Yoshimi와 Tokimatsu(1978)는 작은 스케일의 지반 구조물 모델을 이용한 진동대 시험에서 액상화 저항에 대한 전단응력의 영향을 연구하였다. Castro와 Pouos(1977)는 액상화와 반복변동(cyclic mobility)에 의한 파괴를 구분하여 초기정적전단응력이 증가함에 따라 액상화 저항은 감소하지만 반복변동은 증가한다고 하였다. 또한, 단순반복전단시험을 이용한 평면변형률상태에서의 액상화 저항에 대한 초기정적전단응력의 영향이 Vaid와 Finn(1979)에 의해 연구되었고, Mohamad와 Dobry(1986)는 반복하중에 의한 잔류변형에 기인되는 파괴는 액상화나 반복변동이 발생하지 않더라도 초기정적전단응력으로 인해 발생할 수 있음을 제시하였다.

Ishihara(1985), Vaid와 Thomas(1995), 그리고 Kramer(1996)는 비배수 반복전단시험에서 반복응력이 모래에 가해짐에 따라 시료는 압축 혹은 팽창의 거동을 보인다

고 했다. 그림 1은 이러한 반복응력에 의한 팽창과 압축 거동을 나타낸 것으로 초기에 과잉간극수압의 급속한 증가로 응력경로는 좌측으로 이동하고 그 후 연화거동의 시작점인 한계응력비(critical stress ratio, CSR)에 이른다. 한계응력비는 Vaid와 Chern(1985)에 의해 처음으로 정의되었는데, 응력경로상에서 원점을 통과하는 직선으로 표현되며, 이 선을 한계응력비선(CSR line)이라한다. CSR선을 지나 연화거동현상이 나타난 후 팽창거동을 시작하면서 응력경로의 전환이 나타나는데, 이와 같이 팽창과 압축거동의 경계점을 상전이(phase transformation, PT)점이라하고 응력경로상에서 원점을 통과하는 하나의 직선으로 나타나며, 이 선을 상전이선(PTL)이라한다. 이 전이점을 지나면 시료는 곧 팽창거동을 하며 파괴선(failure line, FL)을 따라 거슬러 올라가게 된다. 그림 1에서 PTL의 아랫부분인 0에서 1로 이동시 시료는 압축거동을 하게 되고 응력경로가 PTL의 윗부분인 2에서 3으로 진행될 때 정(+의 dilatancy) 현상에 의한 팽창거동을 나타내며, 반복응력이 제하(unloading)되는 시점인 3에서 4로 이동시 다시 압축거동을 나타내게 된다.

Hyodo 등(1991)은 반복강도 및 잔류변형을 정량화하고 파괴의 형태를 분류하기 위해 다양한 상대밀도, 초기정적전단응력, 반복응력 조건에서 포화 모래에 대한 일련의 비배수 동적 반복삼축시험을 실시하였고, 그 후에도 Rahhal 등(2000)의 여러 학자에 의해 다양한 시료와 시험조건에서 많은 연구가 수행되어지고 있다.

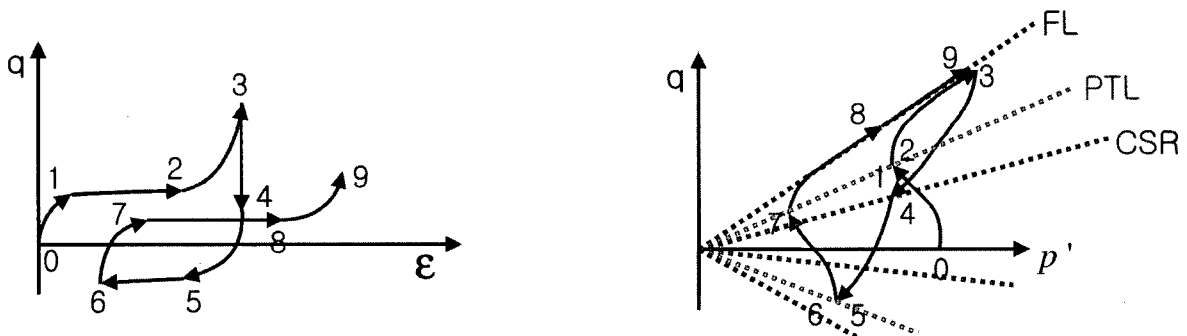


그림 1. 반복응력에 의한 FL, PTL과 CSR 선

표 1. 낙동강 모래의 물성치

G_s	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	Roundness	USCS
2.676	0.360	0.235	1.700	1.230	1.137	0.765	Subangular	SP

3. 시험 방법

3.1 시료 특성

본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 이용하여 #20체 통과 #200체 잔류모래를 흐르는 물에 씻어 clean sand로 만들어 사용하였다. 시료의 물성치는 표 1과 같고, 입도곡선 및 SEM(scanning electron micrograph) 사진은 그림 2와 그림 3에 각각 나타내었다. USCS에 의한 분류는 SP로 나타났고, SEM 사진에 의한 조도(roundness)는 subangular에서 subrounded이며, 모래입자와 간극사이에 미세한 크기의 실트입자가 분포되어 있음을 알 수 있다. 낙동강 모래의 주성분은 SiO_2 가 72.522%로 가장 많고, Al_2O_3 가 14.551%, K_2O 5.224% 그리고 Na_2O 3.684%, Fe_2O_3 2.219% 등의 순으로 함유되어 있다.

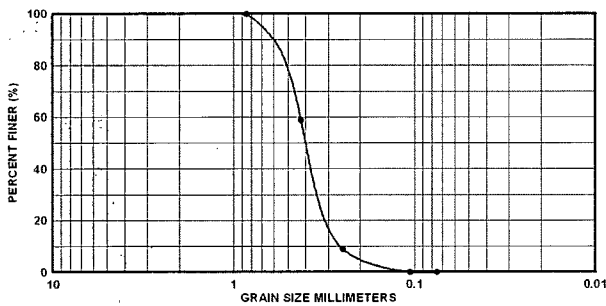


그림 2. 낙동강 모래의 입도곡선

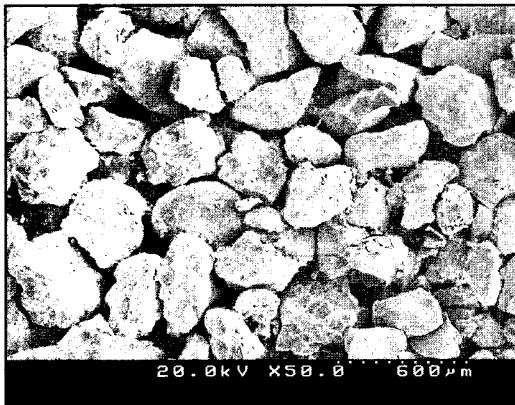


그림 3. SEM 사진

3.2 시험 방법

본 연구에서 사용된 삼축시험기는 Clarence K. Chan 형식의 자동화 삼축시험기로 정적 및 반복삼축시험이 모두 가능한 형식이다. 시료의 크기는 직경 70mm, 높이 140mm이고 느슨한 모래의 경우는 초기 상대밀도 30%, 중간 상태인 경우는 50%가 되도록 하여 건조퇴적법(dry deposition method)으로 성형하였다. 시료성형 후 포화 단계에서는 배압(σ_b)을 300kPa까지 점차적으로 서서히 가하면서 최종적으로 B value가 0.95 이상이 되도록 하였다.

시료의 포화가 완료된 후 압밀단계에서는 등방 및 이방압밀조건으로 나누어 압밀을 실시하였다. 등방압밀조건에서는 같은 크기의 유효수직응력(σ_{1c}')과 유효수평응력(σ_{3c}')을 100kPa 가하여 압밀하였으며, 이방압밀조건에서는 표 2와 같이 σ_{3c}' 을 점차적으로 86kPa과 75kPa로 증가시키는 동안 초기정적전단응력, $q_{st}(=\sigma_{1c}' - \sigma_{3c}')$ 값도 점차적으로 각각 43kPa, 75kPa만큼 증가시켜 이방압밀비(K_c)가 1.5, 2.0이 되도록 하였다. 이방압밀시 응력 증가는 교란방지를 위해 8단계로 나누었으며, 각 단계마다 모래시료내의 과잉간극수압 소산이 충분히 이루어지도록 10분씩 압밀을 실시하였다.

모든 시료에 대하여 평균유효주응력, $p' = (\sigma_{1c}' + 2\sigma_{3c}')/3$ 을 100kPa로 일정하게 한 후 aging 효과를 관찰하기 위하여 압밀시간을 달리하였으며, 압밀 후의 상대밀도는 K_c 값에 상관없이 느슨한 시료의 경우는 34%, 중간 조밀한 시료는 56% 정도로 나타났다.

압밀이 완료된 후 응력제어의 비배수 반복삼축시험을 실시하였으며, 가하여진 반복응력(q_{cy})은 0.1Hz 주기의 정현(sine)파를 이용하였다. 각각의 시료는 반복응력(q_{cy})과 초기정적전단응력(q_{st})의 크기에 따라 응력반전(reversal) 조건과 응력비반전(non-reversal) 조건, 그리고 그 중간인 응력준반전(intermediate) 조건의 다양한 응력 조건으로 시험하였다. 본 논문에서 실시된 반복전단시험 조건은 표 3과 같으며, 표 4와 표 5는 반복삼축시험에 사용된 느슨한 상태와 중간상태 시료의 압밀 후 변화

표 2. 이방압밀 조건

K_c	σ_{3c} (kPa)	σ_{1c} (kPa)	σ_b (kPa)	σ_{3c}' (kPa)	σ_{1c}' (kPa)	q_{st} (kPa)
1.0	400	400	300	100	100	0
1.5	386	429	300	86	129	43
2.0	375	450	300	75	150	75

표 3. 반복전단시험 조건

Sample state	K_c	q_{st} (kPa)	q_{cy} (kPa)	Consolidation time (min)	q_{cy}/q_{st}	Stress reversal
Loose sand ($D_r=34\%$)	1.0	0	35	10, 100, 1000	>1	Reversal
			40	10, 100, 1000	>1	Reversal
			45	10, 100, 1000, 10000	>1	Reversal
	1.5	43	45	10, 100, 1000, 10000	1.05	Intermediate
			55	10, 100, 1000	1.30	Reversal
			60	10, 100, 1000	1.40	Reversal
	2.0	75	45	10, 100, 1000, 10000	0.60	Non-reversal
			60	10, 100, 1000	0.86	Non-reversal
			70	10, 100, 1000	0.93	Intermediate
Medium sand ($D_r=56\%$)	1.0	0	35	10, 100, 1000	>1	Reversal
			40	10, 100, 1000	>1	Reversal
			45	10, 100, 1000, 10000	>1	Reversal
	1.5	43	35	10, 100, 1000	0.78	Non-reversal
			45	10, 100, 1000, 10000	1.05	Intermediate
			55	10, 100, 1000	1.30	Reversal
	2.0	75	45	10, 100, 1000, 10000	0.60	Non-reversal
			75	10, 100, 1000	1.00	Intermediate
			85	10, 100, 1000	1.13	Reversal

표 4. 느슨한 시료의 압밀 후 상태

D_r (%) (before consolidation)	K_c	q_{cy} (kPa)	Consolidation time (min)	After consolidation			
				Dry unit weight (g/cm^3)	Void ratio, e	D_r (%)	
30	1.0	35	10	1.340	0.997	34.370	
			100	1.339	0.999	33.904	
			1000	1.341	0.996	34.516	
		40	10	1.340	0.997	34.252	
			100	1.341	0.995	34.727	
			1000	1.340	0.997	34.324	
		45	10	1.339	0.998	34.016	
			100	1.340	0.998	34.128	
			1000	1.340	0.996	34.466	
		1.5	45	10	1.340	0.996	34.471
				100	1.339	0.999	33.883
				1000	1.339	0.999	33.933
	10000			1.340	0.997	34.419	
	55		10	1.339	0.998	34.028	
			100	1.339	0.998	34.055	
			1000	1.339	0.999	33.888	
	60		10	1.340	0.997	34.324	
			100	1.340	0.997	34.237	
			1000	1.339	0.998	34.027	
	2.0		45	10	1.340	0.998	34.145
				100	1.339	0.999	33.906
		1000		1.340	0.997	34.237	
		10000		1.341	0.996	34.493	
		60	10	1.339	0.999	33.808	
100			1.340	0.997	34.201		
1000			1.341	0.996	34.613		
70		10	1.340	0.996	34.475		
		1000	1.339	0.998	34.017		
			1000	1.340	0.997	34.392	

표 5. 중간 시료의 압밀 후 상태

D_r (%) (before consolidation)	K_c	q_{cy} (kPa)	Consolidation time (min)	After consolidation			
				Dry unit weight (g/cm ³)	Void ratio, e	D_r (%)	
50	1.0	35	10	1.404	0.906	56.400	
			100	1.403	0.907	56.095	
			1000	1.404	0.906	56.387	
		40	10	1.403	0.907	56.170	
			100	1.403	0.907	56.243	
			1000	1.405	0.905	56.681	
		45	10	1.403	0.908	56.012	
			100	1.402	0.908	55.906	
			1000	1.403	0.907	56.271	
			10000	1.404	0.906	56.487	
		1.5	35	10	1.403	0.908	56.075
				100	1.402	0.909	55.729
	1000			1.403	0.908	56.010	
	45		10	1.403	0.907	56.282	
			100	1.404	0.906	56.504	
			1000	1.404	0.906	56.487	
			10000	1.406	0.904	57.018	
	55		10	1.403	0.907	56.269	
			100	1.402	0.908	55.891	
			1000	1.403	0.908	56.075	
	2.0		45	10	1.402	0.908	55.907
				100	1.404	0.906	56.401
		1000		1.404	0.907	56.311	
		10000		1.403	0.908	56.076	
75		10	1.403	0.907	56.225		
		100	1.403	0.908	56.003		
		1000	1.402	0.908	55.881		
85		10	1.404	0.907	56.311		
		100	1.404	0.906	56.504		
		1000	1.403	0.907	56.191		

된 건조단위중량, 간극비 그리고 상대밀도를 나타낸 것이다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 응력경로

Hyodo 등(1991)은 초기정적전단응력(q_{st})과 반복응력(q_{cy})의 복합적인 조건에서 $q_{cy}/q_{st} > 1$ 일 때 응력반전이 생기는 조건을 reversal 조건, $q_{cy}/q_{st} < 1$ 일 때는 응력반전이 없으므로 non-reversal 조건이라고 하며, $q_{cy}/q_{st} = 0.9 \sim 1.1$ 사이에 있을 때는 intermediate 조건이라고 구분하였다.

그림 4는 느슨한 시료에 대하여 각각의 압밀이방비 ($K_c=1.0, 1.5, 2.0$)에서 동일한 반복응력(q_{cy})인 45kPa을 가 하였을 때를 압밀시간경과에 따라 나타낸 것이다. 그림 4에서 q_{st} 의 크기에 따라 응력조건이 각각 다른 reversal, intermediate, non-reversal 조건을 보였는데, (a)의 $K_c=1.0$ reversal 조건에서는 몇 번의 반복응력으로 인하여 인장 축 파괴선(FL)을 따라 올라가면서 유동액상화에 의한 파괴가 발생되었고, (b)의 $K_c=1.5$ intermediate 조건에서는 상전이선(PTL) 이후로 지속적인 간극수압의 감소에 의한 p' 의 감소로 cyclic mobility가 발생되었으며, (c)의 $K_c=2.0$ non-reversal 조건에서는 PTL을 지난 후 간극수압의 변화가 거의 없고 FL상에서 변형만 조금씩 일어날

뿐 초기액상화는 발생하지 않았다. 이와 같이 동일한 반복응력에서 q_{st} 의 크기에 따라 완전히 다른 파괴의 양상을 보이며, Lee와 Seed(1967)의 시험결과와 같이 q_{st} 가 증가할수록 비배수 반복강도가 증가하여 q_{st} 는 모래의 반복거동에서 가장 중요한 인자임을 알 수 있었다.

본 논문에서 FL과 PTL의 결정은 동일한 조건의 시료에 대하여 정적전단시험을 실시하여 구하였다. Vaid와 Chern(1985), Alarcon-Guzman 등(1988)은 삼축압축시험과 비틀림전단시험을 이용하여 모래의 비배수 정적거동과 반복거동의 상호관계를 연구하였는데, Vaid와 Chern(1985)는 정적거동으로부터의 한계간극비(CSR)

선을 반복거동의 응력경로가 지날 때 유동변형이 발생한다고 하였으며, Alarcon-Guzman 등(1988)은 반복하중조건에서의 연화거동은 초기상태에 대응하는 상태경계에 의해 결정되며 정적응력경로가 비배수전단의 상태경계를 구성한다고 하였다. 이들 시험결과는 시험방법의 차이로 인하여 약간 다른 점이 있지만 유효응력경로는 본질적으로 같다고 하였다. 그림 5는 등방압밀($K_c=1.0$)된 느슨한 모래의 구속압에 따른 정적압축 및 인장시험에 따른 응력경로와 축차응력-변형을 관계를 나타낸 것이며, 이 결과로부터 각 조건에서의 FL과 PTL을 결정하였다. 인장시 FL과 PTL이 원점을 지나지 않고

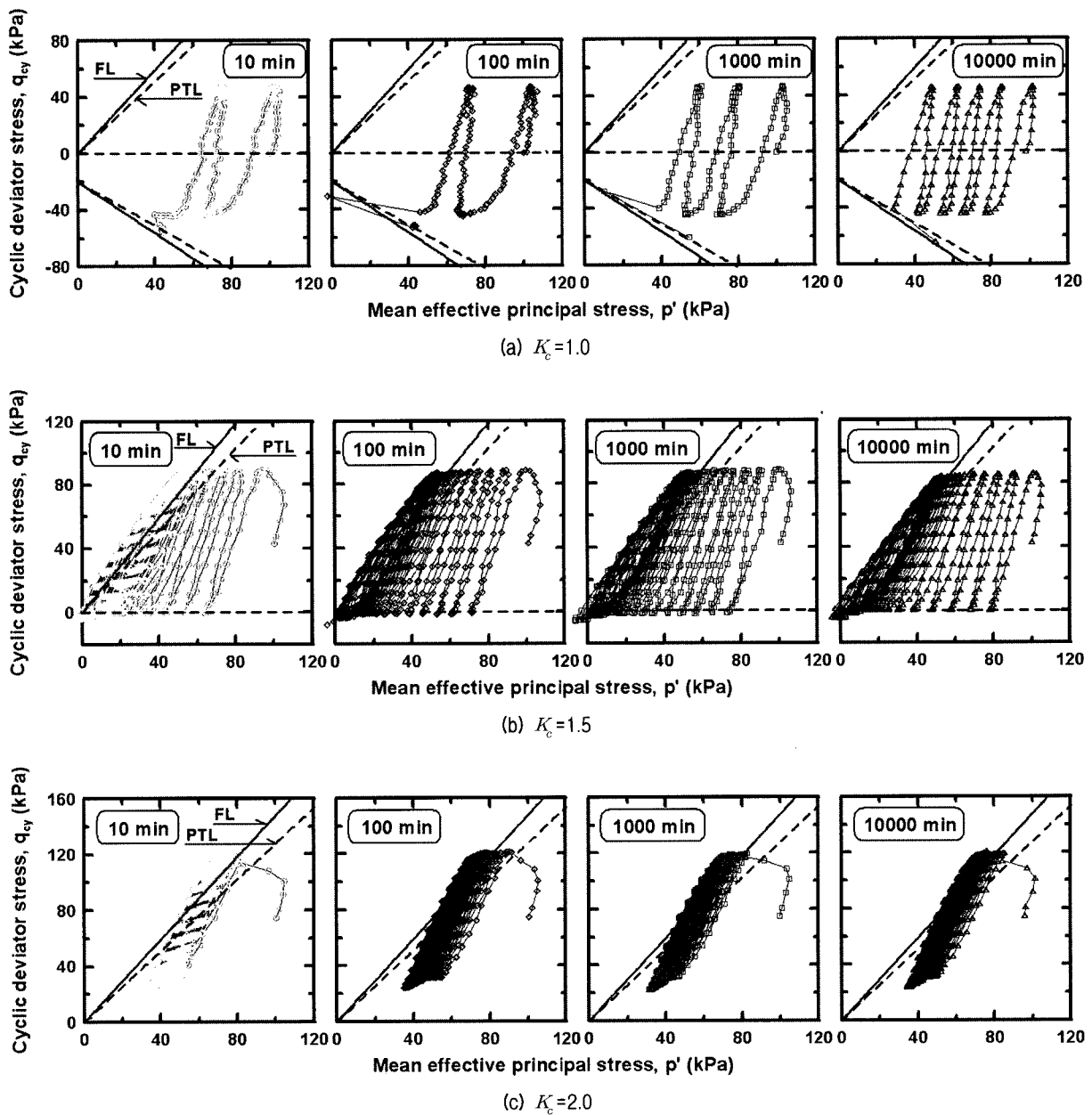
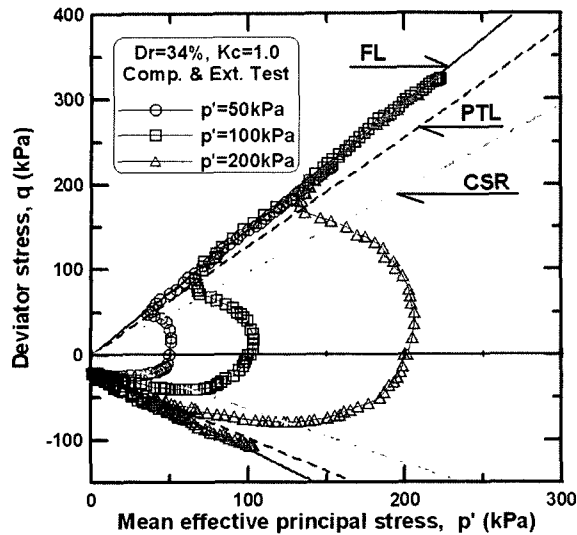
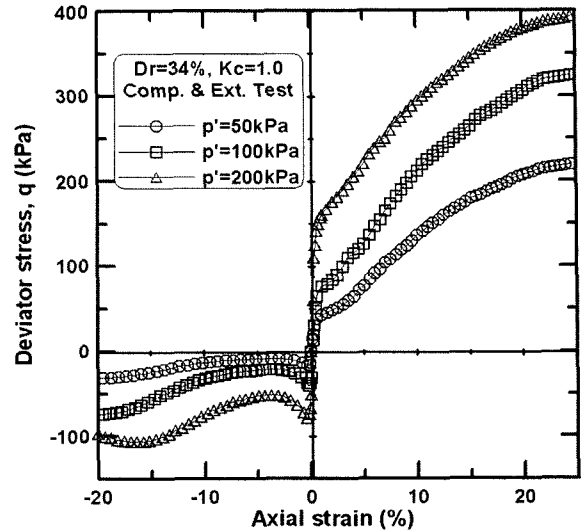


그림 4. 느슨한 시료의 aging에 따른 응력경로($q_{st}=45\text{kPa}$)



(a) 응력경로



(b) 변형률-축차응력

그림 5. 느슨한 시료의 구속압에 따른 정적 압축 및 인장전단시험결과($K_c=1.0$)

(0, -20kPa)의 좌표를 지나는 특징을 보였는데, 이는 그림 5에서 보듯이 유사정상상태변형을 보인 후 낙동강 모래의 subangular한 특징에 의하여 다시 인장력이 증가됨에 기인되는 현상으로 사료된다. 나머지 조건에서의 정적 압축 및 인장시험결과는 지면상 생략하였다.

압밀시간경과에 따른 변화를 살펴보면, 이방압밀시료보다는 reversal 조건의 등방압밀시료에서 압밀시간이 경과함에 따라 반복응력횟수(N)의 증가가 뚜렷하게 나타나 aging 효과를 관찰할 수 있었다. 그에 반하여 intermediate, non-reversal 조건에서는 압밀시간경과에 따른 응력경로상의 차이는 관찰할 수 없었으나, 4.2절에서 다루어질 반복횟수에 따른 축변형률의 변화에서 aging 효과를 보였다. 중간시료에서도 반복횟수(N)가 좀 더 많아지는 것을 제외하고는 느슨한 시료와 유사한 결과를 보였다.

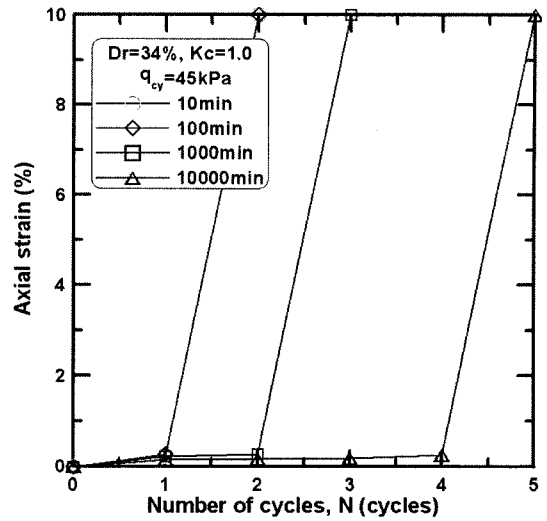
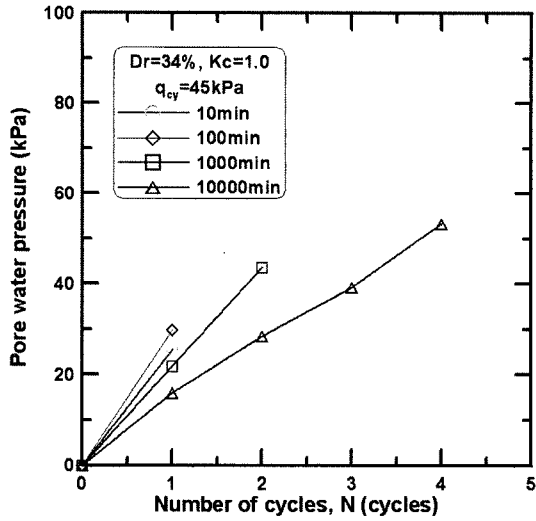
4.2 간극수압 및 축변형률

그림 6은 그림 4에 나타난 응력경로 결과와 같은 조건의 시료에 대하여 반복응력횟수(N)와 간극수압 및 축변형률의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 축변형률은 등방압밀조건에서는 반복응력횟수에 대한 양진폭 변형률(double amplitude strain, DAS)로 구하였으며, 이방압밀 조건에서는 잔류변형률(residual strain, RS)로 구하여 변형률 10%까지 나타냈고, 간극수압은 각 반복응력 주기의 끝에서 측정된 값이다. 그림 6(a)의 등방압밀시료(K_c

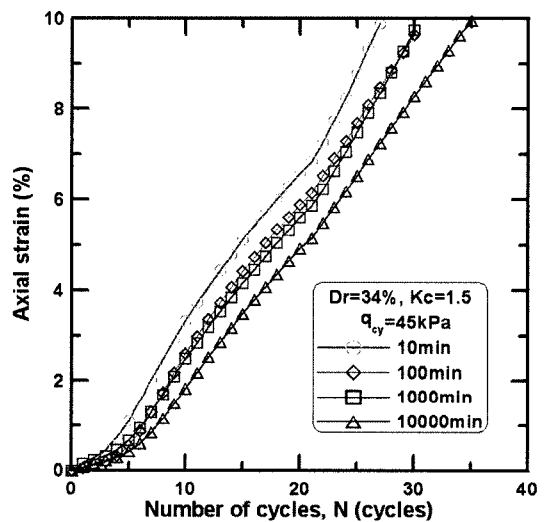
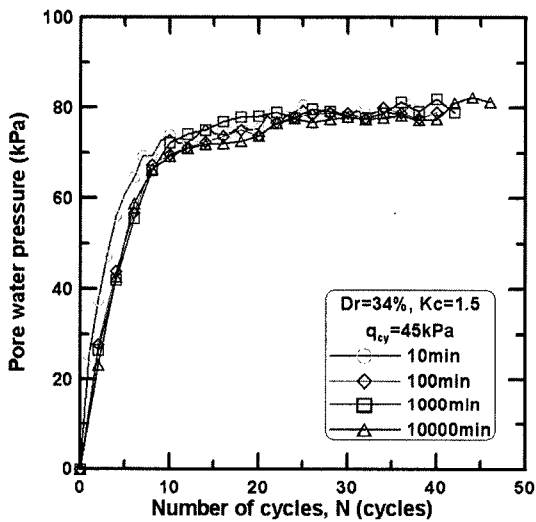
=1.0) 경우 reversal 조건으로 인하여 간극수압은 큰 증가를 보이지 않았으나, 축변형률의 급속한 증가로 액상화 파괴가 발생하였다. 그리고 압밀시간경과에 따른 각 반복응력횟수(N)에서의 축변형률의 변화를 보면 동일한 N에서 압밀시간이 짧을수록 파괴가 빨리 발생하여 10, 100분 압밀시료는 N=2에서, 1000분 압밀시료는 N=3, 그리고 10000분 압밀시료는 N=5에서 유동액상화 파괴가 발생하였다.

그림 6(b)와 (c)의 이방압밀시료에서는 q_{st} 의 증가에 의하여 응력조건이 intermediate, non-reversal 조건으로 전환되었다. $K_c=1.5$ 의 경우 초기에 큰 간극수압이 발생한 이후로는 일정한 경향을 나타내며 축변형률은 서서히 지속적인 증가를 보여 잔류변형에 의한 cyclic mobility 거동을 보였으며, $K_c=2.0$ 에서도 초기에 간극수압이 증가한 이후 거의 간극수압의 변화가 없을 뿐만 아니라 축변형률의 증가도 점차 일정하게 되어 파괴가 일어나지 않았다. q_{st} 의 크기 즉 압밀이방비의 증가에 따라 간극수압은 작게 발생하여 $K_c=2.0$ 에 비하여 $K_c=1.5$ 일 때의 간극수압이 거의 2배 정도 크게 발생하였으며 축변형률도 점차 경화거동의 경향을 보였다.

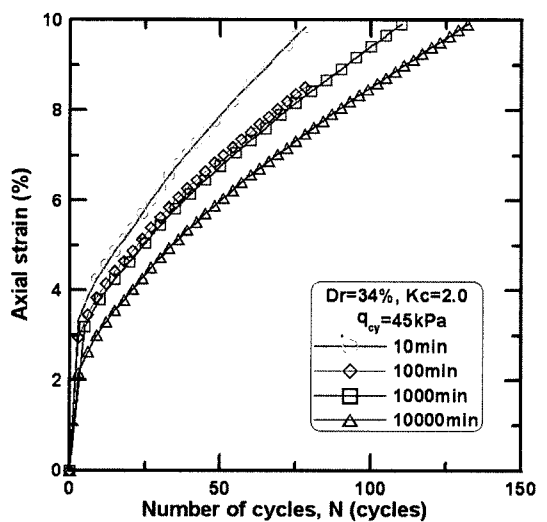
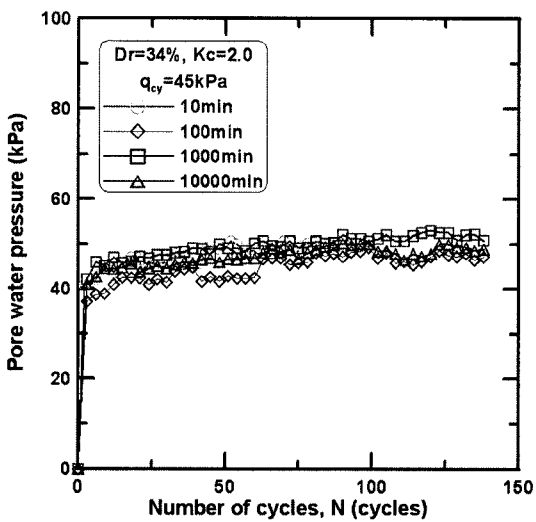
압밀시간경과에 따른 이방압밀시료의 간극수압의 변화는 큰 차이를 나타내지는 않고 모두 유사한 값을 보였으나 전반적으로 압밀시간이 경과함에 의해 간극수압이 작게 발생하는 경향을 보였다. 간극수압에 비하여 축변형률은 압밀시간경과에 따라 큰 차이를 보여 동일한 N에서 압밀시간이 증가할수록 변형률이 순차적으로 작



(a) $K_c=1.0$



(b) $K_c=1.5$



(c) $K_c=2.0$

그림 6. 느슨한 모래의 aging에 따른 간극수압과 축변형률

계 발생함으로써 강성증대의 aging 효과를 확인할 수 있었고, 중간상태 시료에서도 느슨한 시료와 유사한 거동을 보였다.

4.3 비배수 반복전단강도

포화 모래지반의 비배수 반복전단강도는 상대밀도, 초기정적전단응력(q_{st}), 그리고 파괴시점에서의 변형률 정의 즉, 액상화 저항의 정의에 의존하는 것을 많은 학자들의 연구에 의하여 밝혀졌다. 여기서 액상화 저항의 정의는 반복응력에 의한 흙의 파괴시 변형률을 정의하는 것으로 응력반전(reversal)이 있는 경우는 양진폭 변형률(D.A.S) 5%정도로 보며, 대부분 이 시점에서 $p'=0$ 의 초기액상화가 발생한다. 응력반전이 없는 경우는 잔류변형률의 증가로 인하여 파괴에 도달하는데, Mohamad & Dobry(1986) 등은 잔류변형(R.S) 5%를 기준으로 보았으며, Uchida와 Hasegawa(1986) 등은 잔류변형 10%를 파괴기준으로 보는 등 연구자들에 따라 각각 다르게 정의되었다. 본 연구에서는 파괴시 변형률을 응력반전이 있는 등방압밀조건($q_{st}=0$)에서는 양진폭 변형률 5%, 응력반전이 없는 이방압밀조건($q_{st} \neq 0$)에서는 Mohamad & Dobry(1986) 등이 제안한 잔류 변형률 5%를 파괴기준으로 하여 파괴

시의 반복응력횟수(N)를 구하였으며, 그 결과를 표 6에 나타내었다.

표 6에서 모든 경우 압밀시간이 경과함에 따라 파괴시점에서의 반복응력횟수가 전반적으로 증가하는 경향을 보여 aging 효과를 관찰할 수 있었으며, 표 6의 결과를 이용하여 느슨한 상태와 중간상태에서의 압밀시간경과에 따른 반복축차응력비(q_{cy}/p')와 반복응력횟수(N)의 관계를 그림 7, 8에 양대수 그래프로 각각 도시하였다.

Aging 이전의 10분 압밀시료만을 비교분석하면, q_{cy}/p' 와 N의 관계에서 압밀이방비(K_c)와 상대밀도에 비례하여 q_{cy}/p' 의 증가가 크게 나타났고, 압밀시간경과에 따른 결과를 보면 중간상태보다 느슨한 상태에서 압밀시간 경과에 따라 q_{cy}/p' 의 증가가 크게 나타나 상대밀도가 느슨한 상태에서 aging 효과가 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 그리고 압밀이방비에 따른 q_{cy}/p' 의 변화는 일정한 경향을 보이지는 않았으며, 등방압밀시료에 비하여 이방압밀시료에서는 N이 증가할수록 각 압밀시간에서의 q_{cy}/p' 값이 동일하게 수렴되는 경향을 나타냈다.

Seed 등(1983)은 지진자료분석에 의한 지진규모별 등가반복응력횟수를 다음의 표 7과 같이 제안하였다. 그림 7, 8에서 표 7의 각 지진규모에 해당하는 반복응력횟수(N)를 이용하여 낙동강 모래시료의 지진규모에 대한

표 6. 파괴시점에서의 반복응력횟수(N)

Sample state	K_c	q_{cy} (kPa)	Number of cycles, N ($\epsilon=5\%$)				Axial strain
			Aging time (min)				
			10	100	1000	10000	
Loose sand ($Dr=34\%$)	1.0	35	11	14	18	-	D.A.S
		40	3	4	7	-	
		45	2	2	3	5	
	1.5	45	15	17	18	21	R.S
		55	1	3	5	-	
		60	1	1	1	-	
	2.0	45	18	23	25	35	
		60	2	3	10	-	
		70	1	1	3	-	
Medium sand ($Dr=56\%$)	1.0	35	24	35	38	-	D.A.S
		40	6	10	12	-	
		45	4	4	4	7	
	1.5	35	358	362	370	-	R.S
		45	39	41	42	48	
		55	10	13	15	-	
	2.0	45	113	115	136	160	
		75	11	11	14	-	
		85	2	3	5	-	

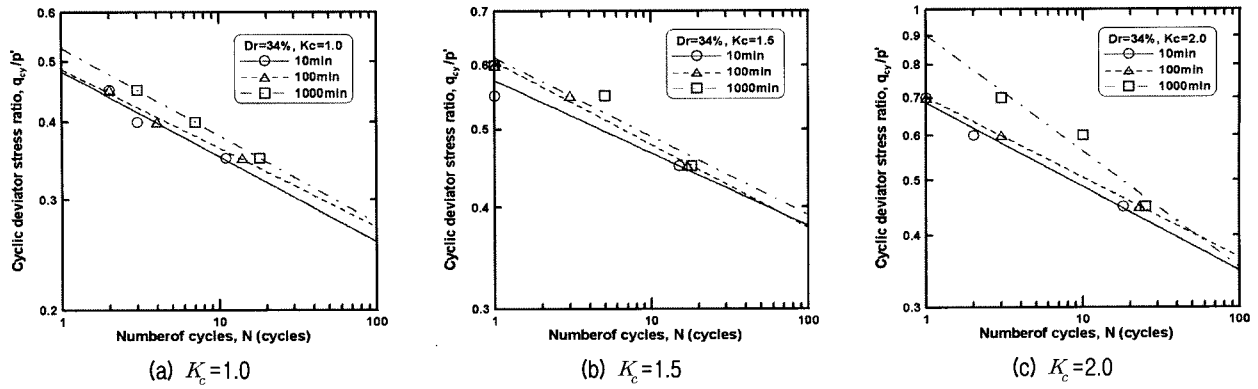


그림 7. Aging에 따른 q_{cy}/p' 와 N 관계곡선(Dr=34%)

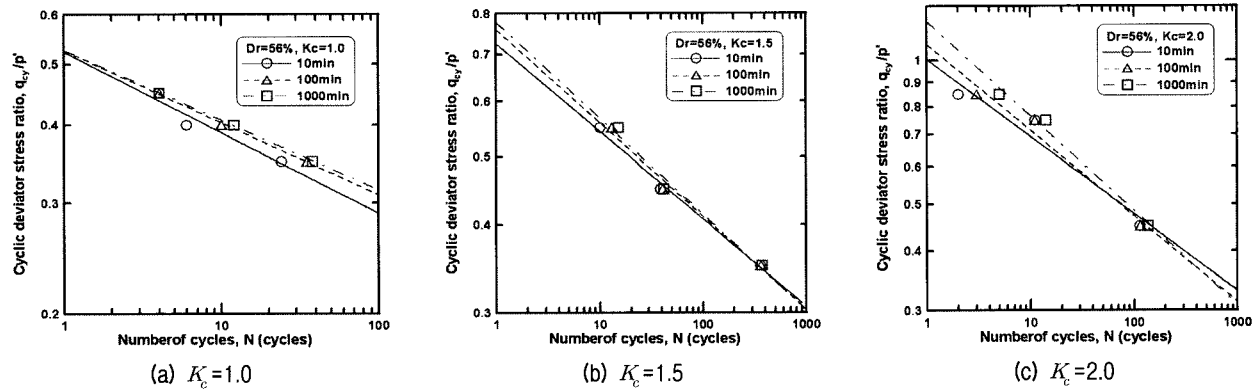


그림 8. Aging에 따른 q_{cy}/p' 와 N 관계곡선(Dr=56%)

표 7. 지진규모별 등가반복응력횟수(Seed 등, 1983)

Magnitude(M)	5.25	6.00	6.75	7.50
Number of cycles(N)	2~3	5~6	10	15

표 8. Aging에 따른 지진규모별 반복전단강도

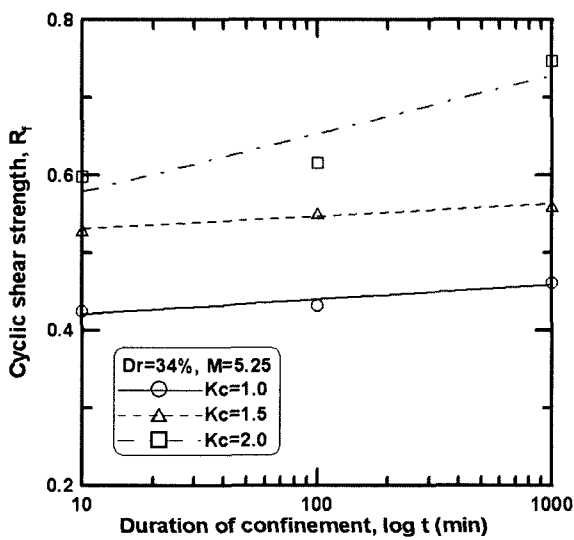
D_r (%)	K_c	Aging time (min)	Cyclic shear strength, $R_f = (q_{cy}/p')_f$			
			Magnitude, M			
			5.25	6.00	6.75	7.50
			Number of cycles, N			
			2.5	5.5	10	15
34	1.0	10	0.4249	0.3815	0.3516	0.3327
		100	0.4324	0.3914	0.3629	0.3448
		1000	0.4618	0.4135	0.3802	0.3592
	1.5	10	0.5289	0.4926	0.4668	0.4500
		100	0.5514	0.5085	0.4782	0.4587
		1000	0.5607	0.5191	0.4897	0.4707
	2.0	10	0.5979	0.5322	0.4873	0.4590
		100	0.6153	0.5506	0.5061	0.4780
		1000	0.7469	0.6358	0.5627	0.5180
56	1.0	10	0.4647	0.4198	0.3887	0.3688
		100	0.4730	0.4319	0.4031	0.3847
		1000	0.4750	0.4350	0.4069	0.3888
	1.5	10	0.6466	0.5858	0.5436	0.5167
		100	0.6722	0.6052	0.5589	0.5295
		1000	0.6864	0.6161	0.5677	0.5370
	2.0	10	0.8661	0.7626	0.6925	0.6487
		100	0.9163	0.7953	0.7143	0.6642
		1000	1.0067	0.8613	0.7652	0.7063

비배수 반복전단강도(R_f)를 aging 시간에 따라 산정하였으며, 그 결과를 표 8에 나타내었다.

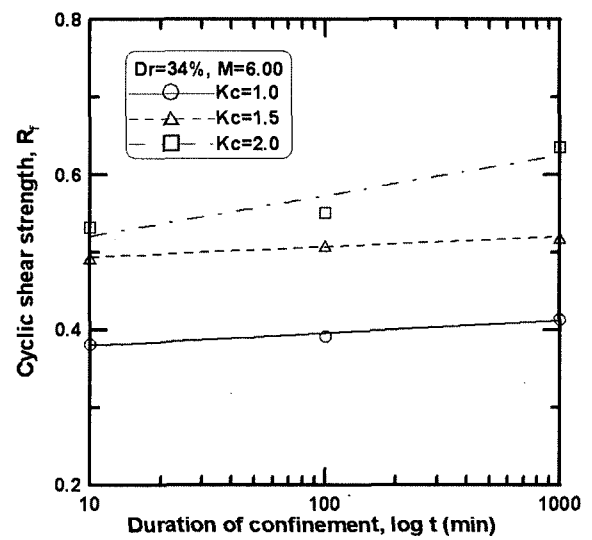
그림 9, 10은 표 8을 이용하여 지진규모별 압밀시간 경과에 따른 반복전단강도(R_f)를 압밀이방비로 구분하여 나타낸 것이다. 압밀시간이 10분에서 1000분으로 증가함에 따라 반복전단강도가 증가하였는데, 그림 9의 느슨한 상태에서 $K_c=1.0$ 일 때는 약 8.3%, $K_c=1.5$ 에서는 약 5.2%, 그리고 $K_c=2.0$ 에서는 약 18.2%로 각각 R_f 가 증가하여 느슨한 경우 전체평균 약 10.6%의 증가를 나타냈다. 그리고 그림 10의 중간상태 시료에서는 10분 압밀시료에 비하여 1000분 압밀시료의 반복전단강도 평균 증가율이 $K_c=1.0$ 일 때는 약 4.0%, $K_c=1.5$ 에서는 약 4.9%, 그리고 $K_c=2.0$ 에서는 약 12.1%로 각각 R_f 가 증가

하여 전체평균 7.0%의 증가율을 보여 aging 효과에 의한 반복전단강도의 증가는 상대밀도가 느슨한 상태에서 조금 더 크게 발생함을 정량적으로 확인할 수 있었으며, 또한 등방압밀조건보다는 이방압밀조건에서 증가하는 경향을 나타냈다. 김영수와 김대만(2004)은 압밀시간경과에 따른 낙동강 모래의 정적삼축시험을 실시한 결과 정적(static)전단거동에 대한 aging 효과는 조밀한 등방압밀시료에서 보다 더 크게 나타난다고 하여 본 연구에서 밝혀진 반복(cyclic)전단거동에 대한 aging 효과와는 차이를 나타내었다.

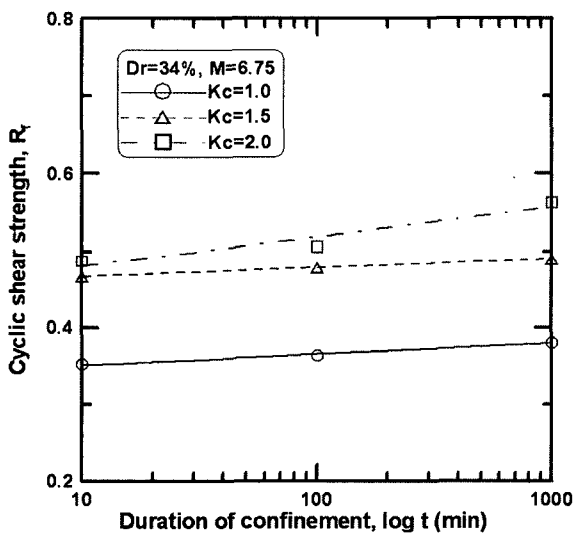
Seed(1979)는 모래의 액상화에 대한 실내 및 현장시험을 실시한 결과 aging에 따라 반복전단강도의 증가가 크게 발생하는 것을 확인하였고, 실내시험에서 결정된



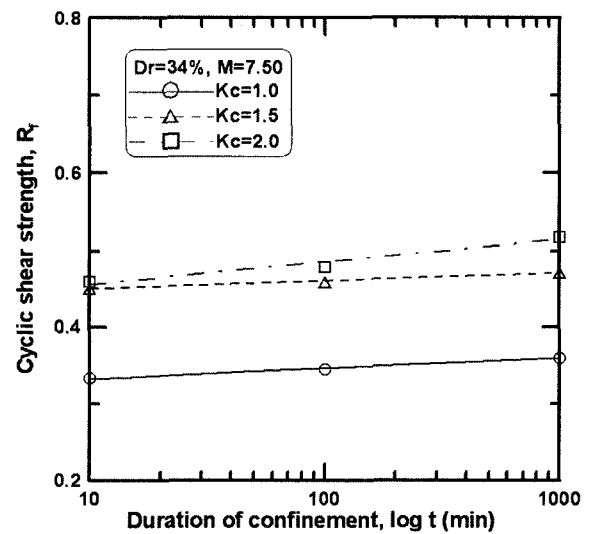
(a) $M=5.25$



(b) $M=6.00$

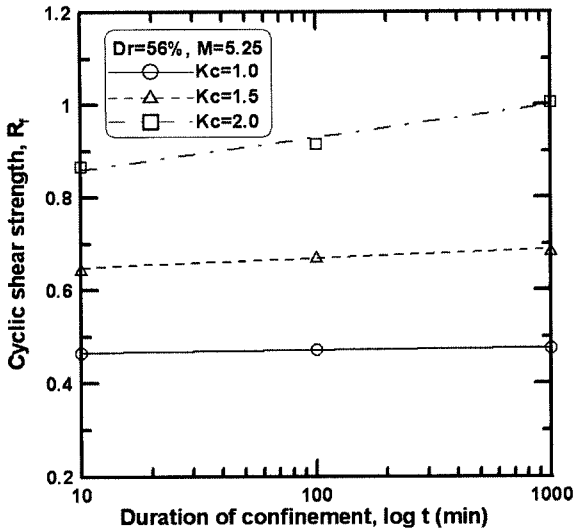


(c) $M=6.75$

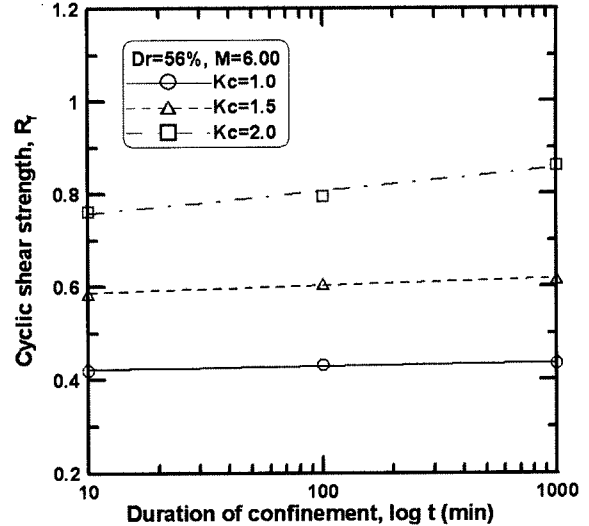


(d) $M=7.50$

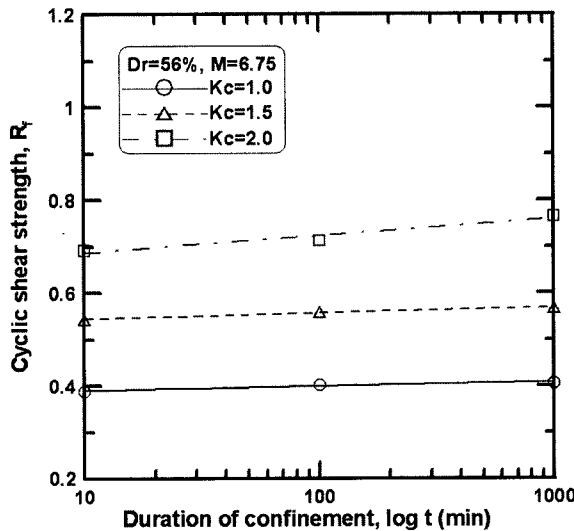
그림 9. 지진규모별 aging에 따른 반복전단강도의 증가($Dr=34\%$)



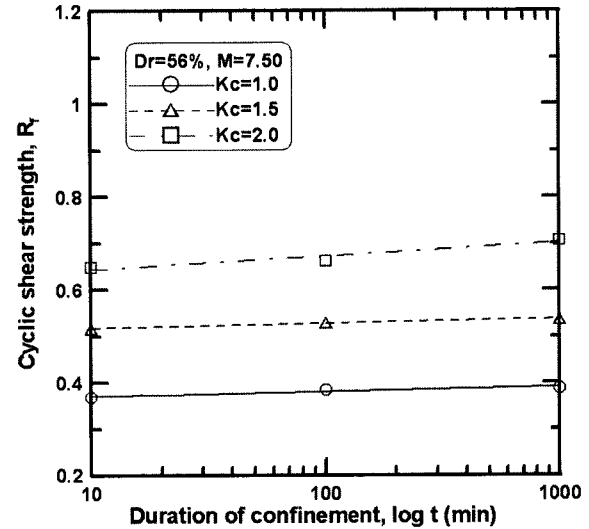
(a) M=5.25



(b) M=6.00



(c) M=6.75



(d) M=7.50

그림 10. 지진규모별 aging에 따른 반복전단강도의 증가(Dr=56%)

반복전단강도를 현장에 적용시 약 50~100%정도 증가시켜 사용할 것을 제안하였다. 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었는데, 그림 8과 그림 9에 나타난 aging에 따른 반복전단강도의 증가율을 이용하여 105일(약 274년) 이후에 반복전단강도를 계산한 결과, 느슨한 모래시료에서는 20~120%정도 범위, 그리고 중간상태 모래시료에서는 10~70%정도 범위의 증가를 보였다. 105일(약 274년)은 Seed(1979)의 시험결과에서 나타난 현장 모래지반 퇴적일수(days after deposition)의 범위 내에서 적당한 일수를 선택한 것이다.

이상에서 실내시험을 통하여 결정된 낙동강 모래의 비배수 반복전단강도를 현장에 적용할 경우 현장의 초기상태인 상대밀도, 이방압밀비, 그리고 지진선험시 적

용되는 지진규모에 따라 반복전단강도를 증가시켜 사용해야 될 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 낙동강 모래를 이용하여 상대밀도, 압밀응력비 그리고 압밀시간을 달리한 조건에서 비배수 반복삼축시험을 실시한 후 그 결과로부터 모래시료의 반복전단에 대한 aging 효과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 반복응력 작용시 초기정적전단응력(q_{st})의 크기에 따라 완전히 다른 파괴의 양상을 보였으며,

q_{st} 가 증가할수록 비배수 반복강도가 증가하였다. 그리고 압밀시간경과에 따른 응력경로의 변화는 이방 압밀시료보다는 reversal 조건의 등방압밀시료에서 압밀시간이 경과함에 따라 반복응력횟수(N)의 증가가 뚜렷하게 나타나 aging 효과를 관찰할 수 있었다.

- (2) 압밀시간경과에 따른 잔류간극수압의 변화는 대부분 큰 차이를 나타내지 않고 유사한 값을 보였으나 잔류변형은 동일한 반복횟수에서 압밀시간경과에 따라 작은 변형률을 보여 aging 효과에 의한 강성 증가를 확인할 수 있었다.
- (3) 포화 모래의 액상화 강도를 파괴 변형률 5%를 기준으로 구하여진 비배수 반복전단강도(R_f)는 reversal 조건의 범위에서 상대밀도와 q_{st} 의 크기에 비례하여 증가하였으며, non-reversal 조건으로 변화되면서 R_f 의 증가량이 감소하였다. 압밀시간경과에 따라 비배수 반복전단강도는 느슨한 시료에서 평균 약 10.6%, 중간상태 시료에서는 평균 약 7.0%의 증가를 보였다.
- (4) 실내시험결과에서 나타난 aging에 따른 반복전단강도의 증가율을 이용하여 퇴적일수 105일(약 274년)에 해당되는 낙동강 모래시료의 지진규모별 반복전단강도를 산정하였으며, 그 결과 실내에서 결정된 반복전단강도의 현장 적용시 지진규모별로 느슨한 상태 모래시료에서는 20~120%, 중간상태 모래시료에서는 10~70%정도의 증가범위로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김영수, 김대만 (2004), "Aging 효과에 따른 모래의 비배수 정적전단거동 특성", *한국지반공학학회논문집*, 제 20권, 6호, pp.137-150.
2. Alarcon-Guzman, A., Leonards, G.A. and Chameau, J.L. (1988), "Undrained monotonic and cyclic strength of sands", *Jour. of the Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1089-1109.
3. Anderson, D. G. and Stokoe, K. H. (1978), "Shear modulus: a time dependant soil property", *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP654, American Society for Testing and Materials, pp.66-90.
4. Castro, G. and Poulos, S. J. (1977), "Factors affecting liquefaction and cyclic mobility", *Jour. of the Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.103, No.GT6, pp.501-516.
5. Charlie, W. A. (1992), "Time dependant cone penetration resistance due to blasting", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.118, No.8, pp.1200-1215.
6. Hyodo, M. et al. (1991), "Undrained cyclic shear strength and residual shear strain of saturated sand by cyclic triaxial tests", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.3, pp.60-76.
7. Ishihara, K. (1985), "Stability of natural deposits during earthquakes", *SPROC., 11th int. Conf. SMFE, San Francisco, Calif.*, Vol.1, pp.321-376.
8. Kramer, S. L. (1996), "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, Inc.
9. Lee, K. L. and Seed, H. B. (1967), "Dynamic strength of anisotropically consolidated sand", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.93, No.SM5, pp.169-190.
10. Mesri, G., Feng, T. W., and Benak, J. M. (1990), "Postdensification penetration resistance of clean sands", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.116, No.7, pp.1095-1115.
11. Mitchell, J. K., and Solymar, Z. V. (1984), "Time-dependent strength gain in freshly deposited or densified sand", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.110, No.11, pp.1559-1576.
12. Mitchell, J. K. (1986), "Practical problems from surprising soil behavior", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.112, No.3, pp.259-289.
13. Mohamad, R., and Dobry, R. (1986), "Undrained monotonic and cyclic triaxial strength of sand", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.112, No.10, pp.941-958.
14. Rahhal, M. E., Lefebvre, G. (2000), "Understanding the effect of a static driving shear stress on the liquefaction resistance of medium dense granular soils", *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, Dec. 20, pp.397-404.
15. Schmertmann, J. H. (1991), "The mechanical aging of soils", *The twenty fifth Carl Terzaghi Lecture*, ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.117, No.9, pp.1288-1330.
16. Seed, H. B. (1979), "Soil liquefaction and cyclic mobility of evaluation for level ground during earthquakes", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.105, No.2, pp.201-255.
17. Seed, H. B., Idriss, I. M., and Arango, I. (1983), "Evaluation of liquefaction potential using field performance data", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.458-482.
18. Shozen, T. (2001), "Deformation under the constant stress state and its effect on stress-strain behaviour of Fraser river sand", M.A.Sc Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
19. Uchida, K. and Hasegawa, T. (1986), "Strength-deformation characteristics of a soil subjected to initial shear stress", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.11-24.
20. Vaid, Y. P. and Finn, W. D. L. (1979), "Static shear and liquefaction potential", *Jour. of Soil Mechanics and Foundation Div.*, ASCE, Vol.105, No.GT10, pp.1233-1246.
21. Vaid, Y. P. and Chern, J. C. (1985), "Cyclic and Monotonic undrained response of sands", *Proc. Advanced in the art of testing soils under cyclic loading conditions*, Detroit, pp.120-147.
22. Vaid, Y. P. and Thomas, J. (1995), "Liquefaction and Post liquefaction Behavior of Sand", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.163-173.
23. Whitman, R. V., Millar, E. T., and Moore, P. J. (1964), "Yielding and locking of confined sand", *Journal Soil Mech. and Found. Eng. Div.*, Vol.90, No.4, pp.57-84.
24. Yoshimi, Y. and Ohoka, H. (1975), "Influence if degree of shear stress reversal on the liquefaction potential of saturated sand", *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp.47-60.
25. Yoshimi, Y. and Tokimatsu, K. (1978), "Two-dimensional pore pressure changes in sand deposits during earthquakes", *2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction*, Vol.2, pp.853-863.

(접수일자 2005. 1. 10, 심사완료일 2005. 10. 24)