

## Aging 효과에 따른 낙동강 모래의 비배수 전단거동 특성 Characteristics of Undrained Shear Behavior for Nak-Dong River Sand Due to Aging Effect

김영수<sup>1)</sup>, Young-Su Kim, 김대만<sup>2)</sup>, Dae-Man Kim

1) 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.

2) 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사졸업, Ph.D., Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National Univ.

**SYNOPSIS** : In this study, to observe aging effect of undrained shear behavior for Nak-Dong River sand, undrained static and cyclic triaxial tests were performed with changing relative density ( $D_r$ ), consolidation stress ratio( $K_c$ ) and consolidation time. As a result of the test, the modulus of elasticity to all samples estimated within elastic zone by the micro strain of about 0.05% in case of static shear behavior increased with the lapse of consolidation time significantly, so aging effect was shown largely. Also strength of phase transformation point( $S_{PT}$ ) and strength of critical stress ratio point( $S_{CSR}$ ) increased with the lapse of consolidation time. Undrained cyclic shear strength( $R_f$ ) obtained from the failure strain 5% increased in proportion to relative density( $D_r$ ) and initial static shear stress( $q_{st}$ ),  $R_f$  of consolidated sample for 1,000 minutes increased about 10.6% compared to that for 10 minutes at the loose sand, and  $R_f$  increased about 7.0% at the medium sand. In situ application range of  $R_f$  to the magnitude of earthquake for Nak-Dong River sand was proposed by using a increasing rate of  $R_f$  as being aging effect shown from this test result.

**Key Words** : Aging effect, Nak-Dong River sand, Consolidation time, Undrained static and cyclic triaxial test, Consolidation stress ratio

### 1. 서론

지구상의 모든 물체는 대부분 시간에 따라 원래의 고유한 특성이 변화되며 흙도 마찬가지로 시간경과에 따라 여러 가지 특성들이 변화된다. 이와 같이 시간에 따라 흙의 공학적 특성이 변화되는 것을 aging 효과라 하며, 현재까지 여러 학자들에 의해 연구되었다. 특히 점성토에 있어서 크리프에 의한 aging 효과는 전체 압밀에 있어서 중요한 요소로서 오래전부터 인식되어져 왔는데, 과잉간극수압이 소산된 이후의 계속된 압밀을 2차 압밀이라 하며, 이에 의한 심각한 변형이나 흙의 특성변화 때문에 많은 연구가 수행된 반면 사질토에서는 일정한 응력하에서 간극수압이 빠르게 소산되어 1차 압밀 이후의 변형은 무시할 정도로 매우 작아서 시간경과에 따른 2차압밀의 영향은 최근까지 연구되지 않았다. 그러나 모래지반에서 퇴적이나 교란 후 시간경과에 따라 관입 저항치의 증가가 현장시험에서 관찰되면서 사질토의 aging 효과가 여러 연구자들에 의하여 활발하게 연구되기 시작했다. 지금까지 실내 및 현장시험을 통하여 연구된 aging 효과에 의한 모래의 공학적 특성 향상으로는 선행압밀하중의 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 사질토 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 모래를 이용하여 느슨 및 중간상태의 시료로 성형한 후 다양한 압밀응력비에서 aging 효과를 관찰하기 위해 10, 100, 1000, 10000분 동안 압밀된 시료를 비배수 정적 및 반복삼축시험을 실시하여 일정한 응력상태하에서의 aging 효과로 인한 비배수 전단거동의 특성을 연구하였다.

## 2. 시험방법

### 2.1 시료특성

본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 이용하여 #20체 통과 #200체 잔류 모래를 흐르는 물에 씻어 clean sand로 만들어 사용하였다. 시료의 물성치는 표 1과 같고, 입도곡선 및 SEM 사진은 그림 1과 사진 1에 각각 나타났다. USCS에 의한 분류는 SP로 나타났고, SEM 사진에 의한 조도는 subangular에서 subrounded이며 모래입자와 간극사이에 미세한 크기의 실트입자가 분포되어 있었다. 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 함유되어있다.

표 1. 낙동강 모래의 물성치

$G_s$	$D_{50}$	$D_{10}$	$C_u$	$C_c$	$e_{max}$	$e_{min}$	Roundness	USCS
2.676	0.360	0.235	1.70	1.23	1.137	0.765	Subangular	SP

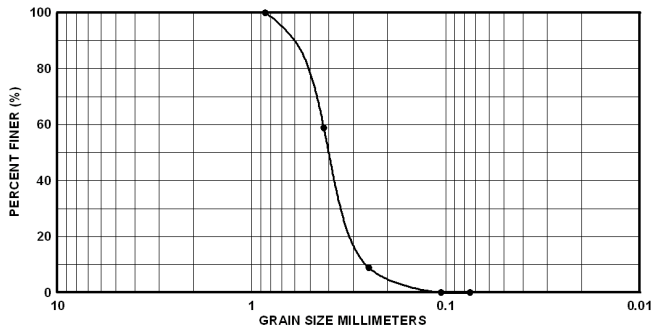


그림 1. 낙동강 모래의 입도곡선

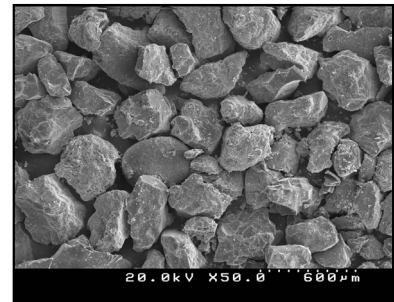


사진 1. SEM 사진

### 2.2 시험방법

본 연구에서 사용된 삼축시험기는 Clarence K. Chan 형식의 자동삼축시험기로 정적 및 반복삼축시험이 모두 가능하다. 시료의 크기는 직경 70mm, 높이 140mm이고 느슨한 모래의 경우는 초기 상대밀도 30%, 중간 상태인 경우는 50%가 되도록 하여 건조퇴적법으로 성형하였다. 시료성형 후 포화단계에서는 배압( $\sigma_b$ )을 300kPa까지 서서히 가하여 B value가 0.95 이상 되도록 하였고, 포화가 완료된 후 압밀단계에서는 압밀응력( $p'$ )을 100kPa로 하여 등방( $K_c=1.0$ ) 및 이방압밀( $K_c=1.5, 2.0$ )조건으로 압밀을 실시하였다.

압밀시간은 aging 효과를 관찰하기 위하여 10, 100, 1000, 10000분의 4가지로 달리하였으며, 압밀 후의 상대밀도는  $K_c$  값에 상관없이 느슨한 시료의 경우는 34%, 중간 조밀한 시료는 56% 정도로 나타났다. 압밀이 완료된 후 변형률 제어의 비배수 정적삼축시험과 응력제어의 비배수 반복삼축시험을 각각 실시하였는데, 정적시험에서의 변형률 속도는 0.1%/min로 하였고, 반복시험시 반복응력( $q_{cy}$ )은 0.1 Hz 주기의 정현파를 이용하였다.

표 2, 3은 본 논문에서 실시한 정적 및 반복삼축시험의 조건을 나타낸 것이다.

표 2. 정적삼축시험 조건

Sample state	$K_c$	$q_{st}$ (kPa)	$p'$ (kPa)	Consolidation time (min)	Mode	
Loose sand (Dr=34%)	1.0	0	50	10	Compression	
			100	10, 100, 1000, 10000		
			200	10		
And	1.5	43	100	10, 100, 1000, 10000	Compression	
	2.0	75	100	10, 100, 1000, 10000		
Medium sand (Dr=56%)	1.0	0	50	10	Extension	
			100			
			200			

표 3. 반복삼축시험 조건

Sample state	$K_c$	$q_{st}$ (kPa)	$q_{cy}$ (kPa)	Consolidation time (min)	$q_{cy}/q_{st}$	Stress reversal
Loose sand (Dr=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	No reversal
			60	10, 100, 1000	0.86	No reversal
			70	10, 100, 1000	0.93	Intermediate
Medium sand (Dr=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	No 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	No reversal
			75	10, 100, 1000	1.00	Intermediate
			85	10, 100, 1000	1.13	Reversal

### 3. Aging에 따른 비배수 정적전단거동

#### 3.1 응력-변형률

정적전단시험 결과 축방향 변형률에 따른 축차응력의 변화를  $D_r=34$ 에 대하여 그림 2에 나타내었으며, 중간상태의 경우는 지면상 생략하였다. 그림 2에서 느슨한 상태임에도 축차응력이 첨두점을 나타내지 않고 경화거동에 의한 팽창을 보였는데, 이는 낙동강 모래입자가 subangular한 특징에 의하여 나타나는 현상으로 생각된다.

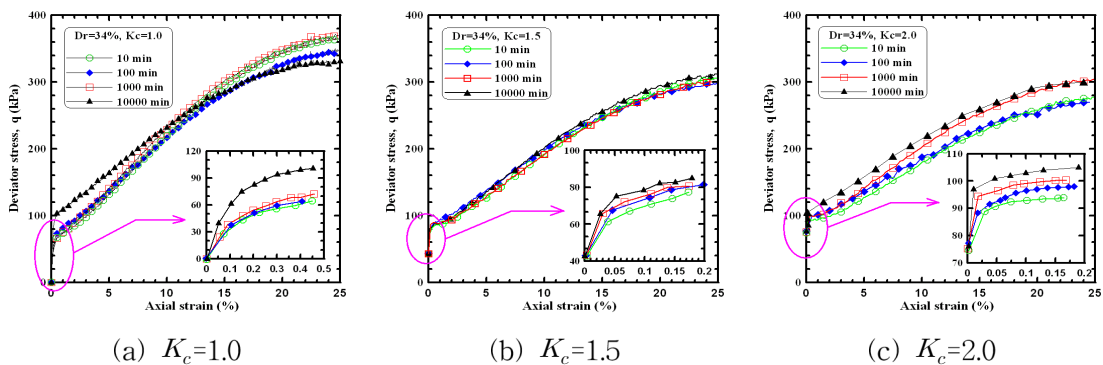


그림 2. 응력-변형률 관계곡선( $D_r=34\%$ )

그림 2에 나타난 변형률 0.05% 이전의 탄성구간에서 산정된 할선탄성계수(secant elastic modulus)는 모든 경우에서 압밀시간에 경과에 따른 aging 효과가 뚜렷하게 나타났는데, 이는 Shozen(2001)이 연구한 Fraser

River sand의 시험에서 전단 변형률 0.03%, 0.15%에 상응하는 전단변형계수인  $G_{s0.03}$ 과  $G_{s0.15}$ 의 값이 1000분 동안 압밀시간에 비례하여 거의 선형적인 증가를 보였다는 결과와 같이 본 연구결과에서의 활선탄성계수 또한 압밀시간 경과에 비례하여 증가하는 aging 효과를 볼 수 있었다. 따라서, 본 논문에서는 변형률 0.05% 범위내 미소변형률의 탄성구간에서 활선탄성계수를 산정하여 표 4에 나타내었고, 압밀시간 증가에 따른 활선탄성계수의 변화를 분석하여 모래의 강성에 대한 aging 효과를 연구하였으며, 본 논문에서는 이후 활선탄성계수를 간단히 탄성계수라 한다. 표 4에서 미소변형률 0.05%에서의 탄성계수는 압밀시간에 따라 뚜렷이 증가하여 큰 차이를 나타내는 반면 변형률 15%에서의 탄성계수는 거의 비슷하거나 압밀시간증가에 따라 일정한 증가를 관찰할 수 없어 큰 범위의 변형률에서 탄성계수에 대한 aging 효과는 나타나지 않는 것으로 판단된다.

그림 3은 느슨한 상태와 중간상태에서 100, 1000, 10000분 압밀시료의 0.05% 미소변형률 범위 탄성계수 ( $E_{100}$ ,  $E_{1000}$ ,  $E_{10000}$ )을 10분 압밀시료의 탄성계수( $E_{10}$ )로 나눈 탄성계수증가비,  $\Delta(E/E_{10})$ 을 압밀시간에 따라 나타낸 것으로 느슨한 상태와 중간상태에서 세 가지 압밀응력비 모두 압밀시간 증가로 인하여 탄성계수가 거의 선형적으로 증가하였다.

표 4. 탄성계수

$D_r$ (%)	$K_c$	$E_{10}$ (MPa)	$E_{100}$ (MPa)	$E_{1000}$ (MPa)	$E_{10000}$ (MPa)
34	1.0	40.563	46.854	65.523	86.399
	1.5	33.462	44.004	55.216	63.243
	2.0	26.150	29.288	37.133	48.639
56	1.0	46.491	72.453	114.717	138.868
	1.5	38.667	48.001	62.321	75.063
	2.0	27.129	38.827	44.164	52.157

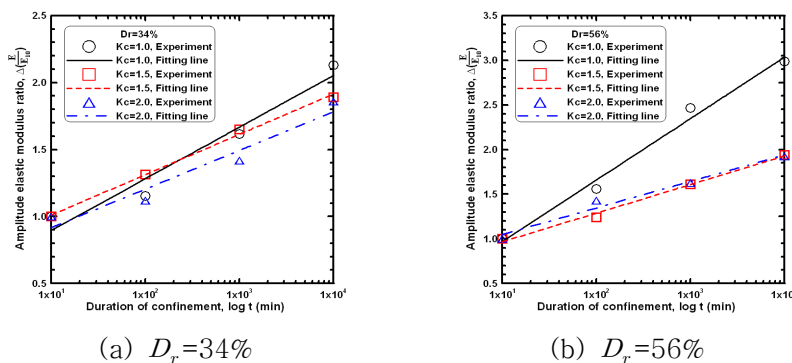


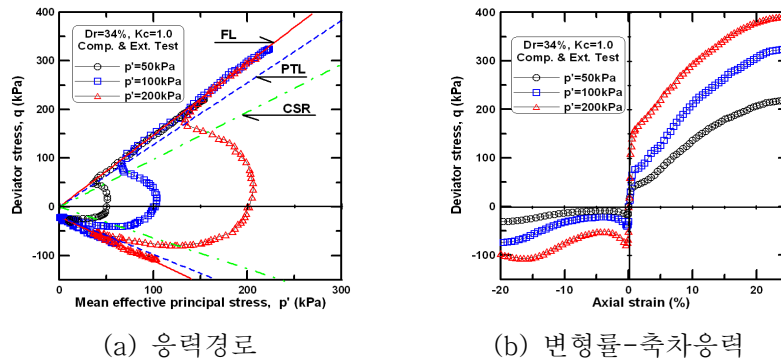
그림 3. 압밀시간 경과에 따른 탄성계수증가

Aging 효과에 따른 탄성계수증가율( $\Delta E$ )을 살펴보면 먼저 느슨한 상태에서 log cycle 당  $\Delta E$ 의 변화는  $K_c=1.0$ 일 때는 16.7%,  $K_c=1.5$ 는 13.1%, 그리고  $K_c=2.0$ 에서는 12.5%로 전체 평균  $\Delta E$ 는 약 14% 정도로 나타났다. 중간상태에서의 log cycle 당  $\Delta E$ 의 변화는  $K_c=1.0$ 인 경우는 29.8%로 아주 크게 나타났으며,  $K_c=1.5$ 는 13.9%, 그리고  $K_c=2.0$ 에서는 12.9%로 전체 평균  $\Delta E$ 는 약 18.9% 정도로 나타나 느슨한 시료에 비하여 조밀한 시료에서 그리고 등방압밀시료에서 aging 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

### 3.2 응력경로

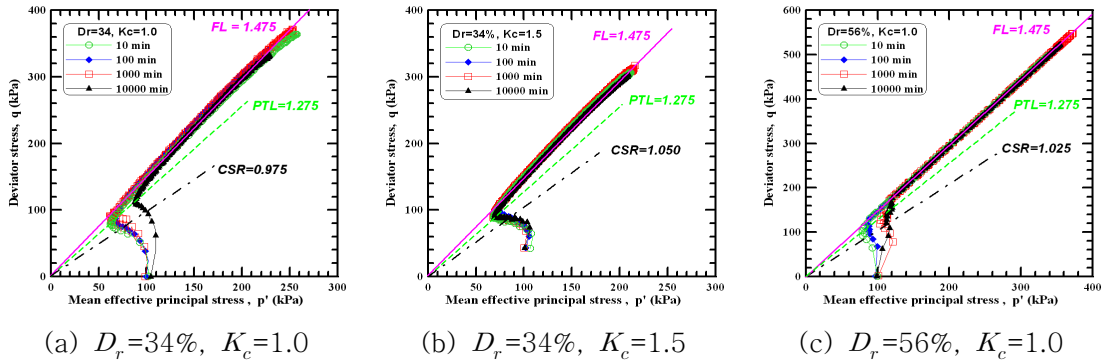
그림 4는 느슨한 모래시료에 구속압 50, 100, 200kPa으로 10분 동안 압밀시킨 후 압축과 인장시험을 통하여 구하여진 응력경로와 축변형률-축차응력을 나타낸 것이다. 초기에 과잉간극수압의 급속한 증가로 응력경로는 좌측으로 이동하고 그 후 연화거동의 시작점인 한계응력비에 이른다. 한계응력비는 Vaid와 Chern(1985)에 의해 처음 정의되었는데, 응력경로공간상에서는 원점을 통과하는 직선으로 표현되는 이 선을 한계응력비선(critical stress ratio, CSR line)이라하며, CSR선에서의 강도는  $S_{CSR}$ 로 정의된다. CSR선을 지나 연화거동현상

이 나타난 후 팽창거동을 시작하면서 응력경로의 전환이 나타나는데, 이 점을 상전이점(phase transformation, PT point)이라고 하고 응력경로상에서 원점을 통과하는 하나의 선으로 나타내며, 이 선을 상전이선(PTL)이라고 한다. 이 전이점에서의 강도를  $S_{PT}$ 로 정의한다. 상전이점을 지나면 시료는 곧 팽창거동을 하며 파괴선(failure line, FL)을 따라 거슬러 올라가게 된다. 그림 4에서 압축시험의 응력-변형률 곡선의 경우 세 가지 구속압 모두에서 뚜렷한 첨두점을 보이지 않아 연화거동이 시작되는 변형률의 위치를 찾아서 CSR선을 결정하였으며, 상전이선과 파괴선의 경우는 뚜렷하여 쉽게 찾을 수 있었다. 반면 인장시험의 응력-변형률 곡선에서는 뚜렷한 첨두점을 나타낸 후 중간정도의 변형률까지 연화거동을 거쳐서 다시 팽창하는 제한적 액상화의 거동을 나타냈다. 인장축에서의 CSR선은 원점을 통과하지만 FL, PTL의 경우 (0, -20kPa)의 좌표를 지나는 특징을 보였는데, 이는 유사정상상태변형을 보인 후 전술한바와 같이 낙동강 모래의 subangular한 특징에 의하여 다시 인장력이 증가됨에 기인되는 현상으로 사료된다.



(a) 응력경로 (b) 변형률-축차응력  
 그림 4. 구속압에 따른 압축 및 인장전단시험결과

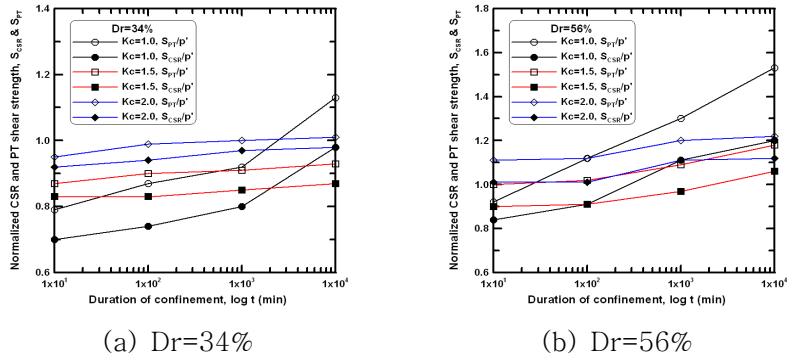
그림 5는 느슨한 상태  $K_c=1.0$ , 1.5와 중간상태  $K_c=1.0$  시료의 압밀시간 경과에 따른 응력경로를 나타낸 것이며 나머지는 지면상 생략하였다. 그림 5의 (a), (c)의  $K_c=1.0$ 에서 느슨한 상태와 중간상태 시료에서 압밀시간 경과에 따라 응력경로가 오른쪽으로 이동되면서 시료의 강성 증가로 전단초기에서부터 팽창이 발생하는 aging 효과를 볼 수 있었다. 파괴선(FL), 상전이선(PTL)선의 기울기는 aging 기간에 관계없이 일정하였고, CSR 선의 기울기도 마찬가지로 압밀응력비 증가에 따라 조금 증가할 뿐 압밀시간의 경과에 관계없이 일정한 기울기를 보여 압밀시간경과와는 상관이 없는 것을 알 수 있다.



(a)  $D_r=34\%$ ,  $K_c=1.0$  (b)  $D_r=34\%$ ,  $K_c=1.5$  (c)  $D_r=56\%$ ,  $K_c=1.0$   
 그림 5. Aging에 따른 응력경로 곡선

그림 6은 응력경로상에서 구하여진  $S_{PT}$ 와  $S_{CSR}$ 를 압밀응력( $p'$ )로 나누어 정규화한 값을 압밀시간에 따라 나타낸 것이다. Gananathan(2002)의 Fraser River sand를 이용하여 모래시료의 aging 효과를 연구하기 위해 시료를  $D_r=26\%$ 로 성형 후  $K_c=2.26$ 이 되도록 하여 두 가지 압밀응력,  $p'=100, 200\text{kPa}$ 로 압밀시간을 1, 10, 100, 1000분로 압밀시킨 시료에 대하여 일련의 시험을 실시한 결과 압밀시간 증가에 따라  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$ 값이 선형적으로 증가한다고 하였는데, 본 연구에서도 느슨한 상태와 중간상태 모두에서 압밀시간경과에 따라  $S_{PT}$ ,

$S_{CSR}$  값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 10분 압밀시료의  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$  값을 기준으로 하여 압밀시간경과에 따른  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$  값의 증가는 이방압밀시료보다는 등방압밀시료일 때가 그리고 상대밀도가 큰 조밀한 시료일수록 aging 효과가 크게 나타났다.



(a) Dr=34% (b) Dr=56%  
그림 6. 압밀시간에 따른  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$ 의 정규화 곡선

## 4. Aging에 따른 비배수 반복전단거동

### 4.1 응력경로

그림 7은 등방압밀조건의 느슨한 시료에서 45kPa의 반복응력이 가하여진 응력반전(reverse)조건에 대하여 압밀시간경과에 따라 응력경로를 나타낸 것이며, 나머지 결과에 대해서는 지면상 생략하였다. 응력경로는 reverse 조건으로 인하여 모두 인장축 파괴선과 만나면서 갑작스런 파괴가 발생하였으며, 이방압밀시료보다는 등방압밀시료에서 그리고  $q_{cy}/q_{st} > 1$ 의 reversal 조건에서 압밀시간이 길어질수록 반복횟수(N)의 증가가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 그에 반하여 응력준반전(intermediate), 응력비반전(no-reverse) 조건의 응력상태에서는 압밀시간경과에 따른 응력경로상의 차이는 관찰할 수 없었으나, 반복횟수에 따른 축변형률의 변화를 살펴보면 압밀시간이 증가함에 따라 동일한 반복횟수에서 축변형률이 작게 나타나 aging 효과를 확인할 수 있었다.

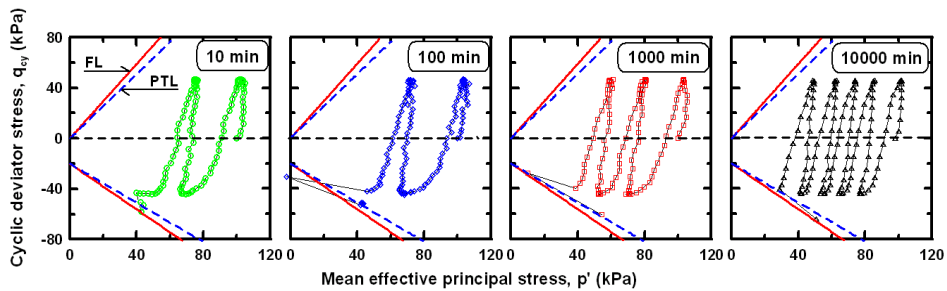


그림 7. 느슨한 시료의 압밀시간에 따른 응력경로( $K_c=1.0$ ,  $q_{cy}=45\text{kPa}$ )

### 4.2 반복전단강도

포화된 모래 지반의 비배수 반복강도는 상대밀도와 초기정적전단응력( $q_{st}$ )의 크기, 액상화 저항의 정의에 의존한다. 여기서 액상화 저항의 정의는 반복하중에 의한 흙의 파괴시 변형률을 정의하는 것으로 응력반전이 있는 경우는 양진폭 변형률 5%정도로 보며 대개 이 시점에서  $p'=0$ 의 초기액상화가 발생한다. 응력반전이 없는 경우는 잔류변형률의 증가로 인해 파괴에 도달하는데, Mohamad와 Dobry(1986)등은 잔류변형 5%를 기준으로 보았으며, Uchida와 Hasegawa(1986)등은 잔류변형 10%로 파괴기준을 보는 등 연구자들에 따라 각각 다르게 정의되었다.

본 연구에서는 응력반전이 있는 경우는 양진폭 변형률 5%로 그리고 응력반전이 없는 경우 잔류변형률 5%를 파괴기준으로 하여 파괴시의 반복응력횟수(N)을 구하였으며, 그림 8은 느슨한 시료의  $q_{cy}/p'$ 와 파괴시 N의 관계를 양대수 눈금상에 직선으로 나타낸 것이다. 모든 압밀응력비에서 압밀시간경과에 비례하여  $q_{cy}/p'$ 의 증가가 크게 나타났으며, 특히 등방압밀시료보다는 이방압밀시료에서 그리고 중간시료보다 느슨한 시료에서  $q_{cy}/p'$ 의 증가가 크게 나타나 aging 효과가 더욱 뚜렷하게 관찰되었는데, 이는 정적전단거동에서 강성에 대한 aging 효과와 반대의 경향을 보였다.

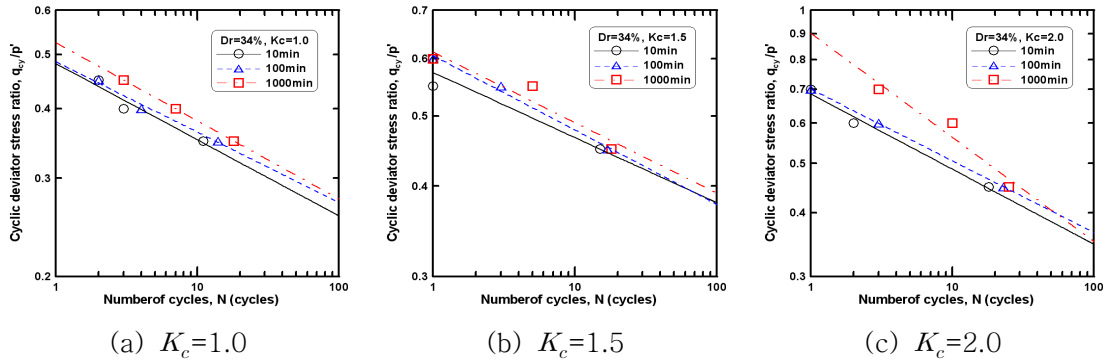


그림 8. 느슨한 시료에서 aging에 따른  $q_{cy}/p'$ -N 관계

Seed 등(1983)은 지진자료분석에 의한 지진규모별 등가반복응력횟수를 표 5와 같이 제안하였는데, 표 5의 각 지진규모에 해당하는 반복응력횟수(N)으로부터 낙동강 모래시료의 지진규모에 대한 반복전단강도( $R_f$ )를 aging 시간에 따라 산정하였다. 그림 9는 지진규모에 따른 반복전단강도 변화를 상대밀도, 이방압밀비와 압밀경과시간에 따라 나타낸 것으로 압밀시간이 10분에서 1000분으로 증가함에 따라 반복전단강도의 증가는 느슨한 경우 전체평균 약 10.6%, 그리고 중간상태의 경우는 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.

표 5. 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

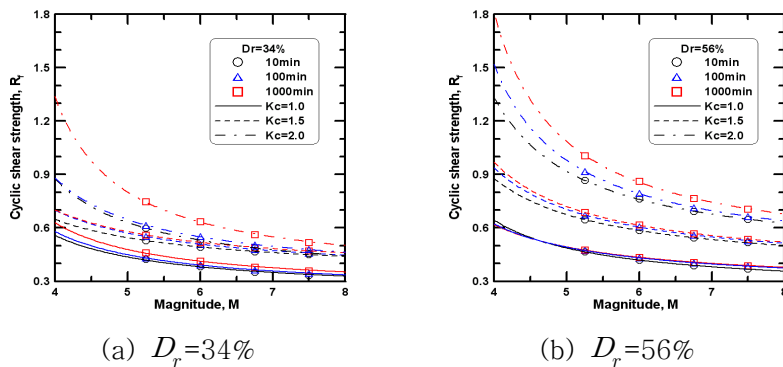


그림 9. Aging에 따른 지진규모별 반복전단강도의 변화

Seed(1979)는 모래의 액상화에 대한 실내 및 현장시험을 실시한 결과 aging에 따라 반복전단강도의 증가가 크게 발생하는 것을 확인하였고, 실내시험에서 결정된 반복전단강도를 현장에 적용시 약 50~100%정도 증가시켜 사용할 것을 제안하였다. 본 연구에서도 이와 유사한 결과를 얻을 수 있었는데, aging에 따른 반복전단강도의 증가

율을 이용하여  $10^5$ 일(약 274년) 이후에 반복전단강도를 산정하였다.  $10^5$ 일(약 274년)은 Seed(1979)의 시험결과에서 현장모래지반 퇴적일수(days after deposition)의 범위 내에서 적당한 일수를 정한 것이다. 산정결과 느슨한 모래시료에서는 20~120%정도 범위, 그리고 중간상태 모래시료에서는 10~70%정도 범위의 증가를 보였다.

따라서, 본 연구에 사용된 낙동강 모래시료의 실내시험결과를 현장적용시 현장의 초기상태인 상대밀도, 이방압밀비, 그리고 지진설계시 적용되는 지진규모에 따라 반복전단강도를 증가시켜 사용해야 될 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 낙동강 모래를 이용한 비배수 정적 및 반복전단시험을 실시하여 다음과 같이 aging 효과에 의한 모래의 비배수 정적 및 반복전단거동의 특성에 대한 결론을 얻었다.

1. 시험결과 모든 경우에서 미소변형률 0.05% 범위내의 탄성구간에서 산정된 탄성계수는 압밀시간경과에 따라 증가하는 경향을 보여 aging 효과에 의한 시료의 강성증대를 확인할 수 있었으며, aging에 의한 탄성계수의 증가는 상대밀도가 클수록 그리고 이방압밀시료보다는 등방압밀시료에서 더 크게 나타났다.
2. 상전이점과 한계응력비점의 강도인  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$ 은 압밀시간경과에 따라 증가하는 경향을 나타냈는데, 상대밀도에 상관없이 등방압밀시료의  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$ 는 aging 효과에 의한 증가가 크게 나타난 반면, 이방압밀시료에서는 등방압밀시료에 비하여 aging에 따른  $S_{PT}$ ,  $S_{CSR}$ 의 증가는 크게 나타나지 않았다.
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, no-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  $10^5$ 일(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.

## 참고문헌

1. 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.
2. Gananathan N. (2002), "*Partially drained response of sands.*" , M.A.Sc Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.