

## 장기 반복하중을 받는 모래지반의 축방향 누적소성변형률 평가

서민창\* · 이시훈\* · 김성렬\*

\*동아대학교 토목공학과

### Evaluation of Accumulated Axial Plastic Strain of Sands under Long-term Cyclic Loading

Min-Chang Seo\*, Si-Hoon Lee\* and Sung-Ryul Kim\*

\*Department of Civil Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** offshore wind turbine 해상풍력기초, cyclic triaxial test 반복삼축시험, sand 사질토, accumulated plastic strain 누적소성 변형률, stiffness degradation 강성저하

**ABSTRACT:** Offshore wind turbines have been constructed extensively throughout the world. These turbines are subjected to approximately  $10^8$  horizontal load cycles produced from wind, waves, and current during their lifetimes. Therefore, the accumulated displacement of the foundation under horizontal cyclic loading has significant effects on the foundation design of a wind turbine. Akili(2006) and Achmus et al.(2009) performed cyclic triaxial tests on dry sands and proposed an empirical model for predicting the accumulated plastic strain of sands under long-term cyclic loading. In this study, cyclic triaxial tests were performed to analyze the cyclic loading behaviors of dry sands. A total of 27 test cases were performed by varying three parameters: the relative density of the sands, cyclic load level, and confining stress. The test results showed that the accumulated plastic strain increased with an increase in the cyclic load level and a decrease in the relative density of the sand. The confining stress had less effect on the plastic strain. In addition, the plastic strain at the 1st loading cycle was about 57% of the accumulated strain at 1,000 cycles. Finally, the input parameters of the empirical models of Akili(2006) and Achmus et al.(2009) were evaluated by using the relative density of the sand and the cyclic load level.

#### 1. 서 론

최근 세계적으로 석탄 및 석유와 같은 화석연료의 고갈 및 지구온난화 해결에 대한 대책으로 태양광이나 수력, 풍력 등과 같은 신재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 신재생에너지 중 경제성이 우수한 것으로 알려진 풍력발전은 풍력자원이 풍부한 해상에 설치되고 있는 추세이다. 현재 국내에서는 서해안 지역에서의 풍력발전단지 건설을 위해 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그런데, 해상 풍력발전기는 바람, 해류, 파도 등에 의해 구조물의 수명동안 약  $10^8$ 회 이상의 장기적인 수평 반복하중을 받는 것으로 알려져 있다. 그러므로, 해상 풍력발전기의 장기적인 성능수준을 평가하려면, 장기 반복하중이 기초 구조물의 영구 변위량에 미치는 영향을 평가하는 것이 중요하다. 그러나, 기존의 풍력발전기 설계기준에는 반복하중을 고려하는 구체적인 설계방법이 제안되어 있지 않은 실정이다(Veritas, 2013).

장기 수평 반복하중을 받는 모래지반의 거동을 평가하기 위

하여 Huurman(1996)과 Akili(2006)는 반복삼축실험을 실시하여 반복재하회수에 따른 모래지반의 축방향 소성변형률의 증가경향을 분석한 바 있다. 특히, Achmus et al.(2009)은 Huurman(1996)의 연구결과를 이용하여 반복 수평하중을 받는 모래지반의 강성저하를 평가하는 방법을 제안하였으며, 이 방법을 수치 해석에 적용하여 반복하중을 받는 풍력발전기 기초구조물의 거동을 분석하였다.

반복하중을 받는 모래지반의 거동은 흙의 특성, 실험조건 등에 의해 많은 영향을 받을 수 있으나, 이에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 또한, 풍력발전기가 설치되는 현장 지반조건을 고려하여 반복삼축시험을 수행하는 것이 필요하므로 이에 대한 실험방법의 정립 또한 중요하다.

그러므로, 본 연구에서는 국내의 대표적인 주문진 표준사를 대상으로 반복삼축시험을 실시하였다. 실험매개변수로서 상대 밀도, 구속압, 반복하중의 크기를 선정하고 조건을 변경하며 총 27가지의 조건에 대한 실험을 실시하였다. 실험결과 반복하중

회수에 따른 축방향 누적소성변형률의 크기를 분석하고, 기존 예측모델에 적용할 수 있는 입력변수값 산정방법을 제시하였다.

## 2. 모래지반의 강성저하모델

### 2.1 기존의 연구결과

Fig. 1은 반복하중을 받는 사질토 시료의 축방향 응력-변형률 관계를 보여준다. 반복하중은 삼축압축 시험에서 일정한 구속 응력을 가한 상태에서 축차응력을 증가시키고 감소시키는 방법으로 적용한다.

그림에서 반복 축차응력의 크기는  $\sigma_{cyc}$ 로 정의된다. 첫 번째 축차응력의 재하 이후 시료에 남아있는 축방향 누적 소성변형률은  $\epsilon_{N=1}^a$ , 그리고 N번째 반복하중이 재하되었을 때의 축방향 누적 소성변형률은  $\epsilon_N^a$ 으로 정의하였다.

그림에서 원점과 응력-변형률의 Peak 점을 연결한 선의 경사를 할선 탄성계수로 정의하였다. 첫 번째 축차응력이 재하되었을 때 흙의 탄성계수는  $E_{s1}$ , 그리고 N번째 반복하중이 재하되었을 때의 탄성계수는  $E_{sN}$ 으로 정의하였다. 즉, 재하회수가 증가함에 따라 축방향 누적소성변형률은 계속 증가하므로 할선 탄성계수값은 계속 감소하게 된다.

만일, 축차응력 제거시에 회복되는 탄성변형률의 크기를 무시하면 탄성계수와 축방향 소성변형률의 크기는 서로 반비례 관계에 있다. 그러므로, 탄성계수와 축방향 소성변형률의 관계는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{E_{sN}}{E_{s1}} \cong \frac{\epsilon_{N=1}^a}{\epsilon_N^a} \quad (1)$$

Huurman(1996)은 사질토에 대한 반복삼축시험을 수행하여 반복하중에 따른 누적 소성변형률의 산정식을 제안한 바 있다. Achmus et al.(2009)은 그의 연구결과를 이용하여 식 (2)의 관계식을 제시하였다. 이 식에서 변수 X는 반복하중 응력비로서 정적 축하중을 증가시켜 파괴가 발생할 때의 축차응력( $\sigma_{1,sf}$ )에 대한 반복 하중의 축차응력( $\sigma_{1,cyc}$ )의 비로서 정의되며 식 (3)으로 나타낼 수 있다. 식 (2)의 변수  $b_1$ 과  $b_2$ 값은 반복횟수에 따른 탄성계수값의 저하를 나타내는 값으로서 모래 특성에 따른 재료

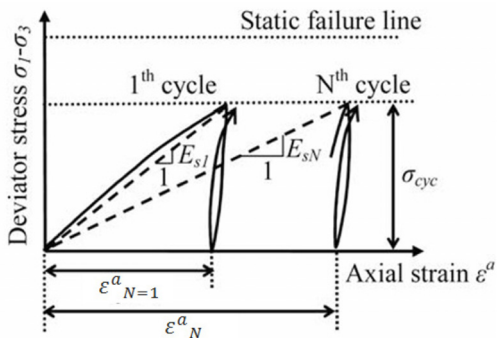


Fig. 1 Stress-strain behavior of sand under cyclic stress (Achmus et al., 2009)

상수값으로 정의하였다. 그러므로, 특정 모래에 대한 변수  $b_1$ 과  $b_2$ 값은 2가지 이상의 X값에 대한 반복삼축시험을 수행하여 반복하중 횟수에 따른 축방향 소성변형률( $\epsilon_N^a$ ) 결과를 측정하면 결정할 수 있다. 식 (2)로부터 재하회수가 증가함에 따라 탄성계수가 감소하는 것을 모델링하여 수치해석 등에 적용할 수 있다 (Le et al., 2013).

$$\frac{E_{sN}}{E_{s1}} \cong \frac{\epsilon_{N=1}^a}{\epsilon_N^a} = N^{-b_1 X^{b_2}} \quad (2)$$

$$X = \frac{\sigma_{1,cyc}}{\sigma_{1,sf}} \quad (3)$$

여기서, N = 반복하중의 재하횟수

X = 반복하중 응력비

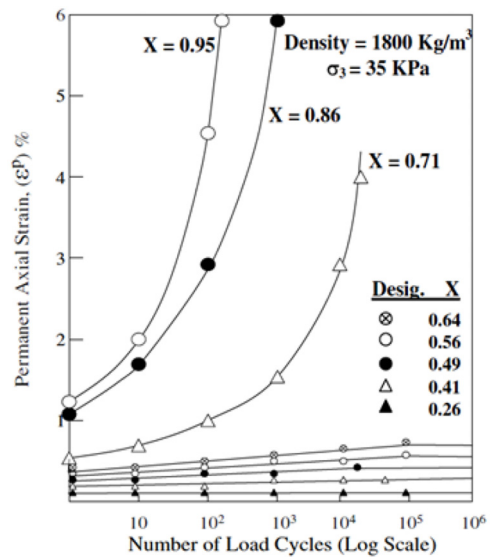
$\sigma_{1,sf}$  = 정적 삼축압축시험의 파괴시 축차응력

$\sigma_{cyc}$  = 반복 하중시험의 반복 축차응력

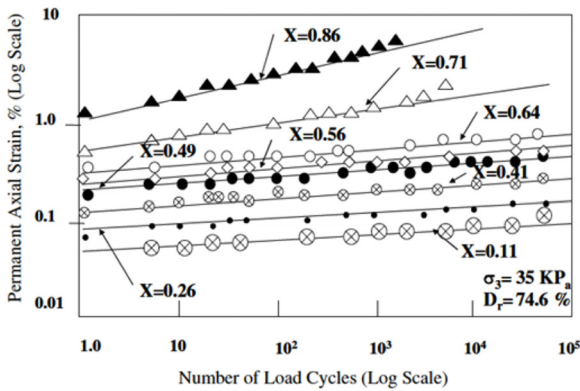
$b_1, b_2$  = 반복회수에 따른 탄성계수값의 저하를 나타내는 재료상수값

Akili (2006)는 건조 사질토에 대한 반복삼축시험에서 반복하중을  $10^5$ 번 이상 가하면서 축변형률을 관찰하였다. 그 결과, Fig. 2(a)와 같이 축방향 소성변형률은 주로 축차응력의 크기에 의하여 영향을 받으며, X값이 0.64이상인 경우에  $10^3 \sim 10^4$ 번의 반복 횟수에서 시료 파괴에 도달하는 것을 관찰하였다. 그는 Fig. 2(a)의 y축에 대하여 로그스케일을 적용한 후 식 (4)의 축방향 누적 소성변형률 예측모델을 제안하였다. 이 식은 Fig. 2(b)의 직선으로 나타내어지며, 식 (4)의 변수 A값은 Fig. 2(b)에서 직선의 y축 교차점, 변수 b는 직선의 기울기를 나타낸다. 그림에서, 계수 A는 변수 X값에 비례하여 증가하는 경향을 보여주며, 변수 b는 X값 및 상대밀도와의 연관성이 나타나지 않았다.

$$\epsilon_N^a = AN^b \quad (4)$$



(a) Permanent axial strain according to number of load cycles



(b) Accumulated axial plastic strain model

Fig. 2 Permanent accumulated axial strain of sand using triaxial cyclic loading test (Akili, 2006)

### 3. 시험계획

본 논문에서는 반복하중에 따른 모래지반의 강성저하 변수를 산정하고자 하였다. 반복하중을 가하는 재하장치로서 Soil Engineering Equipment Co.에서 제작한 자동화 삼축시험기(Li, 1988)를 이용하였다. 본 시험기는 Fig. 3과 같이 셀안에 시료가 들어가는 Chamber, 반복하중을 재하하는 Actuator, 응력과 변형률 등을 제어하고 계측하는 계측부 등으로 구성되어 있다.

시험시료는 건조상태의 주문진 표준사를 이용하였다. 주문진 표준사에는 국내 표준사로서 토조 및 실내시험에서 대표적으로 널리 이용되고 있다. 주문진 표준사의 기본 물성값은 Table 1에 나타내었으며 통일분류법상 SP로 분류된다. 공시체는 직경 50mm, 높이 100mm의 원주형으로 제작하였다. 시료제작은 공시체 몰드 안에 모래를 약 20mm 두께로 쌓고 고무망치로 몰드를 측면 3방향에서 5회씩 타격한 후 다시 모래를 쌓는 과정을 반복하면서 제작하였다. 시료의 상대밀도는 몰드부피와 몰드안에 들어간 모래의 무게를 이용하여 계산하였다.

Table 2는 시험조건을 보여준다. 우선, 정적 삼축압축시험을

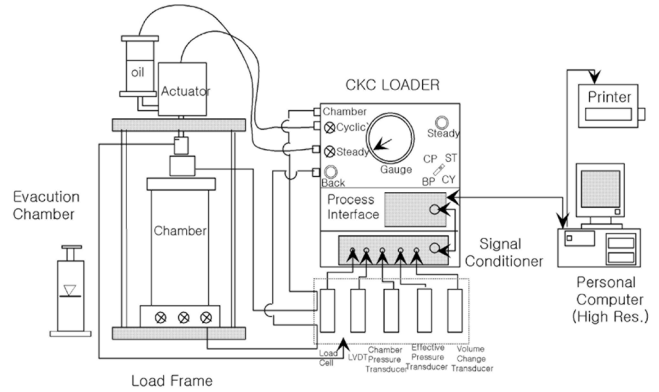


Fig. 3 Automation triaxial testing components

수행하여 상대밀도 30%, 50%, 75%의 3가지, 유효 구속압 100kPa, 150kPa, 200kPa의 3가지 등 총 9가지의 시료에 대한 최대 축응력( $\sigma_{1,sf}$ )을 산정하였다. 정적 재하시험은 변형률 제어시험으로서 등방 구속압을 가한 상태에서 축변형률을 0.2%/min의 속도로 일정하게 증가시키면서 축변형률이 10%에 도달할 때까지 시험을 실시하였다.

하중 조건은 해상풍력발전기에 작용하는 풍력하중이 주로 1방향으로만 증가하였다가 감소하는 특성을 고려하여 1방향 재하조건을 적용하였다. 이를 삼축시험에서 모사하기 위하여 Fig. 1과 같이 축차 응력을 증가시켰다가 0으로 감소시켰다. 하중재하회수는 장기하중을 고려하기 위하여 동일한 하중을 총 1,000회 적용하였다.

반복하중시험에서는 상대밀도, 구속압, 응력비의 3가지 매개변수에 대하여 실험을 수행하였다. 상대밀도는 30%, 50%, 75%의 3가지, 유효 구속압은 100kPa, 150kPa, 200kPa의 3가지 그리고, 반복하중 응력비는 0.3, 0.5, 0.7의 3가지 등 총 27가지 시험조건을 적용하였다. 반복재하시험은 등방 구속압을 적용한 후 정적재하시험의 최대 축차응력( $\sigma_{1,sf}$ )을 기준으로 최대 축차응력의 0.3, 0.5, 0.7배에 해당하는 크기의 반복응력( $\sigma_{1,cyc}$ )을 재하하였다.

Table 1 Physical properties of the Jumunjin Korean standard sand

Specific gravity ( $G_s$ )	Minimum dry density ( $kN/m^3$ )	Maximum dry density ( $kN/m^3$ )	$D_{50}$ (mm)	Coefficient of uniformity ( $C_u$ )	Coefficient of curvature ( $C_c$ )	USCS
2.64	13.04	16.28	0.33	1.4	0.96	SP

Table 2 Testing conditions

Test type	Relative density (%)	Cell pressure (kPa)	Stress ratio (X)			Number of cycles
Static load test	30, 50, 75	100	-	-	-	
		150				
		200				
Cyclic load test	30, 50, 75	100	X=0.3	X=0.5	X=0.7	1,000 (one-way loading)
		150				
		200				

4. 실험 결과

Fig. 4는 정적 재하시험을 수행하였을 때의 대표적인 결과를 보여준다. 시료의 최대 축차응력은 축변형률이 3~5%에 도달하였을 때 발생하였다. 그리고, Table 3은 정적재하시험의 최대 축차응력을 정리하여 보여준다. 상대밀도와 구속압이 증가함에 따라 최대축차응력이 비례하여 증가하였다.

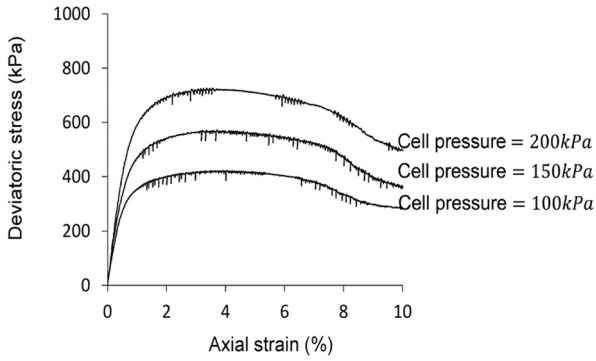


Fig. 4 Axial stress-strain curve from static loading tests ( $D_r = 50\%$ )

Table 3 Peak deviatoric stress from static loading tests ( $\sigma_{1,sf}$ )

C.Pressure \ Dr	30%	50%	75%
100kPa	356	423	462
150kPa	524	572	614
200kPa	634	726	806

Fig. 5~7은 반복삼축시험의 대표적인 결과로서 반복재하에 따른 축차응력-축방향 변형을 관계를 보여준다. 축변형을 발생 경향을 살펴보면 1번째 하중을 가하였을 때 변형률이 가장 크게 발생하고, 반복하중회수가 증가함에 따라 점차 변형률 증분이 감소하였다. Fig. 5, 6, 7의 경우 각각 상대밀도, 응력비, 구속압 증가에 따른 대표적인 실험 결과로서 다른 실험조건은 동일하게 적용하였다. 실험결과에서 축방향 소성변형률의 크기는 상대밀도가 작을수록, 반복하중 응력비가 커질수록 증가하였다. 그리고, 구속압과 소성변형률 사이에는 일정한 경향성이 나타나지 않았다.

Fig. 8은 반복횟수 증가에 따른 축방향 소성변형률 증가경향을 보여준다. 그림의 y축은  $N=1000$ 회의 변형률에 대한 각 재하회수에서 발생한 변형률의 누적비율로서 전체 자료의 평균값을 나타내었다. 그림을 보면, 평균 변형률비는  $N=1$ 일 때 56%,

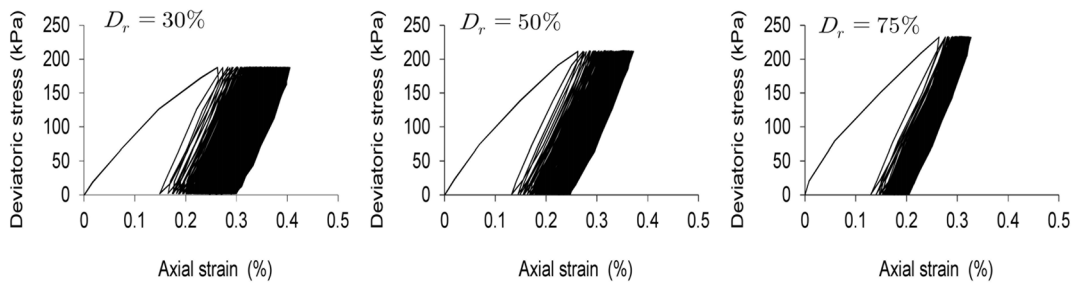


Fig. 5 Cyclic axial stress-strain curves according to relative density (cell pressure=150kpa, stress ratio( $X$ ) = 0.5)

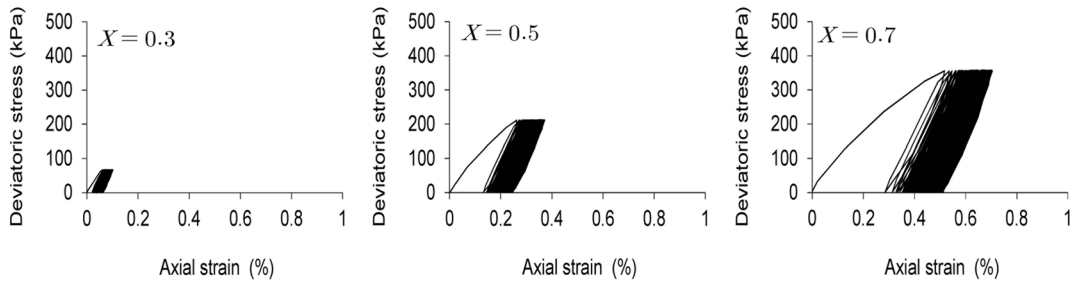


Fig. 6 Cyclic axial stress-strain curves according to stress ratio( $X$ ) ( $D_r = 50\%$ , cell pressure=150kpa)

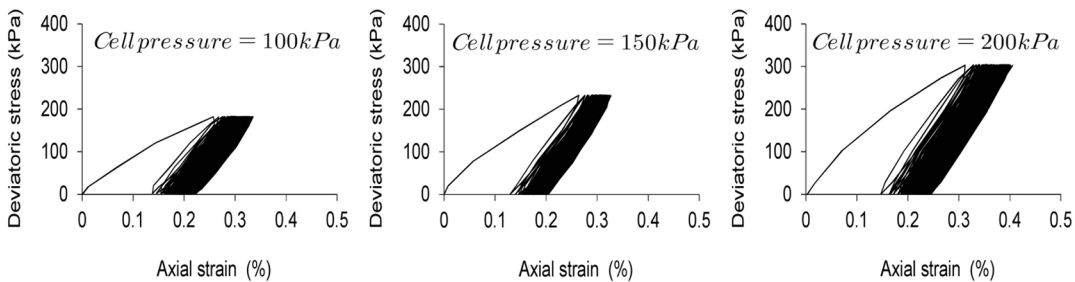


Fig. 7 Cyclic axial stress-strain curves according to cell Pressure ( $D_r = 75\%$ , stress ratio( $X$ ) = 0.5)

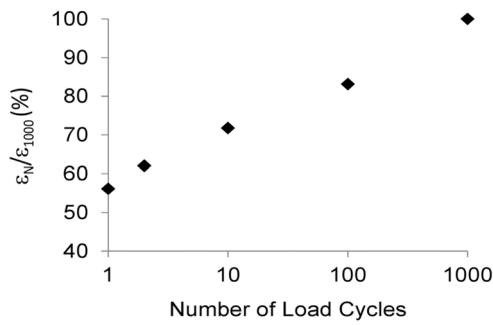


Fig. 8 Normalized accumulated axial displacement according to number of load cycles

$N=10$ 일 때, 72%, 그리고  $N=100$ 일 때 83%로 나타났다.

Fig. 9는 누적 축소성 변형률을 반복하중 응력비에 따라 나타내었다. 전체적으로, 반복응력의 크기가 증가함에 따라 누적 소성변형률이 증가하는 경향을 보여준다.

### 5. 실험결과와 분석

#### 5.1 Akili 모델(2006)의 매개변수 산정

본 연구에서 얻어진 실험결과를 이용하여 식 (4)의 Akili 모델에 적용되는 입력변수  $A$ 와  $b$ 값을 산정하였다. Fig 10은 실험결과로부터 얻어진 대표적인 결과로서 반복하중 응력비가 증가함에 따라 변수  $A$ 와 관련이 있는  $y$ 절편 값이 증가하는 경향을 보여준다.

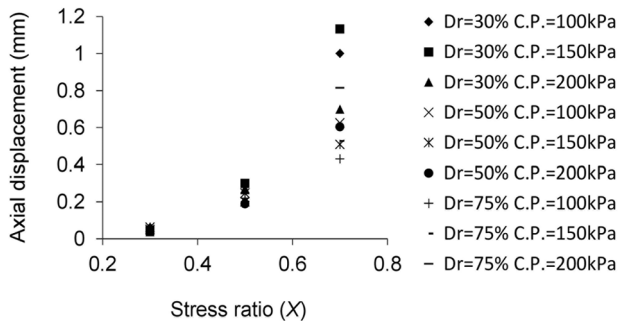


Fig. 9 Accumulated axial displacement according to stress ratio

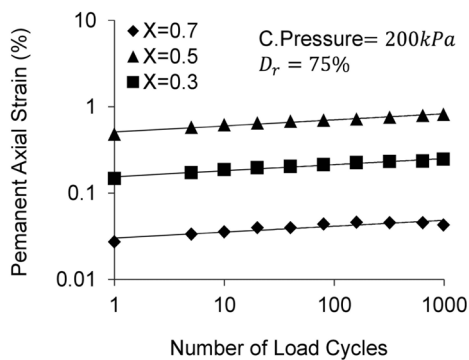


Fig. 10 Permanent axial strain according to number of load cycles ( $D_r = 75\%$ , cell pressure=200kpa)

그러므로, 반복하중 응력비  $X$ 값의 증가에 따른 변수  $A$ 값의 변화경향을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11을 보면 계수  $A$ 값은  $X$ 값이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주었으며, 회귀분석법을 이용하여 변수  $A$ 값의 산정공식을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$A = 1.20X^{3.13} \quad (5)$$

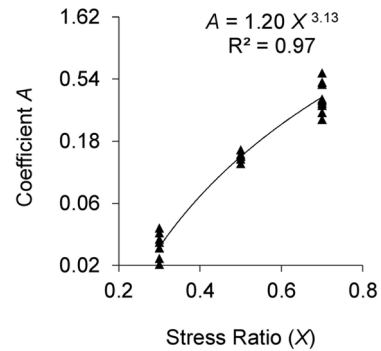


Fig. 11 Variation of A values according to stress ratio

변수  $b$ 의 경우 직선의 기울기와 관련이 있는데 Fig. 12를 보면 변수  $b$ 값이 상대밀도 증가에 따라 감소하는 경향을 보여준다. 이 관계를 분석하기 위하여 Fig. 13과 같이 상대밀도에 따른 평균 기울기값을 나타내었다. 그 결과 회귀분석법을 적용하여 상대밀도에 대한 변수  $b$ 값의 산정공식을 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$b = 0.4236D_r^{-0.44} \quad (6)$$

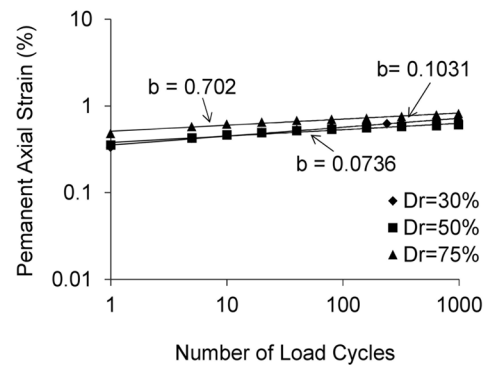


Fig. 12 Variation of b values according to relative density

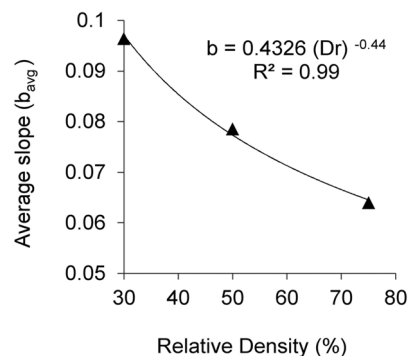
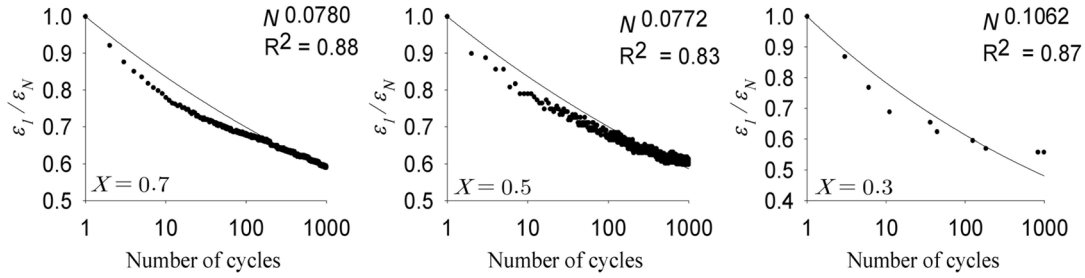


Fig. 13 Variation of  $b_{avg}$  values according to relative density

**Table 4** Comparisons of axial strains between triaxial tests and Akili model(2006)

$D_r$ (%)	Cell pressure(kpa)	Stress ratio( $X$ )	Accumulated plastic strain(%)		Relative error(%)
			Predicted	Measured	
30	150	0.3	0.053	0.045	17
50	150	0.5	0.231	0.247	6
75	150	0.7	0.609	0.527	15



**Fig. 14** Variation of normalized accumulated plastic strain with number of load cycles( $D_r = 75\%$ , cell pressure=200kpa)

앞서 제안된 식 (5)와 식 (6)의 적용성을 살펴보기 위하여 대표적인 실험조건에 대하여 소성변형률의 측정값과 예측값을 비교하였다. 그 결과, Table 4에서 보는 바와 같이 측정값과 예측값의 상대오차는 6~17% 정도로서 제안된 식이 실험결과를 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

Table 5에서 제안된 입력변수값의 적용성을 살펴보기 위하여 대표적인 실험조건에 대하여 소성변형률의 측정값과 예측값을 비교하였다. Table 5에서 상대밀도에 따른  $b_1$ 와  $b_2$ 의 평균값을 적용하였다. 그 결과, 측정값과 예측값의 상대오차는 Table 6과 같이 1~11% 정도로서 예측식이 실험값을 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

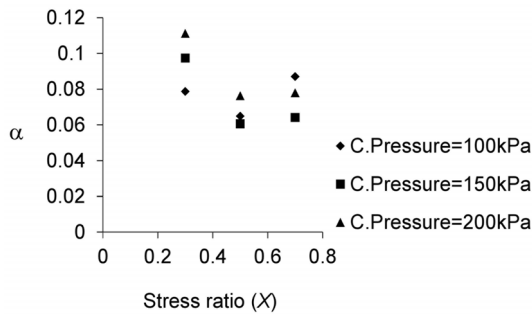
**5.2 Achmus 모델(2009)의 매개변수 산정**

Fig. 14는 반복재하횟수에 따른 정규화 축방향 누적소성변형률 결과를 보여준다.  $y$ 축은 첫 번째 재하의 변형률을  $N$ 번 재하의 변형률값으로 나누어 정규화하였다. 이 그림에서 추세선을 분석하여  $\epsilon_1/\epsilon_N = N^\alpha$ 에 해당하는  $\alpha$ 값을 산정하였다. 이  $\alpha$ 값은 식 (2)에서  $-b_1 X^{b_2}$ 에 해당하는 값이다.

**Table 5** Evaluation of input parameters of Achmus (2009) model

$D_r$ (%)	Cell pressure (kpa)	$b_1$	$b_2$	$b_{1\text{avg}}$	$b_{2\text{avg}}$
30	100	0.1305	0.4235	0.1084	0.1826
	150	0.1085	0.0886		
	200	0.0861	0.0358		
50	100	0.0934	0.1467	0.1026	0.2750
	150	0.1064	-		
	200	0.1080	0.6784		
75	100	0.0827	0.0977	0.0817	0.0326
	150	0.0740	-		
	200	0.0885	-		

그러므로, 각 상대밀도와 구속압에서 3개의  $X$ 값에 따른  $\alpha$ 값의 변화경향을 Fig. 15와 같이 구한 후 이 식에 대한 추세선 식  $\alpha = -b_1 X^{b_2}$ 를 적용하여 변수  $b_1$ 과  $b_2$ 값을 추정하였다. 그 결과, Table 5와 같이 각 상대밀도와 구속압에 따른  $b_1$ 과  $b_2$ 값을 산정하였다. 그러나, 이 값들은 상대밀도 및 구속압에 따라 일정한 경향성이 없는 것으로 나타났다. Achmus et al.(2009)은  $b_1$ 과  $b_2$ 값은 재료상수로 제안한 바 있으므로 상대밀도에 따라 각 평균값을 Table 5와 같이 제안하였다.



**Fig. 15** Variation of  $\alpha$  values according to stress ratio

**Table 6** Comparison of normalized axial strain between triaxial tests and Achmus (2009) model

$D_r$ (%)	Cell pressure (kpa)	Stress ratio ( $X$ )	plastic strain ratio ( $\epsilon_1/\epsilon_N$ )		Relative error (%)
			Predicted	Measured	
30	100	0.7	0.443	0.456	3
50	100	0.7	0.446	0.504	11
75	100	0.7	0.562	0.570	1

## 6. 결 론

해상풍력발전기는 장기적으로 수평 반복하중을 받기 때문에 기초구조물 주변지반의 누적 영구변형을 평가하는 것이 중요하다. Achmus et al.(2009)은 풍력발전기 주변지반의 반복하중에 따른 거동을 평가하기 위하여 강성저하모델을 제안하였다. 이 모델을 실제 설계에 적용하려면 현장 지반에 대한 반복삼축시험을 수행하여 입력변수값을 산정하는 절차가 필요하다. 본 연구는 국내 모형실험에 이용되는 대표적인 표준사인 주문진 표준사에 대한 반복삼축시험을 수행하여 강성저하모델의 입력변수값을 산정하였으며 다음의 결론을 얻었다. 다만, 본 연구에서 이용한 주문진 표준사는 실제 현장의 해저 사질토 지반의 특성과 다를 수 있기 때문에 본 연구결과를 적용할 때는 주의가 필요하다.

(1) 상대밀도, 구속압, 응력비 조건을 변경시키며 반복삼축을 시험한 결과 첫 번째 재하때 발생한 시료의 축방향 변형률이 전체 누적소성변형률( $N=1000$ )의 평균 56%로 가장 크게 발생하였고, 누적 소성변형률의 크기는 응력비( $X$ )에 비례하여 증가하고 상대밀도가 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향이 나타났다.

(2) Akili(2006)가 제안한 식을 이용하여 매개변수를 산정한 결과 매개변수  $A$ 는 응력비에 영향을 받고, 매개변수  $b$ 는 상대밀도에 따라 변화하는 것을 확인하였다. 회귀분석법을 적용하여 변수  $A$ 와  $b$ 를 각각 응력비와 상대밀도의 함수로 산정하는 식을 제안하였다. 제안된 식으로 예측된 축방향 영구변형률은 실험값과의 상대오차가 6~17%로서 실험값을 잘 예측하는 것으로 판단된다.

(3) Achmus et al.(2009)이 제안한 식을 이용하여 상대밀도 변화에 따른 평균값으로부터 매개변수값을 산정하였다. 그 결과, 상대밀도 30%일 때  $b_1=0.108$ ,  $b_2=0.183$ , 상대밀도 50% 일 때  $b_1=0.103$ ,  $b_2=0.275$ , 그리고 상대밀도 75%일 때  $b_1=0.0817$ ,  $b_2$

$=0.0326$ 로 제안하였다. 제안된 식으로 예측된 소성변형률비와 실험값의 상대오차는 1~11%로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단의 이공분야 기초연구사업(NRF-2012R1A1A2A10042889)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## References

Achmus, M., Kuo, Y.-S., Abdel-Rahman K., 2009. Behavior of Monopile Foundations under Cyclic Lateral load. *Computer and Geotechnics*, 36, 725-735.

Akili, W., 2006. Permanent and Resilient Deformation of a Dry Sand under Repeated Compressive Loads. *GeoCongress 2006 - Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, ASCE, 2006, 1-6.

Huurman M., 1996. Development of Traffic Induced Permanent Strain in Concrete block Pavements. *HERON-ENGLISH EDITION*, 41(1), 29-52.

Le, C.H., Kim, S.R., Lee, J.H., 2013. Numerical analysis of Bucket Foundations under Long-term Cyclic Lateral Loading in Sand. *Geotec HANOI 2013 - Geotechnics for sustainable development*, 849-854.

Li, X. S., Chan, C.K., Shen, C.K., 1988. Advanced triaxial testing System. *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTM STP 977, Robert T. Donaghe, Ronald C. Chaney, and Marshall L. Silver, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, 95-106.

Veritas, D.D.N., 2013. DNV-OS-J101 Offshore Standard. *Design of Offshore Wind Turbine Structures*.