수정 IWAN 모델을 이용한 사질토의 반복경화거동에 대한 연구(II) : 모델 검증

A Modified Parallel Iwan Model for Cyclic Hardening Behavior of Sand(II) : Verification

이 진 선* 김 동 수** 추 연 욱*** 윤 종 구****
Lee, Jin Sun Kim, Dong Soo Choo, Yun Wook Yoon, Jong ku

국문요약

본 논문에서는 동반된 논문에서 제안된 수정 병렬 IWAN 모델의 적용성을 금강 모래와 토요라 모래를 대상으로 비틂전단실험을 수행하여 검증하였다. 두가지 사질토에 대하여 대칭 하중과 불규칙 하중을 반복 재하하여 실험을 수행하였다. 제안된 모델의 변수는 다양한 상대밀도와 구속압 조건하에서 대칭 반복하중을 재하하여 결정하였다. 시험 결과, 하중반복회수가 증가함에 따라 발생하는 사질토의 반복경화거동을 수정 병렬 IWAN 모델로 표현 가능하였으며, Pyke(1979)에 의해 제안된 불규칙 하중 형태를 이용한 실험결과를 실험 조건이 유사한 대칭 반복하중 재하실험 결과로 얻어진 모델 변수를 이용하여 예측한 결과 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

주요어 반복경화, IWAN 모델, 대칭하중재하실험, 불규칙 하중재하실험, 비틂전단실험

ABSTRACT

In order to verify the applicability of the developed modified parallel IWAN model, two types of cyclic torsional shear tests were performed using Kum-Kang and Toyoura sands. One was a symmetric-limit loading test and the other was an irregular loading test. Model parameters were derived from the symmetric limit loading tests at various relative densities and confining pressures. The modified parallel IWAN model can predict the cyclic hardening behavior of sands very well as increasing loading cycles in the symmetric-limit tests. Irregular loading tests were performed using the loading shape suggested by Pyke(1979). Cyclic behaviors under irregular loading were simulated using model parameters derived from symmetric limit loading test results of similar loading conditions. The predicted cyclic hardening behaviors under irregular loading matched well with experimental results and the applicability of the proposed model was verified.

Key words : cyclic hardening, IWAN model, symmetric limit cyclic loading test, irregular loading test, torsional shear test

1. 서 론

동반논문에서는 저-중변형률 영역(10^{-3}% - 1%)에서 사질토의 반복 경화 거동의 표현이 가능한 수정 병렬 IWAN 모델을 제안하였다. 본 논문에서는 제안된 모델의 적용성 검증을 위해서 모델 변수 결정 방법과 제안된 모델의 거동을 실험결과와 비교/검증하였다.(1)

본 논문에서 제안된 모델의 거동특성 검증을 위하여 수행한 비틂전단실험은 지진시 지반의 1차원 반복 응력-변형률 거동을 재현하기 위한 실험이다. 일반적인 반복실험은 지반의 반복특성을 규명하기 위하여 정규화된 사인 형태의 하중을 가하여 수행된다. 그러나, 지진시 현장지반은 불규칙한 하중을 경험한다. 이로 인하여 불규칙 하중을 이용한 실험이 수행 되었다.(2),(3) 일반적으로 불규칙 하중 시험을 하는 이유는 반복거동을 위한 지반모델에서 사용되는 확장 Masing rule의 타당성을 검증하기 위한 작업임과 동시에 정규화 sine 하중으로 얻어진 모델 변수로 거동하는 지반 모델이 불규칙 하중에 의해 실제상황과 유사한 거동을 보이는 가를 검증하는 작업이다.

본 논문에서는 두 종류의 모래시료를 이용하여 저-중간변형률 영역에서 대칭 반복하중 및 불규칙 하중을 재하하여 비틂전단실험을 수행하였다. 실험 결과를 이용하여 동반논문에 자세히 서술되어 있는 반복경화 변수(β, χ)를 결정하였으며, 그 결과를 이용하여 불규칙하중을 받는 모델의 거동특성을 살펴 보았다.

2. 실험 장비 및 실험 계획

2.1 비틂 전단실험

반복 비틂전단실험은 등방구속압 상태에서 주응력 방향을 축으로 연속인 회전력을 가하여 수평면 상에 반복전단응력을 가할 수 있다. 이 실험법은 넓은 변형률 범위에서 강성과 감쇠비 특성을 측정하기 위해 수행한다. 본 논문에서는 반복하중 재하실험을 위하여 고정단-자유단 비틂전단실험장치인 Stokoe식 시험기를 이용하였다.(4),(5)

Stokoe식 비틂전단 시험기의 4개의 영구자석이 부착된 가

* 정회원 · 삼성물산 건설부문 과장(대표저자 : ppk21@freechal.com)
** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과, 교수
*** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과, 박사과정
**** 정회원 · 한국과학기술원 건설및환경공학과, 박사과정
본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 6. 19 / 심사종료일 : 2003. 7. 24)

진판(drive plate)은 탑캡으로 시료의 상부에 밀착된다. 영구자석의 끝에는 한 쌍의 가진코일이 타원형태로 감겨 위치한다. 영구자석과 가진코일은 비틂력을 발생시켜 시료에 비틂력을 가한다. 코일-자석 시스템이 시료에 비틂력을 가하는 동안 응력-변형률 이력곡선은 시료에 가해지는 토크와 시료의 비틂 변형을 측정하여 얻을 수 있다. 가진 시스템 코일에서 가해진 볼트값으로 토크의 크기를 구하며, 간격측정기(proximitor)는 시료의 비틂각을 측정하는데 이용된다. 측정된 지반 시료의 비틂각 및 토크는 시료의 크기에 따라 전단응력과 전단변형으로 변환된다. 비틂전단실험 장비는 그림 1에 나타내었다.

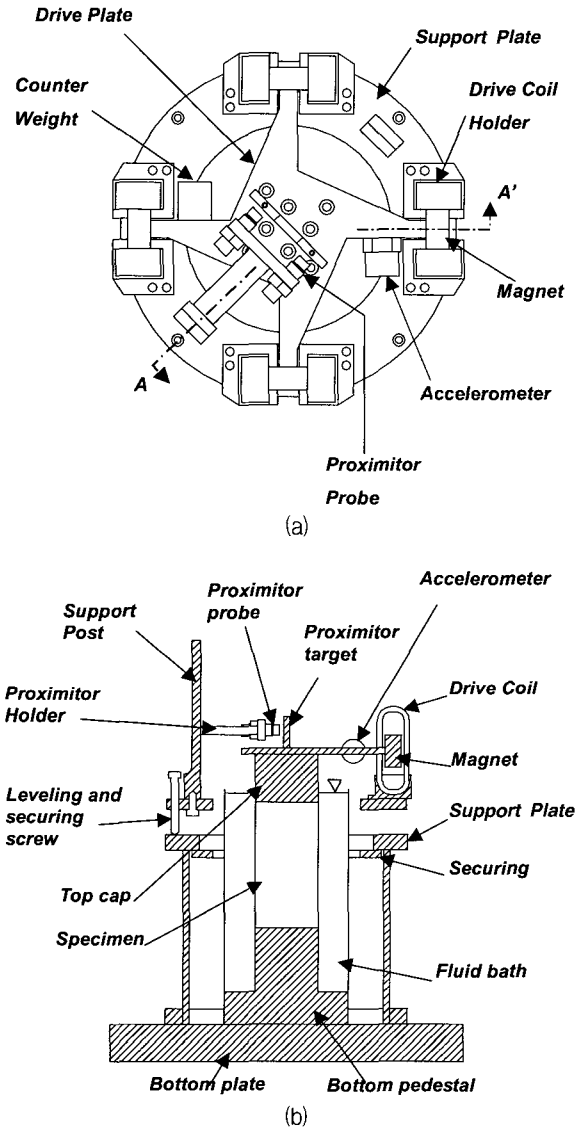


그림 1 비틂전단시험 장비

2.2 대칭하중 재하실험

수정 병렬 IWAN 모델을 위한 초기 재하곡선과 반복 경화변수(β, x)를 결정하기 위하여 대칭하중 재하실험을 수행하였다. 대칭하중 재하 실험은 0.06Hz 주파수의 사인 형태의 하중을 90회 재하하여 수행하였다. 두가지 건조 사질토에 대하여 실험을 수행하였으며, 실험 시료의 지반공학적 물성은 표 1에 나타나 있다. 실험에 사용된 시료(금강모래, 토요라모래) 모두 낙사법(pluviation)으로 성형되었으며, 구속압은 진공압을 사용하였다.

표 1 시험 시료의 공학적 특성

지반물성	금강 모래	토요라 모래
통일분류법(USCS)	SP	SP
최대 간극비	0.973*	0.982
최소 간극비	0.698*	0.617
G_s	-	2.65
C_c(Coefficient of Gradation)	0.96	1.00
C_u(Uniformity coefficient)	2.46	1.29
PI	NP	NP
D_{50}, mm	0.424	0.199

* G_s = 2.65로 가정하여 계산

상대밀도와 구속압을 변화시켜가면서 총 10개의 시험 조건으로 반복하중 재하실험을 수행하였다. 총 10개의 시험조건은 다음과 같다.

금강 모래의 경우 구속압 50kPa에서 상대밀도를 54%에서 82%까지 변화시켰고, 토요라 모래의 경우 54%에서 79%까지 변화시켰다. 구속압의 경우 50, 75, 100kPa로 변화를 주었고, 이 경우 상대밀도는 대략 금강 모래의 경우 73%, 토요라 모래의 경우 65%로 일정하게 유지하였다. 시험조건에 대한 자세한 사항은 표 2에 요약하여 나타내었다.

반복하중 재하실험의 전형적인 실험결과는 그림 2와 같다. 각각의 그림은 하중반복회수 1~30, 30~60, 60~90에서의 결과다. 실험결과로부터 두 시료 모두 하중반복회수가 증가함에 따라 상당량의 반복경화거동을 보임을 알 수 있으며, 특히 10번의 반복하중을 받을 때까지 많은 경화거동이 일어나고, 그 이후는 적은량의 반복경화 거동을 보인다. 또한, 이력곡선은 하중반복회수가 증가함에 따라 특정한 형태를 가지며 수렴하게 된다. 따라서, 반복경화가 발생하는 동안 응력이력곡선의 면적은 하중반복회수가 증가함에 따라 감소하고 이는 시료의 이력감쇠량(hystretic damping)을 감소시킨다.

표 2 대칭 반복한계 하중실험 조건

실험 번호	시료	상대밀도 (%)	구속압 (kPa)	최대비틂력 (kPa)	하중주파수 (Hz)
1	금강 모래	54.7	50	17	0.06
2	금강 모래	73.9	50	17	0.06
3	금강 모래	74.5	75	17	0.06
4	금강 모래	70.6	100	17	0.06
5	금강 모래	82.1	50	17	0.06
6	토요라 모래	54.3	50	14	0.06
7	토요라 모래	67.0	50	14	0.06
8	토요라 모래	65.7	75	14	0.06
9	토요라 모래	63.8	100	14	0.06
10	토요라 모래	79.3	50	14	0.06

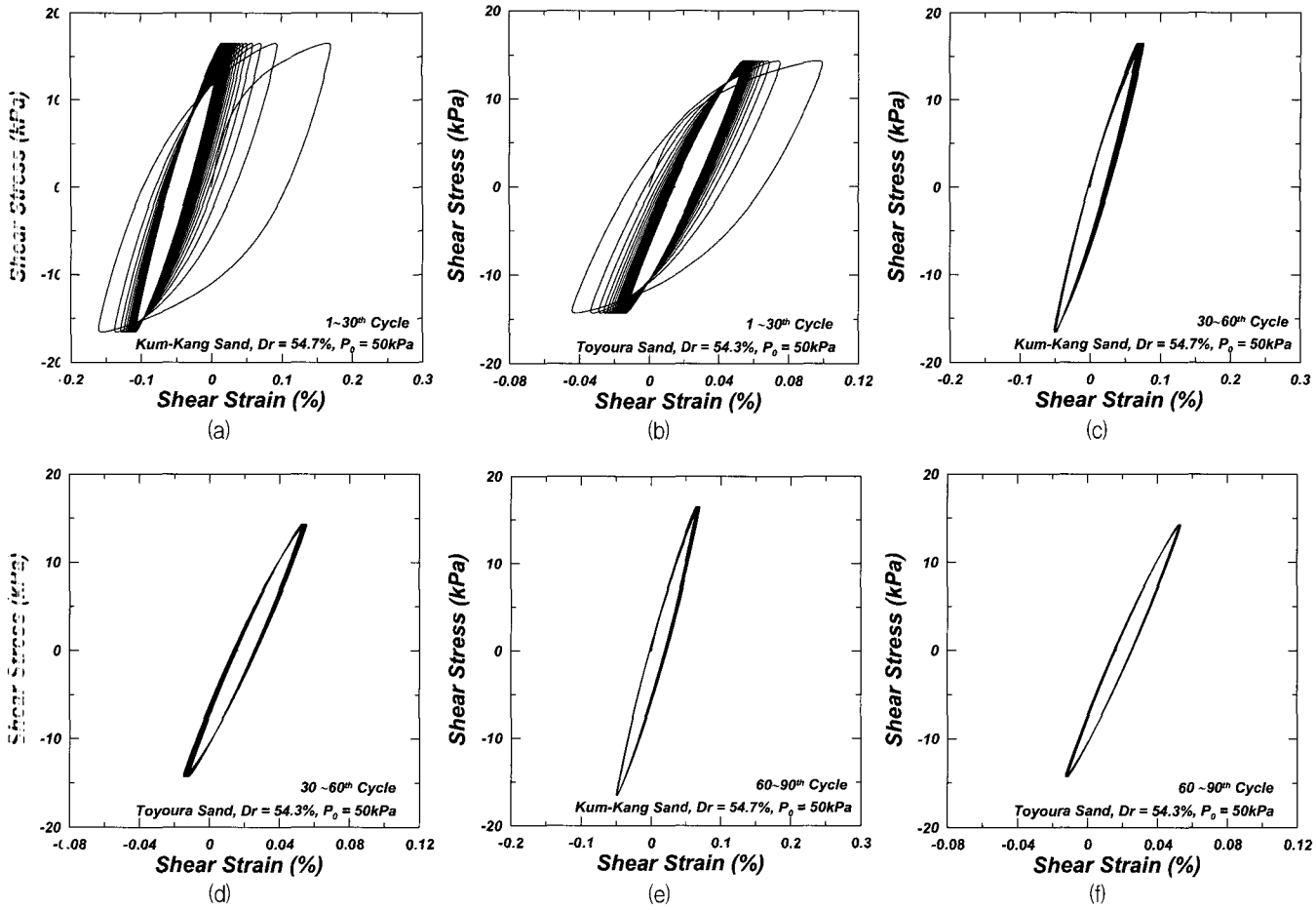


그림 2 반복하중 재하실험의 전형적인 실험결과

2.3 불규칙 하중재하 실험

지진과 같은 불규칙 하중에 대해서 제안된 모델의 적용성을 검증하기 위하여 불규칙 하중재하 시험을 수행하였다. 사용된 하중은 Pyke가 제안한 형태를 이용하였다(그림 3).[2]

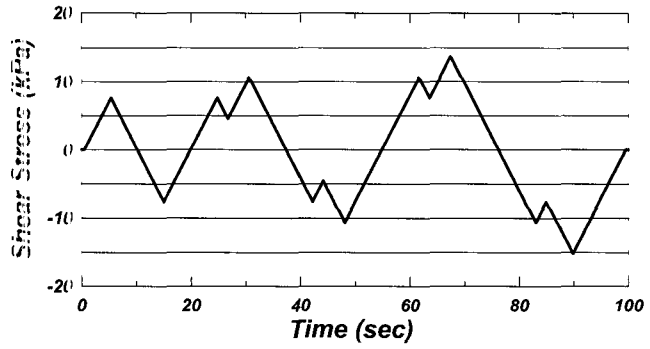


그림 3 불규칙 하중 재하 형상(Pyke, 1979)

불규칙 하중재하 실험은 금강 모래의 경우 상대밀도 55% 토요라 모래의 경우 53%에서 실험을 하였다. 시료는 낙사법으로 성형하였고 구속압은 진공압으로 50kPa을 가하였다 반복하중 재하실험에서는 노이즈 제거를 위한 필터를 사용하였으나, 불규칙 하중재하 실험에서는 하중형태의 왜곡을 방지하기 위하여 사용하지 않았다.

지반 시료에 가해진 비틂력의 최대 크기는 14kN으로 일정하게 하였고, 하중은 불규칙 하중을 5회 반복재하 하였다 자세한 하중 재하 조건은 표 3에 타나내었다. 금강 모래와 토요라 모래의 불규칙 하중에 대한 반복거동은 그림 4와 그림 5에 각각 나타나 있다.

3. 반복하중 재하실험에 의한 경화함수 결정

수정 병렬 IWAN 모델을 이용하여 사질토 시료의 반복거동을 모사하기 위하여 슬라이더 항복응력 분포함수, 개별 요소의 탄성계수 및 반복경화변수(β, x)를 결정해야 한다. 각

표 3 불규칙 하중실험 조건

실험번호	시료	상대밀도(%)	구속압(kPa)	최대비틂력(kPa)	하중주파수(Hz)
1	금강 모래	55.7	50	14	0.01
2	토요라 모래	53.3	50	14	0.01

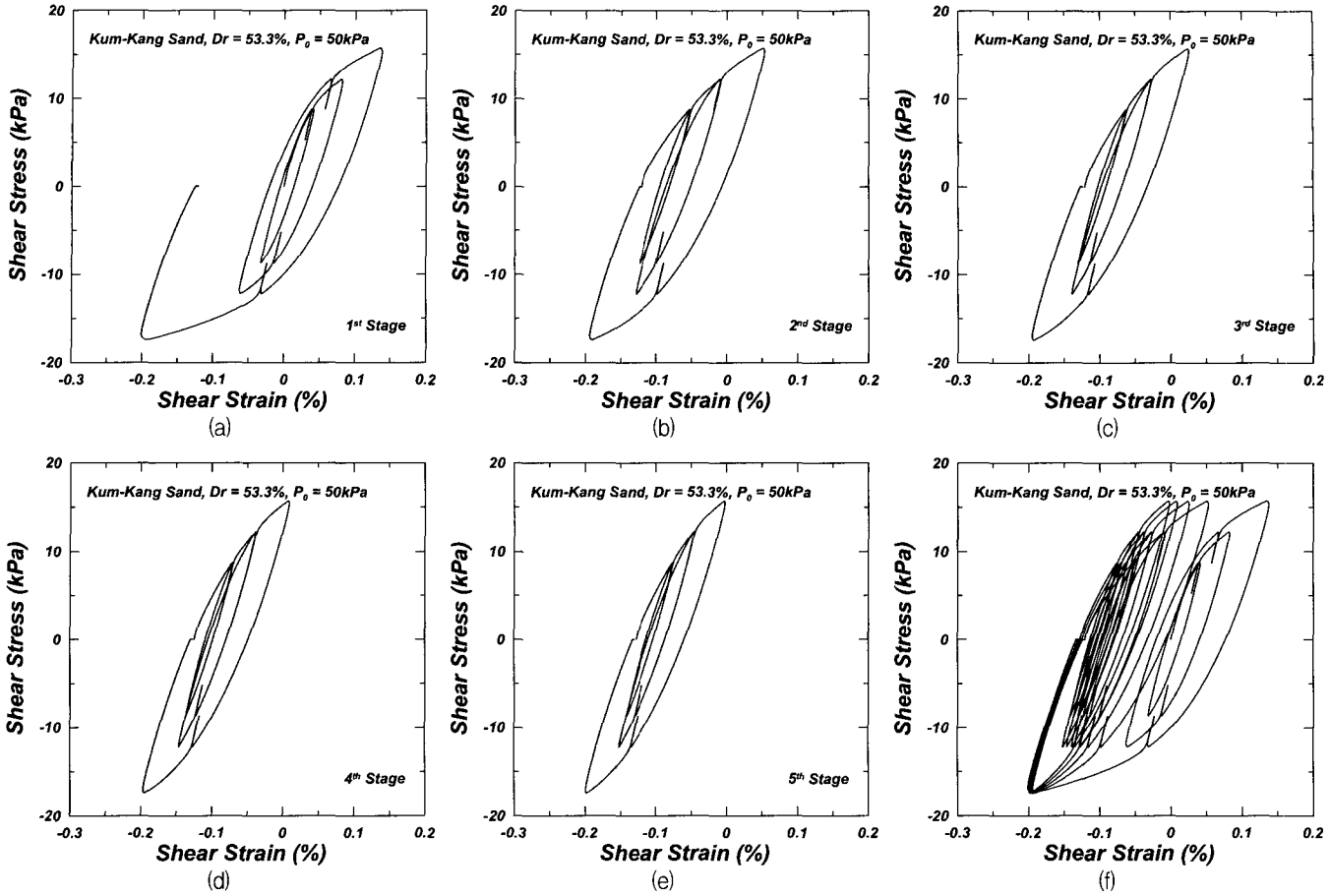


그림 4 금강 모래의 불규칙 하중에 대한 반복거동

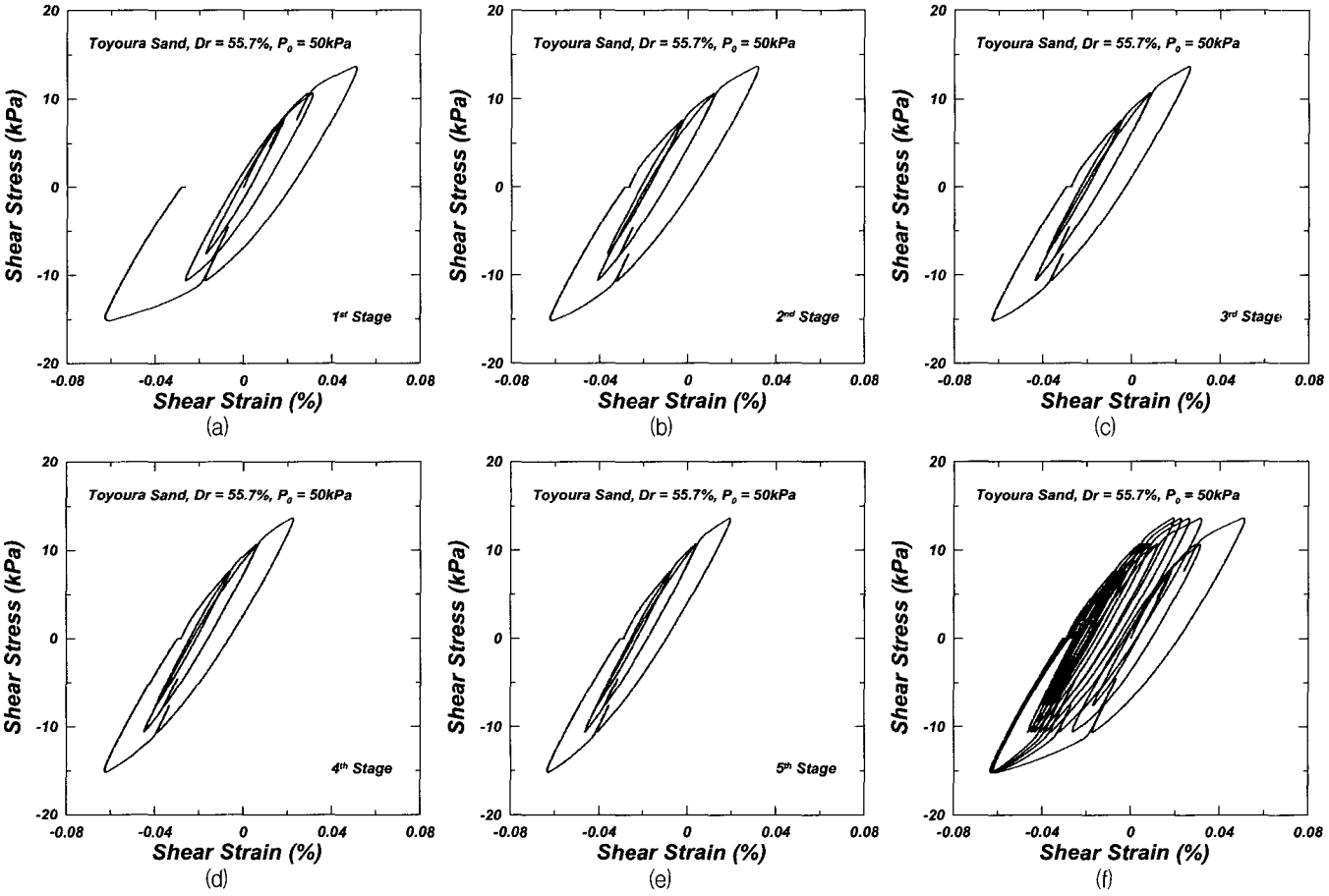


그림 5 토요라 모래의 불규칙 하중에 대한 반복거동

각의 모델변수에 대한 자세한 설명은 동반논문에 되어있다.[1] 모델변수를 결정하는 방법은 다음과 같다.

(i) 슬라이더 항복응력 분포함수는 반복하중 재하실험시 구할 수 있는 초기재하곡선으로부터 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

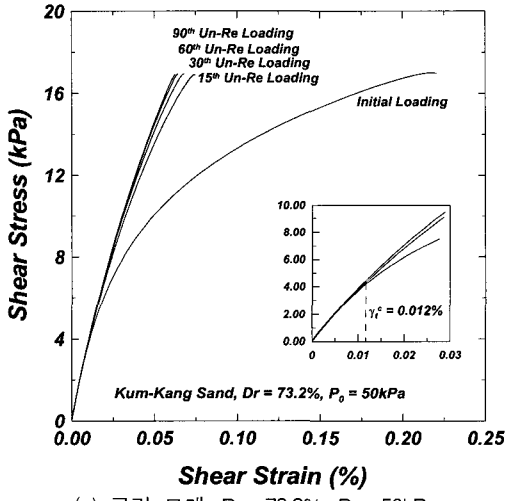
$$\varphi(\tau_i^*) = \Psi(\tau_i^*) - \Psi(\tau_{i+1}^*) = \frac{K_i}{k} - \frac{K_{i+1}}{k}$$
$$= \frac{(\tau_i - \tau_{i-1})/(\gamma_i - \gamma_{i-1}) - (\tau_{i+1} - \tau_i)/(\gamma_{i+1} - \gamma_i)}{k} \quad (1)$$

(ii) 반복한계변형률은 Masing법칙에 근거하여 초기재하곡선의 형태로 그려진 역재하-재재하 곡선의 변화로부터 결정 가능하다. 그림 6에 나타나 바와 같이, 반복한계변형률 이하에서 초기재하곡선들은 하중반복회수에 관계없이 동일하다. 그러나 반복한계변형 이상에서 초기재하곡선들은 하중반복회수이 증가에 따라 강성이 증가하는 형태를 보인다. 따라서, 초기재하곡선이 변화하는 변형률을 기준으로 금강 모래 시료와 토요라 모래시료의 반복한계변형률은 각각 0.012%와 0.007%로 결정되었다.

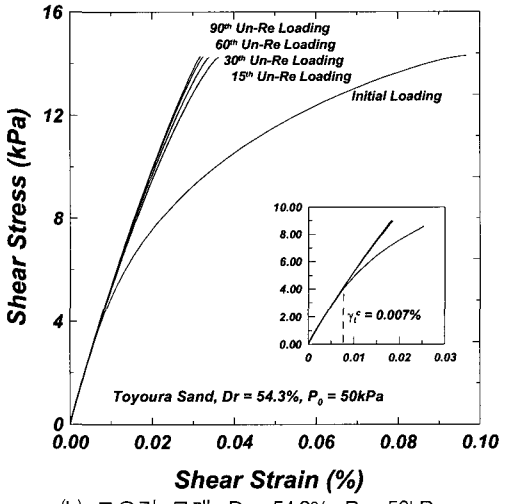
(iii) 경화함수는 누적전단변형률에 따른 슬라이더 항복응력의 변화로부터 얻어진다. 누적전단변형률에 따른 슬라이더 항복응력 $\tau^*(\gamma_{acc})$의 변화량은 분해된 초기재하곡선상 특정 변형률에서 하중반복회수 증가에 따른 슬라이더 항복응력의 변화를 계산하여 얻을 수 있다. 이때 하중역전점은 시료의 변형률 변화속도가 0이므로 슬라이더 항복응력 변화를 계산하기 위한 기준점으로 사용된다.

(iv) 누적전단변형률에 따른 슬라이더 항복응력변화량은 (iii)에서 설명된 바와 같이 식 (2)를 이용하여 표현할 수 있다. 이로부터, 수정 IWAN 모델의 경화함수는 식 (3)과 같이 임의의 누적전단 변형률에서의 슬라이더 응력 분포함수와 전단변형률이 누적되기 이전의 슬라이더 응력 분포함수의 차로 정의된다. 반복하중 재하실험 결과로 구한 누적전단변형률 증가에 따른 슬라이더 응력 분포함수의 변화는 그림 7과 같다. 총 10개의 시험조건에서 얻어진 반복경화 변수는 표 4에 요약되어 있다.

$$\tau_i^*(\gamma_{acc}) = \alpha + \beta e^{-\chi \gamma_{acc}} \quad (2)$$

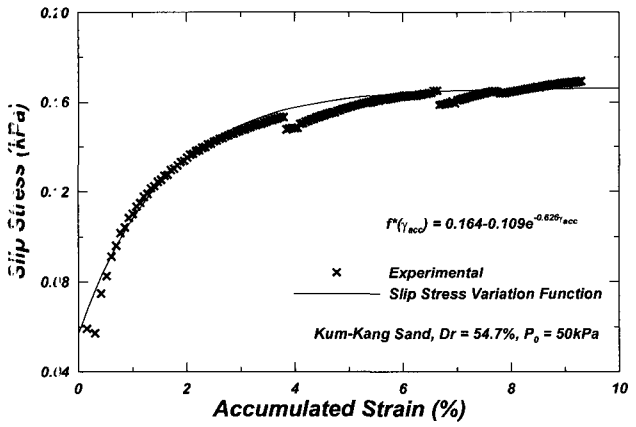


(a) 금강 모래, Dr = 73.2%, P0 = 50kPa

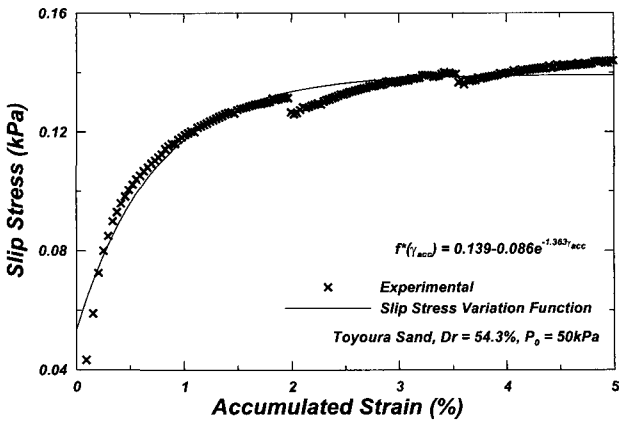


(b) 토요라 모래, Dr = 54.3%, P0 = 50kPa

그림 6 Masing법칙에 근거하여 초기재하곡선 형태로 그려진 역재하-재재하 곡선의 변화



(a) 실험 #1



(b) 실험 #6

그림 7 누적전단변형률 증가에 따른 슬라이더 응력 분포함수의 변화

표 4 대칭 반복한계 하중실험의 경화 변수

실험 번호	경화변수		실험 번호	경화변수	
	β	κ		β	κ
1	-0.109	0.626	6	-0.086	1.363
2	-0.067	0.687	7	-0.189	1.171
3	-0.146	1.239	8	-0.049	2.098
4	-0.069	0.769	9	-0.074	2.435
5	0.074	0.754	10	-0.079	1.236

여기서, α, β, x는 재료상수 이고, γ_{acc}는 누적전단변형률이다.

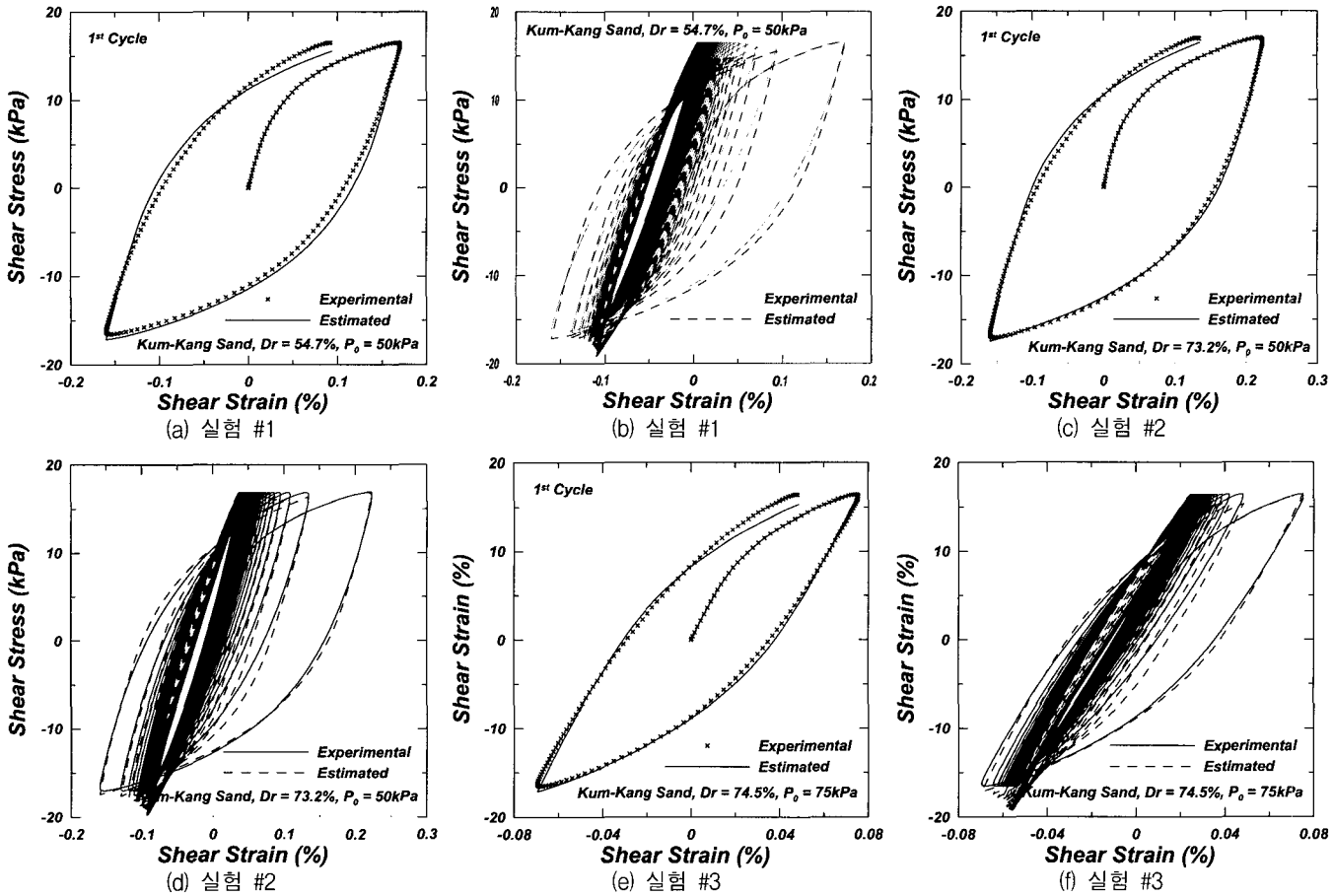
$$H(\gamma_{acc}) = \tau^*(\gamma_{acc}) - \tau^*(0) = \beta(e^{-x\gamma_{acc}} - 1) \quad (3)$$

4. 수정 IWAN 모델의 검증

본 논문에서 제안된 모델의 검증을 위하여 두 종류의 실험을 실시하였다. 하나는 반복하중 재하실험이고 다른 하나는 불규칙 하중재하 실험이다. 대칭반복한계하중실험은 모델 변수를 획득하고 상대밀도와 구속압에 따른 모델의 거동 특성을 검증하기 위하여 수행하였다. 불규칙 하중 재하실험에서는 지진과 같은 하중 조건하에서 제안된 모델의 적용성을 검증하기 위하여 수행하였다.

4.1 반복하중 재하실험을 이용한 검증

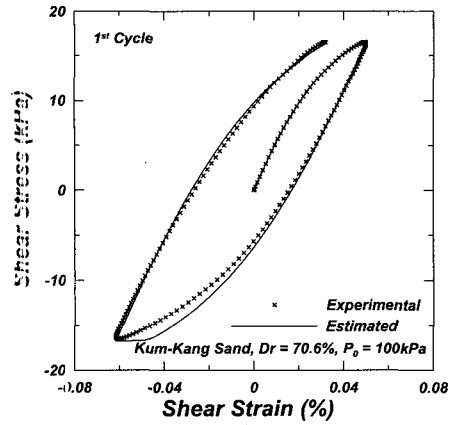
제안된 모델의 경화변수 β와 x는 총 10개의 대칭 한계반복재하 실험으로부터 결정 되었으며, 표 4에 요약하였다. 모델에서 사용한 스프링-슬라이더 요소의 총 수는 실험 초기 재하곡선에서 얻어진 데이터 포인트 수와 동일하며, 실험당 40~45개가 사용되었다. 그림 8에는 실험결과와 제안된 모델의 거동을 비교하였다. 비교 결과 수정 IWAN 모델이 사질토 시료의 반복 거동을 전반적으로 잘 표현하는 것을 볼 수 있다. 특히 지진시 부지응답해석을 위해 가장 중요한 첫 번째 하중 반복시, 매우 잘 일치함을 볼 수 있다. 시험조건 3, 7의 경우 하중 반복회수 20회 이상에서 실험 결과와 다른 예측결과를 보이나, 하중 반복회수 1~10회 까지는 실험결과와 매우 잘 일치하는 거동을 보임을 알 수 있다. 따라서, 비교 결과에 나타난 바와 같이, 제안된 모델은 하중반복회수의



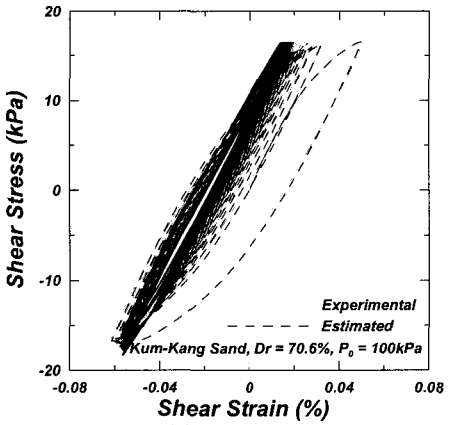
(a) 실험 #1 (b) 실험 #1 (c) 실험 #2

(d) 실험 #2 (e) 실험 #3 (f) 실험 #3

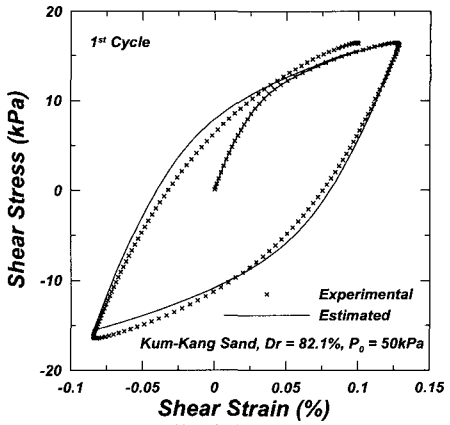
그림 8 반복 하중재하 실험결과와 제안된 모델의 거동을 비교(계속)



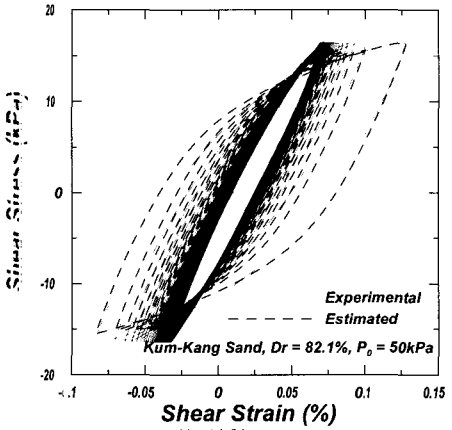
(g) 실험 #4



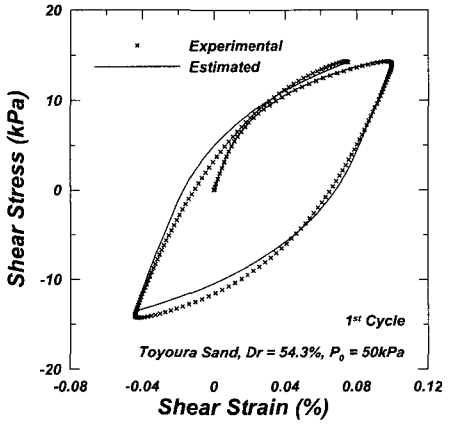
(h) 실험 #4



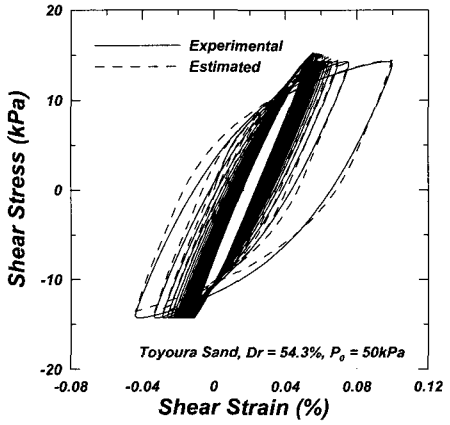
(i) 실험 #5



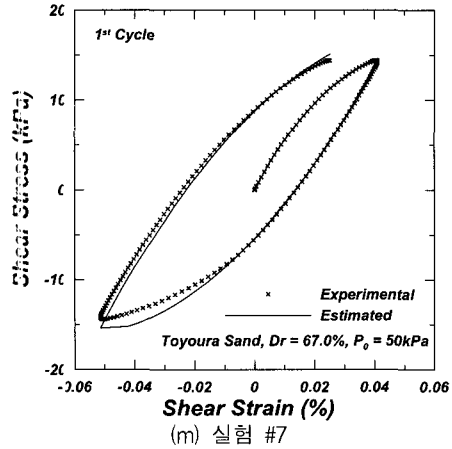
(j) 실험 #5



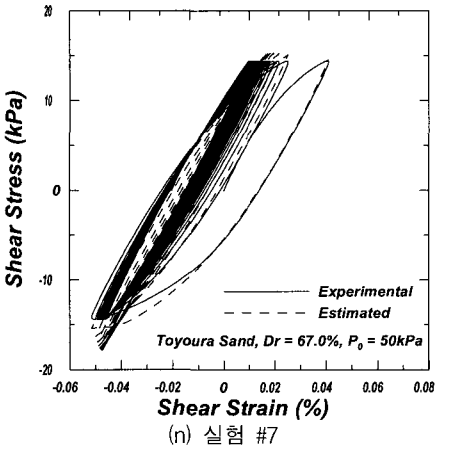
(k) 실험 #6



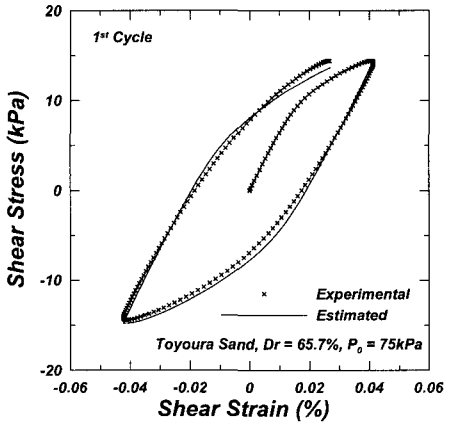
(l) 실험 #6



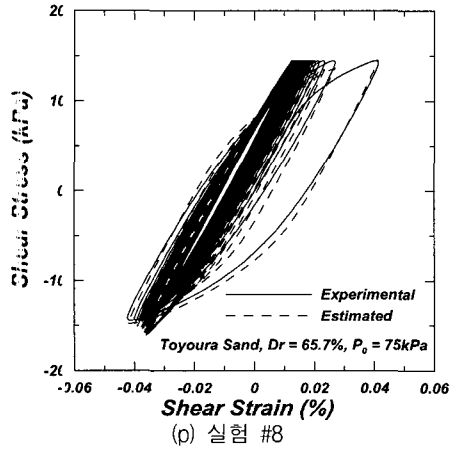
(m) 실험 #7



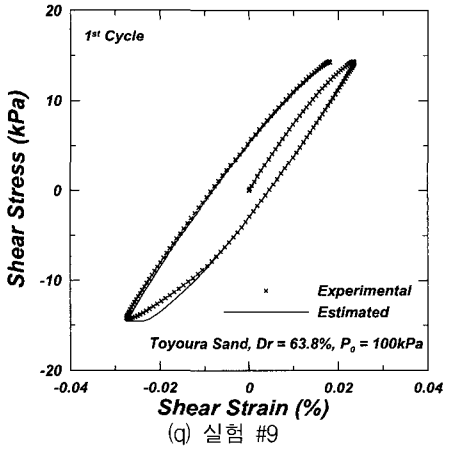
(n) 실험 #7



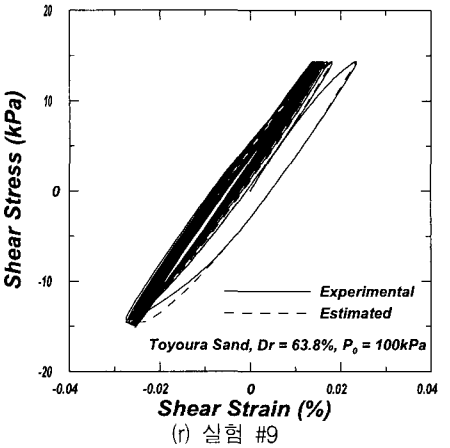
(o) 실험 #8



(p) 실험 #8

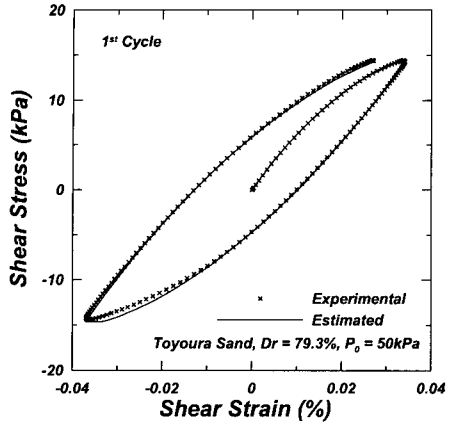


(q) 실험 #9

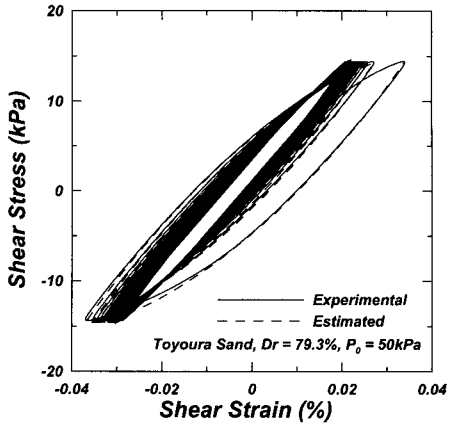


(r) 실험 #9

그림 8 반복 하중재하 실험결과와 제안된 모델의 거동을 비교(계속)



(s) 실험 #10



(t) 실험 #10

그림 8 반복 하중재하 실험결과와 제안된 모델의 거동을 비교

증가에 따라 발생하는 건조 사질토 시료의 경화거동을 매우 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다. 몇 개의 시험조건에서 많은 하중반복회수를 겪었을 경우 모델거동과 실험 결과가 일치하지 않는 부분은 top-cap과 시료간의 순응성 문제로 사료된다.

4.2 불규칙 하중재하 실험을 이용한 검증

불규칙 하중재하 실험은 제안된 모델이 지진과 같은 천이하중(transient loading)을 받을때의 거동을 검증하고 정현하중 시험으로 결정된 경화변수의 적용(중첩의 원리, Palmgren-Miner rule)의 타당성을 검증하기 위해 수행되었다. 모델 변수로 사용된 초기재하곡선과 반복경화변수(β, χ)는 상대밀도 및 구속압이 불규칙 하중재하실험과 유사한 조건하에 수행된 반복하중 재하 실험결과를 사용하였다. 반복 및 불규칙 하중재하실험의 실험조건은 표 5에 나타내었다. 이렇게 결정된 반복경화 변수는 금강 모래의 경우 β=0.024, χ=0.626이었으며, 토요라 모래의 경우 β=0.014, χ=1.363이며, 반복하중재하시험 결과 획득한 초기재하곡선을 이용하여 슬라이더 항복응력 분포함수 및 개별요소의 탄성계수를 결정 하였다.

위와 같이 획득한 모델변수를 가지고 제안된 모델을 사용하여 불규칙 재하실험 결과를 표현한 결과는 그림 9와 같으며, 반복경화 함수를 가지지 않는 기존 IWAN 모델과 비교하였다.

표 5 실험 조건 비교

시료	실험 종류	상대밀도 (%)	구속압 (kPa)	최대 비틂력 (kPa)	하중 주파수 (Hz)
금강 모래	대칭한계하중실험	54.7	50	16	0.1
	불규칙 하중실험	55.7	50	14	0.01
토요라 모래	대칭한계하중실험	54.3	50	14	0.1
	불규칙 하중실험	53.3	50	14	0.01

그림 9에 나타나 바와 같이, 경화변수가 반복하중 재하실험에서 얻어진 것을 사용하였지만 제안된 모델로 예측된 불규칙 반복거동은 실험결과와 매우 잘 일치하였고, 특히 지반응답 해석시 가장 중요한 첫 번째 하중 반복시 매우 잘 일치하였다.

하중 반복회수가 증가하였을 경우 실험결과와 모델의 거동이 다른 현상은 경화함수가 없는 기존 IWAN 모델의 경우 확연히 나타남을 알 수 있으며, 그 차이는 금강 모래시료에 비하여 토요라 모래에서 확연히 나타났다. 이는 반복경화의 절대량이 토요라 모래시료의 경우 크게 나타나기 때문으로 사료된다. 실험결과와 예측결과 사이의 일치하지 않은 부분은 다음과 같이 설명가능하다. i) 경화변수를 결정하는 반복하중재하 실험으로 얻어진 시료의 상대밀도는 불규칙 재하실험의 상대밀도와 일치하지 않다. ii) top cap과 시료사이의 접촉문제로 인하여 이력곡선의 수평 이동을 야기 하였다. 시험결과에 대해서 제안된 모델의 거동이 실험결과를 완벽하게 표현하지 못하지만, 반복하중 뿐만 아니라 지진과 같은 천이하중 상황에 충분히 적용 가능한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 두 가지 종류의 사질토 시료를 이용하여 제안된 모델의 적용성을 검증하였다. 제안된 모델의 변수는 다양한 상대밀도와 구속압 조건하에서 반복하중 재하실험으로부터 획득하여 사용되었다. 반복하중 재하실험 결과, 제안된 모델은 여러 상대밀도와 구속압상에서 건조 사질토 시료가 나타내는 반복경화거동을 매우 잘 예측하였다. 지진과 같은 천이하중상에서의 거동 확인을 위하여 불규칙 하중 재하실험을 수행하였으며 Pyke(1979)가 제안한 하중형태를 사용하였다. 불규칙 하중 재하실험 결과는 유사한 시험 조건으로 수행된 반복하중 재하실험 결과로 부터 모델변수를 획득하여 거동을 예측하였다. 그 결과 제안된 모델의 거동은 실험결과를 잘 예측하였다.

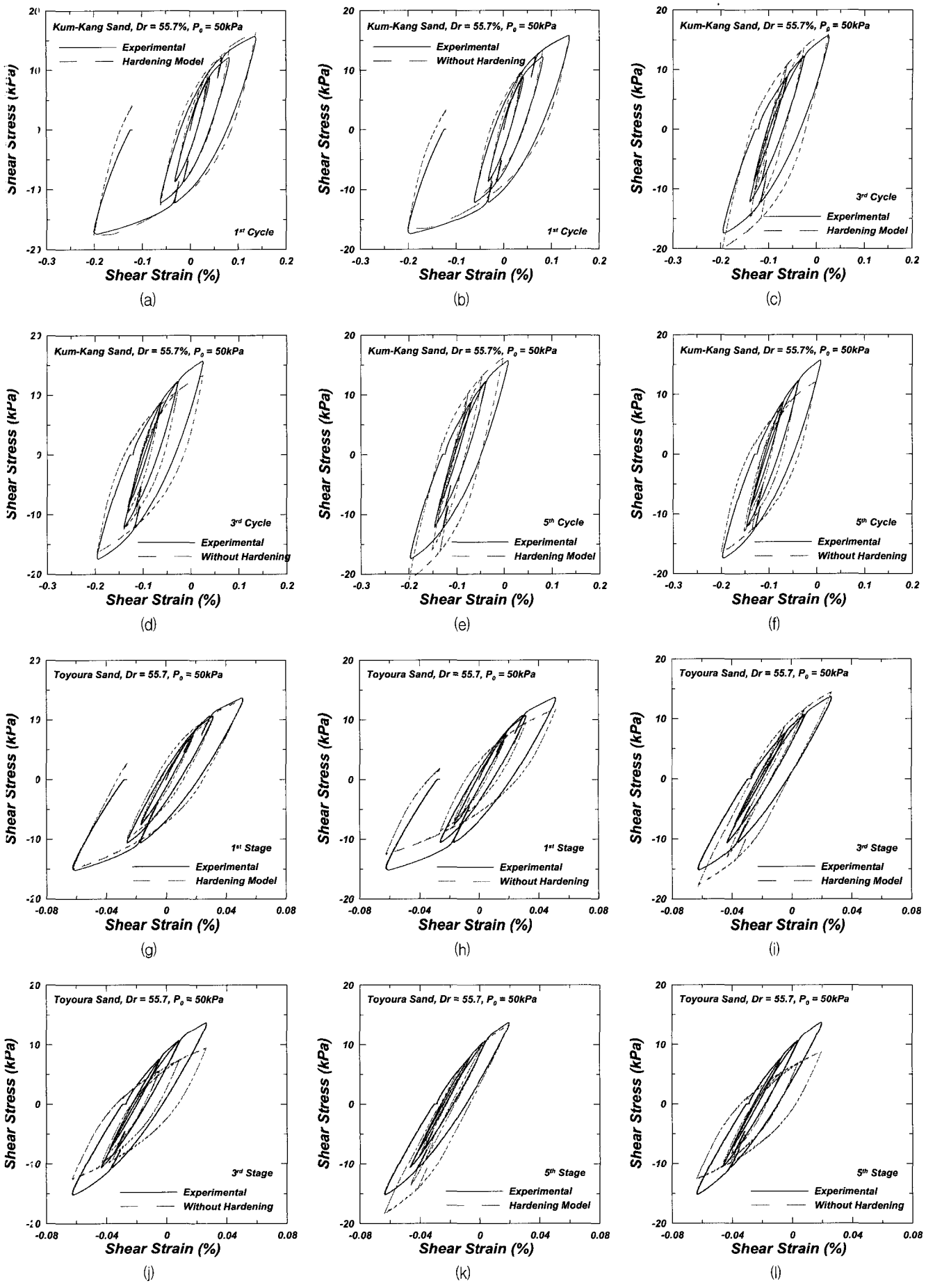


그림 9 불규칙 하중재하 실험결과와 제안된 모델의 거동을 비교

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자 지원사업 과제 (KRF-2002-041-D00511)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Kim, D. S., Lee, J. S., and Choo, Y. W., "A Modified Parallel Iwan Model for Cyclic Hardening Behavior of Sand. Part I. Model Development," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002.
2. Pyke, R., "Nonlinear Soil Models for Irregular Cyclic Loadings," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 105, No. GT6, 1979, pp. 715-726.
3. Ray, R. P. and Woods, R. D., "Modulus and Damping Due to Uniform and Variable Cyclic Loading," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 861-876.
4. Ni, S. H., "Dynamic Properties of Sand Under True Triaxial Stress States from Resonant Column/Torsional Shear Tests," Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, 1987, 421 pp.
5. Kim, D. S., "Deformation Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests," Ph. D. Dissertations, University of Texas at Austin, 1991.
6. Drnevich, V. P., "Undrained Cyclic Shear of Saturated Sand," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 98. No. SM8, 1972, pp. 807-825.