

반복하중을 받는 철근콘크리트 판넬의 비선형 해석 Nonlinear Analysis of RC Panels under Cyclic Loadings

곽 효 경* 김 도 연**
Kwak, Hyo-Gyoung Kim, Do-Yeon

ABSTRACT

This paper presents a simple and reliable constitutive model for predicting the nonlinear response of reinforced concrete subjected to general membrane loadings. Based on the concept of equivalent uniaxial strain, constitutive relations of concrete are presented in the axes of orthotropy. The behavior of cracked concrete is described by a system of orthogonal cracks, which follows the principal strain directions and rotates according to the loading history. Simple hysteretic rules defining the cyclic stress-strain curves of concrete and steel are used. In addition, the stiffness and strength degradation of cracked concrete is included in the formulation. Correlation studies between analytical results and experimental values from idealized shear panel tests are conducted with the objective to establish the validity of the proposed model.

1. 서 론

철근콘크리트 복합재료는 지진이력과 같은 횡방향 반복하중에 대해 충분한 강성을 가지고 저항하므로 토목, 건축구조물에 매우 효과적으로 사용되고 있다. 특히, 전단벽과 같은 부재의 경우 이와 같은 반복하중에 대해 충분한 강도, 에너지 흡수 및 소산능력이 요구되는데, 잠재적인 취성과 파괴를 방지하기 위해서는 지진입력에 따른 구조계의 변형, 강성 저하, 에너지 흡수 및 소산능력에 대한 평가와 이해가 필요하다. 철근콘크리트 부재는 콘크리트의 재료특성, 철근과 콘크리트 사이의 상호작용 때문에 극한하중 하에서 뿐만 아니라 사용하중 하에서도 비선형 거동을 일으키므로, 철근콘크리트 구조계의 변형능력에 대한 보다 정확한 이해를 위해서는 철근콘크리트 재료의 복합적인 거동 특성에 대한 광범위한 이해에 토대를 둔 비선형 해석이 수행되어야 한다.

이와 같은 비선형 거동특성에 대한 정확한 평가를 위해 재료성질의 파악에서부터 구조거동 분석에 이르는 많은 연구가 이루어지고 있는데, 유한요소해석을 위한 구성모델의 경우 대부분이 단조증가(monotonic)하중에 한해서 개발되고 있으며, 반복하중 하에서의 수치해석을 위한 구성모델은 구조 거동 자체의 복잡성과 수치적인 문제 등으로 인해 아직 완전히 정립되어 있지 않다.

이 논문에서는 반복하중을 받는 전단벽의 거동에 대한 효과적인 수치해석을 목적으로 등가일축 변형률 개념을 토대로 개발된 직교이방성 모델에 추가하여 압축강도 감소효과를 고려하였고, 부착 응력-슬립 개념을 토대로 인장강화모델을 개발하였으며, 이로부터 이력 거동에 따른 인장, 압축영역의 응력-변형률 곡선을 정의하였다. 하중조건을 이상화 한 철근콘크리트 판넬에 대한 단조증가 하중 및 반복하중 하에서의 실험결과와의 비교를 통해 제안된 모델을 검증하였다.

* 한국과학기술원 토목공학과 부교수

** 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. 재료모델링

2.1 콘크리트

구조물 대부분의 응력상태가 인장-압축영역에 위치하는 전단벽의 경우 이 영역의 강도포락선에 대한 정의가 중요하다. 여기서는 Kupfer 등이 실험을 통해 제안한 다음의 관계식을 사용하여 강도 포락선을 정의하였다. 여기서 σ_{1p} 와 σ_{2p} 는 각각 주인장응력과 주압축응력을 나타낸다.

$$\frac{\sigma_{1p}}{f_t'} = 1 - 0.8 \frac{\sigma_{2p}}{f_c'} \quad (1)$$

한편, 균열이 진전되면 주균열 사이에 불규칙하게 발생한 미세균열로 인하여 압축측 콘크리트의 유효단면적이 작아지게 되는데 이 논문에서는 Vecchio 등이 실험을 토대로 평균변형을 개념을 사용하여 제안한 식 (2)를 사용하여 압축측 콘크리트의 강도감소효과를 고려하였다.

$$\frac{f_{c2max}}{f_c'} = \frac{1}{0.8 - 0.34 \varepsilon_1 / \varepsilon_c} = \beta \leq 1.0 \quad (2)$$

각 하중상태에 따라 결정되는 인장강도 및 압축강도에 대한 콘크리트의 응력-변형률 관계는 그림 1과 같이 정의하였다.(Saenz) 작용하는 하중이 제거되면 응력 감소에 따른 변형률의 감소가 나타나는데 이를 모사하기 위해 직선관계로 단순화된 제하(unloading)곡선을 사용하였으며, 대응되는 소성변형률은 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{ip}} = 0.145 \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{ip}} \right)^2 + 0.13 \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{ip}} \right), \quad \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{ip}} \right) < 3.0 \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{ip}} = -1.305 + \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{ip}} \right), \quad \left(\frac{\varepsilon_{en}}{\varepsilon_{ip}} \right) \geq 3.0 \quad (4)$$

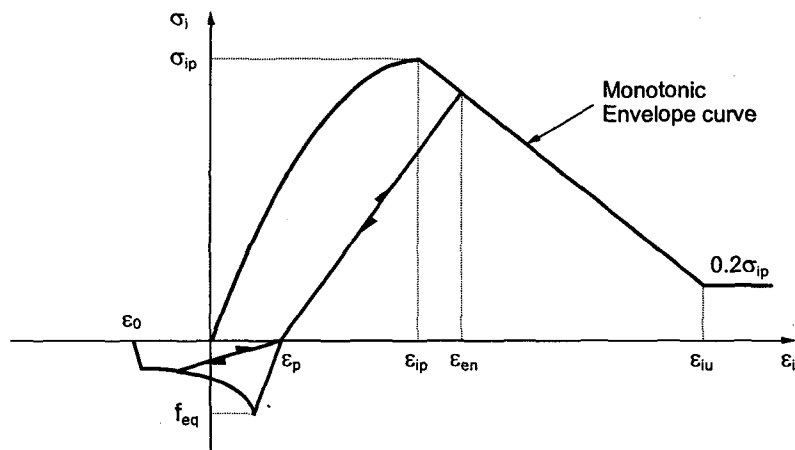


그림 1. 콘크리트의 응력-변형률 관계

또한 응력변화에 따른 재료성질의 변화를 모사하기 위해 단순하면서 콘크리트의 성질을 효과적으로 표현할 수 있는 직교이방성모델(orthotropic model)을 사용하였고, 등가의 일축응력-변형을 곡선에 적용하기 위해 Darwin 등이 제안한 등가일축변형을 개념을 도입하였다.

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1E_2} & 0 \\ \nu\sqrt{E_1E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)^2 \cdot G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 E_1, E_2 는 각각 주인장, 주압축축 콘크리트의 할선탄성계수이며, ν 는 포아송비(Poisson's ratio), $(1-\nu^2) \cdot G = 0.25 \cdot (E_1 + E_2 - 2\nu\sqrt{E_1E_2})$ 이다.

2.2 철근

철근은 압축영역과 인장영역에서 동일한 응력-변형을 곡선을 갖는 일차원 응력-변형을 관계로 구성하였으며, 반복하중에 따른 재료거동을 모사하기 위해 Giffre-Menegotto-Pinto 모델을 사용하였으며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^* = b \cdot \varepsilon^* + \frac{(1-b) \cdot \varepsilon^*}{(1 + \varepsilon^{*R})^{\frac{1}{R}}} \quad (6)$$

여기서 ε^* 와 σ^* 는 정규화된(normalized) 변형률과 응력으로 각각 $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r}$, $\sigma^* = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$ 로 표현된다.

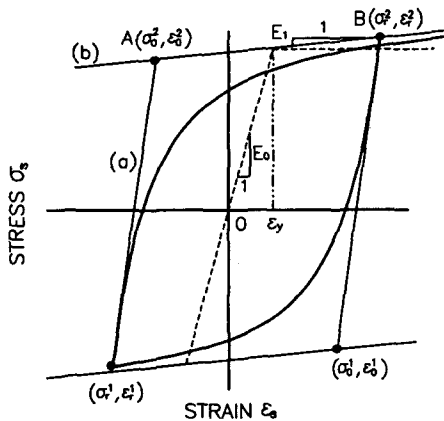


그림 2. 철근의 응력-변형률 관계

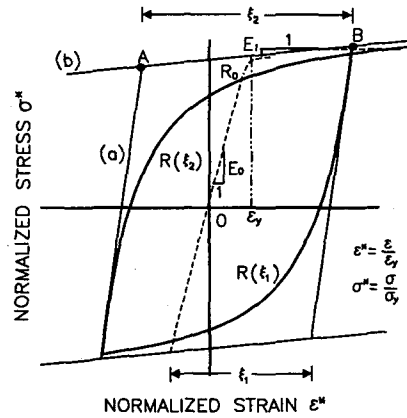


그림 3. R 값의 정의

식 (8)은 기울기가 E_0 와 E_1 인 직선을 점근선으로 하는 곡선의 천이를 나타낸다. 그리고 σ_0 와 ε_0 는 두 점근선의 교차점을 나타내며 σ_r 과 ε_r 은 최근의 역전(reverse)된 응력과 변형률을 나타낸다. b 는 변형경화비율로서 E_0 과 E_1 의 비율을 나타내며, R 은 천이곡선(transition curve)에 영향을 줄 수

있는 Bauschinger 효과를 표현할 수 있는 계수로서 현재 점근선의 교차점과 이전전환점 중 최대 또는 최소값을 갖는 전환점과의 차이에 의해 결정되며 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R = R_0 - \frac{a_1 \cdot \xi}{a_2 + \xi} \quad (7)$$

여기서 ξ 값은 그림 3과 같이 정의되며, R_0 , a_1 , a_2 는 실험에 의해 결정되는 계수들이다.

3. 인장강화모델(Tension Stiffening Model)

이 논문에서는 인장강화효과를 표현하기 위해 부착응력-슬립(bond stress-slip)을 토대로 주인장축에서 철근과 콘크리트 사이의 힘의 평형, 적합조건 등을 사용하여 유효인장응력-변형률 개념으로 개발된 해석모델을 사용하였다. 자세한 유도과정은 생략하였고, 아래에 결과 식만을 나타내었다.

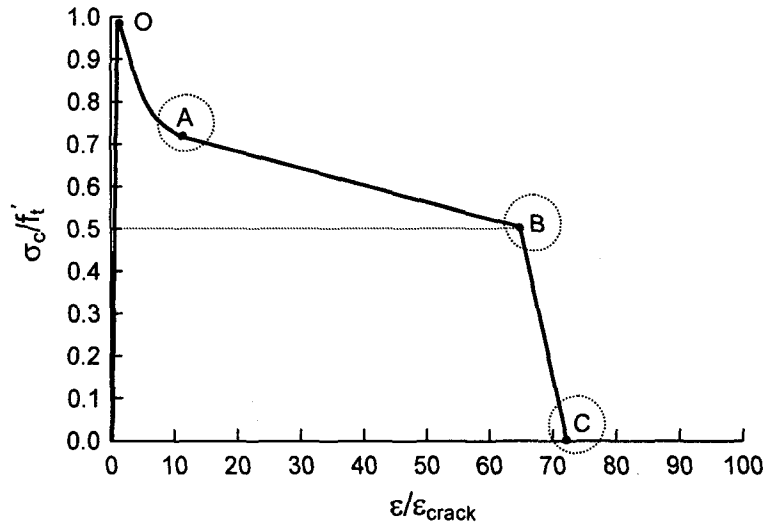


그림 4. 콘크리트의 유효인장응력-변형률 곡선

$$\text{구간 O-A: } \frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{1 - \frac{\tanh ka}{ka}}{1 - \sec hka}, \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_{crack}} = \frac{(1 - \nu^2) + \frac{\tanh ka}{(n'_x \rho_x \cos^4 \theta + n'_y \rho_y \sin^4 \theta) \cdot ka}}{1 - \sec hka} \quad (8)$$

$$\text{점 B: } \frac{\sigma_c}{f_t} = \frac{1}{2}, \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_{crack}} = \frac{1}{E_{s,eq}} \cdot \left(T - \frac{pn\tau_b a}{2} \right) \cdot \frac{E_c}{pn\tau_b a} \quad (9)$$

$$\text{점 C: } \frac{\sigma_c}{f_t} = 0, \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_{crack}} = \frac{1}{E_{s,eq}} \cdot \left(t \cdot (f_{yx} \rho_x \cos \theta + f_{yy} \rho_y \sin \theta) - \frac{p}{s} \tau_b a \right) \cdot \frac{E_c}{pn\tau_b a} \quad (10)$$

4. 강제운동(rigid body motion) 보정

콘크리트의 주인장변형률이 그림 1의 ϵ_0 를 넘어선 상태에서 철근에 항복이 일어나면 인장측 콘크리트는 더 이상 저항력을 갖지 못하므로 이 항복에 의해 그림 5에 나타낸 철근의 응력-변형률 곡선에서 A만큼의 변형에 해당하는 강제운동(rigid body motion)이 콘크리트에 발생된다고 볼 수 있고, 이를 보정하기 위해 y축 철근의 A만큼의 변형과 이로 인한 x축 철근의 변형량을 동시에 고려하여 여기에 대응하는 주인장측 변형률을 계산하면 다음과 같다.

$$d\epsilon_{rigid}^1 = d\epsilon_x \cdot \cos^2 \theta + d\epsilon_y \cdot \sin^2 \theta \quad (11-1)$$

이 변형률 값을 제하(unloading)가 시작될 때 계산될 수 있는데, 이와 같이 계산된 주인장측 변형률 값을 하중이 역전(reverse)되는 시점, 즉 하중의 부호가 바뀌고 콘크리트의 인장, 압축이 뒤바뀌는 시점에서 전체 주인장변형률로부터 빼주므로써 강제운동효과를 제거할 수 있다.

$$d\epsilon_{rigid}^2 = d\epsilon_x \cdot \sin^2 \theta + d\epsilon_y \cdot \cos^2 \theta \quad (11-2)$$

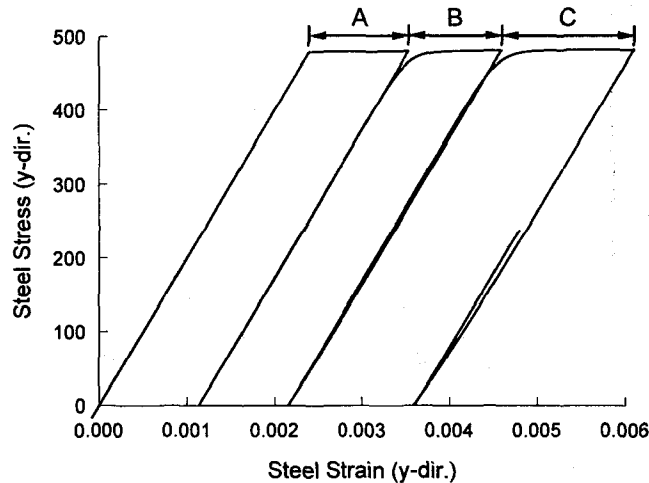


그림 5. 반복하중에 따른 철근의 항복변형률

역전된 하중이 계속 증가하여 다시 추가적인 철근의 항복(B만큼의 변형)이 일어나면 앞에서와 마찬가지로 인장상태로 바뀐 2축 콘크리트가 강제운동 효과를 겪게 된다. 앞에서와 마찬가지로 방법으로 B만큼의 변형에 해당하는 주축변형률을 계산하여 2축 주변형률로부터 빼주면 강제운동을 보정할 수 있다. 마지막으로 재역전된 하중이 계속 증가하여 또 다른 추가적인 철근의 항복(C만큼의 변형)이 발생할 경우 초기에 발생한 A만큼의 항복변형률에 추가 항복변형률을 더해주어야 초기 항복 cycle에서의 소성변형률(A)이 누적될 수 있다.

$$d\epsilon_{rigid}^1 = d\epsilon_{rigid,old}^1 + d\epsilon_x \cdot \cos^2 \theta + d\epsilon_y \cdot \sin^2 \theta \quad (12)$$

5. 유한요소 정식화

유한요소에 의한 정식화 과정에서 철근과 콘크리트 복합체로 형성된 철근콘크리트 유한요소를 구성하게 되는데, 이를 위해서는 두 재료사이에 완전부착이 가정되어 동일한 변위장을 사용하여야 한다. 이때, 균열로 인한 비선형 거동시 유발되는 부착슬립 거동은 인장강화모델에서 간접적으로 그 영향을 반영하였다. 이 논문에서는 콘크리트의 경우 면내균열모델(smearred crack model)을 사용하였고, 특히 회전균열모델로써 균열의 진전에 따른 균열각의 변화를 모사하였다. 이때 주변형률의 증분 값은 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (13)$$

$$d\epsilon_1 = \cos^2\theta \cdot d\epsilon_x + \sin^2\theta \cdot d\epsilon_y + \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\gamma_{xy} \quad (14)$$

$$d\epsilon_2 = \sin^2\theta \cdot d\epsilon_x + \cos^2\theta \cdot d\epsilon_y - \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\gamma_{xy} \quad (15)$$

6. 수치해석

6.1 단조증가(monotonic)하중

단조증가하중 하에서 모델의 타당성을 검토하기 위해 Vecchio 등이 하중조건과 경계조건을 이상화하여 순수전단 시험한 시험체 중 PV19에 대한 실험 결과와 제안된 모델에 의한 수치해석 결과를 비교하였다. 그림 6에 시험체 및 시험체를 유한요소로 이상화하여 나타내었다. 시험체 PV19의 x, y방향 철근비, 철근의 항복응력 및 콘크리트 압축강도, 최대변형률값 등은 표 1에 나타내었다.

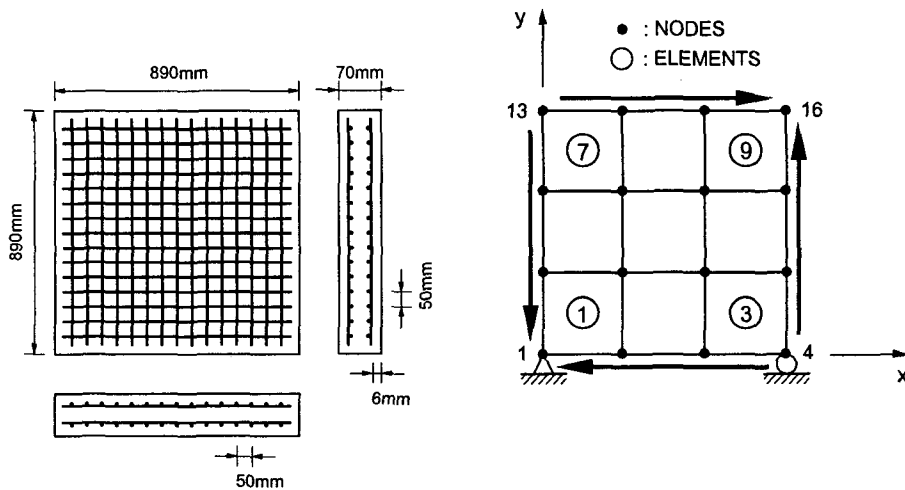


그림 6. Vecchio 등이 실험한 판넬과 유한요소로 이상화한 시험체

표 1. 철근콘크리트 판넬의 제원

Specimen	Loading		Longitudinal (x direction)		Transverse (y direction)		Concrete	
	τ_{xy}	$\sigma_x = \sigma_y$	ρ_x	f_{yt}^*	ρ_y	f_{yt}^*	ϵ_c	f_c^{**}
PV19	Monotonic	0	0.01785	458	0.00710	299	-0.00215	-19.0
SE8	Cyclic	0	0.02930	492	0.00980	479	-0.00260	-37.0
SE9	Cyclic	0	0.02930	422	0.02930	422	-0.00265	-44.2

* 단위: MPa

그림 7에 나타난 바와 같이 x와 y방향의 철근비가 다른 판넬 PV19의 경우 상대적으로 약한 한 쪽방향 철근이 항복한 후 콘크리트의 전단파쇄로 파괴되는 양상을 나타내고 있으며, 이 경우 균열 각의 변화가 크게 일어남을 알 수 있고, 압축강도 감소효과에 따른 차이를 볼 수 있다.

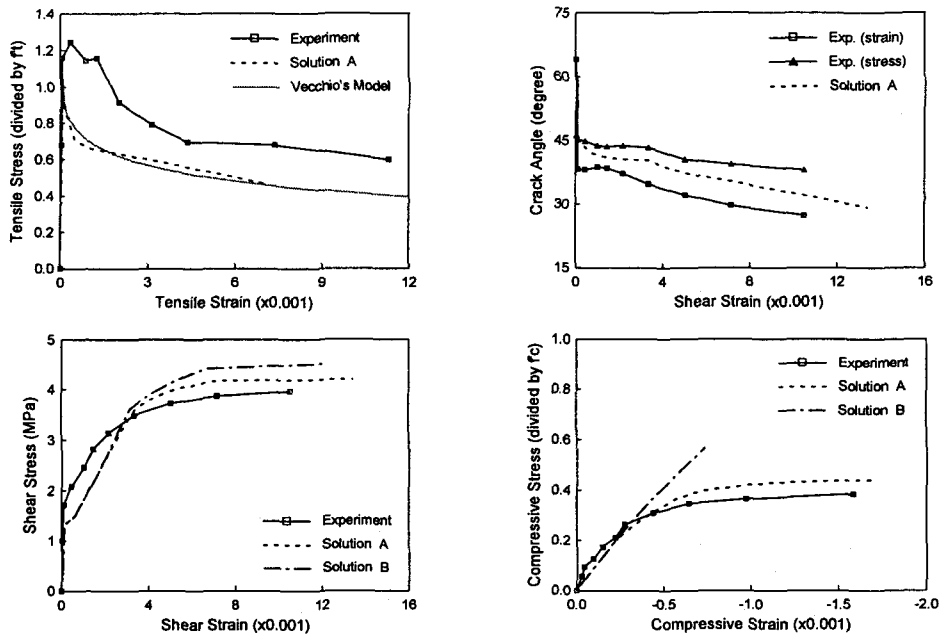


그림 7. PV19 시험체의 수치해석 및 실험결과에 대한 비교

(Solution A: w/ reduction of comp. strength, Solution B: w/o reduction of comp. strength)

그림 7에 나타난 바와 같이 x와 y방향의 철근비가 다른 판넬 PV19의 경우 상대적으로 약한 한 쪽방향 철근이 항복한 후 콘크리트의 전단파쇄로 파괴되는 양상을 나타내고 있으며, 이 경우 균열 각의 변화가 크게 일어남을 알 수 있고, 압축강도 감소효과에 따른 차이를 볼 수 있다.

6.2 반복(cyclic)하중

반복하중하에서의 거동을 살펴보기 위해 Stevens 등이 실험한 시험체(SE8, SE9)에 대해서 실험

결과와 수치해석 결과를 비교하였다. 시험체의 제원 및 하중조건은 표 1에 나타난 바와 같고, 그림 8은 시험체의 형상을 보여주고 있다. 그림 9에 나타난 결과에서 볼 수 있듯이 해석결과가 재하 상태에서 뿐만 아니라 제하 및 재재하 조건에서도 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

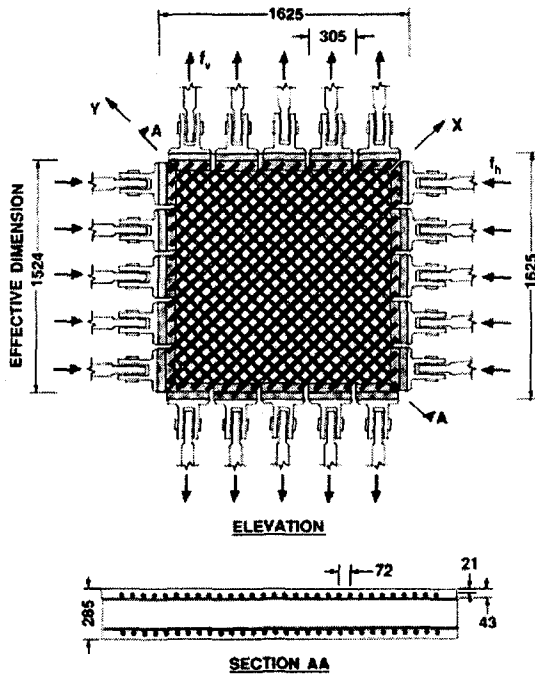


그림 8. SE8 및 SE9 시험체의 제원

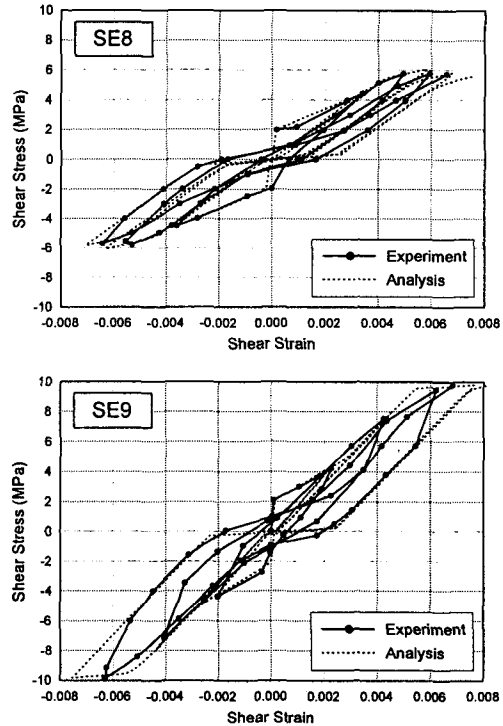


그림 9. SE8 및 SE9의 수치해석 및 실험결과 비교

7. 결 론

이 논문에서는 등가의 일축변형률 개념을 토대로 회전균열모델을 사용하여 반복하중을 포함한 일반적인 하중 하에서 전단벽의 거동 예측을 위한 해석모델을 제안하였고, 단조증가하중과 반복하중하에서 실험결과와의 비교를 통해 해석모델의 타당성을 검증할 수 있었다.

참고문헌

1. ASCE Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, *State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*, ASCE, New York, 1982.
2. Chen, W. F., *Plasticity in Reinforced Concrete*. McGraw-Hill, New York, 1982.
3. Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Structural Journal*, Vol. 83, No. 2, Mar.-Apr. 1986, pp. 219-231.
4. Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., and Collins, M. P., "Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear - Experiments and Constitutive Model", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 2, Mar.-Apr. 1991, pp. 135-146.