

# 주기하중을 받는 철근 콘크리트 소성모델

## Plasticity Model of RC under Cyclic Load

박 홍 근\*      강 수 민\*\*      신 영 수\*\*\*

Park, Hong Gun    Kang, Su Min    Shin, Yeong Soo

---

### ABSTRACT

An existing plasticity model using multiple failure criteria is modified to describe the behavior of reinforced concrete planar members under cyclic load. Multiple failure criteria are used to define both isotropic damage of compressive crushing and anisotropic damage of tensile cracking. A numerical method is developed to define multi-directional and non-orthogonal crack directions. The material model is implemented in the finite element analysis and verified by comparison with existing experiments of reinforced concrete shear wall.

---

### 1. 서론

콘크리트 소성모델에 대한 많은 연구는 반복 및 주기하중을 받는 철근콘크리트의 거동특성을 나타내는데 중점을 두어왔다.<sup>[3]</sup> 그러나, 전단벽 등의 주요 구조부의 주기하중에 대한 거동은 콘크리트의 주기거동특성보다는 인장균열방향, 인장연화 및 경화현상, 철근의 거동특성에 의하여 영향을 받는다.

다중파괴기준은 압축파괴로 인한 등방성 손상과 인장균열로 인한 이방성 손상을 동시에 정의할 수 있기 때문에 다중파괴기준을 이용한 철근콘크리트 소성모델에 관한 폭넓은 연구가 진행되어 왔다. 단조하중을 받는 철근콘크리트를 위한 재료모델은 다축압축상태에서의 강도증가, 인장연화/경화현상 그리고 인장균열에 의한 압축강도저하를 나타낼 수 있어야 한다. 주기거동을 위한 재료모델은 이에 덧붙여 다축균열방향, 비직교 균열방향 그리고 콘크리트와 철근의 주기거동특성을 나타낼 수 있어야 한다. 다중파괴기준을 이용하는 재료모델은 여러 개의 이방성손상을 동시에 나타낼 수 있으므로 다축균열방향과 비직교 균열방향을 정의하는데 적합하여, 따라서 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 해석하는데 효과적인 도구로 이용될 수 있다.

### 2. 재료모델

---

\*정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

\*\*정회원, 서울대학교 대학원

\*\*\*정회원, 이화여자대학교 건축학과 부교수

본 연구에서는 Park 과 Klingner에 의해 개발된 재료모델<sup>[5]</sup>을 주기거동에 적용할 수 있도록 확장한다. 이 재료모델에서는 압축파괴와 인장균열에 대해 각각 독립적인 파괴기준이 사용되며 압축파괴의 경우, Drucker-Prager의 파괴기준이 사용되었다.

$$f_1 = g_1(\sigma, J_2) - \beta \overline{\sigma}_1(\epsilon_{pl}) \quad \text{여기서 } g_1(\sigma, J_2) = A_1 + A_2 \sigma \sqrt{3J_2} + A_3 \quad (1)$$

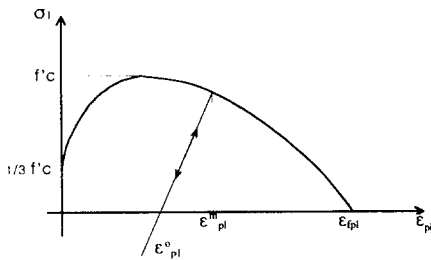


Fig. 1 Yield Surface Function Used for Crushing Failure Criterion

식(1)에서의 파괴면함수  $\overline{\sigma}_1(\epsilon_{pl})$ 는 다음 Fig. 1과 같다.  $\beta$ 는 인장균열에 의한 압축강도저하를 고려한 강도저감계수이고 이는 인장균열에 의한 소성변형에 의한 함수로 정의된다.<sup>[6]</sup> 상수  $A_1, A_2$  그리고  $A_3$ 는 기존의 실험으로 계산할 수 있다.<sup>[5]</sup>

인장균열에 의한 철근콘크리트의 점진적인 이방성 손상을 나타내기 위해서 회전균열소성모델을 사용하였다. 이번 연구에서는 주변형도축의 인장응력이 균열강도에 도달할 때 인장균열의 파괴기준이 적용된다. 하중증가상태에서는, 파괴면과 최소소성변형도에 대하여 정의되는 총 손상도는

주변형도축을 따라 회전한다. 최초의 하중제하(unloading) 시에 파괴면의 방향은 현재의 주변형도축으로 고정된다. 따라서 더 이상의 하중가력과 제하 시에 파괴면의 방향은 바뀌지 않는다.

실제적으로 주기하중 하에서의 철근콘크리트부재의 균열과정은 하중가력 시의 손상 진행과 하중제하 시의 손상 유지의 반복이다. 그러나, 인장불변계수(tensional invariant)를 만족하여야 하는 응력도-변형도 관계에서 이러한 반복적인 균열과정을 정의하기는 어렵다. 또한, 주균열방향의 회전은 주로 초기균열직후에 발생한다. 이에 따라 본 연구에서 사용하고 있는 회전후의 고정균열모델과 같이 초기 균열 후에 얼마간의 균열 손상 방향의 회전은 전체적인 균열방향을 대략적으로 나타낼 수 있다.

주균열이 발전한 후에는 철근콘크리트는 압축파괴나 균열면 사이의 전단에 의해 파괴된다. 그러나, 일정 이상의 철근비를 갖는 대부분의 콘크리트 부재에서는 전단마찰파괴는 일어나지 않으며 따라서 이번 연구에서는 전단에 의한 파괴모드는 생략되었다.

인장균열에 대한 파괴기준은 다음과 같이 정의된다.

$$f_i = g_i(\underline{\sigma}) - \overline{\sigma}_i(\epsilon_{pl}) \quad i=2,3,\dots \text{ and } g_i(\underline{\sigma}) = n_{ij} n_{ik} \sigma_{jk} \quad (2)$$

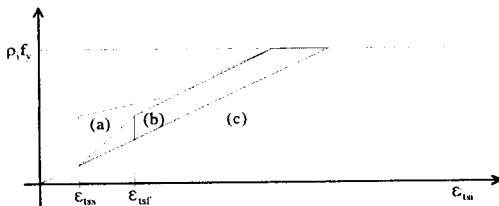


Fig. 2 Idealized Tensile Stress Combination of Reinforced Cracked Concrete : (a) Tension Softening (b) Bond (c) Reinforcing Steel with Reduced Yield Stress

$n_{ij}$ 는 최초의 하중제하가 발생하기 이전의 주변형도축이나, 혹은 최초의 하중제하 발생 후에 고정된 균열방향의 단위 방향벡터이다. 2차원상태에서는 두 개의 직교하는 주변형도축 중에서 이전의 균열방향과 가까운 방향을 현재의 균열방향으로 선택한다.

1방향 인장상태에서 철근콘크리트의 인장거동은 다음 Fig. 2, 3, 4와 같이 이상화된다. 균열발생 후, 철근콘크리트의 응력 조합은 (a)콘크리트의 인장연화

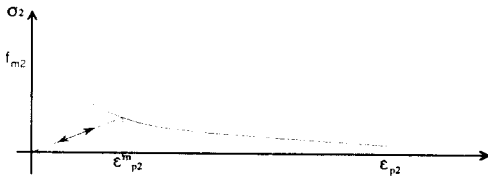


Fig. 3 Yield Surface Function Used for Cracking Failure Criterion

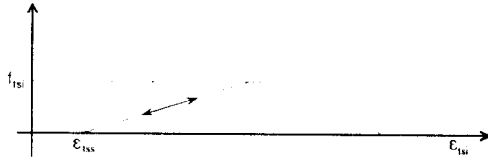


Fig. 4 Bond Stress-Strain Relation

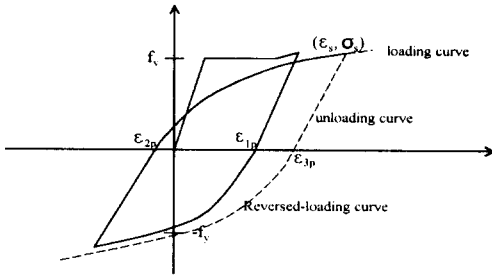


Fig. 5 Strain Hardening Model Including the Bauschinger Effect, Used for Steel Reinforcement (Brown and Jirsa, 1971)<sup>[2]</sup>

### 3. 재료모델의 검증

이 재료모델을 사용한 유한요소해석을 Shing et al.이 수행한 철근콘크리트 블록의 전단벽 시험체인 wall 12와 7에 대해서 적용하였다.<sup>[7]</sup> 시험체의 크기와 유한요소해석모델은 Fig. 6과 같다. 다음 Table 1에는 시험체의 재료값이 주어져 있다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 수직철근량이 많은 wall 7은 큰 횡하중을 받지만 수평철근량이 충분하지 못하여 인장균열폭을 제한하지 못하였다. 따라서 극한 하중 하에서 인장균열에 의한 콘크리트 압축파괴에 의한 조기파괴가 발생하였다. 반대로 수직철근량과 수평철근량이 균형적으로 배근된 wall 12의 경우 하중재하능력은 떨어지나 최대 횡하중이 가해진 이후에 연성거동을 나타내고 있다.

강도와 (b)부착 그리고 (c)철근의 응력으로 구성된다. 인장경화응력은 연화응력과 부착에 의한 응력의 조합으로 이상화된다. 부착응력은 철근 방향에서 고려된다. 앞서 설명한 바와 같이 Fig. 3에 나타난 인장균열에 의한 손상정도를 나타내는 이력변수  $\epsilon_{p2}^m$ 는 하중재하가 일어나기 전에는 현재의 주변형도축으로 회전된다.

2차 인장균열에 대한 파괴기준은 인장응력이 균열강도에 도달하고 동시에 주변형도축의 방향이 1차 균열방향에서 45° 이상 벗어난 경우에 적용한다.

변형도에 대한 파괴기준을 만족하는 응력도를 구하는 방법으로 backward-Euler<sup>[5]</sup>방법이 사용되었다. Fig. 1, 3과 같이 응력-변형도곡선에서 제한 경로가 제공되므로 파괴기준은 일반적인 등방경화소성모델에서 사용되는  $f_i \leq 0$  대신  $f_i = 0$ 이 되어야 한다. backward-Euler 방법의 반복 계산 과정을 고려하여 수렴 기준이  $|f_i| \leq$  허용한계치(tolerance)로 수정된다.

철근에 대한 재료모델로서 Brown과 Jirsa<sup>[2]</sup>이 제안한 변형경화모델을 이용하였다. Fig. 5에 나타나 있듯이 이 재료모델은 Bauschinger효과를 나타내도록 이상화되었다.

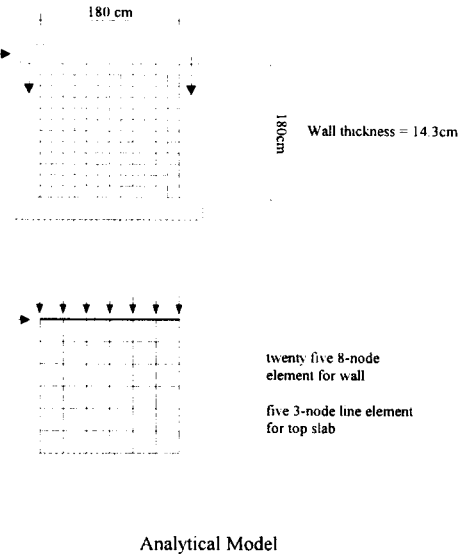


Fig. 6 Numerical Model of Shear Wall

해석결과와 실험결과가 일치하는 것을 Fig. 7과 8을 통해서 알 수 있다.

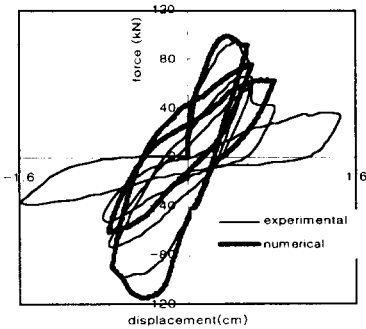


Fig. 7 wall 7의 변위 하중 곡선

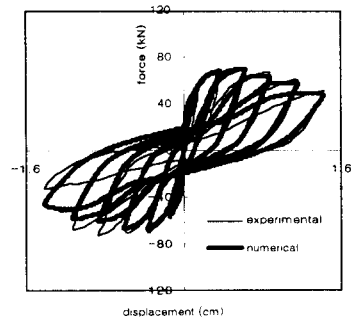


Fig. 8 wall 12의 변위 하중 곡선

Table 1 wall 7 과 12 시험체의 재료값

Wall No.	Masonry $f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Horizontal steel		Vertical steel		Axial Load (kN)
		$\rho_x$ (%)	$F_{sy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\rho_y$ (%)	$F_{yy}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
7	206.7	0.14	3858.4	0.74	70	0.046725
12	220.4	0.24	4547.4	0.38	63	0.07921

#### 4. 결론

본 연구에서 제안된 다중파괴기준을 이용한 소성모델은 주기하중 하에서 압축파괴에 의한 등방성 손상과 인장균열에 의한 이방성 손상을 나타내는데 적합하다. 다축균열과 비직교 균열의 다중파괴기준을 사용함으로써 이 재료모델은 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재해석에 이용할 수 있다. 점진적인 인장균열을 나타내기 위해 회전 후 고정균열모델을 제안하였으며, 제안된 수치해석모델은 기존의 실험결과와 비교함으로써 검증되었다.

#### 참고문헌

1. American Concrete Institute (1995), Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318-95, Detroit, 118-121, 227-230.
2. Brown, R. H. and Jirsa, J. O. (1971), Reinforced Concrete Beams under Load Reversals, Structural Journal, ACI, 68(5), 380-390.
3. Cachim, P. B., Figueiras, J. A., and Pereira, P. A. A. (1998), Model for Concrete under Cyclic Actions, Computational Modelling of Concrete Structures, Balkema, Rotterdam, 643-651.
4. Karan, I. D. and Jirsa, J. O. (1969), Behavior of Concrete under Compressive Loadings, J. Struct. Engrg., ASCE, 95(12), 2543-2563.
5. Park, H. and Klingner, R. E. (1997), Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria, J. Struct. Engrg., ASCE, 123(5), 643-651.
6. Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1986), The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, Structural Journal, ACI, 86(2), 219-231.
7. de la Rovere, H. L. (1990), Nonlinear Analysis of RC Masonry Wall under Simulated Seismic Loadings, thesis presented to the University of California at San Diego for the degree of Doctor of Philosophy