

# RC 구조의 비선형 해석을 위한 분산균열모델

## Smeared Crack Models for Inelastic Analysis of RC Structures



박 홍 근\*



김 재 요\*\*

\*서울대학교 건축학과 부교수 공학박사  
\*\*삼성물산 건설부문 기술연구소 전임연구원 공학박사

### 1. 개 론

철근콘크리트 구조물의 해석을 위해서는 콘크리트 재료의 복잡한 거동특성을 명확히 규명하고 이를 적절히 나타낼 수 있는 재료모델을 사용하여야 한다. 철근콘크리트 구조물은 하중이 작용함에 따라 인장균열, 압축파괴 등이 발생하며, 구조물 내부의 각 위치에서 하중조건에 따라 서로 상이한 거동을 보인다(Fig. 1). 이러한 거동특성을 나타내기 위해서는 압축파괴, 인장균열, 전단파괴 뿐만 아니라 다축압축에 의한 강도증가, 인장균열에 의한 압축강도의 감소 등의 하중작용조건에 따른 콘크리트의 거동변화를 고려하여야 한다(Fig. 2).

철근콘크리트 부재의 정확한 해석을 위해서, 이러한 복잡한 철근콘크리트의 거동을 효과적으로 나타낼 수 있는 재료모델이 요구된다. 지금까지 철근콘크리트의 해석을 위한 많은 재료모델들이 제안되고, 실제 해석에서 적용되어 왔다. 이러한 재료모델들은 콘크리트의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 인장균열거동을 나타내는 방법에 따라서 이산균열모델(Discrete Crack Model)<sup>1,2)</sup>과 분산균열모델(Smeared Crack Model)<sup>3)</sup>로 대별될 수 있다. 이산균열모델은 독립적인 균열을 개별적으로 모델링하는 방법으로서 이론적으로는 콘크리트의 Fracture 손상을 나타내는 정확한 방법이지만 유한요소해석에 적용시 인장 균열 발생 및

발전의 기준과 국부손상의 모델링 등 수치해석적으로 매우 복잡하여 흔히 사용되고 있지 않다. 반면 분산균열모델은 균열 발생 후에도 콘크리트를 균열이 분산되어 있는 연속체로 가정하고 균열손상을 인장변형률로 치환함으로써 유한요소해석에 쉽게 적용할 수 있다. 따라서 균열이 비교적 넓은 부분에 분산되어 발생하는 철근콘크리트 부재의 해석에서 비교적 정확한 해석결과를 나타낼 수 있는 장점이 있으며, 대부분의 실용가능한 재료모델은 분산균열모델에 속한다. 본 특집기사에서는, 이러한 분산균열모델을 사용하여 개발된 여러 모델들을 소개하고, 이에 대한 장단점과 적용성에 대하여 기술하고자 한다.

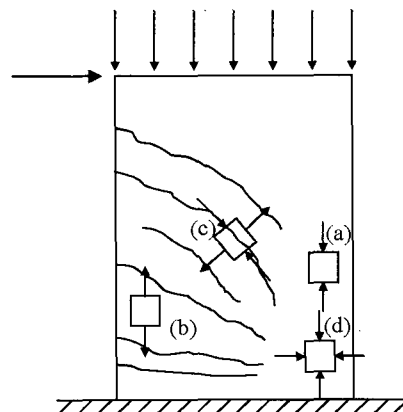


Fig. 1 Reinforced Concrete Shear Wall

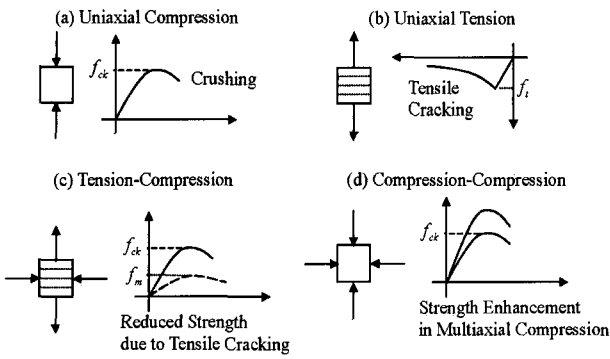


Fig. 2 Behaviors of Concrete (See Fig. 1)

## 2. 등가 1축 모델(Equivalent Uniaxial Model)

### 2.1 인장균열모델에 의한 분류

철근콘크리트의 인장균열은 수많은 미세균열의 열림과 결합에 의한 손상의 발생이며, 이러한 인장균열거동의 복잡성으로 인하여 인장균열방향의 진전을 정확히 예상하기는 어렵다. 따라서, 이상화된 균열방향을 가정하는데, 일반적으로 인장균열의 방향을 정의하는 방법에 따라서 고정

균열모델(Fixed Crack Model)<sup>4,5</sup>, 회전균열모델(Rotating Crack Model)<sup>6,7</sup>, 다중고정균열모델(Multiple Fixed Crack Model)<sup>8</sup>의 세 가지로 나눌 수 있다. 이외에도 여러 방향의 인장균열손상을 조합하여 인장균열을 나타내는 방법은 미소면 모델에서 소개된다.

고정균열모델은 주응력 혹은 주변형률 방향에서 인장균열이 발생하면 인장균열방향이 고정된다. 이후 하중이력 동안 인장균열방향이 고정되는 것으로 가정하며, 균열 후 인장거동은 이 고정균열방향에서 인장, 전단응력-변형률 관계에 의하여 정의된다(Fig. 3 (a)). 그러나 실제 철근콘크리트의 인장균열은 응력에 의하여 유발된 비등방손상이며 인장균열 이후에도 콘크리트의 응력상태는 지속적으로 변하기 때문에, 주인장균열방향은 초기균열방향에서 벗어난 방향으로 점진적으로 회전한다. 인장균열방향이 고정되어 있는 고정균열모델은 이러한 인장균열의 점진적인 발전과 비국부 손상을 정확히 나타내기 어렵다.

회전균열모델은 초기균열이 발생한 후에도 응력상태의 변화에 따라 인장균열과 그에 따른 손상이 점진적으로 회전한다고 가정한다(Fig. 3 (b)). 따라서, 철근콘크리트의 인장균열에 의하여 회전하는 비등방손상을 간접적으로 나

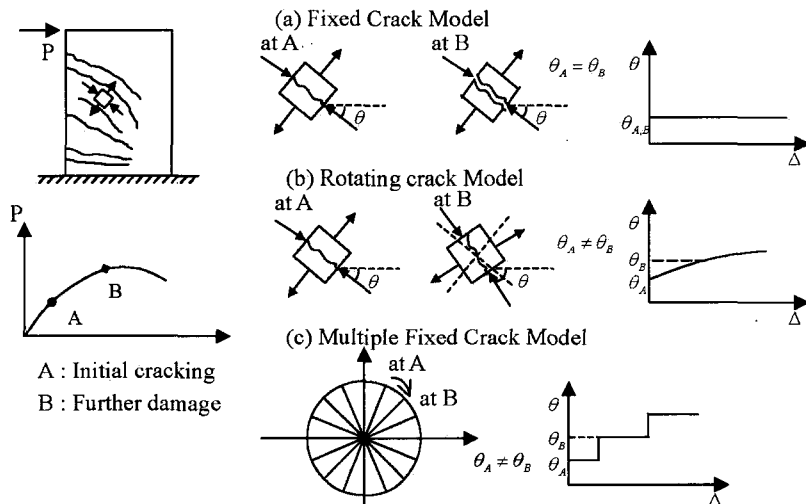


Fig. 3 Classification of Equivalent Uniaxial Model in terms of Crack Models

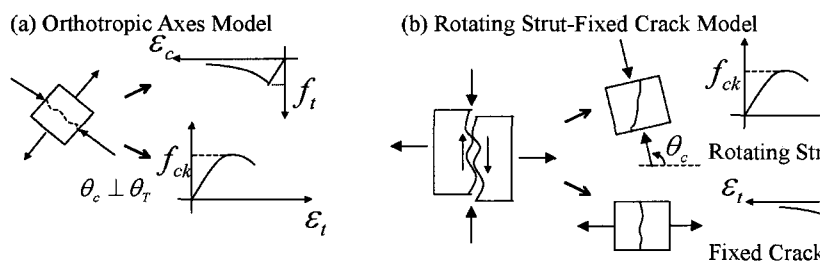


Fig. 4 Classification of Equivalent Uniaxial Model in terms of Compressive Models

타낼 수 있다. 그러나, 한 방향에서의 균열에 의한 손상이 다른 방향으로 지속적으로 전이된다는 것은 콘크리트의 실제 Fracture에 의하여 일어나는 인장 균열 현상과 부합하지 않으며, 주기하중시 동시에 다른 방향에서 발생할 수 있는 다중의 균열과 각 균열 방향에서의 독립된 균열 손상을 나타낼 수 없다.

다중고정균열모델은 초기균열의 발생전 또는 후에 다수의 기준방향들이 결정되며, 균열후 응력상태의 변화에 따라 기준방향들로 균열방향이 전이되거나 다른 기준방향에서 새로운 독립적인 인장균열이 발생할 수 있다(Fig. 3 (c)). 다중기준방향을 사용함으로써 인장균열의 비국소 손상과 다중의 균열 발생을 모두 나타낼 수 있다. 그러나, Fig. 3 (a)에 나타난 바와 같이 인장균열의 전이가 불연속적으로 일어나고, 각 기준방향에서의 인장균열을 고려해야 하므로 해석상의 복잡성을 야기하며, 균열의 발생과 전이에 대한 명확한 규명이 필요하다.

### 2.2 압축모델에 의한 분류

인장균열뿐만 아니라 압축응력을 정의하는 방식에 따라 분류할 수 있다. 이방성 직교축 모델(Orthotropic Axes Model)은 고정 및 회전균열모델에 관계없이 현재 균열방향과 평행한 방향에서 압축응력을 정의한다(Fig. 4 (a)). 균열방향에 대해서는 압축응력-변형률의 관계를 균열의 직각방향에 대해서는 인장응력-변형률의 관계를 각각 적용하며, 전체응력은 두 직교방향의 응력을 독립적으로 결

합하여 얻을 수 있다. 반면, 회전스트럿-고정균열 모델(Rotating Strut-Fixed Crack Model)은 압축응력과 인장응력의 방향을 독립적으로 정의한다(Fig. 4 (b)). 인장응력은 균열의 직각방향에서 정의되며, 압축응력의 방향은 균열과 독립적으로 주변형률축 또는 주응력축에서 정의된다. 전체응력은 각각의 응력-변형률 관계에서 얻어진 압축응력과 인장응력 벡터의 합으로 얻을 수 있다. 이밖에 압축응력에 대해서는 소성모델을, 인장응력에 대해서는 고정균열모델을 적용하여 각각의 응력벡터의 합에 의하여 전체응력을 정의하는 혼합모델이 있다.

### 2.3 장단점 및 적용성

등가 1축 모델은 1축 응력-변형률 관계로 정의되므로 매우 간단하면서도 비교적 정확히 철근콘크리트의 거동을 나타낼 수 있는 방법이며, 복잡한 재료모델보다 오히려 정확한 결과를 나타낼 수 있다. 단점으로는 다축압축상태의 콘크리트의 거동을 정확히 나타내기 어렵다는 점이다. 모델링 상의 주의할 점은 콘크리트의 응력이 과도한 인장응력을 나타내지 않도록 제어해야 한다는 점으로, 이를 위하여 일반적으로 중요하게 간주되는 인장균열방향을 제어하기 보다는 콘크리트의 응력을 압축상태로 제어하는 것이 보다 중요하며, 따라서 압축모델을 정확히 정의하는 것이 인장균열방향을 정의하는 것보다 중요하다고 할 수 있다.

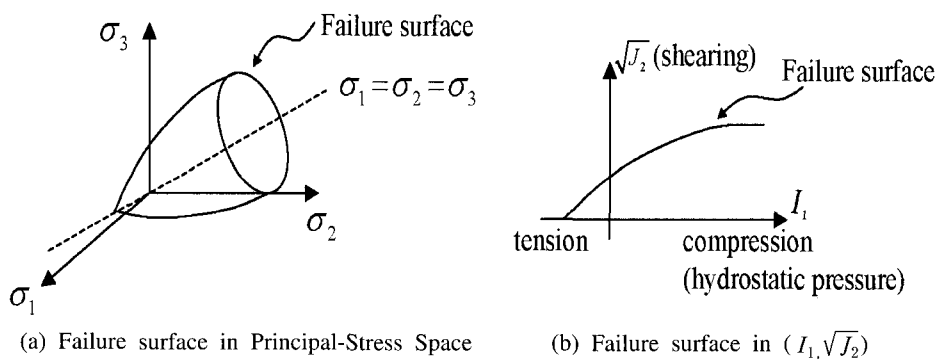


Fig. 5 Drucker-Prager Failure Criterion

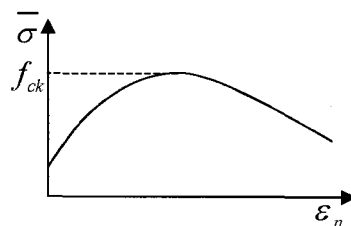


Fig. 6 Uniaxial Stress-Plastic Strain Curve

### 3. 소성모델 (Plasticity Model)

#### 3.1 파괴기준 (Failure Criteria)

다축 응력상태에서의 콘크리트 강도는 1축 응력상태에서의 인장 혹은 압축강도를 독립적으로 적용할 수 없으며, 다축응력상태의 각 성분의 상호작용을 고려하여 결정하여야 한다. 따라서, 응력상태의 함수로서 정의된 많은 콘크리트의 파괴기준들이 제안되어 왔다.<sup>9,10)</sup> 이러한 파괴기준들은 일반적으로 1변수~5변수 모델로 분류할 수 있다. 1변수 모델은 Rankine 파괴기준, Tresca 파괴기준, von Mises 파괴기준이 있으며, 각각 최대인장응력, 최대전단응력, octahedral 전단응력을 파괴기준으로 사용한다. 2변수 모델로 Mohr-Coulomb 파괴기준과 Drucker-Prager 파괴기준이 있다. 이 파괴기준들은 응력불변계수에 의하여 정의되고, 3축 압축력이 증가함에 따라서 강도가 증가하는 콘크리트의 압축거동을 나타낼 수 있다(Fig. 5). 이밖에 Bresler-Pister 파괴기준 (3변수 모델), Ottosen 파괴기준 (4변수 모델), Willam-Warke 파괴기준 (5변수 모델) 등이 있다.

다축응력상태의 파괴기준을 응력불변계수로 정의하는 이유는 다음과 같다. 다축응력은 방향축의 정의에 따라 그 성분이 다른 값을 갖는데, 방향축의 정의에 관계없이 일정한 파괴기준(강도)을 갖기 위해서는 축방향에 관계없이 일정한 값을 나타내는 응력불변계수로 정의하여야 한다.

압축파괴기준으로서 가장 간단한 형태의 Drucker-Prager 파괴기준은 다음과 같다(Fig. 5).

$$F = g - \bar{\sigma} = 0 \tag{1}$$

$$g = A_1 I_1 + A_2 \sqrt{3J_2} + A_3 \tag{2}$$

$g$ 는 응력불변계수에 의하여 정의된 유효응력이며, 상수  $A_1, A_2, A_3$ 는 1축, 2축, 3축 압축 실험값을 이용하여 계산할 수 있다. 파괴면 함수  $\bar{\sigma}$ 는 1축응력-소성변형을 곡선에 의하여 결정된다(Fig. 6). 결과적으로 다차원의 응력 변화는 유효응력으로 1차원화되며, 이 유효응력이 1축 응력-변형을 곡선인 파괴면 함수를 따르게 된다. Drucker-Prager 파괴기준은 등압응력(Hydrostatic Stress,  $I_1$ ) 성분과 편차응력(Deviatoric Stress,  $J_2$ ) 성분의 조합에 의하여 콘크리트의 횡(압축)구속에 의한 압축강도의 증가 현상을 나타낼 수 있다.

최근의 소성모델에서 파괴기준을 적용하는 방법에 따라

단일기준소성모델과 다중기준소성모델로 나눌 수 있다. 단일기준소성모델은 보다 복잡하고 발전된 단일 파괴기준을 사용한다.<sup>11)~13)</sup> 하나의 기준과 하나의 매개변수를 사용하기 때문에 수치계산이 간편하다. 그러나 하나의 등방적인(Isotropic) 파괴기준을 사용함으로써, 비등방적인 파괴 특성을 갖는 인장균열 거동을 나타내는데 한계가 있으며, 주로 철근콘크리트 구조의 압축거동을 나타내는데 사용된다.

다중기준소성모델에서는 기존의 파괴기준을 각 응력상태에 각각 독립적으로 적용시킨다.<sup>14)~17)</sup> 철근콘크리트에서는 인장균열 후에도 철근이 인장력을 지지할 수 있으므로 인장균열은 파괴가 아니며, 철근콘크리트의 파괴는 인장균열이 진전된 후 종국적으로 콘크리트의 압괴에 의하여 일어난다. 따라서, 이러한 철근콘크리트의 인장균열 후 거동특성을 나타내기 위하여 압축파괴와 인장균열을 독립적으로 그리고 동시에 규정할 수 있는 다중파괴기준을 이용한 소성모델을 사용할 수 있다(Fig. 7).<sup>14)~16)</sup> 이 소성모델에서는 다중파괴기준을 동시에 만족하여야 한다. 즉,

$$F_1 = F_2 = F_3 = \dots = 0 \tag{3}$$

$$F_i = g_i - \bar{\sigma}_i \tag{4}$$

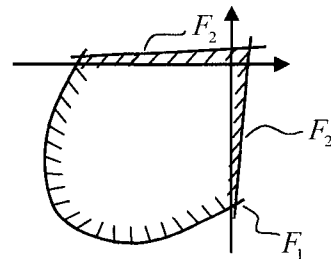


Fig. 7 Plasticity with Multiple Failure Criteria

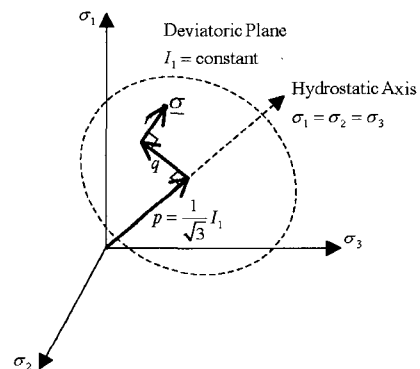


Fig. 8 New Plasticity Model Using Independent Relationships of Hydrostatic and Deviatoric Stress-Strain

여기서 첨자 '1'은 압축파괴를 나타내며, 다른 첨자들은 인장균열에 관련된다.

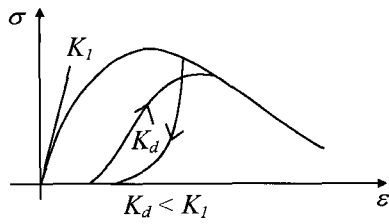


Fig. 9 Stiffness Degradation in Unloading Surface

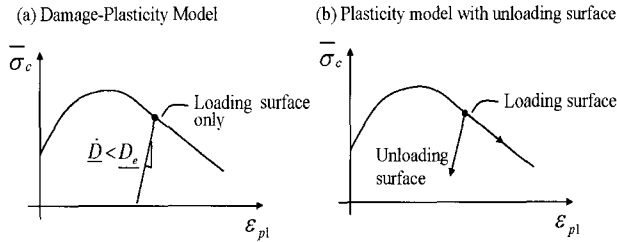


Fig. 10 Classification in terms of the Unloading Curves

또한, 횡압축응력에 의한 콘크리트 압축강도 증가 현상을 보다 정확히 나타내기 위하여 압축응력상태를 미소면 모델과 유사한 방법으로 등압응력(Hydrostatic Stress) 성분과 편차응력(Deviatoric Stress)성분으로 분리하여(Fig. 8), 각각에 독립적인 파괴기준 및 파괴면을 적용한 재료모델이 개발되었다.<sup>17)</sup>

인장파괴기준의 정의에 따라서 소성모델을 구별할 수 있으며, 소성모델에서도 등가 1축 모델에서와 마찬가지로 고정균열, 회전균열, 다중고정균열모델을 사용할 수 있다.

### 3.2 제하곡선

압축 혹은 인장균열에 의한 손상이 발생한 콘크리트의 강성은 초기강성보다 감소한다(Fig. 9). 이러한 저하된 강성을 나타내기 위하여, 손상-소성 모델(Damage-Plasticity Model)을 사용하거나,<sup>18),19)</sup> 또는 제하면(Unloading Surface)을 별도로 정의하는 소성모델을 사용할 수 있다.<sup>16)</sup>

손상-소성 모델의 경우, 강성의 저하와 영구소성변형률을 함께 고려하여, 콘크리트의 손상을 강성의 저하  $d\varepsilon_d$ 와 영구소성변형률  $d\varepsilon_p$ 의 두 부분으로 나누어서 고려한다(Fig. 10 (a)).

$$d\varepsilon_p = (1 - \beta)\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (5)$$

$$d\varepsilon_d = \beta\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \dot{D} \sigma \quad (6)$$

이 모델에서는 별도의 제하면이 존재하지 않으며 제하

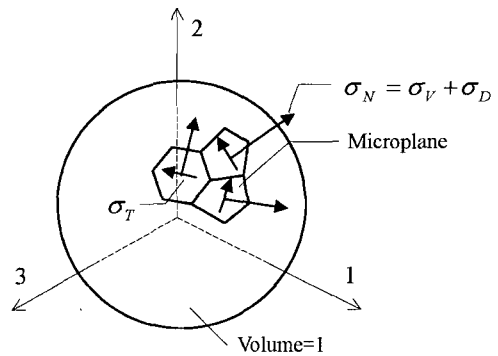


Fig. 11 Spherical Microplanes

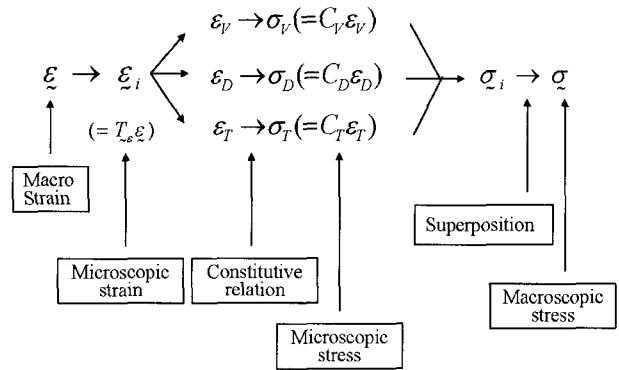


Fig. 12 Concept of Microplane Model

면만 존재한다.  $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} \geq 0$ 인 경우에는 소성유동법칙(Plastic Flow Rule)에 의하여 소성변형률이 증가하고,  $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0$ 인 경우에는 저하된 강성  $\dot{D}$ 에 의하여 제한된다.

제하면을 사용하는 소성모델에서는 실험결과에 근거하여 별도의 제하면 함수를 정의한다(Fig. 10 (b)).<sup>16)</sup> 이러한 경우에는 제하 뿐만 아니라 제하의 경우에도 소성 법칙이 적용되며, 따라서 재하와 제하에 관계없이 항상  $F = 0$ 을 만족하여야 한다.

### 3.3 장단점 및 적용성

일반적으로 소성모델은 오랜 기간 동안의 이론적 연구를 통하여 그 형식이 명확하게 정립되어 있고, 응력불변계수들의 다양한 조합에 의하여 모든 응력상태에서 비교적 정확히 콘크리트의 거동을 나타낼 수 있다. 그러나 많은 변수가 필요하고, 수치적으로 다른 모델에 비하여 복잡하다. 또한 소성모델은 강재와 같이 변형에 의한 미끌림 손상(Slip Damage)에 관련된 재료에 적합하며, 미세균열의 Fracture 현상에 의하여 손상이 결정되는 콘크리트에 적

용하기 위해서는 많은 추가적인 고려 및 이론적 연구가 필요하다.

### 4. 미소면 모델 (Microplane Model)

#### 4.1 기본개념

미소면 모델에서는 응력과 변형률의 관계가 부재 내의 모든 가능한 방향으로의 면(미소면)에 작용하는 응력과 변형률 벡터 사이의 관계에 의하여 결정된다. 기존 소성 모델들은 응력과 변형률의 불변성(invariant)에 기초하여 부재의 대표응력과 대표변형률 사이의 직접적인 관계에 의하여 구성된다. 그러나 미소면 모델은 단위 부피를 각 방향의 미소면으로 나누고, 단위 부피의 대표응력이나 대표변형률은 대표(Macro)와 미소(Micro) 간의 변형률 또는 응력의 불변성을 만족시킨다는 가정 하에 모든 미소면에서의 미소응력 또는 미소변형률들의 합으로서 구한다(Figs. 11 and 12).<sup>20,21)</sup> 미소면 모델의 가장 큰 장점은 다른 재료모델과는 달리 변수의 개수를 최소화하고, 비국소손상을 나타낼 수 있으며, 복잡한 수치계산 없이 비교적 정확히 다양한 상태의 재료거동을 나타낼 수 있다는 점이다.

Bazant<sup>20,21)</sup>에 의하여 개발된 미소면 모델에서, 부재의 대표변형률 벡터  $\epsilon$ 의 축변환에 의하여 각 미소면 상의 변형률 벡터  $\epsilon_i$ 를 구하고, 이  $\epsilon_i$ 는 체적(Volumetric) 변형

률  $\epsilon_v$ , 비체적(Deviatoric) 변형률  $\epsilon_D$ , 접선(Tangential) 변형률  $\epsilon_T$ 로 분리된다. 이 변형률들은 Fig. 13과 같은 응력-변형률 구성 관계에 의하여 체적응력  $\sigma_v$ , 비체적응력  $\sigma_D$ , 전단응력  $\sigma_T$ 에 대응되며, 이 응력들의 조합에 의하여 미소면 상의 응력 벡터  $\sigma_i$ 를 얻는다. 각 미소면들의 응력 벡터들의 벡터 합에 의하여 대표응력 벡터  $\sigma$ 를 얻을 수 있다.

#### 4.2 인장-압축 상태에 대한 모델의 개선

Bazant는 이러한 미소면 모델을 인장-압축을 받는 철근콘크리트에 적용하였으나, 총변형률 관계를 인장과 압축에 동시에 사용할 경우 인장응력을 일으키는 인장변형률과 압축응력을 일으키는 압축변형률을 구분할 수 없으므로 콘크리트의 인장균열 후 거동을 정확히 나타내지 못한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 보다 향상된 모델이 제안되었다.<sup>22)</sup> 인장균열 후 인장-압축상태의 철근콘크리트에서 압축력을 받는 콘크리트 스트럿의 압축응력-변형률 관계는 1축 압축력을 받는 콘크리트와 일치하여야 한다. 따라서, 콘크리트 영역의 압축응력-변형률 관계를 나타내기 위하여 인장균열변형률은 총 변형률에서 배제되어야 한다. 이를 위하여 인장균열이 있는 콘크리트는 개념적으로 콘크리트 영역과 인장균열 영역으로 구분하며(Fig. 14), 총

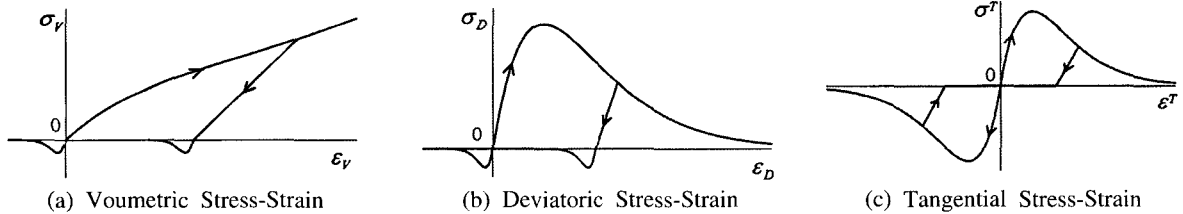


Fig. 13 Stress-Strain Relations of Microplane Model

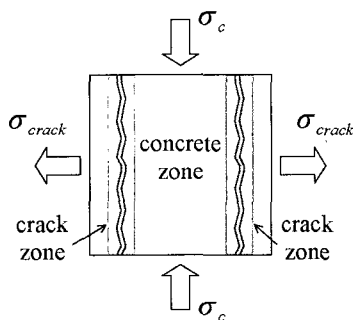


Fig. 14 Concrete and Crack Zone

	Existing Microplane Model	Proposed Microplane Model
Stress (macroscopic)		
Strain		

Fig. 15 Comparison in Stress-Strain Relations of Original and Improved Microplane Models

응력은 이 두 영역 응력의 조합으로 표현한다(Fig. 15).

$$\sigma = \sigma_c + \sum \sigma_{crack} \quad (7)$$

인장균열이 발생한 경우  $\sigma_c$ 를 1축 압축상태로 유지하기 위하여 변형률 한계 개념을 도입한다.  $\sigma_c$ 가 압축상태인 경우 인장변형률은 일정한 한계값을 넘지 않으며, 따라서 콘크리트의 응력은 압축상태를 유지한다. 인장변형률의 한계값은 압축상태의 콘크리트에서 허용되는 최대 횡방향 변형률을 의미한다.

### 4.3 장단점 및 적용성

미소면 모델은 단순화된 응력-변형률 곡선의 조합으로서 콘크리트와 같이 다양하고 복잡한 거동을 나타낼 수 있다는데 큰 장점을 가지고 있다. 또한 강도 측면에서 재료의 거동을 나타내는데 치중하는 소성모델 등 기타 재료 모델에 대하여 응력, 변형률을 적절히 나타낼 수 있는 길을 열어주고 있다. 그러나 다음과 같은 면에서 보다 발전적인 연구가 필요하다.

- 1) 현재까지 연구결과는 대부분 무근콘크리트에 대한 것으로서 철근콘크리트의 거동에 대한 보다 많은 연구가 필요하다
- 2) 미소면 모델에서는 매개변수 조절에 의하여 강도 및 변형률을 나타내는데 이러한 매개변수가 강도 및 변형률과 어떠한 관계에 있는가를 정립하기는 쉽지 않으므로 실험결과와 일치시키기 위해서는 많은 시도가 필요하며, 이러한 단점을 방지할 수 있는 방안이 필요하다.
- 3) 미소면 모델에서는 응력이 존재하지 않는 방향에서도 체적 및 비체적 응력이 존재하는 것으로 나타나는 데 이러한 구성관계상의 이론적 뒷받침이 필요하다.

## 5. 응력-변형률 관계

콘크리트의 압축, 인장 파괴는 기본적으로 국부손상을 일으키는 Fracture에 의하여 일어난다. 반면에 유한요소 해석은 Continuum Mechanics에 근거하는 방법으로서 Fracture에 의한 국부손상을 나타내기 위해서는 응력-변형률 관계가 유한요소의 크기에 따라 조정되어야 한다.

### 5.1 압축 상태

무근 콘크리트의 1축압축응력-변형률의 관계는 Fig. 16

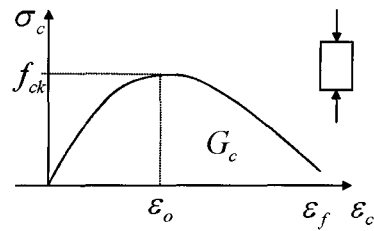


Fig. 16 Compressive Stress-Strain Relation of Plain Concrete

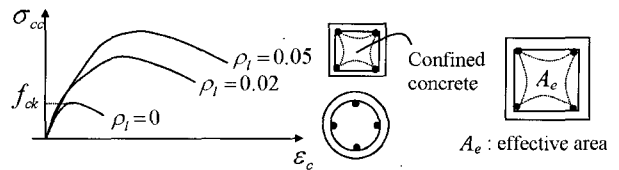


Fig. 17 Concrete Confined by Lateral Re-bars

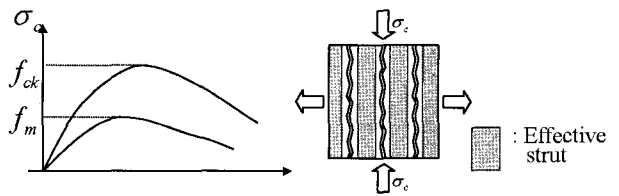


Fig. 18 Compression Softening of Concrete in Tension-Compression

과 같다. 여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 1축압축강도이며, 이에 대한 항복변형률은  $\epsilon_o$ 이며, 파괴변형률  $\epsilon_f$ 는 항복변형률의 3~5배 정도이다.  $G_c$ 는 압축에 대한 콘크리트의 파괴에너지로, 이에 근거하여 요소의 크기에 따라 응력-변형률 관계가 다르게 정의된다. 횡보강근에 의하여 보강된 콘크리트의 경우, 3축 압축을 받는 콘크리트에서와 마찬가지로 압축강도의 증가가 발생한다(Fig. 17). 인장-압축을 받는 콘크리트에서는 인장균열이 발생하면, 여러 방향에서 발생하는 미세균열들에 의하여 압축력을 받는 콘크리트의 유효면적이 감소하므로 압축강도가 감소한다(Fig. 18). 따라서, 이러한 콘크리트의 압축강도는 압축 변형률뿐만 아니라 인장균열의 변형률에 의하여 결정된다.

### 5.2 인장 상태

무근 콘크리트의 1축인장응력-변형률의 관계는 Fig. 19와 같다. 여기서  $G_T$ 는 균열면에서 발생하는 콘크리트의 파괴에너지이다. 이 파괴에너지는 균열면의 응력과 균열 폭의 관계이므로 부재의 길이와 관계없이 일정하다. 그러나 분산균열모델을 사용하는 경우에는 균열이 길이에 따라서 일정하게 분포해 있다고 가정하므로 균열 폭  $\Delta_T$ 에

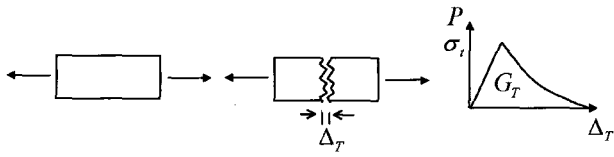


Fig. 19 Tensile Stress-Strain Relation of Plain Concrete

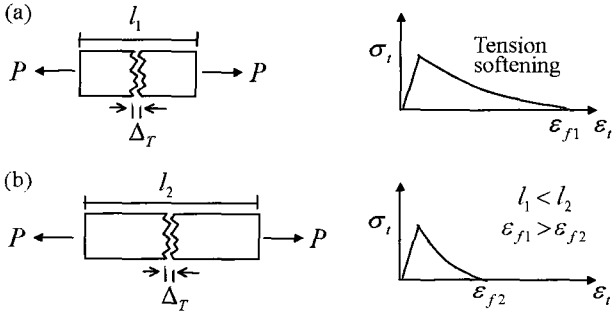


Fig. 20 Length Effect for Tension Softening Behavior

대한 인장균열 변형률을 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon_T = \frac{\Delta_T}{l} \quad (8)$$

따라서, 파괴변형률  $\epsilon_f$  및 인장연화(Tension Softening) 구간에서의 인장응력-변형률의 관계는 부재의 크기에 의하여 다르게 정의되어야 한다(Fig. 20). 유한요소해석에서, 인장균열 변형률은 가우스 적분 지점에서의 유효길이  $l_e (= \sqrt{A})$ 에 의하여  $\epsilon_T = \Delta_T / l_e$ 로 정의한다.

인장균열이 집중되면서 파괴가 발생하는 무근콘크리트와 달리, 철근콘크리트는 철근의 부착에 의하여 균열이 분산된다. 따라서 균열 1개에 대한 응력-균열폭 관계는 같더라도 분산균열모델에 대한 파괴변형률  $\epsilon_f$ 는 증가하며 철근에 의한 인장경화(Tension Stiffening)현상이 발생한다(Fig. 21). 이때, 인장응력-변형률의 관계는 철근비의 영향에 의하여 결정된다.

균열의 방향과 철근의 방향이 일치하지 않는 경우, 균열 방향 혹은 철근방향에서 인장경화현상을 정의할 수 있다. 인장균열방향에서 정의하는 경우(모델 1), 인장응력-변형률 관계는 철근비뿐만 아니라 철근과 균열 사이의 각도의 영향에 의해서 결정된다(Fig. 22 (a)). 철근의 방향에서 인장경화를 정의하는 경우(모델 2), 인장균열의 방향에서는 인장연화현상만을 이상화하고, 철근의 방향에서 인장경화에 의한 부착응력을 정의한다. 철근 방향에서의 응력은 철근의 응력과 부착응력의 합으로 정의된다(Fig. 22 (b)). 이 인장경화현상을 모델링할 때 주의하여야 할 점은 균열 사이에서는 철근에 의하여 인장력이 전달되므로 균열 후 철

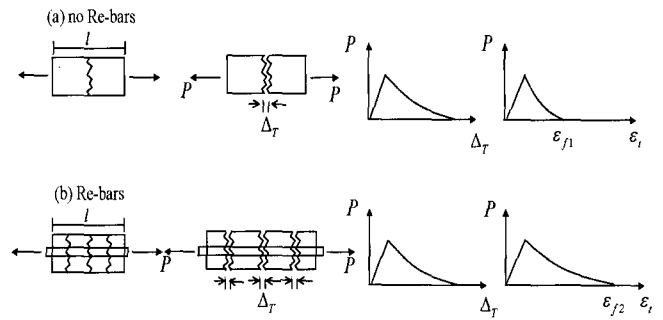


Fig. 21 Comparison of Post-Cracking Behaviors

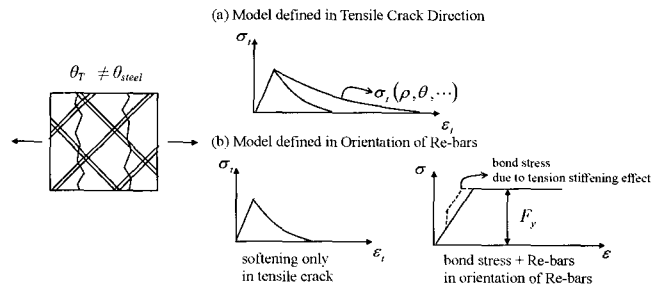


Fig. 22 Tension Stiffening Models in Tensile Crack Direction and Re-bar Direction

근콘크리트의 인장강도는 철근의 항복강도에 의하여 지배받으며, 어떠한 모델을 사용하는 경우에도 철근과 콘크리트 인장강도의 합이 철근의 항복강도를 초과하지 않도록 제어하여야 한다는 점이다. 이러한 관점에서는 모델 2가 이러한 조건을 보다 쉽게 만족시킬 수 있다. 일반적으로 철근은 완전 탄소성으로 가정하여도 무방하다. 철근비가 매우 작은 경우에는 균열이 집중되어 작은 평균인장변형률에서도 균열의 폭이 매우 크며, 따라서 철근이 변형률 경화 영역에 도달할 수 있다.

## 6. 결 론

분산균열모델은 인장균열을 인장변형률로 치환하고 균열 콘크리트를 연속체로 가정함으로써, 유한요소해석에 쉽게 적용하고 철근콘크리트 부재의 해석을 비교적 정확히 할 수 있다. 그러나 인장균열을 방향 및 위치의 측면에서 독립된 손상으로 가정하지 않음으로서, 철근콘크리트의 거동을 나타내는데 몇 가지 단점이 있으며, 이를 극복하기 위하여 다음과 같은 추가 연구가 필요하다.

- 1) 콘크리트의 미세 균열손상은 인장 뿐만아니라 압축 거동에도 영향을 미친다. 동일한 비국소손상모델로서 압축 및 인장 거동을 정확히 나타낼 수 있는 방법의 개발이 필요하다.
- 2) 단조 하중 뿐만 아니라, 주기거동 하에서 인장 및 압



축의 불규칙적인 반복을 잘 나타낼 수 있는 해석 모델의 개발이 요구된다.

- 3) 궁극적으로 인장상태의 콘크리트는 Fracture에 의하여 파괴되므로 이를 유한요소에 적용시킬 수 있는 신뢰성 있는 방법의 개발이 필요하다.
- 4) 정밀한 해석을 위하여 보다 많고 복잡한 변수 및 구성식이 사용되고 있다. 하드웨어적인 전산 시스템의 발전으로 수치해석 시간의 단축 및 해석 능력은 증가되었으나, 수렴성을 향상시킬 수 있는 수치해석적 기법의 개발이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. Ngo, D., and Scordelis, W. C., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams", ACI J., 64(1), 1967, 152~163
2. Nilson, A. H., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method", ACI J., 65(9), 1968, 757~766
3. Rashid, Y. R., "Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels", Nuclear Engrg. and Design, 7(4), 1968, 334~344
4. Okamura, H., and Maekawa, K., "Nonlinear Analysis and Constitutive Modelsof Reinforced Concdrete", Tokyo Gihodo, Japan, 1991
5. Elmorsi, M., Kianoush, M. R., and Tso, W. K., "Nonlinear Analysis of Cyclically Loaded Reinforced Concrete Structures", ACI Struct. J., 95(6), 1998, 725~739
6. Vecchio, F. J., and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected Shear" ACI J., 83(2), 1986, 219~231
7. Vecchio, F. J., "Towards Cyclic Load Modeling of Reinforced Concrete", ACI Struct. J., 96(2), 1999, 193~202
8. de Borst, R., and Nauta, P., "Non-Orthogonal Cracks in a Smeared Finite Element Model", Engrg. Computations, 2, 1985, 35~46
9. Chen, W. F., "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw-Hill, USA ,1982
10. Jirasek, M., and Bazant, Z. P., "Inelastic Analysis of Structures", John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, PO19 1UD, England
11. Etse, G., and Willam, K., "Fracture Energy Formulation for Inelastic Behavior of Plain Concrete", J. Engrg. Mech., ASCE, 120(9), 1994, 1983~2011
12. Menetrey, P., and Willam, K., "Triaxial Failure Criterion for Concrete and Its Generalization", ACI Struct. J., 92(3), 1995, 311~318
13. Imran, I., and Pantazopoulou, S. J., "Plasticity Model for Concrete under Triaxial Compression", J. Engrg. Mech., ASCE, 127(3), 2001, 281~290
14. Park, H., and Klingner, R. E., "Nonlinear Analysis of RC Members Using Plasticity with Multiple Failure Criteria", J. Struct. Engrg, ASCE,, .123(5), 1997, 643~651
15. Feenstra, P. H., and de Borst, R., "A Composite Plasticity Model for Concrete", Int. J. Solids and Struct., 33(5), 1996, 707~730.
16. Park, H., and Kim, J.-Y., "Hybrid Plasticity Model for Reinforced Concrete in Cyclic Shear", Engrg. Struct., 27(1), 2005, 35~48
17. Park, H., and Kim, J.-Y., "Plasticity Model Using Multiple Failure Criteria for Concrete in Compression", Int. J. Solids and Struct., 42(8), 2005, 2303~2322
18. Lee, J., and Fenves, G. L., "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", J Engrg. Mech., ASCE, 124(8), 1998, 892~900
19. Meschke, G., Lackner, R., and Mang, H., "An Anisotropic Elastoplastic-Damage Model for Plain Concrete", Int. J. Numerical Method in Engrg., Wiley, 42(4), 1998, 703~727
20. Bazant, Z. P., and Prat, P. C., "Microplane Model for Brittle-Plastic Material", J. Engrg Mech., ASCE, 114(10), 1988, 1672~1702
21. Bazant, Z. P., Xiang, Y., and Prat, P. C., "Microplane Model for Concrete", J Engrg Mech, ASCE, 122(3), 1996, 245~254
22. Park, H., and Kim, H., "Microplane Model for Reinforced-Concrete Planar Members in Tension-Compression", J. Struct. Engrg., ASCE, 129(3), 2003, 337~345 