

## 인장강성 효과를 고려한 RC 셸의 재료비선형 해석

Material Nonlinear Analysis of the RC Shells  
Considering Tension Stiffening Effects

陳致燮\* · 嚴長燮\*\*

Jin, Chi Sub · Eom, Jang Sub

## Abstract

In this study, material nonlinear finite element program is developed to analyze reinforced concrete shell of arbitrary geometry considering tension stiffening effects. This study is capable of tracing the load-deformation response and crack propagation, as well as determining the internal concrete and steel stresses through the elastic, inelastic and ultimate ranges in one continuous computer analysis. The cracked shear retention factor is introduced to estimate the effective shear modulus including aggregate interlock and dowel action. The concrete is assumed to be brittle in tension and elasto-plastic in compression. The Drucker-Prager yield criterion and the associated flow rule are adopted to govern the plastic behavior of the concrete. The reinforcing bars are considered as a steel layer of equivalent thickness. A layered isoparametric flat finite element considering the coupling effect between the in-plane and the bending action was developed. Mindlin plate theory taking account of transverse shear deformation was used. An incremental tangential stiffness method is used to obtain a numerical solution. Numerical examples about reinforced concrete shell are presented. Validity of this method is studied by comparing with the experimental results of Hedgren and the numerical analysis of Lin.

## 요 지

본 논문에서는 콘크리트 균열 사이의 인장강성 효과를 고려한 임의의 기하학적 형상을 갖는 철근 콘크리트 셸을 해석하기 위하여 재료비선형 유한요소 프로그램을 작성하였다. 본 논문은 연속적인 컴퓨터 해석으로 탄성, 비탄성 및 극한 범위에서의 철근과 콘크리트의 응력은 물론, 하중-변위 응답과 균열전파를 추적할 수 있었다. 골재의물림과 철근의 다올작용을 포함하는 유효전단계수를 평가하기 위하여 균열상태의 전단유지계수를 도입하였다. 콘크리트는 인장에서는 취성으로 압축에서는 탄소성으로 가정하였다. 콘크리트의 소성거동은 Drucker-Prager 항복기준과 결합유동법칙에 따르는 것으로 가정하였다. 철근은 Von Mises 항복기준으로 가정하였으며 등가의 두께를 가지는 철근층으로 모델화 하였다. 수치해석을 위하여는 증분형접선강성도 방법을 사용하였다. 수치예제를 제시하여 본 연구결과를 Hedgren의 실험 결과와 Lin의 수치해석과 비교하였다.

\* 정희원 · 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 황신전문대학 토목과 전임강사

# 1. 서 론

고전적인 얇은 셸 이론<sup>(1)</sup>은 셸의 기하학적 형상에 따라 복잡한 미분방정식의 형태로 표현되고, 이에 대한 엄밀한 해석하는 하중과 경계조건이 매우 단순한 경우에만 구할 수 있었으나 최근에는 컴퓨터와 유한요소법의 발달로 단일재료로 된 임의의 형상을 가진 셸은 쉽게 해석 가능하게 되었다. 그러나 철근 콘크리트 셸구조물은 재료의 복잡성 때문에 그 거동과 비탄성 범위에서의 극한지지능력을 구하는 것이 쉽지 않아서 아직도 실험데이터를 이용한 결과를 설계에 사용하고 있는데 실험에 소요되는 시간과 경비가 막대하다. 이런 실험에 대체할 만한 유한요소모델의 출현이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 단조증가하중을 받는 철근콘크리트 셸의 재료비선형 유한요소 해석프로그램을 작성하여 셸의 하중-변위응답, 셸의 두께 방향의 콘크리트의 균열 및 소성, 또한 철근의 항복을 추적하였다. Mindlin판 이론과 충분할 유한요소법을 적용하였으며 면내력과 면외력 사이의 상호작용효과를 고려하기 위하여 횡요소에 평면응력요소를 조합한 8절점 2차원 등매개변수 요소를 사용하였다. 한 절점을 공유하는 이웃요소들이 동일 평면내에 있을 때의 특이성은 가회전강성도를 도입하여 해결하였다.

또 본 논문에서는 철근콘크리트 셸에서 콘크리트에 균열이 발생했을 때 균열 주위의 인장강성효과를 고려하기 위하여 3가지의 감소곡선을 제시하여 비교하였으며, 골재역물림과 철근의 다올작용을 포함하는 유효전단계수를 평가하기 위하여 균열상태의 전단유지계수를 도입하였다. 콘크리트는 인장에서는 취성으로 압축에서는 탄소성으로 가정하였다. 콘크리트의 소성거동은 Drucker-Prager 항복기준과 결합유동법칙에 따르는 것으로 가정하였다. 철근은 Von Mises 항복기준으로 가정하였으며 등가의 두께를 가지는 철근층으로 모델화하였다. 수치해석을 위하여는 증분형접선강성도 방법을 사용하였다. 수치예제를 제시하여 본 연구결과를 Hedgren의 실험결과와 Lin의 수치해석과 비교하였다.

## 2. 재료성질

### 2.1 철근

철근은 셸 요소에 수평으로 분산된 등가의 철근층으로 대치하였고, 철근의 크기와 철근 간격에 대한 효과는 고려하지 않았다.

철근의 응력-변형률 곡선은 지금까지 기존의 일반 연구에서는 인장과 압축이 동일하게 그림 1(a)와 같이 탄성-완전소성으로 모델링하였다. 본 논문에서는 철근은 항복강도가  $\sigma_y$ 이고,  $\sigma_y$  이후에는 재료접선계수  $E_{sp}$ 를 가지는 선형변형률경화(linear strain hardening) 재료로 그림 1(b)와 같이 모델링하였다. 철근이 항복한 후에 Hu & Schnobrich<sup>(2)</sup>는 접선계수  $E_{sp}=0.01 E_s$ 로 가정하고 Hinton & Owen<sup>(3)</sup>은  $E_{sp}=0.1 E_s$ 로 가정하여 증분구성 매트릭스를 수정조합 하였는데 본 논문에서는 두 가정을 모두 적용하여 비교하였으나 해의 결과에는 별다른 영향이 없어서 후자를 택하였다. 항복기준은 Von Mises 기준을 이용하였다.

### 2.2 콘크리트

일반적으로 콘크리트의 파괴는 2가지 형태 즉 인장과 압축으로 나눌 수 있다. 인장파괴는 주된 균열이 형성되어서 콘크리트가 이 균열의 직각방향으로 인장강도를 잃어 버릴 때이고 압축파괴는 수많은 미세 균열이 발달하여 콘크리트 요소가 모든 방향에서 강도를 잃어 버리는 것이다. 콘크리트의 비선형성의 분기점이 되는 균열의 발생은 콘크리트 1축인장강도, 2축응력상태, 부재의 크기 및 콘크리트 배합, 양생, 건조수축 등에 영향을 받으므로, 균열의 발생을 정확하게 예측하기란 상당히 어렵다.

본 논문에서는 콘크리트의 인장강도기준을 이용한

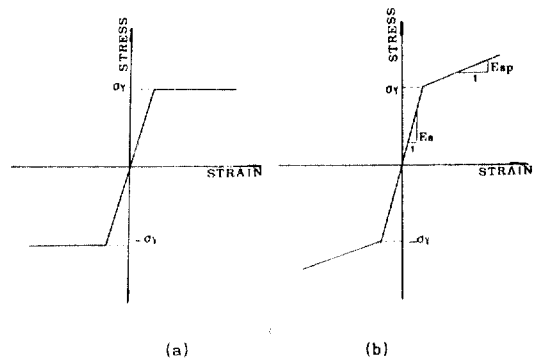


그림 1. Idealized stress-strain curve for steel

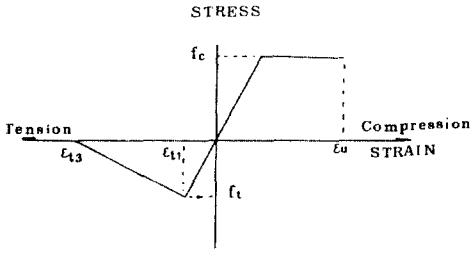


그림 2. Idealized uniaxial stress-strain relation for concrete

분산균열모델(Smeared crack model)을 채택하였다. 콘크리트 응력이 2축인장영역이든 인장-압축영역이든 이들 영역중의 하나가 파괴면에 먼저 도달하면 임의의 위치에서 초기균열이 발생하는 것으로 모델화하였다. 또한 철근콘크리트 쉘의 전체 비선형거동이 콘크리트의 인장균열에 지배되므로 구조물 해석에 대한 모델의 정교함보다는 계산노력을 고려하여 콘크리트의 응력-변형률관계를 2축압축상태에서는 탄성-완전소성모델을 사용하였고 2축인장상태에서는 콘크리트의 인장변형률이 인장강도변형률을 넘을 경우 인장강성효과를 고려하여 여러 식으로 이상화하여 그 결과를 비교하였다.

또 콘크리트의 전단응력에 대해서는 균열이 발생한 후 골재역물림과 철근의 다올작용을 고려하여 전단유지계수(shear retention factor)를 도입하였다.

Hand et al<sup>(4)</sup>은 철근콘크리트판에  $\beta$  값의 수치 실험을 하였는데 그 값이 0.2-1.0의 범위에서 어느 값을 택하여도 해에 영향이 없음을 밝혔다. Bédard et al<sup>(5)</sup>은 무근콘크리트 프리즘과 철근콘크리트보에서  $\beta$ 의 값이 0.10-0.50 범위일 때 안정적인 값을 얻었다. Hu et al<sup>(2)</sup>은 철근콘크리트판과 쉘에서  $\beta$ 의 값을 0.25로 택하였다.

본 논문에서는 콘크리트의 인장강성효과에 대한 비교가 주된 목적이어서  $\beta$ 의 값을 0.4로 택하여 계산하였다.

### 2.3 항복조건

본 논문에서 항복조건 적용에 있어서는 철근은 금속재료에 잘 적용하는 Von Mises 항복조건을 적용하였고, 콘크리트는 Drucker-Prager 항복조건을

이용하였다. Drucker-Prager 기준은 Von Mises 기준에 정수압 응력의 영향을 포함시킴으로서 암반이나 콘크리트의 항복거동을 보다 더 정밀하게 표현 되기 때문에 채택하였다.

#### 2.3.1 Von Mises 항복조건<sup>(6)</sup>

편차응력 텐서의 제2불변량(Second invariant of deviatoric stress tensor)  $J_2$ 가 어느 한계치에 도달하면 항복이 되며, 항복조건식은 다음과 같이 얻어진다.

$$F = \sqrt{3} J_2^{1/2} - \sigma_Y = 0 \quad (1)$$

여기서  $\sigma_Y$ 는 콘크리트의 1축항복강도

Von Mises 항복기준을 주응력의 향으로 나타내면 다음과 같다.

$$F(\sigma) = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} - \sigma_Y \quad (2)$$

#### 2.3.2 Drucker-Prager 항복조건<sup>(6)</sup>

Drucker-Prager 항복조건은 Von Mises 기준에 정수압응력을 고려한 것으로 다음과 같다.

$$F = \alpha I_1 + J_2^{1/2} - k = 0 \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 와  $k$ 는 양(+)의 상수이고  $I_1$ 은 제1차 응력텐서 불변량이다. 또 이 기준은 Mohr-Coulomb 항복면과 관련을 지을 수 있는 데 예를 들어 Mohr-Coulomb 항복면의 외부 꼭지점을 연결한 면일 때의  $\alpha$ 와  $k$ 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3} [3 - \sin \phi]} \quad (4)$$

$$k = \frac{6 c \cos \phi}{\sqrt{3} [3 - \sin \phi]} \quad (5)$$

여기서  $\phi$ 는 재료의 내부마찰각이고  $c$ 는 점착력이다.

본 논문에서는 Kupfer<sup>(7)</sup>가 실험한 콘크리트 일축 압축강도  $f_c'$ 와 일축인장강도  $f_t'$ 를 Chen<sup>(6)</sup>이 제안한 아래와 같은 식을 사용하여 콘크리트의 점착력( $c$ )과 내부마찰각( $\phi$ ) 값을 산출하였다.

$$\sin \phi = \frac{f_c' - f_t'}{f_c' + f_t'} \quad (6)$$

$$c = -\frac{f_c' f_t'}{f_c' - f_t'} \tan \phi \quad (7)$$

Drucker-Prager 항복기준을 주응력의 향으로 표현하면 다음과 같다.

$$F(\sigma) = \alpha(\sigma_1 + \sigma_2) + \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2^2} - \sigma_y' \quad (8)$$

콘크리트의 파쇄는 콘크리트가 항복한 후에 완전히 붕괴된 것으로 정의하여 파쇄면을 변형률로 나타내면 다음과 같다.

$$F(\epsilon) = \alpha(\epsilon_1 + \epsilon_2) + \sqrt{\epsilon_1^2 - \epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_2^2} - \epsilon_u = 0 \quad (9)$$

여기서  $\epsilon_u$ 는 콘크리트의 1축 압축 극한변형률

### 3. 인장강성 효과

철근콘크리트 구조물은 콘크리트에 균열이 발생할 때 철근이 들어 있어서 매우 복잡한 작용을 하게 된다. 콘크리트가 극한 인장강도에 도달할 때 기본적인 균열이 철근길이에 따라서 어떤 간격으로 발생한다. 전체 작용하는 하중이 철근에 의하여 이들 균열을 가로질러 전달되지만 균열 사이의 콘크리트는 아직도 응력을 전달할 응력이 남아 있다. 이것은 철근과 콘크리트 사이의 부착력 때문이다. 이러한 현상을 콘크리트의 인장강성효과(tension stiffening effect)라고 한다. 이와 같은 현상에 의해 균열부위에서의 콘크리트 응력은 0이지만 그것을 철근길이에 걸쳐 평균하면 0이 아니다. 이것은 철근의 크기와 위치에 따라 콘크리트의 균열진전과 균열 범위가 제한되기 때문이다. 하중이 증가함에 따라 보다 많은 균열이 형성되고 콘크리트에 의하여 전달되는 인장력은 점차 감소하나 변형률은 한계인장변형률까지 계속 증가하게 된다. 이리하여 그 요소에 대한 콘크리트 응력-변형률 곡선은 제하(unloading)부분을 갖는 것으로 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

인장강성효과는 두가지 방법을 사용하여 나타낼 수 있다. 첫번째 방법은 콘크리트 응력-변형률 곡선의 인장영역에 대한 제하곡선을 사용하는 것이다. 두번째 방법은 철근의 강성을 크게 하여 사용하는 것이다.<sup>(8)</sup> 본 논문에서는 전자의 방법을 사용하였다.

Scanlon<sup>(9)</sup>은 인장강성 효과를 고려하기 위하여 상대적으로 긴 게이지 길이에 걸쳐 평균응력-변형

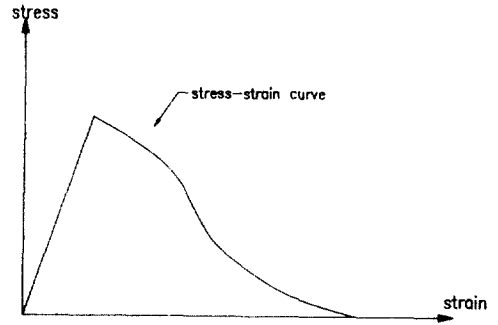


그림 3. Stress-Strain curve for concrete in tension

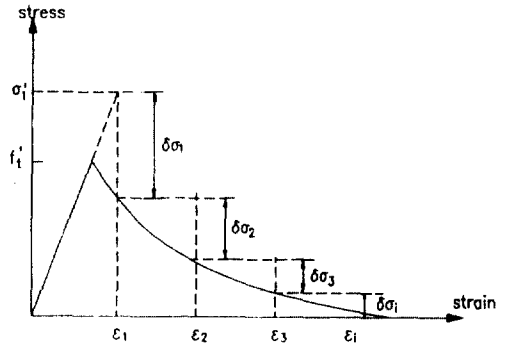


그림 4. Gradual unloading for cracked concrete

률의 개념을 사용하여 평균응력-변형률 곡선을 탄성계수가 차츰 감소하는 계단형 직선들로 대체하였다. Vebo & Ghali<sup>(18)</sup>는 인장강성 효과를 응력상태에 따른 콘크리트의 연화(Softening)현상을 고려하여 해석하고자 하였는데 이때 연화영역을 정의하는 응력-변형률 관계의 여러가지 모양을 가지고 시도하였다. Gilbert & Warner<sup>(10)</sup>는 철근콘크리트 슬래브 해석에서 콘크리트의 인장강성효과를 철근의 강성을 크게 하여 사용하였다. 또 Lin<sup>(11)</sup>은 다항식의 응력-변형률 값을 사용하였다.

본 논문에서는 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트에 균열이 발생하면 0으로 되지만 불평형응력은 규정된 제하곡선을 따라 점차 계단형으로 이완되는 것으로 인장강성 효과를 고려하였다. 그림 4에서 보면 첫째  $\sigma_1$ 이 인장강도를 넘어서면 콘크리트는 균열이 생기고 0인 탄성계수가 다음 해를 위하여 사용된다. 전체응력  $\sigma_1$ 은 감소하나 변형률이 증가하므로  $\delta\sigma_1$ 이

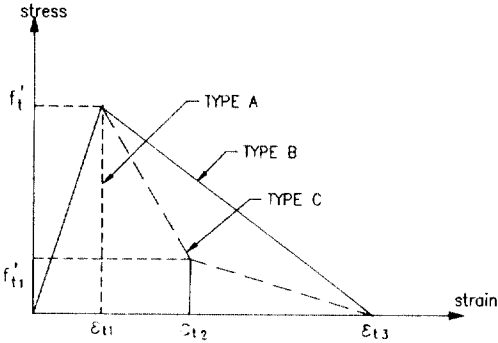


그림 5. Assumed tension stiffening effect

불평형응력으로 고려된다. 두번째 해에 대하여는  $\delta\sigma_2$ 가 불평형응력이 되고 그 이하도 같은 방법으로 이완된다. 그러므로 불평형응력은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\{\delta\sigma_i\} = \{\sigma_i'\} = \{\sigma\} \quad (10)$$

여기서  $\sigma'$ 는 증분된 현단계에서 구해진 전체응력  $\sigma$ 는 구성관계식을 만족하여 얻어진 전체 변형률에 대한 실제응력

본 논문에서는 인장강성 효과를 고려하기 위하여 식 (10)에 계산된 불평형응력을 제하곡선 형태의 선형직선식을 그림 5와 같이 가정하였다.

그림 5에서 보는 바와 같이 TYPE A는 인장강성 효과를 고려하지 않았을 경우 즉 균열이 발생하면 콘크리트 강성이 0으로 떨어진다고 본 것이다.

TYPE B는 인장강성효과를 고려한 것으로 콘크리트의 1축 인장강도와 한계인장 변형률을 연결한 단일직선식으로 모델링한 것이다.

TYPE C도 인장강성효과를 고려한 것으로 2개의 직선식으로 단순화하여 모델링한 것이다. 2직선 모델에는 1/3점 모델, 1/6점 모델을 사용하여 비교한 결과 1/3점 모델보다 작은 값을 사용할 경우는 오히려 좋지 않은 수치결과가 나타났다. 그러므로 본 논문에서는 1/3점 모델을 사용하였다.

#### 4. 쉘의 비선형 유한요소 해석<sup>(12)</sup>

철근 콘크리트셸의 비선형 해석에 있어 콘크리트와 철근의 구성성질은 응력상태나 변형률 상태에

의존된다. 요소내에서 응력상태가 변화함에도 불구하고 어떤 하중상태에서 유한요소의 각 층의 구성성질은 층의 도심에서의 응력상태로 결정되는 일정한 성질을 가지고 있다고 가정한다.

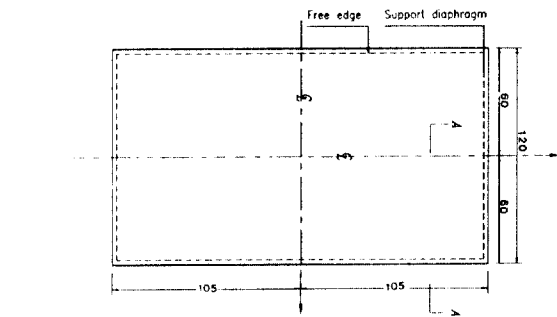
본 연구에서는 증분형 점선강성도법을 이용하여 철근콘크리트 셸 구조물의 재료 구성방정식을 하중단계에 따른 해의 수렴유무판별로 해석하였다. 이 과정은 하중을 유한개의 증분으로 나누는 것으로부터 출발한다.

각 하중 증분에 대하여 평형방정식과 구성방정식이 어떤 허용한계 이내에서 만족될 때까지 반복이 수행된다. 각 하중증분에 대하여 다음 단계들이 수행된다.

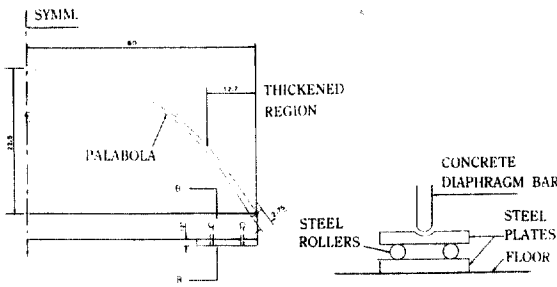
- (1) 전 하중증분에 대한 반복의 끝에 존재하는 수정된 강성도를 이용하여 절점력 증분을 얻기 위하여 구조물을 해석하여 첫 하중증분에 대하여는 초기의 균열이 없는 선형탄성 강성도가 사용된다.
- (2) 전 단계의 전체변위에 새로운 증분에 대한 것을 더하여 전체절점변위를 구한다.
- (3) 증분과 기준면 도심에서의 곡률과 면내 변형률의 전체값을 계산한다.
- (4) 증분과 현재의 구조물 강성도를 형성하는 데 사용된 재료성질을 이용하여 각 층에 대한 변형률과 응력의 전체값을 계산한다.
- (5) 각 층의 응력이나 변형률 상태를 적용한 수렴기준에 대하여 검토하여 불평형응력을 계산하여 수정된 응력에 따라 구성관계성질을 수정한다.
- (6) 수치적분으로 불평형응력을 불평형 절점력으로 변환하여 층 중의 어느 층이 그들의 구성성질이 달라지면 새로운 요소 강성도를 계산한다.
- (7) 불평형 절점력을 조합한 후 불평형력이나 변위증분이 수렴하는지 발산하는지 검토하여 만약 수렴하거나 규정된 최대반복수를 초과하면 다음 하중 증분을 위하여 (1) 단계로 가고 만약 발산하면 해를 정지시킨다.
- (8) 새로운 구성강성도를 형성하고 절점변위증분을 얻기 위하여 불평형 절점력에 대하여 해석한다.

#### 5. 수치 예

본 연구방법의 정당성을 알아보기 위하여 Hedg-



(a) plan



(b) section A-A

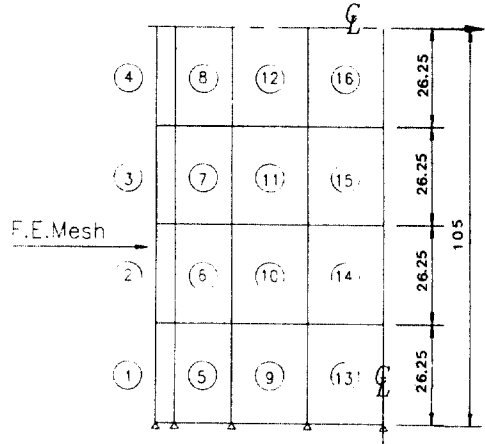
(c) section B-B

그림 6. Model Dimension

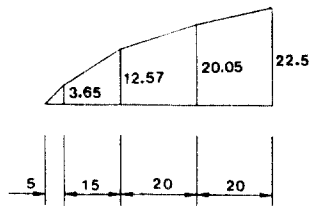
ren<sup>(13)</sup>이 시험한 철근콘크리트 원통형 셸모델을 해석하였다. Hedgren 셸의 치수는 그림 6과 같이 두께가 1.27 cm이고 셸의 길이방향 테두리는 수평거리 12.7 cm 구간에 두께를 변화시켰다. 이것은 테두리 보에 대응하는 것으로 테두리부분의 처짐과 모멘트를 감소시키고 종방향 인장철근을 배근하기 위하여 증가시킨 것이다.

경계조건에 대하여는, 종방향 테두리부분은 전혀 구속이 없고 횡방향 곡선부 단부에는 셸을 충분히 지지할 수 있는 격벽을 설치하였다. 또 4개의 구석점에는 로울러를 설치하였다. 하중은 진공하중장치를 사용하였는데 브레이싱을 댄 합판 뼈대구조 속에 모델을 넣고 아래로 공기를 빼내는 방법을 사용하였다.

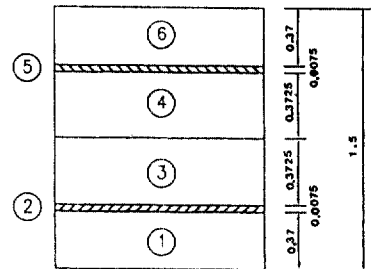
본 연구에서는 단조증가하중을 받는 셸 구조물의 응답이력을 추적하는 것이 목적이므로, 셸의 두께, 배근 및 경계조건들을 단순화하였다. 격벽이 있는 양단을 단순지지로 가정하고 셸의 1/4에 대하여 (4×4)의 유한요소망으로 분할하였다(그림 7). 셸의 두께는 모두 1.5 cm로 가정하였고, 철근은 실제의 철



(a) 4×4 mesh



(b) Layered system



(c) Material properties

$$\begin{aligned}
 E_c &= 2.1 \times 10^6 \text{ t/m}^2 \\
 E_s &= 2.03 \times 10^7 \text{ t/m}^2 \\
 \sigma_{yc} &= 3,073 \text{ t/m}^2 \\
 f_t' &= 490 \text{ t/m}^2 \\
 \nu_c &= 0.15 \\
 \sigma_{ys} &= 42,630 \text{ t/m}^2 \\
 H_c' &= 0 \\
 H_s' &= 2.03 \times 10^6 \\
 \epsilon_u &= 0.003 \\
 \epsilon_{t3} &= 0.00117 \\
 C &= 613.48 \text{ t/m}^2 \\
 \phi &= 46.46^\circ
 \end{aligned}$$

그림 7. Finite element mesh

근량을 등가철근비로 환산하여 사용하였다.

해석에 사용한 재료특성은 그림 7에 있는 바와 같다. Hedgren의 실험에서 셀의 설계하중은  $0.0366 \text{ kg/cm}^2$ 이었다. 본 연구에서는 Fialkow<sup>(14)</sup>가 계산한 등가절점력을 요소좌표계에 관하여 변환하여 사용하였다. Lin<sup>(11)</sup>은 그림 7의 1/4셀을 (16×16)의 삼각형 충분할요소를 사용하여 해석하였고 철근과 콘크리트에 모두 Von Mises 항복기준을 사용하였다.

해석결과를 나타내는 데에는 설계하중에 대한 작용하중의 비를 정의하는 하중계수 F를 이용하였다. 그림 8~그림 10은 하중계수 F에 따른 테두리부분의 지간중앙에서의 수직변위를 나타낸 것이고, 그림 11~그림 13은 셀의 꼭대기 부분의 수직변위를 나타내어 Hedgren<sup>(13)</sup>의 실험결과 및 Lin<sup>(11,16,17)</sup>의 해석결과와 비교한 것이다.

그림 8과 그림 11은 각각 테두리부와 꼭대기부의 처짐을 Hedgren 실험결과와 그림 5에서 가정한 TYPE A, 단일직선 모델인 TYPE B, 2직선 모델인 TYPE C를 비교한 것이다. 해석결과 TYPE B 모델이 실험치에 보다 근접함을 알 수 있었다.

그림 9와 그림 12는 Hedgren 실험결과 및 Lin의 해석결과와 본 연구에서의 인장강성효과를 무시한 TYPE A와 비교한 것이다. 본 연구의 결과가 실험치에 더 근접하였는 데 그 이유는 요소의 선택과 콘크리트에 Drucker-Prager 항복기준을 적용한 때문이라 생각된다.

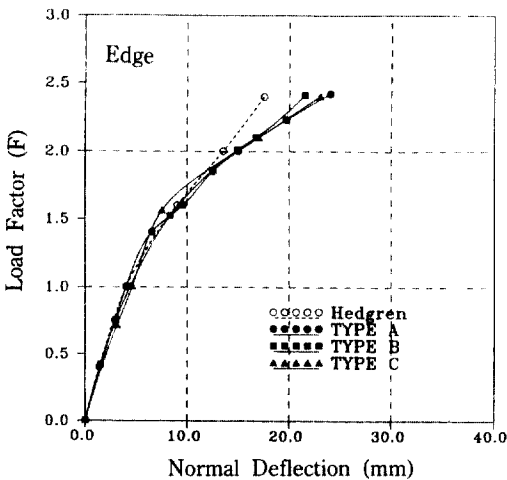


그림 8. Load-Deflection curves at edge(TYPE A, B, C)

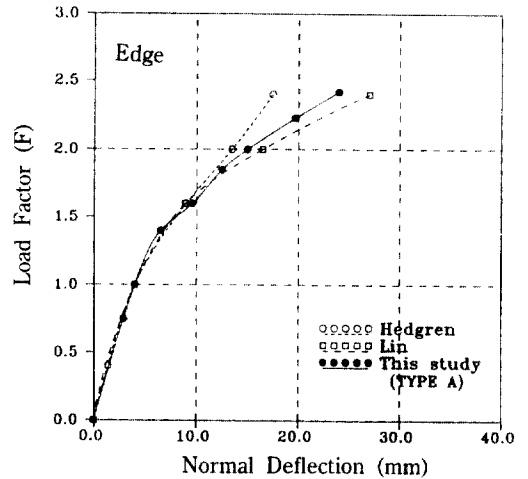


그림 9. Load-Deflection curves at edge(TYPE A)

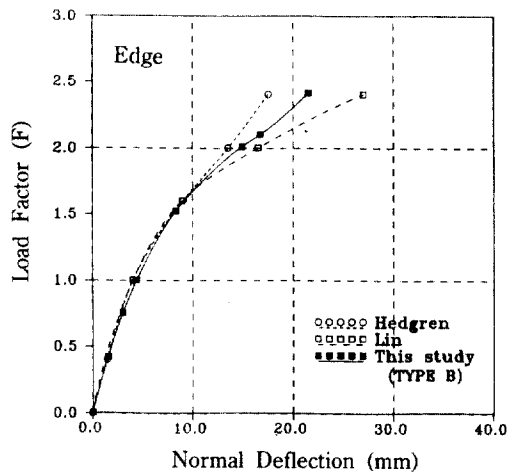


그림 10. Load-Deflection curves at edge(TYPE B)

그림 10과 그림 13은 Hedgren 실험결과 및 Lin의 해석결과 인장강성 효과를 단일직선 모델로 고려한 TYPE B와 비교한 것이다. 결국 TYPE A보다도 TYPE B의 경우가 실험치에 더 가까운 결과를 얻을 수 있었다.

결론적으로 철근콘크리트 셀에서 콘크리트의 인장강성효과를 고려하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

단조증가 하중을 받는 철근콘크리트 셀에 인장강

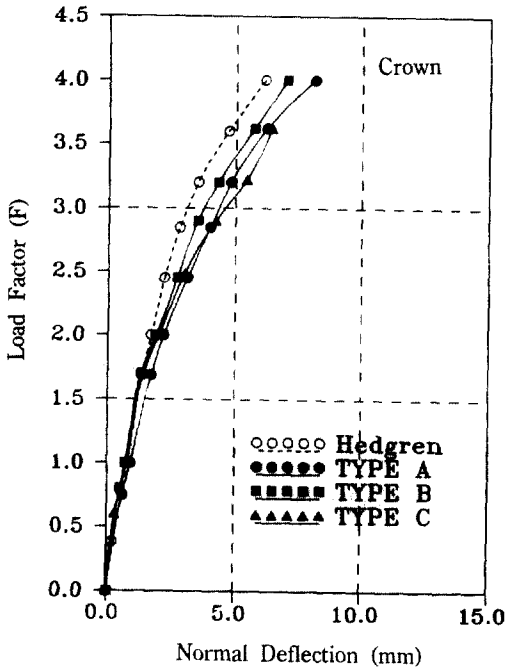


그림 11. Load-Deflection curves at crown(TYPE A, B, C)

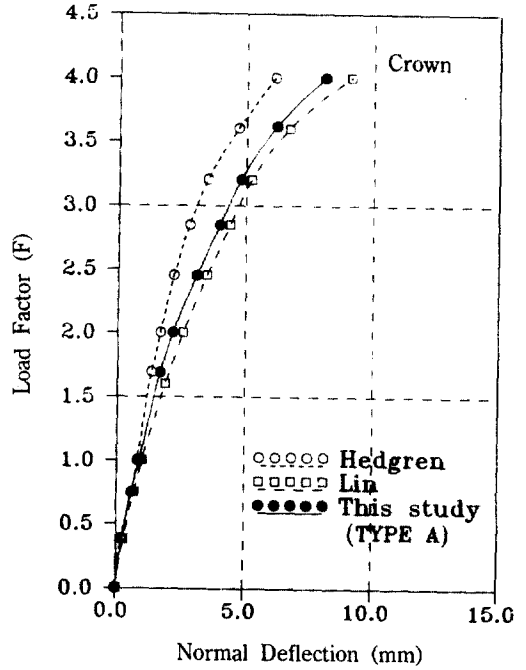


그림 13. Load-Deflection curves at crown(TYPE B)

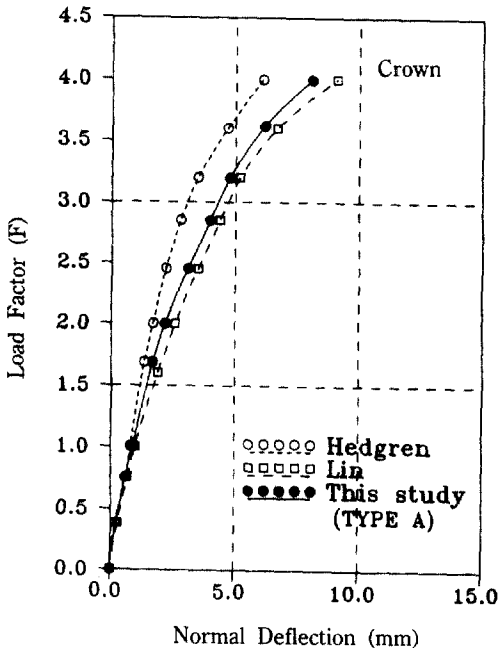


그림 12. Load-Deflection curves at crown(TYPE A)

성효과를 고려한 재료 비선형 해석을 수행하였다. 반복적인 컴퓨터 해석으로 탄성, 소성 및 극한 범위에서의 철근과 콘크리트의 응력은 물론 하중-변위 응답과 균열전파를 추적할 수 있었다.

1. 본 논문에서 제안한 해석방법은 철근콘크리트 쉘의 재료비선형해석에 정당하고 강력한 방법임을 알 수 있었으며 사용한 재료 이상화는 타당함을 알 수 있었다.

2. 본 논문에서는 철근콘크리트 쉘의 두께방향의 콘크리트의 균열 및 소성, 또 철근의 항복을 추적할 수 있도록 충분항방법을 이용하여 각 재료의 항복 기준을 콘크리트층은 Drucker-Prager 항복기준을 사용하고, 철근층은 Von Mises 항복기준을 사용할 경우 일반적으로 두 재료에 동일하게 Von Mises 항복기준을 적용한 경우보다 실험결과에 더 근접한 해석결과를 얻을 수 있었다.

3. 콘크리트에 인장균열이 발생할 때 인장강성 효과는 셸구조물의 후균열 응답에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 제시된 3개의 직선모델 중에서 콘크리트의 인장변형률이 한계인장변형률과 단일직선일 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다.



## 참 고 문 헌

1. Timoshenko, S.P. and Woinowsky-Krieger, S., *Theory of plates and shells*, 2nd. ed., McGraw-Hill, 1959, pp. 429-568.
2. Hu, H.T. and Schnobrich, W.C., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Plates and Shells Under Monotonic Loading", *Computers & Structures*, Vol. 38, No. 516, 1991, pp. 637-651.
3. Owen, D.R.J. and Hinton, E., *Finite elements in plasticity*, Pineridge Press, Swansea, 1980, pp. 157-373.
4. Hand, F.R., Pecknold, D.A., and Schnobrich, W.C., "Nonlinear Layered Analysis of RC Plates and Shells", *Journal of the Structural division, ASCE*, Vol. 99, No. ST7, 1973, pp. 1491-1505.
5. Bédard, C. and Kotsovos, M.D., "Fracture Processes of Concrete for NLFEA Methods", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 3, 1986, pp. 573-587.
6. Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1981, pp. 1-474.
7. Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H., "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses", *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings, ASCE*, Vol. 9-9, No. EM4, Proc. Paper 9917, 1973, pp. 852-866.
8. Nilson, A.H. et al, "State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete", *American Society of Civil Engineering*, 1982, pp. 1-145.
9. Scanlon, A., "Time Dependent Deflection of Reinforced Concrete Slabs", ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Alberta, Edmonton, 1971.
10. Gilbert, R.I. and Warner, R.F., "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Slabs", *Journal of The Structural Division, ASCE*, Vol. 104, No. ST12, 1978, pp. 1885-1900.
11. Lin, C.S., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Slabs and Shells", Ph. D. Dissertation, Division of Structural Engineering and Structural Mechanics, University of California, Berkeley, UC-SESM 73-7, 1973.
12. 진치섭, 차영수, 엄종욱, "철근콘크리트판의 비선형 파괴 유한요소 모델에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*, 제8권, 제3호, 1988, pp. 11-19.
13. Hedgren, A.W. and Billington, D.P., "Mortar Model Test on a Cylindrical Shell of Varying Curvature and Thickness", *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 64, No. 2, 1967, pp. 73-83.
14. Fialkow, M.N., "Design and Capacity Evaluation of Reinforced Concrete Shell Membranes", *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 82-78, 1985, pp. 844-850.
15. Wanchoo, M.K., and May, G.W., "Cracking Analysis of Reinforced Concrete Plates", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 101, No. ST1, 1975, pp. 201-214.
16. Lin, C.S. and Scordelis, A.C., "Finite Element Study of a Reinforced Concrete Cylindrical Shell Through Elastic, Cracking and Ultimate Ranges", *ACI Journal*, Vol. 72, No. 11, 1975, pp. 628-633.
17. Lin, C.S. and Scordelis, A.C., "Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 101, No. ST3, 1975, pp. 523-538.
18. Vebo, A. and Ghali, A., "Moment Curvature Relation of Reinforced Concrete Slabs", *Journal of Structural Division, ASES*, Vol. 103, No. ST3, 1977, pp. 515-531.

(接受 : 1993. 8. 6)