
면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 쉘요소의 개발

Development of Reinforced Concrete Shell Element with Drilling Rotational Stiffness



김태훈*

Kim, Tae-Hoon



유영화**

Yoo, Young-Hwa



신현목***

Shin, Hyun-Mock

ABSTRACT

In this paper, a nonlinear finite element procedure is presented for the analysis of reinforced concrete shell structures. The 4-node quadrilateral flat shell finite element with drilling rotational stiffness is developed. The layered approach is used to discretize behavior of concrete and reinforcement through the thickness. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. The steel reinforcement is assumed to be in a uniaxial stress state and to be a smeared in a layer. The proposed numerical method for nonlinear analysis of reinforced concrete shells will be verified by comparison with reliable experimental results.

Keywords : drilling rotational stiffness, layered approach, smeared crack, uniaxial stress state

* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 강사

*** 정회원, 성균관대학교 토목공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 지하저장탱크, 원자력 폐기물 저장탱크 및 해양구조물등에 대형 철근콘크리트 셸구조물이 건설되고 있으나 철근콘크리트 셸구조물의 역학적 거동을 정확히 예측할 수 있는 해석기법은 아직 개발되어 있지 않다고 하여도 과언이 아니다. 이를 해결할 수 있는 방법으로 비선형 유한요소해석법의 개발 및 적용을 위하여 많은 노력이 경주되어 왔으나^(1,2) 이러한 노력들은 특수한 요소와 효율적인 알고리즘의 개발에 중점 되었으며, 철근콘크리트 셸의 거동을 정확히 예측하기 위한 구성모델의 개발을 위한 노력은 부족하였다⁽³⁾.

이 연구의 대상으로 하는 철근콘크리트 셸구조는 2방향 이상으로 철근이 배근되어 있고 많은 균열이 분산하여 발생하기 때문에 부재의 균열의 발생과 성장보다는 균열 발생후 부재의 전체적인 거동의 종합적인 파악이 더욱 중요하다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델은 몇 개의 균열을 포함하고 유한의 연속체로 가정되는 분산균열모델 (smeared crack model)이 사용되었다. 또한 콘크리트 셸구조를 해석하는데 있어서 하중의 증가에 따른 인장 균열의 진행과 콘크리트의 강도 감소를 보다 자세히 고려하기 위하여 여러 층의 얇은 면응력요소가 두께방향으로 적층되어 있다고 보는 층상화기법(layer method)이 도입되었다. 이 방법은 셸두께를 여러 개의 층으로 분할하여 두께에 따른 응력의 변화를 파악하는 방법이다. 각층의 재료특성이 변화해도 취급이 가능하므로 철근콘크리트의 경우 철근 위치나 철근과 콘크리트의 재료특성이 보다 정확하게 고려될 수 있다.

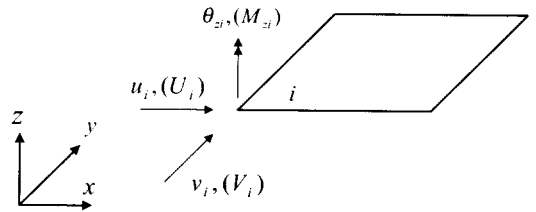
일반적인 셸요소의 자유도는 5개이나 이 연구에서는 3차원 보-기둥 요소와 조합하여 사용될 수 있도록 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도^(4,5)가 도입되었다.

이 연구에서는 2차원 구성방정식과 층상화기법을 이용하여 임의형상의 철근콘크리트 셸구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역등

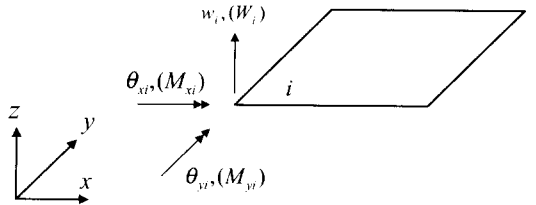
전응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계, 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력 추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 셸요소의 개발을 목적으로 하였다.

2. 면내회전강성도를 갖는 셸구조의 유한요소 정식화

유한요소해석에서 요소의 선정은 중요하며, 요소 범위의 적용과 해석결과의 정확성에 영향을 미친다. 그러므로 요소의 개발에 포함된 가정과 해석의 목적 같은 문제의 본질에 대한 고려가 필요하다.



a) Plane Membrane Actions and Deformations



b) Bending Actions and Deformations

Fig. 1 A flat shell element subjected to plane membrane and bending action

해석에 사용된 평면 셸요소는 Fig. 1과 같이 각 절점에서 3개의 병진과 3개의 회전인 6개의 자유도를 가지며 drilling 자유도를 갖는 면요소

와 Kirchhoff의 이론에 근거한 판요소를 중첩하여 개발되었다. 이 연구에서는 일반적인 쉘요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도^(4,5)를 도입하여 3차원 보-기둥 요소와 조합하여 사용할 수 있도록 하였다.

쉘 요소의 절점변위와 절점력은 Fig. 1과 같으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{q_i\} = \{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}\}^T \quad (1)$$

$$\{f_i\} = \{U_i, V_i, W_i, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}\}^T \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 면내거동을 표현하는 면요소에 관계되는 자유도는 u_i, v_i, θ_{zi} 단면력은 U_i, V_i, M_{zi} 이며 면외거동을 표현하는 판요소에 관계되는 자유도는 $w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}$ 단면력은 W_i, M_{xi}, M_{yi} 이다.

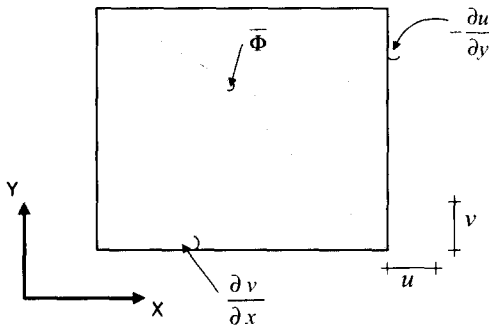


Fig. 2 Physical interpretation of the drilling degree of freedom.

먼저 면요소의 유한요소 정식화에는 변분을 이용하여 Hughes⁽⁶⁾에 의해 제안된 다음 식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \Pi_\rho(\bar{u}, \bar{\Phi}) = & \frac{1}{2} \int_\Omega \text{symm}(\nabla \bar{u}) \cdot C \cdot \text{symm}(\nabla \bar{u}) d\Omega \\ & + \frac{1}{2} \rho \int_\Omega [\text{skew}(\nabla \bar{u}) - \bar{\Phi}]^2 d\Omega - \int_\Omega \bar{u} \cdot f d\Omega \quad (3) \end{aligned}$$

여기서 \bar{u} 는 Ω 영역에서의 trial 변위, f 는 외력, ρ 는 penalty이며, $\bar{\Phi}$ 는 Ω 영역에서의 Drilling 자유도로서 Fig. 2와 같이 다음 식으로

나타낼 수 있다^(4,5).

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

또한 식 (3)에 대하여 변분을 취하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} 0 = & D \Pi_\rho(u, \Phi)(\bar{u}, \bar{\Phi}) \\ = & \int_\Omega \text{symm}(\nabla \bar{u}) \cdot C \cdot \text{symm}(\nabla u) d\Omega \\ & + \rho \int_\Omega [\text{skew}(\nabla \bar{u}) - \bar{\Phi}]^T [\text{skew}(\nabla u) - \Phi] d\Omega \\ & - \int_\Omega \bar{u} \cdot f d\Omega \quad (5) \end{aligned}$$

변분식인 (5)를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$[K^m][q] = [f] \quad (6)$$

여기서 $[K^m]$ 은 drilling 자유도를 포함한 면요소의 강성행렬⁽⁵⁾, $[q]$ 는 절점변위행렬 그리고 $[f]$ 는 절점력행렬이다.

다음으로 면외거동을 표현하는 판요소는 kirchhoff 이론에 근거한 12개의 자유도를 갖는 요소로서 변형에너지에 근거하여 다음과 같이 정식화되었다⁽⁵⁾.

$$U = \sum_b^n U_b^e \quad (7)$$

$$U_b^e = \frac{1}{2} \int_{A^e} [X]^T [D_b][X] dA^e \quad (8)$$

여기서 U_b^e 는 휨에 의한 요소의 변형에너지이며 면외방향의 전단변형은 무시한다. A^e 는 요소의 면적이다. 등방성의 균질한 요소일 때 $[D_b]$ 는 다음 식과 같다.

$$[D_b] = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 E 는 탄성계수이며, ν 는 Poisson 비, h 는 두께, $[X]$ 는 곡률로서 다음과 같다.

$$[X] = \begin{pmatrix} -\partial^2 w / \partial x^2 \\ -\partial^2 w / \partial y^2 \\ -2\partial^2 w / \partial x \partial y \end{pmatrix} \quad (10)$$

여기서 w 는 횡변위이다. 다만, 식(9)는 등방성 균질요소의 경우의 값으로써 철근콘크리트구조의 재료의 비선형성을 고려할 수 없다.

이 연구에서는 3차원 탄성 정식화를 근거한 위의 요소를 바탕으로 철근콘크리트 구조의 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 다음과 같은 층상화 기법이 도입되었다.

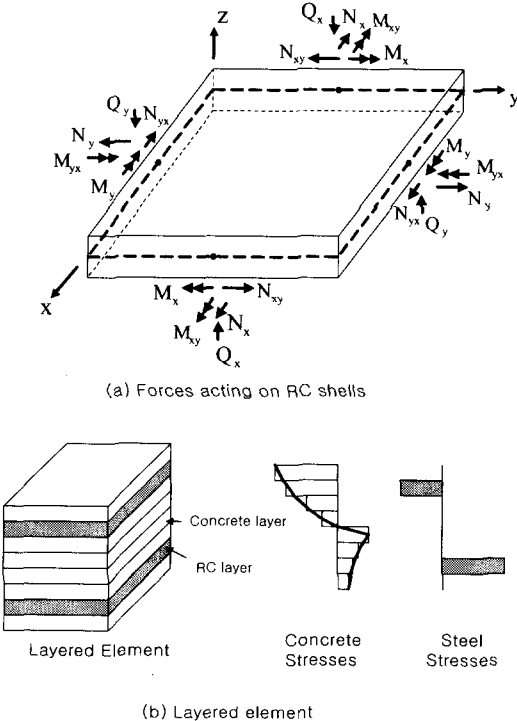


Fig. 3 Shell element

Fig. 3은 셸에 작용하는 힘과 층상화요소이다. 부재의 크기에 비하여 두께가 얇은 셸은 두께방향의 변형은 무시될 수 있으며⁽²⁾ 따라서 이 연구에서는 셸요소의 응력상태를 두께방향의 변형을

무시한 2차원 응력상태로 가정하고, 면외방향의 휨모멘트는 각 층에서의 응력을 두께방향으로 적분하고 이를 다시 중립축에 관한 모멘트의 합으로 표현한다. 각 층에서 면내 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x^i &= \overline{\epsilon}_x + z \phi_x \\ \epsilon_y^i &= \overline{\epsilon}_y + z \phi_y \\ \gamma_{xy}^i &= \overline{\gamma}_{xy} + z \phi_{xy} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\phi_x, \phi_y, \phi_{xy}$ 는 휨과 비틀림 곡률이며, $\epsilon_x^i, \epsilon_y^i, \gamma_{xy}^i$ 는 i 층 xy 평면의 면내 변형률, $\overline{\epsilon}_x, \overline{\epsilon}_y, \overline{\gamma}_{xy}$ 는 요소두께의 중립면 xy 평면의 면내 변형률, z 는 요소두께의 중립면으로부터 i 층 중립면까지의 거리이다. 요소두께의 중립면 변형률과 곡률은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \overline{\epsilon}_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \overline{\epsilon}_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \overline{\gamma}_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \phi_x &= \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \\ \phi_y &= -\frac{\partial \theta_x}{\partial y} \\ \phi_{xy} &= \frac{\partial \theta_y}{\partial y} - \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \end{aligned} \quad (12)$$

철근콘크리트 요소의 2차원 구성모델의 적용을 통해서 각층의 면내 변형률로부터 얻어지는 모든 층의 면내 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^i \\ \sigma_y^i \\ \sigma_{xy}^i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x^i \\ \epsilon_y^i \\ \gamma_{xy}^i \end{pmatrix} \quad (13)$$

여기서, $[C_{ij}]$ 는 2차원 응력상태에서의 철근

콘크리트 요소의 구성방정식으로서 이에 대한 내용은 다음 절에서 다룬다.

철근콘크리트요소의 두께방향 적분은 층요소의 정식화를 통해 이루어진다. 각 층은 콘크리트와 철근콘크리트 층으로 정의되며, 철근은 Fig. 3의 철근콘크리트요소와 같이 층에 분포되어 있다. 각 층에서의 내력은 각 요소로부터 대응하는 적분점에서의 응력을 적분하여 얻을 수 있으며, 이를 다시 두께방향으로 적분하면 쉘요소의 면내력 N_i 와 휨모멘트 M_i 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz = \sum_i \sigma_x^i h^i \\
 N_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz = \sum_i \sigma_y^i h^i \\
 N_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz = \sum_i \sigma_{xy}^i h^i \quad (14) \\
 M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz = \sum_i \sigma_x^i z^i h^i \\
 M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz = \sum_i \sigma_y^i z^i h^i \\
 M_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz = \sum_i \sigma_{xy}^i z^i h^i
 \end{aligned}$$

여기서 n 은 두께에 걸친 층의 개수이며 h^i 는 i 층의 두께이다.

3. 철근콘크리트 요소의 2차원 구성모델

철근콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근이 중첩된 것으로 표현될 수 있다. 그러나 콘크리트와 철근사이에는 부착이 존재하기 때문에 개개의 철근 또는 콘크리트의 해석모델을 단순히 합한 것이 아니라 철근콘크리트로서의 각각의 해석모델이 조합된 것으로 표현되어야 한다. 철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 다른 구조재료에 비해 복잡하다. 특히 균열발생 후의 비선형성은 현저하게 나타난다. 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 균열발생 후의 콘크리트의 인장강성, 압축강성, 전단전달강성 등과 부착활동을 고려한 철근의 강성을 고려되었다. 콘크리트의 균열

모델로는 부재에 발생하는 균열 개개의 발생과 진전보다는 부재의 전체적인 거동을 종합적으로 파악하는 것에 중점을 두어 분산균열모델(smearred crack model)이 사용되었다.

이러한 2차원 응력상태에서의 철근콘크리트 요소의 구성모델은 참고문헌^(7,8)의 연구결과가 인용되었으며, 이에 대하여 간단히 정리하면 다음과 같다.

3.1 균열발생전의 콘크리트 모델

콘크리트의 비선형성, 이방성등을 포함하는 콘크리트의 구성방정식으로는 Maekawa와 Okamura가 제안한 2축 응력상태에 대한 탄소성파괴모델(elasto-plastic and fracture model)⁽⁹⁾을 사용하였다. 이와 같은 모델을 사용하는 주된 이유는 이 모델이 콘크리트의 최대응력을 지나서 변형도 연화영역까지의 어떠한 하중이력에 대해서도 동일한 모델로서 표현이 가능하기 때문이다.

3.2 균열발생의 기준

콘크리트의 주인장응력이 이축응력하에서의 균열강도에 도달하게 되면 균열이 발생하는 것으로 하였으며, 이축응력하에서의 콘크리트의 균열강도 식은 압축-인장영역에 대한 Niwa의 식⁽¹⁰⁾, 인장-인장영역에 대한 Yamada의 식⁽¹¹⁾이 사용되었다.

3.3 균열발생후의 콘크리트 모델

균열이 발생한 후의 콘크리트는 균열면에 따라 비선형성이 탁월하게 나타나므로 구성모델의 기준축을 균열축으로 정하고 균열축에 직각방향의 인장강성모델, 균열축에 나란한 압축강성모델 그리고 균열면에서의 전단전달모델을 각각 적용한다. 이에 대한 자세한 내용은 저자 등의 기발표 논문인 참고문헌 (7),(8)에 기술되어 있다.

3.4 철근콘크리트에 대한 철근모델

콘크리트 속의 철근은 콘크리트와 철근 사이에 부착이 존재하기 때문에 분산균열모델에서와 같이 균열을 포함하는 요소의 평균응력과 평균변형률로 표현되는 경우에는 철근의 항복이 균열면에서 먼저 발생하기 때문에 철근이 항복할 때의 철근의 평균응력은 항복강도 보다 작게 된다. 또한 철근만의 재료적 특성에는 항복고원이 나타나지만 철근콘크리트 속의 철근은 이와 같은 항복고원은 나타나지 않으며 bilinear의 형태로써 표현될 수 있다⁽¹²⁾. 항복 후의 변형도 경화률은 철근비, 철근과 균열면과의 각도, 철근의 항복강도 그리고 콘크리트의 압축강도와 부착성능에 영향을 받으며 이에 대한 모델은 申⁽¹²⁾의 제안식이 사용되었다.

4. 유한요소해석 프로그램의 작성

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용 프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용되는 것이 불가능하다.

이 연구에서는 개발된 면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 셸 요소 자체만으로도 적용 범위가 넓긴 하지만 셸구조물 뿐만 아니라 슬래브와 전단벽 및 보-기둥 요소로 구성되는 일반적인 구조물에 적용을 전제로 한다면 철근콘크리트 셸 요소만의 전용프로그램을 작성하는 것보다는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 것이 효과적이다. 이에 미국 버클리 대학의 Talyor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹³⁾에 이 연구에서 개발된 철근콘크리트 셸 요소를 이식하는 것으로 한다. FEAP은 FEAP자체가 보유하고 있는 트러스, 뼈대, solid 등의 요소 이외에도 사용자가 개발한 50개의 요소를 추가할

수 있으며, 이들의 조합 사용도 가능한 범용 유한요소해석 프로그램이다. 같은 대학의 Filippou도 FEAP을 사용하여 3차원 철근콘크리트 보-기둥 요소⁽¹⁴⁾를 개발한 바 있다.

위로부터 본 연구의 결과는 철근콘크리트 셸 구조물에의 적용뿐 아니라 여러 요소로 구성된 일반적인 구조물에의 적용도 기대된다.

5. 검증용 시험체의 해석 및 고찰

이 연구에서 개발된 철근콘크리트 셸 요소의 검증을 위하여 요소수준의 시험체인 휨과 면내력을 받는 University of Toronto⁽¹⁵⁾의 시험체와 구조물수준의 Bouma등⁽¹⁶⁾이 실험한 철근콘크리트 셸 시험체를 선정하여 해석하고 해석 결과를 고찰한다.

5.1 휨과 면내하중을 받는 요소

조합된 휨모멘트와 면내하중을 받는 셸요소의 거동에 대해서 타당성이 있는가를 확인하기 위해서 University of Toronto⁽¹⁵⁾의 시험체를 해석하였다. 시험체의 치수는 1524×1524×316mm이며 직각방향으로 두 층의 이형철근을 갖는다. 그리고 인장강성의 영향을 보기 위해서 두 방향의 철근비를 다르게 하였다. 시험체 SM1, SM2 그리고 SM3는 같은 종류의 보강을 했으며, 단지 하중조건만 다르게 하였다. SM1은 철근비가 큰 방향으로 휨모멘트가 재하되었으며, SM2는 휨모멘트(SM1)와 철근비가 큰 방향에 인장력 작은 방향에 압축력인 이축 평면응력이 재하되었다. SM3는 이축휨이 작용되었으며, SM4는 SM2와 같은 하중을 받고, 철근은 작용하중과 대응하여 45°방향을 가진다. 시험체의 상세와 하중조건은 Table 1에 나와 있다.

시험체 SM1, SM2 그리고 SM3는 철근과 하중형태에 근거하여 응력분포가 셸에 걸쳐 일정한 것으로 가정될 수 있으므로 하나의 요소로 시험체의 모델화가 가능하다. SM4 시험체는 각을 가

진 철근에 기인하여 시험체 안쪽에 비틀림이 일어나고 응력의 분포가 일정하지 않을 것이므로 시험체의 모델링을 위해 같은 크기의 9개 요소를 사용하였으며 10개의 층으로 나누었다.

해석과 실험의 비교가 Fig. 4부터 Fig. 8까지 나와 있다. 이 그림에서 해석의 결과는 초기상태에서부터 균열의 발생, 파괴에 이르기까지의 극한 상태등 전반적인 실험결과와 잘 일치하였다.

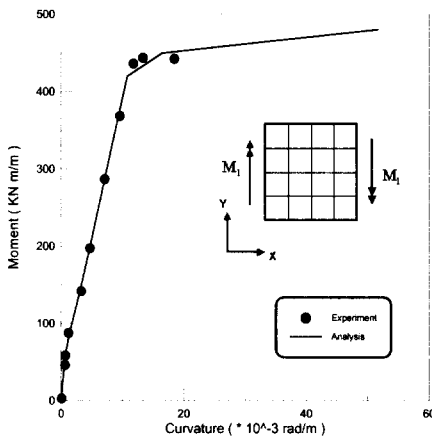


Fig. 4 Response of specimen SM1

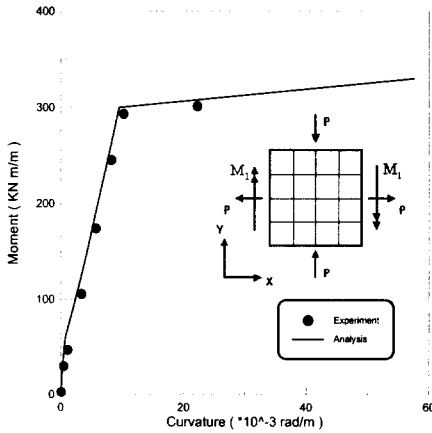


Fig. 5 Response of specimen SM2

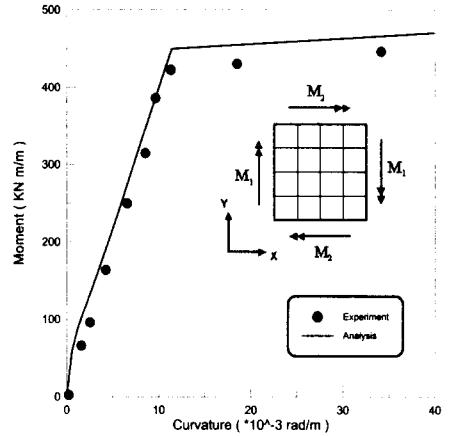


Fig. 6 Response of specimen SM3 (stronger reinforcement)

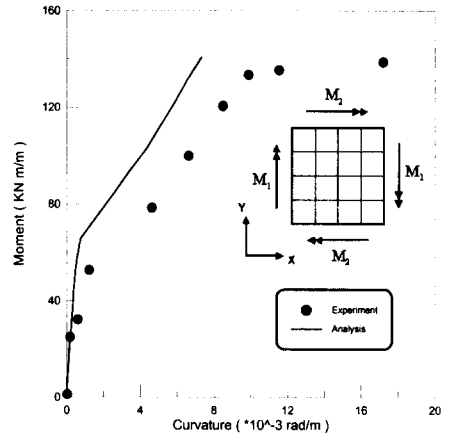


Fig. 7 Response of specimen SM3 (weaker reinforcement)

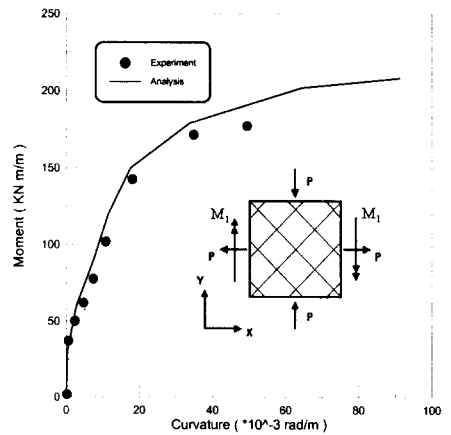


Fig. 8 Response of specimen SM4 (skew reinforcement)

Table 1 University of Toronto slab specimens⁽¹⁵⁾

Specimen	Concrete		Reinforcement				Applied ^b Loading M ₁ :M ₂ :P
	f'_c (MPa)	θ (degrees)	ρ_x (%) ^a	f_{yx} (MPa)	ρ_y (%) ^a	f_{yy} (MPa)	
SM1	47	0	1.25	425	0.42	430	1:0:0
SM2	62	0	1.25	425	0.42	430	0.25m:0:1
SM3	56	0	1.25	425	0.42	430	3.2:1:0
SM4	64	45	1.32	425	0.44	430	0.25m:0:1

^a Per layer ^b See Figs. 4 to 8

5.2 Bouma의 철근콘크리트 셸

이 연구의 해석방법에 대한 타당성을 확인하기 위하여 Bouma 등⁽¹⁶⁾이 실험한 철근콘크리트 셸이 해석되었다. 이 셸은 Fig. 9와 같이 테두리보가 있고 셸의 곡선부 양쪽 단부가 단순 지지되어 있다. 여기서 Bouma 등은 테두리보의 철근량과 지간길이를 달리하여 11개의 시험체에 수직방향의 등분포하중을 파괴에 이를 때까지 비례적으로 증가시켜 실험하였다.

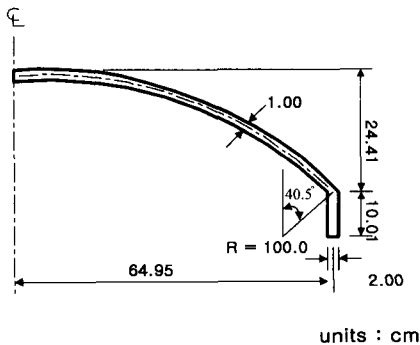


Fig. 9 Geometry for Bouma's shell

이 논문에서는 해석을 위해 시험체 중에서 A2를 채택하였으며, 이 셸의 철근상세는 Fig. 10과 같다. 실험에 사용된 철근과 콘크리트에 대한 재료성질은 너무 분산되어 Chan⁽¹⁷⁾이 사용한 평균값을 이용하였다.

- (1) 콘크리트 $f'_c = 289.7 \text{ kg/cm}^2$,
 $f_t = 50.0 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.3$ (assumed)
- (2) 철근 $E_s = 2102269 \text{ kg/cm}^2$,
 $f_y = 3002 \text{ kg/cm}^2$

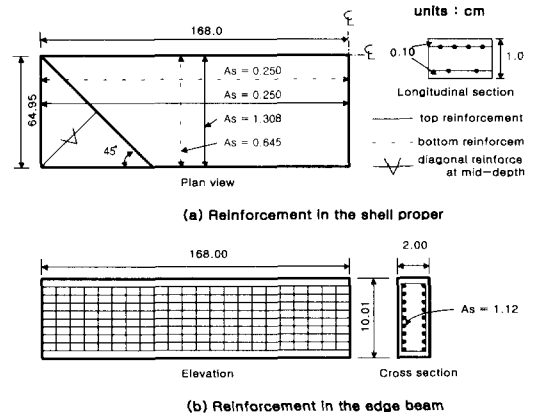


Fig. 10 Reinforcement layout for Bouma's shell

해석에서 요소분할은 대칭성을 고려하여 20개, 테두리보는 5개로 하였고, 충분할은 셸과 테두리보의 콘크리트에 대해서 각각 동일한 두께를 갖는 8개의 층으로 하였다. 이와 같이 해석한 결과를 Bouma 등⁽¹⁶⁾의 실험치와 다른 연구자들^(17,18)의 해석치와 함께 Fig. 11에 나타내었다.

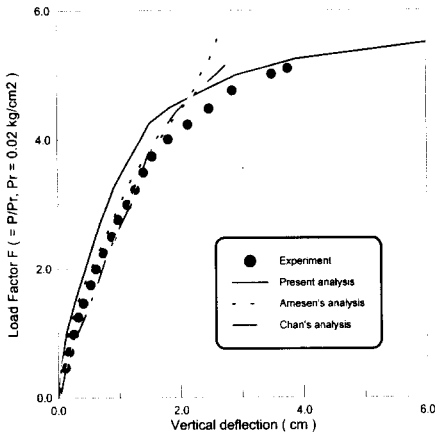


Fig. 11 Load-deflection curves at midspan of edge beam for Bourma's shell

6. 결 론

본 논문에서는 재료적 비선형성을 고려하여 철근콘크리트 셸구조를 해석할 수 있는 셸요소를 개발하였다. 개발된 4절점 평면 셸요소는 콘크리트와 철근콘크리트 층상화기법을 통해 콘크리트 인장강성, 압축연화와 1차원 응력하에서 철근을 포함한 균열 콘크리트의 구성 모델을 성공적으로 사용할 수 있었다.

철근콘크리트 셸요소의 하중-처짐등과 같은 해석 결과를 실험결과 및 타 연구자들의 해석결과와 비교해 볼 때 잘 일치되는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트 셸구조의 균열발생에서부터 철근의 항복 및 파괴에 이르는 모든 응력상태에 대한 비선형 거동을 정확하게 해석할 수 있다.
- 2) 균열 발생후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열면에서의 전단전달강성, 철근의 부착등에 대한 각각의 구성방정식을 조합하여 유한요소해석에 적용함으로써 재료적 비선형성을 정확하게 고려할 수 있다.
- 3) 층상화기법을 도입함으로써 두께방향에 대한 균열의 진행과 콘크리트 및 철근의 응력을 정확하게 추적할 수 있다.
- 4) 본 연구에서는 3차원 보-기둥 요소와 조합하

여 사용할 수 있도록 일반적인 셸요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도를 도입하였으며 이 요소를 사용함으로써 철근콘크리트 셸구조물 뿐만 아니라 슬래브, 전단벽 및 보-기둥으로 구성되는 일반적인 구조물의 해석도 가능할 것으로 기대된다. 이에 대한 연구는 차후의 연구과제로 다루고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. ASCE, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Proceedings of the International Workshop, 1993.
2. Hinton, E. and Owen, D.R.J., Finite Element Software for Plates and Shells, Pineridge Press Ltd., Swansea, UK, 1984.
3. Polak, M.A. and Vecchio, F.J., "Nonlinear analysis of reinforced concrete shells", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.19, No.12, 1993, pp. 3439-3462.
4. Zienkiewicz, O.C. and Talyor, R.L., The Finite Element Method, vol. 2 - Solid and Fluid Mechanics, Dynamics and Non-Linearity, McGraw Hill Book Co., 4th ed., 1991.
5. Lanheng Jin, "Analysis and Evaluation of a Shell Finite Element with Drilling Degree of Freedom", Masters Thesis, University of Maryland at College Park, 1994.
6. Hughes T.J.R., "On Drilling Degrees of Freedom", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 72, 1989, pp. 105-121.
7. 최정호, 유영화, 신현복, "단조증가하중을 받는 철근콘크리트 판요소의 비선형 해석", 대한토목학회 논문집, 제16권, 1-5호, 1996, pp. 585-593.
8. 최정호, 김운학, 신현복, "철근 및 프리스트레스트 콘크리트 슬래브의 비선형 해석", 한국콘크리트학회 논문집, 제8권, 6호, 1996, pp. 223-234.

9. Maekawa, K. and Okamura, H., "The deformational behavior and constitutive equation of concrete using elasto-plastic and fracture model", Journal of faculty of engineering, The University of Tokyo, Vol.37, No.2, 1983, pp.253-328.
10. 二羽淳一郎, 鐵筋 콘크리트板要素의力學的性狀, 東京大學修士論文, 1980.
11. 山田一字, 面內力を受ける鐵筋콘크리트의せん斷傳達機構及び耐力・變形に關する研究, 東京大學學位論文, 1981.
12. 申鉉穆, 繰り返し面內力を受ける鐵筋콘크리트部材の有限要素解析, 東京大學博士論文, 1988.
13. Talyor, R.L., FEAP-A Finite Element Analysis Program, Version 6.3 Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 1998.
14. Spacone, E., Filippou, F.C., and Taucer F.F., "Fibre beam-column model for nonlinear analysis of R/C frames: Formulation", Earthquake Engrg. Struct. Dyn., 25, 1996, pp. 711-725.
15. Polak, M.A., "Nonlinear analysis of reinforced concrete shells", Ph.D. Thesis, University of Toronto, Toronto, Canada, 1992.
16. Bouma, A. L., Van Riel, A. C., Van Koten, H. and Beranek, W.J., "Investigations on models of eleven cylindrical shells made of reinforced and prestressed concrete", Symposium on Shell Research, Delft, 1961.
17. Chan, E. C., "Nonlinear geometric, material and time dependent analysis of reinforced concrete shells with edge beams", Ph.D. dissertation, Division of Structural Engineering and Structural Mechanics, University of California, Berkeley, UC-SESM Report No. 82-8, Dec. 1983.
18. Arnesen, A., Soresen, S. I. and Bergan, P.G., " Nonlinear analysis of reinforced concrete", Computers and Structures, Vol.12, 1980, pp.571-579.

요 약

본 논문에서는 철근콘크리트 셸구조물의 해석을 위한 비선형 유한요소 해법을 제시하였다. 유한요소로서는 면내회전강성도를 갖는 4절점 평면 셸요소가 개발되었다. 두께방향에 대한 철근과 콘크리트의 재료성질을 고려하기 위하여 층상화기법이 도입되었다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트중에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였으며, 철근에 대해서는 1축 응력상태로 가정하여 등가의 분산 분포된 철근량으로 모델화하였다. 수치예제를 통하여 본 논문의 해석방법이 임의 형상의 철근콘크리트 셸구조의 비선형 해석에 적합한 방법임을 입증하고자 한다.

(접수일자 : 1999. 8. 28)