의사체적제어법을 이용한 철근콘크리트 슬래브의 파괴거동 해석

Failure Analysis of Reinforced Concrete Slabs using Pseudo-Volume Control Method

심 상 효* 송 하 원** 최 강 룡*** 남 상 혁**** 변 근 주*****
Shim, Sang-Hyo Song, Ha-Won Choi, Kang-Ryong Nam, Sang-Hyeok Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

The pseudo-volume control method is developed for the failure analysis of RC slabs, by adding pressure node into layered shell element utilizing in-plane constitutive models of reinforced concrete and layered formulation. For the failure analysis of RC slabs in this paper, geometric nonliearity is also considered in the analysis. The validity of the pseudo-volume control method is verified by comparing analysis results and existing experimental results

1. 서 론

본 논문에서는 기하학적인 비선형성을 고려하며 구조물에 발생하는 변위에 따른 의사체적을 제어할 수 있도록 요소에 압력절점을 추가하여 기존의 적층쉘요소를 개선한다. 적층쉘 요소에 철근콘크리트 쉘구조물내의 여러 가지 재료에 대한 하중경로에 따른 비선형거동을 반영할 수 있도록 각 층마다 철근 및 무근콘크리트의 2차원 평면구성모델을 적용한다. 이를 이용하여 철근콘크리트 슬래브 구조물을 모델링하고, 기존의 유한요소해석법인 하중제어법과 변위제어법의 단점을 극복하고, 체적제어법의 적용성[1)2)]을 원통형 구조가 아닌, 즉 내적 체적을 갖지 않는 일반적인 쉘요소의 범위로 확대한 새로운 유한요소해석법인 의사체적제어법으로 해석하여 비선형거동과 한계하중, 한계하중 이후의 연화거동을 구하고, 실험자료 및 하중제어법에 의한 해석으로 의사체적제어법의 타당성을 검증한다.

* 정회원, 평화엔지니어링 구조부 사원
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수, 현재 동경대 토목공학과 객원연구원
*** 정회원, 한국 원자력 안전기술원 선임연구원
**** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
***** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 면내회전자유도를 갖는 철근콘크리트 적층쉘요소

본 논문에서 이용하는 쉘요소는 면외방향의 전단변형을 허용하는 Reissner-Mindlin의 가정을 따르며 요소당 8절점을 갖는 degenerated, isoparametric, serendipity, quadratic 쉘요소이다. 각각의 절점은 면내회전자유도를 포함하여 6개의 자유도를 갖는다. 이 추가된 자유도는 변위와 회전에 대하여 같은 좌표변환행렬을 갖게 하므로 해석시간을 줄일 수 있으며 뼈대요소(frame element)와 집합이 가능한 장점이 있다[1].

유한요소 정식화 과정에서 total Lagrangian formulation과 Green-Lagrangian 변형률에 기초하여 기하학적인 비선형성을 고려하였다. 이때 변형률과 변위는 초기형상으로부터 정의된다. 또한 비선형 변형률항에서 면내방향의 변위에 대한 국부좌표의 미분항을 무시하는 von Karman의 가정을 도입하고 일반적인 쉘요소의 가정인 두께방향으로의 변형률은 무시하였다. 이로부터 요소 중앙면에서의 변형률을 정의하면 두께방향으로의 각 층의 변형률을 정의할 수 있다. 적층쉘에서의 각 층에서의 응력은 재료의 비선형성을 고려한 2차원 평면구성모델을 적용하여 층 두께 중앙에 위치한 응력점들에서 계산되고 이는 해당 층의 두께에 걸쳐 일정한 것으로 가정한다[4].

각 층에 적용되는 평면구성모델은 철근이 매립된 콘크리트 모델로써 균열발생전과 균열발생후로 나누어 적용된다. 균열발생전 콘크리트의 역학모델은 등가응력과 등가변형률에 의한 탄소성 파괴모델을 적용하였다. 하중이 증가함에 따라 발생하는 첫 번째 균열은 주인장응력이 파괴포락선에 도달하면 그 주인장응력의 방향에 직교하도록 발생한다고 가정하였다. 또한 하중단계가 진행하면서 변화하는 주인장응력의 방향과 첫 번째 균열이 25~155° 의 각도를 갖거나 주 변형률이 0보다 큰 경우 제 2균열이 발생한다. 균열이 발생한 후의 콘크리트 모델은 압축균열모델, 인장균열모델, 전단균열모델에 콘크리트내의 철근에 대한 구성법칙을 평균화하여 조합함으로써 구성된다[5].

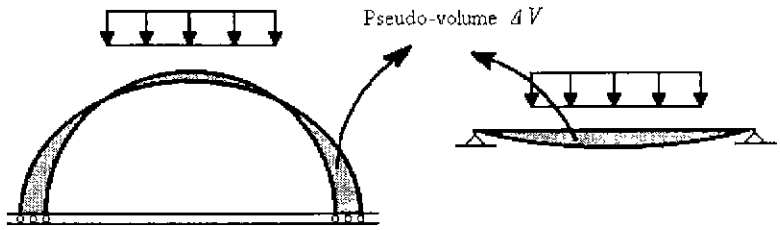
3. 의사체적제어법의 정식화

본 논문에서 제시하는 의사체적제어법은 외력을 받는 쉘요소에 발생하는 의사체적량을 제어하는 유한요소기법이다. 기존의 체적제어법의 경우 변위에 의한 체적량을 구조물의 길이로 나누어 이 값을 제어하므로 원통형 구조와 같이 길이방향으로 일정한 형상을 갖는 구조물에만 적용되는 제약을 가지고 있다[6]. 그러나 의사체적제어법은 외력에 의하여 발생하는 변형에 따른 변형 전·후 체적의 차이를 의사체적으로 정의하고 그 값을 직접 제어하므로 그 적용성이 일반적인 쉘구조물로 확대된다.

쉘구조물에 외력이 가해지면 구조물은 하중이 가해지기 이전과는 다른 변형된 형상을 갖는다. 이러한 구조물의 형상은 체적을 이용하여 표현할 수 있다. 쉘요소의 의사체적은 요소에 가해진 외력에 의하여 변화된 형상의 체적과 초기형상의 체적과의 차이로 정의한다.(그림 1)

경계 b로 둘러 쌓인 물체의 초기체적은 식(3)과 같다. 여기서 n은 요소경계면에 수직방향의 단위벡터이고, x는 쉘요소의 초기좌표이다.

$$V = \int_b n^T \cdot x db \tag{3}$$



(a) 원통형 또는 구형 쉘구조물 (b) 판형 쉘구조물

그림 1 쉘요소의 의사체적

외력에 의하여 쉘요소에 변위가 발생하면 요소의 좌표는 초기좌표에 변위를 더하여 수정할 수 있고, 변화된 체적은 수정된 요소좌표(x')에 의하여 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$V' = \int_b n^T \cdot x' \, db \tag{4}$$

따라서 쉘요소의 의사체적은 식(5)와 같이 정식화된다. 여기서 u는 외력에 의하여 발생하는 변위이다.

$$\Delta V = V' - V = \int_b n^T \cdot u db = \Sigma(\int_{b^e} n^T \cdot N db^e) \tag{5}$$

정의된 의사체적을 유한요소의 평형방정식에 포함시키기 위하여 쉘요소에 압력절점을 추가한다. 압력절점은 압력증분(Δp)을 1개의 자유도를 갖는 가상의 절점이다.(Song and Tassoulas, 1993) 이 절점에서 발생하는 표면력을 요소의 표면력에 첨가하고 요소의 평형방정식에 대입하면 식(6)과 같다.

$$K^e u^l = -(p + \Delta p) \int_{b^e} N^T n db^e + F^e \tag{6}$$

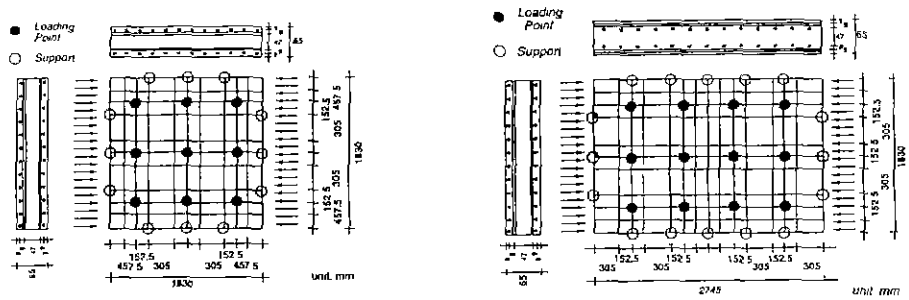
식(5)와 식(6)을 이용하여 강성도행렬을 재구성하면 식(7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_e & \int_{b^e} N^T n \, \mathrm{d} b^e \\ \int_{b^e} n^T N \, \mathrm{d} b^e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \int_{b^e} N^T n \, \mathrm{d} b^e - F_e \\ \Delta V \end{bmatrix} \tag{7}$$

식(7)을 통하여 유한요소의 평형방정식을 만족하면서 의사체적변화에 상응하는 압력변화량을 구할 수 있다. 따라서 외력이 작용하는 콘크리트 쉘구조물의 의사체적을 직접적으로 제어하여 작용하는 압력을 구함으로써 한계하중이후의 거동을 해석할 수 있다. 여기에 재료적 및 기하학적인 비선형성을 고려하기 위하여 재구성된 평형방정식을 만족하는 의사체적에 대한 압력증분을 반복적으로 해석하여야 한다.

4 철근콘크리트 슬래브의 파괴거동 해석

의사캐적제어법의 적용성을 검증하기 위하여 Alberta대학에서 실험을 수행한 판형 슬래브에 대하여 해석하였다[7] 시편은 면내하중과 면외하중을 동시에 받는 판형슬래브이다 시편은 위아래가 같은 철근비를 갖는 직각방향으로 위치한 두 층의 이형철근으로 보강되었으며 주변의 중심점을 단순지지하였다. 그림 2는 시편의 형상을 나타낸다



(a) 시편 A (b) 시편 B

그림 2 시편의 형상 및 사용된 메쉬

하중은 먼저 면내하중을 가한 후 고정시키고 면외하중을 가하였다 각 시편의 철근비 및 면내하중의 크기는 표 1과 같다.

표 1 사용된 시편의 물성치 및 면내하중 (Aghayere, 1990) " . per layer

시편	콘크리트 물성치		철근의 물성치			작용된 면내하중 (kN/m)
	f_{cb}(MPa)	E_c (MPa)	ρ_x(%)[a]	ρ_y(%)[a]	f_y(MPa)	
A1	32 3	22,970	0 336	0 390	504	962
A2	32 3	23,010	0.350	0.400	504	765
B1	40 3	25,580	0 500	0.590	504	874
B2	40 2	25,550	0 500	0.590	504	634

의사체적제어법과 하중제어법에 의하여 유한요소해석을 실시하기 위하여, A-type 슬래브는 10×10 메쉬로 나누었고, B-type 슬래브는 대칭성을 이용하여 전체의 1/4부분만을 모델링하여 7×5 메쉬로 나누었다(그림 2) 또한 각 요소는 두께방향을 따라 7개의 층으로 나누었다. 슬래브의 두께는 폭에 비해 매우 작고, 상대적으로 매우 큰 면내하중이 시편에 가해지기 때문에, 기하학적 비선형을 고려하는 것은 매우 중요하다. A1시편의 경우 하중제어법에서 기하학적인 비선형을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 해석결과를 도시하였다.(그림 3) 기하학적인 비선형성을 고려하지 않은 해석의 경우 쉘구조물의 한계하중을 과대평가하는 것을 알 수 있다. 이는 면내하중에 의하여 발생하는 변형률의 비선형항에 의하여 구조물의 강성이 감소되는 현상을 반영하지 못하기 때문이다 모든 의사체적제어법을 이용한 해석은 기하학적인 비선형성을 고려하였다.

모든시편에 대한 해석결과를 그림 3에서 그림 6에 나타내었다 해석결괴 하중을 증가시키는 하중제어법을 이용한 경우, 하중-변위관계는 한계하중 이후의 거동을 해석하지 못하였다 그러나 의사체적제어법을 이용하여 해석한 경우 한계하중 이후의 거동을 잘 해석하였다 의사체적이 증가함에 따라 균열

은 시편 중앙의 아래쪽 콘크리트에서 시작하여 진행하였다. 등방슬래브의 중앙단면에서 두께방향으로의 균열진행양상을 그림 7에 나타내었고, 비등방슬래브에 대하여 그림 8에 나타내었다. 또한 그림 9에는 등방시편 A1의 7번째 층의 균열양상을 나타내었다. 의사체적이 증가함에 따라 구조물에 발생되는 압력이 커질수록 첫 번째 균열은 면내하중이 작용하는 방향과 직각을 이루지만 중앙에서 멀어져 시편의 경계면에 가까워 질수록 그 각이 작아진다. 따라서 하중의 증가에 따라 두 번째 균열은 첫 번째 균열에 직각이 아닌 방향으로도 잘 구현됨을 알 수 있다.

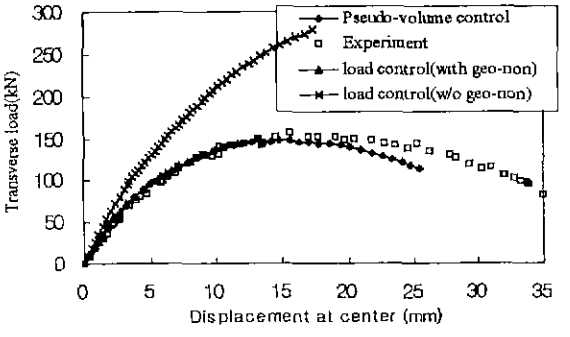


그림 3 시편 A1의 해석결과

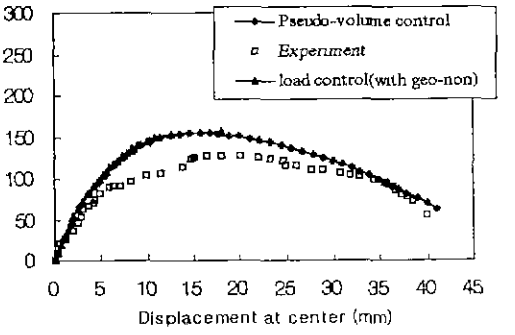


그림 4 시편 A2의 해석결과

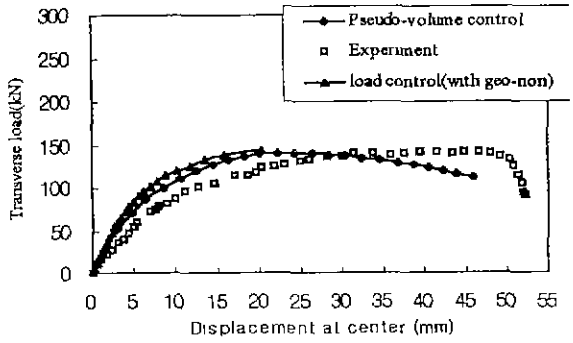


그림 5 시편 B1의 해석결과

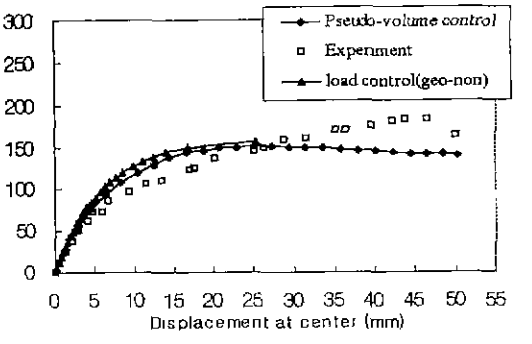


그림 6 시편 B2의 해석결과

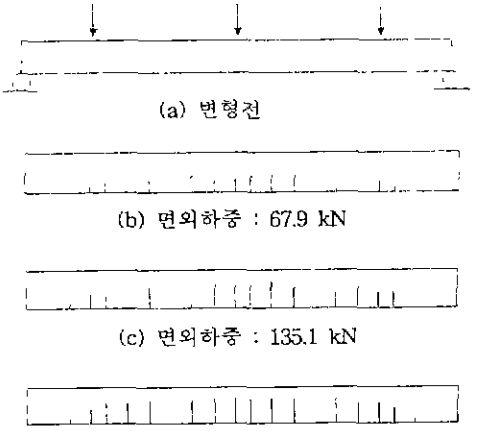


그림 7 A1시편의 두께방향으로의 균열양상

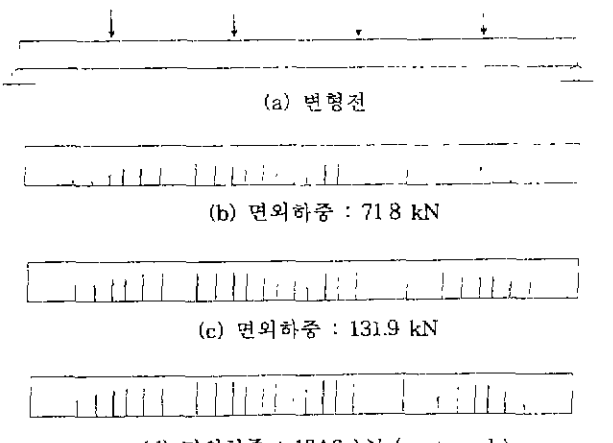
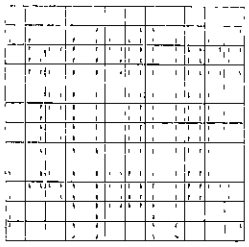
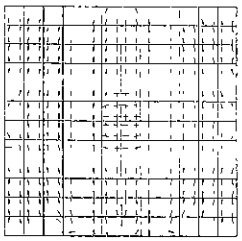


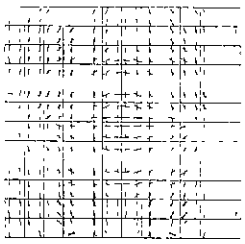
그림 8 B1시편의 두께방향으로의 균열양상



(a) 면외하중 : 69.7 kN



(b) 면외하중 : 135.1 kN



(c) 면외하중 : 138.0 kN (post-peak)

그림 9 시편 A1의 7번째층에서의 균열양상

5. 결 론

본 논문에서는 철근콘크리트 쉘구조물의 파괴거동을 해석하기 위하여 면내회전자유도를 추가한 적층쉘요소에 기하학적인 비선형성을 고려하였으며 철근콘크리트 평면구성방정식을 적용하여 하중경로에 따른 철근콘크리트 구조물의 거동을 고려하였다. 또한, 철근콘크리트 쉘요소에 압력절점을 추가하고 의사채적을 제어할 수 있게 함으로써 체적제어법의 적용성을 일반적인 쉘구조물로 확대하고, 콘크리트 쉘구조물의 최대하중이후의 연성거동을 해석할 수 있는 의사체적제어법을 개발하였다. 이를 이용하여 철근콘크리트 판형슬래브의 파괴거동을 해석하고 이를 기존의 실험결과와 비교하여 본 해석방법의 타당성을 검증하였다.

6. 참고문헌

1) 송하원, 방정용, 변근주, "체적제어법에 의한 철근콘크리트 원통형 구조물의 파괴해석", 전산구조공학회 학술발표회 논문집, Vol. 12, No. 1, pp. 195-202, 1999

2) Song, H. W., Bang, J. Y., Byun, K. J. and Choi, K. R., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Reactor Containment Structure subjected to Ultimate Pressure", 15th Int. Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Volume VI, pp. 341-348, 1999

3) Hughes, T. J. R. and Brezzi, F., "On Drilling Degrees-of-Freedom", Comp. Meh Appl. Mech. Eng., Vol. 72, pp. 105-121, 1989

4) 송하원, 방정용, 변근주, "압력절점을 갖는 다층쉘요소를 이용한 콘크리트 원통형 구조물의 파괴해석" 전산구조공학회 논문집, Vol.12, No.3, pp.475-484, 1999

5) Maekawa, K. and Okamura, H., Nonlinear Analysis and Constitutive Model in Reinforced Concrete, Gihodo-Shuppan, Tokyo, Japan, 1991

6) 송하원, 심상효, 방정용, 변근주, "철근콘크리트 원통형 구조물의 비선형 체적제어 해석법", 대한토목학회 가을 학술발표회 논문집, Vol. 1, pp.345-348, 1999

7) Aghayere, A. O. and MacGregor, J. G., "Tests of Reinforced Concrete Plates under Combined In-Plane and Transverse Loads", ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 6, pp. 615-622, 1990