

회전자유도를 갖는 층상화 요소를 이용한 철근콘크리트 셸구조의 비선형 동적해석

Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Shells Using Layered Elements with Drilling DOF

김 태 훈*
Kim, Tae Hoon

이 상 국**
Lee, Sang Kook

신 현 목***
Shin, Hyun Mock

국문요약

이 논문에서는 철근콘크리트 셸구조의 동적해석을 위한 비선형 유한요소 해법을 제시하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 유한요소로서는 면내회전강성도를 갖는 4절점 평면 쉘요소가 사용되었다. 두께방향에 대한 철근과 콘크리트의 재료성질을 고려하기 위하여 층상화기법이 도입되었다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모듈과 콘크리트 속에 있는 철근모듈을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였다. 동적 평형방정식의 해는 HHT 법에 의한 수치적분으로 구하였다. 신뢰성 있는 해석결과와 비교를 통하여 이 논문의 제안방법이 철근콘크리트 셸구조의 비선형 동적해석에 적합한 방법임을 입증하고자 한다.

주요어 : 철근콘크리트 셸구조, 층상화기법, 재료적 비선형성, 분산균열, 비선형 동적해석

ABSTRACT

In this paper, a nonlinear finite element procedure is presented for the dynamic analysis of reinforced concrete shells. A computer program, named RCAHEST(reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. A 4-node flat shell element with drilling rotational stiffness is used for spatial discretization. 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. Solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor(HHT) algorithm. The proposed numerical method for the nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete shells is verified by comparison with reliable analytical results.

Key words : reinforced concrete shells, layered approach, material nonlinearity, smeared crack, nonlinear dynamic analysis

1. 서 론

최근 들어 원자력 발전소, 지하 탱크, 대형 사일로, 해양구조물 등과 같은 복잡한 철근 콘크리트 셸구조물의 건설이 늘어나고 있다. 그러나, 복잡한 3차원 기하 형상, 하중 조건 그리고 철근콘크리트의 3차원 비선형 거동특성으로 인해 이러한 구조물의 거동을 정확하게 예측하기가 어려운 실정이다. 더욱이 동적하중하에서의 철근콘크리트 셸의 거동을 예측하는 능력은 극히 제한되고 있다. 그 이유는, 콘크리트 부재에서 균열은 필연적으로 발생하게 되며, 이로 인한 부재의 강도 및 강성의 감소, 철근의 항복 및 하중의 반복성으로 인한 균열의 개폐 등을 해석적 모델로 구현하는데 어려움이 있기 때문이다.⁽¹⁾

이 연구에서는 기존의 저차 등에 의하여 개발되었던 면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 쉘요소⁽²⁾⁽³⁾를 사용하여 동적하중을 받는 철근콘크리트 셸구조의 동적 거동특성을 예측하고자 한다. 사용된 요소는 2차원 구성방정식과 층상화

기법을 이용하여 임의 하중을 받는 철근콘크리트 셸구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 전응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 쉘요소로서 3차원 beam-column 요소와 조합하여 사용할 수 있도록 일반적인 쉘요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도가 도입되어 있다. 이와 함께 하중의 지속 시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠효과 등을 고려하여 철근콘크리트 부재의 동적 거동특성을 예측하도록 하였다.

유한요소법을 사용한 비선형 동적해석에 있어서, 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법⁽⁴⁾에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 단계적으로 거침으로써 해를 구하였다. 이 연구의 해석결과를 신뢰성 있는 다른 연구자의 해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였고, 적용과정을 통해서 철근콘크리트 셸구조의 동적 거동특성을 파악하였다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램

2.1 철근콘크리트 쉘요소

유한요소해석에서 요소의 선정은 중요하며, 요소범위의

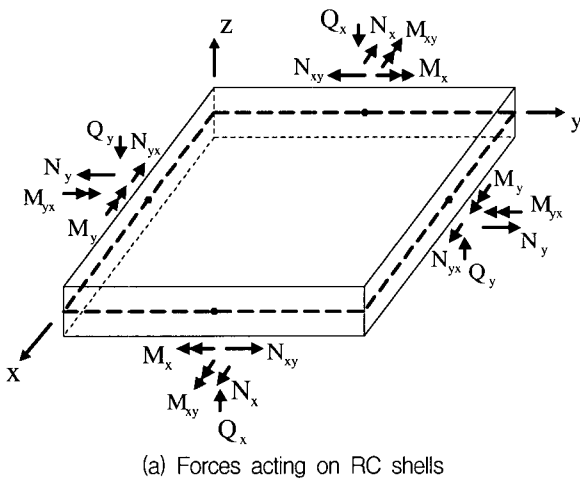
* 학생회원 · 성균관대학교 토목환경공학부, 박사과정 수료
(대표저자 : kth7love@mail.skku.ac.kr)

** 한국원자력안전기술원 구조부지실, 실장

*** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 7. 24 / 심사종료일 : 2001. 12. 3)

적용과 해석결과의 정확성에 영향을 미친다. 이 연구에서 사용된 철근콘크리트 셸요소는 2차원 구성방정식과 층상화기법을 이용하여 임의형상의 철근콘크리트 셸구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 모든 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 셸요소로서 Fig. 1과 같다. 또한, 3차원 beam-column 요소와 조합하여 사용할 수 있도록 일반적인 셸요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도가 도입되어 있다. 따라서, 이 요소를 사용함으로써 철근콘크리트 셸구조물 뿐만 아니라 슬래브, 전단벽 및 beam-column으로 구성되는 일반적인 구조물의 해석도 가능할 것으로 기대된다.^{(2),(3)}



(a) Forces acting on RC shells

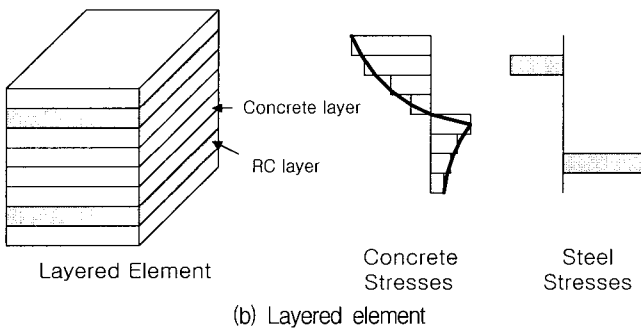


Fig. 1 Reinforced concrete shell element

2.2 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{(2),(3),(5),(6)}을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타구조 재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제2균열의 발생을 제1균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형을 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나, 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형을 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근의 응력은 항복응력보다 작기 때문에, 철근만의 응력-변형을 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않으며 즉시 변형을 경화현상을 보인다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 일정한 변형을 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모델⁽⁷⁾을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다.

지진하중과 같은 동적하중을 받는 철근콘크리트 부재의 거동을 지배하는 주철근은 매우 큰 인장과 압축변형률을 교번으로 받는다. 이러한 큰 변형률의 교번작용으로 인한 low-cycle 피로 문제는 휨부재에서 파괴의 두드러진 형태이다. 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동 모델은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 하며 유한요소해석에서의 적용성이 평가되어야 한다. 이 연구에서는 철근만의 특성을 고려한 Coffin-Manson의 제안식⁽⁸⁾을 Miner의 선형손상모델⁽⁹⁾에 적용하면서 많은 경우에 대한 해석결과로부터 수정 제안하여 콘크리트 속의 철근에 대한 피로거동을 고려하였다.

2.3 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 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞

으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그동안 개발된 면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 쉘요소^{(2),(3)}, 철근콘크리트 평면요소^{(5),(6)} 그리고 경계면요소^{(5),(6)} 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램 FEAP⁽¹⁰⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(reinforced concrete analysis in higher evaluation system technology)⁽⁵⁾를 사용하였다.

3. 비선형 동적해석 기법

3.1 동적 평형 방정식

시간적으로 변하는 동적하중에 대한 구조물의 응답(response)인 구조물의 동적거동을 해석하기 위해서는 구조물의 강성에 의한 탄성력이외에 질량에 의한 관성력과 감쇠효과에 의한 감쇠력을 고려하여야 한다.

동적해석은 하중의 크기, 방향, 위치 등이 시간에 따라 변하기 때문에 정적해석에 비하여 해석상 많은 시간과 노력을 요구하게 되며 궁극적으로는 구조물의 동적거동을 나타내는 다음과 같은 운동방정식의 해를 구하는 것이다.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{P(t)\} \quad (1)$$

여기서 $\{U\}$ 는 변위벡터, $[M]$ 은 질량행렬, $[C]$ 는 감쇠행렬, $[K]$ 는 강성행렬 그리고 $\{P(t)\}$ 는 하중벡터이다.

동적해석의 방법은 크게 모드해석법(mode analysis method)과 시간이력 해석법(time history analysis method)의 두 가지로 나눌 수 있으며 모드해석법은 다시 단일모드 스펙트럼 해석법(single-mode spectral analysis method)과 다중모드 스펙트럼 해석법(multi-mode spectral analysis method)으로 시간이력 해석법은 모드중첩법(mode superposition method)과 직접적분법(direct integration method)으로 구분되는데 이 연구의 목적인 비선형 동적해석에 적합한 해석방법은 직접적분법이다. 직접적분법에 대해서는 Wilson- θ 법, Newmark 법 그리고 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법 등이 제시되어 있는데, 각 시간마다 비선형 동적 평형방정식을 풀어서 비선형 동적거동을 사실적으로 표현하는 것이지만 해석시간이 많이 소요되며 경우에 따라서는 동적 평형방정식의 해를 구할 수 없는 경우가 발생하기도 한다.⁽¹¹⁾ 따라서, 안정적인 비선형 동적 평형방정식의 해의 수렴성 및 해석시간의 효율성을 제고할 수 있는 해석방법의 선택은 매우 중요하다.

3.2 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법

구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고 있다. 이러한 직접적분법 중 연구에 실제 많이 이용되는 해

석법은 Newmark 법과 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법이다. HHT 법은 Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되었다.⁽¹²⁾

이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법⁽⁴⁾에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

Hilber-Hughes-Taylor 법은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t_{n+a}) = F(t_{n+a}) - P(u_{n+a}, \dot{u}_{n+a}, \ddot{u}_{n+a}) = 0 \quad (2)$$

여기서 R 은 잔류력(residual force)벡터로서 불평형하중(unbalanced load)을 나타내며, F 는 시간의 함수로 주어지는 등가의 절점하중(equivalent nodal force)벡터 그리고 P 는 등가의 내력(equivalent internal force)벡터를 의미한다. 또한, u_{n+a} 는 변위, \dot{u}_{n+a} 는 속도 그리고 \ddot{u}_{n+a} 는 가속도를 의미하며 다음 식들로부터 구할 수 있다.

$$u_{n+a} = (1 - \alpha)u_n + \alpha u_{n+1} \quad (3)$$

$$\dot{u}_{n+a} = (1 - \alpha)\dot{u}_n + \alpha \dot{u}_{n+1} \quad (4)$$

$$\ddot{u}_{n+a} = \ddot{u}_{n+1} \quad (5)$$

위의 식을 단일 매개변수로 단순화하기 위해서 다음 식을 사용한다.

$$\beta = -\frac{(2 - \alpha)^2}{4} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{3}{2} - \alpha \quad (7)$$

여기서 α, β, γ 는 해의 안정성과 정확성을 제어하는 매개변수로서 안정적인 해를 얻기 위해서는 α 는 0.5에서 1.0사이의 값이어야 한다.

식 (2)를 선형화 하여 강성행렬로 나타내면 다음 식과 같다.

$$K^{\star(i)} = \alpha K^{(i)} + \frac{\alpha\gamma}{\beta\Delta t} C^{(i)} + \frac{1}{\beta\Delta t^2} M^{(i)} \quad (8)$$

이 연구의 비선형 해법인 Newton 법⁽¹¹⁾을 이용하기 위해서 다음 식과 같이 나타내었다.

$$K^{\star(i)} du_{n+1}^{(i)} = R_{n+a}^{(i)} \quad (9)$$

즉, 식 (9)의 해를 구하기 위해서는 반복계산을 수행하여야 한다. 매 반복계산시에 산정되는 불평형 하중벡터를 사용하여 증분변위를 계산하고 계산된 증분변위가 수렴기준치를 만족할 때까지 반복한다.

4. 해석에 및 고찰

4.1 철근콘크리트 판

이 연구에서 제안된 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 유한차분법을 이용하여 Stangenberg에 의해 해석된 철근콘크리트 판⁽¹³⁾을 선정하였다. 철근콘크리트 판의 형상은 Fig. 2와 같으며 실험체의 재료물성은 Table 1에 나타내었다.

이 예제는 Fig. 2(a)에 나타난 것과 같이 철근콘크리트 판의 중앙부에 Fig. 3과 같은 시간 의존성 하중을 재하 하였으며 그 하중분포는 Fig. 2(b)와 같다. 그리고, 감쇠효과는 고려하지 않았다.

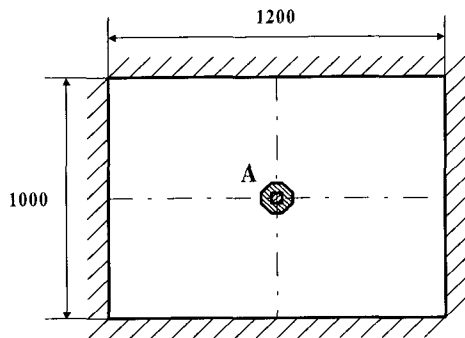
이 예제의 유한요소해석을 위해서 철근콘크리트 판을 기존의 연구에서 개발된 4절점 철근콘크리트 셸요소^{(2),(3)}를 사용하여 Fig. 4와 같이 80개의 요소로 분할하였으며 요소당 10개의 층으로 나누었다. 철근콘크리트 셸요소는 4절점을 갖는 등매개요소로서 2개의 적분점에 대해서 변형률과 응력을 산정하도록 하였다.

비선형 동적해석시 정확성과 안정성을 갖도록 하기 위해서는 적분시간스텝을 고유주기의 1/20~1/30으로 하는 것이 일반적이다.⁽¹¹⁾ 이 연구에서는 해석예제의 고유주기가 0.025초

이므로 1/25인 0.001초로 적분시간스텝을 정하였다. Stangenberg는 0.02초까지의 해석결과를 보고하고 있고 Manjuprasad 등⁽¹⁴⁾은 고유주기 등의 동적거동을 평가할 수 있도록 0.1초까지 해석을 하였는데 이 연구에서는 Manjuprasad 등과 같이 동적거동을 평가하기 위해서 0.1초까지 해석을 수행하였다.

이와 같이 해석한 결과를 Stangenberg의 결과⁽¹³⁾와 Manjuprasad 등의 해석결과⁽¹⁴⁾와 함께 Fig. 5에 나타내었다. 철근콘크리트 판의 중앙부의 최대처짐은 0.017초에서 8.5mm를 보이고 있으며 이는 유한차분법을 이용한 Stangenberg의 해석결과인 0.0153초에서 8.1mm와 유사한 결과를 보인다. Manjuprasad 등은 20절점을 가진 3차원 철근콘크리트 솔리드요소를 사용하여 비선형 동적해석을 하였으며 0.019초에서 11.0mm의 해석결과를 보고하고 있다. Fig. 5로부터 이 연구의 해석결과는 0.02초까지 Stangenberg의 해석결과와 동일한 결과를 보이고 있으며 Manjuprasad 등의 해석결과보다 판의 강성을 약간 크게 평가하고 있는 것을 제외하고는 동적거동을 전반적으로 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 선형해석과 비선형해석 결과를 비교한 것이며 비선형응답시 에너지소산에 기인하여 진폭이 확장되고 주기가 늘어나며 진동이 감소되는 일반적인 특성을 잘 구현함을 알 수 있다.



(a) System, analysed sector

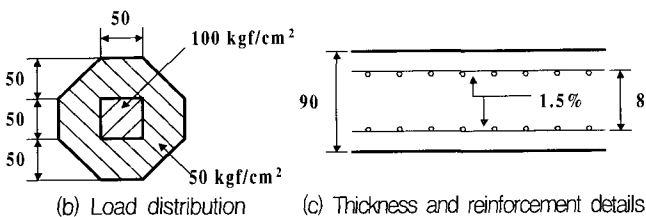


Fig. 2 Example of a reinforced concrete plate(unit : cm)

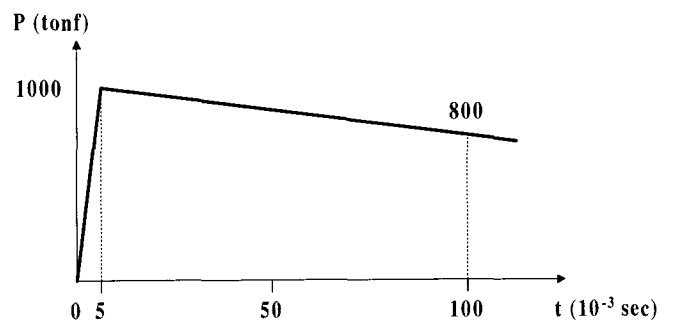


Fig. 3 Load time history for jet force

Table 1 Material properties

Concrete	E_c (kgf/cm ²)	340000
	f'_c (kgf/cm ²)	350.0
	f'_i (kgf/cm ²)	41.4
	ν	0.2
	ρ (kgf · sec ² /cm ⁴)	0.0000025
Steel	E_s (kgf/cm ²)	2100000
	f_y (kgf/cm ²)	4200

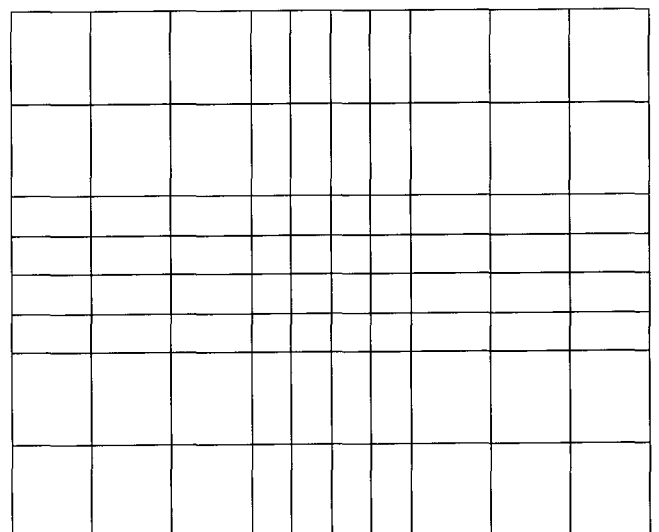


Fig. 4 Finite element mesh used for analysis

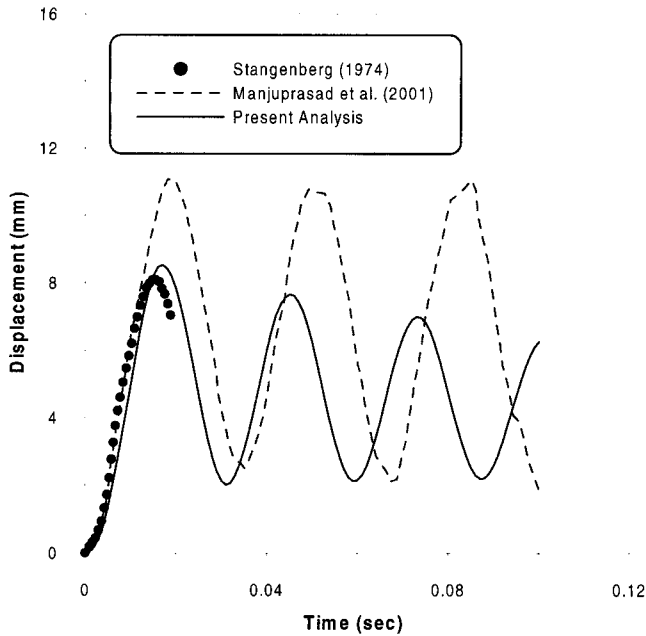


Fig. 5 Displacement-time history of reinforced concrete clamped plate subjected to central jet force

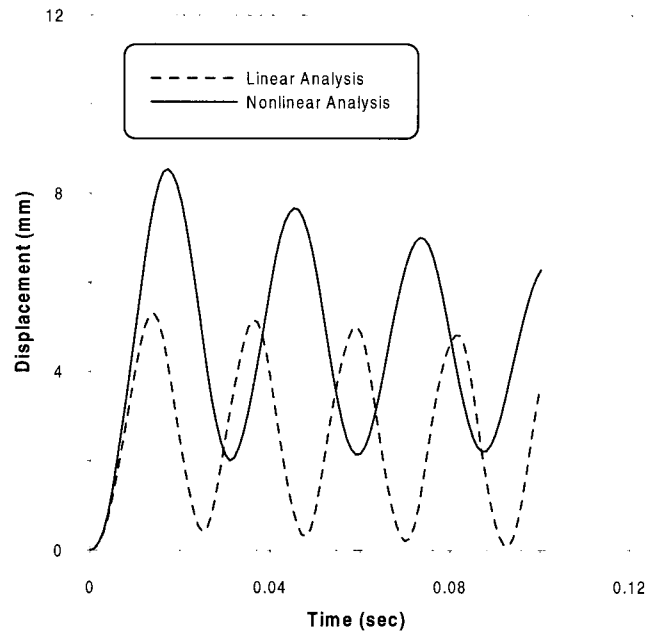


Fig. 6 Displacement response

4.2 철근콘크리트 셸

이 예제는 Reborra 등에 의해 해석된 실제규모의 원자력 격납구조물로서 구조물의 재료물성은 Table 2와 같으며 Fig. 7에 나타내었다.⁽¹⁵⁾ 철근은 셸 전체에 걸쳐 내부와 외부에 각각 40mm 직경으로 8cm 간격으로 배근되어 있으며 결과적으로 1.1 %의 철근비를 나타내고 있다.

이 예제는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 원통부분과 구면부분의 연결부 28m²에 걸쳐 수평으로 Fig. 8과 같은 시간 의존성 하중이 재하되었으며 감쇠효과는 고려하지 않았다.

이 예제의 유한요소해석을 위해서 원자력 격납구조물을 기존의 연구에서 개발된 4절점 철근콘크리트 셸요소^{(2),(3)}를 사용하여 Fig. 9와 같이 90개의 요소로 분할하였으며 요소당 10개의 층으로 나누었다. 철근콘크리트 셸요소는 4절점을 갖는 등매개요소로서 2개의 적분점에 대해서 변형률과 응력을 산정하도록 하였다.

이 연구에서는 해석예제의 고유주기가 0.23초이므로 1/23인 0.01초로 적분시간스텝을 정하여 비선형 동적해석시 정확성과 안정성을 갖도록 하였으며 원통부분과 구면부분의 연결부인 Fig. 7의 A지점의 변위응답을 구하였다.

이와 같이 해석한 결과를 Reborra 등의 결과⁽¹⁵⁾와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 원통부분과 구면부분의 연결부인

A지점의 최대처짐은 0.250초에서 48.0mm을 보이고 있으며 이는 Reborra 등의 해석결과인 0.247초에서 42.9mm와 유사

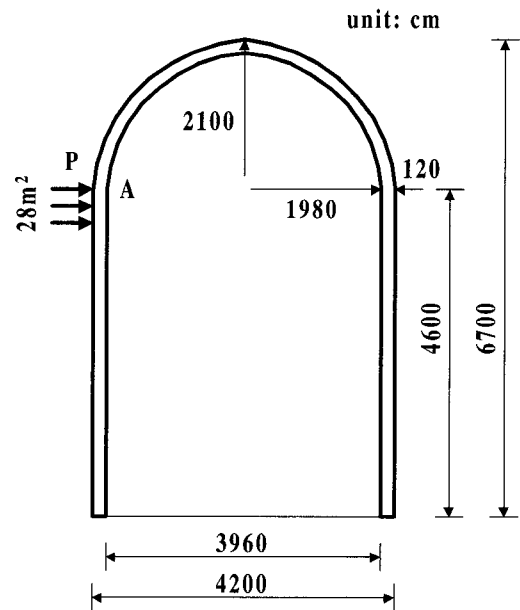


Fig. 7 Geometry of reinforced concrete nuclear containment shell

Table 2 Material properties

Concrete	E_c (kgf/cm ²)	369400
	f'_c (kgf/cm ²)	420.0
	f'_t (kgf/cm ²)	45.4
	ν	0.17
	ρ (kgf · sec ² /cm ⁴)	0.00000245
Steel	E_s (kgf/cm ²)	2100000
	f_y (kgf/cm ²)	4600

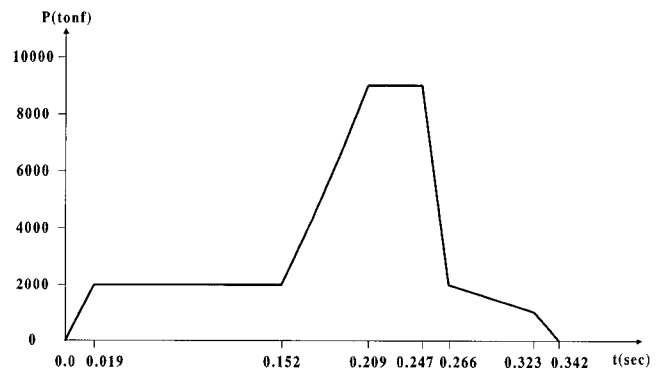


Fig. 8 Load time history for impact force

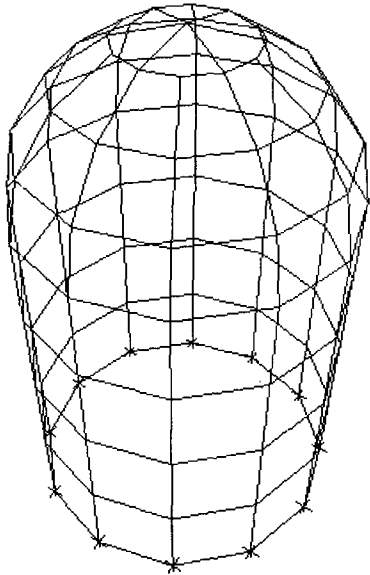


Fig. 9 Finite element mesh used for analysis

한 결과를 보인다. Rebora 등의 해석은 20절점을 가진 3차원 솔리드요소와 2차원 면요소를 사용하여 각각 콘크리트와 철근을 모델링한 결과이다. Fig. 10으로부터 이 연구의 해석 결과는 Rebora 등의 해석결과보다 구조물의 강성을 약간 작게 평가하고 있는 것을 제외하고는 동적거동을 전반적으로 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

원자력 격납구조물의 하중-변위 관계를 나타내고 있는 Fig. 11으로부터 극한하중은 235222kN임을 알 수 있으며 이는 Rebora 등의 해석결과⁽¹⁵⁾인 236144kN과 0.4%의 근소한 차이를 보이고 있다.

일련의 해석결과와 다른 연구자의 해석결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 철근콘크리트 셸구조의 비선형 동적응답을 적절히 구현하고 있다고 판단되며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 동적 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한

신축 또는 기존 철근콘크리트 셸구조의 동적 거동특성 평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 철근콘크리트 셸구조의 비선형 동적 거동 특성 예측을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 동적하중이 작용하는 철근콘크리트 셸구조를 해석하였다. 해석 결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 균열 발생후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열면에서의 전단전달강성 그리고, 철근의 부착 등에 대한 각각의 구성모델을 조합하여 유한요소해석에 적용함으로써 재료적 비선형성을 정확하게 고려할 수 있었다.
- 2) 동적하중의 지속시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠 효과 등을 고려하여 철근콘크리트 부재의 동적 거동특성을 정확하게 예측하였다.
- 3) 동적하중을 받는 철근콘크리트 셸구조의 응답특성을 제대로 평가함으로써 원자력 격납구조물과 같은 중요한 철근콘크리트 구조물의 내진성능 평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 한국원자력안전기술원의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ASCE, "Finite element analysis of reinforced concrete

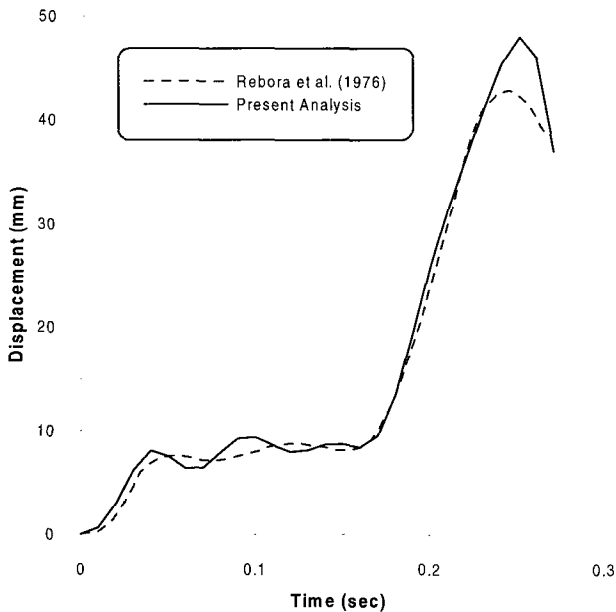


Fig. 10 Nonlinear displacement as function of time

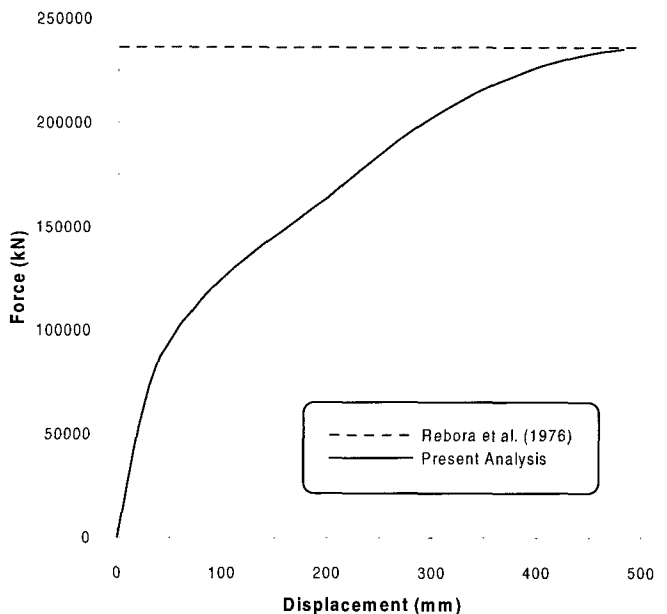


Fig. 11 Load-displacement curves

- structures," *Proceedings of the International Workshop*, 1993.
2. 김태훈, 유영화, 신현목, "면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 셸구조의 개발", 한국콘크리트학회논문집, 제11권, 제6호, 1999, pp. 47-56.
 3. 김태훈, 유영화, 신현목, "반복하중을 받는 철근콘크리트 셸구조의 비선형 해석", 한국지진공학회 논문집, 제4권, 제1호, 2000, pp. 35-49.
 4. Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., and Taylor, R. L., "Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, 1977, pp. 282-292.
 5. 김태훈, 신현목, "Analytical approach to evaluate the inelastic behaviors of reinforced concrete structures under seismic loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 113-124.
 6. 김태훈, 이상철, 신현목, "지진시 철근콘크리트 교각의 피로거동에 관한 해석적 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제13권, 제4호, 2001, pp. 389-396.
 7. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
 8. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, K., "Low-cycle fatigue behavior of reinforcing steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
 9. Perera, R., Carnicero, A., Alarcon, E., and Gomez, S., "A fatigue damage model for seismic response of RC structures," *Computers and Structures*, Vol. 78, 2000, pp. 293-302.
 10. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2*, 2000.
 11. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, 1996.
 12. Hughes, T. J. R., *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, 1987.
 13. Stangenberg, F., "Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete structures," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 29, 1974, pp. 71-88.
 14. Manjuprasad, M., Gopalakrishnan, S., and Appa Rao, TVSR., "Non-linear dynamic response of a reinforced concrete secondary containment shell subjected to seismic load," *Engineering Structures*, Vol. 23, 2001, pp. 397-406.
 15. Rebora, B., Zimmermann, T., and Wolf, J. P., "Dynamic rupture analysis of reinforced concrete shells," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 37, 1976, pp. 269-297.