

면내력을 받는 철근콘크리트 패널의 비선형 유한요소해석

Nonlinear FE Analysis of Reinforced Concrete Panels
subjected to In-plane Force

이홍표, 이상진, 전영선, 서정문
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

철근콘크리트 구조물은 콘크리트의 재료특성, 균열, 콘크리트와 철근의 상호작용 그리고 거친 균열면에서의 전단으로 인해 비선형거동을 한다. 특히 인장력에 약한 콘크리트에 균열이 발생하면 비선형거동이 심화되고 파괴에 도달할 때까지의 거동예측은 매우 어렵다. 이러한 철근콘크리트의 비선형거동을 예측하기 위해 콘크리트의 응력-변형률관계에 대한 구성모델식이 다양하게 제시되고 있으나 소성재료모델을 이용한 철근콘크리트 해석 모델에 대한 연구는 국내에서 미흡한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 소성재료 모델을 이용하여 표준 8절점 쉘 요소를 정식화하고 면내력을 받는 철근콘크리트 패널의 비선형거동을 분석하였다.

Abstract

Reinforced concrete structures subjected to in-plane force exhibit strong nonlinear behaviour due to complex material properties, cracks, interactions between concrete and steel and shear transfer exists in crack surface. Especially if there is crack formations, nonlinear behaviour increases. Thus the prediction of nonlinear behaviour of reinforced concrete includes failure or crushing is very difficult task. Various constitutive equations for concrete stress-strain relationship to predict nonlinear behaviour of reinforced concrete have been proposed. But the study for reinforced concrete analysis model using plastic material model is still demanded. So the purpose of this research is to formulate standard 8-node shell element using plasticity material model for concrete and to analyze nonlinear behaviour of RC panel subjected to in-plane force.

1. 서론

철근콘크리트는 현대 산업사회에서 가장 많이 사용되어지고 있는 건설재료이다. 특히 슬래브, 전단벽, 저장탱크 그리고 원자력발전소 격납건물과 같이 면내력(in-plane force)이나 막응력(membrane force)에 견디도록 설계되어진 구조물이 상당부분을 차지한다. 이러한 구조물에 하중이 작용하여 선형탄성한계를 벗어나면 비선형거동 및 비탄성거동을 한다. 이는 철근콘크리트가 철근과 콘크리트로 구성된 복합재료로서 콘크리트의 재료특성과 철근과 콘크리트의 상호작용으로 인해 그 재료적거동¹⁾이 매우 복잡해지기 때문이다. 특히 인장력에 취약한 콘크리트에 균열이 발생하면 재료의 비선형거동은 급격하게 증가된다. 이 재료들의 물리적인 거동을 정확하게 예측할 수 있는 수치해석모델이 제시되면 철근콘크리트 구조물의 비선형거동과 파괴모드에 대한 해석이 용이하다.

철근콘크리트구조물의 해석모델은 콘크리트 재료특성, 콘크리트 속의 철근 거동, 균열 발생 후 균열면에서 철근과 콘크리트의 부착거동, 균열면의 골재 맞물림 거동 그리고 철근항복 후 거동 등의 물리적 현상을 정확하게 평가 할 수 있는 구성모델을 유도해야 한다. 다양한 콘크리트 구성모델에 대한 비교 연구는 해석기술의 발전측면에서 매우 고무적이라 할 수 있다. 현재 국내에서 콘크리트의 응력-변형률관계에 관한 구성모델의 연구는 직교이방성모델²⁾과 동경모델^{3,4)}을 주축으로 철근콘크리트 구조물의 해석이 활발하게 진행되고 있으나 소성재료모델을 이용한 연구는 아직 활발하지 않다. 따라서 본 연구에서는 소성이론을 바탕으로 유도된 소성재료모델을 이용하여 면내력을 받는 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석을 하고자 한다. 유한요소는 표준 8절점 퇴화 쉘 요소를 사용하였고 해석결과는 Vecchio와 Collins⁵⁾가 실험한 결과와 비교하여 본 연구의 타당성과 활용성을 기술하였다.

2. 철근콘크리트 재료모델

본 연구에서는 콘크리트의 압축거동을 모사하기 위해 Drucker-Prager⁶⁾ 항복기준을 바탕으로 다음과 같이 항복면을 정의하였다.

$$f(I_1, J_2) = [\beta(3J_2) + \alpha I_1]^{1/2} = \sigma_0 \quad (1)$$

여기서 I_1 와 J_2 는 각각 첫 번째와 두 번째 응력불변항을 나타내며 σ_0 는 등가유효응력값이며 일축압축실험으로부터 구할 수 있다. 그리고 재료상수 α 와 β 는 이축실험으로부터 $f'_{cb} = 1.16f'_c$ 일때 $\alpha = 0.355\sigma_0$ 와 $\beta = 1.355$ 이면 Kupfer⁷⁾의 실험결과와 유사한 항복응력포락선을 형성한다(그림 1 참조).

콘크리트의 주응력이 일축압축강도의 30%를 넘으면 초기항복면(initial surface)에 도달하는 것으로 가정한다. 콘크리트의 응력이 탄성한계를 넘어서면 파괴면(failure surface)에

도달할 때까지 소성경화거동을 보인다. 소성경화는 소성변형이 발생하는 동안 항복면의 이동을 정하는데 일반적으로 소성경화규칙에 의해서 소성영역에서 유효응력과 유효소성 변형률의 관계를 가정하게 된다. 본 연구에서는 소성경화규칙을 포물선형태의 등방성 경화모델(isotropic hardening model)을 이용하여 다음과 같이 고려하였다.

$$\sigma_0 = E_0 - \frac{1}{2} \frac{E_0}{\epsilon_0} \epsilon^2 \quad (2)$$

여기서 E_0 는 초기탄성계수이고 ϵ_0 와 ϵ 는 각각 최대응력 f_c 에 상응하는 변형률값과 전체 변형률값을 나타낸다. 이때 전체변형률값은 탄성성분 ϵ_e 와 소성성분 ϵ_p 로 분리할 수 있다. 탄성성분은 $\epsilon_e = \sigma/E_0$ 와 같이 구하고 소성성분은 소성변형률벡터가 항복면에 수직하다고 가정하는 소성연관흐름(associated flow rule)을 다음과 같이 고려하였다.

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

여기서 $d\lambda$ 는 소성변형률증분의 크기를 결정하는 비례상수이고 $\partial f(\sigma)/\partial \sigma_{ij}$ 는 소성흐름벡터이며 항복면에 수직한 방향으로 정의된다. 그리고 $f(\sigma)$ 는 항복함수이다.

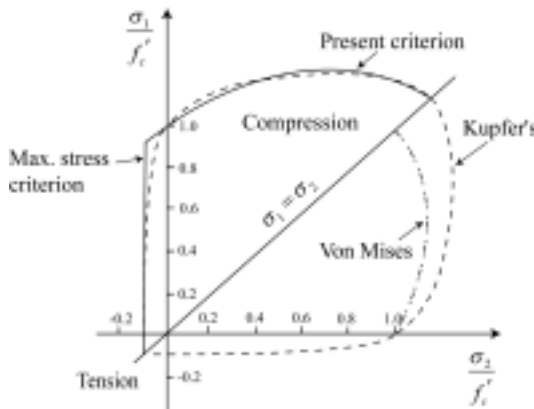


그림 1 콘크리트의 2축 응력포락선

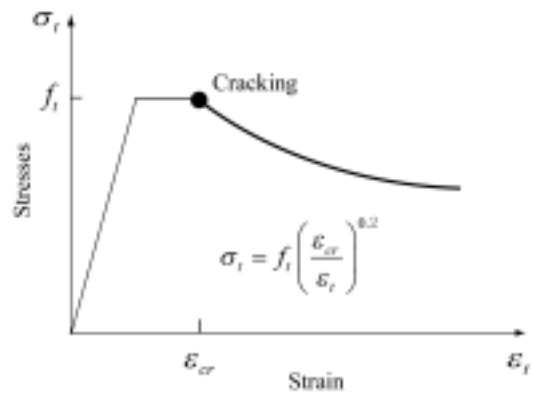


그림 2 인장강화모델

콘크리트의 균열발생기준은 콘크리트의 최대 주응력이 한계값(f_t)을 초과하면 주응력방향의 직각인 면에 균열이 생기는 것으로 가정하였다. 균열이 생기면 콘크리트는 이방성재료로 간주되며 이방성재료의 국부좌표계는 주응력의 방향과 일치시킨다. 첫 번째 균열이 생긴 후 그 방향을 계산한 뒤 균열면에서 최대응력을 계산하고 그 값이 한계값을 초과할 때 두 번째 균열이 첫 번째 균열의 직각방향으로 생긴다고 가정하였다. 그리고 각 적분점에서 최대 두개의 균열을 허용하였으며 개개의 균열발생에 대한 진전보다는 전체적인 균

열발생에 관점을 두어 분산균열모델(smearred crack model)을 적용하였다.

균열이 발생한 철근콘크리트는 철근과의 부착력에 의해 균열하중 이후에도 인장력에 저항할 수 있게 된다. 이를 인장강화효과(tension stiffening effect)라 하며 콘크리트의 응력-변형률선도를 수정하거나 철근의 응력-변형률선도를 수정함으로써 모사할 수 있다. 본 연구에서는 전자의 방법으로 콘크리트층에 철근이 균일하게 분포하는 분산모델을 이용하여 그림 2에 도시한 바와 같이 균열 후 콘크리트의 응력감소를 다음식과 같이 정의하였다.

$$\sigma_t = f_t \cdot \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^{0.2} \quad (4)$$

여기서 ϵ_t 는 균열발생 후 전체변형률값이고 ϵ_{cr} 는 균열이 발생한 시점에서의 변형률값으로서 $\epsilon_{cr} = f_t/E$ 로 구한다.

균열이 발생한 후 균열면에 수직한 방향의 콘크리트 압축강도는 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 압축강도보다 작아진다. 이는 균열면에서 콘크리트의 유효단면적이 감소하기 때문이다. 이러한 현상은 이축응력상태의 패널에서 현저하게 발생하므로 본 연구에서는 그림 3에서 Vecchio와 Collins⁵⁾가 제시한 다음과 같은 압축강도 감소식을 사용하였다.

$$\beta = \frac{1}{0.85 + 0.34\epsilon_1/\epsilon_{cr}} \quad (5)$$

여기서 β 는 압축강도 감소계수이고 ϵ_1 와 ϵ_{cr} 은 각각 균열에 수직한 방향의 전체 주인장변형률값과 초기균열 발생시 변형률값이다.

균열된 콘크리트의 거친면을 통해서 발생하는 전단응력은 순수콘크리트의 경우 골재의 상호작용에 의해 지배되므로 골재의 크기와 입도가 주요변수이며 철근콘크리트에서는 철근과 콘크리트의 다우얼(dowel)작용이 중요하므로 철근비, 철근의 직경 그리고 균열면과 철근의 각도 등이 중요 변수이다. 이러한 물리적인 현상을 수치적으로 모사하기 위해서는 전단탄성계수값을 감소시키는 방법을 주로 사용한다.

본 연구에서는 그림 4에 도시한 바와 같이 Al-Mahaidi⁸⁾가 제시한 쌍곡선함수를 도입하였으며 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{G} &= 0.4G \times \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_1}, \text{ if } \epsilon_1 \geq \epsilon_{cr} \\ \bar{G} &= G, \text{ if } \epsilon_1 < \epsilon_{cr} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 G 는 균열이 발생하지 않은 콘크리트의 전단탄성계수이고 ϵ_1 와 ϵ_{cr} 은 식 (5)에서

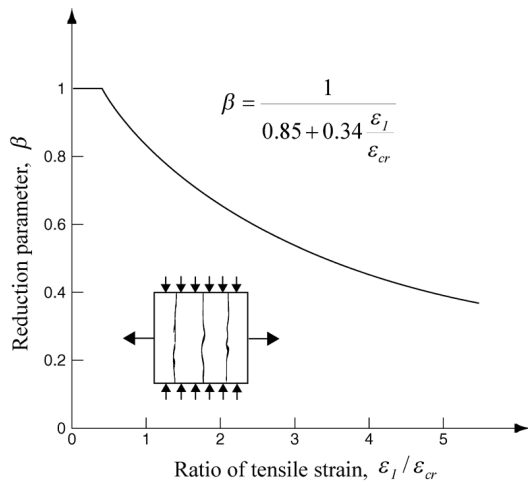


그림 3 압축강도 감소모델

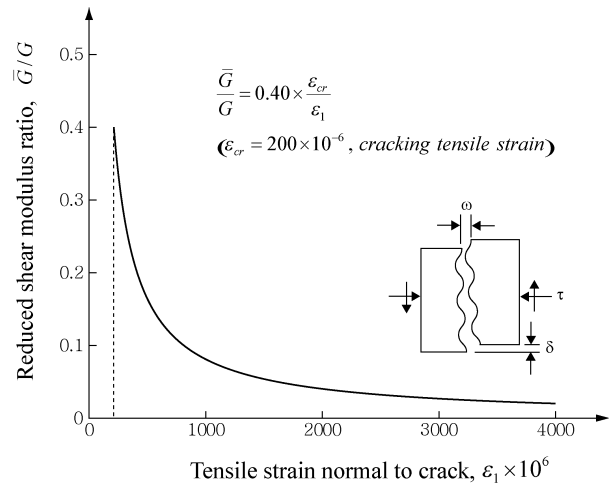


그림 4 전단전달모델

정의하였다.

콘크리트의 압쇄파괴기준은 응력 또는 변형률값을 이용하여 정의할 수 있지만 본 연구에서는 변형률기준을 도입하였다. 이는 콘크리트가 항복하여 파괴에 이르기까지 비탄성변형이 계속 발생하므로 파괴조건은 소성변형에 지배적이기 때문이다. 따라서 다음과 같은 압쇄파괴조건을 사용하였다.

$$\beta(3J_2') + \alpha I_1' = \epsilon_u^2 \quad (7)$$

여기서 I_1' 과 J_2' 은 변형률 불변항이고 ϵ_u 는 일축실험으로부터 구한 극한변형률이다. 콘크리트의 변형도값이 극한변형률값에 도달하면 콘크리트의 응력은 완화되고 모든 강성은 사라지는 것으로 가정하였다.

철근은 축력에만 저항하는 일차원부재로 가정하여 응력-변형률관계를 압축과 인장영역에 동일하게 적용하였다. 철근이 항복하기 전에는 $\sigma_y = E_s \epsilon_s$ 와 같이 철근의 응력을 구하며 철근항복 후에는 $\sigma_y = E_{sy} \epsilon_s$ 와 같이 구하였다. 여기서 E_s 와 E_{sy} 는 각각 철근이 항복 전후의 탄성계수이고 ϵ_s 는 철근의 전변형률 값이다.

3. 수치예제

본 연구에서 제시한 해석모델의 성능검증을 위해 하중조건과 경계조건을 이상화하여 Vecchio와 Collins⁵⁾가 수행한 패널실험을 수치해석 하였다. 시험체의 형상은 그림 5에 도시한 바와 같이 890mm×890mm×70mm이고, 상부와 하부에는 다양한 철근비를 가지는 용접금속망을 사용하였다. 이 실험은 전단응력 및 전단응력과 수직응력이 조합된 여러 하중상태를 적용한 실험으로 수치해석시 구성모델의 검증을 위해 널리 이용되고 있다.

각 시험체의 하중조건과 양방향의 철근비, 철근의 항복응력 및 콘크리트의 압축강도,

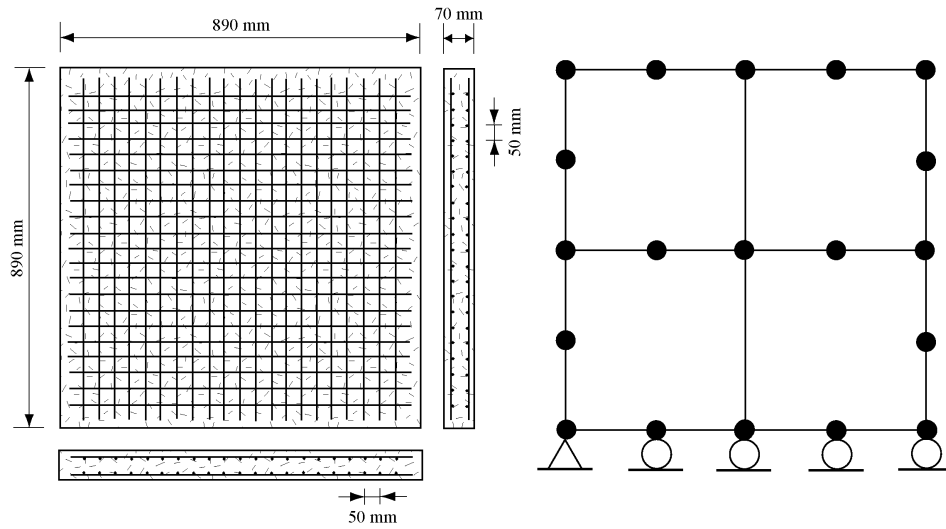


그림 5 시험체의 형상(좌)과 유한요소망(우)

인장강도, 탄성계수 그리고 파괴모드를 표 1에 나타내었다. 콘크리트의 프아송비는 0.2를 사용하였고 인장강도값^{2,9)}은 $f_t' = 0.33\sqrt{f_c}$ 와 같이 산정하였다. 철근의 탄성계수 $E_s = 200,000\text{MPa}$ 를 사용하였으며 변형경화영역의 탄성계수는 $E_{sh} = 0.01E_s$ 로 하였다. 유한요소모델은 그림 5에서 보는 바와 같이 4개의 8절점 쉘요소로 모델링 하였으며 정상적분을 사용하였다. 철근은 요소의 전체면적에 등분포 한다고 가정하여 분산모델 (smeared model)을 적용하였다.

실험결과 순수전단응력 상태에 있는 PV10에서 PV21은 주로 콘크리트 전단파괴가 발생하였고 철근의 항복응력이 다소 낮은 PV11은 콘크리트가 파괴되기 전에 철근이 먼저 항복하였다. 그 외의 시험체는 철근이 항복하기 전에 콘크리트가 파괴되었다.

본 연구에서 해석한 값과 실험결과의 최대응력 및 파괴모드를 표 2에 나타내었고 그림 6에 응력-변형률관계를 도시하였다. 참고로 그림에는 참고문헌 2, 4와 9에서 발췌한 값을

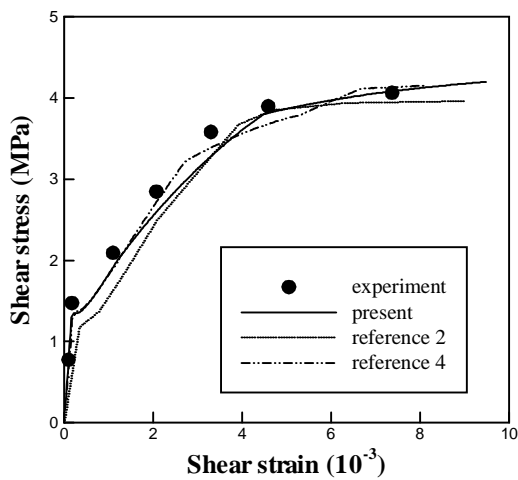
표 1 Vecchio와 Collins 패널의 재료특성값(단위: MPa)

Panel NO.	Loading Ratio	Longitudinal Steel		Transverse Steel		Concrete	
	$\tau : \sigma_x : \sigma_y$	ρ_x	f_x	ρ_y	f_y	f_c	f_t'
PV10	1:0:0	0.01785	276	0.00999	276	14.5	1.26
PV11	1:0:0	0.01785	235	0.01306	235	15.6	1.30
PV12	1:0:0	0.01785	469	0.00446	269	16.0	1.32
PV19	1:0:0	0.01785	458	0.00713	299	19.0	1.44
PV20	1:0:0	0.01785	460	0.00885	297	19.6	1.46
PV21	1:0:0	0.01785	458	0.01296	302	19.5	1.46
PV22	1:0:0	0.01785	458	0.01524	420	19.6	1.46
PV23	1: -0.39: -0.39	0.01785	518	0.01785	518	20.5	1.49
PV25	1: -0.69: -0.69	0.01785	466	0.01785	466	19.2	1.45
PV27	1:0:0	0.01785	442	0.01785	442	20.5	1.49

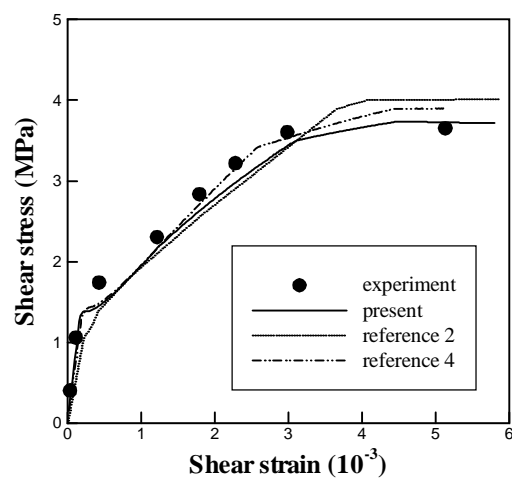
인용하였다. 실험값에 대한 해석결과의 최대응력비의 전체평균은 0.99로서 해석에 의한 최대응력과 파괴모드는 전반적으로 유사한 값을 도출하였다. PV12, PV19와 PV20과 같이 철근비의 이방성이 크고 항복응력비가 클수록 비선형해석에 대한 정확한 거동을 예측하는데 어려웠다. 이는 철근비가 작고 항복응력이 낮은 방향의 철근이 먼저 항복하여 그로 인한 균열발생이 심화되고 따라서 양방향에 대한 이방성이 증대되기 때문으로 판단된다. 양방향의 철근비가 높고 항복응력이 높은 PV22, PV23과 PV27 패널의 경우 초기균열발생시점이 다른 패널에 비해 특히 낮게 평가되었다. 이는 콘크리트의 인장강도값을 위에서 제시한 방법으로 산정하여 발생된 것으로 생각된다. 비교된 모든 모델에서 응력-변형률 관계도 낮게 나타났지만 전체적인 거동은 매우 유사하다. 참고로 PV22, PV23과 PV27 패널은 초기인장강도 값을 $(1.4 \sim 1.5)f_c'$ 로 했을 경우 실험결과와 잘 일치하였다.

표 2 실험값과 해석결과의 비교

Panel NO.	(MPa)				
	(1)	(2)	(1)/(2)		
PV11	3.56	3.68	0.97	0.97	
PV22	6.07	6.20	0.98	1.02	
PV23	8.87	8.82	1.01		
PV25	9.12	8.37	1.09		
PV27	6.35	6.88	0.92		
PV28	5.81	5.25	1.11		
PV10	3.97	4.27	0.93	0.98	
PV12	3.13	2.94	1.06		
PV19	3.95	4.00	0.99		
PV20	4.26	4.41	0.97		
PV21	5.03	5.34	0.94		

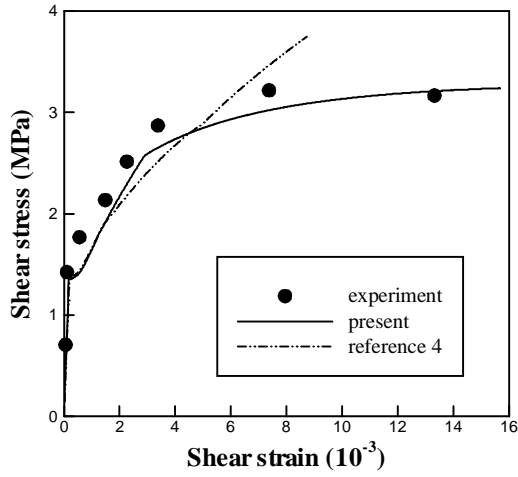


(a) PV10

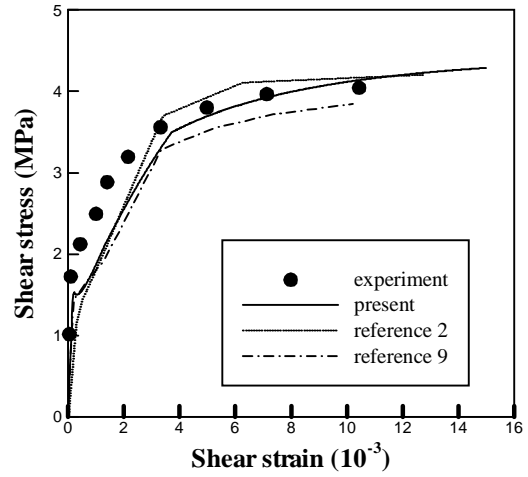


(b) PV11

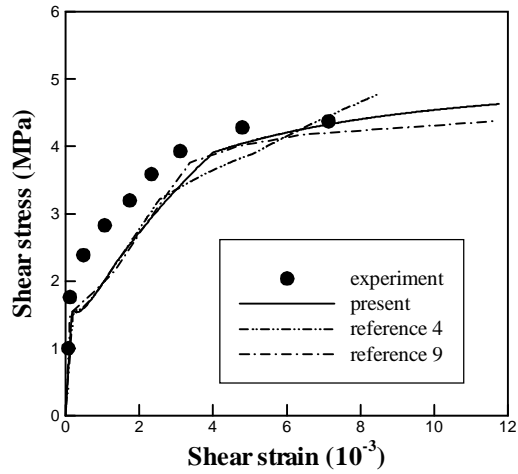
그림 6 패널의 실험결과와 유한요소 해석결과 비교



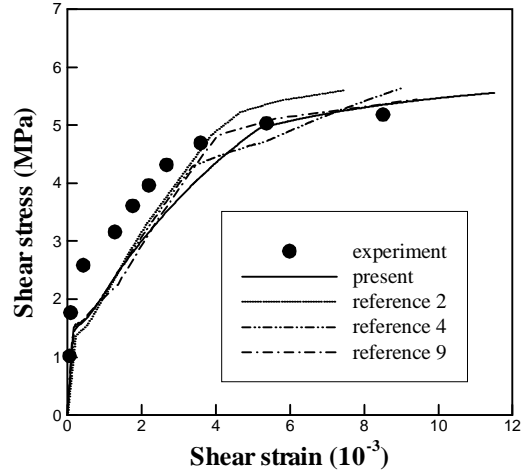
(c) PV12



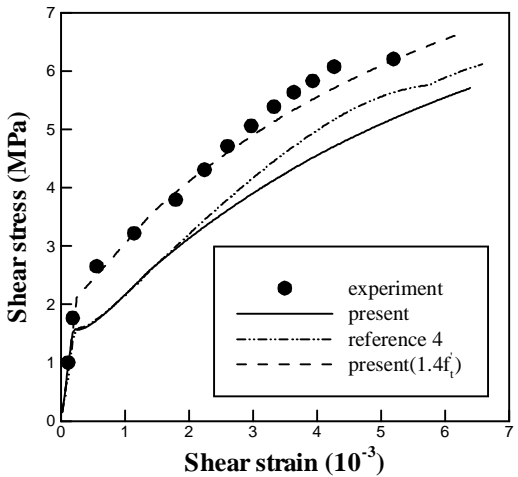
(d) PV19



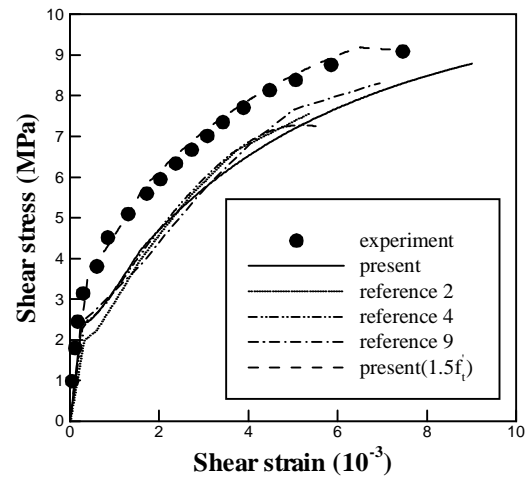
(e) PV20



(f) PV21

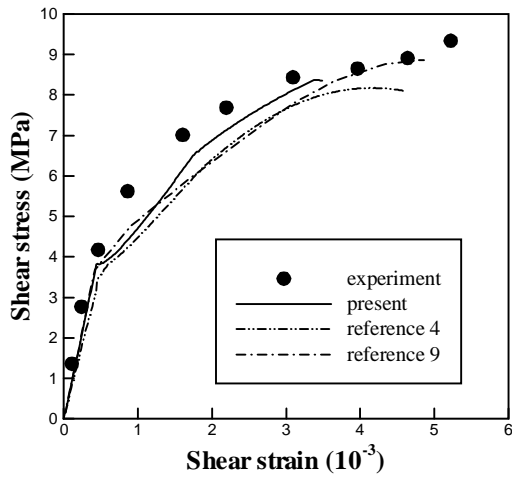


(g) PV22

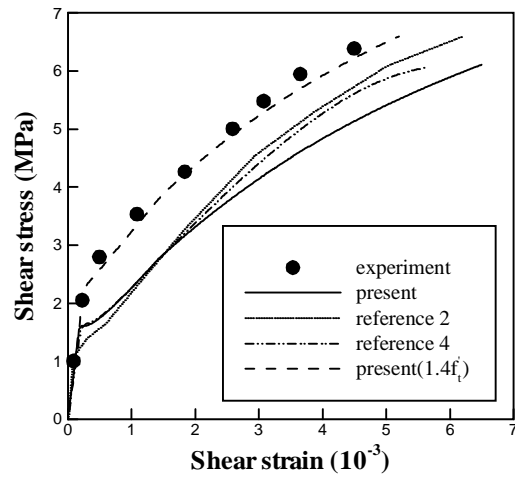


(h) PV23

그림 6 패널의 실험결과와 유한요소 해석결과 비교(계속)



(i) PV25



(j) PV27

그림 6 패널의 실험결과와 유한요소 해석결과 비교(계속)

4. 결론

본 연구에서는 Drucker-Prager 항복기준에 의한 콘크리트 소성재료모델을 이용하여 표준 8절점 쉘유한요소를 정식화하고 철근콘크리트 패널의 비선형거동을 분석하였다. 소성재료모델을 이용한 철근콘크리트 패널의 해석결과 콘크리트의 균열발생시점과 파괴에 이를 때까지의 비선형거동을 비교적 유사하게 예측하였다. 또한 인장강화효과를 고려하여 철근비의 이방성이 클 경우와 조합하중이 작용할 경우에도 좋은 결과를 도출하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 소성재료모델을 이용한 철근콘크리트 해석은 전단벽이나 격납건물과 같이 면내력에 지배적인 다른 구조물의 해석에도 유용할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Chen, W.F., *Plasticity in reinforced concrete*, McGraw-Hill Book Company, 1982.
2. 곽효경, 김도연, “철근콘크리트 전단벽의 비선형 유한요소해석,” *한국전산구조공학회*, 제 12 권 제 3 호, 1999.
3. 최정호, 프리스트레스 콘크리트 쉘구조의 비선형 유한요소해석, 성균관대학교 대학원, 토목공학과, 박사학위논문, 1997.
4. 이상진, 이홍표, 서정문, 철근콘크리트 격납건물의 비선형해석을 위한 유한요소 해석프

로그랩 NUCAS, 한국원자력연구소, KAERI/TR-2076/2002, 2000.

5. Vecchio, F.J. and Collins, M.P., "The response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stress," *Report No. 82-03*, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Canada, 1982.
6. Drucker, D.C. and Prager, W., "A more fundamental approach to plastic stress-strain relation," *Proc. Natl. Cong. USInst. Appl. Mech.*, pp. 487-491, 1951.
7. Kupfer, H., Hilsdorf, K.H. and Rush, H., "Behaviour of concrete under biaxial stresses," *Proceedings, ACI*, Vol. 66, No. 8, pp. 656-666, 1969.
8. Al-mahaidi, R.S.H., "Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete deep members," *Report 79-1*, Department of Structural Engineering, Cornell University, 1979.
9. Chang-Koon Choi and Sung-Hoon Cheung, "Tension stiffening model for planar reinforced concrete members," *Computers & Structures*, Vol. 59, No. 1, pp. 179-190, 1996.