



고강도 철근을 사용한 철근콘크리트 패널의 비선형 유한요소해석

천주현¹⁾ · 성대정²⁾ · 조홍재²⁾ · 조재열³⁾ · 신현목^{4)*}

¹⁾성균관대학교 건설환경연구소 ²⁾삼성물산 토목사업부 ³⁾서울대학교 건설환경공학부 ⁴⁾성균관대학교 건축·토목공학부

Nonlinear Finite Element Analysis of the Reinforced Concrete Panel using High-Strength Reinforcing Bar

Ju-Hyun Cheon,¹⁾ Dae-Jung Seong,²⁾ Hong-Jae Cho,²⁾ Jae-Yeol Cho,³⁾ and Hyun-Mock Shin^{4)*}

¹⁾Construction and Environmental Lab., SungKyunKwan University, Suwon, 16419, Korea

²⁾Dept. of Civil, Samsung C&T Corporation, Seoul, 06620, Korea

³⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

⁴⁾Dept. of Civil and Architecture Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 16419, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to provide analytical method to reasonably predict the overall behavior up to destruction of reinforced concrete panel specimens using high-strength reinforcing bar. A total of 12 specimens of reinforced concrete panels with a wall thickness one-third the size of the actual nuclear containment structures under various loading conditions and design parameters were selected and the analysis was performed using a non-linear finite element analysis program (RCAHEST) was developed by the authors. The mean and coefficient of variation for shear strength at cracking point and maximum shear strength from the experiment and analysis results was predicted 1.03 and 12%, 0.97 and 9%, respectively. For the shear strain at the maximum shear strength from the experiment and analysis results was predicted 0.96 and 30%, respectively. Based on the results, the analysis program that was applied newly modified constitutive equation in this study is judged as having a relatively high reliability for the analysis results.

Keywords : high-strength reinforcing bar, reinforced concrete panel, nonlinear finite element analysis, RCAHEST

1. 서 론

현재 국내에는 총 28기의 원자력 발전소가 운영되고 있으며 총 순수 발전량은 20,721 MW로 세계에서 5번째로 많은 양의 전력을 생산하고 있다. 2022년을 목표로 총 4기를 추가로 건설할 계획에 있으며, 이러한 상황에서 현재 국내·외적으로 원전구조물의 안전성에 대한 사회적 관심은 지속적으로 증대되고 있는 실정이다.

후쿠시마 원전사고에서 보듯이 원전구조물은 매우 높은 수준의 구조안전성이 요구되며 이러한 구조물에는 상대적으로 매우 많은 양의 철근이 소요되는 보수적인 설계로 인한 비경제성과 공사 기간의 연장 및 콘크리트 재료분리와 같은 성능저하의 원인이 되고 있다. 국내 원전은 원자력발전소 격납구조물의 경우 KEPIC (Korea Electric

Power Industry Code, 한국전력산업기술기준) SNB, 기타 콘크리트구조의 경우 KEPIC SNC 설계 기준을 적용하고 있다. 두 기준 모두 철근의 설계기준 항복강도를 420 MPa로 제한하고 있어 고강도 철근을 적용하기 위해서는 실험적 입증자료가 필요하다.¹⁾ 외국의 경우에도 원자로 격납구조의 설계기준인 ASME과 원전의 내진 1급 안전 관련 구조물의 설계기준인 ACI 349에서도 모든 철근의 설계기준의 항복강도를 420 MPa로 제한하고 있는 실정이다.²⁾

경제성과 시공성을 높이는 동시에 높은 수준의 안전성과 내구성 확보를 위해 고강도 철근의 사용은 필요하며, 이를 적용할 수 있는 관련 기준의 개정이 요구되고 있다.¹⁾ 원자력 격납 구조물은 내부 방사성 물질이 외부로 누출되지 않도록 하는 매우 중요한 구조물로서 지진과 같은 외력으로 사고가 발생할 경우 극한 내압으로 인한 다양한 응력상태를 경험 할 수 있다. 다양한 하중 조건과 설계 변수하에서 고강도 철근이 사용된 격납구조물에 대한 성능 검증을 위해 관련된 실험적 연구뿐만 아니라 신뢰성 있는 예측이 가능한 구성관계식과 재료모델의 개발은

*Corresponding author E-mail : hmshin@skku.edu
 Received November 20, 2014, Revised May 18, 2015,
 Accepted June 15, 2015
 ©2015 by Korea Concrete Institute

구조물의 안정성 확보 차원에서 필수적이라 할 수 있으며, 현재까지 국내·외적으로 이와 관련된 연구³⁻⁸⁾가 다양하게 수행되어 오고 있다.

대표적으로 Vecchio 등³⁻⁴⁾은 다양한 하중 조건과 재료 물성을 주요 변수로 전체 30개의 철근콘크리트 패널 실험체를 제작·실험하였다. 실험 결과 등을 바탕으로 수정 압축장 이론(modified compression field theory)을 제안하였으며, 이에 대한 적용성과 타당성을 검증하였다.

Stevens⁵⁾는 반복 이력 순수 전단(reversed cyclic pure shear)을 받는 1,600×1,600×285 크기의 철근콘크리트 패널 실험체를 제작·실험하였으며 콘크리트 응력 증분의 주방향은 변형을 증분의 주방향과 일치한다는 가정을 통해 새로운 구성관계식을 제안·검증하였다.

Kim 등⁶⁾은 Stevens 등⁵⁾이 실험한 철근콘크리트 패널 실험체를 대상으로 실험과 같은 하중 재하 조건하에서 해석을 수행하여 제안된 해석프로그램에 대한 검증을 수행하였다.

Kwak 등⁷⁾은 이축 응력 상태 하의 패널에 대한 균열 발생 이후의 비선형 거동을 모사하기 위한 해석모델을 제안하였으며 격납건물 안전성 향상 기술개발을 목표로 현대건설기술연구소에서 수행된 패널 실험체 중 일부에 대한 해석을 수행하여 그 결과에 대하여 검증하였다.

Lee⁸⁾은 지진하중을 받는 철근콘크리트 패널의 이력거동을 힘의 평형조건, 변형의 적합조건 및 재료의 구성법칙을 이용한 재료 메커니즘을 이용하여 예측하였고, 실험 결과와의 비교·분석을 통해 타당성을 검증하였다.

이 연구에서는 고강도 철근이 사용된 원전 격납구조물에 대한 안전성 확보 및 관련 기준에의 적용을 위한 기초 연구로서 실제 격납구조물 벽체 두께의 1/3 규모를 가지며 고강도 철근이 배근된 철근콘크리트 패널 실험체를 대상으로 파괴시까지의 극한거동 특성을 보다 합리적으로 예측할 수 있는 해석적 방안을 제시하는 것을 목표로 한다.

저자 등⁹⁾에 의해 그 동안 개발된 비선형유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 사용하였으며 총 12개의 실험체²⁾에 대한 검증을 수행하여 해석 결과의 적용성과 타당성을 검증하였다.

2. 고강도 철근콘크리트의 구성방정식

고강도 철근콘크리트 평면응력 요소의 구성방정식은 Fig. 1에서와 같이 저자 등에 의해 기존에 개발된¹⁰⁾ 분산 균열 개념에 근거한 보통강도 콘크리트의 재료모델을 바탕으로 콘크리트의 압축모델, 균열 직각 방향의 인장모델, 균열면에서 전단전달모델, 그리고 콘크리트에 포함된 철근의 해석모델로 각각 구성되어 있다. 여기에, 고강도 콘크리트의 재료특성을 감안할 수 있도록 저자 등에 의해 새로이 수정된 이차원 평면응력 요소를 적용하였으며, 선행 연구 수행을 통해 다양한 하중을 받는 고강도 콘크리

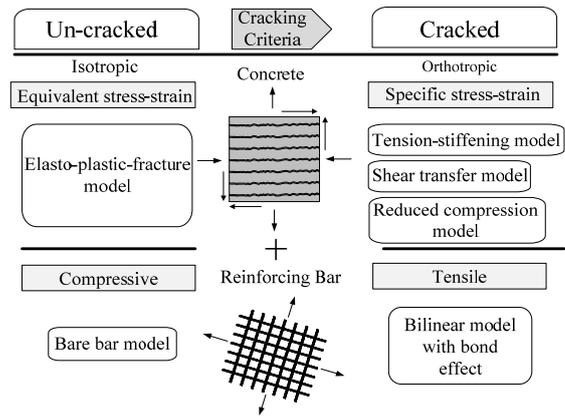


Fig. 1 Outline of analysis model for reinforced high-strength concrete

트 기둥의 내진거동 해석에 적용하여 해석 결과에 대한 신뢰성을 검증하였다.⁹⁾

2.1 균열 발생 이후 콘크리트 인장모델

Shima 등¹¹⁾이 제안한 보통강도 콘크리트의 인장경화모델을 근거로 이 연구에서는 고강도 콘크리트의 단조증가 인장하중 하에서 평균 응력-변형률 곡선은 보통강도 콘크리트와 동일하다고 가정하였다. 균열 발생 이후, 상대적으로 매끈한 균열면을 가지는 고강도 콘크리트의 특성을 고려하여 균열면의 접촉에 의해 발생하는 압축응력은 상대적으로 작다고 보았으며 인장모델에는 접촉에 의한 압축력을 고려하지 않았다.⁹⁾

2.2 균열 발생 이후 콘크리트 압축모델

콘크리트에 균열이 발생한 이후 이축응력 상태의 콘크리트의 압축거동이 저하되는 현상은 고강도 콘크리트의 경우 상대적으로 매끈한 균열면의 특성으로 인해 저하현상이 더 두드러지므로 보통강도 콘크리트와는 다른 접근이 필요하다. Vecchio 등¹²⁾은 균열이 발생한 고강도 콘크리트의 압축거동 저감현상을 규명하기 위하여 43~72 MPa 강도의 콘크리트를 대상으로 면내응력을 받는 평판 실험체에 대한 실험을 수행하였으며, 식 (1)~(3)과 같은 고강도 콘크리트의 압축거동 저감계수 β_c 을 제안하였다. 이 연구에서는 식 (1)의 압축거동 저감계수를 그대로 적용하였으나, 균열폭 증가로 저감계수가 1.0 이하의 값을 가지는 경우 균열에 평행한 방향의 콘크리트 압축모델에서 구속효과를 고려하지 않았다.

$$\beta_c = \frac{1}{1 + K_c K_f} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$K_c = 0.27(\epsilon_t / |\epsilon'_{\omega}| - 0.37) \quad (2)$$

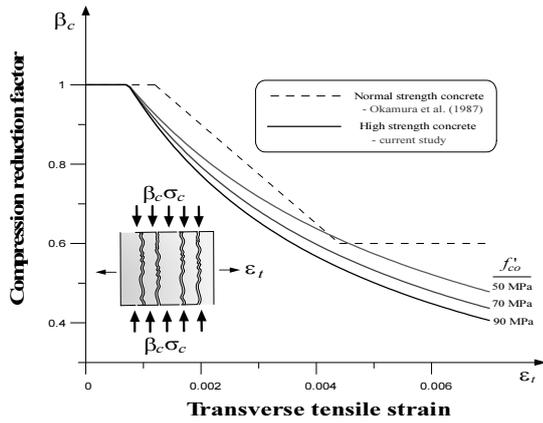


Fig. 2 Compression reduction factor for high-strength concrete

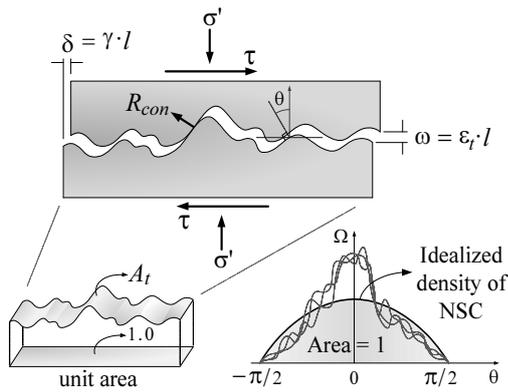


Fig. 3 Contact density function - Idealization of single crack surface

$$K_f = 0.1825 \sqrt{f'_{co} (MPa)} \geq 1.0 \quad (3)$$

여기서, K_c 는 직각방향의 균열에 의한 영향을 고려하는 계수이며 K_f 는 콘크리트의 압축강도에 따른 영향을 고려하는 계수이다.

Fig. 2에는 보통 강도와 고강도 콘크리트에 대하여 Maekawa 등¹³⁾과 Vecchio 등¹²⁾이 제안한 압축 연화 계수(compression softening factor)에 대하여 각각 비교하여 나타내었다.

2.3 균열발생 이후 콘크리트의 전단전달 모델

균열면에서 전단전달모델은 상대적으로 배근한 특성을 가지는 고강도 콘크리트(HSC : High Strength Concrete)의 균열면을 감안하여 식 (4)와 같이 Bujadham 등¹⁴⁾이 제안한 고강도 콘크리트의 접촉면밀도함수 $\Omega(\theta)$ 에 근거하였다. 연구 결과 Fig. 3에서와 같이 일반강도를 갖는 콘크리트(NSC : Normal Strength Concrete) 균열면에서 Li 등¹⁵⁾이 제안한 기존의 전단전달모델을 적용한 경우에 비하여 마찰력, 접촉면의 변형으로 인한 경사각의 변화, 균열면의 파괴 및 소성변형에 기인하는 강성의 저하 등을 추가로 고려할 수 있으며 복잡한 하중이력 상태하의 전단전달 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다.⁹⁾

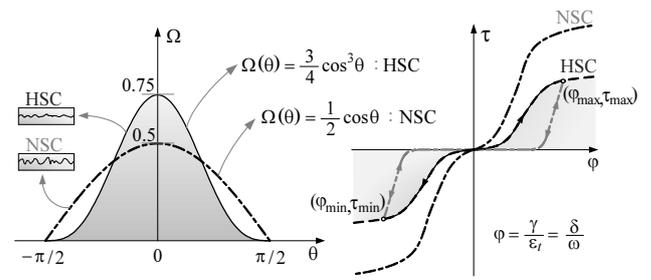


Fig. 4 Contact density function and shear transfer model for high-strength concrete

$$\Omega(\theta) = \frac{5}{6} \exp\left\{-21\left(\frac{\theta}{\pi}\right)^2\right\} \quad (\theta \text{ in radian}) \quad (4)$$

이 연구에서는 해석모델의 전단전달 구성방정식에 수치적분이 필요한 원제안식 (4)에 근접하는 정밀도를 가지면서 수치적분 없이 명시적인 해를 얻을 수 있도록 새로이 제안된²⁾ 식 (5)의 접촉면밀도함수를 사용하였다.

$$\Omega(\theta) = \frac{3}{4} \cos^3 \theta \quad (5)$$

Fig. 4에는 보통 강도와 고강도 콘크리트 균열면에서 Li 등¹⁵⁾과 Bujadham 등¹⁴⁾의 연구 결과와 함께 이 연구에서 새로이 저자 등에 의하여 제안된 접촉면밀도 함수와 전단전달 모델에 대하여 각각 비교하여 나타내었다.

2.4 콘크리트에 포함된 철근의 해석모델

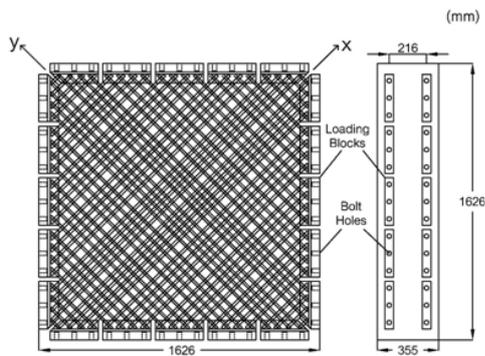
콘크리트에 매입된 철근의 해석모델은 Shima 등¹¹⁾이 제안한 부착모델과 Shin¹⁶⁾이 제안한 평균 응력-변형을 관계식에 근거하였다. 이 연구에서는 균열발생 이후 인장 거동에서 콘크리트가 기여하는 부분을 무시하는 대신 철근과 콘크리트 사이의 부착효과를 콘크리트의 인장경화모델에서 고려하였으므로 탄성영역과 균열초기의 철근콘크리트 강성은 순수 철근만의 강성보다 크며 균열이 진전될수록 콘크리트가 기여하는 바가 줄어들어 철근만의 강성에 수렴하도록 하였다.

2.5 비선형유한요소해석 프로그램의 구성

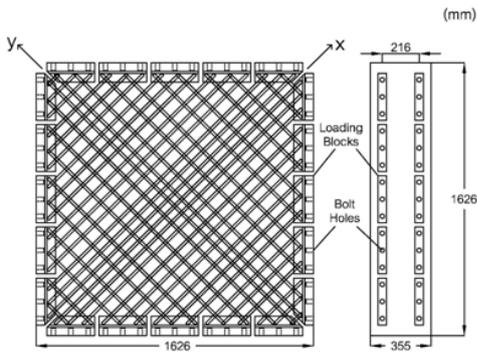
이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근 콘크리트 평면응력요소 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다.⁹⁻¹⁰⁾

3. 철근콘크리트 패널 실험체

Fig. 5에서와 같이 저자 등에 의해 수행된 실제 원전 격납구조물 벽체 두께의 약 1/3 정도의 규모를 갖는 1,626×1,626×355 mm 크기의 대형 철근콘크리트 패널 실험체 12개를 대상으로 선정하였다.²⁾ 수평/수직 철근의 설계 항복강도(420 MPa, 550 MPa), 콘크리트 설계 압축강도(42 MPa, 70 MPa), 수평/수직 철근 비(ρ_x/ρ_y), 하중 재하에 따른 수직응력/전단응력비(f_n/v : 수직응력이 인장인 경우 (+), 수직응력이 압축인 경우 (-)) 및 이와 함께 원전 격납구조물 벽체가 지진, 내압 등과 같이 발생가능한 모든 응력 상태를 고려하여 각각 순수 전단(PS : Pure Shear), 전단 및 이축 인장(SBT : Shear and Biaxial Tension)응력 또는 전단 및 이축 압축(SBC : shear and biaxial compression) 응력 상태 모사를 위한 하중을 주요 변수로 하였다. 이를 통해 고강도 철근이 철근콘크리트 패널 요소의 파괴시까지의 극한거동 특성에 미치는 영향을 파악하고, 고강도



(a) A series specimens details



(b) B series specimens details

Fig. 5 Dimensions and reinforcement layout of specimens

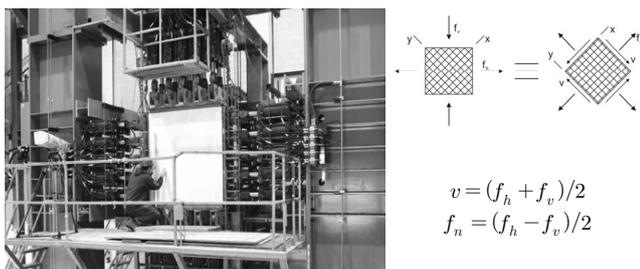


Fig. 6 Shell element tester in Toronto university

철근의 적용 타당성을 검증하기 위해 제작된 실험체로서 토론토 대학교의 Shell Element Tester를 이용하여 실험을 수행하였다(Fig. 6). 실험은 45°만큼 회전한 패널요소에 전단력이 작용하도록 종 방향 및 횡 방향으로 압축/인장 수직력을 단조 증가시키며 가력 하였다. 대상 실험체는 모두 Fig. 5에서와 같이 상·하의 2단 배열로 서로 직각이 되도록 각 방향으로 철근을 배근하였다.

N420A의 세 실험체는 기존 실험체들로 현재 APR (Advanced Power Reactor) 1400 원전구조물에서 사용되고 있는 콘크리트 설계강도 42 MPa와 철근의 항복강도 420 MPa를 사용하였다. 이 세 실험체들을 제외한 나머지는 철근 설계항복강도 550 MPa인 고강도 철근을 사용하였으며, 콘크리트 설계강도 42 MPa과 70 MPa에 따라 각각 N타입과 H타입 실험체로 분리된다.

또한, APR1400 원전구조물 하부 벽체의 종방향 철근 비(ρ_x)와 횡방향 철근비(ρ_y)를 각각 2.09%와 1.35%를 갖는 A Type의 실험체와 각 방향으로의 철근비를 철근 설계항복강도의 비인 420/550 만큼 줄인 1.56%와 1.04%를 갖는 B Type의 실험체로 다시 분류할 수 있다.

총 12개의 실험체에 대한 단면 형상 및 배근 상세와 주요 실험변수에 따른 실제 재료 물성 값을 각각 Fig. 6과 Table 1에 나타내었다.

4. 비선형 유한요소해석

대상 실험체에 대하여 Fig. 7에서와 같이 4절점을 갖는 단일한 철근콘크리트 평면응력 요소를 사용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 이는, 실험의 전과정을 통해 요소에 응력이 균일하게 재하되는 특성을 고려해 해석의 단순성을 위한 것이며, 이외에 각 방향으로의 철근비 및 재료 물성은 Table 1에 나타난 것과 같은 실제의 재료 물성 값들을 그대로 적용하였다.

Table 1 Test variables and material properties

Specimens	f'_c (MPa)	f_{yx} (MPa)	f_{yy} (MPa)	ρ_x (%)	ρ_y (%)	f_n/v
N420A-PS	35.2	448	447	2.09	1.35	0
N420A-SBT						+0.4
N420A-SBC						-0.4
N550B-PS	39.0	631	631	1.56	1.04	+
N550B-SBT						+0.4
N550B-SBC						-0.4
N550A-PS	39.0	631	653	2.09	1.35	0
N550A-SBT						+0.4
H550B-PS						55.8
H550B-SBC	-0.3					
H550A-PS	55.8	631	653	2.09	1.35	
H550A-SBC						-0.2

실제 원전 격납구조물 벽체가 경험할 수 있는 지진, 내압 등과 같이 발생 가능한 모든 응력 상태를 고려하기 위하여 45° 회전한 패널 요소에 각각 순수 전단(PS), 전단 및 이축 인장(SBT)응력 또는 전단 및 이축 압축(SBC)응력이 작용하도록 Mohr원 이론을 통해 각각 횡 방향과 종 방향으로의 인장 수직력(f_h)과 압축 수직력(f_v)을 일정 비율로 유지하면서 파괴시까지 실험을 수행하였다. 해석에서도 Fig. 7에서와 같이 실험과 같은 하중 가력 조건을 만족하도록 하중을 가하면서 해석을 수행하였다. 즉, 순

수전단을 받는 패널 실험체에는 수평 인장력과 수직 압축력을 같은 비율, 즉 1 : 1로 가력하여 실험에서와 같이 45° 회전된 요소에 전단응력과 수직응력이 1 : 0인 순수 전단력이 발생토록 하였다. 또한, 수평 인장력과 수직 압축력을 각각 2.33 : 1의 비율로 가력 하여 45° 회전된 요소에 수직응력과 전단 응력이 실험에서 같이 1 : +0.4인 전단 및 이축 인장응력(SBT)이 발생토록 하였다. 이와 유사하게 수평 인장력 대비 수직 압축력을 각각 1 : 2.33의 비율로 가력하여 45° 회전된 요소에 수직응력과 전단응

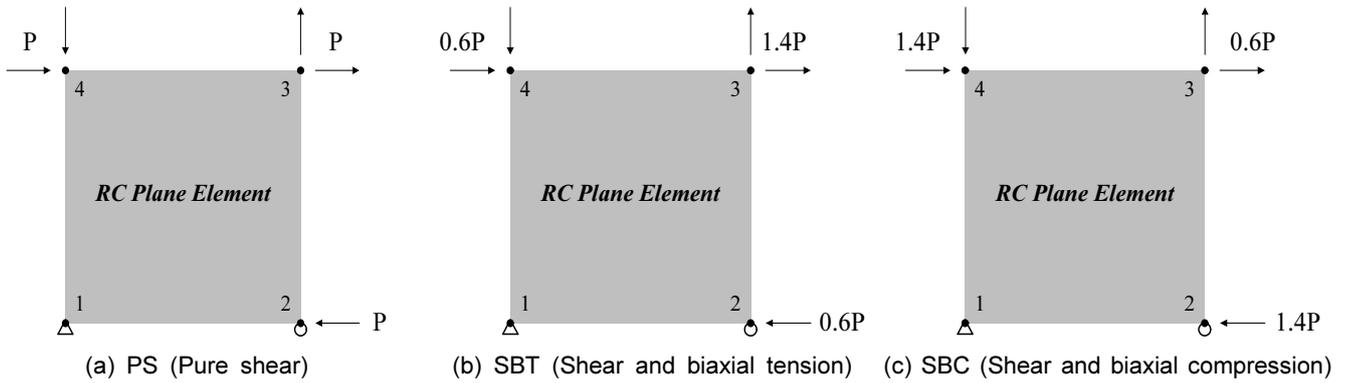


Fig. 7 Finite element mesh and loading condition

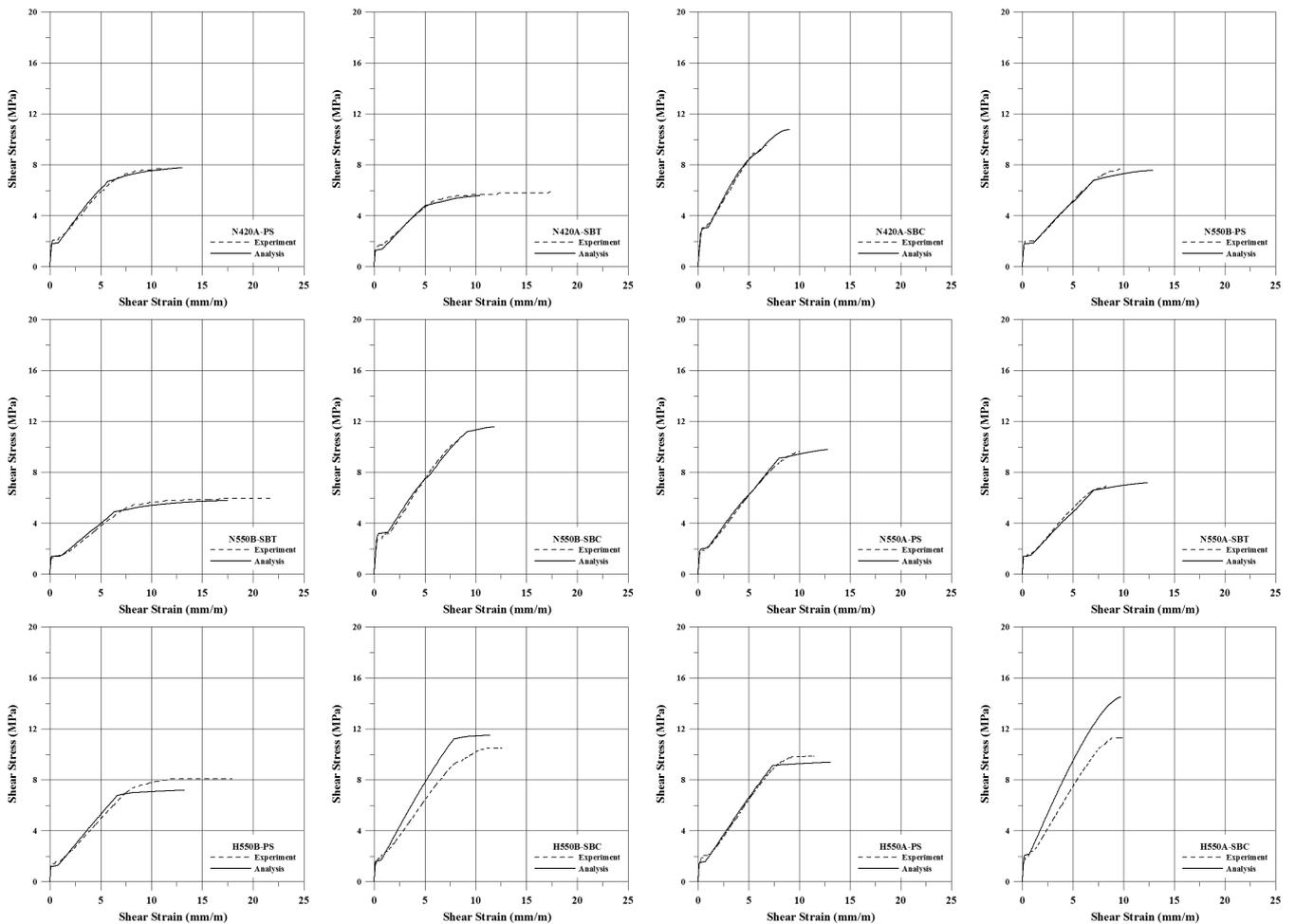


Fig. 8 Comparison of experimental and analytical results for shear stress vs shear strain

Table 2 Summary of experimental and analytical results

	Shear stress						Shear strain at v_u		
	v_{cr} (MPa)			v_u (MPa)			γ_{xy} (mm/m)		
	Exp. (1)	Ana. (2)	(1)/(2)	Exp. (3)	Ana. (4)	(3)/(4)	Exp. (5)	Ana. (6)	(5)/(6)
N420A-PS	2.10	1.80	1.17	7.70	7.80	0.99	10.95	12.97	0.84
N420A-SBT	1.60	1.30	1.23	5.87	5.60	1.05	17.34	10.34	1.68
N420A-SBC	3.07	2.70	1.14	9.56	10.80	0.89	7.09	8.99	0.79
N550B-PS	2.01	1.80	1.12	7.68	7.60	1.01	9.64	12.82	0.75
N550B-SBT	1.29	1.40	0.92	5.97	5.80	1.03	21.65	17.46	1.24
N550B-SBC	2.78	2.90	0.96	10.47	11.60	0.90	8.26	11.78	0.70
N550A-PS	1.88	1.90	0.99	9.64	9.80	0.98	9.98	12.77	0.78
N550A-SBT	1.39	1.40	0.99	6.93	7.20	0.96	8.29	12.33	0.67
H550B-PS	1.29	1.20	1.08	8.08	7.30	1.11	17.94	18.29	0.98
H550B-SBC	1.39	1.50	0.93	10.48	11.50	0.91	12.56	11.36	1.11
H550A-PS	1.58	1.50	1.05	9.84	9.40	1.05	11.43	13.03	0.88
H550A-SBC	1.59	1.90	0.84	11.27	14.50	0.78	10.16	9.65	1.05
Mean			1.03			0.97			0.96
S.T.D			0.12			0.09			0.29
C.O.V			0.12			0.09			0.30

력이 실험에서 같이 1 : -0.4 인 전단 및 이축 압축응력 (SBC)이 발생토록 하였다.

5. 실험 및 해석 결과의 비교·분석

Fig. 8에 총 12개의 검증 대상 철근콘크리트 패널 실험체에 대한 실험 및 해석으로부터의 전단응력-전단변형률 결과를 비교하여 각각 나타내었다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 설계강도 42 MPa를 갖는 실험체(N series)의 경우 수평/수직 철근의 설계 항복강도, 각 방향으로의 철근비 및 하중 재하 조건에 관계없이 균열의 발생 시점과 그 이후의 극한강도와 파괴에 이르기까지의 비탄성영역에 대한 전반적인 거동특성을 비교적 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다. 콘크리트와 수평/수직 철근의 설계 강도가 각각 70 MPa과 550 MPa인 실험체 H550B-SBC와 H550A-SBC 및 일반적으로 전단 및 압축 하중(SBC)을 받는 실험체의 경우에는 초기의 탄성영역 구간과 균열의 발생 시점 등은 전반적으로 잘 예측하고 있으나, 그 이후의 극한강도는 다소 과대평가하고 있는 것으로 나타났다.

실험 결과 양방향 철근 모두 항복하기 전에 콘크리트 압쇄파괴가 일어나 매우 취성적인 파괴 거동을 나타내는 N420A-SBC와 N550B-SBC의 두 실험체를 제외하고는 모두 철근의 항복 이후에 콘크리트 압쇄(crushing)가 발생하였고 최대 전단력 이후 큰 연성파괴 거동을 나타내었으며, 해석 결과도 이러한 결과들에 대해 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다.

Table 2에는 실험과 해석으로부터의 균열 발생 시점과

그 이후의 최대 하중에서의 전단 강도를 각각 비교하여 나타내었으며, 여기에 최대 전단 강도에서의 전단 변형률도 함께 비교하였다. Table 2에서와 같이 해석을 통한 균열 발생 시점에서의 전단 강도 예측은 실험 결과와 비교하여 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 1.03과 12% 정도로서 이 연구에서 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 통한 해석 결과가 실험 결과를 적절히 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 최대 전단 강도의 예측 결과는 실험 결과와 비교하여 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 0.97과 9% 정도로서 해석을 통한 최대 전단 강도 역시 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다. 한편, 최대 전단 강도에 대응되는 전단 변형률에 대한 실험을 통한 예측 결과와 해석으로부터의 결과는 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 0.96과 30% 정도로서 이는 강도 예측 결과에 비해 다소 변동성이 있음을 확인 할 수 있다.

변형률 예측에 있어 일부 실험체의 해석과 실험 결과의 변동성에 대한 보다 명확한 분석을 위해서는 추가적인 실험체의 확보와 연구 수행을 통해 보다 신뢰성 있는 구성관계식의 마련이 필요할 것으로 판단된다. 수행된 연구결과들을 전반적으로 볼 때 저자 등¹⁾에 의해 새로이 수정된 구성관계식을 적용한 해석프로그램을 통한 해석 결과는 강도와 변형률 예측에 있어 비교적 높은 신뢰도를 확보하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

이 연구에서는 고강도 철근이 배근된 철근콘크리트 패

널 실험체에 대하여 균열의 발생에서부터 철근의 항복과 콘크리트의 파쇄에 이르는 전반적인 거동 특성 예측을 위한 해석적 방안을 마련하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 저자 등¹⁾에 의해 수행된 총 12개의 고강도 철근이 배근된 철근콘크리트 패널 실험체를 대상으로 새로이 수정된 구성관계식을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 적용성과 타당성에 대한 검증을 수행하였다. 대상 실험체는 각 방향으로 철근의 항복강도와 철근비, 콘크리트 설계 강도 및 다양한 하중 재하 상태 등을 주요 변수로 실험을 수행하였으며 실제 실험과 같은 조건하에서 해석을 수행하였다. 연구 수행을 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 일부 실험체를 제외하고는 모두 철근의 항복 이후에 콘크리트 압쇄(crushing)가 발생하였고 최대전단력 이후 비교적 큰 연성 파괴 거동을 나타내었으며 해석 결과 역시 일반적으로 균열의 발생과 파괴시 까지의 비탄성영역에 대한 전반적인 거동 특성을 비교적 적절히 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 균열 발생 시점에서의 전단 강도는 실험과 해석으로부터 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 1.03과 12% 정도로서 모든 실험체에 대하여 해석을 통한 균열의 발생을 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 전단 및 압축 하중(SBC)을 받는 실험체에 대한 해석으로부터의 극한 응력은 실험 결과에 비하여 다소 크게 예측하고 있으나, 실험과 해석으로부터의 최대 전단 강도에 대한 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 0.97과 9% 정도로서 극한강도 예측에 대한 해석결과는 비교적 적절하다고 할 수 있다.
- 3) 최대 전단 강도에 대응되는 전단 변형률에 대한 실험과 해석으로부터의 결과는 평균, 표준편차 및 변동계수가 각각 0.96와 30% 정도로서 이는 강도 예측 결과에 비해 다소 변동성이 있으나 전반적으로 볼 때, 이 연구에서 적용한 해석프로그램을 통한 해석 결과는 비교적 높은 신뢰도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 4) 추가적인 실험체의 확보와 함께 추후 연구 수행을 통해 보다 명확한 구성관계식의 마련이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 연구 수행 결과들은 향후, 고강도 철근의 적용과 관련된 설계기준 마련과 함께 원전 격납조물의 시공성과 경제성 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 한국수력원자력(주)의 원자력융합핵심기술개발사업의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임 (과제명 : 원전구조물의 고강도 철근 적용 기술개발, 과

제번호: 2014151010169B).

References

1. Park, H. G., Lee, J. H., Shin, H. M., and Baek, J. W., "Cyclic Loading Test for Shear Strength of Low-rise RC Walls With Grade 550 MPa Bars", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.6, 2013, pp.601-612.
2. Bae, G. M., Proestos, G. T., Lee, S. C., Bentz, E. C., Collins, M. P., and Cho, J. Y., "In-Plane Shear Behavior of Nuclear Power Plant Wall Elements with High-Strength Reinforcing Bars", *Transactions of SMiRT-22*, San Francisco, USA, 2013, pp.1844-1853.
3. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements subjected to Shear", *ACI Structural Journal*, Vol.83, No.2, 1986, pp.219-231.
4. Vecchio, F. J. and Collins, M. P., "Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear using Modified Compression Field Theory", *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.3, 1988, pp.258-268.
5. Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., and Collins, M. P., "Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Shear-Experiments and Constitutive Model", *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.2, 1991, pp.135-146.
6. Kim, T. H. and Shin, H. M., "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.5, No.2, 2001, pp.113-124.
7. Kwak, H. G. and Kim, D. Y., "Cracking Behavior of RC Panels Subject to Biaxial Tensile Stresses", *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.6a, 2004, pp.1223-1233.
8. Lee, J. Y., "Predicting the Nonlinear Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements Subjected to Reversed Cyclic Loading", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.6, No.4, 2002, pp.7-14.
9. Seong, D. J., Kim, T. H., Oh, M. S., and Shin, H. M., "Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake Loads", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.9, No.2, 2011, pp.205-220.
10. Cheon, J. H., Kim, T. H., Lee, B. J., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Circular Hollow Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake", *Magazine of Concrete Research*, Vol.64, No.10, 2012, pp.919-930.
11. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., "Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete", *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo, Vol.39, No.2, 1987, pp.133-194.
12. Vecchio, F. J., Collins, M. P., and Aspiotis, J., "High-Strength Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.4, 1994, pp.423-433.

13. Maekawa, K. and Okamura, H., "The Deformational Behavior and Constitutive Equation of Concrete using Elasto-Plastic Fracture Model", *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo, Vol.37, No.2, 1983, pp.253-328.
14. Bujadham, B. and Maekawa, K., "Qualitative Studies on Mechanism of Stress Transfer across Cracks in Concrete", *Proceedings of Japan Society of Civil Engineering*, Vol.17, No.451, 1992, pp. 265-275.
15. Li, B., Maekawa, K., and Okamura, H., "Contact Density Model for Stress Transfer Across Crack in Concrete", *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo, Vol.40, No.1, 1989, pp.9-52.
16. Shin, H. M., "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Members subjected to Reversed Cyclic In-Plane Loadings", Ph.D. thesis, 1988, University of Tokyo.

요 약 이 연구에서는 고강도 철근이 사용된 철근콘크리트 패널 실험체의 파괴에 이르기까지의 전반적인 거동특성을 합리적으로 예측하기 위한 해석적 방안을 마련하는 것을 목표로 한다. 다양한 하중 조건과 설계 변수하에서 실제 격납구조물 벽체 두께의 1/3 규모를 갖는 총 12개의 철근콘크리트 패널 실험체를 검증 대상으로 선정하여 저자 등에 의해 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 적용하여 해석을 수행하였다. 균열 발생 시점에서의 전단 강도와 최대 전단 강도에 대한 실험과 해석으로부터의 평균과 변동계수는 각각 1.03과 12% 및 0.97과 9% 정도로 예측되었다. 최대 전단 강도에서의 전단 변형률에 대한 실험과 해석으로부터의 결과는 평균과 변동계수가 각각 0.96과 30% 정도로 예측되었다. 결과를 종합해 볼 때, 이 연구에서 새로운 수정한 구성방정식을 적용한 해석프로그램은 그 해석 결과에 비교적 높은 신뢰도를 확보하고 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고강도 철근, 철근콘크리트 패널, 비선형 유한요소해석, RCAHEST