

# 상용프로그램(ABAQUS)을 이용한 원전 격납건물 RC Panel의 극한 인장해석

## Ultimate Tensile Analysis of Reinforced Concrete Containment Panel by using ABAQUS Program

김 남 식\*                      정 대 성\*\*                      김 광 수\*\*\*  
Kim, Nam-Sik                  Jung, Dae-Sung                  Kim, Kwang-Soo

### ABSTRACT

Tension tests of half-thickness concrete containment wall elements and material tests were conducted to derive a crack pattern and constitutive law of concrete. Main test variables are reinforcement ratio and the applied load ratio in two direction, and its effect on the behavior of reinforced concrete panel subjected to biaxial tension is investigated. Based on the test results, analytical expression is derived for the stress-strain relationship of concrete in tension. Ultimate analyses of reinforced concrete panels are carried out by a general purpose structural analysis computer program(ABAQUS), and its results are compared with the test results. The present analysis focuses on the effects of pre-analysis prior to test of specimens. These ultimate tensile analyses as pre-analysis are essential and important to design an effectual scheme of test.

### 1. 서    론

원자력 발전소의 격납건물은 콘크리트 구조물 중에 2축 인장상태의 하중을 받는 대표적인 구조물이다. 원자력 발전소의 격납건물은 지진 등의 원인으로 사고가 발생할 경우 내부 방사성 물질이 외부로 누출되지 않도록 하는 최후 방어벽으로, 이 때 발생하는 극한 내압에 대한 격납건물의 성능 검증 기술 확보는 격납건물의 구조적 안전성 차원에서 필수적이다. 극한 내압에 의해 2축 인장을 받는 격납건물의 거동을 평가하기 위해서는 축소모형 실험 및 해석방법, 파괴모드의 평가 방법, 극한 내압 능력 평가 방법 개발 등이 필요하다. 콘크리트 격납건물에 대한 축소모형 실험은 1970년대부터 폴란드, 캐나다, 영국, 미국, 일본 등 전 세계적으로 연구가 수행되어오고 있으며 국내에서는 최근 관련 분야에 대한 관심이 높아짐에 따라 관련 기술개발에 관한 연구가 활발히 진행중이다.

격납건물의 축소모델에 대한 실험계획을 수립하기 위해서는 먼저 구조 부재 즉, 평면응력 상태의 콘크리트 쉘부재의 거동 실험이 수행되어야 한다. 지금까지, 평면응력 상태에서의 2축 실험은 주로 압축-압축,<sup>1)4)</sup> 인장-압축, 전단-압축, 전단-전단에 대하여 이루어졌으나, 인장-인장의 2축 상태에 대한 실험은 거의 없는 실정이다. 이에 대한 연구는 1979년 캐나다 Alberta 대학을 시초로 미국 EPRI(1984) 등에서 수행한 바 있다.<sup>5)6)</sup>

\* 현대건설(주) 기술연구소 책임연구원

\*\* 명지대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 현대건설(주) 기술연구원 선임연구원

본 연구에서는 국내 원자력발전소의 격납건물에 대한 균열발생 거동 분석, 파괴기준 마련, 설계 및 해석 프로그램 개발 등을 위한 기초 연구로 콘크리트 패널에 대한 1축 인장과 2축 인장에 대한 실험연구를 수행하였다. 실험과 관련한 연구 내용에 대해서는 기 발표된 내용<sup>8)-10)</sup>을 참조하기 바라며, 본 논문에서는 2축 인장상태를 갖는 콘크리트 패널의 극한해석의 내용을 다루었다. 평면응력 상태의 콘크리트 부재에 대해서 인장-인장을 받는 실험은 구현하기가 어려울 뿐만 아니라 실제 실험시 그 거동을 예상하기가 상당히 어렵다. 따라서, 실험체 제작 단계에서부터 설계된 실험체의 신뢰성 확보 및 해석적 검토 차원에서 실험결과를 미리 예상해 볼 수 있는 예비해석(pre-analysis)이 필요하다.

본 논문에서는 실험에 앞서 재료실험의 결과만을 가지고 실험 결과를 모르는 상태에서 예비해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. 또한, 상용 프로그램을 사용하여 2축 인장상태에서 콘크리트 패널의 파괴 거동을 평가하였다. 철근콘크리트 패널의 실험은 콘크리트 압축강도에 따른 균열거동 실험과 철근비 및 1축, 2축 인장 하중비에 따른 구성방정식 도출 실험으로 나누어 수행되었으나 해석 결과는 2축 인장실험 결과만을 비교하였다.

## 2. 철근콘크리트 패널의 2축 인장실험

### 2.1 실험체 설계

철근 콘크리트 패널에 대한 2축 인장 균열거동 실험체는 실제 콘크리트 격납건물 벽체의 거동을 최대한 모사할 수 있도록 가급적 1/2 축소 모형이 아닌 실구조물 두께의 절반에 해당하는 half-thickness model로 설계하였다(Fig. 1). 일반적으로 국내 원전격납건물의 설계기준강도가 40MPa인데 반하여, 실제 발현되는 강도는 60MPa까지 조사되었기에 설계기준강도를 실험변수로 채택하여 각 강도별 각각 2개씩 제작하였다.

실제로 국내의 원전 격납건물은 모두 프리스트레스트 콘크리트 구조로 설계 및 시공되었다. 따라서 실험체를 제작할 때 텐던 덕트를 매설하여 실구조물과 유사한 형태를 가지도록 하였다. 국내에서 시공된 프리스트레스트 콘크리트 격납건물은 대부분 비부착식 텐던을 적용하였으며, 취약부인 중간 벽체에서 프리스트레싱으로 인하여 도입되는 압축력비는 원환(H:hoop) 방향 대 자오선(M:meridional) 방향으로 약 2:1 정도이다. 과도한 내압이 작용하게 되면 프리스트레싱으로 도입된 압축력은 점점 이완되어 영에 이르게 되며, 그 시점부터 격납건물에 도입된 프리스트레싱의 효과는 소멸된다. 비로소 덕트 내의 텐던에 추가적인 응력이 작용하게 되더라도 격납건물은 철근콘크리트 구조물의 거동을 하게 되는 것이다. 따라서, 본 연구에서 수행한 실험은 프리스트레싱 효과가 사라진 시점 이후의 거동에 해당한다. Fig. 2는 실험체의 균열양상 사진이다.

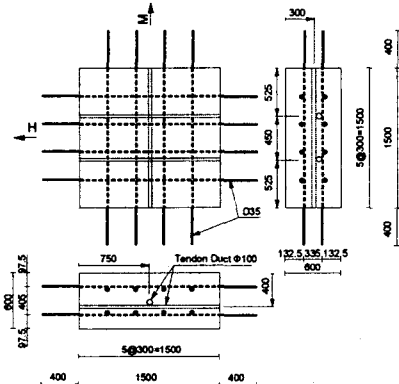


Fig. 1 Configuration and dimension of specimen

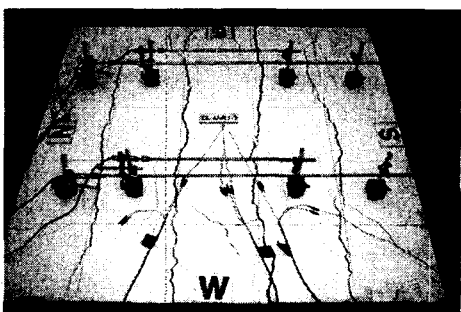


Fig. 2 Crack pattern(typical specimen)

구성방정식 도출 실험체의 경우 주요 실험변수는 철근비인데, 본 연구와 원전 격납건물의 연계성을 고려하여 원전 격납건물의 현황 조사로부터 선정하였다.

실험체는 콘크리트의 인장강성 효과를 확인할 수 있도록 철근이 항복하기 전에 실험체에서 먼저 균열이 발생하도록 설계하여야 한다. 따라서, 기존의 격납건물 중 낮은 철근비를 기준으로 실험체를 제작할 경우 철근이 먼저 항복하는 결과를 초래할 수 있기 때문에 본 실험체는 철근비를 0.009, 0.0135, 0.0188의 세 경우로 설계하여 콘크리트 패널의 인장 강성 효과를 파악할 수 있도록 하였다. 한편 실험의 편의를 기하고 실험 외적인 요인(철근 직경, 철근 덮개 등)을 배제하기 위하여 동일한 직경의 철근을 사용하여 콘크리트의 단면을 조정함으로써 각 실험체가 철근비를 변수로 갖도록 하였다. 단, 철근비가 0.0188인 실험체는 다른 철근비의 실험체와 같이 8개의 철근을 사용할 때 실험체의 형상이 정육면체에 가까워지므로 철근 수를 10개로 늘려 판의 형태를 유지하도록 하였다. Fig. 3은 각각의 실험체에 대한 설계 도면이다.

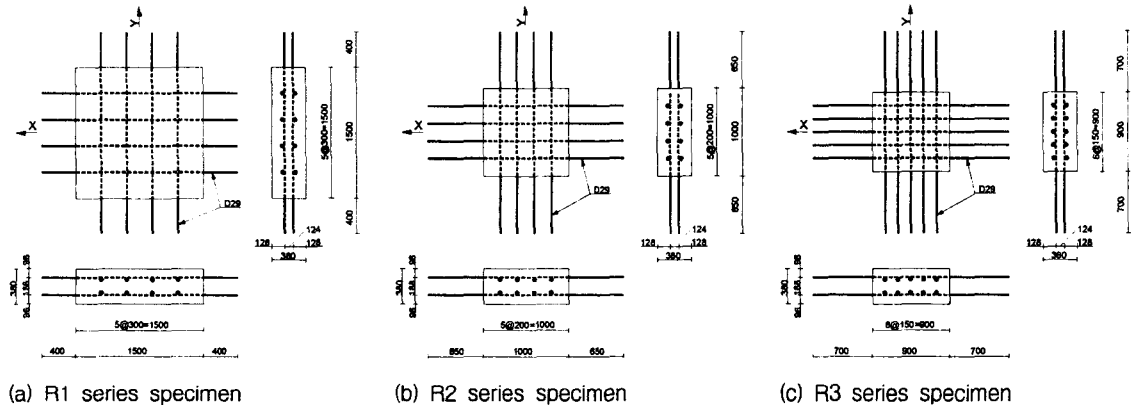


Fig. 3 Specimen configurations and dimensions

Table 1과 Fig. 4에는 실험 변수에 따른 각 실험체의 설계조건과 실험체에 부여된 명칭을 설명하였다.

Table 1 Specimen details with regards to reinforcement ratio

Test category	Compressive strength [MPa]	Reinforcement Ratio	Amount (SD40)	Dimension of Specimen [mm]	Cover Depth [mm]	Applied load (H:M)	Loading scheme	c/db	Spacing [mm]
Crack Pattern (CP)	40(S40)	0.0085	S-D35	1500×1500×600	80	Bi-axial(B); 1:0.5	Monotonically static	2.3	300
	60(S60)								
Constitutive Law (CL)	40(S40)	R1=0.0090	8-D29	1500×1500×380	80	Bi-axial(B); 1:1	Monotonically static	2.8	300
		R2=0.0135	8-D29	1000×1000×380	80	Bi-axial(B); 1:0.58			
		R3=0.0188	10-D29	900×900×380	80	Bi-axial(B); 1:0.27			

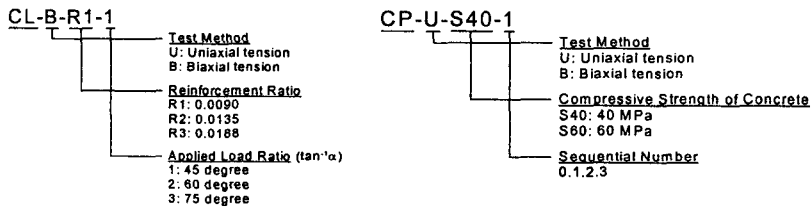


Fig. 4 Specimen Identifications

## 2.2 가력 및 계측 시스템

가력 시스템은 Fig. 5와 같이 실험체의 철근을 길게 설치하여 외부철근을 잡아당겨 2축 인장 상태를 구현하였으며 각 방향의 로드셀로부터 도입하중을 측정하여 2축 인장상태를 확인하였다. 또한, 하중은 원환방향을 기준으로 하여 평균 60 kN/min의 속도로 재하였다. 육안으로 확인한 균열조사 이외에 로드셀, 변형률 게이지, LVDT 등을 자동계측시스템을 이용하여 약 5초 간격으로 측정하였다. Fig. 6은 변형률 게이지 부착 위치를 보여주고 있다.

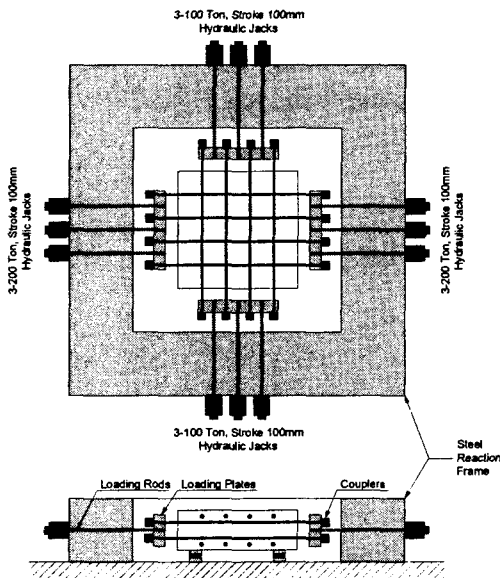


Fig. 5 Test setup

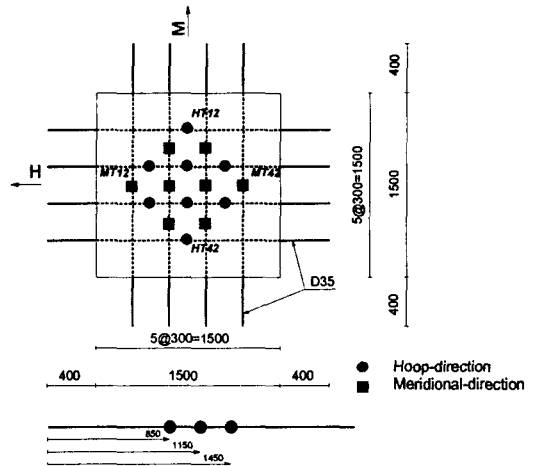


Fig. 6 Location of conventional strain gauges

## 2.3 재료 특성

실험체별로 제작된 3개 이상의 원형공시체와 SD40의 D35철근 및 D29철근을 샘플링하여 재료실험을 수행하고 평균값을 구하였다. 각 재료 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Material properties

Test category	Steel, SD40 [MPa]				Concrete, [MPa]				
	Specimen	$f_y$	$f_{max}$	$E_s$	Specimen	$f_{ck}$	$E_c$	$f_{sp}$	$f_{cr}$
Crack Pattern (CP)	D35	410	653	205,744	CP-S40	41.6	29,147	3.48	2.13
					CP-S60	58.0	29,235	5.00	2.51
Constitutive Law (CL)	D29	404	687	194,413	CL-S40	41.9	27,447	3.67	2.14

## 3. RC Panel의 극한 인장해석

콘크리트 패널의 극한 인장해석은 재료실험 결과와 기존의 재료 모델을 이용하여 예비해석(pre-analysis)의 의미로 수행하였고, 해석은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

### 3.1 해석 모델

각 실험체는 원환방향과 자오선방향의 철근의 위치를 고려하여 Fig. 7과 같이 두께 방향으로 multi-layer 를 갖는 셸요소로 모델링 하였고 콘크리트는 각 방향의 철근이 전체 폭에 균일하게 분포한 것으로 하는 smeared crack model을 사용하였다. 해석은 변위제어에 의한 비선형해석을 수행하였다. 그리고 균열거동 실험체의 경우는 텐던 덕트로 인한 단면 손실을 고려하여 모델링 하였다.

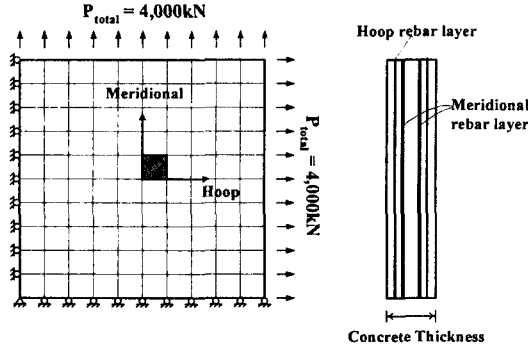


Fig. 7 Finite Element Model

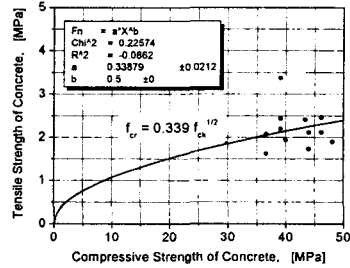


Fig.8 Relationship between cracking stress and compressive strength of concrete

콘크리트와 철근에 대한 재료모델은 기본적으로 재료실험의 결과를 그대로 적용하였으며 콘크리트의 균열 강도는 압축강도에 의한 식(1)에 의해 결정하였다.

$$f_{cr} = 0.33\sqrt{f_{ck}} \quad [MPa] \quad (1)$$

참고로, Fig. 8은 실험으로부터 얻은 콘크리트 압축강도와 균열응력과의 관계를 그래프로 그린 것이다. 이로부터 콘크리트 압축강도 제곱근과의 관계를 회귀 분석하여 식 (2)를 얻었으며 해석에 사용한 균열강도 식 (1)과 거의 일치함을 알 수 있다.

$$f_{cr} = 0.339\sqrt{f_{ck}} \quad [MPa] \quad (2)$$

콘크리트의 인장 응력-변형을 관계곡선 즉, tension stiffening model은 기존의 연구자들에 의해 여러 가지 모델이 제시되어 있으나, 본 해석에서는 Tamai(1998)에 의해 처음 제안되었으며,<sup>7)</sup> Belarbi에 의하여 그 효용성이 검증된 바 있는 식 (3)의 모델을 사용하였다.<sup>1,2,6)</sup>

$$f_t = f_{cr} \left( \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^c, \quad (c=0.4) \quad (3)$$

위의 tension stiffening model을 적용하기 위하여 본 실험에서는 변형을 게이지의 응력-변형을 결과로부터 균열발생 후 하강 곡선부를 직선으로 표현한 결과가 각각의 그래프에 평균을 취한 곡선과 유사한 결과를 보임을 확인하였다(Fig. 9). Fig. 10은 LVDT로부터 얻은 변형률을 이용하여 그린 것으로 Fig. 12에서 얻은 모델 식과 각 그래프의 평균을 취한 곡선을 동시에 제시하였다. 그리고 이 실험적 응력-변형을 곡선은 다음과 같은 수학적 모델로 회귀분석이 가능하였다.

$$f_t = f_{cr} \left( \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^c = f_{cr} \left( \frac{113}{\epsilon_t} \right)^{0.4} \quad (4)$$

실험 결과를 종합해볼 때 균열발생 후 변형률게이지의 값은 LVDT에 비하여 패널 실험체의 국부적인 변형률을 반영하므로 Fig. 10에 제시한 모델이 균열발생 후 콘크리트의 하강곡선부를 보다 현실적으로 반영하는 것이라고 판단된다. 최종적으로 극한 인장해석에 사용한 각 재료모델은 Fig. 11과 같다.

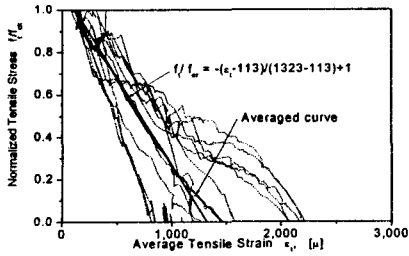


Fig. 9 Average stress-strain relationship of concrete after crack occurrence (Using the data measured from strain gauge)

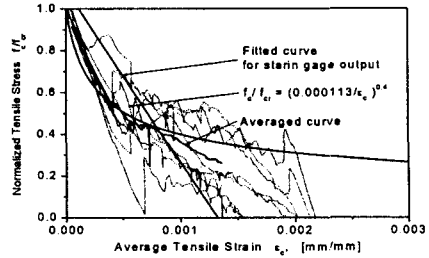
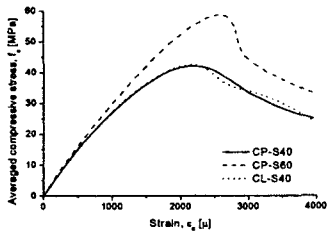
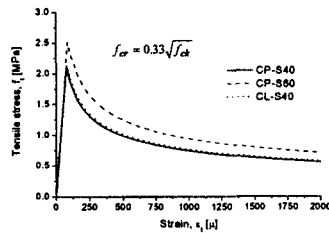


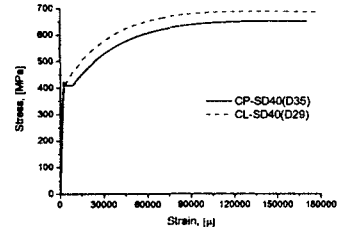
Fig. 10 Average stress-strain relationship of concrete after crack occurrence (Using the data measured from LVDT)



(a) Concrete model - compression



(a) Concrete model - tension



(c) Reinforcement model

Fig. 11 Material models for F.E. analysis

#### 4. 결과 비교

Fig. 12와 Fig. 13은 균열거동 실험체에 대하여 극한해석 결과와 실험결과를 비교하였으며 실험결과는 각 실험체별로 대표적인 변형률 결과만을 선택하여 도입하중을 철근의 단면적으로 나눈 응력과 비교하였다. S40 실험체에 대해서는 원환방향과 자오선 방향에 대한 초기 균열응력이 해석결과와 실험결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 반면에 실험 결과와 달리 S60 실험체에서는 해석결과가 더 크게 나타났다. 이는 해석시 콘크리트의 tension stiffening model의 균열응력을 압축강도에 관한 식 (1)을 사용하였기 때문에 상대적으로 S40 실험체보다 큰 결과를 보였다. 해석결과 항복응력이 실험결과보다는 크게 나타났는데 전체적으로 콘크리트가 균열이후에도 어느 정도 강성을 갖는 tension stiffening 효과를 보여주고 있다.

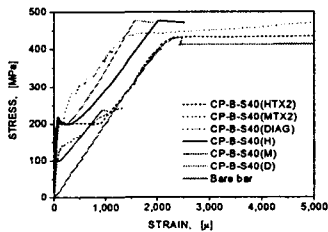


Fig. 12 CP-B-S40-1

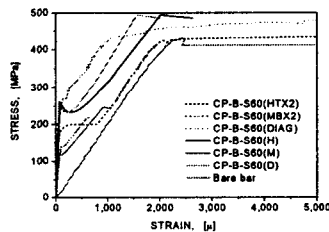
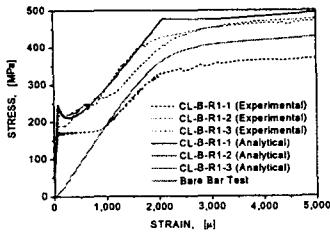


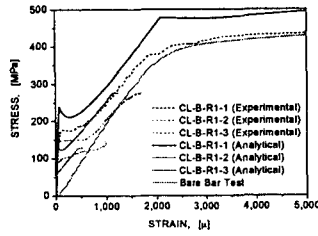
Fig. 13 CP-B-S60-1

다음의 Fig. 14 - Fig. 16은 구성방정식 도출 실험체별로 원환(H), 자오선(M) 그리고 대각(D)방향에 대하여 해석결과와 실험에서 얻어진 평균 응력-변형률 관계곡선을 비교하였다. 해석결과는 실험결과와 약간의 차

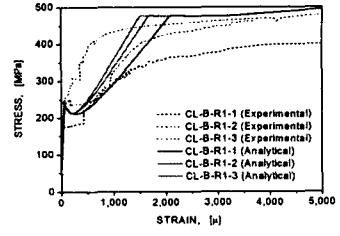
이가 있으나 예비해석의 결과로 볼 때 충분히 실험결과를 예상해볼 수 있는 정도의 결과라 사료된다.



(a) Hoop stress-strain curve

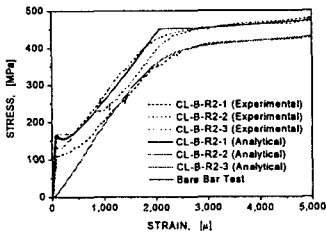


(b) Meridional stress-strain curve

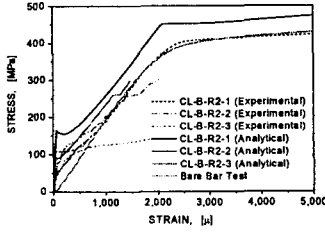


(c) Diagonal stress-strain curve

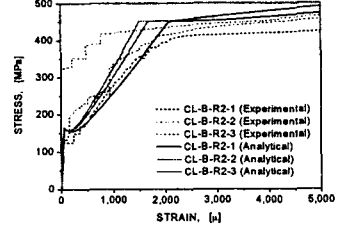
Fig. 14 CL-B-R1 series



(a) Hoop stress-strain curve

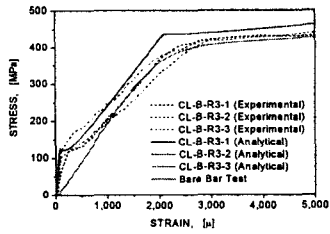


(a) Meridional stress-strain curve

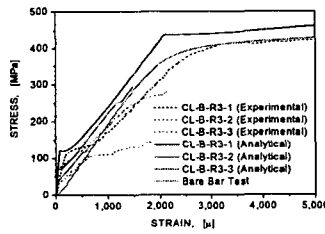


(a) Diagonal stress-strain curve

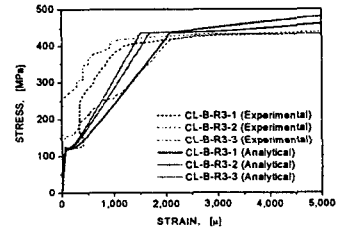
Fig. 15 CL-B-R2 series



(a) Hoop stress-strain curve



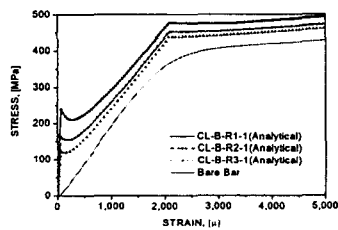
(a) Meridional stress-strain curve



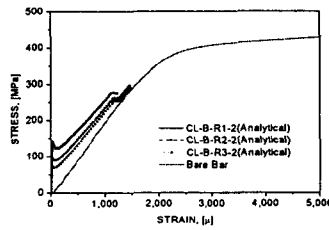
(a) Diagonal stress-strain curve

Fig. 16 CL-B-R3 series

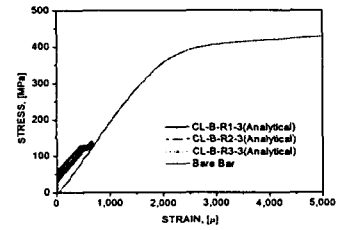
Fig. 17은 구성방정식 도출 실험체에 대하여 동일한 하중 재하시 철근비에 따른 응력-변형률 관계곡선이 다. 철근비가 증가할수록 tension stiffening effect가 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 철근비가 클 경우 전체적인 패널의 거동은 철근에 지배를 받는 것을 알 수 있다. 그리고 원환방향의 결과는 하중비에 관계없이 철근비에 따른 결과가 Fig. 17-(a)의 자오선방향의 결과와 동일하여 생각하였다.



(a) Applied load (H:M=1:1)



(b) Applied load (H:M=1:0.58)



(c) Applied load (H:M=1:0.27)

Fig. 17 Meridional stress-strain curve (CL-B series)

## 4. 결 론

원자력 발전소 격납건물과 같은 인장을 받는 셸구조의 인장파괴거동에 관한 실험과 해석을 위한 연구를 수행하였다. 실험결과에 관한 자세한 내용은 기 발표된 문헌<sup>8)-10)</sup>에 언급되어 있으며, 본 연구에서는 2축 인장을 받는 콘크리트 패널에 대한 극한 인장해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 다음은 본 연구 결과의 주요 내용을 요약 정리한 것이다.

- 1) 해석적으로 균열의 발생시점 및 *tension stiffening* 효과를 확인할 수 있었으며 실험결과 보다는 균열응력과 항복응력이 큰 결과를 보였다.
- 2) 극한 인장해석 결과 철근비가 클수록 전체 거동이 철근의 지배를 받으며 *tension stiffening* 효과가 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 균열거동 실험체 해석결과를 실험결과와 비교해 보면 S60강도가 S40강도 보다 더 큰 차이를 보였으며 해석시 적용된 모델에 있어 고강도 콘크리트에 대한 해석모델의 수정·적용이 요구된다.
- 4) 재료실험 결과만을 이용한 예비해석으로도 실제 실험의 예상결과와 비슷한 결과를 도출할 수 있었으며 합리적이고 현실적인 실험을 설계하기 위해서는 예비해석이 필수적이라 하겠다.

### 감사의 글

이 연구에서 수행한 RC 패널실험은 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 연구비 지원을 한 관계기관에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. N.J. Stevens, S.M. Uzumeri, M.P. Collins, G.T. Will, "Constitutive Model for Reinforced Concrete Finite Element Analysis", *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp. 49-59.
2. A. Balarbi and T.T.C. Hsu, "Constitutive Law of Concrete in Tension and Reinforcing Bar Stiffened by Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, 1994, pp. 465-473.
3. G. Russo and F. Romano, "Cracking Response of RC Members to Uniaxial Tension", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1172-1191.
4. H.C. Chan, Y.K. Cheung, Y.P. Huang, "Crack Analysis of Reinforced Concrete Tension Members", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 8, 1992, pp. 2118-2132.
5. G.E. Sliter, *Concrete Containment Structural Element Tests*, EPRI NP-3774, Vols 1-2, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.
6. Abdeldjelil Belarbi, *Stress-Strain Relationships of Reinforced Concrete in Biaxial Tension-Compression*, Ph. D., University of Houston, Texas, 1991.
7. S. Tamai, H. Shima, J. Izumo, and H. Okamura, "Average Stress-Strain Relationship in Post Yield Range of Steel Bar in Concrete", *Concrete Library of JSCE*, No. 11, 1988, pp. 117-129.
8. 정원기 외, 격납건물 안전성 향상 기술개발 (세부과제: 프리스트레스트 콘크리트 격납건물 부재실험), 1차년도 최종보고서, KAERI, CM-420, 2000.
9. 조재열, 김남식, 조남소, 최인길, "원자력 발전소 격납건물 벽체의 균열거동, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.1, 2003, pp.60-68.
10. 조재열, 김남식, 조남소, 전영선, "2축 인장을 받는 철근 콘크리트의 구성방정식, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.1, 2003, pp.69-77.