

2축 인장을 받는 철근콘크리트 패널의 균열 거동

Cracking Behavior of RC Panel Subjected to Biaxial Tension

조재열* 조남소** 구은숙*** 김남식**** 전영선*****
Cho, Jae Yeol Cho, Nam So Koo, Eun Sook Kim, Nam Sik Jeon, Young Sun

ABSTRACT

Tension tests of six half-thickness concrete containment wall elements were conducted as part of a Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) program. The aim of the KAERI test program is providing a test-verified analytical method for estimating capacities of concrete reactor containment buildings under internal overpressurization from postulated degraded core accidents. The data from the tests reported herein should be useful for benchmarking method that requires modeling of material behavior including concrete cracking and reinforcement/concrete interaction exhibited by the test. Major test variable is the compressive strength of concrete and its effect on the behavior of prestressed concrete panel subjected to biaxial tension.

1. 서론

우리 나라는 원자력발전소의 시공 및 운영 면에서 선진국 대열에 있음에도 불구하고 원자력 격납건물의 구조적 측면에 대한 실험 연구가 거의 없는 실정이다. 그러나, 이러한 연구는 사고 시 격납건물의 거동을 예측하는데 기초 자료로 이용될 뿐만 아니라, 국내의 원자력 격납건물 해석 프로그램 개발을 위한 입력자료 마련 그리고 해석결과와 검증에도 활용할 수 있는 중요한 결과로 기대된다. 이러한 격납건물의 성능평가 기술은 국부적, 개별적 요소 실험 연구를 기초로 하여 실제 격납건물의 축소 모델을 대상으로 한 본격적인 연구개발이 진행되어야 할 것으로 사료된다. 이러한 연구 개발 사업은 단편적인 기술 도입으로 인한 경제적, 기술적 손실을 막아주어 장기적인 측면에서 경제적인 것으로 판단된다.

따라서, 이번 연구에서는 우리 나라 원전 격납건물을 대상 구조물로 하여 사고 시 가장 위험에 놓이게 되는 벽체의 일부를 모사한 패널부재를 제작하였으며, 1축 및 2축 인장 시험을 통하여 균열발생 거동을 분석하고, 파괴기준을 마련하며, 콘크리트 및 철근의 응력-변형을 관계를 도출하고자 하였다. 우선 이 논문에서는 2축인장을 받는 PSC 패널부재의 균열거동 분석을 중점적으로 다루고자 한다.

* 정희원, 서울대학교 공학연구소 특별연구원 · 공학박사

** 정희원, 현대건설기술연구소 선임연구원 · 공학석사

*** 정희원, 현대건설기술연구소 주임연구원 · 공학석사

**** 정희원, 현대건설기술연구소 책임연구원 · 공학박사

***** 정희원, 한국원자력연구소 책임연구원 · 공학박사

2. 철근콘크리트 패널의 2축 인장실험

2.1 실험체 설계

본 실험연구에서는 실제 콘크리트 격납건물을 모사한 총 12개의 패널 실험체를 제작하여 그중 6개의 실험 결과를 토대로 하여 변수로 설정한 콘크리트 압축강도의 영향을 살펴보았다. 실험체의 두께는 실제 원전 격납건물의 벽체 두께의 절반에 해당하는데, 가급적 1/2 축소 모형이 아닌 실구조물 두께의 절반에 해당하는 부분을 떼어 실험체화한 half-thickness model을 채택하여 보다 합리적이고 실질적으로 격납 구조물의 거동을 분석하고자 하였다. (그림 1 참조)

실제로 우리나라 원전 격납건물은 모두 프리스트레스트 콘크리트 구조로 설계 및 시공되었다. 따라서 실험체를 제작할 때 텐던 덕트를 매설하여 실구조물과 유사한 형태를 가지도록 하였다. 우리나라에서 시공되고 있는 프리스트레스트 콘크리트 격납건물은 대부분 비부착식 텐던을 적용하고 있으며, 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 덕트내의 텐던에 추가적인 응력이 작용하게 되더라도 격납건물은 철근콘크리트 구조물의 거동을 하게 되는 것이다. 따라서, 본 연구에서 수행한 실험은 프리스트레싱 효과가 사라진 시점 이후의 거동에 해당한다.

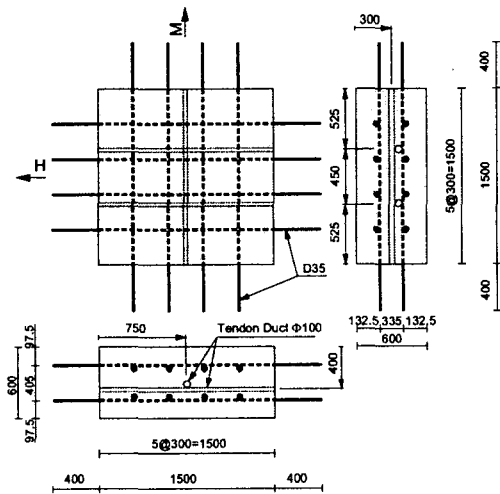


그림 1 실험체 제원

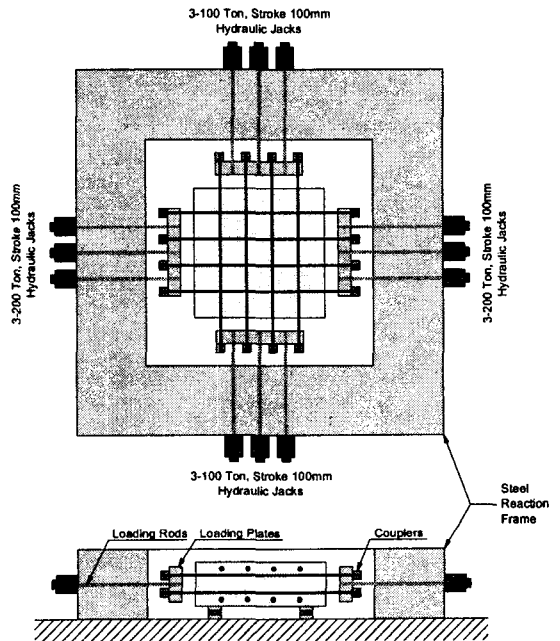


그림 2 가력시스템

앞서 기술한 바와 같이 결과 분석에 이용된 6개의 실험체는 실험변수인 콘크리트 압축강도에 따라 3개씩 두 그룹으로 나뉘며, 각 강도별로 1개는 1축인장 실험용 2개는 2축인장 실험용으로 사용되었다. 일반적으로 원전격납건물의 설계기준강도는 40MPa인데 반하여, 실제 발현되는 강도는 60MPa 정도로 조사되었기에, 두 강도를 실험변수로 채택하였다. 다음 그림 3은 실험체명에 대한 설명이다.

2.2 가력 및 계측 시스템

균열 거동 파악을 위한 실험에서는 원전 격납 건물의 실제의 상황을 반드시 재현하여야 하는데, 그러기 위해서는 2축으로의 가력이 필수적이며 상대적인 평가를 위해서 1축의 가력 상태 역시 포함되어야 한다. 또한 실험의 대상으로 삼는 원전 격납 건물의 부위는 하중의 비가 자오선 방향(M)으로 하중이 '1'일 때 원환방향(H)으로 '2'의 하중이 작용하는 중간부에 해당한다. 따라서 균열 거동 실험에서는 이러한 조건, 즉 2축 인장 상태를 구현하며 2:1의 하중 재하비를 갖고 원환방향을 기준으로 하여 평균 60kN/min의 속도로 재하하였다. 육안으로 확인한 균열조사 이외에 로드셀, 변형률게이지, LVDT 등을 자동계측시스템을 이용하여 약 5초 간격으로 측정하였다. 그림 4와 5는 각각 변형률 게이지 부착 위치와 LVDT의 설치방법을 보여주고 있다.

2.2 재료 특성

실험체별로 콘크리트 원형공시체를 3개 이상씩 제작하였으며, 사용된 SD40의 D35철근을 샘플링하여 재료실험을 수행한 결과 S40시험체와 S60시험체 평균압축강도는 각각 42MPa과 58MPa로써 양호한 결과를 보였으며, 철근도 평균 410MPa의 항복강도와 206,000MPa의 탄성계수의 결과를 나타냈다.

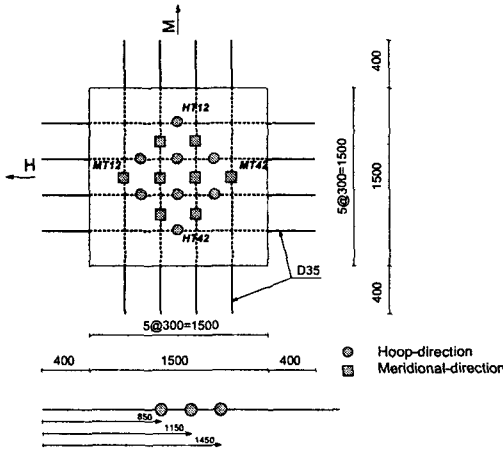


그림 7 변형률게이지 부착 위치

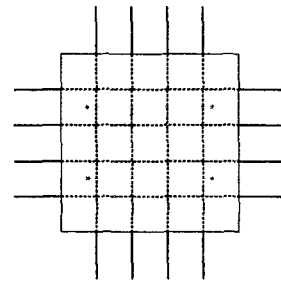


그림 8 LVDT 설치 위치

3. 실험결과

앞서 기술한 바와 같이 콘크리트 압축강도에 따라 3개씩의 실험체를 대상으로 실험을 수행하였는데, 이때 2축 인장실험은 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 2개의 실험체를 대상으로 하였다. 이 절에서는 결과분석 방법에 대하여 간략히 서술하기로 한다. 그림6은 6개의 실험체 중 대표적인 3개의 균열도로서 실험 종료후 관측된 것으로 파괴의 원인이 되는 초기 관통균열 및 균열의 진전상황을 6면에서 바라본 것이다.

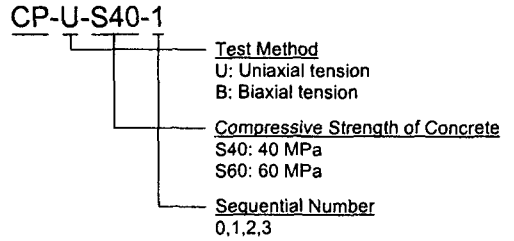


그림 3 시험체명 설명

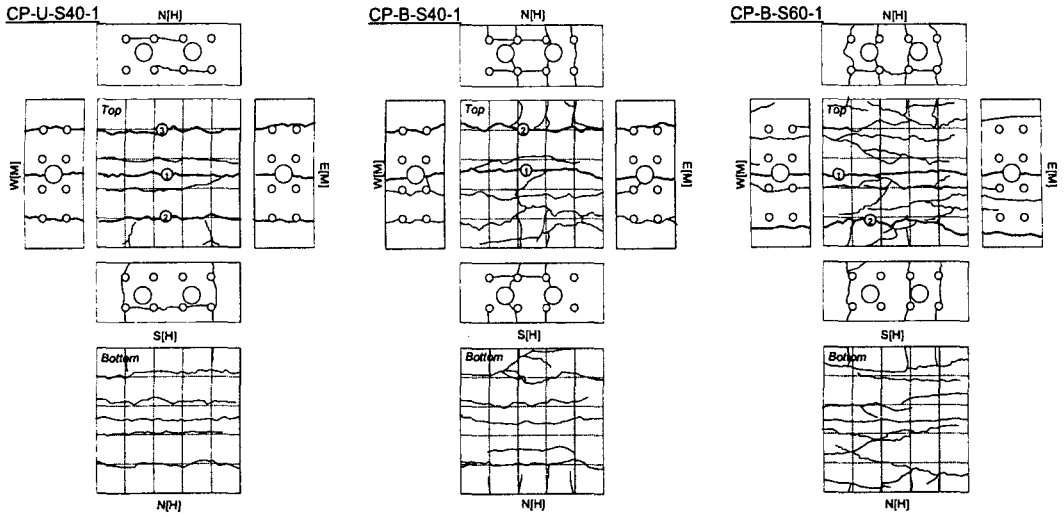


그림 6 대표적인 균열양상

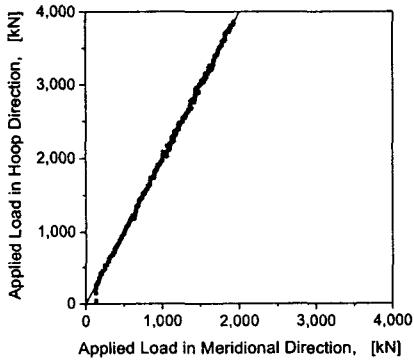


그림 7 원환방향 및 자오선 방향으로 도입된 하중 (H:M=2:1) (CP-B-S60-1)

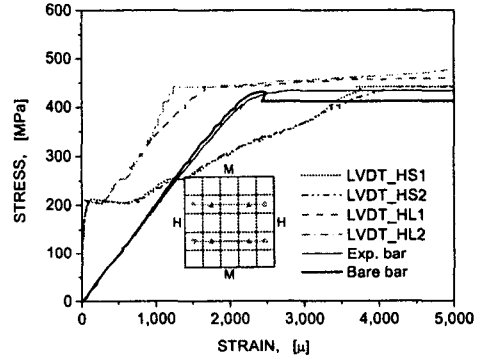


그림 8 원환방향 LVDT로부터 얻은 평균 응력-변형률 곡선 (CP-B-S40-2)

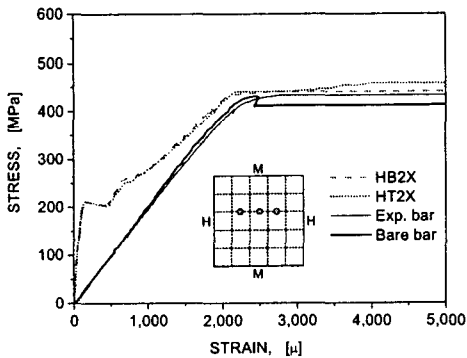


그림 9 원환방향 2mm 철근으로부터 얻은 응력-변형률 곡선 (CP-B-S40-2)

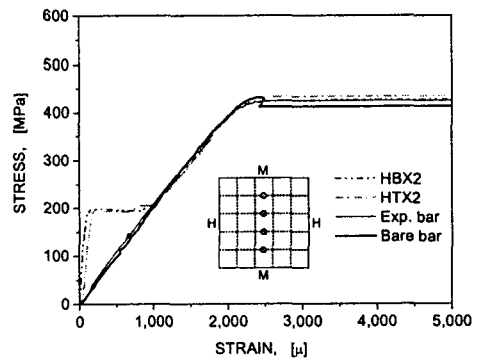


그림 10 원환방향 중앙위치 철근으로부터 얻은 응력-변형률 곡선 (CP-U-S40-1)

그림 7은 2축 인장을 가한 시험체의 2방향 하중 이력을 보여주는 그래프인데, 하중가력의 정확성을 보여주고 있다. 그림 8은 패널 표면에 원환방향으로 부착한 LVDT로부터 측정된 평균 응력-변형률 곡선으로써 균열의 양상에 따라 상대적으로 게이지길이(gage length)가 짧은 LVDT_HS1과 LVDT_HS2의 변형률이 LVDT_HL1과 LVDT_HL2의 변형률 보다 큰 값을 나타낸다. 이는 측정영역내의 균열의 개수 및 폭과 밀접한 관계를 갖고 있다. 또한 곡선의 기울기가 급격히 변하는 것으로부터 자오선 방향으로 균열이 발생했음을 알 수 있다. 또한 재료실험으로부터 얻은 철근의 응력-변형률 곡선(Bare bar)과 패널 밖으로 노출된 철근에 부착한 게이지로부터 얻은 응력-변형률 곡선(Exp. bar)은 거의 같은 거동을 보이고 있으나, LVDT로부터 얻은 곡선과는 상당한 차이를 보이고 있는데, 이것은 tension stiffening 효과와 평균변형률 개념이 반영되었기 때문이다.

그림 9는 원환방향으로 배근된 철근 중 하나의 철근에 500mm 간격으로 부착된 게이지로부터 얻은 응력-변형률 곡선의 평균을 취하여 두 층으로 배근된 철근에 대하여 각각 그래프로 나타낸 것인데, 두 곡선이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이로부터 실험체의 거동이 상하면에서 대칭적으로 진행되었음을 알 수 있다.

그림 10은 원환방향으로 시험체의 중앙에 각기 다른 철근에 부착한 게이지로부터 얻은 응력-변형률 곡선의 평균을 취한 것인데, 다른 그래프들과는 달리 첫 균열발생이후 bare bar의 거동과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 첫 균열이 발생한 텐던 덕트가 매설된 위치와 게이지의 부착 위치가 일치하기 때문에 철근 자체의 재료 특성을 그대로 반영하였기 때문이다.

4. 결과분석

표 1은 실험결과로부터 얻은 콘크리트의 균열하중을 비교한 것이다. 여기서, 철근콘크리트 부재가 인장을 받을 때, 인장력(P)은 콘크리트(P_c)와 철근(P_s)의 강성비율에 따라 분포된다는 기존의 이론에 따라 변형률(ϵ)로부터 전체하중은 다음과 같이 계산한다.

$$P = P_c + P_s = (E_c A_c + n E_s A_g) \epsilon$$

$$= E_c A_g (1 - \rho + n \rho) \epsilon = (EA)_{uc} \epsilon \quad (1)$$

여기서, E_c 는 콘크리트의 탄성계수, A_c 는 콘크리트의 단면적, A_g 는 전체단면적, n 은 콘크리트와 철근의 탄성계수비, ρ 는 철근비이며, $(EA)_{uc}$ 는 비균열의 EA이다. 이때 콘크리트와 철근에 의해 전달되는 하중은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_c = \left(\frac{1}{1+n\rho} \right) P, \quad P_s = \left(\frac{n\rho}{1+n\rho} \right) P \quad (2)$$

한편, 균열발생 하중은 지금까지 살펴본 다양한 그래프로부터 기울기가 급격히 변하는 시점의 하중을 취한 것인데, 모든 시험체에서 이러한 현상은 분명히 나타나므로 균열하중을 얻는데 있어 충분한 객관성이 있었다고 사료된다. 그리고 균열발생시 콘크리트 응력은 콘크리트의 가장 위험단면에 계산하였는데 즉, 덕트로 인한 단면 손실을 고려하였다.

표 1에서 보는 바와 같이 콘크리트의 설계기준강도가 40MPa인 경우와 60MPa인 경우 균열발생하중을 비교하면, 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않다. 그러나, 재료 실험으로부터 얻은 콘크리트 압축강도가 CP-B-S60-1과 CP-B-S60-2에서 60MPa에 미치지 못하는 것으로 나타나 점을 고려할 때, 콘크리트의 압축강도가 60MPa인 경우 40MPa에 비하여 다소 높은 균열하중을 보일 것으로 사료된다. 그러나, 전체적인 양상을 볼 때 이와 같은 고강도 콘크리트의 경우 압축강도가 균열하중에 미치는 영향은 상당히 미미한 것으로 나타났다. 한편, 할렬인장강도와 비교할 때 1축 및 2축 인장시 균열발생 시점에서 콘크리트의 응력은 약 50%에도 미치지 못하는 것으로 나타났다.

표 1 실험체별 균열하중 및 응력

실험체	콘크리트 물성		균열발생시 하중			균열발생시 응력	
	압축강도	활렬 인장강도	P	P _c	P _s	f _c	f _s
	[MPa]	[MPa]	[kN]			[MPa]	[MPa]
CP-U-S40-1	41.2	4.09	1480	1399	81	1.88	193
CP-B-S40-1	41.9	2.87	1541	1451	90	1.96	201
CP-B-S40-2	41.9	2.87	1598	1505	93	2.03	208
CP-U-S60-1	61.4	5.00	1612	1520	92	2.05	211
CP-B-S60-1	54.5	5.00	1532	1446	86	1.95	200
CP-B-S60-2	54.0	5.00	1634	1542	92	2.08	214

앞서 3절에서 제시한 균열도와 다양한 측정데이터를 분석한 결과 프리스트레스트 콘크리트 패널의 균열거동의 특징을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 처음으로 발생한 균열은 쉬스 덕트가 위치한 실험체의 중앙에서 자오선 방향으로 발생했으며, 관통 균열로 발전하여 콘크리트 패널의 거동을 지배하는 것으로 나타났다. 이것은 패널의 단면 중 단면 손실이 가장 큰 부위에서 균열이 발생한다는 예상에 부합되는 결과였다.
- 2) 첫 균열 발생 후 2차 균열은 자오선 방향으로 배근된 철근을 따라 발생하였는데, 대부분 중앙으로부터 750mm 떨어진 최외측 철근쪽부터 균열이 발생하였고 다음으로 250mm 떨어진 철근을 따라 균열이 발생하였다.
- 3) 1축인장의 경우 발생한 균열의 대부분은 가력방향에 수직인 일직선으로 발전한 반면 2:1의 하중비로 2축 인장이 작용한 경우, 주응력의 방향이 변화함에 따라 균열의 형상이 포물선의 형태를 띠었다.
- 4) 2축 인장의 경우에도 원환방향으로 단부에 균열이 발생하였으나, 관통균열 혹은 전길이에 걸친 균열로 발전하지 못하였다.
- 5) 콘크리트 압축강도가 상대적으로 높은 경우, 고강도 콘크리트의 특성상 균열 발생하중에는 큰 영향을 미치지 못하였으나, 균열의 개수가 증가하는 반면 균열폭은 감소하는 것으로 조사되었다.
- 6) 로드셀로부터 측정된 2축 인장 하중 이력곡선을 분석한 결과 대부분의 시험체에서 하중 도입은 목표치(원환방향:자오선방향=2:1)와 거의 일치하는 것으로 나타났다.
- 7) LVDT 및 변형률계이로 측정된 결과를 이용하여 평균 응력-변형률 곡선을 분석한 결과, 균열의 발생시점 및 tension stiffening 효과를 확인할 수 있었다. 또한 시험체의 거동이 좌우대칭 혹은 상하대칭으로 거동을 하였는지 여부를 확인 할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 과기부의 원자력 증장기 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계 당국에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sliter, G.E. (1984), Concrete Containment Structural Element Tests, EPRI NP-3774, Vols 1-2, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
2. Abdeldjelil Belarbi (1991), Stress-Strain Relationships of Reinforced Concrete in Biaxial Tension-Compression, Ph. D., University of Houston, Texas
3. 정원기 외 (2000), 격납건물 안전성 향상 기술개발 (세부과제: 프리스트레스트 콘크리트 격납건물 부재실험), 1차년도 최종보고서, KAERI, CM-420.