

콘크리트 파괴거동특성에 대한 실험적 연구Ⅱ-직접인장시험

Experimental Study on Failure Behavior of Plain Concrete - Direct Tension Test

이 상 근^{*} 이 상 민^{**} 이 화 미^{***} 한 상 훈^{****} 송 영 철^{*****}
Lee, Sang-Kuen Lee, Sang-Min Lee, Hwa-Mi Han, Sang-Hoon Song, Young-Chul

ABSTRACT

The large-scale direct tension tests of plain concrete were performed and then the complete load-CMOD(crack mouth opening displacement) curves with a stable postpeak descending part were presented. Two independently controlled actuators were used to ensure a homogeneous increasing of CMOD in both notches of a specimen and to avoid secondary flexural stresses. It was compared the fracture energies from the test results with them from a classical prediction equation by Bazant and Oh (1983). The results are indicated that the fracture energies from these large-scale direct tensile tests are large as 1.5~2 times on average against them from the Bazants prediction equation. But the tensile strength for large-size specimens was about half of the values determined from the splitting tensile strength tests for 10 by 20 mm cylindrical specimens due to size effect.

1. 서 론

과거 수십년 간의 유한요소법의 계속적인 발달은 복잡한 철근콘크리트 구조물의 설계 및 구조성능을 평가하는데 놀라운 일익을 담당하여 왔다. 더구나 실내 실험기법의 발달로 신뢰성 있는 실험자료가 제시되면서 이를 토대로 한 향상된 재료모델과 새로운 유한요소의 개발 그리고 새로운 알고리즘의 개발 등이 철근콘크리트 구조물의 실제 거동현상을 보다 정확하게 예측할 수 있도록 이끌고 있다.

중요 안전성 관련 구조물로서 원자로의 보호 및 차폐기능을 담당하는 콘크리트 격납건물의 경우 일반적으로 설계 및 해석에 있어서 가상사고를 고려한 원자로 격납건물의 극한 내압성능평가가 수반된다. 이는 탄성영역을 넘어 비선형 거동을 평가하기 위한 것으로 격납건물이 극한내압하에서 비선형 막 거동(membrane behavior)을 일으키기 때문에 유한요소해석을 위해 콘크리트의 파괴거동특성 즉, 일축, 이축, 그리고 삼축영역에서의 거동정보가 필요하다. 따라서, 본 연구는 국내 표준원전 격납건물의 콘크리트 설계강도와 동등 수준의 콘크리트를 대상으로 비선형 재료모델을 개발하고자 대형 직접인장 연화시험을 통한 일축 인장하의 콘크리트 인장거동특성을 실험적으로 제시하였다.

2. 시험 개요

2.1 시험변수 및 시편형상

- * 정회원, 비엔티엔지니어링(주) 기술연구소 소장, 공학박사
- ** 정회원, 비엔티엔지니어링(주) 대표, 공학박사
- *** 정회원, 비엔티엔지니어링(주) 기술연구소 과장, 공학석사
- **** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사
- ***** 정회원, 한전전력연구원 원자력연구실 부장, 공학박사

국내 표준형 원자로 격납건물에 사용된 콘크리트의 일축 인장파괴거동 특성을 규명하고자 표 1과 같이 시험변수를 정하였다. 격납건물의 콘크리트 설계강도 차이(기초와 벽체 및 돔)에 따라 두가지를 고려하였으며, 콘크리트 파괴에너지에 영향을 주는 골재치수는 세단계로 고려하였다.

시편의 크기효과로 인한 영향을 가능한 최소화시키기 위해 대형으로 설계하였다. 그림 1에서와 같이 상부와 하부에 노치(notch)를 2개 두었고, 노치 선단부분은 썸기모양으로 처리하여 단 하나의 주균열이 노치 선단으로부터 발생하도록 유도하였다. 부가적으로 시편의 전·후면에 마주보는 노치의 선단에서 선단까지 인장파괴가 일어나는 순단면의 치수를 고려한 측면 홈(side groove)을 두었다.

표 1 콘크리트 직접인장연화시험에 고려된 시험변수

배합명*	시편치수 (mm)	목표강도 MPa(kgf/cm ²)	굵은골재 최대치수 (mm)	순단면적**, (cm ²)	시편 개수
NS-G13-A1	1,400×1,100×250 (가로×세로×두께)	27.58 (281)	13	1,200	4
NS-G20-A1			20	1,200	2
NS-G20-A2				1,680	2
NS-G40-A1			40	1,200	4
HS-G20-A1		37.92 (387)	20	1,200	4

* NS, HS : Normal, High Strength,
G13, G20, G40 : 굵은골재 최대치수 10, 20, 40 mm,
A1, A2 : 시편의 순단면적 1,200, 1,680 cm²

** 상·하부 노치와 전·후면 홈이 설치된 시편 파단면의 직사각형 면적(그림 1 참조)

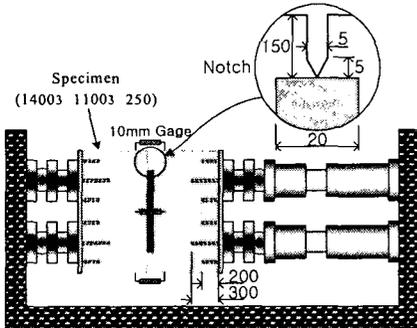


그림 1 대형 직접인장연화시험용 시편형상 및 시험체 설치 모형도

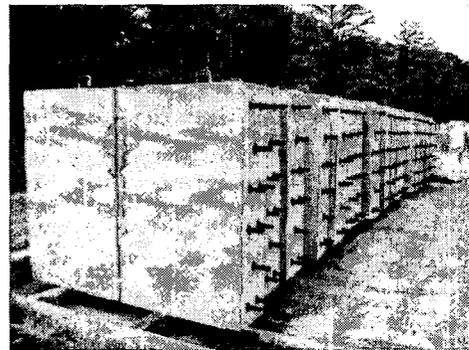


그림 2 상·하 노치를 갖는 콘크리트 판형시편들

표 2 콘크리트 기본 물성(91일 기준)

배합명	목표강도 MPa (kgf/cm ²)	W/B (%)	압축강도 MPa (kgf/cm ²)	조깅인장강도 MPa (kgf/cm ²)	탄성계수 MPa (kgf/cm ²)	초음파속도 (m/s)
NS-G13-A1	27.58 (281)	44.0	35.4 (361)	3.4 (35)	2.643E4 (2.695E5)	4,000
NS-G20-A1			35.2 (359)	3.4 (35)	2.637E4 (2.689E5)	4,002
NS-G20-A2			34.8 (355)	3.3 (34)	2.626E4 (2.678E5)	3,991
NS-G40-A1			41.5 (424)	4.1 (42)	2.923E4 (2.981E5)	4,141

2.2 시편제작

콘크리트의 배합설계는 1종 시멘트와 13.6%의 Fly-ash를 사용하였고, 거푸집은 시편의 기하학적 편

심을 제거하기 위해 강재거푸집을 특수 제작하였고으며, 시편에 인장력을 전달하기 위한 매체로 양 단부에 앵커를 콘크리트 타설전 거푸집에 장착하여 매립되도록 하였다. 그림 2는 콘크리트 타설 후 노천 양생을 통해 최종 제작된 노치를 갖는 콘크리트 판형시편을 보여준다.

시편제작 후 강도 증가추이가 매우 둔화되어 시간에 따른 강도변화가 미소한 91일을 기점으로 시험을 시작하였다. 따라서, 판형시편 제작시 동일환경 하에서 제작 양생한 원주형 시편($\phi 10 \times 20$)에 대해 91일 강도와 AE장비 운용을 위해 초음파속도를 측정하였다, 그 결과는 표 2와 같다.

3. 시험방법

무근콘크리트의 완전하고 안정적인 하중-CMOD곡선을 획득하기 위해 그림3의 폐쇄회로 제어시스템을 적용하여 그림 4와 같이 대형 직접인장연화시험 장치를 최종적으로 구성하였고, 시험 전반에 걸쳐 시편 상·하부 노치 선단의 CMOD를 일정하게 유지되도록 하였다. 여기서, 시험장치의 변형성을 최소화하기 위해 고강성 프레임 및 지그를 사용하였으며, 균열 후 부차적인 휨응력의 재분배가 발생하지 않도록 독립적으로 제어가 가능한 617 kN 용량의 INSTRON 유압가력기(actuator) 두 대를 운용하였다. 시험을 위한 경계조건은 상기에서 언급했듯이 고정단으로 처리했을 때 발생하는 균열 후 부차적인 휨응력의 재분배 현상을 없애기 위해 양쪽 단 모두 힌지로 처리하였다.

시편 상·하부 및 좌·우 측면 중앙부의 노치 선단에서 탄성변위를 포함한 CMOD를 측정하기 위해 변위계 4개를 부착하였으며, 노치 선단부위의 파괴진행대에서 발생하는 콘크리트 내부의 미세균열을 탐지하기 위해 시편 정면의 상부 노치 주위에 6개의 AE(acoustic emission) 센서를 부착하였다.

하중재하는 변위제어방식을 사용하였고 시험 전반에 걸쳐 $0.1 \mu\text{m}/\text{sec}$ 의 속도를 유지하였다. 이는 모든 시험체에 대해 동일하게 적용하였다.

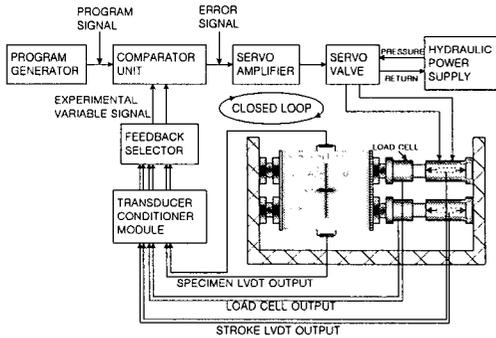


그림 3 폐쇄회로(closed-loop) 제어시스템

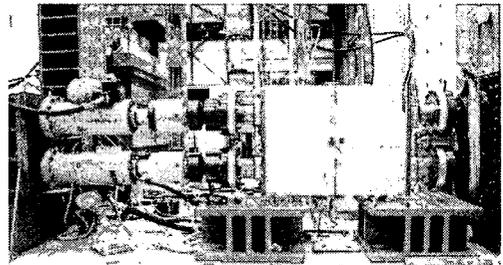


그림 4 무근콘크리트 대형직접인장연화시험 장면

4. 시험결과 및 분석

4.1 완전한 하중-CMOD 곡선

본 연구에서는 무근콘크리트의 대형직접인장시험을 수행하여 완전한 하중-CMOD 곡선을 획득하였다. 먼저, 순단면적이 가장 크게 설계된 NS-G20-A2 시편의 실험결과로 가공방법 및 타당성을 검증하고자 한다. 그림 5는 시편 NS-G20-A2의 완전한 하중-CMOD곡선을 보여준다. 그림 5에서 실제로 사용하게 되는 하중-CMOD곡선은 가장 높이 솟아있는 곡선으로 이는 재하방향 중심축을 기준으로 시편 상·하부에 부착된 유압가력기로부터의 인장력(P_1 , P_2) 각각에 대해 CMOD와의 관계를 도시한 곡선이다. 하중의 경우 상부와 하부에서 얻은 두 개의 곡선에 대해 합으로 표현되고, CMOD의 경우는 평균

으로 표현된다.

한편, 시험 전반에 걸쳐 하중 및 CMOD에 대한 시간이력곡선을 도시하면 그림 6~7과 같다. 즉, 그림 7의 CMOD-시간 이력곡선은 상부와 하부의 변위가 거의 완벽하게 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이를 위해 하중은 두 개의 유압가력기가 서로 상호보완적으로 반응하여 그림 6과 같이 서로 독립적인 하중-시간 이력곡선을 그리게 된다.

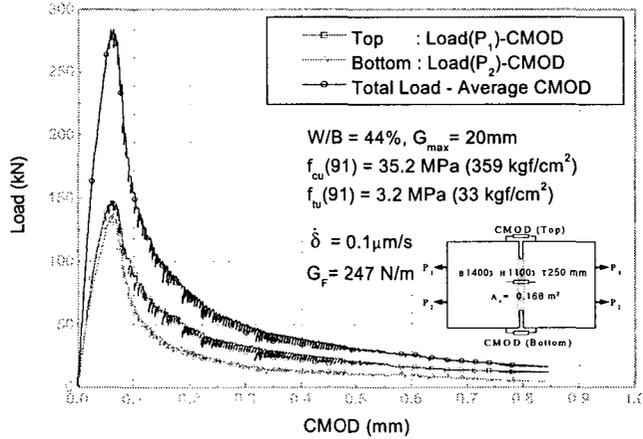


그림 5 일축 인장하의 하중-CMOD곡선(NS-G20-A2)

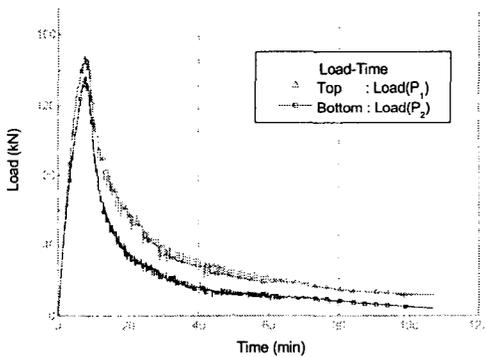


그림 6 독립적으로 제어된 상·하부 유압가력기의 하중-시간 이력

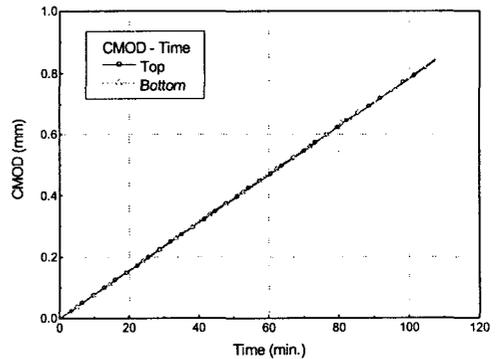


그림 7 상·하 노치부 CDP 변위계로부터 CMOD-시간 이력

결국, 그림 6~7로부터 본 연구의 대형 직접인장시험에 대한 시험방법의 타당성을 입증한 후, 이와 동일한 방법으로 나머지 시편들에 대해 직접인장시험을 수행하였다. 그 결과를 그림 8~11에 제시하였다. 콘크리트 일축 인장파괴거동을 살펴보면 굽은골재 최대치수가 작을수록 정점 후(post-peak) 연화곡선의 초기 경사가 급하며, 골재치수가 클수록 경사가 완만해짐을 보이고 있다. 이는 파괴에너지를 대표하는 연화곡선 아래의 적분영역이 넓어지기 때문에 상대적으로 파괴에너지가 커짐을 의미하는 것이다. 그러나 골재치수가 40 mm인 경우 초기의 완만한 경사를 그대로 유지하지 못하고 중간에 갑작스러운 하중감소가 발생하는 경향을 보여 예상과는 달리 파괴에너지가 그다지 크게 나타나지는 않았다. 이는 연화곡선의 초기 완만한 경사를 유도하던 소수의 주 골재들이 파괴영역이 확산되면서 시멘트골재의 부착력을 잃게될 때 갑작스러운 단면감소로 발생하는 현상으로 판단된다. 또한, 그림 10(시편 HS-G20-A1)의 경우, 같은 골재치수를 사용한 그림 9(시편 NS-G20-A1)에 비해 연화곡선의 초기 경

사가 상대적으로 급하게 나타나고 있는데 이는 콘크리트 강도가 상대적으로 커서 보다 강한 취성 성질을 갖게되어 연화효과가 저하되기 때문이다.

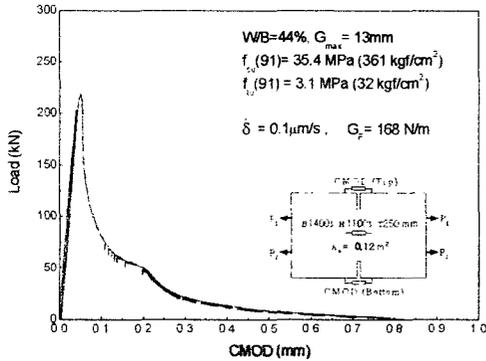


그림 8 일축 인장하의 하중-CMOD 곡선(NS-G13-A1)

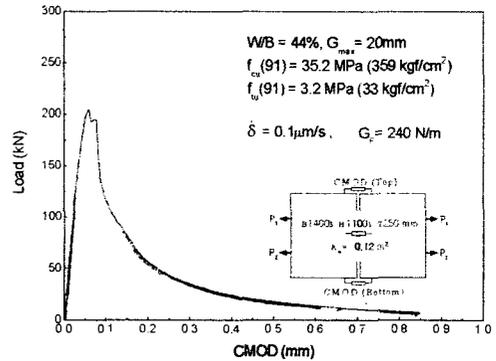


그림 9 일축 인장하의 하중-CMOD 곡선(NS-G20-A1)

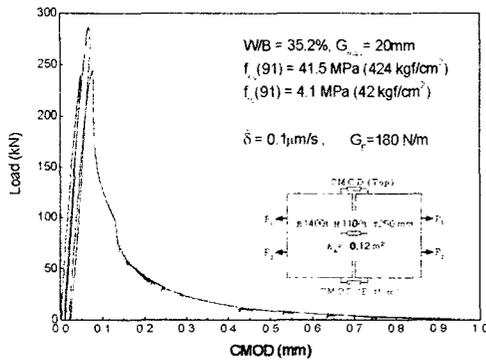


그림 10 일축 인장하의 하중-CMOD 곡선(HS-G20-A1)

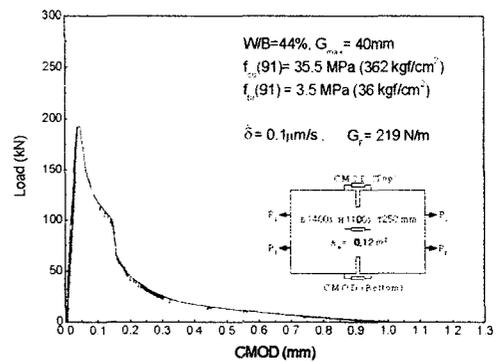


그림 11 일축 인장하의 하중-CMOD 곡선(NS-G40-A1)

4.2 파괴에너지, G_F

시험을 통해 얻은 그림 5 및 그림 8~11의 콘크리트 인장연화곡선으로부터 파괴에너지는 y축의 하중을 순간면적에 대한 응력으로 환산한 응력-CMOD 관계 곡선으로부터 연화거동 영역의 하부면적을 적분함으로써 얻어진다. 응력-CMOD 관계 곡선으로부터 얻어진 파괴에너지를 표 3에 제시하였다.

표 3 대형 직접인장시험하의 콘크리트 파괴에너지

배합명	기본물성(원주형시편)		직접인장시험(편형시편)			
	압축강도 MPa (kgf/cm ²)	조깅인장강도 MPa (kgf/cm ²)	직접인장강도 MPa (kgf/cm ²)	G_F (N/m)	\tilde{G}_F (N/m)	G_F / \tilde{G}_F
NS-G13-A1	35.4 (361)	3.4 (35)	1.83 (18)	168	113.0	1.5
NS-G20-A1	35.2 (359)	3.4 (35)	1.71 (17)	240	119.7	2.0
NS-G20-A2			1.70 (17)	247	119.7	2.0
NS-G40-A1	34.8 (355)	3.3 (34)	1.61 (16)	219	224.1	0.98
HS-G20-A1	41.5 (424)	4.1 (42)	2.40 (24)	180	179.6	1.0

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 강도 2단계, 골재치수 3단계를 변수로 무근콘크리트의 완전한 하중-CMOD 관계를 제시함으로써 콘크리트의 실증적 비선형 재료모델을 제공하였다. 이는 유사 강도수준의 콘크리트 구조물에 대한 비선형해석에 있어서 콘크리트의 보다 신뢰성 있는 거동정보를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.
- 2) 완전한 하중-CMOD 관계로부터 콘크리트의 인장거동은 골재치수가 클 수록 정점 후 하강곡선 즉 연화곡선의 초기 경사가 완만해지는 경향을 보였고, 반면에 강도가 상대적으로 클 경우 초기 경사가 급해지는 경향을 보여 강도 및 골재치수가 연화곡선의 초기경사에 민감하게 반응함을 알 수 있었다.
- 3) 파괴에너지 분석결과 13 및 20mm 골재를 사용한 시편의 경우 완전한 응력-CMOD 곡선으로부터 산정된 파괴에너지가 기존 예측식(Bazant and Oh, 1983)에 의한 값의 1.5~2배에 달하는 것으로 나타나 시편의 크기효과가 파괴에너지에 상당한 영향을 미침을 보였다.
- 4) 그러나, 고강도시편(HS-G20-A1)의 경우 크기효과로 인한 파괴에너지 상승은 거의 나타나지 않았으며, 상대적으로 작은 강도의 시편에 비해 파괴에너지는 오히려 작게 평가되었는데 이는 강도 증가로 인한 파괴에너지 상승보다 연화효과의 저감으로 인한 파괴에너지 저하가 컸기 때문인 것으로 판단되었다.
- 5) 시편의 인장파괴 과정에서 노치면 주위의 균열발생에 대한 AE 특성분석 결과 인장력이 정점하중의 약 37% (0.37ft) 지점에서 초기 내부 미세 균열이 발생하였고, 약 97% (0.97ft)에 이르러 균열 발생 수의 증가가 급격히 이루어짐을 보였다. 정점 후 하강국면에 접어들면서 균열발생 수는 계속 증가하여 인장력이 정점하중의 약 66% 지점까지 떨어졌을 때 가장 많은 수의 균열이 발생하였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구개발사업의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이상근, 송영철, 한상훈(2002), "콘크리트 이축 응력하의 파괴거동", 대한토목학회논문집, Vol. 22, No. 2-A, pp.285~293.
2. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E.(1978), "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design", Journal of Structural Division, ACI, Vol. 104, No. ST11, pp.1761~1773.
3. Gopalaratnam V. S., Shah S. P.(1985), "Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, Technical Paper", ACI Journal, Title No.82~27, pp.310~323.
4. Reinhardt H. W. and Cornelissen H. A. W.(1984), "Post-peak Cycle Behavior of Concrete in Uniaxial tensile and Alternating Tensile and Compressive Loading", Cement and Concrete Research, Vol. 14, pp.263~270.
5. Walsh P. F.(1979), "Fracture of Plain Concrete", The Indian Concrete Journal, Vol. 46, No. 11, pp.469~476.
6. Biolzi L., Guerrini G. L. and Rosati G.(1997), "Overall Structural Behavior of High Strength Concrete Specimens", Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 1, pp.57~63.
7. Slowik, V., Saouma, V. E. and Thompson, A.(1996), "Large Scale Direct Tension Test of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 6, pp.945~954.