

纖維補強 鐵筋콘크리트 보의 強度特性에 관한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Strength Characteristics of Fiber-Reinforced Concrete Beam

김정섭 * 박영배 **
Kim, Jeong-Sup Part, Young-Bae

Abstract

This study aims to provide basic data that can be applied to construct real structures. For this, an experimental structure was manufactured to identify durability according to age of fiber-reinforced concrete which contains fiber reinforcement materials (polypropylene fiber, steel fiber, cellulose fiber) and structural property about flexural behavior and destruction of reinforced concrete beam, and a relation between load and deflection, crack and destruction according to increase of load and ductility capacity was examined.

Fiber-reinforced concrete materials and other constructional materials were experimented and the result is presented as follows: The results obtained through material test of concrete and static experiment of members usings

1. The experiment shows that compressive strength of fiber-reinforced concrete was lower than that of non-reinforced concrete.
2. As a result of strength experiment according to different kinds of fiber, compressive strength of an experimented structure that contains cellulose fiber was the highest when age was 28.
3. When deflection of reinforced concrete beam was examined, it was reported that ductility capacity of the experimented structure that contains fiber-reinforced concrete was raise than that of non-reinforced concrete.

키 워 드 : 섬유, 압축강도, 휨 거동, 연성능력

Keywords : Fiber, Compressive strength, Flexural Behavior, Ductility Capacity

1. 서 론

1.1 연구의 배경

콘크리트는 내구성 및 경제적인 특성과 역학 및 재료적으로 우수한 장점을 가지고 있어 건설분야에 폭넓게 이용되고 있다.

그러나 콘크리트는 압축강도에 비해 인장강도, 휨 강도 및 충격강도가 낮아 과대하중이 작용할 경우 작용 인장 응력과 직각방향으로 균열이 발생하며, 취성적인 파괴성향으로 인해 압축 측 콘크리트가 파괴되던가 붕괴되는 단점이 있다.

이러한 결함을 개선하기 위해 철근, PC강재 및 석면섬유 등을 보강하여 구조 및 비 구조 부재로 사용되어 왔다. 그러나 이들 또한 강재 부식에 의한 콘크리트 구조물의 성능저하 및 석면공해로 인한 건강장애 등의 문제점이 발생하여, 문제 해결을 위한 노력의 일환으로 길이가 짧고 단면이 작은 섬유를 모체인 콘크리트에 임의로 분산하여 보강한 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforce Concrete : 이하 FRC)에 대한 다각적인 연구와 실험이 진행중이다.

섬유보강 콘크리트는 콘크리트의 인장강도와 균열에 대한 저항성을 높이고 인성을 대폭 개선시킬 목적으로 모르터 또는 콘크리트 중에 각종 섬유를 보강시켜 만든 구조용 복합재료로서, 섬유가 시멘트 내에 골고루 분산되어 보강되고 섬유

혼입이 쉽기 때문에 여러 형태의 콘크리트 제품 생산에 적용하기 쉬운 장점이 있다.

섬유보강 콘크리트에 사용되는 섬유는 폴리프로필렌 (Polypropylene)섬유, 강(Steel)섬유, 천연섬유 등으로 그 사용이 증가되고 있다. 특히 천연섬유는 재료가 환경 친화적이므로 그 재료 및 콘크리트와의 결합에 대한 연구 및 개발이 진행 중이다.

일반적으로 섬유보강 콘크리트는 콘크리트의 역학적 단점인 취성을 보완하여 모체 내 섬유의 균열제어 작용에 의한, 연성 및 인성 증대와 충격강도의 증가 및 열에 의한 균열발생을 감소시키는 특성을 갖는 것으로 알려져 있다.

1.2 연구의 목적

섬유보강 콘크리트는 콘크리트 중에 혼입 하는 섬유의 종류, 섬유의 형상, 치수, 혼입률, 배향과 분산 및 콘크리트의 품질 등에 따라 영향을 받기 때문에 섬유의 품질 특성을 시험 등에 의해 충분히 확인한 다음에 이용하여야 한다.

본 연구에서는 사용이 일반화되고 증가되고 있는 폴리프로필렌섬유와 강섬유 그리고 천연섬유인 셀룰로오스섬유를 보강한 시험체를 통해, 보의 내력에 영향을 미치는 극한하중과 초기균열 등을 관찰하고, 하중과 처짐 관계, 하중 증가에 따른 균열과 파괴양상, 연성능력 등을 파악하여 평가·분석함으로써, 섬유보강 콘크리트를 실제 구조물에 적용 시 필요한 기초자료를 제공하는데 연구의 목적이 있다.

* 정희원, 조선대 건축공학과 교수, 공학박사

** 정희원, 송원대 건축과 교수

2. 실험 계획

2.1 일반사항

구조물의 안전성은 그 구조물이 받는 하중의 크기와 구조물 내하력의 대·소 관계로 정해진다. 안전한 구조물의 설계는 이 양자가 정해진 수치라면 간단하지만 하중의 크기, 콘크리트의 품질과 지역특성 등의 불확실한 요소가 많기 때문에 추정해서 계산할 수밖에 없다. 이 추정 값의 신뢰도를 높이기 위해서는 콘크리트의 품질에 따른 구조물의 거동 특성을 파악해야 한다.

본 연구에서는 무보강, 폴리프로필렌섬유와 강섬유 그리고 천연섬유인 셀룰로오스섬유 등을 동일 변수로 철근 콘크리트 보의 휨 실험체 2개씩 총 8개를 제작하여 구조적 거동에 관하여 실험한다.

실험은 재료시험과 부재시험으로 구분하여 수행하며, 재료 시험은 부재시험에 사용된 재료인 콘크리트, 철근 등의 재료적인 물성을 시험하기 위하여 100tonf의 만능재료 시험기를 이용하여, KS규격에 의하여 실시한다.

부재시험에서는 기준 실험체를 완전 파괴될 때까지 가력 후 최대내력을 파악하여 기준 실험체의 최대 내력으로 결정한다.

각 실험체는 가력 초기에는 하중제어방식, 항복이후에는 변위제어방식으로 완전파괴 될 때까지 전단파괴 유도방법으로 가력하여 각각의 변수에 따른 구조적 거동의 특성을 비교·검토한다.

2.2 실험체의 설계

실험체는 극한강도설계법으로 동일하게 설계하며, 실험체의 크기는 그림 1과 같이 150mm(b)×250mm(D)×2100(L)mm로 제작한다.

실험체의 철근은 SD30A를 사용하여 상부에 2-D10, 하부에 2-D13을 배근하였고, 늑근은 D10@100을 배근하며, 피복두께는 30mm로 한다.

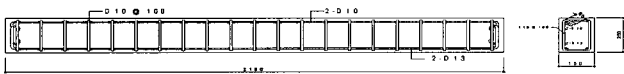


그림 1. 시험체의 상세도

2.3 재료의 특성

1) 시멘트

시멘트는 KS L 5201(포틀랜드시멘트)의 규격에 적합한 국내 S사 제품을 사용하였으며, 시멘트의 화학적 성분 및 비중은 표 1과 같다.

표 1. 시멘트의 화학적 성분 및 비중

구분	화 학 성 분 (%)							비 중
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss	
보통 포틀랜드 시멘트	21.9	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15

2) 골재

골재는 KS F 2502(골재의 체가름시험 방법)의 규격에 적합한 골재를 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2. 골재의 물리적 성질

골재 종류	최대 치수 (mm)	비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	단위용적 중량 (kg/m ³)
잔골재	5	2.61	1.05	2.69	1,653
굵은골재	20	2.67	1.24	6.83	1,550

3) 보강 재료

시험체에 사용된 섬유의 종류는 강섬유, 폴리프로필렌 섬유, 셀룰로오스섬유 등이 있으며, 섬유의 물리적인 특성은 표 3과 같다.

표 3. 보강섬유의 물리적 특성

종류	비중	열전도율	밀도 (ton/m ³)	극한 변형도 (%)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)
S	7.86			0.5~3.5	7~21×103	2.1×106
P	0.90	6	0.89	~25	5.2~7.7	3.5~3.8×104
C	1.5			3~10		

주) S : 강섬유, P : 폴리프로필렌섬유, C : 셀룰로오스섬유

4) 철근

실험체에 사용된 철근은 SD30A의 D10(압축철근, 늑근)과 D13(인장철근)을 사용하였으며, 각각 3개씩의 시험편을 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 따라 시험을 실시하였다.

철근 3개의 평균재료시험 결과는 표 4와 같이 나타나 KS D 3504(철근콘크리트용 봉강)의 규준에 모두 적합하였다.

표 4. 철근의 성질

종류	단면적 (cm ²)	항복강도 (tonf/cm ²)	인장강도 (tonf/cm ²)	연신율 (%)
D10	0.70	3,880	5,459	28.17
D13	1.18	3,873	5,512	28.61

5) 콘크리트

시험체에 사용된 콘크리트는 J회사의 배척플랜트에서 설계 기준강도 240kgf/cm²로 배합된 콘크리트를 타설 전, KS F 2402(포틀랜드시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법)의 규격에 의하여 슬럼프를 확인한 후 타설 한다.

30cm 떨어진 지점 1개소에 LVDT를 설치하여, 가력단계에 따른 시험체의 변위를 측정하였다.

모든 측정장치(Load Cell, DT, S.G)의 측정 데이터는 Data Logger에 연결하여 수집하였으며, 개인용 컴퓨터를 이용하여 변환 처리하였다.

표 5. 콘크리트 배합표

시험체 종류	W/C (%)	S/A (%)	Content (%)	중 량 배 합					
				물 (kgf/m ³)	시멘트 (kgf/m ³)	잔골재 (kgf/m ³)	굵은골재 (kgf/m ³)	섬유 (kgf/m ³)	AD
N	48.6	48.3	0	183	377	813	883	0	3.39
S	48.6	48.3	1.0	183	377	813	883	22.59	3.39
P	55	48.5	0.04	177	322	886	980	0.9	3.39
C	55	48.5	0.1	177	322	886	980	2.25	3.39

주) N : 무보강, S : 강섬유, P : 폴리프로필렌섬유, C : 셀룰로우스섬유

타설과 동시에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 규격에 따라 표준 원주형 공시체(φ15×30mm)를 제작하여 재령별 압축강도를 측정한다. 콘크리트 및 보강섬유의 배합비는 표 5와 같다.

2.4 실험방법

부재실험은 그림 3과 같이 100tonf의 만능 재료시험기에 단순지지 상태로 실험체를 설치하여, 2개의 집중하중이 작용하도록 하였다.

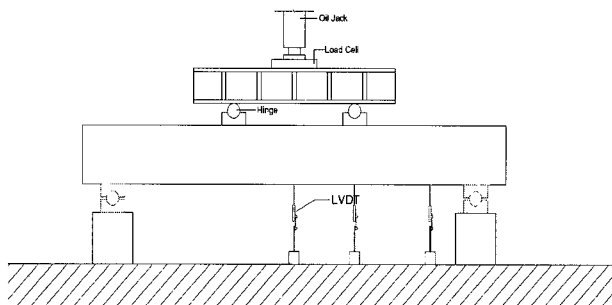


그림 2. 가력장치

가력은 항복 시까지 0.1tonf 단위의 하중제어 방식, 항복이 후에는 변위제어방식으로 가력하였으며, 가력판 상부에 50tonf의 Load Cell을 설치하여 가력단계에 따른 하중을 측정하였다.

실험체 하부의 단부에는 로울러를 설치하여 수평변위와 회전 전에 대한 구속이 발생하지 않도록 하였고, 지점파괴를 방지하기 위하여 12cm폭의 각형 철강을 설치하여 실험하였다.

좌우측 가력점 하부 각 1개소, 좌측지점으로부터 우측으로

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재료시험 실험결과

부재실험의 재료적 특성을 알 수 있는 각 시험체별 압축강도 실험 결과, 모든 시험체는 재령이 경과하면서 강도가 증가하였으나, 재령 180일에서는 강도가 다소 감소하는 것으로 나타났다.

또한, 무보강 콘크리트 시험체에 비하여 섬유보강 콘크리트 시험체가 대체적으로 낮은 강도를 보였다.

섬유보강 콘크리트의 재료시험 결과는 표 6 및 그림 3과 같다.

표 6. 콘크리트 압축강도 측정 결과

시험체명	7일 강도 (kgf/cm ²)	28일 강도 (kgf/cm ²)	90일 강도 (kgf/cm ²)	180일 강도 (kgf/cm ²)
N	128.9	277.4	291.6	273.1
S	131.9	250.6	277.3	250.7
P	128.5	252.1	264.1	251.6
C	125.9	280.4	269.3	237.8

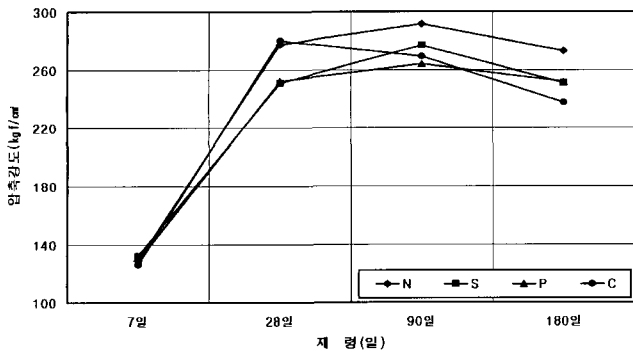


그림 3. 콘크리트 재령별 압축강도

3.2 부재실험체 실험 결과

각 실험체별 부재 실험결과, 초기균열하중과 최대하중은 강 섬유보강 실험체가, 항복하중은 폴리프로필렌 섬유보강 실험체가 높게 나타났다.

초기균열하중이 가장 낮은 실험체는 폴리프로필렌 섬유보강 실험체이며, 항복하중과 최대하중이 낮은 실험체는 셀룰로우스 섬유보강 실험체였다. 부재실험체의 실험결과는 표 8 및 그림 5와 같다.

표 8. 휨 시험체의 실험결과

시험체 명	초기균열하중시		항복하중시		최대하중시	
	P_{cr} (tonf)	δ_{cr} (mm)	P_y (tonf)	δ_y (mm)	P_{max} (tonf)	δ_{max} (mm)
N-1	3.10	1.48	8.00	7.20	10.20	27.36
N-2	2.90	1.16	8.80	6.54	11.30	31.14
S-1	3.10	1.50	8.10	5.36	11.50	30.04
S-2	3.00	1.23	9.00	4.94	11.50	22.16
P-1	3.20	1.46	9.10	6.16	11.80	30.08
P-2	2.60	0.76	8.50	5.36	11.00	30.36
C-1	3.10	1.42	7.50	5.70	10.60	28.64
C-2	2.90	1.25	8.00	6.32	10.50	30.12

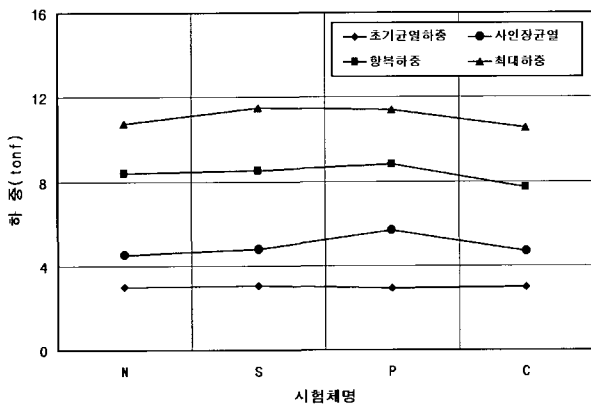


그림 5. 휨 시험체의 실험결과

3.3 균열 및 파괴 양상

1) N-1 시험체

초기균열은 부재의 중앙 하부에서 재하하중 3.10tonf일 때 수직균열로 발생하였으며, 재하하중의 증가에 따라 수직으로 균열이 증대되었다.

사인장균열은 4.50tonf에서 발생하였고, 최대내력은 재하하중 10.20tonf로 나타났다. 최대내력 후 하중은 감소하는 것으로 나타났으나, 부재의 처짐은 계속 증가하였으며, 부재의 상부 중앙에서 시험체가 탈락하였다.

2) N-2 시험체

초기균열은 부재의 하부에서 재하하중 2.90tonf일 때 수직균열로 발생하였다.

가력하중의 증가에 따라 수직균열이 증가되었으며, 사인장균열은 4.70tonf에서 발생하였고 시험체의 최대 내력은 11.30tonf를 나타내었다. 최대내력 후 하중은 감소하였으며, 처짐은 계속 증가하였다.

3) S-1 시험체

3.10tonf에서 보 하부의 중앙에서 초기균열이 발생하였고, 하중 증가에 따라 수직균열이 증대되었으며, 4.80tonf에서 사인장균열이 발생하였다.

수직균열이 많이 발생하였으며, 11.50tonf의 최대내력을 나타낸 후 점차 하중이 감소하였으며, 부재의 처짐은 계속 진행되었다.

4) S-2 시험체

하중가력 후 3.00tonf에서 초기균열이 발생하였고, 가력 하중이 증가할수록 수직균열이 많이 발생하였으며, 사인장균열은 3.30tonf에 발생하였다.

최대내력은 11.50tonf로 나타났으며, 최대내력 후 하중의 감소와 부재의 처짐이 빠르게 진행되었다.

5) P-1 시험체

하중가력 후 3.20tonf에서 보의 하부에 초기균열이 발생하였으며, 점차 수직균열로 진행되었다.

4.50tonf에서 사인장균열이 발생하였고, 부재의 최대내력은 11.80tonf이었으며, 최대내력 후 하중은 천천히 감소하였다.

6) P-2 시험체

초기하중은 2.60tonf에서 발생하였으며, 재하하중이 증가하면서 수직균열이 증대되었고, 5.70tonf에서 사인장균열이 발생하였다.

시험체의 최대내력은 11.00tonf로 나타내었으며, 시험체의 탈락현상은 크게 나타나지 않았다.

7) C-1 시험체

하중가력 후 3.10tonf에서 초기균열이 하부에서 수직으로 발생하였으며, 사인장균열은 5.20tonf에서 발생하였다.

하중 증가에 따른 부재의 처짐 속도가 빠르게 진행되었고,

부재 중앙 상부에서 탈락 현상이 발생하였다. 시험체의 최대 내력은 10.60tonf로 나타내었다.

8) C-2 시험체

2.90tonf에서 수직으로 초기균열이 발생하였으며, 사인장균열은 4.70tonf에서 처음 발생하였다.

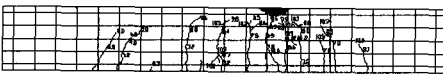
하중 증가에 따라 부재의 처짐은 빠르게 진행되었고, 최대 내력은 10.50tonf로 나타났으며, 부재 중앙 상부에서 탈락 현상이 발생하였다.



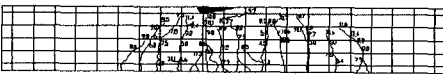
(a) N-1 시험체



(b) N-2 시험체



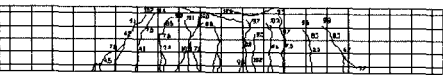
(c) S-1 시험체



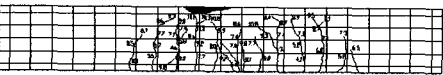
(d) S-2 시험체



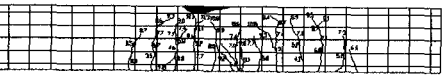
(e) P-1 시험체



(f) P-2 시험체

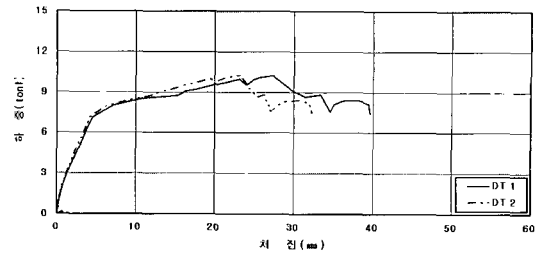


(g) C-1 시험체

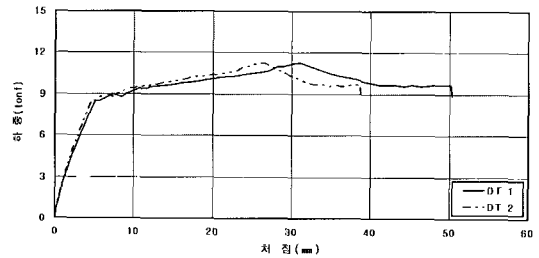


(h) C-2 시험체

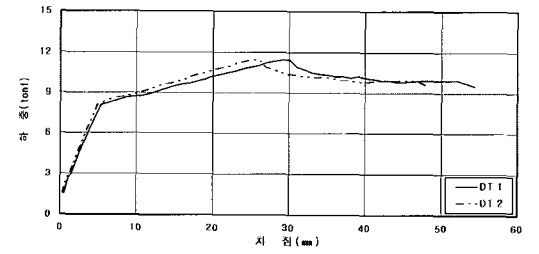
그림 6. 휨 시험체의 균열도



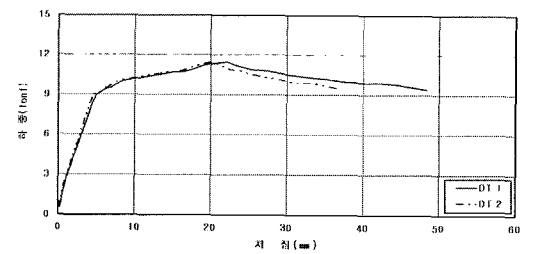
(a) N-1 시험체



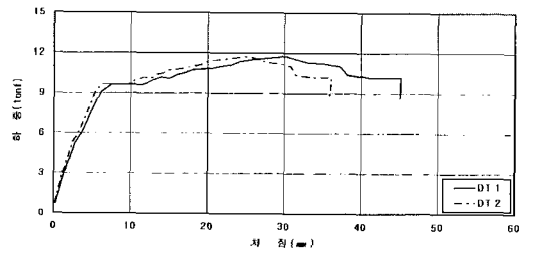
(b) N-2 시험체



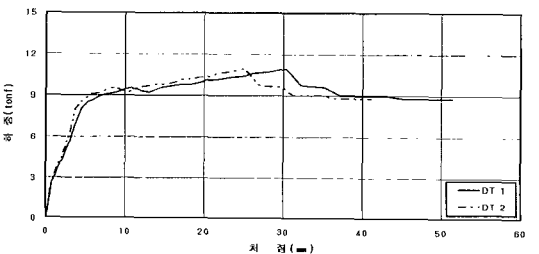
(c) S-1 시험체



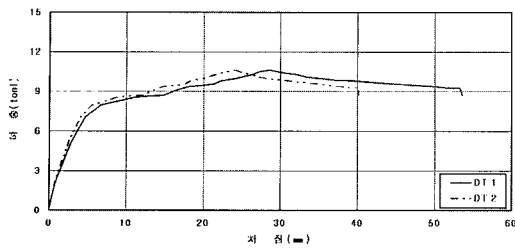
(d) S-2 시험체



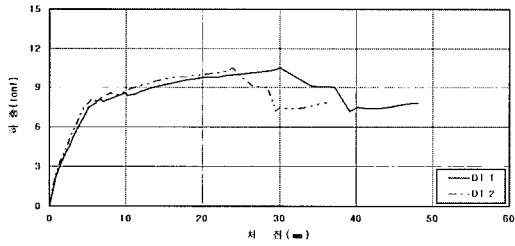
(e) P-1 시험체



(f) P-2 시험체



(g) C-1 시험체



(h) C-2 시험체

그림 7. 시험체의 하중-변위곡선

또한 구조물이 견딜 수 있는 최대하중을 더 이상 지지할 수 없을 때 파괴된다고 하는 파괴의 정의에 따라 식 (2)와 같이 평가하기도 한다. 본 연구에서는 이 식을 적용한다.

$$\mu_{max} = \delta_{max} / \delta_y \text{ (2)}$$

δ_{max} : 최대하중에 대응하는 변위

μ_{max} : 최대하중시의 연성계수

4.1 실험체의 연성능력

실험체의 연성계수는 4.28~5.27로 나타났으며, 무보강 실험체는 4.28, 강 섬유보강 실험체는 5.05, 폴리프로필렌 섬유보강 실험체는 5.27, 셀룰로우스 섬유보강 실험체는 4.90으로 폴리프로필렌 섬유보강 실험체가 가장 높은 연성계수를 나타내었다.

시험체의 내력 증가율은 항복하중에서는 폴리프로필렌 섬유보강 시험체가, 최대하중은 강 섬유보강 시험체가 높게 나타났으며, 최대하중시 셀룰로우스 섬유보강 시험체가 가장 낮은

표 9. 시험체의 연성계수

시험체명	항 복 하 중						최 대 하 중						연성계수	
	하중 (tonf)	평균 (tonf)	처짐 (mm)	평균 (mm)	실험값	평균	하중 (tonf)	평균 (tonf)	처짐 (mm)	평균 (mm)	실험값	평균	μ_{max}	평균
					기준값						기준값			
N-1	8.00	8.40	7.20	6.87	0.95	1.00	10.20	10.75	27.36	29.25	0.95	1.00	3.80	4.28
N-2	8.80		6.54		1.05		11.30		31.14		1.05		4.76	
S-1	8.10	8.55	5.36	5.15	0.96	1.02	11.50	11.50	30.04	26.10	1.07	1.07	5.60	5.05
S-2	9.00		4.94		1.07		11.50		22.16		1.07		4.49	
P-1	9.10	8.80	6.16	5.76	1.08	1.05	11.80	11.40	30.08	30.22	1.10	1.06	4.88	5.27
P-2	8.50		5.36		1.01		11.00		30.36		1.02		5.66	
C-1	7.50	7.75	5.70	6.01	0.89	0.95	10.60	10.55	28.64	29.38	0.99	0.99	5.02	4.90
C-2	8.00		6.32		0.95		10.50		30.12		0.98		4.77	

4. 부재의 연성능력

부재의 연성을 평가하기 위해서 부재의 항복시의 처짐을 기준으로 하여 부재 파괴시의 처짐을 비율적으로 나타낸다.

ACI Committee 363에서는 식 (1)과 같이 연성계수를 정의하고 있다.

$$\mu_{cu} = \delta_{cu} / \delta_y \text{ (1)}$$

δ_{cu} : 부재파괴시의 변위

δ_y : 부재항복시의 변위

μ_{cu} : 부재파괴시의 연성계수

값을 나타냈다.

시험체의 연성계수와 내력 증가율은 그림 8 및 그림 9와 같다.

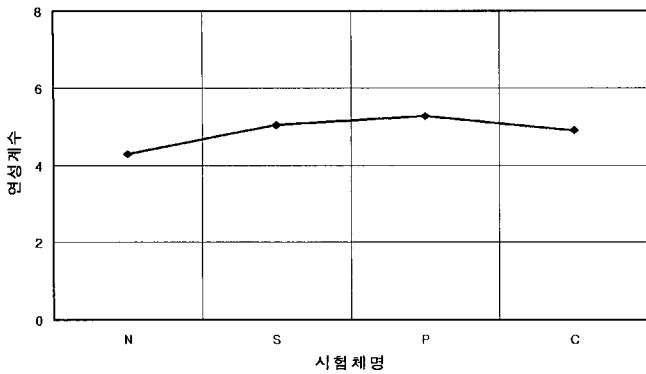


그림 8. 시험체의 연성 능력

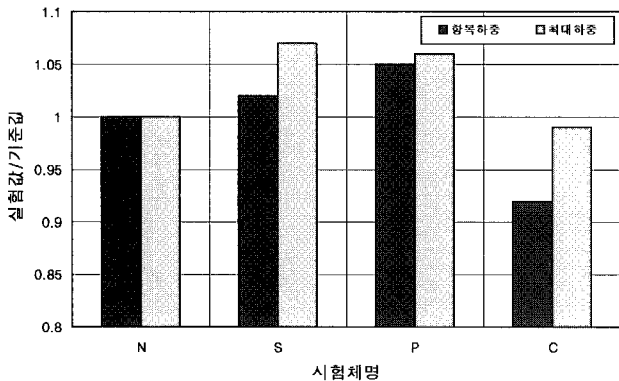


그림 9. 시험체의 내력 증가율

5. 결론

섬유보강 콘크리트를 사용한 종류별(무보강, 강섬유, 폴리프로필렌섬유, 셀룰로우스섬유)재령에 따른 콘크리트의 재료 시험과 철근콘크리트 보의 휨 실험을 통해 얻은 부재실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 섬유 종류별 콘크리트 압축강도 실험 결과, 재령 28일에서 셀룰로우스섬유를 사용한 시험체의 압축강도가 가장 높게 나타났다.
- 2) 무보강 콘크리트 시험체에 비해, 재령 28일은 셀룰로우스섬유보강 시험체가 1.1%정도 높은 압축강도를 나타냈으나, 재령 180일은 섬유보강 시험체 모두 무보강 시험체보다 낮은 압축강도를 나타내었다.
- 3) 부재실험결과, 초기균열하중과 최대하중은 강섬유보강 시험체가, 항복하중은 폴리프로필렌섬유보강 시험체가 높게 나타났다.
- 4) 실험체의 연성능력은 폴리프로필렌 섬유보강 시험체가 가장 높았으며, 무보강 시험체의 연성능력이 가장 낮게 나타났다.

났다.

- 5) 철근콘크리트 보의 휨 실험에서는 무보강 콘크리트를 사용한 실험체에 비하여, 섬유보강 콘크리트를 사용한 실험체 모두 연성능력이 증가하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김정섭의 5인, 「섬유보강 콘크리트의 내화도에 따른 압축강도의 특성에 관한 연구」, 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권 2호, pp.427~430. 2001. 4.
2. 구성모의 4인, 「전단보강이 없는 강섬유보강 콘크리트 보의 전단강도」, 한국콘크리트학회 춘계학술발표논문집 제13권 1호, pp.591~596. 2001.
3. 문제길의 1명, 「섬유보강 콘크리트 보의 전단거동에 미치는 강섬유의 효과」, 한국콘크리트학회 논문집, 1994. 4.
4. 박승범의 3인, 「폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성에 관한 실험적 연구」, 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 1998. 4.
5. 이권욱, 「강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구」, 대한건축학회 추계학술발표대회는논문집 제15권 제2호, 1995.10.
6. 이정아의 4인, 「폴리프로필렌 섬유보강 콘크리트의 강도 및 인성에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회 논문집 제 16권 1호, 1996. 4.
7. 이차돈의 2인, 「강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨 거동에 관한 연구」, 대한건축학회 논문집, 1995. 5.
8. 오병환의 2인, 「강섬유를 혼입한 철근콘크리트 부재의 전단거동 및 전단해석에 관한 연구」, 한국콘크리트학회 논문집, 1993. 6.
9. 우윤걸, 「강섬유보강 콘크리트의 휨 특성」, 대한건축학회 춘계학술발표대회는논문집, 제4권 제1호, pp.185-188, 1984.04.
10. 채민수의 4인, 「폴리프로필렌 섬유의 혼입율변화에 따른 고성능 시멘트 모르타르의 폭열방지 특성에 관한 연구」, 대한건축학회 논문집, 제18권 2호, 1998.
11. 하기주의 4인, 「초기재령 강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨 성능에 대한 실험적 연구」, 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제21권 제1호, pp.75~78. 2001.
12. David Edward Scott 「Characterization of Fibrillated Polypropylene and Recycled Waste Fiber Reinforced Concrete」, Georgia Institute Technology, 1992.
13. ACI Committee 544 ; 「Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete」, ACI. J.(ACU 544.4R), pp.563~580. 1988.
14. ACI Committee 544 ; 「State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete」, J.L. American Concrete Institute Proc. Vol.70, No.11, Nov. pp.729~744. 1973.