전단보강근이 없는 섬유보강 철근콘크리트 보의 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Characteristics of Fiber-Reinforced Concrete Beam Without Shear Reinforcement

김 정 섭* **고 송 균**** **최 진 석*****
Kim, Jeong-Sup Go, Song-Kyoon Choi, Jin-Seok

Abstract

This study examines the material characteristics of fibers and their influences on reinforced concrete through the tests of reinforced concrete by the types of fibers including non-reinforced, steel, polypropylene and cellulose fibers and the test of compressive strength and reinforced concrete beam without shear reinforcement and consequently it obtains the following conclusions.

As a result of conducting compressive strength by the types of specimens, fiber reinforced specimen with the highest compressive strength value at 28 days of age was cellulose fiber reinforced specimen as 280.4kgf/㎠ and steel fiber specimen had the highest compressive strength of 250.7kgf/㎠ at 180 days of age. In case of non-reinforced specimen, its compressive strength was 277.4kgf/㎠ at 28 days of age and 273.1kgf/㎠ at 180 days of age.

Comparing the compressive strength of non-reinforced specimen to that fiber reinforced specimen showed that the compressive strength of fiber reinforced specimen was lower in the passage of age and the results of this experiment showed no effects of fiber reinforcement.

As a result of testing reinforced concrete beam without shear reinforcement, ductility factors of specimens were 4.67 for non-reinforced specimen, 8.18 for steel fiber reinforced specimen, 6.20 for polypropylene fiber reinforced specimen and 5.49 for cellulose reinforced specimen, and it is found that steel fiber reinforced specimen was highest. When non-reinforced specimen and steel fiber reinforced specimen were compared, steel fiber reinforced specimen had higher ductility factor of about 75.2% than that of non-reinforced specimen.

키워드 : 섬유, 압축강도, 연성능력, 철근콘크리트 보
Keyword : Fiber, Compressive Strength, Ductility Capacity, Reinforced Concrete Beam

1. 서 론

1.1 연구의 배경

콘크리트는 내구성 및 경제적인 특성과 역학 및 재료적으로 우수한 장점을 가지고 있어 건설분야에 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 압축강도에 비해 인장강도가 낮아 균열의 생성 및 성장을 억제하기 어려워 취성적 파괴성향을 갖는 단점이 있다. 이러한 콘크리트의 본질적인 단점은 시멘트 및 골재의 품질 개선이나 배합비, 물시멘트비, 혼화재 사용 등에 의해서 개선되기는 어렵다.

콘크리트의 취성거동을 연성거동으로 유도하고 콘크리트의 인장 저항능력을 증대시키며, 역학적 성질을 개선 및 보강하기 위하여 길이가 짧고 단면이 작은 섬유를 모체인 콘크리트에 임의로 분산하여 보강한 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete)에 대한 다각적인 연구와 실험이 진행중이다.

* 정회원, 조선대학교 건축학부 교수, 공학박사
** 정회원, 조선대학교 대학원 박사과정 수료
*** 정회원, 조선대학교 대학원 박사과정

취성적 재료의 성질을 개선하기 위하여 섬유를 처음으로 사용한 것은 아주 오래 전의 일로서 흙벽이나 흙벽돌에 짚여물을 사용하거나 석회 모르터나 석고에 짚여물, 말총 등을 사용한 것이 그 예가 된다.

섬유보강콘크리트에 사용되는 섬유는 강(Steel)섬유, 폴리프로필렌(Polypropylene)섬유, 천연 셀룰로오스(Cellulose)섬유 등으로 그 사용이 증가되고 있다. 특히 천연섬유는 재료가 환경친화적이므로 그 재료 및 콘크리트와의 결합에 대한 연구 및 개발이 진행 중이다.

1.2 연구의 목적

본 연구에서는 사용이 일반화되고 증가되고 있는 강섬유, 폴리프로필렌섬유 그리고 천연섬유인 셀룰로오스섬유를 보강한 철근콘크리트의 보의 실험체를 제작하여 내력에 영향을 미치는 초기균열과 항복하중 및 극한하중 등을 관찰하고, 하중과 처짐 관계, 하중 증가에 따른 균열성상과 파괴양상, 연성능력 등 섬유보강 콘크리트의 구조적 특성변화를 실험을 통해 실질적으로 평가·분석하고자 한다.

또한, 섬유보강 콘크리트가 강도에 미치는 영향을 규명함

으로써, 건설기술자에게 해사에 대한 신뢰성을 명확히 제시하여 섬유보강 콘크리트 품질의 실용성을 제고하는데 연구의 목적이 있다.

2. 실험 계획

2.1 일반 사항

구조물의 안전성은 그 구조물이 받는 하중의 크기와 구조물 내하력의 대소관계로 정해진다. 안전한 구조물의 설계는 이 양자가 정해진 수치라 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 종류별 섬유가 함유된 철근콘크리트 보의 부재 실험체 6개와 보통 철근콘크리트 보의 부재 실험체 2개를 제작하여 구조적 거동에 관하여 실험한다.

실험은 압축강도시험과 부재실험으로 구분하여 실시하며, 압축강도시험은 부재실험에 사용된 재료인 콘크리트의 재료적인 물성을 시험하기 위하여 ø150㎜×300㎜ 원주형 공시체를 제작하여 부어넣기 24시간 후 탈형하였고, 압축시험 전까지 대기중 양생을 실시한 후 표면을 연마하여 재하시 편심으로 인한 파괴를 방지하였다. 압축강도시험은 100tonf의 만능구조시험기를 이용하여 KS 규격에 의하여 실험을 실시한다.

부재실험에서는 기준 실험체를 완전 파괴될 때까지 가력 후 최대내력을 파악하여 기준 실험체의 최대내력으로 결정한다. 각 실험체는 가력초기에는 하중제어방식, 항복이후에는 변위제어방식으로 완전파괴 될 때까지 가력하여 각각의 변수에 따른 특성을 비교·검토한다.

2.2 시험체 설계

실험체는 극한강도설계법으로 동일하게 설계하며, 실험체의 크기는 그림 1과 같이 125㎜(b)×250㎜(D)×1,548(L)㎜로 제작한다. 시험체에 사용된 철근은 D16-2 이형철근으로 배근하였고, 스터럽은 50㎜간격의 D10철근을 사용하였으며 피복두께는 30㎜로 한다.

철근은 거푸집에 넣기 전에 철근 스트레인게이지(Strain gauge, S.G)를 부착하여 조립하고, 철근 양끝에는 충분한 길이의 Hook를 만들어 실험도중 콘크리트와 철근간의 부착강도가 저하하지 않도록 하였다.

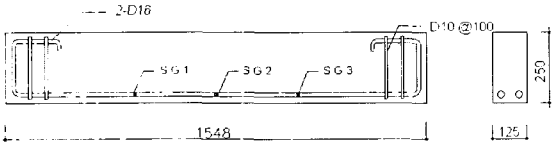


그림 1. 실험체의 상세도

콘크리트 부어넣기는 거푸집에 조립된 철근을 넣은 후 피복두께 유지를 위해 스페이서(Spacer)를 설치한 후 부어넣기 하였으며, 부어넣기 후 콘크리트의 습윤상태를 유지하기 위해 비닐을 덮어 보온양생 한다.

28일 이상 양생 후 실험실로 운반하여 떼어내기 후 이물질을 제거하고, 실험체 표면에는 백색 수성페인트를 칠하여 10 cm간격으로 격자(grid)를 그려서 실험 시 발생되는 균열의 위치 및 형태, 하중 등 진행상황의 파악이 용이하도록 한다.

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

구 분	화 학 성 분 (%)							비중
보통 포틀랜드 시멘트	*SiO2*	*Al2O3*	*Fe2O3*	*CaO*	*MgO*	*SO3*	*Ig.loss*	
	21.9	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	2.58	3.15

2) 골 재

골재는 KS F 2502(골재의 체가름실험 방법)의 규격에 적합한 신안산 강모래와 깬자갈을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2. 골재의 물리적 성질

골재 종류	최대치수 (㎜)	단위용적 중량 (kgf/㎥)	비 중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)
잔골재	5	1,653	2.61	1.05	2.69
굵은골재	20	1,550	2.67	1.24	6.83

3) 섬 유

시험체에 사용된 섬유는 강섬유, 폴리프로필렌섬유, 셀룰로오스섬유 등이 있다.

강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete)는 단면이 작고 길이가 짧은 강섬유를 수화성의 시멘트와 잔골재의 배합이나 수화성의 시멘트, 잔골재, 굵은골재의 배합에 임의로 투입, 분산시켜 만든 건설신소재로서, 콘크리트 내에 임의로 분산되어 콘크리트를 보강할 목적으로 제조된 형상비(단면칫수에 대한 길이 비)가 20~100사이, 길이는 약 13~63㎜의 길이가 짧고 단면이 작은 강선을 말한다.

폴리프로필렌섬유보강 콘크리트(Polypropylene Fiber Reinforced Concrete)의 체적비는 0.1~2%의 섬유로 콘크리트 제품에 사용된 최초의 인조 탄화수소 폴리머(Polymer) 섬유이다. 콘크리트 매트릭스에서 폴리프로필렌 섬유의 화학적 부착은 기대할 수 없으며, 주로 기계적 상호작용에 의한 부착으로 볼 수 있다.

셀룰로오스섬유보강 콘크리트(Cellulose Fiber Reinforced Concrete)는 일반적으로 섬유 길이는 20~500㎜이며, 지름은 0.10~0.75㎜로 다양하다. 그 이유는 섬유가 자연 재료이기 때

문에 지름과 길이가 일정치 않다. 이러한 섬유들은 적은 혼입율의 섬유보강콘크리트를 만드는데 사용되었으며, 가장 잘 알려진 천연섬유는 대나무, 삼(Sisal), 코코넛, 사탕수수 줄기(Sugarcane Bagasse), 바나나, 야자 등이 있다. 실험체에 사용된 섬유의 물리적인 특성은 표 3과 같다.

표 3. 섬유의 물리적 특성

종류	비중	파괴시 변형율 (%)	극한 변형율 (%)	인장강도 (kgf/㎠)	휨탄성계수 (kgf/㎠)
S	7.86	~0.3	0.5~3.5	7~21×103	2.1×106
P	0.91	5~21	~25	2.6~7.1×103	3.6~3.8×104
C	1.5	-	3~10	1.2~5.7×103	1.3~4.0×106

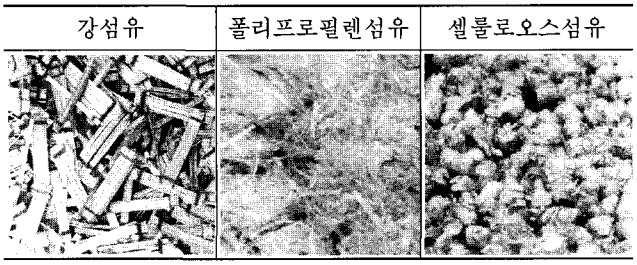


사진 1. 종류별 섬유 전경

2.4 배 합

실험체에 사용된 콘크리트는 J회사의 배처플랜트에서 설계기준강도 240kgf/㎠로 배합된 콘크리트를 타설 전, KS F 2402(포틀랜드시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법)의 규격에 의하여 슬럼프를 확인한 후 부어넣기 한다.

부어넣기와 동시에 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 규격에 따라 원주형 실험체(ø150㎜×300㎜)를 제작하여 재령별 강도를 측정한다. 콘크리트 및 보강섬유의 배합비는 표 4와 같다.

표 4. 콘크리트 배합표

실험체 종류	물시멘트비 (%)	배합중량(kg/㎥)					섬유 혼입율 (%)
		물	시멘트	잔 골재	굵은 골재	섬유	
N	48.6	183	377	813	883	0	0
S	48.6	183	377	813	883	22.59	1.09
P	55	177	322	886	980	0.9	0.04
C	55	177	322	886	980	2.25	0.1

※ *N* : 무보강, *S* : 강섬유보강, *P* : 폴리프로필렌섬유보강, *C* : 셀룰로오스섬유보강

2.5 시험방법

굳지 않은 콘크리트에 대한 시험은 믹서에서 콘크리트를 비벼낸 즉시 콘크리트의 슬럼프(KS F 2402)와 공기량(KS F 2421)을 측정하였다. 공시체 제작은 KS F 2403에 의하여 180 ℓ용량의 강제식 믹서(회전수 25r.p.m)를 사용하였고, 중량배합 계획에 따라 전자 저울을 사용하여 재료량을 정밀하게 계량하여 배합하였다.

굳은 콘크리트에 대한 시험은 콘크리트 압축강도(KS F 2405)시험을 KS 규격에 의거 실시한다.

부재실험은 재령 60일이 경과한 후 그림 2와 같이 100 tonf의 만능구조시험기에 단순지지 상태로 실험체를 설치하여, 2개의 집중하중이 작용하도록 하였다.

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

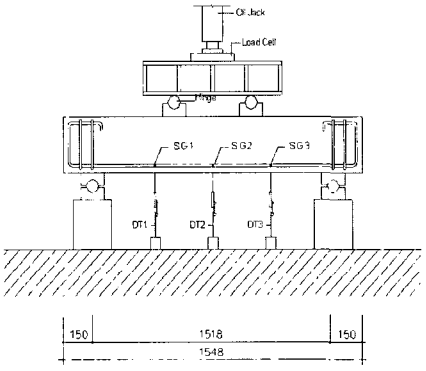


그림 2. 가력장치 및 측정장치

실험체 하부의 단부에는 로울러를 설치하여 수평변위와 회전에 대한 구속이 발생하지 않도록 하였고, 지점에서의 파괴를 방지하기 위하여 12㎝폭의 각형 철강을 설치하였으며, 실험체의 좌측 끝 부분을 15㎝ 돌출시켜 실험하였다.

변위계(LVDT)는 중앙부에 3개소를 설치하여 가력단계에 따른 실험체의 변위를 측정하였고, 철근 스트레인게이지는 철근 중앙부에 3개를 붙였으며, 콘크리트 스트레인게이지는 실험체 중앙부에 1개를 부착하여 부재의 변위 및 변형도를 측정하였다.

모든 측정장치(Load Cell, D.T, S.G)의 측정 데이터는 Data Logger에 연결하여 수집하였으며, 개인용 컴퓨터를 이용하여 변환 처리하였다. 또한 각각의 실험체의 균열 폭을 관찰하면서 직접 도면에 균열된 전 과정을 그리며 발생균열 끝에 하중 값을 기록하였다(그림 6 참조)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 결과

1) 압축강도 실험 결과

부재실험의 재료적 특성을 알 수 있는 실험체 종류별 압축강도 실험을 실시한 결과, 재령 28일 압축강도 값이 가장 높

게 측정된 섬유보강 실험체는 셀룰로오스섬유보강 실험체로 280.4kgf/㎠이며, 재령 180일에는 강섬유보강 실험체로 250.7 kgf/㎠로 압축강도가 가장 높게 나타났다. 무보강 실험체의 경우 재령 28일에는 277.4kgf/㎠, 재령 180일에는 273.1kgf/㎠로 강도의 변화는 크지 않았다.

무보강 실험체와 섬유보강 실험체의 압축강도를 비교하면, 재령 경과시 섬유보강실험체가 약간 낮게 나타나 본 실험 결과에서는 콘크리트에 대한 섬유보강의 효과가 없는 것으로 나타났다. 섬유 종류별 콘크리트의 압축강도시험 결과는 표 5 및 그림 4와 같다.

표 5. 콘크리트 압축강도 결과

실험체명	7일 강도 (kgf/㎠)		28일 강도 (kgf/㎠)		90일 강도 (kgf/㎠)		180일 강도 (kgf/㎠)	
N-1	129.4		269.8		291.3		282.6	
N-2	130.0	128.9	301.0	277.4	296.4	291.6	269.8	273.1
N-3	127.4		261.3		287.1		267.0	
S-1	130.8		231.3		277.5		211.8	
S-2	131.9	131.9	270.4	250.6	287.9	277.3	261.2	250.7
S-3	133.1		250.0		266.4		279.2	
P-1	127.7		269.5		275.5		247.2	
P-2	124.9	128.5	251.1	252.1	253.4	264.1	249.4	251.6
P-3	133.1		235.6		263.3		258.2	
C-1	127.4		278.3		281.4		220.6	
C-2	122.9	125.9	269.5	280.4	267.8	269.3	274.6	237.8
C-3	127.4		293.3		258.5		218.3	

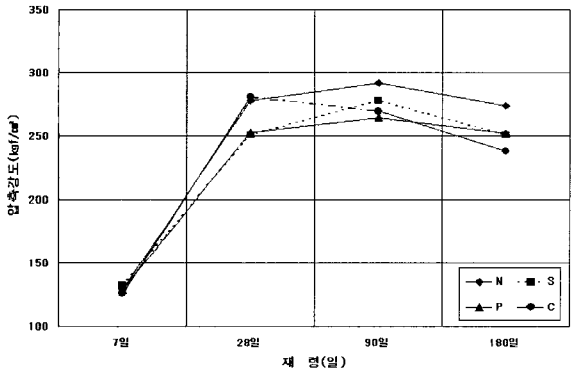


그림 3. 콘크리트 재령별 압축강도

2) 부재실험체 실험 결과

각 시험체별 부재 실험결과, 초기균열응력은 19.63kgf/㎠, 항복강도는 54.87kgf/㎠, 최대강도는 59.43kgf/㎠로 모두 강섬유보강 실험체가 높게 나타났다.

초기균열응력이 가장 낮은 실험체는 무보강 실험체이며, 항복강도와 최대강도가 낮은 실험체는 셀룰로오스섬유보강 실험체였다. 전단보강근이 없는 실험체의 실험결과는 표 6 및 그림 5와 같다.

표 6. 전단보강근이 없는 실험체의 실험 결과

시험체명	초기균열응력 σcr (kgf/㎠)		항복강도 σy (kgf/㎠)		최대강도 σmax (kgf/㎠)	
N-1	7.55	9.03	30.61	31.91	37.71	36.80
N-2	10.51		33.20		35.87	
S-1	19.09	19.63	54.27	54.87	61.31	59.43
S-2	20.16		55.47		57.55	
P-1	9.39	10.89	32.16	31.74	33.76	33.68
P-2	12.40		31.31		33.60	
C-1	12.48	10.44	26.37	25.97	29.92	29.83
C-2	8.40		24.56		29.73	

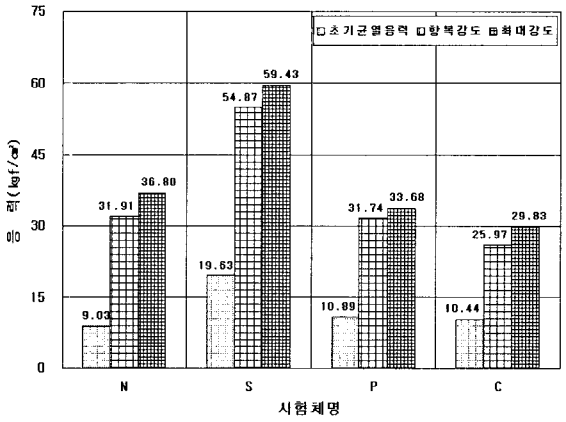
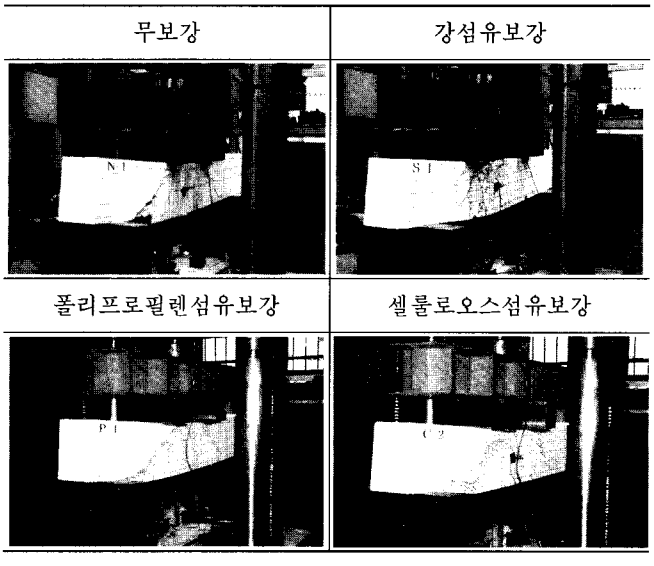


그림 4. 전단보강근이 없는 실험체의 실험결과

사진 2. 섬유보강 실험체의 실험 전경

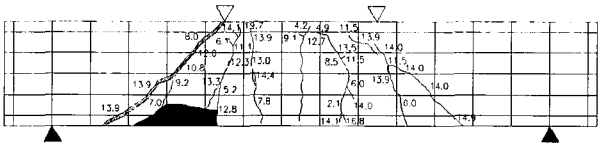


3.2 실험체의 균열 및 파괴형태

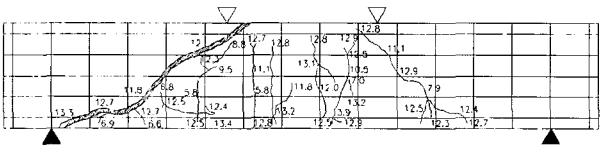
전단보강근이 없는 실험체에 하중을 가하면 부재의 파괴현상은 초기균열이 보의 중앙 하부에서 휨균열에 의한 선행 파괴 후, 하중의 증가로 사인장균열이 발생하여 휨균열과 사인장균열에 의한 파괴 현상으로 인하여 두 힘에 의한 균열이 합성되어 부재의 파괴형태가 나타내었다.

또한 사인장균열로 인하여 균열의 진행방향이 부재 중앙부에서 단부 지점 쪽으로 진행되면서 균열이 10~20㎜ 정도의 폭으로 발생하였다.

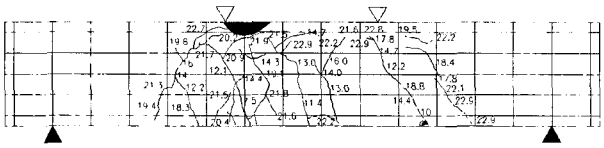
강섬유보강 콘크리트 시험체는 최대강도 후 응력은 천천히 감소면서 처짐은 계속 증가하였으나, 그 외 모든 실험체는 최대강도 후 처짐은 계속 증가하나 응력은 일정 시간 정지하였다가 갑자기 큰 폭으로 감소하면서 부재의 처짐 속도가 빨라졌다.



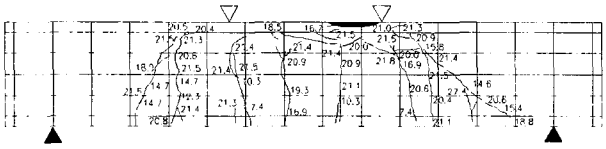
(가) N-1 실험체



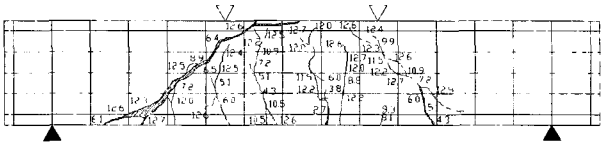
(나) N-2 실험체



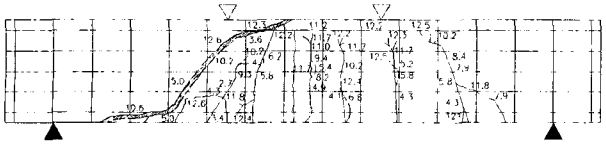
(다) S-1 실험체



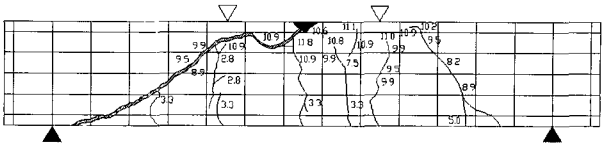
(라) S-2 실험체



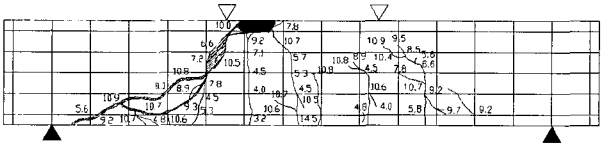
(마) P-1 실험체



(바) P-2 실험체

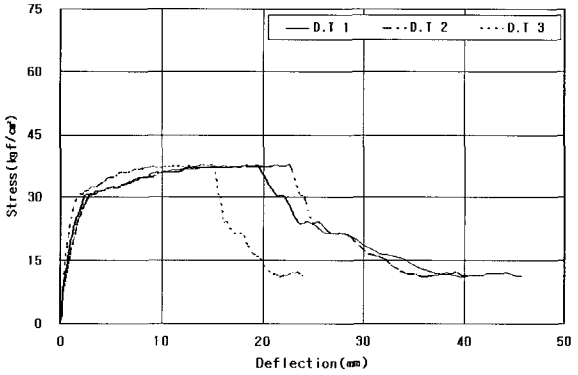


(사) C-1 실험체

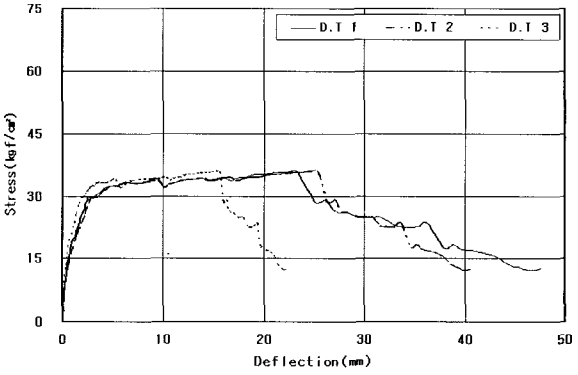


(아) C-2 실험체

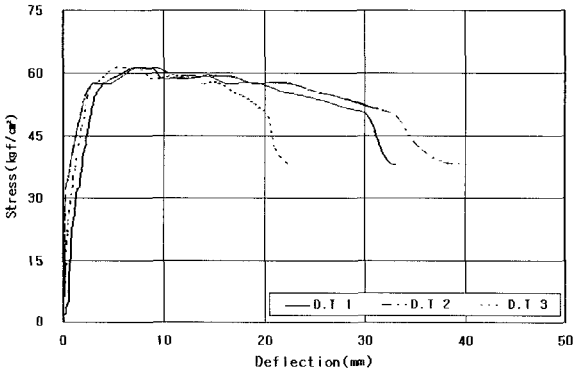
그림 5. 전단보강근이 없는 실험체의 균열도



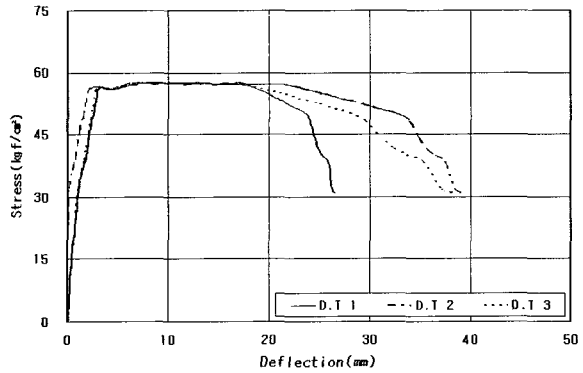
(가) N-1 실험체



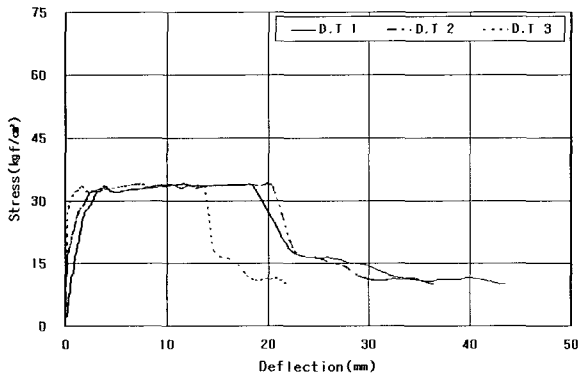
(나) N-2 실험체



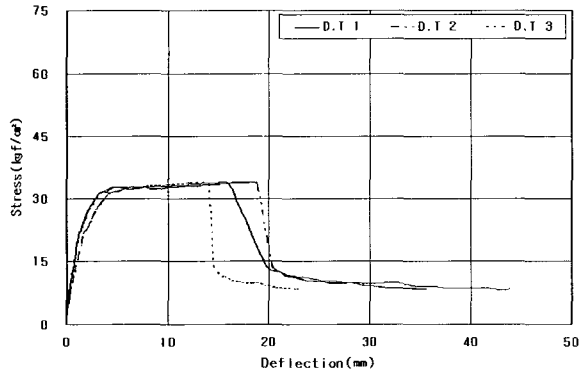
(다) S-1 실험체



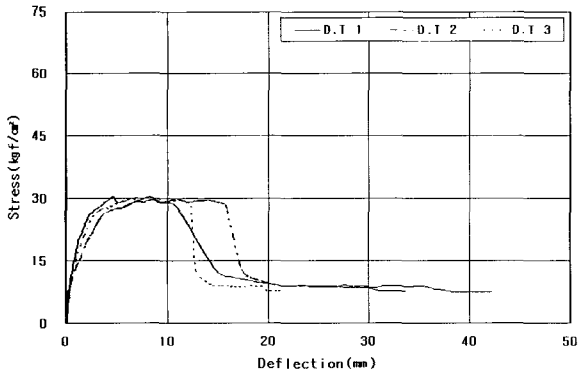
(라) S-2 실험체



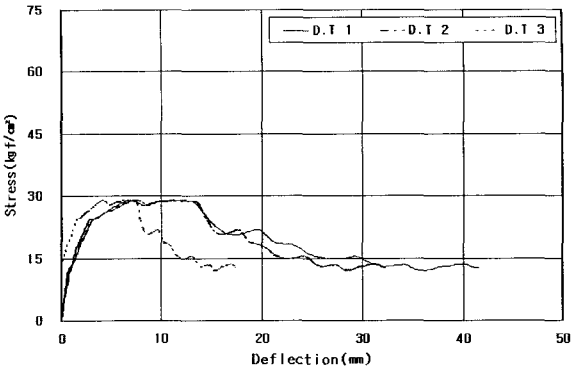
(마) P-1 실험체



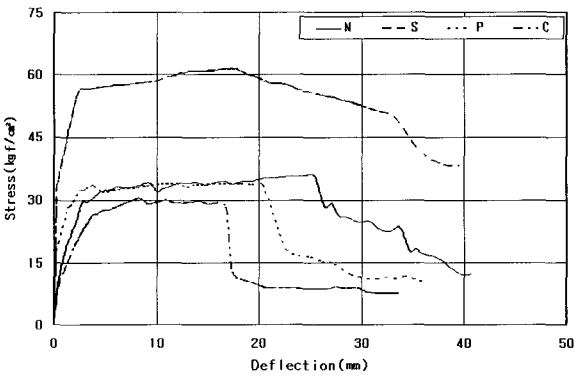
(바) P-2 실험체



(사) C-1 실험체



(아) C-2 실험체



(자) 실험체 종류별 비교 (D.T 2)

그림 6. 전단보강근이 없는 실험체의 응력-변위곡선

4. 부재의 연성능력

철근콘크리트 부재나 구조물의 설계시 사용되는 연성이나 취성의 개념은 그림 8과 같은 하중-변위 곡선으로부터 잘 알 수 있다.

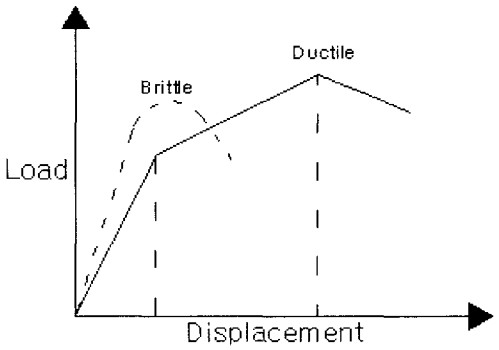


그림 7. 연성 및 취성거동

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

ACI Committee 363에서는 구조물이 견딜 수 있는 최대하중을 더 이상 지지할 수 없을 때 파괴된다고 하는 파괴의 정의에 따라 다음 식과 같이 평가하기도 한다.

표 7. 전단보강근이 없는 실험체의 연성계수

시험체명	항복강도						최대강도						연성계수	
	강도 (kgf/㎠)	평균 (kgf/㎠)	처짐 (㎜)	평균 (㎜)	실험값/기준값	평균	강도 (kgf/㎠)	평균 (kgf/㎠)	처짐 (㎜)	평균 (㎜)	실험값/기준값	평균	μmax	평균
N-1	30.61	31.91	4.06	5.13	0.96	1.00	37.71	36.80	21.28	23.32	1.02	1.00	5.24	4.67
N-2	33.20		6.20		12.04		35.87		25.36		0.98		4.09	
S-1	54.27	54.87	2.12	2.13	1.70	1.72	61.31	59.43	17.88	17.37	1.67	1.62	8.43	8.18
S-2	55.47		2.13		1.74		57.55		16.86		1.56		7.92	
P-1	32.16	31.74	2.48	2.83	1.01	1.00	33.76	33.68	16.06	17.50	0.92	0.92	6.48	6.20
P-2	31.31		3.18		0.98		33.60		18.84		0.91		5.92	
C-1	26.37	25.97	3.12	3.22	0.83	0.78	29.92	29.83	16.80	17.70	0.81	0.81	5.38	5.49
C-2	24.56		3.32		0.77		29.73		18.60		0.81		5.60	

$\mu max = \delta max / \delta y$

여기서, δmax : 최대하중에 대응하는 변위
δy : 부재항복시의 변위
μmax : 최대하중시의 연성계수

4.1 부재 실험체의 연성

시험체의 연성계수는 무보강 실험체는 4.67, 강섬유보강 실험체는 8.18, 폴리프로필렌섬유보강 실험체는 6.20, 셀룰로오스섬유보강 실험체는 5.49로 강섬유보강 실험체가 가장 높게 나타났으며, 강섬유보강 실험체가 무보강 실험체보다 연성계수가 약 75.2%정도 높게 나타났다. 실험체의 연성능력은 그림 9와 같다.

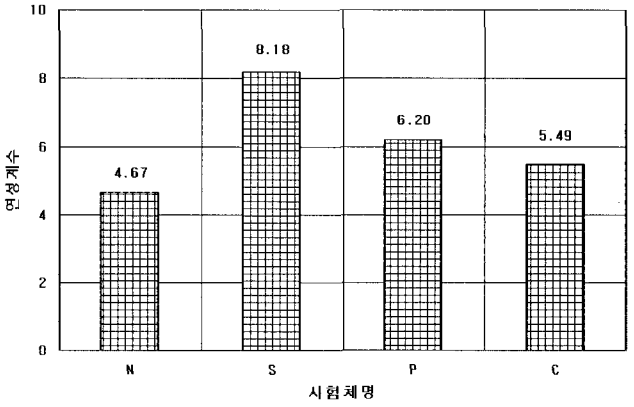


그림 8. 전단보강근이 없는 실험체의 연성 능력

실험체의 내력 증가율은 항복강도 및 최대강도 모두 강섬유보강 실험체가 높게 나타났으며, 셀룰로오스섬유보강 실험체가 가장 낮게 나타났다. 실험체의 내력 증가율은 그림 8 과 같다.

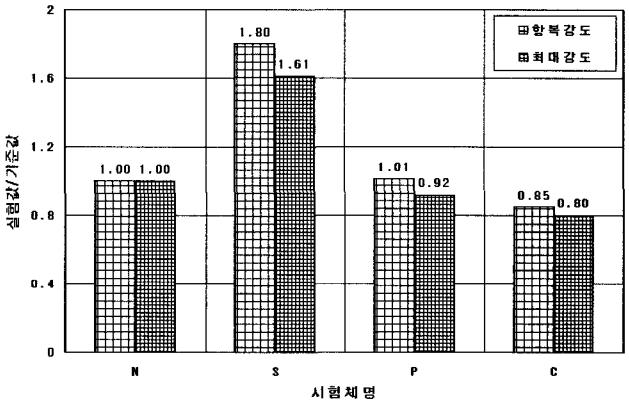


그림 9. 전단보강근이 없는 실험체의 내력 증가율

5. 결 론

섬유보강 종류별(무보강, 강섬유, 폴리프로필렌섬유, 셀룰로오스섬유) 보강 콘크리트를 사용하여 압축강도 실험 및 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 실험을 통하여 각종 섬유의 재료적인 특성과 철근콘크리트에 미치는 영향을 파악한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부재실험의 재료적 특성을 알 수 있는 실험체 종류별 압축강도 실험을 실시한 결과, 재령 28일 압축강도 값이 가장 높게 측정된 섬유보강 실험체는 셀룰로오스섬유보강 실험체로 280.4kgf/㎠이며, 재령 180일에는 강섬유보강 실험체로 250.7kgf/㎠로 압축강도가 가장 높게 나타났다. 무보강 실험체의 경우 재령 28일에는 277.4kgf/㎠, 재령 180일에는 273.1kgf/㎠로 강도의 변화는 크지 않았다.

2) 무보강 실험체와 섬유보강 실험체의 압축강도를 비교하면, 재령 경과시 섬유보강실험체가 약간 낮게 나타나 콘크리트의 압축강도에 대한 섬유보강의 효과가 없는 것으로 나타났다.

3) 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보의 실험결과, 실험체의 연성계수는 무보강 실험체는 4.67, 강섬유보강 실험체는 8.18, 폴리프로필렌섬유보강 실험체는 6.20, 셀룰로오스섬유보강 실험체는 5.49로 강섬유보강 실험체가 가장 높게 나타났다. 무보강 실험체와 강섬유보강 실험체를 비교하였을 경우, 강섬유보강 실험체가 무보강 실험체보다 연성계수가 약 75.2%정도 높게 나타났다.

4) 실험체의 내력 증가율은 항복강도와 최대강도 모두 강섬유보강 실험체가 높게 나타났으며, 셀룰로오스섬유보강 실험체가 가장 낮게 나타났다. 또한, 부재의 파괴현상은 중앙부의 휨응력에 의한 선행 파괴 후 점차 단부의 전단응력에 의한 파괴 현상으로 나타났으며, 두 힘이 합성되어 부재의 파괴가 진행되었다.

5) 셀룰로오스섬유보강 콘크리트는 압축강도에 대한 효과가 있는 것으로 나타났으며, 강섬유보강 콘크리트는 균열 저항능력 및 인성을 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 섬유보강 콘크리트를 실제 구조물에 적용시 섬유의 특성에 따라 선정하여 사용하는 것이 좋다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 구성모외 4인, "전단보강이 없는 강섬유보강 철근콘크리트 보의 전단강도", 한국콘크리트학회 춘계학술발표논문집 제13권 1호, pp.591~596. 2001.
2. 하기주외 4인, "초기재령 강섬유보강 철근콘크리트 보의 휨성능에 대한 실험적 연구", 대한건축학회 춘계학술발표논문집 제21권 제1호, pp.75~78. 2001.
3. 대한건축학회, "섬유보강 콘크리트", 1997.
4. David Edward Scott "Characterization of Fibrillated Polypro-pylene and Recycled Waste Fiber Reinforced Concrete" Georgia Institute Technology, 1992.
5. ACI Committee 544 ; "Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete". ACI. J.(ACU 544.4R), pp.563~580. 1988.
6. ACI Committee 544 ; State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. JL. American Concrete Institute Proc. Vol.70, No.11, Nov. pp.729~744. 1973.