

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트보의 전단거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Shear Behavior of Polymer-Steel Fibrous High Strength Concrete Beams

곽계환* 조선정** 김원태** 조한용***

Kwak Kae-Hwan Cho Sun-Chung Kim Won-Tea Cho Han-Yong

ABSTRACT

Steel fiber and Polymer are used widely for the reinforcement material of RC structures because of its excellence of durability, serviceability as well as mechanical properties. Polymer-Steel fibrous high strength concrete beams' input ratio are 1.0%. The shear span-to-depth ratio are 1.5, 2.8 and 3.6, compressive strength of specimens 320kgf/cm², 436kgf/cm² and 520kgf/cm² in 28 days. The static test was carried out to measure the ultimate load, the initial load of flexural crack and of diagonal crack, from which crack patterns and fracture modes are earned. Also, stress-strain, load-strain and load-deflection are examined during the test cracks(shear crack, flexural crack, and diagonal tension crack), when the load values are sketched according to the growth of crack.

Result are as follows; (1) The failure modes of the specimens increase in rigidity and durability in accordance with the increase of mixing steel fiber and polymer. (2) The load of initial crack was the same as the theory of shear-crack strength (3) Polymer-Steel fibrous high strength concrete beams have increased the deflection and strain at failure load, improving the brittleness of the high strength concrete. (4) In this result of study, an additional study need to make a need formular because the study is different from ACI formular and Zsutty formular.

1. 서론

고강도 콘크리트의 사용은 조기강도의 증대, 콘크리트 부재의 단면감소, 건조 수축의 저감과 불리당의 감소, 공기단축, 수밀성 및 기밀성을 통한 내구성 향상 등의 공학적 특성 개선과 경제적 절감효과라는 측면에서 적극적인 개발이 이루어지고 있다. 또한 폴리머의 특성은 우선 인장, 휨, 압축강도가 일반 시멘트 콘크리트보다 6배정도 강하고, 경량 이어서 제품의 두께를 얇게 하여 중량을 줄일 수 있다. 강섬유는 보강재로 개발 도입하여 상당한 성과를 보고 있는 추세에 있다. 기존 콘크리트보다 작은 단면으로 시공할 수 있으며, 휨강도 증대, 피로저항성 증대, 충격에 대한 저항성 증대, 내열성, 동결융해에 대한 저항성 증대 등의 특성을 갖는 고품질 콘크리트 시공이 가능하게 되었다.

* 정회원 원광대학교 토목환경공학과 정교수·공학박사
** 정회원 원광대학교 토목환경공학과 박사과정·공학석사
*** 원광대학교 토목환경공학과 석사과정

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 철근콘크리트 보의 전단저항 능력을 파악하기 위해서 본 실험에서는 콘크리트의 압축강도 변화는 320kgf/cm², 436kgf/cm², 520kgf/cm²이 되도록 3단계로 나누었으며 보의 전단지간대 유효높이의 비인 전단지간·깊이비(a/d)는 1.5, 2.8, 3.6으로 3종류로 변화시켰다. 특히 정적실험에서는 극한하중, 초기 휨균열하중 및 초기사인장균열하중등을 관찰하고 하중과 철근의 변형률관계, 하중과 중앙처짐관계, 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상등을 분석하였다. 따라서 본 논문에서는 폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 재료역학적 특성을 파악한 후 구조적 거동을 파악하기 위하여 고강도 철근콘크리트 보의 전단거동 특성에 대하여 합리성 및 타당성 여부를 비교 분석하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험개요

취성 재료로 분류되는 콘크리트는 공칭압축강도가 증가할수록 취성거동의 경향이 크게 나타나는데 본 연구에서는 비교적 높은 강도를 갖는 고강도 콘크리트에 폴리머와 강섬유를 혼입하여 재료의 강도 특성과 역학적 거동 특성을 규명하고자 한다. 고강도 콘크리트에 폴리머와 강섬유를 혼입하여 보강효과를 분석한다. 이를 위해 공시체에서는 압축강도실험, 조깅인장강도실험을 수행하여 압축강도, 조깅인장강도를 비교하고 또한 응력-변형률 관계를 산출·고찰한다. 시편에서는 초기휨균열강도, 초기전단균열강도, 극한전단강도를 관찰하여 하중-처짐관계, 하중-변형률관계를 얻어내고 폴리머-강섬유를 고강도 콘크리트의 제반특성에 대한 혼입효과를 규명하였다.

2.2 사용재료의 특성

본 연구에서 사용된 폴리머는 SBR 라텍스(KSL 362)라 하는데 시멘트 콘크리트용 라텍스로서 시멘트와 혼화성이 우수하여 콘크리트에 첨가하여 사용하면 방수성, 내충격성, 강도 보강등에 우수하며, 이에 관한 특성은 표1.과 같다.

표 1. SBR 라텍스의 특성

고형분(%)	ph(25° C)	표면장력(dyne/cm ²)	점도(cps)
48.5	10	40	80

강섬유(Steel Fiber)는 박판절삭법의 연강선재를 냉간 가공한 길이 60mm, 직경 0.8mm, 형상비 75(= $\frac{6}{0.08}$)의 벨기에 제품(Dramix사)을 사용하였다. 특징으로는 단면은 각이 졌고 소재는 대부분 0.3~0.5mm 두께의 냉간압연강판이다. 그리고 인장강도는 30~40kgf/mm²이며 항복강도는 20~30kgf/mm²이다. 시멘트는 비중이 3.14인 ○○사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 잔골재는 강모래로서 비중은 2.62, 조립율은 2.75이다. 잔골재의 물리적 특성은 다음과 같다.

표 2. 잔골재의 물리적 특성

건조비중	함수율	단위용적	각 체의 통과 백분율(%)								조립율
			10mm	NO.4	NO.8	NO.16	NO.30	NO.50	NO.100	PAN	
2.62	1.05	1620	100	99.2	95.6	85.8	57.6	21.0	4.8	0.0	2.75

고강도를 얻기 위해서는 일반적으로 등근 강자갈보다는 쇄석이 유리하다고 알려져 있으며, 지나치게 모난 골재를 사용하면 단위수량이 증가하여 강도가 저하되므로 이에 대한 세심한 주의가 요구된다. 본

실험에서는 대량생산이 가능하고 실용화 측면에서 굵은 골재는 최대치수가 25mm인 쇄석을 사용하였고 표3.에 물리적 특성을 나타내었다.

표 3. 굵은골재의 물리적 특성

최대치수	건조비중	흡수율	단위용적	각 체의 통과 백분율(%)						조립율	
				40 (mm)	25 (mm)	19 (mm)	13 (mm)	10 (mm)	NO.4 NO.8		
25	2.6	0.86	1611	100	99.3	99.3	46.9	49.9	1.7	0.2	6.52

실리카흙은 실리콘 또는 페로실리콘 등으로 귀금속 합금철을 제조하는 과정에서 생기는 폐가스를 응집한 것으로서 SiO_2 를 주성분으로 한 초미립자의 산업부산물이다. 실리카흙은 백색에 가까운 회색을 띄고 있으며 비중은 2.1~2.2정도이고 분말도는 $1\mu m$ 이하의 구형의 초미립자로서 평균입경은 $0.10\mu m$ 정도이다. 실리카흙의 화학성분은 사용재료, 주제품의 종류 및 제조방식에 따라 다르나 화학성분의 대부분이 SiO_2 를 90%이상 함유한 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 사용한 실리카흙은 노르웨이산 마이크로실리카로서 초미분말의 실리카 제품을 사용하였다. 시편제작에 사용된 인장철근(이형철근)은 직경 19mm를 사용하였다.

2.3 배합설계

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 배합은 무엇보다도 폴리머와 강섬유를 균일하게 분산시키는 것이 중요하다. 그리고 고강도 콘크리트의 배합은 보통 콘크리트보다 낮은 물-시멘트비를 적용함으로 워커빌리티가 좋지 않아 감수제 사용이 필요하다고 생각하나 폴리머의 역할로 감수제 사용이 필요없게 되었다. 또한 굵은 골재의 최대치수는 콘크리트의 강도 발현에 중대한 영향을 미치기 때문에 신중하게 결정해야 한다.

배합은 중량배합 방법으로 하였고 배합 또는 시편을 제작할 때 응결시간이 매우 빨라서 신속한 행동이 필요하였다.

본 실험에서는 폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 제조를 위하여 수차례의 시험배합을 수행하여 최적배합을 얻었으며 제조조건은 다음과 같다.

- (1) 시멘트는 보통포틀랜드시멘트를 사용하고 잔골재는 강모래를 사용하였다.
 - (2) 굵은 골재의 최대치수는 실용화 측면에서 대량생산이 가능한 25mm로 하였다.
 - (3) 콘크리트 물결합재비가 35%, 30%, 30%에 대하여 단위시멘트량을 각각 $320kgf/cm^2$, $600kgf/cm^2$, $680kgf/cm^2$ 로 하였다.
 - (4) 콘크리트 물결합재비가 35%, 30%, 30%에 대하여 잔골재율은 43%, 35%, 35%로 변화시켰다.
- 이에 대한 배합설계는 다음과 같다.

표 4. 폴리머-강섬유 혼입 고강도 콘크리트의 배합설계표

Concrete Type	Max size (mm)	W/C (%)	Steel Fiber (%)	SF (%)	Unit volume(kg/m^3)				
					W	C	S	G	P
PSNS	25	35	1.0	-	111.9	320.0	790.0	1300.0	64.0
PSHS1	25	30	1.0	10.0	180.0	600.0	581.0	1121.0	120.0
PSHS2	25	30	1.0	15.0	204.0	680.0	514.0	947.0	136.0

2.4 실험방법 및 측정

공시체 제작 및 강도측정

강도실험용 공시체 제작은 $\phi 150 \times 300\text{mm}$ 몰드를 사용하였으며 원주형 몰드에 3층으로 나누어 채우고 각층마다 25회씩 다짐을 실시하는 등 콘크리트를 KSF 2403규정에 따라 제작하였다. 공시체 제작 1일후 몰드를 탈형하여 표준수중양생을 실시하여 제령 28일 압축강도와 인장강도를 측정하였다. 콘크리트 공시체의 압축강도 및 인장강도는 습윤양성한 공시체를 꺼내어 표면의 물기를 닦고 시험기에 장치한 후 KSF 2405, KSF 2423의 규정에 의해 하중을 매초 2.5kgf/cm^2 의 일정한 속도로 재하하여 실험을 실시하였다.

부재의 제원 및 시편제작

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단거동을 연구하기 위하여 시험체의 제작은 거푸집 두께 12mm의 합판에 단면 $15 \times 30\text{cm}$ 의 보를 길이별로 다르게 하였고 시험체의 주요변수들을 고려하여 정적실험용 시험체 9개를 제작하였다. 여기서 강도별로 PSNS는 폴리머-강섬유를 혼입한 보통강도, PSHS는 폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트를 나타내고 각각 전단지간·깊이비로 I, II, III으로 1.5, 2.8, 3.6으로 하였다. 제작된 실험부재의 제원은 다음과 같다.

표 5. 시험시편의 제원 및 명칭

부재 명칭	부재의 크기 (cm)	인장철근 (mm)	스터럽 (mm)	전단지간비 (a/d)	인장철근비 (ρ_w , %)
PSNS I	15×30×130	$\phi 19$	None	1.5	1.53
PSNS II	15×30×190	"	"	2.8	"
PSNS III	15×30×240	"	"	3.6	"
PSHS1-I	15×30×130	$\phi 19$	"	1.5	"
PSHS1-II	15×30×190	"	"	2.8	"
PSHS1-III	15×30×240	"	"	3.6	"
PSHS2-I	15×30×130	$\phi 19$	"	1.5	"
PSHS2-II	15×30×190	"	"	2.8	"
PSHS2-III	15×30×240	"	"	3.6	"

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 시멘트플 양이 많고 동일한 슬럼프에서 점성이 크기 때문에 용량 100 l의 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료는 잔골재, 굵은 골재, 시멘트, 실리카흙 순으로 투입하고 건비빔을 실시한 후 물과 폴리머를 넣어 다시 혼합하였다. 최종적으로 강섬유를 콘크리트에 뿌려서 다시 5분 정도 혼합하였다. 강섬유를 투입한 후 너무 장시간 혼합하게 되면 화이버 볼(Fiber Ball)현상이 일어났으며 적합한 혼합시간은 4~5분 정도였다.

9개의 시편은 콘크리트 타설시 진동다짐으로 충분한 다짐을 하였으며 제작 48시간 후에 탈형 하여 즉시 비닐로 콘크리트 표면을 덮어 수분이탈을 방지하였고 비닐을 벗긴 후 보온 양생포로 시험체를 덮어 주었으며, 그 후 매일 물을 주어 습윤양생을 실시하였다. 시험체 제작 14일 이후에는 보온 양생포를 벗겨내고 실험직전까지 공기중양생을 실시하였다.

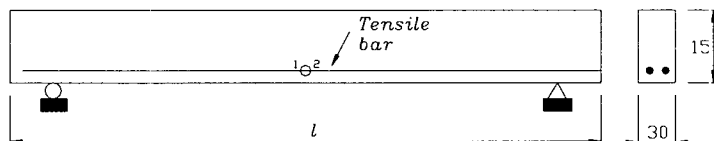


그림 1. 실험부재의 제원 및 센서 부착 위치

재하 및 실험방법

본 실험은 폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 철근콘크리트 보의 전단거동에 관한 실험으로서 하중의 재하간격을 20cm로 하고 유효높이에 대한 전단지간깊이비(a/d)는 1.5, 2.8, 3.6으로 하였으며 단순지지 조건에서 4점 재하를 실시하였다. 또한 실험에 앞서 모든 시험체는 부재의 표면에 10cm간격으로 가로줄과 세로줄을 그어 콘크리트의 균열성장과정을 측정할 수 있도록 백색 페인트를 도포하였다. 이와 같은 백색피복은 실험중의 균열양상을 관찰하는데 편리함을 도모하기 위한 것이다. 정적실험에서 하중재하는 200ton용량의 유압식 만능시험기인 U.T.M을 사용하였다. 파괴에 이를 때까지 1.0ton씩 증가시켰다. 그래서 하중증가에 따른 균열성장과정, 극한 하중, 초기사인장균열하중, 초기휨균열하중, 하중과 철근의 변형율관계, 하중과 중앙처짐관계등을 관찰하였다. 모든 시험체는 보의 중앙처짐을 측정하기 위하여 보의 중앙부에 다이알게이지를 설치하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 역학적 특성

압축강도 및 인장강도

폴리머와 1.0% 강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 압축강도 실험에서 세가지 시리즈로 분류하여 PSNS-시리즈는 w/c=35%, PSHS1-시리즈는 w/c=30 %, PSHS2-시리즈는 w/c=30 %로 하였으며 각 시리즈별로 실험한 28일 압축강도와 인장강도의 결과는 다음 표6.과 같다.

표 6, Test results of Compressive Strength

Series	w/c (%)	Compressive Strength	Tensile strength	압축강도와 인장강도의 비 (f _t /f _{sp})
		(kgf/cm ²) 28-day	(kgf/cm ²) 28-day	
PSNS	35	320	34.2	9.35
PSHS1	30	436	45.8	9.52
PSHS2	30	520	55.1	9.43

※ 각 시리즈별로 재령에 따른 압축강도는 각각 3개의 압축강도 평균치임

3.2 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상

(1) 균열성장

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트보는 압축강도에 상관없이 휨균열은 하중 재하 초기에 순수휨구간에서 발생하여 하중을 증가시키에 따라 미세하게 계속 성장하였다. 하중의 증가에 따라 사인장균열은 전단지간내의 복부중앙에서 단독으로 급작스럽게 발생하거나 중앙에서 1.0d~1.5d 만큼 떨어진 지점에서 휨균열 끝에서 발달하며 성장하였다. 이와 같이 발생한 사인장균열은 하중을 증가시키에 따라 윗부분의 균열전단은 하중점을 향하여 아랫부분의 균열전단은 지지점을 향하여 동시에 성장하여 결국은 극한하중에서 파괴는 사인장균열에 의한 전단인장 혹은 전단압축파괴의 양상을 나타내었다. 휨균열은 어느 정도 수준에서 균열의 진전이 멈추었으며 파괴에 미치는 영향은 아주 작았다. 이러한 사인장 균열은 하중의 증가에 따라서 스티럽이 없는 경우에는 재하점 방향과 지지점 방향으로 약 45° 각도를 가지고 진전되어 대부분은 최종적으로 인장철근을 따르는 할렬파괴로 보가 파괴되었다. 균열성장과정에서 가장 윤곽이 뚜렷한 것은 지지점에서 1-1.5d만큼 떨어져서 재하점을 향하는 사인장 균열이었다.

(2) 파괴양상

폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트보는 압축강도에 관계없이 전형적인 휨파괴가 유발되었다.

폴리머-강섬유를 혼입한 보의 하중을 가하는 과정에서 휨균열의 발생으로 부재 내부에서는 내력의 재분배가 생기며 균열이 생긴 단면의 철근의 변형율이 현저히 커지는 것을 관찰할 수 있다. 하중이 점점 증가하면 균열은 서서히 재하점을 향하여 발전하는데 그 균열의 발전속도는 보통 콘크리트보 보다 훨씬 느리다. 이때 중립축은 계속 위로 상승하며 압축응력은 점점 커진다. 그리고 폴리머를 콘크리트에 혼합함으로써 인장력이 증대되었음을 알 수 있고 하중이 극한 하중에 이르렀어도 부재는 곧바로 파괴되지 않으며 강섬유의 뽀뽀작용에 의하여 어느 정도 내하력을 갖고 있다. 결국 부재는 강섬유의 뽀뽀 작용에 의하여 파괴를 일으킨다. 강섬유가 콘크리트에서 뽀뽀하는 소리는 실험에서 직접 들 수 있으며 파괴직전에 보의 새로운 균열이 불규칙적으로 많이 발생한다. 이는 폴리머와 강섬유가 아직도 콘크리트와 부착되어 있으며 그 파괴는 섬유와의 뽀뽀작용으로 파괴되는 것을 확인할 수 있었다.

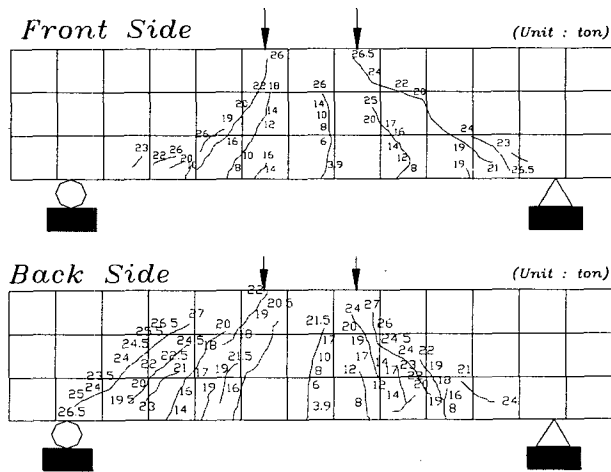


그림 2. 폴리머·강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 보의 균열도 PSHS1-I (a/d : 1.5)

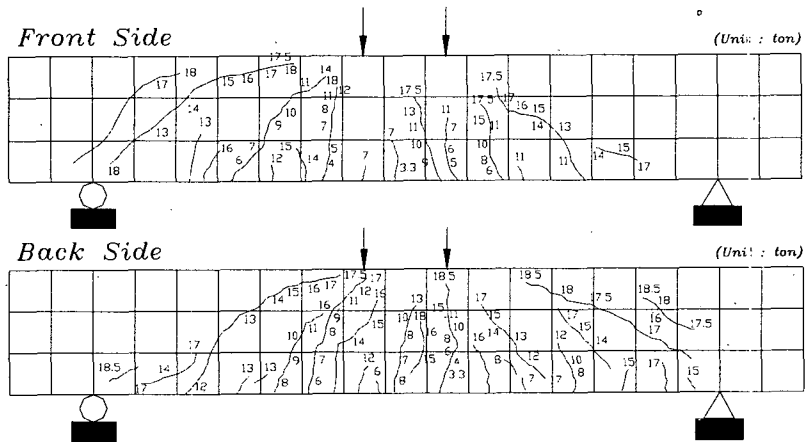


그림 3. 폴리머·강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 보의 균열도 PSHS1-II (a/d : 2.8)

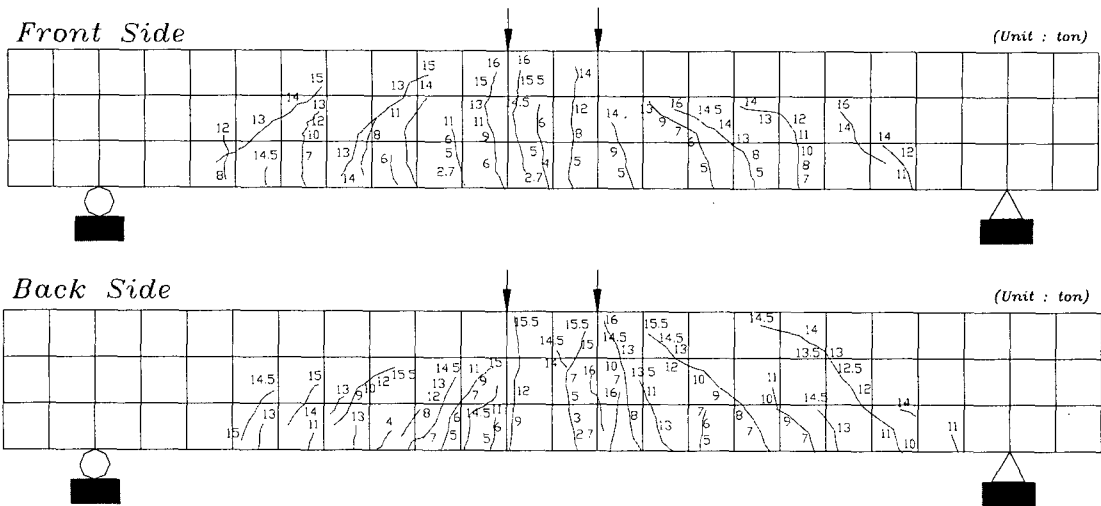


그림 4. 폴리머·강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 보의 균열도 PSHS1-III (a/d : 3.6)

3.3 하중과 변형율관계

보의 변형율은 철근에 부착한 변형계이지(steel strain gages)를 이용하여 측정하였다. 폴리머-강섬유를 혼입한 콘크리트 각각의 부재에 대한 하중과 변형율 관계는 보통강도, 고강도로 구별하여 전단시간·깊이비(a/d)별로 나타내었다

인장철근의 변형율은 하중의 증가에 따라 일정한 기울기를 가지고 증가하였다. 초기 직선부분에서 인장철근은 콘크리트와 동일한 변형율로 거동하였으나 콘크리트의 휨균열이 발생한 후 철근과 강섬유만이 인장력을 부담하므로 변형율의 기울기가 증가하며 이때 부재 내부에서는 내력의 재분배가 생긴다. 즉 균열단면의 철근의 응력과 변형율은 제일 크며 균열사이의 콘크리트는 여전히 외력에 저항하기 때문에 철근의 응력과 변형율은 모두 같지 않은 변화를 일으키는데 균열단면과 멀리 떨어져 있을수록 철근의 변형율은 작으며 따라서 응력도 작아진다. 하중이 계속 증가하면 중립축도 직선에 따라 변화하는 것이 아니라 균열의 발생과 함께 파도식으로 변한다. 전체 하중을 가하는 과정에서 폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 철근 변형율의 증가가 보통 고강도 콘크리트보다 작다. 이는 폴리머와 강섬유도 철근과 함께 외력에 저항하기 때문이다. 즉 동일한 하중에서 폴리머-강섬유를 혼입함으로써 부재의 파괴되는 시간은 보통 콘크리트보다 길다. 대부분의 과정에 있어서 부재는 탄성거동을 하며 강재가 항복한 후의 소성변형은 아주 짧은 시간내에 진행된다.

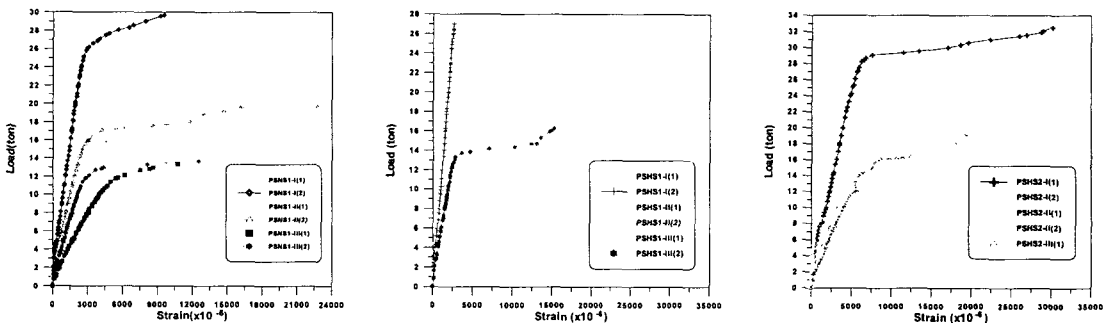


그림 5. PSNS부재, PSHS1부재 및 PSHS2부재의 하중-변형율 관계

4. 결 론

1) 고강도콘크리트는 취성적 성질을 보이는 것이 일반적이나 폴리머와 강섬유를 혼입함으로써 고강도콘크리트의 단점인 취성적 성질을 연성화 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2) 시편이 파괴된 극한강도 결과값을 볼 때 극한강도의 증가는 압축강도의 증가에 의한 영향보다는 전단지간·깊이비의 영향이 더 크다는 것을 확인할 수 있었다.

3) 주어진 강도와 전단지간·깊이비에서 동일한 하중에서의 변형율은 큰 차이가 없으나 전단지간·깊이비에 관계없이 인장철근의 항복후에는 큰 변형율을 나타내었고 강섬유의 영향으로 후균열이 크게 작용되어 부재의 변형이 지속되고 있음을 확인할 수 있었다.

4) 실제 실험값과 ACI 기준식을 비교한 결과 ACI 기준식은 폴리머·강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 경우에도 적용 가능할 정도의 근소한 편차를 나타냈으나 Zsutty의 제안식은 큰 편차를 나타내어 적용하기 어려운 것으로 사료된다. 또한 강섬유의 인자가 포함되어 있지 않기 때문에 ACI 기준식이나 Zsutty의 제안식과는 다른 강섬유의 혼입율에 따른 인자를 고려한 제안식이 필요하다고 생각되며 따라서 강섬유 혼입양이나 혼입율에 대한 인자를 고려하는 추가적인 연구가 필요하리라 사료된다.

참고문헌

1. 박 종 건(1997) "고강도 철근콘크리트 보의 전단파로거동에 관한 연구" 박사학위논문, 원광대학교 대학원 pp.31~36, 42, 72~73
2. Shah, S.P. and Rangan, B.V., "Fiber Reinforced Concrete Properties," ACI Journal, Vol. 68, No. 2 February, 1971, pp.126~135.
3. ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete," ACI Journal, Vol. 75, No. 7, July, 1978, pp.283~289.
4. Narayanan, R. and Darwish, I, Y. S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement," ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 3, May, 1987, pp.216~227.
5. K.H.Kwak, J.Sun and C.T.T. Hsu, "Shear-Faigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams" ACI Structural Journal, Vol. 88, No.2 November-December 1992, pp. 658-664