

강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 보의 전단거동

Shear Behavior of Polymer Cement High Strength Concrete Beams Mixed with Steel Fiber

곽 계 환^{*a} · 박 종 건^{*} · 곽 경 현^{*}

Kwak, Kae Hwan · Park, Jong Gun · Kwak, Kyung Hern

Abstract

Steel fiber and polymer are used widely for reinforcement material of RC structures because of its excellences of the durability, serviceability as well as mechanical properties. The purpose of this study is to investigate the shear behavior of polymer cement high strength concrete beams mixed with steel fiber. The compressive strength of concrete was based on the 100×200 mm cylinder specimens. The compressive strength of concrete are 320 kgf/cm², 436 kgf/cm² and 520 kgf/cm² in the 28 days. The static test was carried out to measure the ultimate load, the initial load of flexural and diagonal cracking, crack patterns and fracture modes. Also, load-strain and load-deflection examined. During the test cracks were sketched against the load values according to the growth of crack. Result are as follows; (1) The failure modes of the specimens are increased in rigidity and durability with mixing steel fiber and polymer. (2) The load of initial crack was similar a theory of shear-crack strength. (3) The deflection and strain at failure load of Polymer-steel fiber high strength concrete beams were increased, improving the brittleness of the high strength concrete.

Keywords : Polymer, Steel fiber, The growth of crack, The ultimate load, Strain, Shear span ratio

I. 서 론

최근, 콘크리트 구조물이 점차 대형화, 장대화, 특수화 되어감에 따라 요구되는 것은 고강도 콘크

리트의 취약점인 취성적 성질의 개선에 있다. 고강도 콘크리트를 연성화시키는데 여러 소재들이 사용되고 있지만 그 중에서도 강섬유에 관심을 두게 되었고 더불어 강성, 연성, 인성, 내구성 등이 크게 향상된 폴리머를 고려하게 되었다. 고강도 콘크리트의 사용은 조기강도의 증대, 콘크리트 부재의 단면감소, 건조 수축의 저감과 블리딩의 감소, 공기단축 및 수밀·기밀성을 통한 내구성 향상 등의 공학적 특성 개선과 경제적 절감효과라는 측면에서 적

* 원광대학교 공과대학

a Corresponding author. Tel.: +82-63-850-6720

fax: +82-63-857-7204

E-mail address: kkh6720@wonkwang.ac.kr

극적인 개발이 이루어지고 있다. 고분자 재료를 사용하는 폴리머 콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 강도, 연성, 인성, 화학저항성, 내구성이 크게 향상되므로 구조용 재료뿐만 아니라 비구조용 재료로도 활용되고 있다. 본 연구에서는 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 보의 전단거동을 파악하기 위하여 기본실험과 정적실험을 실시하였다. 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트의 재료역학적 성질을 파악하기 위하여 기본실험에서는 압축강도와 쪼갠인장강도 특성을 규명하였다.

따라서, 본 연구에서는 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트의 재료역학적 특성을 파악한 후 구조적 거동을 파악하기 위하여 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 보의 전단거동 특성에 대하여 합리성 및 타당성 여부를 비교 분석하고자 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

가. 폴리머(SBR 라텍스)

본 실험에서 사용된 폴리머는 SBR 라텍스(KSL 362)라 하는데 시멘트 콘크리트용 라텍스로서 시멘트와 혼화성이 우수하여 콘크리트에 첨가하여 사용하면 방수성, 내충격성, 강도보강 등에 우수하며, 이에 대한 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of polymer

Type of polymer	Specific gravity (20°C)	pH (25°C)	Viscosity (cps)	Total solids (%)
SBR	1.02	10	80	48.5

나. 강섬유(Steel Fiber)

박판절삭법의 연강선재를 냉간 가공한 길이 60 mm, 직경 0.8 mm, 형상비 $75(= \frac{6}{0.08})$ 의 벨기에 제품(Dramix사)을 사용하였다. 특징으로는 단면은

각이 젖고 소재는 대부분 0.3~0.5 mm 두께의 냉간 압연강판이다. 그리고 인장강도는 $30\sim 40 \text{ kgf/mm}^2$ 이며 항복강도는 $20\sim 30 \text{ kgf/mm}^2$ 이다.

다. 잔골재

본 실험에서 사용할 잔골재는 강모래로서, 이에 대한 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of fine aggregate

Specific gravity	Passing percentage(%)								F·M
	10mm	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	PAN	
2.62	100	99.2	95.6	85.8	57.6	21.0	4.8	0.0	2.75

라. 굵은골재

고강도를 얻기 위해서는 일반적으로 둥근 강자갈보다는 쇠석이 유리하다고 알려져 있으나, 지나치게 모난 골재를 사용하면 단위수량이 증가하여 강도가 저하되므로 이에 대한 세심한 주의가 요구된다. 본 실험에서는 대량생산이 가능하고 실용화 측면에서 굵은 골재는 최대치수가 25 mm인 쇠석을 사용하였다. 이에 대한 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of crushed coarse aggregate

Max size (mm)	Specific gravity	Passing percentage(%)							F·M
		40 (mm)	25 (mm)	19 (mm)	13 (mm)	10 (mm)	No.4	No.8	
25	2.6	100	99.3	99.3	46.9	49.9	1.7	0.2	6.52

마. 철근

시편제작에 사용된 인장철근은 직경 19mm의 이형철근을 사용하였으며, 그 특성은 Table 4와 같다.

Table 4 Characteristics of tensile steel

Bar size	Nominal area (cm ²)	Yielding strength (kgf/cm ²)	Ultimate tensile strength (kgf/cm ²)	Modulus elasticity (kgf/cm ²)
D19	2,865	3,560	5,020	2.04×10^6

Table 5 Chemical composition and physical properties of silica fume

Ig. Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Total	Specific gravity	Surface area (cm ² /g)
1.9	90.0	1.5	3.0	2.0	0.6	0.5	0.5	100	2.2	200,000

바. 실리카흙

본 실험에서 사용한 실리카흙은 노르웨이산 마이 크로실리카로서 초미분말의 실리카 제품이며 이에 대한 물리적 성질 및 화학적 성분은 Table 5와 같다.

2. 실험방법

가. 실험개요

본 연구에서는 고강도 콘크리트에 폴리머와 강섬유를 혼입하여 재료의 강도 특성과 보의 전단거동 특성을 파악하고자 한다. 고강도 콘크리트에 폴리머와 강섬유를 혼입하여 보강효과를 분석한다. 이를 위해 공시체에서는 압축강도와 쪼갬인장강도 실험을 수행한다. 시편에서는 초기 휨균열강도, 초기 전단균열강도, 극한전단강도를 관찰하여 하중-치짐 관계, 하중-변형률 관계를 얻어내고 강섬유 혼입한 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트의 제반특성에 대한 혼입효과를 규명하고자 한다. 따라서, 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 보의 전단저항 능력을 파악하기 위해서는 콘크리트의 압축강도 변화를 3종류로 나누었으며 보의 전단지간대 유효높이의 비인 전단지간/깊이비(a/d)는 1.5, 2.8, 3.6으로 3종류로 변화시켰다. 또한, 정적실험에서는 극한하중, 초기 휨균열하중 및 초기 사인장균열하중 등을 관찰하고 하중과 철근의 변형률 관계, 하중과 중앙치짐 관계, 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상 등을 분석했다.

나. 배합설계

본 실험에서는 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 제조를 위하여 수차례의 시험배합을 수행하여 최적배합을 얻었다. 배합설계는 3가지로 나누어 PSN1-type는 물-시멘트비(W/C)= 35%,

Table 6 Mix proportion of high strength concrete input polymer-steel fiber

Concrete type	Max size (mm)	W/C (%)	Steel fiber (%)	Silica fume (%)	Unit volume(kg/m ³)				
					W	C	S	G	P
PSN1	25	35	1.0	-	111	320	790	1300	64
PSH1	25	30	1.0	10.0	180	600	581	1121	120
PSH2	25	30	1.0	15.0	204	680	514	947	136

PSN1:Normal strength concrete of polymer-steel fiber
PSH1, 2:High strength concrete of polymer-steel fiber

PSH1-type는 물-시멘트비(W/C=30%), PSH2-type는 물-시멘트비(W/C=30%)으로 하였다. 이에 대한 배합설계는 Table 6과 같다.

다. 공시체 제작

1) 압축강도용 공시체

강섬유 혼입한 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 시멘트풀 양이 많고 동일한 슬럼프에서 점성이 크기 때문에 용량 100ℓ의 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료는 잔골재, 굵은 골재, 시멘트, 실리카흙 순으로 투입하고 건비율을 실시한 후 물과 폴리머를 넣어 다시 혼합하였다. 최종적으로 강섬유를 콘크리트에 뿌려서 다시 충분히 믹싱하였다. 강도실험용 공시체 제작은 Ø 150×300 mm 몰드를 사용하였으며 원주형 몰드에 3층으로 나누어 채우고 각층마다 25회씩 다짐을 실시하는 등 콘크리트를 KS F 2403 규정에 따라 제작하였다. 본 실험에서는 공시체의 편심량을 방지하기 위하여 공시체면을 평활하게 함이 중요하므로 유황 캘핑으로 마무리하였다.

2) 콘크리트 보

강섬유 혼입한 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트를

사용한 콘크리트 보의 전단거동을 연구하기 위하여 시험체의 제작은 거푸집 두께 12mm의 합판에 단면 15×30cm의 보를 길이별로 다르게 하였고 시험체의 주요변수들을 고려하여 정적실험용 시험체 9개를 제작하였다. 이에 대한 종류별 세부사항은

Table 7과 같고 실험체 상세도는 Fig. 1과 같으며 이 그림에서 볼 수 있듯이 전단보강철근을 갖지 않는다. 보는 탈형 즉시 비닐로 콘크리트 표면을 덮어 수분이탈을 방지하였고 비닐을 벗긴 후 보온 양생포로 시험체를 덮어 주었으며, 그 후 매일 물을

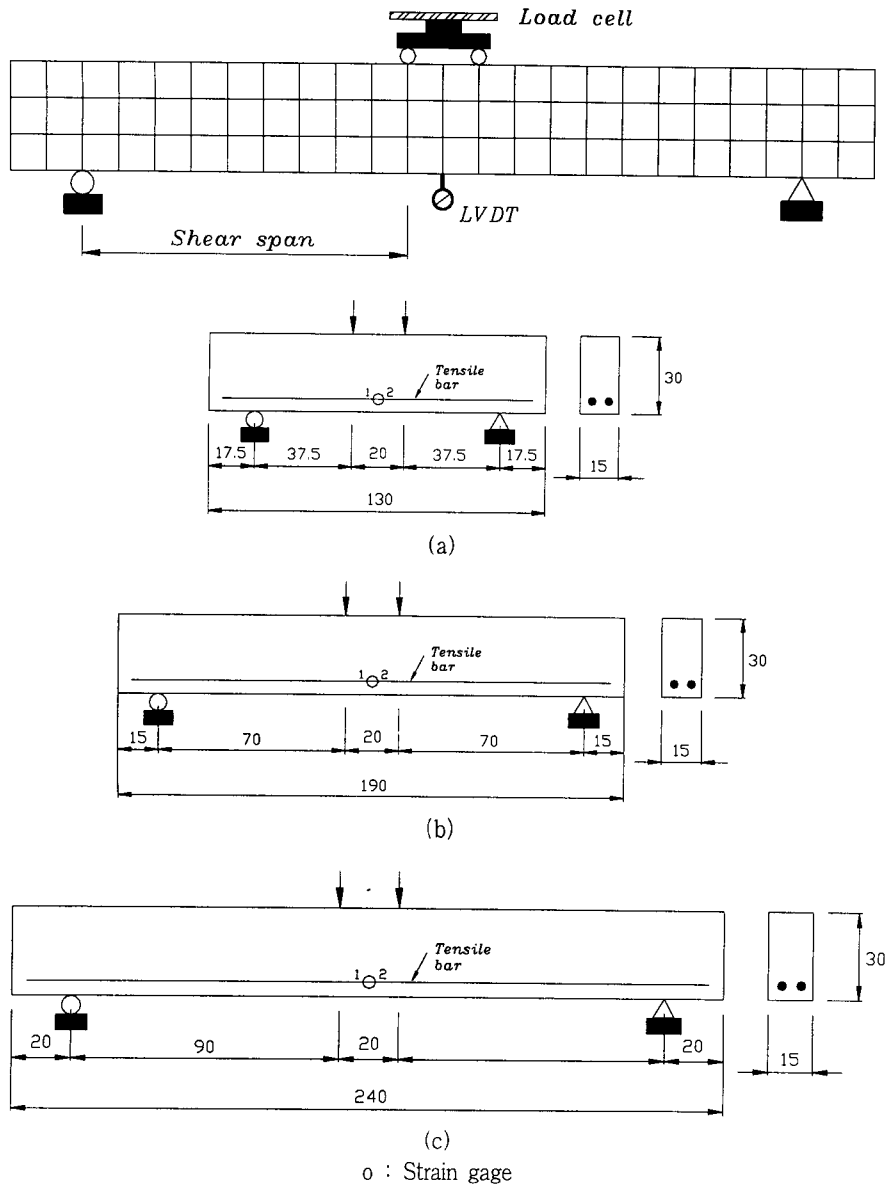


Fig. 1 Shape of test beams and loading arrangement

Table 7 Details of test specimen

Specimen	Beam size (cm)	Tensile steel ratio (mm)	Shear span-depth ratio (a/d)	Tensile steel ratio (ρ_w , %)
PSN1- I	15×30×130	φ 19	1.5	1.53
PSN1- II	15×30×190	"	2.8	"
PSN1- III	15×30×240	"	3.6	"
PSH1- I	15×30×130	φ 19	1.5	"
PSH1- II	15×30×190	"	2.8	"
PSH1- III	15×30×240	"	3.6	"
PSH2- I	15×30×130	φ 19	1.5	"
PSH2- II	15×30×190	"	2.8	"
PSH2- III	15×30×240	"	3.6	"

주어 습윤양생을 실시하였다. 시험체 제작 14일 이후에는 보온 양생포를 벗겨내고 실험직 전까지 공기중 양생을 실시하였다. 양생기간은 3~4개월 소요되었다. 여기서 강도별로 PSN는 폴리머-강섬유를 혼입한 보통강도, PSH는 폴리머-강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트를 나타내었고, 각각 전단지간/깊이비로 I, II, III으로 1.5, 2.8, 3.6으로 하였다.

라. 측정방법

1) 압축강도

공시체 제작 1일후 몰드를 탈형하여 20±2℃ 상온에서 표준수중양생을 실시하여 재령 28일 압축강도와 재령 28일 쪼갬인장강도를 측정하였다. 콘크리트 공시체의 압축강도와 쪼갬인장강도는 습윤양생한 공시체를 꺼내어 표면의 물기를 닦고 200tf 용량의 만능시험기에 장치한 후 KS F 2405, KS F 2423의 규정에 의해 하중을 매초 2.5 kgf/cm²의 일정한 속도로 재하하여 실험을 실시하였다.

2) 전단거동

강섬유 혼입한 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트보의 정적실험에서 시편의 지지조건은 단순보로 하였으며 4점 재하방식으로 중앙부에서 연직하중을 가하였으며 중앙부 2점하중의 재하점 간격은 20 cm 이다. 이 하중은 200 tf 용량의 만능시험기(UTM)



Fig. 2 Set-up of static test beams

를 이용한 하중조절방식에 의하여 가력하였으며 실험시간은 하나의 시편에 대하여 약 50분 정도가 소요되었다. 또한 실험에 앞서 모든 시험체는 부재의 표면에 백색 페인트를 도포하였고 10cm 간격으로 가로줄과 세로줄을 그어 콘크리트의 균열성장 과정을 측정하였다. 이와 같은 백색피복은 실험 중의 균열양상을 관찰하는데 편리함을 도모하기 위한 것이다. 하중과 중앙처짐의 관계는 시편의 순수 휨구간의 중앙에 LVDT를 설치하여 측정하였으며 하중과 변형율의 관계는 각각의 인장철근에 변형측정게이지를 부착하여 측정하였다. 하중증가에 따른 시편의 파괴형태와 극한하중을 측정하였다. 시편의 설치 및 측정모습은 Fig. 1~Fig. 2에 나타내었다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 기본강도 특성

본 실험에서 폴리머와 1.0% 강섬유를 혼입한

Table 8 Test results of compressive and splitting tensile strength

Concrete type	W/C (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Splitting tensile strength (kgf/cm ²)	f' _c /f _{sp}
		28-day	28-day	
PSN1	35	320	34	9.40
PSH1	30	436	46	9.47
PSH2	30	520	55	9.45

고강도 콘크리트 압축강도 및 쪼갬인장강도 실험을 하였다. 이에 대한 28일 압축강도 및 쪼갬인장강도 실험결과는 Table 8과 같다.

2. 전단거동의 특성

가. 하중증가에 따른 균열성장과 파괴양상
Fig. 3~Fig. 5에서 보는 바와 같이 강섬유 혼입

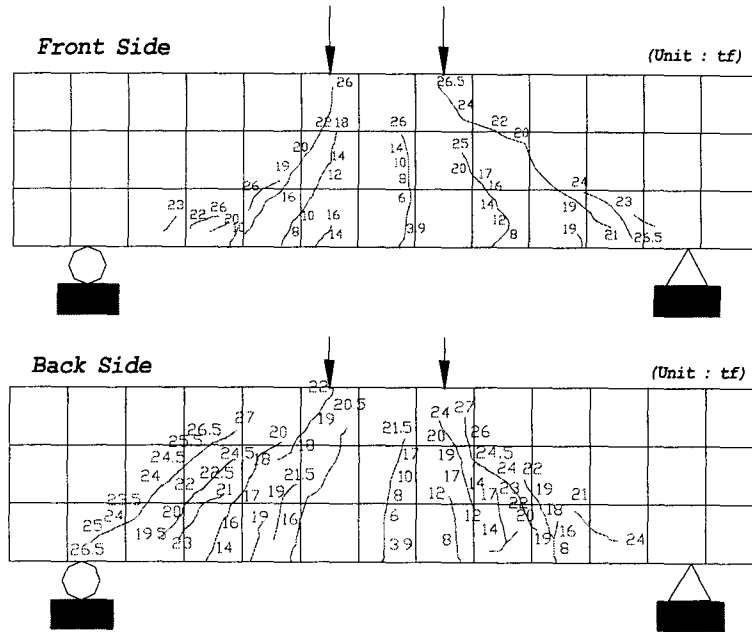


Fig. 3 Crack growth pattern of PSHI-I

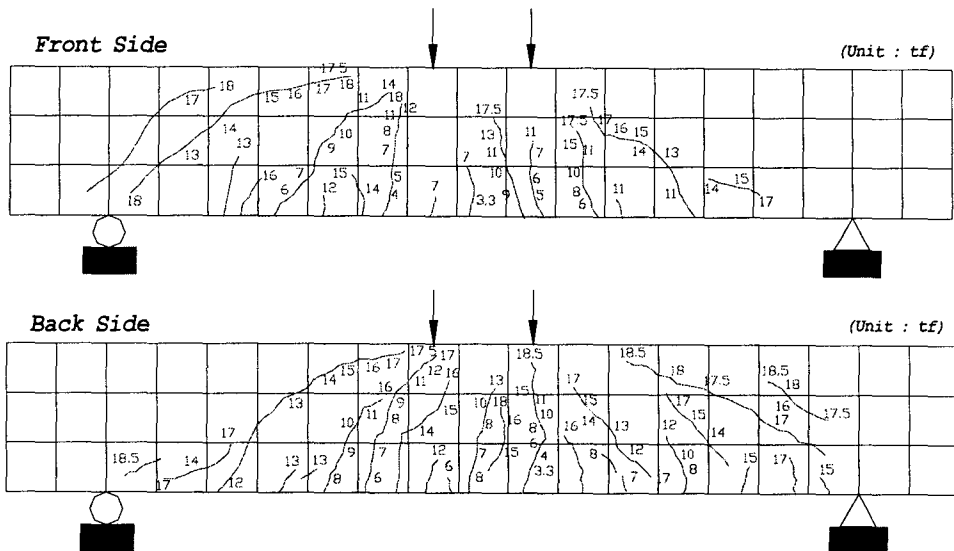


Fig. 4 Crack growth pattern of PSHI-II

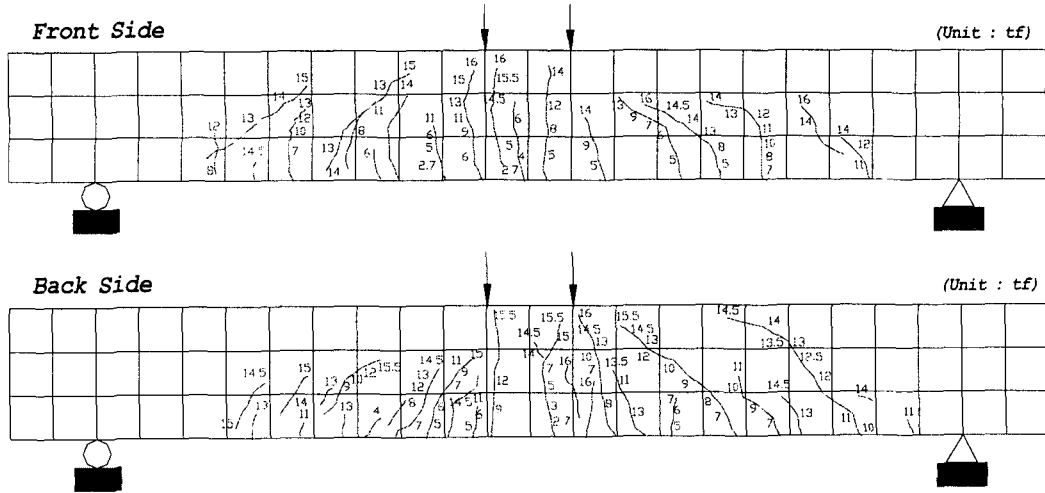


Fig. 5 Crack growth pattern of PSHI-III

한 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 보의 압축강도에 상관없이 휨균열은 하중 재하 초기에 순수휨구간에서 발생하여 하중을 증가시킴에 따라 미세하게 계속 성장하였다. 일정 하중단계에서 휨균열이 가력점을 향하면서 전단지간내의 보 중앙에서 사인장 균열이 갑작스럽게 발생했다. 그리고 폴리머를 콘크리트에 혼합하므로써 인장력이 증대되었음을 알 수 있고 하중이 극한하중에 이르렀어도 부재는 곧바로 파괴되지 않으며 강섬유에 의하여 어느 정도 내하력을 갖고 있다. 결국 부재는 강섬유가 뽑혔을 때 파괴를 일으키고 있음을 확인할 수 있었다. 강

섬유 혼입 폴리머 시멘트 콘크리트 보의 전단지간/깊이비(a/d)가 커질수록 사균열 및 극한하중은 감소하는 경향을 보이고 있으나, 콘크리트 압축강도 증가에 따른 사균열 및 극한하중의 증가함을 알 수 있었다.

나. 하중과 중앙처짐 관계

본 실험은 하중제어 방식으로 가력하였고 보의 중앙 처짐은 부재의 중앙부에 설치한 다이알게이지 값으로 구하였다. 강섬유 혼입한 폴리머 시멘트 고



Fig. 6 Failure feature of PSHI-I

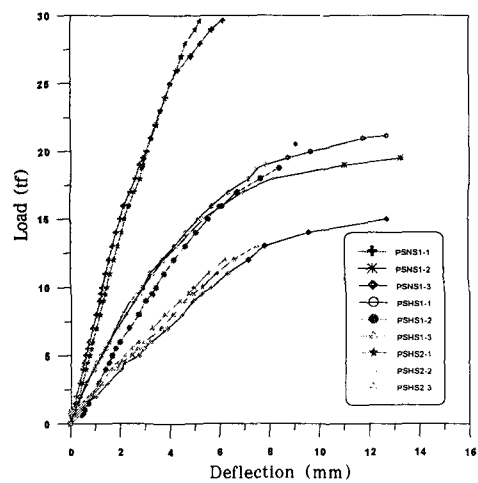


Fig. 7 Load - mid deflection curves

강도 콘크리트 보에 대한 하중과 중앙처짐 관계는 보통강도, 고강도로 구별하여 전단지간/깊이비(a/d) 별로 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 보의 중앙처짐은 초기에는 하중에 비례해서 비교적 직선임을 알 수 있으며 일정한 선형탄성 부재임을 알 수 있다. 하중이 증가하면서 직선관계가 벗어나면서 휨과 사인장균열이 발생하여 보의 강성을 감소시켜 처짐이 증가했다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 실험에서 사용된 모든 보의 초기 처짐의 기울기는 전단지간/깊이비(a/d)로 다르게 나타냈다. 사인장균열이 발생하기 전에는 보의 거동은 선형적이고 보의 강성은 보의 길이에 따라 변화였다.

다. 하중과 변형률관계

보의 변형률은 철근에 부착한 변형게이지(steel strain gages)를 이용하여 측정하였다. 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 콘크리트 보에 대한 하중과 변형률 관계는 보통강도와 고강도로 구별하여 전단지간/깊이비(a/d)별로 Fig. 8~Fig. 10에 나타내었다. 전단구간에서 사인장균열이 발생한 이후에는 큰 인장변형도를 나타냈으며 특히, 전단지간/깊이비(a/d)가 증가함에 따라 인장철근의 변형도의 증가율이 크게 나타났다. 동일한 전단지간/깊이비(a/d)에서

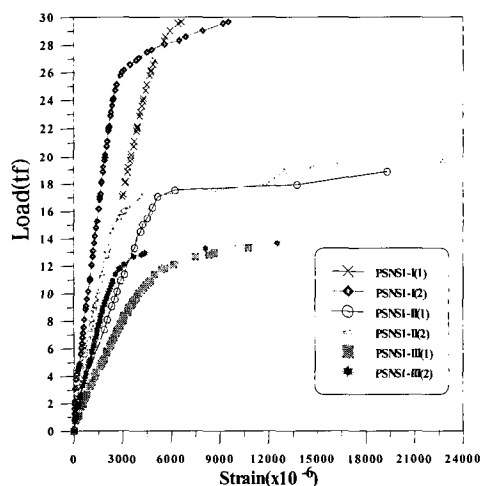


Fig. 8 Load - tensile steel strain of PSN1

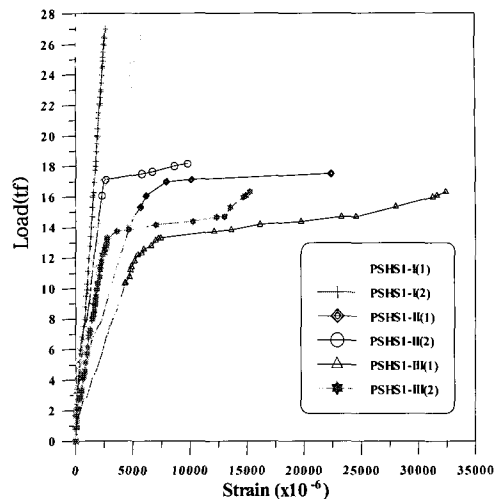


Fig. 9 Load - tensile steel strain of PSH1

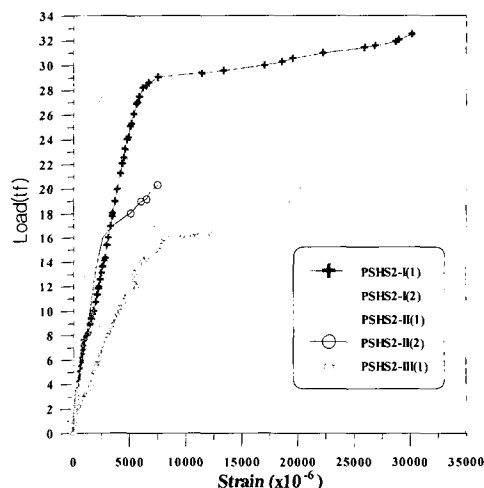


Fig. 10 Load - tensile steel strain of PSH2

인장철근의 변형률은 하중의 증가에 따라 일정한 기울기를 가지고 증가하였다. 폴리머-강섬유를 혼입한 보는 하중을 가하는 과정에서 휨균열의 발생으로 부재 내부에서는 내력의 재분배가 생기며 균열이 생긴 단면의 철근의 변형률이 현저히 커지는 것을 관찰할 수 있다. 초기 직선부분에서 인장철근은 콘크리트와 동일한 변형률로 거동하였으나 콘크리트의 휨균열이 발생한 후 철근과 강섬유만이 인장력을 부담하므로 변형률의 기울기가 증가하며 이

때 부재 내부에서는 내력의 재분배가 생겼다.

Table 9 Results of static test

Specimen	P_{fc} (tf)	P_{cr} (tf)	P_u (tf)	Failure mode
PSN1-I	3.9	14.0	27.0	Shear
PSN1-II	3.6	11.0	19.0	Shear
PSN1-III	4.0	13.6	15.5	Flexure
PSH1-I	4.2	14.0	29.5	Shear
PSH1-II	3.3	12.0	18.7	Shear
PSH1-III	2.7	10.0	16.3	Flexure
PSH2-I	4.8	14.0	33.0	Shear
PSH2-II	3.6	11.0	21.0	Shear
PSH2-III	2.3	14.0	17.1	Flexure

P_{fc} : The load at initial flexure cracking
 P_{cr} : The load at inclined cracking
 P_u : Ultimate load at failure

라. 정적실험 결과

정적실험 결과의 분석은 Table 9에 정리하였으며, Fig. 11~Fig. 12에서는 각각 전체 부재의 극한하중과 초기 사인장균열하중 값을 비교하여 나타내었다. 본 실험결과로 부터 PSNS1-II 실험체가 PSHS1-II보다 극한하중값이 약간 작은 것은 보의 편심작용 및 실험미속으로 조기에 파괴되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 실험에 의해 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트의 강도 및 보의 거동을 측정하였다. 이에 대해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고강도 콘크리트는 취성적 성질을 보이는 것이 일반적이거나 폴리머와 강섬유를 혼입함으로써 고

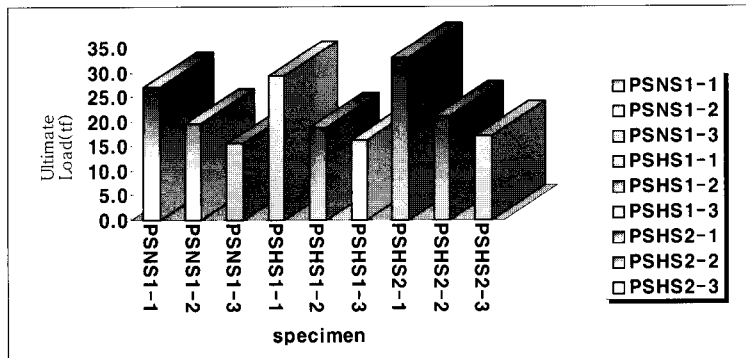


Fig. 11 Comparison of ultimate load

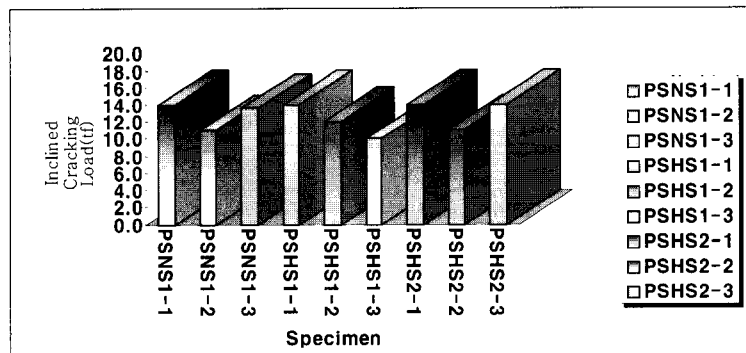


Fig. 12 Comparison of inclined cracking load

강도콘크리트의 단점인 취성적 성질을 연성화함을 알 수 있었다.

2. 시편이 파괴된 극한강도 결과값을 볼 때 극한 강도의 증가는 압축강도의 증가에 의한 영향보다는 전단지간/깊이비(a/d)의 영향이 더 크다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 주어진 강도와 전단지간/깊이비에서 동일한 하중에서의 변형률은 큰 차이가 없으나 전단지간/깊이비(a/d)에 관계없이 인장철근의 항복후에는 큰 변형률을 나타내었으며, 강섬유의 영향으로 후균열이 크게 작용되어 부재의 변형이 지속되고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 강섬유 혼입 폴리머 시멘트 고강도 콘크리트 보의 하중-처짐, 하중-변형률 관계를 얻어 콘크리트 구조물 설계시 기초자료로 이용될 것으로 판단된다.

본 논문은 2001년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 연구되었습니다.

References

1. Kwak, K. H., J. Sun and C.T.T. Hsu, 1992, Shear-faigue behavior of steel fiber reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 88(2), November-December, 658-664.
2. Hideaki Matsuda and Takashi Saheki, 1984, Effect of cement on properties of inverted emulsions and polymer from vinylmonomers with acid an hydride-adducted polypropylene glycol, *J. MACROMOL. SCL-CHEM*, A21(6&7), 775~792.
3. ACI Committee 363, 1987, Research needs for high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, November-December, 559~561.
4. ACI Committee 548, 1986, Guide for the Use of Polymer in Concrete, *ACI Structures Journal*, September-October, 798~828.
5. ACI Committee 318, 1995, Builed code requirements for reinforced concrete(ACI 318-95) and commentary(ACI 318R-95), American Concrete Institue.