

鋼纖維 補強콘크리트보의 剪斷特性에 관한 研究

A Study on the Shear Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams

文濟吉* · 洪益杓**

Moon, Je Kil · Hong, Ik Pyo

Abstract

Four series of fiber reinforced concrete beams without shear reinforcement were tested to determine their cracking shear strengths and ultimate shear capacities. Results of tests on 36 reinforced concrete beams (including 21 containing steel fibers) are reported. Four parameters were varied in the study, namely, the concrete compressive strength, volume fraction of fibers, shear span-to-depth ratio, and the tensile steel reinforcement.

The effects of fiber incorporation on failure modes, deflections, cracking shear strength, and ultimate shear strength have been examined. Resistance to shear stresses have been found to be improved by the inclusion of fibers. Based on these investigations, a method of computing the shear strength of steel fiber reinforced concrete beam is suggested. The comparisons between computed values and experimentally observed values are shown to verify the proposed theoretical treatment.

요 지

본 논문은 진단철근을 갖지 않는 강섬유보강콘크리트 보의 전단특성을 규명하고 균열전단강도와 극한전단강도를 예측하기 위한 것으로 섬유로 보강된 21개의 보를 포함한 총 36개의 보를 4 series로 나누어 실험을 수행하였다. 실험의 변수는 콘크리트의 강도, 섬유혼입율, 전단지간, 인장철근량 등이며, 실험과정을 통해 파괴형상, 처짐, 전단강도 등을 측정하였다.

실험결과로부터 섬유의 혼입량이 많아지고, 콘크리트의 강도가 커질수록, 그리고 전단지간이 짧아질수록 섬유보강콘크리트 보의 균열 및 극한전단강도가 증가됨을 밝혔다. 또한, 실험결과를 회귀분석하여 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안하였다. 제안된 추정식에 의한 계산값과 실험결과를 비교 검토하여 그 상관성을 확인하였다.

1. 서 론

콘크리트의 인장강도를 초과하는 주인장응력이 콘크리트보의 전단지간에 작용할 때 부재의 사방향

균열이 복부에 생기게 되며 결국은 보를 파괴시키게 된다. 또한 콘크리트의 취성은 부재에 초기균열이 형성된 후 매우 빠른 속도로 보를 파괴시키는 원인이 된다.

콘크리트에 강섬유가 혼입되면 콘크리트내에 균등하게 분산되는 섬유들의 균열억제 mechanism에

* 정희원 · 건국대학교 교수

** 정희원 · 안양전문대학 부교수

의해 콘크리트의 취성특성이 변화하여 상당한 연성을 갖도록 하는 효과가 있다.^(1,2) 또한 강섬유보강콘크리트는 섬유가 복부철근보다 좁은 간격으로 콘크리트내부에 분산되고, 부재가 하중을 받아 초기전단균열이 발생한 후 극한전단하중에 이르기까지 섬유가 부착이탈되기에 필요한 추가적인 에너지를 가지므로 보의 전단보강으로 강섬유의 혼입은 스테럽이나 절곡철근보다 유리한 점을 갖는다.^(3,4) 따라서 종래의 철근콘크리트 부재를 섬유로 보강하면 섬유가 전단철근의 역할을 대신하기도 하고, 보와 기둥이 만나는 곳 같은 철근보강의 한계단면에서 철근이 밀집되는 것을 방지할 수 있다.⁽⁵⁾

휨 하중을 받는 콘크리트 보의 전단 파괴는 보의 전단지간에서 발생하는 콘크리트의 인장파괴 때문에 생긴다. Kani⁽⁶⁾는 전단파괴를 막는 복부보강방법으로 철근콘크리트 단순지지보에서 보의 내부에 생기는 아치작용(arch action) 증진의 필요성을 주장했다. 철근콘크리트 보에 스테럽을 배치하거나 섬유를 보강하는 목적은 보의 압축구역을 지지하고 전단파괴에 저항하는 내부 아치작용에 대한 반력을 제공하기 위한 것이다.⁽⁴⁾ 1972년 Batson 등⁽⁴⁾이 보에 강섬유를 보강하면 스테럽의 대체효과를 갖는다는 연구결과를 발표한 이래, 1987년 Mansur 등⁽⁷⁾은 강섬유보강콘크리트 보의 전단강도실험을 통해 철근콘크리트 부재의 설계목적으로 규정된 ACI 규준식을 강섬유보강콘크리트에 이용할 수 있다는 연구결과를 발표했다. 또한 Narayanan 등⁽⁸⁾은 1987년 자신들의 실험성과와 다른 연구들에서의 실험자료를 회귀분석하여 섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안했다. 이상의 연구들에서 콘크리트 보에 강섬유가 혼입되면 상당한 량의 전단보강효과가 있음을 알았으나 콘크리트 보의 전단강도에 섬유가 미치는 효과를 명확히 규명하기에는 부족하였다.

본 연구는 종방향의 인장철근을 갖는 강섬유보강콘크리트 보에서 강섬유의 혼입으로 인한 복부전단보강 효과를 규명하고자 하는 것이다. 최근 장대지간의 교량이나 고층건물 등의 시공에 점차 사용이 확대되고 있는 고강도콘크리트에서 강섬유의 혼입효과를 알아보기 위해 콘크리트의 압축강도를 4단계로 나누어 228 kg/cm²에서 551 kg/cm²에 이르도록

변화시키고 여기에 섬유의 혼입량을 변수로 하였으며, 종래의 연구들^(4,5,8-13)에서 보의 전단강도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 전단지간을 변화시켜 각 series별 실험을 수행하였다. 또한 가장 폭넓게 사용될 수 있는 B배합의 콘크리트에는 인장철근량도 변수로 하였다.

섬유보강콘크리트의 전단특성을 알아보기 위한 실험적 연구들^(4,5,8,10)은 실험체의 대부분을 섬유로 보강한 철근콘크리트 보로 만들어 연구를 수행하였으나 본 논문은 강섬유의 보강이 철근콘크리트 보의 전단에 미치는 영향을 명확히 규명하기 위해 각 series별로 동일한 재료, 형상, 치수, 시험조건을 갖는 보를 같은 갯수의 전단철근을 갖지 않는 철근콘크리트 보와 섬유보강콘크리트 보로 제작하여 그 실험결과를 비교하였다. 총 36개의 보에 대한 실험에서 전단파괴되는 보의 파괴형상, 하중-처짐 관계, 전단강도 등을 측정 및 분석하고 다른 자료들과 비교 검토하였다. 측정된 자료로 회귀분석을 실시하여 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안하였다. 그리고 계산된 추정값과 본 연구에서 얻어진 측정값을 비교 분석하여 제안된 전단강도 추정공식의 타당성을 확인하였다.

2. 실험

2.1 사용재료

시멘트는 국내에서 생산되는 제1종 보통포틀랜드시멘트로 비중이 3.10이상인 것을 사용하였으며, 잔골재는 비중이 2.59인 한강산 모래로 조립율 2.98의 것을, 굵은골재는 비중이 2.70인 안양산 쇄석으로 조립율 6.36인 것을 사용하였다.

강섬유는 양단에 갈고리(hook)가 있는 Belgium BEKAERT사의 Dramix 섬유를 사용하였으며, 이는 개개의 섬유가 수용성 아교다발로 붙어있어 콘크리트 반죽 속에서 분산이 용이하도록 만들어진 것으로 비중 7.85, 직경 0.5 mm, 길이 30 mm로서 형상비(aspect ratio : l/d_f)가 60인 것이다. 실험용 보의 제작에 사용된 인장철근은 일반적으로 사용되는 SD 30 철근으로 항복강도가 3,148 kg/cm²이고 탄성계수가 2.04 × 10⁶ kg/cm²였다.

콘크리트의 고강도화와 시공성의 향상을 위해서

ASTM C 49 Type F로 규정된 나프타린계 고강도 감수제 DAREX SUPER 20을 사용하였으며 비중은 1.21이었다.

2.2 배합설계

배합은 콘크리트의 강도변화와 강섬유의 투입에 따른 시공성확보를 위해 예비시험을 통하여 강도변화에 적합한 물시멘트비를 얻었다. 이에 따라 180 kg의 단위수량을 고정시켜 놓은 상태에서 단위시멘트량을 변수로 하여 설계하였으며, 사용된 굵은골재최대치수 13 mm에 적합한 최소의 잔골재율 43%를 사용하였다.

배합은 A, B, C, D의 4가지 형태로 하였으며, 기존의 자료들^(2,3,5,7,8,11)을 검토한 결과 얻어진 최적의 섬유용적비를 1.0%로 정하여 섬유혼입율을 각 배합마다 0%와 1.0%로 나누어 비교하였다. 단, 가장 폭넓게 이용될 수 있는 콘크리트압축강도 433 kg/cm²의 B배합에 대해서는 강섬유의 혼입효과를 분석하기 위해 섬유혼입율(ρ_f)을 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%의 4가지로 나누어 시험을 실시하였으며, 고강도콘크리트에 속하는 B, C, D배합의 콘크리트 반죽에서는 강섬유의 투입으로 인한 워커빌리티의 개선을 위해 강섬유 투입 전 목표 슬럼프를 15 cm로 하여 시험을

수행하였다. 이에 따른 콘크리트의 압축강도와 할열인장강도는 표 1과 같다.

2.3 실험보의 설계

실험보의 단면형상은 폭(b)이 10 cm, 유효높이(d)가 17 cm, 총높이(h)가 20 cm인 단철근 직각형보로 부재의 총길이는 40~125 cm이고, 지간(L)은 30~115 cm이며, 인장철근량 $A_s=3.801 \text{ cm}^2(3-D13)$ 를 배치하여 강도설계법에 따른 과소철근보로 설계하였다. B배합에는 $A_s=2.534 \text{ cm}^2(2-D13)$ 인 보를 추가하여 인장철근량의 변화가 전단특성에 미치는 영향을 알아보았다. 복부의 전단보강이 없기 때문에 모든 부재가 전단파괴를 일으키도록 제작되었다. 실험부재의 지간변화는 콘크리트부재의 전단강도에 주요 변수로 알려진^(4,5,8-13) 전단지간-유효높이 비(a/d)를 1.4, 2.4, 3.4 등으로 변화시키기 위해서이며, 특히 B배합의 콘크리트에서는 이들 사이에 0.9와 1.9, 2.9의 a/d를 추가시켜 실험부재의 전단지간길이 변화에 따른 전단강도특성의 변화추이를 알아보았다.

실험부재의 단면형상, 치수 및 게이지 부착위치 등은 그림 1과 같으며, 하중재하점과 지지부에서의 국부적인 지압파괴를 방지하기 위해 강판을 사용하였다.

표 1. Properties of concrete

Mix Type	Fiber Content(%)	Slump (cm)	W/C (%)	Compressive Strength, σ_c or $\sigma_{cf}(\text{kg/cm}^2)$	Ten. Spl. Strength, σ_{sp} or $\sigma_{sp}(\text{kg/cm}^2)$
A	0	8	51	228	24.8
	1.0	0	51	247	28.5
B	0	17	40	433	37.9
	0.5	7	40	444	38.3
	1.0	5	40	460	42.0
	1.5	2	40	462	43.5
C	0	16	34	493	45.3
	1.0	5	34	523	46.8
D	0	14	30	551	44.8
	1.0	7	30	572	49.5

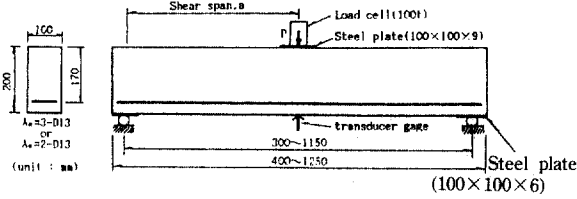


그림 1. Details of beams.

2.4 실험체의 제작 및 양생

콘크리트의 반죽은 30l 용량의 회전식 믹서로 굵은골재와 잔골재를 넣고 30초 정도 혼합한 후 시멘트를 넣어 각 재료가 충분히 고르게 분산된 뒤에 물을 첨가하여 1분간 다시 혼합하였다. 반죽이 끝난 후 슬럼프가 측정되었으며, 슬럼프값을 측정한 다음에는 목표슬럼프를 얻기 위해 이에 알맞은 혼화제량을 첨가하였다. 투입된 재료가 충분히 비벼지면 회전되는 믹서속에 강섬유를 손으로 투입하여 섬유가 고르게 분산될 때까지 반죽을 계속하였다. 섬유가 혼입된 콘크리트의 워커빌리티를 알기 위해 다시 슬럼프시험을 실시 하였다.

반죽된 콘크리트로 압축 및 활열인장강도 실험용 지름 10 cm, 높이 20 cm의 원주형공시체를 각 배합마다 3개씩 총 60개, 지간 변화에 따른 전단강도실험용 보 공시체 총 36개를 제작하였다. 전단강도실험용 부재 제작에 사용된 거푸집은 두께 12 mm의 강판으로 만들어져 거푸집의 변형이 생기지 않았다. 콘크리트의 타설시에는 붓으로 충분한 다짐을 실시 하였으며, 압축 및 활열인장강도실험용 공시체는 타설 24시간 후에 시멘트포로 캐핑을 실시하였다. 모든 공시체는 제작 48시간 뒤에 탈형하여 살수한 후 마포를 덮고 비닐로 밀폐시켜 재령 25일까지 습윤양생을 실시하였다. 각 공시체는 재령 25일 후 대기중에 노출시켜 재령 28일에 해당되는 실험을 실시하였다.

2.5 실험장치 및 방법

압축강도와 활열인장강도 실험은 100t 용량의 유압식 만능시험기를 사용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도시험방법)와 KS F 2423(콘크리트의 인장강도시험방법)에 따라 시행하였다. 전단강도실험에서 실험부재의 지지조건은 단순보이며, 3점하중재하방식으로 중앙부에서 연직하중을 가하는데

하중보정을 위해서는 100t 용량의 load cell을 이용하였다. 하중재하점의 지압파괴와 편심재하를 방지하기 위해 재하점과 지지부를 그림 1과 같은 정4각형 강판으로 보강했는데, 이는 Narayanan⁽¹⁰⁾의 실험적 연구에서와 같이 작은 a/d를 갖는 보는 큰 전단저항능력을 갖기 때문에 발생할 수 있는 용력 집중부의 국부적 지압파괴를 방지하기 위한 것이다. 실험부재의 중앙점하부에는 처짐측정을 위해 transducer를 설치하여 하중증가에 따른 변위량을 X-Y recorder로 기록하였으며, 각 하중단계마다 균열형상 및 균열폭을 최소독치 0.01 mm의 광학균열측정기(eye gage)로 측정하여 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

A에서 D에 이르는 4종의 콘크리트 배합에 따라 series별로 제작된 실험보의 각종 변수에 따른 실험결과들은 표 2와 같다.

3.1 전단거동

3.1.1 파괴형상

실험보에 어떤 일정한 하중이 작용하면 보의 복부에는 전단균열이 발생하는데 초기균열은 대부분 복부의 중앙부에서 생성되었다. 배합 A인 보통콘크리트에서 부터 배합 B, C, D에 이르도록 콘크리트의 강도가 증가하면 균열의 폭이 좁아지고 간격도 작아짐을 볼 수 있었는데 이는 매트릭스의 높은 강성(stiffness)으로 인한 낮은 변형 때문이라 생각된다.

실험한 모든 보는 전단으로 파괴되었으며 전단파괴의 형태는 a/d에 따라 변화되었다. 그림 2(a)는 a/d를 0.9에서 1.4, 1.9, 2.4, 2.9, 3.4에 이르도록 변화시킨 경우로 a/d 0.9와 1.4에서는 순수전단, a/d 1.9와 2.4에서는 전단압축 또는 전단인장, a/d 2.9와 3.4에서는 사인장으로 파괴되었다. a/d가 작은 보는 초기균열이 형성된 후 아치작용에 의해 많은 추가 하중(reserved shear strength)을 받으나 a/d가 큰 보는 초기사인장균열이 발생된 후 파괴가 갑자기 이루어졌다. 철근콘크리트 보와 강섬유보강콘크리트 보의 파괴형태를 비교한 그림 2(b)는 다른 변수들이 모두 일정한 상태에서 강섬유혼입율을 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% 등으로 변화시켜 섬유의 보강에 따른

표 2. Beam details and test results

Series No.	Beam No.*	Mix type	L (cm)	a/d	ρ_s	Fiber Factor or F	Observed Shear Strength (kg/cm ²)		Narayanan's Eq. (3, 7) (kg/cm ²)		Predicted Shear Streng. (kg/cm ²)		V_{co}/V_{cl}	V_{uo}/V_{uf}	V_{co}/V_{cp}	V_{uo}/V_{up}
							V_{co}	V_{uo}	V_{cl}	V_{uf}	V_{cp}	V_{up}				
1	SAP 1	A	47	1.4	.023	.00	27.06	40.59	9.30	38.72	21.06	32.75	2.91	1.05	1.29	1.24
	SAP 2	A	81	2.4	.023	.00	17.65	20.00	7.91	16.07	12.28	19.10	2.23	1.24	1.44	1.05
	SAP 3	A	115	3.4	.023	.00	17.06	19.12	7.33	11.47	8.67	13.48	2.33	1.67	1.97	1.42
	SAF 1	A	47	1.4	.023	.45	33.24	39.12	12.49	48.29	29.18	45.44	2.66	.81	1.14	.86
	SAF 2	A	81	2.4	.023	.45	25.00	26.94	11.09	24.90	19.10	29.76	2.25	1.08	1.31	.91
	SAF 3	A	115	3.4	.023	.45	19.12	22.94	10.52	20.16	14.95	23.30	1.82	1.14	1.28	.99
2	SBP 1	B	47	1.4	.023	.00	30.59	51.18	12.45	45.00	32.18	50.04	2.46	1.14	.95	1.02
	SBP 2	B	81	2.4	.023	.00	19.12	22.06	11.05	19.74	18.77	29.19	1.73	1.12	1.02	.76
	SBP 3	B	115	3.4	.023	.00	17.94	19.71	10.48	14.62	13.25	20.61	1.71	1.35	1.35	.96
	SBP 4	B	47	1.4	.015	.00	28.53	44.12	11.28	35.68	27.91	43.40	2.53	1.24	1.02	1.02
	SBP 5	B	81	2.4	.015	.00	16.18	21.18	10.37	16.56	16.28	25.32	1.56	1.28	.99	.84
	SBP 6	B	115	3.4	.015	.00	13.53	19.12	10.00	12.70	11.49	17.87	1.35	1.51	1.18	1.07
3	SBF 0	B	30	.9	.023	.45	49.41	86.47	17.59	104.04	60.46	94.07	2.81	.83	.82	.92
	SBF 1	B	47	1.4	.023	.45	40.00	73.53	15.73	54.78	40.64	63.26	2.54	1.34	.98	1.16
	SBF 2	B	81	2.4	.023	.45	24.71	36.18	14.33	28.69	25.78	40.15	1.72	1.26	.96	.90
	SBF 3	B	115	3.4	.023	.45	20.29	28.82	13.76	23.40	19.67	30.64	1.47	1.23	1.03	.94
	SBF 4	B	64	1.9	.023	.45	34.12	50.00	14.84	37.22	31.26	48.67	2.30	1.34	1.09	1.03
	SBF 5	B	98	2.9	.023	.45	24.71	32.94	13.99	24.36	22.20	34.58	1.77	1.35	1.11	.95
	SBF 6	B	47	1.4	.023	.23	37.94	61.18	13.72	49.19	35.07	54.56	2.77	1.24	1.08	1.12
	SBF 7	B	81	2.4	.023	.23	25.00	33.82	12.32	23.84	21.52	33.49	2.03	1.42	1.16	1.01
	SBF 8	B	115	3.4	.023	.23	20.29	26.76	11.75	18.70	15.94	24.81	1.73	1.43	1.27	1.08
	SBF 9	B	47	1.4	.023	.68	47.35	62.94	17.26	59.48	44.46	69.23	2.74	1.06	1.07	.91
	SBF10	B	81	2.4	.023	.68	29.41	46.76	15.86	33.10	29.07	45.30	1.85	1.41	1.01	1.03
SBF11	B	115	3.4	.023	.68	17.94	32.05	15.29	27.75	22.74	35.44	1.17	1.15	.79	.90	
4	SCP 1	C	47	1.4	.023	.00	39.41	58.53	14.22	48.56	38.46	59.81	2.77	1.21	1.03	.98
	SCP 2	C	81	2.4	.023	.00	20.00	22.35	12.83	21.81	22.44	34.89	1.56	1.02	.89	.64
	SCP 3	C	115	3.4	.023	.00	19.12	20.00	12.25	16.39	15.84	24.63	1.56	1.22	1.21	.81
5	SCF 1	C	47	1.4	.023	.45	42.35	80.88	16.88	57.08	44.72	69.60	2.51	1.42	.95	1.16
	SCF 2	C	81	2.4	.023	.45	25.29	33.82	15.48	30.03	28.16	43.85	1.63	1.13	.90	.77
	SCF 3	C	115	3.4	.023	.45	23.53	32.35	14.91	24.56	21.34	33.25	1.58	1.32	1.10	.97
6	SDP 1	D	47	1.4	.023	.00	39.71	67.06	14.10	48.32	38.04	59.15	2.82	1.39	1.04	1.13
	SDP 2	D	81	2.4	.023	.00	21.17	26.47	12.71	21.67	22.19	34.51	1.67	1.22	.95	.77
	SDP 3	D	115	3.4	.023	.00	18.24	22.06	12.13	16.27	15.66	24.36	1.50	1.36	1.17	.91
7	SDF 1	D	47	1.4	.023	.45	42.65	86.47	17.53	58.38	47.01	73.16	2.43	1.48	.91	1.18
	SDF 2	D	81	2.4	.023	.45	25.00	41.18	16.13	30.79	29.50	45.93	1.55	1.34	.85	.90
	SDF 3	D	115	3.4	.023	.45	23.53	32.65	15.56	25.20	22.29	34.72	1.51	1.30	1.06	.94

*SAP 1, SAF 1 등은 다음을 의미한다. S: Slender beam, A: Mix type "A", P: Plain concrete, I: a/d에 따른 일련번호, F: Fiber concrete.

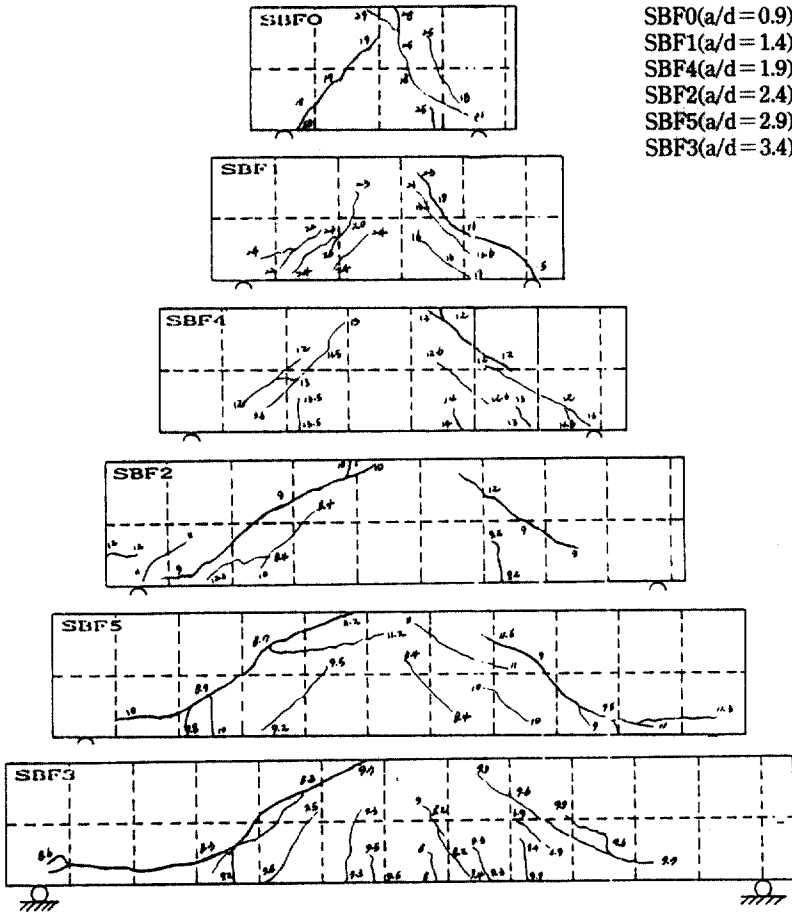


그림 2. (a) Crack patterns for test slender beams (Mix type "B")

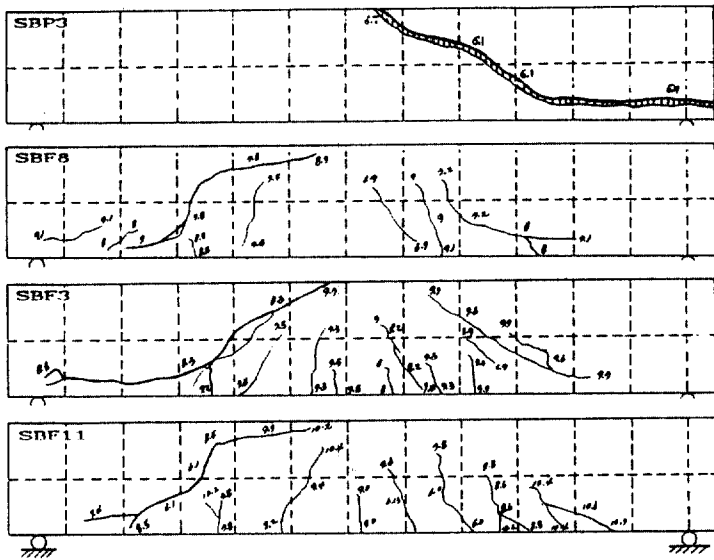


그림 2. (b) Crack patterns for test slender beams (Mix type "B")

강섬유의 효과를 비교한 것이다. 여기서, 섬유혼입율이 증가함에 따라 실험보에는 휨균열이 점차 많이 발생됨을 볼 수 있었으며, 강섬유혼입율이 1.5%인 보 SBF11의 경우에 다른 보와는 달리 전단균열이 발생하기 전에 휨균열이 먼저 발생하였다. 이는 강섬유의 보강이 콘크리트의 휨강도 보다는 전단저항에 더 유용하다는 것을 나타내는 것이다.⁽⁵⁾

강섬유보강콘크리트 보의 섬유의 혼입량이 많아질수록 균열의 폭과 간격이 좁아짐을 나타내었다. 이런 현상은 균열이 콘크리트속에서 매트릭스(matrix)와 섬유의 부착으로 발생하는 연결작용으로 인해 균열폭의 확대를 억제하고 응력을 재분배하기 때문이라 생각되며, 이들 영향으로 인해 주균열의 주위에는 미세균열(microcrack)들이 생성됨을 볼 수 있었다.

이상의 과정을 통해 실험보들은 보에 발생한 초기균열이 하중이 증가함에 따라 점차 진전되고 또한 확장되어 극한하중에 도달하면 파괴되는데 파괴되기 직전에는 부재의 표면에 밀착된 섬유의 부착이탈로 인하여 표면의 콘크리트가 부스러지면서 발생하는 것이라 생각되는 작은 소리들을 들을 수 있어 파괴를 예감할 수 있었으며, 강섬유로 보강된 모든 보의 파괴는 철근콘크리트 보와는 달리 박리현상이 생기지 않았다. 강섬유보강콘크리트 보의 모든 파괴 단면에서 어느 경우에도 강섬유 자체의 끊어짐은 볼 수 없었다.

3.1.2 하중-처짐 관계

모든 실험보들은 균열전단하중에 이르기까지 거의 선형거동을 했으나, 그 이후부터 극한전단하중에 도달될 때 까지의 변형은 비선형에 가까운 것이었다.

그림 3(a)는 콘크리트의 배합이 A에서 D에 이르는 보의 실험결과로서 동일한 a/d와 섬유혼입율을 가진 보가 콘크리트의 강도가 낮은 A배합에서 고강도인 B, C, D배합에 이를수록 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 강성이 커져 처짐이 점차 작아짐을 나타낸다. 그림 3(b)는 B배합의 콘크리트 보에서 a/d가 3.4일 때 섬유혼입율이 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%로 변화되는 경우로서 강섬유혼입량이 많아짐에 따라 연성이 증가되어 처짐이 많아지는 경향을 나타냈다. 또한 섬유를 혼입하지 않은 보 SBP3은 극한전단하중을 받은 후 갑작스러운 파괴로 처짐을 측정하지 못했으나, 섬유를 혼입한 보 SBF8, SBF3, SBF11

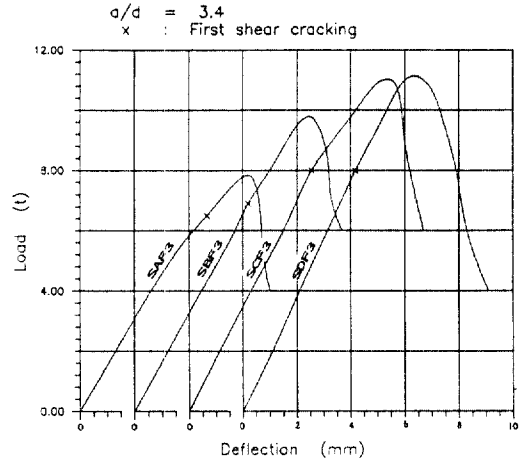


그림 3. (a) Load versus central deflection curves.

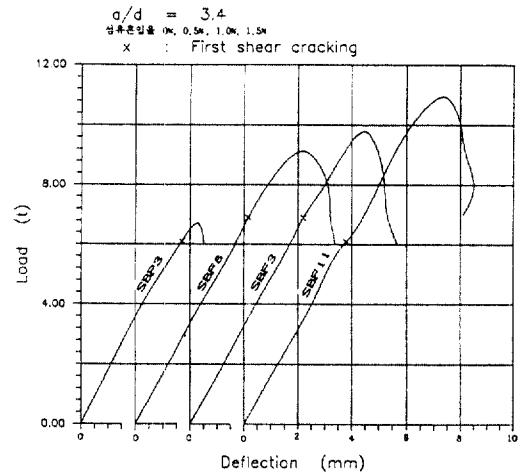


그림 3. (b) Load versus central deflection curves.

등은 극한전단하중을 받은 후에도 상당량의 처짐을 측정할 수 있어 강섬유의 혼입이 콘크리트의 연성 및 인성에 미치는 영향을 볼 수 있었다.

3.2 전단강도

섬유보강콘크리트에서 강섬유의 혼입으로 인한 인장강도와 연성의 개선은 균열이 발생하기 전에는 콘크리트내의 섬유혼입율에 영향을 받고, 균열이 발생한 후 균열이 진전되고 확장될 때는 섬유의 저항에 좌우된다.⁽⁸⁾ 큰 섬유형상비(aspect ratio)를 갖는 섬유는 매우 큰 뿔힘강도를 갖는 것으로 밝

혀졌고, 크림프(crimp)되거나 툽니모양을 갖는 섬유는 등근 수직섬유에 비해 부착특성이 개선됨이 보고되었다.⁽³⁾ 강섬유보강콘크리트의 강도에 영향을 주는 섬유혼입율(ρ_f), 섬유의 형상비(l_f/d_f), 섬유와 매트릭스의 부착계수(β) 등 3가지의 영향을 섬유계수(fiber factor) F라 하는 복합 Parameter로 합성시켜 다음과 같이 나타낸다.⁽¹⁰⁾

$$F = (l_f/d_f) \cdot \rho_f \cdot \beta \quad (1)$$

여기서, β 는 섬유의 각기 다른 부착특성에 의해 계산된 것으로 뽑기(pullout)실험에 의하면 횡단면이 원형일 때 0.5, 크림프되거나 단부갈고리가 있으면 0.75, 툽니모양이면 1.0이다.

콘크리트 원주형공시체 활열인장강도실험은 실험의 수행이 간단하고 일관된 결과를 보여주며, 섬유보강콘크리트가 극한하중을 받아 휨이나 전단, 비틀림등으로 파괴될 때 파괴형상이 활열인장강도 실험에서 원주형공시체의 파괴와 유사하기 때문에 섬유보강콘크리트의 전단강도실험에 이용될 수 있다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서 섬유보강콘크리트의 활열인장강도는 실험용 공시체가 하중을 받아 초기활열균열이 발생할 때의 인장강도를 나타낸 것으로 표 1과 같다.

3.2.1 균열전단강도

ACI 규준식⁽¹⁴⁾에서 보면 섬유로 보강되지 않은 보통의 철근콘크리트 보에 하중이 작용하여 초기전단균열이 발생하면 콘크리트내부의 전단저항강도는 전부 소진된다는 가정하에 가늘고 긴 보(slender beam)의 콘크리트가 부담하는 공칭전단강도를 콘크리트압축강도의 1/2승에 비례하는 것으로 규정하고 있다. 현재 철근콘크리트 보의 비교적 정확한 전단강도추정식이라고 일반적으로 인정되고 있는 것이 Zsutty^(12,13)의 식이다. a/d 가 2.5 이상인 가늘고 긴 보 151개의 실험결과를 회귀분석하여 만든 이 식은 철근콘크리트 보의 전단강도 v_c 를 합리적인 지수형태로 다음과 같이 나타냈다.

$$v_c = k(\sigma_c \cdot \rho_s \cdot d/a)^{1/3} \quad (2)$$

여기서, k 는 무차원계수로써 균열전단강도 추정시에는 10.0, 극한전단강도 추정시에는 10.8이다.

현재 섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도를 예측하는 신뢰할 만한 방법은 아직 없다. Narayanan⁽⁸⁾

은 가늘고 긴 강섬유보강콘크리트 보에 대한 33개의 실험결과를 근거로 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도 v_{cf} 를 추정하는 반실험적 공식을 다음과 같이 제안했다.

$$v_{cf} = A \cdot \sigma_{spf} + B \cdot \rho_s \cdot d/a + C \cdot F \quad (3)$$

여기서, A, B, C는 계수로, A는 0.24의 무차원, B는 204 kg/cm², C는 5.1 kg/cm²이다.

본 연구에서는 실험된 각 보에 초기전단균열이 발견되었을 때의 전단하중을 보의 유효단면적으로 나누어 $v_{co} = (V_{co}/b \cdot d)$ 로 나타내었다. 실험보에서 각 변수들이 균열전단강도에 미치는 영향은 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 강섬유보강콘크리트의 활열인장강도가 증가됨에 따라 균열전단강도가 변화하는 것을 나타낸 것으로, a/d 2.4의 경우에는 거의 증가하지 않음을 보였다. 그림 4(b)는 B배합의 보에서 F가 증가함에 따라 a/d 가 3.4인 보를 제외하고는 균열전단강도가 증가하는 것을 나타낸 것이다. 그림 4(c)에서도 역시 각 배합마다 차이는 있으나 a/d 가 작아짐에 따라 균열전단강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 인장철근량이 섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 2 series에서 서로 다른 인장철근량 ρ_s 를 갖는 2종의 보에 대해 실험을 수행한 결과 표 2와 같이 인장철근량이 철근콘크리트 보의 전단강도에 미치는 영향도 알 수 있었다.

이상과 같은 본 연구의 실험결과들을 종합해 볼 때 σ_{spf} 와 F, d/a , ρ_s 등이 섬유보강콘크리트의 균열전단강도에 미치는 영향을 알았으므로 기존의 식 (2)와 식 (3)을 근거로 실험된 총 36개 보의 결과를 회귀분석하여 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도를 추정할 수 있는 다음 식을 제안하고자 한다.

$$v_{cp} = A' \cdot \sigma_{spf} \cdot \rho_s^{1/3} \cdot d/a + C' \cdot F \quad (4)$$

여기서, A'와 C'는 계수로써, A'는 4.18의 무차원, C'는 11.07 kg/cm²이며, 이 식을 이용한 결과와 실험된 보의 성과는 0.915의 상관계수를 가졌다. 따라서, 철근콘크리트 보에 강섬유가 혼입되므로써 얻어지는 강섬유의 균열전단강도에 대한 기여도는 본 논문에 제안된 식의 제 1항에 있는 콘크리트의 활열인장강도 증가에 따른 몫과 제 2항의 섬유계수

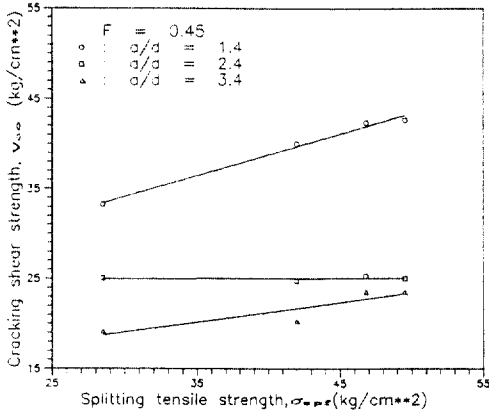


그림 4. (a) Cracking shear strength plotted against splitting tensile strength.

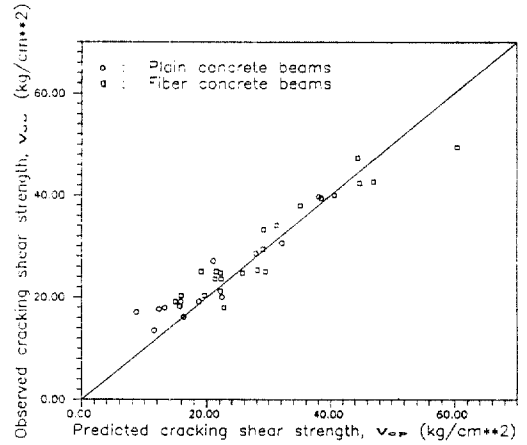


그림 5. Observed cracking shear strength versus predicted values using the proposed Eq. (4).

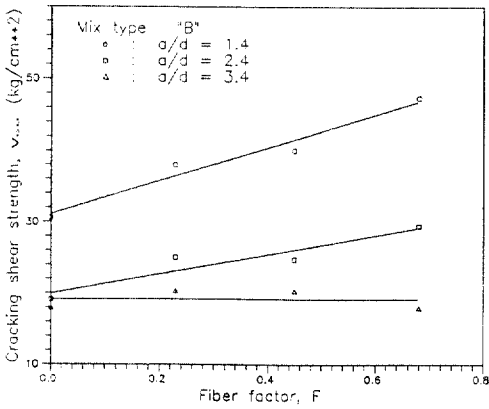


그림 4. (b) Cracking shear strength plotted against fiber factor.

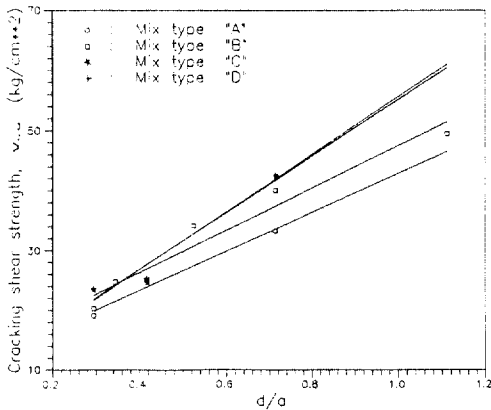


그림 4. (c) Cracking shear strength plotted against shear span-to-depth ratio.

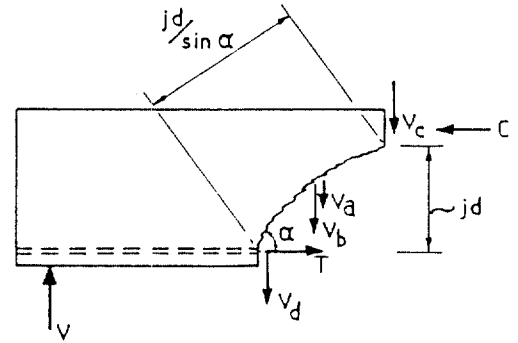


그림 6. Free body diagram of the shear span

로부터 얻어지는 값을 합하여 추정할 수 있을 것이라 생각한다.

그림 5는 실험에서 측정된 균열전단강도 v_{cr} 와 식 (4)로 얻은 균열전단강도 v_{cp} 를 나타낸 것이다.

3.2.2 극한전단강도

섬유보강콘크리트 보에 하중이 가해지면 이 힘은 보의 내부에 발생하는 저항력과 평형을 이루게 된다. 이를 근거로 집중하중을 받는 단순지지 섬유보강콘크리트 보의 전단지간을 그림 6과 같은 자유물체도로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

보에 작용하는 전단력을 1) 압축구역을 가로지르는 전단력 V_c , 2) 균열면에서 골재의 맞물림작용(interlocking)에 의한 수직합성력 V_a , 3) 인장(종방향) 철근의 연결작용(dowel action)에 의한 힘 V_b , 4) 사인장균열면을 따라 생기는 섬유의 뿔힘에 저항하

는 수직합력 V_b 등 4가지의 힘이 저항한다고 가정 하면 전체전단력 V 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$V = V_a + V_b + V_c + V_d \quad (5)$$

그림 6과 같은 철근콘크리트 보에 섬유가 보강 되면 콘크리트의 인장강도와 변형특성이 신뢰할 수 있도록 개선되고 변화되므로 섬유에 의해 발생하는 수직합력 V_b 를 정확히 추정하는 것이 섬유보강콘크리트의 전단강도를 예측하는데 필요하게 된다.

콘크리트내에 강섬유가 혼입되면 섬유의 부착은 점착과 마찰의 합성력과 기계적 맞물림에 좌우된다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 강섬유의 부착저항력을 실험하지 않았으므로 평균극한부착강도 γ 를 Romualdi 등⁽¹⁵⁾이 계산한 평균 섬유뿔길이를 이용해 Swamy 등⁽¹⁶⁾이 회귀분석을 통해 제안한 42.3 kg/cm^2 으로 사용하였다.

실험에서 보에 하중이 증가함에 따라 초기전단균열이 발생한 뒤 모든 실험 보는 추가하중을 저항하고 파괴되었다. 추가하중의 증가비율은 a/d 가 작아지고 콘크리트강도와 F 가 커질수록 많아지는 것으로 나타났는데 이와 같은 현상은 다른 연구들^(4,5,8-13)에서도 나타난 것처럼 주로 a/d 의 감소에 따른 것이라 보여진다. 실험된 보가 최대전단하중을 받았을 때 이 전단하중을 보의 유효단면적으로 나누어 표 2에 v_{uo} 로 나타내었다. 실험된 보에서 각 변수들이 미치는 영향은 그림 7과 같다. 그림 7(a)는 강섬유보강 콘크리트의 활열인장강도가 커짐에 따라 극한전단강도가 거의 선형적으로 증가함을 보였으며, a/d 1.4의 경우는 매우 큰 증가를 나타내었다. 그림 7(b)는 B배합의 보에서 F 가 증가함에 따라 극한전단강도가 변화하는 것을 보여주는 것이고, 그림 7(c)는 d/a 가 커짐에 따른 극한전단강도의 변화를 나타낸 것이다.

섬유보강콘크리트의 극한전단강도 예측을 위해 Narayanan⁽⁸⁾은 보의 총 전단강도를 1) 섬유보강콘크리트의 활열인장강도 σ_{sp} , 2) 인장철근량 ρ_s 와 a/d 에 의한 연결작용, 3) 사인장균열주위의 섬유의 뿔힘응력 v_f 등 3가지 항으로 구성하여 추정하는 식을 제안했다. 이 식은 91개 보의 실험결과를 회귀분석하여 얻은 것으로 다음과 같다.

$$v_{ur} = e[A \cdot \sigma_{sp} + D \cdot \rho_s \cdot d/a] + v_f \quad (6)$$

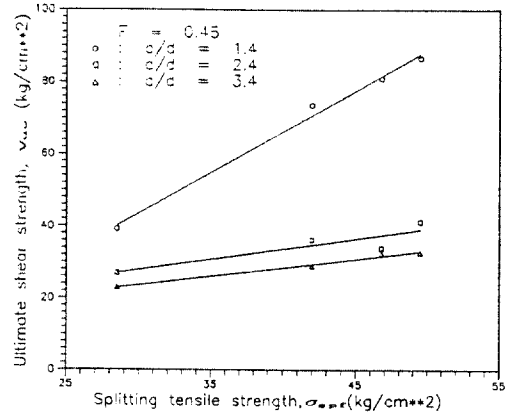


그림 7. (a) Ultimate shear strength plotted against splitting tensile strength.

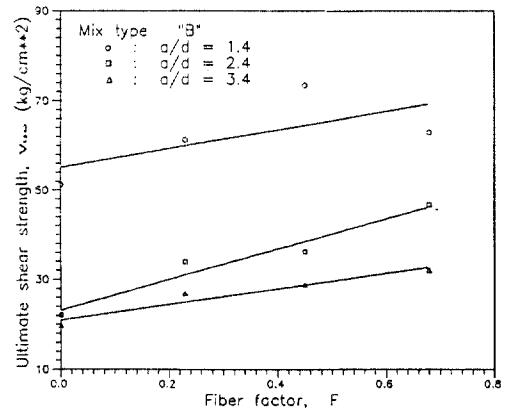


그림 7. (b) Ultimate shear strength plotted against fiber factor.

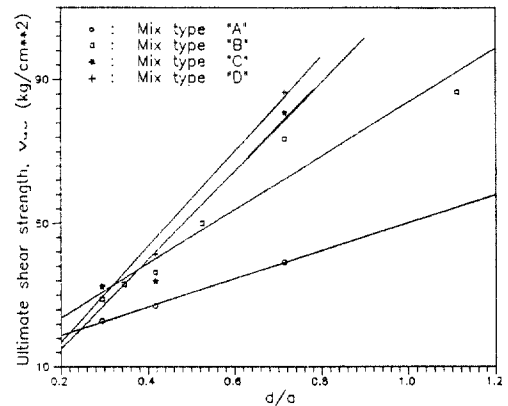


그림 7. (c) Ultimate shear strength plotted against shear span-to-depth ratio.

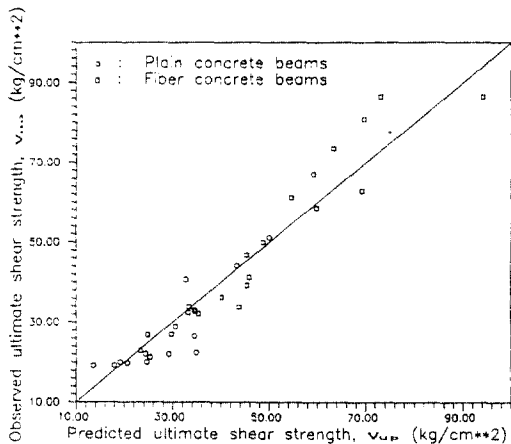


그림 8. Observed ultimate shear strength versus predicted value using the proposed Eq. (7).

여기서, D와 e는 계수로, D는 816 kg/cm²이며, e는 보의 아치작용을 고려한 무차원 값으로 다음과 같다.

$$e = 1.0 \quad \text{—————} \quad a/d > 2.8 \text{ 일 때}$$

$$e = 2.8 \, d/a \quad \text{—————} \quad a/d \leq 2.8 \text{ 일 때}$$

실험된 보의 극한전단강도 측정값과 식 (6)으로 계산한 극한전단강도 추정값은 매우 낮은 상관성을 보였다. 따라서 종래의 철근콘크리트 보에서 극한전단강도 예측식으로 사용되는 식 (2)와 섬유보강 콘크리트 보의 극한전단강도 추정식으로 제안된 식 (6)을 근거로 본 연구에서 수행한 총 36개 보의 실험성적을 회귀분석하여 강섬유보강콘크리트 보의 극한전단강도를 추정할 수 있는 다음 식을 제안하고자 한다.

$$v_{up} = A^* \cdot \sigma_{sp} \cdot \rho_s^{1/3} \cdot d/a + v_t \quad (7)$$

여기서, A*는 무차원계수로 6.50의 값을 가지며, 이 식 (7)을 이용해 계산한 값은 실험결과와 0.949의 높은 상관계수를 가졌다. 따라서 철근콘크리트 보에 혼입된 강섬유의 극한전단강도에 대한 기여도는 제안된 식의 제 1항에 있는 콘크리트의 활열인장강도 증가에 따른 몫과 제 2항에 있는 강섬유의 뽑힘저항강도를 합하여 추정할 수 있을 것이다. 그림 8은 실험에서 측정된 극한전단강도 v_{uo} 와 식 (7)로 계산된 극한전단강도 v_{up} 를 비교한 것이다.

4. 결 론

본 연구는 실험을 통해 콘크리트의 강도, 섬유혼입율, 전단지간, 인장철근량 등의 변화에 따른 강섬유보강 철근콘크리트 보의 전단특성을 알아보고자 수행하였다.

실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트의 강도가 증가하고 섬유의 혼입량이 많아지면 강섬유보강콘크리트 보의 전단지간에 발생하는 균열의 폭이 좁아지고 간격이 작아졌다.
- 2) 보의 파괴는 a/d에 따라 순수전단, 전단압축 또는 전단인장, 사인장 등으로 변화했으며, 처음은 콘크리트의 강도가 작고 섬유혼입량이 많아지면 증가되었다.
- 3) 섬유보강콘크리트 보의 전단강도는 콘크리트의 강도, 섬유계수, d/a 등이 증가함에 따라 거의 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) 초기균열발생 후 보의 추가하중 증가율은 a/d가 작아지고 콘크리트의 강도와 섬유계수가 커질수록 많아졌다.
- 5) 실험결과를 근거로 강섬유보강콘크리트 보의 균열전단강도와 극한전단강도 추정식을 제안했으며 제안된 식은 실험결과와 잘 일치했다.

참 고 문 헌

1. Romualdi, J.P. and Baston, G.B., "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement", *ACI Journal*, Vol. 60, June 1963, pp. 775-790.
2. Swamy, R.N. and Bahia, H.M., "Influence of Fiber Reinforcement on the Dowel Resistance to Shear", *ACI Journal, Symposium Paper, Title No. 76-17*, March 1979.
3. ACI Committee 544, "Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete", *ACI Struct. Journal*, Vol. 85, No. 5, Sep.-Oct. 1988, pp. 563-580.
4. Batson, G., Jenkins, E. and Spatney, R., "Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams", *ACI Struct. Journal*, Oct. 1972, pp. 640-644.
5. Mansur, M.A., Ong, K.C.G. and Paramasivan, P., "Shear strength of Fibrous Concrete Beams without Stirrups", *ASCE Struct. Journal*, 1986, pp. 2066-2079.

6. Kani, G.N.J., "A Rational Theory for the Function of Web Reinforcement", *ACI Journal*, Vol. 66, No. 3, Mar. 1969, pp. 185-197.
7. Mansur, M.A., Lee, C.K. and Lee, S.L., "Deformed Wire Fabric as Shear Reinforcement in Concrete Beams", *ACI Struct. Journal*, Sep.-Oct. 1987, pp. 392-399.
8. Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S., "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", *ACI Struct. Journal*, May-June 1987, pp. 216-227.
9. Mphonde, A.G. and Frantz, G.C., "Shear Tests of High- and Low-Strength Concrete Beams", *ACI Struct. Journal*, July-Aug. 1984, pp. 350-357.
10. Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S., "Fiber Concrete Deep Beams in Shear", *ACI Struct. Journal*, March-April 1988, pp. 141-149.
11. Narayanan, R. and Darwish, I.Y.S., "Shear in Mortar Beams Containing Fibers and Fly Ash", *ASCE Struct. Journal*, 1988, pp. 84-102.
12. Zsutty, T.C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data", *ACI Journal*, Title No. 65-71, Nov. 1968, pp. 943-951.
13. Zsutty, T.C., "Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests", *ACI Journal*, Feb. 1971, pp. 138-143.
14. ACI 318-89, "*Building Code Requirements for Reinforced Concrete*", ACI, 1989, pp. 103.
15. Romualdi, J.P. and Mandel, J.A., "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement", *ACI Journal*, Vol. 61, No. 6, June 1964, pp. 657-671.
16. Swamy, R.N., Mangat, P.S. and Rao, C.V.S.K., "*The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Matrices*", Fiber Reinforced Concrete, SP-44, ACI: 1974, pp. 1-28.

(接受：93. 2. 8)