

강섬유보강 콘크리트의 휨인성 특성에 관한 연구

A Study on the Flexural Toughness Characteristics
of Steel Fiber Reinforced Concrete

박 성 수* 이 정 훈**
Park, Sung-Soo Lee, Jeong-Hun

Abstract

This study reviewed various current methods of evaluating the toughness of steel fiber reinforced concrete specimens and criticized the use of various multiples of first-crack deflection to define toughness indices. The load-CMOD curve to determine toughness, instead of load-deflection curve, was used. The notched steel fiber reinforced concrete specimens with different water/cement ratio(0.35, 0.40, 0.45, 0.50) and fiber volume content(0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%) were tested under third point bending.

요 지

본 연구는 강섬유보강콘크리트의 인성을 평가하는 기존의 다양한 방법을 검토하고, 인성지수를 규명함에 있어 초기균열하중에 여러 가지 곱을 사용하는 방법의 문제점을 지적하였다. 인성을 규명하기 위해 하중-처짐 곡선대신 하중-CMOD 곡선을 사용하였다. 물/시멘트비(0.35, 0.40, 0.45, 0.50)와 섬유혼입량(0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%)을 변수로 하여 노치를 가진 강섬유보강콘크리트 시험체를 3등분점 가력하였다.

Keywords : Steel Fiber Reinforced Concrete, Fracture Toughness, w/c ratio, Load-deflection curve, Load-CMOD curve

핵심 용어 : 강섬유보강콘크리트, 파괴인성, 물/시멘트비, 하중-처짐 곡선, 하중-CMOD 곡선

* 정희원, 부산대학교 건축공학과, 공학박사

** 정희원, 부산대학교 건축공학과, 박사수료

E-mail: hoono5093@orgio.net 051-510-3564

● 본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)란 길이가 짧고 단면이 작은 불연속적인 섬유재료를 불규칙한 배열로 모체인 콘크리트속에 흩어 분산시켜 인장강도, 내충격성, 인성, 휨강도, 균열에 대한 저항성, 연성, 전단강도 등을 대폭 개선시킨 복합 재료이다

Shah와 Rangan에 의해서 강섬유로 보강하면 콘크리트는 연성이 현저하게 증대되고, 에너지의 흡수능력 및 파괴특성이 현저하게 개선된다는 사실이 밝혀졌다^{(1),(2),(3)}

강섬유보강콘크리트의 물성에 영향을 미치는 여러 인자들 중 주요인자로는 섬유(형태, 형상비, 체적당 섬유혼입률, 간격, 배향), 매트릭스(강도, 최대골재크기), 시험체(크기, 형태, 제작방법)등이 있다⁽²⁾

기존의 연구결과들은 주로 섬유의 종류와 섬유혼입률을 변수로 한 실험이 대부분이며,^{(4) (5) (6),(7)} 매트릭스의 강도에 대한 연구는 거의 없는 실정이다

SFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete)는 콘크리트 매트릭스에서 균열이 발생할 때, 미시적인 개념에서 강섬유의 연결작용(bridging action)에 의한 비탄성영역의 발달로 응력이 재분배되며, 균열변위의 증가에 따라 강섬유를 혼입하지 않은 콘크리트가 취성적 거동을 보이는 것과는 달리 최대하중 이후의 거시적인 압축 및 휨파괴거동에서 큰 연성을 갖는다 따라서 섬유의 인발 저항성을 향상시키기 위해서는 w/c비, 골재 혼입량등의 인자를 고려해야 한다.⁽⁸⁾

또한, 콘크리트 휨부재의 파괴거동 특성을 거시적으로 검토하기 위하여 하중-하중점변위 혹은 하중-CMOD (Load-CMOD curve)의 관계를 이용하는 경우가 일반적이나, 하중-하중점변위의 관계는 지점부와 접촉하는 콘크리트면의 파손, 침하 등에 의한 이상변위를 포함할 수 있으며, 이는 파괴과정에서 소모되는 파괴에너지 등과 같은 파괴인자들의 평가에 큰 영향을 끼치게 된다. 이에 반해, 하중-CMOD의 관계는 전술한 이상변위의 발생요인의 영향을 받지 않아 비교적 파괴인자들의 평가결과가 정확한 것으로 알려져 있다.^{(4) (9)}

따라서 본 연구에서는 강섬유보강콘크리트의 파괴인

성을 평가하기 위해 하중-CMOD 곡선을 이용하며, 인성증진에 기여하는 인자 중 매트릭스강도와 직결되는 w/c비를 변화시켜 w/c비에 따른 인성증진효과를 알아보고자 하였다 또한 기존의 인성평가 방법을 검토하여 그 문제점을 알아보는 데 연구의 목적이 있다

2. 파괴인성평가방법

2.1 ASTM C 1018⁽¹³⁾

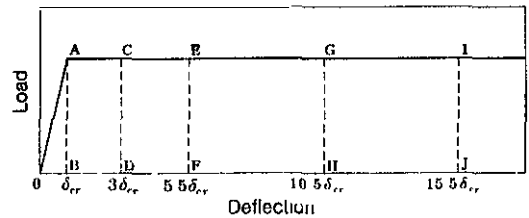


Fig 1 ASTM C 1018에 의한 파괴인성평가방법

$$I_5 = \frac{\text{areaOACD}}{\text{areaOAB}}, \quad I_{10} = \frac{\text{areaOAEF}}{\text{areaOAB}}$$

$$I_{20} = \frac{\text{areaOAGH}}{\text{areaOAB}}, \quad I_{30} = \frac{\text{areaOAIJ}}{\text{areaOAB}} \quad (1)$$

각각의 인성지수 $I_5, I_{10}, I_{20}, I_{30}$ 은 초기 균열하중 시 변위의 3, 5.5, 10.5, 15.5 배까지의 변위일 때의 하중-변위 곡선의 면적을 초기균열하중까지의 면적으로 나눈 것이다 초기균열점까지 선형탄성거동을 보이고, 균열이 발생한 후 완전소성 거동을 보이는 재료의 경우에는 각각의 인성지수의 값은 5, 10, 20, 30이 된다

2.2 JSCE-SF4⁽¹⁴⁾

$$f_e = \frac{T_b}{\delta_{1b}} \frac{l}{bd^2} \quad (2)$$

f_e 유효휨강도

T_b $l/150$ 변위까지의 면적

l 지간의 길이

b 시편의 폭

d 시편의 높이
 δ_{ib} $l/150$ 변위

23 Banthia and Trottier의 제안방법⁽¹²⁾

$$PCS_m = \frac{(E_{post,m})L}{\left(\frac{L}{m} - \delta_{peak}\right)bd^2} \quad (3)$$

E_{pre} : 최대하중까지의 $P-\delta$ 곡선면적
 $E_{post,m}$: 변위 m 까지의 $P-\delta$ 곡선면적
 $E_{total,m}$ 에서 E_{pre} 을 뺀 값

3. 실험

3.1 시험체 개요

본 실험은 강섬유보강 콘크리트의 인성에 미치는 w/c 비의 영향을 알아보기 위하여 0.35, 0.40, 0.45,

0.50의 4가지로 하였으며, 강섬유 혼입률은 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5%로 하였다. 사용된 굵은 골재의 최대 치수는 19mm이하로 하였으며, 잔골재율은 50%, 공기량은 5%가 되도록 하였다.

실험에서 사용된 보는 총 단면이 10×10×40cm(순길이 30cm)로 8번의 비빔을 통해 시험체 별로 3개씩 총 48개 제작되었다. 노치는 두께 3mm의 강판을 타설시 몰드에 끼워 넣었다가 48시간 후 탈형시에 제거하였다. 자세한 시험체 형상과 치수는 Fig 2와 같다.

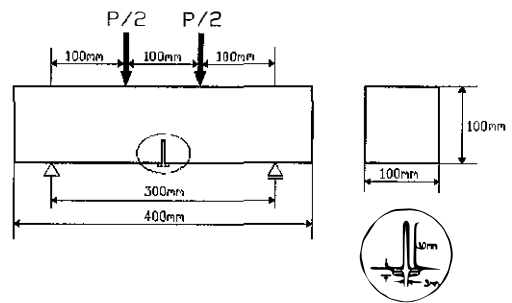


Fig 2 시험체 형상 및 치수

Table 1 강섬유보강콘크리트의 배합설계

specimen	w/c비	Air (%)	S/a (%)	Proportion by unit weight(kgf/m ³)				steel fiber
				Cement	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	
SP35-00	0.35	5	50	400	140	892	890	0
SP35-05								39.3
SP35-10								78.5
SP35-15								117.8
SP40-00	0.40	5	50	400	160	861	861	0
SP40-05								39.3
SP40-10								78.5
SP40-15								117.8
SP45-00	0.45	5	50	400	180	812	814	0
SP45-05								39.3
SP45-10								78.5
SP45-15								117.8
SP50-00	0.50	5	50	400	200	786	787	0
SP50-05								39.3
SP50-10								78.5
SP50-15								117.8

SP○●-△△ ○○=w/c비 △▲=강섬유혼입률
 05=0.5% , 10=1.0% , 15=1.5%

3.2 사용재료 및 배합

사용한 시멘트는 국내 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 잔골재로서 비중이 2.57이고, 조립률이 2.53인 강모래와 굵은 골재로서 최대치수가 19mm이고, 비중이 2.65이며, 조립률이 6.50인 쇄석을 사용하였다. 강섬유는 양단 hook형으로 개개의 강섬유가 수용설 아교로 다발의 형태로 붙어 있는 국내산 제품으로 비중은 7.85이고 길이가 60mm, 형상비가 75이다. 수차레 예비 실험배합을 하여 적절한 유동성을 확보하였다.

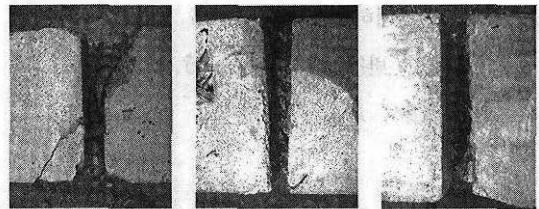
3.3 실험수행

각각의 시편들은 U.T.M.(Universal Testing Machine, 만능시험기)에 의해 3등분점가력을 실시하였다. 가력속도는 0.2t/min로 하였으며, 하중-균열개구변위 곡선을 측정하기 위하여 노치에 크랙 게이지를 설치하였다(Fig. 2).

4. 실험결과 및 고찰

4.1 파괴형태

w/c비의 증가에 따른 파괴형태를 Fig. 3에 나타내었다. w/c비가 증가할수록 섬유와 매트릭스간의 부착강도는 감소한다. w/c비가 0.35인 경우 섬유가 완전히 인발(pull-out)될 때까지 주위의 매트릭스가 심한 파괴가 발생하며, 균열 또한 무수히 많이 생성되었다. 그에 비해 w/c가 0.5인 경우는 섬유가 매트릭스에서 쉽게 박리되며(debonding), 균열 또한 초기 노치의 연장선으로 발생하였다.



(a)w/c=0.35 (b)w/c=0.45 (c)w/c=0.50

Fig. 3 w/c비에 따른 파괴 단면

4.2 초기균열하중 및 최대하중

실험결과를 Table 2에 나타내었으며, 하중-CMOD 곡선은 Fig. 4와 같다. w/c비가 작을수록 최대 하중 이후 급격한 하강곡선을 나타낸다. SP45시험체의 경

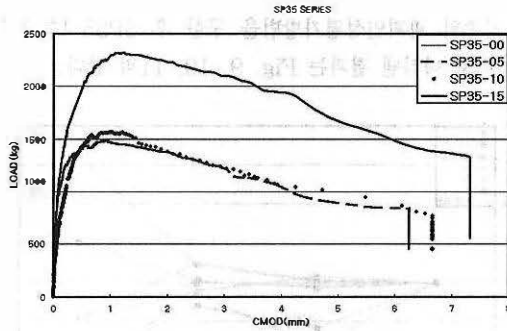
Table 2 실험 결과

specimen	compressive strength	first crack load	peak load	ASTM					JSCE* SF-4	PCS150*
				kNf	kNf	I5	I10	I20		
SP35-00	331		786.82							
SP35-05	333	999.12	1498.40	4.39	9.43	20.17	30.01	60.59	91.36	98.31
SP35-10	348	1040.35	1576.80	5.62	20.80	40.99	44.40	79.36	93.12	101.23
SP35-15	328	1030.60	2322.93	5.06	14.11	27.93	46.03	97.86	132.90	152.85
SP40-00	329		798.25							
SP40-05	323	775.24	1078.82	4.41	9.18	19.83	30.33	62.41	69.77	65.11
SP40-10	329	831.18	1429.74	4.51	9.56	20.81	34.93	73.08	81.13	89.44
SP40-15	331	1085.55	2010.44	5.65	12.68	28.05	44.96	86.56	117.28	123.17
SP45-00	334		781.99							
SP45-05	336	888.97	1385.75	4.77	9.49	20.18	33.01	58.02	80.33	92.86
SP45-10	338	1164.01	2356.19	4.74	10.73	24.45	38.90	82.19	134.49	151.59
SP45-15	296	1258.11	1998.89	4.58	10.06	22.20	34.22	64.38	114.65	133.95
SP50-00	321		745.93							
SP50-05	322	720.40	967.22	7.25	11.30	16.82	24.27	49.01	52.76	53.89
SP50-10	331	765.37	1349.05	5.68	12.42	26.18	44.94	86.91	82.11	126.75
SP50-15	325	715.14	1271.90	4.50	9.78	20.92	34.36	77.34	83.46	48.52

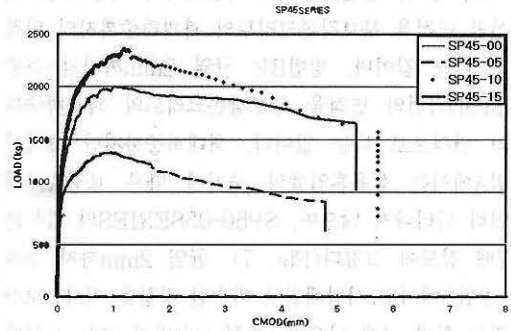
* : kNf/cm²

우 초기균열하중과 최대하중이 SP35, SP40시험체에 비하여 높게 나타나고 있는데, 이러한 원인은 시험체 제작 당시의 외부환경의 차이로 인한 것으로 사료된다.

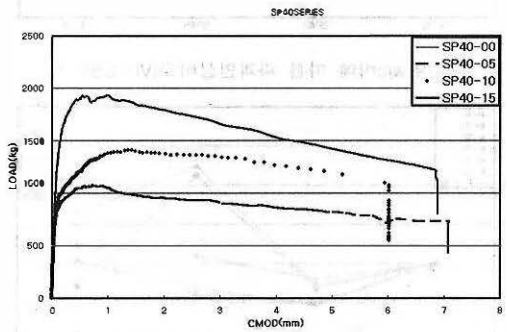
최대하중비교에서 w/c비가 낮은 시험체(0.35, 0.40)에서는 섬유혼입률이 높을수록 강도 증진효과가 크게 나타나며, w/c비가 높은 시험체에서는(0.45, 0.50) 1.5% 혼입시 약간 감소하는 결과를 보인다.



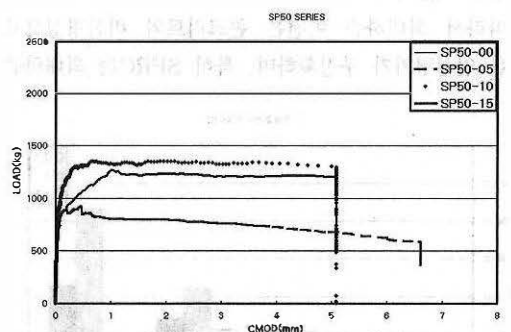
(a) SP35SERIES



(c) SP45SERIES



(b) SP40SERIES



(d) SP50SERIES

Fig. 4 섬유혼입률에 따른 하중-CMOD곡선

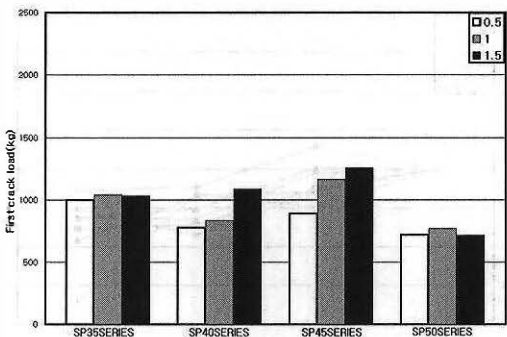


Fig. 5 초기균열하중비교

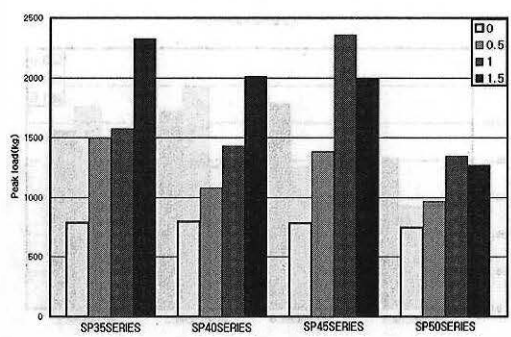


Fig. 6 최대하중비교

4.3 강섬유 보강 효과

단순히 각각의 SERIES별로 무보강콘크리트에 대한 섬유보강콘크리트의 보강효과를 비교한 결과 Fig. 7, 8과 같다. 방법A는 최고하중까지의 하중-CMOD 곡선의 면적을 무보강콘크리트의 파괴하중까지의 면적으로 나눈 값이며, 방법B는 균열 2mm까지의 하중-CMOD곡선의 면적을 무보강콘크리트의 파괴하중까지의 면적으로 나눈 값이다. 최대하중까지만 고려된 방법A에서는 섬유혼입률의 증가에 따른 보강효과가 확연히 나타나지 않으며, SP50-05SERIES의 경우는 5.7배 정도에 그쳤다(Fig. 7). 균열 2mm까지 고려된 방법B에서도 시험체별로 비슷한 경향을 띠나, 보강 효과는 훨씬 크게 나오며, 특히 w/c비가 높은 시험체의 경우 강섬유혼입에 따른 보강효과가 큰 것으로 나타난다(Fig. 8).

따라서 최대하중 이전은 콘크리트의 비선형성으로 인한 인성평가가 부정확하며, 특히 SFRC는 최대하중

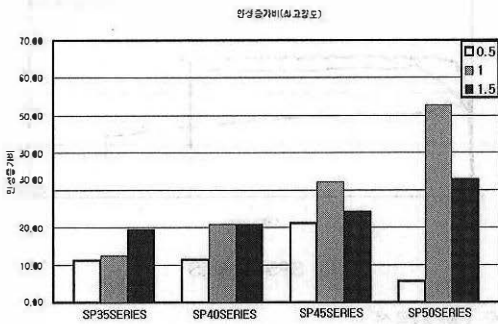


Fig. 7 강섬유보강효과(방법A)

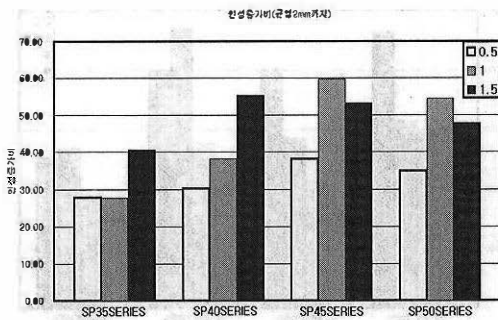


Fig. 8 강섬유보강효과(방법B)

이후의 휨파괴거동에서 큰 연성을 가지므로 최대하중 이후부터 인성을 고려함이 타당할 것으로 판단된다.

4.4 파괴인성

기존의 파괴인성평가방법을 구한 후 SP35시험체와 비교 나타낸 결과는 Fig. 9, 10, 11과 같다.

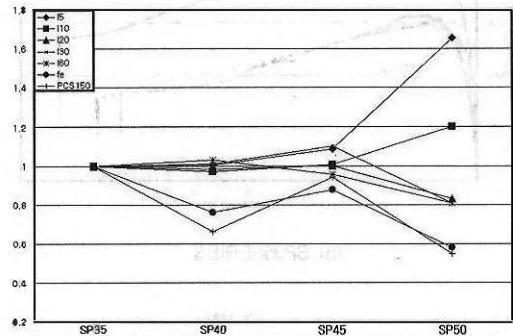


Fig. 9 w/c비에 따른 파괴인성비교(V_f = 0.5%)

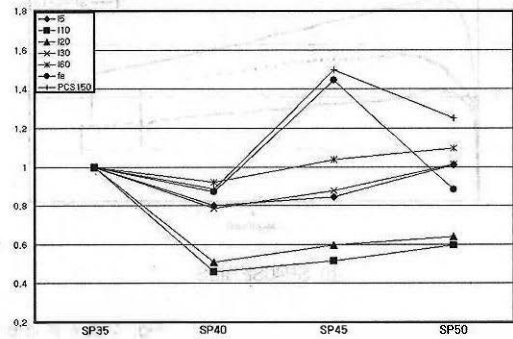


Fig. 10 w/c비에 따른 파괴인성비교(V_f = 1.0%)

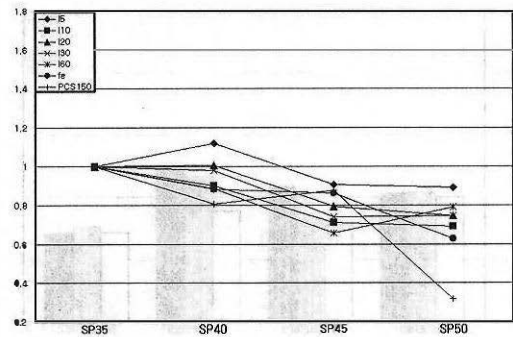


Fig. 11 w/c비에 따른 파괴인성비교(V_f = 1.5%)

섬유혼입률 0.5%인 경우 w/c비가 증가함에 따라 오히려 초기 인성지수 I_5 , I_{10} 은 차츰 증가하다가, w/c비가 0.5인 경우는 급격한 증가 추세를 보인다. I_{20} , I_{30} , I_{60} 으로 갈수록 f_e , PCS_{150} 의 값과 유사한 모습을 나타낸다.

섬유 혼입률 1.0%인 경우는 대부분의 시험체가 SP35시험체에 비해 낮은 값을 나타내고 있으나 w/c비가 증가하면서 차츰 증가하는 경향을 나타내고 있다.

섬유혼입률 1.5%인 경우는 SP35시험체에 비해 모든 인성지수가 낮은 값을 나타낸다. 이상의 결과에서 ASTM C 1018에 의한 인성지수 평가 방법 중 I_5 와 I_{10} 은 오히려 SP35시험체에 비해 높은 값을 보이는 경우가 있으며, 이에 비해 f_e , PCS_{150} 는 대체적으로 안정된 결과를 나타낸다. 이러한 원인은 초기 균열점을 찾는 방법이 콘크리트재료의 비선형성으로 인해 매우 어려우며, 초기 균열점에서의 변위의 크기는 아주 작으므로 그 계측오차가 인성지수의 값에 큰 영향을 미친다고 판단된다.

5. 결론

- 1) ASTM C1018에 의해 계산된 연성지수의 개념을 본 연구에서는 단지 정량적인 비교를 하기위한 방법으로만 사용하였다. 하중-CMOD 곡선을 사용하여 ASTM C1018에 의한 파괴인성 평가방법을 분석한 결과 초기균열하중의 사용은 콘크리트의 비선형성으로 인해 부정확하며, 특히 SFRC는 최대하중 이후의 휨파괴거동에서 큰 연성을 가지므로 최대하중이후부터 인성을 고려함이 타당할 것으로 판단된다.
- 2) w/c비에 따라 무보강시험체에 대한 강섬유보강시험체의 보강효과를 분석한 결과 w/c비가 높을수록 강섬유혼입에 따른 보강효과가 큰 것으로 나타났다. 높은 w/c비에서는 섬유혼입률 1.5%일때 섬유와 시멘트 매트릭스간의 부착강도의 저하로 인해 1.0%와 동일한 효과를 보여, 높은 w/c비에서는 섬유혼입량을 1.5%이하로 제한해야 할 것으로 판

단된다.

- 3) 시험체크기와 노치길이를 변수로 하여 더 많은 연구가 필요하다.

참고문헌

- 1 James J Beaudoin, Handbook of fiber-reinforced concrete, Noyes Publication, 1990
- 2 Arnon Bentur and Sidney Mindess, Fiber reinforced cementitious composites, Elsevier Applied Science, 1990
- 3 Surendra Shah and Gordon Batson, Fiber reinforced concrete, SP105, American Concrete Institute, 1987
- 4 김경수, 김남옥, 이용우, 배주성, "섬유보강재가 콘크리트의 파괴인성과 강도에 미치는 영향", 대한토목학회논문집, 제15권 1호, 1995, pp 83-96
- 5 M K Lee and B I G Barr, "Strength and fracture properties of industrially prepared steel fibre reinforced concrete", Cement & Concrete Composites 25, 2003, pp 321-332
- 6 Chunxiang Qian and Piet Stroeven, "Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibers", Cement & Concrete Composites 22, 2000, pp 343-351
- 7 장동일, 채원규, 이명구, "강섬유보강콘크리트의 휨거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 제2권 2호, 1990, pp 169-174
- 8 S Igarashi, A Bentur and S Mindess, "The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites", Cement & Concrete Composites 18, 1996, pp 313-322
- 9 Vellore S Gopalaratnam and Ravindra Gettu, "On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes", Cement & Concrete Composites 17, 1995, pp 239-254
- 10 Fushu Jeng, Ming-Lang Lin and Shih-Che Yuan, "Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete", Tunneling and Underground Space Technology, 17, 2002, pp 69-82
- 11 P Balaguru, Ramesh Narahari and Mahendra Patel, "Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete", ACI Material Journal,

-
- Nov -Dec , 1992, pp 541-546
- 12 Nemkumar Banthia and Jean-François Trottier, "Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete . Some concerns and a proposition", ACI Material Journal, Jan -Feb , 1995, pp 48-57
- 13 ACI Committee 544, "Design consideration for steel fiber reinforced concrete", ACI 544 4R-88, 1988
- 14 M C Nataraja, N Dhang and A P Gupta, "Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach", Cement & Concrete Research, 30, 2000, pp 593-597
- 15 S Igarashi, A Bentur & S Mindess, "The effect of processing on the bond and interfaces in steel fiber reinforced cement composites", Cement and Concrete Composite, 18, 1996, pp 313-322

(접수일자 : 2003년 8월 6일)