

# 강섬유의 보강이 고강도 콘크리트의 강도 특성에 미치는 영향

## The Effects of Reinforcing of Steel Fiber on the Strength Properties of the High-Strength Concrete

구 봉 근\* 정 경 섭\*\* 김 태 봉\*\*\*  
Koo, Bong Kuen Jung, Kyoung Sup Kim, Tae Bong

### 요 약

강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 강도 특성에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 고성능 감수제를 이용하여 제조한 고강도 콘크리트에 강섬유를 0, 0.5, 1.0, 1.5%로 변화시키면서 실험을 실시하였고, 또한 강섬유의 길이와 휨 시험편의 크기에 따른 강도의 변화에 대하여도 연구하였다. 연구 결과 강섬유 보강 고강도 콘크리트의 압축강도는 강섬유의 혼입률에 따라 크게 영향을 받지 않으나, 활열인장강도와 휨강도는 강섬유 혼입률과 길이에 따라 크게 증가하였고, 특히 최대하중을 지나서도 응력의 감소가 작아 연성이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

### Abstract

This study was performed to investigate the properties of high-strength concrete reinforced with steel fiber. The selected test variables for the high-strength concrete using the super-plasticizer, were fiber contents with 4 levels(0, 0.5, 1.0, 1.5%) and fiber length with 3 levels(30, 50, 60mm) and flexural specimen with 5 size.

It was found from these tests that the compressive strength was not much affected by the fiber content, but splitting tensile strength and flexural strength are increased significantly with the increases of fiber content and length. Particularly, the present study also indicates that the ductilities were remarkably enhanced due to the addition of the steel fibers.

Keywords : High-Strength Concrete, Steel Fiber, SFRC, Fiber Content, Ductility, Strength, Modulus of Elasticity.

### 1. 序 論

現代의 産業分野에서는 보다 높은 強度를 갖는 材料의

開發과 그 適用에 많은 研究가 進行되고 있으며, 建設分野의 콘크리트 材料에 대해서도 最近에 이르러 高層建物 및 거대한 海洋構造物, 原子力發電所 등의 出現으로 高強度 콘크리트의 使用範圍는 보다 더 다양해지고 있다. 그러나, 建設材料로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 引張力이 약하고, 갑작스런 파괴를 일으키는 脆性材料인 점과

\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공박  
\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 부교수, 공박  
\*\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 시간강사

龜裂을 일으키는 短點을 가지고 있다. 콘크리트는 본래 脆性材料이며, 高強度化될수록 더욱 이러한 현상은 두드러진다. 이러한 콘크리트 性質을 개선할 목적으로 鋼纖維를 不規則한 배열로 모르타나 콘크리트 속에 分散시킴으로써 引張強度, 脆性, 耐衝擊性 및 靱性を 개선시킨 複合材料로서의 이용이 활발해지고 있다.<sup>(1-10)</sup>

高強度 콘크리트에 대한 연구는 1960년대부터 美國을 중심으로 이루어져 실제 구조물의 설계 및 시공에 이용되어 왔으며, 최근에는 1000kg/cm<sup>2</sup>이상의 강도를 가진 콘크리트가 건물과 프리스트레스 콘크리트에 사용되고 있다. ACI의 高強度 콘크리트위원회에서는 1984년 “State of the Art Report of High Strength Concrete”를 발간하였고,<sup>(11)</sup> 日本에서도 日本土木學會에서 “高強度 콘크리트 設計指針”을, 日本建築學會에서는 “高強度 鐵筋 콘크리트 造 設計 施工 指針”을 발표하여 앞으로의 이용에 대한 기준으로 삼고 있으며,<sup>(12)</sup> 유럽에서도 西獨을 중심으로 1970년대부터 고강도 콘크리트의 이용이 시작되었고, 현재에는 세계 각국에서 이에 대한 관심이 높아졌다.<sup>(13)</sup>

그러나, 많은 연구 결과에도 불구하고 鋼纖維를 혼입한 高強度 콘크리트에 대한 研究는 미흡하다고 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 高強度 콘크리트에 鋼纖維를 補強한 材料를 대상으로 그 強度特性를 研究하고, 構造部材로서의 脆弱點을 개선할 수 있음을 基礎的으로 밝혀려는데 있다.

## 2. 實 驗

### 2.1. 使用 材料

本 實驗에 사용한 시멘트는 比重이 3.14인 國內 H社 1종 보통포틀랜드시멘트를 使用하였다.

使用된 骨材는 잔 골재로는 錦江産 江모래와 굵은 골재로는 忠北 淸原郡 芙蓉面産 碎石을 사용하였으며, 그 物理的 性質은 Table 1과 같다.

混和濟는 알카리 Sulfonate가 主成分인 (주)세일콘의 高強度 高性能 減水劑 LIGACE G를 사용하였다. 그

Table 1. Physical characteristics of aggregate

Classification		Specific gravity	Absorption rate	Fineness modulus
Fine aggregate		2.57	1.20	2.53
Coarse aggregate	15mm	2.66	0.68	6.50
	25mm	2.66	0.68	7.17

色相은 暗褐色이고 比重이 1.2이다.

本 實驗에 사용된 鋼纖維는 Belgium의 BEKART社 Dramix製品을 사용하였다. 이 제품은 兩端 갈고리(hook) 形으로 個個의 鋼纖維가 水溶性 아교로 다발의 형태로 붙어 있어, 콘크리트 配合時 풀어져 分散效果가 좋다. 또한, 강섬유의 比重은 7.85이고, Table 2와 같이 길이가 3種類인 강섬유를 사용하였다.

Table 2. Dimensions of steel fiber

Type	Length(mm)	Diameter(mm)	Aspect ratio
ZP 30/.50*	30	0.50	60
ZC 50/.50**	50	0.50	100
ZC 60/.80**	60	0.80	75

\* Hooked and specially glued fiber.

\*\* Hooked and normally glued fiber.

### 2.2. 配合設計

本 實驗에서는 高強度 鋼纖維 補強 콘크리트를 目標로 물-시멘트비를 30%로 낮추고, 이를 위해 高強度 高性能 混和劑를 사용하였다. 사용된 굵은 骨材는 纖維의 길이에 따라, 30mm 鋼纖維에는 最大値數 15mm를 사용하고, 50mm와 60mm에는 25mm 骨材를 사용하였다.

또한 본 실험에 사용한 配合基準은 一定한 반죽질기(consistency)를 유지하기 위해 小林一輔 등<sup>(14)</sup>의 文獻을 參照하여 결정하였고, 高性能 減水劑를 사용함으로써 單位水量을 15% 줄일 수 있었다.

各 섬유길이와 混入率에 대한 配合 設計表는 Table 3과 같다.

### 2.3. 實驗 計劃

本 실험은 강섬유 혼입률의 영향을 알아보기 위하여 0, 0.5, 1.0, 1.5%의 4가지로 하였으며, 강섬유의 길이는 30mm, 50mm, 60mm로 形狀比가 각각 60, 100, 75인 3종류를 사용하였다. 사용된 굵은 骨材의 최대치수는 강섬유 길이의 1/2로 결정하였으며, 韃 試驗片의 치수도 사용된 강섬유길이의 3배 이상이 되도록 강섬유의 길이 30mm에 대해서는 幅 100mm로 하고 높이를 100, 150, 200mm로 변화시켰으며, 강섬유길이 50mm와 60mm에 대해서는 幅을 150mm로 하고 높이를 150, 200mm로 변화시켜 Fig.1 및 Table 4와 같이 모두 5가지 형태의 시험편을 제작하였다. 이때 支間은 모두 시험편 높이의 3배로 일정하게 하였다.

Table 3. Mixing proportion of steel fiber reinforced concrete

Fiber length $L_f$ (mm)	Fiber content $V_f$ (vol.%)	Aggre. max. size(mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Proportion by unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
							Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Admix-ture	Steel fiber
30 (60)*	0	15	8	30	45	3	158	527	735	930	6.3	0
	0.5	15	8	30	50	3	173	577	776	803	6.9	39.3
	1.0	15	8	30	55	3	181	603	830	703	7.2	78.5
	1.5	15	8	30	60	3	190	633	876	604	7.6	117.8
50 (100)*	1.0	25	8	30	57	3	204	680	789	616	8.2	78.5
60 (75)*	0	25	8	30	39	3	160	533	632	1023	8.0	0
	0.5	25	8	30	44	3	174	580	679	894	8.7	39.3
	1.0	25	8	30	49	3	183	610	732	789	9.2	78.5
	1.5	25	8	30	54	3	191	637	783	690	9.6	117.8

(\*) is aspect ratio

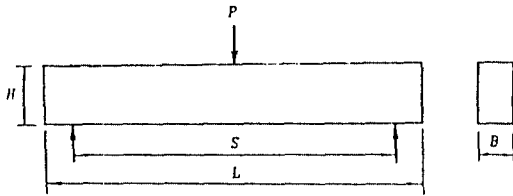


Fig. 1 Shape of specimen

Table 4. Dimension of each type

Type	B	H	L	S
I	10	10	40	30
II	10	15	55	45
III	10	20	70	60
IV	15	15	55	45
V	15	20	70	60

unit: cm

Table 5. Experimental programs of steel fiber reinforced concrete

Test Condition	Effect of fiber content				Effect of $L_f$			Effect of specimen size					
	0	0.5	1.0	1.5	30	50	60	I	II	III	IV	V	
Fiber length ( $L_f$ : mm)	30				30	50	60	30	60				
Specimen type (5 case)	I				IV	IV	IV	I	II	III	IV	V	
Fiber content (vol.%)	0	0.5	1.0	1.5	1.0			1.0					

이상의 實驗計劃을 Table 5에 나타내었다.

압축강도와 割裂 인장강도용 供試體는  $\phi 10 \times 20$ ,  $\phi 15 \times 30$  실린더 몰드를 이용하여 모두 81개를 제작하였으며, 휨 供試體 각각 3개씩 30개를 제작하였다.

콘크리트의 混合을 위하여 용량 50ℓ의 強制式 믹서를 사용하였고, 혼합순서는 먼저 보통 콘크리트의 순서로 混合한 뒤 鋼纖維를 투입 混合하였다. 믹서 混合이 끝난 콘크리트는 삼으로 다시 손비빔 한 후 거꾸집에 타설하였으며, 이 때 시험편의 側面을 위로 하여 2층으로 나누어 최대 휨모멘트가 일어나는 中央部를 먼저 타설하였고, 각 층마다 콘크리트의 表面이 평탄하게 될 때까지 棒진동기를 사용하여 거꾸집 側面을 진동시켜 다짐을 실시하였다.

打設된 供試體는 溫度  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 이고, 濕度 60% 이상인 곳에서 24시간 이상 양생한 후 脫型하였으며, 탈형된 供試體는  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 인 淨水中에서 양생하였다. 모든 시험편은 양생기간에 따른 강도의 차이를 없애기 위하여 60일 이상 水中 양생한 후 시험시까지 空氣中 양생하였다.

한편, 載荷時 支點部位의 沈下로 인한 처짐의 증가를 防止하기 위하여 Fig.2와 같은 처짐 測定器具를 제작하여 실험하였다. 이는 한쪽 支點點 위의 시험편 중앙 높이에 回轉이 가능한 힌지를 설치하고, 다른 쪽은 移動端으로 하기 위해 핀(pin) 위로 수평이동이 가능한 鋼 지지보를 설치하되, 보의 중앙에 線形變位變換機(linear variable differential transformers, LVDT)를 고정된 것으로 시험편 양쪽 側面의 처짐을 측정토록 하였다.

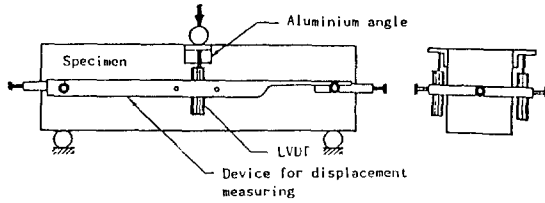


Fig. 2 Apparatus set-up for measuring displacement

#### 2.4. 實驗 方法

壓縮強度試驗은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법), 引張強度試驗은 KS F 2423(콘크리트의 인장강도 시험방법)에 따라 日本 Shimadzu社 100ton容量的 油壓式 萬能試驗機를 사용하였고, 이 때 供試體의 크기는 섬유길이 30mm에는  $\phi 10 \times 20$ cm의 공시체를 50mm, 60mm에는  $\phi 15 \times 30$ cm의 공시체를 사용하였으며, 시험시의 材齡은 수중에서 60일 이상 양생한 후 시험시까지 공기중에서 보관하여 휨시험편과 같은 조건하에서 시험을 행하였다.

한편, 彈性係數를 측정하기 위하여 압축 변형을 측정기(compresso-meter)를 사용하고, 이를 X-Y Recorder로 연결하여 荷重-變形曲線을 自動計測하였다. 계측된 탄성계수는 최대 응력의 40%응력과 변형률의 割線 彈性係數(secant Young's modulus)로 계산하였다.

콘크리트의 포아손 比를 측정하기 위하여 별도의 供試體를 준비하고 電氣抵抗形 콘크리트용 스트레인 게이지 67mm를 공시체 양면에 應力方向과 應力直角方向으로 각각 2개씩 붙인 후, 외력을 가하여 발생한 변형률을 靜的 스트레인 메터를 이용하여 최대하중의 40%점에서 구하였다.

휨 強度 試驗에 사용한 시험기는 Feedback신호가 가능

한 日本 Shimadzu社의 UHF型 5 ton Load Cell이 부착된 Servopulser를 이용하여 中央點 載荷方法으로 실험하였다. 실험시의 載荷速度는 0.3mm/min의 Stroke制御로 실험을 실시하였으며, 처짐은 시험편 양편 중앙부의 LVDT 평균값을 日本 Yaman社의 Analysing Recorder의 GBIP를 이용하여 하중과 함께 Personal Computer에 저장하고, TBASIC(TransEra Co. BASIC)을 이용하여 Plot하고 分析하였다. 이때 LVDT의 최대 측정범위는 5mm이었다.

### 3. 結果分析 및 考察

#### 3.1. 워커빌리티

高強度콘크리트의 제조를 위하여 물-시멘트비를 30%로 낮추고 高性能減水濟(Ligace G)를 사용함으로써 Slump치 5~10cm정도의 필요한 作業性을 얻을 수 있었다.

또한, 強制式 믹서를 사용하고 재료의 투입순서를 골재, 시멘트, 물의 순서로 투입하고, 약 1분간 혼합한 후 鋼纖維를 손으로 뿌리면서 투입하여 강섬유의 均等分散을 꾀하였다. 그러나, 강섬유 길이 30mm의 경우 혼입률 1.5%에서는 약간의 섬유무침(Fiber Ball)현상이 발생하는 경우가 있었으며, 60mm에서는 다소 심하게 나타났다. 이러한 점에서 강섬유의 혼입률 1%가 적절하다고 판단된다. 한편, 棒진동 다짐기를 이용하여 거푸집 표면을 진동시키면서 진행하였으나, 강섬유가 바닥쪽으로 일부 가라앉아 휨 시험편 단면 전체에 균등하게 분포시키는 것이 문제로 대두되어 휨시험편의 하중재하시 側面을 上面으로 하여 시험하였다.

Table 6. Test results of cylinder compressive strength and modulus of elasticity

Fiber length (mm)	Fiber content (Vol.%)	Ave. compressive strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Relative compressive strength	Average modulus of elasticity (kg/cm <sup>2</sup> )
	0	656( 4. 16.1)*	1.00	3.26×10 <sup>6</sup> ( 4. 4.4)*
30	0.5	738( 4. 10.3)	1.13	3.28×10 <sup>6</sup> ( 4. 1.8)
30	1.0	724(14. 10.9)	1.10	3.23×10 <sup>6</sup> (14. 10.1)
30	1.5	673( 3. 2.9)	1.03	3.00×10 <sup>6</sup> ( 3. 5.2)
50	1.0	675( 5. 10.0)	-	3.00×10 <sup>6</sup> ( 5. 2.9)
	0	580( 3. 14.0)	1.00	3.27×10 <sup>6</sup> ( 3. 7.5)
60	0.5	704( 4. 8.5)	1.21	3.28×10 <sup>6</sup> ( 4. 5.1)
60	1.0	612( 3. 17.5)	1.06	2.98×10 <sup>6</sup> ( 3. 0.9)

\* ( ) is specimen number and coefficient of variation.

### 3.2. 壓縮強度 및 彈性係數

강섬유의 혼입률에 따른 圓柱型 供試體의 壓縮強度 및 彈性係數의 측정 결과를 Table 6에 나타내었다.

Fig.3은 강섬유의 혼입률에 따른 壓縮強도의 변화를 보이고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 강섬유의 혼입으로 壓縮強도가 다소 增加하고 있으나, 혼입률이 증가함에 따라 強度가 低下하고 있음을 보여 주고 있다. 이것은 강섬유의 혼입이 콘크리트의 壓縮強도에 는 그다지 效果가 없음을 나타내주고 있다.

또한, Fig.4에서 강섬유 혼입률 1.0%일 때 강섬유 길이의 增加에 따른 壓縮強도의 변화를 살펴보면, 섬유 길이가 증가할수록 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 강섬유의 혼입률과 길이가 一定한 限界를 넘으면 緻密하고 均質한 組織을 얻을 수 없고, 매트릭스와 纖維間의 부착

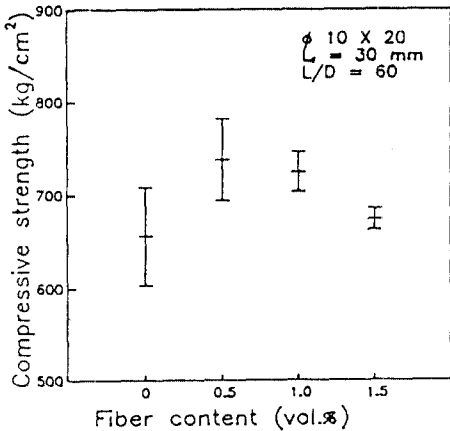


Fig. 3 The effect of steel fiber content on compressive strength

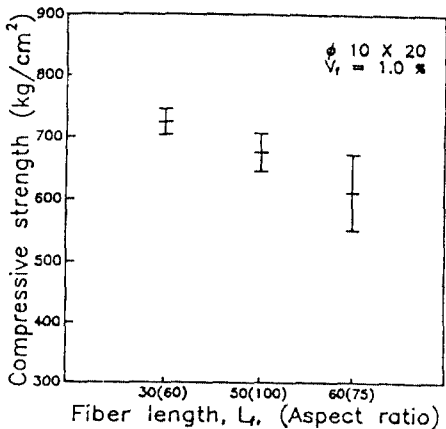


Fig. 4 The effect of steel fiber length on compressive strength

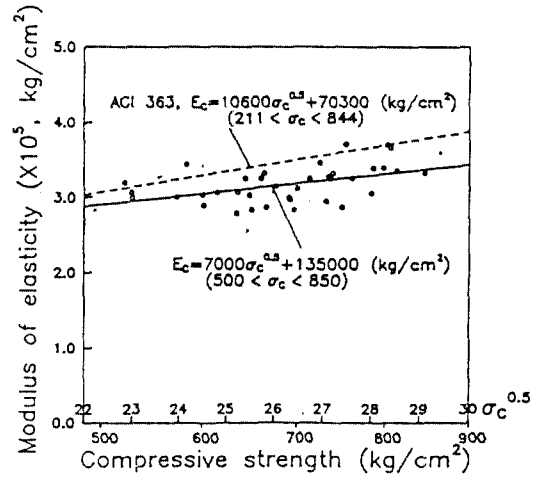


Fig. 5 Modulus of elasticity versus compressive strength

에 큰 역할을 하는 시멘트-폴리 纖維 혼입률이 많아 질수록, 섬유의 길이가 길수록 상대적으로 적어지기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 결과는 Williamson<sup>(15)</sup>의 강섬유 보강 콘크리트 및 모르타르의 시험에서 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 혼입률 1~2%에서 僅少하게 증가한다는 結果와 일치하고 있다. 한편 압축강도 시험시의 破壞過程을 살펴보면, 無筋 콘크리트에서는 최대하중점을 바로 지나 커다란 破斷音을 내면서 高強度 材料의 특성을 나타내며 破斷되었지만, 강섬유 보강 고강도콘크리트의 破斷은 강섬유가 갖는 延性 및 變形率 硬化의 영향을 받아 큰 韌性을 나타내며 서서히 이루어지고 있었다.

강섬유 보강 콘크리트의 彈性係數는 Table 6에서 보는 바와 같이 강섬유의 혼입률에 따라 거의 변화가 없거나 오히려 약간 減少하고 있었다. Patton, Whittaker 등<sup>(16)</sup>은 纖維 혼입률이 1% 증가하면 섬유 콘크리트의 彈性係數는 거의 3.3%씩 減少한다고 발표하였다. 이같은 結果는 彈性係數에 대한 纖維混入의 效果는 일정하지 않으며, 압축시험에서 얻은 탄성계수는 複合材料의 混合法則을 잘 따르지 않고 있음을 알 수 있다. 강섬유 콘크리트의 彈性係數는 Fig.5에서와 같이 壓縮強도의 제곱근에 比例하고 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 鋼纖維 補強, 高強度콘크리트의 탄성계수를 압축강도 500kg/cm<sup>2</sup>에서 850kg/cm<sup>2</sup>의 範圍內에서 예측할 수 있는 식을 다음과 같이 導出하였다.

$$E_c = 7,000 \sqrt{\sigma_c} + 135,000 (\text{kg/cm}^2) \quad (1)$$

이때, 강섬유 보강 콘크리트의 단위중량은 평균 2,420 kg/m<sup>3</sup>이었다.

한편, ACI 363 委員會는 콘크리트의 단위중량 2,346 kg/cm<sup>3</sup>일 때, 압축강도 211kg/cm<sup>2</sup>(3000psi)에서 844kg/cm<sup>2</sup>(12000psi)의 범위 내에서 탄성계수를 예측할 수 있는 다음 식을 제안하고 있다.<sup>11)</sup>

$$E_c = 10,600 \sqrt{\sigma_c} + 70,300 \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

$$(E_c = 40,000 \sqrt{\sigma_c} + 1.0 \times 10^6 \text{ psi})$$

식 (1), 식 (2) 및 Fig.5에서 보는 바와 같이 강섬유 보강 高強度콘크리트의 탄성계수는 一般 高強度콘크리트 보다 압축강도에 따른 탄성계수의 增加率이 鈍化되고 있음을 알 수 있다.

한편, 본 실험에서 얻은 탄성範圍內에서의 포아송 비 ( $\nu$ )는 실험결과 0.2로 나타났다.

### 3.3. 割裂引張強度

강섬유의 길이 및 混入率에 따른 割裂引張強度(splitting tensile strength) 실험결과는 Table 7 및 Fig.6에 나타내었다.

Table 7. Test results of splitting tensile strength

Fiber length (mm)	Fiber content (Vol.%)	Average splitting tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Relative tensile strength	Remarks
	0	49.4( 3, 28.1)*	1.00	
30	0.5	59.2( 3, 8.7)	1.20	
30	1.0	71.4(15, 7.6)	1.45	
30	1.5	85.0( 4, 2.8)	1.72	
50	1.0	85.5( 6, 16.4)	-	
	0	40.0( 3, 11.2)	1.00	
60	0.5	65.4( 4, 6.4)	1.64	
60	1.0	89.2( 3, 8.1)	2.23	

\* ( ) is specimen number and coefficient of variation.

Table 7 및 Fig.6에서 보는 바와 같이 割裂引張強度는 강섬유의 混入率에 따라 直線變化로 증가하고 있었으며, 강섬유 길이가 증가할수록 增加率은 현저하였다. 즉, 강섬유 길이 30mm에서는 纖維混入率에 따라 0.5%에서 1.2배, 1.0%에서 1.45배, 1.5%에서 1.72배 증가하였고, 강섬유 길이 60mm에서는 0.5%에서 1.64배, 1.0%에서 2.23배 증가하였다. 그러나 纖維 混入率이 증가할수록 더욱더 증가하는 것은 아니며, 2.5% 이상되면 오히려

감소하고, 콘크리트의 혼합시 Fiber Ball 등의 현상으로 Workability가 나빠진다고 보고되고 있다.<sup>16)</sup> 割裂試驗에서의 破斷面을 살펴보면, 無筋 콘크리트는 極限狀態에 도달하면 균열이 발생하여 곧 두 조각으로 破斷되었으며, 그 破斷面이 고르게 나타났다. 그러나, 강섬유 보강 콘크리트는 처음에는 미세한 균열이 발생하기 시작하지만, 極限狀態를 지나서도 계속적으로 큰 變形을 同伴하면서 진전되어, 매트릭스내에 완전히 龜裂이 발생하여도 一部는 강섬유가 破斷音을 내면서 完全 破斷될 때까지 抵抗하고 있었다. 따라서, 從來 割裂引張強度 시험법은 강섬유보강 콘크리트와 같이 균열발생후에도 강섬유에 의하여 연결된 두개의 半圓形 球體의 압축시험과 같은 상태로 되기 때문에 정확한 인장강도를 측정하기가 곤란하였다. 그러므로 割裂引張強度 시험법은 무근콘크리트와 같은 脆性材料에 대해서는 유효한 방법이지만, 강섬유보강 콘크리트는 인장강도 시험법으로 적절한 直接引張強度 시험법이 요구되고 있다.

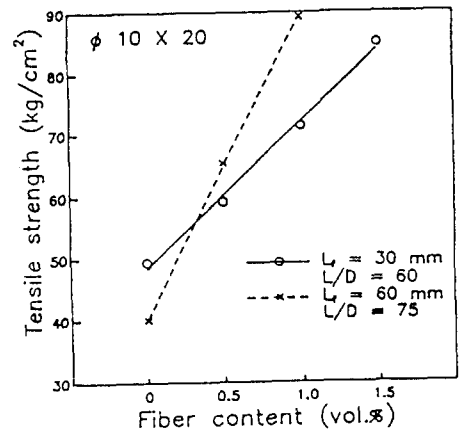


Fig. 6 The effect of steel fiber content on tensile strength

### 3.4. 휨 強度

강섬유의 混入率 강섬유의 種類에 따른 휨 強度의 試驗 結果를 Table 8에 나타내었다.

강섬유 길이 30mm일 때 中央點 載荷試驗으로부터 얻어진 荷重 載荷點의 荷重-처짐曲線은 Fig.7과 같다.

이 그림에서 알 수 있듯이 無筋 콘크리트( $V_f=0\%$ )는 최대하중에 도달한 후 급속한 破壞가 일어남을 알 수 있는데 강섬유가 혼합된 콘크리트에서는 최대하중에 도달한 후에도 계속하여 하중을 받으며 서서히 파괴가 진행함

Table 8. Test results of flexural strengths

Series	Fiber length $L_f$ , mm	Fiber content $V_f$ , %	Specimen size $B \times H \times L$ , mm	Ave. flexural strength $\sigma_b$ , kg/cm <sup>2</sup>	Init. crack flexural strength $\sigma_{crack}$ , kg/cm <sup>2</sup>
A00-I		0	100×100×400	42.5(1.00)*	33.3(1.00)*
A05-I	30	0.5	100×100×400	72.2(1.69)	58.6(1.76)
A10-I	30	1.0	100×100×400	94.2(2.22)	72.1(2.17)
A15-I	30	1.5	100×100×400	110.3(2.60)	45.2(1.36)
A10-IV	30	1.0	150×150×550	89.3(1.00)	60.1(1.00)
B10-IV	50	1.0	150×150×550	99.8(1.12)	53.1(0.88)
C10-IV	60	1.0	150×150×550	110.0(1.23)	66.2(1.10)
A10-I	30	1.0	100×100×400	94.2(1.00)	72.1(1.00)
A10-II	30	1.0	100×150×550	91.4(0.97)	71.4(0.99)
A10-III	30	1.0	100×200×700	68.7(0.73)	52.4(0.73)
C10-IV	60	1.0	150×150×550	110.0(1.00)	66.2(1.00)
C10-V	60	1.0	150×200×700	84.5(0.77)	67.0(1.01)

\* ( ) is relative strength ratio.

을 알 수 있다.

Fig.8은 강섬유 길이 30mm일 때 纖維 混入率에 따른 휨 강도와 初期龜裂時의 強度를 나타내고 있다.

여기서, 初期龜裂強度는 荷重-처짐曲線上에서 非線形으로 되는 點을 택하여 계산하였으나, 각 시험편마다 初期龜裂點을 찾는 것이 쉽지 않았고, 그 結果도 分散이었다. 初期 龜裂強度는 일반적으로 纖維의 混入에 따라 增加하는 경향이 있으나 강섬유 混入率 1.5%에서는 오히려 減少하였다. 따라서, 강섬유의 分散性 및 作業性 등을 고려할 때 混入率 1%일 때가 적당하다고 판단된다.

강섬유 混入率이 증가할수록 휨 強度에 미치는 纖維補強의 效果가 큰 것으로 나타났다. 특히 Fig.9는 강섬유의 補強이 割裂引張強度 및 휨 強度에 미치는 영향을 나타내

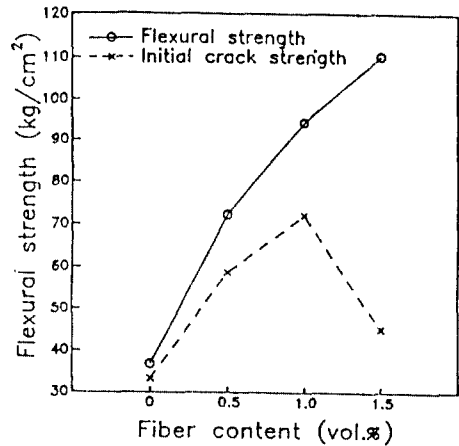


Fig. 8 Flexural strength and initial crack strength for various fiber content ( $L_f=30$ mm)

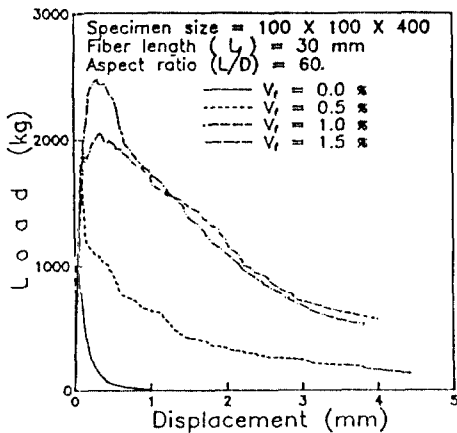


Fig. 7 Load-deflection curve of the specimens with  $L_f=30$ mm

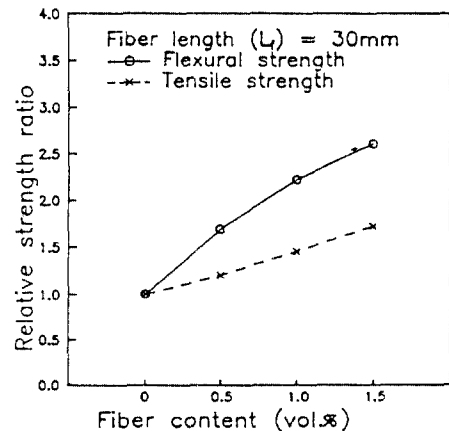


Fig. 9 Relative strength ratio of splitting tensile strength and flexural strength ( $L_f=30$ mm,  $V_f=1.0\%$ )

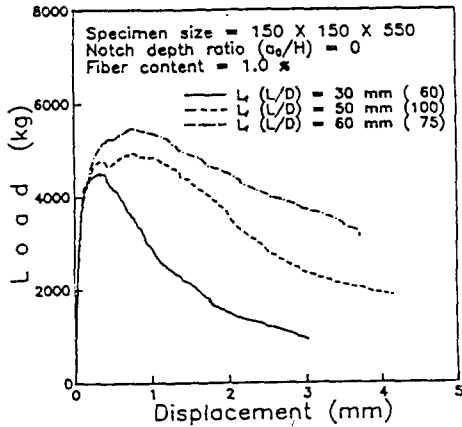


Fig. 10 Load-deflection curve of the specimens with  $V_f=1.0\%$

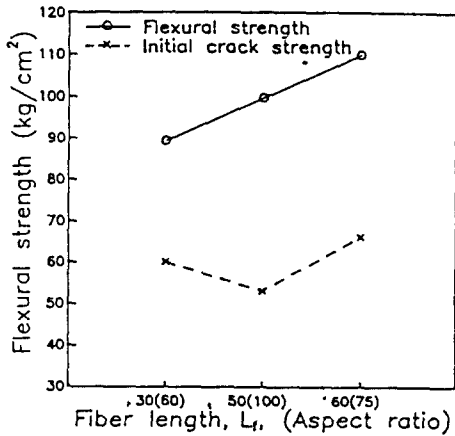


Fig. 11 Flexural strength and initial crack strength for various fiber length ( $V_f=1.0\%$ )

고 있는데, 이 그림에서 강섬유의 보강이 휨 강도에서 보다 더 효과를 나타내고 있다.

또한 Fig.10과 Fig.11은 같은 섬유 혼입률( $V_f=1.0\%$ )일 때 강섬유의 길이에 따른 휨 강도의 변화를 나타내고 있으며, 강섬유의 길이가 길수록 휨 강도가 증가하고, 극한荷重 후에 후龜裂抵抗(post cracking resistance)이 증대하여 더욱 더 延性舉動을 하는 것으로 나타났다. 그러나, 강섬유의 形狀比(aspect ratio)에 따른 강도의 변화는 크게 나타나지 않고 있어, 강섬유를 보강한 고강도 콘크리트에서는 形狀比보다는 강섬유의 길이에 더 依存함을 알 수 있었다.

한편, 供試體의 크기에 따른 강도의 變化를 Table 8에서 알 수 있듯이, 供試體의 크기가 클수록 강섬유 길이

30mm와 60mm에 대하여 모두 휨 강도가 저하되고 있음을 알 수 있었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 강섬유 보강콘크리트의 휨 강도는 강섬유의 혼입률이 증가할수록, 강섬유의 길이가 길수록 증가하고 있으며, 試驗片의 值數가 클수록 減少하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 結 論

最近 이용이 절실히 요구되고 있는 高強度 콘크리트를 대상으로, 高強度 콘크리트가 갖는 脆性を 개선하고, 이를 이용하여 反復荷重이나 衝擊 또는 地震荷重 등에 抵抗性を 높일 수 있도록, 강섬유를 보강한 鋼纖維 補強 高強度 콘크리트의 強度特性에 대한 실험적 연구를 한 결과 다음과 같은 結論을 얻었다.

鋼纖維 補強 콘크리트의 壓縮強度는 강섬유의 혼입률에 따라 크게 영향을 받지 않으며, 또한 彈性係數에 대한 강섬유 혼입률의 효과도 일정치 않았다.

본 연구에서는 압축강도  $500\text{kg/cm}^2$ 에서  $850\text{kg/cm}^2$  범위의 鋼纖維 補強 高強度 콘크리트의 彈性係數를 계산하기 위한 실험식을 提案하였다.

한편, 割裂引張強度와 휨 강도는 강섬유의 혼입률과 길이에 따라서 크게 증가하였으며, 최대하중을 지나서도 응력의 감소가 작아 延性이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 강도의 증진효과는 割裂引張強度보다 휨 강도에서 크게 나타났으며, 시험편의 치수가 클수록 휨 강도가 작아지고 있었다. 또한, 강섬유의 分散性 및 作業性 등을 고려할 때 혼입률 1%일 때가 적당하다고 판단된다.

이상의 결과를 살펴보면 최근 그 使用性이 점차 요구되고 있는 高強度 콘크리트의 최대 문제점인 脆性を 강섬유로 補強함으로써 강섬유 길이, 혼입률에 따라 韌性を 크게 增大시킬 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1990년도 기초연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부로, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Roumualdi, J. P., and Batson, G.B., "Behavior of



- Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement”, *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 60, No.6, June, 1963, pp.775~789.
2. Roumualdi, J. P., and Mandel, J. A., “Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement”, *ACI Journal, Proceedings*, Vol.61, No.6, 1964, pp.657~671.
  3. Johnston, C. D., “Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete - a Review of Mechanical Properties”, in *Fiber Reinforced Concrete*, Detroit, American Concrete Institute, SP-44, 1974, pp.127~142.
  4. Williamson, G. R., “The Effect of Steel Fiber on the Compressive Strength of Concrete”, in *Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, SP-44, 1974, pp.195~208.
  5. Swamy, R. N., Mangat, P. S., and Roa, C.V.S.K., “The Mechanics of Fiber Reinforcement of Cement Metrices”, in *Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, SP-49, 1974, pp.1~28.
  6. Mangat, P. S., “Tensile Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol.6, No.2, Mar., 1976.
  7. Naaman, A. E., and Shah, S. P., “Pull-out Mechanisms in Steel Fiber Reinforced Concrete”, *Proceedings of ASCE, Journal of the Structural Division*, Vol.102, No.ST8, Aug., 1976, pp.1537~1548.
  8. ACI Committe 544, “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete”, *ACI Journal, Proceedings*, Vol.75, No.7, July, 1978, pp.283~289.
  9. Hannant, D. J., “*Fiber Cements and Fiber Concrete*”, John Wiley and Sons, New York, 1978, p.8~51.
  10. 小林一輔, 纖維補強コンクリート特性と應力”, オーム社, 1981, pp.27~43.
  11. ACI Committee 363, “*State-of-the-Art Report on High Strength Concrete*”, (ACI 363R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, p.48.
  12. 日本建築學會, “コンクリートの調査設計・調査管理・品質調査指針案・同解説”, 1975, pp.145~192.
  13. 김진근, 김상식, 오병환, 신성우, “고강도, 유동화 및 섬유 콘크리트의 개발과 역학적 특성에 관한 연구”, 과학기술처, 1990.6, pp.16~24, pp.225~244.
  14. 小林一輔, 岡村雄樹, “所要のコンシステンシーを得るための鋼纖維補強コンクリートの配合設計方法”, 日本土木學會論文報告集, 第293號, 1980.4, pp.111~119.
  15. Williamson, G. R., “The Effect of Steel Fiber on the Compressive Strength of Concrete”, in *Fiber Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, SP-44, 1974, pp.195~208.
  16. Patton, M. E., and Whittaker, W. L., “Effects of Fiber Content and Damaging Load on Steel Fiber Reinforced Concrete Stiffness”, *ACI Journal, Proceedings*, Vol.80, No.1, 1983, pp.13~16.

(접수일자 : 1992. 2. 20)