

# 강섬유 보강 콘크리트의 휨파괴 인성지수의 결정에 관한 비교 연구

A Comparative Study on Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete

구 봉 근\*      정 경 섭\*\*      ○ 김 태 봉\*\*\*      박 종 인\*\*\*\*

Koo, Bong-Kuen Jung, Kyoung-Sup Kim, Tae-Bong Park, Jong-in

## ABSTRACT

This paper reviewed various methods of evaluating the toughness of fiber reinforced concrete materials by means of toughness indices and discussed the use of various multiples of first-crack deflection or first-crack secant compliance to define toughness indices. And a new method what is called effective toughness used to evaluate the toughness of steel fiber reinforced concrete. The proposed method determined from the area below the load-deflection curve until deflection at the loading point becomes 1/150 of the span divided by the ligament area.

## 1. 서 론

본래 취성재료인 콘크리트에 강섬유를 보강함으로써 그 특성을 상당히 증진시킬 수 있었다. 섬유의 보강은 강도의 증진보다는 인성의 증진에 더 큰 비중과 효과가 있다고 보며, 지금까지 많은 연구가 섬유보강콘크리트(fiber reinforced concrete; FRC)의 인성을 평가하기 위하여 수행되어 왔다. 특히 많은 연구자들이 강섬유보강콘크리트의 인성 특성에 대하여 보고하여 왔고 인성의 특성에 정적 휨강도 실험을 통한 하중-처짐 곡선하의 면적을 사용하였다. 인성은 일반적으로 재료나 구조물이 파괴에 이르기까지의 에너지를 흡수할 수 있는 능력으로 표시할 수 있는데 시험 조건과 시험편 형상, 치수 및 하중조건 등에 따라 다르게 나타나고 있다. 그러나 FRC의 인성을 평가하는 요소는 재료의 특성을 나타내기 위하여 시험편 형상, 치수, 하중조건 등에 독립적이어야 한다. 또한 경제적인 이유로도 간단한 시험편으로부터 쉽게 얻을 수 있어야 하며, 비교하기 쉽고 재료의 품질관리가 쉽게 표현되어야 한다. 그러나 실제로 FRC의 인성을 평가하기 위해 사용되고 있는 많은 방법 등이 이러한 요구와 맞지 않는 것이 많았다.

따라서, 본 연구는 기존의 FRC의 인성평가방법을 검토하여 강섬유보강콘크리트에 대한 파괴인성평가를 시험방법이 비교적 간단한 3점 휨 실험을 통해 가장 합리적으로 얻을 수 있는 방법을 검토하여 보기로 한다.

## 2. 인성 평가 방법에 대한 문헌적 고찰

1974년 Johnston<sup>1)</sup>은 FRC의 인성을 평가하는 방법으로 최대하중까지의 하중-처짐곡선하의 면적을 사용하는 것을 제안하였다.

그러나, 이 방법은 그 결과가 시험편 치수와 형상에 따라 상당히 변하기 때문에 합리적인 인성 평가 방법으로 채택되지 못하였다. 이와같은 어려움은 인성지수라는 무차원수로 나타내는 하중-처짐곡선하의 각각의 면적의 비율 도입함으로써 해결 될 수 있었다. 이것은 ACI위원회 544<sup>2)</sup>와 Henager<sup>3)</sup>에 의해서 제안되었다.

ACI위원회 544는 인성지수를 치수 4x4x14in의 휨공시체를 이용한 지간 12in에서 3등분점 2점 재하방법에 의해 휨실험을 행하고 지간 중앙부 처짐이 0.074in(1.9mm)되는 점까지의 하중-처짐곡선하의 면적을 초기균열까지의 면적으로 나눈값으로써 정의하였다. 여기서 초기균열점은 하중-처짐곡선이 비선형으로 되는 점, 즉 비례한도점(limit of proportionality point; LOP)으로 잡고 있다.

544위원회는 처짐을 1.9mm로 정한 근거를 나타내

\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

\*\*\* 정희원, 충북대학교 대학원 박사과정 수료

\*\*\*\* 충북대학교 대학원 석사과정 수료

고 있지 않으나, C.H.Henager는 평균적인 초기균열 시의 처짐 0.125mm의 15배에 상당하는 값으로 설명하고 있다[Fig.1(a)].

ACI 인성지수의 주된 이점은 표준 시험편으로 부터 쉽게 얻을 수 있고 새로운 시험편 형상이나 시험 장비가 필요치 않으며, 고인성재료와 저인성재료를 쉽게 구분할 수 있다. 그러나 이 시험방법은 정해진 시험편에서의 특정 처짐의 항으로 정의되기 때문에 그 결과는 동일한 시험편 및 시험기계로 사용했을 때 가능하다. 또한 시험편의 형상이나 사용한 섬유 의 형태에 아주 민감하다. Henager와 Zollo<sup>4)</sup> 및 Johnston<sup>5)</sup>에 의해서 ACI인성지수 방법의 결점에 대한 논의가 있었으며, Johnston은 이 방법을 시험편의 단면, 시간, 하중의 형태에 따라 조절되어야 하고, 처짐에 영향을 주는 소재 특성의 변화를 고려하여야 한다고 결론짓고, 정해진 시험편 크기에만 사용할 수 있는 고정변위를 사용하는 대신에 하중-처짐곡선의 비례 한도점 변위의 여러가지 다른 곱까지의 면적을 LOP면적으로 나누어진 인성지수를 제안하였다 [Fig.1(b)]. ASTM규준<sup>6)</sup>에는 ACI방법과 Johnston의 방법을 조합하여 채택하고 있다.

또한, Barr 등<sup>7)</sup>은 ACI 인성지수와 유사한 또 다른 인성지수를 제안하였다. 이 방법의 잇점은 시험편의 형태와 규정된 처짐에 무관하다는 점이다. 이는 정해진 변위까지의 하중-처짐곡선하의 면적을 초기 균열점에서의 하중-처짐곡선하의 면적의 4배로 나눈 값의 비로서 나타낸다[Fig.1(c)].

Y.Wang 과 S.Backer<sup>7)</sup>는 인장, 휨 및 compact 인장시험과 그밖의 다른 유사한 시험의 하중-변위 곡선으로부터 비례한도까지의 secant compliance를 이용하여 재료가 강도 및 사용성을 유지하는 데 필요한 한계까지 흡수된 에너지를 초기 secant compliance의 n 배수로 나타내어 이것을 무차원 인성지수(DTln)로 나타내었다. 그들은 초기 secant compliance 의 20배까지의 전 면적을 초기균열시까지의 면적으로 나누어 나타내고 있다[Fig.1(d)].

한편, 일본 콘크리트 공학 협회의 섬유 보강 콘크리트의 시험방법에 관한 규준(JCI-SF4)<sup>9)</sup>에는 3등분 점 하중 재하 방법을 이용하여 휨 실험을 행하고 휨 인성을 처짐이 시간의 1/150까지 하중-처짐 곡선하의 면적에서 유효숫자 3자리까지 구하여 사용하고 있다.

### 3. 본 논문에서의 인성 평가

이상과 같은 대부분의 방법은 초기 균열점을 하중 처짐곡선의 비례한도점으로 잡고 있으나, 콘크리트는 정확한 비례한도점을 나타내고 있지 않기 때문에 그 점을 찾는 것이 쉬운 일이 아니며, 같은 재료, 같은 시험편에 있어서도 그 점은 상당히 다르게 나타날 수 있어 얻고자 하는 인성지수에 상당한 영향을 줄 수 있다.

섬유보강콘크리트의 인성은 임의의 설정된 한계점에 도달할 때까지의 하중-처짐곡선하의 면적으로 정의되므로, 본 논문에서는 초기균열을 가진 휨공시체의 3점 재하방법에 의한 하중-처짐곡선에서 처짐이 시간의 1/150되는 점까지의 전 면적을 균열이 진행되는 면적(ligament area)으로 나눈 값으로 정의하고, 이를 유효인성(effective toughness)이라고 부르기로 한다. 이것은 RILEM의 50-FMC에서 제안한 콘크리트의 파괴에너지 결정방법<sup>10)</sup>을 기본으로하고, 섬유콘크리트의 처짐의 한계를 JCI-SF4에서와 같이 시간의 1/150까지로 정한 것이다.

일반적으로 한계처짐을 작게하면 휨 Toughness에 미치는 섬유의 혼입률과 종류의 영향이 분명하지 않다. 한편, 한계처짐을 크게 하면 공시체의 변형이 크게 되어 처짐량의 측정에 문제가 발생하므로, 유효인성에서 정한 처짐의 한계점은 시험편 시간의 길이에 따라 결정되므로 합리적이라 할 수 있으며, 구조물의 강도와 사용성의 면에 있어서도 현재 콘크리트 시방서의 처짐의 한계를 최대시간의 1/180까지 잡고 있으므로 시험편의 치수를 고려하여 타당하다고 생각된다. 또한 이 값은 단위면적당 균열을 발생시키는데 필요한 에너지로 생각할 수 있다.

### 4. 실험

#### 4.1 실험 재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내 H사 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 사용된 골재는 잔골재로서 강모래와 굵은골재로서 채석을 사용하였으며, 그 물리적 성질은 표 1과 같다.

또한, 본 실험에서는 비중이 1.2인 (주)세일콘의 고강도 고성능 감수제 LIGACE G를 사용하였다.

본 실험에 사용된 강섬유는 모양이 양단 hook형으로 개개의 강섬유가 수용성 아교로 다발로 붙어 있는 Belgium의 BEKART사 Dramix제품으로 비중은 7.85

이고, 길이가 표 2와 같이 3종류인 강섬유를 사용하였다.

#### 4.2 배합설계

본 실험에서는 고강도 강섬유 보강 콘크리트를 목표로 물-시멘트비를 30%로 낮추고, 이를 위해 고강도 고성능 혼화제를 사용하였다. 사용된 굵은 골재는 섬유의 길이에 따라, 30mm 강섬유에는 최대치수 15mm를 사용하고, 50mm와 60mm에는 25mm골재를 사용하였다.

또한 본실험에 사용한 배합기준은 일정한 반죽질기(consistency)를 유지하기 위해 小林一輔 등<sup>11)</sup>의 문헌을 참조하여 결정하였다. 각 섬유길이와 혼입률에 대한 배합설계표는 표 3과 같다.

#### 4.3 실험 준비

본 실험은 강섬유보강콘크리트의 파괴역학적인 인자를 규명하기 위하여 초기균열 길이, 시편의 크기, 강섬유의 길이와 섬유 혼입량 등을 각각의 수준으로 결정하여 계획하고 공시체를 제작하였다.

각 시험편의 형상과 치수를 Fig. 2에 나타내고 있고, 실험계획을 표 4에 나타내었다.

시험편은 모두 침공시체 각각 3개씩 90개를 제작하였으며, 압축강도와 할열인장강도용 공시체를  $\phi 10 \times 20$ ,  $\phi 15 \times 30$  실린더 몰드를 이용하여 침공시체 타설시 동시에 제작하였다.

#### 4.4 혼합 및 타설

콘크리트의 혼합을 위하여 용량 50ℓ의 강제식 믹서를 사용하였고, 혼합순서는 먼저 보통 콘크리트의 순서로 혼합한 뒤 강섬유를 투입 혼합하였다.

믹서 혼합이 끝난 콘크리트는 삽으로 다시 손비빔한 후 거푸집에 타설하였으며, 이때 시험편의 측면을 위로 하여 2층으로 나누어 최대 휨모멘트가 일어나는 중앙부를 먼저 타설하였고, 각 층마다 콘크리트의 표면이 평탄하게 될 때까지 붐 진동기를 사용하여 거푸집 측면을 진동시켜 다짐을 실시하였다.

#### 4.5 거푸집 탈형 및 양생

타설된 공시체는 온도  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 이고, 습도 60% 이상인 곳에서 24시간 이상 양생 한 후 탈형하였으며, 탈형된 공시체는  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 인 수중에서 양생기간에 따른 강도의 차이를 없애기 위하여 60일 이상 수중 양생 한 후 공기중 양생하였다.

#### 4.6 실험 방법

보의 중앙에 초기균열을 일정하게 주기 위하여 다이아몬드 saw cutter를 이용하였으며, 재하시 지점 부위의 침하로 인한 처짐의 증가를 방지하기 위하여 Fig. 3과 같이 한쪽 지지점 위의 시험편 중앙에 회전 가능한 힌지를 설치하고, 다른쪽은 pin 위로 수평이동이 가능한 강판의 중앙에 LVDT를 고정하여 처짐을 측정하도록 하였다.

본 실험에 사용한 시험기는 feedback신호가 가능한 servopulser를 이용하여, 재하속도 0.3mm/min의 stroke제어로 실험을 실시하였으며, 처짐은 시험편 양면 LVDT의 평균값을 analysing recorder의 GBIP를 통하여 data acquisition system을 이용하여 plot하였다. 이때 LVDT의 측정범위는 5mm이었다.

#### 5. 실험 결과

##### 5.1 압축강도 및 인장강도

Fig. 4는 강섬유의 혼입률에 따른 압축강도의 변화를 나타내고 있으며, 이 그림에서 0.5%와 1.0%일 때 압축강도가 다소 증가하고 있고 1.5%에서는 보통의 콘크리트와 비슷하였다. Fig. 5는 강섬유의 혼입률에 따른 할열인장강도의 변화를 나타내고 있으며, 이 그림에서 섬유의 혼입률에 따라 할열인장강도가 대단히 증가됨을 알 수 있다.

한편, 강섬유보강콘크리트의 탄성계수는 약  $3.17 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이었다.

##### 5.2 파괴인성

실험계획에 나타난 여러가지 시험조건 중에서 본 논문에서는 주로 강섬유 혼입률에 따른 인성치만을 보고한다.

Fig. 6은  $L_f=30\text{mm}$ 일 때, Fig. 7은  $L_f=60\text{mm}$ 일 때 섬유혼입률에 따른 하중-처짐곡선을 나타내며, Fig. 8은 초기균열길이의 변화에 따른 하중-처짐곡선이고, 이때 초기 compliance의 변화를 확대하여 Fig. 9에 나타내었다.

본 논문에서 제안한 유효인성의 결과를 살펴보면 다음과 같다. 강섬유의 길이 30mm에 대해서 강섬유의 혼입률에 따른 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 섬유가 함유되어 있지 않은 콘크리트의 파괴인성값이 평균  $0.021\text{kg/mm}$ (206N/m)이었으며, 섬유 혼입률 0.5, 1.0, 1.5% 일 때의 평균이 각각  $0.136\text{kg/mm}$ (1333N/m),  $0.195\text{kg/mm}$ (1911N/m),  $0.285\text{kg/mm}$ (2793

N/m)으로, 보통 콘크리트(0%)보다 각각 6.5, 9.3, 13.6배 증가하였다.

또한 Fig.11은 강섬유 길이 60mm에 대한 강섬유 혼입률에 따른 결과를 보여 주고 있다. 이들의 유효 인성값은 혼입률이 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5% 일 때 0.021kg/mm(206N/m), 0.256kg/mm(2509N/m), 0.400kg/mm (3920N/m), 0.585 kg/mm(5733N/m)으로 보통 콘크리트(0%)보다 각각 12.2, 19.0, 27.9배 증가함을 나타내고 있다. 그리고 섬유의 길이가 60mm일 때의 값이 30mm일 때보다 약 2배의 증가를 보이고 있다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 본 논문에서 제안한 유효인성의 값이 강섬유콘크리트의 침인성을 평가하는데 유효하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 이방법에 대한 여러가지의 조건에서의 충분한 실험적 결과가 더 많이 필요하므로 이에 대한 보완적 연구가 계속 필요하다고 생각된다.

## 6. 결 론

강섬유보강콘크리트의 인성을 평가하기 위하여 기존의 평가방법을 검토하여 볼 때 대부분 기존의 방법들은 시험편치수와 형상 및 하중조건 등에 따라 각각 다르게 나타나고 있고, 특히 초기균열점을 인성지수의 기본으로 잡고 있으나, 이의 측정이 어려울 뿐만아니라, 그 값에도 오차가 심하므로 본 논문에서는 비교적 실험방법이 쉬운 유효인성이라는 새로운 방법을 제안하였다. 이는 초기균열을 가진 3점 휨강도 시험방법에 의한 하중-처짐곡선에서 지간의 1/150까지의 면적을 ligament면적으로 나눈 값으로 나타낸다.

이 방법을 사용하여 고강도 강섬유보강 콘크리트를 대상으로 시험한 결과 비교적 그 인성특성을 잘 나타내고 있는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Johnston, C.D., "Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete - a Review of Mechanical Properties", In *Fiber Reinforced Concrete*, Detroit, American Concrete Institute, Publication SP-44, 1974, pp.127~142.
2. ACI Committee 544, "Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete", *Journal of the American Concrete Institute*, Proceedings Vol. 75, No.7, July, 1978, pp.283~289.
3. Henager, C.H., "A Toughness Index of Fiber Concrete", In *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites* RILEM Symposium 1978, Lancaster, The Construction Press, 1978, pp. 79~86.
4. Zollo, R.F., "Fibrous Concrete Flexural Testing - Developing Standardized Techniques", *Journal of the American Concrete Institute*, Proceedings Vol.77, No.5, September-October, 1980, pp.363~368.
5. Jonston, C.D., "Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete", *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol.4, No.2, Winter, 1982, pp.53~60.
6. ASTM Standard C 1018, "Test Method for Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)", ASTM, Philadelphia, 1986.
7. Barr, B.I., K. Liu, and R.C., Dowers, "A Toughness Index to Measure the Energy Absorption of Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.4, No.4, November 1982, pp.221~227.
8. Wang, Y., S. Backer, "Toughness Determination for Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.11, No.1, February 1989, pp.11~19.
9. JCI-SF4, "纖維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法", 纖維補強コンクリートの試験方法に関する規準, 日本コンクリート工學協會, 1984. 2, pp. 11~17.
10. RILEM 50-FMC, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams", *Materials and Structures*, Vol.18, No.107, RILEM, 1985, pp.33~39
11. 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", 土木學會論文報告集, 第293號, 1980. 4, pp.111~119.

표 1. 골재의 물리적 성질

분류	비중	흡수율	조립률
잔 골재	2.57	1.20	2.53
굵은 골재	15mm	0.68	6.50
	25mm	0.68	7.17

표 2. 강섬유의 치수

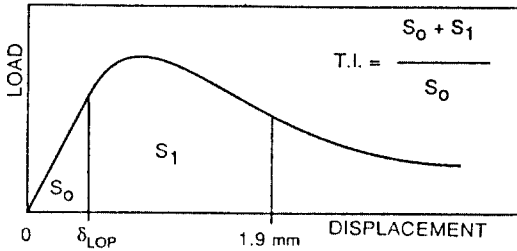
Type	Length(mm)	Diameter(mm)	Aspect ratio
ZP 30/.50*	30	0.50	60
ZC 50/.50**	50	0.50	100
ZC 60/.80**	60	0.80	75

\* : Hooked and specially glued fiber.

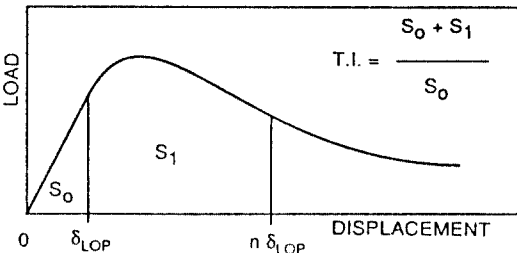
\*\* : Hooked and normally glued fiber.

표 4. 강섬유 보강 콘크리트의 실험 계획표

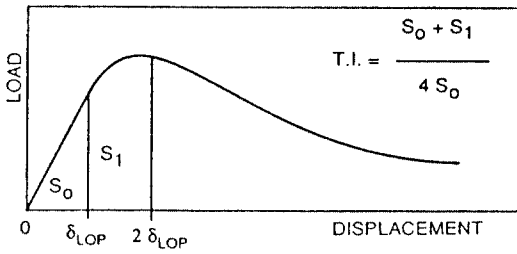
Condition	Test	Effect of notch depth						Effect of $l_f$			Effect of specimen size		Effect of fiber content																								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.3	30	60	30	60	I				IV				V														
Notch depth( $a_0/H$ )								0.3	0.3	30	60	30	60	I				IV				V															
Fiber length( $l_f$ :mm)		30						30	50	60	30	60	30				60																				
Specimen size(5 case)		II						IV	IV	IV	I	II	III	IV	V	I				IV				V													
Fiber content(* vol)		1.0						1.0			1.0			0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5												
Specimen number		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3



(a) by ACI Committee 544



(b) by Johnston,  $n=3, 5.5, 15.5$

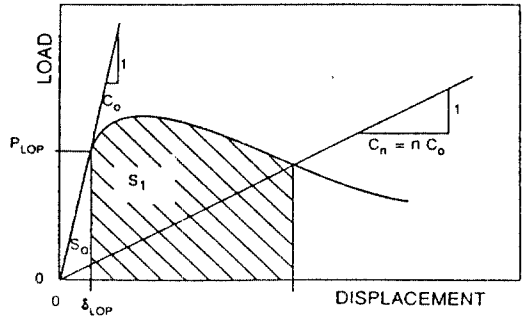


(c) by Barr

표 3. 본 실험에 사용한 배합 설계표

섬유 길이 (mm)	유리 섬유 혼입률 (%vol)	골재의 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	W/C 비율 (%)	인장 강도 (N)	공극률 (%)	단위체로 양 (kg/m³)					
							물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제	강섬유
30	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
50	1.5	15	8	30	60	3	190	633	876	604	7.6	117.8
	0	25	8	30	57	3	204	680	789	616	8.2	78.5
	0.5	25	8	30	39	3	160	533	632	1023	8.0	0
60	1.0	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

\* 섬유 형상비(aspect ratio)



(d) by Wang and Backer,  $n=20$

Fig.1 기존의 인성지수 결정방법

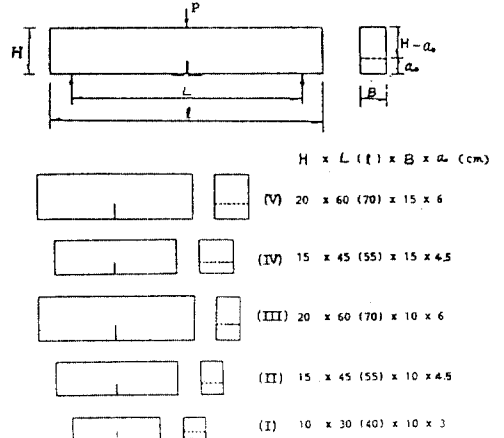


Fig.2 시험편의 형상과 치수

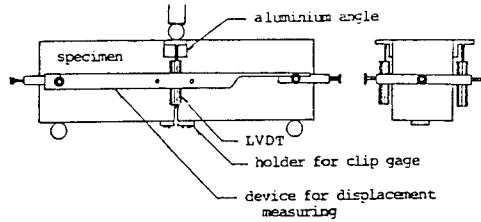


Fig. 3 처짐측정장치

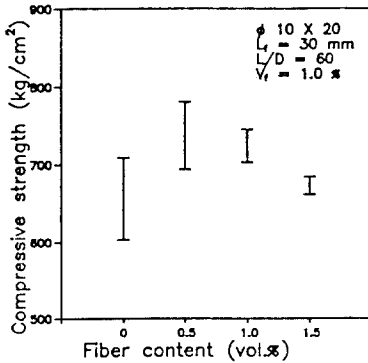


Fig. 4 강섬유의 혼입률에 따른 압축강도의 변화

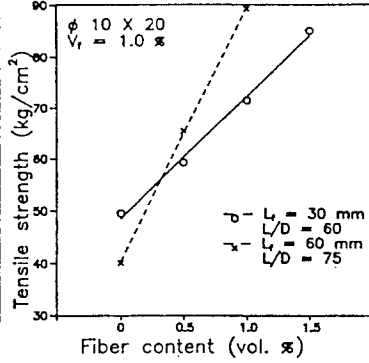


Fig. 5 강섬유의 혼입률에 따른 인장강도의 변화

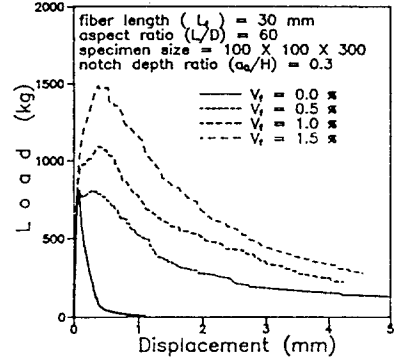


Fig. 6 강섬유의 혼입률에 따른 하중-처짐 곡선 ( $L_f = 30$  mm)

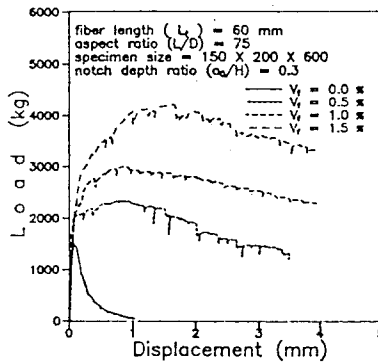


Fig. 7 강섬유의 혼입률에 따른 하중-처짐 곡선 ( $L_f = 60$  mm)

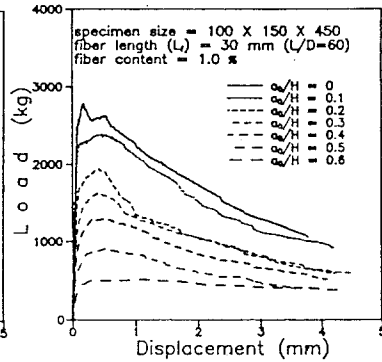


Fig. 8 초기균열깊이에 따른 하중-처짐 곡선

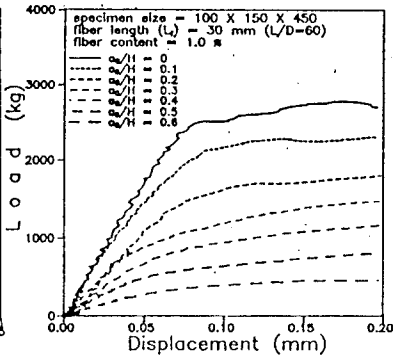


Fig. 9 초기균열깊이에 따른 초기 compliance의 변화

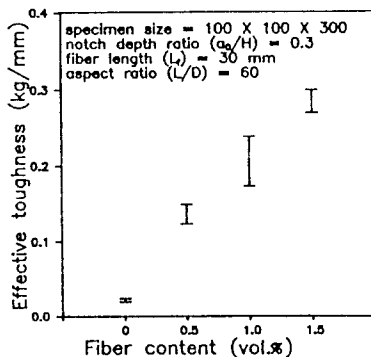


Fig. 10 강섬유의 혼입률에 따른 유효인성치의 변화 ( $L_f = 30$  mm)

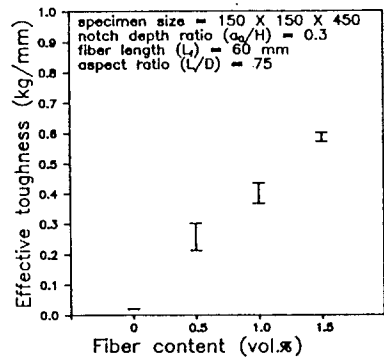


Fig. 11 강섬유의 혼입률에 따른 유효인성치의 변화 ( $L_f = 60$  mm)