

강섬유 보강 콘크리트의 유효인성 평가

Evaluation of Effective Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete

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

요 약

본 연구는 인성지수에 의하여 섬유 보강 콘크리트의 인성을 평가하는 기존의 여러가지 방법을 검토하고, 하중-처짐곡선에서 초기균열시 까지의 여러가지 다른 곱으로 나타내어지는 방법의 불합리성을 지적하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 유효인성이라고 부르는 새로운 방법을 강섬유 보강콘크리트의 인성을 평가하는데 제안하였다. 이는 초기균열을 가진 3점 휨강도 시험에 의한 하중-처짐곡선에서 지간의 1/150까지의 면적을 ligament면적으로 나누어 곱으로 나타낸다. 이 방법을 사용하여 강섬유 보강 고강도 콘크리트 인성특성을 검토한 결과 기존의 방법보다 더 효과적으로 인성을 평가할 수 있었다.

Abstract

This study reviewed various current methods of evaluating the toughness of fiber reinforced concrete beams by means of toughness indices and criticized the use of various multiples of first-crack deflection to define toughness indices. To overcome the shortcomings, this study suggested the effective toughness for evaluation of the toughness of steel fiber reinforced concrete. The suggested method is 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. The suggested effective toughness represented the toughness properties of SFRC in a more consistent manner than others.

Keywords: Toughness, Toughness Index, Effective Toughness, Steel Fiber, SFRC, Brittleness, Initial Crack, Load-Deflection Curve, Ligament Area.

1. 序論

建設材料로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 引張力이 약하고, 갑작스런 파괴를 일으키는 脆性材料인 점과 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을 不規則한 배열로 모르타나 콘크리트 속에 分散시킴으로써 引張強度, 脆性, 耐衝擊性 및 韌性を 개선시킨 複合材料로서의 이용이 활발해지고 있다.^(1~6) 특히, 섬

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

유의 補強은 強度의 증진보다는 靱性の 증진에 더 큰 比重 效果가 있다. 이와 같은 새로운 콘크리트의 휨이나 引張荷重下에서의 우수한 變形 特性과 에너지 吸收能力을 효과적으로 이용하거나, 改善하기 위하여 지금까지 많은 研究가 靱性の 精確한 評價를 하기 위하여 수행되어 왔다.^(7~12) 특히 많은 연구자들이 강섬유 보강 콘크리트의 靱性 特性에 대하여 보고하여 왔고, 靱性の 特性에 精確한 試驗을 통한 하중-처짐 곡선하의 면적을 사용하였다. 靱性は 일반적으로 재료나 구조물이 파괴에 이르기까지의 에너지를 흡수할 수 있는 능력으로 표시할 수 있는데 시험 조건과 시험편 형상, 크기 및 하중 조건 등에 따라 다르게 나타나고 있다. 그러나, FRC의 靱性を 평가하는 要素는 재료의 특성을 나타내기 위하여 시험편 형상, 크기, 하중조건 등에 獨立의이어야 한다. 또한 經濟的인 이유로도 간단한 試驗片으로부터 쉽게 얻을 수 있어야 하며, 比較하기 쉽고 재료의 品質管理가 쉽게 표현되어야 한다. 그러나 실제로 FRC의 靱性を 평가하기 위해 사용되고 있는 많은 方法 등이 이러한 要求와 맞지 않는 것이 많았다.

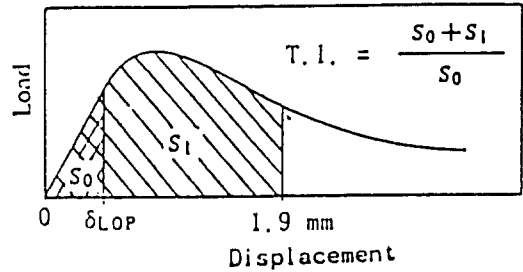
따라서, 본 연구는 기존의 FRC의 靱性評價方法을 검토하여 강섬유 보강 콘크리트에 대한 破壞靱性評價를 시험방법이 비교적 간단한 3點 휨 실험을 통해 가장 合理的으로 얻을 수 있는 方法을 提案하였다.

2. 靱性에 대한 既存의 評價 方法

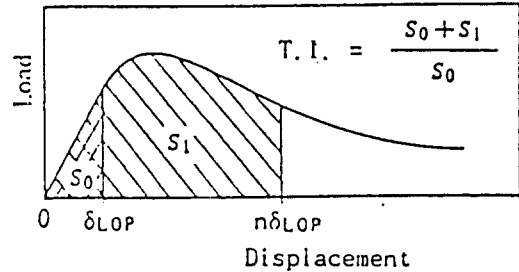
1974년 Johnston⁽⁷⁾은 FRC의 靱性を 평가하는 方法으로 最大荷重까지의 하중-처짐 곡선하의 面積을 사용하는 것을 提案하였다.

그러나, 이 方法은 그 결과가 시험편 크기와 형상에 따라 상당히 변하기 때문에 合理的인 靱性評價 方法으로 채택되지 못하였다. 이와같은 어려움은 靱性指數 (toughness index, TI)라는 無次元數로 나타내는 하중-처짐 곡선하의 각각의 面積의 比를 도입함으로써 해결될 수 있었다. 이것은 ACI委員會 544⁽¹³⁾와 Henager⁽⁸⁾에 의해서 提案되었다.

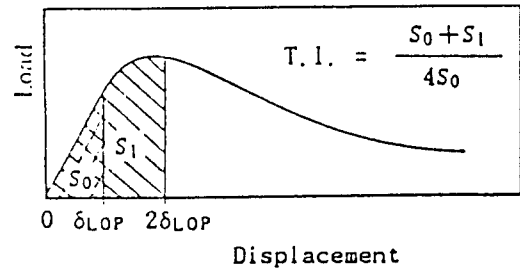
ACI委員會 544는 Henager의 연구에 기초를 둔 靱性指數를 치수 4×4×14in(10×10×35cm)의 휨공시체를 이용한 支間 12in에서 3等分點 2點 載荷方法에 의해 휨 실험을 행하고 支間 中央部 처짐이 0.074in(1.9mm)되는 점까지의 하중-처짐 곡선하의 面積을 초기 균열점까



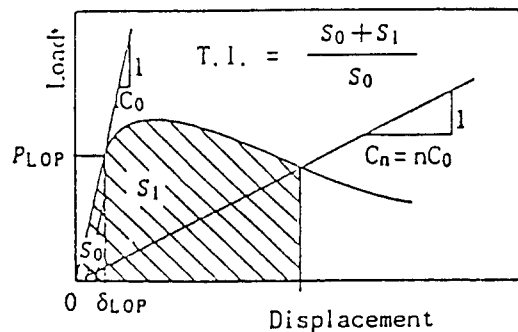
(a) by ACI Committee 544



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



(c) by Barr



(d) by Wang and Backer, n=20

Fig. 1 Definitions of various toughness indices

지의 面積으로 나는 값으로써 定義하였다. 여기서, 初期 균열점은 하중-처짐곡선이 非線形으로 되는 점, 즉 比例限度點(limit of proportional point; LOP)으로

잡고 있다.

ACI委員會 544는 처짐을 1.9mm로 정한 근거를 나타내고 있지 않으나, Henager는 Fig. 1(a)와 같이 평균적인 初期龜裂時的 처짐 0.125mm의 15배에 상당하는 값으로 설명하고 있다.

ACI 韌性指數의 주된 잇점은 標準 試驗片으로부터 쉽게 얻을 수 있고, 새로운 시험편 형상이나 시험장비가 필요치 않으며, 高韌性 材料和 低韌性 材料를 쉽게 구분할 수 있다. 그러나, 이 試驗方法은 정해진 시험편에서의 特定 처짐의 項으로 정의되기 때문에 그 결과는 同一한 시험편 및 시험기계로 사용했을 때 가능하다. 또한 시험편의 형상이나 사용한 섬유 형태의 아주 敏感하다. Henager와 Zollo⁽⁹⁾ 및 Johnston⁽¹⁰⁾에 의해서 ACI 韌性指數 方法의 缺點에 대한 논의가 있었으며, Johnston은 이 방법을 시험편의 斷面, 支間, 荷重의 形態에 따라 조절되어야 하고, 처짐에 영향을 주는 素材特性의 변화를 고려하여야 한다고 결론짓고, 정해진 시험편 크기에만 사용할 수 있는 固定變位를 사용하는 대신에 Fig. 1(b)와 같이 하중-처짐 곡선의 比例限度點 變位の 여러 가지 다른 곱까지의 면적을 LOP면적으로 나누어진 韌性指數를 제안하였다. ASTM 標準⁽¹¹⁾에는 ACI 방법과 Johnston의 방법을 조합하여 採擇하고, I₅, I₁₀, I₃₀ 등으로 나타내고 있으며, 여기서, 첨자 5, 10, 30은 시험편이 완전 탄소성체라고 가정했을 때의 인성지수이다.

또한, Barr 등⁽¹¹⁾은 ACI 韌性指數와 유사한 또 다른 韌性指數를 제안하였다. 이 방법의 이점은 시험편의 형태와 규정된 처짐에 無關하다는 점이다. 이는 Fig. 1(c)와 같이 정해진 變位까지의 하중-처짐 곡선하의 面積을 初期龜裂點에서의 하중-처짐 곡선하의 面積의 4배로 나눈 값의 比로써 나타낸다.

Wang과 Backer⁽¹²⁾는 引張, 휩 및 Compact 인장시험과 그밖의 유사한 시험의 하중 변위 곡선으로부터 比例限度까지의 割線 콤플라이언스(secant compliance)를 이용하여 재료가 強度 및 使用性을 유지하는 데 필요한 限界까지 흡수된 에너지를 初期 割線 콤플라이언스의 n倍數로 나타내어 이것을 無次元 韌性指數(DT_n)로 나타내었다. 그들은 Fig. 1(d)와 같이 初期 割線 콤플라이언스의 20배까지의 全 面積을 초기균열시까지의 면적으로 나누어 나타내고 있다.

한편, 日本 콘크리트工學協會의 纖維 補強 콘크리트

의 試驗方法에 관한 規準(JCI-SF4)⁽¹⁵⁾에는 3等分點 荷重載荷方法을 이용하여 휩 실험을 행하고 휩 韌性을 처짐이 支間の 1/150까지의 하중-처짐 곡선하의 面積에서 유효숫자 3자리까지 구하여 사용하고 있다.

지금까지 보고된 대부분의 韌性指數(TI)에는 初期龜裂點을 실제 실험으로부터 計測하여야 하나, 실제 실험으로는 技術上의 문제점이 있다. 즉, 균열 발생점에 있어서 변위의 크기는 아주 작은 값이므로 計測誤差가 생기기 쉽고, 약간의 誤差에도 韌性指數의 값이 크게 영향을 미치게 된다.

3. 有效 韌性 評價

이상과 같은 대부분의 방법은 初期 龜裂點을 하중-처짐 곡선의 比例限度點으로 잡고 있으나, 콘크리트는 精確한 比例限度點을 나타내고 있지 않기 때문에 그 점을 찾는 것이 쉬운 일이 아니며, 같은 재료, 같은 試驗片에 있어서도 그 점은 상당히 다르게 나타날 수 있어 얻고자 하는 韌性指數에 상당한 영향을 줄 수 있다.

섬유 보강 콘크리트의 韌性은 임의로 설정된 限界點에 도달할 때까지의 하중-처짐 곡선하의 面積으로 定義되므로, 본 논문에서는 初期龜裂을 가진 휩 공시체의 3점 재하방법에 의한 하중-처짐곡선에서 처짐이 支間の 1/150되는 점까지의 全 面積을 균열이 進行되는 面積(ligament area; 전체단면적에서 노치부분의 면적을 뺀 나머지 면적)으로 나눈 값으로 定義하고, 이를 有效 韌性(effective toughness, E.T.)이라고 부르기로 한다.

$$E.T. = \frac{A_{L/150}}{A_{lig.}}$$

- 여기서, E.T. : 有效韌性
- A_{L/150} : 荷重-처짐 曲線에서 支間の 1/150까지의 面積
- A_{lig.} : 리가멘트 面積

이것은 RILEM의 50-FMC에서 提案한 콘크리트의 破壞에너지 決定方法⁽¹⁶⁾을 기본으로 하고, 섬유보강 콘크리트에 있어서 처짐의 限界를 JCI-SF4에서와 같이 支間の 1/150까지로 定한 것이다.

일반적으로 限界처짐을 작게 하면 휩 韌性에 미치는

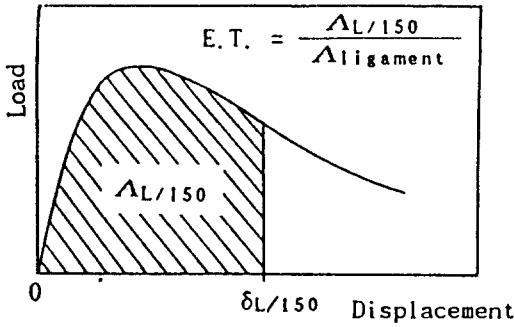


Fig. 2 The method of evaluating the effective toughness of fiber reinforced concrete

섬유의 종류와 혼입률의 영향이 分明하지 않다. 한편, 限界처짐을 크게 하면 공시체의 변형이 크게 되어 처짐량의 측정에 문제가 발생하므로, 有效靱性에서 정한 처짐의 限界點은 시험편 支間の 길이에 따라 결정되므로 限界처짐을 支間の 1/150로 취한 것은 合理的이라 할 수 있으며, 구조물의 強度와 使用性的의 面에 있어서도 현재 콘크리트 示方書⁽¹⁷⁾의 처짐의 最大限界를 支間の 1/180까지 잡고 있으므로 鋼纖維 補強 콘크리트 試驗片임을 고려하면 타당하다고 생각된다. 또한, 이 값은 限界 처짐까지의 單位面積當 均열을 발생시키는데 필요한 에너지로 생각할 수 있다.

4. 實驗

4.1. 使用 材料

본 실험에 사용한 시멘트는 비중이 3.14인 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 사용된 골재는 잔 골재로는 비중이 2.57이고 조립률이 2.53인 錦江產 江모래와 굵은 골재로는 비중이 2.66인 忠北 淸原郡 芙蓉面產 碎石을 사용하였으며, 섬유의 길이에 따라 30mm 강섬유에는 최대치수 15mm골재(조립률 6.50)를 사용하고, 60mm에는 25mm골재(조립률 7.17)를 사용하였다. 또한, 고강도 콘크리트를 제조하기 위해 물-시멘트비를 30% 낮추고, 이를 위해 고강도 고성능 혼화제를 사용하였다. 사용된 混和濟는 알칼리 Sulfonate가 主成分인 (주)세일콘의 高強度 高性能 減水劑 LIGACE G를 사용하였다. 그 色相은 暗褐色이고 比重이 1.2이다.

本 實驗에 사용된 鋼纖維는 형상이 兩端 갈고리

(hook)形으로 個個의 鋼纖維가 水溶性 아교로 다발의 형태로 붙어 있는 Belgium의 BEKART社 Dramix製品을 사용하였으며, 강섬유의 比重은 7.85이고, 강섬유 길이가 30mm, 60mm이고, 형상비가 각각 60, 75인 2種類의 강섬유를 사용하였다.

各 섬유길이와 混入率에 대한 配合은 참고문헌 19에서와 같은 재료를 대상으로 동일한 배합으로 설계하였다.

4.2. 實驗 計劃

본 실험은 강섬유 혼입률의 영향을 알아보기 위하여 0, 0.5, 1.0, 1.5%의 4가지로 하였다. 사용된 굵은 骨材의 최대치수는 강섬유 길이의 1/2로 결정하였으며, 韃試驗片의 치수도 사용된 강섬유 길이의 3배 이상이 되도록 강섬유의 길이 30mm에 대해서는 幅 100mm로 하고 높이를 100, 150, 200mm로 변화시켰으며, 강섬유길이 60mm에 대해서는 幅을 150mm로 하고 높이를 150, 200mm로 변화시켜 Fig.3과 같이 모두 5가지 형태의 시험편을 제작하였다. 모든 韃 시험편은 노치(notch)의 깊이를 시험편 높이의 30%로 일정하게 하였으며, 이때 支間도 모두 시험편 높이의 3배로 일정하게 하였다. 이상의 實驗計劃을 Table 1에 나타내었다.

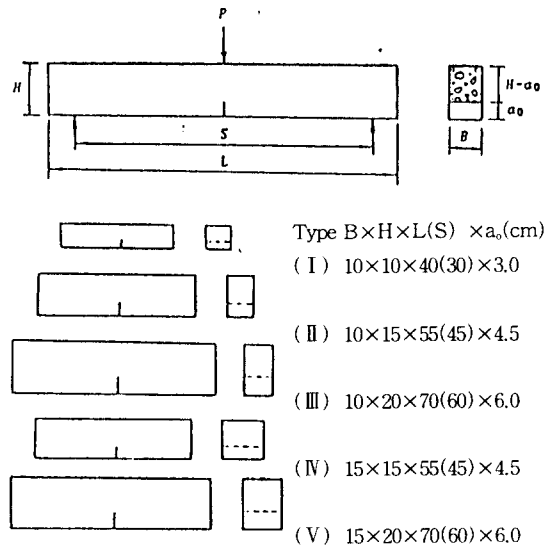


Fig. 3 Dimensions of different sizes of specimens

Table 1. Experimental programs of steel fiber reinforced concrete

Test condition	Effect of fiber content												Effect of specimen size				
Notch depth(a_0/H)	0.3												0.3				
Fiber length(L_f ;mm)	30				60								30		60		
Specimen type(5 case)	I				IV				V				I	II	III	IV	V
Fiber content(vol.%)	0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5	0	0.5	1.0	1.5	1.0				

4.3. 供試體의 製作 및 養生

콘크리트의 혼합을 위하여 용량 50ℓ의 強制式 믹서를 사용하였고, 혼합순서는 먼저 보통 콘크리트의 순서로 혼합한 뒤 鋼纖維를 투입 혼합하였으며, 모두 50개의 휨 시험편을 제작하였다.

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

한편, 보의 중앙에 노치를 일정하게 주기 위하여 다이아몬드 Saw Cutter를 이용하였으며, 載荷時 支點部位의 沈下로 인한 처짐의 증가를 防止하기 위하여 Fig. 4와 같은 처짐 測定器具를 제작하여 실험하였다. 이는 한쪽 支點 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 고정한 것으로 시험편 양쪽 側面의 처짐을 측정토록 하였다.

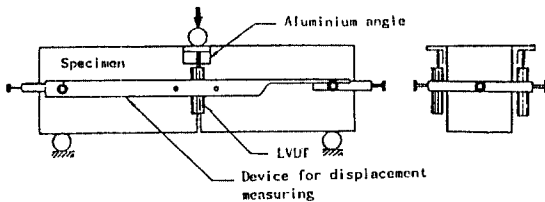


Fig. 4 Apparatus set-up for measuring displacement

4.4. 實驗 方法

휨 強度 實驗에 사용한 시험기는 Feedback신호가 가능한 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 Yaman社의 Analysing Recorder의 GBIP를 이용하여 하중과 함께 Personal Computer에 저장하고, TBASIC(TransEra Co, BASIC)을 이용하여 Plot하고 分析하였다. 이때 LVDT에 최대 측정범위는 5mm이었다.

5. 結果分析 및 考察

본 논문에서 제안한 有效靱性의 妥當性을 증명하기 위하여 纖維 混入率에 따른 기존의 靱性指數와 본 논문에서의 有效靱性을 구하고, 기존의 방법에 의한 각각의 혼입률에서의 靱性指數와 有效靱性의 값을 비교하기 위하여 無筋 콘크리트(혼입률 0%)에서의 값으로 나누어서 Table 2에 나타냈다.

Fig. 5는 강섬유 길이 30mm일 때 混入率의 증가에 따른 無筋 콘크리트($V_f=0$)에 대한 相對 靱性比를 나타내고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 기존의 破壞靱性 評價方法들이 강섬유의 混入率에 따른 靱性의 效果를 잘 나타내지 못하고 있으며, 특히 ASTM에 規定된 初期龜裂點(比例限度點)변위의 3배(I_3), 5.5배(I_{10}), 15.5배(I_{30})를 취하고 있는 規準은 전혀 鋼纖維 補強의 特性을 나타내지 못하고 있다. 한편 ACI規準도 ASTM의 I_{30} 과 비슷한 결과를 보이고 있으며, $10 \times 10 \times 35\text{cm}$ 의 공시체에 대한 것이므로 강섬유의 길이가 50mm이상인 공시체에는 최소한 試驗片의 치수가 15cm이상(강섬유 길이의 3배)이어야 하므로 적용할 수 없다. 더욱이 앞에서 언급한 바와 같이 荷重-變位曲線의 선형이 초기에도 非線形性을 나타내기 때문에 初期龜裂點(比例限度點)을 찾는다는 것이 극히 어려우며, 그 값에도 많은 誤差를 수반하기 쉽다.

강섬유의 길이 30mm에 대해서 강섬유의 混入率에 따른 결과를 구체적으로 살펴보면, 섬유가 함유되어 있지 않은 콘크리트의 破壞靱性값이 평균 21.4kg/m

Table 2. Comparisons of toughness indices and effective toughnesses

Series	Fiber length, mm	Fiber content Vol.%	ASTM method			ACI method	Effective toughness, E. T. (kg/m)
			I ₅	I ₁₀	I ₃₀		
A00-I3	30	0	5.0(1.00)*	8.1(1.00)*	11.2(1.00)*	21.4(1.00)*	21.4(1.00)*
A05-I3	30	0.5	5.0(1.00)	10.0(1.23)	28.4(2.54)	64.0(2.99)	136.4(6.37)
A10-I3	30	1.0	5.0(1.00)	10.5(1.30)	29.9(2.67)	49.9(2.33)	194.8(9.10)
A15-I3	30	1.5	4.9(0.98)	10.8(1.33)	36.1(3.22)	75.8(3.54)	284.7(13.30)
C00-IV3	60	0	6.1(1.00)	12.8(1.00)	30.6(1.00)	21.0(1.00)	21.0(1.00)
C05-IV3	60	0.5	5.6(0.92)	11.5(0.90)	34.3(1.12)	107.2(5.10)	261.2(12.44)
C10-IV3	60	1.0	5.4(0.89)	11.5(0.90)	41.0(1.34)	170.3(8.11)	406.3(19.35)
C15-IV3	60	1.5	5.6(0.92)	13.2(1.03)	51.2(1.67)	129.3(6.16)	588.1(28.00)
C00-V3	60	0	6.5(1.00)	12.9(1.00)	25.9(1.00)	21.5(1.00)	21.5(1.00)
C05-V3	60	0.5	5.6(0.86)	12.2(0.95)	39.9(1.54)	66.1(3.07)	297.1(13.82)
C10-V3	60	1.0	5.9(0.91)	13.2(1.02)	46.9(1.81)	153.7(7.15)	484.7(22.54)
C15-V3	60	1.5	5.8(0.89)	13.6(1.05)	51.9(2.00)	145.9(6.79)	760.7(35.38)

* () is calculated relative toughness

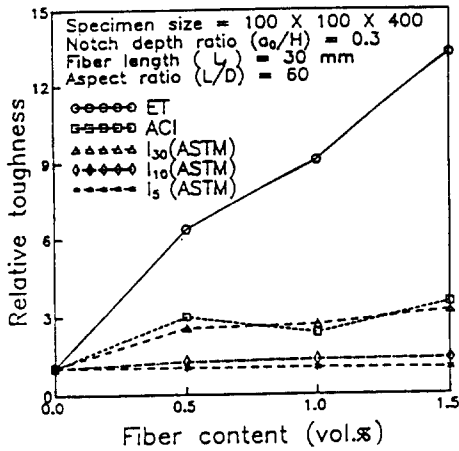
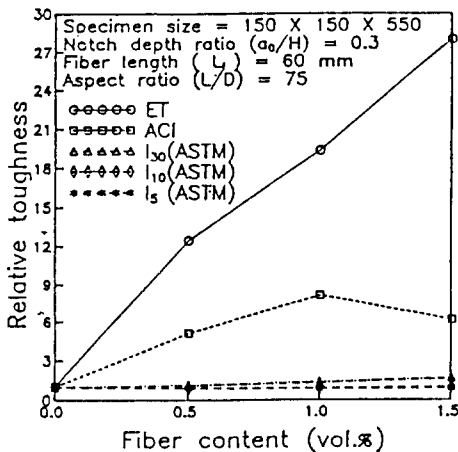


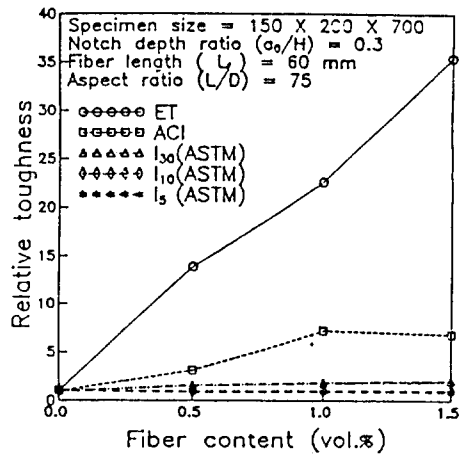
Fig. 5 Comparison of relative toughness for steel fiber reinforced concrete with each fiber content($L_f=30\text{mm}$)

(210N/m)이 있으며, 강섬유 혼입률 0.5, 1.0, 1.5% 일 때의 平均이 각각 136.4kg/m(1337N/m), 194.8 kg/m(1909N/m), 284.7kg/m(2790N/m)으로, 보통 콘크리트(0%)보다 각각 6.4, 9.1, 13.3배 增加하였다.

Fig. 6은 강섬유 길이 60mm에 대한 相對 韌性比를 나타내고 있으며, Fig. 5와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 공시체의 크기가 150×150×550mm일 때, 강섬유 길이 60mm에 대한 강섬유 혼입률에 따른 有效 韌性값은 혼입률이 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5% 일 때 21.0kg/m (206N/m), 261.2kg/m(2560N/m), 406.3kg/m (3982N/m), 588.1kg/m(5763N/m)으로 보통 콘크리트($V_f=0\%$)보다 각각 12.4, 19.4, 28.0배 增加함을



(a) type IV



(b) type V

Fig. 6 Comparison of relative toughness for steel fiber reinforced concrete with each fiber content($L_f=60\text{mm}$)

나타내고 있다. 그리고 강섬유의 길이가 60mm일 때의 값이 30mm일때보다 약 2배의 증가를 보이고 있다. 공시체의 크기가 150×200×700mm일 때, 강섬유 길이 60mm에 대한 강섬유 길이 혼입률에 따른 有效靱性값을 혼입률이 각각 0, 0.5, 1.0, 1.5%일 때 21.5kg/m (211N/m), 297.1kg/m(2912N/m), 484.7kg/m (4750N/m), 760.7kg/m(7455N/m)으로 보통 콘크리트($V_f=0\%$)보다 각각 13.8, 22.5, 35.4배로 증가함을 나타내고 있다.

따라서, 初期龜裂點 즉 比例限度點을 기준으로 하는 기존의 靱性評價 方法에는 문제가 있다고 보며, 공시체의 크기 및 支間에 따라 어느 限界 變位까지의 破壞에너지 기준을 하는 方法이 더 效果의임을 알 수 있다.

한편, 공시체가 크기에 따른 有效靱性值를 Table 3 및 Fig.7에 나타냈다.

Table 3 및 Fig. 7에 나타나듯이 강섬유 길이 30mm, 강섬유 혼입률 1.0%에서 공시체의 크기에 따른 有效靱性值를 살펴 보면, I형 공시체보다 II형 공

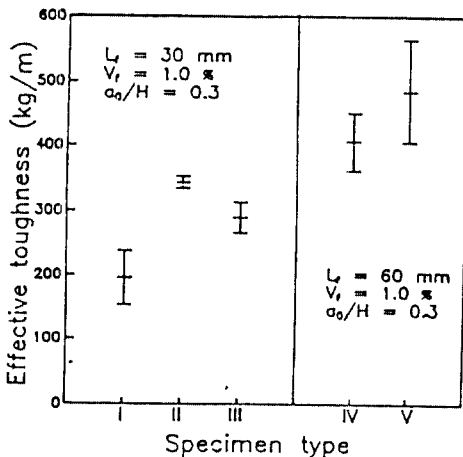


Fig. 7 Effective toughness for each specimen size.

Table 3. Effective toughness for each specimen size*

Series	Fiber length	Specimen size $B \times H \times L$, mm	Effective toughness(E.T.)	Relative effective toughness
	L_f , mm		kg/m	
A10-I3	30	100×100×400	194.8(3, 22.0)**	1.00
A10-II3	30	100×150×550	343.7(3, 2.6)	1.76
A10-III3	30	100×200×700	289.4(2, 8.3)	1.49
C10-IV3	60	150×150×550	406.3(6, 11.1)	1.00
C10-V3	60	150×200×700	484.7(5, 16.4)	1.19

* Steel fiber content (V_f)=1.0% Notch depth ratio (a_0/H)=0.3

** () is specimen number and coefficient of variation

시체는 1.76배, III형 공시체는 1.49배 증가하였고, 강섬유 길이 60mm, 강섬유 혼입률 1.0%에서는 IV형 공시체보다 V형 공시체가 1.19배 증가하였다. 이와 같이 공시체의 크기에 따라 有效靱性의 값이 변하고 있으나, II형 공시체가 有效靱性의 변화가 크지 않음을 고려할 때 이 가운데서는 II형 공시체가 적당하다고 생각된다.

4. 結論

鋼纖維 補強 콘크리트의 龜裂發生 후, 그 특성을 나타낼 수 있는 既存의 靱性 評價方法을 고찰한 결과, 初期 龜裂點을 찾는 方法이 콘크리트 재료의 非線形性으로 인하여 매우 어려우며, 初期 龜裂點에서의 변위의 크기는 아주 작으므로, 그 計測誤差가 靱性指數의 값에 큰 영향을 미친다.

따라서, 본 연구에서는 SFRC의 靱性評價方法으로 有效靱性(effective toughness, E.T.)을 提案하였다.

강섬유 혼입률에 따른 有效靱性을 평가한 결과 기존의 다른 靱性評價方法보다 더 잘 靱性의 效果를 나타낼 수 있었으며, 본 논문에서 제안한 有效靱性의 값이 강섬유 보강 콘크리트의 靱性을 평가하는데 有效하게 적용할 수 있을 것으로 思料된다. 그러나, 이 方法에 대한 試驗片 크기효과 등에 대해서는 충분한 實驗의 結果가 더 많이 필요하므로 이에 대한 補完的 研究가 계속 필요하다고 생각된다.

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. 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.
3. 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.
 4. ACI Committe 544, "Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.75, No.7, July, 1978, pp.283~289.
 5. Hannant, D.J., "*Fibre Cements and Fibre Concrete*", John Wiley and Sons, New York, 1978, pp.8~51.
 6. 小林一輔, "纖維補強コンクリート特性と應用". オーム社, 1981, pp.27~43.
 7. Johnston, C. D., "Steel Fibre Reinforced Mortar and Concrete - a Review of Mechanical Properties", in *Fiber Reinforced Concrete*, Detroit, American Concrete Institute, SP-44, 1974, pp.127~142.
 8. 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.
 9. Zollo, R. F., "Fibrous Concrete Flexural Testing-Developing Standardized Techniques", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.77, No.5, September-October, 1980, pp.363~368.
 10. Johnston, 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.
 11. Barr, B. I., Liu, K., and Dowers, R. C., "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.
 12. Wang, Y., and Backer, S., "Toughness Determination for Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.11, No.1, February, 1989, pp.11~19.
 13. ACI Committe 544, "Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.75, No.7, July, 1978, pp.283~289.
 14. ASTM Standard C 1018, "Test Method for Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)", *ASTM*, Philadelphia, 1986, pp. 650~657.
 15. 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年 2月, pp.11~17.
 16. 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.
 17. 建設部, "콘크리트 標準示方書", 1989, p.67.
 18. 구봉근, 정경섭, 김태봉, 박종인, "강섬유 보강 콘크리트의 휨 파괴 인성지수의 결정에 관한 비교 연구, 한국콘크리트학회, 1991년도 봄 학술발표회 논문집, 제3권 1호, 1991년 5월, pp.69~74.
 19. 구봉근, 정경섭, 김태봉, "강섬유의 보강이 고강도 콘크리트의 강도특성에 미치는 영향", 한국콘크리트학회 논문집 제4권 2호, 1992년 6월 pp.93~101
(접수일자 : 1992. 2. 20)