

섬유보강콘크리트의 인성에 대한 기존평가방법과 TES기법에 관한 연구

A Study on Existing Evaluation Method and TES Method about Toughness of Fiber Reinforced Concrete

배 주 성* 임 정 환** 김 경 수***
Bae, Ju Seong Lim, Jeong Hwan Kim, Kyoung Soo

ABSTRACT

Fiber reinforcement can significantly improve the properties of concrete. Particularly, toughness or energy-absorbing ability of fiber reinforced concrete is frequently higher than that of unreinforced concrete.

Toughness is a measure of energy absorption capacity and used to characterize fiber reinforced concrete's ability to resist fracture when subjected to static, dynamic and impact loads. however, the current standard methods of characterizing the toughness of fiber reinforced concrete have proven to be some inadequate and problems and have caused a great deal of dissent and confusion.

This study research some of the inadequate and problems with these toughness measurement methods and proposes the evaluation method for Fiber Reinforced Concrete toughness.

1. 서 론

건설재료로 널리 사용되고 있는 콘크리트는 인장력에 약하고 갑작스런 파괴를 일으키는 취성재료이며 균열을 일으키는 단점을 가지고 있다. 이러한 인장강도와 균열에 대한 저항성을 높이고 인성을 대폭 개선시킬 목적으로 콘크리트중에 각종 섬유를 분산·보강시켜 만든 구조용 복합재료로서 섬유보강 콘크리트(FRC : Fiber Reinforced Concrete)가 개발되어 이용이 활발해지고 있다.⁽¹⁾

특히, 섬유의 보강은 강도의 증진보다는 인성의 증진에 더욱 확실한 효과가 있으며 여러가지 하중조건 하에서의 우수한 변형특성과 에너지흡수능력을 효율적으로 이용하고 개선하기 위하여 수많은 연구가 진행되었으며 정확한 인성평가를 위한 연구 또한 지속적으로 수행되어져 왔다.⁽²⁾⁻⁽⁷⁾ 많은 연구자들은 정적휨시험을 통한 하중-처짐곡선의 면적을 통해 인성평가를 수행하였으며 인성은 일반적으로 재료나 구조물이 파괴에 이르기까지의 에너지를 흡수할 수 있는 능력으로 표시할 수 있는데 시험조건, 시험편의 형상, 크기 및 하중조건등에 따라 다르게 나타나고 있다.

그러나 섬유보강콘크리트의 인성평가에는 재료의 특성을 나타내기 위하여 시험편의 형상, 크기, 하중조건등에 독립적이어야 하며 또한 경제적인 이유로도 간단한 시험편 및 시험장치로부터 쉽게 파악

* 정회원, 전북대학교 토목·환경공학부 교수
** 전주공업대학 토목과 교수
*** 정회원, 전북대학교 대학원 토목공학과

이 가능하여야 하며 서로 비교가 용이해야 한다. 그러나 실제로 인성을 평가하기 위해 현재 사용되고 있는 대부분의 방법들이 이러한 요구와 부합되고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 연구는 기존에 사용되고 있는 각국의 규정 및 각 연구자에 의해 제안된 인성평가방법을 고찰하고, 나타나는 문제점을 해결·보완하여 보다 합리적인 인성평가방법을 제안하고자 한다.

2. 기존의 인성평가 방법

1974년 Johnston⁽⁸⁾은 섬유보강콘크리트의 인성평가방법으로써 하중-처짐곡선에서 최대하중까지의 면적을 이용할 것을 제안하였으나 이 방법은 시험편의 크기와 형상에 따라 큰 변화를 나타내기 때문에 합리적인 인성평가 방법으로 활용되지 못하였다. 그후 인성지수라는 무차원으로 나타나는 하중-처짐곡선 아래부분 면적의 비를 이용함으로써 좀 더 합리적으로 나타났으며 이는 Henegar⁽⁹⁾에 의해 1978년에 제안되었고 ACI Committee 544⁽¹⁰⁾에 의해 채택되었다. 이 평가방법은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하중-처짐곡선에서 초기균열(first crack)까지의 면적과 0.075in. (1.9mm)처짐까지의 면적의 비를 이용하여 인성지수를 산출하였다. 이때의 초기균열이라 함은 하중-처짐곡선이 최초로 비선형으로 되는 점 즉, 복합체 매트릭스의 역할이 끝나는 점이라고 정의할 수 있다.

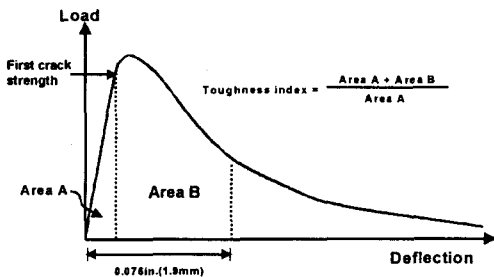


Fig. 1 ACI Committee 544(1978) toughness index based on the Henegar

이와 같이 정의된 인성지수의 잇점은 표준시험편로부터 쉽게 얻을 수 있고 저인성 섬유보강콘크리트를 쉽게 구분할 수 있으나 시험편의 크기 및 형상에 크게 좌우된다는 단점을 가지고 있다.

Johnston⁽¹¹⁾은 이러한 단점을 보완하기 위해 정해진 시험편에서 사용할 수 있는 고정변위를 사용하는 대신에 하중-처짐곡선에서 나타나는 초기균열시 처짐의 여러곳까지의 면적을 초기균열시 처짐까지의 면적으로 나누어 인성지수를 파악하는 방법을 제안하였다. 이를 바탕으로 ASTM C 1018⁽¹²⁾의 규준이 마련되었으며 개략적으로 파악하면 Fig. 2 및 Table 1과 같다.

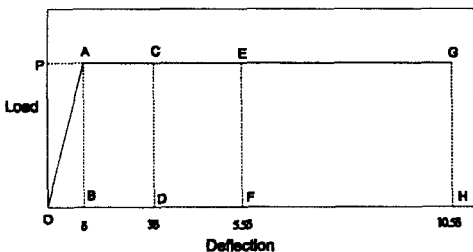


Fig. 2. Definition of toughness indices in terms of multiples of first-crack deflection and elastic-plastic material behavior

Area Basis ^A		OACD	OAEF	OAGH
Index Designation		I ₅	I ₁₀	I ₂₀
Deflection Criterion		3δ	5.5δ	10.5δ
Values of Toughness Indices	Plain concrete	1.0	1.0	1.0
	Elastic-Plastic Material	5.0	10.0	20.0
	Observed Range for Fibrous Concrete	1 to 6	1 to 12	1 to 25

Table 1. Definition of toughness indices in ASTM C 1018

여기에서 I₅, I₁₀, I₂₀은 초기균열처짐의 3배, 5.5배, 10.5배까지의 면적을 초기균열처짐까지의 면적으로

나누었을 때의 인성 지수를 나타내며 첨자 5, 10, 20은 시험편이 완전 탄소성체라고 가정했을 때의 인성 지수이다. ACI Committee 544에서는 이와 같은 ASTM의 인성 지수에 total 인성 지수 (I_t)를 포함한 개정된 규준을 마련하였다.⁽¹³⁾

또한 일본콘크리트공학협회의 섬유보강콘크리트 시험방법에 관한 규준⁽¹⁴⁾을 보면 시험편의 인성측정을 처짐이 지간의 1/150까지의 하중-처짐곡선의 면적으로 에너지흡수능력을 평가하여 휨강도계수로 나타내고 있다. 지금까지 나타난 평가방법을 도시하면 Fig. 3과 같다.

위에서 나타난 인성측정방법 이외에도 Barr등은⁽¹⁵⁾ 또다른 인성 지수를 제안하였다. 이는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 정해진 변위까지의 면적을 초기균열처짐까지 면적의 4배로 나눈 값으로 나타내었다.

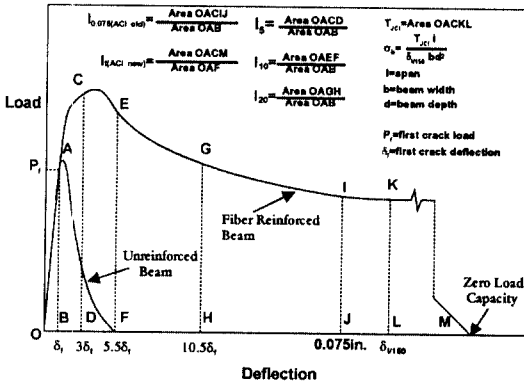


Fig 3. Toughness definitions from ACI Committee 544, ASTM C 1018 and JCI SF-4

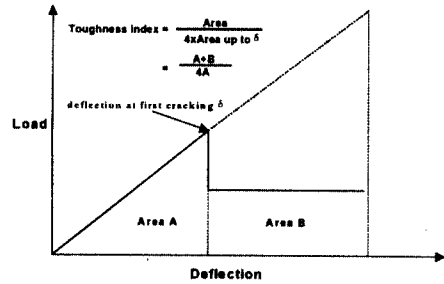


Fig 4. Definition of toughness index proposed by Barr et al.

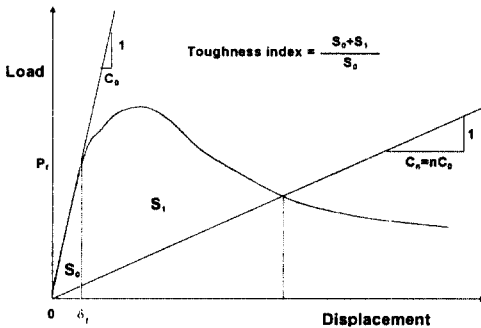


Fig 5. Definition of toughness index proposed by Wang and Backer

또한 Wang과 Backer⁽⁴⁾는 여러시험으로부터 구한 하중-변위곡선으로부터 비례한도까지의 할선컴플라이언스(secant compliance)를 이용하여 인성을 파악하였는데 이들은 Fig. 5와 같이 초기 할선컴플라이언스의 n배까지의 전면적을 초기균열까지의 면적으로 나누어 나타내고 있다.

3. 기존 평가방법의 고찰

현재 국내에서는 섬유보강콘크리트의 인성평가를 ASTM C 1018과 JCI SF-4에 규정된 방법을 주로 사용하고 있으며 이 평가방법들은 시험편의 처짐측정에 의해 크게 좌우되며 최근의 연구에서 정확한 처짐측정방법은 여러측면에서 제안되고 있으며 가장 대표적인 방법으로서 휨시험시 한쪽 지점위의 시험편 중립축에 회전가능한 hinge를 설치하고 다른 한쪽은 이동단으로 하기 위해 pin위로 수평이동이 가능한 지지보를 설치한 YOKE jig를 이용하는 방법이 주로 이용되고 있다.

3.1 ASTM C 1018에 규정된 평가방법의 고찰

이 평가 방법은 먼저 초기균열을 선정하여 그때까지의 하중-처짐곡선의 면적과 초기균열처짐 n배까지의 면적의 비를 이용하여 무차원의 지수를 파악함으로써 인성을 평가하는데 각 연구자에 따라 초기균열 선정에 상당한 차이를 보이고 있다. 이러한 초기균열 선정의 차이로 인한 지수의 값은 매우 큰 영향을 받기 때문에 초기균열에 의한 지수의 파악 대신에 어느 일정처짐까지의 에너지흡수능력을 평가하고, 평가된 에너지흡수능력을 이용하여 환산휨강도를 측정하는 것이 초기균열 선정시 나타나는 오차의 영향을 받지 않는 적절한 평가방법이라 하겠다.

또한 인성평가를 위해서 어느 일정처짐까지의 하중-처짐곡선의 면적을 측정하는데 ASTM C 1018에서는 이 일정처짐을 초기균열의 3.0, 5.5, 10.5배등으로 규정하고 있다. 이는 섬유 종류나 혼입물이 다른 여러종류의 시험편을 비교하는데 있어서 각각의 시험편에 따라 초기균열의 위치가 다르기 때문에 객관적으로 각 시험편을 비교·평가를 할 수가 없는 단점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해서는 각 시험편의 공통적인 요소를 파악해 인성을 평가함으로써 여러종류의 시험편을 비교하여야 하는데 이 공통적인 요소를 시험편의 크기에 관련시켜 즉, 시험편 지간의 1/n처짐까지의 하중-처짐곡선면적을 구해 이를 인성평가에 이용함으로써 섬유의 종류나 혼입물이 다른 여러 시험편에 대해 동시에 비교할 수 있다.

3.2 JCI SF-4에 규정된 평가방법의 고찰

이 평가방법은 하중-처짐곡선에서 지간의 1/150까지의 면적을 이용해 휨강도계수를 산출하는데 이러한 경우 동일한 휨강도계수값을 갖지만 확연히 다른 하중-처짐관계를 나타내는 경우 시험편의 거동이 연성적인가 취성적인가를 파악할 수 없으며 초기균열 이후에 나타나는 거동을 파악할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 앞절에서 나타난 바와 같이 처짐을 지간의 1/n로 다등분함으로써 시험편의 거동을 파악할 수 있다.

4. 인성평가방법의 제안

섬유보강콘크리트의 인성은 임의로 설정된 점까지의 하중-처짐곡선의 면적으로 정의되므로 본 연구는 휨공시체의 3등분하중재하방법에 의한 하중-처짐곡선에서 처짐이 지간의 1/n되는 점까지의 면적을 이용하여 인성평가방법을 제안하였고 이를 인성평가강도(TEs : Toughness Evaluation Strength)라 칭하기로 하며 이는 다음식과 같다.

$$TES_n = \frac{A_{1/n}}{L} \cdot \frac{L}{b(h-a)^2} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

여기서 TES : 인성평가강도(kg/cm^2) $A_{1/n}$: 하중-처짐곡선에서 지간 1/n까지의 면적
 L/n : 지간을 n으로 나눈값 (cm) b : 시험편의 폭 (cm)
 h : 시험편의 높이 (cm) a : notch의 깊이 (cm)

위의 식은 JCI SF-4에 규정된 섬유보강콘크리트의 인성시험방법을 기본으로 하고 일정처짐을 지간의 1/n로 그리고 최대처짐을 지간의 1/150로 정하였다. 이 최대처짐은 현재 콘크리트시방서에서 최대

처짐을 지간의 1/180까지로 규정하고 있으므로 섬유보강콘크리트를 고려하면 타당하다고 판단된다.

5. TES방법과 기존평가방법과의 비교

Fig. 6에서 나타난 시험편 A, B 시험편의 하중-처짐곡선을 보면 서로간에 확연히 다른 거동특성을 나타내고 있으며 초기부분에서 어느정도까지는 B 시험편이 A 시험편보다 에너지흡수능력이 우수하게 나타나지만 최종적으로 L/150 처짐에서 나타나는 전체적인 에너지흡수능력은 A 시험편이 B 시험편보다 우수한 것으로 나타났다. JCI SF-4의 휨강도계수는 전체적으로 A 시험편이 우수하다는 것을 보여주는 하지만 그 전에 나타나는 B 시험편의 우수성은 보여주지 못한다는 단점을 가지고 있다. 그러나 Table 2에서 보는바와 같이 TES는 이러한 B 시험편의 초기우수성과 전체적인 A 시험편의 우수성을 모두 나타낼 수 있다는 잇점을 가지고 있다. 또한 ASTM C 1018에서의 인성지수는 어느 정도까지는 B 시험편의 에너지흡수능력이 우수하고 어느시점부터 A 시험편이 우수하다는 것을 확실하게 나타내지를 못해 서로 다른 시험편에 대해 비교할 수 없다는 단점을 가지고 있으나 TES방법은 L/n의 처짐에 따라 파악하므로 초기부분은 B 시험편이 우수하고 어느시점부터 A 시험편이 우수하며 종래에 전체적으로는 A 시험편이 우수하다는 것을 확실히 파악할 수 있어 두종류 이상의 시험편에 대해 비교할 수 있다는 잇점을 가지고 있다.

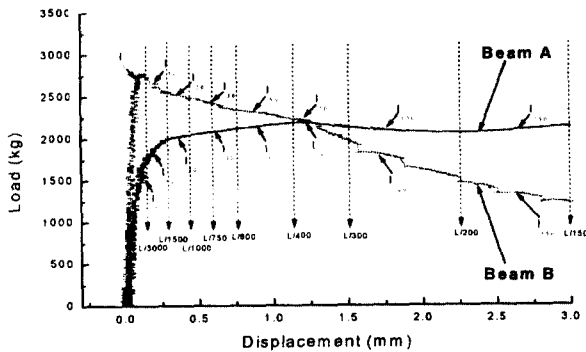


Fig. 6 Characterization of FRC using toughness indices(ASTM C 1018), flexural strength factor (JCI SF-4) and proposed toughness evaluation strength(this study)

ASTM C 1018		JCI SF-4		TES				
Toughness indices		Flexural Strength Factor (kg/cm ²)		Toughness Evaluation Strength (kg/cm ²)				
	A	B	A	B	A	B		
I ₅	5.43	8.38			TES ₃₀₀₀	12.44	33.98	
I ₁₀	13.37	20.89			TES ₁₅₀₀	17.89	29.16	
I ₂₀	40.63	33.20			TES ₁₀₀₀	22.36	32.45	
I ₃₀	64.37	48.78			TES ₇₅₀	24.80	33.82	
I ₅₀	113.15	75.56	F.T	27.17	25.76	TES ₆₀₀	25.06	32.92
I ₇₀	163.32	106.83			TES ₄₀₀	25.59	31.44	
I ₁₀₀	227.63	143.70			TES ₃₀₀	26.58	30.83	
I ₁₅₀	357.05	191.53			TES ₂₀₀	27.20	28.02	
					TES ₁₅₀	27.17	25.76	

Table 2. Toughness indices, Flexural Strength Factor and Toughness Evaluation Strength of specimen A and B

이상과 같은 결과를 비교·고찰한 결과 본 연구에서 제안한 TES방법은 기존에 사용되어 왔던 ASTM C 1018과 JCI SF-4에서 규정하고 있는 섬유보강콘크리트의 인성평가방법이 가지고 있는 문제점을 보완·해결한 합리적인 인성평가방법이라고 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 섬유보강콘크리트의 인성에 대한 기존평가방법들에서 나타나는 문제점을 고찰하고 이를 해결·보완한 좀 더 합리적이고 생각되는 인성평가방법을 제안하기 위해 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 섬유보강콘크리트의 인성평가는 하중-처짐곡선을 통해 파악되며 외부 변형을 제거한 정확하고 순수한 시험편 자체의 처짐측정을 위해서는 시험편 중립축의 처짐을 파악할 수 있는 YOKE jig를 이용한 측정방법이 요망된다.
- (2) ASTM C 1018의 인성평가방법에서 나타나는 문제점은 초기균열점 선정에 따른 오차발생, 서로 다른 시험편에 대한 비교평가가 불가능함을 알 수 있었다.
- (3) JCI SF-4의 인성평가방법에서는 시험편의 거동특성을 파악할 수 없는 것이 가장 큰 문제점으로 나타났다.
- (4) 따라서 본 연구에서는 기존에 사용중인 ASTM C 1018의 인성지수와 JCI SF-4에서의 휨강도계수에서 나타난 문제점을 해결·보완하여 좀 더 합리적으로 인성평가가 가능한 인성평가강도기법을 제안하였다.

- 참고 문헌 -

1. 최신콘크리트공학, 한국콘크리트학회, pp.585~630, 1993
2. Nemkumar Banthia and Jean-Francois Trottier, "Test method for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete : Some concerns and proposition" ACI Materials journal, January-February 1995, pp.48~57
3. Vellore S. Gopalaratnam, Surendra P. Shah, Gordon B. Batson, Marvin E. Criswell, V. Ramakrishnan, and Methi Wecharatana, "Fracture toughness of fiber reinforced concrete" ACI Materials journal, July-August 1991, pp.339~353
4. Youjiang Wang and Stanley Backer, "Toughness determination for fibre reinforced concrete" The International Journal of Cement composites and Lightweight concrete, pp.11~19, Vol.11, 1989
5. A. Hillerborg, "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_f of concrete" Materials and Structures, Vol.18, pp.291~296, 1985
6. B. I. G. Barr and E. B. D. Hasso, "A study of toughness indices" Magazine of concrete research, Vol.37 pp.162~174, 1985
7. 구봉근, 정경섭, 김태봉 "강섬유 보강 콘크리트의 유효인성 평가" 한국콘크리트학회 논문집, 제4권 2호, 1992.6 pp.103~110
8. Johnston, C. D., "Steel fiber reinforced mortar and concrete - a review of mechanical property" ACI SP-44, 1974, pp.127~142
9. Henegar, C. H., "Toughness index of fiber concrete" Testing and test methods of fiber cement composites, (RILEM symposium 1978), Construction press Ltd., Lancaster, UK, pp.79~86
10. ACI Committee 544, "Measurement of properties of fiber reinforced concrete" ACI journal, Proceeding, Vol.75, No.7 July, 1978, pp.283~289
11. Johnston, C. D., "Definition and measurement of flexural toughness parameters for fiber reinforced concrete" cement concrete & aggregates, Vol.4, 1982, pp.53~60
12. ASTM C 1018, "Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading)"
13. ACI Committee 544 "Measurement of properties of fiber reinforced concrete" ACI Materials journal, November- December 1988, pp.583~593
14. (社)日本コンクリート工學協會 "鋼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" JCI SF-4
15. Barr, B. I., Liu, K., and Dowers, R.C., "A toughness index to measure the energy absorption of fiber reinforced concrete" International journal of cement composites and lightweight concrete, Vol.4, No.4, November, 1982, pp.221~227
16. B. Barr, R. Gettu, S. K. A. Al-Oraimi & L. S. Bryars, "Toughness measurement - the need to think again" Cement and concrete composites, Vol.18, 1996, pp. 281~297