



섬유혼입률이 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 인장연화거동에 미치는 영향

강수태^{1)*} · 홍기남²⁾ · 한상훈²⁾ · 김성욱¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 구조교량연구실 ²⁾충북대학교 토목공학과

The Effect of Fiber Volume Fraction on the Tension Softening Behavior of Steel Fiber-Reinforced Ultra High Strength Concrete

Su-Tae Kang,^{1)*} Ki-Nam Hong,²⁾ Sang-Hoon Han,²⁾ and Sung-Wook Kim¹⁾

¹⁾Structural Engineering & Bridges Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

ABSTRACT The influence of steel fiber volume on the tension softening behavior in steel fiber-reinforced ultra high strength concrete was investigated. Three-point bending test (TPBT) with notched beams was performed and inverse analysis method by Uchida et al. was adopted to obtain the tension softening behaviors from the results of TPBT. It could be found that the initial stiffness was constant regardless of steel fiber volume, the increase of steel fiber volume fraction made the tensile strength higher, but all of the curves converged on an asymptote with a crack width. It was proposed the equation of softening curve expressed by combination of plastic behavior part and exponential descending behavior part considering the steel fiber volume fraction and w_0 , which is corresponding to the maximum crack width of plastic area. Thereafter, the crack propagation analysis using finite element method with smeared crack model was also carried out and it was confirmed that the proposed equation had a good agreement with the experimental results.

Keywords : ultra high strength concrete, steel fiber, fiber volume fraction, tension softening curve, inverse analysis

1. 서 론

콘크리트는 압축강도 및 내구성이 매우 우수한 건설재료로서 강재와 더불어 구조물에 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장강도와 휨강도가 상대적으로 작아서 균열발생에 대한 취약성을 가지고 있으며, 또한 압축강도가 증가함에 따라 보다 취성적 거동을 보이는 등 재료의 본질적 한계를 내포하고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 오래 전부터 시멘트 복합체의 성능 향상을 위해 섬유를 혼입하는 방법이 이용되어왔다. 섬유보강의 가장 큰 장점은 인장강도의 증가와 인성의 향상에 있다.^{1,2)} 이 외에도 전단강도를 향상시키는 효과가 있으며, 동적하중에 대한 저항성 증대, 수축균열을 줄이는 효과 등이 있다.³⁻⁵⁾ 최근에 연구되고 있는 강섬유보강 초고강도 콘크리트 (steel fiber-reinforced ultra high strength concrete)의 역학적 특성은 높은 인장

강도와 균열 이후의 높은 연성발현을 들 수 있다.⁶⁾ 입경 1 mm 이하의 입자들의 적절한 비율로 구성되며 일반적으로 RPC (reactive powder concrete)라고 일컬어지는 시멘트 기반 매트릭스에 취성거동을 보완하기 위하여 강섬유가 보강된 초고강도 콘크리트는 매우 높은 강도를 나타냄과 동시에 인성 및 내구성 측면에서도 매우 우수한 성능을 발휘한다.⁷⁾ 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 역학적 특성을 살펴보면 압축강도는 약 180에서 200 MPa의 값을 나타내며, 쪼갬인장강도의 경우는 평균적으로 약 10에서 12 MPa, 휨인장강도는 평균 30에서 35 MPa의 값을 가진다. 이러한 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 인장특성은 구조물이 휨파괴와 전단파괴에 도달할 때까지의 연성거동에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 초고강도 강섬유보강 콘크리트를 이용한 구조물에서는 우수한 재료성능에 의해 구조부재의 축소 및 경량화를 도모할 수 있고 건설경비의 절감이 가능하다. 초고강도 강섬유보강 콘크리트를 이용한 구조물의 실용화를 도모하며 효율적인 활용 및 사용분야를 개발하기 위해서는 그 역학적 특성을 활용한 설계 및 구조해석기술의 개발이 반드시 필요하며, 특히 초고강도 강섬유보강 콘크리트를

*Corresponding author E-mail : alphard@kict.re.kr

Received May 19, 2008, Revised August 19, 2008,

Accepted October 31, 2008

©2009 by Korea Concrete Institute

구조부재에 적용하고 그 특성을 반영한 큰 변형 성능을 기대하기 위해서는 FEM 해석 등의 방법에 의해 종국상태를 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 그러나 현재까지 섬유유 하중부담 평가를 포함한 정량적 역학적 성능 평가를 위한 연구가 아직 충분하지 않을 뿐 아니라 FEM 해석을 통해 변형성능을 정확하게 추정할 수 있는 신뢰성 있는 인장연화모델이 아직 정립되어 있지 않다.

본 연구에서는 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 인장거동 특성과 섬유혼입률에 따른 인장거동의 변화에 대한 실험을 수행하고, 실험 결과를 토대로 FEM 역해석을 통해 인장연화거동을 파악하였으며, 변형성능을 정확하게 추정할 수 있는 인장연화모델을 도출하였다.

2. 인장연화거동 평가 방법에 대한 고찰

2.1 섬유보강 콘크리트의 인장 실험

일반적으로 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능은 매트릭스와 섬유의 특성에 의해 결정되며, 섬유의 특성으로는 주로 섬유의 형상이나 강도특성, 섬유혼입률, 섬유분포 등이 있다. 일반 콘크리트의 역학적 성능은 주로 강도를 통해 평가하지만, 섬유보강 콘크리트의 경우, 균열저항성이나 변형성능 등의 특성은 강도만으로 평가가 불가능하다. 콘크리트 및 모르타르를 섬유로 보강하는 경우, 주로 매트릭스에 거시적 균열이 발생하는 시점 이후에 인성 증가가 명확하게 나타나지만 강도에 미치는 영향은 비교적 작다. 따라서 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능을 평가하기 위해서는 거시적인 매트릭스 균열을 섬유로 전달하여 닫히도록 하는 결합응력 (bridging stress)을 정량적으로 평가하는 것이 중요하다. 섬유보강 콘크리트의 이와 같은 성능을 평가하는 특성으로는 인장연화곡선이 적절하다고 판단되나 인장연화곡선을 측정하는 방법에 대하여 기술한 규정은 아직 표준화되어 있지 않은 실정이다. 파괴진행영역에서의 인장응력과 균열폭의 관계로 정의되어지는 인장연화곡선은 파괴역학적 파라미터의 하나로서 곡선 내 면적으로부터 파괴에너지를 구할 수 있고, 균열 후 거동을 쉽게 확인할 수 있으며, 균열진전 저항성을 파악할 수 있다. 따라서 인장연화곡선은 섬유보강 콘크리트의 역학적 성능을 표현하는데 아주 유용하게 이용된다.

섬유보강 콘크리트의 인장연화곡선을 구하는 실험 방법으로는 일반 콘크리트에서와 같이 노치가 있는 보의 휨실험,⁸⁻¹⁰⁾ 일축인장실험,^{11,12)} CT (compact tension) 실험¹³⁻¹⁵⁾ 등이 있다. 이 실험 방법 중에서 인장연화곡선을 직접적으로 구하는 일축인장 실험을 수행하는 것이 가장 바람직하나 실험 결과 정확도를 확보하는 문제가 있어서 표준시험법으로서 채택될 경우에는 신뢰성 있는 데이터 확보에 어려움이 따른다. 또한 CT (compact tension) 실험은 작은 공시체 체적으로 큰 파괴면적을 얻을 수 있고 공시체 자중의 영향이 적은 것 등은 장점이지만, 기본적으로 노치

가 있는 보 실험과 같이 간접적인 방법이며 특별한 실험장치가 필요하기 때문에 표준시험으로 사용하기에는 무리가 있다. 휨 실험의 경우에는 기존의 실험기와 재하장치에서도 실험이 가능하기 때문에 매우 손쉽게 수행될 수 있는 실험법으로 노치가 있는 보의 휨 실험을 수행하여 얻은 실험데이터와 역해석을 통해 인장연화곡선을 구한다.

노치가 있는 보의 휨 실험은 RILEM의 표준시험이며, 모르타르·콘크리트의 파괴에너지시험¹⁶⁾과 강섬유보강 콘크리트의 성능 실험¹⁷⁾에서도 적용되고 있는 가장 일반적이며 우수한 파괴 파라미터 실험 방법이다. 또한 휨 실험을 이용하는 보통 콘크리트의 경우와 같이 섬유보강 콘크리트의 인장연화곡선도 구할 수 있다. 노치 낸 보의 휨 실험을 통해 파괴에너지나 휨인성 평가를 위해서는 하중-변위곡선의 측정을 필요로 하고, 인장연화곡선을 추정하기 위해서는 클립게이지 등을 이용하여 노치에서의 균열개구변위 (CMOD, crack mouth opening displacement)와 노치 선단에서의 균열선단개구변위 (CTOD, crack tip opening displacement) 및 하중과의 관계를 측정할 필요가 있다.

섬유보강 콘크리트를 대상으로 하여 노치가 있는 보의 휨 실험을 수행할 경우에 발생하는 문제점은 큰 변위 발생 시의 데이터 계측에 있다. 섬유보강 콘크리트는 일반 콘크리트에 비하여 큰 개구변위에서도 결합응력이 존재하기 때문에 섬유보강 콘크리트의 노치가 있는 보의 휨 실험에서는 실험체가 큰 휨변형 및 균열개구변위에 도달할 때까지 하중을 지탱한다. CMOD와 CTOD를 계측하는 경우 클립게이지를 이용하는 것이 일반적이거나 섬유보강 콘크리트의 경우에는 클립게이지의 측정 용량을 초과하여도 공시체가 하중을 지탱하고 있는 경우가 많다. 따라서 섬유보강 콘크리트의 인장연화곡선에 있어서 결합응력이 0에 도달하는 점의 개구변위, w_{cr} (한계개구변위)를 정확히 산정하는 것이 곤란하다. 이러한 경우 측정할 최대 균열개구폭을 임의의 값으로 정하고 이후의 데이터를 무시하는 방법을 사용하거나 균열개구폭 대신 중앙 처짐을 이용하는 경우도 있다.

2.2 역해석 방법

Kitsutaka^{18,19)}는 1995년 콘크리트의 인장연화곡선을 결정할 수 있는 다직선 근사기법을 제안하였다. 이 기법은 해석적으로 구한 하중-처짐관계와 실험적으로 구한 하중-처짐관계가 서로 일치하도록 인장연화곡선을 결정하는 데이터 보간법의 일종이다. 이 기법에서 인장연화곡선은 다직선으로 근사화되며, 각 직선의 위치는 해석을 통해서 가상균열의 진전과 함께 단계적으로 결정된다. Fig. 1은 균열발생 위치가 i 번째 굴곡점 (knee point)까지 결정된 인장연화곡선의 $i+1$ 번째 굴곡점의 위치를 결정하는 과정을 보이고 있다. 우선 i 번째 굴곡점으로부터 $\bar{\sigma}(w)$ 는 Fig. 1(a)와 같다고 가정한다. 다음으로 Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같이 가상균열단이 해석모델의 $i+1$ 절점까지 진

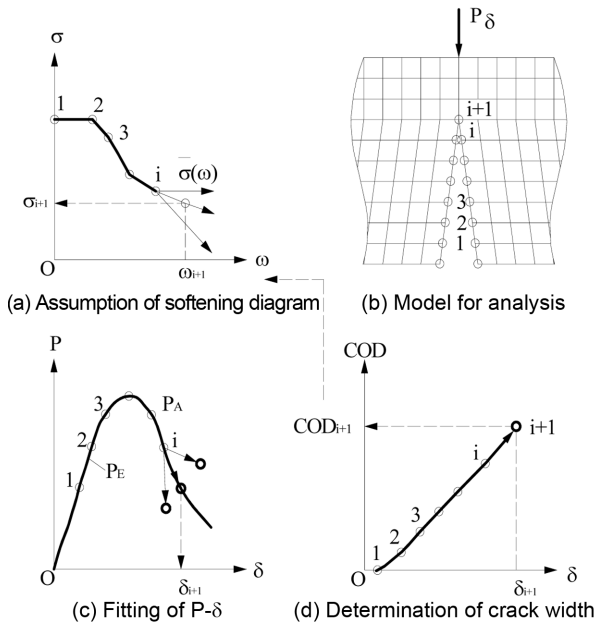


Fig. 1 Poly-linear approximation method^{18,19)}

전되었을 때의 하중, 변위, 균열개구변위 (crack opening displacement, COD)를 계산한다. 그리고 $\bar{\sigma}(w)$ 를 실험적으로 구한 하중-처짐관계와 해석적으로 구한 하중-처짐관계가 일치하도록 반복법을 통해서 결정한다. $i+1$ 번째 굴곡점에서의 균열폭 w_{i+1} 은 Fig. 1(d)와 같이 $\bar{\sigma}(w)$ 를 결정된 다음 해석적으로 구한 COD_{i+1} 을 이용하여 구할 수 있다. 마지막으로 굴곡점 $i+1$ 의 응력은 Fig. 1(a)와 같이 $\bar{\sigma}(COD_{i+1})$ 을 이용하여 결정할 수 있다.

다직선 근사법 계산 프로그램은 가상균열모델을 사용한 균열확장해석 프로그램에 반복 루틴을 추가하기만 하면 되기 때문에 매우 간단하다. 또한 데이터 보간 과정에서 단지 $\bar{\sigma}(w)$ 의 기울기만 필요하기 때문에 반복 과정이 매우 단순하다. 더욱이 실험 과정에서 하중-처짐관계 또는 하중-균열개구변위관계만 안정적으로 얻으면 되고, 실험체의 크기와 형상에 관계없이 적용이 가능하다는 것이 큰 장점이다.

이 기법에서는 실험체 형상에 관한 정보와 하중-처짐관계 또는 하중-균열개구변위만이 입력조건으로 필요로 한다. 입력데이터를 이용하여 탄성한계 인장응력에 대응하는 초기결합응력 (균열발생강도)과 균열발생 이후의 인장응력에 대응하는 결합응력과 개구변위관계를 계산할 수 있다. 다직선 근사화 기법은 보통 콘크리트에 대해서는 정확도가 충분하게 검증되었고, 본 연구에서 다루고 있는 재료와 유사한 초고성능 콘크리트에 대해서도 몇몇 연구자들에 의해 그 정확도가 검증되었다.

Uchida 등²⁰⁾은 다직선 근사화 기법을 이용하여 인장연화곡선을 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 휨인장 실험으로부터 얻은 하중-CMOD곡선 또는 하중-처짐곡선을 이용하여 FEM 모델을 통해 역해석을 수행하여 인장응력-균열개구변위 관계를 구하는 방법으로 인장연화곡선을 구하는 과정은 Fig. 2와 같이 나타내어진다.

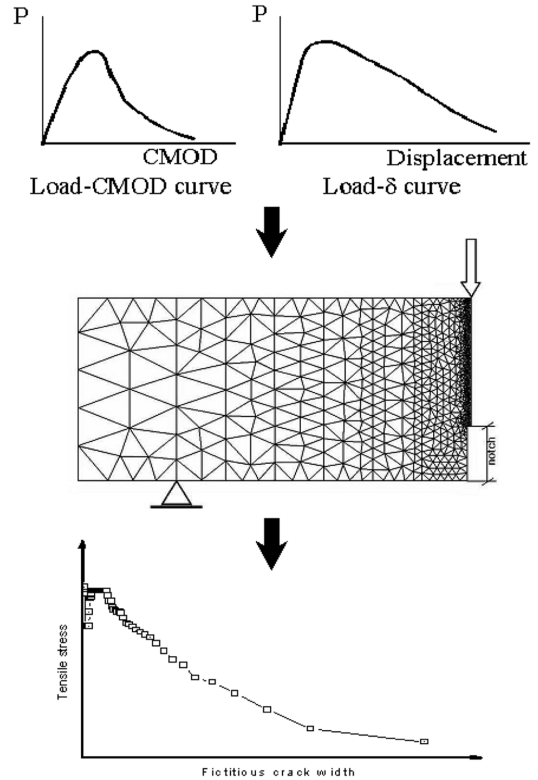


Fig. 2 Process of determination of tensile softening curve

3. 실험

3.1 실험 계획 및 배합

본 연구에서는 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 인장연화거동에 섬유혼입물이 미치는 영향을 파악하기 위해 노치 낸 보에 대한 3점 휨 실험을 수행하였다. 실험 방법은 일본콘크리트공학협회 (Japan Concrete Institute)의 섬유보강 콘크리트의 하중-변위곡선 시험법 (JCI-S-002-2003)²¹⁾과 동일하게 이루어졌다. 실험변수는 섬유혼입률로 하였으며 강섬유혼입률의 범위는 부피비로 1%에서 5%까지 1%씩 증가시켜 5가지로 나누어 수행하였다. 본 연구에서 사용된 강섬유는 인장강도가 약 2,500 MPa이고 길이와 직경이 각각 13 mm와 0.2 mm인 직선형 강섬유이다. 휨 실험체는 실험 변수별 5개 씩 제작하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 콘크리트의 배합을 나타낸 것이다.

3.2 실험체 제작 및 실험 방법

실험체는 단면의 폭과 높이가 100 mm이고, 길이가 400 mm로 제작되었다. 실험체는 타설 후 1일동안 20°C 습윤양생을 거친 후 3일 동안 90°C 고온증기양생을 실시하였으며, 실험재령까지 20°C 수중에서 보관되었다. 실험을 수행하기 직전에 다이아몬드 커터기를 이용하여 실험체 중앙에 노치를 주었다. 노치의 깊이는 모든 실험체에서 실험체 높이의 30%로 하였으며, 노치의 폭은 4 mm로 일정하게 유지하였다. 휨 실험에 이용한 실험 장치는

Table 1 Mix design of concrete

Mix proportion, relative ratio*						
Cement	Water	Silica fume	Fine aggregates	Filler	Superplasticizer	Steel fiber
1.00	0.25	0.25	1.10	0.30	0.018	1,2,3,4,5 vol. %

* Relative ratios: weight ratio to cement, except steel fiber expressed as volumetric ratio to the whole volume

하중과 변위 조절이 가능한 2,000 kN 용량의 만능재료시험기이며, 하중은 변위조절 방식으로 분당 시편 지간 (300 mm)의 1/1,500의 속도로 재하하였다. 또한, 실험 중 실험체 중앙에서의 처짐을 측정하기 위해서 10 mm 용량의 LVDT를 양면에 1개씩 설치하였으며, 노치부의 균열 폭을 측정하기 위해서 클립게이지를 실험체의 바닥면에 부착하였다. Fig. 3은 휨 실험의 실험체 및 실험 장치에 관한 제원을 나타낸 것이다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 섬유혼입률에 따른 휨거동의 변화

100 × 100 × 400 mm 실험체의 강섬유혼입률 (V_f)에 따른 휨강도를 구하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2를 보면 강섬유혼입률이 증가함에 따라 휨강도가 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 혼입률 증가로 인한 휨인장 방향으로 배열된 강섬유의 수가 증가함으로 인한 것이라고 판단된다. 한편, 강섬유혼입률이 증가함에 따라 휨강도 증가율이 점차 감소하는 경향을 나타내고 실험 결과의 표준편차가 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 혼입률이 증가함에 따라 워커빌리티가 감소하면서 휨인장 방향으로 배열되는 강섬유량에 편차가 많이 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

Figs. 4와 5는 강섬유혼입률별 평균 하중-CMOD관계와 하중-처짐 관계의 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 CMOD의 값은 약 4 mm 이내에서 측정되었는데 이것은 본 연구에서 사용된 클립게이지의 용량이 5 mm이기 때문에 그 이상의 균열폭을 측정할 수 없었기 때문이다. Fig. 5는 강섬유혼입률이 증가함에 따라 초기강성에는 큰 변화가 없으나 최대하중이 점차적으로 증가하고 연화구간에서의 거동이 점점 취성적으로 변화함을 보이고 있다.

4.2 역해석 결과

본 연구에서는 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 인장

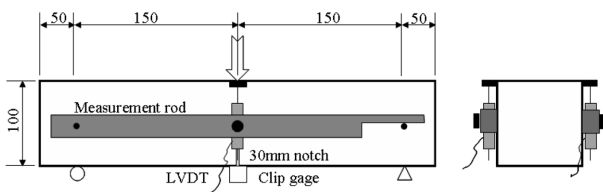


Fig. 3 Three-point bending test

Table 2 Flexural test results for several fiber volume fraction

Specimen	V_f (%)	Max. load (kN)	Flexural strength (MPa)	Mean (MPa)	Standard dev. (MPa)
VF1-1	1	17.515	16.09	16.40	0.32
VF1-2		17.895	16.43		
VF1-3		18.395	16.89		
VF1-4		17.590	16.15		
VF1-5		17.900	16.44		
VF2-1	2	35.155	32.29	34.70	2.34
VF2-2		39.290	36.08		
VF2-3		38.410	35.27		
VF2-4		40.900	37.56		
VF2-5		35.155	32.29		
VF3-1	3	50.292	46.19	47.06	1.93
VF3-2		49.536	45.49		
VF3-3		54.528	50.08		
VF3-4		52.121	47.87		
VF3-5		49.710	45.65		
VF4-1	4	54.260	49.83	52.19	2.68
VF4-2		60.145	55.24		
VF4-3		57.905	53.18		
VF4-4		53.280	48.93		
VF4-5		58.525	53.75		
VF5-1	5	67.285	61.79	61.67	4.66
VF5-2		63.405	58.23		
VF5-3		68.025	62.47		
VF5-4		62.035	56.97		
VF5-5		75.030	68.91		

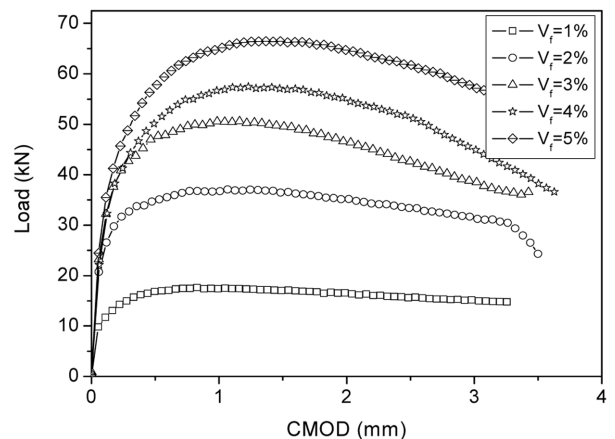


Fig. 4 Comparison of mean load-CMOD curve

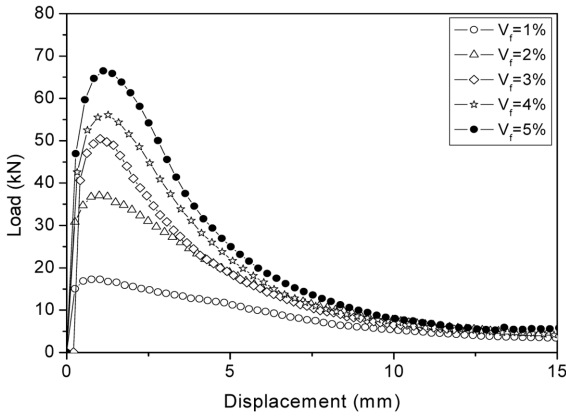


Fig. 5 Comparison of mean load-deflection curve

연화곡선을 얻기 위해 앞서 언급한 Uchida 등²⁰⁾이 제안한 역해석 방법을 사용하였다. FEM 역해석에 사용된 유한요소 모델은 684개의 절점과 1,206개의 삼각형 평면응력요소로 구성하였으며, 실험체 중앙의 노치부는 균열진전 상태를 정확하게 평가하기 위해서 매우 작은 크기의 요소를 이용하여 모델링하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 사용한 클립게이지의 용량이 5 mm로 매우 작아서 그 이상의 CMOD 측정이 불가능하였다. 따라서 하중-CMOD 관계를 입력값으로 사용하여 역해석을 수행할 경우 연화구간에서의 거동을 파괴에 이르기까지 구하는 것이 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 하중-CMOD 관계의 실험결과 대신 하중-처짐 관계의 실험 결과를 해석의 입력값으로

사용하는 것을 검토했으며, $V_f=1\%$ 실험체에 대한 평균 하중-CMOD곡선과 평균 하중-처짐곡선을 각각 입력값으로 사용하여 역해석을 실시하였다. Fig. 6(a)는 입력값으로 하중-CMOD와 하중-처짐곡선을 사용하여 도출된 인장연화곡선의 비교를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 입력값에 관계없이 FEM 역해석을 통해서 얻어진 인장연화곡선은 거의 동일한 형태를 나타냄을 알 수 있다. 또한, FEM 역해석으로부터 얻은 인장연화곡선을 FEM 해석의 콘크리트 인장모델로 사용하여 하중-CMOD 관계와 하중-처짐관계를 예측한 결과를 Fig. 6(b)와 (c)에 나타내었는데 두 가지 입력값에 대해 모두 인장연화관계가 얻어진 범위까지 하중-처짐관계 및 하중-CMOD 관계를 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 강섬유혼입률 $V_f=1\%$ 이외의 실험체에 대해서는 하중-처짐관계를 이용하여 FEM 역해석을 실시하여 인장연화곡선을 도출하였다. Figs. 7~10에서 보는 바와 같이 역해석을 통해 도출한 인장연화곡선이 인장모델로서 실제 거동을 잘 나타냄을 알 수 있다.

4.3 인장연화곡선의 제안

앞의 해석 결과를 바탕으로 본 절에서는 강섬유보강 초고강도 콘크리트에 대해 섬유혼입률의 함수로서 인장연화곡선의 모델식을 제안하고자 한다. 일본의 田中 등²²⁾은 압축강도 200 MPa와 휨인장강도 35 MPa의 초고강도 강섬유 콘크리트에 대한 인장연화모델을 이선형 곡선의

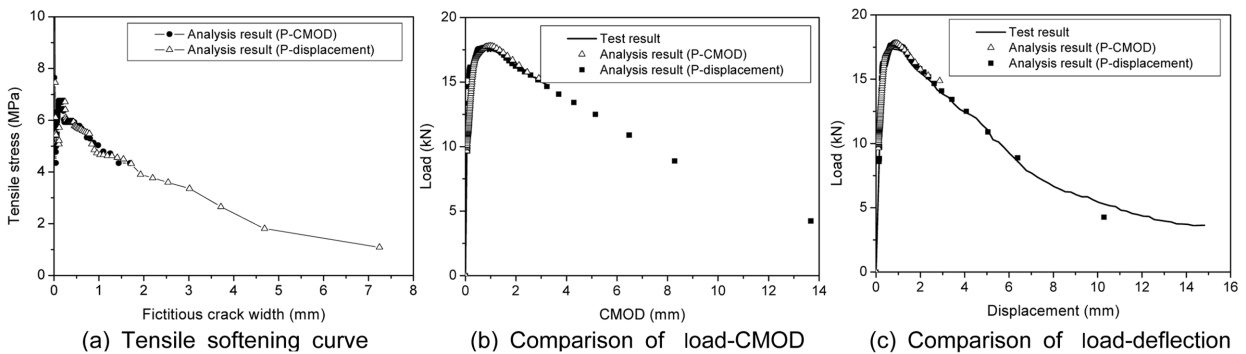


Fig. 6 FEM inverse analysis results ($V_f=1\%$)

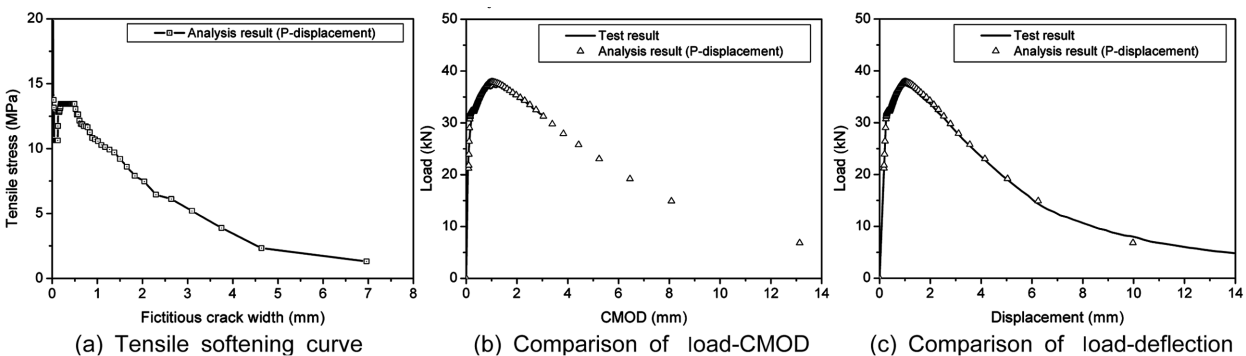


Fig. 7 FEM inverse analysis results ($V_f=2\%$)

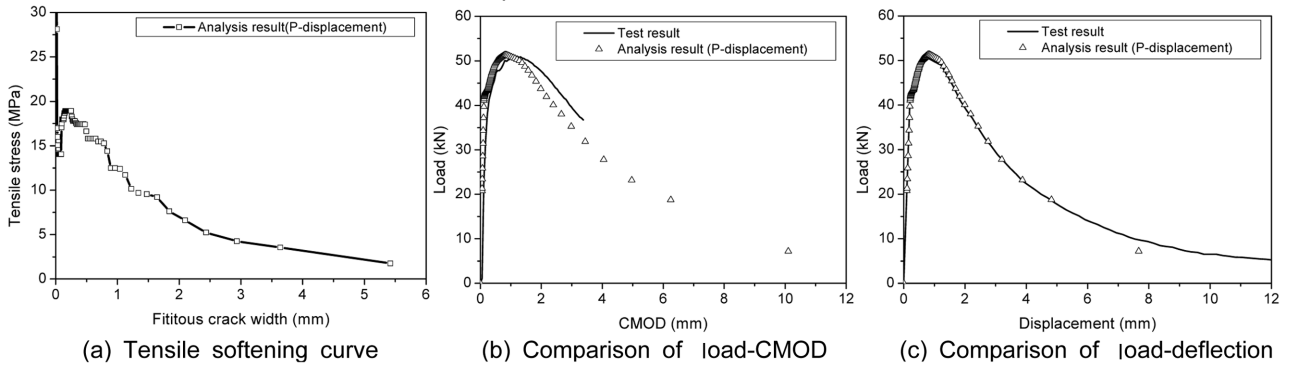


Fig. 8 FEM inverse analysis results ($V_f=3\%$)

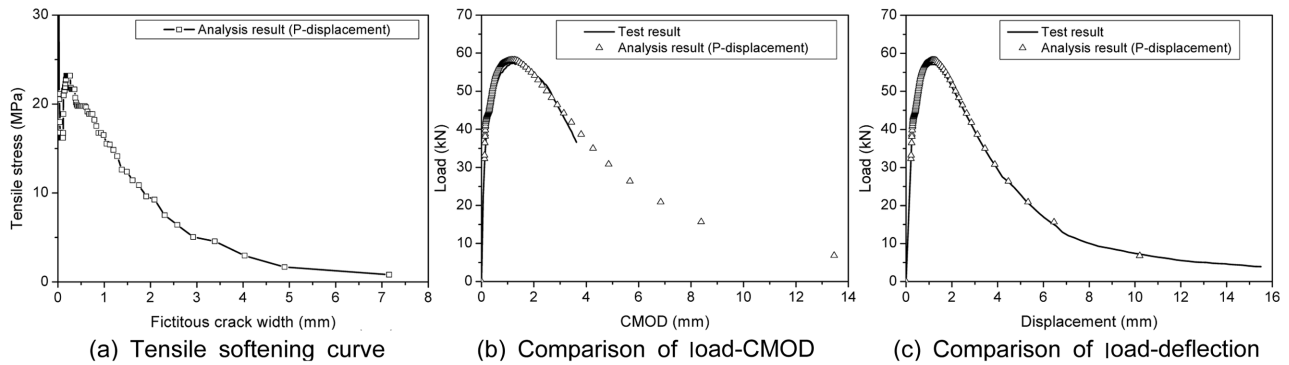


Fig. 9 FEM inverse analysis results ($V_f=4\%$)

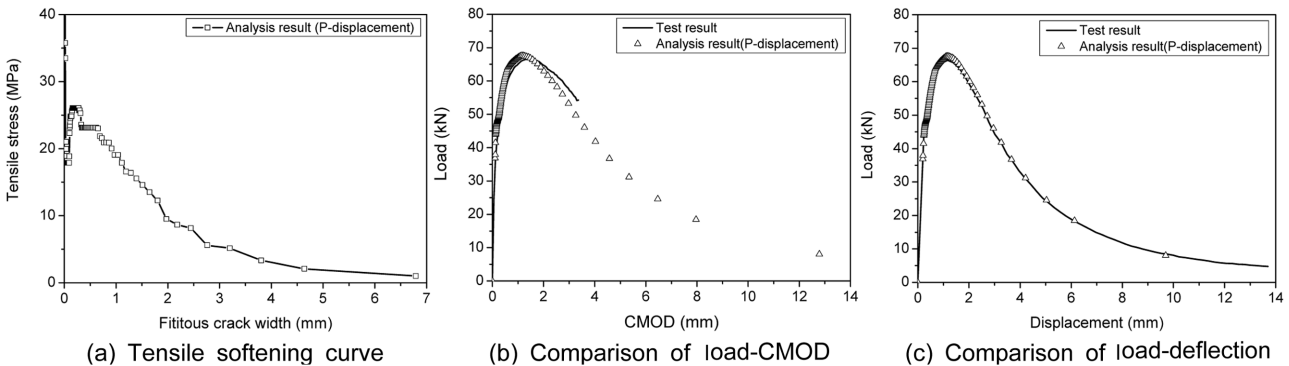


Fig. 10 FEM inverse analysis results ($V_f=5\%$)

형태로 제안하였으나, 이 모델은 강섬유혼입률 2%에 대한 것으로 적용이 제한적이다.

Fig. 11에서는 FEM 역해석을 통해 얻어진 각 강섬유 혼입률에 따른 인장연화거동을 비교하여 나타내었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 강섬유혼입률이 증가함에 따라 인장강도가 점차적으로 증가하며, 또한 공통적으로 모든 인장연화거동에서 인장강도에 도달한 후 일정구간 인장강도를 유지하다가 이후구간에서 응력이 감소하기 시작하여 일정크기의 균열폭에서 점근적으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하고자 하는 인장연화모델은 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 크게 인장응력이 일정하게 유지되는 구간과 응력이 감소하는 구

간으로 구분하여 나타내었으며, 인장강도가 일정하게 유지되는 구간을 직선으로 표현하고 응력이 감소하는 구간을 지수함수로 표현하였다. 이때 인장응력이 일정하게 유지되는 구간의 최대변위, w_0 는 Fig. 11에 보이는 바와 같이 강섬유혼입률과 관계없이 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 나타났으며 본 연구에서는 5개 혼입률의 평균치를 적용하여 그 값을 0.26 mm로 결정하였으며, 이 값을 임계균열폭으로 정의하였다. Liaw 등²³⁾은 일반 콘크리트에 대해 삼중선형 (trilinear) 곡선을 사용하여 인장연화곡선을 정의하였는데, 각각의 선형구간에 대한 임계균열폭은 압축강도에 의해 결정된다고 언급하고 있다. 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 압축강도는 섬유혼입률에 거

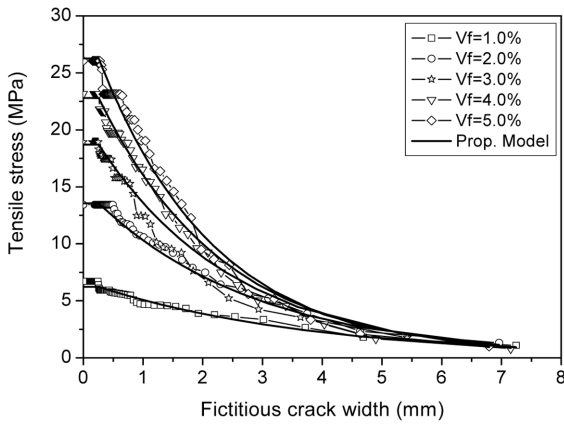


Fig. 11 Comparison tensile softening model with inverse analysis results

의 영향을 받지 않으며, 따라서 임계균열폭이 섬유혼입률에 따라 거의 일정한 값을 보인 실험 결과는 Liaw 등의 연구 결과와 일치한다.

따라서 실험 결과에 대한 회귀분석을 통하여 본 연구에서 제안하는 인장연화곡선의 모델식은 다음의 식을 통해 정의되어진다.

$$f_t = 131 \cdot (V_f)^{1/3} - 22 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$\omega < \omega_0 \text{ 일 때, } \sigma_w = f_t \quad (2)$$

(응력이 일정하게 유지되는 구간)

$$\omega > \omega_0 \text{ 일 때, } \sigma_w = f_t \cdot b^{(\omega - \omega_0)} \quad (3)$$

(응력이 감소하는 구간)

여기서, ω_0 는 0.26 mm이며, $b = 0.3 - 0.1 \cdot \ln(V_f)$ 이다.

5. 결 론

본 연구에서는 강섬유혼입률이 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 인장연화거동에 미치는 영향을 파악하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 초고강도 강섬유보강 콘크리트는 강섬유의 혼입률에 관계없이 거의 일정한 값의 초기강성을 나타내었다.
- 2) 강섬유혼입률이 증가할수록 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 휨인장강도는 향상된 반면, 실험값의 편차가 증가하고, 연화거동은 보다 취성적인 것으로 나타났다.
- 3) 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 인장연화곡선을 얻기 위해 Uchida 등이 제안한 역해석법을 사용하였으며, 역해석으로 구한 인장연화곡선이 실험 결과와 아주 잘 일치함을 보였다.
- 4) 하중-균열폭 관계를 입력값으로 사용한 역해석 결과와 하중-처짐 관계를 사용한 역해석 결과는 서로

잘 일치하였다.

- 5) 섬유혼입률과 임계균열폭의 함수로서 강섬유보강 초고강도 콘크리트의 인장연화모델을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 “하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발”에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Shah, S. P., “Do Fibers Increase the Tensile Strength of Cement-Based Matrixes?,” *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 6, 1991, pp. 595~602.
2. Balaguru, P. N. and Shah, S. P., *Fiber-Reinforced Cement Composites*, New York, McGraw-Hill, 1992.
3. Nawy E. G., *Fundamentals of High-Performance Concrete*, New York, John & Wiley, 2001.
4. Banthia, N., Bindiganavile, V., and Mindess, S., “Impact Resistance of Fiber Reinforced Concrete,” *Proceeding of RILEM 4th International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites(HPFRCC4)*, Ann Arbor, USA, 2003, pp. 117~131.
5. Shah, S. P., Sarigaphuti, M., and Karguler, M. E., *Comparison of Shrinkage Cracking Performance of Different Types of Fibers and Wiremesh*, Fiber Reinforced Concrete Developments and Innovations, Michigan, American Concrete Institute, 1994, pp. 1~18.
6. Richard, P. and Cheyrezy, M., “Composition of Reactive Powder Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, 1995, pp. 1501~1511.
7. Bonneau, O., et al., “Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes,” *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 4, 1997, pp. 286~290.
8. de Oliveira e Sousa, J. L. A. and Gettu, R., “Determining the Tensile Stress-Crack Opening Curve of Concrete by Inverse Analysis,” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No. 2, 2006, pp. 141~148.
9. de Oliveira e Sousa, J. L. A. and Gettu, R., “Inverse Analysis of Notched-Beam Test Data for Obtaining Tensile Stress-Crack Opening Relation of Fiber Reinforced Concrete,” *Symposium on Fibre-Reinforced Concrete Befib*, 2004, pp. 809~818.
10. Mihashi, H., Kikuchi, T., Akita, H., and Yamada, H., “Simplified Method to Evaluate Tensile Strain Performance of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites,” *CAJ Proceedings of Cement & Concrete*, No. 60, 2007, pp. 483~490.
11. Wang, Y, Li, V. C., and Backer, S., “Experimental Determination of Tensile Behavior of Fiber Reinforced Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 87, No. 5, 1990, pp. 461~468.
12. Naaman, A. E., Fisher, G., and Krstulovic-Opara, N., *Measurement of Tensile Properties of Fiber Reinforced Concrete: Draft Submitted to ACI Committee 544*, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5), 2007, pp. 3~12.

13. Kagawa, Y. and Sekine, K., "Toughening by Continuous Single Fiber Bridging in Ceramic Matrix Composite," *Materials Science & Engineering, Properties, Microstructure and Processing. A, Structural Materials*, Vol. 221, No. 1/2, 1996, pp. 163~172.
14. Park, J. S., Katoh, Y., Kohyama, A., Lee, S. P., and Yoon, H. K., "Evaluation of Fracture Toughness of Ceramic Matrix Composites Using Small Specimens," *Fusion Engineering and Design*, Vol. 61/62, 2002, pp. 733~738.
15. Reza, F., Yamamuro, J. A., and Batson, G. B., "Electrical Resistance Change in Compact Tension Specimens of Carbon Fiber Cement Composites," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, No. 7, 2004, pp. 873~881.
16. Japan Concrete Institute, *Method of Test for Fracture Energy of Concrete by Use of Notched Beam JCI-S-001-2003*, http://www.jci-web.jp/jci_standard/
17. RILEM TC 162-TDF, "Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced Concrete," *Materials and Structures*, Vol. 33, 2000, pp. 3~5.
18. Kitsutaka, Y., *Fracture Parameters for Concrete Based on Poly-Linear Approximation Analysis of Tension Softening Diagram*, FRAMCOS-2, Germany, AEDIFICATION, 1995.
19. Kitsutaka, Y., "Fracture Parameters by Poly-Linear Tension Softening Analysis," *Journal of Engineering Mechanics* Vol.123, No.5, 1997, pp.444~450.
20. Uchida, Y. and Kurihara, N., "Determination of Tension Softening Diagrams of Various Kinds of Concrete by Means of Numerical Analysis," *FRAMCOS-2*, Germany, AEDIFICATION, 1995.
21. Japan Concrete Institute, *Method of Test for Load-Displacement Curve of Fiber Reinforced Concrete by Use of Notched Beam JCI-S-002-2003*, http://www.jci-web.jp/jci_standard/
22. 田中など, "超高強度纖維補強コンクリートの引張特性と引張軟化曲線のモデル化," *日本土木學會論文集*, Vol. 67, No. 788, 2005, pp. 159~173.
23. Liaw, B. M., Jeang, F. L., Du, J. J., Hawkins, N. M., and Kobayashi, A. S., "Improved Non-Linear Model for Concrete Fracture," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 116, No. 2, 1990, pp. 429~445.

요 약 본 연구에서는 섬유혼입률이 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 인장연화거동 특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 노치 낸 보에 대한 3점 재하 휨실험을 통해 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 휨인장 거동을 구하고, Uchida 등이 제안한 역해석법을 사용하여 휨 실험 결과로부터 인장연화곡선을 도출하였다. 노치 낸 보의 휨 실험 결과에서 초기강성은 섬유혼입률에 관계없이 일정한 값을 나타내고, 강섬유의 혼입률이 증가할수록 초고강도 강섬유보강 콘크리트의 휨인장강도는 증가하며 연화거동은 일정 균열폭에서 점근적으로 수렴하는 경향을 나타내었다. 역해석을 통해 구한 인장연화곡선으로부터 섬유혼입률과 임계균열폭, ω_0 의 함수로 인장연화모델을 제안하였으며, 인장연화모델은 균열이 진행됨에 따라 일정한 인장응력 값을 가지는 소성구간과 지수함수로 주어지는 연화구간으로 나누어 제시하였다. 본 연구에서 제시한 인장연화모델을 적용하여 점성균열모델을 이용한 유한요소해석을 수행한 결과, 해석 결과와 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 초고강도 콘크리트, 강섬유, 섬유혼입률, 인장연화곡선, 역해석