

# 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화 거동

## Tension Softening Behavior of Ultra-Strength Steel Fiber Reinforcement Concrete

홍기남<sup>\*</sup> 한상훈<sup>\*</sup> 고경택<sup>\*\*</sup> 박정준<sup>\*\*\*</sup> 류금성<sup>\*\*\*</sup>  
Hong, Ki Nam Han, Sang Hoon Koh, Kyung Taek Park, Jung Jun Ryu, Gum Sung

### ABSTRACT

For a better understanding of the fracture behavior of concrete structures, knowledge of the post-cracking behavior of concrete material is essential. The tension softening diagram can describe the post-cracking behavior of concrete in tension. In this paper, Four points bending tests with a notch have been carried out to investigate tensile properties of the steel fiber reinforced concrete(SFRC). Poly-linear approximation method combined with FEM analysis is applied to the steel fiber reinforced concrete to determine the tension softening diagrams and also to certify the validity of the method. The simulated load-CMOD curves using the determined softening diagrams though the poly-linear approximation method completely agree with the measured ones.

### 1. 서론

콘크리트는 경제적이고 내구성이 우수한 건설재료로서 강재와 더불어 가장 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 콘크리트는 인장강도와 휨강도가 작아 균열이 발생하기 쉬운 본질적인 결함을 갖고 있으며, 또한 초고강도 콘크리트의 실용화에 따른 압축강도의 증가로 콘크리트의 취성파괴가 문제시 되고 있다. 이런 콘크리트의 결함 및 문제점을 개선하고자 섬유를 보강하여 인성을 향상시킨 다양한 섬유 보강 시멘트 복합체가 사용되고 있다. 특히, 최근 압축강도 100MPa 이상을 지닌 초고강도 시멘트 매트릭스에 강섬유를 혼입하여 고인성을 부여한 초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체가 개발되어 주목을 받고 있다. 초고강도 섬유 보강 시멘트 복합체의 특성으로는 종래의 일반 콘크리트 및 섬유 보강 콘크리트보다 압축강도가 증가될 뿐만 아니라 휨, 인장, 압축파괴시에 인성이 대폭적으로 향상되고, 초고강도에 따른 시멘트 경화체의 밀실화로 각종 열화인자의 침투 및 확산계수가 낮은 고내구성을 지니는 것들을 들 수 있다. 이와 같은 장점을 가지는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 실용화를 도모하며 효율적인 활용 및 사용용도를 개발하기 위해서는 그 역학적 특성을 활용한 설계 및 구조해석기술의 개발이 반드시 필요하다. 특히, 초고강도 강섬유 보강 콘크리트를 구조부재에 적용하여 대변형 성능을 기대하기 위해서는 FEM해석 등의 방법에 의해 중극상태 등을 정확하게 추정하는 것이 중요하다. FEM해석을 통해 변형성능을 정확하게 추정하기 위해서는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화거동을 파악하여 그 거동을 정확하게 묘사할 수 있는 인장연화모델의 개발이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화모델 개발을 최종 목표로 강섬유 혼입률을 변수로 고려한 공시체에 대한 휨시험을 실시하였다. 그리고 휨시험으로부터 얻어진 하중-개구변위관계를 다직선 근사 기법에 적용하여 해석적으로 인장-개구변위관계를 도출하고, 그 거동을 분석하였다.

\* 정회원, 충북대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

## 2. 사용재료 및 시험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며 혼화제는 실리카폼을 사용하였다. 골재는 5mm이하의 모래만 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았으며, 밀도  $2.62\text{g/cm}^3$ ,  $\text{SiO}_2$  93%인 규사를 사용하였다. 충전제는  $\text{SiO}_2$  93%이상이고, 평균입경  $13\mu\text{m}$ , 비중 2.6인 것으로 사용하였다. 시멘트 복합체의 유동성을 확보하기 위해 폴리칼본계의 고성능 감수제를 사용하였다. 배합시 혼합순서는 먼저 잔골재, 실리카폼, 충전제 및 시멘트를 동시에 투입하여 건비빔을 실시한 이후 물과 고성능 감수제를 넣었다. 그리고 이후에 강섬유를 고르게 투입하는 순서로 콘크리트를 비빔하였다. 비빔이 끝난 콘크리트를 이용하여  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 인 직사각형 단면의 공시체를 제작하였으며, 공시체가 양생된 후에 중앙부에 높이 50mm의 현치를 도입하였다. 표 1과 표 2에 각각 콘크리트 배합과 공시체 제원을 나타내었다.

표 1 콘크리트 배합(질량비)

W/B	시멘트	실리카폼	충전제	모래	고성능감수제	강섬유
0.2	1.0	0.25	0.3	1.1	0.016	0.0~0.05

표 2 공시체 제원

공시체명	강섬유 길이(mm)	강섬유 직경(mm)	형상비	W/B	섬유타입	$V_f(\%)$
SF1	13	0.2	65	0.2	Straight	1.0
SF2	13	0.2	65	0.2	Straight	2.0
SF3	13	0.2	65	0.2	Straight	3.0
SF4	13	0.2	65	0.2	Straight	4.0
SF5	13	0.2	65	0.2	Straight	5.0

### 2.2 시험방법

본 연구에서 이용한 실험장치는 하중과 변위 조절이 가능한 20tonf 용량의 UTM을 사용하였으며, 하중재하 방식은 변위조절 방식을 택하여 가력속도를 분당 시편 길이(300mm)의 1/1500으로 조절하여 시험을 실시하였다. 또한, 공시체의 처짐을 측정하기 위해서 50mm 용량의 LVDT를 사용하였다. 균열폭을 측정하기 위해서는 크립게이지를 공시체의 하면에 부착하여 이용하였다. 그림 1에 실험장치 개요를 나타내었다.

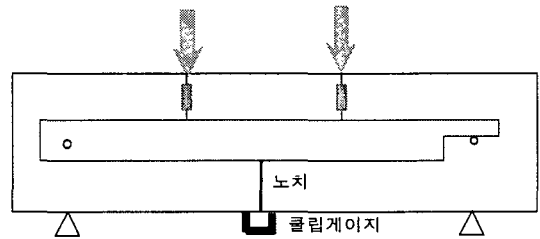


그림 1 실험개요

## 3. 휨시험결과와 역해석

### 3.1 다직선 근사 역해석법

우치다 등은 인장연화특성을 평가하기 위해 휨시험으로부터 얻어진 하중-변위곡선가지고 FEM 역해

석을 통해 인장응력-개구변위관계를 다직선으로 근사화하는 방법을 제안하였다. 이 역해석법은 보통 강도의 콘크리트를 대상으로 주로 사용되고 있으며, 일부 연구자들에 의해 초고강도 강섬유 보강 콘크리트에 대해서도 충분한 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다. 다직선 역해석법을 적용할 때 필요한 입력치는 공시체 형상에 관한 정보와 하중-변위관계(또는 하중-개구변위)뿐이며, 탄성한계 인장응력에 대응하는 결합응력과 균열발생 이후의 인장응력에 대응하는 결합응력과 개구변위관계가 해석적으로 얻어진다..

### 3.2 역해석 결과

5개 공시체의 휨시험으로부터 얻은 하중-개구변위관계를 이용하여 인장응력-개구변위관계를 역해석을 통하여 결정하였다. 역해석에 이용된 FEM모델은 그림 2에 나타낸 것과 같이 237개의 절점과 374개의 삼각형 평면응력요소로 구성하였다. 특히, 공시체 중앙부는 해석의 정확도를 향상시키기 위해 많은 요소를 이용하여 세밀하게 모델링하였다. 그림 3에 다직선 근사화 기법을 적용한 역해석을 통해서 도출된 각 공시체의 인장응력-균열폭관계를 나타내었다. 강섬유 혼입율이 증가함에 따라 콘크리트의 인장강도가 증가함을 그림을 통해서 확인할 수 있다. 그러나, 강섬유 혼입율이 2%미만에서는 혼입율 증가에 따른 인장강도 증가율이 매우 크게 나타났으나, 3%이상으로 증가하게 되면 인장강도 증가율이 크게 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 인장연화구간에서의 인장응력은 강섬유 혼입율이 증가함에 따라 보다 급격하게 감소하는 거동을 그림 3은 보이고 있다. 또한, 모든 공시체의 노치부 균열폭이 2mm이상 증가되면 인장응력은 거의 변화없이 일정하게 유지되면서 균열폭만 크게 증가함을 나타내고 있다. 특히, 강섬유 혼입율이 3% 이상의 공시체의 인장응력-균열폭관계가 거의 유사한 거동을 나타내고 있음을 그림 3을 통해서 확인할 수 있다.

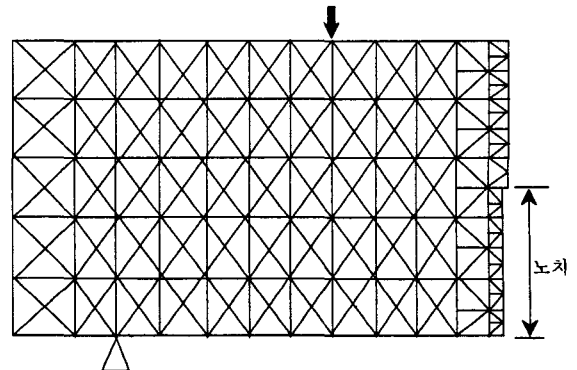


그림 2. 역해석용 FEM모델

그림 4와 5에는 그림 3에 나타낸 인장응력-균열폭관계를 이용한 FEM해석을 통하여 표 2에 나타낸 실험체들의 하중-균열폭관계와 하중-변위관계를 구하여 실험결과와 비교하여 나타내었다. 그림 5에서 강섬유 혼입율 4% 공시체의 결과는 실험중 변위계에 이상이 발생하여 정확하게 측정되지 않아 비교에서 제외하였다. 그림 4와 5를 통해서 확인할 수 있듯이 다직선 근사화 기법을 통하여 도출된 인장응력-개구변위관계를 적용하는 경우 공시체의 하중-개구변위관계 및 하중-변위관계를 매우 정확하게 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 다직선 근사화 기법을 통해서 도출된 그림 3의 인장응력-개구변위관계의 정확도를 확인할 수 있다.

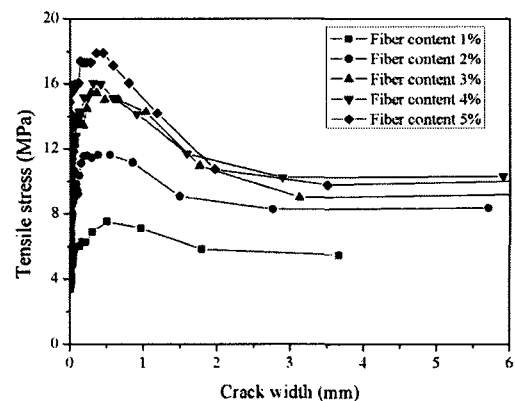


그림 3. 인장응력-균열폭 관계

### 3.3 인장응력-균열폭관계의 단순화

그림 3으로부터 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장응력-개구변위관계를 그림 5에 나타낸 것과 같이 3개의 직선으로 단순화할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉 인장응력이 일정하게 유지되면서 균열

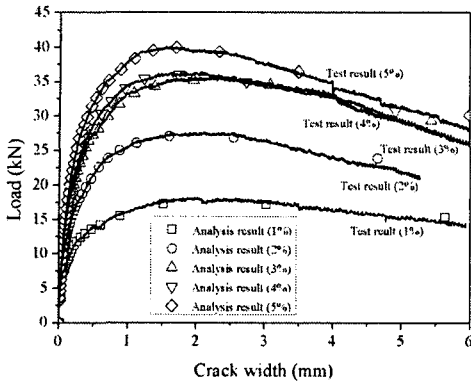


그림 4. 하중-균열폭 관계의 비교

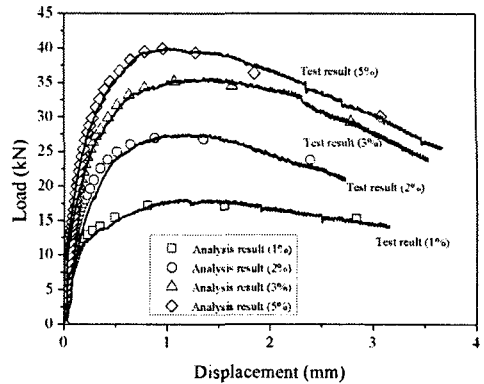


그림 5. 하중-변위 관계의 관계

폭이 증가하는 구간, 인장응력이 감소하면서 균열폭이 증가하는 구간, 그리고 인장응력이 수렴되면서 균열폭이 크게 증가하는 구간으로 구분할 수 있다. 이 영역을 구분하는 균열폭  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ 는 실험변수에 의해서 결정되는 값으로 그림 4에서도 그 영향을 확인할 수 있다.  $w_1$ 은 강섬유 혼입율이 증가함에 따라 감소하고,  $w_2$ 는 강섬유 혼입율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 앞으로 추가적인 실험을 통해 충분한 실험 데이터를 확보하여  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ 를 정량적으로 평가할 수 있다면 충분한 정확도를 가진 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장-연화모델의 구현이 가능할 것으로 보인다.

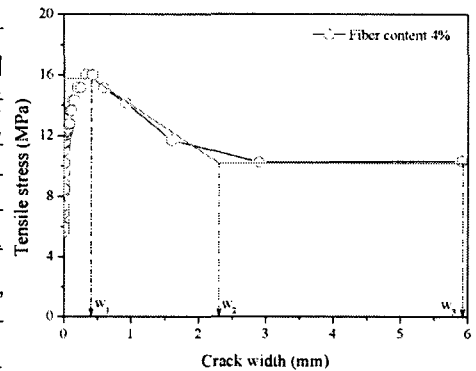


그림 6. 인장응력-균열폭 관계의 단순화

#### 4. 결론

강섬유 보강 초고강도 콘크리트에 대한 휨실험을 실시하고, 다직선 근사화 기법을 도입한 FEM 역해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다직선 근사화 기법을 도입한 FEM 역해석을 통해 얻어진 인장응력-균열폭관계는 정확도가 매우 우수한 것으로 나타났다.
- 2) 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 인장연화곡선을 3개의 직선으로 표현이 가능한 것으로 나타났으며, 추후 추가적인 실험 및 해석을 통해 충분한 정확도를 갖는 인장연화모델의 개발이 가능할 것을 보인다.

#### 참고문헌

1. Uchida, Y., Kurihara, N., Rokugo, K., and Koyanagi, W., "DETERMINATION OF TENSION SOFTENING DIAGRAMS OF VARIOUS OF CONCRETE NY MEANS OF NUMERICAL ANALYSIS", Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2, 1995, pp 17-30.
2. 田中良弘, 福浦尚之, 鷗澤哲史, 坂本淳, 前堀伸平, 片桐誠, "超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", 土木學會論文集, No. 788/V-67, 2005, pp. 159-173.