

# 가상균열모델에 의한 강도 수준이 다른 콘크리트의 인장연화곡선 결정

## Determination of the Tension-Softening Curve of Concrete at Different Strength Level using Fictitious Crack Model

오 성 진<sup>\*</sup>      박 현 재<sup>\*\*</sup>      김 희 성<sup>\*\*\*</sup>      진 치 섭<sup>\*\*\*\*</sup>  
Oh, Sung Jin    Park, Hyun Jae    Kim, Hee Sung    Jin, Chi Sub

### ABSTRACT

The most important material parameters are fracture energy and the stress-crack opening displacement( $\sigma-w$ ) curve to determine the behavior of concrete. Especially, the relationship between the  $\sigma-w$  curve is strongly important to determine the load-displacement curve of concrete that has a major influence on the fracture behavior of a concrete.

In this paper, notched plain concrete beams with different strength level were tested under three-point bending and fracture energy, the load-deflection curve, and the load-crack mouth opening displacement(CMOD) curve were obtained from the experimental data. Also, the fictitious crack model(FCM) was applied to determine the load-deflection curve of notched plain concrete beams using various types of  $\sigma-w$  curve model proposed by Petersson and we compared experimental results with numerical ones carried out by Finite Element Method(FEM).

### 1. 서    론

구조물의 역학적 거동은 사용재료에 따라 많은 영향을 받는다. 콘크리트는 다른 재료에 비하여 경제성이 뛰어나고, 임의의 형태로 쉽게 제작할 수 있는 등 여러 가지 유리한 조건으로 인하여 오늘날 주요한 건설재료의 하나로 사용되고 있다. 그러나, 콘크리트는 비균질 재료이므로 그 역학적 거동은 매우 복잡하다. 콘크리트의 인장시험 결과를 보면 최고하중에 도달한 후 연화현상이 생기는 것을 알 수 있다. 즉, 최고하중 이후 변위는 증가하나 하중은 감소하는 특성을 나타낸다. 콘크리트에 발생하는 균열은 인장이 지배하므로, 연화곡선은 응력확대계수와 파괴에너지 등과 같이 콘크리트의 파괴특성으로 간주되고 있다.

본 연구에서는 비선형 파괴해석 방법중 하나인 가상균열모델을 이용하여 콘크리트 강도수준에 따른 인장연화특성을 규명하고자 한다. 이를 위해 중앙에 노치가 있는 보를 보통 및 고강도 콘크리트로 제작하고 3점휨시험 및 가상균열모델에 의한 해석 결과로부터 인장연화특성을 서로 비교하였다.

\*정회원, 부산대학교 토목공학과 석사과정

\*\*정회원, 부산대학교 생산기술연구소 전임연구원

\*\*\*정회원, 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원

\*\*\*\*정회원, 부산대학교 토목공학과 교수

## 2. 가상균열모델 및 인장연화모델

### 2.1 콘크리트의 인장거동 특성

콘크리트와 같은 비선형재료의 응력-변형률 곡선은 구조물의 길이에 의존한다<sup>1,4,5,6</sup>. 이것은 응력-변형률곡선을 재료성질로 사용하는 것은 적당하는 않음을 의미하는 것이다. 그러므로 콘크리트의 변형특성을 기술하는 적절한 방법은 다음 두가지 관계식을 이용하여야 한다. 첫째로 그림 1(a)와 같이 파괴영역 바깥 재료에 대해서는 응력-변형률 곡선( $\sigma-\epsilon$  곡선)을 사용하는 것이고, 둘째는 그림 1(b)와 같이 파괴영역내에서는 응력-균열열림변위 곡선( $\sigma-w$  곡선)을 이용하는 것이다.

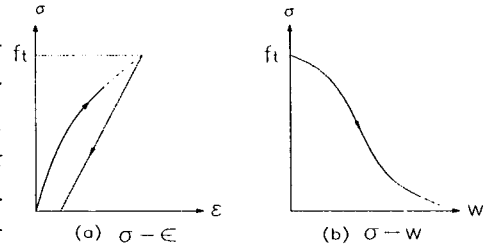


그림 1 인장연화곡선

### 2.2 가상균열모델

선형탄성파괴역학(LEFM)은 콘크리트에 적용할 때 많은 문제점을 내포하고 있으며, 균열선단의 미세균열 영역 형성에 의한 비선형성을 고려한 비선형파괴역학이 보다 콘크리트에 적합한 해석기법이라는 의견이 일반적이다.

비선형파괴역학 기법으로는 Hillerborg 등<sup>2,3</sup>에 의해 제안된 가상균열모델(Fictitious Crack Model : FCM)과 Bazant 등<sup>3</sup>이 제안한 균열밴드모델(Crack Band Model : CBM) 등이 있다. FCM은 파괴영역 형성에 의한 변형의 증대에 따른 응력의 감소 즉 연화특성을 역학적 모델로 표현한 것이다. 기본적인 개념은 Barenblatt의 결합력 모델과 같고 파괴영역에 가상균열을 도입하고 가상균열면 사이의 거리, 즉 균열폭의 함수로 닫힘응력  $\sigma(w)$ 을 분포시키는 것이다. 따라서  $\sigma-w$  관계는 콘크리트의 인장파괴 거동의 연화구성법칙이라 할 수 있다.

FCM에서는 미세균열이 인장강도  $f_t$ 에 도달한 후 생성된다고 가정하고 그 후는 변형이 비선형영역에 국소화되고 그 외 부분은 탄성적으로 회복된다고 하는 실험적 사실에 기초를 두고 있다. 따라서 비선형 영역의  $\sigma-w$  곡선을 구성법칙으로 생각하여 곡선 아래의 면적은 이 영역을 형성하기 위한 에너지 소비량을 나타내는 파괴에너지  $G_F$ 이며 인장강도  $f_t$ 와 함께 재료특성치로 간주한다.

그림 2는 균열면에 따라 배열된 절점을 표현한 것이다. 여기서 노치선단의 절점  $k$ 가 콘크리트의 인장강도  $f_t$ 에 도달한 후의 인장연화 법칙은 식 (1)로 표현된다.

$$\sigma_i = \sigma(w_i) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_i = P_i/A_i$

$A_i$  : 절점  $i$ 의 지배면적       $w_i$  : 절점  $i$ 의 균열폭

$P_i$  : 절점  $i$ 에 작용하는 닫힘력

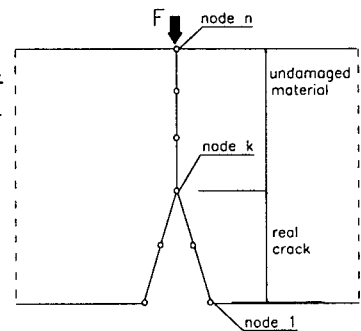


그림 2 균열경로상의 유한요소 절점 분포

### 2.3 인장연화법칙의 구성

식 (1)의 인장연화법칙은 그림 3과 같이 모델링 할 수 있다<sup>1,2</sup>. 본 연구에서는 강도수준이 다른 콘크

리트보의  $\sigma-w$  곡선을 모델링하기 위해 Petersson<sup>1)</sup>이 제안한 그림 3(b)와 같은 콘크리트의 연화곡선을 2직선으로 근사하는 방법을 사용하였다. 2직선 모델의 경우 절점의 응력은 인장강도  $f_t$ 에 도달한 후 연화법칙에 의거한 균열폭  $w$ 에 따라 아래의 식 (2)와 같이 된다<sup>4)</sup>.

$$\sigma = f_t - \frac{f_t - \sigma_1}{w_1} w \quad \text{for } 0 \leq w \leq w_1$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{w_c - w_1} (w_c - w) \quad \text{for } w_1 \leq w \leq w_c$$

$$\sigma = 0 \quad \text{for } w_c \leq w \quad (2)$$

여기서,  $w_c$ 는 한계균열열림변위이다.

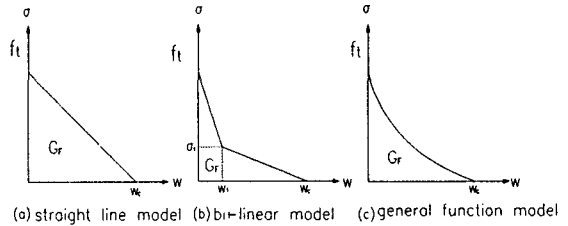


그림 3 연화모델

### 3. 파괴에너지

파괴에너지  $G_F$ 는 콘크리트 구조물의 취성파괴에 대한 합리적인 예측을 위해 필요한 재료특성치이며, 균열의 한 단위 면적을 생성시키는 데 필요한 에너지 양으로 정의된다. 파괴에너지의 측정원리는 정의된 거리로 균열을 전파하게 하고 균열전파로 인한 에너지 소모량을 측정하는 것이다. 본 연구에서는 수치해석을 수행하기 위한 파괴에너지를 결정하기 위해 3점휨시험에 의하여  $P-\delta$  곡선을 구하고 이 곡선 아래의 면적으로부터 식 (3)에 의해 파괴에너지를 계산하는 방법을 사용하였다<sup>1,2)</sup>. 이 면적은 콘크리트에서 균열이 전파함으로써 소비되는 에너지를 나타내며, 작용된 하중 이외에 콘크리트보의 자중에 의한 영향을 고려하여 콘크리트의 파괴에너지를 계산한다(그림 4 참조).

$$G_F = \frac{A_0 + mg \cdot \delta_0}{t(b-a)}, \quad P_0 = \frac{mg}{2} \quad (3)$$

여기서,  $A_1 + A_2 = mg \cdot \delta_0$ : 보의 자중에 의한 면적  
 $mg$ : 보의 자중,  $A_0$ : 하중 - 변위 곡선 아래의 면적  
 $t$ : 보의 두께,  $b$ : 보의 길이  
 $a$ : 초기 균열 깊이

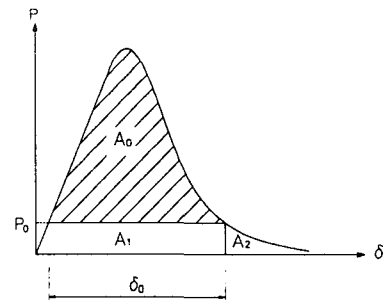


그림 4 노치가 있는 3점휨시험보의  $P-\delta$  곡선

### 4. 실험

#### 4.1 사용재료 및 콘크리트 배합

본 실험에서 사용한 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트이며 굵은골재는 최대치수 20mm인 부순돌을 사용하였다. 보통강도(NS) 및 고강도(HS) 콘크리트의 설계기준강도는 각각  $250 \text{ kgf/cm}^2$ 와  $500 \text{ kgf/cm}^2$ 로 정하였고, 이를 위한 콘크리트 배합표는 표 1 과 같다.

표 1 콘크리트 배합표

시 편	굵은골재의 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	s/a (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	AE 감수제(g)
보통강도 콘크리트(NS)	20	8±1.0	6±0.5	55	44	165	300	813	1047	600
고 강 도 콘크리트(HS)	20	8±1.0	6±0.5	33	40	180	550	590	900	2760

### 4.2 시험편 제작 및 실험방법

시험편은 그림 5와 같이 초기 노치가 있는 단순보를 보통 및 고강도 콘크리트로 제작하였다. 이 때 노치는 두께가 2mm인 알루미늄판을 이용하여 시험편 제작시 몰드의 중앙에 끼웠다가 탈형할 때 제거하여 제작하였다. 또한 균열개구변위(Crack Mouth Opening Displacement : CMOD)측정을 위한 clip gage 장착을 위해 노치 선단에 knife edge를 부착하였다. 콘크리트 혼합은 강제식 믹서를 사용하여 시멘트와 골재를 2분간 건비빔을 실시하고 물을 투입한 후 8분 정도 충분한 비빔을 실시하였다. 모든 실험체는 타설 24시간 후에 몰드에서 탈형하여 KS F 2329에 따라 수중양생하였다.

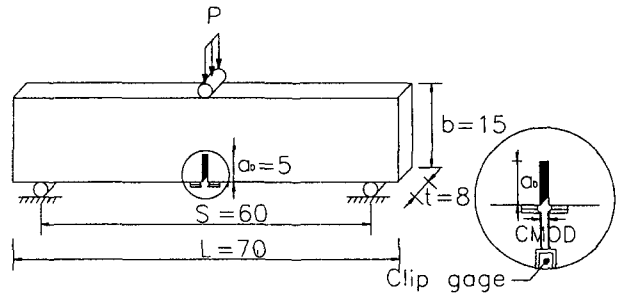


그림 5 시험편의 형상 및 크기

압축강도 측정은  $\phi 10 \times 20$  cm의 실린더형 몰드를 사용하여 재령 28일에 KS F 2405에 따라 측정하였으며, 탄성계수 E는 KS F 2438의 방법으로 구하였다

P- $\delta$  및 P-CMOD를 구하기 위한 3점휨시험은 UTM(Instron사, 최대하중 : 10tf)를 사용하였다. 이 때, UTM의 변위계속 속도는 0.05mm/min으로 하였으며, CMOD측정은 Tokyo Sokki사의 UB-5A clip gage를 사용하였다. 또, 콘크리트의 파괴에너지  $G_F$ 는 식 (3)을 이용하여 구하였고, 인장강도는 KS F 2407에 따라 구한 휨인장강도로 정하였다.

### 4.3 실험결과

압축강도시험으로 구한 콘크리트의 압축 및 인장강도, 탄성계수, 파괴에너지는 표 2 와 같다.

표 2 콘크리트의 압축 및 인장강도, 탄성계수, 파괴에너지

시 편	압축강도 $f_c$ ( kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 $f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 E ( kgf/cm <sup>2</sup> )	파괴에너지 $G_F$ (kgf/cm)
NS	250	36.72	$2.24 \times 10^5$	0.78
HS	494	49.89	$3.46 \times 10^5$	1.42

3점휨시험으로 구한 P- $\delta$  곡선과 P-CMOD 곡선은 각각 그림 6 및 그림 7과 같다.

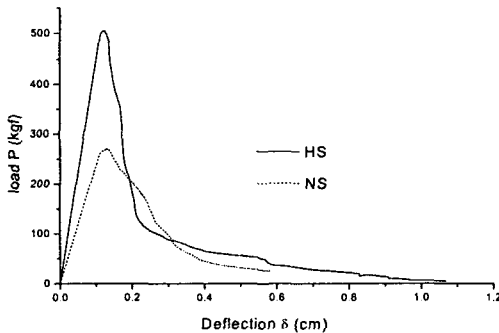


그림 6 P- $\delta$  곡선

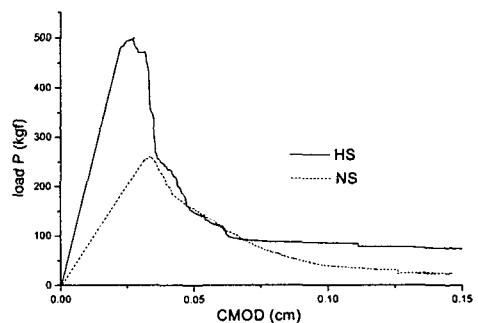


그림 7 P - CMOD 곡선

## 5. 수치해석에 및 결과

### 5.1 해석방법

본 연구에서는 FCM을 이용한 유한요소프로그램을 작성하여 콘크리트의 연화특성을 조사하였다. 해석에 사용한 시험편의 기하학적 형상은 그림 5와 같으며, 재료특성치는 표 2와 같다. 또, 프와송비는 0.2를 사용하였다. 유한요소해석을 위한 프로그램 흐름도는 그림 8과 같다. 시험체의 대칭성을 고려하여, 본 연구에서는 시험체의 절반에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

본 연구에서는 다양한 형태의 인장연화곡선을 이용하여 강도수준에 따른 인장연화특성을 검토하기 위하여 Petersson이 제안한 2직선 인장연화곡선 모델(1/3점, 1/4점, 1/5점)<sup>1,2,3)</sup>을 사용하였다. 또한 반복적인 수치해석으로 구한 수정모델(수정1/3점, 수정 1/5점)을 사용하였다. 인장연화곡선을 이루는 매개변수는 표 3와 같다.

표 3 연화곡선모델의 매개변수

Model	$\sigma_1(\times f_t)$	$w_1(\times G_F / f_t)$	$w_c(\times G_F / f_t)$
1/3	1/3 = 0.33	0.80	3.60
수정 1/3	1/3 = 0.33	0.87	3.40
1/4	1/4 = 0.25	0.75	5.00
1/5	1/5 = 0.20	0.70	6.50
수정 1/5	1/5 = 0.20	0.74	6.30

### 5.2 해석결과

그림 9 및 그림 10은 FCM에 사용한 보통 및 고강도의 인장 연화모델과 3점휨시험으로 구한  $\sigma-w$  곡선을 비교한 것이다.

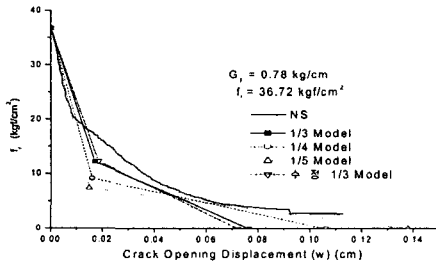


그림 9 보통강도 콘크리트의 인장연화모델

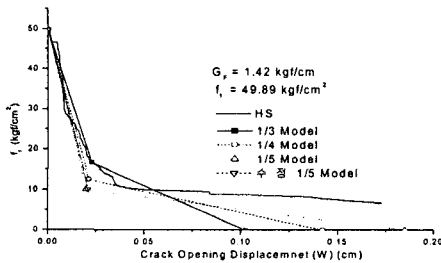


그림 10 보통강도 콘크리트의 인장연화모델

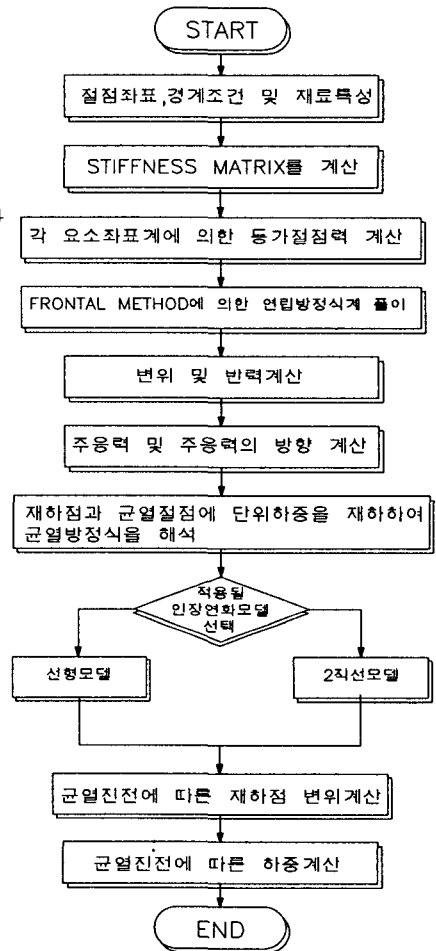
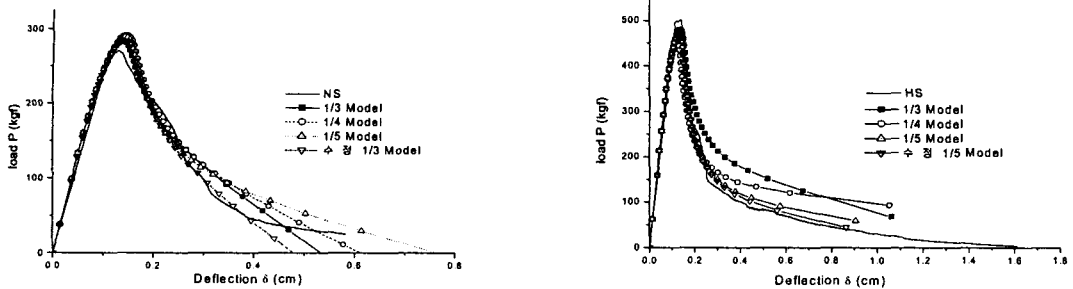


그림 8 프로그램 흐름도

그림 11은 가상균열모델을 사용하여 예측된  $P-\delta$  곡선과 3점휨시험으로 측정된  $P-\delta$  곡선을 비교한 것이다.



(a) 보통강도 콘크리트의  $P-\delta$  곡선

(b) 고강도 콘크리트의  $P-\delta$  곡선

그림 11 FCM 및 3점휨시험보에 의한  $P-\delta$  곡선의 비교

그림 9~그림 11에서 인장연화모델 및  $P-\delta$  곡선을 실험결과와 비교해 보면, 보통강도에 대해서는 수정 1/3점 모델이 고강도에 대해서는 수정 1/5점 모델이 실험결과와 비슷함을 알 수 있다. 이는 강도가 높아짐에 따라 최대하중 이후에는 급격한 하중 감소를 일으키는 취성거동 때문이라고 판단된다. 따라서, 2직선 인장연화 모델을 사용할 때 강도수준에 따라 적절한 인장연화곡선을 적용해야 한다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

- 1) 인장연화모델을 구성하는 파라메타인 파괴에너지, 인장강도,  $\sigma-w$  곡선을 실험으로 구한 후 이를 FCM에 적용하여  $P-\delta$  곡선을 결정할 수 있다.
- 2) 보통 및 고강도 콘크리트의 인장연화곡선을 잘 나타내는 인장연화모델은 각각 수정 1/3점 및 수정 1/5점 모델로 나타났다. 따라서, 보다 정확한 인장연화곡선을 추정하기 위해서는 강도 수준에 따른 합리적인 인장연화 파라메타를 설정하여야 한다.
- 3) 다양한 인장연화모델 및 콘크리트 강도수준에 따른 인장연화특성에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. Petersson, P.E., "Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials", Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, pp.1~174, 1984.
2. Shah, S.P, Swartz, S.E, Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete", John Wiley & Sons INC., pp.110~161, 1963.
3. Hillerborg, A., "Numerical Methods to Simulate Softening and Fracture of Concrete", Fracture Mechanics of Concrete, Martinus Nijhoff Publishers, pp.141~170, 1985.
4. Roelfstra, P.E, Wittmann, F.H., "Numerical Method to Link Strain Softening with Failure of Concrete", Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, pp.163~175, 1986.
5. 진치섭, 엄장섭, 김희성, 배문교, "콘크리트의 연화거동에 관한 수치해석", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집 4호 2권, pp.173~178, 1982.
6. 진치섭, "파괴역학의 기초", 부산대학교 대학원 토목공학과 강의노트, pp.1~390, 1999.