

# 콘크리트 인장강성이 철근콘크리트 보의 거동에 미치는 영향

## Effect of Tension Stiffening on the Behavior of Reinforced Concrete Beam

이 봉 학\* · 김 동 호\* · 홍 창 우\*\* · 이 정 호\*\*  
Lee, Bong Hak · Kim, Dong Ho · Hong, Chang Woo · Lee, Jung Ho

### Abstract

Tensile behavior in concrete has been neglected until recently. However, the effect of tensile stresses in concrete must be considered where the member primarily carries tensile forces or when ultimate strength is affected by the cracking history. In this paper, a series of experiments were performed with a reinforced rectangular beams of 15 specimens in order to investigate the effect of tension stiffening into the nonlinear analysis and cracking behavior. The experimental results were analyzed in terms of load-deflection curves and strain fracture energy with respect to the main experimental variables such as types of specimen, strength of concrete and steel ratio. The results from experiments and finite element analysis were compared in terms of load-deflection relationship and cracking pattern. The results are as follows:

The tension stiffening effects of reinforced concrete beams were observed up to yielding of members after cracking, showing strain energy difference of 35% at the beam of 0.57% steel ratio compared with that of beam ignoring the tension stiffening effect. The tension stiffening of concrete strength  $400\text{kgf/cm}^2$  and  $600\text{kgf/cm}^2$  increased by 8% and 13%, respectively, compared with that of concrete strength  $200\text{kgf/cm}^2$ . The tension stiffening effects were greater at a ductile member rather than a brittle one. The load-deflection results of finite element analysis showed very similar results from experiment. The crack growth and pattern might be predicted from the nonlinear finite element analysis considering concrete tension stiffening.

### I. 서론

기존의 철근콘크리트 부재의 설계와 해석방법은 콘크리트의 인장강도를 휨계산에서 무시하므로써 인장응력의 전부를 인장철근이 부담하게 하는 방

법이 주로 사용되어 왔다(Guo 1987). 그러나, 철근콘크리트 부재의 실제 거동을 고찰해 보면 인장응력을 부담하는 요소는 철근과 콘크리트의 부착응력, 균열면 사이의 인장강성, 균열면내의 골재의 맞물림 효과, 철근의 다우웰 작용 등과 같은 재료

\* 강원대학교 공과대학

\*\* 강원대학교 대학원

키워드 : 콘크리트 인장거동, 변형에너지, 인장강성

의 비선형성이 복합적으로 작용함으로써 인장응력에 저항하게 된다(Bazant 1987, Chan 1992). 이러한 재료의 비선형성과 하중이력에 대한 변형 및 거동 특성을 고려한 부재의 해석은 그 결과에 미치는 영향이 상당히 크며, 휨이나 인장응력을 주로 부담하는 교량이나, 정확한 거동예측을 필요로 하는 구조물에서는 인장강성을 고려한 해석의 중요성이 더욱 증대된다(Massicotte 1990, Collins 1991). 따라서, 본 연구에서는 철근콘크리트 보의 실험을 수행하여 철근콘크리트 균열형상, 콘크리트의 강도, 철근비가 콘크리트의 인장강성에 미치는 영향과 인장강성이 부재의 비선형해석과 균열 파괴형상에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 또한, 실험결과와 검증의 위해 콘크리트의 인장강성을 고려한 비선형 유한요소해석을 수행하여 실험 결과에 의한 하중-처짐 및 균열특성과 비교하였다.

## II. 실험

### 1. 시험체 제작

시험체는 콘크리트의 강도(200, 400, 600kgf/cm<sup>2</sup>), 철근비( $\rho=0.57, 1.52, 2.57\%$ ), 시험체의 형상(Type-A, B, C)을 주요 실험변수로 하였으며 인장강성의 영향이 크게 나타날 것으로 판단되는 철근비 0.57%의 시험체를 Type-A, B, C로 제작하고 철근비가 1.52, 2.57%의 경우는 Type-A의 시험체만 제작하여 총 15개의 부재를 제작하였다. 실험변수 및 부재제작 상세는 Table 1에 나타났다. 시험체의 형상 및 제원은 Fig. 1에 나타냈으며, Fig. 2에는 시험체의 철근배근 측면도와 단면도를 나타냈다. 여기서, Type-A는 정규시험체, Type-B는 인장영역에 균열을 발생시킨 시험체, Type-C는 철근만이 인장응력을 부담하도록 인장철근을 노출시켜 제작한 시험체이다.

Table 1. Experimental variables and details of RC beam specimens

Specimen	Concrete strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Rebar(SD30)			Balanced steel ratio ( $\rho_b$ )	$\rho/\rho_b$	Stirrup
		Dia.	Each	Steel ratio( $\rho$ )			
L-0.5-A	200	D19	2	0.57	3.227	0.1766	D10@100
L-0.5-B			2	0.57		0.1766	D10@100
L-0.5-C			2	0.57		0.1766	D10@100
L-1.5-A		D25	3	1.52		0.4710	D13@100
L-2.5-A		D29	4	2.57		0.7964	D13@100
M-0.5-A	400	D19	2	0.57	5.827	0.0978	D10@100
M-0.5-B			2	0.57		0.0978	D10@100
M-0.5-C			2	0.57		0.0978	D10@100
M-1.5-A		D25	3	1.52		0.2609	D13@ 70
M-2.5-A		D29	4	2.57		0.4411	D13@ 70
H-0.5-A	600	D19	2	0.57	7.160	0.0796	D10@100
H-0.5-B			2	0.57		0.0796	D10@100
H-0.5-C			2	0.57		0.0796	D10@100
II-1.5-A		D25	3	1.52		0.2123	D13@ 65
H-2.5-A		D29	4	2.57		0.3589	D13@ 59

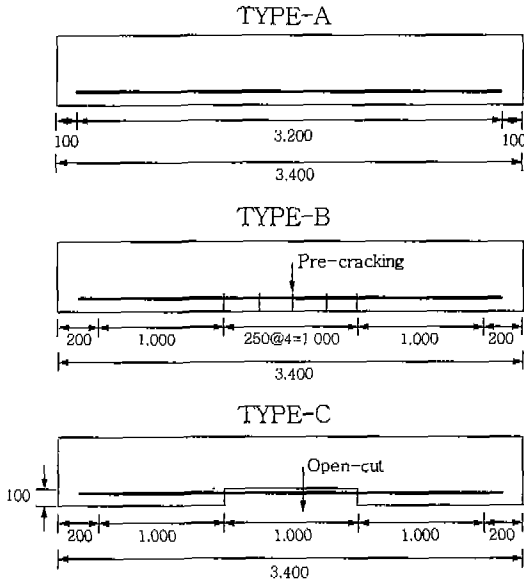


Fig. 1. Geometry and size of reinforced concrete beams(unit : mm)

## 2. 콘크리트 배합 및 실험방법

시험체 타설을 위한 콘크리트 배합과 측정된 28 일 강도특성은 Table 2와 같다. 콘크리트의 배합 강도를 200, 400, 600kgf/cm<sup>2</sup>로 설정하여 배합했으며, 압축강도의 측정치는 배합설계강도와 유사한 215, 371, 605kgf/cm<sup>2</sup>를 얻었다. 휨부재 실험은 200톤 용량의 만능시험기로 양단이 단순 지지된 상태에서 2점 하중을 재하하였으며 재하형태는 Fig. 2에 도시하였다. 하중은 일정한 속도로 증가하도록 제어하였으며, 시험체의 중앙부분과 하중 가력부에 변위계(LVDT)를 설치하여 처짐을 측정하였다. 각 시험장치로부터 얻어진 데이터는 데

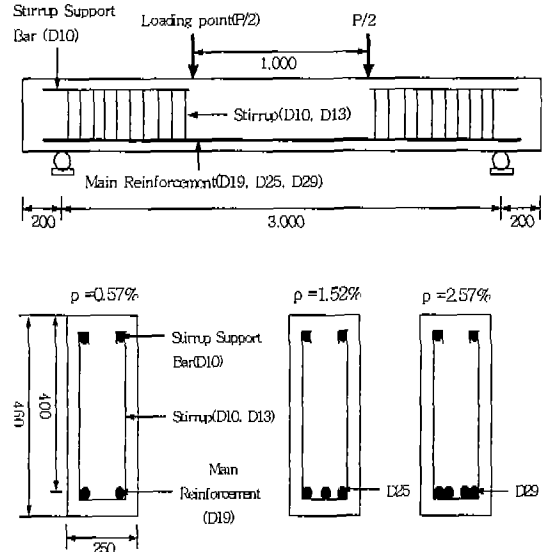


Fig. 2. Loading and details of reinforcement of beams (unit : mm)

이터 로거를 이용하여 기록하였다.

## III. 실험결과 및 고찰

### 1. 시험체의 형상에 따른 고찰

철근비 0.57%인 시험체의 콘크리트 강도 및 형상에 따른 부재의 하중-처짐의 특성을 Fig. 3~5에 나타내었다. Fig. 3~5에서 Type-A와 B의 시험체는 처짐이 약 1.0mm 정도를 전후하여 균열이 발생하였으며, 균열발생 전 선형탄성거동과 균열발생 후 하중의 증가에 따라 처짐이 크게 증가하는 비선형거동을 보였다. 이 그림에서 나타난 C-Type의 시험체는 항복시까지 콘크리트의 인장강성이

Table 2. Mix proportion and strength properties of concrete

Design strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )						Comp. strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
			W	C	S.F.	S	G	S.P.			
200	56	45	180	320	-	820	1,002	0.960	215	202,457	0.17
400	35	40	175	500	-	673	1,013	9.000	371	294,845	0.19
600	25	35	170	612	68	561	1,041	14.28	605	340,304	0.21

콘크리트 인장강성이 철근콘크리트 보의 거동에 미치는 영향

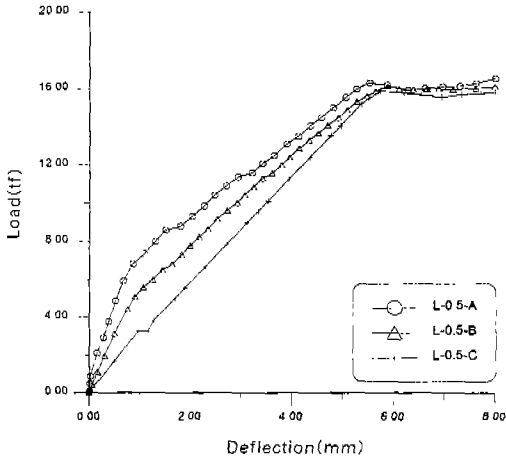


Fig. 3. Influence of strength and specimen-type on tension stiffening(200kgf/cm<sup>2</sup>)

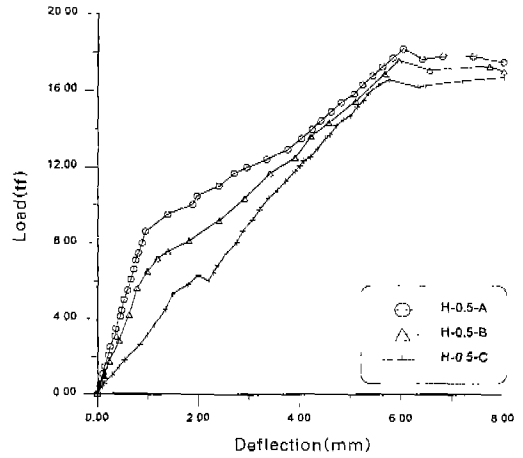


Fig. 5. Influence of strength and specimen-type on tension stiffening(600kgf/cm<sup>2</sup>)

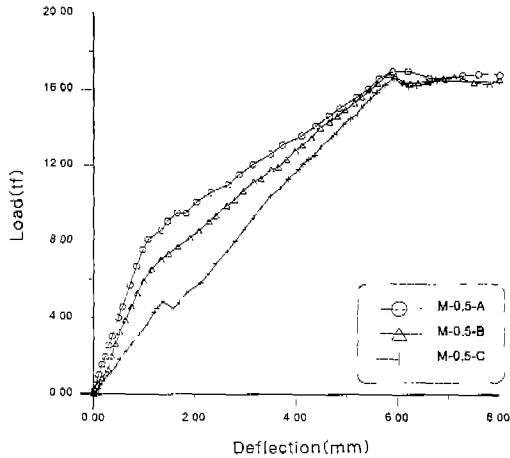


Fig. 4. Influence of strength and specimen-type on tension stiffening(400kgf/cm<sup>2</sup>)

존재하지 않는 거동특성을 보여 철근만이 인장응력을 부담하는 거동을 보였다. 각 시험체의 초기 균열하중과 부재가 항복되는 시점까지를 기준으로 하여 하중-처짐의 관계로부터 계산된 변형에너지의 값을 Table 3에 나타내었다. 콘크리트의 강도에 따라 변형에너지의 평균값은 C-Type의 시험체를 기준 했을때 B-Type에서는 19%, A-Type에서는 35% 정도 증가한 값을 나타냈다. 이것은 인장축의 콘크리트가 철근과 함께 응력을 부담할 때

Table 3. Strain energy and loading points of beams

Specimen	Per (tf)	Py (tf)	Pult (tf)	Strain energy (tf · mm)	Ductility index
L-0.5-A	7,366	16,533	22,400	63,747	16,300
L-0.5-B	5,599	16,133	22,766	57,348	-
L-0.5-C	3,300	15,900	18,600	47,322	-
L-1.5-A	11,400	41,866	45,533	213,693	4,393
L-2.5-A	16,366	71,066	71,066	466,743	1,000
M-0.5-A	8,099	17,200	23,800	68,575	15,100
M-0.5-B	6,533	16,800	24,400	59,631	-
M-0.5-C	4,866	16,600	20,366	51,031	-
M-1.5-A	11,600	44,166	48,966	214,067	3,766
M-2.5-A	16,566	74,499	77,899	518,004	1,913
H-0.5-A	8,599	18,200	23,933	71,967	12,660
H-0.5-B	6,600	17,600	23,066	62,103	-
H-0.5-C	6,299	16,800	19,733	52,785	-
H-1.5-A	12,266	46,599	48,900	220,933	3,367
H-2.5-A	17,033	80,366	83,266	520,479	1,298

에 비하여 철근만이 인장응력을 받게될 때는 부재의 항복시까지 대략 35%의 변형에너지 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 콘크리트의 인장

강성은 부재의 비선형거동과 내하력에 큰 영향을 미치게 되는 것으로 사료된다.

### 2. 콘크리트 강도에 따른 고찰

콘크리트 강도가 증가함에 따라 시험체 형상에 관계없이 초기균열하중이 다소 높게 나타났다. L-2.5-A 시험체의 경우 파괴형상은 최대철근비인 0.75 $\rho_b$ 보다 다소 높은 철근비로서 철근이 항복하기 전 콘크리트의 상부에서 압축파괴 양상을 보였다. 각 시험체의 하중-처짐의 관계로부터 계산된 변형에너지의 값으로 인장강성효과를 고찰했을 때 200kgf/cm<sup>2</sup>강도 콘크리트를 기준으로 하면 400 kgf/cm<sup>2</sup>와 600kgf/cm<sup>2</sup>강도에서 Type-A는 각각 8% 및 13%, Type-B는 4%와 8%, Type-C는 8%와 12% 정도 증가함을 나타냈다. 따라서 인장강성은 콘크리트의 강도에 크게 의존함을 알 수 있으며, 콘크리트 강도가 커질수록 초기 균열하중이 증가하기 때문에 콘크리트가 부담하는 인장강성의 영향은 큰 것으로 나타났으나 균열발생 이후에는 변형에너지의 감소율은 증가하는 것으로 나타났다.

### 3. 철근비에 따른 고찰

철근비의 변화에 대한 하중-처짐의 관계를 Fig. 6

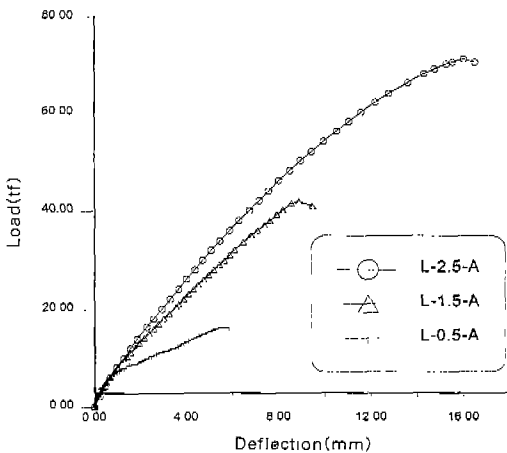


Fig. 6. Influence of steel-ratio on tension stiffening (200kgf/cm<sup>2</sup>)

~8에 나타내었다. Fig. 6에서 L-0.5-A 시험체에서는 균열 발생이후 부재의 항복시까지 콘크리트의 인장강성의 영향으로 인한 비선형 거동이 철근비가 1.52%와 2.57%인 시험체에 비하여 명확하게 나타났으며, 이러한 거동은 Fig. 7, 8에서와 같이 콘크리트의 강도 400kgf/cm<sup>2</sup> 및 600kgf/cm<sup>2</sup>에서도 비슷한 경향을 보였다. 철근콘크리트 보의 연성능력은 최대하중시의 처짐을 항복하중시의 처짐으로 나눈 연성지수로 표현되는데 철근비가 0.57%

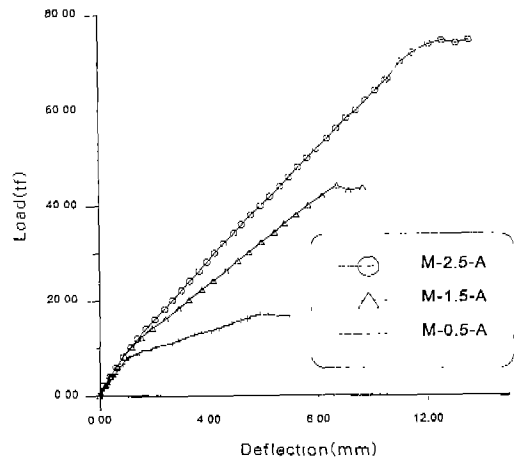


Fig. 7. Influence of steel-ratio on tension stiffening (400kgf/cm<sup>2</sup>)

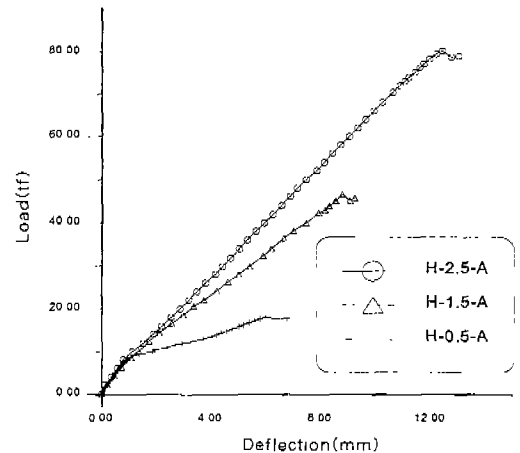


Fig. 8. Influence of steel-ratio on tension stiffening (600kgf/cm<sup>2</sup>)

에서의 연성지수는 평균 14.7 정도로 나타났다. 그리고 철근비가 1.52%인 시험체에서는 평균 3.842 정도의 연성지수를 나타내었다. 또한 철근비가 2.57%인 부재는 연성지수가 1.0~1.9으로 연성능력이 크게 저하되었다. 이와 같은 실험결과로부터 철근콘크리트 부재에서 철근비가 낮을수록 콘크리트의 연성 영향은 증대되어 정확한 해석을 위해서는 콘크리트의 인장강성을 고려해야 한다.

#### IV. 구조 해석

##### 1. 해석모델

철근콘크리트 보는 응력과 변위의 관계가 점진적으로 달라지게 되는 재료의 비선형성을 고려하여 평면응력으로 이상화하여 유한요소 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였다. 철근콘크리트 보의 모델링에 사용된 요소는 LUSAS에서 제공하는 평면 연속체 요소인 철근의 3절점 BAR3

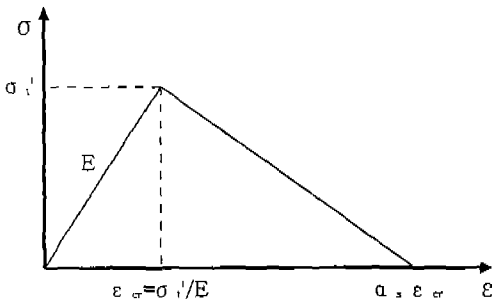


Fig. 9. Tension-stiffening model of concrete.

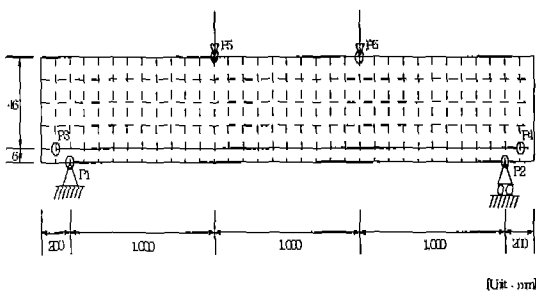


Fig. 10. Modeling of reinforced concrete beam

요소와 콘크리트의 8절점 QPM8 요소를 사용하였다. Fig. 10은 철근콘크리트 보의 모델링을 나타낸 것이다. 또한, 모델링에 적용한 재료적 특성으로 콘크리트의 압축강도, 인장강도, 탄성계수 및 포아슨비는 실험으로부터 얻어진 결과를 사용하였다. 콘크리트의 인장강성을 고려하기 위하여 Fig. 9에 나타난 바와 같이 콘크리트에 균열이 발생한 이후의 응력이 선형적으로 감소하는 모델을 적용하였으며, 여기서 인장응력이 손실되는 시점까지의 인장강성계수  $a_s$ 는 200, 400, 600kgf/cm<sup>2</sup>에 대하여 각각 35, 45, 55를 사용하였다. 철근의 탄성계수와 포아슨비는 각각 2,040,000kgf/cm<sup>2</sup>와 0.3을 적용하고 항복응력은 3,000kgf/cm<sup>2</sup>로 가정하였으며, 항복조건은 Von Mises의 이론을 사용하였다. 이러한 모델링을 통하여 Modified Newton-Raphson Method의 반복해석기법을 이용한 수치계산을 수행하여 비선형해석을 수행하였다.

##### 2. 실험결과와 해석결과의 비교

콘크리트 강도에 따른 실험결과와 해석결과의 비교는 Fig. 11~13과 같다. L-0.5-A시험체의 해석결과는 부재가 탄성영역에서는 비교적 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 처짐이 약

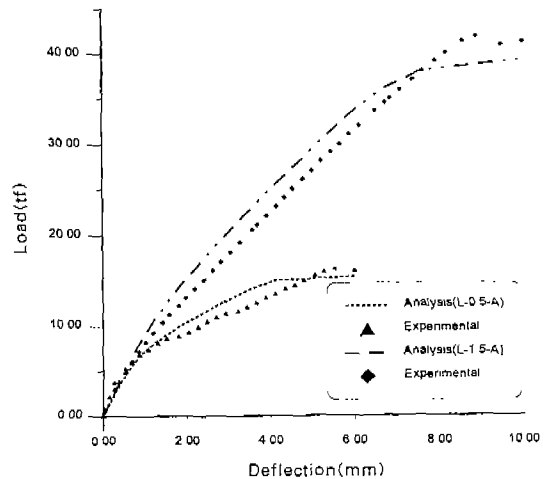


Fig. 11. Comparison of test with analysis results (200kgf/cm<sup>2</sup>)

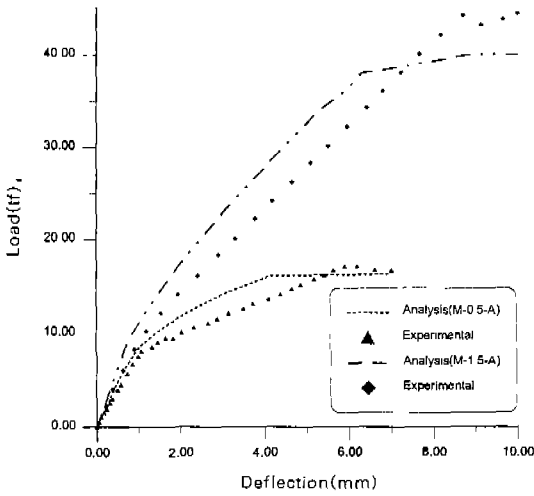


Fig. 12. Comparison of test with analysis results (400kgf/cm<sup>2</sup>)

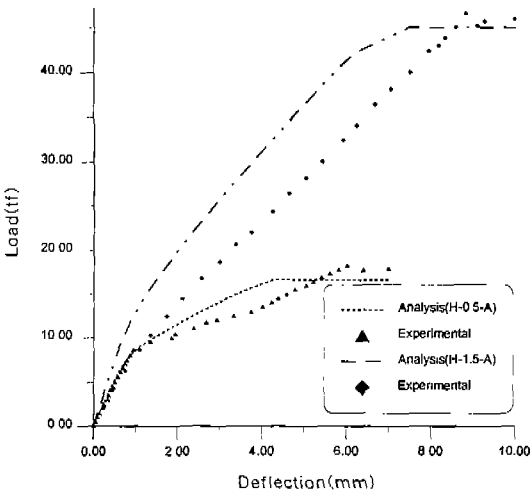


Fig. 13. Comparison of test with analysis results (600kgf/cm<sup>2</sup>)

0.9mm 정도 발생한 이후부터 부재의 항복시까지는 다소 차이를 보였으며, L-1.5-A시험체는 해석결과와 실험결과가 비교적 일치하는 경향을 나타내고 있다. M-0.5-A와 H-0.5-A는 콘크리트의 강도가 증가할수록 균열발생 이후의 거동은 해석결과와 강성이 다소 크게 나타났으며, M-1.5-A와 H-1.5-A는 비교적 경향이 잘 일치하고 있다. 이와 같은 차이는 해석에 사용된 인장강성 모델의 영향

에 기인된 것으로 판단된다. 사용된 인장강성 모델은 선형감소 모델로 보다 정확한 해석을 위해서는 인장강성모델에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

### 3. 균열형상의 비교

실험결과로부터 나타난 철근콘크리트 보의 균열형상은 철근비가 0.5%인 시험체에서는 콘크리트 강도 영향에 관계없이 휨균열이 주로 발생하였으며, 항복이후 최대하중까지의 범위에서는 인장철근 방향에 수평한 활발균열이 발생되었고 휨균열 외에 전단균열은 발생되지 않았다. M-1.5-A시험체의 경우 휨균열과 함께 전단구간에 휨전단균열이 발생하였고, H-0.5-A에서는 휨구간에서 보의 축에 수직으로 발생하는 휨균열과 전단구간의 사인장균열도 나타났다. L-2.5-A의 시험체에서 휨균열은 중립축까지 진전되다가 전단응력에 의한 사인장균열의 지배로 콘크리트 압축상단이 파괴되는 양상을 나타내었다. M-2.5-A도 균열의 양상은 유사하게 나타났으며 H-2.5-A의 경우 부재의 중앙 압축상단 콘크리트가 파괴되었다. Fig. 14는 유한요소해석 결과로부터 콘크리트 강도와 철근비 변화에 따른 균열형상을 실험결과와 비교하여 나타내었다. 해석결과와 실험결과를 비교하면 전반적인 균열의 범위와 양상이 실험결과와 유사하게 나타났으며, 콘크리트의 역학적 특성과 철근콘크리트 보의 부재에 작용되는 하중 및 실제의 조건이 해석에 정밀히 고려된다면 균열발생의 양상과 균열 단면의 예측이 가능함을 알 수 있었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 인장강성이 철근콘크리트 보의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위해 단철근 직사각형 보를 제작하여 실험을 수행하였고 콘크리트의 인장강성을 고려한 유한요소 해석을 실시하였다. 이와 같은 실험과 해석을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 철근콘크리트 보에서 콘크리트의 인장강성은

콘크리트 인장강성이 철근콘크리트 보의 거동에 미치는 영향

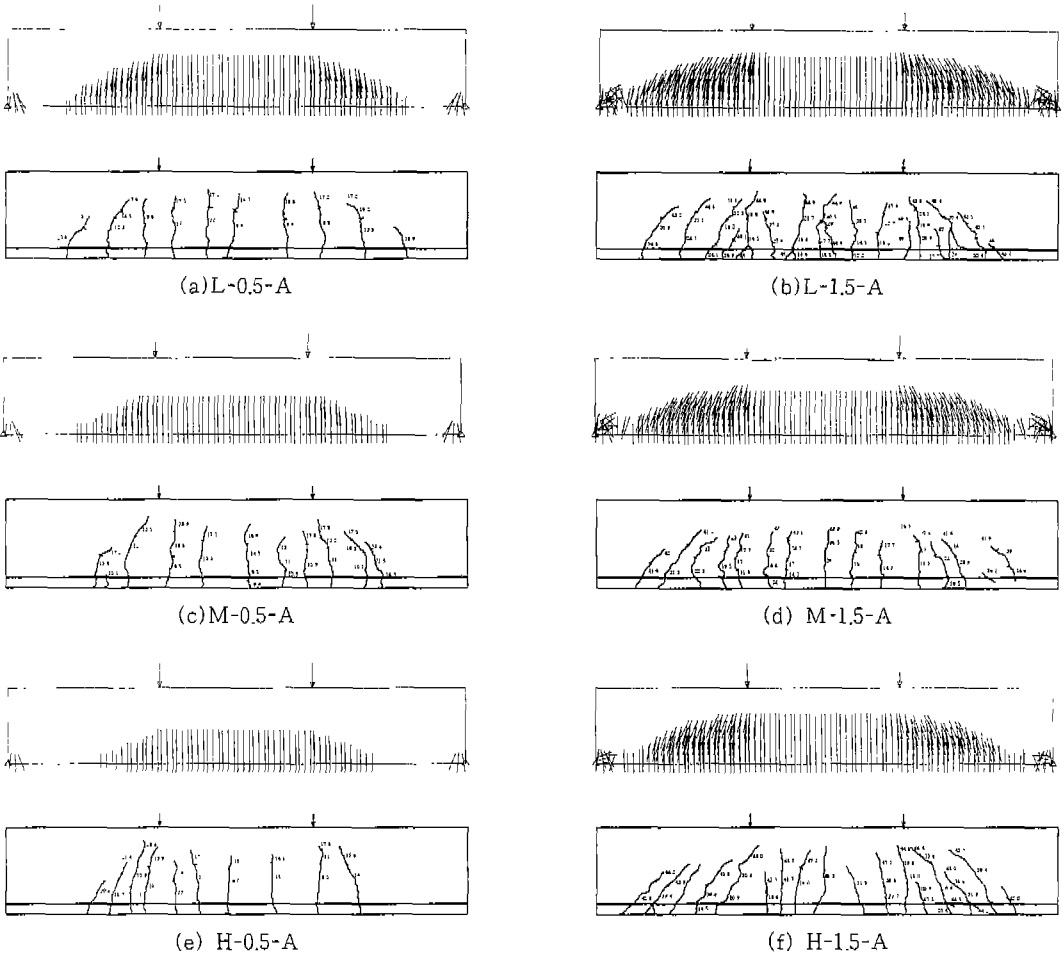


Fig. 14. Comparison of crack pattern of test with analysis results

주) 상 : FEM해석결과  
하 : 실험결과

균열이 발생된후 부재의 항복시까지 영향을 미치고 있으며 콘크리트의 인장강성을 고려하였을 때와 무시하였을 때 철근비가 0.57%인 시험체에서 약 35%의 변형에너지 차이를 나타냈다.

2. 강도  $200\text{kgf/cm}^2$ 의 콘크리트를 기준으로 변형에너지를 상대 비교할 때  $400\text{kgf/cm}^2$  및  $600\text{kgf/cm}^2$  강도 시험체에서 각각 8%와 13% 증가를 나타냈다. 따라서, 철근콘크리트 보의 거동 해석시 콘크리트의 인장강성은 반드시 고려되어야

할 것으로 판단된다.

3. 철근콘크리트 보에서 철근비가 낮고 부재의 연성능력이 클수록 콘크리트의 인장강성이 부재의 비선형 거동에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

4. 유한요소 해석결과에 의한 하중-처짐의 특성은 실험결과와 근사적으로 일치하는 것으로 나타났다. 균열해석 결과는 하중의 작용에 따라 발생하는 균열의 진전과 예측이 가능하였다.



본 논문은 한국과학기술재단 지정 강원대학교 부설  
"석재 복합 신소재 제품연구센터" 지원에 의하여  
이루어진 것입니다.

### 참 고 문 헌

1. Bazant, Z. P., Pan, J., and Gilles., 1987, Softening in Reinforced Concrete Beams and Frames, Journal of Structural Engineering, Vol. 113, No. 12, pp. 2333~2347.
2. Chan, H. C., Cheung, Y. K., and Huang, Y. P., 1992, Crack Analysis of Reinforced Concrete Tension Members, Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 8, pp. 2118~2132.
3. Collins, M. P. and Mitchell, D., 1991, Response of Members Subjected to Axial Load (Ch. 4)", Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, pp. 124~167.
4. Guo, Z. H., and Ahang, Z. Q., 1987, Investigation of Complete Stress-Deformation Curves for Concrete in Tension, ACI Material J, pp. 279~285.
5. Massicotte, B., Elwi, A. E., and MacGregor, J. G., 1990, Tension Stiffening Model for Planar Reinforced Concrete Members, Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No. 11, pp. 3039~3058.
6. "London University Stress Analysis System(LUSAS-Version 12)", 1997, FEA Lt, England.