

# 유리섬유쉬트로 보강된 콘크리트 기둥의 유한요소해석

## Finite Element Analysis of Concrete Columns Strengthened with Glass Fiber Sheets

정택원\*                      송하원\*\*                      변근주\*\*  
Jung, Taek-Won              Song, Ha-Won              Byun, Keun-Joo

### ABSTRACT

For finite analysis of concrete columns strengthened with glass fiber sheets, an effective concrete model which considers the confining effects by lateral reinforcement and glass fiber sheets is necessary. In this paper, the so-called elasto-plasticity and continuum fracture model (EPF model) is modified to consider high confining effects of strengthened reinforced concrete columns by introducing a simple correction factor ( $\alpha$ ) which relates maximum lateral confining stress of the column to the evolution of deviatoric plasticity. Then, a finite element analysis is carried out for the strengthened reinforced concrete columns using the modified EPF model and equally spaced truss elements. It is shown that the analysis predicts well the failure behavior of reinforced concrete columns strengthened with glass fiber sheets.

### 1. 서론

콘크리트 구조물은 설계와 시공중의 결함이나, 사용중의 손상, 그리고 시간이 지남에 따른 열화에 의하여 구조물의 내하력이 저하된다. 이러한 성능저하가 발생한 콘크리트 구조물의 사용기간을 증가시키기 위해서는 적절한 보수 및 보강이 필요하다. 이러한 필요에 따라서 최근 보수 및 보강에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 기둥의 보강재료중 유리섬유쉬트(GFS)를 사용한 보강효과 해석에 관한 연구가 활발히 수행되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존의 탄소성 연속체적파괴모델을 수정하여 높은 구속효과가 일어나는 유리섬유쉬트로 보강된 콘크리트 기둥의 보강성능을 유한요소해석을 통하여 규명하였고, 트러스 요소를 사용하여 유리섬유쉬트를 유한요소 모델링하는 기법을 제안하였다.

### 2. 콘크리트 파괴모델과 보강기둥 모델링

#### 2.1 콘크리트 연속체적 파괴모델

\* 정회원, (주) 신성엔지니어링 사원  
\*\* 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

본 연구에서는 탄소성 연속체적 파괴모형을 콘크리트의 구성모델로 사용하였다. 콘크리트는 미시적 불연속면이 존재하므로 연속체가 아니나, 유한 영역에 대한 평균화를 통하여 연속체로서 가정한다.<sup>1)</sup>

콘크리트의 탄소성 연속체적 파괴모형은 그림 1과 같이 모델화 될 수 있다. 즉 콘크리트의 탄성은 스프링으로, 소성은 점성감쇠장치로 모델화 되며, 스프링의 파괴는 콘크리트의 손상을 의미한다. 총응력(total stress)은 비손상 탄소성상태의 내부응력(internal stress)과 연속체적 파괴모형에 의한 손상정도의 합으로 나타낼 수 있다.

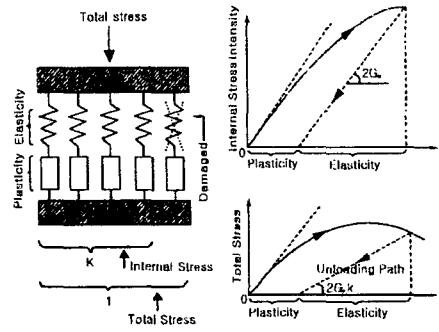


그림 1 탄소성 연속체적 파괴 시스템<sup>1)</sup>

소성모델은 연속체적 파괴모형과 함께 콘크리트의 비선형성을 표현하는데 중요하다. 횡방향 철근에 의하여 구속된 콘크리트는 구속을 나타내는 정수압 응력불변량( $I_1$ )이 비교적 작고 응력편차불변량( $J_2$ )이 큰 조건에 적합하도록 실험을 통하여 탄소성 연속체적 파괴모형을 제안하였다. 그러나 구속이 크게 발생하는 여러 겹의 유리섬유쉬트의 시편의 경우는 기존의 탄소성 연속체적 파괴모형로는 유리섬유쉬트의 구속효과에 의한 보강효과를 효과적으로 산정 할 수 없다.<sup>2)</sup>

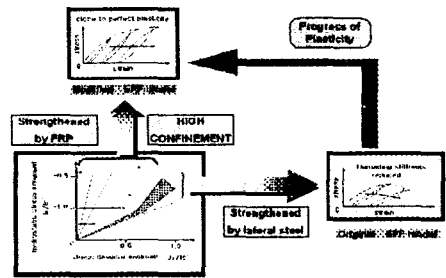


그림 2 콘크리트 비선형을 고려한 응력경로<sup>2)</sup>

## 2.2 구속효과

구속의 정도를 나타내기 위하여 횡방향 철근에 의하여 구속된 콘크리트의 모형을 3차원을 고려하여 구속효과계수를 산정하였고, 횡방향 철근의 구속효과가 최대한 발휘되는 경우의 최대구속응력  $\sigma_{v, \text{lim}}$ 를 식 (1)과 같이 나타내었다.<sup>3)</sup>

$$\sigma_{v, \text{lim}} = \frac{1}{2} p_v \sigma_{sy} \quad (1)$$

여기서,  $p_v$ ,  $\sigma_{sy}$ 는 각각 체적비와 철근의 항복응력이다.

섬유쉬트로 보강된 콘크리트의 면적비  $p_f$ 와 체적비  $p_{fv}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_f = \frac{th}{dh} = \frac{t}{d} \quad (2)$$

$$p_{fv} = \frac{4std}{sd^2} = \frac{4t}{d} = 4p_f \quad (3)$$

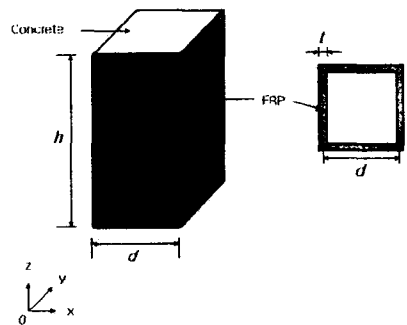


그림 3 섬유보강재로 구속된 콘크리트기둥의 모델

식(3)을 이용하여 식(1)을 섬유보강쉬트로 보강된 콘크리트의 경우의 최대구속응력으로 나타내면 식(4)와 같다.

$$\sigma_{v, \text{lim}} = \frac{1}{4} p_{fv} \sigma_{fy} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{fy}$ 는 섬유섬트의 항복응력이다.

### 2.3 섬유보강을 고려한 콘크리트 소성모델

동일한 하중조건에서 종철근은 없고 띠철근으로 구속된 4각형 콘크리트 기둥을 실험<sup>31)</sup>을 통하여 변형률의 변화율에 따른  $\beta$ 값을 도입하여 섬유보강에 따른 탄성 편차 불변량  $J_{2c}$ 와 소성 편차 불변량  $J_{2p}$ 의 관계식을 수정하였다.

$$J_{2p} = \alpha \cdot \beta \cdot H(J_{2c}) \quad (5)$$

그림 4에서 최대구속응력이 크기가 증가된 시편의 경우  $\alpha \cdot \beta$ 값을 증가시킨 해석결과가 실험과 보다 일치함을 알 수 있다. 변형률의 변화율이 3~5  $\mu$  strain/sec이므로  $\beta=1.5$ 를 고정시키고, 해석값과 실험값이 일치한 세 점을 통하여 그림 5와 같이 최대구속응력에 따른  $\alpha$ 의 식을 식 (6)으로 제안하였다.

$$\alpha = 0.4104 \cdot \exp(0.1315 \sigma_{v, \text{lim}}) \quad (6)$$

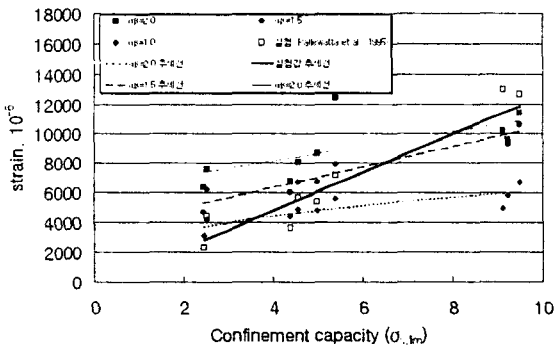


그림 4  $\alpha\beta$ 의 변화에 따른 해석과 실험의 비교

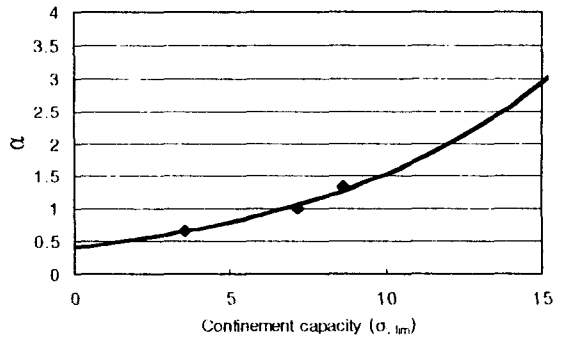


그림 5 최대구속응력에 따른  $\alpha$ 의 변화

### 2.4 유한요소 모델

콘크리트는 16절점을 가지는 solid 요소를 사용하여 모델링 하였다. 유리섬유섬트는 그림 6과 같이 일축인장강도를 파괴기준으로 하여 인장강도에 도달하기 전까지의 선형탄성으로 모델링 하였고, 유리섬유섬트를 모델링하기 위하여 축방향 강성만을 가지고 있는 트러스 요소(truss element)를 사용하였다.

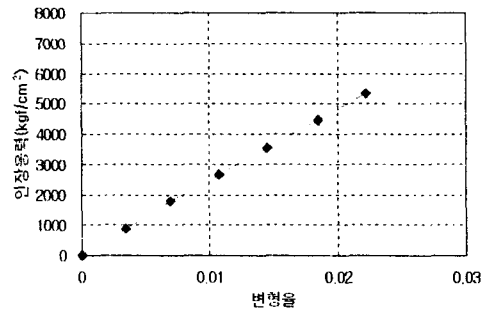


그림 6 유리섬유섬트의 인장응력과 변형률의 관계<sup>4)</sup>

그림 7 (a)유리섬유쉬트로 보강된 시편을 그림 7 (b)의 트러스 요소를 사용하여 등간격으로 유한 요소 모델링을 하였다. 중앙부분의 트러스 요소의 단면적은 전체 보강재의 단면적  $ht$ 에 콘크리트기둥의 높이  $h$ 에 대한 트러스 요소간의 거리  $s$ 의 비( $s/h$ )를 곱한 값으로 구하였고, 양단 트러스 요소의 단면적은 중앙부 트러스 요소 면적의 반으로 구하였다. 즉 중앙부의 트러스의 단면적은  $ts$ 이고 양단 트러스의 면적은  $0.5ts$ 이다.

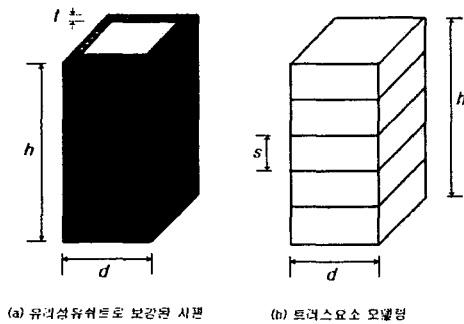


그림 7 유리섬유쉬트 유한요소 모델링

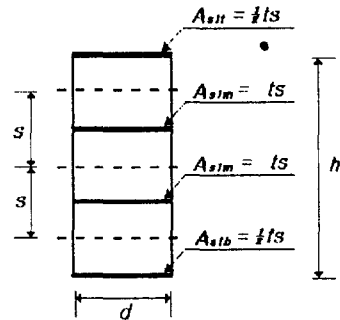


그림 8 트러스요소의 면적결정

### 3. 유리섬유쉬트로 보강된 콘크리트 기둥의 유한요소해석

#### 3.1 대상시편 및 해석 조건

해석에 사용된 대상시편은 전 측면에 관하여 한쪽 방향으로 보강된 그림 9의 시편으로써 유리섬유쉬트에 의해 구축되어있는 사각단면의 콘크리트 기둥이다. 사용된 유리섬유쉬트와 콘크리트의 강도 및 탄성계수는 실험에 의해 결정된 값을 사용하였고 시편의 제원은 표 1과 같다.

표 1 무근콘크리트기둥시편(CP1)의 제원

	물성값
Strength of Concrete	340 kgf/cm <sup>2</sup>
Young's Modulus of Concrete	263,610 kgf/cm <sup>2</sup>
Poisson's Ratio ( $\nu$ )	0.18
Thickness of GFS sheets	1.3 mm
Yield Strength of GFS	6,266 kgf/cm <sup>2</sup>
Young's Modulus of GFS	253,058 kgf/cm <sup>2</sup>

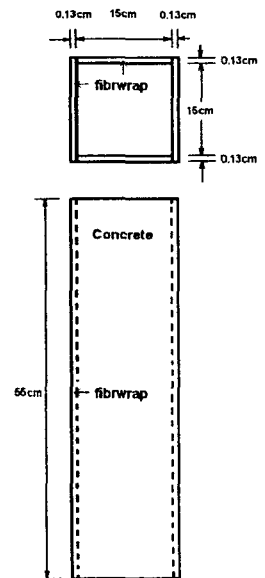


그림 9 보강 무근콘크리트 기둥시편<sup>4)</sup>

### 3.2 대상구조물의 유한요소 모델링

실험시편은 1/4에 대하여 그림 10과 같이 유한요소 모델링 하였다. 유리섬유쉬트는 트러스 요소를 사용하여 모델링을 하였고, 콘크리트는 16절점 탄소성 연속체적 파괴모델의 solid 요소를 사용하였다. 일반적인 구조모형 실험에 사용되는  $\beta=1.5$ 를 사용하고, 보강겹수에 따라 표2와 같이  $\alpha$ 값을 산정 하여 수정된 콘크리트 탄소성 연속체적 파괴모델에 적용하였다.

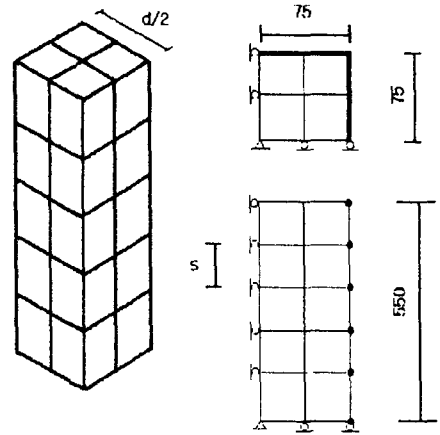


그림 10 유리섬유쉬트로 보강된 무근콘크리트 기둥 모델링 (단위:mm)

표 2 유리섬유보강시편의 최대구속응력 및  $\alpha$

시편	구분	$\sigma_{c, lim}$ (Mpa)	$\alpha$
1겹보강시편 (CP1)		5.34	0.83
2겹보강시편 (CP2)		10.67	1.67
3겹보강시편 (CP3)		16.01	3.37

### 3.3 대상구조물의 유한요소해석 결과

1, 2, 3겹 보강된 시편 CP1, CP2, CP3 시편에 대한 유한요소해석을 실시하였고, 결과는 그림 11, 12, 13과 같다. 1겹 보강된 시편 CP1의 경우는 실험 중 유리섬유쉬트의 파단에 앞서 유리섬유쉬트간의 풀림현상에 의한 결과 해석값이 실험값과 차이를 보였다. 세 가지 시편 모두가 기존의 모델로서 보강에 따른 구속효과를 잘 구현하지 못하였으나, 수정된 연속체적 파괴모델을 사용하는 경우 보강에 따른 구속효과를 잘 보여주며 해석결과도 보다 실험값에 일치함을 알 수 있다.

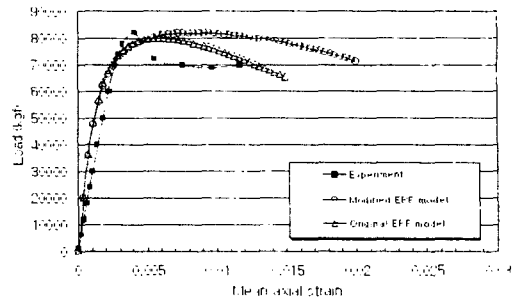


그림 11 1겹보강시편(CP1)의 해석결과

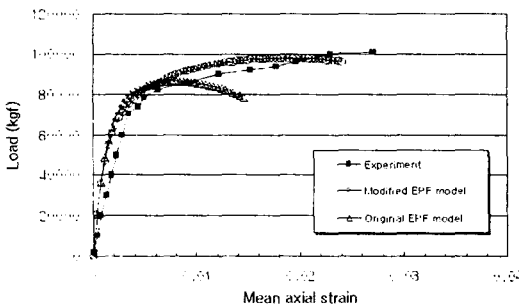


그림 12 2겹보강시편(CP2)의 해석결과

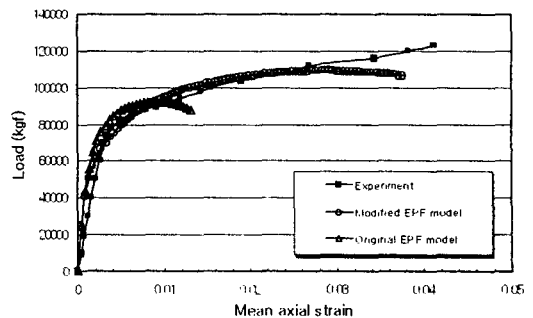


그림 13 3겹보강시편(CP3)의 해석결과

#### 4. 결론

유리섬유쉬트에 의해 보강된 철근콘크리트 기둥에 대한 유한요소 모델링과 해석으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 구속효과에 따른 소성편차기울기의 변화를 나타내는 변수를 도입하여 탄소성 연속체적 파괴모델을 수정하였고, 실험결과와 유한요소해석결과의 비교를 통하여 수정된 탄소성 연속체적 파괴모델의 타당성을 검증하였다.
- (2) 등간격의 트러스 요소를 사용하여 유리섬유쉬트 보강재를 모델링 하였고 무근콘크리트기둥의 해석결과와 실험결과의 비교를 통하여 트러스 요소를 사용하여 유리섬유쉬트를 모델링이 가능함을 보였다.
- (3) 겹수에 따른 유리섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트기둥을 해석하고 실험결과와 비교를 통하여, 겹수에 따른 보강효과를 유한요소해석을 통하여 규명하였고 유한요소해석을 위한 모델링 기법의 타당성을 검증하였다.

#### 참고문헌

1. Okamura, H. and Maekawa, K. (1991), "Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete", Gihodo, Tokyo
2. Maekawa, K., Takemura, J., Irawan, P., and Irie, M. (1993), "Triaxial Elasto-Plastic and Continuum Fracture Model for Concrete", *Concrete Library of JSCE*, No. 22, pp. 165-195
3. Pallewatta, T. M., Irawan, P., and Maekawa, K. (1996), "Confinement Effectiveness of Lateral Reinforcement Arrangements in Core Concrete", *Concrete Library of JSCE*, No. 27, pp. 197-223
4. (주)콘크리닉 (2000), *실리카흙과 현장기계합침을 이용한 유리섬유 복합재(CAF)의 콘크리트구조물 보수보강공법*, 신기술지정등록서 제233호