

# 콘크리트 충전 강관 부재의 휨거동에 관한 유한요소해석

## Finite Element Analysis of the Flexural Behavior of Concrete Filled Steel Tubes

강재윤\*      최은석\*\*      진원종\*\*      이정우\*\*      김병석\*\*\*      이흥수\*\*\*\*

Kang, Jae-Yoon Choi, Eun-Suk Chin, Won-Jong Lee, Jung-Woo Kim, Byung-Suk Lee, Heung-Soo

### ABSTRACT

Appropriate analysis models for concrete-filled steel tube (CFT) subjected to bending moment were determined to assess flexural behavior of CFT member. Applying this model, finite element analyses was performed and compared against experimental data considering the compressive strength of in-filling material and the composite action between tube shell and in-filling core. Analysis results showed that the FE model proposed in this study is feasible for the analytical investigation of the flexural behavior of CFT member according to loading conditions, effect of compressive strength of various core materials and other design parameters.

### 1. 서론

CFT부재의 극한 강도는 구성 재료의 재료 특성, 즉 콘크리트계 충전재의 압축강도와 강관의 항복 강도 및 강관과 충전재간의 합성조건에 큰 영향을 받게 된다. 또한, CFT부재의 극한강도는 콘크리트에 작용하는 구속응력(confining stress)과 강관의 형상, 강관의 폭-두께비(D/t비) 등과 같은 강관의 기하학적 특성에 의해서도 크게 달라진다.

CFT거더의 설계에는 강관의 재료특성, 강관 형상, 강관 폭-두께비, 강관과 충전재간의 마찰 또는 합성조건, 충전재의 재료특성 등과 같은 설계영향 변수가 고려되어야 하며, 각각의 영향 변수와 부재 극한 강도와의 관계를 파악하기 위해서는 광범위한 부재 실험이 수행되어야 하지만, 현실적으로 설계 영향변수-극한강도 관계를 파악하기 위한 다양한 실험을 수행할 수 없으므로 실험 결과를 비교적 정확하게 모사할 수 있는 근사모델을 이용하여 매개변수해석을 수행하게 된다. 이를 위하여, 본 연구에서는 콘크리트 충전 강관거더의 휨거동을 해석적으로 평가하기 위한 재료모델과 해석 방법을 검토함으로써 매개변수 해석을 위한 기초자료로 활용하고자 한다. 구조해석에 사용한 해석 소프트웨어는 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS v.6.5를 사용하였고, 휨재하 실험 결과와 근사 모델의 해석결과를 비교하여 해석모델을 검증하였다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구위원

\*\*\*\* 정회원, 비비엠코리아(주) 기술연구소 실장

## 2. 재료물성 및 해석 방법

### 2.1 강재 재료 특성

강재 재료특성과 관련하여 실험체당 2~5개의 인장시험 시편을 제작하고, 일축 인장시험을 통하여 항복응력을 결정하였다. 각 시험체 시편별 항복응력은 327.2~394.6 MPa의 범위였고, 그 평균치인 360 MPa를 해석시 재료 항복강도로 하였다. 강재의 탄성계수( $E_s$ )는 210 GPa, 포아송비( $\nu_s$ )는 0.3으로 하고, 강재의 응력-변형을 관계는 재료 시편시험의 결과를 참고하여 그림 1과 같이 가정하였다.

### 2.2 충전재 재료 특성

본 연구에서 충전재는 크게 보통콘크리트와 경량 기포 모르타르(Air-Mortar)로 구분하였다. 보통 콘크리트의 경우, Carreira and Chu[1]가 제안한 관계식에 의해 압축강도 약 27 MPa의 콘크리트 재료의 응력-변형을 관계를 유도하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는  $15000\sqrt{f_c}$ 를 적용하여 24.91 GPa로 하였고, 포아송비( $\nu_c$ )는 0.167로 하였다. 콘크리트 충전 강관부재에서 강관의 구속효과를 고려한 충전재의 응력-변형을 관계는 Hu et al.[2]의 제안식에 의해 유도하였으며, 그림 2에 보인 바와 같이 압축강도를 31.3 MPa로 하였고, 이때의 변형률은 0.00256으로 약 28%의 변형률 개선이 있는 것으로 가정하였다. 콘크리트의 인장응력-변형을 관계는 일축 압축응력에 대한 일축 인장응력의 비를 0.0836으로 가정하여 그림 3과 같은 응력-변형을 관계로 가정하였다.

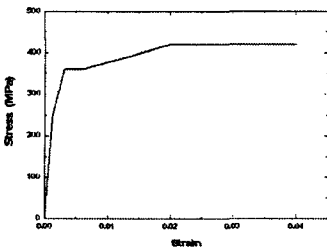


그림 1 강재의 응력-변형을 관계 곡선

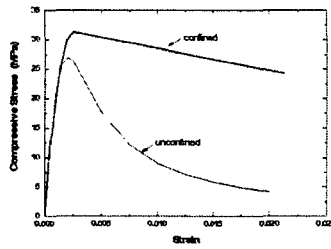


그림 2 콘크리트의 압축응력-변형을 관계곡선

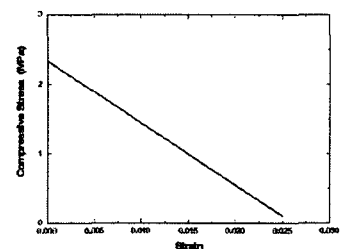


그림 3 콘크리트의 인장응력-변형을 관계 곡선

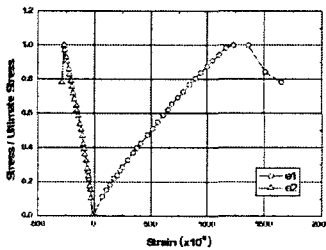


그림 4 경량 기포 모르타르의 응력-변형을 관계 (실험치)

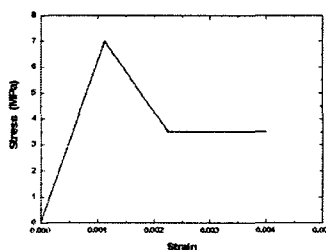


그림 5 Air-Mortar의 압축응력-변형을 관계 곡선

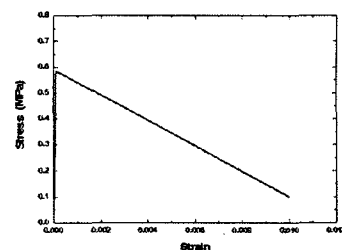


그림 6 Air-Mortar의 인장응력-변형을 관계 곡선

충전용 경량 기포 모르타르(Air-Mortar)의 역학적 특성은 “강관 충전용 경량기포 콘크리트(Foaming Type Concrete) 개발” 연구보고서[3]를 참고하여, 탄성계수는 6230 MPa로 하였고, 포아송비는 보통 콘크리트와 동일한 값인 0.167로 가정하였다. 그림 4는 일축압축시험으로부터 얻어진 Air-Mortar의

응력-변형률 관계 곡선으로서, 이로부터 압축강도 약 7 MPa인 충전용 Air-Mortar의 압축응력-변형률 관계를 그림 5와 같이 가정하였고, 인장응력-변형률 관계는 그림 6과 같이 가정하였다.

### 2.3 해석 모델 개요

본 연구에서는 콘크리트 충전 강관 거더의 해석을 위하여 ABAQUS v.6.5를 사용하였으며, 강관 및 내부 합성 연결재는 4절점 쉘요소(S4R)를 이용하여 모델링하였고, 충전재의 모델링에는 8절점 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하였다. 해석 모델은 대칭성을 고려하여 구조체의 1/4을 모델링하였으며, 7형 perfobond 리브 복부의 홀과 플랜지부는 무시하고 해석모델링에는 7형 perfobond 리브의 복부판만 고려하였다. 재하판 및 지점 블록은 강질 요소(rigid body element)로 모델링하였고, 재하판 및 지점 블록과 강관간의 경계조건은 강결조건(perfect tie)으로 하였다. 강관 모델과 충전재 모델간의 경계조건은 ABAQUS에서 제공하는 접촉조건(contact property)을 이용하였으며, 이 접촉조건에서 접촉면에 수직인 방향에 대한 접촉응력-간격 조건은 hard contact으로 하였다. 접촉면과 평행한 방향으로서는 마찰조건(penalty friction formulation)을 적용하였으며, 이때 마찰계수는 보통 콘크리트 충전에 대해서 0.5를 적용하고, Air-Mortar 충전에 대해서 0.25를 적용하였다.

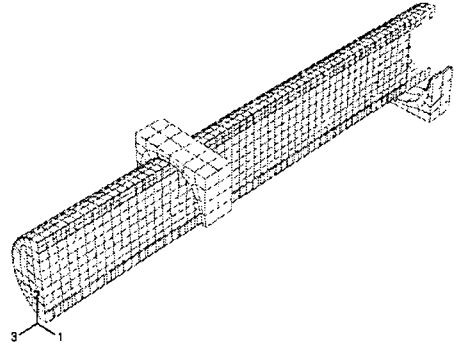


그림 7 충전 강관 해석모델

### 3. 해석 결과

본 연구에서 제안한 해석모델을 이용하여 그림 8과 같은 휨재하 실험체에 대해서 유한소요해석을 수행하고 실험결과와 비교하였다. 해석대상은 지름 508mm, 두께 9mm의 빈 강관(VOID), 강관내부를 강도 27 MPa의 보통 콘크리트로 충전한 실험체(BCF-N-N), 강관 내부를 강도 7 MPa의 Air-Mortar로 충전한 실험체(BMF-N-N), 강관 내부에 합성 연결재를 두어 강관과 충전재간의 완전합성을 유도한 실험체(BCF-6P-N 및 BMF-6P-N)의 5종류 실험체이다.

그림 9는 내부 충전하지 않은 강관과 강관 내부를 강도를 달리한 충전재로 충전한 경우에 대한 해석결과를 보인 것이다. 빈 강관 해석의 경우에는 휨좌굴 강도가 실험치와 거의 동일한 값을 보였고, 강관 내부를 충전한 실험체에 대한 해석결과도 강관 압축부에서의 좌굴에 의한 내력 감소 경향을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 10 및 그림 11은 강관 내부에 기계적 합성 기구를 둔 실험체의 해석결과를 보인 것이므로 강관과 충전재의 합성을 유도함으로써 충전 강관 부재의 휨내력이 증가하는 경향도 실험 결과와 비교하여 매우 정확한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

그림 12는 내부 합성 연결재를 두지 않은 충전강관 부재의 단부 상대변위 해석결과를 보인 것으로서 콘크리트를 충전한 실험체(BCF-N-N)의 경우에는 단부 상대변위가 실험 계측치와 비교적 비슷한

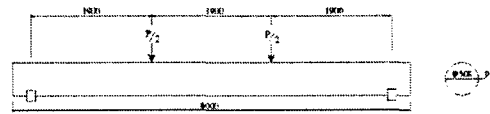
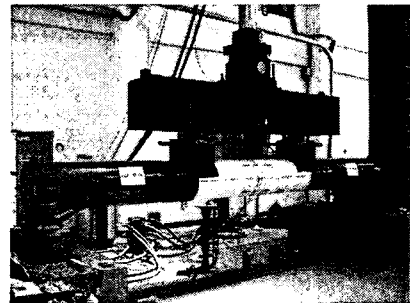


그림 8 CFT강관 휨재하실험

경향을 보였으나, Air-Mortar 충전 실험체(BMF-N-N)의 경우에는 실험 계측치와의 오차가 매우 크게 나타났다. 이는 Air-Mortar 내부의 기포 공극이 파괴되면서 변형을 흡수하게 되는 실제 거동과는 다르게 해석시에는 충전재 공극의 영향을 고려할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

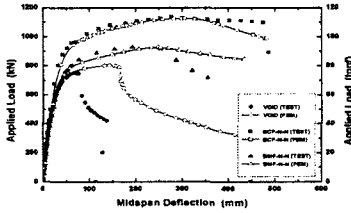


그림 9 충전 강관 해석결과

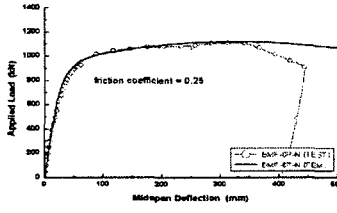


그림 10 BMF-N-N 해석결과

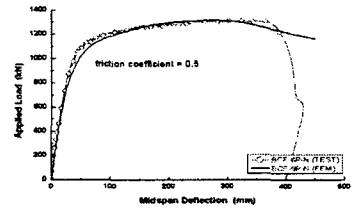
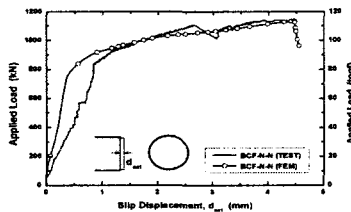
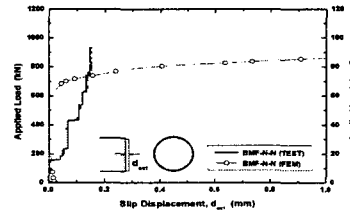


그림 11 BCF-N-N 해석결과



(a) BCF-N-N



(b) BMF-N-N

그림 12 강관-충전재 상대변위 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 충전 강관의 휨거동 해석을 위하여 재료 모델과 강관-충전재 경계조건 및 유한요소 모델을 제시하였다. 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 본 연구에서 제시한 해석모델로 휨거동 해석을 수행한 결과, 충전강관 부재의 실제 휨거동에 매우 가까운 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다. 특히, 콘크리트로 충전된 충전강관 부재의 해석에 대해서는 항복하중, 최대하중 및 강관-충전재 상대변위 등의 주요 거동을 매우 정확하게 예측할 수 있었다. Air-Mortar로 충전된 충전강관 부재의 경우에는 단부 상대변위에 대해서는 큰 오차를 보였으나, 그 외의 주요 거동은 실제 거동에 가까운 해석 결과를 얻을 수 있었다. 이로부터, 본 연구에서 제시한 해석모델의 타당성을 확인하였으며, 향후 충전강관부재의 다양한 재하조건 및 설계 매개변수를 고려한 구조해석에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Carreira, D. J. and Chu, K. H. (1985) Stress-strain relationship for plain concrete in compression, ACI Struct. J., Vol.82, No.11, 797-804, 1985
2. Hu, H. T., Huang, C. S., and Chen, Z. L. (2005) Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination, J. of Constructional Steel Research, No. 61, 1692-1712
3. 비비엠코리아(주) 기술연구소 (2004) 강관충전용 경량기포콘크리트 개발