

CFT 기둥의 비선형 유한요소해석을 위한 개선된 강관-콘크리트 간 부착 모델 개발

권 양 수¹ · 곽 효 경^{1*} · 황 주 영¹ · 김 진 국² · 김 종 민²

¹한국과학기술원 건설 및 환경공학과, ²POSCO 철강솔루션센터

An Improved Bond Slip Model of CFT Columns for Nonlinear Finite Element Analysis

Yangsu Kwon¹, Hyo-Gyoung Kwak^{1*}, Ju-Young Hwang¹, Jin-Kook Kim² and Jong-Min Kim²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 305-701, Korea

²Steel Solution Center, POSCO, Incheon, 406-840, Korea

Abstract

CFT column has a lot of structural advantages due to the composite behavior between in-filled concrete and steel tube. This paper deals with the development of an effective numerical model which can consider the bond-slip behavior between both components of concrete matrix and steel tube without taking double nodes. Since the applied axial load to in-filled concrete matrix is delivered to steel tube by the confinement effect and the friction, the governing equation related to the slip behavior can be constructed on the basis of the force equilibrium and the compatibility conditions. In advance, the force and displacement relations between adjacent two nodes make it possible to express the slip behavior with the concrete nodes only. This model results in significant savings in the numerical modeling of CFT columns to take into account the effect of bond-slip. Finally, correlation studies between numerical results and experimental data are conducted to verifying the efficiency of the introduced numerical model.

Keywords : CFT, FEM, bond-slip behavior, bond stress, ultimate resisting capacity

1. 서 론

원형 충전 강관(Concrete-Filled Tube, CFT) 구조는 원형 또는 각형의 강관에 콘크리트를 충전한 구조로서 강관이 콘크리트를 구속하는 특성으로 인해 강성 등 구조적 거동 뿐만 아니라 강관이 거푸집의 역할을 함에 따라서 시공성 등 여러 장점을 갖는 구조형식이다.

CFT에 대한 실험연구 및 해석적 연구는 지난 수년간 여러 연구자들에 의하여 수행되었으며, 그 결과를 바탕으로 하여 AISC(2005), ACI(2008) 및 Eurocode(2004)에 CFT에 대한 기본적인 설계방법들이 규정되어 있다. 그러나 CFT 구조를 대상으로 한 실험연구는 실험조건 등 구조거동 이해에 있어서 필요한 변수설정에 제약이 있기 때문에 이를 보완

하기 위한 적절한 수치해석의 활용이 필요하다.

CFT 구조의 구조적 장점은 강관과 내부 충전 콘크리트의 복합거동에 의한 것으로 CFT 구조의 적절한 수치해석을 위해서는 두 재료 간 부착거동에 대한 이해 및 수치해석 모델에 이를 반영하는 것이 필요하다.

이형철근에 대한 부착거동 특성에 대한 연구는 부착응력과 슬립(Slip)에 대한 모델식이 제안되어 있으나(CEB-FIP, 1990; Kwak, 1994) CFT 구조의 강관-콘크리트 간의 부착거동에 대하여 직접적으로 적용할 수 없을 뿐만 아니라 구속 응력 발생과 같은 CFT 구조가 갖는 특성을 반영하지 못하고 있다. CFT 구조의 부착응력 발생에 대하여 제한적인 실험적 연구 및 부착강도 모델식에 대한 연구가 수행된 바 있으나(Kwon *et al.*, 2001) 수치해석 연구에서는 강관과

* Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3621; E-mail: khg@kaist.ac.kr

Received February 1 2015; Revised February 12 2015

Accepted February 13 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

콘크리트 간에 스프링 요소와 같은 추가적인 요소를 도입하는 등의 부착 거동 특성을 간접적으로 반영한 연구가 수행되어 왔다(Lee et al., 2011; Moon et al., 2012).

따라서 본 연구에서는 CFT 구조에 하중이 재하 시 마찰에 의하여 발생하는 하중전달 메커니즘을 기반으로 하여 강관의 등가 강성을 고려하고 이를 수치해석에 반영할 수 있는 해석 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 적합성을 판단하기 위해 실제 CFT 기둥의 부착응력에 대한 실험결과, 기존 수치해석 방법을 통해 산정된 해석결과와 수직, 수평방향 응력 분포 비교 분석을 수행하였다. 또한 CFT 기둥의 비선형 해석을 통해 얻어진 하중변위 곡선과 극한강도 비교를 통해 CFT 거동 특성에 있어서 부착 모델 반영에 따른 영향 또한 검토하였다.

2. 본 론

이 장에서는 CFT 구조의 강관-콘크리트 간 부착 거동 특성 모델에 대해 소개한 후, 기존 실험결과와 비교하여 강관 응력 분포에 대한 적합성 및 타당성을 검증하고, CFT 구조의 극한해석을 통해 부착 거동 특성 반영에 따른 CFT 거동 영향에 대해 검토하고자 한다.

2.1 강관-콘크리트의 부착 거동 알고리즘

콘크리트와 강재의 부착 거동에 대하여 대표적으로 MC90 (CEB-FIP, 1990)에서는 콘크리트와 이형철근의 부착-슬립에 대한 식이 제시되어 있다. 그러나 이는 이형철근의 마디에 의한 콘크리트의 파괴영향을 표현한 모델식으로 이 모델식이 고려하고 있는 파괴 메커니즘(mechanism)은 CFT 기둥에서 부착응력 발생에 대한 메커니즘과는 상이한 것이다. 따라서 CFT 구조에 있어 강관-콘크리트의 부착 거동을 묘사할 수 있는 해석적 접근이 필요하다. CFT 기둥에 발생하는 부착응력은 포이송 비에 의한 콘크리트의 횡방향 변형이 강관에 의해 구속되고, 이로 인해 발생한 구속압이 작용하는 상태에서 콘크리트의 수직 변위가 발생할 때 일어나게 된다. 즉, CFT 기둥의 강관-콘크리트의 부착 거동 묘사를 위해서는 순수 구속력 발생으로 인해 발생하는 콘크리트 횡방향 변형(δ_{conf}) 성분(Fig. 1(a))과 부착으로 인한 상부 전달력에 의한 변형(δ_{bond})을 반영해야 한다(Fig. 1(b)). 따라서 축력 재하 시, 콘크리트에 발생하는 변형은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\varepsilon_{\theta, total} = \varepsilon_{\theta, conf} - \varepsilon_{\theta, bond} \quad (1)$$

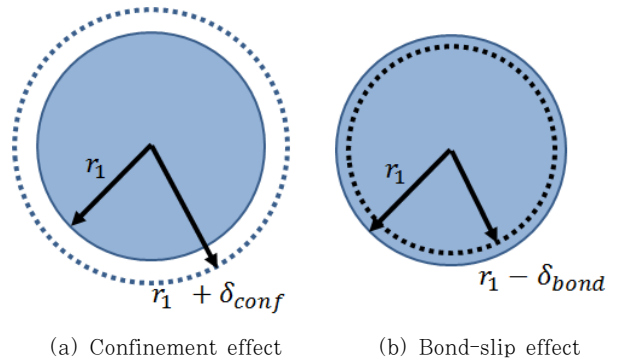


Fig. 1 Deform shape idealization of in-filled concrete

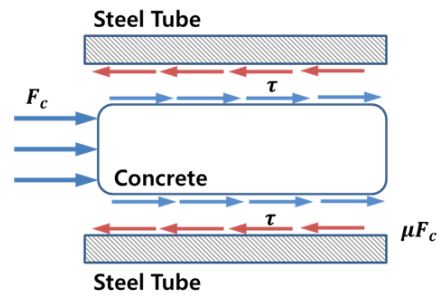


Fig. 2 Load transfer between filled concrete and steel tube in CFT

$$\frac{\delta_{total}}{r_1} = \frac{\delta_{conf}}{r_1} - \frac{\delta_{bond}}{r_1} \quad (2)$$

여기서, $\varepsilon_{\theta, total}$ 는 콘크리트의 전체 횡방향 변형률, $\varepsilon_{\theta, conf}$ 은 구속력에 의한 콘크리트 횡방향 변형률, $\varepsilon_{\theta, bond}$ 는 부착에 의한 콘크리트 횡방향 변형률이다.

구속력에 의한 콘크리트, 강관 변형은 탄성론을 기반으로 한 일반해나 유한요소법을 활용하여 산정할 수 있으나 부착 영향에 의한 변형을 산정하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 부착 영향의 고려가 필요하다. 내부 콘크리트에 압축력(F_c)이 발생하게 되면 콘크리트-강관 간 마찰 계수에 의해 도입된 압축력과 반대 방향으로 강관에 전단력을 통해 하중이 전달된다(Fig. 2).

이 때, 힘의 평형 관계를 통해 강관에 전달되는 힘(μF_c)의 방향을 z 축으로 놓고, 강관의 크기에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu F_c = \int_0^L \tau dz \times \pi r_1 \times L \quad (3)$$

$$\int_0^L \tau dz = \frac{\mu F_c}{\pi r_1 L} = E_{bond} \delta_{bond} \quad (4)$$

여기서, τ 는 강관에 발생하는 전단응력, r_1 는 강관의 내부

지름(=내부 충전 콘크리트 지름), L 은 강관의 전체 길이, E_{bond} 는 강관의 부착 강성, δ_{bond} 는 강관-콘크리트 간 발생하는 상부 전달력(부착 영향)에 의한 변위이며, 힘의 평형관계를 통해 다음과 같이 유도되며, 콘크리트에 작용하는 압축력(F_c)의 항으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta_{bond} = \frac{F L}{EA} = \frac{(F_c - \mu F_c)L}{E_c \pi r_1^2} \quad (5)$$

$$F_c = \frac{E_c \pi r_1^2}{(1-\mu)L} \delta \quad (6)$$

여기서, E_c 는 콘크리트의 탄성계수이며 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 E_{bond} 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$E_{bond} = \frac{\mu E_c}{(1-\mu)} \frac{r_1}{L^2} \quad (7)$$

강관-내부 콘크리트 간 부착거동 묘사를 위해 제 유한요소 해석에 있어 실제 사용되는 요소의 크기에 대하여 부착강성의 산정이 필요하다. Fig. 3과 4와 같이 임의의 콘크리트 요소와 부착이 발생하는 강관은 강성(k_s)을 갖는 부착 요소로 가정할 수 있다. 부착요소에 전달되는 힘(F_{bond})를 힘의 평형에 따라서 수식 (8)과 같이 정의할 수 있고, 요소 크기(s)에 따라서 k_s 는 수식 (9)과 같이 산정할 수 있다.

$$F_{bond} = k_s \delta_{bond} = E_{bond} A_{element} \delta_{bond} \quad (8)$$

$$k_s = \frac{\mu}{(1-\mu)} \frac{r_1}{L^2} s^2 E_c \quad (9)$$

강관-내부 콘크리트 간 부착거동 묘사를 위해 각 재료 모델을 토대로 콘크리트의 변형과 강관의 변형으로 구성된 구성방정식을 다음 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며 콘크리트 가상 절점(1,3)와 강관의 가상 절점(2,4)에 대하여 정리하면 식 (11)과 같다(Kwak, 1994).

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_s & 0 & -k_s & 0 \\ 0 & k_s & 0 & -k_s \\ -k_s & 0 & k_{tube} + k_s & -k_s \\ 0 & -k_s & -k_s & k_{tube} + k_s \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} P_C \\ P_S \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{cc} & K_{cs} \\ K_{cs} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_C \\ d_S \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서, $k_{tube} = A_s E_s / L$ 이다. 또한, 하중 재하시 콘크리트

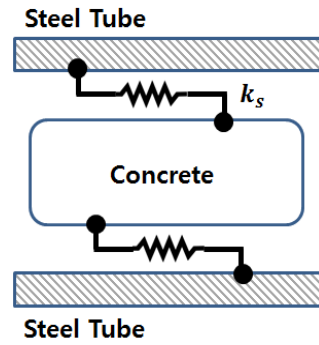


Fig. 3 Idealization of bond-slip behavior in CFT

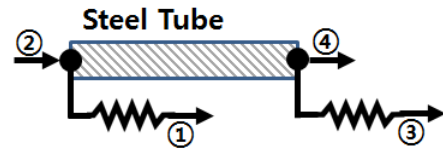


Fig. 4 Idealization of steel tube considering bond-slip behavior in CFT

의 변위는 유한요소해석을 통해 쉽게 결정할 수 있고 부착 영향을 반영한 콘크리트의 등가 강성(K_{cc}^*)을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$[K_{cc}^*] = \frac{k_{tube} k_s k_s}{k_{tube} (k_s + k_s) + k_s k_s} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, 부착강성(k_s)을 무한대로 가정할 경우, 실제 강관 강성과 동일한 값을 갖게 되므로 완전 부착상태로 볼 수 있다.

실제 부착상태 반영을 위하여 강관-콘크리트 간 마찰계수(μ)는 Baltay 등(1990)의 연구결과에 따라 약 0.3에서 0.6 사이의 값을 사용할 수 있으며, 본 논문에서는 대표값으로 제시하고 있는 0.47을 사용하였다.

2.2 CFT의 유한요소해석 모델

2.2.1 콘크리트 재료특성

콘크리트 재료는 압축영역에서 응력이 증가함에 따라 소성 변형이 증가하고, 압축강도를 넘어서면 파쇄(crushing)되어 더 이상의 압축응력을 부담하지 못한다. 또한 인장력을 받게 되면 인장영역에서 인장강도 이상의 인장응력이 작용하면 균열이 발생하게 된다. 일반적으로 콘크리트는 압축거동 보다는 인장거동에 상대적으로 민감하므로 콘크리트의 비선형 특성 묘사를 위해서는 압축 축 응력-변형을 관계 정의 뿐만 아니라 균열발생 이후의 거동에 있어서 응력-변형을 관계의 적절한 정의 또한 필요하다.

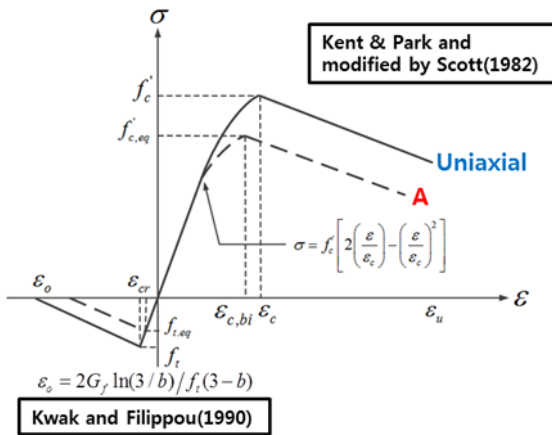


Fig. 5 Uniaxial stress-strain relation of concrete

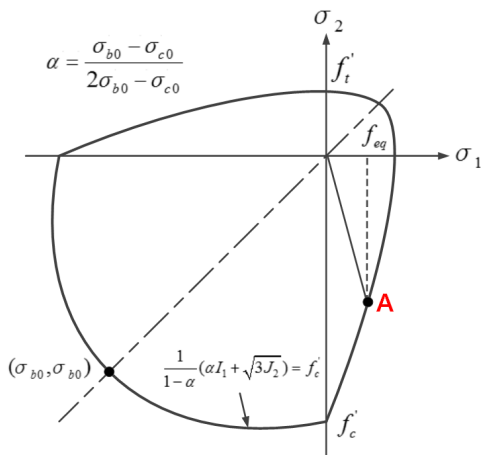


Fig. 6 Bi-axial concrete strength envelope (Lee et al., 1987)

콘크리트의 압축 축 응력-변형률 관계는 기존 해석에서 널리 사용되는 Scott(1982)이 수정한 Kent and Park 식에 따라 적용하였다. 또한 콘크리트 인장 축 응력-변형률 관계는 균열 사이 손상되지 않은 콘크리트 내부에는 철근과 콘크리트 사이의 부착에 의해 전달된 국부인장응력으로 인해 균열이 형성된 후에도 급격한 인장응력의 감소가 발생하지 않게 된다. 따라서 이와 같은 인장증강효과(tension stiffening effect)를 고려해야 하는데 본 논문에서는 Kwak 등(1990)이 제안한 요소크기에 대한 파괴에너지로 정의되는 모델 식을 사용하여 콘크리트 균열 발생 이후의 응력 - 변형률 곡선을 정의하였다(Fig. 5, 6). 이 때, 콘크리트 탄성계수(E_c)는 측정 값이 있는 경우에는 그 값을 사용하였고, 그 외 경우에는 $4700\sqrt{f'_c}$ (MPa)를 사용하였다. 또한 프아송 비(ν_c)는 0.18을 사용하였다.

콘크리트의 비탄성 거동을 모델링하기 위하여 본 연구에서는 ABAQUS(2013)에서 제공하는 Concrete damaged plasticity 모델을 적용하였다. 이 모델은 기타 모델에 비해

다축 응력 상태에 놓인 콘크리트의 비탄성 거동을 모델링하는데 적합하며 인장, 압축 소성이론을 채택하여 콘크리트 인장 균열 및 압축파괴 모두 반영할 수 있다는 장점이 있다. Concrete damaged plasticity 모델은 비상관 소성 흐름 법칙(non-associated flow rule)을 적용하고 팽창각(dilation angle)의 함수인 유동 포텐셜(flow potential)과 콘크리트의 경우 형상계수(K_c) 0.667(=2/3)에 따라 항복면이 정의되는 특성이 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 팽창각(ψ)을 38° 를 사용하였다(Goto et al., 2010)

2.2.2 강제 재료특성

한편 강재는 콘크리트와는 달리 재료의 특성을 정의함에 있어서 단일 응력-변형률 관계를 통해 정의할 수 있고, 압축 영역과 인장 영역에서 동일한 응력-변형률 곡선을 갖는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 이 논문에서는 응력 변화에 따른 재료 성질의 변화는 수치적인 안정성과 계산상의 이점 등을 고려하여, 항복응력 도달(f_y)까지 선형 탄성 거동 이후 항복 응력 도달 시 완전 소성(perfect plastic) 거동을 하는 재료로 정의하여 유한요소해석을 수행하였다(Fig. 7). 이 때, 강재의 탄성계수(E_s) 및 프아송 비(ν_s)는 각각 200GPa, 0.3으로 정의하였다.

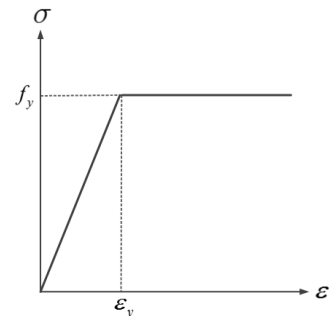
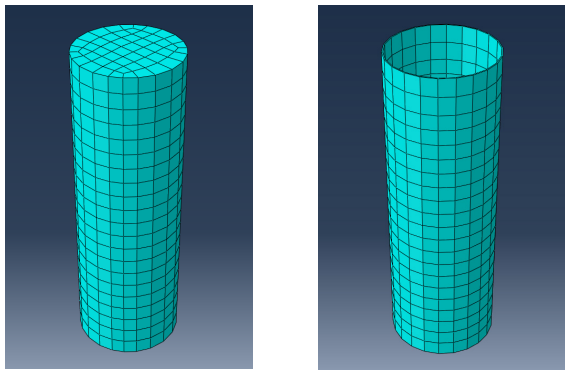


Fig. 7 Uniaxial stress-strain relation of steel

2.2.3 유한요소해석 모델

본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.13 (2013)을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 8은 본 연구에서 사용된 CFT의 유한요소해석 모델을 나타낸 것이다. 강관은 4절점 쉘 요소(S4R)를 사용하였고, 콘크리트에는 8절점 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하였다. CFT 기둥과 같이 두 재료간에 복합거동 묘사를 위해서는 접촉면(contact surface)에 대한 접촉(contact) 모델링이 유한요소해석 모델 구성에 있어서 매우 중요하다. 완전 부착(perfect bond)으로 가정할 경우 부착거동을 반영하지 못하여 구조물의 강성이 과다 평가되는 문제점이 있으며 이를 해결하기 위해



(a) In-filled Concrete (b) Steel tube

Fig. 8 Finite element model

ABAQUS의 마찰 거동(friction behavior)을 반영(Goto *et al.*, 2010)하거나 Gap 요소(Moon *et al.*, 2012)를 사용하는 등의 시도가 있었다.

본 연구에서는 앞서 제안한 부착 모델을 모델링을 위하여 강관과 충전 콘크리트 접촉면에서의 ABAQUS(2013)에서 제공하는 Cohesive behavior 옵션을 사용하였다. Surface cohesive behavior는 모델링 방법에 있어서 각 절점에 스프링 요소 등 추가 요소를 도입하는 등의 방법보다 용이하며 각 부착 면에 해당하는 강성을 입력하여 보다 직접적으로 접촉면의 부착 거동을 묘사할 수 있다는 장점이 있다.

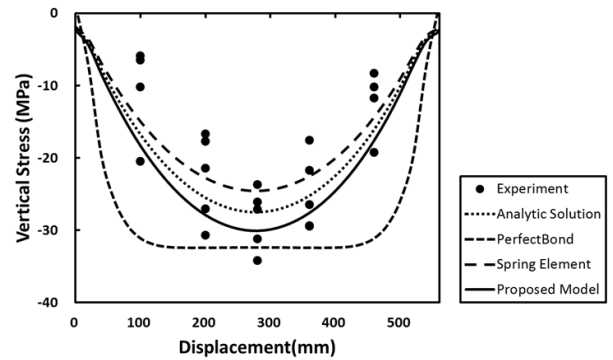
2.3 부착 모델에 따른 강관 응력분포 비교

본 연구에서 제안한 부착 모델의 검증을 위하여 CFT 부재에 축방향 하중 재하 시, 발생하는 강관의 응력 분포에 대한 해석을 수행하였다. Table 1에서 해석에 사용한 시험체 제원을 나타내었으며, 이는 강관에 의해 구속된 콘크리트에 발생하는 구속압과 접촉면에서의 부착-슬립 발생에 따른 응력 발생에 대한 실험 결과이다(Kwon *et al.*, 2001). 여기서 D는 CFT의 전체 직경, t는 강관의 두께이며 L은 CFT의 길이를 나타낸다.

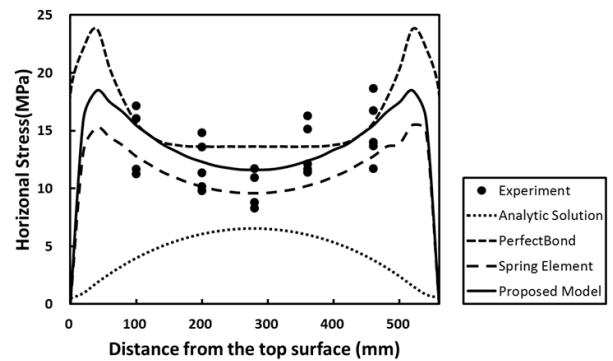
여기서는 콘크리트에만 하중을 가하여 콘크리트가 강관에 의해서만 구속되도록 하였으며 해석 모델에서도 이를 반영하여 하중 및 구속조건을 콘크리트 면에서만 각각 상·하부면에 설정하였다. Fig. 9은 30ton의 하중 재하 시, 실험 및 해석에서 얻어진 강관에서의 수직, 수평방향 응력을 나타낸 것이다. 부착 상태 모델링에 따른 응력분포 영향을 분석하기 위

Table 1 Geometric and material properties of specimen

Model	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f_y (MPa)	f'_c (MPa)
Kwon <i>et al.</i> (2001)	140	2.9	560	265	57.17



(a) Vertical(axial) stress distribution



(b) Horizontal(lateral) stress distribution

Fig. 9 Stress distribution(30ton)

하여 완전 부착으로 가정 시(perfect bond), 각 절점 별 스프링 요소 사용 시(spring element) 및 본 연구에서 제안한 부착 모델(proposed model)을 적용한 결과를 나타내었다. 또한 추가적으로 콘크리트와 강관의 응력분포를 이차원 문제로 단순화하여 축대칭 문제로 응력함수(stress function)를 유도하여 각 방향의 응력을 산정하였다(analytic solution).

수직 응력분포(Fig. 9(a))에서는 Analytic Solution과 마찬가지로 하중 재하면과 경계조건에서 응력이 발생하지 않으며 중앙부에서 최대가 발생하는 경향이 모든 해석 케이스에서 발생하였다. 완전 부착(perfect bond)으로 가정한 경우에는 응력의 수렴하는 양상이 다른 케이스와는 다르게 나타났는데 이는 강관 및 콘크리트에 동일한 변위가 발생하여 나타나는 것으로 판단된다. 실험결과와 비교하였을 때 스프링 요소를 도입한 부착 모델(spring element) 및 본 연구에서 제안한 모델이 시험 결과와 유사한 거동 특성을 보이게 되나 본 연구에서 제안한 모델이 실험값과 가장 정확한 값을 예측할 수 있는 것으로 나타난다.

수평 응력분포(Fig. 9(b))에서는 Analytic Solution에서 나타나는 응력분포 양상과는 상이한 응력분포를 실험 및 해석 결과에서 확인할 수 있다. 이는 하중 재하면에서 콘크리

트와 강관의 마찰력으로 인해 단부에서 콘크리트의 횡방향 변위가 구속되어 부착응력의 최대 발생 지점이 이동하여 나타난 결과로 판단된다. 수직 응력분포와 마찬가지로 완전 부착(perfect bond) 가정 시에는 전반적으로 실험 및 다른 부착 가정과는 다르게 더 큰 응력 값을 가지며 중심을 기점으로 보다 넓은 영역에서 수렴하는 양상 상이한 양상을 보인다. 다른 해석 케이스 역시 수직 응력분포와 마찬가지로 실험 결과와 유사한 양상을 보이게 되나 본 제안 모델을 통한 부착 거동을 묘사한 케이스에서 가장 정확한 값을 예측하는 것으로 판단된다.

수직, 수평 응력분포 결과에서 알 수 있듯이 부착상태 묘사에 따라서 강관에 발생하는 응력분포에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 실제 CFT 기둥의 거동 예측에 있어 비선형 유한요소해석의 정확성에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 2.4 절에서는 각 부착 모델에 따른 CFT 기둥의 극한 해석을 수행하여 그 영향을 분석하였다.

2.4 부착 모델에 따른 CFT 극한강도 해석

본 연구에서 제안한 부착 모델이 CFT 부재의 극한 강도 등 실제 극한 상황까지 하중 재하 시 거동 특성을 적절하게 나타 낼 수 있는지 검증하기 위하여, 실험결과와 강관-콘크리트 간 부착 모델링 방법에 따른 비교하였다. Table 2는 비선형 유한요소해석에 사용된 CFT 기둥의 제원을 나타내었다. 이 CFT 기둥 시험체 제원은 기존 CFT 기둥의 해석적 연구에서 널리 사용된 바 있는 Schneider(1998)와 Huang 등(2002)의 실험체이며 총 6가지 시험체에 대하여 비교하였다. 각 시험체는 D/t 비가 22에서 150까지 변화한 것이며 모델명에서 D/t 비를 확인할 수 있다.

실험 조건과 유사한 하중 상태를 모델링하기 위하여 CFT 구조 상부면에 변위 조건을 통해 하중을 재하하였으며 하부면에서는 수직 방향으로 경계조건을 도입하여 해석을 수행하였다.

Table 3에서는 기존 AISC(2005)에서 사용하고 있는 극한강도 설계식과 실험에서 얻어진 극한하중, 그리고 부착 조건 설정에 따른 극한강도를 나타낸 것이다. AISC(2005) 설계식 강도는 원형 강관을 사용한 CFT 기둥의 경우 $P_0 = 0.95A_c f'_c + A_s f_y$ 로 산정할 수 있다. 여기서, A_c 는 콘크리트 단면의 넓이, A_s 는 강관 단면의 넓이다.

완전 부착으로 가정 시(perfect bond, P_{PB}), 각 절점 별 스프링 요소 사용 시(Spring element, P_{Spring}) 및 본 연구에서 제안한 부착 모델(proposed model, P_{Bond})을 적용한 극한 강도를 나타내었다. 또한 각 시험체 별 하중-변위 곡선

Table 2 Geometric and Material Properties of CU

Model	D (mm)	t (mm)	L (mm)	f_y (MPa)	f'_c (MPa)
CU-022	140	6.5	602	313	23.8
CU-040	200	5.0	840	265.8	27.15
CU-047	140	3.0	602	285	28.18
CU-070	280	4.0	840	272.6	31.15
CU-100	300	3.0	900	232	27.23
CU-150	300	2.0	840	341.7	27.23

Table 3 Ultimate Strength of Design Equation, Test and FEM results(unit: kN)

Model	P_0^*	P_{dt}	P_{PB}	P_{Spring}	P_{Bond}
CU-022	1155	1666	2172	1705	1529
CU-040	1584	2017	2543	2219	2119
CU-047	765	893	1119	923	861
CU-070	2755	3025	3636	3305	3011
CU-100	2498	2810	3068	2846	2789
CU-150	2514	2608	2920	2815	2654

* $P_0 = 0.95A_c f'_c + A_s f_y$ (AISC, 2005)

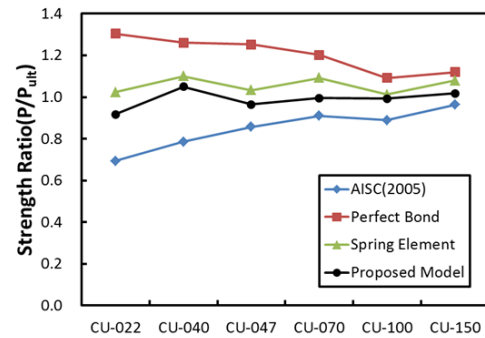


Fig. 10 Uniaxial stress-strain relation of steel

또한 함께 도식하였다(Fig. 11).

Fig. 10에서 실험에서 산정된 극한 강도 대비 각 부착 상태 가정 별 극한강도 비선형 해석결과에 대한 비율을 나타내었다. 강관 및 콘크리트 간에 부착 상태를 스프링 요소를 통해 반영한 Spring Element case와 본 연구에서 제안한 Proposed Model case는 상대적으로 실제 극한 강도를 보다 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 완전 부착 모델(perfect)이나 구속력의 영향을 반영하지 않은 설계식(AISC)과 다르게 D/t 비율이 상대적으로 작은 경우에도 (CU-022, CU-040) 실제 극한 강도와 유사한 강도를 예측하는 것으로 나타났으며 이는 D/t 비가 작을수록 부착 영향이 실제 CFT 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 특히 CU-022, 040의 경우($D/t=22, 40$)에는 다른 시험체와 다르게 변위 하중 증가에 따라서 연화(softening) 양상이 발생하지 않는데 이는 상대적으로 두꺼운 강관의 영향으로 인하여 강관의 콘크리트의 파괴 이후에도 강관이 하중

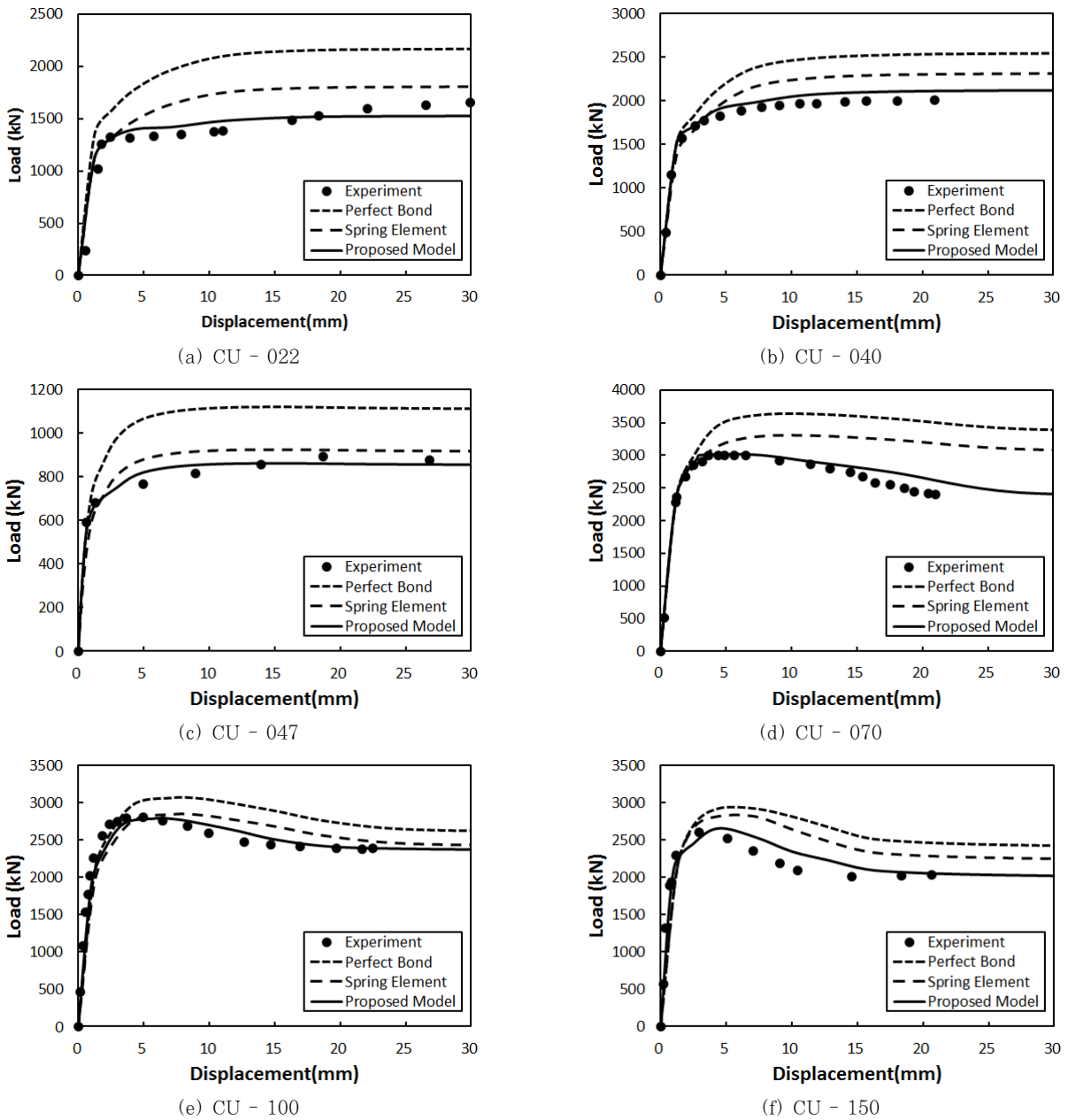


Fig. 11 Load-displacement curves of Specimen

을 계속 분담하는데 기인한 것으로 이 경우 상대적으로 큰 슬립량이 발생할 수 있고 따라서 부착 모델을 통해 강관-콘크리트 간 부착 상태 반응을 통해 보다 정확한 거동 예측을 할 수 있는 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 CFT 구조의 강관-콘크리트 간 부착 상태를 묘사를 위한 개선 모델을 제안하였다. 개선된 모델을 적용한 비선형 유한요소해석을 통해 축력이 재하된 CFT 기둥 부재에 대하여 강관에 발생하는 수직, 수평 응력분포를 기준

실험결과와 비교하여 제안된 강관-콘크리트 부착 모델의 적합성을 검증하였다. 또한 CFT 부재의 압축실험 및 해석 결과와의 하중변위 곡선, 구조강성 및 극한강도 비교를 통해 강관-콘크리트간 부착 영향이 실제 구조거동에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며 제안된 해석 모델을 통해 실제 CFT 기둥의 거동을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되었습니다.

References

- ABAQUS** (2013) *Abaqus Analysis User's Manual version 6.13.*, Dassault Systèmes Simulia Corp.
- ACI** (2008) *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, Farmington Hills, Michigan, p.503.
- AISC** (2005) *Specifications for Structural Steel Buildings*, Chicago, IL, p.460.
- Baltay, P., Gjelsvik, A.** (1990) Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress, *J. Mater. Civil Eng. ASCE*, 2(1), pp.46~49.
- CEB-FIP** (1990) *CEB-FIP Model Code 90*, Cornite Euro International Du Beton, pp.82~87.
- Eurocode 4, EN 1994-1-1** (2004) *Design of Composite Steel and Concrete Structures*, Part 1.1 General Rules and Rules for Buildings, European Union, p.118.
- Fung, Y.C., Tong, P.** (2001) *Classical and Computational Solid Mechanics*, World Scientific, Singapore, p.940.
- Goto, Y., Kumar, G.P., Kawanishi N.** (2010) Nonlinear Finite-Element Analysis for Hysteretic Behavior of Thin-Walled Circular Steel Columns with In-Filled Concrete, *J. Struct. Eng. ASCE*, 136, pp.1413~1422.
- Hu, H.T., Huang, C.S., Wu, M.H., Wu, Y.M.** (2003) Nonlinear Analysis of Axial Loaded Concrete-filled Tube Columns with Confinement Effect, *J. Struct. Eng. ASCE*, 129(10), pp.1322~1329.
- Huang, C.S., Yeh, Y.-K., Liu, G.-Y., Hu, H.-T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., Wang, S.H., Wu, M.-H.** (2002) Axial Load Behavior of Stiffened Concrete Filled Steel Columns, *J. Struct. Eng. ASCE*, 128(9), pp.1222~1230.
- Kwak, H.G.** (1994) Development of an Analytic Algorithm to Simulate Bond-Slip Effect, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 14, pp.711~719.
- Kwak, H.G., Filippou, F.C.** (1990) Finite Element Analysis of Reinforcement Concrete Structures under Monotonic Loads, Report No. UCB/SEMM-90/14, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, p.120.
- Kwon, S.H., Kim, J.K.** (2001) Bond Stress in Concrete Filled Steel Tubular Column, *J. Korea Concr. Inst.*, 13(2), pp.93~98.
- Lee, H.L., Kim, H.J., Hwang, W.S.** (2011) Behavior of the Foundation of Concrete Filled Tubular Pier, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(5), pp.491~498.
- Lee, J., Fenves, G.L.** (1998) Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures, *J. Eng. Mech., ASCE*, 124(8), pp.892~900.
- Moon, J., Ko, H., Lee, H.E.** (2012) Development of Non-linear Finite Element Modeling Technique for Circular Concrete-filled Tube (CFT), *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 32(3A), pp.139~148.
- Schneider, S.P.** (1998) Axially Loaded Concrete-filled Steel Tubes, *J. Struct. Eng. ASCE*, 124(10), pp.1125~1138.

요 지

본 논문에서는 CFT 구조의 강관과 내부 충전 콘크리트 간 복합거동을 유한요소해석 시 적절하게 반영하기 위해 강관과 콘크리트 간 부착 슬립관계 묘사를 위한 알고리즘을 제시하였다. 내부 충전 콘크리트에 축방향 하중 발생 시, 강관과 콘크리트 간 마찰로 인해 강관으로 하중이 전달되며, 이에 따른 강관 슬립량과 힘의 평형관계를 통해 등가강성을 통해 부착관계를 파악할 수 있다. 실제 원형 CFT 부재의 부착응력 실험을 통해 측정된 수직 및 수평 방향 응력 분포 결과와 제안된 해석 기법을 통해 산정된 응력 분포의 비교를 통해 제안된 해석 기법의 타당성을 검증하였다. 또한 비선형 유한요소해석 시 강관과 콘크리트의 부착 거동 묘사에 따라 CFT 기둥의 거동 특성에 영향을 미치게 되므로 축방향 하중이 작용하는 CFT 부재 실험 결과와 제안된 부착-슬립 모델을 반영한 유한요소해석 결과의 하중-변위 곡선 관계 비교를 통해 제안된 기법의 적합성을 검증하였다.

핵심용어 : CFT, 유한요소법, 부착슬립, 부착응력, 극한강도