

# XFINAS 계면요소와 고체요소를 이용한 콘크리트-강재 합성구조물의 비선형 거동해석

## Nonlinear Analysis of Steel-Concrete Composite Structures using XFINAS Interface and Solid Elements

김 기 두\*  
Kim, Ki-Du

수타스트라디트 송삭\*\*  
Suthasupradit, Songsak

박 종 화\*\*\*  
Park, Jong-Hwa

박 재 균†  
Park, Jaegyun

### 요 지

합성구조는 전체가 동일한 재료 특성을 가지는 구조와는 달리 서로 다른 특성 즉 강재와 콘크리트의 구조로 결합되어 있다. 따라서 실제 모델링 시 이러한 재료 특성을 반영하지 않으면 실제 거동을 예측할 수 없으므로 콘크리트와 강재 사이에 인터페이스 요소를 연결하여 강재와 콘크리트의 슬립을 예측할 수 있게 한다. 인터페이스 요소는 일반적으로 사용되는 구성방정식은 적합하지 않고 실제 부착 및 슬립을 고려한 비선형 구성 방정식을 사용하여야만 적절히 사용할 수 있다. 이 계면요소를 이용하여 판형 강재 박스와 콘크리트의 접촉면을 묘사하였다. 그리고 강재 박스의 휨-좌굴 거동을 묘사하기 위해서는 일반적인 8절점 적합 요소의 사용은 부적절하므로 판형 강재 박스는 보강 변형도(Enhanced Assumed Strain) 고체 요소를 사용하여 휨거동을 묘사할 수 있게 하였다.

**핵심용어** : 계면요소, 보강변형도 고체요소, 콘크리트-강재 합성구조, 비선형 해석

### Abstract

Unlike the structure which has a homogeneous material property, a composite structure is coupled with materials which have different properties, namely, steel and concrete. At actual modeling, the real behavior cannot be predicted without consideration of those material characteristics. Therefore, by putting the interface element between concrete and steel, a slip of steel and concrete is made predictable. Interface element can be used properly not by an ordinary constitutive relation, but by a non-linear constitutive relation considering actual adhesion and slip. A contact surface between plate-shape steel box and concrete is described by using this interface element. Furthermore, because the general 8 node conforming element is inappropriate for describing a bending buckling behavior of steel box, the EAS(Enhanced Assumed Strain) solid-shell element is used to describe a bending behavior of plate-shape steel box.

**Keywords** : interface element, EAS Solid element, Concrete-Steel composite structure, Nonlinear Analysis

## 1. 서 론

최근 교량 설계, 시공 분야에서는 강재와 콘크리트의 재료 특성을 효과적으로 이용하는 합성, 복합 교량을 선호하고 있다. 이 가운데 콘크리트 충전 강관(CFT: Concrete Filled steel Tube)은 강관에 콘크리트를 채워 넣은 합성구조체로,

지금까지 주된 구조재로 써온 강재와 콘크리트의 단점을 보완하고 장점을 극대화하여 뛰어난 구조적 성능을 보여준다(황원섭 등, 2003). 콘크리트 충전 강관을 이용한 합성, 복합 교량은 외관이 수려하고, 투시성이 좋으며, 가볍고 경제성이 우수할 뿐만 아니라 유지관리 효율도 뛰어나, 현대 교량에서 중요시하는 미적 측면과 환경친화적 측면을 두루 만족

† 책임저자, 종신회원 · 단국대학교 토목환경공학과 부교수

Tel: 031-8005-3473 ; Fax: 031-8005-3496

E-mail: jpark@dankook.ac.kr

\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수

\*\* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후 연구원

\*\*\* 현대건설 토목환경사업부 상무

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

시킨다.

콘크리트 충전 강관 합성형 교각은 강부재를 주체로 콘크리트를 일체화시킨 복합 구조이다. 강재는 인장영역의 강도와 변형 성능이 우수하지만, 압축영역에서는 좌굴이 발생한다. 반면에 콘크리트는 압축영역보다 인장영역의 강도가 작고 취성을 가지는 구조 재료이다. 복합 교량은 강재와 콘크리트의 이질적인 재료를 결합하여 두 재료의 단점을 보완한다. 교량 구조물에서 콘크리트 충전 강관 합성 부재는 교각, 트러스교, 아치교 등 압축 부재에 적용하는 경우가 많다. 콘크리트 충전강관은 시공품질의 확보와 공기의 단축이 가능하기 때문에 교량의 교각부재로 적합한 것으로 평가되고 있다. 이에 따라 외국에서는 많은 교량의 교각부재로 적용사례가 점차 증가하고 있으며, 국내에서도 연구가 활발히 진행되고 있다(김현중 등, 2007; 정철현 등, 2009).

복합구조에서 서로 다른 두 가지 재료가 만나는 경계에서 가장 큰 문제가 되고 있는 것은 그 재료들이 분리되었을 때 일어나는 불연속 변위이다. 만약 두 경계가 완전한 일체 거동을 보인다고 가정하면, 해석은 용이하나 그 거동은 실제와 많이 다를 수밖에 없다. 강과 콘크리트의 합성 구조물에서 특히 전단 연결재가 없는 경우에는 경계에서의 미끄러짐 현상에 대한 묘사가 해석에 큰 영향을 미친다. 경계면에서의 이러한 국부적 상대변위가 전체 구조물의 거동을 좌우할 수 있다. 이 때 경계에서의 전단응력과 법선응력은 강재와 콘크리트 사이의 접촉력과 마찰에 달려있다. 이러한 국부 변형과 비탄성 변형을 적절히 고려하기 위하여 구조물의 수치모델에 접촉 경계 요소가 반드시 포함되어야 한다. 일반적으로 강과 콘크리트의 경계면에서는 미리 정의된 경계의 위치가 명확하게 제시될 수 있다. 따라서 이런 경우 그 경계면에 두께를 가지지 않는 계면요소의 사용은 적절하다.

일반적으로 두께가 일정하게 얇은 형태의 구조물은 2 차원 모델인 셸(shell) 요소를 사용하여 3차원 고체의 거동을 묘사한다. 그러나 셸 요소는 2 차원 모델의 특성상 두께 방향의 변형이나 응력에 대한 묘사가 부족하므로 두께 방향으로 하중을 받는 구조물의 경우는 비록 그 형태가 셸 또는 유사한 형태일 경우라도 부정확한 해석 결과를 가져온다. 이러한 셸 요소의 단점을 보완하기 위하여 고체-셸(Solid-shell) 이라고 불리는 3차원 셸 요소가 등장하였다(Parisch 1995; Hauptmann 등, 1998). 일반적인 변위 기반의 3차원 8절점 요소를 납작하게 누른 형태의 고체-셸은 일반 2차원 셸 요소에서 추가로 더해주는 절점의 회전 자유도가 필요하지 않은 장점이 있다.

변위를 기반으로 하는 고체-셸 요소는 지나치게 자유도가 제한되어 발생하는 locking 문제를 가지고 있으며, 이 문제

를 해결하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 체적분을 수행할 때 기준 보다 적은 수의 가우스 점을 사용하는 방법(Hauptmann 등, 2000), 그리고 혼합적분을 이용한 방법(Simo 등, 1992; Dvorkin 등, 1984) 등이 제안되었다. 특히 C. Freischlager and K. Schweizerhof(1996)는 보강변형도(Enhanced Assumed Strain) 고체요소를 제안하였다. 보강변형도 고체요소는 처음 Simo and Rifai(1990)에 의해 제안되었으며, Hu-Washizu 범함수에 서로 독립적인 변위와 변형도, 응력을 가정하여 유도된 혼합 정식화(mixed formulation)에 기초한다. 일반 변위 기반의 변형도에 추가로 더해지는 발전된 가상 변형도는 응력과 서로 직교 하도록 설계되어 추가로 일을 발생시키지 않으며, 유한요소 정식화에서는 사라진다. 그러나 이러한 방법은 일반적으로 locking을 없애기 위하여 저차 적분법(reduced integration)을 동반하기 때문에 특별한 경우에 강성행렬(stiffness matrix)이 불안정해지는 결과를 보일 수 있다.

콘크리트 충전강관 구조의 모델링은 전체가 동일한 재료 특성을 가지는 구조와는 달리 서로 다른 특성 즉 강재와 콘크리트의 구조로 결합되어 있다. 따라서 실제 모델링 시 이러한 재료특성을 반영하지 않으면 실제 거동을 예측할 수 없으므로 콘크리트와 강재 사이에 인터페이스 요소를 연결하여 강재와 콘크리트의 슬립을 예측할 수 있게 한다. 인터페이스 요소는 일반적으로 사용되는 구성방정식은 적합하지 않고 실제 부착 및 슬립을 고려한 비선형 구성방정식을 사용하여야만 적절히 사용할 수 있다. 이 연구에서는 콘크리트-강재 합성구조물의 비선형 거동해석을 적절하게 수행하기 위하여 수직과 전단 방향으로 균열을 발생시키는 Carol 등(1997)의 모델을 사용하여 계면요소를 구성하였다. 이 계면요소를 이용하여 판형 강재 박스와 콘크리트의 접촉면을 묘사하였다. 그리고 강재 박스의 휨 좌굴 거동을 묘사하기 위해서는 일반적인 8절점 적합 요소의 사용은 부적절하므로 판형 강재 박스는 보강변형도(Enhanced Assumed Strain) 고체요소를 사용하여 휨거동을 묘사할 수 있게 하였다.

## 2. 유한요소 정식화

본 연구에 사용된 유한요소의 정식화 과정을 계면요소와 고체 요소로 나누어 다음에 설명하였다.

### 2.1 8절점 계면요소

콘크리트와 강재 경계면은 재료 특성이 달라서 하중재하시 경계면에서 서로 일치하지 않는 불일치 격자(non-matching

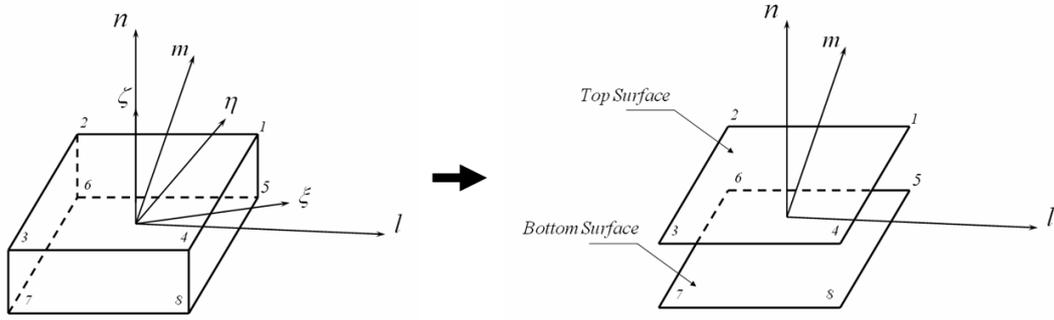


그림 1 계면 요소의 좌표계

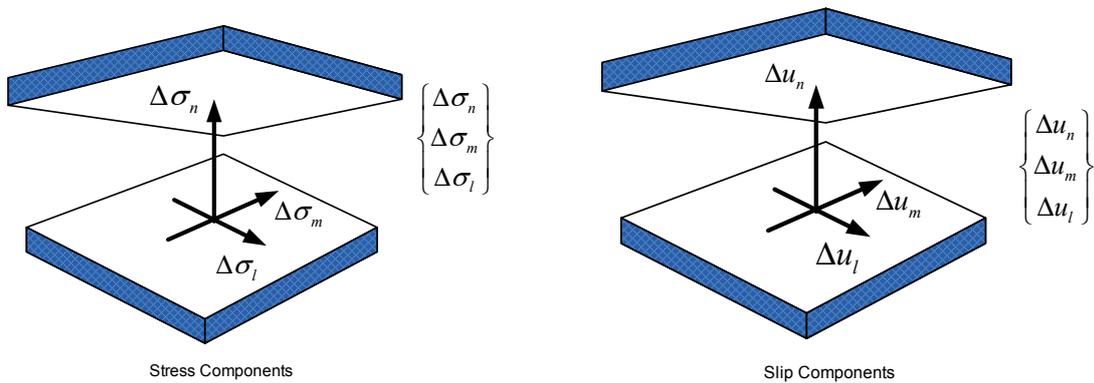


그림 2 계면 요소의 응력과 변형 요소

mesh)가 발생하는데, 경계면에서 일관성을 유지 및 하중 재하 시 거동을 묘사하기 위하여 두께가 없는(zero thickness) 선형/비선형의 특성을 갖는 계면요소를 개발하였다. 이 요소는 절점 당 3개의 자유도를 가지며, 정식화에서 그림 1에서 보는 바와 같이 전역, 국부, 자연 좌표계를 사용한다. 응력은 응력-상대변위의 관계로 정의되며 드러커-프래거(Drucker-Prager)의 탄소성 항복함수를 이용하였다.

$$V_n = \frac{\overline{V}_\xi \times \overline{V}_\eta}{|\overline{V}_\xi \times \overline{V}_\eta|}, \quad V_m = \frac{(V_n \times \overline{V}_\xi) + \overline{V}_\eta}{(V_n \times \overline{V}_\xi) + \overline{V}_\eta}, \quad (1)$$

$$V_l = V_m \times V_n, \quad \overline{V}_\xi = \frac{\partial P}{\partial \xi} \Big| \Big| \frac{\partial P}{\partial \xi}, \quad \overline{V}_\eta = \frac{\partial P}{\partial \eta} \Big| \Big| \frac{\partial P}{\partial \eta}$$

여기서,  $V_n, V_m, V_l$ 는 국부 좌표계,  $n, m, l$ 축의 기저벡터이고  $\overline{V}_\xi$ 와  $\overline{V}_\eta$ 는  $\xi$ 와  $\eta$ 에 접하는 단위 공변 기저 벡터이다.

위치벡터  $P$ 는 일반적인 2차원 4절점 사각형 요소의 형상 함수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \sum_{i=1}^4 N_i \overline{P}_i, \quad (2)$$

여기서,  $\overline{P}_i$  = 절점 벡터

$$\begin{aligned} N_1 = N_5 &= 0.25(1+\xi)(1+\eta) \\ N_2 = N_6 &= 0.25(1-\xi)(1+\eta) \\ N_3 = N_7 &= 0.25(1-\xi)(1-\eta) \\ N_4 = N_8 &= 0.25(1+\xi)(1-\eta) \end{aligned} \quad (3)$$

그림 1에서 절점 1과 5, 2와 6, 3과 7, 4와 8은 같은 위치를 나타낸다(두께=0).

먼저 세 개의 자유도에 해당하는 구성방정식은 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma_n \\ \Delta\sigma_m \\ \Delta\sigma_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_m & 0 \\ 0 & 0 & K_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_m \\ \Delta u_l \end{bmatrix} = [D] \begin{bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_m \\ \Delta u_l \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식에서  $n$ 은 계면에 수직인 방향,  $m, l$ 은 계면의 접선방향이고 서로 수직이다.

이제 전체적인 계면요소의 접선방향 변위의 성분은 요소의 상부 표면과 하부 표면의 상대변위로부터 계산할 수 있다. 즉,

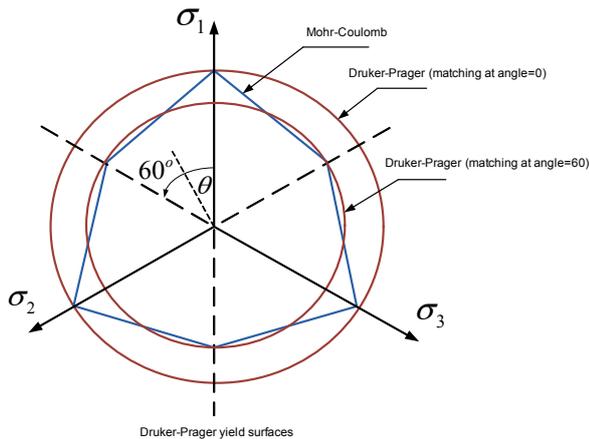


그림 3 드러커-프래거의 항복면

$$\begin{bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_x \\ \Delta \bar{U}_y \\ \Delta \bar{U}_z \end{bmatrix}^{Top} - \begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_x \\ \Delta \bar{U}_y \\ \Delta \bar{U}_z \end{bmatrix}^{Bottom} = [H] \begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_x \\ \Delta \bar{U}_y \\ \Delta \bar{U}_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $[H] = [[N_1][N_2][N_3][N_4] - [N_5] - [N_6] - [N_7] - [N_8]]$ 이다.

지역적인 상대변위는 지역적 방향 벡터와 변환 행렬에 의해 결정된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_m \\ \Delta u_l \end{bmatrix} = [V_n \ V_m \ V_l]^T \begin{bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \Delta u_x \\ \Delta u_y \\ \Delta u_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

그러면, 전체 좌표계에서의 요소의 강성 행렬과 내력 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[K_e]^{24 \times 24} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [H]^T [T]^T [D][T][H] J d\xi d\eta \quad (7)$$

$$[f_e]^{24 \times 1} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [H]^T [T]^T \{\sigma_{nml}\} J d\xi d\eta \quad (8)$$

여기서,  $J$ 는 자코비안(Jacobian) 행렬식으로  $J = |\bar{V}_\xi \times \bar{V}_\eta|$ 이다.

일반적으로 콘크리트는 인장방향으로 균일이 발생하고 압축 방향으로는 항복에 의한 파단이 발생하는 비탄성 거동을 나타내며 강재는 인장과 압축 모두 항복이 발생하는 소성거동을 보인다. 이러한 재료의 경계면에서 힘은 부착 및 마찰력에 의해서 전달되는 비선형 거동을 나타내며 그림 3과 같은 드러커-프래거의 소성 이론을 사용하였다.

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (9)$$

여기서,  $I_1$ 은 응력 텐서의 첫 번째 불변량( $=\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ),  $J_2$ 는 편차응력(deviatoric stress) 두 번째 불변량이고  $\alpha, k$ 는 재료 상수이다.

연결부에서는 파괴 현상이 나타난다. 즉, 응력이 최대 지점을 지나면서 상대변위가 커짐에 따라 강도가 감소한다. 이 현상을 묘사하기 위하여 본 요소에서는 Maekawa(2003)의 모델을 적용하였으며 3개의 매개변수를 가진 항복함수는 다음과 같다.

$$\sigma_l^2 + \sigma_m^2 - (c - \sigma_n \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 = 0 \quad (10)$$

여기서,  $\phi$ 는 마찰각,  $c$ 는 점성 계수,  $\chi$ 는 인장 저항계수이다. 즉,

$$c = c_0 \left( 1 - \frac{W'}{G_f} \right). \quad (11)$$

여기서,  $c$ 와  $c_0$ 는 각각 현재와 초기의 점착력 계수이고  $G_f$ 는 연결부의 특정 파괴 변수이다.  $W'$ 는 연결부의 상대변위로 발생하는 일의 양을 의미하며 다음 식으로 나타난다.

$$dW' = \begin{cases} \sigma_l du_l + \sigma_m du_m + \sigma_n du_n & \text{if } \sigma_n > 0 \\ (\sigma_l du_l + \sigma_m du_m) \left\{ 1 + \frac{\sigma_n \cdot \tan \phi}{\sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_m^2}} \right\} & \text{if } \sigma_n \leq 0 \\ 0 & \text{inside the yield surface} \end{cases} \quad (12)$$

위 식의 보다 자세한 설명은 Maekawa(2003)에 나타나 있다.

### 2.2 8 절점 보강변형도 고체요소

보강변형도 고체요소의 변형도는 일반적인 연속 변위로부터 얻어지는 변형도  $E^c$ 와 발전된 가상 변형도  $E^e$ 의 총 합으로 정의된다. 등가매개변수 공간에서의 보강변형도 정식화는 요소의 중앙에서 계산되는 자코비안 행렬에 의해 변환되어 실제 공간과 연결되어 있다. 발전된 가상 변형도는 등가매개변수 공간에서 2등급 텐서로 정의되며, Simo and Rifai (1990)에서 처음으로 제안되었다.

$$\Delta E^e = \frac{\det J_0}{\det J} T_e^0 \Delta \bar{E}^0 \quad (13)$$

여기서,  $J$ 는 자코비안 행렬이고,  $J_0$ 는 요소 중앙에서의 자코

비안 행렬이다. 즉,

$$\mathbf{J}_0 = \begin{bmatrix} x_{,\xi} & y_{,\xi} & z_{,\xi} \\ x_{,\eta} & y_{,\eta} & z_{,\eta} \\ x_{,\zeta} & y_{,\zeta} & z_{,\zeta} \end{bmatrix} \bigg|_{\xi=0, \eta=0, \zeta=0} \quad (14)$$

식 (13)은 실제 공간에서의 발전된 가상 변형도 증분  $\Delta \tilde{\mathbf{E}}^0$ 를 등가매개변수 공간에서의 발전된 가상 변형도 증분  $\Delta \mathbf{E}^e$ 로 매핑 해준다. 이러한 발전된 가상 변형도는 다음의 관계를 가정하여 계산된다.

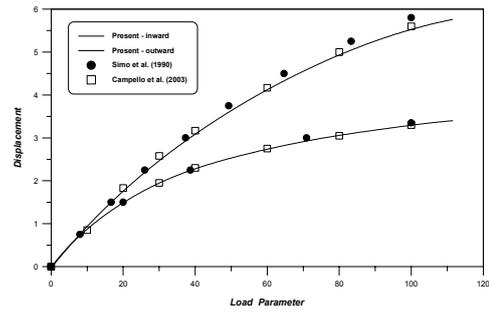
$$\Delta \tilde{\mathbf{E}}^0 = \mathbf{M} \Delta \alpha^e \quad (15)$$

여기서,  $\Delta \alpha^e$ 는 발전된 내부 매개변수 벡터이고  $\mathbf{M}$ 은 Hauptmann and Schweizerhof(2000)에 의하여 제안된 보간행렬이다. 8 절점 고체요소의 locking 현상을 막기 위하여 다음의 보간행렬을 선택하였다.

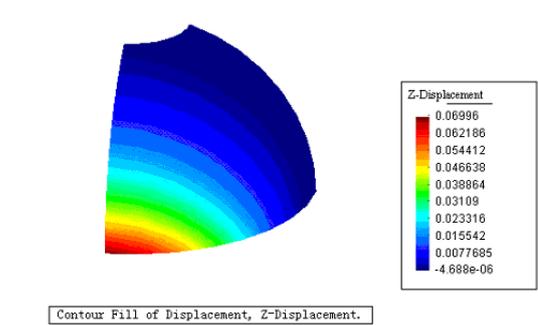
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \xi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \xi \eta \\ 0 & \eta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \zeta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \xi & \eta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \xi \zeta & \eta \zeta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \xi & \zeta & 0 & 0 & 0 & \xi \eta & \eta \zeta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \xi \eta & \eta \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta \zeta & 0 & 0 & 0 & \xi \eta \zeta \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 3. 수치 해석

XFINAS는 구조물의 선형 및 비선형 동적 해석을 수행하기 위하여 개발된 범용 유한요소 해석 시스템으로 지금까지 개발된 다른 시스템보다도 더욱 빠르고, 정확하며 안전성을 가지고 있는 강력한 시스템이다. 초기 버전 FINAS는 영국 런던의 임페리얼공대(Imperial College, London)에서 대형 컴퓨터 전용의 강구조 비선형 해석을 위하여 개발되었으며 AIT 및 건국대학교와 설계자들에 의하여 개인용 컴퓨터 전용으로 선형 및 비선형 동적 해석 버전인 XFINAS (eXtended FINAS)로 확장되어 토목, 건축, 기계 및 항공기 등의 구조 해석 및 설계의 범용 목적으로 재개발 되었다. XFINAS의 해석기능(Analysis Option)은 선형, 비선형 해석, 고유진동수, 좌굴, 선형 동적, 비선형 동적, 지진해석, 차량 이동하중에 의한 교량해석, 철도교/차량 등의 동적 해석,



(a) 하중-변위 곡선



(b) 반구체의 변위 contour plot

그림 4

콘크리트의 비선형 거동 등을 해석할 수 있다. 본 연구는 XFINAS의 해석 기능을 이용하여 계면요소를 개발하고 그 결과를 검증하기 위하여 강재 및 콘크리트의 연결부를 계면요소와 결합하여 모델링하였다.

### 3.1 18도의 구멍을 가지는 반구체

8 절점 보강변형도 고체요소의 휨과 박막 거동을 검증하기 위하여 18도의 구멍을 가지는 반구체의 기하 비선형 거동을 해석하였다. 양끝단의 하중-변위의 곡선을 비교, 검토한 결과 기존의 결과들과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 본 예제에 사용된 기하학적 제원 및 물성치는 각각 반경=10, 두께=0.04,  $E=6.825 \times 10^7$ , 포아슨비=0.3이며 그 결과를 SIMO(1992)와 비교하였다.

### 3.2 법선 및 접선 응력을 받는 콘크리트 연결부

강재 및 콘크리트의 구조해석을 위하여 다음과 같이 세 가지 결과를 비교하였다. 콘크리트 요소는 드러커-프래거의 소성거동을 포함한 8절점 보강변형도 고체요소를 이용하였다. 강재는 두께가 얇은 판재이므로 압축을 받아 휨 거동이 일어난다. 따라서 고차요소(21절점)를 사용하지 않을 경우 휨 거동을 나타낼 수 있는 8절점 보강변형도 고체요소가 필수적이

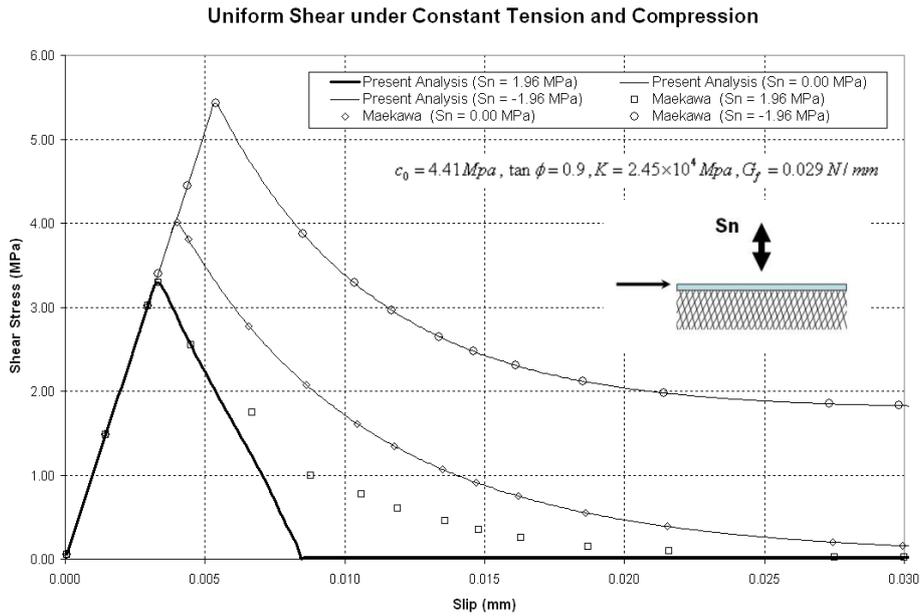


그림 5 계면 요소의 일정 전단력 시험 결과

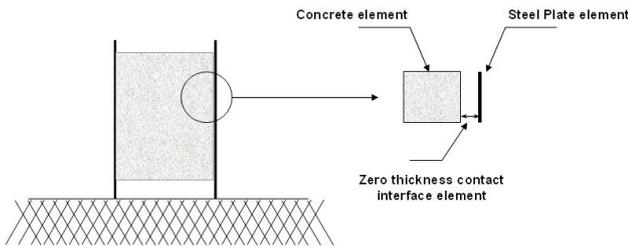


그림 6 콘크리트-강재 합성 박스 모델

다. 균일한 전단응력 하에서 인장과 압축의 경우에 대하여 계면의 전단응력과 미끄러짐의 관계를 검토하였다. 여기서 사용된 물성치는  $\alpha = 0.2105$ ,  $k = 3.095 \text{ MPa}$ 이다.

여러 응력이 결합된 상태에서 계면 요소의 성능을 평가하기 위하여 일정한 축면 전단력과 인장/압축력을 받는 연결부의 해석을 수행하였다.  $S_n = 1.96 \text{ MPa}$ 의 경우 Maekawa는 실험식을 보정한 항복기준을 제시하였으나, 본 논문에서는 특정한 경우가 아닌 일반적으로 적용 가능한 드러커-프레거 기준을 사용하여 다소 차이를 보이며 나머지 경우( $S_n = -1.96$  &  $S_n = 0.0$ )는 해석 결과 비교치와 유사한 경향을 나타내고 있다.

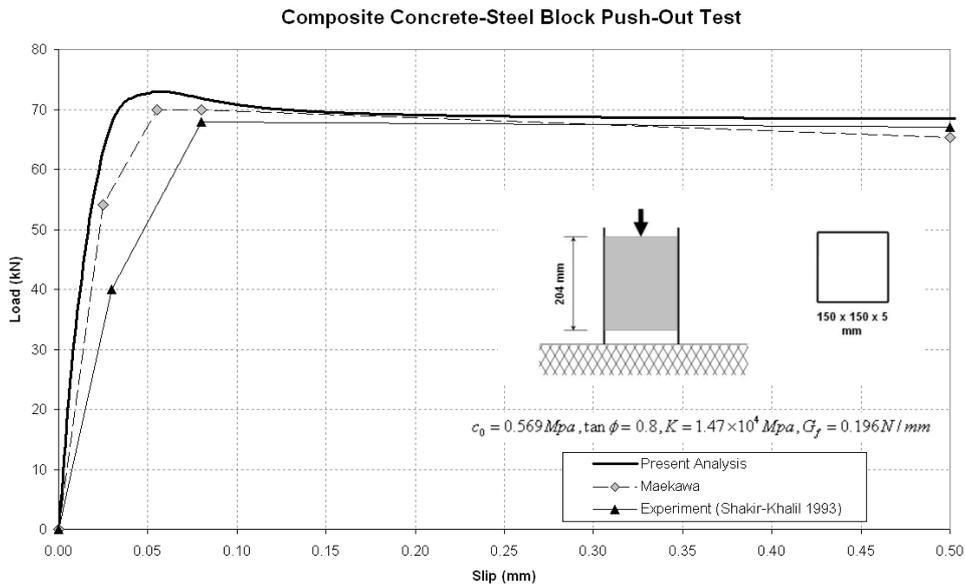


그림 7 합성 박스의 하중-미끌어짐 곡선

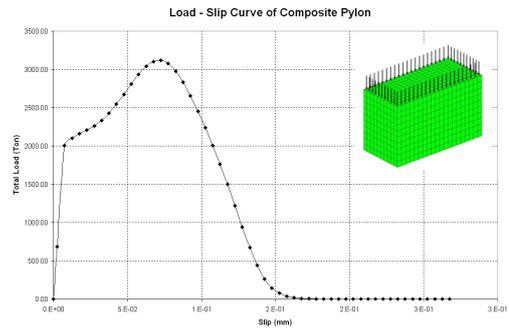
### 3.3 사각형 콘크리트-강재 합성형 박스의 밀어내기 테스트

사각형 강재 박스 안에 콘크리트를 채운 후 콘크리트를 밀어내는 시험이 Shakir and Khalil(1993)에 의해 수행되었다. 이 결과를 재현하기 위하여 콘크리트와 강재를 8절점 보강변형도 고체 요소로 모델링하고 두 재료 사이에 계면요소를 설치하여 해석하였다. 합성형 박스의 하중-미끌어짐 관계 곡선을 얻기 위하여 비선형 해석을 수행하다. 여기서 Maekawa는 실험식에 의한 탄소성 항복이론을 이용하여 이 경우에는 잘 일치하였으나, 본 연구에서는 일반적인 항복이론을 이용하여 모든 경우에도 적용할 수 있도록 하였다. 기하학적 데이터는 그림 7에 있으며 재료 상수는  $\alpha = 0.199$ ,  $k = 0.4246\text{MPa}$ 이다.

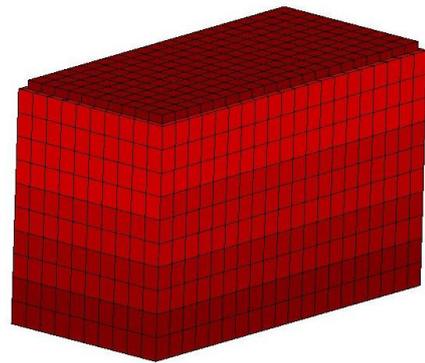
### 3.4 콘크리트-강재 주탑

일반적으로 콘크리트는 인장방향으로 균일이 발생하고 압축 방향으로는 항복에 의한 파단이 발생하는 비탄성 거동을 나타내며 강재는 인장과 압축 모두 항복이 발생하는 소성거동을 보인다. 이러한 재료의 경계면에서 힘은 부착 및 마찰력에 의해서 전달되는 비선형 거동을 나타내며 드러커-프레거의 소성 이론을 사용하였다.

주탑의 아래 부분은 매스 콘크리트로 채워진 강 박스이다. 콘크리트와 강 박스는 8절점 보강변형도 고체요소로 모델링되었으며, 그 경계에 계면요소를 적용하였다. 이와 같은 조건을 이용하여 콘크리트-강재 주탑의 경계면에서 비선형 거동 해석을 수행하였다. 경계 조건은 수직방향으로 움직인다고



(a) 하중-변위 곡선



(b) 합성 주탑 하부의 변형

그림 9

가정하였으며 수평방향은 고정하였다. 그 결과로 상부에 작용하는 하중과 변형 곡선을 계산하였다(그림 9(a)).

파괴모드는 강재 부재의 슬립과 극한강도와 관계에서 알 수 있으며 극한 강도는  $3.136 \times 10^6 \text{ kN}$ 에서 일어나며 0.08mm의 슬립을 보이므로 실제 최대하중에서는 슬립이 거의 발생하지 않는 것으로 알 수 있다.

## 4. 결 론

이번 연구에서는 두께를 가지지 않는 계면요소를 개발하고 이를 보강변형도 고체요소와 연결하여 콘크리트-강재 합성부재의 비선형 거동을 해석하였다. 계면요소의 비선형성은 실험식에 의한 항복조건 대신 모든 경우에 대한 다양한 적용성을 위하여 드러커-프레거의 항복 이론을 이용하였다. 강재의 경우 기존의 일반적인 적합 고체요소 대신 3차원 보강변형도 고체요소를 사용하여 박판의 휨-좌굴 거동을 묘사할 수 있게 하였다. 그 성능을 검증하기 위하여 여러 가지 해석을 수행하고 기존의 결과와 비교하였으며, 대부분의 경우 잘 일치함을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 건설교통부 한국건설기술평가원의 건설기술혁신

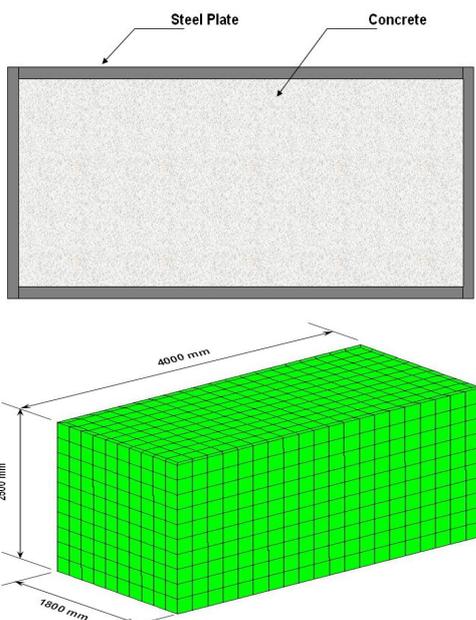


그림 8 합성 주탑 하부 모델

연구개발사업(06건설혁신D05) 지원에 의하여 이루어졌으며, 저자들은 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김현중, 염응준, 한택희, 강영중 (2007) 내부 구속 중공 CFT 교각의 연성도 평가, 한국전산구조공학회 학술발표회, pp.683~687.

정철현, 송나영, 김인규, 진병무 (2009) CFT 트러스 거더의 휨강성 및 진동특성, 대한토목학회 논문집, 29(1A), pp.19~30.

황원섭, 김동조, 정대안 (2003) 콘크리트 구속효과를 고려한 CFT 단주의 극한강도, 대한토목학회 논문집, 23(5A), pp.1011~1018.

Carol, I., Prat, P.C., Lopez, C.M. (1997) Normal/Shear Cracking Model: Application to Discrete Crack Analysis, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE* 123, pp.765~773.

Dvorkin, E., Bathe, K.J. (1984) A Continuum Mechanics Based Four-Node Shell Element for General Nonlinear Analysis, *Eng. Comput.*, 1, pp.77~88.

Freischlager, C., Schweizerhof, K. (1996) On a Systematic Development of Trilinear Three-Dimensional Solid Elements Based on Simo's Enhanced Strain Formulation, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 33, pp.2993~3017.

Hauptmann, R., Schweizerhof, K. (1998) A Systematic Development of Solid-Shell Element Formulations for Linear and Nonlinear Analysis Employing Only Displacement Degree of Freedom,

*Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 42, pp.49~70.

Hauptmann, R., Schweizerhof, K., Doll, S. (2000) Extension of the Solid-Shell Concept for Large Elastic and Large Elasto-Plastic Deformations, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 49, pp.1121~1141.

Maekawa K., Pimanmas A., Okamura H. (2003) Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, *Spon press*, London.

Parisch, H. (1995) A Continuum-Based Shell Theory for Non-Linear Applications, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 38, pp.1855~1883.

Shakir, Khalil, H. (1993) Pushout Strength of Concrete-Filled Steel Hollow Sections, *The Structural Engineer*, 71(13/6), pp.230~243.

Simo, J.C., Rifai, M.S. (1990) A Class Of Mixed Assumed Strain Methods and the Method of Incompatible Modes, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 29, pp.1595~1638.

Simo, J.C., Armero, F. (1992) Geometrically Non-Linear Enhanced Strain Mixed Methods and the Method of Incompatible Modes, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 33, pp.1413~1449.

- 논문접수일 2009년 9월25일
- 논문심사일
  - 1차 2009년10월 9일
  - 2차 2010년 5월18일
- 게재확정일 2010년 6월 4일