

축력을 받는 충전콘크리트 각형강관과 콘크리트-H형강 합성보
접합부의 유한요소 모델링에 관한 연구

An Investigation into the Finite Element Modeling of Connections of
Composited H-Beams and Concrete Filled S · H · S Columns Subjected
to Compression

이 종 석*
Lee, Jong Seok

윤 영 조**
Yoon, Young jo

김 승 현***
Kim, Seung Hyun

ABSTRACT

Recently, square hollow section (S · H · S) is frequently used for column and H-section for beam of steel building structures. The connection between S · H · S column and H-beam is found to weaken the rotational restraint of the joint. Several types of detail to overcome the problem have been suggested for the connection between concrete filled S · H · S column and concrete composited H-beam. In this paper, modelling technique to monitor the behavior of the connections is proposed. Then, Drucker-Prager yield criteria is introduced to simulate yield behavior of in-fill concrete while Von-Mises was used in earlier works. Gap-elements are also introduced to simulate the interaction between S · H · S columns and the in-fill concrete as in previous papers. axial forces are applied to S · H · S columns and made to vary in intensity and eccentricity.

1. 서 론

일반적인 중저층 건축구조물에서 아직까지는 철근콘크리트 구조물이 대부분을 차지하고 있다. 철근콘크리트 건물은 습식구조(RC구조)로서 열악한 작업환경, 자원 재활용의 어려움, 자원고갈로 인한 양질의 골재부족, 인건비 상승등의 문제를 안고 있다. 따라서 대량생산과 현장조립이 양호한 H형강을 주부재로 사용하는 철골구조가 보편화 되고 있는 추세에 있다. 철골조 건축구조물에서 H형강부재는 강축과 약축이 구별되어 있어 보재로서는 유리한 단면이다. 그러나 기둥재로서는 강축과 약축의 존재가 기둥배치시 약점이 되며 지진이나 풍하중등 횡력에 저항하기 위해서는 약축을 포함하는 평면에는 Bracing이나 Shear Wall을 별도로 설치해야 하는 문제점이 있다. 그러므로 기둥으로서의 H형강에 대한 약점을 보완하기 위해 폐단면이고 강축과 약축의 구분이 없는 좌우대칭 단면을 갖는 기둥으로서 각형강관 부재를 사용하려는 추세에 있다. 그러나 이러한 각형강관 기둥은 H형강보와의 접합부 형성에서 휨강성 저하라는 취약점을 갖게된다. 이러한 취약점을 보완하기 위해 많은 접합부 형태가 국내외에서 개발되고 있다. 이러한 추세의 일환으로서 각형강관에 무근콘크리트를 충전하고 H형강보에 콘크리트스라브를 합성한 접합부를 여러가지 형태로 개발하게 되었다. 각형강관이 압축재로서 사용될때 각형강관 내부에 무근콘크리트를 채우는 방법은 내화성능향상은 물론 기둥의 단면을 증가시키지 않고도 부재내력을 증가시킬수 있으며 각형강관의 구속효과에 의해 충전콘크리트의 내력상승과 충전콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 보강효과에 의해 부재내력이 상승하고 탁월한 변형성능을 발휘하는 장점이 있다. 이렇게 고안된 접합부는 실제실험을 통하여 그 거동이 파악되었다.⁽⁷⁾ 그리하여 이러한 실제거동이 유한요소 모델링을 통하여 추적되거나 예측되어지는 연구가 필요하게 되었다. 본논문은 이렇게 개발되어지

* 울산대학교 토목공학과 교수
** 울산대학교 토목공학과 박사과정
*** 울산대학교 토목공학과 석사과정

고 실험되어지는 여러형태 접합부의 거동을 유한요소 모델링을 통하여 예측하는 기법을 연구하고자 한다. 즉 각형강관내의 콘크리트와 각형강관에 접합되는 H형강과 H형강보위의 철근콘크리트 스라브의 합성보라는 이질적인 구조요소들을 유한요소 모델링하여 궁극적으로는 실험체의 비선형 거동을 미리 예측할 수 있는 기법을 연구하고자 한다. 그리하여 전 연구⁽⁸⁾에서는 각형강관내의 콘크리트 항복조건으로서 Von-Mises 항복조건을 사용하였는데 이번에는 Drucker-Prager 항복조건을 사용하고 접촉 알고리즘(Gap Element)은 전 연구의 것을 그대로 사용하고자 한다. 또한 전 연구에서는 축력을 적용시키지 않았는데 이번에는 축력의 크기, 편심의 크기를 변화시켜 보기로 하였다.

2. 콘크리트 항복조건의 특징

주응력축 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) 공간상의 한 점으로 콘크리트 응력을 나타내고 이 공간상에 항복조건(failure curve)을 나타낼 때 이 failure curve는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- failure curve는 곡면이다.
- failure curve는 압축영역에서 볼록(convex)하며 다음과 같은 볼록한 조건(convex condition)을 갖는다.

$$\frac{\partial^2 \gamma}{\partial \theta^2} < \gamma + \frac{2}{\gamma} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \theta} \right)^2 \quad \therefore \text{convex condition}$$

- failure curve는 다음 그림 2.1, 2.2에서 보여주는 특징을 갖는다.

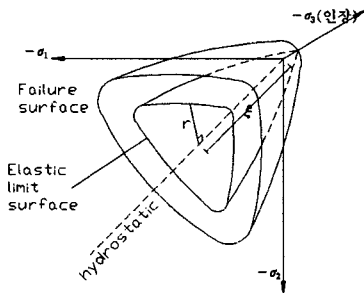


그림 2.1 주응력 공간상의 failure surface

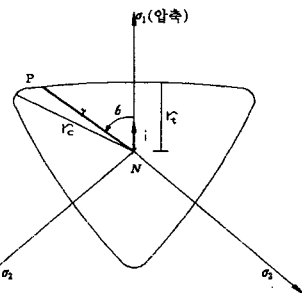


그림 2.2 Deviatoric plane 상의 failure surface

- failure curve가 octahedral 평면과의 교차하는 모양을 보면 인장 혹은 작은 압축응력하(작은 ξ 값)에서는 삼각형에 가깝고 큰 압축응력하(큰 ξ 값)에서는 원형에 가까워진다.
- 그림 2.2에서와 같이 항상 $\frac{r_i}{r_c} < 1$ 이며 π -평면 근처에서는 0.5 정도이고 $\xi = +7f_c$ (f_c : 콘크리트 압축강도)에서는 0.8 정도의 값을 갖는다.

2.1 Mohr-Coulomb의 항복조건

Mohr-Coulomb에 의해서 제안된 일반적인 항복조건은 다음식의 $|\tau|$ 가 일정값을 가지면 항복한다는 것이다.

$$|\tau| = c - \sigma \tan \phi \quad (2.1)$$

또한 오른쪽 그림 2.3에서

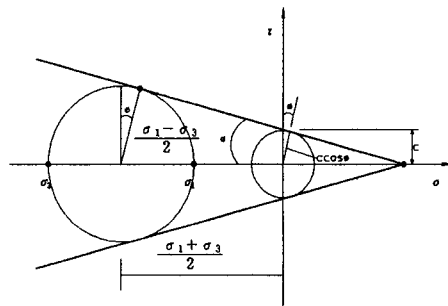


그림 2.3 Mohr Coulomb 항복조건에서의 주응력들간의 관계
- 231 -

$$\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1 \quad \text{for } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad - (2.2)$$

$$f_c' = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad - (2.3)$$

$$\frac{\sigma_1}{f_i'} - \frac{\sigma_3}{f_c'} = 1 \quad - (2.4)$$

$$f_i' = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad - (2.5)$$

그리고 일반적인 편차 주응력 (s_1, s_2, s_3)에 대한 다음 식에서

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_m \\ \sigma_m \end{bmatrix} = 2 \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \cos(\theta_0 - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_0 + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad - (2.6)$$

식(2.6)을 식(2.2)에 대입하면 아래식이 나온다.

여기서 $\sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2c \cos \phi} - \sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2c \cos \phi} = 1 \quad \text{for } \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 라는 조건에서

$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + \sqrt{J_2} \sin(\theta + \frac{1}{3}\pi) + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) \sin \phi - c \cos \phi \quad - (2.7)$$

$$f(\xi, \gamma, \theta) = \sqrt{2} \xi \sin \phi + \sqrt{3} \gamma \sin(\theta + \frac{1}{3}\pi) + \gamma \cos(\theta + \frac{1}{3}\pi) \sin \phi - \sqrt{6} c \cos \phi = 0 \quad - (2.8) \text{ 이 성립한다.}$$

위 두 failure curve식을 meridian plane과 주응력축 공간상에 나타내면

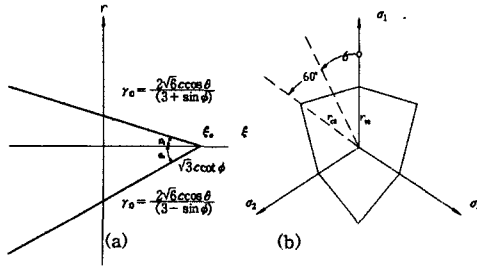


그림 2.4 Mohr-Coulomb 항복조건 (a)meridian plane
(b) π -plane

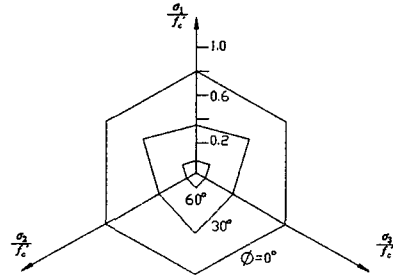


그림 2.5 Deviatoric plane 상의 failure curves

그림 2.5에서 내부 마찰각(ϕ)이 크면 failure curve가 octahedral 평면과 교차하는 모양이 삼각형에 가깝고 내부마찰각이 작아지면 육각형에 가까워 진다는 것을 알 수 있다.

또한 다음 식이 성립한다.

$$\gamma_0 = \frac{2\sqrt{6}c \cos \phi}{3 + \sin \phi} = \frac{\sqrt{6}f_c'(1 - \sin \phi)}{3 + \sin \phi} \quad \text{-----} \quad (2.9)$$

$$\gamma_0 = \frac{2\sqrt{6}c \cos \phi}{3 - \sin \phi} = \frac{\sqrt{6}f_c'(1 - \sin \phi)}{3 - \sin \phi} \quad \text{-----} \quad (2.10)$$

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_\infty} = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad \text{-----} \quad (2.11)$$

그런데 이 Mohr-Coulomb 항복조건을 응력이 육각형이나 삼각형의 코너부위에 있을 때 수치해석을 수행하기가 힘들다는 단점이 있다. 따라서 다음의 Drucker-Prager 항복조건을 설명하고자 한다.

2.3 Drucker-Prager 항복조건

Mohr-Coulomb 모델의 단점을 개선하기 위한 Two-Parameter Model의 한 종류로서 Drucker-Prager Model이 제안되었다.

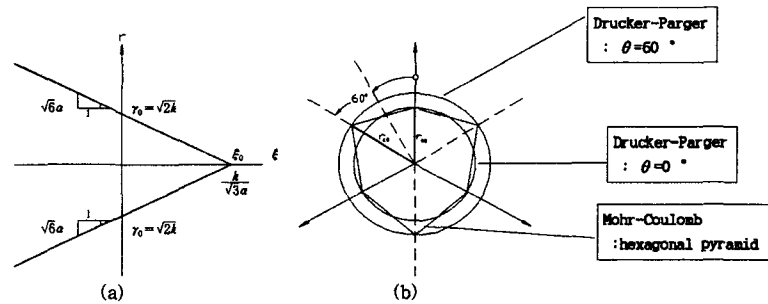


그림 2.6 Drucker-Prager 항복조건 (a)meridian plane (b) π plane

위 그림을 식으로 표현하면

$$f(\sigma, \tau) = \sqrt{3}\sigma\alpha + \tau - \sqrt{2}k = 0 \quad (2.12)$$

여기서 α, k 의 상한값은

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \quad (2.13)$$

α, k 의 하한값은

$$\alpha = \frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \quad k = \frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \quad (2.14)$$

위 α, k 값은 식(2.113) 과 식(2.114) 로 표현되는 상한값과 하한값 사이에 있으며 보통 c, ϕ 값에 의해 결정된다. 그런데 본 논문에서는 Mohr-Coulomb 항복조건에 f_c, f_t 값을 대입하여 정하였다.

3. 접촉 알고리즘

3.1 개 론

접촉현상은 여러개의 재료로 구성되는 구조물에서 흔히 발생하는 현상으로서(예 : 그림4-2에 나타난 바와 같이 H형강보위의 철근콘크리트슬라브는 인장을 받고 이때 각형강관과 각형강관 내부의 콘크리트는 서로 떨어져서 거동을 하지만 H형강보의 하부플렌지와 각형강관의 접합부분은 각형강관과 각형강관 내부의 콘크리트가 서로 압축을 받아 같이 거동을 하는 형태) 구조물의 변형이 미소하고 재료가 탄성거동을 하는 경우에도 비선형성을 가지는 문제이기 때문에 수치적 해결이 용이하지 않다. 초기에는 이론해를 통한 접근 방법이 주류를 이루었으나 수치 기법의 발달에 따라 유한요소법이 접촉문제의 해를 구하기 위한 주요 도구로 사용되고 있다. 일반적인 유한요소법의 정식화는 변위 자유도에 기초를 두고 이루어지는 바 접촉문제에서는 접촉영역의 변위가 불가입성(impenetrability) 조건에 의해 제한된다. 불가입성 조건이란 한 부재의 표면에 위치한 질점이 다른 부재의 내부로 침범할 수 없다는 조건을 의미한다. 불가입성 조건을 구현하는 방법은 크게 두가지로 구분할 수 있는데 하나는 정식화과정 자체에서 변위제한 조건을 고려하는 것이고 다른 하나는 Gap 요소를 사용해서 접촉하는 영역들을 연결시키는 방법이다.

제한조건을 부여하려면 먼저 접촉 가능한 점들이 정의되어야 하는데 가장 간단한 방법은 접촉이 예상되는 영역에서 쌍을 이루는 질점들을 설정하고 해석과정에서 각 쌍들의 접촉 여부를 검토하는 것이다. 접촉 가능한 점들이 설정되면 제한조건은 다양한 방법으로 구현될 수 있다. Gap 요소의 강성을 보정하는 기본적인 개념은 두 영역의 간격이 떨어져 있으면 강성을 "0"으로 설정하

고 접촉하게 되면 강성을 큰 값으로 증가시키는 것이다.

Gap 요소를 이용한 접촉 알고리즘의 장점은 새로운 형태의 미지수나 특별한 해석 기법이 필요 없기 때문에 기존의 유한요소해석 프로그램에 쉽게 포함시켜 사용할 수 있다는 것이다. 이에 본 논문에서는 마찰이 포함되지 않은 삼차원 탄소성 접촉문제를 간단하면서도 효율적으로 해결할 수 있도록 새로운 형태의 Gap 요소를 개발하도록 한다.

3.2 Gap을 이용한 접촉 알고리즘

그림3-1은 접촉면이 포함된 구조시스템을 해석하기 위해 Gap 요소를 도입한 유한요소 모델을 개략적으로 도시하고 있다. Gap 요소는 외부 하중에 의해서 두 영역 A 와 B가 겹쳐지는 것을 방지하는 역할을 제외하고는 영역들의 거동에 아무런 저항을 하지 않는다는 점에서 일종의 가상적인 요소로 정의될 수 있다. Gap 요소를 사용해서 접촉 문제를 해석하는 과정을 설명하기 위하여 일차적으로 그림3-1에 나타난 하나의 Gap 요소 i 와 j 사이의 부재에 대한 거동을 살펴보면 다음과 같다. Gap 요소는 두 영역 A 및 B의 상대적인 거동에 따라 길이가 증가하거나 감소하는 상태가 될 것이다. 결국 Gap 요소의 길이는 두 접촉면 사이의 간격으로 정의될 수 있다. 이 값은 상수가 아니라 접촉문제의 수렴해를 구하는 반복과정에서 계속 변하는 변수가 된다. Gap 요소의 축방향 변형율이 인장축(+)이면 요소의 길이가 증가된 상태(elongated state)임을 의미하며 이때는 Gap 요소가 두 영역의 변형을 구속해서는 안된다. 즉 Gap 요소의 탄성계수를 무시할 수 있을 정도의 작은 값으로 설정함으로써 전체적인 거동에 영향을 주지 않도록 해야한다. 반면에 변형율이 압축축(-)이면 요소의 길이가 감소되어 수축된 상태(contracting state)임을 나타내고 변형율의 값이 "-1"에 이르게 되면 요소의 길이가 "0"이되어 두 영역 사이의 간격이 완전히 사라지게 되므로 접촉된 상태(contact state)임을 나타낸다. 결국 변형율이 "-1"보다 작게 되면 한 영역이 다른 영역의 내부로 침범한 형태(overlapped state)가 되어 물리적으로 정의될 수 없는 상태가 되므로 겹쳐지는 것을 방지하기 위하여 요소의 탄성계수를 무한히 큰 값으로 지정해야 한다. 이러한 Gap 요소의 개념은 간단한 접촉문제를 대상으로 흔히 사용되어 왔다. 그러나 기존의 Gap 요소는 두 영역이 접촉하거나 겹쳐질 때 요소의 길이를 설정하는데 어려움이 있다.(그림 3-3(E),(F)) 이에 본 논문에서는 기존 Gap 요소의 개념을 보완하여 새로운 형태의 Gap 요소를 제안하고자 한다. 그림3-2는 그림3-1에서 도시한 하나의 Gap 요소에 대한 구성형태를 개략적으로 도시한 것이다.

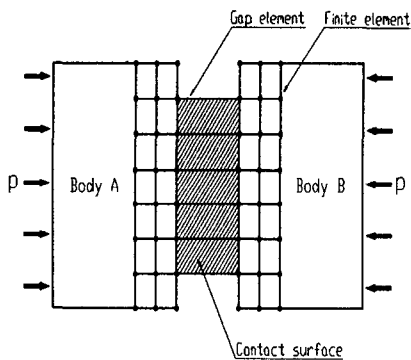


그림3-1 접촉면이 포함된 구조 시스템

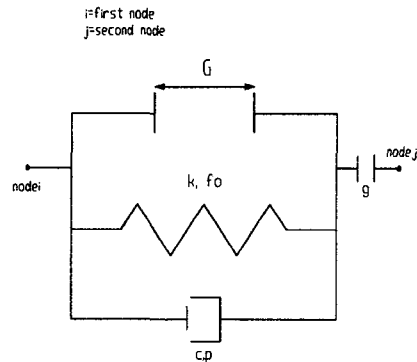


그림3-2 Gap 구성형태







Schematic Deformation		State and Discription	
		General Gap Element	Proposed Gap Element
A		Initial state Initial gap Distance	Initial state Initial gap Distance (G + g)
B		Elongated state $\epsilon > 0$ $d > d_0$	Seperated state (G + g) $< d \quad g > 0$
C		Contracted state $-1 < \epsilon \leq 0$ $0 < d \leq d_0$	
D			Contact state $G \approx 0$ $g = 0$
E		Contact state $\epsilon = -1$ $d = 0$	Overlapped state (G + g) < 0
F		overlapped state $\epsilon < -1$ $d < 0$	

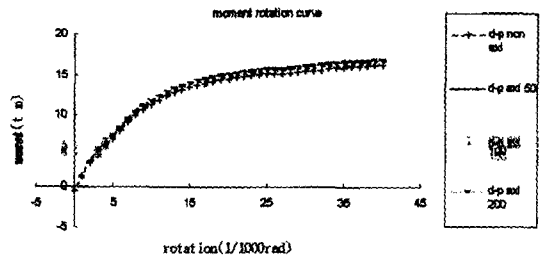
그림3-3 기존 Gap 요소와 제안된 Gap 요소의 비교

4. 해석모델 및 해석과정

본 연구에서 대상으로 하는 축력을 받는 충전콘크리트 각형강관과 콘크리트 합성된 H형강보 접합부에 대한 거동을 묘사하기 위하여 3차원 비선형 유한요소 해석프로그램인 COSMOS/M을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 그림4-1에서 보듯이 각형강관의 중심축을 기준으로 대칭이므로 전체모델의 반에 대해서만 모델링하였다. 각형강관과 H형강보 요소는 횡변형과 전단변형을 고려한 4절점 Shell요소를 사용하였으며 접합부의 횡변형에 대한 거동을 고찰하는 것이 목적이므로 콘크리트 합성된 H형강보와 충전콘크리트 각형강관에서의 국부적인 파괴모드 즉 H형강보의 웹 및 플렌지 좌굴을 고려하지 않았다. 이에 따라 H형강보는 상대적으로 체눈의 크기를 크게하여 모델링하였다. 각형강관 내부의 무근콘크리트는 8절점을 갖는 Solid요소를 사용하였다. 그림4-2와 같이 H형강보에 합성된 철근콘크리트 스투브는 인장을 받는다. 그리하여 스투브 콘크리트는 인장에 전혀 저항을 하지 못한다는 가정하에 스투브철근을 H형강보의 플렌지 폭과 동일하게 가정하고 환산 단면적으로 바꾸어 Shell요소를 사용하였다. H형강보와 스투브가 일체로 거동하게 하기 위해 설치해놓은 Stud bolt는 강성이 큰 Beam요소를 사용하였다. 각형강관 내부의 무근콘크리트와 각형강관 사이의 접촉부분을 살펴보자. 즉 접촉상태가 압축접촉이나 인장접촉이냐에 따라 압축시에는 각형강관 내부 충전콘크리트가 일체로 거동하지만 인장접촉에서는 별도로 거동한다. 이와같은 거동을 모델링하기 위해 앞에서 언급한 Gap요소가 필요하게 된다. H형강보에 의해 각형강관 플렌지가 내부로 밀려 들어가는 압축력을 받을 때 처음에는 압축접촉이라도 나중에는 인장접촉이 될 수 있다. 이에 대한 대안으로서 Gap요소를 이용한 접촉알고리즘을 통하여 구현하였다. 각형강관과 무근콘크리트는 Gap요소에 의해서 연결될수 있도록 접촉면에서 동일한 체눈을 사용하였으며 두 요소사이의 마찰은 고려하지 않고 두성분은 횡변형에 의해서 연속성을 유지하게 하였다. 강재의 항복강도는 쿠펜테스트 결과를 각성분의 재료성질로 이용하였으며 각형강관과 H형강보의 탄성계수는 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 프와송비는 0.3으로 하였고 콘크리트의 탄성계수는 $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 프와송비는 0.17로 하였다. 재료적 비선형을 고려하기 위하여 각형강관내의 콘크리트에는 Drucker-Prager 조건을 사용하였으며 이때 중요변수로서 α, k 값을 정해야 하는데 이 α, k 값은 c, ϕ 값과 관계가 있으므로 Mohr-coulomb의 항복조건식에서 콘크리트강도의 크기에 따라 얻어낸 c, ϕ 값에서 α, k 값을 계산하여 적용시켰다.

5.2 축력의 크기에 따른 비교

본 접합부가 사용되는 중저층 구조에서는 기둥에 축력이 적용되므로 이 축력의 크기를 2, 4, 8층 높이의 축력 즉 50t, 100t, 200t 으로 변화시켜 보았다.

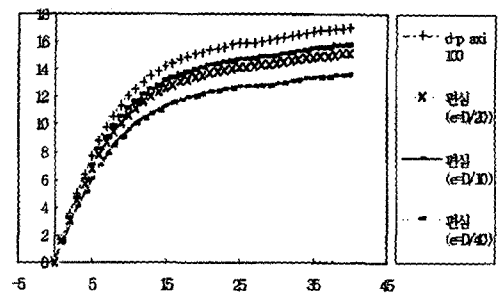
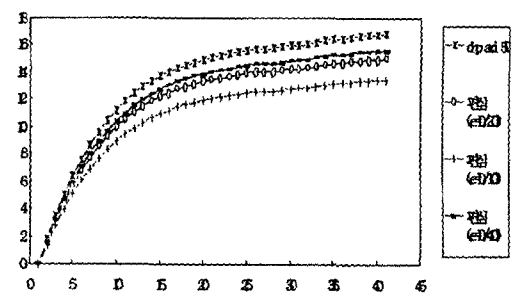


구분	SDW	
	My	Mu
50t	12.727	16.329
100t	13.143	16.941
150t	13.358	16.827

그림 5.2 축력의 크기에 따른 비교

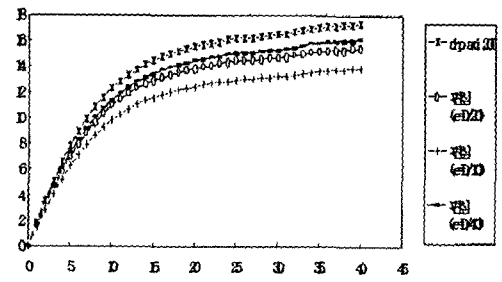
5.3 편심의 크기에 따른 비교

위 그래프에서 보듯이 축력이 커지면 접합부의 강성이 증가한다. 그 이유로서는 3축 응력(축력) 상태에서는 콘크리트 항복응력이 높아지기 때문이다. 그런데 실제 구조물에서는 축력이 커지면 좌굴효과나 편심효과 때문에 접합부 휨강성이 떨어지는 경향이 있을 것이기 때문에 편심의 크기를 변화시켜 이런 경향을 파악하고자 하였다.



(a) 축력 50ton일 때 편심크기에 따른 변화

(b) 축력 100ton일 때 편심크기에 따른 변화



편심량	$e = \frac{1}{40} D$		$e = \frac{1}{20} D$		$e = \frac{1}{10} D$	
	My	Mu	My	Mu	My	Mu
50t	100	100	100	100	100	100
100t	96.979	97.676	94.572	99.533	95.247	98.603
150t	96.343	97.132	96.217	99.399	90.045	97.137

My : 항복 모멘트, Mu : 종국 모멘트

(c) 축력 200ton일 때 편심크기에 따른 변화

그림 5.3 축력변화와 편심크기에 따른 비교

6. 결 론

지금까지 논의한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- Drucer-Prager 항복조건을 사용한 모델이 Von-Mises 항복조건을 사용한 모델보다 실험치에 가까움을 알수있었다.
- 축력의 크기를 50t에서 2, 4배 증가시켜 100t,200t으로 작용시켰을때 초기강도(My), 종국강도(Mu)가 증가하는 것은 콘크리트의 구속효과 때문이다. 그러나 그 증가율은 1~5%정도로서 미미하다.
- 편심의 크기가 $0.5cm(\frac{D}{40})$, $1cm(\frac{D}{20})$, $2cm(\frac{D}{10})$ 정도일때 초기강도(My), 종국강도(Mu)가 2~10%정도 감소한다.
- 이상과 같은 결과로 미루어 축력을 받는 콘크리트로 채워진 각형강관기둥은 콘크리트 구속효과에 의한 강도증진 보다는 편심이나 좌굴로 인한 강도감소효과가 더 클 것으로 판단되었다. 이러한 예상을 실험으로 확인하는 과정과 좌굴해석까지 확대해서 수행하는 노력이 앞으로 필요하다.

7. 참고문헌

1. W. F. Chen, E. M. Lui, "Stability Design of Steel Frame" CRC Press, Inc., 1991.
2. Reidar Bjorhovde, Jacques Brozzetti, "Connections in Steel Structures Behaviour, Strength and Design" Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1988.
3. W. F. Chen, "Joint Flexibility in Steel Frame" Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1987.
4. SAMSUNG Engineering, "A Study on the Structural Characteristics of Concrete Filled Steel Tube Columns" SAMSUNG Engineering and Construction Co., Ltd. Institute of Technology, 1993.
5. M. R. Bahaari, A. N. Sherbourne, "Computer Modelling of an Extended End-Plate Bolted Connection" Department of Civil Engineering, University of Waterloo, 1993.
6. 정기택. "볼트 접합부의 비선형 해석을 위한 수치해석 방법에 관한 연구" 한국과학 기술원. 1995.
7. 이종석, 이광훈, "충전콘크리트 각형강관과 콘크리트 합성된 H형강보 접합부의 휨거동에 관한 연구" 한국강구조학회, 1995.12.
8. 이종석, 변우정, "충전콘크리트 각형강관과 콘크리트 합성된 H형강보 접합부의 유한요소 모델링에 관한 연구" 한국전산구조공학회 학술발표, 1995.10.