

콘크리트 스퀘어 합성된 H형강보-충전각형강관기둥 휨성능 결정요인에 관한 연구

이 종 석
토목환경공학부

<개 요>

최근 들어서 철골구조물에 각형강관기둥과 H형강보가 많이 사용되는 추세에 있다. 각형강관기둥과 H형강보의 접합부는 그 회전강성이 약한 것으로 알려져 있다. 그러한 약점을 보완하기 위해서 콘크리트 충전된 각형강관과 H형강보 접합부에 대한 많은 고안이 이루어지고 있다. 그런데 이렇게 고안된 모든 접합부 모델에 대해서 실험을 행할 수는 없다. 그렇다면 수치해석 모델링과 수치해석에 의해 그 강도를 규명해야 한다. 그리하여 본 논문에서는 유한요소 모델링기법을 연구하고 접합부의 강성을 좌우하는 여러요소 즉 콘크리트 강도, 각형강관두께, 축력의 크기, 축력의 편심위치 등을 변화시켜 접합부 강성변화에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았다.

A Parametric study on the behavior of Concrete-Filled SHS Columns to Compositied H-Beam Connections

Jong-seok Lee
Dept. of Civil and Environment Eng.

<Abstract>

Recent steel structures use square hollow sections and H-sections for columns and beams respectively. But we can hardly have rigid column-beam connections and thus we must take some measures to improve the rotational stiffness of connections. For this purpose, several types of connections, such as H-section beams connected to concrete-filled square hollow section columns, are contrived and put to experiment.

The experimental works, however, are usually difficult and expensive. Particularly, experimenting many types of connections with similar behavior may not be feasible. Instead, the numerical modelling and analysis will be adopted to derive the stiffness of connections. In this work FEM modeling techniques are examined and parametric analysis are carried out. The major parameters considered are concrete strength, thickness of steel column, magnitude of axial force and eccentricity of axial forces.

1. 서 론

우리나라의 일반적인 중저층 건축구조물의 시공재료로는 현재까지 대부분 철근 콘크리트를 사용하고 있다. 철근콘크리트 건물은 습식구조(R.C구조)로서 열악한 작업환경으로 인한 작업성 측면, 자원 고갈로 인한 양질의 골재 부족으로 인한 재료 확보성 측면 및 인건비 상승으로 인한 경제성 측면에서 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 약점이 되어 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 상대적인 휨강성 저하라는 취약점을 갖게된다. 이러한 취약점을 보완하기 위해 많은 접합부 형태가 국내외에서 개발되고 있다. 이러한 추세의 일환으로서 각형강관에 콘크리트를 충전하고 H형강보에 콘크리트스라브를 합성한 접합부를 여러가지 형태로 개발하게 되었다.⁽⁷⁾ 각형강관내에 콘크리트를 채우게 되므로써 각형강관의 구속효과에 의한 충전 콘크리트의 강도 증진, 각형강관과 충전 콘크리트의 합성에 의한 각형강관 단면의 증가효과 및 충전콘크리트에 의한 각형강관의 국부좌굴에 대한 보강효과등이 있다. 따라서 각형강관이 압축재료로 사용될때는 단면을 증가시키지 않고도 부재내력을 증가 시킬수 있으며 접합부에서는 휨 전달능력이 상승되고 변형성능 또한 탁월한 장점이 있다. 이렇게 고안된 접합부는 실제실험을 통하여 그 거동이 어느 정도까지는 파악되었다.⁽⁷⁾ 이것과 더불어 접합부 거동에 영향을 미치는 여러요소를 찾아 내고, 이러한 요소들의 변화에 의한 접합부의 거동을 예측하는 연구가 필요하게 되었다. 이러한 요소들로는 콘크리트강도, 각형강관두께, 항복조건 적용방법, 축력의 크기, 축력의 편심정도등이다. 본 연구에서는 유한요소기법을 통하여 이러한 여러요소값의 변화에 따르는 접합부의 거동을 예측하는 방법을 연구하고자 한다.

즉 각형강관내의 콘크리트와 각형강관에 접합되는 H형강과 H형강보위의 철근콘크리트스라브의 합성보라는 이질적인 구조요소들을 유한요소 모델링하여 궁극적으로는 실험체의 비선형 거동을 미리 예측할 수 있는 기법을 연구하고자 한다.

2. 재료의 항복조건

접합부를 구성하는 주재료는 강재(steel)와 콘크리트(concrete)이다. 이러한 주재료들의 항복조건을 어떻게 적용시키느냐에 따라라도 접합부의 휨강성이 달라진다.

2.1 콘크리트의 항복조건

콘크리트 주응력 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) 공간상에 항복면을 나타냈을 때 그 형태는 그림 2.1 과 같다. 이 항복면의 정수압축(hydrostatic axis)에 수직한 면에 의한 단면을 Deviatoric plane이라 하고 정수압축을 포함한 면에 의한 단면을 meridian plane이라 한다. 먼저 Deviatoric plane상에 나타난 항복곡선의 특징은 다음과 같다.

- 항복곡선은 매끄럽다(smooth).
- 항복곡선은 적어도 압축응력에 대해서는 볼록하다(convex).

$$\text{볼록조건: } \frac{\partial^2 r}{\partial \theta^2} < r + \frac{2}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)^2 \text{ -----(2-1)}$$

- 항복곡선은 그림 2.2에서 보여주는 특징을 갖는다.
- 항복곡선은 인장 또는 작은 압축응력(π -평면에 가까운 작은 ζ 값)하에서는 삼각형에 가깝고 압축응력이 커짐에 따라(큰 ζ 값) 원형에 접근한다.

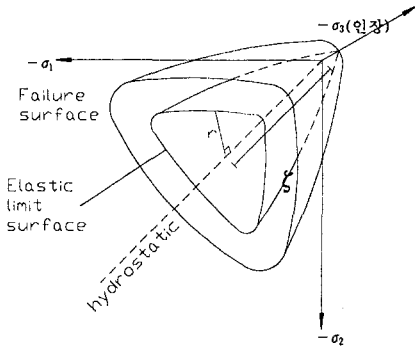


그림 2.1 주응력 공간상의 yield surface

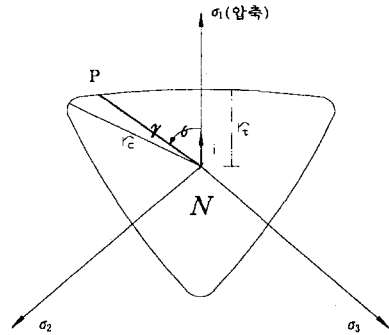
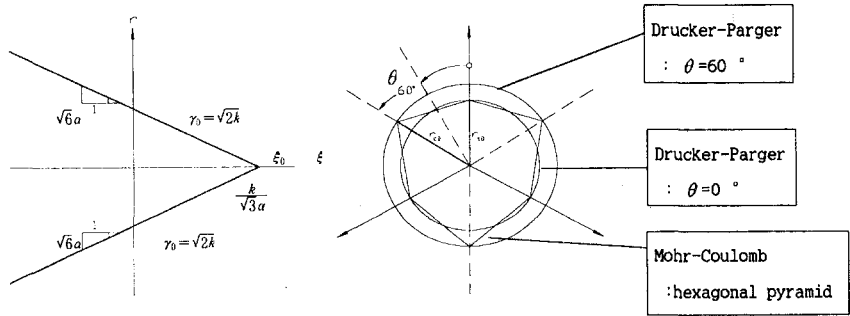


그림 2.2 Deviatoric plane 상의 yield surface

또한 meridian plane상의 항복곡선의 특징은 다음과 같다.

- 항복곡선은 정수압의 크기(ζ 값)에 따라 변한다.
- 항복곡선은 매끄럽고 볼록한 곡선이다(smooth, convex and curved)

이와 같은 콘크리트항복조건을 보다 단순화하여 수치해석시 적용하기 편리하도록 정리해 놓은 것으로서 Drucker-Prager 항복조건등이 있다. Drucker-Prager에 의해 제안된 항복조건은 두 매개변수 모델의 일종으로써 Mohr-Coulomb파괴조건과 Von-Mises항복조건을 합성, 수정하여 다음(2-2)식과 같이 만들었다. (2-2)식을 주응력 공간상에서 표현하면 그림2-3과 같이 된다.



(a) meridian plane 상의 yield surface

(b) π plane 상의 yield surface

그림2.6 Drucker-Prager 항복조건

$$f(I_1, I_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K$$

$$= \sqrt{6} \alpha \zeta + r - \sqrt{2}K = 0 \quad \text{-----(2-2)}$$

여기서 I_1 : 주응력의 1차 불변량
 J_2 : deviatoric응력의 2차 불변량

$$\zeta = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$$

$$r = \sqrt{2j_2}$$

α, k : 양의 상수

$\theta = 60^\circ$ 에서 α, K 는 상한값을 가지며

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)}, \quad K = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad \text{-----(2-3)}$$

$\theta = 0^\circ$ 에서 α, K 는 하한값을 갖는다.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}, \quad K = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad \text{-----(2-4)}$$

여기서 c (점착력), ϕ (내부마찰각)는 Mohr-Coulomb항복 조건에 나타나는 매개변수이다. 본 연구에서는 Mohr-Coulomb의 항복조건에 압축강도와 인장강도를 대입하여 c, ϕ 를 구한 후 α, K 를 정하여 표를 만들었다.

표2-1. 압축강도 크기에 대한 c, ϕ, α, K 값

f_c' (압축강도) (kg/cm ²)	c (kg/cm ²)	ϕ (degree)	α	K
180	31.0812	51.896	0.4106	30.0216
240	39.7528	53.3436	0.4215	37.4068
300	47.3871	52.9593	0.4171	44.8687

2.2 강재의 항복조건(Von-Mises Yield Criterion)

Von-Mises에 의해 제안된 항복조건은 Octahedral전단 응력이 임계값(K)에 도달하면 재료는 항복이 시작된다는 것이다.

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} K \quad \text{-----(2-5)}$$

$$f(J_2) = J_2 - K^2 = 0$$

여기서 τ_{oct} : Octahedral 전단응력

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] : \text{deviatoric 응력의 2차 불변량}$$

$$K = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} : \text{순수전단 상태에서 항복응력} \quad \sigma_y : \text{일축응력 상태에서 항복응력}$$

일반적으로 Von-Mises의 항복조건은 금속재료의 거동에 잘 맞으며 Deviatoric면 상에서 항복곡선이 원이므로 수치해석을 수행하는데 편리하므로 연성재료의 항복조건으로 사용되고 있다. 그런데 콘크리트가 고압축상태에 있을 경우에도 Von-Mises의 항복조건을 사용하기도 한다.

3. 접촉 알고리즘

접촉현상은 2개 이상의 구조물이 상호간에 구조적인 부재에 의해 연결되지 않은 상태에서 하나의 구조물로 거동할 때 발생한다. 그림 4-2에 나타난 바와 같이 합성보에 모멘트가 작용하면 각형강관에는 인장력과 압축력으로 전달된다. 이때 각형강관과 내부콘크리트는 인장력이 작용하는 부분에서는 분리되어 거동하게 되고 압축력이 작용하는 부분에서는 서로 연결되어 일체로 거동하게 된다. 이렇게 접촉현상은 구조물의 변형이 미소하고 재료가 탄성거동을 하는 경우에도 구조물에 비선형 거동을 발생시키는 현상이기 때문에 구조해석이 용이하지 않다. 초기에는 이론적인 해를 구하여 접근하는 방식이 주류를 이루었으나,

현재에는 컴퓨터와 수치해석 기법의 발달로 유한요소법이 접촉문제를 해석하는 주요 도구가 되었다. 접촉문제를 유한 요소법으로 정식화하는데는 한 부재의 표면에 위치하는 절점이 접촉영역의 다른 부재 내부로 침범할 수 없다는 불가입성의 변위에 대한 제한조건이 만족되어야 한다. 불가입성조건을 구현하는 방법은 크게 두가지로 구분할 수 있는데, 하나는 정식화 과정자체에서 변위 제한 조건을 고려하는 것이고 다른 하나는 Gap요소를 사용해서 접촉하는 영역들을 연결시키는 방법이다. 본 논문에서는 Gap요소를 이용하여 불가입성 조건을 구현하였다.

3.1 Gap을 이용한 접촉 알고리즘

그림3-1은 접촉면이 포함된 구조시스템을 해석하기 위해 Gap 요소를 도입한 유한요소 모델을 개략적으로 도시하고 있다.

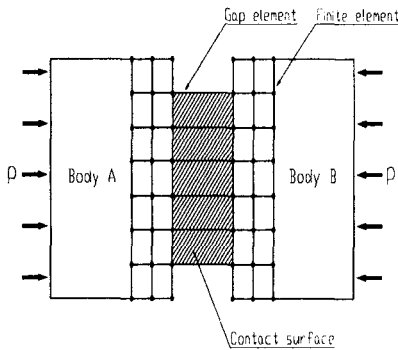


그림3-1 접촉면이 포함된 구조 시스템

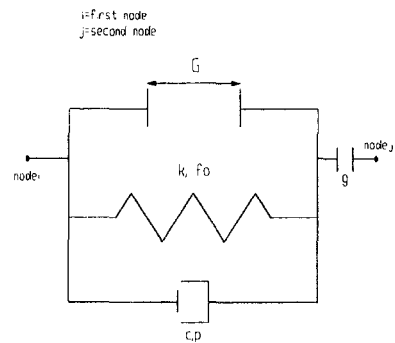


그림3-2 Gap 구성형태

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.







Schematic Deformation		State and Discription	
		General Gap Element	Proposed Gap Element
A		Initial state Initial gap distance d_0	Initial state Initial gap distance d_0
B		Elongated state ζ $d > d_0$	Seperated state $d > d_0 + \mu$
C		Contracted state $0 < d \leq d_0$	
D			Contact state $d = \mu$
E		Contact state $d = 0$	Overlappstateed $d < \mu$
F		overlapped state $d < 0$	

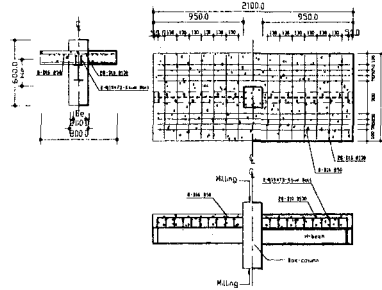
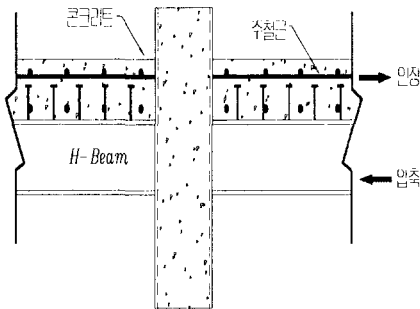
그림3-3 기존 Gap 요소와 제안된 Gap 요소의 비교

그러나 기존의 Gap 요소는 두 영역이 접촉하거나 겹쳐질 때 요소의 길이를 설정하는데 어려움이 있다.(그림3-3(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.

4. 모델링 및 해석과정

본 연구에서 대상으로 하는 축력을 받는 충전콘크리트 각형강관과 콘크리트 합성된 H형 강보 접합부에 대한 거동을 묘사하기 위하여 3차원 비선형 유한요소 해석프로그램인 COSMOS/M을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 그림4-1에서 보듯이 각형강관의 중심축

을 기준으로 대칭이므로 전체모델의 반에 대해서만 모델링하였다. 각형강관과 H형강보 요소는 휨변형과 전단변형을 고려한 4절점 Shell요소를 사용하였으며 접합부의 휨변형에 대한 거동을 고찰하는 것이 목적이므로 콘크리트 합성된 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 스라브는 인장을 받는다. 그리하여 스라브 콘크리트는 인장에 전혀 저항을하지 못한다는 가정하에 스라브철근을 H형강보의 플렌지 폭과 동일하게 가정하고 환산 단면적으로 바꾸어 Shell요소를 사용하였다. H형강보와 스라브가 일체로 거동하게 하기위해 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 Gap 요소를 이용한 접촉알고리즘을 통하여 구현하였다. 각형강관과 무근콘크리트는 Gap요소에 의해서 연결될수 있도록 접촉면에서 동일한 체눈을 사용하였으며 두 요소사이의 마찰은 고려하지 않고 두 성분은 휨변형에 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.



SDW : 콘크리트 300Kg/cm² , 각형강관200×200×6 Directing , Welding 접합부

그림4-1 모델링 대상 접합부개형

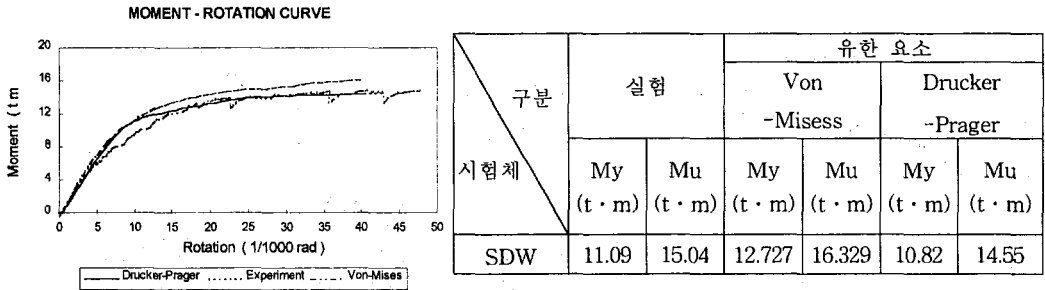
그림4-2 접합부 하중전달도

5. 결과의 고찰

전절에서와 같이 모델링하여 해석과정을 정립한 후에 접합부 휨강성의 크기를 결정하는 여러 요소값들을 변화시켜 적용하여 보았다. 즉 각형강관 내의 충전콘크리트에 Drucker-Prager와 Von-Mises항복조건을 적용시킨 결과를 실험 결과와 비교하여 Drucker-Prager의 식이 더욱 실제와 부합한다는 것을 확인한 후 충전콘크리트의 강도를 변화시켜 보았으며, 축력을 크기와 편심량을 변화 시키면서 적용하여 보았다. 이때 좌굴효과는 고려하지 않았는데 그이유는 이 기둥의 거동이 단주에 가깝고 중저층 구조물에서 횡방향 변위가 작으므로 상대적으로 편심좌굴효과도 작을 것으로 보았기 때문이다.

5.1 두가지 항복조건에 의한 결과

접합부에 대한 실험결과와 본 논문에서의 모델링결과(Drucker-Prager 항복조건 적용, Von - Mises 항복조건 적용)를 비교하여 보았다. 이때 콘크리트강도(σ_{ck})는 300kg/cm^2 , 각형강관 두께(t)는 6mm로 하였다.



(a) 결과 그래프

(b) 위 그래프를 정리한 표

그림 5.3 Drucker-Prager, Von-Mises항복조건에 의한 결과와 실험결과의 비교

5.2 충전콘크리트의 강도변화에 의한 결과

기둥내에 충전된 콘크리트 강도(σ_{ck})를 180, 240, $300(\text{kg/cm}^2)$ 으로 변화시켜 보았다. 이때 각형강관 두께는 6mm로 하였다.

표 5-1 콘크리트강도(σ_{ck})변화에 따른 결과비교

구분 시험체	σ_{ck} (kg/cm^2)	M_y (t·m)	휨 강 성(M_y/θ_y) (t·m/rad)
SDW	180(60%)	11.85(93.1%)	848(95.6%)
	240(80%)	12.98(98.1%)	877(98.9%)
	300(100%)	12.727(100%)	887(100%)

5.3 각형강관 두께(t)의 변화에 의한 결과

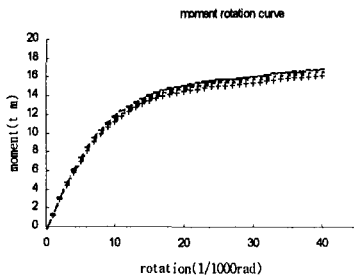
각형강관의 두께를 6, 9(mm)로 변화시켜 보았다. 이때 콘크리트강도(σ_{ck})는 300kg/cm^2 로 하였다.

표 5-2 두께(t)변화에 따른 결과비교

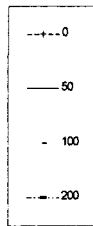
구분 시험체	t (mm)	M_y (t · m)	휨강성 (t · m/rad)
SDW	6	12.727(100%)	887(100%)
TDW	9	13.21(103.8%)	921(103.8%)

5.4 축력의 크기변화에 의한 결과

본 접합부가 사용되는 중저층 구조에서는 기둥에 축력이 적용되므로 이 축력의 크기를 2, 4, 8층 높이의 축력 즉 50t, 100t, 200t 으로 변화시켜 보았다. 이때 콘크리트강도(σ_{ck})는 300kg/cm^2 , 각형강관 두께(t)는 6mm로 하였다.



(a) 결과 그래프



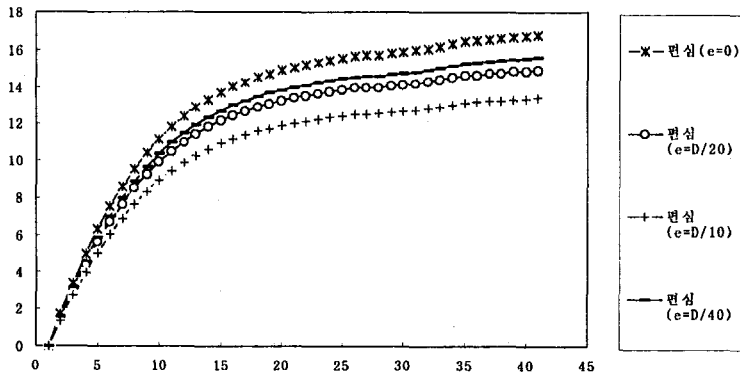
구분 하중	SDW	
	M_y (t · m)	M_u (t · m)
0t	12.727(100%)	16.329(100%)
50t	12.855(101%)	16492(101%)
100t	13.143(103.3%)	16.941(103.7%)
200t	13.358(104.9%)	16.827(103.1%)

(b) 위 그래프를 정리한 표

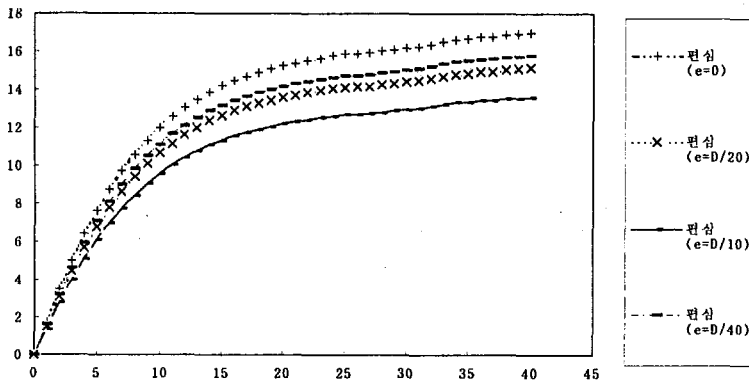
그림 5.4 축력의 크기에 따른 비교

5.5 편심의 크기에 따른 비교

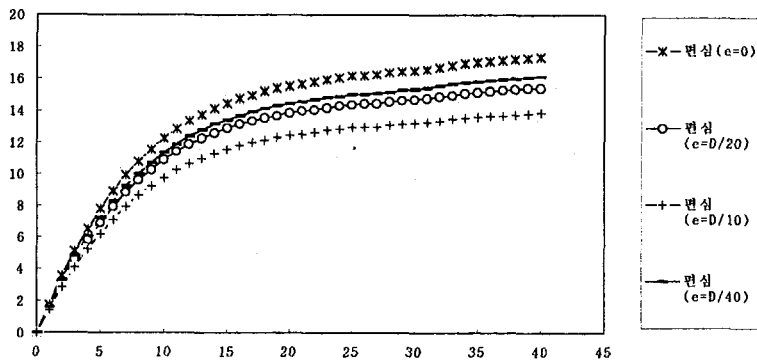
위 그래프에서 보듯이 축력이 커지면 접합부의 강성이 증가한다. 그 이유로서는 3축 응력상태에서는 콘크리트 항복응력이 높아지기 때문이다. 그런데 실제 구조물에서는 축력이 커지면 좌굴효과나 편심효과 때문에 접합부 휨강성이 떨어지는 경향이 있을 것이기 때문에 편심의 크기를 변화시켜 이런 경향을 파악하고자 하였다. 이때 콘크리트강도(σ_{ck})는 300kg/cm^2 , 각형강관 두께(t)는 6mm로 하였다.



(a) 축력 50ton일 때 편심크기에 따른 변화



(b) 축력 100ton일 때 편심크기에 따른 변화



(c) 축력 200ton일 때 편심크기에 따른 변화

편심량 축력	e=0		$e = \frac{1}{40} D$		$e = \frac{1}{20} D$		$e = \frac{1}{10} D$	
	My	Mu	My	Mu	My	Mu	My	Mu
0t	12.727	16.329	12.727	16.329	12.727	16.329	12.727	16.329
50t	12.855	16.492	11.974	15.362	11.476	14.722	10.305	13.221
100t	13.143	16.941	12.130	15.635	11.625	14.984	10.438	13.454
200t	13.358	16.827	12.373	15.586	11.858	14.937	10.647	13.412

My : 항복 모멘트 , Mu : 종국 모멘트

(d) 위 그래프 (a),(b),(c)를 정리한 표(My,Mu :t · m, D=200mm)

그림 5.5 축력변화와 편심크기에 따른 비교

6. 결 론

지금까지 논의한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 각형강관내에서 콘크리트는 삼축응력상태에 있으므로 콘크리트의 충전자체의 영향이 크며 표5.1에서 보듯이 충전콘크리트의 강도 변화는 접합부의 강성에 큰 영향을 미치는 요인이 아니다.
- 각형강관 두께가 6mm에서 9mm로 1.5배 증가하였는데 My값은 3.8% 증가에 그쳐서 각형강관 두께의 변화가 접합부 휨강성에 큰 영향을 미치지 않는다. 즉 국부좌굴에 견딜 수 있는 최소 두께(6mm)만 유지하면 접합부의 휨성능은 크게 저하되지 않는다.
- Drucer-Prager 항복조건을 사용한 모델이 Von-Mises 항복조건을 사용한 모델보다 실험치에 가까움을 그림5-1에서 보듯이 알수있었다.
- 도심축방향력의 크기를 50t에서 2, 4배 증가시켜 100t,200t으로 작용시켰을때 초기강도(My), 종국강도(Mu)가 증가하는 것은 콘크리트의 구속효과 때문이다. 그러나 그 증가율은 그림5-4에서 보듯이 1~5%정도로써 미미하다.
- 편심의 크기가 $0.5cm(\frac{D}{40})$, $1cm(\frac{D}{20})$, $2cm(\frac{D}{10})$ 정도일때 초기강도(My), 종국강도(Mu)가 그림5-5에서 보듯이 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. 본 모델을 이용하여 접합부의 거동을 예측할 수 있는 가능성을 제시하였으며 이러한 예측결과를 실험으로 확인하는 과정과 좌굴해석까지 확대해서 수행하는 노력이 앞으로 필요하다.

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 기술 원, 1995.
7. 이중석, 이광훈, "충전콘크리트 각형강관과 콘크리트 합성된 H형강보 접합부의 휨거동에 관한 연구" 한국강구조학회, 1995.12.