Journal of Korean Society of Steel Construction

Vol.29, No.3, pp.237-247, June, 2017



# 수직다이아프램을 사용한 충전형 각형강관기둥 접합부의 내력평가

김경태<sup>1\*</sup> · 이헌우<sup>2</sup> · 김영기<sup>3</sup> · 김태진<sup>4</sup> · 김종호<sup>5</sup>

<sup>1</sup>팀장, 기술연구소, ㈜창민우구조컨설탄트, <sup>2</sup>대리, 기술연구소, ㈜창민우구조컨설탄트, <sup>3</sup>사장, ㈜이지파트너, <sup>4</sup>사장, ㈜창민우구조컨설탄트, <sup>5</sup>대표이사, ㈜창민우구조컨설탄트

# Structural Strength of Beam-to-CFT Connections with Vertical Diaphragm

Kim, Kyungtae<sup>1\*</sup>, Lee, Heon-Woo<sup>2</sup>, Kim, Young-Ki<sup>3</sup>, Kim, Taejin<sup>4</sup>, Kim, Jong-Ho<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Senior Engineer, Research Center, Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul, 06125, Korea
 <sup>2</sup>Engineer, Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul, 06125, Korea
 <sup>3</sup>President, EG Partner, Seoul, 04781, Korea
 <sup>4</sup>President, Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul, 06125, Korea
 <sup>5</sup>CEO, Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul, 06125, Korea

**Abstract** - This paper investigates structural characteristics of internal vertical diaphragm and its influence on the connection strength between concrete filled tubular(CFT) column and beam. CFT columns are hybrids that combine two materials in one member. They have the benefits of steel for high tensile strength and ductility and of concrete for high compressive strength and stiffness. Analytical method of the flexural strength of vertical diaphragm to account moment transfer between panel zones is presented using yield line theory. Connection design is verified by a set of monotonic tests and numerical analysis with different diaphragm thicknesses. Plastic zones of CFT flange was found and matched closely to FEM results. Both analytical and experimental results showed good agreement that vertical diaphragm effectively alleviates the stress and transfer the force. **Keywords** - CFT column, Vertical diaphragm, Structural strength, Weld, Plastic analysis

# 1. 서 론

콘크리트 충전형 각형강관(CFT) 기둥은 강재와 콘크리트 의 장점을 결합한 하이브리드 시스템으로서 콘크리트의 압 축력과 강재의 인장력을 조합해 기둥 단면효율이 매우 뛰어 나고 작은 면적으로도 큰 강도를 발휘할 수 있는 장점이 있어 이를 적용하는 추세가 점점 증가하고 있다.

각형강관의 기둥과 보가 연결되는 접합부는 그 종류와 형 태가 매우 다양하다. 기존에는 일반용접으로도 접합부가 충 분한 연성을 확보한다고 생각했으나 노스리지지진 발생 이

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction \*Corresponding author.

Tel. +82-2-2085-7170 Fax. +82-2-578-0425 E-mail. ktkim@minwoo21.com 후 접합부에서 대량의 취성파괴가 발생하자 이를 개선하기 위해 다이아프램 사용이 제안되었다. 실험을 통해 내부 다이아 프램과<sup>[11,[2],[3],[4],[5],[6]</sup> 외부 다이아프랩이<sup>[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13]</sup> 접합부의 강도 및 연성도를 개선하는 효과가 입증되었으며 최근에는 다이아프램과 유사한 역할을 하는 관통형 볼트나 스트럿을 사용하는 사례가 있다<sup>[14],[15]</sup>. 관통형 다이아프램 형식은 최소의 강재사용으로 보의 하중을 반대편 보까지 원 활히 전달할 수 있어 일반적으로 많이 사용되어왔지만 양쪽 보의 춤이 달라지면 기둥 내부 다이아프램의 제작이 복잡해 지고 콘크리트 충전이 어려워지는 경우가 발생하였다<sup>[16]</sup>.

한편 접합부의 내력은 보와 연결된 기둥면의 변형과 밀접 한 관련이 있으므로 일반적으로 항복선 이론을 사용하여 접 합부의 내력을 평가한다. 압축력이 작용하는 부재에 휨이 발 생할 경우 항복내력이 현저히 떨어지므로<sup>[17],[18],[19],[20]</sup> 대부 분 축력을 받는 상태에 놓인 기둥은 이러한 강도 저감을 설계 공식에 반영하여야 한다. 국내 기준<sup>[21]</sup>을 비롯한 해외 주요 설계 가이드라인에는<sup>[22],[23]</sup> 축적된 실험 결과로 부터 검증된

Note.-Discussion open until December 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 4, 2017; revised May 23, 2017; approved on May 23, 2017.

식이 나와 있지만 모든 접합부에 대해 실험을 수행하기 어려 운 점을 감안하면 엔지니어의 주관적 판단에 의해 실제 내력 이 과도하게 평가되는 상황이 발생할 수 있다.

본 연구는 관통형 수직다이아프램이 적용된 새로운 형태 의 각형강관기둥의 접합부에 대해 구조적 특성을 평가하였 다. 수직 다이아프램의 두께를 변수로 두고 다이아프램 내부 의 힘의 전달과 응력의 변화를 실험과 유한요소해석으로 확 인하였다. 또한 강도 저감을 고려한 접합부의 내력을 계산하 여 기둥이 보의 하중을 충분히 견딜 수 있는지 이론적으로 분 석하였다.

## 2. 실험

## 2.1 실험계획 및 실험체 제작

각형 CFT 기둥- 보 접합부 실험체를 제작하기 위하여 보 플랜지의 항복강도를 기준으로 KBC에서 규정된 기준을 만 족하도록 접합부를 설계하였다. 접합부 실험체는 기둥 내부 에 설치되어 있는 수직 다이아프램의 두께에 따른 접합부 성 능과 파괴모드를 확인하기 위해서 다이아프램의 두께는 50mm, 45mm, 40mm로 정하여 실험체를 제작하였다. 접합부 실험 체의 기둥과 보의 크기는 세 실험체 모두 동일하다(Table 1).

각형강관 부재를 제작하기 위하여 먼저 강판을 절단하고 얇은 철판을 개선한 후에 부분용입용접으로 강판들을 접합 하였다. 그리고 다이아프램이 지나갈 수 있도록 강관에 구멍 을 뚫고 맞댐용접으로 강관과 다이아프램을 접합하였다. H 형강 보 웨브와 강관, H형강 보 단부의 스티프너는 모살용접 을 하였고 보플랜지와 기둥의 접합등은 개선용접으로 처리 하였다. 다이아프램을 비롯한 접합부는 E71T-1@1.4mm 전극봉을 사용하여 용접하였다(Fig. 1).

실험체 기둥과 보에 사용된 강종은 SM490A이며 시편실 험 결과에 의하면 항복강도와 인장강도의 평균값은 각각 389MPa, 488MPa이며 연신율은 24.0%로 나타났다. 콘크 리트의 압축강도는 시편테스트의 평균값인 49MPa로 정하



Fig. 1. Test specimens - S1

Table 2. Mechanical properties of materials

	Matarial	E	Fy	Fu
	Material	GPa	MPa	MPa
Col.	SM490A	195	389	488
Beam	SM490A	195	389	488
Diaph	SM490A	195	389	488
		Е	Fck	
Core Concrete		20.9	49	

Table	1.	S	pecifications	of	CFT	columns	and	beam	connections
-------	----	---	---------------	----	-----	---------	-----	------	-------------

Specimens	Column	Beam	Diaphragm	Weld diaphragn to column
S1	□ -400×400×10×20	H-700×300×13×24	50mm	Full penetration CJP
S2	□ -400×400×10×20	H-700×300×13×24	45mm	Full penetration CJP
S3	□ -400×400×10×20	H-700×300×13×24	40mm	Full penetration CJP

였다(Table 2).

# 2.2 가력 및 계측방법

실험체 설치시 기둥 상하 끝단 플레이트를 반력 기둥에 설 치된 힌지에 연결하고 가력점에 1000kN급 엑츄에이터를 부 착하였다. 가력시 보의 횡좌굴 방지를 위한 좌굴 방지대를 가력점에서 약 1m 가량 떨어진 지점에 양쪽으로 설치하였다



Fig. 2. Test setup of monotonic loading



Fig. 3. Locations of strain guage and LVDT

(Fig. 2). 실험체의 응력과 변형률을 측정하기 위해 상부 플 랜지, 하부 플랜지 그리고 기둥의 패널존에 총 23개의 변형 률 게이지를 설치하였고 가력점과 기둥에 총 4개의 LVDT를 설치하였다. 하중점의 변위 및 패널존 변형과 H형강의 보의 상 하 플랜지의 변형률을 게이지를 이용하여 측정하였다(Fig. 3).

접합부에 모멘트를 발생시키기 위하여 보 끝단에 연직하 중을 가력하는 방법을 선택하였다. 재하속도는 세 실험체 모 두 일정하게 0.2mm/sec로 유지하였다. 탑다운 공법 상황이 고려된 지하층에 매립되는 CFT 기둥이므로 반복하중에 대 한 효과가 미미하다고 가정하였다. 약 1000kN 용량의 유압 식 잭을 사용하여 가력하였으며 Load cell로 하중을 계측하 였다. 실험체의 편심을 최소화하기 위해 주두와 주각부분, load cell 그리고 H형강의 보 접합부는 모두 편접합으로 유 도하였다.

#### 2.3 실험 결과

세 실험체 모두 파단이 발생한 시점에 굉음이 발생하였고 이후 실험을 종료하였다. 파단은 모두 접합부에 인접한 보의 플랜지에서 발생했으며 기둥면으로부터 거의 동일하게 떨어 진 위치에서 발생하였다(Fig. 4). 실험체의 초기 강성은 10.8~12.1kN/mm로 나타났고 항복은 다이아프램의 두께 가 얇은 실험체부터 낮은 하중에서 우선 발생하였다(Table 3). 보 플랜지의 굽힘에 의한 항복은 보 상부 플랜지의 변형률 게 이지 el - e6로부터 측정하였다(Fig. 5). 각 측정값은 보의



Fig. 4. Beam flange failure after the peak loads



Table 3. Elastic stiffness and peak loads of specimens

Fig. 5. Strain on the top flange (Top) t = 50mm, (Middle) t = 45mm, (Bottom) t = 40mm

모멘트에 의한 상부 플랜지의 축방향 변형률을 나타내며 보 부재의 항복여부는 항복 변형률 0.002mm/mm을 기준으로 확인하였다. 측정 결과, 세 실험체 모두 다이아프램이 위치



Fig. 6. Load-displacement curves (a) t = 50mm, (b) t = 45mm, (c) t = 40mm

한 가운데에서 먼저 항복이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 단조가력실험에서 나온 실험체 1, 3의 하중-변위 그래프 에서 초기 탄성 구간에서는 하중이 안정적으로 증가하는 것 을 확인할 수 있다(Fig. 6). 게이지 e2를 제외한 나머지는 실 험체가 파괴 될 때까지 모두 탄성범위에 있는 것을 확인하였 다. 실험체 2의 하중-변위 그래프에서 나타난 살짝 꺾인 현 상(kink)은 실험체를 고정하는 볼트의 미끄러짐이 원인이라 고 판단된다. 게이지 e1에서 대변형이 발생한 것으로 볼 때 하중의 재분배가 발생하여 변형이 가운데로 집중하지 않고 분산된 것으로 판단된다.

실험체 1과 3은 하중이 안정적으로 계속 증가하다가 비슷

한 하중에서 파괴된 반면 실험체 2는 최대하중이 나머지 실 험체들 보다 높게 나타났다. 초기 부재의 항복은 최대 하중 의 55%, 40%, 40%인 지점을 지날 때 발생하였다.

# 3. 유한요소해석

## 3.1 해석방법

실험결과와 해석결과를 비교하기 위하여 실험체를 대상 으로 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS v6.14를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해석모델에서 각형강관, 수직 다이 아프램, H-형강 보, 콘크리트 코어를 각각 솔리드 모델로 구 현하였다.

해석 신뢰도를 높이기 위하여 접합부 부근의 메쉬를 미세 하게 조정하였고 실제 항복이 발생할 것으로 예상되는 보 플 랜지의 약 100mm 위까지 기둥면을 따라 메쉬의 크기를 더 조밀하게 설정하였다(Fig. 7). 콘크리트의 경우 파괴에너지 (fracture energy)가 메쉬크기에 의존하지 않도록 특성길 이(characteristic length)를 고려하여 설정하였다<sup>[24]</sup>.

실제 접합부의 최대 내력을 확인할 수 있도록 기둥의 양 끝단을 3축 방향에 대해서 구속했으며 실제 기둥은 보의 길 이방향을 따라 대칭(symmetry) 경계조건 옵션을 적용하였 고 하중은 보 끝 상측 플랜지에 연직 방향으로 가력하였다.

#### 3.2 재료모델

콘크리트와 강재의 탄성계수는 시편테스트의 결과를 사용하였다(Table 2). 강재의 포와송비는 0.29, 콘크리트는 0.2를 사용하였다. 강재는 등방성 경화(isotropic hardening plasticity) 소성 모델을 적용하였고 항복강도는 389MPa를 사용하였다. 콘크리트의 비선형 파괴속성은 콘크리트 손상 (concrete damaged plasticity)소성 모델로 구현하였다. 균열이 발생한 직후의 연화작용(softening)은 균열 브리징







Fig. 8. Stress-strain curve for steel (top) stress-separation law for concrete in compression (middle) in tension (bottom)

(crack bridging concept) 개념을 사용하여 구현하였다<sup>[25]</sup>. 기존 연구결과로부터<sup>[26]</sup> 얻은 콘크리트의 파괴에너지 *G<sub>f</sub>* 를 면적으로 가지는 응력-분리(stress-separation)의 선 형 관계식을 압축 인장에 대해 각각 사용하였다(Fig. 8). 이 때 콘크리트의 인장강도는 2.8MPa를 압축강도는 49MPa를 사용하였다.

## 3.3. 해석결과

하중-변위 그래프를 사용하여 실험 결과 그리고 유한요 소해석 결과 및 보의 내력을 표현하였다(Fig. 6). 보의 내력 은 각각 항복내력과 전소성내력으로 표현하였다. 초기 강성 은 해석과 유사한 경향을 보이며 선형적으로 증가하다가 가 력점이 약 10~20mm 내려 온 지점에서 초기 항복이 발생하 는 것을 확인하였다. 이후 실험체 하중은 큰 변화없이 그래 프를 따라 증가하다가 실험체 파괴로 인해 보의 전소성 내력 에 도달하지 못하였다. 파괴지점에서의 해석오차는 10% 미 만으로 나타났다.

# 4. 결과 분석

3장에서 설명한 해석모델을 이용하여 해석한 결과와 실험 결과를 비교하였을 때 3개의 실험체 모두에서 최대하중, 초 기강성, 변형률이 매우 근소한 오차를 가진 것으로 나타났다. 따라서 해석결과가 실험체의 실제거동을 유사하게 모사하고 있는 것으로 판단된다. 유한요소 해석결과에 근거하여 수직 다이아프램이 적용된 CFT 기둥의 거동을 다음과 같이 분석 하였다.

### 4.1 수직다이아프램의 영향성

보 상부플랜지의 인장력으로 인해 면외방향의 하중이 기 둥에 작용하게 되면 이 하중은 기둥의 플랜지를 통해 기둥의 웨브와 수직다이아프램으로 전달된다. 해석 결과에 의하면 기둥의 웨브와 다이아프램의 강성 차이로 약 3:7의 비율로 인장력이 분재되는 것을 확인하였다. 기둥의 패널존에서 측 정한 변형률 값과 해석의 응력을 비교한 결과, 40mm 두께 의 다이아프램을 사용하여도 기둥의 웨브가 탄성 범위 내에서



Fig. 9. Maximum principal strain at the peak loads and von mises stress plot near column face (left) t = 50mm, (middle) t = 45mm, (right) t = 40mm

보의 장력을 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 검토되었다. 연직하중이 최대 지점에 근접할 때, 보의 단면은 이미 전 소성 한계를 넘어선 것을 확인하였다. 보의 변형은 보의 상 부플랜지의 가운데에서 가장 크게 나타나며 제일 먼저 항복 점에 도달하였다. 최대 주응력변형률을 확인한 결과, 상부 플랜지와 연결된 기둥의 플랜지 그리고 수직다이아프램도 마찬가지로 소성구간에 도달한 것을 확인하였다(Fig. 9). 기 둥 플랜지는 보를 중심으로 사각형의 소성지역을 형성하였 으며 이때의 유효폭은 세 실험체 모두 유사하게 약 100~110mm 정도로 나타났다. 수직다이아프램이 항복 변형을 통해 기둥 뒤편까지 힘의 전달이 되었으며 다이아프램의 두께가 항복 변형이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 마지막으로 최대 하중 발생지점에서 변형률 게이지가 부착된 위치까지 플랜 지 상부에 소성변화가 발생한 것을 확인할 수 있다. 기둥의 플랜지와 수직 다이아프램에서 변형이 집중되는 것으로 나 타났고 접합부의 내력은 이 2가지 요소가 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 4.2 축력을 받는 접합부의 내력 평가

접합부의 내력은 가장 큰 영향을 미치는 요소인 기둥 플랜 지의 국부 휨내력과 수직다이아프램의 인장내력으로 평가하 였다. 웨브의 국부좌굴 및 크리플링과 같은 다른 기둥 요소 의 영향은 건축구조기준 내 설계식에서는 만족하지만 이 평가 식에서는 고려되지 않았다. 기둥플랜지의 내력은 간단한 항 복선이론을(Yield Line Theory) 사용하였고 수직다이아프 램의 내력은 탄성론을 사용하여 계산하였다(Fig. 10).



Fig. 10. CFT column with vertical diaphragm



Fig. 11. CFT column section under compressive loading

이 두가지 이론에서는 재료의 강도는 동일하다고 가정을 하지만 실제로 부재가 축력을 받게되면 강도가 저감이 되므 로 모멘트에 대한 저항성도 영향을 받게된다<sup>[17],[19]</sup>. 저감되 는 소성 모멘트는 강도와 비례하여 저감되기 때문에 보-기 둥 접합부에서는 축력에 대한 영향을 반드시 고려해야 한다.

#### 4.2.1 수직다이아프램의 내력

기둥의 축력은 콘크리트와 강재 단면이 동시에 지지하는 것으로 가정하였다(Fig. 11). 이때 다이아프램이 받은 축력 은 강성 비율에 따라 분배하였다.

$$\epsilon = \frac{\eta C}{E_s A_s} \tag{1}$$

여기서,

$$\eta = \frac{E_s A_s}{E_s A_s + E_c A_c}$$

축력을 받는 다이아프램은 포와송비에 의하여 횡방향으 로 증가하고 이로 인해 단위 면적당 다이아프램의 내력은 원 래의 항복강도보다 저감되어 식 (2)와 같이 표현이 된다.

$$P_c = E_s(\epsilon_y - \nu\epsilon) = f_y - E_s \nu\epsilon \tag{2}$$

## 4.2.2 기둥 플랜지 내력

상한이론(upperbound theorem)에 따라 운동학적 경계 조건(kinematic boundary condition)을 만족하는 플레이 트의 단위 길이당 에너지 소산 비율(Dissipation rate)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[27]</sup>.



Fig. 12. Yield line of the web plate of CFT column

$$\overline{D}_{\int} = \int_{x_{1I}}^{x_{1J}} M_{1}\dot{\kappa}_{1}dx_{1} + \int_{x_{2I}}^{x_{2J}} M_{2}\dot{\kappa}_{2}dx_{2} \qquad (3)$$

$$= M_{1} \int_{x_{1I}}^{x_{1J}} \dot{\kappa}_{1}dx_{1} + M_{2} \int_{x_{2I}}^{x_{2J}} \dot{\kappa}_{2}dx_{2}$$

$$= M_{1} (\dot{\theta}_{1,J} - \dot{\theta}_{1I}) + M_{2} (\dot{\theta}_{2,J} - \dot{\theta}_{2I})$$

$$= M_{p1} |\dot{\theta}_{1,JI}| + M_{p2} |\dot{\theta}_{2,JI}|$$

여기서 x<sub>1</sub> = x, x<sub>2</sub> = y, *I*,*J* = 1,2, *M<sub>p</sub>* 는 소성모멘트, κ는 곡률, 그리고 θ는 소성회전각 비율로 정의한다. 기둥과 수직 한 방향을 1, 평행한 방향을 2로 정의하고 각 방향에 대해서 모멘트, 곡률, 소성회전각을 검토해야 한다. 기둥 플랜지의 항복선을 Fig. 12와 같이 가정하였다.

각각의 항복선의 에너지 소산량을 계산하면 식 (4)에서 (8)과 같다.

$$D_{AD} = l_{AD} M_{p1} \left| \dot{\theta}_{AD} \right| = (b_f + 2b) M_{p1} \frac{\dot{w}_0}{a}$$
(4)

$$D_{AB} = l_{AB} M_{p2} \left| \dot{\theta}_{AB} \right| = (t_f + 2a) M_{p2} \frac{w_0}{b}$$
(5)

$$D_{A'D} = l_{A'D} M_{p1} \left| \dot{\theta}_{A'D} \right| = b_f M_{p1} \frac{w_0}{a}$$
(6)

$$D_{A'B'} = l_{A'B'} M_{p2} \left| \dot{\theta}_{A'B'} \right| = t_f M_{p2} \frac{\dot{w}_0}{b}$$
(7)

$$D_{AA'} = bM_{p1} |\dot{\theta}_1| + aM_{p2} |\dot{\theta}_2|$$

$$= bM_{p1} \frac{\dot{w}_0}{a} + aM_{p2} \frac{\dot{w}_0}{b}$$
(8)

총 에너지 소산량을 외부 일(external work rate)과 동일 한 것을 이용하여( $\dot{W}_{ext} = D_{int}$ ) 다음과 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$D_{\rm int} = 2(D_{AD} + D_{AB} + D_{A'D'} + D_{A'B'}) + 4D_{AA'}$$
(9)

$$\dot{W}_{\text{ext}} = \int_{A} \dot{Pw_0} dA = P \int_{A} \dot{w_0} dA \qquad (10)$$
$$= P \dot{w_0} b_f t_f$$

$$\dot{Pw_0}b_f t_f = 4M_{p1}\frac{\dot{w_0}}{a}(b_f + 2b) + 4M_{p2}\frac{\dot{w_0}}{b}(t_f + 2a)$$
(11)

위 식 (11)에서 단위 면적당 기둥 플랜지의 내력을 구하면 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$P_{f} = \frac{4}{b_{f}t_{f}} \left[ \frac{M_{p1}}{a} (b_{f} + 2b) + \frac{M_{p2}}{b} (t_{f} + 2a) \right]$$
(12)

여기서 미지수 a를 찾기 위해 방정식을 미분하면 이론적으 로 식 (13)을 얻을 수 있다. a는 이론적으로 산출한 유효폭을 의미한다.

$$a = \sqrt{\frac{b(b_f + 2b)}{2} \frac{M_{p1}}{M_{p2}}}$$
(13)

축력을 받는 플레이트의 소성 모멘트는 강도와 비례하여 저감하게 되는데 항복기준에 따라 강도저감계수를 다르게 하여 식 (14)와 같이 나타내었다<sup>[17]</sup>.

$$M_{p1} = (1 - n^2) M_p$$

$$M_{p2} = k M_p$$
(14)

여기서 강도 저감계수 k는,

	Diaphragm	Mn kN-m	M0 kN-m	M1 kN-m	1-Mn/M0	1-Mn/M1	a mm
S1	700×350×50	2519	3126	3060	19%	18%	97.1
S2	700×350×45	2519	2887	2830	13%	11%	97.2
S3	700×350×40	2519	2708	2651	7%	5%	97.3

Table 4. Design loads for CFT column-beam connection under compression



Fig. 13. Strength reduction due to axial load (a) S1 t = 50mm, (b) S2 t = 45mm, (c) S3 t = 40mm

$$\begin{split} n &= \frac{\sigma_c}{f_y}, \ M_p = f_y \frac{t^2}{4} \\ k &= \frac{2 - 2n^2}{\sqrt{4 - 3n^2}} \ \text{(Von Mises)} \\ k &= \frac{2 + 2n}{2 + n} \ \text{(Tresca)} \end{split}$$

소성 메카니즘 가정에 따라 계산한 결과에 의하면 세 실험 체 모두 약 97mm 유효폭을 가지는 것으로 검토되었는데 이 것은 유한요소해석에서 나타난 100mm와 설계기준으로부 터<sup>[21]</sup> 계산한 120mm 와 매우 유사한 결과이다. 유효폭을 산 정할 때는 실제 실험과 동일한 조건으로 맞추기 위하여 축력 의 효과는 배제하였다.

보의 전소성내력은  $M_n$  그리고 실제 기둥 부재를 가정하여 400톤의 축력이 가해진 상태의 접합부 내력을  $M_1$ , 축력이 없는 상태의 내력을  $M_0$ 라고 하여 비교하였다. 그 결과, 40mm 두께의 다이아프램을 가진 세 실험체 모두 보의 전소성내력 이상을 견디는 것을 확인하였고 다이아프램의 두께가 두꺼워 질수록 더 큰 내력을 가지는 것을 검토하였다(Table 4). 축력 이 작용할 때의 강도저감의 관계를 분석한 결과, 세 실험체 모두 축력이 가해질수록 강도가 저감이 되는 것을 확인하였 다. 다이아프램의 두께에 따라 조금의 차이가 발생하지만 400톤이 가해진 기둥 부재의 강도는 약 2~3%까지 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 13).

# 5. 결 론

실험과 유한요소해석을 통해 수직다이아프램이 적용된 콘 크리트 각형강관 기둥(CFT)의 접합부 내력과 수직다이아프 램의 메커니즘을 분석하고 고찰한 결론은 아래와 같다.

- (1) 각기 다른 두께의 수직 다이아프램을 가진 400×400 각 형강관기둥에 H 700×300×13×24보를 접합시켜 단조 가력 실험을 수행하였다. 실험 결과, 세 실험체의 파괴 는 기둥면으로부터 일정거리 떨어진 플랜지 상부 균열에 의해 발생하였다. 최대하중은 보의 전소성 내력의 약 85% 수준까지 도달하였다. 유한요소해석의 응력결과를 통해 수직다이아프램이 힘을 충분히 전달하고 기둥 웨브의 힘 을 분담하는 것을 확인하였다.
- (2) 기둥이 축력을 받는 상황을 고려하기 위해 강도저감계
   수가 반영된 접합부 내력식을 제안하였다. 내력식은 기
   등의 플랜지와 수직다이아프램의 영향성을 고려하였다.
   계산된 내력과 유효폭이 유한요소해석결과와 매우 유사
   한 경향을 나타내었다.
- (3) 실제 실험에서는 최대 하중이 보의 전소성 내력 도달하 기 이전에 보 파괴가 발생하였다. 가운데에 위치한 다이 아프램으로 인해 보 플랜지에 응력이 집중될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 후속 연구를 통해 파괴 메커니즘 을 추가로 검증해야 할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구는 중력하중에 대해서만 검토하였고 지진하중과 같은 동적 반복하중에 대해서는 추가적인 연구를 통해 검토할 예정이다. 아울러 용접 불량이나 실험체 제작과 정에서 발생할 수 있는 결함은 본 연구의 분석대상에서 제외하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비지원 (17RERP-B099826-03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감 사드립니다.

# 참고문헌(References)

- Chung, J., Seo, S., Matsui, C., and Choi, S. (2005) Hysteresis Behavior of Square Tube Columns to H-Beam Connections with Vertical Stiffeners, *Advances in Structural Engineering*, Sage, Vol.8, No.6, pp.561-572.
- [2] Fukumoto, T., and Morita, K. (2005) Elastoplastic Behavior of Panel Zone in Steel Beam-to-Concrete Filled Steel Tube Column Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.131, No.12, pp.1841-1853.
- [3] 河野昭彦,松井千秋,村井望(1998) コンクリート充填角形 鋼管柱とH形鋼梁のダイヤフラム補強型接合部の局部変 形に対する荷重一変形関係モデル,鋼構造論文集,日本鋼 構造協会,第5巻,第17号, pp.93-104.

Kawano, A., Matsui, C., and Murai, N. (1998) Load-Deformation Relationship Models for Local Deformations in Diaphragm-Stiffened Connections of H-Shaped Steel Beams to Rectangular CFT Columns, *Kou Kouzou Rombunshuu*, Japanese Society of Steel Construction, Vol. 5, No.17, pp.93-104 (in Japanese).

- [4] Lu, X.L, Yu, Y., Kiyoshi, T., and Satoshi, S. (2000) Experimental Study on the Seismic Behavior in the Connection Between CFRT Column and Steel Beam, *Structural Engineering and Mechanics*, Techno-Press, Vol.9, No.4, pp.365-374.
- [5] Morita, K., Fu, G., Teraoka, M., and Yokoyama, Y. (1995) Experimental Study on Connections with Eccentricity Between Concrete Filled Square Tubular Steel Column and Steel Beam, *Structural Steel: PSSC '95 (Proceedings of 4th Pacific Structural Steel Conference), Vol.2: Structural Connections*, Peragamon, UK, pp.25-32.
- [6] Sasaki, S., Teraoka, M., Morita, K., and Fujiwara, T. (1995) Structural Behavior of Concrete-Filled Square Tubular Column with Partial-Penetration Weld Corner Seam to Steel H-Beam Connections, *Structural Steel: PSSC '95* (Proceedings of the 4th Pacific Structural Steel Conference), Vol.2: Structural Connections, Peragamon, UK, pp. 33-40.
- [7] Al-Rodan, A.-K. (2004) T-Cleat Connections to Concrete-

Filled Tubular Internal Columns, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 130, No.5, pp.725-731.

- [8] Choi, S., Lee, S., Hong, S., and Kim, J. (2009) Structural Capacities of Tension Side for CFT Square Column-to-Beam Connections with Combined-Cross Diaphragm, *Advances in Structural Engineering*, Sage, Vol.11, No.2, pp. 209-227.
- [9] Kang, C.-H., Shin, K.-J., Oh, Y.-S., and Moon, T.-S. (2001) Hysteresis Behavior of CFT Column to H-Beam Connections with External T-Stiffeners and Penetrated Elements, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.23, No.9, pp.1194-1201.
- [10] Park, J.W., Kang, S.M., and Yang, S.C. (2005) Experimental Studies of Wide Flange Beam to Square Concrete-Filled Tube Column Joints with Stiffening Plates Around the Column, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.131, pp.1866-1876.
- [11] Shin, K.-J., Kim, Y.-J., Oh, Y.-S., and Moon, T.-S. (2004) Behavior of Welded CFT Column to H-Beam Connections with External Stiffeners, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.26, No.13, pp.1877-1887.
- [12] 서성연, 정진안, 최성모, 김성용(2005) 외측 다이아프램을 사용한 현장 용접형 각형강관기둥, 한국강구조학회논문 집, 한국강구조학회, 제17권, 제4호, pp.459-467.
  Seo, S.Y., Jung, J.A., Choi, S.M., and Kim, S.Y. (2005) Seismic Behavior of H Shaped Beam to Square Column Connection with Outer Diaphragm Using Field Welding, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.17, No.4, pp.459-467 (in Korean).
- [13] 이성희, 김영호, 최성모(2016) 용접조립 각형 CFT 기둥-보 외다이아프램 접합부의 구조 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제2호, pp.75-83.
  Lee, S.H., Kim, Y.H., and Choi, S.M. (2016) Structural Behavior of Welded Built-up Square CFT Column to Beam Connections with External Diaphragm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No. 2, pp.75-83 (in Korean).
- [14] 黄炳生,杜培源,樊建慧(2009) 方钢管混凝土柱一钢梁外 隔板式节点非线性有限元分析,四川建筑科学研,四川建筑 科学研究,第35巻,第1号,pp.59-64.
  Huang, B.S., Du, P.Y., and Fan, J.H. (2009) Nonlinear Analysis on Connection with Outer Diaphragms Between Square Concrete Filled Steel Tube Columns and Steel Beams, *Sichuan Building Science*, Sichuan Building Science Research, Vol.35, No.1, pp.59-64 (in Chinese).

- [15] Matsui, C. (1985) Strength and Behavior of Frames with Concrete Filled Square Steel Tubular Columns Under Earthquake Loading, *Proceedings of the International Specialty Conference on Concrete Filled Tubular Structures*, China, pp.104-111.
- [16] 이성희, 정헌모, 양일승, 최성모(2009) 내부유공판을 사용 한 각형 CFT 기둥-보 단순인장 접합부의 실험적 연구, 한 국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제6호, pp. 575-583.

Lee, S.H., Jung, H.M., Yang, I.S., and Choi, S.M. (2009) An Experimental Study on Simple Tension Connections for Square CFT Column to Beam Using Internal Plate with Holes, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.6, pp.575-583 (in Korean).

- [17] Cao, J.J., Packer, J.A., and Yang, G.J. (1998) Yield Line Analysis of RHS connections with Axial Loads, *Journal* of Constructional Steel Research, Elsevier, Vol.48, No.1, pp.1-25.
- [18] Nie, J., Qin, K., and Cai, C.S. (2009) Seismic Behavior of Composite Connections: Flexural Capacity Analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.65, No.5, pp.1112-1120.
- [19] Qin, Y., Chen, Z., and Wang, X. (2014) Elastoplastic Behaviour of Through-Diaphragm Connections to Concrete-Filled Rectangular Steel Tubular Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.93, pp.88-96.
- [20] Qin, Y., Chen, Z., and Wang, X. (2014) Experimental In-

vestigation of New Internal-Diaphragm Connections to CFT Columns Under Cyclic Loading, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.98, pp.35-44.

- [21] 대한건축학회(2016) 건축구조기준, 대한건축학회. Architectural Institute of Korea (2016) Korean Building Code-Structural (KBC 2016), AIK, Korea (in Korean).
- [22] American Institute of Steel Construction (1997) Specification for the Design of Steel Hollow Structural Sections, AISC, USA.
- [23] European Committee for Standardization (1992) Eurocode 3: Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (ENV 1993-1-1: 1992E), Belgium.
- [24] Bažant, Z.P., and Oh, B.H. (1983) Crack Band Theory for Fracture of Concrete, *Materials and Structures*, Vol.16, No.3, pp.155-177.
- [25] Hillerborg, A., Modéer, M., and Petersson, P.-E. (1976) Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, Vol.6, No.6, pp.773-781.
- [26] Bažant, Z.P., and Yu, Q. (2011) Size-effect Testing of Cohesive Fracture Parameters and Nonuniqueness of Workof-Fracture Method, *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, Vol.137, No.8, pp. 580-588.
- [27] Jirásek, M., and Bažant, Z.P. (2001) Inelastic Analysis of Structures, Wiley, UK.

**요 약**: 본 연구에서는 각형 강관 내부에 수직 다이아프램이 적용된 CFT 기둥 접합부의 구조적 특성에 대해 알아보았다. 각형 CFT 기둥의 거동을 파악하기 위해 실대형 3개 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 다이아프램의 거동을 확인하였으며 접합부 내력 식을 제안하였다.

핵심용어 : 콘크리트 충전강관, 수직 다이아프램, 강도, 용접, 항복선 이론