

# 원형강관 X-이음 트러스접합부의 압축 주강관소성화 평가

이경구<sup>1\*</sup> · 신용섭<sup>2</sup> · 손은지<sup>3</sup>

<sup>1</sup>부교수, 단국대학교, 건축공학과, <sup>2</sup>연구원, 단국대학교, 건축공학과, <sup>3</sup>석사과정, 단국대학교, 건축구조

## Evaluation of Compressive Chord Plastification of Circular Hollow Section X-joint Truss Connection

Lee, Kyungkoo<sup>1\*</sup>, Sin, Yong Sup<sup>2</sup>, Son, Eun Ji<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Dept. of Architecture Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi, 448-701, Korea.

<sup>2</sup>Researcher, Dept. of Architecture Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi, 448-701, Korea.

<sup>3</sup>Master course, Dept. of Architecture Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi, 448-701, Korea.

**Abstract** - The researches on circular hollow section(CHS) connections have been conducted continuously because of development of material properties and complex local behavior of the connections. The purpose of this study is that the effects of material strength and chord wall slenderness on chord plastification and strength of CHS X-joint truss connection under compression on branch member were evaluated. To this end, finite element analyses were performed for various connections, using ANSYS Mechanical APDL program. Based on the analysis results, the design strength of the connections according to chord plastification limit state in KBC were examined. Finally, special considerations for CHS X-joint connection design were suggested.

**Keywords** - Circular hollow section, X-joint, truss connection, chord plastification, connection strength, finite element analysis

### 1. 서론

원형강관 부재는 단면의 우수한 성능으로 인해 대공간 건축물, 초고층 건축물 등의 트러스 구조에 널리 사용되고 있다. 원형강관구조의 트러스접합은 하나 이상의 지강관으로 구성되고 접합부를 연속하여 통과하는 주강관에 용접된 접합부로 정의되고, 접합부는 지강관과 주강관의 형상과 하중 전달방법에 따라 분류된다<sup>[1]</sup>.

강관-강관 접합부 거동을 규명하기 위한 수많은 연구결과, 지강관에서 작용하는 하중으로 인해 접합부의 주강관에

서 상당한 변형과 소성화를 경험하게 됨이 보고되었다. 비록 건축구조기준<sup>[1]</sup>에서는 강관-강관 트러스접합부 설계강도를 위한 파괴모드로 주강관의 소성화와 전단항복(휨)을 고려하고 있으나, 전단항복 파괴모드는 일반적이지 않고 주강관의 지름두께비가 상대적으로 작은 경우에 주로 발생한다.

강관구조 접합부의 현행 설계식은 많은 실험 및 해석에 바탕을 두고 제안되었지만, 재료의 발전, 접합부의 복잡한 국부 거동 때문에 국외에서는 지속적으로 개정하고 있다. 국내에서도 강관구조 접합부의 재료 및 형상에 따른 실험 및 해석 연구<sup>[2],[3],[4],[5]</sup>가 수행되었으나, 적용한계에 따른 국부 거동에 대한 연구는 여전히 부족한 상태이다. 특히 항복강도 제한이나 주강관벽세장비(지름두께비)의 최소값 제한 등이 Eurocode 3<sup>[6]</sup>, CIDECT<sup>[7]</sup> 등과 차이가 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다.

이 논문에서는 주강관 양쪽에 지강관 두 개가 용접되어 지강관에서 전달되는 하중이 주강관을 관통하고 반대편 지강관에 의해 평형을 이루는 X-이음 트러스접합부를 대상으로

Note.-Discussion open until April 30, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 29, 2015; revised September 28, 2015; approved on September 30, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-8005-3742 Fax. +82-31-8021-7225

E-mail. [kklee@dankook.ac.kr](mailto:kklee@dankook.ac.kr)

하였다. 다양한 원형강관 X-이음 트러스접합부에 대하여 정밀유한요소해석을 수행한 후, 재료강도 및 주강관벽세장비(지름두께비)가 접합부 주강관소성화에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 현행 기준에서 제시하는 소성화 한계상태의 접합부 설계강도를 검토하였다.

## 2. 기준 및 지침서 검토

원형강관 접합부에 대한 연구는 전 세계적으로 이루어지고 있으며, 이러한 연구결과를 바탕으로 국내 건축구조기준<sup>[1]</sup>, 미국 AISC<sup>[8]</sup>, 유럽 CIDECT<sup>[7]</sup>, ISO<sup>[9]</sup>, EUROCODE(EC3)<sup>[6]</sup> 등의 기준 및 지침서에서 강관-강관 접합부 설계를 위한 재료물성치 및 형상에 대한 적용한계를 제시하고 있다.

매우 큰 비균일 응력분포가 발생할 수 있는 강관 접합부의 경우, 부재 항복이 발생하기 전에 접합부 파단이 발생하지 않도록 충분한 변형능이 필요하다. 이를 위해 강관접합부에 대하여 각 기준은 재료의 항복강도와 항복비를 제한하고 있다. 각 기준 및 지침서에서 제시하는 항복강도( $F_y$ )와 항복비( $F_y/F_u$ )를 Table 1에 정리하였다. AISC<sup>[8]</sup>와 국내 건축구조기준은 공칭항복강도를 360MPa로 제한하고 있는 반면, 유럽의 CIDECT<sup>[7]</sup>, ISO<sup>[9]</sup>, EC3<sup>[6]</sup>는 보다 높은 공칭항복강도를 허용하고 있음을 알 수 있다. 특히, EC3<sup>[6]</sup>는 최근에 개발되고 그 성능이 향상되고 있는 고강도강을 고려하여 공칭항복강도를 700MPa까지 허용하고 있다. 그러나 360MPa를 초과하는 공칭항복강도를 허용하는 경우, 이에 상응하여 접합부의 공칭강도를 저감하고 있다. 국내에서도 항복강도 650MPa의 건축구조용 압연강재(HSA800)를 개발하여 한

국산업표준규격(KS D5994)에 확정 고시하였으므로, 이러한 재료물성치 적용한계와 접합부 공칭강도에 대한 분석이 필요하다.

Table 2에는 원형강관 X-이음 트러스접합부를 위한 건축구조기준과 EC3<sup>[6]</sup>의 기하학적 형상 적용제한을 정리하였다. 주강관지름-대-벽두께비인 주강관벽세장비( $D/t$ ), 지강관지름-대-벽두께비인 지강관벽세장비( $D_b/t_b$ ), 지강관지름-대-주강관지름비인 폭비( $\beta = D_b/D$ )를 비교하였다. 대표적인 차이점은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

첫째, EC3<sup>[6]</sup>에서는 주강관 및 지강관의 최소 두께를 2.5mm로 제한하고 있으며, 주강관의 경우 두께를 25mm 미만으로 제한하고 있다. 건축구조기준에서는 주강관 및 지강관 두께 제한은 없다.

둘째, 주강관벽세장비의 경우, 두 기준 모두 최대값은 동일하지만 EC3<sup>[6]</sup>에서는 최소값을 제한하고 있다.

셋째, 지강관벽세장비의 경우, 건축구조기준은 지강관에 압축력이 작용할 때와 인장력이 작용할 때의 제한을 구분하는 반면, EC3<sup>[6]</sup>에서는 구분이 없고 최소값을 제한하고 있다.

이 연구에서는 접합부 공칭강도 결정에 일반적으로 작용하는 주강관 소성화 한계상태에 주강관벽세장비가 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 폭비와 지강관벽세장비는 고정하였다.

건축구조기준에 따르면, 원형강관 X-이음 트러스접합부의 설계강도( $P_n$ )를 주강관소성화와 전단항복(휨)한계상태 중에서 작은 값으로 한다. 주강관소성화 파괴모드는 폭비( $\beta = D_b/D$ )가 0.85이하인 지강관의 접합부에서 일반적으로 나타난다. 전단휨 파괴모드는 주강관 면에서의 초기균

Table 1. Limitations on materials

Design guide	Limits of applicability	
	yield strength ( $F_y$ )	yield-to-tensile ratio ( $F_y/F_u$ )
KBC	$F_y \leq 360MPa$	$F_y/F_u \leq 0.8$
AISC	$F_y \leq 360MPa$	$F_y/F_u \leq 0.8$
CIDECT	$F_y \leq 460MPa$	$F_y/F_u \leq 0.8$
ISO	$F_y \leq 460MPa$	N/A
EUROCODE (EC3)	$F_y \leq 700MPa$	$F_y \leq 460MPa$ : $F_y/F_u \leq 0.91$ $460MPa \leq F_y \leq 700MPa$ : $F_y/F_u \leq 0.91$

Table 2. Limits of applicability

Variables	Limits of applicability	
	KBC	EUROCODE 3
Thickness ( $t, t_b$ )	N/A	$2.5mm \leq t \leq 25mm$ $t_b \geq 2.5mm$
Chord wall slenderness ( $D/t$ )	$D/t \leq 40$	$10 \leq D/t \leq 40$
Branch wall slenderness ( $D_b/t_b$ )	$D_b/t_b \leq 0.05E/F_{yb}$ (for compression) $D_b/t_b \leq 50$ (for tension)	$10 \leq D_b/t_b \leq 50$
Width ratio ( $\beta = D_b/D$ )	$0.2 \leq D_b/D \leq 1.0$	$0.2 \leq D_b/D \leq 1.0$

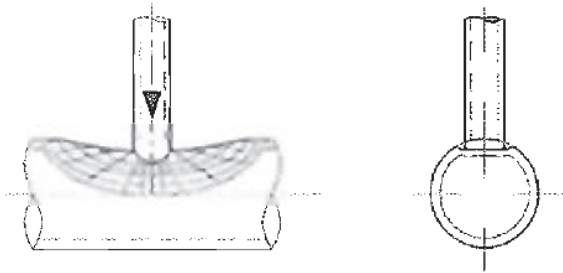


Fig. 1. Failure modes for chord plastification<sup>[9]</sup>

열 발생이 주된 원인으로, 일반적이지 않고 주강관벽세장비 ( $D/t$ )가 상대적으로 작은 경우에 발생한다<sup>[5]</sup>. 이 논문에서는 주강관소성화의 한계상태에 대해서만 고려하였다. Fig. 1은 주강관소성화 파괴모드를 보여주며 주강관소성화의 한계상태에 의한 설계강도는 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

$$P_n \sin \theta = F_y t^2 [5.7 / (1 - 0.81 \beta)] Q_f \quad (1)$$

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석 모델

유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Mechanical APDL<sup>[10]</sup>을 이용하여 수행하였다. 원형강관 X-이음 트리스접합부 형상을 Fig. 2와 같이 3차원으로 모델링하였다. 요소모델은 8개의 절점을 가진 육면체 SOLID185 (8-Node Structural Solid) 요소<sup>[11]</sup>를 사용하였다. 요소는 접합부 주변부를 더 조밀하게 구성하였다.

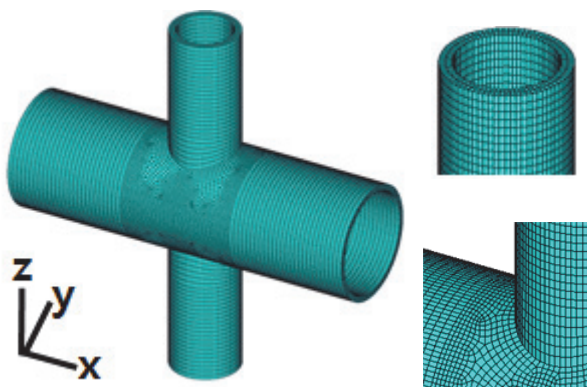


Fig. 2. Analysis model

지강관과 주강관이 이루는 각도( $\theta$ )는  $90^\circ$ 로 하였다. 수평방향의 주강관 단부는 부재축방향(x축방향)으로 이동을 자유롭게 하고, 주강관에 축하중과 휨하중을 작용하지 않았다. 하중을 양쪽 지강관 단부에 부재축방향(z축방향)으로 균등하게 분포하여 압축력을 받도록 단조가력하였다. 해석은 변위제어로 수행하였다.

#### 3.2 해석 검증

이 연구의 유한요소해석의 신뢰성 확보를 위하여 기존에 실험한 X-이음 트리스접합부를 모델링하여 비선형 시간이력해석을 우선 수행하였다. 이 원형강관 접합부 실험체는 수평방향의  $\Phi 400 \times 25$  주강관과 수직방향의  $\Phi 300 \times 15$  지강관이 중앙에서 용접접합되었다. 주강관과 지강관의 총 길이는 둘 다 3000mm이며, 주강관 양단을 자유단으로 하고 지강관 양단에 강판을 설치하여 압축하중을 변위제어로 작용하였다. 강관들의 강재를 SM490과 HSA800로 달리하여 동일한 형상의 접합부 실험을 수행하였다<sup>[4]</sup>. Fig. 3은 접합부 지강관 변위와 하중 관계 해석결과와 실험결과를 비교한 것이다. 현행 기준의 주강관소성화 한계상태에 의한 접합부 공칭강도는 최대내력과 3%변형한계(접합부 지강관 변위가 주강관 지름( $D$ )의 3%에 해당하는 변형)중 작은 값에 의해 결정된다<sup>[12]</sup>. 비교 결과, 전체적으로 해석값과 실험값이 유사함을 확인하였다. 최대내력과 3%변형한계의 해석강도는 실험강도보다 약간 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 4장에 기술된 강도의 경향에 영향을 미치지 않으며, 기준의 설계강도 평가에 있어서는 보다 보수적인 접근으로 사료된다.

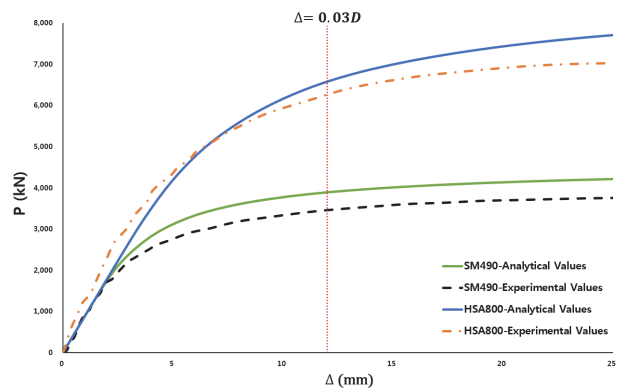


Fig. 3. Comparison of experimental and analytical results

### 3.3 해석 변수

재료강도와 접합부 공칭강도와 관계를 살펴보기 위하여, 강재 SM490과 HSA800를 변수로 선택하였다. 재료모델에는 각각 항복강도 325MPa와 650MPa, 인장강도 490MPa와 800MPa를 적용하였다. 탄성계수  $E=205,000\text{MPa}$ , 푸아송비  $=0.3$ 을 사용하였다. 재료모델의 응력-변형률 곡선은 삼선형(Trilinear)으로 구현하였고, 항복 후 기울기인 소성계수(tangent modulus)는 SM490과 HSA800 모두 동일하게 하였다.

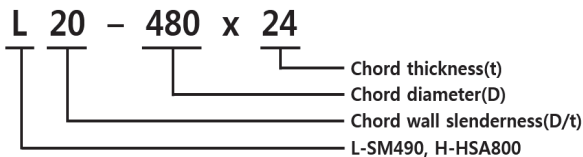
또한, 주강관벽세장비가 주강관 소성화 한계상태에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 폭비와 지강관벽세장비는 고정된 상태로 주강관벽세장비를 변수로 선택하였다. 주강관벽세장비( $D/t$ )에 대해 국내 건축구조기준<sup>[1]</sup>에서는 최소값이 없으나, EC3<sup>[6]</sup>에서 제시하는  $D/t = 10$ 을 최소값으로 하고, Table 3과 같이  $D/t=10, 20, 30, 40$ 으로 설정하였다. 지강관벽세장비( $D_b/t_b$ )는 적용제한을 충분히 만족하면서, 동시에 지강관의 좌굴이나 과도한 변형이 없도록 10으로 하였다. 지강관지름 대 주강관지름 비인 폭비( $\beta$ )는 적용제한의 중간범위에 해당하는 0.6으로 고정하였다.

또한, 주강관지름( $D$ )을 국내의 일반구조용 탄소강 강관의 표준치수<sup>[13]</sup> 범위 내에서 240, 480, 720, 960으로 달리하고, 각각에 대하여 주강관벽세장비를 변수로 대입하였다. 해석 모델 표본을 증가시켜 해석결과와 신뢰도를 높이고자 하였다.

유한요소해석모델 일람을 Table 4에 정리하였다. 모델명은 강재종류(SM490, HSA800) 및 주강관벽세장비( $D/t$ )-주강관지름( $D$ )x주강관두께( $t$ )로 정의하였다(Fig. 4참조).

**Table 3.** Variables of analysis

Variables	Values				Limits of applicability
	10	20	30	40	
$D/t$	10	20	30	40	$D/t \leq 40$
$D_b/t_b$	10				$D_b/t_b \leq 0.05E/F_y$
$\beta = D_b/D$	0.6				$0.2 \leq D_b/D \leq 1.0$



**Fig. 4.** Model designation symbol

**Table 4.** List of analysis models

Model No.	$D$	$t$	$D/t$	$D_b$	$t_b$	$D_b/t_b$
L10-240x24	240	24	10	144	14.4	10
L20-240x12	240	12	20	144	14.4	10
L30-240x8	240	8	30	144	14.4	10
L40-240x6	240	6	40	144	14.4	10
L10-480x48	480	48	10	288	28.8	10
L20-480x24	480	24	20	288	28.8	10
L30-480x16	480	16	30	288	28.8	10
L40-480x12	480	12	40	288	28.8	10
L10-720x72	720	72	10	432	43.2	10
L20-720x36	720	36	20	432	43.2	10
L30-720x24	720	24	30	432	43.2	10
L40-720x18	720	18	40	432	43.2	10
L10-960x96	960	96	10	576	57.6	10
L20-960x48	960	48	20	576	57.6	10
L30-960x32	960	32	30	576	57.6	10
L40-960x24	960	24	40	576	57.6	10
H10-240x24	240	24	10	144	14.4	10
H20-240x12	240	12	20	144	14.4	10
H30-240x8	240	8	30	144	14.4	10
H40-240x6	240	6	40	144	14.4	10
H10-480x48	480	48	10	288	28.8	10
H20-480x24	480	24	20	288	28.8	10
H30-480x16	480	16	30	288	28.8	10
H40-480x12	480	12	40	288	28.8	10
H10-720x72	720	72	10	432	43.2	10
H20-720x36	720	36	20	432	43.2	10
H30-720x24	720	24	30	432	43.2	10
H40-720x18	720	18	40	432	43.2	10
H10-960x96	960	96	10	576	57.6	10
H20-960x48	960	48	20	576	57.6	10
H30-960x32	960	32	30	576	57.6	10
H40-960x24	960	24	40	576	57.6	10

## 4. 주강관소성화 한계상태 평가

### 4.1 접합부의 소성화 분포

Fig. 5는 접합부 지강관 변형이 주강관지름의 3%에 도달 하였을 때, 동일한 형상 다른 재료 접합부의 Von Mises Stress 분포 일례를 보여준다. Fig. 5의 지강관과 주강관이 접합된 부위의 Von Mises Stress 분포를 보면, SM490 접합부의 경우 항복강도 235MPa 이상의 영역이 접합 부위에

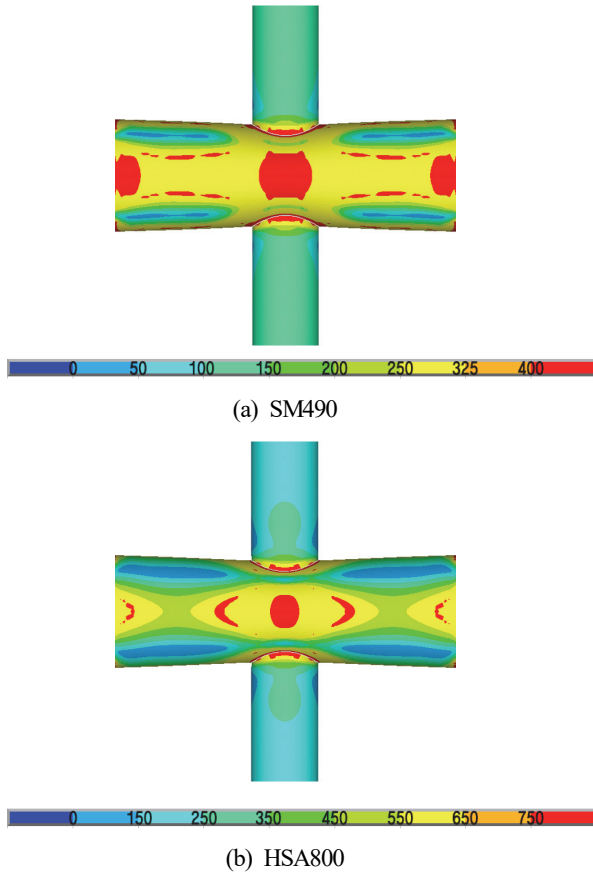


Fig. 5. Von mises stress

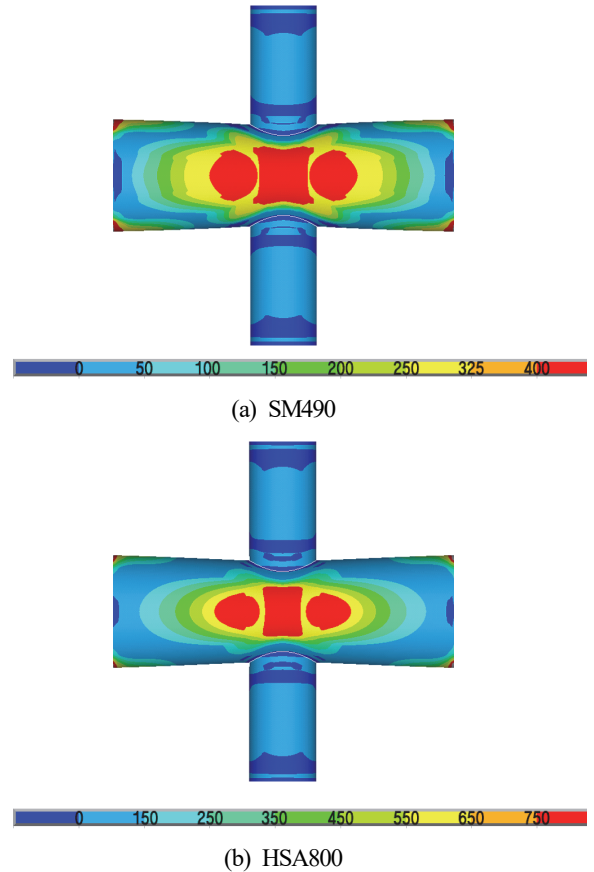


Fig. 6. 1<sup>st</sup> Principal stress

넓게 분포되어 있다. HSA800 접합부의 경우에도 항복강도 650MPa 이상의 영역이 접합 부위에 분포되어 있다. 모든 해석결과가 유사한 분포를 나타냈다. 이를 통해 지강관 변형이 주강관지름의 3%에 도달하였을 때 주강관의 소성화가 발생하였음을 확인하였다.

Fig. 6는 동일 변형에서 주응력(1<sup>st</sup> Principal Stress) 분포를 보여준다. 주강관 측면에 상당한 인장력이 작용함을 알 수 있다.

#### 4.2 주강관소성화에 따른 접합부 강도 평가

주강관소성화 한계상태에 의한 접합부 공칭강도를 평가하기 위하여 식 (1)을 정규화 할 수 있다. 식 (1)에서 지강관과 주강관이 이루는 각도가 90°이고, 주강관 축하중 및 휨하중이 없으므로  $Q_f = 1.0$ 이 되어, 다음과 같이 정규화 하였다.

$$\frac{P_n}{F_y t^2} = \frac{5.7}{1 - 0.81\beta} \quad (2)$$

해석 모델의 폭비( $\beta = D_b/D$ )는 0.6으로 동일하므로, 주강관소성화의 한계상태에 따른 모든 해석모델의 정규화 된 접합부 공칭강도는 11.09의 값을 갖는다. 해석에 작용한 하중도 동일하게 정규화하여 표현할 수 있다.

또한 접합부 지강관 변위( $\Delta$ )를 주강관 지름( $D$ )로 나누어 정규화 하였다. 정규화 변위를  $\Delta/D \times 100(\%)$ 로 나타냄으로써 3%변형한계를 쉽게 판단할 수 있다. 즉, 3%변형한계는  $\Delta/D \times 100(\%) = 3(\%)$ 에 해당한다.

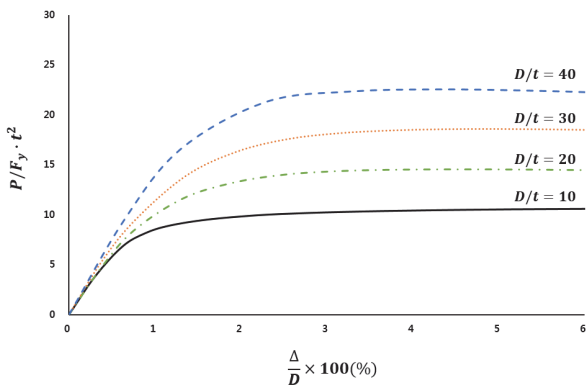
Fig. 7은 이렇게 정규화 된 접합부 변위-하중 곡선 일례이다. 강재 SM490와 HSA800대하여 주강관지름이 480인 접합부들의 주강관벽세장비에 따른 변위-하중 곡선들을 비교하였다. 강재 SM490와 HSA800 접합부 모두 주강관벽세장비가 작을수록 정규화 된 최대강도가 작아지는 경향을 보여준다.

한편, 기존의 주강관소성화 한계상태는 최대강도와 주강관지름의 3% 변형에 해당하는 강도 중 작은 값으로 정해지므로 이에 대하여 살펴볼 필요가 있다. 강재SM490를 사용한 접합부의 경우, 접합부 지강관 변위가 3%변형한계에 도

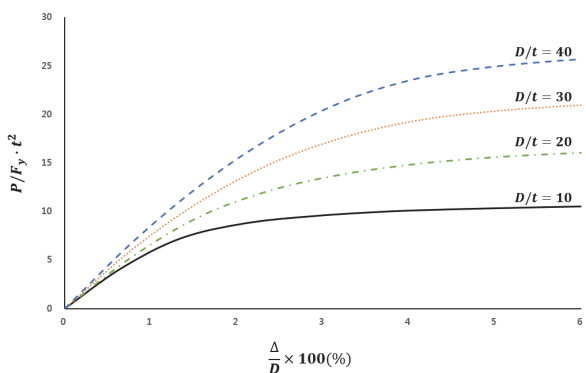
달하기 전에 최대강도에 도달하였다. 그러나 강재 HSA800를 사용한 접합부의 경우, 최대강도에 도달하기 전에 지강관 변위가 3%변형한계에 도달하는 경향을 보여준다. 특히 주강관벽세장비가 클수록 최대강도에 훨씬 못 미쳐서 3%변형한계에 도달함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 주강관소성화가 발생할 경우 보다 큰 재료항복강도를 가진 접합부에서 상대적으로 보다 많은 변형이 발생한다는 CIDECT<sup>[7]</sup>의 내용과 일치한다.

강재 및 주강관벽세장비 (즉, 주강관 두께)의 효과를 명확하게 보기 위하여, 강재 SM490과 HSA800를 사용한 모든 해석모델을 주강관벽세장비( $D/t$ )별로 분류하여 Fig. 8에 정규화 된 변위-하중 곡선을 나타내었다. 이 곡선들은 다음과 같은 내용을 내포하고 있다.

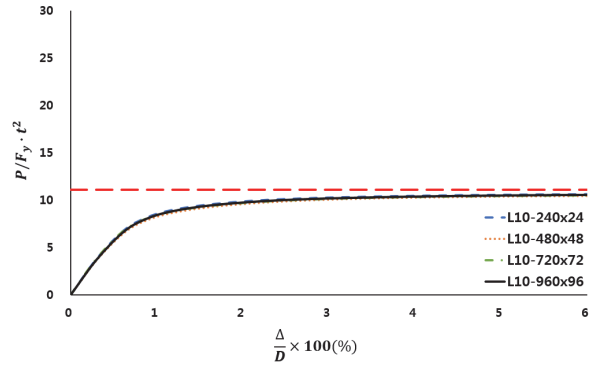
첫째, 주강관벽세장비가 크면 하중-변위 관계가 주강관 지름에 따라 약간의 편차를 보여주지만, 전체적으로 주강관벽세장비가 일정하면 동일한 정규화 하중-변위 관계를 나타낸다.



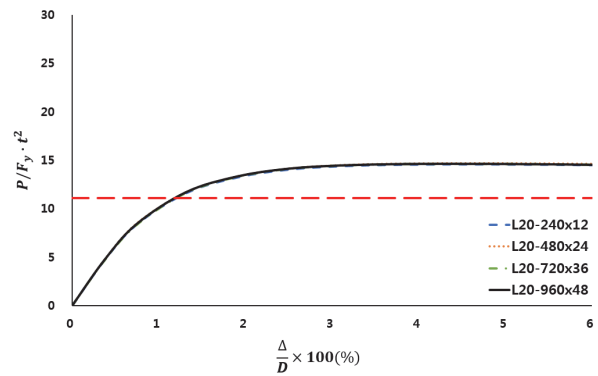
(a) SM490



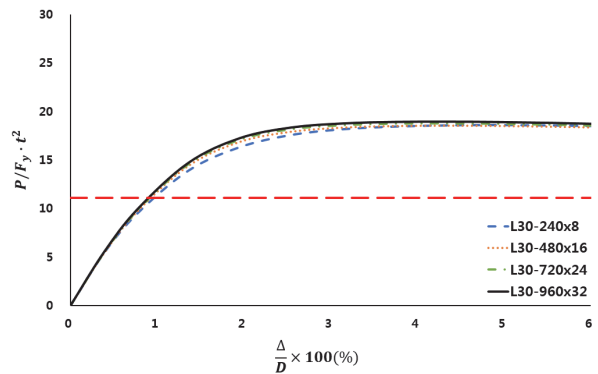
(b) HSA800



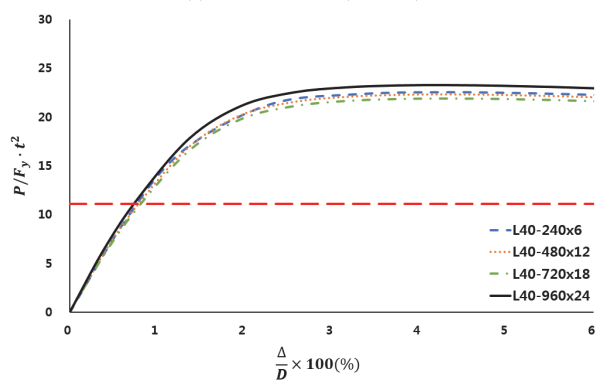
(a)  $D / t = 10$  (SM490)



(b)  $D / t = 20$  (SM490)

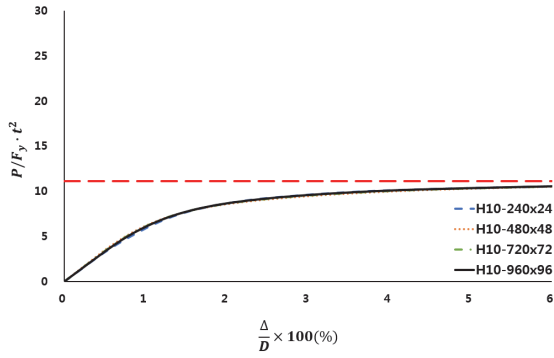


(c)  $D / t = 30$  (SM490)

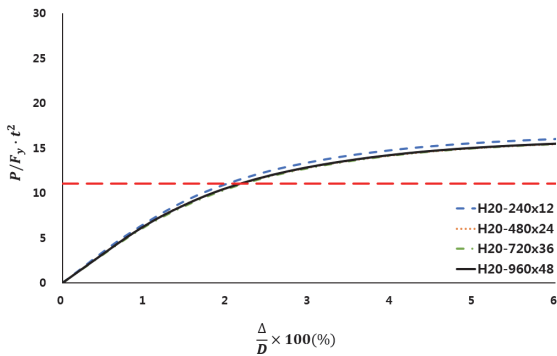


(d)  $D / t = 40$  (SM490)

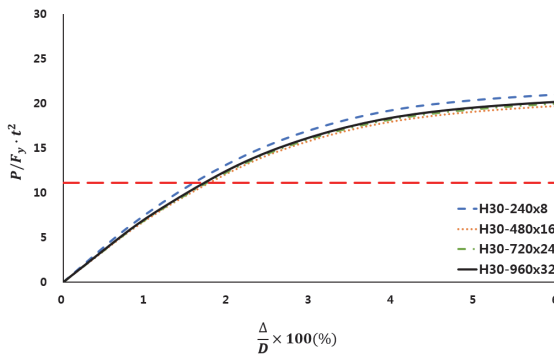
Fig. 7. Normalized strength vs. chord slenderness



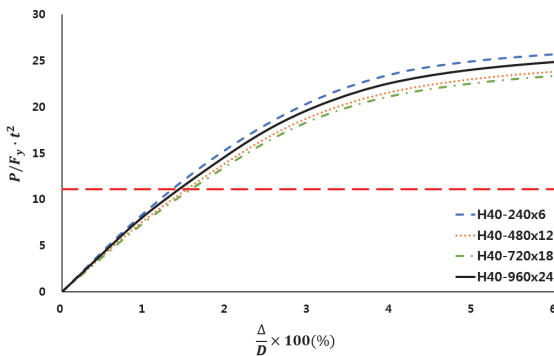
(e)  $D / t = 10$  (HSA800)



(f)  $D / t = 20$  (HSA800)



(g)  $D / t = 30$  (HSA800)



(h)  $D / t = 40$  (HSA800)

Fig. 8. Comparisons of normalized connection strength

둘째, 고강도강 HSA800 접합부가 동일한 주강관벽세장비에서 3%변형한계에 상응하는 강도가 SM490 접합부보다 작은 경향을 보인다. 기존 실험결과에서도 재료항복강도가 클수록 변형한계에 상응하는 강도가 작음을 보여주었다<sup>[14]</sup>. 한편, 해석결과는 주강관벽세장비가 클수록 이러한 경향이 명확하고 작은 경우에는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

셋째, 주강관벽세장비가 작을수록 3%변형한계에 상응하는 강도가 작아진다. 식 (2)를 통해 얻어진 11.09의 정규화 공칭강도와 비교하였을 때,  $D/t = 10$ 인 접합부는 3%변형한계에 상응하는 강도가 기준의 공칭강도보다 작다. 특히  $D/t = 10$ 인 고강도강 접합부는 3%변형한계에 상응하는 강도가 계수  $\phi = 0.9$ 를 곱한 설계강도보다도 작다.

### 5. 결론

이 연구에서는 지강관에 압축력이 작용하는 원형강관 X-이음 트러스접합부에 대하여, 재료강도 및 주강관벽세장비에 따른 주강관소성화의 경향을 분석하고, 주강관소성화 한계상태의 접합부 강도를 검토하였다. 이를 위하여 재료항복강도, 주강관의 지름( $D$ )과 두께( $t$ )를 변수로 유한요소해석을 수행하였다. 지강관벽세장비와 지강관-주강관 폭비는 일정하게 유지하였다. 이 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 재료의 강도를 달리하여 수행한 기존의 실험결과와 해석 결과를 비교하여 이 논문의 유한요소해석모델이 합리적인 임을 검증하였다.
- (2) 주강관벽세장비가 일정하면, 접합부 하중을 재료항복강도와 주강관두께의 제곱으로 나눈 정규화하중-변위 곡선이 거의 동일함을 확인하였다. 유한요소해석결과는 기준의 주강관소성화 한계상태의 접합부 공칭강도가 재료항복강도와 주강관두께의 함수임을 명확히 보여준다.
- (3) 동일한 주강관벽세장비에서, 고강도강 접합부의 주강관소성화 3%변형한계(주강관 지름의 3%변형)에 상응하는 정규화강도가 저강도강 접합부보다 작은 경향을 보인다. 이 결과는 주강관소성화가 발생할 경우, 재료항복강도가 클수록 접합부에서 보다 많은 변형이 발생한다는 국외 지침서 내용과 일치한다.
- (4) 주강관벽세장비가 작을수록 주강관소성화 3%변형한계에 상응하는 접합부 강도가 작게 나타났다. 특히, 주강관벽세장비( $D/t$ )가 10일 때, 저강도강제 접합부 강도가

기준의 주강관소성화 공칭강도보다 작았다. 이는 주강관벽세장비가 매우 작으면 기준의 공칭강도를 발휘하지 못할 수도 있음을 시사한다.

- (5) 주강관벽세장비( $D/t$ )가 10일 때 고강도강재 접합부 강도가 기준 공칭강도에 훨씬 못 미쳤다. 이는 (3)항 결과와 함께 고강도강 접합부의 공칭강도는 현행 기준 공칭강도를 저감하여 사용해야 함을 시사한다. 이 결과는 고강도강 접합부의 공칭강도에 저감계수를 적용하는 외국 기준 및 지침의 개념과 일치한다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌(References)

[1] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 및 해설, 기문당. Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code and Commentary*, Kimmoondang, Korea (in Korean).

[2] 김우범, 박현호(2012) 단부 구속을 받는 리브 보강 플레이트 원형강관 X형 접합부의 극한내력 도출에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp. 383-398. Kim, W.B., and Park, H.H. (2012) Study on the Ultimate Strength of Gusset Plate-Circular Hollow Section (CHS) Joint Stiffened with Rib-Plate by End Restraint, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.4, pp.383-398 (in Korean).

[3] 이수현, 신경재, 이희두, 김우범(2012) 고강도 원형강관의 길이방향 거셋플레이트 접합부 실험 및 해석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.35-46. Lee, S.H., Shin, K.J., Lee, H.D., and Kim, W.B. (2012) Test and Analysis on the Longitudinal Gusset Plate Connection to Circular Hollow Section (CHS) of High Strength, *Journal of Korean Society of Steel Construc-*

*tion*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.35-46 (in Korean).

[4] 이철호(2014) 연구1세부과제 ‘고성능재료기술개발’ 자체 평가 보고서, 초고층빌딩시공기술연구단. Lee, C.H. (2014) *Self-Evaluation Report on Research Sub-Task 1 (High-Performance Material Technology)*, Super-Tall Building Construction Technology Research Group, Korea (in Korean).

[5] 한국강구조학회(2014) HSA800 강관접합부 설계지침보고서, 12월, 한국강구조학회. KSSC (2014) *Report for Design Guide of HSA800 Hollow Section Connection (December)*, KSSC, Korea (in Korean).

[6] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints (EN 1993-1-8: 2005)*, Belgium.

[7] Wardenier, J., Packer, J.A., Zhao, X.-L., and van der Vegte, G.J. (2010) *Hollow Sections in Structural Applications (2nd Ed.)*, Comité International pour le Développement et l'Etude de la Construction Tubulaire, Geneva.

[8] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)*, USA.

[9] International Organization for Standardization (2013) *Static Design Procedure for Welded Hollow Section Joints - Recommendations (ISO 14346: 2013)*, Switzerland.

[10] ANSYS (2010) *ANSYS Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide*, ANSYS, Inc., USA.

[11] ANSYS (2013) *ANSYS Mechanical APDL Element Reference*, ANSYS, Inc., USA.

[12] Lu, L.H., De Winkel, G.D., Yu, Y., and Wardenier, J. (1994) Deformation Limit for the Ultimate Strength of Hollow Section Joints, *Tubular Structures VI (Proceedings of the 6th International Symposium on Tubular Joints)*, CRC Press, UK, pp.341-347.

[13] 한국강구조학회(2011) 강구조설계, 구미서관. KSSC (2011) *Design of Steel Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).

[14] Noordhoek, C., and Verheul, A. (1998) *Static Strength of High Strength Steel Tubular Joints*, CIDECT Report No. 5BD-9/98, Delft University of Technology, Netherlands.

**요 약** : 원형강관구조 접합부는 재료의 발전과 접합부의 복잡한 국부 거동 때문에 지속적인 연구되고 있다. 이 연구는 지강관에 압축력이 작용하는 원형강관 X-이음 트러스접합부의 주강관 소성화변형과 접합부 강도에 재료강도와 주강관벽세장비가 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 재료강도와 주강관벽세장비를 변수로 하여 다양한 원형강관 X-이음 트러스접합부에 대하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Mechanical APDL을 사용하여 정밀유한요소해석을 수행하였다. 해석결과를 토대로 현행 건축구조기준에서 제시하는 주강관소성화 한계상태의 접합부 설계강도를 검토하였다. 결론적으로 원형강관 X-이음 트러스접합부 설계에서 고려해야 할 사항을 제시하였다.

**핵심용어** : 원형강관, X-이음, 트러스접합, 주강관소성화, 접합부 강도, 유한요소해석