

# 관벽에 작용하는 전단력의 영향을 고려한 거셋트 플레이트-강관 접합부의 극한강도

김우범<sup>1\*</sup><sup>1</sup>교수, 건축공학과, 공주대학교

## Ultimate Strength of Gusset Plate-Tube Joints Considering Shear Force on the Tube Wall

Kim, Woo Bum<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Professor, Dept. of Arichitectural Engineering, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea

**Abstract** - In the design of the present electric transmission steel tube tower, the joint is designed in the form of a gusset plate-steel tube connection, and a design strength formula is provided with respect to the axial force applied to the steel pipe and the moment transmitted from the gusset plate. However, in the actual behavior, the shear force as well as the axial force and the moment are applied, so the current design strength formula does not reflect this. Especially, when the eccentric joint is applied to the joint, only the shear force and the axial force are applied to the tube wall of the joint. In this study, the influence of three parameters of axial force, shear force, and moment on the ultimate strength of the joints were obtained through finite element analysis of the joints. From the ultimate strength of the joints obtained from the analysis results, the interaction formula of axial force-moment, axial force-shear force, and shear force-moment is derived and finally the yield strength of the joint considering the shear force and moment is provided.

**Keywords** - Electric transmission tower, Gusset plate-steel tube connection, Eccentric joint, Interaction curve, Shear effect

### 1. 서론

현행 송전 강관철탑 설계<sup>[1]</sup>에 있어서 접합부는 거셋트 플레이트-강관 접합의 형태로 설계되고 있으며, 강관에 가해지는 축력과 거셋트 플레이트로부터 전달되는 모멘트에 대하여 내력식이 제공되고 있다. 그러나 실제 거동에 있어서는 축력과 모멘트뿐만 아니라 전단력이 가해짐으로써 현재의 내력식은 이를 반영하지 못하고 있다. 특히 접합부에 외편심 접합을 채택하는 경우에는 접합부 관벽에는 전단력과 축력

만이 가해지기 때문에 이에 대한 내력 추정이 필요하다. 이와 관련한 연구로 관벽에 가해지는 축력의 편심이 접합부에 미치는 영향이 파악되었으며<sup>[2]</sup> 관벽에 발생하는 국부 변형으로 인한 내력 저하를 방지하기 위하여 보강방법 등을 제시한 바 있다<sup>[3]</sup>. 그러나 아직까지 접합부에 작용하는 축력, 전단력, 모멘트를 동시에 고려하여 접합부 내력을 추정하는 설계식은 제시된 바 없다. 일본의 강관설계기준<sup>[4]</sup>에서는 모멘트 내력만을 제시하고 있으며 국내 및 유럽의 설계기준<sup>[5],[6]</sup>에서는 모멘트와 축력을 고려하고 있으나 전단력은 고려하지 못하고 있다. 본 연구에서는 접합부의 유한요소 해석을 통하여 축력, 전단력, 모멘트 세 가지 하중 변수와 접합부의 형상변수가 접합부의 극한강도에 미치는 영향에 대하여 파악하였다. 해석결과로 도출된 접합부의 극한강도로부터 축력-모멘트, 축력-전단력, 전단력-모멘트의 상관관계식을 도출하여 최종적으로 전단력과 모멘트를 고려한 접합부의 내력식을 제공하였다.

Note.-Discussion open until October 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 19, 2020; revised March 20, 2020; approved on March 20, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-41-521-9330 Fax. +82-41-562-0310

E-mail. wbk@kongju.ac.kr

## 2. 거셋트 플레이트-강관접합부의 설계식

축력 및 횡력을 받는 거셋트-강관 접합부에는 거셋트 플레이트는 그 면내에 작용하는 응력만을 부담하고, 거셋트 플레이트를 면외에 휨변형시킨 응력은 부담하지 않는 것으로 설계해야 한다. 또한 거셋트 플레이트의 응력이 관벽의 일부에 집중적으로 가해지므로 응력집중 및 관벽의 국부변형이 유발되기 쉽다. 따라서 이러한 접합부의 설계는 관벽의 국부적인 파괴에 의해 내력이 부족하지 않도록 적절한 형상으로 설계하도록 규준에서는 명시하고 있다. 이러한 접합부의 절점에 있어서 강관에는 거셋트 플레이트로부터 휨모멘트( $M$ ), 인장력 또는 압축력( $P$ ), 전단력( $Q$ )이 작용하며 산출은 다음 식에 의한다.

- 관벽 모멘트:  $M = (P_1 \cos \theta_1 + P_2 \cos \theta_2)D/2$
- 인장(압축)력:  $P = (P_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin \theta_2)$
- 관벽 전단력:  $Q = (P_1 \cos \theta_1 + P_2 \cos \theta_2)$
- 보강플레이트 작용력( $M$ 과  $P$ 가 작용):  
 $PV_1 = M/B + P/2$   
 $PV_2 = -M/B + P/2$

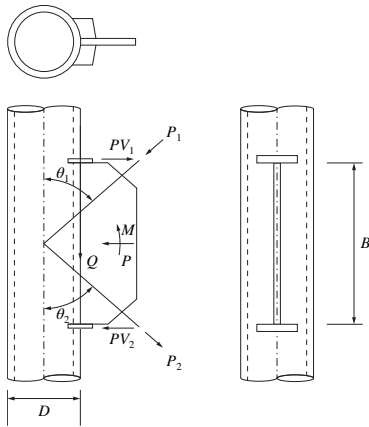


Fig. 1. Shape of connection

이러한 복합하중이 작용하는 접합부의 국부변형에 대한 항복내력은 세부적인 해석을 통한 정확한 극한내력 추정이 현실적으로 불가하므로 국내규준 및 해외 규준에서는 다음과 같이 단순화된 접합부 모멘트 내력식을 채택하고 있다.

$$M_u = 1.198B \left( \gamma^{0.2} + 1.5 \frac{B}{2D} \gamma^{-0.1} \right) T^2 \sigma_y \quad (1)$$

$\gamma$  :  $D/(2T)$

$B$  : 거셋트 플레이트 길이

$T$  : 강관두께

$D$  : 강관직경

$\sigma_y$  : 항복응력

$$M_u = \frac{B^2 T \sigma_y (1.3/a + 0.07) \sqrt{1 - (N/N_y)^2}}{\sqrt{3(1.3/a + 0.07) + \sqrt{1 - (N/N_y)^2}}} \quad (2)$$

$B$  : 거셋트 플레이트 길이

$T$  : 강관두께

$N$  : 축력

$N_y$  : 항복축력

$\sigma_y$  : 항복응력

$a$  :  $D/(2T)$

식 (1)은 모멘트만이 고려된 내력식이며 식 (2)는 모멘트와 축력이 고려된 내력식이다. 두 내력식 모두 전단력을 고려치 못하고 있음을 알 수 있다.

## 3. 관벽의 모멘트 및 전단 내력식 제안

본 연구에서는 접합부 유한요소 및 변수해석을 통하여 관벽의 모멘트( $M$ ), 관벽의 전단력( $P_v$ )에 대한 각각의 내력식을 제안하였다.

### 3.1 관벽의 모멘트 내력식 제안

지난 연구<sup>[7]</sup>에서 거셋트 플레이트 길이( $B$ ), 강관 원주의 보강비( $C_r$ ), 강관직경( $D$ ), 강관두께( $t$ ) 등을 변수로 유한요소해석을 수행하여 각 변수에 따른 영향을 분석하였다. 분석한 결과로 극한 모멘트 내력식을 도출하였다. 도출된 강관접합부의 모멘트 내력식은 다음과 같다.

$$M_{wu} = 2.8 \left\{ 0.7 \left( \frac{D}{t} \right)^{3.5} - 10 \left( \frac{B}{D} \right)^5 \right\}^{0.3 \sqrt{C_r}} B t^2 \sigma_y \quad (3)$$

$B$  : 거셋트 플레이트 길이

$D$  : 강관직경

$t$  : 강관두께

$C_r$  : 강관 원주에 대한 보강비

$\sigma_y$  : 항복응력

적용범위:  $1/6 \leq C_r \leq 1/2, 1.0 \leq B/D \leq 3.0,$

$10 \leq D/t \leq 70$

### 3.2 관벽의 전단내력식 제안

지난 연구에서 거셋트 플레이트 길이( $B$ ), 강관 원주의 보강비( $Cr$ ), 강관직경( $D$ ), 강관두께( $t$ ) 등을 변수로 유한요소 해석을 수행하여 각 변수에 따른 영향을 분석하였다. 분석한 결과로 극한 전단내력식을 도출하였다. 지난 연구에서도 출한 강관접합부의 전단내력식은 다음과 같다.

$$P_{vu} = (2.1D + 0.2B + 3Cr)t\sigma_y \quad (4)$$

## 4. 조합하중 작용시 각 하중에 대한 내력의 상관관계

조합하중이 작용할 경우 각 내력상관관계를 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 해석은 ABAQUS 14.1을 사용하였으며, 강관의 국부좌굴변형과 소성흐름을 정확히 모델링하기 위하여 S4R5 셸(shell) 요소를 사용하였다. 이 요소는 thin-element이고 각 절점마다 5개의 자유도를 갖는 4노드 4변형 셸요소이다. 요소의 분할은 응력집중 현상 및 정확한 최대내력 추정이 가능하도록 강관에 대해서는 직경이 76.6 mm인 시험체는 5 mm 간격으로 요소를 분할하였고 강관의 직경에 대하여 나머지 시험체도 같은 비율로 요소를 분할하였다.

항복조건으로는 von-Mises의 항복조건을 사용하였으며 재료의 탄성계수는 205,000 N/mm<sup>2</sup>, 프아송비는 0.3, 항복응력은 275 N/mm<sup>2</sup>으로 동일하게 적용하였다.

Fig. 2는 해석시험체의 유한요소해석 모형을 나타낸 것이다.

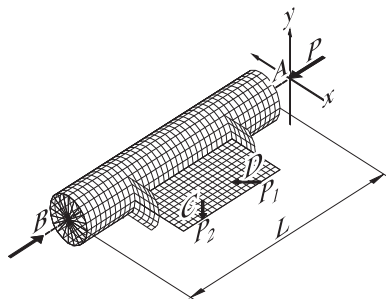


Fig. 2. Finite element model

### 4.1 접합부 시험체의 제원

접합부의 각 변수에 따른 극한 내력을 파악하기 위하여 거셋트 플레이트 길이( $B$ ), 보강비( $Cr$ ), 강관직경( $D$ ), 강관두께

( $t$ ) 등을 변수로 하여 시험체를 계획하였다. 시험체는 강관 구조 설계규준의 폭두께비 제한에 따라  $10 \leq D/t \leq 70$ 으로 제한하였고, 실용성을 고려하여 강관직경에 대한 거셋트 길이의 비는  $1.0 \leq B/D \leq 3.0$ 으로 제한하여 계획하였다. 거셋트 플레이트는 강관에 비해 두께를 2배로 하여 강성을 높게 설정하여 최대내력에 이르기 전에 거셋트 플레이트의 항복이 발생하지 않도록 하였다.

Table 1은 접합부 시험체 제원을 나타낸 것이다.

Table 1. Classification of specimens

Specimen name*	B (mm)	D (mm)	t (mm)	L (mm)
120g76.6/1.5	120	76.6	1.5	400
140g76.6/1.5	140	76.6	1.5	400
160g76.6/1.5	160	76.6	1.5	400
180g76.6/1.5	180	76.6	1.5	400
200g76.6/1.5	200	76.6	1.5	400
200g71.5/1.5	200	71.5	1.5	380
200g81.5/1.5	200	81.5	1.5	420
200g91.5/1.5	200	91.5	1.5	480
200g101.5/1.5	200	101.5	1.5	540
200g76.6/1.2	200	76.6	1.2	400
200g76.6/1.6	200	76.6	1.6	400
200g76.6/2	200	76.6	2	400
200g76.6/3	200	76.6	3	400
200g76.6/4	200	76.6	4	400
200g76.6/5	200	76.6	5	380
200g76.6/6	200	76.6	6	380
400g250/10	400	250	10	1,200
400g252/12	400	252	12	1,200
400g254/14	400	254	14	1,200
840g600/10	840	600	10	2,400
840g602/12	840	602	12	2,400
840g605/15	840	605	15	2,400
960g600/10	960	600	10	2,400
960g602/12	960	602	12	2,400
960g605/15	960	605	15	2,400
1080g1000/15	1,080	1,000	15	4,320
1080g1005/20	1,080	1,005	20	4,320
1080g1010/25	1,080	1,010	25	4,320

\*120g76.6/1.5 = length of gusset plate ("120g") + diameter of tube ("76.6") + thickness of tube ("1.5")

\*\*Reinforcement ratio 1/6, 1/4, 1/3, 1/2 is applied for each specimen.

접합부 작용하는 하중은 Fig. 3과 같이 강관의 축력( $P$ ), 관벽 모멘트( $M$ ), 관벽 전단력( $P_v$ )이 (a) 강관 축력과 관벽 모멘트의 조합으로, (b) 강관 축력과 전단력의 조합으로, (c) 관벽 전단력과 관벽 모멘트의 조합으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 각 조합들에 대한 상관관계식을 유한요소해석 결과의 변수해석을 통한 데이터베이스를 바탕으로 도출하였다.

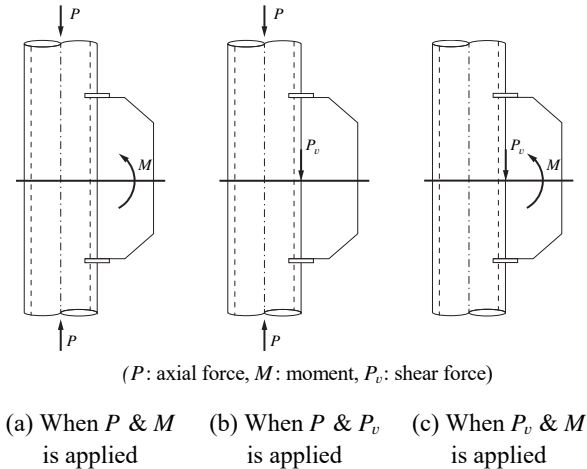


Fig. 3. Load on gusset plate connection

#### 4.2 축력-관벽모멘트의 상관관계

축력과 관벽모멘트의 상관관계를 파악하기 위하여 거셋트 플레이트 길이( $B$ ), 강관 원주의 보강비( $Cr$ ), 강관직경( $D$ ), 강관두께( $t$ ) 등을 변수로 하여 해석 수행한 후, 각 변수에 따른 상관관계를 분석하였다. 하중은 시험체 강관 중심에 축하중을 단계별로 일정하게 작용시키고 거셋트 플레이트 양단에 우력 모멘트를 주어 관벽모멘트를 서서히 증가시키면서 해석을 수행하였다.

##### 4.2.1 거셋트 플레이트 길이에 따른 영향

거셋트 플레이트 길이의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 거셋트 플레이트 길이를 120 mm - 200 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $B/D$ 의 값은 1.6 - 2.8로 식 (3) 및 식 (4)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 직경( $D = 71.5$  mm)에 대해 강관직경만 증가시킨 것으로 거셋트 플레이트 길이에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 3에 나타내었다. 앞에서 살펴 보았듯이 거셋트 플레이트 길이가 다른 각 시험체의 최대 관벽모멘트 값은 각각 다르고  $P - M_w$ 의 내력도 다르지만 이를 무차원화하면 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 거셋트 플레이트 길

이에 관계없이 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

##### 4.2.2 보강비에 따른 영향

보강비의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 보강비를 1/6, 1/4, 1/3, 1/2로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 보강각도에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 보강비의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계도 무차원화하면 유사한 경향을 보였다.

##### 4.2.3 강관직경에 따른 영향

강관직경의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 강관직경을 71.5 mm - 101.5 mm로 증가시키면서

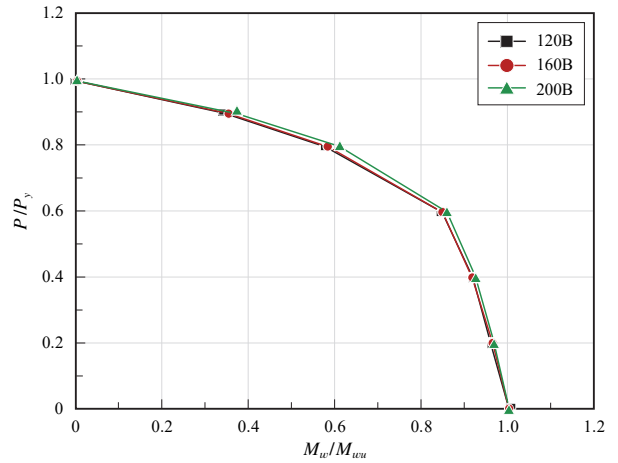


Fig. 4. Interaction between axial force and moment with gusset plate length

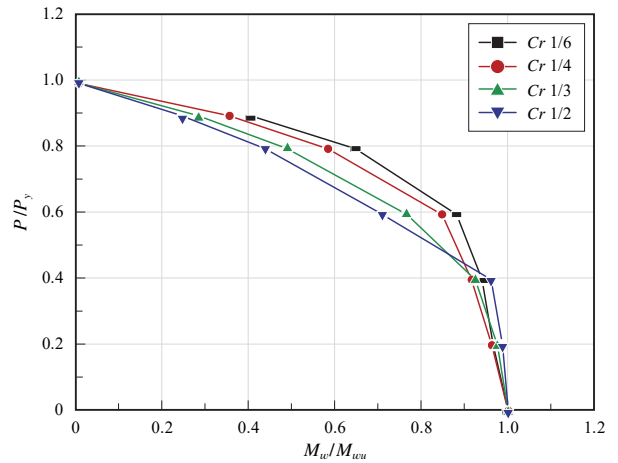


Fig. 5. Interaction between axial force and moment with reinforcement ratio

해석을 수행하였다. 이때  $D/t$ 의 값은 47 - 67로 식 (3)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 두께( $t = 1.5 \text{ mm}$ )에 대해 강관직경만 증가시킨 것으로 강관직경의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 6에 나타내었다. 앞에서 살펴보았듯이 각 시험체의 최대 관벽모멘트값은 각각 다르지만 이를 무차원화하면 강관직경의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계도 동일한 내력특성을 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4.2.4 강관두께에 따른 영향

강관두께의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 강관두께를 1.5 mm - 5.0 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $D/t$ 의 값은 47 - 67로 식 (3)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 강관직경( $D = 101.5 \text{ mm}$ )에 대해 강관두께만 증가시킨 것으로 강관두께의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8과 같이 강관두께의 변화에 따른 내력값은 다르지만 무차원화하면  $P - M_w$ 의 상관관계도 비슷한 경향을 보였다.

#### 4.2.5 축력-관벽모멘트의 상관관계식 제안

각 변수의 변화에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같이  $P - M_w$ 의 상관관계를 도출하였으며, 시험체의 각 변수에 따른  $P - M_w$ 의 상관관계와  $P - M_w$ 의 상관관계 제안식을 비교한 것을 Fig. 8에 나타내었다.

$$\left(\frac{P}{P_y}\right)^3 + \frac{M_w}{M_{wu}} = 1 \quad (5)$$

#### 4.3 축력-관벽 전단력의 상관관계

축력과 관벽 전단력( $P - P_v$ )의 상관관계를 파악하기 위하여 앞에서 해석한 동일한 시험체에 하중조건을 달리하여 해석을 수행하였다. 하중은 시험체에 일정한 축력을 작용하고 횡력의 관벽전단력을 점진 가력하였다.

#### 4.3.1 거셋트 플레이트의 길이에 따른 영향

거셋트 플레이트 길이의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 거셋트 플레이트 길이를 120 mm - 200 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $B/D$ 의 값은 1.6 -

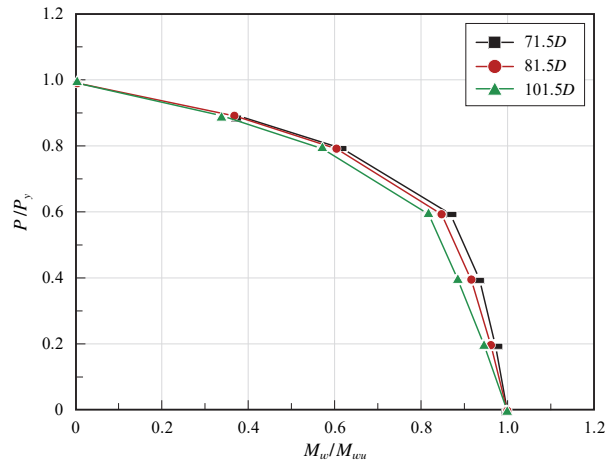


Fig. 6. Interaction between axial force and moment with tune diameter

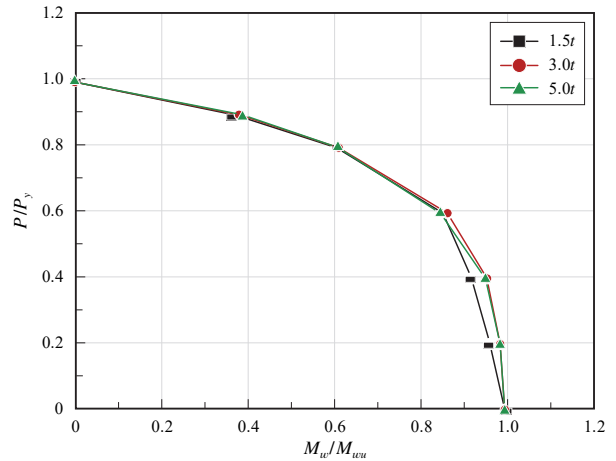


Fig. 7. Interaction between axial force and moment with tube thickness

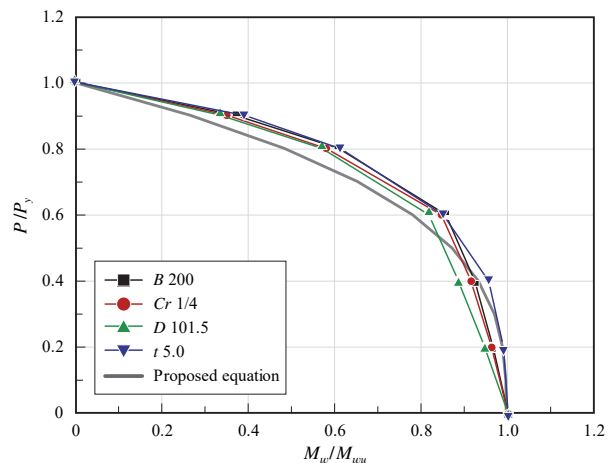


Fig. 8. Proposed interaction curve between axial force and moment



2.8로 식 (3) 및 식 (4)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 직경( $D = 71.5 \text{ mm}$ )에 대해 강관직경만 증가시킨 것으로 거셋트 플레이트 길이에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 9에 나타내었다. 앞에서 살펴보았듯이 거셋트 플레이트 길이가 다른 각 시험체의 극한 관벽전단력은 각각 다르지만 이를 무차원화하면 그림에서 볼 수 있듯이 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 축력이 증가함에 따라 관벽전단력이 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 관벽에 작용하는 관벽전단력이 거셋트 판에 의해 마치 축력과 같은 성분으로 작용하므로 선형적인 상관관계를 이루기 때문이다.

#### 4.3.2 보강비에 따른 영향

보강비의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 보강비를 1/6, 1/4, 1/3, 1/2로 증가시키면서 유한요소 해석을 수행하였다. 보강각도에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 10에 나타내었다.

#### 4.3.3 강관직경에 따른 영향

강관직경의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 강관직경을 71.5 mm - 101.5 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $D/t$ 의 값은 47 - 67로 식 (3)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 두께( $t = 1.5 \text{ mm}$ )에 대해 강관직경만 증가시킨 것으로 강관직경의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 11에 나타내었다. 앞에서 살펴보았듯이 각 시험체의 극한 관벽전단력은 단면 성능에 의해 영향을 받으므로 직경의 변화에 따라 각각 다르고  $P - P_v$ 의 내력 또한 다르지만 이를 무차원화하면 강관 직경의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계도 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

#### 4.3.4 강관두께에 따른 영향

강관두께의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 강관두께를 1.5 mm - 5.0 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $D/t$ 의 값은 47 - 67로 식 (3)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 강관직경( $D = 101.5 \text{ mm}$ )에 대해 강관두께만 증가시킨 것으로 강관 두께의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 강관두께의 변화에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계도 무차원화하면 유사한 경향을 보인다.

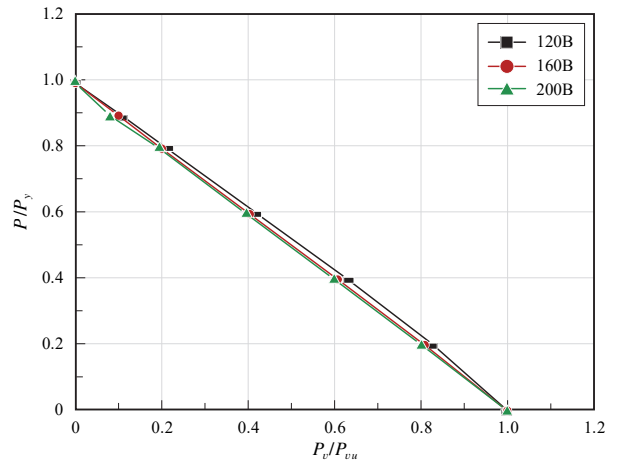


Fig. 9. Interaction between axial force and shear force with gusset plate length

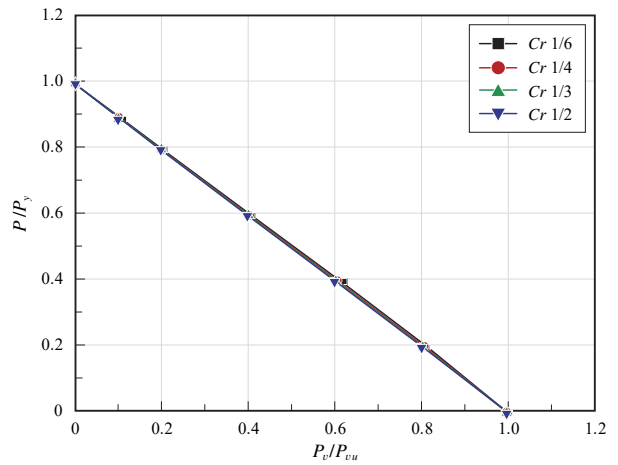


Fig. 10. Interaction between axial force and shear force with reinforcement ratio

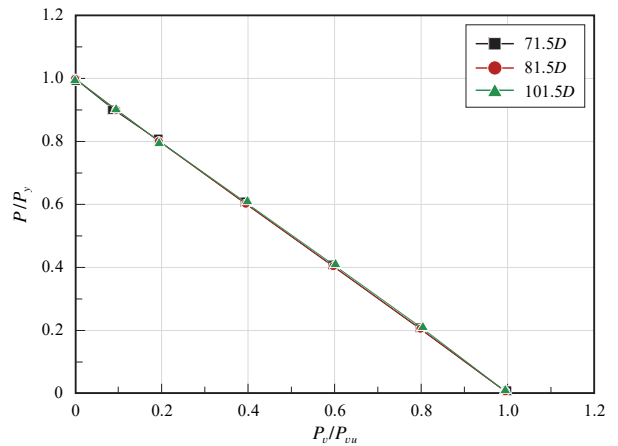


Fig. 11. Interaction between axial force and shear force with tube diameter

4.3.5 축력-관벽전단력의 상관관계식 제안

각 변수의 변화에 대하여  $P - P_v$ 의 상관관계에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같이  $P - P_v$ 의 상관관계를 도출하였으며, 시험체의 각 변수에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계와  $P - P_v$ 의 상관관계 제안식을 비교한 것을 Fig. 13에 나타내었다.

$$\frac{P}{P_y} + \frac{P_v}{P_{vu}} = 1 \quad (6)$$

4.4 관벽전단력-관벽모멘트의 상관관계

관벽전단력과 관벽모멘트( $P_v - M_w$ )의 상관관계를 파악하기 위하여 앞에서 해석한 동일한 시험체에 하중조건만을 달리하여 해석을 수행하였다. 하중은 시험체에 일정한 축력을 작용하고 횡력의 관벽전단력을 점진 가하였다.

4.4.1 거셋트 플레이트의 길이에 따른 영향

거셋트 플레이트 길이의 변화에 따른  $P_v - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 거셋트 플레이트 길이를 120 mm - 200 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $B/D$ 의 값은 1.6 - 2.8로 식 (3) 및 식 (4)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 직경( $D = 71.5$  mm)에 대해 강관직경만 증가시킨 것으로 거셋트 플레이트 길이에 따른  $P - P_v$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 14에 나타내었다. 그림과 같이 관벽전단력이나 관벽모멘트의 내력비가 대부분 1.0 이상의 값을 나타내었다. 이는 관벽에 작용하는 관벽전단력이 강관의 단면모멘트로 작용하고 이 모멘트가 거셋트 플레이트에 작용하는 관벽모멘트와 서로 대치되어 상쇄되므로 접합부의 내력이 상승하는 것으로 판단된다. 따라서 관벽전단력은 작용하나 관벽모멘트가 작용하지 않는 내편심 강관접합부보다 관벽전단력과 관벽모멘트가 동시에 작용하는 무편심 강관접합부나 외편심 강관 접합부가 더 유리하다는 것을 알 수 있다.

4.4.2 보강비에 따른 영향

보강비를 증가시키면서 해석을 수행한 후 보강비에 따른  $P_v - M_w$ 의 상관관계를 무차원화하여 Fig. 15에 나타내었다. 보강각도가 증가할수록 내력은 증가하나 각 보강비에 대한 극한내력으로 나누어 무차원화하면 보강각도가 작을수록 내력비는 감소하였다.

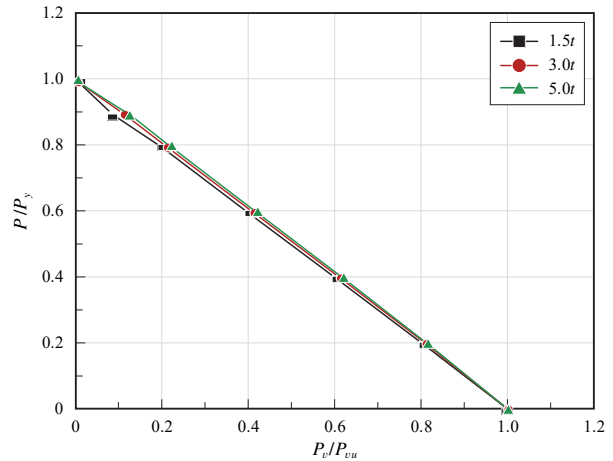


Fig. 12. Interaction between axial force and moment with tube thickness

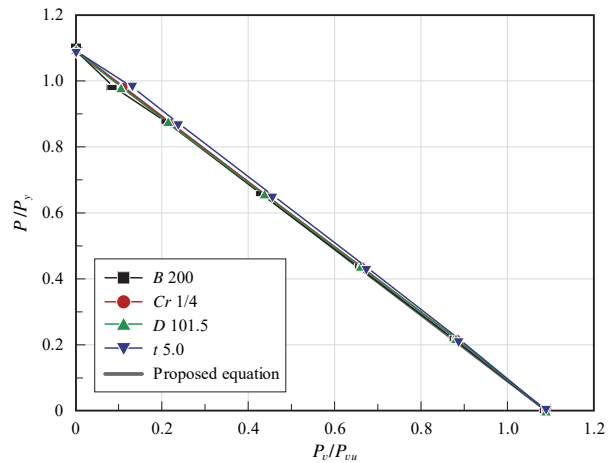


Fig. 13. Proposed interaction curve between axial force and shear force

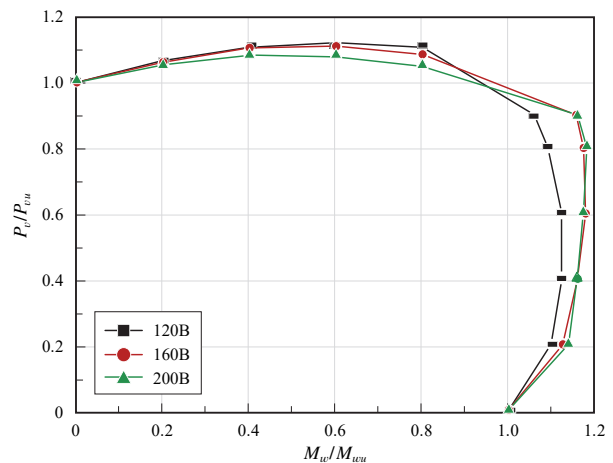


Fig. 14. Interaction between shear force and moment with gusset plate length

#### 4.4.3 강관직경에 따른 영향

강관직경의 변화에 따른  $P_v - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 강관두께는 일정하게 하고 강관직경을 71.5 mm - 101.5 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $D/t$ 의 값은 47 - 67로 식 (3)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 두께( $t = 1.5$  mm)에 대해 강관직경만 증가시킨 것으로 Fig. 16에 나타내었다. 그림과 같이 강관직경의 변화에 따른  $P_v - M_w$ 의 상관관계는 직경에 상관없이 유사한 경향을 보였으며 관벽전단력과 관벽모멘트의 상호작용에 의해 내력이 상승하여 내력비가 대부분 1.0 이상을 나타내었다.

#### 4.4.4 강관두께에 따른 영향

강관두께의 변화에 따른  $P_v - M_w$ 의 상관관계를 파악하기 위하여 강관두께를 1.5 mm - 5.0 mm로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 이때  $D/t$ 의 값은 47 - 67로 식 (3)의 적용범위 내에 있는 값이다. 이는 동일한 강관직경( $D = 101.5$  mm)에 대해 강관 두께만 증가시킨 것으로 강관두께의 변화에 따라 관벽전단력이나 관벽모멘트에 대한 내력은 각각 다르지만 이를 무차원화하면 Fig. 17에서 볼 수 있듯이 차이는 있으나 유사한 경향을 보였으며, 관벽전단력과 관벽모멘트의 상호작용에 의해 내력이 상승하는 것을 알 수 있다.

#### 4.4.5 관벽전단력-관벽모멘트의 상관관계식 제안

각 변수에 대하여  $P_v - M_w$ 의 상관관계에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같이  $P_v - M_w$ 의 상관관계를 도출하였으며, 시험체의 각 변수에 따른  $P_v - M_w$ 의 상관관계와  $P_v - M_w$ 의 상관관계 제안식을 비교한 것을 Fig. 18에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 관벽모멘트와 관벽전단력이 동시에 작용하면 서로 보완 관계가 있어 내력이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 관벽전단력만 작용하는 내편심 강관보다는 수직분력과 관벽모멘트가 동시에 작용하는 무편심 강관 또는 외편심 강관이 내력적인 측면에서 유리하다.

$$\left(\frac{P_v}{P_{vu}}\right)^2 - 0.85 \left(\frac{P_v}{P_{vu}}\right) \left(\frac{M_w}{M_{wu}}\right) + 0.95 \left(\frac{M_w}{M_{wu}}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

위에서 도출한 축력-관벽전단력, 관벽전단력-관벽모멘트, 축력-관벽모멘트의 상관관계를 바탕으로 세 하중변수를 무차원화시킨 다음과 같은 상관관계식을 도출하였다. 여기서  $p, p_v, m_w$ 는 각각의 최대강도로 무차원화된 변수이다.

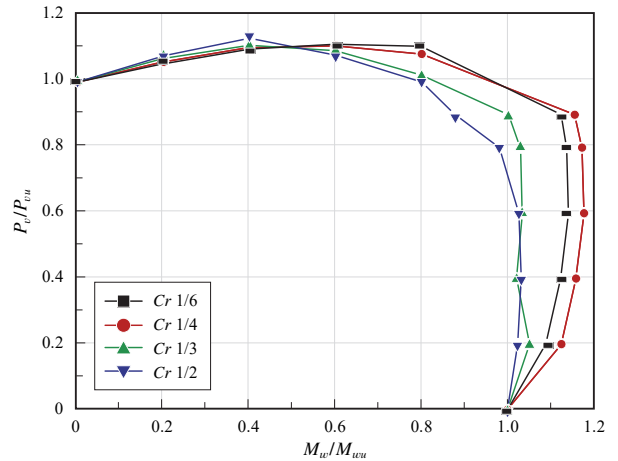


Fig. 15. Interaction between shear force and moment with reinforcement ratio

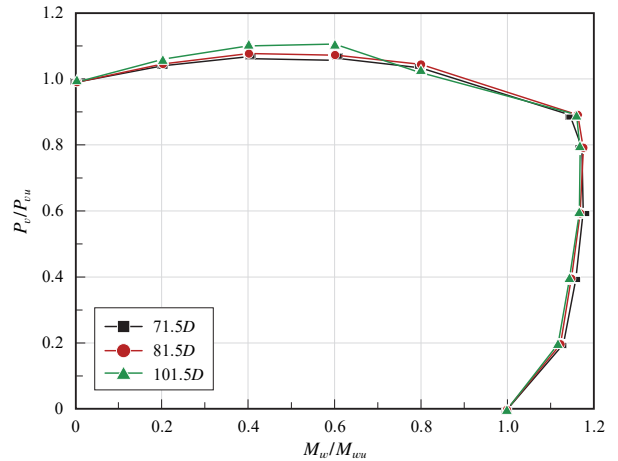


Fig. 16. Interaction between shear force and moment with tube diameter

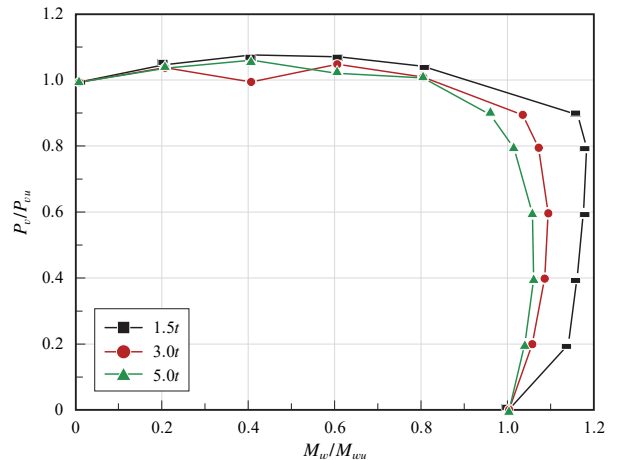


Fig. 17. Interaction between shear force and moment with tube thickness



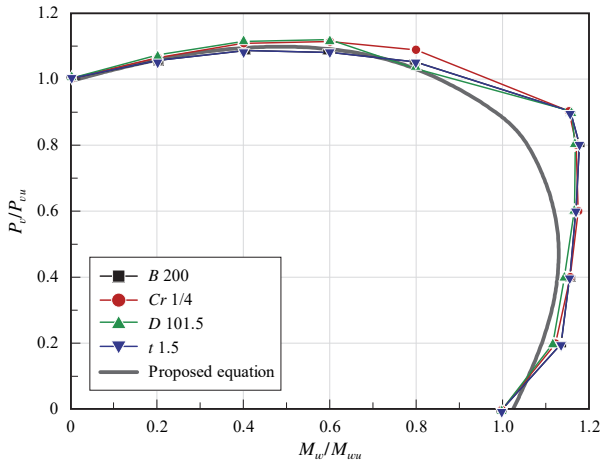


Fig. 18. Proposed interaction curve between shear force and moment

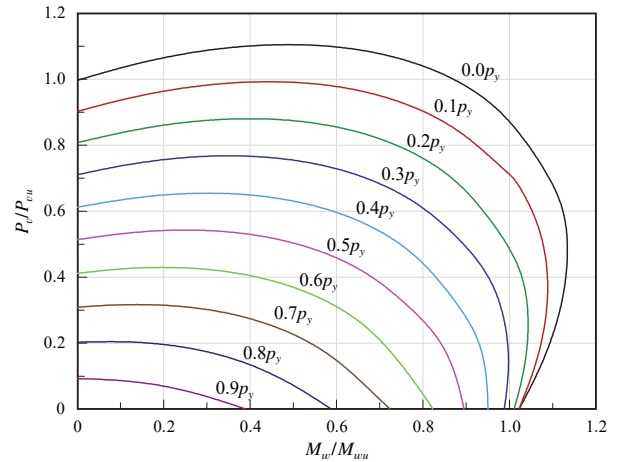


Fig. 19. Proposed  $P_v - M_w$  interaction curve

$$p_v = 0.42m_w + 0.04p^3 - 0.94 \pm \sqrt{1 - 0.77(m_w + 0.1p^3 + 0.45p)^2} \quad (8)$$

$$\left( p = \frac{P}{P_y}, p_v = \frac{P_v}{P_{vu}}, m_w = \frac{M_w}{M_{wu}} \right)$$

### 5. 결론

본 연구에서는 송전철탑 강관 접합부의 내력식을 보완하기 위하여 접합부 유한요소해석과 형상 변수해석을 통하여 설계전단강도와 설계 휨강도 식을 제안하고 접합부에 작용하는 조합하중에 대하여 축력-관벽전단력-관벽모멘트 상관관계식을 제시하였다. 그 결과 지금까지 거셋트 플레이트-강관 접합부 설계식에서 고려되지 못했던 관벽전단력을 설계식에 반영함으로써 접합부의 설계에 신뢰도를 높이는 한편 편심 접합부 설계를 가능케 하는 계기를 마련하였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2019년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호 : R17XA05-24).

### 참고문헌(References)

- [1] Korea Electric Power Corporation (2013) *Design Standard of a Steel Towers for Overhead Power Transmission* (DS-1111), KEPCO, Korea (in Korean).
- [2] Kim, W.B., Lee, Y.J., Kim, K.S., and Chung, S.Y. (2001) An Study on the Stiffened Effect of K-Type Tubular Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.13, No.6, pp.609-619 (in Korean).
- [3] Kim, W.B. (2001) A Study on the Ultimate Strength of Tube-Gusset Connection Considering Eccentricity, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.13, No.2, pp.201-210.
- [4] Architectural Institute of Japan (2010) *Recommendation for Limit State Design of Steel Structures*, AIJ, Japan (in Japanese).
- [5] Architectural Institute of Korea (1998) *Design Standard and Explanation for Steel Tube Structure*, Kimoon dang (in Korean).
- [6] Packer, J.A., and Henderson, J.E. (2009) *Design Guide for Hollow Structural Section Connections* (2nd Ed.), Canadian Institute of Steel Construction, Canada.
- [7] Kim, W.B., and Jeon, B.J. (2008) A Study on the Ultimate Load of Electric Transmission Tower Considering Joint Strength, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.188-194 (in Korean).

---

**요 약** : 현행 송전 강관철탑 설계에서 접합부는 거셋트 플레이트-강관 접합의 형태로 제작되며, 강관에 가해지는 축력 및 모멘트에 대해 접합부 설계식이 제공되고 있다. 그러나 접합부의 실제 거동에 있어서는 축력, 모멘트 뿐만 아니라 전단력이 가해지고 있으나 기존의 관련 규준에서는 이를 반영치 못하고 있다. 특히 강관의 거셋트 플레이트에 횡력이 편심으로 작용하는 편심 접합부에서는 전단력과 축력만이 발생하므로 현행 설계식으로는 이에 대한 평가가 가능치 않다. 본 연구에서는 접합부의 형상변수인 거셋트 플레이트의 길이, 강관의 두께, 강관의 직경 및 보강 형태를 변수로 하여 유한요소해석을 수행한 후 전단내력식과 모멘트 내력식을 제시하였다. 또한 축력, 전단력, 모멘트가 동시에 작용하는 조합하중에 대한 안전성 평가를 위하여 축력-전단력-모멘트 상관관계식을 제시하였다.

**핵심용어** : 송전철탑, 거셋트-강관접합부, 편심접합, 상관관계 곡선, 전단효과

---