

리브 붙은 고력볼트 강관플랜지 이음의 극한 설계방법에 관한 해석적 연구

Analytical Study on Ultimate Design Method of Tube Flange Joints with the Rib Plate Using the High Strength Bolt

김 성 은¹⁾

Kim, Seong Eun

요 약 : 현장에서 자주 사용하는 강관 플랜지이음은 고력볼트를 사용한 인장접합의 일종이다. 이 이음에 있어서 응력전달은 고력볼트를 조을때 얻어지는 재료간의 높은 압축력을 이용해서 행하여진다. 그리고 플랜지이음의 역학적성상에 대해서 충분히 설명되어 있지 않고 설계방법도 확립되어 있다고 말하기 어렵다. 이상의 문제점을 포함한 플랜지이음에 대해서 종국내력에 착안을 둔 설계법을 제안하고자 한다.

본 연구의 목적은 리브 붙은 고력볼트 강관 플랜지의 이음에 대한 설계방법을 세우기 위한 기초자료를 얻는데 있고 또한 리브나 링이 개입된 형식에 있어서 직경이 다른 강관 플랜지의 이음이 설계될 수 있는지 조사하는데 있다.

ABSTRACT : The tube flange joint often used in the field is a kind of tensional joint method using the high strength bolts. Transferring stress is conducted by high axial pressure between each part of material that is produced by twisting the high strength bolts. And historical characteristics of the flange joint have not been studied sufficiently and it is difficult to say that the design method is established definitely. Therefore new method using ultimate strength is need to be suggested to solve there problems in using flange joint. The purposes in this study are to gain the data base for establishing design method of joint in the form like figure1 and survey whether the joint of tube flange with non-equal diameter can be designed or not in the form like rib or ring.

핵 심 용 어 : 鋼管플랜지이음, 高力볼트, 極限設計方法, 리브

KEYWORDS : Tube Flange Joint, Hinge Strength Bolt, Ultimate Design Method, Rib

1) 정회원, 계명대학교 건축공학과 교수, 공학 박사

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

강관의 용도는 배관용이나 열전달용 또는 구조용으로서 매우 광범위하게 이용되고 있다. 이러한 강관의 현장이음으로서 가장 대표적인 것은 플랜지 판을 개입해서 고력볼트에 의하여 접합하는 방법이며, 본 논문에서 대상으로 하는 것은 그림 1에 나타난 형식의 강관플랜지 이음의 설계방법에 대해서 검토한다.

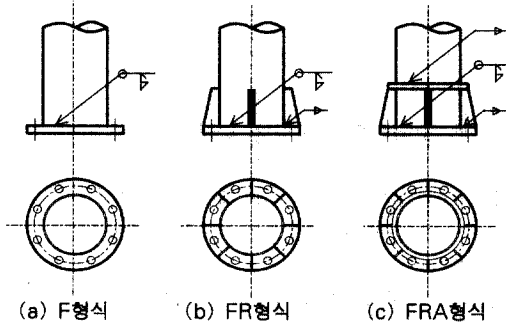


그림 1

이들 이음의 설계방법으로서 그림 1(a)의 F형식에 대해서는 볼트의 강도로서 내력이 결정되는 경우의 설계식이 제시되어 있으나^[1~2], 다른 형식에 대해서는 적당히 설계자의 판단에 맡기고 있다. 구조물의 설계에서는 탄성응력해석을 기본으로 하여 허용응력도 설계가 기본이지만, 접합부와 같이 복잡한 응력분포가 생기는 부분의 탄성해를 구하는 것은 매우 어려운 경우가 많다. 따라서 접합부의 설계 방법에 대해서는 靜的許容應力場을 기본으로 한 靜的設計의 개념을 이용하는 것이 적절하고 허용응력도 설계에 있어서도 이 개념이 부분적으로 도입되고 있다. 단, 극한 설계에서는 응력의 재배분이 전재로 되어 있고, 재료의 소성 및 인성이 필요조건이기 때문에 극한 설계이론의 구축에 있어서는 塑性 및 韌性이 확보되도록 하는 배려와 실험적 확인이 불가결할 것이다.

2. 설계의 기본 방침

- (1) 全強이음(항복이음)으로 한다.
- (2) 볼트의 破斷을 피한다.

(1)에 대해서는 이음의 설계하중을 다음과 같이 설정한다.

$$1) \text{ 全強이음} : P_0 = A \cdot \sigma_y$$

$$2) \text{ 保有耐力이음} : P_u = A \cdot \sigma_u$$

여기서, A : 강관 단면적

σ_y : 강관의 인장항복 응력도

σ_u : 강관의 破斷強度

이음 각부를 保有耐力設計 할 때, 高力볼트 이음의 母材의 파단강도를 기준값으로 취하므로 이음각부의 재료에 강관의 σ_u 이상의 것을 이용하면 全強設計된 이음은 保有耐力設計의 조건을 만족한다. 다음은 高力볼트의 破斷에 대한 안전율은 표 1과 같다^[3]. SS400級 및 SM490級の 강재에서는 고력볼트 F10T를 대상으로 한다면 강재의 σ_u/σ_y 와 거의 동등하거나 그것 이상이므로 全強設計를 할 때 고력볼트를 短期許容引張力에 대해서 설계하면 이음 전체로서 全強이음은 保有耐力이음의 조건을 만족하게 된다.

표 1

	SS400급	SM490급
σ_u/σ_y	1.71	1.52

또 볼트의 破斷은 구조물의 붕괴와 연결되는 가능성이 있으므로 (2)의 설계방침을 세웠다

3. 설계대상 요소 및 기호

설계대상 요소는 그림 2에 나타내고 기호의 설명은 아래와 같다.

- (1) 高力볼트 · 直徑(斷面積)
 - 개수 (n)
 - 볼트 구멍 중심 徑(ϕ_B)
- (2) 플랜지 板 · 판두께 (t_F)
 - 外徑(ϕ_F)
- (3) 리브(Rib) · 판두께 (t_R)
 - 높이(h)
 - 상폭($b_A = \beta h$)
 - 하폭($b_R = ah$)
- (4) 링(Ring) · 판두께 (t_A)
 - 直徑(ϕ_A)
- (5) 각부 용접사이즈(s)
- (6) 하부구조의 각 치수는 오른쪽 상부에 첨자 L을 붙여서 표시한다.

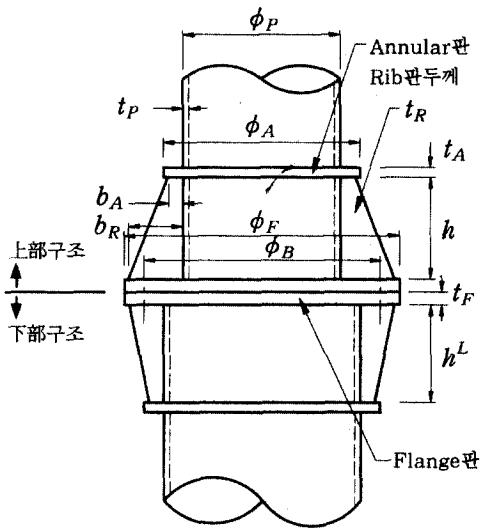


그림 2. 설계대상 요소의 치수

4. F 형식의 설계

F형식의 봉괴기구(그림 3참조)와 대응하는 봉괴하중은 이미 구해져 있다⁽⁴⁾. 각 모드의 봉괴하중을 P_i ($i = 1, 2, 3, 4$)라 하면, 2절의 설계방침

(1), (2)에서 다음의 설계조건이 요구된다.

$$P_1 \leq \text{Min} (P_2, P_3, P_4) \quad (1)$$

$$P_1 \leq P_2 \text{ 또는, } P_4 \leq P_3 \quad (2)$$

環狀線荷重을 받는 원판의 봉괴하중 F (線荷重의 合力)는 그림 4에서 주어진다.

단, $M_o = \sigma_y t_F^2 / 4$ (원판(플랜지판)의 全塑性 모멘트)

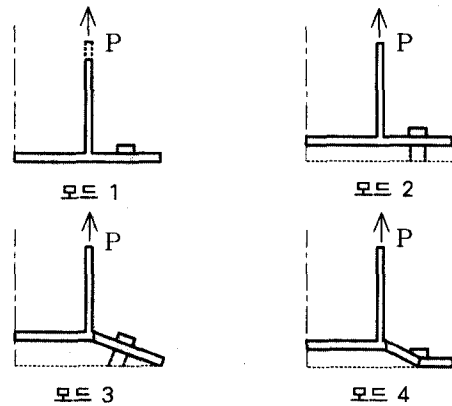


그림 3. 無孔 플랜지板 형태의 봉괴기구

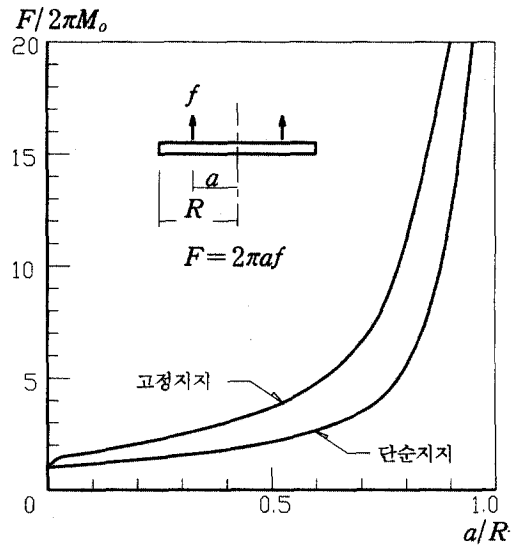


그림 4

P_3 는 그림 4의 단순지지의 경우, 또 P_4 는 고정지지의 경우를 참조해서 구하여 진다. F형식 이음의 全強設計순서를 다음과 같이 나타낸다.

- (1) $P_o (= A \cdot \sigma_y)$ 를 준다.
- (2) 플랜지판 徑 및 볼트구멍 중심 徑을 결정한다. 고력볼트의 게이지 e_1 및 연단거리 e_2 를 결정하면, ϕ_F , ϕ_B 는 결정된다. 참고적으로 鋼管構造 設計施行指針⁽²⁾에 나타나 있는 표준이음의 형상을 그림 5에 나타낸다.

고력볼트 중심 徑	$e_1 = e_2$
M 16	25mm
M 20	30mm
M 22	35mm
M 24	40mm

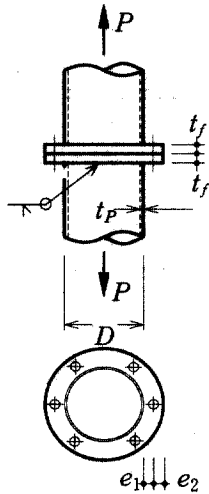


그림 5

- (3) 그림 4에서 $F/2\pi M_o$ 의 값 f_o 를 구한다. 단, $F = P_o$, $a = \phi_P$, $R = \phi_B$ 로 놓는다. 그리고 플랜지 판의 必要 판두께는 다음 식에서 산정된다.

$$t_F = \sqrt{\frac{2P_o}{\pi \cdot f_o \cdot F\sigma_y}} \quad (3)$$

단, $F\sigma_y$: 플랜지 판의 항복응력도

또, t_F 는 高力볼트에 의한 펀칭시어(Punching Shear)로부터 결정되는 다음 조건도 만족해야 한다.

$$t_F \geq \frac{\sqrt{3}T_o}{\pi D F\sigma_y} \quad (4)$$

단, T_o : 高力볼트의 短期허용 인장력
 D : 座金徑

식 (4)에서 결정되는 必要 판두께를 표 2에 나타낸다.

단, 플랜지 판 : SS400
 高力 볼트 : F10T

표 2

	필요 판두께(mm)
M 16	6.7
M 20	8.4
M 22	9.3
M 24	10.1

- (4) 高力볼트 개수 n 을 식 (2)에 따라서 다음 식을 만족하도록 결정한다.

$$nT_o \geq P_o \quad (5)$$

$$nT_o \geq \frac{e_1 + e_2}{e_2} \left[P_o - \frac{2\pi M_o}{1 - \phi_P / \phi_F} \right] \quad (6)$$

단, 高力볼트의 最小 피치로부터 n 은 다음 식을 만족해야 한다.

$$n \leq \frac{\pi \phi_B}{2.5d} \quad (d: \text{볼트 軸徑}) \quad (7)$$

식 (6)은 설계조건 식 (2)에서 다음과 같이 구할 수 있다. 環狀線 荷重을 받는 원판의 極限 解

析에서 그림 3 모드3의 붕괴하중 P_3 는 다음 식으로 주어진다.

$$P_3 = \frac{2\pi m_o}{1 - \phi_P / \phi_F} + \frac{\phi_F - \phi_B}{\phi_F - \phi_P} n T_o \quad (8)$$

식 (8)에 설계조건 식 (2)의 제 2항을 적용하고, $P_4 = P_o$, $\phi_F - \phi_B = 2e_2$, $\phi_F - \phi_P = 2(e_1 + e_2)$ 로 하면, 식 (6)이 얻어진다.

4.1 설계 예

鋼管은 STK400, 플랜지판은 SS400, 高力볼트는 F10T로 하고 e_1 및 e_2 는 그림 5에 의하며, 계산결과는 표 3에 나타나 있다.

이 설계 예에서 같은 직경의 강관이음의 경우, F형식에 의해서 全強이음을 구성하는 것은 충분히 가능하다고 할 수 있다.

한편, 직경이 다른 강관이음의 경우, 작은 직경측의 a/R 의 값이 작게 되므로, 플랜지 판 두께가 상당히 크게 된다고 생각 할 수 있다. 아울러 과거에 행한 실험의 시험체 형상을 그림 6에 나타내고 실험 결과를 그림 7에 나타낸다. 그림 7에서 P_a 는 강관구조설계시공지침 (4.4.16)식⁽²⁾

에 의한 플랜지 이음의 허용인장력이고, P_c 는 그림 3의 모드4에 의한 極限解析值이며, P_o 는 공칭값에 의한 강관의 항복강도이며, P_u 는 공칭값에 의한 강관의 인장강도이다.

그림 6의 이음형상에 대해서 앞에서 기술한 全強設計를 행하면 다음의 플랜지 판두께 t_F 및 볼트 개수가 얻어진다.

필요 판두께 : $t_F = 19.2\text{mm} \rightarrow 22\text{mm}$

필요 볼트 개수 : $\begin{cases} M16: 19\text{본} \rightarrow 20\text{본} \\ M20: 12\text{본} \\ M22: 10\text{본} \end{cases}$

또 그림 6의 시험체는 최종적으로 강관과 플랜지판의 용접 접합부가 파단 하였다. F형식 이음에 대해서는 변형능력에 문제가 있을 가능성이 있다.

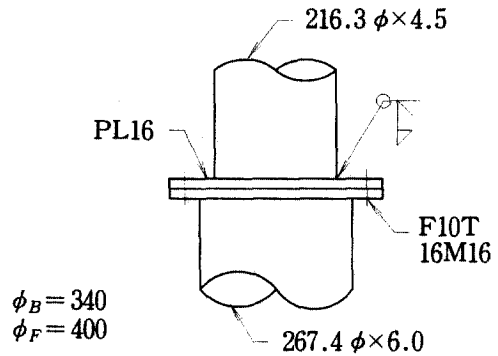


그림 6 異徑 강관의 이음형식

표 3

강 관	M 16	M 22	M 16	M 22
	필요 판두께(mm)		볼트 개수(n)	
φ101.6 × 3.2	8.1	9.2	5	3
φ101.6 × 5.0	10.0	11.3	7	4
φ216.3 × 4.5	10.0	11.7	14	8
φ216.3 × 8.0	13.2	15.4	24	13
φ318.5 × 6.0	11.2	13.8	28	15
φ318.5 × 9.0	13.6	16.8	41	21
강 관	설계 판두께(mm)		볼트 개수(n')	
φ101.6 × 3.2	16	22	3 → 4	2 → 4
φ101.6 × 5.0	16	22	6 → 6	3 → 4
φ216.3 × 4.5	16	22	11 → 12	5 → 6
φ216.3 × 8.0	16	22	23 → 24	11 → 12
φ318.5 × 6.0	16	22	24 → 24	12 → 12
φ318.5 × 9.0	16	22	39 → 40	19 → 20

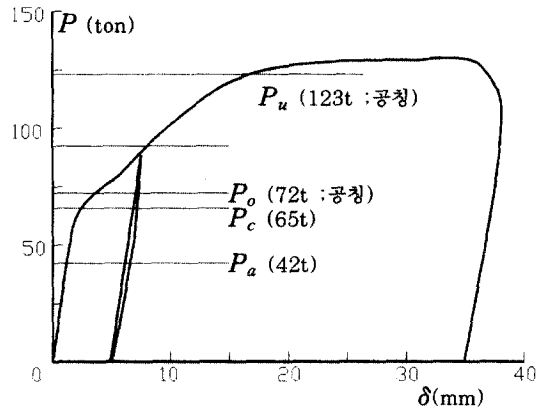


그림 7

5. FR 형식의 설계

강관지침⁽²⁾에서는 리브 플레이트에 의한 管壁의 국부변형 때문에 리브의 효과는 그다지 기대할 수 없고, 오히려 플랜지 판 두께를 충분히 크게 하고 리브를 이용하지 않는 편이 바람직하다고 되어있다. 「리브를 사용하지 않는 편이 바람직하다」는 것에 관해서는 4절의 결과로부터 필자도 전적으로 찬성한다. 한편, 극한해석의 기본정리로부터, 적어도 이음의 강도(붕괴하중)에 관해서는 리브에 의한 보강효과를 기대할 수 있다. 그림 6에 나타낸 시험체에 판 두께 6mm의 리브를 배치한 시험체의 실험결과를 그림 8에 나타낸다.

리브 형상은 그림 중에 나타나 있다. 이 그림과 그림 7을 비교하면, 리브에 의한 보강효과는 명확할 것이다.

FR형식의 全強設計法을 확립하기 위해서는 이

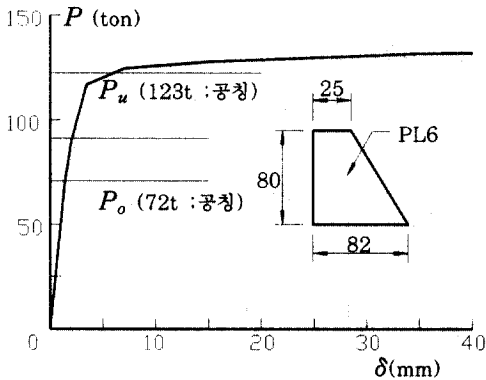


그림 8

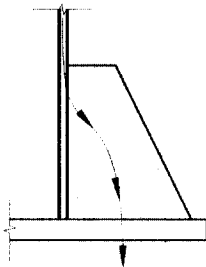


그림 9. RIB PLATE의 힘의 흐름

이음의 붕괴성상을 명확하게 할 필요가 있으나, 리브와 管壁에 둘러 쌓인 플랜지 판의 붕괴성상이 아직 미해결 상태이고, 여기서는 과거의 설계순서에 준한 설계방법을 나타내기로 한다. 힘의 흐름은 그림 9에 나타낸 바와 같이 鋼管벽 → 리브 → 플랜지 판 → 볼트로 이어진다.

5.1 設計 方法

- (1) 플랜지 판을 그림 10에 나타낸 바와 같이 원주방향에 있는 유효폭 b 를 갖는 양단고 정보로 생각하고, 볼트 하중 T_B 를 집중하중으로 해서 판두께 t_F 를 산정한다. 단, 유효폭 b 는 다음 식에 의한다.

$$b = \text{Min} \left[\frac{(\phi_F - \phi_B + l)}{2}, \frac{(\phi_F - \phi_P)}{2} \right] \quad (9)$$

- (2) 볼트의 설계에 즈음하여, 지레 반력 위치를 플랜지 판 끝으로 하고 그림 11에 나타낸 바와 같은 外力분포를 상정한다. 이때, 볼트張力 T_B 는 아래 식에 의해서 얻어진다.

$$T_B = \frac{b}{\phi_F - \phi_B} \cdot \frac{P_o}{n} \quad (10)$$

- (3) 리브는 그림 10에 나타낸 外力에 대해서 부록 解析例의 극한해석 결과에 기본으로 하여 검토한다. 이때 부록의 (부4), (부5) 식에서 리브 판 두께 t_R 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\frac{\sigma_o}{1 + a^2} t_R \geq \frac{P_o}{nb} \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_o}{2r\sqrt{1 + (a - r/2)^2}} t_R \geq \frac{P_o}{nb} \quad (12)$$

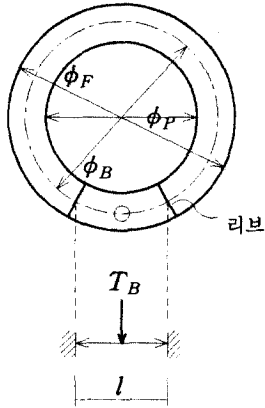


그림 10

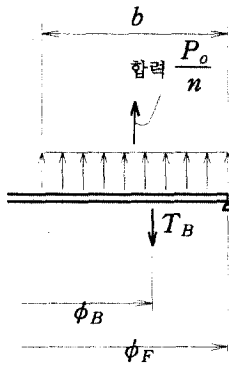


그림 11

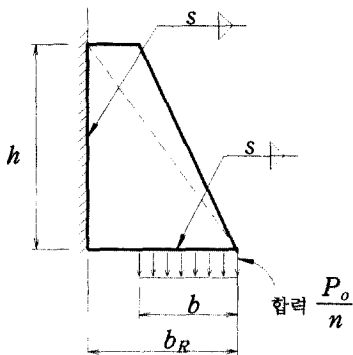


그림 12

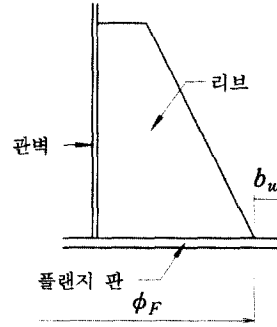


그림 13

단, σ_o : 리브의 항복 응력도

$$b_R = ah, \quad frh = \frac{P_o}{n}, \quad rh = b \text{ 이다.}$$

(4) 리브와 강관 및 플랜지 판 사이에는 그림 12에 나타낸 바와 같이 사이즈 s 의 양면 모살용접으로 한다. 리브 주변에 작용하는 전단력 및 인장력을 각각 단위 길이당 q 및 P 로 하면, 사이즈 s 는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\frac{2}{3} (\sigma_o \cdot s)^2 \geq P^2 + 3q^2 \quad (13)$$

이상은 FR형식 이음의 설계방침이다. 또, 異徑 강관 이음의 경우에는 b, b_R 등은 大徑側에서 검토할 필요가 있다.

또, 리브 붙은 이음에서는 그림 13에 나타낸 바와 같이 리브 끝단에 10mm 정도의 용접 여분 b_w 가 있으나, 여기서는 플랜지 판 徑 ϕ_F 를 리브 선단까지의 직경으로 한다.

5.2 設計例

(1) 설계 조건

1) 강관 : STK400, $\phi 216.3 \times 4.5$

2) 플랜지 및 리브 : SS400

3) 고력 볼트 : F10T,

$$M16({}_B T_a = 9.35 \text{ ton})$$

4) 설계조건 : $P_o = 2.4 \times 29.94 = 72 \text{ ton}$

$$e_1 = e_2 = 25 \text{ mm (그림 5에 의함)}$$

$$\phi_F = 31.63 \text{ cm}$$

$$\phi_B = 26.63 \text{ cm}$$

(2) 고력 볼트 개수 (n)

우선 식 (9)에서 $b = \frac{\phi_F - \phi_B}{2} = 5 \text{ cm}$ 로 하면

식 (10)에서 $n = 7.7 \rightarrow 8$ 본

이하에서 $n = 8, 14$ 의 두 경우에 대해서 검토한다. ($n = 14$ 는 F형식 이음의 필요 볼트 개수)

(3) 플랜지 판 두께 (t_F)

설계 방침 (1)에서 플랜지 판 두께 t_F 는 다음 식에서 구하여 진다.

$$bM_o = \frac{T_B l}{8}, \quad M_o = \frac{t_F^2}{4} \sigma_o \quad (14)$$

	l (cm) (그림 10)	b (cm) (식 9)	T_B (t) (식 10)	M_o (tcm) (식 14)	t_F (cm) (식 14)
$n=8$	14.4	5.0	9.0	3.24	2.32 → PL25
$n=14$	8.22	5.0	5.14	1.06	1.32 → PL16

(4) 리브 높이 (h)

강관이 圓周方向軸力에 대해서 안전하기 위해서는 다음 식이 성립하지 않으면 안 된다.

$$(2\alpha - r) \frac{P_o}{2\pi h} \leq \sigma_o t_P \quad (15)$$

단, σ_o : 강관의 항복응력도

식(15)에서 리브높이(h)의 최저한계가 규정된

다. 식(15)에 있어서 $\alpha = \frac{b_R}{h}$, $r = \frac{b}{h}$ 로 놓으면 필요한 리브 높이(h)를 구하는 다음 식이 얻어진다.

$$h^2 = (2b_R - b) \frac{P_o}{2\pi \sigma_o t_P} \quad (16)$$

위 식에서 $b_R = b = 5 \text{ cm}$, $P_o = 72 \text{ ton}$, $\sigma_o = 2.4 \text{ ton/cm}^2$, $t_P = 0.45 \text{ cm}$ 이므로 리브의 필요 높이 h 가 얻어진다.

$h = 7.28 \text{ cm}$ 이나 10 cm 로 할 경우,

이때 $\alpha = \frac{b_R}{h} = 0.5$, $r = \frac{b}{h} = 0.5$ 가 된다.

(5) 리브 판 두께 (t_R)

필요한 판 두께는 다음과 같다.

	(식 11)	(식 12)
$n=8$	0.94cm	0.77cm
$n=14$	0.54cm	0.44cm

(6) 용접부의 사이즈 (s)

리브의 응력은 $f = \frac{P_o}{nb}$ 이며 $n=8$ 일 때 $f = 1.8 \text{ ton/cm}$ 이고 $n=14$ 일 때 $f = 1.03 \text{ ton/cm}$ 로 놓고 다음과 같이 된다.

	σ_x (t/cm)	σ_y (t/cm)	τ (t/cm)
$n=8$	0.45	1.80	0.90
$n=14$	0.26	1.03	0.52

식 (13)에 있어서 리브의 AB에서는 $P = \sigma_x$, $q = \tau$, BC에서는 $P = \sigma_y$, $q = \tau$ 이기 때문에 모살용접 필요 사이즈 s 가 다음과 같이 얻어진다. (그림 14 참조)

	AB			BC		
	p	q	$s(\text{cm})$	p	q	$s(\text{cm})$
$n=8$	0.45	0.90	0.83	1.80	0.92	1.23
$n=14$	0.26	0.52	0.48	1.03	0.52	0.70

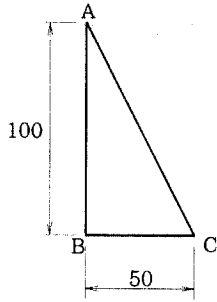


그림 14

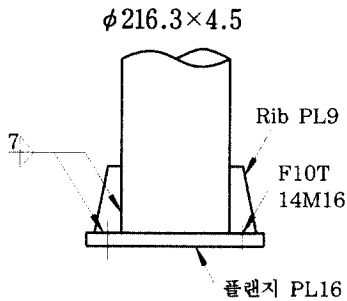
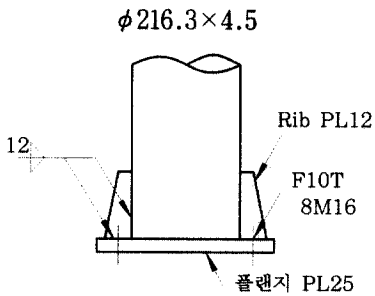


그림 15

이상의 설계결과를 그림 15에 나타낸다.

그림 15의 FR형식과 F형식의 설계 예를 비교하면 FR형식의 t_F 가 크게 되어 있고, 리브의 효과를 전혀 살리지 못하고 있다. 이것은 플랜지 판의 강관 내부부분이 이음의 내력에 기여하는 효과를 무시하고 있기 때문이다.

6. FRA 형식의 설계

이 이음의 설계에서는 Annular plate의 설계가 가해지는 만큼으로, 다른 부분은 FR 형식과 동등하다. 단, Annular plate의 존재에 의해서 리브 플레이트의 응력이 완화되기 때문에, FR형식의 경우에 비교해서 리브 플레이트의 치수, 판 두께 및 모살용접의 사이즈 등을 작게 할 수가 있다고 판단되므로 추후 연구보완하여 게재하고자 한다.

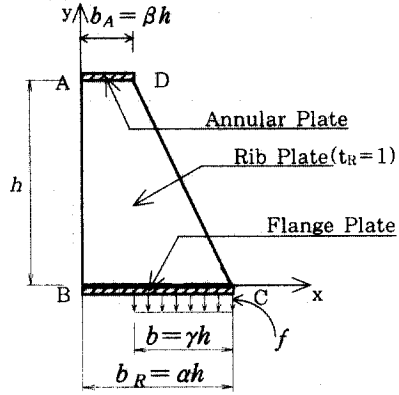
7. 결론

본 논문에서는, 高力 볼트를 이용한 강관 플랜지 이음의 全強設計 (2절에서 정의한 의미) 법에 대해서 검토하였다. 대상으로 한 이음 형식은 그림 1에 나타난 종류이다. 본 논문에서 제안한 설계법에 의한 약간의 설계 예로부터 다음의 요점을 정리할 수 있다.

- (1) 같은 직경 강관이음에서는 F형식에 의해서 全強設計가 충분히 가능하다. 단, 이 형식에 대해서는 앞으로 변형능력에 관한 실험적 검토가 필요하다.
- (2) 본 논문에서 나타난 FR 형식 및 FRA 형식의 설계법에서는 리브의 보강효과를 살릴 수가 없다. 그 이유는 플랜지 판의 강관내부분이 이음의 내력에 기여하는 효과를 무시하고 있기 때문이다. 이들의 이음에 대해서는 이음 전체로서의 가능한 붕괴기구와 대응하는 붕괴하중을 검토할 필요가 있다.
- (3) FR 형식 및 FRA 형식의 이음은 게이지 e_1

과 연단거리 e_2 의 비가 상당히 크게 되는 (가령 $e_1/e_2 > 4\sim 5$ 정도) 직경이 다른 鋼管이음, 혹은 플랜지 판에 구멍이 있는 경우 등에 적합하다고 생각할 수 있다.

(4) 본 논문에 나타난 設計法에서는 원주 방향에 離散的으로 존재하는 高力볼트나 리브를 연속적으로 분포하는 것으로 理想化하고 있다. 앞으로 이러한 이상화가 어느 정도의 볼트 개수에서 성립하는가를 명확하게 할 필요가 있다.



부그림 1

감사의 말

본 논문에서 이용되고 있는 실험결과의 자료는 日本國 大阪大學 工學部 五十嵐研究室에서 제공 받았으며, 이에 감사의 뜻을 표한다.

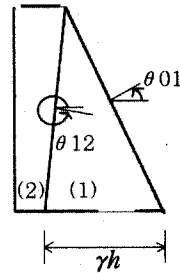
참고 문헌

1. 김성은 : 高力볼트를 이용한 강관 플랜지 이음의 극한설계법에 관한 연구, 계명대학교 산업기술연구논문집, 제22집1호, 1999년 6월 pp.263~270
2. 日本建築學會 : 鋼管構造設計施工指針, 技報堂, 1980년 2월
3. 日本建築學會 : 高力볼트接合設計施工指針, 技報堂, 1979년
4. 五十嵐他 : 高力볼트를 이용한 鋼管フランジ續手の離間荷重と崩壞荷重, 近畿支部, 1981년 6월

부 록 - 리브의 극한해석 예

아래 그림 <부그림1>의 형상을 생각한다. 단, AD부분의 Annular Plate 및 BC부분의 플랜지 플레이트는 面外하중에 대해서 저항하지 않으나 리브플레이트의 전단변형을 구속하는 것으로 한다.

(1) 하계정리에 의한 解



부그림 2

리브플레이트를 부그림2와 같이 영역(1),(2)로 나누어서 생각한다.

① 기호는 다음과 같다.

$$C_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$S_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

$$t_{ij} = \tan \theta_{ij}$$

② 경계조건은 다음과 같다.

$$\sigma_y^{(1)} = f$$

$$\sigma_x^{(1)} C_{01} + \tau^{(1)} S_{01} = 0 \quad (\text{부1})$$

$$\sigma_y^{(1)} S_{01} + \tau^{(1)} C_{01} = 0$$

$$\sigma_y^{(2)} = 0$$

③ 不連續조건식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(1)} C_{12} + \tau^{(1)} S_{12} \\ = \sigma_x^{(2)} C_{12} + \tau^{(2)} S_{12} \quad (\text{부2}) \\ \sigma_y^{(1)} S_{12} + \tau^{(1)} C_{12} \\ = \sigma_y^{(2)} S_{12} + \tau^{(2)} C_{12} \end{aligned}$$

④ 幾何學的關係式은 다음과 같다.

$$t_{01} = \tan \theta_{01} = \alpha - \beta \quad (\text{부3})$$

$$t_{12} = \tan \theta_{12} = \alpha - \beta - \gamma$$

(부1), (부2), (부3)식에서 다음의 해가 얻어진다.

영역(1)에서, $\sigma_x = (\alpha - \beta)^2 f$

$$\sigma_y = f$$

$$\tau = -(\alpha - \beta)f$$

영역(2)에서, $\sigma_x = \gamma(2\alpha - 2\beta - \gamma)f$

$$\sigma_y = 0$$

$$\tau = -\gamma f$$

다음은 TRESCA의 항복조건에서 다음의 解가 얻어진다.

영역(1)에서,

$$f \leq \frac{\sigma_o}{1 + (\alpha - \beta)^2} \quad (\text{부4})$$

영역(2)에서,

$$f \leq \frac{\sigma_o}{2\gamma \sqrt{1 + (\alpha - \beta - \frac{\gamma}{2})^2}} \quad (\text{부5})$$

(2) 상계정리에 의한 解

부그림3의 (a)에 대한 解는 다음과 같다.

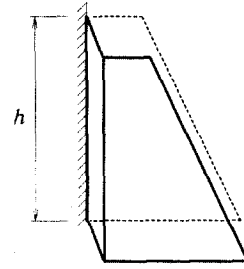
$$f = \frac{\sigma_o}{2\gamma} \quad (\text{부6})$$

부그림3의 (b)에 있어서 F점의 좌표 및 EF의 길이에 대한 解는 다음과 같다.

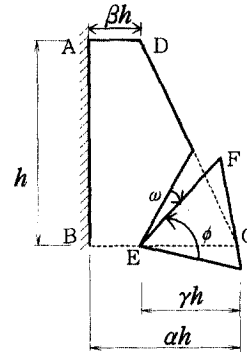
$$(x_F, y_F) = \left(\frac{\alpha + (\alpha - \beta)(\alpha - \gamma) \tan \phi}{1 + (\alpha - \beta) \tan \phi} h \right.$$

$$\left. , \frac{\gamma \tan \phi}{1 + (\alpha - \beta) \tan \phi} h \right)$$

$$EF = \frac{\gamma h}{1 + (\alpha - \beta) \tan \phi} \sqrt{1 + \tan^2 \phi}$$



(a) 不連續전단흐름



(b) 不連續塑性흐름

부그림 3

(접수일자 : 2000년 5월 28일)