

## 두께가 다른 이종배관 용접부 면삭 각도 변화에 따른 하중지지능력 평가

백종현\*† · 김영표\* · 김우식\*

\* 한국가스공사 연구개발원

### Load Bearing Capacity of Welded Joints between Dissimilar Pipelines with Unequal Wall Thickness

Jong-hyun Baek\*†, Young-pyo Kim\* and Woo-sik Kim\*

\* R&D Division, Korea Gas Corporation

(Received October 7, 2011 ; Revised June 25, 2012 ; Accepted June 25, 2012)

**Key Words:** API 5L X42, API 5L X65, API 5L X80, Dissimilar Pipe(이종배관), Load Bearing Capacity(하중 지지능력), Unequal Wall Thickness(다른 두께), Wall Thickness Ratio (두께비)

**초록:** 두께가 다른 이종강도 배관 용접부에서 인장, 내압 및 굽힘응력에 대한 하중지지능력을 평가하였다. 1.22, 1.54, 및 1.89의 두께비를 갖는 API X65-API X80, API X42-API X65 및 API X42-API X80 배관 용접부를 유한요소해석을 통하여 하중지지능력을 평가하였다. 이종강도 배관의 두께비가 1.5 이하에서 인장강도와 최대모멘트는 면삭각도 변화에 큰 영향을 받지 않으나 두께비가 1.5 이상에서는 큰 영향을 받는다. 저강도 배관의 길이방향 면삭각도와 두께비 변화에 따라서는 내압에 의한 파열압력은 영향을 받지 않는다.

**Abstract:** The behavior of the load bearing capacity of a pipeline with unequal wall thickness was evaluated using finite element analyses. Pipelines with a wall thickness ratio of 1.22-1.89 were adopted to investigate plastic collapse under tensile, internal pressure, or bending stress. A parametric study showed that the tensile strength and moment of a pipeline with a wall thickness ratio less than 1.5 were not influenced by the wall thickness ratio and taper angle; however, those of a pipeline with a wall thickness ratio more than 1.5 decreased considerably at a low taper angle. The failure pressure of a pipeline with unequal wall thickness was not influenced by the wall thickness ratio and taper angle.

### 1. 서 론

$$t_D = \frac{P_d D_o}{2SFET} \tag{1}$$

에너지 수송을 위한 매개체로 다양한 직경과 두께의 배관은 산업계에서 폭넓게 사용된다. 배관 용접시에는 동일 직경과 동일 두께의 배관이 사용되는 경우 외에 직경 또는 두께가 다른 배관이 용접되는 경우가 다수 발생한다.<sup>(1-3)</sup>

배관 두께가 두꺼운 쪽은 저강도 배관이며 얇은 쪽은 고강도 배관으로 맞대기 이음에 의한 원주용접에 의해 시공된다. 배관 두께는 식 (1)의 배관의 설계두께에 의해 결정한다.<sup>(4)</sup>

- $t_D$  : Design wall thickness (mm)
- $P_d$  : Design pressure (MPa)
- $D_o$  : Nominal outside diameter of pipe (mm)
- S : Yield strength (MPa)
- E : Joint factor (SAW, ERW, Seamless pipe=1)
- T : Temperature derating factor ( $\leq 121^\circ\text{C}=1$ )
- F : Design factor (0.8~0.4)

고강도 배관에 비하여 두꺼운 두께를 갖는 저강도 배관의 단면부는 내압에 의해 발생하는 원주응력, 지반의 부등 침하에 따른 굽힘응력 및

† Corresponding Author, [jhbaek@kogas.or.kr](mailto:jhbaek@kogas.or.kr)

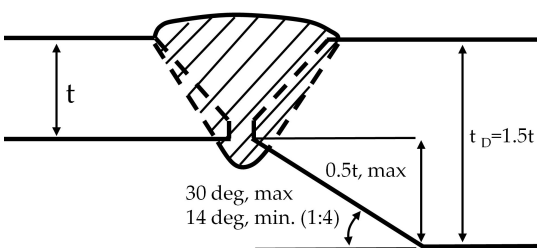
유체온도와 배관온도 변화에 따른 배관 길이방향 팽창에 의해 인장응력 발생 시 응력 집중을 최소화하기 위하여 Fig. 1과 같이 저장도 배관의 두께가 완만히 변화되도록 배관 길이방향의 기울기를 설정하여 면삭 가공한다. 저장도 배관 용접부의 기울기 가공은 배관 단면의 내면, 외면 또는 외면과 내면을 혼합하여 고강도 배관 두께와 동일한 두께를 갖도록 제작한다.

해외 배관 설계규격인 ASME B31.8,<sup>(4)</sup> CSA Z662,<sup>(5)</sup> AS 2885.2<sup>(6)</sup> 및 GB 50251<sup>(7)</sup>에 의하면 저장도 배관 용접면의 기울기 각도는 14°~30° 범위이며, SP 42-102<sup>(8)</sup>는 20°~30° 범위로 규정하고 있다. 그러나 국내 배관규격인 KS B6733,<sup>(9)</sup> KGS GC205<sup>(10)</sup> 및 KGS FS451<sup>(11)</sup>에 의하면 두꺼운 저장도 배관의 길이방향 면삭각의 기울기는 1/3이하로 규정하고 있으나 최소값은 규정되어 있지 않다.

해외배관 규격에서 저장도 배관의 설계두께는 고강도 배관의 1.5배 이하로 규정하고 있으나 강도차이에 대한 제한은 없다. Table 1에는 식 (1)에 의해 계산된 이종 강도로 용접되는 배관에 대한 두께비를 나타내었으며 1.5를 초과하는 두께비는 굵은 글씨로 나타내었다.

**Table 1** Thickness ratio for various pipe joint combinations

Low strength (thick pipe)	High strength (thin pipe)					
	X100	X80	X70	X65	X56	X42
Gr.B	<b>2.82</b>	<b>2.25</b>	<b>1.97</b>	<b>1.83</b>	<b>1.58</b>	1.18
X42	<b>2.38</b>	<b>1.89</b>	<b>1.67</b>	<b>1.54</b>	1.33	
X56	<b>1.79</b>	1.43	1.25	1.16		
X65	<b>1.54</b>	1.22	1.08			
X70	1.43	1.14				
X80	1.25					



**Fig. 1** Weld joint design of pipe with unequal wall thickness

이종강도 배관 용접부의 강도는 고강도 배관의 강도와 동등 또는 그 이상의 강도를 갖는 용접봉을 사용하여 용접한다.<sup>(4,5)</sup>

고강도 API X52(14" OD x 0.5") 배관과 저장도 A106 Gr.B(14" OD x 0.75") 배관 용접부에 대한 두께 차이에 의한 파열압력 평가는 George 등<sup>(1)</sup>에 의해 최초로 연구되었으며 내압에 의해 고강도 얇은 배관에서 파열이 발생되었다. 두꺼운 저장도 배관에 기울기 가공된 면은 두꺼운 배관과 고강도 배관으로부터 “bridging effect”를 받아 강화된다.

본 연구에서는 두께가 다른 이종 강도 배관 용접시 저장도 두꺼운 배관의 길이방향 면삭각도 기울기 변화와 배관 두께비 차이에 따른 하중지지능력 변화를 평가하고자 하였다. 두께가 다른 이종배관에 부가되는 하중을 인장, 내압 및 굽힘으로 설정하여 부가하중 변화에 따른 배관의 변형거동을 유한요소법으로 해석하여 소성붕괴거동을 고찰하고자 한다.

## 2. 유한요소해석 대상 배관

유한요소해석에 사용된 두께가 다른 이종 강도 배관은 외경 30인치 (762mm) API X42 (t=27mm), API X65 (t=17.5mm) 및 API X80 (t=14.3mm)을 사용하였다.

API 5L규격에 따르면 API X42 배관의 최소규정항복강도(SMYS)는 290MPa(42,000psi)이며 최소규정인장강도(SMTS)는 415MPa이고, API X65 배관은 450MPa(65,000psi), 535MPa 그리고 API X80 배관은 555MPa(65,000psi), 625MPa이다.<sup>(12)</sup>

두께와 강도가 다른 배관의 조합은 X68-X80, X42-X65 및 X42-X80 3종류를 사용하였으며 각 조합배관의 두께비는 1.22, 1.54 및 1.89이다. 두께비는 식 (1)에서 내압, 외경 및 0.4의 설계계수에 의해 요구되는 각 배관두께의 비율이며 이는 두 배관의 항복강도비와 동일하다. 일정 압력에서 각 조합배관의 두께비는 일정하므로 본 연구에서는 서로 다른 조합배관에서 다르게 사용된 두께비를 이종배관 두께비에 대한 평가인자로 사용하였다.

X42-X65 배관 용접부는 E9016G 용접봉의 인장물성을 사용하였으며 X42-X80 및 X65-X80 용접부는 E10018M 용접봉의 기계적 물성을 사용하였다. Table 2에 각 배관의 강도와 두께비 및 용접

부 조합을 나타내었다.

탄소성 유한요소해석 시 사용되는 배관에 대한 인장물성은 API 5L<sup>(12)</sup>에서 규정하고 있는 최소규정항복강도와 최소규정인장강도를 적용한 인장물성을 사용하였다. 그러나 용접부의 경우 AWS<sup>(13)</sup>에서는 인장강도에 대한 규정은 있으나 항복강도에 대한 규정은 없으므로 인장실험으로 획득한 인장물성 자료를 사용하였다.

천연가스 수송용 배관으로 사용되는 탄소강 재료는 인장강도를 나타내는 지점에서 10~13%의 연신율을 나타내고 있다.<sup>(13,14)</sup>

배관 인장물성은 각 배관의 공칭인장강도( $\sigma_c$ )에서의 공칭변형률( $\epsilon_c$ )을 0.1로 가정하여 식 (2)와 식 (3)의 관계를 이용하여 진인장응력( $\sigma_t$ )과 진인장변형률( $\epsilon_t$ )로 환산하여 사용하였다.

$$\sigma_t = \sigma_c(1 + \epsilon_c) \quad (2)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_c) \quad (3)$$

E9016과 E10018M 용접봉으로 용접된 부위의 인장물성은 직경 6mm의 봉상형 인장시험편을 ASTM E8M 규격에 의거 제작하여 인장특성을 파악하여 유한요소해석 시 진인장응력과 진인장변형률로 환산하여 사용하였다.

Fig. 2에 배관과 용접부의 진응력-진변형률 인장곡선을 나타내었다. Fig. 2의 진응력-진변형률 곡선에 대한 구성방정식은 Holloman<sup>(16)</sup>에 의해 제시된 식 (4)의 형태로 표현되며 그 결과는 식 (5)~(9)에 나타내었다.

$$\sigma_t = K\epsilon_t^n \quad (4)$$

$K$  : strength coefficient

$n$  : strain hardening exponent

$$\sigma = 592.88\epsilon^{0.11563} \quad \text{for API X42} \quad (5)$$

$$\sigma = 680.77\epsilon^{0.06733} \quad \text{for API X65} \quad (6)$$

$$\sigma = 776.50\epsilon^{0.05520} \quad \text{for API X80} \quad (7)$$

$$\sigma = 896.11\epsilon^{0.12055} \quad \text{for E9016G} \quad (8)$$

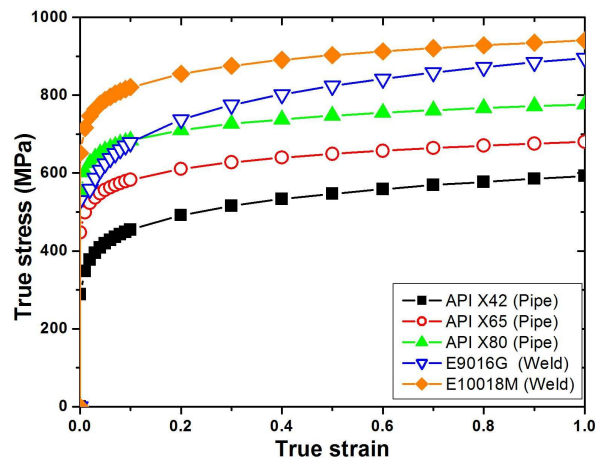
$$\sigma = 940.74\epsilon^{0.05917} \quad \text{for E10018M} \quad (9)$$

### 3. 소성붕괴에 대한 유한요소해석

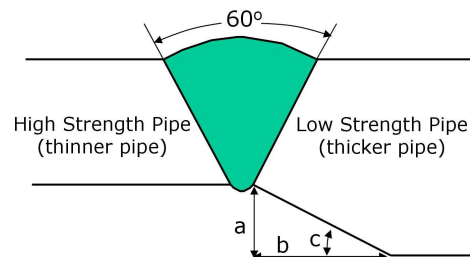
Fig. 3과 Table 3과 같이 저장도 두꺼운 배관의

**Table 2** Weld joint combinations of pipeline with outer diameter of 30" (762mm)

API Pipe	SMYS of pipe	SMTS of pipe	Joint design (thickness ratio)	Electrode type	SMTS of electrode
API X80 (14.3t)	555MPa (80ksi)	625MPa (90ksi)	X65-X80 (1.22)	E10018M	690MPa (100ksi)
API X65 (17.5t)	450MPa (65ksi)	535MPa (77ksi)	X42-X65 (1.54)	E9016G	620MPa (90ksi)
API X42 (27t)	290MPa (42ksi)	415MPa (60ksi)	X42-X80 (1.89)	E10018M	690MPa (100ksi)



**Fig. 2** True tensile stress-strain curves for pipes and electrodes



**Fig. 3** Weld joint of pipe with unequal wall thickness

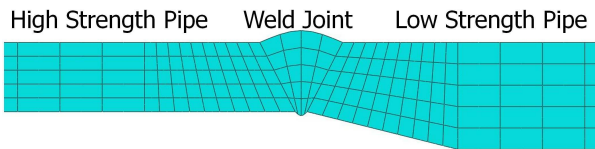
길이방향 기울기가 1:1(45°)에서 1:16(4°)으로 변화함에 따른 두께가 다른 이중 강도 배관의 인장, 내압 및 굽힘응력에 대한 하중지지능력을 평가하기 위하여 ABAQUS Ver. 6.10<sup>(17)</sup> 프로그램을 사용하여 대변형을 적용한 유한요소해석을 실시하였다.

두께를 달리하는 이중배관 모델의 전체 길이는 2m로 설정하였으며 CAX8R 축대칭으로 모델링하여 3,481개의 절점과 1,022개의 요소로 구성하였다.<sup>(2,3)</sup> 두께가 다른 이중 배관의 두께방향으로는 5등분, 길이방향으로는 100등분하여 요소를 분할하여 모델 중심부를 Fig. 4에 나타내었다. 용접부의 bevel 각도는 60°, 외면덧살 높이는 3mm, 내면덧살 높이는 1mm 그리고 root gap은 3mm로 설정하였으며 용접시 발생하는 잔류응력은 유한요소 해석 고려대상에서 제외하였다.<sup>(2)</sup>

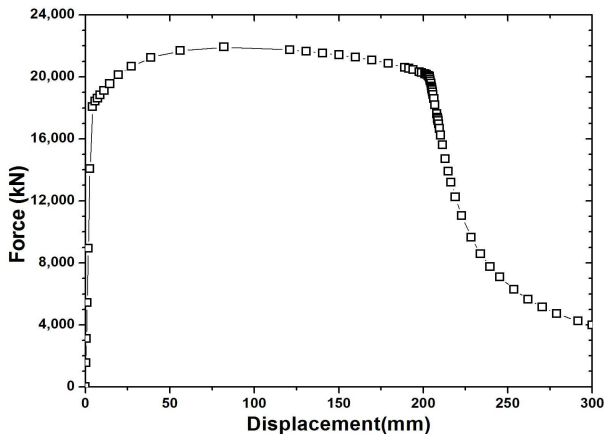
인장하중에 따른 하중지지능력 평가는 저장도 두꺼운 배관의 끝단을 변위와 회전에 대하여 고정하고 고강도 배관의 끝단을 300mm 변위 이동하였다. Fig. 5에서와 같이 최대 force를 나타내는

**Table 3** Preparation of pipe end face at low strength pipe

Taper ratio (a:b)	Taper angle (c)	Taper ratio (a:b)	Taper angle (c)
1:1	45	1:6	9
1:2	27	1:8	7
1:3	18	1:12	5
1:4	14	1:16	4

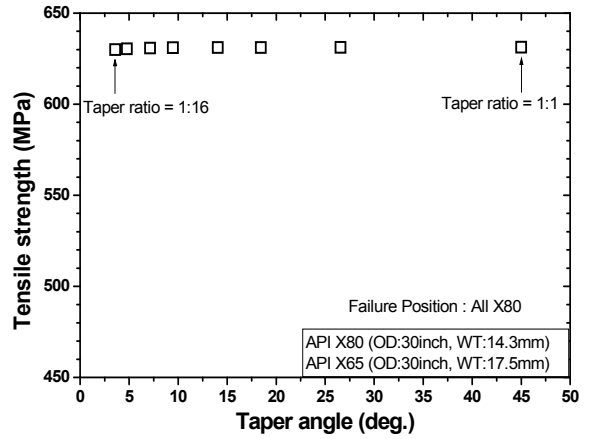


**Fig. 4** Finite element model of X42-X65 joint with taper ratio of 1:4

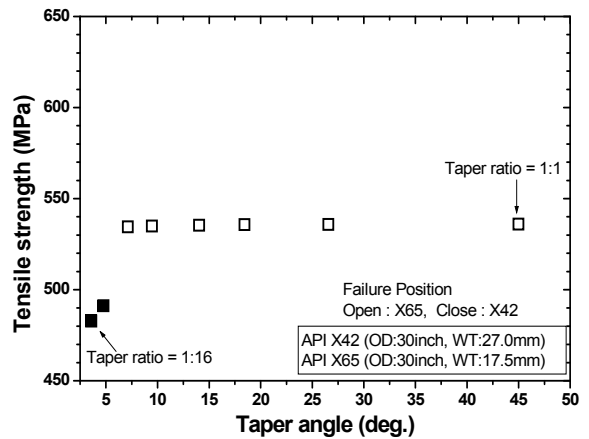


**Fig. 5** Force vs. displacement under tensile load

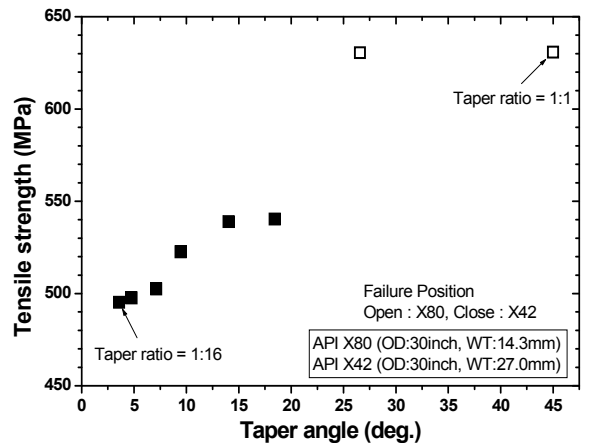
변위지점을 파단변위로 평가하였으며, 파단위치는 변위 부가시 최대변형률을 나타내는 위치를 파단부로 설정하였다. 파단부의 단면적과 저장도 배관의 고정점에서의 reaction force를 사용하여



(a) API X65-X80



(b) API X42-X65



(c) API X42-X80

**Fig. 6** Tensile strength of pipe with unequal wall thickness

파단시의 인장강도를 평가하였다.

내압에 대한 하중지지능력은 Static-Riks option을 사용하여 배관 내부표면에 압력을 부가하여 최대를 나타내는 압력을 파열압력으로 설정하였다.<sup>(18)</sup>

굽힘에 대한 하중지지능력 평가는 저강도 배관과 고강도 배관의 양 끝단에 회전을 부가하여 배관 양 끝단에서 발생하는 최대모멘트를 적용하여 평가하였다.

#### 4. 유한요소해석 결과

두께가 다른 천연가스 배관용접 시 저강도 두꺼운 배관의 길이방향 면삭각도 기울기 변화와 두께비 차이에 따른 하중지지능력을 인장, 내압 및 굽힘에 의한 하중변수를 사용하여 유한요소해석을 실시하여 평가하였다.

##### 4.1 인장에 대한 하중지지능력

Fig. 6은 두께가 다른 이중 강도 배관 접합부인 X65-X80, X42-X65 및 X42-X80 3종류에 대하여 두꺼운 저강도 배관 용접부 단면부의 길이방향 기울기 변화에 따른 인장강도 변화를 나타낸 것이다.

배관 두께비가 1.22인 X65-X80 접합부에서는 저강도 두꺼운 배관의 길이방향 면삭각도 기울기 변화에 관계없이 고강도 얇은 배관인 API X80 배관에서 파단이 모두 발생하였다.

배관 두께비가 1.54인 X42-X65에서는 저강도 배관의 길이방향 면삭각도가 7°(1:8)~45°(1:1) 범위에서는 고강도 배관인 API X65 배관에서 파단이 발생하였으며 그 이하의 면삭각도에서는 저강도 배관인 API X42 배관의 면삭 가공이 시작된 부위에서 파단이 발생하였다.

배관 두께비가 1.89인 X42-X80에서는 저강도 배관의 길이방향 면삭각도가 27°(1:2)~45°(1:1) 범위에서는 고강도 배관인 API X80 배관에서 파단

이 발생하였으며 그 이하의 면삭각도에서는 저강도 배관인 API X42 배관의 기울기 가공이 시작된 부위에서 파단이 발생하였으며 Fig. 7에 14°(1:4)의 면삭각도를 갖는 X42-X80 배관의 파단 위치를 나타내었다.

고강도 배관에서 파단이 발생된 경우에는 고강도 배관의 공칭인장강도에서 파단이 발생되었으나 저강도 배관에서 파단이 발생된 경우에는 “bridging effect”에 의해 저강도 배관의 공칭인장강도에 비하여 더 높은 강도에서 파단이 발생하였다.<sup>(1)</sup>

Zhu와 Leis는<sup>(2)</sup> 식 (10)의 조건을 만족하면 두께가 다른 이중 강도 배관 접합부의 파단은 고강도 얇은 배관에서 발생한다고 발표하였으며 Table 4는 본 연구에서 평가 대상 배관 접합부에 대한 식 (10)의 결과를 나타낸 것이다.

$$\frac{UTS_1}{UTS_2} < \frac{t_1}{t_2} \quad (10)$$

- UTS<sub>1</sub> : Ultimate tensile strength of high strength
- UTS<sub>2</sub> : Ultimate tensile strength of low strength
- t<sub>1</sub> : Wall thickness of low strength
- t<sub>2</sub> : Wall thickness of high strength

두께비가 1.5 이하인 Fig. 4-a)의 X65-X80 접합부는 식 (10)의 예측에 만족하고 있으나 두께비가 1.5 이상인 X42-X65와 X42-X80에서는 두꺼운 배관의 길이방향 면삭각도 변화에 따라 식 (10)을 만족하지 않는 경우가 발생하였다.

두께비가 1.5 이하인 경우 이중강도 배관의 파단 강도는 면삭각도가 4°(1:16)~45°(1:1) 범위에서는 영향을 받지 않으나, 두께비가 증가하고 면삭각도가 감소함에 따라 파단강도는 감소하는 경향을 나타내

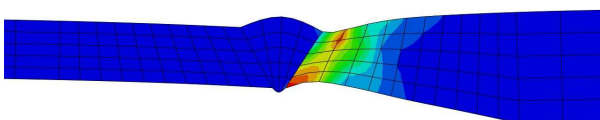


Fig. 7 Failure position of X42-X80 joint with taper ratio of 1:4 under tensile load

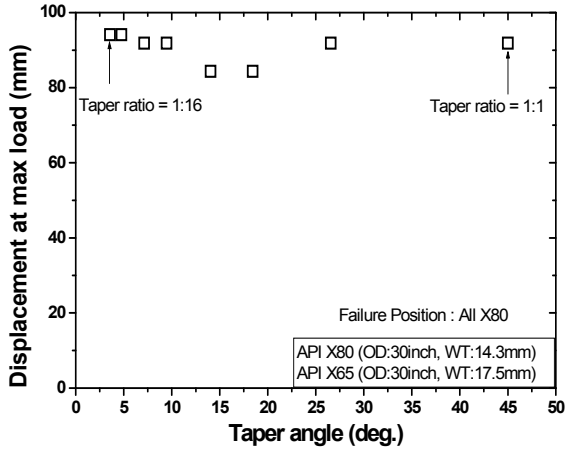
Table 4 Preparation of pipe end face at low strength pipe

Joint design	UTS <sub>1</sub> /UTS <sub>2</sub>	t <sub>1</sub> /t <sub>2</sub>	Predicted failure position
X65-X80	1.17	1.22	X80
X42-X65	1.29	1.54	X65
X42-X80	1.51	1.89	X80

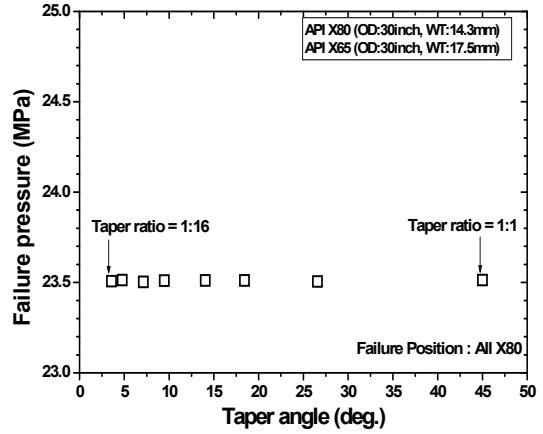
고 있으므로 이종강도 배관 용접시 두 배관의 두께 비는 1.5 이하로 설정하는 것이 타당하다.

Fig. 8은 두께가 다른 이종 강도 배관 접합부인

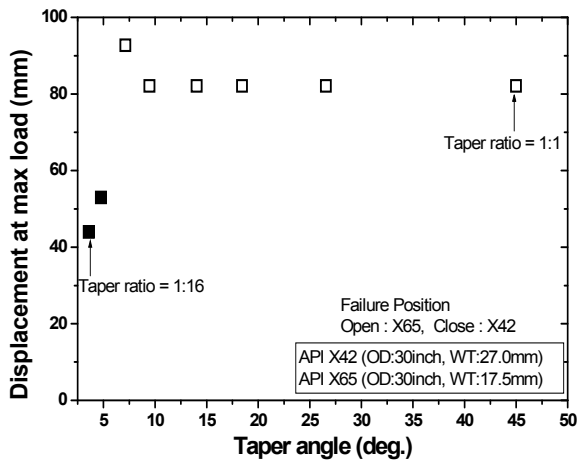
X65-X80, X42-X65 및 X42-X80에 대하여 인장변위 부가에 의해 파단시의 길이 2m로 모델링된 배관 전체 길이방향 변위를 나타낸 것이다.



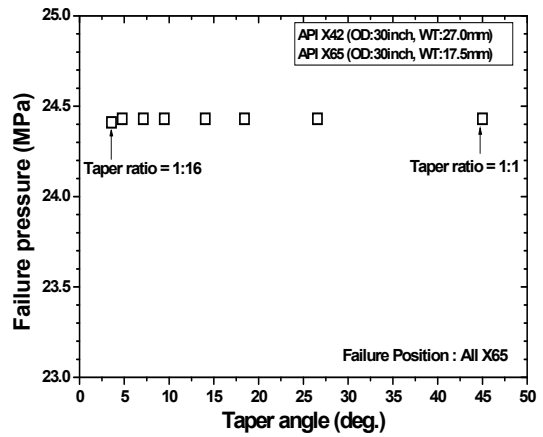
(a) API X65-X80



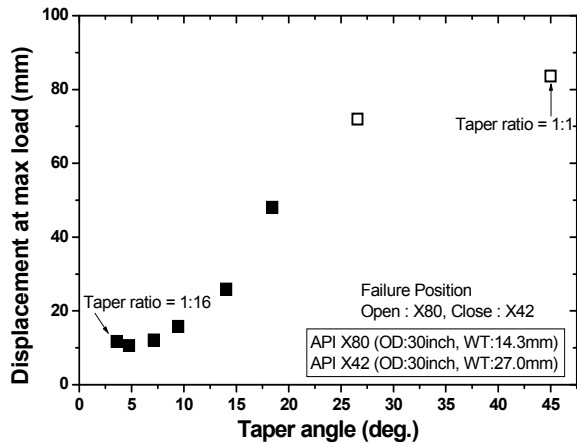
(a) API X65-X80



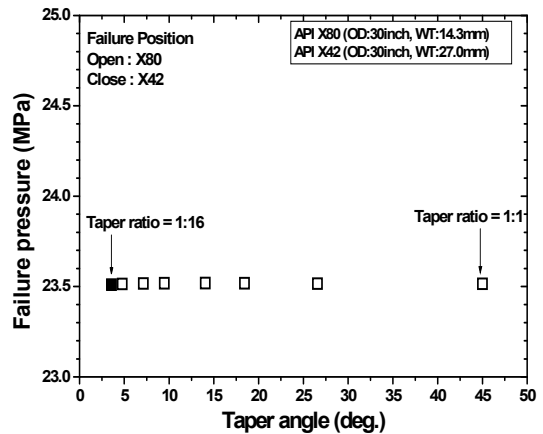
(b) API X42-X65



(b) API X42-X65



(c) API X42-X80



(c) API X42-X80

Fig. 8 Displacement of pipe with unequal wall thickness at tensile failure

Fig. 9 Failure pressure of pipe with unequal wall thickness

배관 두께비가 증가함에 따라 파단 시점의 배관 전체의 변위는 감소하고 있으며 두께비가 1.22에서는 두꺼운 배관의 길이방향 면삭각도 기울기 변화와 관계없이 비슷한 변위를 나타내나 두께비가 1.89인 X42-X80 접합부에서는 면삭각도가 감소함에 따라 파단시점의 변위는 계속 감소하고 있었다. 이는 이중강도 배관의 두께비가 1.5 보다 과도하게 높으면 인장하중에 대한 하중지지능력이 감소됨을 알 수 있다.

4.2 내압에 대한 하중지지능력

Fig. 9는 두꺼운 저강도 배관의 길이방향 면삭각도 기울기 변화에 따른 파열압력 변화를 나타낸 것이다.

면삭각도 기울기 변화에 따라서 전체적으로 파열압력 변화는 없었다. 두께비가 1.89인 X42-X80에서 면삭각도가 4°(1:16)를 제외하면 전 구간에서 고강도 배관의 모재부에서 파열이 발생하였다.

두께가 다른 X65-X80, X42-X65 및 X42-X80 배관의 평균 파열압력은 23.52MPa, 24.43MPa 및 23.51MPa 이다. 내압에 의한 파열시 두께비가 1.89까지는 면삭각도가 5°(1:12)~45°(1:1) 범위에서 파열 위치는 식 (10)을 사용하면 예측 가능하다.

Fig. 10은 두꺼운 저강도 배관의 길이방향 면삭각도가 14°(1:4)인 배관 접합부에서 내압에 의한 파열시점의 배관 길이방향의 내면에서 발생하는 원주응력을 각 배관의 인장강도로 표준화하여 나타낸 것이다.

파열시 고강도 배관 부위가 저강도 두꺼운 배관에 비하여 더 높은 인장강도비( $\sigma_{hoop}/\sigma_{uts}$ )를 나타내고 있었으며 배관의 두께비가 증가할수록 저강도 배관 부위의  $\sigma_{hoop}/\sigma_{uts}$ 는 고강도 배관에 비하여 더 낮아 파열은 고강도 배관에서 발생하였다.

배관 외경을 기준으로 한 내압에 의한 파열 압력은 식 (11)을 통하여 예측 할 수 있다.<sup>(2)</sup>

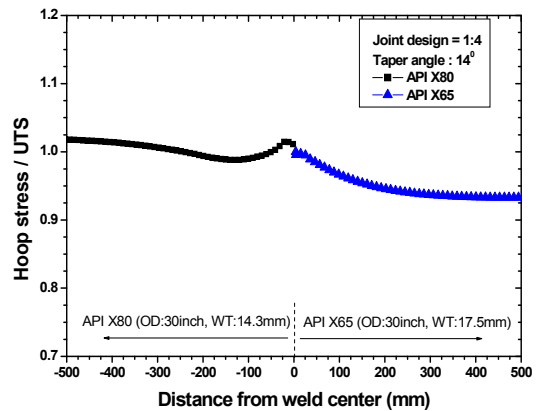
$$P_{OD} = \left(\frac{2}{3}\right)^n \left(\frac{2t\sigma_{uts}}{D_{OD}}\right) \quad (11)$$

$n$  : strain hardening exponent  
 $\sigma_{uts}$  : ultimate tensile strength

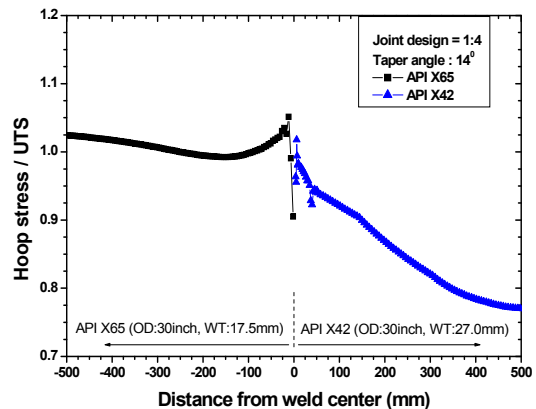
식 (11) 사용 시 가공경화지수( $n$ )는 식 (5)~(7)을 사용하거나 또는 API 579<sup>(19)</sup>에서 제시된 식 (12)를 사용하여 예측 할 수 있다.

$$n_{API} = \frac{1 + 1.3495\beta - 5.3117\beta^2 + 2.9643\beta^3}{1.1249 + 11.0097\beta - 11.7464\beta^2} \quad (12)$$

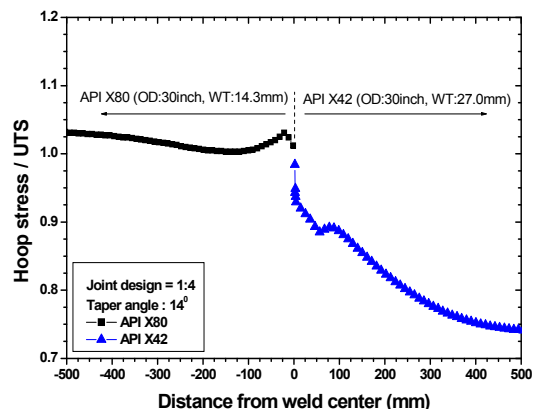
$n_{API}$  : strain hardening exponent in API 579  
 $\beta$  : ratio of yield strength to tensile strength



(a) API X65-X80



(b) API X42-X65



(c) API X42-X80

Fig. 10 Ratio of hoop stress to ultimate tensile strength at failure pressure

Table 5에는 식 (5)~(7) 또는 식 (12)의 가공경화지수를 사용하여 식 (11)을 통해 예측한 파열압력과 식(11)에서 배관의 외경 대신에 내경을 적용하여 식 (13)을 통해 예측한 파열압력을 나타내었다.<sup>(20)</sup>

인장실험을 통해 계산된 가공경화지수(n)와 식 (12)을 통해 예측된 가공경화지수(n<sub>API</sub>)는 6%내의 오차범위를 나타내고 있으며 파열압력은 외경 기준인 식 (11)에 비하여 내경을 기준으로 한 식 (13)의 결과가 유한요소해석결과에 더 근사하게 일치하고 있으므로 파열압력은 내경을 기준으로 하는 식 (13)을 사용하는 것이 더욱 정확한 파열압력을 예측할 수 있다.

$$P_{ID} = \left(\frac{2}{3}\right)^n \left(\frac{2t\sigma_{uts}}{D_{ID}}\right) \quad (13)$$

4.3 굽힘에 대한 하중지지능력

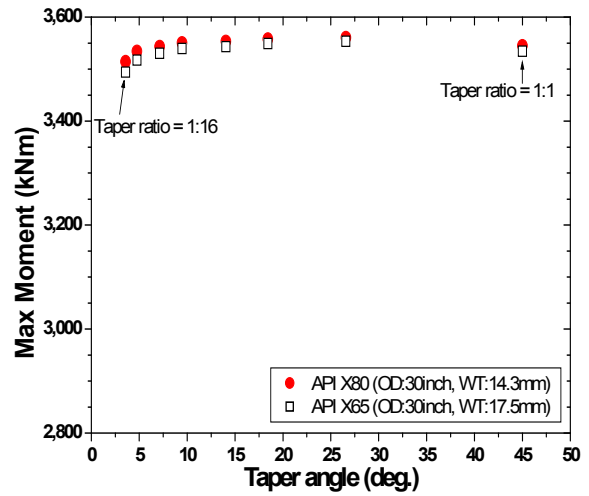
배관에서 모멘트는 배관의 곡률변형, 직경대 두께비, 진원도, 항복강도, 인장강도, 재료의 불균일성, 국부적 응력집중, 하중조건 및 온도 등에 영향을 받는다. 배관에 굽힘이 가해지면 배관은 전체변형과 국부변형이 계속되며 굽힘에 대한 저항력이 최대를 나타내는 지점에 도달하게 되며 계속 곡률이 증가되면 배관은 연화되어 하중지지능력을 상실하게 된다.<sup>(21~23)</sup>

본 연구에서는 모멘트-곡률 곡선에서 이중배관의 양 끝단에서 발생하는 최대모멘트를 기준으로 굽힘하중에 대한 하중지지능력을 평가하였다.<sup>(23)</sup>

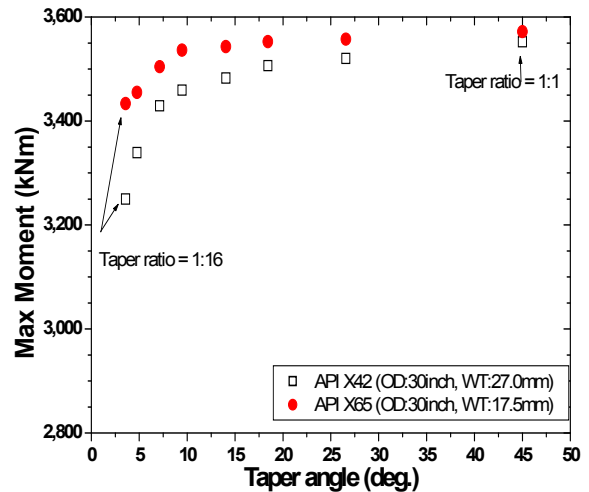
Fig. 11은 두꺼운 저장도 배관의 길이방향 면사각도 기울기 변화에 따른 굽힘하중에 대한 최대

Table 5 Predicted failure pressure for pipeline with outer diameter of 30" (762mm)

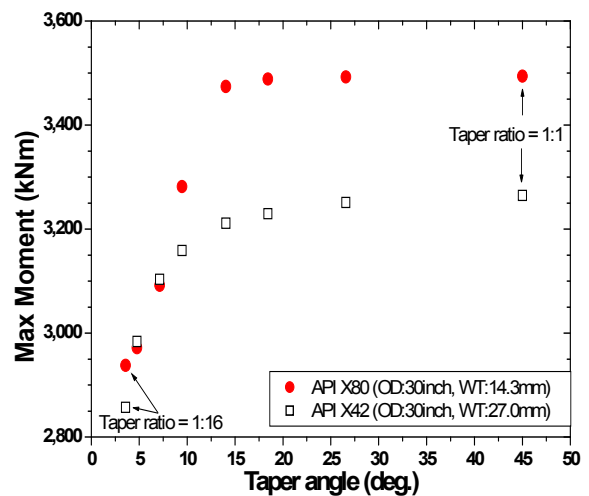
Pipe	ID (mm)	n (test)	n (API)	n (test)		n (API)	
				P <sub>OD</sub>	P <sub>ID</sub>	P <sub>OD</sub>	P <sub>ID</sub>
X42 (27t)	708	0.1156	0.1167	27.92	30.04	27.93	30.06
X65 (17.5t)	727	0.0673	0.0666	23.70	<b>24.84</b>	23.69	<b>24.83</b>
X80 (14.3t)	733.4	0.0552	0.0519	22.79	<b>23.67</b>	22.76	<b>23.64</b>



(a) API X65-X80



(b) API X42-X65



(c) API X42-X80

Fig. 11 Moment of pipe with unequal wall thickness



모멘트 변화를 나타낸 것이다. 두께가 다른 이중강도 배관에 대한 굽힘하중에 대한 거동은 4.1 절의 인장하중 거동과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

두께비가 1.22인 X65-X80 접합부에서는 저장도 배관의 길이방향 면삭각도 기울기 변화에 따라서 최대모멘트는 큰 변화를 나타내지 않았다. 두께비가 증가와 면삭각도 감소에 따라 최대모멘트는 감소하고 있다.

두께비가 1.54인 X42-X65 접합부에서는 면삭각도가 9°(1:6)~45°(1:1) 범위에서는 최대모멘트 변화가 크지 않으나 면삭각도가 감소함에 따라 최대모멘트는 감소한다. 두께비가 1.89인 X42-X80 접합부에서는 면삭각도가 14°(1:4)~45°(1:1) 범위에서는 최대모멘트 변화가 크지 않으나 면삭각도가 감소함에 따라 최대모멘트는 급격히 감소하고 있었다.

굽힘응력 관점에서는 두 배관의 두께비가 1.5 이하인 경우에는 4°(1:16)~45°(1:1) 범위에서는 면삭각도 변화에 의해서 최대모멘트는 영향을 받지 않으나 두께비가 1.5에 비하여 과도하게 증가되면 면삭각도 감소에 따라 최대모멘트는 상당히 감소된다.

## 5. 결론

두께가 다른 이중강도 배관 용접시 두께비와 저장도 두꺼운 배관의 길이방향 면삭각도 변화에 따른 하중지지능력 평가를 인장, 내압 및 굽힘에 의한 하중변수를 사용하여 유한요소해석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 배관의 두께비가 1.5 이하에서는 면삭각도 변화에 따라서는 최대인장하중이 큰 영향을 받지 않는다.

(2) 두께비가 1.5 이상에서는 면삭각도 변화에 따라 인장강도는 큰 영향을 받는다.

(3) 저장도 배관의 길이방향 면삭각도 변화에 따른 내압에 의한 과열압력은 영향을 받지 않으며 배관의 내경 기준인 다음 식을 사용하여 과열압력을 예측할 수 있다.

$$P_I = \left(\frac{2}{3}\right)^n \left(\frac{2t\sigma_{uts}}{D_D}\right)$$

(4) 두께비가 1.5 이하인 접합부에서 저장도 배관의 길이방향 면삭각도 변화에 따라서 최대모멘

트는 큰 변화를 나타내지 않으나 두께비가 1.5 이상에서는 면삭각도가 감소함에 따라 최대모멘트는 감소한다.

(5) 배관 두께가 다른 이중강도 배관 용접시 두께비가 1.5 이하인 경우에는 저장도 배관의 면삭각도가 4°(1:16)~45°(1:1) 범위에서는 인장하중, 내압 및 굽힘하중에 큰 영향을 주지 않는다.

(6) 국내 규정에서는 면삭각도 설정 시 최대값만 규정하고 있으나 하한값에 대한 규정이 필요하며 또한 두께비에 대한 제한도 필요하다.

## 참고문헌

- (1) George, H. H. and Rodabaugh, E. C., 1959, "Tests of Pups Support "Bridging Effect," *Pipe Line Industry*, Oct., pp. 218-223.
- (2) Xian-Kui, Z. and Brian N. L., 2005, "Plastic Collapse Assessment Method For Unequal Wall Transition Joints in Transmission Pipelines" *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 127, No. 4, pp. 449-456.
- (3) Michael, L., Peter, T. and Phillip, V., 2010, "Thickness Limit for Welded Joints between Pipes of Different Yield Strengths," *Journal of Pipeline Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 99-105.
- (4) ASME B31.8, 2010, *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*, The American Society of Mechanical Engineers.
- (5) CSA Z662, 2007, *Oil and Gas Pipeline Systems*, Canadian Standards Association.
- (6) AS 2885.2, 2007, *Pipelines-Gas and liquid Petroleum, Part 2: Welding*, Australian Standard.
- (7) GB 50251, 2003, *Code for Design of Gas Transmission Pipeline Engineering*, Chinese Standard.
- (8) SP 42-102, 2004, *Design and Construction of Gas Pipeline from Metal Pipes*, Russian Standard.
- (9) KS B6733, 2003, *Pressure Vessel (General Standard)*, Korean Standard.
- (10) KGS GC205, 2009, *Code for Welding and Nondestructive Test of Gas Facilities*, Korea Gas Safety Code.
- (11) KGS FS 451, 2009, *Facility/Technical/Inspection/Safety Diagnosis Code for Outside of Producing and Supplying Places of Wholesale Gas Business*, Korea Gas Safety Code.

- (12) API 5L, 2007, *Specification for Line Pipe*, 44th ed., American Petroleum Institute.
- (13) AWS A5.5, 2005, *Specification for Low-Alloy Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. American Welding Society.
- (14) Min, K. Z., Bae, J. H., Kim, K. and Lee, D. J., 2011, "Effects of Mo and Nb on Tensile and Charpy Impact Properties of API X80 Linepipe Steels," *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, Vol. 49, No. 10, pp. 766~773.
- (15) Baek, J. H., Kim, Y. P., Kim, K., Kim, C. M., Kim, W. S. and Seok, C. S., 2010, "Effects of Pre-strain on the Mechanical Properties of API 5L X65 Pipe," *Materials Science and Engineering(A)*, Vol. 527, pp. 1473~1479.
- (16) Holloman, J. H., 1949, "Tensile Deformation," *Transactions of the American Institute Metallurgical and Petroleum Engineers*, Vol. 16, pp. 268~290.
- (17) ABAQUS Version 6.10, 2010, *Analysis User's Manual*, ABAQUS Inc., Rhode Island, USA.
- (18) Riks, E., 1987, "Progress in Collapse Analysis," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 109, No. 1, pp. 33~41.
- (19) API 579, 2007, *Fitness-for-Service*, 2nd ed., American Petroleum Institute.
- (20) Brabin, T. A., Christopher, T. and Rao, B. N., 2011, "Bursting Pressure of Mild Steel Cylindrical Vessels," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 88, No. 2-3, pp. 119~122.
- (21) Chattopadhyay, J., Kushwaha, H. S. and Roos E., 2006, "Some Recent Developments on Integrity Assessment of Pipes and Elbows. Part I: Theoretical Investigations," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 10, pp. 2904~2931.
- (22) Bai, Y., Igland, R. and Moan, T., 1993, "Tube Collapse under Combined Pressure, Tension and Bending," *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 121~129.
- (23) Hauch, S. and Bai, Y., 2000, "Bending Moment Capacity of Groove Corroded Pipes," *Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE 2000-YB003)*, Seattle, USA.