

## 열림 · 닫힘 방향 하중이 고려된 두께 감소된 엘보우의 건전성평가

# The Structure Integrity Assessment of the Wall Thinned Elbow Considering In/Out-Plane Bending.

Ungburn Jang<sup>a,1</sup>, Kyuin Shin<sup>b,2</sup>, Sungho Lee<sup>c,3</sup>, Changhee Kuan<sup>d,\*</sup>

<sup>a</sup> Department Beauty of Hanse University of Hansero 30, Gunpo Gyeonggi-do 435-742, Republic of Korea

<sup>b</sup> Korea Disaster & Safety Institute, Gwacheon, Gyeonggi-do 427-800, Republic of Korea

<sup>c</sup> Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) Company, Daejeon 34101, Republic of Korea

<sup>d</sup> Department Beauty of Hanse University of Hansero 30, Gunpo Gyeonggi-do 435-742, Republic of Korea

### ABSTRACT

Local wall thinning elbow due to the water flow is one of the main degradation phenomenon in carbon steel pipe of plant system. The API579 code of FFS (fitness for service) used in the chemical plant gives a guideline to protect local wall thin problem in a straight pipe, but it does not include an elbow. In this study, the locally wall thinned elbow, which is considered an extrados or intrados wall thinned elbow, was carried out considering in-plane or out-plane bending using FEM (finite element method) analysis, and some of results were also compared with the experimental data. The results could give the structure integrity assessment to protect the local wall thinned elbow.

### KEYWORDS

wall thinning  
elbow  
API579 code  
FEM  
structure integrity  
assessment

국부적인 두께감소 문제에 대하여 직관부위를 대상으로 한 건전성 평가는 잘 알려져 있으나 엘보우를 대상으로 한 건전성 평가는 최근에 원자력 분야에서는 많은 연구가 이루어지고 있으나 석유화학 플랜트에서 이용되는 건전성 평가 지침서 중 하나인 API579 코드에는 아직 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 엘보우를 대상으로 엘보우의 외부(extrados)와 내부(intrados)에 두께 감소가 있다고 가정한 후 유한요소해석법을 이용하여 두께감소된 엘보우의 건전성평가 해석을 수행하였다. 본 해석 결과는 석유화학 플랜트에서 이용되는 엘보우의 건전성 평가에 이용될 수 있음을 보여주었다.

두께감소  
엘보우  
API579코드  
유한요소해석  
건전성평가

© 2016 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-31-450-5254 Fax. 82-31-450-3172.  
Email. [bcpcbcp@daum.net](mailto:bcpcbcp@daum.net)

1 Tel. 82-10-5277-4320. Email. [jang0516@korea.com](mailto:jang0516@korea.com)  
2 Tel. 82-10-2339-5365. Email. [kyuinshin@hanmail.net](mailto:kyuinshin@hanmail.net)  
3 Tel. 82-10-9421-5919. Email. [sungholee@khnp.co.kr](mailto:sungholee@khnp.co.kr)  
4. Tel. 82-10-7777.7891. Email. [bcpcbcp@daum.net](mailto:bcpcbcp@daum.net)

### ARTICLE HISTORY

Received Dec. 07, 2015  
Revised Dec. 22, 2015  
Accepted Dec. 29, 2015

## 1. 서론

플랜트 배관 시스템에서 유체의 흐름에 의해 야기되는 배관의 국부적인 두께감소 문제는 배관의 파열 및 소성붕괴 등의 발생에 의한 설비의 건전성 저하에 큰 영향을 미치고 있어 관심의 대상이 되고 있다(강기정, 2004). 원자력발전소의 경우 1986년 미국 Surry 2호기에서 2차 계통 탄소강 배관의 파열 사고가 발생된 이후 다양한 연구가 진행되었으며(박치용 등, 2005), 국내 원자력발전소에서도 2차 보조계통 배관에서 국부적인 두께감소에 의한 파열 사고가 발생되어 이에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다(박재학 등 2008). 그러나 지금까지의 두께감소 결함에 대한 대부분의 연구들은 직관을 대상으로 수행되었으며(홍경민 등, 2013, 남경민 등, 2010), 엘보우(elbow)나 연결관 등에 대한 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 특히 석유화학 플랜트에서 이용되는 API579 코드의 경우 두께감소 문제는 일반적인 두께감소와 국부적인 두께감소로 나누어 세밀하게 관리되도록 하고 있으나 엘보우와 같은 브랜치 배관에 대한 허용 기준 등은 아직 없는 상황이다(API579, 2007).

이에 본 연구에서는 플랜트에서 이용되는 엘보우를 대상으로 배관 내부의 바깥쪽(extrados)과 안쪽(intrados)에 국부적으로 두께가 감소되었다고 가정을 하고, 엘보우 배관이 열리는 방향과 닫히는 방향으로 각각 굽힘하중을 가하여 해석을 수행하였다. 이때 유사한 조건에서 엘보우 실패관을 이용한 기존의 실험결과와 비교하여 해석결과와 잘 일치함을 보여주었으며, 이를 기반으로 탄소성 해석으로부터 엘보우에 가한 하중-변위 곡선을 구하여 최대하중을 평가하였고, 두께감소 부위에서의 두께감소 길이, 폭 그리고 두께감소 깊이에 대한 영향을 살펴보았다.

## 2. 유한요소해석

두께가 감소된 엘보우의 결함의 길이, 깊이, 그리고 폭에 대한 영향과 결함의 위치의 영향을 파악하고자 유한요소 해석을 수행하였다.

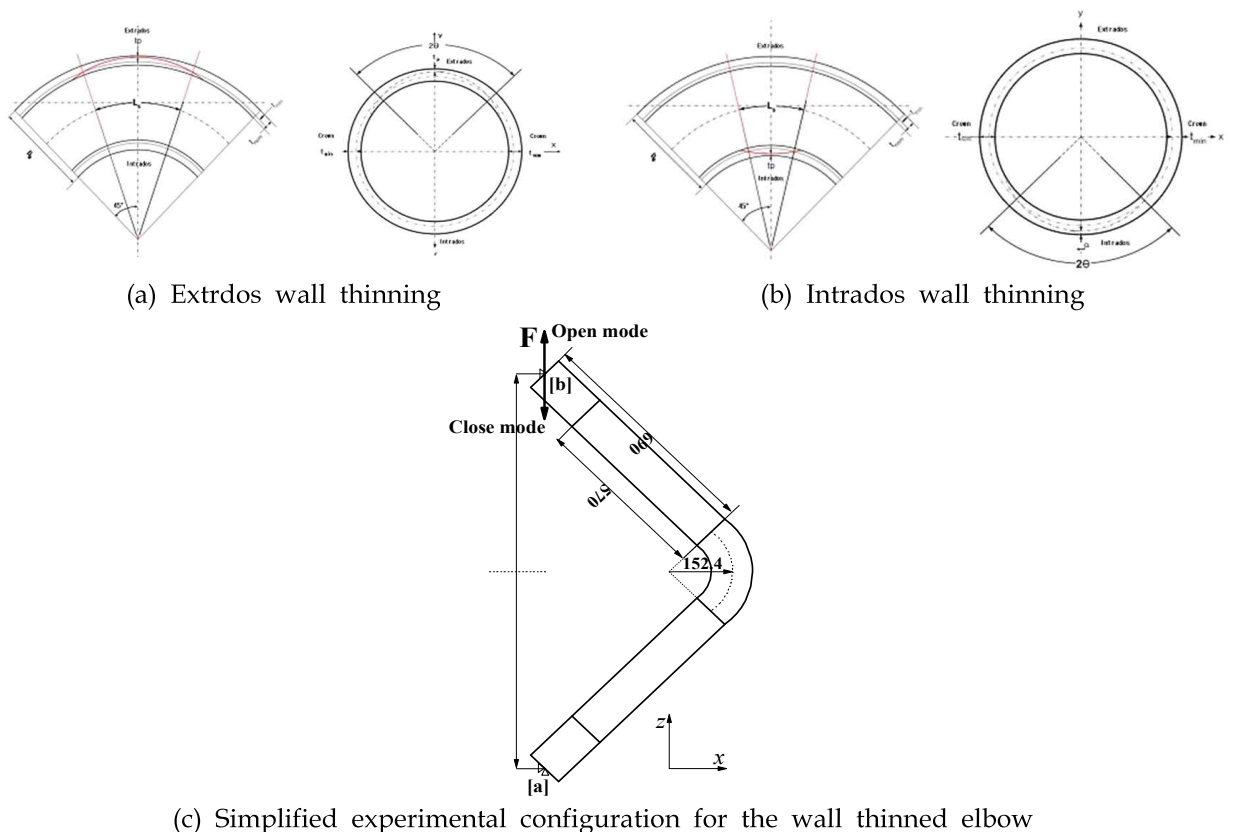


Fig. 1 Schematic diagram of elbow with extrados and intrados wall thinning

Figure 1 (a)에서와 같이 엘보우의 바깥쪽에 두께감소가 있다고 가정한 경우와, Fig. 1 (b)에서와 같이 엘보우의 안쪽에 결함이 있다고 가정한 경우의 두 가지 경우에 대하여, Fig. 1 (c)에서와 같이 열림 하중(open mode)과 닫힘 하중(close mode)을 작용시켜 하중-변위 곡선을 구하였다.

엘보우의 재료는 ASTM A234 WPB로 플랜트에서 사용되는 재료이며 외경(Do)은 113.4mm, 내경(Di)은 97.8mm, 두께(t)는 7.8mm이고, 엘보우 곡률반경(Rm)은 152.4mm이다. 해석 시 Fig. 2에서와 같이 인장강도 이후에는 완전소성으로 가정하였으며, ASTM A234 WPB 재료의 항복강도( $\sigma_{ys}$ )는 291.1MPa, 인장강도( $\sigma_{ut}$ )는 481.6MPa, 탄성계수는 210GPa, 푸아송비는 0.3이다. 엘보우의 두께감소해석 조건은 Table 2에 나타내었으며, Fig. 3에 두께가 감소된 엘보우의 유한요소 모델을 나타내었다.

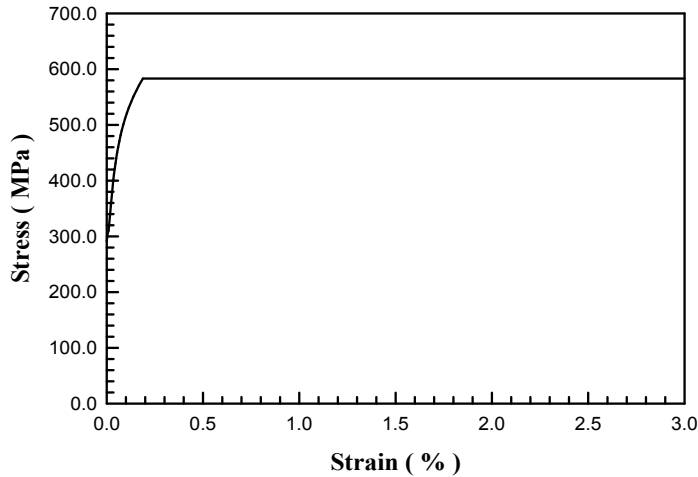


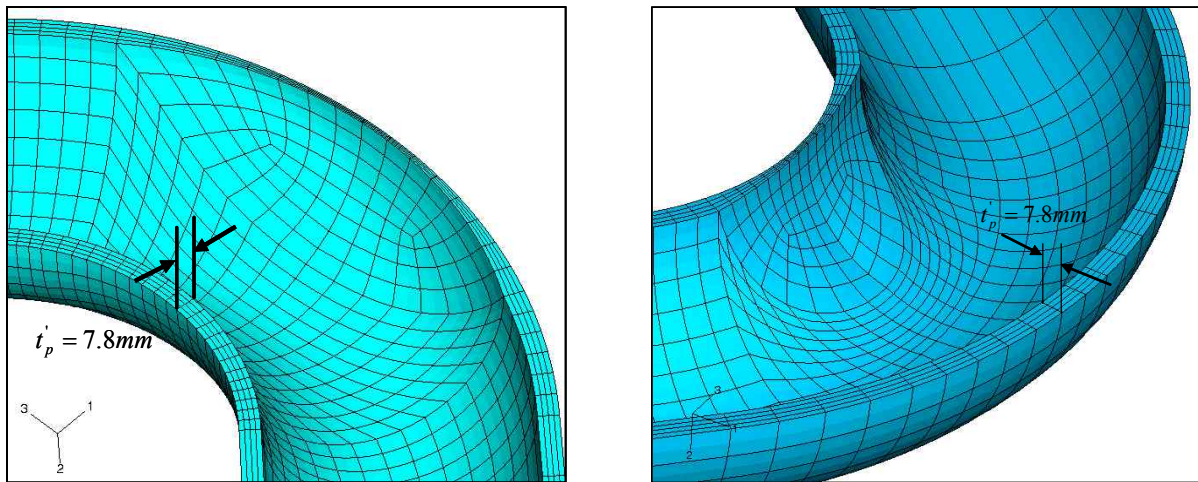
Fig. 2 stress-strain curve for elastic plastic analysis in ASTM A234 WPB steel

Table 1 Flaw type in elbow

Flaw type	$L/D_o$	$t_p$ (mm)	2C (degree)	$L/D_o$	$t_p$ (mm)	2C (degree)
Extrados	0.25	2	-	0.25	4	90
			180			180
			360			360
	1	2	90	1	4	90
			180			180
			360			360
	1.5	2	90	1.5	4	90
			180			180
			360			360
Intrados	0.25	2	90	0.25	4	90
			180			180
	1	2	90	1	4	90
			180			180
	1.5	2	90	1.5	4	90
			180			180
No thinning elbow	No wall thinning in an elbow					

유한요소 해석은 ABAQUS 상용프로그램(v. 6.10)으로부터 20 절점, 3 차원 구조용 요소(3D20R)를 사용하여, y-축방향 대칭 (symmetric) 조건을 이용하여 전체의 1/2을로 모델링 하였고, 두께를 따라 4개의 요소를 형성시켰다. 여기서  $L/D_0$ 는 길이방향 두께 감소를 외경으로 나눈 비로써 표현한 것이고,  $t_p$ 는 잔여 두께,  $2C$ 는 원주방향의 두께 감소를 각도 (degree)로 나타낸 것이다.

탄소성 해석 시 두께감소부의 대변형(large deformation)과 응력-변형을 거동에 대한 기하학적 비선형 옵션 (NLGEOM)을 적용하였으며, 2단계로 나누어 1단계에서는 내압(inner pressure) 10MPa을 가한 후, 2 단계에서는 내압은 유지되면서 열림 (open mode) 또는 닫힘(close mode) 하중(force)을 가하였으며, 이때 하중 작용 시 변위 조절 (displacement control)로 하중을 가하여 해석을 수행하였다. 이로부터 Fig. 1 (c)에서 [a]점에서의 반력(reaction force)과 [b]에서의 변위(displacement)를 얻어 하중-변위 곡선을 구하였다.



(a) Extrados ( $L/D_0=1.0$ ,  $2C=90$ ,  $t_p=2$ )

(b) Intrados ( $L/D_0=1.0$ ,  $2C=90$ ,  $t_p=2$ )

Fig. 3 Finite element model of elbow with extrados(a) and intrados(b) wall thinning

### 3. 해석 결과

본 연구에서 형성한 모델의 적합성을 알아보기 위하여 Fig. 4에서와 같이 기존의 실험 결과 (김진원 등, 2006)와 비교하였다. 기존의 실험결과(김진원 등, 2006)는 본 해석과 같은 재료를 이용하여 실험한 것으로, 엘보우의 바깥쪽과 안쪽과 부위에 두께 감소가 존재한 경우에 대하여 닫힘하중을 가하여 얻은 하중-변위 곡선으로 실험 결과와 본 해석 결과와 비교하였다. Fig. 4 (a)는 엘보우의 두께감소가 바깥쪽에 존재하는 경우로, 무차원화한 길이방향 두께감소 길이( $L/D_0$ )는 1, 원주방향 두께감소 폭( $2C$ )은  $90^\circ$  그리고 잔여두께가 4mm인 두께감소가 존재하는 경우에 대하여 닫힘 하중(CM)을 가하여 실험 결과와 본 해석 결과와 비교한 그림이다. 닫힘 하중을 수행한 실험 결과에서의 최대 하중( $P_{max}$ )은  $-32.57\text{kN}$ , 해석 결과로부터 얻은 최대 하중( $P_{max}$ )은  $-30.88\text{kN}$ 으로 본 연구의 해석결과가 실험결과보다 약간 낮았지만 실험결과와 5.2%의 오차로 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 4(b)는 엘보우의 두께감소가 안쪽에 존재하는 경우로 실험 시편의 두께감소 조건은  $L/D_0 = 1$ ,  $2C = 90^\circ$ , 그리고  $t_p = 5.3\text{mm}$ 인 경우에 대하여, 해석에서는  $t_p$ 가 4mm에 대하여 닫힘 하중(CM)을 가하여 얻은 결과를 비교한 것으로, 실험 결과는  $-33.4\text{MPa}$ , 해석 결과는  $-31.9\text{MPa}$ 로 본 연구의 해석결과가 실험결과보다 약간 낮았지만 실험결과와 4.5%의 오차로 잘 일치함을 알 수 있었다.

이를 기반으로 엘보우에 외부와 내부 두께감소가 존재하는 경우에 대하여 탄소성해석을 통하여 열림하중과 닫힘하중을 변위로 조절하여 해석을 수행하였다.

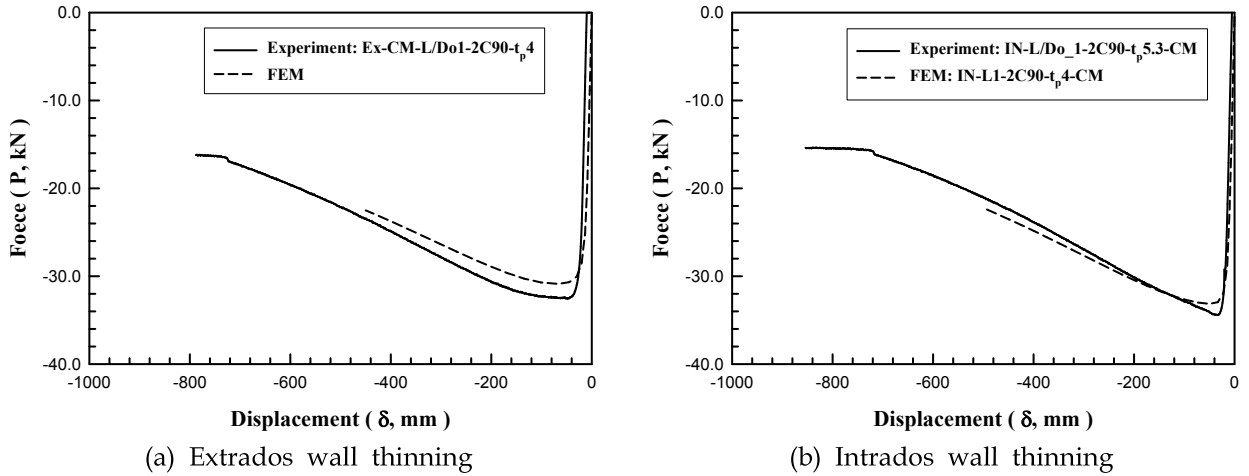


Fig. 4 Comparison between experimental data and elastic plastic analysis in elbow with a extrados (a) and intrados (b) wall thinning

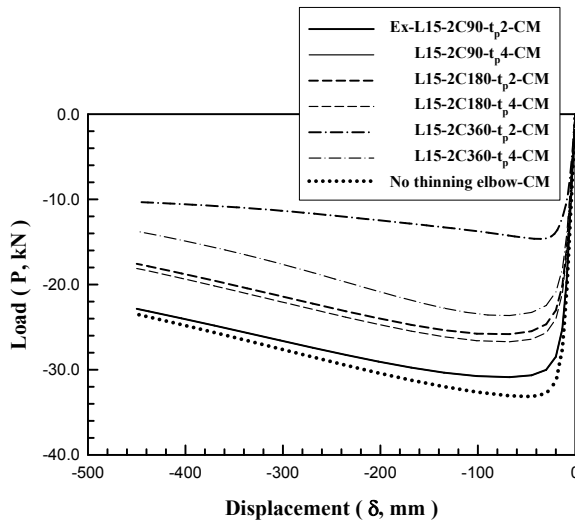
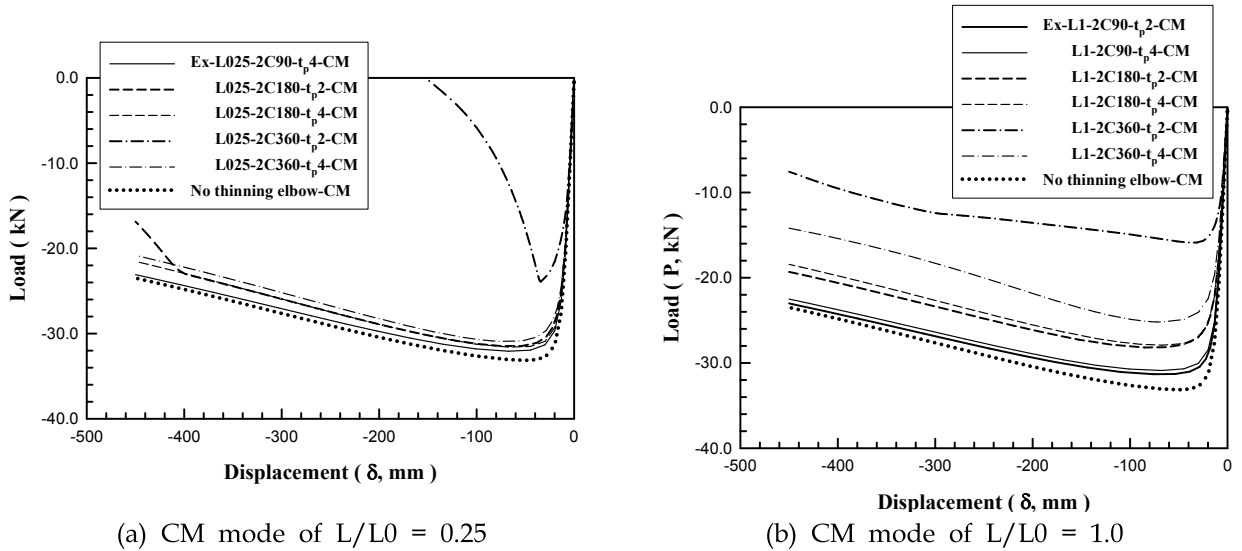


Fig. 5 Comparison of extrados flawed elbow under close mode

Figure 5부터 7의 그림에서 Ex는 엘보우의 바깥쪽(extrados) 두께감소의 약자이고, IN은 엘보우의 안쪽(intrados) 두께감소의 약자이다. 그리고 CM은 닫힘하중(close mode)의 약자이고, OM은 열림하중(open mode)의 약자이다. 무차원화된 길이방향 두께감소 (L/Do)가 1인 경우에 대하여, 2C는 원주방향 두께감소폭으로 90와 180를 각도(degree)로 표현하였다. tp2와 tp4는 최초의 공칭두께로부터 두께가 감소된 후의 잔여두께를 표현한 것으로 잔여두께 (tp)가 2와 4mm인 경우이다.

Figure 5는 엘보우의 바깥쪽(extrados)에 두께감소가 존재하는 경우에 대하여 닫힘 하중(Close mode)을 가하여 얻은 하중-변위 곡선이다. Fig. 5 (a)는 무차원화된 길이방향 두께감소 길이(L/Do)는 0.25로 일정하고 원주방향 두께감소 폭과 잔여두께를 변화시킨 경우에 대하여 비교한 그림으로, 두께감소가 없는 엘보우에 대한 해석결과와 함께 나타내었다. 그림에서 보면 길이방향 두께감소 길이가 짧은 경우 원주방향 두께감소 폭이 360, 잔여두께가 2mm인 경우를 제외하고는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Figure 5 (b)와 (c)는 L/Do가 1.0과 1.5로 일정하게 한 경우로 두 그림을 함께 비교해보면, 길이방향 두께감소 길이가 길어지고 원주방향 두께감소폭 과 잔여두께가 작아질수록 최대 하중이 떨어짐을 알 수 있다.

Figure 6은 엘보우의 바깥부위에 두께감소가 존재하는 경우에 대하여 열림 하중(Open mode)을 가하여 얻은 하중-변위 곡선이다. Fig. 7 (a)는 무차원화된 길이방향두께감소길이(L/Do)는 0.25로 일정하고 원주방향 두께감소폭과 잔여두께를 변화시킨 경우에 대하여 비교한 그림으로 두께감소가 없는 엘보우에 대한 해석결과와 함께 나타내었다.

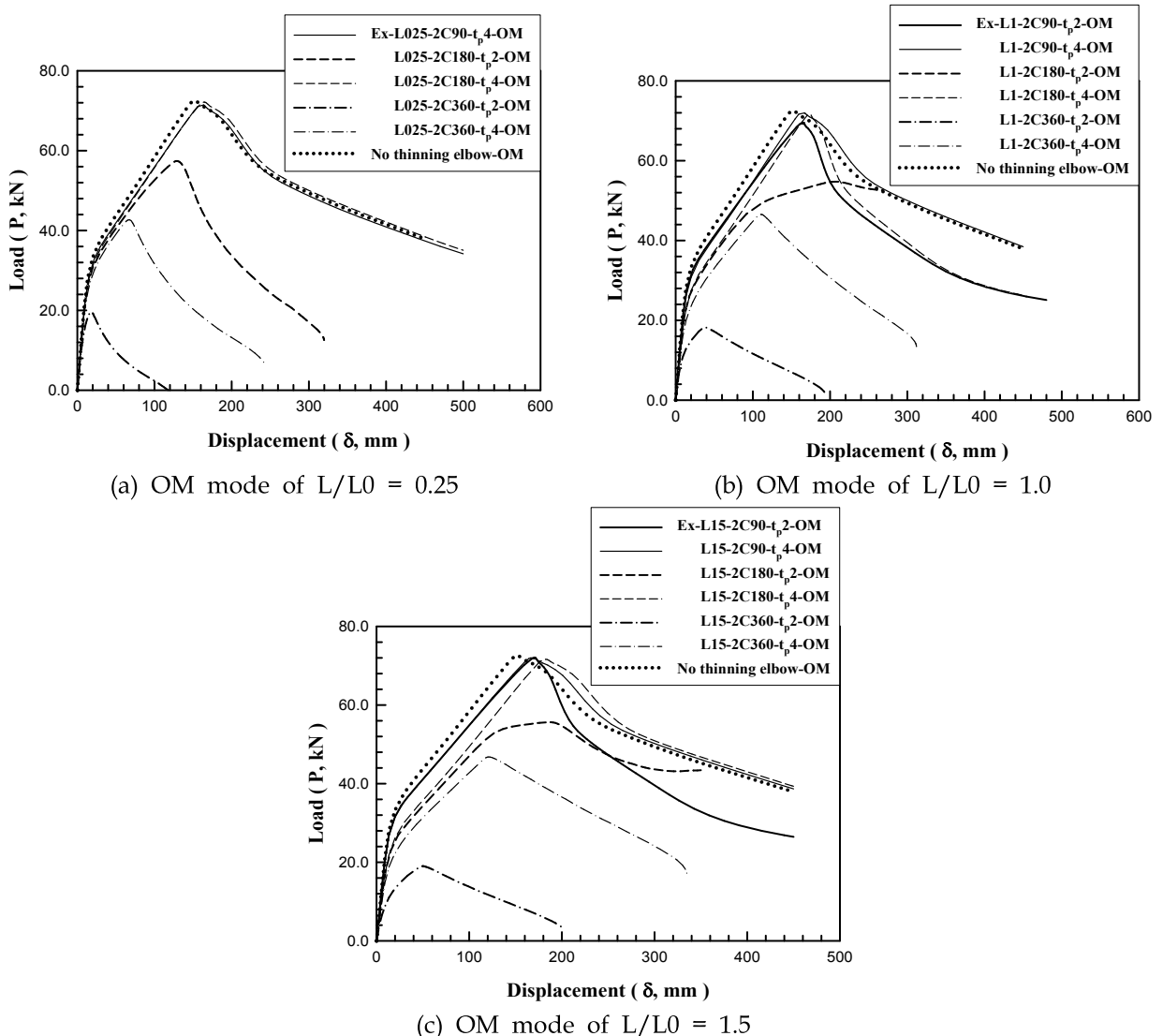


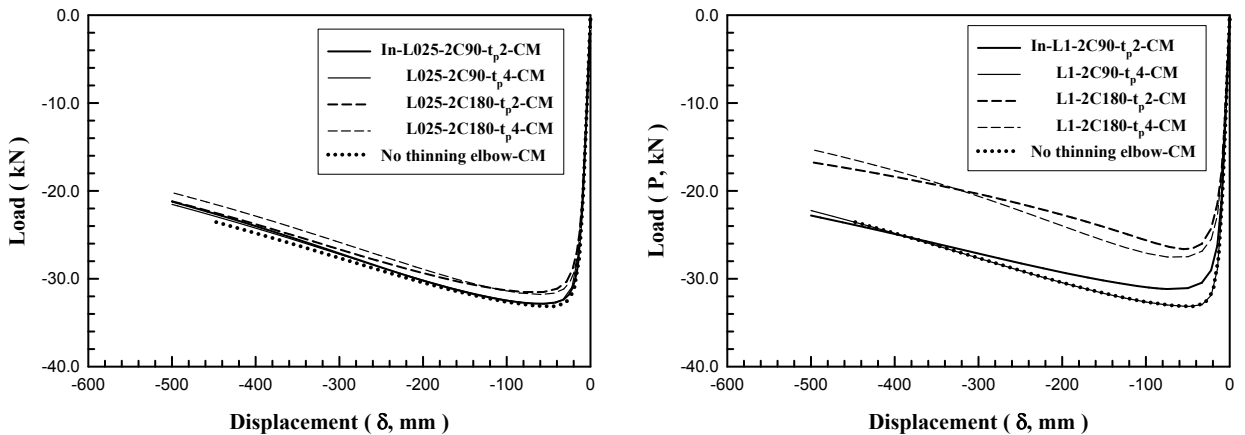
Fig. 6 Comparison of intrados wall thinned elbow under open mode

그림에서 보면 길이방향 두께감소 길이가 짧고, 원주방향 두께감소 폭이 짧은 경우 (2C90) 결함이 없는 엘보우의 결과와 큰 차이가 없게 나타나지만, 원주방향 두께감소 폭이 커질수록 잔여 두께의 영향 또한 커져 최대 열림 하중이 떨어지는 것을 알 수 있다.

Figure 6 (b)와 (c)는 L/Do가 1.0과 1.5로 일정하게 한 경우로 두 그림을 함께 비교해보면 열림 하중이 작용하는 경우 원주방향 두께감소폭 이 짧은 경우(2C90)는 최대 열림 하중의 영향은 거의 없게 나타나지만, 원주방향 감속 폭이 180인 경우를 살펴보면 잔여두께가 4mm인 경우는 2C90의 결과보다는 약간 떨어지지만 유사하게 나타나고 잔여두께가 2 mm로 얇아지면 서 최대 열림 하중이 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

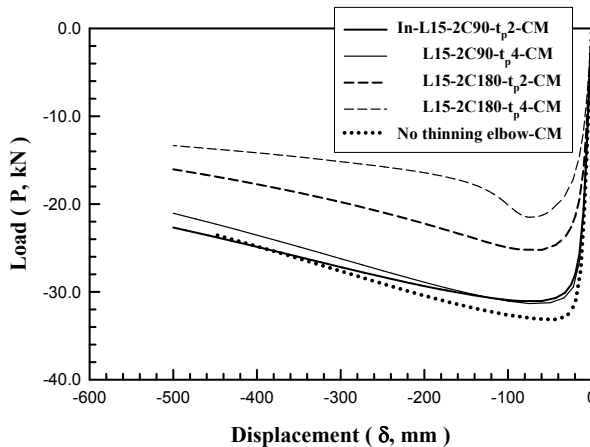
Figure 7은 엘보우의 안쪽(intrados)부위에 두께감소가 존재하는 경우에 대하여 닫힘 하중(Close mode)을 가하여 얻은 하중-변위 곡선이다. Fig. 8 (a)는 무차원화한 길이방향 두께감소길이(L/Do)는 0.25로 일정하고 원주방향 두께감소 폭과 잔여두께를 변화시킨 경우에 대하여 비교한 그림으로 두께감소가 없는 엘보우에 대한 해석결과와 함께 나타내었다. 그림에서 보면 Fig. 5 (a)의 결과와 유사하게 길이방향 두께감소길이가 짧은 경우 최대 닫힘 하중은 원주방향 두께감소 폭과 잔여두께의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

Figure 7 (b)는 L/Do가 1.0으로 일정하게 한 경우로 2C90인 경우를 살펴보면 잔여두께가 4mm인 경우 결함이 없는 엘보우의 경향과 크게 차이가 없지만, 잔여두께가 2mm인 경우에는 하중이 약간 떨어져 두께의 영향이 있는 것으로 나타났다. 그러나 2C180인 경우에는 확연하게 최대 닫힘 하중이 떨어져 원주방향 두께감소 폭과 잔여 두께의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.



(a) CM mode of L/L0 = 0.25

(b) CM mode of L/L0 = 1.0



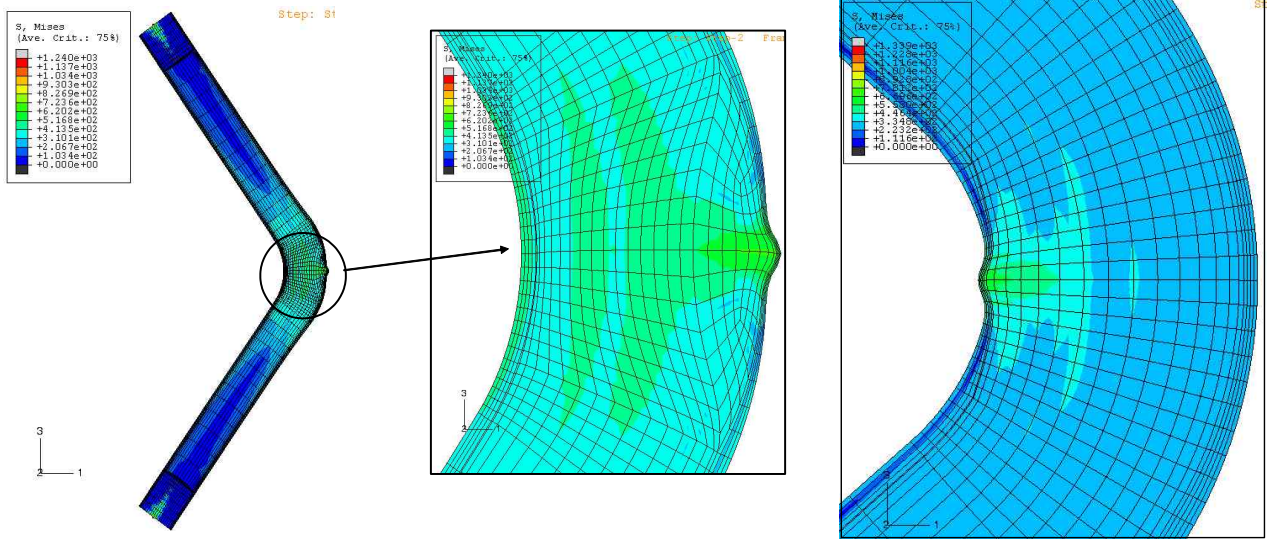
(c) CM mode of L/L0 = 1.5

Fig. 7 Comparison of intrados wall thinned elbow under close mode



Figure 7 (c)는 L/Do가 1.5로 일정하게 한 경우로 2C90인 경우를 살펴보면 잔여두께가 2와 4mm인 경우 모두 결함이 없는 엘보우보다는 낮게 나타나지만, 두 잔여 두께의 최대 단힘 하중 경향은 비슷한 것으로 보인다. 그러나 2C180인 경우에는 확연하게 하중이 떨어져 원주방향 두께감소 폭과 잔여 두께의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8 (a)는 엘보우의 외부쪽에 두께감소 (L/Do는 1.0, 2C는 180, tp는 2 mm)된 모델로부터 열림하중이 작용된 경우 탄소성해석을 행한 후에 최대 응력에서의 Von Mises 응력분포를 나타낸 그림이고, Fig. 8 (b)는 엘보우의 안쪽에 두께감소 (L/Do는 1.0, 2C는 180, tp는 2 mm)된 모델로부터 단힘하중이 작용된 경우 탄소성해석을 행한 후에 최대 응력에서의 Von Mises 응력분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 엘보우의 외부쪽과 안쪽 최대 두께감소부에서 벌짐 (bulging)이 발생된 것을 볼 수 있었다.



(a) extrados wall thinning (L/Do=1.0, 2C=180, tp=2mm)

(b) intrados wall thinning (L/Do=1.0, 2C=180, tp=2mm)

Fig. 8 Von Mises distribution of extrados and intrados wall thinned elbow

#### 4. 결론

두께감소 곡관의 손상압력과 손상하중에 미치는 결함의 길이, 깊이, 폭에 대한 영향과 결함의 위치의 영향을 파악하고자 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 시 엘보우에서 엘보우의 바깥쪽(extrados)과 안쪽(intrados)에 결함이 있다고 가정한 경우의 두 가지 경우에 대하여 단힘하중(close mode)과 열림 하중(open mode)을 작용시켜 하중-변위 곡선을 구하였다.

탄소성해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 엘보우의 바깥쪽과 안쪽과 부위에 같은 조건으로 두께감소가 존재한 경우 실험 결과와 본 해석 결과가 최대 하중을 평가하는 데 있어서 잘 일치함을 알 수가 있었다.
2. 엘보우의 바깥쪽에 감육이 존재한 경우에 대하여 압축하중을 가하여 얻은 하중-변위 곡선 결과, 축방향 감육길이가 짧은 경우에는 원주방향 감육폭이 360o, 잔여두께가 2mm인 경우를 제외하고는 감육 원주폭과 감육 두께에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러나 축방향 감육길이가 길어지고 원주방향 감육폭과 잔여두께가 작아질수록 외부 결함에 의한 영향이 커지는 것을 알 수 있었다.
3. 엘보우의 바깥부위에 감육이 존재한 경우에 대하여 인장하중을 가하여 얻은 하중-변위 곡선 결과 축방향 감육길이가 짧고, 원주방향 감육폭이 짧은 경우(2C90) 결함이 없는 엘보우의 결과와 큰 차이가 없게 나타났으나, 원주방향 감육폭이 커질수록 잔여 두께의 영향 또한 커지는 것을 알 수 있었으며, 축방향 감육길이가 길어질 경우에는 원주방향 감육폭이 짧은 경우



에는 잔여두께의 영향이 거의 없게 나타났지만 원주방향 감육폭이 커질수록 잔여두께의 영향이 있음을 알 수 있었다.

4. 엘보우의 안쪽부위에 감육이 존재한 경우에 대하여 압축하중을 가하여 얻은 하중-변위 곡선 결과 축방향 감육길이가 짧은 경우에는 엘보우의 바깥쪽에 감육이 존재한 경우에 대하여 압축하중을 가하여 얻은 결과와 유사하게 나타났으나, 축방향 감육길이가 길어진 경우에는 원주방향 감육폭과 잔여 두께의 영향이 크게 나타남을 알 수 있었다.

## References

- Lee, S.H., Lee, Y.S. ( 2015). "Code and Standard for Thinned Pipe Structural Integrity Assessment", KSME 15RE-Th1P016, 2, pp. 86-86.
- Park, J.H., Shin, K.I., Park, C.Y., and Lee, S.H. (2008). "Allowable local thickness of wall-thinned straight pipes in ASME Code Case N-597-2", International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol.85, pp. 620 - 627.
- API579-1/ASME FFS-1 (2007). "Fitness-For-Service".
- Dassult System (2010). ABAQUS/CAE V6.10.
- Kim, J.W., Na, Y.S., Lee, S.H. (2006). "Evaluating on the Effects of Circumferential Thinning Angle and Bending Load on the Failure Pressure of Wall-Thinned Elbow through Burst Tests", Journal of the KOSOS, Vol 21, No. 6, pp. 14-19.
- Kang, K.J. (2004). "Investigation of Pipe Rupture Accident in Mihama Unit 3, Japan", Nuclear Industry, Vol. 24, Np. 9, pp. 4-13.
- Hong, K.M., Kan, Y.J., Park, N.K., Yoon S.B., (2013), "Application of Laser Ultrasonic Technique for Nondestructive Evaluation of Wall Thinning in Pipe," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 33, No. 4, pp. 361-367.
- Nam, K.W., Ahn, S.H. ,Do, J.Y. (2010). "Analysis of Weld Beads for Wall Thinning Defects in the Weld Zone of the Boost Pump Recirculation Pipe for Power Plants and Evaluation of Their Integrity," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 24, No. 4, pp. 38-46.