

# 여러 형상의 감육부를 가진 엘보우의 소성붕괴 굽힘 하중의 평가

신규인<sup>†</sup> · 이성호\* · 윤기봉\*\*

중앙대학교 차세대에너지·안전연구소 · \*한국전력 전력연구원 · \*\*중앙대학교 기계공학부  
(2008. 4. 2. 접수 / 2008. 6. 20. 채택)

## Evaluation of Plastic Collapse Bending Load of Elbows with Thinning Area of Various Shapes

Kyu In Shin<sup>†</sup> · Sung Ho Lee\* · Kee Bong Yoon\*\*

Energy · Safety Research Institute, Chung Ang University

\*Korea Electric Power Research Institute

\*\*Department of Mechanical Engineering, Chung Ang University

(Received April 2, 2008 / Accepted June 20, 2008)

**Abstract** : Elbows with various shapes of local wall thinning were numerically analyzed by finite element method to get load-displacement curves and the maximum loads. Results were compared with the experimental data obtained by another study. Elastic-plastic analysis were carried out under the combined loading conditions of internal pressure and in-plane bending loads. Two types of bending loads were considered such as elbow opening mode and elbow closing mode. Also, two different wall thinning geometries were modeled. Wall thinning area located extrados or intrados of elbow inner surface was considered. Longitudinal and circumferential lengths of the thinning area and the thinned thickness were varied for analysis. The results showed that the maximum load of the wall-thinned elbow decreased with increasing of the circumferential thinning length and the thinned thickness in both of extrados and intrados thinning locations in both loading types. The maximum load obtained by the analysis were in good agreement with the experimentally measured maximum load with the same wall thinning type and dimensions. This supports accuracy of the analysis results obtained in this study.

**Key Words** : collapse load, elbow, extrados, intrados, finite element analysis, maximum bending load, wall thinning

### 1. 서론

발전소 등의 플랜트 배관에서 발생되고 있는 배관의 국부적인 두께감소인 감육(減肉) 문제는 배관의 파열 및 소성붕괴 등의 발생에 의한 설비의 건전성 저하에 큰 영향을 미치고 있어 관심의 대상이 되고 있으며, 국내·외에서 이에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1-4)</sup>. 원자력발전소의 경우 1986년 미국 Surry 2호기에서 2차 계통 탄소강 배관의 파열 사고가 발생한 이후 다양한 연구가 진행되었으며<sup>1)</sup>, 이를 기초로 두께감소 결함에 대한 건전성 평가 모델들이 제시되었고, 이들 중 일부 평가 모델들은 ASME 코드의 기준으로 채택되었다<sup>2-8)</sup>. 지금까지의 감육 결함에 대한 대부분의 연구들은 직

관을 대상으로 수행되었으며, 엘보우(elbow)나 연결관 등에 대한 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 또한 2차 계통 배관 관리를 위해서는 두께가 감소된 배관이 발견되는 경우, 계속 사용 가능 여부에 대하여 신속하게 판단할 수 있는 기준이 필요하다<sup>1,8)</sup>.

본 연구에서는 엘보우 배관의 외호면(extrados)과 내호면(intrados)의 배관 내부에 국부적으로 두께가 감소되었다고 가정하고, 엘보우 배관이 열리는 방향과 닫히는 방향으로 각각 굽힘하중을 가하여 해석하였다. 탄소성 해석으로부터 배관에 가한 하중과 하중점의 변위를 구하여 최대하중을 평가하였으며, 이로부터 엘보우 소성붕괴 굽힘하중에 미치는 감육부의 감육길이, 감육폭 그리고 감육깊이에 대한 영향과 감육부의 위치에 대한 영향을 파악하였다.

또한 유사한 조건에서 엘보우 실패관을 이용한 실험결과와 비교하여 해석결과와 잘 일치함을 보

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kyuinshin@wm.cau.ac.kr

여주어 본 연구결과의 신뢰성을 설명하였다<sup>1)</sup>.

## 2. 유한요소해석

### 2.1. 해석 대상 엘보우

본 연구의 해석대상 엘보우의 재료는 ASTM A234 WPB로 외경( $D_o$ )은 113.4mm, 두께( $t$ )는 7.8mm이고 엘보우 곡관반경( $R_m$ )은 152.4mm이다.

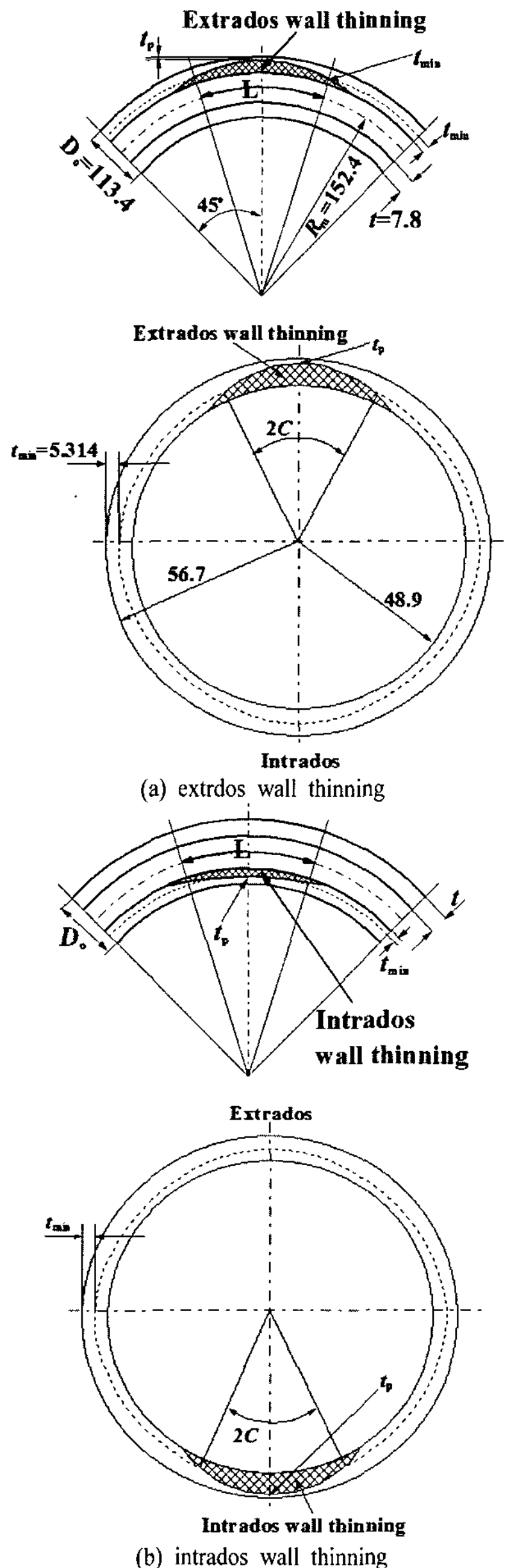


Fig. 1. Schematic diagram of elbow with extrados and intrados wall thinning.

Table 1. FEA conditions of various wall thinning cases in elbow

Thinning Location	$L/D_o$	$t_p$ (mm)	$2C$ (degree)	$L/D_o$	$t_p$ (mm)	$2C$ (degree)
Extrados	1	2	90	1	4	90
			180			180
			360			360
	1.5	2	90	1.5	4	90
			180			180
			360			360
Intrados	1	2	90	1	4	90
			180			180
			360			360
	1.5	2	90	1.5	4	90
			180			180
			360			360

엘보우의 두께감소에 의한 감육형상은 Fig. 1(a)와 같이 엘보우의 외호면에 그리고 Fig. 1(b)와 같이 엘보우의 내호면에 감육부가 있다고 가정하여 내면에서의 감육만을 고려하였다.

엘보우의 감육형상은 감육길이  $L$ 과 감육폭  $2C$ 로 나타낸다. 배관축의 감육길이( $L$ )는 Fig. 1(a)에서와 같이 곡관의 중심점을 중심으로 하고  $L$ 인 호를 갖는 부채꼴이 배관의 중심선에 사상이 되었을 때 길이로 정의된다. 그 호가 최소설계요구두께( $t_{min}$ )와 만나는 두 점과 최소잔여두께( $t_p$ ) 중심부를 지나는 또다른 호의 형태로 하여 축방향 감육길이를 나타내도록 하였다. 최소설계요구두께는 5.314mm이다. 배관축에 수직인 단면에서 원주방향 감육폭의 형상은 배관 단면의 중심을 중심으로 하고  $2C$ 인 호를 갖는 부채꼴을 배관의 내경에 사상이 되었을 때, 그 호가  $t_{min}$ 과 만나는 두 점과  $t_p$ 를 지나는 호의 형태로 하여  $2C$ 의 길이를 나타내도록 하였다. 엘보우의 내호면 감육형상 또한 Fig. 1 (b)에서 보는 바와 같이 외호면 감육형상과 같은 형식으로 표현하였다.

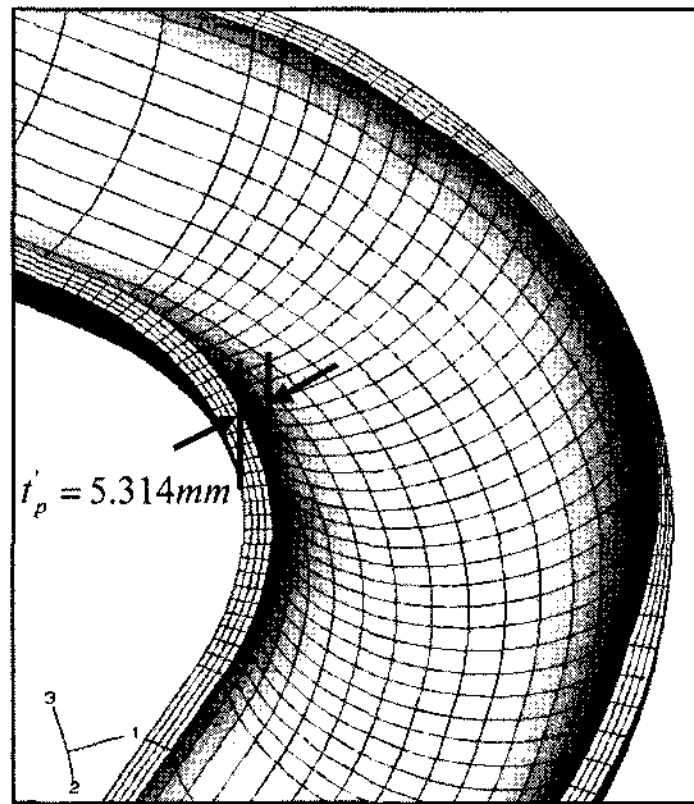
감육된 엘보우의 해석 조건을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 무차원화한 배관 축방향 감육길이는  $L/D_o$ 로, 원주방향 감육폭은  $2C$ 로 그리고 최소잔여두께는  $t_p$ 로 표현하였다.

### 2.2. 유한요소 모델링

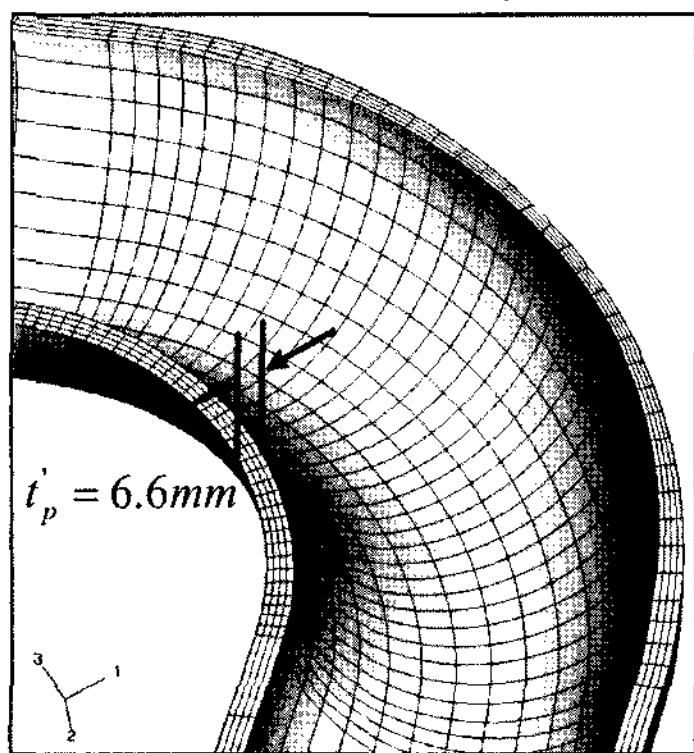
엘보우의 유한요소 모델은 Fig. 2와 3에 나타내었으며, ABAQUS 5.8 상용프로그램으로부터 20절점, 3차원 구조용 요소(3D20R)를 사용하여,  $y$ -축방향 대칭조건을 이용하여 전체의 1/2을 모델링 하였고, 두께 방향으로 4개의 요소를 형성시켰다.

Fig. 2의 외호면 감육형상의 경우,  $t_p$ 가 2mm이고  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우에는 축방향 감육 길이에 상관없이, 엘보우의 내호면 부위도 두께의 2.486mm가 감소되어 최소설계요구두께가 되었다고 가정(따라서 잔여두께는  $t_{min}$ 과 동일) 하였고,  $t_p$ 가 4mm이고  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우에도 엘보우의 내호면 부위는 두께의 1.2mm가 감소되었다고 가정(따라서 잔여두께는 6.6mm)하여 실제 엘보우에서 발생하는 일반적인 감육형상과 비슷하도록 모델을 구성하였다. Fig. 3의 엘보우의 내호면 감육형상에 대해서도 마찬가지로  $t_p$ 가 2mm이고  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우에는 축방향 감육 길이에 상관없이 엘보우의 외호면 부위는 두께의 2.486mm가 감소되었다고 가정하였으며,  $t_p$ 가 4mm이고  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우에도 엘보우의 외호면 부위는 두께의 1.2mm가 감소되었다고 가정하였다.

엘보우의 경계조건은 Fig. 4에 보인바와 같다. 전체 엘보우의 하단 중심, A점,을  $x$ -와  $z$ -방향으로 고정시켰고, 엘보우의 상단 중심, B점,을  $x$ -방향으로 고정시켰다.

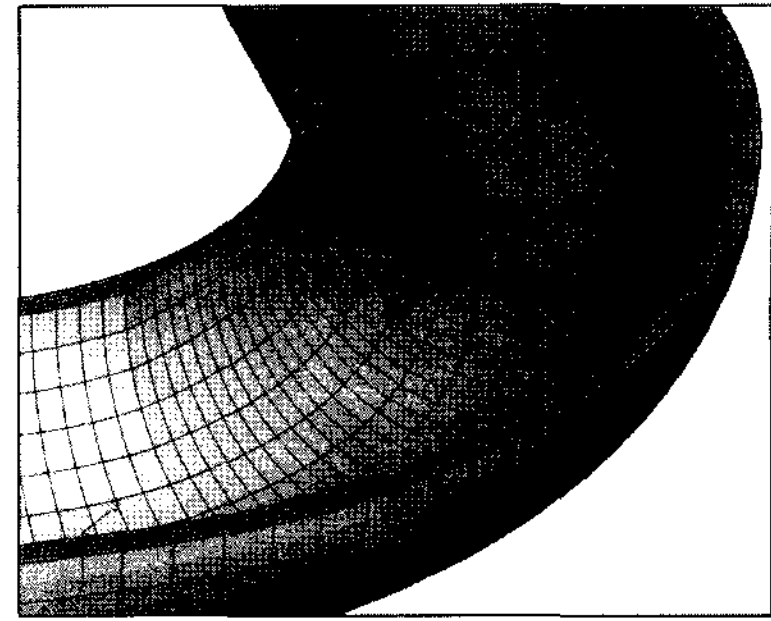


(a)  $L/D_o = 1.0, 2C = 180, t_p = 2mm$

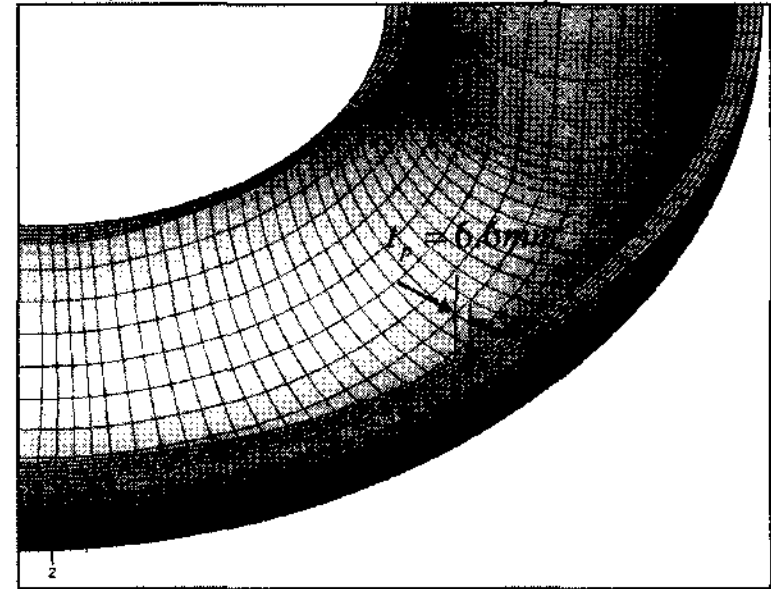


(b)  $L/D_o = 1.0, 2C = 180, t_p = 4mm$

Fig. 2. Finite element model of elbow with extrados wall thinning.



(a)  $L/D_o = 1.0, 2C = 180, t_p = 2mm$



(b)  $L/D_o = 1.0, 2C = 180, t_p = 4mm$

Fig. 3. Finite element model of elbow with intrados wall thinning.

배관 재료의 탄소성 거동은 Fig. 5에 보인바와 같이 인장강도 이후에는 완전소성으로 거동한다고 가정하였으며, 두께감소부에서는 대변형(large deformation)이 가능하도록 하였다. 또한 응력-변형을 거동에 대한 비선형 옵션(NLGEOM)을 적용하였다. 하중은 2단계로 나누어 부과하였다. 1단계에서는 내압 10MPa를 가하였고, 2단계에서는 내압은 유지되면서 엘보우가 열리는 모드의 굽힘하중(opening bending mode load) 또는 엘보우가 닫히는 모드의 굽힘하중(closing bending mode load)을 가하였다. 굽

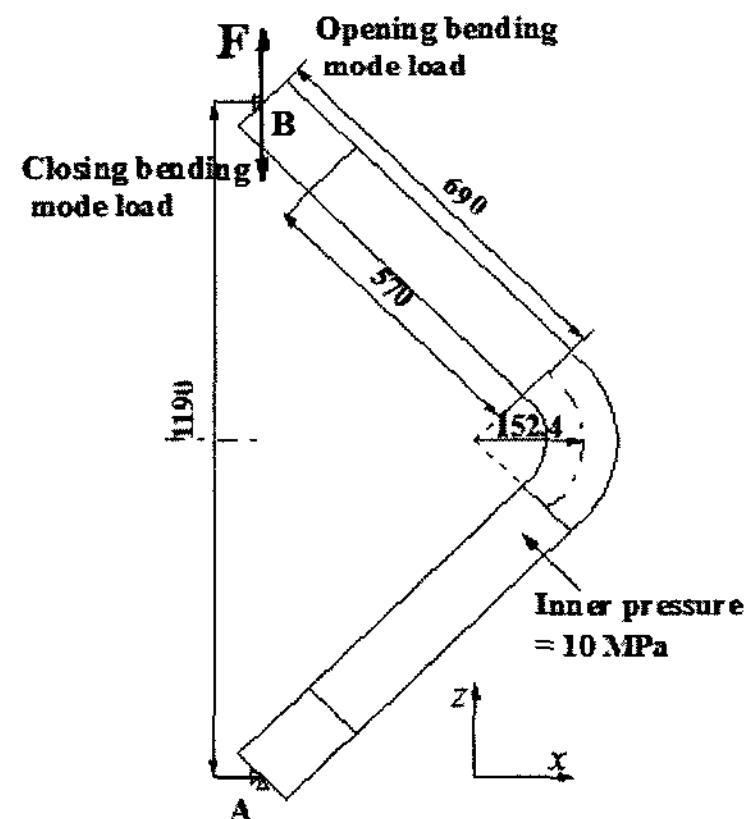


Fig. 4. Loading conditions in elbow, inner pressure and opening or closing bending loads.

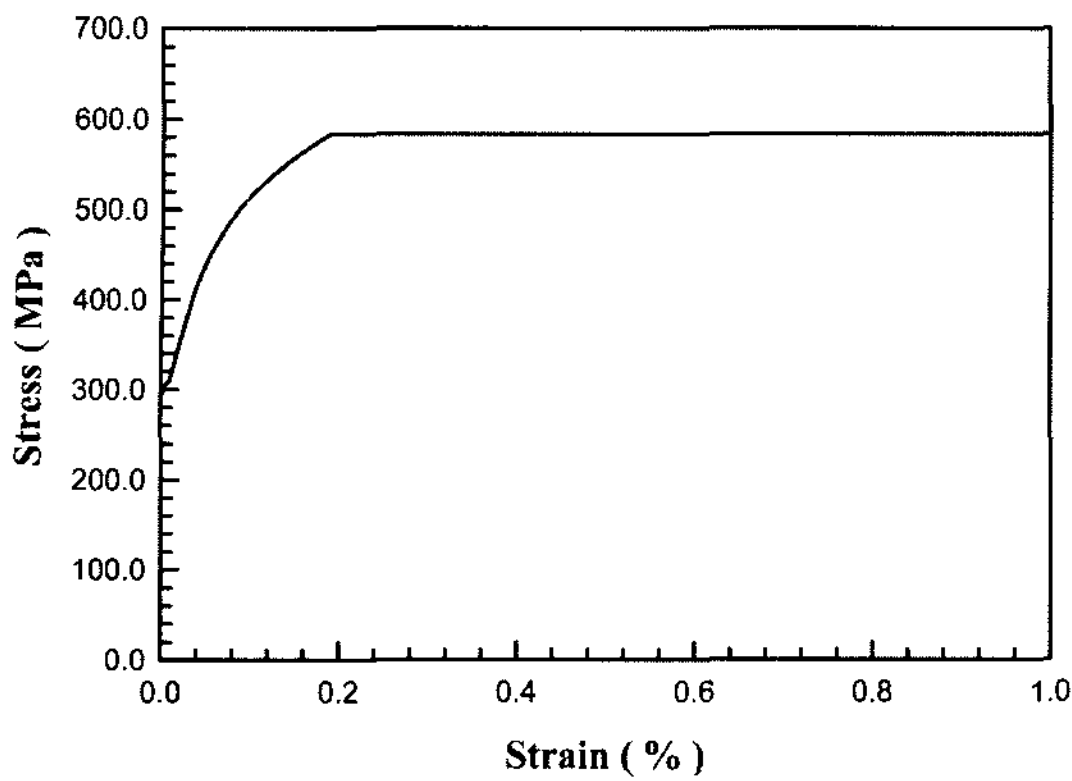


Fig. 5. Stress-strain behavior of ASTM A234 WPB steel used in analysis.

힘하중을 부가할 때에는 변위를 가하여 하중이 부과되도록 해석을 수행하였으며, 이로부터 Fig. 4에서 A점에서의 반력과 B점에서의 변위로부터 반력-변위 선도를 구하였으며, 이때 최대 하중을 해석하였다.

### 3. 결과 및 토의

앞 절에 설명한 엘보우의 외호면과 내호면 내부에 감육부가 존재하는 경우에 대하여 탄소성 해석을 수행할 때에 외호면 감육인 경우에는 엘보우가 열리는 모드의 굽힘하중과 엘보우가 닫히는 모드의 굽힘하중을 가하였고, 내호면 감육인 경우에는 엘보우가 닫히는 모드의 굽힘하중만 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 6부터 9에 나타내었다.

Fig. 6부터 9의 그림에서 EX는 엘보우의 외호면 감육, IN은 엘보우의 내호면 감육의 약자로 표기하였으며, OM(opening bending mode load)은 열리는 모드의 굽힘하중의 약자로, CM(closing bending mode load)은 닫히는 모드의 굽힘하중의 약자로 표시하였다.

Fig. 6은 엘보우의 외호면과 내호면에 감육부가 존재한 경우에 대하여 이성호 등<sup>1)</sup>이 엘보우가 닫히는 모드로 굽힘하중을 가하여 수행한 실험 결과를 본 해석 결과로부터 얻은 반력-변위 선도와 비교한 그림이다. Fig. 6(a)는 엘보우의 외호면에  $L/D_0$ 는 1,  $2C$ 는  $90^\circ$  그리고  $t_p$ 는 4mm가 존재하는 경우에 대하여 비교한 그림으로, 실험에서의 압축최대 하중( $P_{max}$ )은 -32.57kN 그리고 본 해석 결과로부터 얻은 압축최대하중은 -30.88kN으로 본 해석 결과는 실험 결과의 최대 하중을 평가하는 데 있어서 -5.2%의 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 6(b)

의 경우 실험 조건에서는 엘보우의 내호면에  $L/D_0$ 는 1,  $2C$ 는  $90^\circ$  그리고  $t_p$ 는 5.3mm인 감육부가 존재하는 경우에 대하여, 본 해석조건에서  $L/D_0$ 와  $2C$ 는 같고  $t_p$ 가 4mm 경우에 대하여 비교한 그림이다. 그림에서 보면 잔여두께 차이의 영향으로 본 해석 결과가 실험결과의 최대압축하중 보다 약간 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 실험값과 비교한 이 결과로부터 본 연구에서 수행한 해석이 실제 감육부의 거동을 타당성있게 예측할 수 있다고 볼 수 있다.

Fig. 7은 엘보우의 외호면에 감육부가 존재한 경우에 대하여 엘보우가 닫히는 굽힘하중을 가하여 얻은 반력-변위 선도이다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각  $L/D_0$ 가 1.0과 1.5이고  $2C$ 와  $t_p$ 를 변화시킨 경우에 대하여 비교한 그림으로 감육부가 없는 건전한 엘보우에 대한 해석결과와 함께 나타내었다. Fig. 7(a)에서 보면  $2C$ 가  $90^\circ$ 와  $180^\circ$ 일 때, 각각의 경우를 살펴보면, 배관이 건디는 하중은 최소두께  $t_p$ 의 영향보다는 감육폭  $2C$ 의 영향을 크게 받지만,  $360^\circ$ 의 감육부가 있는 경우에는 최소두께뿐 아니라 감육폭

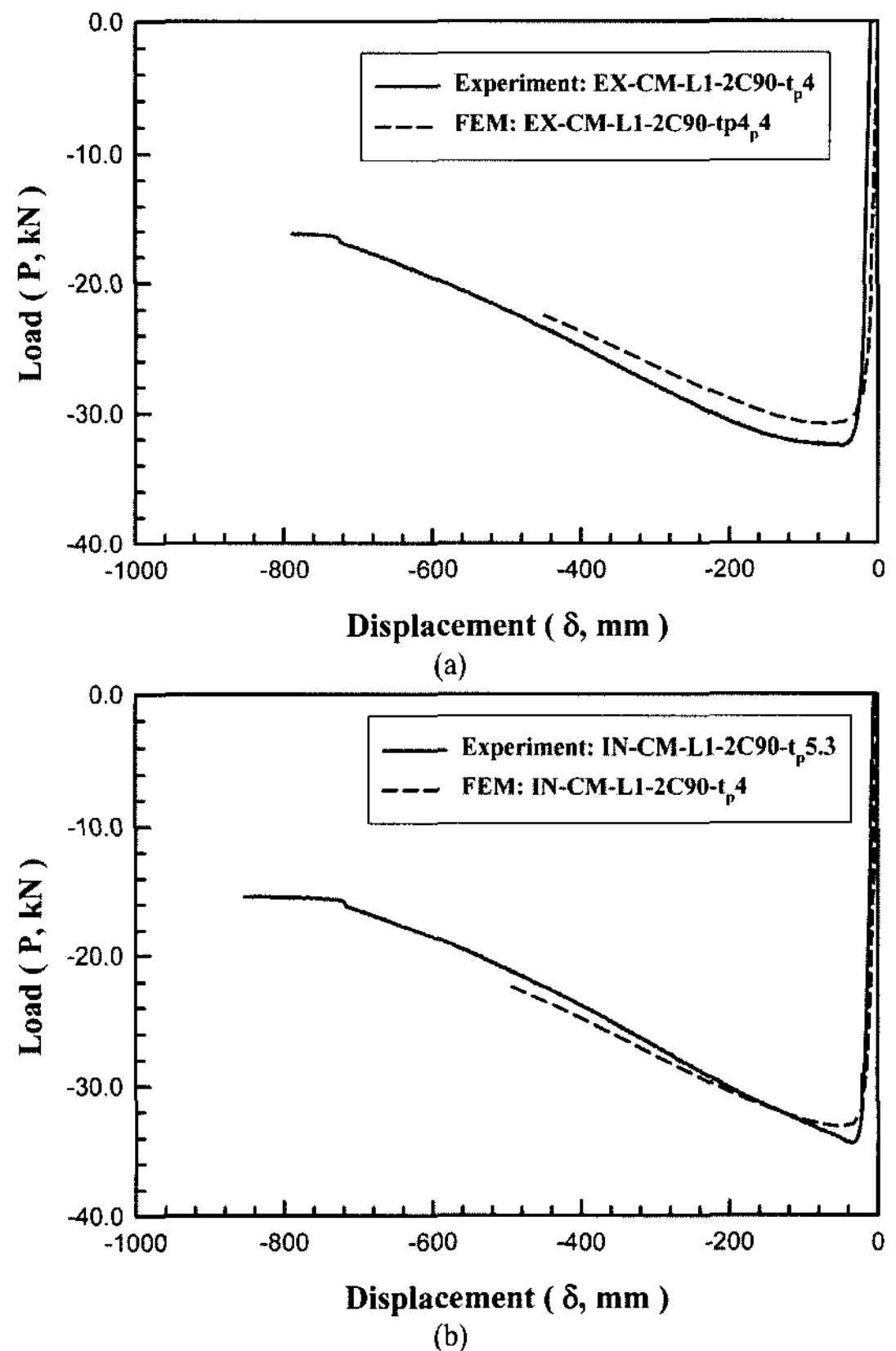


Fig. 6. Comparison of load-displacement curves between experiment and elastic plastic analysis.

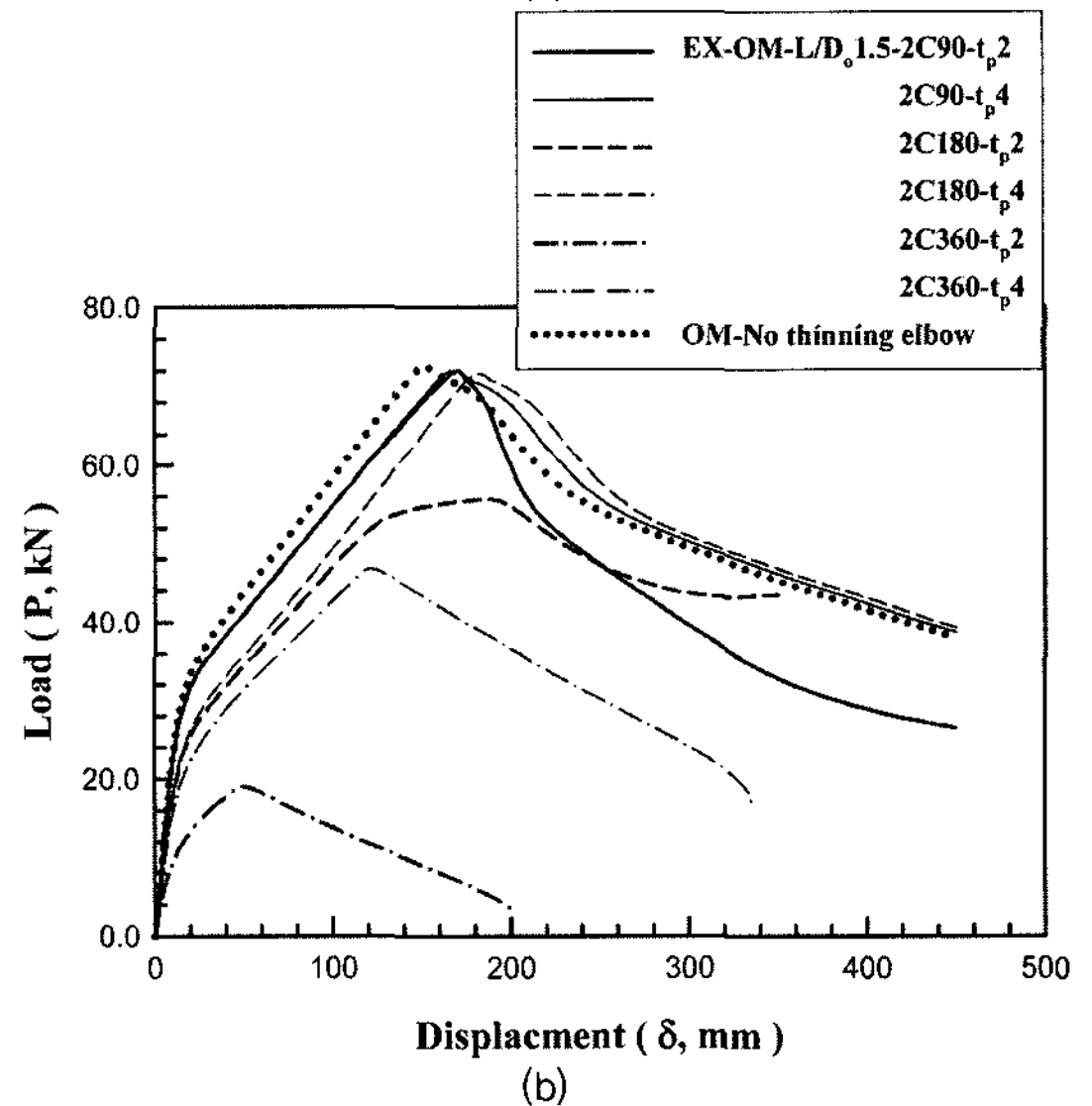
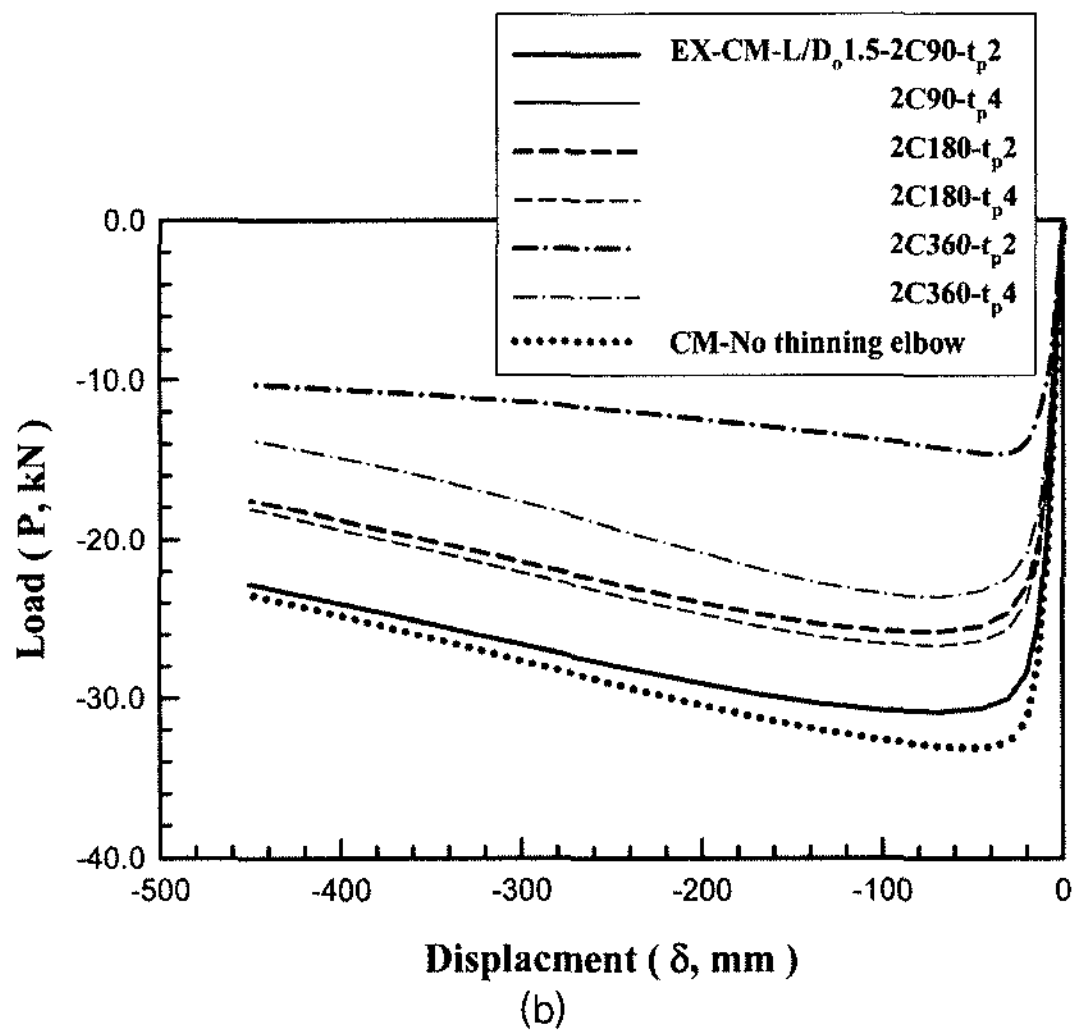
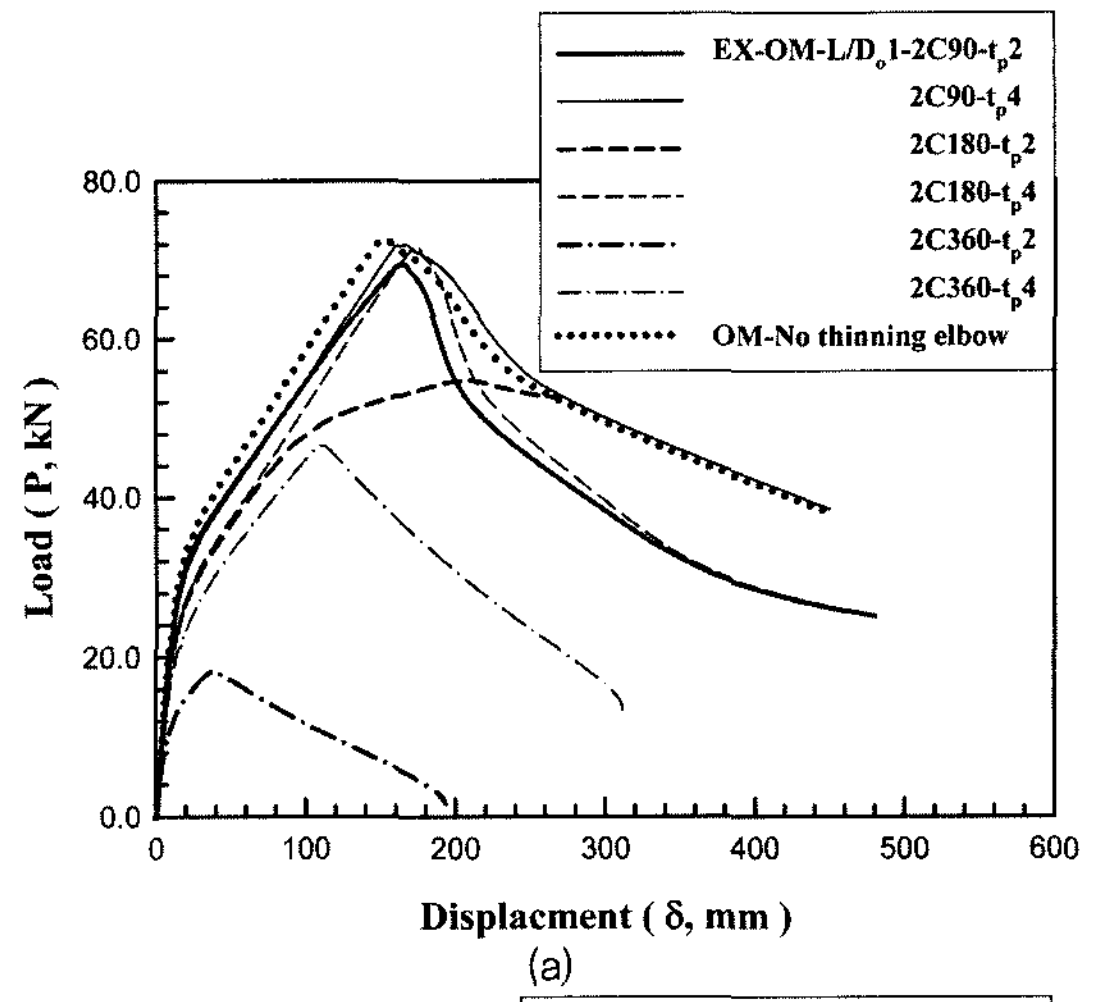
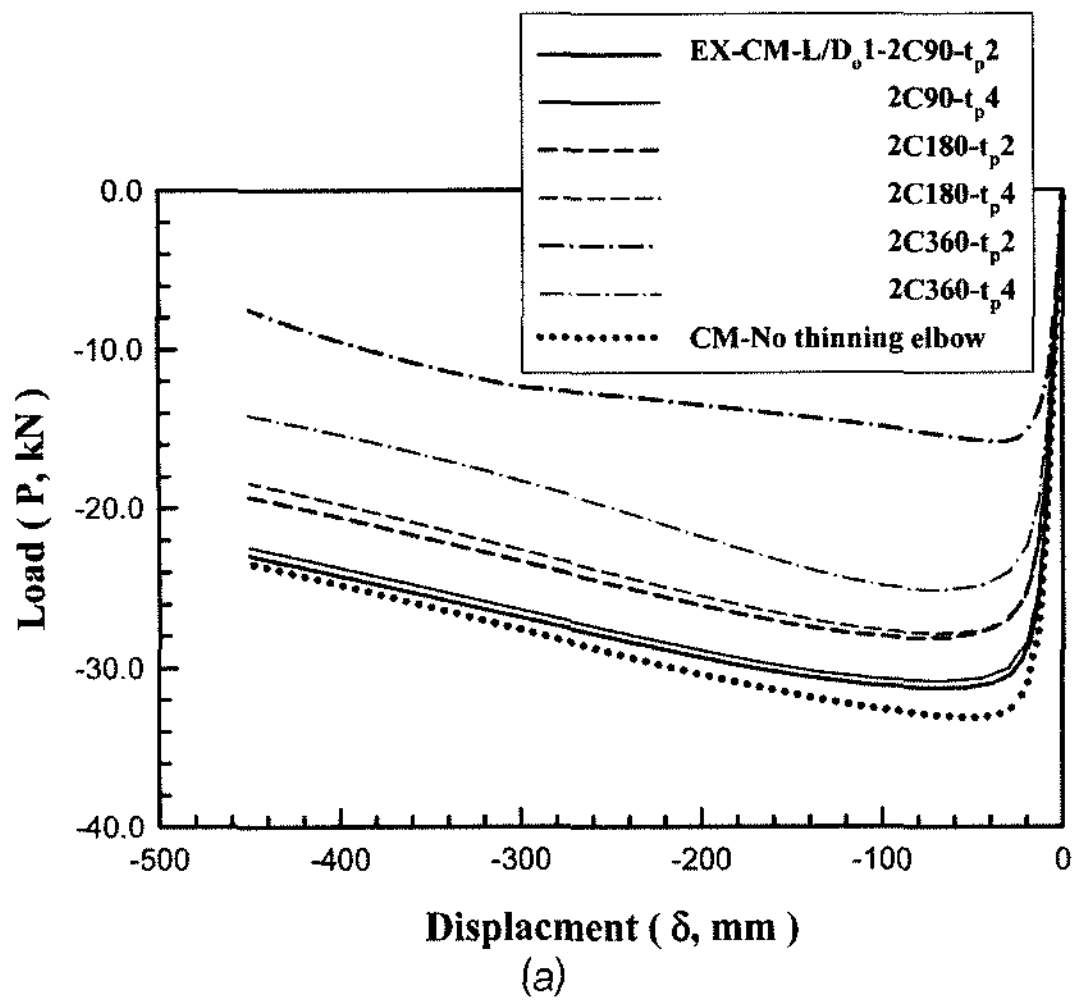


Fig. 7. Results of elastic plastic analysis for extrados wall thinning elbow under closing mode bending load.

Fig. 8. Results of elastic plastic analysis for extrados wall thinning elbow under opening mode bending load.

의 영향이 함께 커짐을 알 수 있다. 감육길이의 영향은 감육폭이 작을 때는 크지 않으나, 감육폭이 커지면 감육길이의 영향도 같이 증가하는 것을 Fig. 7(a)와 (b)를 비교해보면 알 수 있다.

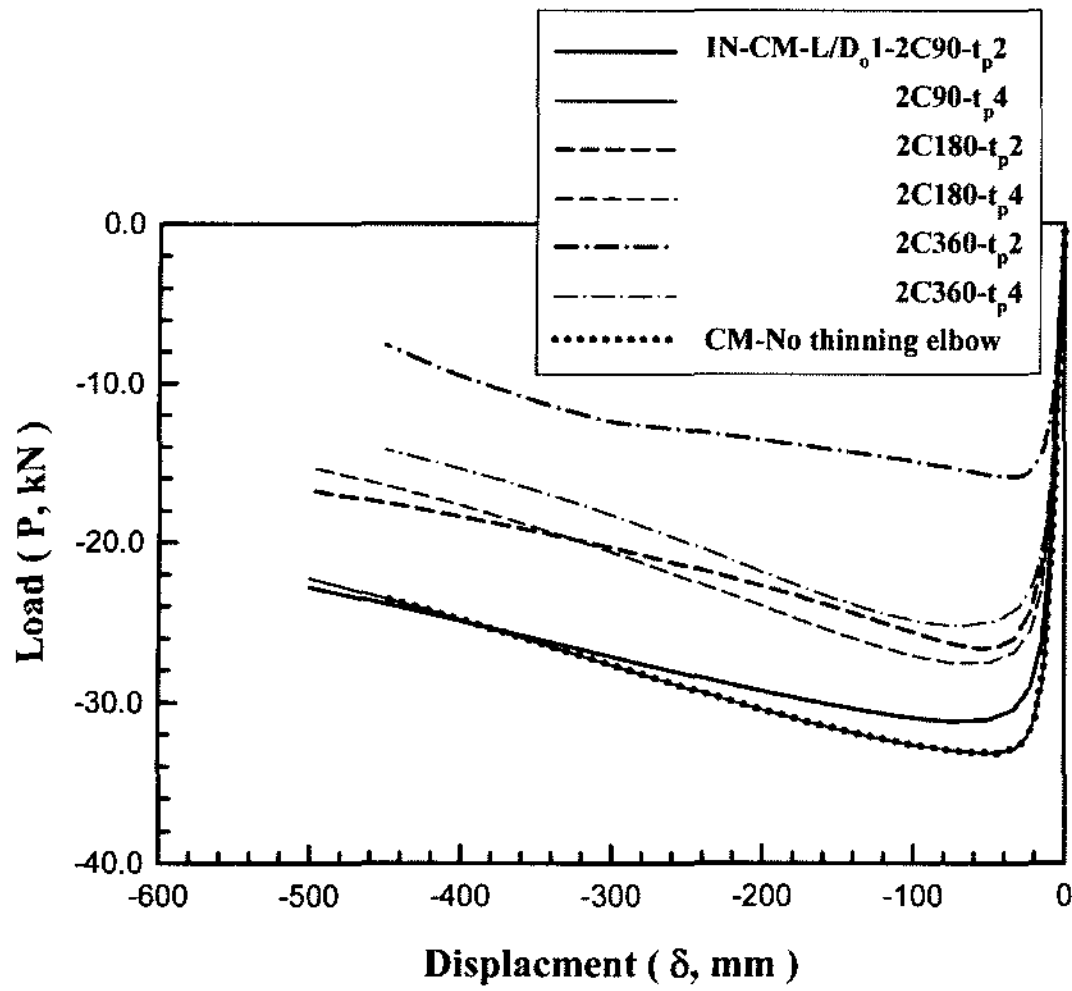
또한 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 감육길이  $L$ 이 길어진 경우, 감육폭  $2C$ 가 짧으면( $90^\circ$ ) 최소두께  $t_p$ 의 영향이 없지만, 감육폭이 커질수록 최소두께의 영향 또한 함께 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 엘보우의 외호면에 감육부가 존재한 경우에 대하여 엘보우가 열리는 모드의 굽힘하중을 가하여 얻은 반력-변위 선도를 나타내었다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각  $L/D_0$ 를 1.0과 1.5로 일정하게 하였고,  $2C$ 와  $t_p$ 를 변화시킨 경우에 대하여 해석한 경우들을

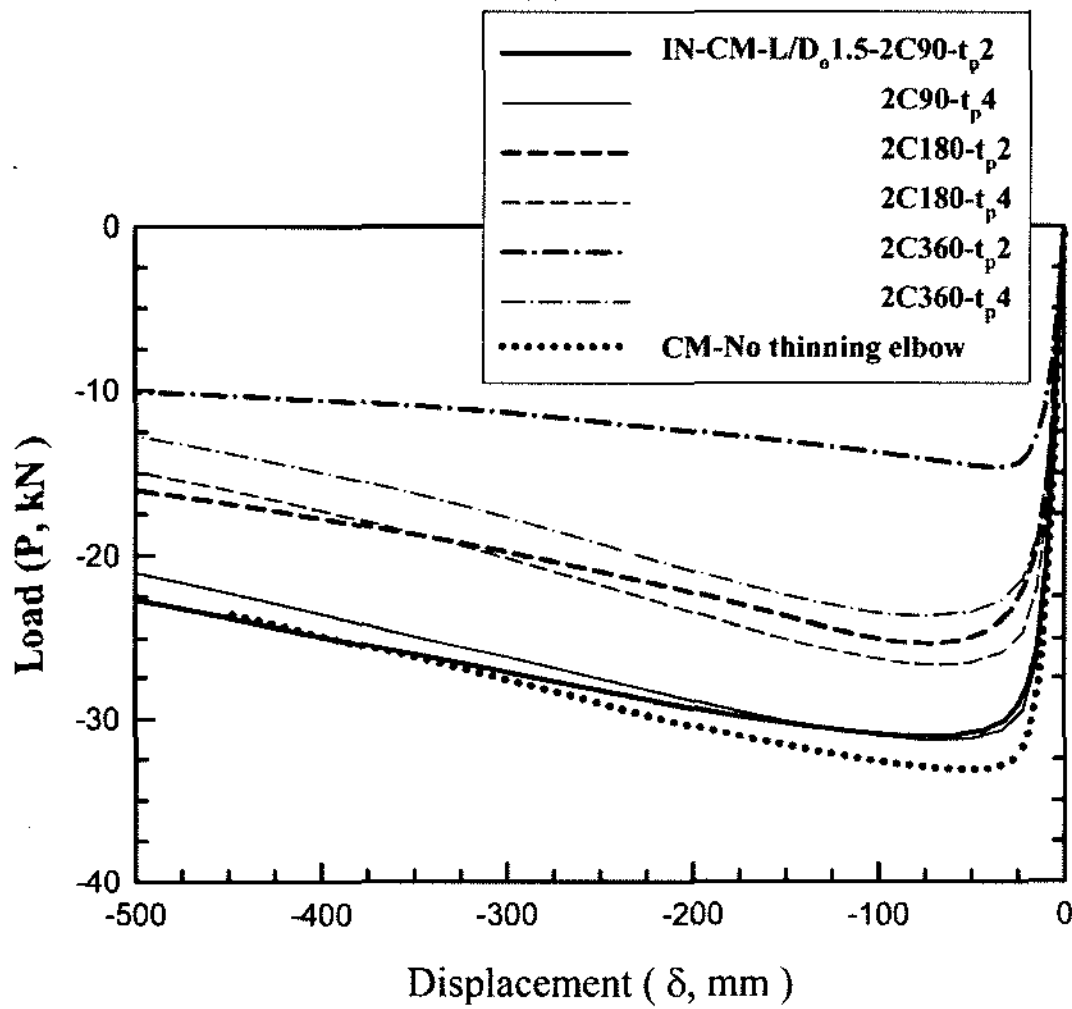
비교한 그림이다. Fig. 8(a)와 (b) 모두 감육폭  $2C$ 가 비교적 작은  $90^\circ$ 인 경우에는  $t_p$ 의 영향이 거의 없는 것을 알 수 있다.

그러나  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우와  $360^\circ$ 인 경우에는,  $t_p$ 가 4mm에서 2mm로 얇아지면서 엘보우가 버티는 하중이 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 즉, 감육부위가 넓어지면 최소두께의 영향을 매우 크게 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 엘보우의 내호면에 감육부가 존재한 경우에 대하여 엘보우가 닫히는 굽힘하중을 가하여 얻은 반력-변위 선도이다. Fig. 9(a)는  $L/D_0$ 가 1.0으로 일정하고  $2C$ 와  $t_p$ 를 변화시킨 경우에 대하여 비교한 그림으로 감육부가 없는 엘보우에 대한 해석



(a)



(b)

Fig. 9. Results of elastic plastic analysis for intrados wall thinning elbow under closing mode bending load.

결과와 함께 나타내었다. 그림에서 감육폭  $2C$ 가  $90^\circ$ 인 경우를 보면  $t_p$ 가 4mm인 경우 결함이 없는 엘보우의 경향과 크게 차이가 없지만,  $t_p$ 가 2mm인 경우에는 최대압축하중이 감소하여 두께의 영향이 큰 것으로 나타났다. 그러나 감육폭  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우에는 최대압축하중이 급격히 떨어지며  $2C$ 와  $t_p$ 의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9(b)는  $L/D_0$ 를 1.5로 일정하게 한 경우로  $2C$ 가  $90^\circ$ 인 경우를 보면  $t_p$ 가 2mm인 경우와 4mm인 경우 모두 결함이 없는 엘보우 보다는 최대압축하중이 작게 나타났으나, 두께의 영향이 크게 없는 것으로 나타났다. 그러나  $2C$ 가  $180^\circ$ 인 경우에는  $2C$ 와  $t_p$ 의 영향이 크게 증가함을 보여주고 있다.

Table 2. Comparison between predicted and measured values of maximum load

$\alpha$ ( $D_0/L$ )	$\beta$ ( $2\pi/2C$ )	$\gamma$ ( $t/(t-t_p)$ )	Measured value $f(\alpha, \beta, \gamma)$	Predicted value $f(\alpha, \beta, \gamma)$
1.0	4	1.35	0.9444	0.9967
		2.05	0.9313	0.9293
	2	1.35	0.8505	0.6976
		2.05	0.8422	0.8180
	1	1.35	0.4792	0.5481
		2.05	0.7598	0.7624
0.67	4	1.35	0.9310	0.9823
		2.05	0.9310	0.9227
	2	1.35	0.7791	0.6759
		2.05	0.8060	0.8041
	1	1.35	0.4421	0.5227
		2.05	0.7133	0.7448

실제 발전소 배관의 엘보우에서 비파괴 검사에 의해 두께 감소가 탐지된 경우 감육부의 감육길이 ( $L$ ), 감육폭( $2C$ ) 및 감육깊이( $t-t_p$ ) 등을 측정하면 그 엘보우가 견딜수 있는 굽힘 하중을 본 해석결과를 정리한 식을 사용하여 예측할 수 있을 것이다. 즉 감육발생이 없는 엘보우의 최대 부하 하중과 비교해 감육이 발생한 배관의 최대 하중의 감소 비율을 함수  $f$ 라고 가정하면 이 함수값은 감육이 심해 질수록 작아지게 된다. 따라서  $f$ 는 식 (1)과 같이  $1/L$ ,  $1/2C$ ,  $1/(t-t_p)$ 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\frac{P_{\max(\text{wall thinning})}}{P_{\max(\text{no wall thinning})}} = f\left(\frac{D_0}{L}, \frac{2\pi}{2C}, \frac{t}{t-t_p}\right) = f(\alpha, \beta, \gamma) \quad (1)$$

외호면 감육부를 갖는 엘보우에 닫히는 방향의 하중을 가한 경우 Fig. 7에 측정된 최대하중과 그때의 관련 변수를 Table 2에 나타내었다. 이때 예측된 최대하중 감소비  $f$ 값과 아래 식 (2)으로 표현되는 회귀선 식으로 예측된  $f$ 값도 함께 나타내었다. 식 (2)에서  $f$ 값을 결정하는 변수 중 감육길이, 감육폭, 감육두께의 각각의 곱으로 표현되는  $\alpha\beta$ ,  $\beta\gamma$ ,  $\alpha\gamma$  등은 감육부의 면적을 나타내는 차원이므로 이 변수들에 의해 강도의 감소비율이 결정되는 것은 타당성이 있다고 볼 수 있다.

$$f(\alpha, \beta, \gamma) = -0.3291 + (0.13329*\alpha) + (0.34162*\beta) + (0.47397*\gamma) - (0.011038*\alpha*\beta) - (0.033722*\alpha*\gamma) - (0.13411*\beta*\gamma) \quad (2)$$

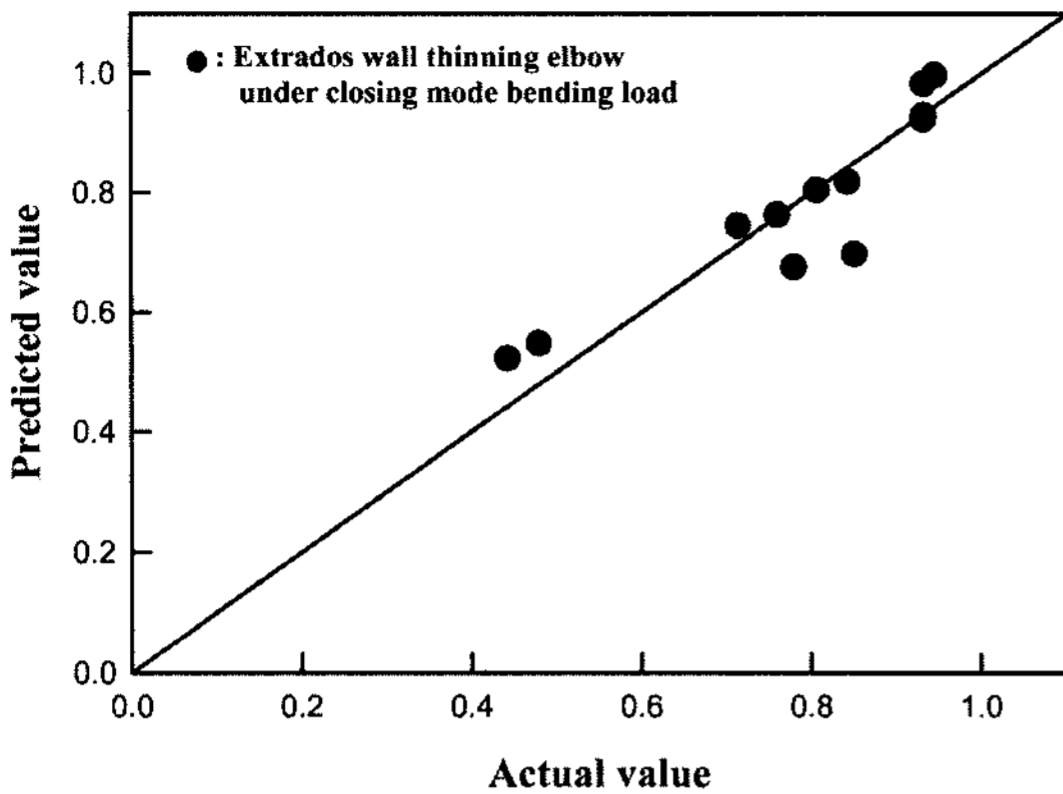


Fig. 10. Comparison between predicted and actual values of the normalizing  $P_{max}$ .

즉, 식 (2)을 활용하면 실제 플랜트에서 감육부가 발견된 경우 강도 저하 비율을 대략적으로 예측할 수 있을 것이다. Table 2의 측정값과 예측값을 Fig. 10에 비교하여 나타내었다.

#### 4. 결론

엘보우 배관의 외호면(extrados)과 내호면(intrados)에 두께가 감소된 감육부가 배관 내면에 있다고 가정하고, 각각의 경우에 대하여 배관 축방향 감육길이(L), 원주방향 감육폭(2C) 그리고 최소잔여두께( $t_p$ )를 변화시켜 소성붕괴 급힘하중의 이들에 대한 영향을 파악하고자 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 해석 시 내압이 고려된 상황에서 엘보우가 닫히는 모드의 급힘하중과 열리는 모드의 하중을 각각 작용시켜 하중점에서의 반력-변위 선도를 구하였으며 이로부터 소성붕괴 시의 최대급힘하중을 평가하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 엘보우의 외호면과 내호면에 감육부가 존재하는 경우 참고문헌<sup>1)</sup>의 실패관 실험 조건과 유사한 조건에서 수행된 탄소성 해석 결과로 평가한 최대 급힘하중은 실험으로 측정한 값과 잘 일치하였다. 따라서 본 연구의 해석 결과에는 신뢰성을 부여할 수 있다.
- 2) 엘보우의 외호면에 감육부가 존재하는 경우에 대하여 엘보우가 닫히는 급힘하중을 가하여 얻은 반력-변위 선도 결과 감육폭이 작을 때는 크지 않으나, 감육폭이 커지면 감육길이와 최소두께의 영향이 함께 크게 나타난다.
- 3) 엘보우의 외호면에 감육부가 존재하는 경우

에 대하여 엘보우가 열리는 모드의 급힘하중을 가하여 얻은 반력-변위 선도 결과 감육폭이 비교적 작은( $90^\circ$ ) 경우에는 최소잔여두께의 영향이 거의 없으나, 감육부위가 넓어지면 최소두께의 영향을 크게 받는다.

4) 엘보우의 내호면에 감육부가 존재하는 경우에 대하여 엘보우가 닫히는 급힘하중을 가하여 얻은 반력-변위 선도결과 감육폭이  $90^\circ$  면 결합이 없는 엘보우의 경향과 크게 차이가 없지만, 최소잔여두께가 얇아질 경우에는 최대압축하중이 감소하여 두께의 영향이 크게 나타났다. 또한 감육부위가 넓어질수록 감육폭과 최소잔여두께의 영향이 커서 최대 압축하중이 급격히 떨어졌다.

5) 실제 발전소 배관의 엘보우에서 비파괴 검사에 의해 두께 감소가 탐지된 경우 감육부의 감육길이(L), 감육폭(2C) 및 감육깊이( $t-t_p$ )의 측정값으로부터 엘보우에 부가할 수 있는 최대 급힘하중의 저하율을 예측할 수 있는 평가식을 제안하였다.

**감사의 글 :** 본 연구는 지식경제부 에너지기술 혁신 프로그램의 일환으로 수행되었습니다(“차세대 에너지안전 첨단관리 시스템 구축” 연구단, 세부 과제번호 : 2007-M-CC23-P-11-0-000). 이 논문의 일부는 2008년도 중앙대학교 우수연구자 연구비 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

- 1) 이성호, 박치용, 이정근, 김범년, 김태룡, 외 11명, “감육배관 관리기술 최적화 및 적용 연구”, 한전전력연구원 보고서, A04NT02, 2006.
- 2) R. J. Jospin, “Displacement Estimates of Pipe Elbows Prior to Plastic Collapse Loads”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 178, pp. 165~178, 1997.
- 3) T. Ying, and M. Vernon, “Correlation of In-Plane Bending Test and FEA Results for Thin-walled Elbows,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 217, pp. 21~39, 2002.
- 4) T. L. Gerber, P. C. Riccardella, A. Y. Kuo, and D. R. Pitcairn, “Acceptance Criteria for Structural Evaluation of Erosion-Corrosion Thinning in Carbon Steel Piping”, EPRI NP-5911SP, 1988.
- 5) L. Zhang, Y. Wang and C. Liu, “Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, pp. 697~703, 2001.

- 6) A. Robertson, H. Li and D. Mackenzie, "Plastic Collapse of Pipe Bends under Combined Internal Pressure and In-plane Bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, pp. 407~416, 2005.
- 7) A. S. Mohab and Y. A. Y. Maher, "Nonlinear Analysis and Plastic Deformation of Pipe Elbows Subjected to In-Plane Bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, pp. 603~611, 1998.
- 8) 심상훈, 송정수, 윤기봉, 황경모, 진태은, 이성호, "CANDU형 원전 2차 배관의 침부식 감육관리 방법에 관한 연구", *한국에너지공학회지*, Vol. 11, No. 1, pp. 18~25, 2002.