

# TES 소성하중 기준의 감육엘보 기기건전성 평가

이성호<sup>†</sup>·박치용\*·이정근\*·박재학\*\*

## Integrity Evaluation of Thinned Elbow Based on TES Plastic Load

Sung-Ho Lee, Chi-Yong Park, Jeong-Keun Lee and Jai-Hak Park

**Key Words:** Thinned Elbow(감육엘보), Real Scale Failure Test(실 배관 실증실험), Finite Element Analysis(유한요소해석), TES(2배탄성구배)

### Abstract

Wall thinning defect due to flow accelerated corrosion is one of major aging phenomena in most power plant industries, and it results in reducing load carrying capacity of the piping systems. A failure testing system was set up for real scale elbows containing various simulated wall thinning defects, and monotonic in-plane bending tests were performed under internal pressure to find out the failure behavior of thinned elbows. Various finite element models were generated and analysed to figure out and simulate the behavior for other thinning shapes and loading conditions. This paper presents the decreasing trends of load carrying capacity according to the thinning dimensions which were revealed from the investigation of finite element analysis results. A mechanical integrity evaluation model for thinned elbows was proposed, also. This model can be used to calculate the TES plastic load of thinned elbows for general internal pressure, thinning location, and in-plane bending direction.

#### 기호설명

$D_o$  : 공칭외경  
 $R_b$  : 엘보의 곡률반경  
 $R_m$  : 엘보의 평균반경  
 $P$  : 내압  
 $t_n$  : 공칭두께  
 $t_m$  : 설계기준 최소요구두께  
 $t_p$  : 감육 배관 최소두께  
 $L$  : 축방향 감육길이

$L/D_o$ : 축방향 등가감육길이

$2\theta$  : 원주방향 감육폭

### 1. 서론

플랜트 배관계통에서 발생하는 국부적인 감육 현상(두께감소)은 배관요소의 건전성을 저하시키는 주요 요인이다<sup>(1)</sup>. 원전 배관계통의 경우 감육은 탄소강배관의 건전성을 저하시키는 대표적인 손상기구로 대두되고 있으며 원전 운전성과 배관계통의 구조 건전성 확보 차원에서의 중요한 관심 대상으로 대두되고 있다<sup>(2-3)</sup>.

배관의 감육결함에 대한 건전성 평가 연구는 주로 오일과 가스 배관을 대상으로 수행되었다<sup>(4-5)</sup>. 원전 배관을 대상으로 하는 연구는 1986년 미국 Surry 원전에서 감육결함에 의한 손상이 발생한 이후 1990년대부터 진행되었다. 이들 연구

† 회원, 한전전력연구원 원자력발전연구소  
E-mail : sungho@kepri.re.kr  
TEL : (042)865-5657 FAX : (042)865-5604

\* 한전전력연구원 원자력발전연구소

\*\* 충북대학교 안전공학과

에서는 다양한 형태의 실험적·해석적 접근이 이루어졌으며, 이를 기초로 감육결합에 대한 건전성 평가 모델들이 제시되었고 이들 중 일부 평가 모델들은 ASME 코드의 기준으로 채택되었다(6-9).

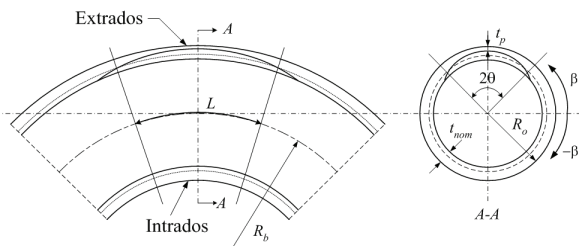
최근 유한요소해석을 기초로 감육결합이 존재하는 엘보에 대한 손상압력과 손상모멘트를 평가하기 위한 노력들이 일부 진행되고 있다(10-15). 또한 엘보 시편을 활용한 실 배관 실증실험 데이터를 확보하고 유한요소 모델을 생성 및 해석하여 실험결과와 비교 검토한 바 있다(16-17).

본 연구에서는 내압과 면내굽힘의 복합하중을 고려한 감육 엘보 실증실험 및 유한요소해석 결과로부터 2배탄성구배법(twice elastic slope method)에 기초한 하중지지능력 감소 거동을 고찰하였으며 이로부터 감육 엘보에 대한 기기건전성 평가 모델을 제시하고 설계시 고려하는 하중들과 비교 검토하였다.

## 2. 실 배관 손상하중 실증실험

### 2.1 실증실험 시편

실 배관 실증실험에 사용한 시편은 곡률반경 ( $R_b$ )이 공칭외경 ( $D_o$ )의 1.5배인 90° 엘보의 양단에 길이가 공칭외경 ( $D_o$ )의 5배인 직관을 연결하여 제작하였다. 엘보와 직관의 재료는 각각 ASTM A234 WPB와 ASTM A106 Gr.B이며, 공칭외경 114.3mm 공칭두께 8.56mm의 상용규격 배관요소를 사용하였다. Fig. 1에서와 같이 엘보 외호면(Extrados) 또는 내호면(Intrados)에 축방향 등가감육길이 ( $L/D_o$ ), 원주방향 감육폭 ( $2\theta/\pi$ ), 감육깊이 ( $(t_n - t_p)/t_n$ ) 등을 고려한 Table 1에 제시한 12종류의 3차원 타원형상 인공감육을 가공하였다.



(b) wall-thinning dimensions

Fig. 1 Dimensions of a wall thinned elbow specimen

### 2.2 실험절차 및 방법

Table 1 Specimens for combined load test

ID No.	Location	Length $L/D_o$	Width $2\theta/\pi$	Depth $(t_n - t_p)/t_n$
EX-1/IN-1	Extrados	Notch	0.5	0.53
EX-2/IN-2		0.25	0.5	0.53
EX-3/IN-3		1.0	0.5	0.77
EX-4/IN-4	Intrados	1.0	0.5	0.53
EX-5/IN-5		1.0	1.0	0.53
EX-6/IN-6		1.0	0.5	0.38

실증실험에 앞서 감육결합 가공이 완료된 시편의 외면에 일정한 간격으로 격자를 그리고 감육결합부를 중심으로 각 격자점에서 초음파 두께 측정 장비를 이용하여 두께를 측정하였다. 두께 측정이 완료된 시편에 물을 채우고 실험조건 내압 ( $P$ )인 10 MPa까지 가압하였으며 실험종료시까지 내압이 유지되도록 하였다. 본 실험에서는 Fig. 2에서와 같이 시편의 하단 끝단 중심인 [a] 지점을  $x, y, z$  방향으로 고정시켰으며 시편 상단 끝단 중심인 [b] 점에  $z$  방향으로 열림(open) 또는 닫힘(close) 방향으로의 변위제어를 통해 면내굽힘하중을 작용시켰다. 시편의 끝단에 설치한 로드 셀과 LVDT로부터 굽힘하중 방향으로의 변위와 하중을 취득하였다.

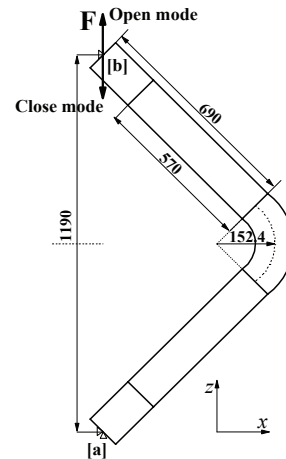


Fig. 2 Schematic of bending moment apply

## 3. 유한요소 모델링 및 해석

실증실험을 모사하기 위해 감육결합 위치, 축방향 등가감육길이, 원주방향 감육폭, 감육깊이 등의 감육형상을 고려하여 29개 종류의 모델을 생성하였는데 Fig. 3에 나타난 바와 같이 전체의 1/2를 모델링 하였다.

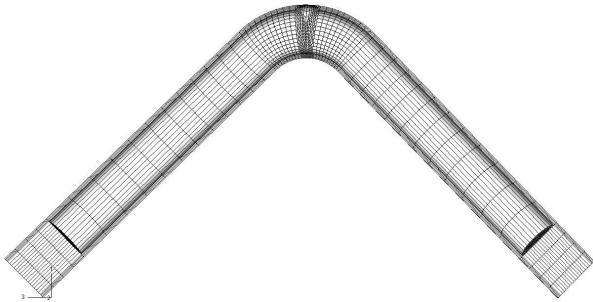


Fig. 3 Global view of finite element model

동 모델들에 대해 열림 또는 닫힘의 굽힘 방향과 설계규격상의 최대 압력 16.5 MPa를 고려하여 0, 10, 20 MPa의 내압을 반영한 총 174개의 모델로 확장한 유한요소 해석을 수행하였다.

ABAQUS 상용 프로그램을 활용한 각 유한요소 해석 모델에서 20 절점의 육면체 저감적분요소 (C3D20R), y-축방향 대칭 조건 등을 이용하였으며 두께를 따라 4개의 요소를 형성시켰다. ABAQUS에서의 MPC(multi point constraint)를 이용하여 모델 양 끝단의 모든 절점을 구속시켰다.

유한요소 모델에 적용한 물성치는 Table 2에 나타낸 바와 같으며, 실험 대상 엘보로부터 추출하여 제작된 시편으로부터 인장시험을 통해 확보한 Fig. 4에서의 진응력-진변형률 곡선을 적용하였다. 탄소성 해석에 감속부의 대변형과 응력-변형률 거동에 대한 기하학적 비선형성 옵션을 적용하였다. 1단계에서는 내압을 가한 후 2단계에서는 내압이 유지되면서 열림 방향 또는 닫힘 방향의 변위 조절을 통해 굽힘하중을 가하는 2단계 해석을 수행하였으며 이로부터 양 끝점에서의 반력과 변위를 얻어 하중-변위 곡선을 구하고 이를 회전각-모멘트 곡선으로 변환하였다.

#### 4. 유한요소해석과 실증실험과의 비교

##### 4.1 손상거동 고찰

Fig. 5에 유한요소 해석으로부터 얻은 각 감속 위치-굽힘방향 조합들에 대한 최대모멘트 시점에서의 하중분포를 비교하여 나타내었다.

Fig. 5(a)의 외호면감속-열림방향굽힘의 경우에는 비록 감속부인 외호면에서 좌굴손상이 먼저 시작되기는 하나 최대응력이 외호면 감속부에서 보다 내호면 외부에서 먼저 도달하며, 내호면 중심부의 반경방향으로의 전체 단면이 진인장장도

Table 2 Mechanical properties used in FEA

$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_u$ [MPa]	$\sigma_{ut}$ [MPa]	$E$ [GPa]	$\nu$ [-]
291.1	481.6	583.1	210	0.3

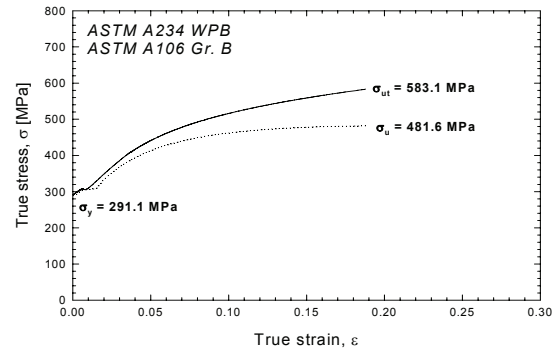


Fig. 4 True strain-stress curve used in elastic-plastic finite element analysis

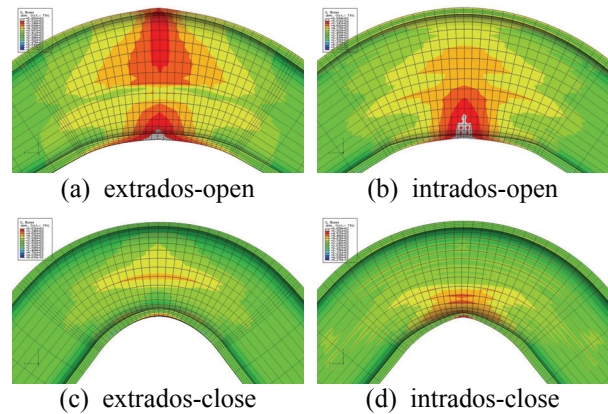


Fig. 5 Comparison of load distributions

( $\sigma_{ut}$ )에 도달한 이후 중심부에서의 두께가 줄어들기 시작하는 거동을 보였다.

이를 실증실험에서의 거동과 비교해 보면, 물론 절대값의 차이는 있지만 내호면 중심부의 두께가 줄어들기 시작하는 시점이 실험에서 내호면에 균열손상이 발생하였던 시점과 일치하였다.

Fig. 5(b)의 내호면감속-열림방향굽힘의 경우에는 최대응력이 외호면보다 내호면 감속부에서 먼저 도달하게 되며, 내호면 중심부의 반경방향으로의 전체단면이 진인장장도( $\sigma_{ut}$ )에 도달한 이후 중심부에서의 두께가 줄어들기 시작하는 거동을 보였다. 이를 실증실험에서의 거동과 비교해 보면, 내호면 중심부의 두께가 줄어들기 시작하는 시점이 내호면에서 균열손상이 발생하였던 시점

과 일치하였다. 본 조건에서는 외호면에서의 좌굴손상은 발생하지 않았다.

Fig. 5(c)의 외호면감육-단힘방향굽힘의 경우에는 감육부인 외호면과 건진부인 내호면에서보다 크라운 영역에서 전단면변형 손상이 먼저 시작되고 지속적으로 굽힘하중이 가해진 후 내호면에서 좌굴손상이 시작되는 거동을 보였다. 이 경우에는 전인장장도( $\sigma_{ut}$ )에 도달한 부위는 나타나지 않았으며 감육부인 외호면에서의 반경방향으로의 두께변화는 보이지 않았다. 이를 실증실험에서의 거동과 비교해 보면 단힘방향으로의 최대변위 상태에서도 균열손상이 발견되지 않으나 크라운 영역에서의 전단면변형 손상과 건진부인 내호면에서 좌굴손상을 보였던 것과 일치하였다.

Fig. 5(d)의 내호면감육-단힘방향굽힘의 경우에는 내호면 감육부에서 좌굴손상이 먼저 시작된 이후에 내호면에 가까운 크라운 영역에서 전단면변형 손상이 시작되는 거동을 보였다. 이 경우에는 감육부인 내호면 외측에서 전인장장도( $\sigma_{ut}$ )에 도달하기 시작하였으나 감육부인 내호면에서의 반경방향으로의 두께변화는 보이지 않았다. 이를 실증실험에서의 거동과 비교해 보면, 단힘방향으로의 최대변위 상태에서도 균열손상이 발생하지 않으나 크라운 영역에서의 전단면변형 손상과 감육부인 내호면에서의 좌굴손상을 보였던 것과 일치하였다.

#### 4.2 회전각-모멘트 곡선 거동 고찰

Fig. 6에 실증실험과 유한요소해석 결과 간의 회전각-모멘트 곡선을 각 감육위치-굽힘방향 조합에 대해 비교하여 제시하였다.

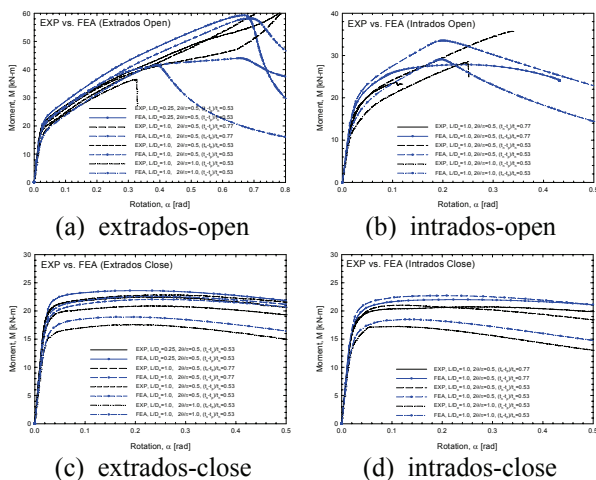


Fig. 6 Comparison between experiment and FEA

Fig. 6에서의 회전각-모멘트 곡선들은 Fig. 7에서와 같이 탄성영역 내의 하중에 해당하는 1배탄성구배법에 기초한 OES(once elastic slope) 탄성모멘트와 2배탄성구배법에 기초한 TES(twice elastic slope) 소성모멘트, 균열손상에 해당하는 불안정모멘트 등의 특성을 보이고 있다. TES 소성모멘트의 경우 Fig. 6에서와 같이 최대 (-)7.2%~(+16.5%의 범위에서 유한요소해석 모델이 실 배관 실증실험을 잘 모사하고 있다.

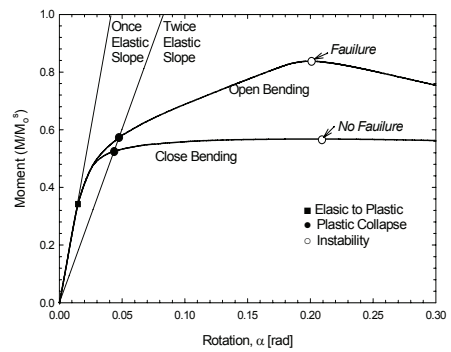


Fig. 7 Load definitions for bending moment

#### 5. TES 소성모멘트 감소 거동

Fig. 8에 감육 없는 엘보 대비 공칭두께의 77%가 감육( $(t_n - t_p)/t_n = 0.77$ ) 된 엘보의 축방향 증가감육길이( $L/D_o$ ) 및 원주방향 감육폭( $2\theta/\pi$ ) 변화에 따른 TES 소성모멘트 비의 감소 거동을 각 감육위치-굽힘방향 조합에 대해 비교하여 제시하였다.

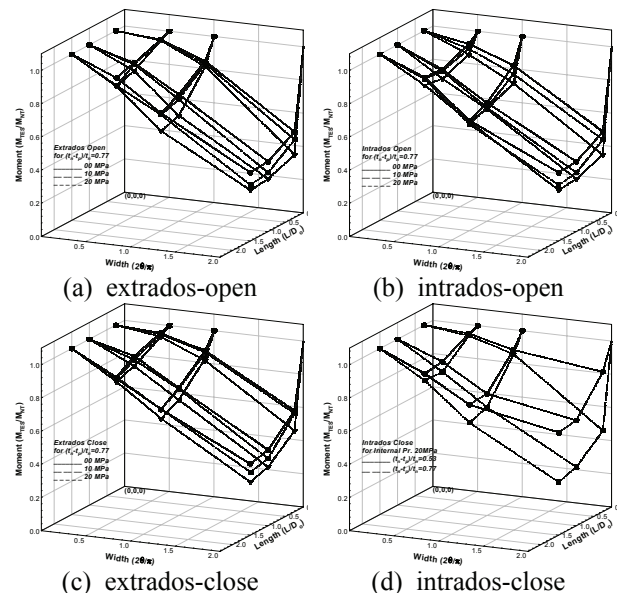


Fig. 8 Comparison of moment ratio

Fig. 8에서와 같이 내호면 또는 외호면에서의 최대 감육인 축방향 등가감육길이  $L/D_o=1.5$ , 원주방향 감육폭  $2\theta/\pi=1$ , 감육깊이  $(t_n - t_p)/t_n = 0.77$ 인 경우에는 감육이 없는 엘보의 TES 소성모멘트 대비 최대 60% 수준으로 감소하는 경향을 보였으며, 외호면 감육의 경우가 내호면 감육의 경우에 비해 약 5% 정도 적게 감소하는 경향을 보였다. 한편, 상기와 동일한 축방향 등가감육길이 및 감육깊이에 대해 원주방향으로 전체가 감육된 즉 원주방향 감육폭  $2\theta/\pi=2$ 인 경우에는 감육이 없는 엘보의 TES 소성모멘트의 30% 수준으로 크게 감소하는 경향을 보였다.

## 6. 감육엘보 기기건전성 평가 모델

내압과 면내굽힘의 복합하중을 받는 감육 엘보에 대한 TES 소성모멘트  $M_L$ 를 굽힘하중 만 작용하는 TES 소성모멘트  $M_o$ 와 내압에 대한 무차원 값인  $p(P/((t_n\sigma_y)/R_m))$ 의 2차 곡선의 곱인 식(1)로 나타내었으며  $m$ 과  $n$ 은 각 감육위치-굽힘방향 조합에 대해 축방향 등가감육길이, 원주방향 감육폭, 감육깊이의 함수로 나타내었다. Correction Factor는 열림과 닫힘의 굽힘방향에 대해 각각 0.8과 0.9를 적용하여 최종 결과가 실증 실험 및 유한요소해석에서의 TES 소성모멘트를 모두 포함할 수 있도록 하였다. 식(2)에서의 감육엘보에 대한 TES 소성모멘트  $M_o$ 는 감육이 없는 엘보의 TES 소성모멘트  $M_{NT}$ 로부터 축방향 등가감육길이의 증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 경향을 반영하였다.  $f_o$ 는 축방향 등가감육길이 0인 경우의 TES 소성모멘트로서 그 값은 1로 하였다.  $f_\infty$ 는 감육길이( $L$ )가 공칭외경( $D_o$ )에 비해 충분히 긴 경우의 TES 소성모멘트로서 축방향 등가감육길이  $L/D_o \approx 2$ 에서 수렴하도록 하였고 각 감육위치-굽힘방향 조합에 대해 원주방향 감육폭과 감육깊이의 함수로 나타내었다.

$$M_L = \text{Correction Factor} \times M_o(m p^2 + n p + 1) \quad (1)$$

$$M_o = M_{NT} \left[ (f_o - f_\infty) \exp\left(-3.0 \frac{L}{D_o}\right) + f_\infty \right] \quad (2)$$

## 7. 설계하중과의 비교

설계허용 최대굽힘하중과의 비교를 위하여 내압  $P=10\text{MPa}$ 인 경우에 대해 축방향 등가감육길이  $L/D_o=1.5$ , 감육깊이  $(t_n - t_p)/t_n=0.77$ 의 감육형상에 대해 감육위치, 굽힘방향, 원주방향 감육폭에 따른 식(1)의 단계별 계산결과와 TES 소성모멘트( $M_L$ )을 Table 3에 요약하여 제시하였다.

**Table 3** Comparison of moments [kN-m]

Item	EX-OP	IN-OP	EX-CL	IN-CL	360-OP	360-CL
$M_{NT}$	24.840	24.840	21.446	21.446	24.840	21.446
$f_o$	1					
$f_\infty$	0.708	0.663	0.696	0.644	0.413	0.429
$M_o$	17.598	16.474	14.932	13.813	10.261	9.209
$C.F$	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9
$p$	0.212					
$m$	-1.838	0	-1.815	0	0.543	-0.949
$n$	0.285	-0.189	0.448	-0.044	-1.093	-0.223
$M_L$	13.817	12.637	14.498	13.150	6.609	7.644
$M_{OES}$	7.599	6.824	9.279	8.811	N/A	N/A
$M_A$	4.73					
$M_A + M_B$	5.77					
$M_C$	7.85					

Table 3에서와 같이 엘보의 원주방향 감육폭이 1.0인 경우 공칭두께의 77%가 감육되어도 TES 소성모멘트는 설계허용 최대굽힘하중에 비하여 최대 2배 높은 것으로 나타났다. 또한 하중 조건별 OES 탄성모멘트는 어느 설계허용 최대굽힘하중들 보다 높게 나타나는데 이는 설계시 고려한 지속하중 및 일시적하중이 감육된 엘보에 가해지더라도 소성변형뿐만 아니라 균열손상 없이 충분히 견디어 낼 수 있음을 의미한다.

원주방향 감육폭이 2.0인 경우의 TES 소성모멘트는 설계허용 최대굽힘하중보다 크기는 하나 그 차이는 크지 않다. 이는 원주방향 전체가 공칭두께의 77%로 감육된 엘보는 설계시 고려한 지속하중 및 일시적하중이 감육된 엘보에 가해지면 소량의 소성변형이 발생하기는 하나 균열손상은 발생하지 않은 상태에서 하중을 견디어 낼 수 있음을 의미한다.

## 8. 결 론

본 연구에서는 내압과 면내굽힘의 복합하중을 받는 감육 엘보에 대한 실증실험, 유한요소해석, 회전각-모멘트 거동 분석, 설계허용 최대굽힘하중과의 비교 등을 통하여 다음의 결론을 얻었다.

감육 엘보의 기기건전성 평가 기준은 소량의 소성변형을 허용하더라도 균열손상 발생을 배제할 수 있는 TES 소성모멘트로 설정하는 것은 타당성이 있다.

감육 엘보를 TES 소성모멘트에 기준하여 관리하게 되면, 외호면 또는 내호면에서 공칭두께의 77%가 감육 된 경우에는 감육 없는 엘보에 대한 설계허용 최대굽힘하중이 작용하더라도 소성변형 없이 견디어 낼 수 있으나 원주방향 전체가 감육 된 경우에는 설계허용 최대굽힘하중이 작용하게 되면 소량의 소성변형은 발생할 수 있으나 균열손상은 발생하지 않는다.

## 참고문헌

- (1) Chexal, B., Horowitz, J., Dooly, B., Millett, P., Wood, C. and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," *EPRI TR-106611-R2*
- (2) WANO, "Flow-Accelerated Corrosion", 2006, *Significant Event Report 2006-1*
- (3) INPO, "Flow-Accelerated Corrosion", 2006, *Engineering Program Guideline*
- (4) Colson, K.E.W. and Worthington, R.G., 1990, "New Guidelines Promise More Accurate Damage Assessment," *Gas & Oil J.*, Vol. 32, pp. 41~44
- (5) Kiefner, J.F. and Vieth, P.H., 1990, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," *Oil & Gas J.*, Vol. 32, pp. 56~59
- (6) Deardorff, A.F. and Bush, S.H., 1990, "Development of ASME section XI criteria for erosion-corrosion thinning of carbon steel piping," *PVP-Vol-186, NDE-Vol.7*, pp. 71~75
- (7) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec. XI, Div. 1, ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," 1998 ed.
- (8) Zhang, L., Wang, Y., Chen, J. and Liu, C., 2001, "Evaluation of Local Thinned Pressurized

Elbows," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol.78, pp. 697~703

- (9) Draft for ASME Sec. XI, App. X, "Analytical evaluation of internal or external wall thinning in piping systems," 2003, rev.8
- (10) Lim, H., Shim, D.J., and Kim, Y.J., 2003, "Development of Methodology for Locally Corroded Pipe Using Reference Stress Concept," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1200~1209
- (11) Kim, J.W., Park, C.Y. and Kim, B.N., 2001, "Evaluation of Local Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 25, No. 1, pp. 81~88
- (12) Park, C.Y., Lee, S.H. and Kim, J.W., 2005, "Comparison of Applicable Code for Integrity Evaluation of Wall Thinning Damage in the Piping," *Proc. of the KSME 2005 Spring Annual Meeting*, pp. 243~248
- (13) Kim, Y.J. and Oh, C.S., "Limit Loads for Pipe Bends under Combined Pressure and In-Plane Bending based on Finite Element Limit Analysis", 2006, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, pp. 148~153
- (14) Oh, C.S. and Kim, Y.J., "Closed-Form Plastic Collapse Loads of Pipe Bends under Pressure and In-Plane Bending", 2006, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP-ICPVT11-93770*
- (15) Lee, S.H., Lee, J.K. and Park, J.H., 2007, "Failure Behavior of Thinned Elbows According to Circumferential Thinning Width and Position under Internal Pressure and In-Plane Bending", *Trans. of the KPVP*, Vol. 3, No. 1, pp. 74~80
- (16) Lee, S.H., Lee, J.K. and Park, J.H., 2008, "Behavior of TES Plastic Loads of Locally Thinned Elbow in Real-Scale Failure Test under Combined Load", *Proc. of the KSME 2008 Spring Annual Meeting*, pp. 179~184
- (17) Lee, S.H., Shin, K.I., Lee, K.H. and Park, J.H., 2008, "Finite Element Modeling and Analysis for Failure Test under Combined Load of Locally Thinned Elbow", *Proc. of the KSME 2008 Spring Annual Meeting*, pp. 496~501