

감육 결함의 원주방향 위치에 따른 엘보우의 붕괴 거동 평가

이장곤 · 김진원

조선대학교 원자력공학과

1. 서 론

원자력 발전소는 수많은 배관계통으로 구성되어 있는데, 이들 배관계통에는 배관의 적절한 배열과 다양한 운전 하중에 대한 배관계통의 유연성을 높이기 위해 여러 형태의 엘보우들이 적용되고 있다. 또한, 엘보우는 탄성영역 이상의 과도한 하중조건에서도 국부적인 소성 변형에 의해 에너지를 흡수함으로써 배관계통 전체의 건전성을 유지할 수 있도록 하는 역할을 한다¹⁾. 따라서, 붕괴 하중을 초과하지 않는 범위에서 엘보우에 대한 건전성을 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 다양한 운전 조건에서 엘보우의 안전 여유도를 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다.

그러나 원전 배관계통에서 엘보우는 다양한 형태의 기계적 또는 재료적인 열화 손상에 노출되어 있다. 특히, 탄소강 배관의 경우 유동 가속 부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)으로 배관의 두께가 얇아지는 감육 결함의 발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있다²⁾. 따라서 가동 중 배관계통에 대한 건전성 확보를 위해 엘보우 거동에 미치는 감육 결함의 영향을 정확히 파악하는 것이 중요하다.

원전 배관의 감육 결함에 대한 건전성 평가와 관련한 많은 실험적·이론적 연구들이 1990년대 이후 수행되었다. 그러나, 대부분 직관에 존재하는 감육 결함을 대상으로 하였으며³⁻⁵⁾, 엘보우에 대해서는 최근 일부 연구가 진행되었다⁶⁻⁸⁾. 보우 감육에 대한 최근의 연구들은 90° 엘보우의 외면 전체가 감육된 경우를 고려하거나 내부 감육 결함의 경우에는 외호면(Extrados)과 내호면(Intrados)에 결함이 존재하는 것을 가정하여 평가되었다. 그러나 실제 엘보우에서 감육 결함은 외호면과 내호면 뿐만 아니라 엘보우 측면 등 다양한 위치에서 발생하는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 감육 결함의 원주방향 위치에 따른 엘보우 붕괴 거동을 평가하고자 한다. 특히, 엘보우 측면에 존재하는 감육 결함의 다양한 형상, 내압과 엘보우의 작용하중 방향에 따른 탄소성 유한요소 해석을 수행하고, 이 결과로부터 감육 결함의 원주 방향 위치에 따른 엘보우의 모멘트-회전 거동과 붕괴모멘트 변화 등을 비교·평가하였다.

2. 해석방법

2.1 해석 조건

감육 결함의 원주방향 위치에 따른 엘보우의 거동을 평가하기 위해서, 본 연구에서는 외경(D_0)이 400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm이고, 곡률 반경(R_b)이 배관 평균 반경(R_m)의 3배인 90° 엘보우를 대상으로 해석을 수행하였다. 엘보우의 외호면(Extrados), 내호면(Intrados), 측면(Crown) 내부에 존재하는 감육 결함을 가정하였으며, 해석에 적용된 결함의 형상은 Table 1에 정리된 것과 같다. 여기서 결함의 형상은 배관의 두께가 설계코드의 최소설계요구두께(t_{min}) 이하인 영역의 크기를 나타낸 것이다. 결함 길이(L)는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 측면 위치에서의 등가 길이로 실제의 엘보우에 존재하는 결함 길이는 결함의 위치에 따라 다른 값을 가진다.

Table 1. Matrix for FE analysis of wall thinned elbow

Location	Loading Type	R_b/R_m	Thinning Length L/D_0	Minimum Thickness, t/t_{min}	Thinning Angle, θ/π
Extrados	Closing	3	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25, 0.5, 0.75	0.0694, 0.125, 0.25, 0.50
	Opening				
Intrados	Closing	3	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25, 0.5, 0.75	0.0694, 0.125, 0.25, 0.50
	Opening				
Crown	Closing	3	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25, 0.5, 0.75	0.0694, 0.125, 0.25, 0.50
	Opening				

엘보우에 작용되는 하중은 내압과 굽힘 하중이 동시에 작용되는 조건을 가정하였으며, 작용 내압으로는 0, 5, 10, 15, 20MPa를 고려하였다. 굽힘 하중은 In-plane상에서 엘보우를 닫아주는 경우(닫힘 모드)와 퍼주는 경우(열림 모드)를 각각 고려하였다.

2.2 유한요소모델

Fig. 2는 해석에 사용된 3차원 유한요소모델을 나타낸 것으로 엘보우의 대칭성을 고려하여 1/2만을 모델 하였다. 엘보우 거동에 미치는 연결 배관의 영향을 최소화하기 위해서, 엘보우에 연결된 배관부는 배관 직경에 비해 충분히 길게 모델링 하였다⁸⁾. 유한 요소는 20절점의 Brick 요소가 적용되었으며, 모델을 구성하는 요소 수와 절점 수는 각각 3320과 17175이다. 엘보우의 1/2만을 모델링 함에 따라 Fig. 2에서 나타낸 것과 같은 대칭경계조건이 적용되었으며, 굽힘을 적용하기 위해서 배관 끝단의 모든 절점을 MPC Option을 적용하여 구속한 후 회전시켰다. 내압은 굽힘 모멘트를 적용하기 전에 분포하중 형태로 곡관의 내면에 작용되었다. 해석은 범용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 엘보우에서 단면 변형과 좌굴 현상을 고려하기 위해 대변형 조건(Option)을 사용하였다. 해석에 적용된 배관의 재료 물성치는 $E=206$ GPa, $\sigma_y=302.0$ MPa, $\sigma_u=462.0$ MPa 이다.

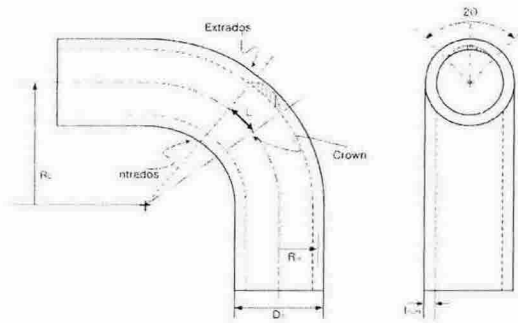


Fig.1 Definition of dimensions of wall thinning defect in elbow

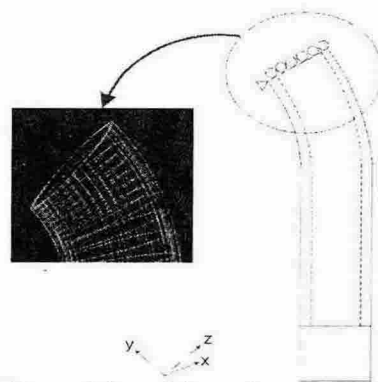


Fig.2 FE model and boundary conditions employed in the present analysis

2.3 붕괴모멘트 계산

본 연구에서는 엘보우의 모멘트-회전 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 Offset선과 모멘트-회전 곡선이 교차하는 모멘트 값을 붕괴모멘트(M_c)로 정의하였다^{1,8)}. 모멘트-회전 곡선과 Offset선의 교차점 보다 작은 회전각에서 최대 모멘트가 나타나는 경우에는 최대 모멘트를 붕괴모멘트로 정의하였다.

3. 해석결과 및 토의

3.1 엘보우의 모멘트-회전 거동

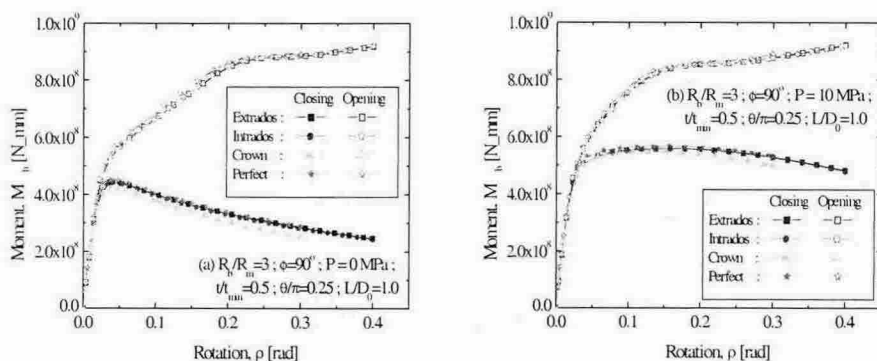


Fig.3 Moment-rotation behavior of not thinned and locally thinned elbow

감속 결합의 원주방향 위치에 따른 엘보우 변형 거동을 살펴보기 위해서, 굽힘 하중에 대한 엘보우의 모멘트-회전 거동을 살펴보았다. Fig. 3은 결합이 존재하지 않는 건전 엘보우와 각각 외호면, 내호면, 측면에 $t/t_{\min}=0.5$, $\theta/\pi=0.25$, $L/D_0=1.0$ 인 결합을 가진 엘보우에 대한 모멘트-회전 곡선을 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 것과 같이 닫힘 모드 하중에서는 회전각 증가에 따라 모멘트가 증가하다 감소하는 경향을 보였으며, 열림 모드 하중에서는 회전 각 증가에 따라 모멘트가 계속 증가하는 경향을 보였다. 또한, 내압이 작용되는 경우에는 모멘트-회전 곡선이 약간씩 증가하는 거동을 보였으며, 특히 닫힘모드의 굽힘이 작용되는 경우에 뚜렷한 증가를 보였다. 굽힘 하중에 따른 이러한 변형 거동은 결함의 유무와 결함 위치에 관계없이 거의 유사하게 나타났다. 다만, 결함이 존재하는 경우, 모멘트-회전 곡선에서 모멘트 값이 약간씩 저하하였으며, 결함에 의한 모멘트 저하 정도는 닫힘 모드 하중에서는 내압에 상관없이 외호면, 내호면, 측면 순서로 모멘트가 낮았다. 열림 모드 하중에서는 내압이 없는 경우 내호면, 외호면, 측면 순서로 낮고, 내압이 작용되는 경우 외호면, 내호면, 측면 순서로 낮은 경향을 보였다.

3.2 붕괴모멘트 거동

3.2.1 결함 깊이에 따른 결함 위치의 영향

Fig. 4는 각 결함 위치에서 결함 깊이에 따른 붕괴모멘트 변화를 살펴보기 위해서, 폭과 길이가 $\theta/\pi=0.25$, $L/D_0=1.0$ 인 감육 결함을 가진 엘보우의 붕괴모멘트를 건전 엘보우의 붕괴모멘트로 무차원화하여 결함의 두께에 따라 나타낸 것이다.

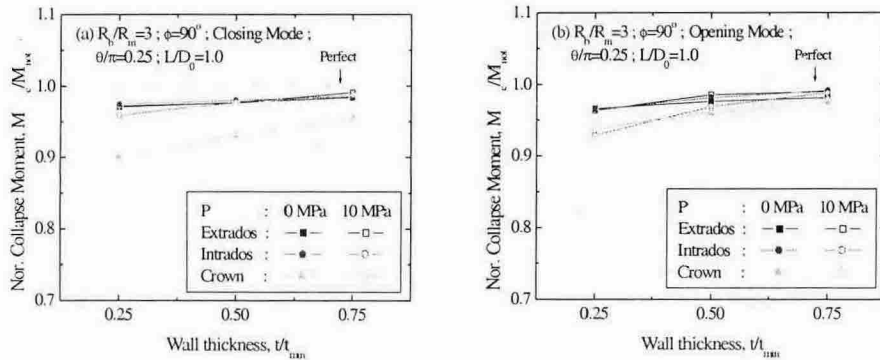


Fig.4 Effect of depth of wall thinning defect on the defect location of wall thinned elbow

Fig. 4(a)에서 알 수 있는 바와 같이 닫힘 모드 하중의 경우에는 전체적으로 결함 깊이에 따라 붕괴모멘트의 비가 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 내압이 작용하지 않는 측면 결함을 제외하면, 모든 결함 깊이에서 붕괴모멘트의 비가 비슷한 값을 보였다. 그러나, 내압이 없는 측면 결함의 경우에는 다른 조건에 비해 결함 깊이에 따른 변화가 크게 나타나며, 전체적으로 낮은 붕괴모멘트 비를 보였다. 열림모드 하중이 작용되는 경우에도 Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 결함 깊이에 따라 붕괴모멘트의 비는 거의 선형적으로 감소하였다. 이 경우에는 결함이 내호면에 위치하고 내압이 작용될 때 결함 깊이에 따른 변화가 크게 관찰되었다. 측면 결함의 경우에는 다른 결함 위

치에 비해 전체적으로 낮은 붕괴모멘트 비를 보였으며, 닫힘 모드에 비해 내압에 따른 변화가 거의 없었다.

따라서 건전 엘보우와 비교하여 결함 깊이에 따른 감육 엘보우의 붕괴모멘트 감소는 결함의 위치에 관계없이 거의 선형적으로 나타났으며, 굽힘 방향에 따라 다소 차이는 있지만 모든 결함 깊이에서 결함이 측면에 위치할 때 붕괴모멘트의 감소가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2.2 결함 길이에 따른 결함 위치의 영향

Fig. 5는 각 결함 위치에서 결함 길이에 따른 영향을 살펴보기 위해서 $t/t_{\min}=0.5$, $\theta/\pi=0.25$ 인 감육 결함을 가진 엘보우의 붕괴모멘트를 건전 엘보우의 붕괴모멘트로 무차원화하여 결함 길이에 따라 나타낸 것이다.

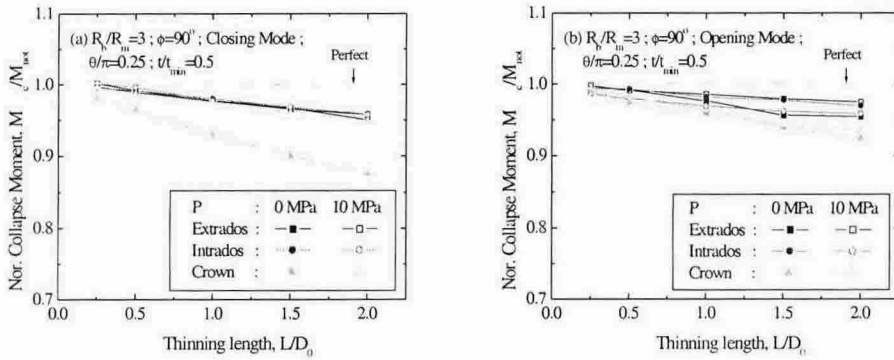


Fig.5 Effect of length of wall thinning defect on the defect location of wall thinned elbow

Fig. 5(a)에서 알 수 있는 것과 같이 닫힘모드 하중조건에서 결함 길이가 증가함에 따라 붕괴모멘트의 비가 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 결함 깊이에 따른 변화와 유사하게 내압이 작용되지 않는 측면 결함을 제외하면 결함 길이에 따른 붕괴모멘트 비는 모든 조건에서 유사하였고, 내압이 작용되지 않는 측면 결함에서 길이 변화에 따른 영향이 가장 크고 붕괴모멘트 감소가 가장 심하게 나타났다. 열림모드 하중이 작용되는 경우에는 내압과 무관하게 내호면, 외호면과 비교하여 결함 길이에 따른 붕괴모멘트의 감소가 가장 크게 관찰되었다 (Fig. 5(b)). 또한, 외호면 결함과 내호면 결함에 비해 내압에 의한 영향이 작게 나타났다.

따라서, 건전 엘보우와 비교하여 감육 결함에 의한 붕괴모멘트 감소는 결함 위치와 무관하게 결함 길이에 따라 거의 선형적으로 변화하였다. 또한, 결함에 의한 붕괴모멘트 감소는 굽힘 방향에 따라 차이는 있지만 전체적으로 측면 결함에서 가장 크게 나타났으며, 특히 내압이 없이 닫힘모드 굽힘이 작용되는 경우에 뚜렷한 감소를 보였다.

3.2.3 결함 폭에 따른 결함 위치의 영향

Fig. 6은 $t/t_{min}=0.5$, $L/D_0=1.0$ 인 감육 결함을 가진 엘보우의 붕괴모멘트를 건전 엘보우의 붕괴모멘트로 무차원화하여 결함의 원주방향 폭에 따라 나타낸 것이다.

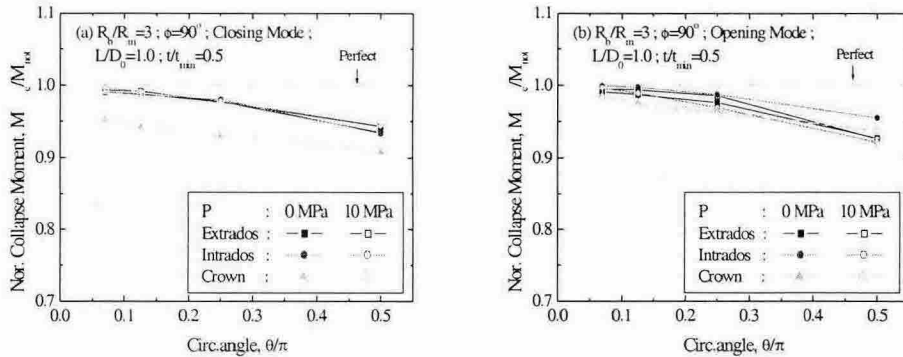


Fig.6 Effect of circumferential angle of wall thinning defect on the defect location of wall thinned elbow

그림에서 알 수 있는 것과 같이 굽힘 하중의 방향에 관계없이 외호면과 내호면 결함에 비해 측면 결함에서 원주방향 결함 폭에 따른 붕괴모멘트 비의 변화가 작은 것으로 나타났다. 즉, 엘보우 측면에 존재하는 감육 결함의 경우에 원주방향 결함 폭에 따른 붕괴모멘트의 감소가 외호면 또는 내호면에 존재하는 감육결함에 비해 작았다. 그러므로, 원주방향 결함의 폭이 $\theta/\pi=0.25$ 이하에서는 측면 결함에서 붕괴모멘트의 비가 가장 낮지만, 그 이상에서는 다른 위치의 결함이 보다 낮은 붕괴모멘트 비를 보였다.

따라서, 결함의 폭이 작은 경우에는 결함이 측면에 위치하는 경우 결함에 의한 붕괴모멘트의 감소가 가장 크게 나타나지만, 그 이상에서는 외호면이나 내호면에 결함이 존재할 때 결함에 의한 붕괴모멘트의 감소가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2.4 내압에 따른 결함 위치의 영향

Fig. 3~Fig. 6의 결과에서 단힘모드 하중에서는 측면에 결함이 위치한 경우 내압에 따른 차이가 크게 관찰되었다. 반면, 열림 모드 하중에서는 결함이 내호면에 위치한 경우 내압에 따라 변화가 상대적으로 크고, 측면 결함에서는 내압에 따른 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, $t/t_{min}=0.5$, $\theta/\pi=0.25$, $L/D_0=1.0$ 인 감육 결함을 가진 엘보우에 대한 붕괴모멘트 비를 결함의 위치별로 내압에 따라 살펴보았다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 단힘모드 하중에서는 결함이 각각 외호면과 내호면에 위치한 경우, 내압의 증가에 따라 붕괴모멘트 비가 약간 증가하다가 감소한 반면 결함이 측면에 위치한 경우는 내압에 따라 계속 증가하는 경향을 보였다. 열림 모드 하중의 경우에는 전체적으로 내압이 증가함에 따라 약간 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 결함이 외호면과 측면에 존재하는 경우에 비해 내호면에 위치한 경우에는 상대

적으로 낮은 내압에서 붕괴모멘트 비가 감소하는 경향을 보였다.

단힘모드 하중에서 측면 결함이 다른 위치의 결함과 달리 내압이 증가함에 따라 붕괴모멘트의 감소 정도가 작아지는 것은 측면 결함이 다른 결함 위치에 비해 단면변형에 취약한데 내압이 이러한 단면 변형을 억제하기 때문으로 판단된다.^{(9),(10),(11)} 한편, 열림모드 하중에서 내호면 결함이 다른 결함 위치에 비해 낮은 내압에서 붕괴모멘트의 감소가 크게 나타났다. 이것은 내호면이 다른 위치에 비해 내압의 의한 응력이 높고, 이것이 굽힘 하중에 의해 작용되는 결함부의 인장응력을 더욱 증가시켜 붕괴를 촉진하기 때문에 보다 낮은 압력에서 내압의 영향이 뚜렷이 나타나는 것이다.^{3,5,7)}

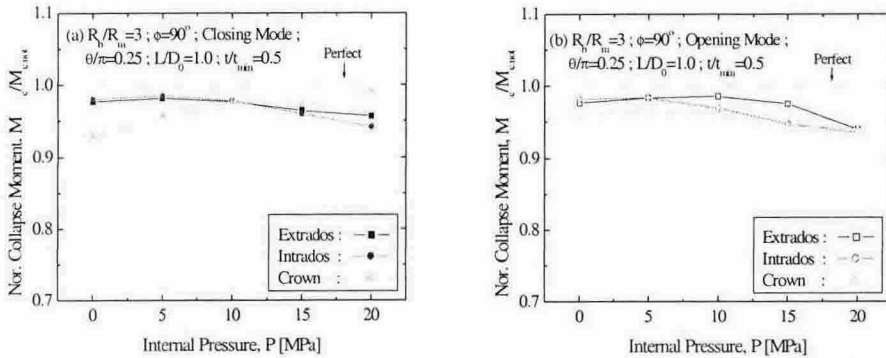


Fig.7 Effect of internal pressure on the defect location of wall thinned elbow

4. 결론

본 논문에서는 감육 결함의 원주방향 위치에 따른 엘보우의 붕괴거동을 살펴보기 위하여, 결함의 위치에 따라 다양한 결함 형상, 내압, 그리고 하중조건에서 탄소성 유한요소 해석을 수행하고 붕괴 거동을 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단힘모드 하중조건에서 내압이 작용되는 경우에는 결함의 위치에 관계없이 결함에 따른 붕괴모멘트의 감소가 결함 형상(깊이, 길이, 폭 등)에 따라 유사하였으며, 내압이 작용하지 않는 경우에는 측면 결함이 다른 경우에 비해 크게 나타났다.

(2) 열림모드 하중 조건에서는 측면 결함이 내압에 상관없이 다른 위치에 비해 결함 깊이와 길이에 따른 감소가 뚜렷하였으며, 결함의 원주방향 폭에 따른 변화는 완만하게 감소하는 경향을 나타낸다. 또한, 다른 위치에 비해 측면 결함에서 결함에 의한 붕괴모멘트 감소가 크게 나타났다.

(3) 엘보우의 굽힘 방향에 따라 다소 차이는 있지만, 결함에 의한 붕괴모멘트의 감소는 결함이 외호면과 내호면에 위치한 경우는 내압의 증가에 따라 약간 감소하다가 증가하는 경향을 보인 반면, 측면 결함의 경우는 단힘 모드 하중에서는 내압의 증가에 따라 감소하며, 열림 모드 하중에서는 감소하다가 증가되었다.

참고문헌

- (1) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., "Limit loads for pipe elbows subjected to in-plane opening moments and internal pressure," J. of Press. Ves. Tech., Vol.121, pp 17~23, 1999
- (2) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI/TR-106611-R2, 1998
- (3) Miyazaki, k., kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H., and Ando, K., "Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load," Nucl. Eng. & Des, Vol. 191, pp 195~204, 1999
- (4) Wilkowski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B., and Rudland, D., "Progress In Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas and Pipe and Piping Components," Nucl. Eng. & Des., Vol. 195, pp 149~169, 2000
- (5) Kim, J. W., Park, C. Y., "An Evaluation of Failure Behavior of Pipe with Local Wall Thinning by Pipe Experiment," Trans. of KSME (A), Vol. 26, No.4, pp 731~738, 2002
- (6) Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., K., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., "Fracture behavior of straight pipe and elbow with local wall thinning," Nucl. Eng. & Des, Vol. 211, pp 91~103, 2002
- (7) Kim, J. W., Kim, T. S., Park, C. Y., "An Evaluation of The Effect of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow," Trans. of KSME (A), Vol. 28, No.4, pp 402~409, 2004
- (8) Kim, J. W., Kim, T. S., Park, C. Y., "Effect of Internal Pressure on the Behavior of Wall Thinned Elbow under In-Plane Bending," Proceedings of the KSME 2004 spring annual meeting, KSME-04S046, pp 61, 2004
- (9) Yu, L., and Martzen, V.C., "B₂ stress index for elbow analysis," Nucl. Eng. & Des, Vol. 192, pp 261~270, 1999
- (10) Chattopadhyay, J., "The effect of internal pressure on in-plane collapse moment of elbows," Nucl. Eng. & Des, Vol. 212, pp 133~144, 2002
- (11) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., "Nonlinear analysis and plastic deformation of pipe elbows subjected to in-plane bending," I. J. of Press. Ves. & Pip., Vol.75, pp 603~611, 1998