

< 논문 >

감육 곡관의 붕괴거동에 미치는 곡관 굽힘각의 영향

김진원* · 나만균*

(2006년 4월 4일 접수, 2006년 7월 14일 심사완료)

Effect of Bend Angle on the Collapse Behavior of Locally Wall Thinned Pipe Bends

Jin-Weon Kim and Man-Gyun Na

Key Words: Bend Angle(굽힘각), Pipe Bend(곡관), Collapse Behavior(붕괴거동), Local Wall Thinning(국부감육)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of bend angle on the collapse behavior of locally wall thinned pipe bends. For this purpose, the present study performed three-dimensional finite element analysis on the 30-, 60-, and 90-degree pipe bends with local wall thinning at the center of intrados, extrados, and crown, and evaluated the collapse moment for different thinning dimensions under closing- and opening-mode bending with a constant internal pressure. The results showed that, for intrados and extrados wall thinning, the reduction in the collapse moment due to local wall thinning became significant with decreasing bend angle of pipe bends. This effect of bend angle was enhanced with increasing thinning dimensions, and it was clearer for opening-mode bending than for closing-mode bending. For crown wall thinning, however, the effect of bend angle was unclear and was less sensitive to the change of wall thinning shapes.

1. 서론

발전소의 배관계통에는 다양한 형태의 곡관들이 사용되고 있다. 이들 곡관은 배관의 배치를 자유롭게 할 수 있도록 할 뿐 아니라, 배관계통의 유연성을 높여줌으로써 열팽창이나 앵커이동에 대한 반력을 감소시켜 배관계통이 탄성 범위에서 거동할 수 있도록 한다. 또한, 지진과 같이 과도한 천이하중이 작용될 때, 국부적인 소성변형을 통해 에너지를 흡수함으로써 전체 배관계통의 손상을 방지하는 역할을 한다.^(1,2) 따라서, 곡관부의 건전성 확보는 배관계통 전체의 건전성 유지 측면에서 매우 중요하다. 그러나, 탄소강 배

관의 경우, 배관계통에서 곡관부는 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion) 등에 의한 감육결합의 발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.^(3,4) 따라서, 배관계통 곡관부에 대한 건전성 확보를 위해서는 곡관의 거동에 미치는 이들 결합의 영향을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다.

그러나, 아직까지 곡관의 거동에 미치는 감육결합의 영향은 충분히 파악되지 않은 상태이며, 최근 이와 관련한 연구들이 일부 수행되고 있다.⁽⁵⁻⁸⁾ Ahn 등⁽⁵⁾은 곡관부 외면 전체를 일정한 깊이로 가공한 엘보우를 이용하여 굽힘 실험을 수행하고, 곡관의 붕괴모멘트에 미치는 벽면의 두께감소 영향을 평가한 바 있다. 또한, 본 연구의 선행 연구에서는 엘보우 내부의 외호면, 내호면, 그리고 측면에 다양한 크기의 국부 감육결합을 가정하여 유한요소해석을 수행하고, 이들 결과로부터 엘보우 붕괴거동에 미치는 국부 감육결합의 영향을 평가하였다.^(6,7) 그러나, 이들 연구는

* 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7109 FAX : (062)232-9218

* 회원, 조선대학교 원자력공학과

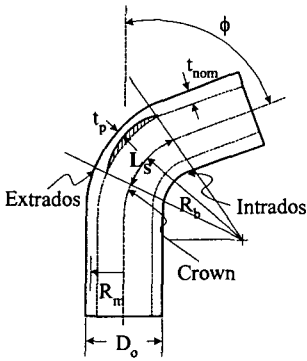


Fig. 1 Definition of dimensions of pipe bend

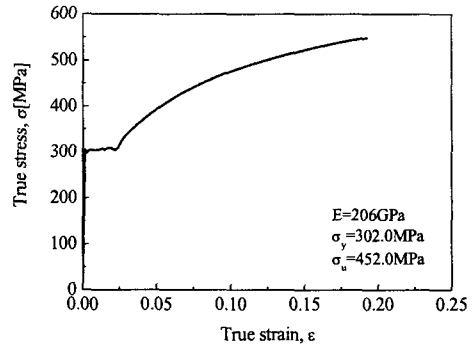
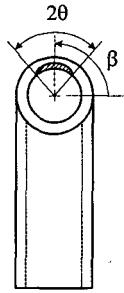


Fig. 3 True stress-strain curve used in FE analysis

Table 1 Dimensions of wall thinning defect considered in FE analysis

Thinning length, L/D_o	Maximum thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$	Thinning angle, θ/π
0.5, 1.0, 2.0	0.301, 0.534, 0.767	0.125, 0.25, 0.50

함의 영향을 곡관의 굽힘각에 따라 살펴보았으며, 이들 결과를 결함의 위치, 굽힘하중의 방향, 그리고 결함의 크기에 따라 비교하였다.

2. 평가 방법

2.1 해석조건

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 양 끝에 직관이 연결된 직경 (D_o)이 400mm, 반경 대 공칭두께의 비 (R_o/t_{nom})가 10, 그리고 곡률반경(R_b)이 평균반경(R_m)의 3배인 곡관을 고려하였다. 해석에서 고려된 곡관의 굽힘각 (ϕ)은 30°, 60°, 90°이며, 곡관에 연결된 직관의 길이는 평균반경의 10배 ($10R_m$)로 고려하였다. 곡관에서 감속결함은 곡관의 내호면, 외호면, 측면에 각각 존재하는 것으로 가정하였으며, 해석에서 고려된 결함의 크기는 Table 1과 같다.

해석에는 일정한 내압 조건에서 굽힘모멘트가 작용되는 복합하중을 고려하였다. 내압의 크기는 감속결함이 주로 발생하는 원전 2차측 배관의 설계압력을 고려하여 10MPa로 가정하였으며, In-plane상의 열림모드와 닫힘모드의 굽힘하중이 고려되었다.

2.2 유한요소모델

유한요소해석에는 20절점의 Brick 요소를 사용

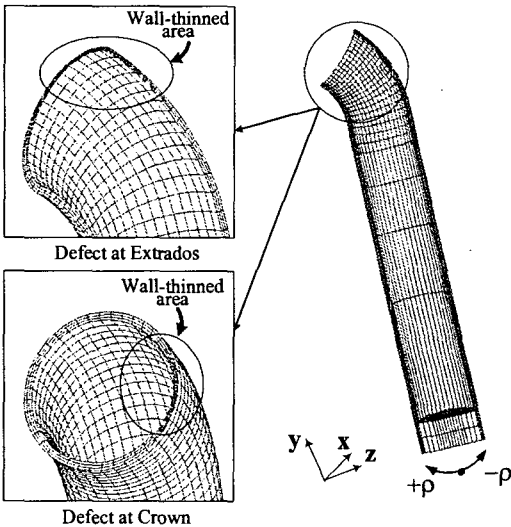


Fig. 2 Finite element model used in the analysis

모두 굽힘각 (ϕ)이 90°인 엘보우를 대상으로 수행되었다. 그런데, 실제 발전소 배관계통에는 90° 이하의 다양한 굽힘각을 갖는 곡관들이 적용되고 있고, 이들 곡관에서 감속결함이 발생하는 것으로 보고되고 있다.⁽⁴⁾

따라서, 본 논문에서는 감속결함이 존재하는 곡관의 붕괴거동에 미치는 굽힘각의 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해서 감속결함을 갖는 다양한 굽힘각의 곡관을 대상으로 유한요소해석을 수행하고, 굽힘각에 따른 감속 곡관의 붕괴거동을 평가하였다. 해석에는 곡관의 내호면(intrados), 외호면(extrados), 측면(crown)에 존재하는 감속 결함이 고려되었으며, 곡관에는 일정한 내압에서 In-plane상의 닫힘모드와 열림모드의 굽힘하중이 작용되는 것으로 가정하였다. 해석 결과로부터 모멘트-회전 거동과 붕괴모멘트에 미치는 감속결

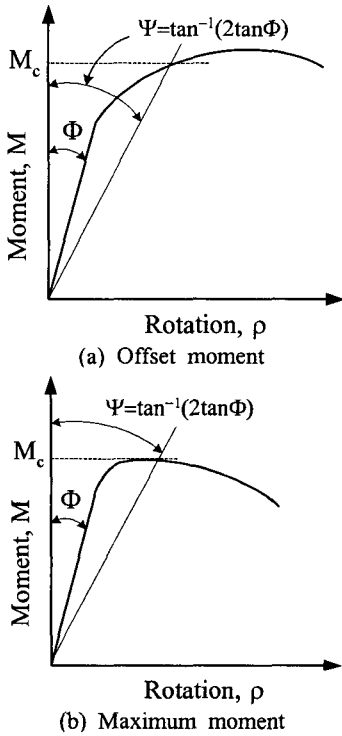


Fig. 4 Determination of collapse moment from the moment-rotation curve

한 3차원 모델이 적용되었으며, 곡관의 대칭성을 고려하여 외호면 결함과 내호면 결함을 갖는 경우에는 곡관의 1/4만을 모델링하고, 측면 결함을 갖는 경우에는 곡관의 1/2을 모델링하였다. 굽힘 하중은 배관 끝단의 모든 절점을 MPC option으로 구속한 후 일정 각도를 회전시킴으로써 작용시켰다. Fig. 2는 해석에서 고려된 유한요소모델을 나타낸 것이다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽⁹⁾ code를 사용하여 수행하였다. 해석에는 응력-변형률 거동의 비선형성과 기하학적 비선형성을 모두 고려하였다. 해석에 사용된 곡관 재료의 진응력-진변형률 곡선은 Fig. 3에 나타낸 것과 같다.

2.3 붕괴모멘트 정의

굽힘하중이 작용될 때 곡관의 붕괴모멘트는 다양한 방법에 의해 정의될 수 있는데, 본 연구에서는 Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이 모멘트-회전 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 직선(offset 선)과 모멘트-회전 곡선의 교점에 해당

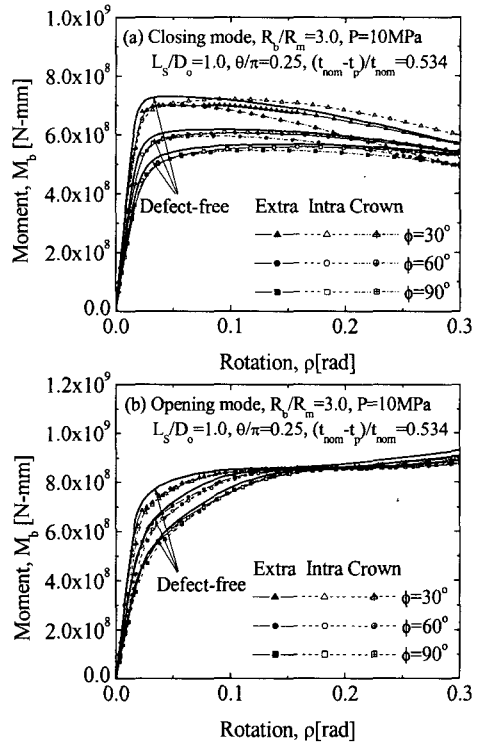


Fig. 5 Effect of bend angle on the moment-rotation behavior of wall thinned pipe bends

하는 굽힘모멘트를 붕괴모멘트로 정의하였다. 이러한 붕괴모멘트 결정 방법은 결과의 재현성이 높고 적용의 편의성 측면에서 유용한 것으로 알려져 있으며,⁽¹⁰⁾ ASME B&PV code 에서도 이 방법을 추천하고 있다.⁽¹¹⁾ 다만, Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이 모멘트-회전 곡선과 offset 선의 교차점보다 작은 회전각에서 최대모멘트가 나타나는 경우에는 최대모멘트를 붕괴모멘트로 정의하였다.

3. 굽힘각에 따른 감육 곡관의 붕괴거동

3.1 모멘트-회전 거동에 미치는 굽힘각의 영향

굽힘하중 조건에서 감육 곡관의 변형 거동에 미치는 굽힘각에 대한 영향을 파악하기 위해서, 깊이, 폭, 길이가 각각 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.534$, $\Theta/\pi=0.25$, $L_s/D_o=1.0$ 인 감육결함을 갖는 곡관의 굽힘각에 따른 모멘트-회전 곡선의 차이를 결함 위치와 하중조건에 따라 살펴보았다. Fig. 5에서 알

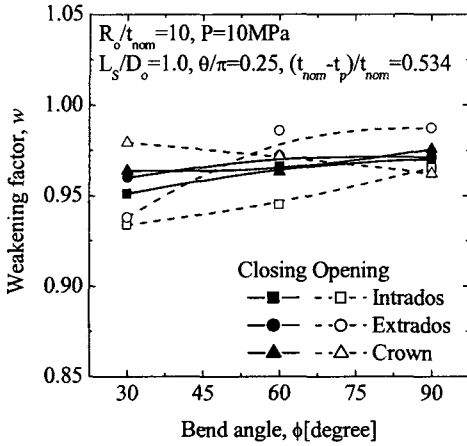


Fig. 6 Effect of bend angle on the collapse moment of wall thinned pipe bend

수 있는 것과 같이 닫힘모드와 열림모드 모두 곡관의 굽힘각이 감소함에 따라 모멘트-회전 곡선에서 탄성영역 기울기와 소성영역의 모멘트 값이 높게 나타났다. 그러나, 열림모드 하중조건에서는 변형이 증가($\rho > 0.15\text{rad}$)에 따라 굽힘각에 따른 모멘트 값의 차이가 사라지는 것으로 나타났다.

굽힘각에 따른 이러한 모멘트-회전 거동은 결합 위치에 따라 거의 차이가 없었다. 또한, 모멘트 값이 약간씩 감소하는 것을 제외하면, 결합이 없는 건전 곡관과 비교할 때, 전체적인 거동이 거의 유사한 것을 알 수 있다. 따라서, 일정한 내압조건에서 굽힘하중이 작용되는 경우에 감속 곡관의 전체적인 변형거동은 곡관 자체의 기하학적 형상에 의해 지배되며, 곡관부에 존재하는 감속결합의 영향은 상대적으로 크지 않은 것을 알 수 있다.

3.2 붕괴모멘트에 미치는 굽힘각의 영향

3.2.1 결합 위치에 따른 굽힘각의 영향

곡관의 붕괴거동에 미치는 굽힘각의 영향을 정량적으로 파악하기 위해서, 길이, 폭, 길이가 각각 $(t_{nom} - t_p)/t_{nom} = 0.534$, $\theta/\pi = 0.25$, $L_s/D_o = 1.0$ 인 감속결합이 곡관부 내호면, 외호면, 그리고 측면에 각각 존재하는 곡관의 붕괴모멘트를 굽힘각의 크기에 따라 살펴보았다. Fig. 6은 감속 곡관의 붕괴모멘트(M_C)를 건전 곡관의 붕괴모멘트($M_{C,NT}$)로 무차원화하여 굽힘각의 크기에 따라 나타낸 것이

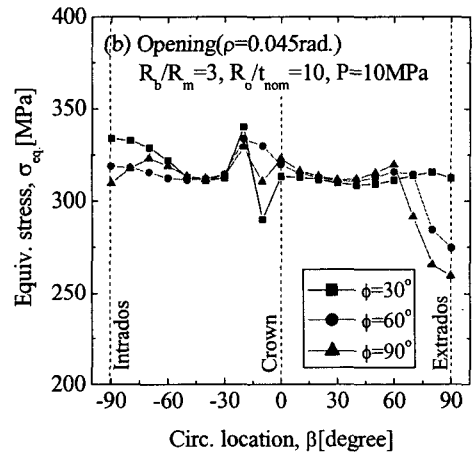
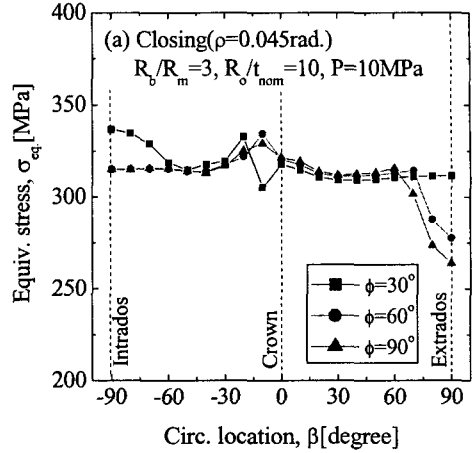


Fig. 7 Stress distribution along the circumference at the bend region under in-plane bending with internal pressure

다. 여기서 무차원화한 붕괴모멘트 값을 취약계수(w)로 정의하였으며, 취약계수가 작을수록 붕괴모멘트 감소에 미치는 감속결합의 영향이 큰 것을 의미한다.

Fig. 6에서 알 수 있는 것과 같이 내호면과 외호면 감속결합의 경우에는 굽힘하중의 방향에 관계없이 곡관의 굽힘각이 증가됨에 따라 취약계수가 증가하는 경향을 보였다. 반면, 측면 결합의 경우에는 굽힘각에 따른 취약계수의 변화가 거의 없거나 굽힘각 증가에 따라 취약계수가 약간 감소하는 경향을 보였다. 전체적으로 외호면 결합에 비해 내호면 결합에서 낮은 취약계수를 보였으며, 외호면 결합의 경우에는 굽힘각이 60° 에서

90°로 증가할 때 보다 30°에서 60°로 증가할 때 취약계수의 변화가 크게 나타났다. 전체적으로 닫힘모드에 비해 열림모드에서 굽힘각에 따른 취약계수의 변화가 크게 관찰되었다. 따라서, 내호면과 외호면 결합의 경우에는 곡관의 굽힘각이 작을수록 붕괴모멘트 저하에 미치는 감육결합의 영향이 크게 나타나며, 측면 결합의 경우에는 붕괴모멘트 감소에 미치는 감육결합의 영향이 굽힘각 크기에 거의 영향을 받지 않았다.

따라서, 굽힘각이 90° 보다 작은 곡관은 굽힘각이 90°인 엘보우에 비해 감육 결합에 의한 하중 지지능력의 감소가 크며, 감육 배관에 대한 건전성 평가에서 90° 엘보우를 대상으로 개발된 평가 모델을 이들 곡관에 적용하는 것은 비보수적인 평가 결과를 줄 것이다. 또한, 배관 계통에서 감육 결합에 의한 하중지지능력의 감소는 굽힘각이 가장 작은 직관에서 가장 클 것으로 예상되며, 곡관의 건전성에 미치는 감육결합의 영향을 직관을 가정하여 평가하는 경우에 가장 보수적인 결과를 주게 될 것이다.

감육 곡관에서 굽힘각에 따른 이러한 경향은 굽힘하중 조건에서 곡관부의 응력분포 차이로부터 설명될 수 있다. Fig. 7은 Fig. 6에서 수행된 감육 곡관과 동일한 형상의 결합이 없는 건전 곡관에 10MPa의 내압과 붕괴모멘트에 해당하는 회전각($\rho=0.045\text{rad.}$)이 작용될 때, 곡관부의 원주방향 위치에 따른 등가응력의 크기를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 닫힘모드와 열림모드 모두 곡관의 내호면과 외호면에서는 굽힘각이 작을수록 등가응력이 증가한 반면, 측면에서는 굽힘각에 따른 응력의 차이가 뚜렷하지 않으며, 전반적으로 $\phi=30^\circ$ 에서 응력이 가장 낮고, 60°와 90°에서는 거의 유사한 응력을 보였다. 또한, 굽힘하중의 형태에 관계없이 외호면에 비해 내호면에서 전체적으로 높은 응력을 보였다. 따라서, Fig. 6의 결과와 비교하면, 곡관의 굽힘각에 따라 응력 차이가 큰 부위에서는 붕괴모멘트에 미치는 감육결합의 영향이 굽힘각에 따라 크게 변화하였으며, 응력이 높은 영역에서 감육결합에 의한 붕괴모멘트의 감소가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 곡관부에서 응력이 높은 영역일수록 감육결합에 대한 취약부로 작용하며, 따라서 붕괴모멘트에 미치는 감육결합의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것이다.

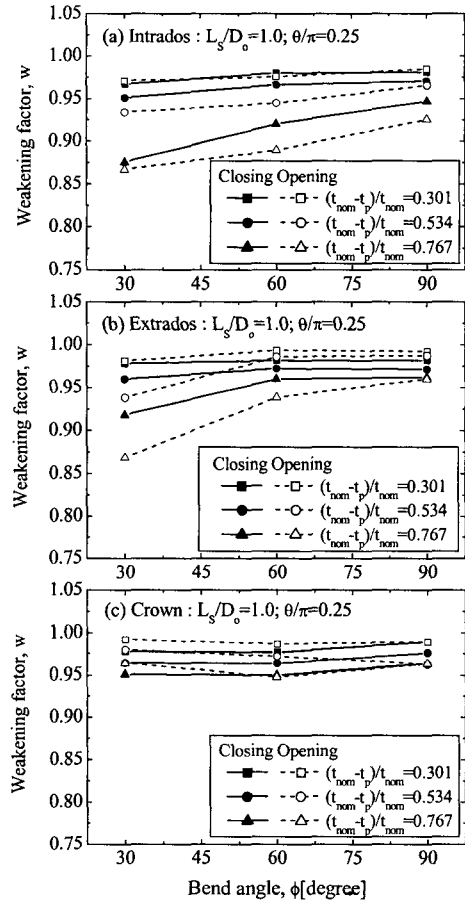


Fig. 8 Effect of bend angle on the collapse moment of wall thinned pipe bend for different thinning depths

3.2.2 결합 형상에 따른 굽힘각의 영향

결합의 형상에 따라 감육 곡관의 붕괴모멘트에 미치는 굽힘각의 영향을 파악하기 위해서, 각각의 결합 위치에서 결합 깊이, 폭, 그리고 길이 변화에 따른 취약계수의 변화를 굽힘각에 따라 살펴 보았다. Figs. 8, 9, 10은 10MPa의 일정 내압 조건에서 결합의 깊이, 폭, 그리고 길이에 따른 감육 곡관의 취약계수를 굽힘각에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 결합의 깊이, 폭, 그리고 길이가 변할지라도 앞서 파악된 곡관의 굽힘각에 따른 취약계수의 변화 경향은 유사한 것을 알 수 있다. 즉, 외호면과 내호면 결합에서는 굽힘각이 증가함에 따라 취약계수가 증가하며, 측면 결합에서는 취약계수가 굽힘각에

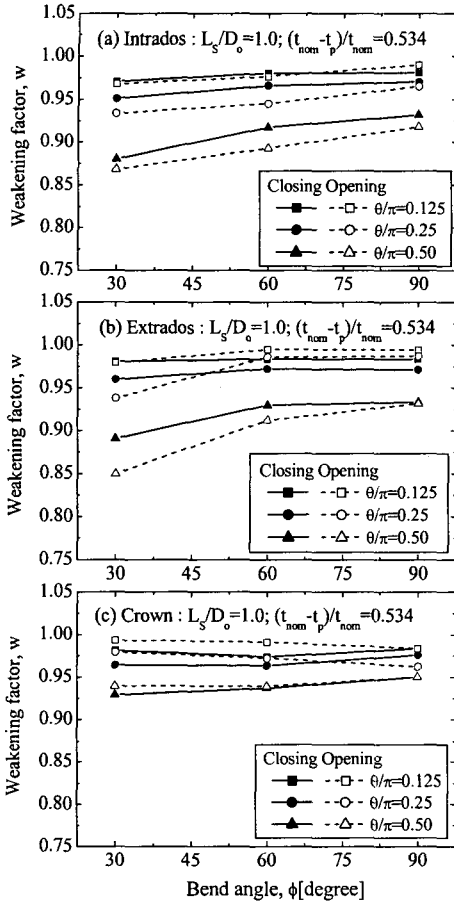


Fig. 9 Effect of bend angle on the collapse moment of wall thinned pipe bend for different thinning angles

따라 거의 같은 값을 보였다. 또한, 닫힘모드에 비해 열림모드에서 취약계수에 미치는 굽힘각의 영향이 보다 뚜렷하게 나타났다.

한편, 내호면과 외호면 감육 곡판에서는 결함의 깊이, 폭, 그리고 길이가 증가됨에 따라 굽힘각에 따른 취약계수의 변화가 증가하였다. 특히, 결함의 깊이와 폭이 증가됨에 따라 굽힘각의 영향이 크게 증가하였다. 반면, 측면 결함의 경우에는 결함 깊이, 폭, 그리고 길이 증가에 따라 전체적으로 취약계수의 값은 감소하지만, 굽힘각에 따른 취약계수의 변화 정도는 거의 유사하였다. 결함 형상에 따른 이러한 경향은 굽힘하중의 방향에 관계없이 비슷하였다. 또한, Figs. 8 & 9와

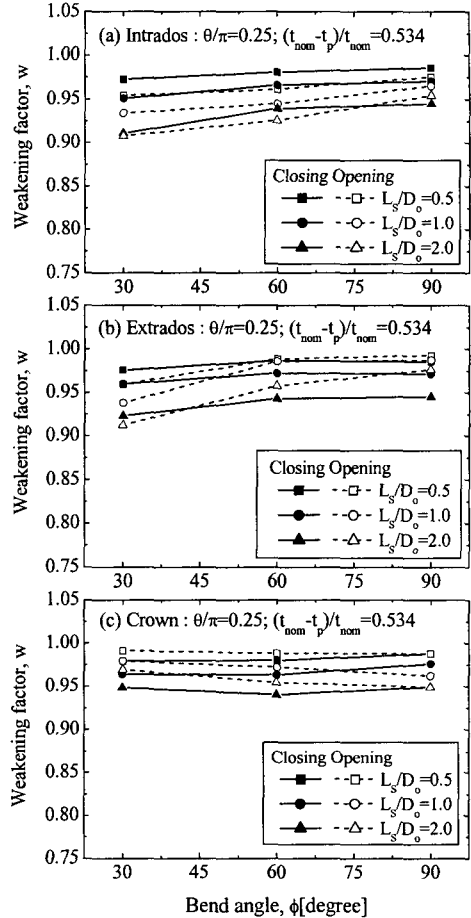


Fig. 10 Effect of bend angle on the collapse moment of wall thinned pipe bend for different thinning lengths

Fig. 10의 결과를 비교해보면, 결함 위치와 굽힘하중의 방향에 관계없이 취약계수에 미치는 굽힘각의 영향이 결함 깊이와 폭의 변화에 비해 결함 길이 변화에 둔감한 것을 알 수 있다.

감육 결함의 형상에 따른 이러한 경향은 앞서 토의된 바와 같이 굽힘각과 곡판부 위치에 따른 응력 크기의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 굽힘각에 따라 응력의 차이가 크게 나타나는 영역에서는 결함 크기가 증가함에 따라 응력에 미치는 감육 결함의 영향이 크기 때문에 붕괴모멘트에 미치는 굽힘각의 영향이 크게 나타나는 반면, 굽힘각에 따른 응력의 차이가 크지 않은 영역에서는 결함의 크기가 증가할지라도 붕괴모

멘트에 미치는 굽힘각의 영향이 작게 나타나는 것이다. 또한, 굽힘각의 영향이 결함 깊이와 폭에 비해 결함 길이 변화에 민감하지 않은 것은 굽힘 하중 조건에서 일정한 결함길이 이상에서는 결함 길이에 따른 결함부의 응력 변화가 결함 깊이나 폭에 비해 크지 않기 때문으로 판단된다.^(6,12)

4. 결 론

본 논문에서는 감육 곡관의 붕괴거동에 미치는 곡관의 굽힘각에 대한 영향을 파악하기 위해서, 다양한 굽힘각을 갖는 감육 곡관을 대상으로 유한요소해석을 수행하여, 감육 곡관의 붕괴거동에 미치는 굽힘각의 영향을 분석하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 굽힘각에 따른 감육 곡관의 모멘트-회전 거동은 결함이 없는 건전 곡관의 굽힘각에 따른 거동과 거의 유사하였다.

(2) 내호면과 외호면 감육 곡관에서는 감육결함에 의한 붕괴모멘트 감소가 굽힘각 감소에 따라 뚜렷이 증가한 반면, 측면 감육 곡관에서는 붕괴모멘트 감소에 미치는 감육결함의 영향이 곡관의 굽힘각에 거의 영향을 받지 않았다.

(3) 닫힘모드에 비해 열림모드에서 굽힘각에 따른 영향이 크게 관찰되었으며, 전체적으로 외호면 결함에 비해 내호면 결함에서 감육 결함에 의한 붕괴모멘트의 감소가 크게 나타났다.

(4) 내호면과 외호면 감육 곡관에서는 결함의 크기가 증가됨에 따라 붕괴모멘트에 미치는 굽힘각의 영향이 증가한 반면, 측면 감육 곡관에서는 결함의 크기에 관계없이 굽힘각의 영향이 유사하였다.

(5) 이들 연구 결과는 아직까지 확립되지 못한 원전 감육 곡관의 건전성 평가 모델과 감육부의 허용두께 기준 개발에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) Shalaby, M. A. and Younan, M. Y. A., 1999, "Limit Loads for Pipe Elbows Subjected to In-Plane Opening Moments and Internal Pressure," *J. of Press. Ves. Tech.*, Vol. 121, pp. 17~23.

(2) Chattopadhyay, J., 2002, "The Effect of Internal Pressure on In-Plane Collapse Moment of Elbow," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 212, pp. 133~144.

(3) Chexal, B., Horowitz, J., Dooley, B., Millett, P., Wood, C., and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," *EPRI/TR-106611-R2*.

(4) Korea Atomic Energy Research Institute, 2001, "Development of Enhanced Safety Technology for Operating PHWR Plant," *KAERI/RR-2226/2001*, Final Report.

(5) Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., K., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., 2002, "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning," *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 211, pp. 91~103.

(6) Kim, J. W., Kim, T. S., Park, C. Y., 2004, "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.

(7) Kim, J. W and Lee, J. G., "Effect of Circumferential Location of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow," *J. of Kor. Soc. of Safety*, Vol. 20, No. 1, pp. 55~61.

(8) Kim, J. W, Na, M. G., and Park, C. Y., 2005, "Development of Failure Pressure Evaluation Model for Internally Wall Thinned Piping Components," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 29, No. 7, pp. 947~954.

(9) Hibbitt, Karlson and Sorensen Inc., 2002, "ABAQUS ver. 6.2 User's Manual"

(10) Yahiaoui, K., Moffat, D. G. and Moreton, D. N., 2000, Piping Elbows with Cracks, Part 2: Global Finite Element and Experimental Plastic Loads Under Opening Bending," *J. Strain Anal.*, Vol. 35, pp. 47~57.

(11) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.VIII, 1995 ed., "Rules for Construction of Pressure Vessels"

(12) Park, B. G., Kim, Y. I, and Kim, Y. J., 2005, "Limit Load Solutions for Pipes with Local Wall Thinning Based on Finite Element Limit Analysis," *Proc. of KSME Spring Meeting*, pp. 231~236.