

내압과 내면 굽힘하중 조건에서 곡관의 거동에 미치는 굽힘각의 영향

김진원[†] · 나만균

조선대학교 원자력공학과
(2004. 12. 6. 접수 / 2005. 5. 31. 채택)

Effect of Bend Angle on the Behavior of Pipe Bend under Internal Pressure and In-Plane Bending Loads

Jin-Weon Kim[†] · Man-Gyun Na

Department of Nuclear Engineering, Chosun University
(Received December 6, 2004 / Accepted May 31, 2005)

Abstract : This study performed finite element analysis on the pipe bend with various bend angles under loading conditions of internal pressure and combined pressure and bending, to investigate the effect of bend angle on the collapse behavior of pipe bend and on the stress state in the bend region. In the analysis, the pipe bends with bend angle of $5\sim 90^\circ$ were considered, and the bending moment was applied as in-plane closing and opening modes. From the results of analysis, it was found that the collapse moment of pipe bend increases with decreasing bend angle. As the bend angle decreases, also, the equivalent stress at intrados region increases regardless of bending mode. Under closing mode bending, especially, the increase in stress at intrados is significant so that the maximum stress region moves from crown to intrados with decreasing bend angle.

Key Words : pipe bend, bend angle, collapse moment, stress state, finite element analysis

1. 서 론

발전소나 기타 플랜트의 배관계통에는 다양한 형태의 곡관이 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, 운전 중 곡관은 국부적으로 소성변형 될지라도 붕괴되지 않도록 설계 및 운영되어야 한다. 따라서, 작용 하중에 따른 곡관의 붕괴거동을 정확히 평가하고, 이를 바탕으로 적절한 안전여유도를 파악하는 것이 중요하다.

이와 관련하여 많은 이론적, 수치적, 그리고 실험적 연구들이 수행되었다¹⁻⁷⁾. 이들 연구에서는 다양한 하중 조건에서 곡관의 붕괴거동과 변형거동이 고찰되었으며, 붕괴하중 예측을 위한 평가식이 제시되었다. 또한, 최근에는 균열이나 국부 감육과 같은 결함이 존재하는 곡관에 관한 연구들도 진행되고 있다^{8,9)}. 그러나, 이러한 연구에도 불구하고 아직까지 곡관의 붕괴거동과 변형거동에 대한 연구는 굽힘각 (Φ)이 90° 인 곡관에 제한되어 있으며, 발전소 배관 설계를 위한 산업 기준들도 굽힘각이 90° 인 곡관만을 고려하고 있다^{10,11)}. 다만, 최근 Kumar가 곡관의 응력지수 (B_2 와 C_2)에 미치는 굽힘각의 영향을 살펴본 바 있다¹²⁾. 그러나, 실제 배관계통에는 $30^\circ\sim 75^\circ$ 범위의 다양한 굽힘각을 갖는 곡관들이 사용되고 있기 때문에¹³⁾, 곡관의 거동과 응력상태에 미치는 굽힘각의 영향을 파악하는 것은 곡관의 건전성 확보 측면에서 매우 중요하다.

따라서, 본 논문에서는 곡관의 붕괴거동과 국부 응력 상태에 미치는 굽힘각의 영향을 파악하

[†] To whom correspondence should be addressed.
jwkim@chosun.ac.kr

기 위해서, 다양한 굽힘각을 갖는 곡관을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 곡관의 붕괴하중과 곡관부의 응력 분포를 굽힘각에 따라 살펴보았으며, 곡관의 건전성에 미치는 굽힘각의 영향을 고찰하였다.

2. 해석방법

2.1. 해석조건

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 양 끝에 직관이 연결된 직경 (D_0)이 400mm, 반경 대 공칭두께의 비(R_0/t_{nom})가 10, 그리고 곡률반경(R_0)이 배관반경 (R_m)의 3배인 곡관을 고려하였다. 곡관에 연결된 직관의 한쪽 끝은 구속되었으며, 다른 쪽은 자유로운 상태에서 굽힘하중이 작용되는 것으로 가정하였다. 해석에서 고려된 곡관의 굽힘각 (ϕ)은 $5 \sim 90^\circ$ 이며, 연결 직관의 길이는 L_1 과 L_2 모두 평균 반경의 10배 ($10R_m$)로 가정되었다. 해석은 단순 내압 조건과 내압과 굽힘의 복합하중 조건에서 수행되었다. 내압으로는 0과 10MPa을 고려하였으며, 굽힘하중으로는 내면(In-plane) 상에서 곡관을 밖으로 펴주는 열림모드(opening mode)와 안쪽으로 굽혀주는 닫힘모드(closing mode)가 고려되었다. 여기서 굽힘하중은 연결 직관의 끝단에 일정량의 회전각 (ρ)을 변위제어 형태로 작용함으로써 적용하였다.

2.2. 유한요소모델

유한요소해석에는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 20

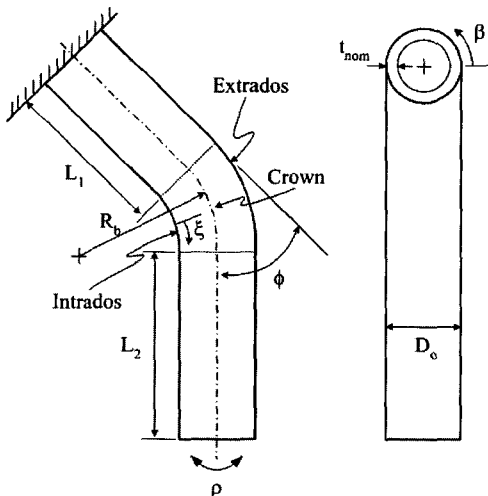


Fig. 1. Definition of dimensions of pipe bend

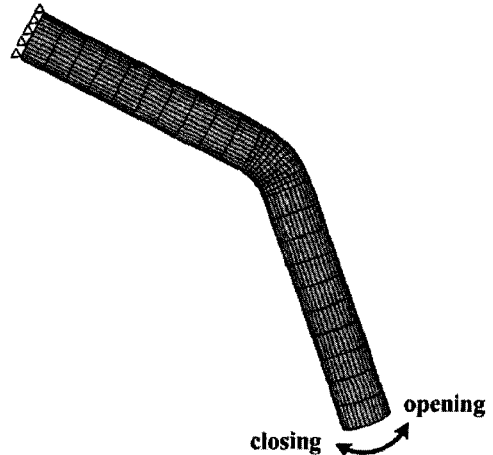


Fig. 2. Finite element model used in the analysis

Table 1. Tensile properties used in FE analysis

Young's modulus [GPa]	Yield stress [MPa]	Ultimate tensile stress [MPa]
206	302.0	452.0

절점의 Brick 요소를 사용한 3차원 모델이 적용되었으며, 대칭성을 고려하여 배관의 1/2만을 모델링하였다. 곡관부에는 길이방향으로 10개, 원주방향으로 18개, 두께방향으로 3개의 요소를 배열하였다. 본 연구에서는 배관의 한쪽 끝단이 고정된 것으로 가정하였기 때문에 고정된 면에서 모든 절점의 자유도는 구속되었다. 굽힘하중을 작용시키기 위해서 배관 끝단 면에서 모든 절점의 자유도를 MPC (multi point constraint) option을 사용하여 한 점에 구속한 후 회전시켰다. 탄소성 해석을 수행하였으며, 해석에는 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS¹⁴⁾가 사용되었다. 해석에서 곡관부의 단면변형과 좌굴 현상을 고려하기 위해서 대변형 조건을 적용하였다. 유한요소해석에 사용된 곡관의 재료물성치는 Table 1과 같다.

2.3. 붕괴모멘트 정의

굽힘하중이 작용될 때 곡관의 붕괴모멘트는 다양한 방법에 의해 정의될 수 있는데, 일반적으로 모멘트-회전 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 직선과 모멘트-회전 곡선의 교점에 해당하는 굽힘모멘트를 붕괴모멘트로 정의한다^{1~3,6)}. 따라서, 본 연구에서도 Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 offset 방법을 적용하여 붕괴모멘트를 정의하였다.

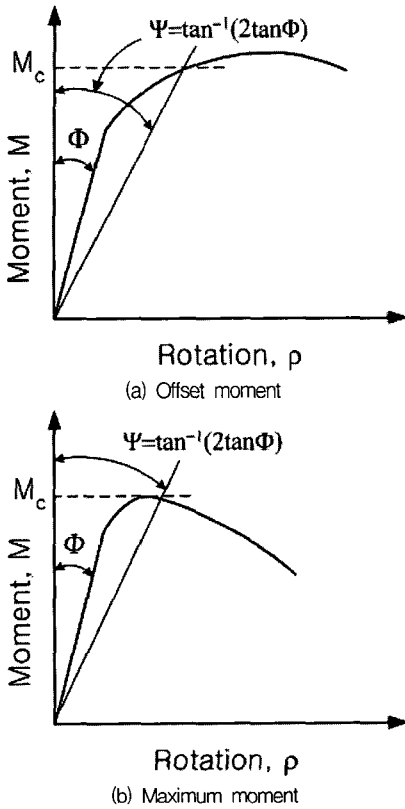


Fig. 3. Determination of collapse moment from the moment-rotation curve

다만, Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 모멘트-회전 곡선과 offset선의 교차점보다 작은 회전각에서 최대모멘트가 나타나는 경우에는 최대모멘트를 붕괴모멘트로 정의하였다.

3. 굽힘각에 따른 곡관의 붕괴거동 및 곡관부의 응력분포

3.1. 곡관의 붕괴거동에 미치는 굽힘각의 영향

굽힘하중 하에서 곡관의 변형거동에 미치는 굽힘각의 영향을 파악하기 위해서 굽힘각에 따른 모멘트-회전 곡선의 변화를 살펴보았다. Fig. 4에서 알 수 있는 것과 같이 닫힘모드와 열림모드 모두 굽힘각이 감소함에 따라 모멘트-회전 곡선이 증가하였으며, 탄성영역에서 곡선의 기울기가 증가하였다. 그림에는 나타내지 않았지만, 굽힘각에 따른 이러한 변형거동은 내압이 없는 경우에도 유사하였다.

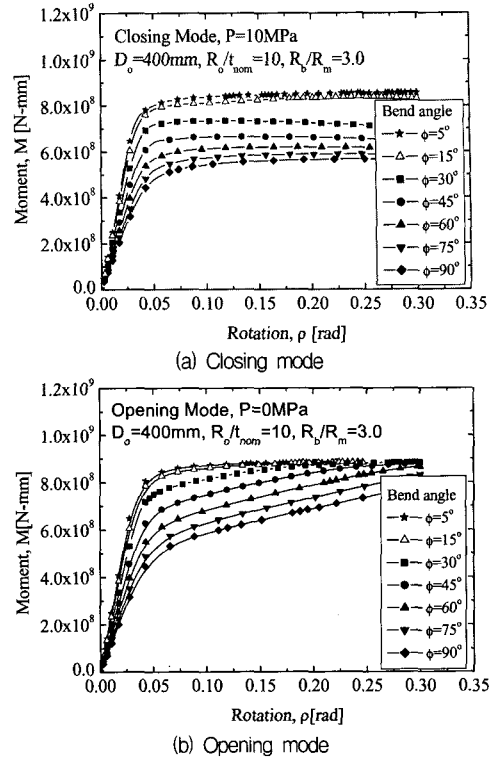


Fig. 4. Effect of bend angle on the moment-rotation behavior of pipe bend

한편, Fig. 5는 모멘트-회전 곡선으로부터 구한 붕괴모멘트(M_c)를 직관에 대한 붕괴모멘트($M_L = 4R_m^2 \sigma_y$)로 무차원화하여 굽힘각의 크기에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 내압의 유·무와 굽힘하중의 형태에 관계없이 굽힘각이 증가함에 따라 붕괴모멘트가 감소하는 경향을 보였다. 굽힘각에 따른 붕괴모멘트의 변화는 열림모드에 비해 닫힘모드 굽힘하중에서 크게 나타났으며, 내압이 작용되지 않는 경우가 내압이 10MPa인 경우에 비해 뚜렷하였다.

곡관의 굽힘각 증가에 따른 모멘트-회전 곡선의 탄성영역 기울기 감소와 붕괴모멘트 감소는 굽힘각 증가에 의한 곡관의 유연성 증가와 단면변형의 용이성 때문이다. 따라서, 내압이 작용되는 경우가 작용되지 않는 경우에 비해 굽힘각에 따른 붕괴모멘트의 감소가 작게 나타나는 것은 내압에 의한 곡관부의 단면변형 억제 효과에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 내압에 의한 단면변형 억제가 곡관부의 강성을 증가시켜 굽힘각 증가에 의한 유연성 증가를 감소시키고, 곡관의 하중지탱능력을 향상하기 때문이다.

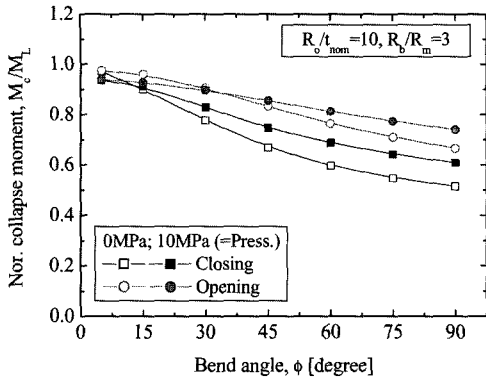


Fig. 5. Effect of bend angle on the collapse moment of pipe bend

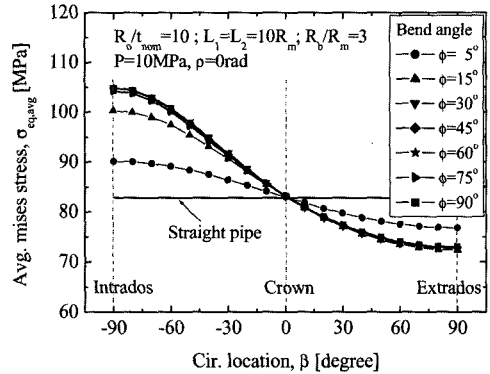
3.2. 굽힘각에 따른 곡관부의 응력분포

3.2.1. 단순 내압 조건

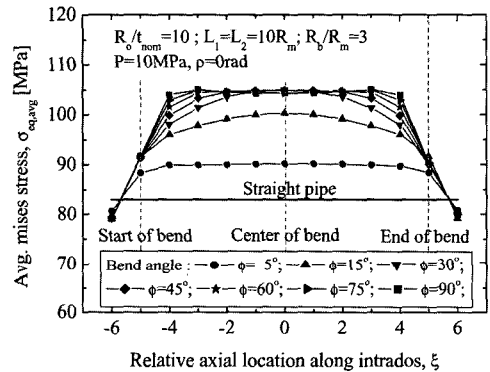
Fig. 6은 10MPa의 내압이 작용되는 경우, 곡관 중심에서 원주방향 위치(Fig. 1에서 β)와 내호면(Intrados)에서 길이방향 위치(Fig. 1에서 ξ)에 따른 응력 분포를 나타낸 것이다. 여기서, 응력은 각 위치에서 두께방향으로 배열된 절점들의 등가응력 (von Mises)을 평균한 것이다. Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같이 곡관의 중심에서 원주방향 위치에 따른 등가응력은 굽힘각에 관계없이 전체적으로 내호면에서 최대값을 보이고, 외호면 (Extrados)에서 최소값을 보였다. $\phi = 30^\circ \sim 90^\circ$ 범위에서는 원주방향 위치에 따른 응력의 분포와 크기가 굽힘각에 관계없이 거의 일정했으나, 굽힘각이 30° 보다 작은 경우에는 내호면 측의 응력이 낮아지고 외호면 측의 응력이 높아져 직관의 응력분포에 접근하였다.

한편, 원주방향 위치에 따라 가장 높은 응력을 보이는 내호면에서 길이방향 위치에 따른 등가응력의 분포를 살펴보면, Fig. 6(b)에 나타낸 것과 같이 30° 이하의 굽힘각을 갖는 곡관에서는 최대 응력이 곡관의 중심부에서 나타나는 포물선 형태의 분포를 보였다. 그러나, 굽힘각이 커짐에 따라 곡관 중심부의 응력은 거의 일정한 반면 곡관과 직관의 연결부 근처에서 응력이 증가하여, $\phi=75^\circ$ 보다 큰 굽힘각을 갖는 곡관에서는 최대 등가응력이 곡관과 직관의 연결부 근처에서 나타났다.

따라서, 단순 내압만 작용되는 경우, 곡관의 굽힘각에 관계없이 취약부가 항상 곡관의 내호면에서 나타나며, $30^\circ \sim 90^\circ$ 범위의 굽힘각을 갖는 곡관에서는 원주방향의 응력분포가 굽힘각에 의존하지 않는 것을 알 수 있다. 45° 보다 작은 굽힘각을 갖



(a) Circumferential location at center



(b) Axial location at intrados

Fig. 6. Stress distribution in the bend region under internal pressure

는 곡관에서는 내호면의 길이방향 위치에 따라 곡관의 중심에서 취약부가 나타나지만, $\phi = 45^\circ$ 보다 큰 굽힘각을 갖는 곡관에서는 곡관의 끝단부, 즉 곡관과 직관의 연결부 근처에서 취약부가 형성되는 것을 알 수 있다.

3.2.2. 단함모드 굽힘하중 조건

Fig. 7은 내압과 단함모드 굽힘하중이 동시에 작용될 때, 탄성변형 영역($\rho=0.017\text{rad}$)에서 곡관 중심의 원주방향 위치와 내호면의 길이방향 위치에 따른 등가응력의 크기를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 알 수 있는 것과 같이 $\phi = 90^\circ$ 인 곡관에서는 곡관의 측면(Crown)과 외호면에서 각각 등가응력의 최대와 최저가 나타났으며, 내호면에서는 측면과 외호면의 중간 정도 응력 크기를 보였다. 굽힘각이 작을수록 내호면 측의 응력이 증가하여, 45° 보다 작은 굽힘각을 갖는 곡관에서는 등가응력의 최대가 내호면에서 형성되었다. 굽힘각이 15° 보다 작은 곡관에서는 측면의 응력이 크게 감소하고 외호

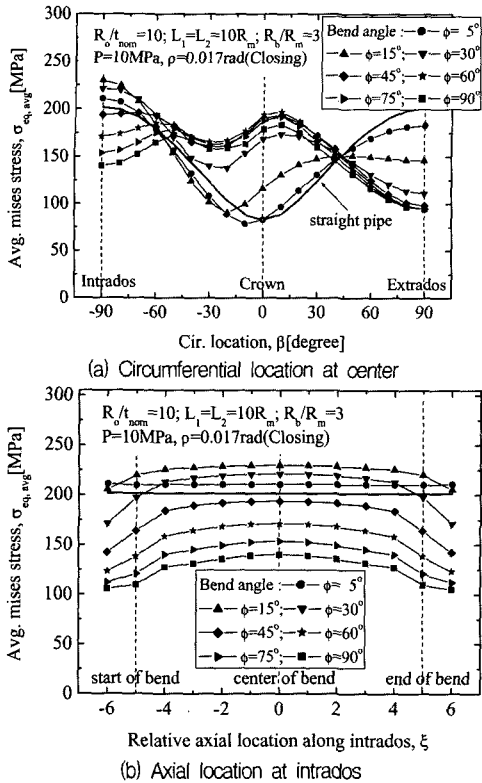


Fig. 7. Stress distribution in the bend region under in-plane closing mode ($\rho=0.017$ radian)

면의 응력이 증가하여 직관에 가까운 응력 분포를 보였다. 내호면에서 길이방향 위치에 따른 등가응력의 분포는 굽힘각에 관계없이 곡관의 중심에서 최대가 나타나는 완만한 포물선 형태의 분포를 보였다(Fig. 7(b)). 전체적으로 등가응력의 크기는 $\phi = 90^\circ$ 인 곡관에서 가장 낮았으며, 굽힘각이 작을수록 증가하여 $\phi = 15^\circ$ 에서 최대 값을 보이고, $\phi = 5^\circ$ 에서는 다시 감소하여 직관의 응력분포에 접근하였다. 직관과 비교하여 굽힘각이 45° 보다 큰 경우에는 내호면 전체에서 응력이 직관보다 낮은 값을 보였으며, $\phi = 30^\circ$ 보다 작은 경우에는 직관보다 높은 응력 값을 보였다.

한편, Fig. 8은 곡관에 작용되는 굽힘모멘트가 붕괴모멘트를 초과하는 조건($\rho = 0.20\text{rad}$)에서 곡관부의 응력분포를 나타낸 것이다. 굽힘각이 90° 인 경우에 곡관 중심에서 원주방향 위치에 따른 응력분포는 측면에서 최대 값을 보였고, 곡관의 측면을 중심으로 내호면과 외호면의 응력이 거의 대칭 분포를 보였다 (Fig. 8(a)). 굽힘각이 작아짐에 따라 외호면 측의 응력 변화는 거의 없으나, 내호면 측

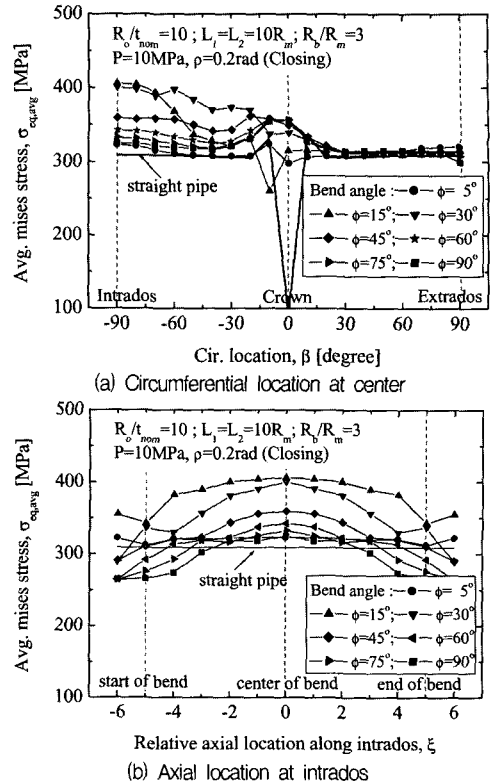


Fig. 8. Stress distribution in the bend region under in-plane closing mode ($\rho=0.20$ radian)

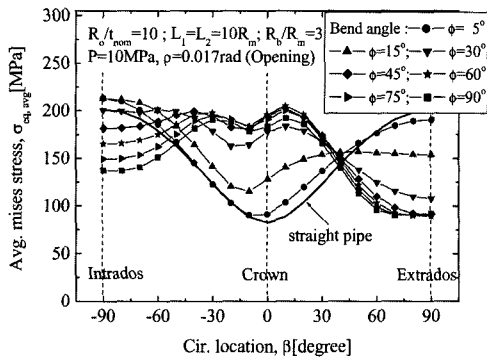
의 등가응력은 점차 증가하여 $\phi = 15^\circ$ 와 30° 에서는 내호면에서 최대 등가응력이 나타났다. $\phi = 5^\circ$ 에서는 측면과 내호면 측의 응력이 다시 감소하여 직관의 응력분포에 접근하였다. 또한, 원주방향의 모든 위치에서 등가응력의 크기는 직관에서 보다 높은 값을 보였다. 동일한 굽힘조건($\rho = 0.20\text{rad}$)에서 내호면의 길이방향 위치에 따른 등가응력의 분포는 Fig. 8(b)에 나타낸 것과 같이 탄성변형 조건에서와 유사하였다. 즉, 굽힘각이 90° 인 곡관에서 가장 낮은 등가응력을 보였으며, 굽힘각이 작을수록 내호면에서 응력이 증가하여 $\phi=15^\circ$ 에서 최대를 보이고, $\phi=5^\circ$ 에서는 다시 감소하여 직관의 응력분포에 접근하는 경향을 보였다. 다만, 탄성변형 영역에서와 달리 곡관 끝단부에 비해 중심부에서 응력이 크게 증가하였으며, 모든 굽힘각에서 중심부의 응력이 직관에 비해 높게 나타났다.

따라서, 내압과 단형모드 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우, 곡관의 변형 정도에 관계없이 굽힘각이 작아질수록 곡관부에서 최대 등가응력의 위치가 곡관 측면에서 내호면으로 이동하는 경향을 보

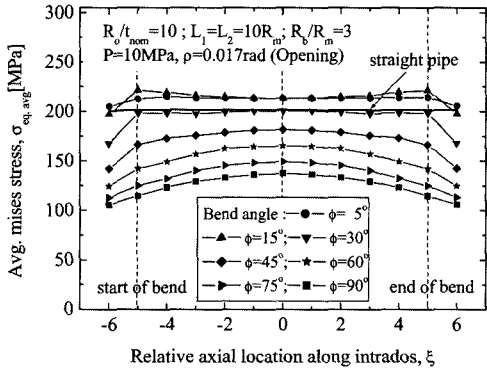
였다. 또한, 굽힘각이 작을수록 최대 등가응력의 크기가 증가하였다. 이것은 굽힘각이 작아짐에 따라 곡관의 취약부가 측면에서 내호면 측으로 이동하며, 취약부에서 손상 가능성이 증가되는 것을 의미한다.

3.2.3. 열림모드 굽힘하중 조건

Fig. 9는 내압과 열림모드 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우, 탄성변형 영역($\rho=0.017\text{rad}$)에서 곡관 중심의 원주방향 위치와 내호면의 길이방향 위치에 따른 등가응력의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 굽힘각에 따른 곡관부의 응력분포 변화는 닫힘모드 굽힘하중의 경우와 거의 유사하다. 즉, 곡관의 굽힘각이 작아짐에 따라 외호면 측의 응력변화는 거의 없지만, 내호면 측의 등가응력은 증가하였다. 또한, 내호면의 길이방향 위치에 따른 응력분포는 굽힘각이 작을수록 증가하여 $\phi=15^\circ$ 에서 최대 값을 보였고, 다시 감소하여 직관의 응력분포에 접근하였다.



(a) Circumferential location at center

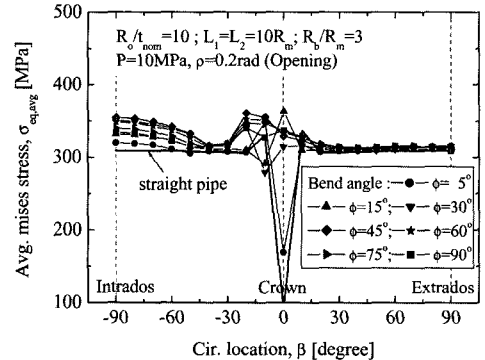


(b) Axial location at intrados

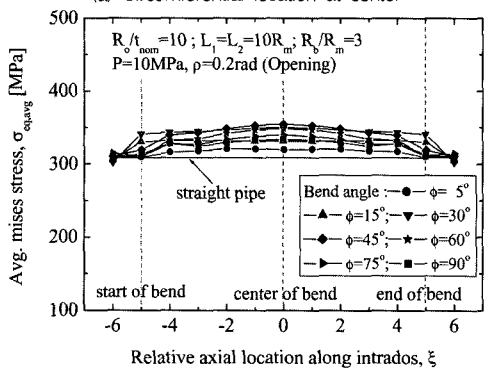
Fig. 9. Stress distribution in the bend region under in-plane opening mode ($\rho=0.017$ radian)

붕괴모멘트를 초과하는 굽힘모멘트가 작용되는 경우($\rho=0.20\text{rad}$), 굽힘각에 따른 곡관부의 응력분포는 Fig. 10에 나타난 것과 같다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 이 경우에도 곡관 중심의 원주방향 위치와 내호면의 길이방향 위치에서 굽힘각에 따른 응력분포의 변화는 닫힘모드 하중에 작용되는 경우와 거의 유사하였다. 다만, 굽힘각 감소에 따른 내호면 측의 응력 증가가 닫힘모드 하중에 비해 작게 나타났다(Fig. 10(a)). 따라서, 굽힘각이 감소할지라도 내호면 측의 등가응력이 측면의 등가응력과 유사하거나 약간 낮은 값을 보였다. 또한, 내호면에서 길이방향 위치에 따른 응력분포의 변화가 곡관의 굽힘각 변화에 따라 상대적으로 작게 나타났다(Fig. 10(b)).

따라서, 일정 내압과 함께 열림모드의 굽힘하중이 동시에 작용되는 경우에도 굽힘각 감소에 따른 내호면 측의 등가응력 증가 경향은 여전히 나타났다. 그러나, 닫힘모드에 비해 응력의 증가 정도가 작았으며, 굽힘각이 감소할지라도 최대 등가응력은 여전히 곡관의 측면에서 형성되는 것을 알 수 있다.



(a) Circumferential location at center



(b) Axial location at intrados

Fig. 10. Stress distribution in the bend region under in-plane opening mode ($\rho=0.20$ radian)

4. 곡관 건전성에 미치는 굽힘각의 영향

해석 결과에서 내압의 크기에 관계없이 곡관의 굽힘각이 작아질수록 붕괴모멘트는 증가하였다. 또한, 내압과 함께 굽힘하중이 작용되는 경우, 외호면 측의 응력은 곡관의 굽힘각에 관계없이 유사한 값을 보이지만, 내호면 측의 응력은 굽힘각이 작아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 특히, 단힘모드의 굽힘하중이 작용되는 경우에는 굽힘각이 감소함에 따라 최대 등가응력의 발생 위치가 곡관의 측면에서 내호면 측으로 이동하는 것을 확인하였다.

따라서, 이들 결과로부터 하중제어 형태의 굽힘하중이 작용하는 경우에는 굽힘각이 작은 곡관일수록 높은 하중지지능력을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나, 변위제어 형태의 굽힘하중이 작용되거나 국부적인 응력에 의해 지배되는 손상의 경우에는 곡관의 굽힘각이 작을수록 국부적인 응력이 증가하므로 곡관의 안정성이 저하될 수 있다. 특히, 굽힘각이 작아질수록 곡관의 내호면에서 응력이 크게 증가하므로, 외호면이나 측면에 존재하는 결함에 비해 내호면에 존재하는 결함의 경우에는 굽힘각이 작을수록 손상 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

한편, 내압만 작용되는 경우에는 최대 등가응력이 곡관의 내호면에서 나타나고, 굽힘각이 30° 보다 큰 경우에는 굽힘각의 크기에 관계없이 거의 일정한 원주방향 응력 분포와 크기를 보였다. 또한, 굽힘각이 45° 보다 작은 경우에는 길이방향 위치에 따라 내호면 중심에서 가장 높은 응력을 보인 반면, $\phi = 45^\circ$ 보다 큰 굽힘각을 갖는 곡관에서는 곡관과 직관의 연결부 근처에서 등가응력이 높게 나타났다. 따라서, 단순 내압 조건에서는 굽힘각이 $\phi = 30^\circ$ 보다 큰 경우에 곡관의 내호면이 가장 취약하며, 굽힘각이 작을수록 내호면에서 취약부의 위치가 곡관의 끝단부에서 중심부로 이동하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 곡관의 붕괴거동과 곡관부의 응력분포에 미치는 곡관의 굽힘각에 대한 영향을 파악하기 위해서, 다양한 굽힘각을 갖는 곡관에 대한 유한요소해석을 수행하여 곡관의 붕괴모멘트와 응력상태를 분석하였다. 그 결과, 다음의 결론을 얻었다.

1) 내압의 유·무에 관계없이 곡관의 굽힘각이 작을수록 곡관의 붕괴모멘트는 증가하는 경향을 보였다. 굽힘각에 따른 붕괴모멘트 변화는 내압이 작을수록 크게 관찰되었다.

2) 단순 내압 조건에서는 원주방향으로 내호면에서 항상 최대 등가응력을 보였으며, 외호면에서 최소 등가응력을 보였다. 이러한 응력의 분포와 크기는 30° 이상의 굽힘각을 갖는 곡관에서 거의 일정하였다. 그러나, 굽힘각이 감소함에 따라 내호면에서 최대응력의 발생 위치가 곡관의 끝단부에서 곡관의 중심부로 이동하였다.

3) 곡관에 내압과 함께 굽힘하중이 작용되는 경우, 외호면 측의 응력은 곡관의 굽힘각에 관계없이 유사한 값을 보였지만, 내호면 측의 응력은 굽힘각이 감소함에 따라 증가하였다. 특히, 열림모드에 비해 단힘모드의 굽힘하중이 작용될 때, 굽힘각 감소에 따른 내호면 측의 응력 증가가 크게 나타났으며, 최대 등가응력의 위치가 곡관의 측면에서 내호면 측으로 이동하였다.

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) Chattopadhyay, J., "The effect of internal pressure on in-plane collapse moment of elbow", *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 212, pp. 133~144, 2002.
- 3) Matzen, V. and Yu, L., "B₂ stress index for elbow analysis", *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 192, pp. 261~270, 1999.
- 4) Shalaby, M.A. and Younan, M.Y.A., "Nonlinear analysis and plastic deformation of pipe elbows subjected to in-plane bending", *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 75, pp. 603~611, 1998.
- 5) Tan, Y. and Matzen, V., "Correlation of in-plane bending test and FEA results for thin-walled elbows", *Nucl. Eng. & Des.*, Vol. 217, pp. 21~39, 2002.
- 6) Kussmaul, K., Diem, H.K., Uhlmann, D. and Kobes, E., "Pipe bend behavior at load levels beyond design", *Trans. of SMiRT-13*, pp. 187~198, 1995.
- 7) Hilenkopf, P., Boneh, B., and Sollogoub, P., "Experimental study of behavior and functional

- capability of ferritic steel elbows and austenitic stainless steel thin-walled elbpws”, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 33, pp. 111~128, 1988.
- 8) 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.
 - 9) Chattopadhyay, J., Butta, B.K., Kushwaha, H.S., Roos, E., and Herter, K. H., “Load bearing capacity of flawed piping components-comparison of experiment with calculation”, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, Vol. 81, pp. 599~608, 2004.
 - 10) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, 1995 ed., “Nuclear Components”.
 - 11) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.1, 1995ed., “Power Piping Code”.
 - 12) Kumar, R. and Saleem, M.A., “Bend angle effect on B_2 and C_2 stress indices for piping elbows”, *J. of Press. Ves. Tech.*, Vol. 123, pp. 226~231, 2001.
 - 13) Korea Atomic Energy Research Institute, “Development of enhanced safety technology for operating PHWR plant”, KAERI/RR-2226/2001, Final Report, 2001.
 - 14) Hibbitt, Karlson and Sorensen Inc., “ABAQUS ver. 6.2 User's Manual”, 2002.