

감육위치와 굽힘반경의 변화에 따른 감육엘보우의 손상 거동

김태순 · 박치용 · 박재학*

한국전력공사 전력연구원 · *충북대학교 공과대학 안전공학과

1. 서론

탄소강은 가공성과 용접성이 우수하기 때문에 각종 산업설비의 배관재로 많이 사용되고 있으며, 특히 가압중수로형 원전의 1차측 배관과 가압경수로형 원전의 2차측 배관에 주로 사용되고 있다. 그러나 탄소강 배관은 부식에 취약하므로 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion) 현상에 의한 배관의 두께가 감소하는 감육(減肉)손상이 중요하게 대두되고 있는 실정이다.^{1,2)} 이러한 감육현상은 다른 어떤 설비보다 안전성의 확보가 강조되고 있는 원전 배관의 경우에 있어서는 특히 중요한 건전성 저해요인으로 인식되고 있다. 그러나 원전 배관의 경우에는 종류와 형상이 다양하고 감육부의 형태 또한 일정하지 않은 관계로 유한요소해석을 위한 모델링이 쉽지 않은 것이 현실이다. 특히, 감육엘보우(wall thinned elbow)는 직관에 비해 감육형태가 복잡하고 감육부의 위치에 따라 배관의 건전성에 주는 영향이 달라지므로 정확한 형상의 모델링과 보다 많은 계산이 요구된다.

기존의 연구결과에 의하면 일반적으로 감육배관의 건전성 평가는 감육부의 형상과 감육배관의 손상기준, 작용하중 등에 의해 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 감육엘보우의 경우에는 이외에도 엘보우의 곡률반경과 굽힘각도 등이 건전성 평가에 영향을 주는 것으로 인식되고 있다.^{3,4)} 이러한 감육엘보우의 건전성평가가 신뢰성을 갖기 위해서는 다양한 감육엘보우의 특성들을 충분히 고려할 수 있는 해석방법의 확립이 무엇보다 중요하다.

엘보우의 감육부 형상은 직관에서와는 달리 굽은 부위에서 감육형상을 묘사해야 하기 때문에, 모든 해석대상에 대하여 각각 모델링을 수행하는 것은 비효율적인 뿐만 아니라 거의 불가능한 방법일 수밖에 없다. 따라서 본 논문에서는 엘보우에 비해 비교적 감육형상을 묘사하기 용이한 직관에서 감육형상을 모델링한 후, 이 감육직관을 임의의 각도와 방향으로 굽히는 방법을 사용하여 감육부를 포함하고 있는 엘보우에 대한 다양한 응력해석의 수행이 가능하도록 하였다. 또한 엘보우의 감육부 위치를 엘보우 중심부를 기준으로 원주방향으로는 바깥쪽(extrados)에서 안쪽(intrados)로, 축방향으로는 엘보우의 중심에서는 물론 중심에서 임의의 거리만큼 떨어진 부분에도 고려할 수 있도록 하였다. 이러한 감육엘보우의 모델링을 통해, 감육위치를 외부와 내부로 구분하고 곡률반경(radius curvature)을 변화시켜 가면서 손상 거동을 살펴보았다. 이때 엘보우에 작용되는 하중은 in-plane상에서 닫힘모드(closing mode)와 열림모드(opening mode)로 하였다.

2. 유한요소 모델링

2.1 직관에 대한 유한요소 모델링

감육엘보우의 유한요소 모델링을 하기 위해 먼저 유한요소 상용프로그램인 ANSYS를 사용하여 Fig. 1과 같은 직관을 고려하였다.⁵⁾ 엘보우 모델링의 전단계로 수행되는 직관 모델링은 전체 배관의 중심부에 감육이 된 부분과 두께가 일정한 배관 부분, 그리고 하중을 가하기 위한 양끝의 강체(rigid beam)부분으로 이루어져 있다. 감육부의 길이를 포함한 감육배관의 모든 형상은 자유롭게 조정할 수 있도록 하였으며, 감육부 길이의 증감에 따라 요소(elements)나 절점(nodes)의 수가 적절히 결정되도록 하였다. 특히, 감육부는 실제 배관의 감육형상을 고려하여 모델링의 오류로 인한 응력집중 등의 현상을 최소화하기 위해 감육부와 비감육부가 만나는 부분을 구형으로 처리하였다.

그리고 Fig. 1과 2에서 보는 것처럼 굽힘하중을 주기 위해 배관의 양끝에 일정한 길이의 강체를 고려하였다. 직관에서 가하는 하중은 4점굽힘 하중이었으나, 엘보우 해석에서 하중조건은 엘보우의 끝단에서 중심쪽으로 하중을 가하는 닫힘모드(closing mode)와 반대의 경우로 하중을 가하는 열림모드(opening mode)로 나눌 수 있다.

2.2 감육엘보우의 유한요소 모델링

(1) 감육엘보우의 형상 구현

감육부를 포함하고 있는 직관을 기본으로 하여 Table 1과 같이 다양한 경우에 대한 감육엘보우의 형상을 구현하기 위해, 먼저 Fig. 3과 같은 20개의 절점을 갖는 3차원 Brick요소를 고려하였다. 이 요소를 간단한 좌표변환을 통해 Fig. 4와 같이 굽히는 방법을 통해 모서리가 곡선화된 요소를 생성하게 된다. 이를 감육이 된 배관의 경우에 적용하면 간단히 감육이 된 엘보우 배관을 모델링 할 수 있다.

직관을 엘보우로 변환하는 과정에서 요소와 절점의 수, 그리고 각 요소를 구성하는 절점의 구성과 요소형태(element type)는 동일한 것이 유리하며, 적어도 요소가 포함하는 절점의 수는 같아야 한다. 직관을 굽히는 방향은 감육된 위치를 기준으로 바깥쪽과 안쪽, 그리고 측방향(crown) 등의 일반적인 경우는 물론 임의의 굽힘방향과 굽힘각을 갖는 엘보우 배관도 가능하도록 했다. 감육길이는 엘보우의 중심축을 따르는 길이가 직관에서의 감육길이와 같도록 하였으나, 엘보우로 변환시 중심축의 길이를 조절함으로써 감육이 된 위치에 따라 곡률반경의 중심에서 바깥쪽(extrados)에 위치한 경우가 안쪽(intrados)에 위치한 경우보다 감육길이가 길어지게 되는 점을 보완할 수 있다.

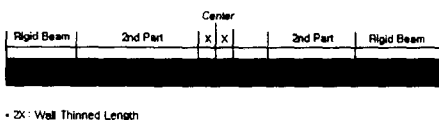


Fig. 1 Configuration for a wall thinned pipe.



Fig. 2 FE meshes of a wall thinned pipe.

Table 1 Modeling parameters for analysis of a wall thinned elbow.

Classification	Variables	Comments
Pipe geometry	Pipe length	
	Thickness	t_{nom}
	Curvature radius	bend radius
Configuration of a wall thinned elbow	Location	Extrados, Intrados etc.
	Length	
	Width	2θ
	Wall thinned thickness	d/t_{min}
Loading condition	Load type	Tension, Compression
	Internal pressure	

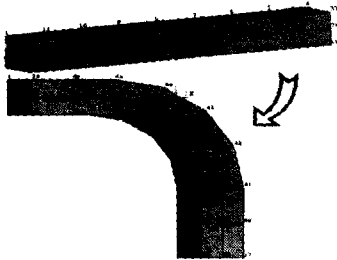


Fig. 3 Transforming brick elements to bend shape elements.

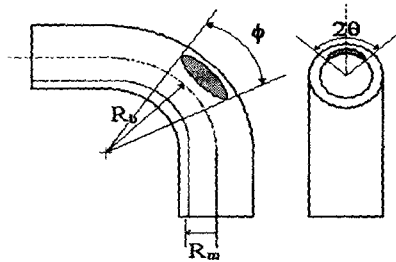


Fig. 4 Definition of dimensions of wall thinning defect in elbow.

(2) 감육엘보우에 대한 유한요소모델 최적화

엘보우에서 감육은 Fig. 4에서와 같이 축방향 또는 원주방향으로 다양하게 분포하고, 감육형상 또한 일정하지 않다. 따라서 감육엘보우의 건전성 평가를 위해서는 여러 가지 경우의 감육조건을 유연하게 수용할 수 있는 모델링이 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 5에서 보여주는 것처럼 감육중심부 단면에 대칭조건을 고려하고, 하중에 의한 변형을 반영할 수 있도록 단면 안쪽의 한점을 국부좌표계상에서 두 방향에 대해 구속하였다. 배관에 연결된 강체의 끝에서 가해지는 하중은 국부좌표계상에서 y방향(전체 좌표계를 기준으로 하였을 경우 y-z평면상에서 y방향과 45°를 이루는 방향)으로 변위 (controlled displacement)로써 가해진다.

감육이 된 엘보우에 대한 유한요소해석은 요소의 수가 많고, 또 다양한 경우에 대한 계산을 수행해야 하므로 최소의 요소와 절점을 갖도록 다음과 같은 방법으로 모델을 수정하였다. Fig. 5는 감육부를 중심으로 관의 축방향(z방향) 대칭을 고려하여 단순화하는 과정을 나타내고 있다. 결과적으로 본 해석방법은 감육부 중심에서 축방향과 원주방향으로 대칭조건을 고려한 1/4모델을 기본으로 하였으며, 이때의 해석 결과와 원주방향 대칭만을 고려한 1/2모델과의 해석 결과는 동일하게 나타났다.

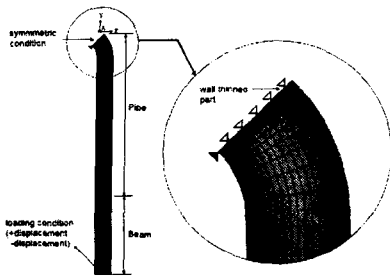


Fig. 5 Boundary conditions of a local wall thinned elbow.

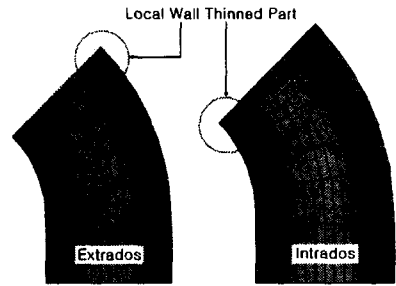


Fig. 6 Local wall thinning in the extrados and intrados.

Table 2 Analysis condition of the wall thinned elbow.

Wall-thinned location	Curvature radius, R_b	Pressure [MPa]	Eroded Configuration				Load type
			t_{min} [mm]	d/t_{min}	2θ [°]	Length [mm]	
Extrados	$3.0 \cdot R_m$	10.0	18.63	0.50	90	400	Closing Opening
Intrados	$6.0 \cdot R_m$						
	$10.0 \cdot R_m$						

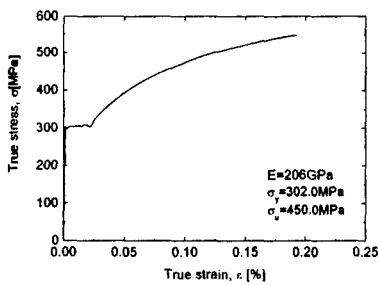


Fig. 7 True stress-strain curve used in FE analysis.

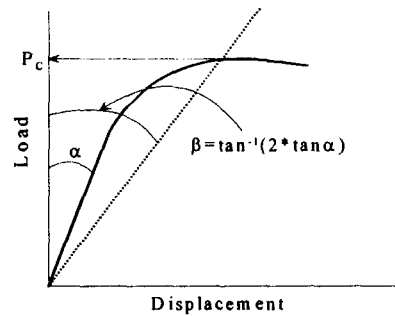


Fig. 8 Determination of collapse limit load for elbow.

3. 감육엘보우에 대한 유한요소해석

3.1 해석 조건

감육엘보우의 손상거동을 살펴보기 위해, 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 응력-변형을 관계를 갖는 재료로 된 직경(D_0)이 400mm이고 공칭두께(t_{nom})가 20mm인 엘보우에 직관이 연결된 배관을 대상으로 하였다. 엘보우의 기하학적 특성 중의 하나인 곡률반경

은 Table 2에서 보는 바와 같이 배관의 평균반경(R_m)의 3배, 6배, 10배로 하였고, 8,000mm 길이의 배관에 양끝에는 각각 2,000mm 길이의 강체를 고려하였다. 감육이 된 위치는 Fig. 6에서 나타낸 것처럼 바깥쪽(extrados)과 안쪽(intrados)으로 하였다. 감육부의 길이는 Table 2에서 나타낸 바와 같이 400mm로 하였고, 감육폭(2θ)은 90° , 그리고 감육두께는 t_{min} (18.63mm)의 50%인 경우에 대해 해석을 하였다.

하중조건으로는 배관의 내압을 10MPa로 하였고, 하중변위는 배관에 연결된 강체의 끝부분의 한점에서 축방향에 대해 45° 방향으로 감육부 중심의 응력이 재료의 공칭인장강도를 초과하거나 지지하중이 감소하는 시점까지 가하였다. 응력해석은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하였으며, 곡관부에서의 좌굴(buckling)현상을 고려하여 대변형 조건을 추가하였다.⁶⁾ 엘보우의 손상거동을 살펴보는 데는 여러 가지 방법이 사용될 수 있지만, 본 연구에서는 Fig. 10에서 보여주는 것처럼 하중-변위 곡선에서 탄성영역 기울기의 1/2에 해당하는 offset line과 교차하는 점에서 구해지는 붕괴하중을 사용하였다.⁷⁾

3.2 해석 결과

감육엘보우의 붕괴하중을 구하기 위해 Table 2에서와 같이 고려한 해석조건들에 대해 각각 배관 끝단에서 가해진 변위에 대한 감육부의 하중을 살펴보았다. Fig. 11과 12는 감육위치가 엘보우의 바깥쪽에 위치했을 경우의 하중-변위곡선으로 곡률반경의 변화에 따른 하중지지능력이 증가하는 것을 보여주고 있다. Fig. 11은 in-plane 상에서 닫힘모드 하중에 대한 경우로 가해지는 변위에 따라 하중이 증가하다 일정한 값에 이르러 수렴하는 현상을 보여준다. 반면에 Fig. 12는 열림모드 하중에 대한 경우로 닫힘모드와는 다르게 변위의 증가에 따라 하중이 계속 증가하는 거동을 보여주고 있다.

하중지지능력의 관점에서 보면 열림모드 하중이 작용되는 경우가 닫힘모드 하중이 작용되는 경우보다 더 높은 하중지지력을 갖는 것으로 나타났다. 하중이 수렴하는 경우(닫힘모드)에는 수렴하는 시점에서의 응력이 항복강도와 인장강도의 범위 내에 존재하지만 열림모드 하중조건에서는 경우에는 끝단의 변위가 증가함에 따라 하중 또한 계속 증가하는 거동을 보였다. 따라서 열림모드 하중조건에서의 붕괴하중은 Fig. 10에서와 같이 offset line에 의해 구한 하중과 응력기준에 의해 결정된 하중을 비교한 후, 더 낮은 값을 붕괴하중으로 결정하였다.

감육이 엘보우의 안쪽 면에 생겼을 때 하중-변위곡선은 Fig. 13과 14와 같으며, 감육이 바깥쪽에 있을 경우와 마찬가지로 곡률반경의 변화에 따른 하중지지능력이 증가하는 것을 보여주고 있다. 그리고 열림모드 하중에 대한 경우가 닫힘모드의 경우 보다 큰 하중지지능력을 갖는 것으로 나타났다. 감육엘보우에서 곡률반경과 하중조건에 따라 구해진 붕괴하중을 Fig. 15와 16에 그림으로 나타냈다. 결과에서 보듯이 동일한 감육길이에 대해서는 곡률반경의 증가가 붕괴하중의 증가를 보여주고 있으며, 닫힘모드에서 보다는 열림모드에서 큰 붕괴하중 값을 갖는 것으로 나타났다.

감육위치에 따라서는 본 해석에서 결함길이가 Fig. 4에서와 같이 평균화된 각(ϕ)으

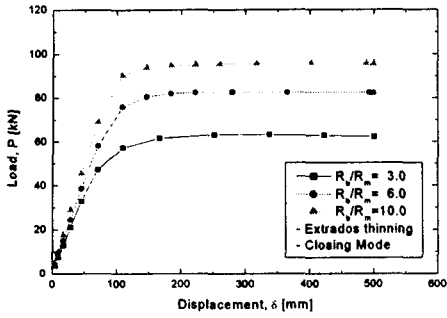


Fig. 11 Load-displacement curve according to radius curvature(extrados).

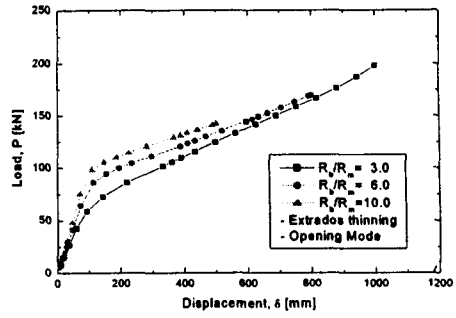


Fig. 12 Load-displacement curve according to radius curvature(extrados).

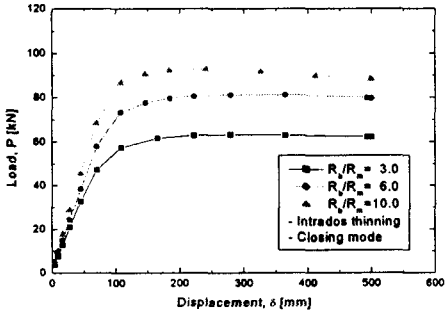


Fig. 13 Load-displacement curve according to radius curvature(intrados).

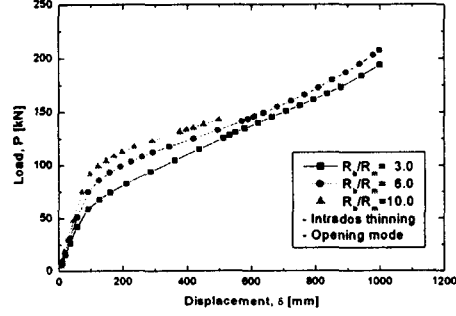


Fig. 14 Load-displacement curve according to radius curvature(intrados).

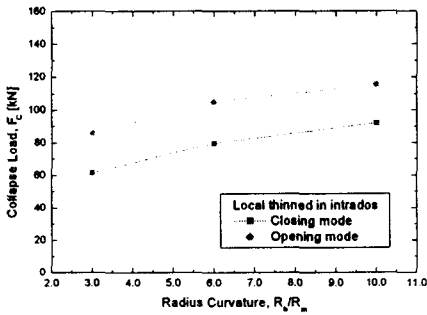


Fig. 15 Effects of radius curvature on collapse load for local thinning in extrados of elbow.

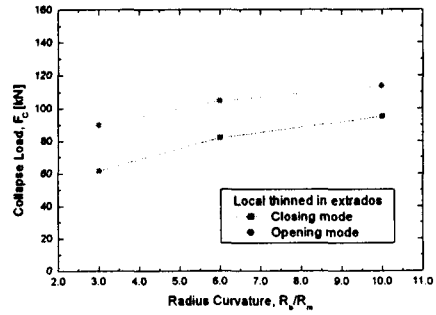


Fig. 16 Effects of radius curvature on collapse load for local thinning in intrados of elbow.

로 표현되어 있으므로, 엘보우의 길이에 대한 감육부의 길이의 비는 동일하다. 이때 감육위치에 대한 붕괴하중은 유사하게 나타났다. 그러므로 동일한 감육길이가 존재할 경우는 안쪽에 존재할 때의 붕괴하중이 바깥쪽 보다 작을 것으로 판단된다.

4. 결 론

감육엘보우의 형상을 효율적으로 모델링하기 위해 비교적 모델링이 용이한 직관에서 감육형상을 모델링한 후, 이 감육직관을 적절한 각도와 방향으로 굽히는 방법을 사용하였다. 또한 엘보우의 감육은 형상이 복잡하여 해석에 많은 시간이 소요되기 때문에 요소를 최적화하는 과정을 거치도록 하여, 감육으로 인한 엘보우의 손상에 대한 광범위하고 빠른 유한요소해석이 가능하도록 하였다.

이러한 방법을 통해 감육엘보우의 손상거동을 살펴보기 위한 해석을 수행한 결과, 곡률반경과 하중조건에 따라 구해진 붕괴하중은 곡률반경이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며, 닫힘모드의 하중이 작용하는 경우보다는 열림모드의 하중이 작용하는 경우가 큰 붕괴하중 값을 갖는 것으로 나타났다. 감육위치에 따라서는 동일한 감육길이가 존재할 경우는 바깥쪽에 존재할 때의 붕괴하중이 안쪽 보다 큰 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) B. Chexal, J. Horowitz, B. Dooley, P. Millett, C. Wood and R. Jones, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant", EPRI/TR106611-R2, 1998.
- 2) F. Michael, H. Rock and H. Schultz, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Aging-Related Aspects", Nucl. Eng. & Des., Vol. 207, pp. 307-316, 2001.
- 3) 김진원, 박치용, 김범년, "내압과 굽힘하중하에서 감육배관의 국부허용두께 평가," 대한기계학회 논문집 A권, Vol. 25, No. 1, pp.81-88, 2001.
- 4) 김진원, 박치용, "내압과 굽힘의 복합하중에서 감육배관의 손상기준," 한국산업안전학회 논문집, Vol. 17, No. 4, pp. 81-88, 2001.
- 5) ANSYS, Inc., "ANSYS User's Manual," 2001.
- 6) Hibbit, Karlson and Sorensen Inc., "ABAQUS User's Manual," 2001.
- 7) Y. Tan, and V. Matzen, "Correlation of In-plane Bending Test and FEA Results for Thin-walled Elbows", Nucl. Eng. & Des., Vol. 217, pp. 21-39, 2002.
- 8) Z. Li, W. Yenpei, C. Jin and L. Cengdian, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows", Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, pp. 697-703, 2001.