

원주방향 균열이 발생하는 곡관 감육부의 형상적 특성

김진원[†] · 이성호^{*}

Geometric Characteristic of Wall-thinning Defect Causing Circumferential Crack in Pipe Elbows

Jin Weon Kim[†] and Sung Ho Lee^{*}

(Received 31 JAN 2011, Accepted 17 FEB 2011)

ABSTRACT

The objective of this study is to classify the geometry of wall-thinning defect that causes a circumferential crack in the pipe elbows subjected to internal pressure. For this objective, first of all a criterion to determine the occurrence of circumferential cracking at wall-thinned area was developed based on finite element simulation for burst tests of pipe elbow specimens that showed axial and circumferential cracking at wall-thinned area. In addition, parametric finite element analysis including various wall-thinning geometries, locations, and pipe geometries was conducted and the wall-thinning geometries that initiate circumferential crack were determined by applying the criterion to the results of parametric analysis. It showed that the circumferential crack occurs at wall-thinning defect, which has a deep, wide, and short geometry. Also, it is indicated that the pipe elbows with larger radius to thickness ratio are more susceptible to circumferential cracking at wall-thinned area.

Key Words : Wall-thinning defect(감육결함), Pipe elbow(곡관), Circumferential crack(원주방향 균열), Failure mode(손상모드)

기호설명

D_o = outer diameter of pipe elbow
 L_C = axial wall-thinning length
 L_s = equivalent axial wall-thinning length
 t_{nom} = nominal thickness of wall-thinned pipe elbow
 t_p = minimum thickness at wall-thinned area
 P = internal pressure
 R_b = bend radius of pipe elbow
 R_o = outer radius of pipe elbow
 ϵ_A = axial strain at wall-thinned area
 ϵ_C = circumferential strain at wall-thinned area
 θ = half circumferential thinning angle

σ_u = ultimate tensile stress
 σ_y = yield stress
 σ_{ut} = true ultimate tensile stress

1. 서론

일반적으로 배관이나 압력용기와 같이 실린더 형태의 구조물에서는 단순 내압 조건에서 원주방향 응력이 축방향 응력에 비해 2배 정도 큰 값을 갖는다. 따라서, 고압에서 운전되는 이들 기기의 건전성을 평가할 때, 원주방향 응력을 주요 작용응력으로 고려하여 축방향 결함을 평가 대상으로 고려한다^{1,2)}. 원자력발전소(이하 원전)나 기타 플랜트의 탄소강 배관에서 고온고압의 유체 유동에 의해 발생하는 감육 결함에 대한 건전성 평가에서도 내압에 의한 원주방향 응력을 주요 작용응력으로 고려하고 있으며, 감

[†] 책임저자, 회원, 조선대학교 원자력공학과
E-mail : jwkim@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7109 FAX : (062)232-9218

^{*} 회원, 한국전력연구원 원자력발전연구소

육결합에 대한 허용두께 기준이나 대부분의 손상압력 평가 모델도 결함에 의해 증가되는 원주방향 응력의 크기를 기초로 개발되었다^{3~6)}. 감육결합이 가공된 배관 시편을 이용한 손상시험 결과에서도 대부분의 감육결합은 내압 조건에서 축방향 균열 발생을 보였다⁷⁾. 즉, 대부분의 감육 배관에서 결함부의 손상은 원주방향 응력에 의해 지배된다.

그러나, 최근 수행된 감육 곡관에 대한 손상시험 결과에 의하면, 단순 내압 조건에서 감육결합의 형상에 따라 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 것을 확인하였다^{7,8)}. 배관에서 원주방향 균열 생성 및 전파는 배관의 양단 파단을 초래할 수 있기 때문에 축방향 균열에 비해 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합은 배관의 건전성과 원전의 안전성 확보 측면에서 보다 심각하게 고려되어야 할 것이다. 따라서, 배관에서 감육결합 관리의 신뢰성과 배관 건전성 확보를 위해서는 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 형상 조건을 명확히 파악하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 감육 곡관에 대한 손상시험 결과에서 확인된 손상모드와 이에 대한 유한요소 시뮬레이션 결과를 기초로 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 기준(손상모드 변화 조건)을 도출하였다. 또한, 다양한 감육 형상을 고려한 유한요소 변수해석을 수행하고, 해석 결과에 원주방향 균열 발생 기준을 적용하여 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 형상 조건을 파악하였다.

2. 감육결합의 손상모드 변화 기준

2.1 곡관 감육부 손상모드

선행 연구에서는 감육 곡관 시편을 이용하여 단순 내압 조건에서 손상압력 평가 시험을 수행하였다⁷⁾. 곡관 시편은 내벽에 감육결합이 가공된 엘보우의 양단에 직관을 연결한 것으로, 엘보우와 직관 재료로는 원전 2차측 배관계통에 주로 사용되는 ASTM A234 WPB와 ASTM A106 Gr.B가 각각 적용되었다. Fig. 1은 곡관 시편과 감육결합의 형상을 나타낸 것으로, 시험에서 고려된 결함의 형상과 위치는 Table 1에 정리하였다.

손상시험 결과에서 감육부의 손상모드를 살펴보면 대부분의 시편에서 감육부는 부풀어 오른 후 축방향 균열이 발생되었다. 그러나, 원주방향 전체가

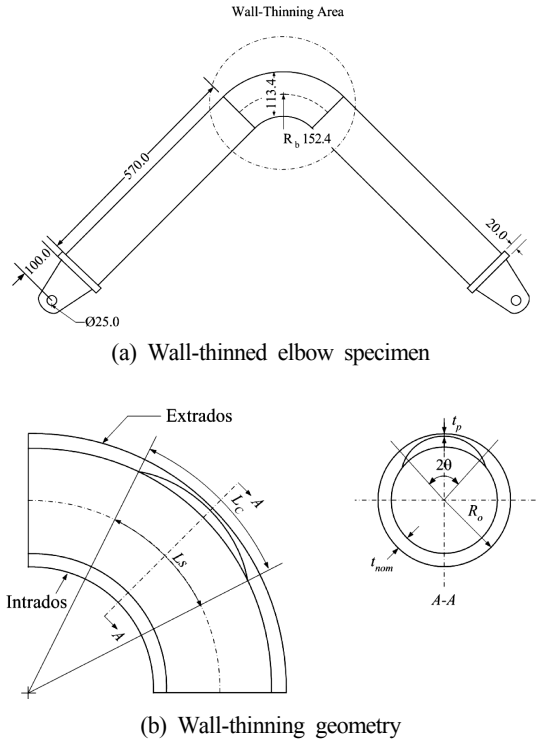
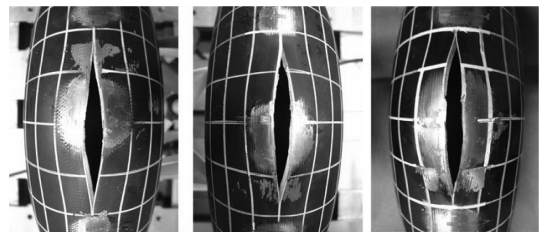
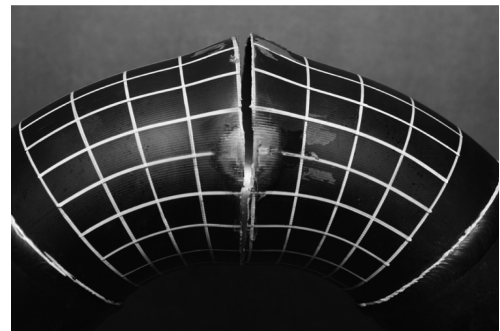


Fig. 1 Elbow specimen and local wall-thinning geometry



(a) Extrados: $L_s/D_o = 1.0$, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774$



(b) $\theta/\pi = 1.0$, $L_s/D_o = 0.5$, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom} = 0.774$

Fig. 2 Failure modes of wall-thinned elbow under simple internal pressure

Table 1 Matrix of failure test of wall-thinned elbow

Thinning location	Equiv. thinning length, L_s/D_o	Max. thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$	Circ. thinning angle, θ/π
Extrados	0.25 ~ 1.5	0.706 ~ 0.833	0.125 ~ 0.5
Intrados	0.25 ~ 1.5	0.706 ~ 0.833	0.125 ~ 0.5
Full-circ.	0.50 ~ 1.5	0.774	1.0

감육($\theta/\pi=1.0$)되고 결합 길이와 깊이가 각각 $L_s/D_o=0.5$ 와 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.774$ 인 조건에서는 다른 감육 결합 형상과 달리 외호면 영역에서 원주방향 균열이 생성되어 전파(약 280° 정도)되는 손상모드를 보였다. Fig. 2는 손상시험에서 관찰된 곡관 시편의 감육부에서 발생된 축방향 균열과 원주방향 균열을 보여주고 있다.

2.2 원주방향 균열 발생 기준 도출

앞서 서술한 바와 같이 대부분의 감육결합은 단순 내압이 작용되는 경우에 축방향 균열 발생의 손상모드를 보인다. 그러나, 일부 감육결합 형상에서는 감육부에서 원주방향 균열이 발생되었다. 여기서는 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 기준을 도출하기 위해서, Table 1의 감육 곡관 손상시험에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하고 감육부에서 원주방향과 축방향의 변형률 변화를 살펴보았다.

2.2.1 유한요소 모델

Fig. 3은 감육 곡관에 대한 손상시험을 시뮬레이션하기 위한 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 곡관 시편의 대칭성을 고려하여 곡관의 1/4만을 모델링하였으며, 감소적분이 반영된 20절점의 육면체요소로 구성되었다. 유한요소 모델은 곡관 시편에서 실제 측정된 감육부의 두께와 형상을 기초로 설계되었으며, 두께 방향으로 3개의 요소를 배열하고 감육결합부에는 미세 요소를 적용하였다. 손상에 수반되는 감육부의 대변형 현상을 반영하기 위해 기하학적 비선형 옵션(NLGEOM in ABAQUS)을 적용하였다. 작용하중으로 내압만을 고려하였으며, 내압은 곡관 내면에 배열된 요소에 분포하중 형태로 적용되었다. 시편 끝단은 막힌 것으로 모델링 되었으며, 끝단 내면에 내압을 직접 작용함으로써 내압에 의한 축방향 하중이 감육 곡관의 거동에 적절히 작용될 수 있도록 하였다.

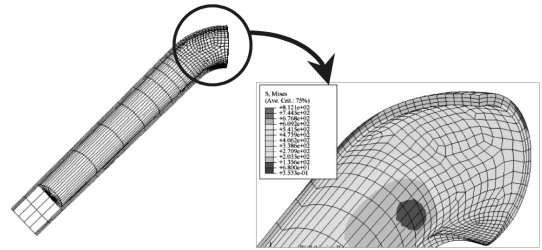


Fig. 3 Finite element model for simulating burst test of wall-thinned elbow

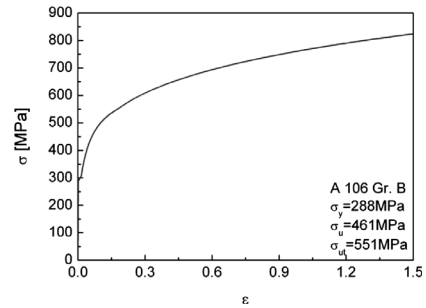


Fig. 4 True stress-true strain curve used for finite element simulation

해석에는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS code⁹⁾가 사용되었다. 엘보우에서 채취한 인장시편을 이용하여 구한 진응력-진변형률 곡선이 유한요소 해석시 재료물성치로 사용되었으며, 해석에서 직관과 곡관의 재료물성치는 동일한 것으로 가정하였다. Fig. 4는 해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것이다.

2.2.2 원주방향 균열 발생 기준

곡관 시편의 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 조건을 파악하기 위해서, 손상시험에 대한 유한요소 시뮬레이션 결과로부터 감육부 중심에서 축방향(ϵ_A)과 원주방향(ϵ_C)의 변형률을 구하고 내압에 따른 이들 값의 변화를 살펴보았다. 여기서, 원주방향과 축방향 변형률은 두께 방향의 평균값이다.

각 시편에서 내압에 따른 감육부 중심의 축방향과 원주방향 변형률 비(ϵ_A/ϵ_C)를 살펴보면, Fig. 5에 나타난 것과 같이 감육부에서 축방향 균열이 발생된 외호면(Extrados) 감육 곡관과 내호면(Intrados) 감육 곡관의 감육부에서는 축방향 변형률이 원주방향 변형률 보다 작은 값($\epsilon_A/\epsilon_C < 1$)을 보였다. 일정한 길이와 폭을 갖는 감육결합의 경우에 길이가 감소함에 따라

전체적으로 ϵ_A/ϵ_C 이 증가하는 경향을 보였다. 또한, 감육결합의 길이가 $L_s/D_o=0.5$ 이상인 경우에는 감육부에서 소성 변형이 진행됨에 따라 ϵ_A/ϵ_C 가 탄성 변형 영역에 비해 감소하였으나, 감육결합의 길이가 짧은 경우($L_s/D_o=0.25$)에는 감육부에서 소성 변형이 진행됨에 따라 ϵ_A/ϵ_C 가 탄성 변형 영역에 비해 증가하였다. 원주방향 전체가 감육된 경우($\theta/\pi=1.0$)에도

감육부에서 축방향 균열이 발생된 경우에는 ϵ_A/ϵ_C 가 1보다 작은 값을 보였다 (Fig. 6). 그러나, 곡관 시편의 감육부에서 원주방향 균열이 발생되어 전파된 경우($\theta/\pi=1.0$, $L_s/D_o=0.5$, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.774$)에는 감육부에서 소성 변형이 시작됨에 따라 ϵ_A/ϵ_C 가 탄성 영역에서 보다 증가할 뿐 아니라 ϵ_A/ϵ_C 가 1보다 큰 값을 보였다. 즉, 곡관 시편의 감육부에 원주방향 균열이 발생된 경우에는 축방향 변형률이 원주방향 변형률보다 큰 값을 보였다.

기존 연구 결과에 의하면 배관의 감육부에서 소성 변형이 시작되면서 ϵ_A/ϵ_C 가 탄성 변형 영역보다 큰 값을 보이는 경우에 감육부에서 원주방향 균열이 발생되는 것으로 보고하였다¹⁰⁾. 그러나, 감육 곡관 손상 시험에 대한 유한요소 시뮬레이션 결과, 감육결합의 길이가 짧은 경우에는 감육부에서 축방향의 균열이 발생됨에도 불구하고 소성 변형 영역에서 ϵ_A/ϵ_C 가 탄성 변형 영역에 비해 큰 값을 보였다. 따라서, 기존 연구에서 제시한 기준이 만족될지라도 감육부에서 원주방향 균열이 발생되지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 감육부에서 소성 변형이 진행됨에 따라 ϵ_A/ϵ_C 가 탄성 영역에 비해 증가할지라도 원주방향 균열이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 대신 손상 시험에 대한 유한요소 시뮬레이션 결과에 의하면 감육부에서 축방향 변형률이 원주방향 변형률보다 큰 값을 보일 때 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생되었다. 따라서, 감육부 중심에서 내압에 따른 ϵ_A/ϵ_C 가 1을 초과할 때 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 것으로 판단하는 것이 타당하며, 여기서는 식 (1)을 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 기준으로 제시하고자 한다.

$$\epsilon_A/\epsilon_C > 1 \tag{1}$$

3. 원주방향 균열 발생 감육결합 분류

3.1 결함 형상에 따른 변수해석

앞서 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 기준을 도출하였다. 여기서는 다양한 감육결합 형상을 고려한 감육 곡관에 대한 유한요소 변수해석을 수행하여 감육부 중심에서 변형률을 구하고, 감육결합 형상별로 ϵ_A/ϵ_C 의 변화를 살펴보았다. 변수해석에 사용된 유한요소 모델은 기본적으로 앞서 유한요소 시뮬레이션에 사용된 것(Fig. 3)과 동일하며, 곡

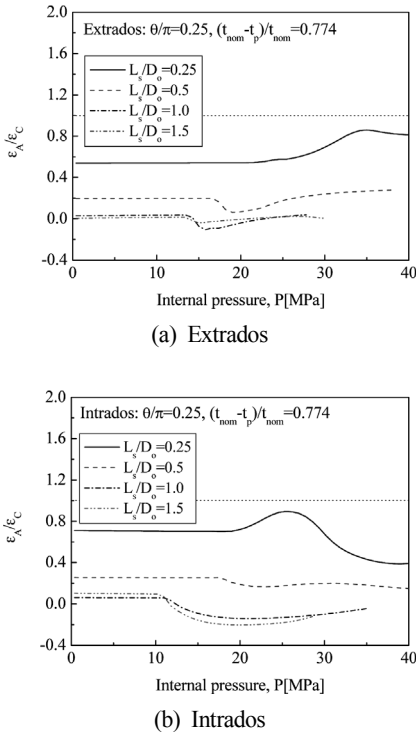


Fig. 5 Ratio of axial and circumferential strains at wall-thinned area of extrados and intrados wall-thinned elbow specimens

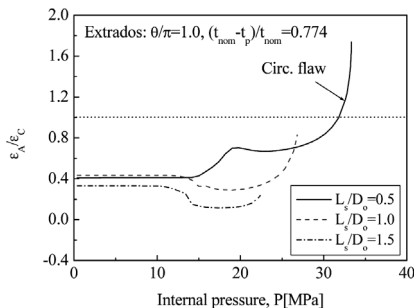
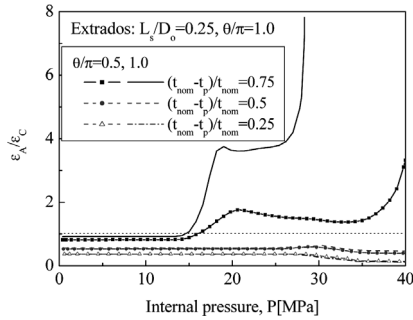


Fig. 6 Ratio of axial and circumferential strains at wall-thinned area of full-circumference wall-thinned elbow specimens

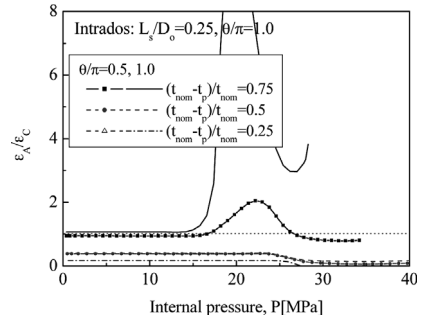
Table 2 Matrix of parametric finite element analysis

Thinning location	Equiv. thinning length, L_s/D_o	Max. thinning depth, $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}$	Circ. thinning angle, θ/π	Radius to thickness ratio, R_o/t_{nom}	Etc.
Extrados	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25, 0.50, 0.625*, 0.75	0.125, 0.25, 0.5	10	
Intrados	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25, 0.50, 0.625*, 0.75	0.125, 0.25, 0.5	10	
Full-circ.	0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.25, 0.50, 0.625*, 0.75	1.0	10	
	0.25, 0.5	0.75	1.0	20	

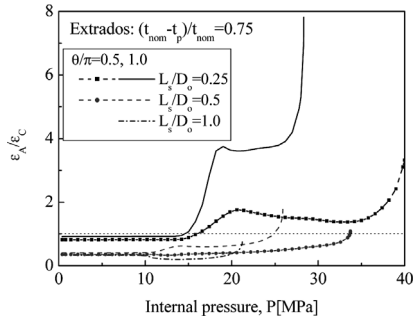
* only for $L_s/D_o=0.0625$ & 0.125 and $\theta/\pi=0.5$



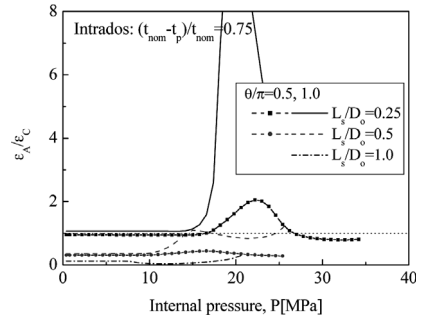
(a) Thinning depth



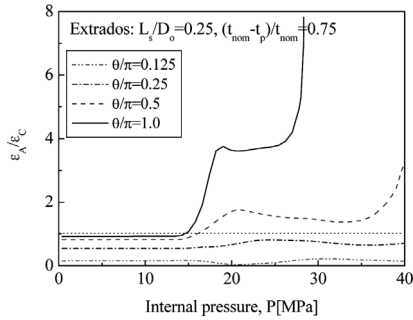
(a) Thinning depth



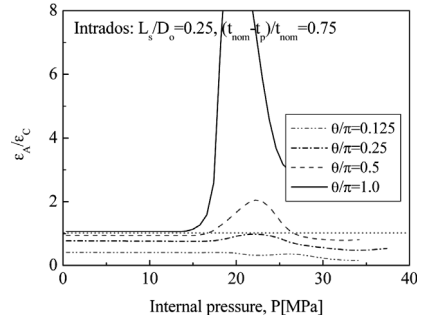
(b) Thinning length



(b) Thinning length



(c) Circ. thinning angle



(c) Circ. thinning angle

Fig. 7 Variations of ϵ_A/ϵ_C with internal pressure for different defect geometries for extrados wall-thinned elbow

Fig. 8 Variations of ϵ_A/ϵ_C with internal pressure for different defect geometries for intrados wall-thinned elbow

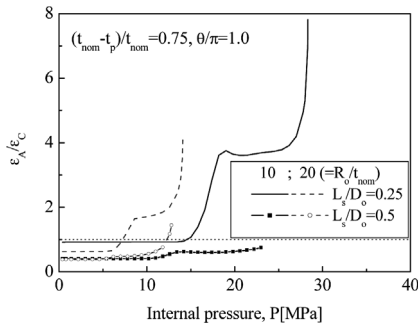


Fig. 9 Effect of R_o/t_{nom} on the $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ for full-circumferential wall-thinned elbow

관의 크기와 감육결합의 형상만을 수정하였다. 변수 해석에서 고려한 감육 곡관은 외경이 400mm이고 곡률반경이 외경의 1.5배인 엘보우 양단에 외경의 5배 길이의 직관이 연결된 것으로 가정하였다. 변수 해석에는 다양한 크기의 감육결합이 고려되었으며, 감육결합이 곡관부 중심의 외호면, 내호면, 그리고 원주방향 전체에 걸쳐 존재하는 경우를 각각 고려하였다. Table 2는 변수해석에서 고려한 감육결합의 형상과 위치를 정리한 것이다. Table 2에서 감육결합의 형상에 대한 정의는 Fig. 1에 나타난 것과 같다.

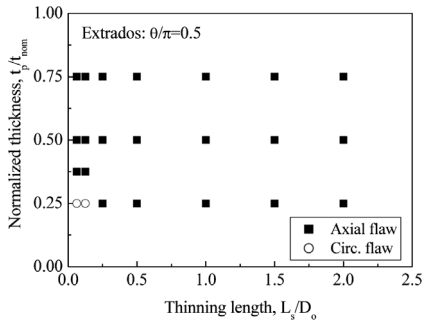
Figs. 7과 8은 변수해석 결과로부터 곡관의 외호면과 내호면에 감육결합이 존재하는 경우와 원주방향 전체가 감육된 경우에 감육부 중심에서 내압에 따른 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 감육결합의 위치에 관계없이 감육결합의 원주방향 폭과 깊이가 증가할수록 그리고 감육결합의 길이가 짧아질수록 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 가 증가하는 경향을 보였다. 특히, 원주방향 폭과 깊이가 크고 길이가 짧은 감육결합에서는 감육부에서 소성변형이 발생됨에 따라 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 가 급격히 증가하여 1을 초과하였다. 따라서, 곡관에서 감육결합의 깊이와 폭이 증가하고 길이가 감소함에 따라 감육부에서 원주방향 균열이 발생되어 원주방향으로 전파될 가능성이 높아지는 것을 알 수 있다.

한편, 곡관 감육부에서 원주방향 균열 발생에 미치는 곡관의 형상에 대한 영향을 살펴보기 위해서, 동일한 형상의 감육결합 조건에서 R_o/t_{nom} 가 10과 20인 곡관의 감육부에서 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 를 비교하였다. Fig. 9는 R_o/t_{nom} 이 10과 20인 곡관에 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.75$ 인 원주방향 전체가 감육된 결합($\theta/\pi=1.0$)이 존재하는 경우에 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에

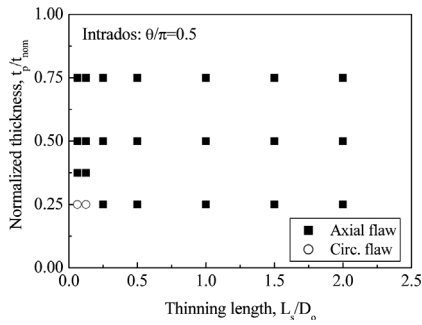
서 알 수 있는 것과 같이 감육결합의 길이에 관계없이 $R_o/t_{nom}=10$ 인 곡관에 비해 $R_o/t_{nom}=20$ 인 곡관이 상대적으로 낮은 내압조건에서 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 이 증가하여 1을 초과하였다. 감육결합의 길이가 $L_s/D_o=0.5$ 인 경우에 $R_o/t_{nom}=10$ 인 곡관에서는 내압이 증가할지라도 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 가 1을 초과하지 않지만, $R_o/t_{nom}=20$ 인 곡관에서는 $\varepsilon_A/\varepsilon_C$ 가 1을 초과하였다. 따라서, 동일한 형상의 감육결합을 갖는 경우에 곡관의 R_o/t_{nom} 가 증가할수록 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 가능성이 큰 것을 알 수 있다.

3.2 원주방향 균열 발생 감육결합 형상

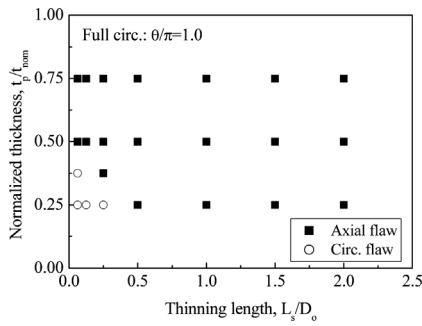
앞서 수행된 변수해석 결과에 식(1)의 기준을 적용하여 곡관의 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 형상을 분류하였다. 곡관에서 감육결합의 원주방향 폭이 $\theta/\pi=0.25$ 이하인 경우에는 Table 2에서 고려된 모든 감육결합 깊이와 길이 조건에서 원주방향 균열이 발생되지 않았다. 또한, 감육결합의 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.5$ 이하(두께가 $t_p/t_{nom}=0.5$ 이상)인 경우에도 변수해석에서 고려한 감육결합의 길이와 원주방향 폭의 크기에 관계없이 감육부에서 원주방향 균열은 발생되지 않았다. 그러나, 감육결합의 원주방향 폭이 $\theta/\pi=0.5$ 이상인 경우에는 감육결합의 깊이와 길이에 따라 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 것으로 예측되었다. Fig. 10은 원주방향 폭이 $\theta/\pi=0.5$ 인 외호면 감육 곡관과 내호면 감육 곡관, 그리고 원주방향 전체가 감육된 곡관에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 깊이와 길이를 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 원주방향 감육 폭이 $\theta/\pi=0.5$ 인 외호면 감육 곡관과 내호면 감육 곡관에서는 감육결합의 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.75$ 이상(두께가 $t_p/t_{nom}=0.25$ 이하)이고 감육결합의 길이가 $L_s/D_o=0.125$ 이하이면 감육부에서 원주방향 균열이 발생하였다. 원주방향 전체가 감육된 경우($\theta/\pi=1.0$)에는 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 형상이 확대되었다. 감육결합의 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.75$ 이상(두께가 $t_p/t_{nom}=0.25$ 이하)인 조건에서는 감육결합의 길이가 $L_s/D_o=0.25$ 이하에서 원주방향 균열이 발생되었으며, 감육결합의 깊이가 $L_s/D_o=0.0625$ 인 조건에서는 깊이가 $(t_{nom}-t_p)/t_{nom}=0.625$ (두께가 $t_p/t_{nom}=0.375$)까지 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 것으로 예측되었다.



(a) Extrados



(b) Intrados



(c) Full-circ.

Fig. 10 Wall-thinning geometries to occur circumferential crack in wall-thinned area

원전 배관 감육결합에 대한 허용 두께기준을 제시하고 있는 ASME Sec.XI Code Case N-597에서는 배관의 안전등급에 따라 감육부의 최소 두께가 $t_p/t_{nom} < 0.3$ (Class 1 배관) 또는 $t_p/t_{nom} < 0.2$ (Class 2&3 배관)이면 추가적인 평가 없이 감육 배관을 정비하거나 교체하도록 요구하고 있다. 따라서, Fig. 10의 결과로부터 감육부의 원주방향 폭이 $\theta/\pi=0.25$ 이하인 경우에는 감육결합의 위치에 관계없이 감육부가 임계두께에 도달할지라도 감육부에서 원주방향 균열

이 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, 곡관의 감육결합 관리시 원주방향 균열 발생을 고려할 필요가 없다. 그러나, 감육부의 원주방향 폭이 $\theta/\pi=0.5$ 이상인 경우에는 감육결합의 길이에 따라 감육부 두께가 ASME Sec.XI Code Case N-597의 임계두께 이상에서 감육부의 원주방향 균열이 발생할 수 있다. 따라서, 이 경우에는 배관 감육결합에 대한 건전성 평가시 감육부에서 원주방향 균열의 발생 가능성을 확인해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 단순 내압조건에서 곡관의 감육결합부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 형상 조건을 파악하기 위해서, 감육 곡관 손상시험 결과에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 감육부에서 원주방향 균열이 발생하는 조건을 도출하였다. 또한, 다양한 감육결합 형상을 고려한 유한요소 변수해석을 수행하고, 그 결과에 원주방향 균열 발생 기준을 적용하여 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생할 수 있는 감육결합의 형상 조건을 파악하였다. 이들 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 감육 결합부에서 축방향 변형률과 원주방향 변형률의 비가 1을 초과할 때, 곡관 감육부에서 원주방향 균열이 발생하였다.
2. 감육부의 깊이와 원주방향 폭이 클수록 그리고 길이가 짧을수록 내압조건에서 원주방향 균열 발생 가능성이 증가하였다.
3. 감육결합의 형상이 동일한 경우, 곡관의 반경대 두께 비(R_o/t_{nom})가 클수록 감육부에서 원주방향 균열 발생 가능성이 증가하였다.
4. 감육결합의 원주방향 폭이 $\theta/\pi=0.25$ 이하이면 감육결합의 길이가 $L_s/D_o=0.0625$ 이상에서는 감육부의 최소 두께가 ASME Sec.XI Code Case N-597의 임계두께에 도달할지라도 원주방향 균열이 발생하지 않았다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

1. ASME, Section III, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components," Appendix G, Protection Against Nonductile Failure., 1998ed.
2. ASME, Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," Appendix A, Analysis of Flaws., 1998ed.
3. ASME Section XI, Div.1, ASME Code Case N-597 rev.2, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," 2003ed.
4. ANSI/ASME, B31G, "Manual for Determinating the Remaining Strength of Corroded Pipelines," 1991ed.
5. Leis, N. and Stephens, D.R., 1997, "An alternative approach to assess the integrity of corroded line pipe. Part I current status and II alternative criterion," Proc. of 7th Int. Conf. on Offshore and Polar Eng., pp. 624-641.
6. Li, Z., Yinpei, W., Jin, C., and Cengdian, L., 2001, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows," Int. J. Press. Ves. and Piping, Vol. 78, pp. 697-703.
7. Kim, J.W., Lee, S.H., and Park, C.Y., 2009, "Experimental Evaluation of the Local Wall-Thinning on the Failure Pressure of Elbows," Nucl. Eng. and Design, Vol. 239, pp. 2737-2746.
8. Kamaya, M., Suzuki, T., and Meshii, T., 2008, "Normalized the Influence of Flaw Length on Failure Pressure of Straight Pipe with Wall-thinning," Nucl. Eng. and Design, Vol. 238, pp. 8-15.
9. Hibbitt, Karlson, and Sorensen Inc., 2009. ABAQUS Ver. 6.8 User's Manual.
10. Herman, I., and Meshi, T., 2008, "Fracture Mode Prediction Method for Pipes with Wall-thinning by using the History Data of Strain Ratio," Proc. of PVP 2008, PVP2008-61908.