

내압과 굽힘하중하에서 감육배관의 국부허용두께 평가

김진원* · 박치용* · 김범년*
(2000년 4월 14일 접수)

Evaluation of Local Allowable Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment

Kim Jin Weon, Park Chi Yong and Kim Bum Nyun

Key Words: Thinned Pipe(감육배관), Erosion/Corrosion(침부식), Carbon Steel Pipe(탄소강 배관), Local Allowable Wall Thickness(국부허용두께), Minimum Required Wall Thickness(최소요구두께)

Abstract

This study proposed an analytical method to evaluate a local allowable wall thickness (LAWT) for locally thinned pipe subjected to internal pressure and bending moment. In this method, the stresses in the thinned region were calculated by finite element analysis and plastic collapse was applied as a failure criterion of thinned pipe. Using this method, LAWT for a simplified thinned pipe was evaluated with variation in axial extent of thinned area, and it was compared with allowable wall thickness provided by previous pipe wall thickness criteria. The results showed that the LAWT was lower, about 50%, than that calculated by construction code or ASME Code Case N-597, and it was higher, about 2 times, than that estimated by evaluation model based on pipe experiments. In addition, LAWT was decreased with increasing axial extent of thinned area and saturated with further increase in axial extent. And, the variation in LAWT with axial extent of thinned area depended on type of load, especially a magnitude of bending moment, considering in the evaluation.

1. 서 론

원자력발전소 2차측 배관의 대부분은 탄소강 배관으로 구성되어 있는데, 이들 배관은 수질이나 유동조건, 그리고 배관형상 등에 따라 배관 내면에서 부식과 침식이 발생하고, 이로 인해 배관의 두께가 감소하는 현상이 발생된다. 이러한 형태의 손상은 미국의 Surry 발전소 주급수 배관이 감육에 의해 파단됨으로서 크게 주목받게 되었으며,⁽¹⁾ 발전소의 가동 년 수가 증가됨에 따라 탄소강 배관의 건전성에 있어서 가장 중요한 고려 사항으로 대두되고 있다.⁽²⁾ 따라서 고에너지

탄소강 배관에서의 침부식 메커니즘과 침부식에 미치는 환경 인자들을 밝히기 위한 많은 연구들이 수행되었으며, 감육된 배관계통과 감육 위치를 예측하기 위한 프로그램의 개발이 이루어지고 있다.⁽³⁾ 한편, 발전소에서는 배관의 두께 측정을 가동중검사 계획에 반영하여 점검을 강화하고, 감육이 발견된 배관들을 부식이 강한 배관 재질로 교체하거나 보강하고 있다.

원자력발전소의 안전성 측면에서는 감육이 발견되거나 예상되는 배관을 모두 교체하는 것이 가장 바람직하지만, 발전소의 경제성과 제한된 정비기간 등을 고려하면 감육된 모든 배관을 교체하는 것이 현실적으로 어렵다. 따라서 건전성 평가를 통해 감육배관에 대한 적절한 두께 허용 기준을 설정하여 배관의 보수 및 교체를 결정하는 것이 보다 합리적일 것이다. 현재 원전 배관

* 회원, 한전 전력연구원 원자력연구실
E-mail : jwkim@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5556 FAX : (042)865-5514

의 두께에 대한 기준으로는 설계코드에서 제시하고 있는 최소요구두께(t_{min})가 적용되고 있다.^(4,5) 그러나 설계코드의 두께 기준은 운전 중에 발생한 국부적인 감육을 고려하지 않고 있으며, 설계시 요구되는 배관의 최소 두께만을 제시하고 있다. 따라서 가동중 부분적으로 감육된 원전 배관에 적용할 수 있는 국부적인 최소허용두께 기준을 정립하는 것이 우선적으로 필요하다.

이와 관련하여 최근 감육배관에 대한 건전성 평가 및 허용두께 기준 확립을 위해 많은 실험적·이론적 연구들이 수행되었다.^(6~8) 이들 연구에서는 실제 배관을 이용한 다양한 시험결과로부터 감육된 배관의 파단거동과 손상모드를 밝히고, 배관의 건전성 평가를 위한 이론적 모델들을 제시하고 있다. 한편, ASME에서는 칩부식에 의해 감육된 배관에 대해 적절한 관리지침을 제공하기 위한 연구들이 수행되었으며,⁽⁹⁾ 이들 결과를 바탕으로 최근 ASME Code Case 형태로 감육배관의 사용, 교체, 보수 등에 대한 평가 기준 및 평가 절차들을 제시하였다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 이들 방법들은 실제 감육배관에서 나타나는 감육부의 형상과 원전 배관에서 고려되어야 하는 다양한 형태의 하중조건을 충분히 고려하지 못하는 한계를 보이고 있다.^(11,12)

따라서, 본 논문에서는 내압과 굽힘하중을 모두 고려하여 감육배관의 국부적인 허용두께를 평가할 수 있는 해석적 방법을 제시하였다. 또한, 간단한 감육배관을 대상으로 내압과 굽힘하중 조건에서 국부허용두께(t_{aloc})를 평가하고, 국부허용두께에 미치는 감육부 길이의 영향을 분석하였다.

2. 기존 배관허용두께 기준

2.1 설계코드의 최소요구두께

설계코드에서 배관의 두께는 근본적으로 압력에 의한 원주방향 응력기준과 압력 및 굽힘하중에 의한 축방향 응력기준을 만족할 수 있도록 결정된다. 따라서 설계코드에서 배관의 최소요구두께는 2단계 평가로 이루어지며, 먼저 식 (1)에 따라 t_{min} 이 계산된다. 식 (1)에서 결정된 t_{min} 이 배관의 안전등급에 따라 주어지는 ASME Sec.III⁽⁴⁾ 또는 ANSI/ASME B31.1⁽⁵⁾의 응력기준을 만족하면 최소허용두께로 결정되고, 응력기준을 만족하지

못하는 경우는 두께를 증가시키거나 작용응력이 감소되도록 설계를 변경하여 응력기준을 만족시킨다. 따라서, 설계코드에서 배관의 최소요구두께는 배관의 설계압력에 의해 결정된다.

$$t_{min} = \frac{P_D D_o}{2(S + yP_D)} \quad (1)$$

여기서, P_D 는 설계압력, D_o 는 배관의 외경, y 는 계수, S 는 ASME Sec.II에서 주어지는 재료의 허용응력이다. ASME Class 1 배관의 경우는 S 대신에 ASME Sec.II에서 주어지는 재료의 설계응력 강도(S_m)가 적용된다.

2.2 ASME Code Case N-597의 국부허용두께

ASME Code Case N-597⁽¹⁰⁾은 국부적으로 감육된 배관의 계속 사용에 대한 허용여부를 평가하기 위해서 최근 ASME Sec.XI에서 개발된 것으로, 아직 원전 배관에 대한 적용이 허용되지는 않았지만 감육된 배관의 교체, 정비, 계속 사용 등을 결정할 수 있는 기준을 제시하고 있다. ASME Code Case N-597에서는 다음 주기 검사시 예상되는 배관두께(t_p)가 $0.875 \times$ 공칭두께(t_{nom})와 $0.2 \times t_{nom}$ 의 범위에 있는 경우에 평가를 통해 국부허용두께를 결정할 수 있도록 하고 있으며, ASME Class 2&3 배관에 대한 평가방법과 기준을 제시하고 있다. ASME Code Case N-597은 기본적으로 설계코드에 바탕을 둔 것으로 감육부의 형상과 설계압력에 의해 t_{aloc} 가 결정되고, 이것이 응력기준을 만족하는지 평가하는 2단계 기준을 사용하고 있다.

t_{aloc} 는 Fig. 1과 같이 정의되는 감육부위의 형상에 따라 다음의 3가지로 구분하여 평가한다.

(a) Case 1 (감육부의 원주방향 폭이 제한된 경우) : t_{min} 이하로 감육된 영역 사이의 거리가

$$2.5\sqrt{R_{nom}t_{nom}} \text{ 또는 } 2L_{m,avg} \text{ 이상이고, } L_{m(t)}$$

$\sqrt{R_{min}t_{min}}$ 보다 작거나 같은 경우에 t_{aloc} 은 Fig. 2의 Curve-1에 의해 결정된다. 여러 곳이 감육된 경우에는 하나의 감육영역으로 고려하여 평가할 수 있다. 여기서 $L_{m(t)}$ 는 감육부위의 원주방향 폭, R_{nom} 은 공칭반경, $L_{m,avg}$ 는 두께가 t_{min} 이하로 감육된 부위의 평균 폭이고, R_{min} 은 t_{min} 에 대한 평균반경이다.

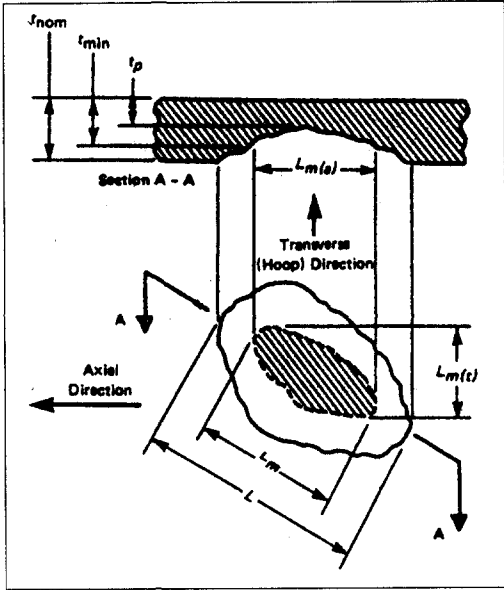


Fig. 1 Illustration of erosion/corrosion wall thinning

(b) Case 2 (감육부의 원주방향과 길이방향의 폭이 모두 제한된 경우) : 감육부의 최대폭 L_m 이 $2.65\sqrt{R_{min}t_{min}}$ 보다 작거나 같고, t_{nom} 이 $1.13t_{min}$ 보다 큰 경우에 t_{aloc} 은 식 (2)에 의해 결정된다.

$$t_{aloc} \geq t_{min} \frac{0.353L_m}{\sqrt{R_{min}t_{min}}} \quad (2)$$

(c) Case 3 (감육부의 원주방향 폭에 대한 제한이 없는 경우) : 위의 두 조건을 만족하지 못하는 경우에 t_{aloc} 은 Fig. 2의 Curve-2에 의해 결정된다. 이 때 인접한 감육영역 사이의 축방향 거리가 $2.5\sqrt{R_{nom}t_{nom}}$ 또는 $2L_{m,max}$ 이상 떨어져 있어야 하며, 여러 곳이 감육된 경우에는 하나의 감육부위로 가정하여 평가할 수 있다. 여기서, $L_{m,max}$ 은 인접한 감육부들의 L_m 값중 최대 값을 의미한다.

2.3 JAERI-M-93의 국부허용두께

감육배관에 대한 건전성 평가를 위해 일본원자력연구소(JAERI)에서는 내압과 굽힘하중 조건에서 배관실험을 수행하였다. 동일한 감육길이에서

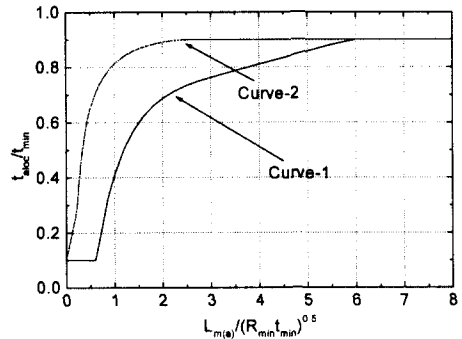


Fig. 2 Allowable wall thickness for locally thinned pipe in ASME Code Case N-597 Case 1&3

감육부의 원주방향 폭과 깊이에 따른 배관의 파단하중을 평가하고, 그 결과를 바탕으로 식 (3)과 같은 감육배관의 파단에 대한 평가 모델을 제시하였다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} M_m/M_c &= 1, (0.0 \leq P_i/P_b \leq 0.5) \\ 0.5M_m/M_c + P_i/P_b &= 1, (0.5 \leq P_i/P_b \leq 1.0) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, M_m 는 작용 굽힘모멘트, P_i 는 내압이고, M_c 는 붕괴 굽힘모멘트, P_b 는 파열압력이다. 원주방향으로 일정하게 감육(360°)된 배관의 경우 M_c 는 식 (4)와 같이 주어지며, P_b 는 다양한 관계식들에 의해 주어지고 있으나 단면에서의 완전소성을 가정한 식 (5)가 실험 결과와 가장 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

$$\begin{aligned} M_c &= \int_A \sigma \cdot y \, dA \\ &= 4\sigma_f [R_o^3 - R_i^3]/3 \end{aligned} \quad (4)$$

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_u \ln K \quad (5)$$

여기서, σ_f 는 항복응력(σ_y)과 인장응력(σ_u)의 평균으로 정의되며, R_o 는 배관의 외반경, R_i 는 배관의 내반경, 그리고 K 는 배관의 외경과 내경의 비이다.

따라서, 감육배관의 국부허용두께는 하중과 감육형상, 그리고 배관의 인장데이터가 주어지면 식 (3)이 만족되는 조건에서 결정될 수 있다. 이 모델에 의한 허용두께 평가에서는 내압과 굽힘하

중을 모두 고려하고 있으며, 감육부의 폭과 깊이
에 대한 영향이 잘 반영되어 있다. 그러나 감육
부의 길이에 대한 영향을 고려하지 못하는 한계
를 보이고 있다.

3. 해석적 감육배관 허용두께 평가 기준

배관의 허용두께 평가와 관련된 기존의 방법들
은 대부분 내압에 의해 허용두께를 결정한
다.^(10,13~15) 그러나 원전 배관들은 지진하중, 열팽
창하중 등과 같은 큰 굽힘하중을 고려하여 안전
성이 입증되어야 한다. 따라서, 감육배관의 최소
허용두께도 이들 하중을 고려하여 평가되는 것이
바람직하며, 여기서는 내압과 굽힘하중을 동시에
고려한 평가 기준을 제시하였다.

3.1 허용두께 평가 기준

앞선 연구들에서 수행된 배관실험 결과들에 의
하면 감육배관의 손상모드는 하중의 작용형태와
감육부위의 형상에 의존하는 것으로 알려져 있
다.^(6~8) 내압과 굽힘하중이 작용되는 경우에 감육
배관은 주로 타원형 변형과 좌굴에 의해 손상되
며, 균열이 발생하는 경우에도 감육부에서 내경
(necking)에 의한 소성붕괴를 보이고 있다.⁽⁷⁾

따라서, 압력과 굽힘하중이 동시에 작용되는
경우에 감육배관의 파단기준으로 소성붕괴를 적
용할 수 있으며, 본 논문에서는 허용두께에 대한
평가 기준으로 식 (6)을 적용하였다.

$$\sigma_{app} (P_D, M_m, R_o, t_{aloc}) \leq \sigma_f (\text{Material}) \quad (6)$$

즉, 감육배관의 국부허용두께는 작용되는 하중
조건에 관계없이 해석적으로 평가된 감육부에서
의 작용응력(σ_{app})이 재료의 유동응력(σ_f)을 초과
하지 않는 조건으로부터 결정된다.

식 (6)에서 작용응력과 유동응력은 정의에 따라
다양한 값들이 적용될 수 있다. 응력해석 결과에
서 주어지는 작용응력으로는 감육부에서의 국부
최대응력이나 단면 평균응력 등을 고려할 수 있
다. 또한, 유동응력으로는 일반적인 소성붕괴 기
준에서 사용되는 $(\sigma_y + \sigma_u)/2$, ASME Sec. XI에
서 정의되는 $2.4S_m$,⁽¹⁶⁾ B31G 평가에서 사용되는
 $1.10 y_u$,⁽¹³⁾ 그리고 배관 파열시험 결과에서 도출된

$\sigma_y + 68.95 \text{MPa}$ ^(17,18) 등이 적용될 수 있다.

3.2 작용하중

식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 주어진 배
관형상에서 허용두께 평가에 미치는 작용하중의
영향은 매우 중요하다. 그러나 배관에 작용되는
하중을 정확히 예측하는 것은 현실적으로 불가능
하며, 특히 원전 배관의 경우 운전중에 작용하는
실제 하중 뿐 아니라 가상의 하중들을 고려하여
배관이 안전하다는 것을 입증해야 한다. 따라서
여기서는 감육배관의 허용두께 평가에 하중의 보
수성을 고려하기 위해서 설계시 허용될 수 있는
최대하중을 적용하였다. 즉, 내압으로는 설계압력
을 적용하고, 굽힘하중으로는 식 (7)로 주어지는
설계코드의 1차 응력에 대한 제한식을 만족하는
최대 굽힘모멘트를 적용하였다.

$$B_1 \frac{P_D D_o}{2t_{nom}} + B_2 \frac{M}{Z} = 1.5S \quad (7)$$

여기서, B_1 과 B_2 는 1차 응력지수, Z 는 배관의
단면계수다.

4. 국부허용두께 평가 및 고찰

간단한 감육형상을 가진 배관을 대상으로 본
논문에서 제시된 해석적 평가 방법을 적용하여
국부허용두께를 평가하고, 국부허용두께에 미치
는 감육부 길이의 영향을 분석하였다.

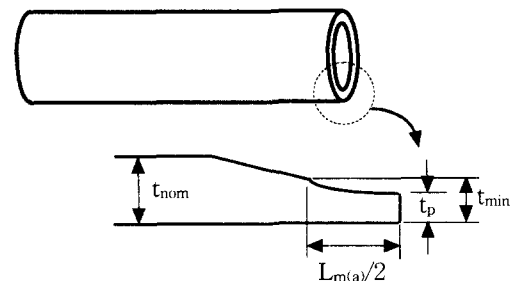


Fig. 3 Typical circumferentially thinned pipe model used in the evaluation

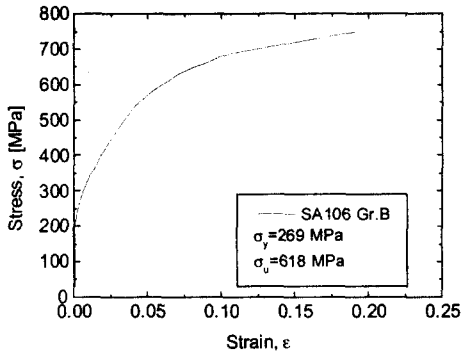


Fig. 4 True-stress vs. true-strain curve used in sample analysis

4.1 대상배관 및 감육부 응력해석

대상 배관은 외경이 457.2mm이고, 공칭두께가 23.8mm인 탄소강으로 원주방향으로 전체가 일정하게 감육된 배관을 가정하였다(Fig. 3). 배관실험 결과에서 원주방향으로 전체면이 감육된 경우가 배관 파단에 가장 취약한 것으로 알려져 있으므로 가장 보수적인 조건을 선택한 것이다.^(6,7) 배관 재료의 항복응력은 269MPa이며 영률은 195GPa이고, 재료의 응력-변형률 곡선을 Fig. 4와 같다.

작용하중으로 배관의 설계압력을 8.17MPa으로 가정하고, 배관의 형상과 설계압력을 입력으로 식 (7)로부터 계산된 배관계통의 최대 굽힘모멘트를 굽힘하중으로 적용하였다. 주어진 하중조건에서 감육부위의 응력은 유한요소방법을 이용하여 평가하였으며, 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS Code를 사용하였다. 해석에 사용된 유한요소 모델은 Fig. 5와 같이 3차원 모델로서 대칭성을 고려하여 배관의 1/4만을 모델하였으며, 20절점의 육면체요소를 적용하여 전체 모델을 900개 요소와 5299개 절점으로 구성하였다. 하중은 배관 내면에 압력과 압력에 의한 인장하중을 배관 끝단면에 먼저 작용시킨 후 4-점 굽힘하중을 작용시켰다. 4점-굽힘하중에 의한 국부적인 하중의 집중이 없이 감육부에 순수 굽힘하중이 작용될 수 있도록 하기 위해서, 4점-굽힘하중이 작용되는 배관부를 매우 두껍게 모사하고 재료 물성치를 탄성으로 고려하였다.

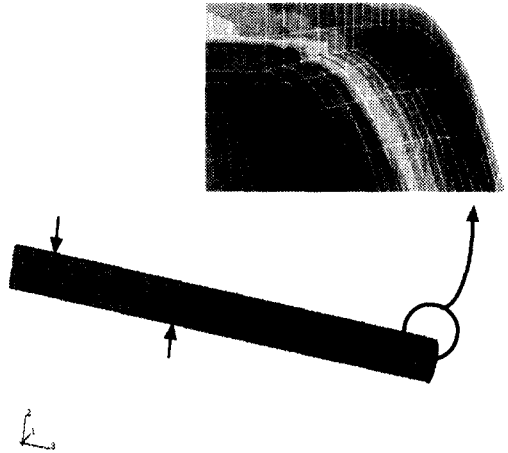


Fig. 5 FEM model of pipe wall thinning

4.2 감육배관의 국부허용두께 평가

앞서 소개된 대상 배관에 대한 국부허용두께를 감육부의 길이에 따라 평가하였다. Fig. 6은 평가 결과를 나타낸 것으로 기존 방법들에 의해 평가된 결과와 비교하였다. 허용두께 결정을 위한 평가 기준으로 작용응력에는 국부 최대응력과 단면 평균응력을 적용하고, 유동응력에는 σ_y , $1.1\sigma_y$, 그리고 $\sigma_y + 68.95\text{MPa}$ 을 각각 적용하였다. 주어진 배관 형상에서 설계코드에 의한 최소요구두께는 17.5mm이며, ASME Code Case N-597에 의한 국부허용두께 평가에는 감육형상에 따라 Case 3이 적용되었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 해석적 평가에 의한 감육부의 허용두께는 적용되는 유동응력 및 작용응력과 감육부 길이에 따라 차이를 보이고 있으나, 감육부 길이가 짧은 경우를 제외하고는 설계코드에서 요구되는 t_{min} 보다 43~54% 정도 작은 값을 보이고 있다. 또한 ASME Code Case N-597에 의해 평가된 t_{allow} 보다 36~50% 정도 작은 국부허용두께를 보였다. 반면, 실제 배관실험 데이터에 근거한 JAERI 모델에 의해 계산된 최소허용두께보다 1.8~2.4배정도 큰 두께를 보이고 있다. 따라서, 본 논문에서 제안된 해석적 평가 방법의 결과는 설계에서 허용되는 최대하중을 작용하중으로 고려하고 보수적인 소성붕괴기준을 적용했음에도 불구하고, 기존의 설계코드나 Code Case의 결과보다 약 2배정도 작은 국부허용두께를 허용하였으며, 실제 배관이 파단되는 두께보

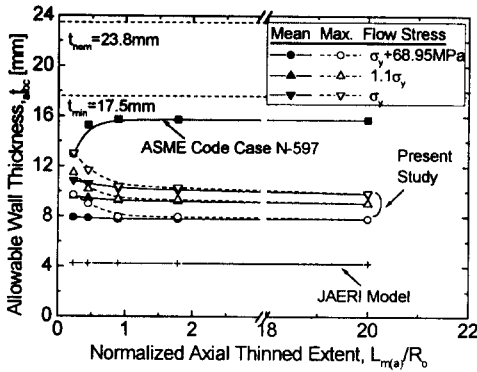


Fig. 6 Allowable wall thickness for locally thinned pipe

다는 약 2배정도 안전여유도를 지닌 허용두께를 제시하고 있다.

한편, 평가에서 파단기준으로 적용된 감육부의 작용응력과 재료의 유동응력에 따라 다양한 허용두께를 보이고 있는데, 작용응력으로 감육부의 국부 최대응력을 적용한 경우는 단면 평균응력을 사용한 것에 비해 큰 허용두께를 보이고 있다. 이러한 차이는 감육부 길이가 배관의 반경보다 작은 영역($L_{m(a)}/R_0 \leq 1$)에서 뚜렷이 관찰되고 있는데, 국부적인 응력집중 현상 때문으로 판단된다. 또한 유동응력에 따른 허용두께는 감육부의 길이에 관계없이 전체적으로 거의 일정한 차이를 보였다.

4.3 국부허용두께 평가에 미치는 감육부 길이의 영향

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 해석적 평가 방법에 의한 감육배관의 국부허용두께는 감육부 길이가 증가함에 따라 감소하다가 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 감육부 길이에 따른 국부허용두께의 변화는 감육부 길이가 배관의 반경보다 작은 영역($L_{m(a)}/R_0 \leq 1$)에서 크게 나타나고 있으며, 작용응력으로 국부 최대응력을 적용하는 경우가 단면 평균응력을 적용하는 경우에 비해 보다 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 이러한 감육부 길이에 따른 국부허용두께 변화는 ASME Code Case N-597의 결과와 상반된 경향을 나타내는 것으로 ASME Code Case N-597에서는 감육길이 증가함에 따라 증가하다 감육부의 길이가

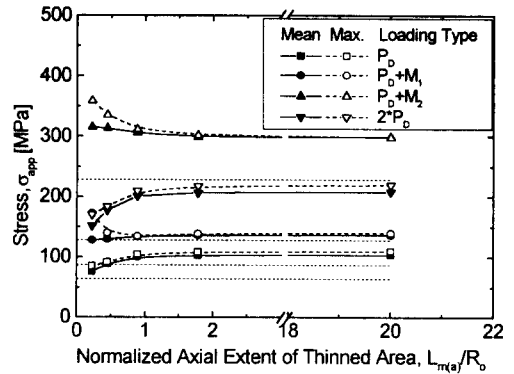


Fig. 7 Variation of maximum and sectional mean stress with axial extent of thinned area

$L_{m(a)}/R_0 > 1$ 에서 일정한 값에 수렴하고 있다. 감육부 길이에 따른 상반된 경향은 국부허용두께 평가에서 고려하고 있는 하중형태의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, ASME Code Case N-597에서는 허용두께가 단순히 내압만에 의해 결정되지만, 해석적 평가법에서는 압력과 굽힘하중이 동시에 작용되기 때문에 감육부에서 응력집중과 재배열되는 형태가 다르게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

4.4 하중형태에 따른 감육부위의 응력상태

감육부 길이에 따른 영향을 분석하기 위해서 감육부 두께가 $0.85t_{min}$ 이고 단순 내압과 내압 및 굽힘모멘트가 복합적으로 작용하는 몇 가지 하중조건에서 감육부의 응력상태를 평가하였다. 작용하중에서 굽힘모멘트, M_1 은 식 (7)에 의해 주어진 최대 굽힘모멘트(M_b)의 1/2이고, M_2 는 $2 \times M_b$ 다.

Fig. 7은 각 하중조건에서 평가된 감육부의 국부적인 최대응력과 최대응력이 나타나는 단면에서의 평균응력을 감육길이에 따라 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 단순 내압만 작용하는 경우에는 감육길이가 증가함에 따라 감육부에서 국부 최대응력과 단면 평균응력이 증가하다가 일정한 값에 수렴하고 있다. 그러나, 내압과 함께 굽힘모멘트 M_1 이 동시에 작용하는 경우에는 단면 평균응력이 감육길이에 관계없이 일정한 값을 보이고 있으며, 국부 최대응력은 감육부 길이에 따라 감소하다가 수렴하는 경향을 보였다. 보다 큰 M_2 의 굽힘모멘트가 압력과 동시에

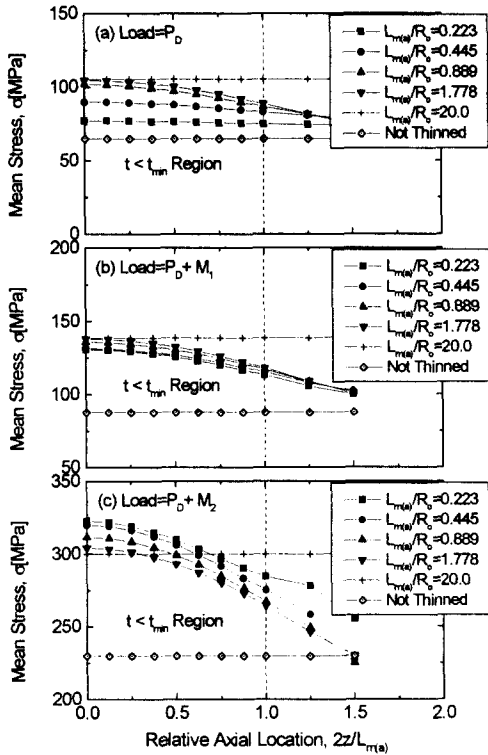


Fig. 8 Sectional mean stress with normalized axial location within thinned area for each loading type of (a) P_D , (b) P_D+M_1 , (c) P_D+M_2

작용하는 경우에는 국부 최대응력과 단면 평균 응력이 모두 압력만 작용할 때와 반대로 감육길이에 따라 응력이 감소하다 일정한 값에서 수렴하였다. 감육부 길이에 따른 응력의 변화는 허용두께에서와 같이 감육부 길이가 배관의 반경보다 작은 영역에서 뚜렷이 나타났다. 따라서, 감육부의 길이에 따른 감육부 단면의 평균응력 변화는 굽힘모멘트가 증가함에 따라 경향이 반대로 천이하고 있으며, 이것은 굽힘하중에 의한 감육부에서의 응력집중 때문인 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 8은 각 하중조건에서 감육부의 축방향 위치에 따른 단면 평균응력을 나타낸 것으로, 감육부의 길이에 따른 응력분포 천이현상을 잘 보여주고 있다. Fig. 8에서 내압만이 작용되는 경우에 감육부위에서 응력은 감육길이에 따라 증가하고 있으며, 감육부위의 모든 응력은 전체 배관이 감

육두께인 $L_{m(a)}/R_0=20.0$ 의 경우 보다 낮은 값을 보이고 있다. 그러나, 이러한 경향은 굽힘모멘트가 증가됨에 따라 역전되어 감육길이가 증가됨에 따라 감육부에서의 응력은 감소하고, 하중조건이 P_D+M_2 인 경우에는 감육부 중심에서 $L_{m(a)}/R_0=20.0$ 이 가장 낮은 응력 크기를 보이고 있다.

이러한 하중형태에 따른 감육부에서의 응력상태 변화로부터 ASME Code Case N-597에서 국부허용두께가 감육길이에 따라 증가하는 것이 허용두께 평가에 압력만을 고려하기 때문이라는 것을 알 수 있으며, 굽힘하중이 동시에 고려되는 경우에는 굽힘하중의 크기에 따라 국부허용두께의 감육길이 의존성이 결정된다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 감육배관의 국부허용두께(t_{local}) 평가에서 압력과 굽힘하중을 모두 고려하는 해석적 평가 방법을 제안하고, 감육부 길이에 따른 국부허용두께의 변화를 평가하였다. 평가결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 본 논문에서 제시한 평가방법에 의한 국부허용두께는 설계코드의 최대 허용하중과 보수적인 소성붕괴 기준을 적용함에도 불구하고 설계코드나 ASME Code Case N-597의 최소허용두께보다 약 50% 정도 작은 값을 보였으며, 배관실험에 근거한 평가 모델의 최소허용두께보다는 약 2배 정도 큰 값을 보였다. 따라서, 본 평가방법이 감육배관의 허용두께에 대한 과도한 보수성을 제거하면서 적절한 안전여유도를 가지고 원전 배관의 국부허용두께를 평가하고 있는 것을 알 수 있다.

(2) 해석적 평가방법에서는 감육부 길이에 따라 국부허용두께가 감소하다 수렴하는 경향을 보이고 있는 반면, ASME Code Case N-597에 의해 평가된 국부허용두께는 감육길이에 따라 증가하다 수렴하는 경향을 보였다. 또한 두 방법 모두 국부허용두께에 미치는 감육부 길이의 영향은 감육부 길이가 배관의 반경보다 작은 경우에 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한, 국부허용두께의 감육부 길이 의존성은 굽힘하중의 크기에 의해 결정되며, ASME Code Case에서 감육부 길이의 영향이 상반되게 나타나는 것은 해석적 평가에서는 내압과 굽힘하중을 고려하는 반면, Code Case에서는 내압만을 작용하중으로 고려하고 있기 때문이다.

참고문헌

- (1) Virginia Electric and Power Co., 1989, "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report."
- (2) Choi, Y. H. and Kang, S. C., 2000, "Evaluation of Piping Integrity in Thinned Main Feedwater Pipes," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol. 32, No. 1, pp. 67~76.
- (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) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, 1995 ed., "Nuclear Components."
- (5) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.1, 1995ed., "Power Piping Code."
- (6) Japan Atomic Energy Research Institute, 1993, "Technical Reprt on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute (Japanese)," *JAERI-M, 93-074*, pp. 104~115.
- (7) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H., and Ando, K., 1998, "Fracture Strength and Behavior for Carbon Steel Pipes with Local Wall Thinning," *Proc. ASME PVP-Vol.371*, pp. 93~100.
- (8) Ando, K., Ahn, S. H., Ishiwata, M., and Hasegawa, K., 1999, "Plastic Collapse Behavior of Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Moment," *Proc. SMiRT-15*, Vol. 5, pp. v257~v264.
- (9) Dearnorff, A. F. and Bushm S. H., 1990, "Deveolpment of ASME Section XI Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping," *Proc. ASME PVP-Vol.186*, pp. 71~75.
- (10) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI, Div.1, 1998ed., ASME Code Case N-597, "Requirement for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning."
- (11) 김진원, 박치용, 김범년, 1999, "감속부위 길이가 배관의 허용두께 평가에 미치는 영향," 대한기계학회 '99년 추계학술대회 논문집A, pp. 597~602.
- (12) 김범년, 김진원, 박치용, 1999, "감속배관의 최소 허용두께 결정방법에 대한 고찰," 대한기계학회 보일러 및 압력용기위원회 제2회 학술대회 논문집, pp. 35~41.
- (13) American Society of Mechanical Engineer, ANSI/ASME B31.G, 1991., "Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines."
- (14) Ahammed, M., 1997, "Prediction of Remaining Strength of Corroded Pressurised Pipelines," *International Journal of Pressure Vessel & Piping*, pp. 213~217.
- (15) 이억섭, 김호중, 1999, "외부부식의 형상이 파이프라인의 파손예측에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집(A), 제23권, 제11호, pp. 2096~2101.
- (16) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Sec.XI., 1995ed., "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components."
- (17) Kiefner, J. F and Vieth, P. H., 1990, "New Method Corrects Criterion for Evaluating Corroded Pipe," *Oil and Gas Journal*, pp. 56~59.
- (18) P'Crady II, H. T., Hisey, D. H., and Kiefner, J. F., 1992, "Pressure Calculation for Corroded Pipe Developed," *Oil and Gas Journal*, pp. 84~89.