

증기발생기 전열관 감육부의 강도 및 손상평가

성기용* · 안석환** · 윤자문*** · 남기우****

*부경대학교 대학원 기계공학연합협동과정

**부경대학교 기계공학부

***요코하마국립대학 물질공학과

****부경대학교 신소재공학부

Failure Assessment and Strength of Steam Generator Tubes with Wall Thinning

KI-YONG SEONG*, SEOK-HWAN AHN**, JA-MOON YOON*** AND KI-WOO NAM****

*Department of UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering Graduate School, Pukyong National University, Busan, Korea

**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Department of Energy & Safety Engineering, Yokohama National University, Yokohama, Japan

****Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Steam generator tube 증기발생기 전열관, Wall thinning 감육, Inconel 인코넬, Bending load 굽힘하중, Finite element analysis 유한요소해석, Strength 강도, Deformation 변형

ABSTRACT: Steam generator tubes are degraded from wear, stress corrosion cracking, rupture and fatigue and so on. Therefore, the failure assessment of steam generator tube is very important for the integrity of energy plants. In the steam generator tubes, sometimes, the local wall thinning may result from severe degradations such as erosion-corrosion damage and wear due to vibration. In this paper, the elasto-plastic analysis was performed by FE code ANSYS on steam generator tubes with wall thinning. Also, the four-point bending tests were performed on the wall thinned specimens, and then it was compared with the analysis results. We evaluated the failure mode, fracture strength and fracture behavior from the experiment and FE analysis. Also, it was possible to predict the crack initiation point by estimating true fracture ductility under multi-axial stress conditions at the center of the thinned area from FE analysis.

1. 서 론

플랜트용 배관은 플랜트의 중요한 설비의 일부로서, 이들 배관에 대하여 건전성 유지를 위한 예방 및 보전기술에 관한 많은 연구가 행하여져 왔다. 이들 배관은 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화 손상을 받을 우려가 있으며, 최근 배관에 발생하는 감육현상에 의한 배관파손사고가 국내외적으로 보고되고 있다(ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1992; ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, 1998).

이에 감육이 발생한 배관에 외력이 작용하는 경우 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 변형에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 해명하기 위한 연구가 행하여지고 있다(안석환 등, 2002; 2003; Ahn et al., 1998; 2002; Miyazaki et al., 1999).

특히, 원자력 개발이 진척됨에 따라 원자로의 설계와 안전심사를 하기 위한 안전개념이 여러 가지로 제기되고 있다. 우리나라의 원전은 PWR(Pressurized water reactor, 가압수형로)등을 운용하고 있다. PWR의 1차계통의 주요기기는 원자로용기, 노내구조물, 연료, 제어봉 클러스터, 증기발생기, 가압기, 펌프 등으로 구성되어 있다. 이들 기기 중 증기발생기 전열관에는 인코넬 600이 사용되어져 왔다. 최근 침식-부식 혹은 마모 등에 의한 감육과 파손이 빈발하게 발생되고 있다. 이와 같은 증기발생기 파열에 대한 사고는 지난 몇 년 동안 매년 증가하고 있는 실정(신규인 등; 2004; McDonald et al., 1996; Frederick and Hernalsteen, 1985)이며, 이에 대한 여러 연구가 진행되어져 오고 있다(박명규 등, 1996; 신규인 등; 2004; 김현수 등; 2004).

Inconel 600에 대체할 개량형에는 Inconel 690을 적용하고 있다. Inconel의 경우 상당히 내식성을 갖는 재료로 알려져 있지만 사용기간 동안 침식-부식, 진동에 의한 마모 등에 의한 열화 현상이 발생하고 있고, 침식-부식, 진동에 의한 마모 등으로부터 감육현상이 전열기 세관에 발생하고 있다. 이와 같이 감육

교신저자 남기우: 부산 남구 용당동 산 100번지

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

이 발생하게 되면 수명 저하를 가져오게 된다.

따라서, 본 연구에서는 증기발생기 전열관에 사용되는 Inconel 690세관에 대하여 침식-부식 및 마모현상을 모의하고, 예상되는 감육부를 감육깊이와 감육길이 별로 몇 가지를 설정하고, 단조굽힘강도시험 및 유한요소 해석을 실시하였다. 굽힘하중을 받는 증기발생기 전열관용 Inconel 690세관의 실험 및 FE 해석으로부터 강도 및 변형의 정도를 조사하여 손상평가를 실시하고 상호 비교 분석하였다. 또한 FE 해석에 의해 균열발생 예측을 시도하였다(Miyazaki et al., 2002; 안석환과 남기우, 2005).

2. 재료, 실험 및 해석방법

2.1 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 재료는 직경 19mm, 공칭두께 1.1mm인 Inconel 690(UNS NO6690) 세관으로서 증기발생기 전열관으로 사용되고 있다. 실험 전열관으로부터 KS규격에 의해 절취한 인장시험편을 사용하여 기본적인 기계적 물성치를 얻기 위한 인장시험을 실시하였다. 인장시험으로부터 구한 증기발생기 전열관의 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 1과 2에 나타낸다.

증기발생기 전열관 감육부의 강도 및 변형에 대한 평가를 하기위해 이용한 4점 굽힘시험 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. 이때 사용된 증기발생기 전열관 감육시험편의 형상을 Fig. 2에 나타낸다. 감육결함은 감육길이(l) 및 감육깊이(d)를 파라미터로 하여 기계적으로 배관 외부에 모의하였다. 전주감육 및 부분적 감육을 상정한 배관의 치수를 각각 Table 3에 나타낸다. 감육비(=감육깊이/공칭두께), d/t 를 4종류, 감육길이, l 을 4종류로 하였다.

Table 3의 시험편 번호 중 좌측 상단의 asterisk(*)로 표시한 것은 부분적 감육시험편을 나타낸다. 부분적 감육시험편은 5종류를 이용하였다. 부분적 감육부가 하중부하방향에 대해 직각방향에 놓이도록 위치시켜 동일한 방법으로 실험 및 해석을 수행하였다.

실험은 4점 굽힘하중을 부하하였고, 이때 크로스헤드 변위 속도 2mm/min의 변위제어로 실온 대기 중에서 행하였다. 단, 내압은 고려되지 않았다. 실험으로부터 굽힘모멘트와 하중선 변위를 측정하였다.

2.2 해석방법

침식-부식 혹은 진동에 의한 마모에 의해 손상 받은 증기발생기 전열관 감육부를 모의하였다. 감육부에 대한 손상평가를 위한 해석에 있어서는 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS ver. 7.0을 이용하여 탄소성해석을 행하였다. 매쉬모델링은 감육부에 대해서는 4변형 2차 8절점요소를 사용하였고, 감육부를 제외한 나머지 부분은 6면체 20절점 요소를 사용하였다. 해석에 이용된 파라미터로서 영률은 206GPa, 포아송비 0.3로 하고 Von Mises 항복조건을 적용하였다. 해석은 등방경화칙을 가정하여 행하고, 대칭성을 고려하여 1/4 배관모델을 이용하였다.

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
	σ_u [MPa]	σ_y [MPa]	[%]
Inconel 690	733	358	64.4

Table 2 Chemical composition [wt%]

Material	Ni	Cr	Fe	Mn	Si	C	Al
Inconel 690	Bal.	30	9.5	0.35	0.25	0.01	0.25

Table 3 Specimen geometries

Specimen No.	Thinned ratio	Thinned length	Failure mode
	d/t	l (mm)	
SGT-EXP1	0.0	0	Ovalization
SGT-EXP2	0.3	5	Ovalization
SGT-EXP3	0.3	20	Buckling
SGT-EXP4	0.3	40	Buckling
SGT-EXP5	0.6	5	Buckling
SGT-EXP6	0.6	20	Buckling
SGT-EXP7	0.6	40	Buckling
SGT-EXP8	0.8	5	Crack initiation
SGT-EXP9	0.8	20	Buckling
SGT-EXP10	0.8	40	Buckling
*SGT-EXP11	0.3	5	Ovalization
*SGT-EXP12	0.3	20	Ovalization
*SGT-EXP13	0.6	40	Ovalization
*SGT-EXP14	0.8	20	Ovalization
*SGT-EXP15	0.8	40	Ovalization
SGT-ANA1	0.0	0	Ovalization
SGT-ANA2	0.3	5	Ovalization
SGT-ANA3	0.3	20	Buckling
SGT-ANA4	0.3	40	Buckling
SGT-ANA5	0.6	5	Buckling
SGT-ANA6	0.6	20	Buckling
SGT-ANA7	0.6	40	Buckling
SGT-ANA8	0.8	5	Buckling
SGT-ANA9	0.8	20	Buckling
SGT-ANA10	0.8	40	Buckling

SGT-EXP No. : Number of specimens used in experiments

SGT-ANA No. : Number of specimens used in analyses

* : Partially wall thinned tube specimen

t : Nominal thickness, 5.1 mm

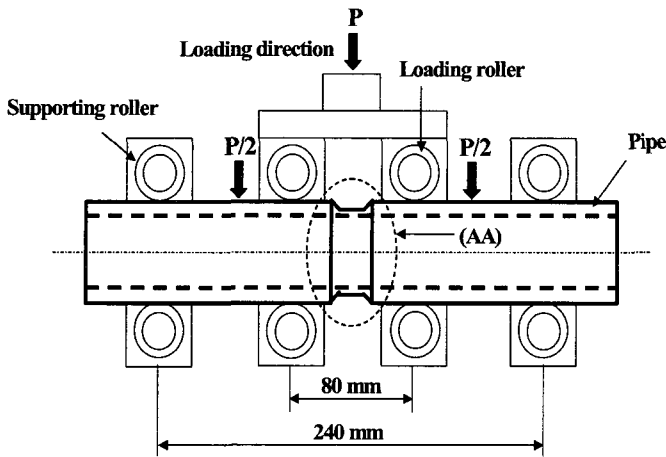
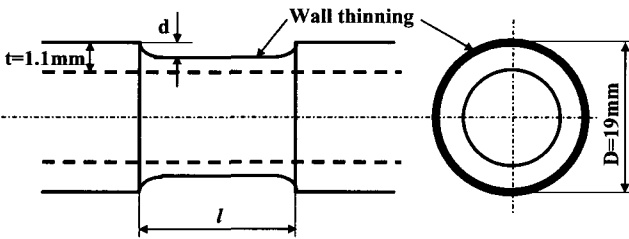
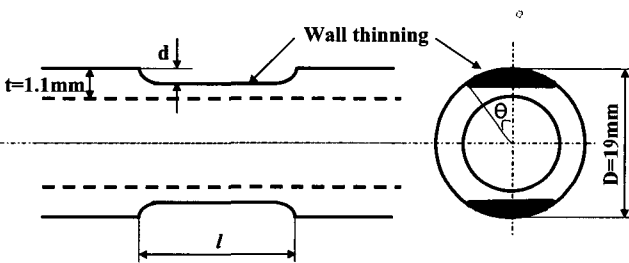


Fig. 1 Schematic of four-point bending test system



(a) All-circumferentially wall thinned tube specimen



(b) Partially wall thinned tube specimen

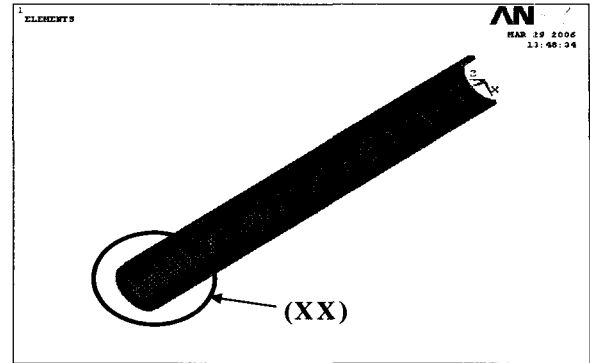
Fig. 2 Detail of (AA) region in figure 1

하중은 Fig. 1과 같은 4점 굽힘하중이 작용하도록 하였다. 이때 부하 스패ん 길이는 80mm, 지지 스패ん 길이는 240mm로 각각 설정하였다. 이때 해석에 이용된 시험편 형상은 실험에 이용된 형상인 Fig. 2(a) 및 (b)와 같다. 그림에서 θ 는 감육각도를 나타낸다. Fig. 3에는 메쉬모델링의 예를 나타낸다. Fig. 4에는 FE 해석에 사용한 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.

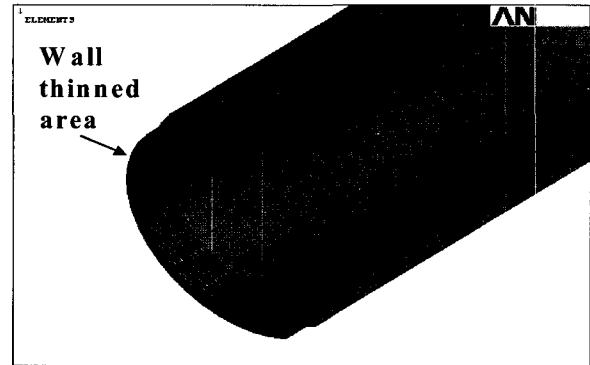
3. 결과 및 고찰

3.1 증기발생기 전열관의 감육부의 굽힘강도

증기발생기 전열관의 감육부에 4점 굽힘하중을 단조적으로



(a) 1/4 FEM modeling used



(b) Detail of (XX) region in (a)

Fig. 3 An example of FEM model

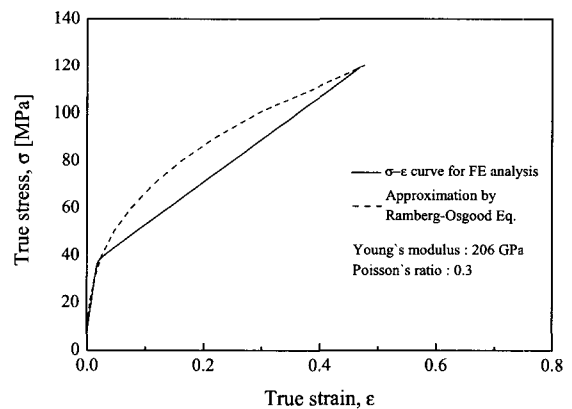


Fig. 4 True stress-true strain curve used in FE analysis

부하하여 굽힘에 의한 변위가 50mm가 될 때까지의 실험을 실시한 대기중에서 행하였다. 이 실험으로부터 구한 굽힘모멘트-변위 곡선을 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에는 건전한 전열관, 전주 감육 및 부분감육의 결과를 함께 나타내었다.

Fig. 5에는 감육비, $d/t=0.3, 0.6$ 및 0.8 로서 각각의 동일 감육비에 대한 감육길이의 변화에 따른 실험에 의한 굽힘모멘트-변위를 나타낸 것이다. 감육이 없는 건전한 전열관의 굽힘모멘트

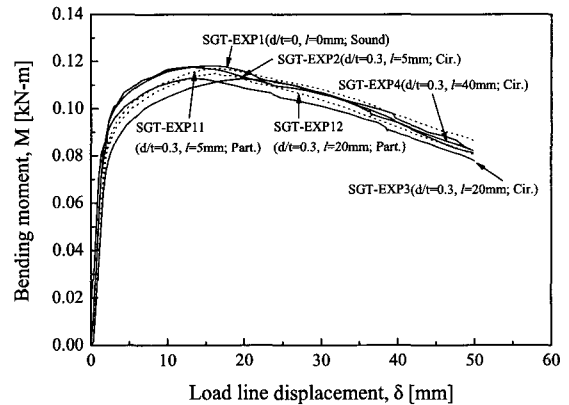
에 비해 감육비가 커질수록 또한 감육길이가 더 길어질수록 최대굽힘모멘트가 낮게 나타났고, 또한 최대굽힘모멘트를 기록한 이후에 하중의 저하하는 정도가 커졌다. 이것은 감육깊이가 깊고 또한 감육길이가 길수록 강도저하가 현저하다는 것을 나타낸다.

Fig. 5(a)는 $d/t=0.3$ 의 경우로서, 전주감육 및 부분감육 모두 감육길이에 상관없이 건전한 전열관과 비교했을 때 모멘트의 차이는 거의 없었다. 이때 전열관에 나타난 손상형태는 편평화(Ovalization)파괴 혹은 좌굴(Buckling)파괴였다. 최대굽힘모멘트를 나타낸 후 하중의 저하는 아주 완만하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

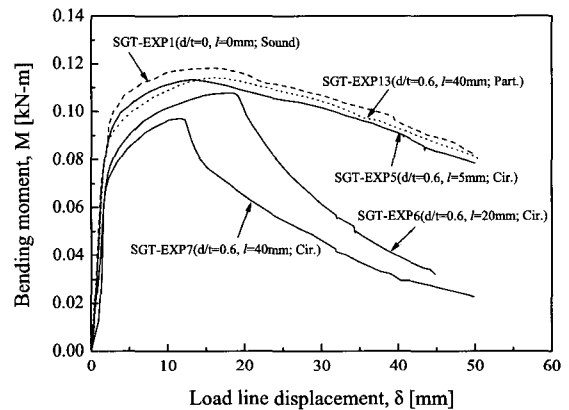
Fig. 5(b)는 $d/t=0.6$ 의 경우이다. 부분감육시험편은 감육길이가 $l=40\text{mm}$ 인 것에 불구하고 건전한 전열관과 더불어 최대굽힘모멘트를 나타낸 후 하중의 저하가 완만하였다. 이때 손상모드는 편평화파괴였다. 전주감육의 경우에는 $l=5\text{mm}$ 인 경우에는 하중저하가 완만하게 나타났다. 손상모드에 있어서도 거의 편평화에 가까운 좌굴파괴의 형태를 나타내었다. 반면, 감육길이가 20 및 40mm로 커짐에 따라 최대굽힘모멘트를 나타낸 후 급격한 하중저하를 나타내었다. 이때 손상모드는 좌굴(Buckling)파괴를 나타내었다.

Fig. 5(c)는 $d/t=0.8$ 의 경우로서 Fig. 5(b)의 경우와 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 단, $l=5\text{mm}$ 인 전주감육의 경우에는 최대굽힘모멘트를 나타낸 후 하중의 저하와 함께 균열이 발생하였다. 최초 변위가 약 3mm정도 처짐이 발생하였을 때 국부적인 necking(Necking)현상을 동반하면서 하중이 저하하다가 균열 발생과 더불어 하중이 급격한 저하를 나타내었다. 시험종료 시에는 거의 양단분리파괴(Double ended fracture)상태가 되었다(Fig. 8(f)).

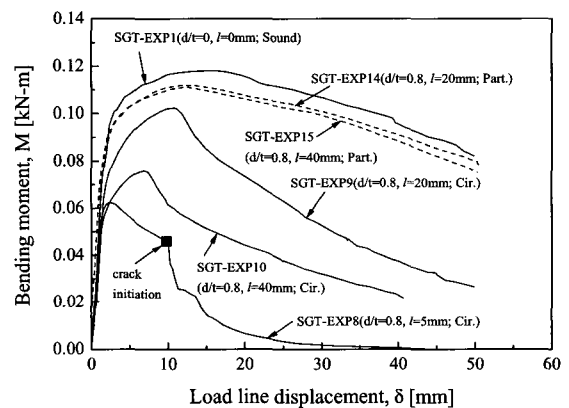
이상의 결과로부터, 감육비가 $d/t=0.3$ 으로서 얇은 경우에는 전주감육과 부분감육에 관계없이 또한 감육길이에 상관없이 최대굽힘모멘트 이후 하중의 급격한 저하는 나타나지 않았고 거의 건전한 전열관의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 이때 손상모드는 전주감육의 경우 감육비에 따라 편평화파괴 및 좌굴파괴를 나타내었고, 부분감육에서는 감육비 및 감육길이에 상관없이 편평화파괴를 나타내었다. 한편, 감육비가 $d/t=0.6$ 및 0.8로서 깊어지게 되면 전주감육으로서 감육길이가 짧은($l=5\text{mm}$) 경우에는 상기와 유사한 경향을 나타내었고 또한, 부분감육일 경우에는 감육길이에 상관없이 상기와 유사한 경향을 나타내었다. 이때 손상모드는 동일 감육비를 가지는 전주감육으로서 감육길이가 20 및 40mm로 길어지게 되면 좌굴파괴를 부분감육에서는 편평화파괴를 각각 나타내었다. 단, $d/t=0.8$ 로서 깊고 이때 감육길이가 $l=5\text{mm}$ 로서 짧은 경우에는 최대굽힘모멘트 이후 균열이 발생하였다. 따라서 전주감육의 경우에는 감육비가 커질 경우에는 감육길이의 영향도 수반하는 것으로 판단된다. 단, 본 연구에 적용한 부분감육의 형상은 감육의 전길이에 대해 동일한 감육깊이를 가지는 경우이며, 또한 감육된 각도가 작은 경우에 한정되어졌다. 그러므로, 부분감육일지라도 감육각도가 더 커지고 또한 더 긴 감육길이를 가질 경우와 감육의 전길이에 대해 감육깊이가 다른 경우에 대해서는 추



(a) Case of $d/t=0.3$

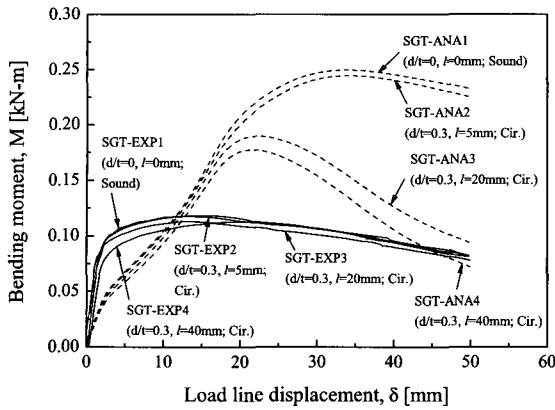


(b) Case of $d/t=0.6$

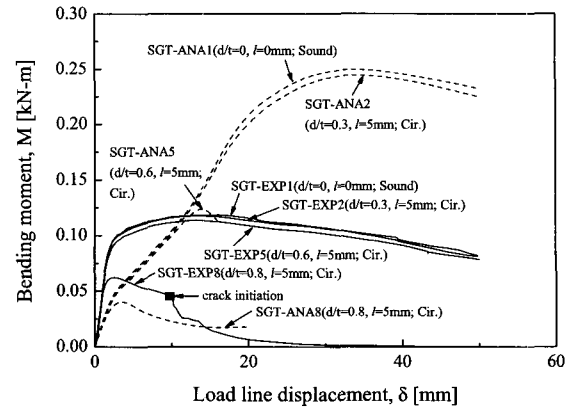


(c) Case of $d/t=0.8$

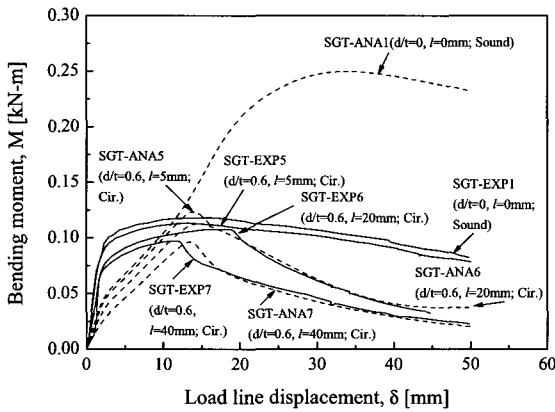
Fig. 5 Bending moment-load line displacement curves obtained from the experiments of wall thinned steam generator tubes



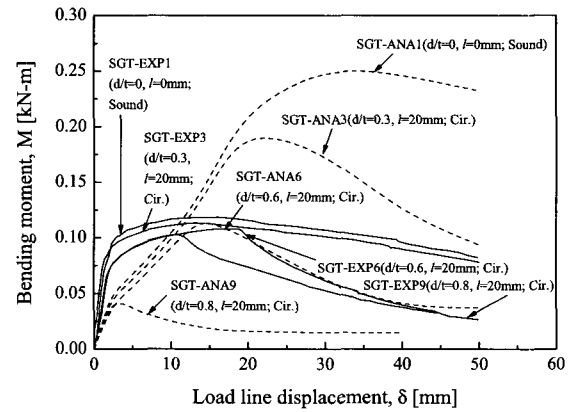
(a) Case of $d/t=0.3$



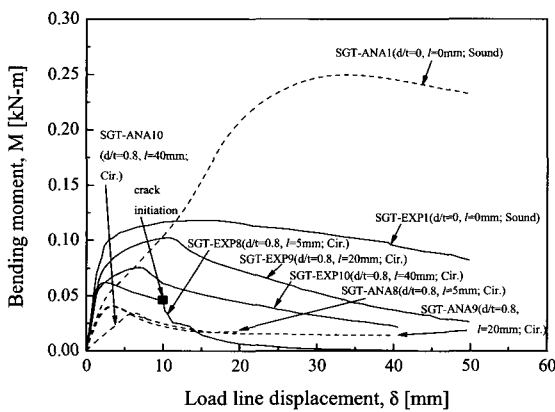
(a) Case of $l=5$ mm



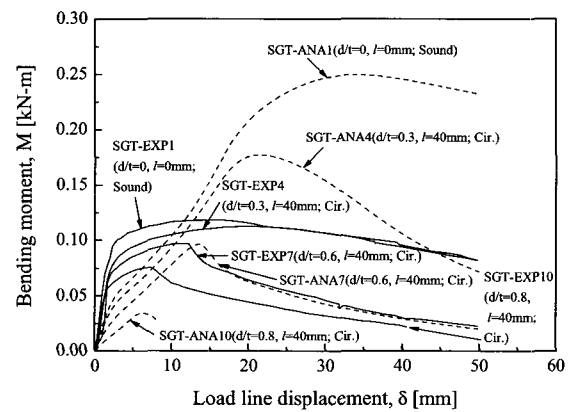
(b) Case of $d/t=0.6$



(b) Case of $l=20$ mm



(c) Case of $d/t=0.8$



(b) Case of $l=40$ mm

Fig. 6 Comparison between experimental and analytical bending moment-load line displacement curves of wall thinned steam generator tubes [case of identically thinned ratio]

Fig. 7 Comparison between experimental and analytical bending moment-load line displacement curves of wall thinned steam generator tubes [case of identically thinned length]

가적인 연구가 병행되어야 할 것으로 판단된다(안석환 등, 2003).

Fig. 6과 7에는 실험과 해석으로부터 구한 굽힘모멘트-변위를 서로 비교하여 나타내었다. 그림 속의 실선은 실험결과를 또, 파선은 해석결과를 각각 나타낸다. 각 그림 속에는 건전한 튜브의 결과도 함께 나타내었다.

Fig. 6에는 동일 감육비에 대하여 감육길이를 변화시켰을 때의 결과를 정리하여 나타내었다.

Fig. 6(a)는 감육비 $d/t=0.3$ 의 결과이다. 건전한 전열관 및 감육길이 $\ell=5\text{mm}$ 로서 짧은 경우의 해석에 의한 최대굽힘모멘트가 실험에 의한 최대굽힘모멘트보다 약 2배 가량 크고, 감육길이 $\ell=20$ 및 40mm 인 경우에는 약 0.6배 가량 크게 나타나고 있다. 그러나 좌굴이 발생한 감육길이 $\ell=20$ 및 40mm 의 해석 결과에서는 최대굽힘모멘트를 나타낸 후 하중이 저하하여 변위 40mm 근방에서는 해석값과 실험값이 거의 유사한 값을 나타내었다. 실험 및 해석 종료시점인 변위 50mm 까지 하중이 부하되는 동안 실험결과 및 해석결과에 있어서는 변위의 증가와 더불어 다소 차이는 있으나 하중의 저하가 나타났다. 그러나, $d/t=0.3$ 의 경우에는 실험값에서는 감육길이에 따른 변화가 나타나고 있지 않은 것에 반해, 해석에 있어서는 감육길이가 길어짐에 따라 하중의 변화를 보였다. 특히, 해석결과를 보면 실험에서 보다는 항복이 먼저 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 실험에서는 항복발생 후 곧 최대굽힘모멘트에 달하고 있지만, 해석에서는 항복발생 후 계속되는 변위의 증가와 더불어 상당히 높은 하중을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 8을 보게되면 건전한 전열관과 $d/t=0.3$, $\ell=5\text{mm}$ 인 경우, 실험과 해석에 있어서 부하지점으로부터 하중이 부하되는 위치에서 변위의 증가와 더불어 먼저 항복이 발생하여 전단면 항복으로 빠르게 전파해가고 있고 오히려 감육부가 견디는 듯한 양상을 나타내고 있다. 따라서, FE해석에 의해 시험편 단면에 나타난 응력분포가 하중 부하지점에서 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 해석결과가 더 크게 나타나는 이유는 현재로서는 명확하지 않지만 아마도 재료의 물성치에 연관이 있는 것으로 판단된다. 즉, 본 연구에 사용된 재료의 기계적 특성치를 보면 인장강도가 항복강도의 약 2배 이상을 나타내고 있는데 반해 신율도 64% 이상을 나타내고 있는데 이는 높은 극한강도에 비해 큰 연신이 가능한 연성이 풍부한 재료임을 알 수 있다. 또한, 사용된 재료의 기하학적인 치수가 두께 약 1.1mm 로서 상당히 얇다. 그러므로 FEM에 의한 대상시험편에 대한 메쉬를 나눌 때 상당히 어려움이 따르며 메쉬모델링의 영향도 크게 관여되는 것으로 판단된다.

Fig. 6(b)는 $d/t=0.6$ 및 Fig. 6(c)는 $d/t=0.8$ 의 결과를 나타낸다. Fig. 6(b)와 (c)의 경우 실험결과와 해석결과가 유사한 경향을 나타내고 있다. $d/t=0.6$ 의 경우에는 실험과 해석결과가 거의 유사하였다. 그러나, $d/t=0.8$ 의 경우에는 $d/t=0.3$ 의 경우와는 반대로 오히려 해석에 비해 실험결과에 있어서 최대굽힘모멘트가 약 2배정도로 크게 나타나고 있다.

이것으로부터 감육비가 $d/t=0.3$ 으로서 적은 경우에는 실험결과가, 감육비가 $d/t=0.6$ 으로서 큰 경우에는 해석결과가 더욱 보

수적으로 나타남을 알 수 있다. 그러나 이는 사용된 재료의 두께가 1.1mm 로서 얇기 때문에 실제 감육비에 따른 감육의 양은 큰 차이가 없기 때문에 결과적으로 상당히 민감한 경향을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7에는 동일 감육길이에 대하여 감육비를 변화시켰을 때의 결과를 정리하여 나타내었다. Fig. 5(a), (b) 및 (c)에도 나타내었듯이 동일 감육길이 ℓ 을 가지는 경우, 감육비 d/t 가 커질수록 최대굽힘모멘트가 낮고 또한 하중의 저하가 급격히 나타나는 것으로부터 감육부의 강도에 감육비가 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 동일 감육길이를 가지는 경우 감육비가 큰 $d/t=0.8$ 의 경우들이 소성변형이 다소 적게 나타났다. 특히, Fig. 7(b)와 (c)를 비교해 보면 거의 동일한 양상과 비슷한 모멘트-변위의 값을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터, 감육길이의 영향은 있으나 감육의 정도가 어느 한계길이보다 길어지게 되면 대체로 그 영향의 폭은 거의 차이가 없는 것으로 판단된다. 이는 위에서 언급하였듯이 Inconel 재료의 특성상 고강도, 고연성인 것과 관련이 있을 것으로 생각되며, 실험치와 해석치 사이에 경향적인 면에서 유사한 양상을 보이고 있지만, 금후 이 부분에 대해서 좀더 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 8에는 실험과 FE 해석으로부터 얻은 변위 50mm 일 때의 전열관 감육부에 발생한 변형 양상의 몇몇 예를 나타내었는데, 앞에서 언급한 것과 같은 양상들을 보여주고 있다. 특히, 편평화과괴를 나타낸 두 경우, 즉 건전한 전열관과 $d/t=0.3$ 과 $\ell=5\text{mm}$ 를 가지는 감육전열관을 제외하고는 감육부에서 큰 응력을 나타내는 응력분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 경우 좌굴 혹은 균열에 의한 손상이 전열관에 나타났다.

3.2 균열발생 예측에 의한 감육부 손상평가

Fig. 9에서는 증기발생기 전열관의 손상평가를 시도하였다. 손상평가의 방법으로서 균열발생을 예측하도록 하였으며, 이때 Miyazaki et al.(2002)에 의해 제안된 평가방법을 이용하여 균열발생을 예측하였다. Miyazaki 등은 다축응력조건하에서 진파피연성(ϵ_{mf})을 평가하기 위해서 아래의 식 (1)과 같이 Weiss의 이론(1972)을 확대 전개하여 식을 도출하고 있다.

$$\epsilon_{mf} = \frac{\left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n}{\left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n} \epsilon_{uf} \quad (1)$$

where,

$$m = \sqrt{(1 + \alpha + \beta)^2 - 3(\alpha + \beta + \alpha\beta)}$$

$$\omega = \frac{1}{1 + \alpha + \beta}$$

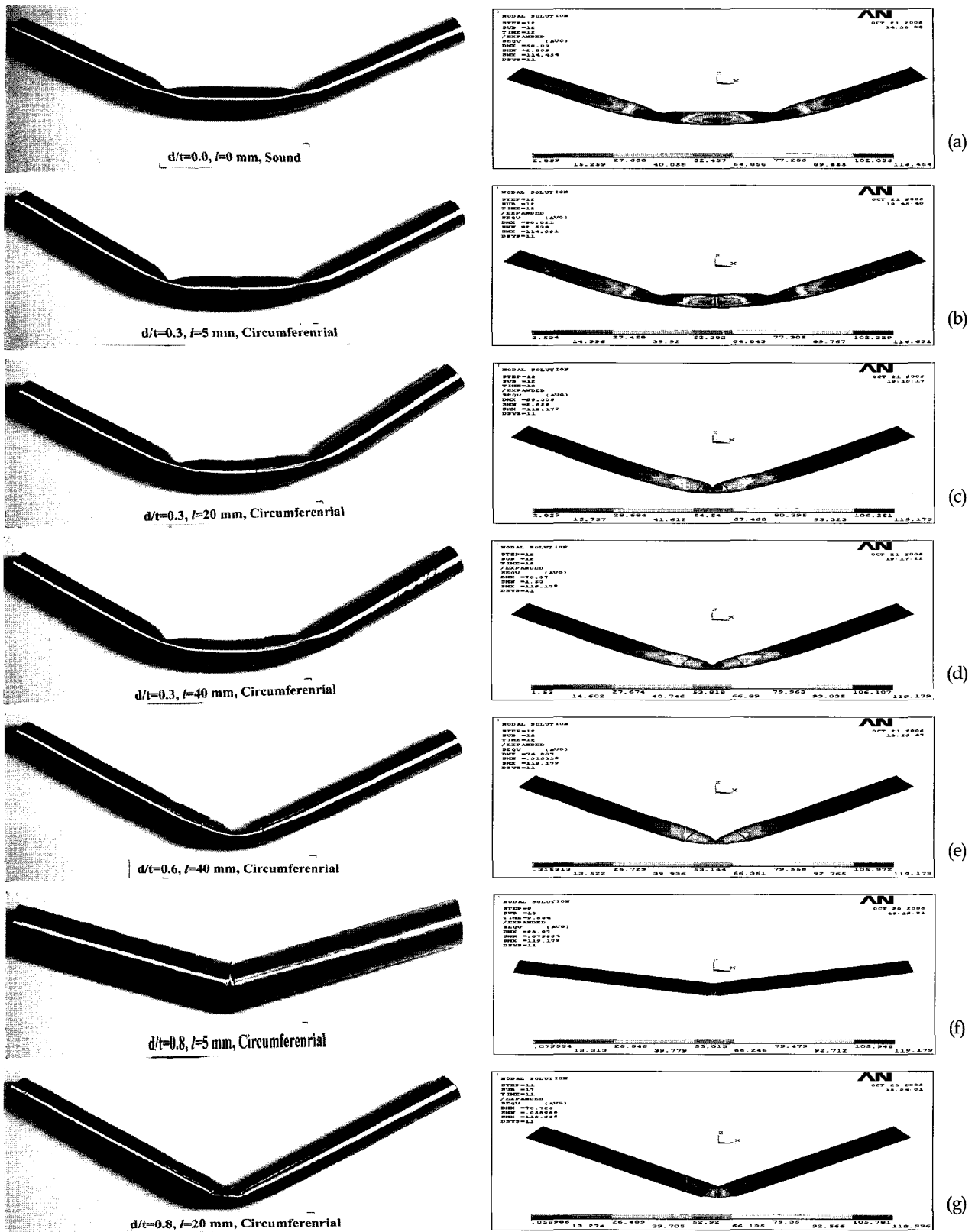


Fig. 8 Failure surfaces obtained from experiment (left) and FE analysis (right): (a) Case of $d/t=0.0$ and $l=0$ mm, (b) Case of $d/t=0.3$ and $l=5$ mm, (c) Case of $d/t=0.3$ and $l=20$ mm, (d) Case of $d/t=0.3$ and $l=40$ mm, (e) Case of $d/t=0.6$ and $l=40$ mm, (f) Case of $d/t=0.8$ and $l=5$ mm and (g) Case of $d/t=0.8$ and $l=20$ mm

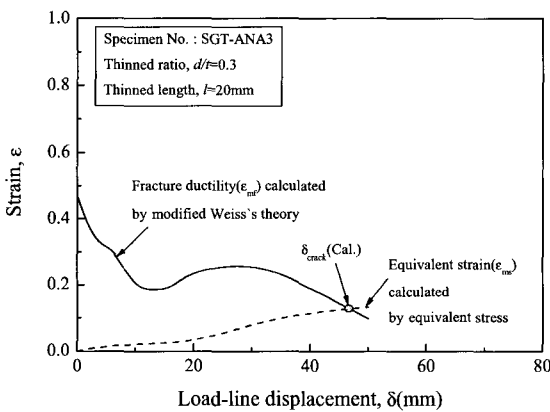
$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \beta = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

여기서, σ_1 , σ_2 및 σ_3 는 주응력들을, σ 는 항복응력을 각각 나타낸다.

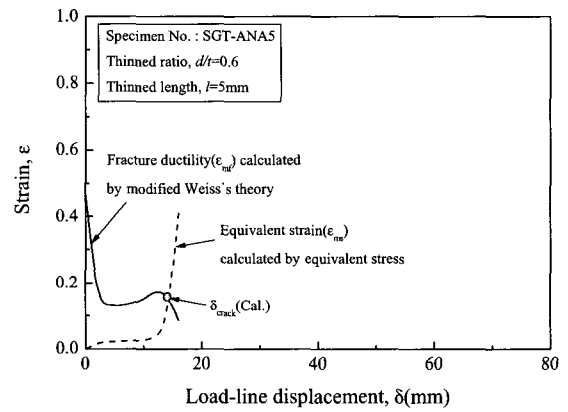
다축응력의 정도는 전열관 튜브의 변형에 의존한다. 그런 까닭으로, 감육부의 중앙부에서의 진파괴연성(ϵ_{mf}) 또한 변형에 의존한다. 상당변형률(ϵ_{ms})은 전열관 튜브의 변형과 더불어 증가한다. 즉, Weiss의 이론에 근거하여 균열은 감육부에서 발생하는 상당변형률이 식 (1)로 주어지는 진파괴연성을 증가하는 점(그림 속의 교차점)에서 발생한다고 가정한다. 본 연구에서는, ϵ_{mf} 의 값은 식 (1)에서 FE 해석으로부터 얻어진 감육부의 중앙에서의 주응력들을 대체함으로써 평가되었고, ϵ_{ms} 의 값은 FE 해석으로부터 얻어졌다. 균열발생점(δ_{crack}), 즉 균열이 발생된 하중선 변위는 이상의 방법에 의해 평가하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10에는 Miyazaki 등(2002)에 의해 제안된 평가방법을 이용하여 균열발생을 예측한 결과를 나타낸다. 하중

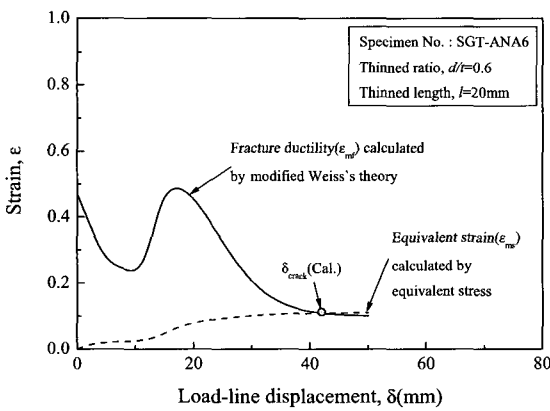
선 변위(δ)의 함수로서 위에 나타낸 식 (1)에 의하여 계산된 상당변형률과 진파괴연성을 각각 점선과 실선으로 나타내었다. 상기에서도 언급하였듯이 이때 상당변형률(ϵ_{ms})과 진파괴연성(ϵ_{mf})이 교차를 하는 경우에는 그 교차점에서 균열이 발생하는 것으로서, 또한 교차가 발생하지 않을 경우에는 균열이 발생하지 않는 것으로 기준하였다. Fig. 9(a)~(d)는 균열발생이 예측된 경우이다. (a)는 $d/t=0.3$ 및 $l=20\text{mm}$ 의 경우로서, 균열은 $\delta_{crack}=46.7\text{mm}$ 에서 발생할 것으로 예측되었다. 또한, (b)는 $d/t=0.6$ 및 $l=5\text{mm}$ 의 경우로서 균열은 $\delta_{crack}=14.1\text{mm}$, (c)는 $d/t=0.6$ 및 $l=20\text{mm}$ 의 경우로서 균열은 $\delta_{crack}=41.9\text{mm}$, (d)는 $d/t=0.6$ 및 $l=5\text{mm}$ 의 경우로서 균열은 $\delta_{crack}=6.8\text{mm}$ 에서 각각 발생할 것으로 예측되었다. 실전열관튜브 실험에서는 (d)의 경우인 $d/t=0.8$, $l=5\text{mm}$ 일 때 균열이 발생하였으며 이때 균열발생점은 $\delta_{crack}=9.9\text{mm}$ 였다. 실험에서는 $\delta=1.96\text{mm}$ 에서 좌굴현상이 나타나 최대굽힘모멘트를 결정하였고, 이후 하중저하가 수반되다가 $\delta=9.9\text{mm}$ 에서 균열이 발생하여 급격한 하중저하를 가져왔다. 실험과 해석결과에서 거의 유사한 일치률



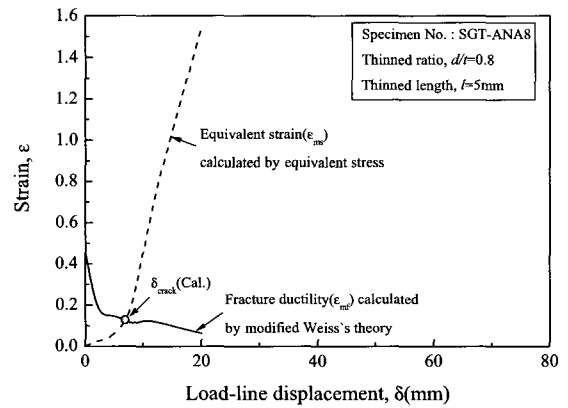
(a) Case of $d/t=0.3$ and $l=20\text{mm}$



(b) Case of $d/t=0.6$ and $l=5\text{mm}$

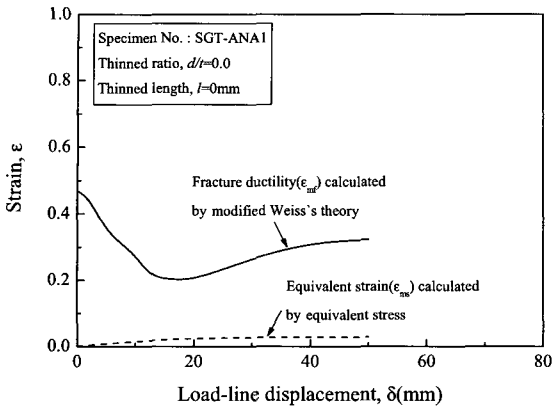


(c) Case of $d/t=0.6$ and $l=20\text{mm}$

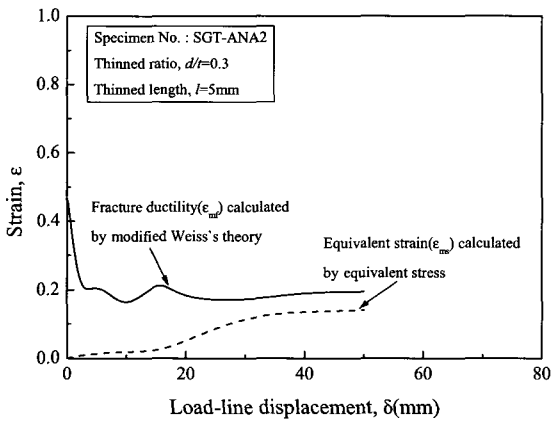


(d) Case of $d/t=0.8$ and $l=5\text{mm}$

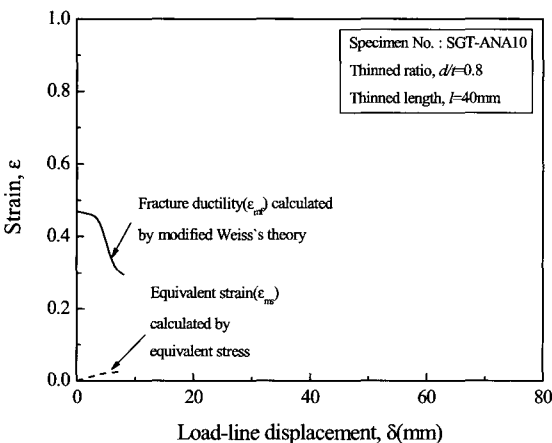
Fig. 9 Estimation of crack initiation by ϵ_{mf} and ϵ_{ms} [Case of the crack initiation]



(a) Case of $d/t=0.0$ and $l=0\text{mm}$



(b) Case of $d/t=0.3$ and $l=5\text{mm}$



(c) Case of $d/t=0.8$ and $l=40\text{mm}$

Fig. 10 Estimation of crack initiation by ϵ_{mf} and ϵ_{ms}
[Case of the non crack]

나타내었다. (d)의 경우 감육비가 크고, 감육길이가 상대적으로 짧아 감육부에 응력집중이 용이하였기 때문에 균열이 빠른 변위에서 나타난 것으로 판단된다. 그 외의 (a), (b), (c)의 경우에는 해석에 의한 예측의 결과는 3가지 경우 모두 균열 발생이 예측되었는데 반해, 실험에서는 균열이 나타나지 않고 좌굴현상이 나타났다. 아마도 이것은 상기에도 언급하였듯이 다축응력상태에 변화가 발생한 것으로 판단된다. 즉 다축응력의 상태가 전열관 튜브의 변형정도에 의존하는 바, 본 연구에 사용된 Inconel 690의 경우 그 연성이 상대적으로 풍부하였기 때문에 튜브의 변형에 따른 다축응력이 변화가 발생한 까닭이다. 다시 말해서 균열이 예측된 해석결과들을 보면 상당변형률이 튜브의 변형과 더불어 상대적으로 증대하고 있고 이것이 감육부 중앙부에서의 다축응력의 변화를 가져 온 것으로 사료된다.

Fig. 10(a)~(c)는 균열이 발생하지 않은 경우의 몇몇 예이다. (a)는 건전한 세관의 결과로서 균열발생이 나타나지 않았다. (b)는 앞의 굽힘모멘트-변위 선도에서 건전한 세관과 거의 유사한 경향의 결과를 나타내었는데 감육길이가 짧은 것에 반해 감육비가 적어 응력집중의 효과가 나타나지 않아 균열이 발생하지 않은 것으로 사료된다. 또한 (c)와 같이 감육비가 0.8로서 가장 크고, 감육길이가 40mm로서 가장 큰 경우에는 균열발생 이전에 좌굴과 같은 심한 소성변형이 먼저 발생함으로써 균열발생과 같은 예리한 결함의 생성이 곤란해졌기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

증기발생기 전열관의 감육부에 대한 손상평가를 행한 결과, 감육부의 형상에 따라 강도 및 변형의 정도가 다르게 나타남을 알 수 있었다. 이것으로부터 감육비 및 감육길이가 강도와 변형을 결정하는 파라미터라는 것을 나타내었다. 해석과 실험의 결과 비교에 있어서 건전배관과 감육비가 작고, 감육길이가 짧았던($d/t=0.3$, $l=5\text{mm}$) 경우 및 감육비가 큰($d/t=0.8$) 경우에는 실험과 해석에서 다소 차이가 발생하였다. 이는 실험에 있어서 박판두께의 경우 특히 본 연구에 사용된 Inconel 690세관과 같은 고연성재료인 경우에는 감육부 이외에 하중 부하부분의 변형이 상대적으로 결과에 반영되어진 것으로 판단된다. 금후 여기에 대해서는 좀 더 다양한 접근방법이 필요하다고 생각된다. 전반적으로는 실험과 해석결과가 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 주어진 식에 의해 균열발생을 예측 가능함을 나타내었다.

참 고 문 헌

김현수, 김종성, 진태은, 김홍덕, 정한섭 (2004). "관통균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 파열압력 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제28권, 제7호, pp 1006-1013.
박명규, 김영중, 전장환, 김종민, 박준수 (1996). "증기발생기 전열관 확관천이부위 축방향 관통균열의 관막음 기준에

- 관한 연구" 대한기계학회논문집 A권, 제20권, 제9호, pp 2894-2900.
- 신규인, 박재학, 김홍덕, 정한섭, 최영환 (2004) "T-형 복합 균열이 존재하는 증기발생기 전열관의 파열압력 시험 및 해석" 대한기계학회논문집 A권, 제28권, 제2호, pp 158-164.
- 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕 (2002). "감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성" 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 66-72.
- 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재윤 (2003). "감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가" 대한기계학회논문집 A권, 제27권, 제1호, pp 8-17.
- 안석환, 남기우 (2005). "굽힘하중을 받는 배관의 파손에 미치는 감육의 영향" 대한기계학회논문집 A권, 제29권, 제4호, pp 606-613.
- Ahn, S.H., Ando, K., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (1998). "Plastic Collapse behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load Allowable Limit", JHPI, Vol 36, No 4, pp 225-234.
- Ahn, S.H., Nam, K.W., Yoo, Y.S., Ando, K., Ji, S.H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (2002). "Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning", Nuclear Engineering and Design 211, pp 91-103.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III. (1992)
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. (1998)
- Deardorff, A.F. and Bush, S.H. (1990). "Development of ASME Section Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping", ASME PVP, PVP-Vol-18, pp 71-75.
- Mathonet, J.F., Cherasse, J.M., Leblois, C.L. and Guyette, M. A. (1995). "Belgian Methodology for Evaluation of Frosion Corrosion Phenomena in Unit 1; 2; 3 & 4 of the DOEL Nuclear Power Plant(NPP)", ASME PVP, PVP-Vol-303, pp 393-399.
- McDonald, P.E., Shah, V.N., Ward, L.W. and Ellison, P.G. (1985). "Steam Generator Tube Failures", NUREG CR-6365.
- Frederick, G. and Hernalsteen, P. (1985). "Tube Sheet and Expansion Transsition Cracking at Doel 3 and Tihange", EPRI Workshop in Primary Side SCC, San Diego.
- Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H. and Ando, K. (1999). "Fracture Behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load", Nuclear Engineering and Design 191, pp 195-204.
- Miyazaki, K., Nebu, A., Kanno, S., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (2002). "Study on Fracture Criterion for Cabon Steel Pipes with Local Wall Thinning", J. of High pressure Institute of Japan, Vol 40, No 2, pp 62-72.
- Weiss, V. (1972). Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, pp 159.

2006년 10월 30일 원고 접수

2006년 12월 14일 최종 수정본 채택