

# 감육된 증기발생기 전열관의 유한요소 해석 Finite Element Analysis for Wall Thinned Steam Generator Tubes

성기용·안석환·남기우

K. Y. Seong, S. H. Ahn and K. W. Nam

**Key Words** : Wall Thinning(감육), Steam Generator Tube(증기발생기 전열관), Bending Load(굽힘하중), Finite Element Analysis(유한요소해석), Strength(강도), Deformation(변형)

**Abstract** : Failure assessment of steam generator tube are very important for the integrity of energy plants. In pipes of energy plants, sometimes, the local wall thinning may result from severe erosion-corrosion damage. Recently, the effects of local wall thinning on fracture strength and fracture behavior of piping system have been well studied. In this paper, the elasto-plastic analysis is performed by FE code ANSIS on steam generator tube with wall thinning. We evaluated the failure mode, fracture strength and fracture behavior from FE analysis. 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.

## 1. 서 론

원자력 플랜트 배관은 그 성능이나 안전성 유지에 있어서 원자력 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 배관의 내면에 발생하는 감육현상에 의해 대형사고가 발생하고 있음이 국내외적으로 보고되고 있다<sup>1,2)</sup>.

이와 같은 배관의 감육현상은 심각한 중대사고를 일으킬 수 있기 때문에 감육에 대한 허용기준 안등을 마련하고자 다방면에 걸친 검토를 하고 있다. 그러나 배관 내부에 감육이 발생하였을 경우에 배관의 강도와 변형에 관한 계통적인 연구의 예는 아직 미미하고, 또한 그 특성에 대한 해명이 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다<sup>3~8)</sup>. 따라서, 감육이 발생한 배관에 외력이 작용하는 경우 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 변형에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 해명하기

위한 연구가 행하여지고 있다<sup>3~8)</sup>. 그러나, 감육이 발생한 배관의 파괴거동에 대해서는 아직도 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

특히, 원자력 개발이 진척됨에 따라 원자로의 설계와 안전심사를 하기 위한 안전개념이 여러 가지로 제기되고 있다. 우리나라의 원전은 PWR (Pressurized Water Reactor, 가압수형로)등을 운영하고 있다. PWR의 1차계통의 주요기기는 원자로 용기, 노내구조물, 연료, 제어봉 클러스터, 증기발생기, 가압기, 펌프 등으로 구성되어 있다. 이들 기기 중 증기발생기 전열관에는 인코넬 600이 사용되어져 왔으나, 최근 감육과 파손이 빈발한 관계로 개량형에는 인코넬 690을 적용하고 있다. Inconel의 경우 상당히 내식성을 갖는 재료로 알려져 있지만 사용기간 동안 침식-부식에 의한 열화현상이 발생하고 있고, 침식-부식에 의한 감육현상이 전열기 세관에 발생하고 있다. 이와 같이 감육이 발생하게 되면 수명 저하를 가져오게 된다.

따라서, 본 연구에서는 증기발생기 전열관에 사용되는 Inconel 세관에 침식-부식현상을 모의하여 예상되는 감육부를 감육깊이와 감육길이 별로 몇가지를 설정하고, 유한요소 해석을 실시하였다. 굽힘하중을 받는 Inconel 세관의 FE 해석으로 부터 강도 및 변형의 정도를 예측하여 손상평가를 실시하였다.

접수일 : 2006년 6월 8일, 채택확정 : 2006년 8월 21일  
남기우(책임저자) : 부경대학교 신소재공학부  
E-mail : namkw@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1640  
성기용 : 부경대학교 대학원  
안석환 : 부경대학교 기계공학부

2. 재료 및 해석방법

2.1 재료

본 연구에 사용된 재료는 증기발생기 전열관으로 사용되는 직경 19mm, 공칭두께 1.1mm인 Inconel 690(UNS NO6690) 세관이다. 실패관으로부터 절취한 인장시험편을 사용하여 인장시험으로부터 구한 그 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 1과 2에 나타낸다.

그리고, 증기발생기 전열관 감육부의 강도 및 변형에 대한 규명을 하기위해 해석에 이용된 시험편의 형상을 Fig. 1에 나타낸다. 감육결함은 감육길이( $l$ ) 및 감육깊이( $d$ )를 파라미터로 하여 배관 외부에 모의하였다. 360°의 전주감육을 상정한 배관의

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength $\sigma_u$ [MPa]	Yield strength $\sigma_y$ [MPa]	Elongation [%]
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 ( $d/t$ )	Thinned length ( $l$ , mm)	Failure mode
FE-SGT-1	0.0	0	Ovalization
FE-SGT-2	0.3	5	Ovalization
FE-SGT-3	0.3	20	Buckling
FE-SGT-4	0.3	40	Buckling
FE-SGT-5	0.6	5	Buckling
FE-SGT-6	0.6	20	Buckling
FE-SGT-7	0.6	40	Buckling
FE-SGT-8	0.8	5	Buckling
FE-SGT-9	0.8	20	Buckling
FE-SGT-10	0.8	40	Buckling

치수를 Table 3에 나타낸다. 감육비(감육깊이/공칭두께),  $d/t$ 를 4종류, 감육길이,  $l$ 을 4종류로 각각 하였다.

2.2 해석방법

감육된 증기발생기 전열관의 감육부에 대한 손상 평가를 위한 해석에 있어서는 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS ver.7.0을 이용하여 탄소성해석을 행하였다. 메쉬모델링은 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. 해석에 있어

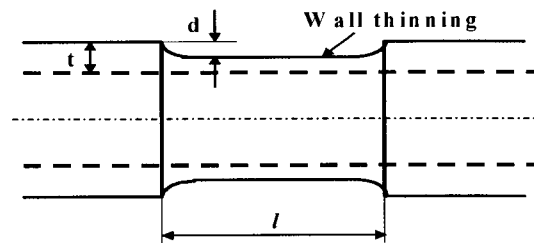
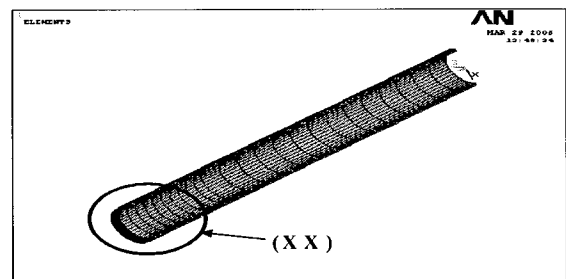
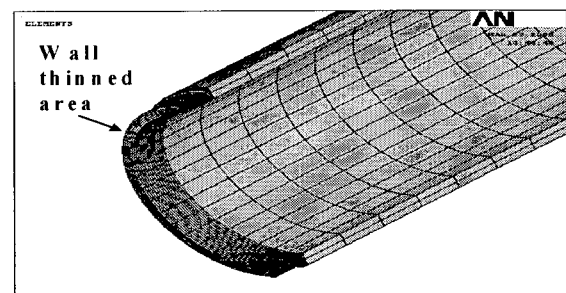


Fig. 1 Schematic of shape and dimensions of wall thinned steam generator tube



(a) 1/4 FEM modeling used



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

Fig. 2 An example of FEM model

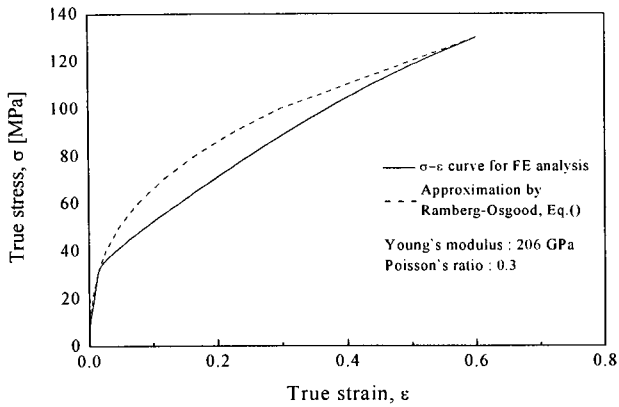


Fig. 3 True stress-true strain curve used in FE analysis

서 하중은 4점 굽힘하중이 작용하도록 하였다. 이때 부하 스패 길이는 80mm, 지지 스패 길이는 240mm로 각각 설정하였다. Fig. 2에 메쉬모델링의 예를 나타낸다.

Fig. 3에는 FE 해석에 사용한 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 감육된 전열관의 굽힘강도와 변위

증기발생기 전열관의 감육부에 4점 굽힘하중을 부하하여 변위가 50mm가 될 때까지 구한 굽힘모멘트-변위 곡선을 Fig. 4 및 5에 각각 나타낸다.

Fig. 4는 각각의 동일 감육비(d/t)에 대해 감육깊이를 변화시켰을 때의 굽힘모멘트-변위의 변화를 나타낸 것이다. 그림 속에는 감육이 없는 건전 세관의 결과를 함께 나타내었다.

감육이 없는 건전한 전열관의 굽힘모멘트에 비해 감육비 d/t=0.3, 0.6, 0.8과 같이 감육비가 커질수록 최대굽힘모멘트의 저하의 폭이 더 크게 나타났다. 이것은 감육깊이가 깊을수록 강도저하가 현저하다는 것을 나타낸다.

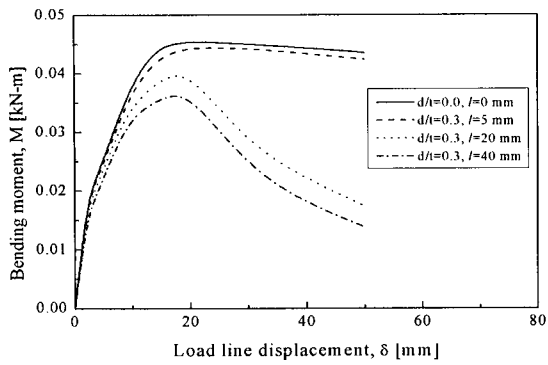
Fig. 4(a)에 있어서, d/t=0.3, l=5mm인 경우에는 건전한 배관에 비해 모멘트의 차이는 거의 없었다. 이때 전열관에 나타난 손상형태는 편평화(Ovalization)과피였다. 최대모멘트를 나타낸 후 하중의 저하는 아주 완만하게 진행되고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, 나머지 경우들에 있어서는 최대모멘트를 나타낸 후 감육깊이가 길어짐에 따라 하중

이 급격히 저하하고 있음을 알 수 있다. 이때 나타난 손상의 형태는 좌굴(Buckling)과피였다. Fig. 4(b)의 경우에 있어서는, Fig. 4(a)에 비해 감육비가 커졌고, 따라서 하중의 저하가 큰 폭으로 나타났다. 그러나, 최대모멘트를 나타낸 후 Fig. 4(a)보다는 급격저하의 정도가 다소 덜 심한 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)의 경우도 Fig. 4(b)의 경우와 거의 비슷한 경향으로서 급격저하의 정도가 조금 더 완만하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 하중의 저하 폭은 가장 크게 나타났지만 오히려 최대모멘트를 나타낸 후의 하중저하는 Fig. 4(a) 및 (b)의 경우보다도 덜 심하였다.

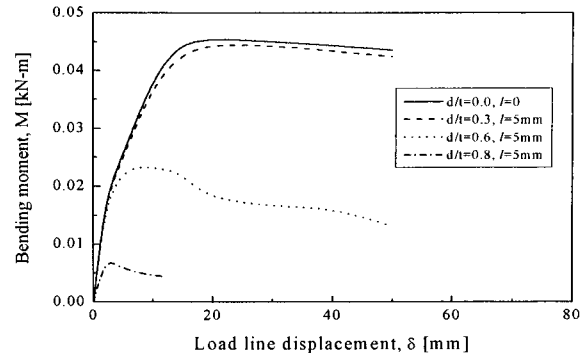
특히, 감육비가 커질수록 동일 감육비 내에서의 감육깊이에 의한 영향은 오히려 줄어들어 줄어드는 것으로 판단된다. Fig. 4(a) 및 (b)에서는 감육비가 커질수록 또, 동일 감육비라면 감육깊이가 커질수록 최대모멘트가 낮았다. 그러나, d/t=0.8의 경우에 있어서는 최대모멘트의 차이는 거의 없지만 감육깊이 l=5mm보다도 20 및 40mm의 최대모멘트 값이 다소 크게 나타났다. d/t=0.8과 같이 감육비가 큰 경우에 오히려 감육깊이가 짧게 되면 소성변형 정도가 충분하지 못하게 되는 원인으로서는 감육깊이가 상당히 커져 공칭두께의 감소가 심해졌고, 또한 감육깊이마저 짧아서 잔여 리가멘트(ligament)부분이 적기 때문에 응력집중이 빠르게 진행되어 적은 변위에서도 좌굴 등과 같은 변형이 쉽게 나타났기 때문이라고 생각된다. 이와 같이 오히려 감육깊이가 큰 경우에 있어서 소성변형 정도가 증가하는 양상을 나타내는 이유는 Inconel 재료가 그 기계적 특성치에 있어서 비교적 높은 강도를 유지하면서도 연성이 풍부하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5에는 동일 감육깊이에 대하여 감육비를 변화시켰을 때의 결과를 정리하여 나타내었다.

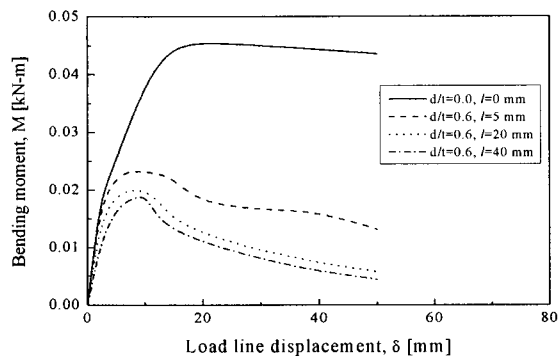
Fig. 5(a), (b) 및 (c)에도 나타내었듯이 동일 감육깊이 l을 가지는 경우, 감육비 d/t가 커질수록 하중의 저하가 급격히 나타나는 것으로부터 감육부의 강도에 감육비가 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 동일 감육깊이를 가지는 경우 감육비가 큰 d/t=0.8의 경우들이 충분한 소성변형을 나타내지 못하였다. 특히, Fig. 5(b)와 (c)를 비교해 보면 거의 동일한 양상과 비슷한 모멘트-변위의 값을 나타



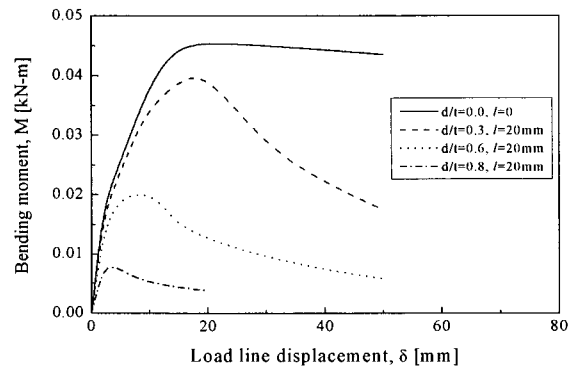
(a) Case of  $d/t=0.3$



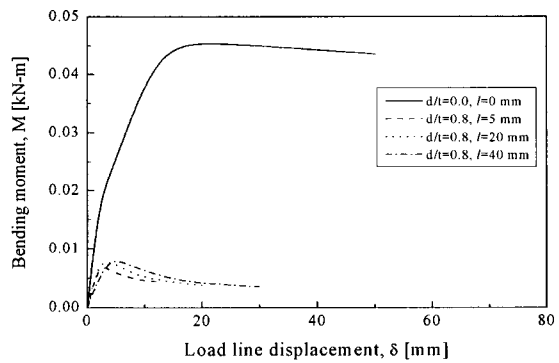
(a) Case of  $l=5\text{mm}$



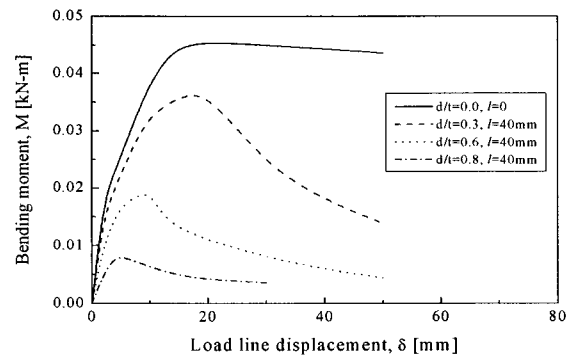
(b) Case of  $d/t=0.6$



(b) Case of  $l=20\text{mm}$



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



(c) Case of  $l=40\text{mm}$

Fig. 4 Bending moment-load line displacement curves of wall thinned steam generator tubes by FE analysis [according to thinned ratio]

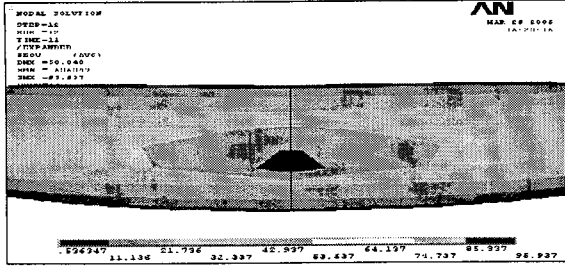
Fig. 5 Bending moment-load line displacement curves of wall thinned steam generator tubes by FE analysis [according to thinned length]

내고 있는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터, 감육길이의 영향은 있으나 감육의 정도가 어느 한계길이보다 길어지게 되면 대체로 그 영향의 폭은 거의 차이가 없는 것으로 판단된다.

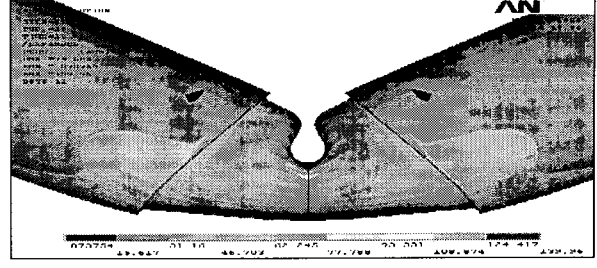
이는 위에서도 언급하였듯이 Inconel 재료의 특성상 고강도, 고연성인 것과 관련이 있을 것으로

생각되며, 금후 이 부분에 대해서 좀더 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다.

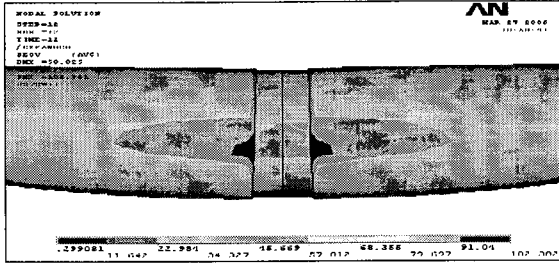
Fig. 6(a)~(j)에는 FE 해석으로부터 얻은 작용변위 50mm일 때의 전열관 감육부의 변형을 나타내었는데, 앞에서 언급한 것과 같은 양상들을 보여주고 있다.



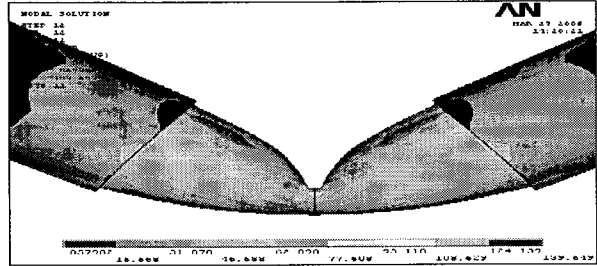
(a) Case of  $d/t=0.0$  and  $l=0\text{mm}$



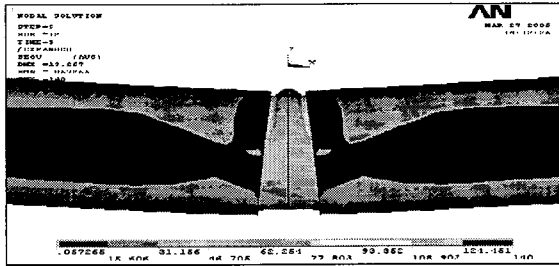
(f) Case of  $d/t=0.6$  and  $l=20\text{mm}$



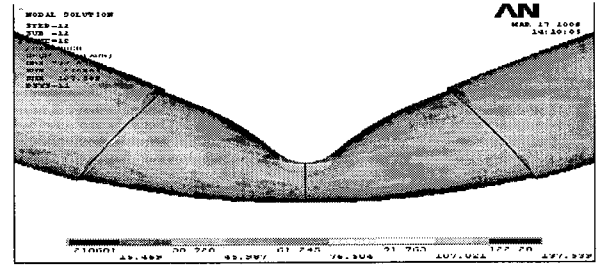
(b) Case of  $d/t=0.3$  and  $l=5\text{mm}$



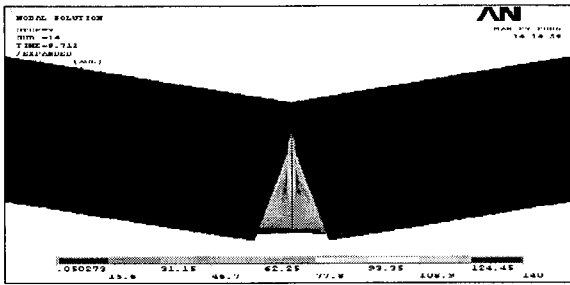
(g) Case of  $d/t=0.8$  and  $l=20\text{mm}$



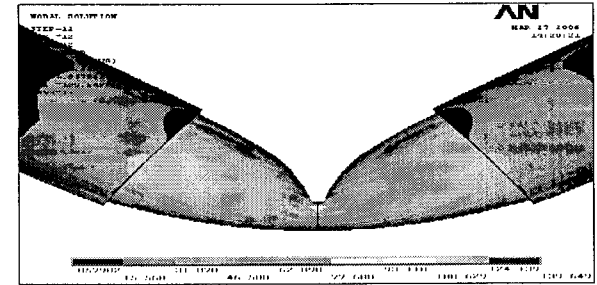
(c) Case of  $d/t=0.6$  and  $l=5\text{mm}$



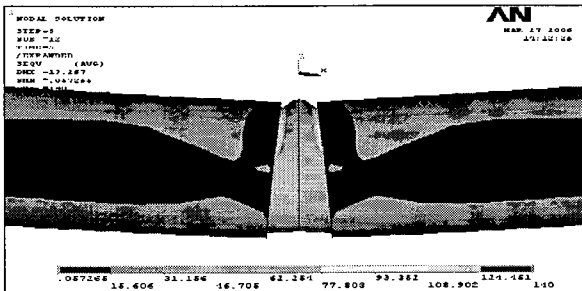
(h) Case of  $d/t=0.3$  and  $l=40\text{mm}$



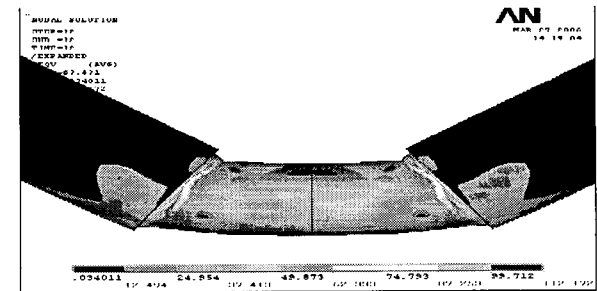
(d) Case of  $d/t=0.8$  and  $l=5\text{mm}$



(i) Case of  $d/t=0.6$  and  $l=40\text{mm}$



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



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

Fig. 6 Failure surface obtained from FE analysis

3.2 전열관 감육부의 균열발생 예측

Fig. 7에는 증기발생기 전열관의 손상평가를 시도하였다. 손상평가의 방법으로서 균열발생을 예측하도록 하였으며, 이때 Miyazaki 등<sup>8)</sup>에 의해 제안된 평가방법을 이용하여 균열발생을 예측하였다. Miyazaki 등은 다축응력조건하에서 진파괴연성( $\epsilon_{mf}$ )을 평가하기 위해서 아래의 식 (1)과 같이 Weiss의 이론<sup>9)</sup>을 확대 전개하여 식을 도출하고 있다. 다축응력의 정도는 배관의 변형에 의존한다. 그런 까닭으로, 감육부의 중앙부에서의 진파괴연성( $\epsilon_{mf}$ ) 또한 변형에 의존한다. 상당변형율( $\epsilon_{ms}$ )은 배관의 변형과 더불어 증가한다. 즉, Weiss의 이론에 근거하여 균열은 감육부에서 발생하는 상당변형율이 식 (1)로 주어지는 진파괴연성을 능가하는 점(그림속의 교차점)에서 발생한다고 가정한다.

본 연구에서는,  $\epsilon_{mf}$ 의 값은 식 (1)에서 FE 해석으로부터 얻어진 감육부의 중앙에서의 주응력들을 대체함으로써 평가되었고,  $\epsilon_{ms}$ 의 값은 FE 해석으로부터 얻어졌다. 균열발생점( $\delta_{crack}$ ), 즉 균열이 발생된 하중선 변위는 이상의 방법에 의해 평가하였다.

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

where,

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

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

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

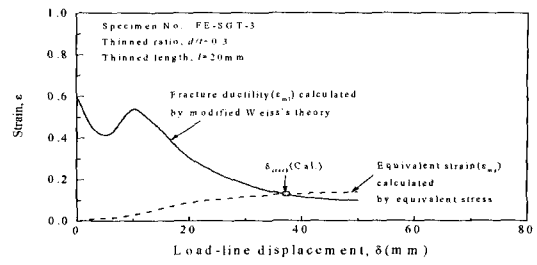
$$\beta = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

여기서,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  및  $\sigma_3$ 는 주응력들을,  $\sigma_0$ 는 항복응력을 각각 나타낸다.

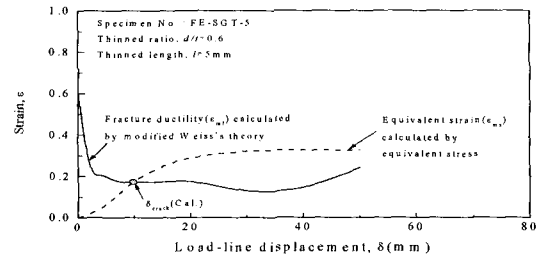
Fig. 7에는 하중선 변위( $\delta$ )의 함수로서 식 (1)에 의하여 계산된 상당변형율과 파괴연성을 각각 점선과 실선으로 나타낸다.

Fig. 7(a)와 (b)는 균열 발생이 예측된 경우이다.

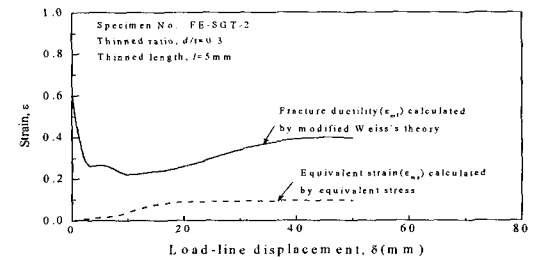
Fig. 7(a)는  $d/t=0.3$ ,  $\ell=20\text{mm}$ 의 경우로, 균열은  $\delta_{crack}=37.26\text{mm}$ 에서 발생할 것으로 예측되었다.



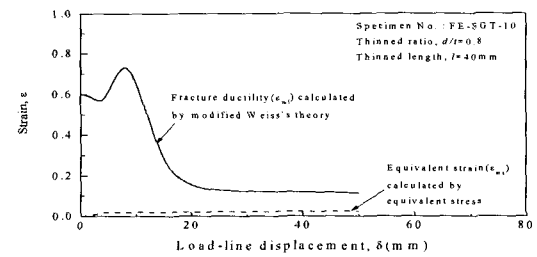
(a) Case of  $d/t=0.3$  and  $\ell=20\text{mm}$



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



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



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

Fig. 7 Relationship between  $\epsilon_{mf}$  and  $\epsilon_{ms}$

Fig. 7(b)는  $d/t=0.6$ ,  $\ell=5\text{mm}$ 의 경우로서 균열은  $\delta_{crack}=9.73\text{mm}$ 에서 발생할 것으로 예측되었다. 두 경우를 비교하면 감육비가 크고, 감육길이가 짧을수록 균열발생점은 작은 하중선 변위에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이에 반해 Fig. 7(c)와 (d)는 균열이 발생하지 않은 경우이다. Fig. 7(c)는 앞의 굽힘 모멘트-변위 선도에서 건전세관과 거의 유사한 경향의 결과를 나타내었는데 감육길이가 짧은 것에 반해 감육비가 적어 응력집중의 효과가 나타나지 않아 균열이 발생하지 않은 것으로 사료된다. 또한 Fig. 7(d)와 같이 감육비가 0.8로서 가장 크고, 감육

길이가 40mm로서 가장 큰 경우에는 균열발생 이전에 좌굴과 같은 심한 소성변형이 먼저 발생함으로서 균열발생과 같은 예리한 결함의 생성이 곤란해졌기 때문으로 판단된다.

### 5. 결 론

감육된 증기발생기 전열관에 대한 유한요소 해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

유한요소 해석으로부터 감육부의 형상에 따라 강도 및 변형의 정도가 다르게 나타남을 알 수 있었다. 즉, 감육비( $d/t$ )와 감육길이( $l$ )가 전열관 감육부의 강도와 변형에 영향을 미쳤다. 또한, 손상평가의 척도로서의 균열발생점의 예측을 도입하고, 이를 FE 해석을 통하여 시도할 수 있었다. 결과로부터 증기발생기 전열관의 건전성 평가를 계통적으로 해석 가능하였다.

### 참고 문헌

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1992.
2. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, 1998.
3. 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕, 2002, " 감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성" , 한국해양공학회지, 제 16권, 제 5호, pp. 66-72.
4. 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재윤, 2003, " 감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가" , 대한기계학회논문집, 제 27권, 제 1호, pp. 8-17.
5. S. H. Ahn, K. Ando, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 1998, " Plastic Collapse behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load Allowable Limit" , JHPI, Vol. 36, No. 4, pp. 225-234.
6. S. H. Ahn, K. W. Nam, Y. S. Yoo, K. Ando, S. H. Ji, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 2002, " Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning" , Nuclear Engineering and Design Vol. 211, pp. 91-103.
7. K. Miyazaki, S. Kanno, M. Ishiwata, K. Hasegawa, S. H. Ahn and K. Ando, 1999, "

Fracture behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load" , Nuclear Engineering and Design Vol. 191, pp. 195-204.

8. K. Miyazaki, A. Nebu, S. Kanno, M. Ishiwata and K. Hasegawa, 2002, " Study on Fracture Criterion for Carbon Steel Pipes with Local Wall Thinning" , J. of High pressure Institute of Japan, Vol. 40, No. 2, pp. 62-72.
9. V. Weiss, 1972, Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, pp. 159.