

공학석사 학위논문

배관 감육부의 변형 및 강도에 대한
유한요소 해석

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2005년 8월

부경대학교 대학원

기계공학학연협동

이 수 식

이수식의 공학석사 학위논문을 인준함.

2005 년 8 월

주 심 공학박사 김 진 욱



위 원 공학박사 안 석 환



위 원 공학박사 남 기 우



Finite Element Analysis for Deformation and Strength of Pipes with Local Wall Thinning

Soo-Sig Lee

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

Abstract

Fracture behaviors and strengths of pipes are very important for the integrity of energy plants, ocean structures, and so on forth. In pipes of energy plants and ocean structures, 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 monotonic bending analyzes were performed of full-scale carbon steel pipes with local wall thinning. A monotonic bending load was applied to straight pipe specimens by four-point loading at ambient temperature without internal pressure. Also, the elasto-plastic analysis is performed by FE code ANSYS on straight pipes with wall thinning. We evaluated the failure mode, fracture

strength and fracture behavior from FE analysis. Also, the effect of the axial strain on deformations and failure modes was estimated by FE analysis.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

플랜트 및 해양구조물 등의 냉각계통, 운송용 등에 사용되는 배관은 성능이나 안전성 유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 이와 같은 배관에 대하여 건전성 유지를 위한 예방 및 보전기술에 관한 많은 연구가 행하여져 왔다. 최근엔 원자력 발전소의 수요가 증가하고 장기간 사용으로 인해 배관 건전성 평가를 수행해야 하는 경우가 더욱 증가하고 있는 추세이다. 따라서 원자력 발전소의 주요 배관에 대해서는 배관 파단 사고로부터 주요 기기 및 구조물을 보존하기 위한 엄격한 기술기준을 적용하여 설계, 제작되고 있으며 운전 중에도 가동중검사(in-service inspection, ISI)를 통해 건전성을 확인하고 있다. 이와 같이 배관에 있어서는 그 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화 손상을 받을 우려가 있으며, 최근 배관의 두께가 감소하는 현상(이하 감육이라 한다)이 국내외적으로 보고되고 있다^(25,26). 배관에 발생한 균열(crack)의 발생 및 진전에 대한 연구는 이미 국내외적으로 이미 많은 연구⁽¹⁻⁷⁾가 진행되어졌지만, 아직도 감육 문제에 대해서는 여러 가지 불명의 점이 해결되지 않고 있다.

대표적인 감육에 의한 사고사례로서는 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고⁽⁸⁾, 일본 미야마 원전 배관 파단사고⁽⁹⁾ 등이 보고되어있고, 국내에서도 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서도 배관 감육 손상이 발생되

고 있는 실정이다⁽¹⁰⁾. 이상과 같이 배관의 감육문제는 세계 각 국에서 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 등이 검토되고 있다 (11-14).

이와 같이, 감육문제는 심각한 문제로 대두되어 감육에 대한 허용기준 안 등이 검토되고 있다. 그러나 배관에 국부적인 감육부가 발생하였을 경우에 있어서의 배관의 강도와 손상모드를 해명하기 위한 연구의 예는 아직 미미하고, 또한 그 특성에 대한 해명이 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다⁽¹⁵⁻²²⁾.

최근, 감육이 배관에 발생하고 급침하중을 받는 경우에 대하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는 가를 정량적으로 해명하기 위한 연구가 행하여지고 있다⁽¹⁸⁻²²⁾. 그러나, 감육을 가지는 배관의 파괴강도 및 파괴거동에 대해서는 아직도 더 많은 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 탄소강배관이 침식-부식에 의해 두께감소가 발생하였을 경우를 가정하고, 고압탄소강배관에 임의적으로 감육결함을 상정한 후 유한요소법에 의한 해석을 수행하였다. 이와 같이, 배관에 상정한 감육의 형상과 정도에 따라 배관에 발생한 손상모드와 강도를 해석적으로 검토하였다.

1.2 이론적 배경

배관 건전성 평가법에는 선형탄성파괴역학(LEFM)과 탄소성파괴역학(EPFM) 등이 있다.

탄소성파괴역학 영역에서는

- 1) 균열구동력다이아그램(Crack Driving Force Diagram; CDFD)법
- 2) J 적분법
- 3) 찢김계수(Tearing Modulus)를 이용한 J-T해석법
- 4) 전변형률파손평가다이아그램(Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram; DPFAD)법
- 5) 국부 넥킹(local necking) 발생시의 평가법인 한계하중법(limit load analysis) 및 무차원 소성역 매개변수(DPZP)법

등이 있다^(23,24,25,27).

또한, 원자력 발전소에서는 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec.XI에 의하여 자체적으로 평가하는 방법을 수행하고 있다⁽²⁶⁾.

1.2.1 실단면응력 criterion

오스테나이트 스테인리스강과 같은 고연성재료의 파괴는 균열둔화, 균열 단면의 전단면항복 및 균열안정 성장 후에 발생한다. 이 경우, 최대하중시의 실단면응력은 재료의 항복응력(σ_y)과 인장강도(σ_u)의 중간값으로 한다. 실단면응력 criterion은 균열단면에 있어서 평균응력이 σ_y 와 σ_u 사이에 있는 한계치에 달했을 때 파괴가 발생하는 것으로 생각하

는 파괴평가법이다. 즉, 이론적 임계 실단면응력은 배관재료의 유동응력 (flow stress, σ_f)으로 정의되며, 배관응력이 이 값에 도달하면 파괴되었다고 판단하고 이때의 상태를 소성붕괴(plastic collapse)라고 한다. Kanninen 등^(1,2)은 이 σ_f 를 이용하여 평가를 행하고 있다. 이 유동응력에 기준한 평가는 Net Section Stress criterion(실단면응력 기준, =한계하중법(limit load analysis))이라 하고, 재료를 완전소성체로서 취급하는 것이다.

이때 적용되는 유동응력의 값들로서는

(1) 탄소강의 경우

$$a) \sigma_f = 1.04 \sigma_y + 10 \text{ ksi} \approx 0.51 (\sigma_y + \sigma_u)$$

$$b) \sigma_f = \frac{3\sigma_y + \sigma_u}{4}$$

$$c) \sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2.4}$$

$$d) \sigma_f = 0.4 (\sigma_y + \sigma_u)$$

(2) 스테인리스강의 경우

$$a) \sigma_f = \frac{1.15 (\sigma_y + \sigma_u)}{2} \approx 3S_m$$

$$b) \sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2}$$

1.2.2 실단면응력의 모델링 및 응력분포

Fig. 1은 실단면응력 기준에 있어서 파괴과정에서의 단면응력분포의 모델링을 나타낸다. 균열단면에서의 전단면항복 후 단면의 평균응력 σ_{net} 가 σ_i 에 달하면 균열이 발생하고, 그 후 가공경화에 의한 저항이 증가하면 $\sigma_{net}=\sigma_i$ 에 있어서 최대하중을 나타내고 파괴한다.

Fig. 2는 배관의 원주방향으로 부분적으로 균열이 발생하였을 때의 단면의 응력분포를 나타낸다.

Fig. 3은 균열을 가진 배관에 내압 및 굽힘하중이 작용하였을 때의 실단면응력의 분포를 모델링 한 예를 나타낸다. 이와 같은 경우에 대해서 실단면응력 기준에 준한 Kanninen 등^(1,2)의 평가식은 아래식과 같다. 이때 실단면응력 기준에 의하여 σ_i 및 σ_c 는 σ_f 로 치환하면 된다. 이외에 여러 가지의 식들이 다수 발표되고 있다⁽³⁻⁷⁾.

이상과 같은 평가식은 균열을 가정한 경우에 대한 평가식이다. 그러나, 감육과 같이 예리하지 못한 형태의 결함을 가진 경우에 있어서는 아직 기준이 마련되어 있지 못하고, 균열에 적용하고 있는 평가식을 사용하고 있는 실정이다. 이전의 연구에 의하면 감육을 가진 배관의 강도 평가를 실단면응력 기준에 준하여 시도한 결과 균열과는 약간의 차이는 발생하고 있지만 대체로 실단면응력 기준에 의한 감육결함의 강도평가가 가능함을 나타내고 있고, 균열에 비해서 감육에 대하여서는 실단면응력 기준이 더욱 보수적임을 나타내고 있다^(18,20,22).

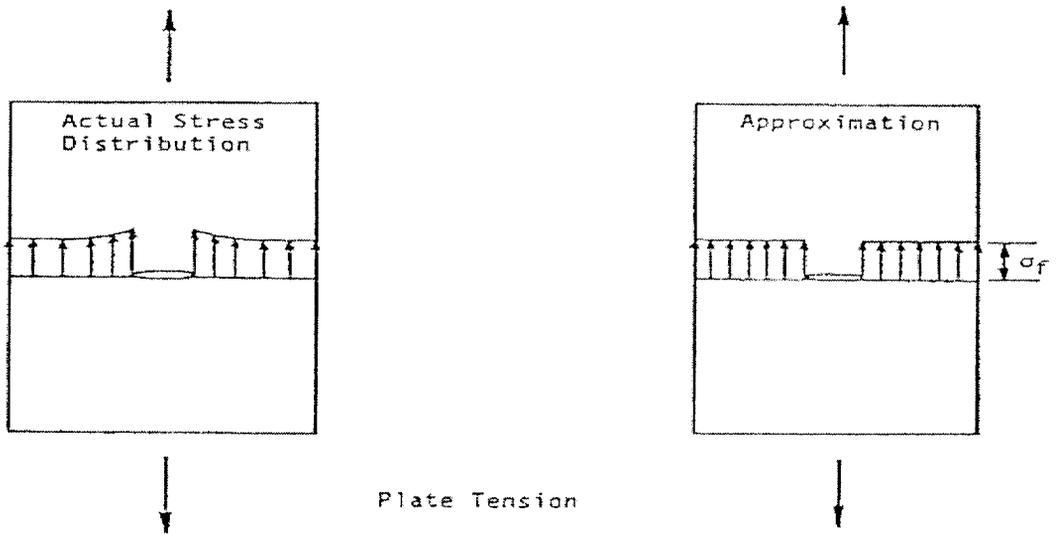


Fig. 1 Stress distribution modelling of Net-Section Collapse Criterion^(1,2)

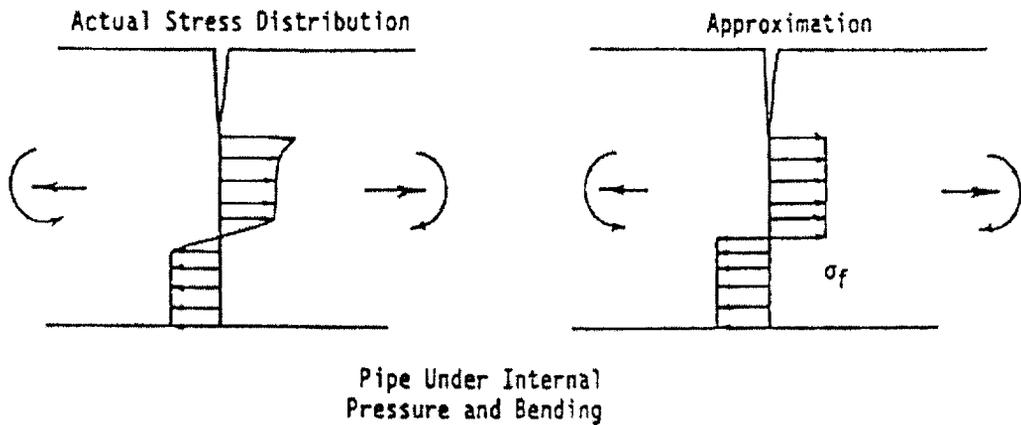


Fig. 2 Stress distribution modelling of circumferential part-through^(1,2)

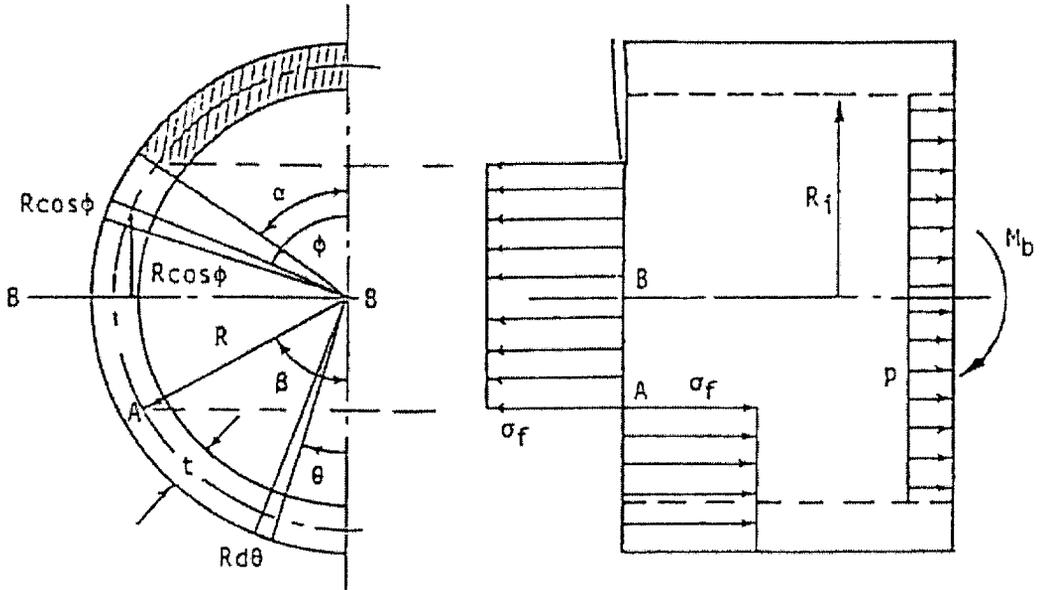


Fig. 3 Stress distribution modelling of circumferential cracked pipe for Net-Section Collapse Criterion^(1,2)

Note: R : Mean radius of pipe

t : Wall thickness

p : Internal pressure

M_b : Moment

β : One half of neutral angle

α : One half of crack angle

σ_f : Flow stress

(1) 파괴모멘트 M_B

$$M_B = 2 \sigma_c R^2 t (2 \sin \beta_B - \sin \theta)$$

where ,

$$\beta_B = \frac{\pi - \theta}{2} - \frac{\pi}{4} \frac{Rp}{t \sigma_c}$$

(2) 누설모멘트 M_L

1) $\beta_L \leq \pi - \theta$ 의 경우

$$M_L = 2 \sigma_i R^2 t \left(2 \sin \beta_L - \frac{d}{t} \sin \theta \right)$$

where ,

$$\beta_L = \frac{\pi - \frac{d}{t} \theta}{2} - \frac{\pi}{4} \frac{Rp}{t \sigma_i}$$

2) $\beta_L > \pi - \theta$ 의 경우

$$M_L = 2 \sigma_i R^2 t \left\{ 2 \left(1 - \frac{d}{t} \right) \sin \beta_L + \frac{d}{t} \sin \theta \right\}$$

where ,

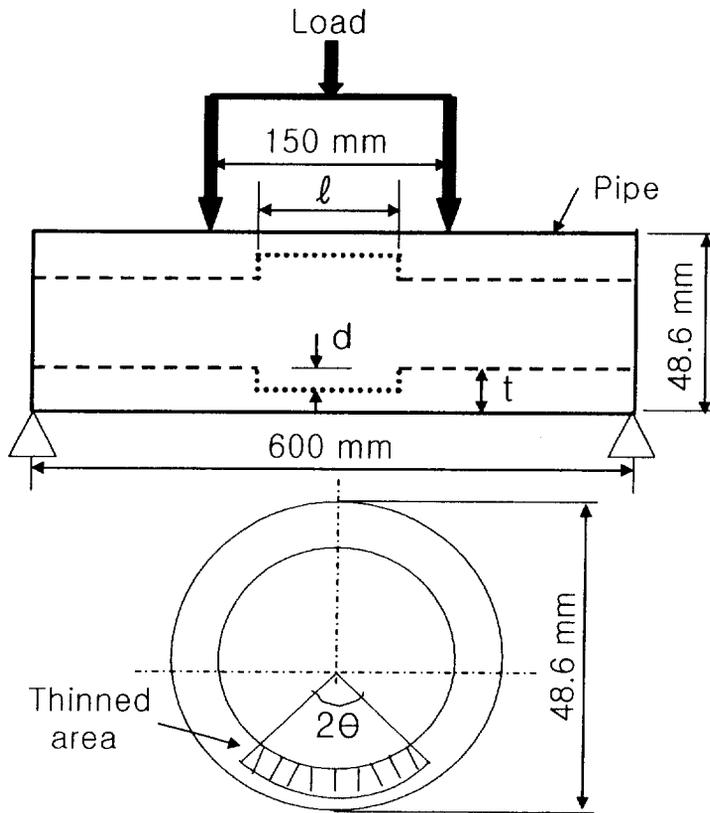
$$\beta_L = \pi + \frac{1}{1 - \frac{d}{t}} \left\{ \frac{\frac{d}{t} \theta - \pi}{2} - \frac{\pi}{4} \frac{Rp}{t \sigma_i} \right\}$$

2. 재료 및 해석방법

2.1 재료

본 해석에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80 STS370 고압 탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; JIS Standard G3455)이며, 실패관으로부터 절취한 인장시험편을 사용하여 인장시험으로부터 구한 그 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 1과 2에 나타낸다.

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 해석에 이용한 시험편의 형상을 Fig. 4에 나타낸다. 감육결함은 감육각도(2θ), 감육길이(l) 및 감육깊이(d)를 파라미터로 하여 임의적으로 배관 내부에 모의하였다. 시험편의 종류에 있어서는 $2\theta=45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 의 4가지 종류에 대해서, $l=20, 80, 140\text{mm}$ 및 $d=2, 4\text{mm}$ 를 각각 적용하였다.



l : Thinned length

d : Thinned depth

t : Nominal thickness (5.1mm)

2θ : Thinned angle

Fig. 4 Pipe specimen with local wall thinning and 4-point bending load used in the FE analysis

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	(%)
STS370	402	273	28

Table 2 Chemical composition [wt%]

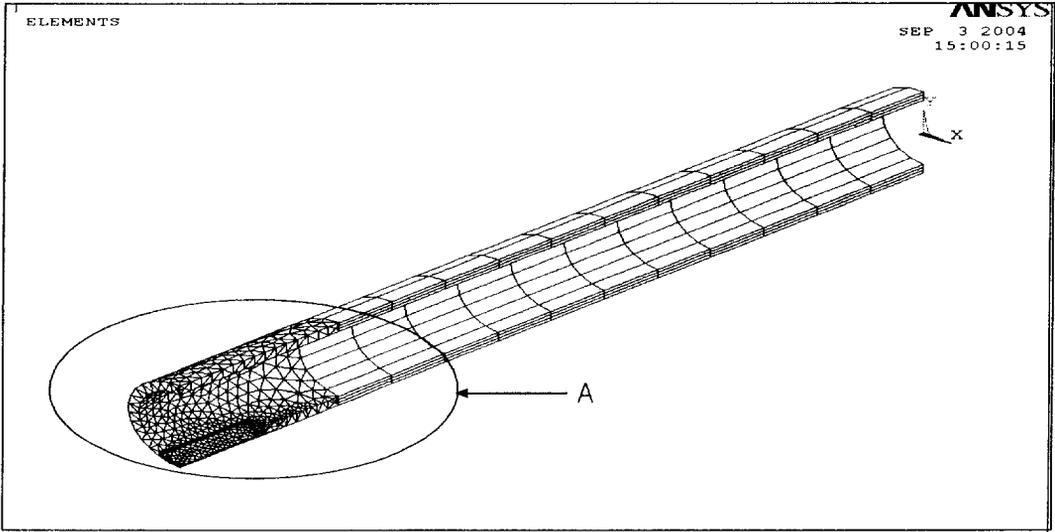
Material	C	Si	Mn	P	S
STS370	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

2.2 해석방법

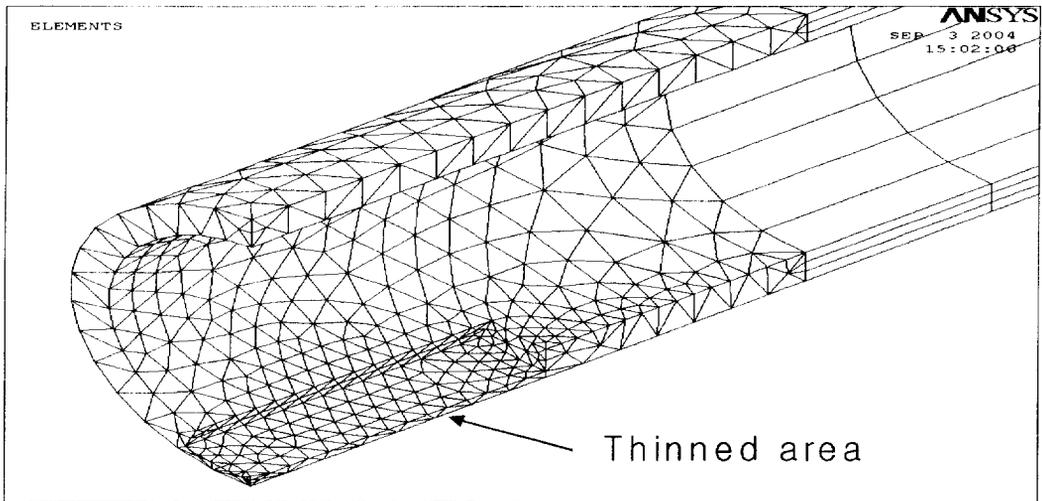
해석에 있어서는 유한요소법 소프트웨어인 ANSYS를 이용해서 탄소성해석을 행하였다. isoparametric 20절점요소를 이용하여 대칭성을 고려해서 1/4 모델의 배관을 작성하였다. 해석에는 Von Mises의 항복조건을 사용하였다. 해석은 변위제어로 행하여 하중점의 절점반력해를 구하였다. 이때, 내압은 고려하지 않았다. 입력한 재료 data는 동 재료의 인장시험에 의해 얻어진 값을 다직선근사해서 사용하였다. 영률은 206Gpa, 포아송비는 0.3, 항복응력은 340MPa로 했다. 해석은 등방경화칙을 가정해서 행하였다. 하중의 부하는 모의한 감육결함을 가지는 배관에 4점굽힘하중이 작용하는 것으로 하였다. 또한, 감육결함은 부하하중에 대해서 인장측에 놓이도록 하였다. 이때, 부하 스패 길이는 150mm, 지지 스패 길이는 600mm로 하였다.

Fig. 5(a)와 (b)에는 배관의 유한요소 모델의 예를 나타낸다.

Fig. 6에는 FE 해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.



(a) 1/4 model



(b) Detail of A

Fig. 5 A example of FE analysis modeling for thinned pipe

specimen

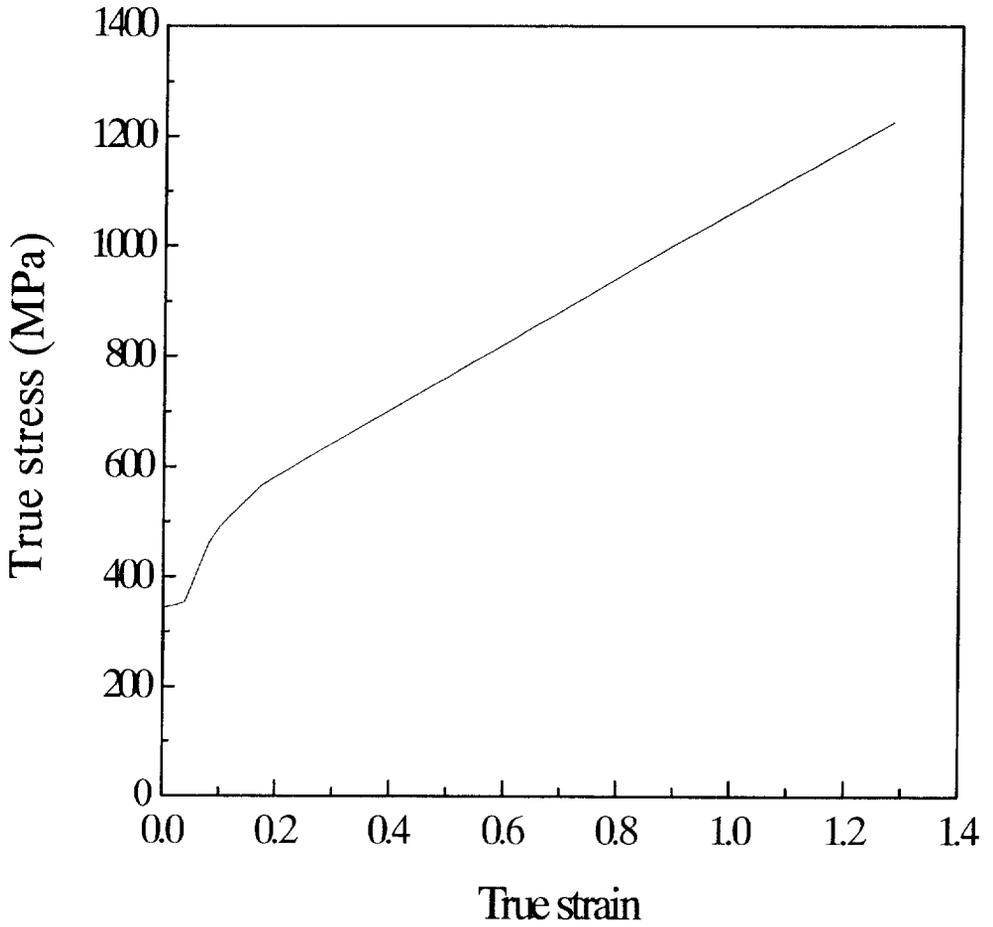


Fig. 6 True stress- true strain curve used in FE analysis

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석에 의한 $M-\delta$ 선도 및 강도고찰

Fig. 7~14에는 다양한 감육결합을 가진 배관에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 얻어진 굽힘모멘트(M)와 하중점변위(δ) 사이의 관계를 나타낸다. 결과의 정리는 감육각도(2θ)와 감육비(d/t) 및 감육길이(l)로 나타내었다. Fig. 7~14의 모든 그림 속에는 감육결합이 없는 건전한 배관의 $M-\delta$ 선도를 함께 나타내었다. 변형정도에 있어서는 변위가 140mm가 될 때 까지를 해석에 이용하였다.

Fig. 7, 9, 11, 13은 $d/t=0.392$ 인 경우의 결과 들이다. 이때, 감육길이 $l=20, 80, 140$ mm를 이용하였다. 건전한 배관에 비해 감육각도가 커질수록 최대강도는 저하하였고, 동일한 감육각도일 경우 감육길이가 길수록 최대강도가 저하하였다. 감육결합이 가장 큰 360° 전주감육의 경우, 건전한 배관에 비해서 감육길이가 $l=20$ mm에서는 약 22.6%, $l=140$ mm에서는 약 40.8% 정도 최대강도의 감소를 나타내었다. 이에 반해, 감육각도가 45° 로 비교적 작은 부분감육에 있어서는 건전배관에 비해 최대강도의 저하는 1.2~4.8% 정도였다.

Fig. 8, 10, 12, 14는 $d/t=0.784$ 인 경우의 결과 들이다. 감육길이 $l=20, 80, 140$ mm를 이용하였다. 건전한 배관에 비해 감육각도가 커질수록 최대강도는 저하하였고, 동일한 감육각도일 경우 감육길이가 길수록 최대강도가 저하하였다. 감육결합이 가장 큰 360° 전주감육의 경우에 있어서는 건전한 배관에 비해서 감육길이가 $l=20$ mm일 때 약 78.6%,

$l=140\text{mm}$ 에서는 약 79.8% 정도 최대강도의 감소를 나타내었다. 또한, 감육각도가 45° 로 비교적 작은 부분감육에 있어서는 건전배관에 대해 최대강도의 저하는 2.4~14.3%로 $d/t=0.392$ 에 비해 약간 증가하고 있음을 알 수 있다.

동일한 감육각도 및 동일한 감육길이를 가질 경우에 있어서는 감육깊이가 깊을수록 최대강도가 감소하였다. 즉, 감육결합이 가장 큰 360° 전주감육일 때 $d/t=0.392$ 에 비해 $d/t=0.784$ 의 감육결합을 가지는 배관의 최대강도는 약 66% 정도 감소하였다. 또한, 동일한 감육각도 및 동일한 감육길이를 가지는 경우라 하더라도, 감육깊이가 깊수록 최대강도는 저하하였다. 즉, 360° 전주감육일 때 $d/t=0.392$ 의 경우 $l=20\text{mm}$ 에 비해 $l=140\text{mm}$ 에서 23.1% 정도 감소를 나타내었다. 그리고 $d/t=0.784$ 의 경우, 180° 부분감육에 있어서 $l=20\text{mm}$ 에 비해 $l=140\text{mm}$ 에서 27.3% 정도 최대강도의 감소를 보였다. 그런데 여기서 특이한 것은 $d/t=0.784$ 의 감육을 가지는 360° 전주감육에서는 $l=20\text{mm}$ 에 비해 $l=140\text{mm}$ 에서의 최대강도의 저하는 약 5.6% 정도로 오히려 큰 변화가 나타나지 않았다. 이것은 이미 360° 전주에 걸쳐서 $d/t=0.784$ 만큼의 깊은 감육결합이 형성되었기 때문에 Fig. 14에 나타내었듯이 최대강도가 거의 변형이 발생하지 않았음에도 불구하고 형성된 결과이다. 즉, 감육깊이가 깊어질 경우에는 감육길이에 대한 거의 상관없이 강도의 저하가 나타나고 있음을 알 수 있다.

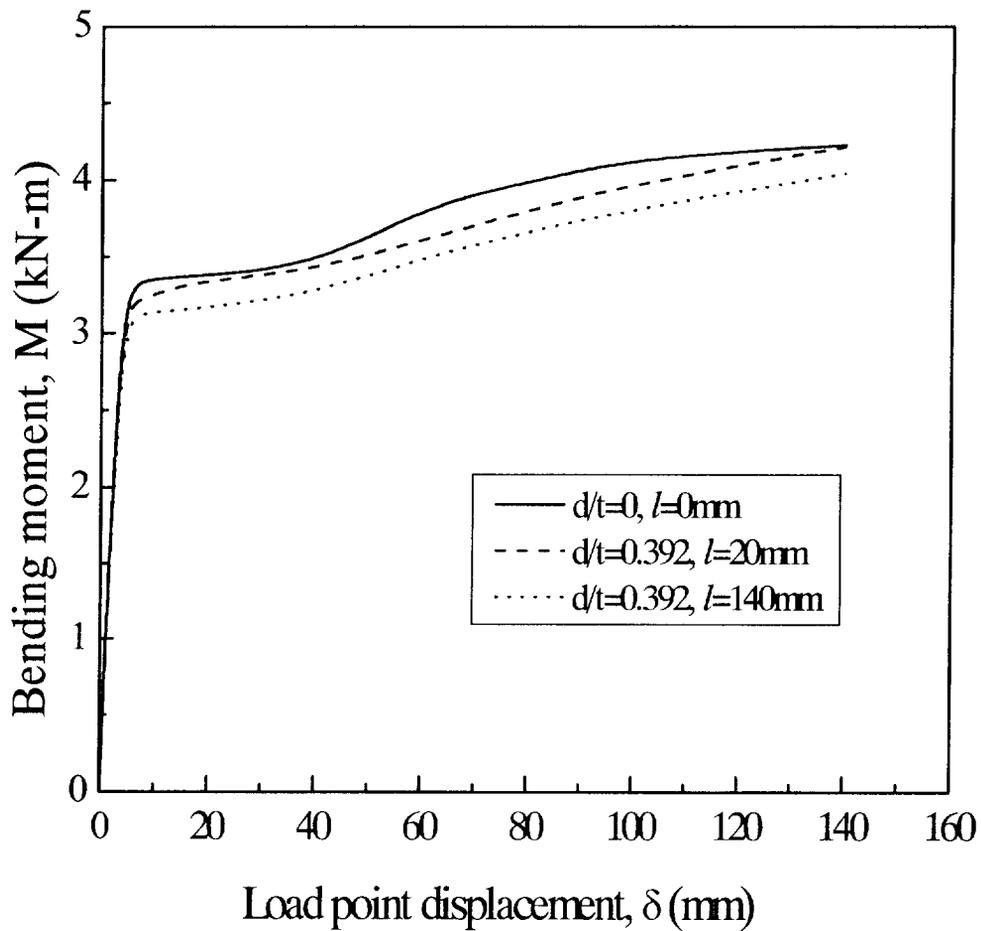
이와 같은 내용을 다시 한번 요약해보면, 건전한 배관에 비해서 최대강도에서의 감소는 1) 감육각도가 커질수록, 2) 동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육길이가 길수록, 3) 동일한 감육각도 및 감육깊이라면

감육깊이가 깊을수록 현저하였다.

이전의 연구결과에 의하면 360° 전주에 걸쳐 감육결합이 형성되었을 경우, 감육깊이가 배관의 공칭두께의 약 50% 이상이 되면 조건부 허용 혹은 수리 및 교환을 필요로 한다고 보고되고 있다^(18-20,22). 또한, 감육배관이 반복하중을 받을 경우정적최대강도의 약 75%정도까지를 한계하중으로 본다면^(20,25,26), 본 연구의 결과에 있어서 감육깊이가 공칭두께의 78.4%로 깊어졌을 때 감육각도가 90°인 $l=140\text{mm}$ 의 경우(2.8MPa)는 건전배관의 정적강도의 75%인 3.15MPa 보다도 낮기 때문에 이보다도 조건이 열악한 180° 및 360° 감육배관 들은 허용할 수 없는 결함으로 판정할 수 있다. 또한, 감육깊이가 공칭두께의 39.2%의 감육배관에 있어서도 180°의 $l=80\text{mm}$ 이상 및 360° 감육배관 들은 허용할 수 없는 결함으로 판정할 수 있다고 사료된다. 이와 같은 결과들은 배관의 건전성 확보를 위하여, 금후 더 많은 해석결과를 검토하여 실험에 의한 결과들과의 비교를 할 필요가 있다.

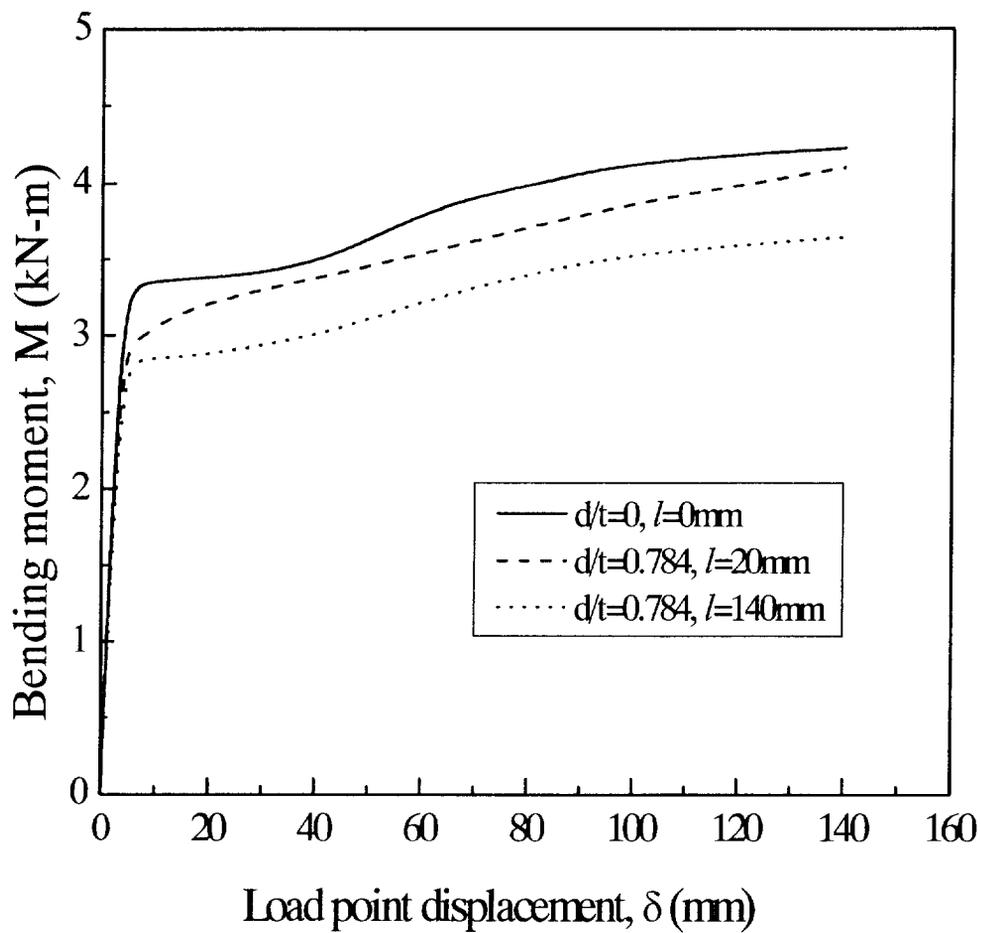
Fig. 15~20은 유한요소해석을 통하여 얻은 감육배관에서의 응력분포 및 변형양상의 몇몇 예를 나타낸다. 변위가 140mm만큼 변형되었을 때의 결과들로서 하중부하방향에 대해 인장응력이 발생하는 쪽의 감육결합이 위치하고 있는 영역에서 높은 응력분포가 넓은 범위에 걸쳐 발생하고 있음을 알 수 있다. 해석으로부터는 편평화 및 좌굴과 같은 손상모드가 나타났다. 특히, 균열발생이 예상되는 감육배관에 대해서는 ANSYS의 해석에 있어서 계산이 종료되었는데, 이것은 메쉬가 비교적 세밀하지 못하게 만들어지는 등의 원인으로 인하여 해의 발산이 발생하였기 때문으로 사료되며, 균열발생에 따른 최종붕괴강도로서 판단하기

에는 다소 무리가 있다고 생각된다. 그러나, 안 등⁽²²⁾의 논문에서의 실물 실험결과와 비교해 보면 동일 감육크기에서 균열이 발생한 것으로 보아 균열이 발생한 것으로 예상되어진다.



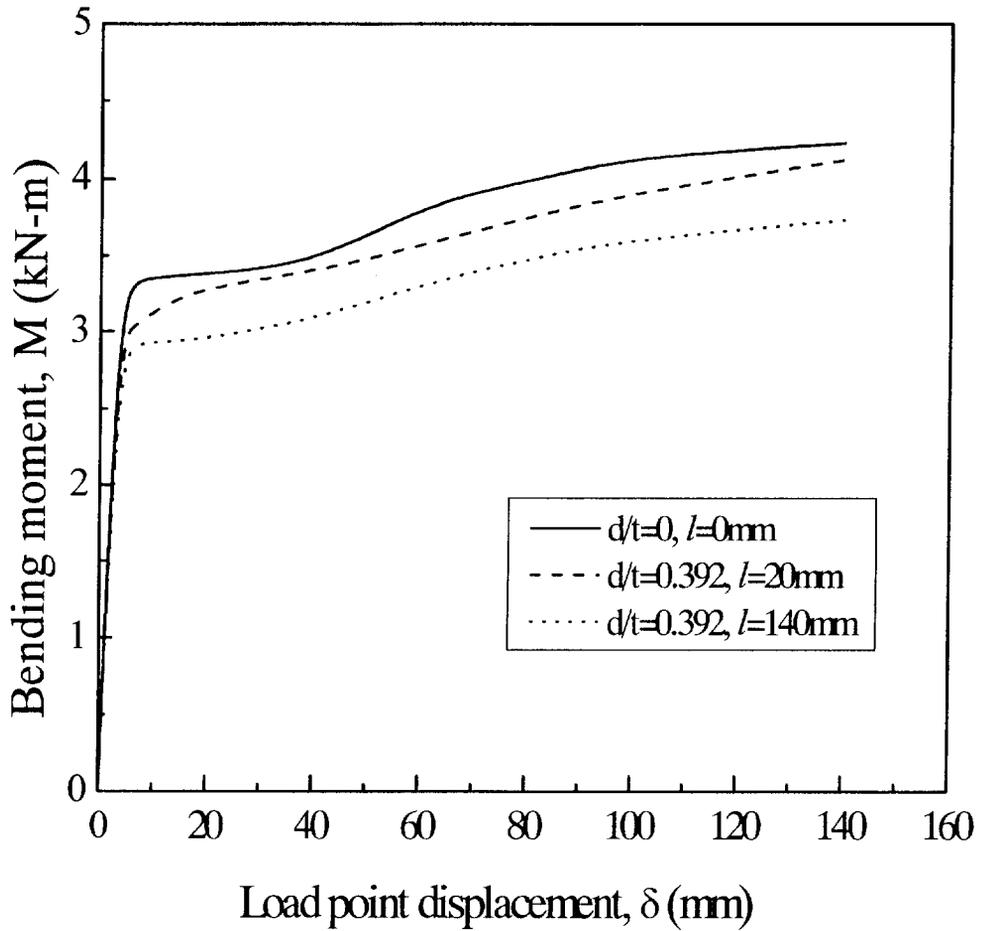
Case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.392$

Fig. 7 Bending moment(M)–load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



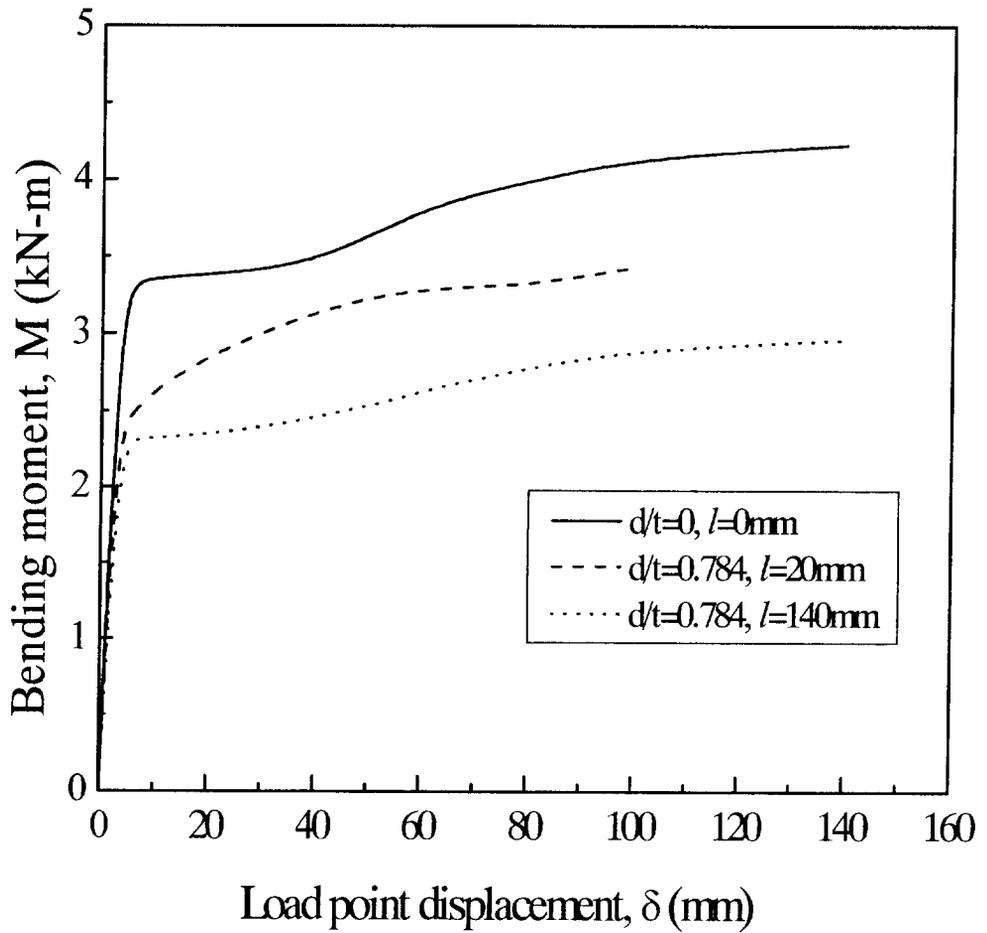
Case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.784$

Fig. 8 Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



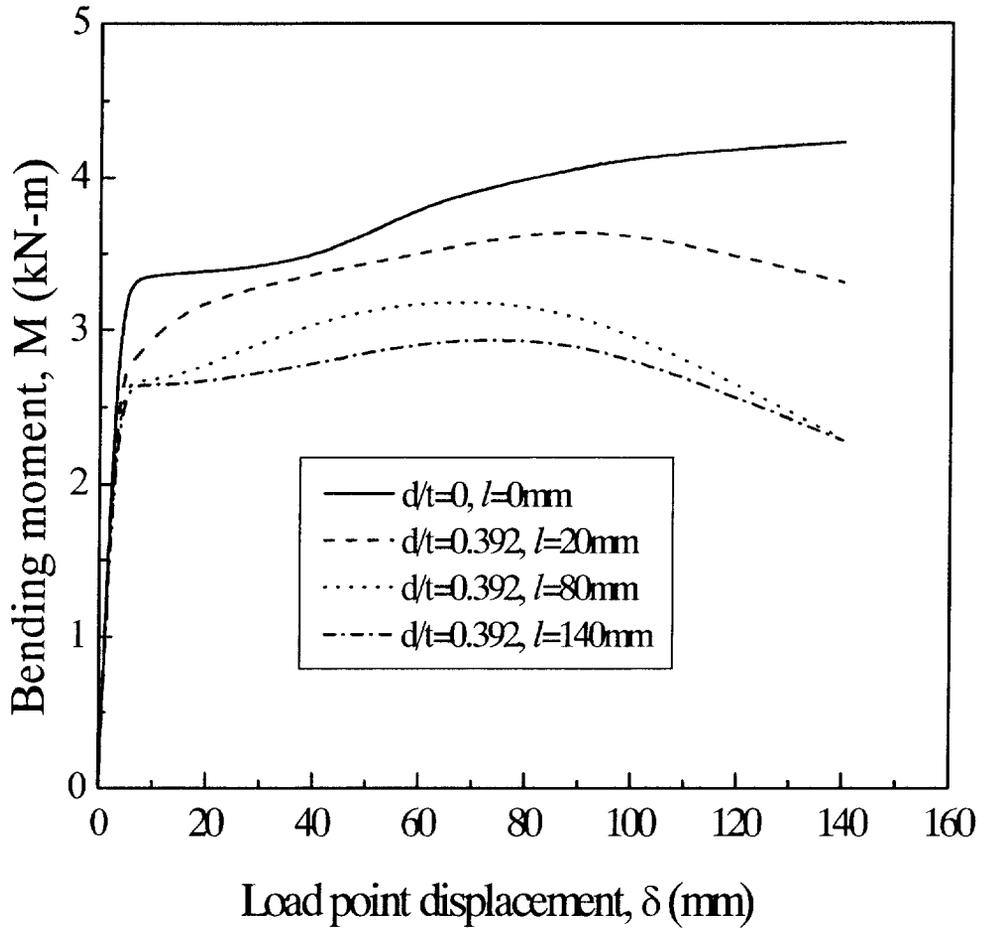
Case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.392$

Fig. 9 Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



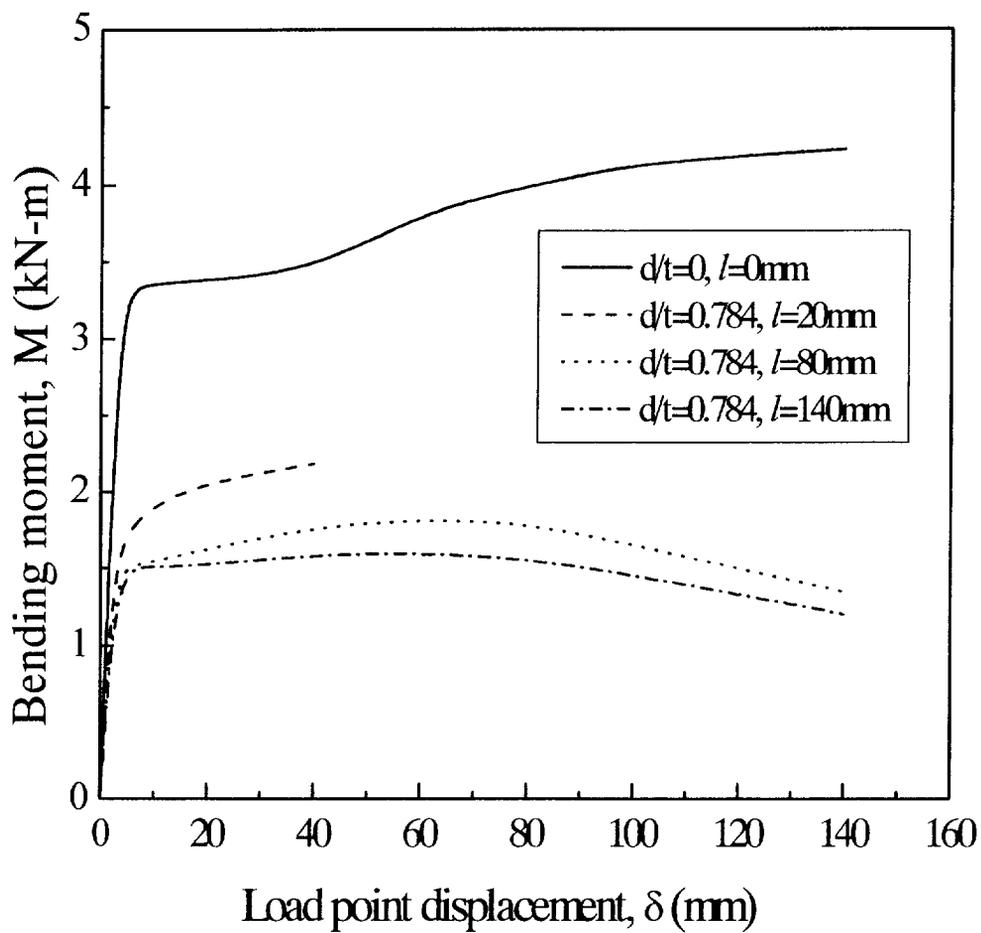
Case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.784$

Fig. 10 Bending moment(M)–load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



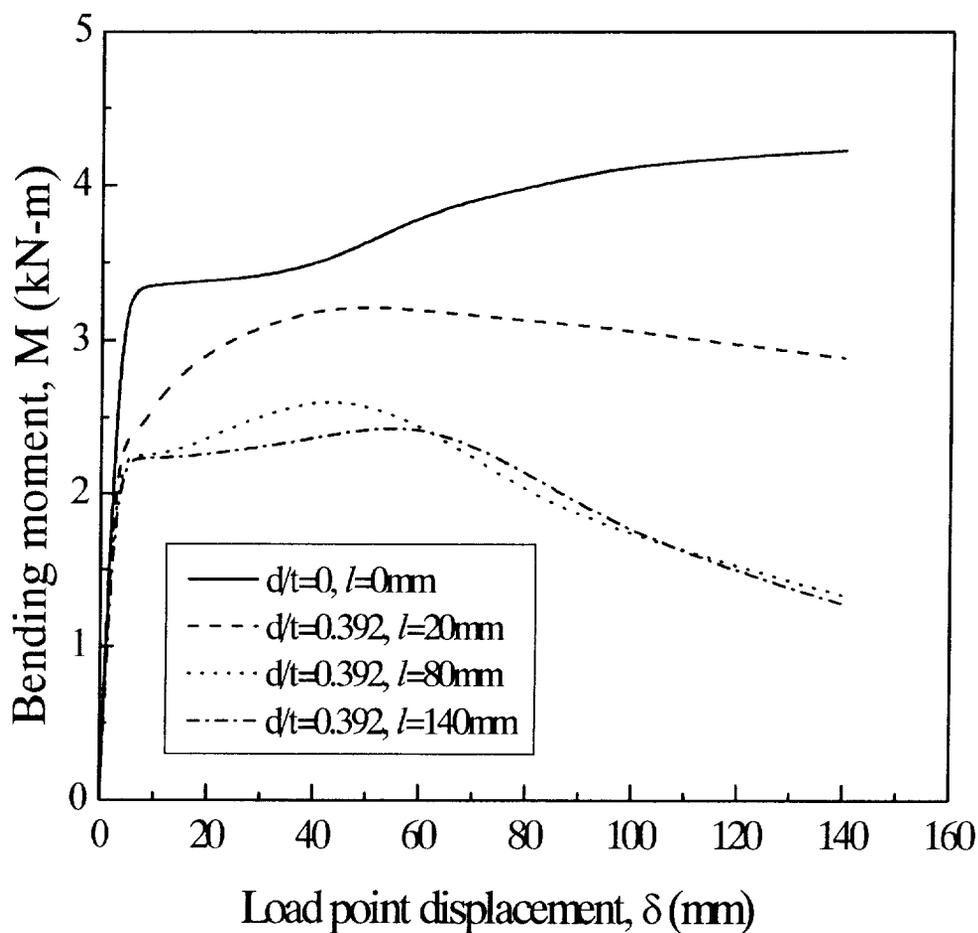
Case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.392$

Fig. 11 Bending moment(M)–load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



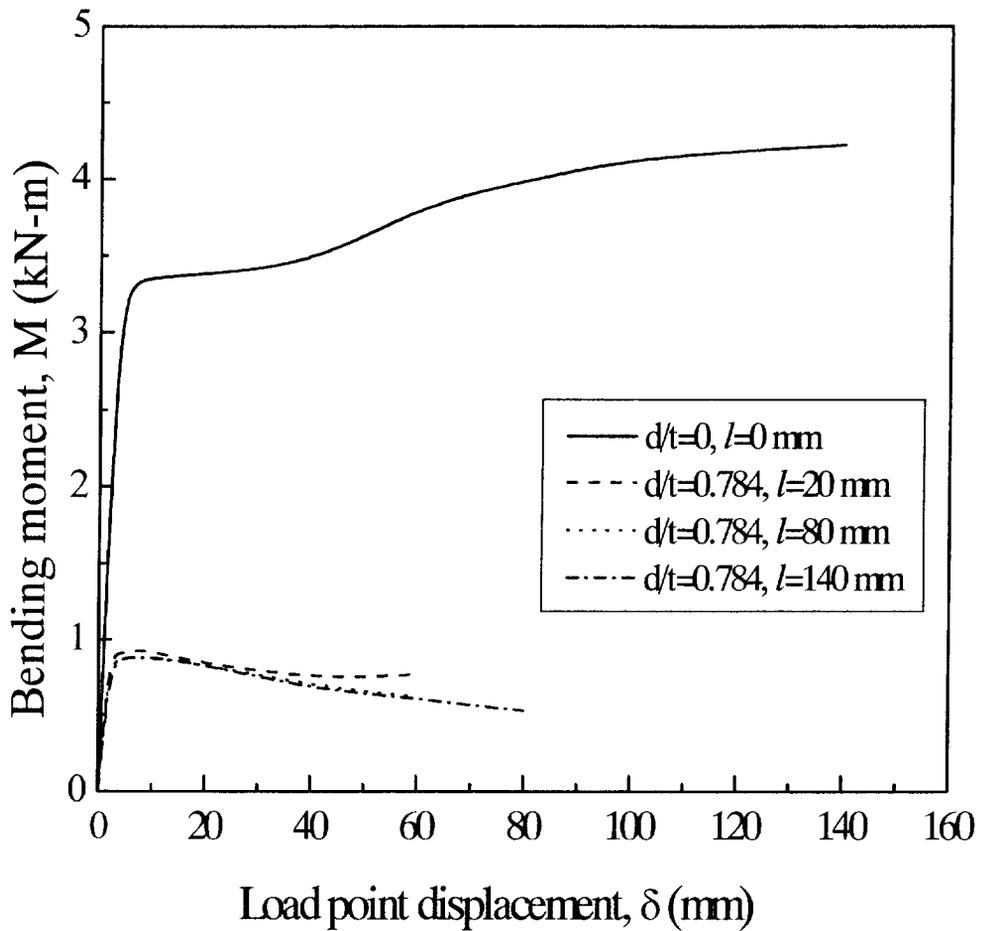
Case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.784$

Fig. 12 Bending moment(M)–load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



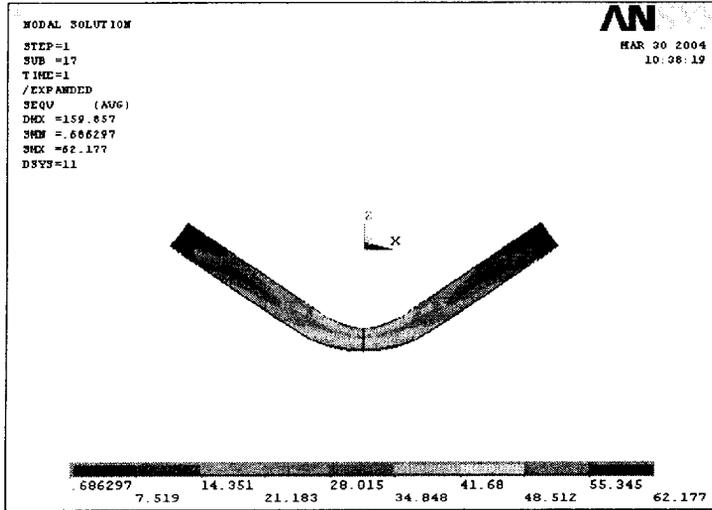
Case of $2\theta=360^\circ$ and $d/t=0.392$

Fig. 13 Bending moment(M)–load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



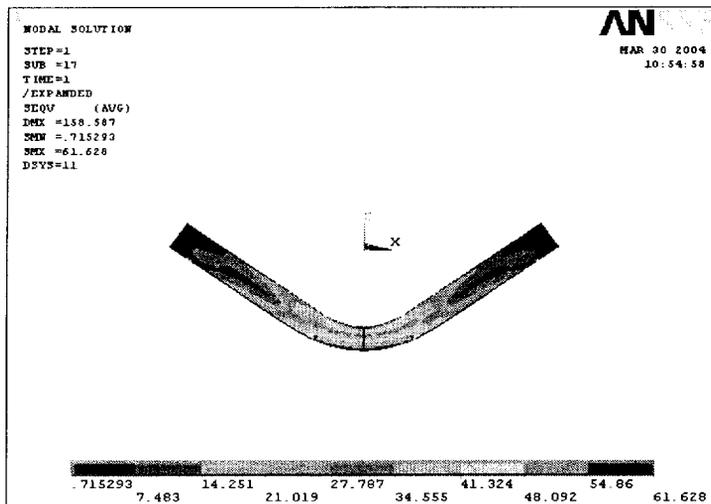
Case of $2\theta=360^\circ$ and $d/t=0.784$

Fig. 14 Bending moment(M)–load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



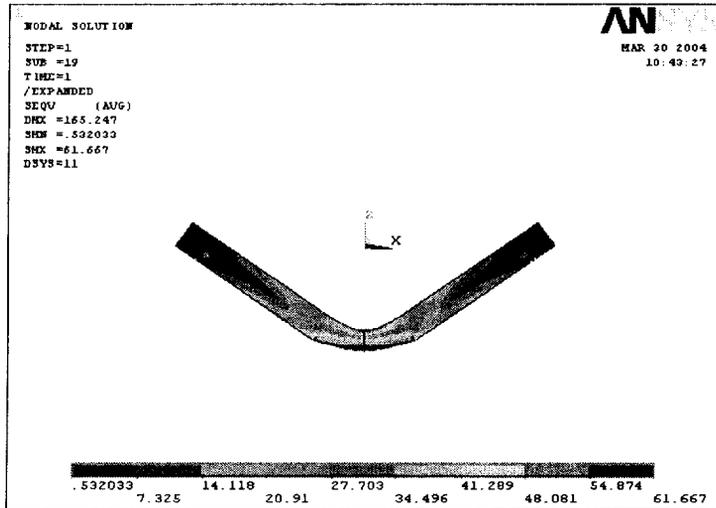
Case of $2\theta=45^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=140\text{mm}$

Fig. 15 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



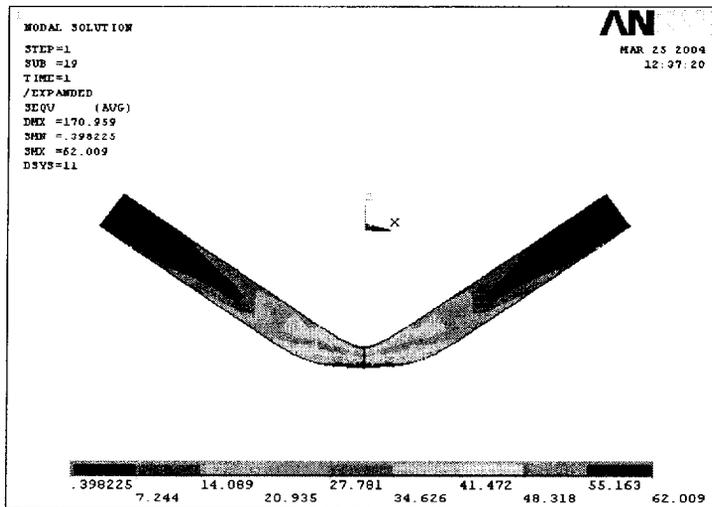
Case of $2\theta=90^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=140\text{mm}$

Fig. 16 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



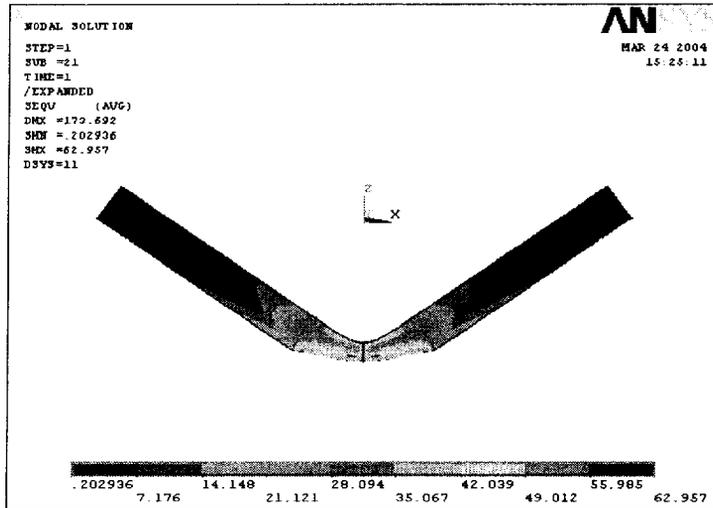
Case of $2\theta=90^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=140\text{mm}$

Fig. 17 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



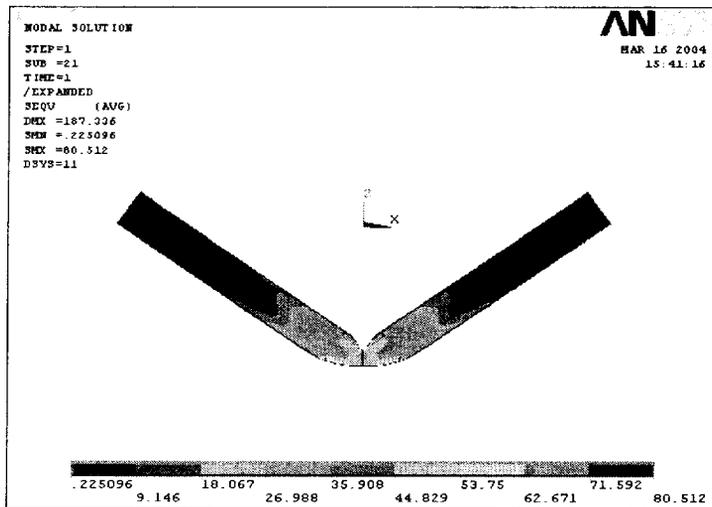
Case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=140\text{mm}$

Fig. 18 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



Case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=140\text{mm}$

Fig. 19 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



Case of $2\theta=360^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=140\text{mm}$

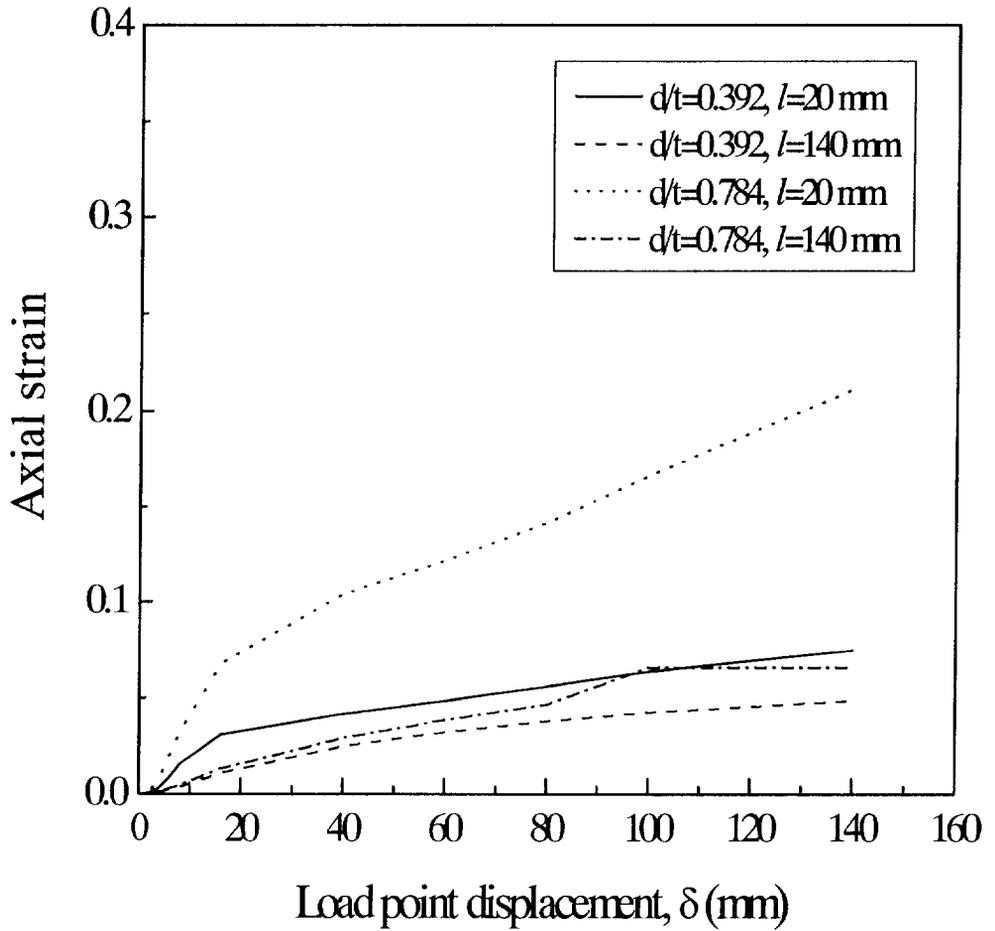
Fig. 20 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis

3.2 축방향 strain의 영향

감육배관의 손상모드에는 감육부에 작용하는 스트레인(strain)의 크기가 지배하는 것으로 생각된다. 그래서 Fig. 21~24에 해석에 의해 얻어진 배관중앙부의 감육부의 인장응력을 받는쪽의 축방향 스트레인을 나타내었다.

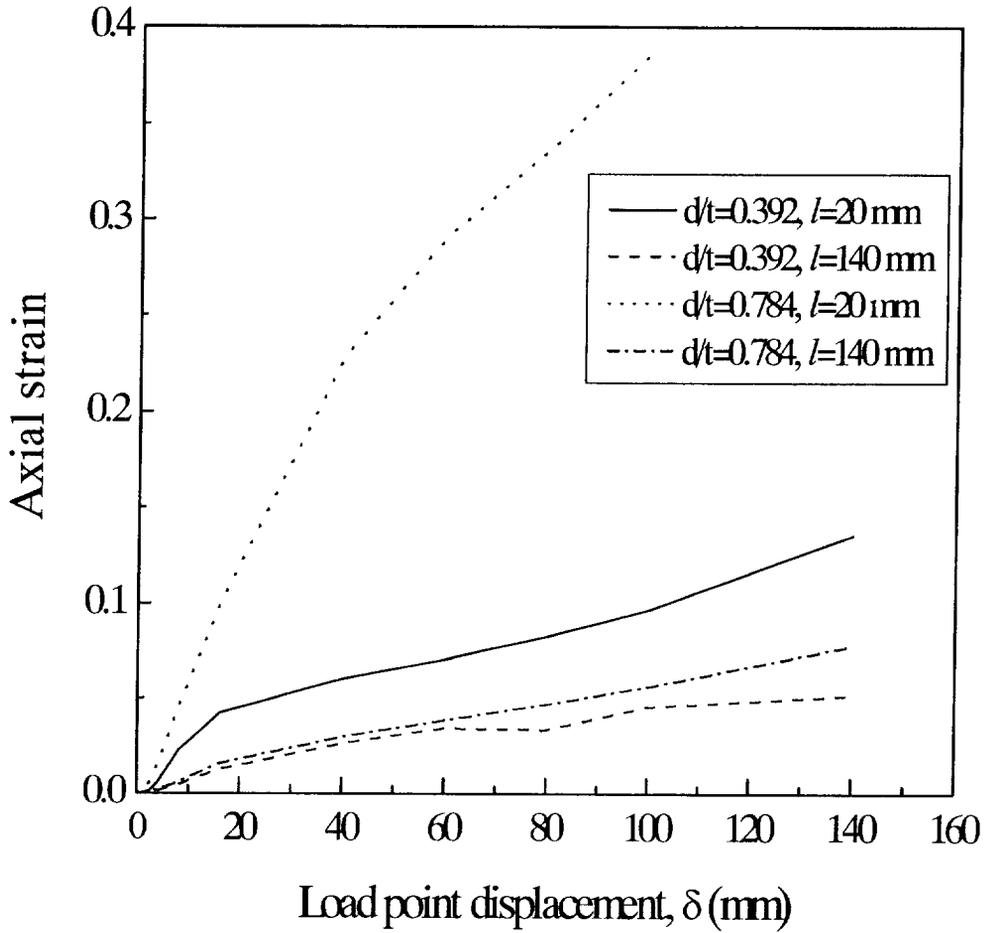
Fig. 21은 $2\theta=45^\circ$ 의 경우로서, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록 ($d/t=0.784$ and $l=10\text{mm}$) 축방향 스트레인이 크게 나타났고, 동일 감육길이일 경우 감육깊이가 깊을수록 또, 동일 감육깊이라면 감육길이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 되는 경향을 나타내었다.

Fig. 22는 $2\theta=90^\circ$, 23은 $2\theta=180^\circ$, 24는 $2\theta=360^\circ$ 의 결과로서 Fig. 21과 동일한 결과를 나타내고 있다. 이것은, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록 잔여 리가먼트(ligament)가 적기 때문에 감육부가 빨리 전단면 항복하기 때문인 것으로 사료된다. 특히, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧은 감육결함을 가지는 경우 감육각도가 커질수록 적은 변형량에서 큰 축방향 스트레인을 나타내었고, 180° 및 360° 감육의 경우 도중 계산이 종료되는 결과는 실물 실험상에서의 균열이 발생한 것과 일치하고 있는 것으로 보아, 균열이 발생하는 경우 축방향 스트레인의 영향이 크게 작용되는 것으로 생각된다.



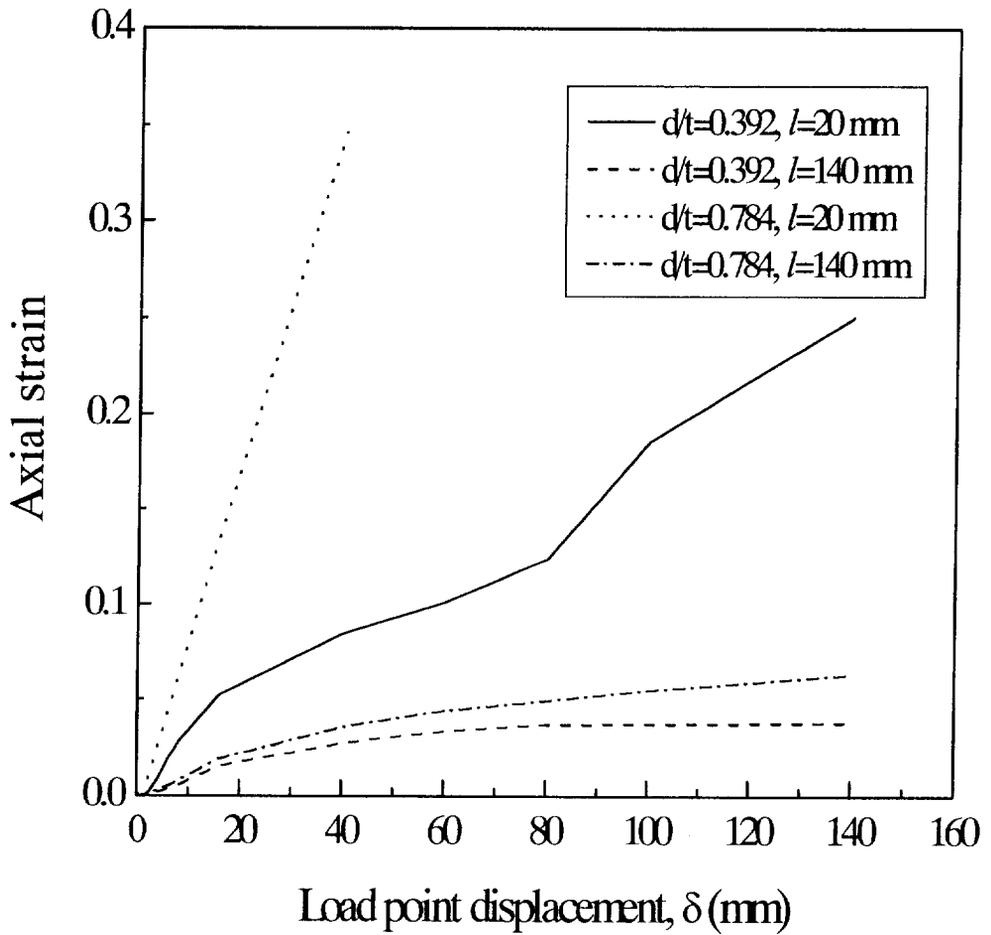
Case of $2\theta=45^\circ$

Fig. 21 Relationship between load point displacement and axial strain



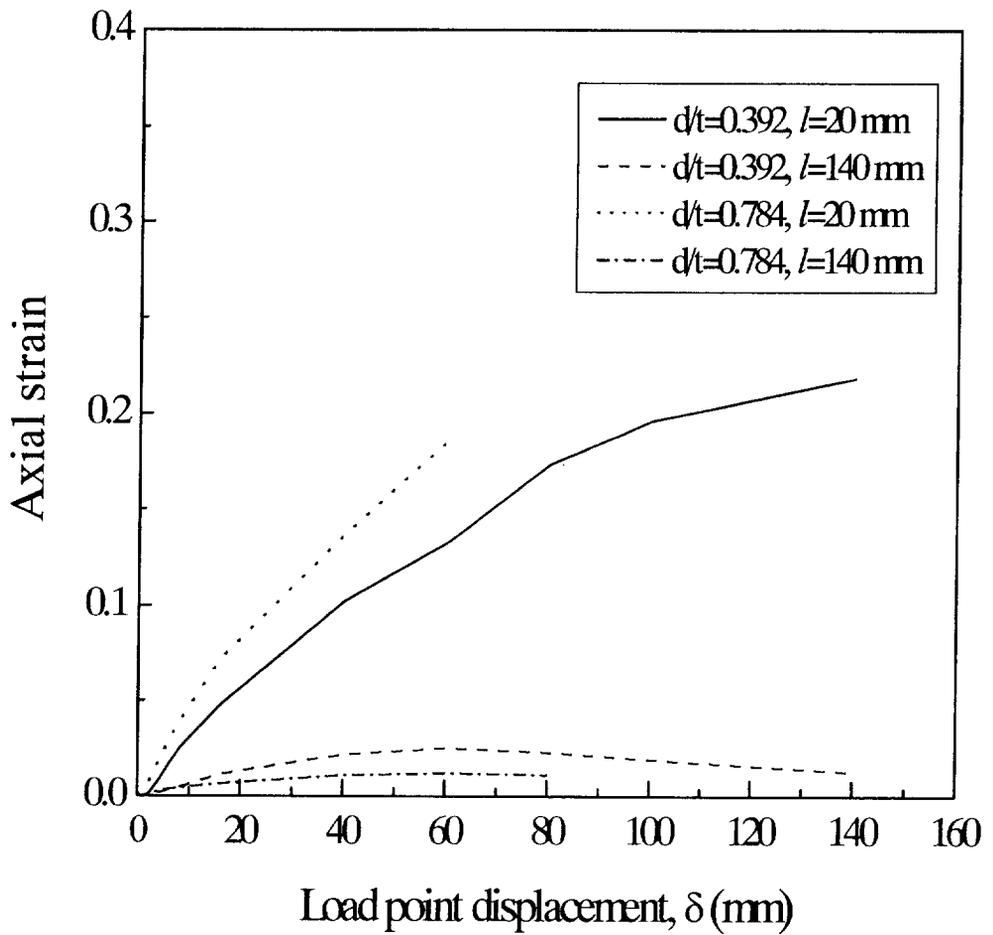
Case of $2\theta=90^\circ$

Fig. 22 Relationship between load point displacement and axial strain



Case of $2\theta=180^\circ$

Fig. 23 Relationship between load point displacement and axial strain



Case of $2\theta=360^\circ$

Fig. 24 Relationship between load point displacement and axial strain

4. 결 론

탄소강배관이 침식-부식에 의해 두께감소(감육)가 발생하였을 경우를 가정하여 임의적으로 감육결함을 상정한 후 유한요소법에 의한 해석을 수행하여, 감육배관의 건전성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 건전한 배관에 비해서 ①감육각도가 커질수록, ②동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육깊이가 길수록 또한, ③동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육깊이가 깊을수록 최대강도에서의 감소는 현저하였다.
- 2) ① 감육깊이가 깊고 감육길이 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 나타났고, ② 동일 감육깊이일 경우 감육깊이가 깊을수록 또, ③동일 감육깊이라면 감육길이 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 되는 경향을 나타내었다.
- 3) 유한요소해석으로부터 감육배관에 편평화 및 좌굴이 손상모드로서 나타났고, 균열발생이 예상된다.

참 고 문 헌

- (1) Kanninen, M. F. et al, "Mechanical Fracture Predictions for sensitized Stainless Steel Piping with Circumferential Cracks," EPRI-NP-192, 1976.
- (2) Kanninen, M. F. et al, "Towards an Elastic-Plastic Fracture mechanics predictive capability for Reactor Piping," Nuclear Engineering and Design, Vol. 48, pp. 117~134, 1978.
- (3) Smith, E., "The Difference Between the Fracture Initiation and Maximum Load Net-Section Stresses for a Cracked Structure," Int. J. Press vessel and Piping, Vol. 8, pp. 347~356, 1980.
- (4) Smith, E., "The Net-Section Stress at the Onset of Crack Extension: Part 2- The Effects of Geometric Configurational Parameters," Int. J. Press vessel and Piping, Vol. 10, pp. 1~9, 1982.
- (5) 長谷川 外, "ステンレス鋼SUS304表面切欠平板の板厚貫通舉動," 機講論, No. 800-1, pp. 58~60, 1983.
- (6) 長谷川 外, "周方向表面き裂を含む壓力配管の漏洩荷重評價法," 壓力技術, Vol. 21, pp. 15~21, 1983.
- (7) Hasegawa, K. et al, "Prediction of Fracture Tolerances for Stainless Steel Pipes with Circumferential Cracks," ASME PVP Conference, Portland, 1983.

- (8) Virginia Electric and Power Co., “Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report,” 1987.
- (9) CNN.com, “Japan to probe nuclear accident” , 2004.
- (10) Shim, S. H., Song, J. S., Yoon, K. B., Hwang, K. M., Jin, T. E., Lee, S. H. and Kim, W. S., “Application of CHECWORKS Code for Metal Loss in the Secondary Piping Systems Wolsung Unit 1,” Proceeding of the Pressure Equipment Tech. Conference 2000, pp. 59~64, 2000.
- (11) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H. and Ando, K., “Fracture Behavior of Carbon Steel pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load,” Nuclear Engineering and Design 191, pp. 195~204, 1999.
- (12) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N., “Effects of Axial Extent of Thinned Area on the Allowable Wall Thickness in Thinned Pipe,” Proceedings of the KSME 1999 Fall Annual Meeting A, pp. 597~602, 1999.
- (13) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N., “Evaluation of Local Allowable Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment,” Transactions of the KSME A, Vol. 25, No. 1, pp. 81~88, 2001.
- (14) Kanninen, M. F., Zahoor, A., Wilkowski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., “Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304

- Stainless Pipes under Dynamic Loading,” EPRI NP-2347, Vols. 1 and 2, EPRI, Palo Alto, 1982.
- (15) Virginia Electric and Power Co., “Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report,” 1987.
- (16) Deardorff, A. F. and Bush, S. H., “Development of ASME Section Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping,” ASME PVP, PVP-Vol-18,NDE-Vol. 7, pp. 71~75, 1990.
- (17) Mathonet, J. F., Cherasse, J. M., Leblois, C. L. and Guyette, M. A., “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, 1995.
- (18) Ahn, S. H., Ando, K., Isiwata, M. and Hasegawa, K., “Plastic Collapse Behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load Allowable Limit,” JHPI, Vol. 36, No. 4, pp. 225~234, 1998.
- (19) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H. and Ando, K., “Fracture behavior of Carbon Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load,” Nuclear Engineering and Design 191, pp. 195~204, 1999.
- (20) Ahn, S. H., Nam, K. W., Yoo, Y. S., Ando, K., Ji, S. H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K., “Fracture Behavior of Straight Pipe and Elbow with Local Wall Thinning,” Nuclear Engineering and Design 211, pp. 91~103, 2002.

- (21) 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕, “감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성,” 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp. 66~72, 2002.
- (22) 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재윤, “감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가,” 대한기계학회논문집, 제27권, 제1호, pp. 8~17, 2003.
- (23) 김영진, 석창성, 전현규, 최영환, 이정배, “원자력 배관 건전성 전문가 시스템개발(1),” 대한기계학회 논문집, 제20권, 제2호, pp. 575~584, 1996.
- (24) NPIES ver,2.0, Nuclear Piping Integrity Expert System.
- (25) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III. 1992.
- (26) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. 1998.
- (27) NP-6045 Research Project 1757-65, Evaluation of Flaws in Ferraws in Ferritic Piping, 1998.