

감육배관의 유한요소해석에 의한 파괴거동 평가

안석환* · 남기우** · 김진욱*** · 이수식**** · 윤자문****

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 재료공학부

***한국기계연구원

****부경대학교 대학원

Fracture Behavior Evaluation of Wall Thinned pipes by Finite Element Analysis

SEOK-HWAN AHN*, KI-WOO NAM**, JIN-WOOK KIM***, SOO-SIG LEE*** AND JA-MUN YOON****

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

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

***Korea Institute of Machinery & Materials 66, Sangnam-dong, Changwon, Kyungnam 641-010, Korea

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

KEY WORDS: Wall Thinned pipe(감육배관), Finite Element Analysis(유한요소해석), Bending Load(굽힘하중), Fracture Behavior(파괴거동)

ABSTRACT: Fracture behaviors and strength of pipes with local wall thinning 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 strength and fracture behaviors of piping systems have been well studied. In this paper, the elasto-plastic analysis is performed by FE code ANSYS. We evaluated the failure mode, fracture strength and fracture behavior from FE analysis.

1. 서 론

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. 배관에 있어서는 그 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화 손상을 받을 우려가 있으며, 최근 배관의 두께가 감소하는 현상(이하 감육이라 한다)이 국내외적으로 보고되어지고 있다(ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1992; ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, 1998). 배관의 감육문제는 심각한 문제로 대두되어 감육에 대한 허용기준 안 등이 검토되어지고 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(안석환 등, 2003; Ahn et al, 1998, 2002; Dearth et al, 1990; Mathonet et al, 1995; Miyazaki et al, 1999; Virginia Electric and Power Co, 1987).

감육이 배관에 발생하고, 굽힘하중을 받는 경우에 대하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는 가를 정량적으로 해명하기 위한 연구가 행하여지고 있다(안석환 등, 2003; Ahn et al, 1998, 2002; Miyazaki et al, 1999).

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

2. 재료 및 해석방법

2.1 재료

본 해석에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80 STS370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; JIS Standard G3455)이며, 실배관으로부터 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. 1에 나타낸다. 감육결함은 감육각도(2θ), 감육길이(ℓ) 및 감육깊이(d)를 파라미터로 하여

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산 100

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

임의적으로 배관 내부에 모의하였다. 시험편의 종류에 있어서는 $2\theta=45^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ 의 4가지 종류에 대해서, $l=10, 40, 70\text{mm}$ 및 $d=2, 4\text{mm}$ 를 각각 적용하였다.

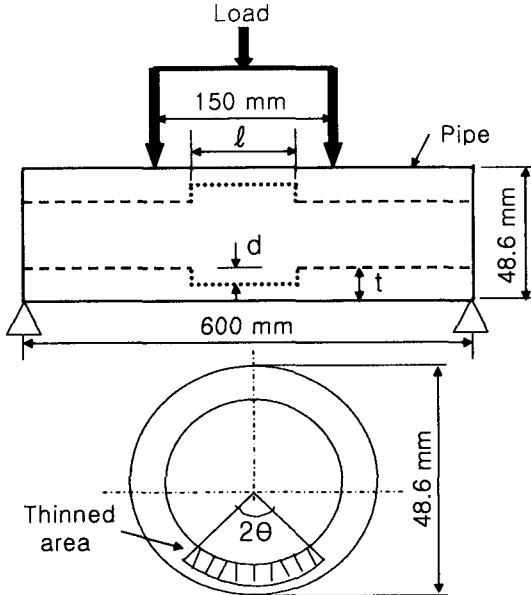


Fig. 1 The schematic example of wall thinned pipe specimen

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 다 직선근사해서 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 인장축에 놓이도록 하였다. 이때, 부하 스패 길이는 150mm, 지지 스패 길이는 600mm로 하였다.

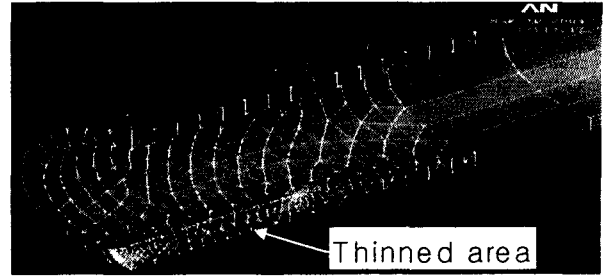


Fig. 2 A example of FE analysis modeling for thinned pipe specimen

3. 결과 및 고찰

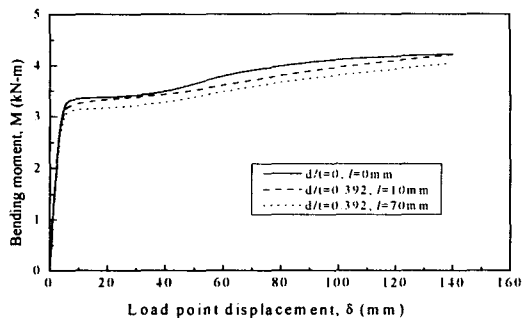
3.1 유한요소해석에 의한 M-δ 선도 및 강도고찰

Fig. 3(a)-(h)에는 다양한 감육결함을 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. 3의 모든 그림 속에는 감육결함이 없는 건전한 배관의 M-δ선도를 함께 나타내었다. 변형정도에 있어서는 변위가 140mm가 될 때 까지를 해석에 이용하였다.

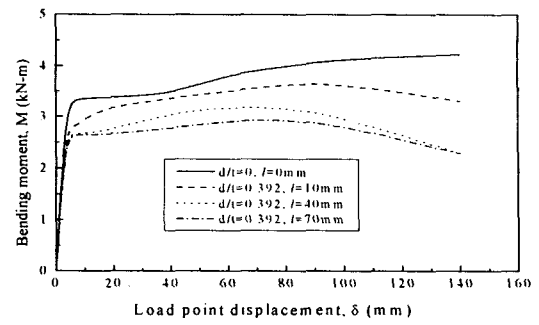
Fig. 3(a), (c), (e), (g)는 $d/t=0.392$ 인 경우의 결과 들이다. 이때, 감육길이 $l=10, 40, 70\text{mm}$ 를 이용하였다. 건전한 배관에 비해 감육각도가 커질수록 최대강도는 저하하였고, 동일한 감육각도일 경우 감육길이가 길수록 최대강도가 저하하였다. 감육결함이 가장 큰 360° 전주감육의 경우, 건전한 배관에 비해서 감육길이가 $l=10\text{mm}$ 에서는 약 22.6%, $l=70\text{mm}$ 에서는 약 40.8% 정도 최대강도의 감소를 나타내었다. 이에 반해, 감육각도가 45° 로 비교적 작은 부분감육에 있어서는 건전배관에 비해 최대강도의 저하는 1.2~4.8% 정도였다.

Fig. 3(b), (d), (f), (h)는 $d/t=0.784$ 인 경우의 결과 들이다. 감육길이 $l=10, 40, 70\text{mm}$ 를 이용하였다. 건전한 배관에 비해 감육각도가 커질수록 최대강도는 저하하였고, 동일한 감육각도일 경우 감육길이가 길수록 최대강도가 저하하였다. 감육결함이 가장 큰 360° 전주감육의 경우, 건전한 배관에 비해서 감육길이가 $l=10\text{mm}$ 에서는 약 78.6%, $l=70\text{mm}$ 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.

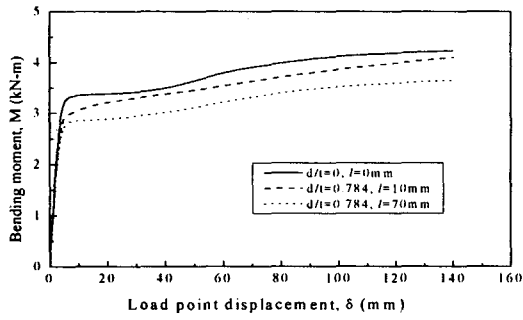
동일한 감육각도 및 동일한 감육길이를 가질 경우에 있어서는 감육깊이가 깊을수록 최대강도가 감소하였다. 즉, 감육결함이 가장 큰 360° 전주감육일 때 $d/t=0.392$ 에 비해 $d/t=0.784$ 의 감육결함을 가지는 배관의 최대강도는 약 66% 정도 감소하였다. 또한, 동일한 감육각도 및 동일한 감육길이를 가지는 경우라 하더라도, 감육길이가 길수록 최대강도는 저하하였다. 즉, 360° 전주감육일 때 $d/t=0.392$ 의 경우 $l=10\text{mm}$ 에 비해 $l=70\text{mm}$ 에서 23.1% 정도 감소를 나타내었다. 그리고 $d/t=0.784$ 의 경우



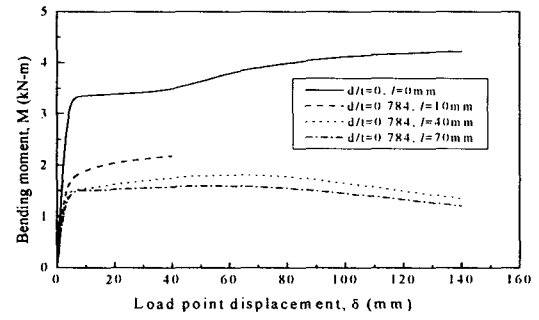
(a) The case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.392$



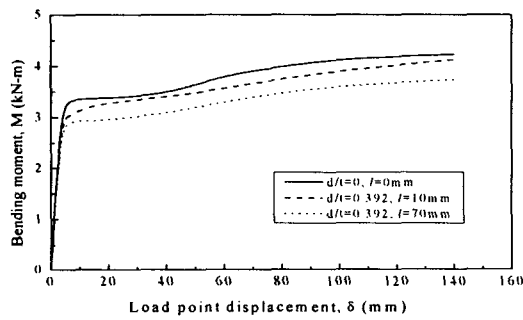
(e) The case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.392$



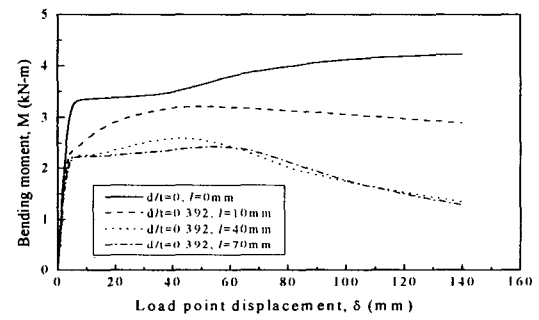
(b) The case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.784$



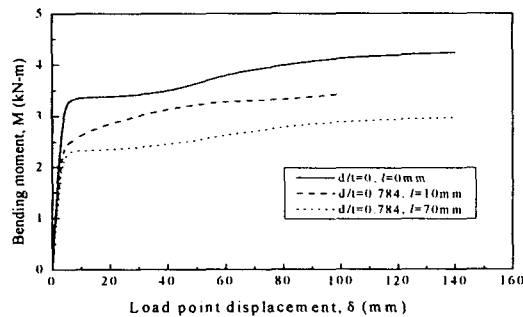
(f) The case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.784$



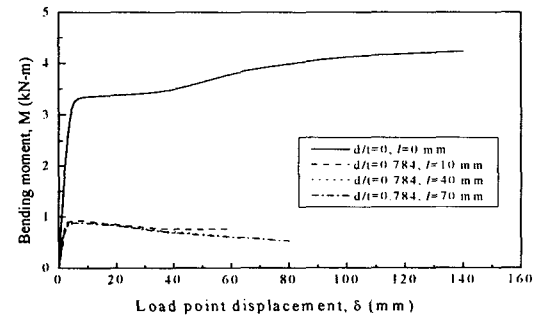
(c) The case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.392$



(g) The case of $2\theta=360^\circ$ and $d/t=0.392$



(d) The case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.784$



(h) The case of $2\theta=360^\circ$ and $d/t=0.784$

Fig. 3 Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis

180° 부분감육에 있어서 $l=10\text{mm}$ 에 비해 $l=70\text{mm}$ 에서 27.3% 정도 최대강도의 감소를 보였다. 그런데 여기서 특이한 것은 $d/t=0.784$ 의 감육을 가지는 360° 전주감육에서는 $l=10\text{mm}$ 에 비해 $l=70\text{mm}$ 에서의 최대강도의 저하는 약 5.6% 정도로 오히려 큰 변화가 나타나질 않았다. 이것은 이미 360° 전주에 걸쳐서 $d/t=0.784$ 만큼의 깊은 감육결합이 형성되었기 때문에 Fig. 3(h)에 나타내었듯이 최대강도가 거의 변형이 발생하지 않았음에도 불구하고 형성된 결과이다. 즉, 감육깊이가 깊어질 경우에는 감육깊이에는 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 감육깊이가 깊수록, 3) 동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육깊이가 깊을수록 현저하였다.

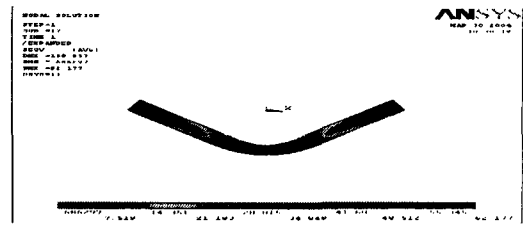
이전의 연구결과에 의하면 360° 전주에 걸쳐 감육결합이 형성되었을 경우, 감육깊이가 배관의 공칭두께의 약 50% 이상이 되면 조건부 허용 혹은 수리 및 교환을 필요로 한다고 보고되어지고 있다(안석환 등, 2003; Ahn et al, 1998, 2002; Miyazaki et al, 1999). 또한, 감육배관이 반복하중을 받을 경우 정적 최대강도의 약 75% 정도까지를 한계하중으로 본다면 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1992; Ahn et al, 2002), 본 연구의 결과에 있어서 감육깊이가 공칭두께의 78.4%로 깊어졌을 때 감육각도가 90°인 $l=70\text{mm}$ 의 경우(2.8MPa)는 건전배관의 정적강도의 75%인 3.15MPa 보다도 낮기 때문에 이보다도 조건이 열악한 180° 및 360° 감육배관들은 허용할 수 없는 결함으로 판정할 수 있다. 또한, 감육깊이가 공칭두께의 39.2%의 감육배관에 있어서도 180°의 $l=40\text{mm}$ 이상 및 360° 감육배관들은 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. 4(a)~(f)는 유한요소해석을 통하여 얻은 감육배관에서의 응력분포 및 변형양상의 몇몇 예를 나타낸다. 감육결합이 위치하고 있는 영역에서 높은 응력이 발생하고 있고, 인장응력이 넓은 범위에 걸쳐 발생하고 있음을 알 수 있다. 해석으로부터는 편평화 및 좌굴과 같은 손상모드가 나타났다. 특히, 균열발생이 예상되는 감육배관에 대해서는 ANSYS의 해석에 있어서 계산의 결과가 종료되는 것으로 나타났다.

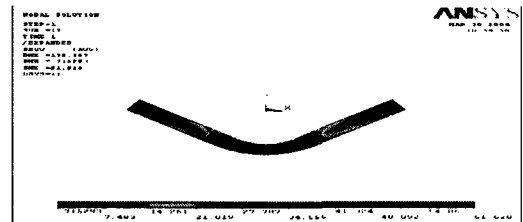
3.2 축방향 strain의 영향

감육배관의 손상모드에는 감육부에 작용하는 스트레인(strain)의 크기가 지배하는 것으로 생각된다. 그래서, Fig. 5에 해석에 의해 얻어진 배관중앙부의 감육부의 인장응력을 받는 쪽의 축방향 스트레인을 나타내었다.

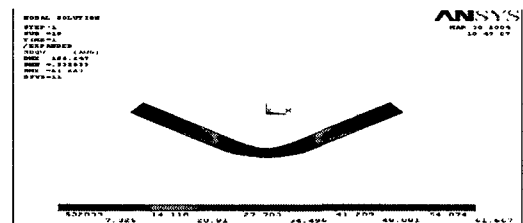
Fig. 5(a)는 $2\theta=45^\circ$ 의 경우로서, 감육깊이가 깊고 감육깊이가 짧을수록($d/t=0.784$ and $l=10\text{mm}$) 축방향 스트레인이 크게 나타났고, 동일 감육깊이일 경우 감육깊이가 깊을수록, 또, 동일 감육깊이라면 감육깊이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 되는 경향을 나타내었다. Fig. 5(b)는 $2\theta=90^\circ$, 5(c)



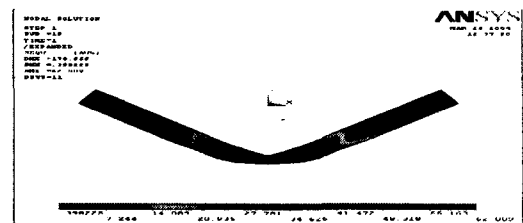
(a) The case of $2\theta=45^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=70$ mm



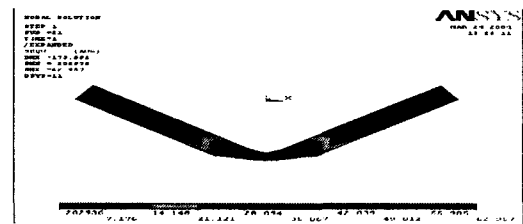
(b) The case of $2\theta=90^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=70$ mm



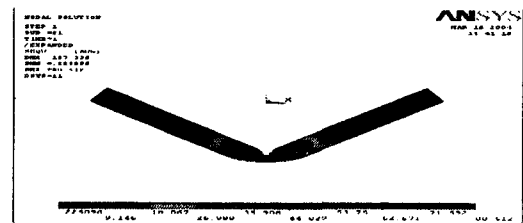
(c) The case of $2\theta=90^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=70$ mm



(d) The case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=70$ mm



(e) The case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=70$ mm



(f) The case of $2\theta=360^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=40$ mm

Fig. 4 Stress distribution of wall thinned pipes by FE analysis

는 $2\theta=180^\circ$, 5(d)는 $2\theta=360^\circ$ 의 결과로서 Fig. 5(a)와 동일한 결과를 나타내고 있다. 이것은, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록 잔여 리가멘트(ligament)가 적기 때문에 감육부가 빨리 전단면 항복하기 때문인 것으로 사료된다. 특히, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧은 감육결합을 가지는 경우 감육각도가 커질수록 적은 변형량에서 큰 축방향 스트레인을 나타내었고, 180° 및 360° 감육의 경우 도중 계산이 종료되는 것으로 보아 실제 실험상에서는 균열이 예상되며, 균열이 발생하는 경우 축방향 스트레인의 영향은 크게 작용되는 것으로 생각된다.

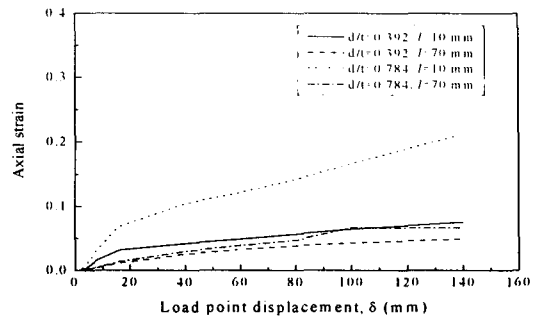
4. 결 론

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

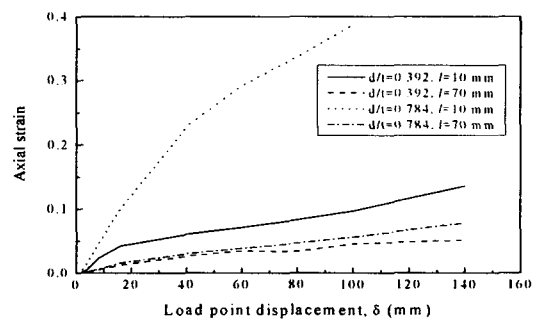
- 1) 건전한 배관에 비해서 감육각도가 커질수록, 동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육길이가 길수록, 또한 동일한 감육각도 및 감육길이라면 감육깊이가 깊을수록 최대강도에서의 감소는 현저하였다.
- 2) 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 나타났고, 동일 감육길이일 경우 감육깊이가 깊을수록 또, 동일 감육깊이라면 감육길이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 되는 경향을 나타내었다.
- 3) 유한요소해석으로부터 감육배관에 편평화 및 좌굴이 손상모드로서 나타났고, 도중의 계산 종료로부터 균열발생이 예상된다.

참 고 문 헌

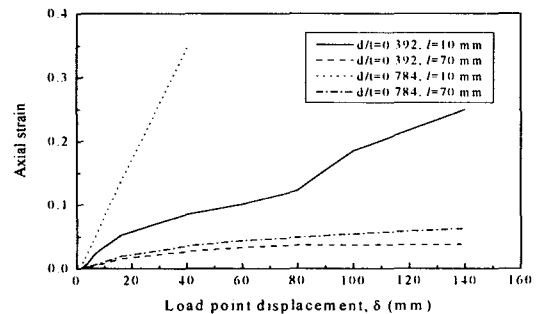
- 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재윤 (2003). "감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가" 대한기계학회논문집, 제27권, 제1호, pp. 8-17.
- Ahn, S. H., Ando, K., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (1998). "Plastic Collapse behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to bending Load Allowable Limit", JHPI, Vol. 36, No. 4, pp. 225-234.
- 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



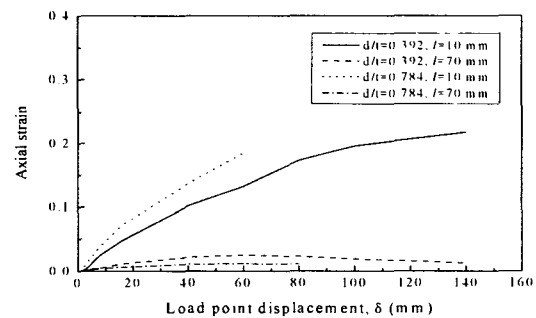
(a) The case of $2\theta=45^\circ$



(b) The case of $2\theta=90^\circ$



(c) The case of $2\theta=180^\circ$



(d) The case of $2\theta=360^\circ$

Fig. 5 Relation between load point displacement and axial strain obtained from finite element analysis

- NDE-Vol. 7, 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.
- 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.
- Virginia Electric and Power Co. (1987). "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report".

200 년 월 일 원고 접수

200 년 월 일 최종 수정본 채택