

감육배관의 유한요소해석에 의한 변형 및 강도 평가

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

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 재료공학과

***한국기계연구원

****부경대학교 신소재공학부

Evaluation of Deformation and Strength of Wall Thinned Pipes by Finite Element Analysis

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

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

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

***Korea Institute of Machinery & Materials, Chang Won, Korea

****Division 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, Failure Mode 손상모드

ABSTRACT: Fracture behavior and pipe strength are very important to the integrity of energy plants, ocean structures, and so forth. The pipes of energy plants and ocean structures are subject to local wall thinning, resulting from severe erosion-corrosion damage. Recently, the effects of local wall thinning on fracture strength and fracture behavior of piping systems have been the focus of many studies. In this paper, 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, using FE analysis. Also, the effect of the axial strain on deformations and failure modes was estimated by 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 보고되고 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 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(안석환 등, 2003; Ahn et al., 1998, 2002; Deardorff et al., 1990; Mathonet et al., 1995; Miyazaki et al., 1999; Virginia Electric and Power Co., 1987).

최근, 감육이 배관에 발생하고 굽힘하중을 받는 경우에 대하여 배관감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는 가를 정량적으로 해명하기 위한 연구가 행하여지고 있다(안석환 등, 2002, 2003; Ahn et al., 1998, 2002; Miyazaki et al., 1999). 그러나, 감육을 가지는 배관의 파괴강도 및 파괴거동에 대해서는 아직도 더 많은 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 탄소강배관이 침식-부식에 의해 두께 감소가 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.

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 나타내었다.

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산 100

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

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 해석에 이용한 배관의 형상 및 하중부하의 형태를 Fig. 1에 나타낸다. 감육결합은 감육각도(2θ), 감육길이(l) 및 감육깊이(d)를 파라미터로 하여 임의적으로 배관 내부에 모의하였다. 감육결합의 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.

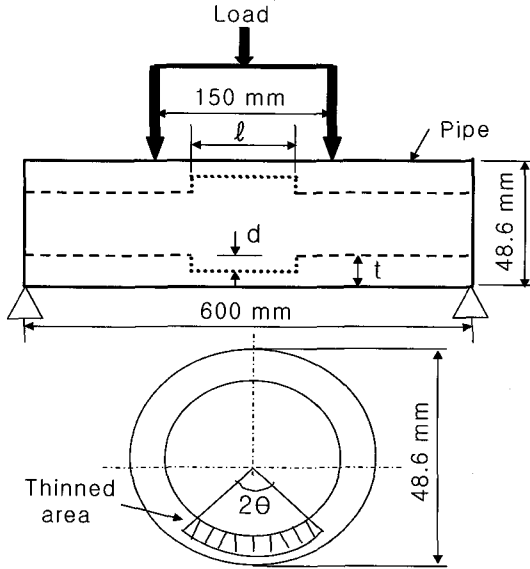


Fig. 1 Schematic example of the wall thinned pipe shape and the four-point bending load used at FE analysis

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
	σ_u [MPa]	σ_y [MPa]	[%]
STS370	402	273	28

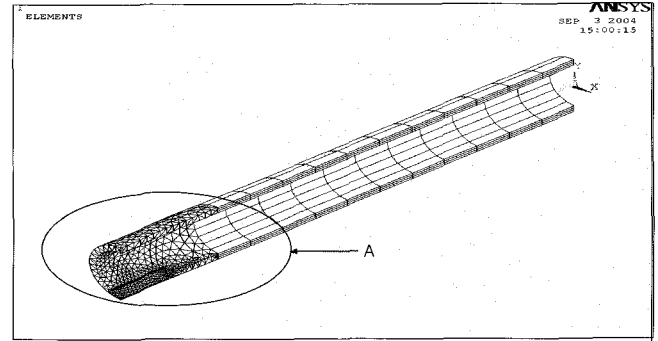
Table 2 Chemical composition [wt%]

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

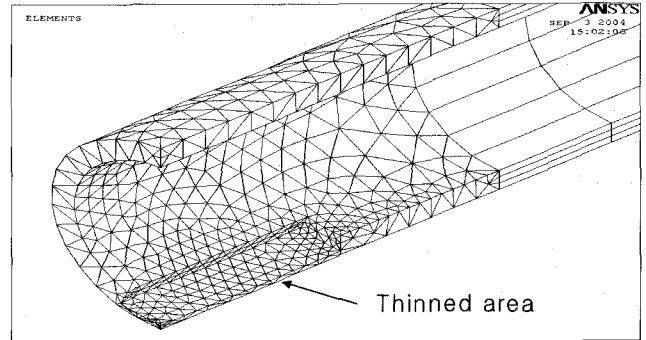
2.2 해석방법

해석에 있어서는 유한요소법 소프트웨어인 ANSYS ver.7.0을 이용해서 탄소강해석을 행하였다. 메쉬모델링은 육면체 20절점요소와 4면체 10절점요소를 사용하였다. 대칭성을 고려해서 1/4 배관모델을 작성하였다. 해석에는 Von Mises의 항복조건을 사용하였다. 해석은 변위제어로 행하여 하중점의 질점반력해를 구하였다. 이때, 내압은 고려하지 않았다. 입력한 재료 data는 동 재료의 인장시험에 의해 얻어진 값을 다직선 근사해서 사용하였다. 영률은 206GPa, 포아송비는 0.3으로 했다. 해석은 등방경화칙을 가정해서 행하였다. 하중의 부하는 모의한 감육결합을 가

지는 배관에 4점굽힘하중이 작용하는 것으로 하였다. 또한, 감육결합은 부하하중에 대해서 인장측에 놓이도록 하였다. 이때, 부하 스패น 길이는 150mm, 지지 스패น 길이는 600mm로 하였다. Fig. 2에는 배관 유한요소 모델의 예를 나타낸다. Fig. 3에는 FE 해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.



(a) 1/4 model



(b) Detail of A

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

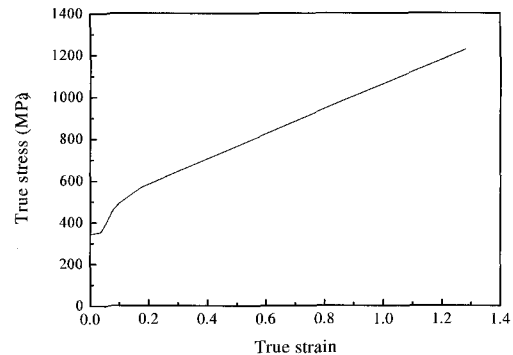


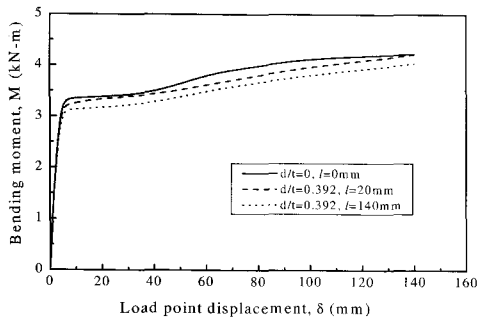
Fig. 3

True stress-true strain curve used in FE analysis

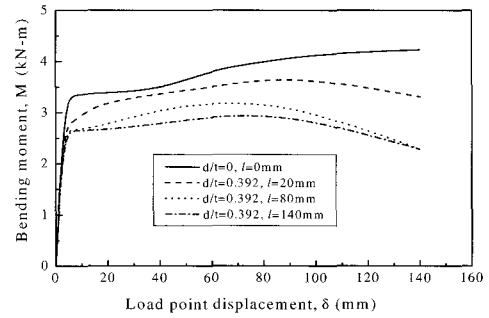
3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소해석에 의한 M-δ 선도 및 강도고찰

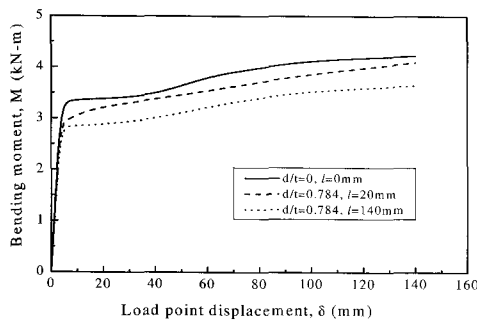
Fig. 4(a)-(h)에는 다양한 감육결합을 가진 배관에 대하여 유



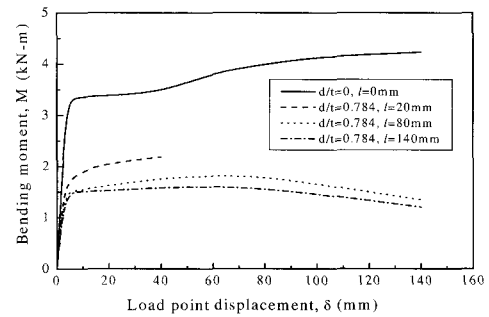
(a) The case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.392$



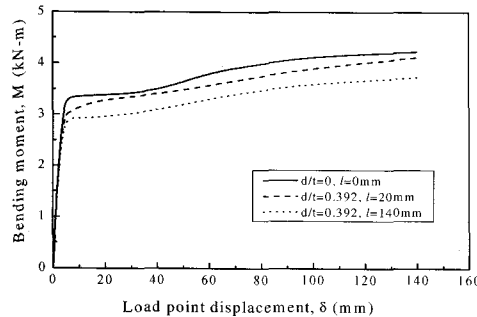
(e) The case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.392$



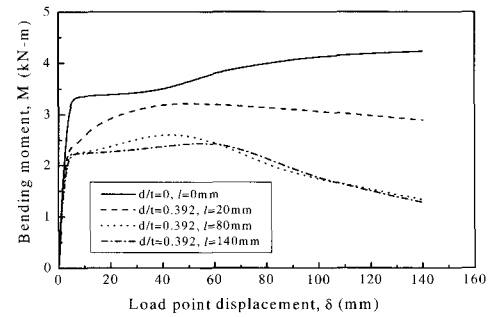
(b) The case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.784$



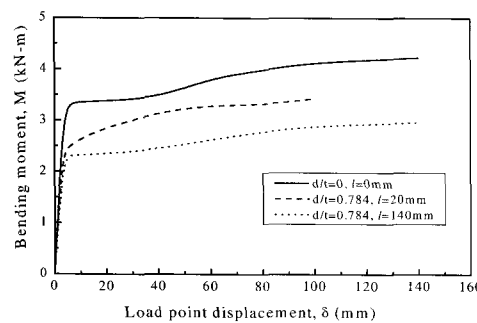
(f) The case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.784$



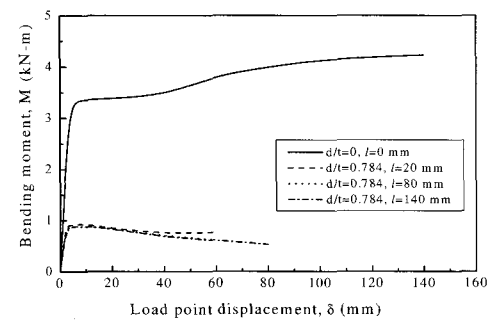
(c) The case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.392$



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

한요소 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. 4의 모든 그림 속에는 감육결합이 없는 건전한 배관의 M - δ 선도를 함께 나타내었다. 변형정도에 있어서는 변위가 140mm가 될 때까지를 해석에 이용하였다.

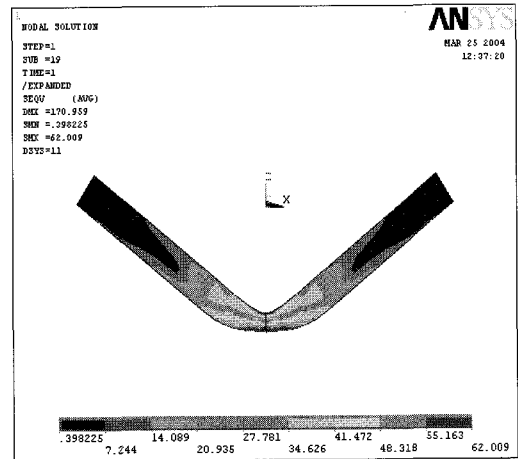
Fig. 4 (a), (c), (e), (g)는 $d/t=0.392$ 인 경우의 결과들이다. 이때, 감육길이 $l=20, 80, 140\text{mm}$ 를 이용하였다. 건전한 배관에 비해 감육각도가 커질수록 최대강도는 저하하였고, 동일한 감육각도일 경우 감육길이가 길수록 최대강도가 저하하였다. 감육결합이 가장 큰 360° 전주감육의 경우, 건전한 배관에 비해서 감육길이가 $l=20\text{mm}$ 에서는 약 22.6%, $l=140\text{mm}$ 에서는 약 40.8% 정도 최대강도의 감소를 나타내었다. 이에 반해, 감육각도가 45° 로 비교적 작은 부분감육에 있어서는 건전배관에 비해 최대강도의 저하는 1.2~4.8% 정도였다.

Fig. 4 (b), (d), (f), (h)는 $d/t=0.784$ 인 경우의 결과들이다. 감육길이 $l=20, 80, 140\text{mm}$ 를 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 $l=20\text{mm}$ 일 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.

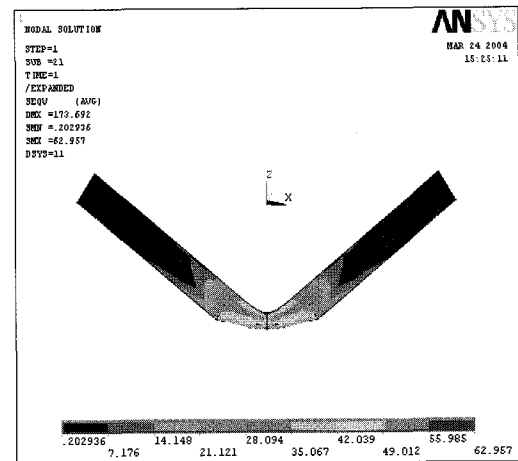
동일한 감육각도 및 동일한 감육길이를 가질 경우에 있어서는 감육깊이가 깊을수록 최대강도가 감소하였다. 즉, 감육결합이 가장 큰 360° 전주감육일 때 $d/t=0.392$ 에 비해 $d/t=0.784$ 의 감육결합을 가지는 배관의 최대강도는 약 66% 정도 감소하였다. 또한, 동일한 감육각도 및 동일한 감육길이를 가지는 경우라 하더라도, 감육길이가 길수록 최대강도는 저하하였다. 즉, 360° 전주감육일 때 $d/t=0.392$ 의 경우 $l=20\text{mm}$ 에 비해 $l=140\text{mm}$ 에서 23.1% 정도 감소를 나타내었다. 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 나타나질 않았다. 이것은 이미 360° 전주에 걸쳐서 $d/t=0.784$ 만큼의 깊은 감육결합이 형성되었기 때문에 Fig. 4(h)에 나타내었듯이 최대강도가 거의 변형이 발생하지 않았음에도 불구하고 형성된 결과이다. 즉, 감육깊이가 깊어질 경우에는 감육길이에는 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.

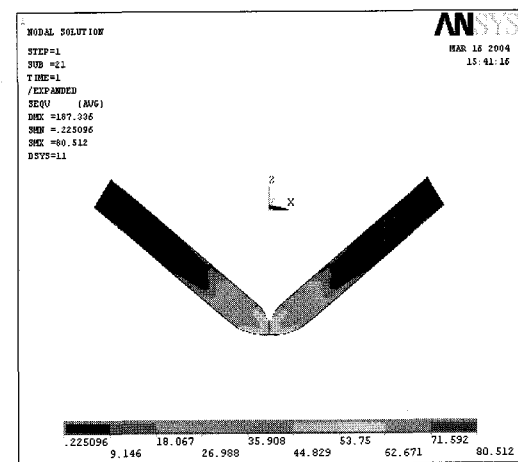
이전의 연구결과에 의하면 360° 전주에 걸쳐 감육결합이 형성되었을 경우, 감육깊이가 배관의 공칭두께의 약 50% 이상



(a) The case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=140\text{mm}$



(b) The case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.784$ and $l=140\text{mm}$



(c) The case of $2\theta=360^\circ$, $d/t=0.392$ and $l=140\text{mm}$

Fig. 5 Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis

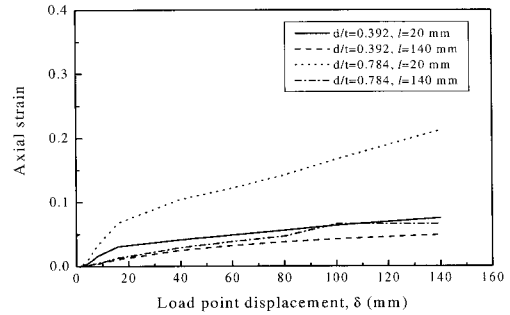
이 되면 조건부 허용 혹은 수리 및 교환을 필요로 한다고 보고되고 있다(안석환 등, 2003; Ahn et al., 1998, 2002; Miyazaki et al., 1999). 또한, 감육배관이 반복하중을 받을 경우 정적최대강도의 약 75%정도까지를 한계하중으로 본다면 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1992; Ahn et al., 2002), 본 연구의 결과에 있어서 감육깊이가 공칭 두께의 78.4%로 깊어졌을 때 감육각도가 90°인 $l=140\text{mm}$ 의 경우(2.8MPa)는 건전배관의 정적강도의 75%인 3.15MPa 보다도 낮기 때문에 이보다도 조건이 열악한 180° 및 360° 감육배관들은 허용할 수 없는 결함으로 판정할 수 있다. 또한, 감육 깊이가 공칭두께의 39.2%의 감육배관에 있어서도 180°의 $l=80\text{mm}$ 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 결과들과 비교할 필요가 있다.

Fig. 5(a)~(c)는 유한요소해석을 통하여 얻은 감육배관에서의 응력분포 및 변형상상의 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 요소분할이 비교적 세밀하지 못하게 만들어지는 등의 원인으로 인하여 해의 발산이 발생하였기 때문으로 사료된다. 균열발생에 따른 최종붕괴강도로서 판단하기에는 다소 무리가 있다고 생각된다. 그러나, 전보(안석환 등, 2003)의 실물 실험결과와 비교해 보면 동일 감육크기에서 균열이 발생한 것으로 보아 균열이 발생할 것으로 예상하여, 이때의 해석상의 강도를 최종강도로 사용하였다. 이것은 편평화 및 좌굴이 발생한 해석 결과들이 실험결과와 좋은 일치를 보이고 있기 때문이다.

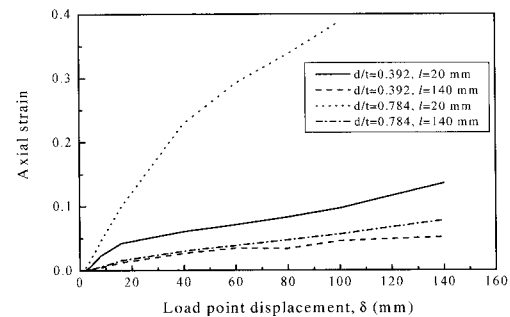
3.2 축방향 변형도(strain)의 영향

감육배관의 손상모드에는 감육부에 작용하는 변형도의 크기가 지배하는 것으로 생각된다. 그래서 Fig. 6에 해석에 의해 얻어진 배관중앙부의 감육부의 인장응력을 받는쪽의 축방향 변형도를 나타내었다.

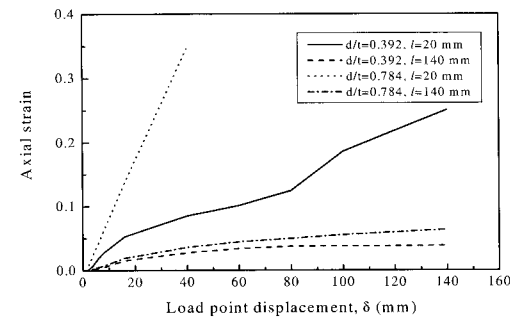
Fig. 6(a)는 $2\theta=45^\circ$ 의 경우로서, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록($d/t=0.784$ and $l=10\text{mm}$) 축방향 변형도가 크게 나타났고, 동일 감육깊이일 경우 감육깊이가 깊을수록 또, 동일 감육깊이라면 감육길이가 짧을수록 축방향 변형도가 크게 되는 경향을 나타내었다. Fig. 6(b)는 $2\theta=90^\circ$, 6(c)는 $2\theta=180^\circ$, 6(d)는 $2\theta=360^\circ$ 의 결과로서 Fig. 6(a)와 동일한 결과를 나타내고 있다. 이것은, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록 잔여 리가먼트(ligament)가 적기 때문에 감육부가 빨리 전단면 항복하기 때문인 것으로 사료된다. 특히, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧은 감육결합을 가지는 경우 감육 결과는 실물 실험상에서의 균열이 발생한 것과 일치하고 있는 것으로 보아, 균열이 발생하는 경우 축방향 변형도의



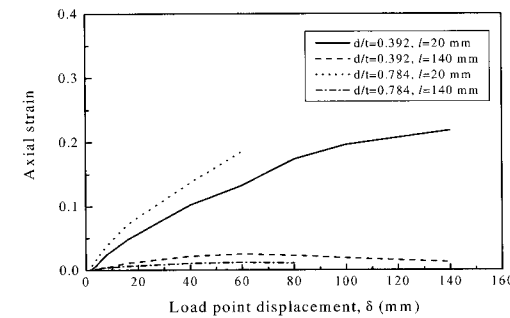
(a) The case of $2\theta=45^\circ$



(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. 6 Relationship between load point displacement and axial strain

각도가 커질수록 적은 변형량에서 큰 축방향 변형도를 나타내었고, 180° 및 360° 감육의 경우 도중 계산이 종료되는 영향이 크게 작용되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

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

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

참 고 문 헌

- 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, 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, 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.

2004년 6월 23일 원고 접수

2005년 2월 7일 최종 수정본 채택