



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

발전용 플랜트 배관의 강도 및
변형에 미치는 내/외부 감육의 영향



2007년 2월

부경대학교 대학원

기계공학학협동

석금철

공학박사 학위논문

발전용 플랜트 배관의 강도 및 변형에 미치는
내/외부 감육의 영향

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함.



2007 년 2 월

부경대학교 대학원

기계공학학연합동

석 금 철

석금철의 공학박사 학위논문을 인준함.

2006 년 12 월

주 심 공학박사 문 창 권 (인)

위 원 공학박사 안 병 건 (인)

위 원 공학박사 강 순 배 (인)

위 원 공학박사 안 석 환 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

<i>Abstract</i> -----	iv
제 1 장. 서 론 -----	1
1.1 연구 배경 및 목적 -----	1
1.2 이론적 배경 -----	7
1.2.1 소성붕괴 기준 -----	7
1.2.2 실단면응력의 모델링 및 응력분포 -----	15
제 2 장. 내부 감육배관의 강도와 변형에 대한 유한요소 해석 -----	21
2.1 서 론 -----	22
2.2 재료 및 해석 방법 -----	24
2.2.1 재료 -----	24
2.2.2 해석방법 -----	27
2.3 해석결과 및 고찰 -----	30
2.3.1 유한요소해석에 의한 M- δ 선도 및 강도고찰 -----	30
2.3.2 축방향 strain의 영향 -----	45
2.4 요약 -----	50

**제 3 장. 내부 및 외부 감육배관의 강도와 변형에 대한
실험 및 해석의 비교----- 51**

3.1 서론	-----	52
3.2 재료 및 실험 방법	-----	54
3.2.1 재료	-----	54
3.2.2 실험 및 해석방법	-----	54
3.3 결과 및 고찰	-----	62
3.3.1 외부감육배관의 강도에 대한 실험과 해석결과의 비교	-	62
3.3.2 내부 및 외부감육의 감육위치의 영향	-----	66
3.3.3 내부 및 외부감육부에서의 균열발생의 예측	-----	75
3.4 요약	-----	85

제 4 장. 감육된 배관 용접부의 강도와 변형 ----- 86

4.1 서론	-----	87
4.2 재료 및 실험 방법	-----	90
4.2.1 재료	-----	90
4.2.2 용접조건	-----	94
4.2.3 실험방법	-----	96
4.3 결과 및 고찰	-----	98
4.3.1 용접유무에 따른 감육배관의 M- δ 선도	-----	98

4.3.2 용접유무에 따른 감육배관의 강도 고찰 -----	107
4.4 요약 -----	114
제 5 장. 결 론 -----	116

참 고 문 헌

감사의 글



*Effect of Inner/Outer Wall Thinning on Strength and
Deformation of Energy Plant Pipes*

Kum-Cheol Seok

*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 analyses were performed on full-scale carbon steel pipes with local wall thinning on the inside. A monotonic bending load was applied to straight pipe specimens by four-point loading at ambient temperature without internal pressure. The elasto-plastic analysis was 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.

Experiments for effects of location of thinned wall on the fracture behavior of pipes were carried out, and were compared with the analytical results. Local wall thinning for the bending test was machined with the various sizes on the outside of pipes in order to simulate the metal loss due to erosion/corrosion. Accurate simulations of fracture behaviors of outer wall thinning, were possible by three dimensional elasto-plastic analyses and then FE analysis for the pipes with local wall thinning on the outside made a comparative study with that of inside. Fracture type obtained from the experiments and analyses could be classified into ovalization, local buckling and crack initiation depending on the thinned length and thinned ratio. From the results, the fracture behaviors of pipes with the outer wall thinning were showed that can be applied to estimate the fracture behaviors of pipes with the inter wall thinning.

Monotonic bending tests were performed on full-scale welded carbon steel pipes with local wall thinning to compare unwelded ones. A monotonic bending load was applied to straight pipe specimens by four-point loading at ambient temperature without internal pressure. The observed failure modes were divided into four

types; ovalization, crack initiation/growth after ovalization, local buckling and crack initiation/growth after local buckling. Also, the strengths of welded and unwelded piping system with local wall thinning were evaluated.



제 1 장



1.1 연구 배경 및 목적

최근 에너지의 수요 증대와 화석에너지의 고갈에 따른 대체에너지에 대한 요구가 증가하고 있는 실정이다. 대체에너지 자원에는 여러 가지가 사용되고 있으나, 아직도 세계적으로는 원자력 발전에 대한 의존도가 크다. 미국, 일본, 프랑스 등에 못지않게 우리나라도 원자력 발전에 의한 에너지 의존도는 근 50%에 육박하고 있다.

통상 원자로는 사용목적에 의해 분류할 수 있다. 그 중 우리나라는 약 80%정도를 가압수형로(pressurized water reactor; PWR)를 사용한다. Fig. 1.1은 가압수형로(pressurized water reactor; PWR)의 개념도를 나타낸다. 그림에서 보듯이 PWR 발전소는 3개의 분리된 냉각회로를 갖고 있다. 즉, 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System; 일차계통), 증기(Steam) 및 급수(Feedwater)계통(이차계통), 복수기냉각수계통(Condenser Cooling Water System)으로 구분되어 있고, 이들 중에서 방사성을 띠고 있는 회로는 원자로 냉각재계통뿐이다. Fig. 1.2도 가압수형로 원전의 냉각회로 구성을 잘 보여주고 있다^(1,2). 냉각수는 냉각수 펌프로써 로심으로 운반되고 열을 식힌다., 이 형식에서는 경수가 비등하는 압력 이상의 압력을 가압기에서 가압하여 원자로 압력용기 내에서 물을 비등시키지 않는다. 원자로에서 발생한 고압수는 증기발생기로 보내지고 이 증기발생기의 2차측에서 고온고압증기를 발생시켜 터빈을 회전시켜 발전하고 전력을 얻는다⁽³⁾.

근년에 들어 와서는 원자력 발전 기기 계통에 여러 가지 문제가 발생하여 그것이 사고로 이어지는 사례가 보고 되고 있다. 1979년 미국 스

리마일섬의 사고, 1986년 구소련의 체르노빌 사고를 비롯하여 다수의 사고에 대해 원전의 안전에 대한 심각성을 더하고 있다. 특히, 지진 발생시 방사능 누출을 방지하는 내진설계적 요구가 현실적으로 대두되고, 이는 안전성평가에 대한 요구로 이어지고 있다^(4,5).

에너지 플랜트에 사용되는 기기들은 이상과 같은 관점으로부터 상당히 중요한 의미를 가진다. 즉 파손의 우려가 있고 이는 곧 방사능 누출 및 피폭과 같은 대형사고로 연결되어질 수 있다. 이들 기기 중에서 배관은 전체 기기 중 많은 비율을 차지하고 있다. 이들 배관에 대한 파손 방지 프로그램이나 안전성 평가가 많은 연구자 혹은 연구기관들에 의해 행하여져 왔다⁽⁶⁾.

특히, 감육에 의해 발생한 대표적인 원전사고로는 1986년에 발생한 미국의 Surry 원자력발전소 사고를 비롯하여 가장 최근에 발생한 일본 Mihama 원자력발전소 사고 등이 보고되고 있다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

1986년 미국 버지니아주 버지니아 전력 Surry 원자력발전소 2호기에 있어서, 2차계 급수배관의 배관파단사고가 발생하여 배관파단개소 주변에서 작업하고 있던 작업원 8명이 화상을 입고 그 중 4명이 사망한 사고가 발생하였다. 파손상황을 검사한 결과, 파손한 배관 엘보우의 내표면이 심한 두께 감소에 의한 손상(감육이라 한다)이 발생하여 움푹 패여진 현상이 나타나 있었다. 이것은 명확하게 배관의 형상과 고속류의 흐름의 심한 변화에 의한 erosion의 양상을 나타내고 있었다. 따라서 이 현상은 원자로의 trip 후의 통상 일어날 수 있는 압력상승에 의한 감육 부분이 손상하여 연성과단한 것으로 판단되어졌다. 배관 내면의 현저한 감육의 원인은 직접적으로는 국부적인 난류에 의하지만, 수질관리상의

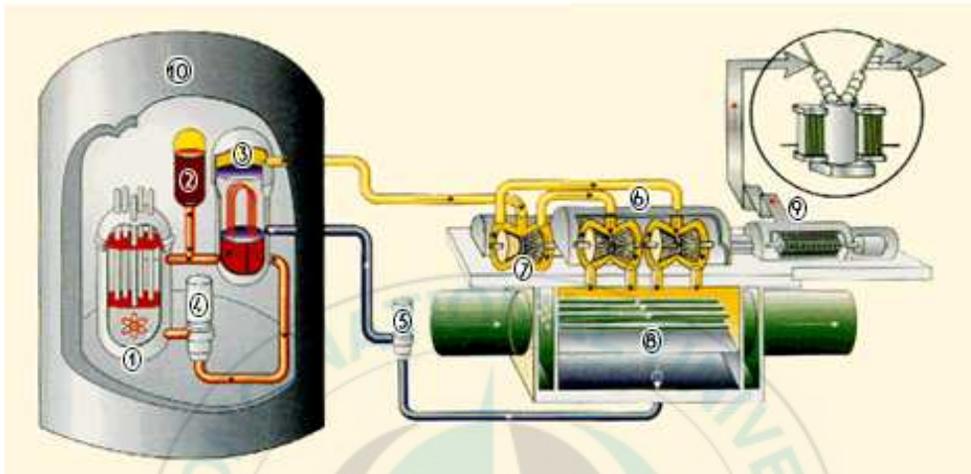
문제, 온도 등의 조건이 중첩되어진 erosion-corrosion(침식-부식)현상에 기인하는 것으로 알려졌다^(7,9,10).

따라서, 에너지 관련 플랜트의 주요배관은 플랜트의 기능이나 안전성 유지상 중요한 설비의 일부로서 건전성 평가가 이루어져야만 한다. 그러므로 예방보전기술 등의 특단의 조치가 필요한 것이다.

이에, 본 연구에서는 원자력 등 에너지 플랜트의 2차계 배관에 사용되는 고압탄소강^(14,15)을 이용해서, 유체의 흐름에 의해 발생할 수 있는 침식-부식에 의한 여러 가지 감육현상을 배관에 모의하여 실험 및 해석을 통하여 감육배관의 강도 및 변형에 대한 연구를 행하였다. 또한, 배관 용접부에 발생한 감육을 모의하여 강도와 변형에 대한 파손거동을 용접하지 않은 경우와 비교 검토하였다.

이상으로부터 행하여진 감육배관의 강도 및 변형에 대한 실험과 해석의 결과로부터 재료역학적^(16-20,40) 및 파괴역학적 개념^(16-20,40)을 이용한 배관의 건전성 평가⁽⁴⁰⁾를 행하는 것을 목적으로 하였다.

가압경수로형 (PWR)



- ① 원자로
- ② 가압기
- ③ 증기발생기
- ④ 냉각재펌프
- ⑤ 주급수펌프
- ⑥ 저압터빈
- ⑦ 고압터빈
- ⑧ 복수기
- ⑨ 발전기
- ⑩ 원자로건물

Fig. 1.1 Schematic of pressurized water reactor

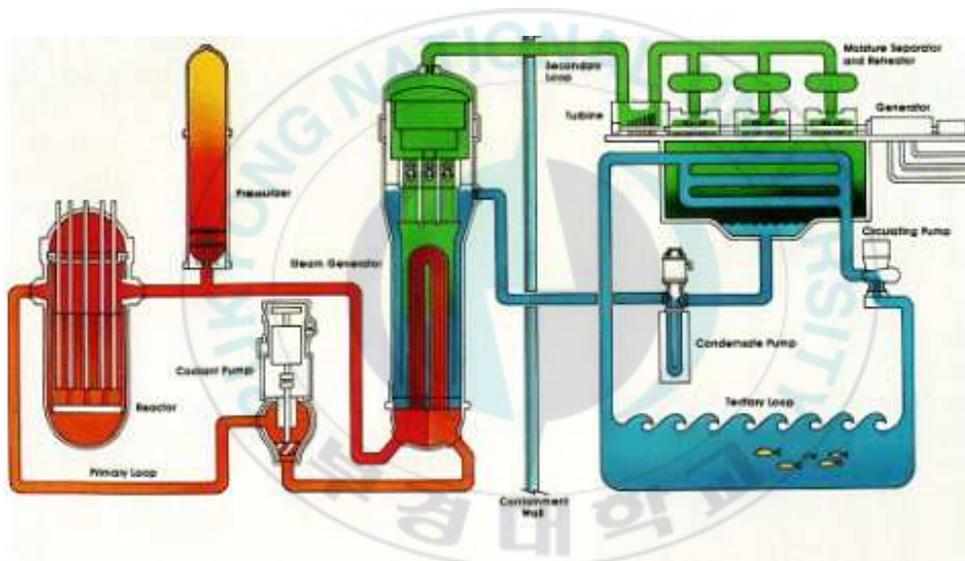


Fig. 1.2 Schematic of the cooling system of pressurized water reactor

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-T 해석법
 - (4) 전변형률 파손평가 다이아그램 (Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram; DPFAD)법
 - (5) 국부 넥킹(local necking) 발생시의 평가법인 한계하중법 (limit load analysis)
 - (6) 무차원 소성역 매개변수(DPZP)법
- 등이 있다^(21,22,23,25).

또한, 원자력 발전소에서는 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec. XI에 의하여 자체적으로 평가하는 방법을 수행하고 있다⁽²⁴⁾.

1.2.1 소성붕괴 기준⁽⁵⁵⁾

이론적 임계 실단면응력은 배관재료의 유동응력(flow stress) 또는 파괴응력(fracture stress)으로 정의되며, 배관응력이 이 값에 도달하면 파괴되었다고 판단하며 이를 소성붕괴(plastic collapse)⁽¹¹⁻¹³⁾라고 한다. 이

러한 소성붕괴에 의한 파괴는 해석적인 방법에 기초한 한계하중법(limit load method)과 다양한 실패관 파손실험 결과를 토대로 작성한 실험식을 이용하여 건전성을 평가한다. 현재 각국에서 사용중인 소성붕괴 기준은 다음과 같다.

(1) Miller 소성붕괴평가법

Miller는 원격굽힘하중(remote bending moment)이 작용하는 배관에 원주방향 결함이 존재하는 경우에 대한 소성붕괴평가식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\sigma_{pc} = \frac{M_{pc}}{4R^2t} = \sigma_f \left[\cos\left(\frac{\eta\beta\pi}{2}\right) - \frac{\eta\sin(\beta\pi)}{2} \right] \quad (1.1)$$

for $\beta < \frac{1}{2-\eta}$

$$\sigma_{pc} = \frac{M_{pc}}{4R^2t} = \sigma_f \left[(1-\eta)\sin\left\{\frac{(1-\beta\eta)\pi}{2(1-\eta)}\right\} + \frac{\eta\sin(\beta\pi)}{2} \right] \quad (1.2)$$

for $\beta > \frac{1}{2-\eta}$

여기서,

σ_{pc} : 소성붕괴응력

M_{pc} : 전소성굽힘모멘트

R : 배관반경

t : 배관두께

a : 결함깊이

$2c$: 결함길이

D : 배관직경

$\beta = \frac{2c}{\pi R}$ β : 배관직경에 대한 결함길이의 비

$\eta = \frac{a}{t}$: 결함깊이 비

σ_f : 유동응력

식 (1.1) 및 (1.2)는 결함을 포함한 배관의 두께방향 잔여길이가 재료의 임계응력, 즉 유동응력이나 항복응력에 이르렀을 때 소성붕괴가 발생한다고 가정하여 작성한 식이다. Miller의 식은 CEGB/R6 평가법과 BSI PD6493에서 채택하여 사용하고 있다.

(2) Wilkowski & Eiber 소성붕괴평가법

Wilkowski와 Eiber는 surface defect transformation을 이용하여 다음과 같은 소성붕괴평가 식을 제안하였다.

$$\sigma_{pc} = \frac{M_{pc}}{\pi R^2 t} = \sigma_f \left[\frac{1-\eta}{1-\frac{\eta}{N}} \right] \quad (1.3)$$

여기서,

$$N = [1 + 0.26\beta + 47\beta^2 - 59\beta^3]^{\frac{1}{2}} \text{ 이다.}$$

(3) Willoughby 소성붕괴평가법

Willoughby는 원격굽힘하중이 작용하는 배관의 원주방향결함에 대한 실패관 실험결과를 토대로 다음과 같은 소성붕괴평가식을 제안하였다.

$$\sigma_{pc} = \frac{M_{pc}}{\pi R^2 t} = \sigma_f (1 - 1.6\pi\beta\eta) \quad (1.4)$$

식 (1.4)는 실험결과 중 가장 낮은 값들을 기초로 작성하였으며 결함길이에 대해 안전계수 2를 적용하였다. Willoughby의 식은 BS 4515에서 채택하여 사용하고 있다

(4) CSA Z662 소성붕괴평가법

CSA(Canadian Standard Association)에서는 원격굽힘하중이 작용하는 배관의 원주방향 용접부에 존재하는 결함에 대한 실패관 실험을 수행하고 이를 기초로 다음과 같은 소성붕괴 평가기준을 제안하였다.

$$\sigma_{pc} = \sigma_y (1.03 - 18\beta\eta) \quad (1.5)$$

식 (1.5)는 원주방향 용접부에 표면결함을 넣어 파손테스트를 한 후, 그 결과를 작성한 식으로 결함깊이에 2, 결함길이에 2.5의 안전계수를 도입한 식이다. 현재 본 기준식은 CSA Z662 App. K에 채택되어 사용되고 있다.

(5) Kastner 소성붕괴평가법

Kastner는 내압 P가 작용하는 경우에 대한 소성붕괴평가식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma_{pc} = \frac{PR}{2Rt} = \frac{(1-\eta)(\pi-\beta\eta)}{\pi(1-\eta)+2\eta\sin\beta} \quad (1.6)$$

(6) ASME Sec. XI 한계하중법

ASME Sec. XI에서는 배관에 존재하는 원주방향과 축방향결함의 한계하중 해석을 위한 식을 다음과 같이 제시하였다. 이때, 배관의 거동을 소성붕괴로 가정하여 계산한다.

Fig. 1.1에 나타낸 바와 같이 작용하중에 의해 배관의 잔여단면에 발생하는 응력이 유동응력(flow stress)과 같아질 경우 파단이 발생한다고 가정한다.

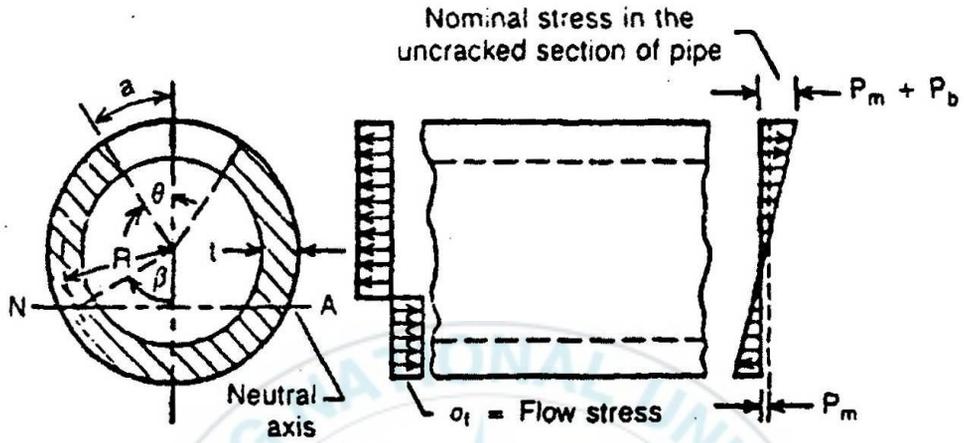


Fig. 1.1 Stress equilibrium at the crack cross section of a pipe

(i) 원주방향일 경우

① $\theta + \beta \leq \pi$ 일 때

$$P_b = 2\sigma_f \left[\frac{2\sin\beta - \left(\frac{a}{t}\right)\sin\theta}{\pi} \right] \quad (1.7)$$

$$\beta = \pi - \theta \left(\frac{a}{t}\right) - \frac{\left(\frac{P_m}{\sigma_b}\right)\pi}{2}$$

② $\theta + \beta > \pi$ 일 때

$$P_b = 2\sigma_f \left[\frac{\left(2 - \frac{a}{t}\right) \sin\beta}{\pi} \right] \quad (1.8)$$

$$\beta = \pi - \theta \left(\frac{a}{t} \right) - \frac{\left(\frac{P_m}{\sigma_b} \right) \pi}{2}$$

여기서,

P_b : 1차 굽힘응력

P_m : 2차 굽힘응력

(ii) 축방향 균열일 경우

$$\sigma_h = \frac{\sigma_f}{M} \sigma_h \quad (1.9)$$

여기서,

$$M = \sqrt{1 + \left(\frac{1.61}{4Rt} \right) l^2}$$

σ_h : 파괴시 원주응력

l : 전체 축방향 결함길이

R : 배관의 평균반경

t : 배관의 벽두께

한계하중법에서의 안전계수는 배관이 견딜 수 있는 한계하중 P'_b 나 σ'_h 을 작용하중 P 로 나눈 값으로 정의 된다

한편, 오스테나이트 스테인리스강과 같은 고연성재료의 파괴는 균열 둔화, 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 생각하는 파괴평가법이다. 즉, 이론적 임계 실단면응력은 배관재료의 유동응력(flow stress, σ_f)으로 정의되며, 배관응력이 이 값에 도달하면 파괴되었다고 판단하고 이때의 상태를 상기에도 나타내었듯이 소성붕괴(plastic collapse)라고 한다. Kanninen 등^(26,27)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

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

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

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

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

(2) 스테인리스강의 경우

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

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

1.2.2 실단면응력의 모델링 및 응력분포

Fig. 1.3은 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. 1.4는 배관의 원주방향으로 부분적으로 균열이 발생하였을 때의 단면의 응력분포를 나타낸다.

Fig. 1.5는 균열을 가진 배관에 내압 및 굽힘하중이 작용하였을 때의

실단면응력의 분포를 모델링 한 예를 나타낸다. 이와 같은 경우에 대해서 실단면응력 기준에 준한 Kanninen 등^(26,27)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⁽²⁸⁻³²⁾.

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 강도평가를 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^(40,42,44).

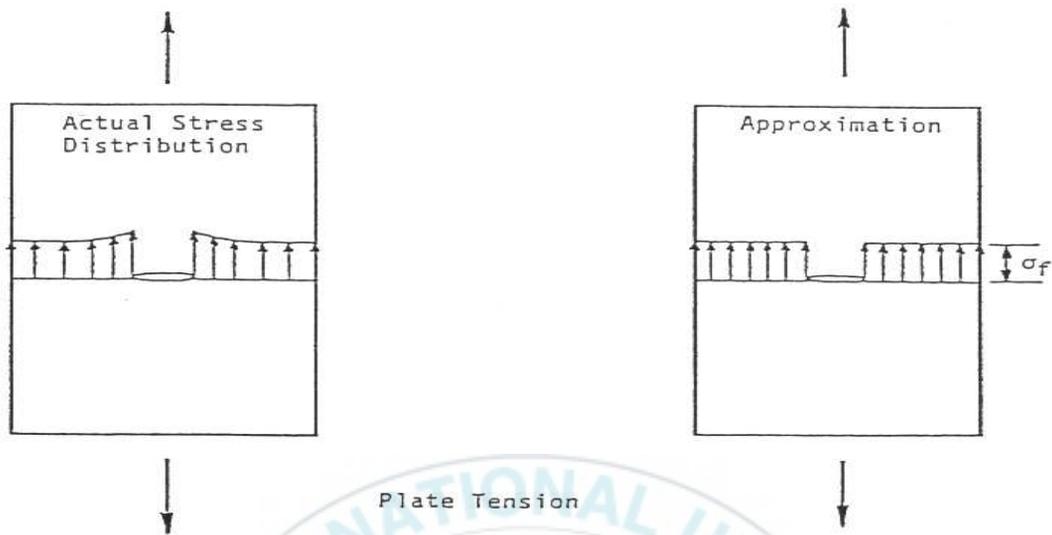


Fig. 1.3 Stress distribution modelling of Net-Section Collapse Criterion^(26,27)

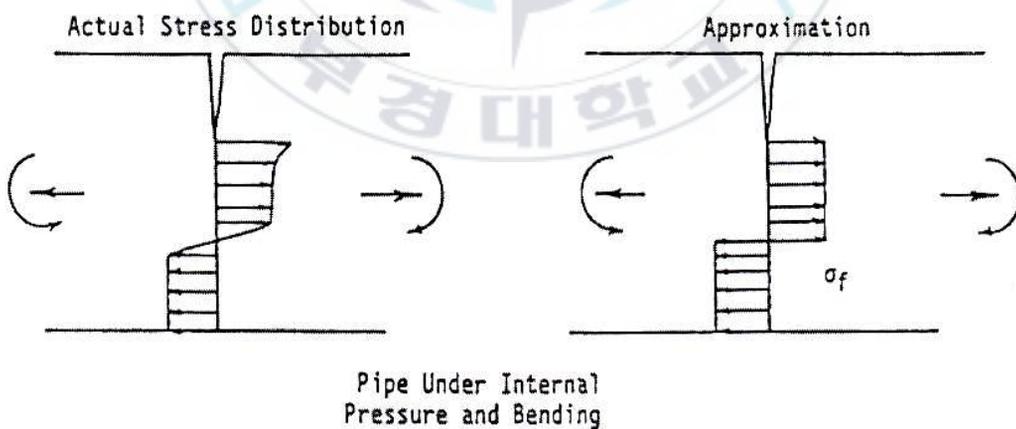


Fig. 1.4 Stress distribution modelling of circumferential part-through^(26,27)

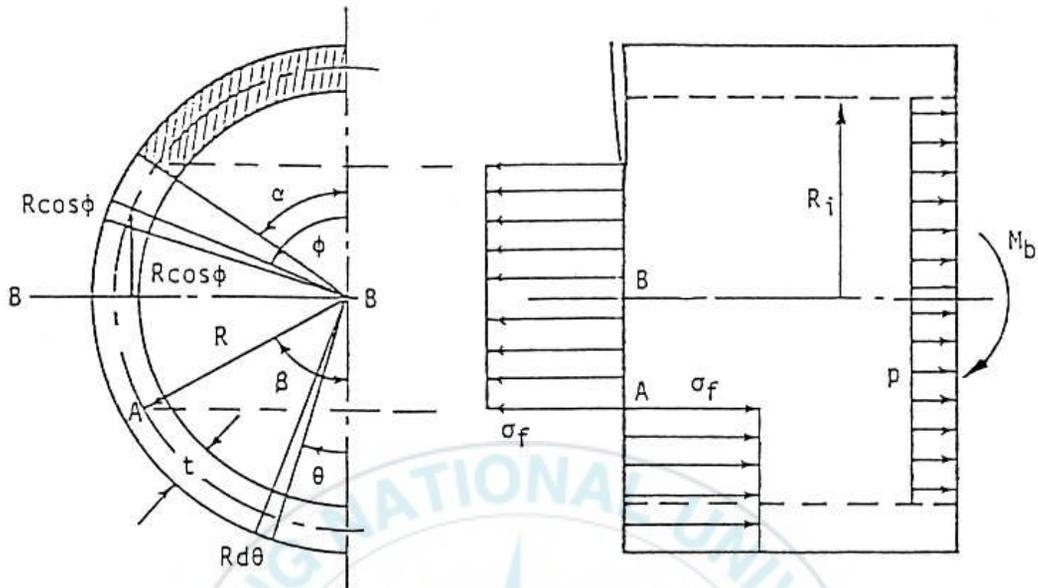


Fig. 1.5 Stress distribution modelling of circumferential cracked pipe for Net-Section Collapse Criterion^(26,27)

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

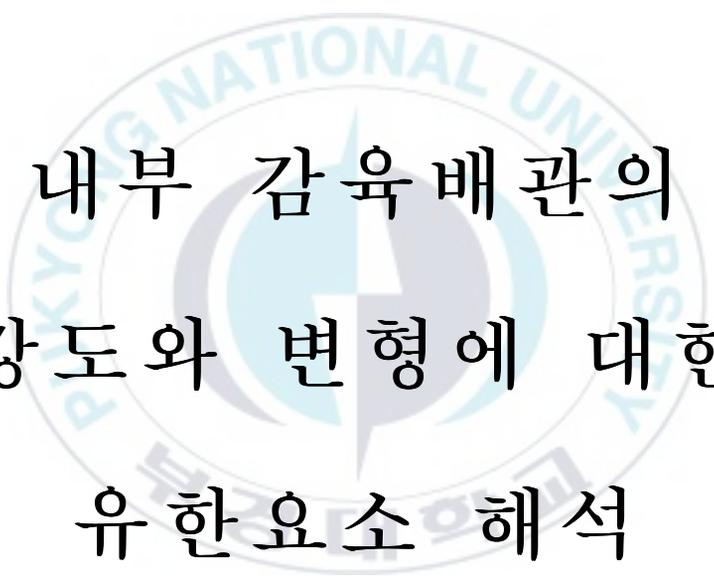
$$M_L = 2\sigma_i R^2 t \left(2 \left(1 - \frac{d}{t} \right) \sin \beta_L + \frac{d}{t} \sin \theta \right)$$

where,

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



제 2 장



내부 감육배관의
강도와 변형에 대한
유한요소 해석

2.1 서론

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^(23,24). 배관에 발생한 균열(crack)의 발생 및 진전에 대한 연구는 이미 국내외적으로 이미 많은 연구⁽²⁶⁻³²⁾가 진행되어 졌지만, 아직도 감육 문제에 대해서는 여러 가지 불명의 점이 해결되지 않고 있다.

대표적인 감육에 의한 사고사례로서는 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고⁽⁷⁾, 일본 미야마 원전 배관 파단사고⁽⁸⁾ 등이 보고되어 있고, 국내에서도 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서도 배관 감육 손상이 발생되고 있는 실정이다⁽³³⁾. 이상과 같이 배관의 감육문제는 세계 각 국에서

심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 등이 검토되고 있다
(34-37).

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^(7,34,38-44).

최근, 감육이 배관에 발생하고 굽힘하중을 받는 경우에 대하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는가를 정량적으로 해명하기 위한 연구가 행하여지고 있다^(34,40-44). 그러나, 감육을 가지는 배관의 파괴강도 및 파괴거동에 대해서는 아직도 더 많은 연구가 필요하다.

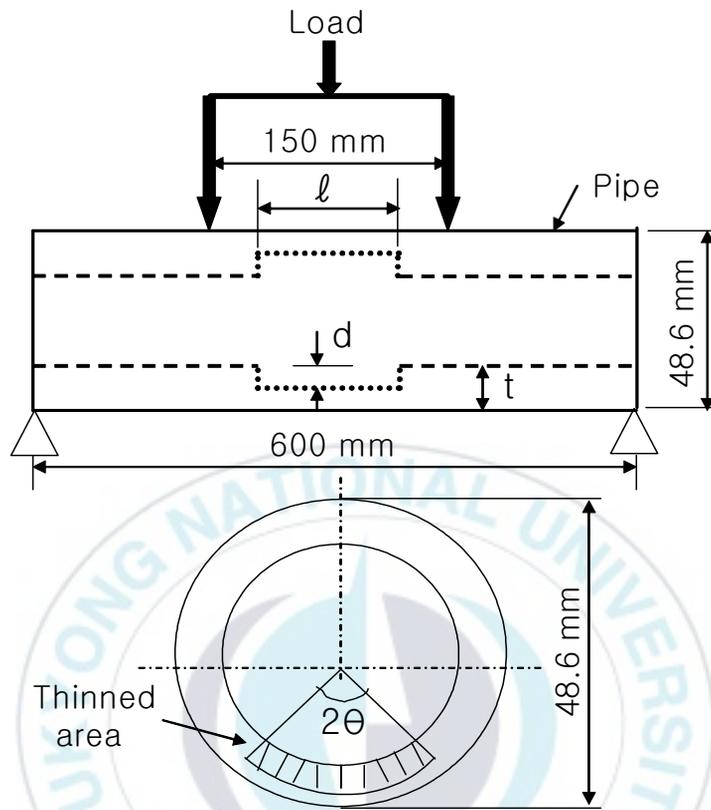
따라서, 본 연구에서는 탄소강배관이 침식-부식에 의해 두께감소가 발생하였을 경우를 가정하고, 고압탄소강배관에 임의적으로 감육결함을 상정한 후 유한요소법에 의한 해석을 수행하였다. 이와 같이, 배관에 상정한 감육의 형상과 정도에 따라 배관에 발생한 손상모드와 강도를 해석적으로 검토하였다.

2.2 재료 및 해석방법

2.2.1 재료

본 해석에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80 STS370 고압 탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; JIS Standard G3455)이며, 실배관으로부터 절취한 인장시험편을 사용하여 인장시험으로부터 구한 그 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 2.1 과 2.2에 나타낸다.

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 해석에 이용한 시험편의 형상을 Fig. 2.1에 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. 2.1 Pipe specimen with local wall thinning and 4-point bending load used in the FE analysis

Table 2.1 Mechanical properties

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

Table 2.2 Chemical composition [wt%]

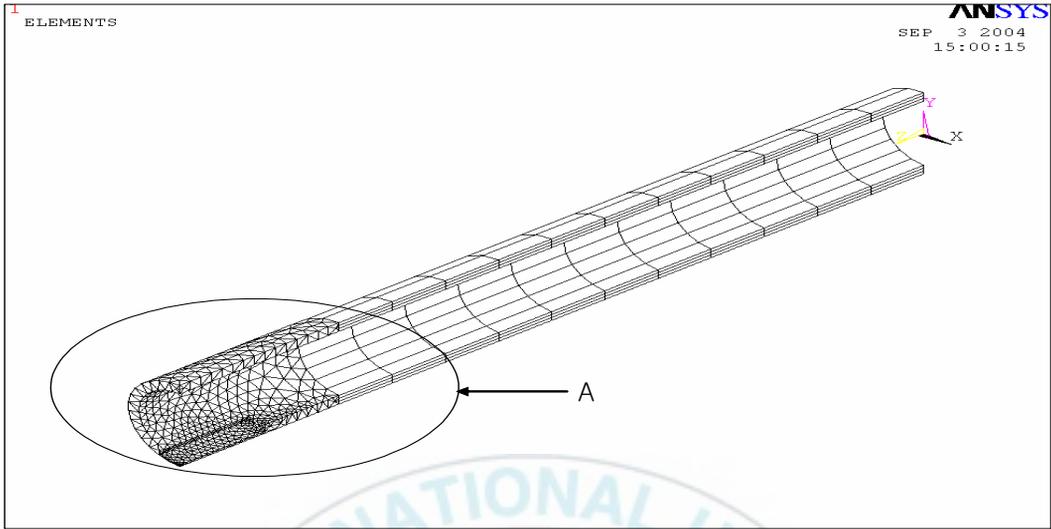
Material	C	Si	Mn	P	S
STS370	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

2.2.2 해석방법

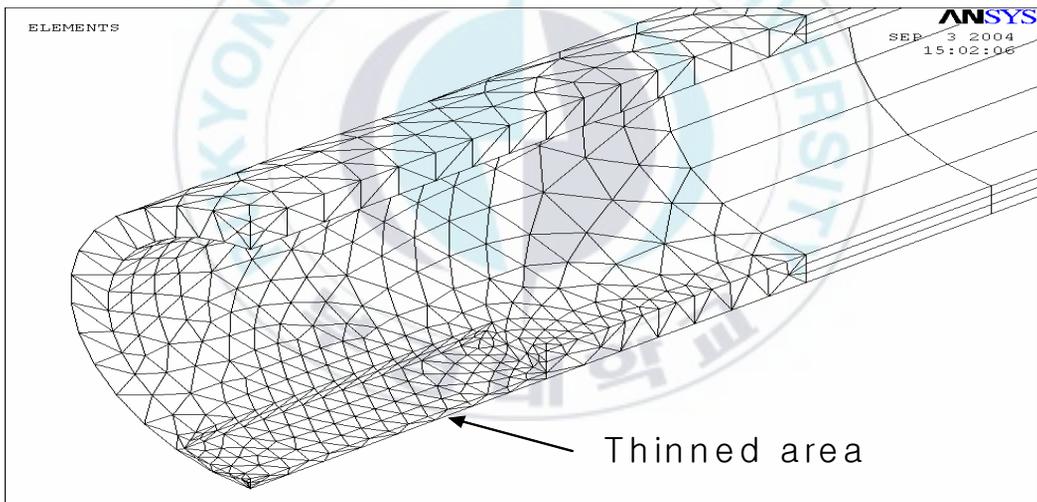
해석에 있어서는 유한요소법 소프트웨어인 ANSYS를 이용해서 탄소성해석을 행하였다. isoparametric 20절점요소를 이용하여 대칭성을 고려해서 1/4 모델의 배관을 작성하였다. 해석에는 Von Mises의 항복조건을 사용하였다. 해석은 변위제어로 행하여 하중점의 절점반력해를 구하였다. 이때, 내압은 고려하지 않았다. 입력한 재료 data는 동 재료의 인장시험에 의해 얻어진 값을 다직선근사해서 사용하였다. 영률은 206Gpa, 포아송비는 0.3, 항복응력은 340MPa로 했다. 해석은 등방경화칙을 가정해서 행하였다. 하중의 부하는 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. 2.2(a)와 (b)에는 배관의 유한요소 모델의 예를 나타낸다.

Fig. 2.3에는 FE 해석에 사용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.



(a) 1/4 model



(b) Detail of A

Fig. 2.2 A example of FE analysis modeling for thinned pipe specimen

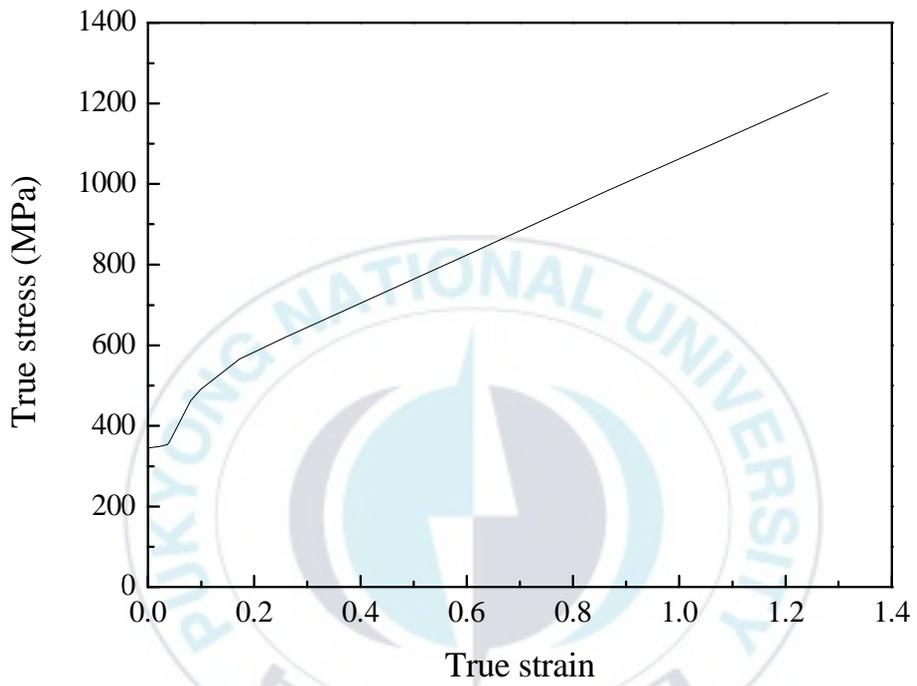


Fig. 2.3 True stress- true strain curve used in FE analysis

2.3 해석 결과 및 고찰

2.3.1 유한요소해석에 의한 $M-\delta$ 선도 및 강도고찰

Fig. 2.4(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. 2.4(a)~(h)의 모든 그림 속에는 감육결함이 없는 건전한 배관의 $M-\delta$ 선도를 함께 나타내었다. 변형정도에 있어서는 변위가 140mm가 될 때 까지를 해석에 이용하였다.

Fig. 2.4(a), (c), (e), (g)는 $d/t=0.392$ 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. 감육결함이 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. 2.4(b), (d), (f), (h)는 $d/t=0.784$ 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. 감육결함이 가장 큰 360° 전주감육의 경우에 있어서는 건전한 배관에 비해서 감육길이가 $l=20$ mm일 때 약 78.6%,

$t=140\text{mm}$ 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 $t=20\text{mm}$ 에 비해 $t=140\text{mm}$ 에서 23.1% 정도 감소를 나타내었다. 그리고 $d/t=0.784$ 의 경우, 180° 부분감육에 있어서 $t=20\text{mm}$ 에 비해 $t=140\text{mm}$ 에서 27.3% 정도 최대강도의 감소를 보였다. 그런데 여기서 특이한 것은 $d/t=0.784$ 의 감육을 가지는 360° 전주감육에서는 $t=20\text{mm}$ 에 비해 $t=140\text{mm}$ 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. 2.4(h)에 나타내었듯이 최대강도가 거의 변형이 발생하지 않았음에도 불구하고 형성된 결과이다. 즉, 감육깊이가 깊어질 경우에는 감육길이에 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

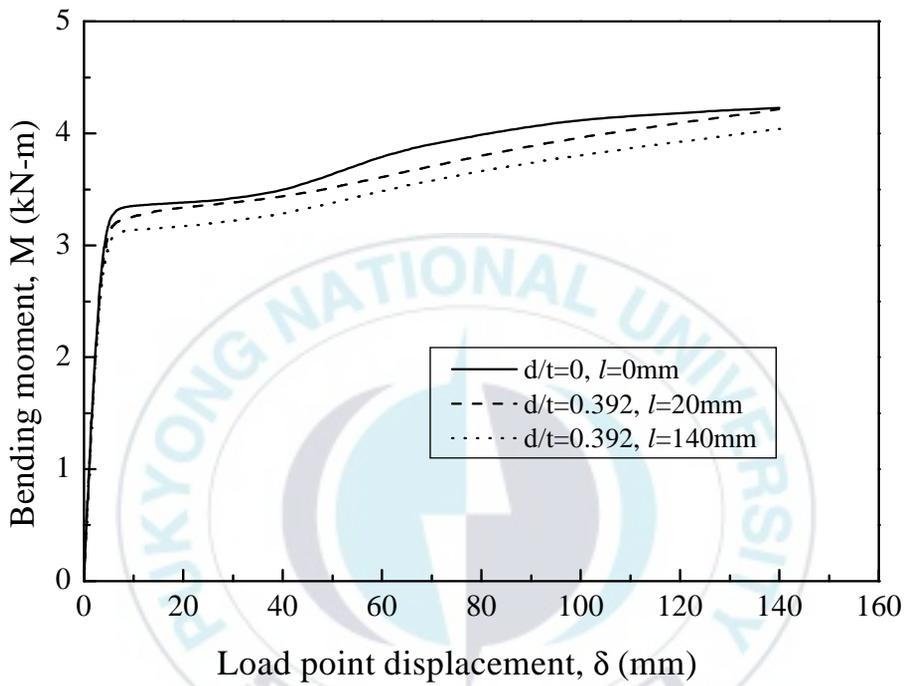
감육깊이가 깊을수록 현저하였다.

이전의 연구결과에 의하면 360° 전주에 걸쳐 감육결함이 형성되었을 경우, 감육깊이가 배관의 공칭두께의 약 50% 이상이 되면 조건부 허용 혹은 수리 및 교환을 필요로 한다고 보고되고 있다^(34,40,41,44). 또한, 감육배관이 반복하중을 받을 경우정적최대강도의 약 75%정도까지를 한계하중으로 본다면^(23,24,42), 본 연구의 결과에 있어서 감육깊이가 공칭두께의 78.4%로 깊어졌을 때 감육각도가 90°인 $t=140\text{mm}$ 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 $t=80\text{mm}$ 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. 2.5(a)~(f)는 유한요소해석을 통하여 얻은 감육배관에서의 응력 분포 및 변형양상의 몇몇 예를 나타낸다. 변위가 140mm만큼 변형되었을 때의 결과들로서 하중부하방향에 대해 인장응력이 발생하는 쪽의 감육결함이 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

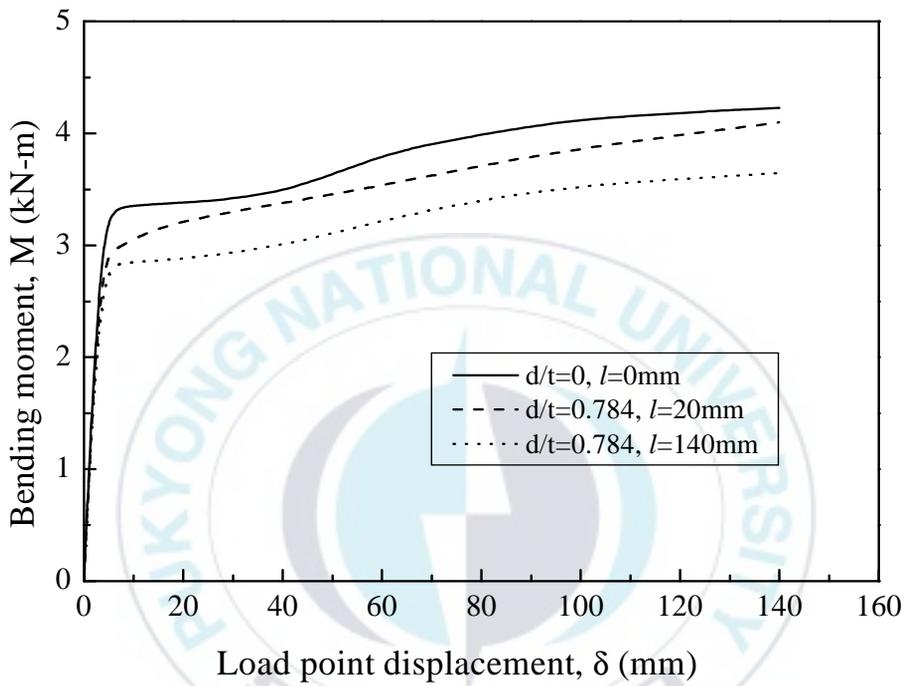
에는 다소 무리가 있다고 생각된다. 그러나, 안 등^(40,42,43,44,46)의 논문에서의 실물 실험결과와 비교해 보면 동일 감육크기에서 균열이 발생한 것으로 보아 균열이 발생한 것으로 예상되어진다.





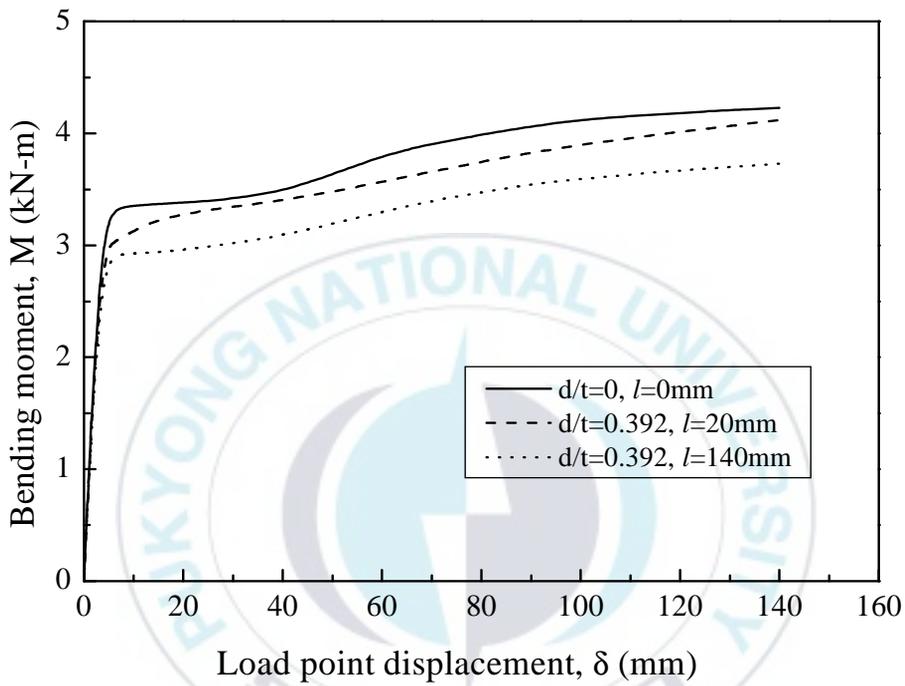
[Case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.392$]

Fig. 2.4(a) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



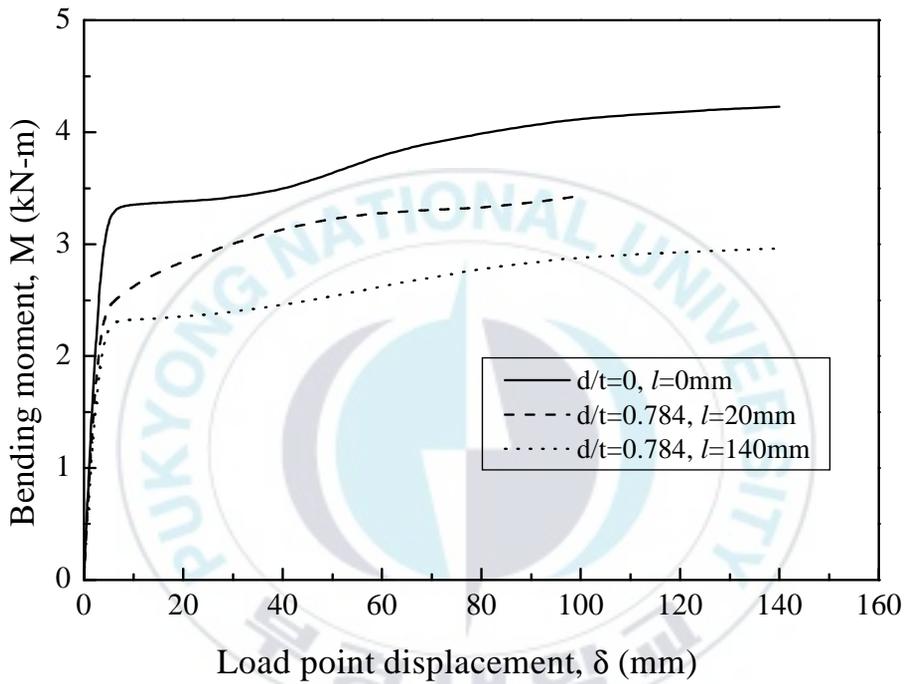
[Case of $2\theta=45^\circ$ and $d/t=0.784$]

Fig. 2.4(b) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



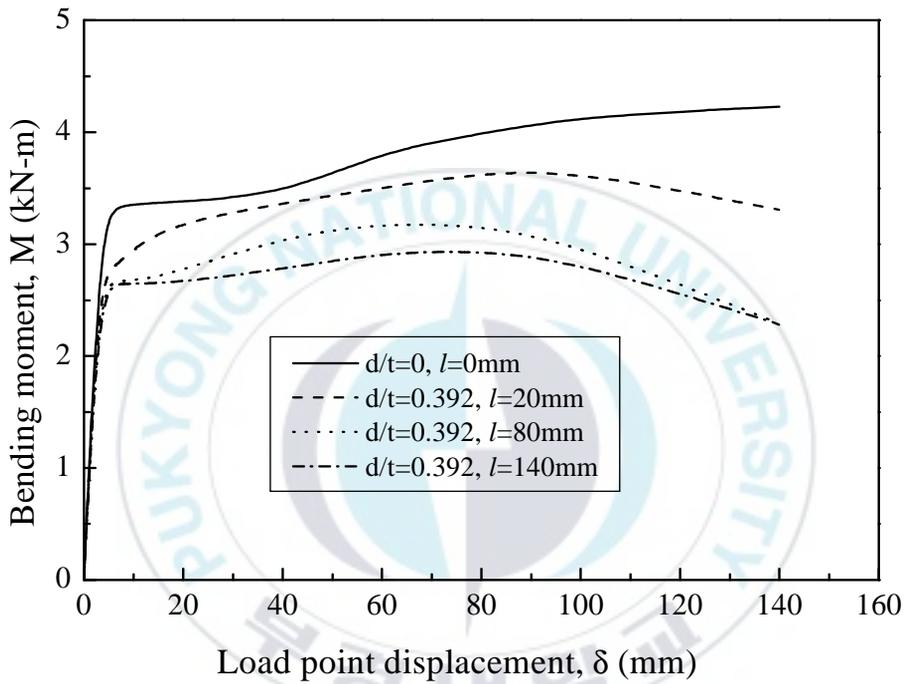
[Case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.392$]

Fig. 2.4(c) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



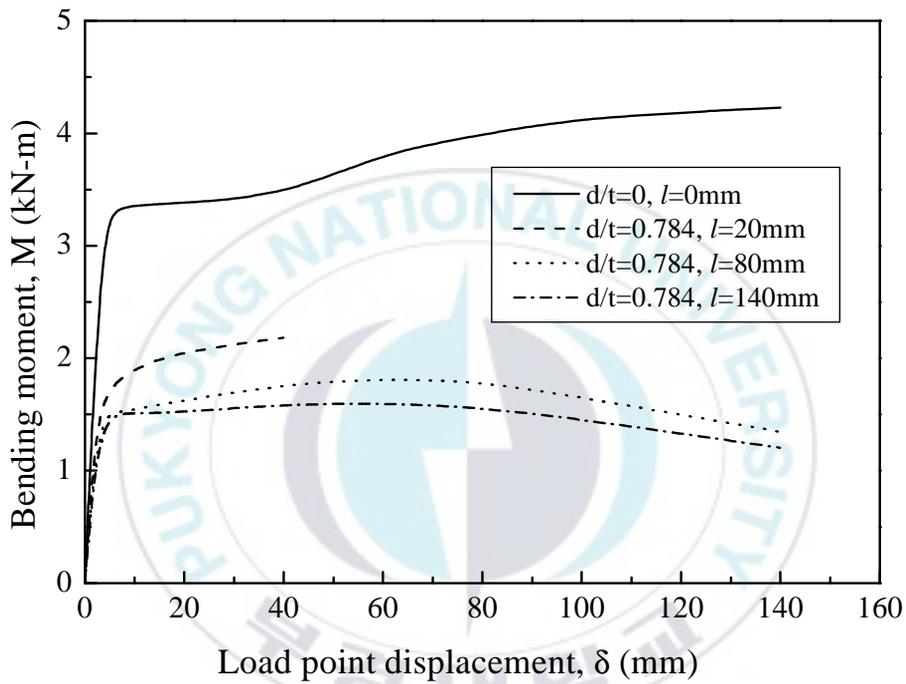
[Case of $2\theta=90^\circ$ and $d/t=0.784$]

Fig. 2.(d) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



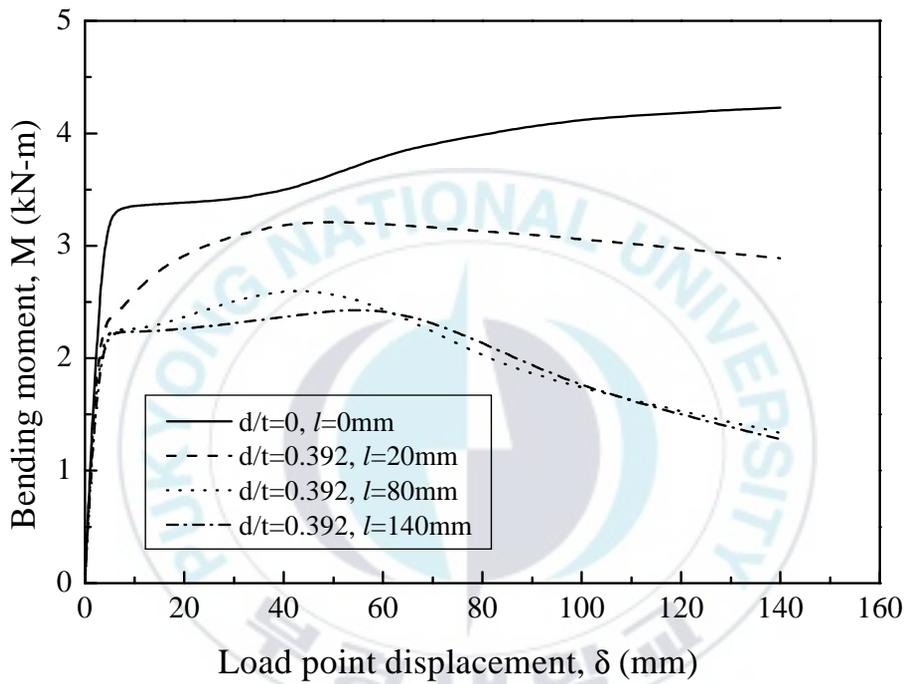
[Case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.392$]

Fig. 2.9(e) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



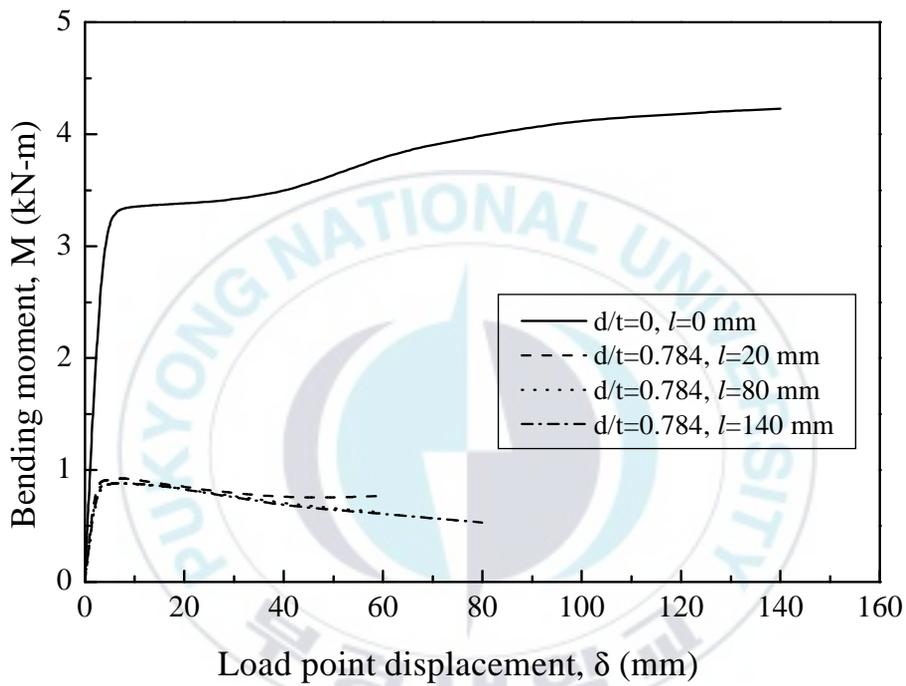
[Case of $2\theta=180^\circ$ and $d/t=0.784$]

Fig. 2.9(f) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



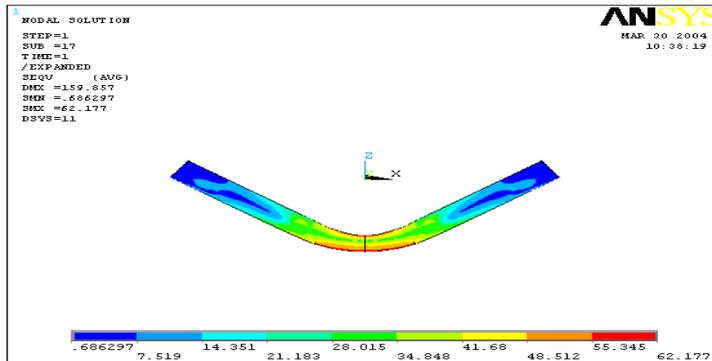
[Case of $2\theta=360^\circ$ and $d/t=0.392$]

Fig. 2.4(g) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



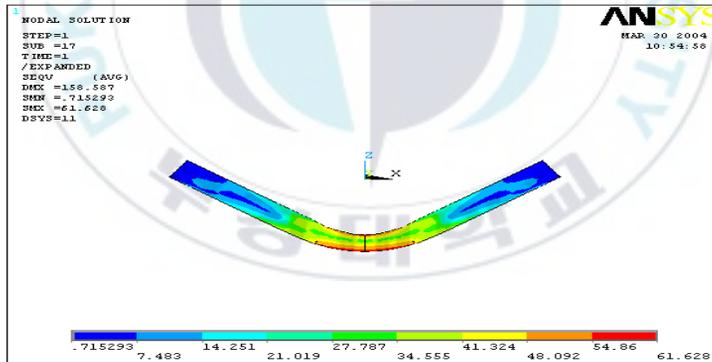
[Case of $2\theta=360^\circ$ and $d/t=0.784$]

Fig. 2.4(h) Bending moment(M)-load point displacement(δ) curves of wall thinned pipes by FE analysis



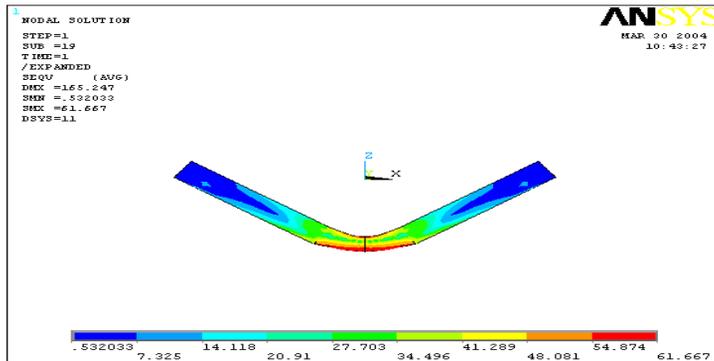
[Case of $2\theta=45^\circ$, $d/t=0.784$ and $t=140\text{mm}$]

Fig. 2.5(a) Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



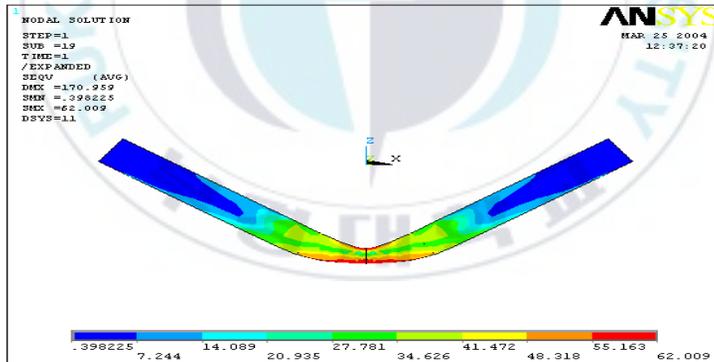
[Case of $2\theta=90^\circ$, $d/t=0.392$ and $t=140\text{mm}$]

Fig. 2.5(b) Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



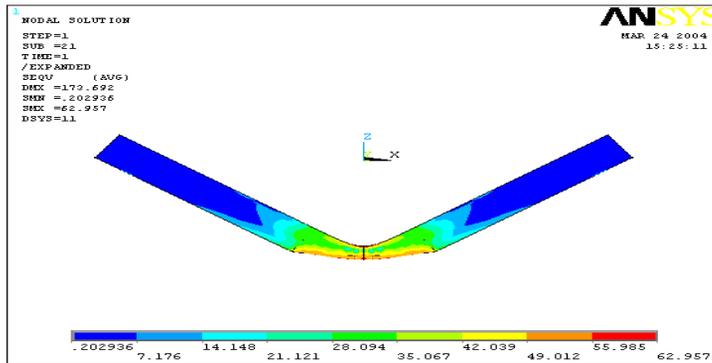
[Case of $2\theta=90^\circ$, $d/t=0.784$ and $t=140\text{mm}$]

Fig. 2.5(c) Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



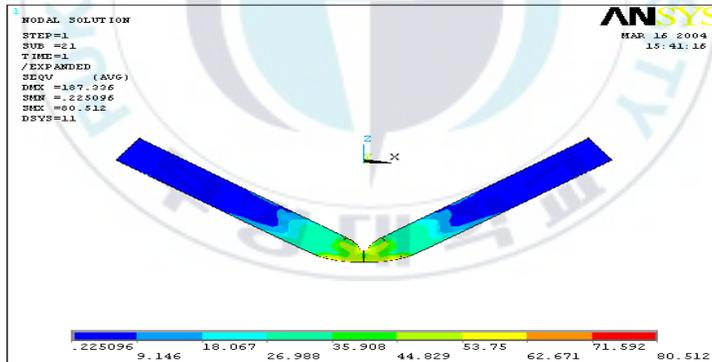
[Case of $2\theta=180^\circ$, $d/t=0.392$ and $t=140\text{mm}$]

Fig. 2.5(d) Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



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

Fig. 2.5(e) Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis



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

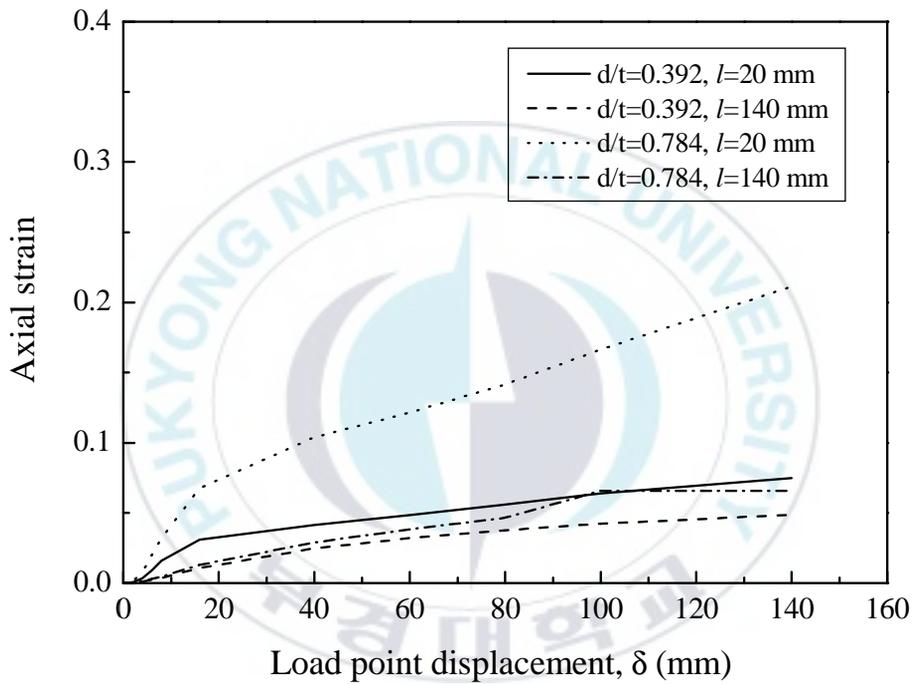
Fig. 2.5(f) Stress distributions of wall thinned pipes by FE analysis

2.3.2 축방향 *strain*의 영향

감육배관의 손상모드에는 감육부에 작용하는 스트레인(strain)의 크기가 지배하는 것으로 생각된다. 그래서 Fig. 2.6(a)~(d)에 해석에 의해 얻어진 배관중양부의 감육부의 인장응력을 받는쪽의 축방향 스트레인을 나타내었다.

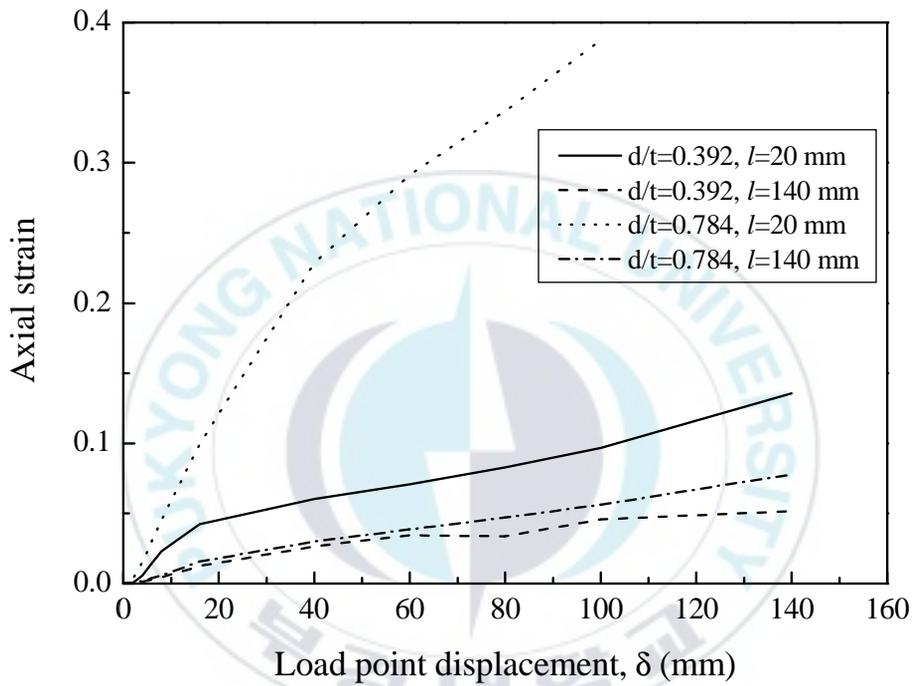
Fig. 2.6(a)는 $2\theta=45^\circ$ 의 경우로서, 감육깊이가 깊고 감육길이가 짧을수록($d/t=0.784$ and $l=10\text{mm}$) 축방향 스트레인이 크게 나타났고, 동일 감육길이일 경우 감육깊이가 깊을수록 또, 동일 감육깊이라면 감육길이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 되는 경향을 나타내었다.

Fig. 2.6(b)는 $2\theta=90^\circ$, Fig. 2.6(c)는 $2\theta=180^\circ$, Fig. 2.6(d)는 $2\theta=360^\circ$ 의 결과로서 Fig. 2.6(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 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.



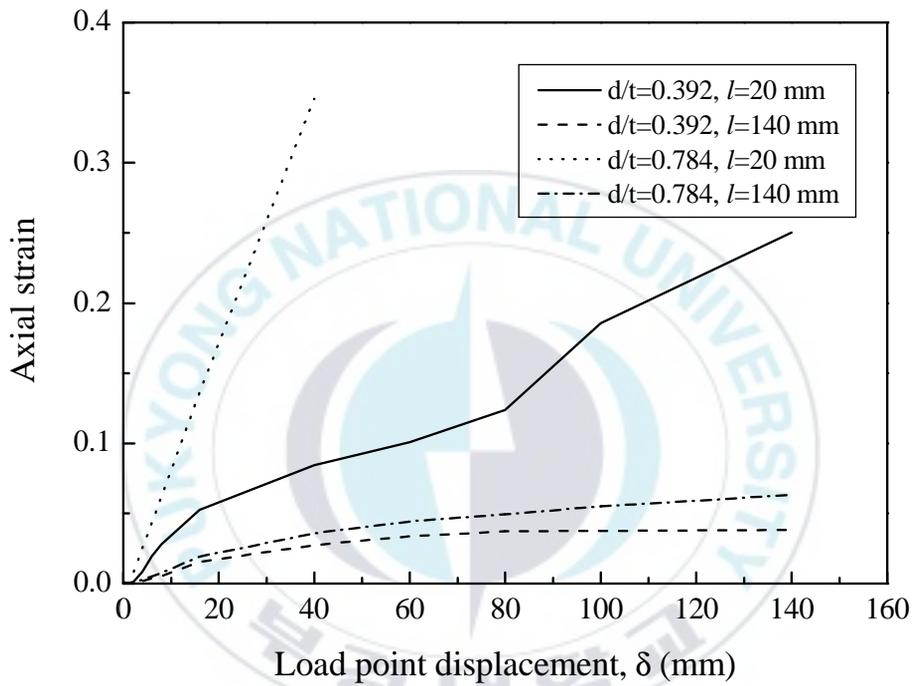
[Case of $2\theta=45^\circ$]

Fig. 2.6(a) Relationship between load point displacement and axial strain



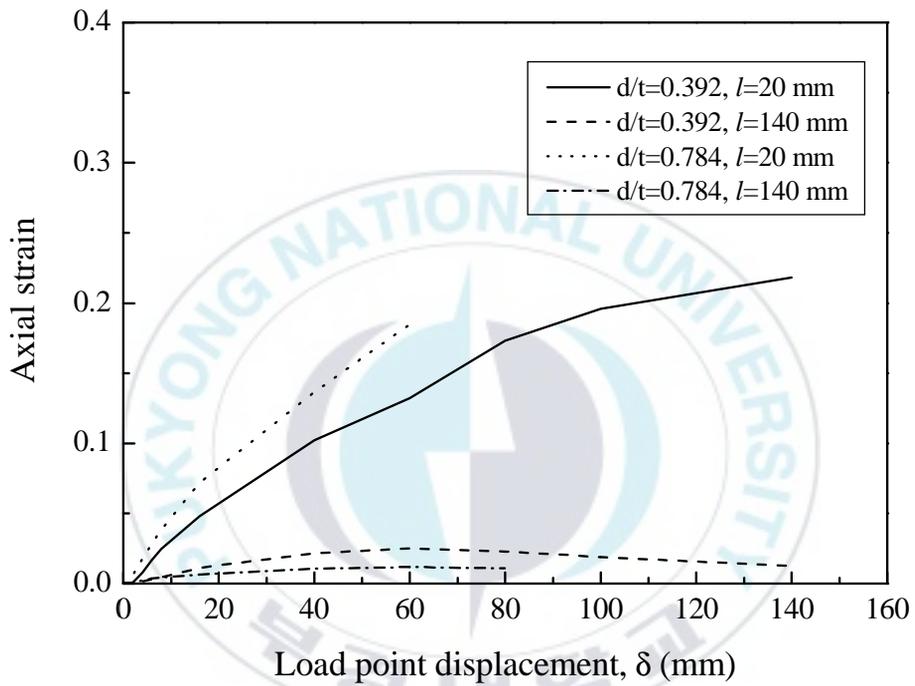
[Case of $2\theta=90^\circ$]

Fig. 2.6(b) Relationship between load point displacement and axial strain



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

Fig. 2.6(c) Relationship between load point displacement and axial strain



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

Fig. 2.6(d) Relationship between load point displacement and axial strain

2.4 요약

탄소강배관이 침식-부식에 의해 두께감소(감육)가 발생하였을 경우를 가정하여 임의적으로 감육결함을 상정한 후 유한요소법에 의한 해석을 수행하여, 감육배관의 건전성을 검토한 결과 다음과 같이 요약 할 수 있다.

(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 감육깊이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 나타났고, ② 동일 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.

제 3 장



내부 및 외부감육의
강도와 변형에 대한
실험 및 해석의 비교

3.1 서론

현대 산업사회의 에너지 수요는 나날이 가일층 증가하고 있는 경향이 있다. 특히, 우리나라는 에너지의 수급을 원자력발전에 크게 의지하고 있는 실정이다. 원자력 플랜트의 건설비용에 막대한 재원이 필요하기 때문에, 이에 원자력 플랜트에 사용되는 기기들의 경년열화에 대해 대체 방안을 수립함으로써 사용 기기들의 수명연장을 가져 올 필요성이 있다. 여러 가지 기기들 중 배관은 상당부분을 차지하고 있다. 따라서 배관에 대한 건전성평가를 통하여 플랜트의 안전성을 확보해야만 한다. 그러나 원자력발전 플랜트 배관은 고온고압수나 증기가 고속으로 흐르기 때문에 Erosion/Corrosion 현상에 의한 국소 감육이 발생할 가능성이 많다. 이러한 국소 감육의 발생으로 인하여 배관시스템의 전체의 신뢰성이 떨어질 가능성이 농후하다. 감육에 의해 발생한 대표적인 원전 사고로는 1986년에 발생한 미국의 Surry 원자력발전소 사고를 비롯하여 가장 최근에 발생한 일본 Mihama 원자력발전소 사고 등이 보고되고 있다^(7,8). 최근 이러한 사고를 계기로 감육에 대한 허용기준안 마련을 위한 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있는 실정이다
(34,38,39,40,42,45-48)

감육은 일반적으로 유체의 이동통로인 배관의 내면에 발생한다. 그러나 이와 같이 배관의 내면에 감육형상을 기계가공으로 도입하는 것이 상당히 어렵고 기타 다른 문제점들로 인하여 지금까지 대체로 배관의 외면에 감육형상을 도입하고 실험 및 해석을 실시하여 오고 있다
(40,42,46-48)

따라서, 본 연구에서는 배관시스템에 발생하는 감육을 형상화하여 배관 외부에 기계가공에 의해 상정한 다음 감육배관의 파손거동 실험을 실시하였다. 그리고 동일한 형상의 감육을 모의한 유한요소해석을 실시하여 실험결과와 비교에 의해 유한요소해석에 의한 타당성을 검증하였다. 또한 유한요소 해석을 통한 내부 및 외부 감육배관의 균열발생을 예측하고 상호 비교하였다. 더욱이, 내부에 감육을 가지는 배관의 유한요소해석을 통하여 외부에 감육을 가지는 배관의 유한요소 해석을 통한 파손거동과 비교함으로써 배관 외부 및 내부에 발생한 감육에 의한 파손거동의 차이를 검토하였다.



3.2 재료 및 실험방법

3.2.1 재료

본 연구에 사용한 배관은 전장 700mm, 외경 48.6mm인 Schedule 80 (두께 5.1mm)의 STS370 탄소강배관(JIS 규격)이다. 이와 같은 배관에 다 깊이 및 길이가 각각 다른 전주감육을 배관의 외부에 기계적으로 가공하였다.

전주감육을 갖는 배관시험편의 개략도를 Fig. 3.1에 나타낸다. Fig. 3.1(a)는 배관의 외부에 감육형상을 모의한 경우로 실험 및 해석에 이용하였다. Fig. 3.1(b)는 배관의 내부에 감육을 상징한 경우로 해석에 이용하였다.

본 연구에 사용된 재료의 기계적성질과 화학성분을 각각 Table 3.1과 Table 3.2에 나타낸다. 또한 배관에 모의된 여러 가지 감육치수를 Table 3.3에 나타낸다. 여기서 공칭두께 t 에 대한 감육된 깊이 d 의 비를 감육비 d/t 로서 나타내었다.

3.2.2 실험 및 해석방법

외부감육을 가지는 배관에 정적하중을 부하하여 4점 굽힘시험을 행하였다. 이때, 부하스팬 길이는 150mm, 지지스팬 길이는 600mm로 하였다. 실험은 크로스헤드 변위속도 1mm/min의 변위제어로 실온 대기 중

에서 실시하였다. 단, 내압은 고려하지 않았다.

또한, 외부 및 내부에 감육을 가지는 배관시험편에 대해 유한요소해석을 실시하였다. 해석은 ANSYS Ver. 7.0을 이용하였다. Mesh model은 육면체 20절점요소와 4면체 10절점요소를 사용하였다. 해석에 있어서는 하중점 위치에서 변위를 제어하고 그 점의 반력해를 부하하중으로 하였다. 해석모델은 대칭성을 고려하여 1/4로 하여 해석하였다. 이때, 영율은 206GPa, 항복응력은 340MPa이다. Mesh modelling의 예를 Fig. 3.2(a) 및 (b)에 각각 나타낸다. Fig. 3.3에는 해석에 이용된 진응력-진변형률 곡선을 나타낸다.



Table 3.1 Mechanical properties

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

Table 3.2 Chemical composition [wt%]

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

Table 3.3 Specimen geometries

	Specimen No.	Thinned length ℓ (mm)	Thinned ratio d/t
Sound pipe (EXP. & FEA)	WTP-1	0	0
	OWT-2	10	
	OWT-3	25	0.8
Outer wall thinning (EXP. & FEA)	OWT-4	120	
	OWT-5		0.6
	OWT-6	10	0.5
	OWT-7		0.2
Inner wall thinning (FEA)	IWT-2	10	
	IWT-3	25	0.8
	IWT-4	120	
	IWT-5		0.6
	IWT-6	10	0.5
	IWT-7		0.2

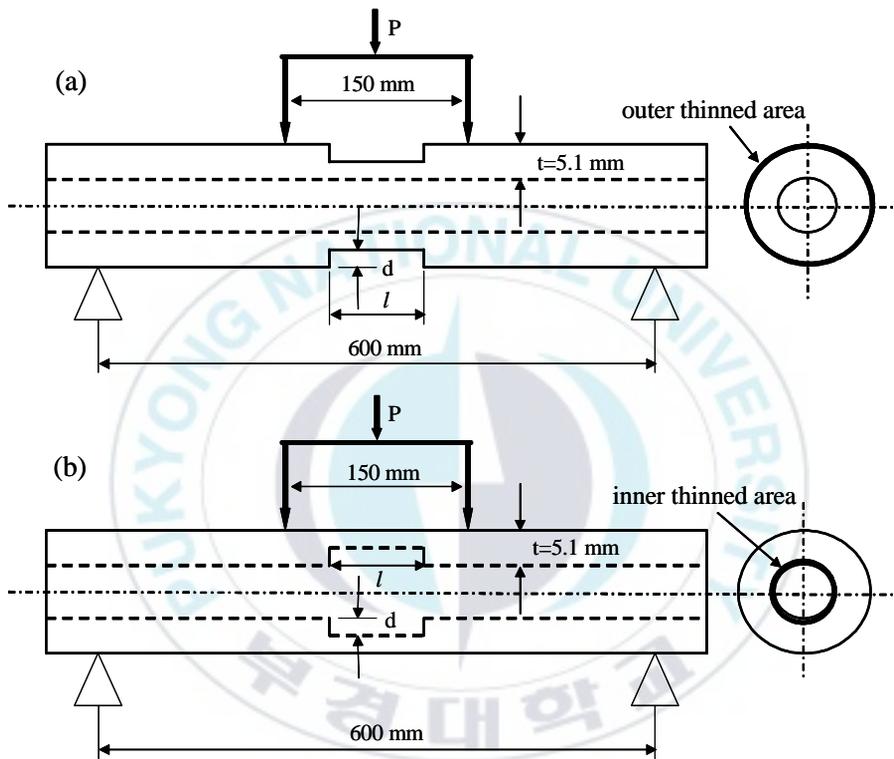


Fig. 3.1 Schematic of dimensions of a wall thinned pipe specimen and four-point bending test system

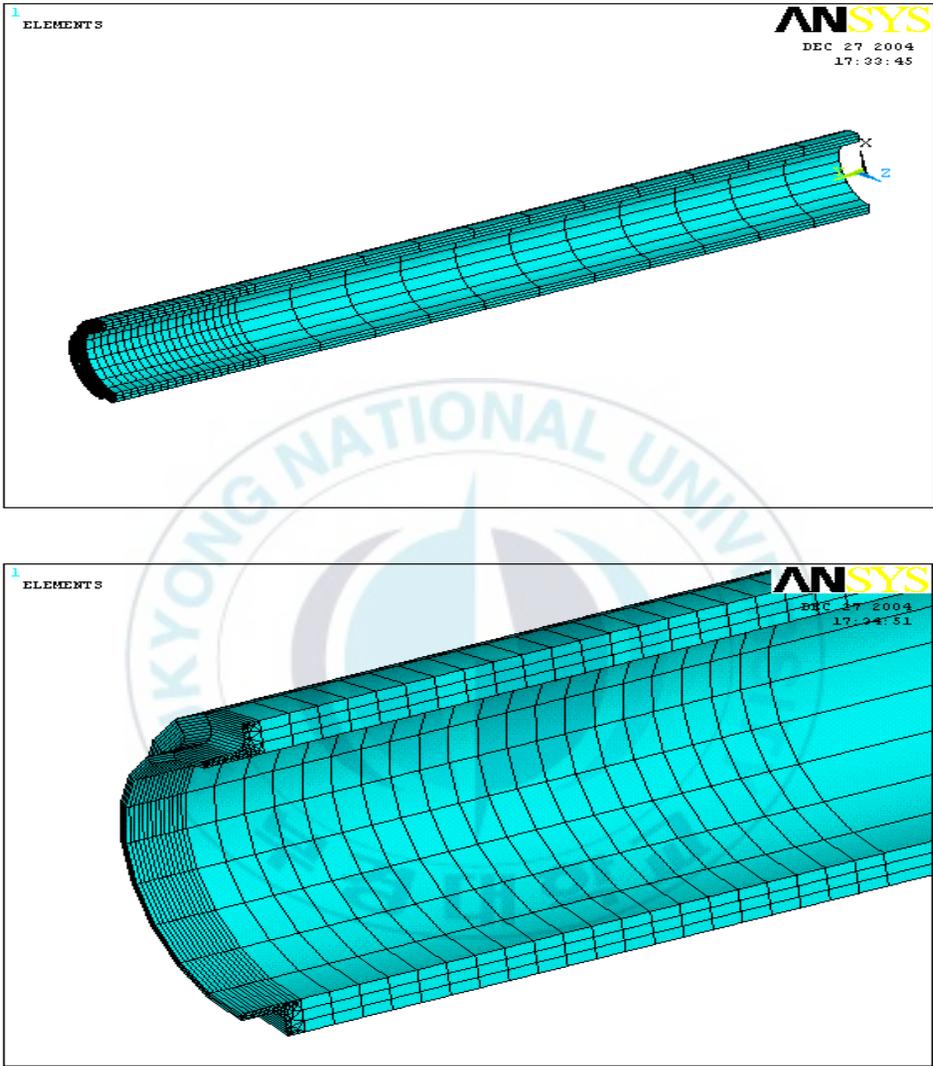


Fig. 3.2(a) Examples of FEM model

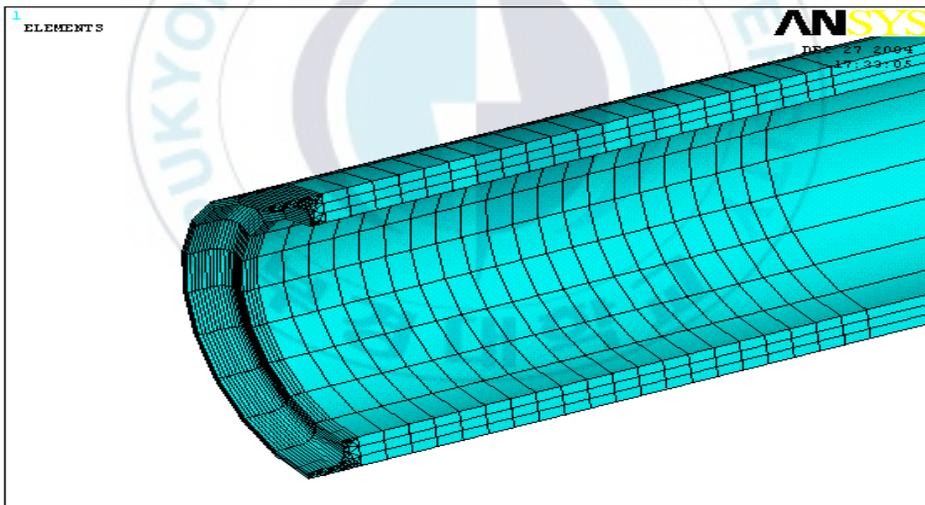
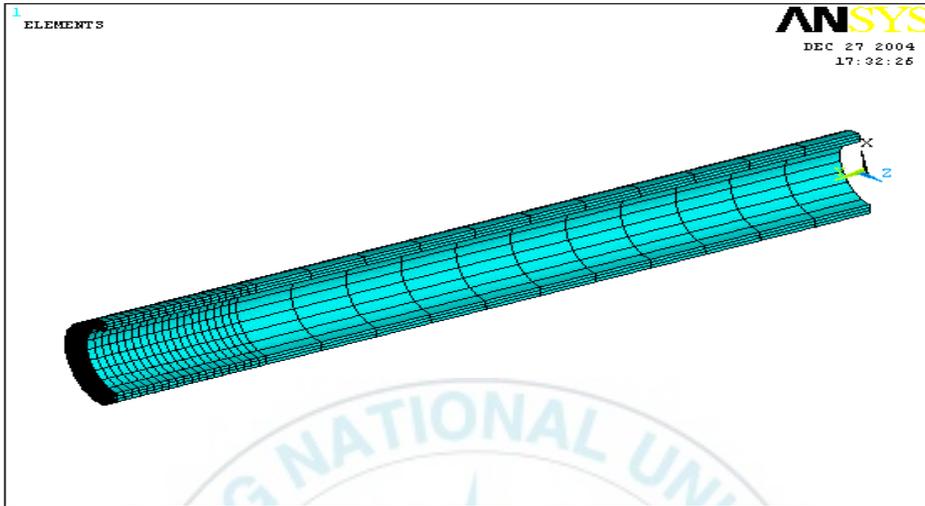


Fig. 3.2(b) Examples of FEM model

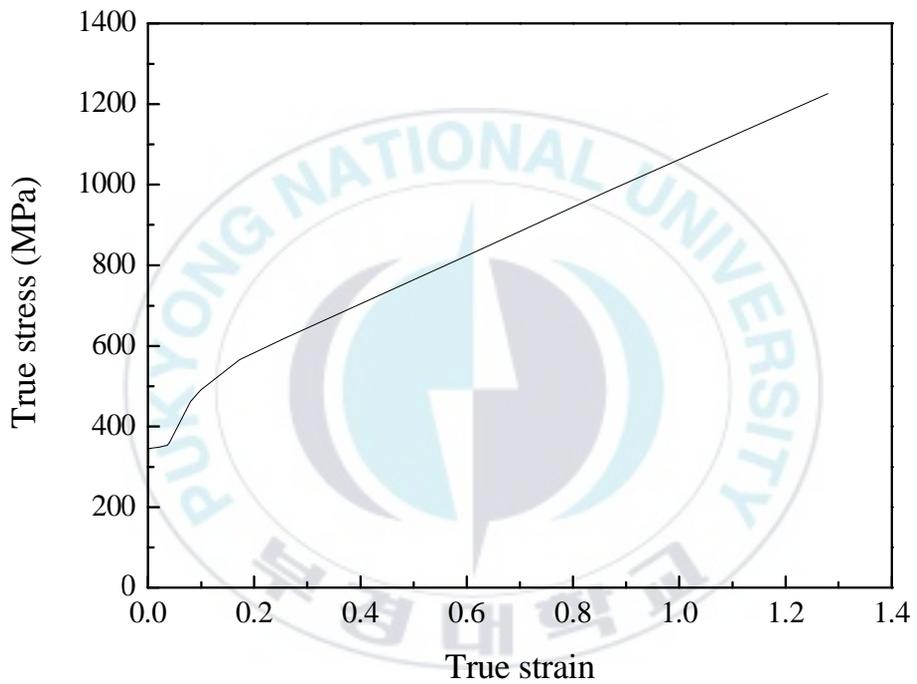


Fig. 3.3 True stress-true strain curve used in FE analysis

3.3 결과 및 고찰

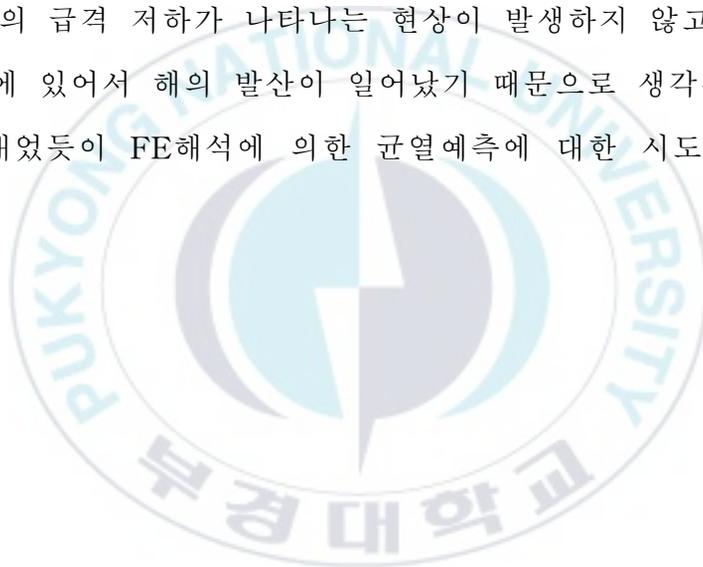
3.3.1 외부감육배관의 강도에 대한 실험과 해석결과의 비교

각 감육배관의 파손형태는 편평화(Ovalization), 좌굴(Buckling), 균열 발생(Crack initiation)으로 분류되었다. Fig. 3.4(a)는 감육비 $d/t=0.8$ 및 Fig. 3.4(b)는 감육길이 $l=10\text{mm}$ 인 외부감육배관의 실험과 FE해석으로부터 얻어진 굽힘모멘트-변위선도를 각각 나타낸다. 결과 속에는 감육결합을 상정하지 않은 건전한 배관(sounded pipe, WTP-1)의 결과를 함께 나타내었다. 그림 속에서 실선은 실험결과, 파선은 해석결과를 각각 나타낸다. 감육비 $d/t=0.8$ 로 고정하고 감육길이를 다르게 한 Fig. 3.4(a)에 있어서, 동일한 감육비를 가지는 경우 감육길이의 변화에 따라 파손의 양식은 다르게 나타났다. 즉, 감육이 되지 않은 $l=0\text{mm}$ 의 건전한 배관의 경우에는 편평화 파괴가 나타났고, $l=25\text{mm}$ 이상인 경우에는 좌굴에 의해 파괴되었다. 특히, $l=10\text{mm}$ 일 경우에는 균열이 발생하였다.

감육길이를 $l=10\text{mm}$ 로 고정하고 감육비를 다르게 한 Fig. 3.4(b)에 있어서, 동일한 감육길이를 가지는 경우 감육비의 변화에 따라 파손의 양식은 다르게 나타났다. 즉, 감육이 되지 않은 $l=0\text{mm}$ 의 건전한 배관의 경우와 $d/t=0.2$ 까지는 편평화 파괴가 나타났고, $d/t=0.5, 0.6$ 및 0.8 에서는 균열에 의해 파괴되었다. 이상의 결과로부터 동일한 감육비를 갖는 경우, 감육길이가 짧은 경우에는 균열에 의해, 또 감육길이가 긴 경우에는 좌굴에 의해 파손의 양식이 결정되고 있음을 알 수 있다. 또한, 동일한 짧은 감육길이를 가지는 경우, 감육비가 깊어질수록 균열에 의해 파손이 결정

되어졌다. 짧은 감육길이($t=10\text{mm}$) 및 깊은 감육비($d/t=0.8$)를 대상으로 정리된 Fig. 3.4(a) 및 (b)의 결과로부터 전체적으로 실험결과와 해석의 결과가 좋은 일치를 나타냄으로서, 긴 감육길이에 대한 여러 가지 감육비 및 얇은 감육비에 대한 여러 가지 감육길이에 있어서도 동일한 양상의 결과가 추정된다. 그러므로 감육을 가지는 배관에 대해 감육비 및 감육길이 영향은 미치는 파라미터라는 것을 알 수 있다.

단, 실험의 결과에서 균열이 발생한 경우에 대해 해석에서는 균열 발생 후 하중의 급격 저하가 나타나는 현상이 발생하지 않고 있다. 이것은 FE해석에 있어서 해의 발산이 일어났기 때문으로 생각된다. 그래서 뒤에 나타내었듯이 FE해석에 의한 균열예측에 대한 시도를 실시하였다.



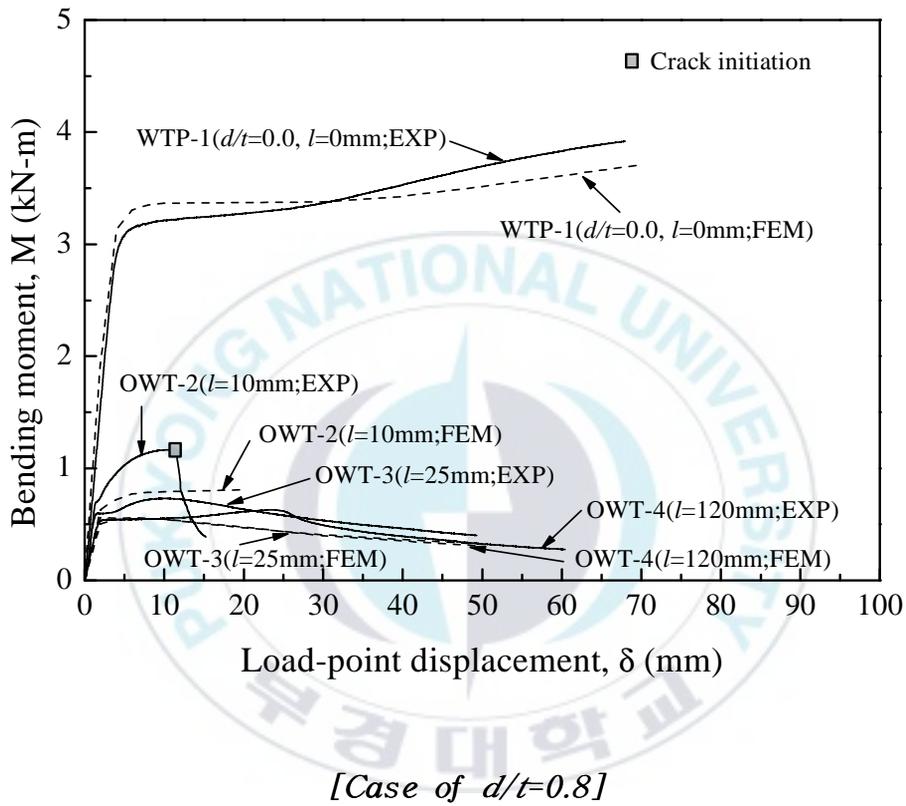


Fig. 3.4(a) Relationship between moment and displacement obtained from experimental and analysis of pipes with outer wall thinning

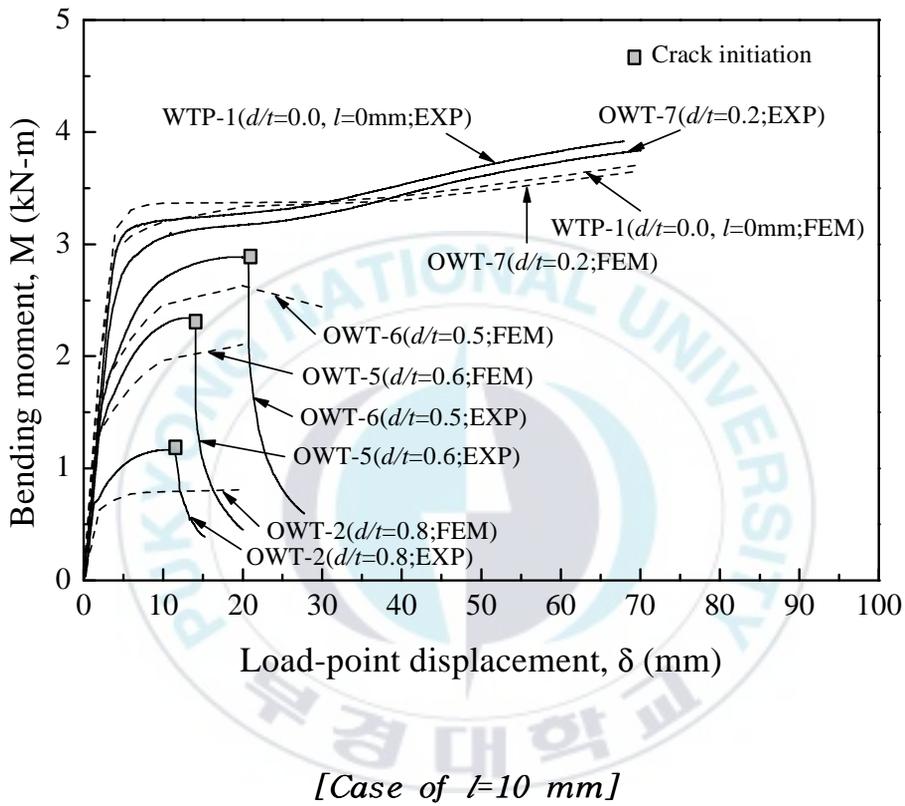


Fig. 3.4(b) Relationship between moment and displacement obtained from experimental and analysis of pipes with outer wall thinning

3.3.2 내부 및 외부감육의 감육위치의 영향

사실, 배관의 감육문제는 대개 유체의 통로가 되는 배관 내부에서의 침식/부식에 의해 야기되는 문제이다. 그러나 배관 내부에 감육결함을 상정하기가 까다로운 점을 들어 배관 외부에 감육결함을 가공하고 결과를 도출하였다. 따라서 외부에 감육결함을 가공한 외부감육의 결과를 실제 발생하는 배관 내부감육의 대응으로 적용 가능한지의 여부를 알 필요가 있다. 그래서 Fig. 3.5에는 상기 Fig. 3.4에 나타낸 외부감육에 대한 내부감육의 결과를 비교하여 나타내었다. 이미 Fig. 3.4에서 외부감육의 결과가 실험과 해석에 있어서 좋은 일치를 나타내었고 상기와 같은 이유에 의해서 외부감육의 해석결과에 대한 내부감육의 해석결과를 비교하는 것으로 하였다.

Fig. 3.5(a)는 감육비 $d/t=0.8$ 로 일정하게 하여 감육길이를 달리한 경우이고, Fig. 3.5(b)는 감육길이 $l=10\text{mm}$ 로 일정하게 하고 감육비를 여러 가지로 달리한 경우의 굽힘모멘트-변위 선도 결과들이다. 그림 속에는 건전배관의 결과도 함께 나타내었다(일점쇄선). 실선은 외부감육의 결과를 파선은 내부감육의 결과를 각각 나타낸다. 결과로부터 내부감육의 해석결과가 외부감육의 해석결과와 거의 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 외부감육의 최대모멘트보다 내부감육의 최대모멘트가 다소 높게 나타나는 양상을 보였지만 전반적으로 외부감육의 결과와 내부감육의 거동결과가 양호한 일치를 나타내고 있고 따라서, 외부감육의 결과를 내부감육의 결과로서 적용 가능하다고 판단된다. 단, 여러 가지 배관구경

(diameter), 감육비 및 감육길이에 대해서 더 많은 실험과 해석에 대한 결과의 도출이 요구되며 금후 검토해 볼 여지가 있다.

Fig. 3.6, 3.7 및 3.8에는 유한요소해석으로부터 구한 건전배관과 외부 및 내부감육배관의 감육부에 나타난 시험종료 시의 변형에 따른 파손모드의 양상을 각각 나타낸다.

Fig. 3.6은 감육을 가지지 않는 건전한 배관의 변형을 나타낸다. Fig. 3.7(a)~(f)는 외부감육부의 결과를, Fig. 3.8(a)~(f)는 내부감육부의 결과를 각각 나타낸다.



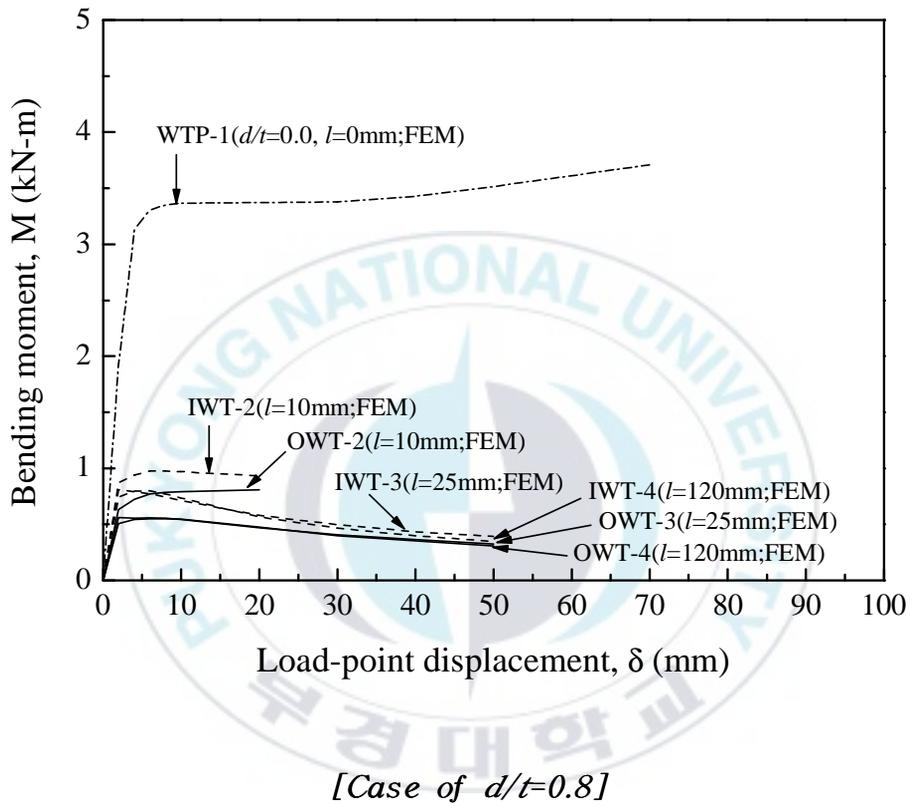


Fig. 3.5(a) Comparison between inner and outer wall thinning for moment and displacement obtained from FE analysis of pipes with local wall thinning

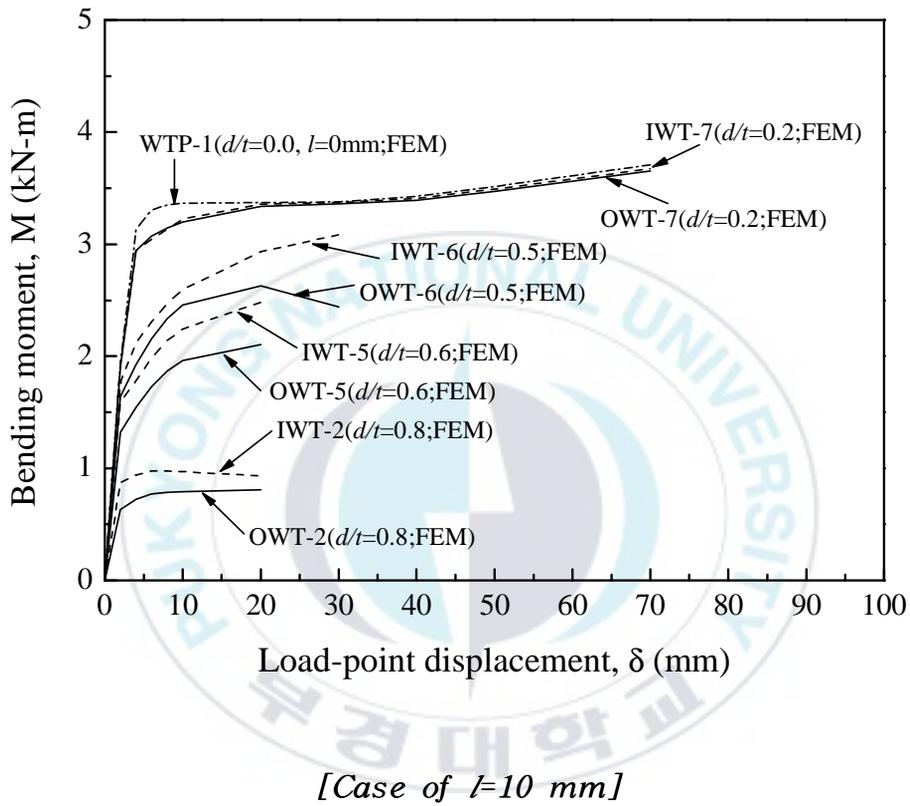


Fig. 3.5(b) Comparison between inner and outer wall thinning for moment and displacement obtained from FE analysis of pipes with local wall thinning

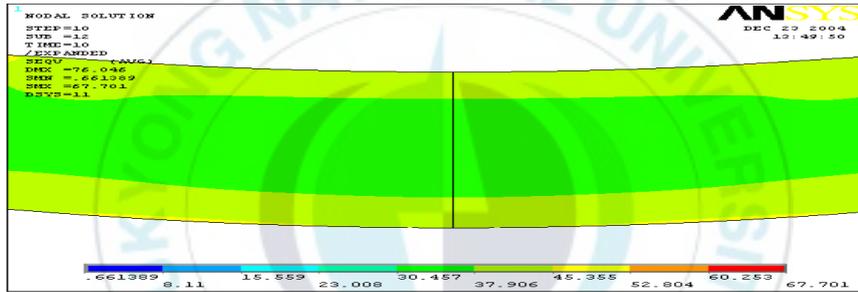
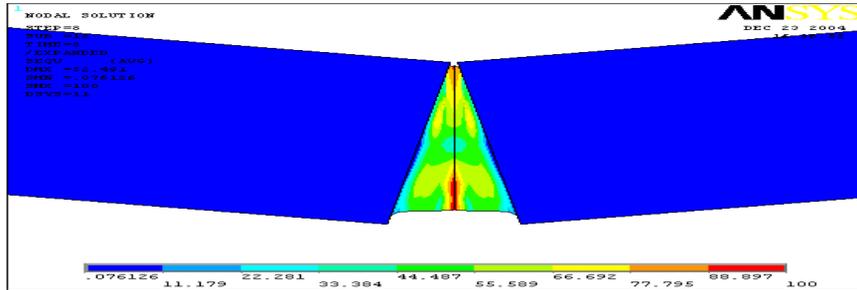
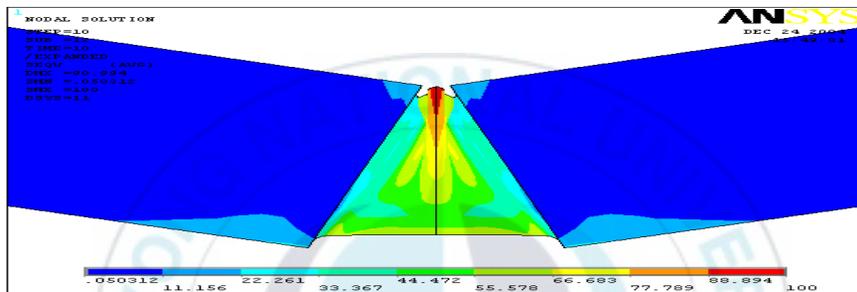


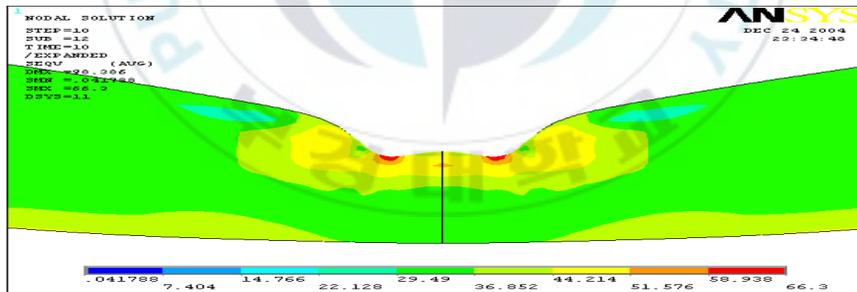
Fig. 3.6 Stress distribution and failure mode occurred in a sound pipe



(a) Outer wall thinning; $d/t=0.8$ and $\ell =10$ mm

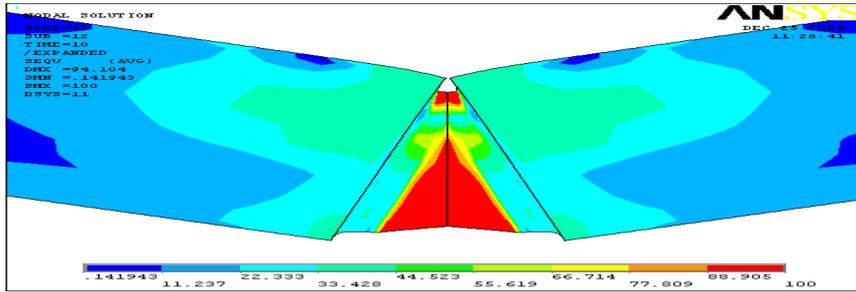


(b) Outer wall thinning; $d/t=0.8$ and $\ell =25$ mm

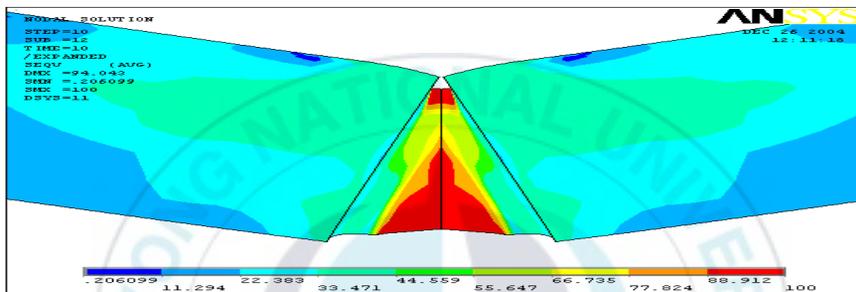


(c) Outer wall thinning; $d/t=0.8$ and $\ell =120$ mm

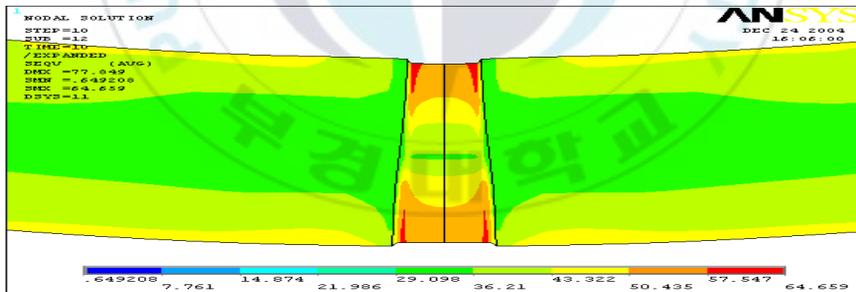
Fig. 3.7 Stress distribution and failure mode occurred in the outer wall thinning



(d) Outer wall thinning; $d/t=0.6$ and $l = 10$ mm

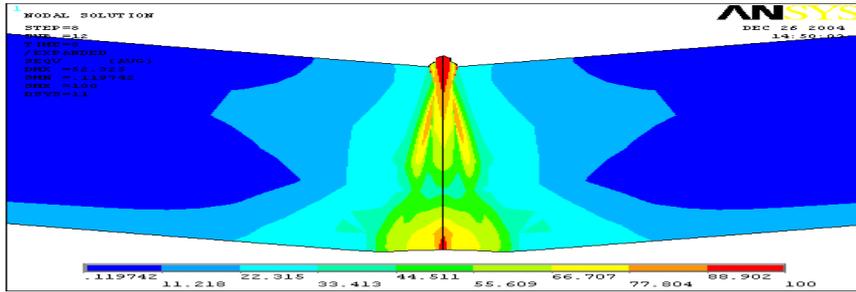


(e) Outer wall thinning; $d/t=0.5$ and $l = 10$ mm

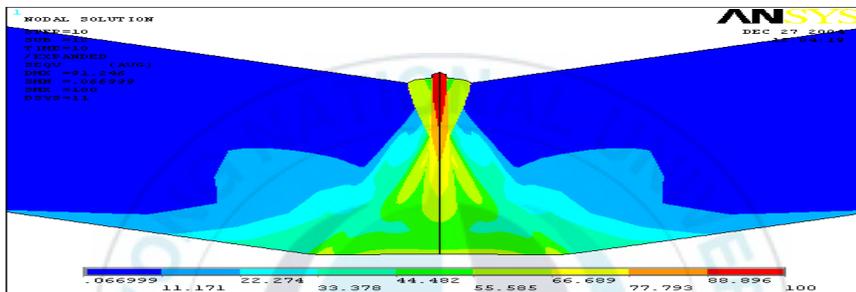


(f) Outer wall thinning; $d/t=0.2$ and $l = 10$ mm

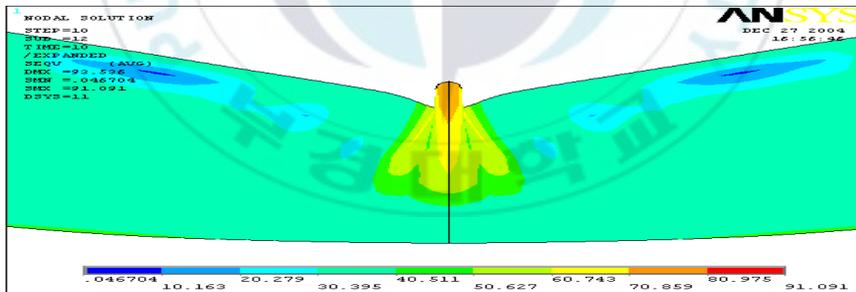
Fig. 3.7 Stress distribution and failure mode occurred in the outer wall thinning



(a) Inner wall thinning; $d/t=0.8$ and $\ell = 10$ mm

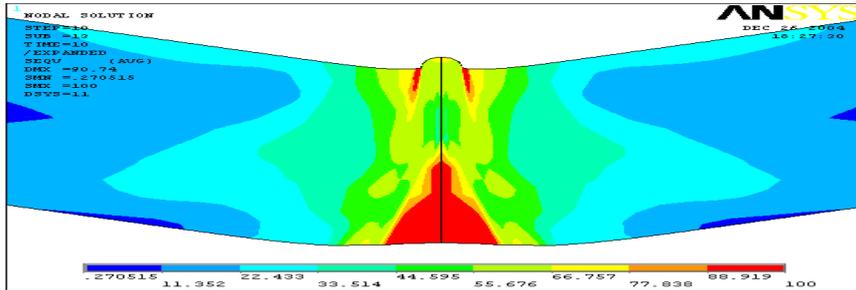


(b) Inner wall thinning; $d/t=0.8$ and $\ell = 25$ mm

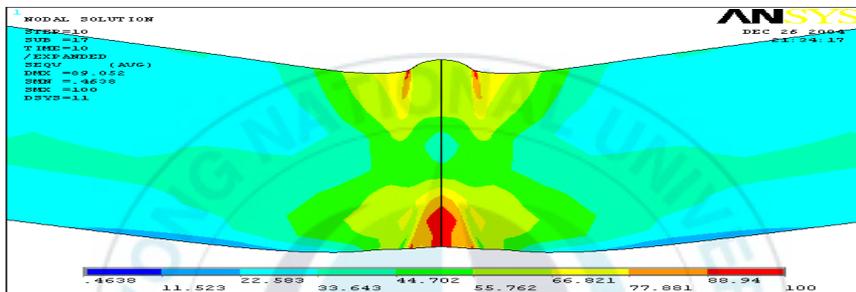


(c) Inner wall thinning; $d/t=0.8$ and $\ell = 120$ mm

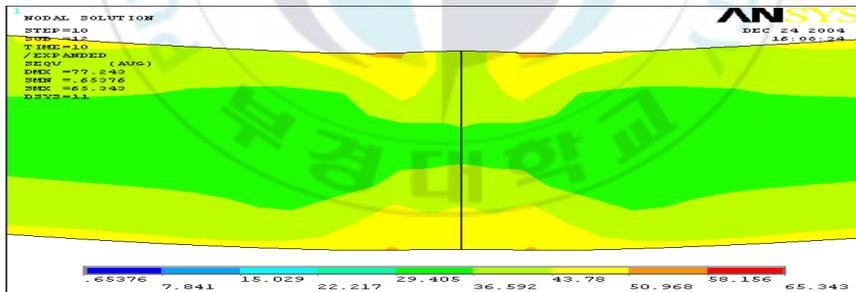
Fig. 3.8 Stress distribution and failure mode occurred in the inner wall thinning



(d) Inner wall thinning; $d/t=0.6$ and $l=10$ mm



(e) Inner wall thinning; $d/t=0.5$ and $l=10$ mm



(f) Inner wall thinning; $d/t=0.2$ and $l=10$ mm

Fig. 3.8 Stress distribution and failure mode occurred in the inner wall thinning

3.3.3 내부 및 외부감육부에서의 균열발생의 예측

전절에도 나타내었듯이 외부감육의 경우 실험에 있어서 균열이 발생하여 하중의 급격한 저하가 나타났지만 동일 치수의 해석에 있어서는 균열발생에 의한 하중의 저하가 나타나지 않아 균열의 발생여부를 판단하기가 어려웠다. 따라서 이 절에서는 외부 및 내부감육에 대해서 균열 발생에 대한 예측을 시도하였다.

Miyazaki 등⁽⁴⁹⁾은 Weiss 이론⁽⁵⁰⁾을 확장하여 다축응력장의 진파괴연성(ϵ_{mf})의 변화로부터 균열을 예측하는 방법을 제안하였다. 이 예측법은 최대 감육부에 발생한 상당변형률(ϵ_{ms})이 다축응력하의 진파괴연성보다 클 때 최대 감육부에 균열이 발생한다고 평가한다.

아래에 나타내는 식 (3.1)은 Miyazaki 등에 의해 제안된 진파괴연성을 구하는 식이다.

$$\epsilon_{mf} = \frac{\left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\omega m \sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n}{\left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right) + \lambda \left(\frac{\sigma_{uf}}{\sigma_0}\right)^n} \epsilon_{uf} \quad (3.1)$$

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, σ_1 , σ_2 및 σ_3 는 주응력들을, σ_0 는 항복응력을 각각 나타낸다. σ_0 는 340MPa이다.

σ_{yf} 는 단축응력 조건하에서의 진파괴응력을 나타낸다. 본 논문에서는 $\sigma_{yf}=1,065\text{MPa}$ 이다. Ramberg-Osgood식⁽⁵¹⁾의 계수로서 $\lambda=20.4$, $n=3.11$ 이다.

다축응력의 정도는 배관의 변형에 의존한다. 그런 까닭으로, 감육부의 중앙부에서의 진파괴연성(ϵ_{mf}) 또한 변형에 의존한다. 게다가, 상당변형율(ϵ_{ms})은 배관의 변형과 더불어 증가한다. 따라서 Weiss의 이론에 근거하여 균열은 감육부에서 발생하는 상당변형율이 식 (3.1)로 주어지는 진파괴연성을 능가하는 점에서 발생한다고 가정한다.

Fig. 3.9에는 외부감육(a, c, e) 및 내부감육(b, d, f)에서 각각 균열발생을 예측한 결과를 나타내었다. 그림에서 점선은 파괴연성을, 실선은 상당변형율을 각각 나타낸다.

Fig. 3.9(a)와 (b)는 감육비 $d/t=0.8$, 감육길이 $l=10\text{mm}$ 인 OWT-2와 IWT-2에 대하여 하중점 변위(δ)의 함수로서 식 (3.1)에 의하여 계산된 상당변형율과 파괴연성을 각각 나타낸다.

Fig. 3.9(a)의 외부감육 OWT-2의 경우는 실험결과에 있어서는 균열은 $\delta_c=11\text{mm}$ 에서 발생한 반면, 해석에 있어서는 $\delta_c=10\text{mm}$ 에서 파괴연

성과 상당변형율이 교차하여 균열발생이 예측되었다. Fig. 3.9(b)의 내부감육 IWT-2의 경우에는 해석에 있어서 $\delta_c=13\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형율이 교차하여 균열발생이 예측되었다.

감육길이가 짧을 경우에 배관시험편은 균열에 의해 파손되는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 이것은 감육부에서 다축성이 응력 억제에 의해 증가하기 때문이다.

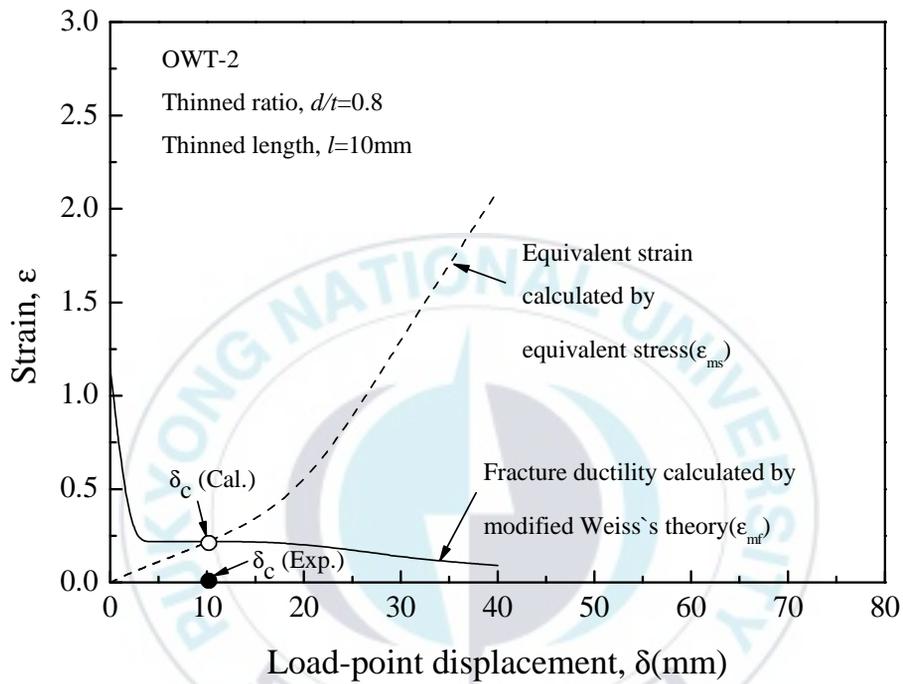
Fig. 3.9(c)와 (d)는 감육비 $d/t=0.6$, 감육길이 $l=10\text{mm}$ 인 OWT-5와 IWT-5에 대한 결과이다. 또한, Fig. 3.9(e)와 (f)는 감육비 $d/t=0.5$, 감육길이 $l=10\text{mm}$ 인 OWT-6과 IWT-6에 대한 결과이다. Fig. 3.9(c) 및 (e)에 나타난 OWT-5 및 6의 실험결과는 균열에 의한 파손이 발생하였고, 이때 균열은 $\delta_c=13\text{mm}$ 및 $\delta_c=20\text{mm}$ 에서 각각 발생하였다. 이에 대해, 해석에 있어서는 Fig. 3.9(c)와 Fig. 3.9(e)의 외부감육에 있어서는 각각 $\delta_c=10\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형율이 교차하고 있다. 반면, Fig. 3.9(d)와 (f)의 내부감육에 있어서는 각각 $\delta_c=18\text{mm}$ 및 $\delta_c=23\text{mm}$ 에서 파괴연성과 상당변형율이 교차하고 있다.

Fig. 3.9에서 거의 실험에 비해 해석에서 균열이 빨리 발생하는 것으로 나타났고, 해석치가 실험치에 비해 더 보수적으로 나타나고 있다. 특히, 감육비 d/t 가 작아질수록 균열발생점에 대한 실험과 해석에서의 오차는 커졌다. 이와 같이 균열발생점에 대한 실험치와 해석치 사이에서의 오차는 해석에 있어서 진응력과 진변형율 사이의 관계를 Ramberg-Osgood식에 다직선 근사한 후 Weiss의 이론을 적용하였기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 또한, 외부감육에 비해 내부감육의 균열예측 결과가 오히려 외부감육의 실험결과에 근접하고 있다.

여기에 대해서는 금후 여러 가지 경우들에 대해서 좀더 세밀하게 추가적으로 검토해 볼 여지가 있는 것으로 사료된다.

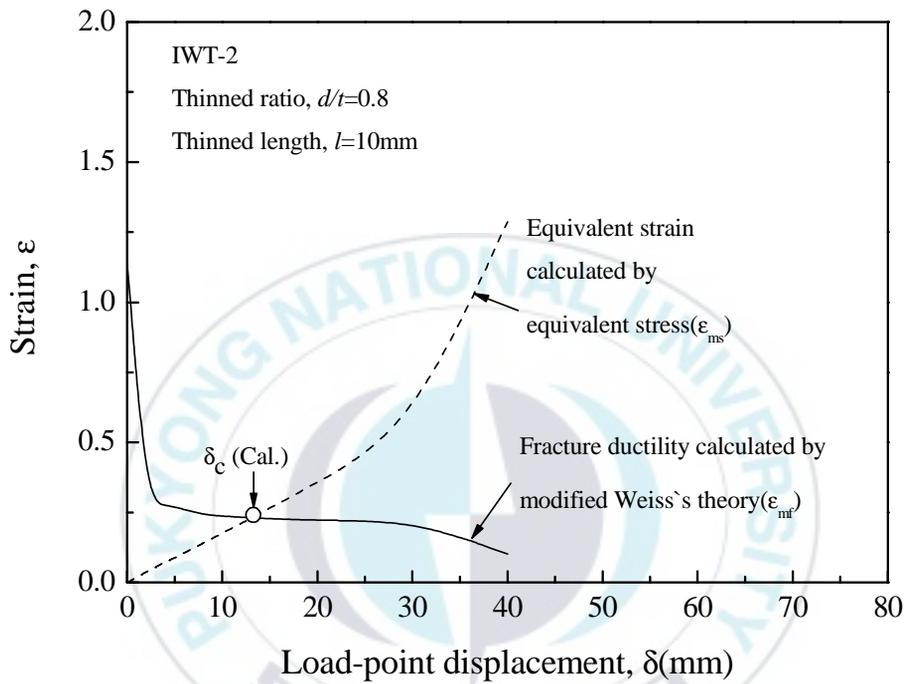
이상으로부터, 결과적으로 식 (3.1)에 의하여 표현된 진과괴연성과 상당변형율을 사용함으로써 균열발생점을 평가하는 것이 가능하다고 판단된다.





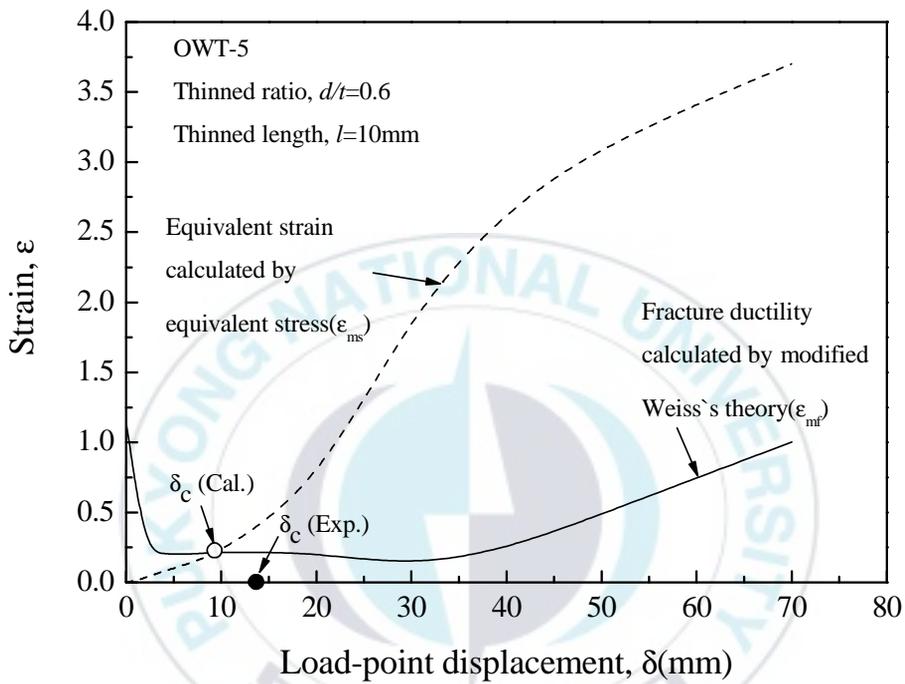
[Outer wall thinning; OWT-2]

Fig. 3.9(a) Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation



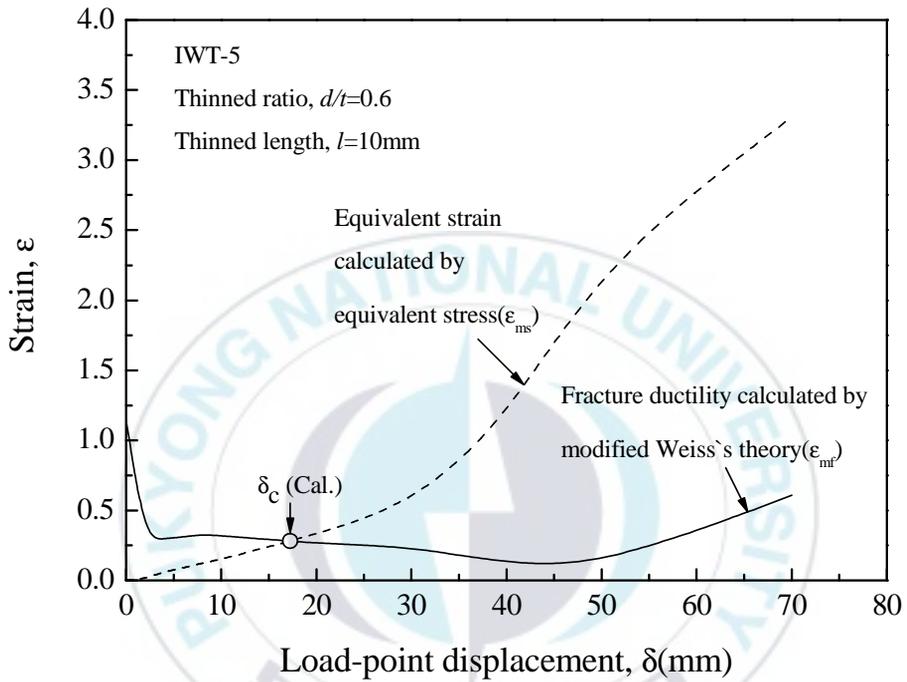
[Inner wall thinning; IWT-2]

Fig. 3.9(b) Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation



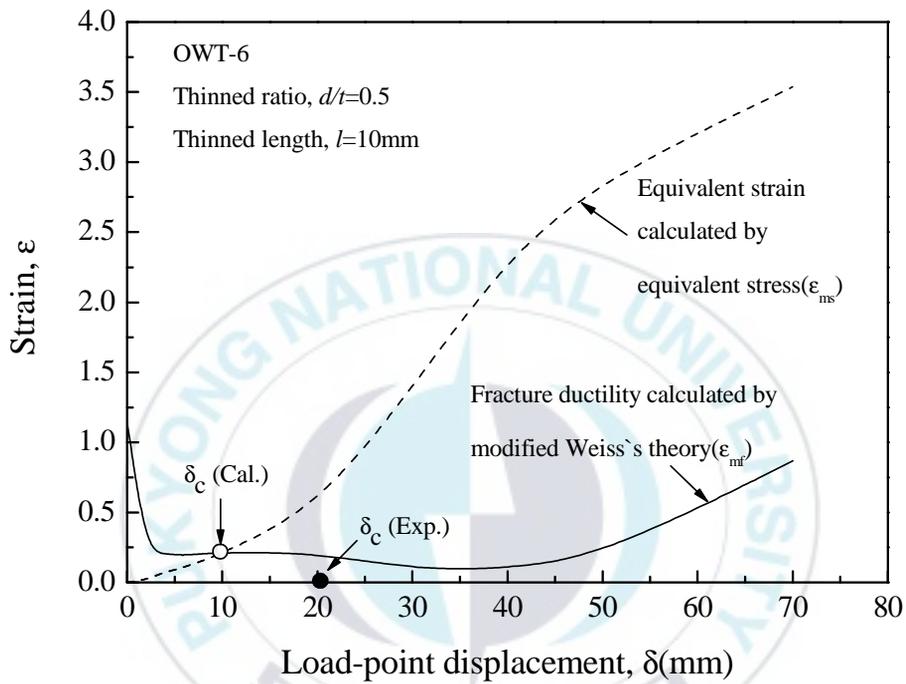
[Outer wall thinning; OWT-5]

Fig. 3.9(c) Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation



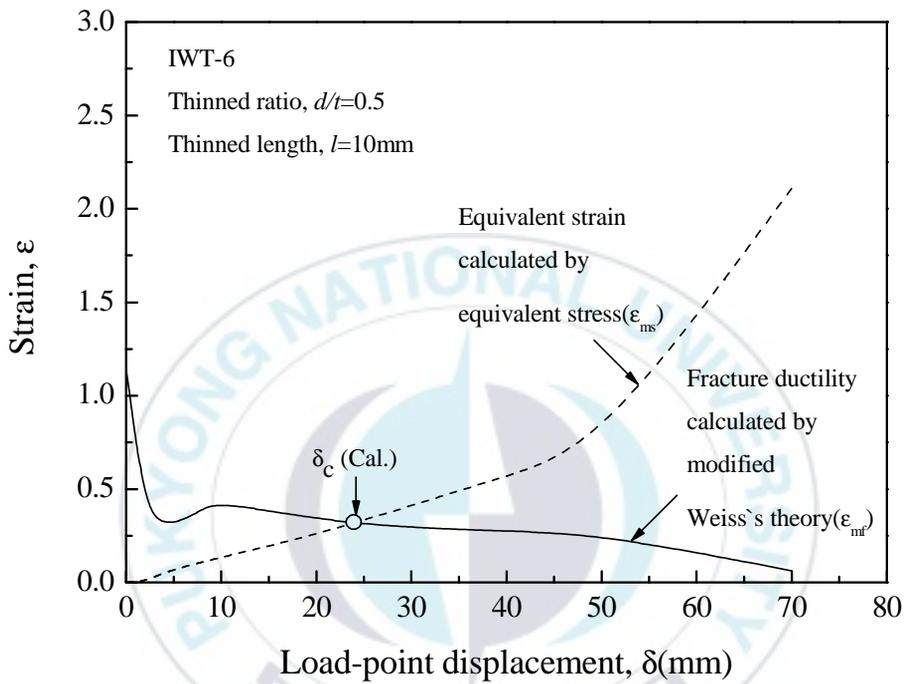
[Inner wall thinning; IWT-5]

Fig. 3.9(d) Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation



[Outer wall thinning; OWT-6]

Fig. 3.9(e) Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation



[Inner wall thinning; IWT-6]

Fig. 3.9(f) Relationship between equivalent strain and fracture ductility as a function of displacement for the prediction of crack initiation

3.4 요약

일반적으로 감육현상은 배관의 내부에서 발생한다. 그러나, 실험 증명을 위한 가공상의 어려움으로 말미암아 배관의 외부에 결함을 가공하여 그 결과를 내부감육에 적용 가능한지의 여부를 알아보고자, 배관의 외부와 내부에 감육결함을 모의하고 실험 및 해석을 통해서 비교, 검토한 결과 다음과 같은 요약을 할 수 있다.

(1) 비교적 짧은 감육길이를 가진 배관은 균열에 의해 파손된다는 것을 알 수 있었고, 배관의 파손에 미치는 감육의 영향은 감육길이 및 감육비에 의존하였다. 또한, 다축 조건하에서 진과괴연성에 대한 평가를 이용함으로써 감육부 중앙에서 균열의 발생이 예측 가능하다는 것을 나타내었다.

(2) 외부감육과 내부감육의 결과가 거의 일치하는 경향을 나타냄으로 외부감육의 결과를 내부감육의 결과로 대체 적용 가능함을 나타내었다.

단, 균열발생의 예측에 있어서는 금후 다양한 각도에서의 추가적인 검토가 필요하다.

제 4 장

감 육 된 배 관 용 점 부 의 강 도 와 변 형

4.1 서론

발전시설 등의 에너지 관련 플랜트에 사용되는 배관은 플랜트의 성능이나 안전성 유지에 있어서 중요한 설비의 일부이며, 배관의 건전성 유지를 위한 예방 및 보전기술에 대한 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 파단사고로부터 주요 기기 및 구조물을 보존하기 위한 엄격한 기술기준을 적용하여 설계, 제작되고 있으며 운전 중에도 가동중검사(in-service inspection, ISI)를 통해 건전성을 확인하고 있다. 그러나 이러한 기술기준에도 불구하고 에너지 관련 플랜트의 배관에 있어서는 그 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화 손상을 받을 우려가 있으며, 최근 국부적인 감육(배관의 두께가 감소하는 현상)현상⁽⁴⁰⁾이 국내외적으로 보고되어지고 있는 실정이다. 대표적인 사례로서는 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고^(7,8) 등이 보고 되어있고, 국내에서도 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서도 배관 감육 손상이 발생되고 있는 실정이다⁽³³⁾.

이상과 같이 배관의 감육문제는 세계 각 국에서 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 등이 검토되고 있다^(26,38,39).

배관 건전성 평가법은 취성과파괴 여부를 평가하는 선형탄성과괴역학(LEFM)과 연성과파괴 여부를 평가하는 탄성과괴역학(EPFM) 등이 있다. 탄소성과괴역학 영역에서는 균열구동력도표(Crack Driving Force

Diagram; CDFD)를 이용한 평가법 및 J 적분과 찢김계수(Tearing Modulus,T)를 이용한 J-T해석법 등이있고 전변형률과손평가도표(Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram; DPFAD)를 이용한 평가법이 있으며 배관의 국부넥킹 시의 평가법인 한계하중법(limit load method) 및 무차원 소성역 매개변수(DPZP)법 등이있다. 또한 원자력 발전소에서는 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec.XI 에 의하여 자체적으로 평가하는 방법을 수행하고 있다^(21,22,25-27).

그러나, 배관에 국부적인 감육부가 발생하였을 때의 배관의 강도와 파괴기구를 해명하기 위한 계통적인 실험 연구의 예는 극히 적고, 또한 그 특성의 해명이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다⁽³⁴⁻³⁶⁾. 이러한 배관의 감육문제는 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 안 등이 검토되어지고 있다^(7,26,33,38,39). 실질적으로 배관에 발생하는 감육의 문제는 배관의 내부이며, 내압에 의한 영향을 크게 받을 것이다. 고압탄소강배관에 기계적으로 감육부를 가공하여, 급힘하중 하에서 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는 가를 정량적으로 해명하기 위한 실험 연구가 보고되어지고 있다.

그러나, 실제 구조물에 있어서는 배관을 연결시키기 위하여 용접을 행하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 용접부의 용접응력은 구조물의 취성, 파괴강도, 피로, 좌굴, 진동, 침식-부식 등에 영향을 주는 중요한 요인이 되며⁽⁵²⁻⁵⁴⁾ 용접부가 침식-부식에 의해 두께감소가 발생할 것을 가정하여 고압탄소강배관을 용접한 후 그 용접부에 감육결함을 기계적으로 외부에

가공하였다. 이와 같이, 배관용접부에 상정한 감육의 형상과 정도에 따른 용접배관의 손상모드와 강도를 구하고 용접하지 않은 감육배관의 결과와 상호 비교, 검토하였다.

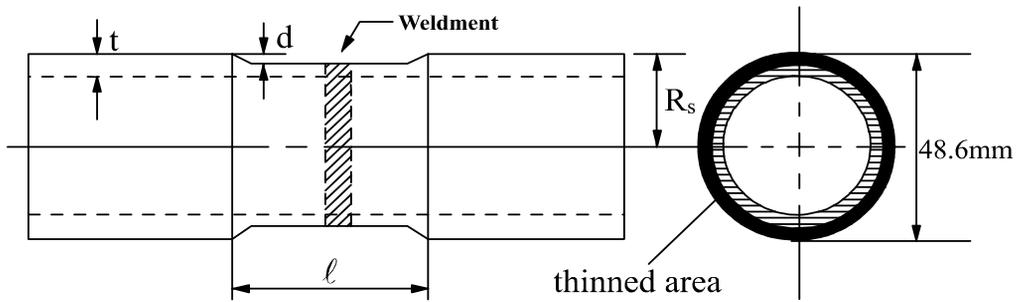


4.2 재료 및 실험방법

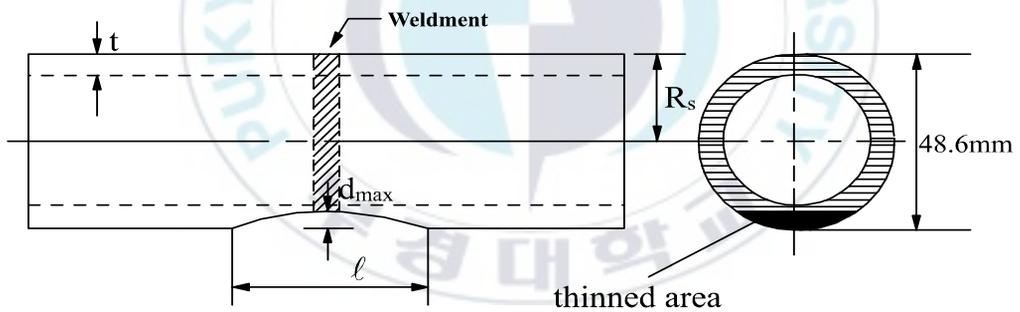
4.2.1 재료

본 실험에 사용된 재료는 직경 48.6 mm인 Schedule 80 SPPH38 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS Standard)이다. 그 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 4.1과 4.2에 나타낸다.

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 사용한 시험편의 형상을 Fig. 4.1(a)와 (b)에 나타낸다. 파괴거동에 미치는 감육 위치의 영향은 고려되지 않았다. Fig. 4.1(a)는 360°전주에 걸쳐서 감육 가공을 한 경우로서 용접을 하지 않은 배관시험편 및 용접배관시험편을 나타낸다. 또한 Fig. 4.1(b)는 감육각도(θ)를 가지는 부분적으로 감육한 시험편으로서 길이방향(l)으로 감육의 깊이가 다르도록 가공하였고, 중심부에서의 감육의 깊이가 d_{max} 가 되게 한 용접하지 않은 배관시험편 및 용접배관시험편을 각각 나타낸다. Table 4.3에는 Fig. 4.1(a)와 (b)에 도식적으로 나타낸 시험편의 각각의 치수 및 실험으로부터 구한 최대모멘트의 결과를 나타낸다.



(a) 360° circumferentially thinned specimen
(welded and unwelded pipe)



(b) Partially thinned specimen with the different depth
(welded and unwelded pipe)

Fig. 4.1 Pipe specimens with local wall thinning

Table 4.1 Mechanical properties

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

Table 4.2 Chemical composition [wt%]

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

Table 4.3 Specimen geometries and test results

Specimen No.	Half Outer Diameter	Wall Thickness	Thinned Depth	Wall Thinned Ratio	Axially Thinned Length	Thinned Angle	Maximum Moment by Exp.	Failure Mode
	$R_s(\text{mm})$	$t(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	d/t	$l(\text{mm})$	$2\theta(^{\circ})$	M_{\max} (kN · m)	
SP-1	24.3	5.1	0	0	0	360	3.918	O
SP-2	"	"	1	0.196	10	"	3.837	O
SP-3	"	"	4	0.784	10	"	1.167	BC
SP-4	"	"	1	0.196	25	"	3.782	O
SP-5	"	"	4	0.784	25	"	0.732	B
SP-6	"	"	1	0.196	50	"	3.590	O
SP-7	"	"	4	0.784	50	"	0.622	B
SP-8	"	"	1	0.196	100	"	3.409	O
SP-9	"	"	4	0.784	100	"	0.628	B
* SP-12	"	"	4	0.784	50	63.4	3.795	O
* SP-13	"	"	4	0.784	100	"	3.718	O
WP-1	"	"	0	0	0	360	3.625	O
WP-2	"	"	1	0.196	10	"	3.616	O
WP-3	"	"	4	0.784	10	"	1.134	OC
WP-4	"	"	1	0.196	25	"	3.565	O
WP-5	"	"	4	0.784	25	"	0.631	B
WP-6	"	"	1	0.196	50	"	3.592	O
WP-7	"	"	4	0.784	50	"	0.472	B
WP-8	"	"	1	0.196	100	"	3.378	O
WP-9	"	"	4	0.784	100	"	0.565	B
* WP-12	"	"	4	0.784	50	63.4	3.519	O
* WP-13	"	"	4	0.784	100	"	3.482	O

Note: O : Ovalization

OC : Crack initiation after ovalization

B : Buckling

BC : Crack initiation after buckling

SP-1~SP-13 : Unwelded specimens

WP-1~WP-13 : Welded specimens

SP-1 and WP-1 : Non local wall thinning specimen

* : Maximum thinned depth = d_{\max}

4.2.2 용접조건

본 연구에 이용된 배관의 용접은 불활성가스 텅스텐 아크용접(Gas tungsten arc welding; GTAW)을 이용(용접기; DHT-400)하여 실딩 가스(Shielding gas)로서 순도 99.99%의 아르곤(Argon)하에서 직류정극성(D.C. straight polarity)으로 시행하였고, 그 상세한 조건은 Table 4.4에 나타낸다. Fig. 4.2는 배관용접부의 패스순서(Pass sequence)를 나타낸다.



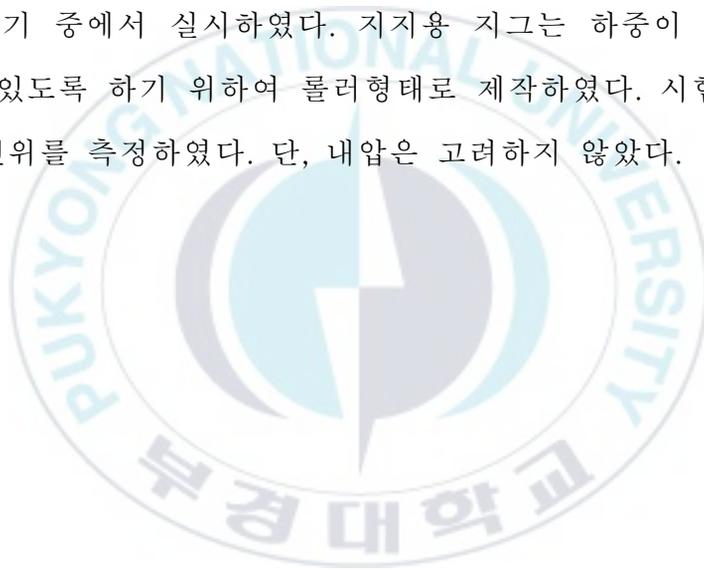
Fig. 4.2 Pass sequence of welded pipe

Table 4.4 Welding conditions

Bead No.	Filler Metal Type	QCN or Lot No.	Size	Temp. (°C)	Amps (A)	Volts (V)	Speed (cm/min)	Gas Flow Rate (l/min)	Tungsten Electrode
1	ER70S-6	032456	2.4φ	31	120~140	11~12	13~15	13~15	EWTh-2. 4φ
2	"	"	"	78	"	"	"	"	"
3	"	"	"	104	"	"	"	"	"

4.2.3 실험방법

Fig. 4.1과 같이 감육결함을 가공한 실패관 시험편에 Fig. 4.3과 같이 4점굽힘시험을 실시하였다. 굽힘시험시에는 용량 98kN의 만능시험기 (Shimadzu사: Model EHF-ED10)를 이용하여 정적인 굽힘하중을 부과하였다. 이때, 부하 스패 길이(L)는 150mm, 지지 스패 길이(L_0)는 600mm로 하였고, 크로스헤드 변위 속도는 1mm/min의 변위 제어에 의해 실온 대기 중에서 실시하였다. 지지용 지그는 하중이 동일 위치에 부과될 수 있도록 하기 위하여 롤러형태로 제작하였다. 시험 시에 하중과 하중점변위를 측정하였다. 단, 내압은 고려하지 않았다.



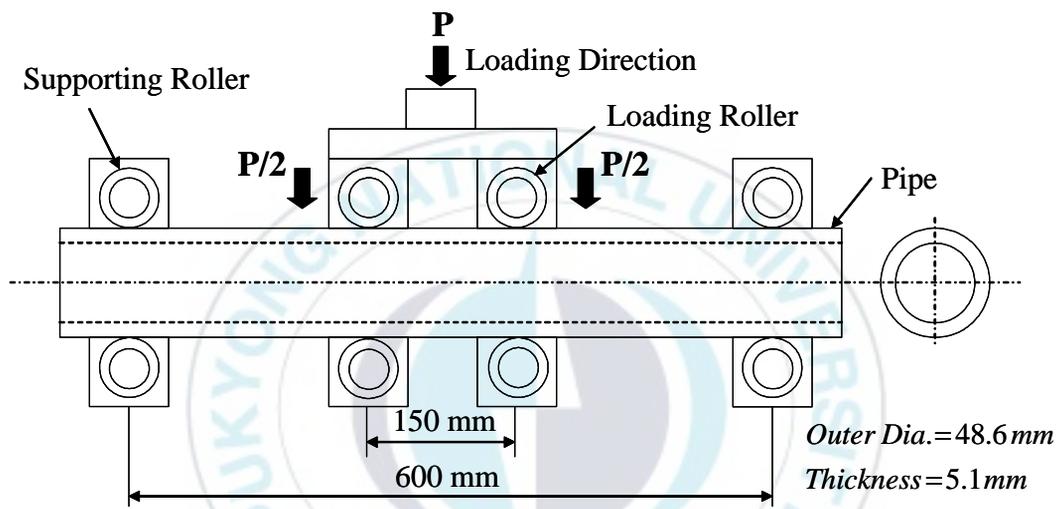


Fig. 4.3 Four-point bending test

4.3. 결과 및 고찰

4.3.1 용접유무에 따른 감육배관의 $M - \delta$ 선도

Fig. 4.4(a)~(f)는 4점굽힘시험에 의한 모멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다. 배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 편평화, 편평화 후균열발생, 국부좌굴 및 국부좌굴후 균열발생과 같은 4종류의 손상모드가 나타났다. 각각의 그림 속에는 용접하지 않고 감육결함을 상정한 배관시험편(SP시험편)과 용접후 감육결함을 상정한 배관 시험편(WP 시험편)을 각각의 감육길이에 대하여 정리하여 나타내었다. 그림속의 화살표는 변위의 증가에 따라 하중의 급격한 변화가 없으므로 해서 도중에 시험을 중단한 결과로서 하중의 지속적인 증가를 나타내고 있다. 편평화파괴 한 경우에 있어서는 변위가 약 70mm되는 지점의 강도를 최대강도로 선택하여 비교하였다.

먼저, Fig. 4.4(a)는 감육결함을 가공하지 않은 건전한 배관($\alpha=0\text{mm}$)의 용접 유무에 따른 M - δ 선도를 나타내고 있다. 용접을 한 경우(WP-1)가 용접을 하지 않은 시험편의 경우(SP-1)에 비해 변위 70mm인 지점에서의 강도가 약 92.5% 정도를 나타내고 있다. 두 시험편 모두 편평화현상을 나타내었고 파손되는 경향에 있어서 거의 동일한 현상을 나타내었다.

Fig. 4.4(b)는 감육길이 $t=10\text{mm}$ 및 감육깊이 $\alpha=1\text{mm}$ 와 4mm 의 경우이다. $d/t=0.196$ 인 경우(SP-2와 WP-2) 모두 편평화파괴를 나타내었고, 용접을 한 시험편에 비해 약 94.2%로 낮게 나타났다. $d/t=0.784$ 로 감육

결합의 깊이가 큰 경우(SP-3과 WP-3)에 있어서는 용접을 한 시험편의 최대강도가 그렇지 않은 시험편에 비해 약 97.2% 정도로 낮게 나타나고 있다. 그러나, 최대 강도점 부근에 있어서 균열이 발생한 이후 급격한 하중의 저하를 가져왔고 편평화 후 균열파괴 하였다. $d/t=0.784$ 로서 용접을 하지 않은 시험편은 최대강도는 낮게 나타났지만 오히려 최대강도를 나타내는 변위에 있어서는 약 67.5%정도 더 변형을 하고있다. 최대 강도를 나타낸 이후 균열이 발생하였으며 이후 급격한 하중의 저하를 나타내고 있다. 최종 파괴의 형태는 좌굴 후 균열 파괴를 나타내었다.

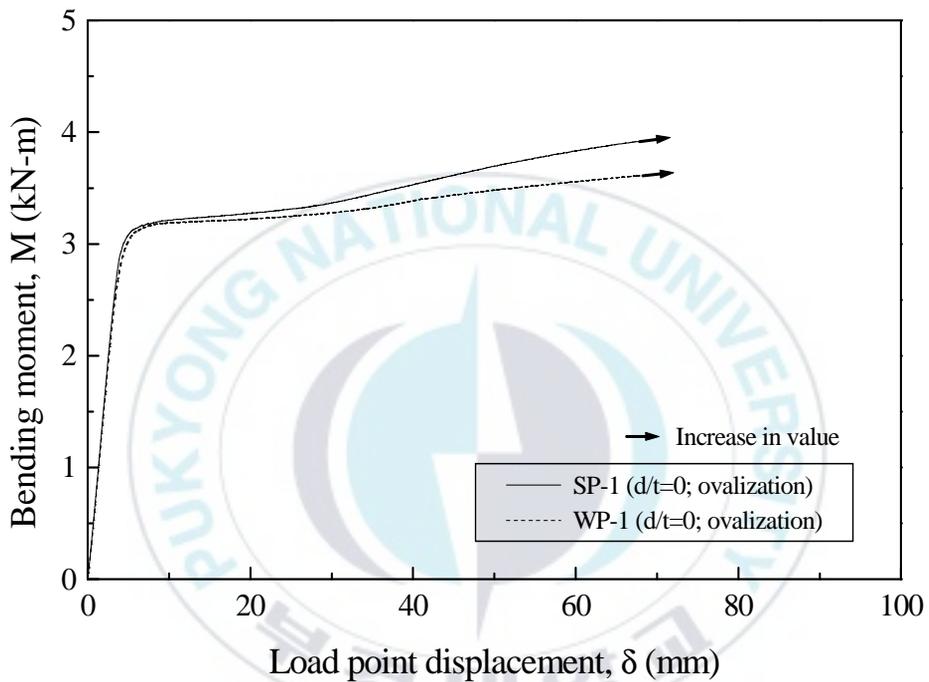
Fig. 4.4(c)는 감육길이 $t=25\text{mm}$ 및 감육깊이 $a=1\text{mm}$ 과 4mm 의 경우이다. $d/t=0.196$ 의 경우 편평화 파괴를 나타내었고, 용접을 한 시험편(WP-4)의 최대강도가 용접을 하지 않은 시험편(SP-4)에 대해 약 94.3% 정도를 나타내었다. $d/t=0.784$ 의 경우 용접을 한 시험편(WP-5)의 최대강도가 용접을 하지 않은 시험편에(SP-5)에 대해 약 86.2% 정도로 나타내었다. 그러나 WP-5에서는 최대강도 이후 균열이 발생하여 하중이 급격히 저하하고 좌굴 후 균열파괴의 양상을 나타내었으나, SP-5에서는 최대강도를 나타낸 후 좌굴파괴하고 있고 하중의 급격한 저하 없이 소성변형하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.4(d)는 감육길이 $t=50\text{mm}$ 및 감육깊이 $a=1\text{mm}$ 와 4mm 의 경우이다. $d/t=0.196$ 의 경우는 편평화를 나타내었다. 변위 70mm지점에서의 최대강도의 차는 거의 없으나, 실험을 계속할 경우 용접을 하지 않는 시험편의 최대강도가 다소 높게 나타나리라 예상된다. $d/t=0.784$ 에 있어서는 용접을 한 시험편(WP-6)의 경우가 최대강도에서 약 75.9% 정도 낮게 나타낸 후 균열이 발생하였다. 그러나 감육길이 t 이 짧은 경우에

비해서 하중의 저하는 완만함을 알 수 있다. SP-7은 좌굴파괴를 나타내고 있고 최대강도 이후 하중의 급격한 저하없이 소성변형하고 있다.

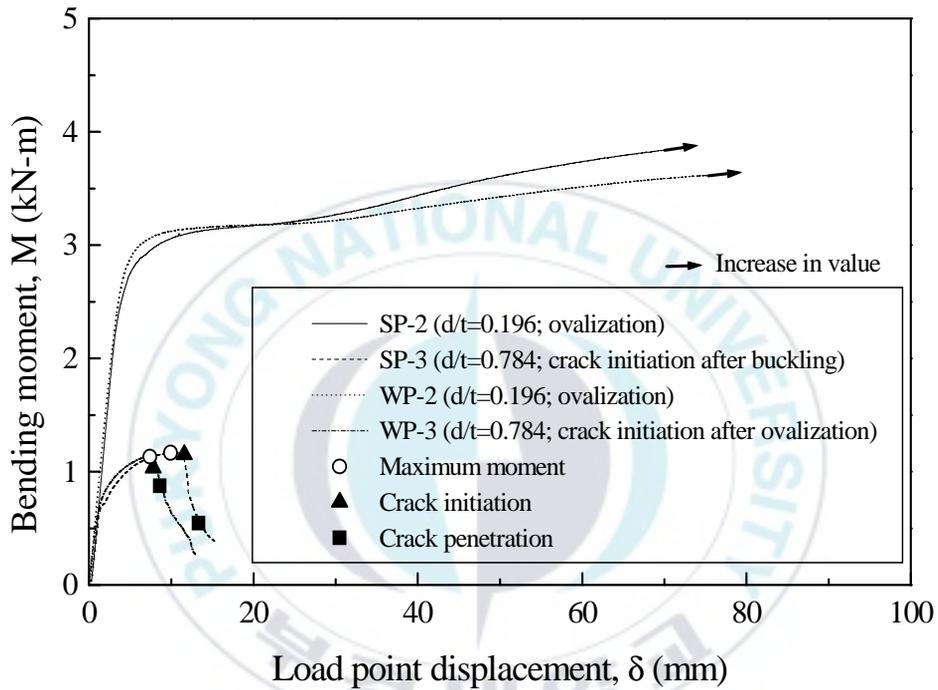
Fig. 4.4(e)는 감육길이 $l=100\text{mm}$ 및 감육깊이 $a=1\text{mm}$ 와 4mm 의 경우이다. 편평화가 발생한 $d/t=0.196$ 의 경우 최대강도의 차는 미미하게 나타났다. 또한, $d/t=0.784$ 의 경우는 좌굴파괴를 나타내었고, 용접을 한 경우(WP-9)가 그렇지 않은 경우에 비해 약 90% 정도의 최대강도를 나타내었다. 좌굴발생 후 하중의 급격한 저하 없이 소성변형하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4.4(f)는 부분적으로 감육결함을 상정한 경우로서 길이 방향에 대해 최대감육깊이, $a=4\text{mm}$ 로 한 경우이다. 모든 경우 편평화 현상을 나타내었고 용접을 한 시험편의 경우보다 각각 $l=50\text{mm}$ 에 있어서는 약 92.2%, $l=100\text{mm}$ 에서는 약 93.7% 정도의 하중의 저하를 가져왔다.



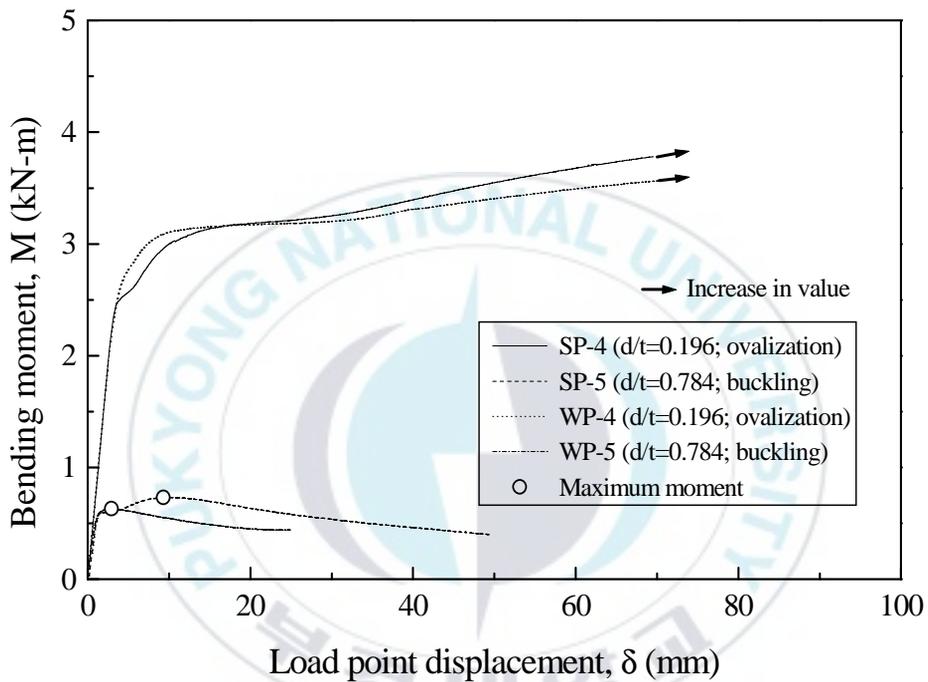
[Case of non local wall thinning]

Fig. 4.4(a) Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



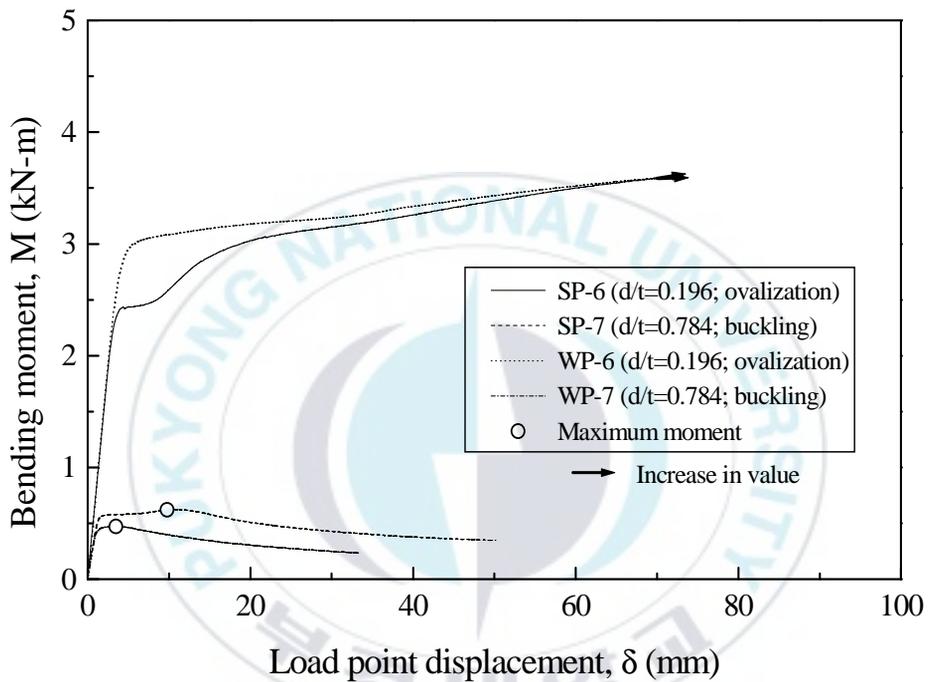
[Case of $t = 10\text{mm}$]

Fig. 4.4(b) Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



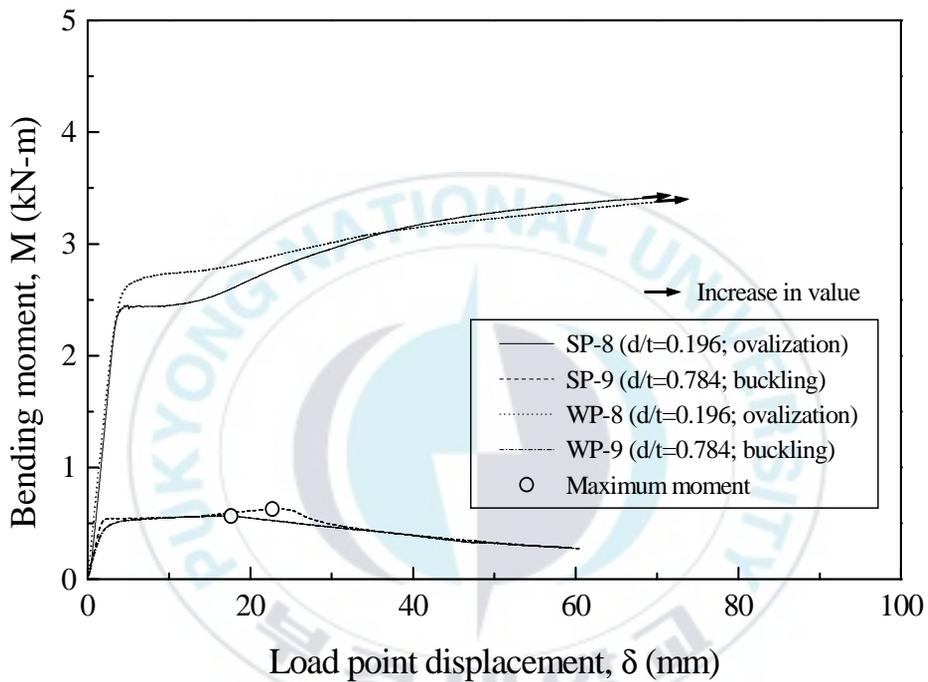
[Case of $t = 25\text{mm}$]

Fig. 4.4(c) Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



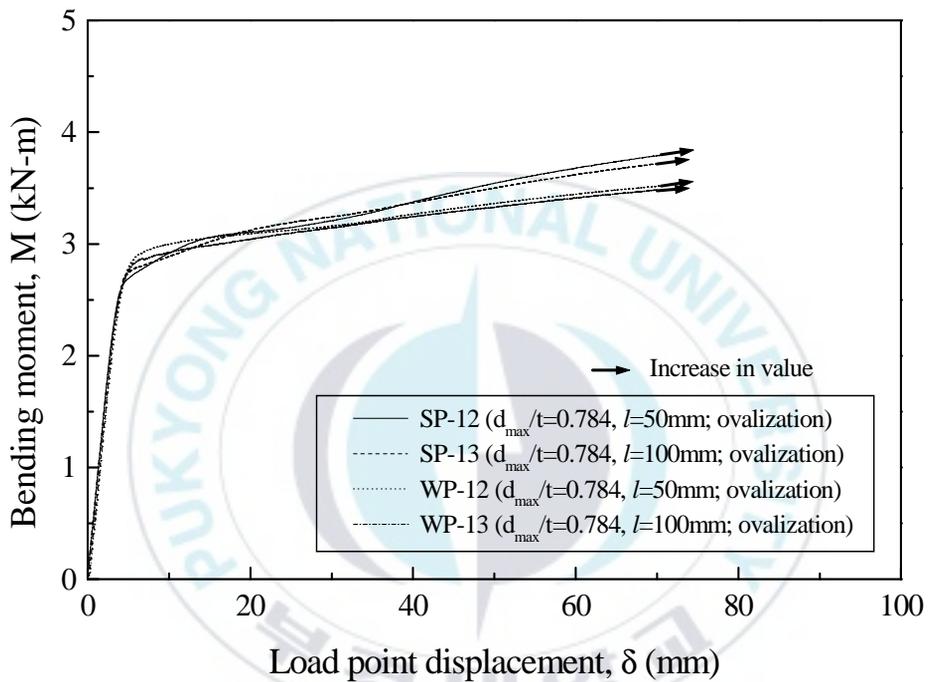
[Case of $t = 50\text{mm}$]

Fig. 4.4(d) Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



[Case of $t = 100\text{mm}$]

Fig. 4.4(e) Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



[Case of $d_{max}=4\text{mm}$]

Fig. 4.4(f) Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment

4.3.2 용접유무에 따른 감육배관의 강도 고찰

Fig. 4.5에는 최대하중시의 모멘트 M_{max} 와 이론적으로 구한 소성붕괴 모멘트 M_{PC} 와의 관계를 나타낸다. 감육부를 가지는 STS370 고압탄소강배관 시험편에 대한 이론적인 계산값은 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)^(34,37)에 의하여 구하였다. 실단면 응력 기준에 의하여 구한 이론식은 식 (4.1)과 같이 주어진다.

$$M_{PC} = 2 R^2 t \sigma_s [2 \sin \beta + (\pi - 2\beta) \cos \beta] - [A r \sigma_s] \quad (4.1)$$

여기서,

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2} \right) - \left(\frac{A}{4Rt} \right)$$

$$A = R_s^2 \theta - R_s^2 \cos \theta \sin \theta$$

$$r = R \cos \beta + \left(\frac{2 R_s}{3} \right) \left[\frac{\sin^3 \theta}{\theta - \sin \theta \cos \theta} \right]$$

$$R = R_s - \left(\frac{t}{2} \right)$$

여기서, β 는 중립축 반각, A 는 감육된 면적, R 은 평균반경, R_s 는 외측 반경, θ 는 감육된 반각(radian), r 은 모멘트 암(arm), t 는 배관 두께를 각각 나타낸다. 그리고 σ_f 는 유동응력(flow stress)으로서 식 (4.2)와 같이 주어진다.

$$\sigma_f = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \quad (4.2)$$

여기서, σ_x 는 인장강도를 σ_y 는 항복강도를 각각 나타내며, Table 4.1에 나타낸 STS370 탄소강관의 기계적특성치를 이용하였다. 사용된 실단면 응력 기준은 상당히 보수적인 평가를 주고 있다. 따라서, 이 조건에 적용된 유동응력 σ_f (인장강도와 항복강도의 합이 1/2)의 값을 상향 조정하면 약 $1.19\sigma_f$ 를 만족하게 된다. 이 $1.19\sigma_f$ 는 본 재료의 인장강도값을 넘지 않은 범위에서 가장 근접한 값이다. 그림속의 기호들은 모두 위에서 언급한 $1.19\sigma_f$ 를 적용하여 구한 M_{PC} 를 이용하여 나타낸 결과들이다. 항복응력을 고려한 M_Y 값을 상회하는 결과들에 한정하여 살펴보면 아직도 보수적평가를 하고 있음을 알 수 있다.

이상에서 언급한 것처럼 용접을 하지 않은 배관과 용접을 한 배관에 감육이 발생하고 손상모드로서 편평화가 나타나면 실단면 응력에 의한 평가는 보수적임을 알 수 있다. 그러나, 손상모드로서 좌굴 혹은 균열이 발생하였을 때는 허용할 수 없는 결과를 보여주고 있다.

4.3.1절에서 언급한 결과에서는 d/t 의 변화에 관계없이 용접을 하지 않은 배관의 최대강도가 용접을 한 배관의 최대강도에 비해 더 크게 나

타나고 있다. 이것은 아마도 배관의 손상모드 및 감육깊이의 영향일 것으로 판단된다. Fig. 4.4의 결과들을 보면 알 수 있듯이 용접배관의 경우에 있어서 항복강도가 대체적으로 높게 나타나고 있으나 감육깊이가 짧을수록 변위가 짧은 것은 용접에 의해 취화되어진 부분에 거의 감육이 발생하였기 때문이라고 생각된다. 그러나 감육깊이가 어느 정도로 길어졌을 때는 오히려 짧았을 때에 비해 소성변형의 능력에 있어서 더 많이 변형되어지는 결과를 보여주고 있으므로 다양한 조건들에 대한 검토의 여지가 있다.

Fig. 4.6 및 4.7은 감육배관의 굽힘시험 완료 후 나타난 손상모드를 나타내고 있다. Fig. 4.8은 이상에서 나타낸 용접을 실시한 배관과 실시하지 않은 배관의 강도의 변화를 비로서 나타낸 것이다. 그림의 종축에는 용접을 실시한 배관의 최대모멘트를 용접을 실시하지 않은 배관의 최대모멘트로 나눈 후 %로서 나타내었다. d/t 가 클수록 강도의 저하가 크게 나타났지만, 동일 감육깊이인 경우 감육깊이가 어느 정도 길어지면 오히려 감육깊이가 짧았을 때에 비해 강도비의 저하는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 감육깊이가 짧은 경우 모재부와 용접부의 거리가 가깝기 때문에 용접부의 전단면 항복에 도달하는 기간이 빠르게 되고 그 만큼 소성변형 능력도 작아진다. 그러나 감육깊이가 어느 정도 길어지게 되면 감육부의 중앙에 위치한 용접부가 오히려 하중의 지지 역할을 함에 따라 소성변형능력이 다소 많아지고, 취화된 용접부의 하중지지 정도에 따라 강도비가 다소 상승하는 효과를 가져왔기 때문이라고 생각된다. 이 역시 금후 여러 가지 감육깊이에 대해 검토의 여지가 있다.

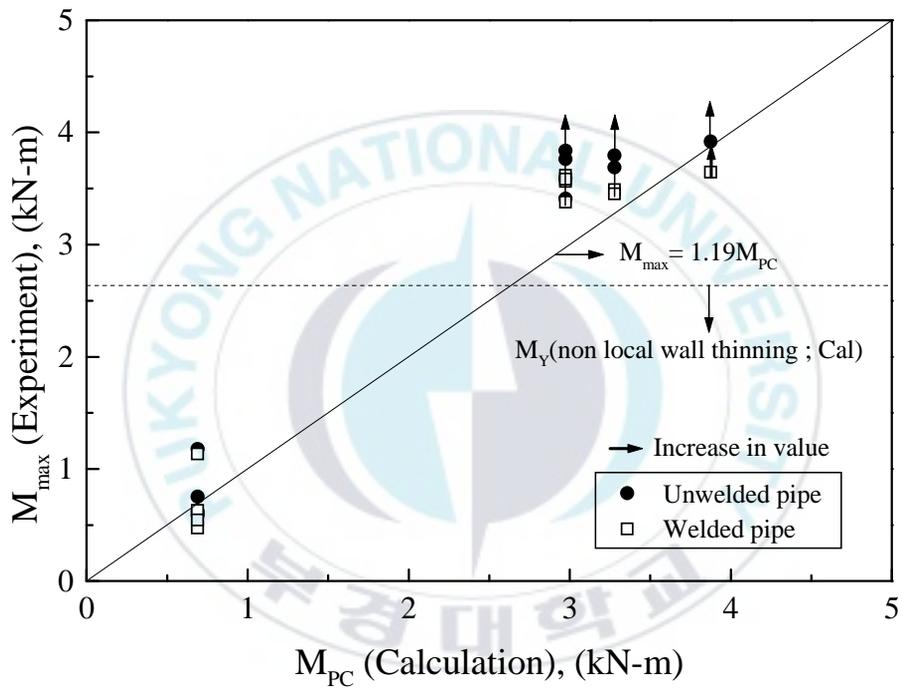
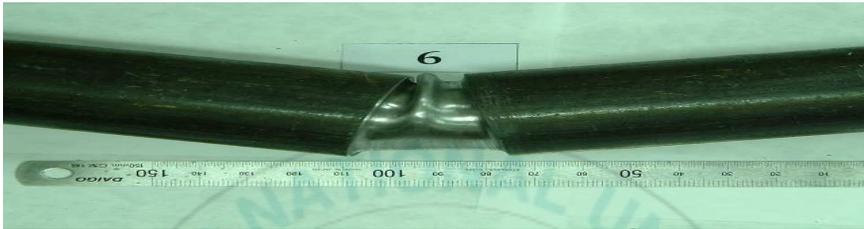


Fig. 4.5 $M_{max}(Exp.)$ vs. $M_{PC}(Cal.)$



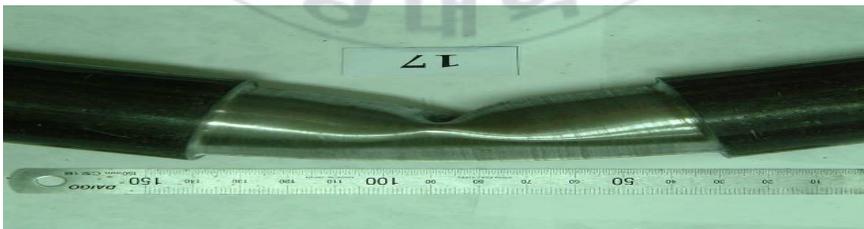
(a) $l=10\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$



(b) $l=25\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$

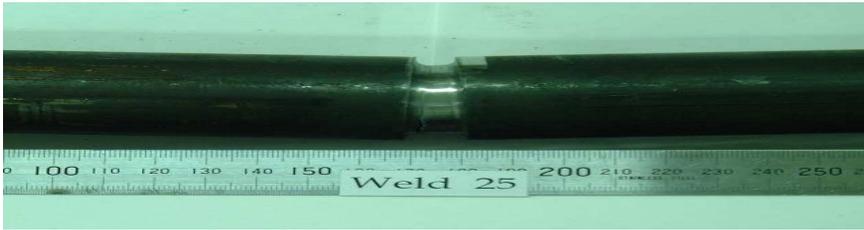


(c) $l=50\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$



(d) $l=100\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$

Fig. 4.6 Failure mode of locally wall thinned pipes (unwelded pipes)



(a) $l=10\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$



(b) $l=25\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$



(c) $l=50\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$



(d) $l=100\text{mm}$ and $d=4\text{mm}$

Fig. 4.7 Failure mode of locally wall thinned pipes (welded pipes)

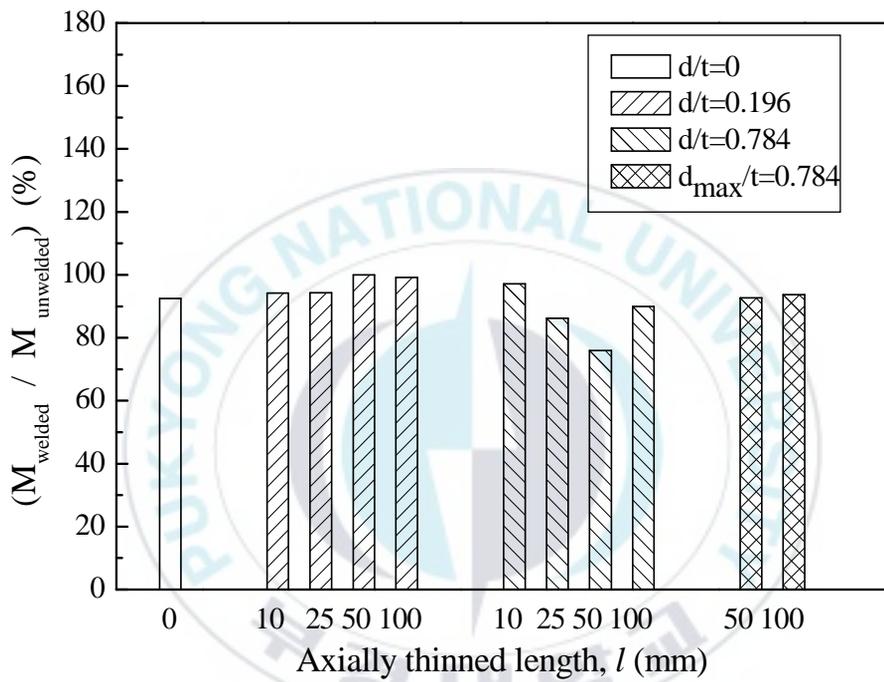


Fig. 4.8 Moment ratio vs. wall thinned length

4.4 요약

본 연구에서는 고압탄소강배관을 용접한 후에 기계적으로 감육부를 가공하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 굽힘강도 및 파괴양식에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 조사하였다. 그리고 용접한 고압탄소강배관재의 손상모드와 강도를 구하고, 용접하지 않은 고압탄소강배관의 결과와 상호 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 용접 및 용접을 하지 않은 배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 편평화 파괴, 편평화 후 균열 파괴, 국부좌굴 파괴 및 국부좌굴 후 균열 파괴의 4종류가 나타났다. 국부적인 감육부를 가지는 배관에 있어서는 용접 유무에 상관없이 감육부의 형상차이에 의해서 손상모드가 다르게 나타났다.

(2) $M_{max} \geq M_Y$ 인 즉, 건전배관의 전소성모우멘트보다 감육부에서 나타난 소성붕괴모우멘트가 큰 경우에는 제안된 유동응력(1.19 σ)을 적용하더라도 보수적 평가를 하고 있음을 알 수 있다.

(3) 용접을 하지 않은 감육배관에 비해 용접을 행한 감육배관의 강도는 최대 약 24.1% 정도 감소하였다. 특히, 감육깊이가 깊어질수록 용접을 하지 않은 감육배관에 비해 용접을 행한 감육배관의 최대강도는 저하하는 경향을 나타내었다.

(4) 본 연구의 결과는 배관 외부에 감육을 설정한 경우이다. 그러나 실제 감육의 문제는 배관의 내부에서 발생하고, 또한 내압에 의한 영향을 크게 받는다. 따라서 향후 배관 내부에 감육을 설정한 경우 및 내압을 고려한 연구에 대한 검토가 필요하다.



제 5 장



본 연구에서는 에너지 플랜트에 사용되는 배관에 대해서, 유체의 흐름에 의해 발생할 수 있는 침식-부식에 의한 여러 가지 감육현상을 배관에 모의하여 실험 및 유한요소 해석을 통하여 감육배관의 강도 및 변형에 대한 연구를 행하였다.

그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

건전한 배관에 비해서 ①감육각도가 커질수록, ②동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육깊이가 깊수록 또한, ③동일한 감육각도 및 감육깊이라면 감육깊이가 깊을수록 최대강도에서의 감소는 현저하였다.

또한, ① 감육깊이가 깊고 감육깊이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 나타났고, ② 동일 감육깊이일 경우 감육깊이가 깊을수록 또, ③동일 감육깊이라면 감육깊이가 짧을수록 축방향 스트레인이 크게 되는 경향을 나타내었다.

비교적 짧은 감육깊이를 가진 배관은 균열에 의해 파손된다는 것을 알 수 있었고, 배관의 파손에 미치는 감육의 영향은 감육깊이 및 감육비에 의존하였다. 또한, 다축 조건하에서 진과괴연성에 대한 평가를 이용함으로써 감육부 중앙에서 균열의 발생이 예측 가능하다는 것을 나타내었다. 유한요소해석으로부터 감육배관에 편평화 및 좌굴이 손상모드로서 나타났고, 균열발생이 예상된다.

그리고, 외부감육과 내부감육의 결과 비교를 통하여 외부감육과 내부감육의 결과가 거의 일치하는 경향을 나타냄으로 외부감육의 결과를 내부감육의 결과로 대체 적용 가능성을 나타내었다.

또한, 본 연구에서는 고압탄소강배관을 용접한 후에 기계적으로 감육부를 가공하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 굽힘강도 및 파괴양식에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 조사하였다. 그리고 용접한 고압탄소강배관재의 손상모드와 강도를 구하고, 용접하지 않은 고압탄소강배관의 결과와 상호 비교, 분석으로부터, 용접 및 용접을 하지 않은 배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 편평화 파괴, 편평화 후 균열 파괴, 국부좌굴 파괴 및 국부좌굴 후 균열 파괴의 4종류가 나타났다. 국부적인 감육부를 가지는 배관에 있어서는 용접 유무에 상관없이 감육부의 형상차이에 의해서 손상모드가 다르게 나타났다.

$M_{max} \geq M_I$ 인 즉, 건전배관의 전소성모우멘트보다 감육부에서 나타난 소성붕괴모우멘트가 큰 경우에는 제안된 유동응력(1.19 σ)을 적용하더라도 보수적 평가를 하고 있음을 알 수 있었다. 용접을 하지 않은 감육배관에 비해 용접을 행한 감육배관의 강도는 최대 약 24.1% 정도 감소하였다. 특히, 감육깊이가 깊어질수록 용접을 하지 않은 감육배관에 비해 용접을 행한 감육배관의 최대강도는 저하하는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) 日本機械學會編 (1989), "耐震設計と構造動力學", 日本工業出版, pp. 159~167.
- (2) Web.knu.ac.kr/~nuclear
- (3) 村主 進 (1990), "原子爐安全工學", 日刊工業新聞社, pp. 6~7.
- (4) 岡 芳明 (1995), "次世代輕水爐の開発及び研究狀況と新要素技術", 日本原子力學會誌, Vol. 37, No. 9, pp. 2.
- (5) 佐藤一男 (1995), "最近の原子力安全の話題", 日本原子力學會誌, Vol. 37, No. 9, pp. 43~46.
- (6) Ahn, S. H., Hidaka, A. and Ando, K. (1997), "Fatigue crack growth and penetration behavior in pipe subject to bending load", Transactions of the 14th International Conference on Structural mechanics in Reactor Technology(SMiRT), Lyon, France, Vol. G(August 1997), pp. 113~120.
- (7) Virginia Electric and Power Co. (1987), "Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report.
- (8) CNN.com (2004), "Japan to probe nuclear accident".
- (9) 矢川 元基 (1987), "美國Surry原子力發電所2号爐2次系配管破斷事故の報告", 日本原子力學會誌, Vol. 29, No. 7, pp. 621.
- (10) 日本原子力研究所 (1987), "サリ-原子力發電所の配管破斷事故", 日本原子力學會誌, Vol. 29, No. 11, pp. 952.
- (11) 藤田 讓, 楠田 忠雄, 川井 忠彦 (1988), "塑性設計法", 森北出版.

- (12) 石川 信隆, 大野 友則 (1988), "入門-塑性解析と設計法", 森北出版.
- (13) 町田 進 (1984), "延性破壊力學", 日刊工業新聞社.
- (14) Japanese Industrial Standards
- (15) 大和久 重雄 (1978), "JIS 鐵鋼材料入門", 大河出版.
- (16) Hibbeler, R. C. (1997), "Mechanics of Materials", Prentice-Hall, Inc.
- (17) 三村, 町田 進 (2000), "基礎材料強度學", 培風館
- (18) 萩原 芳彦, 鈴木 秀人, "破壊力學", Ohmsha.
- (19) 이종기, 나의균 (1999), "과괴역학", 원창출판사
- (20) 國尾 武, 中澤 一, 林 彦, 岡村 弘之 (1984), "破壊力學實驗法", 朝倉書店
- (21) 김영진, 석창성, 전현규, 최영환, 이정배 (1996), "원자력 배관 건설성 전문가 시스템개발(1)", 대한기계학회 논문집, 제20권, 제2호, pp. 575~584.
- (22) NPIES ver,2.0, Nuclear Piping Integrity Expert System.
- (23) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III. (1992).
- (24) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. (1998).
- (25) NP-6045 Research Project 1757-65, Evaluation of Flaws in Ferraws in Ferritic Piping, (1998).
- (26) Kanninen, M. F. et al. (1976), "Mechanical Fracture Predictions for sensitized Stainless Steel Piping with Circumferential Cracks", EPRI-NP-192.

- (27) Kanninen, M. F. et al (1978), "Towards an Elastic-Plastic Fracture mechanics predictive capability for Reactor Piping", Nuclear Engineering and Design, Vol. 48, pp. 117~134.
- (28) Smith, E. (1980), "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.
- (29) Smith, E. (1982), "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.
- (30) 長谷川 外, (1983), "ステンレス鋼SUS304表面切欠平板の板厚貫通挙動", 機講論, No. 800-1, pp. 58~60.
- (31) 長谷川 外, (1983), "周方向表面き裂を含む圧力配管の漏洩荷重評価法", 圧力技術, Vol. 21, pp. 15~21.
- (32) Hasegawa, K. et al. (1983), "Prediction of Fracture Tolerances for Stainless Steel Pipes with Circumferential Cracks", ASME PVP Conference, Portland.
- (33) Shim, S. H., Song, J. S., Yoon, K. B., Hwang, K. M., Jin, T. E., Lee, S. H. and Kim, W. S. (2000), "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.
- (34) 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.

(35) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N. (1999), "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.

(36) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N. (2001), "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.

(37) Kanninen, M. F., Zahoor, A., Wilkowski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J. (1982), "Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304 Stainless Pipes under Dynamic Loading", EPRI NP-2347, Vols. 1 and 2, EPRI, Palo Alto.

(38) 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.

(39) Mathonet, J. F., Cherasse, J. M., Leblois, C. L. and Guyette, M. A. (1995), "Belgian Methodology for Evaluation of Erosion Corrosion Phenomena in Unit 1; 2; 3 & 4 of the DOEL Nuclear Power Plant (NPP)", ASME PVP, PVP-Vol-303, pp. 393~399.

(40) Ahn, S. H., Ando, K., Isiwata, 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.

(41) Ahn, S. H., Nam, K. W., Takahashi, K. and Ando, K. (2006), " Comparison of experimental and finite element analytical results for the strength and the deformation of pipes with local wall thinning subjected to bending moment ", Nuclear Engineering and Design 236, pp. 140~155.

(42) 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.

(43) 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕 (2002), " 감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성 ", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp. 66~72.

(44) 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재운 (2003), " 감육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가 ", 대한기계학회논문집, 제27권, 제1호, pp. 8~17.

(45) 안석환, 남기우 (2006), " 감육된 탄소강배관의 변형과 파괴거동 ", 한국해양공학회지, 제20권, 제4호, pp. 17~23.

(46) 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 도재운 (2003). " 감 육배관의 굽힘하중에 의한 손상모드와 파괴거동 평가 " 대한기계학회논문집, 제27권, 제1호, pp 8-17.

- (47) Japan Atomic Energy Institute (1993), " Technical Report on the Piping Reliability Tests at the Japan Atomic Energy Research Institute " , JAERI-M, 93-076, pp. 104
- (48) 通商産業省 (1980), " 發電用原子力設備に關する構造等の技術基準 " , 告示第501号.
- (49) Miyazaki, K., Nebu, A., Kanno, S., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (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.
- (50) Weiss, V. (1972). Proceeding 1st Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, pp 159.
- (51) Ramberg, W. and Osgood, W.R. (1943). " Description of Stress-Strain Curves by Three " , NACA Technical Note, No 902.
- (52) M. Hayashi, I. Tanaka, K. Lida, F. Matsuda and M. Sato, " Vibration Behavior and Fatigue Strength of Mocked-Up Piping System " , ASME Journal of Pressure Vessel Technology Vol. 119, pp. 343~350, 1997.
- (53) 西田正, "應力集中" 森北出版, pp. 632~635, 1967.
- (54) 이철구, 남궁재관, "신편 용접공학", 1996.
- (55) 산업설비안전진단연구회, "배관안전진단기술" , 도서출판 창조, pp. 305~328, 2000.

<논문집, *Journal Publication*>

1. S.H. Ahn, K.C. Seok and K.W. Nam (2007), " Characteristics of Strength and Deformation of Inner/Outer Local Wall Thinned Pipes ", Key Engineering Materials (in print)

2. 석금철, 안석환, 남기우 (2007), " 침식-부식에 의해 감육된 배관의 파손거동에 미치는 감육위치의 영향 ", 한국해양공학회지 (인쇄 중).

K.C Seok, S.H Ahn and K.W. Nam (2007), " Effect of Local Wall Thinned Location due to Erosion-Corrosion on Fracture Behavior of Pipes ", The Korean Society of Ocean Engineers (in print).

3. S. H Ahn, K.C. Seok and K.W. Nam (2007), " A Study on Experimental Evaluation for fracture Behavior of Carbon Steel pipes for High Pressure Service with Local Wall Thinning ", Key Engineering Materials (in submission).

감사의 글

면학의 긴 여정 속에서 많은 굴곡의 터널을 지날 때 마다 초심이 흔들려 마음의 갈망으로 힘들고 어려웠던 시간 들을 회상하면서 도움을 주신 많은 분들께 감사의 글을 올립니다.

먼저 본 논문이 완성될 수 있도록 아낌없는 지도와 배려를 해 주신 지도교수 남기우 교수님께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다. 또한, 보다 알찬 논문이 될 수 있도록 심사 지도 해주신 문창권 교수님, 안석환 교수님, 한국 폴리테크닉대학 안병건 교수님, 강순배 박사님께 진심으로 감사를 드립니다. 아울러 부경대 안병현 교수님, 한국기계연구원 김진욱 박사님, 한국 폴리테크닉대학 도재윤 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

본 연구를 수행하는 동안 많은 도움을 주신 신소재 공학부 김해숙님, 박승원님, 김미경님께도 감사드립니다. 또한 힘들때 많은 조언을 해주신 국방품질관리소 손창석 선임연구원님, 김성광 선임연구원님, 한국경영기술건설턴트 협회 이수식사장님, 경남 안실련 강대석 대표님, 김정자 행정실장님, 장종진 사무차장님, 경남 어머니회 방미애 회장님 그리고 밀양 안실련 가족 모두 감사를 드립니다.

학위기간 중 자주 찾아뵙지 못하고 가끔 들릴 때 마다 자식을 걱정해 주신 부모님과 늘 따뜻한 말씀과 위로의 격려로 북돋아 주신 매형 김방

우, 누님 박영기님께 또한 감사를 드립니다 그리고 오늘이 있기까지 항상 웃으며 내 인생의 든든한 동반자인 사랑하는 아내 김영주와 밝고 올바르게 잘 자라고 있는 우리 집 꿈나무 장남 연은, 차남 연화와 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.

2006년 12월

석 금 철

