

공학석사 학위논문

감육된 배관 용접부의
파괴강도와 손상모드

지도교수 남 기 우

이 논문은 공학석사 학위논문으로 제출함.



2004 년 8 월

부경대학교 대학원

기계공학학 · 연합동

김 용 운

김용운의 공학석사 학위논문을 인준함.

2004 년 6 월

주 심 공학박사 문 창 권 (인)

위 원 공학박사 안 석 환 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

1. 서 론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 이론적 배경	4
2. 재료 및 실험 방법	10
2.1 재료	10
2.2 용접조건	14
2.3 실험방법	16
3. 결과 및 고찰	17
3.1 용접유무에 따른 감육배관의 M- δ 선도	17
3.2 용접유무에 따른 감육배관의 강도 고찰	26
4. 결 론	34
참고 문헌	36

Fracture Behaviors and Failure Modes of Welded Pipes with Local Wall Thinning

Yong-Un Kim

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

Abstract

Fracture behaviors of pipes with local wall thinning are very important for the integrity of nuclear power plant. In pipes of energy plants, sometimes, the local wall thinning may result from severe erosion-corrosion (E/C) damage. However, the effects of local wall thinning on strength and fracture behaviors of piping system were not well studied. In this paper, the monotonic bending tests were performed of full-scale welded and unwelded carbon steel pipes with local wall thinning. A monotonic bending load was applied to straight pipe specimens by four-point loading at ambient temperature without internal pressure. 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.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

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 확인하고있다. 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⁽¹⁾이 국내외적으로 보고되어지고 있는 실정이다. 대표적인 사례로서는 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고⁽²⁾ 등이 보고되어있고, 국내에서도 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서도 배관 감육 손상이 발생되고 있는 실정이다⁽³⁾. 이상과 같이 배관의 감육문제는 세계 각 국에서 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 등이 검토되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾.

배관 건전성 평가법은 취성과파괴 여부를 평가하는 선형탄성파괴역학(LEFM)과 연성파괴 여부를 평가하는 탄성파괴역학(EPFM) 등이 있다

탄소성파괴역학 영역에서는 균열구동력도표(Crack Driving Force Diagram; CDFD)를 이용한 평가법 및 J 적분과 찢김계수(Tearing Modulus, T)를 이용한 J-T 해석법 등이 있고 전변형률파손평가도표 (Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram; DPFAD)를 이용한 평가법이 있으며 배관의 국부넥킹 시의 평가법인 한계하중법(limit load method) 및 무차원 소성역 매개변수(DPZP)법 등이 있다. 또한 원자력 발전소에서는 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Sec.XI 에 의하여 자체적으로 평가하는 방법을 수행하고 있다⁽⁷⁻¹⁰⁾. 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⁽¹¹⁻¹³⁾. 이러한 배관의 감육문제는 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 안 등이 검토되어지고 있다⁽²⁻⁶⁾. 실질적으로 배관에 발생하는 감육의 문제는 배관의 내부이며, 내압에 의한 영향을 크게 받을 것이다. 고압탄소강배관에 기계적으로 감육부를 가공하여, 굽힘하중 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⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 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 용접배

관의 손상모드와 강도를 구하고 용접하지 않은 감육배관의 결과와 상호 비교, 검토하였다.

1.2 이론적 배경⁽¹⁸⁾

이론적 임계 실단면응력은 배관재료의 유동응력(flow stress) 또는 파괴응력(fracture stress)으로 정의되며, 배관응력이 이 값에 도달하면 파괴되었다고 판단하며 이를 소성붕괴(plastic collapse)라고한다. 이러한 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.

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

for $\beta < \frac{1}{2-\eta}$ (1.1a)

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

for $\beta > \frac{1}{2-\eta}$ (1.1b)

여기서, σ_{pc} = 소성붕괴응력

M_{pc} = 전소성굽힘모멘트

R = 배관반경

t = 배관두께

a = 결함깊이

$2c$ = 결함길이

D = 배관직경

$\beta = c/\pi R = 2c/\pi D$, 배관직경에 대한 결함길이의 비

$\eta = a/t$, 결함깊이 비

σ_f = 유동응력

식 (1.1a), 및 (1.1b)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.

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

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

3) Willoughby 소성붕괴평가법

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

$$\sigma_{pc} = \frac{M_{pc}}{\pi R^2 t} = \sigma_f (1 - 1.6\pi\beta\eta) \quad (1.3)$$

식 (1.3)은 실험결과중 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 원격급힘하중이 작용하는 배관의 원주방향 용접부에 존재하는 결함에 대한 실패관 실험을 수행하고 이를 기초로 다음과 같은 소성붕괴 평가기준을 제안하였다.

$$\sigma_{pc} = \sigma_y(1.03-18\beta\eta) \quad (1.4)$$

식 (1.4)는 원주방향 용접부에 표면결함을 넣어 파손테스트를 한 후, 그 결과를 작성한 식으로 결함길이에 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.

$$\sigma_{pc} = \frac{PR}{2Rt} = \frac{(1-\eta)(\pi-\beta\eta)}{\pi(1-\eta)+2\eta\sin\beta} \quad (1.5)$$

6) ASME Sec. XI 한계하중법

ASME Sec. XI에서는 배관에 존재하는 원주방향과 축방향결합의 한계하중해석을 위한 식을 다음과 같이 제시하였으며, 배관의 거동을 소성붕괴로 가정하여 계산한다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 작용하중에 의해 배관의 잔여단면에 발생하는 응력이 유동응력(flow stress)과 같아질 경우 파단이 발생한다고 가정한다.

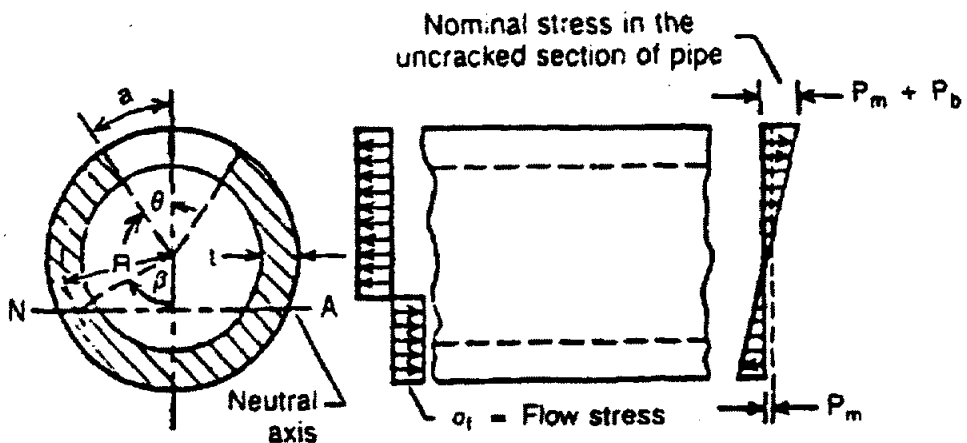


Fig. 1 Stress equilibrium at the crack cross section of a pipe

i) 원주방향일 경우

$\theta + \beta \leq \pi$ 일 때

$$P_b = 2\sigma_f \{2\sin\beta - (a/t)\sin\theta\} / \pi \quad (1.6a)$$

$$\beta = \{ \pi - \theta (a/t) - (P_m / \sigma_t) \pi / 2 \}$$

$\theta + \beta > \pi$ 일 때

$$P_b = 2\sigma_f \{ (2 - a/t) \sin\beta \} / \pi \quad (1.6b)$$

$$\beta = \{ \pi - \theta (a/t) - (P_m / \sigma_t) \pi / 2 \}$$

여기서, P_b : 1차 굽힘응력

P_m : 2차 굽힘응력

ii) 축방향 균열일 경우

$$\sigma_h = \frac{\sigma_f}{M} \quad (1.7)$$

여기서,

$$M: \sqrt{1 + (1.61/4Rt)} \ell^2$$

σ_h : 파괴시 원주응력

ℓ : 전체 축방향 결함길이

R: 배관의 평균반경

t: 배관의 벽두께

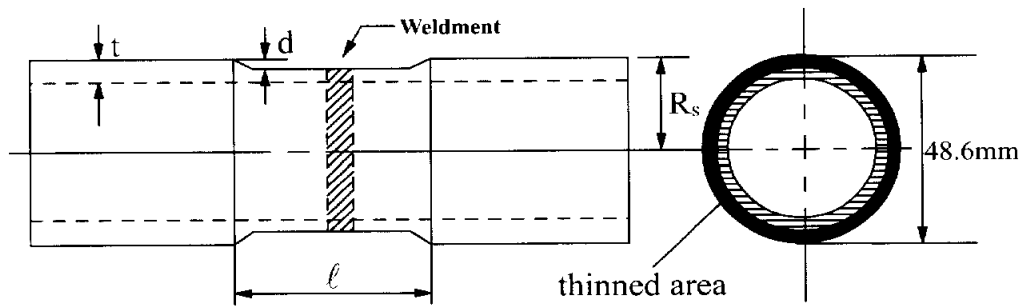
한계하중법에서의 안전계수는 배관이 견딜 수 있는 한계하중 P_b '나 σ_b '을 작용하중 P로 나눈 값으로 정의 된다

2. 재료 및 실험방법

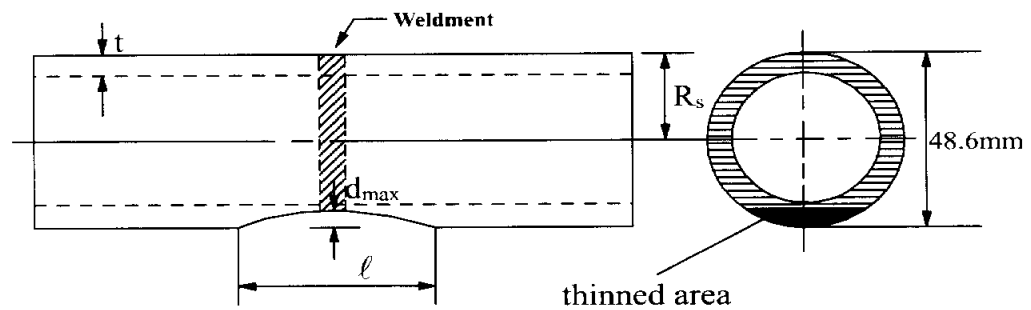
2.1 재료

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 1과 2에 나타낸다.

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 사용한 시험편의 형상을 Fig. 2(a)와 (b)에 나타낸다. 파괴거동에 미치는 감육 위치의 영향은 고려되지 않았다. Fig. 2(a)는 360°전주에 걸쳐서 감육가공을 한 경우로서 용접을 하지 않은 배관시험편 및 용접배관시험편을 나타낸다. 또한 Fig. 2(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 3에는 Fig. 2(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. 2 Pipe specimens with local wall thinning

Table 1 Mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation
	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	(%)
SPPH38	402	273	28

Table 2 Chemical composition [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S
SPPH38	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

Table 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_o (mm)	t(mm)	d(mm)	d/t	l (mm)	2θ (°)	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}

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 4에 나타낸다. Fig. 3은 배관용접부의 패스순서(Pass sequence)를 나타낸다.

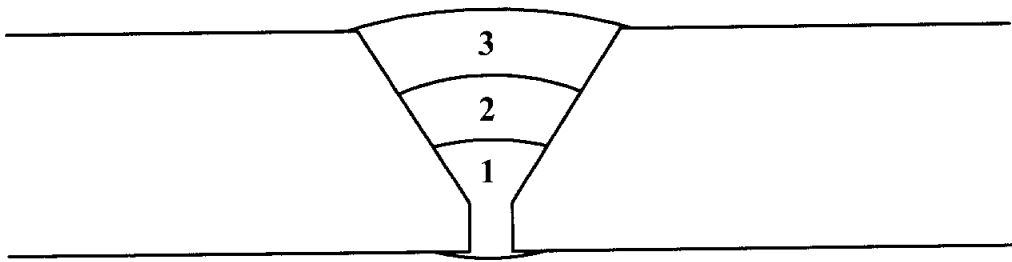


Fig. 3 Pass sequence of welded pipe

Table 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	"	"	"	"	"

2.3 실험방법

Fig. 2과 같이 감육결함을 가공한 실패관 시험편에 Fig. 4와 같이 4점 굽힘시험을 실시하였다. 굽힘시험시에는 용량 98kN의 만능시험기 (Shimadzu사: Model EHF-ED10)를 이용하여 정적인 굽힘하중을 부과하였다. 이때, 부하 스패 길이(L_f)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. 시험시에 하중과 하중점변위를 측정하였다.

단, 본 실험에서는 내압은 고려하지 않았다.

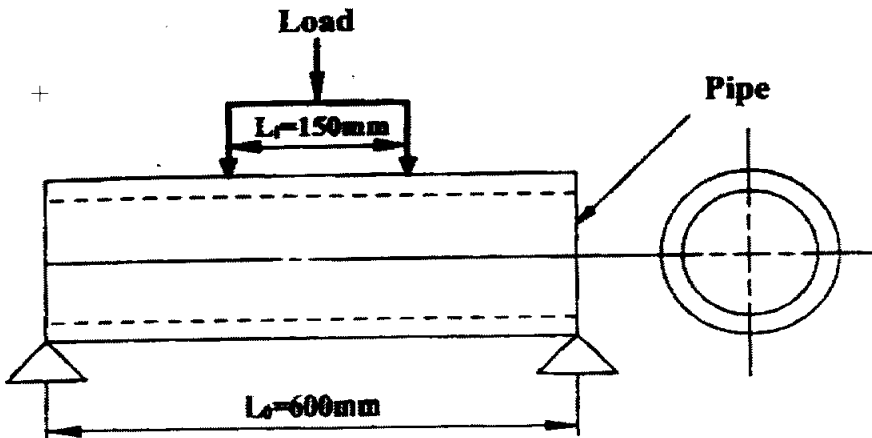


Fig. 4 Four-point bending test

3. 실험 결과 및 고찰

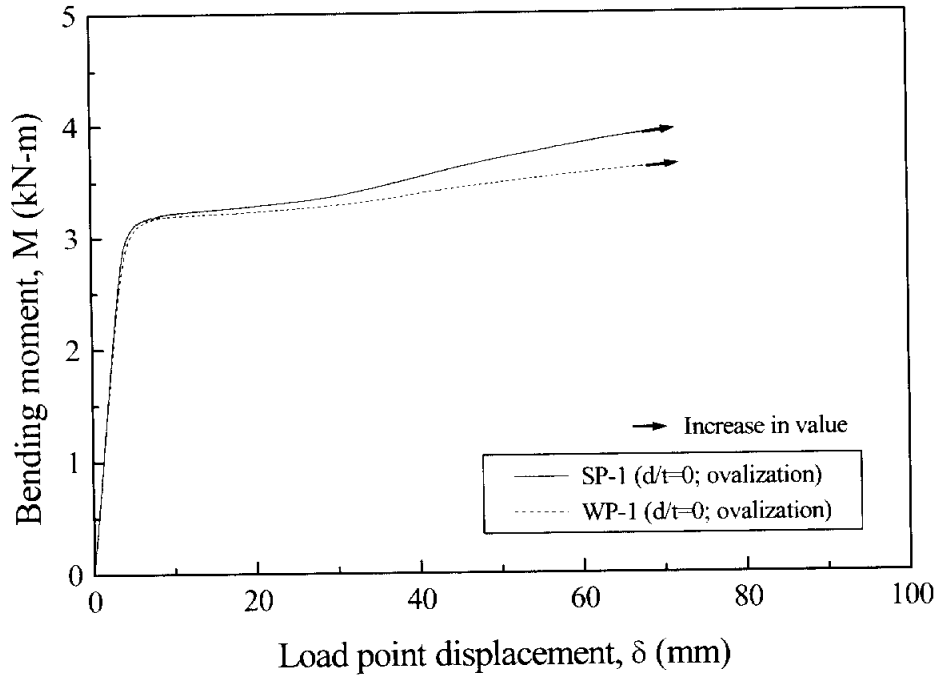
3.1 용접유무에 따른 감육배관의 M - δ 선도

Fig. 5(a)~(f)는 4점굽힘시험에 의한 모멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다. 배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 편평화, 편평화후 균열발생, 국부좌굴 및 국부좌굴후 균열발생과 같은 4종류의 손상모드가 나타났다. 각각의 그림 속에는 용접하지 않고 감육결함을 상정한 배관시험편(SP시험편) 과 용접후 감육결함을 상정한 배관 시험편(WP시험편)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. 편평화 파괴 한 경우에 있어서는 변위가 약 70mm되는 지점의 강도를 최대 강도로 선택하여 비교하였다.

먼저, Fig. 5(a)는 감육결함을 가공하지 않은 건전한 배관($d=0\text{mm}$) 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 편평화 현상을 나타내었고 파손되는 경향에 있어서 거의 동일한 현상을 나타내었다. Fig. 5(b)는 감육길이 $\ell=10\text{mm}$ 및 감육깊이 $d=1\text{mm}$ 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 감육결함의 깊이가 큰 경우(SP-3과 WP-3)에 있어서는 용접을 한 시험편의

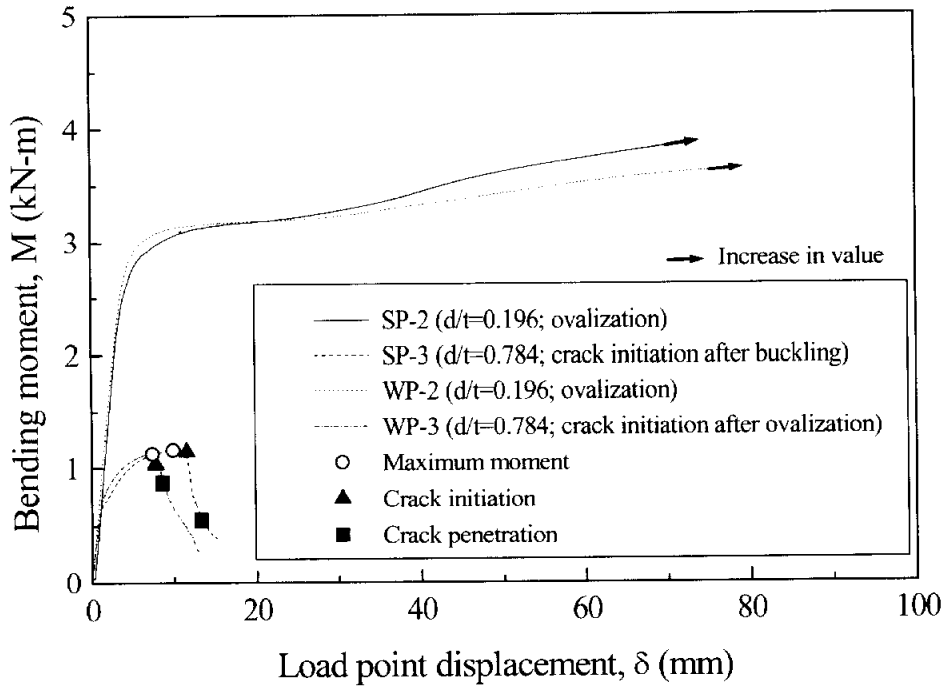
최대강도가 그렇지 않은 시험편에 비해 약 97.2% 정도로 낮게 나타나고 있다. 그러나, 최대 강도점 부근에 있어서 균열이 발생한 이후 급격한 하중의 저하를 가져왔고 편평화 후 균열파괴 하였다. $d/t=0.784$ 로서 용접을 하지 않은 시험편은 최대강도는 낮게 나타났지만 오히려 최대강도를 나타내는 변위에 있어서는 약 67.5%정도 더 변형을 하고있다. 최대강도를 나타낸 이후 균열이 발생하였으며 이후 급격한 하중의 저하를 나타내고 있다. 최종 파괴의 형태는 좌굴 후 균열 파괴를 나타내었다. Fig. 5(c)는 감육길이 $\ell=25\text{mm}$ 및 감육깊이 $d=1\text{mm}$ 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 소성 변형하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(d)는 감육길이 $\ell=50\text{mm}$ 및 감육깊이 $d=1\text{mm}$ 와 4mm 의 경우이다. $d/t=0.196$ 의 경우는 편평화를 나타내었다. 변위 70mm 지점에서의 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 ℓ 이 짧은 경우에 비해서 하중의 저하는 완만함을 알 수 있다. SP-7은 좌굴파괴를 나타내고 있고 최대강도 이후 하중의 급격한 저하

없이 소성변형하고 있다. Fig. 5(c)는 감육길이 $\ell=100\text{mm}$ 및 감육깊이 $d=1\text{mm}$ 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 소성 변형하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(f)는 부분적으로 감육결함을 상정한 경우로서 길이 방향에 대해 최대감육깊이, $d=4\text{mm}$ 로 한 경우이다. 모든 경우 편평화 현상을 나타내었고 용접을 한 시험편의 경우보다 각각 $\ell=50\text{mm}$ 에 있어서는 약 92.2%, $\ell=100\text{mm}$ 에서는 약 93.7% 정도의 하중의 저하를 가져왔다.



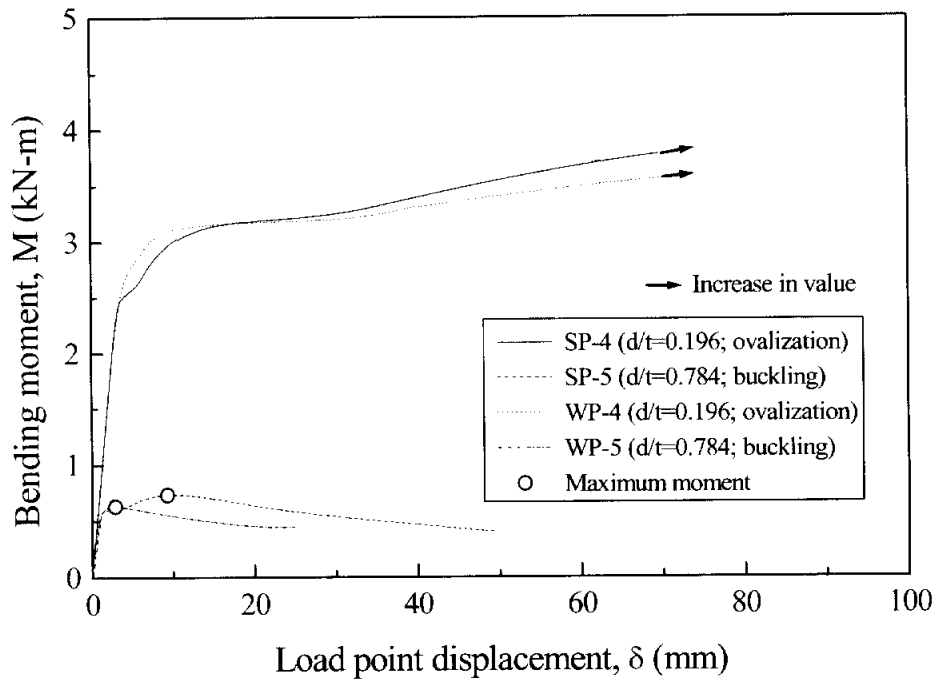
(a) The case of non local wall thinning

Fig. 5 Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



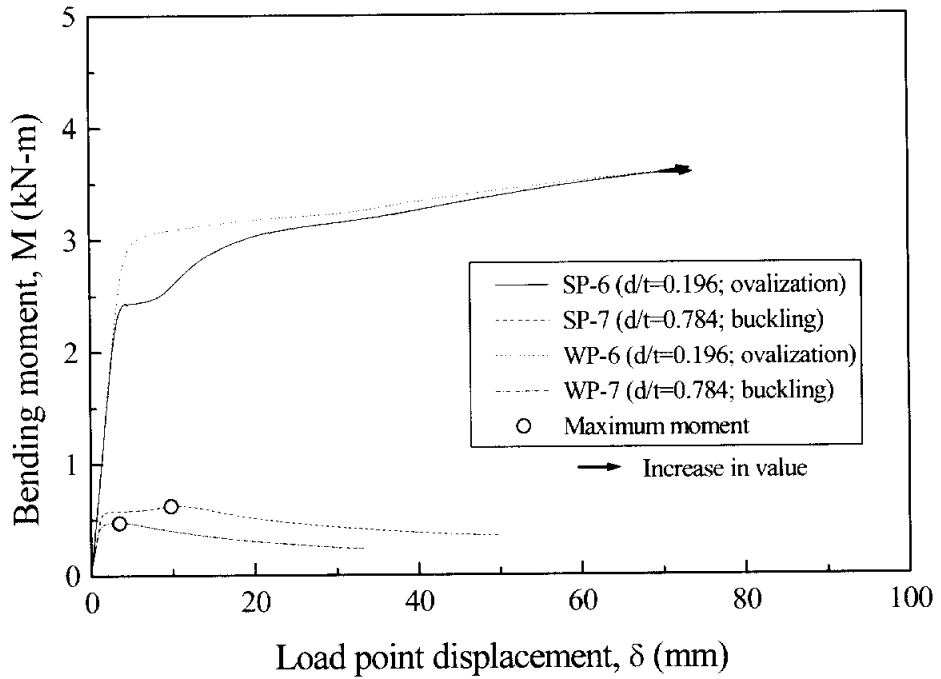
(b) The case of $\ell = 10\text{mm}$

Fig. 5 Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



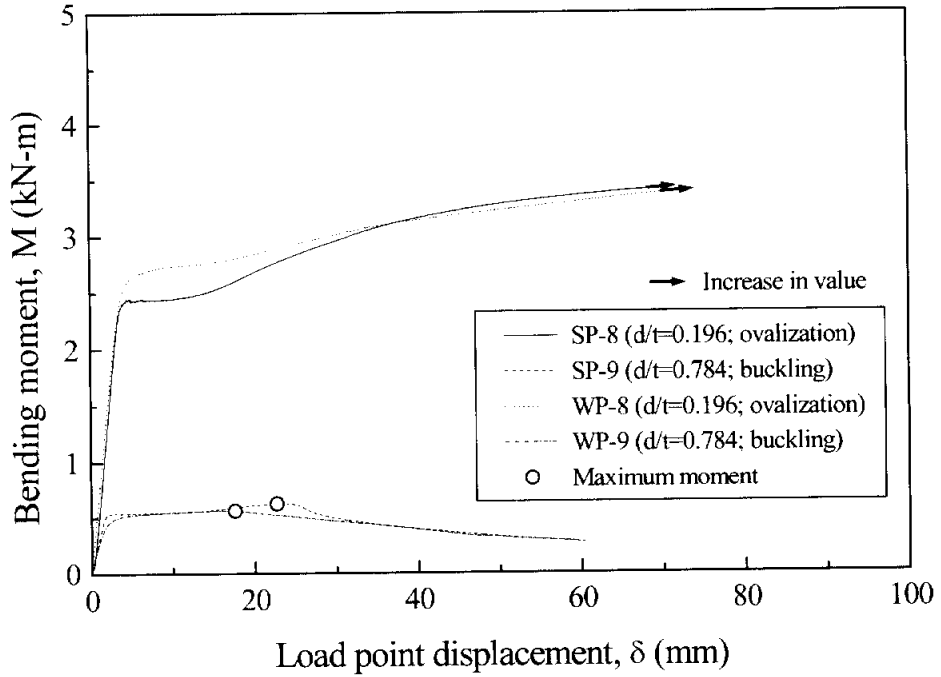
(c) The case of $\ell = 25\text{mm}$

Fig. 5 Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



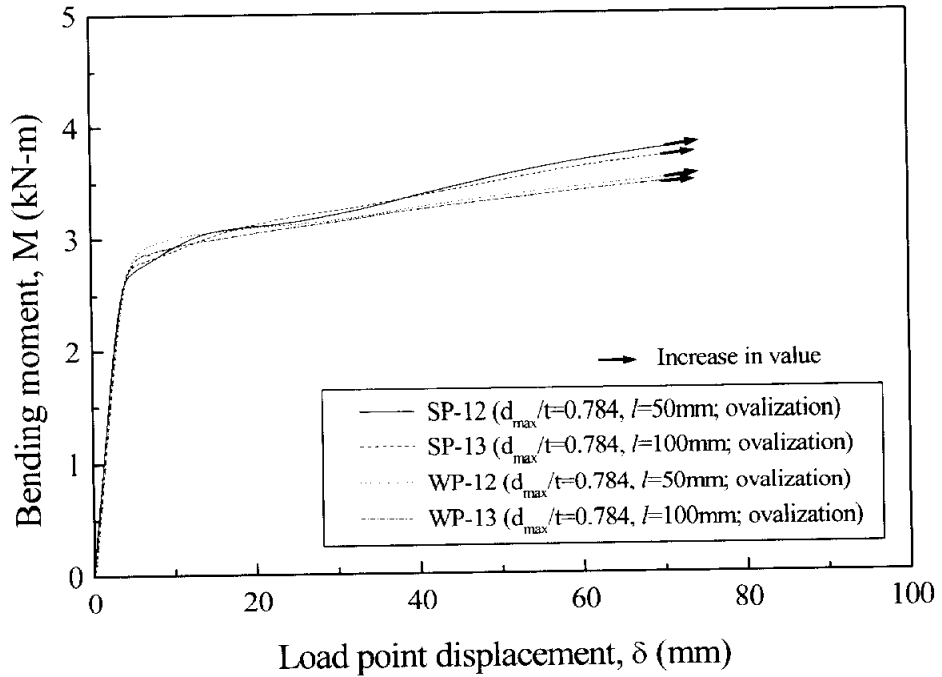
(d) The case of $\ell = 50\text{mm}$

Fig. 5 Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



(e) The case of $\ell = 100\text{mm}$

Fig. 5 Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment



(f) The case of $d_{\max} = 4\text{mm}$

Fig. 5 Moment–displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment

3.2 용접유무에 따른 감육배관의 강도 고찰

Fig. 6에는 최대하중시의 모멘트 M_{max} 와 이론적으로 구한 소성붕괴 모멘트 M_{PC} 와의 관계를 나타낸다. 감육부를 가지는 SPPH38 고압탄소 강배관 시험편에 대한 이론적인 계산값은 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)^(11,14)에 의하여 구하였다. 실단면 응력 기준에 의하여 구한 이론식은 식 (3.1)과 같이 주어진다.

$$M_{PC} = 2 R^2 t \sigma_f [2 \sin \beta + (\pi - 2\beta) \cos \beta] - [A r \sigma_f] \quad (3.1)$$

여기서,

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

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

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

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 (3.2)와 같

이 주어진다.

$$\sigma_f = \left(\frac{\sigma_u + \sigma_y}{2} \right) \quad (3.2)$$

여기서, σ_u 는 인장강도를 σ_y 는 항복강도를 각각 나타내며, Table 1에 나타낸 SPPH38 탄소강강관의 기계적특성치를 이용하였다. 사용된 실단면 응력 기준은 상당히 보수적인 평가를 주고 있다. 따라서, 이 조건에 적용된 유효응력 σ_f (인장강도와 항복강도의 합의 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_V 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.

3.1절에서 언급한 결과에서는 d/t 의 변화에 관계없이 용접을 하지 않은 배관의 최대강도가 용접을 한 배관의 최대강도에 비해 더 크게 나타나고 있다. 이것은 아마도 배관의 손상모드 및 감육길이의 영향일 것으로 판단된다. Fig. 5의 결과들을 보면 알 수 있듯이 용접배관의 경우에 있어서 항복강도가 대체적으로 높게 나타나고 있으나 감육길이가 짧을

수록 변위가 짧은 것은 용접에 의해 취화되어진 부분에 거의 감육이 발생하였기 때문이라고 생각된다. 그러나 감육길이가 어느 정도로 길어졌을 때는 오히려 짧았을 때에 비해 소성변형의 능력에 있어서 더 많이 변형되어지는 결과를 보여주고 있으므로 다양한 조건들에 대한 검토의 여지가 있다.

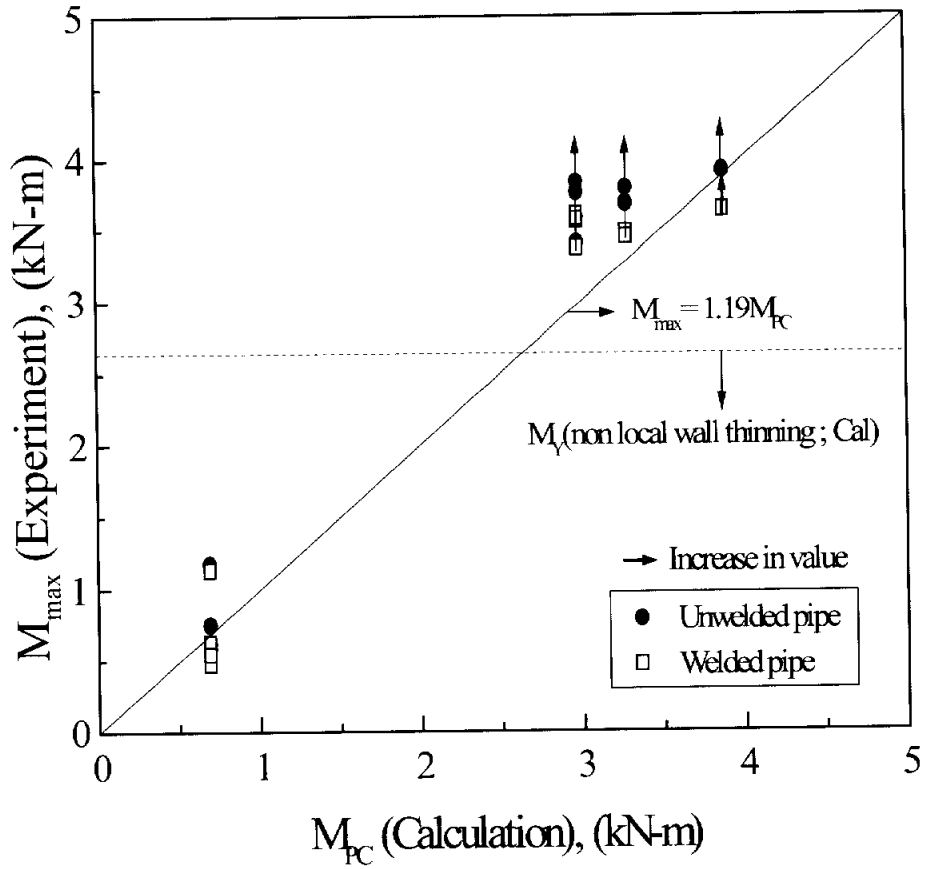
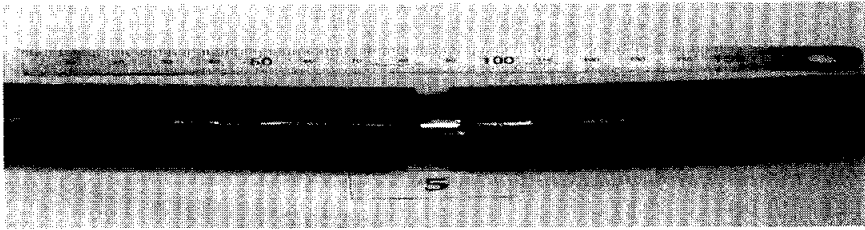
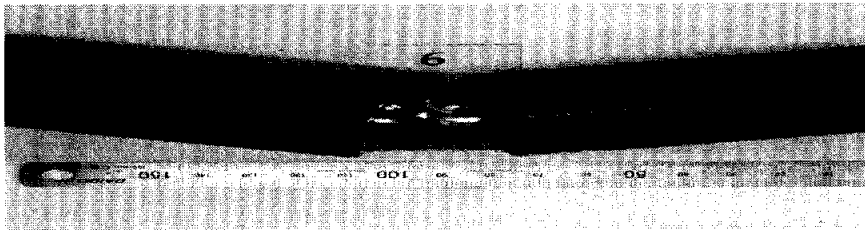


Fig. 6 M_{\max} (Exp.) vs. M_{PC} (Cal.)

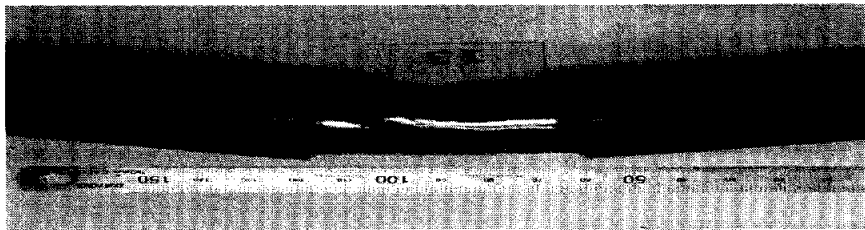
Fig. 7 및 8은 감육배관의 굽힘시험 완료 후 나타난 손상모드를 나타내고 있다. Fig. 9은 이상에서 나타난 용접을 실시한 배관과 실시하지 않은 배관의 강도의 변화를 비로서 나타낸 것이다. 그림의 종축에는 용접을 실시한 배관의 최대모멘트를 용접을 실시하지 않은 배관의 최대모멘트로 나눈 후 %로서 나타내었다. d/t 가 클수록 강도의 저하가 크게 나타났지만, 동일 감육깊이인 경우 감육깊이가 어느 정도 길어지면 오히려 감육깊이가 짧았을 때에 비해 강도비의 저하는 감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 감육깊이가 짧은 경우 모재부와 용접부의 거리가 가까기 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.



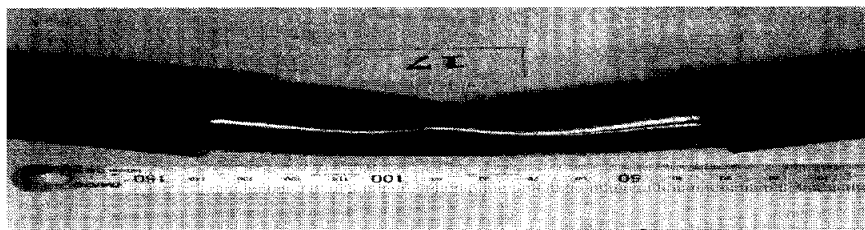
(a) $\ell = 10\text{mm}$ and $d = 4\text{mm}$



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

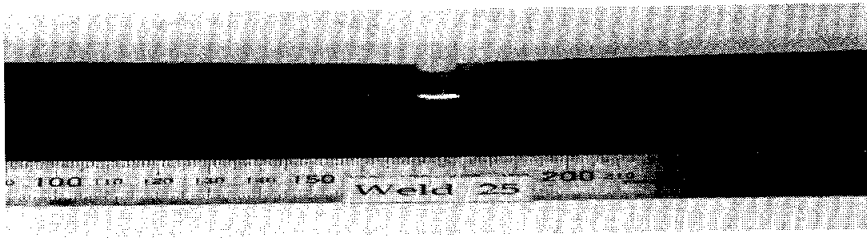


(c) $\ell = 50\text{mm}$ and $d = 4\text{mm}$

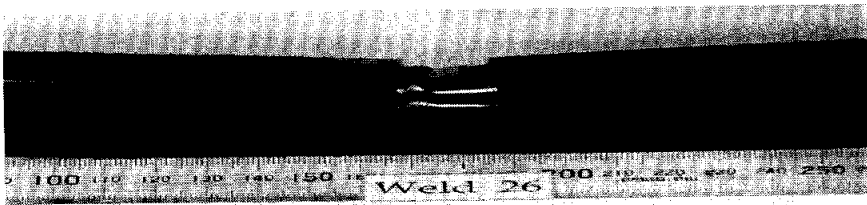


(d) $\ell = 100\text{mm}$ and $d = 4\text{mm}$

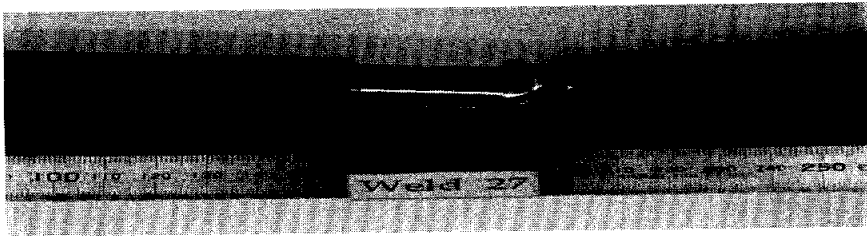
Fig. 7 Failure mode of locally wall thinned pipes (unwelded pipes)



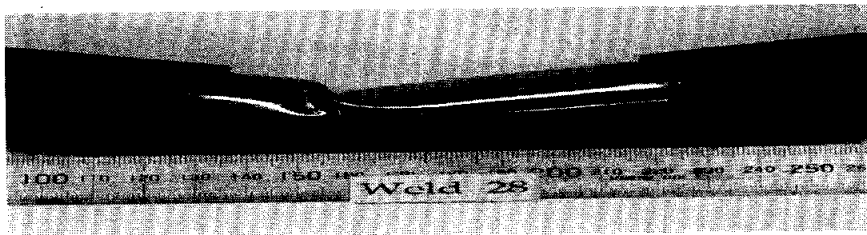
(a) $\ell = 10\text{mm}$ and $d = 4\text{mm}$



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



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



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

Fig. 8 Failure mode of locally wall thinned pipes (welded pipes)

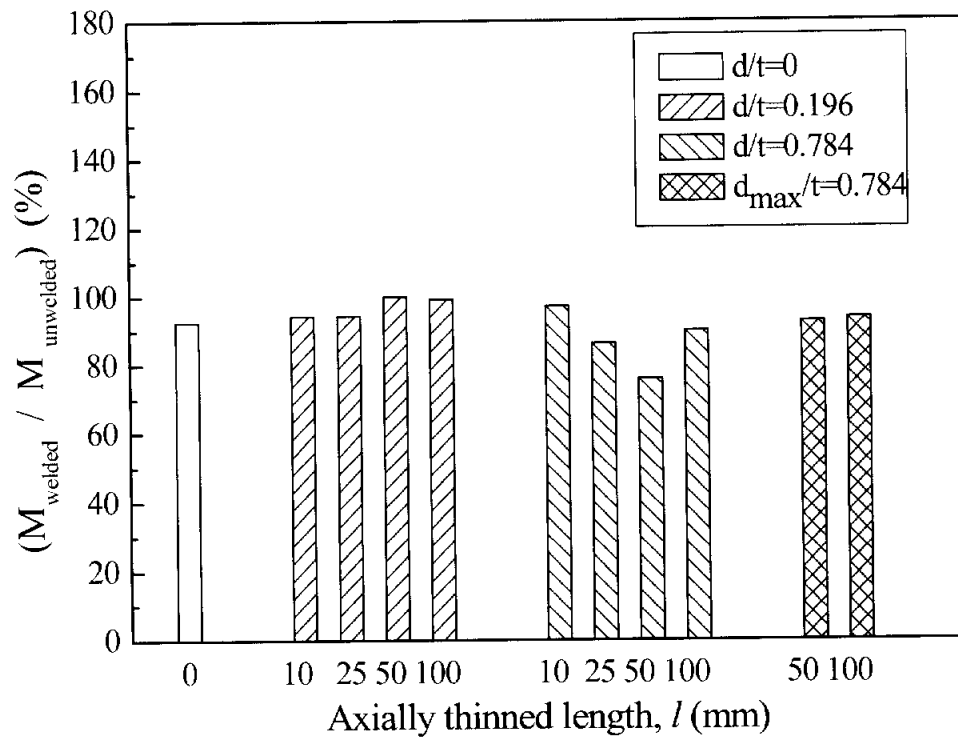


Fig. 9 Moment ratio vs. wall thinned length

4. 결 론

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($1.19\sigma_f$)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.

참 고 문 헌

- (1) Ahn, S. H., Ando, K., Isiwata, M. and Hasegawa, K., Plastic Collapse Behavior of Pipes with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load Allowable Limit, JHPI, Vol. 36, No. 4, pp. 225~234, 1998.
- (2) Virginia Electric and Power Co., Surry Unit 2 Reactor Trip and Feedwater Pipe Failure Report, 1987.
- (3) Shim, S. H., Song, J. S., Yoon, K. B., Hwang, K. M., Jin, T. E., Lee, S. H. and Kim, W. S., Application of CHECWORKS Code for Metal Loss in the Secondary Piping Systems Wolsung Unit 1, Proceeding of the Pressure Equipment Tech. Conference 2000, pp. 59~64, 2000.
- (4) Deardorff, A. F. and Bush, S. H., Development of ASME Section Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping, ASME PVP, PVP-Vol-186, NDE-Vol.7, pp. 71~75, 1990.
- (5) Mathonet, J. F., Cherasse, J. M., Leblois, C. L. and Guyette, M. A., 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, 1995.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. X I, 1998.
- (7) American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, 1995.

- (8) NP-6045 Research Project 1757-65, Evaluation of Flaws in Ferraws in Ferritic Piping, 1998.
- (9) 김영진, 석창성, 전현규, 최영환, 이정배, “원자력 배관 건전성 전문가 시스템개발(1)”, 대한기계학회 논문집, 제20권, 제2호, pp. 575~584, 1996.
- (10) NPIES ver. 2.0, Nuclear Piping Integrity Expert System.
- (11) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S. H. and Ando, K., Fracture Behavior of Carbon Steel pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load, Nuclear Engineering and Design 191, pp. 195~204, 1999.
- (12) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N., Effects of Axial Extent of Thinned Area on the Allowable Wall Thickness in Thinned Pipe, Proceedings of the KSME 1999 Fall Annual Meeting A, pp. 597~602, 1999.
- (13) Kim, J. W., Park, C. Y. and Kim, B. N., Evaluation of Local Allowable Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment, Transactions of the KSME A, Vol. 25, No. 1, pp. 81~88, 2001.
- (14) Kanninen, M. F., Zahoor, A., Wilkowski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304 Stainless Pipes under Dynamic Loading, EPRI NP-2347, Vols. 1 and 2, EPRI, Palo Alto, 1982.

- 15) 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.
- 16) 西田正, “應力集中” 森北出版, pp. 632~635, 1967.
- 17) 이철구, 남궁재관, “신편 용접공학”, 1996.
- 18) 산업설비안전진단연구회, 배관안전진단기술 , 도서출판 창조, pp. 305~328, 2000.