감육을 가지는 배관 용접부의 파괴거동

안석환†·남기우*·정정환**·김용운**

Fracture Behavior of Welded Pipes with Local Wall Thinning

Seok-Hwan Ahn, Ki-Woo Nam, Jeong-Hwan Jeong and Yong-Un Kim

Key Words: Local Wall Thinning(국부감육), Welded Pipe(용접배관), Failure Mode(손상모드), Bending Load(굽힘하중), Fracture Strength(파괴강도), Fracture Behavior(파괴거동)

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

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. 이러한, 에너지 관련 플랜트의 배관에 있어서는 그 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화 손상을 받을 우려가 있으며, 최근 국부적인 감육(배관의 두께가 감소하는 현상)현상이 국내외적으로 보고되어지고 있는 실정이다. 이러한 배관의 감육문제는 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 안 등이 검토되어지고 있다.

배관에 국부적인 감육부가 발생하였을 경우, 배관의 강도와 손상모드를 해명하기 위한 실험연구의 예는 극히 적고, 또한 그 특성의 해명이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 실질적으로 배관에 발생하는 감육의 문제는 배관의 내부이며, 내압에 의한 영향을 크게 받을 것이다.

저자들은 이미 전보에 있어서 고압탄소강배관의 외부에 기계적으로 감육부를 가공하여, 굽힘하중 하에서 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 손상모드에 어떠한 영향을 미치는 가를 정량적으로 해명하기 위한 실험 연구를 실시하였다. 그러나, 실제 구조물에 있어서는 배관을 연결시키기 위하여 용접을 행하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 용접부가 침식-부식에 의해 두께감소가 발생한 것을 가정하여 고압

† 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : shahn@mail1.pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1617 FAX : (051)620-1405
* 회원, 부경대학교 재료공학부
** 회원, 부경대학교 대학원

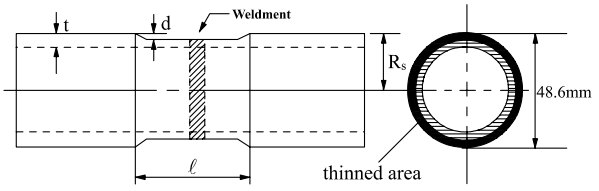
탄소강배관을 용접한 후 그 용접부에 감육결함을 기계적으로 외부에 가공하였다. 이와 같이, 배관 용접부에 상정한 감육의 형상과 정도에 따른 용접배관의 손상모드와 강도를 구하고 용접하지 않은 감육배관의 결과와 상호 비교, 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

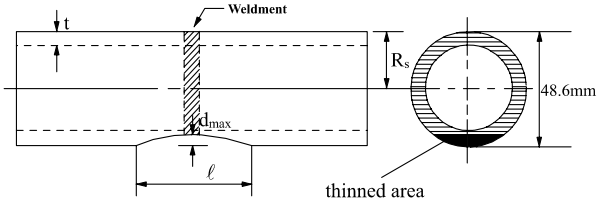
2.1 재료

본 실험에 사용된 재료는 직경 48.6 ㎜인 Schedule 80 STS370 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; JIS Standard G3455)이다. 그 기계적 성질 및 화학성분을 각각 Table 1과 2에 나타낸다.

그리고, 감육부의 강도 및 손상모드에 대한 규명을 하기위해 사용한 시험편의 형상을 Fig. 1(a)와 (b)에 나타낸다. 파괴거동에 미치는 감육위치의 영향은 고려되지 않았다. Fig. 1(a)는 360 ℃전주에 걸쳐서 감육가공을 한 경우로서 용접을 하지 않은 배관시험편 및 용접배관시험편을 나타낸다. 또한 Fig. 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 4에는 Fig. 1(a)와 (b)에 도식적으로 나타낸 시험편의 각각의 치수 및 실험으



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



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

Fig. 1 Pipe specimens with local wall thinning

로부터 구한 최대모멘트의 결과를 나타낸다.

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(시행자; (주)두산중공업), 그 상세한 조건은 Table 3에 나타낸다. Fig. 2는 배관용접부의 패스 순서(Pass sequence)를 나타낸다.

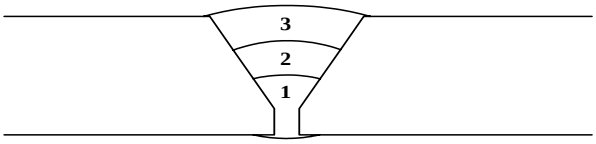


Fig. 2 Pass sequence of welded pipe

2.3 실험방법

Fig. 1과 같이 감육결함을 가공한 실배관 시험편에 4점굽힘시험을 실시하였다. 굽힘시험시에는 용량 98kN의 만능시험기(Shimadzu사: Model EHF-ED10)를 이용하여 정적인 굽힘하중을 부하하였다. 이때, 부하 스팬 길이(L_I)는 150 ㎜, 지지스팬 길이(L_O)는 600 ㎜ 로 하였고, 크로스헤드 변위 속도는 1 ㎜/min의 변위 제어에 의해 실온 대기 중에서 실시하였다. 지지용 지그는 하중이 동일 위치에 부하될 수 있도록 하기 위하여 롤러 형태로 제작하였다. 시험시에 하중과 하중점변위를 측정하였다. 단, 본 실험에서는 내압은 고려하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접유무에 따른 감육배관의 M-δ선도

Fig. 3(a)~(f)는 4점굽힘시험에 의한 모멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다. 배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 편평화, 편평화 후 균열발생, 국부좌굴 및 국부좌굴후 균열발생과 같은 4종류의 손상모드가 나타났다. 각각의 그림 속에는 용접하지 않고 감육을 상정한 배관시험편(SP시험편)과 용접 후 감육을 상정한 배관시험편(WP시험편)을 각각의 감육길이에 대하여

Table 1 Mechanical properties

Properties / Material	Tensile Strength (σ_u)	Yield Strength (σ_y)	Elongation
STS370	402 MPa	273 MPa	28 %

Table 2 Chemical compositions[wt%]

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

Table 3 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	〃	〃	〃	〃	〃

정리하여 나타내었다. 그림속의 화살표는 변위의 증가에 따라 하중의 급격한 변화가 없으므로 해서 도중에 시험을 중단한 결과로서 하중의 계속적인 증가를 나타내고 있다. 편평화파괴 한 경우에 있어서는 변위가 약 70mm되는 지점의 강도를 최대강도로 선택하여 비교하였다.

먼저, Fig. 3(a)는 감육결함을 가공하지 않은 건전한 배관의 용접 유무에 따른 M-δ선도를 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 형상을 나타내었다. Fig. 3(b)는 감육길이 ℓ=10mm인 경우로서 감육깊이 d=1 과 4mm의 경우이다. d/t=0.196인 경우(SP-2와 WP-2) 모두 편평화파괴를 나타내었고, 용접을 한 시험편의 최대강도가 용접을 하지 않은 시험편에 비해 약 94.3%로 낮게 나타났다. 이에 반해, d/t=0.784로 감육결함의 깊이가 큰 경우(SP-3과 WP-3)에 있어서는 오히려 용접을 한 시험편의 최대강도가 그렇지 않은 시험편에 비해 약 130%정도로 높게 나타나고 있다. 그러나, 최대강도점 부근에 있어서 균열이 발생하였고 이후 급격한 하중의 저하를 가져왔고 편평화 후 균열파괴하였다. d/t=0.784로서 용접을 하지 않은 시험편은 최대강도는 낮게 나타났지만 오히려 최대강도를 나타내는 변위에 있어서는 약 67.5%정도 더 변형을 하고 있고, 최대강도를 나타낸 이후 균열이 발생하였으며 이후 급격한 하중의 저하를 나타내고 있다. 최종 파괴의 형태는 좌굴 후 균열파괴를 나타내었다. Fig. 3(c)는 감육길이 ℓ=25mm인 경우로서 감육깊이 d=1 과 4mm의 경우이다. d/t=0.196의 경우 편평화파괴를 나타내었고, 용접을 한 시험편(WP-4)의 최대강도가 용접을 하지 않은 시험편(SP-4)에 대해 약 94.3% 정도를 나타내었다. d/t=0.784의 경우 용접을 한 시험편(WP-5)의 최대강도가 용접을 하지 않은 시험편(SP-5)에 대해 약 156% 정도를 나타내었다. 그러나, WP-5에서는 최대강도 이후 균열이 발생하여 하중이 급격히 저하하여 좌굴 후 균열파괴의 양상을 나타내었으나, SP-5에서는 최대강도를 나타낸 후 좌굴파괴하고 있고 하중의 급격한 저하 없이 소성변형하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 감육길이 ℓ=50mm인 경우로서

Table 4 Specimen geometries and test results

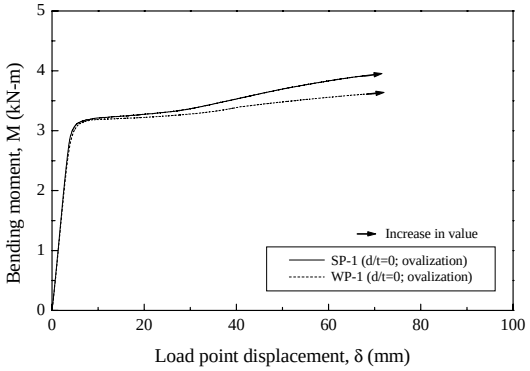
Specimen No.	Half Outer Diameter	Wall Thickness	Thinned Depth	Wall Thinned Ratio	Axially Thinned Length	Thinned Angle	Maximum Moment by Exp.	Failure Mode
	R_s(mm)	t(mm)	d(mm)	d/t	ℓ(mm)	2θ(°)	M_{max} (kN·m)	
SP-1	24.3	5.1	0	0	0	360	3.918	0
SP-2	〃	〃	1	0.196	10	〃	3.837	0
SP-3	〃	〃	4	0.784	10	〃	1.167	BC
SP-4	〃	〃	1	0.196	25	〃	3.782	0
SP-5	〃	〃	4	0.784	25	〃	0.732	B
SP-6	〃	〃	1	0.196	50	〃	3.590	0
SP-7	〃	〃	4	0.784	50	〃	0.622	B
SP-8	〃	〃	1	0.196	100	〃	3.409	0
SP-9	〃	〃	4	0.784	100	〃	0.628	B
* SP-12	〃	〃	4	0.784	50	63.4	3.795	0
* SP-13	〃	〃	4	0.784	100	〃	3.718	0
WP-1	〃	〃	0	0	0	360	3.625	0
WP-2	〃	〃	1	0.196	10	〃	3.616	0
WP-3	〃	〃	4	0.784	10	〃	1.513	OC
WP-4	〃	〃	1	0.196	25	〃	3.265	0
WP-5	〃	〃	4	0.784	25	〃	1.140	BC
WP-6	〃	〃	1	0.196	50	〃	3.592	0
WP-7	〃	〃	4	0.784	50	〃	1.056	BC
WP-8	〃	〃	1	0.196	100	〃	3.378	0
WP-9	〃	〃	4	0.784	100	〃	1.032	B
* WP-12	〃	〃	4	0.784	50	63.4	3.519	0
* WP-13	〃	〃	4	0.784	100	〃	3.482	0

Note: O : Ovalization
OC : Crack initiation after ovalization
B : Buckling
BC : Crack initiation after buckling
SP-1 ~ SP-14 : Unwelded specimens
WP-1 ~ WP-13 : Welded specimens
SP-1 and WP-1 : Non local wall thinning specimen
* : Maximum thinned depth = d_{max}
↑ : Increase in value

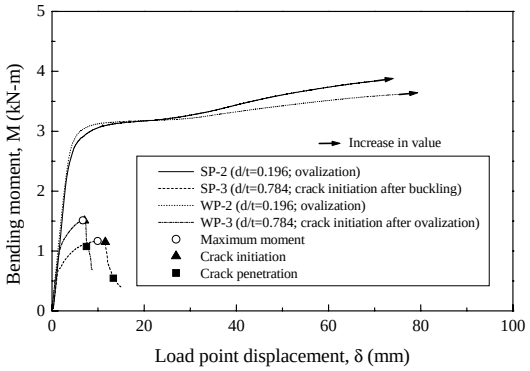
감육깊이 d=1 과 4㎜의 경우이다. d/t=0.196의 경우는 편평화를 나타내었고 변위 70㎜지점에서의 최대강도의 차는 거의 없으나, 실험을 계속할 경우 용접을 하지 않은 시험편의 최대강도가 다소 높게 나타나리라 예상된다. d/t=0.784에 있어서는 용접을 한 시험편(WP-6)의 경우가 최대강도에서 약 170% 정도 높게 나타났으나 최대강도를 나타낸 후 균열이 발생하였다. 그러나, 감육길이 ℓ이 짧은 경우에 비해서 하중의 저하는 완만함을 알 수 있다. SP-7은 좌굴파괴를 나타내고 있고 최대강도 이후 하중의 급격한 저하없이 소성변형하고 있다. Fig. 3(e)는 감육길이 ℓ=100㎜인 경우로서 감육깊이 d=1 과 4㎜의 경우이다. 편평화가 발생한 d/t=0.196의 경우 최대강도의 차는 미미하게 나타났다. 또한, d/t=0.784의 경우는 좌굴파괴를 나타내었고 용접을 한 경우(WP-9)가 그렇지 않은 경우에 비해 약 164% 정도의 최대강도를 나타내었다. 좌굴 발생 후 하중의 급격한 저하 없이 소성변형하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(f)는 부분적으로 감육결함을 상정한 경우로서 길이방향에 대해 최대감육깊이, d_{max}를 4㎜로 한 경우이다. 모든 경우 편평화현상을 나타내었고 용접을 한 시험편이 용접을 하지 않은 시험편의 경우보다 ℓ=50㎜에 있어서는 약 92.7%, ℓ=100㎜에서는 약 93.7% 정도의 하중의 저하를 가져왔다.

3.2 용접유무에 따른 감육배관의 강도 고찰

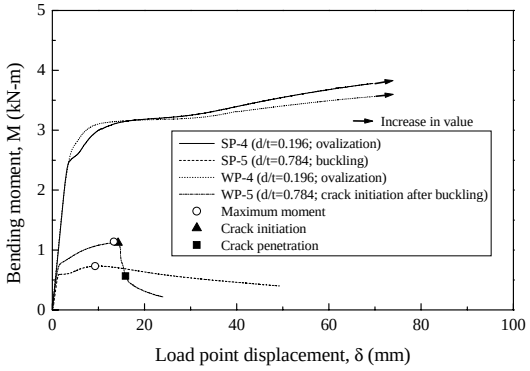
Fig. 4에는 최대하중시의 모멘트 M_{max}와 이론적으로 구한 소성붕괴모멘트 M_{PC}와의 관계를 나타낸다. 감육부를 가지는 STS370 고압탄소강배관 시험편에 대한 이론적인 계산값은 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)에 의하여 구하였다. 전보에서 보고했듯이 실단면 응력 기준은 상당히 보수적인 평가를 주고 있다. 따라서, 이 조건에 적용된 유동응력 σ_f(인장강도와 항복강도의 합의 1/2)의 값을 상향 조정하면 약 $1.19\sigma_f$를 만족하게 된다. 이 $1.19\sigma_f$는 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_Y값을 상회하는 결과들에 한정하여 살펴보면 아직도 보수적 평 가를 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.



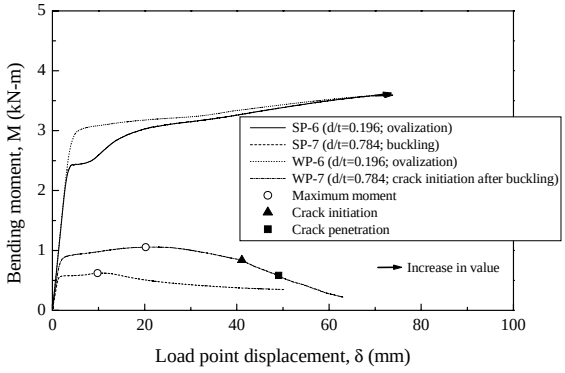
(a) The case of non local wall thinning



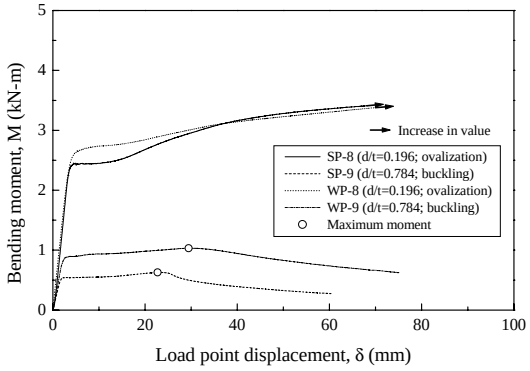
(b) The case of ℓ=10 ㎜



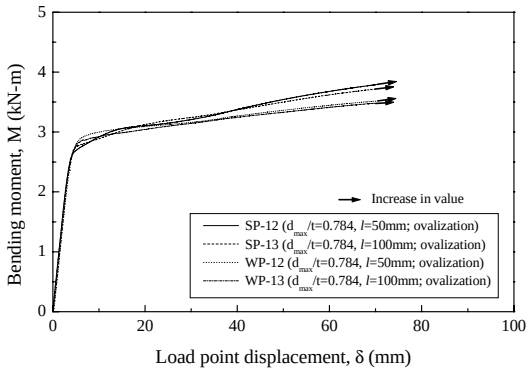
(c) The case of ℓ=25 ㎜



(d) The case of ℓ=50 ㎜



(e) The case of ℓ=100 ㎜



(f) The case of d_{max}=4㎜

Fig. 3 Moment-displacement curves for locally thinned pipes with weldment and unweldment

3.1절에서 언급한 결과에서는 d/t가 작은 경우에는 용접을 하지 않은 배관이 최대강도에서 더 큰 값을 나타내고 있으나, d/t가 커짐에 따라서 오히려 용접을 한 배관의 경우에 있어서 최대강도값이 더 크게 나타나고 있다. 이것은 아마도 배관의 손상모드 및 감육길이의 영향일 것으로 판단된다. Fig. 3의 결과들을 보면 알 수 있듯이 용접배관의 경우에 있어서 항복강도가 대체적으로 높게 나타나고 있고 감육길이가 짧을수록 변위가 짧은 것은 용접에 의한 취성이 발생하였기 때문이라고 생각된다. 그러나 감육길이가 100㎜ 정도로 길어졌을 때는 오히려 용접을 하지 않은 경우보다도 강도 및 소성변형에 있어서 나은 결과를 보여주고 있으므로 다양한 조건들에 대한 검토의 여지가 있다.

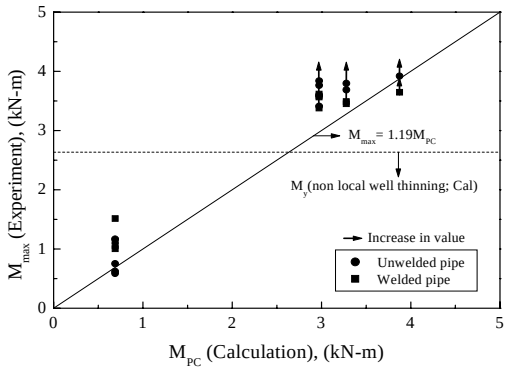


Fig. 4 M_{max}(Exp.) vs. M_{PC}(Cal.)

4. 결 론

1) 용접 및 용접을 하지 않은 배관의 감육부에 굽힘하중을 부하한 결과, 편평화, 편평화후 균열발생, 국부좌굴 및 국부좌굴후 균열발생과 같은 4종류의 손상모드가 나타났다.

2) 용접유무에 관계없이 실단면 응력기준은 보수적인 평가를 나타내었다..

3) 용접을 하지 않은 배관에 대해 용접한 배관의 최대강도는 d/t가 적을수록 저하하였고, d/t가 클수록 더 크게 나타났다.

참고문헌

생략