

A106 Gr B강 배관용접부의 잔류응력해석 및 피로균열성장특성

(Fatigue Crack Propagation Characteristics in HAZ of A106 Gr B Steel Pipe Weldments)

김철한* · 배동호** · 김복기*** · 조선영* · 홍정균**** · 이범노****

(* 성균관대학교 대학원, *** 성균관대 기계공학부,

** 명지전문대 기계설계과, **** Battelle)

Key Word : heat affected zone(HAZ, 열영향부), residual stress(잔류응력), stress redistribution(응력재분포), crack closure(균열닫힘), K_{op} (균열개구 응력확대계수), K_{res} (잔류응력확대계수), ΔK_{eff} (유효응력확대계수범위)

Abstract

In this study, residual stresses of the weldment were calculated by finite element analysis(FEA) and experiment. And, the crack closure behaviour and fatigue crack growth characteristics in field of residual stress of A106 Gr B steel pipe weldment were investigated under various stress ratio. Obtained results are as follows. 1) K_{op} was independent of K_{max} and load ratio in fatigue crack growth. 2) In variation of load ratio, the scatter band of crack growth curve was reduced by half considering crack closure. and 3) Neglecting crack closure behaviour, actual fatigue crack growth rate can be underestimated' and Actual fatigue crack growth rate can be overestimated by K_{res} in tensile residual stress field.

1. 서 론

용접은 높은 생산성, 우수한 경제성 등에 힘입어 산업설비 또는 구조물의 제작수단으로 널리 이용되고 있으나, 용접부에서는 각종 용접결함과 기하학적인 형상에 의한 응력 집중부(stress concentration zone)가 발생할 뿐만 아니라, 용접입열(heat input)과 용접부재의 구속으로 인해 심한 경우 부재의 항복강도(yield strength) 이상의 용접 잔류응력(welding residual stress)이 발생하게 된다. 이러한 응력집중 또는 잔류응력이 외부의 피로하중(fatigue load)과 중첩될 경우에는 용접부의 피로강도가 현저하게 저하됨으로써 구조물 파손의 주된 원인이 되기 때문에, 용접구조물의 안전설계나 신뢰성평가를 위한 용접부의 피로균열진전 해석에는 보다 세심한 주의가 필요하다.^(1~4)

본 연구에서는 발전 및 중화학 플랜트 등의 배관재로서 널리 이용되고 있는 A106 Gr B강의 용접 열영향부내에 존재하는 균열의 피로에 의한 성장특성을 해석하기 위한 기초 연구로서, 용융용접과정에서 발생하는 잔류응력의 분포를 유한요소법(FEM)과 실험을 통하여 해석하였다. 그리고, 용접된 관(pipe)으로부터 피로시편의 절취와 가공과정에서

기존의 잔류응력이 상당히 이완될 수 있으나, 시편 제작 후 잔존하는 최종 잔류응력이 피로균열성장에 미치는 영향은 무시할 수 없기 때문에, 가공된 시편에 대한 잔류응력을 실험적으로 측정하고 이를 바탕으로 K_{res} 값을 유한요소해석을 통하여 계산하였다. 이상의 결과와 용접잔류응력 및 열영향부 내에 존재하는 균열의 진전시 발생하는 균열닫힘 현상의 해석결과를 토대로 공기중 피로균열 성장 특성곡선을 재정리하였다.

2. 용접 잔류응력 해석

2.1 해석 모델

본 연구에서는 최근에 개발된 유한요소 해석에 의한 잔류응력 해석 기법들 중에서 비교적 해석결과에 대한 신뢰성과 해석과정의 경제성이 합리적인 것으로 평가되고 있는 Tsai⁽⁵⁾ 등이 제안한 입열 모델(heat input model)을 가지고 2차원 유한요소해석을 통하여 용접잔류응력을 해석하였다. 해석대상은 석유화학과 발전설비에 널리 사용되고 있는 A106-Gr B강 배관재로서, 화학적 성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같고, 관의 치수는 두께 33mm, 외경 275mm이며, 용접조건 및 용접과정은 Table 3과 같다.

Fig. 1의 2차원 유한요소해석 모델은 6절

점 비선형 평면변형률 요소(plain strain element)를 사용하였다. 그리고 실 용접과 동일한 용가제 효과(filler metal effect)를 얻기 위해서 요소재생법(element rebirth method)을 이용하였으며, 해석 결과의 정확도를 높이기 위해 용접 비드를 세밀하게 분할하였다. 본 해석에 사용된 프로그램은 HKS사의 ABAQUS이다. 그리고, 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해서 천공법(hole drilling method)으로 실험 해석하여 그 결과를 비교하였다.

2.2 해석 결과

Fig. 2는 Fig. 1의 유한요소 해석 모델에 의한 배관 용접부 외표면에서의 축 방향, 즉 용접선에 수직인 방향의 잔류응력분포를 천공법에 의한 측정결과와 비교해서 도시한 것으로서, 두 결과가 상당히 근사하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 용접부의 역학적 특성을 해석함에 있어서 반드시 고려되어야 할 용접 잔류응력을 정확히 해석하기 위해서는 실제 용접상황을 재현할 수 있는 유한요소해석 모델의 작성과 합리적인 경계 및 구속조건의 설정이 필요하다고 사료된다. Fig. 2의 축방향 잔류응력분포의 경향을 살펴보면, 용접금속(weld metal)과 열영향부 경계(weld toe) 근방 및 용접비드 내에서 높은 인장응력(tensile stress)상태의 피크 치(peak value)를 나타내고 있는데, 용접비드의 좌우 열영향부에서의 피크 치가 동일위치가 아닌 비대칭적인 형태를 나타내는 것은 다층용접의 최종단계에서 용접순서의 차이에 의해 후속 용접패스의 용접입열의 영향에 의한 것으로 생각된다.

3. 용접잔류응력에 의한 응력확대계수(K_{res})

3.1 해석 모델과 방법

본 연구에서는 균열선단 근방의 J 적분값을 2차원 유한요소해석하고, 그 결과로부터 K_{res} 값을 계산하였다. 해석대상은 CT시편으로서, 시편의 형상은 용접 열영향부내에 존재하는 균열을 중심으로 상·하 대칭이므로; Fig. 3과 같이 반 모델로서 작성하였다. 모델의 기계적 성질은 Table 2와 같고, 특히, 용접비드부의 기계적 성질은 용접된 실배관으로부터 채취된 인장시편을 가지고 실험적으로 구하여, 그 값을 적용하였다. 사용된 요소는 8절점 쉘요소(shell element)이며, 균열선단(crack tip)부근을 방사형으로 모델링함과 동시에 균열선단은 특이요소(singular element)를 사용하여 J 적분값 계산에 적합

하도록 하였다.

3.2 해석 결과

용접된 실제 배관으로부터 시편을 채취하고 가공하는 과정에서 용접 잔류응력은 상당 부분 이완이 되는데, 본 연구에서 사용된 피로시편에 대하여 파단법으로 최종 잔류응력을 측정된 결과 20.5 MPa 정도였다. 이렇게 측정된 최종 잔류응력값을 Fig. 3의 모델에 초기조건으로 적용하고 응력해석을 수행하여 Fig. 4의 결과를 얻었다. 이 응력분포로부터 J 적분값은 $0.01139 Nmm/mm^2$ 로 계산되었으며, 탄성해석에 있어서 J 와 K 의 관계를 이용하여 K_{res} 을 계산한 결과 $K_{res}=1.5 MPa\sqrt{m}$ 의 값을 얻었다.

4. 잔류응력장 내에서의 피로균열 성장 특성

4.1 시편

시편 재료는 유한요소해석에서와 동일하며 Fig. 1에 표시된 바와 같이, 예균열의 방향이 용접선에 평행하도록 채취하였다. 시험편은 ASTM E647에 의거 CT시편으로 제작하였다. 실 용접배관으로부터 시편을 채취하는 과정에서 용접잔류응력의 이완은 막을 수 없기 때문에, 절단된 시편에 잔존하는 용접 잔류응력의 이완을 최대한 억제시키기 위해서 습식으로 기계가공 하였다.

4.2 실험장치 및 실험방법

피로시험장치는 10ton용량의 유압식 피로시험기(Instron 8516)이며, 부하형태는 ASTM E647의 하중감소 실험법을 따랐다. 이 때 실험하중은 $P_{max} = 15696N$ 에서 시작하여 단계적으로 감소시키며 실험을 진행하였으며, 부하속도 $f=20Hz$ 의 정현파를 사용하였다. 또한, 하중비의 변화에 따른 피로균열 진전 특성 및 균열단합 거동을 파악하기 위하여 $R=0.05, 0.1, 0.25, 0.4, 0.5$ 로 하중조건을 변화시켜 피로실험을 수행하였다.

4.3 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 K_{max} 와 K_{op} 에 대한 하중비 의존성을 나타낸 것이다. 하중비가 $R=0.05, 0.1, 0.25$ 인 경우에는 $K_{op}=14MPa\sqrt{m}$ 정도로 K_{max} 의 변화에도 불구하고 거의 일정한 값을 나타내었으며, 이것은 R. Strikanth와 M. Ghate⁽⁶⁾의 연구결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나, $R=0.4$ 와 0.5 인 경우에는 K_{max} 에 대하여 선형적인 변화

를 나타내었으며, 균열단합 현상이 관찰되지 않았다. 이는 하중비가 큰 범위에서는 $K_{min} > K_{op}$ (Fig. 5) 이 되므로, 균열전단의 소성 변형에 의한 균열면상의 탄성적인 가압효과가 감소되어, 제하시의 균열단합 현상이 뚜렷이 나타나지 않았기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 6은 균열진전에 따른 균열열림비 ($U = \Delta K_{eff} / \Delta K$)의 경향을 나타낸 것이다. 균열길이 증가함에 따라 U값이 점차 감소하나 균열진전과 함께 U값의 감소폭이 줄어드는 경향을 보였으며, 동일 균열길이에 있어서는 하중비가 커질수록 K_{min} 이 증가하여 ΔK 가 감소하므로 U값이 상승하였다.

Figs. 7, 8은 균열단합 현상을 고려하지 않은 응력확대계수 범위(ΔK) 및 이를 고려한 유효응력확대계수 범위(ΔK_{eff})와 균열성장속도와의 관계를 비교·도시한 것이다. $da/dN - \Delta K$ 의 관계는 하중비가 증가함에 따라 균열성장곡선이 왼쪽으로 이동하는 일반적인 경향을 보여주고 있지만, Fig. 9에서와 같이 하중비가 낮은 경우에는 $K_{op} > K_{min}$ 이 되므로, 균열성장특성곡선은식(1)의 유효응력확대계수폭(ΔK_{eff})을 사용하여 균열성장곡선을 재정리할 필요가 있다.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} + K_{res} - K_{op} \quad (1)$$

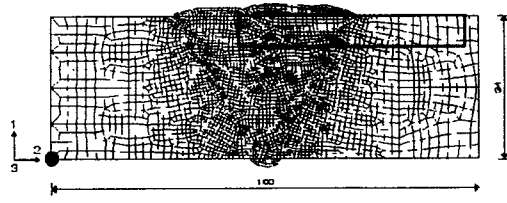
Fig. 8에 나타난 바와 같이, $K_{min} < K_{op}$ 인 경우에는 선도를 왼쪽으로 이동시키게 되며, 이동되는 정도는 K_{op} 값이 K_{min} 값에 무관하게 일정하므로 하중비가 낮을수록 커지게 된다. 그러므로 하중비의 변화에 따른 균열성장곡선의 분산폭이 균열단합현상을 고려하지 않았을 때보다 약 50%가량 감소하는 결과를 나타내었다. 그리고, 본 연구에서와 같이 균열진전면에 대하여 수직방향의 인장잔류응력이 균일하게 존재하는 경우에는 식(4)에서 알 수 있듯이 균열성장특성곡선이 K_{res} 만큼 과대 평가되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 피로균열진전에 미치는 균열단합현상과 잔류응력의 영향을 감안할 때 용접부의 정확한 피로균열진전 특성의 해석을 위해서는 피로 실험에 앞서 정확한 잔류응력분포의 추정과 그에 따른 역학적 변수들의 계산이 선행되어야 할 것이다.

6. 결론

- 1) A106 Gr B 강의 용접부에 대한 용접 잔류응력을 경사함수 열원 모델(heat source model with lump function)로 2차원 유한요소 해석한 결과, 용접 열영향부와 용접 비드 부 내에는 인장잔류응력의 피크 치가 존재하며, 이것은 피로균열진전거동에 영향을 미친다.
- 2) A106 Gr B 강 용접부의 열영향부내에 존재하는 균열의 공기중 피로거동에 있어서, 균열 열림점에 상당하는 K_{op} 은, 하중비(R) < 0.4에서, K_{max} 와 하중비에 대해 독립적이나, 하중비가 낮을수록 균열단합 현상의 영향은 크게 작용한다는 것이 확인되었다. 그리고, 균열단합 현상을 고려하면 하중비 변화에 따른 균열성장 특성곡선의 분산폭을 50%정도로 줄일 수 있었다.
- 3) 본 연구에서와 같은 인장 잔류응력장에서의 피로균열진전 특성에 있어서, 잔류응력은 균열성장특성곡선을 K_{res} 만큼 오른쪽으로 이동시킨다. 그리고, 저 하중비(R < 0.4)에서 균열단합현상은 피로균열 성장에 영향을 미치지므로, 용접부의 피로균열진전특성곡선은 잔류응력과 균열단합현상을 동시에 고려한 ΔK_{eff} 에 의해서 정리되는 것이 합리적이라 사료된다.

참고문헌

- 1) K. Masubuchi, "Analysis of Welded Structure", Pergamon Press, pp. 328-335, 1980
- 2) "銲接接合便覽", 日本銲接學會編, pp.86-105, 1990
- 3) Th. Nitschke-Pagel and H. Wohlfahrt, "Influence of Residual Stress on the Fatigue Strength of High Strength Structural Steel", European Conference on Residual Stresses IIW-Nr XIII pp. 1514-1593, 1992
- 4) H. Kobayashi and A. Todoroki, "Effect of Weld Induced Residual Stress on Fatigue Crack Growth in Compact Specimen", 日本材料學會集 第35卷 第391号 pp. 73-78, 1986
- 5) J. K. Hong, "Study of Numerical Methodologies For Multi-pass Welding Analysis", Ph.D Thesis, Ohio State University, 1996
- 6) E. banerjee, "A Review of Crack Closure", AFWAL-TF-B4-4031, University of Dayton, pp. 15-47, 1984



B.C at ● : $U_2 = 0$

Fig. 1 FEM model for residual stress analysis

Table 1. Chemical composition of A106 Gr B

A106 Gr B		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr+Mo	Ni+Cu
GTAW	WELD	0.08	0.96	0.33	0.011	0.006	0.08	0.05	0.36
	HAZ	0.09	0.86	0.21	0.009	0.004	0.10	0.05	0.38
SMAW	B/M	0.10	0.86	0.21	0.010	0.004	0.10	0.06	0.39

Table 2. Mechanical properties of A106 Gr B

A 106 Gr B	Tensile	
	Y.S.	T.S
	367MPa	486MPa

Table 3. Welding conditions and process

A 106 Gr B		GTAW+SMAW	
Gas (%)		GTAW	SMAW
flow rate (ℓ/min)		Ar 99.99	Ar 99.99
		15~20	15~20
Filler metal	Class	ER70S-G	E7016
	Dia.(mm)	2.0	3.2
Current	Type polarity	DCSP	AC/DCRP
	Range(A)	80~140	110~180
Volts Range(V)		9~13	22~28
Travel speed(cm/min)		6~9	3~7

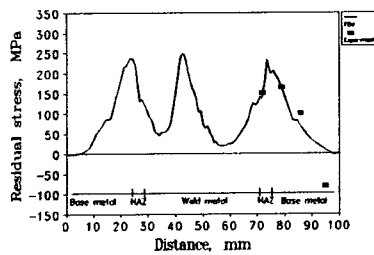


Fig. 2 Axial residual stress distribution on surface of the weldment

Fig. 3 FEA model for K_{res} analysis



Fig. 4 Residual stress redistribution by crack propagation

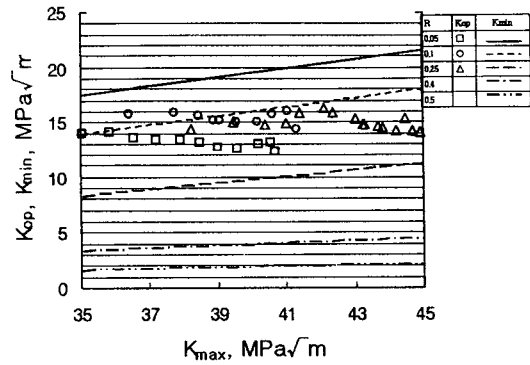


Fig. 5 Relation of K_{op} and K_{max}

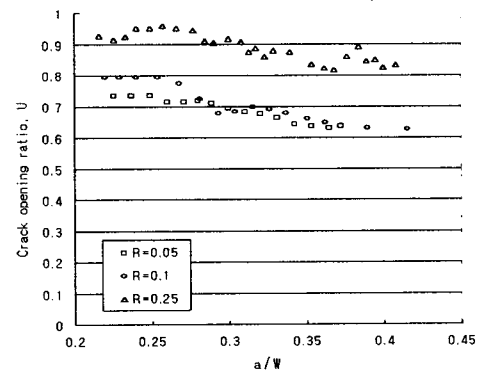


Fig. 6 Relation of a/W and U

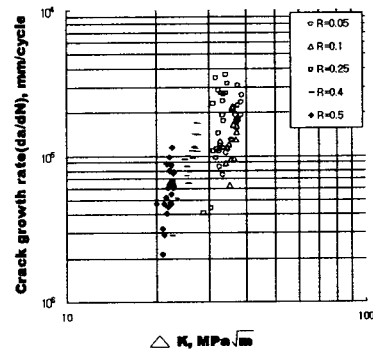


Fig. 7 Relation of $da/dN - \Delta K$

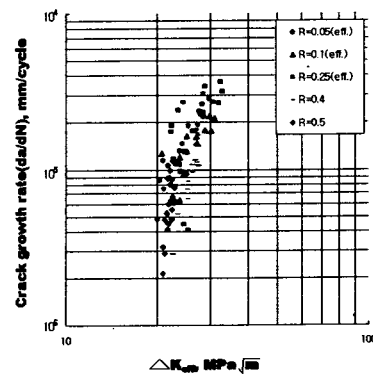


Fig. 8 Relation of $da/dN - \Delta K_{eff}$