

研究論文

SS400 용접부의 표면피로균열거동에 관한 연구⁺

이용복* · 조남익** · 박강은***

A study on surface fatigue crack behavior of SS400 weldment

Y. B. Lee *, N. I. Cho ** and K. E. Park ***

Key Words : Aspect ratio (형상비), Heat affected zone (HAZ, 열영향부), Weld zone (용접부), Weld metal zone (용착금속부), Base metal zone (모재부), Stress intensity factor (응력 확대 계수)

Abstract

In order to investigate characteristics of surface fatigue crack propagation from a pit shaped surface defect which frequently exists around welded joints, SS400 steel with thickness of 12mm, which has been generally used for structure members, was welded with submerged-arc butt type and machined for both surface. An initial surface defect of pit shape with the aspect ratio of 2 was made on the specimen. The initial defect was located at 5 different zones over the weldment : weld metal zone, boundary between weld metal and HAZ, HAZ, boundary between HAZ and base metal. Characteristics of surface fatigue crack propagation from the defect on each region under the same loading condition were investigated and compared.

1. 서 론

기계나 구조물 부재의 사용중 파괴를 일으키는 가장 근본적인 원인은 반복하중을 받을때 부재중에 존재하는 여러 형태의 결함 또는 미소균열을 기점으로 해서 발생하는 피로파괴이며, 균열이 진전

하여 최종파단에 이르기까지 파손에 가장 크게 영향을 주는 것은 재료표면에 존재하는 여러 형태의 표면결함 및 표면균열이다. 구조물에 존재하는 대부분의 표면결함과 표면균열은 표면길이가 20mm 이하이고, 깊이가 4mm 이하의 것이 많다고 알려져 있으며¹⁾, 이들은 구조물 제작시 생길수 있는 표면의 손상과 제조과정에서 발생할 수 있는 기포

+ 95 대한용접학회 추계학술대회 발표

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과

** 정회원, 전주공업전문대학 기계과

*** 비회원, 홍익대학교 대학원

(porosity), 피트(pit) 및 불순물(impurity)의 혼입과 응력 부식등에 의하여 여러 형상으로 존재하게 된다.^{2,3)} 특히 용접작업중에 습기나 과열등에 의하여 용융상태에서 기포가 발생하게 되어 이들이 용융 시 외부로 빠져 나오면서 냉각속도 보다 빠르지 못한 경우 용접부 표면에 pit형 결함이 존재 하게 된다. pit가 재료표면에 존재할 때 외부로 부터 정하중이나 반복하중등이 작용하면 응력집중을 받게 되며, 그 결과 균열이 발생하기 용이하게 된다. 이와 같이 pit형 표면 결함은 용접부위에서 발생하기 쉬우므로 이에 대한 피로강도의 평가가 요구되는 한편 용접구조물 안전설계에 매우 중요한 인자로 생각된다. 그러나 pit로 부터의 균열은 표면균열상태로 3차원적인 특성때문에 이에 대한 연구가 다소 미흡한 상태이며, 엄밀한 해는 존재 하지 않는다고 보며 근사해^{4,5)}나 실험치^{6~8)} 또는 이들 결과를 이용하여 얻은 경험식^{9,10)}들이 존재하는 정도이다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같이 용접이 모든 기계나 구조물에 미치는 중요성을 고려하여 교량, 선박, 차량등의 구조물로 광범위하게 사용되는 일반구조용 압연강재인 SS400을 선택하여 서브머지드 아크 용접을 한 후 각 영역별로 구분하여 pit형 표면노치를 만들고, 이들로 부터 균열이 발생 및 진전하는 특성과 피로수명 평가방법에 대하여 비교 고찰 하고자 하였다.

2. 표면균열에 관한 응력확대계수

3차원 유한요소법을 이용하여 Newman과 Raju¹⁰⁾는 유한 판재표면에 존재하는 반타원 표면균열이 균열면에 수직한 인장응력을 받을때 응력확대계수(K_I)를 판재의 두께(t), 형상비(a/c), 폭비(c/w), 표면으로부터 측정된 각(φ)에 따른 보정계수식(F)를 사용하여 다음과 같이 구하였다.

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{Q} F\left[\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{w}, \pi\right] \quad (1)$$

여기서, Q는 Raju에 의해 제안된 타원형상계수이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = 1 + 1.464 \left[\frac{a}{c}\right]^{1.65} \quad \left[\frac{a}{c} \leq 1\right] \quad (2)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left[\frac{a}{c}\right]^{1.65} \quad \left[\frac{a}{c} > 1\right] \quad (3)$$

보정계수 F는 표면 균열의 형상비 및 균열의 치수비, 각도(φ) 등의 함수이며 다음과 같다.

$$F = [M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4] g \cdot f_\phi \cdot f_w \quad (4)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c}\right) \quad (5)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{(0.2 + \frac{a}{c})} \quad (6)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1.0}{(0.65 + \frac{a}{c})} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \quad (7)$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{c}\right)^2] (1 - \sin \phi)^2 \quad (8)$$

각도함수 (f_φ)

$$f_\phi = \left[\left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi\right]^{1/4} \quad (9)$$

유한폭의 수정함수 (f_w)

$$f_w = \left[\sec\left(\frac{\pi c}{w} \sqrt{\frac{a}{t}}\right)\right]^{1/2} \quad (10)$$

윗 식의 적용범위는 다음과 같다.

$$0 < \frac{a}{c} \leq 1.0, \quad 0 \leq \frac{a}{t} < 1.0,$$

$$\frac{2c}{w} < 0.5, \quad 0 \leq \phi \leq \pi$$

그러나 Newman과 Raju¹²⁾는 형상비 a/c>1 범위까지 확장적용할 수 있도록 다음과 같이 제안하고 있다.

$$M_1 = \sqrt{\frac{c}{a}} \left(1 + 0.04 \frac{c}{a}\right) \quad (11)$$

$$M_2 = 0.2 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \quad (12)$$

$$M_3 = -0.11 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \quad (13)$$

$$g = 1 + [0.1 + 0.35 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \left(\frac{c}{a}\right)] (1 - \sin \phi)^2 \quad (14)$$

$$f_\phi = \left[\left(\frac{c}{a}\right) \sin^2 \phi + \cos^2 \phi\right]^{1/4} \quad (15)$$

본 연구에서는 표면 균열의 형상비와 치수비에 폭넓게 적용할 수 있고 오차범위가 가장 작은 3차원 유한요소해석에 의한 응력확대계수를 적용하고

자 한다.¹³⁾

3. 시험재료 및 시험방법

본 실험에 사용된 재료는 12mm 두께의 일반구조용 압연강재로서 그 화학적성분 및 기계적 성질은 Table 1, Table 2에 나타낸 바와 같다. 또한, 재료의 용접변형을 방지하기 위하여 구속상태에서 용접을 하였고, 용접봉은 저탄소강인 EM12를 사용하였으며, 그 화학적 성분은 Table 3, 용접 조건은 Table 4에 각각 표시하였다. 본 실험을 위하여 25ton 용량의 전기유압식 만능재료시험기(Instron, 1332 series)를 사용하였으며, 정현파(Sine wave)의 하중을 부하시키고 피로균열 특성을 고찰하기 위하여 응력비(R), 최대하중(Pmax)은 각각 0.1, 87.358KN으로 정하였으며, 반복하중 속도는 12Hz. 상온에서 각 영역별로 실험을 하였다.

균열길이는 초기 표면 결함으로부터 10000 사이클 간격으로 측정하였으며, 깊이방향의 균열길이를 측정하기 위하여 최대하중을 일정하게 유지하면서 반복하중의 진폭을 감소 시키고, Photo. 1과 같이 비치마크(beach mark)를 형성시킨 후 그 크기를 이동현미경($\times 20$)으로 측정하였다.

또한, 균열 발생이 시작된 이후 부터의 측정 데이터로 ΔK 값과 균열진전속도(da/dN, dc/dN)와의 관계를 각 영역별로 구하였다.

Table 1. Chemical compositions of SS400(Wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S
SS400	0.15	0.26	0.61	0.13	0.17

Table 2. Mechanical properties of SS400

Material	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Elongation (%)
SS400	361	481.7	24

Table 3. Chemical compositions of electrode EM12 (Wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S
EM12	0.12	0.05	1.25	0.03	0.035

Table 4. Welding conditions.

Electrode Dia. ϕ (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)
3.2	450	35	110

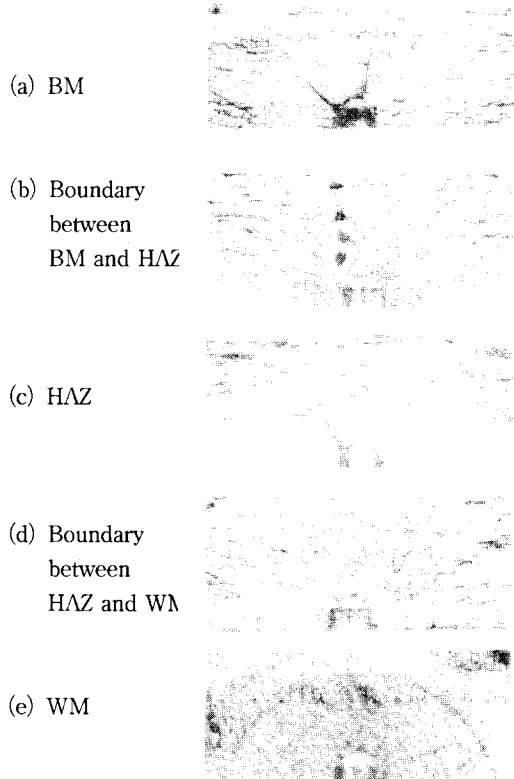
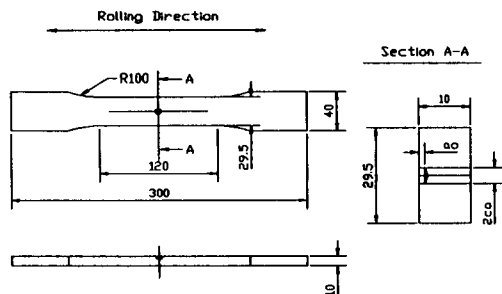


Photo 1. Variation of surface crack shape obtained by beach mark method

Fig. 1 Configuration of specimen



4. 실험 결과 및 고찰

4. 1 결함형상에 따른 형상비의 변화

형상비 (aspect ratio, a/c)의 변화를 재료 두께에 대한 균열 깊이비 (depth ratio, a/t)로 무차원화한 값을 Fig. 2에 나타내었으며, 초기 표면 결함의 형상비 (a/c)=2로 부터 균열이 발생하면서 초기에는 각 영역에서 형상비가 서서히 작아지고 깊이비 (a/t)=0.3 부근에서 서서히 감소하는 경향을 보였다.

열영향부 (HAZ)와 모재부 (BM)의 경계에서는 전 표면 피로균열 진전과정에서 형상비가 항상 1보다 큰 값을 보이며, 모재 (BM) 및 용착금속부 (WM)는 깊이비 (a/t)=0.49 부근에서 형상비가 1로서 반원형의 모양을 가지며 그 이후 서서히 반타원형으로 변하게 된다. 그리고 용착금속부와 HAZ 경계 및 HAZ에서는 0.28~0.3 범위 내에서 형상비가 항상 1보다 작은 값을 나타내며 반타원형을 유지한다. 각 영역에서의 형상비 변화에 대한 실험식은 다음과 같다.

① Weld Metal (WM)

$$\left(\frac{a}{c}\right) = 2.32 - 3.4 \left(\frac{a}{t}\right) + 1.86 \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

② Boundary between HAZ & WM

$$\left(\frac{a}{c}\right) = 2.45 - 4.64 \left(\frac{a}{t}\right) + 2.96 \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

③ HAZ

$$\left(\frac{a}{c}\right) = 2.35 - 4.68 \left(\frac{a}{t}\right) + 3.08 \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

④ Boundary between HAZ & BM

$$\left(\frac{a}{c}\right) = 2.38 - 3.2 \left(\frac{a}{t}\right) + 1.57 \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

⑤ Base Metal (BM)

$$\left(\frac{a}{c}\right) = 2.48 - 4.25 \left(\frac{a}{t}\right) + 2.52 \left(\frac{a}{t}\right)^2$$

또한, 초기 표면결함선단에서 표면방향(균열길이 c)으로 0.2mm 균열시 까지의 초기수명 (N_i)과 파괴시 까지의 전 피로수명 (N_f)을 Fig. 3와 같이 용접부위의 각 영역별로 나타내었으며 전 피로수명은 용착금속부, 용착금속부와 HAZ의 경계, HAZ, 모재부, HAZ와 모재부의 경계순으로 길게 나타났으며 초기수명은 큰 차이는 없으나 HAZ, 용착금속부와 HAZ 경계, 모재부, HAZ와 모재부

의 경계, 용착금속부 순으로 높게 보여주고 있다.

따라서, 이들 각 영역에서의 전 피로수명에 대한 초기수명비를 나타내면 Fig. 4와 같으며 전 피로수명에 대한 초기수명비가 가장 높게 나타난 영역은 HAZ로 58%이며, 가장 낮은 영역은 용착금속부로 34% 정도이다. 이 결과는 열영향부의 정도가 가장 높으면서 취화되었고, 용착금속부에서는 정도가 열영향부보다 낮으며 인성이 큰 영향을 받기 때문으로 사료된다.¹⁴⁾

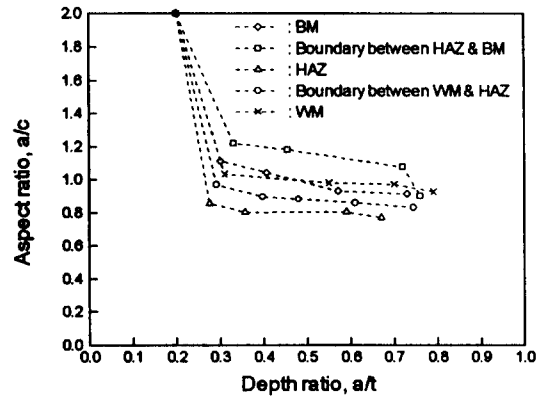


Fig. 2 Change of aspect ratio of surface crack for cyclic tensile load

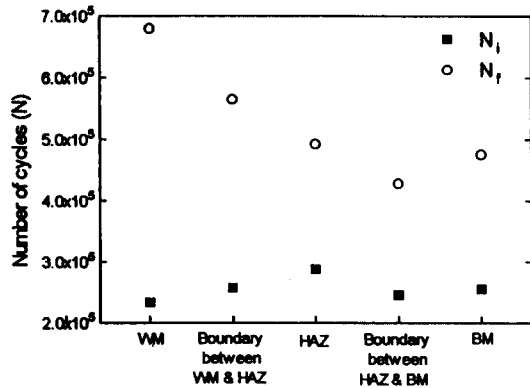


Fig. 3 Relationship between fatigue life by number of cycles vs. each zone

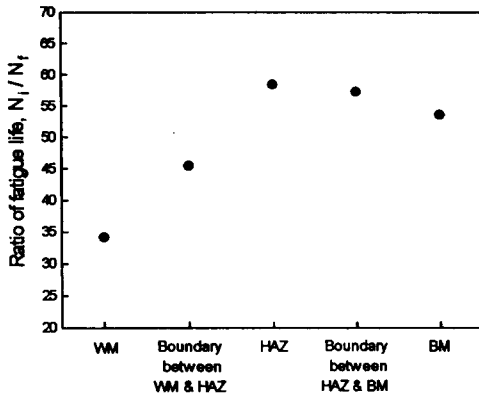


Fig. 4 Ratio of fatigue life in welding zone

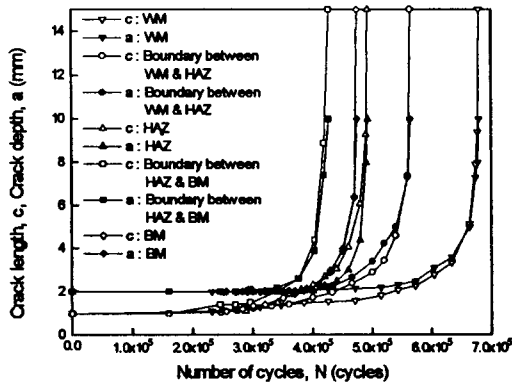


Fig. 5 Fatigue crack length and crack depth vs. number of cycles

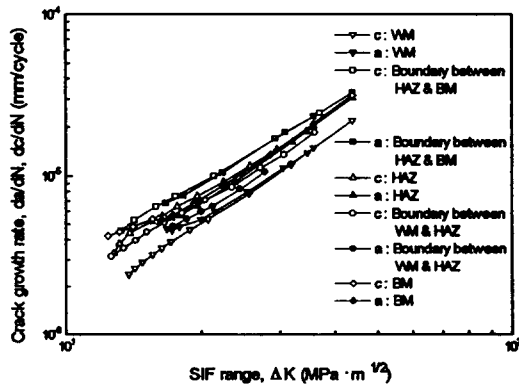


Fig. 6 Crack growth rate of depth and surface vs. stress intensity factor range (ΔK)

4. 2 표면 피로균열 진전 특성

앞절에서 얻은 형상비 변화로부터 용접부의 각 영역에 대한 표면방향 및 깊이방향의 균열 진전 특성을 고찰하면 Fig. 5에 나타낸 바와같이 용착금속부의 경우 초기에는 깊이 방향에 비하여 표면방향 균열이 빠른 속도로 증가하면서 반복수의 증가에 따라 두방향 모두가 같아지는 경향을 보이며, 용착금속부와 열영향부의 경계에서도 비슷한 경향을 보이고 있다. 또한, 열영향부의 경우에는 초기에 깊이 방향 균열은 진전하지 않으며 표면방향 균열만 급격하게 진전하다가 4×10^5 cycle 이후부터 깊이방향 균열도 진전되기 시작하였고, 열영향부와 모재부의 경계 및 모재부는 초기에는 동일한 경향을 보이지만 열영향부와 모재부의 경계에서는 반복수와 더불어 표면방향 균열 진전 속도가 깊이방향 보다 빠른 속도로 진전됨을 알 수 있다.

또한, 응력확대계수폭 (ΔK)에 대한 표면 및 깊이방향의 균열진전속도 (da/dN , dc/dN)를 각 용접부의 영역별로 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서, 피로균열 진전속도는 열영향부와 모재부의 경계가 가장 빠른속도를 나타내었고 열영향부, 모재부, 용착금속부와 열영향부의 경계, 용착금속부 순으로 빠르게 나타냄을 알 수 있다. 열영향부와 모재부의 경계에서 균열진전속도가 가장 빠르게 나타낸 원인은 경도가 낮고 취화된 결과로 판단되며, 용착금속부의 균열진전속도가 가장 느린 원인은 경도가 높고 인성이 크기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

용접부위의 각 영역에서 피로균열이 진전 될때의 특성에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. beach mark 법을 이용하여 용접부 각 영역에서의 형상비 변화를 정확하게 파악할 수 있었고, 표면피로균열은 초기결합 형상비 (a/c) 2로부터 반원형상의 1까지 급속히 변하며 그 이후부터는 점점 반타원형상으로 진전하였다.

2. 각 영역에서의 형상비 변화에 대한 실험식을 얻었다.

3. 전 피로수명에 대한 초기수명비는 열영향부, 열영향부와 모재부 경계, 모재부, 용착금속부와 열영향부 경계, 용착금속부 순이며 열영향부가 58%로 가장 높고 용착 금속부는 34%로 가장 낮게 나타난다.

4. 피로균열 전진속도는 열영향부와 모재부의 경계, 열영향부 모재부, 용착금속부와 열영향부 경계, 용착금속부 순으로 크게 나타난다.

참 고 문 헌

1. 國尾 武, 林郁彦 : 破壊力學實驗法, 朝倉書店, (1984).
2. 近藤良之 : 腐蝕ピット腐蝕疲勞き裂發生壽命豫測, 日本機械學會論文集, 第 53卷 495號, (1987).
3. 清水眞佐男, 川寄一博 : 高强度鋼の疲勞強度に及ばすマイクロピットの影響, 日本機械學會論文集, 第 53卷 485號, (1987), pp. 11~16.
4. F. W. Smith and D. R. Sorensen : The Semi-Elliptical Surface Crack-A Solution by the Alternating Method, Int. J. of Fracture, Vol. 12, (1976), pp. 47~57.
5. I. S. Raju and J. C. Newman : Stress Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Crack in Finite-Thickness Plates, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, (1979), pp. 817~829.
6. A. F. Grandt Jr. and G. M. Sinclair : Stress Intensity Factors for Surface Cracks in Bending, ASTM STP 513, (1972), pp. 37~58.
7. D. V. Nelson : Review of Fatigue-Crack Growth Prediction Methods, Exp. Mech., Vol. 17, No. 2, (1977), pp. 41~49.
8. R. G. Forman and V. E. Kearney : Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures, J. of Basic Eng., Vol. 9, (1967), pp. 459~464.
9. J. C. Newman Jr. : Fracture Analysis of Surface and Through-Cracked Sheets and Plates, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 5, (1975), pp. 667~689.
10. J. C. Newman Jr. and I. S. Raju : Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension and Bending Loads, NASA TP - 1578, National Aeronautics and Space Administration, (1979).
11. J. C. Newman Jr. and I. S. Raju : An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack, (1981).
12. J. C. Newman and I. S. Raju : Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three Dimensional Finite Bodies, Fracture Mechanics, ASTM STP 791, (1983), pp. 1238~1265.
13. J. C. Newman and I. S. Raju : A Review and Assessment of Stress Intensity Factors for Surface Cracks, ASTM STP 687, (1979), pp. 16~42.
14. 이용복 : 용접부에 있어서의 응력확대계수에 관한 실험적연구, 인하대학교 석사학위 논문, (1978), pp. 50~58.