

SS400 용접 부위의 표면 피로균열거동에 관한 연구

A study on surface fatigue crack behavior of SS400 welding Zone

이 용복*, 조 남익**, 박 강은***

* 홍익대학교 기계공학과, 서울

**전주공업전문대학 기계과, 전주

***홍익대학교 대학원, 서울

ABSTRACT In order to investigate characteristics of surface fatigue crack propagation from a pit shaped surface defect which frequently exists near weld joints, SS400 steel with thickness of 12mm, which generally used for structure members, was submerged-arc welded with butt type and machined for both surface. The weld joints were divided into 5 regions, weld metal, boundary between heat affected zone (HAZ), HAZ, boundary between HAZ and base metal, and base metal. Specimens from each region were machined for a pit shaped initial surface defect with aspect ratio of 2. characteristics of surface fatigue crack propagation from the defect under the same loading condition were compared and discussed.

1. 서 론

기계나 구조물 부재가 사용중 파괴를 일으키는 가장 근본적인 원인은 반복하중을 받을때 부재중에 존재하는 여러 형태의 결함 또는 미시균열을 기점으로 해서 발생하는 피로파괴이고, 특히 용접작업중에 습기나 과열등에 의하여 용융상태에서 기포가 발생하게 되어 이들이 용융시 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 이에대한 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 존재하지 않는다고 보며 근사해나 실험치 또는 이들 결과를 이용하여 얻은 경험식들이 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 표면노치를 만들고, 이들로 부터 균열이 발생 및 진전하는 특성과 피로수명 평가방법에 대하여 비교 고찰 하고자 하였다.

2. 시험재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 12mm 두께의 일반구조용 압연강재로서 그 화학적성분 및 기계적 성질을 Table 1, Table 2에 나타내었다. 또한, 재료의 용접변형을 방지하기 위하여 구속상태에서 용접을 하였고, 용접봉은 저탄소강인 EM12를 사용하였다. 본 실험을 위하여 25ton 용량의 전기유압식 만능재료시험기(Instron, 1332 series)를 사용하였으며, 정현파(Sine wave)의 하중을 부하시키고 피로균열 특성을 고찰하기 위하여 응력비(R)는 0.1, 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 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	σ_u	Elongation
SS400	361	481.7	24

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1 결함형상에 따른 형상비의 변화

형상비의 변화를 재료 두께에 대한 균열 깊이비로 무차원화한 값을 Fig. 1에 나타내었으며, 초기 표면 결함의 형상비(a/c)=2로 부터 균열이 발생하면서 초기에는 각 영역에서 형상비가 급격히 작아지고 깊이비(a/t)=0.3 부근에서 점점 감소하는 경향을 보였다. HAZ와 모재부의 경계에서는 전 표면 피로균열 진전과정에서 형상비가 항상 1보다 큰 값을 보이며, 모재 및 용착금속부는 두께비(a/t)=0.49 부근에서 형상비가 1로서 반원형의 모양을 가지며 그 이후 서서히 반타원형으로 변하게 된다. 그리고 용착금속부와 HAZ 경계 및 HAZ 에서는 0.35 부근에서 형상비가 항상 1보다 작은 값을 나타내며 반타원형을 유지한다. 또한, 초기 표면결함선단에서 0.2mm 균열시 까지의 초기수명 (N_i)과 파괴시 까지의 전 피로수명(N_f)을 Fig. 2와 같이 용접부위의 각 영역별로 나타내었으며 전 피로수명은 용착금속부, 용착금속부와 HAZ 의 경계, HAZ, 모재부, HAZ와 모재부의 경계순으로 반복수가 증가 하였으며 초기수명은 큰 차이는 없으나 HAZ, 용착금속부와 HAZ 경계, 모재부, HAZ와 모재부의 경계, 용착금속부 순으로 높게 보여주고 있다. 따라서, 이들 각 영역에서의 전 피로수명에 대한 초기수명비를 나타내면 Fig. 3과 같으며 전 피로수명에 대한 초기수명비가 가장 높게 나타난 영역은 HAZ로 58%이며, 가장 낮은 영역은 용착금속부로 34% 정도이다.

3. 2 표면 피로균열 진전 특성

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

또한, 응력확대계수폭(Δk)에 대한 균열진전속도(da/dN , dc/dN)를 각 용접부위 영역별로 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서, 피로균열 진전속도는 HAZ와 모재부의 경계가 가장 빠른속도를 나타내었고 HAZ, 모재부, 용착금속부와 HAZ의 경계, 용착금속부 순으로 나타냄을 알수 있다. HAZ와 모재부의 경계에서 균열진전 속도가 가장 빠르게 나타난 원인은 경도가 낮고 취성화된 결과로 판단되며, 용착금

속부의 균열진전속도가 가장 느린 원인으로서는 경도가 높고 강인성이 크기 때문으로 사료된다.

4. 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) 2로 부터 반원형상의 1까지 급속히 변하며 그 이후 부터는 점점 반타원형상으로 진전하였다.

2. 각 영역에서의 형상비 변화에 대한 실험결과식은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ Weld Metal (WM)} : \left(\frac{a}{c}\right) = 2.32 - 3.4\left(\frac{a}{t}\right) + 1.86\left(\frac{a}{t}\right)^2$$

$$\textcircled{2} \text{ HAZ \& WM} : \left(\frac{a}{c}\right) = 2.45 - 4.64\left(\frac{a}{t}\right) + 2.96\left(\frac{a}{t}\right)^2$$

$$\textcircled{3} \text{ HAZ} : \left(\frac{a}{c}\right) = 2.35 - 4.68\left(\frac{a}{t}\right) + 3.08\left(\frac{a}{t}\right)^2$$

$$\textcircled{4} \text{ HAZ \& BM} : \left(\frac{a}{c}\right) = 2.38 - 3.2\left(\frac{a}{t}\right) + 1.57\left(\frac{a}{t}\right)^2$$

$$\textcircled{5} \text{ Base Metal (BM)} : \left(\frac{a}{c}\right) = 2.48 - 4.25\left(\frac{a}{t}\right) + 2.52\left(\frac{a}{t}\right)^2$$

3. 전 피로수명에 대한 초기수명비는 HAZ, HAZ와 모재부 경계, 모재부, 용착금속부와 HAZ경계, 용착금속부 순이며 HAZ가 58%로 가장 높고 용착 금속부는 34%로 가장 낮게 나타내었다.

4. 피로균열 진전속도는 HAZ와 모재부의 경계, HAZ, 모재부, 용착금속부와 HAZ의 경계, 용착금속부 순으로 증가하였으며, 피로균열 진전속도가 증가한 이유는 경도가 낮고 취성화된 결과로 판단되며, 피로균열 진전속도가 감소한 이유는 경도가 높고 강인성이 크기 때문으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. 近藤良之 : “腐蝕ピット腐蝕疲労き裂發生壽命豫測”, 日本機械學會論文集, 第 53卷 495號, 1987.
2. 清水眞佐男, 川寄一博 : “高強度鋼の疲労強度に及ぼ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.
3. Raju I. S. and Newman J. C. : “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.
4. Grandt Jr. A. F. and Sinclair G. M.: “Stress Intensity Factors for Surface Cracks in Bending”, ASTM STP 513, 1972, pp. 37~58.
5. Newman J. C. and Raju I. S. : “Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three Dimensional Finite Bodies”, Fracture Mechanics, ASTM STP 791, 1983, pp. 1238~1265.

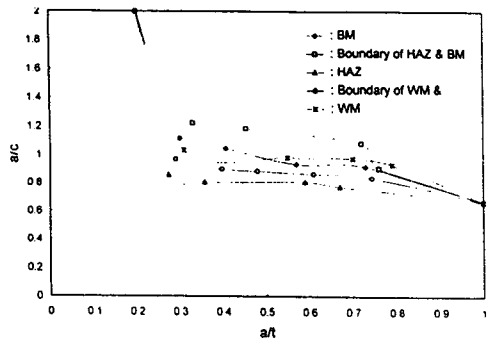


Fig. 1 Change of aspect ratio of surface crack for cyclic tensile load.

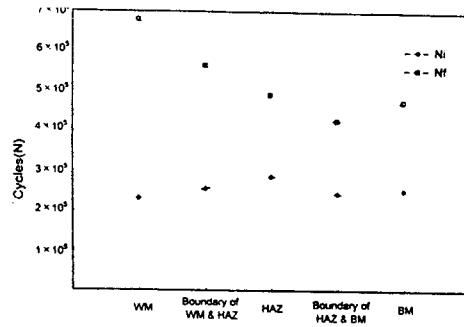


Fig. 2 Relationship between fatigue life by number of cycles vs. each weld zone.

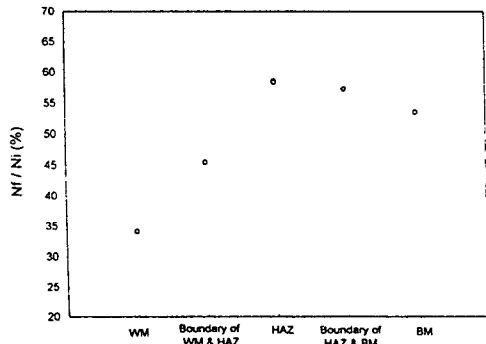


Fig. 3 N_f/N_i (%) of welding zone.

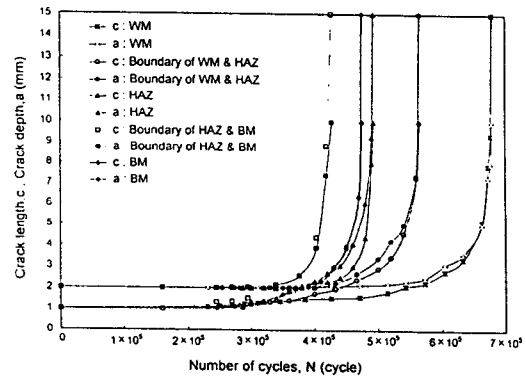


Fig. 4 Fatigue crack length, crack depth vs. number of cycles

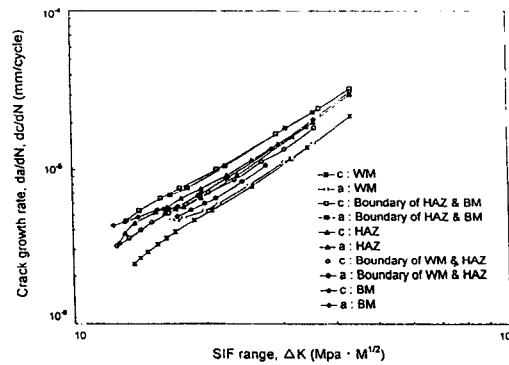


Fig. 5 Crack growth rate vs. stress intensity factor range (ΔK).