

맞대기 용접 강판재에서 압연 및 잔류응력에 의한 피로거동

Fatigue Behavior with respect to Rolling and Residual Stress in Butt-welded Steel Plate

김 성엽 *, 오 병덕 *, 이 용복 **

* 홍익대학교 대학원 기계공학과

** 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

1. 서 론

강구조물의 안전설계를 위하여 재료의 기계적 성질과 피로특성을 정확하게 파악하고, 그 결과를 고려하여 설계하는 것이 중요하다. 재료의 제조과정에서 발생하는 압연의 방향성과 용접에 의한 잔류응력은 강구조물에 필연적으로 존재하게 되어 구조물 안전에 영향을 주게 되므로 안전하고, 효율적인 설계를 위해서는 이들 영향에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 이러한 구조물들은 지속적인 반복하중을 받게 되므로 압연 및 잔류응력을 고려하여 피로특성을 파악하는 것이 중요하다. 현재 용접 잔류응력을 고려한 피로거동 연구사례는 많이 있지만 압연방향에 따른 피로거동 연구는 아직 미흡한 실정이다. 특히 압연의 영향과 잔류응력을 고려한 종합적인 피로거동 연구는 찾아보기 힘들다. 이에 본 연구에서는 일반적인 구조물 재료로 많이 사용하고 있는 SS400 압연 강판 재료를 사용하여 맞대기 용접을 하고, 재료의 압연방향과 용접 잔류응력을 고려한 피로거동 특성에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

2. 실험

2.1 시험편의 준비

본 연구를 위하여 일반구조물 재료로 많이 사용하고 있는 3mm 두께의 열간압연 강판재료인 SS400을 선택하였고, 인장실험을 위하여 하중방향에 대하여 압연방향을 0°, 30°, 45°, 60° 및 90°가 되도록 채취하였으며 Fig.1에 나타난 바와 같이 KS 5호 규격에 따라 0.01mm 이내의 오차범

위로 와이어 절단가공하였다. 모재의 피로균열 시험편은 Fig.2의 규격으로 인장시험편과 같이 하중방향에 대하여 압연방향 각도를 주어 와이어 절단가공하였고, 용접재의 피로균열 시험편은 강판의 압연방향과 같은 방향으로 용접비드 방향을 잡고, 앞면과 뒷면 양쪽을 FCAW로 맞대기 용접하였다. 이때 두 강판을 압연방향과 일치시켜 맞대놓고, 용접열로 인한 과대변형을 방지하기 위하여 지그를 고정시켰다. 용접조건은 230A의 전류와 26V의 전압으로 12l/min 송출유량의 혼합가스 분위기에서 40cm/min의 운봉속도로 용접을 수행하였다. 시험편의 중앙에 $\phi 2\text{mm}$ 의 구멍을 뚫고, 양쪽으로 0.1mm 폭과 2mm 길이의 슬릿을 방전가공 하였으며 그로부터 2mm 길이의 예비균열을 진전시켰다.

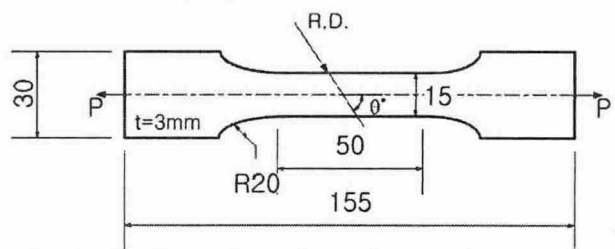


Fig. 1. Configuration of tensile specimen

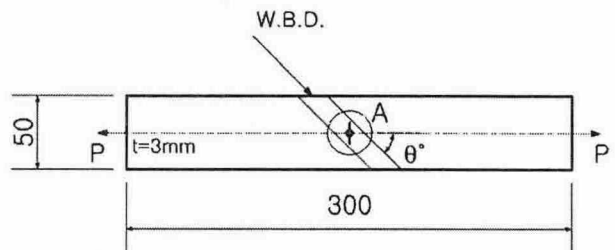


Fig. 2. Configuration of welded fatigue specimen

2.2 실험 방법

본 실험을 위하여 5톤 용량의 피로시험기 (Instron 8511)를 사용하였으며 우선 모재시험편의 압연방향에 따른 피로특성을 알아보기 위하여 피로실험을 수행하였다. 이때 시험데이터의 신뢰성을 갖도록 하기 위하여 하중방향과 시험편 재료의 압연방향 각도별 3편 이상씩을 사용하였고, 예비균열은 시험하중 5% 이내의 높은 하중으로 양쪽 슬릿으로부터 2mm 피로균열을 진전시킨 후 실험하중에 의하여 피로균열 진전실험을 수행하였다. 용접시험편은 피로실험 전에 천공법 (Mather's method)과 자기식 응력측정기 사용을 병행하여 잔류응력을 측정하였다. 또한 압연 및 용접비드 방향을 같도록 하여 하중방향 각도를 구분하여 모재시험편과 동일 방법 및 동일 조건으로 피로균열 진전실험을 수행하였다. 피로균열 진전길이 측정은 금속광학현미경을 사용하여 1/100mm 이내의 정확도로 일정 사이클마다 반복 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재의 피로균열 진전특성

Lee 등의 연구결과에 의하면 재료의 압연방향에 따른 인장강도는 거의 변화가 없는데 이것은 재료의 압연방향에 따른 피로균열 진전속도는 인장강도와 관련시킬 수 없음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 피로균열은 비교적 낮은 하중 하에서 진전하므로 소성영향을 거의 받지 않고, 취성 거동을 하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 하중방향과 압연방향 사이의 각도에 따른 피로거동은 응력비의 영향과 비교하기 위하여 피로균열 진전

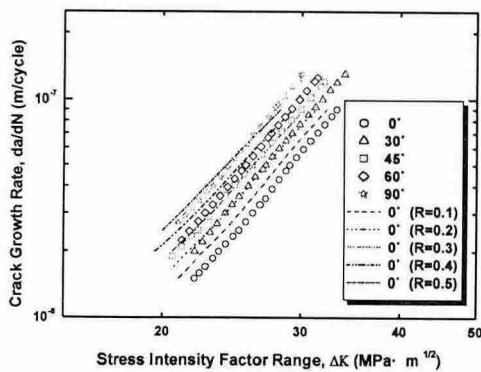


Fig. 3. da/dN vs. $\Delta K(\text{MPa} \cdot \sqrt{m})$ [R]

속도가 가장 낮은 0°인 경우를 기준으로 하여 응력비를 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5일 때 Forman식을 이용한 피로균열 예측선을 함께 나타내면 Fig.3과 같다. 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 0°로부터 90°까지의 피로균열 진전속도의 증가는 응력비를 0으로부터 0.5까지 증가시켰을 때의 피로균열 진전속도 구간 내에 있다.

3.2 용접재의 피로균열 진전특성

용접재의 피로실험 결과를 하중방향과 용접비드 방향 및 압연방향 사이의 각도별로 나타내면 Fig.4~Fig.8과 같고, 이들을 종합하여 나타내면 Fig.9와 같다. 0°인 경우 피로균열 진전속도는 시험편 중앙의 용접부에 분포하는 높은 인장 잔류응력의 영향을 받아 초기에 매우 높은 균열진전속도를 보이며 균열이 진전함에 따라 인장 잔류응력의 영향이 줄어들어 나중에는 모재의 균열진전 속도와 일치되고 있다. 또한 하중방향과 용접비드 방향 사이의 각도가 클수록 잔류응력의 영향은 감소하며 피로균열 진전특성은 같은 경향을

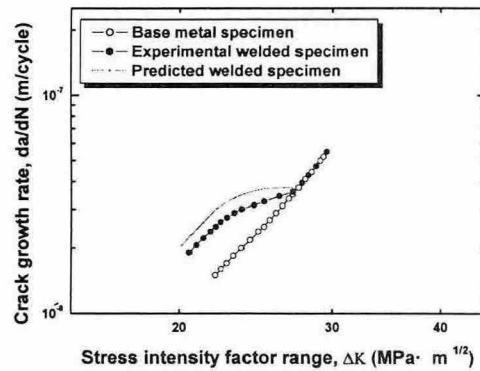


Fig. 4. da/dN vs. $\Delta K(\text{MPa} \cdot \sqrt{m})$ [$\theta=0^\circ$]

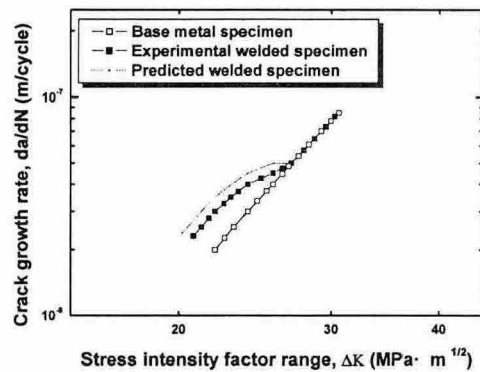


Fig. 5. da/dN vs. $\Delta K(\text{MPa} \cdot \sqrt{m})$ [$\theta=30^\circ$]

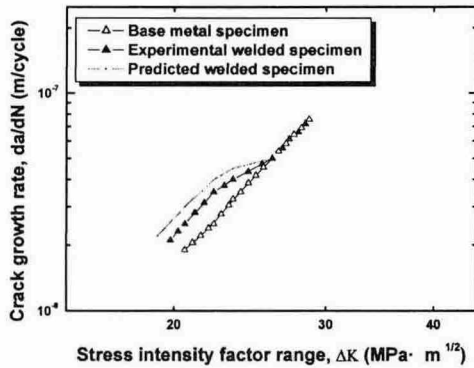


Fig. 6. da/dN vs. $\Delta K(MPa \cdot \sqrt{m})$ [$\theta=45^\circ$]

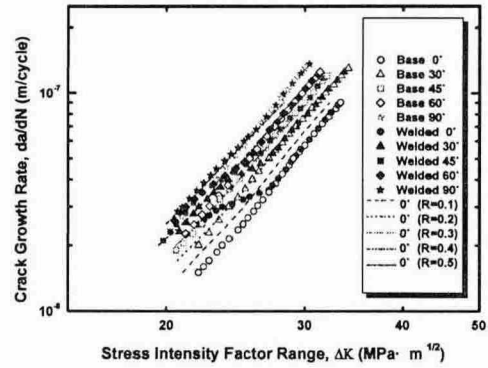


Fig. 9. da/dN vs. $\Delta K(MPa \cdot \sqrt{m})$ [sum]

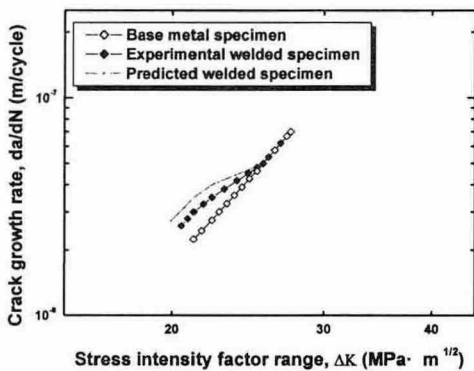


Fig. 7. da/dN vs. $\Delta K(MPa \cdot \sqrt{m})$ [$\theta=60^\circ$]

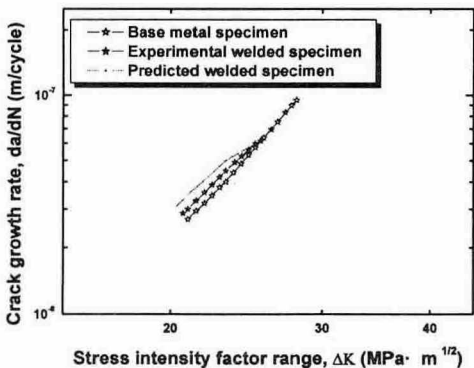


Fig. 8. da/dN vs. $\Delta K(MPa \cdot \sqrt{m})$ [$\theta=90^\circ$]

나타내고 있다. Fig.9에서 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 0°인 경우 모재의 피로균열 진전속도가 가장 낮게 나타나지만 초기에 높은 인장 잔류응력으로 인하여 45°의 경우와 유사하게 나타난다. 또한 압연방향이 90°인 경우 모재의 피로균열 진전속도는 가장 높게 나타나지만 낮게 분포하는 인장 잔류응력으로 균열초기에 피로균열 진전속도가 크게 나타나지 않는다.

4. 결 론

본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 비교적 낮은 하중 하에서 압연장재의 피로균열은 항복강도 및 연신률과 관계가 있고, 인장강도와는 연관지을 수 없는데 이는 피로균열이 취성거동을 하기 때문인 것으로 생각된다.

2) 하중방향과 압연방향 사이의 각도가 0°로부터 90°까지의 피로균열 진전속도의 증가는 응력비를 0으로부터 0.5까지 증가시켰을 때의 피로균열 진전속도 구간 내에 있다.

3) 용접재의 피로균열은 용접잔류 응력분포에 민감하게 영향을 받고 있으므로 용접구조물의 안전설계를 위하여 잔류응력 분포를 정확하게 파악하고, 하중방향과 용접방향 및 재료의 압연방향을 잘 조화시켜 설계하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. Sang Chul Kim, Yong Bok Lee : The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region, J. of the KWS, 5-1 (1987), 42-56
2. Yong Bok Lee, Chin Sung Chung, Young Keun Park and Ho Kyung Kim : Effect of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behavior of SS330 Weldment, Int. J. Fatigue, 20-8 (1998), 565-573
3. P. Paris and F. Erdogan : A Critical Analysis of Crack Propagation Law, J. of Basic Eng., Trans. of ASME, 8 (1963), 528-534