

## 강봉 맞대기 용접재의 피로 특성

### Characteristics of Fatigue Strength in Butt-Welded Steel Rods

정 재근\*, 오 병덕\*, 이 용복\*\*

\* 홍익대학교 대학원 기계공학과

\*\* 홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

**ABSTRACT** For this study, SM45C steel rods using generally for power transmission shafts and machine components was selected and welded by Butt-GMAW method. and then it was studied about estimation of fatigue strength and the region of infinite life. From this result, it is demanded that the stress for safety design of machine components using SM45C butt-welded steel rods must be selected in the region of the lowest infinite life of heat affected zone.

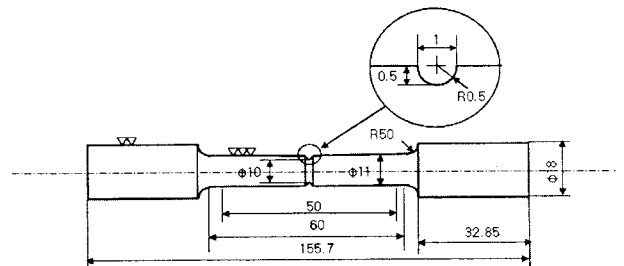
#### 1. 서 론

기계의 동력축이나 피스톤 로드 등 기계요소 제작에 많이 사용하는 강봉 구조물의 안전설계를 위하여 강도평가를 정확하게 파악하는 것은 매우 중요한 과제이다. 본 연구에서는 강봉 구조물로 많이 사용하고 있는 SM45C 강봉을 선택하여 GMAW 용접법으로 맞대기 용접하였고 용접부위를 용착금속부, 용착금속부와 열영향부의 경계, 열영향부로 구분하여 모재부와 더불어 각 위치에 원둘레 U-노치를 가공하고 회전 굽힘 피로시험을 하여 피로특성 및 수명평가를 해보고자 하였다. 그리고 Goodman의 식을 이용한 Haigh 선도로부터 무한 수명을 갖는 영역을 알아보고 본 강봉 용접재료를 사용하는 경우의 안전설계 응력범위에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

#### 2. 실험 방법

본 연구를 위하여 사용한 시험편 재료는 상온에서 인발 공정에 의하여 제조된 지름 25mm의 SM45C 강봉을 선택하였고 양 끝 면을 30° 경사지도록 원둘레로 기계가공하고 60° 개선(groove) 형태로 맞대어 지그로 고정하고 회전시키며 GMAW 용접법에 의하여 3층 맞대기 용접 하였다. 그리고 기계적 성질을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 표준 시험편을 기계 가공하였고 용접부위를 기준으로 하여 양쪽으로 대칭되도록 Fig. 2와 같이 회전 굽힘 피로 시험편을 기계 가공하였

다. 용접부 주위를 경 연마(polishing)하고 부식시켜 용착금속부의 중앙, 용착금속부와 열영향부의 경계, 열영향부 그리고 모재부를 명확하게 구별시킨 후 각 위치에 반경 0.5mm의 원둘레 U-노치를 가공하였다. 강봉 맞대기 용접부의 회전 굽힘 피로시험을 수행하기 전에 용접 각 부의 기계적 성질을 알아보기 위하여 먼저 인장시험 및 경도시험을 수행하였다. 인장시험은 100kN의 UTM을 사용하였고 노치의 영향을 알아보기 위하여 모재의 평활재료 시험편(smooth specimen in base metal)에 대한 시험도 수행하였다. 경도시험은 정밀한 측정을 위하여 마이크로 비커스(micro-vickers)경도를 측정하였다. 회전 굽힘 피로시험은 FTO-10(H) 형식의 회전 굽힘 피로시험기를 사용하였고 공냉 chamber를 설치해서 실내 온도와 같은 18°C~20°C 범위의 온도를 유지시키며 피로시험을 수행하였다. 하중 조건은 각 시험편마다 4~5단계 하중을 사용하였으며 10<sup>4</sup>~10<sup>7</sup>범위의 고 사이클에서 회전 굽힘 피로시험을 수행하였다.



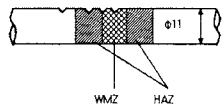


Fig. 1 The schematic of specimens for tensile test

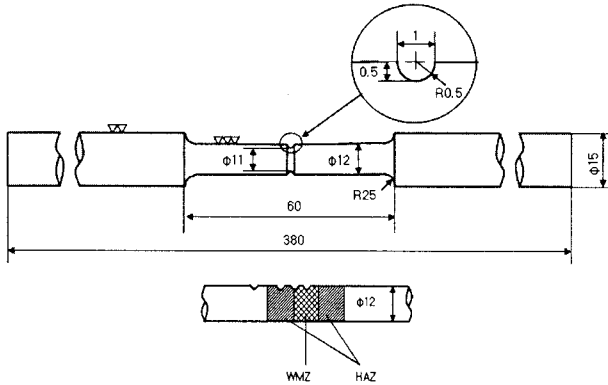


Fig. 2 The schematics of specimens for rotating bending fatigue test

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 용접재의 기계적 성질

Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 용착금속부는 167Hv 정도의 경도치를 갖고 용착금속부와 열영향부 경계에서 급작스럽게 경도가 증가하여 최고 200Hv 정도 값까지 나타나며 열영향부에서 급작스럽게 경도가 감소하여 165Hv 정도 값까지 감소한다. 그리고 열영향부에서 모재부로 접근하면서 서서히 경도가 증가하다가 용착금속부 중심으로부터 11mm 떨어진 위치로부터 가장 높은 205Hv 정도의 경도치를 보이고 있다. 이러한 현상은 상온에서 인발공정에 의하여 제조되므로 인하여 가공경화의 영향을 크게 받은 결과로 생각되며 열영향부가 가장 낮게 나타나고 용착금속부가 모재부에 비하여 현저하게 낮은 결과를 보이고 있는데 이 결과는 용접 시 높은 열로 가열된 후 상온에서 서서히 냉각 되어 재료가 연화된 결과라고 생각된다. 인장시험은 모재의 평활재로 시험편 (unnotched specimen)과 노치 시험편 (notched specimen)으로 용접재의 모재부(base metal zone) 열영향부(heat affected zone), 열영향부와 용착금속부의 경계(The boundary between heat affected zone and weld metal zone) 및 용착금속부(weld metal zone)로 구분하여 수행하였다. 그 결과는 Fig. 4에서 보이는 바

와 같다. 노치 시험편의 경우 모재 평활재로의 경우와 비교하여 노치영향에 의한 응력집중을 받아 전반적으로 낮은 값들을 갖고 모재 노치재료와 비교하여 항복강도는 다소 차이를 보이나 인장강도와 연신율은 유사하게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 이들 결과로부터 모재의 경우 상온 인발공정에 의한 경화와 높은 압축잔류응력의 발생으로 인하여 모재가 초기에 용접부위에 비하여 높은 항복강도를 나타내고 있고 평활재로의 인장강도가 노치재료의 인장강도보다 높게 나타나는 데 이 결과는 노치의 영향이라고 생각 된다.

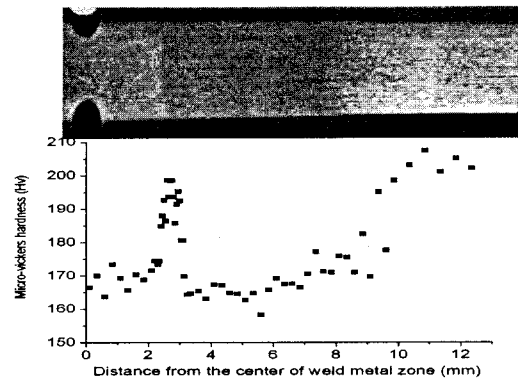


Fig. 3 Distribution of micro-vickers hardness number in weld zone

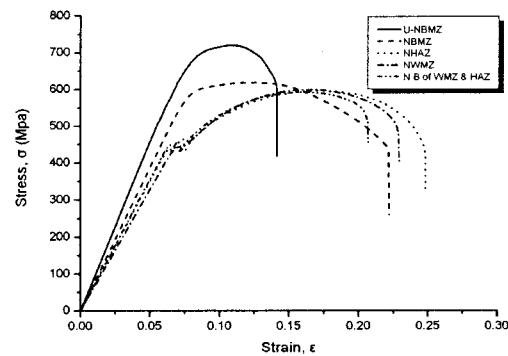


Fig. 4 Stress - strain diagram for tensile specimens

#### 3.2 용접재의 피로강도

모재의 평활재로 시험편(unnotched specimen)의 피로강도와 피로한도에 대한 실험값은 기계적 성질로부터 예측한 값과 유사하며 노치재료 시험편(notched specimen)의 피로수명곡선은 노치에 의한 피로 응력집중계수  $K_f$ 의 영향을 받아 평활재로의 경우보다 피로강도가 전반적으로 낮게 나타나고 있다.

피로강도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나고 있다. 모재부의 피로강도는 상온에서 인발공정에

의하여 제조된 모재가 초기에 높은 압축잔류응력을 갖고 있고 기계적 성질에서 나타나는 바와 같이 높은 경도와 인장강도를 갖고 있어 초기의 다소 높은 인장 작용하중을 받는 중 사이클 범위에서 높은 피로강도 값을 보이다가 오랜 반복하중으로 인하여 고 사이클 범위에서 압축잔류응력이 완되고 경도 및 인장강도도 다소 완화되어 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 5로부터 이 용접재의 무한수명을 갖는 영역의 응력범위를 알아보기 위하여 Goodman의 식을 이용한 Haigh 선도를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에서의 무한수명 영역은 평활재료의 모재에 비하여 원둘레 U-노치를 갖는 각 용접부위가 매우 좁게 나타나고 있으며, 피로노치계수를 고려하여 평활재료로 예상한 Fig. 7에서의 각 용접부위에 대한 Haigh 선도에서 무한수명 영역은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 모재부, 열영향부의 순으로 크게 나타나고 있다.

따라서 본 연구에서 사용한 SM45C 강 봉 맞대기 용접재료를 사용하여 기계구조물을 제작할 때 안전설계를 위해서는 무한수명 영역이 가장 낮게 나타나는 열영향부 영역의 범위를 기준으로 설계응력을 선택하는 것이 요구된다.

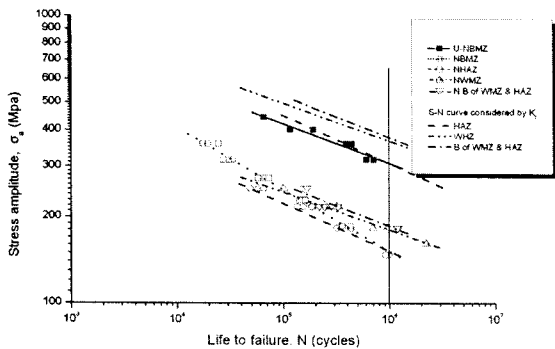


Fig. 5 S-N curve for all of specimens in weld zone

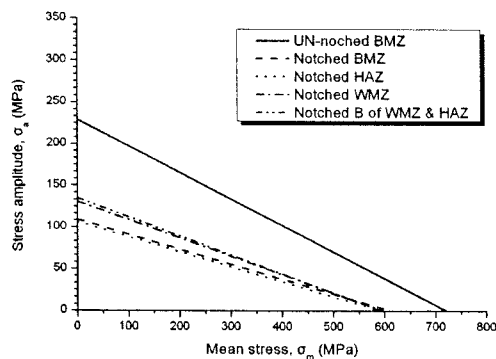


Fig. 6 Haigh diagram for notched materials of weld zone an

d un-notched base metal

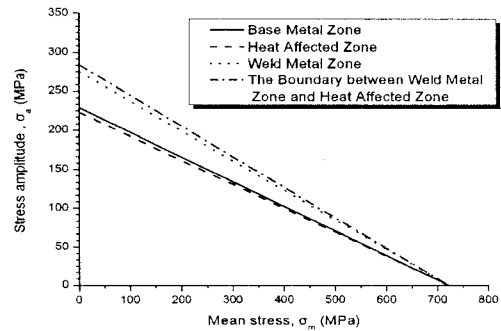


Fig. 7 Haigh diagram considered fatigue notch factor,  $K_f$  for notched materials of weld zone

#### 4. 결 론

- 1) 냉간 인발공정에 의한 가공경화로 인하여 모재부에서 경도와 인장강도가 가장 높게 나타나고 용접에 의하여 높은 열을 받은 후 상온에서 서서히 냉각됨으로서 용접부위가 연성화되어 용접부의 경도 및 인장강도는 낮게 나타난다.
- 2) 각 용접부의 피로강도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나며 이 경향은 경도 값의 순서와 같다.
- 3) 모재부의 피로강도는  $10^4 \sim 10^6$  사이클 범위에서 낮은 사이클에서는 용접부위의 피로강도와 비교하여 높게 나타나고 있으며 높은 사이클 범위로 갈수록 피로강도가 현저히 감소하여  $10^6$  사이클 근방에서 가장 낮은 열영향부의 피로강도와 유사하게 나타난다. 이러한 경향은 모재의 인발공정으로 인한 초기의 높은 압축잔류응력이 오랜 반복하중으로 인하여 완되고 경도 및 인장강도도 다소 연성화되는 영향으로 생각된다.
- 4) 무한수명평가로부터 용접재료의 무한수명영역은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타난다. 따라서 안전설계응력은 가장 낮은 열영향부의 무한수명영역 범위 내에서 정하는 것이 요구된다.

#### 참 고 문 헌

1. R.C. Juvinall : Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength, McGraw Hill, New York, 1983.
2. H.F. Moore and J.B. Koppers : An Investigations of the Fatigue of Metals, Univ. Ill. Eng. Exp. Stn. Bull., 124, 1921.