

## SM45C 용접부에서 회전굽힘시험에 의한 피로 및 파단면의 특성

이용복\*

(논문접수일 2009. 05. 15, 심사완료일 2009. 12. 31)

### Characteristics of Fatigue Behavior and Fracture Surfaces by Rotary Bending Test in SM45C Welding Zone

Yong-Bok Lee\*

#### Abstract

SM45C steel rods using generally for machine components were selected and welded by butt-GMA welding method for this study. And then they were studied about characteristics of fatigue behavior and fracture surfaces by rotary bending test. Fatigue strength in weld zone present highly in order of the boundary between deposited metal zone and heat affected zone, deposited metal zone, heat affected zone. The region of infinite life by Haigh diagram present highly in order of the boundary between deposited metal zone and heat affected zone, deposited metal zone, heat affected zone. Fatigue cracks in unnotched specimens of base metal and weld zone introduce simultaneously from extensive out-side of circumferential cross-section and propagate to the other side indicating beach markings and dimples according to consolidation of fatigue cracks. Fatigue cracks in all of notched specimens introduce simultaneously in out-side of circumferential cross-section by high stresses and propagate to center of it indicating beach markings.

**Key Words** : Characteristics of Fatigue Behavior(피로특성), Fracture Surface(파단면), Fatigue Strength(피로강도), Weld Zone(용접부), Infinite Life(무한수명), Fatigue Crack(피로균열), Dimple(딴플), Beach Mark(비취마크)

\* 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과 (yblee@wow.hongik.ac.kr)  
주소: 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1

## 1. 서론

기계의 동력축이나 피스톤 로드 등 기계요소제품에 많이 사용하는 환봉 강재는 이음할 때 주로 나사이음이나 용접에 의하여 수행되고 있고, 현재 용접기술의 향상으로 작업이 간편하고 강도향상을 위해서 용접에 의한 이음을 많이 활용하고 있다. 그러나 용접이음부에는 열응력에 의한 잔류응력의 존재뿐 만 아니라 급랭으로 인한 금속조직의 편석으로 조직간의 경계가 발생하고, 모재 자체의 인발 소성가공에 의한 경화와 용접으로 인한 열 소성 및 인화 등의 영향을 받을 수 있다<sup>(1-3)</sup>. 따라서 용접된 환봉 강재를 사용하는 기계요소 재료를 안전하게 사용하기 위해서는 이 들 영향을 고려하여 용접부의 피로강도 평가를 정확하게 파악할 필요가 있다. 그리고 이들 기계요소는 사용조건에 따라 인장, 압축, 굽힘 및 비틀림 등의 하중과 반복적인 회전굽힘응력을 받아 파손이 쉽게 발생할 수 있다. 이와같이 용접부재는 가공공정에 의한 여러 가지 변수들로 인하여 취약하게 될 수 있고 하중조건에 따라 피로강도상 크게 영향을 받을 수 있다<sup>(4-6)</sup>. 따라서 환봉 용접계의 안전사용이나 안전설계를 위하여 피로강도에 대한 정량적 평가가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 기계구조물 재료로 많이 사용하는 SM45C 환봉을 GMA용접법으로 맞대기 용접하여 용접부 각 경계에서의 회전 굽힘 시험에 의한 피로특성을 알아보고 안전설계응력 범위와 파단면의 특성에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구를 위하여 시험편 재료는 일반적으로 기계 구조물로 많이 사용하고 있고, 상온에서 인발 공정하여 제조된 지

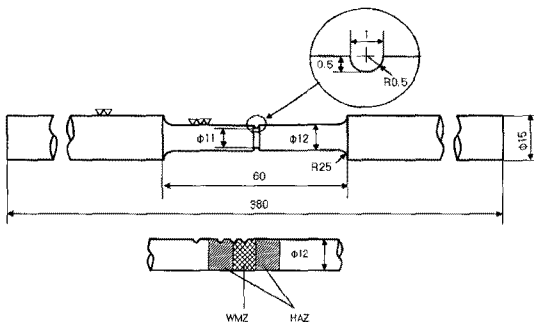


Fig. 1 The schematics of specimens for rotating bending fatigue test

름 25mm의 SM45C 강봉을 선택하였다. 그리고 시험편 치수를 고려하여 길이에 맞도록 절단한 후 한쪽 끝 면을 30° 경사지도록 원둘레로 기계가공하였고 두 재료를 60° 개선 (groove) 형태로 맞대어 적당한 간격(3-4mm)을 두어 지그로 고정하고 회전시키며 GMAW( $CO_2$  gas metal arc welding) 법에 의하여 3층 맞대기 용접 하였다. 용접 후 용접부를 중심으로 양쪽으로 대칭되도록 Fig. 1의 규격으로 기계 가공하였다. 그리고 용접부위를 경 연마(polishing)하여 4% 나이탈 용액으로 부식시키고 각 경계가 명확하게 나타나도록 한 후 용착금속부, 용착금속부와 열영향부의 경계, 열영향부 그리고 모재부로 구분하여 그림에 나타낸 바와 같이 반경 0.5mm의 원둘레 U-노치를 기계가공 하였다. 재료의 기계적 성질 및 화학성분은 Table 1 및 Table 2와 같고, 용접은 일반적으로 적용하는 적절한 용접조건을 적용하여 Table 3의 조건으로 수행하였다. 우선, 용접부위의 기본적인 기계적 성질을 알아보기 위하여 마이크로비커스 경도를 측정하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 피로시험은 FTO-10(H) 형식의 회전 굽힘 피로 시험기(Fig. 3)를 사용하였고, 회전속도를 2,000rpm으로 유지하고 하중시험 중에 발생하는 열을 일정하게 유지시키기 위하여 냉각 챔버(chamber)를 설치해서

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Mechanical properties			
	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Hardness number (H <sub>v</sub> )	Elonga-tion (%)
SM45C	666	721	205	18

Table 2 Chemical compositions of base metal

Material	Chemical compositions(wt.%)				
	C	Si	Mn	P	S
SM45C	0.43	0.27	0.44	0.03	0.035

Table 3 Welding conditions by GMAW

Number of pass	Current (A)	Voltage (V)	Diameter of wire (mm)	Gas flow (l/m)
1	200	24	1.2	14
2	220	26	1.2	14
3	260	26	1.2	14

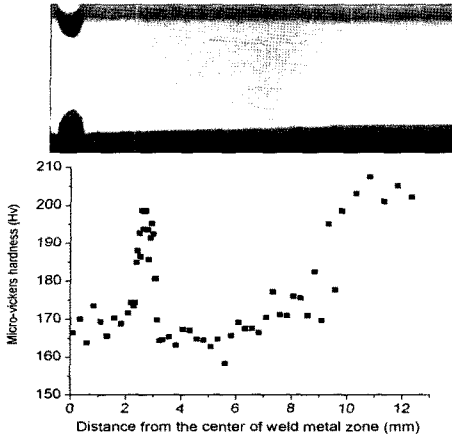


Fig. 2 Distribution of micro-vickers hardness number in weld zone

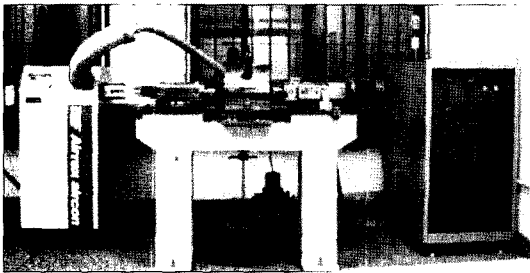


Fig. 3 Rotating bending fatigue testing machine

상온과 같은 18°C~20°C 범위 내의 온도를 유지시키며 수행하였다. 하중 조건은 각 시험편마다 4~5단계 하중을 사용하였고, 고 사이클 범위( $10^4 \sim 10^7$ )에서 시험을 수행하였다.

### 3. 실험결과에 대한 고찰

#### 3.1 피로노치계수

용접부위의 각 위치 및 경계부에서의 정확한 피로특성을 알아보기 위하여 각 부위에 U-노치를 주어 실험하였고, U-노치에 의한 응력집중계수를 고려하여 평활재로 예상한 피로특성을 비교 고찰하고자 하였다. 이를 위하여 우선 집합구조 형상에 따른 응력집중계수  $K_t$ (stress concentration factor)를 고려하고, 실험을 통한 용접부의 피로노치계수  $K_f$ (fatigue notch factor)와 노치감도계수  $q$ (notch sensitivity factor)를 평가하여 나타내었다.

응력집중계수  $K_t$ 는 반원형 U-노치를 가진 환봉이 굽힘 하중을 받을 때 다음의 Peterson식<sup>(7,8)</sup>을 이용하여  $K_t=2.4820$ 를 얻었다.

$$K_t = 3.032 - 7.431\left(\frac{2t}{D}\right) + 10.390\left(\frac{2t}{D}\right)^2 - 5.009\left(\frac{2t}{D}\right)^3 \quad (1)$$

기초이론의 계산식을 이용하여 구한 노치시험편에 대한 Peterson, Neuber의 피로노치계수  $K_f$ 는 다음과 같다<sup>(9,10)</sup>.

$$\begin{aligned} K_f(\text{Peterson}) &= 2.111 \\ q(\text{Peterson}) &= 0.7498 \\ K_f(\text{Neuber}) &= 2.0247 \\ q(\text{Neuber}) &= 0.6914 \end{aligned}$$

모재의 평활재 및 노치시험편에 대한 S-N 선도를 실험 데이터를 이용하여 Fig. 4에 나타내었다. 이로부터 모재 평활재의 피로한도는 322MPa, 모재부 노치재의 피로한도는 150MPa로 나타난다. 이 두 피로한도의 비율에서 피로노치계수  $K_f=2.1333$ 를 얻었다. Fig. 5는 S-N선도에서 Peterson, Neuber의 피로노치계수 값의 변화에 따른 S-N선도의 변화와 실험값과의 비교를 나타낸 것으로 모두 잘 일치하며 Peterson의 예측선도와 실험값이 더 잘 일치함을 보여준다. 그리고 노치가 있는 모재 시험편의 실험수명과 예상수명을 비교할 때 두 방법 모두 잘 일치하는 경향을 보여준다. 이러한 사실로부터 U-노치를 갖는 각 용접 부위의 피로시험 결과로부터 피로노치계수  $K_f$ 를 고려하여 평활재로 한 각 용접 부위의 피로수명 예측을 할 수 있다고 사료된다.

#### 3.2 피로강도평가

각 용접부위의 노치재료 시험편에 대한 피로수명곡선을 모재의 평활재료 및 노치재료의 피로시험결과와 같이 나타내면 Fig. 6와 같으며 피로강도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나고 있다. 이 경향은 경도 값의 순서와 같다. 모재부의 피로강도는  $10^4 \sim 10^7$ 사이클 범위의  $10^4$ 사이클 근방에서 여러 용접부의 피로강도보다 높게 나타나고 있고 점점 저 하중 고 사이클 쪽으로 갈수록 피로강도가 여러 용접부의 경우보다 급속하게 떨어지는 경향을 보이며  $10^6$  사이클에서 피로강도가 용접부위에서 가장 낮은 열영향부의 경우와 유사하게 나타나고 있다. 용접지역에서 각 용접부의 피로강도를 정확하게 평가하기

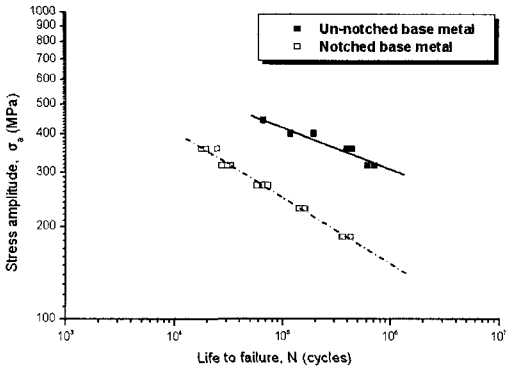


Fig. 4 S-N curve for notched material and un-notched material in base metal

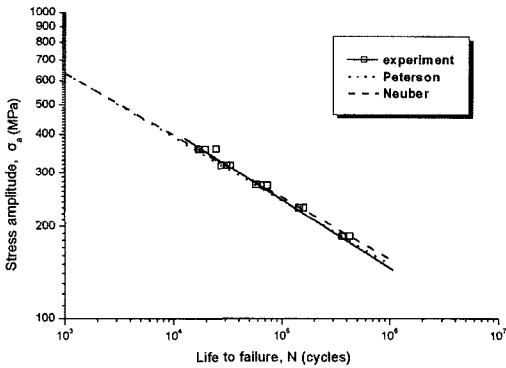


Fig. 5 S-N curves predicted by Peterson and Neuber in notched base metal

위하여 각 부위의 위치에 반경 0.5mm의 원둘레 U-노치를 가공하여 실험하였고 앞에서 얻은 피로노치계수,  $K_f$ 를 고려하여 평활재료로 예상한 피로강도 값들은 실제 모재의 평활 재료 시험에서 얻은 값과 비교하여 다소 높게 나타나고 있으나 크게 차이를 보이고 있지 않고 있어 평활재료로 한 각 용접부위의 피로강도 평가를 하는데 자료로서 활용할 수 있다고 판단된다. S-N선도에 의한 수명평가 결과로부터 용접재의 무한수명을 갖는 영역의 응력범위를 알아보기 위하여 Goodman의 식 (2)를 이용한 Haigh 선도<sup>(11,12)</sup>를 Fig. 6에 나타내었다.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (2)$$

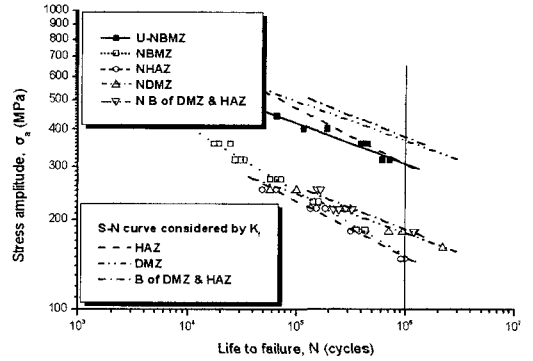


Fig. 6 S-N curves for all of specimens in weld zone

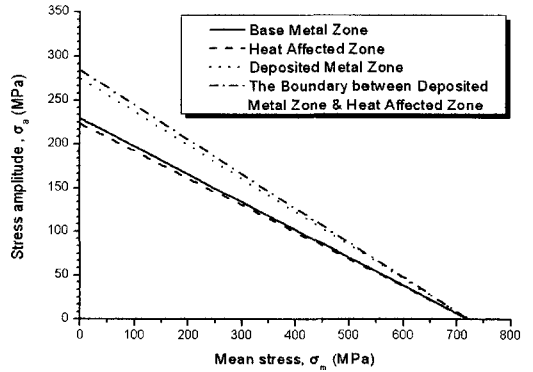


Fig. 7 Haigh diagram considered fatigue notch factor,  $K_f$  for notched materials

여기서 사용된 수정계수(modifying factors) 값은 다음과 같다.

$$C_l(\text{load type factor}) = 1(\text{bending})$$

$$C_s(\text{size factor}) = 0.9593(d=11\text{mm})$$

$$C_{s_f}(\text{surface finish factor}) = 0.7885(\text{machined or cold-drawn})$$

가로축의 평균응력 임계값  $\sigma_m$ 은 인장시험 결과로부터 얻은 응력-변형률 선도에서의 인장강도 값  $\sigma_u$ 을 기준으로 하였고, 반복응력의 폭 값  $\sigma_a$ 를 나타내는 세로축에는  $10^6$ 사이클에서의 각 용접부위의 피로강도,  $\sigma_f$ (fatigue limit) 즉 내구한도,  $\sigma_e$ (endurance limit) 값을 기준으로 나타내었다. 여기에서 얻은 용접 각 부위의 피로강도 값은 크기효과, 하중효과 및 표면가공 효과의 수정계수를 고려한 값이다<sup>(11)</sup>. 무

한수명 영역은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 모재부, 열영향부의 순으로 크게 나타나고 있다. 이 결과로부터 SM45C 환봉 맞대기 용접재료를 사용하여 구조물을 제작할 때 무한수명 영역이 가장 낮게 나타나는 열영향부 영역의 값을 기준으로 설계응력을 선택하는 것이 요구된다.

### 3.3 피로파단면

Fig. 8 ~ Fig. 15는 피로파괴된 시험편의 파단면 형상으로 모재의 평할 재 시험편(Fig. 8 및 Fig. 9), 용착금속부의 평할 재 시험편(Fig. 10 및 Fig. 11), 모재부의 노치 시험편(Fig. 12), 열영향부의 노치 시험편(Fig. 13), 용착금속과 열영향 경계부의 노치 시험편(Fig. 14), 용착금속부의 노치 시험편(Fig. 15)을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 16은 용착금속부 노치재의 파단면에 지역별 균열파단 특성을 나타낸 것이다. 회전 굽힘 피로시험에서 모든 피로균열은 외부 원주 상에서 넓게 발생하였고 균열이 단면 외부로부터 내부로 진전될 때 균열면의 합체에 의한 딩플(dimple)형상과 외부의 느린 피로균열 진전 영역에서 상호 마찰에 의한 광택 면을 보인다. 그리고 내부 쪽으로 빠르게 피로균열이 진전하면서 최종파단영역 주변까지 스트라이에이션(striation)과 비취마크(beach mark)를 보이고 있다. 모재 노치 시험편의 경우 파단면의 최종 위치는 작용응력 236MPa를 기준으로 작용응력이 높을수록 중앙에 나타나며 낮을수록 중앙으로부터 편중되어 나타났다. 그리고 용접부 노치 시험편의 경우에서도 작용응력이 높을수록 최종파단면이 중심부 가까이에 위치하는 경향을 나타내었다. Lee<sup>(13)</sup> 등의 연구에 의하면 재료 내에 기포나 이물질이 게재할 때 그 위치로부터 균열이 발생하여 피로강도를 저하시키는 요인이 되고 있고, 특히 용접재의 경우 이러한 현상이 많이 발생하고 이들 결함이 중심으로부터 외부 쪽에 위치할수록 피로균열이 일찍 발생하여 피로수명을 크게 저하시키는 경향을 보인 바 있다. 이와 같은 현상으로부터 본 연구결과에서는 일률적으로 작용하중 만의 영향을 나타낸 것으로 보아 용접이 잘 이루어진 것을 알 수 있다. 평할 재에서 작용하중이 낮은 경우 피로균열은 단면 외부의 한 쪽 넓은 지역에서 동시에 발생하여 오랫동안 진전하게 되고 단면 외부의 다른 쪽에서 최종 파단 된다. 작용 하중이 높은 경우 피로균열은 단면 외부의 여러 곳에서 동시에 균열이 발생하여 그들로부터 단면 중심으로 빠르게 진전되고 중앙 쪽에서 최종 파단 되는 경향이 나타난다. 그리고 노치 시험편의 경우 파단면은 응력 집중의 영향을 받아 균열이 동일 원주상의 외부로부터 균일하게 동시에 발생하고 빠르게 진전되어 전반적으로 평탄하게 나타나고 있다. 일반적으로 용

접부는 용착금속부, 열영향부, 모재부로 구성되어 있고 용착금속부와 열영향부는 A1 변태점 이상으로 가열된 영역으로 급열 급랭의 열 사이클을 받기 때문에 모재와 다른 미세 조직을 갖고 있으며 조립역, 혼입역, 세입역, 구상 펄라이트역, 취성화영역 등으로 구성되어 있다. 그리고 이들 부위에는 용접 입열, 이음형상, 판 두께, 예열 조건, 용접횟수에 따라 냉각속도가 다르기 때문에 여러 가지 변태조직이 나타나는 것으로 알려지고 있다<sup>(14,15)</sup>.

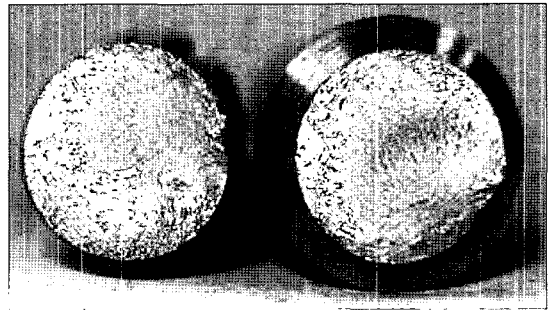


Fig. 8 Fracture surface of unnotched BMZ(276MPa, 70,730cycles)



Fig. 9 Fracture surface of unnotched BMZ(393MPa, 31200cycles)

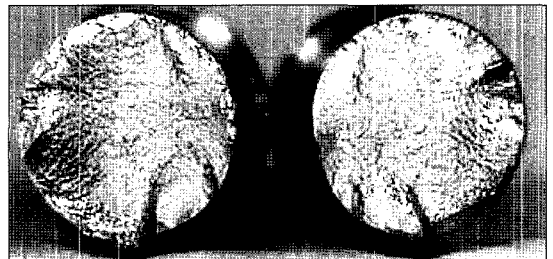


Fig. 10 Fracture surface of unnotched DMZ(248MPa, 67,900cycles)

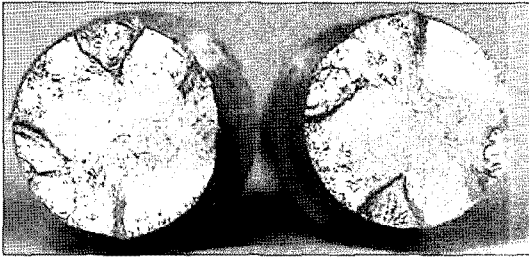


Fig. 11 Fracture surface of unnotched DMZ(279MPa, 25,400cycles)

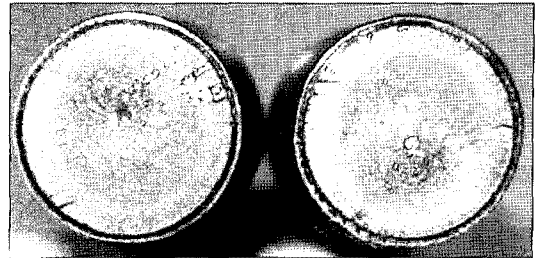


Fig. 15 Fracture surface of notched DMZ(217MPa, 16,690cycles)

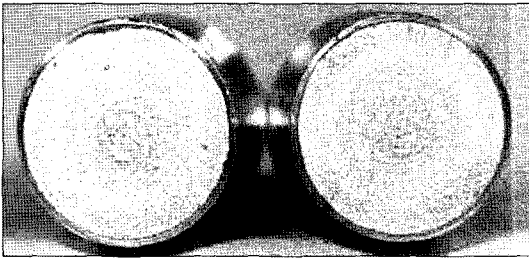


Fig. 12 Fracture surface of notched BMZ(276MPa, 30,600cycles)

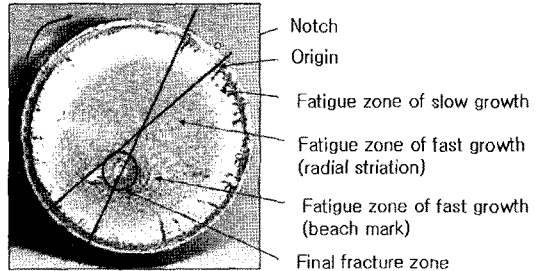


Fig. 16 Characteristics of fracture surface(notched DMZ, 186MPa, 21,890cycles)

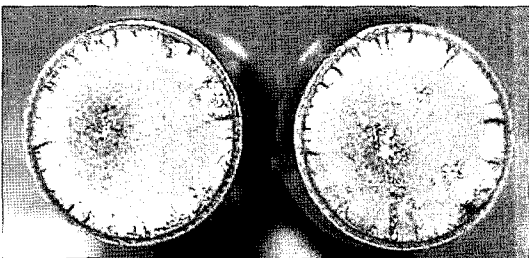


Fig. 13 Fracture surface of notched HAZ(217MPa, 6,550cycles)

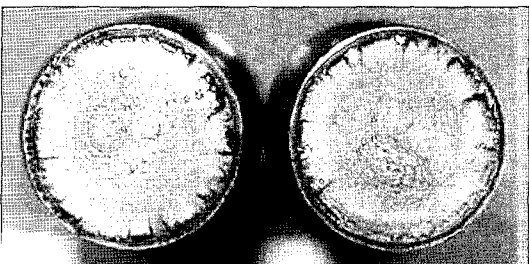


Fig. 14 Fracture surface of notched boundary between DMZ & HAZ(248MPa, 5,700cycles)

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 일반 기계구조물로 많이 활용하고 있는 SM45C 강 봉재를 선택하고 GMAW법으로 맞대기 용접하여 용접부위의 피로 및 파단면의 특성에 대하여 고찰해 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) SM45C 환봉 용접부에서 경도는 인발 공정에 의한 모재의 소성경화로 인하여 모재부에서 경도가 205Hv.로 가장 높게 나타나고 다층 용접에 의하여 열 영향으로 연화된 용착금속부와 열영향부의 경도가 170Hv.와 165Hv.로 낮게 나타난다. 용접부의 피로강도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나는데 이 경향은 경도 값의 순서와 같다.
- (2) Goodman식에 의한 Haigh선도로부터 용접재의 피로강도에 의한 무한 수명 영역은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 모재부, 열영향부의 순으로 높게 나타난다. 따라서 SM45C 환봉 용접재의 안전설계응력은 주어진 가장 낮은 열영향부의 무한수명영역 범위 내에서

정하는 것이 바람직하다.

- (3) 대부분 피로균열은 외부 원주 상에서 넓게 동시에 발생하고 균열이 단면 외부로부터 내부로 진전될 때 균열면의 합체에 의한 덩플 형상과 내부 쪽으로 빠르게 피로균열이 진전하면서 최종 파단 영역 주변까지 스트라이에이션과 비취마크를 보이고 있다.
- (4) 평활 재에서 작용하중이 낮은 경우 피로균열은 단면 외부의 한 쪽 넓은 지역에서 동시에 발생하여 서서히 진전하다가 다른쪽으로 빠르게 진전하며 최종 파단 되고, 작용 하중이 높은 경우 단면 외부의 여러곳에서 동시에 균열이 발생하여 단면 중심으로 빠르게 진전되어 중앙부위에서 최종파단 된다. 그리고 노치 재와 비교하여 덩플 형상과 굴곡이 크게 나타난다.
- (5) 노치 재에서 파단면은 응력 집중의 영향을 받아 균열이 동일 원주상의 외부로 부터 동시에 균일하게 발생하고 빠르게 진전 되어 전반적으로 평탄하게 나타나고 있다. 최종 파단은 모재에서 작용 응력 236MPa를 기준으로 작용 응력이 높을수록 중앙에 나타나며 낮을수록 중앙으로 부터 편중되어 나타난다. 용접 재에서도 같은 경향을 보이며 평활재의 파단면과 비교하여 비취마크가 더 명백하게 나타난다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Juvinall, R. C., 1983, *Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength*, McGraw-Hill, New York.
- (2) Collins, J. A., 1981, *Failure of Materials in Mechanical Design*, Wiley-Interscience, New York.
- (3) Lee, Y. B., Chung, C. S., Park, Y. K., and Kim, H. K., 1998, "Effects of Redistributing Residual Stresses on the Fatigue Behavior of SS330 Weldments," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 8, pp. 565~573.
- (4) Lee, Y. B. and Oh, B. D., 2005, "Characteristics of Fatigue Crack Propagations with respect to the Angles

- between Rolling and Tensile Loading Directions of Steel Plates," *J. of KSMTE*, Vol. 14, No. 3, pp. 74~80.
- (5) Lee, Y. B. and Oh, B. D., 2003, "Fatigue Characteristics of Load-Carring-Cruciform Fillet Welded Joints according to Welding Methods," *J. of KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 38~44.
- (6) Lee, Y. B., Siljander, A., and Lawrence Jr., F. V., 1992, "The Role of Casting Porosity in Fatigue Properties of AL-Si 319 Lost Foam Cast Alloy," *KSMTE Journal*, Vol. 6, No. 2, pp. 81~87.
- (7) Peterson, R. E., 1974, *Stress Concentration Factor*, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- (8) Pilkey, W. D., 1997, *Peterson's Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- (9) Kuguel, R., 1961, "A Relation between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume," *ASTM, Proc.*, Vol. 61, pp. 732~748.
- (10) Toper, T. H., Wetzel, R. M., and Morrow, J. D., 1969, "Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens," *J. of Material*, Vol. 4, No. 1, pp. 200~209.
- (11) Bannantine, J., Comer, J., and Handrock, J., 1987, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, University of Illinois, USA, pp. 6~28.
- (12) Shigley, J. E. and Mischike, C. R., 1989, *Mechanical Engineering Design*, 5th ed., McGraw-Hill, Singapore, pp. 296~300.
- (13) Lee, Y. B., 1978, "An Experimental Study of the Stress Intensity Factor at the weld zone," Master Degree Thesis, Inha University, Republic of Korea, p. 50.
- (14) Ewalds, H. L. and Wanhill, R. J., 1986, *Mechanisms of Fracture in Actual Materials, Fracture Mechanics*, Edward Arnold, Delft; London; Baltimore; Victoria, pp. 226~256.
- (15) Boyer, H. E., 1974, *Photography of Fractured Parts and Fracture Surfaces*, Metal Handbook, 8th ed., USA, pp. 11~48.