

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.6.519

SM45C 환봉 용접재의 피로거동에 관한 실험적 연구

이 용 복[†] · 정 재 근^{*}

(2008년 3월 10일 접수, 2008년 4월 18일 심사완료)

An Experimental Study on Fatigue Behavior in Welded SM45C Steel Rod

Yong-Bok Lee and Jae-Keun Jung

Key Words: Fatigue Strength(피로강도), Infinite Life(무한수명), Deposited Metal Zone(용착금속부), Heat Affected Zone(열영향부), Base Metal Zone(모재부), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Drawing Process(인발공정), Alternating Stress(반복응력)

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 by Haigh diagram using Goodman's equation. Fatigue strength in weld zone presents highly in order of the boundary between deposited metal zone and heat affected zone, deposited metal zone, heat affected zone. This result agrees with distribution of hardness in weld zone. Fatigue strength in base metal zone presents highly compared with weld zone in low cycles between 10^4 cycles and 10^6 cycles, but it presents the lowest fatigue strength on the order of heat affected zone in the vicinity of 10^6 cycles. It is the result that the first high compressive residual stress distributed by drawing process of the steel rods is released and the base metal is softened by alternating stresses. The region of infinite life by Haigh diagram presents highly in order of the boundary between deposited metal zone and heat affected zone, deposited metal zone, heat affected zone. From this results, 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
에 많이 사용하는 환봉 강재는 보수 및 이음 할
때 주로 용접 또는 나사이음에 의하여 수행되고
있고 이들 재료는 인장, 압축, 굽힘, 그리고 비틀

림 등의 하중을 정적, 동적 및 반복적으로 받
고 있다. 이와 같이 사용조건에 따라 여러 가지
하중을 받고 있는 환봉 강재 구조물의 안전설계
를 위하여 많은 노력이 진행되어왔고 이에 대한
연구 자료들이 많이 존재하고 있다.^(1~4) 현재 용접
기술의 향상으로 간편하고 높은 강도의 구조물
제작과 경제성을 고려하여 용접에 의한 환봉 이
음을 많이 활용하고 있다. 그러나 용접이음부
는 열응력에 의한 잔류응력이 존재하고 급냉에
의한 금속조직의 편석으로 조직 간의 경계가 발
생하여 용접부의 강도를 저하시키고 있다.^(5~7) 그
러므로 강 봉을 사용하는 구조물의 안전설계를

[†] 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

E-mail : yblee@wow.hongik.ac.kr

TEL : (02)320-1665 FAX : (02)322-7003

* 홍익대학교 대학원 기계공학과

위하여 강도평가를 정확하게 파악하는 것은 매우 중요한 과제이다. 특히 강 봉재의 경우 화학성분에 따른 강의 재료와 용접조건에 따라 용접부 각 경계의 기계적 성질이 크게 차이를 나타내고 있다. 따라서 이들 조건에 따른 강 봉 용접부의 피로강도 향상을 위하여 그 기초 연구로서 용접부 각 경계에서의 기계적 성질은 물론 피로강도 특성을 정확하게 파악해 볼 필요가 있다. 이를 고려하여 본 연구에서는 일반적으로 강 봉 구조물로 많이 사용하고 있는 SM45C 환봉을 선택하여 GMAW(CO₂ Gas Metal Arc Welding) 용접법으로 맞대기 용접하였고 각 용접부위에 대한 회전 굽힘 시험을 하여 피로거동을 평가해 보고자 하였다. 그리고 최종적으로 이들 결과에 의한 Goodman의 식을 이용한 Haigh 선도로부터 무한 수명을 갖는 영역을 알아보고 SM45C 환봉 용접 재료를 사용하는 경우의 안전설계 응력 범위에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

2. 실험

2.1 시험편의 준비

본 연구를 위하여 사용한 시험편 재료는 일반적으로 기계 구조물로 많이 사용하고 있고 상온에서 인발 공정에 의하여 제조된 지름 25mm의 SM45C 환봉을 선택하였고, 양 끝 면을 30° 경사 시도록 원둘레로 기계가공한 후 60° 개선(groove) 형태로 맞대어 지그로 고정하고 회전시키며 GMAW 용접법에 의하여 3층 맞대기 용접 하였다. 그리고 우선 각 용접부위의 기계적 성질을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 표준 인장 시험편 규격으로 평활재 시험편(unnotched specimen)과 U-노치 시험편(U-notched specimen)을 준비 하였다. 이때 각 용접부위를 용착금속부(deposited metal zone), 용착금속부와 열영향부의 경계(the boundary between deposited metal zone and heat affected zone), 모재부(base metal zone)로 구별하여 각 부위를 중심으로 양쪽으로 대칭되도록 기계가공 및 경 연마(polishing)하고 부식시킨 후 노치 시험편은 각 위치에 반경 0.5mm의 원둘레 U-노치를 기계가공 하였다. 또한 용접부위의 경도 측정을 위하여 용접부 주위를 평탄하게 기계가공하고 경 연마(polishing) 후 부식시켜 각 경계가 명확하게 나타나도록 하여 경도 시험편을 준비하

였다. 그리고 회전 굽힘 시험편은 Fig. 2와 같이 인장시험편의 경우와 같은 방법으로 준비 하였다. 각 부위의 시험편은 12편 이상씩 준비하여 4단계 시험 하중으로 구분하여 각 시험 하중에서 3편 이상씩 회전 굽힘 피로 시험을 수행할 수 있도록 준비 하였다. 시험편 재료의 기계적 성질 및 화학 성분은 Table 1 및 Table 2와 같고 GMAW의 용접조건은 Table 3과 같다.

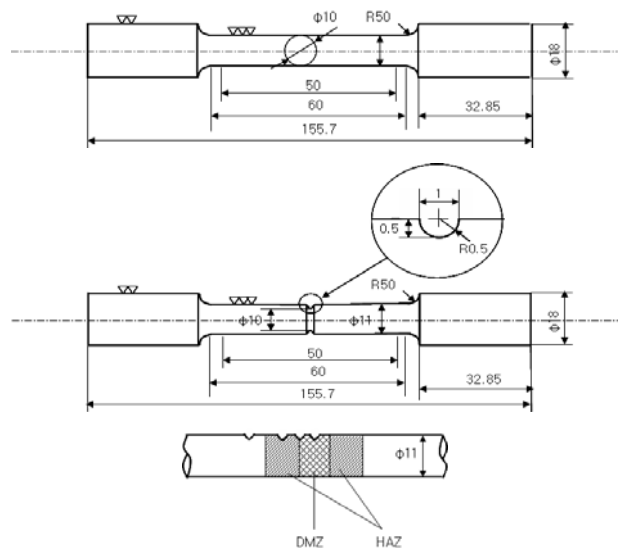


Fig. 1 The schematic of specimens for tensile test

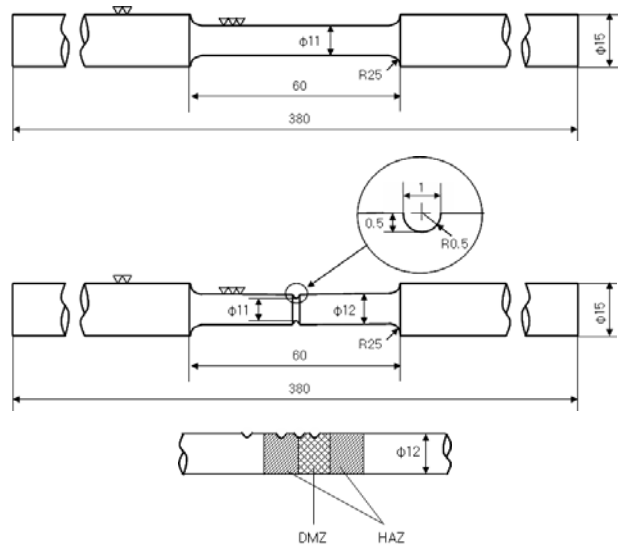


Fig. 2 The schematic of specimens for rotating bending fatigue test

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Mechanical properties			
	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Hardness number (H_V)	Elongation (%)
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 /min)
1	200	24	1.2	14
2	220	26	1.2	14
3	260	26	1.2	14

2.2 실험방법

SM45C 환봉 맞대기 용접부에 대한 회전 굽힘 피로시험을 수행하기 전에 용접 각 부의 기계적 성질을 알아보기 위하여 먼저 인장시험 및 경도시험을 수행하였다. 인장시험은 100kN의 UTM을 사용하였고 각 용접부위의 기계적 특성을 파악하기 위하여 각 용접 부위별로 원둘레 U-노치를 가공한 시험편을 사용하였다. 노치의 영향을 알아보기 위하여 모재의 평활재로 시험편에 대한 시험도 수행하였다. 경도시험은 용착금속부의 중심 위치로부터 0.2mm 간격으로 모재부로 이동시키며 마이크로 비커스(micro-vickers)경도를 측정하였다. 환봉 맞대기 용접재료의 피로수명 평가를 위하여 회전 굽힘 피로시험은 FTO-10(H) 형식의 회전 굽힘 시험기(Fig. 3)를 사용하였고 하중하의 회전 굽힘 피로시험 중에 발생하는 열을 일정하게 유지시키기 위하여 공냉챔버(chamber)를 설치

**Fig. 3** Rotating bending fatigue testing machine

해서 실내 온도와 같은 18C~20C 범위 내의 온도를 유지시키며 시험을 수행하였다. 하중조건은 각 시험편마다 4.5단계 하중을 사용하였으며 $10^4 \sim 10^7$ 범위의 고 사이클에서 회전 굽힘 피로시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접재의 기계적 성질

용접재료에 대한 기계적 성질을 파악하기 위하여 경도시험 및 인장시험을 수행하였다. 경도시험은 Fig. 4에 보여주는 바와 같이 용착금속부의 중심 위치로부터 모재부로 이동하면서 0.2mm 간격으로 측정하였다. 그림에서 보여주는 바와 같이 용착금속부는 167Hv 정도의 경도 값을 갖고 용착금속부와 열영향부 경계에서 급작스럽게 경도가 증가하여 최고 200Hv 경도 값까지 나타나며 열영향부에서 급작스럽게 165Hv 경도 값까지 감소한다. 그리고 열영향부에서 모재부로 접근함에 따라 서서히 경도가 증가하다가 용착금속부 중심으로부터 11mm 떨어진 위치로부터 가장 높은 205Hv 정도의 경도 값을 보이고 있다. 이들 경도시험결과는 대체적으로 후열처리된 판재의 경도 값보다 현저히 높게 나타나고 있다.⁽⁸⁾ 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 평활재 시험편 과 노치 시험편 그리고 용접재료의 모재부, 열영향부, 열영향부와 용착금속부의 경계 및 용착금속부로 구분하여 수행하였다. 그 결과는 Fig.

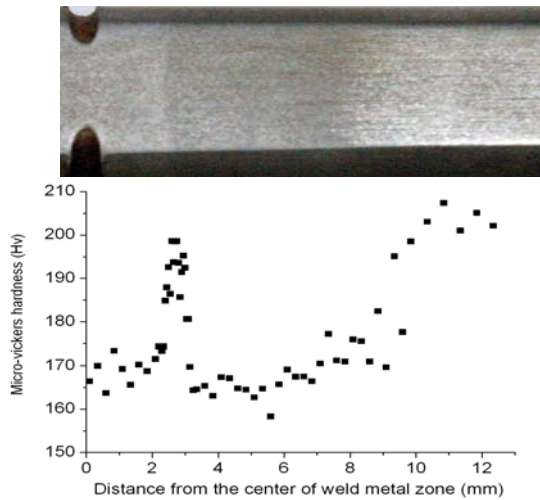


Fig. 4 Distribution of micro-vickers hardness number in weld zone

5에 보이는 바와 같다. 모재 평활재료 시험편의 경우 항복강도 666MPa, 인장강도 721MPa, 연신율 18%로 Table 1에 나타낸 바와 같고, 모재 노치재료는 항복강도 550MPa, 인장강도 612MPa, 연신율 18%이다. 그리고 열영향부, 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부의 노치 시험편은 항복강도 441MPa, 인장강도 595MPa, 연신율 18%로 각 부위에서 오차범위내의 유사한 기계적 특성을 보이며 모재 평활재료의 경우와 비교하여 노치영향⁽⁹⁾에 의한 응력집중을 받아 전반적으로 낮은 값들을 갖고 모재 노치재료와 비교하여 항복강도는 다소 차이를 보이나 인장강도와 연신율은 유사하게 나타나고 있다. 이들 결과로부터 모재의 경우 상온 인발공정에 의한 경화와 높은 압축잔류응력의 발생으로 인하여 모재가 초기에 용접부위에 비하여 높은 항복강도를 나타내고 있고, 평활재료의 인장강도가 노치재료의 인장강도보다 높게 나타나는데 이 결과는 노치의 영향이라고 생각 된다.^(10,11) 각 용접부위의 노치재료는 모재 노치재료에 비하여 항복강도가 큰 차이로 낮게 나타나고 있고, 인장강도는 작은 차이로 낮게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 용접 열로 인하여 연화된 용접재가 항복강도 이후 소성변형으로 인한 경화의 영향으로 강도가 서서히 증가하여 모재 노치재료의 인장강도 값과 유사하게 나타나고 있다고 생각된다.

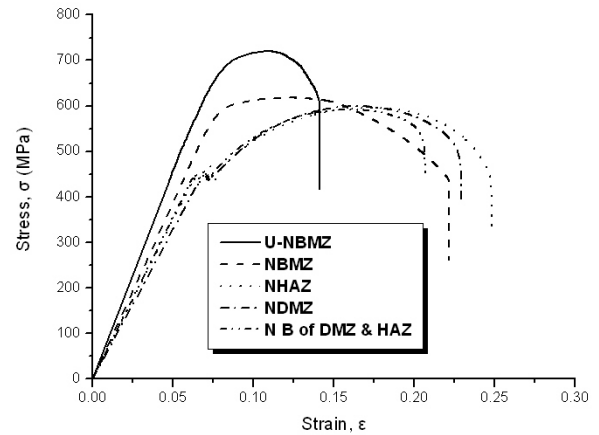


Fig. 5 Stress - strain diagram for tensile specimens

3.2 용접재료의 피로거동

Fig. 6은 Peterson과 Neuber의 피로노치계수를 이용한 값과 실험값과의 비교를 나타낸 S-N선도이다. Neuber에 의한 값보다 Peterson에 의한 예측값이 실험값에 더 잘 일치함을 보이나 두 방법 모두 잘 일치하는 경향을 보여준다. 이러한 사실로부터 재료의 인장강도 σ_u 와 피로노치계수 K_f 로부터 노치가 있는 재료의 피로수명 예측을 정확하게 할 수 있음을 알 수 있다. 용접재료에 대한 피로거동을 평가해 보기 위하여 고 사이클 범위에서 회전 굽힘 피로시험을 수행하였고 모재의 평활재료와 노치재료의 피로시험 결과를 나타내면 Fig. 7과 같다. 모재의 평활재료 시험편의 피로강도와 피로한도에 대한 실험값은 기계적 성질로부터 예측한 값과 유사하며 노치재료 시험편의 피로수명곡선은 노치에 의한 피로응력집중계수 K_f 의 영향을 받아 평활재료의 경우보다 피로강도가 전반적으로 낮게 나타나고 있다.⁽¹²⁻¹⁵⁾ 각 용접부위의 노치재료 시험편에 대한 피로수명곡선과 이들 곡선으로부터 피로노치계수, K_f 를 고려하여 평활재료로 예상한 피로수명곡선을 나타내면 Fig. 8과 같다. 피로강도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나며 특히 모재부의 피로강도는 $10^4 \sim 10^6$ 사이클 범위의 10^4 사이클 근방에서 여러 용접부의 피로강도보다 높게 나타나고 있고 점점 고 사이클 쪽으로 갈수록 피로강도가 여러 용접부의 경우보다 급속하게 떨어지는 경향을 보이며 10^6 사

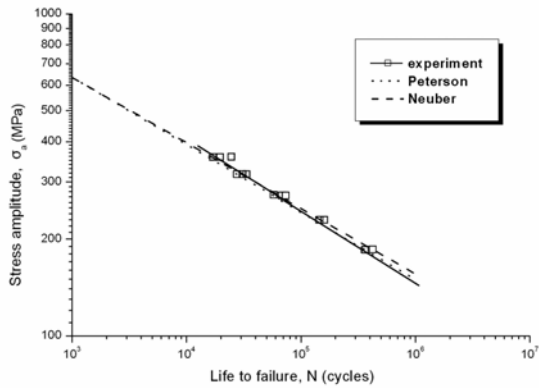


Fig. 6 Comparison with S-N curves predicted by Peterson and Neuber in notched

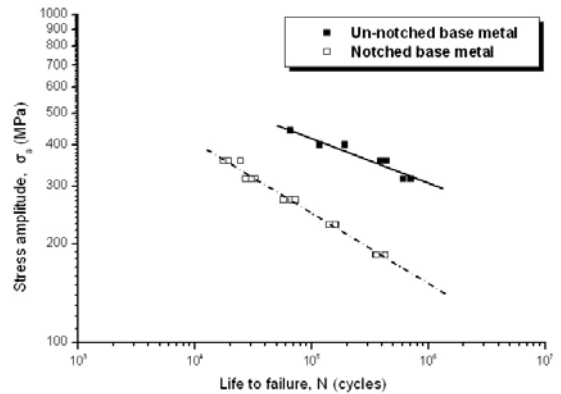


Fig. 7 S-N curve for notched material and un-notched material in base metal

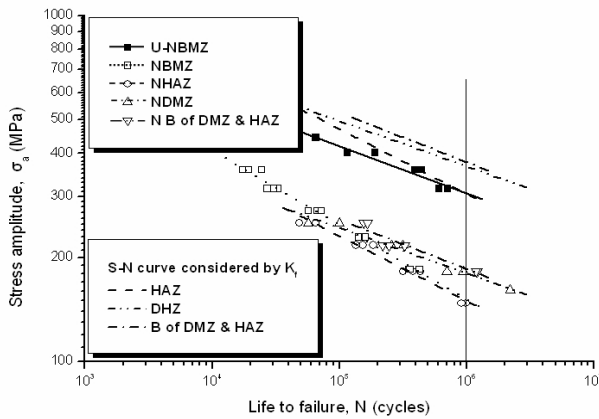


Fig. 8 S-N curve for all of specimens in weld zone

이클에서 피로강도가 용접부위에서 가장 낮은 열영향부의 경우와 유사하게 나타나고 있다. 이러한 경향은 상온에서 인발공정에 의하여 제조된 모재가 높은 압축잔류응력을 갖고 있고 기계적 성질에서 나타나는 바와 같이 높은 경도와 인장강도를 갖고 있어 다소 높은 인장 작용하중을 받는 초기 사이클 범위에서 높은 피로강도 값을 보이다가 오랜 반복하중으로 인하여 고 사이클 범위에서 압축잔류응력이 이완되고 경도 및 인장강도도 다소 완화되어 나타나는 현상으로 생각된다. 이들의 결과는 기계적 성질에서 나타나는 바와 같이 경도와 인장강도의 높은 수준에 따라 피로강도가 높게 나타나고 압축잔류응력이 인장강도와 피로강도에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.⁽¹⁶⁾ 그리고 용착금속부와 열영향부의 경계부에서 다른 용접부위에 비하여 경도 값이 매우 급작

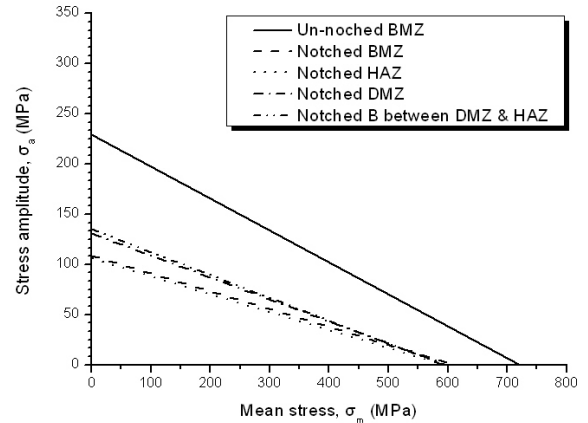


Fig. 9 Haigh diagram for notched materials of weld zone and un-notched base metal

스러운 증가를 보이며 높게 나타나고⁽¹⁷⁾ 있으나 응력-변형률 선도 상의 응력변화와 S-N선도 상의 피로강도 차이가 크게 차이를 보이지 않는데 이것은 시험편을 위한 환봉 맞대기 용접 시 60° 개선하여 용접함으로서 용착금속부와 열영향부가 다소 혼합된 상태의 특성을 보이는 것이라 생각 된다. 또한 경도분포도에서 알 수 있듯이 그 경계 폭이 2mm 이내로 좁고, 1mm 폭(반경 R=0.5mm)의 U-노치를 가공하여 인장시험 및 피로시험을 수행하였기 때문에 순수한 용착금속부와 열영향부 사이의 경계만의 특정 값을 얻기가 곤란한 결과라고 생각한다. 이들 결과로부터 용접재의 무한수명을 갖는 영역의 응력범위를 알아보기 위하여 Goodman의 식을 이용한 Haigh 선도⁽¹⁸⁾로 나타내면 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. Fig. 9는 각 용접부위의 노치재료 시험결과를 나타낸 것이고,

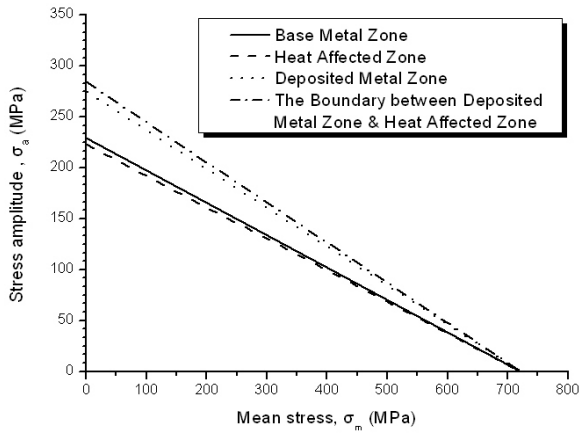


Fig. 10 Haigh diagram considered fatigue notch factor, K_f for notched materials of weld zone

Fig. 10은 Fig. 9의 값들에 피로노치계수, K_f 를 고려하여 나타낸 선도이다. 가로축의 평균응력 임계값은 인장시험 결과로부터 얻은 응력-변형률 선도에서의 인장강도 값(σ_u)을 사용하였고, 반복응력의 폭 값(σ_a)을 나타내는 세로축에는 각 용접부위의 피로한도(σ_f : fatigue limit), 즉 내구한도(σ_e : endurance limit) 값을 나타내었다. 여기에서 얻은 용접 각 부위의 내구한도 값은 피로시험으로부터 얻은 피로한도 값에 크기효과, 하중효과 및 표면가공 효과의 수정계수를 고려한 값이다.⁽¹⁹⁾ Fig. 9의 무한수명 영역은 평활재료의 모재에 비하여 원둘레 U-노치를 갖는 각 용접부위가 매우 좁게 나타나고 있으며, 피로노치계수를 고려하여 평활재료로 예상한 Fig. 10의 각 용접부위에 대한 Haigh 선도에서 무한수명 영역은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 모재부, 열영향부의 순으로 크게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 SM45C 환봉 맞대기 용접재료를 사용하여 기계구조물을 제작할 때 안전설계를 위해서는 무한수명 영역이 가장 낮게 나타나는 열영향부 영역의 범위를 기준으로 설계응력을 선택하는 것이 요구된다.

4. 결론

일반 기계요소 및 구조물재료로 많이 활용하고 있는 SM45C 환봉재를 GMAW 용접법으로 맞

대기 용접하여 용접부위의 피로거동을 파악해 보고 안전설계를 위한 무한수명 영역에 대하여 고찰해 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 냉간 인발공정에 의한 가공경화로 인하여 모재부에서 경도와 인장강도가 가장 높게 나타나고 용접에 의하여 높은 열을 받은 후 상온에서 서서히 냉각됨으로서 용접부위가 연화되어 용착금속부와 열영향부의 경도 및 인장강도는 낮게 나타난다.

(2) 모재의 회전 굽힘 피로시험으로부터 노치재료는 평활재료에 비하여 피로강도가 현저히 낮게 나타나며 실제 평활재료 시험의 피로강도 값은 노치재료를 기준으로 기하학적 형상의 노치계수를 고려한 값보다 다소 낮게 나타난다.

(3) 각 용접부위의 피로강도 값은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나며 이 경향은 경도 값의 순서와 같다.

(4) 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 피로강도 값과 유사하게 나타난다. 이러한 경향은 모재의 인발공정으로 인한 초기의 높은 압축잔류응력이 오랜 반복하중으로 인하여 이완되고 경도 및 인장강도도 다소 연화되는 영향으로 생각된다.

(5) Goodman의 식에 의한 무한수명 평가로부터 용접재료의 무한수명영역은 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타난다. 따라서 안전설계응력은 가장 낮은 열영향부의 무한수명영역 범위 내에서 정하는 것이 요구된다.

후 기

이 논문은 2007년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Boyer, H. E., 1975, "Metal Handbook No.10 Failure Analysis and Prevention," 8th ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- (2) Juvinall, R. C., 1983, "Engineering Considerations

- of Stress, Strain, and Strength," McGraw-Hill, New York.
- (3) Collins, J. A., 1981, "Failure of Materials in Mechanical Design," Wiley-Interscience, New York.
- (4) Sors, L., 1971, "Fatigue Design of Machine Components," Pergamon Press, Oxford.
- (5) Fuchs, H. O. and Stephen, R. I., 1980, "Metal Fatigue in Engineering," Wiley-Interscience, New York.
- (6) Moore, H. F. and Kommers, J. B., 1921, "An Investigations of the Fatigue of Metals," Univ. Ill. Eng. Exp. Stn. Bull., 124.
- (7) Lee, Y. B., Oh, B. D. and Kim, S. Y., 2006, "Fatigue Behavior with Respect to Rolling and Residual Stress in Butt-Welded Steel Plate," J. of KSME(A), Vol.30, No.7, pp. 826~832.
- (8) McMahon, J. C. and Lawrence, F. V. Jr., 1984, "Predicting Fatigue Properties through Hardness Measurements," FCP Report No. 105, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- (9) Peterson, R. E., 1974, "Stress Concentration Factor," John Wiley & Sons, Inc.
- (10) Pilkey, W. D., 1997, "Stress Concentration Factors, Second Edition," John Wiley & Sons, Inc., pp. 122~125.
- (11) Kuguel, R., 1961, "A Relation between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume," Am. Soc. Test. Master. Proc., Vol. 61, pp. 732~748.
- (12) Toper, T. H., Wetzel, R. M., and Morrowm J. D., 1969, "Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens," *J. Mater.*, Vol. 4, No. 1, pp. 200~209.
- (13) Dowling, N. E., 1979, "Fatigue at Notches and the Local Strain and Fracture Mechanics Approaches," in Fracture Mechanics, ASTM STP 667, C. W. Smith (ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 247~273.
- (14) Smith, R. A. and Miller, K. J., 1977, "Fatigue Cracks at Notches," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 19, pp. 11~22.
- (15) Socie, D. F., Dowling, N. E. and Kurath, P., 1984, "Fatigue Life Estimation of Notched Members," in ASTM STP 833, Fracture Mechanics fifteenth Symposium, R. J. Sanford (ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 284~299.
- (16) Bannantine, J., Comer, J. and Handrock, J., 1987, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," pp. 6~8.
- (17) Lee, Y. B., 1978, "An Experimental Study of the Stress Intensity Factor at the weld zone," Master's Thesis, p. 50.
- (18) Shigley, J. E. and Mischike, C. R., 1989, "Mechanical Engineering Design," 5th ed., McGraw-Hill, pp. 296~300.
- (19) Tarasov, L. P. and Grover, H. J., 1950, "Effect of Grinding and Other Finishing Process on the Fatigue Strength of Hardened Steel," Am. Soc. Test. Master. Proc., Vol. 50, p. 668.