

강 봉(SM45C) 맞대기 용접부의 피로수명 평가

오 병 덕* · 이 용 복**

*홍익대학교 대학원 기계공학과

**홍익대학교 기계·시스템디자인 공학과

Estimation of Fatigue Life in Butt-Welded Zone of SM45C Steel Rod

Byung-Duck Oh* and Yong-Bok Lee**

*Dept. of Mechanical Engineering, Hongik University Graduate School, Seoul 121-791, Korea

**Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

*Corresponding author : yblee@wow.hongik.ac.kr

(Received March 7, 2008 ; Revised May 14, 2008 ; Accepted June 10, 2008)

Abstract

SM45C steel rods being used generally for power transmission shafts and machine components was selected and welded by Butt-GMAW(Gas Metal Arc Welding) method. An estimation of fatigue life was studied by constructing S-N curve. Fatigue strength of base metal zone showed higher values than one of weld zone in low cycles between 10^4 and 10^6 cycles. However, significant decrease in fatigue strength of base metal was found around 10^6 cycles, which were almost same as one of heat affected zone. This decrease was attributed that initial residual stress of the steel rods distributed by drawing process was diminished by continually applied load, and resulted in softening of base metal. The fatigue limit of the weld zone was highest in the boundary between deposited metal zone and heat affected zone, and followed by in the order of deposited metal zone, base metal zone, and heat affected zone. Based on these results, it is revealed that the stress for safety design of machine components using SM45C butt-welded steel rods must be selected within the region of the lowest fatigue limit of heat affected zone.

Key Words : SM45C steel rod, Machine components, Fatigue life, Fatigue strength, Fatigue limit, Base metal zone, Compressive residual stress, Drawing process, Alternating stress

1. 서 론

기계의 동력축이나 피스톤 로드 등 기계 및 건축 구조물에 많이 사용하는 강 봉재는 이음 할 때 주로 나사 이음이나 용접에 의하여 수행되고 있고 이들 재료는 인장, 압축, 굽힘, 그리고 비틀림 등의 하중을 정적, 동적 및 반복적으로 받고 있다. 이와 같이 사용조건에 따라 여러 가지 하중을 받고 있는 강 봉재 구조물의 안전설계를 위하여 많은 노력이 진행되어왔고 이에 대한 연구 자료들도 많이 존재하고 있다¹⁻⁴⁾. 용접기술의 향상으로 간편하고 높은 강도 및 경제성을 고려하여 용접은 모든

강 구조물과 강 봉 이음에 많이 활용하고 있다. 그러나 용접이음부에는 열응력에 의한 잔류응력이 존재하고 급냉에 의한 금속조직 간의 경계가 발생하여 용접부의 강도를 저하시키고 있다⁵⁻⁸⁾. 그러므로 강 봉을 사용하는 구조물의 안전설계를 위하여 강도를 정확하게 평가하는 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 용접재료의 안전 사용 및 설계를 위해서는 그 기초 연구로서 용접부 각 경계에서의 기계적 성질은 물론 피로 거동을 정확하게 평가해볼 필요가 있다.

이를 고려하여 본 연구에서는 일반적으로 강 봉 구조물로 많이 사용하고 있는 SM45C 강 봉을 선택하여 GMAW법으로 맞대기 용접을 실시하였고 용접부위를 용착금속부, 용착금속부와 열영향부의 경계, 열영향부로 구분하여 모재부와 더불어 각 위치에 원둘레 노치를 가공하고 회전 굽힘 피로시험을 하여 피로강도 및 피로 수명을 평가 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 시험편의 준비

본 연구를 위하여 일반적으로 기계 구조물로 많이 사용되고 있고 상온에서 인발 공정에 의하여 제조된 지름 25 mm의 SM45C 강 봉 재료를 선택하였다. 그리고 양 끝 면을 30° 경사지도록 원둘레로 기계가공하고 60° 개선(groove) 형태로 맞대어 지그로 고정한 후 회전시키며 GMAW에 의하여 3층 맞대기 용접 하였다. 기계적 성질을 파악하기 위하여 표준 인장시험편을 기계 가공한 후 용접부 주위를 경연마(polishing)하고 부식시켜 용착금속부의 중앙, 용착금속부와 열영향부의 경계, 열영향부 그리고 모재부의 각 위치에 반경 0.5 mm의 원둘레 U-노치를 기계 가공하였다. Fig. 1에 평활재 및 노치 인장시험편을 나타내었다. 경도 시험편은 용접부위를 평평하게 기계가공 하고 경연마 후 부식시켜 각 경계가 명확하게 나타나도록 준비하였다. 또한 회전 굽힘 피로 시험편은 평활재와 노치재로 구분하여 용접부위의 양쪽으로 대칭되도록 Fig. 2와 같이 기계 가공하였다. 용접부위는 인장시험편의 경우와 같이 용착금속부, 용착금속부와 열영향부의 경계, 열영향부, 모재부로

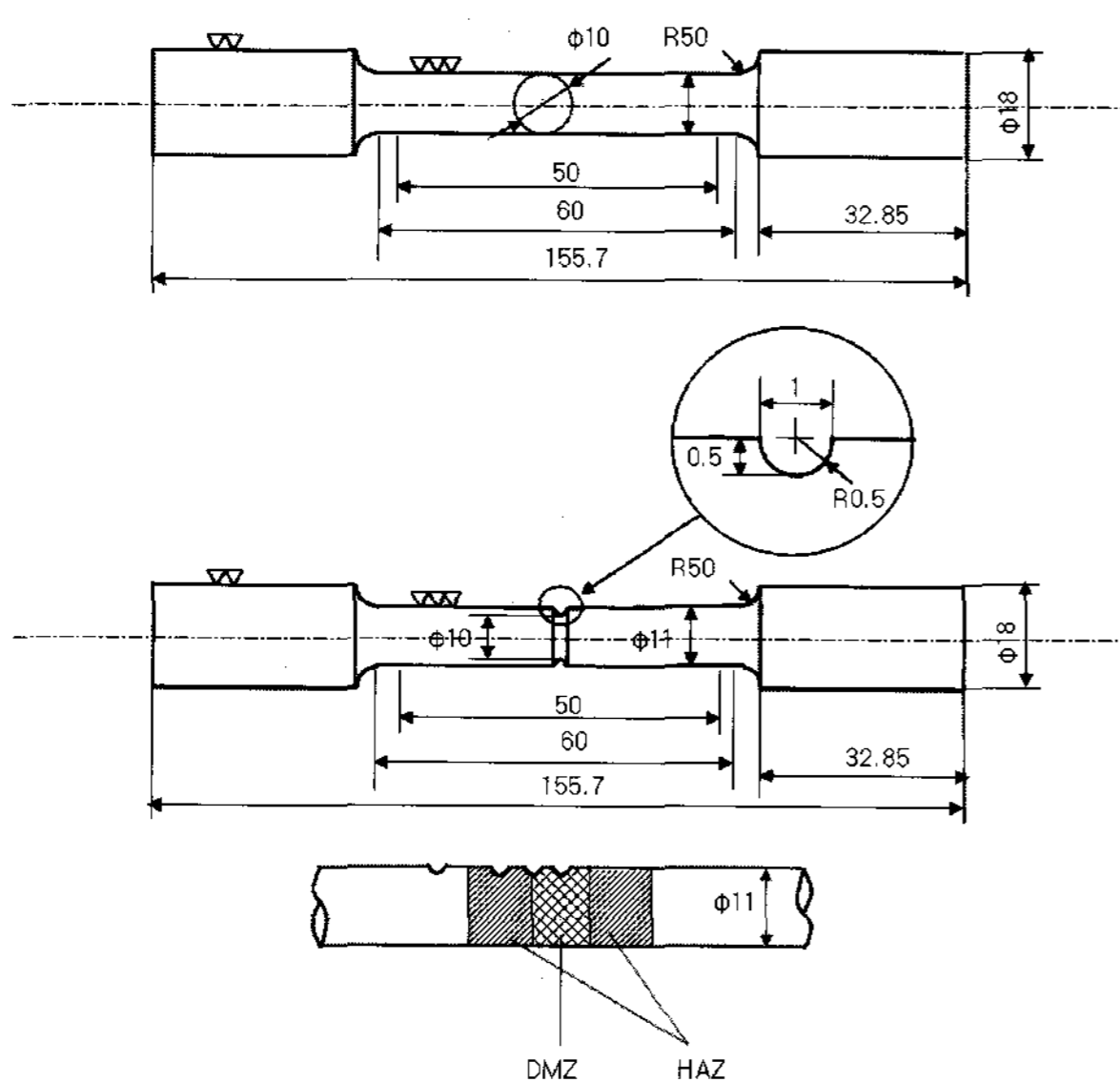


Fig. 1 The schematics of specimens for tensile test

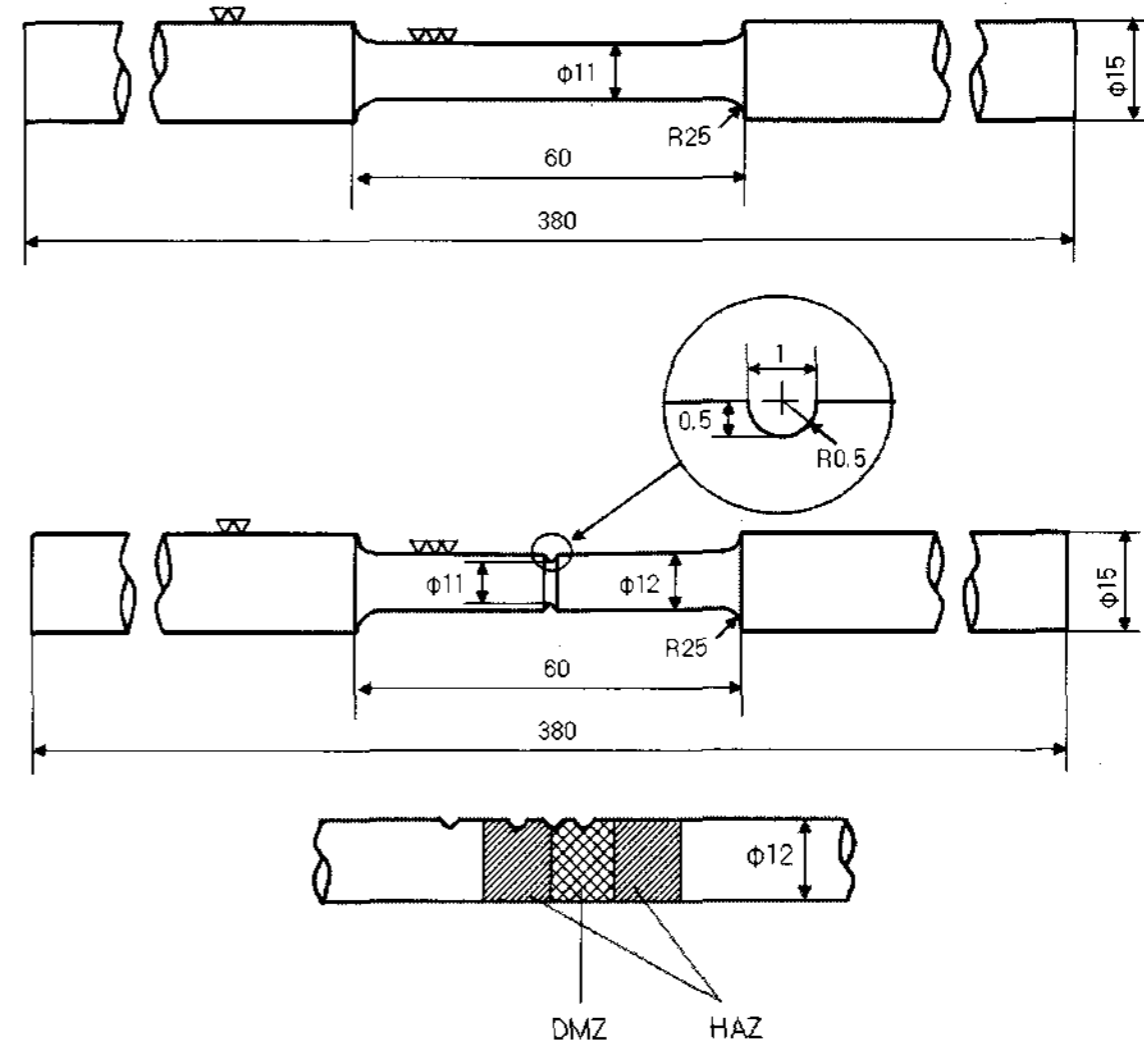


Fig. 2 The schematics of specimens for rotating bending fatigue test

구분하여 원둘레 U-노치를 가공하였다. 각 경계의 시험편은 12편 이상씩 준비하여 4단계 시험 하중으로 구분하여 각 시험 하중에서 3편 이상씩 회전 굽힘 피로 시험을 수행할 수 있도록 준비하였다. 시험편 재료의 기계적 성질 및 화학성분은 Table 1 및 Table 2와 같고 GMAW의 용접조건은 Table 3과 같다.

2.2 실험 방법

강 봉 맞대기 용접부의 회전 굽힘 피로시험을 수행하

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Mechanical properties			
	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Vickers Hardness (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)	Dia. 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

기 전에 용접 각 부의 기계적 성질을 알아보기 위하여 먼저 인장시험 및 경도시험을 수행하였다. 인장시험은 100 kN의 UTM을 사용하였고, 각 용접부위의 특성을 파악하기 위하여 모재부, 열영향부, 용착금속부와 열영향부의 경계 그리고 용착금속부로 구별하여 시험을 수행하였다. 노치의 영향을 알아보기 위하여 모재의 평활 재료 시험편(un-notched specimen in base metal)에 대한 시험도 수행하였다. 경도시험은 측정 부위를 평탄하게 위치시키고 용착금속부로부터 모재부로 이동시키며 마이크로 비커스(micro-vickers)경도를 측정하였다. 회전 굽힘 피로시험은 FTO-10(H) 형식의 회전 굽힘 피로시험기(Fig. 3)를 사용하였고 하중하의 회전 굽힘 피로시험 중에 발생하는 열을 일정하게 유지시키기 위하여 공냉 챔버(chamber)를 설치해서 실내 온도와 같은 18°C~20°C 범위 내의 온도를 유지시키며 피로시험을 수행하였다. 하중 조건은 각 시험편마다 4~5 단계 하중을 사용하였으며 $10^4 \sim 10^7$ 범위의 고사이클에서 회전 굽힘 피로시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용접재의 기계적 성질

용접재료에 대한 기계적 성질을 파악하기 위하여 경도 및 인장시험을 수행하였다. 경도시험은 Fig. 4에 보여주는 바와 같이 용착금속부의 중심 위치로부터 모재부로 이동하면서 0.2 mm 간격으로 측정하였다. 용착금속부는 167 Hv 정도의 경도치를 갖고 용착금속부와 열영향부 경계에서 급격하게 경도가 증가하여 최고 200 Hv로 나타나며, 열영향부에서 급작스럽게 경도가 감소하여 165 Hv로 감소한다. 그리고 열영향부에서 모재부로 접근하면서 서서히 경도가 증가하다가 용착금속부 중심으로부터 11 mm 떨어진 위치로부터 가장 높은 205 Hv 정도의 경도치를 보이고 있다. 이러한 결과는 모재가 상온에서 인발공정에 의하여 제조되므로

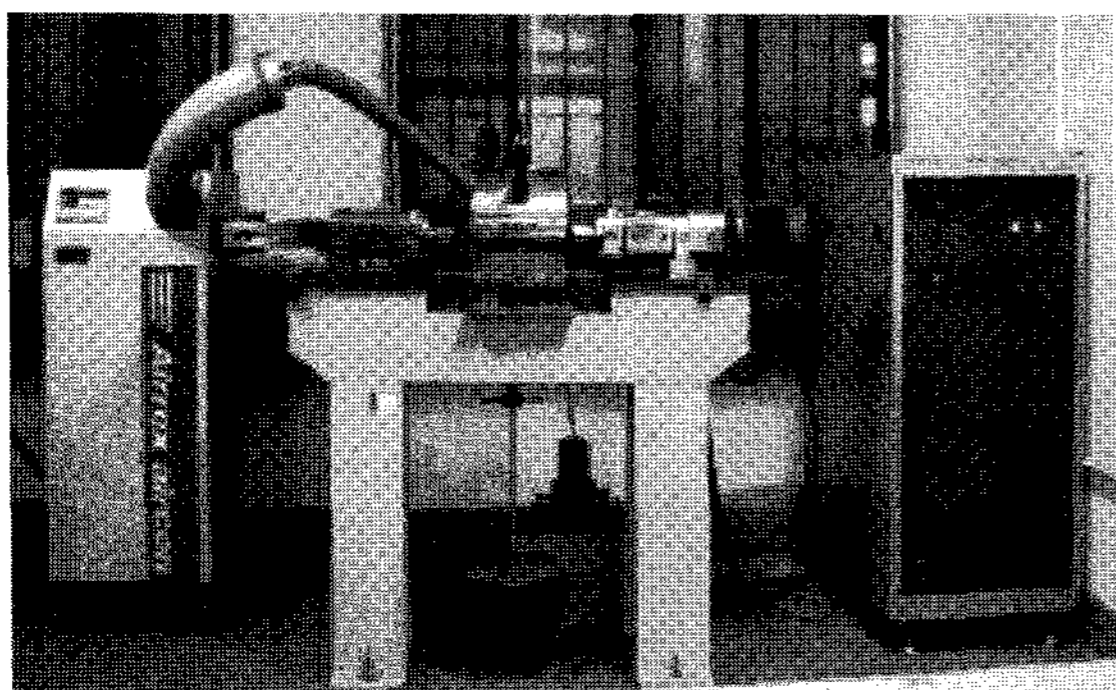


Fig. 3 Rotating bending fatigue testing machine

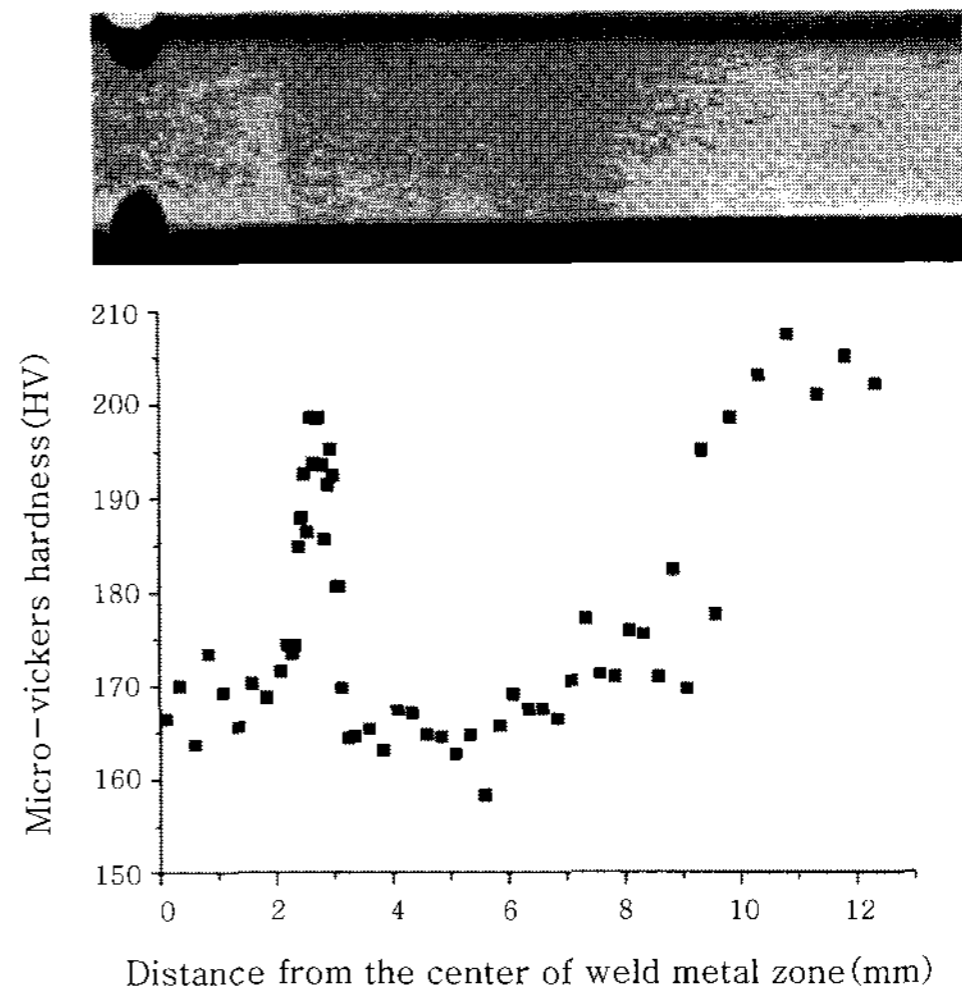


Fig. 4 Distribution of micro-vickers hardness number in weld zone

가공경화의 영향을 크게 받은 결과로 생각되며 열영향부가 가장 낮게 나타나고 용착금속부와 더불어 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 평활재료 시험편 (U-NBMZ: un-notched base metal zone)과 노치 시험편(NBMZ: notched base metal zone), 그리고 용접재의 모재부(BMZ: base metal zone), 열영향부(HAZ: heat affected zone), 열영향부와 용착금속부의 경계(B of HAZ & DMZ: boundary between heat affected zone and deposited metal zone) 및 용착금속부(DMZ: deposited metal zone)로 구분하여 수행하였다. 그 결과는 Fig. 5에서 보이는 바와 같다. 모재 평활재료 시험편의 경우 항복강도는 666 MPa, 인장강도는 721 MPa 그리고 연신율은 15 % 이며 노치 시험편의 경우 모재 노치재료는 항복강도가 550 MPa, 인장강도가 612 MPa, 연신율은 18 %이다. 그리고 열영향부, 열영향부와 용착

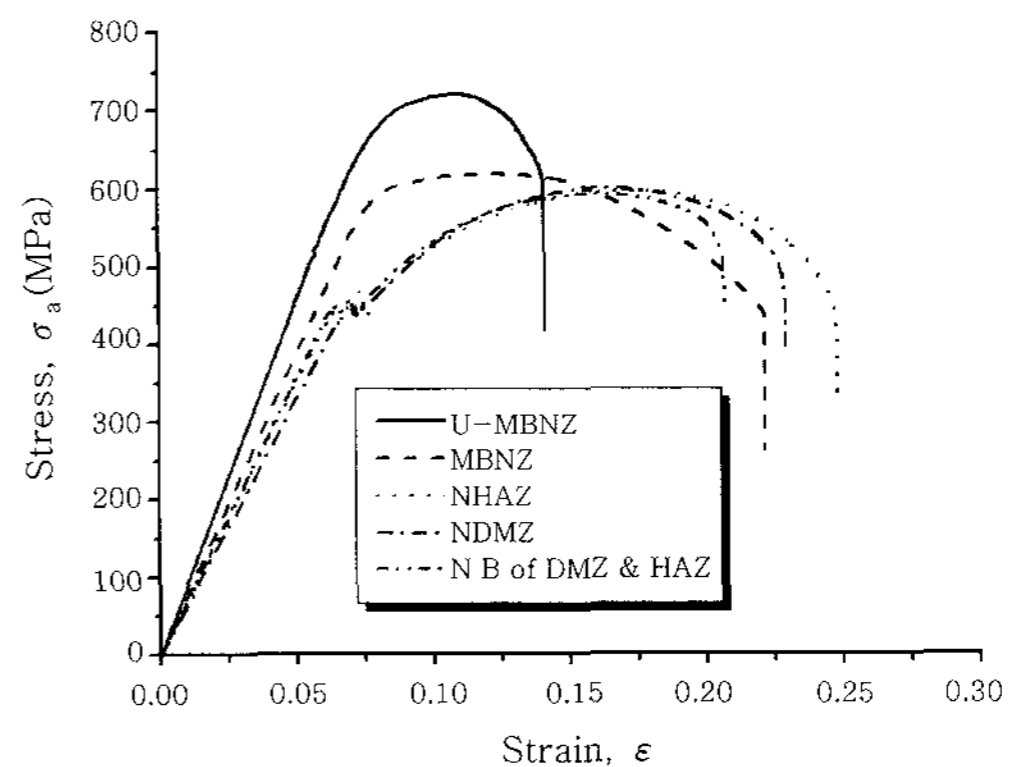


Fig. 5 Stress-strain diagram for tensile specimens

금속부의 경계 및 용착금속부의 노치 시험편은 항복강도 441 MPa, 인장강도 595 MPa, 연신을 18 %로 모재 평활재 시험편의 경우와 비교하여 노치영향⁹⁾에 의한 응력집중을 받아 전반적으로 낮은 값을 갖고 모재 노치시험편과 비교하여 항복강도는 다소 차이를 보이거나 인장강도와 연신율은 유사하게 나타난다. 이들 결과로부터 모재의 경우 상온 인발공정에 의한 경화와 높은 압축잔류응력의 발생으로 인하여 모재가 초기에 용접부위에 비하여 높은 항복강도를 나타내고 있다. 그리고 평활재료의 인장강도가 노치재료의 인장강도보다 높게 나타나는 것은 노치의 영향이라고 생각 된다¹⁰⁾. 각 용접부위의 노치재료는 모재 노치재료에 비하여 항복강도가 큰 차이로 낮게 나타나고 있으나 인장강도는 유사하게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 용접 열로 인하여 연화된 용접부위가 초기에 낮은 항복강도를 갖고 이후 소성변형에 의한 경화로 강도가 서서히 증가하여 모재의 인장강도 값과 유사하게 됨을 알 수 있다²⁾.

3.2 S-N곡선에 의한 피로수명

피로수명을 평가하기 위하여 회전 굽힘 시험기를 사용하여 고 사이클 범위(10^4 - 10^7)에서 피로시험을 수행하였다. 모재의 평활재료(un-notched specimen)와 노치재료(notched specimen)의 피로시험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 노치재료 시험편의 피로수명곡선은 노치에 의한 피로 응력집중계수, K_f 의 영향을 받아 평활재료의 경우보다 피로강도가 전반적으로 낮게 나타나고 있다¹¹⁻¹⁴⁾. 각 용접부위의 노치재료 시험편에 대한 피로수명곡선을 모재의 평활재료 및 노치재료의 피로시험결과와 같이 피로한도를 10^6 사이클의 피로수명을 갖는 범위로 나타내면 Fig. 7과 같다. 피로강도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나고 있다. 모재 노치시험편의 피로강도는

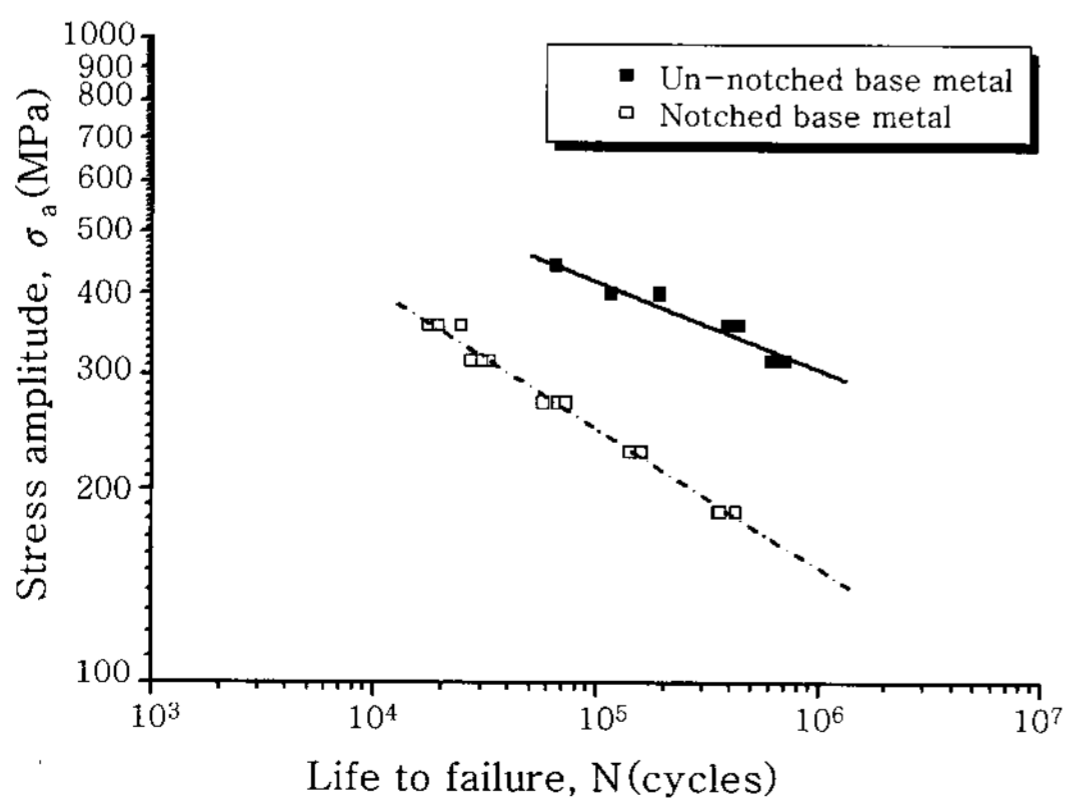


Fig. 6 S-N curve for notched material and un-notched material in base metal

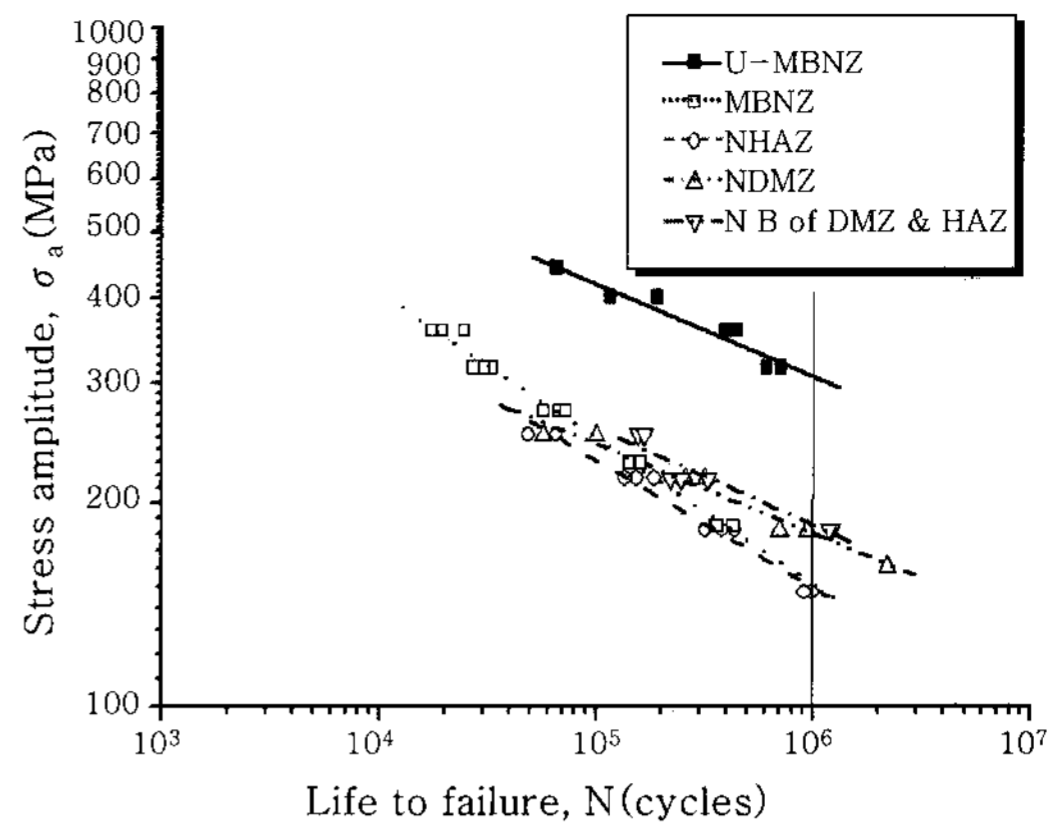


Fig. 7 S-N curve for notched materials of weld zone and un-notched base metal

10^4 ~ 10^6 사이클 범위의 10^4 사이클 근방에서 용접부 노치 시험편의 피로강도보다 높게 나타나고 있다. 그리고 점점 저하중 고사이클 쪽(10^6)으로 갈수록 피로강도가 용접부 시험편의 경우보다 급속하게 떨어지는 경향을 나타내며 10^6 사이클에서 용접부위에서 가장 낮은 열영향부의 피로강도와 유사하게 나타나고 있다. 이러한 경향은 상온에서 인발공정에 의하여 제조된 모재가 높은 압축잔류응력을 갖고 있고 기계적 성질에서 나타나는 바와 같이 높은 경도와 인장강도를 갖고 있어 초기에 높은 피로강도 값을 보이다가 고 사이클 쪽으로 갈수록 오랜 반복하중으로 인하여 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 보여주고 있다¹⁵⁾. 그리고 용착금속부와 열영향부의 경계에서 다른 용접부위에 비하여 경도가 매우 높게 나타나고¹⁶⁾ 있으나 응력-변형률선도 상의 응력변화와 S-N선도 상의 피로강도 차이가 크게 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 강 봉 맞대기 용접 시 재료를 60° 개선(groove)가공하여 용접함으로써 용착금속부와 열영향부가 다소 혼합된 상태의 특성을 보이는 것이라 생각 된다. 또한 경도분포도에서 알 수 있듯이 그 경계 폭이 2 mm 이내로 좁고, 1 mm 폭의 U-노치를 가공하여 인장시험 및 피로시험을 수행하였기 때문에 순수한 용착금속부와 열영향부 사이의 특정 값을 얻기가 곤란했던 결과라고 생각한다.

각 용접부의 노치 시험편 데이터를 사용하여 기하학적 조건에 따른 피로노치계수¹⁷⁾, K_f 를 적용하여 S-N 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 모든 시험데이터를 함께 나타내면 Fig. 9의 S-N곡선과 같다.

이들 곡선으로부터 피로노치계수, K_f 를 고려하여 평

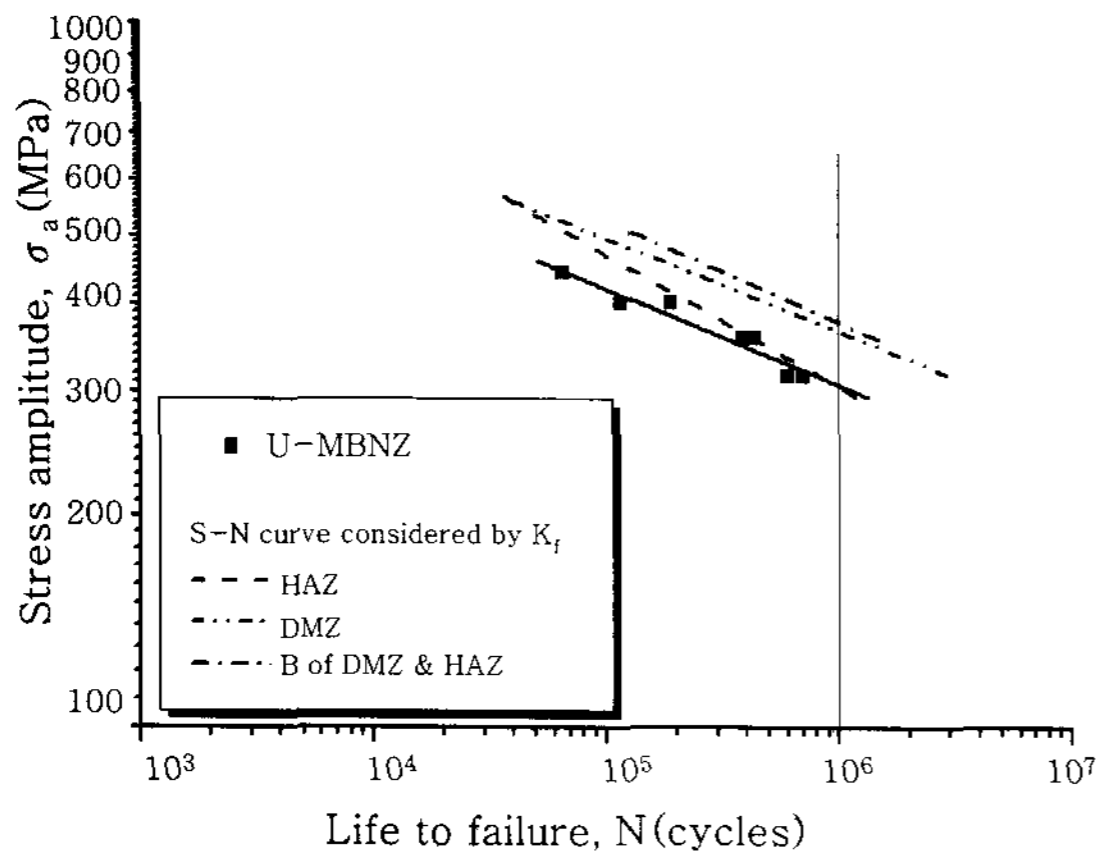


Fig. 8 S-N curve considered fatigue notch factor, K_f for notched materials of weld zone

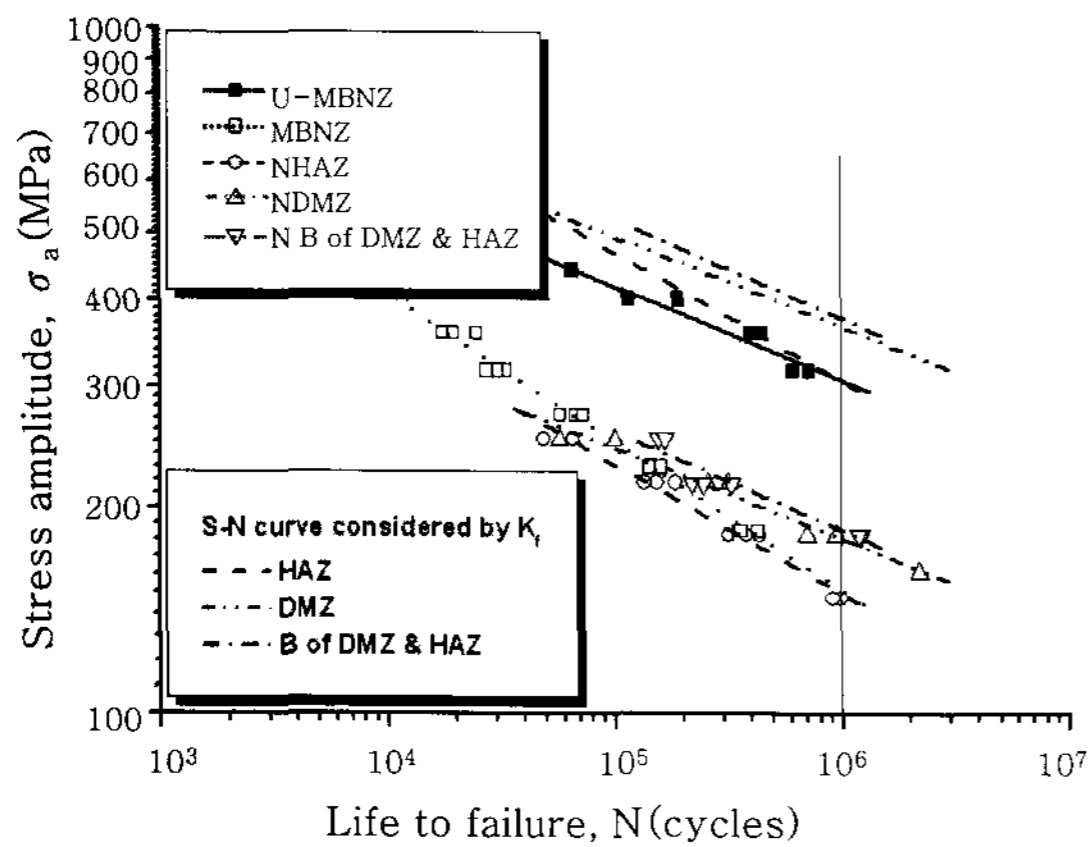


Fig. 9 S-N curve for all of specimens in weld zone

활재료로 예상한 피로강도 값들은 실제 모재의 평활재료 시험에서 얻은 값과 비교하여 다소 높게 나타나고 있으나 크게 차이를 보이고 있지 않고 있어 평활재료 용접부위의 피로강도 평가를 하는데 자료로써 활용할 수 있다고 판단된다. Fig. 9로부터 피로한도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 모재부, 열영향부의 순으로 높게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 SM45C 강 봉 맞대기 용접재료를 사용하여 기계구조물을 제작할 때 안전설계를 위해서는 피로한도가 가장 낮게 나타나는 열영향부의 피로한도 값을 기준으로 설계응력을 선택하는 것이 요구된다.

4. 결 론

일반 기계구조물로 많이 활용하고 있는 SM45C 강 봉재를 GMAW 용접법으로 맞대기 용접하여 용접부위의 기계적 성질과 피로수명에 대하여 고찰해 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 인발공정에 의한 소성경화로 인하여 모재부에서

경도와 인장강도가 가장 높게 나타나고 다층용접에 의한 풀림현상으로 용접부위가 연화되어 용착금속부와 열영향부의 경도 및 인장강도는 낮게 나타난다.

2) 각 용접부의 피로강도는 고 사이클 범위($10^4 \sim 10^6$)의 초기에 모재부, 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 열영향부의 순으로 높게 나타나며, 이 경향은 경도 값의 순서와 일치한다.

3) 모재부의 피로강도는 $10^4 \sim 10^6$ 사이클 범위에서 초기에 용접부의 피로강도와 비교하여 높게 나타나고 고 사이클로 갈수록 피로강도 값이 현저히 감소하여 10^6 사이클 근방에서 가장 낮은 열영향부의 피로강도 값과 유사하게 나타난다. 이러한 현상은 모재의 인발공정으로 인한 초기의 높은 압축잔류응력이 오랜 반복하중으로 인하여 이완되고 경도 및 인장강도도 다소 연화되는 영향으로 생각된다.

4) S-N곡선에 의한 용접부위의 피로한도는 열영향부와 용착금속부의 경계, 용착금속부, 모재부, 열영향부의 순으로 높게 나타난다. 따라서 본 강 봉 용접재의 안전설계응력은 가장 낮은 열영향부의 피로한도 범위 내에서 정하는 것이 필요하다.

후 기

이 논문은 2006년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. H. E. Boyer: Metal Handbook No.10, Failure Analysis and Prevention, 8th ed., American Society for Metals, Ohio (1975)
2. R. C. Juvinall: Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength, McGraw-Hill, New York (1983)
3. J. A. Collins: Failure of Materials in Mechanical Design, Wiley-Interscience, New York (1981)
4. L. Sors: Fatigue Design of Machine Components, Pergamon Press, Oxford (1971)
5. H. O. Fuchs and R. I. Stephen: Metal Fatigue in Engineering, Wiley-Interscience, New York (1980)
6. H. f. Moore and J. B. Kommers: An Investigations of the Fatigue of Metals, Univ. Ill., Eng. Exp. Stn. Bull., **124** (1921)
7. Y. B. Lee, N. I. Cho and K. E. Park: A Study on Surface Fatigue Crack Behavior of SS440 Weldment, J. of KWS, **14-2**(1996), 124-129 (in Korean)
8. S. C. Kim, Y. B. Lee: The Application of Forman Equation for Fatigue Crack Propagation in Welding Residual Stress Region, J. of KWS, **5-1**(1987), 42-56 (in Korean)
9. R. E. Peterson: Stress Concentration Factor, John Wiley & Sons, Inc. (1974)

10. R. Kuguel: A Relation between Theoretical Stress Concentration Factor and Fatigue Notch Factor Deduced from the Concept of Highly Stressed Volume, Am. Soc. Test. Mater. Proc., **61** (1961), 732-748
11. T. H. Toper, R. M. Wetzel, and JoDean Morrow: Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens, J. Mater., **4-1** (1969), 200-209
12. N. E. Dowling: 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, (1979), 247-273
13. R. A. Smith and K. J. Miller: Fatigue Cracks at Notches, Int. J. Mech. Sci., **19**(1977), 11-22
14. D. F. Socie, N. E. Dowling, and P. Kurath: 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, (1984), 284-299
15. J. Bannantine, J. Comer and J. Handrock: Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, (1987), 6-8
16. Y. B. Lee: An Experimental Study of the Stress Intensity Factor at the weld zone, Master Thesis, (1978), 50-58 (in Korean)
17. W. D. Pilkey: Stress Concentration Factors, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., (1997), 122-125