

CR60강, SM58Q강과 그 용접부의 저사이클 피로특성

김창주* · 염태동** · 조수형** · 유인석** · 위창욱**

A Study of Low Cycle Fatigue Properties in CR60, SM50Q Steel and the Weldments

C. J. Kim*, T. D. Yum**, S. Y. Cho, I. S. You** and C. O. Wee**

Key Words : CR강(Controlled Rolling Process Steel), 다수시험편법(Companion specimens test), 띠조직(Banded structure), 소성변형범위(Plastic strain range), 탄성변형범위(Elastic strain range), 전변형범위(Total strain range), 반복수(Number to failure), Manson-Coffin 관계식, 반복 소성변형계수(Coefficient of cyclic plastic strain), 반복소성변형지수 (Exponent of cyclic plastic strain), 반복탄성변형계수(Coefficient of cyclic elastic strain), 반복탄성변형지수(Exponent of cyclic elastic strain)

Abstract

Low cycle fatigue test was performed by companion specimens method to compare the properties of cyclic strain for the weldments of controlled rolling steel CR60 and welding structural steel SM58Q. And the result does not showed any difference of low cycle fatigue life between weldments. Especially, the values of coefficient of cyclic plastic strain C_p and exponent of cyclic plastic strain K_p of heat affected zones of CR60 steel and SM58Q steel were same. And C_p and K_p of CR60 steel were equal to the values of weld, it means a good combination between the base metal, the heat affected zone and the weld of CR60 steel.

* 정회원, 한국기계연구원 재료기술부

** 정회원, 삼성중공업(주) 생산기술연구소

1. 서 론

용접구조물 제조에 따른 원가절감이나 특성개선의 노력은 지속적으로 시도되고 있는 가운데, 근래에 개발된 CR(제어압연)강에 대한 관심은 증대되고 있으며, CR강은 종래의 용접구조용 강재를 대신할 수 있는 단계에 이르고 있다.

그 예로서 CR60강은 C ; 0.2% 이하, Si ; 0.5% 이하, Mn ; 2% 이하 및 Ti, Nb, V 등을 미량 첨가하고, 열처리가 없이 압연온도 만으로써 제어압연(Controlled Rolling Process Steel)한 강종으로 인장강도가 60Kg/mm²인 동급의 압연 열처리 용접구조용강의 대체용으로서 국내에서 개발된 것이다. 이는 통상의 담금질과 뜨임 강재보다 원가면에서 유리할 뿐만 아니라 용접성에 영향을 미치는 인자인 탄소당량과 저온 균열감수성의 지수를 낮춰, 특성을 개선한 강재로 종래에 합금원소 첨가에 의해 인성을 확보한 강재에서 문제가 되는 열영향부의 확대 및 연화를 방지할 수 있어서 저온 인성도 좋은 것으로 소개되고 있다.

한편 이들 강재 자체의 제조기술이나 기계적 특성, 용접부의 일반적 특성 등에 관해서는 이미 잘 알려져 있으나 용접구조재로서 용접부의 소성역의 피로한도를 평가할 수 있는 저사이클 피로특성(LCF ; Low Cycle Fatigue)에 대한 자료는 미흡한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 근래에 국내에서 개발된 CR60 강재와 동급으로 취급되는 기존의 SM58Q 강재의 용접시료에 대해 저사이클 피로특성(LCF)을 실험을 통해 반복소성변형 하에서의 내구한도를 비교하였다. 여기서 용접부라 함은 주조조직인 용착부, 용접시입열에 따라 열처리된 열영향부 및 모재에 이르는 세 종류의 조직이 좁은 구간에 걸쳐 연속적으로 전개되는 특징이 있다. 그리고 각각의 부위도 엄밀히 말하면 급냉과 서냉의 차이에 따라 경사적(傾斜的)으로 변화한 불균질 조직을 갖는다. 그러므로 위와 같은 조직상의 복잡성이 배제되어 영향인자가 단순한 모재를 제외한, 열영향부나 용착부에 대한 저사이클의 피로특성 결과를 엄밀한 의미에서 절대치나 정량적인 값으로 취급하기는 어렵다. 그러나 CR60강과

SM58Q강의 모재와 용접부의 특성을 비교할 목적으로 이들에 대해 동일한 조건에서 용접시료를 제작하고 실험하였으므로 두 강재의 용접물이 상대적인 면에서 비교된 바에 있어서는 긍정적 가치를 부여할 수 있다고 본다.

2. 실험방법

2.1 용접시료의 준비

CR60강 및 SM58Q강의 용접시험편은 각각 Fig. 1과 같이 개선형상으로 맞대기이음 용접하였으며 용접조건은 Table 1과 같다.

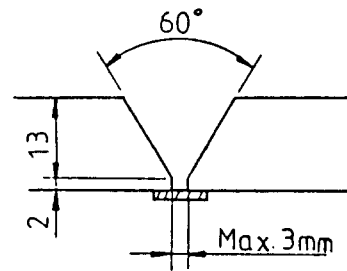


Fig. 1 Schematic diagram of butt welded joint

2.2 시험편 제작 및 피로시험

저사이클 피로시험을 위한 용접시험편의 종류는 Table 2에서와 같이 첫째, 두께 15mm 판재인 SM58Q 및 CR60 강재의 모재(Base), 둘째, SM58Q-SM58Q와 CR60-CR60 끼리 각각 맞대기이음 용접한 시료의 열영향부(B-H-W), 셋째, CR60강의 용착부(H-W-H) 시료 등인 세 종류로 준비하였다.

시험편의 형상은 Fig. 2의 a)와 같으며 열영향부와 용착부의 시험편에 있어서는 기계가공시 표점부를 정확히 알기 위해서 3% Nital액으로 부식시켜 확인하였다. 여기서 시험편의 표점거리 이내의 조직을 보면 시료판재와 용접부의 형상에 따라 다음의 Fig. 2의 b)에서와 같이 열영향부가 위주인 B-H-W

Table 1 Welding condition

Method	Filler Metal	Wire Φ	A/V	Speed(mm/min)	Pass	H.I(KJ/cm)
CO ₂	AWS 70S-6	1.2	280/40	400	3	16

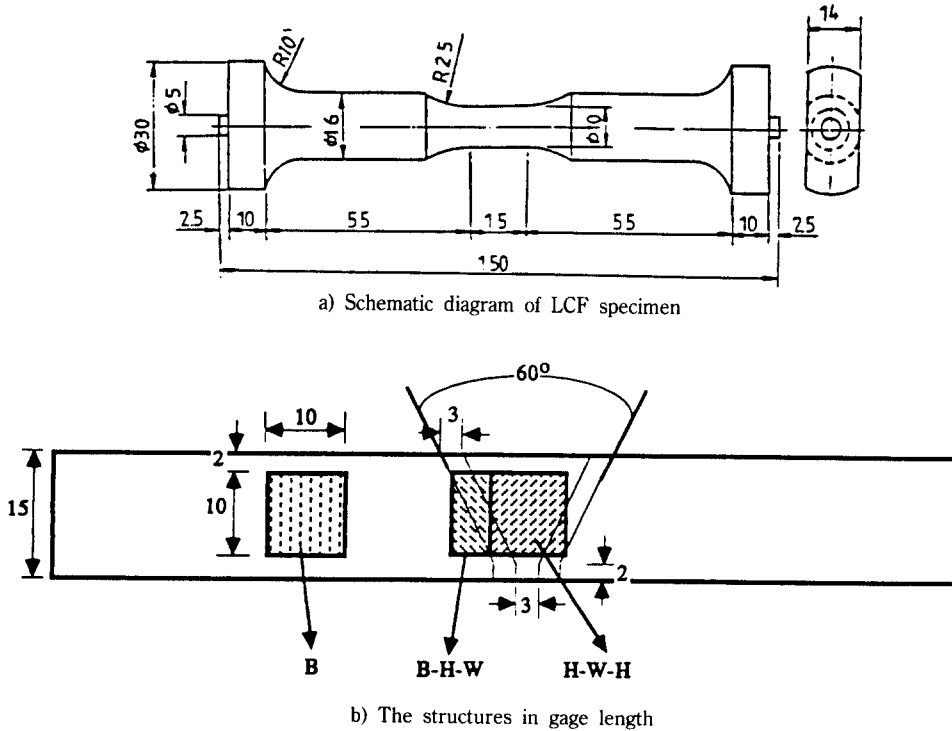


Fig. 2 Schematic diagram of LCF specimen and its structures in gage length.

시험편은 열영향부(H)를 대각선으로하여 양단에 일부의 모재(B)와 용착부(W)가 포함되어 있고, 용착부가 위주인 H-W-H 시험편은 용착부(W)를 가운데로 하여 양단에 약간의 열영향부(H)가 포함되어 있다.

한편, 피로시험 중 기계연삭가공시에 발생한 흠에 의한 노치효과를 없애기 위해 1000mesh 에머리페이퍼와 다이아몬드 페이스트로 다듬질 연마하였다.

SCHENCK사 서보유압식 인장압축 피로시험기를 사용하였고, 시험방법은 다수시험편법(Companion specimens test)¹⁾으로 전변형범위는 $\Delta\epsilon/2 = 0.3\%$, 0.4% , 0.6% , 0.9% , 1.2% 및 1.5% 인 6단계로서 모든 단계에서 변형속도는 $10^{-2}/\text{sec}$, 일축 인장압축의 형식으로, 파형은 삼각파를 적용하였으며, 변형제어를 위한 시험편의 표점거리는 10mm로 하였다.

Table 2 LCF specimens tested

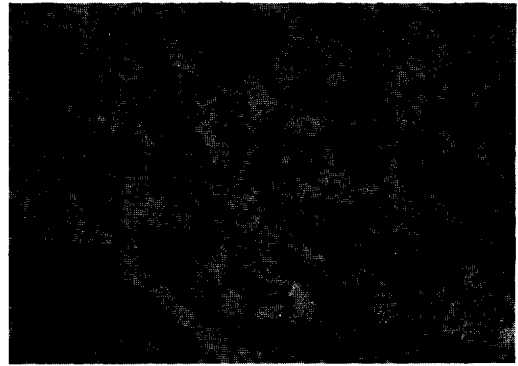
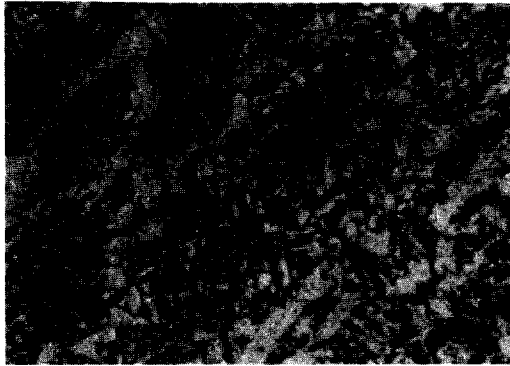
Specimens	SM58Q	CR60
B	o	o
B-H-W	o	o
H-W-H	-	o

B ; Base metal, H ; HAZ, W ; Weld metal

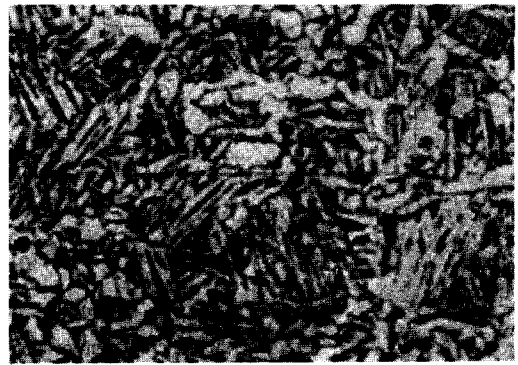
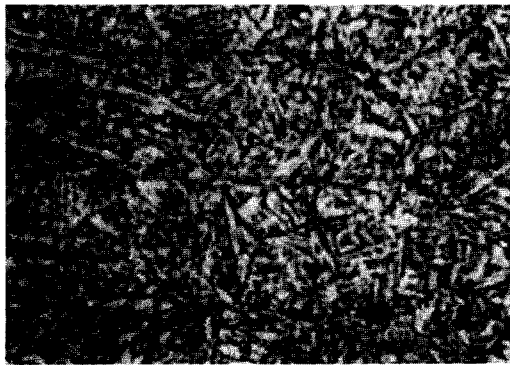
3. 실험결과 및 고찰

3.1 금속조직의 변화

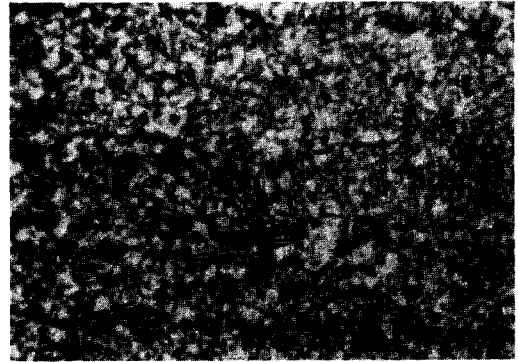
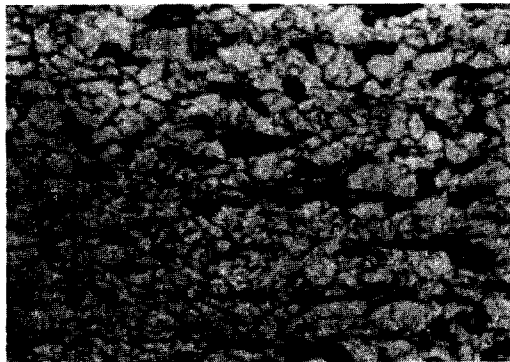
Photo. 1에서 CR60강 및 SM58Q강의 용접부 중, 용착부(Weld)는 주상정을 갖는 구조조직이다. 그러나 열영향부(HAZ)에 있어서 CR60강과 SM58Q강은 주로 침상의 급냉 조직이며, CR60강의 경우가 SM58Q강에 비해 미세한 조직인 점에 차이가 있다. 그리고 각각의 모재는 페라이트와 펄라이트가 혼재한 조직으로 압연방향을 따라서 띠조직(Banded structure)을 하고 있으며 CR60강의 결정립이 SM58Q강에 비해 조대하다. 그럼에도 불구하고 동일한 용접입열 조건 하에서 CR60강 열영향부의 조직이 SM58Q강에 비해 미세한 침상인 점은 강도나 금속조직적인 측면에서 재료 자체의 용접성을 개선한 효과에 기인한 결과로 본다.



WELD



H A Z



BASE

Photo. 1 Microstructures of CR60 and SM58Q steel welded joints

3.2 경도의 변화

Fig. 3은 CR60강 및 SM58Q강 용접부의 미소경도 분포이며, 여기서 보면, CR60강의 모재는 Hv 213 정도로서 SM58Q강이 Hv 225 정도 인것에 비해 다소 낮다. 그리고 두 강종 간에 있어서 각각의 용착부와 열영향부 등, 용접 부위별의 경도는 차이가 거의 없지만, 두 강종 모두 용접부 중에서 접합부의 경도가 Hv 225 정도로서 가장 높고 열영향부와 모재의 경계부가 Hv 195 정도로서 가장 낮아 이들 간에는 Hv 30 정도의 차이를 보이나 용접부의 특징상 실용적인 경우에 Hv 50 이내로 권장하는 점을 감안하면 현저한 차이로는 볼 수 없다.

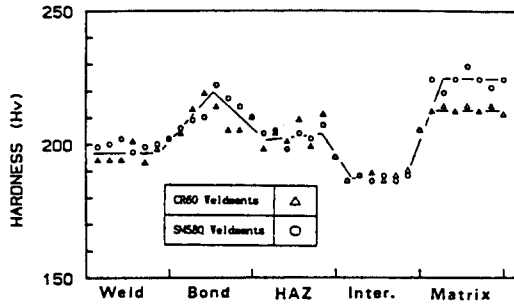


Fig. 3 Hardness distribution of CR60 and SM58Q steel weldments

3.3 저사이클 피로(LCF)특성

Fig. 4는 CR60강과 SM58Q강의 모재 및 용접부 시험편들에 대한 저사이클 피로시험 후 각 단계의 전변형하에 반복변형을 받는 과정에서 안정 내지는 준안정 상태에 도달한 $N/N_f \approx 0.5^{(2)}$ 에 해당하는 시기의 전변형범위 $\Delta\epsilon_p/2$ 와 파단 반복수 N_f 의 관계이다. 두 강종의 모재(B), 열영향부(B-H-W) 및 용착부(H-W-H) 간에는 서로의 수명 상에 차이가 거의 없음을 보인다.

이를 반복 소성변형과 반복 탄성변형의 거동으로 구분하여 살펴보면 우선, Fig. 5는 반복 소성변형범위 $\Delta\epsilon_e/2$ 와 파단 반복수 N_f 의 관계로서, 두 강종의 모재(B), 열영향부(B-H-W) 및 용착부(H-W-H) 시료 간에는 차이가 거의 없는 비슷한 수명선도를 보이고 있다. 그리고 Fig. 6은 이 때의 반복 탄성변형범위

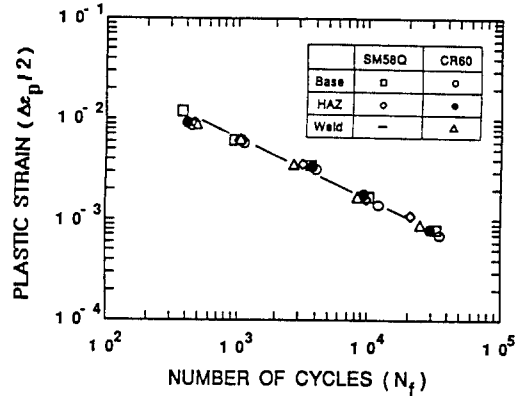


Fig. 4 Relationship between $\Delta\epsilon_p/2$ and N_f for CR60 and SM58Q steel weldments

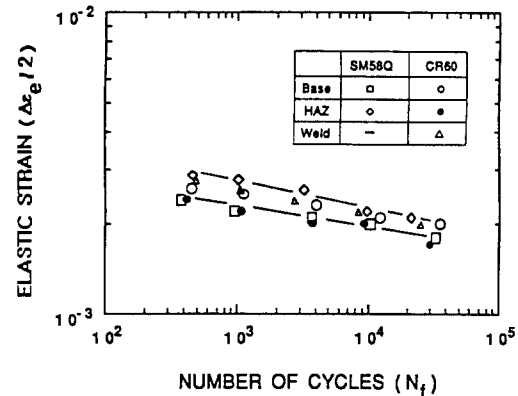


Fig. 5 Relationship between $\Delta\epsilon_e/2$ and N_f for CR60 and SM58Q steel weldments

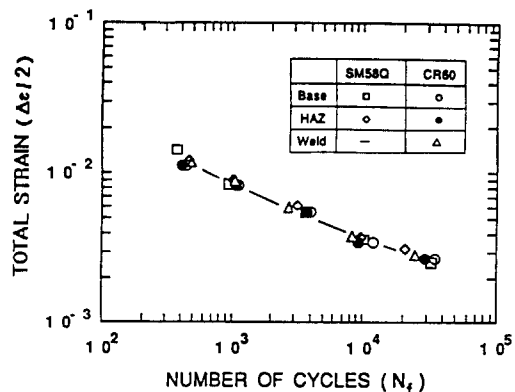


Fig. 6 Relationship between $\Delta\epsilon_t/2$ and N_f for CR60 and SM58Q steel weldments

$\Delta\epsilon/2$ 와 파단 반복수 N_f 의 관계로서, 수명선도는 SM 58Q강의 열영향부(B-H-W)와 CR60강의 용착부(H-W-H)가 비교적 높고 CR60강의 열영향부와 SM58Q강의 모재는 비교적 낮으며 CR60강의 모재는 이들의 중간 수준을 나타내고 있다. 여기서 Fig. 6에서 보였던 정도의 반복 탄성변형에 따른 수명선도 상의 차이는 저사이클 피로수명에 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 볼 수 있다.

한편 Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6에서의 데이터 점들을 가지고 다음과 같이 Manson-Coffin 관계식³⁾을 통한 정수로서 구해보면 Table 3과 같다.

$$\Delta\epsilon/2 = \Delta\epsilon_p/2 + \Delta\epsilon_e/2 \quad (1)$$

$$\Delta\epsilon_p/2 = C_p/N_f K_p \quad (2)$$

$$\Delta\epsilon_e/2 = C_e/N_f K_e \quad (3)$$

Table 3 Low cycle fatigue properties of CR60 and SM 58Q steel weldments

Specimen		C_p	K_p	C_e	K_e
CR60	Base Metal	0.392	0.591	0.003	0.059
	B-H-W	0.321	0.571	0.004	0.074
	H-W-H	0.393	0.600	0.005	0.090
SM58Q	Base Metal	0.334	0.581	0.004	0.063
	B-H-W	0.320	0.571	0.005	0.084

위 표에서, 각 시료들의 반복 소성변형계수(Coefficient of cyclic plastic strain) C_p 는 0.320~0.393, 반복 소성변형지수(Exponent of cyclic plastic strain) K_p 는 0.571~0.600인 범위로 일반 기계구조용 탄소강재의 담금질과 뜨임한 정도의 수준을 나타낸다^{4, 5)}. 여기서 반복 소성변형 하에서의 수명선도를 결정하는 이 정수들의 예를 들어 보면, CR60강과 SM58Q강의 열영향부(B-H-W)는 C_p 가 0.320~0.321, K_p 는 0.571로서 다른 시료의 경우에 비하여 낮고 특히, CR60강의 경우는 용착부(H-W-H)의 C_p 가 0.393, K_p 는 0.600으로 높은 바와 같이 서로 상대 보완적인 값을 나타내어 이들의 수명선도를 작성하여 보면 전술한 Fig. 4에서 처럼 서로 일치하는 결과가 되고 있다.

그리고 CR60강의 용접시료를 보면 모재의 C_p 와 K_p 는 용착부(H-W-H)와 같으며, 열영향부(B-H-W)의 C_p 와 K_p 는 SM58Q의 열영향부(B-H-W)와 각각 같다. 이는 CR60강에 대해서 SM58Q와 동일한 조건에서 용접을 행하여도 모재-열영향부-용착부의 관계는 잘 결합된 상태임을 말한다. 따라서 이들 실험결과를 정량적인 우열로서 구별하기는 곤란하나

다음과 같은 사실은 알 수 있다. 즉 CR60강은 우선 모재 자체나, 열영향부 및 용착부의 경우에 SM58Q강과 비교하여 소성변형 하에서의 내구성은 거의 동등한 수준이 되고 있다.

한편, 각 시료들의 반복 탄성변형계수(Coefficient of cyclic elastic strain) C_e 는 0.003~0.005, 반복 탄성변형지수(Exponent of cyclic elastic strain) K_e 는 0.063~0.090인 범위로 이는 일반 기계구조용 탄소강재의 담금질과 뜨임한 정도의 수준을 나타낸다^{4, 5)}. 여기서 반복 탄성변형 하에서의 수명선도를 결정하는 이 정수들을 보면 서로 간에 다소의 차이는 있으나 정량적으로 비교하기는 어렵다.

예를 들어 SM58Q의 열영향부(B-H-W)와 용착부(H-W-H)의 C_e 는 0.005로서 같고, K_e 는 각각 0.084와 0.090로서, 전술한 Fig. 5에서와 같이, 다른 것들에 비해 비교적 높은 수명선도를 보인다. 그리고 CR60강의 열영향부(B-H-W)와 SM58Q강 모재의 C_e 는 0.004로 같고, K_e 는 각각 0.074 및 0.063으로 비교적 낮은 수명선도를 보이며, CR60강의 모재는 C_e 가 0.003, K_e 는 0.059로서 이들의 중간 정도를 나타내었다. 그러나 반복 탄성변형 하에서 이런 정도의 차이가 저사이클 피로 수명상에 영향을 미치는 요소가 되지 못하는 결과를 보이지만 만일, 전변형범위 $\Delta\epsilon/2$ 가 낮은 경우나 탄성응력범위인 고사이클 피로와 같이 장수명측에서는 영향적 요소가 될 수도 있다.

다른 한편, 위의 시험결과를 다음의 동적인 응력-변형의 관계식⁶⁾인

$$\sigma_a = C' \Delta\epsilon_p/2^n \quad (4)$$

로서 구해보면 Fig. 7에서와 같이 동적 항복강도인 $\Delta\epsilon_p/2 = 0.2\%$ 에서의 응력범위 σ_a 를 구별할 수 있다. 그림 7에서 동적 항복강도는 CR60강의 모재가 비교적 높고, CR60강의 용착부(H-W-H)와 SM58Q강의 열영향부(B-H-W)가 비교적 낮으며 CR60강의 열영향부(B-H-W)와 SM58Q강의 모재는 중간 정도를 보인다.

이상의 결과에서 CR60강과 그 용접부는 저사이클 피로영역에 있어서 정변형에 대한 내구성이나 피로강도가 SM58Q강과 그 용접부와 비교하여 결코 부족하지 않음을 알 수 있다.

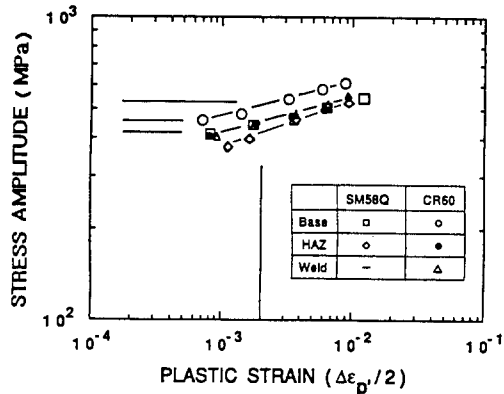


Fig. 7 Relationship between σ_a and $\Delta\epsilon_p/2$ for CR60 and SM58Q steel weldments

4. 결 론

본 연구는 용접구조물의 대체용 강재 개발 및 이의 특성개선을 개선하기 위한 노력으로 수행한 연구로서, 제어압연 강재인 CR60강과 종래의 용접구조용 강재인 SM58Q강의 용접부에 대한 저사이클 피로특성을 비교한 바에 따르면 아래와 같은 결론들을 얻었다.

1) CR60강과 SM58Q강의 용접 열영향부(B-H-W)의 반복소성변형계수 C_p 는 각각 0.320과 321, 반복소성변형지수 K_p 값은 각각 0.571로서 동등한 값을 보였다.

2) CR60강 모재의 반복소성변형계수 C_p 와 반복소성변형지수 K_p 값은 각각 0.392와 0.591로서 용착부(H-W-H)가 각각 0.393과 0.600인 것과 동등하며, SM58Q강 모재의 C_p 와 K_p 값은 각각 0.334와 0.581

로서 이들의 중간 정도를 보였다.

3) 이상과 같이 각 시료 간에 있어서 C_p 와 K_p 값의 상호 보완적 결과로 반복소성 하에서의 수명선도는 서로 일치하는 경향을 보이고 있다.

4) 동적 항복강도는 CR60강의 모재가 비교적 높고, 용착부(H-W-H)와 SM58Q강의 열영향부(B-H-W)가 비교적 낮으며 CR60강의 열영향부(B-H-W)와 SM58Q강의 모재는 이들의 중간 정도를 보이고 있다.

5) 이상의 결과는 CR60강과 그 용접부는 저사이클 피로영역에 있어서 정변형에 대한 내구성이나 피로강도가 SM58Q강과 그 용접부와 비교하여 결코 부족하지 않음을 의미한다.

참 고 문 헌

1. Manual on low cycle fatigue testing, ASTM special technical publication 465, (1969), 53
2. 西島 敏, 田中雄一, 松岡三郎, 阿部孝行, 新津文夫: JIS 機械構造用炭素鋼ならびにCr及ひCr-Mo鋼の軸荷重疲労特性, 日本機械學會論文集 (A 편), 46, (1980), 412
3. 川田雄一: 金屬の疲労と設計, オーム社, (1982), 179-184
4. 日本 金属材料技術研究所, 疲労 Data Sheet, No. 44 (1985) 16
5. 김창주, 김경현, 최재영, 이내성: 국산기계구조용탄소강(SM45C)의 피로 Data Sheet, UNC 116-1075C, (1988), 100
6. H. O. Fuchs: Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, Inc. (1976), 27