

## TMCP 고장력강 용접부의 피로 특성에 관한 연구

임채범\* · 권영각\* · 장래웅\* · 엄기원\*\*

### Fatigue Properties of Welded Joints for TMCP Steels

C.B. Lim\*, Y.G. Kweon\*, R.W. Chang\*, G.W. Um\*\*

**Key Words :** TMCP (Thermo-Mechanical Control Process), Accelerated Cooling(가속냉각), LCF(저사이클 피로), HCF(고사이클피로), Welded Joints(용접부), Microstructure(미세조직)

#### Abstract

Fatigue behavior of the AH, DH and EH grade TMCP(Thermo-Mechanical Control Process) steels was studied. High cycle and low cycle fatigue tests were carried out for the weldment and base metal of each steel.

The results showed that the fatigue limit at  $2 \times 10^6$  cycles was 33 to 37kg/mm<sup>2</sup> for the base metal and 30 to 34kg/mm<sup>2</sup> for the weldment. The ratio of fatigue limit to tensile strength for TMCP steels was 0.65 to 0.71, which was a value close to the upper limit for the ordinary steels. It was also found that the high cycle fatigue behavior of TMCP steels could be affected by the microstructures of base metal. It will be necessary to have fine structure for TMCP steels to increase the fatigue resistance. In low cycle fatigue test, the fatigue lifetime of AH and DH steels accorded well with the ASME best fit curve, while that of EH steel was considerably lower than the fatigue lifetime of the other steels.

Fatigue resistance of the weldment made by high heat input(180kJ/cm)welding was not lower than that made by low heat input(80kJ/cm)welding in case of high cycle fatigue, but the high heat input welding decreased the fatigue resistance in case of low cycle fatigue.

---

\* 정희원, 산업과학기술연구소

\*\* 정희원, 한양대학교 공과대학

1. 서 론

제강, 제어가열, 제어압연, 제어냉각을 유기적으로 결합하여 이들의 공정조건을 통일적으로 규제함으로써 성형 완료시 재료에 최고의 재료특성을 부여하도록 하는 기술체제라 정의되고 있는 신 제어 압연법, 즉 TMCP(Thermo-Mechanical Control Process)법에 의해 제조되는 강재는 인성이 우수할 뿐만 아니라, 탄소당량이 낮아 용접성이 매우 우수하며, 최근 선체구조용 강재로서 각광을 받고 있다<sup>1),2),3)</sup>.

일반 압연에 의해 제조된 normalized 강재는 금속 조직이 주로 ferrite 및 pearlite 주체의 조직으로 되어 있으나, TMCP 강재는 ferrite의 입도가 미세화되어 있고, 제2상으로서 pearlite와 함께 소량의 bainite도 생성되어 있다.

이러한 가속냉각강은 저 탄소당량이므로 대입열 용접시 용접열에 의한 재가열을 받아 TMCP강의 강화기구인 accelerated cooling 효과의 소멸로 인하여 용접부에서 연화현상이 발생하여 용접부 피로 특성을 저하시킨다는 보고가 있으나 명확하

게 규명되지 않고 있는 실정이다<sup>4),5)</sup>.

본 연구에서는 TMCP강 모재 및 용접부의 피로특성을 평가하기 위해 피로강도를 나타내는 S-N 곡선 및 low cycle 피로특성인  $\epsilon$ -N 곡선을 구하여, 모재의 미세조직 및 용접입열량 변화에 따른 용접부 미세조직의 차이가 피로특성에는 어떠한 영향을 미치는가를 고찰해 보았다.

2. 실험방법

시험재는 수냉 제어 압연법에 의해 제조된 선체 구조용 고장력강재로 항복강도가 각각 37, 42, 40 kg/mm<sup>2</sup>인 AH32, DH36, EH36 grade의 세가지 강재를 사용하였다(이하, A,B,C 강으로 표기함). 시험재의 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 시험재의 용접조건은 Table 2와 같이 용접입열량을 80kJ/cm, 180kJ/cm의 2 수준으로 변화시켜 submerged arc용접을 하였다.

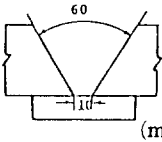
LCF(low cycle fatigue) 시험은 total strain control 방식으로 total strain amplitude의 크기를  $\pm 1.2 \sim \pm 0.5\%$  범위로, strain ratio가 -1인

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of specimens

Specimen	Thick-ness (mm)	Chemical Composition (wt, %)								Mechanical Properties			Remarks
		C	S <sub>i</sub>	M <sub>n</sub>	P	S	Sol-Al	T <sub>i</sub>	C <sub>eq</sub>	$\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)	
A	18	0.147	0.246	1.030	0.020	0.004	0.020	-	0.328	37	51	39.7	AH 32 Grade
B	25	0.141	0.329	1.214	0.022	0.004	0.027	0.010	0.357	41.5	55	35.4	DH 36 Grade
C	20	0.086	0.285	1.400	0.017	0.006	0.048	0.016	0.331	39.8	49	42.8	EH 36 Grade

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%)$$

Table 2 Welding conditions

Welding process	Shape of groove	Welding current (A)	Arc voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Welding consumables	
SAW (Submerged Arc Welding)		L : 1050 T : 900	40 40	26 26	180	UC 36×PFI52B	
			930	36	25		80

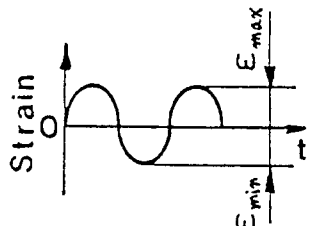
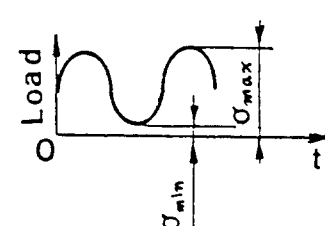
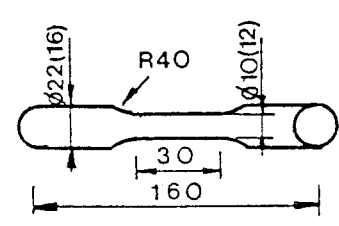
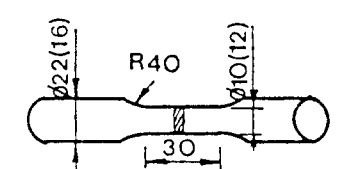
sine파로 실시하였다. 반복속도(cycle frequency)는 0.1-1 Hz로 하였으며, 시험편의 인장 최대 하중이 50% 저하될 때까지의 반복수를 파단수명( $N_f$ )로 하였다. 탄성 및 소성 strain amplitude는  $\frac{N_f}{2}$  일때의 hysteresis loop로부터 구하였다<sup>6)</sup>.

HCF(high cycle fatigue) 시험은 하중 제어 방식으로 반복속도 20Hz, 응력비(stress ratio)  $R=0.1$  조건으로 cyclic tension 시험을 실시하여 반

복횟수  $2 \times 10^6$  회에서의 피로강도를 구하였다.

본 실험에 사용한 피로 시험편의 경우 Table 3과 같이 gage length가 25mm이고, 직경이 2종류(10, 12mm)인 uniform gage 형태의 봉상시험편을 사용하였고, 인장시험편은 직경14mm의 KS 4호 시험편을 사용했다. 그리고, 인장 및 피로 시험편은 시험편 중심이 판두께 중심과 일치하도록 하였고, 용접부 시험편의 경우 용접금속-열영향부 경

**Table 3 HCF and LCF test conditions**

Type of test	Uniaxial		
Type and capacity of testing machine	Servohydraulic, 25 Ton		
Loading condition	Completely reversed $R=-1$	Cyclic tension $R=0.1$	
Waveform	Constant amplitude test		
			
Frequency	0.1-1Hz	20Hz	
Environment	Room temperature, laboratory air		
Specimen (dimension in mm)	Base metal		Rolling direction →
	Butt welded joint		

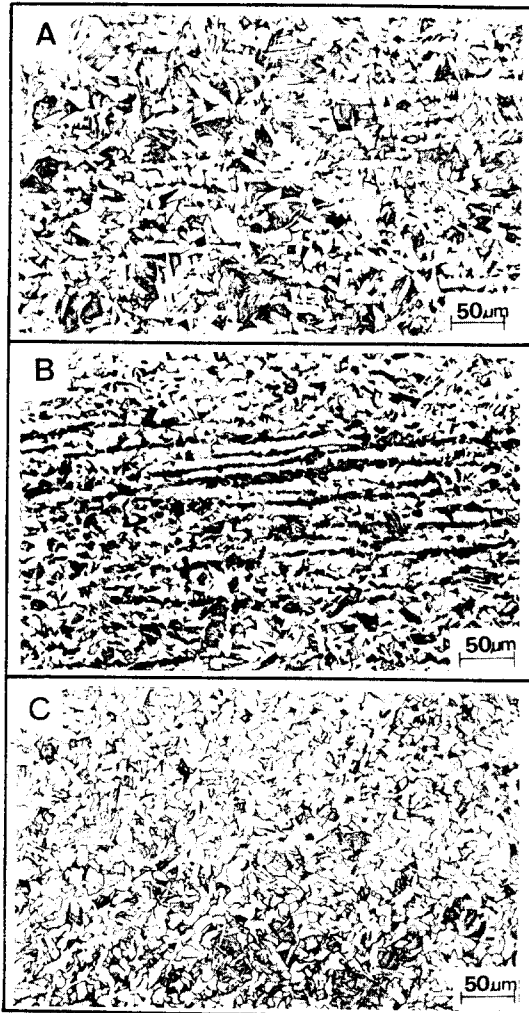
계선이 시험편 중앙에 위치하도록 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 시험재의 미세조직 특성

##### 3.1.1. 모재의 조직 특성

TMCP법에 의해 제조된 3가지 강종 A, B, C의 금속 조직은 Photo.1에서 보는 바와 같이 ferrite,



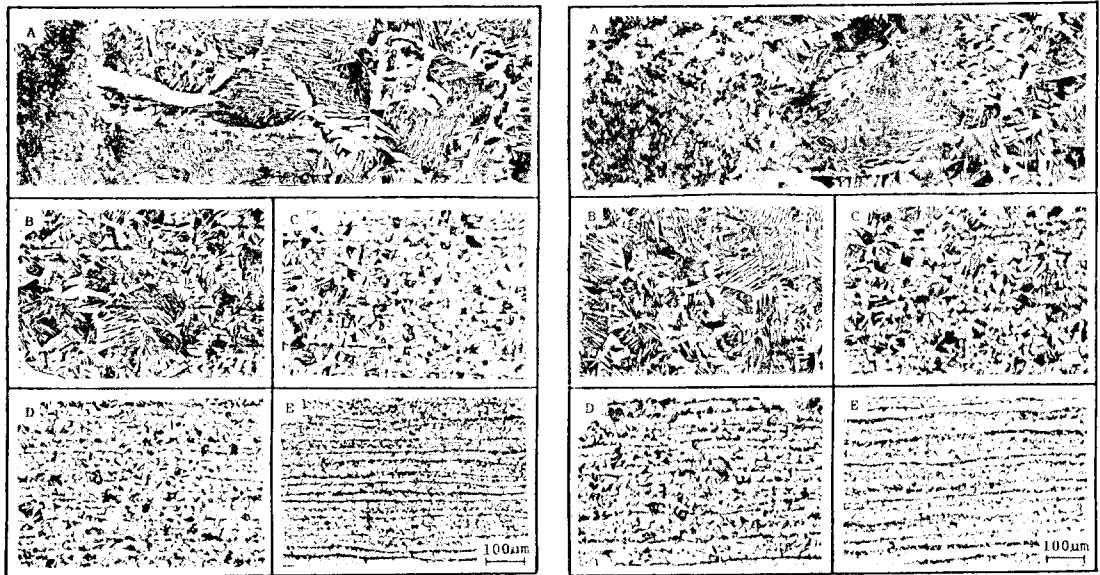
(A) AH 32 steel  
(B) DH 36 steel  
(C) EH 36 steel

Photo. 1 Microstructures of base metal

pearlite, bainite의 세 가지 조직이 혼합되어 있다. A강의 경우 주로 bainite와 ferrite의 혼합 조직으로 되어 있으며 군데 군데 pearlite가 약간씩 분산 되어 있는 형태로 존재하고 있다. B강의 경우는 탄소함량이 A강과 비슷하지만 pearlite가 normalized압연 강재에서 흔히 보이는 band의 형태로 남아 있어서 가속냉각의 효과가 A강 보다 미약한 것으로 보인다. C강의 경우는 pearlite및 bainite의 분율이 0.14wt% carbon의 A, B강에 비해 적게 나타나고 있으나 ferrite의 결정립이 상당히 미세화되어 있다. 주 조직인 ferrite의 입도는 A강이 입도 #11.4, B강은 입도 #11.6, C강은 입도 #가 12.2로서 C강이 가장 미세하였다. A강과 C강의 금속 조직이 형태적으로 유사하지만 C강은 A강에 비해 더 미세한 ferrite조직을 갖고 있으며, ferrite grain의 분포도 보다 더 균질하였다.

##### 3.1.2. 용접부 조직 특성

용접 입열량에 따른 세 강종의 용접부 미세조직 변화를 Photo.2~Photo.4에 나타내었다. A강의 경우, 열영향부의 조직은 입열량 80kJ/cm, 180 kJ/cm인 두 경우 fusion line에서 입계를 따라 초석 ferrite가 석출되어 있고 내부에는 상부 bainite와 같은 저온변태 조직으로 구성되어 있다. 입열량이 증가함에 따라 fusion boundary의 조직이 넓게 발달되어 있고, fusion boundary에서 약 10mm 떨어진 열영향부에서는 fine ferrite와 고립된 cementite로서 존재하는 저합금 고장력강 특유의 weld normalized조직을 나타내고 있다. 입열량이 증가함에 따라 각 부위에서의 현미경 조직이 조대화되어 있다. B강의 경우, 입열량 80kJ/cm, 180kJ/cm 공히 fusion boundary의 조직은 A강과 유사하나, 열영향부의 현미경 금속조직은 용접 입열량이 80kJ/cm의 경우는 pearlite 조직이 분산되어 있는 반면에 180kJ/cm에서는 banded pearlite조직을 나타내고 있다. C강의 경우는 A및 B강과는 달리 초석 ferrite석출 및 저온 변태조직은 나타나지 않고, fusion boundary로부터 열영향부에 걸쳐서 전반적으로 미세한 ferrite와 pearlite주체의 조직으로 되어 있으며 입열량 증가에 따라 조직이 조대화되어 있다.

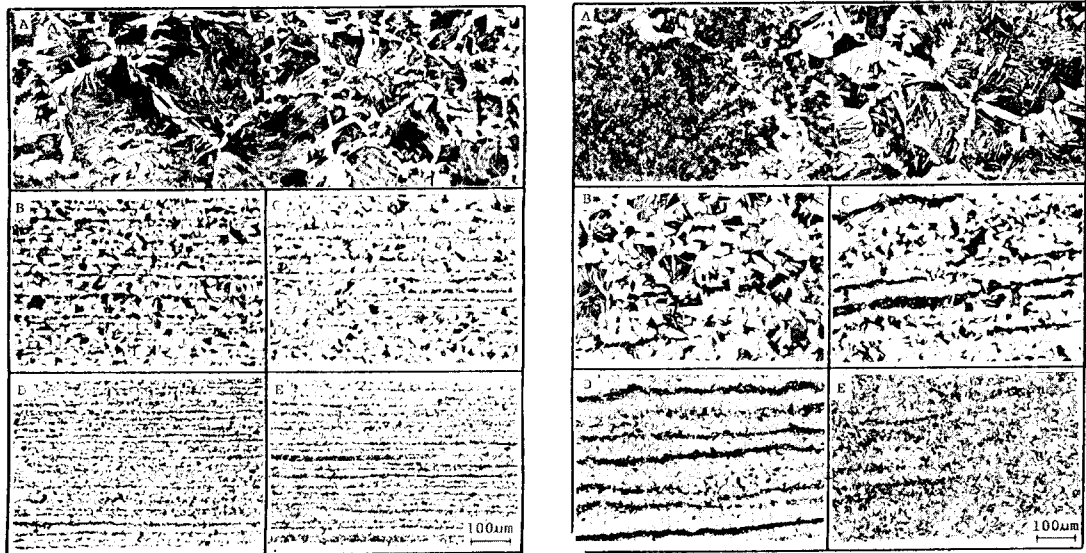


H.I.: 80kJ/cm

H.I.: 180kJ/cm

(A) F.L (B) F.L+3mm (C) F.L+5mm (D) F.L+7mm (E) F.L+9mm  
(F.L= Fusion Line)

**Photo. 2** Microstructures of welded joints of steel A



H.I.: 80kJ/cm

H.I.: 180kJ/cm

(A) F.L (B) F.L+3mm (C) F.L+5mm  
(D) F.L+7mm (E) F.L+9mm

(A) F.L (B) F.L+5mm (C) F.L+10mm  
(D) F.L+15mm (E) F.L+20mm

**Photo. 3** Microstructures of welded joints of steel B

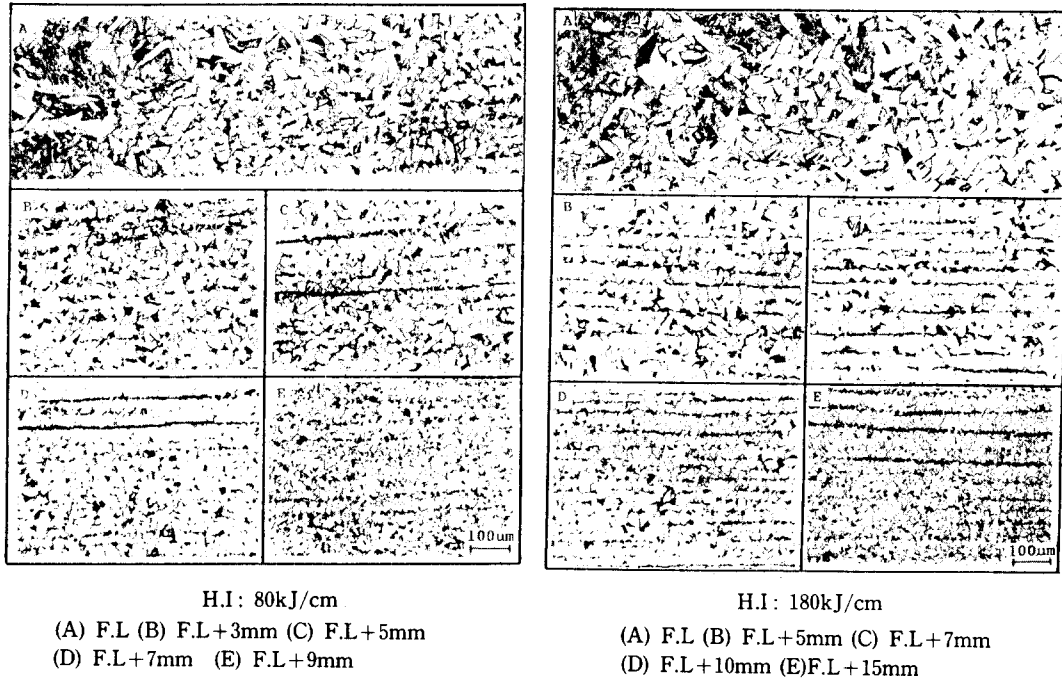


Photo. 4 Microstructures of welded joints of steel C

3.2. 시험재의 기계적 성질

3.2.1. 용접부 경도분포

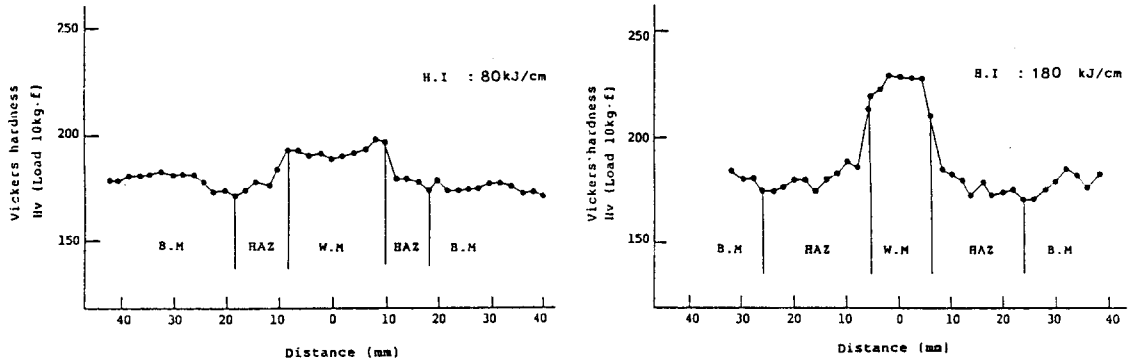
A, B, C 세 강종에 대해 용접 입열량 변화에 따른 용접부 경도분포를 Fig. 1에 나타내었다. A강 모재의 평균경도값은 179H<sub>v</sub>이었고, B강의 경우 170H<sub>v</sub>, C강의 경우 157H<sub>v</sub>로 C강의 경도값이 A 및 B강에 비해 10-20H<sub>v</sub>정도 낮았다. 용접 입열량이 80kJ/cm에서 180kJ/cm로 대폭 증가된 대입열 용접 열영향부 경도 분포는 80kJ/cm의 경우에 비해 A강의 경우는 비슷하며, B강은 증가한 반면 C강은 감소하였다. 이와 같은 현상은 Photo. 2-4에 나타나듯이 용접입열량 변화에 따른 열영향부 미세조직의 차이에 기인하며, 열영향부의 폭은 입열량 180kJ/cm의 대입열 용접의 경우가 입열량 80kJ/cm의 경우에 비해 2배 가량 넓었다. 본 실험에서는 3강종 모두 열영향부의 경도값이 모재보다 낮아지는 연화 현상은 나타나지 않았으나, 용접열 영향부의 경도값이 일반적으로 용접금속에

비해 상당히 낮았다.

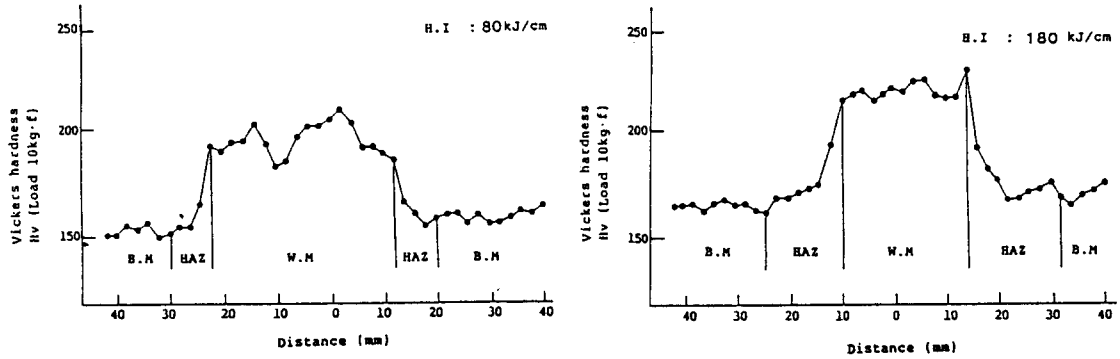
3.2.2. 인장시험결과

시험재 A, B, C 강에 대해 대입열 submerged arc용접을 적용하였을때 용접입열량 변화에 따른 용접부 인장특성을 모재와 함께 Table 4에 나타내었다.

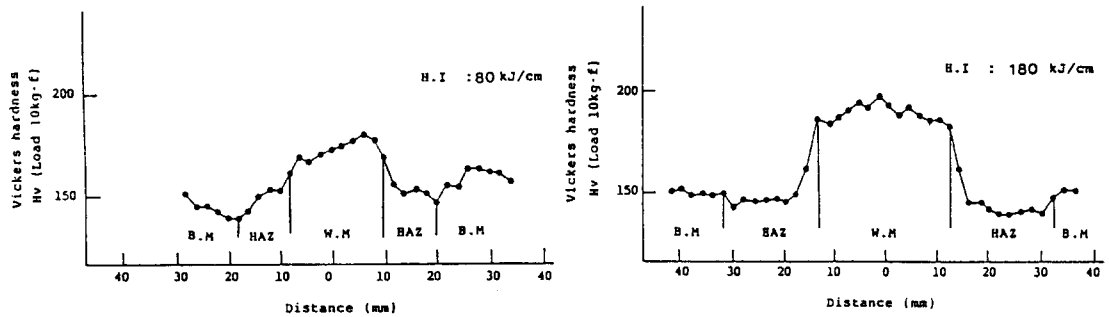
모재의 경우 C강의 인장응력은 49kg/mm<sup>2</sup>로 A 및 B강에 비해 2-6kg/mm<sup>2</sup>정도 낮았으나, Photo. 1에서 나타나듯이 조직의 미세화에 기인하여 인장 응력값에 대한 항복응력은 A 및 B강에 비해 상대적으로 높아 항복비(yield ratio)가 81%로 가장 컸다. 용접부 인장특성은 A강의 경우는 모재와 거의 비슷한 값을 나타낸 반면에 B 및 C강은 모재보다 2-4kg/mm<sup>2</sup> 정도 낮았다. 인장시험시 모든 용접 시험편의 파단은 용접 열영향부 부근에서 발생하였으며, 이는 앞에서 나타난 용접부 경도 분포와도 잘 일치하고 있다.



a) steel A



b) steel B



c) steel C

Fig. 1 Hardness distributions of welded joint measured along the direction normal to the weld line at the mid-thickness.

Table 4 Results of tension test

Specimen	Yield Strength $\sigma_y$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength $\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	E1, $\epsilon$ (%)	Reduction of Area $\psi$ (%)	Yield Ratio $\sigma_y/\sigma_u$ (%)	True Fracture Stress $\sigma_f$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Fracture Ductility $\epsilon_f^*$
A	Base metal	37.0	51.0	39.7	73	112.0	1,309
	180kJ/cm	36.0	50.9	25.4	69	105.5	1,171
	80kJ/cm	35.6	51.5	32.8	73	116.0	1,309
B	Base metal	41.5	55.0	35.4	75	129.9	1,386
	180kJ/cm	37.3	52.9	27.2	74	127.3	1,347
	80kJ/cm	39.2	52.7	30.0	73	123.9	1,309
C	Base metal	39.8	49.0	42.8	82	133.5	1,715
	180kJ/cm	35.7	45.9	23.4	79	127.3	1,561
	80kJ/cm	34.2	46.0	32.4	77	120.3	1,470

$$*\epsilon_f = \ln \frac{100}{100 - \psi}$$

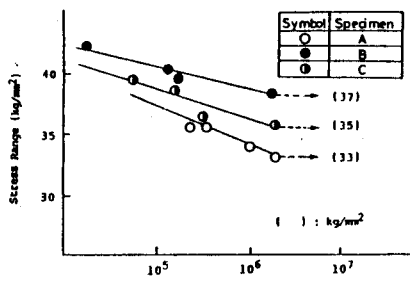
### 3.3. 피로 강도

#### 3.3.1. 모재의 피로강도

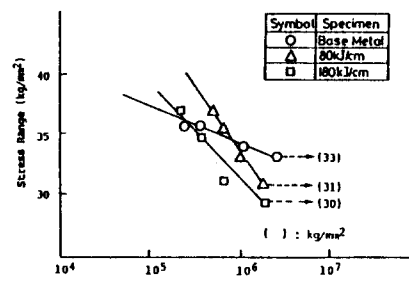
Fig. 2에서 (a)는 A, B, C세가지 강재의 모재에 대하여 반복횟수  $2 \times 10^6$ 회까지의 응력범위와 반복횟수의 관계를 나타내며, Fig. 중 ( )안의 숫

자는  $2 \times 10^6$ 회에서의 시간 피로 강도( $\sigma_w$ 로 표기함)이다.

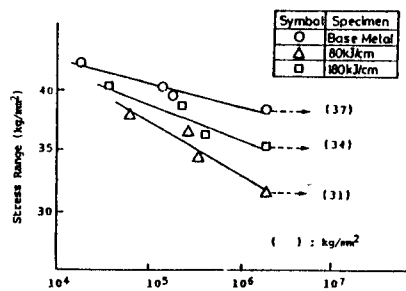
이러한 결과를 Table 4에 나타낸 인장특성과 비교해 보면, 항복강도와 인장강도가 가장 높은 B강의  $\sigma_w$ 값은  $35 \text{ kg/mm}^2$ 으로 다른 2강종에 비해



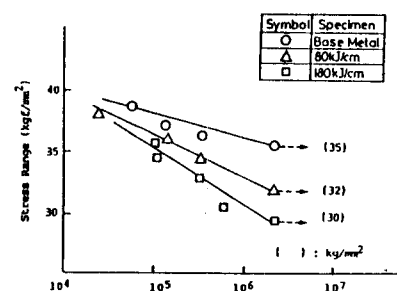
(a) Comparison of S-N curves for base metal



(b) Comparison of S-N curves for steel A



(c) Comparison of S-N curves for steel B



(d) Comparison of S-N curves for steel C

Fig. 2 Results of high cycle fatigue test



높았다. 그러나, 시험재중 금속조직의 형태가 유사한 A와 C강을 비교해 볼때, 인장강도가 2kg/mm<sup>2</sup> 정도 높은 A강의  $\sigma_w$ 값은 C강 보다 오히려 2kg/mm<sup>2</sup> 정도 낮아, 일반적으로 모재의 피로강도가 어느 강도 수준까지는 인장강도가 높을수록 증가한다는 사실과 상반된 결과를 가져왔다.

그러나, 비슷한 인장강도를 가진 재료에서는 피로성질이 인장 강도보다는 금속조직에 더 민감하며<sup>7)</sup>, 일반적으로 결정립의 크기와 항복강도의 관계를 나타내는 Hall-Petch equation이 피로강도와 결정립 크기의 관계에도 적용된다고 J. Masounave는 언급하였으며<sup>8)</sup> 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma_D = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

단,  $\sigma_D$  ; 피로한도

$\sigma_0, k$  ; 상수

$d$  ; 결정립크기

본 실험에서 C강의 2×10<sup>6</sup>회에서 시간피로강도  $\sigma_w$ 가 A강에 비해 높게 나타난 것은 C강의 모재 금속조직이 A강에 비해 보다 더 미세하고 균일하였기 때문이라고 사료되며, Table 4에 나타낸 바와 같이 C강의 항복응력이 A강 보다 높다는 사실과도 잘 일치하고 있다.

따라서 결정립 내에서 slip변형등에 의한 소성변형의 국부적 집중에 의해 발생하는 1단계 균열이 지배적인 high cycle영역에서의 피로수명에는 결정립 크기가 큰 영향을 미치므로, 강재의 피로강도를 향상시키기 위해서는 소수의 심한 slip영역을 억제하고 많은 소성변형 영역을 가진 균일화 slip을 조장하기 위하여, TMCP강의 제조시 강재의 조직을 미세하고 균일하게 하는 것이 하나의 피로강도 향상책이라 할 수 있다.

### 3.3.2. 용접부의 피로강도

HCF특성에 미치는 용접 입열량의 영향을 검토해 보기 위하여 Fig. 2의 (b), (c), (d)에 A, B, C 세가지 강재에 대한 모재 및 입열량 변화에 따른 용접부 시험 결과를 함께 나타내었다. TMCP강 용접 시험편의 2×10<sup>6</sup> cycles에서의 피로강도는 모재에 비해 A강의 경우는 2-3kg/mm<sup>2</sup>, B강의 경우 3-6kg/mm<sup>2</sup>, C강의 경우 3-5kg/mm<sup>2</sup>정도

감소 하였다.

이와 같은 사실을 용접 입열량 변화에 따른 용접부 조직 특성의 변화 및 경도 분포의 차이로서 고찰해 보면 다음과 같다.

A강의 경우 Photo. 2 및 Fig. 1에 나타나듯이 입열량 증가에 따른 열영향부의 미세조직 및 경도의 차이는 거의 없어, 대입열 용접 적용에 따른 피로강도가 소입열 용접에 비해 큰 차이가 나타나지 않았으며, 본 실험에서 실시한 고응력 범위에서의 피로수명은 오히려 모재보다 증가된 경향마저 보인다. B강의 경우는 입열량 180kJ/cm로 대입열 용접한 시험편의 피로 강도가 80kJ/cm로 용접한 경우보다 오히려 3kg/mm<sup>2</sup>정도 높게 나타났다. 이러한 사실은 입열량이 80kJ/cm경우의 열영향부의 조직은 pearlite band가 분산된 조직인 반면에 입열량 180kJ/cm에서는 banded pearlite조직을 나타내 열영향부의 경도값이 입열량 증가에 따라 증가하였으며, pearlite조직의 경우 탄화물과 ferrite의 계면이 전위의 source 및 sink로 되어 cross slip발생이 용이한 환경을 제공하므로<sup>9)</sup> banded pearlite 조직쪽이 피로균열 발생에 더 큰 저항력을 갖는다고 사료되었다. C강의 경우는 입열량이 증가 할 수록 피로강도는 감소되었는데, 입열량 증가에 따른 열영향부 조직의 조대화 및 경도값의 감소에 기인하였다고 사료되었다.

이상과 같이 2×10<sup>6</sup> cycles에서의 피로강도는 입열량 변화에 따른 용접부 조직의 차이에 기인한 열영향부의 경도값이 증가될수록 피로강도가 높게 나타났다.

Table 5에 본 실험에서 실시한 각 시험편들에 대한 인장강도와 피로강도를 나타내었다. 본 실험에서 얻은 피로강도비(fatigue strength ratio)  $\sigma_w/\sigma_u$ 는 모재의 경우 0.65-0.71이었고, 용접부의 경우는 0.59-0.70이었다. Fig. 3에  $\sigma_w$ 와  $\sigma_u$ 와의 관계를 기존의 data와 비교해 나타내었다. 본 실험에서 사용한 TMCP강 모재와 용접부는 기존 data의 scattering범위의 상한치 부근에 위치하고 있다. 따라서, TMCP강 모재의 high cycle피로강도는 종래재보다 비교해 볼때 등등 이상의 특징을 가지고 있고, high cycle피로 강도 측면에서 대입열 용접 적용이 가능하다고 사료되었다.

Table 5 Fatigue strength ratio for various specimens

Specimen		Fatigue Strength $\sigma_w$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength $\sigma_u$ (kg/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_w/\sigma_u$
A	Bese Metal	33	51.0	0.65
	80kJ/cm	31	51.5	0.60
	180kJ/cm	30	50.9	0.59
B	Bese Metal	37	55.0	0.67
	80kJ/cm	31	52.7	0.59
	180kJ/cm	34	52.9	0.64
C	Bese Metal	35	49.0	0.71
	80kJ/cm	32	46.0	0.70
	180kJ/cm	30	45.9	0.65

$\sigma_w$  = Fatigue strength at  $2 \times 10^6$  cycles

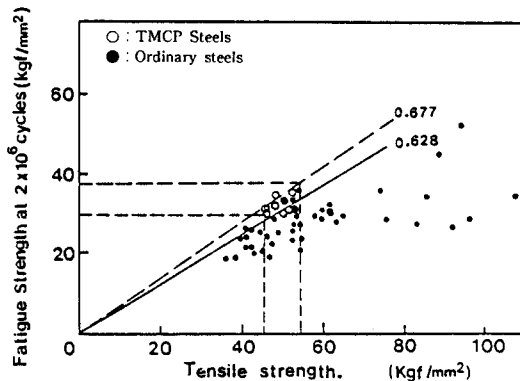


Fig. 3 The relationship between fatigue strength and tensile strength<sup>9)</sup>

### 3. 4. Low cycle 피로특성

A, B, C강의 모재 및 용접부 시험편 길이 방향 Total strain amplitude ( $\epsilon_{ta}$ )와 파단수명 ( $N_f$ )과의  $\epsilon$ -N관계를 Fig. 4에 나타내었다.  $\epsilon_{ta}$ 를  $\pm 1.2\%$ 까지 변화시켜 LCF시험을 실시하였으며, strain amplitude와 파단수명 ( $N_f$ )를 대수좌표에 나타낼 때 직선관계가 존재하였고, 다음과 같은 Manson-Coffin의 관계식이 성립하였다.

$$\epsilon_{pa} \cdot N_f^{kp} = C_{fp}$$

$$\epsilon_{ea} \cdot N_f^{ke} = C_{fe}$$

따라서,  $\epsilon_{ta}$ 는

$$\epsilon_{ta} = C_{fp} \cdot N_f^{-kp} + C_{fe} \cdot N_f^{-ke} \text{으로 나타내어진다.}$$

단,  $\epsilon_{ta}$  : 전 변형을 진폭 (total strain amplitude)

$\epsilon_{pa}$  : 소성 변형을 진폭 (plastic strain amplitude)

$\epsilon_{ea}$  : 탄성 변형을 진폭 (elastic strain amplitude)

$N_f$  : 파단 반복수 (number of cycles to failure)

k, C : 재료 상수

본 실험에서 얻은 시험 결과로부터 구한 재료 상수 k 및 C를 Table 6에 나타내었다. Fig. 5(a)에 TMCP강 모재의 LCF 피로특성을 비교해 보기 위하여 A, B, C강의  $\epsilon_{ta}$ - $N_f$ 관계를 통합해 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 A와 B강은 서로 비슷한 LCF특성을 나타내며 ASME best fit곡선에 위치하고 있다. 그러나, C강의 경우 strain 진폭이 작은 영역에서는 A 및 B강과 비슷한 LCF특성을 나타내나 strain 진폭이 큰 영역에서는 LCF 수명이 상당히 감소하였다. 이는 Table 6에 나타나듯이 LCF시험에서 반복 plastic strain측 절편이 상수  $C_{fp}$ 의 값이 A, B 강은 1.09, 0.658인 반면에 C강은 0.111로서 plastic strain amplitude가 큰 영역에서의 피로수명이 A, B강에 비해 상당히 감소된다는 것을 나타내어 주고 있다. 따라서, 본 실험에서의 C강의 결정립 미세화는 high cycle 피로 강도는 향상시켰지만, 소성저동인 low cycle 피로특성 측면에서는 큰 영향을

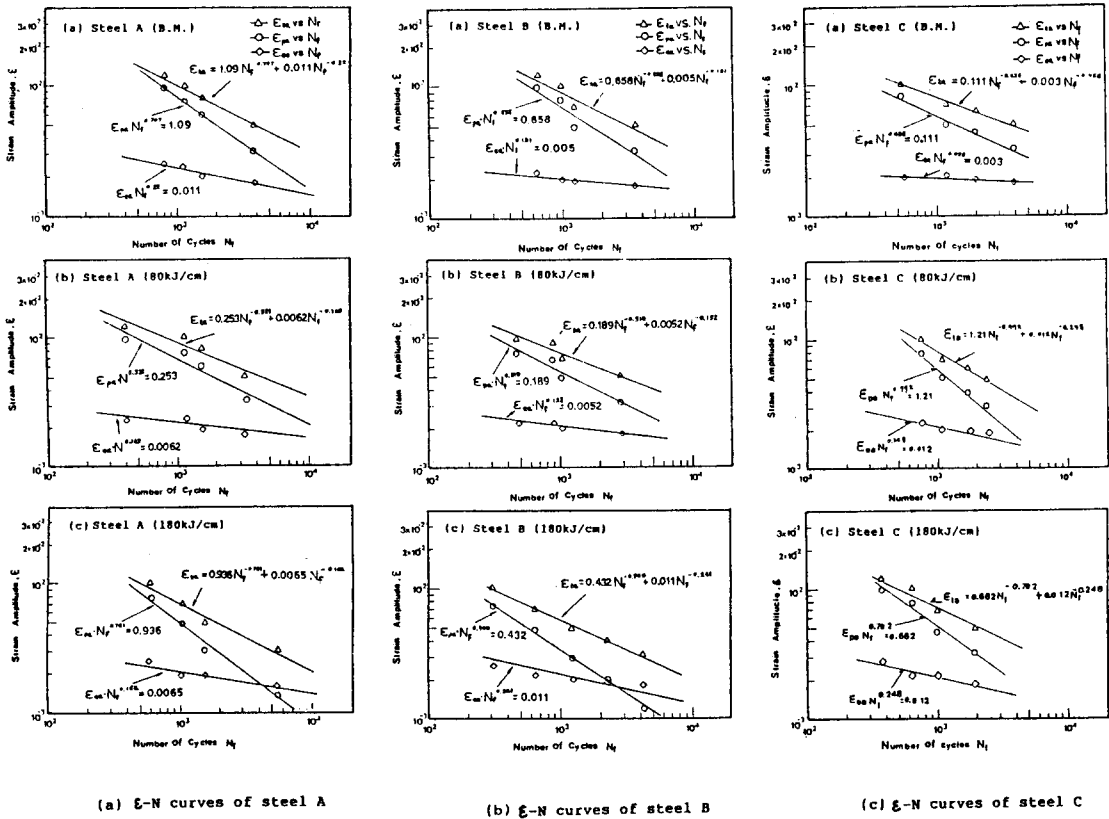


Fig. 4 Results of low cycle fatigue test

주지 않는다고 사료되었다.

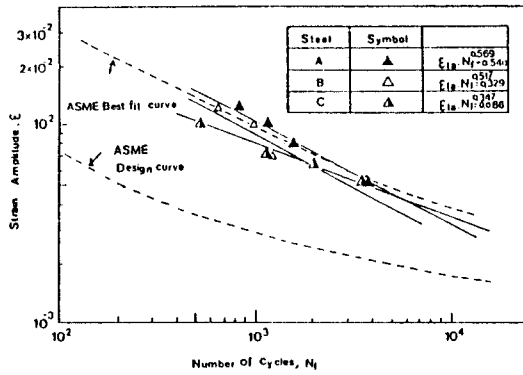
한편, 용접입열량 변화에 따른 A, B, C강의 용접부  $\epsilon_{ta}$ - $N_f$  직선을 Fig. 5(b), (c), (d)에 나타내었다. 입열량 80kJ/cm로 용접한 시험편의 LCF특성이 180kJ/cm로 대입열 용접한 시험편보다 모두 우수하였고, 특히 A강에 대해 80kJ/cm로 용접한 시험편의 LCF수명은 모재와 거의 비슷한 수준을 나타내고 있다. A, B강에 대해 입열량 180kJ/cm로 용접한 시험편의 피로수명은 모재의 수명에 비해 약 1/2정도 감소하였다. C강의 경우는 용접부 LCF수명이 total strain amplitude가 큰  $\pm 1\%$ 에서는 오히려 모재보다 연장되었으며, 전체적으로 A 및 B강의 피로 수명의 중간 정도에 위치하고 있다.

A강의 경우 입열량 80kJ/cm로 용접한 시험편이 모재와 거의 비슷한 LCF특성을 나타내는 것은 용접에 의한 용접금속 및 용접열영향부의 경도 분포가 Fig. 1에 나타나듯이 거의 균일하게 분포

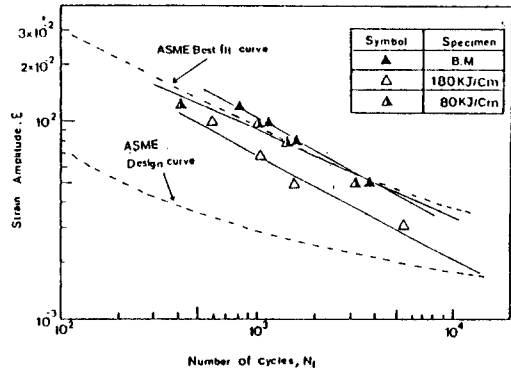
되어 있어 피로에 의한 용접부 전체가 균일한 변형을 받았기 때문이라 생각되며, 입열량이 180 kJ/cm로 증가할수록 LCF수명이 모재에 비해 상당히 감소한 것은 용접에 의한 용접부 경도분포의 차이가 크게 나타나, 용접 금속 보다 경도가 낮은 영역인 열영향부쪽이 국부적인 응력집중(metallurgical notch effect)을 받아 피로 균열이 빨리 발생되었기 때문이라 사료되었다.

이와 같이 용접부가 하중에 수직방향으로 놓여 있는 통상의 피로시험편의 경우 반복하중에 따라 나타나는 strain의 형태는 모재에 비해 매우 복잡하다고 예상된다. strain분포가 항상 일정한 모재와는 달리, 용접부의 경우는 용접금속, 열영향부 및 모재에 각기 다른 strain을 나타내며, 가장 큰 strain은 강도가 약한 부분에서 나타난다고 할 수 있다.

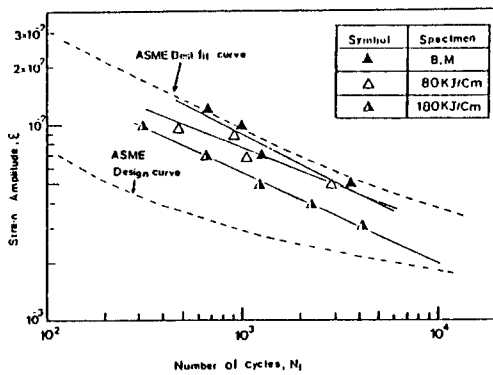
따라서, 용접부의 LCF수명이 모재에 비해 감소된 것은 Photo. 5에서와 같이 용접 금속보다는



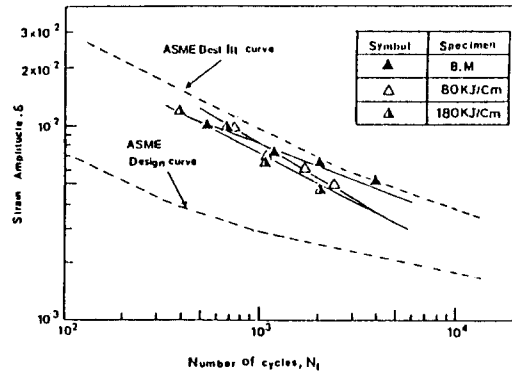
(a) Comparison of  $\epsilon$ - $N$  curves for base metal



(b) Comparison of  $\epsilon$ - $N$  curves for steel A



(c) Comparison of  $\epsilon$ - $N$  curves for steel B



(d) Comparison of  $\epsilon$ - $N$  curves for steel C

Fig. 5 Comparison of LCF test results with the ASME design curve

Table 6 Material constants of Manson-Coffin's equation  $\epsilon \cdot N^k = C$  for various specimens.

Specimen	Exponent k			Constant C			$\epsilon_f^*$	
	$k_{ft}$	$k_{fp}$	$k_{fe}$	$C_{ft}$	$C_{fp}$	$C_{fe}$		
A	Base Metal	0.569	0.707	0.220	0.540	1.09	0.011	1,309
	80kJ/cm	0.421	0.521	0.149	0.167	0.253	0.006	1,309
	180kJ/cm	0.531	0.761	0.164	0.278	0.936	0.007	1,171
B	Base Metal	0.517	0.655	0.131	0.329	0.658	0.005	1,386
	80kJ/cm	0.399	0.510	0.132	0.121	0.189	0.005	1,309
	180kJ/cm	0.460	0.700	0.241	0.138	0.432	0.011	1,347
C	Base Metal	0.347	0.426	0.056	0.086	0.111	0.003	1,715
	80kJ/cm	0.576	0.772	0.248	0.429	1.210	0.012	1,470
	180kJ/cm	0.546	0.702	0.248	0.319	0.662	0.012	1,561

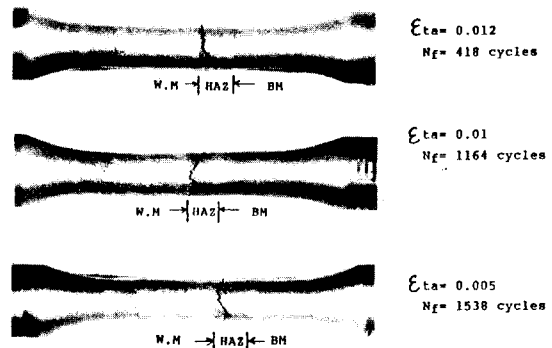


Photo. 5 Low cycle fatigue fractured specimens of welded joint for steel A(H.I.=80kJ/cm)

열 영향부쪽에 소성변형이 집중되어 피로균열 발생을 촉진시켰다고 생각된다.

본 실험의 LCF결과를 ASME design곡선과 비교해 본 결과 안전측에 있었으나, LCF특성이 중요시되는 구조물을 시공할 때는 용접부가 균일한 strain을 받도록 설계 및 용접시공상 주의를 기하여야 된다고 사료된다.

#### 4. 결 론

TMCP법에 의해 제조된 Y.P. 36kg/mm<sup>2</sup>급 AH, DH 및 EH grade의 선체구조용 고장력강 모재와 용접 입열량이 80kJ/cm, 180kJ/cm인 2경우의 용접부에 대해 피로시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) TMCP강 모재의 반복회수  $N=2 \times 10^6$ 회에서의 피로강도  $\sigma_w$ 는 33-37kg/mm<sup>2</sup>이었고, 용접부의  $\sigma_w$ 는 30-34kg/mm<sup>2</sup>이다. 모재의 피로강도비  $\sigma_w/\sigma_u$ 는 0.65-0.71이고, 종래재에서 얻어지는 data범위의 상한에 가까운 값이다.

(2) TMCP강 모재의 경우 항복강도 및 인장강도가 가장 높은 DH강이 피로강도가 가장 높았으며, 비슷한 인장 특성을 갖는 AH, EH강의 경우 결정립이 미세한 EH강의 피로 강도가 높았다.

(3) TMCP강 용접부의 경우 용접입열량 변화에 따른 용접부 조직의 차이에 기인한 열영향부 경도값이 증가될수록 피로강도는 높게 나타났다.

(4) AH, DH강 모재의 LCF수명은 ASME best fit곡선과 거의 일치하고 있으나, EH강의 경우 strain진폭이 큰 영역에서 LCF수명은 상당히 감소하였다.

(5) 대입열 용접 적용에 따른 LCF 피로수명은 ASME design곡선에 비해 안전측에 있었으나, metallurgical notch effect를 받아 모재에 비해

LCF 수명이 1/2정도로 감소하였다.

#### 참고문헌

- 1) 渡邊之：鐵鋼新素材，TMCP鋼の適用分野，溶接學會誌，Vol.55，No.1，(1986)，pp.49-55.
- 2) 森川博文，森山康，伊藤龜太郎：鐵鋼新素材，TMCP鋼の冶金的特徴と母材特性，溶接學會誌，Vol.55，No.2，(1986)，pp.83-90.
- 3) 寺鴨久榮，古君修：TMCP技術の今後の展開，溶接學會誌，Vol.55，No.7，(1986)，pp.411-418.
- 4) 井上好章等：TMCP型 HT50 鋼板のHAZ軟化を有する継手強度，溶接冶金委員會，TMCP鋼 溶接冶金 Symposium，Vol.5，(1985)，pp.140-150.
- 5) 松本重人等：TMCP 50kgf/mm<sup>2</sup>鋼 溶接継手の疲勞強度，溶接冶金委員會，TMCP鋼 溶接冶金 Symposium，Vol.5，(1985)，pp.151-160.
- 6) D.T. Raske and JoDean Morrow：Mechanics of Materials in Low cycle Fatigue Testing，ASTM STP，Vol.465，(1969)，pp.1-25.
- 7) George E, Dieter：Mechanical Metallurgy，McGraw-Hill，Chap. 12.
- 8) J. Masounave, J.P. Baillon and J.I. Dickson：La Fatigue des Matériaux et des Structures，Ed. by C. Bathias and J.P. Baillon，PUM，FRANCE，Chap. 6，(1980).
- 9) 堀部進，内山郁：鐵鋼の溶接部の疲勞，日本材料強度學會誌，Vol.16，No.1，(1981)，pp.1-17.