

.....
論 文

Al-10%Si-0.3%Mg 주조재의 보수용접에 따른 내구특성 연구

김경현, 이정무

A Study on the Durability of Al-10%Si-0.3%Mg Castings with Weld Repair

Kyung-Hyun Kim and Jung-Moo Lee

Abstract

The effects of weld repair on the durability in Al-10%Si-0.3%Mg castings were evaluated. The strength and fracture toughness in fusion zone were higher than those in the base metal by rapid cooling of fusion zone after welding. There were no significant differences between fatigue properties in castings and weld repaired specimen as the results of low cycle fatigue and rotating bending fatigue test. Therefore it was concluded that weld repairing did not have any significant effect on the mechanical properties of castings. (Received October 1, 1994)

1. 서 론

Al-10%Si-0.3%Mg 합금은 주조성이 우수하고 내마모성이 뛰어나며 열팽창계수가 작은 장점이 있어, 강도와 내마모성이 요구되며 초대형으로 형상이 매우 복잡하고 치수의 정확도를 요구하는 특수방산용 crank case 및 항공기부품 등에 사용되고 있다. 이러한 부품의 품질수준은 MIL code의 class 1, grade B등급으로 제품 내부에 수축공은 물론 기포 및 비금속개재물 등이 철저히 배제되어야 한다.

초대형이며 형상이 복잡한 알루미늄 주물부품들은 제품의 내부에 균열이 생성하여 성장하기 쉬우며 또한 결함들이 전혀 없는 부품을 제조하기란 불가능하다. 주조시에 대형 주물부품의 극히 일부분에 생성된 주조결함으로 인하여 대형 주물 전체를 사용하지 못하는 것은 비경제적으로 중요한 부위를 제외한 일부분에 생긴 주조결함들은 보수용접하여 사용할 필요가 있다.

그러나 복잡 형상의 특수 방산부품과 항공기부품 등은 높은 신뢰성과 안정성을 요구하기 때문에 보수용접에 따른 피로강도, 파괴인성 등의 특

성변화에 대한 검토가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Al-10%Si-0.3%Mg 합금 주조재를 선택하여 보수용접에 따른 내구특성을 비교평가하여 보수용접의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 모재 제조

순 Al(99.8%)과 순Mg, Al-20%Si 모합금을 사용하여 Al-10%Si-0.3%Mg 조성의 합금을 목표로 도가니로에서 용해하였는데, 용해된 합금의 조성은 Table 1과 같다. 용탕의 온도를 720°C까지 상승시켜 입자 미세화제 및 개량처리제를 투입하여 30분간 유지시킨 후, 730°C에서 아르곤 가스를 0.61/kg Al으로 주입하여 6분간 탈가스 처리하였으며 720°C에서 주형에 주입하였다. 입자미세화 및 개량처리제는 각각 Al-5%Ti-1%B

Table 1. Chemical composition of the specimen (wt.%).

Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Ni	Ti	Sr	Al
9.95	0.25	0.16	0.015	0.025	0.005	0.064	0.012	bal.

모합금과 Al-10%Sr-14%Si 모합금을 사용하여 0.1%Ti, 0.015%Sr으로 합량을 맞추었다[1,2]. 이들 모재를 525°C에서 10시간 동안 용체화처리하고 161°C에서 8시간 동안 시효처리(T6처리)하였다.

2.2 용접시험편 제작

용접전 모재를 충분히 예열하여 용접전류 50A, 용접속도 100mm/min로 TIG 용접을 하였다. 1pass 용접후 dross를 제거하고 wire brush로 깨끗하게 닦은 다음 다시 torch로 예열하여 용접하였는데 이런 방법을 반복하여 인장시험편, 피로시험편은 4pass로 용접후 채취하였고 파괴인성시험편은 6pass로 용접후 채취하였다.

2.3 특성시험

특성시험으로 경도측정, 인장시험, 저주기피로시험, 회전굽힘피로시험 및 파괴인성시험 등을 실시하였는데, 인장시험용 시험편은 ASTM B557의 알루미늄주물용 시험편으로 하였고, 충격시험용 시험편은 V-notch 4호 시험편으로 하였다.

저주기피로시험편의 형상은 Fig. 1과 같으며 표면 Scratch의 영향을 최소화하기 위하여 1 μ m의 paste로 연마하였으며 Gage Length가 10mm인 Extensometer로 Strain을 측정하였다. Total Strain Amplitude는 0.6%에서 0.2%까지 변화시켰다. 일정한 Total Strain Amplitude에서 반복경화나 반복연화가 일어나면 Plastic Strain Amplitude가 변하게 되므로 피로수명의 절반인 $N_f/2$ 일 때의 Hysteresis Loop로부터 Plastic Strain Amplitude를 구하여 Coffin-Manson Plot의 Data로 이용하였다[3]. 회전굽힘피로시험은 JIS Z 2274 1호 시험편을 사용하였는데 표면 Scratch의 영향을 줄이기 위하여 [4] 기계가공후 표면을 매끈하게 연마하였다. 회전굽힘피로시험은 최대굽힘 모멘트가 10kg인 4점하중식 피로시험기를 사용하였다. 시험방법은 R=-1인 완전역조조건으로 부하를 걸어주었으며, 회전수는 3480rpm으로 상온대기중에서 실시하였다. 파괴인성시험은 ASTM E399의 C-T 시험편으로 시험하였고 파괴인성치는 $K_Q = (P_Q f(a/W)) / (BW^{0.5})$ 로 계산하였다. 여기서 P_Q 는 응력

-변형선도에서의 결정된 하중, $f(a/W)$ 는 식의 상수, a 는 crack의 길이, B 는 시험편의 두께, W 는 시험편의 폭을 나타낸다.

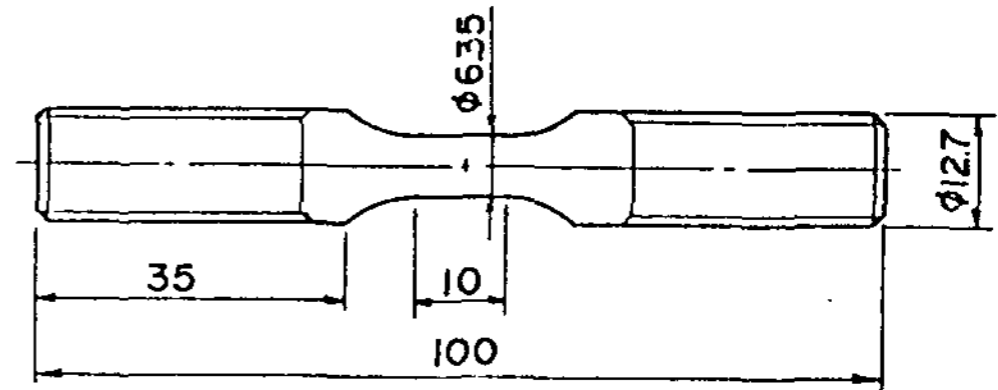


Fig. 1. Dimension of the low cycle fatigue test specimen.

3. 결과 및 고찰

3.1 인장 및 충격특성

Fig. 2는 T6처리한 용접재의 부위별 항복강도 및 인장강도를 나타낸 것이다. 용융부인 FZ의 인장강도는 260MPa로서 모재의 인장강도

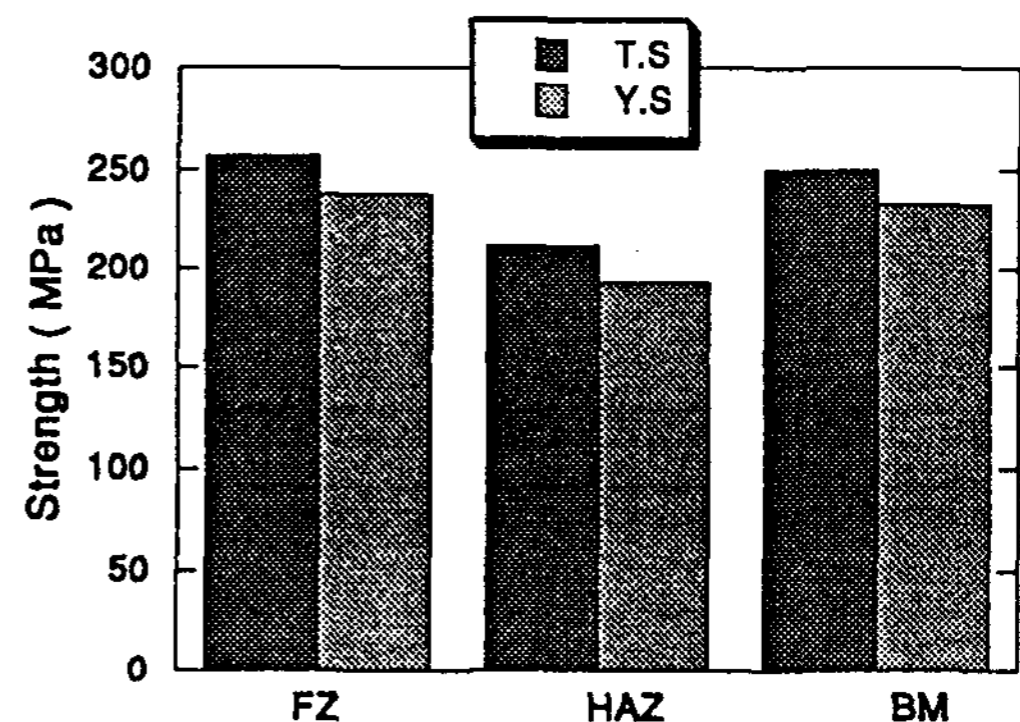


Fig. 2. Tensile properties of welded specimens after T6 treatment(BM : base metal, HAZ : heat affected zone, FZ : fusion zone).

250MPa보다 다소 높으며 열영향부위인 HAZ는 210MPa 정도로 가장 낮은 값을 보였다. Photo 1은 용접재 및 용접재를 T6처리한 후의 미세조직을 관찰한 것으로서 T6처리된 용융부, 열영향부위의 경우 T6처리 전보다 공정 Si이 균일하고 미세하게 분산된 것을 알 수 있으며 특히 용융부는 용접후 급냉이 되어 모재보다 수지상정간격이 미세한 것으로 관찰되었는데, 따라서 용융부의 강도가 모재보다 다소 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 T6처리한 용접재의 부위별 연신율과

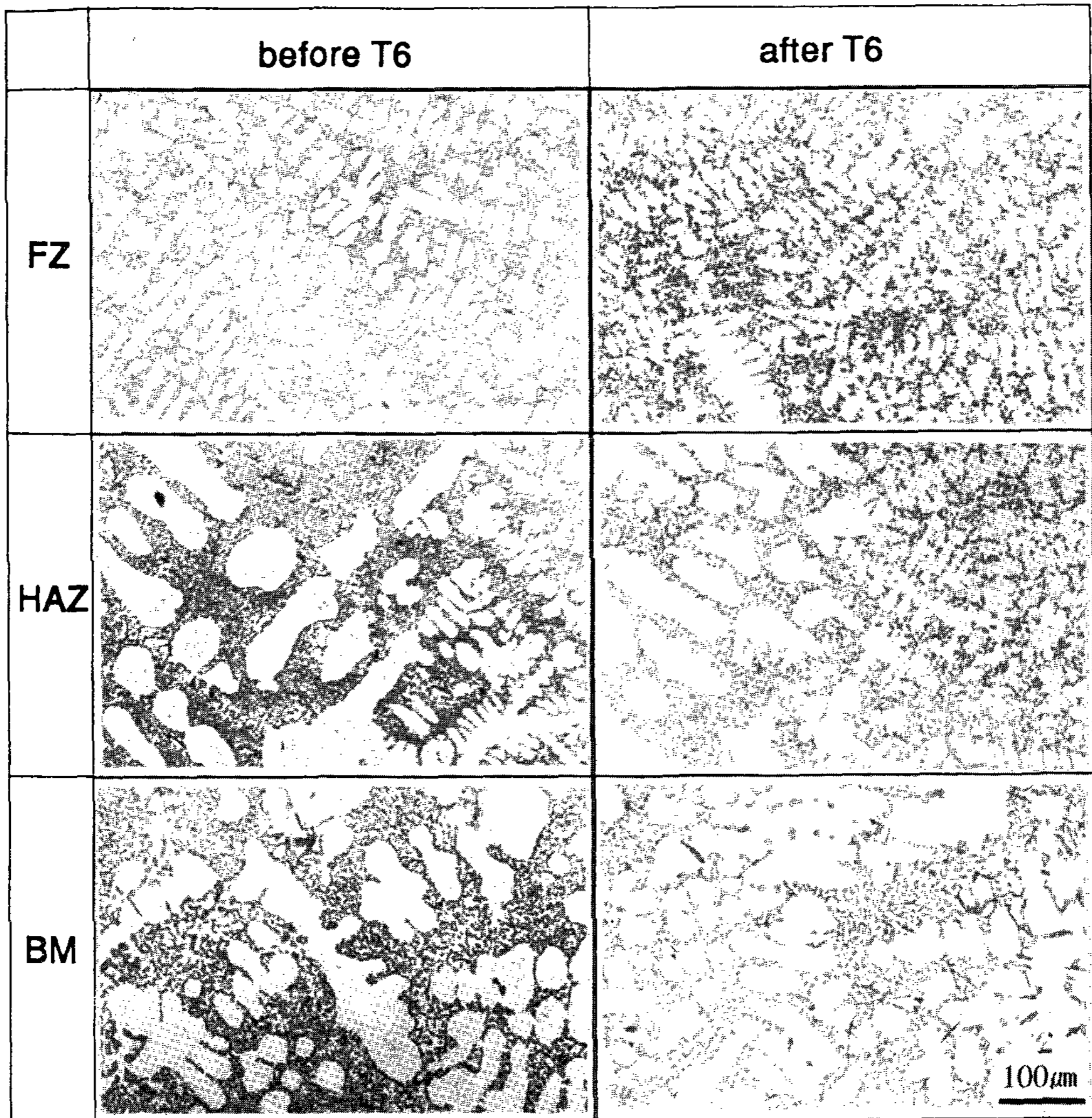


Photo 1. Microstructures of the welded specimens.

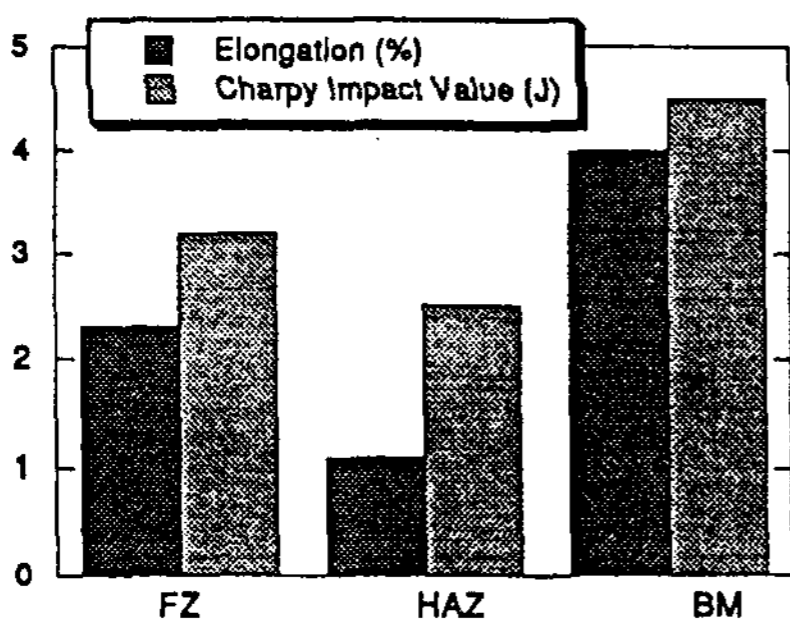


Fig. 3. Elongation and Charpy impact value of welded specimens after T6 treatment.

충격치를 보여주고 있다. 용융부의 연신율은 2.3%로서 모재의 연신율 4%보다 저하되었으며 열영향부의 연신율은 1.1%로서 가장 취약함을 보이고 있다.

Fig. 4는 용접재의 T6처리 전후의 부위별로 경도분포를 나타낸 것이다. T6처리 전의 경도는 용융부, 열영향부 및 모재부가 각각 61Hv, 62Hv, 65Hv 정도를 나타내었고, T6처리를 하면 Mg₂Si 등의 시효경화 석출물이 석출되므로[5] 각 부위 모두 110Hv 이상으로 증가하였는데 각 부위별로 큰 차이는 없었다.

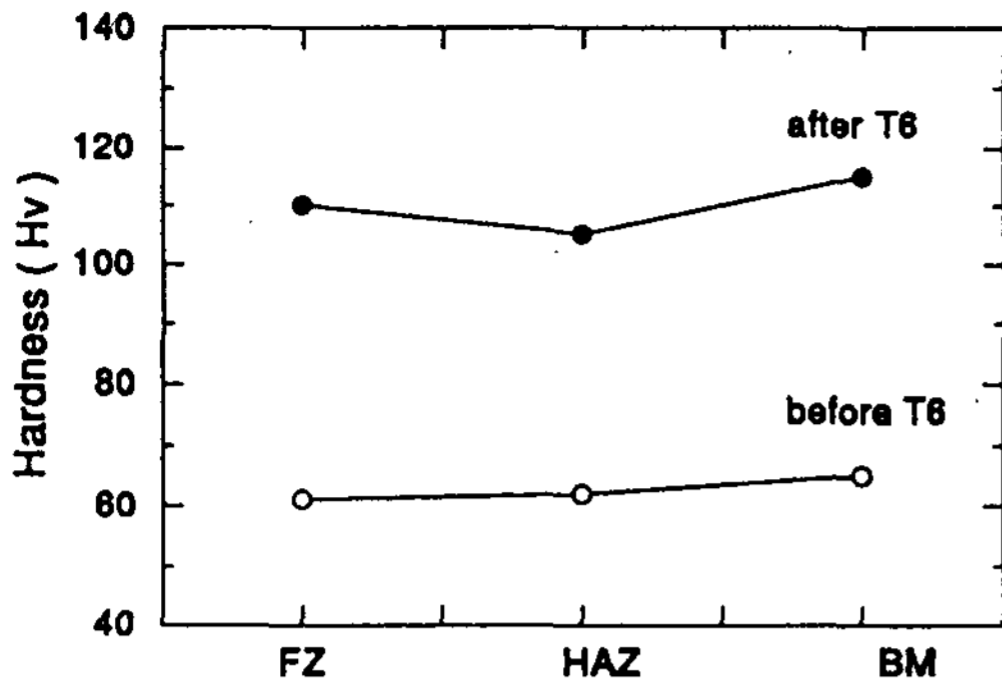


Fig. 4. Variation of hardness of welded specimens with T6 treatment.

3.2 저주기 피로특성

주조재, 주조후 T6처리재, 용접재 및 용접후 T6처리한 시험편에 대하여 저주기 피로시험을 실시하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 주조재와 용접재의 T6처리 후 반복경화거동을 보여주는 것으로

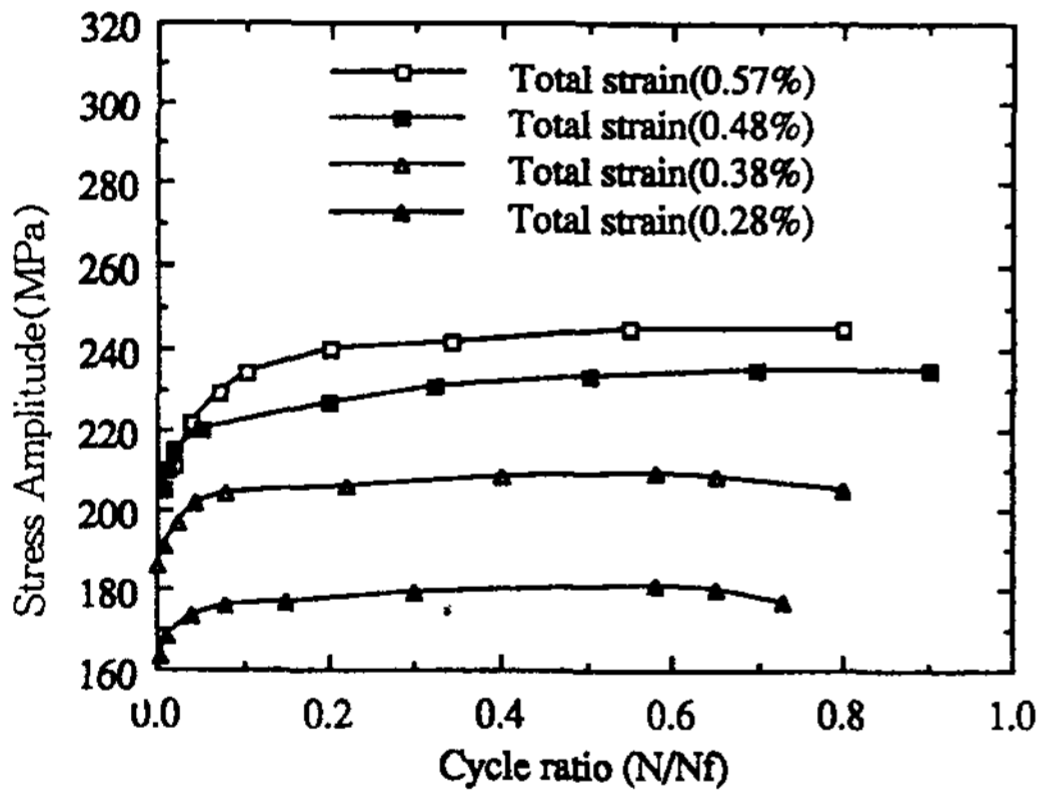


Fig. 5. Cyclic hardening behavior of the base metal after T6 treatment.

반복회수가 증가함에 따라 시험편 모두 경화현상이 일어나고 있다. 이런 양상은 T6처리 전의 시험편에서도 유사하였다. 4개 조건으로 제작된 시험편은 N/N_f 가 0.05까지는 급격한 경화가 일어나고 그 이후부터는 완만하게 상승한다. Total strain이 큰 0.48%, 0.57%에서는 경화가 지속되면서 응력의 감소없이 파괴가 일어나는 반면 0.28%, 0.38%의 낮은 Strain에서는 응력이 감소되면서 파괴가 일어난다.

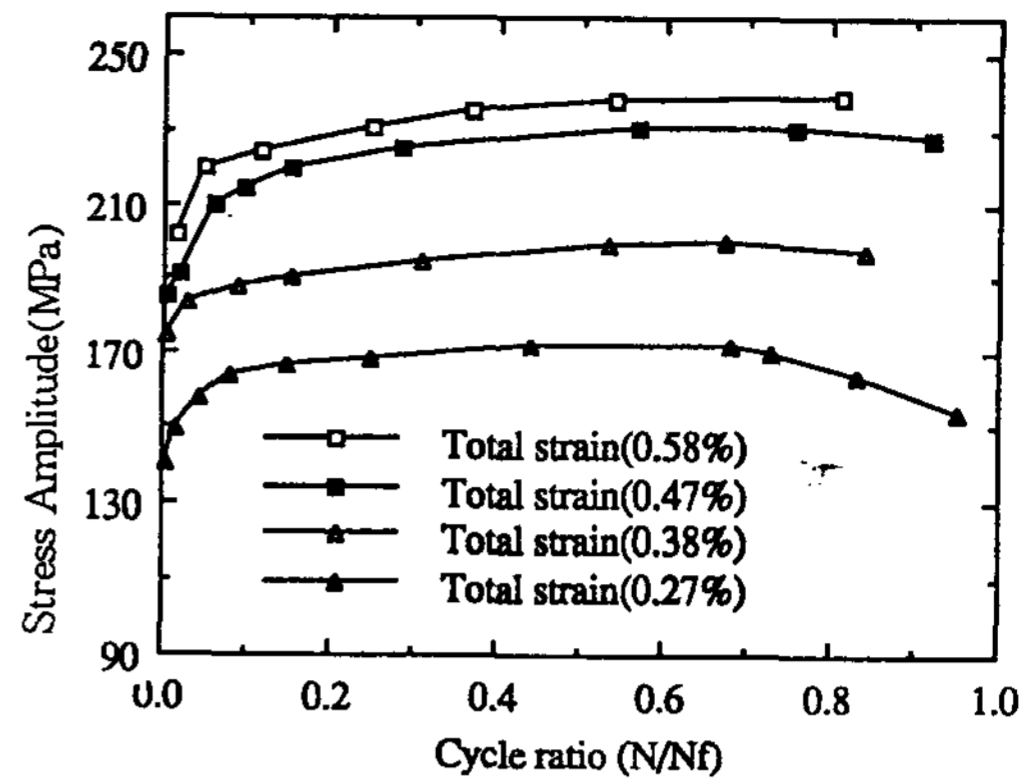


Fig. 6. Cyclic hardening behavior of the welded specimen after T6 treatment.

또한 T6처리한 모재의 반복응력-변형곡선은 Fig. 7과 같이 정적인 응력-변형곡선과 비교하면 현저한 경화가 일어나고 있음을 보여주고 있고 Strain이 커질수록 경화 정도가 커지는 것을 알 수가 있다. 이와 같이 Strain Amplitude가 클수록 경화 정도가 커지는 것은 Strain Amplitude 증가에 따라 작용하는 슬립계가 많아지므로 이들의 상호작용이 커지고 이에 따라 Strain Cycling에 대한 저항성이 커지는 것으로 판단된다.

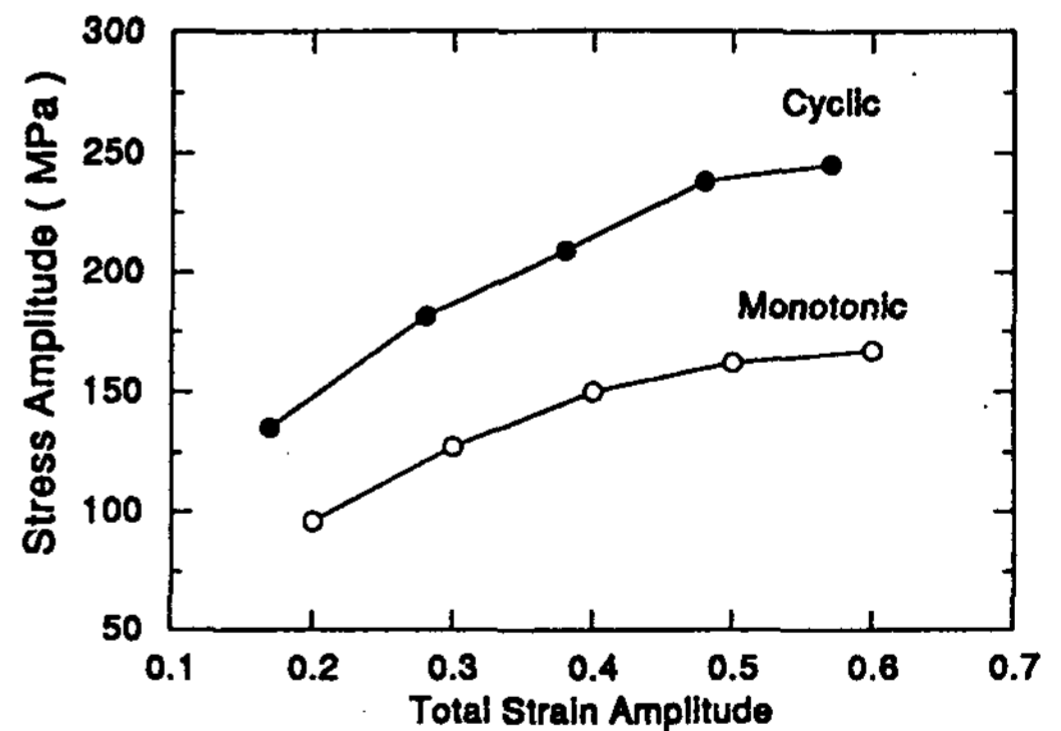


Fig. 7. Monotonic and cyclic stress-strain curve of the base metal after T6 treatment.

Fig. 8은 4종류 시험편의 Total Strain을 0.28%로 일정하게 하였을 때 N/N_f 에 대한 Stress의 변화를 나타낸 것이다. T6처리한 용접재가 T6처리한 주조재에 비하여 Stress Amplitude값은 다소 낮지만, 응력변화 거동은 유사하였다.

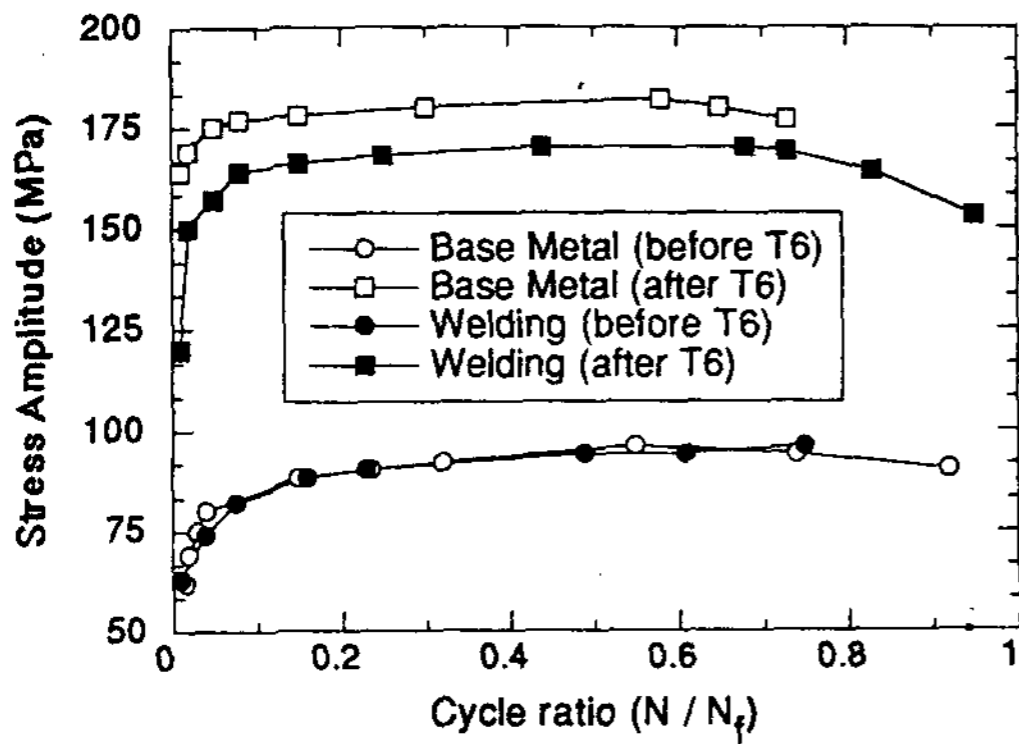


Fig. 8. Cyclic hardening behavior of the specimen (total strain 0.28%).

Fig. 9는 4종류 시험편의 응력-변형곡선을 나타낸 것으로 주조재와 용접재의 응력-변형곡선이 매우 유사하였으며 이들을 T6처리한 후에 시험한 결과도 아주 유사하였다. 따라서 극히 일부분에 발생한 주조결함은 보수용접하여도 피로수명에 미치는 영향은 크지 않기 때문에 보수용접제품의 사용에 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 또한 Total Strain이 0.38%에서 T6처리하지 않은 시험편의 Stress는 105.5MPa 정도로 낮으나 용접후 T6처리한 시험편의 Stress는 199.5MPa로 크게 증가되는데 보수용접후에는 필히 T6처리가 필요할 것으로 생각된다.

Photo 2는 Total Strain이 0.38%인 저주기

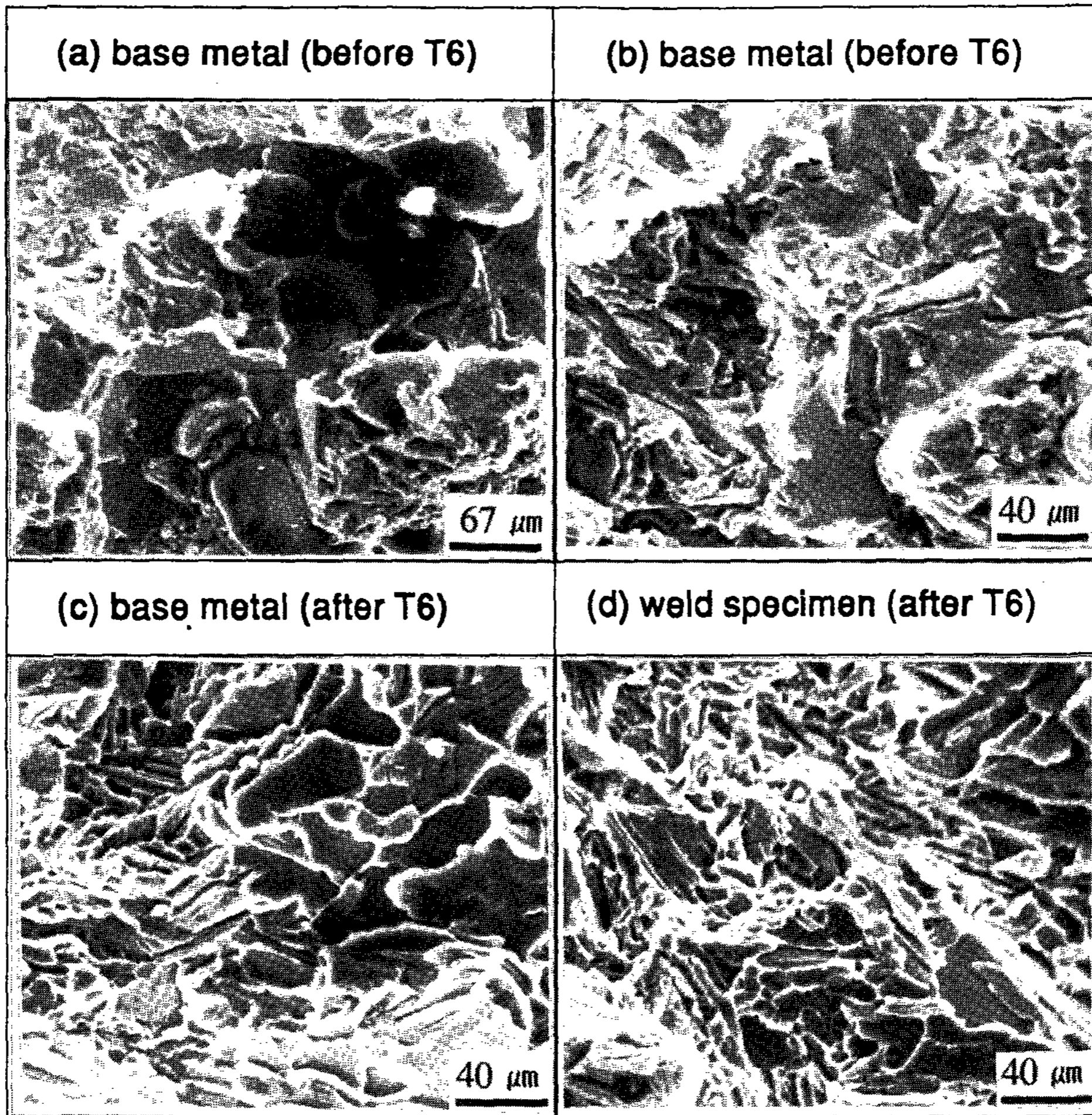


Photo 2. SEM fractographs of the low cycle fatigue specimens.

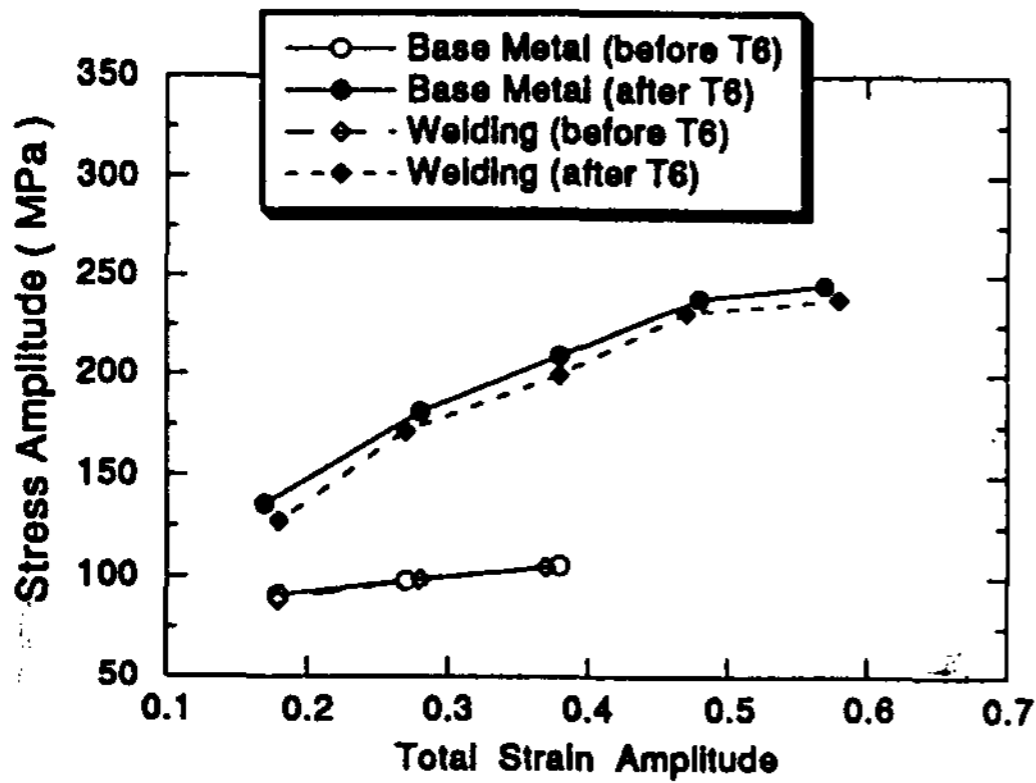


Fig. 9. Cyclic stress-total strain curve of base metal and welded specimens.

피로 시편의 파단면을 관찰한 것이다. (a)는 T6 처리하지 않은 모재부를 관찰한 것으로 기지내에 기공이 존재하며 이런 부분들에서 균열이 생성될 수 있는데, 이런 기공들은 모재부에서는 관찰되지만 용접부에서는 발견할 수 없었다. (b), (c), (d)는 파단면을 보여주는 사진으로 T6처리하지 않은 모재부는 조대하고 불균일한 벽개파면을 나타내나 T6처리를 하면 모재부나 용접부가 벽개파면을 보이거나 미세하고 균일한 양상을 나타내었다.

3.3 회전굽힘피로특성

Fig. 10은 용접재와 모재를 T6처리하여 회전 굽힘피로시험한 결과로 160MPa 응력하에서 용접재의 피로파단 회전수는 1.2×10^4 회로 모재의

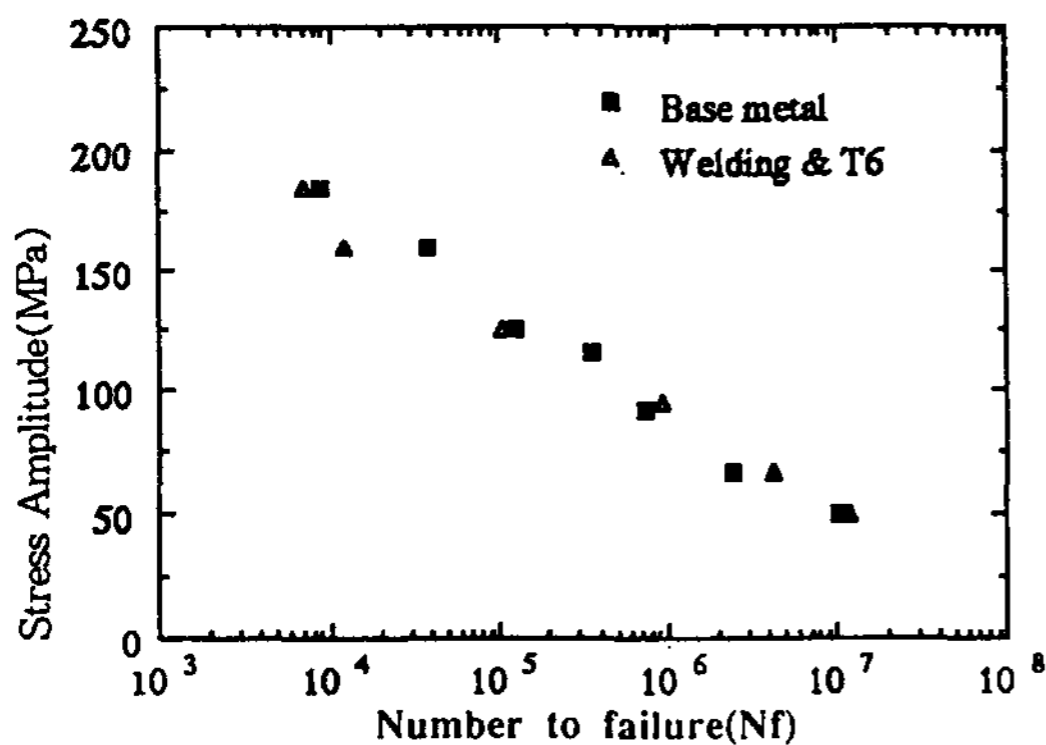


Fig. 10. S-N curve of base metal and welded specimens on rotating bending fatigue test.

피로파단회전수 4.1×10^5 회보다 떨어지지만 185MPa 응력하에서 용접재의 피로파단회전수는 7.1×10^3 회로 모재 6.5×10^3 회와 매우 유사하다. 또한 125MPa 응력하에서 용접재 및 모재의 피로파단회전수는 각각 1.24×10^5 회, 1.59×10^6 회로 유사한 것을 알 수 있는데 전반적으로 용접재와 모재와의 회전굽힘피로시험 결과 피로특성이 매우 유사하여 주물결합부위를 제거한 후 보수용접하여도 제품의 내구수명에는 큰 영향이 없으리라 판단된다.

3.4 파괴인성특성

Fig. 11은 용접부위에 따른 파괴인성을 측정 한 결과이다. 용융부위의 파괴인성치(K_{Ic})는 $108 \text{ kg.f/mm}^{3/2}$ 로서 모재의 파괴인성치 $77 \text{ kg.f/mm}^{3/2}$ 보다 높으며 열영향부위의 파괴인성치는 $62 \text{ kg.f/mm}^{3/2}$ 정도로 가장 낮은 값을 나타내었다. 용융부의 파괴인성치가 가장 높은 값을 나타내는 것은 Photo. 1에서 알 수 있듯이 용접후 급냉으로 수지상정 간격과 공정 Si의 크기가 가장 미세하기 때문인 것으로 판단된다.

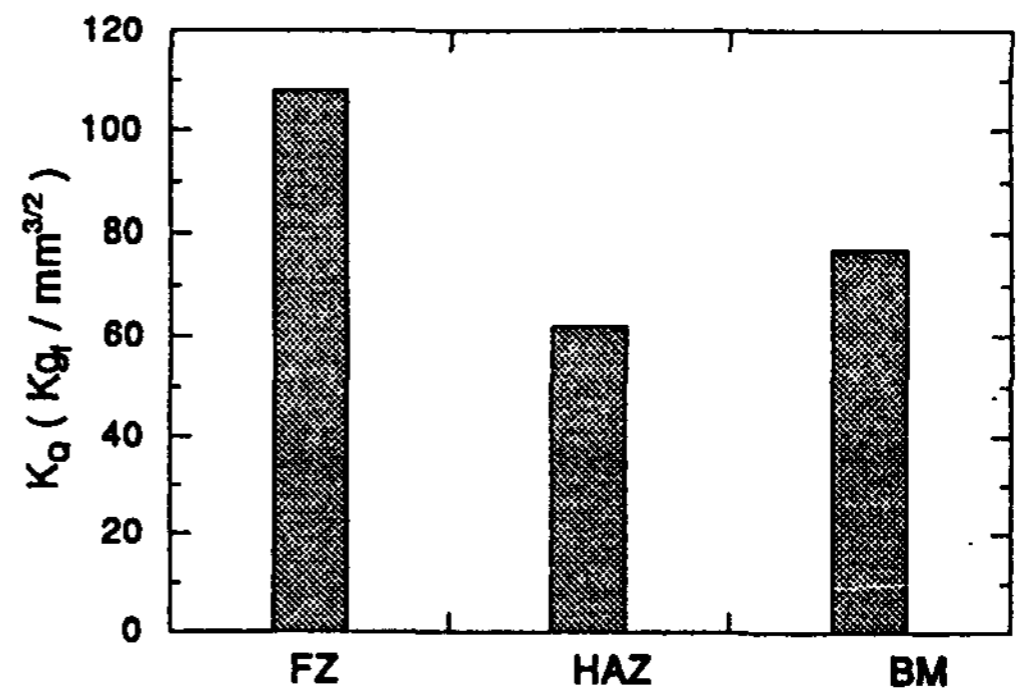


Fig. 11. Fracture toughness of base metal, heat affected zone and fusion zone(after T6 treatment).

4. 결론

본 연구에서는 Al-10%Si-0.3%Mg 합금 주조재를 선택하여 보수용접에 따른 내구특성을 비교 평가하여 보수용접의 적용 가능성을 검토하였는데 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용융부는 용접후 급랭이 되어 모재보다 수지상정 간격이 미세해져서 모재부에 비하여 강도

와 파괴인성치가 높았다. 그러나 열영향부는 모재에 비하여 강도와 파괴인성치가 낮았다.

2) 저주기피로시험 결과 N/N_f 가 0.05까지 급격히 경화된 후 완만히 상승하여 파단되는데 주조재와 용접재 모두 이러한 파괴양상을 나타내었다. 또한 응력-변형곡선에서 용접재의 stress amplitude는 주조재의 stress amplitude보다 다소 낮지만 곡선의 변화거동은 유사하였다.

3) 회전굽힘 피로특성을 비교한 결과 모재의 특성이 용접재의 특성에 비하여 다소 우수하나 거의 유사하였다. 따라서 주물결함부위를 제거한 후 보수용접하여 적절한 열처리를 하면 제품의 내구특성에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 김경현 : 연구보고서 BMB014-1950.C (1994) 56
- [2] 김경현, 이정무, 정신검 : 한국주조공학회지, 13 (1993) 94
- [3] E. A. Starke, G. Lutjering : Fatigue and Microstructure ASM, (1978) 205
- [4] 鎌土重晴, 徳富一郎 : 輕金屬, 37 (1987) 261
- [5] L. F. Mondolfo : Aluminium Alloys - Structures & Properties, Butterworth (1979) 759