

E.B 용접된 18% Ni 마르에이징강 박판의 인장이음강도에 관한 연구

정병호* · 김무길* · 김원녕**

A Study of Tensile Strength in 18% Ni Maraging Steel Sheet Welded with Electron Beam

B. H. Jung · M. K. Kim · W. N. Kim

Key words : Tensile strength of welded joint(용접이음부의 인장강도), Electron beam(전자비입), Welding heat input(용접입열), Joint efficiency(이음효율), Aging(시효), Repeated solution heat treatment(반복용체화처리)

Abstract

The strength level of welded joint in room temperature and elevated temperature up to 600 °C was investigated in 250 and 300 grade 18% Ni maraging steel sheet welded with electron beam.

The results obtained in this study are as follows ;

1. Optimum welding heat input was 600J/cm in 1.0mm thickness and the room temperature tensile strength, joint efficiency of welded joint treated with optimum aging condition were found to be about 166kg/mm², 95% in 250 grade, 189kg/mm², 92% in 300 grade maraging steel sheet, respectively.
2. Tensile strength of welded joint in room temperature increased slightly by aging after repeated solution heat treatment, but the fracture mode showed a shear.
3. Joint efficiency at a temprature between 540°C and 600°C found to be about 72% to 55%, but the joint efficiency exceeded about 90% below 300 °C.
4. The fracture occurred in most weld metal, and the fracture surface showed a shallow dimple.

* 부경대학교 금속공학과 (원고접수일 : 96년 10월)

** 한국해양대학교 기관공학과

1. 서 론

항공·우주, 해양, 원자력 분야의 첨단적 기술 개발에는 높은 비강도를 가진 재료가 요구되며, 여기에는 마르에이징강(maraging steel)과 같은 높은 비강도 재료의 고강도화와 용접 등의 가공기술 확립이 요망되고 있다. 고강도 구조재료의 일종인 마르에이징강은 열간이나 냉간 소성가공이 용이한데, 가공후 austenite상이 소입되면 martensite 상으로 된후 시효경화에 의해 강도가 높아지게 된다. 또 시효경화 원소인 Ti와 Mo량을 변화시키면 150~350MPa의 넓은 강도수준을 가진 강종이 얻어 질 수 있다.¹⁾

마르에이징강은 고체 rocket의 외각, 항공기의 착륙장치, 심해 잠수정, 원심 분리기의 분리용기, 각종 금형·다이, 고압용기 등에 사용되고 있으며, 강인성뿐만 아니라 가공성도 우수하여 금후 강인성 소재로서 이의 용도가 확대될 것으로 생각된다. 그러나 고강도 구조재료로서의 용접성은 일반적으로 모재의 강도 상승에 따라 용접 이음부의 이음효율이 저하되는 경향을 가진다. 즉 모재의 강도보다 용접금속의 강도가 낮게 되는데, 이의 개선책으로는 용접금속의 폭을 좁게 해서 고강도의 모재를 통하여 용접금속을 소성구속 시켜 이음효율의 저하를 방지하는 것이 생각될 수 있다.²⁻⁵⁾ 용접금속의 폭을 좁게 하는데는 고에너지 밀도의 열원을 이용한 용접이 유효한데, 마르에이징강에 기존의 TIG, 또는 MIG 용접을 실시할 경우, 열영향부의 결정립 조대화 구역에서 인성이 열화되고 또 $\alpha+\gamma$ 의 2상 영역에 가열된 영역 및 용접금속에서 강도의 저하가 생긴다고 보고되고 있어, 이러한 재질 열화를 억제키 위해 고강도 재료에는 고밀도 저입열의 전자비임용접이 채용되는 추세에 있다.²⁻³⁾ 따라서 본 연구에서는 마르에이징강중 가장 용도가 많은 250 및 300 grade의 18% Ni 마르에이징강

박판에 전자비임 용접을 실시, 상온 이음강도 수준에 미치는 용접입열 및 열처리의 영향을 광범위하게 조사·연구하였으며, 아울러 승온시의 고온 이음강도 수준에 대한 기초적인 연구도 실시하였다.

2. 실험방법

2.1 시료

입수된 약 4mm두께의 판재 시료는 VIM 및 VAR 제조 공정을 거친 것이며, 용접을 위해 약 1.0mm의 박판으로 냉간에서 압연가공 하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 시료의 주요 화학조성을 나타낸다.

2.2 용접조건 및 인장시험

냉간 가공된 판재는 맞대기 용접을 위해 200×50mm의 크기로 절단후 초음파 세척하고, 맞대는 간격은 0.1mm 이하가 되도록 하였다. 또 판재의 가장자리는 용접시의 변형을 억제하기 위해 TIG 용접기로 가접을 실시하였다. 가접후 저진압형 전자비임용접기(60kV, 100mA)를 이용, 판재의 압연 방향으로 용접을 실시하였는데, 이때 진공도는 약 7.5×10^{-3} torr로 유지하였다. 용접은 판재의 이면까지 용입이 될 수 있도록 예비 용접을 실시, 적합한 용접조건을 범위를 구하였다. 이때 beam의 focus condition A_b 는 용접금속의 폭을 결정하는 중요한 인자인데, $A_b=1$ 이 되는 just focus 조건을 조절하기 어려워 본 용접에서는 $A_b=1$ 보다 약간 큰 상태로 용접시 일정하게 유지하였다. 따라서 본 실험의 용접조건은 가속전압 50kV, 용접속도 1cm/sec로 일정하게 한 후, beam의 전류만 조정, 판재의 이면까지 용입이 가능하고 용략되지 않는 입열 범위인 600J/cm에서 900J/cm까지 약 100 J/cm의 간격으로 용접입열을 변화시켰다. 인장 시험편은 용접후 용접선에 직각방향에서 용접금속

Table. 1 Chemical composition of alloy used

18% Ni Maraging Steel	Chemical Composition(wt.%)					
	C	Ni	Co	Mo	Ti	Fe
250 Grade	0.01	18.65	8.16	5.07	0.39	Balance
300 Grade	0.02	18.04	9.12	4.73	0.51	"

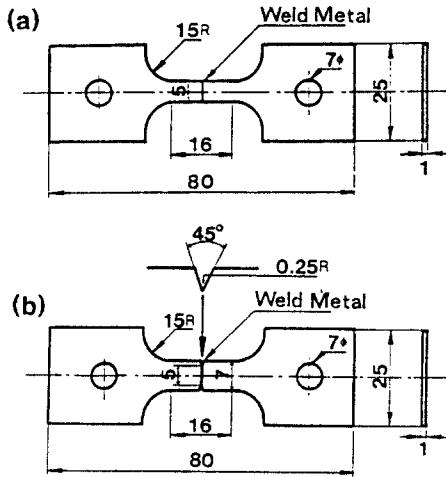


Fig. 1 Dimension and shape of tensile specimen
(a ; smooth specimen, b ; notched specimen)

이 시편 평행부의 중앙에 오도록 시편 금형을 이용하여 채취하였으며, 용접시 표면과 이면에 생긴 소량의 덧살은 연삭 제거하였다. Fig. 1은 채취된 인장시편의 치수 및 형상을 나타내며, 용접금속의 인성평가를 위한 notch 시편의 notch는 CNC profile grinder를 이용, 1mm V notch를 용접금속의 양쪽 중앙에 정밀 가공하였다.

2.3 열처리 및 인장시험

용접후 가공된 시편은 우선 마르에이징강 시효 열처리로 권장되고 있는 시효조건⁶⁾중 480℃에서 4시간 시효처리만 실시하는 경우와, 820℃에서 1시간 용체화처리하고 480℃에서 4시간 시효처리하는 2가지의 열처리방법을 이용, 용접입열 변화에 따른 인장강도를 측정하였으며, 이때 이음효율이 가장 크게 되는 최적 입열 조건을 구하였다. 또 본 연구에서는 이러한 최적 입열 조건에서도 가장 적합한 용체화 및 시효처리 조건을 알기 위해 용체화 온도를 820℃, 900℃, 1000℃, 1100℃, 1200℃로 각각 변화시키고 1시간 유지후 수냉시켜 인장강도를 측정, 적합한 용체화 온도를 구하였으며, 이후 380℃ 3hr, 480℃ 4hr, 480℃ 24hr, 550℃ 3hr, 600℃ 3hr의 조건으로 각각 시효처리후 인장강도를 측정하고 최적의 시효조건을 구하였다. 또

한 반복 용체화 처리를 통한 시효처리도 이음강도의 개선에 유용한 것으로 보고⁷⁾되고 있어, 1100℃와 1200℃에서 각각 1시간 고온 용체화 처리후 이보다 더 낮은 1000℃ 이하의 900℃와 820℃에서 각각 1시간 반복 용체화 시키고 최적 시효조건에서 시효한 시편의 이음강도와 이음효율을 비교·조사하였다. 모든 열처리는 소형 진공로에서 실시하였고, 상온에서의 인장강도 측정시 cross head speed는 1mm/min으로 일정하게 하였다.

한편 고온에서의 이음강도는 로가 부착된 MTS type의 인장시험기를 사용, 상온 이음강도 조사시 규명된 최적 입열조건과 시효조건에서 처리된 시편들에서만 조사되었는데, 200~600℃의 시험온도 범위와 스트레인 속도 변화에 따른 이음강도와 이음효율을 주로 조사하였다. 또 각 시험조건에서 인장시험후 파단된 부위의 확인과 파단면 조직은 광학현미경과 SEM을 이용하여 관찰하였으며, 기본적으로 시효경화된 용접부의 광학 현미경조직과 TEM 조직도 아울러 조사하였다. 특히 용접부의 TEM 시편은 thin film을 제작하고, jet polishing은 20% perchloric acid(HCl₄)+80% methanol 혼합액을 사용하였다. 그 외 용접부의 경도값은 본 연구에서 나타내지는 않았으나 각각의 열처리 시 미소 경도값을 측정, 시효여부를 확인하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 조직

Photo. 1의 (a)~(d)는 820℃에서 1시간 용체화 처리하고 480에서 4시간 시효처리를 실시한 경우, 용접부 횡단면의 광학 현미경 및 TEM 사진이다. Photo. 1의 (a)에서 알 수 있는 바와같이 용접금속은 시효경화된 martensite의 수지상정과 austenite가 잔류된 수지상정 경계로 구성된 혼합조직이며, 전자비입 용접의 저입열과 급속응고로 인해 수지상정들이 크게 성장되어 있지 않음을 알 수 있다. 또 열영향부나 모재 조직도 열영향에 의한 결정립 크기의 차이는 있으나, 시효경화된 martensite 상으로 경도값 측정에서 확인되었다. photo. 1의 (b)~(d)는 용접부의 TEM 조직을 각각 나타내

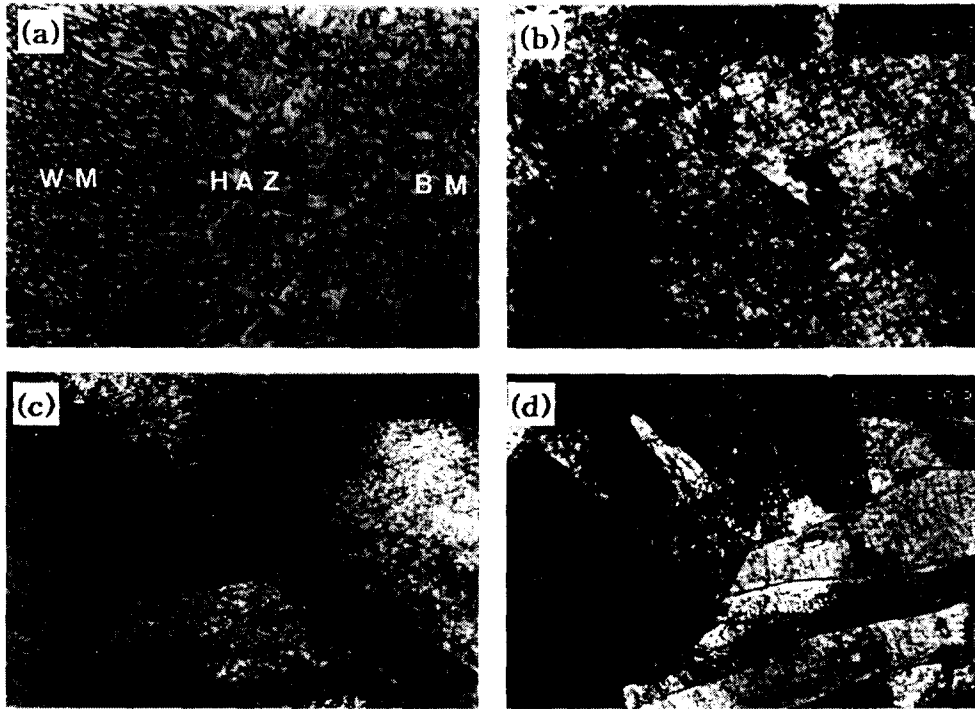


Photo. 1 Optical and TEM micrographs of transverse cross section in weldment
(a ; weldment, b ; weld metal c ; HAZ, d ; base metal)

는데, 시효경화되어 전위밀도가 큰 lath martensite들이 잘 나타나 있다. 또 시효시 석출된 미세 석출물은 고전위 밀도의 lath 경계를 따라서나 기지의 양쪽에 미세하게 관찰되고 있는데, 나타내지는 않았으나 EDX 관찰 및 이들의 회절 pattern을 분석해 본 결과 마르에이징강의 강도와 인성을 대표하는 Ni_3Mo , Ni_3Ti , $FeMo$ 등의 금속간화합물로 판단되었다.

3.2 상온 이음강도

Fig. 2는 용접입열에 따른 용접 이음부의 최대 인장강도(ultimate tensile strength, UTS)값을 전술한 시효처리 조건(480℃에서 4시간 시효처리만 실시하는 경우와 820℃에서 1시간 용체화 처리하고 480℃에서 4시간 시효처리를 실시하는 2가지 방법)에 따라 각각 비교한 것으로, grade에 관계없이 입열의 증가에 따라 UTS값은 약간 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 용접후 시효처리만 실시한 경우에 비해 용체화처리하고 시효처리한 경

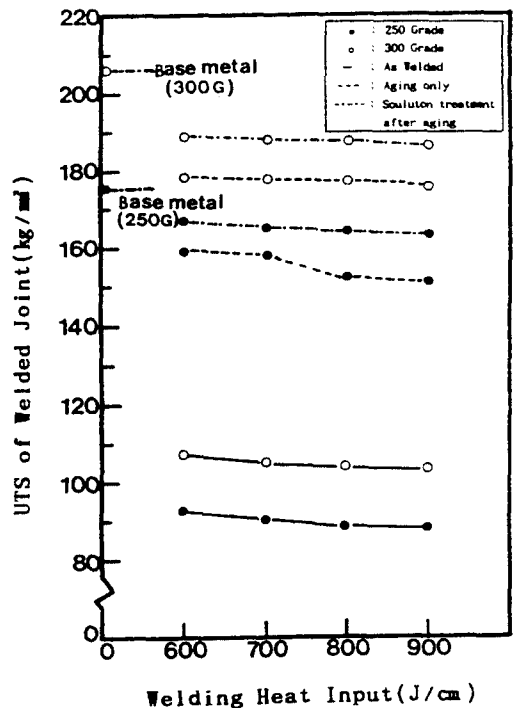


Fig. 2 Relation between welding heat input and UTS of welded joint

우가 더 높은 UTS값을 나타내고 있다.

입열 증가에 따라 UTS값이 약간 감소하는 것은 입열의 증가로 용접금속의 폭이 증가되어 지강도 용접금속의 변형을 고강도의 열영향부나 모재가 구속하는 정도가 약해졌기 때문으로 생각된다.^{3,9)} 또 용접후 시효처리만 실시한 경우에 비해 용체화 처리하고 시효 시킨 경우의 이음강도가 더 큰 것은, 시효처리만 실시한 경우, 열영향부에서 떨어진 모재부에 용접시 용접열에 의해 일부 시효된 부분이 그후의 시효처리에 의해 과시효에 의한 연화가 일어나 강도의 저하가 생기기 때문으로 생각되며, 반면 용체화 처리후 시효처리하면 이러한 과시효 부분이 없어지고 아울러 잔류응력의 소멸 및 수지상정의 일부 소멸로 인해 이음강도의 상승이 일어나기 때문으로 생각된다. 따라서 용접입열은 용접금속의 폭이 가장 작게 나타난 600J/cm가 가장 최적으로 생각되었고, 용접후 용체화 처리하고 시효 처리 하는 경우가 시효처리만 실시하는 경우보다 이음강도면에서 더 우수하다고 판단되었으며, 이때 인장 이음강도는 250grade에서 약 166kg/mm², 300grade에서 약 189kg/mm²으로 나타났다.

이에 따라 최적 입열 600J/cm로 용접된 평활시편에서 더 적합한 용체화 온도를 구하기 위해 용체화 온도변화에 따라 UTS값과 노치 인장강도(notch tensile strength, NTS)값을 나타낸 것이

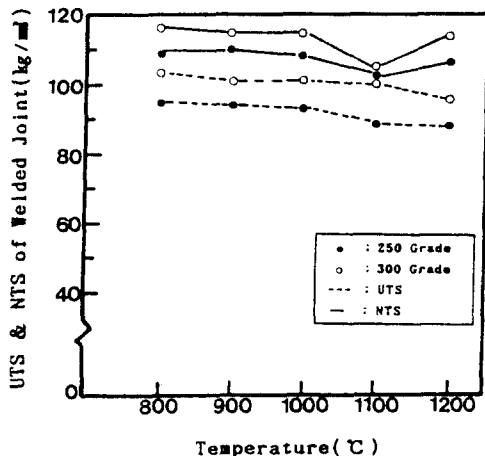


Fig. 3 Relation between UTS, NTS of welded joint and various solution heat treatment temperature

Fig. 3이다. Fig. 3에서와 같이 용체화 온도가 1000°C 이하일 때는 UTS와 NTS값에 대한 온도의 영향이 적고, 1000°C 이상일 때는 이들 값이 낮아지고 있어, 용체화 처리 온도는 3.2절에서 언급된 820°C가 적합함이 확인되었다. 한편 이러한 용체화 처리 후에도 가장 중요한 최적 시효조건을 구해야 하므로, Fig. 4에 시효온도와 시간을 변화시켰을 때의 UTS와 NTS값을 각각 나타내었다. Fig. 4에서와 같이 시효온도는 480°C가 가장 우수함을 알 수 있는데, 이보다 더 낮은 시효온도에서는 Mo rich zone 등의 불안정 석출물이 형성되므로 강도가 낮게 되고¹⁰⁾, 이보다 더 높은 시효온도, 즉 과시효 온도에서는 최적 시효온도에서 형성된 Ni₃Mo, Ni₃Ti, FeMo 등의 안정 석출물들이 조대한 안정상인 Fe₂Mo계의 석출물로 재고용되고, 이와 더불어 강도가 적은 역변태 austenite상의 석출이 일어나 강도의 저하가 일어난다고 생각된다.^{11~12)}

따라서 시효온도는 480°C의 경우가 가장 양호함이 재확인 되고 있으나, 480°C의 시효온도에서도 Fig. 4에서와 같이 4시간 시효 시킨 경우보다 24시

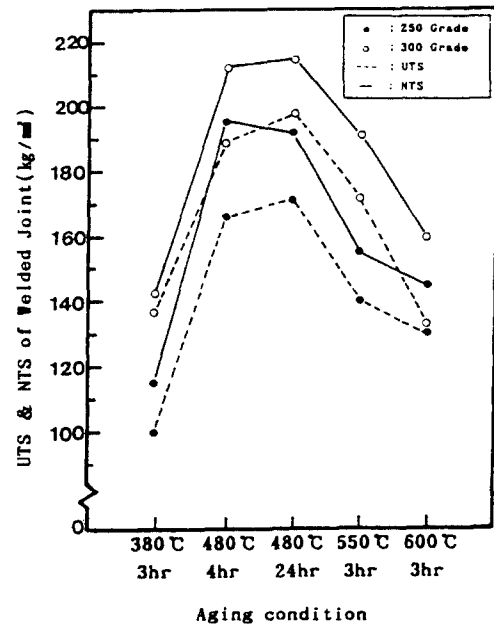


Fig. 4 Relation between aging condition and UTS, NTS of welded joint

간 시효 시킨 경우의 UTS값이 약간 높게 나타나고 있다. 그러나 장시간 시효 시킨 경우는 인장시험시 파괴양식이 cup & cone 파괴가 아닌 전단파괴를 나타내었는데, 이것은 인장특성이나 열처리 효율면에서 매우 불리하므로 시효시간은 4시간 정도가 적합하다고 판단된다. 또 Fig. 4에 나타난 NTS값을 이용, 노치 민감성비(notch sensitivity ratio, $NSR = \frac{NTS}{UTS}$)를 구해 보면 시효조건에 관계없이 전부 1이상이 되므로 마르에이징강 전자비입 용접부의 용접금속은 인성이 양호함을 쉽게 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4의 시효조건에 따른 용접이음부의 이음효율(joint efficiency)을 나타낸 것으로 모재의 최대 인장강도값과 용접이음부의 최대 인장강도 값과의 비를 %로 나타낸 것이다. Fig. 5에서와 같이 820℃에서 1시간 용체화 처리하고 480℃에서 4시간 시효시킨 최적 시효조건에서 250 grade는 약 95%, 300 grade에서는 약 92%의 높은 이음효율을 나타내고 있다.

한편 마르에이징강 전자비입 용접부는 전술한 바와 같이 저강도의 용접금속을 고강도의 열영향부와 모재가 둘러싼 구성으로, 용접 이음강도는 용접금속의 소성변형을 모재가 구속하는 정도에 의해 의존되어 모재의 강도비, 인장시편의 치수 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려지고 있다.¹⁰⁾ 그러나 실제 용접 이음강도는 이러한 요인 외에 용접후의 열처리 조건도 매우 중요하다고 생각된다. 따라서

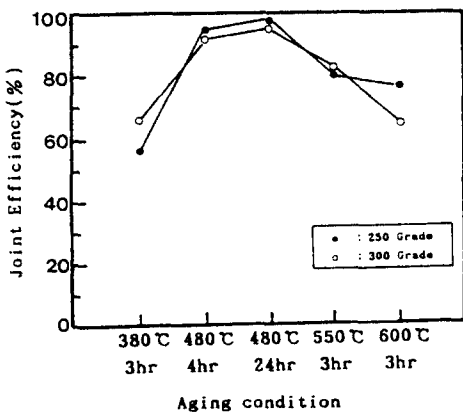


Fig. 5 Relation between aging condition and joint efficiency of welded joint

전술한 열처리 방법 이외에 이음강도를 증가시킬 수 있는 다른 방법을 제시한다면, 반복 용체화 처리후 시효처리 하는 방법이다. 즉 이 방법을 적용시키면 일반적인 시효처리에서 달성키 어려운 용접금속내의 성분원소 편석완화, 수지상정 소멸, 압연과 직각방향에 생긴 band조직 소멸, 잔류 석출물의 고용증대 등, 용접 이음부의 파괴 인성의 증대에 상당히 기여할 수 있다고 생각된다.¹¹⁾ 따라서 Fig. 6에는 전술한 최적 시효조건(A)의 경우를 포함, 1100℃나 1200℃에서 고온 용체화 시킨 후 1000℃보다 더 낮은 900℃와 820℃에서 각각 순차적으로 반복 용체화 시킨 (B), (C)의 경우에 있어서 UTS 및 NTS값을 비교하여 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 UTS값은 (C)의 경우보다 (B)의 경우가 약간 더 크게 나타나 있다. 즉 (B)에서와 같이 1100℃에서 고온 용체화처리후 반복 용체화처리한 경우가 (A)의 최적 시효조건인 경우보다 약 3~4kg/mm² 정도 UTS값이 더 크게 나타나 있다. 이것은 고온 용체화에 의해 조대화 되었던 γ립이 그후의 반복 용체화에 의해 재결정 효과로 세립(이 때 용접금속의 수지상정 소멸과 더불어 γ립은 약 30~35μm의 세립으로 재결정 미세화 되었음)으로 되어 UTS 값이 약간 증가된 것으로 판단되었다. 따라서 UTS 값이나 이음효율면에서 (B)의

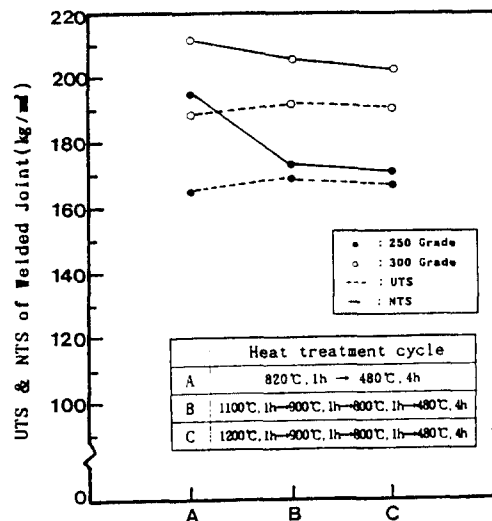


Fig. 6 Comparison of UTS and NTS level by the effect of repeated heat treatment cycle

경우가 (A)의 방법보다 더 우수하다고 할 수 있으나, 고온 용체화 및 반복 용체화처리에 따른 열처리 효율면에서는 (A)의 경우보다 더 불리하다고 생각된다. 그러나 이러한 방법의 열처리는 전술한 바와 같이 모재 및 용접이음부의 파괴인성면이나 조직학적인 면에서 더 많은 장점을 가지고 있다고 판단된다.

3.3 고온 이음강도

Fig. 7은 최적 용접입열 600J/cm로 용접되고 최적 시효조건에서 열처리된 평활 인장시편을 $1.0 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ 의 스트레인 속도로 고온 인장시험시 측정된 UTS값을 시험 온도와의 관계로 나타낸 것이다.

Fig. 7에서와 같이 온도의 상승에 따라 이음강도는 감소하는 경향을 나타내고 있고, grade에 관계없이 이 경향은 동일함을 알 수 있다. 고온이 됨에 따라 이음강도의 감소가 큰 것은 저강도의 용접금속에 작용되는 고강도의 열영향부와 모재부의 소

성구속 효과가 적어져 이음강도의 온도 의존성이 더 크게 작용되었기 때문으로 생각된다. 물론 고온이 되면 역변태($\alpha' \rightarrow \gamma$)나 석출물의 재고용¹³⁾등 조직학적인 변화도 따르겠지만 단시간의 고온 인장 시험에서는 이러한 효과가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. Fig. 8은 600J/cm의 용접입열과 최적 시효조건에서 처리된 강도가 큰 300grade의 마르에이징강에 대한 UTS 값을 시험온도와 스트레인 속도변화와의 관계로 나타낸 것이다. Fig. 8에서와 같이 500℃ 미만의 온도에서는 UTS 값에 큰 차이가 없으나 500℃ 이상의 온도에서는 스트레인 속도가 클수록 더 높은 UTS 값을 보이고 있는데, 이것은 고온에서는 결정입계가 전위의 장벽으로 작용치 못하고 결정입계의 전단이 더 중요한 변형기구로 되기 때문에, 고온과 높은 스트레인 속도에서 높은 강도수준을 유지하기 위해서는 스트레인 속도가 클수록, prior austenite 입자 크기가 클수록 UTS 값이 커진다는 마르에이징강 모재에 대한 G.saul의 연구보고¹⁴⁾와 거의 유사한 경향으로 볼

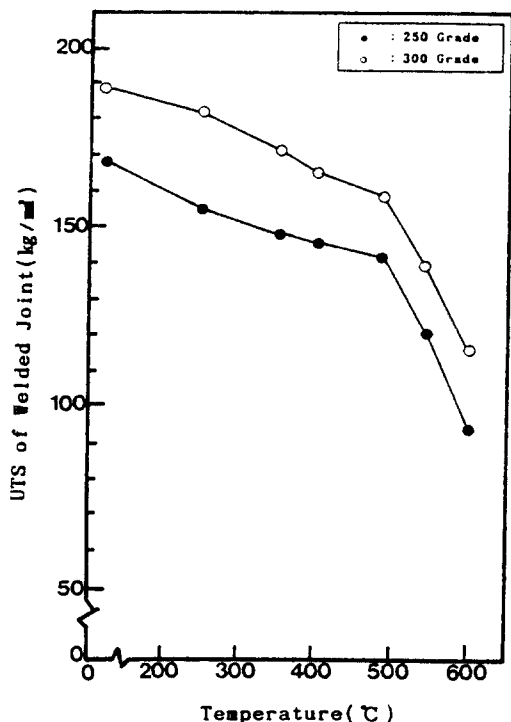


Fig. 7 Relation between UTS of welded joint and elevated temperature

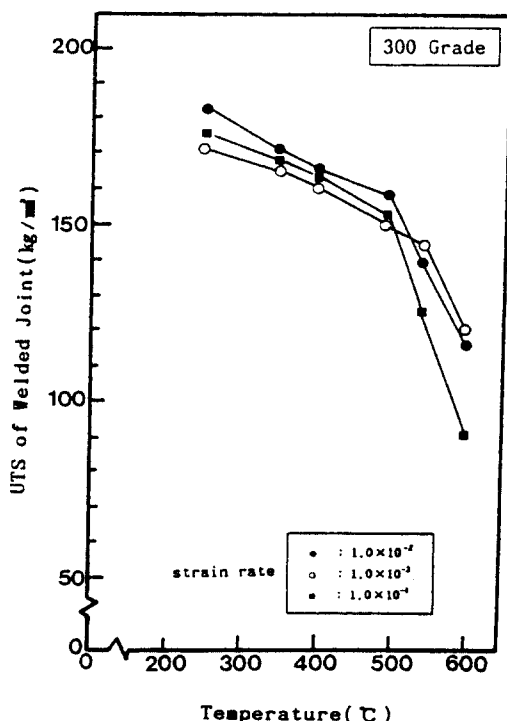


Fig. 8 Relation between UTS of welded joint and elevated temperature under strain rate condition

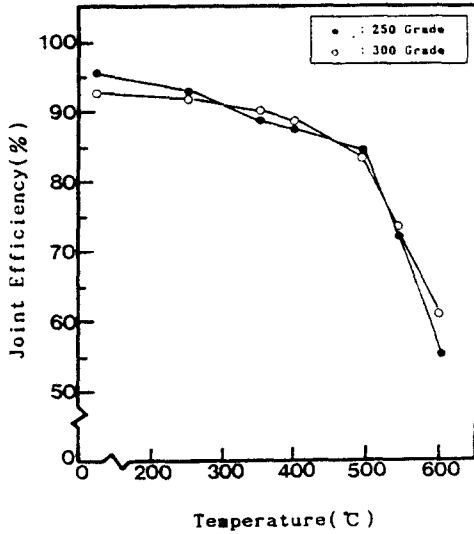


Fig. 9 Relation between joint efficiency of welded joint and elevated temperature

수 있다.

Fig. 9는 시험온도와 이음효율과의 관계를 나타낸 것으로 상온에서는 전자비임 용접의 특성에 의해 높은 이음효율을 보이고 있으나, 고온이 될수록 이음효율이 감소되는 일반적인 경향을 나타내고 있다. Fig. 9에서와 같이 마르에이징강의 과시효 온도인 약 540°C 부근에서 이음효율은 약 72%로 나타나 있으며, 600°C에서는 약 55~60%까지 이음효율이 감소되어 있다.

그러나 300°C 이하의 온도에서는 grade에 관계없이 약 90% 이상의 이음효율을 나타내고 있어, 상온에서 300°C 정도의 온도까지는 250 및 300 grade 마르에이징강의 이음강도 수준이 양호하게 유지됨을 알 수 있다.

3.4 파단부위 및 파단면 조직

Photo. 2는 광학 현미경과 SEM을 이용, 상온과 고온 인장시 나타난 파단 부위와 파단면의 조직을 대표적으로 나타낸 것이다. Photo. 2에서와 같이 상온과 고온 인장시 파단은 거의 용접금속의 수지상정 경계에서 발생되었고, 파단면의 조직도 전부 알고 미세한 dimple들이 주로 나타나 있다.

단 Photo. 2에 나타내지는 않았으나 고온용체화

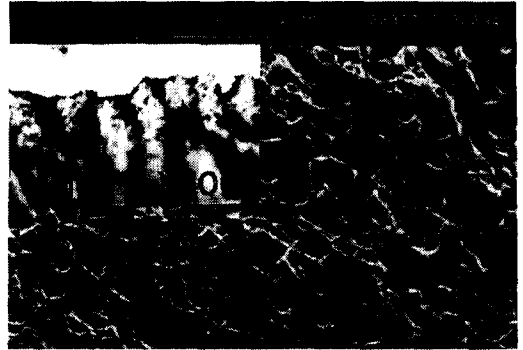


Photo. 2 Fracture surface by optical microscope and SEM fractography of butt welded joint in 18% Ni maraging steel sheet

처리후 반복 용체화 처리한 시편의 경우는 용접금속의 수지상정이 대부분 사라져 cup & cone 파괴가 아닌 전단파괴 양식이 나타나 수지상정 경계의 파단 모양은 나타나지 않았다. 그러나 파단면의 조직은 동일한 dimple 모양을 보여 주었고, 파단 부위는 용접금속과 열영향부를 가로지르는 인장방향과 약 45°로 나타났음이 확인되었다.

따라서 전자비임 용접된 18% Ni마르에이징강 박판에 시효처리후 상온이나 600°C까지의 고온 인장시험시 파괴거동은 용접부의 이음강도에 어떤 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되었다.

4. 결 론

전자비임 용접된 250 및 300 grade 18% Ni 마르에이징강 박판에서 용접후 열처리 변화에 따른 상온 인장이음강도 수준과, 600°C까지의 고온 인장이음강도 수준에 대한 조사 및 연구를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최적의 용접입열은 1.0mm 박판에서 600 J/cm이었으며, 용접후 최적 시효조건(820°C 1시간 용체화 처리후 480°C에서 4시간 시효 처리)에서 열처리시 상온 인장강도 및 이음효율은 250 grade에서 약 166kg/mm², 95%이었고, 300 grade에서 약 189kg/mm², 92%로 각각 나타났다.

2. 1100°C(1200°C)에서 1시간 고온 용체화후 900°C 및 820°C에서 각각 1시간 반복 용체화 처리하고 480°C에서 4시간 시효처리시 이음강도는 최

적 시효조건의 경우보다 약 3~4kg/mm² 증가되었다.

3. 최적 입열 및 시효처리 조건에서 용접된 용접부의 고온인장 시험시 이음효율은 540~600℃ 범위에서 약 72~55%로 크게 감소되었으나, 300℃ 이하의 온도에서는 약 90% 이상으로 나타났다.

4. 상온이나 고온에서 인장시험시 파단은 거의 용접금속에서 발생되었고 파단면은 알코 미세한 dimple들이 주로 나타났다.

참고문헌

- 1) 勝田充苗 ; 新素材, 12, pp. 24~27, (1995).
- 2) 勝田充苗, 河部義邦 外 2人 ; 鐵 と 鋼, 69, 8, pp. 990~997, (1983).
- 3) 勝田充苗, 河部義邦 外 2人 ; 鐵 と 鋼, 70, 14, pp. 1950~1957, (1984).
- 4) 勝田充苗, 河部義邦 外 2人 ; 鐵 と 鋼, 71, 2, pp. 274~280, (1985).
- 5) 佐勝邦彦, 豊田政男 ; 溶接學會誌, 40, pp. 885, (1971).
- 6) 鈴木和久, 下山仁一, 兵田年弘 ; 溶接學會誌, 36, 2, pp. 116, (1967).
- 7) 河部義邦 ; 日本金屬學會會報, 14, 10, pp. 767~777, (1975).
- 8) 栗林一彦, 堀内良 ; 鐵 と 鋼, S-1290, pp. 236, (1983).
- 9) 佐勝邦彦, 土井勉, 豊田政男 ; 溶接學會誌, 37, 11, pp. 1214~1226, (1968).
- 10) 坂木庸晃, 杉本公一, 官天大海 ; 鐵 と 鋼, 67, 14, pp. 2171~2181, (1981).
- 11) H. J. Rack, David Kalish ; Met. trans, 2, November, pp. 3011~3020, (1971).
- 12) C. A. Pampilo, H. W. Paxton ; Met. Trans, 3, pp. 2895, (1972).
- 13) S. Floreen, R. F. Decker ; Trans. ASM, 57, pp. 403~411, (1963).
- 14) G. saul, J. A. Roberson, A. M. Adair ; Met. Trans, 1, February, pp. 383~387, (1970).