

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
 第11卷第2號 1993年6月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol. 11. No. 2, Jun., 1993

18% Ni 마레이징강의 용접 잔류 응력에 미치는 열처리의 영향

배강열* · 나석주* · 김원훈**

Effect of Heat Treatments on Welding Residual Stresses of 18% Ni Maraging Steel

K. Y. Bae*, S. J. Na*, W. H. Kim**

Key Words : 18% Ni Maraging Steel(18% Ni 마레이징 강), GTA Fillet Weld(GTA 필렛 용접부), Welding Residual Stress(용접 잔류응력), Hole Drilling Method(홀드릴링 방법), Aging Heat Treatment(시효경화 열처리), Solution Heat Treatment(용체화 열처리)

Abstract

One of the most interesting and promising steel groups considered for the rocket motor case, aircraft and aerospace component is the maraging(martensitic plus aging) nickel steel, developed by International Nickel Company in 1960. This material attains a very high strength with good fracture toughness by simple heat treatments which do not involve a quenching. Full strength can be obtained by "maraging" at 480°C for 3 hours for the 18% Ni maraging steel.

The effect of heat treatments was considered on the residual stress field of 18% Ni maraging steel weldments. In experiments, various heat treatments such as stress relieve heat treatment, aging and solution heat treatment were carried out for the GTA weldments and the residual stresses were measured by using the hole drilling method.

Whereas the conventional pattern of residual stress shows the stresses to be maximum along the weld centerline with tensile stress extending into the heat affected zone, the pattern in maraging steels shows the centerline stress to be compressive.

* 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

** 정회원, 국방과학연구소

After welding, a series of aging, solution heat treatment and solution heat treatment plus aging treatment were carried out and the residual stresses were measured to reveal that these heat treatments almost completely remove the welding residual stresses.

1. 서론

용접 구조물에는 일반적으로 용접후 냉각하는 동안에 잔류 응력이 발생하게 되고, 특히 용접부 근방에서는 높은 인장 잔류 응력이 존재하게 되며, 재료에 따라서는 용접부의 인장 잔류응력이 재료의 항복 응력과 거의 같은 크기까지 도달하기도 한다. 따라서 용접부의 파괴 위험을 줄이기 위해서 용접부에 국부적 또는 전체적으로 발생된 응력을 제거, 감소 또는 재분포시키기 위한 처리가 요구되어지며, 위와 같은 현상을 규명하기 위한 많은 이론적, 실험적 연구가 진행되어 왔다⁴⁾.

마레이징(maraging)강은 1960년도에 개발된 재료로 매우 우수한 파괴인성값과 더불어 210kg/mm² 이상의 항복강도를 갖는 Fe-Ni 합금으로서 Ni 함량에 따라 12% Ni, 18% Ni, 20% Ni, 25% Ni 마레이징 강 등의 종류가 있으며 그중 18% Ni 마레이징 강도 등급에 따라 200, 250, 300으로 나누어진다.

본 연구에서는 로켓트 모터 케이스(rocket motor case)용 재료로 가장 널리 사용되고 있는 250 등급 마레이징 강에서 용접 전·후의 서로 다른 열처리 공정에 따라 용접 잔류응력 분포가 어떻게 변화하는가를 규명하기 위하여 홀 드릴링(hole drilling)방법을 적용하여 잔류응력의 크기, 분포를 측정하고 그 결과를 분석하였다.

2. 잔류 응력 측정법

2.1. 홀 드릴링 방법에 의한 잔류 응력 측정원리

잔류 응력이 존재한 평판에 구멍을 내면(Fig. 1), 점 P에서 변형률 변화량은 σ_x , σ_y 의 크기, 구멍으로부터의 거리, 응력 상태등에 따라 다르다.

Fig. 1에서와 같은 x, y방향 응력이 작용할때, r 방향의 변형률은 Kirsch해에 의해 다음과 같이 주어진다⁵⁾.

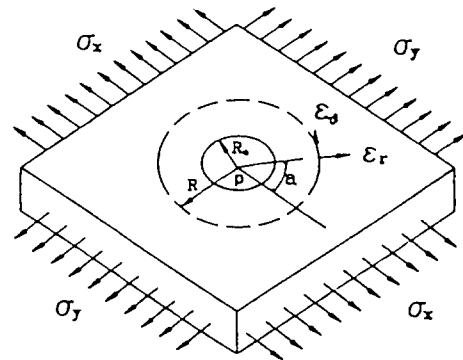


Fig. 1 Strain relaxation at point P due to the introduction of a hole

$$\epsilon_r = \sigma_x(A + B \cos(2\alpha)) + \sigma_y\{A + B \cos(2\alpha + \pi)\} \quad (1)$$

여기서

$r = R/R_0$: 구멍으로부터 점 P까지의 무차원 반경

E, ν : 탄성 계수와 포와송비

$$A = -\frac{1+\nu}{2E} \left[\frac{1}{r^2} \right]$$

$$B = -\frac{1+\nu}{2E} \left\{ \left[\frac{4}{1+\nu} \right] \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right\}$$

$$C = -\frac{1+\nu}{2E} \left\{ -\left[\frac{4\nu}{1+\nu} \right] \frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \right\}$$

수식 (1)의 A, B는 이론적인 전개에 의해 직접 계산이 가능하나, 실제 적용에 있어서는 이론 전개시 가정들을 보상할 수 있는 A, B를 사용한다. 특히, 후판시 사용하는 블라인드 홀 드릴링(blind hole drilling) 방법에는 적절한 A, B가 요구된다. 실제 실험에서 사용하는 A, B는 스트레인 게이지 제작 회사의 데이터로 주어진다.

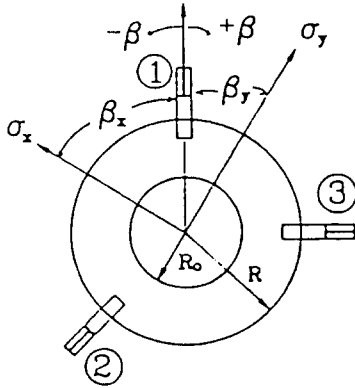


Fig. 2 Strain gage rosette arrangement for determining residual stresses

Fig. 2에서 스트레인 게이지 1, 2, 3에서의 반지름 방향 변형률을 ϵ_r 이라 하여 Fig. 1과 비교하면,

$$a = \beta_x \text{인 경우 } \epsilon_r = \epsilon_1$$

$$a = \beta_x + \pi/4 \text{인 경우 } \epsilon_r = \epsilon_2$$

$$a = \beta_x + \pi/2 \text{인 경우 } \epsilon_r = \epsilon_3$$

이 되므로 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 를 이용하여 주응력과 주응력 방향 β 를 구할 수 있고, 이로부터 부하 응력 σ_x, σ_y 의 크기를 구할 수 있다⁵⁾.

2.2. 잔류 응력 측정 실험

용접 비이드(bead)는 줄(file)로 제거하여 모재와 수평을 이루도록 한 후 사포 #100~600을 차례로 사용하여 용접 금속과 모재 표면을 연삭하였다. 이때 줄 작업에 의한 응력이 생성되지 않도록 손 작업으로 천천히 연삭하는 세심한 주의를 기울였다.

측정하고자 하는 시편의 표면에 잔류 응력 측정용으로 제작된 스트레인 게이지 로제트(strain gage rosette)을 부착한다. 사용된 게이지는 Micro-Measurement사의 TEA-06-RK-120으로 base의 크기가 8mm, 게이지의 길이가 1.6mm였으며, 형태는 Fig. 2에 나타난 것과 동일하다. 게이지의 부착 방향은 Fig. 2의 1 방향을 용접선과 일치하게 하였고, 게이지의 중앙은 측정하고자 하는 점에 위치하도록 하였다. 스트레인 게이지를 접착한 후 안내 장치(guide apparatus)를 설치하고 현미경으로 드릴 구멍 중심을 맞춘다. 이때 사용한 스트레인 게이지에는 구멍을 뚫을때 중심이 일치하도록 원 주위에 4방향으로 표시가 있으므로 현미경을 회전시켜가며 정확히 맞춘다. 구멍 뚫기는

air abrasive jet machine을 사용하였으며, 구멍을 뚫을 때 발생하는 변형율의 변화값을 switch and balance unit와 변형률 지시계를 이용하여 측정하였다. 이때의 변형율은 표면에서 약 1.5mm의 구멍을 뚫을 때까지 발생한 값이다. 이상에서 기술된 측정 시험 방법 및 절차는 ASTM E837-89 표준서에 따라 수행되었다⁵⁾.

2.3. 실험 시편

Fig. 3에 제시된 바와같이 길이 100mm, 폭 65mm, 두께 2.5mm 평판의 중앙에 길이 50mm, 높이 15mm, 두께 3mm의 판을 중앙에 GTAW(gas tungsten arc welding)공정을 적용하여 용가재 금속은 공급하지 않고 필릿(fillet) 용접을 실시하였다. 실험에 사용된 18% Ni 마레이징 강 경우 일반 탄소강과는 다르게 용접 변형은 적으나 필릿 용접시에 실제 제품의 용접 조건 및 구속조건과 유사하도록 용접 치구를 설치한 후 용접하여 용접 변형의 발생을 억제하였다.

용접 조건은 Table 1에 제시되어 있으며 사용된 입열은 660J/mm 정도이다. 또 시편용접은 Table 2에 제시된 바와 같이 용접 전 소재의 열처리 공정을 크게 2종류로 나누어 응력제거 열처리(stress relieve annealing)

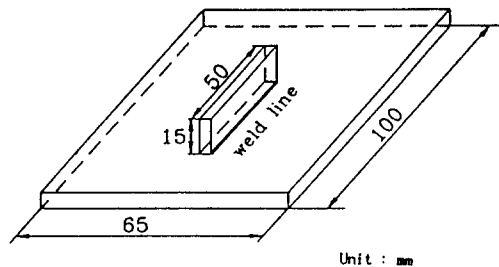


Fig. 3 Weld specimen of maraging steel

Table 1 Welding conditions

Contents	Values
Welding current(A)	110
Arc voltage(V)	12
Travel speed(mm/sec)	2
Gas used(%)	99.995Ar
Gas flow rate(L/min)	8.5
Gap size(mm)	φ13
Electrode stick out(mm)	7
Electrode type & size(mm)	EWTh-2, φ2.4
Number of pass	1

Table 2 Conditions of experimental heat treatment

Thickness	Joint type	Specimen conditions	Remarks
2.5mm	Bead on plate	S.R.A+Welding	
2.5mm	Fillet	S.R.A+Welding	SW
		S.R.A+Welding+Aging	SWA
		S.R.A+Welding+S.H.T.	SWS
		S.R.A+Welding+S.H.T.+Aging	SWSA
		Aging+Welding	AW
		Aging+Welding+Aging	AWA
		Aging+Welding+S.H.T.	AWS
		Aging+Welding+S.H.T.+Aging	AWSA

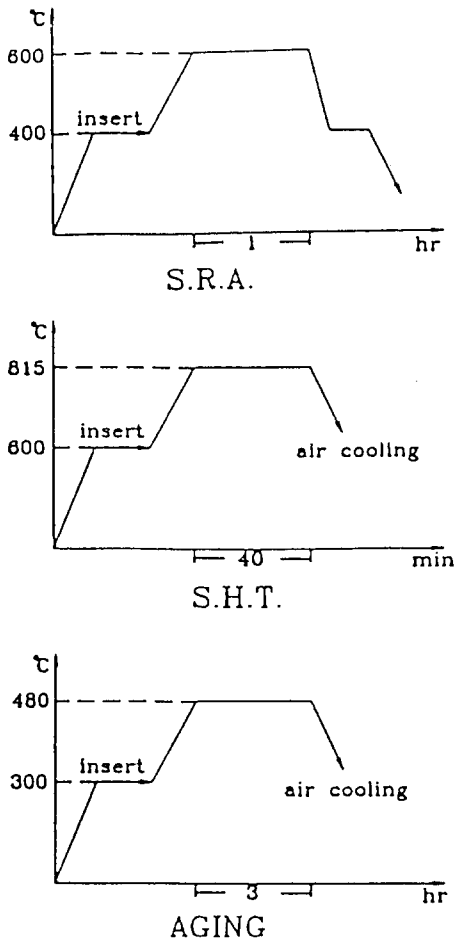


Fig. 4 Heat treatment conditions of maraging steel

ing heat treatment : S.R.A)와 시효 경화처리(aging)로 구분하였고, 용접후의 열처리 단계로는 열처리 실시하지 않은 경우, 시효 경화처리, 용체화 풀림처리(solution heat treatment : S.H.T.), 용체화 풀림처리후 시효 경화처리 공정으로 나누어 각각에 대한 잔류응력을 측정하여 그 결과를 실제 용접공정에 적용하기 위한 자료로 활용하였다. Fig. 4는 본 실험에 사용된 열처리 사이클을 나타낸다. 특히 18% Ni 마레이징 강은 Fig. 5에 제시된 바와 같은 사용 열처리 조건에 따라 열처리하면 다른 강에 비해 대체로 치수 변화량은 적으며, 풀림 열처리 상태에서 로크웰 C 정도(H_RC)로 약 30 정도이지만 3시간 시효경화 처리 공정을 거치면 약 50 정도의 정도로 증가하게 된다⁶⁾.

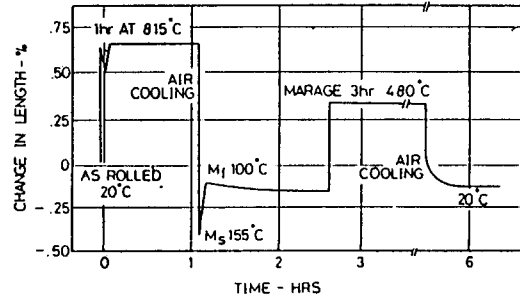


Fig. 5 Dilatometry behavior of 18% Ni maraging steel cycled through normal heat treatment

사용된 마레이징 강의 화학 성분은 Table 3에 제시되어 있으며 특히 최적의 강도, 인성치를 얻기 위해서는 탄소 0.03%, 실리콘 0.1%, 망간 0.1%, 황 0.01%, 인 0.01% 이하로 제한하고 있다. 또 815°C에서 40분 용체화처리 후 480°C에서 3시간 시효경화 처리한 후의 상온에서 기계적 성질을 Table 4에 제시하고 있다⁷⁾.

또한 풀림 처리후 용접을 실시한 후 측정된 경도 분포와 시효 경화처리 후의 용접부 경도 분포를 Fig. 6에서 제시하고 있는데, 시효 경화 처리에 의한 경도 크기증가가 대단히 큼을 알 수 있고, 용접부 및 열영향부의 경도도 모재와 상응함을 알 수 있다⁷⁾.

Table 3. Chemical Compositions of 18% Ni maraging steel(Grade 250)

C	Si	Mn	S	P	Mo	Co	Ni	Al	Ti	B	Zr	Ca
0.006	0.02	0.01	0.001	0.004	4.88	8.21	18.64	0.13	0.44	0.0037	0.02	0.05

Table 4 Mechanical properties of bars of 18% Ni maraging steel
(Solution annealed 815°C, 40 minutes, Aged 480°C, 3 hours)

Properties	Values
• Hardness, Rockwell C	48-50
• Tensile strength, kg/mm ²	172-190
• Yield strength, kg/mm ²	170-186
• Elongation	
In 50mm, %	6-10
In 25mm, %	10-12
• Reduction in area, %	35-60
• Poisson's ratio	0.30
• Modulus of elasticity, kg/mm ²	1.90×10 ⁴
• Modulus of rigidity(shear), kg/mm ²	0.73×10 ⁴
• Charpy V-notch energy absorption at 25°C, kg·cm	248-456

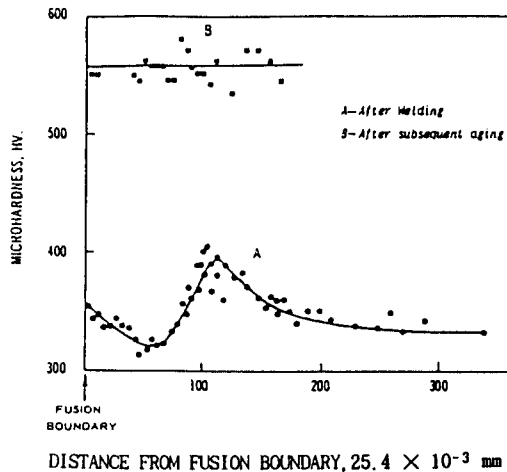


Fig. 6 A microhardness traverse of the heat-affected zone of a weld made on 18Ni(250) maraging steel in the as-annealed condition⁷⁾

3. 결과 및 고찰

Fig. 7은 풀림 열처리된(annealed heat treatment) 두께 2.5mm 마레이징 강 of bead-on-plate 용접후의 잔류 응력을 측정된 값으로 마레이징 강 of 용접후 일반적인 잔류 응력 형태를 관찰하기 위한 실험 결과이다. 이때 용접에서 발생한 열 응력 및 잔류 응력의 특성상 용접 길이 방향(종축 방향) 응력이 가장 크게

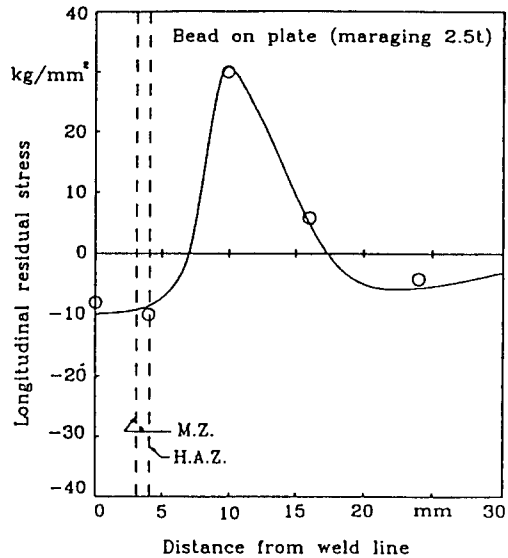


Fig. 7 Experimental residual stress on upper surface of 2.5mm thickness maraging steel (bead-on-plate welding)

작용하기 때문에 길이 방향 응력만을 고찰의 대상으로 선택하였다.

용접 토치(torch)가 주어진 임의의 단면을 지나갈때 용접부 온도가 최대치를 이루어 열원(heat source) 주위에서는 온도 구배가 매우 크며 압축 항복 응력에 의해 소성 변형이 발생한다. 이때까지는 가역 과정만 거치므로 용접부 주위에서는 압축 응력이 나타나고 힘의 자체 평형을 만족하기 위해 중앙에서 떨어진 영역에서는 인장 응력이 나타난다.

온도가 계속 상승함에 따라 항복 응력이 저하하여 압축 응력은 감소하나 계속 가열하고 있기 때문에 압축 응력 영역은 늘어난다. 냉각이 진행됨에 따라 수축이 일어나므로 열원 주위에서 부터 인장 응력이 나타나서 그 값은 커진다. 따라서 일반 저탄소강 용접에서는 잔류 응력 분포는 용접부 주위에서 항복 응력 정도의 높은 인장 잔류 응력이 나타나나, 마레이징 강에서는 Fig. 7과 같이 용접부 주위에서 압축 잔류 응력이 나타났으며, 열 영향부에서도 압축 잔류 응력이 나타났는데 F. H. Lang 등에 의해서 측정 발표된 마레이징 강의 일반적인 경향과 유사한 결과를 보였다. 이와 같은 현상은 오스테나이트(austenite)에서 마르텐사이트(martensite)로 상변태가 일어날때, 오스테나이트나 페라이트(ferrite)에 비해서 마르텐사이트의 밀도가 낮아서 부피가 팽창하고, 이때 이

러한 오스테나이트-마르텐사이트 상변태가 Fig. 8에서와 같이 비교적 낮은 온도에서 일어나기 때문이다⁷⁾

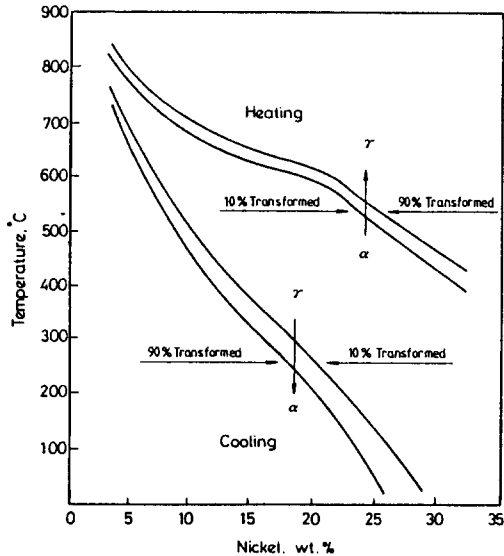


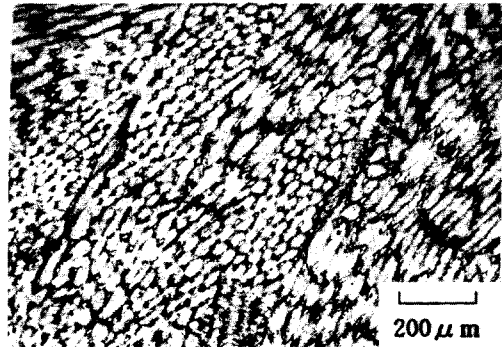
Fig. 8 Iron-nickel transformation diagram⁷⁾

이러한 응력 형태는 용접부에서의 저온 균열(cold crack) 발생 가능성을 줄여 준다고 볼 수 있다. 한편 HAZ에서 약 6mm 떨어진 모재위치에서 측정한 결과 약 30kg/mm² 정도의 인장 잔류응력이 나타났고, 나머지의 모재에서도 전형적인 용접후 잔류응력 분포를 나타내었다.

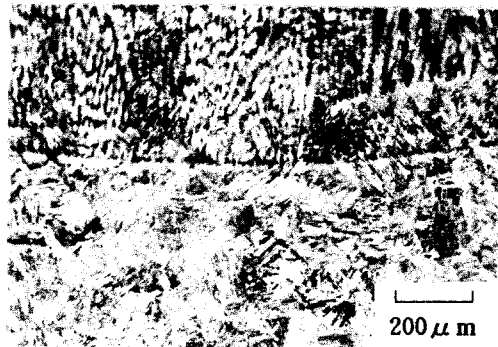
용접부 및 열영향부위에서의 최대 압축 잔류 응력은 약 10kg/mm² 정도를 보였고, 모재에서의 최대 인장 잔류 응력은 약 30kg/mm² 정도로서 마레이징 강의 사용 용체화 열처리 및 시효 경화 처리후의 인장 강도의 약 17%에 해당되었다.

Fig. 9는 본 연구에 사용된 18% Ni 마레이징 강의 금속 조직 사진이다. 측정 시점은 응력 풀림 열처리 →GTA 필렛 용접→용체화 열처리→시효 경화 처리한 후의 결과로서 (a)는 하얀점(white pool)을 가진 오스테나이트와 마르텐사이트 매트릭스 구조를 보이며, (b)는 용융선 근처 즉 용접부와 열영향부위에서의 조직 사진으로 결정립이 조대한 마르텐사이트 구조를 보이고 있다. (c)는 모재의 조직 사진으로 전형적인 마르텐사이트 조직을 보여주고 있다.

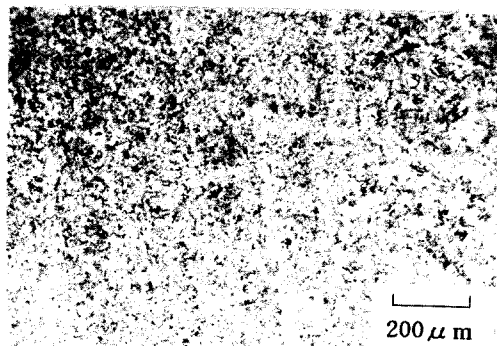
조직 관찰용 부식액은 Vilellas 시약(HCl+HNO₃+CuCl₂+H₂O)을 사용하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Microstructures in the fillet weld on the 18% Ni maraging steel after S.R.A.+welding+S.H.T.+aging. Etchant : Vilellas.

- (a) Weld region
- (b) Near the fusion line of a weld
- (c) Base metal

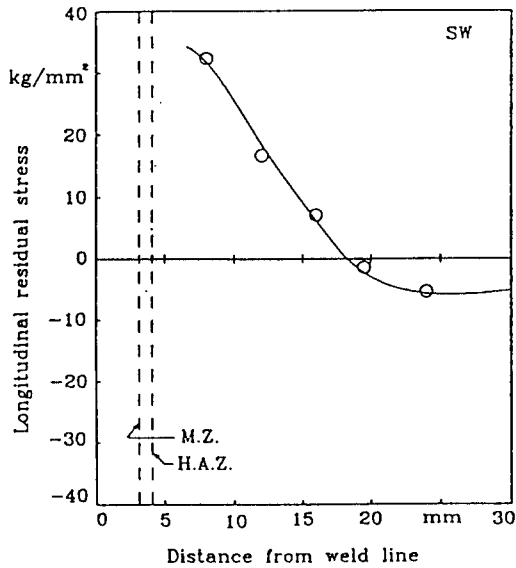


Fig. 10 Experimental residual stress in fillet joint of maraging steel(S.R.A.+welding)

Fig. 10은 2.5mm 두께의 마레이징 강을 용력 풀림 열처리를 한후 Fig. 3과 같은 형상으로 GTA 필렛 용접한 후에 잔류 응력을 측정된 결과로서, 용접부에 인접한 영역에서는 필렛 형상이기 때문에 스트레인 게이지를 붙일수 없어서 측정을 할 수가 없었다. 본 실험에서는 용접부 중앙에서 가능한 가까운 거리까지 실험을 실시하였는데, 그 결과 용접부에 가까운 곳에서는 인장 잔류 응력이 발생하고 용접부에서 멀어진 영역에서는 압축 잔류 응력이 나타났다. 이 실험을 토대로 bead-on-plate 용접후 나타나는 Fig. 7과 같은 잔류응력 분포와 비교해 보면 용접부 및 열영향부위에서는 압축 잔류응력이 발생될 것으로 판단된다.

Fig. 11은 2.5mm 두께의 마레이징 강을 용력 풀림 처리후 GTA 필렛 용접한 다음 시효 경화 처리(SWA 시편), 용체화 열처리(SWS 시편) 및 용체화 열처리 + 시효 경화 처리(SWSA 시편)한 후의 잔류 응력을 측정된 결과로서, 3종류의 서로 다른 열처리 조건 모두에서 용접 잔류 응력이 거의 완전히 제거되었음을 알 수 있다. 이때 시효 경화 처리 조건은 Fig. 4에서와 같이 용접된 시편을 300°C에서 열처리 로(furnace)내로 장입하여 480°C에서 3시간 유지시킨 후 공냉(air cooling)시켰고, 또 용체화 열처리 조건은 용접된 시편을 600°C에서 열처리 로내로 장입하여 815°C에서 40분 유지시킨 후 공냉시켰다.

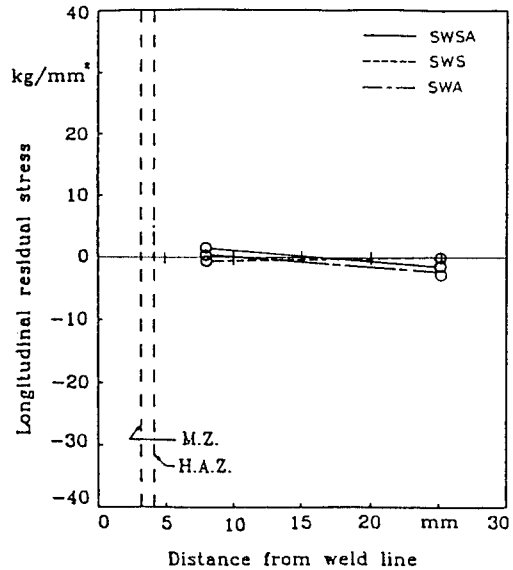


Fig. 11 Experimental residual stresses in fillet joint of maraging steel (S.R.A.+welding+aging : SWA, S.R.A.+welding + S.H.T. : SWS, S.R.A.+welding+ S.H.T.+ aging : SWSA)

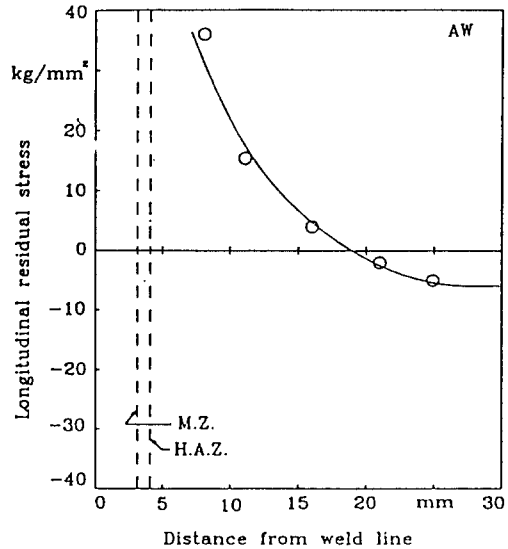


Fig. 12 Experimental residual stress in fillet joint of maraging steel(aging+welding)

Fig. 12는 2.5mm 두께의 마레이징 강을 시효 경화 처리후 GTA 필렛 용접한 후에 잔류 응력을 측정된

결과이다. 그 결과 Fig. 10의 응력 제거 열처리후에 용접하고 측정된 잔류응력 분포와 유사한 양상, 즉 용접부에서 가까운 곳에서는 인장 잔류 응력이, 용접부에서 떨어진 영역에서는 압축 잔류 응력이 나타났다. 이것은 용접전의 열처리 상태에 따라 잔류응력 크기와 분포는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

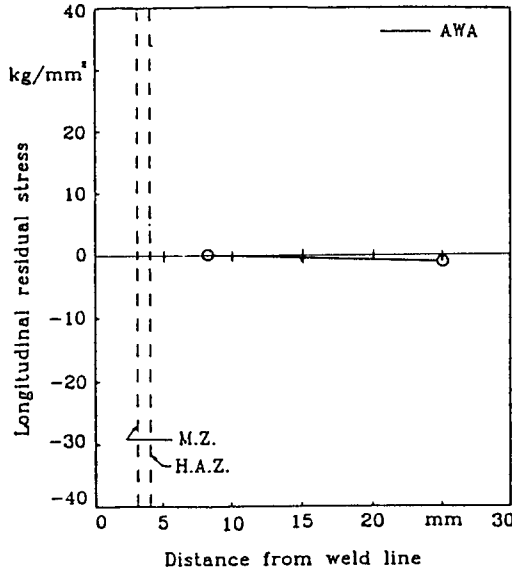


Fig. 13 Experimental residual stress in fillet joint of maraging steel (aging+welding+aging)

Fig. 13은 시효경화 처리→GTA 필렛 용접→시효경화 처리한 후 잔류응력을 측정된 결과인데 앞에서와 마찬가지로 잔류 응력은 거의 나타나지 않았다.

Fig. 14는 18% Ni 마레이징 강을 실제 로켓트 모터 케이스 형상에 본 연구에서 적용된 응력 풀림 열처리 (S. R. A.)→GTA 필렛 용접→용체화 열처리(S. H. T.)→시효경화 처리 공정을 거친후 잔류 응력을 측정된 결과이며, 앞에서와 마찬가지로 잔류 응력은 거의 완전하게 제거됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

18% Ni 등급 250 마레이징 강을 GTAW 공정을 적용하여 용접한후, 용접 전후의 열처리 상태에 따른 용접부 잔류 응력 형태를 홀 드릴링 방법에 의해 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

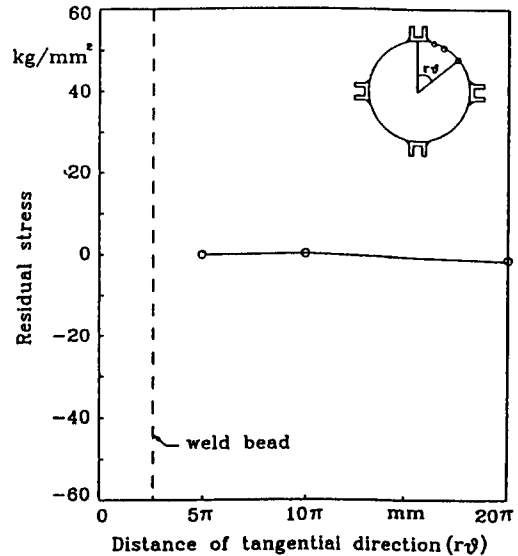


Fig. 14 Residual stress in rocket motor case of real shape of maraging steel (S.R.A.+welding+S.H.T.+aging)

- (1) 18% Ni 마레이징 강은 저 탄소강의 용접부에서 일반적으로 나타나는 잔류 응력 분포와는 다르게 용접부 및 열영향부위에서 압축 잔류 응력이 나타났으며, 풀림 상태의 열처리 조건에서 bead-on-plate 용접시 용접부 및 열영향부에서는 약 10kg/mm²의 압축 잔류 응력이 나타났고, 최대 인장 잔류응력은 약 30kg/mm² 크기로 모재에서 나타났다.
- (2) 용접전의 열처리 조건 즉, 응력 제거 열처리 및 시효 경화처리 후 용접부 잔류응력 분포에는 차이가 없었다.
- (3) 용접후 시효경화 처리, 용체화 풀림 처리 또는 용체화 풀림처리후 시효 경화 처리에 의해서 용접시 생성된 잔류 응력은 거의 완전하 제거 되었다.

참 고 문 헌

- (1) Friedman, E., 1975, "Thermomechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method," Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, Vol. 97, pp. 206~213
- (2) Andersson, B. A. B., 1978, "Thermal Stresses in

- a Submerged-Arc Welded Joint considering Phase Transformation," Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, Vol. 100, pp. 356~362
- (3) Snyder, M. K. and Bathe, K. J., 1981, "A Solution Procedure for Thermo-Elastic-Plastic and Creep Problems," Nuclear Engineering and Design, Vol. 64, pp. 49~80
- (4) Papazoglou, V. J. and Masubuchi, K., 1982, "Numerical Analysis of Thermal Stresses during Welding Including Phase Transformation Effects," Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, Vol. 104, pp. 198~203
- (5) Measurements Group, 1985, "Measurement of Residual Stresses by Hole-Drilling Strain-Gage Method," TECH NOTE TN-503-1, U. S. A.
- (6) R. J. Knoth and F. H. Lang, 1966, "18% Nickel Maraging Steel Metallurgy and its Effects on Welding," Reprinted from Metals Engineering Quarterly, pp. 3~7
- (7) F. H. Lang and N. Kenyon, 1960, "Welding of Maraging Steels," WRC Bulletin 159, pp. 1~40
- (8) ASTM E837-89, "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method," 1989, pp. 715~720