

Al-7020의 Pulse-GMA 용접에 관한 연구(2)

— 실제 용접부의 성질 —

김재웅* · 허장욱* · 나석주** · 백운형***

A Study on Pulse-GMA Welding of Al-7020 (2)

-Properties of Weldment-

J.W. Kim*, J.W. Hur*, S.J. Na** and W.H. Baek***

Key Words : Pulse-GMAW(펄스 가스 메탈 아아크 용접), Weld Metal(용착부), Heat Affected Zone(열영향부), Porosity(기공), Residual Stress(잔류응력), Heat Treatment(열처리)

Abstract

Major problems in welding Al-7020 include shrinkage, porosity in welds and loss of strength in the heat affected zone. Thus it is important to examine the mechanical properties and reliability of welds.

In this study, a series of experiments was carried out to determine the mechanical properties such as micro-hardness distribution, tensile strength, porosity and residual stress distribution of the Al-7020 weldment made by pulse-GMA welding.

The results of the experiments are as follows.

- (1) The micro-hardness of weld metal and heat affected zone was lower than that of the base metal.
- (2) The tensile strength of the deposited metal was much lower than that of the base metal.
- (3) The porosity in weld metal zone was negligible under the adopted conditions of experiments.
- (4) The residual stress in the weld metal was lower than that of the heat affected zone, because the weld metal was softened.

And the micro-hardness distribution, the tensile strength and the residual stress distribution of the weldment in the as-welded condition were compared with those of the weldment after heat treatment.

*한국과학기술원 생산공학과

**정회원, 한국과학기술원 생산공학과

***대전 기계창

1. 서 론

Al-7020의 용접시에는 합금원소의 작용에 의해서 용접부에 균열이 발생할 확율이 높기때문에 균열이 없는 용착금속을 얻기 위해서는 적절한 용가재를 선정하여 공급하여야 한다.¹⁾ 모재나 용가재에 Zr을 0.2%가량 첨가하였을때 용접결함이 최소로 됨이 발견되었으며, 미세한 양의 Cu가 함유되어 있어도 용접균열의 정도가 심각하게 되기 때문에 Cu의 양을 0.2%이하로 유지시켜야 한다고 제안되었다. 알루미늄의 수소용해도는 온도에 따라 크게 변화하고, 또한 최고 용해도가 용융온도에서의 용해도에 비해 매우 커서 알루미늄의 용착금속에는 수소기공의 발생이 용이하²⁾, 이것은 인성 및 연성을 저하시키기 때문에 구조물의 수명과 밀접한 관계가 있다. 또한 용접을 수행할 때 용접변수를 잘못 선정하면 불완전용입(lack of penetration)이나 용합불량(incomplete fusion)과 같은 용접결함이 발생하여³⁾ 허용하중이 저하되며 동적하중 하에서는 응력집중 효과가 첨가되어 더욱 심각한 결과를 가져올 수 있다.

이렇게 용접부위는 구조물중의 취약부가 되므로 그 기계적성질과 안전성에 대한 문제점이 규명되어야 할 것이다. 알루미늄합금의 용접에 있어서 용접부의 기계적 성질 및 안전성은 용접변수들에 의해 크게 영향을 받으므로 1차연구에서는 Al-7020의 용접에서 용접변수들이 용접부 형상에 미치는 영향을 알아보았으며⁴⁾, 본 연구에서는 1차연구의 결과를 실제 용접접합부(weld joint)에 적용하여 용접부의 경도분포, 인장강도, 기공 및 잔류응력분포와 같은 성질들을 조사하였다.

2. 용접부 성질조사에 대한 실험준비

본 용접실험에 적용한 Al-7020은 압출재이며 그 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다. 실제 용접접합부는 28mm두께 모재에 대해서 Fig.1과

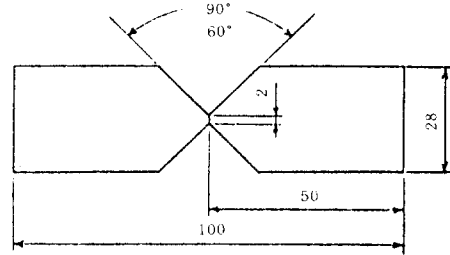


Fig. 1 Butt joint design of 28mm thick plate

같이 X형홈(double V-groove)의 각도를 60°, 90°로 하여 홈의 각도변화에 대한 영향을 알 수 있도록 준비하였다. 4mm 두께 모재의 경우는 I형홈(square groove) 맞대기용접을 하였으며 상, 하면을 모두 용접하는 2-패스용접과 한면만을 용접하는 1-패스용접을 각각 적용하였다.

각각 해당되는 용접조건을 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 여기서 모재두께 28mm의 90°, X형홈에 대한 용접조건중 패스번호1과 패스번호2의 용접조건은 1차연구의 주요 용접변수에 대한 용접실험⁴⁾ 조건중에서 선정하여 적용한 것이며 나머지 조건은 패스번호1의 조건에서 수정된 조건들로서 용접패스수가 증가할수록 비드폭을 크게하는 것을 목표로 용접전압이 상대적으로 높은 조건들을 적용하였다. 28mm 두께, 60°, X형홈에 대한 용접조건중 패스번호1에서 패스번호4까지의 용접조건은 주요 용접변수에 대한 용접실험⁴⁾의 조건들중에서 선정하여 적용하였으며 패스번호5와 패스번호6은 수정된 조건들이다. 4mm 두께 모재의 용접에서도 주요 용접변수에 대한 용접실험⁴⁾ 조건중에서 선정하여 적용하였다.

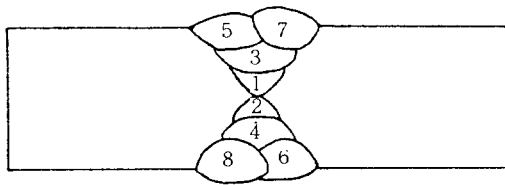
28mm 두께 모재의 용접시 루우트간격(root gap)은 0mm로 설치하고 용접하였으며, 4mm 두께 모재에 대해서는 2-패스 용접시 루우트간격은 0mm, 1-패스 용접시는 1mm로 하였다. 모든 용접자세는 아래보기자세이며 용접토치의 팁 끝에서 공작물간의 거리는 20mm로 하고 나머지 고정조건은 1차연구의 용접실험에서와 동일한 조건으로

Table 1 Chemical composition of workpiece (Al 7020)

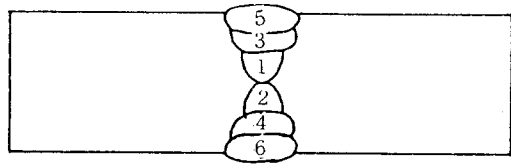
Chemical component	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zr	Zr	Al
Specification	<0.35	<0.40	<0.15	0.05-0.50	1.00-1.30	0.10-0.35	4.00-5.00	0.08-0.25	0.08-0.20	remain
Workpiece	0.06	0.14	0.04	0.19	1.16	0.14	4.58	0.13	0.12	"

Table 2 Welding conditions for butt welding (28mm thickness)

Pass No.	Groove angle (degree)	Wire feed rate (ipm)	Welding voltage (V)	Welding speed (mm/min)
1	90	320	32	350
	60	320	32	450
2	90	320	32	350
	60	320	32	450
3	90	350	34	350
	60	320	32	450
4	90	350	34	350
	60	320	32	450
5	90	350	34	350
	60	320	34	450
6	90	350	34	350
	60	320	34	450
7	90	320	34	350
	60			
8	90	320	34	350
	60			



(90° double V groove)



(60° double V groove)

Table 3 Welding conditions for butt welding (4mm thickness)

Parameter	2-pass welding		1-pass welding
	pass 1	pass 2	
Wire feed rate (ipm)	130	130	135
Welding speed (mm/min)	655	655	655
Peak pulse current (A)	245	245	245
Welding voltage (V)	24	24	24
Pulse frequency (pps)	120	120	120

Table 4 Fixed welding condition for experiment

Parameter	Condition
Polarity	Reversed
Filler wire	Al 5356 dia.=1.6mm
Shield gas	Ar 25%+He 75%, 60 CFH

Table 4와 같이 적용하였다. 90°, X형홈 맞대기 용접시 패스번호5에서 패스번호8까지는 홈의 모서리로 부터 각각 7mm 안쪽을 겨냥하여 용접하였다. 용접된 시편의 일부는 용접후 열처리에 따른

용접부의 기계적 성질변화를 알기위해 Fig.2와 같은 조건으로 열처리를 하였다.

3. 용접부의 성질조사 및 결과

3.1 용접부의 형상 및 조직

용접부의 형상을 알기위해 각 시편의 단면을 취하였으며 연마(polishing)와 에칭(etching)후 촬영하여 Fig.3에 나타내었다. 모재두께 28mm,

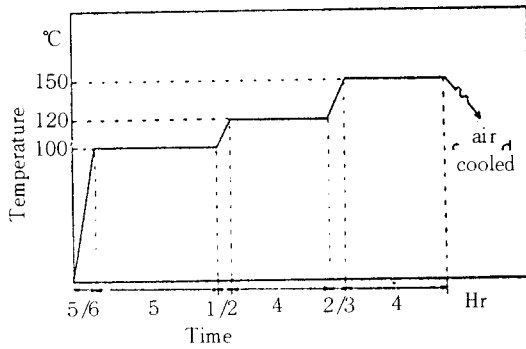


Fig. 2 Artificial aging condition

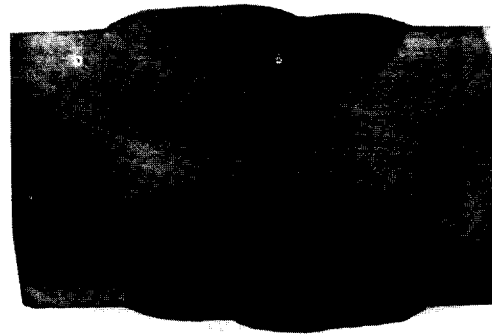
90°, X형홈의 용접부에서는 루우트면 중앙부위가 모두 용융되었으나 60°, X형홈에서는 루우트 부위에서 불완전용입이 발생되었다. 이것으로 보아 적용된 용접조건에서 와이어 송급속도의 증가에 의한 용입깊이의 증가가 요구되며 특히 60°, X형홈 접합부에서는 90°, X형홈보다 더욱 큰 값의 와이어 송급속도를 적용해야 됨을 알 수 있다.

위 각 시편들의 단면들을 통해서 용접패스가 중첩되는 에서 먼저 용접된 부위가 나중에 용접된 부위에 의해 열처리 효과가 나타난 것을 볼 수 있었다. 4mm두께 모재의 단면사진을 통하여 루우트면의 완전한 용융이 있음을 알 수 있으며 여기서 1-패스 용접시 용착금속부의 처짐이 크게 생겼음을 볼 수 있다. 용접부의 미세 조직은 4mm두께 모재를 1-패스용접한 시편을 연마와 에칭한 후 광학현미경으로 조사하였으며 사진으로 촬영하여 Fig.4에 나타내었다. 이 사진으로 부터 용착금속부에서 수지상 결정조직이 형성되었음을 볼 수 있다.

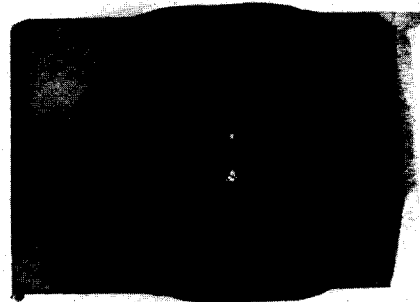
3.2 용접부의 경도(Micro-hardness)

분포 조사

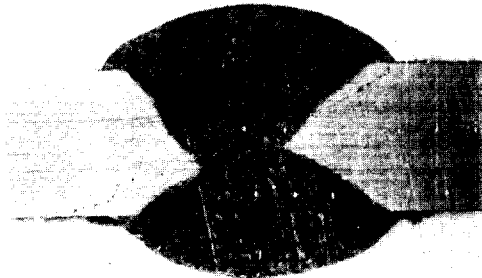
용접부 단면에서 용접부 중앙선으로부터 모재 방향으로 1mm간격으로 측정하였으며 각 시편의 용접한 그대로의 상태와 열처리후의 상태에 대하여 측정된 결과를 Fig.5와 Fig.6에 나타내었다. 모재의 경도는 전혀 용접열을 받지 않은 재료에 대해 측정하였는데, 7위치에서 측정된 값의 평균치가 102였다. 전체적인 결과를 통하여 용착금속부에서는 경도값이 65-75, 열영향부위는 80-90, 열영향을 받지 않은 모재 부위는 95-105의 분포 값을 보이고 있다. Al-7020은 석출경화형 재료로서 입계(grain boundary) 및 입내에 석출물들



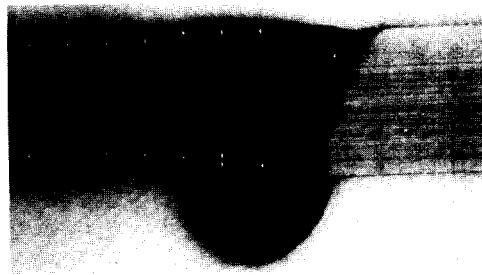
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3 Weld pool shape of butt joint

- (a) 28mm thickness, 90° double V-groove
- (b) 28mm thickness, 60° double V-groove
- (c) 4mm thickness, 2-pass welding
- (d) 4mm thickness, 1-pass welding

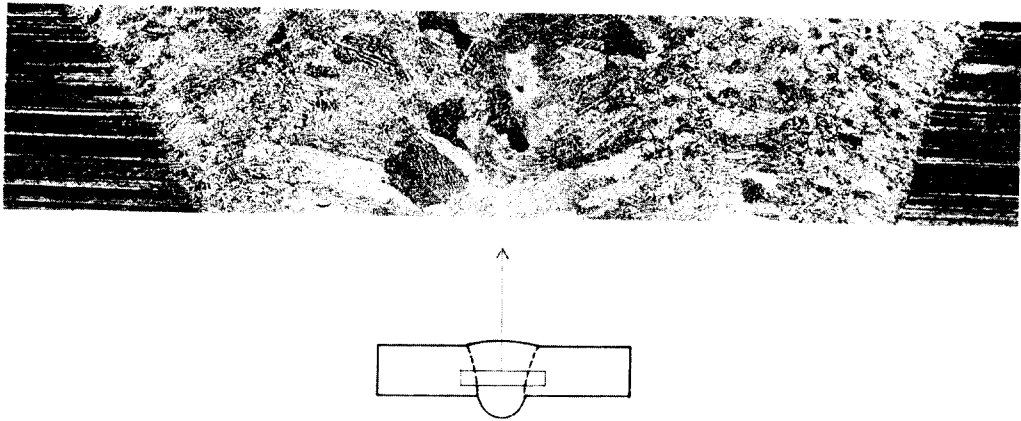


Fig. 4 Microstructure of weldment (4mm thick, 1-pass welding, ×50)

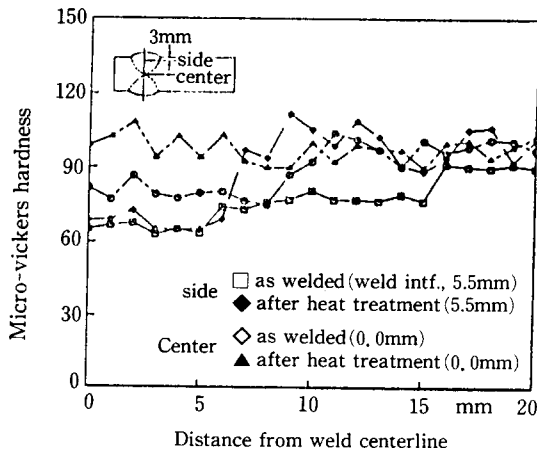


Fig. 5 Micro-hardness variation in weldment (28mm thick., 60° double V-groove butt joint)

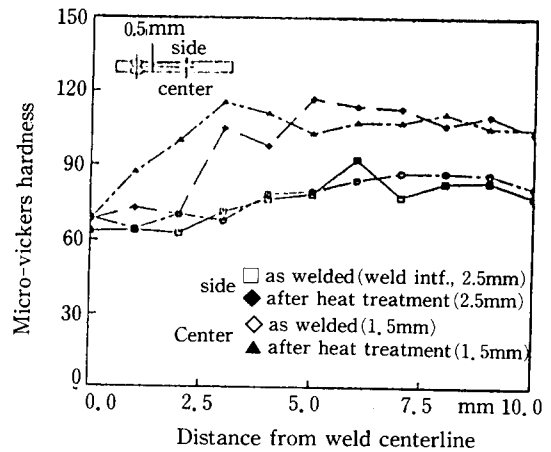


Fig. 6 Micro-hardness variation in weldment (4mm thick., 2-pass butt welding)

(precipitates)이 존재하여 높은 경도 및 강도를 가지나, 열영향부에서는 용접열에 의해 입계내의 석출물이 재용해되어 없어지고 입계의 석출물도 밀도가 감소하여 기계적 성질이 약화된다⁵⁾. 용접 후 열처리된 시편에서는 열영향을 받은 부위가 열처리효과로 인해 모재에 준하는 경도값을 보이고 있는데 이것은 용접열에 의해 사라진 석출물이 후 열처리에 의해 재생성되어 석출경화성이 회복되었기 때문이다. 그러나 용착금속부의 경도는 용가재와 모재가 혼합된 용착금속의 고유값으로서 용접 후 열처리에 의한 영향을 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 즉 용가재인 Al-5356이 주성분인 용착금속은 재료의 특성상 열처리에 의해 경화되지 않는 성질이 있기 때문이다.

3.3 용접부의 인장강도 조사

본 연구에서 사용한 모재의 인장강도를 알기 위하여 인장시험편의 형상을 ASTM B557M규격에 해당하는 것으로 만들어 시험한 결과 인장강도가 43.6Kg/mm²이었다.

용접부의 인장강도를 알기위해 시험편을 Fig.7과 같이 채취하여 제작하였으며 인장시험 결과는 Table 5에 나타내었는데 전체적으로 모재의 강도에 비해 매우 작은 것을 알 수 있으며 열처리후에도 약간의 강도 증가가 있으나 뚜렷한 증가는 없었다. 인장시험시 파단은 항상 용착금속에서 발생하였으므로 인장강도값은 용가재와 모재가 혼합된 용착금속의 고유값으로서 용접후 열처리에도 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

Table 5 Result of weld metal tensile test

	Tensile strength (kg/mm ²)	
	As welded	After heat treatment
28mm Butt (90° V groove)	24.98	25.19
	26.20	25.71
28mm Butt (60° V groove)	24.98	25.56
	25.45	25.87

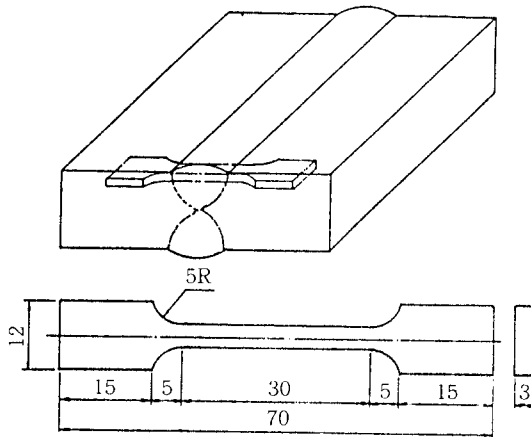


Fig. 7 Tensile test specimen of weldment

3.4 용접부의 기공조사

3.4.1 기공의 영향 및 측정방법

본 연구에서는 용접시 기공생성을 억제하기 위하여 보호가스로 75%He-25%Ar를 선택하였다⁶⁾⁷⁾. 기공은 모재와 용접분이 포함하고 있는 수소, 모재표면에 존재하는 산화층, 불활성 보호가스의 불순물 및 용접분위기에 의하여 발생한다⁶⁾. 이밖에 기공에 영향을 미치는 인자로서 접합부 형상과 용접자세가 있는데 일반적으로 접합부형상이 복잡하거나 용접자세가 어려울수록 수소기체가 유입될 가능성이 크다. Al 및 Al합금의 수소용해도는 온도에 따라 크게 변화하는데 용융지(weld pool)에서의 최고용해도는 용융온도에서보다 훨씬 크므로 유입된 수소가 냉각중에 미처 방출되지 못하면 수소기공을 형성하게 된다⁸⁾.

기공이 용접구조물에 미치는 영향은 항복강도의 경우 기공의 양에는 거의 무관하나, 연신율은 약간의 기공이 존재해도 크게 영향을 받으며, 인장강도는 기공의 증가로 인한 단면적의 기공의 양이 단면적의 1%까지는 괜찮으나 그 이상 증가시에는 급격히 떨어지는 것으로 알려져 있다⁹⁾¹⁰⁾.

기공 측정방법으로는 방사선사진(radio-graphic), 현미경검사(microscopic), 비중(specific gravity)을 이용한 방법 및 TV화면 이용방법등이 있다. ⁷⁾¹⁰⁾. 본 연구에서 기공측정은 TV화면 이용방법과 유사한 것으로 용접부단면을 #1500사포와 형깊을 이용하여 연마한 다음 금속현미경으로 100배 확대하여 현미경 자체에 표시되어있는 원(0.02 mm)을 이용하여 기공크기를 측정하였다. 기공과 불순물과의 구별방법은 기공과 그 주변의 촛점 차이로서 판단할 수 있었다.

3.4.2 기공 측정결과

앞의 방법으로 측정된 기공의 크기는 실제 기공보다 작게 나올 것이므로 그 평균값을 실제 기공 직径의 0.5배로 간주하고 기공일 단면적을 구하였으며, 기공의 단면적을 용착금속부의 단면적으로 나눈 값을 Table 6에 나타내었다. 보통 미세한 기공으로 간주하는 직경(1/64")¹⁰⁾보다 큰 기공은 거의 찾아 볼 수 없었으며 기공의 총 단면적도 인장강도가 영향을 받는 1%보다 크게 못미치는 것을 알 수 있었다. 용접조건의 변화에 따른 기공단면적의 변화를 찾고자 하였으나 기공의 양이 미세하고 뚜렷한 관계가 없었으며, 또한 모재와 용착금속부에서의 기공단면적 차이도 미소하므로 실제 용접부에서 기공의 영향을 무시하여도 무방할 것으로 사료된다.

3.5 용접부의 잔류응력 측정

3.5.1 잔류응력 측정방법

잔류응력의 값은 변형률을 측정하여 구성방정식에 의해 구하는데 본 연구에서는 blind-hole-drilling 방법¹¹⁾¹²⁾으로 28mm 두께 60°, X형용접시편에 대하여 용접한 그대로의 상태와 용접후 열처리한 상태에 대해 실험하였으며 그 방법은 다음과 같다.

용접비이드를 줄(file)로 제거하여 모재와 수평을 이루도록하고 사포 #100-#1000를 차례로 사용

Table 6 Porosity of weldment

Weldment condition	Porosity
	$(\frac{\text{Area of pore}}{\text{Area of weld pool}} \times 10^6)$
4mm thickness, Base metal	5.3
4mm thickness Square groove 1-pass weld	4.8
4mm thickness Square groove 2-pass weld	3.9
28mm thickness, Base metal	1.9
28mm thickness 60° double V-groove Butt weld	9.9
28mm thickness 90° double V-groove Butt weld	6.7

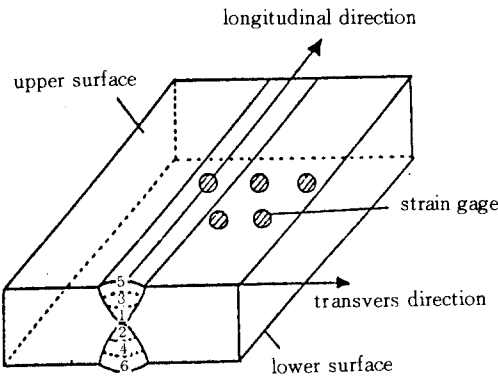


Fig. 8 Strain gage location on the surface of weldment

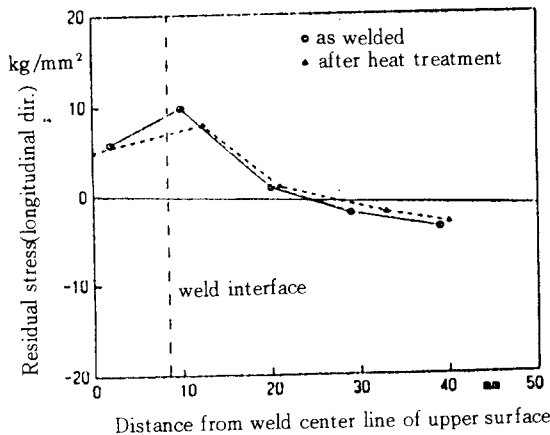


Fig. 9 Longitudinal residual stresses in upper surface of weldment

하여 표면을 연삭한다. 이때 줄작업에 의해 응력이 생성되지 않도록 세심한 주의가 필요하다. 측정하고자 하는 시편의 표면에 잔류응력 측정용으로 제작된 strain gage를 부착시킨후 milling guide를 설치하고 milling guide에 있는 현미경으로 중심을 맞추어 구멍을 뚫는다. 목표한 길이만큼 구멍을 뚫은 상태에서 발생된 변형률을 측정한다. 시편에서 잔류응력의 측정위치는 용접선방향으로 응력이 일정하다는 가정하에 Fig.8과 같이 용접선중심에서 횡방향으로 약 10mm간격을 두고 strain gage를 부착하여 윗면과 아랫면에서 실시하였다.

3.5.2 잔류응력 측정결과

용접선방향의 잔류응력은 Fig.9과 Fig.10에서와 같이 용접선근처에서는 인장잔류응력, 용접선에서 떨어진 곳에서는 압축잔류응력이 작용하고 있다. 일반적인 재료의 용접선방향 최대잔류응력은 항복응력보다 약간 낮은 값이 나타나게 되는데, 측정된 열영향부의 항복응력(17-18kg/mm²)은 모재의 항복응력(36kg/mm²)에 비하여 약 절반에 해당하는 값이었고 용착금속부에서는 항복응력이 14-15 kg/mm²이었다. 실험결과에서도 용착금속부의 용접선방향 잔류응력이 열영향부에 비해서 낮게 나타나는 현상을 볼 수 있었다. 그러므로, 잔류응력 관점에서 Al-7020은 용착금속부와 열영향부의 낮은 강도로 인하여 최대잔류응력이 작은 값을 갖는

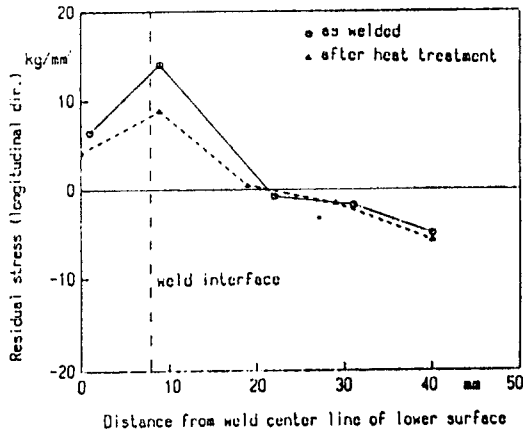


Fig. 10 Longitudinal residual stresses in lower surface of weldment

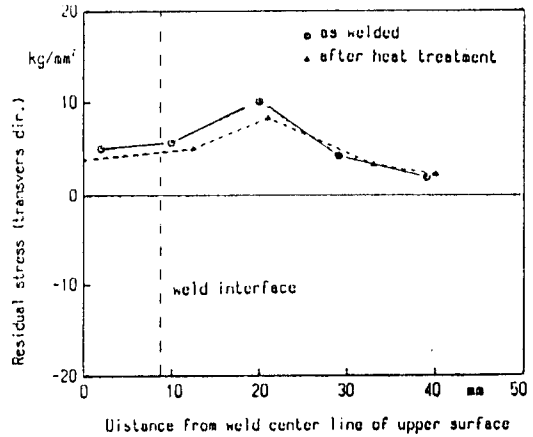


Fig. 11 Transverse residual stresses in upper surface of weldment

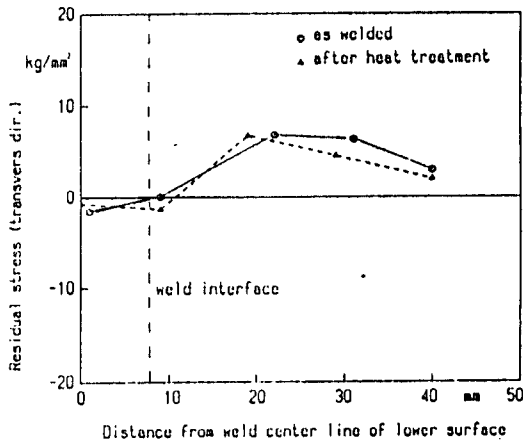


Fig. 12 Transverse residual stresses in lower surface of weldment

유리한 효과를 나타낸다. 후열처리에 의한 잔류응력 변화는 나타나지 않고 있는데, 이것은 열처리 시 시편의 전영역에 걸쳐서 온도가 균일하므로 열응력이 발생하지 않았고 적용된 열처리 온도에서는 잔류응력에 의한 국부적인 소성변형이 거의 없었기 때문이라 사료된다.

Figure 11과 Fig. 12에서 보면 윗면과 아랫면의 횡방향 잔류응력의 크기는 다르게 나타나고 있다. 이것은 마지막으로 용접한 아랫면에서 수축에 의한 연장효과와 굽힘에 의한 압축효과 때문에 용접선 근처에서는 응력이 거의 작용하지 않고 용접선에서 떨어진 곳에서 인장효과의 영향이 크게 나타나기 때문이라 사료된다. 윗면에서는 아랫면의 마지막층을 용접하기 전에는 Fig. 12와 같은 응력분

포를 갖고 있으며, 마지막층 용접에 의해 굽힘이 발생하여 윗면에서 인장응력이 크게 작용하게 된다.

4. 결 론

실제 용접접합부로 가공된 시편을 용접한 후 용접부의 경도, 인장강도, 기공 및 잔류응력 분포를 측정하였으며 각각의 경우 용접후 열처리한 시편에 대해서도 측정하여 비교하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 용접부의 경도 측정결과 용착금속부의 경도가 가장 낮았으며 열영향부의 경도는 용접후 열처리에 의해 열영향을 받지 않은 모재 수준으로 회복되었다.

(2) 용접부의 인장시험 결과 모재의 인장강도보다 훨씬 작은 인장강도값이 나타났는데 이것은 파단이 용착금속에서 발생하기 때문이다.

(3) 용접부의 기공 측정결과 본 연구의 실험조건에서는 기공의 양이 용접부의 강도와 인성에 거의 영향을 미치지 않을 정도로 적게 나타났다.

(4) 용접의 잔류응력 측정결과 용접부에서는 강도가 작기 때문에 최대 잔류응력이 작은 값을 갖는 유리한 효과가 나타났으며, 후열처리에 의한 잔류응력변화는 거의 없었다.

(5) 루우트패스에서 충분한 용융이 일어나게 하기 위해서는 특별히 높은 와이어 송급속도를 적용해야 하는데, 90°흡일때보다는 60°흡일때 더 높은 와이어 송급속도를 선정하여야 한다.

참고문헌

1. K.P. Mudark, "Schweisstechnische Untersuchungen einer Al Zn Mg Legierung unter besonderer Berücksichtigung der Schweissrissigkeit", Schweissen und Schneiden, Dec.1960, pp. 45-55.
2. L.W. Eastwood, "Gas in Light Alloys", John Willy & Sons Inc. New York, 1946.
3. J.A. Liptak, "Techniques for Welding 7039 Aluminum with Various Inert Gas Process", Welding Journal, Dec. 1966, Res. Suppl., pp. 561s-568s.
4. 김재웅 외, "Al-7020의 Pulse-GMA용접에 관한 연구(1) : 용접변수가 용접부 현상에 미치는 영향", 대한 용접 학회지, 원고 의뢰중.
5. 남수우 외, "연구보고서 87-RF-009", 한국과학기술원, 1987년 12월, pp. 26-31.
6. F.R. Collin, "Porosity in Aluminum Alloy welds", Welding Journal, Jun. 1958, pp. 589-593.
7. R.A. Woods, "Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds", Welding Journal, Mar. 1974, Res. Suppl., pp. 97s-108s.
8. Z.P. Saperstein, G.R. Prescott and E.W. Monroe, "Porosity in Aluminum Welds", Welding Journal, Oct. 1964, Res. Suppl., pp. 443s-453s.
9. R.F. Ashton, R.P. Wesley and C.R. Dixon, "The Effect of Porosity on 5086-H116 Aluminum Alloy Welds", Welding Journal, Mar. 1975, Res. Suppl., pp. 95s-98s.
10. R.J., Shore and R.B. McCauley, "Effect of Porosity on High Strength Aluminum 7039", Welding Journal, Jul. 1970, Res. Suppl., pp. 311s-321s.
11. "Measurement of Residual Stressess by the Hole - Drilling Strain - Gage Method", Measurements Group TECH NOTE TN-503 -1, USA, 1985.
12. G.S. Schajer, "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements", Journal of Eng. Mat. and Technology, vol.103, 1981, pp. 157-163.