

후판 알루미늄 합금 용접의 기공 발생과 방지대책

김 종 희* · 박 동 환*

Porosity in Thick Aluminium Alloy Welds (Causes and Prevention)

J. H. Kim* and D. H. Park*

1. 개 요

알루미늄합금의 용도가 우주 항공기 부품에서 자동차, 선박, 건축 등 다양화 되면서 이들 재료에 대한 용접기술 또한 산업현장의 주요한 과제로 등장하게 되었다. 알루미늄합금은 극히 활성이 높고, 열전도율이나 열팽창계수가 매우 큰 물리적 특성 및 액상과 고상간의 매우 큰 수소 용해도 차이 등의 특이한 성질을 가지고 있기 때문에 용접에 있어서는 기공이나 미세한 용합 불량 발생하기 쉽고, 또 용접변형의 제어에도 세심한 배려를 요하는 등 우수한 용접부를 만들기위해서 고려해야할 문제를 가지고 있다.

특히 기공이 후판 알루미늄 합금 용접에 있어서 보수공사의 대부분을 차지하고 있으므로 기공 방지법을 확립하는 것은 매우 중요하다. 알루미늄 합금의 용접에 있어서 기공의 발생원인은 수소에 의한 것이라고 정립되어 있거나 그 방지법에 대해서는 많은 연구검토가 행해지고 있음에도 불구하고 수소의 공급경로가 매우 다양하고 복잡하기 때문에 아직 체계적으로 확립되어 있지 못한 실정이다.

본 해설에서는 후판 알루미늄 용접시 가장 큰 문제가 되는 기공의 발생 원인과 방지대책을 기 발표된 자료를 기초로 하여 요약 정리함으로서 앞

으로 여러 생산현장에서의 알루미늄합금 용접 특히 MIG용접 관련 문제점 해결에 도움이 되고자 한다.

2. 기공의 발생기구

기공의 발생 원인이 수소라는 것에 대해서는 이론(異論)은 없으며, 이는 용착금속을 그리세린 용액속에서 기계적으로 질삭하는 방법으로 용착금속 내부에 존재하는 기공속의 가스를 직접채취하여 분석한 결과에서도 쉽게 입증된다.

기공의 발생원인이 수소에 의한 것인줄 알면서도 MIG 용접에서의 수소의 공급경로는 매우 다양하고 복잡하기 때문에 기공발생을 감소 및 방지 시키는 것은 간단한 문제가 아니다.

2.1 수소 제공처

MIG 용접에 있어서의 수소원으로는 대략 아래 4가지로 분류할 수 있다.

- 1) 모재 및 와이어 표면에 부착 또는 흡착된 수분, 유기물, 부식생성물 등의 분해에 의한 수소
- 2) 모재 및 와이어 중에 고용되어있는 수소
- 3) 보호가스중의 수소 및 수분
- 4) 아아크 분위기 중에 유입된 주변공기중의 수분
상기된 수소 제공처에서 유입된 수소가 용접중의 용융지 보호가스중의 수소농도에 점유하는 비율을

* 정회원, 현대중공업 (주) 산업기술연구소

여러가지로 가정하여 산출한 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1. 보호가스중의 수소농도 계산결과

수소원	보호가스에 대한 비율(%)	기여율(%)
보호가스 본래의 수소 ^{a)}	0.0035	12
와이어의 수소 ^{b)}	0.0068	24
모재의 수소 ^{c)}	0.0019	7
공기유입에 의한 수소 ^{d)}	0.0162	57
합 계	0.0284	100

Note ; 전압 24V, 전류 280A, 용접속도 500mm/min, 와이어 송급속도 5m/min 및 가스 유량 20ℓ/min 등의 용접조건으로 두께 10mm의 Plate에 Bead on Plate 용접을 하는 조건을 가정.

- a) JIS K 1105 규격치를 기준으로 계산
- b) φ1.6mm 와이어의 고용+표면가스를 5cc/100g 로 하여 계산
- c) 줄로 갈아낸 표면에 부착한 가스량을 0.002cc/m², 고용가스량을 0.688cc/100g (용접에서의 평형 용해도)으로 계산
- d) 20℃ 상대습도 70%의 공기 1.0%가 보호가스 중에 혼합한 것으로 계산

2.2 기공 생성 기구

수소가 용착금속에서 기공을 형성하는 것은 간단하게 말하자면 고온용융 상태와 응고구간에서의 수소 용해도의 급격한 변화 때문이다. 즉, 알루미늄의 수소용해도는 Fig.1에 나타낸 바와같이 용접 직하에서 약 0.036 cc/100g인 반면, 용접 이상에서는 약 20배에 해당하는 0.7 cc/100g 이상으로 급격히 증가한다. 따라서 용접용융지가 응고 할때 고상의 용해도 이상의 수소는 기포를 형성하여 용융지 표

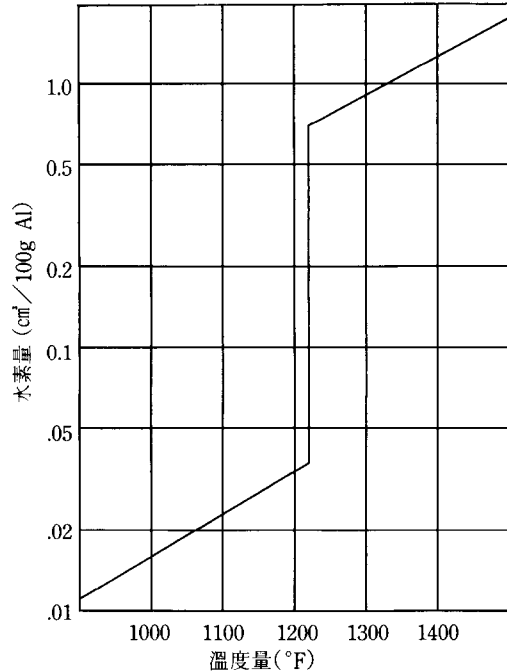


Fig. 1 알루미늄의 온도에 따른 수소 용해도 변화

면으로 방출되며, 표면으로 방출되지 못하고 용착금속내에 잔류하게 되면 기공이 된다. 이와같이 수소에 의하여 용착금속 중에 기공이 생성되는 과정을 도식적으로 나타낸것이 Fig.2 이다.

3. 기공발생 인자와 방지대책

기공 발생에 영향을 주는 인자는 복잡다양하지만 일반적으로 최대 공약수적인 인자들을 요약하면

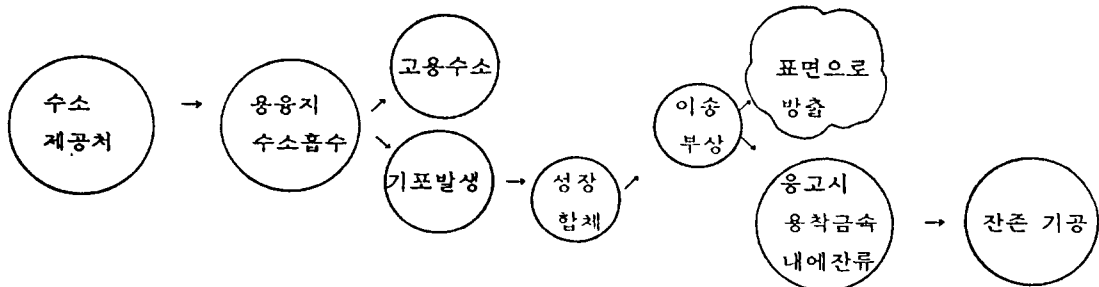


Fig. 2 기공의 생성과정

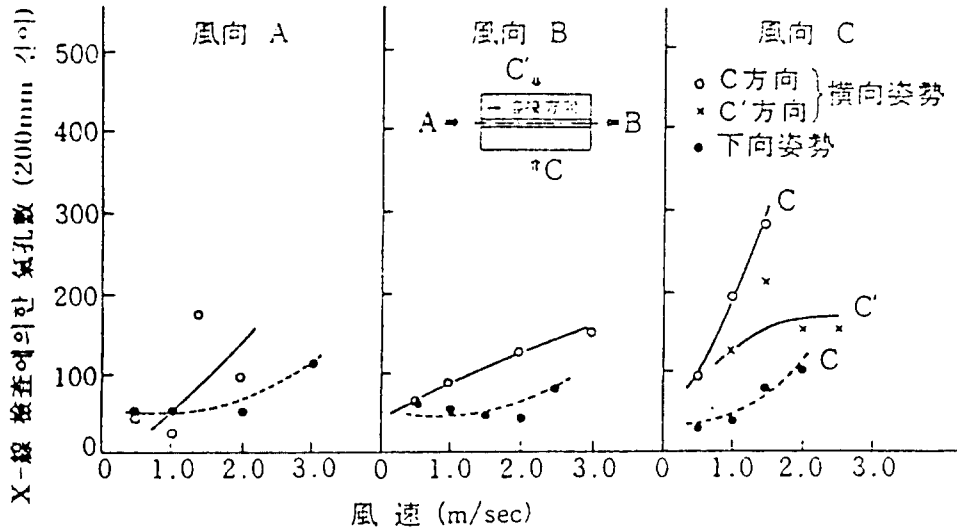


Fig. 3 기공 발생수에 미치는 풍속, 풍향의 영향
(용접조건 : A5083P-O(6mm), A5183WY(φ1.6mm), V-Groove Bead on Plate, 250A, 21V, 645mm/min., Ar 25ℓ/min.)

다음과 같다.

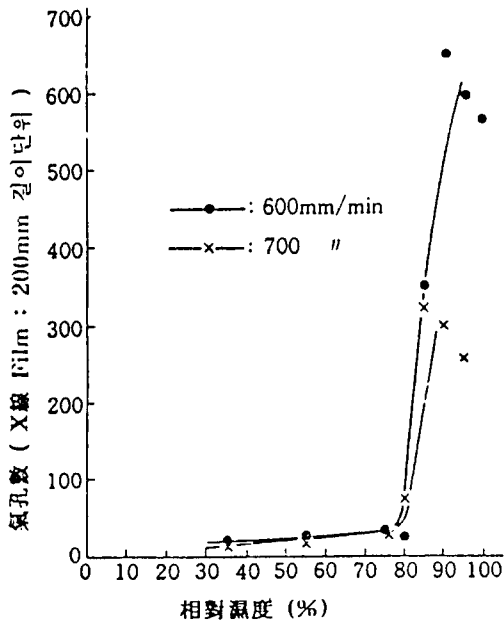


Fig. 4 기공 발생수에 미치는 상대습도의 영향 氣孔數(X線 Film : 200mm 길이 단위) (용접조건 : A5083O-O(10mm), A5183WY(φ1.6mm), 氣溫 30℃, 평향자세 Bead on Plate, 290A, 24V)

3.1 작업환경

작업장은 유해한 먼지 쓰레기 금속분말이 적고 청결하여야 함을 원칙으로 한다. 용접 시공시의 풍속은 1m/sec를 넘지 않아야 하며, 1m/sec 이상이 될 경우에는 반듯이 방풍막을 설치해야 한다. Fig.3에 나타낸바와 같이 어느 풍향의 경우도 풍속의 증가에 따라 기공발생수가 증가하고, RT검사시 1~2급으로 합격하기 위해서는 허용풍속을 1m/sec 이하로 관리해야 한다.

또한 기공 발생은 용접시 주변환경 특히 습도의 영향을 크게 받게 되는데, Fig.4에 보여 주듯이 상대습도 85% 이상에서 급격하게 기공이 증가하는 것을 나타내고 있다. 따라서 특별한 조치를 하지 않는한 상대습도가 85~90%(기온 30℃ 기준)를 넘는 상태에서 용접해서는 않된다.

표준적으로 용접이 수행될 경우 용융지 보호가스 분위기속으로 공기의 유입은 1~3% 정도로 추측되고 있고 이 유입 공기중의 수분이 기공의 수소 원인으로 되는것은 Table 1의 계산 결과에서도 확인된다. 따라서 풍속의 증가는 보호가스 분위기를 흠어지게 하기때문에 공기의 유입량을 증가시키고,

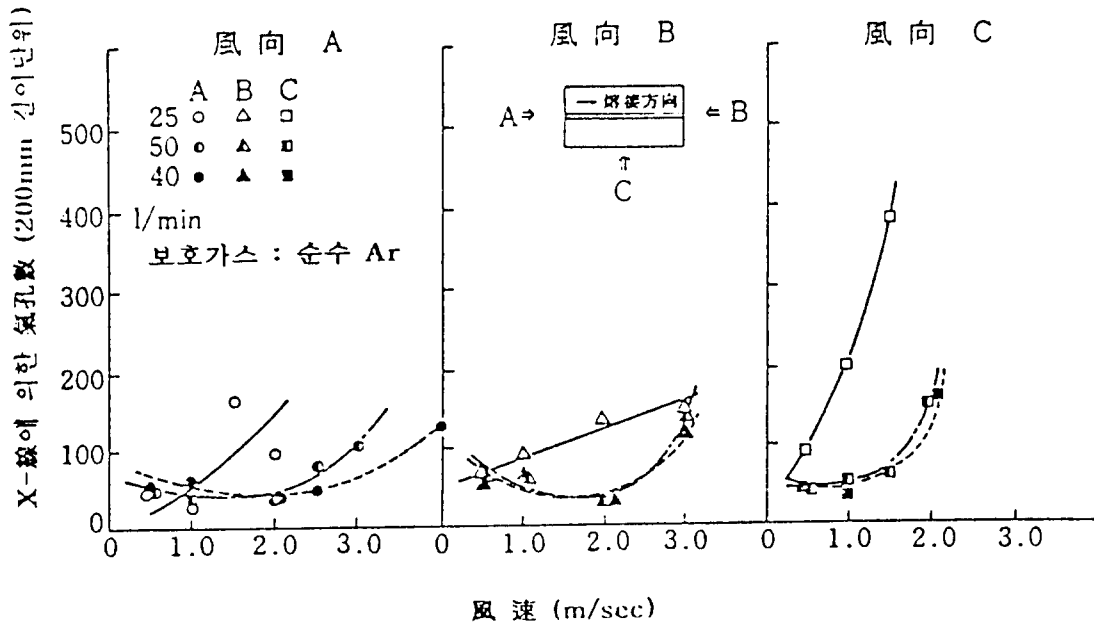


Fig. 5 풍속, 풍향과 발생수와의 관계(가스 유량을 증가한 경우)
 (용접조건 : A5083O-O(6mm), A5183WY(φ1.6mm), V-Groove Bead on Plate, 횡향 자세, 210A, 21V, 645mm/min., 토오치높이 10mm, 토오치각도 0°)

습도의 증가는 공기 유입량이 일정하여도 유입공기 중의 수분량을 증가시키는 것이 되므로, 두 경우 모두 보호가스 분위기속의 수소 농도를 증가시키기 때문에 기공발생수가 증가하는 것이라고 생각되고 있다. 특히 습도가 증가하는 경우는 보호가스 분위기속으로 공기 유입에 의한 영향 뿐만 아니라 와이어의 결로, 토오치 내면의 결로 등에도 영향을 미쳐 보호가스 분위기속의 수소 농도를 보다 더 증가시키기 때문에 기공 발생에 대해서는 매우 큰 영향을 준다.

바람의 영향을 감소시키기 위해서는 용접부 주위에 방풍막을 설치하는 방법과 보호가스 유량을 증가시키는 방법이 있다. Fig.5에서는 보호가스 유량을 40ℓ/min.로 증가 시킬 경우 어느 풍향의 경우도 기공발생이 크게 감소하는 것을 나타 내었다. 또한 습도의 영향에 대해서는 보호가스 프리 플로우(Pre flow), 와이어 릴 박스내에 보호가스 방류와 토오치 냉각수 온도관리 방법이 있다. Fig.6에서는 보호가스 프리 플로우 시간을 120 sec.로 실시 할 경우 용접 Bead 전반부에서도 기공발생량이 크게 감소하는 것을 나타 내었으며, Fig.7에서는 수냉식 용접

토오치에서 냉각수 온도를 로점 이상으로 올렸을 경우 기공발생량이 크게 감소 하는 것을 나타내었다.

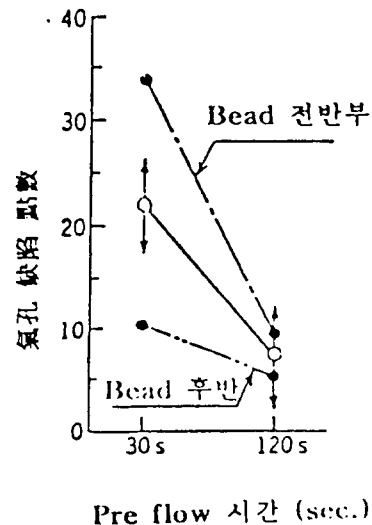


Fig. 6 보호가스 Pre flow 시간의 효과 추정 도표

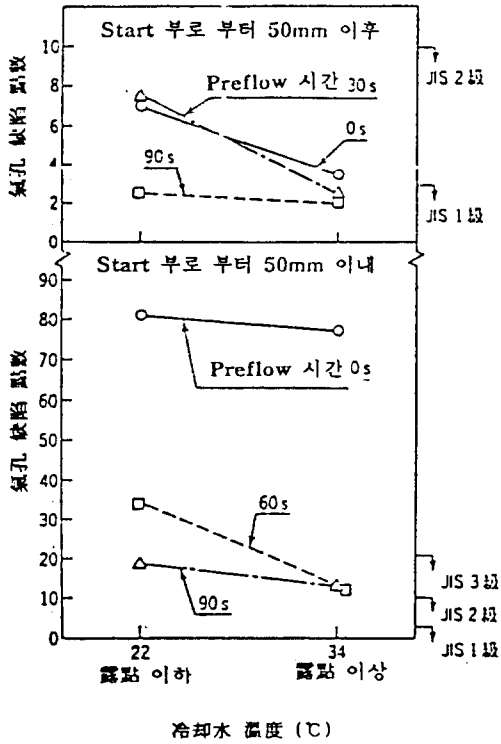


Fig. 7 기공발생수에 미치는 용접 토오치 냉각수 온도의 영향

3.2 용접기 및 주변설비

와이어 송급장치

와이어 송급속도의 변화는 아아크 안정성에 영향을 미쳐, 결국 기공발생에 큰 영향을 주기 때문에 와이어 송급속도는 일정하게 유지 되지않으면 안된다. 와이어는 와이어 릴에서 와이어 직선교정 롤러, 송급, 가압롤러 및 와이어 콘듀이터 라이너를 거쳐 송급되며, 이 송급 과정에서 송급상 방해가 있으면 아크가 불안정하게 되고 아크 불안정은 주위의 공기를 보호가스 분위기 속으로 끌어들이게 되어 기공발생의 원인이 되기 때문에 용접전에 철저한 관리를 통하여 정확히 조정 사용되어야 한다.

또한 와이어 송급 과정에 와이어가 기름으로부터 오염되거나, 와이어 표면에 상처를 입지 않도록 주의해야 한다. 와이어 콘듀이터 라이너 속에 알루미늄 가루가 들어가 와이어 송급을 방해하는 수가 있기때문에 정기적으로, 예를들면 와이어 스펀을

갈아끼울때 Ar 가스로 라이너 내부를 불어서 청소하는 것이 필요하다.

토오치

노즐 직경 및 형상은 용융지 보호 성능을 좌우하고 기공발생에 영향을 주기 때문에 와이어 직경, 사용전류, 보호가스 유량, 협소한 용접부에 대한 접근성 등을 감안하여 결정해야한다.

일반적으로 1.6φmm의 와이어를 사용하는 경우 외경 25φmm 내경 16φmm 정도의 노즐이 사용되며, 휘어진 노즐 보다는 직선형 노즐이 사용된다. Fig. 8은 직선형 노즐에서의 노즐길이와 용접부가스 보호성의 관계를 나타내었다.

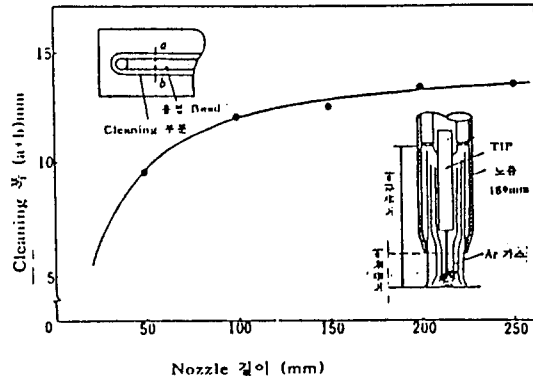


Fig. 8 Nozzle 길이와 Cleaning 率의 관계
(용접조건 : 노즐높이 15mm, 용접전류 190A, 용접전압 23V, 용접속도 44cm/분, 보호가스유량 15ℓ/분)

노즐의 취급 부주의에 의한 노즐 끝부분 변형 또는 노즐끝부분에 스파타가 많이 부착하는 것은 용융지 보호를 나쁘게하고 기공발생을 증가 시키기 때문에 토오치의 취급 및 노즐끝부분의 과열에 주의해야 한다. 특히 수냉 토오치의 경우 냉각수의 흐름량에 주의를 해야하는 것은 말할 필요도 없다.

보호가스 공급라인

보호가스 공급라인의 길이, 재질, 이음부 숫자등은 보호가스의 순도 관리에 영향을 주기때문에 충분한 검토와 관리가 요구된다. 가스공급라인의 길이는 가능한 짧은 것이 좋고 이음부 숫자도 적은 것이 좋다는 것은 당연하지만 가스공급 라인인 재질로서는 Table 2에 나타낸 바와 같이 스텐레스 튜브가

Table. 2 가스 Prewlow 시간과 가스 순도(露點)와의 관계

호스 종류 Ar Prewlow 시간(분)	고무 호스	비닐 호스	경질 테프론 호스	비 고
2	-45.5	-	-57	-호스 출구에서 측정된 露點의 변화 -Ar 가스 유량 30ℓ/min -이음부 숫자 : 2 -호스 길이 : 2 m
5	-48	-	-64	
8	-51.5	-	-	
10	-51.5	-37	-67	
16	-54.5	-	-67	
20	-55	-42	-	
26	-55	-42	-	

가장 좋고 다음으로 경질의 테프론, 비닐, 고무호스 순으로 추천된다.

가스공급라인의 중간부분에서 가스가 새어 나오는 것이 없도록 취급에 주의를 함과 아울러 점검을 철저히 하지 않으면 안된다.

3.3 보호가스

보호가스중의 불순물 (H₂, H₂O)은 기공발생에 큰영향을 주기때문에 관리가 잘된 보호가스를 사용해야 한다.

Fig.9에 나타낸바와 같이 보호가스의 로점(露點)이 -40℃ (-40°F)이하일 경우 기공은 거의 발생되지 않으며 그 이상으로 증가 할수록 기공발생량은 증가한다. 현재 시판되고 있는 용접용 Ar 가스는 JIS K 1105에 기준하여 공급되고 있으며, 그 규격치와 시판가스의 분석치는 Table 3에 나타낸 바와 같다. 시판가스의 분석치에서 보여 주듯이 일관 시판가스들은 일반적으로 JIS 규격치를 크게 상회하는 고순도로 제조되어 있음을 알 수 있다.

따라서 일반적으로 공급되는 Ar 가스 자체에는

Table. 3 용접용 Ar 가스의 품질

순도 및 불순물	JIS K 1105 (1967) (日本)	MIL A 18455 (1958) (美國)	시판가스의 분석 a)			
			A	B	C	D (美國)
아르곤% (Vol.)	>99.9	>99.975				>99.9
酸素% (Vol.)	<0.002	<0.005	0.00001	0.00001	0.00002	<0.002
水素% (Vol.)	<0.001	<0.005	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.004
窒素% (Vol.)	<0.1	<0.015	0.00004	0.0001	0.0001	<0.1
탄산가스 % (Vol.)	規定無	規定無	0.000007 檢出無	0.00008 0.0002	0.000006 0.0001	
메 탄% (Vol.)	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02
水分 _b , mg/ℓ (露點) °C	(-55°C) (以下)	(-55°C) (以下)	(-70°C)	(-66°C)	(-72°C)	

Note a) 리듬吸收法, 放電比色法 또는 熱傳導法

b) 35°C 100 Kg/cm² 以上の 압력용기로 부터 채취한 시료의 값

c) 알루미늄 용접용 美軍規格

d) 赤外分光分析法에 의한 것으로, 다른 CO, N₂O, 鹽化物, 그외의 炭化水素는 檢出 되지 않았다.

비고 : 가스중의 水分은 mg/ℓ 또는 露點으로 표시하고 있다. 또, 微量의 불순물은 ppm 으로 나타내고 있다. 1 ppm=0.0001% (vol.) 이다.

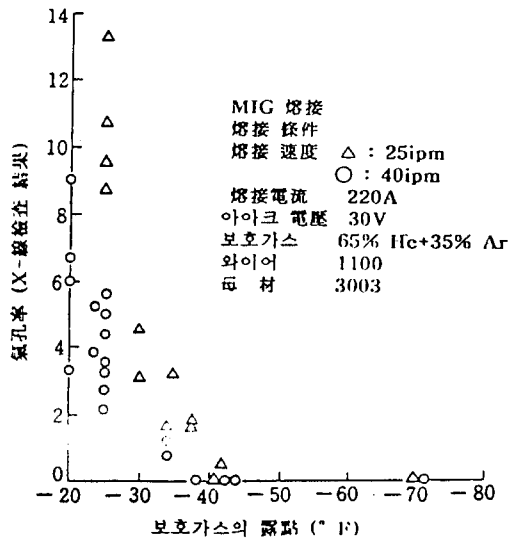


Fig. 9 기공 생성에 미치는 보호가스 露點의 영향

문제가 없고 오히려 3.1 항 “보호가스 공급라인”에서 지적된 바와같이 사용과정에서의 속도 유지가 중요하다 하겠다.

3.4 용접시공 조건

토오치의 위치

토오치 높이, 토오치 각도는 용융지 보호성을 좌우하는 기본적인 요인이고, 어느 것이나 기공발생에 영향을 준다. Fig.10, Fig.11은 횡향자세 용접에서 토오치 높이, 토오치 각도의 영향을 평가한 것으

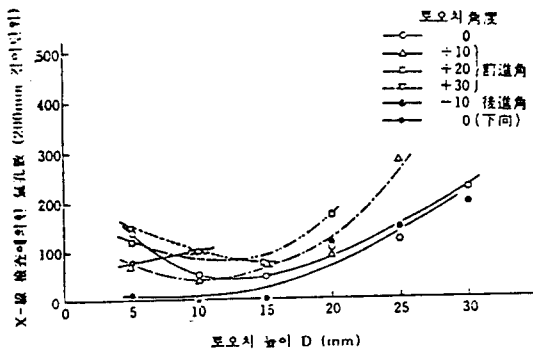


Fig. 10 토오치 높이가 기공발생량에 미치는 영향 (용접조건 : A5083P-O(6mm), A5183WY(φ1.6mm), V-Groove Bead on Plate, 횡향자세, 보호가스 유량 25 ℓ/min., 210A, 21V, 645mm/min.)

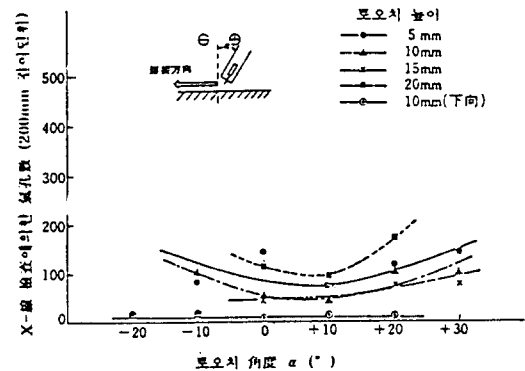


Fig. 11 토오치 각도가 기공발생량에 미치는 영향 (용접조건 : A5083P-O(6mm), A5183WY(φ1.6mm), V-Groove Bead on Plate, 횡향자세, 보호가스 유량 25 ℓ/min., 210A, 21V, 645mm/min.)

로서 토오치의 높이는 10~15mm, 토오치의 각도는 수직 또는 5~10°의 전진각도로 하는것이 기공 발생량을 가장 억제 할 수 있음을 보여주고 있다.

보호가스 유량

Fig.12는 횡향 및 하향자세 용접에서 보호가스 유량별 기공 발생량을 조사한 결과를 나타내었다. 보호가스 유량이 극히 적은 경우에는 보호상태가 희박하게 되고, 극히 많은 경우는 난류가 생겨서 어느 경우나 주위 공기의 유입량이 증가하여 기공 발생량이 증가한다고 생각된다. 따라서 일반적으로

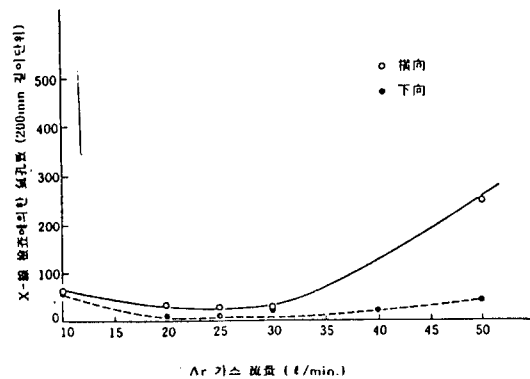


Fig. 12 보호가스 유량이 기공발생량에 미치는 영향 (용접조건 : A5083P-O(6mm), A5183WY(φ1.6mm), V-Groove Bead on Plate, 토오치높이 10mm, 토오치각도 0°, 210A, 21V, 645mm/min.)

사용하는 노즐내경이 16φmm 인 토오치에 1.6φmm 와이어를 사용하여 MIG 용접을 할 경우 적정 보호가스(순 Ar) 유량은 25~30ℓ/분 으로 판명 된다.

ROOT GAP

Fig.13은 ROOT GAP의 변화와 기공 발생수와의 관계를 나타낸것으로서, ROOT GAP이 "O" 일때는 다수의 기공이 발생하는 것을 보여 주고 있다. 이 결과는 다른 문헌에서도 보고되고 있으며, ROOT GAP 내에 존재하는 공기가 보호가스 흐름에 의해 추출되지 않고 용융금속중에 유입 되어졌기 때문 이라고 설명되고 있다.

따라서 기공을 방지하기 위한 최선책은 ROOT GAP을 1mm 정도로 유지하는 것이지만 구조물을 조립하는데는 적용이 어렵다. 차선책으로 ROOT FACE의 크기를 작게하고, BACKING재를 이용하여 충분히 이면까지 용입될 수 있도록 용접조건을 조정하면 된다.

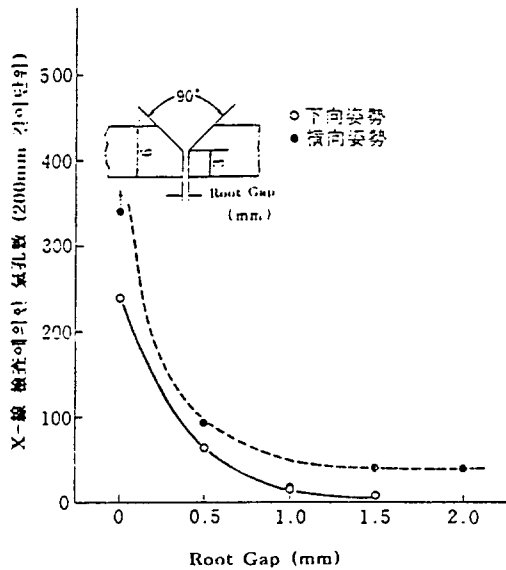


Fig. 13 기공 생성에 미치는 Root Gap의 영향 (용접조건 : A5083P-O(6mm), A5183WY(φ1.6mm), 210A, 21V, 645mm/min.)

용접 자세

Fig.14는 용접자세를 변화시켜 Vee Groove Bead on Plate 용접을 실시하고 기공발생 수를 조사한

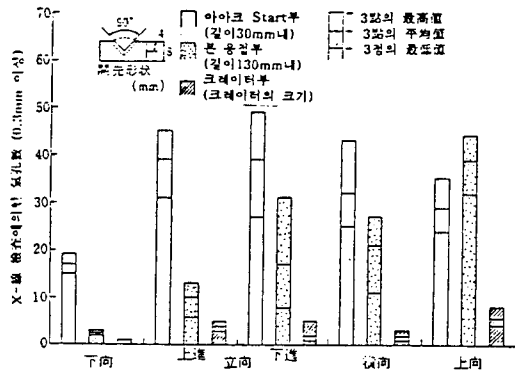


Fig. 14 Bead on Plate 용접부의 평균 기공발생 수(1층 용접)

결과이다. 하향 용접에 비해서 횡향, 상향자세는 기공 발생이 훨씬 용이하며, Fig.14의 Start부(30mm), 본 용접부(130mm) 크레이터부 각각에 대한 결과에서 보여주는 바와같이 횡향, 상향자세는 기공의 부상 탈출이 곤란하고, 보호효과가 나쁜등의 이유에서 하향자세에 비해서 기공이 발생하기 쉽다. 입향자세의 경우에는 상진법으로 시공할경우 기공 발생은 적지만 하진법의 경우는 다수의 기공이 발생하고 있다.

따라서 알루미늄 합금의 용접은 가능한 한 하향 자세로서 시공 하도록 용접설계를 하여야 하겠다.

4. 기공의 검사 방법과 평가기준

현재 알루미늄합금 용접부에 대한 기공 검사 및 평가는 다음의 4가지 방법에 의하여 실시되고 있으며, 공업적으로는 1) 방사선 투과검사가 주로 이용되고 2)~4)의 방법은 연구를 목적으로 사용되고 있다.

- 1) 방사선 투과검사
- 2) 확대 투영기에 의한 단면검사
- 3) 비중측정
- 4) 가스분석

방사선 투과검사

방사선 투과검사법은 광범위한 검사가 가능하고 방법이 간편하며 대량처리가 가능하기 때문에 공업적 목적은 물론 연구목적으로도 넓게 이용되고 있다. 알루미늄 및 알루미늄 합금의 용접부에 대한

Table. 4 모재 두께와 시험 시야의 크기 (mm)

母材 두께	20.0 미만	20.0 이상 80.0 미만	80.0 이상
試驗視野의 크기	10×10	10×20	10×30

Table. 5 결함의 크기와 점수

결함의 크기 (mm)	1.0 이하	1.0 초과 2.0 이하	2.0 초과 4.0 이하	4.0 초과 8.0 이하	8.0 초과 10.0 이하
점 수	1	2	4	8	16

Table. 6 점수 환산하지 않는 결함크기 (mm)

母材 두께	결함의 크기
20.0 미만	0.4
20.0 이상 40.0 미만	0.6
40.0 이상	母材 두께의 1.5%

Table. 7 모재 두께와 결함 점수에 의한 등급 분류

試野 mm	10×10			10×20		10×30
母材 두께	5.0 미만	5.0 이상 10.0 미만	10.0 이상 20.0 미만	20.0 이상 40.0 미만	40.0 이상 80.0 미만	80.0 이상
등급	2	3	4	6	7	8
1	2	3	4	6	7	8
2	7	10	14	21	24	28
3	14	21	28	42	49	56
4	결함점수가 3급 보다 큰것					

비고 : 모재의 두께가 다른 경우에는 얇은쪽 두께로 한다.

방사선 투과검사 규격은 JIS Z3105 이다. 본 규격에는 투과 사진에 의해 산출된 결함점수에 따라 1급~4급 까지의 등급을 정하는 것으로 되어있다. 즉, 우선 시험부의 전체면적 중에서 결함점수가 가장 크게되는 부분에는 Table 4에 따라 시험 시야를 설정한다. 다음에 기공에 대해서는 기공 직경에 따라 Table 5의 계수를 기공갯수에 곱하여 결함 점수를 산출하나, Table 6에 나타내는 직경이하의 기공은 결함점수에 넣지 않는다. 기공 이외의 결함(산화 피막혼입, LF)에 대해서도 각각의 규정에 따라 결함점수를 산출하여 합계의 결함 점수를 구한다. 이 구해진 합계의 결함점수에 대해 등급이 Table 7에 따라 결정 되어진다.

5. 맺음말

알루미늄 합금 용접에서 기공발생은 수소에 의한 것으로 이를 방지 하고자 용융지 보호가스 분위기속으로 유입되는 수소들의 제거처들중 가장 기여율이 큰 인자에 대한 수소유입 경로와 유입량을

감소시키는 방법에 대하여 살펴 보았다.

그러나 용접 생산현장에서 이러한 수소 유입량 감소 대책들을 실천하는 것은 단순한 작업이 아니다. 용접시공 관리자와 용접사들이 본 해설에서 소개한 내용을 이해하고 응용하여 작업장 환경, 용접장비와 부속기기 및 용접 시공조건 등을 수시로 점검하는 등 지속적인 관리와 실천을 통하여 기공 생성량을 감소시킬 수 있고, 우수한 품질의 알루미늄 합금 용접을 수행할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Kaiser Aluminum & Chemical Sales, INC : Welding Kaiser Aluminum(Second Edition)
2. 水野政夫 : The Cause, It's Disposal of Blow Holes Growth at Aluminum Plate Welding. (1979)
3. Eisuke Sakai and Hiroshi Nitoo : 輕金屬溶接 Vol.22 (1984), No.9, pp 395~407
4. 原田 章二 : アルトビ'ア (1990-11), pp 205~213