

GTAW에 의한 고력 Al 합금 용접부의 조직 및 결함에 대한 연구

하려선* · 정병호** · 박화순***

*부경대학교 대학원 재료공학과

**부경대학교 신소재공학부 금속공학전공

***부경대학교 신소재공학부 재료공학전공

Structures and Defects in Welds of High Strengths Al Alloys by Using GTAW

Ryeo-Sun Ha*, Byong-Ho Jung** and Hwa Soon Park***

*Dept. of Materials Science and Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

**Major of Metallurgical Engineering, Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

***Major of Materials Science and Engineering, Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

Abstract

Recently Al alloys are being used gradually for structural materials of transports. In welding of Al alloys used for transports, good weldabilities as well as adequate mechanical properties of the welds should be ensured as structural materials. In this study, the welds formation, macro and microstructural characteristics, generation of defects and hardness distribution in welds of Al alloys of 5083, 6N01 and 7N01 by DCSP- and AC-GTA welding process, were investigated. The deeper penetration was obtained in all welds of the alloys by DCSP-GTAW with He gas, compared with those by using AC-GTAW. The 6N01 alloy showed high susceptibilities to solidification cracking in weld metal and liquation cracking in HAZ of the welding beads of both DCSP- and AC-GTAW process. The cracking ratio of 6N01 alloy was increased with increasing of welding current. The porosity ratios in weld metal of all alloys used were extremely low including all welding conditions of DCSP-GTAW. However, in AC-GTAW process, the porosity ratios of the welds using Ar gas showed much higher values than those using He gas.

* Corresponding author : saintflower@hanmail.net

(Received May 16, 2003)

Key Words : Weldability, Structure, Defect, GTAW, AC, DCSP, Solidification crack, Liquation crack, Porosity

1. 서 론

Al 합금은 구조물의 경량화의 관점으로부터 항공기, 자동차, 철도차량 및 선박 등의 수송분야의 구조물에 대한 적용이 증가하고 있다. 그러므로 Al 합금이 수송기기의 경량화 구조재료로 사용되기 위해서는 고강도가 요구되는 동시에 양호한 용접성이 필수적으로 요구된다. 따라서 경량구조용 고력 Al 합금의 용접부에 대한 고능률성, 고신뢰성을 확보하기 위해서는 용접부에서 발생하는 제결함을 방지 또는 저감화하는 것이 당연한 과제이다.

경량구조용 Al 합금에 대한 용접으로는 아크용접이 그 주류를 이루고 있는데, GMAW(Gas Metal Arc Welding) 및 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) 용접부에서는 프로세스의 고유특성 등에 기인하여 입열량의 증대에 의한 변형 및 균열발생 등이 중요한 문제로 대두되어 있다¹⁾. 그러므로 차량의 경우에는 소입열 사용과 용접변형을 줄일수 있는 펄스(pulse) GMA 용접을 주로 사용하고 있으며, 선박용의 중·후판에도 적용하고 있다. 그러나, GMA 용접의 경우 스패터가 발생할 수 있으며, 또 LNG 탱크 등 대형구조물은 고능률을 확보하기 위하여 He 가스를 사용하는 대전류의 직류정극성(DCSP) GTA 용접을 이용하는 추세이다

2.3) 한편, Al의 산화피막에 대한 청정작용을 나타내는 교류(AC) GTA 용접도 보조적으로 많이 사용하지만, 주로 박판 및 중판에 적용되고 있고, 최근에는 보호가스를 Ar에서 He 가스로 전환시켜 능률면이나 용접부의 품질특성을 향상시키고 있다. 특히, He 가스를 사용하는 DCSP-GTA 용접법은 고능률, 소변형의 관점에서 박판 및 중판뿐만 아니라 전처리에 주의하면 용입에 깊어지는 장점을 이용하여 후판에도 적용할 수 있는 유리한 방법으로 알려져 있다⁴⁾.

따라서 본 연구에서는 경량구조용 고력 Al 합금에 DCSP-GTA 용접을 적용하였을 경우, 분위기가스 및 용접조건에 따른 용접부의 조직적인 특성 및 제결함의 발생에 대하여 기초적인 검토를 하였다. 또한 이들 제 특성을 검토하기 위하여 AC에 의한 GTA도 병행 검토하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에 사용한 재료는 비열처리형 합금으로 Al-Mg계의 5083, 열처리형 합금으로 Al-Mg-Si계의 6N01 및 Al-Zn-Mg계의 7N01을 사용하였다. 그리고 비열처리형 합금인 Al-Mn계의 3003과 열처리형 합금인 Al-Cu-Mg계의 2017은 비교재로서 사용하였다. 사용재료의 화학조성 및 처리조건을 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

DCSP 및 AC에 의한 GTA 용접은 65(w)×110(l)×4(t)의 시험편에 대하여, 길이방향으로 용접재료를 사용하지 않은 비드온플레이트 용접을 하였으며, 보호가스로는 He 및 Ar 가스를 사용하였다. 이때의 주요 용접조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 GTA welding conditions

Welding process	Welding current (A)	Welding speed (cm/min)	Shielding gas (l/min)	Electrode (dia., mm)	Arc distance (mm)	Electrode tip angle (°)
DCSP	60~100	25	He (15) Ar (20)	Pure W (2.4)	2	45
AC	80~100	25	He (15) Ar (20)	Pure W (4)	2	60

용접부 단면의 매크로 및 미세조직은 주로 Keller 시약(2mlHF+3mlHCl+5mlHNO₃+190mlH₂O)으로 에칭하여 광학현미경 및 일부 주사식전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다. 그리고 균열의 파면관찰은 SEM을 이용하였고, 또 균열근방의 미세조직에 대하여 SEM-EDX를 이용하여 성분분석을 하였다. 용접부 단면의 경도는 용접후 약 1개월 상온 방치한 다음 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 용융경계부로부터 용접금속측과 모재의 양 방향으로 측정하였다. 크레이터 균열율은 크레이터 직경에 대한 전체 크레이터 균열길이의 백분율로 나타내었다. 용접금속에 발생한 기공의 기공률은 비드 중심의 표면에서 약 250~300 μ m 하부의 횡단면에 400격자의 점산법을 이용하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 비드의 형성 및 용접부의 조직

용접법 및 용접조건에 의한 비드의 외관 및 용접부 단면의 매크로조직의 예를 Fig. 1에 나타내었다. 용접금속이 형성되는 용접조건에서는, 용접법 및 보호가스의 종류에 관계없이 비교적 양호한 용접비드가 형성되었다. 그러나 비드의 표면은 Ar 가스 및 AC 용접부의 경우가 표면의 광택이 양호하였다. 그리고 DCSP 용접의 경우가 AC의 경우에 비하여 전체적으로

Table 1 Chemical compositions of materials used

Materials	Chemical compositions (wt.%)									Treatment condition
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	
2017	0.560	0.24	3.77	0.710	0.60	0.025	0.0120	0.025	bal.	T3 ¹
3003	0.270	0.72	0.15	1.110	-	-	0.0064	-	bal.	H14 ²
5083	0.120	0.18	0.05	0.610	4.79	0.110	0.0180	0.017	bal.	H112 ³
6N01	0.430	0.18	0.17	0.017	0.47	0.018	0.0180	0.012	bal.	T6 ⁴
7N01	0.064	0.14	0.12	0.49	1.26	0.200	4.5500	0.034	bal.	T5 ⁵

*Solution treatment (495~505°C) → cold rolling → R.T. aging (over 96hrs at room temperature).
 *2 Work hardening (without cold rolling), *3 As hot rolled, *4 Solution treatment (quenching from 525~535°C) → aging (170~180°C×8hrs), *5 Aging (120°C×24hrs)

Welding conditions	5083		6N01	
	Surface	Cross-section	Surface	Cross-section
DCSP, He, 60A				
DCSP, He, 80A				
DCSP, He, 100A				
DCSP, Ar, 100A				
AC, He, 80A				
AC, He, 100A				
AC, Ar, 100A				

Fig. 1 Bead appearances and macrostructures of cross section of 5083 and 6N01 welds

용입이 현저하게 깊게 나타났다. 또한, 동일 용접법에서 He 가스를 사용한 경우가 Ar을 사용한 경우에 비하여 용입이 현저하게 깊어지는 경향을 나타내었다. 동일 전류에서 비드폭에 대한 용입깊이의 정도는 DCSP-He > AC-He > DCSP-Ar > AC-Ar 순으로 나타났다. 그리고 5083의 경우에는 비드표면의 처짐과 이면비드의 부풀음(swelling) 현상²⁾이 타 재료에 비하여 비교적 크게 나타나는 경향을 보였으며, 6N01의 경우에는 용접조건에 따라서 비드의 표면에서도 관찰이 될 정도의 큰 균열이 발생하였다.

Fig. 2에는 He 가스를 사용하여 DCSP로 용접하였을 때 용융경계부 근방 및 용접금속 중앙부의 미세조직을 나타내었다. 용융경계부 근방의 용접금속은 용융경계부에서 에피택시알 성장한 대부분의 주상정과 일부의 셀룰라렌드라이트(cellular dendrite)로 구성되어 있는 것이 관찰되었다. 용접금속 중앙부는 대체적으로 등축정이 나타나는 혼합조직을 나타내었다. 용접전류의 증가에 따른 용접금속 조직의 조대화는 6N01에서 가장 크게 나타나는 경향을 보였다. 또, 용융경계부 근방의 열영향부는 고온으로 가열되고 비교적 급냉되므로 합금에 따라 재결정되었거나 석출물이 재고용된 상태이지만, 6N01을 제외하면 대체적으로 용접전류의 증가에 따른 조대화가 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 이와 같이

용융경계부 근처의 열영향부 결정립의 조대화가 뚜렷하지 않은 것은 Al 합금의 열전도도가 높아 열영향부의 구역이 비교적 넓은 뿐 아니라, 본 연구에서 사용한 합금의 종류에 따라서는 재결정 억제 및 결정립 미세화 원소들이 적량 함유되어 있기 때문으로 생각된다. 위와 같은 DCSP에 의한 용접금속 및 용융경계부의 미세조직적 특성은 종래의 Al 합금에 대한 아크 용접부와 유사한 결과를 나타내었다.

He가스에 의한 DCSP 용접부 단면의 경도분포의 예를 Fig. 3에 나타내었다. 용접금속의 경도는 5083을 제외하면, 모재에 비하여 전체적으로 약간 낮은 값을 나타내었다. 5083의 열영향부에서는 연화구역의 폭이 거의 없고 모재의 경도와 유사한 매우 양호한 경도분포를 나타내었다. 7N01의 열영향부에서도 석출물 재고용에 의한 경도값 변화 이외는 과시효에 의한 연화구역이 거의 나타나지 않았으며, 모재의 경도와 유사한 경도분포를 나타내었다. 이것은, 7N01의 경우에는 실온에서 열영향부의 연화구역에서 경도가 쉽게 회복되는 자연시효의 특성이 우수하기 때문으로 생각된다. 한편 6N01의 열영향부에서는 비교적 넓은 범위에 걸쳐서 모재에 비하여 약간 낮은 경도값을 나타내었다. 이러한 용접부에서의 경도분포의 경향은 다른 용접조건에 경우도 유사하게 나타났다.

Welding process: GTAW-DCSP, Shielding gas: He

Welding Current	60A		100A	
Alloys	Near fusion boundary	Weld metal	Near fusion boundary	Weld metal
2017				
3003				
5083				
6N01				
7N01				

Fig. 2 Optical microstructures of the weld metal and near fusion boundary in DCSP-GTAW with He gas

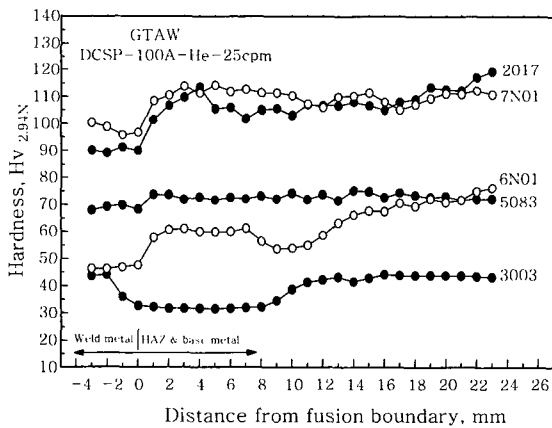
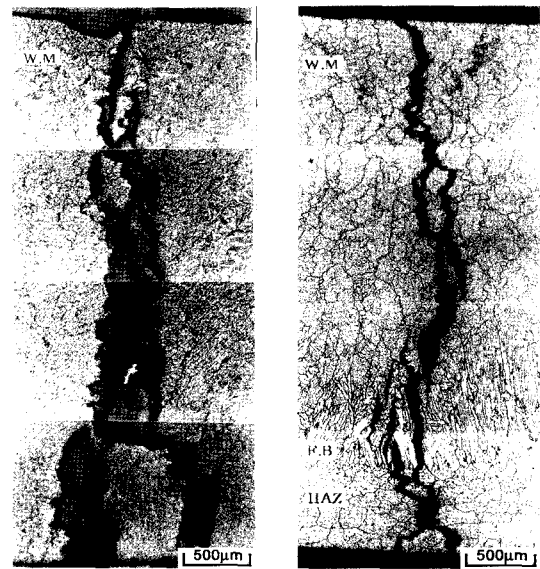


Fig. 3 Hardness distributions of the welds

3.2 용접부의 제결함 현상

3.2.1 용접부의 균열

지금까지의 연구보고에 의하면, 대입열 아크용접에서는 균열감수성이 낮은 5083이나 7N01에서도 균열이 발생하는 것으로 알려져 있고³⁾, Al-Cu계의 실용합금인 2014나 2024에서도 저용점 공정상이 형성되어 균열감수성이 높다고 보고되어 있다⁵⁾. 그러나 본 연구의 용접 조건 범위내에서는, 비드균열의 경우, 6N01에서만 용접금속의 중앙 부분에서 균열이 발생하였다.



(a) DCSP(He gas), 100A (b) AC(He gas), 100A
Fig. 4 Optical microstructures near crack occurred in 6N01 welds

6N01의 균열 및 균열주위의 단면 미세조직을 Fig. 4에 나타내었다. 6N01의 경우, 용접전류 80A 이상에서 He 가스를 사용한 DCSP와 AC의 용접방법 모두에서 균열이 일부 발생하였으며, 용접전류가 증가함에 따

라 균열의 발생정도가 더욱 증가하는 경향을 보였다. 그러나 Ar 가스를 사용한 경우에는 균열이 발생하지 않았다. 일반적으로 6000계 Al 합금에서 고온균열이 많이 발생하는 이유는, 응고구간을 확장시키고 용해도가 큰 Mg 및 Si 성분 등이 함유되어 있어 입열이 증가되면 저융점의 용질이 액상으로 형성되기 쉽고, 이들 액상이 수지상정 입계에 오랫동안 잔존하게 되므로, 응고시 수축에 의한 인장스트레인에 의하여 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 균열은 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 주로 용접금속 중심부에서 수지상정 입계를 따라 용융경계선에 인접한 열영향부까지 진전되는 경향을 보였다. 이러한 균열주위의 용접금속을 EDX로 면분석한 결과에 의하면, Fig. 5의 (b)에서와 같이 균열의 원인이 되는 저융점물질이나 불용성화합물의 형성에 영향을 주는 Si 성분이 수지상정 입계에 농화되어 있음을 알 수 있었다.

Fig. 6은 6N01에서 발생한 균열의 파면을 SEM으로 관찰한 것으로서, 용접금속에서는 (a)와 같이 덴드라이트의 돌기가 관찰되는 응고균열의 특징을 나타내었으며, 용융경계선에 인접한 열영향부에서는 (b)와 같이 액화균열로 보이는 입계균열이 관찰되었다. 따라서 6N01에서는 용접금속에서의 응고균열뿐만 아니라 열영향부의 액화균열감수성도 높다는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서 사용한 Al 합금 용접부의 균열감수성을 더욱 상세히 검토하기 위하여, 크레이터부에서 발생한

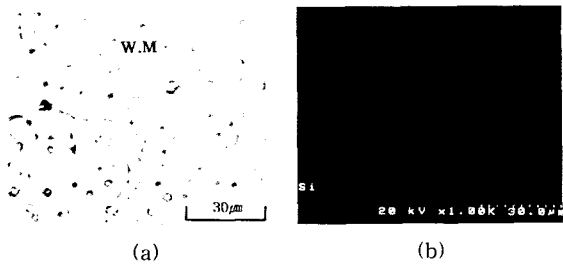


Fig. 5 SEM microstructure of (a) weld metal of 6N01 and (b) EDX analysis on (a)

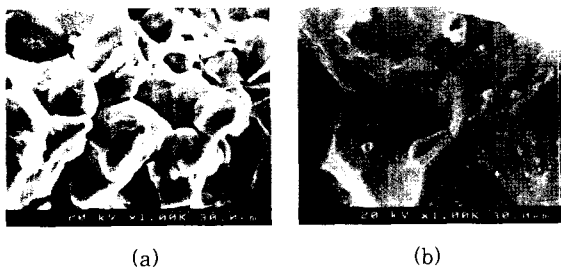


Fig. 6 SEM microfractographs showing (a) solidification crack in weld metal and (b) intergranular crack in HAZ near fusion boundary of 6N01 welds

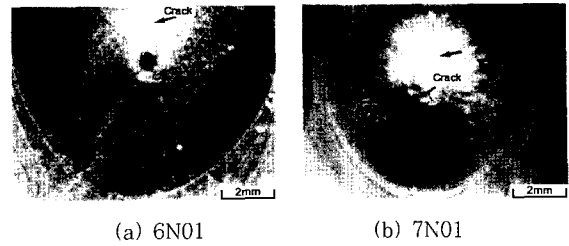


Fig. 7 Macrophotographs of crater crack in (a) 6N01 and (b) 7N01 welds in welding current 100A of AC-GTAW with He gas

균열에 대하여 조사하였다. Fig. 7은 용접전류가 100A 일 때 6N01 및 7N01에서 발생한 크레이터 균열부를 나타낸 것으로서, 6N01의 경우 크레이터 중심부에서 전형적인 별모양(star-like)의 크레이터 균열이 발생하여 크레이터 폭 전체로 진전된 형상을 나타내었다. 7N01의 경우는 분리된 선 모양(linear-like)을 나타내었다. 크레이터부에서의 균열은 He 가스를 사용하였을 경우에 6N01 및 7N01에서 발생하였으며, 비교재로 사용한 2017에서도 균열이 발생하였다.

Fig. 8은 각 합금에 대한 크레이터 균열률을 나타낸 것이다. 크레이터 균열이 가장 많이 발생한 것은 본 연구의 합금 중 비드균열이 가장 많이 발생하였던 6N01로서, 대부분이 80A 이상의 AC 용접부에서 발생하였다. 2017의 경우에는 100A일 때 DCSP 용접부에서도 일부 발생하였다. 이와 같이 DCSP에 비하여 AC 용접에서 균열이 잘 발생하는 것은 동일 전류에서 비드폭이 더욱 크고 용입이 작아 응고수축에 따른 스트레인이 더욱 크게 형성되기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 Ar 가스에 비하여 He 가스의 경우에 균열감수성이 증가하는 것은, He 가스 사용시의 아크 열원의 집중성이 높아 더 많은 용융금속을 형성하고, 따라서 변형량도 증가하기 때문⁷⁾으로 생각된다. 크레이터부의 균열발생 결

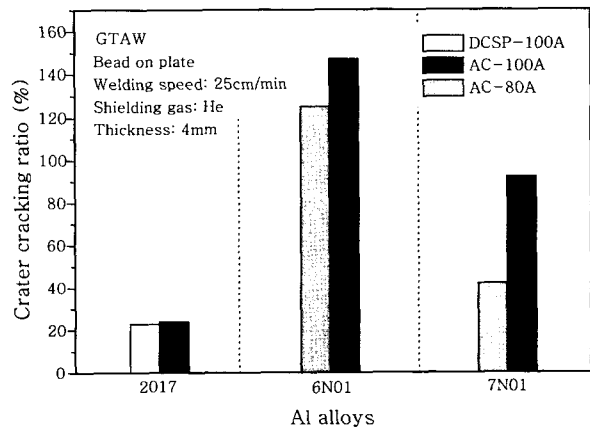


Fig. 8 Crater cracking ratio in weld metal of 2017, 6N01 and 7N01

과에 의하면, 용접비드에서의 균열발생 결과와 마찬가지로 6N01의 경우가 고온균열 감수성이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 7N01의 경우도 비교적 높은 균열감수성을 나타내었다.

3.2.2 용접금속의 기공

용접법 및 용접조건에 따른 각 합금의 기공률을 Fig. 9에 나타내었다. DCSP에 의한 용접부에서는, 용접방법, 용접전류 및 보호가스에 관계없이, 기공률은 약 0.5% 이하로 대단히 낮은 값을 나타내었다. 그러나 AC에 의한 용접부에서는 Ar 가스를 사용한 경우에 대단히 높은 기공률을 보였으며, 특히 5083이 가장 높은 값을 나타내었다. Ar 가스를 사용하여 AC로 용접한 경우의 2017 및 5083에 발생한 기공 및 기공근처의 단면 미세조직의 예를 Fig. 10에 나타내었다. 가장 높은 기공률을 나타낸 5083의 경우에는 비드 표면 근방에서 50~100 μ m의 비교적 큰 기공이 주로 관찰되었다. 각 합금의 용접금속에서의 기공은 원형이 주로 관찰되었으며, 그 외 수지상정간 또는 그 입계에서 형성된 불규칙 미세 기공도 일부 관찰되었다. 한편, 용접전류를 증가시키거나 용접속도를 감소시키면 기공생성이 억제된다는 보고^{1,8)}가 있지만, 본 연구의 범위내에서는 용접전류에 따른 기공발생의 정도는 5083을 제외하면 대체로

유사하였다. 특히, He 가스를 사용할 경우 용접전류나 용접방법에 관계없이 매우 낮은 기공률을 나타내는 것은 He 가스의 적절한 유량에 따른 대기와의 차폐가 잘 이루어졌을뿐 아니라, He 가스의 사용에 따라 용융지의 온도상승효과에 의하여 가스방출이 더욱 용이하게 이루어졌기 때문⁴⁾으로 생각된다. 그리고, 기공의 주 발생원을 수소라고 가정하였을 경우에는, 고밀도의 He 이온이 용융지에서의 H₂ 분압을 감소시켜 기공의 핵생성을 느리게 하고 기공의 성장속도를 저하시키는 것 또한 원인으로 생각할 수 있다⁹⁾.

따라서, DCSP에 의한 GTAW는 깊은 용입을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 용접금속의 기공 억제에도 대단히 유효하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

경량구조용으로 사용되고 있는 고력 Al 합금 중 비열처리형인 5083과 열처리형인 6N01 및 7N01에 대하여, DCSP 및 AC에 의한 GTA 용접법을 이용하여 비드온플레이트 용접을 실시한 후, 용접비드의 형성, 용접부의 매크로 및 미세조직적 특성 및 결함현상 등에 대하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동일한 용접전류에서, DCSP로 용접한 경우가 AC의 경우에 비하여 용입이 깊게 나타났으며, 또한 보호가스로 He를 사용한 경우가 Ar의 경우에 비하여 용입이 깊게 나타났다.

2) 용접금속은 용융경계선에서 에피탁시알 성장된 주상정과 등축정의 혼합조직으로 구성되었으며, 용접전류의 증가에 따른 조직의 조대화는 6N01에서 가장 크게 나타났다.

3) 용접비드에서의 응고균열은 6N01에서만 관찰되었으며, 수지상정 입계를 따라 용접금속의 중심에서 주로 발생하는 경향을 보였다. 그리고 용융경계부 근방의 열영향부에서 액화균열도 관찰되었다. 이들 균열은 He 가스를 사용한 DCSP 및 AC 용접에서 용입이 크거나 용접전류가 높을 때 나타났으며, 균열발생 원인 중의 하나로 Si 성분의 입계 농화가 관찰되었다. 따라서 6N01의 경우에는 용접금속에서의 응고균열감수성 뿐만 아니라 열영향부에서의 액화균열에 대한 감수성도 높다는 것을 알았다.

4) 크레이터 균열은 대부분 He 가스를 사용한 AC 용접에서 발생하였고, 용접전류가 높을수록 크레이터 균열율이 증가하였다. 이러한 균열은 6N01에서 가장 많이 발생하였으며, 용접비드에서는 균열이 발생하지 않았던 열처리형의 7N01에서도 일부 관찰되었다.

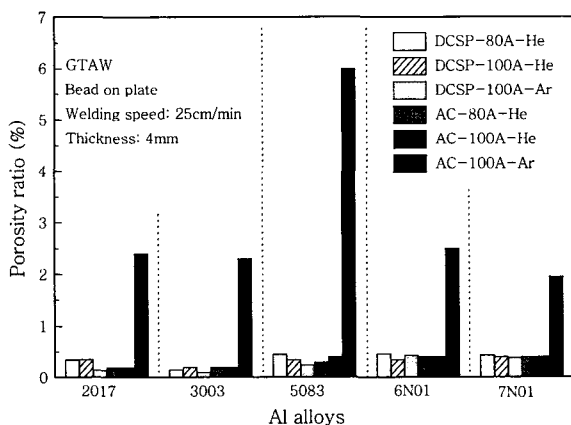


Fig. 9 Variation of porosity ratios in weld metal

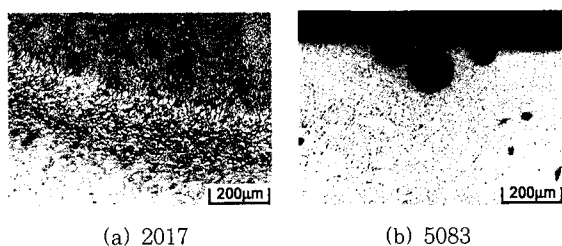


Fig. 10 Microstructures showing porosities in weld metal of AC-GTAW with Ar gas

5) DCSP 용접의 경우 보호가스에 따른 기공률은 합금의 종류에 관계없이 약 0.5% 이하로 대단히 낮은 값을 나타내었다. 그러나, AC 용접에서 Ar 가스를 사용하였을 경우에는 기공발생 정도가 크게 증가하였으며, 5083에서 가장 많은 기공이 관찰되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 96-03-00-08-01-3)에 의하여 수행된 결과이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Akira Uchida : Welding of Non-ferrous Metals, Journal of the Japan Welding Society, **38-9** (1969), 3-17 (in Japanese)
2. Watanabe Takehara, Marumoto Hideo, Moro Takashi and Terada Makoto : The Effect of DCSP TIG Arc on Welding in Aluminium Alloy, Journal of Light Metals, **27-3** (1977), 113-121 (in Japanese)
3. 永岡榮之, 入澤敏夫 : DCSPティグ溶接のアルミニウムへの適用, 輕金屬溶接, **21-9** (1983), 12-23 (in Japanese)
4. Yutaka Kimura, Susumu Harada, Toyoyuki Satoh, Keiki Ariga and Katsuhiko Yasuda : Application of He-DCEN·TIG Orbital Welding to Aluminium
5. Yoshihiko Sugiyama : Weldability of Aluminium-Copper Alloys, Journal of the Light Metal Welding and construction, **18-1** (1980), 10-27 (in Japanese)
6. 杉山禎彦 : アルミニウムおよびその合金の溶接割れについて, 溶接技術, 9月 (1972), 101-112. (in Japanese)
7. Kazuo Hiraoka, Akira Okada and Michio Inagaki : Effect of Helium Gas on Arc Characteristic in Gas Tungsten Arc Welding, Journal of the Japan Welding Society, **3-2** (1985), 241-246 (in Japanese)
8. Yoshikazu Kuriyama, Kazuyuki Minoda, Hideyuki Nagaoka and Kiyohumi Ishikawa : Prevention of Porosity in Aluminium Alloy Weldments, Ishikawaharimakiho, **15-1** (1975), 47-56 (in Japanese)
9. Z.P.Saperstein, G.R.Prescott and E.W.Monroe : Porosity in Aluminium Weld, WRS, October (1964), 443-453