

Al-Cu 합금의 GTA 용접에서 중력에 따른 미세조직 거동에 관한 연구 Gravitational effects on the microstructural evolution of GTA welds in an Al-Cu alloy

강 남현*, Jogender Singh**, Anil K. Kulkarni**

* 한국생산기술연구원

** 펜실베니아 주립대학교

ABSTRACT

Gas tungsten arc welds on Al-4 wt% Cu alloys were investigated to determine effects of gravitational orientation on the weld solidification behavior. Outward convection flows in the parallel-down weld might be inhibited because of its reverse direction with respect to the gravity vector. This resulted in abnormal 'S' shape of the trailing s-l interface and the solidification rate (V_s), which was receded toward the weld pool center. Significant influence of gravitational orientation resulted in the variation on the weld pool shape associated with convection flows, which in turn affected solidification orientation/morphology and the primary dendrite spacing(λ_1).

1. 서 론

대형 구조물 또는 파이프 용접의 경우 중력이 용접현상에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다. 지난 30년간 용접부 형상 및 대류현상에서 중력에 관한 연구가 수행되었고¹⁻⁴⁾, 응고조직에 관한 연구도 발표되었다⁵⁻⁶⁾. 그러나 현재까지 용접 미세조직 거동에 관하여 분분한 해석 논쟁을 해결할 수 있는 체계적인 연구가 이루어지지 않았다. 최근의 연구에서 중력은 용융풀 자유표면의 형상과 함께 용접부 형상까지 영향을 미치는 것으로 밝혀졌으나 응고조직에서의 중력의 효과는 밝혀내지 못하였다⁷⁾. 본 연구에서는 Al-4wt.% Cu 합금의 GTA 용접 시 중력이 미치는 응고조직 거동을 조사하고자 한다. Al-Cu 합금계는 응고조직에 관한 다량의 기존 실험결과를 보유하고 있으며, 또한 합금원소의 큰 밀도차에 따라 중력의 효과를 극대화시킬 수 있다는 장점이 있다.

2. 실험방법

응고조직에 관한 중력방위의 영향을 조사하기 위하여 중력벡터와 아크 진행방향과의 방위관계를 Figure 1과 같이 설계하였다. 세 종류의 용접자세(\perp , \parallel -U, \parallel -D)로 Al-4wt.% Cu 모재 위에 BOP 용접을 하였다. 중력효과 관찰을 위하여 용접부 크기를 최대화 시켜야 할 필요가 있었으므로⁷⁾ 완전용입을 시키지 않는 한도에서 최

대의 GTA 용접출력과 최소의 용접속도를 구현하여 용접을 수행하였다. 자세한 용접조건 및 시편준비 과정은 다음과 같다.

■ 용접출력: 185A, 16.5V ($\pm 0.2V$)

■ 용접속도: 3mm/s

■ 시편크기: 50mm x 150mm x 6.5mm

결정성장속도(V_s)와 고액경계에서의 온도구배(G_L)를 이용하여 중력벡터의 방위에 따른 응고조직 거동과 미세조직 크기(λ_1)를 조사하였다. 결정립 성장방향(θ)과 λ_1 은 용접 중심면에서 측정되었으며, V_s 를 계산하는데 사용되었다. G_L 은 측정된 용접부 형상으로부터 결정되었다.

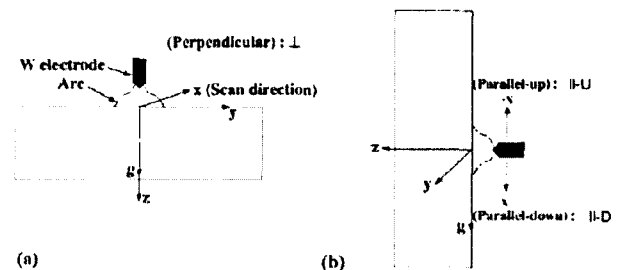


Figure 1 Welding orientation: (a) perpendicular orientation to gravity and (b) parallel-up and parallel-down orientation to gravity

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 형상

용접자세에 따른 용접부(Fusion Zone; FZ) 형상을 Table 1에 나타내었다. II-U 용접자세는 \perp 또는 II-D 용접자세에 비하여 15% 깊은 용입과 22% 증가한 FZ area를 나타내었다. 이 결과는 지난 실험결과와^{7,8)} 일치하는 경향을 보였다. 용접자세와는 무관하게 일정한 입열량(heat input)을 공급하였으나 다른 용접부 형상을 얻은 결과를 짐작해 보면 용융풀에서의 G_L 과 cooling rate(CR) 또한 변동이 있었음을 알 수 있다. 이는 연쇄적으로 응고조직과 λ_1 에도 영향을 미치리라 생각된다.

Table 1 Measured weld pool shape (FZ) as a function of gravitational orientation

	Depth (mm)	Width (mm)	Depth / Width	Area (mm ²)
\perp	2.35 ± 0.1	6.60 ± 0.1	0.36 ± 0.03	11.0 ± 0.4
II-U	2.75 ± 0.1	6.75 ± 0.2	0.41 ± 0.05	13.6 ± 0.5
II-D	2.35 ± 0.1	6.50 ± 0.1	0.36 ± 0.03	10.6 ± 0.3

3.2 용접 응고조직

용접부의 top-view를 관찰한 결과 고액경계에 서 columnar 형상의 결정립이 성장하였고, 용접 중심선에 가까워지면서 'axial' 또는 'stray-like' 형상의 결정립 구조로 바뀌었다. 또한 band 형의 용접비드가 용접자세와 무관하게 관찰되어, 중력벡터의 방위에 따른 macroscopic 결정립 구조의 변화는 분명하지 않았다.

응고조직에 관한 미세구조를 조사하였다. 고액경계면에서 성장한 columnar 결정립은 용접자세와 무관하게 간격이 넓고 길게 늘어선 형태를 갖고 있었다. 응고가 진행되면서 용접중심선을 향하여 결정립은 미세화 되었으며, 대표적인 II-U과 II-D 용접자세에서의 미세구조를 Figure 2에 나타내었다. II-D 결정립은 용접부 표면에서도 여전히 길게 늘어선 columnar 구조를 유지하고 있었으나, II-U 결정립의 경우 columnar 구조의 방향성을 잃고 등방향 구조를 나타내기 시작하였다. Figure 2에 포함되지는 않았지만 \perp 용접자세의 결정립 구조는 II-U과 II-D 결정립 구조를 모두 가지고 있었다.

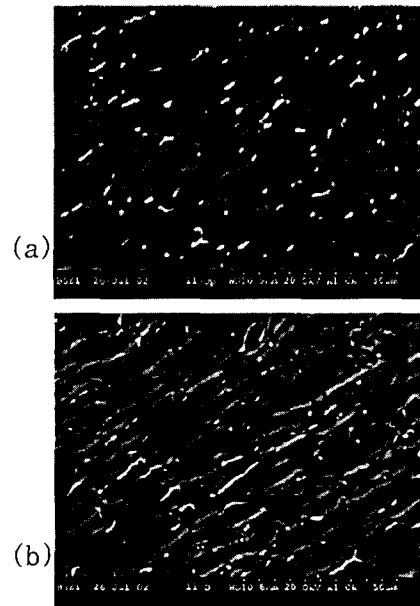


Figure 2 Representative microstructures near the weld pool surface for the (a) II-U and (b) II-D weld

3.3 결정립 성장방향

결정립 성장방향은 columnar 결정립 성장방향과 용접진행방향 사이의 각도(θ)로 측정되었다. \perp 와 II-U 용접자세의 경우 columnar-dendritic 결정립의 성장방향은 용접부 표면으로 접근하면서 지속적으로 감소하였다. 그러나 II-D 결정립은 지속적인 감소를 보이지 않고 'S-shape'의 변태를 보였다. Figure 3a는 용접 중심면에서 결정립 성장방향을 표시한 그림이다. 결정성장속도(V_s)는 식(1)을 사용하여 θ 에서 전환되었고 Figure 3b에 표시하였다.

$$V_s = V_a \cos\theta \tag{1}$$

V_a 는 용접진행방향과 평행한 용접속도를 가리킨다. 전반적으로 용접자세에 따른 V_s 거동은 II-D에서의 변태형상을 제외하면 고액 용융계면에서 용접부 표면에 이르기까지 비슷한 V_s 값을 보였다.

II-U 용접부에서는 중력벡터의 방향과 용융풀의 outward 대류방향이 일치하여 trailing 고액경계 및 V_s 형상은 변태점 없이 원형을 나타낼 것이라 생각된다. 그러나 II-D 용접부의 경우 outward 대류방향과 중력벡터가 반대방향으로

작용하여 outward 대류는 억제되고 고액경계가 무너져 내린 형상이 되리라 생각된다. 이러한 억제된 고액경계로 말미암아 결정성장방향(θ)과 결정성장속도(V_s)에서 'S-shpe'의 변태형상을 관측할 수 있었으리라 생각된다.

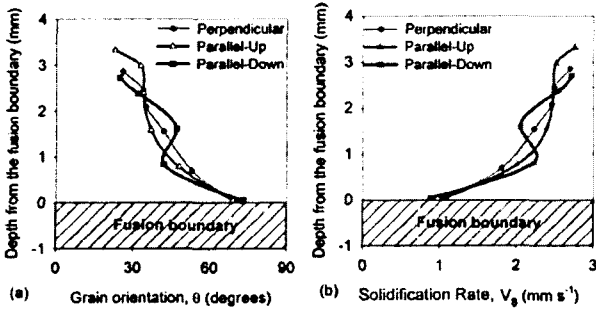


Figure 3 Effects of gravitational orientation on the (a) the measured angle θ and (b) the calculated V_s

3.4 Primary dendrite spacing (λ_1)

용접 중심면에서 시편의 두께방향으로 측정된 λ_1 을 Figure 4에 나타내었다. 용접자세와 무관하게 용융경계에서 가장 간격이 넓은 λ_1 이 발견되었고, 용접부 표면으로 접근하면서 미세화 됨을 알 수 있었다. \parallel -D과 \perp 용접자세의 경우는 비슷한 λ_1 값을 보였다. 그러나 \parallel -U 용접부는 다른 용접자세에 비하여 18% 넓은 λ_1 을 고액경계면과 용접부 표면에서 가지고 있음을 알 수 있었다. 이 결과는 \parallel -U 용접부의 작은 CR 때문에 확산 및 결정립 성장에 필요한 충분한 시간을 가졌기 때문이라 생각된다.

4. 결 론

중력벡터의 방위에 따른 용접응고조직의 거동을 조사하기 위하여 Al-4wt.% Cu 합금에 대한 GTA 용접부 응고조직을 관찰하였다.

- 1) \parallel -U 용접부의 크기는 \parallel -D과 \perp 에 비해 22% 증가하였다.
- 2) 따라서, \parallel -U 용접부의 경우 \parallel -D과 \perp 에 비해 넓은 λ_1 값을 나타내었다.
- 3) 용접부 표면에서 \parallel -D 용접응고조직은 더욱 columnar 구조를 보였고, 결정성장속도 (V_s)는 'S-shape'의 변태형상을 보였다.

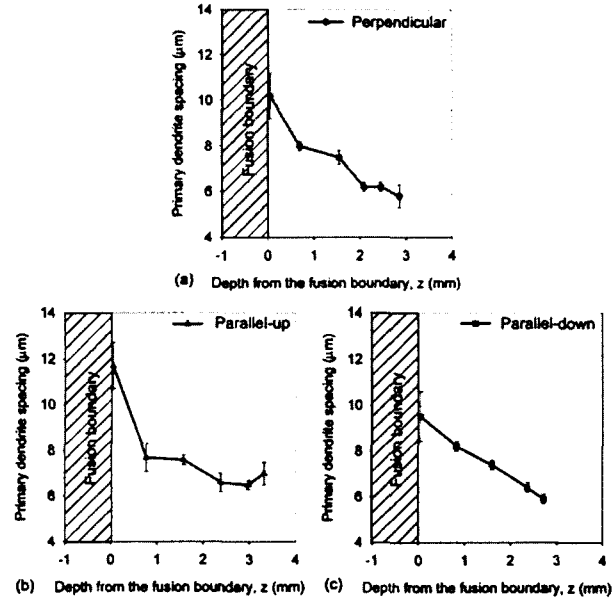


Figure 4 The primary dendrite spacing (λ_1) as a function of welding orientation

참고문헌

1. K. Nogi, Y. Aoki, H. Fujii and K. Nakata, Acta Materialia 46(12) (1998) 4405.
2. J. S. Foley and C. M. Banas, ICALOE'87 (1987) 47.
3. B. E. Paton, Autom. Weld. 25(6) (1972) 1.
4. D. K. Aidun, J. J. Domey and G. Ahma^야, Welding Journal 79(6) (2000) 145s.
5. G. L. Workman and W. F. Kaukler, ICALOE'90 (1990) 430.
6. D. K. Aidun and J. P. Dean, Welding Journal 78(10) (1999) 349s.
7. N. Kang, T. A. Mahank, A. K. Kulkarni and J. Singh, Mater. and Manuf. Proc. 18(2) (2003) 169.
8. R. E. Mueller, PhD thesis, York University, North York, Ontario, 1994.