

Spot-GTA 용접자세에 따른 304 스테인리스강 용융지 표면 및 용접부 형상 거동

강남현* · 박영도** · 조경목* · Singh Jogender*** · Kulkarni Anil****

*부산대학교 재료공학부

**동의대학교 신소재공학과

***펜실베이니아주립대학교 Applied Research Laboratory

****펜실베이니아주립대학교 기계공학과

Behavior of Weld Pool Shape and Weld Surface Deformation as a Function of Spot-GTA Welding Position for 304 Stainless Steel

Namhyun Kang*, Yeong-Do Park**, Kyung-mox Cho*, Jogender Singh*** and Anil Kulkarni****

*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

***Applied Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA 16801, USA

****Department of Mechanical Engineering, Pennsylvania State University, University Park, PA 16801, USA

Abstract

Effects of gravitational orientation on gas tungsten arc welding (GTAW) for 304 stainless steel were studied to determine the critical factors for weld pool formation, such as weld surface deformation and weld pool shape. This study was accomplished through an analytical study of weld pool stability as a function of primary welding parameters (arc current and arc holding time), material properties (surface tension and density), and melting efficiency (cross-sectional area). The stability of weld pool shape and weld surface deformation was confirmed experimentally by changing the welding position. The arc current and translational velocity were the major factors in determining the weld pool stability as a function of the gravitational orientation. A 200A spot GTAW showed a significant variation of the weld pool formation as the arc held longer than 3 seconds, however the weld pool shape and surface morphology for a 165A spot GTAW were 'stable', i.e., constant regardless of the gravitational orientation. The cross-sectional area of the weld (*CSA*) was one of the critical factors in determining the weld pool stability. The measured *CSA* (13.5mm^2) for the 200A spot GTAW showed a good agreement with the calculated *CSA* (14.9mm^2).

*Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr

(Received August 22, 2007)

Key Words : Weld pool shape, Weld surface deformation, 304 stainless steel, Gravitational orientation, Welding position, Cross-sectional area (*CSA*), Gas tungsten arc welding (GTAW)

1. 서 론

일반적으로 아크 또는 고에너지빔을 열원으로 사용하는 용접공정은 모재의 온도가 용점 이상으로 가열되어 용융금속에서 일어나는 유동현상과 이에 따른 응고현상

이 최종 용접부의 품질에 중요한 영향을 미친다. 용융부에서의 유동현상은 주로 표면장력(surface tension) 및 전자기력(electromagnetic force)에 의한 대류(convection)가 큰 영향력을 발휘하며¹⁻⁴⁾, 상대적으로 중력 가속도(gravitational acceleration)에 의한 부력(buoyancy force)이 용융부 대류현상에 미치는 효

과는 극히 작은 것으로 알려져 있다^{5,6)}. 그러나 실질적으로 파이프용접에서는 용접자세에 따른 중력의 영향으로 용접부 표면 및 단면의 형상이 변하는 것을 알 수 있다. 또한 저자는 용접조건(높은 용접전류 및 낮은 용접속도)에 따라 중력이 용접부 표면형상을 결정하는 중요한 요인이 될 수 있으며, 결과적으로 용접부 단면의 형상 및 미세조직도 변화시킴을 실험 및 전산모사를 통하여 증명하였다^{7,8)}. 이와 같이 용융부에서의 대류현상 및 용접부 형상에 대한 연구는 거의 대부분 전산모사에 의한 방법으로 수행되었으므로, 재료 또는 용접 전원의 종류에 따라 공통적으로 적용되지 못하는 어려움을 가지고 있었다. 따라서 전산모사 방법이 아닌 용융금속의 물리적 성질과 용융지 표면에서의 힘 평형 방정식을 이용하여 중력의 영향을 분석할 필요가 있다. 실제 파이프용접의 경우에 최종 적용하기 전에 용접자세에 따른 중력의 영향을 체계적으로 모델연구하기 위하여 spot-GTA 용접공정 조건에 따라 예측하고자 한다.

본 연구는 가스텅스텐아크용접(GTAW)에서 중력의 방위가 용접부 형상에 미치는 영향을 분석하고 실험적으로 증명하였다. 중력이 용접부 형상에 미치는 용융효율(melting efficiency)의 거동은 용접부 단면적(cross-sectional area, CSA)을 이용하여 분석하였다. 일반적으로 용융효율은 Q_m/Q_i 로 정의되며, Q_m 은 용융지만을 녹이는데 필요한 열량 즉 입열량(heat input)이다⁹⁻¹¹⁾. 용접조건이 일정하다면 Q_i (current × voltage × time)는 일정하며, Q_m 은 용융지의 체적 또는 면적에 대한 함수이므로 용접부 단면적을 이용하여 용융효율의 거동을 분석하였다. 용융효율은 모재의 물리적 특성인 표면장력과 밀도의 함수로 분리되어 계산되었으며, 이 계산 값은 주요 용접변수인 아크 전류와 아크 유지시간에 따라 실험적으로 증명되었다. 중력이 용접부 형상에 미치는 영향에 대한 분석방법은 지속적으로 지구에서의 파이프용접 및 우주에서의 용접 시 중력에 대한 기본적인 이해를 돕는데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

2. 실험방법

용접부에서 중력 방위의 영향을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 용접위치를 변화시키며 실험을 수행하였다. 용접자세는 아래보기자세와 수직자세로 구별되었다. 아래보기자세는 수평으로 놓인 시편에 중력의 방향으로 아크를 조사하여 용접을 수행한 경우이고, 수직자세는 수직으로 놓인 시편에 중력의 방향과 수직인 방향에서 아크를 조사하여 용접을 수행하였다. 용접시편은 50mm × 50mm × 6.5mm (t)의 304 스테인리스강을 사용하였고, 시편과 같은 재료로 구성된 작업테이블이 시편

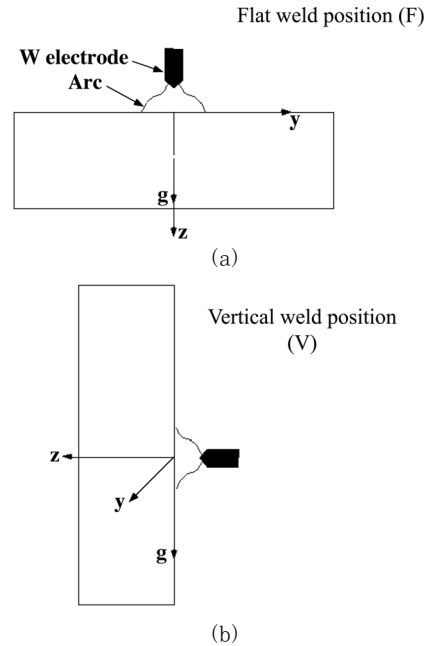


Fig. 1 Welding positions: (a) flat position and (b) vertical position

Table 1 Process parameters used to produce the weld using the gas tungsten arc welding (GTAW)

Parameters	Conditions
Welding current	165A / 200A
Arc voltage	14.2V / 15.0V
Diameter of the electrode	2.4mm
Distance from the tip to the specimen	1.7mm
Electrode tip angle	60°
Shielding gas / flow rate	Ar / 25CFH
Sample size	50 × 50 × 6.5mm

을 고정하였다. 가스텅스텐아크 스폿용접은 165A와 200A의 용접전류를 사용하고 아크 유지시간을 0.5~10초까지 변화시키며 중력의 영향을 조사하였다. 보다 자세한 용접공정 조건들은 Table 1에 나타내었다. 용접부 단면검사는 중력의 방향으로 용접부 중앙단면을 절단하여 용입, 폭 및 단면적(CSA)을 조사하였다. 용접자세에 따른 용접부 형상의 거동을 체계적으로 연구하기 위하여 아래보기자세에서는 용접부 중앙단면의 어느 방향으로 절단하더라도 대칭을 이루므로 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 수직자세에서는 중력의 영향을 극대화하기 위하여 수직으로 놓인 시편에서 중력의 방위와 동일한 방향으로 용접부 중앙단면을 절단하여 용접부 폭, 용입 및 단면적을 측정하였다. 용접부 단면 형상은 10% 옥살산 용액에서 전해에칭을 수행하여 광학현미경을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험결과

3.1 아크 유지시간과 아크 전류가 용접부 형상에 미치는 영향

용접전류 165A 스폿용접에서 아크 유지시간 및 용접 위치에 따른 용접부의 폭, 용입 및 단면적의 거동을 Fig. 2에 나타내었다. 일정한 용접전류를 유지하고 아크 유지시간을 0.5초에서 10초까지 상승시키면서 용접

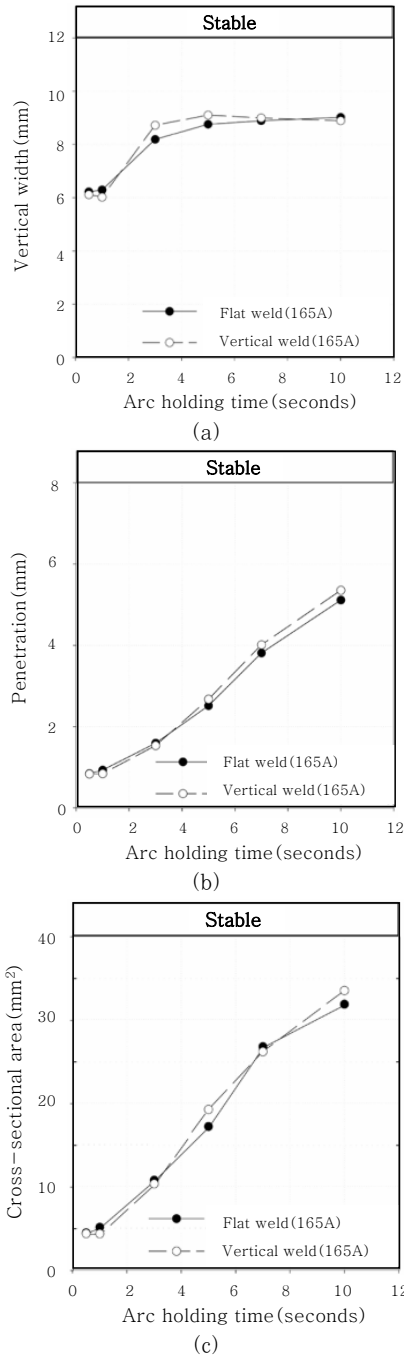


Fig. 2 Measured weld pool (a) width, (b) penetration and (c) cross-sectional area for 165A spot GTAW

부 형상을 변화시켰다. 아크 유지시간 0.5초에서 3초까지는 용접부 폭, 용입 및 단면적이 꾸준히 증가하였다. 아크 유지시간 5초가 지나면서 용입과 단면적은 계속하여 증가되었으나(Fig. 2b 및 2c), 용접부 폭은 더 이상 증가하지 않고 7초 이후에는 거의 일정한 값을 보였다(Fig. 2a). Fig. 2에서 볼 수 있듯이 165A 스폿용접에서는 용접부 폭, 용입 및 단면적의 거동에 아크 유지시간이 미치는 영향은 관찰되었으나, 용접자세 또는 중력 방위의 영향은 관찰되지 않았다. 이와 같이 용접자세에 따라 용접부의 형상이 큰 영향을 받지 않는 조건을 안정구역(stable)이라 정의하였다.

용접전류의 영향을 연구하기 위하여 200A 스폿용접을 수행하여 용접자세 및 중력 방위에 따른 용접부의 형상을 조사하였다. Fig. 3a 및 3b는 아크 유지시간을 3초까지 유지할 때 용접부 폭과 용입이 꾸준히 증가함을 보여주고 있다. 3초 후부터 용접부 폭이 증가하는 속도가 줄어들면서 5초 이후에는 거의 일정한 폭을 보였다. 그러나 용입은 아크 유지시간과 함께 꾸준히 증가하였으며, 용접자세 및 중력 방위에 따라 뚜렷한 용접부 형상의 변화를 나타내었다. 즉 아래보기자세 대비 수직자세에서는 3초 아크 유지시간의 경우 28% 증가한 용입을 나타내었고 10초 유지한 경우 15% 증가한 용입을 보였다. 이에 상응하여 용접부의 단면적도 수직자세에서 주목할 만한 증가를 보였다. 용접전류 200A 스폿용접에서는 아크 유지시간 3초 이후부터 용입 및 용접부 단면적에 대한 중력 방위의 영향이 매우 중요한 것으로 판명되었다. 이와 같이 용접자세에 따라 용접부의 형상이 크게 변하는 조건, 즉 200A 스폿용접 시 아크유지시간 3초 이후의 조건을 불안정구역(unstable)이라 정의하였다.

용접전류 165A 스폿용접에서는 아크 유지시간 10초 동안 중력 방위에 따라 용접부 형상이 거의 일정하였으므로 용접자세에 따른 용접부 형상은 안정화 되어 있었다(Fig. 2). 그러나 용접전류가 165A에서 200A로 증가하면서 중력 방위에 따라 용입 및 용접부 단면적의 상당한 변화가 있었다(Fig. 3). 따라서 아크 유지시간 3초 이후의 200A 스폿용접 시 용접위치에 따른 용접부 형상은 불안정한 것으로 판명되었다.

3.2 용접부 표면의 형상과 용접부 단면 형상과의 관계

저자는 용접부 표면 형상이 용접부 단면형상과 밀접한 관계가 있으며, 응고속도와 자유표면의 복귀속도에 대한 계산방법을 발표하였다⁷⁾. 따라서 용접자세에 따른 용접부 형상의 거동을 설명하기 위하여 용접부 표면 형

상을 스폿용접 종료 후 시편의 표면 형상을 레이저 프로필로메트리(laser profilometry)법으로 측정하여 Fig. 4에 용접부 단면형상과 함께 표시하였다. 측정된 표면 형상이 용접 도중 아크 아래에서 일어나는 실시간 자유 표면의 형상과는 정확하게 일치하지는 않았지만, 아크가 꺼진 이후 아크압력 때문에 변형되었던 자유표면의 회복속도에 비해 시편의 응고 속도가 빠른 것으로 계산

되었기 때문에 측정된 표면 형상은 대표성을 가질 수 있을 것으로 판단되었다. 특히 Fig. 4c 및 4f에서 볼 수 있듯이 용접부 중심의 표면이 뾰족한 형상을 나타내고 있는 것도 응고속도가 빠르다는 주장을 뒷받침하고 있다.

용접전류 165A 스폿용접에서 아크 유지시간 0.5초 및 1초 동안 용접부 표면의 형상은 용접위치와 상관없이 거의 일정하였다. 아크 유지시간 0.5초의 용접부 표면과 용접부 단면 형상을 Fig. 4a에 나타내었다. 아크 유지시간이 3초에서 5초까지 늘어나면서 자유표면의 형상은 Fig. 4b에서와 같이 눈에 띄게 변형되기 시작하는 것을 알 수 있다. 아크 유지시간이 7초를 넘어가면서 용접부 표면의 중앙부가 심하게 변형되고 용접부의 가장자리에 쌓인 형상으로 Fig. 4c와 같이 측정되었다. 아크 유지시간 1초, 5초 및 7초에서의 용접부 표면의 형상도 측정하였으며, 각각 0.5초, 3초 및 10초의 결과와 동일한 경향을 보였다. Fig. 4b 및 4c에서 볼 수 있듯이 수직자세에서는 아크 유지시간 3초가 넘으면 표면 용융부가 중력의 방향으로 흘러내리는 현상이 두드러졌다.

용접전류가 미치는 영향을 연구하기 위하여 200A로 높은 후 용접부 표면의 형상을 측정하였다. 아크 유지시간 0.5초 및 1초 동안 용접부 표면과 단면은 165A의 경우와 동일하게 용접위치에는 무관하게 거의 일정한 형상을 나타내었다(Fig. 4d). 아크 유지시간이 3초 및 5초까지 증가하면서 용접부 표면의 형상은 Fig. 4e와 같이 눈에 띄게 변형되었다. 7초 이상의 아크 유지시간에서는 용접부 중앙부는 움푹 파인 형상을 보였으며, 용접부 표면은 중력의 방향으로 흘러내려 용접부 가장자리에 쌓인 것이 관찰되었다(Fig. 4f). Fig. 4e 및 4f에서 볼 수 있듯이 중력의 영향은 용접자세에 따라 용접부 표면 및 단면의 형상을 바꿀 정도로 중요한 역할을 하였다. 아크 유지시간 3초 및 10초의 스폿용접부에서 수직자세는 아래보기자세에 비하여 각각 28%와 15% 깊은 용입을 보였다. 200A 스폿용접에서는 3초 이후부터 용접위치 또는 중력의 방향에 따라 눈에 띄게 변형된 용접부 표면이 용접부 단면 형상을 변화시키는 것으로 사료된다.

4. 고 찰

용접부 자유표면의 변형은 주로 아크 압력과 전자기력 또는 유체역학적 와동(vortex)의 영향으로 알려져 있다. 표면장력과 중력은 표면 변형부를 평평하게 하는 복원력 역할을 한다. 본 실험에서는 165A와 200A 스

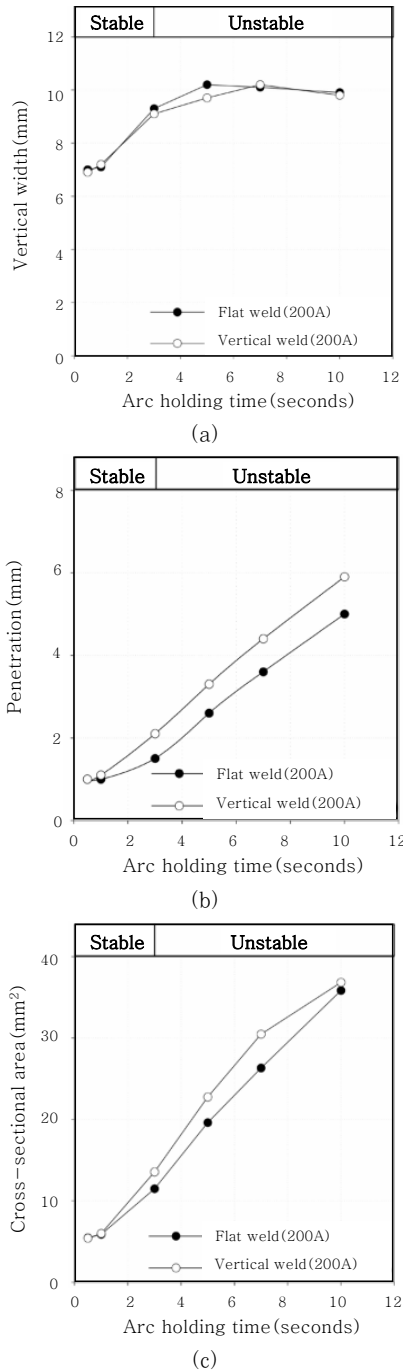


Fig. 3 Measured weld pool (a) width, (b) penetration and (c) cross-sectional area for 200A spot GTAW

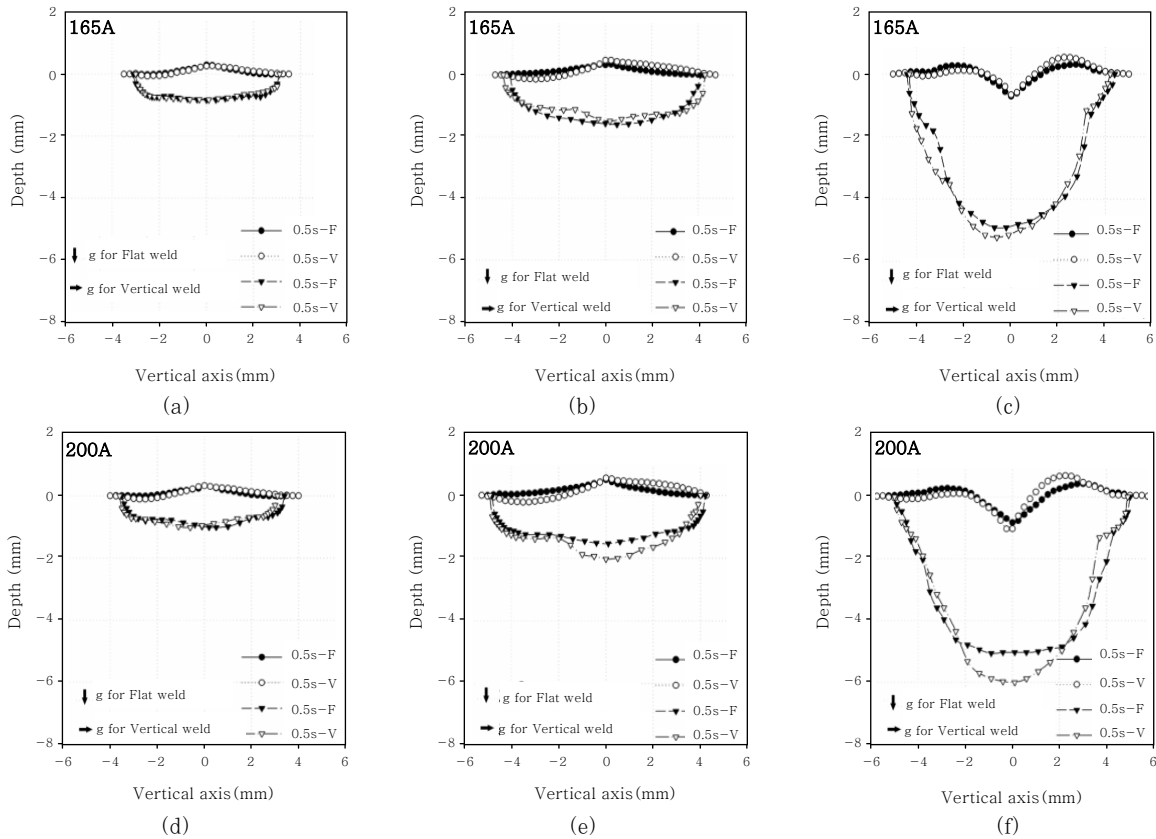


Fig. 4 Measured weld surface deformation and weld pool shape for 165A spot GTAW; (a) 0.5s, (b) 3s, (c) 10s arc hold time and for 200A spot GTAW; (d) 0.5s, (e) 3s, (f) 10s arc hold time.

꽃용접 시 중력의 방위에 따른 용접부 형상의 변화 거동이 서로 다른 것으로 나타났으며, 이는 용접 공정변수 중 아크전류가 다르기 때문이라 사료된다. Rokhlin 등은 아크 압력이 아크 전류의 제곱에 비례하여 증가하고, 용접부 표면 변형 정도는 아크 압력의 크기와 관련이 있다고 밝혔다^{12,13)}. 165A에 비해 높은 아크 전류를 사용한 200A 스폿용접에서는 높은 아크 압력의 영향으로 표면 변형의 정도가 심하였다(Fig. 4e 및 4f). 반면에 165A 스폿용접에서는 낮은 아크 압력으로 인하여 표면 변형이 심하지 않고 비교적 평평한 표면 형상을 보였다(Fig. 4b 및 4c). 자유표면의 변형이 심하여 중앙부가 깊숙이 패인 형상에 비해 평평한 표면 형상의 경우 표면장력 또는 중력에 의한 복원력도 상대적으로 낮을 것으로 생각한다. 따라서 비교적 평평한 표면 형상을 가진 165A 스폿용접에서는 자유표면의 변형에 미치는 중력 방위의 영향이 200A 스폿용접에 비해 적을 것으로 판단된다.

문헌연구에 의하면 중력의 방위에 따른 자유표면 형상 거동은 아크 압력의 차이에 의해 발생하는 용융지 자유표면의 변형의 정도에 따라 복원력으로 작용하는 중력 관성의 차이로 말미암아 발생하는 것으로 사료된

다¹³⁾. 그러나 본 연구에서는 3차원 가우시안 분포를 가지는 것으로 알려져 있는 아크 압력을 포함하여 표면장력, 점성 전단응력 및 중력을 모두 고려한 복잡한 분석 방법보다는, 아크 압력에 의한 영향을 제외하고 용융지 형상이 변형된 후 중력 및 표면장력에 의해 표면 변형이 복원되는 환경을 분석하기 위하여 용접부 단면적(cross-sectional area, CSA)과 같은 용융효율 개념을 도입한 분석법을 수행하였다. 용융효율은 용접 공정변수(아크전류 및 유지시간)와 재료특성(표면장력 및 밀도)과 밀접한 관련이 있으며, 용접 종료 후 용접부 형상의 크기에 의해서도 간접적으로 유추할 수 있다. 아래보기 및 수직자세 스폿용접의 결과로부터 용접부 단면이 넓고 입열량이 클수록 중력 방위가 용접부 형상에 미치는 영향이 커지는 것을 알 수 있었다. 200A 스폿 GTAW의 경우 용접자세에 따라 용접부 형상이 변동되는 구간(unstable)과 변동되지 않는 구간(stable)을 보였다 (Fig. 3). 용접자세에 따라 변동하는 용접부 형상을 가지는 한계 구간은 아크 유지시간 3초 이상의 용접조건에서 다음과 같이 나타났다: 용접부 폭 9.1mm, 용입 2.1mm, 단면적(CSA) 13.5mm². 용접부 형상이 한계 구간보다 큰 용접부에서는 용접자세 또

는 중력 방위에 따른 용접부 형상의 변화가 큰 것으로 목격되었다. 그러나 165A 스폿 GTAW에서는 아크를 10초 동안 유지하더라도 중력 방위에 따른 용접부 형상의 변화가 크지 않았다. 165A 스폿용접에서 아크 유지시간 10초의 경우 생성된 용접부는 폭 9.0mm, 용입 5.3mm 그리고 단면적(CSA) 33.5mm²에 이를 정도의 큰 형상의 용접부가 형성되었다(Fig. 2).

중력 방위에 따른 용접부 형상을 나타내는 기준 중 단면적(CSA)의 한계 구간을 식 (1)에서와 같이 용융지에서의 힘 평형 계산식을 이용하여 분석하였다. 용접부의 단면적은 용접부의 폭 및 용입까지 포함하는 개념이기도 하다. 수직자세에서의 대표적인 용접부 단면 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 용접부의 용융 단면적(CSA)은 용융지 자유표면에서의 표면장력과 점성의 전단응력(τ)에 의해 유지되며, 용융금속의 무게가 용접부 표면의 장력보다 클 때까지 용융지를 지지한다. 3차원 가우시안 분포를 가지는 아크압력은 수학적 해법에 의한 풀이가 어렵고 전산모사에 의한 해석이 가능하므로 본 연구에서는 제외하였다. 식 (1)에서 용접 용융금속이 안정하게 유지될 수 있는 조건은 표면장력(F_σ)의 좌변향이 관성(F_g)과 점성력(F_τ)의 합인 우변항보다 큰 경우이다.

$$F_\sigma = F_g + F_\tau \quad (1)$$

식 (1)은 스폿용접일 경우 용접속도가 0이므로 용접부 고상-액상 계면과 이루는 각도에서 유도되는 점성 전단응력(F_τ)은 무시하였다⁴⁾. 용융지 표면에 의해 지지 받을 수 있는 최대 용융금속 단면적(CSA)은 식 (2)와 같이 고상-액상 계면보다 높은 곳에 위치한 유체의 표면장력(σ)과 재료의 밀도(ρ) 그리고 중력 가속도 상수(g)에 의해 정의되는 영역과 일치한다.

$$\frac{\sigma}{\rho g} = CSA \quad (2)$$

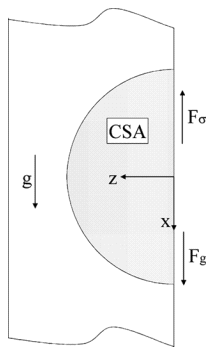


Fig. 5 Weld pool support geometry

식 (2)는 용접부 최대 단면적(CSA)을 계산하는데 사용되었다. 계산된 CSA보다 낮은 단면적의 용접부에서는 중력의 방위와 상관없이 일정한 용접부 형상을 가지게 될 것이다. 계산에 필요한 304 스테인리스강의 물리적 성질들은 다음과 같다¹⁴⁾: $\sigma = 1.169$ (N m⁻¹), $\rho = 8000$ (kg m⁻³). 표면장력과 중력에 의한 힘 평형 관계식을 통하여 304 스테인리스강의 최대 용접 단면적은 14.9mm²로 계산되었다.

중력의 방위와는 무관하게 일정한 용접부 형상을 가질 수 있는 최대 용융 단면적(CSA) 계산값에 대해서 실험적인 검증을 수행하였다. 200A 스폿용접에서 아크 유지시간 3초 이후부터 용접자세 또는 중력 방위의 변화에 따라 용접부 단면 및 표면 형상이 크게 변하는 것을 볼 수 있다(Fig. 3 및 4e). 아크 유지시간 3초의 200A 스폿용접부의 단면적은 13.5mm²이었다. 13.5mm²보다 작은 단면적을 가지는 용접부에서는 중력의 방위에는 무관하게 일정한 용접부 단면 및 표면의 형상을 가지고 있었다(Fig. 4d). 따라서 중력의 영향을 무시할 수 있는 최대 단면적 한계값은 13.5mm²로 측정되었으며, 이는 계산값(14.9mm²)과 거의 일치함을 이루었다. 그러나 165A 스폿용접에서는 아크 유지시간 10초의 경우 용접부 단면적이 33.5mm²까지 증가하여 최대 단면적 한계값 13.5mm²보다 큰 값을 가지고 있었으나 용접부 형상에서 중력의 영향은 거의 무시할 정도로 작았다. 165A 및 200A의 스폿용접에서 생성된 용접부의 크기를 비교한 결과 중력의 방위에 따른 용접부 형상의 변화 여부를 결정하는 가장 중요한 인자는 문헌조사에서와 같이 아크 압력을 포함한 힘 평형 관계식에 의해 결정되지만, 3차원 가우시안 분포를 가지는 아크 압력을 제외하고 간단한 용접재료의 물리적 특성에 의해 결정되는 용접부 단면적(CSA)도 용접자세에 따라 용접부 형상을 변화시킬 수 있는 중요한 인자인 것으로 판단된다. 그리고 165A 스폿용접에 대한 용접부 형상의 안정성을 정확히 예측하기 위해서는 아크압력을 포함한 수치해석을 통하여 향후 연구가 진행되어야 할 것으로 생각한다.

5. 결 론

용접자세와 중력의 방위에 따른 용접부 형상의 거동을 용융금속의 표면장력과 밀도와 같은 물리적 특성에 의해 결정되는 힘 평형식을 이용하여 분석하고 실험적으로 증명하였다.

1) 304 스테인리스강 용접부의 경우 수직자세에서 중력의 영향을 받지 않는 최대 용융 단면적 한계값은 14.9mm²로 계산되었다.

2) 아크 전류 200A 스폿용접 실험에서는 아크 유지 시간 3초 이후부터 용접부 단면 및 표면형상이 중력의 방위에 따라 변화하였으며, 이때의 용융 단면적은 13.5mm^2 로 계산값(14.9mm^2)과 거의 일치함을 이루었다.

3) 그러나 165A 스폿용접 실험에서는 아크 유지시간 10초 동안 중력의 방위와 무관하게 일정한 용접부 단면 및 표면 형상을 나타냈다. 이때의 용융 단면적 실험값은 최대 한계값보다 큰 33.5mm^2 를 나타냈다.

4) 용접부 단면적(CSA)이 중력 방위에 대한 용접부 단면 및 표면 형상을 결정하는 중요한 인자임을 알 수 있었으며, 더욱 정확한 해석을 위해서는 아크 전류에 의한 아크 압력도 중요한 인자가 되어야 함을 알 수 있었다.

5) 결론적으로 아크 전류가 충분히 높아 용융지 표면의 변형이 크고 최대 용융 단면적 한계값보다 큰 용접부 단면적을 가진 경우, 중력에 의한 관성으로 인한 복원력이 충분치 않으며 결국에는 용접자세에 따라 용접부 단면 및 표면형상이 변하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. B. E. Paton: Welding in space, *Weld. Engineer*, **57-1**(1972), 25-29
2. D. K. Aidun, J. J. Domey, and G. Ahmadi: Effect of high gravity on weld fusion zone shape, *Weld. J.*, **79-6**(2000), 145s-150s
3. K. Nogi, Y. Aoki, H. Fujii, and K. Nakata: Behavior of bubbles in weld under microgravity, *Acta Mater.*, **46-12**(1998), 4405-4413
4. J. S. Foley and C. M. Banas: Laser welding stability limits, *ICALEO'87*, (1987), 47-54
5. S. Kou and D. K. Sun: Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds, *Met. Trans.*, **16A-2**(1985), 203
6. 김원훈, 나석주: 용접아크 및 용융풀의 유동을 고려한 용접부 수치해석, *대한용접학회지*, **15-1**(1997), 26-35
7. N. Kang, T. A. Mahank, A. K. Kulkarni, and J. Singh: Effects of gravitational orientation on surface deformation and weld pool geometry during gas tungsten arc welding, *Mater. Manuf. Process*, **18-2**(2003), 169-180
8. N. Kang, J. Singh, and A. K. Kulkarni: Gravitational effects on the weld pool shape and microstructural evolution during gas tungsten arc and laser beam welding of 304 stainless steel and Al-4wt%Cu alloy, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **1027**(2004), 529-549
9. P. W. Fuerschbach and G. A. Knorovsky: A study of melting efficiency in plasma arc and gas tungsten arc welding, *Weld. J.*, **70-11**(1991), 287s-297s
10. B. Hu and G. den Ouden: Synergetic effects of hybrid laser/arc welding, *Sci. Technol. Weld. Joi.*, **10-4**(2005), 427-431
11. M. Suban, J. Tusek and M. Uran: Use of hydrogen in welding engineering in former times and today, *J. Mater. Process. Tech.* **119**(2001), 193-198
12. S. I. Rokhlin and A. C. Guu: A study of arc force, pool depression, and weld penetration during gas tungsten arc welding, *Weld. J.*, **72-8**(1993), 381s-390s
13. M. L. Lin and T. W. Eager: Influence of arc pressure on weld pool geometry, *Weld. J.*, **64-6**(1985), 163s-169s
14. S. Grigoriev and E. Z. Meilikhov, *Handbook of Physical Quantities*: CRC Press, Boca Raton, FL, 1997