가변 극성 알루미늄 아크 용접의 초고속 카메라 음극점 현상 관찰

조정호^{*,†} · 정훈철^{*} · 박경배^{*} · 이준경^{**}

^{*}충북대학교 기계공학부

^{**}현대자동차 생산개발본부

Cathode Spot Phenomena Observation by High Speed Camera in Variable Polarity Aluminum Arc Welding

Jungho Cho^{*,†}, Hunchol Jung^{*}, Kyungbae Park^{*}, and Junkyung Lee^{**}

^{*}School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

^{**}Production Development Division, Hyundai Motors, Uiwang, 16082, Korea

[†]Corresponding author : junghocho@chungbuk.ac.kr

(Received February 5, 2018 ; Revised February 20, 2018 ; Accepted February 23, 2018)

Abstract

Variable polarity GTAW is applied to aluminum alloys for the purpose of low heat input and thermal deformation. Reverse polarity plays a role of removing oxide film then enhances the arc weldability of aluminum. However, it is newly known that reverse polarity also increases heat input efficiency in arc welding. The authors explained the phenomenon by adopting combination of cathode spot random walk and quantum tunneling effect. In this research, stationary variable polarity GTA is observed through high speed camera to figure out the characteristics of cathode spots of aluminum surface in reverse polarity and prove heat input increase effect. As result, anode spot is not observed during straight polarity in variable polarity arc unlike straight polarity DC arc because the oxide layer is removed then the electrons are widely absorbed. Cathode spots are observed on the aluminum surface during reverse polarity duration in variable polarity arc. Several spots are generated in simultaneously and their locations are quickly changed, which is even faster than frame rate of high speed camera. Occasionally one big cathode spot is generated then arc plasma is concentrated on the spot. As result, spatters and metal vapor are observed in the vicinity of the spot because of the concentrated arc plasma on very small area, which is not observed in straight polarity arc in DC or variable polarity.

Key Words : Variable polarity, Arc, Aluminum, Reverse polarity, Straight polarity, Cathode spot, Anode spot

1. 서 론

알루미늄 소재는 산화 피막의 특성으로 아크 용접성이 좋지 않은 것으로 알려져 있다. 용접성 향상을 위해 가장 널리 알려져 있는 방법은 모재에 음극을 인가하고, 전극에 양극을 인가하는 역극성(reverse polarity, DCEP) 아크를 이용하는 것이다. 역극성 아크에서는 모재의 산화 피막이 제거되는 청정 효과 덕분에 양호한 아

크 용접성을 획득할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이에 따라, 소모성 와이어 전극을 사용하는 GMAW에서는 역극성 아크를 사용하고, 비소모성 전극을 사용하는 GTAW에서는 정극성(straight polarity, DCEN)과 역극성 아크가 번갈아 발생하는 가변 극성 아크를 이용해 알루미늄 아크 용접을 수행하고 있다¹⁾.

역극성 아크에서 볼 수 있는 청정 효과의 주요 기작은 아크 플라즈마의 양이온 충돌 에너지가 산화 피막을 파괴시킨다는 설명의 이온 폭탄 효과로 알려져 있고, 부

수적인 기작으로 모재의 음극점에 아크가 집중되어 산화 피막을 제거한다는 양자 터널링 효과가 알려져 있다²⁻⁴⁾. 본 연구진은 선행 연구에서 양자 터널링 효과와 음극점 이동 현상의 복합 작용이 산화 피막 제거와 입열 효율 증대의 주요 기작으로 설명한 바 있다⁵⁾.

본 연구에서는 선행 연구에서 제안한 이론을 뒷받침하기 위해 가변 극성 알루미늄 아크 용접에서 음극점 현상을 초고속 카메라 관찰하여 그 특성을 분석하였다.

2. 초고속 카메라 실험 조건

실험에 사용된 알루미늄 평판은 가공유 등에 의한 표면 이물질의 영향을 제거하기 위해 에탄올을 이용해 탈지 과정을 거쳤다. 가변 극성 아크의 전류 파형은 오실로스코프로 측정해 설정 전류와 역극성, 정극성 파형의 주기를 정밀하게 조절하였다. 2% 토륨 텅스텐 전극봉은 실험 전 팁의 각도를 60°로 가공한 후 10A, 10% 역극성 분율의 가변 극성 아크를 발생시켜 뽕죽한 침단을 제거한 후 본 실험에 사용하였다. 이는 본 실험에서 안정적인 아크를 유지하고, 팁 침단 마모에 의한 알루미늄 표면의 텅스텐 오염을 최소화하기 위한 것이다. 본 실험에서는 아크를 5초간 발생시켜 3.5초와 4.0초 사이의 안정적인 아크 유지 구간에서 아크와 알루미늄 표면을 초고속 카메라 촬영하여 음극점 현상을 관찰하였다. 알곤 보호가스는 15L/min로 공급해주었으며, 아크 길이는 9mm이다. 가변 극성 전류의 주파수는 100Hz로 고정하였다. 초고속 카메라 촬영 속도는 초당 20,000으로 설정하여 한번 촬영에 총 10,000 프레임을 저장하였다. 이는 100Hz 가변 극성 아크 전류의 1주기 파형을 50개 촬영했음을 의미한다. 본 실험에 사용된 가변 극성 아크 전류의 1주기 동안 역극성과 정극성 지속 시간 비는 50:50으로 역극성 비율 50%에 해당한다. 아울러, 정극성 전류만을 사용하는 DC 아크를 관찰하여 가변 극성 아크와 비교하였다.

3. 관찰 결과 및 고찰

Fig. 1은 모두 정극성 DC 아크 플라스마와 알루미늄 표면을 보여주고 있다. 용접 전류는 30A이다. 용접 전류가 매우 낮기 때문에 일반적으로 알려져 있는 종(bell) 모양의 아크 플라스마는 뚜렷이 나타나지 않는다. 위쪽의 밝은 영역은 음극으로 인가된 텅스텐 전극 부근의 플라스마이고, 아래쪽은 양극으로 인가된 알루미늄 모재이다. 전자가 방출되는 텅스텐 전극 주변과 전자가 흡수되는 모재 표면 일부 영역에 아크 플라스마가 집중되어 있음을 쉽게 알 수 있다. 특이한 것은 아

Fig. 1 Straight polarity DC arc plasma in strong(left) and weak(right) phase

크 플라스마가 일정하지 않다는 것이다. Fig. 1의 왼쪽 사진에서는 아크 플라스마가 밝게 빛나는 반면, 오른쪽 상대적으로 어둡다. 이는 낮은 전류로 인해 아크 플라스마가 일관적으로 유지 되지 않고 있음을 의미한다. 낮은 전류로 인해 아크 플라스마의 강성이 높지 않아, 보호 가스의 불안정적인 유동이나 외기에 의해 아크가 불안정하기 유지되는 것이다. 정극성 DC 아크에서 아크 플라스마는 시간에 따라 밝기, 즉 온도의 차이는 있으나 공통적으로 양극인 모재의 특정 영역과 음극인 텅스텐 전극 주변에서 가장 높은 온도를 보임을 알 수 있다. 덧붙여, 모재에서 전자를 흡수하는 밝게 빛나는 영역을 양극점이라 일컫는다⁶⁾. 양극점을 음극점과 유사하게 생각하는 경우가 많은데, 음극점은 양극점에 비해 매우 작다.

Fig. 2는 가변 극성 아크의 정극성 주기 동안의 아크 플라스마와 알루미늄 표면이다. 전류는 앞서와 동일한 30A이다. Fig. 1의 모재 쪽에서 관찰되는 밝은 영역, 즉 양극점이 불분명함에 주목할 필요가 있다. DC 아크에서는 양극 모재의 특정한 영역에 아크가 집중되어 양극점이 관찰되는 반면, 가변 극성에서의 양극 모재에는 아크가 집중되는 영역이 없어 양극점이 관찰되지 않는다. 이는 산화막의 유무차이에 기인한다. 잘 알려져 있

Fig. 2 Variable polarity arc plasma during straight polarity duration

는 바와 같이 가변 극성의 역극성 아크는 알루미늄 산화막을 제거하는 역할을 한다. 따라서, 가변 극성의 정극성 아크에서는 아크 도달 영역의 산화막이 제거되었거나 많이 남아 있지 않아서 넓은 영역에 걸쳐 전자가 흡수되는 반면, 정극성 DC에서는 산화막에 의해 전자가 흡수되는 영역이 최단 통전 거리인 텅스텐 전극 바로 아래쪽에 국한되어 이 영역에 아크가 집중되므로 밝게 빛나는 것이다. 알루미늄 산화막은 세라믹으로 분류되는 부도체이다.

전자가 방출되는 기작은 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 고온의 표면에서 전자가 방출되는 열전자 방출(thermionic emission)이고, 다른 하나는 상대적으로 낮은 온도에서 외부 전기장에 의해 전자가 방출되는 비열전자(non-thermionic emission) 방출이다. 비열전자 방출은 전기장에 의해 방출되므로, 필드 방출(field emission)로도 알려져 있다. 알루미늄이나 구리와 같이 자유 전자가 풍부한 재료의 표면은 전기장에 의해 쉽게 전자를 방출하므로 주요 전자 방출 기작은 비열전자 방출이다. 반면, 텅스텐은 열전자 방출이 전자 방출의 주요 기작이다.

앞서 언급한 바와 같이 전자가 흡수되는 비교적 넓은 영역을 양극점으로 일컫는 반면, 음극점은 전자가 방출되는 영역으로 양극점에 비해 매우 작다. 또한, 문헌에 따르면, 음극점은 매우 빠른 속도로 이동하고, 음극점의 위치가 지속적으로 바뀌는 이유는 아직 명확히 알려지지 않았다. 다만, 음극 소재 표면의 미세 돌기나 산화층의 차이, 각종 합금 원소의 밀도 차이 등이 그 원인일 것으로 추측하고 있다. 이는 자연에서 낙뢰의 위치를 정확히 예측할 수 없는 것과 유사하다.

Fig. 3은 가변 극성의 역극성 아크에서 관찰되는 아

Fig. 3 Variable polarity arc plasma and cathode spots during revers polarity duration

크 플라즈마와 알루미늄 표면의 모습이다. 텅스텐 전극 주변부를 보면, 정극성 아크에서와 달리 이 영역에서 아크 플라즈마의 집중도가 낮아진 것을 알 수 있다. 정극성에서는 전자 방출 영역이 전극의 팁으로 한정되어 아크가 집중되지만, 역극성에서 전자가 흡수되는 영역이 상대적으로 넓게 분포하기 때문에 유추할 수 있다. 흥미로운 것은 알루미늄 모재 표면이다. 밝게 빛나는 작은 점들을 다수 볼 수 있다. 바로 전자가 방출되는 음극점들이다.

사진에서 보듯이, 본 연구에서 관찰된 음극점은 한 순간 여러 위치에 동시다발적으로 분포하고 있다. 그리고, 이 음극점들은 다음 프레임에서는, 다시 말해 1/20,000 초 후에는 그 위치가 바뀐다. 그러나, 모든 음극점이 그런 것은 아니다. Fig. 4와 같이 상대적으로 큰 음극점이 한 위치에서 비교적 장시간 유지되는 경우도 있다. 특정 순간에 음극점이 한 위치에만 존재하는지, 여러 위치에 동시에 존재할 수 있는지도 불분명하다. 초고속 카메라 역시 셔터 스피드에 한계가 있어 셔터 스피드보다 짧은 시간에 음극점의 위치가 바뀌면, 그 잔상이 그대로 기록되기 때문이다.

Fig. 4는 상대적으로 큰 음극점이 한 위치에 비교적

Fig. 4 Variable polarity arc plasma and a concentrated cathode spot during revers polarity duration. concentrated big cathode spot generated spatters and metal vapor(right side image)

장시간 머무르고 있는 상황을 보여주고 있다. 흥미로운 것은, 이후에 발견되는 현상으로 Fig. 4의 오른쪽 사진과 같다. 우연히 한 위치에 머무르게 된 큰 음극점은 다량의 전자를 방출하게 되고, 아크 플라즈마는 이 위치에 집중된다. 집중된 플라즈마는 자연스럽게 이 위치에 열을 전달하게 되고 이로 인해 스패터가 발생한다. 아울러, 음극점의 경계에서는 금속 증기로 유추되는 가스 유동도 보인다. 실험 조건에서 언급한 바와 같이 실험 표면은 에탄올로 탈지 과정을 거쳤고, 일부 남아있었을 표면 불순물은 이미 아크에 의해 증발했을 것이기 때문에 Fig. 4의 집중된 음극점에만 보이는 이 가스는 금속 증기로 유추하는 것이 합당하다.

Fig. 5는 정극성 DC 아크와 가변 극성 아크를 조사한 후의 알루미늄 표면을 비교한 것이다. 위쪽의 사진은 DC 아크에 의한 것으로, 양극점이 위치가 변하여 3개의 점 형태 흔적이 남은 것을 볼 수 있다. 중앙의 점이 초고속 카메라로 관찰했던 양극점의 흔적이고, 좌우의 흔적은 초기 아크 발생 때 형성된 것으로 추정된다. DC 아크의 초기 점화는 고전압 고주파 전류를 사용하므로, 점화 아크 발생 위치는 최단 통전 경로를 따르지 않기 때문이다. 아래쪽의 사진은 가변 극성 아크에 대한 표면으로 DC에 비해 아크가 먼 거리까지 도달했음을 알 수 있다. 역극성 아크에서 모재 표면의 산화막은 터널링 효과에 따라 음극점을 통해 전자를 방출하므로, 산화막이 충분히 얇은 경우 음극점은 먼 거리까지 도달할 수 있다. 이에 따라 가변 극성 아크의 경우, 아크가 먼 거리까지 도달해 흔적을 남긴 것이다.

앞서 관찰한 바와 같이 역극성 아크의 알루미늄 모재 표면에서는 전자를 방출하는 음극점이 관찰된다. 음극점은 빠른 속도로 이동하기도 하고, 간헐적으로 한 위치에 잠시 머무르기도 한다. 문헌에 따르면⁷⁾ 음극점의 위치와 이동의 원인은 분명하지 않다. 다만, 음극점이 한 점에 머무르는 경우, 이 위치에 집중적으로 열이 전달되므로, 음극점을 좁은 영역에 집중시키거나 한 위치

에 고정시킬 수 있다면 보다 높은 입열 효율을 기대할 수 있을 것이다. 본 연구 결과는 30A의 낮은 전류 영역에서 정극성과 역극성 아크의 음극점 현상을 관찰한 것이다. 60~150A의 고전류 음극점 현상은 추가 연구 주제로 현재 진행 중이다.

4. 결 론

본 연구는 가변 극성 아크 알루미늄 용접의 역극성에서 음극점 현상을 관찰하여 이전 연구에서 제안한 이론을 보완하기 위한 것으로, 고정 아크의 특성을 초고속 카메라 관찰하여 다음과 같은 결론에 이르렀다.

- 1) 정극성 DC 아크에서는 알루미늄 표면에 큰 양극점이 관찰되지만, 가변 극성의 정극성 아크에서는 양극점이 관찰되지 않는데, 이는 역극성 아크에서 이미 산화막이 제거되어 전자가 알루미늄 표면의 특정 영역에서 흡수되지 않고, 넓은 영역에 걸쳐 고루 흡수되기 때문이다.
- 2) 가변 극성의 역극성 아크에서는 알루미늄 표면에서 음극점이 관찰되는데, 그 위치가 매우 빠르게 바뀐다.
- 3) 전자가 방출되는 음극점이 특정 위치에 집중되어 머무르는 경우, 아크가 집중되어 입열 효율이 증가하고 그 증거로 스패터와 금속 증기가 관찰된다.
- 4) 역극성에서 터널링 효과로 산화막을 통해 전자가 방출되는 알루미늄의 음극점은 먼 거리까지 도달한다. 이에 따라, 용접 후 알루미늄 표면의 아크 흔적은 가변 극성의 경우가 정극성 DC 아크보다 크다.

후 기

이 연구는 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. (This work was supported by the intramural research grant of Chungbuk National University in 2015)

ORCID: Jungho Cho: <https://orcid.org/0000-0003-2165-2692>

Reference

1. J. F. Lancaster, Physics of Welding, International Institute of Welding, Pergamon, (1984)
2. J. Cho, Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) Welding Part 1, Introduction and Theoretical Background, *Journal of KWJS*, 30(3) (2012), 1-3
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.3.1>
3. J. Cho, Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) Welding Part 2, Applications and Welding Physics, *Journal of KWJS*, 30(4) (2012), 1-3

Fig. 5 Aluminum surface after 5 seconds of exposure to stationary DC(top) and variable polarity(bottom) arc

- <https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.4.291>
4. J. Cho, Weldability Increase of Aluminum by Variable Polarity Arc, *Journal of KWJS*, 32(1) (2014), 108-111
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.1.108>
 5. J. Cho, J. J. Lee and S. W. Bae, Heat Input Analysis of Variable Polarity Arc Welding of Aluminum, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81 (2015), 1273-1280
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7292-y>
 6. Y. Lee, K. J. Chung and Y. S. Hwang, Feasibility study on high current ion beam extraction from anode spot plasma for large area ion implantation, *Current Applied Physics*, 15 (2015), 1599-1605
<https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.09.020>
 7. E. Hantzsche, Mysteries of the arc cathode spot: a retrospective glance, *IEEE Transactions on Plasma Science* 31 (2003), 799-808
<https://doi.org/10.1109/TPS.2003.818412>