

## 가변 극성 알루미늄 아크 용접의 이론적 배경 고찰

조정호<sup>\*,†</sup> · 이중재<sup>\*</sup> · 배승환<sup>\*</sup> · 이용기<sup>\*</sup> · 박경배<sup>\*</sup> · 김용준<sup>\*</sup> · 이준경<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>충북대학교 기계공학부<sup>\*\*</sup>현대자동차 생산개발본부**Theoretical background discussion on variable polarity arc welding of aluminum**Jungho Cho<sup>\*,†</sup>, Jungjae Lee<sup>\*</sup>, Seunghwan Bae<sup>\*</sup>, Yongki Lee<sup>\*</sup>, Kyungbae Park<sup>\*</sup>  
Yongjun Kim<sup>\*</sup> and Junkyung Lee<sup>\*\*</sup><sup>\*</sup>School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea<sup>\*\*</sup>Production & Development Division, Hyundai-Kia Motor Company, Hwaseong 445-869, Korea

†Corresponding author : junghocho@chungbuk.ac.kr

(Received April 16, 2015 ; Accepted April 24, 2015)

**Abstract**

Cleaning effect is well known mechanism of oxide layer removal in DCEP polarity. It is also known that DCEN has higher heat input efficiency than DCEP in GTAW process. Based on these two renowned arc theories, conventional variable polarity arc for aluminum welding was set up to have minimum DCEP and maximum DCEN duty ratio to achieve the highest heat input efficiency and weldability increase. However, recent several variable polarity GTA research papers reported unexpected result of proportional relationship between DCEP duty ratio and heat input. The authors also observed the same result then suggested combination of tunneling effect and random walk of cathode spot to fill up the gap between experiment and conventional arc theory. In this research, suggested combinational work of tunneling effect and rapid cathode spot changing is applied to another unexpected phenomena of variable polarity aluminum arc welding. From previous research, it is reported that wider oxide removal range, narrower bead width and shallower penetration depth are observed in thin oxide layered aluminum compared to the case of thick oxide. This result was reported for the first time and it was hard to explain the reason at that time therefore the inference by the authors was hardly acceptable. However, the suggested combinational theory successfully explains the result of the previous report in logical way.

Key Words : Variable polarity, Aluminum, GTAW, Cleaning effect, Tunneling effect, Cathode spot

## 1. 서 론

고온의 용점과 강도를 갖고, 밀도가 모재보다 높은 산화막을 가지고 있는 알루미늄 소재의 아크 용접성은 낮은 편이지만, 역극성(DCEP, reverse polarity)의 GMA를 이용하거나, 부분적으로 역극성을 사용하는 가변 극성 GTA를 이용하면 별도의 산화막 제거 공정을 거치지 않아도 용접이 가능하다. 이는 역극성에서 청정 효과로 알려진 산화막 제거 특성 덕분으로, 아크 플라

즈마의 양이온이 모재 표면에 충돌하는 운동에너지에 의해 산화막이 파괴되는 메카니즘으로 지금까지 설명되어져 왔다<sup>1-3)</sup>.

아울러, 일반적인 GTA 용접에서는 아크 열의 70%가 양극으로 전달되고 나머지 30%가 음극으로 전달되는 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>. 따라서, 정극성(DCEN, straight polarity) 아크의 입열 효율이 역극성인 경우보다 더 높고, 이에 따라 기존의 가변 극성 아크 알루미늄 용접 기술은 청정 효과를 이용하고 입열 효율을 높이기 위해 역극성의 분율을 최소화하고, 정극성의 분율을 최대화

**Table 1** Comparison of variable polarity arc welding result. Anodized surface vs. wire brushed surface of aluminum\

	Anodized surface	Wire brushed surface
Oxide layer	Thick	Thin
Oxide removed white band	Narrow	Wide
Weld depth	Deep	Shallow
Weld width	Wide	Narrow
Fusion zone size	Great	Less

하는 전략으로 전류 펄스를 설정해왔다. 그러나, 최근의 몇몇 가변 극성 아크 알루미늄 용접 연구에서는 기존의 이론과는 달리 역극성 분율이 높을수록 입열이 증가하는 결과를 보고하였다<sup>5,6)</sup>. 본 연구진도 동일한 현상을 관찰하였고, 문헌 조사를 통해 이 같은 현상에 대한 납득할 만한 논리적인 설명이 부재함을 알게 되어 새로이 터널링 효과와 음극점 이동 현상의 복합 작용을 제안한 바 있다<sup>7)</sup>.

이 연구에서는 터널링 효과와 음극점 이동 현상의 복합 작용을 이용해 기존 연구에서 보고된 가변 극성 알루미늄 아크 용접의 이상 현상에 대해 추가적인 설명을 시도한다. 역극성 분율과 입열의 비례 관계는 이미 앞선 연구에서 효과적으로 설명하였고, 여기에서는 그 외에 용접부 형상과 관련된 현상, 즉 산화막 제거 영역, 용접부 너비, 용입 깊이에 관한 결과를 고찰할 것이다.

## 2. 역극성 분율과 용접부 형상

가변 극성 GTA를 이용한 알루미늄 용접에 관한 연구는 그리 많지 않다. 그 중 용접부 형상과 관련해 흥미로운 연구 결과를 보고한 연구는 2007년 Yarmuch et al<sup>5)</sup> 이다. 이 연구는 산화막 두께를 달리한 시편에 대해 역극성 분율을 주요 변수로 하여 용접부 형상의 변화를 관찰하여 보고하고 있다. 알루미늄 표면을 와이어 브러쉬로 문질러 산화막을 제거한 시편과 애노다이징(anodizing)을 통해 산화막을 더 두껍게 만들어준 시편에 대해 가변 극성 아크를 적용하고 용접부 형상을 중심으로 결과를 비교하였다.

용접부 형상과 관련해 상호 비교한 항목은 산화막 제거 영역의 크기, 비드 폭, 용입 깊이, 그리고 용융부(FZ)의 크기이다. 산화막이 제거된 영역의 비교에서, 두꺼운 산화막의 애노다이징 시편 표면은, 산화막이 거의 제거되었거나 그 두께가 얇은 와이어 브러싱 시편에 비

해 협소한 면적의 산화막 제거 영역을 보였다. 다시 말해, 산화막이 얇은 시편에서 더 넓은 영역에 걸쳐 산화막이 제거되었다는 뜻이다. 그러나, 용접부 비드 폭은 애노다이징 시편에서 더 크게 관찰되었으며, 용입 깊이 또한 애노다이징 시편에서 더 큰 값을 보였다. 결과적으로 용융부 크기는 애노다이징 시편에서 더 크게 측정되어, 산화막이 두꺼운 경우에 더 큰 입열이 발생했음을 알 수 있다. 이러한 결과를 간략하게 표로 정리하면, Table 1과 같다. 아울러, 앞서 언급한 바와 같이 이 연구에서도 역극성 분율이 높을수록 더 큰 용융부가 관찰되어 역극성과 입열량이 비례하는 결과를 보였다.

이 연구 역시 역극성과 입열량의 비례 관계에 대한 기존 이론과의 모순을 언급하였지만, 이에 관한 자세한 규명이나 새로운 이론적 배경에 대한 고찰이 이루어지지 못하였다. 아울러, 위에서 언급한 산화막 두께에 따른 용접부 형상 변화에 대해서는, 두꺼운 산화막에서 전자 방출을 위해 추가 에너지가 필요하고, 이 추가 에너지로 인해 입열이 증가하였을 것이라는 추론으로 결론을 맺고 있다.

## 3. 터널링 효과와 음극점 이동의 복합 작용 이론 적용

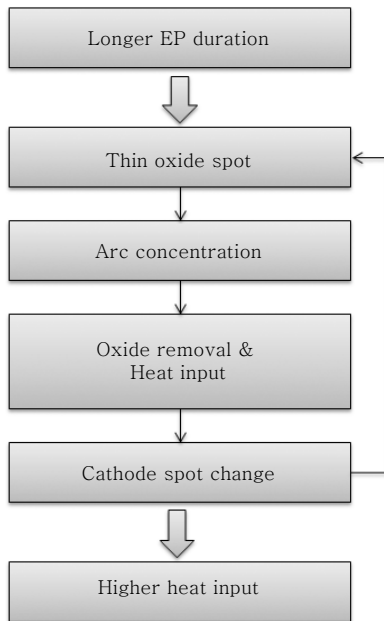
가변 극성 아크를 이용한 알루미늄 용접에서 명백하게 관찰되는 역극성 분율과 입열량의 비례 관계는 터널링 효과와 음극점 이동 현상을 복합적으로 고려하면 설명이 가능하다.

알루미늄 산화막은 통전이 불가능한 부도체이지만, 전압이 인가되면 박막의 산화막을 통해 극도로 높은 전기장이 유도되어 오히려 산화막을 통해 전자 방출이 더 쉽게 이루어진다. 이와 같은 현상을 양자 터널 효과<sup>8)</sup>라고 하며, 텅스텐 전극의 열전자 방출(thermionic emission) 메커니즘과 달리 상대적으로 낮은 온도에서 전자 방출이 일어나므로 비열전자 방출(nonthermionic emission)이라고 하기도 하고, 전기장에 의한 유도 전자 방출이므로 필드 방출(field emission)이라고도 한다. 음극에서 전자가 방출될 때는 한 지점에서 집중적으로 방출되는데, 이 점을 음극점이라고 하며, 음극점은 매우 짧은 주기를 가지고 불규칙적으로 위치가 바뀐다. 이는 진공 아크와 가스 아크에서 공통적으로 관찰되는 현상으로, 불규칙적인 위치 이동을 특징삼아 이를 음극점의 랜덤 워크(random walk)로 부르기도 한다. 음극점이 계속해서 이동하는 메커니즘은 아직 뚜렷이 밝혀지지 않았으나<sup>9,10)</sup>, 표면의 불순물 결합이나 형상적 불균일에 따른 일함수(work function)의 차이를

주요 원인으로 보고 있다. 가변 극성 아크 알루미늄 용접에서도, 마찬가지로 역극성 기간 동안 알루미늄 용접에서 음극점 이동 현상이 관찰된다. 그리고, 알루미늄에서의 음극점 이동 현상은 위치 별로 상이한 산화막 두께와 이에 따른 일함수 차이를 추가적인 요인으로 생각할 수 있다.

역극성에서 전자는 음극점을 통해 집중적으로 방출되고, 이때 아크 플라즈마는 음극점에 집중될 수밖에 없다. 따라서, 집중된 아크로 이 지점의 산화막이 제거되며, 동시에 입열이 증가하는 것이다. 그런데, 음극점은 매우 짧은 주기로 위치가 이동하므로 역극성 주기 동안 아크가 집중된 음극점의 위치는 여러 군데 존재한다. 덧붙여, 알루미늄 용접에서는 산화막 두께가 얇은 위치에서 일함수 값이 작기 때문에 위치별로 상이한 산화막 두께가 음극점 이동의 주요 원인일 수 있다. 전자가 집중적으로 방출되는 음극점에 아크가 집중되어 입열이 증가하므로, 역극성 주기가 길어질수록 자연스럽게 전체 용접부 입열량이 증가한다. 이를 도표로 나타내면, Fig. 1과 같다. 역극성 주기 동안 음극점은 일함수가 낮은 얇은 두께의 산화막 지점을 따라 계속해서 이동하고, 이 음극점을 따라 아크 플라즈마가 집중되며 입열이 증가한다. 역극성 분율이 증가할수록 입열이 집중되는 음극점이 더 많이 발생하므로, 용접부 전체에 대한 입열량이 증가하는 것이다.

위의 터널링 효과와 음극점 이동의 복합 작용을 앞서의 산화막 두께에 따른 용접부 형상 결과에 적용하면



**Fig 1** Mechanism of higher heat input for higher DCEP duty ratio

다음과 같이 설명할 수 있다. 산화막이 얇은 와이어 브러싱 표면에서 음극점은 상대적으로 먼 거리에서까지 발생할 수 있다. 이 지점까지 아크가 발생하려면 아크의 길이가 길어져 더 높은 전압이 필요하지만, 산화막이 얇아 일함수가 낮으므로 전자 방출이 용이하고, 이에 따라 동일 전압 하에서 상대적으로 더 먼 거리까지 아크가 도달할 수 있는 것이다. 따라서, 산화막 제거 영역이 애노다이징 시편보다 넓어진다. 그러나, 아크가 먼 거리까지 도달하다보니, 공간상 아크의 유효 반경이 커져 에너지 밀도가 작아지므로 비드 폭과 용입 깊이가 작아지는 것이다. 반대로, 산화막이 두꺼운 애노다이징 표면에서는, 일함수가 상대적으로 크기 때문에 아크는 멀리 도달하지 못하고 좁은 영역에 머물러 에너지 밀도가 증가하고, 이는 넓은 비드 폭과 깊은 용입으로 나타나 더 큰 용융부를 형성하는 것이다. 이를 간단히 정리하면 Table 2와 같다.

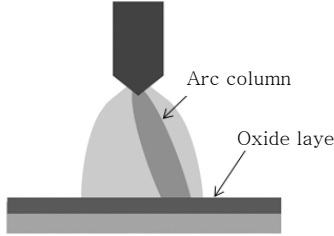

#### 4. 결 론

가변 극성을 이용한 알루미늄 아크 용접은 기존의 아크 이론과는 다른 결과를 보인다. 기존의 아크 이론에 따르면, 정극성 분율이 높을수록 입열량이 증가할 것으로 기대할 수 있으나, 실제 실험 결과는 반대로 역극성 분율이 높을수록 더 큰 입열량을 보인다. 이런 모순을 보완하기 위해 앞선 연구에서 터널링 효과와 음극점 이동 현상의 복합 작용을 제안하였고, 제안한 이론을 통해 실험 결과를 논리적으로 설명하였다.

이 외에 가변 극성과 관련된 다른 선행 연구는 알루미늄 산화막 두께에 따라 달라지는 용접부 형상에 관한 실험 결과를 보고하였으나, 이에 대한 명확한 설명이 이뤄지지 못했다. 본 연구에서는 선행 연구의 산화막 두께에 따른 용접부 형상 변화를 이론적으로 뒷받침하기 위해 앞서 제안했던 터널링 효과와 음극점 이동의 복합 작용을 적용하였고, 성공적으로 실험 결과를 설명할 수 있었다.

산화막이 얇은 알루미늄 표면에서는 일함수가 낮아 전자 방출이 용이하므로 상대적으로 먼거리까지 아크가 도달할 수 있고, 이에 따라 산화막이 제거된 영역이 넓지만, 아크가 먼거리까지 도달하다보니 공간상으로 보면 아크의 유효 반경이 커져 에너지 밀도가 작아지므로 비드 폭과 용입 깊이가 작아진다. 반대로, 산화막이 두꺼운 표면에서, 일함수는 상대적으로 크기 때문에 아크는 멀리 도달하지 못하고 좁은 영역에 머물러 에너지 밀도는 증가하므로 더 큰 용융부를 형성할 수 있는 것이다.

**Table 2** Comparison of variable polarity arc welding result. Oxide thickness decides the arc power density then it is resulted as heat input difference

	Anodized surface	Wire brushed surface
Schematic		
Work function of oxide layer	Greater	Less
Arc reach	Close	Far
Oxide removed white band	Narrow	Wide
Power density	Greater	Less
Weld depth	Deep	Shallow
Weld width	Wide	Narrow

후 기

이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. (This work was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2013)

References

1. Lancaster JF (1986) *The Physics of Welding*. 2nd Ed., PergamonPress
2. J. Cho : Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) Welding Part 1, Introduction and Theoretical Background, *Journal of KWJS*, 30(3) (2012), 1-3 (in Korean)
3. J. Cho : Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) Welding Part 2, Applications and Welding Physics, *Journal of KWJS*, 30(4) (2012), 1-3 (in Korean)
4. American Welding Society, *Welding Handbook* (1987), 2, 8th ed.

5. M. A. R. Yarmuch and B. M. Patchett : Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum, *Welding Journal*, 86 (2007), 196s-200s
6. F. Li, Z. Yu, X. Xiao, X. Hua and Y. Wu : Research of Cathode Cleaning and Weld Formation of AC TIG Welding of Aluminum Alloy, *The 2nd East Asia Symposium on Technology*, Sep 26(27) (2012), Nara, Japan
7. J. Cho : Weldability Increase of Aluminum by Variable Polarity Arc, *Journal of KWJS*, 32(1) (2014), 108-111 (in Korean)
8. R. H. Fowler and L. Nordheim : Electron Emission in Intense Electric Fields, *Proceedings of the Royal Society of London Series A* 118 (1928), 173-181
9. E. Hantzsche : Mysteries of the Arc Cathode Spot: A Retrospective Glance, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 31 (2003), 799-808
10. B. Jüttner : Cathode spots of electric arcs, *Journal of Phys D: Applied Physics* 34 (2001), R103-R123



- 조정호
- 1978년생, 공학박사
- 충북대학교 기계공학부 교수
- 용접/접합공정, 용접물리, 용융플 해석
- e-mail : junghocho@cbnu.ac.kr