연 구 논 문

ISSN 1225-6153
Online ISSN 2287-8955

가변 극성 아크의 알루미늄 용접성 향상에 관한 연구

조 정 호*,†

*충북대학교 기계공학부

Weldability Increase of Aluminum by Variable Polarity Arc

Jungho Cho*,†

*School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

†Corresponding author : junghocho@chungbuk.ac.kr

(Received January 17, 2014 ; Revised February 11, 2014 ; Accepted February 19, 2014)

Abstract

Low arc weldability of aluminum alloy is enhanced by applying variable polarity TIG and the result is theoretically investigated to figure out the mechanism. Conventionally, it is well known fact that DCEP (reverse polarity) arc is effective on aluminum welding. The reason is due to oxide layer removal by plasma ion bombardment and therefore it is named as cleaning effect. Another fact of polarity characteristic is that DCEN shows higher heat input efficiency therefore conventional variable polarity arc used to apply DCEP portion as small as possible. However, higher DCEP portion shows bigger weldment in this research and it is explained by adopting a theory of arc concentration on oxide layer with tunneling effect which was not clearly mentioned before in several variable polarity TIG welding research. Disagreement between variable polarity TIG welding result and conventional arc polarity theory is rationally explained for the first time with help of electron emission theory.

Key Words : Variable polarity, Arc, Aluminum, Weldability, Cleaning effect, GTA, TIG, DCEP

1. 서 론

알루미늄은 모재보다 높은 산화피막의 용융점과 비중으로 아크에 의한 용접성이 낮은 편이다. 그러나, 전극에 양극을 인가하는 DCEP(direct current electrode positive) 역극성(reverse polarity)을 사용하면, 플라즈마 양이온의 운동에너지에 의한 산화 피막 제거 효과로 용접성이 극적으로 향상되는 것으로 보고되어 있다.[1] 이는 통상 청정 효과(cleaning effect)로 불리우며, DCEP 극성을 이용하는 GMA 용접이나 교류 전원의 GTA 용접으로 알루미늄을 접합시키는 원리로 이용되고 있다[2,3].

본 연구에서는 DCEP와 DCEN의 분율을 조정할 수 있는 가변 극성(variable polarity) 아크를 이용해 GTA 용접법으로 알루미늄 합금을 용접하는 실험을 기반으로 아크의 극성 변화가 알루미늄의 용접성 향상에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다.

2. 실 험

실험에는 5052 알루미늄 합금을 이용하였으며, 시편은 3mm 두께에 300mm 길이와 50mm 너비로, 겹치기 이음에 필렛 용접을 타겟으로 하였다. 용접부에 대한 개요도는 Fig. 1 과 같고, 이러한 용접부 설계는 알루미늄 합금 박판을 이용한 차체 제작에서 쉽게 볼 수 있는 이음부다.

용접 전원은 디지털 인버터 타입의 가변 극성 GTA 용접기로 펄스 주파수와 펄스 내 DCEP 분율과 DCEN 분율을 조정할 수 있다. 기존의 실험 문헌과 사전 테스트를 통해 펄스 주파수는 용접부 형성에 미치는 영향이 미미함을 알 수 있었고, 이를 바탕으로 펄스 주파수는 100Hz로 고정하였다. 단순 사각 파형을 적용하였으며, 용접 변수의 복잡성을 줄이기 위해 라인 열입력을 기준

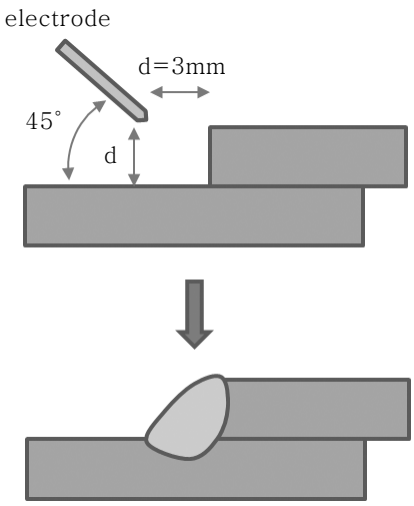


Fig 1 Schematic diagram of 3mm thickness aluminum sheet lap joint fillet welding

으로 용접 속도를 0.12m/s로 고정한 채 용접 전류와 DCEP 분율의 영향을 고찰하였다. 보호 가스는 99.9% 순도의 알곤으로 15L/m의 공급량을 설정하였다.

실험 결과로 각 조건별 용접부 단면 형상은 Fig. 2와 같다. 그림에서 보듯이 용접 전류와 DCEP 분율이 높아질수록 용접부가 커지는 것을 알 수 있다. 특히, DCEP 분율 향상에 따른 입열량 향상 효과는 그 경향성을 관찰할 수는 있으나, 일관성이 다소 결여된 것을 볼 수 있는데, 이유는 DCEP분율이 높아 질수록 전극 손실량이 높아져 아크가 불안정해지기 때문이다. 다시 말해, 모재에서 방출된 고온의 전자가 텅스텐 전극봉에 집중되어 흡수됨에 따라 용융과 증발, 용적으로 떨어져 나가는 손실량이 증가되고, 이와 동시에 아크 불안정성이 높아져 아크 지속 시간이 감소하게 되므로 40, 50%의 DCEP 분율에서 용접부 크기가 다시 줄어드는 것이다.

3. 용접성 향상 고찰

DCEP 극성에서의 알루미늄 용접성 향상은 플라즈마 양이온의 운동 에너지에 의해 산화 피막이 파괴되기 때문이다[1]. 청정 효과 또는 이온 폭탄(ion bombardment) 효과[4]로 알려진 이 기작의 간접적인 증거는 알곤 보호 가스와 헬륨 보호가스 비교 실험 결과로 제시된다. 원자의 크기가 커서 상대적인 운동량이 높을 것으로 생각되는 알곤 보호 가스에서의 용접성이 더 높게 관찰되기 때문이다.

가변 극성 아크의 특징을 결정하는 또 다른 극성별 특성은 서로 다른 발열량이다. 일반적으로 양극과 음극에서의 발열 비율은 "양극:음극=7:3"으로 밝혀져 있는데[5], 이는 음극에서 방출된 다량의 전자가 플마즈마 기둥을 통과하면서 에너지가 증가되어 양극에서 흡수됨으로써 음극은 상대적으로 냉각 효과를 보이고, 양극은 전자의 운동 에너지를 흡수하여 고온 가열되기 때문이다.

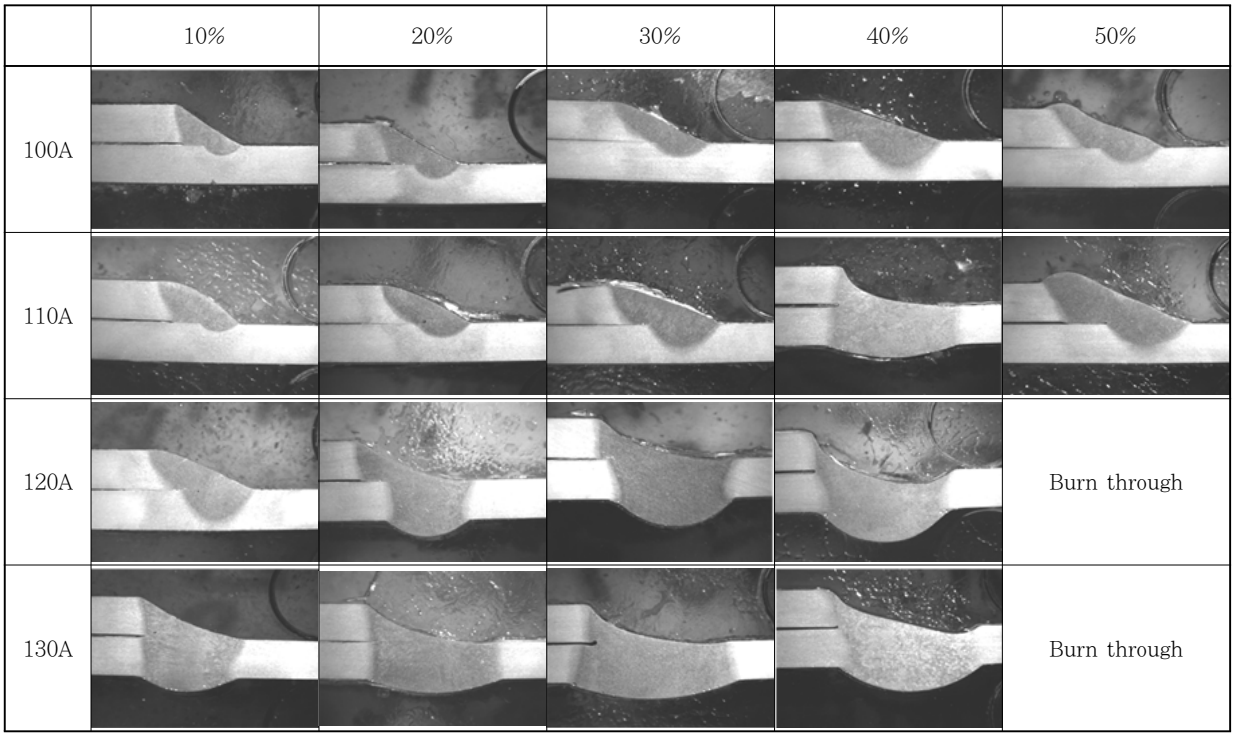


Fig. 2 Experimental result of aluminum sheet lap joint fillet welding with variable polarity TIG.

위에 언급한 두 가지 이론을 바탕으로 가변 극성 아크를 이용해 알루미늄을 용접하는 경우 통상적인 펄스 설정은 DCEP 분율은 낮게, DCEN 분율은 높게 하는 것이었다. 물론, 소모성 전극을 사용하는 GMA 용접의 경우 와이어 용융률과 용적 이행성을 고려하여 100% DCEP 분율이나 상대적으로 낮은 DCEN 분율을 섞어 사용할 수도 있다. 그러나, 비소모성 전극을 사용하는 GTA 용접이나 플라즈마 용접에서는 최소한의 DCEP 분율을 사용하여 전극 손상을 줄이고 입열 효율을 높이는 것이 정답으로 여겨져 왔다. 그리고, 이러한 설정의 배경에는 Fig. 3과 같이 DCEP 극성의 역할과 DCEN 극성의 역할이 분명하게 구분되었던 이론적 뒷받침이 있었다. 즉, DCEP 극성 아크에서는 산화막 제거가 주로 이루어지고, DCEN 극성일 때 높은 입열 효율을 통한 용융 및 접합이 이루어진다는 것이다.

그러나, 위에서 언급한 "DCEP-산화막 제거, DCEN-용융" 기작은 본 실험 결과에는 전혀 부합하지 못한다. 이같이 기존 이론에 배치되는 실험 결과는 이번이 처음이 아니다. 본 실험과 마찬가지로 가변 극성 GTA 용접을 이용한 알루미늄 용접 실험에 대한 결과 보고는 몇 개 외엔 찾아보기가 힘들지만, 그 중 앞선 2개의 연구 결과[6,7]는 본 연구에서처럼 높은 DCEP 분율에서 높은 입열 효율을 보이고 있다. 하지만, 2개의 논문 모두 그 원인에 대해서는 언급조차 하지 못하고 있다.

높은 DCEP 분율에서의 높은 입열 효율과 청정 효과를 통한 알루미늄 용접성 향상에 관한 상관 관계는 기존의 이온 폭탄 효과가 아닌 아크의 음극점 집중에 관한 이론을 도입하면 설명이 가능하다.

아크 용접에서 금속 재료로부터 전자가 방출되는 기구는 크게 두 가지로 나뉜다. 하나는 비소모성 전극봉을 사용하는 경우와 같이 고온의 텅스텐 전극에서 전자가 방출되는 열전자 방출(thermionic emission)이고, 다른 하나는 스틸, 알루미늄, 구리 등의 전극에서와 같이 자유전자가 풍부한 전기 전도성 금속에서 전자가 방출되는 비열전자 방출(non-thermionic emission)이다. 후자의 경우는 상온에서의 전자 방출이라기 보다는 텅스텐의 경우보다 상대적으로 매우 낮은 온도에서의 방출이기에 붙여진 이름이다. 비열전자 방출은 필드 방출(field emission)이라고 불리기도 하는데, 매우 얇은 층의 음극 전압 강하 영역에서 상대적으로 높은 전기장에 의해 전자가 유도 방출 되기 때문에 붙여진 명칭이다.

필드 방출 이론이 알루미늄 산화막에 적용된, 또 다른 두 가지 산화막 제거 원리가 제안되어 있다. 첫 번째는 터널링 효과(tunneling effect)라 불리는 것으로, 아크 전압이 인가된 상황에서 박막의 절연체인 산화막에 걸쳐 매우 높은 전기장이 형성되고, 높은 전기장에 의해 유도된 모재의 전자가 절연체를 뚫고 방출된다는 원리이다. 흥미로운 것은 산화막에 의한 유도된 높은 전기장에 의해 오히려 산화막을 통해 전자 방출이 더 용이하다는 것이다. 두 번째는 절연체 파괴(dielectric breakdown)로[8], 앞서의 터널링 효과와 유사하게, 유도된 높은 전기장이 전자를 방출 시키되 모재가 아닌 산화막 자체에서 전자를 방출하도록 하여, 전자 방출과 동시에 절연체가 파괴된다는 것이다.

이 두 가지 산화막 제거 원리 중 본 실험 결과를 설명할 수 있는 원리는 바로 첫 번째의 터널링 효과이다. 위에서 언급한 바와 같이 터널링 효과에서는 오히려 산화막을 통해 전자 방출이 용이하게 되고 이는 아크가 산화막에 집중되는 결과를 낳는다. 아크가 집중된 산화막은 순간적인 고온에 의해 용융되고[9], 이 열은 그대로 모재로 전달되어 모재의 용융이 이루어지는 기작이다. 아크가 집중되었던 산화막은 이제 더 이상 존재하지 않고, 아크는 주변의 다른 산화막을 찾아 새로운 통전 경

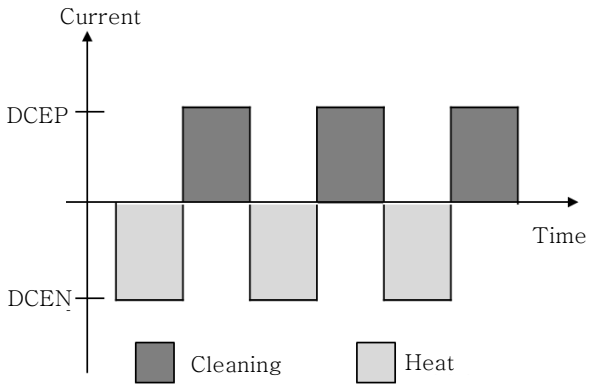
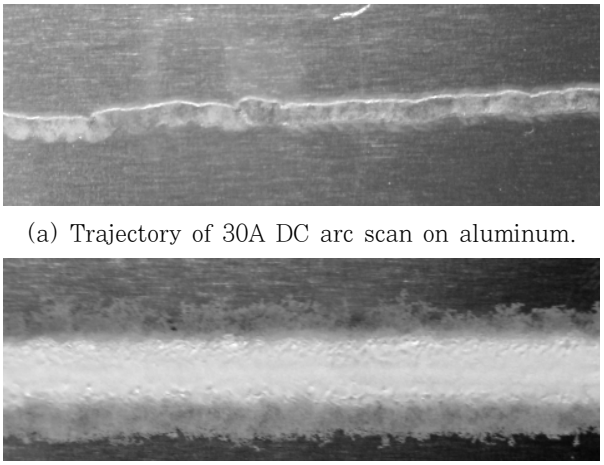


Fig 3 Role of DCEP and DCEN period in variable polarity arc pulse train



(a) Trajectory of 30A DC arc scan on aluminum.

(b) Trajectory of 30A VP arc scan on aluminum.

Fig. 4 Verification of aluminum oxide removal by VP arc presented by white band region in (b)

로를 형성한다. 이에 따라 음극점이 계속해서 위치를 바꾸는 음극점 이동 현상이 나타나는 것이다. 음극점 이동 현상은 기존의 연구에서 고속 카메라를 이용해 이미 관찰, 보고되어 있고[10], 본 연구에서도 간접적으로나마 입증되었다. Fig. 4는 시편을 30A 저전류의 DC 아크와 가변 극성 아크로 스캐닝한 표면을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 DC 아크는 좁은 궤적을 보이고 있지만, 가변 극성 아크가 지나간 시편은 상대적으로 매우 넓은 아크 궤적을 보이고 있다. 이는 아크가 한 점에 머무르지 않고, 계속해서 이동한 흔적으로 아크가 산화막의 한 점에 집중된 후 그 지점의 산화막을 파괴시키고 다른 산화막의 한 점에 집중되는 순환 과정을 간접적으로 보여주는 것이다. 그림에서 VP 아크가 지나간 자리의 넓은 흰색 띠 영역은 산화막이 제거된 영역으로 분석되었다[6].

이러한 음극점 이동, 산화막의 아크 집중 원리를 도입하면 본 연구의 실험 결과에 대한 이론적인 설명이 가능하다. 즉, 높은 DCEP 분율은 아크의 산화막 집중 및 파괴, 모재로의 열전도 공정이 이루어지는 시간이 더 많음을 의미하고, 이에 따라 DCEP 분율이 높을수록 더 높은 입열 량을 얻을 수 있었던 것이다. 비록 이전 GTA 용접에서의 양극 발열 원리가 일반적인 아크 용접에서는 통용된다 하더라도, 최소한 알루미늄 용접에서는 양극 발열 보다는 음극점 아크 집중에 의한 입열 효율이 더 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 가변 극성(variable polarity) 아크를 이용한 알루미늄 용접성 향상에 관한 것으로 디지털 인버터 TIG 용접기를 이용해 전류 펄스 중 DCEP와 DCEN 분율을 조정하여, 아크의 전기 극성이 알루미늄의 용접성에 미치는 영향을 분석하였다. 자동차 차체 적용을 목적으로 하여 3mm 두께 5052 알루미늄 합금의 겹치기 이음 필렛 용접부에 대해 최적 용접 조건을 도출하는 방식으로 실험을 진행하였으며, 용접 변수로는 알곤 보호 가스를 사용하고, 선행 테스트를 통해 펄스 주파수는 영향이 미미함을 검증하여 상수로 고정함과 동시에, 일정한 용접 속도 하에 DCEP 분율과 용접 전류를 변화시켜 최적 용접 조건을 도출하였다. 그리고, 용접부 단면 분석을 통해 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 동일한 용접 전류에서 DCEP 분율이 높을수록 더 큰 용접부 사이즈를 얻을 수 있다.

2) DCEP 분율이 높을수록 텅스텐 전극봉의 손실량이 커지고, 이에 따라 아크가 불안정해져 용접부 사이즈는 다시 감소한다.

3) DCEP 분율과 입열 효율과의 비례 관계는 기존의 아크 이론과 반대되는 것으로, 알루미늄 용접에서는 DCEP 극성에서 터널링 효과에 의한 산화막 아크 집중으로 이 현상을 설명할 수 있다.

4) 기존의 양이온 스퍼터링 혹은 이온 폭탄에 의한 청정 효과로는 DCEP 분율과 입열 효율의 비례 관계를 설명할 수 없으므로, 가변 극성의 알루미늄 용접성 향상 효과 메커니즘에는 고찰에서 언급한 산화막의 터널링 효과와 아크 집중 원리가 보충되어야 한다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업의 결과물입니다. (No. 2012R1A1A1012487)

참 고 문 헌

1. C. D. Yoo and S. J. Na : Arc Welding, 2011, 74-76, The Korean Welding and Joining Society (in Korean)
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. J. F. Lancaster : Physics of Welding, International Institute of Welding, Pergamon, 1984
5. J. Talkington : Variable Polarity Gas Metal Arc Welding, M. S. Thesis, The Ohio State University, 1998
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. M. A. R. Yarmuch and B. M. Patchett : Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum, Welding Journal, July, **86** (2007) 196s-200s
8. Q. Pang, T. Pang, J. C. McClure and A. C. Nunes : Workpiece Cleaning During Variable Polarity Plasma Arc Welding of Aluminum, Journal of Engineering for Industry **116-4** (1994) 463-466
9. A. Scotti, J. C. Dutra and V. A. Ferraresi : The Influence of Parameter Setting on Cathodic Self-Etching During Aluminum Welding, Journal of Materials Processing Technology **100-1** (2000) 179-187
10. R. Sarrafi and R. Kovacevic : Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc, Welding Journal, January, **89** (2010) 1s-10s