

가변 극성 플라즈마 아크 (VPPA) 용접 Part 2, 적용 사례 및 용접 물리

조 정 호*[†]

*충북대학교 기계공학부

Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) Welding Part 2, Applications and Welding Physics

Jung-Ho Cho*[†]

*School of Mechanical Engineering, Chungbuk. National University

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

1. 서 론

Part 1의 VPPA 소개에 이어 본 논문에서는 듀랄루민 소재에 대한 성공적인 적용 사례를 중심으로 본격적인 접합 메카니즘, 즉 산화막 제거와 플라즈마, 보호 가스 역할에 대해 기술한다.

2. 적용 사례

이미 Part 1에서 언급했듯이 알루미늄은 모재에 비해 질량이 크고 용융점이 높은 산화막 때문에 용접성이 매우 떨어진다. 특히, 듀랄루민으로 통칭되는 Al-Cu계, 즉 2000계 알루미늄은 용접성과 브레이징성이 더욱 떨어지지만, 그나마 Cu 함량이 높은 2219는 내식성이 우수하고 용접이 가능해 로켓의 연료 탱크 소재로 오래 전부터 적용되어 왔다.

1950년대 중반, R. Gage에 의해 GTAW (gas tungsten arc welding)의 대기 개방형 아크를 노즐을 통해 분사하는 방법, 즉 플라즈마 아크 용접법이 고안된 이후, 1960년대 GTAW로 생산되던 Titan III-C 로켓에 처음으로 정극성(straight polarity, DCEN)의 플라즈마 아크 용접법이 적용되었다. 1960년대 후반 보잉(Boeing)사가 처음으로 역극성(reverse polarity, DCEP)이 포함된 가변 극성 플라즈마 용접을 알루미늄 접합에 적용해 매우 성공적인 결과를 보여주었고, 이 기술은 1970년대 후반 NASA에 의해 채택되어 2219 듀랄루민 소재로 만든 우주 왕복선의 연료 탱크 생산에 적용되었다. 이 기술 적용에 의해 기존의 GTAW 용접

시 필요했던 사전 개선작업이 없어졌음은 물론, 3.6 - 26.4mm 두께 판재의 멀티 패스 전도 모드 용접을 싱글이나 더블 패스의 킥용접으로 대체했을 뿐 아니라 방사선 촬영에 의한 기공 및 결함 검출 등의 사후 품질 검사가 필요 없을 정도로 단 한번의 결함 제품 검출 없이 성공적으로 용접부를 생산한 것으로 보고되어 있다¹⁻³⁾.

이후 가변 극성 플라즈마 아크 용접법은 후판 알루미늄 용접부 생산에 가장 효과적인 솔루션으로 알려졌으나, 장비에 대한 수요가 많지 않고 고가여서 우주 산업 외에는 널리 통용되지는 않고 있다.

3. 산화막 제거

알루미늄 용접에 효과적인 가변 극성 아크는 DCEP와 DCEN이 번갈아 나타나는 것으로 그 접합 기작을 이해하기 위해서는 통전 매개체로서의 아크 현상에 대한 배경 지식이 필요하다. 아크 용접은 높은 전기장이 걸린 기체를 통한 방전 현상으로 고온의 플라즈마가 발생하고, 이를 용접 열원으로 이용하는 가장 기본적인 용접법이다. 전기 방전을 위해 인가한 양극과 음극에서는 고온의 플라즈마에 의한 열과 함께, 재료에 따른 전기적 특성이 다르게 나타나므로 플라즈마 가스로부터 금속 고체로의 전류 경로로서의 현상과, 모재와 전극봉으로서의 재료 특성에 대한 연구들이 꾸준히 있어 왔다.

아크 용접에서 중요한 역할을 하는 인자는 고온에서 고속으로 운동하며 에너지를 전달하는 전자다. DCEN에서는 전극봉에 음극이 인가되고, 용접 모재에 양극이

인가되어, 전자는 전극봉에서 방출된 후 모재로 전달된다. GTAW의 경우라면, 텅스텐 전극봉을 사용하므로 고온에서 전자가 방출되는 열전자 방출(thermionic emission)이 일어나고, 플라즈마 열과 함께 전자의 운동 에너지가 모재로 전달되어 금속을 용융시키는 에너지원이 된다.

DCEP의 경우에는 철이나 알루미늄 등의 모재가 음극이 되어 텅스텐의 경우보다 낮은 온도에서 전자를 방출되므로 비열전자 방출(non-thermionic emission)로 불리며, 용접 입열 효율이 DCEN 보다 상대적으로 낮은 것으로 알려져 있다. 아울러, 음극 모재의 넓은 면적에서 방출된 전자들이 좁은 영역의 전극봉 팁으로 집중되므로 전극봉에 과도한 열이 발생하게 되어 전극봉의 수명을 단축시키게 된다. GMAW의 경우라면, 이 현상이 소모성 전극봉의 용융을 더욱 용이하게 하므로 오히려 장점이 된다.

DCEP로 알루미늄 모재에 음극을 인가해주면 산화막이 쉽게 제거 되어(청정효과, cathode cleaning effect) 용접성이 좋아지고, 이를 가능하게 하는 기작은 산화막에 집중되는 전류와 플라즈마 가스 이온의 충돌 에너지(ion bombardment)로 알려져 있다. 하지만, 앞서 설명했듯이 DCEP는 입열 효율이 떨어지고 전극봉의 수명이 단축되므로 이를 보완하기 위해 DCEN과 적정 비율을 갖는 펄스 형태의 교류 전원, 즉 가변 극성 전원을 사용하는 것이다.

알루미늄 산화층은 세라믹으로 분류되는 절연체이다. 따라서, 전류가 흐르지 못한다. 하지만, 박막의 알루미늄 산화층 양면에 강한 전기장이 걸리면, 전자가 산화층을 통과하여 이동하게 되는데 이를 터널링(tunneling) 효과라고 한다. 실제 실험 결과 DCEP로 알루미늄 용접 시 아크는 산화층 표면에 집중되어 형성되는 것으로 관찰되었다. 그리고, 터널링 효과는 산화층에 전류가 집중되는 이유로 여겨져 왔다⁴⁾. 그러나 이 현상 한 가지만으로는 전류가 산화층에 집중되는 이유를 설명하기가 어렵다.

아크가 산화층에 집중되는 현상은 일함수(work function) 개념을 도입하면 이해가 쉽다. 일함수는 전자 방출을 위해 필요한 에너지로 이 숫자가 낮을수록 더 쉽게 더 많은 전자를 방출한다. 알루미늄은 약 4eV의 일함수를 갖지만, 문헌에 따르면 두께가 8.4nm일 경우 알루미늄 산화층은 약 1.3eV의 일함수를 갖는다⁵⁾. 따라서, 알루미늄 모재에 음극을 인가하면 수 nm 두께의 박막 산화층을 통해 더 쉽게 전자를 방출할 수 있음을 알 수 있다. 알루미늄 산화층은 절연체이므로 산화층 자체에서 전자가 방출된다기 보다는 박막의 산

화층이 존재함으로써 강한 전기장이 형성되어 알루미늄 모재로부터 더 쉽게 전자를 방출할 수 있다는 것으로 이해해야 한다. 즉, 동일 온도라면 산화층이 있는 알루미늄 표면에서 더 많은 전자가 방출되므로 아크는 산화층에 집중된다. 그리고, 산화층에 집중된 아크는 쉽게 산화막을 용융시키는 것이다.

두 번째로 언급한 산화층 제거 기작은 플라즈마 가스 이온의 충돌 에너지이다. 스퍼터링(sputtering)으로 언급되기도 하는 이 현상은 고온의 양성 플라즈마 가스 이온이 음극의 모재와 충돌해 에너지를 전달함으로써 산화막 제거를 돕는 것으로 알려져 있다. 만약, 모재 표면과 반응하는 가스 이온이라면 위에서 언급한 엄밀한 의미의 스퍼터링과 동일한 결과를 보일 것이다. 이 기작을 입증하는 가장 간단한 실험은 아르곤과 헬륨을 플라즈마 가스로 사용하여 산화막 제거 효과를 비교하는 것이다. 이미 잘 알려져 있듯이, 원자의 크기에 따른 운동 에너지의 차이 때문에 아르곤을 사용하는 경우에 더욱 효율적인 산화층 제거 결과를 보인다.

마지막 세 번째로 설명 가능한 기작은 첫 번째의 산화막 통전과 관련이 있다. 앞서 설명한 바와 같이 산화층과 같은 절연체가 높은 전기장 하에서 전도성을 띄게 되는 현상을 절연 파괴(dielectric breakdown)라고 하는데, 이 절연 파괴 현상 자체가 본질적으로 통전 매개체인 원래의 절연체, 즉 알루미늄 산화층을 파괴시키는 특성이 있으므로 산화막 제거에 도움이 된다는 것이다⁶⁾.

하지만, 중요한 것은 위의 세 가지 산화막 제거 원리 중 두 번째를 제외한 나머지는 모두 명확한 실증 없이 통용되어 지거나 언급되고 있는 이론으로 아직도 몇몇 연구자들에 의해 VPPA의 알루미늄 용접 원리를 밝히기 위한 노력들이 계속해서 이루어지고 있는 상황이다. 즉, 개발되어 적용된 지 반세기가 되어가는 용접 기술이지만, 그 근본적인 원리는 여전히 탐구중인 현재 진행형 기술인 것이다.

4. 플라즈마/보호 가스

플라즈마 용접은 기존의 아크 용접과 달리 독립적인 두 가지 경로로 공급되는 가스가 필요하다. 첫 번째는 아크 플라즈마 형성을 위해 노즐로 분사되는 플라즈마 가스이고, 두 번째는 쉴드 캡을 통해 분사되는 보호 가스이다. 일반적으로 플라즈마 가스로는 아르곤을 사용하고, 보호가스로는 아르곤이나 헬륨 또는 이 두 가스의 혼합 가스를 사용한다.

헬륨-아르곤 혼합 가스를 보호 가스로 사용하는 경우에 아르곤의 비중이 높아지면, 이온화 에너지가 상대적

으로 낮은 아르곤이 헬륨보다는 이온화되기가 쉽기 때문에 보호 가스 중의 아르곤이 이온화 되어 플라즈마 가스가 될 확률이 높아진다. 따라서, 보호 가스로부터 공급된 아르곤 중 일부가 노즐을 통해 분사되는 중심부 아크의 에너지를 전달 받아 플라즈마 가스가 되고 이 영향으로 아크는 점차 퍼져 종 모양 (bell shape)에 가깝게 되며, 플라즈마 가스의 증가로 저항이 낮아지므로 아크 전압은 낮아진다. 따라서, 100% 헬륨을 보호 가스로 사용하는 경우에 아크 집중이 잘 되고, 입열 효율 증가와 키흔 용접에 유리하다.

5. 맺음말

현재 우리나라의 VPPA 시장 규모는 매우 작다. 알루미늄 소재 자체가 고가인데다 키흔 용접으로 생산할 만큼 후판 소재의 적용 분야가 많지 않기 때문이다. 하지만, 주목해야 할 세 가지는 중국의 VPPA 연구 현황과 알루미늄 적용 분야의 확장 가능성, 그리고 우리나라의 우주 산업 진출이다.

온라인 상으로 검색할 수 있는 VPPA 연구 논문은 그리 많지 않다. 그런데, 흥미로운 것은 중국에서의 연구 동향으로 China National Knowledge Infrastructure (cnki.com.cn)에서 VPPA로 검색되는 연구 논문 포함 보고서는 총 87건인데, 이중 82건이 2000년 이후의 보고서이다. 중국은 경제 개방 이후 우주 산업에 많은 투자를 했다. 그 결과 2003년 중국 최초의 유인 우주선을 발사했고, 2011년엔 실험용 우주정거장 텐궁 1호 발사에 성공했으며, 같은 해 무인 우주선을 발사해 텐궁 1호와 도킹에 성공했다. 그리고, 2012년 6월 드디어 유인 우주선과 텐궁 1호와의 도킹을 성공시켰다. 2000년 이후 집중된 VPPA 연구와 중국 우주 산업의 괄목할 만한 성장은 당연히 상관관계가 있다.

이제 우리나라의 현재 우주 진출 상황을 보자. 우리는 현재 러시아의 발사체를 들여와 우리 영토에서 발사하려는 노력 중에 있으며, 이를 기반으로 독자적인 발사체를 개발 중에 있다. 우주 진출에 반드시 VPPA 연구가 뒷받침되어야 한다는 이야기는 아니다. 그러나, 내식성이 우수하고 비강도가 높은 듀랄루민 소재가 발사체의 적정 소재로 정답처럼 여겨지고 있고, 그 소재 그대로 우리 역시 추진하고 있는 대목에서 용접 기술에 대한 연구 개발이 뒷받침 되지 않는다면 소재와 용접 기술 모두 수입에 의존해 단지 우리 영토에서 제작한다는 것 말고는 큰 의미를 두기 어렵다.

마지막으로 주력 산업으로의 파급 효과를 언급할 필요가 있다. 우리 경제는 자동차와 조선에 크게 의지하고 있으며, 이 두 산업 분야에서 알루미늄의 사용량 증

가는 따로 언급할 필요가 없다. 덧붙여, 경쟁이 가속화될수록 고급 알루미늄 소재에 대한 요구도 증가할 것이며, 보다 안정적인 알루미늄 용접 기술에 대한 수요 또한 크게 늘어날 것이 자명하다.

알루미늄의 용접성은 매우 낮다. 그러나, 알루미늄의 다양한 접합 형상에 대응할 수 있고, 후판의 단일 패스 용접을 가능케 하는 기술은 가변 극성 플라즈마 아크 용접이 유일하므로, 관련 기술에 대한 저변 확대가 필요하다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. A. C. Nunes, Jr., E. O. Bayless, Jr., C. S. Jones, III, P. M. Munafò, A. P. Biddle and W. A. Wilson, Variable Polarity Plasma Arc Welding on the Space Shuttle External Tank, *Welding Journal*, **63**, 27-35, Sept. 1984
2. M. A. R. Yarmuch and B. M. Patchett, Variable AC Polarity GTAW Fusion Behavior in 5083 Aluminum, *Welding Journal*, **86**, 196s-200s, Jul. 2007
3. N. J. Woodward, I. M. Richardson and A. Thomas, Variable Polarity Plasma Arc Welding of 6.35mm Aluminium Alloys: Parameter Development and Preliminary Analysis, *Science and Technology of Welding and Joining*, **5**, 21-25, 2000
4. Arc Welding, C. D. Yoo, S. J. Na, 2011, Korean Society of Welding and Joining
5. M. Kaltenbrunner, P. Stadler, R. Schwödiauer, A. W. Hassel, N. S. Sariciftci and S. Bauer, Anodized Aluminum Oxide Thin Films for Room-Temperature-Processed, Flexible, Low-Voltage Organic Non-Volatile Memory Elements with Excellent Charge Retention, *Advanced Materials*, **23**, 4892-4896, 2011
6. R. Sarrafai and R. Kovacevic, Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc, *Welding Journal*, **89**, 1s-10s, Jan. 2010



- 조 정 호
- 1978년생
- 충북대학교 기계공학부
- 용접/접합 공정, 용접물리
- e-mail : junghocho@chungbuk.ac.kr