

# 가변 극성 플라즈마 아크 (VPPA) 용접

## Part 1, 소개 및 이론적 배경

조 정 호<sup>\*,†</sup>

\*충북대학교 기계공학부

### Variable Polarity Plasma Arc (VPPA) Welding

#### Part 1, Introduction and Theoretical Background

Jung-Ho Cho<sup>\*,†</sup>

\*School of Mechanical Engineering, Chungbuk. National University

†Corresponding author : junghocho@chungbuk.ac.kr

## 1. 서 론

탄소 배출량 감소와 연비 향상이라는 두 가지 목적을 위해 화석 연료를 사용하는 운송 수단은 중량 절감을 위한 경량화 요구를 받고 있고, 관련된 소재 분야의 연구 중심에 알루미늄이 있다. 그러나, 알루미늄의 용융 용접성은 좋지 않은 것으로 알려져 있어, 마찰 교반 접합(FSW, friction stir welding)이나 SPR(self piercing rivet)과 같은 접합법이 개발되어 자동차, 항공 산업에서 이용되고 있다. 그러나, FSW는 용접부 마감 또는 신뢰성, 그리고 특히 관련 문제가 끊임없이 제기되고 있고, SPR은 응력 집중, 기밀성 그리고 중량 증가의 고질적인 문제가 있어 알루미늄 소재의 용융 접합에 대한 기술 개발과 개선이 여전히 요구되고 있다.

알루미늄 용융 접합의 가장 효과적인 솔루션은 가변 극성 아크, 그 중에서도 가변 극성 플라즈마 아크(VPPA, variable polarity plasma arc)로 알려져 있다. 우주 산업 목적으로만 사용된 사례가 있어 널리 알려지지는 않았지만, 우리나라와 중국을 비롯한 아시아권의 우주 산업 진출이 활발해 지면서 근래에 들어 관심을 받고 있다.

## 2. 플라즈마 아크 용접

에너지 밀도 기준으로 플라즈마 아크<sup>1-5)</sup>는 Fig. 1과 같이 일반적인 아크와 레이저의 중간 영역에 속한다. 전기 방전을 통한 열원 발생 메카니즘은 TIG/MIG 아

크와 동일하지만, 아크 플라즈마를 노즐을 통해 분사함으로써 아크의 유효 반경을 강제적으로 축소시켜 에너지 밀도를 증가시킨 것이 기존 아크와 다른 특징이다. 이로 인해, 레이저 용접부 보다는 효과가 적지만 키홀 용접이 가능해 아크 용접을 필요로 하는 정밀 용접 목적의 특수한 경우에 한해 이용되고 있다.

플라즈마 아크는 아크 방전 위치에 따라 비이행형(non-transfer) 모드와 이행형(tranfer) 모드로 나뉜다. 비이행형 모드는 Fig. 2의 왼쪽 그림과 같이 전극과 플라즈마 가스 노즐 사이에 방전을 일으키고, 노즐을 통해 아크 플라즈마를 불어내는 방식이다. 이행 모드는 TIG 아크와 마찬가지로 비모소성 전극봉과 모재 사이의 전기 방전을 용접 열원으로 사용하는 것으로 아크 플라즈마가 노즐에 의해 제한적으로 방출되므로 TIG 아크 보다 고밀도로 아크를 집중시킬 수 있다. 비

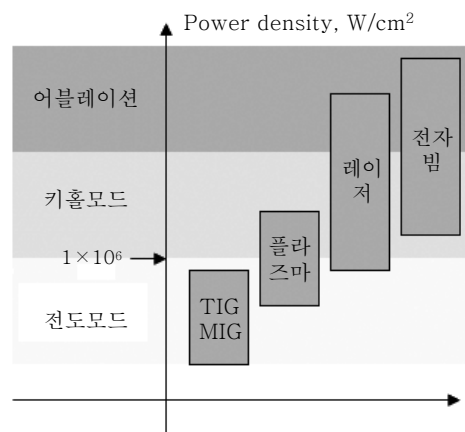


Fig. 1 용접 열원 밀도 비교

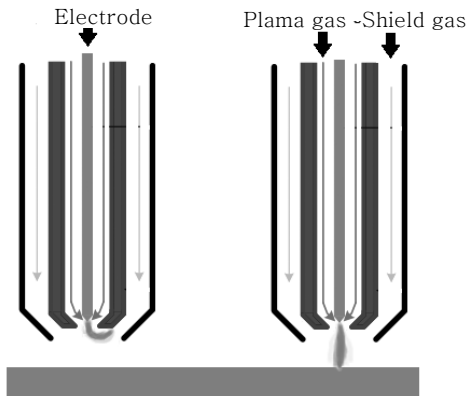


Fig. 2 플라즈마 아크의 비이행형 모드(왼쪽)와 이행형 모드(오른쪽)

이행 모드의 플라즈마 아크는 용접 열원으로서의 의미는 없으나 플라즈마를 노즐 밖으로 불어냄으로써 노즐 밖으로 분사되는 플라즈마 기둥이 이행 모드의 아크 스타트를 보다 용이하게 한다.

### 3. 가변 극성 플라즈마 아크 용접

플라즈마 용접에서는 거의 대부분의 경우에 DC 아크를 용접 열원으로 사용하고 있으나, 우주 항공 산업 목적의 듀랄루민 용접에는 AC 플라즈마, 특히 EN (electrode negative)과 EP (electrode positive) 성분의 분율을 조절할 수 있는 가변 극성 플라즈마 아크<sup>6-10)</sup> (VPPA, variable polarity plasma arc)를 사용해 온 것으로 알려져 있다.

가변 극성 전원은 일반적인 교류 전원과 달리, Fig. 3와 같이 EP/EN 분율을 조정할 수 있다. 아크 용접에서 EN, 즉 전극봉에 음극을 인가하고 모체에 양극을 인가하는 경우, 고온의 전극에서 방출된 전자가 모체로 전달되기 때문에 EP 보다 높은 입열 효율을 보인다. EP의 경우는 EN 보다 입열 효율이 낮을 뿐 아니라 넓은 영역의 모체 표면에서 방출된 전자가 전극봉 끝단으로 집중되어 전달되므로 전극봉의 온도를 높여 수명을 단축시키는 단점이 있어, 대부분의 TIG 아크 용접은 DCEN을 사용하고 있다.

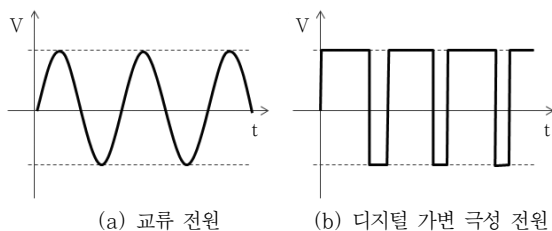


Fig. 3 일반적인 AC 아크 전원과 가변 극성 전원 비교

Table 1 연강과 알루미늄, 그리고 각 산화물의 열물리학적 특성 비교

구분	용융점(°C)	비중	열전도율(CGS)
연강	1527	7.86	0.12
알루미늄6061	650	2.71	0.37
연강 산화물	1560	5.2	-
알루미늄 산화물	2072	4	-

알루미늄 용접의 어려움은 Table 1 로 대변된다. 용융점이 낮아 기공이 발생하기 쉬운 문제 외에 알루미늄 산화물 또한 용접을 어렵게 한다. 연강의 경우 산화물과 모체의 용융 온도 차이가 거의 없고, 산화물의 비중이 모체보다 작으므로 용접 시 표면의 산화물이 큰 문제가 되지 않는다. 하지만, 알루미늄의 경우 산화물의 용융 온도가 모체보다 3배 이상 높아 모체가 용융되어도 산화물이 용융되지 않는 경우가 자주 발생하고, 덧붙여 산화물의 비중이 모체보다 높아 용접 시 고체의 산화물이 용접부에 혼입되어 크랙을 유발하는 결함의 원인이 된다.

알루미늄 용접 시 VPPA를 사용하는 가장 큰 이유는 EP 인 경우에 나타는 청정효과 (cleaning effect) 때문이다. Fig. 4와 같이 EP의 경우 전자는 전극봉으로 향하고, 플라즈마 이온( $Ar^+$ )은 모체로 향해 운동하게 되는데, 전자의 크기에 비해 플라즈마 이온이 매우 크기 때문에 운동 에너지의 영향도 극대화 되어 플라즈마 이온의 충돌로 표면의 알루미늄 산화막이 더 잘게 부서지고 용융량이 증가한다. 플라즈마의 이러한 역할은 이온 충격 (ion bombardment)으로 알려져 있고, 이에 따른 표면 산화막 제거를 청정효과라 일컫는다. VPPA는 플라즈마 아크의 EP 분율을 조절함으로써, 청정효과를 도모하고 EN의 장점을 효과적으로 이용하기 위한 전류 제어 방식이다. 더불어, 작은 아크 반경으로 열변형을 최소화하면서 키홀 용접이 가능한 장점이 있어 용접성이 낮은 듀랄루민 용접에 최적화된 솔루션으로 알려져 있다.

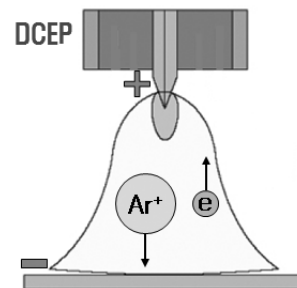


Fig. 4 DCEP의 전자와 플라즈마 이온의 운동 방향

#### 4. 맺 음 말

우리 나라 경제의 밑거름이 되고 있는 3대 제조 분야 중 두 가지는 자동차와 조선 산업이다. 이 두 산업 분야에서 알루미늄 소재의 비중이 증가하고 있는데, 자동차에서는 알루미늄에 의한 경량화, 조선에서는 LNG 탱크와 같은 특수 선박의 재료로 사용량이 늘어나고 있기 때문이다.

아울러 우리 기술로 로켓을 만들어 쏘아 올리려는 노력까지 더해져 알루미늄의 접합 솔루션에 대한 시대적 요구는 날로 커지고 있다.

현재 FSW나 SPR과 같은 알루미늄 접합 솔루션이 등장해 비교적 널리 이용되고 있다고는 하나, 조인트 형상의 자유도나 기밀성 측면 등에서 용융 접합이 가지고 있는 장점에는 비교할 바가 아니다.

VPPA는 아크 열원이면서도 키홀 모드 용접이 가능해 용접이 까다로운 알루미늄 소재의 효과적인 솔루션으로 알려져 있다. 본 기술 강좌의 Part 2에서는 VPPA의 성공적인 적용 사례를 중심으로 용접 조건과 특성, 그리고 이 용접 기술의 국산화 필요성에 관해 논한다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. S. H. Yoon, J. R. Hwang and S. J. Na, A Study on Plasma Augmented Laser Welding Process for Joining of Thin Stainless Steel Sheets, Abstracts of the 2004 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, 2003 Nov. 01, 33-35 (in Korean)

2. J. H. Cho, T. W. Park, S. J. Na, J. R. Hwang, Y. H. Won, T. S. Kim and S. H. Lee, Heat Transfer Analysis of High Speed PALW for SSLT, Abstracts of the 2004 Spring Annual Meeting of Korean Welding and Society, 2004 May 01, 112-114 (in Korean)

3. J. R. Hwang, S. H. Yoon and S. J. Na, Improvement of Penetration Characteristics by Plasma Augmented Laser Welding of Small Diameter Stainless Steel Tubes, Journal of the Korean Welding and Joining Society, **22-6** (2004), 30-35 (in Korean)

4. S. H. Yoon, J. R. Hwang and S. J. Na, A study on the plasma augmented laser welding for small diameter STS tubes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **32** (2007), 1134-1143

5. E. Craig, The plasma arc process - A review, Welding Journal, **67**, 19-25, Feb. 1988

6. J. T. Yoo, J. S. Tark, J. H. Yoon, Y. S. Jang, Y. M. Lee and S. B. Kang, Keyhole Welding of Aluminum Alloy by Variable Polarity Plasma Arc Welding, Abstracts of the 2006 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, 2006 Oct. **19**, 72-74 (in Korean)

7. A. C. Nunes, Jr., E. O. Bayless, Jr., C. S. Jones, III, P. M. Munafo, A. P. Biddle and W. A. Wilson, Variable Polarity Plasma Arc Welding on the Space Shuttle External Tank, Welding Journal, **63** (1984), 27-35, Sept. 1984

8. P. F. Mendez and T. W. Eagar, Welding Processes for Aeronautics, Advanced Materials & Processes, 39-43, May 2001

9. B. Irving, Why aren't airplanes welded?., Welding Journal, **76**, 31-41, Jan. 1997

10. L. F. Martinez, C. Matlock, R. E. Marques, J. C. McClure and A. C. Nunes, Effect of Weld Gases on Melt Zone Size in VPPA Welding of Al 2219, Welding Journal, **73**, 51-55, Oct. 1994



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