플라즈마 아크 피어싱에서 더블 아크가 STS304 상단면에 미치는 특성 분석

김동현^{*,**} · 조대원^{*,†} · 조영관^{*,**} · 서 정^{*} · 최광덕^{*} · 김륜한^{*} · 안석영^{**,††}

^{*}한국기계연구원 부산기계기술연구센터

^{**}부산대학교 기계공학부

Characteristic Analysis of Double Arcing on the Top Surface of STS304 in Plasma Arc Piercing

Dong-Hyun Kim^{*,**}, Dae-Won Cho^{*,†}, Yeong-Kwan Jo^{*,**}, Jeong Suh^{*}, Kwang-Deok Choi^{*},
Ryoonhan Kim^{*}, and Seokyoung Ahn^{**,††}

^{*}Busan Machinery Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, Busan, 46744, Korea

^{**}Mechanical Engineering, Pusan National Univ., Busan, 46241, Korea

[†]Corresponding author: [†]dwcho@kimm.re.kr, ^{††}sahn@pusan.ac.kr

(Received April 21, 2021; Revised July 27, 2021; Accepted August 12, 2021)

Abstract

Plasma arc cutting is a thermal cutting method that melts and removes the material by projecting an arc heat source onto the cutting part of material. In the case of cutting thick plate, plasma arc piercing is performed before plasma arc cutting for cutting quality and cutting efficiency. The quality of plasma arc piercing varies greatly depending on several variables. In particular, the factors such as stand-off distance, current and thickness of material play an important role in inducing double arcing. Therefore, it is necessary to investigate the phenomenon that occurs during plasma arc piercing according to the factors. In this study, we synchronized the arc shape photographed with a high-speed camera using a band-pass filter and the voltage waveform measured with the DAQ equipment. And it was confirmed that the smaller the stand-off distance, the stronger the current and the thicker the thickness of material, the worse the top surface of the material by double arcing.

Key Words: Plasma arc cutting, Plasma arc piercing, Double arcing, Stand-off distance, Voltage, Top surface

1. 서 론

플라즈마 아크 절단(Plasma Arc Cutting, PAC)은 고온의 수축된 아크를 이용하여 모재를 용융시키고 절단가스를 이용하여 용융금속을 불어내는 절단방식을 말한다. 플랜트, 자동차, 조선·해양 등 다양한 산업분야 등 현대 산업에서 금속을 절단하고 컴퓨터 수치 제어(CNC) 기계와 결합하여 다양한 모양을 절단하는데 사용되는 공정으로 용접 공정과 더불어 핵심 공정으로 활용되고 있다^{1,2)}.

PAC 토치의 작동원리는 Fig. 1과 같이 고주파·전압을 이용하여 전극봉(electrode)과 노즐 사이에 파일

릿 아크(pilot arc)를 발생시킨다. 발생된 파일릿 아크가 노즐 내부에 흐르는 가스를 가열 및 이온화 시켜 플

Fig. 1 Principle of arc generation during PAC

라즈마 제트를 만들고 노즐에서 분출된 플라즈마 기체의 도전성을 통해 전극(cathode)과 모재(anode) 사이에 주 아크(Main arc)를 발생시킨다. 이때, 플라즈마 제트는 노즐을 통과하면서 수축되어 고에너지와 고밀도를 가진 채 절단부를 용융 및 제거하게 된다³⁾.

수mm 이상 절단의 경우, 절단 초기에 용융물을 붙어내야 절단 효율이 상승하기 때문에 모재의 중심이 아닌 모재의 끝단부에서 절단을 시작해야 좋은 절단 품질을 얻을 수 있다. 하지만 모재의 끝단부가 확보되지 않거나 모재의 형상이 복잡한 경우 PAC 공정 전에 플라즈마 아크 피어싱(Plasma Arc Piercing, PAP) 공정을 수행하게 된다.

더블 아크(Double Arcing, DA)는 노즐 내부에서 전기적으로 절연된 아크가 흐를 때, 전극과 노즐을 연결하는 아크로 분리되는 본질적인 현상이다. 정상 아크의 경우, Fig. 2(a)와 같이 전극과 모재를 연결(A-C 경로)하는 아크가 발생한다. 반면 비정상 아크의 경우, Fig. 2(b)와 같이 아크가 전극과 모재를 연결(A-C 경로)하는 아크와 전극과 노즐, 모재를 연결(A-B-C 경로)하는 아크로 분리된다⁴⁾. DA발생 시 절단 품질에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐만 아니라 노즐과 전극이 파손되어 더 이상의 절단 작업을 수행할 수 없다.

더블 아크의 발생 원인은 다음과 같다. PAC에서 전류값이 일정 한계치보다 높아지면 노즐 구속부의 아크를 덮고 있는 차폐 가스층이 파괴되어 더블 아크가 발생한다. 전류가 증가하거나 노즐 orifice의 직경이 감소 또는 오리피스(orifice)의 길이가 증가하면 더블 아크의 발생 확률이 높아진다⁵⁾. 반면 노즐의 오리피스에 증착된 절연층(dielectric film)은 더블 아크 발생을 억제하는 중요한 역할을 한다⁴⁻⁶⁾.

Nemchinsky et. al.은 피어싱 시간에 따른 구멍 깊이 변화와 열전도에 관한 연구를 진행하였다⁷⁾. Colombo et. al.은 고속카메라를 활용해 PAC공정에서 파일럿 아크(pilot arc)에 관한 연구와 PAP공정에 대한 연구를 진행하였으며 파일럿 아크가 하프늄(hafnium) 입

자의 궤적 및 소모품(shield-nozzle)에 미치는 영향 등을 파악하였다⁸⁾. Prevosto et. al. 은 더블 아크 발생원인 중 하나인 가스압에 대한 물리적 해석에 관한 연구를 진행하였고⁹⁾ Nemchinsky et. al. 은 더블 아크 발생 원인과 가스 흐름, 양극 부착 위치, 극 침식, 절연층과 더블 아크의 관계 등에 관한 연구를 진행하였다^{4,10)}. 그러나 지금까지 발표된 연구논문들은 PAC 또는 PAP공정에서 노즐과 모재의 거리에 따른 더블 아크가 모재 상단면에 미치는 특성에 관한 연구에 대해 발표된 사례가 없다.

따라서 본 연구에서는 PAP 공정에서 시편 두께와 전류, 노즐과 모재의 거리에 따른 변수가 더블 아크 형성과 모재 상단면에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 구성 및 방법

실험 방법은 Fig. 3과 같이 고속 카메라, PAC 장비, 전압-전류 측정 장비(Data acquisition, DAQ)를 사용하고, 아크 형상과 더블 아크 발생 관계를 확인하기 위해 초고속카메라와 DAQ를 동기화하였다. 절단가스는 4kgf/mm^2 로 분사하였으며 각각 아르곤(Ar)과 질소(N_2)를 사용하였다. 실험에 사용된 소재는 원전의 금속 구조물에 주로 활용되는 스테인리스강(STS304)으로 선정하였다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 시편 두께(t), 시편-노즐 거리(Stand-off distance, SOD), 전류(A)에 따라 총 20회의 실험을 수행하였으며, 시편 두께는 5mm와 10mm, 시편-노즐 거리는 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 전류는 145A, 180A로 두었으며 full factorial로 계획하여 실험을 수행하였다.

실험을 통해 획득한 결과로는 피어싱 후 발생하는 홀 면적(Hole Area)과 더블 아크 영향부 면적(Affected area), 측정 전압 파형, DAR(Double Arcing Rate, DAR)가 있으며 피어싱 공정에서 홀과 더블 아크 영향부 면적의 정확한 값을 계산하기 위해 Fig. 4와 같이

Fig. 2 Schematics of normal arc (a), double arcing (b)

Fig. 3 Schematics of experiment

Table 1 Experiment table

No	Variables			Results					
	Thickness (mm)	SOD (mm)	Current (A)	Area (mm ²)		P _t (s)	T _t (s)	DAT (s)	DAR (%)
				Affected	Hole				
1	5	1	145	61.61	27.74	0.39	2.82	0.92	32.52
2	5	1	180	83.23	47.23	0.37	3.70	2.03	54.81
3	5	2	145	24.00	21.11	0.32	2.05	0.43	20.98
4	5	2	180	32.59	19.99	0.34	2.08	0.22	10.43
5	5	3	145	22.60	17.02	0.31	1.34	0	0
6	5	3	180	24.29	18.15	0.33	2.08	0	0
7	5	4	145	24.64	18.00	0.33	1.98	0	0
8	5	4	180	24.11	18.50	0.30	2.03	0	0
9	5	5	145	23.03	17.08	0.30	1.71	0	0
10	5	5	180	25.28	18.49	0.29	1.53	0	0
11	10	1	145	84.95	26.46	3.00	7.12	6.42	90.17
12	10	1	180	97.90	59.80	1.47	3.70	3.27	88.30
13	10	2	145	72.31	36.21	1.56	2.97	1.17	39.23
14	10	2	180	75.67	54.60	1.29	2.96	1.26	42.50
15	10	3	145	44.84	35.27	1.15	2.55	0.84	23.86
16	10	3	180	60.98	34.51	1.14	2.39	1.06	44.48
17	10	4	145	38.84	31.54	1.20	2.59	0.46	17.64
18	10	4	180	42.41	32.10	1.02	2.32	0.29	12.33
19	10	5	145	40.56	32.63	1.02	2.50	0.28	11.08
20	10	5	180	46.98	33.00	0.83	2.47	0.82	33.24

이미지를 이원화하여 계산하였다. 시편 상단면의 홀 면적은 Fig. 4(a)와 같이 상단면의 스패터를 제거한 후 이원화하여 측정하였다. 더블 아크 영향부 면적은 Fig. 4(b)와 같이 더블 아크 발생으로 인해 생긴 영향부를 이원화하여 홀 면적을 포함해 측정하였다. Fig. 5와 같이 플라즈마 아크가 시편을 관통한 시간(Piercing time, P_t)은 플라즈마 아크가 점화된 시점부터 플라즈마 아크가 시편 하부를 관통할 때까지 시간이며, 플라즈마 아크가 유지된 시간(Total time, T_t)은 아크 점화부터 점멸까지의 시간을 의미한다.

더블 아크는 Fig. 6과 같이 PAP 공정 중에 여러 번 발생하는 경우가 존재한다. 따라서 식(1)과 같이 각 PAP 공정에서 걸리는 더블 아크 시간(Double Arcing Time, DAT)의 합을 계산하는 것이 유효하며, DAR은 식(2)에 표현한 것처럼 플라즈마 아크가 유지된 총 시간(Total Time, t_T)과 DAT합의 비율로 표현하였다.

$$\Sigma DAT = DAT_1 + DAT_2 + DAT_3 + \dots + DAT_4 \quad (1)$$

$$DAR = \frac{\Sigma DAT}{T_t} \times 100 \quad (2)$$

Fig. 4 Calculating hole and DA affected area of top surface

Fig. 5 Piercing time with current waveforms

(a) Normal arc (b) Double arcing

Fig. 8 Arc shape for PAP

Fig. 6 Piercing time calculation method

Fig. 7 Plasma arc shape identification

Fig. 7은 플라스마 아크 형상을 촬영한 모식도로써 플라스마 아크를 보다 용이하게 식별하기 위해 이원화된 이미지를 활용하였다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각 정상적인 피어싱이 일어난 경우와 더블 아크가 발생한 경우에 대한 이원화된 이미지로서 더블 아크 발생 시 주

(a) With double arc (b) Without double arc

Fig. 9 Top surface shapes after piercing

아크 길이가 감소되는 특성이 존재함을 알 수 있다. 일반적으로 주 아크 길이가 전압과 비례하는 관계에 있다는 점⁶⁾을 비추어 볼 때 본 연구에서는 Fig. 6와 같이 더블 아크 발생시(DAT₁, DAT₂) 전압 강하가 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

PAP 공정 조건에 따라 다양한 결과가 도출되었으며 전반적으로 더블 아크가 발생하지 않는 조건에서 좋은 피어싱 품질을 얻을 수 있다. Fig. 9(a)와 (b)는 각각 더블 아크 발생 여부에 따른 시편 상단면의 사진으로 Fig. 9(a)와 같이 더블 아크 발생 시 홀과 홀 주변에 비교적 불규칙한 형상이 관찰되는 반면 Fig. 9(b)와 같이 더블 아크가 발생하지 않았을 때는 시편 상단면의 홀이 비교적 매끄럽고 홀 주변이 비교적 매끈한 것을 알 수 있다.

Fig. 10과 11, 12는 각각 전류와 시편 두께, SOD에 따른 DAR을 나타낸 그래프이다. 먼저 Fig. 10에서 전류에 따른 DAR의 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 11와 같이 시편이 두꺼운 쪽에서

Fig. 10 Double arcing rate by current

Fig. 11 Double arcing rate by specimen thickness

Fig. 12 Double arcing rate by Stand-off distance

DAR은 증가하는 특성을 보인다. 시편 두께가 5mm인 경우 SOD가 3mm 이상에서는 더블 아크가 발생하지 않지만, 시편 두께가 10mm인 경우에는 SOD가 1~5mm의 모든 값에서 더블 아크가 발생하는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 12에서는 SOD가 작을수록 DAR이 증가하는 특성을 알 수 있는데, 시편 두께가 10mm,

Fig. 13 Step of double arcing occurrence

SOD가 1mm인 경우 DAR 값은 88% 이상으로 상당히 불안한 더블 아크가 발생함을 알 수 있다. 그러나 SOD가 증가하는 경우 DAR 값이 감소되는 경향을 보이며 전류 145A, 시편 두께 10mm인 경우 DAR 값이 약 11% 미만으로 비교적 좋은 품질의 피어싱 결과를 도출할 수 있다.

SOD와 시편 두께 변화가 DAR에 영향을 미치는 이유는 다음과 같다. Fig. 13은 PAP 공정에서 스패터에 의해 더블 아크가 발생하는 현상을 도식화한 그림이다. 더블 아크가 발생하지 않을 때는 노즐이 절연층에 의해 절연되어 파일럿 아크가 발생할 때를 제외하고는 전류가 흐르지 않는다. 그러나 피어싱 공정 시 발생하는 스패터가 노즐에 부착되어 노즐에 전류가 흐르게 되면 노즐이 양극화(+)되어 더블 아크가 발생하게 된다. 이때, 시편 두께가 두꺼운 쪽에서 노즐에 부착되는 스패터가 많아지고 SOD가 작을수록 노즐과 시편 거리가 짧아지게 된다. 이후 노즐에 전류가 흐를 가능성이 증가하여 DAR이 증가하게 되고 발생한 더블 아크는 Fig. 9와 같이 SOD 값에 따라 PAP품질에 영향을 미치게 된다.

Fig. 14는 SOD에 따른 상단면의 홀 면적 변화를 나타낸 그래프로 두께에 따라 그 영향이 다른 것으로 확인되었다. 180A, 10mm 구간에서는 SOD가 3mm를 이상인 경우 홀 면적 변화가 나타나지 않는 반면 SOD가 그 이하인 경우 SOD 감소에 따라 홀 면적이 증가한다. 또한 145A, 10mm 구간에서는 전반적으로 홀 면적의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 한편 시편 두께가 5mm, 180A 구간에서는 SOD가 2mm 이상, 145A 구간에서는 SOD가 3mm 이상인 경우 홀 면적 변화가 나타나지 않게 된다. 즉, 전반적으로 SOD가 감소에 따라 홀 면적이 증가하지만, 일정 길이 이상

Fig. 14 Top hole area by stand-off distance

Fig. 15 DA affected area by stand-off distance

인 경우 홀 면적에 미치는 영향은 적다.

Fig. 15는 SOD에 따른 시편 상단면의 더블 아크 영향부 면적을 나타낸 그래프이다. 시편 두께가 5mm 일 때 145A, 180A 전류값에서 SOD가 1mm인 경우 비교적 큰 값을 보이지만, SOD가 2mm 이상인 경우 SOD에 따른 더블 아크 영향부 값의 변화가 적음을 알 수 있다. 반면 시편 두께가 10mm 인 경우 SOD값이 4mm 이상 되어야 더블 아크 영향부 면적이 증가하지 않는다는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 시편의 두께에 따라 더블 아크가 영향을 주는 면적이 각각 다르다는 것을 확인하였다.

Fig. 16은 두께에 따른 더블 아크 영향부 면적을 비교한 것으로 145A, 180A 모두 시편 두께가 증가함에 따라 더블 아크 영향부 면적이 증가하게 된다. Fig. 17은 전류에 따른 더블 아크 영향부 면적에 대한 그래프다. 시편 두께가 10mm인 경우, 모든 SOD 영역에서 전류의 증가에 따라 해당 면적이 증가한 반면, 시편 두께가 5mm인 경우 SOD가 1~2mm 구간에서 전류 증가에 따른 해당 면적의 증가하지만, SOD 3mm 이

(a) Current - 145A

(b) Current - 180A

Fig. 16 DA affected area by specimen thickness

상인 경우 전류에 따른 해당 면적의 증감 패턴이 뚜렷하지 않게 된다. 이를 통해 두께가 두꺼운 쪽에서 전류와 SOD에 따른 더블 아크에 따른 민감도가 크고, 두께가 얇은 경우 충분한 SOD가 확보되면 더블 아크 발생을 줄일 수 있게 된다.

Fig. 18은 SOD에 따른 P_t 를 비교한 그래프이다. 시편 두께가 5mm일 때는 SOD 변화에 따른 경향이 나타나지 않으나 시편 두께가 10mm인 경우 SOD가 증가할수록 P_t 가 감소한다. 이는 해당 두께에서는 SOD 증가 시 더블 아크 발생이 적고 DAR이 감소되어 보다 아크 플라스마가 피어싱에 집중되기 때문에 P_t 값이 작아지게 되는 것이다.

위와 같은 결과들을 통해 SOD가 작고 시편이 두꺼운 쪽에서 DAR이 증가하였고 전류가 높은 쪽에서 시편 상단면의 홀과 더블 아크 영향부의 면적이 증가함을 확인하였다. 본 실험에서는 SOD가 특히 더블 아크 형

(a) Thickness - 5mm

(a) Thickness - 10mm

Fig. 17 DA affected area by current **Fig. 18** Piercing time by SOD

성에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며 SOD가 4mm 이상으로 유지해야 DAR이 낮고 좋은 품질의 PAP 공정을 수행할 수 있었다. 따라서 시편의 두께에

따라 적합한 SOD와 전류를 설정해야 좋은 품질의 절단면을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 실험에서는 Band-pass filter를 부착한 고속카메라와 DAQ측정 장비를 활용하여 SOD와 전류, 시편 두께에 따른 PAP 특성과 더블 아크와의 관계를 분석하였다. 이와 관련하여 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Fig. 6에서 전압 파형에 따라 달라지는 아크 형상을 확인할 수 있으며 이는 DAQ를 통해 측정된 전압 파형에서의 전압 강하는 더블 아크 발생을 의미한다.

2) SOD가 작을수록 시편 상단면의 홀 면적과 더블 아크 영향부 면적이 증가하고, 일정 거리 이상이 유지되어야 비교적 안정적인 플라즈마 피어싱 공정을 수행할 수 있다.

3) 시편 두께는 피어싱 절단 품질에 큰 영향을 미치며 시편이 두꺼울 때, DAR이 증가하고 그에 따른 P_t 가 증가하게 된다.

4) 절단 전류가 증가하면 SOD 구간에 따라 DAR이 증가하는 영역과 그렇지 않은 영역으로 나뉘어지며, 특정 SOD 이상인 경우 DAR을 적게 유지할 수 있다.

5) 초고속카메라와 동기화된 전압 그래프의 분석을 통해 더블 아크 발생 여부를 모니터링 할 수 있으며 DAR을 예측함으로써 PAP 공정의 품질 모니터링에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 '원전해체 폐기물 감용, 처분을 위한 금속폐기물 절단기술 개발' 과제 (No. 2017-M2B2B1072891)와 'ICT기반 원격해체 시스템 가상 운전 기술개발' 과제 (No. 2019M2C9A1057806)의 지원으로 수행하였음.

ORCID: Dong-Hyun Kim: <https://orcid.org/0000-0002-8267-8709>

ORCID: Dae-Won Cho: <http://orcid.org/0000-0001-8668-1385>

ORCID: Yeong-Kwan Jo: <http://orcid.org/0000-0001-7401-1667>

ORCID: Ryoohan Kim: <https://orcid.org/0000-0002-0600-0904>

ORCID: Seokyoung Ahn: <https://orcid.org/0000-0002-6978-7273>

References

1. K. Salonitis and S. Vatsiosianos, Experimental investigation of the plasma arc cutting process. *Procedia cirp*, 3 (2012) 287-292.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.050>

2. H. T. Kim and S. C. Kil, High Quality Plasma Cutting and Laser Cutting Technology. *J. Weld. Join.* 35(2) (2017) 30-34.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.2.5>
3. Korean Welding and Joining Society, Welding and Joining Handbook, III: Welding and Related Processes, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2007) 434-439.
4. V. Nemchinsky, A mechanism that triggers double arcing during plasma arc cutting, *J. Phys. D Appl. Phys.* 42(20) (2009) 205209.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/20/205209>
5. L. Prevosto, B. Mancinelli, and H. Kelly, On the Double-Arcing Phenomenon in a Cutting Arc Torch, *INTECH*, Rijeka, Croatia (2011) 504-524.
6. C. D. Yoo and S. J. Na, Arc Welding, *Korean Welding and Joining Society*, Daejeon, Korea (2011) 62-65.
7. V. A. Nemchinsky, W. S. Severance, and M. S. Showalter, Piercing of a metal slab by a plasma jet during plasma arc cutting, *J. Phys. D Appl. Phys.*, 32(12) (1999) 1364.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/32/12/313>
8. V. Colombo, A. Concetti, E. Ghedini, S. Dallavalle, and M. Vancini, High-speed imaging of pilot arcing and piercing in PAC, *IEEE T. Plasma Sci.* 36(4) (2008) 1042-1043.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2008.924617>
9. L. Prevosto, H. Kelly, and B. Mancinelli, On the physical origin of the nozzle characteristic and its connection with the double-arcing phenomenon in a cutting torch, *J. Appl. Phys.* 105(1) (2009) 013309.
<https://doi.org/10.1063/1.3041636>
10. V. A. Nemchinsky and W. S. Severance, What we know and what we do not know about plasma arc cutting, *J. Phys. D Appl. Phys.* 39(22) (2006) R423.
<https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/22/R01>