수직 GMA 용접부의 스파터 추적 알고리즘에 관한 연구

윤태종* · 박민호** · 오원빈* · 이보람* · 김일수*,†

*목포대학교 공과대학 기계공학과

**중소조선연구원

A Study on Spatter Tracking Algorithm for a Vertical GMA Welding Process

Tae-Jong Yun*, Min-Ho Park**, Won-Bin Oh*, Bo-Ram Lee* and Il-Soo Kim*,†

*Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo Univ., Mokpo, 58554, Korea

**Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Yeongam, 58457, Korea

†Corresponding author : ilsookim@mokpo.ac.kr

(Received April 15, 2019 ; Revised May 7, 2019 ; Accepted June 25, 2019)

Abstract

GMA (Gas Metal Arc) welding has the advantage of no slag formation and is becoming the most suitable technology for automated welding. Recently, robot welding and machine welding have been replaced by GMA welding. However, welding spatter has always been a problem with GMA welding, especially GMA welding using CO₂ gas as a shielding gas. Therefore, it is necessary to minimize the occurrence of spatter. In this paper, the spatter generation process was analyzed and the amount of generated spatters was minimized by controlling the unstable waveform of the current. In addition, we developed a spatter tracking algorithm to confirm the effect of spatter reduction.

Key Words : Gas metal arc, Spatter, Spatter tracking algorithm, Welding automation

1. 서 론

1970년 이후 용접산업은 생산성 향상시키기 위하여 용접자동화 및 기계화가 적극 추진되면서 아크용접이 가스메탈아크(GMA) 용접과 플럭스 코어드아크(FCA) 용접으로 발전되고 있다. 이러한 추세는 최근까지도 지속되고 있는데, 특히 GMA 용접은 슬래그가 생성되지 않는다는 특징 때문에 용접 자동화에 가장 적합한 기술로 광범위하게 적용되고 있다. 최근에 국내에서 로봇용접 및 기계화용접이 확산되면서 GMA 용접으로 대체되는 추세에 있다¹⁾. 하지만 GMA 용접에서 용접중 스파터가 발생하여 용접품질에 크게 영향을 미치고 있다. 일반적으로 용접 스파터는 용접부에 균열을 일으키거나 노즐을 오염시켜 보호가스의 흐름을 막아 용접성을 떨어지게 하고 최종적으로 용접품질 저하를 일으킨다. 또한 스파터를 제거하는데 사용되는 시간과 노력은 용접

생산성을 저해하는 주요 요인으로 작용한다. 이러한 스파터 발생을 저감하여 과거부터 용적이행 형태에 따른 스파터 발생현상에 대한 많은 연구가 수행 되었지만, 단순히 용접전원에 집중되어 왔다.

Ito et al.²⁾은 펄스 CO₂ 아크 용접에서 스파터 저감을 위한 연구를 수행하였고, Mita³⁾와 Maruyama et al.⁴⁾은 고속 제어 능력을 가진 인버터 용접기를 개발하여 스파터를 저감하기 위한 연구를 수행하였다. Schweier et al.⁵⁾는 레이저 용접에서 고속 카메라 이미지를 이용하여, 통계적으로 용접실험 중에 스파터 수와 용접 매개변수 간의 상관관계를 분석하였다.

Jeong et al.⁶⁾은 수직 용접에서 스파터 색상 및 형상 데이터를 분석하여 자동 용접 라인의 스파터를 줄이는 방법에 대해 연구를 하였고, Gao et al.⁷⁾는 디스크 레이저 용접에서의 플럼 분류 및 스파터 특성을 기반으로 한 용접 안정성 평가하였다. Gunenthiram et al.⁸⁾는 스파터 배출량의 정량화 및 용융물 풀 거동과의 상

관관계를 분석하였으며, Wu와 Flynn⁹⁾은 GMA 용접에서 제안된 하이브리드 제어 방법으로 출력 전압과 출력 전류의 빠른 조절의 효과를 실험적으로 증명하였다. Yamamoto et al.¹⁰⁾은 인버터 제어 펄스 Pulsed GMA 용접기를 사용하여 스패터 감소 방법을 개발하였다. Suga¹¹⁾와 Mita¹²⁾는 용접재료 관점에서 스패터를 줄이기 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 선행된 스패터 관련 연구에 기초로하여 스패터 발생을 저감시키고자 용적이 용융지로 이행하는 전 과정을 촬영하여 스패터 발생 과정 및 스패터가 모재에 미치는 영향을 관찰하였으며, 이때 용접전류의 순간적인 변화를 분석함으로써, 스패터 발생 순간과 원인을 도출하였다. 또한 용접 공정변수에 따른 스패터 주효과 및 스패터에 따른 용접부 경도 주효과 분석을 통해 수직 GMA 용접부 스패터 추적 알고리즘을 개발하여 스패터 입자크기의 저감 효과를 확인하고, 균열성장에 의한 파단을 방지하는 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 용접부 스패터 실험

2.1 실험 장치 및 방법

가스메탈아크(Gas Metal Arc) 용접의 단락이행영역에 있어서 용적이행은 용적의 성장 및 이행과 관계된 물리적인 양(전압, 전류, 재료 등)에 따라 달라진다. 특히, 용적이 용융지속으로 이행될 때 용적의 성장이 정상적으로 일어나지 않은 상태에서 용접전류의 급격한 상승이 일어나면 용적이 용융지속으로 이행되지 않았음에도 불구하고 아크가 발생하게 되어 스패터가 발생하게 된다. 이러한 스패터는 불량한 용접상태와 오염된 노즐을 통해 보호가스의 흐름을 방해하여 용접품질을 저하시키는 요인으로 작용하게 된다.

수직 GMA 용접공정에서 발생하는 스패터분포 및 용접부에 미치는 영향을 분석하기 위하여 500A급 GMA용접기와 토치 구동부, 와이어 송급장치, 수직형 용접 JIG로 용접 시스템을 구성하여 용접실험을 실시하였다. 용접와이어는 솔리드 와이어(YGW 11, 1.2 ϕ)를 사용하였으며, 보호가스는 용접기를 통해 토치에 공급되도록 개별적인 보배를 사용하여 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 또한 보다 체계적인 데이터 수집 및 결과 분석을 위하여 용접전류 및 전압은 모니터링 시스템(WTS-100A)를 이용하여 데이터를 수집하였으며, 공정변수에 따른 스패터 분포를 수치적으로 확인하였다. 모재는 표면온도가 20 $^{\circ}$ C이상 예열한 상태에서 수행하였다. 본 실험은 수직 GMA 용접공정에서 발생하는 스

Fig. 1 Experimental setup for vertical GMA welding

Fig. 2 Input and output variables of metal transfer welding experiment

패터의 분포와 입자크기, 비행거리 등에 따라 용접부에 미치는 영향을 확인하고 용접품질을 실시간으로 모니터링하기 위하여 수행하였으며, 공정변수로는 용접전류, 아크전압, 용접속도로 선정하여 용접실험을 수행하였다. 용접공정 분석을 위하여 출력변수는 스패터의 분포, 입자크기, 비행거리로 선정하였으며, Fig. 2에 나타난 바와 같이 수직 GMA 용접부 스패터 실험을 수행하였다.

기타변수들은 수직 GMA 용접공정에서 일반적으로 사용되는 용접토치 각도, 용접방향, CTWD(Contact Tip to Workpiece Distance) 등이 있으며, 이는 다수의 기존 연구결과 및 예비실험을 통해 선정하여 본 용접실험에 적용하였다. 따라서 CTWD 및 용접토치 각도의 경우 기존의 수직 GMA 용접관련 선행연구들에서 선정해왔던 15mm, 15 $^{\circ}$ 의 값들로 고정하여 실험을 진행하였으며, Fig. 3에 용접토치의 CTWD와 토치 각도에 대

Fig. 3 Torch angle and CTWD in vertical GMA welding experimental

Table 1 Mechanical properties of base metal

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
SS400	250	400	23	160

Table 2 Chemical composition of base metal

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
SS400 (%)	0.15	0.01	0.697	0.013	0.007	0.087	0.041	0.503	Bal.

Fig. 4 A schematic diagram for vertical GMA welding

한 모식도를 나타낸다.

용접모재는 일반 구조용 압연강재인 SS400 재질의 평판을 사용하였으며, 400×400×15mm 규격의 평판 시험편을 제작하였으며, 실험에 사용된 시험편의 기계적 성질 및 화학적 조성은 Tables 1~2에 각각 나타낸다. 시험편에 용접하고자 하는 용접부의 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결함의 원인지 되지 않도록 와이어 브러시 및 샌드페이퍼로 시험편을 깨끗이 닦아내어 Fig. 4에 용접시험편의 규격과 수직 GMA 용접부 스패터 실험 개략도를 나타낸다.

2.2 실험 계획

일반적인 실험계획법으로 알려진 완전요인설계의 경우 각각의 입력변수들의 수준을 일정간격으로 배치하여 모든 입력변수들간 수준의 조합에 의해 실험이 이루어지게 된다. 입력변수의 수가 n 개이고, 수준의 수가 k 개인 경우 총 k^n 개의 실험횟수를 수립할 수 있으며, 이와

Table 3 Vertical GMA welding parameters and their levels

Parameter \ Level	-1	0	1
Welding current(A)	250	260	270
Arc voltage(V)	23	25	27
Welding speed(cm/min)	46	53	60
Fixed variable	• CTWD : 15mm • Torch Angle : 15° • Shielding gas flow rate : 99% CO ₂ 18 ℓ/min		

같은 완전요인배치법은 실험수행을 위한 시간 및 비용이 늘어나고 반응의 비선형적 변화감지가 다소 부족한 단점을 가지고 있으나 각각의 변수 특성치에 대한 공정의 여러 가지 요인 해석이 가능하다.

따라서, 본 실험에서는 입력변수 변화에 따른 출력변수 반응의 모든 요인효과를 추정할 수 있고 고차의 교호작용 효과를 검출하기 위하여 완전요인배치법(FFD)을 적용하였다. 입력변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)의 적정수준 및 범위는 예비실험을 통하여 정하였으며, 입력변수의 수는 3개이고 수준의 수는 3으로써 총 27회의 실험조건이 생성되었다. Table 3은 입력변수의 실험변수 및 수준을 나타낸다.

3. 실험 분석

3.1 스패터 발생량 분석

용접부 스패터 실험은 수직 GMA 용접공정에서 발생하는 스패터 발생량을 확인하기 위해 수립한 실험계획을 기반으로 수행하였으며, 스패터의 크기와 비행거리는 육안검사를 통해 측정하고 스패터의 발생량은 용접전류 및 아크전압 모니터링 시스템(WTS-100A)을 사용하였다. 스패터의 발생은 용접공정시 단락이행에서 단락 후 다시 아크 재 발생 중 전류 및 전압조건의 불안정으로 아크에 의한 용융물의 비산에 의해 발생하거나 와이어의 이물질이나 소재와의 적합하지 않은 조합에 의해 발생한다. 이러한 용적이행은 회전이행과 반발이행으로 스트리밍 이행 조건보다 높은 전류에서 발생하는 이행 형태으로써, 저항열과 아크열에 의해 용융된 와이어의 끝이 전자기력의 영향을 받아 나선형 궤적을 그리면서 빠른속도로 용융지를 침식하는 형태가 발생된다.

이러한 이행은 불안정한 회전 및 반발 이행조건으로 용접이 이루어지면 아크가 불안정하고 대형 스패터가 일어나기 때문에 회전 및 반발 이행이 발생되지 않는 범위에서 용접을 수행하는 것이 일반적이다¹³⁾. 위와 같

Table 4 Results of vertical GMA experiment

Test no.	Generation spatter (ea)	Average size (mm)	Flight distance (mm)	Typical spatter geometry	Test no.	Generation spatter (ea)	Average size (mm)	Flight distance (mm)	Typical spatter geometry	Test no.	Generation spatter (ea)	Average size (mm)	Flight distance (mm)	Typical spatter geometry
1	1	1.24	1.63		10	2	1.34	1.81		19	3	2.44	2.55
2	2	1.62	1.16		11	8	1.54	1.66		20	4	2.61	1.94
3	7	1.01	1.45		12	3	1.93	1.47		21	2	1.92	1.82
4	6	1.31	2.14		13	4	1.04	1.84		22	4	2.61	1.71
5	4	1.21	2.32		14	3	2.06	4.18		23	3	2.31	4.31
6	4	1.94	2.46		15	5	2.09	2.34		24	2	2.59	2.14
7	5	1.01	4.15		16	9	2.18	2.61		25	4	2.02	6.47
8	5	0.81	5.62		17	11	2.34	6.17		26	3	2.53	2.86
9	5	0.92	2.57		18	2	1.81	2.72		27	2	2.84	3.14

Fig. 5 Result of waveform(welding current) according to spatter

은 이유로 스패터의 발생을 최소화시키기 위해 공정변수에 따른 스패터 발생량, 크기, 비행거리를 분석하고자 하였으며, 스패터의 발생량과 측정결과를 Table 4 및 Fig. 5에 나타낸다.

3.2 경도 실험

본 연구는 용착금속부와 열영향부에 한정된 경도 시험을 수행하였으며, Fig. 6의 비커스경도계를 사용하여 경도실험을 수행하였다. 이 때 사용된 하중은 0.5N으로 용착금속부 가운데를 중심으로 좌우측으로 3회씩 측정하였으며, 경도 측정시 발생하는 미세표시에 의한 상

Fig. 6 Vickers hardness test **Fig. 7** Measured location of hardness

대 경도들에 영향을 주지 않은 0.15mm 간격으로 경도 분석을 수행하였다. Fig. 7은 용접 시험편의 경도측정 위치를 나타낸 그림이며, 스패터 발생에 따른 모재인 SS400 재질의 경도보다 어느정도의 강도가 상승하는지 확인하기 위해 Table 5와 같이 열영향부 7회, 용착

Table 5 Results of hardness

Test no.	Heat affected zone hardness(HV)	Weldment zone hardness(HV)	Test no.	Heat affected zone hardness(HV)	Weldment zone hardness(HV)	Test no.	Heat affected zone hardness(HV)	Weldment zone hardness(HV)
1	207.31	209.03	10	221.34	235.59	19	245.96	247.51
2	211.36	228.34	11	208.61	217.48	20	261.61	254.33
3	209.05	214.87	12	221.34	241.61	21	199.62	215.56
4	204.77	217.39	13	221.67	232.25	22	243.04	253.69
5	198.63	215.14	14	263.54	271.62	23	261.37	267.62
6	199.07	205.36	15	266.84	257.56	24	259.30	245.66
7	234.78	266.91	16	257.81	263.18	25	267.33	273.15
8	221.36	273.68	17	259.84	255.51	26	259.61	260.84
9	201.51	214.66	18	218.36	224.64	27	258.83	261.06

금속부 3회에 대한 경도치를 평균값으로 산출하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 용접 공정변수에 따른 스패터 주효과 분석

수직 GMA 용접공정에서 사용된 3가지 변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)에 따라 복잡한 공정변수들의 상관관계에서 스패터에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 MINITAB 프로그램을 이용하여 주효과도를 분석하였다. 이러한 분석은 스패터 형성하는데 영향력을 미치는 인자들의 연관성을 확인하고자 수행하였으며, Figs. 8~10은 스패터를 형성하는데 영향을 미치는 다변량 인자들을 분석한 결과를 나타낸다.

스패터 발생량의 경우 3가지의 공정변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)에서 영향력은 모두 인자들 사이에서 연관성이 관찰되었으나 경향의 지속성은 유일하게 아크전압이 증가될수록 스패터 발생량이 증가되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 아크전압을 제외한 용접전류와 용접속도는 스패터 발생량을 제어할 수 있는 인자

로는 판단할 수 없는것을 의미한다.

스패터 입자크기는 용접전류에 의해 변화될 수 있는 효과가 가장 크며, 경향의 지속성도 확인되어 스패터의 입자크기를 제어할 수 있는 인자로 선정할 수 있다. 이는 용접전류가 증가됨에 따라 인칭되는 와이어 속도가 동반 증가되어 아크의 불안정으로 인한 용착되지 못한 입자의 크기가 와이어 속도에 의해 증가되는 것을 의미한다. 마지막으로 스패터의 비행거리는 용접전류, 아크

Fig. 9 Main effects plot on average size

Fig. 8 Main effects plot on generation spatter

Fig. 10 Main effects plot on flight distance

전압, 용접속도에서 모두 주효과가 발생되었지만 상대적으로 비교해 볼 경우 아크전압에서 가장 큰 영향력이 확인되었다. 용접전류와 아크전압이 증가할수록 비행거리가 동반 증가하는 것을 확인하였으며, 이는 용접전류와 아크전압이 상승할수록 아크력이 증가되기 때문에 반발이행에 의해 스파터의 비행거리가 동반 증가하는 것으로 판단된다. 비행거리가 감소하는 영향은 용접속도가 증가할수록 아크에 의해 용융된 모재에 빠른 속도로 용착됨으로써, 용융지에서 반발되는 이행의 횟수가 감소하고 반발력도 동반 감소되어 수직 GMA 용접부에서 발생하는 스파터의 비행거리가 동반 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 용접전류와 용접속도 인자의 경우 아크전압 보다 주효과가 부족하기 때문에 비행거리를 제어할 수 인자로는 접하지 않을 것으로 사료된다.

4.2 스파터에 따른 용접부 경도 주효과 분석

위의 장에서는 수직 GMA 용접공정에서 사용된 3가지 변수(용접전류, 아크전압, 용접속도)에 따른 복잡한 공정변수들과 스파터 간의 상관관계를 확인하였으며, 스파터 발생 경향에 따른 모재(SS400)의 용착금속부 및 열영향부의 경도의 주효과 영향을 확인하였다. 용접부 경도에 관한 고찰은 해상환경에 노출된 선박건조시 부식을 방지하기 위한 분야로써, 용접부 건전성을 판단하는데 필히 요구되는 사항이다. 미국부식학회의 NACE MR0175 CODE¹⁴⁾에 따르면 용접부 경도가 23HRC (254.7HV)를 넘지 않도록 권장하고 있으며, 수직 GMA 용접부에서 동일한 권장조건과 적합한 용접조건을 선정하고자 하였다. 스파터와 용접부 경도 간의 주효과 영향력이 확인될 경우 용접공정 변수의 제어만으로 용접부 경도를 제어할 수 있을 것으로 판단된다. Figs. 11~12는 스파터 발생 경향에 따른 용접부 경도의 주효과 결과를 나타낸다.

모재의 용접부 경도의 경우 스파터 입자크기가 2.01mm

Fig. 11 Main effects plot on hardness for weldment

Fig. 12 Main effects plot on hardness for HAZ

이상일 경우 경도가 급격히 상승하여 250~267HV의 범위에서 증감이 반복되는 경향을 확인하였다. 열영향부 경도의 경우 스파터 입자크기와 비행거리에 따라서 경도의 변화경향을 확인하였으며, 스파터 입자크기가 2.04mm 이상이 될 경우 용접부 경도와 동일한 경향으로 급격히 증가하여 증감을 반복하는 주효과 결과를 확인하였다. 또한 스파터 비행거리의 경우 5.34mm 이상이 될 경우 열영향부 경도가 급격히 증가되어 최대 273.68HV 까지 지속적으로 증가하는 경향을 확인하였다. 따라서, 열영향부의 경도는 스파터의 입자크기의 영향보다 비행거리의 주효과 영향이 우선되기 때문에 열영향부 경도를 제어하기 위한 주요 인자로 선정이 가능하다. 스파터의 입자크기와 비행거리의 증가는 불안정한 아크에 따라 반발 아크력에 의해 아크가 일시적으로 종료됨으로써, 냉각이 급속히 이뤄지면서 켄칭효과가 발생되고 마르텐사이트와 같은 아주 경한 조직이 생성되어 경도가 상승하는 것으로 판단된다.

최종적으로 미국부식학회에서 권장하는 254.7 HV의 용착금속부와 열영향부의 경도를 넘지 않게 하기 위해서는 실험 모재의 스파터 입자크기를 감소시켜야 하며, 이는 기계적 특성을 만족하는 조건하에서 낮은 용접전류를 채택해야 한다. 또한 열영향부 경도의 경우 스파터 비행거리를 감소시켜야 하기 때문에 낮은 아크전압을 채택해야 하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 용접공정 변수는 기계적 특성(인장, 충격 등)을 만족하는 환경을 전제로 선정되어야 한다.

4.3 스파터 추적 알고리즘 개발

순간단락시 용융풀의 반경이 전극의 반경보다 상대적으로 작은 경우 용적에는 전자기력이 용적을 위로 밀어 올리는 힘이 작용하며, 용적이 완전히 이행되지 못하고 오히려 핀치력에 의하여 용융지와와의 접촉이 끊어지면서 아크를 재 발생시키는데, 이를 순간단락(Instantaneous

Short Circuit, ISC)이라 한다. 이러한 순간단락은 스패터를 다량 발생시키는데, 아크 재 발생시 강한 폭발력으로 용적과 용융지를 강타하여 용적과 용융지의 일부가 비산되기 때문이다. 또한 아크 폭발로 인하여 표면장력으로 구형을 유지하던 용적은 매우 불규칙한 모양으로 바뀌고 용융지 유동도 매우 불규칙해짐으로써 아크의 방향이 불규칙하게 바뀌어 여러 방향으로 스패터를 발생시킨다. 순간단락에서 발생하는 스패터는 매우 조대하므로 용융상태로 모재에 부착될 확률이 높기 때문에 이를 제거하기 위한 추가적인 공정이 필요하다. 순간단락의 제어는 Pinchuk¹⁵⁾ 등이 제안하였으며, 용접 전압이 8~12V 이하가 될 경우 단락이 되었다고 판단하여 전류를 2~10A로 0.7~1msec 시간동안 전류를 감소시켜 단락전류 상승을 지연시킨다. 즉 단락시 전류상승을 지연시킴으로써 용적을 밀어 올리는 전자기력을 약화시켜 순간단락을 정상단락이 될 수 있도록 유도한다. 이와 같은 제어 개념을 Fig. 13에 나타내었으며, 지연 시간을 적용함으로써, 스패터를 현저하게 줄일 수 있을 것으로 예측하였다.

또한, Kim¹⁶⁾은 전류상승제어를 통해 일정 전류 이상 상승을 제한하는 방법을 적용하여 스패터의 발생량을 확인하고 스패터 저감 효과를 확인하였으며, 상승범위가 250~270A사이로 전류 상승이 제한될 경우 초기 단락시 가장 적은량의 스패터가 발생되어 시작지점 용접부의 아크의 안전성과 건전성을 확보 할 수 있는 기법을 제안하였다. 일반적인 GMA 용접공정에서 순간단락 및 스패터 발생은 0으로 만들기는 사실상 불가능하며, 이

(a) Current decrease control

(b) Delay time control

Fig. 13 Control of current waveform for suppression of short circuit

러한 스패터를 최소화시키기 위해 기계 및 전기적인 제어를 통해 안정한 용적이행과 최소 스패터가 발생하는 초기 단락을 분석하였다. 이와 같이 기존의 선행연구들은 안정한 용적이행을 수행하기 위한 초기단락 제어로 전반적인 용접부에 용착되는 스패터를 제어하기에는 한정적인 적용성이 있다.

따라서, 초기단락 제어를 통해 Initiating arc의 안정성 확보로 전반적인 용접부의 스패터 저감 현상을 확인하고, 군집분석을 이용하여 스패터 용착을 판별할 수 있는 스패터 추적 알고리즘을 개발하고자 하였다.

4.4 초기단락 제어를 통한 용접부 스패터 저감

단락기간 중 전류가 최대치에 도달하였을 때 아크가 재생되며, 이때 재생된 아크는 강한 폭발력(아크 반발력)으로 용융지를 쳐내면서 소립의 스패터를 발생시킨다. 따라서 아크 재생 시 발생하는 스패터를 억제하기 위해서는 가능한 낮은 전류를 유지한 상태에서 아크가 재생하도록 하여야 한다. 이러한 개념으로 여러 가지 파형이 제안되고 있는데 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 설정된 전류이상에서는 전류 상승속도를 감소시켜 궁극적으로 아크재생 시의 전류를 낮게하는 유지하는 방법과 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 일정 전류 이상 상승을 제한하는 방법, 전류를 급격히 저하시켜 낮은 전류에서 아크가 재생성 되도록 하는 방법 등이 있다. 초기 단락전류 상승기울기에 따른 단락거동의 변화를 살펴보면 Fig. 14의 ②를 기준으로 ①과 같이 전류 상승기울기가 너무 큰 경우에는 전자기력이 짧은 시간동안 가교에 강하게 가해져 가교의 파단시간이 짧아지고, 높은 피크전류에서 아크가 재생되기 때문에 다량의 스패터가 발생하게된다. 하지만 ③과 같이 너무 작은 경우에는 전자기력이 작으므로 가교가 파단되는 속도가 지연되어 장시간 단락이 해소되지 못하고, 와이어는 저항열에 의해 가열되고 결국 와이어 중간에서 파단되어 스패터화 된다. 또한 와이어가 중간에서 파단될 경우 아크가 끊기고, 이 후 아크가 재생될 때 대립의 스패터

Fig. 14 A schematic diagram for control of gradient in current rise

를 발생시키게 된다. 이러한 개념으로 여러 가지 파형이 제안되고 있는데 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 설정된 전류이상에서는 전류 상승속도를 감소시켜 궁극적으로 아크재생 시의 전류를 낮게하는 유지하는 방법과 초기 전류 상승기울기를 크게 하고, 일정 전류 이상 상승을 제한하는 방법, 전류를 급격히 저하시켜 낮은 전류에서 아크가 재생성 되도록 하는 방법 등이 있다. 초기 단락전류 상승기울기에 따른 단락거동의 변화를 살펴보면 Fig. 14의 ②를 기준으로 ①과 같이 전류 상승기울기가 너무 큰 경우에는 전자기력이 짧은 시간동안 가교에 강하게 가해져 가교의 파단시간이 짧아지고, 높은 피크전류에서 아크가 재생되기 때문에 다량의 스파터가 발생하게된다.

하지만 ③과 같이 너무 작은 경우에는 전자기력이 작으므로 가교가 파단되는 속도가 지연되어 장시간 단락이 해소되지 못하고, 와이어는 저항열에 의해 가열되고 결국 와이어 중간에서 파단되어 스파터화 된다. 또한 와이어가 중간에서 파단될 경우 아크가 끊기고, 이 후 아크가 재생될 때 대립의 스파터를 발생시키게 된다. 따라서 적절한 단락전류 상승기울기를 제어하여야 하지만 아크가 피치 최고점으로 올라가는 시간이 msec단위로 1/1000sec 정도의 미세한 전류제어 기술을 적용하기에는 매우 많은 기술적 한계가 있다¹⁷⁾.

따라서, 초기 단락시 발생하는 전류의 불안정한 파형제어를 통해 전류 안정화 구간 후 전반적인 용접부의 파형변화를 관찰하고 용접부에 용착되는 스파터의 비행거리 및 입자크기 변화를 분석함으로써, 모재에 가해지는 경화성을 방지하고자 하였다. Table 6는 스파터가 다량 발생되어 모재에 영향을 미치는 경화성을 기준으로 선별한 실험조건을 나타내고 있으며, Fig. 15는 전류상승제어(270A)를 적용한 전류파형과 적용하지 않은 전류파형을 비교한 결과를 나타낸다. 전류상승 제어는 초기 단락시 전류가 상승되는 구간을 전기적 제어를 통해 순간 전류를 급격히 저하시킴으로써, 아크의 폭발력을 최소화시켜 기존의 공정보다 적은량의 스파터가 발

Fig. 15 Results for waveform of test 15 using control of gradient in current

생되는 현상을 기반으로 전류상승 제어를 적용한 추가 실험을 수행하였다. 초기 단락시 발생하는 스파터는 초고속 카메라 영상을 기반으로 산출하였으며, 스파터 저감은 용접부 표면에 용착된 스파터의 입자크기 및 비행거리를 측정하여 저감효과를 확인하였다.

전류상승 제어를 통해 스파터의 입자크기와 비행거리를 감소시킴으로써, 용접구조물에 미치는 경화 현상을 최소화시키고자 하였으며, Tables 7~8에 전류상승 제어를 통해 감소된 스파터 발생과 용접부 경화 현상에 대한 결과를 나타낸다. 스파터 입자크기와 비행거리의 산출은 Fig. 4와 같은 방법으로 동일하게 적용하였으며, 용접부 경도의 경우 Fig. 7과 동일한 방법으로 용접부 경도를 측정하여 데이터 비교에 신뢰성이 포함된 결과를 확보하였다. 그 결과, 스파터 입자크기의 경우 최소 43.58%의 최대 58.91%의 저감 효과를 확인하고 평균 52.95%의 스파터 입자크기의 저감 효과를 확인하였다.

비행거리의 경우 평균 31.94%로 저감 효과를 확인하였다. 이러한 스파터 저감 효과는 용접부의 경화 현상을 방지할 수 있으며, Table 6에 나타낸 바와 같이 용착금속부 경도는 최대 14.83%의 연화효과를 열영향

Table 6 Design of experiment conditions for decrease of spatter

Test No.	Welding current(A)	Arc voltage(V)	Welding speed(cm/min)	Average size(mm)	Flight distance(mm)	Weldzone hardness(HV)	HAZ hardness(HV)
15	260	25	60	2.09	2.34	263.54	257.56
16	260	27	46	2.18	2.61	266.84	263.18
17	260	27	53	2.34	6.17	257.81	255.51
23	270	25	53	2.31	4.31	261.37	267.62
25	270	27	46	2.02	6.47	267.33	273.15
26	270	27	53	2.53	2.86	259.61	260.84

Table 7 Results of decrease effectiveness for spatter

Test No.	General method		Current control method		Decrease effectiveness	
	Average size(mm)	Flight distance(mm)	Average size(mm)	Flight distance(mm)	Size (%)	Distance (%)
15	2.09	2.34	1.04	1.61	50.24	31.20
16	2.18	2.61	1.23	4.17	43.58	32.41
17	2.34	6.17	1.02	1.81	56.41	30.65
23	2.31	4.31	0.98	2.93	57.58	32.02
25	2.02	6.47	0.83	4.39	58.91	32.15
26	2.53	2.86	1.24	1.91	50.99	33.22
Average					52.95	31.94

Table 8 Results of decrease effectiveness for weldment hardness

Test No.	General method		Current control method		Decrease effectiveness	
	Weldzone hardness(HV)	HAZ hardness(HV)	Weldzone hardness(HV)	HAZ hardness(HV)	Weldzone (%)	HAZ (%)
15	263.54	257.56	246.42	251.36	7.65	2.41
16	266.84	263.18	233.16	248.62	9.56	5.53
17	257.81	255.51	233.41	239.35	10.17	6.32
23	261.37	267.62	240.34	244.91	8.05	8.49
25	267.33	273.15	227.69	234.33	14.83	14.21
26	259.61	260.84	238.01	248.32	8.32	4.80
Average					0.00	0.00

부 경도는 최대 14.21%의 연화효과를 확보하였다. 용접부의 인장강도는 경화 정도에 절대적인 영향을 미치기 때문에 용접부 건전성을 확보하는데 필수적으로 요구됨에 따라 미국부식학회에서 권장한 제한조건에도 충족하는 수직 GMA 용접부를 도출하였다.

5. 결 론

GMA 용접의 스패터 발생과정을 관찰하였으며, 용접 공정변수에 따른 스패터 주효과 및 스패터에 따른 용접부 경도 주효과 분석을 통해 수직 GMA 용접부 스패터 추적 알고리즘을 개발하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1) 용접공정 변수에 따른 용적이행과 스패터 발생량을 확인하기 위해 용접실험을 수행하였으며, 주요인자에 의한 스패터의 입자크기, 비행거리, 발생량을 분석함으로써 용접부에 미치는 영향력은 확인하였다.

2) 초기 단락시 발생되는 전류의 불안정한 파형제어를 통해 전류 안정화 구간을 형성하고 이에 따라 용접부 표면에 용착되는 스패터 발생량을 최소화시키고자 하였으며, 상승제어 구간을 지정하여 평균 52.95%의 스패터 저감효과를 확인함.

3) 용접공정 변수의 제어로 용접부에 미치는 경화 현상을 확인하였으며, 미국부식학회에서 권장하는 경도 (254.7 HV)의 상한치를 선정하여 균열성장에 의한 파단을 방지하는 가이드라인을 제시하였다.

Acknowledgment

본 연구는 산업통산자원부에서 지원하는 산업핵심기술개발사업 (No. 20002772)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

ORCID: Tae-Jong Yun: <https://orcid.org/0000-0002-3827-5857>

ORCID: Min-Ho Park: <https://orcid.org/0000-0002-6354-7092>

ORCID: Won-Bin Oh: <https://orcid.org/0000-0003-2032-1031>

ORCID: Bo-Ram Lee: <https://orcid.org/0000-0002-0201-6335>

ORCID: Ill-Soo Kim: <https://orcid.org/0000-0002-9936-6760>

References

1. Y. Kambe, Some Aspects on Welding Consumable Development, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 67(2) (1998) 109.
2. T. Ito, F. Koshiishi, M. Sato and M. Ushio, Study of spatter reduction in pulsed CO₂ shielded arc welding, *J. Weld. International.* 12(5) (1998) 366-371.
<https://doi.org/10.1080/09507119809448501>

3. T. Mita, Reducing Spatter in CO₂ Gas Shielded Arc Welding - Waveform Control, *J. Japan Weld. Soc.* 6(2) (1998) 209-214.
<https://doi.org/10.1080/09507118909446598>
4. Y. Maruyama, M. Sato and Y. Hida., Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding, *J. Weld. International.* 4(9) (1990) 677-683.
<https://doi.org/10.1080/09507119809447801>
5. M. Schweier, J. F. Heins, M. W. Haubold and M. F. Zaeh, Spatter Formation in Laser Welding with Beam Oscillation, *J. Physics Procedia.* 41 (2013) 20-30.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.047>
6. Y. C. Jeong, Y. G. Jung and Y. T. Cho, Simple Monitoring of Welding Spatter for Quantification and Observation using a Mobile Phone, *J. Advances in Mech. Eng.* 9(9) (2017) 1-9.
<https://doi.org/10.1177/1687814017725247>
7. X. Gao, Q. Wen and S. Katayama, Analysis of High-Power Disk Laser Welding Stability Based on Classification of Plume and Spatter Characteristics, *J. Trans. Nonferr Metal Soc.* 23 (2013) 3748-3757.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62925-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62925-8)
8. V. Gunenthiram, P. Peyre, M. Schneider, M. Dal, F. Coste, I. Koutiri and R. Fabbro, Experimental Analysis of Spatter Generation and Melt-Pool Behavior During the Powder Bed Laser Beam Melting Process, *J. Mate. Process. Technol.* 251 (2018) 376-386.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.012>
9. M. Wu, D. Flynn, An Advanced Gas Metal Arc Welding Machine Design for Low Spatter Welding, *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics.* (2018) 335-340.
<https://doi.org/10.1109/ISIE.2018.8433865>
10. H. Yamamoto, S. Harada and T. Yasuda, The Development of Welding Current Control Systems for Spatter Reduction, *J. Weld. International.* 4(5) (1990) 398-407.
<https://doi.org/10.1080/09507119009447750>
11. T. Suga, Spatter Reduction in MAG Welding - Consumables Aspects, *J. Weld. International.* 6(1) (1992) 16-19.
<https://doi.org/10.1080/09507119209548135>
12. T. Mita, Spatter Reduction - Power Source Consideration, *J. Weld. International.* 5(11) (1991) 847-850.
<https://doi.org/10.1080/09507119109446800>
13. C. H. Kim, H. B. Chae, J. K. Kim and J. H. Kim, Welding Phenomena in Laser-GMA Hybrid Welding Process with and without Arc Rotation, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 24(3) (2006) 15-21.
14. ANSI/NACE MR0175/ ISO 15156-2, Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production, (2009).
15. I. S. Pinchuk, Stabilization of Transfer and Methods of Reducing the Spattering of Metal in CO₂ Welding with a Short Arc, *Svar. Proiz.* 27(6) (1980) 12-14.
16. H. J. Kim, C. H. Lee, The Characteristics of Power Sources on the Spatter Generation Rate in CO₂ Arc Welding Process, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 17(4) (1999) 16-21.
17. H. J. Kim, Y. S. Kim, Concept of Waveform Control for the Reduction of CO₂ Welding Spatter, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 16(3) (1998) 18-28.
18. S. H. Kang, H. S. Bang and C. H. Kim, Spatter Generation During Constant Voltage DC-AC Pulse Tandem Gas Metal Arc Welding Process, *J. Weld. Join.* 36(3) (2018) 65-71.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.3.10>
19. J. H. Cho, H. C. Jung, K. B. Park and J. K. Lee, Cathode Spot Phenomena Observation by High Speed Camera in Variable Polarity Aluminum Arc Welding, *J. Weld. Join.* 36(1) (2018) 103-107.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.1.13>
20. Md. R. U. Ahsan, T. H. Kim, D. B. Kim, C. W. Ji and Y. D. Park, A Study on the Effect of Wire Composition on Welding with Gap and Offset in Cold Metal Transfer (CMT) GMAW, *J. Weld. Join.* 36(5) (2018) 12-18.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.5.2>