

研究論文

FCAW 수평 필릿용접용 용접선추적을 위한 아크센싱 알고리즘 개발

權 純 昌* · 崔 在 成** · 張 樂 芙***

Development of an Effective Arc Sensing Algorithm for Seam-Tracking in Flux-Cored Arc Welding Process for Horizontal Fillet Joints.

Soon-chang Kwon*, Jae-sung Choi** and Nag-young Chang***

Key Words : Arc Sensor(아크센서), Arc Current(용접전류), Weighted-Arc-Current(가중 용접전류), Weight Factor(가중치), Weaving(위빙), Tip-to-Workpiece Distance(팁-모재거리), Offset of Weaving(위빙편차), Seam-Tracking(용접선추적), Variance Analysis(분산분석)

Abstract

This paper describes a newly developed arc-sensing algorithm of seam-tracking for FCAW (flux-cored arc welding) horizontal fillet welding. In this algorithm, arc current and the Weighted-Arc-Current (WAC) are used to adjust the position of a weld torch in directions of bead throat and weaving, respectively. The WAC, which is newly devised in this study, means that arc current in the vicinity of weaving end is more emphasized than that in the center of weaving. The reason of this is because there usually exists much noise in the center of weaving due to abrupt change of arc length in case some empty gaps exist in a fillet joint.

Variance analysis was performed in order to check the effect of weld parameters on arc current and the WAC. As a result, the relationships between tip-to-workpiece distance and arc current, and between weaving offset and the WAC were established.

To check the validity of the algorithm, seam-tracking experiments were performed under various welding condition. The result of experiments showed a satisfactory tracking performance in the presence of empty gaps in a horizontal fillet joint.

* 정회원, 대우중공업(주) 선박해양기술연구소, 아주대학교 시스템공학과

** 정회원, 고등기술연구원 생산기술연구실, 아주대학교 시스템공학과

*** 비회원, 고등기술연구원 생산기술연구실

1. 서 론

용접구조물은 여러가지 외적인 요인으로 인하여 설계사양과 실제 구조물의 용접선 사이에는 정도의 차이는 있으나 형상오차가 존재하고 있다. 이러한 현상은 주로 구조물의 열변형, 수축, 스프링백 (spring-back) 및 구조물 제작과정에서 발생하는 가공오차, 조립오차 등에 기인하고 있다. 따라서, 이렇게 변형된 구조물을 로봇 등의 자동용접장치로 용접을 할 때는 로봇트가 피용접물의 변형량을 알게 하여 그 차이만큼을 보상하여 용접할 수 있어야 한다.

이를 위하여 현재까지 여러가지 용접선 추적용 센서 - 아크센서^{1~4)}, 비전센서⁵⁾, 초음파센서^{6~8)}, 레이저센서^{9,10)} - 들이 연구되어 왔으며, 그 중 일부는 상용화되어 사용되고 있는 것도 있다. 이들 중 아크센서를 제외하고는 용접토치 주위에 검출 장치를 부착해야 하므로 필릿 (fillet) 용접과 같이 공간이 제한된 곳에는 충돌위험이 따를 뿐만 아니라, 아크용접시 발생하는 스패터, 폼 (fume) 등으로 인하여 센싱의 정확도가 떨어진다. 또한, 이들 장치를 부착함에 따른 경비가 추가로 소요되므로 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 용접 중에 발생하는 아크(또는 용접전류) 자체를 이용하기 때문에 공간상의 제약이 없는 아크 감지알고리즘 (arc-sensing algorithm)에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 현재까지 시도되지 않은 "Weighted-Arc-Current" (이하 "WAC" 또는 "가중 용접전류"라 칭함.) 방법을 시도하였다. 이는 용접 중의 용접전류 중에서 위빙중심부의 전류보다 위빙 양쪽 끝단부의 전류에 가중치를 더 부여하는 것인데, 특히 용접중심부에 흔히 존재하는 갭 (gap), 스패터 등의 이물질의 영향을 줄여 추종성을 높이고자 하였다. 따라서, 위빙방향의 보정 (correction)에는 가중용접전류를 이용하였으며, 두께방향 보정에는 지금까지 널리 알려진 용접전류의 세기를 이용하였다. Fig.1에 보정방향을 나타내었으며, ①번은 좌 (left), 우 (right) 로의 위빙 방향을 뜻하며, ②번은 상 (up), 하 (down) 로의 두께 방향을 뜻한다. Fig.2는 좌표계를 보여 주고 있으며, W축이 위빙축이고, L축이 두께방향 축이며,

지면속으로 향하는 Z축은 용접진행방향 축이다.

한편, 용접전류 및 가중용접전류의 변화에 영향을 주는 용접인자를 분산분석으로 찾아내어 이들 인자와의 관계식을 정립하였다. 또한 본 알고리즘의 추종성을 검증하기 위하여 용접선 추적실험을 수행하였으며, 아울러 가중치를 주지않는 기존방식과도 비교하였다.

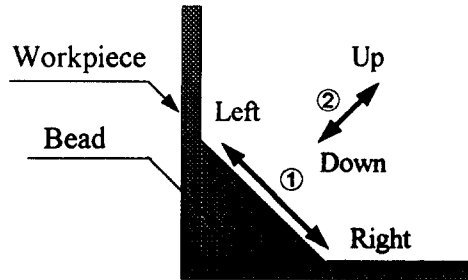


Fig. 1 Definition of Directions

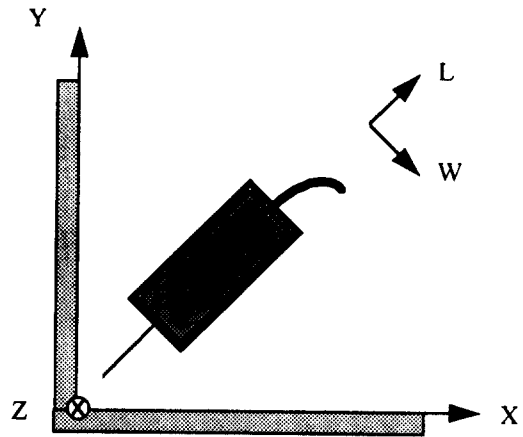


Fig. 2 Definition of Coordinates

2. 아크센서(Arc Sensor)의 원리

2.1 개요

Fig.3의 와이어 (wire) 에 양극 (+) 을 가하고 모재 (workpiece) 에 음극 (-) 을 가하여 FCAW 용접을 하면, 아크가 발생하고 이때 발생하는 주울열에 의

하여 와이어가 용융이 된다. 이때 토치끝단부(팁)와 모재사이(이하 "팁-모재거리"라 칭함.)에는 전압강하가 일어나는데, 와이어 돌출길이(L_e)에 의한 전압강하와 아크길이(L_a)에 의한 전압강하가 일어난다. 이들 중 아크길이는 팁-모재거리(L)가 변하더라도 거의 일정하게 유지되므로 이로 인한 저항의 변화는 작으나 와이어 돌출길이의 변화에 따른 저항의 변화는 상대적으로 크다고 입증되었다¹³⁾. 이는 팁-모재거리가 길면 저항이 커지고 짧으면 저항이 작아짐을 뜻하는데, 저항은 전류와 반비례하므로 결과적으로 팁-모재거리가 길면 전류는 작아지고 짧으면 전류가 커짐을 뜻한다¹⁴⁾. 이러한 관계를 Fig. 4에 나타내었는데 팁-모재거리는 위빙중심(©)에서 가장 길고 끝단(㉠, ㉡)에서 가장 짧으며, 용접전류는 위빙중심에서 가장 낮고 위빙의 양쪽 끝에서 가장 높음을 보여 주고 있다.

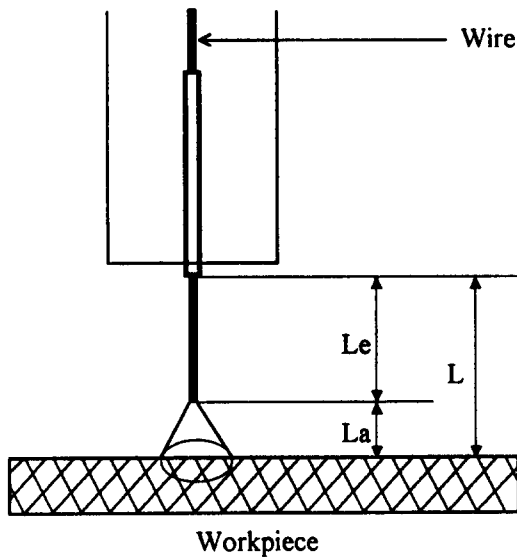


Fig. 3 Configuration of Welding Geometry

아크센서는 이러한 현상을 이용하는 것으로, 두께방향의 보정에는 용접전류의 세기를 주로 이용하며, 위빙방향의 보정에는 적분방식(integral), 미분방식(differential), 주파수분석방식(frequency analysis) 등이 이용되고 있다. 적분방식은 위빙 좌우측의 용접전류의 차이를 이용하는 것인데, 필릿

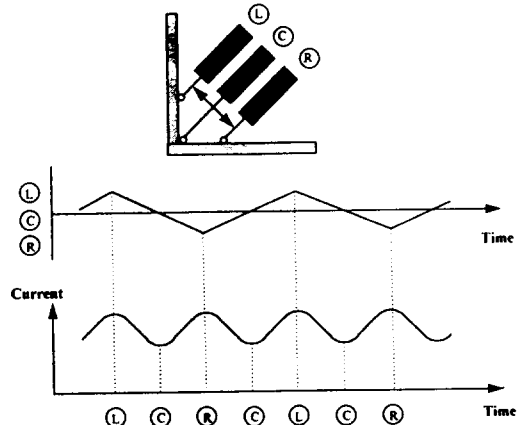


Fig. 4 Weaving & Weld Current

용접부재 사이에 갭이 있는 경우에는 위빙중심부근에서 용접전류의 변동이 심하기 때문에 이로 인하여 추종성이 떨어지는 단점이 있다.

미분방식은 위빙구간의 용접전류에 대하여 커브 피팅하여 2차함수로 표현되는 관계식을 구한 후, 이를 미분하여 기울기가 영이 되는 점을 찾는 방식인데, 계산시간이 길어지는 단점이 있다. 주파수 분석방식은 토치가 용접중심선으로부터 벗어나지 않을 때는 용접전류 신호의 주파수가 위빙주파수의 2배(Fig. 4 참조)가 되지만, 벗어날 때는 용접전류 신호의 주파수가 위빙주파수와 같아지는 것을 이용하는 것인데, 이 방식의 단점은 몇 번의 위빙을 한 후에야 용접전류신호의 주파수 판별이 가능하다는 것이다.

2.2 WAC(Weighted-Arc-Current) 알고리즘

WAC 알고리즘에서도 두께방향 보정에는 용접전류를 이용하며, 제어변수로는 팁-모재거리(L)를 이용한다. 그러나, 위빙방향 보정에는 본 연구에서 처음으로 시도한 "가중용접전류"(본 연구에서 붙인 이름임.)를 이용하며, 제어변수로는 위빙편차(W)를 이용한다. 이들 제어변수를 Fig. 5에 나타내었다.

식(1)에 용접전류(I_w) 및 가중용접전류(I_w)를 계산하는 방법을 나타내었는데, 가중용접전류는 측

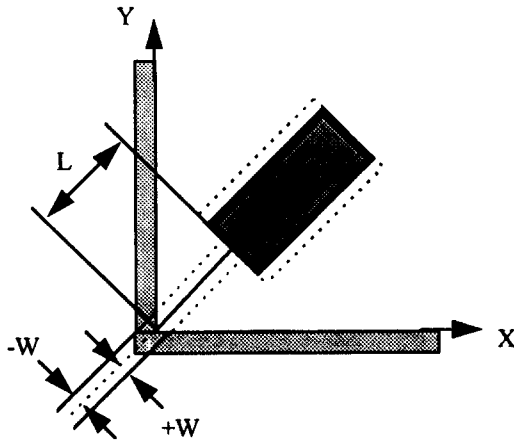


Fig. 5 Offset of Weaving & Tip-to-Workpiece Distance

정한 용접전류 (I_d) 에 가중치 ($\Phi(i)$) 를 곱하여 모두 더한 후 측정용접전류의 갯수 (n) 로 나누어서 구한다.

$$\begin{cases} I_d = \frac{\sum_{i=1}^n I_f(i)}{n} \\ I_w = \frac{\sum_{i=1}^n I_f(i) \Phi(i)}{n} \end{cases} \quad (1)$$

위빙방향 보정에 가중용접전류를 쓰는 이유는 실제 용접구조물의 용접중심부에는 갭, 용접취부점 등이 존재하는 경우가 많은데, 이들의 영향을 최소화하여 용접선 추종성을 높이하고자 함이다. Fig. 6에 갭의 종류를 나타내었는데, (a)는 수직모재에 갭이 있는 경우이고, (b)는 수평모재에 갭이 있는 경우이다. 이와 같은 갭부위를 용접하는 경우, 위빙중심의 갭에서는 팁-모재거리가 갑자기 변하므로 이로 인하여 아크길이가 변하게 되어 용접전류에 변동 (fluctuation) 을 초래하게 된다. 즉, (a)와 같이 갭이 있는 경우에는 위빙중심 좌측의 용접전류에 변동이 발생하며, (b)인 경우에는 위빙중심 우측의 용접전류에 변동이 발생하게 된다. 이와 같은 경우 위빙좌우의 용접전류의 차이만을 비교하면 용접선 추종이 어렵게 된다. 따라서,

이와 같은 갭, 이물질에 의한 갑작스런 전류변동을 최대한 줄일 필요가 있다.

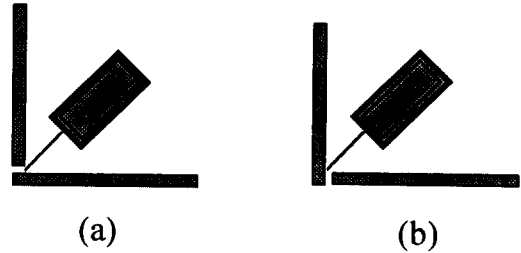


Fig. 6 Gaps in Horizontal Fillet Joints

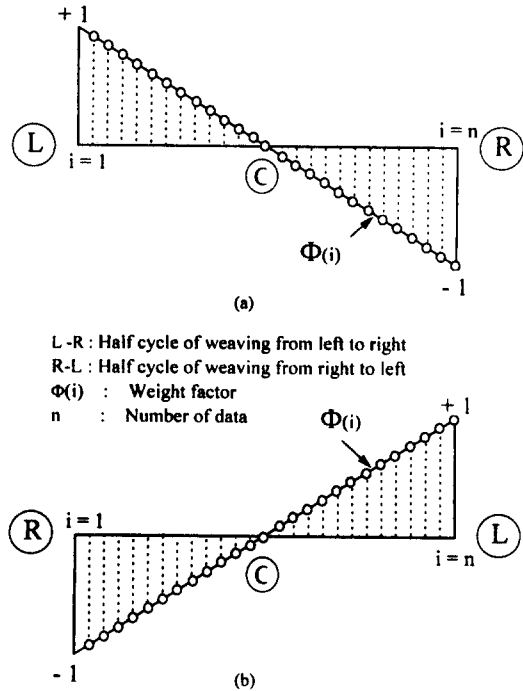


Fig. 7 Definition of Weight Factor

이러한 용접전류의 변동을 줄이기 위하여 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 가중치를 부여하였다. 가중용접전류는 W축의 양 (+) 의 방향을 (-)로 하고, W축의 음 (-) 의 방향을 (+)로 정의하였는데, (a)는 좌에서 우로 위빙 때의 가중치 분포이며, (b)는 우에서 좌로 위빙 때의 분포이다. 두 그림 모두 위빙중심부에서 가중치가 0이고 끝단부에서 +1 또는

-1인 것을 볼 수 있는데, 이는 위빙중심부의 겹에 의해 발생하는 용접전류의 변동을 줄여 보고자 하였다. 상세한 가중치 계산방법을 식(2)에 나타내었다.

$$\phi(i) = \begin{cases} \text{Sign} \frac{\frac{n}{2} - i + 1}{\frac{n}{2}} & i=1, 2, \dots, \frac{n}{2} \\ \text{(n이 짝수인 경우)} \\ \text{Sign} \frac{\frac{n}{2} - i}{\frac{n}{2}} & i = \frac{n}{2} + 1, \dots, n \\ \text{(n이 짝수인 경우)} \\ \text{Sign} \frac{\frac{(n-1)}{2} - i + 1}{\frac{(n-1)}{2}} & i=1, 2, \dots, n \\ \text{(n이 홀수인 경우)} \end{cases} \quad (2)$$

식(2)에서 $\phi(i)$ 는 가중치이고, n은 위빙 반 사이클(Fig.8 참조) 동안의 데이터(용접전류) 갯수이고, Sign은 좌에서 우로 위빙시는 (+)이고 우에서 좌로 위빙시는 (-)이다.

3. 용접인자(weld parameters) 실험

앞에서 정의한 특성치(용접전류, 가중용접전류)를 용접선추적에 이용하기 위하여는 먼저 이들 특성치와 용접인자와의 관계를 정립해야 한다. 즉, 특성치에 영향을 주는 용접인자들을 찾아 그들과 특성치와의 관계를 정립해 둘 필요가 있다.

본 연구에서는 용접인자로 용접전압(V), 와이어

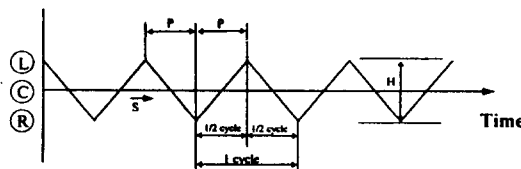


Fig. 8 Definition of Weaving

송급속도(F), 팁-모재거리(L), 위빙편차(W), 용접속도(S), 위빙폭(H), 위빙피치(P) 등 7가지로 선정하였다. 위빙인자(위빙폭, 위빙피치, 용접속도)들을 Fig.8에 정의하였다.

3.1 아크센서 실험장치

본 실험을 위하여 4축으로 구성된 실험장치를 제작하였으며, Fig.9는 실험장치의 외관을 보여주고 있다. ①번은 Z축방향으로 용접진행하는 축이고, ②번은 X축방향으로 편차(offset)를 주는 축이며, ③번은 W축방향으로 위빙과 편차 및 보정을 하는 축이며, ④번은 두께방향으로 팁-모재거리를 조절하는 축이다. 토치는 ④번축에 부착되어 있다. 따라서 ②,③,④번축을 조절함으로써 X-Y 평면의 임의의 방향으로 편차부여 및 보정이 가능하도록 되어 있다. 4축 모두 DC 서보모터를 쓰며 볼스크류로 구동되고, 모터제어기는 컴퓨터 안에 내장되어 있다.

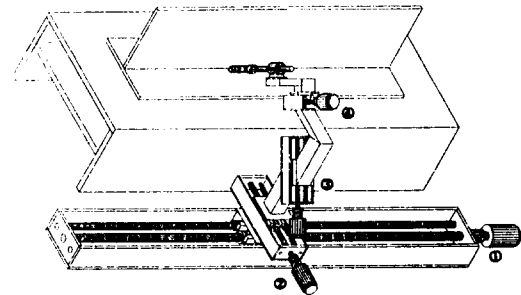


Fig. 9 Experimental Set-Up for Arc Sensing System

Fig.10은 실험장치의 블록다이어그램이다. 용접기의 선트저항으로부터 용접전류의 세기에 해당하는 전압을 추출하여 증폭기로 50배 증폭하여 저역 필터로 노이즈를 없앤 후, A/D 변환기를 통하여 디지털값으로 변환한 후, 디지털 필터링하여 전압값을 산출한다. 미리 캘리브레이션해 둔 전압과 용접전류와의 관계를 이용하여 용접전류로 환산되고, 두께방향보정량 및 폭방향보정량 계산에 쓰일 용접전류 및 가중용접전류를 식(1)로부터 구한 후 모터제어기를 통하여 보정이 이루어진다.

용접기는 Daiden제품(모델명: 500U)이고, 저역

필터는 용접기의 동특성에 의한 용접전류의 변화를 줄이기 위하여 차단주파수가 10Hz가 되도록 제

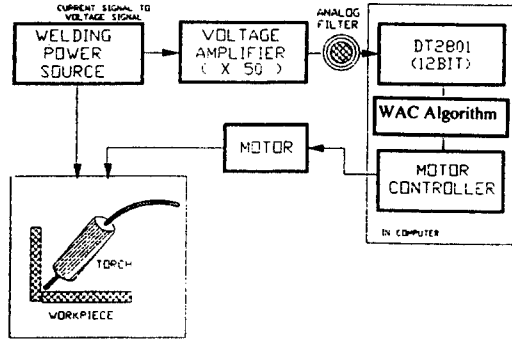


Fig. 10 Block-Diagram of Arc Sensing System

작하였으며, A/D 변환기는 12bit인 PC 내장형 DT2801을 사용하였다.

3.2 실험조건설정

인자실험을 하기 위하여는 먼저 각 인자들의 사용범위를 설정할 필요가 있다. 용접인자들의 범위는 산업현장에서 많이 쓰는 조건으로 선정하였는데 목두께 (Fig. 11 참조)를 약 3.5-6.0mm를 낼 수 있는 조건으로 Table. 1과 같이 선정하였다. 여기

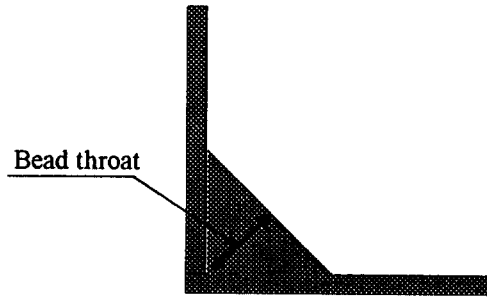


Fig. 11 Definition of Bead Throat

Table 1. Data Levels of Weld Parameters

용접 인자 설정치	V	F	L	W	H	S	P
	용접전압 (Volt)	와이어 공급 속도 (Ampere)	팁-모재간거리 (mm)	위빙편차 (mm)	위빙폭 (mm)	용접속도 (mm/sec)	위빙피치 (mm)
최소치	22	200	23	-1.5	4	3	1.5
최대치	28	260	26	1.5	6	5	2.5

Table 2. Table of Orthogonal Array

실험 번호	열 번 호															실험조건
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$V_0F_0L_0W_0H_0S_0P_0$
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	$V_0F_0L_0W_1H_1S_1P_1$
3	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	$V_0F_0L_1W_0H_0S_1P_1$
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	$V_0F_0L_1W_1H_1S_0P_0$
5	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	$V_0F_1L_0W_0H_0S_0P_1$
6	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	$V_0F_1L_0W_1H_0S_1P_0$
7	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	$V_0F_1L_1W_0H_1S_1P_0$
8	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	$V_0F_1L_1W_1H_0S_0P_1$
9	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	$V_1F_0L_0W_0H_1S_1P_0$
10	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	$V_1F_0L_0W_1H_0S_0P_1$
11	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	$V_1F_1L_1W_0H_1S_0P_1$
12	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	$V_1F_0L_1W_1H_0S_1P_0$
13	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	$V_1F_1L_0W_0H_0S_1P_1$
14	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	$V_1F_1L_0W_1H_1S_0P_0$
15	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	$V_1F_1L_1W_0H_0S_0P_0$
16	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	$V_1F_1L_1W_1H_1S_1P_1$
인자 배치	V (V)	F (F)	V×F (W×H)	L (L)	V×L (W×S)	F×L (W×P)	e	W (W)	L×S (V×W)	L×P (F×W)	H (H)	L×W (L×W)	S (S)	P (P)	L×H (F×S)	

서는 개별인자들과 특성치 사이에 선형관계가 있는 것으로 가정하여 인자별로 2수준(최소, 최대)으로 설정하였다.

Table. 2에는 앞에서 선정한 인자들에 대한 배치를 나타내었다. 여기서는 한 번의 실험으로 15인자의 영향을 볼 수 있는 L_{16} 직교배열방식의 실험계획법을 이용하였다. Table. 2의 실험번호는 실험조건의 종류를 나타내며, 열번호는 인자배치를 뜻한다. 괄호안의 인자는 가중용접전류인자를 뜻하고, 괄호가 없는 것은 용접전류인자를 뜻한다. 인자별 개개의 영향뿐만 아니라 두 인자사이의 교호작용(interaction)에 의한 영향이 있을 것이라고 생각되는 인자들에 대하여도 조사하였다. 즉, 용접전류에 대한 교호작용은 팁-모재거리에 의한 교호작용을 중점적으로 보았으며, 가중용접전류에 대한 교호작용은 위빙편차에 의한 교호작용을 중점적으로 보았다. 왜냐하면, 본 WAC 알고리즘에서는 용접선 추적용 제어인자로 팁-모재거리 및 위빙편차를 이용하기 때문이다. 교호작용이 있는 인자배열 표시는, V인자와 F인자의 교호작용이 있는 경우 VxF와 같은 형태로 표현하였다. 0과 1은 각각 최소, 최대수준을 뜻한다.

실험은 수평필터용접으로 하였으며, 와이어는 직경이 1.2mm인 flux-cored 와이어이고, 개스는 CO_2 개스만을 사용하였다.

3.3 Data Acquisition 및 Data 분석

Table. 2의 각 실험조건에서 3회씩, 총 48회를 무순으로 실시하였다. 데이터는 위빙 반 사이클마다 1초당 500개로 추출한 후, 보다 정확한 용접전류를 얻기 위하여 1차무한응답 디지털 필터링을 식(3)과 같이 하였다¹⁶⁾. $I(n)$ 은 필터기로 입력되는 용접전류, $I_f(n-1)$ 은 이미 필터링된 값이며, $I_f(n)$ 은 필터링하여 얻은 새로운 값이다. a와 b는 상수인데 필터링이 가장 잘 되는 값으로 각각 0.4, 0.6으로 선정하였다.

$$I_f(n) = a I(n) + b I_f(n-1) \quad (3)$$

이와같이 디지털 필터링된 용접전류(I_f)를 식(1)에 대입하여 위빙 반 사이클마다 특성치들을 계산하며, 이를 10 사이클 동안 위빙한 전 구간의 평균

Table 3. Results of Data Acquisition

측정치 실험 번호	용접전류 (Ampere)			가중용접전류 (Ampere)		
	1회	2회	3회	1회	2회	3회
1	194	190	194	-1.2	-1.8	-2.9
2	187	186	185	-3.6	-0.2	-0.6
3	178	175	174	2.6	3.8	2.2
4	181	182	184	-2.9	-3.3	-1.9
5	250	247	250	-1.3	0.7	-0.8
6	241	240	248	-2.5	-2.1	-2.7
7	237	231	240	2.4	2.0	2.6
8	236	239	235	-0.8	-0.6	-0.5
9	186	195	191	5.9	4.4	3.6
10	192	195	192	-1.3	-1.4	-0.7
11	186	190	189	0.4	0.8	0.7
12	183	185	182	-0.1	1.2	2.3
13	256	261	267	-1.0	-0.8	-1.1
14	268	271	275	-2.2	-2.2	-2.3
15	258	262	263	-0.5	-0.2	-0.6
16	249	254	256	-0.8	-1.3	-0.9

값을 계산하여 이것을 각각 1회 용접의 용접전류 및 가중용접전류로 하였다. 이들 계산값을 Table. 3에 나타내었다.

이들 측정값을 분산분석하여 특성치에 영향을 미치는 인자를 찾았으며, Table. 4는 그 결과를 보여 주고 있다. 변동합을 구하는 과정 및 분산분석 과정(참고문헌 15 참조)을 요약하면, 변동합은 어떤 인자의 두 수준간의 차이에 따른 특성치의 총변동을 나타내는데 변동합이 클수록 특성치의 변화에 영향을 주고 있음을 뜻한다. 자유도는 측정횟수-1로 정의되며, 분산은 변동합을 자유도로 나누어서 구한다. 특성치에 대한 영향유무를 평가하는데 쓰이는 F_0 값은 실험인자의 분산값을 오차의 분산값(0.58)으로 나누어서 구한다. 어떤 인자의 수준차이가 특성치변화에 영향을 주고 있는지를 알기 위하여는 Table. 4의 F_0 값과 기각치 $F(\alpha)$ 값으로 평가하는데, $F_0 > F(\alpha)$ 이면 그 인자는 특성치에 영향을 주고 있음을 뜻한다. 여기서는 $\alpha=0.05$ 를 택하였다. F_0 열의 ** 표시는 $F_0 > F(0.01)$ 을 뜻하는데 이는 인자가 특성치에 영향을 많이 주고 있음을 나타내고, * 표시는 $F_0 > F(0.05)$ 를 뜻하는데 영향이 크지는 않으나 무시할 수 없는 정도를 뜻한다. 영향이 아주 적은 인자들은 오차(Error)항에 포함하였다.

Table 4. Results of Variance Analysis
(a) 용접전류

용접인자 (Weld Factor)	자유도 (DOF)	변동합(Sum of Variation)	분산(Variance)	F ₀	F(0.05)
V	1	1837.7	1837.7	212.8**	4.17
F	1	50895.2	50895.2	5894.1**	4.17
L	1	981.0	981.0	113.6**	4.17
W	1	11.0	11.0	1.28	4.17
H	1	25.5	25.5	2.96	4.17
S	1	414.2	414.2	48.0**	4.17
P	1	46.0	46.0	5.33*	4.17
V×F	1	792.2	792.2	91.7**	4.17
V×L	1	11.0	11.0	1.28	4.17
Error	38	328.1	328.1		
Total	47	55341.9			

(b) 가중용접전류

용접인자 (Weld Factor)	자유도 (DOF)	변동합(Sum of Variation)	분산(Variance)	F ₀	F(0.05)
V	1	4.88	4.88	8.41**	4.17
F	1	11.51	11.51	19.83**	4.17
L	1	12.71	12.71	21.91**	4.17
W	1	54.83	54.83	94.52**	4.17
H	1	2.04	2.04	3.52	4.17
S	1	36.93	36.93	63.67**	4.17
V×W	1	1.58	1.58	2.72	4.17
F×W	1	2.39	2.39	4.11	4.17
F×S	1	21.20	21.20	36.55**	4.17
W×H	1	26.85	26.85	46.29**	4.17
W×S	1	12.51	12.51	21.56**	4.17
W×P	1	3.80	3.80	6.55*	4.17
V×F×L	1	1.17	1.17	2.02	4.17
Error	34	19.72	0.58		
Total	47	212.1			

Table 4의 (a)로부터 용접전류에 영향을 주는 인자는 용접전압, 와이어송급속도, 팁-모재거리, 용접속도, 위빙피치 등임을 알 수 있고, 위빙편차와 위빙폭은 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또한 팁-모재거리에 의한 교호작용은 거의 없으나, 용접전압과 와이어송급속도 사이에서는 교호작용이 있음을 알 수 있다. 또한, Table 4의 (b)로부터 알 수 있듯이 가중용접전류에 영향을 주는 인자로는 용접전압, 와이어송급속도, 팁-모재거리, 위빙편

차, 용접속도등으로 나타났으며, 위빙폭과 위빙피치 등은 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 위빙편차에 의한 교호작용 영향은 위빙폭, 용접속도, 위빙피치 사이에서 있는 것으로 나타났으며, 와이어송급속도와 용접속도 사이에서도 있는 것으로 나타났다.

Table 4에서도 알 수 있듯이, 실제 용접시 용접조건으로 미리 지정해 주는 인자(용접전압, 와이어송급속도, 위빙폭, 위빙피치, 용접속도)를 제외

하면 팁-모재거리 및 위핑편차가 용접전류 및 가중용접전류에 각각 가장 영향을 많이 주고 있으므로 본 연구에서 이들을 제어인자로 선정되었음이 적절함을 알 수 있다.

3.4 특성치와 용접인자(weld parameters)와의 관계

특성치에 영향을 주는 인자들을 바탕으로 특성치와 인자들과의 관계식을 찾는다. 용접전류에는 용접전압, 와이어송급속도, 팁-모재거리, 용접속도, 위빙피치, 용접전압과 와이어송급속도와의 교호작용 등이 영향을 주므로 이들 인자와 용접전류와의 관계는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_d = k_0 + k_1V + k_2F + k_3L + k_4S + k_5P + k_6VF \quad (4)$$

이를 행렬식으로 표현하면 식(5)와 같이 된다.

$$[I_d] = [K][k] \quad (5)$$

여기서, $[I_d]$, $[k]$ 는 각각 $[16 \times 1]$ 행렬이고, $[K]$ 는 $[16 \times 7]$ 행렬이며 식(6)과 같이 표현된다.

$$[K] = \begin{bmatrix} 1 & V_0 & F_0 & L_0 & S_0 & P_0 & V_0F_0 \\ 1 & V_0 & F_0 & L_0 & S_1 & P_1 & V_0F_0 \\ 1 & V_0 & F_0 & L_1 & S_1 & P_1 & V_0F_0 \\ 1 & V_0 & F_0 & L_1 & S_0 & P_0 & V_0F_0 \\ 1 & V_0 & F_1 & L_0 & S_0 & P_1 & V_0F_1 \\ 1 & V_0 & F_1 & L_0 & S_1 & P_0 & V_0F_1 \\ 1 & V_0 & F_1 & L_1 & S_1 & P_0 & V_0F_1 \\ 1 & V_1 & F_0 & L_0 & S_1 & P_0 & V_1F_0 \\ 1 & V_1 & F_0 & L_0 & S_0 & P_1 & V_1F_0 \\ 1 & V_1 & F_0 & L_1 & S_0 & P_1 & V_1F_0 \\ 1 & V_1 & F_0 & L_1 & S_1 & P_0 & V_1F_0 \\ 1 & V_1 & F_1 & L_0 & S_1 & P_1 & V_1F_1 \\ 1 & V_1 & F_1 & L_0 & S_0 & P_0 & V_1F_1 \\ 1 & V_1 & F_1 & L_1 & S_0 & P_0 & V_1F_1 \\ 1 & V_1 & F_1 & L_1 & S_1 & P_1 & V_1F_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

미지의 상수값 $[k]$ 를 구하기 위하여는 식(5)를 식(7)과 같이 변형한다. 식(7)을 계산할 때 용접전류(I_d)는 Table.3의 각 실험번호의 3회의 평균값을 이용하였으며, 행렬 $[K]$ 의 요소값들은 용접조건으로부터 알 수 있는데, V_0F_1 의 경우 최소 용접전압과 최대 와이어송급속도와와 같으므로 그 값은 Table.1로부터 $22 \times 260 = 5720$ 이다. 다른 요소들의 값도 이와 같이 구할 수 있다.

$$[k] = ([K]^T [K])^{-1} [K]^T [I_d] \quad (7)$$

한편, 가중용접전류에는 용접전압, 와이어송급속도, 팁-모재거리, 위빙편차, 용접속도, 위빙편차와 위빙폭, 용접속도, 위빙피치 사이 및 와이어송급속도와 용접속도 사이의 교호작용이 영향을 주므로 이들 인자와 가중용접전류와의 관계는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_w = k_0' + k_1'V + k_2'F + k_3'L + k_4'W + k_5'S + k_6'WH + k_7'WS + k_8'WP + k_9'FS \quad (8)$$

마찬가지로 식(8)도 식(5)와 같은 행렬식으로 표시할 수 있는데, 이때 $[K]$ 는 $[16 \times 10]$ 행렬이 되며, 식(7)과 같이 변환한 후 풀면 미지수 $[k's]$ 들의 값을 구할 수 있다. 이렇게 하여 구한 상수값을 Table.5에 나타내었다. 한편, 식(4), (8)은 식(9)와 같이 요약할 수 있다.

$$\begin{cases} I_d = a_1 + \beta_1 L \\ I_w = a_2 + \beta_2 W \end{cases} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{cases} a_1 = k_0 + k_1V + k_2F + k_4S + k_5P + k_6VF \\ \beta_1 = k_3 \\ a_2 = k_0' + k_1'V + k_2'F + k_3'L + k_5'S + k_9'FS \\ \beta_2 = k_4' + k_6'H + k_7'S + k_8'P \end{cases}$$

용접선 추적시에는 식(9)를 이용하는데, 용접전압, 와이어송급속도, 위빙폭, 용접속도, 위빙피치

Table 5. Calculated Coefficients of Experimental Model

용접전류		가중용접전류	
계수명 (Coefficients)	계산값 (Calculated value)	계수명 (Coefficients)	계산값 (Calculated value)
k_0	266.35000	k_0'	-31.46000
k_1	-8.30600	k_1'	0.10625
k_2	-0.04153	k_2'	0.07238
k_3	-3.01250	k_3'	0.34333
k_4	-2.93125	k_4'	2.39333
k_5	-1.96250	k_5'	5.97458
k_6	0.04507	k_6'	-0.49833
		k_7'	-0.34083
		k_8'	0.37500
		k_9'	-0.0221667

등은 용접조건으로 미리 선정하기 때문에 $a_1, \beta_1, a_2, \beta_2$ 를 알 수 있고, 용접중에 측정된 용접전류와 가중용접전류는 각각 식 (1)로부터 구하여 이들을 식 (9)에 대입함으로써 팁-모재거리(L) 및 위빙편차(W)를 계산할 수 있다.

예를 들면, 용접전압=25Volt, 와이어송급속도=250A, 위빙폭=5mm, 용접속도=4mm/초, 위빙피치=1.5mm인 경우 식 (9)의 관계식은 식 (10)과 같이 된다.

$$\begin{cases} I_d = 315.3 - 3.0125L \\ I_w = -1.085 - 0.8992W \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 팁-모재거리가 길수록 용접전류는 작아짐을 볼 수 있으며, 또한 위빙축이 (+)방향으로 벗어날수록 가중용접전류가 음수값으로 됨을 알 수 있다. 이는 앞에서 기술한 아크센서의 원리 및 가중용접전류의 정의(Fig. 7)와도 각각 일치함을 보여주고 있다. 위빙편차가 0일 때는 토치가 용접선의 중심에 위치하고 있음을 뜻하는데, 이때 가중용접전류가 -1.085인 것은 수평필릿 용접중에 액체상태인 용융액이 중력에 의하여 아래(-Y방향)으로 쏠리고 있음을 보여 주고 있다.

4. 용접선 추적실험

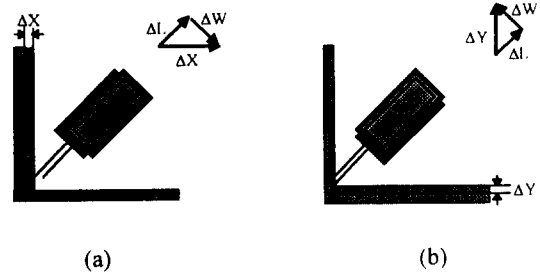


Fig. 12 Examples of Correction

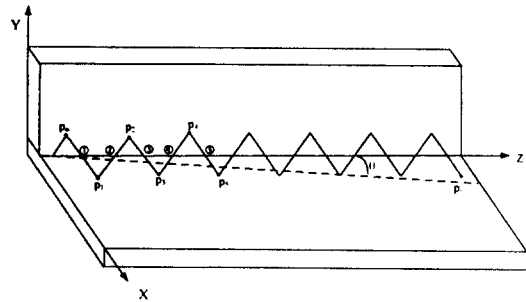


Fig. 13 Correction Example of Seam Tracking

4.1 용접선추적 알고리즘

여기서는 앞에서 구한 관계식 (9)를 이용하여 용접선을 추적하는 것에 대하여 기술한다. Fig. 12의 (a)는 수직모재가 오른쪽으로 벗어나 있으므로 토치를 오른쪽으로 ΔX 만큼 이동시켜야 하는데, 이는 L축과 W축을 양(+)의 방향으로 각각 ΔL 및 ΔW 만큼 이동시킴으로써 가능하다. 또한, (b)는 수평모재가 위로 이동한 경우인데, 이는 L축은 $+\Delta L$ 만큼, W축은 $-\Delta W$ 만큼 이동함으로써 가능하다. 따라서, X-Y평면상의 임의의 방향으로 용접선이 벗어나 있더라도 L축과 W축을 조정함으로써 보상이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 13은 이런 보정방법을 이용한 용접선추적의 일례를 보여 주고 있는데, 토치가 점선과 같이 수직모재에 대하여 고의적으로 θ° 만큼 벗어나도록 X축을 구동하고, 이를 WAC 알고리즘으로 실제의 용접중심선인 Z축을 추적해 가는 것을 보여 주고 있다.

보정은 위빙 반 사이클마다 이루어지며, 보정에

쓰이는 특성치는 직전의 위빙 한 사이클 동안의 특성치를 이용한다. 즉, Fig. 13의 ③번 구간(j=3)의 보정을 하기 위하여는 ①, ②번 구간에서 구한 용접전류 및 가중용접전류를 식(9)에 대입하여 각 구간에서의 팁-모재거리(L₁, L₂) 및 위빙편차(W₁, W₂)를 구하고, 이 값들을 식(11)에 대입하여 평균값(L_m, W_m)을 구한 후, 다시 이들을 식(12)에 대입하여 보정할 거리(ΔL, ΔW)를 최종적으로 구한다. 이 값을 이용하여 위빙할 새로운 점인 ③번 구간의 p₃(Z₃, L₃, W₃) 점을 찾는다. 이때 Z₃는 점p₂의 Z₂값에 위빙피치만큼 더하여 구하고, L₃는 L₂에 ΔL를 더하여 구하고, W₃는 W₂에 위빙폭만큼 가감함과 아울러 ΔW를 더하여 구한다. 그리고, 보정은 점 p₂에서 새로 구한 점 p₃으로 위빙하는 것을 말한다. 다음 ④번 구간의 p₄점은 ②, ③번 구간의 값들을 이용하며 계산은 식(9), (11), (12)와 같은 방법으로 되풀이 한다. 이와 같이 새로운 위빙점을 구하는 것을 식(13)에 나타내었다.

$$\begin{cases} L_m = \frac{L_{j-2} + L_{j-1}}{2} \\ W_m = \frac{W_{j-2} + W_{j-1}}{2} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta L = L_{ref} - L_m \\ \Delta W = W_{ref} - W_m \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} p_2(Z_2, L_2, W_2) = p_2(Z_2, L_{ref}, -H/2) \\ p_3(Z_3, L_3, W_3) = p_2(Z_2 + P, L_2 + \Delta L, W_2 + H + \Delta W) \\ p_4(Z_4, L_4, W_4) = p_3(Z_3 + P, L_3 + \Delta L, W_3 - H + \Delta W) \\ p_j(Z_j, L_j, W_j) = p_{j-1}(Z_{j-1} + P, L_{j-1} + \Delta L, W_{j-1} + (-1)^{j-1} H + \Delta W) \end{cases} \quad (13)$$

식(11), (13)의 j는 위빙 구간번호이고, 식(12)의 L_{ref}, W_{ref}는 각각 용접전에 미리 설정하는 팁-모재거리 및 위빙편차이며, 경우에 따라서는 초기위빙 몇 구간의 값을 이용할 수도 있다.

식(13)의 내용을 요약하면, 새로운 위빙점의 Z 및 L좌표는 각각 직전의 좌표에 위빙피치(P) 및 보정량(ΔL)만큼 더한 좌표값이고, W좌표는 직전의 좌표에 위빙폭(H) 및 보정량(ΔW)을 더한 것이다.

한편, 용접속도는 모든 구간에서 일정하게 유지하였다. 왜냐하면, 위빙 반 사이클마다 보정하므로 보정량이 미소하여 이에 따른 구간별 위빙에 걸리는 시간이 거의 동일하다고 볼 수 있기 때문이다.

4.2 용접선 추적실험

WAC 알고리즘의 용접선 추종성을 시험하기 위하여 식(9)를 이용하여 실제의 용접선 추적을 실험하였다. 편차는 Fig. 14의 원 안의 모든 방향으로 생길 수 있으므로 여기서는 대표적으로 4방향(X축의 +방향 ① 및 -방향 ③), Y축의 +방향 ② 및 -방향 ④)의 편차에 대하여 실시하였으며, 편차각도(θ°)는 3° 및 5°에 대하여 실험하였다. 또한, WAC 알고리즘의 robustness를 보기위하여 용접조건(용접전압, 와이어송급속도, 위빙폭, 위빙피치, 용접속도)을 바꾸어 가면서 실험하였다. 모재의 두께는 12mm이며, 갭이 2mm정도 있는 수평필릿용접으로 하였다.

한편, WAC 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여, 가중치를 다르게 주지않고 위빙 좌우전류차이만을 이용하는 기존방식과도 비교하였다.

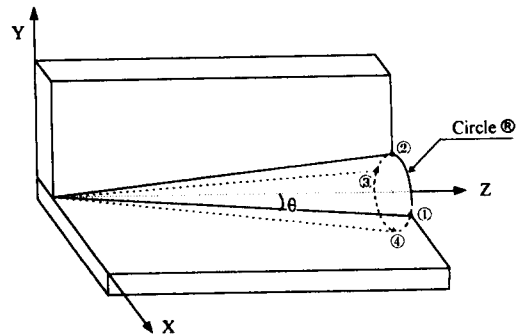


Fig. 14 Definition of Offset Range
(Offset Range : inside the Circle ⑧)

Fig. 15는 WAC 알고리즘으로 용접선 추적을 실험한 결과이다. 4방향 모두에 대하여 용접선 추적을 실험한 결과를 두께방향(L축), 위빙방향(W축)의 각각에 대하여 보여 주고 있다. 그림의 보정량은 누적치를 나타낸 것인데, (a), (b), (c), (d) 네

그림에서 보는 바와 같이 W축은 약 1.5mm이내의 오차를 유지하며 추종하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 용접선이 어떠한 방향으로 벗어나 있더라도

용접선을 따라가고 있음을 알 수 있다. 또한 용접 조건에 구애받지 않고 추종하고 있음을 알 수 있다.

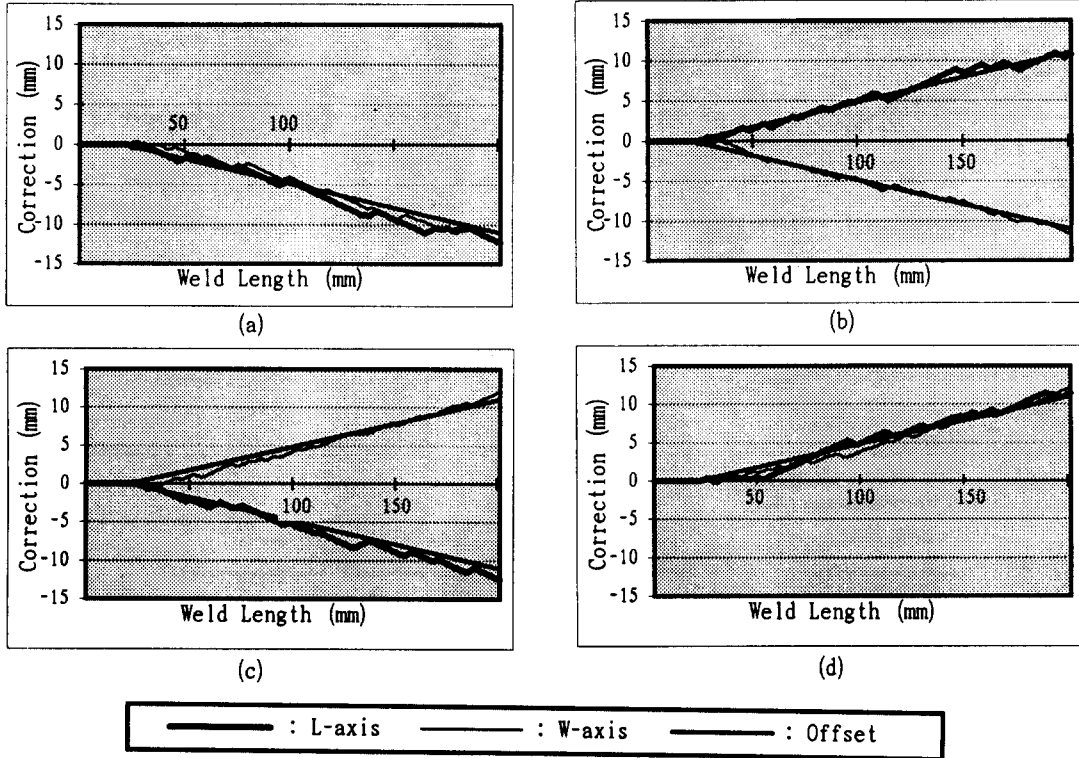


Fig. 15 Seam-Tracking Results of WAC (Weighted-Arc-Current) Algorithm (with Gap 2mm)
 (a) Offset : 5 deg. in +x dir., Voltage=24V, feedrate=240A, Weaving Width=4mm, Pitch=2mm, Weld Speed=7mm/sec
 (b) Offset : 5 deg. in -y dir., Voltage=23V, feedrate=230A, Weaving Width=6mm, Pitch=1.5mm, Weld Speed=5mm/sec
 (c) Offset : 5 deg. in +y dir., Voltage=26V, feedrate=250A, Weaving Width=5mm, Pitch=1.5mm, Weld Speed=5mm/sec
 (d) Offset : 5 deg. in -x dir., Voltage=28V, feedrate=270A, Weaving Width=4mm, Pitch=2mm, Weld Speed=6mm/sec

Fig. 16은 기존의 방식으로 실험한 결과이다. 그림 (c)의 W축은 Fig. 15의 (c)의 W축과 거의 비슷한 추종성을 가지고 있음을 볼 수 있으나, 그림 (a), (b), (d)의 W축은 최고 2.0mm의 오차를 가지고 있으므로 Fig. 15의 (a), (b), (d)에 비하여 추종성이 다소 떨어짐을 알 수 있다. 이는 갭이 있는 부위에서는 추종성이 떨어짐을 뜻한다.

Fig. 17은 WAC 알고리즘의 용접속도의 변화에 따른 용접선 추적실험 결과이다. 용접속도 이외의 용접조건은 변경하지 않고 실험하였다. 속도가 4-6mm/초에서는 추종오차가 약 1mm 이내로 두 축의 추종성에 차이가 없으나, 속도가 빠른 8mm/초에서는 추종오차가 약 2mm로 추종성이 다소 떨어지고 있다. 이는 용접진행 속도가 빠른 관계

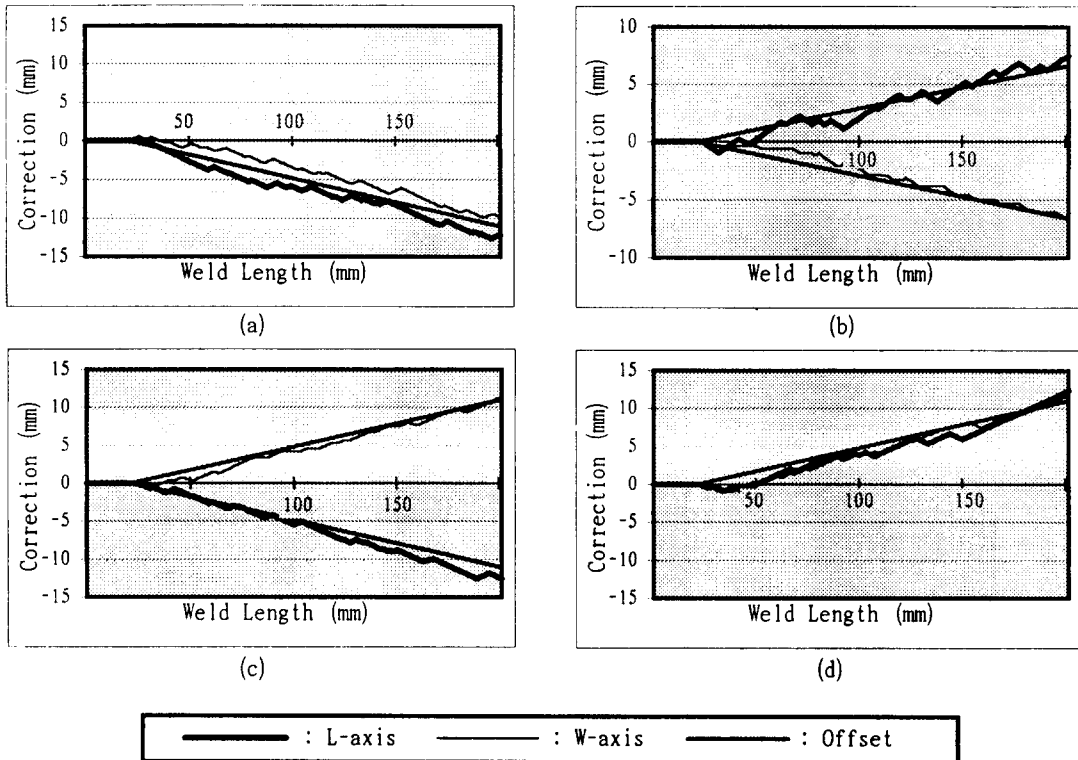


Fig. 16 Seam-Tracking Results of WAC (Weighted-Arc-Current) Algorithm (with Gap 2mm)
 (a) Offset : 5 deg. in +x dir., Voltage=24V, feedrate=240A, Weaving Width=4mm, Pitch=2mm, Weld Speed=7mm/sec
 (b) Offset : 3 deg. in -y dir., Voltage=23V, feedrate=230A, Weaving Width=6mm, Pitch=1.5mm, Weld Speed=5mm/sec
 (c) Offset : 5 deg. in +y dir., Voltage=26V, feedrate=250A, Weaving Width=5mm, Pitch=1.5mm, Weld Speed=5mm/sec
 (d) Offset : 5 deg. in -x dir., Voltage=28V, feedrate=270A, Weaving Width=4mm, Pitch=2mm, Weld Speed=6mm/sec

로 와이어 용융상태가 매우 불안정하여 용접전류의 불안정을 가져오고 이로 인하여 추종성이 떨어진 것으로 추측된다. 이는 빠른 용접속도에 알맞는 용접전압 및 와이어송급속도의 설정이 좋지않은 데 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 18은 WAC 알고리즘으로 용접선을 추적한 용접상태를 보여 주고 있는데 Fig. 15의 (c)의 용접상태이다. 이때의 각목은 5.5mm 였으며, 그림에서 알 수 있듯이 보정오차가 극부적으로 1.5mm 정도 있더라도 전체의 용접비드 상태는 불량이 아님을 보여 주고 있다.

5. 결 론

WAC 알고리즘은 토치를 위빙하는 동안 용접전류를 센싱한 후, 위빙 좌우방향의 끝단부쪽으로의 전류에 대하여 가중치를 더 부여하여 새로운 특성치인 가중용접전류를 계산하여 위빙방향 보정에 이용하는 것으로, 특히 산업현장에서 흔히 발생하는 모재사이의 갭에 대처하는데 중점을 두었다. 또한, 용접전류 및 가중용접전류에 영향을 미치는 용접인자를 찾아내어 실제의 용접선 추적에 반영

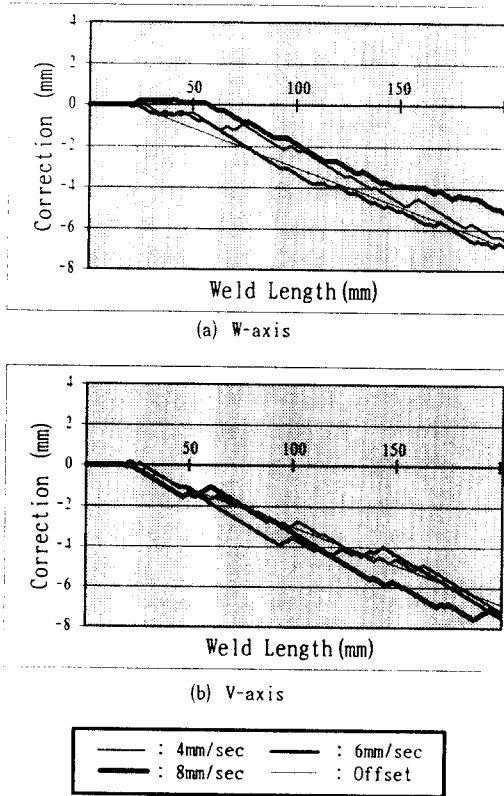


Fig. 17 Effect of Welding Speed in WAC Algorithm
 Offset : 3 deg. in +x direction, Feedrate=240A, Weaving Width=4mm, Weaving Pitch=3mm, Voltage=25V

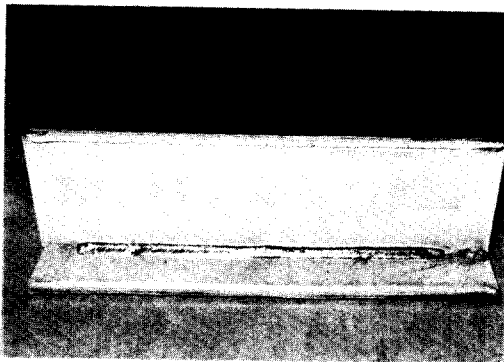


Fig. 18 Photograph of Tracking Result by WAC Algorithm in CO₂ Arc Welding

하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 용접전류에 영향을 주는 인자로는 와이어송급속도가 가장 많이 영향을 주고, 용접전압, 팁-모재거리, 용접속도, 위빙피치 순으로 나타났다. 가중용접전류에 영향을 주는 인자로는 위빙편차가 가장 많이 영향을 주는 것으로 나타났으며, 그 다음으로 용접속도, 팁-모재거리, 와이어송급속도, 용접전압 순으로 나타났다.

2) 용접선이 상하, 좌우 어떠한 방향으로 벗어나 있더라도 WAC 알고리즘의 위빙방향의 보정오차는 약 1.5mm 이내였으며, 이는 기존방식의 보정오차 2.0mm보다 우수하여 갭이 존재하는 산업현장에 보다 잘 적용될 수 있음을 보여 주었다.

3) 또한, 용접조건(용접전압, 와이어송급속도, 위빙폭, 위빙피치, 용접속도)에 구애받지 않고 추종하는 robustness를 갖추고 있다. 다만, 용접속도가 8mm/초 이상에서는 추종성이 다소 떨어지는 현상이 나타났다.

본 연구에서는 1차함수 가중치만을 실험하였으나 향후에는 다른 형태(2차함수, 3차함수 등)에 대하여도 연구가 이루어져 갭이 있는 부위의 추종성에 가장 적합한 가중치 형태를 찾을 필요가 있으며, 또한 본 연구에서는 가중용접전류와 인자들 사이에 선형관계가 있는 것으로 가정하였으나 인자들에 대한 개별적인 실험을 하여 개별인자들과 가중용접전류와의 관계를 규명하면 추종오차를 더 줄일 수 있을 것으로 생각된다. 아울러 어느 정도 크기의 갭까지 가능한지에 대한 실험과 수직 및 곡선용접에 대하여도 실험함으로써 WAC 알고리즘의 신뢰성을 더 높일 필요가 있다고 사료된다.

6. 참고 문헌

1. 허장욱, 김재웅, 나석주, 이승영: "혼합가스 GMA용접에서 아-크신호를 이용한 용접선 추적에 관한 연구", 대한용접학회지, 제8권, 제1호 (1990), pp. 23-30.

2. 김수영, 이승영, 나석주: "Flux-Cored Arc용접 용 아-크센서의 개발 및 이를 이용한 용접선 추적에 관한 연구", 대한용접학회지, 제10권 4호(1992), pp. 290-298.
3. J. W. Kim, S. J. Na: "A Study on Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillets", Welding Research Supplements, Aug. 1991, pp. 216s-221s.
4. J. W. Kim, S. J. Na: "A Study on Arc Sensor Algorithm for Weld Seam Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joint", Proc. of Inst'n Mech Engineers, Vol205, pp. 247-255.
5. S. Nakata, H. Jie, Y. Tsuruha: "Visual Sensing System for In-Process Control of Arc Welding Process", Welding International No.12, 1988, pp.1086-1090.
6. R. Fenn, R. R. Stroud: "Development of an ultrasonically sensed penetration controller and seam tracking system for welding robots", Inst'n of Mech Engineers, 1984, C 471/84, pp.105-108.
7. R. R. Stroud and T. J. Harris: "Seam tracking butt and fillet welds using ultrasound", Int. J. for the Joining of Materials, Vol. 2(1), 1990, pp. 21-24.
8. C. Umeagukwu, B. Maqueira, R. Lambert: "Robotic Acoustic Seam Tracking: System Development and Application", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 36, No. 3, August, 1989. pp. 338-348.
9. C. Umeagukwu, J. McCormick: "Investigation of an Array Technique for Robotic Seam Tracking of Weld Joint", IEEE Trans. on Ind'l Electronics, Vol. 38, No. 3, Jun. '91, pp. 223-229.
10. S. Nagarajan, P. Banerjee, W. Chen: "Control of the Welding Process Using Infrared Sensors", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 8, No. 1, Feb. 1992, pp. 86-93.
11. P. Smith: "Seam and Tactile Sensing Used in Robotic Welding of Heavy Fabrications", Advanced Welding Systems, Nov. 1985, pp. 161-169.
12. C. Cullen: "An Adaptive Robotic Welding System Using Weld-Wire Touch Sensing", Welding Journal, Nov. 1988, pp. 17-21.
13. George E. Cook: "Robotic Arc Welding: Research in Sensory Feedback Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-30, No. 3, Aug. 1983, pp. 252-268
14. J. W. Kim, S. J. Na, "A Study on Prediction of Welding Current in Gas Metal Arc Welding", Proc. of Inst'n Mech Engineers, Vol 205, pp. 59-69.
15. 박성현, 「실험계획법」, 민영사, 1994, pp. 463-478.
16. David J. DeFatta, Joseph G. Lucas, William Hodgkiss: 「Digital Signal Processing」, John Wiley & Sons, Inc., 1988, pp. 46-49.