

SAW 용접시 다중 토치를 이용한 용접부 적응제어에 관한 연구

문형순* · 정문영* · 배강열**

* 현대중공업(주) 산업기술연구소

** 진주산업대학교 산업자동차공학과

A Study on Adaptive Control to Fill Weld Groove by Using Multi-Torches in SAW

H. S. Moon*, M. Y. Jeong** and K. Y. Bae***

* Dept. of Automation, Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Ulsan 682-060, Korea

** Dept. of Industrial Automation, Chinju National University, Chinju 660-758, Korea

Abstract

Significant portion of the total manufacturing time for a pipe fabrication process is spent on the welding following primary machining and fit-up processes. To achieve a reliable weld bead appearance, automatic seam tracking and adaptive control to fill the groove are urgently needed. For the seam tracking in welding processes, the vision sensors have been successfully applied. However, the adaptive filling control of the multi-torches system for the appropriate welded area has not been implemented in the area of SAW(submerged arc welding) by now.

The term adaptive control is often used to describe recent advances in welding process control but strictly this only applies to a system which is able to cope with dynamic changes in system performance. In welding applications, the term adaptive control may not imply the conventional control theory definition but may be used in the more descriptive sense to explain the need for the process to adapt to the changing welding conditions.

This paper proposed various types of methodologies for obtaining a good bead appearance based on multi-torches welding system with the vision system in SAW. The methodologies for adaptive filling control used welding current/voltage, arc voltage/welding current/wire feed speed combination and welding speed by using vision sensor. It was shown that the algorithm for welding current/voltage combination and welding speed revealed sound weld bead appearance compared with that of voltage/current combination.

(Received August 14, 1999)

Key Words : Multi-torches, Vision sensor, SAW, Automation seam tracking, Adaptive filling control

1. 서 론

유해가스나 용접소음 등으로 인하여 초래되는 열악한 용접환경은 작업자들에게 상당한 피로감을 유발하게 된다. 또한 수용접에 의한 재현성 감소 등은 재 용

접을 부분적으로 초래하게 되고, 이로 인해 생산성 감소를 초래하게 된다. 이러한 이유 때문에 80년대 이후부터 용접자동화에 대한 요구가 점진적으로 증가하고 있으며, 이를 위해 각종 센서류가 하루가 다르게 발달하고 있다. 특히 시각센서의 경우 90년대를 기점으로 하여 기능과 가격 면에서 상당한 발전을 거듭하고

있다. 비 접촉식 센서로서 사용되는 비전센서는 용접선 자동추적, 용접 비드 형상 계측 그리고 사용자 모니터링 시스템 등에 다양하게 적용되고 있으며, 점점 그 적용 분야를 넓혀가고 있는 실정이다¹⁻⁷⁾.

용접환경과 연계하여 적용된 시각센서 시스템은 주로 용접선 자동 추적이나 용접풀(weld pool) 모니터링(monitoring) 시스템을 구성하는데 사용되어져 왔다^{1,3-9)}. 하지만 실제 용접공정에서는 기계가공 및 성형(forming)공정이 선행되며, 이로 인해 용접 그루브(groove)의 단면적이 부분적으로 변화하는 현상을 보이게 된다. 따라서 용접선 자동추적은 기본적인 기능으로서 사용되어야 하며, 부가적으로 변화하는 용접부를 인식하여 상황에 따라 용접조건을 적절히 제어해야 하는 추가적인 기능이 필수적이다.

자동용접을 구현하기 위해 사용될 수 있는 용접 공정으로는 GMAW(gas metal arc welding), FCAW(flux cored arc welding) 그리고 SAW(submerged arc welding) 등이 있다. SAW는 토치와 모재사이에 플럭스(flux)가 존재하기 때문에 아크가 외부 공기와 차단되며, 이로 인해 안정된 아크를 발생시킬 수 있다. 또한 이러한 이유 때문에 다른 용접공정에서 사용하기 힘든 고전류 영역을 사용할 수 있다. 안정된 아크 특성은 다전극을 이용한 용접을 가능케 하며, 일반적으로 최대 다섯 개의 토치를 일직선상에 배치하여 사용할 수 있다.

본 연구에서는 시각센서가 장착된 다전극 용접장비를 이용하여 다양한 용접부 적응제어 알고리즘을 제시하였으며, 각각의 특성과 용접결과를 분석하였다. 또한 각각의 알고리즘 중 그루브 면적변화에 따라 실질적으로 적용될 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 이를 통해 다전극 용접장치의 용접선 자동추적 뿐만 아니라 용접하고자 하는 그루브의 단면적 변화에 대응할 수 있는 적응제어 시스템을 구성할 수 있었다.

2. 용접부 적응제어

일반적으로 용접기 전원 특성은 크게 정전류(Constant Current)와 정전압(Constant Voltage) 전원으로 나눌 수 있다. 정전류의 경우 일정한 용접전류를 유지하기 때문에 균일한 용입(penetration) 깊이를 얻을 수 있으나, 아크 길이의 변화에 따라 전류값 변화는 미소하나 전압 신호의 변화가 크다. 반대로 정전압특성의 경우 아크 길이에 따른 전압 변화는 미소하나 전류 변화는 크다. 이러한 특성을 이용하여 정전류나 정전압특성에 따른 센서의 기준 변수는 전류가 되거나

혹은 전압이 된다. 정전류의 경우는 대부분 전압값을 이용하여 아크 센서를 구성하며, 정전압의 경우는 변화가 심한 전류를 센서 변수로 사용한다. 또한 용접기 내부에서도 일정한 전압 및 전류값을 제어하기 위하여 와이어 송급속도를 제어하게 된다. 정전압의 경우에는 와이어 송급속도를 제어하기 위하여 전류값을 이용하며, 정전류의 경우는 전압값을 이용하게 된다.

2.1 용접기 전원에 따른 측정신호 특성

본 연구에서 사용된 용접기는 SAW용 Lincoln DC1500과 AC1200이다. 여기서 1500과 1200은 최대 사용전류를 의미하며, 용접진행방향을 기준으로 선단에 DC1500, 나머지 2,3,4,5전극은 정전류 특성을 가진 AC1200으로 구성하였다. 선단 DC1500은 일정한 용입깊이를 유지하기 위하여 정전류 특성을 이용하였다. 2, 3전극은 용접부를 적절하게 채우기 위하여, 4, 5전극은 용접부 비드를 형성하기 위하여 사용되었다.

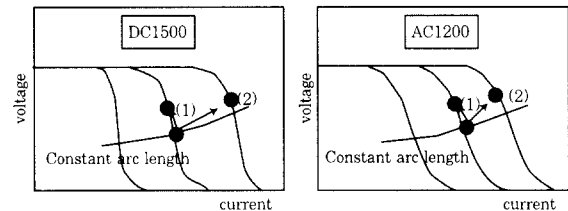


Fig. 1 Power source characteristics of DC 1,500 and AC 1,200

Fig.1는 DC1500과 AC1200의 용접기 전원 특성 곡선을 나타낸 것이다. 위의 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전류값을 (2)과 같은 곡선으로 변경시키고 전압값을 변화시키지 않을 경우 일정한 아크 길이를 유지하기 위하여 용접기는 전압값을 일정 범위 내에서 증가시키게 된다. 일반적으로 전류값을 증가시키면 각각의 수하특성에 의하여 전압의 변동률이 달라지게 된다. DC1500의 경우 전압과 전류값이 결정된 경우 (이하 (1)의 경우) 신호를 측정해 보면 전류값은 크게 변화가 없으나 전압값은 많은 변화를 보이게 된다. 즉 원하는 전류값은 어느 정도 근사치에 접근할 수 있으나 전압값은 일정한 전류값을 유지하기 위하여 증감을 계속 보이게 된다. 이에 대한 측정신호를 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다.

이러한 용접기 특성을 이용하여 (2)와 같은 제어를 행하면 전압값의 변동이 심하며, 따라서 원하는 전압값을 정확히 얻기 힘들다. 따라서 원하는 와이어 송급

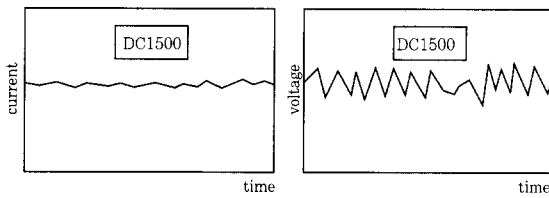


Fig. 2 Schematic diagram for welding current and arc voltage signal

속도를 정확한 값으로 제어하기 힘들게 된다.

AC1200의 경우 전압과 전류값이 선정된 경우(이하 (1)의 경우) 신호를 측정해 보면, 전류값은 DC1500보다 변화가 심하며 전압값의 경우 DC1500보다 작다. 이에 대한 측정신호를 Fig.3에 도식적으로 나타내었다.

따라서 원하는 전류값을 얻기에는 DC1500보다 어려우나 원하는 전압값을 얻기에는 DC1500보다 용의하다.

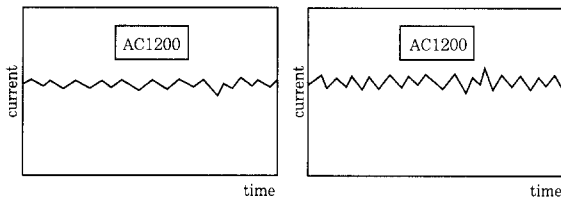


Fig. 3 Schematic diagram for welding current and arc voltage signal

2.2 추적 알고리즘

사용된 알고리즘은 단순 조인트(joint) 인식을 통한 용접선 추적 알고리즘이다. 본 연구에서 사용된 용접부 형상은 V-그루브 형태이며 이차 미분법을 이용하여 그루브 에지(edge)들을 추출하였다. 용접부의 중심은 추출된 에지의 산술 평균값을 사용하였으며, 용접부 추적시 추적 형태는 모터 드라이브(motor driver)상의 속도 모드를 이용하였다. 반도체 레이저는 30mW급을 사용하였으며, 기계 가공면이나 그라인딩(grinding)등에 의한 난반사 및 2차 반사등을 최소화하기 위하여 센서를 용접진행 반대방향으로 10.5° 정도 기울여 사용하였다. 또한 스페터나 아크광에 의한 영향을 최소화 하기 위하여 센서 끝단부에 스페터 방지장치를 사용하였다. 모터 및 모터 드라이브는 미찌비시 사의 서보 제어 기능이 내장된 제품을 이용하였다. 용접공정은 SAW이며 5전극이 하나의 풀을 형성하는 시스템이다. 이를 Fig. 4에 나타내었다.

2.3 용접적응제어 알고리즘

용접공정을 적용하기 위해서는 기계가공 및 용접부 고정 공정 등이 선행되게 된다. 대형 부재를 고정하는



Fig. 4 Experimental apparatus of five torches for adaptive filling

경우 고정 오차에 의해 용접선이 변화하게 되나, 용접선 자동추적센서를 이용해 쉽게 극복할 수 있다. 하지만 가공 공정에 따라 용접하고자 하는 그루브의 면적이 변할 수 있으며, 이는 결과적으로 용접결함을 유발하게 된다. 따라서 이를 보정하기 위해서는 변화하는 용접부 면적을 미리 계산하여 적절한 용접조건으로 보정해야만 한다. 본 연구에서는 전압/전류/와이어 송급속도를 이용한 용접 적응제어 알고리즘, 전류/전압을 이용한 알고리즘 그리고 끝으로 용접속도를 이용한 적응제어 알고리즘을 제안하였다. 또한 이 결과를 이용해 5전극 및 정전류 용접전원 특성을 이용하여 용접할 경우 그루브 형상 변화에 따른 적절한 알고리즘을 제시하고자 한다.

2.3.1 전압/전류/와이어 송급속도를 고려한 용접적응제어

정전류 특성을 사용하는 경우 와이어 송급속도는 아크전압에 의해 결정된다. 하지만 아크전압 또한 용접전류값에 따라 그 변화특성이 다르게 제어된다. 따라서 와이어 송급속도는 아크전압과 용접전류의 조합 값에 영향을 받는다고 할 수 있다. 즉 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta I = \Delta WFS \frac{\partial I}{\partial WFS} \quad \Delta V = \Delta WFS \frac{\partial V}{\partial WFS} \quad (1)$$

여기서,

$$\Delta I = I(t + \Delta t) - I(t)$$

$$\Delta V = V(t + \Delta t) - V(t)$$

WFS : 와이어 송급속도(Wire Feed Speed)

$$\frac{\partial I}{\partial WFS}, \frac{\partial V}{\partial WFS} : \text{실험을 통해 결정되는 값}$$

식(1)에 의하면 ΔWFS 값이 결정되면 제어하고자 하

는 전압과 전류값이 자동적으로 결정된다. 이를 시각 센서에서 계산할 수 있는 그루브 면적함수로 변경한다면, 시각센서의 면적계산만으로 변화하는 그루브 면적에 대한 대응성을 가지게 된다. 본 연구에서는 그루브에 채워야할 면적을 그루브 면적과 캡(cap)면적으로 나누었으며 이를 Fig.5에 나타내었다.

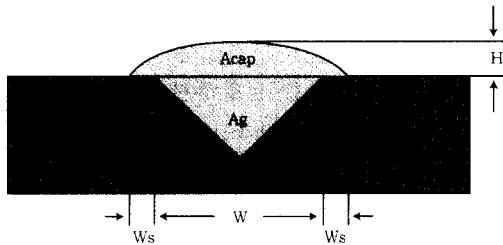


Fig. 5 Definition of groove area and cap area

채워야할 표준 그루브에 대한 표준면적을 A_{fs} , 시각센서를 이용해 실제 측정된 면적을 A_{fm} , 그리고 보상해야할 면적차를 ΔA 로 표시하고 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$A_{fs} = A_{cap_s} + A_{g_s} \quad (2)$$

$$A_{fm} = A_{cap_m} + A_{g_m} \quad (3)$$

$$\Delta A = A_{fm} - A_{fs} \quad (4)$$

여기서,

$A_{fs}, A_{g_s}, A_{cap_s}$: 표준면적(그루브 면적+캡 면적), 표준 그루브 면적, 표준 캡면적

$A_{fm}, A_{g_m}, A_{cap_m}$: 측정면적(그루브 면적+캡 면적), 측정 그루브 면적, 측정 캡면적 계산의 편의성을 위하여 A_{cap} 은 다음과 같이 결정하였다.

$$A_{cap} = \frac{(W+2Ws) \cdot H \cdot factor}{2} \quad (5)$$

그루브에 실제 채워지는 면적은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta \frac{\pi D^2}{4} \cdot WFS(\text{mm}^3/\text{sec}) \quad (6)$$

여기서,

η : 효율(efficiency)

D : 와이어 직경

본 연구에서 사용된 와이어 직경은 4.0mm이며, SAW 공정을 사용하였으므로 η 는 1로 두었다. 식(6)

을 속도로 나누면 단위 속도 당 채우는 면적이 되며, 이는 그루브에 채워지는 단면적과 동등하다. 이를 식(7)과 (8)에 나타내었다.

$$A_{fm} = \left(\frac{\eta \pi D^2}{4} \cdot WFS' \right) / V_s \quad (7)$$

$$A_{fs} = \left(\frac{\eta \pi D^2}{4} \cdot WFS_s \right) / V_s \quad (8)$$

여기서,

WFS' : 실제 측정된 면적을 채우기 위한 와이어 송급 속도(mm/min)

WFS_s : 표준 면적을 채우기 위한 와이어 송급속도(mm/min)

V_s : 용접속도(mm/min)

식(7)과 (8)을 식(4)에 대입하면 식(9)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_{fm} - A_{fs} \\ &= \eta \frac{\pi D^2}{4} (WFS' - WFS_s) / V_s \\ &= \eta \frac{\pi D^2}{4} (\Delta WFS) / V_s \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에 의해서 와이어 송급속도 차이를 시각센서가 측정한 면적차 값으로 표현할 수 있으며 이를 식(10)에 나타내었다.

$$\Delta WFS = \Delta A \cdot V_s \cdot \frac{4}{\eta \pi D^2} \quad (10)$$

식(10)과 식(1)을 조합하면 변화하는 그루브 면적에 따른 용접전류 및 전압의 변화 값을 결정할 수 있다. 본 연구에서는 용접부를 채우기 위하여 5개 토치가 하나의 용접풀을 형성하는 시스템을 구성하였으며, 선단의 DC1500 용접기는 아크의 안정성과 용입깊이를 결정하므로 제어 변수로는 제외하였다. 따라서 나머지 4개의 AC1200용접기를 제어 대상으로 선정하였으며, 각 토치의 전압과 전류 변화 값은 아래와 식(11)과 같이 결정하였다. 다전극 사용시 각 토치별 전류 설정 값이 차이가 많이 나기 때문에 전체 전류 합에 대한 토치별 전류 변환값 비율을 이용하였다. 이에 대한 제어선도를 Fig. 6에 나타내었다.

$$\Delta I = \Delta A \cdot V_s \cdot \frac{4}{\eta \pi D^2} \cdot \frac{\partial I}{\partial WFS}$$

$$\Delta V = \Delta A \cdot V_s \frac{4}{\eta \pi D^2} \cdot \frac{\partial I}{\partial WFS}$$

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta I \cdot I_{s2}}{I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} + I_{s5}}, \Delta I_3 = \frac{\Delta I \cdot I_{s3}}{I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} + I_{s5}}$$

$$\Delta I_4 = \frac{\Delta I \cdot I_{s4}}{I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} + I_{s5}}, \Delta I_5 = \frac{\Delta I \cdot I_{s5}}{I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} + I_{s5}}$$

$$\Delta V_2 = \Delta V_3 = \Delta V_4 = \Delta V_5 = \frac{\Delta V}{4} \quad (11)$$

여기서,
 $I_{s2}, I_{s3}, I_{s4}, I_{s5}$: standard welding current for AC1200

여기서,
 A_{fs} : standard weld fill area in database system
 A_{fm} : measured weld fill area measured by vision sensor
 I_s, V_s, S_s : standard welding parameters for current, voltage and welding speed
 I_m, V_m, WFS_m : measured welding parameters for current, voltage and wire feed speed
 I', V' : Actual value through welding machine interface box
 ΔA : $A_{fs} - A_{fm}$
 Schedule data : standard initial welding conditions for given standard groove shape

스케줄 데이터(Schedule data)는 데이터 베이스 시스템(database system)으로 구성되어 있다. 기본 데이터로는 사용하고자 하는 표준 그루브의 캡면적과 이를 제외한 그루브 자체 면적, 표준 그루브를 적절히 채우기 위한 각 토치별 용접전류(I_s), 전압(V_s), 용접속도(S_s), 효율(η) 그리고 사용하고자 하는 와이어의 직

경(D)등으로 구성되어 있다. Lincoln 용접기의 경우 원하는 용접 전압 및 전류를 설정하기 위해서 용접 제어기 판넬 상면에 위치한 저항값(manual knob position)을 설정하게 되어있다. 따라서 본 연구에서는 Lincoln 용접기를 제어하기 위하여 아날로그 입력 전압값-0에서 4095 값을 갖는 12비트 DA변환기-에 따라 저항값이 설정될 수 있도록 서보 포텐션 메타(servo potenton meter) 회로를 구성하였다. 또한 적절한 전압 및 전류값을 설정하기 위한 ρI 와 ρV 는 실험을 통해서 서로 상관관계를 형성하였다. 이에 대한 실험식을 식 (12)에 나타내었다.

$$KV = 3.6 + 0.075(V-34) - 0.004(I-1000) \quad (12)$$

여기서,
 V : desired voltage
 I : desired current
 KV : equivalent to the manual knob position and kept within the range 1 11

이를 실제 전압 및 전압값을 설정하기 위한 저항치로 바꾸면 식 (13) 및 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\text{Analog Output for arc voltage} = 4095(1 - VRR) \quad (13)$$

$$\text{Analog Output for welding current} = 4095 * IRR \quad (14)$$

여기서,
 $VRR = 1.0 (0.1(KV - 1))$
 $IRR = I/1500$

실험식의 신뢰도 및 원하는 전압 전류를 유지하기 위하여 샘플링 주기 4Hz 마다 전압 및 전류값을 측정하였다. 측정된 값들은 식 (13) 및 (14)를 계속 보정하기 위하여 사용하였다.

2.3.2 전압/전류를 고려한 용접적응제어

와이어 송급속도를 고려하지 않고 전류값과 전압값

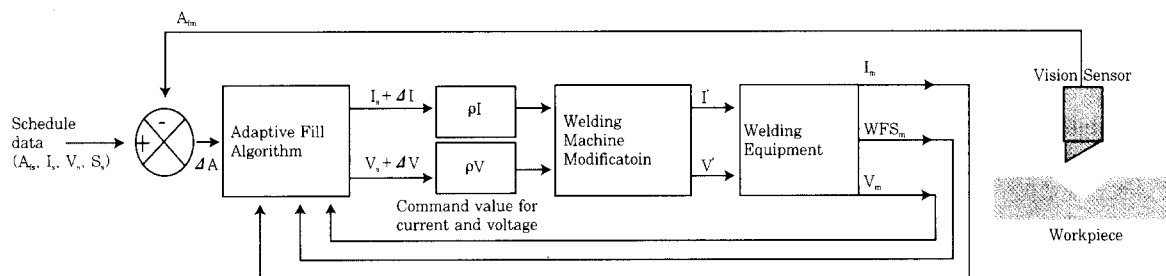


Fig. 6 Block diagram for adaptive fill control

만으로 용접부 적응제어를 구현하고자 할 경우, 채워야 할 표준 그루브의 면적과 측정된 그루브를 기준으로 실제 채워야 할 면적에 대한 비율이 우선적으로 결정되어야 한다. 이를 식 (15)에 나타내었다.

$$k = A_{pm} / A_s \tag{15}$$

용접전류와 와이어 용융속도는 Fig. 7과 같이 어느 정도 선형적인 관계를 가지고 있으며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$MR = \alpha I + \frac{\beta I^2}{area} \tag{16}$$

여기서,

MR : melting rate [mm/sec]

I : welding current

α, β : constant ($\alpha \approx 0.3 \text{ mmA}^{-1} \text{ s}^{-1}$ $\beta \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ A}^2 \text{ s}^{-1}$)

l : electrical stick-out

area : cross sectional area of wire

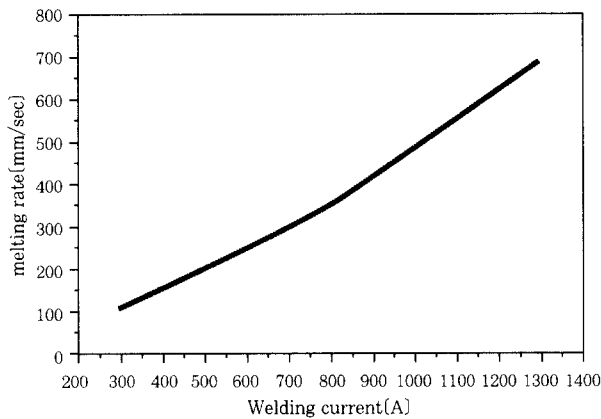


Fig. 7 Relationship between current and melting rate (stick-out = 45mm, dia. of wire = 4.0)

따라서 용접전류의 증가는 와이어 용융속도를 증가시키게 되며 실제 그루브에 채워지는 양은 증가하게 된다. 5전극 토치를 사용하는 경우 표준면적을 채우기 위한 전체 용접전류 I_s 는 다음과 같다.

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} + I_{s5} \tag{17}$$

여기서,

I_{s1} : standard welding current for DC1500

$I_{s2}, I_{s3}, I_{s4}, I_{s5}$: standard welding current for AC1200

면적이 변할 경우 변경해야할 전체 전류 총합 TI는 식

(15)를 조합하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$TI = k \cdot I_s \tag{18}$$

5전극 용접시 선단 토치의 경우 일정한 용입깊이와 아크 안정성에도 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 선단토치의 전류는 제어하지 않았으며 변경될 전체 용접전류 I_{rev} 와 제어하고자 하는 토치들의 전체 전류합 I_m 는 다음과 같다.

$$I_{rev} = TI - I_{s1} \tag{19}$$

$$I_m = I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} + I_{s5} \tag{20}$$

식 (17), (18), (19)을 조합하면 각 토치별로 제어해야할 용접전류값이 결정되며 이를 식 (21)에 나타내었다.

$$I_{s2}' = \frac{I_{rev} \cdot I_{s2}}{I_m}, I_{s3}' = \frac{I_{rev} \cdot I_{s3}}{I_m}, I_{s4}' = \frac{I_{rev} \cdot I_{s4}}{I_m}, I_{s5}' = \frac{I_{rev} \cdot I_{s5}}{I_m} \tag{21}$$

전압의 경우 위의 과정을 통해서는 결정할 수 없다. 하지만 용접기 전원 특성상 안정된 아크 및 용융속도에 대한 번백(burn back)현상을 방지하기 위하여 전류 증가시 전압도 동시에 증가시켜야만 한다. 따라서 전압값은 아래와 같이 결정하였다.

$$\frac{V}{dV} = \frac{I}{dI} \tag{22}$$

$$V = \frac{dV}{dI} I \tag{23}$$

2.3.3 용접속도를 이용한 용접적응제어

용접속도를 이용한 적응제어 방식은 가장 간단한 형태를 나타낸다. 표준 용접속도를 V_s 라고 하면, 제어될 용접속도 V_c 는 식 (15)에서 사용된 변수를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c = V_s / k \tag{24}$$

만일 측정된 그루브 면적이 표준 그루브 면적의 두배가 되다면 변경되는 속도는 실제 표준 속도의 반으로 줄어들게 된다.

3. 결과 및 고찰

용접부 적응제어 알고리즘의 특성을 실험하기 위하

여 시작점의 면적과 종점의 면적이 선형적으로 변하는 시편을 제작하였다. Fig. 5에 표시된 Ws 와 H를 각각 3mm로 선정하였을 때, 시작점 그루브의 면적은 37mm², 캡면적은 23mm²가 되며, 전체적으로 채워야할 면적은 60mm²이다. 종점의 경우 전체적으로 채워야할 면적은 98mm²이며, 시작점과는 38mm²의 면적 차를 나타낸다. 이를 Fig. 8에 나타내었다. 본 연구에서는 시점의 그루브 면적과 캡 면적을 표준 면적으로 설정하였으며, 이에 대한 표준 용접조건은 Table 1에 표시된 바와 같다.

Table 1 Standard welding conditions for adaptive fill control

welding speed = 2.000mm/min		
	welding current [A]	arc voltage [V]
1st torch(DC 1,500)	800	34
2nd torch(AC 1,200)	650	35
3rd torch(AC 1,200)	600	35
4th torch(AC 1,200)	600	35
5th torch(AC 1,200)	550	36

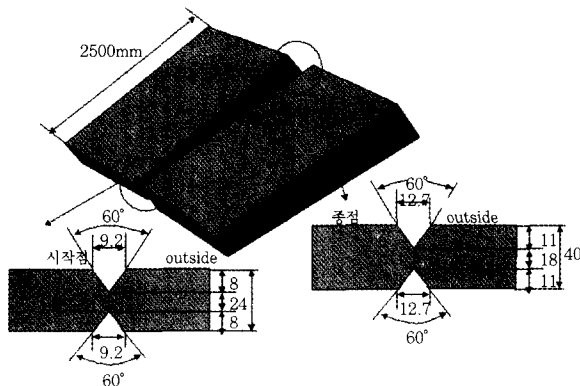


Fig. 8 Schematic diagram of workpiece used for adaptive control

3.1 일정 용접조건 제어

Table. 1에 표시된 용접조건을 이용하여 변하는 용접부 형상과는 관계없이 항상 일정한 용접조건으로 용접한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 결과적으로



Fig. 9 Photograph for result of welding

Table.1에 나타난 표준 용접조건이 용접 시작점의 표준 용접조건이므로 용접 진행방향으로 용착량이 부족하게 되는 결과를 나타내었다. 용접된 시편의 외관을 보면 용착량이 부족하여 용접부 형상이 아래로 오목한 형상을 나타내었다.

3.2 전압/전류/와이어 송급속도 제어

앞 절에서 설명한 바와 같이 선두의 DC 전극은 아크의 안정성과 일정한 용입깊이를 유지하기 위한 목적으로 사용되기 때문에 실제 제어 대상에서 제외하였다. 따라서 적응제어를 위해 사용된 전극은 두 번째, 세 번째, 네 번째 그리고 다섯 번째 전극이며, 약 150mm 마다 측정된 전류/전압값의 제어 결과를 Table 2에 나타내었다. 사용된 제어 초기 변수값은 factor = 1, $\eta = 1$ 로 설정하였다. $\frac{\partial I}{\partial WFS}$ 와 $\frac{\partial V}{\partial WFS}$ 는 사용하고자 하는 용접기 특성에 따라 그 값들이 변할 수 있으며, 본 연구에서 사용한 Lincoln AC 1200 정전류 특성 용접기인 경우 각각 0.3, 0.02의 실험치를 얻을 수 있었다.

용접시험결과는 Table. 2에 나타난 바와 같이 와이어 송급속도에 따른 전압값을 독립적으로 제어하는 경우 용접기의 응답속도와 맞물려 많은 요동을 나타낸다. 즉 정전류 특성으로 인하여 전류값은 지령치를 추종하나, 전압의 경우 선정된 전류값을 일정하게 유지하기 위하여 지령치와는 무관하게 제어됨을 알 수 있었다. 용접 전류를 증가시키는 경우 이와 상응한 전압값이 증가해야 하나, 적응제어 알고리즘을 통해 계산된 전압값이 용접기 특성 곡선과 일치하지 않기 때문에 전압값의 요동이 나타남을 알 수 있다. 마지막 토치인 다섯 번째 토치의 경우 다른 전극보다 전압의 요동 폭이 매우 크다. 첫 번째 토치부터 네 번째 토치에 의해 형성된 용접 풀이 매우 비대하고 또한 비대한 용접풀이 아크 압력에 의해 요동을 하기 때문에 다른 전극보다 전압의 요동 폭이 크게 된다. 전압값은 비드폭을 결정하는 주요인자이므로 비드의 형상은 불규칙하게 되며, 용접비드 외관의 전체적인 형상은 만족스럽지 못했다. 이에 대한 실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

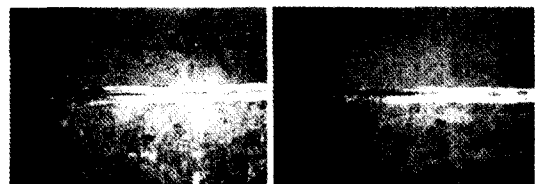


Fig. 10 Photograph for result of welding

Table 2 Result of welding for adaptive control by using current/voltage/wire feed speed combination

Distance [mm]		0	150	300	450	600	750	900	1,050	1,200	1,350	1,500	1,650	1,800	1,950	2,100	2,250	2,400	2,510
2nd Torch	current [A]	650	690	720	760	770	800	840	870	900	920	960	950	980	1,000	1,030	1,070	1,110	1,150
	voltage [V]	35	35	37	37	38	42	39	37	39	40	40	42	41	42	42	44	43	48
3rd Torch	current [A]	600	620	650	680	720	750	790	820	860	900	920	940	980	990	1,020	1,050	1,080	1,150
	voltage [V]	35	35	38	36	36	36	34	38	38	40	40	38	41	41	42	43	43	44
4th Torch	current [A]	600	610	640	670	690	740	760	800	840	860	910	940	960	980	1,000	1,050	1,070	1,040
	voltage [V]	35	35	35	35	35	37	36	36	37	39	37	37	41	39	40	45	40	40
5th Torch	current [A]	550	580	620	650	720	710	750	760	820	800	820	850	890	930	970	940	950	1,010
	voltage [V]	36	32	38	37	36	34	40	39	37	39	35	40	42	46	48	42	43	47

3.3 전압/전류 제어

3.2절의 결과를 바탕으로 식 (23)에서 결정되는 전압값은 비드형상에 영향을 많이 주게 되므로 식 (21)에서 결정된 전류값을 기준으로 전압값은 용접기 자체 특성에 따라 자동적으로 변하게 하였다. 이에 대한 용접실험 결과를 Table. 3에 나타내었다.

Table. 3에서 보이는 바와 같이 비드 외관을 결정하는 전압값이 선형적으로 변경됨을 알 수 있었으며, 비드 외관 및 변화하는 그루브 면적에 따른 채우는 양도 적절함을 알 수 있었다. 이를 Fig. 11에 나타내었다. 적응제어를 구현하기 위한 전류값은 약 650[A]에서 1,100[A]로 변하게 되며, 아크 안정성을 보장하기 위해서는 더 이상의 전류값 증가는 억제되어야 한다. 따라서 실제 그루브에 채워지는 양은 용접속도를 2,000mm/min을 기준으로 했을 때 37mm² 이 최대 값이며, 속도가 1,000mm/min인 경우 74mm² 이 최대 값을 알 수 있다. 따라서 두께가 두꺼운 경우, 즉 실제 채워야할 면적의 변화율이 클 경우에는 크게 실용적이지 못함을 알 수 있었다. 하지만 면적의 변화율이 작을 경우에는 용접전류 만으로 충분히 적응제어를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

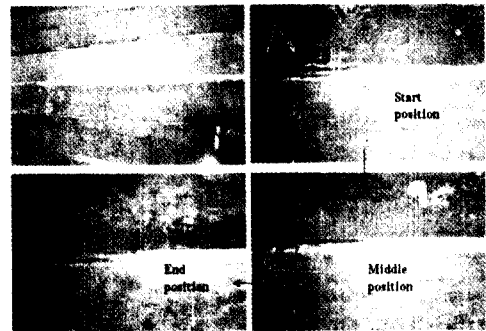


Fig. 11 Photograph for result of welding

3.4 용접속도 제어

용접속도제어 적용대상은 3전극 토치구조를 갖는 시스템을 이용하였다. 즉 선단에 DC 1,500 그리고 두 번째, 세 번째 전극은 AC 1,200을 사용하였으며, 두 용접기 모두 정전류 특성을 이용하였다. 따라서 본 장비로 용접조건을 제어할 수 있는 토치의 수는 2개뿐이다. 3.3절에 서술된 바와 같이 5전극 시스템을 사용할 경우에 실제 채울 수 있는 양이 한정되기 때문에 본 장비로 실제 그루브를 채울 수 있는 양은 매우 미소하다. 따라서 본 장비의 적응제어 변수는 용접속도가 적절함을 알 수 있다. Table. 4와 5에 3전극 용접장비에 대

Table 3 Result of welding for adaptive control by using current/voltage combination

Distance [mm]		0	150	300	450	600	750	900	1,050	1,200	1,350	1,500	1,650	1,800	1,950	2,100	2,250	2,400	2,510
2nd Torch	current [A]	650	680	700	720	740	770	800	820	850	870	880	910	920	950	990	1,030	1,050	1,100
	voltage [V]	35	35	36	36	38	38	39	39	39	40	40	42	42	42	42	43	43	44
3rd Torch	current [A]	600	620	650	670	690	730	750	760	800	830	870	890	910	950	980	1,000	1,020	1,050
	voltage [V]	35	35	35	36	36	36	37	38	38	39	40	41	41	41	42	43	43	46
4th Torch	current [A]	600	610	640	670	690	720	740	760	800	820	860	890	920	940	970	1,010	1,030	1,040
	voltage [V]	35	35	35	35	35	36	36	36	37	39	39	38	40	40	41	43	44	45
5th Torch	current [A]	550	580	600	630	650	690	710	750	760	780	820	850	890	900	920	940	950	950
	voltage [V]	36	36	38	38	38	38	39	39	39	39	40	40	42	46	46	46	46	46

Table 4 Standard welding conditions for adaptive fill control

welding speed = 1,200mm/min		
	welding current [A]	arc voltage [V]
1st torch(DC 1500)	800	34
2nd torch(AC 1200)	600	35
3rd torch(AC 1200)	600	35

Table 5 Result of welding for adaptive control by using welding speed

measured distance [mm]	0	200	400	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800	2,000	2,200	2,400
speed [mm/min]	1,200	1,160	1,130	1,080	1,040	1,010	960	920	880	850	820	770	732

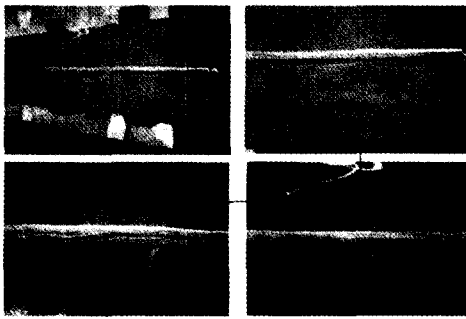


Fig. 12 Photograph for result of welding

한 표준 용접조건 및 제어된 용접속도를 나타내었다. Table. 5의 결과를 보면 그루브 가공 오차에 의해 용접속도가 약간의 비 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있다. Fig.12에 용접속도를 이용한 적응제어 용접결과를 나타내었다. 용접속도를 이용하여 적응제어를 구현하는 경우 상당한 양의 면적차가 나더라도 이를 극복할 수 있었으나, 측정된 면적이 표준 그루브 면적보다 매우 클 경우 속도가 감소됨으로 인하여 용입 깊이의 증가를 초래할 수 있다.

4. 결 론

용접공정은 매우 복잡한 물리적 특성과 유해한 환경을 수반하고 있으며, 이로 인해 공정의 자동화에 대한 다양한 요구가 최근에 급상승하고 있다. 자동화의 기본 철학은 생산성 향상 및 작업자에게 편안한 환경을 조성해 주는 것이다. 생산성 향상을 위하여 모재의 두께가 두꺼운 경우 일반적으로 SAW 기법을 적용하고 있으며, 본 연구에서는 5전극 용접시스템을 개발 적용하였다. 2전극에 대한 SAW는 세계적으로 공인된 바가 있으나 5전극의 경우에는 영국의 British Steel과 용접기 회사인 Lincoln만이 장비를 보유하고 있다. 특히 British Steel에서 사용중인 5전극 시스템은 단지

용접선 자동추적 기능만을 보유하고 있으며, 세계적으로 SAW 5전극에 대한 용접부 적응제어를 구현한 곳은 전무한 실정이다. 본 연구에서는 다양한 적응제어 알고리즘을 제시하였으며 각 알고리즘 별 특성 및 한계점을 실험을 통하여 정립하였다. 용접부의 단면적차가 많이 나지 않을 경우 전류/전압 제어 방식을 사용하면, 부가적으로 속도제어를 위한 시스템이 필요치 않다는 장점을 가진다. 하지만 단면적 차가 많이 나는 경우 용접속도를 이용해야만 아크 안정성을 유지하면서 용접부를 적절히 채울 수 있음을 알 수 있었다. 끝으로 본 알고리즘 개발을 통해 현재 3전극 및 5전극 자동화 장비를 개발 적용 중에 있으며, 향후 유사 장비를 개발하고자 하는 개발자에게 많은 도움이 되리라 생각한다.

참 고 문 헌

1. S. J. Na, J. S. Sin and J. W. Kim : A Study on Seam Tracking and Arc Data Monitoring for Sheet Metal Welding, Int. Conf. on Computerization of Welding Information IV, Orlando, Florida, Nov. 3-6(1992), pp.240 - 250
2. C. W. Lee and S. J. Na : Vision Sensor for Welding Automation, Journal of the Korea Welding Society, Vol. 11, No. 3(1993), pp.10-21
3. R. W. Richardson : Robotic Weld Joint Tracking Systems-Theory and Implementation Methods, Welding Journal, Vol. 65, No. 11(1986), pp.43-51
4. Y. Suga, Y. Sato, M. Naruse, K. Kojima and K. Ogawa : Recognition of the Weld Line by a

- Visual Sensing System and Weld Line Tracking in Automatic Welding of Thin Aluminum Plates, *Welding International*, Vol. 7, No. 4(1993), pp.273-279
5. S. Nakata, J. Jie, Y. Tsuruha, N. Noguchi and T. Kobashri : Visual Sensing System for In-Process Control of Arc Welding Process, *Journal of Japan Welding Society*, Vol. 6, No. 1(1988), pp.123-127
6. R. J. Beattie, S. K. Cheng and P. S. Logue : The Use of Vision Sensor in Multipass Welding Applications, *Welding Journal*, Vol. 67, No. 11(1988), pp.23-28
7. J. S. Sin : A Study on Seam Tracking and Arc Data Monitoring System in Lap Joint, M.S. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology(1991)
8. J. E. Agapakis : Approach for Recognition and Interpretation of Workpiece Surface Features Using Structured Lighting, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 5(1990), pp.3-16
9. D. Brzakovic and D. T. Khani : Weld Pool Edge Detection for Automated Control of Welding, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3(1991), pp.397-403
10. J. Norrish : *Advanced Welding Processes*, Institute of Physics Publishing(1992), pp.147-155