

特輯 : 용접자동화용 센서의 응용기술

아크용접에서 전기적신호를 이용한 용접공정의 감시 및 제어

조 시 훈 · 김 재 응

Monitoring and Adaptive Control of Arc welding Process by Using Electric Arc Signal

S. H. Cho and J. W. Kim



조시훈/영남대학교/
1968년생/용접자동화
시스템 및 용접부 변형
해석에 관심이 있음.



김재응/영남대학교/
1959년생/용접공정의
자동화 및 용접구조물
해석에 관심이 있음

1. 서 언

용접공정은 제품의 생산에 있어서 가장 기본적인 필수적인 조립공정중의 하나이다. 그러나 강한 아크열과 아크광, 연기, 소음 등으로 인한 열악한 작업환경 때문에 작업자가 작업을 기피하게 되고, 용접부의 품질이 작업자의 기능 수준에 의존하게 되므로 용접접합부의 품질을 균일하게 유지하기 위한 개선방안을 모색하게 되었다. 대량 생산체제에 있어서 제품의 생산성을 향상시키고, 적절한 수준의 품질을 유지시키는 관점에서 생산의 자동화분야는 끊임없이 발전하고 있으며 용접공정에도 기계화된 용접장치들이 생산현장에 투입되어 사용되고 있으나 용접대상물의 형상오차, 부정확한 장착, 열변형 등의 여러 가지 용접조건 변화로 인해 우수하고 균일한 품질의 용접제품을 생산하는 데에는 다소의 문제점을 안고 있는 실정이다. 따라서 용접공정중 발생할 수 있는 공정변수의 변화에 따른 적절한 대응을 통하여 우수하고 균일한 품질의 용접접합부를 얻을 수 있는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

용접에 있어 용접품질이란 용접부의 강도로써 설명이 가능한 데, 용접부 강도를 확인하는 방법으로는 인장시험과 같은 기계적인 검사 그리고 금속학적인 방법인 용접부 조직검사 등이 있다. 그러나 이러한 검사 방법에 앞서 용접부 강도를 우선적으로 대변할 수 있는 것으로는 용접부 외관, 즉, 용접부 폭 (bead width), 용입 (weld penetration) 의 정도로써 용접부 강도를 표시한다. 따라서 균일하고 우수한 용접강도를 나타내는 용접품을 얻기 위해서는 용접공정의 안정화가 이루어져야 하며, 특히 아크용접공정의 경우 공정의 안정화는 아크 안정성 (arc stability) 에 많은 영향을 받게 된다. 아크의 안정성에 영향을 미치는 공정변수로는 전류, 전압, 보호가스 등이 있으며,¹⁾ 이러한 공정 변수에 의한 아크의 안정성은 GMA용접의 경우 용융금속이행 (droplet transfer) 의 균일성과 더불어 공정중 발생하는 스패터의 량으로 나타내어 지기도 한다.²⁾ 결국 안정된 용접공정을 이룩하기 위해서는 용접공정의 물리현상에 대한 향상된 이해와 더불어 전류, 전압과 같은 공정 변수와 용접부 형상과 같은 출력변수의 상관관계에 대한 정확한 지식이 필요하며, 앞서 언급한 용접공정의 자동화를 위해서

는 용접공정을 감시(monitoring), 제어(control) 할 수 있는 기술이 요구된다.

아크용접공정은 산업생산에 있어 가장 많이 쓰이고 있는 용접방법의 일종이며, 그 종류로는 크게 SMAW(shield metal arc welding), GMAW(gas metal arc welding), SAW(submerged arc welding), GTAW(gas tungsten arc welding) 등이 있다. 아크 용접공정을 감시, 제어하기 위한 기술에는 시각 및 전자기 센서 등을 이용한 기술과 전기적 신호를 이용하는 것이 있으며 이를 분류해 보면 Table 1. 과 같이 분류할 수 있다. 전기적 신호를 이용하는 기술은 아크용접 고유의 신호를 이용하는 관계로 별도의 감지장치가 필요하지 않으므로 경제적인 장점을 가지고 있으며, 공정상의 작은 변화도 전기적 신호에의 변화를 일으키므로 이를 이용한 용접공정의 다양한 분석이 가능하다. 그러나 이러한 전기적 신호중 각기 필요한 정보를 얻기 위해서는 적절한 신호처리 기법이 요구되어진다. 따라서 본 해설에서는 Table 1. 에 분류된 각각의 기술 중 용접공정상의 전기적 신호인 아크신호를 이용한 용접공정의 감시 및 제어의 원리와 응용분야에 대해 설명한다.

2. GTA용접에 있어 용융지 진동을 이용한 용접부 형상의 감시 및 제어

GTA용접공정은 고품위 용접을 위해 가장 많이 사용되고 있는 용접공정 중의 하나이며, 모든 금

속 및 합금의 용접에 이용되고 있다. 특히 양이온에 의한 청정효과로 산화물에 의한 용접부의 손상을 방지할 수 있으며, 슬래그와 스패터가 없는 관계로 표면이 깨끗한 용접부를 얻을 수가 있다. 또한 GTA 용접공정중의 하나인 펄스 GTA 용접은 용접부 입열의 제어가 용이하므로 용접 열변형을 최소화함과 동시에 용입을 증가시킬 수 있어 박판의 용접에 널리 이용되고 있다.⁴⁾ 펄스 GTA용접공정에서 전류는 피크전류치와 베이스전류치 사이에서 주기적으로 반복된다(약 1~5Hz). 피크전류 기간 중에는 용융지로의 열입력이 증가하므로 용입이 커지게 되고, 반대로 베이스전류 기간중에는 열입력이 감소하므로 용융지는 냉각되며 이러한 현상이 반복됨으로 용접부는 완성된다. 펄스전류 기간 중에는 입열의 증가와 더불어 강한 플라즈마 기류로 인해 용융지에서의 진동이 발생하고 진동의 형태는 용접부의 형상에 따라 달리 나타나므로⁴⁾, 많은 연구자들이 이에 대한 연구를 진행해 왔다.⁶⁻⁸⁾ 용융부에서의 진동은 아크길이의 변화를 유발하는데, 이 때의 용융부 아크길이의 변화는 아크길이와 전압이 비례관계가 있음을 고려할 때 결국 용접 전압의 변화를 의미한다.^{9,10)} 아크길이의 변화는 용접아크를 이루고 있는 플라즈마 체적의 변화를 일으키는 데, 용접공정에 있어 용접전압강하(voltage drop)는 애노드(anode), 캐소드(cathode), 플라즈마(plasma) 등 아크 전 영역에 걸쳐 일어난다. 하지만 플라즈마 영역의 전압강하

Table 1 Sensors for adaptive control and monitoring system(3)

Sensor	Detection Element	Control Variables	Control/Monitoring Objects
<ul style="list-style-type: none"> • Arc signal -Welding current -Welding voltage 	<ul style="list-style-type: none"> • Groove width • Potential of base plate and backing plate • Numbers of anomalous 	<ul style="list-style-type: none"> • Welding speed • Welding current • Wire feed speed 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantity of deposited metal • Back bead shape • Bead shape • Tracking control
<ul style="list-style-type: none"> • Optics -Point (photodiode) -Line (MOS) -Area (CCD image) 	<ul style="list-style-type: none"> • Light quantity on backing plate Width of molten pool Groove root gap 		
<ul style="list-style-type: none"> • Thermal -Radiation temperature -Infrared imaging 	<ul style="list-style-type: none"> • Vicinity of molten pool • Thermal image of molten pool 		

가 다른 영역의 전압강하에 비해 매우 작기 때문에 용융지 진동에 따른 전압의 변화는 매우 작음을 알 수 있고¹¹⁾, 또한 용융지에서의 산화물등의 유동에 따른 영향을 애노드 전압강하 영역에서 많이 받을 수 있기 때문에 전압을 센싱함으로써 인한 용융지의 진동형태를 분류함은 한계가 있음을 알 수 있다. 이에 반해 플라즈마 체적의 변화는 전압의 변화에 비해 크고 플라즈마 체적의 변화에 따른 아크빛의 변화를 광센서를 이용해 센싱할 경우 용융지 진동 현상에 좀 더 민감하다는 장점이 있다^{12,13)}. 하지만 광센서를 이용한 경우에 있어서도 작업환경에 의한 영향을 받을 가능성이 충분히 있으므로 이의 우열을 가리는 데에는 무리가 따른다. 따라서 본 해설에서는 전압을 센싱하고 이의 주파수 분석을 통해 용접부 형상에 따른 용융지 진동 현상을 설명하고 이의 제어 가능성을 설명하고자 한다.

용접부 형상에 따른 용융지 진동 형태를 분류하면 Fig. 1과 같이 크게 3가지의 형태로 나눌 수 있다¹⁴⁾. 모드 1, 2는 부분 용입의 형태를 보여주는 것인데, 먼저 모드1의 경우 펄스전류 기간이 짧거나 용접속도가 느린 경우 발생하는 것으로 높은 용융지 진동 주파수를 가지며 낮은 진폭을 보인다. 모드2는 모드1과는 반대로 펄스전류 기간이 길거나 용접속도가 빠른 경우 발생하는 것으로 낮은 용융지 진동 주파수를 가지며 높은 진폭을 특징으로 한다. 그리고 모드2의 경우는 humping bead와 같은 용접부 결함을 포함할 가능성이 높은 관계로 가급적 피하여야 한다. 따라서 모드1에서 모드2로의 천이(transition)는 펄스시간에 의존하며, 천이펄스시간은 피크전류, 아크길이, 용접속도에 반비례한다. 모드3은 완전 용입이 이루어질 때의 용융지 진동의 형태를 나타내는 것으로 가장 낮은 용융지 진동 주파수를 보인다. 각각의 모드에서 용융지 주파수와 용융지 크기와의 상관관계는 다음 식으로 표현된다¹⁵⁾.

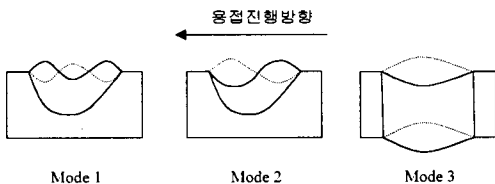


Fig. 1 각 모드에 따른 용융지진동 형태¹⁴⁾

$$\text{Mode 1, 2: } f = 5.84 \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{1/2} D_1^{-3/2}$$

$$\text{Mode 3: } f = 1.08 \left(\frac{\gamma}{h \rho_s} \right)^{1/2} D_{eq}^{-3/2}$$

$$D_{eq}^2 = \frac{1}{2} (D_i^2 + D_b^2)$$

여기서,

f : 용융지 진동주파수(Hz)

D₁ : 부분용입에서 용융지의 표면직경(mm)

D_i : 완전용입에서 용융지의 표면직경(mm)

D_b : 완전용입에서 용융지의 이면직경(mm)

D_{eq} : 용융지의 유효직경(mm)

γ : 표면장력(N/m)

ρ : 밀도(kg/m³)

h : 모재 두께(mm)

앞에서 살펴본 바와 같이 모드2에서는 용접부의 불량을 야기할 가능성이 있으므로 실제 용접은 모드1과 모드3에서 이루어지며 부분용입(모드1)에서 완전용입(모드3)으로의 전환시에는 주파수의 천이(transition) 현상을 수반한다. 이것이 Fig. 2에 나타나 있으며, 천이현상은 베이스 전류의 증가에 따른 용융지의 폭이 증가함에 따라 나타난다. 이것을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 부분

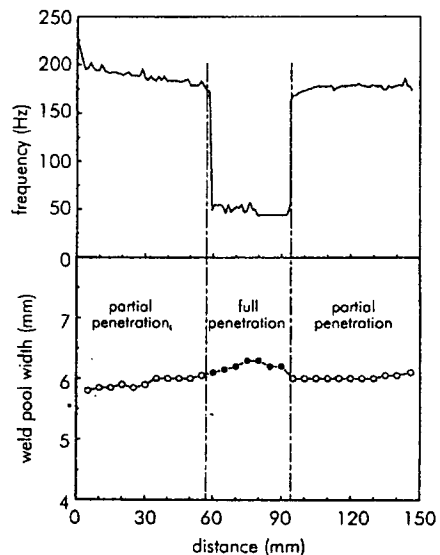


Fig. 2 부분용입과 완전용입의 천이현상¹⁶⁾

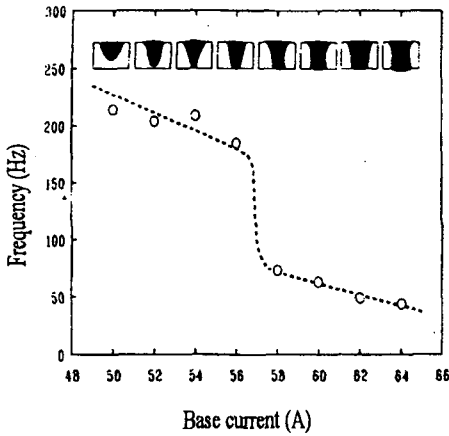


Fig. 3 전이구간에서 베이스전류에 따른 용융지형상과 주파수¹⁰⁾

용입인 경우 용융지 진동 주파수대는 강종에 따라 차이는 있지만 약 180~220Hz를 보이고 완전용입인 경우 약 40~60Hz의 주파수대를 보인다. 하지만 완전 용입의 경우 용융지 이면지름(Bottom Diameter of Weld Pool, 이하 Db)이 작을 경우 용융지는 부분 용입의 경우와 같은 주파수 특성을 보이고 Db가 증가 함에 따라 주파수는 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 이것의 원인으로는 다음과 같이 설명이 가능하다. 즉, 부분용입인 경우 용융금속이 용융되지 않은, 주위의 고체금속에 의해 지지되기 때문에 용융지는 아크압력에 의해 반경 방향으로 변형을 받는다. 이것은 모드1의 진동을 일으킨다. 완전용입이 일어났을 때에는 고체금속에 의한 지지가 없기 때문에 용융지는 아래쪽으로 변형된다. 그러나 베이스전류 기간 동안에는 아크압력이 존재하지 않게 되고 용융금속은 표면장력에 의해 위쪽으로 힘을 받으며 이러한 과정은 모드3의 진동을 유발한다. 모드3의 진동은 용융지의 완전용입을 이끌어지만 Db가 매우 작은 경우 여전히 용융금속의 많은 부분이 고체금속에 의해 지지를 받으므로 용융지의 진동은 모드1과 매우 유사한 현상을 보여준다. 이러한 현상을 이용하면 실제 용접공정에서 용입의 정도를 실시간으로 제어하는 것이 가능하며, 이 때 제어를 위한 파라미터로서 용접전류 또는 용접속도를 이용할 수 있다. 다음은 용접속도를 제어 파라미터로 한 경우이다.

펄스 GTA 용접에서 용융지의 진동을 이용해서

용입을 제어하기 위해서는 용접 전압 신호가 센싱되어야 한다. 센싱된 전압신호에는 펄스 GTA 용접기 전원의 스위칭 주파수가 포함되어 있으므로 저대역 통과 필터(Low Pass Filter)를 이용해서 이를 차단 시켜야 한다. 용접전압을 센싱한 후 이의 주파수 분석이 요구되며, 주파수 분석된 결과를 살펴보면 10Hz 미만의 주파수 영역에서 높은 강도를 나타내는 데 이것은 펄스 전류의 주파수 성분이 나타나는 것으로 이것 또한 해석영역에서 제외되어야 한다. 이렇게 해석된 결과와 함께 용융지 진동과 Db의 관계를 기초로 제어시스템을 구축한다. 이 때 제어변수로는 용접속도를 사용한다. 이것은 일반적으로 용접속도와 용접부의 폭이 반비례의 관계가 있기 때문이다. Fig. 4와 5는 목표로 하는 이면 비드의 폭과 주파수를 각각 4mm,

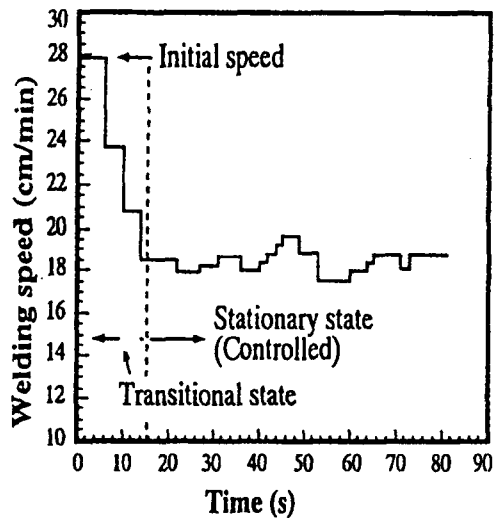


Fig. 4 용입깊이 제어실험에서 용접속도 제어결과¹⁷⁾

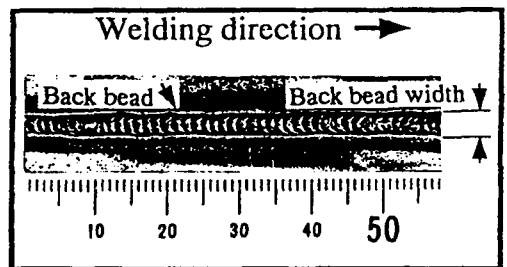


Fig. 5 용입제어 실험결과¹⁷⁾

30Hz로 설정하여 용접속도를 제어변수로 사용한 용접부의 이면 비드의 폭을 제어할 때, 속도변화와 용접부 외관을 보여준다.¹⁷⁾ 그림에서 보듯이 용접속도는 19cm/min에서 안정된 값을 보여주므로 용융지 진동을 이용한 용접부 용입의 감시 및 제어가 충분히 가능함을 보여준다.

3. 단락이행 주파수를 이용한 GMA용접의 이면비드 제어

소모성 전극을 사용하는 GMA용접공정에서 금속이행 형태는 전극에서 모재로의 용적이행 형태에 따라 크게 단락이행(short circuit transfer mode), 입상이행(globular metal transfer), 스프레이 이행(spray transfer)으로 나뉘어 진다. 이러한 각 금속이행 형태에서 시편으로의 입열량은 단락이행, 입상이행, 스프레이 이행 순으로 커지게 된다. 따라서 박판 용접에서는 전류, 전압 범위가 낮아서 입열량이 적은 단락이행 형태를 사용하게 된다.

단락이행의 특성은 용접전류와 전압의 파형, 단락 주파수로(short circuit frequency)로 나타나게 되는 데 초당 단락횟수인 단락 주파수는 금속의 단락이행을 구성하는 여러인자(용접전압, 전류, 용접전원회로의 인덕턴스 등)에 민감한 반응을 나타내고 아크의 상태를 대변하게 된다.¹⁸⁾ 일반적으로 아크의 상태는 단락주파수가 높고 규칙적으로 나타날 때 안정된다.¹⁾

박판용접에서 용접부의 품질은 두꺼운 판재에 비하여 다양한 용접조건에 따라 더욱 민감한 반응을 나타낸다. 용접조건중 용접전류, 전압, 속도 등은 최적의 품질을 나타내는 조건을 설정해서 적용하므로 비교적 균일한 작업조건이 유지되지만, 용접물의 준비과정인 절단, 절곡작업에서 발생하는 부품간의 오차에 의해 루트간격(root gap)의 변화는 흔히 나타날 수 있다. 이러한 루트간격의 변화에 의해 용접부의 비드 높이가 불균일 해지거나 용락(burn through)이 발생하게 된다. 루트간격이 크게 되면 용융부가 넓어지게 되며 용융금속의 일부를 이면비드(back bead) 상태로 유지하려는 금속의 표면장력이 작게 되므로 처짐이 발생하여 이면비드의 높이는 높아지게 되며, 이것이 과도해지는 경우 용락이 발생하게 된다. 이 때 루트간격이 커짐에 따라 용접속도를 증가시키면 용융금속의

양이 적어지고 용융금속의 자중과 표면장력이 평형을 이루어 이면비드 높이가 과도해 지거나 용락이 발생하는 현상을 방지할 수 있게 된다. 박판 용접공정에서 용접부의 성질을 1차적으로 나타내는 것은 표면비드의 높이와 폭, 이면비드의 높이와 폭, 비드의 균일성 그리고 용락의 유무등이다. 특히 이면비드는 완전한 용입을 나타내는 척도로서 품질을 나타내는 주요한 인자가 된다. 일반적으로 박판 맞대기 용접에서 루트간격에 대해 상대적으로 용접속도가 너무 빠르면 완전 용입이 일어나지 않고 반대로 너무 느리면 이면비드가 과도해지거나 용락이 발생하게 된다. 용락이 발생되면 보수 용접을 해야 하기 때문에 생산성을 저해하는 주요한 원인이 된다. 루트간격의 변동을 감지하기 위한 장치는 접촉롤러를 이용하는 방법과 광학센서를 이용하는 방법을 들 수 있다^{19,20)}. 또한 Y. Kitazawa는²¹⁾ 후판 용접의 초층용접(root pass)에서 단락주파수를 이용한 이면비드의 제어에 관해 연구하였는데, 이면받침(backing plate)을 사용하는 조건에서 단락주파수가 용융지 선단과 전극간 거리의 함수로 주어지는 특성을 이용하였고, 루트간격에 의해서 이면비드가 과도해 지거나 용락이 발생하는 것을 고려하지 않았다. J. W. Kim등은²²⁾ 박판 맞대기 용접에서 이면비드의 높이에 영향을 미치는 루트간격의 변동을 단락주파수로 감지하고 실험적으로 구한 루트간격과 적정 용접속도와와의 관계를 이용하여 완전용입이 되고 이면비드가 과도해지거나 용락이 발생하는 것을 방지하여 적절한 이면비드를 나타내도록 제어하는 시스템에 대한 연구를 수행하였다.

단락주파수는 기본적으로 용접속도와 관계가 있으며, 속도에 따른 루트간격과 단락주파수의 관계를 보면, 각각의 용접속도에서 루트간격이 증가함에 따라 단락주파수가 감소한다. 특히 이면받침이 있는 경우 아크의 반발력에 의해 와이어 끝의 용적(molten droplet)이 와이어의 앞쪽으로 전달되어 이면받침과 직접 접촉하게 되고 이어 표면장력에 의해 용융지로 흡수된다. 이러한 과정은 단락이행 현상과는 다른 용적이행을 보이는 것으로 용접속도와 와이어와 용융지 선단사이의 거리가 반비례함을 고려할 때 용접속도가 증가함에 따라 단락이행 주파수가 감소하는 원인이 된다. 따라서 Fig. 6과 같이 용융지 선단과 와이어와의 위치사이의 거리가 큰 영향을 미치며 이에 따른 주파수를 제어변수로 이용하여 이면비드를 제어했을 때 양호한 결과를 보였다. 이면받침이 없는 경우 루트간격이 증가함

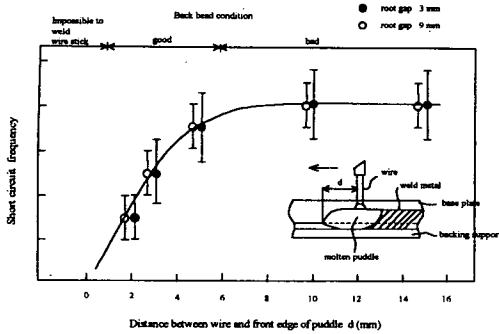


Fig. 6 단락주파수와 와이어 위치와의 상관관계²¹⁾

에 따라 단락주파수가 감소하는 이유는 다음과 같이 추정된다. 즉, 루트간격이 있는 경우 아크 아래 전반부의 모재 측면이 아크에 의해서 용융되어 시편과 아크의 접촉면적이 줄어들게 되고 따라서 전극과 시편의 접촉횟수 즉 단락횟수가 줄어들게 된다. 이러한 경우 용접중에 시편의 밑쪽을 관찰해 보면 아크의 일부가 갭을 통해 빠져나가는 것을 볼 수 있다. 이와 아울러 루트간격이 커짐에 따라 표면비드의 높이는 낮아지고 이면비드의 높이는 높아지게 된다. 따라서 전극과 용융지 사이의 거리는 커지게 되어 전류가 감소하고 아크 유지시간이 길어지게 되어 단락주파수가 감소하게 된다. Fig. 7은 박판재의 맞대기 용접에서 양호한 이면비드를 나타내는 루트간격과 최적 용접속도와와의 관계를 나타내고 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다²²⁾.

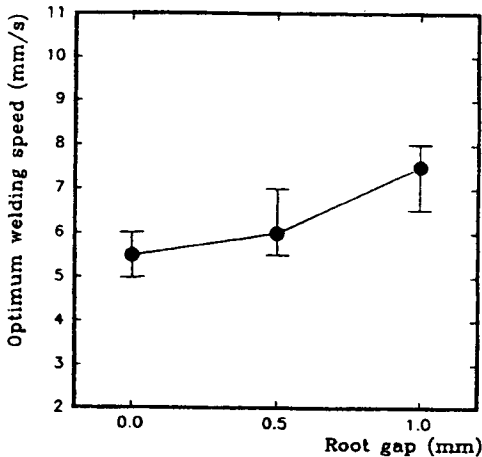


Fig. 7 다양한 갭에서 최적 용접속도²²⁾

$$y = 0.01136x^2 - 1.61741x + 63.05005$$

여기서,

x : 단락주파수 (Hz)

y : 최적의 이면비드를 나타내는 용접속도 (mm/sec)

위의 식과 같은 관계를 이용하면 단락주파수를 측정하므로 루트간격을 추정하고 그에 적절한 용접속도를 출력시킴으로써 양호한 이면비드를 얻을 수 있는 제어시스템을 구축할 수 있게 된다. 이러한 제어시스템을 이용해서 용접부 이면비드를 제어한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보면 루트간격이 0mm에서 1.2mm까지 선형적으로 변함에 따라 적절한 용접속도 범위내의 값을 출력하여 변화하는 루트간격에 대해 용락이 발생하지 않고 완전한 용입이 일어나는 이면비드를 형성함을 볼 수 있다.

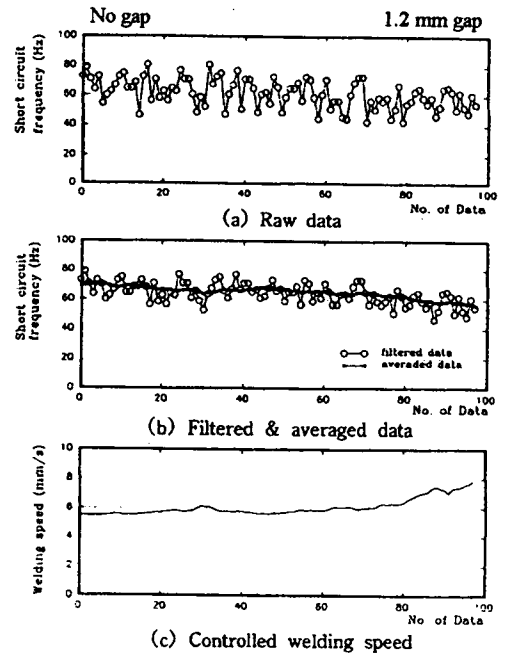


Fig. 8 갭의 증가에 따른 용접속도 제어의 결과²²⁾

4. 아크 안정성 감시

CO₂ 아크용접은 용접부 결함을 일으키지 않고

과다한 스파터가 발생하지 않는 안정된 아크를 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 실제 용접시에는 여러 가지 외란에 의해 지속적인 아크의 안정성을 유지하는 것이 어렵다. 이렇게 용접품질에 영향을 주는 아크의 안정성에 대해 이전에는 주로 용접작업자들의 경험에 의하여 아크의 형상을 관찰하거나 용접중의 발생음을 청취하는 방법과 같이 주관적이고 정성적인 판단에 의해 행해졌다. 그러나 최근에는 아크상태가 직접적으로 반영되는 용접전압 및 전류의 파형분석을 통한 정량적인 평가가 시도되었다. 따라서 본 단원에서는 여러 연구자들에 의해 이루어진 다양한 아크안정을 평가하기 위한 방법에 대해 살펴보기로 한다.

Arai²³⁾ 등은 CO₂ 아크용접의 단락이행에서 아크 전압의 파형을 단락구간과 아크구간으로 나눈 후, 아크구간에 대해 파형분석을 하였는데, 아크시간의 표준편차(σ)를 아크의 안정성과 상관관계를 비교하였다. (그림9). 그림에서 보듯이 아크 안정성은 표준편차값이 증가할 수록 감소함을 보여 아크의 안정성과 표준편차는 반비례의 관계가 있음을 보이고 있다. 이 때 아크의 안정성은 숙련된 작업자의 판단에 의해 결정되었다. 또한 아크시간의 표준편차를 용접전류, 아크전압, 와이어 돌출길이를 표현하여 다중회귀분석을 수행하였으며, 이를 수식으로 표현하면 아래 식으로 정의된다²³⁾. 식에서의 변수들 가운데 특히 아크 전압에 큰 영향을 받는다.

$$\sigma = 0.0351I + 0.966V + 0.116L - 3.43$$

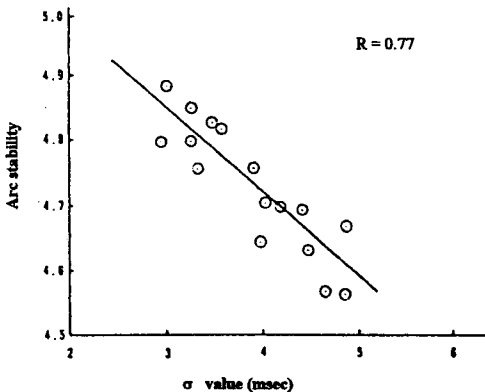


Fig. 9 σ 값과 아크안정성과의 관계²³⁾

σ : 아크시간의 표준편차(msec)

V : 실측 아크전압(V)

I : 용접전류(A)

L : 와이어 돌출길이(mm)

윗식에 의한 표준편차와 실제 측정된 표준편차와의 상관관계가 Fig. 10으로 나타나며이것으로부터 용접조건을 변화시키는 것에 따라 표준편차의 변화를 분석함과 동시에 아크 안정성의 정량평가가 가능하다.

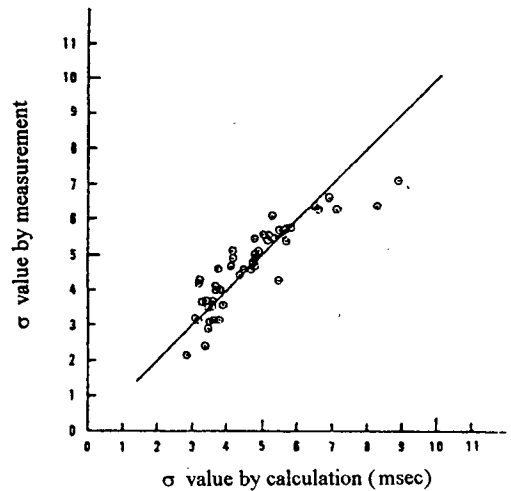


Fig. 10 σ 값의 계산치와 측정치와의 관계²³⁾

Mita²⁴⁾는 용접전류, 전압의 분석을 통해 공정중의 많은 변수들 가운데 아크의 안정성에 크게 영향을 미치는 인자로서 아크단락시간의 표준편차 $s[T_s]$, 아크시간의 표준편차 $s[T_a]$, 아크단락평균전류의 표준편차 $s[\bar{I}_s]$, 아크평균전류의 표준편차 $s[\bar{I}_a]$ 를 이용하여 아크의 안정성을 판단하는 지수(index)를 개발하여 아크 안정성과의 상관관계를 유도하였으며 이를 수식으로 다음과 같이 표현하였다.

$$W = W_a + W_R + W_p$$

$$W_a = \ln \left(\frac{s[T_s]}{1.3} \times \frac{s[T_a]}{3.8} \times \frac{s[\bar{I}_s]}{24} \times \frac{s[\bar{I}_a]}{23.6} \right)$$

$$W_R = 2 \ln \left(\frac{\bar{R}_a}{R_i} \right)$$

$$W_p = \ln \left(\frac{P_a}{P_i} \right)$$

여기서,

Ri : 최적용접조건에서 아크기간동안 평균저항 (Ω)

Ra : 아크기간동안 관찰된 평균저항(Ω)

Pi : 최적용접조건에서 아크기간동안 파워(W)

Pa : 아크기간동안(W)

윗식에서 W_a 는 위의 4개의 변수에 의한 아크의 안전성지수이며 W_R 은 저전압 영역에서 아크가 소멸하는 현상을 나타내는 수정계수이다. 그리고 W_p 는 고전압영역에서 아크가 불안정해지는 현상을 보상하기 위한 수정계수이다. 여기에서도 계산된 아크안정성 지수와 실제 용접공정상의 아크안정성과의 상관관계를 결정하기 위해 계산시 이용된 용접조건하에서 용접을 행했을 경우 아크의 안정성을 숙련자의 판단에 근거하여 결정하였다.

Fig. 11은 용접전류 130A에서 용접전압을 변경시키면서 계산된 아크안정성 지수와 숙련자의 판단에 의한 아크안정성 상관관계를 나타내는 것으로 아크안정지수가 작을수록 아크의 안정성은 가장 양호한 것으로 나타났다.

Liu¹⁾는 용접전압에 따른 용적이행 시간(t_a)의 표준편차를 구하여 t_a 가 가장 작은 편차를 가지는 용접파라미터일 때 가장 짧은 이행구간과 가장 적은 스파터, 가장 좋은 비드 형태를 만든다고 보고하

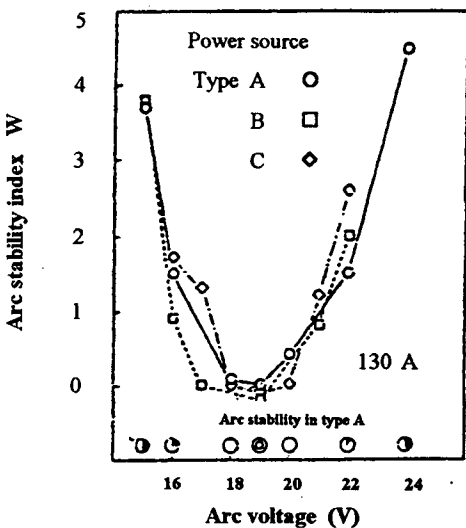


Fig. 11 130A에서 아크안정지수와 아크전압과의 상관관계²⁾

고 있다. 또한 용적이행속도가 이행금속의 크기, 공정의 안정성에 관한 정보를 제공한다는 사실을 고려하여 전류, 전압에 따른 최적의 용적이행속도를 제시하였고(그림12) 이것은 현장 작업에서 안정된 용접조건으로 여겨지는 용접조건과 일치하였다. 이의 Lucas²⁵⁾는 아크의 안정성이 단락시간의 최고 전류치와 단락 주기의 균일성에 의한 것임을 밝혔으며, Kim²⁾등은 아크시간 표준편차와 단락시간 표준편차를 이용한 새로운 파형변수 $[\alpha(T_s)\alpha(T_o)]$ 를 제시하여 스파터의 발생량과의 상관관계를 비교 분석함으로써 아크의 안정성을 평가하였다. 이에 따르면 $[\alpha(T_s)\alpha(T_o)]$ 가 감소 할수록 스파터의 발생량이 선형적으로 감소함을 보였다.

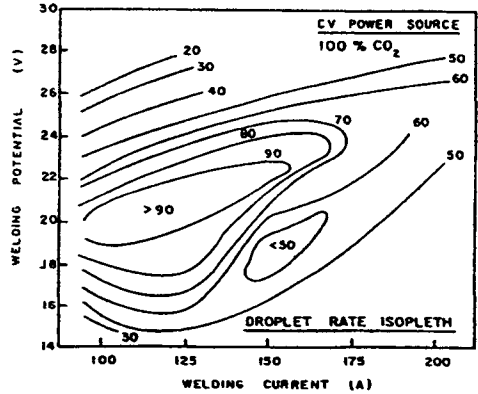


Fig. 12 100% CO₂에서 용적이행속도¹⁾

5. 맺음 말

아크용접은 산업현장에서 가장 많이 사용되는 기본적인 생산 수단이다. 그러나 열악한 작업환경으로 인한 작업기피와 숙련공의 부족 현상은 산업현장에서의 생산성 하락과 품질저하로 이어진다. 따라서 용접공정의 자동화는 필연적으로 이루어져야 할 분야임이 틀림없다. 최근 전자기술의 발달은 이러한 용접공정의 자동화를 촉진시키는 계기가 되었으며, 이러한 기술을 이용해서 용접자동화를 위한 많은 연구가 이루어 졌다. 본 해설에서는 아크용접공정중의 전기적 신호와 용접부의 폭 및 용입, 이면비드 크기와의 관계를 설명하였고, 이를 이용한 감시와 제어의 가능성을 살펴보았다. 또한 용접공정 안정화의 척도인 아크안정성을 위한 지

수를 아크신호로부터 추출하므로써 용접환경에 적응하여 최적의 용접품질을 얻을 수 있는 시스템의 개발이 가능함을 나타내었다. 앞으로 인공지능 응용기술과 신호처리능력의 향상에 따라 아크신호를 이용한 감시 및 제어기술이 용접기술의 고도화에 보다 적극적으로 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. S. Liu and T. A. Siwert : Metal transfer in Gas Metal Welding; Droplet Rate, *Welding Journal*, 70(2), (1981), pp. 52s-58s
2. 김희진, 강봉동, 이강희, 유중돈 : CO₂용접의 단락이행 조건에서 스파터발생과 파형인자와의 관계, *대한용접학회지*, Vol. 16, No. 3, (1998), pp. 223-229
3. T. Araya and S. Saikawa : Recent Activities on Sensing and Adaptive Control of Arc Welding, Proc. the 3rd Int'l Conf. on Trends in Welding Research, Gatinsburg, Tenn., USA, June 1-5, (1992), pp. 833-842
4. Y. H. Xiao : Weld Pool Oscillation during Gas Tungsten Arc Welding, *Welding in the world*, Vol. 31, No. 6, pp. 379-380
5. D. J. Koteck, D. L. Cheever and D. J. Howden, : Mechanism of ripple formation during welding solidification, *Welding Journal*, 51(8), pp. 386s-391s
6. C. D. Sorensen, T. W. Eager : Digital Signal Processing as Diagnostic Tool for Gas Tungsten Arc Welding, Proc. 2nd Int'l Conf. on Trends in Welding Research, Gatinsburg, Tenn., USA, (1989), pp. 467-472
7. H. Maruo, Y. Hirata : Study on pulsed TIG arc welding, *Technology Reports of Osaka University*, 37, (1987), pp. 51-63
8. R. B. Madigan, R. J. Renwick, D. F. Farson, R. W. Richardson : Computer control of full penetration GTA welds using pool oscillation sensing, Proc. 1st Conf. on Computer Technology in Welding, The welding institute, London, (1986), pp. 165-174
9. A. S. Tam, D. E. Hardt : Weld pool impedance for pool geometry measurement: stationary and nonstationary pool, *Journal of Dynamic systems, Measurement and Control*, ASME, Vol. 111, pp. 545-553
10. R. J. Renwick, R. W. Richardson : Experimental investigation of GTA weld pool oscillation, *Welding Journal*, 62(2), (1981), pp. 29s-35s
11. 이세현 : 아크용접에 있어서의 아크의 특성과 응용, *대한용접학회지*, Vol. 10, No. 1, (1992), pp. 7-11
12. C. D. Yoo and R. W. Richardson : An Experimental study on sensitivity and signal characteristic of weld pool oscillation, *Transaction of the Japan Welding Society*, Vol. 24, No. 2, (1993), pp. 54-62
13. R. T. Deam : Weld pool frequency: A new way to define a weld process, Proc. 2nd Intern. Conf. on Trends in Welding Research, Gatinsburg, Tenn., USA, (1989), pp. 967-971
14. Y. H. Xiao, G. D. Ouden : Weld Pool Oscillation during GTA Welding Mild Steel, *Welding Journal*, 74(8), (1993), pp. 428s-434s
15. Y. H. Xiao, G. D. Ouden : A Study of GTA Weld Pool Oscillation, *Welding Journal*, 71(8), (1990), pp. 289s-293s
16. Y. H. Xiao, G. D. Ouden : Sensing GTA weld pool geometry by arc voltage signal processing, *Welding & Metal Fabrication*, No1, (1996),
17. Y. Suga : Penetration Control in Welding of Thin Plate by Detecting Oscillation of Molten Pool, *Automation Technology of Arc Welding* published by Japan Welding Society, 1996, II43-II48
18. A. F. Manz : The One-Knob Welder, *Welding Journal*, 47(9), (1968), pp. 720-725
19. H. Wakanatsu, A. Ioch, K. Wakanatu, H.

- Nomura and Y. Sato : Development and Application of Sensors and Sensor systems for Arc Welding in Japan(part2), IIW Doc, (1996), XII-962-86
20. K. J. Matthes and W. Renatus : Automating the MAG welding of butt joints, schweisstechnik(Berlin), Vol. 36, No. 12, (1986), pp. 536-538
21. Y. Kitazawa, Y. Nagai and T. watanabe : Through the Arc Sensing System for GMA One Side Welding, IIW Doc, (1986), XII-931-86
22. 안재현, 김재웅 : 박판 GMA용접에서 단락주 파수를 이용한 이면비드의 제어에 관한 연구, 대한용접학회지, Vol. 13, No. 4, (1995), pp. 75-84
23. Arai, et. al. : The investigation for Arc Phenomena by means of a computer, Quarterly Journal of Japan Welding Society, Vol. 1, No. 3, (1983), pp. 15-20
24. T. Mita, et. al. : Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Shielded Arc Welding, Welding International, No. 2, (1988), pp. 152-159
25. W. Lucas : Microcomputer System, Software and Expert System for Welding Engineering, Welding Journal, 56(4), (1989), pp. 19-30