

특 집 : 자동차 제조에서의 용접기술 동향

자동차 산업의 아크용접 품질향상을 위한 파형분석 기술

조 상 명

Waveform Analysis for Quality Improvement of Arc Welding in Automobile Industries

Sang-Myung, Cho

1. 서 론

자동차 산업에서 아크용접을 적용하는 경우는 거의 대부분이 GMAW로서 솔리드 와이어를 사용한다. 솔리드 와이어는 플럭스코어드 와이어에 비하여 아크 안정성이 그다지 우수하지 못하고 스파터도 많이 발생하는 경향이 있지만 슬래그가 거의 없고 환경이 청정하며 와이어 송급성이 우수한 장점이 있어서 자동용접과 로봇용접에 주로 적용되고 있다. 그러나 기술적으로는 어떤 인버터 용접기를 어떻게 사용하고 공정 인자를 어떻게 관리하느냐에 따라 스파터 발생량이 현저하게 다르며, 아크 안정성도 크게 다른 것이 현 실정이다.

한편, 자동차 조립 산업 및 부품 산업에서 아크용접 적용 실태를 보면 대부분 박판에 짧은 용접시간 동안 짧은 비드로 용접하는 경우가 많다. 용접자세는 아래보기 자세 또는 수평 필릿자세로 용접하는 것이 일반적이다. 또한 용접 이음부는 무엇보다도 겹치기 이음이 많고 가끔 맞대기 이음과 필릿이음도 있는 실정이다.

따라서 여기서는 짧은 비드를 용접할 때 불량 발생에 가장 큰 영향을 미치는 아크 개시 실패에 대하여 집중적으로 취급하기로 한다. 근래에는 용접 스파터를 줄이고 비드 외관을 개선할 목적으로 실드가스로서 20%CO₂+80%Ar를 적용하는 MAG용접을 많이 도입하고 있지만 그 와이어를 선택할 때 기술적으로 고려해야 하는 사항에 대해서도 언급하기로 한다. 그리고 국내에서 선도적으로 적용되고 있는 아크 용접 공정의 인라인 품질 모니터링 시스템에 대하여 기술하고 여러 용접점 중 불량 용접 부위를 어떻게 표현하는지에 대하여 살펴보고 6시그마의 적용 방법에 대하여도 언급하기로 한다.

2. 짧은 비드 용접에 중요한 아크 개시 특성

2.1 아크 개시 실패의 2가지 유형

아크 개시 특성은 크게 정상적인 아크 개시와 아크

개시 실패로 구분할 수가 있고 여기서는 주로 아크 개시 실패에 초점을 맞추어서 설명하고자 한다.

Fig. 1 (a) (b)는 두 종류의 아크 개시 실패 사례를 보인 것으로서 그 정의는 다음과 같다.

- 1) Sticking : 아크 개시 직후 아크길이가 지나치게 짧아져서 장기단락을 하게 되어 아크가 끊기는 현상
- 2) Burn back : 아크 개시 직후 아크길이가 과대하게 길어져서 아크가 끊기는 현상

2.1.1 스티킹으로 인한 아크 개시 실패의 특징

Fig. 2는 전형적인 스티킹으로 인한 아크 개시 실패 사례를 보인 파형이다. 아크 개시 직후에 전압파형을 보면 단락을 하였기 때문에 전압이 낮아진 상태에서 약 30msec정도의 긴 시간 동안 단락해 있는 동안에도 단락이 해소되지 못하고 아크가 재점화 되지 못한 상태이기 때문에 결국에는 스티킹이 생기면서 아크가 끊기게 된다.

스티킹으로 인한 아크 개시 실패는 저전류 영역에서 더 자주 발생하며 그 원인은 다음과 같다.

- 높은 Slow down 속도
- 짧은 Slow down 시간

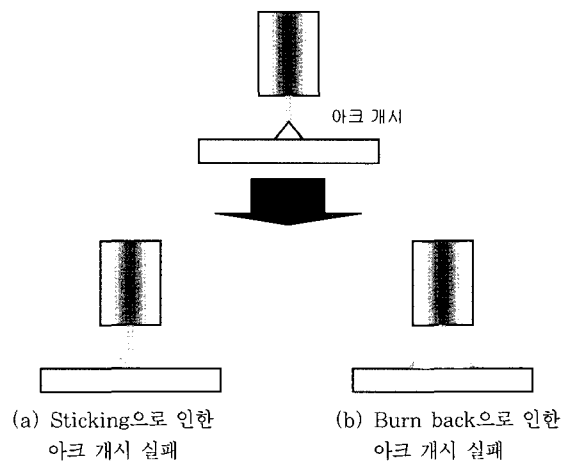


Fig. 1 아크 개시 실패의 대표적인 2종류 현상

- 과도한 용구 또는 용구 표면에 형성된 심한 산화물
- 낮은 아크 개시 전류 (특히 저전류 용접 영역) : Fig. 2의 경우에는 낮은 아크 개시 전류가 원인임.

2.1.2 번 백으로 인한 아크 개시 실패의 특징

Fig. 3은 번 백으로 인한 아크 개시 실패의 전형적인 출력 파형을 보인 것이다. 그림의 전압 파형에서 보면 무부하 전압에서 아크 개시 순간에 전압이 감소한 직후에 단락전압까지 감소하지 않고 바로 높은 아크 전압 상태를 유지하다가 점점 아크 전압이 높아지고 전류는 감소하면서 결국에는 아크가 끊기게 된다.

번 백으로 인한 아크 개시 실패는 고전류 영역에서 더 자주 발생하며 그 원인은 다음과 같다.

- 컨택팁 구멍막힘에 의한 와이어 송급 지연 : 불규칙적인 아크 개시 실패에 대한 원인으로 됨.
- 늦은 Slow down 속도 : Fig. 3의 경우는 130cpm 정도의 늦은 Slow down속도가 직접적인 원인임.
- 긴 Slow down 시간 : Fig. 3의 경우는 긴 Slow down시간도 직접적인 원인으로 될 수 있음.
- 과도한 스타트 전류(특히 대전류 영역)

2.2 아크 개시 특성에 미치는 각종 인자의 영향

2.2.1 아크 개시 특성에 미치는 초기 아크 개시 전류의 영향

Fig. 4는 초기 아크 개시 전류(Hot voltage)를 변화시켰을 때의 초기 아크길이의 변화를 나타낸 것으로서 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- 초기 아크 개시 전류가 낮을수록 와이어가 천천히 용융어 아크길이는 비교적 짧게 형성된다.

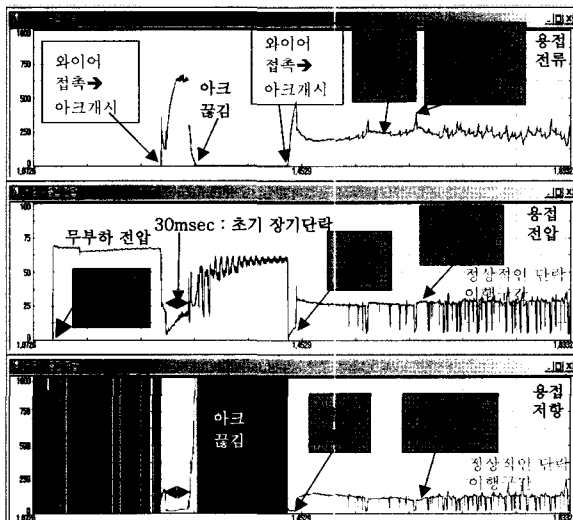


Fig. 2 아크 개시 직후의 초기 장기단락으로 인한 아크 개시 실패 파형

- 초기 아크 개시 전류가 높을수록 와이어가 빨리 용융되어 아크길이는 비교적 길게 형성된다.

Fig. 5는 초기 아크 개시 전류를 low로 설정했을 경우의 용접 전류, 전압 및 아크 저항 모니터링 파형으로서 I_{mi} 와 R_m 는 다음과 같이 나타났다.

I_{mi} (초기 전류 최대값) : 420A

R_m (아크저항 최대값) : 230mΩ

Fig. 6은 초기 아크 개시 전류를 medium으로 설정했을 경우의 용접 전류, 전압 및 아크 저항 모니터링 파형으로서 I_{mi} 와 R_m 는 다음과 같이 나타났다.

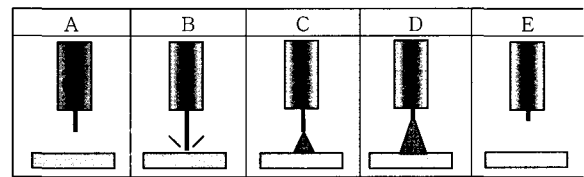
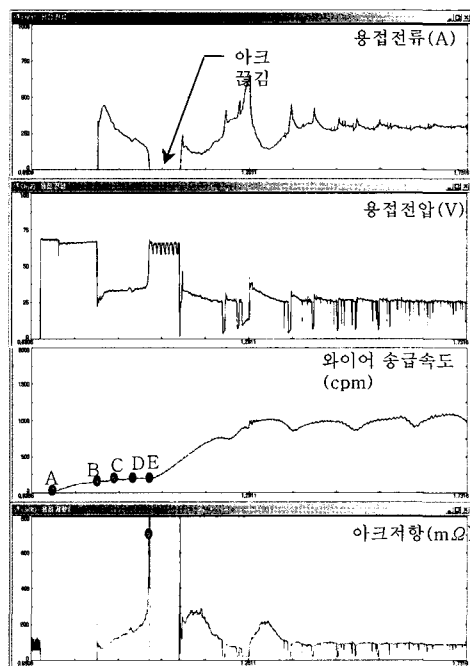
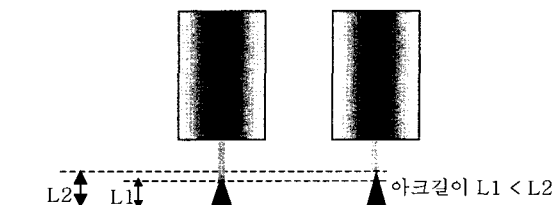


Fig. 3 아크 개시 직후 아크 길이 과대로 인한 Burn back형 아크 개시 실패



(a) 초기 아크 개시 전류 : 낮음 (b) 초기 아크 개시 전류 : 높음

Fig. 4 초기 아크 개시 전류에 따른 초기 아크길이의 변화

I_{mi} (초기 전류 최대값) : 530A
 R_m (아크저항 최대값) : 282m Ω

초기 아크 개시 전류를 low로 설정했을 때보다는 초기전류의 최대값이 증가하여 초기의 아크 길이가 더 길어져서 아크저항의 최대값이 증가해 있음을 볼 수 있다. 이런 현상은 전류파형과 전압파형만을 보아도 알 수가 있지만 역시 저항파형에서 보다 현저하게 나타나고 있다.

Fig. 7은 초기 아크 개시 전류를 high로 설정했을 경우의 용접 전류, 전압 및 아크 저항 모니터링 파형으로서 전형적인 번 백에 의한 아크 끊김으로 분류되며

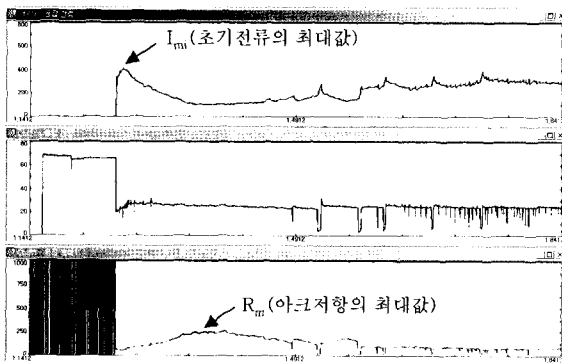


Fig. 5 초기 아크 개시 전류가 Low 일 때의 모니터링 파형

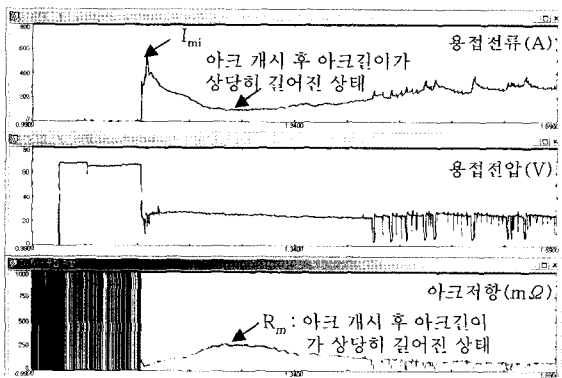


Fig. 6 초기 아크 개시 전류 Medium 일 때의 모니터링 파형

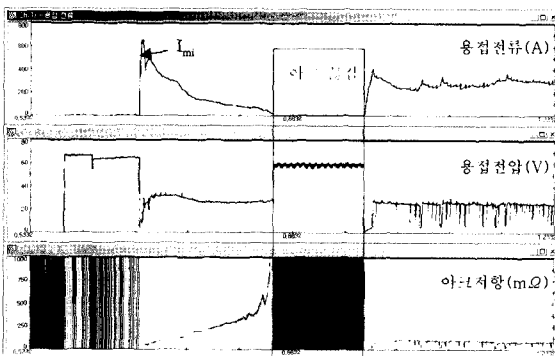


Fig. 7 초기 아크 개시 전류 High 일 때의 모니터링 파형

I_{mi} 와 R_m 는 다음과 같이 나타났다.

I_{mi} (초기 전류 최대값) : 665A
 R_m (아크저항 최대값) : ∞ (아크 끊김)

초기 아크 개시 전류를 High로 설정하면 아크 길이가 과대하게 길어져서 아크가 끊기게 되었다. 전압 파형에서 최초의 단락 이후 아크가 재점호 된 상태에서 아크길이가 계속해서 길어지게 됨에 따라 더 이상 단락은 발생하지 않고 전류가 감소한다. 아크길이가 계속 증가하므로 전류는 계속 감소하고 아크저항은 증가하다가 아크가 끊기면 급작스럽게 커지지만 전압은 거의 일정하게 유지되는 것은 역시 정전압 특성의 용접기이기 때문이다. 그러나 아크가 끊기면 무부하 전압이 걸리면 다시 아크를 발생시킬 준비를 하는 것이다. 두 번째 아크가 발생될 때는 개시 전류가 비교적 낮았기 때문에 아크 개시도 안정적으로 되었다.

2.2.2 아크 개시 특성에 미치는 와이어 Slow down 속도의 영향

- Slow down 속도 : 용접 신호가 들어오면 와이어가 모재와 접촉하기 위하여 천천히 내려오는 속도

Fig. 8은 와이어 Slow down에 대하여 나타낸 그림으로서 와이어가 모재와 접촉하기까지의 속도와 접촉 직후 아크가 생겨서 아크길이가 점차 길어지면서 정상 길이까지 커질 때까지 와이어는 천천히 송급되어야 한다.

Fig. 9에서 볼 수 있는 것과 같이 본 용접 전류가 높고 와이어 송급속도가 빠를 때는 초기의 Slow down속도가 너무 늦을 경우 아크 개시 직후에 아크길이가 과대해져서 아크가 끊기는 수가 자주 있다. 이 경우도 전형적인 번 백형 아크 개시 실패이다. Fig. 10은 Fig. 9의 파형에서 표기한 순간에 해당하는 아크 상태를 모식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 11은 와이어 Slow down 속도를 fast로 설정하여 초기의 Slow down속도가 320cm/min의 속도로 송급되었고 이 속도는 slow로 둔 상태에 비하여 2배 이상의 빠른 상태로 초기 와이어가 송급된다. 따라서 아크 개시 직후 와이어가 Slow down속도에서 정상속

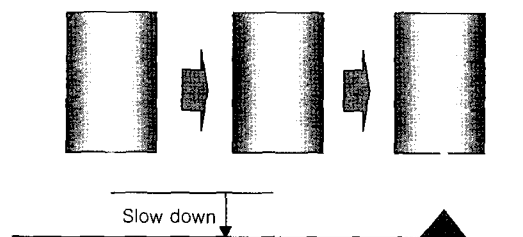


Fig. 8 와이어 Slow down의 정의

도로 증가하기 시작한 직후에 '아크길이'가 가장 길어져서 불안하기는 했지만 정상적으로 아크 개시가 이루어졌다.

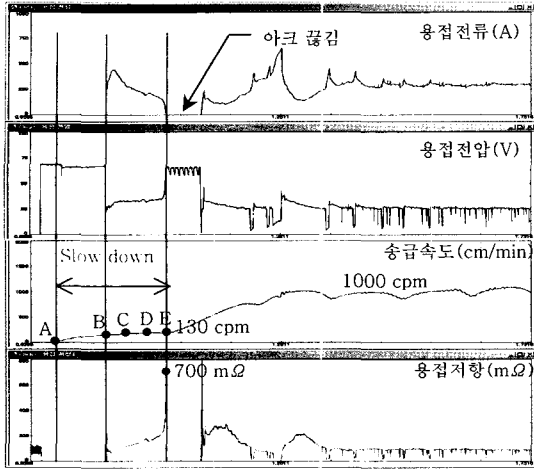


Fig. 9 Slow down 속도가 slow 일 때의 모니터링 파형 (Slow down 속도 : 130cm/min)

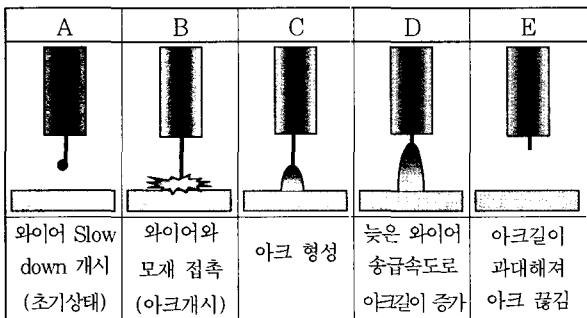


Fig. 10 와이어 Slow down시의 아크 길이 변화와 아크 끊김

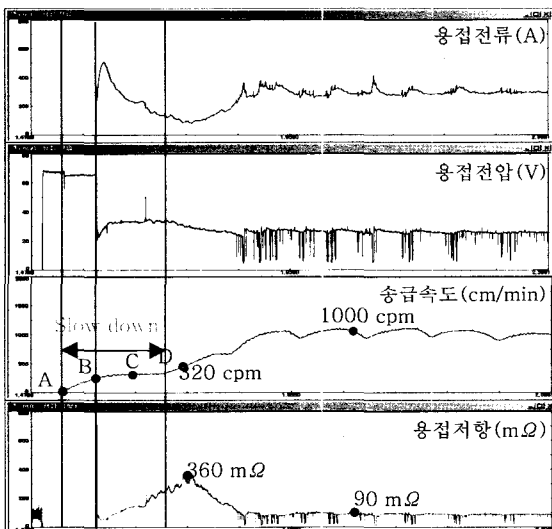


Fig. 11 Slow down 속도가 fast 일 때의 모니터링 파형 (Slow down 속도 : 320cm/min)

2.2.3 아크 개시 특성에 미치는 와이어 끝 용구크기의 영향

Fig. 12는 용구크기 수준 설정에 따른 용구 형상의 변화를 보여주는 것으로서 'high'로 갈수록 용구 크기가 커짐을 알 수 있다. 용구크기는 아크 종료시에 파형제어를 하여 설정해주는 것으로서 용접기에 따라서 그 크기가 안정적으로 형성되지 않는 경우도 있으나 그 크기에 따라 아크 개시 특성이 지배된다.

Fig. 13은 용구크기 수준을 low로 설정하여 형성된 작은 용구를 가진 상태에서 아크 개시를 한 것으로서 초기 개시 전류가 높아서 약간 아크길이가 커지는 했지만 정상적인 아크 개시가 이루어졌다.

Fig. 14는 용구크기 수준을 high로 설정하여 용구가 가장 크게 형성되도록 하여 아크 개시를 하였을 때의 파형으로서 전형적인 스티킹에 의한 아크 개시 실패가 생겼다. 이것이 스티킹인 것을 알 수 있는 것은 전압 파형을 보면 단락상태에서 아크가 재점화 되면서 바로 무부하 전압이 걸리면서 끊어지는 파형을 보면 알 수가 있다. Fig. 14에서 아크 개시 실패가 된 원인으로서는 용구가 크게 된 것도 들 수 있지만 초기 개시 전류가 Fig. 13보다 낮게 걸렸던 것도 들 수가 있다. 따라서 용구의 크기와 초기의 아크 개시 전류는 적절한 상관 관계를 가져야만 성공적인 아크 개시가 이루어진다. 즉

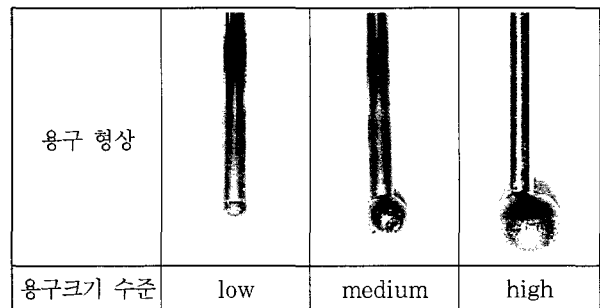


Fig. 12 용구크기 수준 설정에 따른 용구 형상의 변화

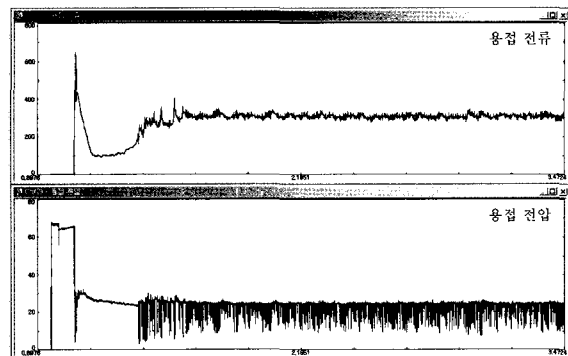


Fig. 13 용구크기 수준 'low'일 때의 용접 전류 및 전압 모니터링 파형

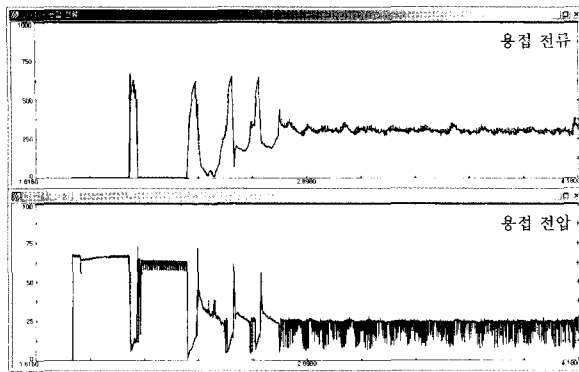


Fig. 14 용구크기 수준 'high'일 때의 용접 전류 및 전압 모니터링 파형

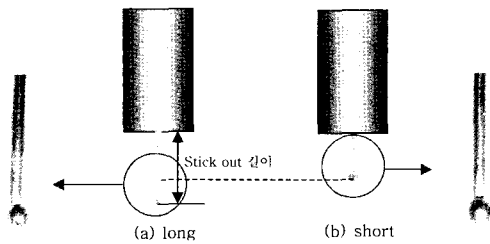


Fig. 15 Stick out의 정의

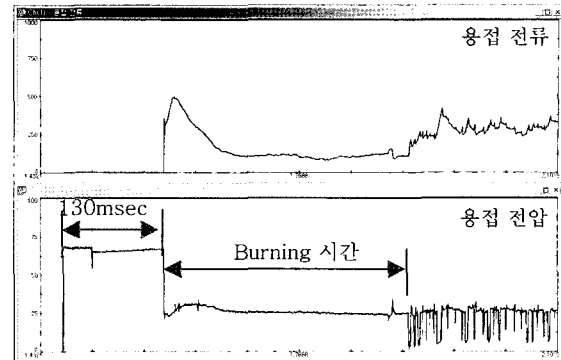
용구 크기가 작으면 초기 아크 개시 전류는 적당히 낮아야 되고 용구 크기가 크면 초기 아크 개시 전류가 높아야만 성공적인 아크 개시가 가능해진다.

2.2.4 아크 개시 특성에 미치는 와이어 Stick out의 영향

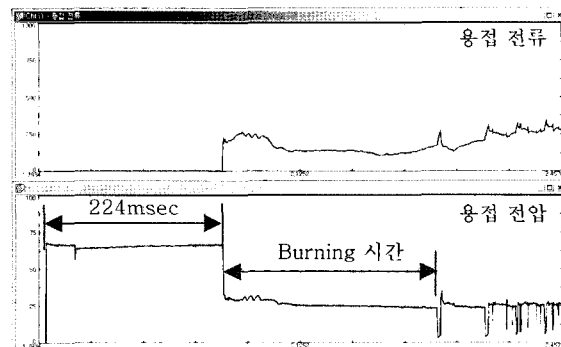
Stick out : 용접 종료 후 콘택팁 끝에서 돌출되어 나온 와이어의 길이

Fig. 15에서 보여지듯이 Stick out이 'short'로 되면 Stick out 길이가 짧아지고 용구크기는 어느 정도 커짐을 알 수 있다.

Fig. 16(a) (b)는 Stick out변화에 따른 무부하 전압 시간의 변화를 나타낸 것으로서 Stick out길이가 짧아짐에 따라 와이어와 모재가 접촉하는데 걸리는 시간이 길어져서 무부하 전압이 길게 걸리는 것을 알 수 있다. 또한 (a)에서와 같이 Stick out이 "long"으로 되어 있으면 와이어가 천천히 공급되는 시간이 길어지기 때문에 아크 개시 후 Burning 시간이 길어져서 번백으로 인해 아크가 끊길 수 있고, 초기 개시 전류가 커지는 경우도 번 백으로 인한 아크 끊김이 자주 생길 수 있는 위험성이 있다. 즉 공정이 불안정한 상태로 될 수 있다. 따라서 와이어 Slow down 시간이 너무 길게 설정되었거나 Slow down 속도가 너무 늦어서 아크 개시 때 번 백이 자주 생기는 경우는 이 Stick out을 짧



(a) Stick out "long"



(b) Stick out "short"

Fig. 16 Stick out변화에 따른 무부하 전압 시간의 변화

게 하여 무부하 전압이 걸리는 시간이 길게 하면 개선이 될 수 있다. 반면에 아크 개시 때 스티킹이 자주 생기면 Stick out을 "long"으로 두는 것이 유리하다.

3. 저전류 영역 MAG용접에서의 스파터 발생에 미치는 솔리드 와이어 종류의 영향

자동차의 조립공정과 부품 생산 공정에서는 주로 저전류 단락이행 GMAW를 실시하고 있으며 용접 방법은 주로 기계화된 자동용접 또는 로봇용접이 적용되고 있다. 따라서 용접 재료가 품질과 생산성에 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있으나 국내의 산업 현장에서는 아직 와이어를 엄격하게 구분하여 사용하지 않는 예를 자주 볼 수 있어서 여기서는 그 특성에 대하여 검토하였다.

Table 1은 화학도금한 YGW 12 와이어와 전기도금한 YGW 16 와이어를 썼을 때 송급특성과 통전특성을 비교하기 위해 행한 실험의 결과이다. 용접 케이블은 똑같이 직경300mm로 한바퀴 감아서 송급시에 마찰저항이 생기도록 하였다. YGW 16쪽이 평균전류가 높고 단락시간비가 높게 나타난 것은 와이어 송급 저항이 작아서 와이어가 부드럽게 잘 송급되었기 때문에 나타난 결과인 것으로 판단된다.

Table 1 화학도금한 YGW12와 전기도금한 YGW16의 비교(300D 1turn)

와이어 종류	용도	동 도금방법	설정조건		출력상태		
			전류	전압	전류	전압	단락 시간비
YGW 12	저전류 단락이행 CO ₂ 용접용	화학도금	250A	25V	258A	26.3V	2.55%
YGW 16	저전류 단락이행 MAG 용접용	전기도금	250A	25V	266A	25.5V	4.55%

Table 2 고속MAG 용접에서 와이어에 따른 스패터 발생 특성 비교

스패터 \ 와이어	YGW 12	YGW 16
대립	13.8g(11.2%)	4.6g(7.6%)
소립	109.8g(88.8%)	55.8g(92.4%)
Total	123.6g	60.4g
g/min	5.15	2.51

(3t Lap joint, 290A 설정, 24V설정, 용접속도190cpm, 2토치 100개 생산)

Table 2는 3t두께의 강판을 겹치기 용접하는 공정에서 용접속도를 190cpm으로 높은 상태에서 MAG용접을 하여 제품을 생산한 경우에 설정전류 290A, 설정전압 24V로 100개의 제품을 생산했을 때 현장에서 포집한 스패터를 정리하여 보인 것이다. 전류가 높음에도 불구하고 용접속도가 매우 높은 고속용접이므로 전압을 높게 하면 언더컷과 험핑비드로 인해 생산이 불가능하므로 전압을 낮추어서 상당한 단락이 생기도록 하여 생산하는 특수한 공정이었다. Table 2에서 보면 전체적으로 스패터가 많이 발생하였지만, YGW 16와이어를 적용한 경우가 스패터는 거의 반의 수준으로 낮아지는 경향을 보였다. 비교적 높은 전류영역이지만 실제로 고속 MAG용접을 하므로 거의 단락이행으로 용접하였기 때문에 와이어는 단락이행용을 적용하게 되었다.

결과적으로 MAG용접에는 MAG용접용 와이어가 유리하며 특히 표면의 동 도금층도 화학도금보다는 전기도금으로 생산한 것이 마찰저항이 적고 송급 안정성을 높일 수 있으며 스패터도 현저히 감소함을 알 수 있었다. 또한 Si, Mn이 적게 포함된 YGW 16에 의한 용접비드 표면에는 산화물이 적게 형성되므로 작업현장이 보다 청결하며 비드 외관도 미려한 것으로 드러났다.

4. 자동차 산업에서의 로봇용접 인라인 품질 모니터링 기술의 현황

Fig. 17은 자동차 부품 조립 현장의 로봇용접 공정

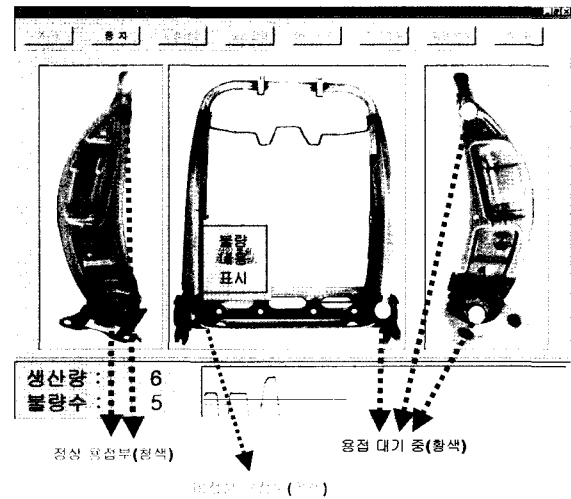


Fig. 17 자동차 부품 조립 현장의 로봇용접 공정에서의 인라인 품질 모니터링 시스템 화면 (6개 용접부 표시)

에서의 인라인 품질 모니터링 시스템 화면을 보인 것으로서 6곳의 용접부를 표시하고 있다. 실제 생산하는 제품의 사진을 입력하여 용접부위를 표시하여 도면에 익숙하지 않은 작업자나 경영자도 쉽게 눈으로 확인할 수 있게 고안한 시스템이다. PC에서 작동되고 LAN으로 연결되어 있는 이 시스템은 국내에서 개발되어 국내의 다국적 기업에서 사용 중이다. 각 용접부의 위치 정보, 용접조건 및 품질 평가 Spec.은 사전에 입력해둔다. 특히 각 용접부는 다음과 같은 정보를 화면에 색깔로 나타내어 눈으로 쉽게 공정상태와 품질 상태를 확인할 수 있도록 되어 있다.

- 용접전의 용접부 : 노란색
- 정상 용접 완료된 용접부 : 청색
- 비정상적 용접된 부분 : 적색(비정상으로 된 인자의 내용 표시 창)

각 용접부에는 번호가 부여되어서 매 순간에 용접중인 부위를 알 수 있으며, 용접중인 부위의 공정 인자를 파형의 형태로 직접 하부의 보조창에 나타내도록 구성되어 있다. 특정부위에 불량률이 자주 발생하거나 용접누락부분의 식별이 용이하도록 구성되어 있다. 각 용접부의 품질 평가를 위한 상하한 Spec.의 결정은 기본적

으로 6시그마를 적용하여 할 수 있도록 되어 있으며 용접이 끝나면 관련 데이터는 데이터 베이스의 형태로 저장되어 각종 통계처리가 가능하다.

Fig. 18은 자동차 부품 조립 현장 로봇용접 공정에서의 용접 품질에 영향을 미치는 CTP(Critical To Process) 즉 전류, 전압, 입열량 및 단락비 등에 대한 공정능력지수를 평가하기 위한 히스토그램을 보인 것이다. 각 용접부별로 품질 평가 Spec.의 상하한치를 사전에 결정하여 두고 계속된 데이터를 축적하여 정기적으로 공정능력을 평가함으로써 불합리한 부분을 쉽게 찾아내고 Process Innovation을 해야 할 용접 부위가 어디인지를 신속하게 파악하여 개선 목표를 합리적으로 설정할 수 있도록 개발된 것이다.

이와 같이 용접품질에 영향을 미치는 공정인자들에 대한 공정능력을 정기적으로 평가해보면 관리상의 문제점과 용접 기술상의 문제점을 쉽게 발견할 수 있고 항상 최상의 공정을 유지할 수 있는 기본 체제를 가지게 되는 것이다.

생산하는 모델이 변경되면 모재와 용접이음부의 특성을 고려하고 설계도면과 사진을 참고하여 용접 부위를 표시하고, 주요 공정 인자의 상하한 Spec.을 결정해야만 얻어지는 공정인자 데이터를 이용하여 공정능력지수를 계산할 수 있게 된다.

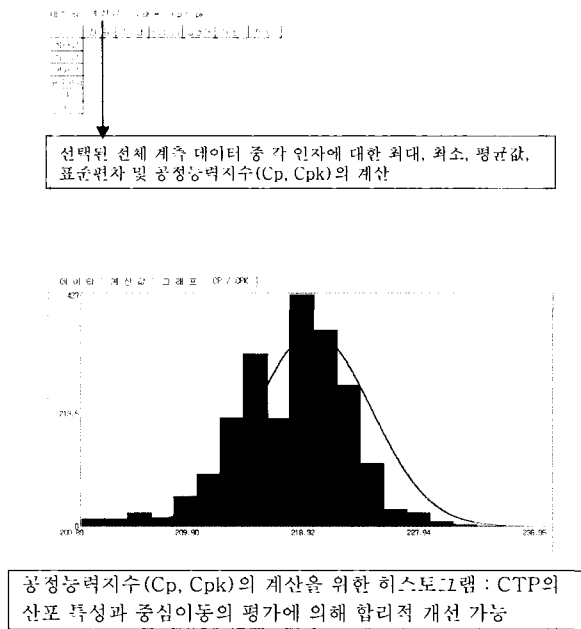


Fig. 18 자동차 부품 조립 현장 로봇용접 공정에서의 전류, 전압, 입열량 및 단락비 등에 대한 공정능력지수의 평가(각 용접부별로 계산)


5. 결 론

국내의 자동차 산업이나 자동차 부품산업의 국제 경쟁력은 계속적으로 높아지고 있는 것이 최근의 추세이다. 이러한 국제 경쟁력 향상에 박차를 가하도록 하기 위해서는 용접공학 분야에서도 기술적으로 기여할 수 있는 분위기가 형성되어야 하고 더 나아가서는 선진국의 용접 생산성과 품질을 능가하는 것이 요구되는 시점이다.

자동용접이나 로봇용접을 적용하는 여러 현장에 있어서 용접속도는 수 배 이상의 차이를 보이기는 힘들지만, 용접 불량률을 보면 수 배에서 수십 배 이상의 차이도 흔히 볼 수 있다. 생산성에서의 차이보다는 품질 불량률의 차이가 더욱 현저하다고 하는 것은 역시 고도의 기술과 전문지식이 어떻게 현장에 접목되었으며, 품질 관리를 위하여 어떤 방법과 장치가 동원되고 있는가가 중요한 것으로 판단된다. 품질이 우수해야만 고객으로부터 신뢰를 얻을 수 있고, 제품의 품위도 높일 수가 있으며 이러한 방향만이 고급 시장을 지배할 수 있는 길이며 이 길이 2만 불의 시대로 가는 길이 될 것이다.

우리나라의 용접 현장에도 이제는 IT의 접목이 본격적으로 이루어지고 있고 부분적으로는 선진국을 능가하는 기술적 사례도 엿볼 수가 있다.

또한 최근에는 용접분야에도 본격적으로 6시그마를 접목하는 추세가 나타나고 있다. 용접분야에 6시그마를 제대로 적용하려면 용접 전문지식이 반드시 필요하다. 즉, 품질에 영향을 미치는 공정인자의 설정을 위해서는 상당한 전문지식이 요구되고 그 데이터의 획득을 위해서는 아크 모니터링 시스템과 같은 디지털 장비들이 필요하다. 그러나 이러한 기술적 수준은 세계 어느 나라보다도 선두적인 입장에서 개발되어 다양한 현장에 접목되고 있어서 용접분야에서의 6시그마의 적용은 세계에서 한국이 가장 앞서 갈 수 있을 것으로 보인다. 이미 일부의 대기업 용접현장에서는 외국 생산설비를 도입할 당시에는 용접품질 수준이 뒤쳐져 있었지만, 최근 6시그마와 In-line 품질 감시 시스템을 설치하고 나서는 품질수준이 오히려 외국보다 앞서게 된 사례들도 나타나고 있어서 한국 내에서 전통산업+IT의 성공적인 분야로서 용접산업이 거론 되기를 기대한다.



- 조상명(趙相明)
- 1955년생
- 부경대학교 신소재공학부
- 소재프로세스공학전공
- e-mail: pnwcho@mail.pknu.ac.kr