

아크용접 품질 모니터링 기술의 동향

조상명 · 최규원 · 이광원

Trends of Monitoring Technology for the Arc Welding Quality

Sang-Myung Cho, Kyu-Won Choi and Kwang-Won Lee

1. 서 언

용접분야에서도 이제는 용접이 가능한가 어떤가의 여부보다는 품질과 생산성이 기업의 부가가치 창출에 있어서 중요한 요소로 대두되고 있다. 특히 최근의 용접 현장에는 각종 자동설비와 로봇은 물론이고, 컴퓨터를 직접 적용하는 추세에 있어서 이와 관련된 응용 기술의 발전이 주목된다. 즉 하드웨어인 자동설비와 로봇을 최대한 효율적으로 활용하여 생산성과 품질을 향상시키기 위해서는 그것을 운용하는 용접관련 중견 기술자들의 역할과 용접생산을 위한 각종 소프트웨어의 응용이 효과적으로 되어야 한다^{1,2)}.

특히 자동 생산 설비나 로봇을 써서 생산할 경우에는 작업자가 직접 현장에서 용접 품질을 감시하고 있지 못하기 때문에 품질의 자동 감시 즉 품질 모니터링의 중요성이 점차 강조되고 있는 실정이다^{1,2)}. 또한 제조물 책임보험(PL)의 확대적용에 따라 정상적인 용접 품질이 얻어지고 있다고 하는 것과 정상적인 공정에 의하여 제품이 용접되었다고 하는 것을 기록으로 남기게 되는 것이 점차 중요하게 되었다.

수동용접이나 반자동용접을 주로 하는 공정에서는 용접 작업자의 기량시험을 통과하는 사람에게 자격을 부여하여 그 작업자와 용접 품질을 연관시켜 신뢰하는 체제로 되어 있었다. 따라서 기능위주의 생산 방식에서는 작업자가 용접용 실드가스가 좀 이상한지, 컨택 팁이 약간 막혔는지 또는 루트간격이 약간 커졌는지 등의 공정 불안정 요인을 직접 관찰하고 있어서 품질이 작업자의 손 끝에 가장 크게 의존하게 되었던 것이다. 그러나 자동용접 생산 현장에서는 정전이나 냉각수 차단 등과 같은 근본적인 문제는 당연히 감시되어야 하겠지만, 생산이 정상적으로 이루어지고 있는 때

라도 공정변수가 불안정하다면 불량 발생률은 높게 되어 전체적인 품질 손실은 커지게 될 것이다.

본 특집호에서는 이러한 용접 분야의 환경 변화를 고려하여 최근에 점차 중요시 되고 있는 용접중에 품질을 순간적으로 모니터링하는 기술에 대하여 취급하였다.

2. 아크용접에서의 품질과 그 영향 인자

아크용접을 실시하여 얻어지는 용접관련 품질은 여러 가지로 구분할 수 있겠지만, 다음과 같이 용접부 형상이나 결합과 관련된 항목들의 정량적 특성에 따라 평가될 것이다³⁾.

- 비드 외관 관련 품질 : 비드폭, 비드높이, 오버랩, 언더컷, 스파터 등
- 용입형상 또는 용융상태 관련 품질 : 용입불량, 용락, 융합불량 등
- 균열 관련 품질 : 저온균열, 고온균열 등
- 이물질 혼입 관련 품질 : 기공, 피트, 슬랙 혼입, 텅스텐 혼입 등
- 용접부 기계적 성질 관련 품질 : 연화, 취화, 경화 등
- 용접구조물의 형상과 강도 관련 품질 : 변형, 잔류응력 등

한편, 상기와 같이 용접 품질의 중요한 척도로 될 수 있는 각종 형상 또는 결합의 형성은 용접전후에 취하는 그루브의 준비, 용접봉의 건조, 모재의 예열과 후열 등과 같은 조치사항에 따라서도 크게 영향을 받지만, 용접중에 변할 수 있는 각종 품질 영향 인자 즉 전류, 전압, 저항, 단락주파수(또는 단락시간비) 및 와이어 송급속도 등과 같은 용접 공정 변수의 영향을 보다 직접적으로 받게 된다.

특히 용접전에 취해야 하는 각종 준비상태가 불량하거나, 용접중의 관리상태가 불량해지면 공정 변수가 불안정해지면서 품질 불량이 발생하게 되는 특징이 있다. 따라서 최근에는 컴퓨터에 의한 용접공정 변수의 모니터링 기술과 품질 평가 알고리즘을 개발하기 위한 다양한 시도가 보고되고 있어서 이하에서는 여기에 관련된 기술적 자료를 다루었다.

3. 용접품질 평가를 위한 공정변수의 모니터링 기술

3.1 공정변수 불안정의 모니터링과 품질불량 발생 사례

3.1.1 피복아크용접에서의 아크 불안정과 기공 발생

Fig.1은 저수소계 용접봉(KS E4316)을 써서 교류 피복아크용접을 하여 얻은 비드외관과 그 종단면 및 용접시의 전류 파형을 모니터링하여 나타낸 것이다¹⁾. 비드외관은 비교적 양호하게 보였도 종단면에서는 4개의 기공이 발생해 있는 것을 알 수 있다. 20초 동안 모니터링한 전류 파형(교류이므로 \pm 값이 동일)은 아크가 정상적이면 검게 보이게 되지만, 8초에서 14초 사이에 흰 수직선의 모양으로 나타난 4군데의 아크 끊김부가 관찰되었다. 피복 아크용접에서는 아크열에 의해 피복재가 연소하여 끊임없이 실드가스가 생기지만 순간적으로 아크가 끊기면 실드가스가 발생하지 않기 때문에 공기의 혼입으로 인하여 기공이 생기기 쉽게 된다.

결국, 기공불량이라는 결함이 생기지 않도록 하기 위해서는 아크자체가 안정되어야 하며 그 아크 안정성을 정량적으로 평가하는 기법과 공정중에 그것을 모니터링하는 기술이 중요하게 된다.

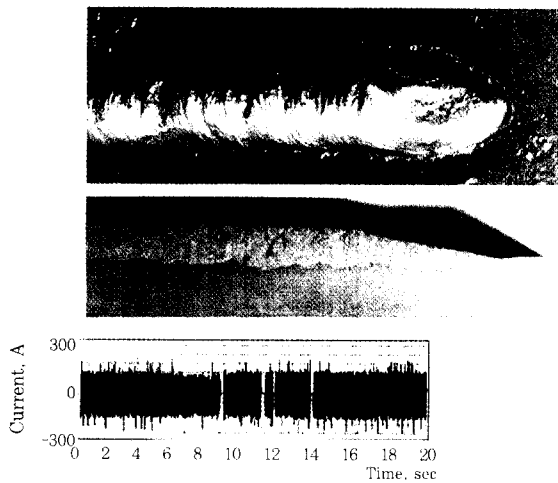


Fig. 1 Bead appearance, blow holes and current wave by unstable AC SMAW

Fig.2 (a) (b)는 저수소계 용접봉에 의해 20초 동안 교류 피복아크용접을 하면서 모니터링한 파형으로서 아크저항의 변동특성을 보인 것이다. (a)는 고기능자가 직접 수동으로 용접한 파형으로서 18초근방에서 잠깐 아크가 불안정했다. (b)는 저기능자가 용접한 것으로서 8-10초 사이에 2회, 15-18초 사이에서 길게 1회 짧게 1회 아크가 끊겼던 것을 알 수 있다. 대체로 안정적으로 생산중인 용접공정에서는 기공이 항상 생기는 것이 아니고, 가끔 아크가 불안정해졌을 때 발생하게 되고, 이것을 검지할 수 있는 기법이 필요한 것이다. 아크 길이가 불안정하거나 끊겼을 때 가장 크게 변하는 용접공정 변수는 아크 저항(=아크전압/전류)인 것이다. 즉 아크 길이가 너무 길어지면 대부분의 용접기에서 전압은 증가하고 전류는 감소하는 경향을 보이기 때문에 저항의 변동특성이 가장 크게 되는 것이다. 따라서 저항의 변동특성을 일괄 통계처리하여 정량적으로 나타낸 변동계수(=표준편차/평균저항)에 의하여 아크 안정성의 정량적 척도로 삼았던 것이다.

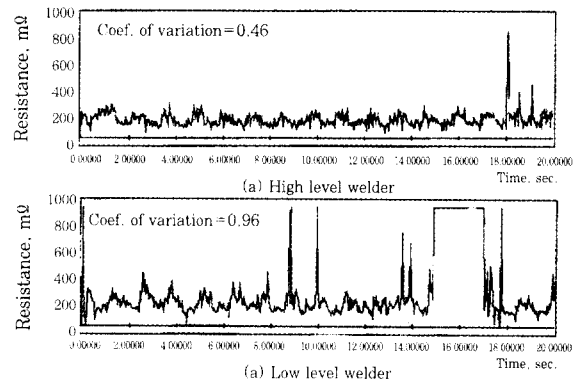


Fig. 2 The variation of arc resistance in SMAW by two level welders

3.1.2 가스메탈 아크용접에서의 공정 불안정과 불량 발생

Fig.3 A, B, C는 솔리드 와이어에 의한 가스금속 아크용접에서 실드가스가 끊겨서 품질이 불안정하게 되는 것을 공정중에 모니터링하기 위한 기법을 연구한 것으로서 실드가스는 21초 근방에서 끊겼다²⁾. A, B 그림은 전류와 전압의 변동특성을 정량화시켜 실드 불량을 평가하기 위한 것이고, C는 저항의 변동특성을 아크상태계수(Arc condition number)의 형태로 표현하여 평가한 것으로서 역시 가장 민감하게 불안정 현상을 파악할 수 있는 것은 저항을 응용한 것이다. 다만 이 연구에서는 저항의 순간적인 모든 값을 그대로 통계처리하지 않고 아주 짧은 시간 Δt 초 동안의 저항 값을 평균하여서 그 평균값의 변동특성을 써서 아크안정성의 척도로 삼았던 것이다.

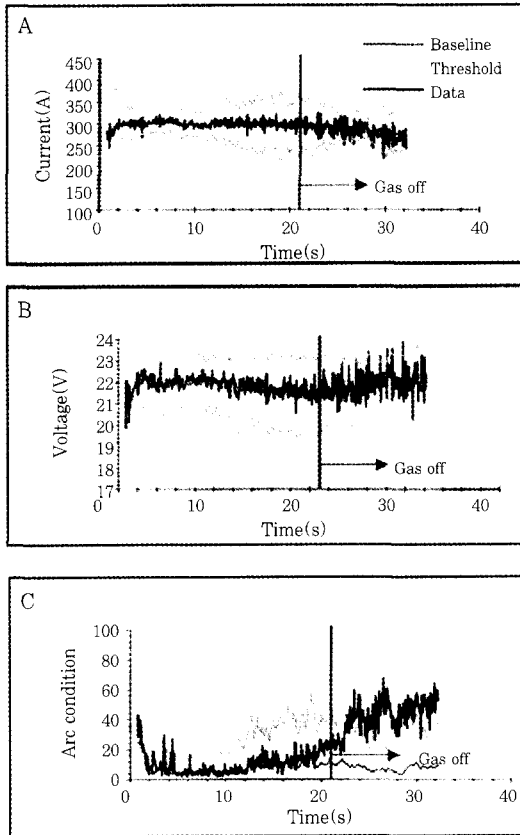


Fig. 3 The variation of current, voltage and arc condition number as the shield gas was turned off in GMAW.

Fig.4 A, B는 생산현장에서 품질 모니터링을 위하여 적용하여 얻은 자료로서 A는 단락주파수의 변동특성을 나타낸 것이고, B는 아크상태계수를 이용한 것이다²⁾. 파형 그림에서 원형기호가 표시된 곳은 비정상임을 나타내는 곳으로서 단과주파수 파형에서는 4초근방, 아크상태계수 파형에서는 8.7초 근방에 표시가 되어 있다. 실제의 제품에서는 8.7초 근방에서 불량이란 군데 생겼는데, 아크상태계수를 적용한 경우에는 정확하게 이것이 모니터링 되었음을 보인 것이다.

3.1.3 아크스폿용접에서의 품질 모니터링 사례

Fig.5는 수직자세에서 아크스폿용접(t3.2mm, φ 6.5mm의 플러그용접)을 실시하였을 때 얻은 전류, 전압 파형과 실제 제품의 마크로 단면을 보인 것으로서 국내의 에어컨용 컴프레서 자동용접(MAG용접) 생산라인에서 직접 획득한 내용이다. 플러그 용접은 두 모재를 너깃(Nugget) 형태로 잇기 위하여 한쪽에 구멍을 뚫어서 그 구멍 안에서 아크를 다른 쪽 모재 위에 발생시켜 구멍을 완전히 채우는 형태로 하면서 구멍 하부의 모재에 용입이 되도록 하여 접합하는 것이다.

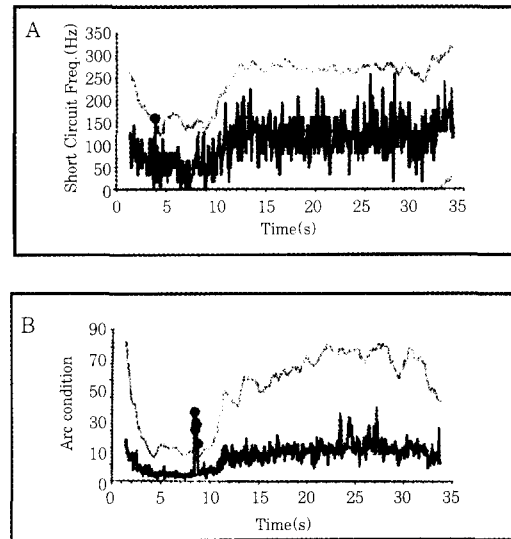
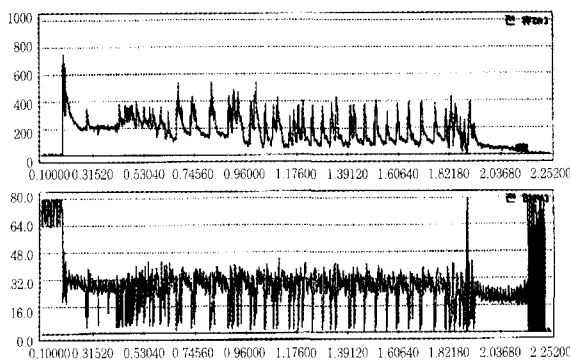
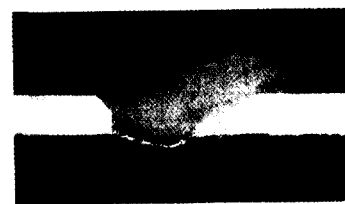


Fig. 4 The arc condition and short circuit frequency quality parameters for a weld with a defect at 8.7s

Fig.5는 수직자세에서 용접하여 얻은 용접부의 품질로서 비드가 하부(그림의 오른쪽)로 너무 심하게 처져서 상부쪽(그림의 왼쪽)에서 누설불량이 발생하여 불량처리 된 것이다. 이러한 불량은 와이어 송급량과 입열량이 과대할 때, 용접시간이 너무 길 때, 아크길이 길어질 때, 또는 실드가스중 CO₂가스 혼합비의 갑작

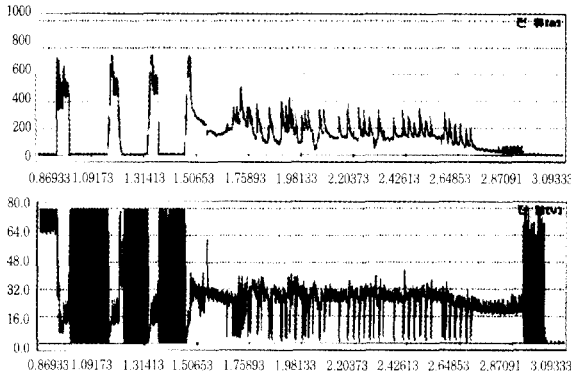


(a) The current and voltage wave for drooped bead



(b) The appearance of drooped bead

Fig. 5 The result of arc monitoring and bead appearance in the arc spot plug welding



(a) The arc start characteristics for the bead with blow holes



(b) The appearance of bead with blow holes

Fig. 6 The wave monitored for arc start failure and blow holes.

스런 감소 등에 기인한다. 따라서 품질 모니터링 시스템에서는 이러한 공정변수들을 정량적으로 처리하여 상하한계를 정하여 평가하면 된다.

Fig.6은 상기와 동일한 수직자세 아크스폿용접부에서 심한 기공의 발생으로 냉매가 누설되어 불량처리된 제품으로서 그 때의 전류와 전압 파형을 마크로 단면 사진과 함께 표시하였다. 전류와 전압 파형에서 보면 아크 개시 순간에 아크 끊김이 3회나 생겨서 전형적인 아크개시 실패의 모양을 보인 것이다. 마크로 단면을 보면 기공이 매우 심하게 발생하여 비드의 높이가 비정상적으로 커져있음을 알 수 있다.

자동 생산라인에 있어서 아크용접 불량은 현장의 관리 수준에 따라 크게 다르지만, 심한 경우는 수%~수십%의 불량이 발생하고 우수한 경우는 0.1%이하의 수준까지 심지어는 100ppm의 수준까지 달성한 사례를 볼 수 있다. 따라서 아주 가끔 발생하는 용접불량을 대량으로 발생하지 않도록 하기 위해서는 항상 공정을 감시하고 있어서 불안정한 경우에는 경보를 울리던가 심한 경우에는 라인을 멈추게 하는 시스템이 필요한 것이다.

Fig.7은 12초 정도 연속 용접하는 자동생산 라인에서 스파터가 컨택팁의 끝에 붙어서 와이어의 송급 불안정이 생긴 것을 모니터링한 것으로서 가장 위의 파형은 전류이고, 중간 파형은 전압의 변동특성이며, 아래쪽 파형이 송급속도를 보인 것이다. 시간축의 가운데 부분에서 송급속도가 감소하고 전류가 감소한 것을 볼 수 있다. 이 경우도 비드 외관이 불량해지고 기공이 생길 우려가 있어서 경고를 울리게 하는 경우이다.

3.2 맞대기 용접에서의 용락 발생에 대한 단락특성의 모니터링

Fig.8은 단락이행 영역에서 맞대기 용접할 때 루트 간격의 증가로 용락이 생겨서 품질 불량이 발생하는

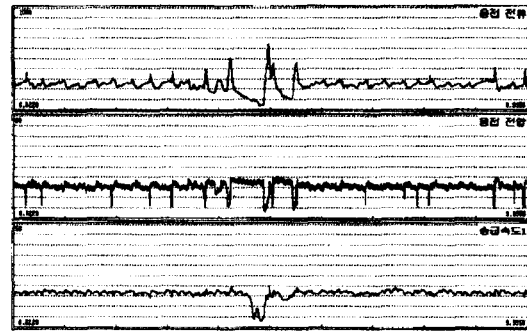


Fig. 7 The result of monitored wave for unstable wire feeding.

것을 평가하기 위해서 단락주파수(1초당 일어나는 단락횟수)의 변화를 모니터링하여 나타낸 것이다⁵⁾. 루트 간격이 0mm일 때는 단락주파수의 평균값은 약70Hz 정도로 높고 그 주파수의 변동은 그다지 크지 않지만, 루트간격이 0.5mm인 경우는 평균 단락주파수가 65회 정도로 낮아지고 그 변동은 다소 심하게 된다. 루트 간격이 1mm로 더욱 커진 경우는 단락주파수의 평균도 현저하게 낮아지고 변동특성도 심하게 되어 이러한 모니터링의 결과를 정량적으로 평가하면 용락 현상 또는 용락의 징후(이면비드의 과대한 처짐)를 판단할 수 있게 된다. 용락이 생길 때는 용융지의 높이가 낮아져서 아크길이가 순간적으로 길어지므로 단락이 생기기 곤란하게 되어 단락주파수가 감소하게 된다.

단락주파수는 일정한 미소 시간 Δt 초 동안의 단락 횟수를 계산해서 구하게 된다. 또한 한 구간의 Δt 초 동안의 단락주파수만으로 용락현상을 판단하기에는 그 변동특성이 너무 심하므로 일반적으로는 이동평균법을 적용하게 된다.

그러나 용융지의 높이와 아크길이의 순간적인 변동을 단락주파수만에 의하여 모니터링하면 1회 단락당 단락시간의 변화를 고려하기 곤란한 점이 있다. 예를 들어 단락시간이 아주 짧은 순간단락만 n회 일어나서

순간단락주파수 n Hz인 경우와, 정상단락주파수 n Hz인 경우, 장기단락만이 일어나는 장기단락주파수 n Hz인 경우를 서로 비교해보면 아크길이는 순간단락만이 일어나는 경우가 가장 길고 용융지의 높이가 낮아져 있어서 용락이 쉽게 일어난다. 즉 같은 단락주파수라 하여도 단락시간에 따라 용융지의 높이가 현저하게 달라지게 되어 단락주파수만에 의해서는 아크길이의 작은 변화를 민감하게 모니터링하기 곤란하다고 판단된다.

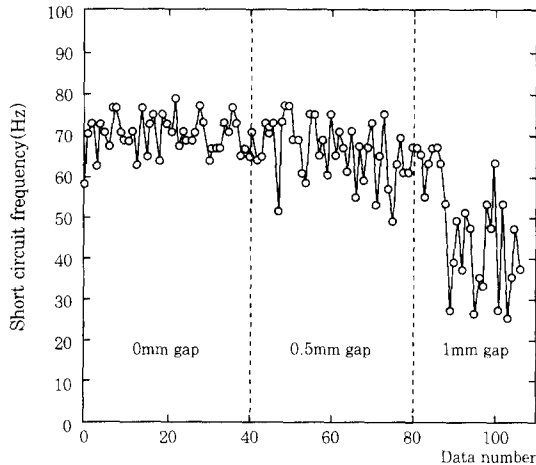


Fig. 8 The variation of short circuit frequency as a quality parameter for melt through in butt welding.

Fig.9는 용락으로 인한 품질 불량을 모니터링하기 위해서 단락시간비를 적용하여 연구한 결과의 일부로서 루트간격이 6초와 15초근방에서 각각 0에서 0.4mm로 증가하여 용락이 발생하였을 때의 단락시간비의 변화 특성을 보인 것이다^{6,7)}. 여기서 단락시간비는 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{단락시간비} = (\text{단락시간의 합} / \Delta t) \times 100\%$$

여기서도 각 구간의 순간적인 단락시간비는 비교적 큰 변동특성을 보이고 있지만, 5점 이동평균법을 적용함으로써 Fig.9의 실선으로 보인 바와 같이 상당히 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

결국, 단락이행 영역의 GMAW에 의한 맞대기 용접부에 있어서 용락불량에 대한 품질불량을 연속적으로 모니터링하기 위해서는 단락주파수를 적용하는 것보다는 단락시간비를 활용하는 쪽이 유리함을 알 수 있었다.

3.3 온라인 용접 품질 모니터링을 위한 6시그마의 적용 사례

기업의 진정한 경쟁력은 개발과 제조공정은 물론이고 영업과 A/S부서의 서비스 품질까지 모든 공정을

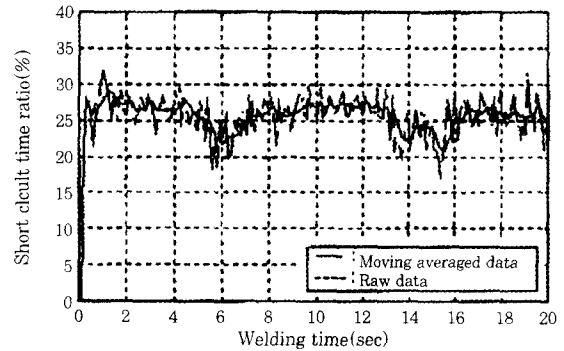


Fig. 9 The variation of short circuit time ratio as a quality parameter for melt through in butt welding

결함없이 처리해야만 향상될 것이다^{8,9)}. 품질에 영향을 직접적으로 미치는 공정변수의 허용 상한치(Upper Specification Limit, USL)와 허용 하한치(Lower Specification Limit, LSL)사이에만 장기간의 공정변수가 산포해 있으면 결함은 발생하지 않게 된다. 그러나 실제로 결함이 완벽하게 생기지 않도록 하기보다는 통계적으로 의미를 가지는 최소한의 결함 발생률 유지하도록 하는 것이 현실적이다. 따라서 각 공정변수가 정규분포를 하고 있다고 할 때 그 표준편차인 σ (시그마)의 6배인 6σ 수준을 유지하면 그 공정에서의 결함 발생률은 3.4ppm으로 유지되므로 공정변수의 산포가 작게 되도록 유지관리 하는 체계를 6σ 라고 한다. 6σ 수준을 쉽게 달성하기 위해서는 공정변수의 상하한계(USL-LSL)를 크게 잡는 것도 중요하지만, 이것은 공정개발 단계에서 결정되고 상당히 제한적이다. 그러나, 공정변수의 산포 특성은 생산중에 계속적으로 심하게 변할 수 있으며 공정관리 능력에 따라서 현저하게 좌우되는 특성을 지닌다. 즉 단기공정 능력지수 $C_p=2.0$, 장기공정 능력지수 $C_{pk}=1.5$ 가 얻어지면 그 공정은 6σ 수준이 확보되어 결함이 3.4ppm이하로 유지된다는 것이다.

기존의 100ppm 품질관리는 제조공정에만 주로 적용하였는데, 6σ 는 영업, 개발, 설계, 제조, 품질보증 및 사후관리등 모든 공정에 대하여 적용된다는 것과 공정능력 자체를 향상시켜 불량을 근원적으로 방지하려고 하는 것이 다른 점이라고 할 수 있다.

용접공정의 경우는 제품의 요구 품질 사양이 다양한 것과 그 품질에 영향을 미치는 변수도 또한 아주 다양하므로 현실적으로 성공적인 응용사례가 아직 많이 보고되지 않고 있다.

Fig.10은 MAG용접에 의한 수직자세 아크스폿용접 공정(용접시간 약2초, t_3 2.2mm, ϕ 6.5mm의 플러그용접)에서 전압을 모니터링하여 평균전압에 대하여 공정

능력 분석을 수행한 결과로서 평균치가 높은 것과 표준편차가 매우 큰 것이 특징이며, 매우 불안정한 공정임을 알 수 있다. 즉 단기공정 능력지수 $C_p=0.62$, 장기공정 능력지수 $C_{pk}=0.22$ 였다. 이 자료도 Fig.5와 Fig.6에서 보인 바와 같이 실제로 국내의 자동용접 공정에 적용되고 있는 실례를 보인 것으로서 공정 불안정의 원인을 정밀하게 조사한 결과 작업물의 좌우 회전 때문에 아크스폿용접 점의 위치가 불안정한 것이 가장 큰 원인임을 알 수 있었다. 용접 점의 위치가 심하게 어긋날 때는 $\phi 6.5$ 구멍의 외부로까지 벗어나서 결과적으로는 와이어 돌출길이가 t3.2만큼 작아져서 전압이 감소하면서 전류가 증가하는 현상이 생기게 되었다. 그러나 일반적인 경향으로서는 용접 와이어의 조준위치가 구멍의 중심이어야 하는데, 구멍의 언저리에서 용접 개시하게 되어 와이어 돌출길이의 불안정과 아크길이의 불안정이 심하게 되어 용접부에서 누설불량이 자주 발생하였던 것이다.

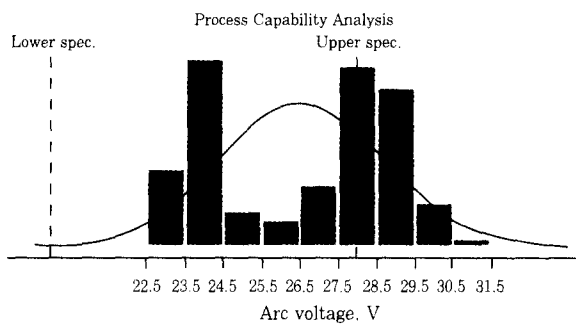


Fig. 10 Process capability analysis for the arc voltage.

Fig.11은 상기 Fig.10의 공정 불안정의 원인으로 인정된 용접 점 위치를 계측하여 통계처리한 것으로서 단기공정 능력지수 $C_p=0.88$, 장기공정 능력지수 $C_{pk}=0.58$ 로서 상당히 불안정한 공정임을 알 수 있었다. 이 작업물은 좌우 회전에 의해 용접 점이 어긋나는 경향이 있어서 심할 때는 수mm까지 어긋나는 경우가 있었던 것이다.

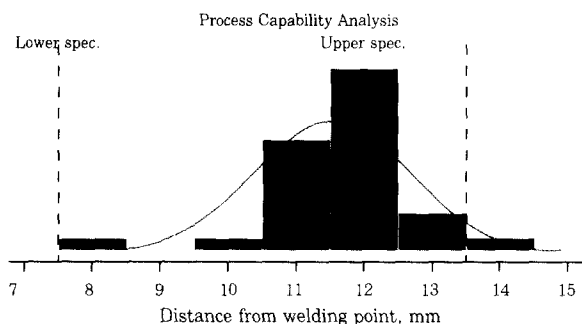


Fig. 11 Process capability analysis for the distance from welding point.

결국, 이 아크스폿용접 점은 그 위치관리를 하지 않고 있다가 용접공정 변수에 용접 점의 위치를 포함시켜서 엄격한 관리를 개시하였다.

Fig.12는 용접 점의 위치를 관리하기 시작하고 약 1개월이 지난 상태에서 용접 점의 위치에 관한 공정능력을 분석한 결과이다. 용접 점 위치에 관한 상하한치의 관리범위와 실제의 용접 점 위치 데이터의 산포 특성을 보면 현저하게 개선된 것을 알 수 있다. 구멍의 직경이 6.5mm이기 때문에 용접 점의 위치가 3mm이상 어긋나면 전압이 심하게 변하고 품질도 불안정해질 수 있는 것으로 나타났다.

Fig.13은 용접 점의 위치 관리후 평균전압에 대하여 다시 공정능력 분석을 실시한 결과이다. 전압 상하한치의 범위에 비하면 그 산포는 매우 작고 아주 안정된 공정으로 되었음을 알 수 있다. 물론 이렇게 개선된 배경에는 토치주변의 관리나 전압자체에 대한 관리, 실드가스 등의 관리를 포함한 다양한 개선노력이 있었지만, 가장 근본적인 것은 역시 용접 점의 위치 제어이었다.

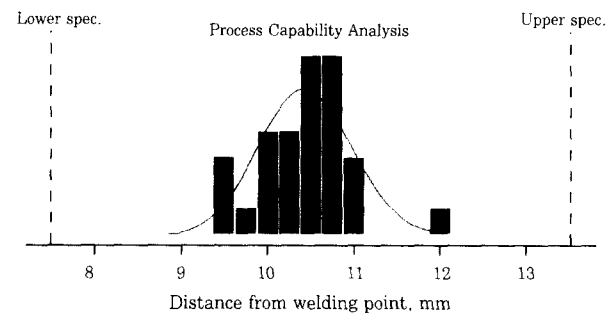


Fig. 12 Distribution of the distance from welding point after improvement.

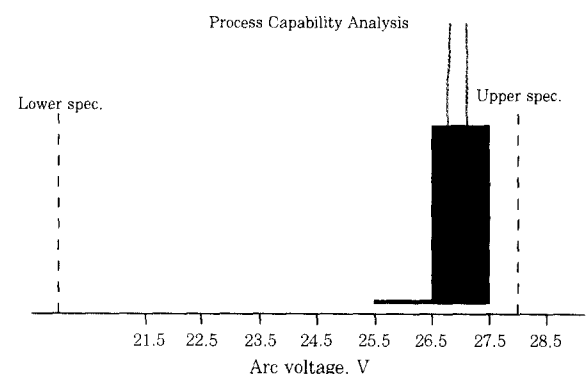


Fig. 13 Process capability for arc voltage after improvement

상기의 아크스폿용접부의 누설 불량률은 초기의 불량률에 비하여 약 1/3이하의 수준으로 획기적으로 개선되었으며, 현재도 지속적으로 각종 용접공정 변수에 대한 6σ 관리를 실시하고 있는 중이다.

결과적으로 용접부의 불량률을 감소시켜서 품질을 향상시키기 위해서는 우선 품질의 요구 사양에 미치는 다양한 공정변수의 정의, 공정변수의 계측(장단기 모니터링), 공정변수와 품질의 상관 관계 분석, 개선, 그리고 지속적인 공정변수의 모니터링에 의한 지속적인 관리가 요구된다고 할 수 있다.

4. 결 언

고가의 대량 생산 라인에 있어서 아크용접 공정에 의한 품질 불량률이 다른 공정의 그것보다 월등히 높다고 하는 인식이 지배적이고 이것은 기업 전체적인 입장에서 본다면 용접공정이 문제의 공정으로 보일 수도 있지만, 역으로 말하면 관심의 대상이라고 할 수도 있다.

용접 품질을 개선하려는 많은 품질관리 담당자들의 입장에서는 용접공정이 복잡하고 어려워서 품질에 영향을 미치는 공정변수를 쉽게 정의하기 어렵고, 공정변수의 계측도 일반적이지 않다고 한다. 또한 공정변수와 품질의 상관관계 분석을 위해서는 용접부의 단면 마크로를 관찰하거나 경도의 분포를 얻어야 하는 등 복잡한 과정을 거쳐야 하기 때문에 쉽게 결과를 얻지 못하고 있다고 투덜댄다. 그러나 이러한 품질 혁신 과정은 당연히 이론과 실무적 경험이 풍부한 용접 전문가와 품질관리 담당자가 공동으로 추진해야 하는데, 국내에는 생산기술 전문가가 기업내에서 그다지 높게 가치 평가되지 못하고 있는 실정이어서 조선소와 원자력 관련 현장 이외의 기업에서 용접 전문가를 찾기가 쉽지 않은 실정인 것 같아 아쉽게 생각된다.

온라인으로 용접 품질을 모니터링하여 공정의 불량률을 획기적으로 낮추기 위해서는 금후 공정변수와 품질의 상관관계를 신경망과 같은 새로운 기법들에 의하여 구할 수 있는 토대가 필요하다. 또한 용접 고유의

전문기술과 다른 전문분야와의 활발한 교류를 지향하면서 함께 발전하는 상생의 기반이 마련되도록 하여 용접기술의 부가가치를 높여 가도록 해야 할 것이다. 이러한 상생의 기반 구축에 의한 가치 창출은 이론과 실무, 연구실과 현장, 개발자와 작업자, 온라인과 오프라인 그리고 기술자와 경영자 사이에 대해서도 그대로 적용되는 원리이므로 금후 지속적인 관심과 노력이 요구된다.

참 고 문 헌

1. S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo and I. Claesson : On-Line quality monitoring in short-circuit gas metal Arc welding, AWS Welding research supplement(Feb. 1999), 59s-73s
2. T.P. Quinn, C. Smith, C.N. McCowan, E. Blachowiak and R.B. Madigan : Arc Sensing for Defects in Constant-Voltage Gas Metal Arc Welding, AWS Welding research supplement(Sep. 1999), 322s-328s
3. 대한용접학회 편 : 용접·접합 편람, (1998)
4. 조상명 : 교류 피복 아크용접에 있어서 아크 안정성의 정량적 평가에 관한 연구, 대한용접학회지, 16-4(1998), 381-390
5. 안재현, 김재용 : 박판 GMA용접에서 단락 주파수를 이용한 이면 비드의 제어에 관한 연구, 대한용접학회지, 13-4(1995), 330-339
6. 감병오, 김상봉, 이성규, 조상명 : GMAW에 의한 이면 비드 용접에서의 단락 시간비에 관한 검토, 대한용접학회, 1998년도 특별강연 및 춘계학술발표 개요집 (1998)
7. 감병오, 강병철, 이성규, 조상명, 김상봉 : 원칩 마이크로프로세서를 이용한 GMAW의 이면 비드 제어, 대한용접학회, 1998년도 특별강연 및 춘계학술발표 개요집 (1998)
8. 아오키 야스히코 외지음, 한국능률협회 식스시그마 추진팀 옮김 : 6시그마 경영, 21세기 북스(1998)
9. 이레테크 미니탭사업부 : MINITAB 실무 완성, 이레테크 (2000)



- 조상명(趙相明)
- 1955년생
- 부경대학교 재료공학부 생산가공공학전공
- 용접기의 파형제어, 용접설계, 용접공정 개발 및 품질 모니터링
- e-mail : pnwcho@pknu.ac.kr



- 최규원(崔圭原)
- 1975년생
- 부경대학교 대학원 석사과정 생산가공학과
- 용접공정개발, 용접 품질 모니터링 및 용접에 대한 6σ의 적용
- e-mail : hunterwon@hanmail.net



- 이광원(李光源)
- 1973년생
- 모니텍코리아 대표
- 용접장비진단, 품질모니터링 장치 개발
- e-mail : info@monitech.co.kr