

# 8. 재료 및 가공분야 특집기사

## (2) 특집기사

### 자동용접생산 라인에 있어서 6시그마의 적용 Application of 6-sigma in Automatic Welding Production Lines.



조상명  
S-M Cho

- 부경대학교 재료공학부 생산가공공학전공 부교수(공학박사)
- (사)한국박용기관학회 심사위원, 종신회원
- (사)대한용접학회 사업이사
- 용접전문 웹사이트 weldnet.co.kr 운영책임자
- 용접기술사
- E-mail : pnwcho@pknu.ac.kr

#### 1. 서 언

제조업 분야에서도 디지털화의 바람이 거세게 불고 있다. 용접산업 분야에서도 용접전원의 디지털화는 물론이고, 자동용접 생산라인에 있어서 품질 평가를 위한 컴퓨터의 적용과 공정인자의 네트워크에 의한 집중관리가 본격화함에 따라 디지털화가 급속히 확산되고 있는 실정이다.

특히 최근에 지식 경영과 디지털 경영을 함께 추진하면서 많은 기업에서는 새로운 관리기법인 6시그마를 적용하여 커다란 성과를 올리고 있다. 이 6시그마는 마케팅, 연구개발, 생산 및 품질관리, 일반관리 등 기업의 전반적인 분야에서 모두 적용가능한 기법으로서 현대 디지털 경영의 중요한 하나의 축을 형성하고 있다고도 할 수 있다. 최근 한 정유회사의 가솔린 브랜드명을 시그마 식스라고 한 것도 결국은 무결점이 될 수 있도록 관리하기 위하여 6시그마 기법을 적용했다는 것을 의미한다.

한편, 자동생산 라인에 있어서 용접공정은 조립

방법으로서는 매우 저렴한 생산비용으로 되고 제품의 경량화에 가장 유리하기 때문에 비교적 많이 적용되는 추세에 있다. 그러나 용접공정에는 품질에 영향을 미치는 인자가 아주 많고 그 인자들을 모두 정밀하게 관리하기가 쉽지 않기 때문에 품질 불량률이 상당히 높게 되는 점이 지적되고 있다. 또한 생산라인에 배치되는 작업자의 숫자가 점차 줄어들게 됨에 따라 많은 경우에 용접 불량 발생하더라도 즉시 인식하지 못하고 상당수의 제품에서 불량이 발생한 후에 후공정에서 발견되기 때문에 그 손실 정도는 커지게 되고, 전체적인 고품질 관리가 어려워지게 된다.

1990년대 이전에는 생산라인에 컴퓨터를 설치하여 제품의 생산공정을 모니터링하거나 품질을 평가하는 경우는 찾아보기 힘들었다. 그러나 오늘날 자동 생산라인에서 공정관리나 품질 평가를 위해 설치된 컴퓨터는 이미 보편화되어 있다.

따라서, 여기서는 자동 아크용접 공정에 있어서 그 품질 평가를 위하여 아크용접 모니터링 시스템

을 이용하여 데이터를 획득하고, 6시그마를 적용함으로써 획기적으로 품질개선을 할 수 있었던 사례를 중심으로 기술하였다. 또한 새로 개발한 조정밀 저항용접 공정에 처음으로 적용하기 위한 정밀 저항용접기의 성능 평가에 6시그마를 적용하여 정량적인 출력 안정성 평가를 수행했던 내용에 대하여도 기술하였다.

## 2. 6시그마의 기본개념

### 2.1 6시그마란?

6시그마(이하 6σ라 한다)의 시그마(σ)는 통계학에서 변동을 나타내는 여러 척도중 하나인 표준편차 (Standard Deviation)를 나타낸다. 일반적으로, "몇 σ 수준"이라고 하는 것은 업무 프로세스 또는 제조 프로세스의 품질 성능을 동일한 척도로 바꾸어 비교할 수 있는 기준을 제시해준다.

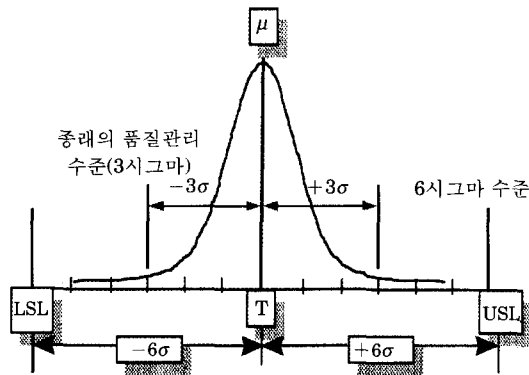


그림 1 6σ 관리 범위의 개념

그림 1은 정규분포 특성을 갖는 공정인자에 대해서 중심치에서 ±3σ로 되는 위치를 표시하였고, 중심치에서 ±6σ로 되는 위치도 함께 표시하여 서로 비교하였다. 만약 공정 인자의 관리 상하한계가 종래의 품질 관리 수준인 ±3σ범위에 있다면 그 상하한계(USL, LSL)를 벗어나서 생기는 품질 불량률은 6.68%나 된다. 반면에 ±6σ범위에 공정 인자의 관리 상하한계가 있다면, 품질 불량률은 거의

0%로 된다. 이것은 공정 인자의 관리 상하한계에 비하여 표준편차가 큰 공정에서는 품질 불량률이 생김을 의미한다.

결국, 모든 공정 각각에서 발생하는 품질 불량률을 낮게 하려면, 공정 인자의 표준편차σ가 충분히 작게 관리하고, 그 평균치μ도 목표치T에서 어긋나지 않도록 관리해야 함을 의미한다.

### 2.2 종래의 품질관리 기법과 6시그마의 차이

6σ는 QC(품질관리), TQC(전사적품질관리), TQM(전사적품질경영)등 전통적 품질관리 기법과는 차이가 있다.

표 1 종래 관리 기법과의 차이

구 분	6σ기법	종래기법(3σ기준)
목 표	고객만족	제조공정 만족
측정지표	표준편차(σ)	불량률(%)
추진주체	6σ 사내 전문가	제조현장 담당자 중심
추진방법	하향(Top→Down)	상향(Down→Top)
개혁대상	경영 전체 프로세스	불량발생 공정
적용범위	제조, 구매, 마케팅, 개발 등 전 부문	제조 부문
불량허용범위	백만개 중 3.4개 (3.4PPM)	백만개 중 66800개 (66800PPM)

표1은 6σ와 종래의 품질관리 기법(통상 3σ 기준)의 차이점을 정리한 것이다. 종래의 품질관리 기법은 제조공정 만에 대하여 적용되었지만, 6σ의 본질적인 목표는 고객만족이며, 제조공정과 서비스 등 전분야에 걸쳐 적용될 수 있다. 추진방법도 종래에는 밑에서 위로 향해가는 식이었으나 6σ는 위에서 아래로 향해서 추진될 수 있도록 한다.

또한 불량허용범위도 3.4PPM으로서 아주 낮은 수준으로 되어 있다.

### 2.3 6σ 관리 사이클 (DMAIC)

그림 2는 6σ의 관리를 위한 기본적인 사이클 즉 DMAIC을 나타낸 것이다.

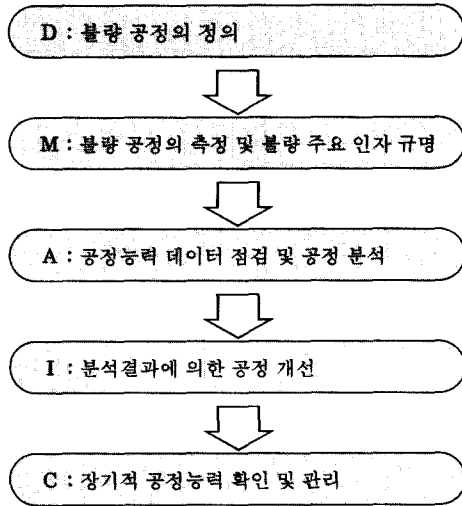


그림 2 6σ의 관리 사이클

첫 번째로 관리할 대상 또는 불량이 발생하여 개선할 대상을 정의(Define)한다.

두 번째로 불량을 일으키는 주요인자를 측정하는 과정(Measurement)이 있어야 된다.

세 번째로는 공정능력을 분석하는 과정(Analysis)과 불량의 원인규명을 하는 과정이 필요하다.

네 번째로는 공정을 개선하는 과정(Improve) 또는 설비 개선 또는 부품 개선 등이 반드시 요구된다.

끝으로, 장기공정 능력을 확인하고 안정된 공정이 확립되어 높은 품질 수준이 계속적으로 유지될 수 있도록 관리(Control)하는 단계가 필요해지게 된다

2.4 단기 공정능력과 장기 공정능력

6σ의 가장 핵심적인 개념중 하나가 공정의 안정성을 정량적으로 평가하기 위한 공정능력지수라고 하는 것이다. 이 공정능력 지수는 크게 단기공정능력지수Cp와 장기공정능력지수 Cpk로 구분된다. 각각의 산출과정은 다음과 같다.

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

$$Cpk = Cp(1 - k)$$

여기서, USL : Upper Specification Limit  
 LSL : Lower Specification Limit  
 k : 목표치(T)와 표본평균(μ)의 차이인 변동오차

$$k = \frac{|T - \mu|}{(USL - LSL)/2}$$

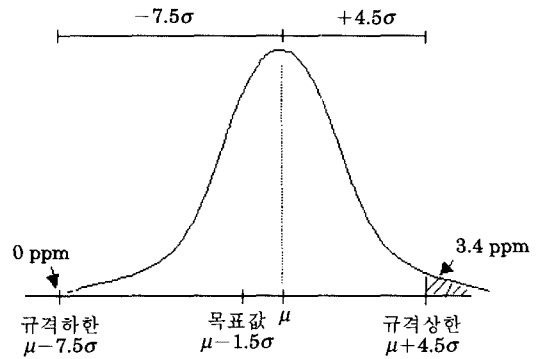
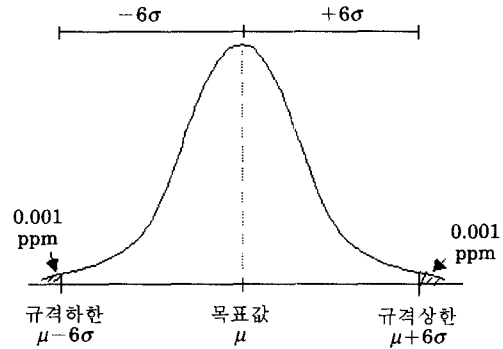


그림 3 6σ수준의 정의

6σ를 적용하여 공정능력을 향상시켜서 불량률을 낮게 유지하기 위해서는 다음과 같은 정량적인 지수값이 얻어져야 된다.

$$Cp \geq 2.0$$

$$Cpk \geq 1.5$$

다만, 여기서 Cp가 2.0이상이라고 하는 것은 공정인자의 산포가 적게 되어야 한다는 의미이다. Cpk가 1.5이상 되기 위해서는 Cp가 2.0 이상이

면서  $k \leq 0.25$ 의 조건이 성립되어야 하는데 이것은 공정인자의 산포가 적으면서 공정인자의 평균  $\mu$ 가 목표치 T에서 크게 벗어나지 않도록 관리해야 함을 의미한다.

### 3. 자동 아크용접 품질 개선을 위한

#### 3.1 아크용접 공정에서의 품질 불량에 관한 기본 검토

자동 아크용접 라인에 있어서 자주 발생하는 용접품질에 직접 영향을 미치는 인자는 대략 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 용접전의 인자 : 그루브 형상, 용접자세, 용접봉의 건조, 모재의 예열, 토치의 고정, 실드가스, 와이어의 종류, 등
- 2) 용접중의 인자 : 전류, 전압(아크길이), 용접저항, 입열량, 단락주파수, 단락시간비, 와이어 송급속도, 용접속도 등

상기의 용접전 인자에 대해서는 용접생산 설계 및 공정개발 과정에서 충분히 검토하여 불량이 발생하지 않도록 사전에 조치를 할 수 있다. 그러나, 용접중의 인자는 사전에 적절하게 결정할 수가 있지만 용접중에도 조금씩 변할 수 있고 그로 인해서 불량이 즉시 발생할 수가 있다. 따라서 용접중의 인자에 대해서는 연속 모니터링을 실시하여 불량 발생유무를 평가함으로써 불량 제품이 연속적으로 발생하지 않도록 하는 것과 불량품의 조기 발견이 가능하도록 하는 체제가 요구된다.

그림 4는 교류피복 아크용접을 실시하여 촬영한 비드 외관과 그 종단면에 발생한 기공을 보인 것이고, 그 때 아크모니터링을 실시하여 획득한 전류 파형을 보인 것이다. 전류파형에서 8~12초 사이를 보면 4곳의 흰 세로 선이 보이고, 이것이 아크가 순간적으로 끊겼을 때 발생하는 전형적인 파형이다. 이러한 아크 불안정은 바로 전류 파형에서

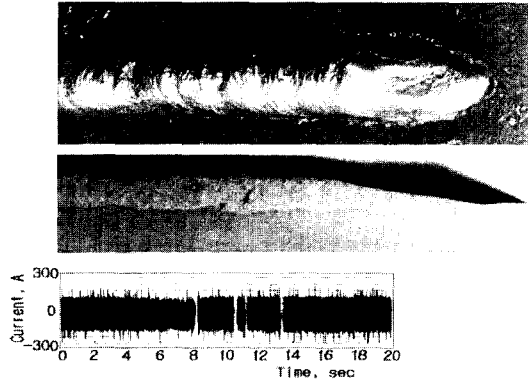


그림 4 교류피복 아크용접에서 아크끊김으로 인해 발생한 기공과 그 때 모니터링한 전류 파형

전류가 0에 가까운 값으로 떨어지는 순간을 계산해내면 정량적인 판단이 가능하고, 불량 발생 직후에 경보를 울릴 수도 있는 것이다.

그러나 용접공정에서는 그림 4와 같은 전류 파형의 특징을 보이는 것 이외에 다양한 인자의 파형을 해석해서 용접불량과 연결시키는 연구가 매우 중요하다.

#### 3.2 아크개시 특성의 개선 사례

##### 3.2.1 아크개시 실패로 인한 불량량의 정의 (Define)

그림 5는 자동생산 라인에서 아크스폿용접을 실시해서 플러그용접을 하였을 때, 아크개시 실패로 인해 용접부에서 발생한 기공의 모습을 보인



그림 5 아크개시 실패로 인해 아크스폿용접부에 생긴 기공

것이다. 이러한 기공이 발생하면 누설이 생기기 때문에 제품의 성능에는 치명적인 영향을 미치게 된다.

3.2.2 아크개시 실패에 대한 측정 (Measure)

그림 6은 아크스폿용접에 있어서 아크개시를 실패하였을 때 모니터링 전류와 전압 파형을 보인 것이다. 이 파형은 인버터 직류 가스메탈아크용접기를 써서 혼합가스(Ar80%+CO<sub>2</sub>20%)로 용접하였을 때 얻어진 것이다. 따라서 전류가 0으로 되고, 전압이 무부하 전압으로 된 초기의 3곳이 아크 끊김이 생긴 부분이다.

이와 같이 용접 아크개시 실패는 전류의 평균값 계측에 의해서는 정확하게 알 수 없고, 전류의 변동계수를 쓰거나 전압의 평균치 또는 전압의 변동계수를 써야만 합리적으로 평가할 수가 있는 것이다.

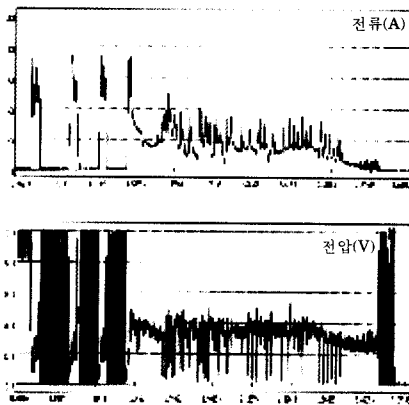


그림 6 아크스폿용접시의 아크개시 실패 파형(상부 : 전류 파형, 하부 : 전압파형)

3.2.3 아크개시 실패에 대한 공정능력 분석 (Analysis)

그림 7은 아크개시 특성에 미치는 전자리액터의 영향을 분석한 것으로서 각 그림의 가로축은 용접시의 평균전류를 나타낸 것이고, 왼쪽 수직선(점선)은 하한계(Lower specification)이고, 오른쪽 수직선(점선)은 상한계(Upper specification)를 나타낸

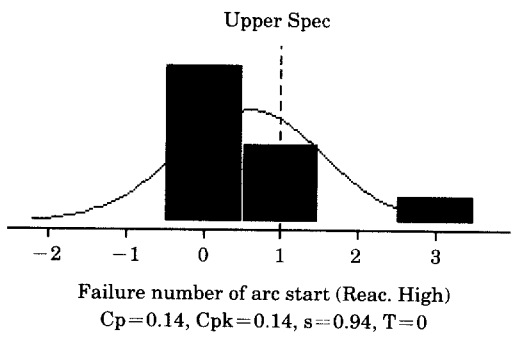
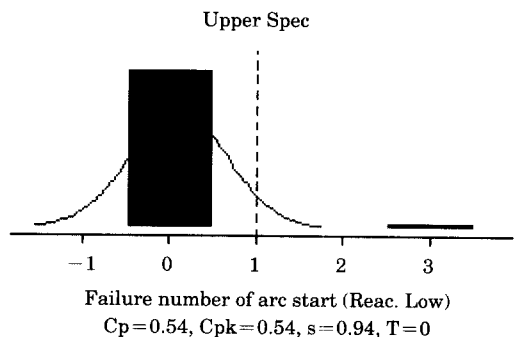
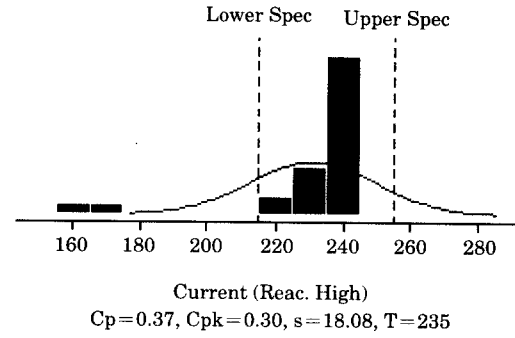
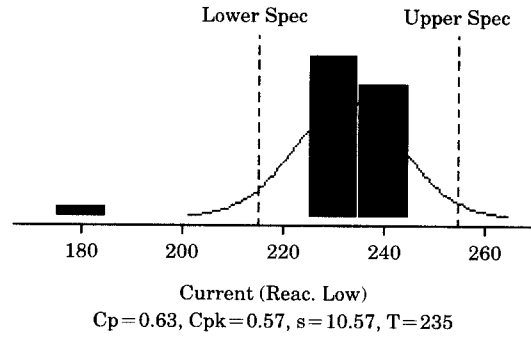


그림 7 전자 리액터의 고저에 따른 아크개시 특성 분석

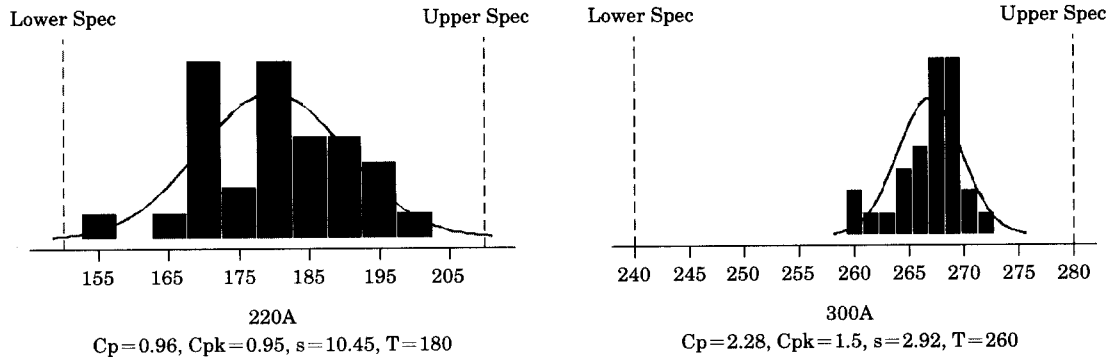


그림 8 전류의 고저에 따른 아크개시 특성 분석

것이다. 전자리액터를 낮게 하였을 때(Reac. Low)가 높게 하였을 때(Reac. High)보다 아크개시 실패의 가능성이 낮음을 보인 것이다. 평균 전류에 대한 공정능력 분석 결과, 어느 경우나 만족스러운 Cp, Cpk의 값을 얻지 못했으나, 적어도 전자리액터를 낮게 하면 공정능력 지수는 높아져서 보다 안정된 공정으로 변하는 것은 확실히 알 수 있었다.

또한 아크개시 실패수에 대한 공정능력 분석 결과도 역시 전자리액터를 낮게 한 경우가 공정능력 지수는 커짐으로서 보다 좋아지는 경향을 보였던 것이다.

그러나, 전체적으로 이 공정에서는 단기공정능력 지수 Cp와 장기공정능력 지수 Cpk가 각각 2.0과 1.5에 미치지 못하므로 공정불량률 3.4ppm의 달성은 불가능한 것으로 나타났다.

한편, 이 공정에 있어서 아크개시 실패 시간이 짧은 경우는 항상 기공 발생으로 연결되지는 않고, 소수의 작은 기공이 생긴 경우도 누설불량으로 직접 연결되지는 않기 때문에 실제의 제품에 있어서 불량 발생률은 훨씬 낮았던 것이다.

3.2.4 아크개시 실패의 개선(Improvement)

아크개시 실패로 인한 기공 발생을 감소시키고, 그로 인한 누설불량을 줄이기 위해 개선한 내용은 다음과 같다.

- 1) 평균용접전류의 증가 : 약 20A Up
- 2) 전자 리액터 감소 : Standard → Low

평균전류는 당초에 220A로 용접하였으나, 20A 정도만 증가시킨 것은 전류가 너무 높으면 또 다른 문제점이 나타나기 때문에 약 10% 정도만 높게 설정하여 용접하도록 하였다. 또한 전자리액터는 현장에서 흔히 표준(Standard)으로 두고 용접하는데, 저전류 영역이나 짧은 시간 동안 용접해야 할 경우는 아크 안정성 확보를 위해서 낮추는 것이 유리하게 되므로 이와 같이 개선하게 되었다.

표 2는 아크개시 실패에 대한 개선 작업전에 9099개의 제품을 생산하였을 때, 평균 실패 비율이 18.4%이었다. 그러나 전류를 20A 높이고, 전자리액터를 낮추는 개선을 취함으로써 평균 실패 비율은 4.9%로 감소하여 현저한 개선 효과를 보였다.

아크개시 실패 비율이 개선전에 비해 약 1/4로 감

표 2 아크개시 실패에 대한 개선 결과

전자 리액터 설정 위치	용접전류	생산수량	아크개시 성공	아크개시 실패	아크개시 실패 비율(%)
Standard	220A	9099(개)	7442	1657	18.4
Standard	240A	1000(개)	917	83	8.3
Low	240A	1000(개)	951	49	4.9

소하였고, 그로 인하여 용접부의 기공으로 인한 누설불량도 현저하게 감소하게 되었다.

3.2.5 양호한 아크개시를 위한 관리 (Control)

위의 아크스폿용접 공정에 대해서는 관리 지침을 작성하여 장기적인 관리가 확실하도록 하였다. 또한, 모든 용접기에 아크모니터링 시스템을 설치하여 항상 공정인자를 평가함으로써 불량률의 연속적인 발생이 근원적으로 방지될 수 있도록 하였으며, 제품의 모델 변경시에도 효율적인 용접 조건 설정이 가능하도록 되었다.

3.3 아크스폿 용접점 어긋남 불량 개선 사례

3.3.1 용접점 어긋남에 관련된 불량률의 정의 (Define)

그림 9는 아크용접점이 미리 가공한 구멍의 중



(a) 용접점이 구멍의 중심에서 크게 어긋난 경우



(b) 용접점이 구멍의 중심에서 약간 어긋난 경우

그림 9 용접점 어긋남 불량에 의한 비드형상

심에 맞추어지지 못하고 어긋나서 자동 아크스폿 용접된 경우의 불량 사례이다. (a)는 용접점이 심하게 어긋나서 오른쪽에 있는 구멍이 전혀 채워지지 않은 상태인 것을 보인 사례이고, (b)는 용접점이 약간 어긋났기 때문에 비드의 오른쪽에 약간 융합불량이 생겨서 누설이 된 경우이다.

이와 같은 용접점 어긋남 불량률의 상당량 발생하여 6 $\sigma$ 활동의 한 대상으로 정의하게 되었다.

3.3.2 용접점 위치 및 용접 파형의 측정 (Measure)

(1) 용접점 위치 측정

그림 10은 실제 두 개의 자동 생산 라인에서 용접한 제품 30개의 용접점을 측정한 결과를 정리한 것이다. 각 라인에 있어서 용접점 위치의 가장 바람직한 값을 점선으로 나타내고 있으며, 용접점 위치 데이터가 이 점선에 가까울수록 양호한 것이고, 상하로 심하게 떨어져 있을수록 산포가 심하고 불량률의 발생 가능성이 높게 되는 것이다.

용접점 어긋남이 심하지 않은 라인에서는 점선 근방에 데이터가 집중되어 있지만, 용접점 어긋남이 심한 라인에서는 용접점 위치 데이터가 점선의 상하에 심하게 산포되어 있어서 상당한 불량률 발생의 경향을 볼 수 있다.

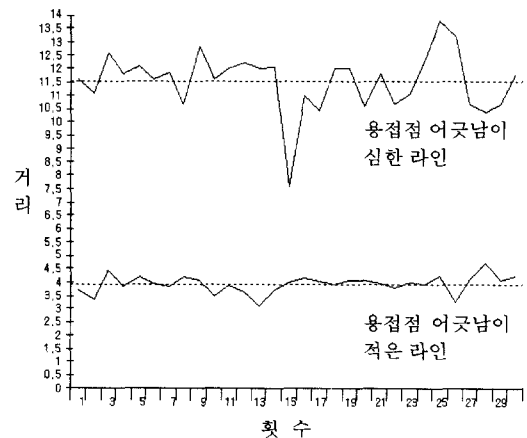


그림 10 용접점 중심 위치의 측정 결과

(2) 용접점 위치 어긋남이 생길 때의 용접 파형 모니터링

그림 11은 용접점과 구멍의 중심이 잘 일치하였을 때의 용접 전류와 전압을 각각 나타낸 파형으로서 3점을 동시에 용접한 결과이다. 따라서 1번 용

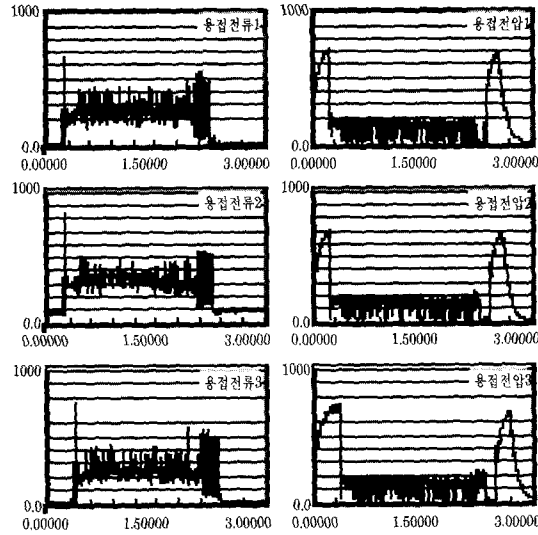


그림 11 용접점과 구멍의 중심이 잘 일치한 용접 파형(3점 동시 용접)

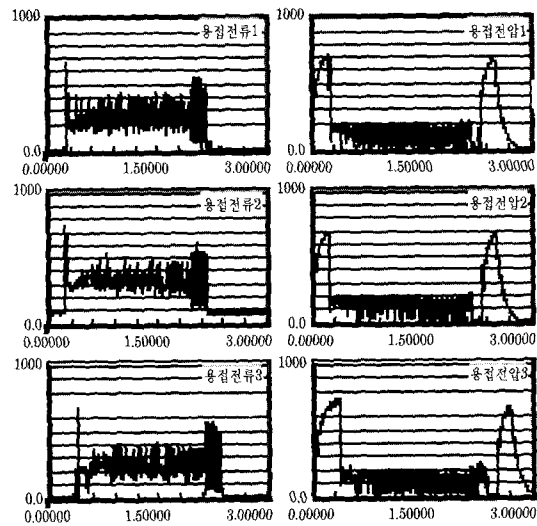


그림 12 용접점이 심하게 어긋난 경우의 용접 파형(3점 동시 용접)

접점의 공정 인자로서는 용접전류1, 용접전압1의 파형을 나타냈고, 2번 및 3번 용접점에 해당하는 용접전류와 용접전압도 같은 형태로 표현하였다. 각 용접점에 해당하는 파형에 대한 정량적인 값, 즉 평균전류, 평균전압, 단락횟수, 단락시간비율, 아크끊김횟수 등을 자동 측정하였다. 이 측정에는 자체 개발한 아크모니터링 시스템을 활용하였으며, 각 인자들의 계산을 위해서는 별도의 알고리즘이 요구된다.

그림 12는 용접점이 심하게 어긋난 경우의 용접 전류와 전압 파형으로서 파형의 그림만 보아서는 정상적인 경우와 현저한 차이를 인식할 수 없다. 그러나 평균전류, 평균전압, 단락횟수, 단락시간비율, 아크끊김횟수 등과 같은 인자들을 구체적으로 계산하여 통계처리한 결과 정상적인 경우와 현저한 차이가 나타나게 되었다.

3.3.3 용접점 어긋남에 대한 공정능력 분석 (Analysis)

그림 13은 용접점 어긋남이 심한 때의 용접전압에 대한 공정능력 분석 결과를 나타낸 것이다. 왼쪽의 수직선(점선)은 하한계(Lower specification)이고 상한계(Upper specification)를 나타내는 수직선은 데이터의 막대그래프에 가려져 있다. 즉 데

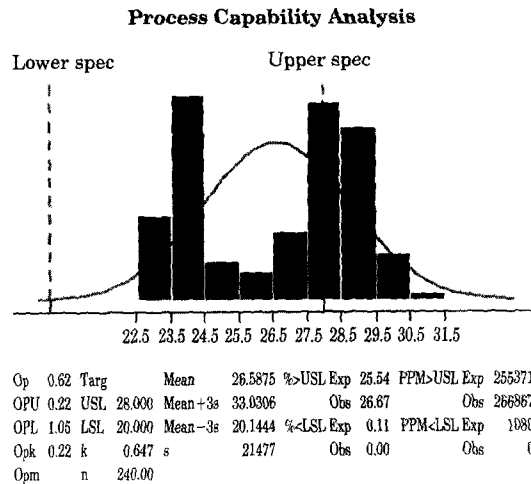


그림 13 용접점 어긋남이 심한 때의 용접전압에 대한 공정 능력 분석 결과



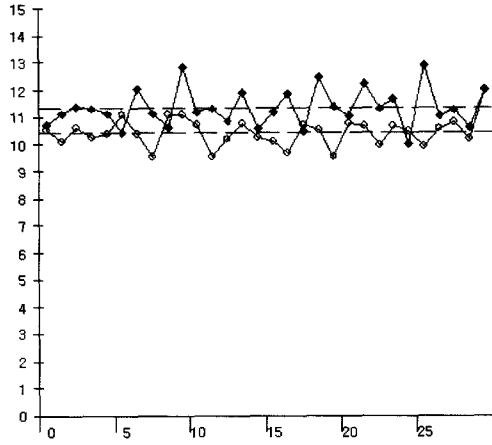


그림 14 위치제어용 지그 설치에 의해 개선한 후의 용접점 위치 산포

이터의 평균치  $\mu$ 가 목표치에서 큰 쪽으로 상당히 어긋나 있음을 알 수 있다. 또한 전압의 산포도 크기 때문에 안정된 공정은 아님을 알 수 있다.

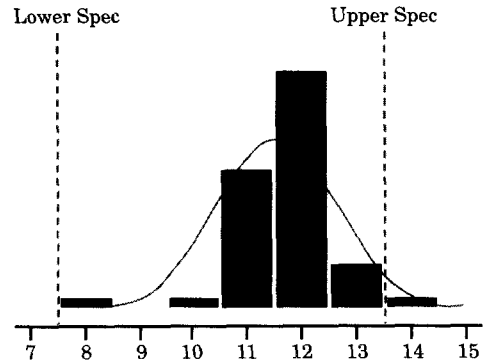
또한 상기의 용접 파형 모니터링 결과 얻어진 각종 인자들을 이용한 공정능력 분석도 가능하고 이러한 절차를 적절히 활용하면, 용접점 위치를 현장에서 직접 측정하지 않고 파형의 모니터링만에 의해서도 그 위치 어긋남을 인식할 수가 있는 것이다.

### 3.3.4 용접점 위치의 정밀 제어에 의한 개선 (Improvement)

자동 용접 현장에서 구멍의 중심과 용접토치의 중심을 정확하게 제어하여 용접점이 어긋나지 않도록 할 수 있는 지그를 설계하여 설치하였다. 지그의 성능 평가를 위해 다시 상기의 공정능력 분석을 수행하였으며, 지그의 설치 초기부터 완전한 성능이 얻어지지 못하여 2-3차례의 공정능력 분석을 수행하여 최종적으로 만족스런 용접점의 위치 산포가 얻어졌던 것이다.

그림 15와 그림 16은 개선 전후의 용접점 위치에 대한 공정능력 분석 결과로서 개선후는 상하한계의 중심에 데이터의 평균이 거의 일치하면서도 산포도 적게 되어 있어서 좋은 개선효과를 정량적

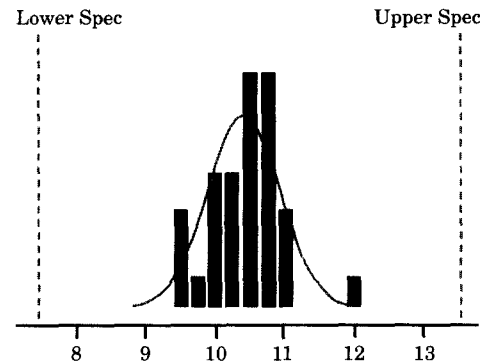
### Process Capability Analysis for R2(8/26)



Op	0.88	Targ	10.5000	Mean	11.5407	%>USL Exp	4.16	PPM>USL Exp	41590
OPU	0.58	USL	13.5000	Mean+3s	14.9334	Obs	3.33	Obs	33333
OPL	1.19	LSL	7.5000	Mean-3s	8.1479	%<LSL Exp	0.02	PPM<LSL Exp	177
Opk	0.58	k	0.3469	s	1.1309	Obs	0.00	Obs	0
Opm	0.65	n	30.0000						

그림 15 개선 전 용접점 위치에 대한 공정능력 분석 결과

### Process Capability Analysis for R2(9/15)



Op	1.88	Targ	10.5000	Mean	10.4343	%>USL Exp	0.00	PPM>USL Exp	0
OPU	1.92	USL	13.5000	Mean+3s	12.0286	Obs	0.00	Obs	0
OPL	1.84	LSL	7.5000	Mean-3s	8.8400	%<LSL Exp	0.00	PPM<LSL Exp	0
Opk	1.84	k	0.0219	s	0.5314	Obs	0.00	Obs	0
Opm	1.88	n	30.0000						

그림 16 개선 후 용접점 위치에 대한 공정능력 분석 결과

으로 확인할 수가 있었다.

### 3.3.5 관리 (Control)

용접점 위치가 잘 관리될 수 있도록 하기 위해서

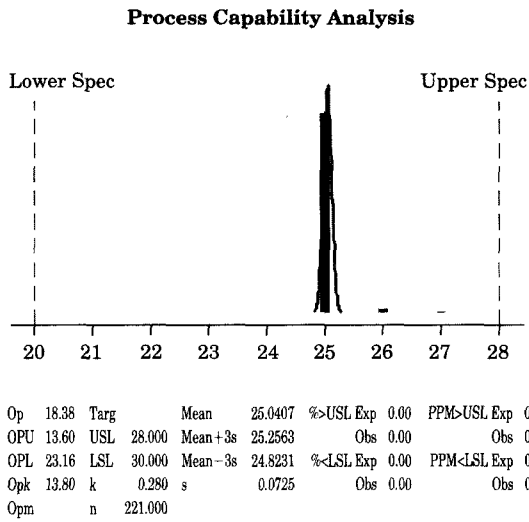


그림 17 개선후 정상적인 관리하에서의 아크전압에 대한 공정능력 분석결과

는 정기적인 지그의 점검이 필요하고, 그 때 지그의 성능 평가까지 함께 할 수 있도록 하는 체계가 필요하였다.

또한 아크모니터링 시스템에 의해서 획득한 용접 공정 인자들의 산포를 6σ에 의하여 분석함으로써 항상 라인상(in line)에서 엄격한 관리가 가능한 체제를 확립할 수 있었다. 비정상적인 아크스폿용접이 행해지면 항상 경보음을 발생하는 구조로 되어 있어서 작업자의 현장 감시 업무에 부담이 현저하게 줄어들게 되었다.

#### 4. 정밀 저항용접기의 성능 평가를 위한 6시그마의 적용

##### 4.1 정밀 저항용접기 성능 평가의 배경

선박의 각종 센서류나 전자부품의 조립을 위해서 많이 적용되는 정밀 저항용접법은 그 생산원가가 저렴하면서도 설비투자가 소규모이며, 대량 생산시의 품질도 균일하게 잘 얻어지는 장점이 있다.

이러한 정밀 저항용접에는 통상 컨덴서형 직류 용접전원과 인버터제어에 의한 직류 용접전원이

많이 적용되고 있는 추세이다. 일반적인 컨덴서형 직류 용접전원은 가격이 싸다는 것과 단시간 통전이 가능하다는 장점은 있지만, 전류의 출력파형을 다양하고 정밀하게 제어할 수 없는 단점 때문에 고부가가치의 부품을 대량 생산하는데는 적절하지 못하다. 한편, 가장 보편적으로 적용되는 인버터제어형 직류용접전원은 출력안정성은 우수하지만 초단시간 통전(예, 1msec의 통전시간)은 불가능하기 때문에 초정밀 저항용접에는 사용될 수 없는 특징이 있다.

그런데, 최근에는 일부의 전자제품(예, 휴대폰용 소형 배터리)을 조립하는 과정에서 매우 얇은 소재를 이용하는데, 그 때의 용접 통전시간은 1msec전후로 아주 짧게 되어야 한다. 이렇게 통전시간을 초단기로 하면 제품표면에 산화가 잘 되지 않고, 전극의 사용수명이 현저히 증가하게 되므로 생산라인의 정지 간격이 길어지게 되는 등 그 장점이 많다.

따라서, 여기서는 정밀 저항용접기의 성능평가를 함에 있어서 다음과 같은 사항을 고려하고, 6σ를 적용하여 그 단기공정능력지수 Cp를 계산하여 출력 안정성을 평가하였다.

- 요구 통전전류 : 1300A
- 무부하 상태에서의 단시간 고전류의 출력 안정성(30회 반복)
- 부하상태(약1.2mΩ)에서의 출력 안정성(30회 반복)
- 단기공정능력지수 Cp계산에 사용한 USL-LSL : 100A

##### 4.2 각 정밀 저항용접기의 출력 전류 측정 (Measure)

그림 18은 정밀 저항용접기의 출력전류를 스폿용접모니터링 시스템에 의해 계측하여 나타낸 것이다. 통전시간이 3msec.정도로 짧았기 때문에 이 인버터 직류 용접기의 출력전류는 파형이 상당히 불규칙하고 출력이 안정되지 못하였다. 통상 이런 형태의 용접기는 출력전류의 통전시간이 10msec.

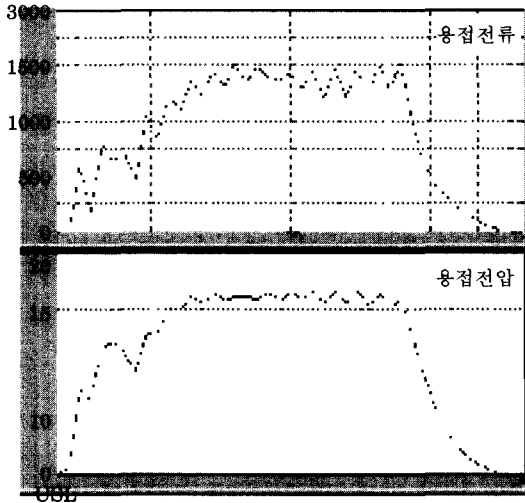


그림 18 정밀 인버터 직류저항용접기의 출력 전류 파형 일례(Spot Monitoring System)

정도 되면 아주 출력안정성이 우수해진다.

여기서는 4종류의 정밀 저항용접기의 출력에 대하여 무부하 상태에서 30회 측정하였으며, 실제 제품의 부하저항과 같은 부하상태(STS304, t1.2 1매→1.2mΩ)를 주어서 30회씩 측정하였다.

4.3 출력 전류의 안정성 분석(Analysis)

표 3은 4종류의 정밀 저항용접기에 따른 출력 안정성의 평가 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 출력 안정성은 단기공정능력지수 Cp에 의하여 평가하였다. 실제 현장에서 용접기가 사용될 때는 적어도 Cp가 2.0이상이면 만족스럽지만, 실험실에서 무부하 또는 일정하고 안정된 부하상태에서 용접할 때는 2.0보다 훨씬 큰 값이 얻어져야 한다.

표 3에서 보면, 무부하 상태에서는 Cp가 전체적으로 크게 얻어져서 상당히 만족스런 결과가 얻어졌다. 특히 T사의 C모델은 출력의 편차가 전혀 없어서 Cp가 무한대로 되었지만, T사의 B모델은 1.623으로서 무부하 상태에서도 안정된 출력이 얻어지지 못하는 것을 알 수 있었다. 이 B모델은 원래 대출력 인버터 용접전원으로서 단시간 통전에

표 3. 각 정밀 저항용접기에 따른 출력 안정성 평가 결과

용접기종류	무부하 단락 출력전류*		부하시 출력전류* (STS304, t1.2 1매)	
	표준편차σ(A)	Cp**	표준편차σ(A)	Cp**
외국 M사 인버터용접기	0.805	12.42	17.97	0.556
T사 A모델 인버터용접기	0.455	21.98	27.91	0.358
T사 B모델 인버터용접기	6.161	1.623	61.40	0.16
T사 C모델 신개발용접기	0.00	∞	1.28	7.812

\* 통전시간 : 3msec,  
\*\* USL-LSL : 100A

는 그다지 적합하지 않음을 알 수 있었다.

한편, 1.2mΩ의 부하상태에서 30회 반복 통전하였을 때의 Cp는 T사의 C모델만이 충분히 만족스런 값을 보였다. 따라서 본 연구에서는 T사의 C모델을 선택하여 현재 양산 라인에서 사용하고 있으며, 통전시간은 1msec.전후로 매우 짧게 하여 아주 안정되게 적용하고 있다.

고급 용접기(기존 용접기 가격의 5-6배)의 국산화 과정에서 국내 대기업들의 불신감을 불식시키고 합리적인 용접기의 성능 평가 방법을 확립할 수 있게 된 것에서 가장 큰 의미를 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

용접 분야에는 용접품질에 미치는 인자가 매우 특수하고 다양하여 일반적인 품질 관리 전문가들이 접근해서 6σ를 적용하지 못하는 것이 지금까지의 추세였다. 따라서 대규모 자동 생산라인에서 용접공정만이 품질 불량률 유난히 많이 발생시키는 문제 공정으로 취급되었었다.

그러나, 최근에는 아크모니터링 시스템 및 스폿모니터링 시스템의 현장 적용과 관련하여 품질

영향 인자의 자동 검출이 가능해졌고, 용접 분야에서 6 $\sigma$ 를 이해하여 그것을 적용할 수 있는 입장이 됨으로써 획기적인 품질 개선의 가능성이 엿보인다.

국내에서도 일부의 대기업이기는 하지만, 생산 라인의 모든 용접기에 아크모니터링 시스템을 설치하고, 각각을 한 대의 품질 감시 컴퓨터로 연결하는 네트워크를 구축하여 성공적으로 활용하고 있다. 이런 형태로 되면 현장 품질 감시원의 업무 부담은 물론이고 품질 불량률의 획기적인 감소 효과와 품질에 영향을 미치는 공정 변수를 모두 기록 관리

할 수 있어서 금후 강조되는 제조물 책임보험에 대한 대비도 가능한 것으로 평가받고 있다.

용접 분야에서도 이제는 본격적으로 디지털화를 추구할 수 있는 기틀이 구축되고 있다고 할 수 있다.

또한 IT(Information Technology)분야의 번창을 옆에서 보고 '강건너 불구경 하듯' 할 것이 아니라 적극적으로 재료 가공 분야에 활용하여 제조업의 고부가가치화에 박차를 가해야 할 것으로 생각된다.