연 구 논 문

# 서보건 이용 시 저항 점 용접의 동특성 분석에 관한 연구

백 정 엽* · 이 종 구** · 이 세 헌***

*한양대학교 공과대학 정밀기계공학과
**대한상공회의소 전북인력개발원 컴퓨터응용 금형설계학과
***한양대학교 공과대학 기계공학부

# A Study of Dynamic Characteristic for Resistance Spot Welding Process Using Servo-gun System

Jung-Yeub Baek*, Jong-Gu Lee** and Se-Hun Rhee***

*Department of Precision Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
**Computer Aided Mould & Die Design, Jeonbuk Human Resources Development Institute, Gunsan 573-882, Korea
***School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

## Abstract

Air gun has been one of the good tools to press two sheet metals. However, it is not easy to control the acting force precisely. A Servo-gun is a good tool to control the acting force on the workpiece comparing with the air gun. Servo-gun has a higher tensile shear strength and lower indentation depth as well as smaller spatter. Dynamic resistance was obtained according to the acting force and welding current. As the acting force was changed during welding, the welding quality was increased.

* Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr
(Received December 20, 2004)

Key Words : Resistance spot welding, Welding-gun, Servo-gun, Dynamic resistance, Tensile shear strength, Indentation

## 1. 서 론

자동차 생산의 자동화에 저항 점 용접이 도입되면서 용접건이 로봇의 끝 단에 연결되어 자유로운 움직임이 가능하게 되었다. 저항 점 용접에서 용접건은 주로 공압을 이용해 용접부에 압력을 작용하였으나, 최근에 서보모터를 이용하여 가압력을 변화시키는 서보건 방식으로 전환되는 추세이다. 일반적으로 서보건을 사용하면 용접 로봇의 이동경로 감소와 가압력 안정화 시간 감소에 따른 공정 시간 감소, 목표 가압력에 도달하기 시작할 때 오버슈트가 없는 가압 프로화일, 소음의 감소 등의 장점을 얻을 수 있다. 저항 점 용접에서 중요한 입력 인자(용접 전류, 통전 시간, 가압력 등) 중 하나인 가압력에 대한 영향에 대해 Roger B.Hirsch[1]가 제시한 것처럼 가압력은 용접 품질과 밀접한 관련이 있고, 최적 가압 조건이 존재한다. 따라서 서보건 시스템을 사용할 경우 가압력 인자에 대한 정확도 및 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

서보건 시스템에 대해서는 Kazutsugu Suita 등[2]이 공압건으로부터 로봇과 동기화 할 수 있는 서보건으로의 기술 전환을 제안하였고, Park Ji-Hwan 등[3]은 서보건 저항 점 용접 공정에서 품질향상을 위한 가압력 제어를 위해 제어 모델을 개발하고 가압력이 용접 품질에 미치는 영향을 분석하였다. 서보건과 공압건의 비교에 관해서 Stephen A.Slavick[4]가 저항 점 용접에서 서보건의 구조를 설명하고 서보건과 공압건을 비교하여 서보건의 장점을 제시하였고, He Tang 등[5]은 서보건과 공압건을 비교하여 서보건의 제어 성능이 공압건 보다 우수함을 실제 실험 결과를 통해 증명하였다. 또한

기존의 저항 점 용접 공정으로는 양호한 용접 품질 결과를 얻기가 어려운 알루미늄 합금 용접에 임창석 등[6]은 서보건을 이용하여 점 용접 시 발생하는 기공을 가압변화를 통해 줄일 수 있는 방법에 대해 제시하였다. 기존의 연구들은 서보건의 현장 적용 시 얻을 수 있는 장점들과 경제적인 측면에서 생산성 향상에 대한 방법을 제시하였다. 그러나 많은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 서보건은 초기 설치비용이 일반 공압건 보다 고가이기 때문에 현장 적용이 용이하지 못하고, 기존 용접 로봇과의 인터페이스 문제 등으로 인해 우리나라의 경우 새로운 자동차 생산라인에 일부 적용되고 있다. 만약 서보건이 기존 공압건 보다 우수한 용접 품질을 가지고 있다면 서보건의 적용이 더 활발해 질 것이다.

본 연구에서는 서보건이 공압건과 비교하여 단순히 시스템 특성에 따른 생산성향상, 소음 감소 등과 같은 측면보다 가압력 제어 정확도 및 정밀도 향상의 장점을 이용하여 용접 품질과의 관계를 분석하고자 하였다. 이를 위해서 용접 품질 판단 기준인 강도와 압흔깊이, 날림 발생여부 등을 사용하여 공압건과 서보건의 비교를 수행하였다. 또한 동저항을 계측하여 서보건 저항 점 용접에서 너깃 형성과 관련된 고찰을 하였고, 이를 바탕으로 너깃 생성이 수행되는 시점을 기준으로 통전 시간 중에 가압력 변화를 주어 보다 향상된 용접 품질을 얻고자 하였다. 이에 따른 결과를 고장력 TRIP강에 적용하였다.

## 2. 서보건 제어 시스템

실험에 사용된 서보건 시스템은 Fig. 1에서 보여진 바와 같이 서보모터와 제어기의 조합으로 이루어져 있고, 모터에 연결된 벨트와 볼 스크류의 움직임으로 전극이 직선운동을 수행하도록 제작되었다. 기존 공압건 시스템에서는 가압력의 제어가 어렵고 타점 당 가압력의 제어가 사실상 불가능 했던 반면, 서보모터를 제어함으로써 가속도, 속도, 위치, 토크 제어가 가능해져 가압력 제어를 수행할 수 있었다. 또한, 소프트터치 동작 알고리즘을 개발하여 모재에 충격 없이 가압이 가능해져 모재의 안정화 시간을 줄여 용접을 수행하므로 용접 시간을 단축할 수 있었다. 서보건은 Fig. 2와 같이 7축 로봇으로 함께 제작되거나 6축 로봇의 끝 단에 부착되어 로봇과의 협동 작업에 의하여 동기 동작이 가능해진다. 이처럼 로봇과의 동시동작으로 전극의 개방 동작과 타점 이동 동작을 동시에 수행함으로써 용접 수행시간이 감소되었다.

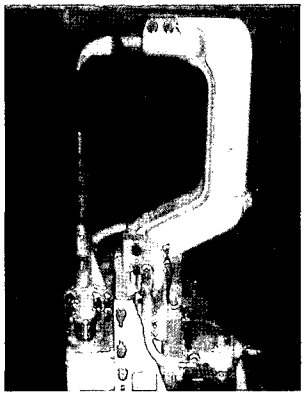


**Fig. 1** *Photo of servo gun for resistance spot welding*

필요한 가압력을 생성시키기 위하여 모터에 대한 입력으로 서보건 끝 단의 가압력을 제어한다. 가압할 경우를 제외하고는 위치제어의 방법으로 서보건을 작동시켰다. 서보건의 하단부에 접촉센서를 설치하여 용접수행 후 전극이 제자리에 돌아올 때의 위치를 기억하도록 하였고 이 값을 기준으로 다음 타점의 전극 제어를 수행하였다. 가압 시에는 모재의 특정거리 까지는 고속이동하고, 그 후 모재와 접촉 시까지는 저속 이동하게 되는 소프트터치 동작알고리즘을 기반으로, 모재와 전극이 접촉할 때 프로그램에 설정된 속도와 가속도의 허용치를 넘었을 경우 모터는 멈추게 된다. 그 후 원하는 가압력을 얻기 위하여 토크제어를 통해 가압과정이 이루어 진다. 이러한 과정을 Fig. 3에 나타내었다.

전극이 멈추었을 때 위치제어에서 토크제어로 바뀌게 되는데, 여기서의 입력 값은 전압이 된다. 측정된 가압력과 전압과의 상관관계를 Fig. 4에 나타내었다. 실험에 실제 필요한 200kgf ~ 400kgf범위에서의 출력값은 일정하였고, 이 값들의 평균값을 이용하여 1차의 회귀식을 구하였다. 식(1)에서 *force[kgf]* 는 전극 끝단 가압력을 나타내고, *voltage[V]* 는 지령 전압을 표시한다. 따라서 식(1)에서 지령된 전압에 따라 전극 가압력이 출력된다.

$$force = 148 \times voltage - 755 \quad (1)$$

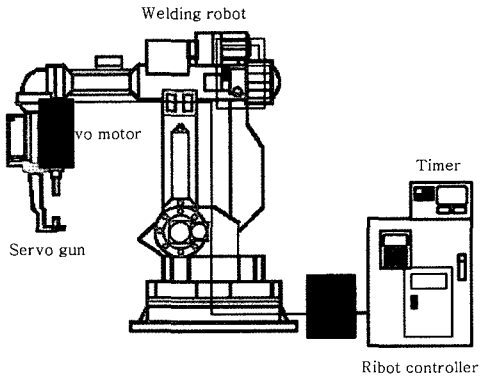



**Fig. 2** Resistance spot welding robot using servo-gun

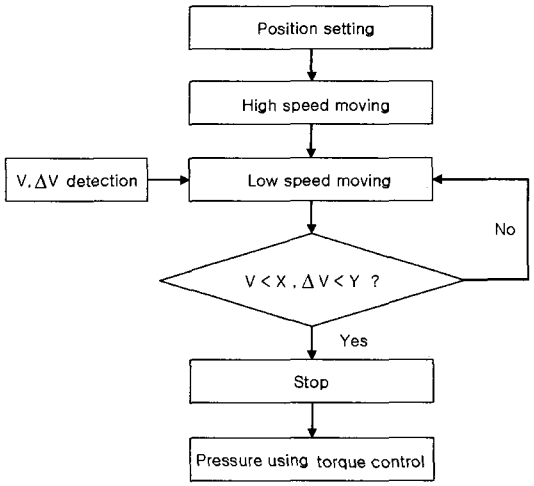



**Fig. 3** Flowchart of force control algorithm for servo gun

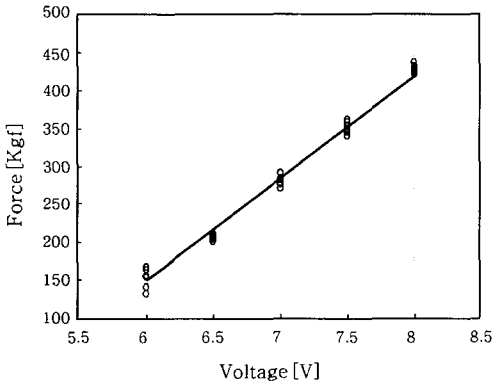



**Fig. 4** Relationship between the force and voltage

## 3. 서보건과 공압건의 용접 특성 해석

서보건이 공압건을 대체함으로써 용접 품질에도 어느 정도 영향이 미칠 것으로 생각된다. 그러나 구체적인 연구결과가 아직 알려지지 않았다. 본 연구에서는 구성된 서보건 시스템의 사용이 용접 품질에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 용접부의 전단인장강도, 압흔깊이, 날림현상의 발생유무와 동저항 패턴을 비교 함으로써 이러한 품질 판단 인자에 어떠한 영향을 미치는지 공압건과 같은 조건으로 비교 실험을 실시하여 그 결과를 분석하였다.

### 3.1 실험강종 및 시편

일반적으로 저항 점 용접에서 용접부 품질은 전단인장강도, 너깃 지름, 압흔깊이 등을 기준으로 하고 있다. 특히 전단인장강도 값과 압흔깊이는 용접부 품질을 판단하는 중요한 지표이다. 저항 점 용접에서 전단인장강도와 압흔깊이는 용접전류, 통전시간, 가압력에 의해 결정되므로, 이 값들을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 모재는 고장력 TRIP 60강으로 그 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1과 같다. 그리고 시편의 규격은 Fig. 5과 같은 모양으로 하여 폭(W)이 30mm, 두께(T)가 1.2mm, 길이(L)가 100mm인 시편을 이용하였다.

### 3.2 가압력 변화에 따른 용접 품질 분석

가압력이 용접품질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 같은 조건으로 공압건과 서보건으로 Table 3의 조건으로 실험을 실시 하였다. 용접 수행 후 저항 점 용접의 품질의 판단 기준으로 전단인장강도와 용접부의 압흔깊이를 사용하였다. 전단인장강도의 기준값은 10,276N으로 사용하였고, 압흔깊이의 경우는 시편의 두께의 10%를 기준으로 설정하였다.(KS규격 B 0850 참조) 또한 날림현상의 발생 여부를 살펴보았다. 용접 품질 정보를 담고 있는 동저항을 측정하여 가압력 인자가 용접품질에 미치는 영향을 분석하였다. 모든 실험은 10회 반복실험 실시 후 평균값을 사용하였다.

Fig. 6, 7에 가압력에 따른 공압건과 서보건의 전단인장강도와 압흔깊이의 값을 전류를 변화시키며 나타내었다. 압흔깊이는 압흔의 중심과 중심으로부터 압흔의 지름 만큼 떨어져 있는 점에서의 판 표면과의 높이차를 다이얼 게이지로 측정 하였다. (KS규격 B0850참조) 날림현상이 발생하는 영역은 원으로 표시하였다. 동일

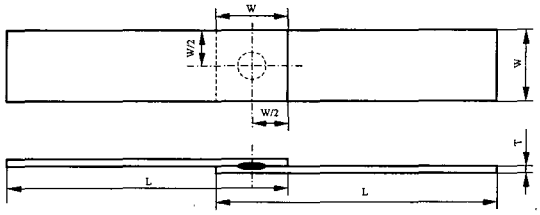



**Fig. 5** Spot weld specimen for tensile shear test

**Table 1** Chemical compositions of TRIP(wt %)

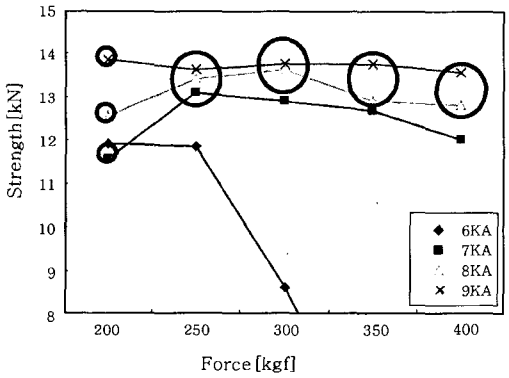
| C | Mn | Si | P | S | S-Al | N | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.084 | 1.52 | 0.97 | 0.078 | 0.005 | 0.04 | 0.004 | Re |

**Table 2** Mechanical property of TRIP

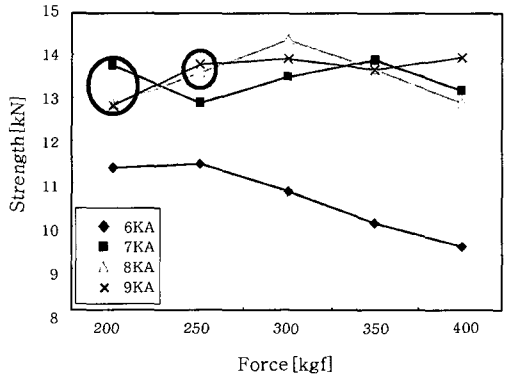
| Yield strength [kgf/mm$^2$] | Tensile strength [kgf/mm$^2$] | Elongation (%) |
|---|---|---|
| 40~50 | 62 | 30~35 |

**Table 3** Welding process variables

| Welding time (cycle) | Welding current(kA) | Force(kgf) |
|---|---|---|
| 15 | 6, 7, 8, 9 | 200,250,300,350,400 |

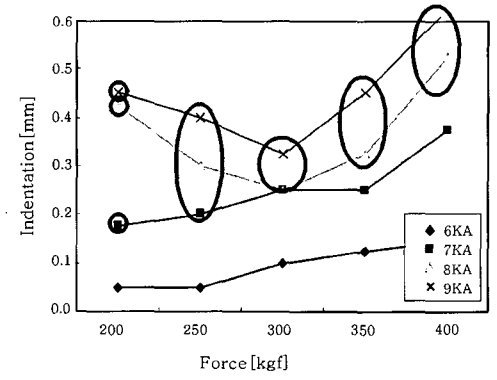



(a) Air gun

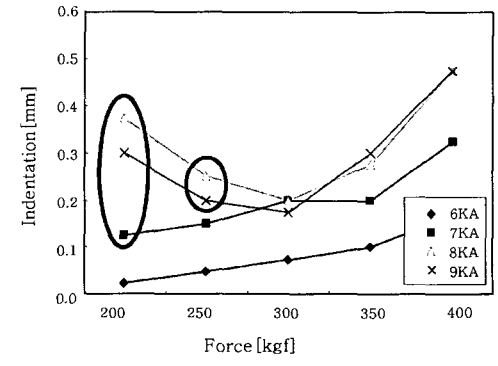



(b) Servo gun

**Fig. 6** Force vs tensile shear strength




(a) Air gun




(b) Servo gun

**Fig. 7** Force vs indentation

한 조건과 동일한 용접타이머로 용접을 수행하였음에도 불구하고 용접 품질에는 많은 차이점을 나타내었다. 이로서 가압력의 제어가 용접품질에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 가압력 제어 방식에 따라 보다 향상된 용접 품질을 얻을 수 있을 것이라는 예측을 할 수 있다.

공압건으로 용접을 수행하였을 경우 용접 적정 전류보다 저전류인 6kA인 경우를 제외하고는 가압력과 큰 관계없이 기준 강도값을 만족하는 전단인장강도 값을 나타내었고, 용접 전류가 높을수록 전단인장강도 값도 약간씩 증가함을 알 수 있었다. 그러나 가압력이 낮거나 전류가 높은 경우 대부분 날림현상이 과도하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 압흔깊이에서도, 전류가 클수록 큰 값을 나타내었다. 서보건으로 용접을 수행했을 경우는 용접전류가 6kA인 경우, 인장 실험 결과 전단인장강도가 낮을 뿐 아니라 단면 파단이 발생하였으나 공압건으로 용접을 수행한 경우와 달리 특정강도 이상을 유지하였다. 6kA를 제외한 경우, 용접 가압력이 낮으면 용접 초기 접촉 저항의 증가로 발생되는 초기 과도 입열로 인해 용접부의 용융이 많이 발생하여 압흔깊이는 증가하나, 용융이 생성되고 난 뒤 용융부를 견고하게 만드는 가압력을 주지 못해 전단인장강도가 감소하는 경향을 보였다. 반면 적절한 가압력에서는 충분한 입열로 전단인장강도가 증가함과 동시에 압흔깊이도 낮음을 알 수 있었다. 가압력이 적절한 수준을 넘으면, 초기 접촉 저항의 감소로 저항 발열량이 줄어들고, 이로 인하여 전단인장강도가 감소하는 경향을 보여주었고, 통전 후 유지시간에 과도한 가압력을 받아서 압흔깊이가 깊어진다는 점을 예측 할 수 있었다. 그리고 가압력이 200, 250kgf의 경우를 제외하고는 날림현상이 발생하지 않음을 알 수 있었고, 이것은 공압건과 비교해 현격히 차이 나는 부분이었다. 공압건으로 용접을 수행한 시편의 전단인장강도는 용접전류가 증가함에 따라 증가하고 압흔깊이는 증가하는 반면, 서보건의 경우에는 용접전류가 증가함에따라 전단인장강도가 비례하게 증가하지 않았고, 압흔깊이도 증가하다가 특정 전류값에서 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 용접부 통전 시 용융부에 공압건의 경우에는 일정한 가압력으로 유지되는 반면, 서보건의 경우에는 건의 위치제어로 가압력이 제어되어 가압력이 특정가압력을 유지하지 못하고 용융시의 가압력 변화로인한 차이인 것으로 추정할 수 있다. 이로서 공압건과 서보건의 용접 최적조건이 다름을 알 수 있으며, 이에 대한 연구가 진행중이다.

위의 실험결과와 같이 같은 조건의 용접 수행 시 기존의 공압건과 비교해 서보건을 이용한 용접 시 전단인

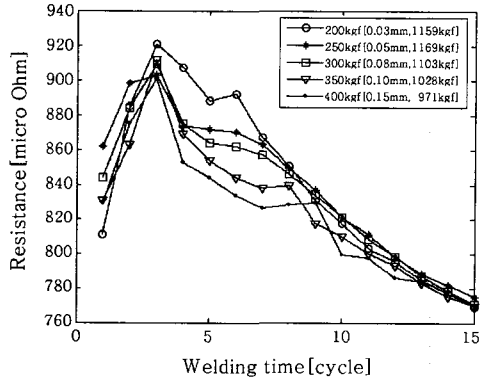
장강도와 압흔깊이, 날림현상 등에서 용접 품질이 향상되었음을 알 수 있다. 이는 가압 방법을 제외하고는 같은 조건에서 실험한 결과이기 때문에 가압방식의 차이가 용접품질을 결정 짓는 중요한 인자임을 확인 할 수 있다.

이러한 현상을 고찰하고자 용접기의 1차측에서 동저항을 측정하였고, 이 동저항을 분석함으로써 용접중의 너깃 형성과정과 강도 등을 예측할 수 있었다. 일정한 전류일 때 가압력의 변화에 따른 동저항 패턴을 Fig. 8에 나타내었다. 가압력에 따른 동저항의 패턴을 보여줌과 동시에 그때의 전단인장강도와 압흔깊이를 나타냄으로써 용접품질과 동저항의 관계를 알아보기 쉽게 하였다. Fig. 8(a)에서는 낮은 용접 전류로 인하여 가압력 변화에 따른 특징적인 동저항 변화가 보이지 않았다. 가압력이 증가할수록 저항이 낮아짐을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 용접품질이 비교적 양호했던 8kA일 때의 가압력에 따른 동저항 변화를 나타내었는데, 가압력이 클수록 초기 접촉저항 값이 감소함을 알 수 있고, 가장 가압력이 작은 200kgf 일 때, 초기 입열량이 가장 커서 날림현상이 발생 하였고, 이로 인해 저항이 급격이 낮아짐을 알 수 있다. 가압력이 가장 큰 400kgf일 때에는 초기 입열량의 부족으로 베타피크 지점이 후반부에 나타남을 알 수 있다.

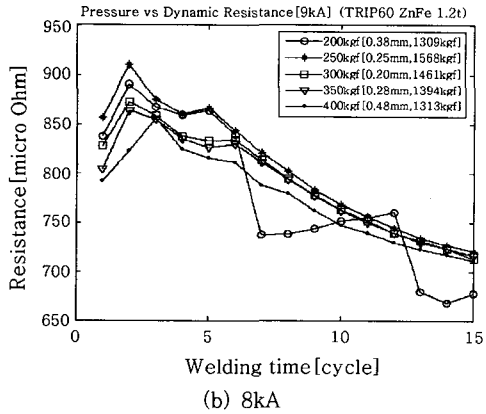
가압력이 일정할 때 용접 전류에 따른 동저항 패턴을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)에서 전류가 낮을 때 초기 접촉저항이 낮음을 알 수 있고, 용접 전류가 증가함에 따라 급격한 동저항 변화로부터 과도한 날림현상이 발생됨을 알 수 있다. 이는 용접 전류에 상관없이 부적절한 용접임을 알 수 있고 가압력이 용접품질에 큰 영향을 미치는 인자임을 나타낸다. Fig. 9(b)에서는 높은 가압력에서의 용접전류에 따른 동저항의 변화를 나타내었다. 베타피크의 위치가 Fig. 9(a)와 비교해 용접공정의 후반부로 이동했는데, 높은 가압력으로 인해서 초기 접촉 저항이 감소함에 따라 입열량도 줄어 들었기 때문이다.

### 3.3 통전 중 가압력 변화가 용접성에 미치는 영향 분석

용접 공정에서 서보건 시스템의 사용이 생산성 향상의 측면뿐만 아니라 용접품질 향상에도 영향이 있음을 알았다. 본 연구에서는 이처럼 가압력 변화가 용접 품질과 밀접한 영향이 있음을 알고, 통전 중 가압변화가

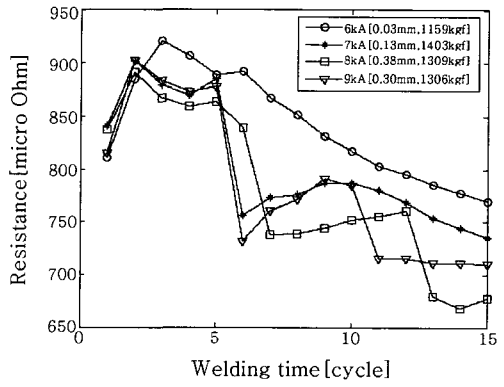



(a) 6kA

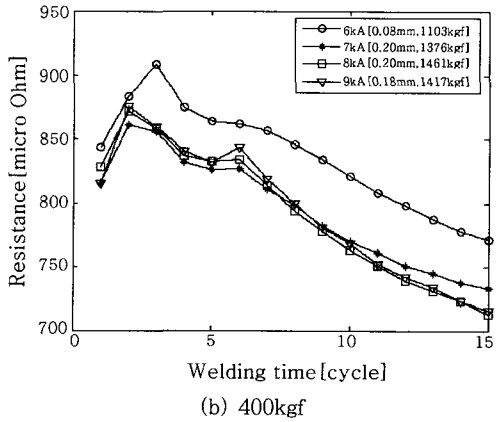



(b) 8kA

**Fig. 8** Force vs dynamic resistance




(a) 200kgf




(b) 400kgf

**Fig. 9** Current vs dynamic resistance

용접품질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. Table 4와 같이 초기 가압력을 P1으로 설정하였고 가압변화 후의 가압력인 후기 가압력을 P2로 설정하였다. P1에서 P2로 변환되는 가압력 변화구간은 통전 시작 후 5cycle지점으로 지정했다. 이는 용접 시 용융이 시작되는 시점으로, 1차측에서 측정한 동저항 그래프로 이를 확인할 수 있었다.

Fig. 10에서 P1이 200, 250kgf일 때 기준강도 이상의 값을 나타내지만 날림현상이 발생하여 부적절한 용접품질을 나타냄을 알 수 있다. P2 가 300, 350, 400kgf 일 때는 P2 의 값에 따라 압흔깊이가 달라짐을 알 수 있다. 날림현상이 발생하지 않는 가압변화조건에서 P2 가 P1보다 클 때 용접품질이 향상됨을 알 수 있었다. Fig. 11에서 P1이 300kgf일 때 압흔깊이가 전반적으로 낮음을 알 수 있다. 따라서 P1을 300kgf 정도로 고정하고, P2를 결정하면 기준강도 이상의 높은 전단인장강도 값과 낮은 압흔깊이 값을 얻을 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 12는 이때의 동저항 그래프이다. Fig. 12(a)는 모두 P2가 증가할 때의 동저항 그래프로, 초기 가압력이 낮아 초기 접촉저항이 높음을 알 수 있고 이로 인하여 후기 가압력과 상관없이 급격한 동저항 변화를 일으킴으로써 날림현상이 발생함을 알 수 있다. Fig. 12(b)에서는 가압변화가 이루어지는 5cycle지점에서 동저항이 Fig. 12(a)와는 달리 급격한 변화 없이 변화됨을 알 수 있었고, 가장 우수한 용접품질을 얻을 수 있는 동저항 패턴을 나타낸다. Fig. 12(c)에서는 초기의 높은 가압력으로 인하여 접촉 저항의 감소로 베타피크 지점이 전체적으로 후반부로 이동 되었음을 확인하였다.

**Table 4** Welding process variable using double force steps

| Welding time(cycle) | Welding current(kA) | Force P1(kgf) | Force P2(kgf) |
|---|---|---|---|
| 15 | 8 | 200, 250, 300, 350, 400 | 200, 250, 300, 350, 400 |

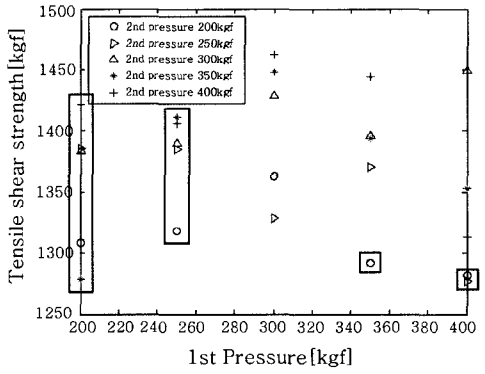



**Fig. 10** Force vs shear tensile strength(8kA)

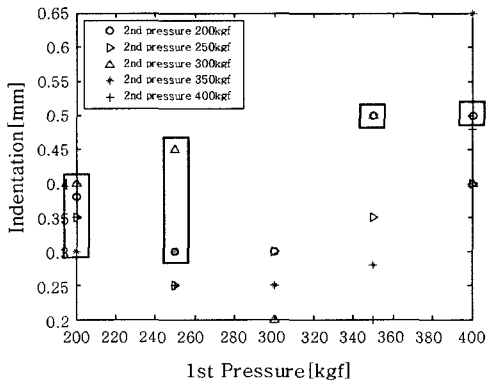
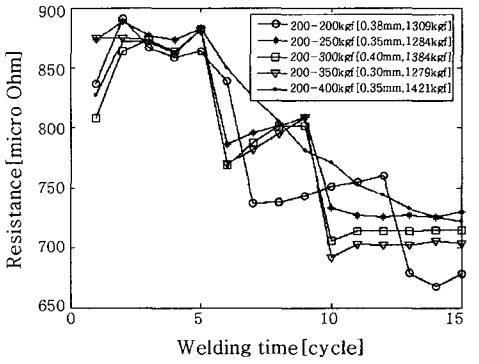
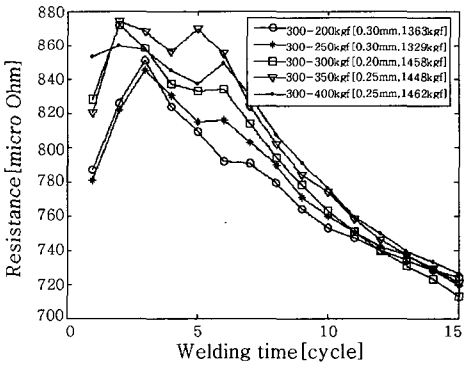


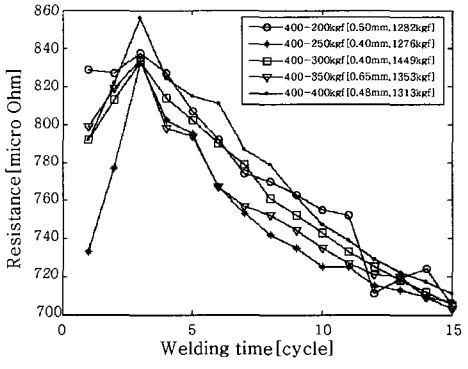

**Fig. 11** Force vs indentation(8kA)




(a) 1st 200kgf(8kA)




(b) 1st 300kgf(8kA)




(c) 1st 400kgf(8kA)

**Fig. 12** Force vs dynamic resistance

동저항 패턴의 베타피크 지점 이후에 가압력을 높였을 경우, 날림현상이 발생한 경우를 제외하고는 또 하나의 베타피크 지점이 발생함을 동저항 그래프로 확인할 수 있었는데, 이렇게 후반부에 동저항이 한번 더 상승함으로써 전단인장강도의 향상과 압흔깊이의 감소를 유발함을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

저항 점 용접 공정에서 공압건 시스템의 경우보다 서보건 시스템을 사용할 때 얻을 수 있는 장점 및 용접부 품질에 관한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 서보건과 공압건 시스템을 이용하여 고장력 TRIP강에 대해서 용접전류와 가압력 변화에 따른 용접 품질을 비교하였다. 서보건이 공압건 보다 용접강도값은 더 큰 값을 가졌고 압흔깊이는 더 작은 값을 나타냈다. 또한 같은 용접 조건에서 날림 발생 비율도 서보건의 경우가 더 적었다. 이는 TRIP강에서 서보건 시스템을 적용하는 것이 공압건보다 더 적절함을 표시해준다.

2) 용접 품질을 나타내는 공정 변수인 동저항을 계측하여 전류와 가압력 변화에 따른 신호 분석을 통해 너깃 생성과 관련된 내용을 제시하였다.

3) TRIP강의 저항 점 용접 공정에서 서보건을 이용하여 통전 시간 중간에 가압력 변화를 수행하면서 너깃 생성이 생성된 시점을 기준으로 통전 후반부 가압력을 증가시키는 가압 패턴이 용접부 품질을 향상 시키는 결과를 얻을 수 있었다.

## 참 고 문 헌


1. R. B. Hirsch : Tip Force Control Equals Spot Weld Quality, Welding Journal, **72-3** (1993), 57-60
2. K. Suita, et al. : Current Status of a Spot-welding Gun for Automobile Body Assembly Lines Incorporating a State of the Art Integrated Servo-motor, Journal-Society of Automotive Engineers of Japan, **50-12** (1996), 57-63
3. J. H. Park : Force Control for the Improvement of Weld Qualities in Resistance Spot Welding Process, Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (1998)
4. S. A. Slavick : Using Servoguns for Automated Resistance Welding, Welding Journal, **78-7** (1999), 29-33
5. H. Tang, et al. : Servo Guns for Resistance Spot Welding, Society of Automotive Engineers; SAE 2000 world congress (Mar 2000), 2000-01-1289
6. C. S. Lim and H. S. Chang : Spot Welding of Aluminum Alloys Using Servogun, Journal of KWS, **22-4** (2004), 43-49 (in Korean)
7. M. Kimchi : Spot Weld Properties When Welding with Expulsion - Comparative Study, Welding Journal, **63-2** (1984), 58-63
8. G. S. Kim, J. W. Kim, C. Y. Won and S. W. Choi : Servo Gun-type Inverter Spot Welding System, Journal of Korean Institute of power electronics, **8-5** (2003), 397-406 (in Korean)
9. Y. Cho and S. Rhee : New Measuring Technology of Dynamic Resistance and Strength Estimation in Resistance Spot Welding, Measurement Science and Technology, **11-8** (2000), 1173-1178
10. N. R. Duchar, R. K. Choen, H. A. Nied and S. J. Godwin : A Closed Loop Control System for Resistance Spot Welding, Measurement and Control for Batch Manufacturing ASME 103rd Winter Annual Meeting, Phoenix Arizona (1982), 89-103
11. Y. Cho, S. Rhee and K. Um : A Study of Real- Rime Weldability Estimation of Resistance Spot Welding using Fuzzy Algorithm, Journal of KWS, **16-5** (1998), 76-85 (in Korean)
12. Recommended Practices for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding, Supersedes AWS D8.7-78, SAE J-1188, An American National Standard
13. J. Min, Y. Oh and G. Kim : A Study on the Spot Weldability of Automotive Steel Sheets, Journal of KWS, **14-3** (1996), 41-47 (in Korean)