

저항 점 용접 로봇에서 서보건의 가압력 제어를 통한 용접 강도 향상에 대한 연구

박 영 환* · 이 중 구** · 이 세 현***

*한양대학교 BK21 혁신설계 기계인력 양성사업단

**한양대학교 정밀기계공학과

***한양대학교 기계공학부

A Study for the Improvement of Weld Quality Through Force Control of Servo Gun in Resistance Spot Welding using Robot

Young Whan Park*, Jonggu Lee** and Sehun Rhee***

*The BK21 Program for Research and Education in Mechanical Engineering, Hanyang University

**Precision Mechanical Engineering, Hanyang University

***Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract

Resistance spot welding is widely used for joining sheet metals in the automotive manufacturing process. Recently, servo-gun is used to increase the productivity and precise control the acting force. However, force control mechanisms have not been investigated with servo-guns until now. In this paper, it is proved that servo-motor current is proportional to torque and by experiment, experimental equation between servo-motor current and electrode force was derived. Algorithm for feedback control of electrode force was suggested using current measurement. In addition, applying soft touch method to this system the impact between electrode and specimen, which is the problem of air gun, could be reduced. Indentation made the force decrease in holding time of resistance spot welding. In order to overcome this problem, force compensation using the servo gun was used and it improved weld strength in good welding current range.

*Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr

(Received March 13, 2006)

Key Words : Resistance spot welding, Servo-gun, Servo-motor, Feedback current, Current transformer, LVDT sensor

1. 서 론

자동차 차체의 조립공정에 있어서 저항 점 용접은 가장 널리 쓰이는 용접법이다. 그 이유는 저항 점 용접기의 단순한 원리와 값싼 설비비 때문이다. 자동차 생산 라인에서는 저항 점 용접의 가압은 공압을 이용한 방법이 현재까지는 주로 이용되었다. 하지만 자동화와 생산성 향상, 원가절감, 소음 등의 작업 환경 개선을 만족시키기 위해서는 로봇과 저항 점 용접기를 동기화가 필

요하며, 좀 더 빠르게 용접할 수 있는 저항 점 용접기의 필요가 요구되었다. 이와 같은 이유로 많은 자동차 제작사는 공압건을 대체할 새로운 서보건을 현장에 투입하고자 이에 관련된 연구를 수행하여 왔다.

서보 모터를 이용하여 가압력을 주는 서보건은 프로그램을 통하여 로봇과의 동기성을 높여주고, 짧은 스트로크(stroke) 제어로 용접목표에 대한 접근 시간을 단축할 수 있다. 또한 저항 점 용접에서 용접 전류, 통전 시간과 함께 3대 중요 요소인 가압력을 제어하여 용접 강도를 더욱 좋게 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따

표면 항력이 변화하여 마찰에 의한 토크도 변화하게 된다. 그러므로 전극이 닿기 전과 닿은 후를 구분하여 해석하여야 한다.

전극이 접촉 이전의 단계에서 서보 모터 전체에 걸리는 토크 T_m 는 식 (2)와 같다.

$$T_m = T_v + T_f + T_d \quad (2)$$

그리고 전극이 접촉한 이후의 모터의 토크 T_m' 은 가압력에 의한 토크 T_p 와 마찰 변화에 의한 토크 T_f' 를 고려하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_m' = T_v + T_f' + T_d + T_p \quad (3)$$

$$T_f' = T_f + \Delta T_f \quad (4)$$

이 때, T_f' 는 식 (4)과 같이 표현될 수 있으며 ΔT_f 는 가압력(P)의 증가에 따라 볼 스크류와 전극 너트사이의 표면 항력 증가로 인하여 변화된 마찰력에 대한 토크이다. 이때 발생하는 가압력을 P 라고 하면, 가압력에 의해 발생하는 토크 T_p 에 대하여 $P = \alpha_p T_p$ 와 같은 비례적인 관계를 갖는다. 여기서 α_p 는 비례상수이다. 그리고 볼 스크류와 전극 너트사이의 표면 항력은 가압력에 비례하여 증가하므로 ΔT_f 는 $\Delta T_f = \beta T_p$ 와 같은 관계식을 갖는다. β 는 마찰 토크와 가압 토크간의 비례상수이다. 이와 같은 관계를 이용하면 ΔT_m 은 식 (5)와 같다.

$$\Delta T_m = T_m' - T_m = T_p + \Delta T_f = (1 + \beta)T_p \quad (5)$$

그리고 토크와 가압력간의 관계식을 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같은 결론을 얻을 수 있으며 이에 식 (1)을 대입하면 식 (7) 과 같은 가압력과 전류와의 관계식을 얻을 수 있다. 식 (7)에서 보는 바와 같이 전류 I 와 가압력 P 사이에는 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

$$P = \frac{\alpha_p}{1 + \beta} \Delta T_m \quad (6)$$

$$P = \frac{\alpha_p}{1 + \beta} k (I_p + \Delta I_f) \quad (7)$$

서보건 전극의 이동에 대한 전류 값의 변화는 Fig. 3과 같다. 전극이 서로 닿지 않고 일정 속도로 접근할 때는 가속도와 마찰력, 외란에 의한 토크가 발생하여 이에 상응하는 전류 값으로 나온다. 전극이 닿은 후부터 서보건의 아래 전극단의 탄성력에 의해서 가압력이

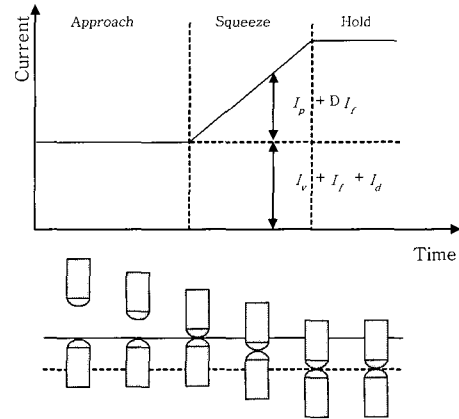


Fig. 3 Current change by the electrode movement

증가하기 시작하고 이에 상응하여 마찰력 또한 비례적으로 커진다. 이에 비례하여 서보 모터에 걸리는 토크도 커지게 된다. 증가한 토크는 전류 값의 증가로 나타나며, 접촉 후부터 증가한 전류 값을 계측함으로써 가압력의 증가량을 알 수 있다.

3. 계측 전류와 가압력간의 상관관계

3.1 서보건 시스템 구성

서보건 시스템은 서보 모터에 의하여 발생하는 토크를 벨트와 볼 스크류를 통하여 전극에 전달하여 가압력을 발생시킨다. Fig. 4에서 일반적인 서보건 시스템의 구성을 보여주고 있다. 서보건은 서보건을 구동하기 위한 서보 모터부, 점 용접을 위한 타이머와 서보 모터와 타이머를 제어하는 상위 제어기로 크게 세 부분으로 구성된다. 그리고 서보 모터부는 AC 서보 모터를 이용하여 가압을 주는 서보건 (servo-gun), 서보 모터를 구동시키기 위한 모터 컨트롤러(motor controller)와 서보 드라이브(servomotor)로 이루어져 있다. 타이머(timer)는 점 용접에서 용접 전류와 통전 시간을 조절하는 기능을 한다.

본 논문에서는 저항 점 용접의 3대 인자 중에 하나인

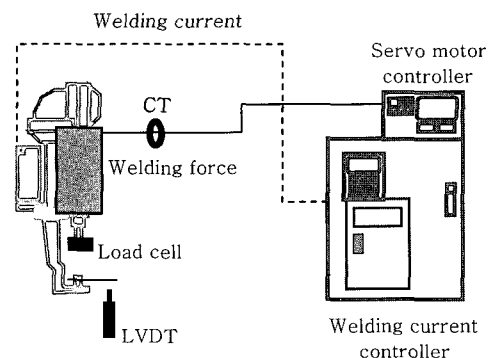


Fig. 4 Servo-gun and welding robot system

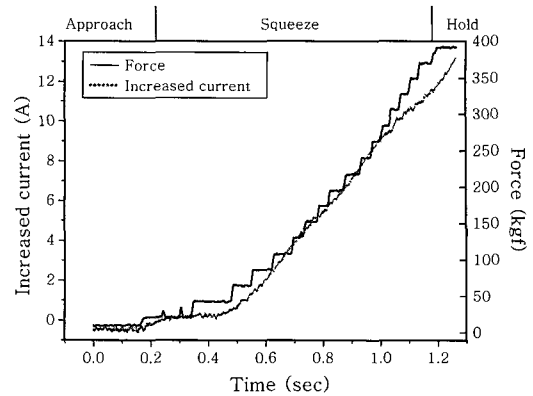
가압력을 측정하기 위해서 서보건(gun) 끝단에 로드셀(load-cell)을 사용하였으며, 모터에 발생하는 피드백(feed-back) 전류를 측정하기 위하여 전류 센서(current transformer: CT) 중에 하나인 홀(hall) 소자 형태의 전류센서를 사용하였다. 전류센서를 이용하여 서보모터 드라이버에서 서보 모터로 입력되는 전류를 측정하였다. 그리고 하부 전극에 접촉식 변위센서(linear variable differential transducer: LVDT)를 부착하여 하부전극의 움직임을 측정하였다.

3.2 전류와 가압력간의 상관관계

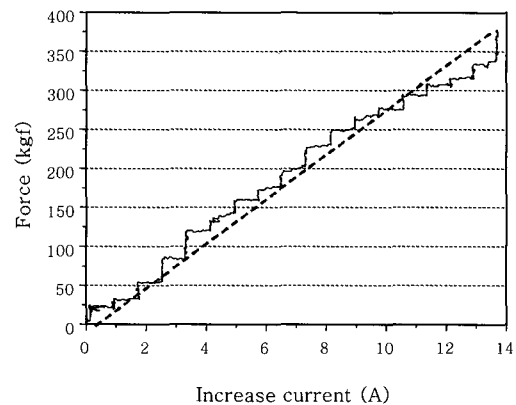
전류와 가압력간의 상관관계를 구하고자 실험을 수행하였다. 식 (7)에서 얻어진 이론식을 전기 및 기계적인 모델링으로 구하기는 매우 어렵다. 그러므로 이론식의 결과로부터 실험식을 구하여 그 결과를 이용하여 서보모터 제어에 사용하였다. 실험에서 서보모터의 전극에 대한 접근 속도는 5.47 mm/s로 하였다. 그리고 하부 전극에 장착된 로드셀로부터 가압력을 측정하였고 이에 따른 모터 전류의 값을 전류 센서로부터 측정하였다.

실험 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 (a)는 시간에 따른 가압력과 전류신호를 표시하였다. 그리고 (b)에서는 전류 신호의 증분과 가압력 간의 관계를 나타내었다. Fig. 5 (a) 에서 Approach 부분은 상부 전극이 점 용접을 위해 하부 전극으로 움직이는 구간이다. 접근단계에서는 일정한 속도로 전극이 움직이면서 일정한 마찰과 외란을 가지므로 서보 모터의 토크의 변화가 없게 된다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 전류의 변화가 이 단계에서는 거의 일어나지 않는다. 0.18 sec 부근 이후는 상부와 하부 전극이 시편을 중심으로 닿으면서 가압력을 발생시킨다. 이 부분을 Squeeze 구간으로 표현하였다. 이때부터 가압이 형성되며, 이에 따라 전류가 상승한다. 제어기에 설정된 가압력에 도달하면 상부 전극은 이동을 멈추게 된다. 이후부터는 Hold 구간으로 바뀌며 일정한 가압력을 유지하게 된다. 그러므로 그림에서 보는 바와 같이 전류의 변화가 없다. Fig. 5 (b)는 전극의 가압력이 증가함에 따라 서보 모터에 걸리는 총 토크가 증가하게 되고 이 토크의 증가에 비례하여 서보 모터의 전류가 증가함을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전류와 가압력은 선형적인 형태를 가지고 있음을 알 수 있다.

위의 실험 데이터를 바탕으로 서보 모터의 전류와 가압력의 관계 모델을 1차 선형 회귀식의 형태로 구하였다. 가압력과 전류 변화량에 대한 실험식은 식 (8)과 같다.



(a) Change of current and force during the electrode movement



(b) Relationship between force and servo motor current increment

Fig. 5 Experiment result for force and servo motor current increment

$$P = 37.80 \cdot \Delta I - 90.83 \quad (8)$$

여기서 P 는 가압력이며, ΔI 는 Squeeze 구간에서 증가된 전류의 양이다.

4. 서보건 시스템을 이용한 가압력 제어

가압력 제어를 위한 서보건 시스템의 제어 과정은 Fig. 6과 같다. 서보건의 제어는 크게 2부분으로 나눌 수 있다. 상부전극이 모재에 닿기 전과 닿은 후로 나눌 수 있다. 전극 단의 이동은 속도 제어를 통하여 이루어졌다. 전극을 모재 부근까지는 빠른 속도로 이동한 다음, 전극이 모재에 가까이 접근하였을 때 속도를 낮추어 접촉 시 충격을 줄이도록 속도 제어를 하였다. 이와 같은 방법에 의해 소프트 터치(soft touch)가 가능하였다. Fig. 6에서 미리 설정된 하부 전극과의 간격까지는 빠르게 이동하지만 그 이후에는 천천히 이동하므로 공압건에서 발생하는 초기의 불안정한 영역을 제거할 수 있었다. Fig. 7은 설정된 상부 및 하부 전극간의 간격이

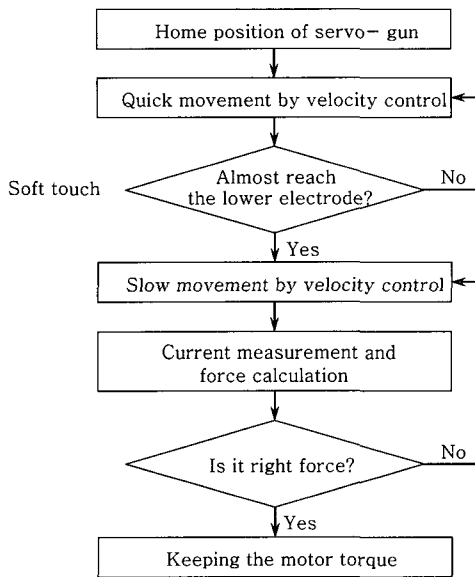


Fig. 6 The algorithm for the force control and soft touch of servo-gun

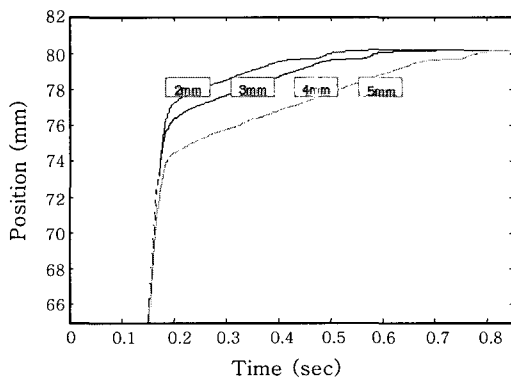


Fig. 7 Soft touch profile on servo-gun system

2, 3, 4, 5 mm 인 경우 소프트 터치한 결과이다. 설정 간극에 상관없이 적절한 소프트 터치가 이루어짐을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8 은 공압건과 서보건간의 가압력 방법의 차이를 나타내었다. Fig. 8 에서 보는 바와 같이 공압건을 이용하는 경우 접촉초기 및 가압 초기에 전류의 충격으로 인하여 불안정 영역이 존재한다. 그러나 서보건의 제어에 의한 소프트 터치 방법을 이용하면 공압건에서 발생하는 초기 충격현상을 최소화 할 수 있었다.

소프트 터치 후, 설정된 가압력까지 서보건 시스템의 가압을 생성시키는 방법으로는 비례미분 제어기(PD controller)를 이용하였다. PD 제어기의 튜닝 방법은 기본적으로는 Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 계수를 구하였고, 실제 시스템에는 이 값을 중심으로 시행 착오법(try and error method)으로 최종 비례 및 미분 제어계수를 구하였다.

전류 계측을 이용한 서보건 시스템의 가압력 제어와 제어 알고리즘의 유용성을 판단하기 위하여 다양한 접

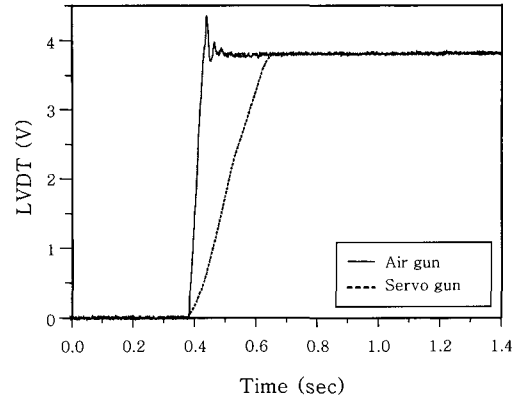


Fig. 8 Comparison of pressing pattern between air gun and servo gun

근속도와 전류 증가량에 따른 가압실험을 반복하여 수행하였다. 실험의 조건과 수준은 Table 1과 같다. Table 1에서 보는 바와 같이 상부 전극의 이동 속도는 5가지의 수준으로 나누었고 전류의 증가량은 4가지 조건으로 나누었다. 상부전극의 이동속도의 값은 전극과 모재가 접촉할 때, 충격이 크게 발생하지 않은 구간의 값으로 설정하였다. 식 (8)과 같이 가압력은 전류의 증가량과 비례하며, 가압력을 접촉 전과 후의 전류량의 변화를 이용하여 제어하였다.

Fig. 9는 여러 가지 접근 속도에 따라 가압력 제어 결과를 보여주고 있다. Fig. 9 에서 x축은 접촉 후 전류의 증가량이며, y 축은 로드셀에 의하여 계측된 결과이다. 실험의 결과와 식 (8)과의 관계에서 그 값이 잘 일치하고 있다. 그러므로 서보 모터 전류를 이용한 가압력 제어가 잘 됨을 보여 준다. 서보건의 전극 단의 모재에 대한 접근 속도에 따라 접촉 이전의 전류 또한 다른데, 이것은 서보 모터 전류 증가량에 대한 가압력

Table 1 Level and values of experimental conditions for the force control

Approach speed (mm/sec)	Increased current (A)
23.3, 46.6, 69.9, 93.2, 116.6	3.03, 4.45, 6.05, 7.57

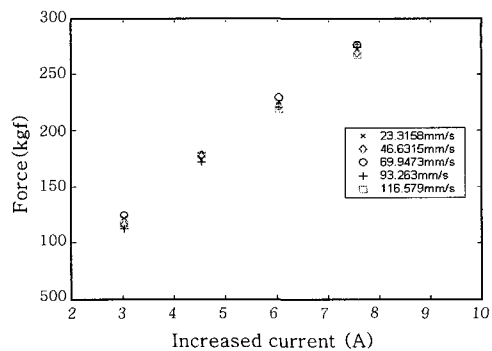


Fig. 9 Force control at the various electrode speeds

변화에는 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 또한 실험의 반복 정밀도에 대하여도 300 kgf 를 기준으로 하여 약 -5 에서 5 kgf의 약 $\pm 5\%$ 의 오차를 확인 할 수 있었다. 그러므로 서보건의 가압에 대한 반복 정밀도도 충분히 좋은 것으로 사료된다.

5. 가압력 제어를 통한 용접 강도의 향상

5.1 저항 점 용접중의 용접 현상 분석

C-type의 서보건에서 발생하는 가압력은 Fig. 10과 같은 원리를 통하여 얻어진다. 전극 상단이 하부 전극을 누르기 시작하면 하부 전극은 그 변위량에 비례하는 탄성력을 발생시킨다. 이 탄성력에 의해서 모재를 눌러주는 가압력이 생성된다. 전극 단이 서로 마주치고 나서 최대 가압력에 이르는 거리가 2 mm 이내이다. 따라서 하부 전극단의 변위를 측정하면 현재의 가압력을 측정할 수 있다. Fig. 11 는 변위측정 자기센서(LVDT)를 하부전극에 부착하여 로드셀(load cell)로 측정한 가압력과 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 서보건의 가압력은 하부 전극단의 변위와 비례함을 알 수 있다.

용접 중에는 대 전류가 전극을 통하여 흐르기 때문에 전극에 로드셀을 부착하여 가압력을 측정 할 수 없다.

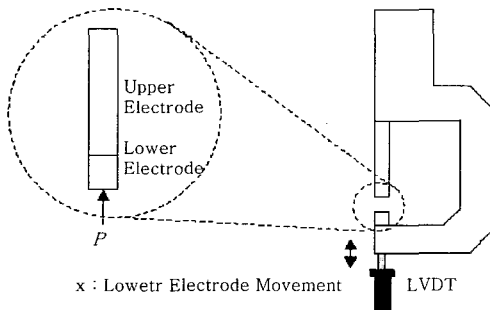


Fig. 10 The principle to make a force on servo-gun system

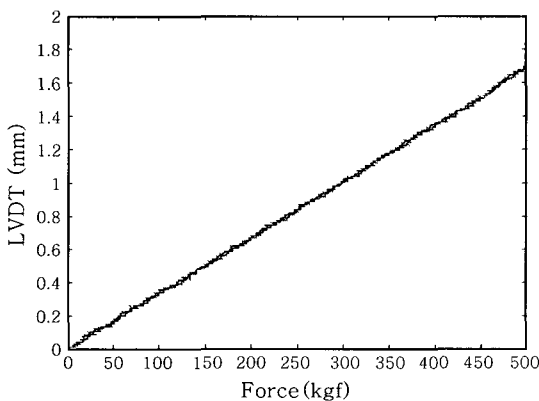


Fig. 11 The relationship between force and lower electrode movement

그러나 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 하부 전극의 움직임은 가압력과 비례적인 관계를 가지므로 하부전극의 변위를 측정함으로써 가압력을 계측 할 수 있다. 1.2 mm 아연도금 강판의 용접에 있어서 하부 전극의 변위를 측정하여 용접중의 가압력 변화를 계측하였다. 용접 전류는 5 kA 이며 용접시간은 15 cycle로 고정하였고 가압력은 300 kgf로 하여 실험을 수행하였다. 실험의 결과는 Fig. 12와 같다. Fig. 12는 가압력과 하부전극의 움직임 그리고 이에 따른 상부전극의 움직임을 차례대로 표현하였다. 하부 전극의 변위는 LVDT 센서를 이용하여 계측하였고, 상부전극의 변위는 서보모터의 엔코더(encoder)값을 이용하여 측정하였다. 서보건 시스템 저항 점 용접 과정에서 서보건의 기구적 특성과 마찰력 등의 영향으로 서보건의 상부 전극 단이 멈추고 난 후에 생성되는 미세 추가 가압력의 변화는 Fig. 12의 상부 전극의 움직임에 영향을 주지 못한다. 그러나 Fig. 12에서 하부 전극은 용접 중에 급변하게 되고 이것은 가압력의 변화를 준다. 특히 0.3 초 이후부터 0.55 초 사이의 구간에서 극심한 요동이 발생하는데 이것은 너겟이 형성됨에 따라 용융금속의 부피 팽창과 수축이 반복되기 때문에 발생한다. 그 이후에 팽창했던 용융금속이 응고됨에 따라 하부 전극은 위로 서서히 위로 올라간다. 용융이 마무리 된 후인 0.85 초 이후에는 초기의 값 보다 더 높이 올라가게 되는데 이것은 하부 전극에 영향을 주어 용접 중에 발생하는 압흔자국의 깊이에 의해 발생된다. 이것은 Fig. 12의 중간 그림에서 보는 바와 같이 용접 후 하부전극이 이동하였고, 이로 인해 가압력이 초기 가압력보다 낮아지고 있음을 알 수 있다.

5.2 서보건을 이용한 가압력 보상 제어

일반적인 저항 점 용접에서는 용접 후 압흔자국이 발생된다. 이것은 서보건 시스템의 구조적 특징에 의해서

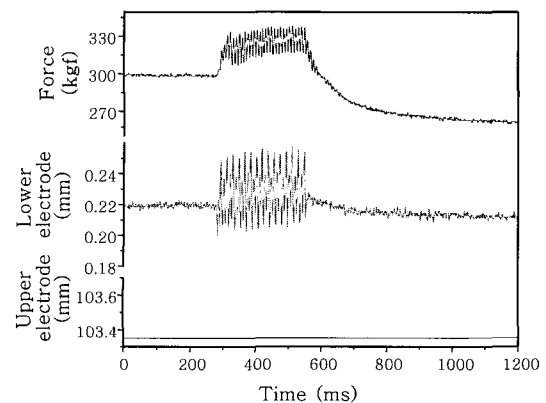


Fig. 12 Force and electrode position during resistance spot welding without compensation

후반부의 가압력을 저하시키는 요인으로 작용한다. Fig. 11과 12에서 보는 바와 같이 저항 점 용접 공정에서 생긴 압흔자국 깊이에 비례하여 가압력이 감소하게 된다. 이러한 가압력 저하 범위가 서보건 시스템의 탄성영역(하위전극의 탄성력에 의하여 가압력이 작용하고 있는 영역) 내에서 발생하기 때문에 상부 전극의 위치제어를 통하여 가압력을 더 줌으로써 저항 점 용접의 유지시간 (hold time)에 발생하는 가압력 저하현상을 보상할 수 있다. 보상 방법은 Fig. 13 과 같다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 너겟이 응고되는 중에 초기의 하부전극 위치보다 높게 내려가는 시점을 기준으로 그 이후부터 가압력이 저하된다. 그러므로 Fig. 13에서 보는 바와 같이 너겟이 형성되어 응고 후 유지시간에 들어가는 시점을 기준으로 상부 전극을 아래로 움직이면 전극에 가하여 지는 가압력에 의하여 유지시간에 발생하는 가압력의 저하를 보상할 수 있다. 다시 말하면 앞흔자국의 깊이에 따른 유지시간의 가압력 저하 현상을 방지할 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 13에서 제안된 가압력 보상방법을 이용하여 용접하였을 때, 발생하는 가압력, 상부 및 하부전극의 움직임을 나타낸 그림이다. 그림의 상부 전극 움직임에서 보는 바와 같이 용접이 끝 난 후 유지시간에 들어가는 시점에서 상부전극을 움직여 주었다. 이때, 하부전극의 변화를 보상하게 되고 이에 따라 가압력이 상승되어 초기 가압력과 비슷하여 졌음을 알 수 있다.

이와 같은 제어 프로파일을 통한 용접 강도의 향상 유무를 파악하기 위하여 보상제어 실험을 수행하였다. 보상 방법은 Fig. 14와 같이 상부 전극의 위치 프로파일의 변화에 의해서 이루어진다. 모재는 1.2 mm 아연 도금강판을 사용하였고, 그 외의 실험 조건은 Table 2

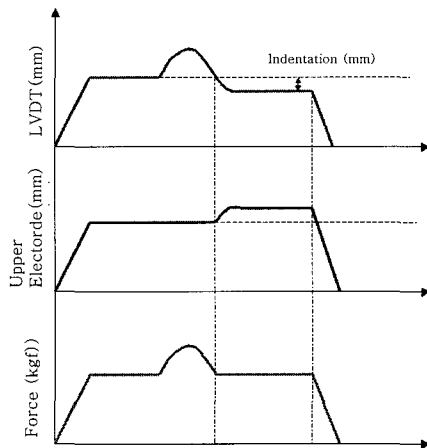


Fig. 13 Compensation method for force decrease by indentation depth

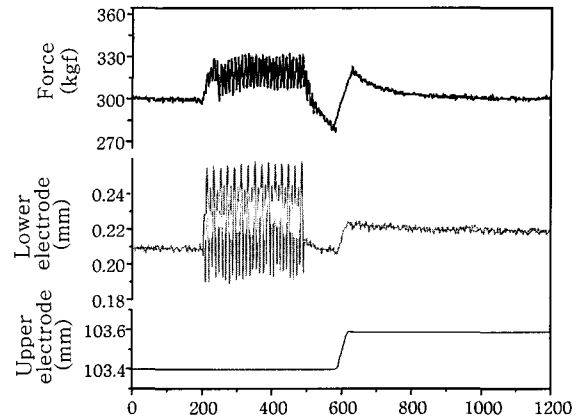


Fig. 14 Force and electrode position during resistance spot welding with compensation

와 같다. 앞흔자국 깊이는 실험의 전류범위에 있어서 그 깊이는 0.05 mm 에서 0.2 mm 로 기초적인 실험을 통하여 알 수 있었다. 그러므로 본 실험에서는 앞흔자국 깊이를 0.2 mm 로 설정하여 가압력을 보상하였다.

실험의 결과는 용접부의 강도를 이용하여 표현 하였다. 용접강도를 측정하는 방법은 KS 규격 KS B0851에 따라 진행하였다. 각 용접 조건에 대하여 3회 반복 실험을 수행하였고 이것을 평균하였다. 각 전류 조건에서 보상 제어를 하지 않은 경우와 보상 제어를 한 경우의 용접 강도 비교를 Fig. 15에 나타내었다. 6.5 kA

Table 2 Test conditions for the compensated force control

Initial force (kgf)	Welding current(kA)	Welding time (cycle)
300	7, 8, 9, 10	15

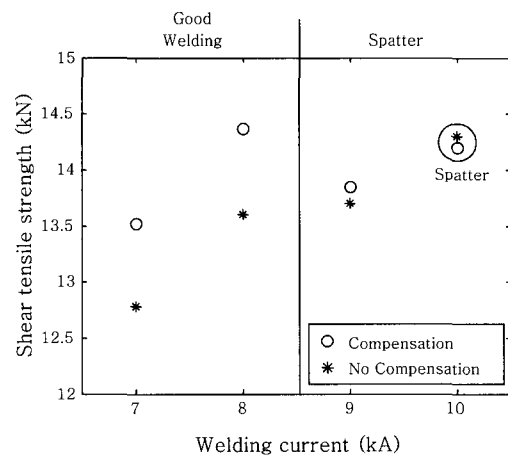


Fig. 15 Result of tensile strength and comparison with and without force compensation

의 이하의 전류인 경우, 너겟이 완전하게 형성되지 않고 저항 점 용접이 되지 않는 구간이다. 7에서 8 kA는 적정 용접 조건으로 가압력 보상 제어 시 더 높은 용접 강도를 가짐을 알 수 있다. 9 kA 인 경우는 일부 용접에서 스파터가 발생하였으므로 스파터가 발생하는 영역으로 구분하였다. 9 kA 는 적정 용접에서 스파터가 발생하는 영역으로 넘어가는 구간으로 스파터가 가끔씩 발생한다. 10 kA의 경우는 전 실험에서 스파터가 발생하였다. 이 경우는 스파터에 의하여 적정 용접현상과 일반적인 용접현상과는 다른 너겟 형성 메커니즘이 발생되기 때문에 가압력의 보상에 따른 강도 상승의 효과가 발생하지 않았다.

이와 같이 서보전 시스템에서 유지시간의 가압력 저하에 의해 발생하는 문제점을 가압력 보상 제어를 통해 해결할 수 있었다. 적정 용접 조건에 있어서 가압력 보상을 통하여 인장강도의 상승효과를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

로봇을 이용한 저항 점 용접에서 서보전의 적용은 생산성 향상, 원가 절감, 작업환경 개선 등을 위해 개발되었다. 그리고 이 서보전 시스템을 통하여 용접강도에 큰 영향을 미치는 가압력을 제어할 수 있다. 본 논문에서는 실제 용접공정에서 가압력 제어를 위한 계측시스템의 개발과 가압력 제어 알고리즘을 개발하였고, 이를 기반으로 용접 유지시간에 발생하는 가압력 저하에 따른 보상 제어를 통해 용접 강도향상을 시킬 수 있었다. 따라서 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 서보전 저항 점 용접시스템에서 서보모터의 피드백 전류를 이용하여 서보모터에 의해 얻어지는 토크가 전극의 가압력과 상관관계가 있음을 밝혔고 이를 기반으로 하여 전극이 모재부에 접촉한 이후의 서보모터 전류변화와 서보전의 가압력과 비례함을 실험을 통하여 제시하였고 이에 따른 실험식을 구하였다.

2) 전극단의 가압력을 서보 모터의 입력 전류를 계측하여 저항 점 용접의 가압력을 피드백 제어 (feedback control) 하였고, 그 제어 알고리즘을 구현하였다. 또한 소프트 터치 (soft touch) 방법을 제안하였고 이를 통하여 전극이 시편에 접촉할 때 발생하는 충격현상을 줄일 수 있었다.

3) 로봇을 이용한 서보전 저항 점 용접에서 전류가

통전된 후, 발생하는 앞흔자국 깊이에 의하여 유지시간에서 가압력 저하 현상이 발생한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 서보전의 위치제어로 가압력을 보상하였다. 이를 통해 적정용접 영역에서 용접 강도가 향상되었으며 가압력을 보상하지 않는 경우 보다 전단 인장 강도의 상승효과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년도 2단계 두뇌한국21 사업과 한양대 철강공정연구소 지원 연구비에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 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
2. R. B. Hirsch: Tip Force Control Equals Spot Weld Quality, *Welding Journal*, 72-3 (1993), 58s-63s
3. J. H. Park : Force Control for the Improvement of Weld Qualities in Resistance Spot Welding Process, Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1998 (in Korean)
4. S. A. Slavick : Using Servo Guns 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, (2000)
6. J. Y. Baek : A Study on Optimization of Process Variables in Resistance Spot Welding using Servo-Gun System, Master Thesis, Hanyang University, 2002 (in Korean)
7. C. Luthardt, *et al.* : The Servo Controlled Spot Welding Gun, *Robot-Tokyo*, (1997), 31-34
8. M. Jou : Real Time Monitoring Weld Quality of Resistance Spot Welding for the Fabrication of Sheet Metal Assemblies, *Journal of Materials Processing Technology*, 132-1 (2003), 102-113
9. H. Tang : Influence of Welding Machine Mechanical Characteristics on the Resistance Spot Welding Process and Weld Quality, *Welding Journal*, 82-5 (2003), 116s-124s
10. D. W. Chun: On Line Feedback Control of Electrode Movement for Resistance Spot Welding, Master Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1984 (in Korean)