

CD 스티드 용접의 해석 및 결함 분석

Part 1 : 공정 모델링과 해석

오 현 석* · 유 중 돈**

*현대 모비스, 응용기술연구부

**한국과학기술원, 기계공학과

Analysis of CD Stud Welding Process and Defects Part 1: Process Modeling and Analysis

Hyun-Seok Oh* and Choong-D. Yoo**

*Hyundai MOBIS Technology Research Institute, Yongin, Gyeonggi-do 446-912, Korea

**Dept. of Mech. Eng., KAIST, Daejeon 305-701, Korea

Abstract

The CD (Capacitor Discharge) stud welding utilizes the arc heat and pressure to attach the stud to the workpiece, which consists of the arc ignition, arcing and pressure welding stages. In order to predict the dynamic behavior of the CD stud welding process, mechanical and electrical models are employed in this work. While the mechanical model estimates the duration of each stage, the electrical model predicts the voltage and current waveforms using the RLC circuit. Effects of process parameters such as the electric components and spring force are analyzed through simulation. It is found that the contact resistance and gap between the stud and base metal influence the tip fusing and arcing duration. The calculated results showed reasonably good agreements with the experiment results.

*Corresponding author : cdyoo@kaist.ac.kr

(Received February 2, 2006)

Key Words : CD stud welding, Mechanical and electrical modeling, RLC circuit

1. 서 론

스티드 용접(stud welding)은 스티드와 모재 사이의 아크를 발생시켜 스티드와 모재를 용융시킨 상태에서 스티드에 압력을 가해 용접한다. 스티드 용접공정은 아크 스티드(arc stud)와 CD(Capacitor Discharge) 스티드 용접으로 구분할 수 있다. CD 스티드 공정은 커패시터에 저장한 전기 에너지를 이용하기 때문에 아크용접에 비해 용접이 매우 짧은 시간내에 완료되고 생산성이 높으며 숙련된 기술을 요구하지 않는 장점이 있다. 또한, 용접부에 발생하는 잔류 응력과 열변형이 작고, 이종 재료 간의 접합도 가능하다. 이와 같은 다양한 장점에도 불구하고 용접부가 급격하게 냉각되어 용

접부의 경도가 높고 신뢰성이 낮기 때문에 강도가 중요하지 않은 경우에 사용되고 있다¹⁻³⁾.

스티드 용접에서 발생하는 현상을 규명하고 최적 용접조건을 결정하기 위한 연구가 수행되었다. Venkataraman⁴⁾ 등은 전압, 전류 파형으로부터 아크 지속 시간을 구하여 용접부의 냉각속도에 영향을 미치는 인자를 파악하고 접합부 미세 조직의 변화에 대해 조사하였다. CD 스티드 용접에서는 냉각 속도가 매우 빠르기 때문에 접합부에서 스테인리스 강의 미세 조직이 다양하게 바뀔 수 있음을 보여주었다. Simmons⁵⁾ 등은 질소 함량이 높은 스테인리스 강의 용접에 전압, 전류 파형을 반복적으로 측정하고 접합부를 관찰하여 공정 변수 최적화를 시도하였다. Wilson⁶⁾ 등은 아크 지속 시간과 접합 강도의 상관 관계를 조사하여 최적 접합강도를 얻을 수

있는 조건을 수식으로 나타내었다.

CD 스테드 용접의 공정 단계에 대한 연구로서, Wilson⁷⁾ 등은 고속 카메라를 이용하여 아크의 발생, 성장, 소멸 과정에 대해 관찰하였으며, 용융 금속이 플라즈마 형태로 배출된다는 사실을 확인하였다. Paul⁸⁾ 등은 공정 단계에 따라 전압, 전류 파형을 분석하였고, 공정 변수가 파형에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. Ping⁹⁾ 등은 CD 퍼커션(percussion) 용접기를 등가의 RLC 소자로 취급하여 출력 전류 파형을 구하는 프로그램을 구성하였다. 그러나 기계적인 모델을 포함하지 않기 때문에 완전한 출력 파형을 얻기 어렵다.

CD 스테드 용접에서는 아크 발생과 동시에 압력이 가해지기 때문에 CD 스테드 용접 시스템을 해석하려면 시스템의 기계적인 요소 뿐만 아니라 전기적인 요소를 함께 고려하여야 한다. 본 연구에서는 스테드 용접의 접촉 모드(contact mode)에 대한 기계적 모델링과 전기적 모델링을 수행하였으며, 모델링을 통해 공정 변수가 출력전류와 전압에 미치는 영향을 파악하였다. 이와 같은 해석은 적절한 용접조건 결정에 활용 가능할 것으로 사료된다.

2. 시스템 모델링

CD 스테드 용접 시스템은 Fig. 1에서 보인 바와 같이 스테드에 압력을 가해 모재에 이동시키고 접합부를 형성하는 스테드 건(gun)과 용접전류와 전압을 제공하는 용접기로 구성된다. 그러므로 스테드 용접 시스템을 해석하려면 스테드 건에 의한 기계적인 모델링과 함께 용접기와 아크를 포함하는 전기적인 모델링이 필요하다.

2.1 기계적 모델링

스테드 용접부는 용융된 스테드와 모재의 압착에 의해 발생하므로 스테드 건에 의해 스테드가 모재로 이동하는 과정을 모델링하여야 한다. 스테드 건은 내부에

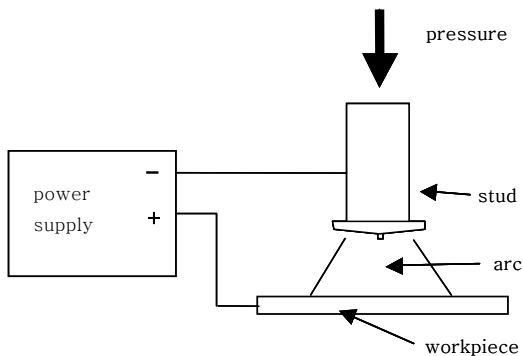


Fig. 1 Schematic of CD stud welding process

설치된 스프링 또는 공압 장치를 이용하여 스테드를 모재로 이동시켜 가압하며, 수동 용접인 경우에는 주로 스프링을 사용하고 자동 용접의 경우에는 공압을 사용한다. 본 연구에서는 스프링을 사용하여 스테드를 이동시키며, 스프링 힘에 의한 스테드의 운동을 모델링하였다.

Fig. 2는 CD 스테드 용접의 접촉 모드에서 발생하는 전형적인 출력 파형을 나타낸다. 용접시간은 3ms로 매우 짧지만, 다음의 3구간으로 구분할 수 있다. 첫번째 구간은 스테드 팁(ignition tip)의 용융 구간으로서 팁이 모재에 접촉하여 높은 전류가 흐르고 저항열에 의해 팁이 용융되면서 아크가 발생한다. 두번째 구간은 아킹(arcing) 구간으로서 아크가 발생하여 유지되며, 스테드가 모재에 완전히 접촉하면 아크가 소멸한다. 세번째 구간은 가압 구간으로 압력이 가해지는 상태에서 용융부가 응고되어 접합이 완료된다.

팁 용융 구간과 아킹 구간의 지속 시간은 저항열과 가압력에 의해 결정되며, 팁 용융 구간과 아킹 구간의 지속 시간을 예측하기 위하여 기계적인 모델링을 수행하였다. 팁의 용융 및 기화에 필요한 열량과 저항열에 의해 발생하는 열량이 동일하다고 가정하면, 팁 용융 시간은 다음의 식으로부터 계산한다.

$$Q = \int_0^t I(t)^2 (R_{tip} + R_{tc}) dt = m_{tip} C (T_m - T_0) + m_{tip} (H_f + H_v) \quad (1)$$

이때, I는 용접전류, R_{tip}은 팁의 체적저항, R_{tc}는 팁과 모재 사이의 접촉저항, m_{tip}과 C는 팁의 질량과 비열, T_m과 T₀는 팁의 기화온도와 상온, H_f와 H_v는 팁의 용융열과 기화열을 나타낸다.

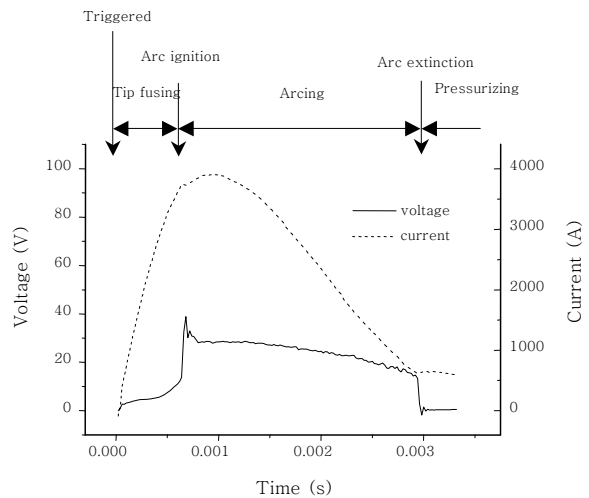


Fig. 2 Typical waveform of welding current and voltage

스터드는 건 내부 전극에 삽입되기 때문에 스테드는 전극과 함께 이동한다. 스프링을 사용하는 경우에는 스프링 힘에 의한 스테드의 가속도는 다음과 같다.

$$a = F_s / m_{tool} \quad (2)$$

이때, F_s 는 스프링 힘, m_{tool} 은 스테드 건 전극의 질량을 나타낸다.

스터드의 이동 시간은 스테드의 가속도와 스테드의 이동 거리에 의해 결정되며, 스테드의 이동 거리는 팁의 길이와 스테드 및 모재 표면이 손실되어 늘어난 길이로 구성된다. 스테드의 가속도가 일정하므로 아크 지속 시간은 다음과 같다.

$$t_{arc} = \sqrt{\frac{2(z_{tip} + z_m)}{a}} \quad (3)$$

이때, t_{arc} 는 아크 지속 시간, z_{tip} 은 스테드 팁의 길이, z_m 은 아킹 시간 동안에 스테드와 모재가 용융하여 추가로 증가한 길이이다.

커패시터에 저장된 에너지에 따라 스테드와 모재의 용융량이 결정되고, 스테드와 모재의 용융량이 많아질수록 배출되는 스테드와 모재 표면의 용융 금속량이 증가한다. 그러므로 스테드와 모재 사이에 늘어난 길이 z_m 은 다음과 같다.

$$k \times \frac{1}{2} C_c V_c^2 = [C(T_m - T_0) + H_f] \rho \pi R_t^2 z_m \quad (4)$$

이때, C_c 는 커패시턴스, V_c 는 커패시터의 충전전압, ρ 는 스테드와 모재 금속의 밀도, R_t 는 스테드의 반지름, k 는 실험적으로 결정되는 상수값을 나타낸다.

2.2 전기적 모델링

CD 스테드 용접기는 커패시터 뱅크(capacitor bank)와 제어기(controller)로 구성되며, 커패시터는 전기 에너지를 저장하고 제어기는 커패시터의 전압을 조절하는 역할을 한다. 커패시터에 저장된 전기 에너지는 커패시턴스와 전압에 의해 결정되며($E = \frac{1}{2} C_c V^2$), RC 회로에서 시정수(time constant)는 저항과 커패시턴스에 의해 결정된다($t = RC_c$).

스터드 용접에서 발생하는 전류와 전압 파형을 정확하게 계산하려면 용접 시스템의 전기 회로를 모델링하여야 한다. 이를 위하여 CD 스테드 용접 시스템의 회로를 Fig. 3에 보인 바와 같이 등가의 RLC 회로로 나

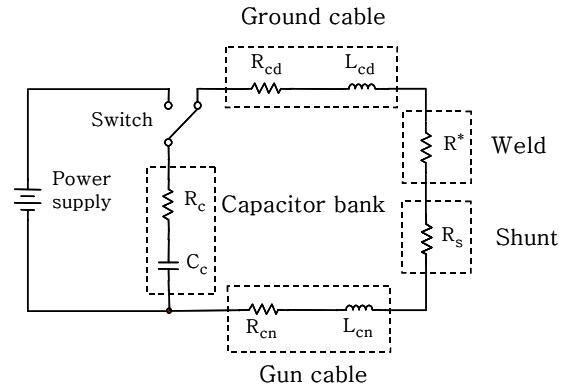


Fig. 3 Equivalent RLC circuit

타내었다. 회로 스위치의 위치에 따라 커패시터에 전기 에너지가 저장되거나 저장된 전기 에너지가 방출되어 아크가 발생한다. 커패시터에 저장된 전기 에너지를 방출하는 경우, 커패시터 양단에 걸리는 전압은 다음의 비선형 2차 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$L_t C_c \frac{d^2 U_{ps}(t)}{dt^2} + R_t C_c \frac{dU_{ps}(t)}{dt} + U_{ps}(t) = 0 \quad (5)$$

$$L_t = L_{cd} + L_{cn}$$

$$R_t = R_{cd} + R_{cn} + R_s + R_c + R^*$$

이때, U_{ps} 는 커패시터 양단의 전압, C_c 는 전원 공급 장치의 커패시턴스, L_{cd} 는 접지 케이블 인덕턴스, L_{cn} 은 건 케이블 인덕턴스, R_{cd} 는 접지 케이블 저항, R_{cn} 은 건 케이블 저항, R_s 는 션트(shunt) 저항, R_c 는 커패시터 내부저항이다. R^* 는 용접부 저항으로 용접 구간에 따라 변화하며, 용접 초기에 스테드 팁이 용융하는 경우에는 $R^* = R_{tip} + R_{tc}$, 아크가 발생한 경우에는 $R^* = R_{arc}$, 스테드와 모재가 접촉하여 아크가 소멸하면 $R^* = 0$ 이다. 이중에서 아크 저항을 나타내는 R_{arc} 는 아크의 출력(power)에 의해 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 다음의 식으로 나타내었다.

$$R_{arc} = m P_{arc}^n \quad (6)$$

이때, P_{arc} 는 아크 출력, m 과 n 은 상수이다. 아크와 관련된 상수값은 해석으로 구하기 어려우므로 실험을 통해 결정하였다.

위의 비선형 미분 방정식을 풀기 위한 초기 조건은 다음과 같다.

$$U_{ps} = U_0, \quad \frac{dU_{ps}}{dt} = 0 \quad \text{at } t = 0 \quad (7)$$

이때, U_0 는 커패시터의 초기 충전전압이다.

기계적 모델을 이용하여 각 구간의 지속 시간을 계산하고 이를 전기적 모델과 연계하여 시간에 따라 변화하는 용접전압과 전류를 계산하였다. 수치 방법으로 Runge-Kutta 4차식을 계산하였다.

3. 실험

해석에 필요한 상수와 공정 변수의 값, 용접전류와 전압 파형을 측정하기 위하여 실험을 수행하였다. 로드 셀(load cell)을 이용하여 스테드 건의 스프링 힘을 측정하였으며, LCR 미터를 이용하여 용접기와 케이블 및 스테드 건의 인덕턴스, 커패시턴스와 저항을 측정하였다. 또한 ASTM B539-80에 따라 스테드 팁과 모재 사이의 접촉 저항을 측정하였다.

CD 용접기는 48000, 84000, 120000 OF 의 3단계로 커패시턴스 용량을 변화시킬 수 있으며, 충전 전압은 80~200V 범위에서 설정할 수 있다. 스테드 건은 접촉 모드(contact mode) 전용으로 건 내부에 장착된 스프링으로 스테드를 이동시키며, 스프링 힘에 따라 용접시간이 변화한다. 실험의 공정 변수는 충전 전압, 커패시턴스, 케이블의 인덕턴스, 스테드 건 내부의 스프링 힘, 스테드 팁의 길이와 지름이다. 커패시터의 충전 전압 범위는 DC 90~130V, 커패시턴스는 48000~120000 OF , 케이블의 인덕턴스는 4~35 OH , 스프링 힘은 20~100N, 스테드 팁 길이는 0.4~0.8mm, 지름은 0.4~1.0mm이다.

용접을 하기 전에 아세톤으로 세척하여 스테드와 모재 표면에 존재하는 불순물을 제거하였다. 용접에 사용된 스테드는 부식 방지를 위해 구리 도금 처리된 1010 저탄소강 재질로서 규격은 M5이다. 팁의 직경과 길이가 용융에 미치는 영향을 확인하기 위하여 팁을 가공하여 직경과 길이를 변화시켰다. 모재로 사용한 판재는 1.2mm 두께의 SS400 일반 구조용 저탄소강이다. 션트(shunt)를 이용하여 용접전류를 측정하였으며, 스테드와 모재 사이의 용접전압을 측정하였다. 전압과 전류 파형 측정하기 위하여 50kHz의 샘플링 주파수로 데이터를 수집하였다. 모든 실험에서 DCEN 극성을 사용하였으며, 각 실험 조건에 대해 3번 이상 실험하였다. 용접부의 상태를 확인하기 위하여 시편을 절단하고 광학 현미경으로 단면을 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 상수와 공정 변수의 결정

해석에 필요한 상수와 공정변수는 접촉 저항, 전극의

질량, 스테드와 모재 사이의 늘어난 길이, 아크저항, 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 등이다. 대부분은 측정을 통해 구할 수 있지만 접촉 저항, 스테드와 모재 사이의 늘어난 길이 및 아크저항은 단순 측정으로 얻기 곤란하여 실험으로 구하였다. 계산에 사용된 전극 질량, 스테드 반지름 및 상수값을 Table 1에 나타내었다.

상온에서 스테드와 모재 사이에서 압력에 따른 접촉 저항을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. CD 스테드 용접에서 사용하는 스프링 힘의 범위는 40N에서 110N 이므로 접촉 저항은 약 2m Ω 이다. 용융점에서 스테드 팁 끝과 모재 표면의 거칠기가 사라지므로 접촉 저항은 온도의 함수로써 용융점까지 선형적으로 감소한다고 가정하였다.

Fig. 5는 스테드 팁의 온도에 따른 접촉 저항과 체적 저항을 나타내며, 온도에 따른 비저항값을 이용하여 체적 저항을 계산하고 곡선 맞춤(curve fitting)한 결과와 함께 나타내었다^{10,11)}. 팁이 용융될 때 1200K이하의 온도에서는 주로 접촉 저항에 의해 열이 발생하고, 1200K이상의 온도에서는 체적 저항에 의해 열이 발생한다.

커패시터에 저장된 에너지에 따라 스테드과 모재 표

Table 1 Measured parameters for computation

m_{tool}	0.127 kg
R_t	3.3 mm
C_c	11300 μF
L_{cd}	4.9 μH
R_{cd}	3.5 m Ω
L_{cn}	6.1 μH
R_{cn}	6.3 m Ω
R_s	0.1 m Ω
R_c	9.0 m Ω

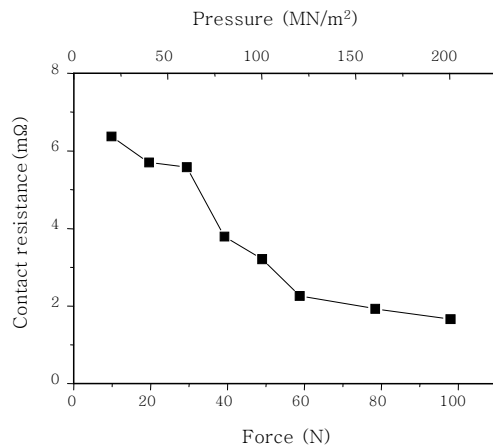


Fig. 4 Contact resistance between stud and base metal

면의 용융량이 변화하고 압력, 단락 및 기화에 의해 용융 금속이 바깥으로 배출되므로 스테드의 이동 거리가 변화한다. 따라서 입열량에 따른 스테드와 모재의 길이 변화량을 측정하고 배출된 용융 금속을 용융하는데 필요한 에너지를 계산하여 커패시터에 저장된 에너지와 비교하였다. 커패시터에 저장된 에너지의 절반 정도가 Fig. 6에 보인 바와 같이 배출 금속의 형태로 소모되며 곡선 맞춤으로 구한 식(4)의 상수 k는 약 0.491이다.

아크 저항은 아크 길이와 아크의 이온화율(degree of ionization)의 영향을 받으며 비선형적으로 변화한다. 스테드 용접에서 아크 길이가 감소하면 아크 저항이 감소하고, 아크의 온도가 증가하면 이온화율이 상승하여 아크 저항이 감소할 것으로 판단하였다. Fig. 7은 아크 출력과 아크 저항의 관계를 나타내며, 아크 저항은 측정된 용접전류와 전압을 이용하여 구하였다. Fig. 7(a)에서 아크 시간이 경과함에 따라 아크 길이가 감소하기 때문에 아크 저항은 감소해야 하지만 아크 저항은 증가하며, 이는 아크 출력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 아크 저항은 아크 길이 보다 아크 출력

에 의해 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이와 같은 아크 출력과 아크 저항의 결과인 Fig. 7(b)에서 곡선 맞춤으로 구한 식(6)의 상수 m과 n은 각각 38.1, -0.763이다.

4.2 해석 결과

스테드 용접은 Fig. 2에 보인 바와 같이 3ms 정도의 짧은 시간에 대전류가 흐르면서 용접이 완료되기 때문에 아크용접과 달리 케이블 저항이나 접촉 저항 등이 전류와 전압 파형에 큰 영향을 미친다. Fig. 8은 스테드 팁과 모재 사이의 접촉 저항을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 팁의 용융 시간을 비교한 결과이다. Fig. 8(a)에서 접촉 저항을 고려하지 않는 경우에는 실험 결과와 계산 결과에 큰 오차가 발생한다. Fig. 8(b)에서 접촉저항을 고려하고 식(1)에서 팁의 기화에 필요한 열량을 제외하고 계산한 경우 실험 결과와 계산 결과는 잘 일치하였다. 이로 미루어 볼 때 저항열에 의해 팁의 온도가 상승하면 팁의 대부분은 액상으로 존재하고 일부만 기화되어서 아크를 발생시킬 것으로 판단된다.

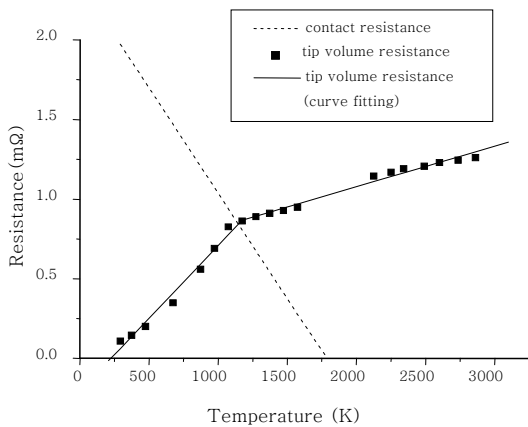


Fig. 5 Variation of resistance with respect to temperature

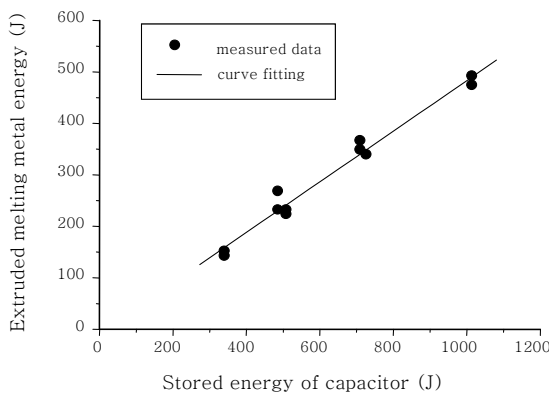
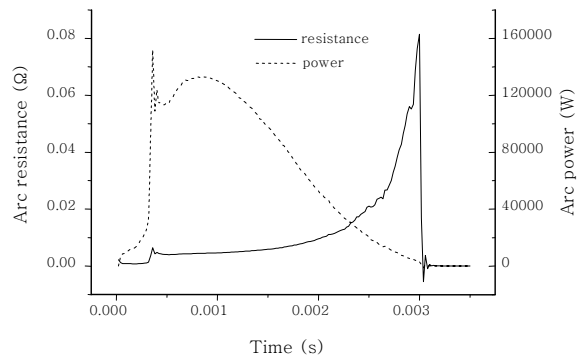
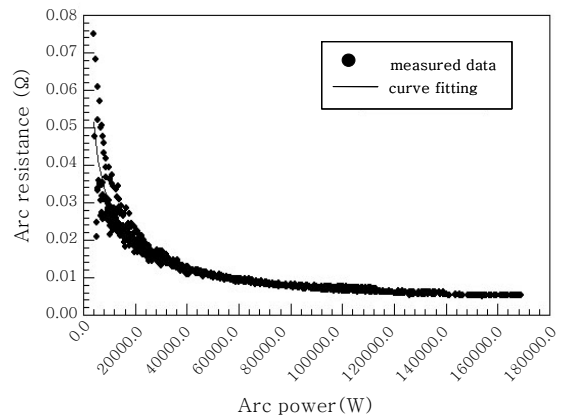


Fig. 6 Relation between extruded melting metal energy and stored capacitor energy

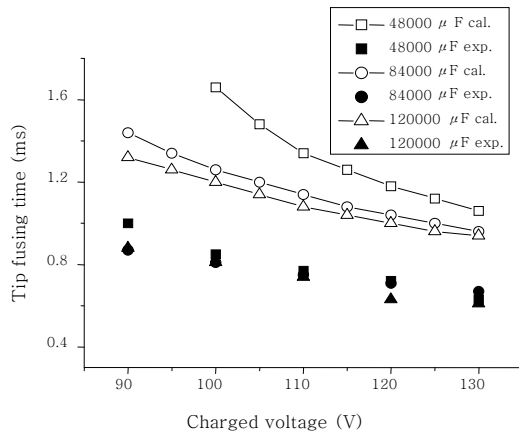


(a) Variation of arc resistance and arc power

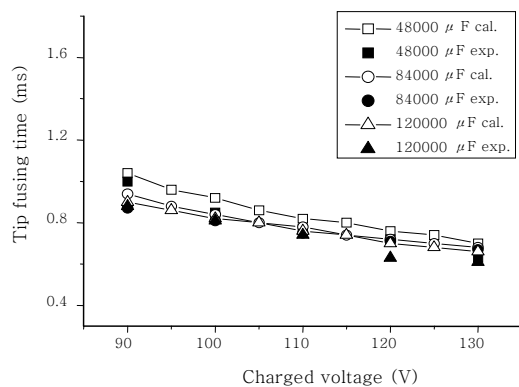


(b) Regression of arc resistance

Fig. 7 Relation between arc resistance and arc power



(a) Without contact resistance



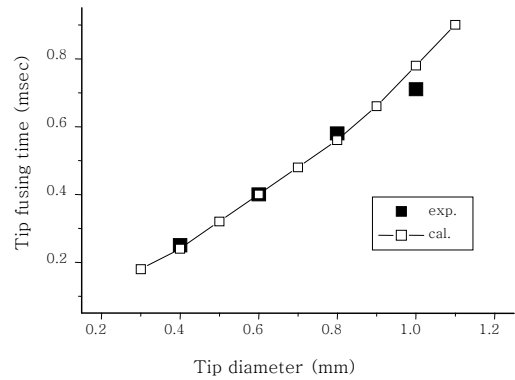
(b) With contact resistance

Fig. 8 Effect of contact resistance of stud tip on tip fusing time

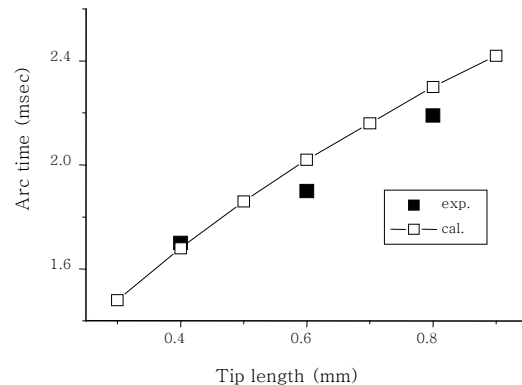
Fig. 9는 스테드 팁의 크기는 팁의 용융시간과 아킹 시간에 미치는 영향을 나타낸다. 팁의 직경이 증가할수록 저항이 감소하여 팁의 용융시간이 증가하며, 팁의 길이가 증가하면 아킹 시간이 증가한다. 해석을 통해 실험으로 측정된 용접전류와 전압의 파형을 결과를 비교적 정확하게 예측하였다.

스테드 용접에서 중요한 공정 변수는 커패시턴스, 충전전압, 압력이기 때문에 각 공정변수가 용접전류와 전압 파형에 미치는 영향을 분석하였다. 커패시턴스의 변화에 따른 용접전류와 전압 파형의 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 커패시턴스는 시정수에 영향을 주기 때문에 커패시턴스가 증가함에 따라 전류가 완전히 방전되는 시간이 증가하였다. 계산에 의해 용접전류를 비교적 정확하게 예측할 수 있었지만, 용접전압의 경우에는 오차가 발생한다. 용접전압의 오차는 스테드 팁의 용융 구간인 용접 초기에 주로 발생하며, 이는 팁과 모재 사이에서 온도에 따른 접촉 저항의 변화를 곡선 맞춤에 의해 단순화시켰기 때문이다.

커패시터의 충전 전압이 용접 전압, 전류 파형에 미



(a) Tip fusing time



(b) Arcing time

Fig. 9 Effect of tip dimension on tip fusing time and arcing time

치는 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 전압은 시정수에 영향을 미치지 않기 때문에 전류의 방전 시간은 충전 전압과 무관하게 일정하며, 충전 전압이 증가하면 방전 시 에너지 밀도가 증가하므로 전류가 증가한다. 실험 결과와 계산 결과는 비교적 정확하게 일치하였으며, 용접 전압의 경우에는 Fig. 10과 유사하게 초기 전압에서 오차가 발생하였다.

커패시턴스와 충전 전압이 일정한 조건에서 스프링 힘이 전류 파형에 미치는 영향을 Fig. 12에 나타내었다. 스프링 힘은 주로 아킹 시간에 영향을 주며, 전류 파형은 거의 유사하다. 스프링 힘을 증가시키면 아킹 시간은 단축되며, 이로 인하여 스테드가 모재에 접촉하는 순간의 전류값은 증가한다. 그러므로 스프링 힘을 조절하여 단락 순간의 전류값을 변화시킬 수 있다.

일반적으로 CD 스테드 용접부에는 기공이 존재하지만, 기공이 다수 존재하는 경우에도 굵금 시험과 박리 시험에서 접합부의 파단이 발생하지 않았다. 그러나 일반 아크용접에 비해 접합부의 기공이 크게 발생하였기 때문에 용접부의 품질은 낮은 것으로 판단한다.

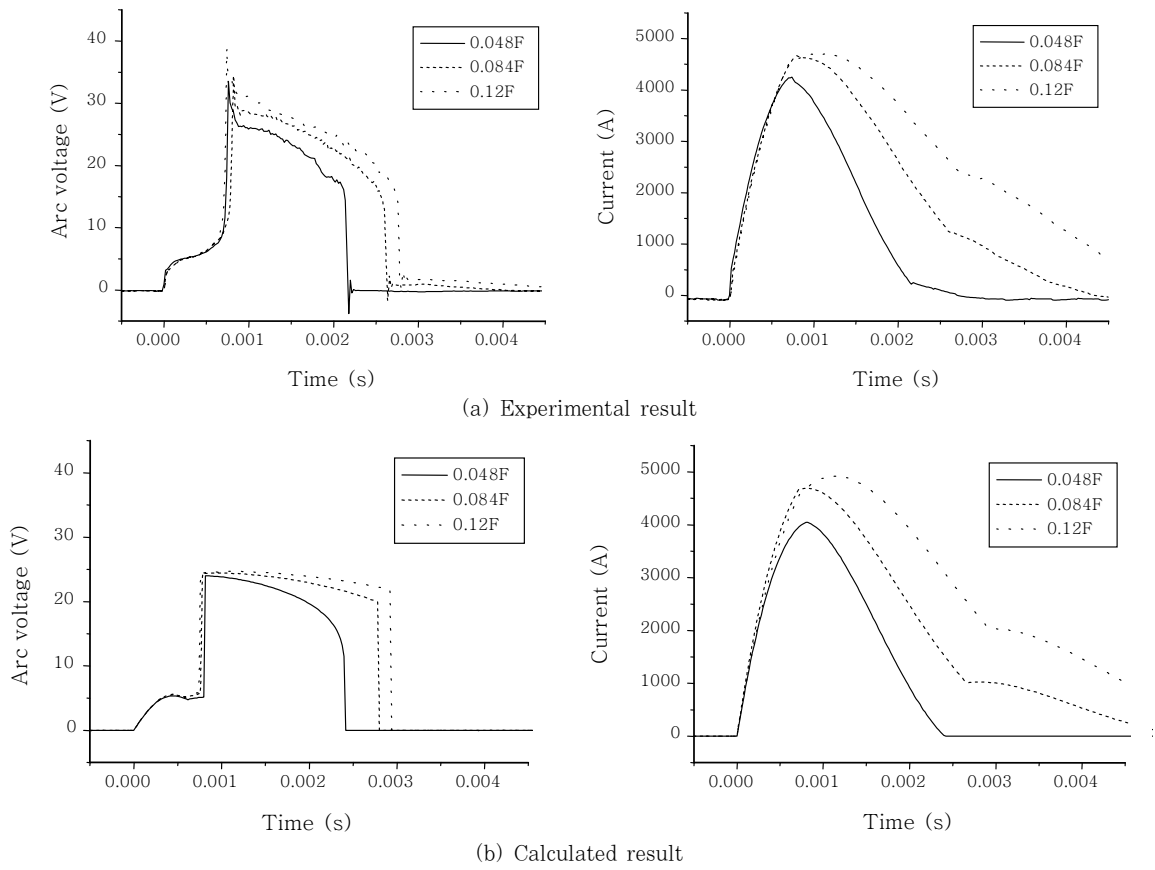


Fig. 10 Effects of capacitance on welding current and voltage

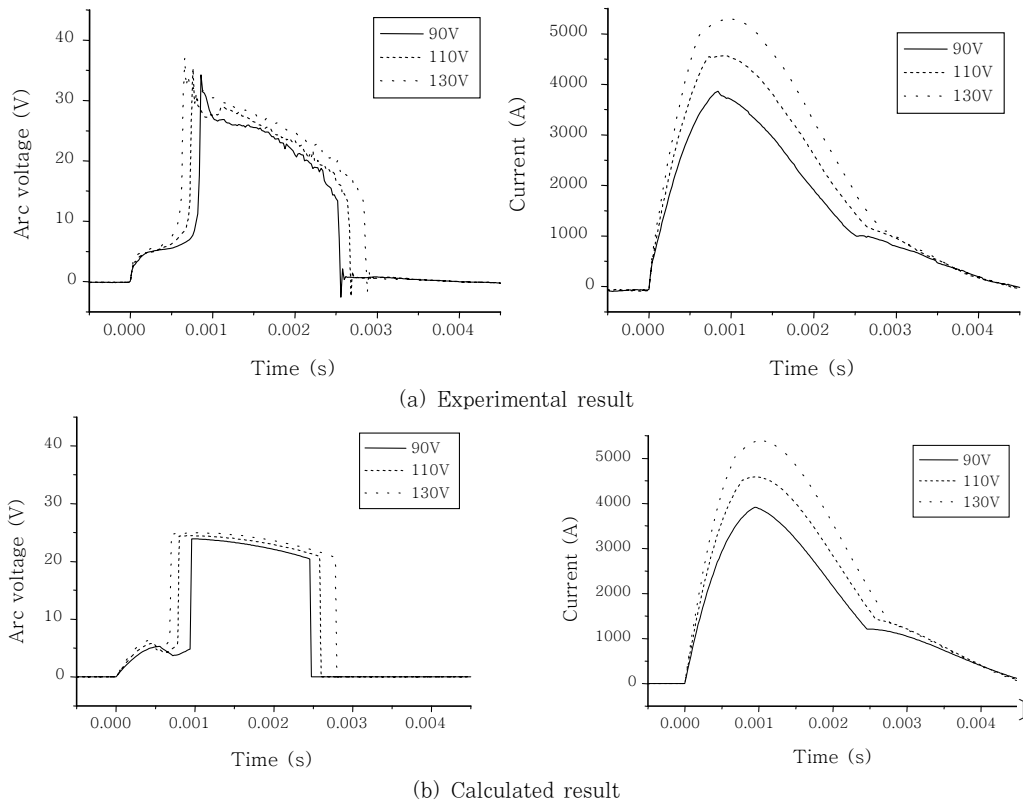


Fig. 11 Effects of charging voltage on welding current

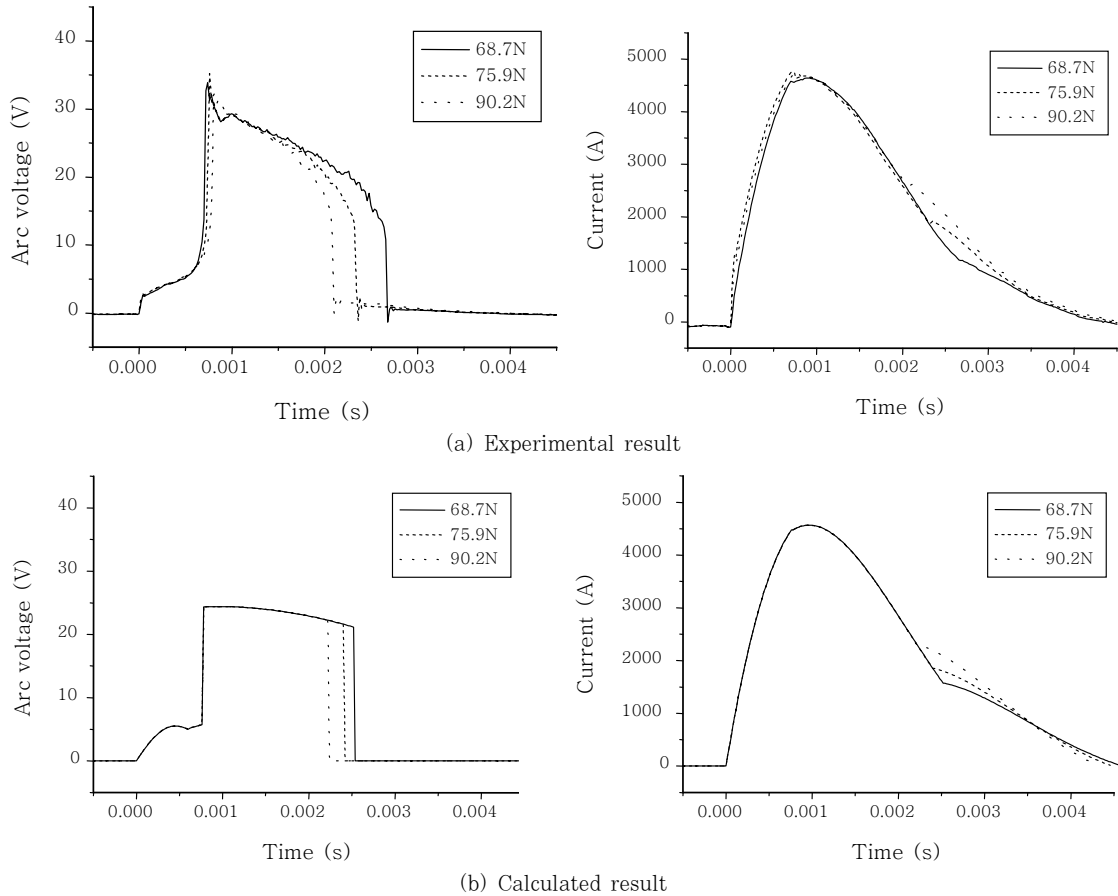


Fig. 12 Effects of spring force on welding current

5. 결 론

CD 스테드 용접 시스템의 기계적 모델과 전기적 모델을 연계하여 계산한 결과를 실험 결과와 비교하였다. 기계적 모델은 스테드 팁의 용융 시간과 아킹 시간을 계산하기 위하여 수행하였다. 스테드 팁의 용융 시간은 팁의 크기에 영향을 받고, 아킹 시간은 팁의 길이와 스프링 힘에 의해 결정된다. 용접 시스템의 회로를 등가의 RLC 회로로 모델링하였으며, 충전 전압과 커패시턴스가 입열량과 용접시간에 큰 영향을 준다. 전기 회로에서 커패시터의 내부저항, 케이블 저항, 케이블 인덕턴스는 값이 작지만, 용접시간이 매우 짧고 높은 전류가 사용되는 CD 스테드 용접 시스템에서 영향이 무시될 수 없다. 모델을 이용한 계산 결과는 실험 결과를 비교적 정확하게 예측하였다.

참 고 문 헌

1. AWS: Welding Handbook, Vol.2, 1991, 299-327
2. ASM Handbook Committee: ASM Handbook, Vol.6, 1993, 221-222
3. R. D. Wilson: Explore the Potential of Capacitor-

- Discharge Welding, *Advanced Materials & Processes*, **145-6** (1994), 94-95
4. S. Venkataraman, J. H. Devletian: Rapid Solidification of Stainless Steels by Capacitor Discharge Welding, *Welding J.*, **67-6** (1998), 111s-118s
5. J. W. Simmons, R. D. Wilson: Joining of High-Nitrogen Stainless Steel by Capacitor Discharge Welding, *Welding J.*, **75-6** (1996), 185s-190s
6. R. D. Wilson, J. A. Hawk: Rapid Solidification Joining Using the Capacitor Discharge Welding Process, *Metallurgical Processes for Early Twenty-First Century*, **2** (1994), 267-282
7. R. D. Wilson, J. R. Woodyard, J. H. Devletian: Capacitor Discharge Welding: Analysis through Ultrahigh-Speed Photography, *Welding J.*, **72-3** (1993), 101s-106s
8. B. K. Paul, R. D. Wilson, E. McDowell, J. Benjarattananon: Study of Weld Strength Variability for Capacitor Discharge Welding Process Automation, *Science and Technology of Welding and Joining*, **6-2** (2000), 109-115
9. S. Ping, W. Xu: Simulation Study on Capacitor Discharge Percussion Welding, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **10-4** (1997), 295-298
10. J. H. Davis: *Metals Handbook*, Vol.1, 1990, 196-199
11. R. S. Hixon, M. A. Winkler, M. L. Hodgdon: Sound Speed and Thermophysical Properties of Liquid Iron and Nickel, *Physical Review B*, **42-10** (1990), 6485-6491