

CD 스테드 용접의 해석 및 결함 분석

Part 2 : 기공 제어

오 현 석* · 유 중 돈**

*현대 모비스, 응용기술연구부

**한국과학기술원, 기계공학과

Analysis of CD Stud Welding Process and Defects

Part 2 : Control of Void

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

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

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

Abstract

Since the voids occur at the CD stud welds, the mechanism of void formation and void reduction method are investigated in this work. It is speculated that the voids are formed because of high short-circuit current above 1000A. When the simple flow model is used to estimate the void trapping condition, the most voids are trapped at the weld mainly due to fast cooling rate of the CD stud weld. Since it is almost impossible to remove the voids completely, a method is proposed to reduce the void by decreasing the short-circuit current at the end of the arcing time. The experimental results show that the void is reduced by decreasing the short-circuit current to 1000A.

*Corresponding author : cdyoo@kaist.ac.kr

(Received February 2, 2006)

Key Words : CD stud welding, Void formation, Flow model, Short-circuit current

1. 서 론

스테드 용접(stud welding)은 아크열과 압력을 이용하여 스테드를 모재에 접합시키는 공정으로 CD(Capacitor Discharge) 스테드 용접은 생산성이 높고 열변형과 잔류응력이 작기 때문에 산업 현장에 널리 사용되고 있다. 그러나 급냉으로 인하여 용접부의 경도가 높고 다수의 기공이 발생하기 때문에 용접부의 품질은 아크 용접에 비해 낮은 것으로 알려져 있다¹⁻³⁾.

CD 스테드 용접에서 발생하는 결함의 원인은 정렬 불량, 부적절한 용접조건 등으로 다양하지만, 적절한 용접조건을 사용하는 경우에도 용접부에 기공이 발생한다. 급냉에 의한 용접부의 조직 변화에 관한 연구를 포함하여 CD 스테드 용접의 신뢰성 향상을 위한 연구들

이 수행되었다⁴⁻⁶⁾. 실험 계획법을 이용하여 모재 표면의 도금 상태 및 청결도, 스테드 극성 및 디자인, 모재 두께 등의 공정 변수에 대한 접합부의 신뢰성을 평가하고자 하였다. 스테드의 직경이 증가할수록 접합부에 기공이 많이 발생하고 모재 표면에 아연 도금과 같은 코팅층이 존재할 경우 기공이 빈번하게 발생함을 관찰하였다⁵⁾. 또한, 알루미늄의 경우에는 비정상적으로 높은 아크전압이 발생하는 현상을 관찰하고, 스테드 표면에서 코팅층을 제거함으로써 접합부에서 기공을 감소시키고 접합 강도를 향상시켰다⁶⁾.

기공은 아크 열에 의해 모재 성분이 기화되면서 형성된 가스가 바깥으로 배출되지 못하고 접합부에 갇혀서 생성되며 공정 변수의 제어를 통해 기공을 감소시켰다고 보고된 바 있다⁷⁾. 그러나 이는 재료 특성에 기인한 것으로 일반적인 CD 스테드 용접에는 적용하기 힘들

다. 강과 구리 금속에 대해서 적절한 용접 조건을 사용하는 경우에도 접합부의 기공이 발생함이 알려져 있다⁸⁾. 고속 카메라를 이용하여 CD 스테드 용접공정을 분석하기 위한 연구가 시도되어 다양한 현상을 관찰하였지만⁹⁾, 10ms 이내의 짧은 용접 시간과 강한 아크 빛으로 인하여 용접부가 형성되는 과정을 정밀하게 관찰하기 어렵다.

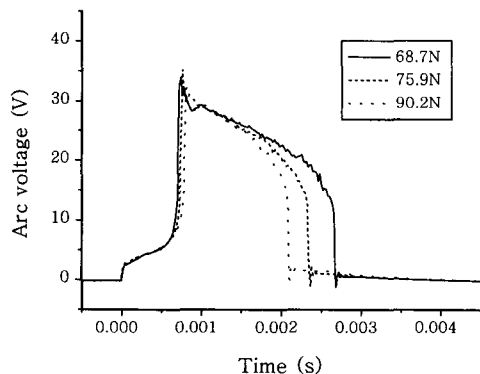
이와 같은 연구에도 불구하고 CD 스테드 용접부에 기공이 발생하는 원인과 기구(mechanism)에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 기공 발생 기구를 규명하고, 해석을 통하여 기공 제거의 어려움을 정량적으로 계산하였다. 기공 발생 기구를 이용하여 기공을 억제하는 방법을 제시하였다.

2. 기공 발생 기구

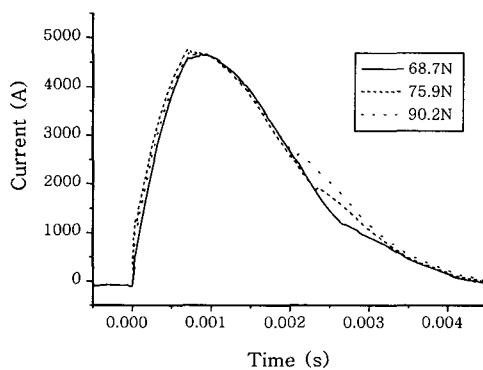
앞에서 언급한 바와 같이 적절한 용접조건을 사용하는 경우에도 CD 스테드 용접부에 기공이 발생한다. 그러므로 용접부에 기공이 발생하는 원인을 용접전류와 전압 파형 및 스패터가 발생하는 용접과정으로부터 유

추하였다. Fig. 1은 스프링 힘에 따라 변화하는 용접전류와 전압 파형을 측정된 결과이다. 스테드 용접은 3ms 이내에 완료되며, 스프링 힘을 증가시키면 스테드의 속도가 증가하여 용접시간이 2.6ms에서 2ms로 단축되고 주로 아킹(arcing) 시간이 감소한다. 스프링 힘이 변화하더라도 초기의 용접전류와 전압은 크게 변화하지 않지만, 용접의 마지막에 스테드와 모재의 용융부가 접촉하는 순간의 단락 전류는 2500A, 1700A, 1000A로 매우 큰 차이를 보인다.

용접전류와 전압의 파형으로부터 용접부의 형성 과정을 Fig. 2와 같이 유추할 수 있다. Fig. 2(a)에서 스테드 팁(tip)이 저항열에 의해 용융되면서 아크가 발생하면 아크열에 의해 스테드와 모재가 용융된다. 용접전류가 4000A 이상으로 매우 높기 때문에 용융 금속의 기화와 아크 압력에 의한 용융물 표면에서 큰 변형이 발생한다. Fig. 2(b)에서 스테드와 모재의 용융부가 접촉하는 순간 전기적으로 단락이 발생하므로 스패터(spatter)가 발생하여 스테드와 모재의 용융부 표면은 불규칙한 형상으로 변화한다. Fig. 2(c)에서 불규칙한 표면이 접촉하면서 용접부의 내부에 기공이 형성된다. 이와 같은 현상은 GMA 용접에서 단락이행 모드를 사



(a) Welding voltage



(b) Welding current

Fig. 1 Effect of spring force on welding voltage and current

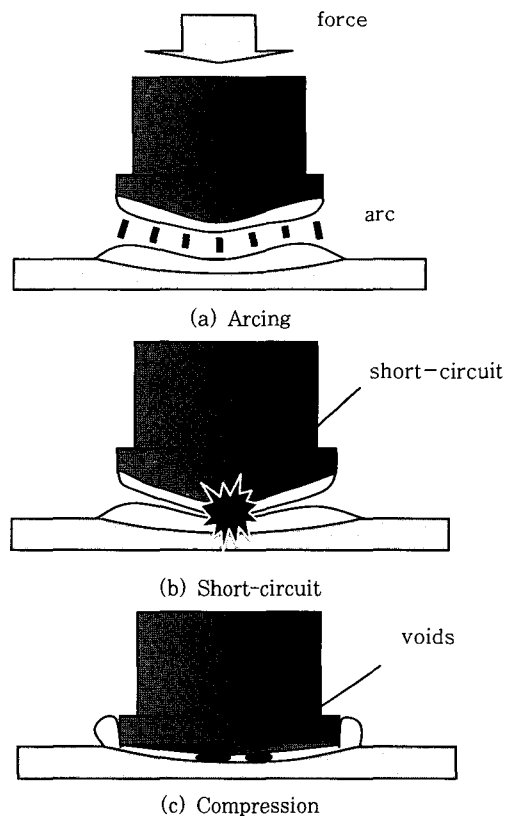


Fig. 2 Sequence of welding process and void formation

용하는 경우와 매우 유사하며¹⁰⁾, 스테드 용접의 경우에는 단락 순간의 전류가 GMA 용접에 비해 크게 높기 때문에 스파터가 더욱 격렬하게 발생한다.

Fig. 3은 스테드 용접부의 단면을 나타내며, 용접전류는 매우 높지만 용접시간이 짧기 때문에 용융부의 크기가 작다. 또한, 압력에 의해 용융부의 상당 부분이 외부로 배출되고 압착되기 때문에 용접부의 두께가 수십 μm 정도로 매우 얇다. 단순한 유동 모델을 이용하여 용융부를 실린더라고 가정하면, 기공의 배출은 Fig. 4에 보인 바와 같이 기공의 초기 위치와 용접부의 응고 시간 동안 기공이 이동하는 거리 L_v 를 이용하여 판별할 수 있다.

$$L_v = v_v \Delta t \tag{1}$$

여기서 v_v 는 기공의 반경 방향 속도, Δt 는 용접부의 응고시간을 나타낸다.

용융부의 체적이 일정하다고 가정하면, 기공의 반경 방향 속도 v_v 는 다음과 같다.

$$v_v = \frac{r_v}{2h} v_z \tag{2}$$

이때, r_v 는 기공의 위치, h 는 용융부의 두께, v_z 는 수직 방향의 스테드 속도를 나타낸다. 위의 식으로부터 기공의 속도는 반경에 비례하여 증가한다.

식(1)에서 용접부의 응고시간 Δt 는 용융부 금속의 최고 온도와 시편 용융 온도의 온도차 그리고 냉각속도를 이용하여 구할 수 있다.



Fig. 3 Cross-section of stud weld

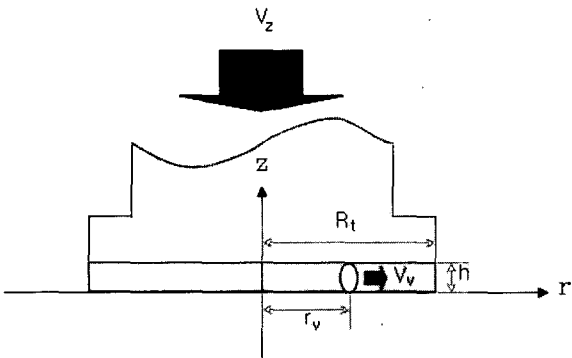


Fig. 4 Schematic of flow model

$$\Delta t = \frac{\Delta T}{C_r} \tag{3}$$

여기서 ΔT 는 용융부 금속의 최고 온도와 용융 온도의 온도차, C_r 은 용접부의 냉각속도이다. 식(1)~(3)으로부터 기공이 이동하는 거리는 다음과 같다.

$$L_v = \frac{r_v}{2h} v_z \frac{\Delta T}{C_r} \tag{4}$$

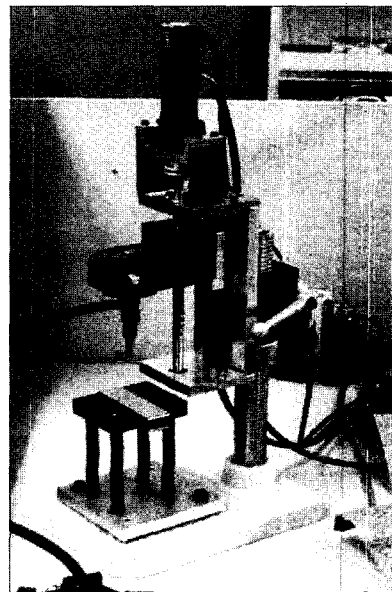
기공의 이동 거리인 L_v 와 기공이 배출되기 위해 이동해야 하는 거리인 $(R_t - r_v)$ 의 비를 나타내는 α 를 이용하여 기공의 배출 여부를 판별할 수 있다.

$$\alpha = \frac{L_v}{R_t - r_v} = \frac{r_v / R_t}{2h(1 - r_v / R_t)} v_z \frac{\Delta T}{C_r} \tag{5}$$

위의 식에서 ($\alpha > 1$)이면 기공이 배출되고, ($\alpha < 1$)이면 기공이 용접부에서 빠져 나오지 못한다.



(a) Spring gun



(b) Servo gun

Fig. 5 Stud guns with spring and servo-motor

3. 실험

Fig. 5는 실험에 사용된 스프링 건과 서보 건을 나타낸다. Fig. 5(a)에 나타낸 스프링 건은 접촉 모드(contact mode) 전용으로 건 내부에 스프링이 장착되어 있어서 스프링의 압축 변위를 조절해서 초기 가압력 설정이 가능하다. 스프링 건은 스테드 팁이 모재와 접촉한 상태에서 통전 후 아크가 발생하여 스테드와 모재 사이에 간극이 형성되면 스프링 힘에 의해 스테드가 이동한다. 그러므로 스프링 힘에 따라 아크 시간이 변하고 스테드의 이송 시간이 결정된다. Fig. 5(b)는 서보 모터를 이용하여 제작한 서보 건을 나타낸다. 서보 모터를 이용하면 스테드를 일정한 속도로 이송시킬 수 있지만, 모터가 일정한 속도에 도달하는데 시간이 소요되기 때문에 스테드와 모재 사이에 간격이 필요하다. 그러므로 서보 건을 이용하는 경우에는 갭 모드(gap mode)로 용접하는 것과 유사하다.

실험의 공정 변수는 용접기의 커패시턴스, 충전 전압, 스프링 힘, 스테드 팁의 길이와 직경이다. CD 용접기는 48000, 84000, 120000 μ F의 세 단계로 커패시턴스 용량을 변화시킬 수 있으며, 충전 전압은 80~200V 범위에서 설정할 수 있다. 충전 전압 범위는 90~130V, 스프링 힘은 40~150N, 스테드 팁의 길이와 직경은 각각 0.4~1.0mm와 0.4~0.8mm이다.

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. 선트를 이용하여 용접전류를 측정하였으며, 스테드와 모재 사이의 용접전압을 측정하였다. 전압과 전

류 파형 측정하기 위하여 50kHz의 샘플링 주파수로 데이터를 수집하였다. 모든 실험에서 DCEN 극성을 사용하였으며, 각 실험 조건에 대해 5회 이상 실험하였다.

용접부의 상태를 확인하기 위하여 시편을 절단하고 광학 현미경으로 단면을 관찰하고 기공의 길이를 측정하였다. 굽힘 시험(bending test)과 전단 시험(shear test)을 통하여 용접부의 품질을 평가하고 적정 용접조건을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 용접조건에 따른 기공의 배출

Fig. 6는 전압 변화에 대한 접합부의 굽힘 시험 결과를 나타내며 파괴가 모재에서 발생하였으며, 전단 시험 결과 스테드에서 모두 파단이 발생하였다. 굽힘 시험 결과와 용접부 외관으로부터 구한 적정 용접조건을 Table 1에 나타내었으며, Fig. 7은 적정 용접조건을 이용하여 용접한 경우의 용접부 단면을 보여준다. 굽힘 시험과 전단 시험을 만족시키지만, 거의 모든 용접부에서 기공이 존재하였다. 스테드 용접은 냉각 속도가 매

Table 1 Proper welding conditions

Gun type	Spring gun	Servo gun
Charged voltage (V)	110	110
Capacitance (μ F)	84000	84000
Spring force (N)	76	Not used
Electrode velocity (mm/s)	Not used	380
Stud tip length (mm)	0.6	0.6
Stud tip diameter (mm)	0.9	0.9

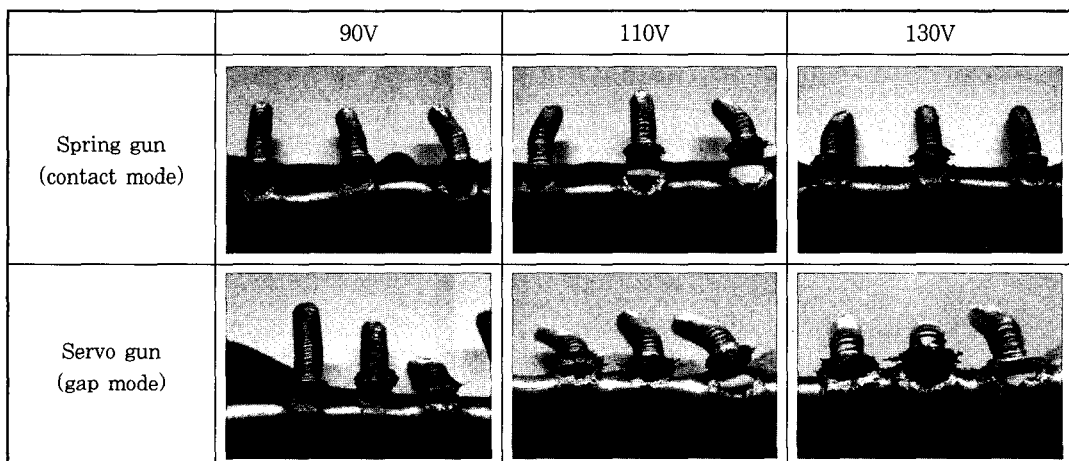


Fig. 6 Bending test results

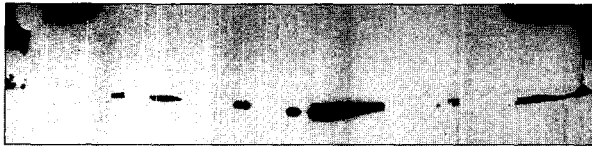


Fig. 7 Cross section of weld interface with voids

우 빨라서 용접부가 경화되고 기공과 같은 용접 결함이 존재하더라도 접합부의 품질은 낮다. 그러나 굽힘 시험 등에서 파괴는 모재 또는 스테드의 나사 부위에서 발생하며, 이는 접합부의 크기에 비해 모재의 두께가 얇거나 나사 부위의 반경이 작기 때문이며, 접합부의 강도나 건전성이 높기 때문인 것은 아니다.

식(5)를 이용하여 용접부에서 기공이 배출되는 조건을 계산하였으며, 계산에 사용된 상수값을 Table 2에 정리하였다. 냉각 속도로 $10^6 \sim 5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 의 값을 사용한 계산 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 냉각 속도가 증가할수록 기공은 배출되기 어렵고, 냉각 속도가 $5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 인 경우에는 용접부의 기공은 거의 배출되지 못한다. 계산에 사용된 냉각속도는 스테인리스 강의 냉각 속도이며, 본 연구에서 사용한 저탄소강은 스테인리스강에 비해 열전달 계수가 높으므로 냉각속도가 더 빠르다. 또한, 용접부 두께를 응고가 완료된 시편을 측정하였기 때문에 압축시 두께에 비해 작다. 그러므로 계산 결과는 기공이 배출되는 최소한의 조건을 나타낸다.

저탄소강에 가장 가까운 $5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 의 냉각속도 조건에서 스테드의 이동 속도를 최대 속도인 600mm/s 로 증가시키더라도 Fig. 9와 같이 기공이 스테드 테두리 부근에 존재하는 경우를 제외하면 대부분의 기공은 외부로 배출되지 못한다. 이와 같은 계산 결과로부터 저탄소강을 이용한 스테드 용접에서 기공이 발생하면 외부로 배출되어 기공이 없는 건전한 용접부를 얻는 것은 거의 불가능하다고 판단된다.

4.2 기공 감소 방법

계산 결과로부터 CD 스테드 용접에서 기공이 존재하지 않는 용접부를 얻는 것은 거의 불가능하기 때문에 기공을 감소시키고 기공의 비율을 일정하게 유지하는 방법을 모색하였다. 본 연구에서는 아크용접의 단락이행에서 스파터를 감소시키기 위하여 단락 전류를 감소시키는 방법을 적용하였다¹⁰⁾. 즉, 스프링 힘이나 스테드 팁 길이를 조절하여 낮은 용접전류에서 단락이 발생하도록 아킹 시간을 조절하는 방법을 제안하고, 실험을 통해 제안한 방법을 검증하였다.

스프링 힘과 팁 길이를 조절하여 아킹 시간을 변화시

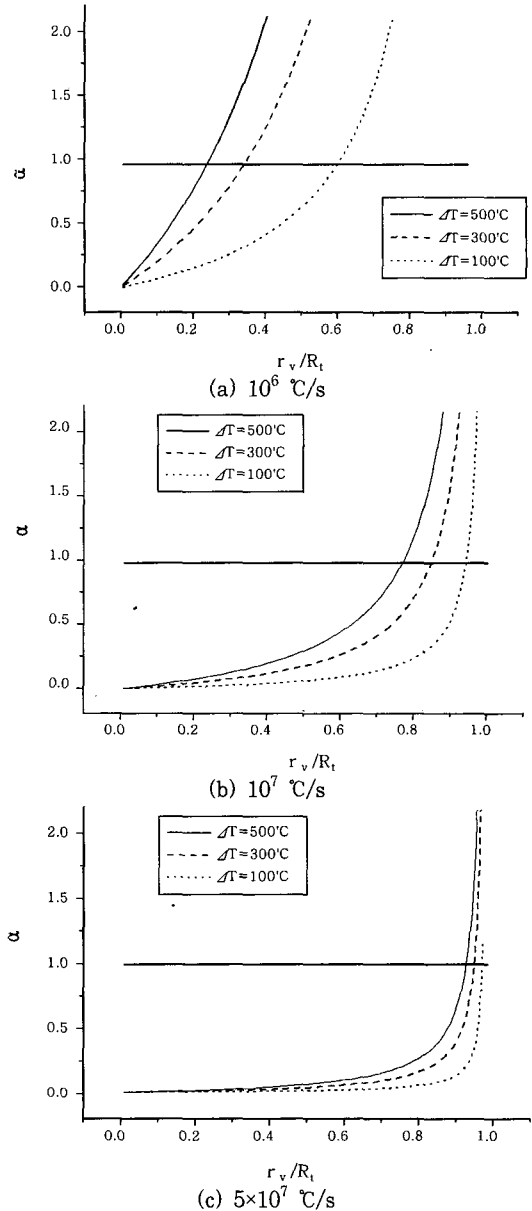


Fig. 8 Effect of cooling rateto void extrusion (a)1: void extrusion, $\alpha < 1$: void trapping)

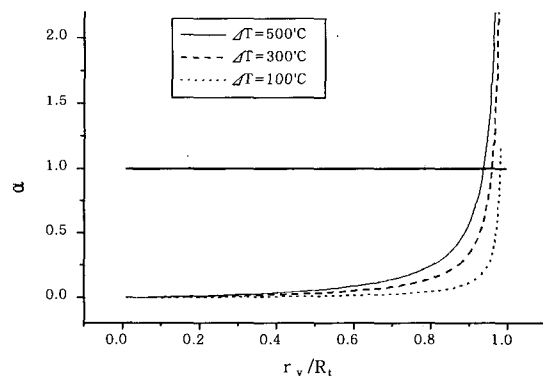


Fig. 9 Void extrusion with maximum stud velocity of 600mm/s (a)1: void extrusion, $\alpha < 1$: void trapping)

킴으로서 단락 전류값을 변화시키고, 용접부의 단면 사진으로부터 기공 비율 (void ratio, R_v)을 측정하였다. 기공 비율은 용접부 길이에 대한 기공 길이의 비로 다음과 같이 정의하였다.

$$R_v = (L_v/L_w) \times 100 \quad (6)$$

Fig. 10은 스프링 힘에 따라 단락 전류를 변화시키는 경우의 실험 결과를 나타낸다. 스프링 힘을 조절하여 단락 전류를 간접적으로 제어하기 때문에 동일한 조건에서도 약 100~200A의 편차가 발생하지만, 각 실험 조건에서 약 700A의 간격으로 설정하였기 때문에 경향성을 파악하는 데에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 단락 전류가 낮아지면 기공 비율이 감소하는 경향성을 보이고 있다. 스프링 힘이 116N인 조건에서 단락 전류는 2900A, 기공 비율은 38%이지만, 스프링 힘을 조절하여 76N인 조건에서는 단락 전류가 1400A로 낮아지고 기공 비율은 25%로 감소하였다. 그러나 스프링 힘이 56N으로 낮은 조건에서 단락 전류가 감소하지만 오히려 기공 비율이 증가하였다. 이는 스프링 힘이 너무 약해서 냉접(cold weld)이 발생하기 때문이며, 이러한 냉접 현상은 낮은 입열량, 낮은 파워 밀도, 낮은 가압력, 긴 팁 길이 등에 의해서도 발생한다.

Fig. 11은 스티드 팁 길이에 따라 단락 전류를 변화시키는 경우의 실험 결과를 나타내며, 단락 전류가 낮아지면 기공 비율이 감소한다. Fig. 11(a)는 스프링 건을 사용하는 경우에 팁의 길이가 단락 전류와 기공 비율에 미치는 영향을 나타낸다. 팁의 길이가 0.6mm인 조건에서 단락 전류는 1800A, 기공 비율은 36%이지만, 팁의 길이가 1.0mm인 조건에서 단락 전류는 800A로 낮아지고 기공 비율은 24%로 감소하였다. Fig. 11(b)는 서보 건을 사용하는 경우에 팁의 길이가

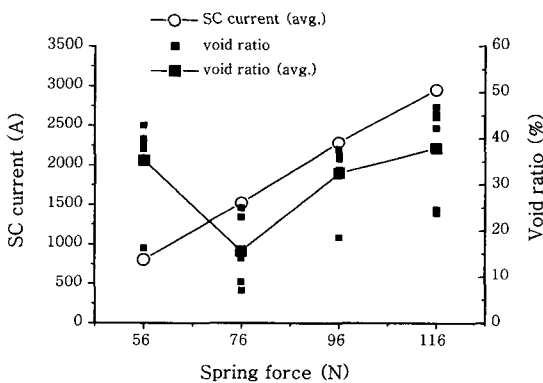


Fig. 10 Effect of spring force on short-circuit current and void ratio

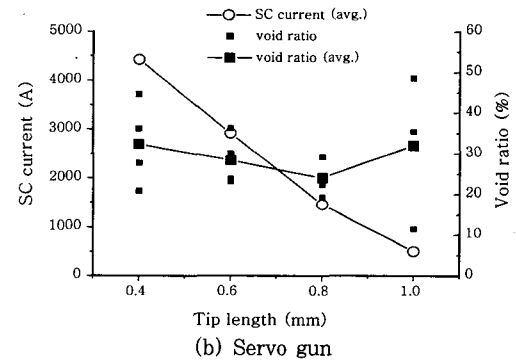
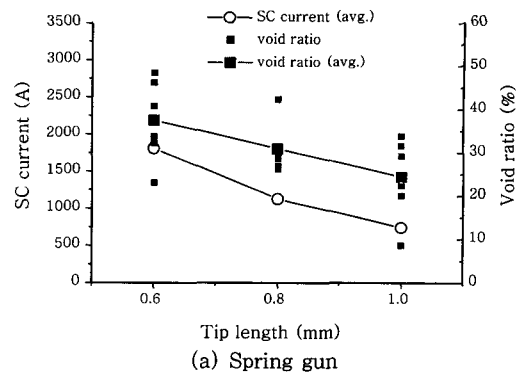


Fig. 11 Effect of tip length on short-circuit current and void ratio

단락 전류와 기공 비율에 미치는 영향을 나타낸다. 이전 실험 조건과 비교하여 팁의 지름이 0.8mm에서 0.4mm로 감소하였으며, 이는 서보 건을 사용하는 경우에는 갭 모드로 용접하기 때문이다. 단락 전류가 낮아지면 기공 비율이 감소하는 경향성을 보이며, 이전 스프링 건을 이용한 실험과 유사한 추세를 나타내고 있다. 팁 길이가 0.4mm인 조건에서 단락 전류는 4500A, 기공 비율은 32%이지만 팁 길이가 0.8mm인 조건에서는 단락 전류는 1300A로 낮아지고 기공 비율은 25%로 감소하였다. 팁 길이가 1.0mm인 조건에서는 오히려 기공 비율이 증가하였고 입열량이 작아서 냉접 현상이 발생하였다.

일반적으로 단락 전류가 감소할수록 기공 비율이 감소하며 단락 전류가 1000A 부근에서 가장 낮은 기공 비율을 보인다. 그러나 단락 전류가 500A 이하로 너무 낮을 경우에는 냉접 현상이 발생하여 기공 비율이 증가한다. 기공 비율이 낮은 경우에도 편차가 크지만, 단락 전류가 1000A 보다 높거나 너무 낮은 경우에 비해 편차가 감소하므로 균일한 기공 분포를 얻을 수 있다. 단락 전류에 따라 기공 비율이 변화하지만, 기공의 위치에 대한 경향성은 발견하지 못하였다. 서보 건을 사용하면 스프링 건에서 발생하는 불안정한 가압의 영향을 제거할 수 있지만, 기공 비율과 편차는 유사하였다.

5. 결 론

CD 스티드 용접부의 기공은 스티드와 모재의 용융부가 접촉하면서 발생하는 용융 금속의 기화와 스패터에 의해 형성되는 것으로 추정되며, 유동 해석을 통해 CD 스티드 용접부의 기공을 완전히 제거하는 것은 불가능함을 입증하였다. 기공을 감소시키는 방법으로 스프링 힘이나 서보 모터를 이용한 아킹 시간의 제어를 통해 단락 전류를 감소시키는 방법을 제안하였다. 스프링 건과 서보 건을 이용하는 경우에 기공 비율과 편차가 유사하며, 단락 전류가 1000A 정도인 경우에 용접부의 기공이 감소하였다.

참 고 문 헌

1. AWS: Welding Handbook, Vol.2, 1991, 299-327
2. R. D. Wilson: Explore the Potential of Capacitor-Discharge Welding, *Advanced Materials & Processes*, 145-6 (1994), 94-95
3. W. Nishikawa: The Principle and Application Field of Stud Welding, *Welding International*, 17-9 (2003), 699-705
4. S. Venkataraman, J. H. Devletian: Rapid Solidification of Stainless Steels by Capacitor Discharge Welding, *Welding J.*, 67-6 (1998), 111s-118s
5. S. Ramasamy, J. Gould, D. Workman: Design of Experiments Study to Examine the Effect of Polarity on Stud Welding, *Welding J.*, 81-2 (2002), 19s-26s
6. S. Ramasamy: Drawn Arc Aluminum Stud Welding for Automotive Applications, *J. of the Minerals*, 54-8 (2002), 44-46
7. J. W. Simmons, R. D. Wilson: Joining of High-Nitrogen Stainless Steel by Capacitor Discharge Welding, *Welding J.*, 75-6 (1996), 185s-190s
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. R. D. Wilson, J. R. Woodyard, J. H. Devletian: Capacitor Discharge Welding: Analysis through Ultrahigh-Speed Photography, *Welding J.*, 72-3 (1993), 101s-106s
10. H. J. Kim, H. S. Ryoo, B. Y. Kang: Application of Waveform Control Technology in GMA Welding, *J. of KWS*, 21-1 (2003), 21-26 (in Korean)