아크 스폿 용접의 입열효율 계산 방법에 관한 연구

장 경 복† · 조 상 명**

(2002년 7월 2일 접수, 2003년 5월 9일 심사완료)

A Study on the Calculating Method of the Heat Input Efficiency in Arcspot Welding

Kyoung Bok Jang and Sang Myoung Cho

Key Words: Arc Spot Welding(아크 스폿 용접), GMAW(Gas Metal Arc Welding), Heat Input Efficiency of Arc(아크입열효율), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

Abstract

In arc spot welding process, the arc is not moving and heat input is concentrated in one spot so that the heat input efficiency of arc is higher than that of GMAW. In other words, the heat input efficiency of arc change during weld time because arc start is done in spot and weld metal is filled. Therefore, the heat input model of arc spot welding should be different from that of general GMAW.

In present study, the calculating model of heat input efficiency in arc spot welding was suggested by temperature monitoring near spot in arc spot welding of copper plate. The result showed that the heat input efficiency of arc was changed three times during weld time. The accuracy of calculating method of heat input efficiency was verified by heat transfer analysis of arc spot welding process using finite element method.

1. 서 론

차체 구조의 접합에는 저항 점용접, 아크 용접, 레이저 용접 등의 접합법이 이용되고 있으며, 이 중 저항 점용접과 아크 용접이 널리 사용되고 있다. 저항 점용접은 저항 발열을 이용하여 용접을 행하기 때문에 판재의 두께가 두껍거나 용접지점의 간격이 허용한도보다 좁을 경우 원하는 작업결과를 얻기가 어렵게 된다. 더욱이 접합부의 양쪽 면에서 동시에 가압을 가해 주어야 하기 때문에 형상에 따라 작업의 제한을 받는 단점이 있다. 이와 같이 저항 점용접의 사용이 제약을 받을 경우, 일반적으로 아크 스폿 용접(arc spot welding)이 이용된다.[1]

아크 스폿 용접이란 접합되어야 할 두 판재 중 한쪽에 구멍을 뚫은 후 그 구멍을 통해 용탕을 채워 판재를 접합시키는 용접법으로 플러그 용접(plug welding)이라고도 한다. 이 방법은 판재의 한쪽 면만을 통한 접합이 가능하며, 약 6.4mm 두께의 강판까지 겹치기 용접이 가능한 것으로 알려져 있다.[2] 이러한 아크 스폿 용접은 접합부의 한쪽 면만을 가압해 주면 되므로 양쪽면을 동시에 가압해야 하는 저항 점용접 보다 형상의 제약을 적게 받으며 두꺼운 판재까지 용접이 가능하므로 그 사용 범위가 상당히 넓다.[3~5] 이러한 아크 스폿 용접은 기본적으로 GMAW(Gas Metal Arc Welding)와 유사하나, 용접 열원의 이동이 없고, 입열이 스폿에 집중되므로 GMAW 보다 짧은 시간에 고입열이 이루어진다는 점에 있어서 차이가 있다.[6~10]

† 책임저자, 회원, 삼성중공업(주) 거제조선소
조선플랜트연구소 용접연구
E-mail : janggb@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-1454 FAX : (051)512-9835
* 회원, 부경대학교 재료공학부 생산가공공학

일반적인 이동 열원 아크 용접의 경우 아크 효율을 적게는 65%에서 많게는 95%까지로 보고 있으나 아크 스폿 용접의 경우 열원의 이동없이 스폿에 열원이 집중되어 용접금속이 충전되어 오기 때문에 아크 효율이 다소 높다는 정도만 알려져 있을 뿐이다.[11,12] 그리고, 구멍의 크기에 따라 아크 입열 효율이 달라지기 때문에 입열 모델을 정립하기가 어렵다. 또한, 용탕이 바닥으로부터 충전되면서 모재도 용융되기 때문에 아크 효율이 용접시간에 따라 변화한다. 즉, 용접 시작 시에는 아크가 구멍으로부터 보호되기 때문에 아크 효율이 거의 100%에 가까우나 시간이 지남에 따라 용탕이 충전되어져 아크가 대기 중에 노출되기 때문에 효율은 점점 떨어지며 표면에 비드를 형성할 즘에는 아크로부터 나오는 열은 상당한 손실을 입은 후 모재로 전달되게 된다.

이에 본 연구에서는 열전도 특성이 좋아 아크 열원의 입열 영향을 순간적인 온도 계측을 통해 직접 관찰할 수 있는 동판을 이용하여 일정 크기의 구멍을 뚫고 아크 스폿 용접을 수행하면서 구멍 주위의 아크 열원과 가까운 지점에서의 온도를 모니터링하여 그 결과로서 시간에 따른 아크 효율의 변화를 계산하였다. 또한, 이러한 결과를 유한요소법을 이용한 3차원 열전달 해석에 적용하여 본 연구에서 제시한 아크 스폿 용접 입열 효율 계산 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 재질 및 시험 방법

본 연구에 사용된 재료는 동판(99.9% 순동)으로 직경은 191mm이며, 두께는 16.1mm이다. 아크 스폿 용접을 위한 구멍의 직경은 6.5mm, 깊이는 3.5mm이며, 용접 자세는 수직 자세이다. Fig. 1은 동판에 열전대를 부착하여 수직자세로 용접하는 모습이며, Fig. 2는 동판의 치수와 입열효율 측정을 위한 열전대 부착위치를 나타낸 것이다.

열전대는 용접부 반대편에 구멍을 뚫어 B-CuP 브레이징 삽입재를 이용하여 부착하였으며, 실용접 시 아크력에 의한 노이즈를 최소화하기 위해 세라믹 관을 이용하였다. 용접조건은 전압 25V, 전류 225A, 용접 시간 1.9sec 이다.

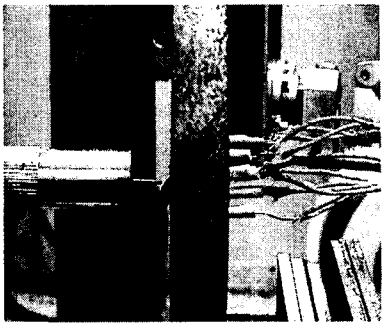

Fig. 1 Arc spot welding in copper plate with thermocouple

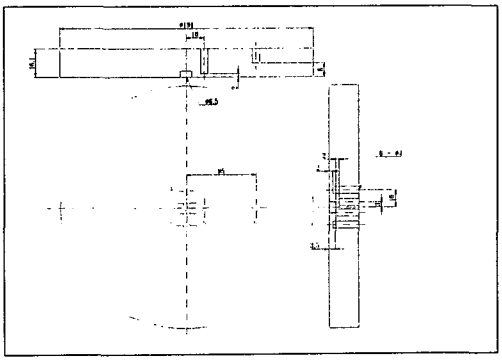

Fig. 2 Dimension of copper plate and position of thermocouple

3. 온도계측 결과 및 고찰

Fig. 3은 6군데 열전대 위치에서의 온도 모니터링 결과를, Fig. 4는 용접 시의 아크 모니터링 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 용접 후 동판의 전체적인 온도의 상승(△T)은 6.14K임을 알 수 있다. 그런데, 입열효율은 용접조건으로 계산되어지는 입열량과 실제 동판에 투여된 입열량의 비로서 계산될 수 있다. 즉, Fig. 4의 아크 모니터링 결과에서 구해지는 입열량(Q)은 10,782J(227A×25V×1.9sec)이고 온도 모니터링 결과에서 구해지는 실제 동판의 전체 평균 온도 상승(△T) 6.14K로 동판에 투여된 열량은 $Q = C_v \times m \times \Delta T$에서 동판의 질량(m)이 3.82kg, 비열(C_v)이 390kJ/kg·K에서 9147J이다. 그러므로, 본 아크 점용접의 평균적인

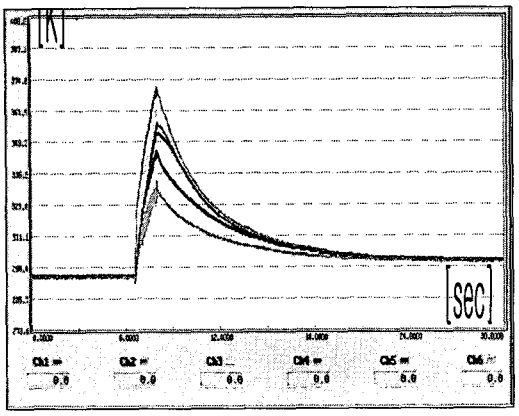

Fig. 3 Results of temperature monitoring for copper plate

Fig. 4 Result of arc monitoring

입열효율은 85% ($\frac{9247}{10782}\times 100$) 정도가 된다. 이는 일반적으로 보고되고 있는 아크스폿 용접의 평균 입열효율과 유사하다.

그러나, 이 효율은 평균적인 효율이고 실질적으로는 아크 스폿 용접시간 동안 입열효율은 변화한다. Fig. 5에 온도 모니터링 결과를 용접시간 동안만 확대하여 나타내었다. 여기서, 온도 기울기가 용접시간 동안 크게 3번 변화하고 있음을 알 수 있는데 각 구간에 해당하는 시간과 기울기로서 시간에 따른 입열효율을 계산하였다.

첫번째 기울기를 나타내는 아크 스타트 후 0.24초까지는 와이어 송급속도로서 계산해 보면 아크가 깊이 3.5mm 위치에서 스타트하여 0.95mm

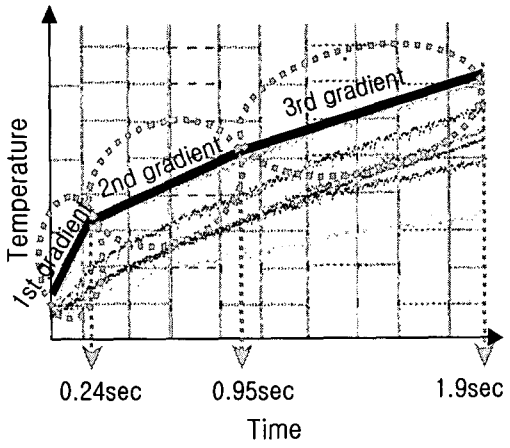

Fig. 5 Gradient variation during welding time

까지 충전되어 오는데 까지 걸리는 시간을 나타내며, 이 시간 동안에는 아크가 구멍 안에서 보호되기 때문에 아크 효율이 거의 100%에 달한다. 그러나, 용접금속이 점점 충전되어 짐에 따라 아크가 대기 중으로 노출되기 때문에 모재로 전달되는 열은 점점 줄어들므로, 아크 입열효율은 감소한다. 이러한 구간을 나타내는 것이 0.24초에서 0.95초까지이다. 이렇게 용접금속이 3.5mm까지 채워지고 표면의 비드를 형성할 동안에는 아크가 대기에 직접적으로 노출되기 때문에 아크 입열효율은 더욱 떨어지게 된다. 결국, 아크 입열 효율은 용접시간의 함수로서 점차적으로 감소된다는 것을 알 수 있는데, 이 시간 구간을 크게 3구간 (0~0.24sec, 0.24~0.95sec, 0.95~1.89)으로 나누고 첫번째 구간의 기울기를 1로 보고, 나머지 구간의 기울기 비를 구하였다. 이 때의 비는 1, 0.88, 0.74가 되고, 아크 입열 효율의 변화는 100%, 88%, 74%가 된다.

이를 기준으로 평균적인 입열 효율은

$$82.52\%\left(=\frac{100\times 0.24+88\times 0.71+74\times 0.95}{1.9}\right)$$

로 상기에서 계산되어진 85%와 거의 유사함을 알 수 있어 본 계산 결과의 타당성을 확인할 수 있다. Fig. 6은 이렇게 계산되어진 아크 입열 효율 계산 모식도를 나타낸다.

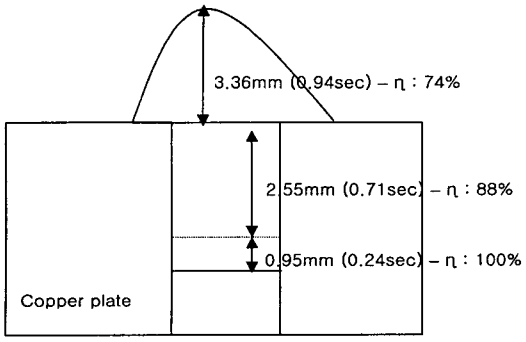

Fig. 6 Outline of heat input model in arc-spot welding

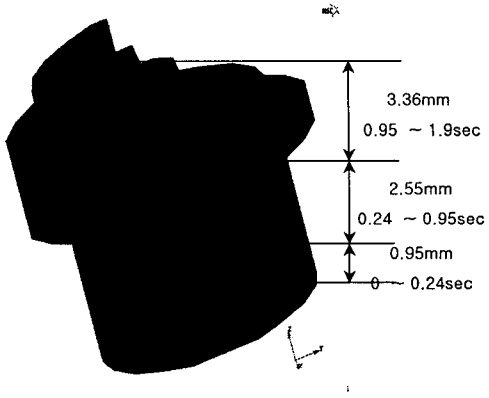

Fig. 8 Shape of bead element

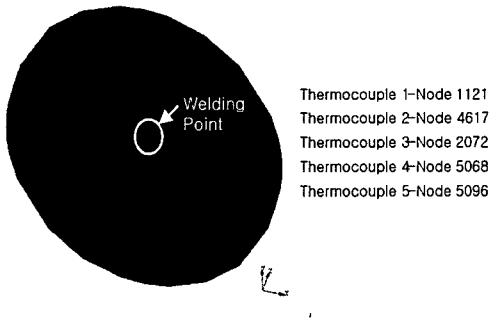

Fig. 7 Finite element model and node number in thermocouple position

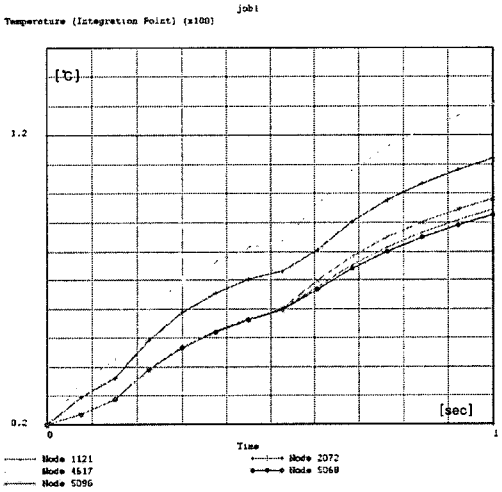

Fig. 9 Temperature profile for arc efficiency 100 %

4. 유한요소 해석

계산되어진 아크 입열효율의 타당성을 검증하기 위해 시험편과 동일한 유한요소 모델을 구성하여 용접시간 동안 아크 입열효율이 변화하지 않고 100%로 일정하다고 가정하고 수행한 열전달 해석과 아크 입열효율이 계산되어진 결과처럼 시간에 따라 변화한다고 보고 수행한 열전달 해석결과 중 어느 쪽이 계측결과와 유사한지를 비교 검토하였다. Fig. 7은 모델의 요소형상과 열전대 부착 위치에서의 절점 번호를 나타낸다.

Fig. 8은 유한요소 모델 중 용접금속 부분만을 확대하여 나타낸 것으로 온도계측 결과에서 계산되어진 아크 입열 효율이 모델에 어떻게 적용되는가를 보여주고 있다. 즉, Fig. 7에서 용접 시간 중 0.24초 동안은 그 시간에 해당하는 0.95mm 높이까지의 비드 요소에만 입열이 되고 윗 부분은 비활성화된 요소로 지정하여 실제 용접금속이 충전되는 과정을 모델링하였다.

Fig. 9은 용접시간 동안 아크 입열효율이 변화하지 않는 100%라고 가정한 경우의 해석 결과로서 열전대 부착위치에서의 온도 프로파일을 나타낸 것이며, Fig. 10은 아크 입열효율이 용접시간의 함수로서 변화하는 즉 Fig. 6에 나타난 계산되어진 아크 입열효율을 입열 모델에 적용하여 해석된 결과를 나타낸다.

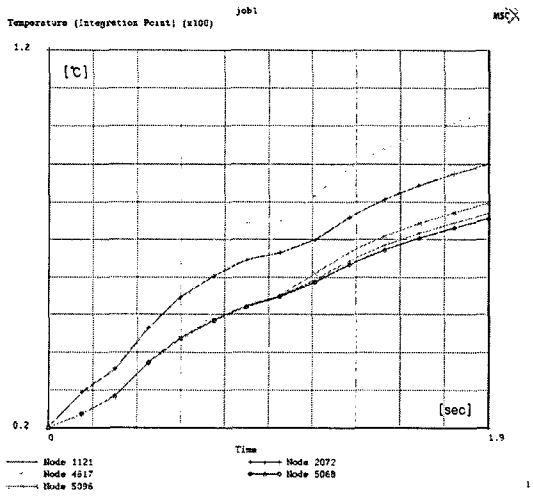

Fig. 10 Temperature profile for calculated heat input model

아크 스폿 용접공정의 입열특성을 무시하고 용접시간 동안 아크 입열효율이 100%라고 가정한 경우의 해석 결과는 아크 입열효율이 과대 평가되어짐으로 인해 각 열전대에서 용접 직후의 피크 온도가 90℃～130℃로 전체적으로 계측 결과(70℃～100℃)에 비해 20℃～30℃ 가량 높게 나타나고 있다. 이에 반해 아크 스폿 용접공정의 입열특성을 고려하여 계산되어진 입열 모델을 적용한 경우는 온도 모니터링 결과와 유사한 프로파일을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러므로, 아크 스폿 용접공정의 경우 용접시간에 따라 아크 입열 효율이 변화하는 입열 모델의 적용이 반드시 필요하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

아크 스폿 용접시 시간에 따라 변화하는 아크 입열효율을 계산하기 위한 모델을 제시하였으며 그 주된 결과는 다음과 같다.

(1) 열전도 특성이 좋아 아크 열원의 입열 영향을 순간적인 온도계측을 통해 직접 관찰할 수 있는 동판을 이용하여 일정 크기의 구멍을 뚫고 아크 스폿 용접을 수행하면서 구멍 주위의 아크 열원과 가까운 지점에서의 온도를 모니터링하여 그 결과로서 시간에 따른 아크 입열 효율의 변화를 계산할 수 있었다.

(2) 본 모델의 경우 아크 입열효율은 용접시간 동안 크게 3번 변화(100%→88%→74%)하였는데 이를 각 구간의 시간을 고려하여 평균 내어보면 82.52%로서 용접조건으로 계산되어진 입열량과 실제 동판에 투여된 입열량의 비로서 계산되어진 평균 입열효율(85%)과 유사한 결과를 나타내어 계산모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

(3) 유한요소 해석 결과 아크 스폿 용접의 경우 용접시간에 따른 아크 입열효율의 변화를 고려해 주는 입열 모델의 적용이 반드시 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

(1) 現代自動車(株), 1988, "電氣抵抗熔接," pp. 3～60.

(2) 英國熔接學會, 1984, "自動 炭酸가스 熔接".

(3) W. P. Blankenship, etc., 1983 "Evaluation of GMA Spot Welding for Assembly of High Performance Sheet Steel Structure," Welding Journal, March, pp. 27～33.

(4) 小野英彦, 1982, "鋼のCO2ア-クスポット熔接(第1報)," 熔接學會誌, 第51卷, 第7号 pp. 604～609.

(5) M.S Han, J.M Han, J.Y Lee, 1997, "A Study on the Bending Strength of a Built-up Beam Fabricated by the CO_2 Arc Spot Welding Method," Journal of KWS, Vol. 15, No. 4, pp. 369～379.

(6) O. W. Blodgett, 1987, "Calculating Cooling Rates of Arc Spot Welds," Welding Journal, December, pp. 17～31.

(7) T. Muraki, J.J. Bryan, and K. Masubuchi, 1975, "Analysis of Thermal Stresses and Metal Movement During Welding," Journal of Eng. Materials and Tech. ASME, pp. 81～91.

(8) H.D. Hibbit, and P.V. Marcal, 1973, "A Numerial Thermo-mechanical Model for the Welding and Subsequent Loading of a Fabricated Structure," Computers and Structure, pp. 1145～1174.

(9) R.E. Nickell, and H.D. Hibbit, 1975,

"Thermo-mechanical Analysis of Welded Structures," Nuclear Eng. and Design, pp. 110~120.

(10) E. Friedman, "Thermo-mechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method," Journal of Press. Vesel Tech. ASME, Series J, 97(3), (1975), pp. 206~213.

(11) J.K. Hwang, K.B Jang, S.S Kang, 1998, "A Study on the Weldability of 304 stainless steel," Journal of KWS, Vol. 16, No. 1.

(12) J.K. Hwang, K.B Jang, S.S Kang, 1999, "Prediction of Nugget Shape by Finite Element Modeling in Arc-spot Welding," Journal of KWS, Vol. 17, No. 2.