# Arc용접 용융효율 측정용 고성능 디지털 칼로리메터의 개발

# Development of the high performance digital calorimeter to measure the melting efficiency of arc welding

조진안*, 오동수**, 황동수***, 조상명****
* 부경대학교 대학원 소재프로세스공학과
** 한국폴리텍Ⅶ창원대학 산업설비자동화과
*** 모니텍(주)
**** 부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공, pnwcho@pknu.ac.kr

## 1. 서 론

TIG용접에서 아크에너지는 텅스텐 전극으로부터 아크를 통해 모재 표면에 전달된다. 용접에서는 모재를 적절한 깊이와 폭으로 용융시키는 것이 중요하다. 하지만 TIG용접 공정에서 긴 아크길이나 낮은 용접속도로 인해 넓고 얕은 비드를 만들고, 낮은 용융효율로 인해 과대한 변형이 발생하는 문제가 생긴다. 기존의 칼리로메터는 용접기 출력과 아크열의 구분이 명확하지 않아서 아크효율의 정의와 값에 일관성이 없는 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 고성능 디지털 칼로리메터를 개발하여 아크효율과 용융효율을 보다 합리적이고 효율적으로 측정하는 것을 그 목적으로 하였다. 또한 개발한 칼로리메터의 정밀 캘리브레이션을 거쳐 TIG용접에서 전류와 아크길이에 따른 아크효율 및 용융효율을 측정하여 Giedt등의 선행연구 결과와 비교 고찰하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료

본 실험에서는 폭40×길이100×두께9.5mm의 STS 304 plate위에 bead on plate용접하였다. 이 시편을 칼로리메터의 Cu 판위에 놓은후 길이 80mm의 용접을 하였다. 전극은 Φ3.2 2%Th W을 사용하였다.

### 2.2 실험 방법

Fig. 1은 칼로리메터의 모식도를 나타낸 것이다. 내부 동판의 In과 Out에 T-type 열전대를 부착하고 온도를 측정하였다. 온도는 온도모니터링 시스템(TMS-6000)으로 측정하였고, 0℃에서 60℃까지 6단계로 나누어서 Calibration하였다.

중량이 측정된 Mild steel을 보온로에서 70℃로 30분간 유지하였다. 가열된 Mild steel을 Calorimeter에 넣고 calorie를 측정하였다.

용접 전류, 전압은 티그용접모니터링 시스템(WTM-2000N)으로 측정 하였다.

용접 후 재빨리 칼로리메터의 뚜껑을 닫았다. 칼로리메터 내부로 일정한 유속의 냉각수가 흐르고, 냉각수로 열이 전달되어 시편이 냉각된다.

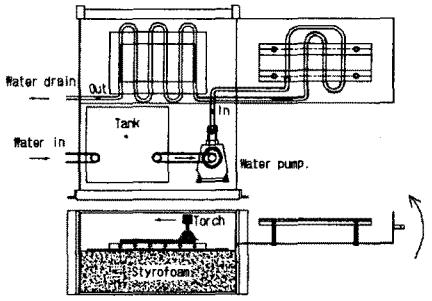


Fig. 1 Schematic of calorimeter

냉각수 In과 Out의 온도가 상온으로 일정해질 때까지 최대 1500sec까지 측정하였다.

Table 1은 공통 용접 조건이다.

Table 1 Welding condition

| | |
|---|---|
| Power source | Inverter AC/DC TIG |
| Welding speed | 7 cm/min |
| Shield gas | Ar 100%, 15 ℓ/min |

Exp. A, B, C의 용접 조건은 Table 2에 나타내었다. Exp. A, B는 Arc length를 일정하게 하고 용접 전류를 증가시켰다. Exp. C는 용접전류를 동일하게 하고 Arc length를 변경하였다.

Table 2 Welding condition for experiment

| Exp. | Set current | Arc length($L_A$) |
|---|---|---|
| Exp.A | 50, 100, 150, 200A | 0mm |
| Exp.B | | 3mm |
| Exp.C | 150A | 2, 3, 4mm |

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 용접전류와 용접회로 열손실의 관계

식 (1)은 아크열을 정의한 것이다.

$$Heat\ of\ arc = Machine\ output - heat\ loss\ of\ welding\ circuit \quad ------(1)$$

여기서, Machine output : 용접기 출력단자에서 측정한 전압과 전류로 계산

Heat loss of welding circuit : 용접토치를 접지시켜 측정한 전압과 전류로 계산

Fig. 2는 아크길이$L_A$ 0mm로 접지하여 용접전류를 변경시켰을 때 용접회로의 저항과 전압을 나타낸 것이다. 용접전류가 증가하더라도 용접회로의 저항은 동일하고, 전압은 전류에 비례하여 증가한다. Fig. 3은 $L_A$ 3mm에서 용접전류에 대한 아크열과 용접회로 열손실을 나타낸 것으로서, 전류의 제곱에 비례하여 증가한다.

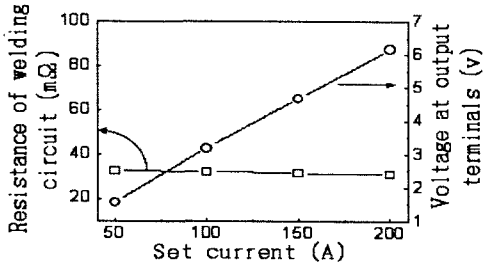


Fig. 2 Effect of set current on the resistance of welding circuit

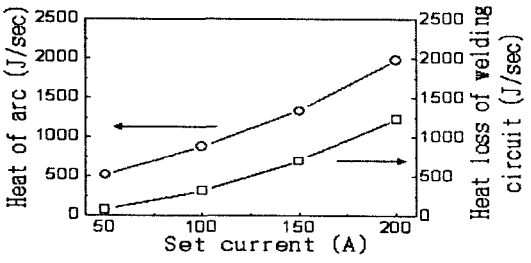


Fig. 3 Effect of set current on the heat of arc and the heat loss of welding circuit

### 3.2 아크 효율에 미치는 용접전류의 영향

식 (2)와 (3)은 용접기 출력에 대한 아크효율과 아크열에 대한 아크효율에 대해 나타낸 것이다. 기존의 연구에서는 식 (2)의 분모 항에 용접기 출력을 사용하여 $\eta_M$을 계산하였고, 본 연구에서는 식 (3)의 아크열을 사용하여 $\eta_A$를 결정하였다. 식 (4)는 용융효율에 대해 나타낸 것이다.

$$Arc\ efficiency\ \eta_M = \frac{Heat\ input\ to\ base\ metal}{Machine\ output} \quad ----(2)$$

$$Arc\ efficiency\ \eta_A = \frac{Heat\ input\ to\ base\ metal}{Heat\ of\ Arc} \quad ----(3)$$

$$Heat\ of\ arc = Machine\ output - Heat\ loss\ of\ welding\ circuit$$

$$Melting\ efficiency = \frac{Heat\ to\ melt}{Heat\ input\ to\ base\ metal} \quad ----(4)$$

여기서, Heat to melt = (weld metal volume x 8720J/cc)

Fig. 4는 아크길이 3mm일 때 용접전류에 대한 비드 외관 및 용접금속 단면적을 나타낸다. Fig. 5는 용접전류에 대한 아크효율 $\eta_M$, $\eta_A$을 나타낸다. 용접전류가 증가 할 때 용접기 출력에 대한 아크효율$\eta_M$은 현저히 감소하고, 아크열에 대한 아크효율$\eta_A$는 약 0.94이었고, Giedt[1]의 결과는 0.8로 낮았다. 이와 같이 $\eta_A$가 낮은 이유는 아크열에 용접회로 열손실이 일부 포함되어 있었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안하는 용접회로 열손실을 완전히 배제한 순수한 아크열에 대한 모재입열양의 비로 아크효율을 계산하는 것이 바람직하다.

Fig. 6은 용접전류에 대한 용융효율을 나타낸 것이다. 용접전류가 증가할 때 용융효율은 0, 0.053, 0.119, 0.158로 증가하였다. 이 용융효율은 본 연구결과와 Giedt의 결과가 거의 유사하게 얻어졌다. 다만 Giedt의 연구에서는 21600sec의 측정시간이 소요되었으나 본 연구에서는 1500sec의 짧은 시간으로 측정이 가능하였다.

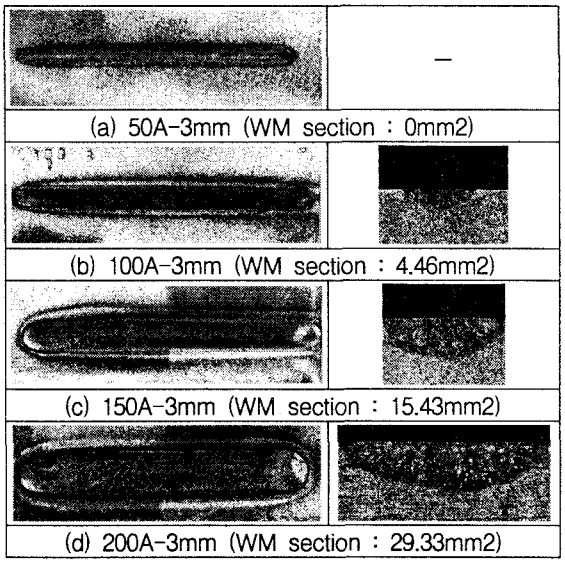


Fig. 4 Bead appearance and macro section with various current

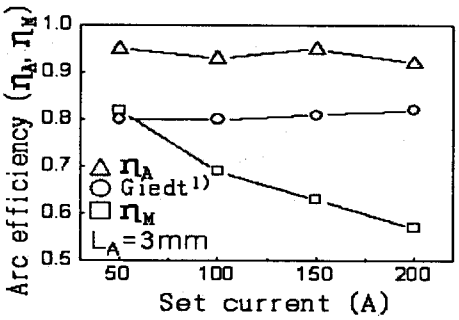


Fig. 5 Effect of set current on the arc efficiency

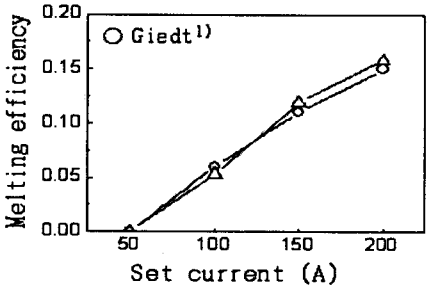


Fig. 6 Effect of set current on the melting efficiency

### 3.3 용융 효율에 미치는 아크길이의 영향

Fig. 7은 설정전류 150A에서 아크길이 2, 3, 4mm일 때 비드외관 및 단면을 나타낸 것이다. 아크길이가 감소할수록 좁고 깊은 비드를 형성한다. Fig. 8은 아크길이에 따른 아크효율을 나타낸 것이다. 아크길이가 2, 3, 4mm 일 때 $\eta_M$은 0.6으로 일정하고, $\eta_A$는 감소하였다. Fig. 9는 아크길이에 대한 용융효율을 나타낸 것이다. 아크길이 2, 3, 4mm일 때 용융효율은 0.122, 0.119, 0.117로 감소하였다.

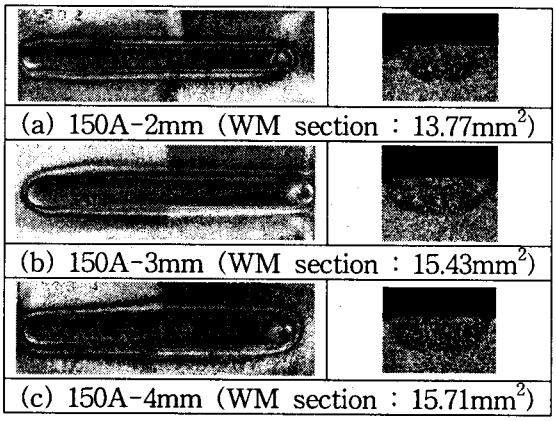


Fig. 7 Bead appearance and macro section with various arc length

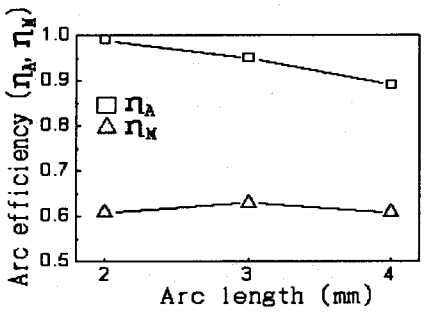


Fig. 8 Effect of arc length on arc efficiency

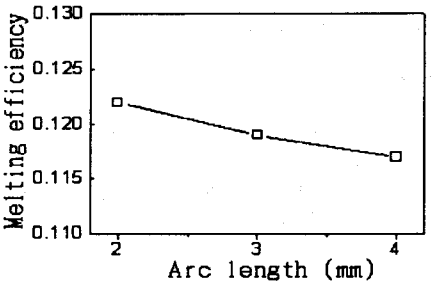


Fig. 9 Effect of arc length on melting efficiency

## 4. 결 론

1) Giedt의 연구에서는 21600sec의 측정시간이 소요되었으나 본 연구에서는 1500sec의 짧은 시간으로 측정할 수 있는 고성능 디지털 칼로리메터를 개발할 수 있었다.

2) 용접전류가 증가하면 용접회로 열손실이 커져서 Machine output에 대한 아크효율은 감소하는 현상을 보인다. Machine output에서 용접회로 열손실을 뺀 아크열에 대한 아크효율$\eta_A$는 용접전류에 관계없이 일정한 값을 보이므로 이 $\eta_A$를 사용하는 것이 바람직하다.

3) Giedt는 Arc근처에서 아크열을 측정한 $\eta_A$는 0.8로 낮게 평가되었다. 하지만 모재, 콜릿, 텅스텐 전극의 열손실은 고려되지 못했다. 따라서 본 연구에서는 전체의 용접회로 열손실을 고려한 아크효율은 0.9로 평가되었다.

4) 아크길이가 짧아질 때 주위로의 에너지 손실이 적어 좁고 깊은 비드를 만들고 아크 전압 강하가 감소하여 입열량이 적어지고 용융효율은 증가한다.

## 참 고 문 헌

1. Geidt, W.H., Tallerico, L.N., and Fuerschbach, P.W. 1989. GTA welding efficiency ; calorimetric and temperature field measurements. Welding Journal 68 (1):28-s to 32-s.