



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



**비영리.** 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



**변경금지.** 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

저항용접에서 입열량과 통전시간이  
용융효율에 미치는 영향에 관한 연구



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

金 眞 旭

工學碩士 學位論文

저항용접에서 입열량과 통전시간이  
용융효율에 미치는 영향에 관한 연구

指導教授 趙 相 明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

金 眞 旭

金眞旭의 工學碩士 學位論文으로  
認准함

2007年 2月



주 심 工學博士 金 雨 烈 (印)

위 원 工學博士 李 秉 雨 (印)

위 원 工學博士 趙 相 明 (印)

## 목 차

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| Abstract                                         | 1  |
| 제 1장 서론                                          | 2  |
| 1.1 연구 배경 및 필요성                                  | 2  |
| 1.2 연구 목적 및 개요                                   | 3  |
| 제 2장 이론적 배경                                      | 4  |
| 2.1 저항 용접                                        | 4  |
| 2.1.1 원리                                         | 4  |
| 2.1.2 저항 용접부 각부의 명칭                              | 7  |
| 2.1.3 저항용접 3대 조건에 대한 고찰                          | 9  |
| 2.2 용융 효율                                        | 21 |
| 제 3장 동일 입열량에서 통전시간과 용융효율의 관계 검토를 위한<br>고속카메라의 적용 | 22 |
| 3.1 서언                                           | 22 |
| 3.2 실험 재료 및 방법                                   | 23 |
| 3.2.1 실험 재료                                      | 23 |
| 3.2.2 실험 방법                                      | 25 |
| 3.3 실험 결과 및 고찰                                   | 31 |
| 3.3.1 통전시간과 용융효율의 관계                             | 31 |
| 3.3.2 고속촬영에 의한 통전시간과 용융효율의 관계 검토                 | 40 |
| 제 4장 동일 통전시간에서 입열량이 용융효율에 미치는 영향                 |    |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 검토 실험 -----                                             | 43 |
| 4.1 서언-----                                             | 43 |
| 4.2 실험 방법 -----                                         | 44 |
| 4.3 실험 결과 및 고찰 -----                                    | 45 |
| 제 5장 단상AC 및 인버터DC 전원의 파형 형태가 너깃과 날림에<br>미치는 영향 검토 ----- | 48 |
| 제 6장 결론 -----                                           | 52 |
| 참고 문헌 -----                                             | 53 |



# *A study on the Effect of heat input and welding time on melting efficiency in resistance spot welding*

jin-wook, Kim

*Major of Materials Processing Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University*

## Abstract

The resistance welding processes are widely used in sheet metals, because welding time is short and operation is simple and has been used for many years as a reliable technique for joining pressed steel sheet.

Recently many studies on the melting efficiency in arc welding have been carried on, and their results contribute to reduce angular distortion. But there has been no study on the melting efficiency in resistance welding yet.

In this study, the melting efficiencies of Single phase AC and Inverter DC with same heat input were compared, the melting efficiency according to the welding time with same heat input was calculated in order to evaluate the effect of welding time on the melting efficiency, and the melting state of joint was captured by high speed camera.

The result of high speed camera shooting shows a great difference in the temperatures changes of nugget along with current waveform in single phase AC power source, while they were not so intense in inverter DC power source.

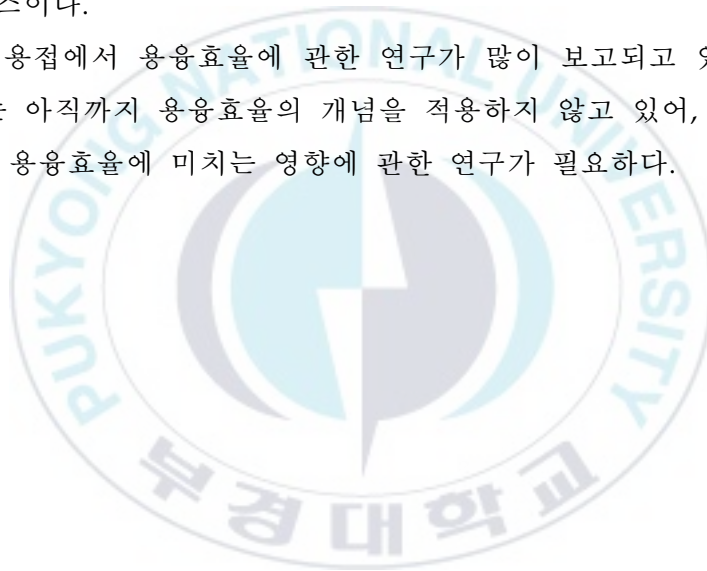
Key Words: Resistance spot welding, Melting efficiency, Heat input, Welding time, High speed camera, Single phase AC, InverterDC, Welding current, Welding voltage, Nugget volume

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

저항 용접은 용접 시간이 매우 짧아 우수한 경제성과 생산성의 확보가 용이하여 널리 이용되고 있으며, 용접기술과 자동화 기술의 발달로 자동차, 가전제품 등 모든 분야까지 확산되어졌다. 또 저항 용접은 아크 용접에 비해 작업자 숙련도에 의한 용접품질의 차이가 없어, 용접사 의존성이 낮은 용접 프로세스이다.

최근 Arc 용접에서 용융효율에 관한 연구가 많이 보고되고 있지만 저항용접에서는 아직까지 용융효율의 개념을 적용하지 않고 있어, 통전시간과 입열량이 용융효율에 미치는 영향에 관한 연구가 필요하다.



## 1.2 연구 목적 및 개요

최근 Arc 용접에서 용융효율에 관한 연구가 많이 보고되고 있다. GAMW에서 동일 각장으로 공정 설계된 필릿 용접부는, CTWD 증가에 따라 용융효율의 증가로 각변형이 감소하였고, 용접속도 증가에 따라 용융효율의 증가로 각변형이 감소하였다. 또 Arc 길이 증가에 따라 용융효율의 감소로 각변형이 증가하였다. 이와 같이 용융효율이 각변형에 많은 영향을 끼쳤다. 하지만 저항용접에서는 아직까지 용융효율에 관해 보고된 연구는 없다.

본 연구에서는 동일 입열량에서 단상AC 전원 및 인버터DC 전원의 용융효율을 비교하고 통전시간이 용융효율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 동일한 입열량에서 통전 시간에 따른 용융효율을 계산하고 고속카메라를 사용해 용접 중 너깃부의 가열 용융 상태 촬영하였다.

또 동일한 통전시간에서 입열량을 변경하여 입열량이 용융효율에 미치는 영향을 검토하고, 단상AC와 인버터DC 전원의 용접 파형이 너깃과 날림에 미치는 영향을 검토하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 저항 용접

#### 2.1.1 원리

저항 용접은 피용접재의 두 표면을 서로 마주보게 고정시킨 후 가압하여 용접전류를 흘려 두 접촉면에서의 접촉저항 및 고유저항에 의한 발열로 피용접재를 접합하는 용접공정이다.

도체에 전류를 흐르게 하면 도체 내부의 전기저항에 의해 열손실을 일으킨다. 일반적인 전기회로에서는 이와 같은 손실을 최소화하는 방향으로 기술을 발전시키고 있으나, 저항 용접은 발열 손실을 오히려 적극적으로 이용하는 기술이다<sup>1)</sup>. 저항체에 전류를 통할 때에 발생하는 열량 즉 전기저항열(주울열)은 다음과 같다<sup>2)</sup>.

$$\begin{aligned} Q &= I^2 R t, \text{ J} \\ &= 0.24 I^2 R t, \text{ J} \text{ ----- (2.1)} \end{aligned}$$

여기서, I : 용접 전류, A                      1cal : 4.2J  
R : 저항,  $\Omega$                                   1J : 0.24cal  
t : 통전시간, sec

즉 저항(R)을 가진 물체에 전류(I)를 t초 동안 흘려주면  $I^2 R t$  주울(Joule)이라는 열(Q)이 발생한다.

또한 저항 발열량 Q를 전류밀도의 항으로 표현하면

$$\begin{aligned} Q &= I^2 R t = I^2 \rho L / A_s, \text{ J} \text{ ----- (2.2)} \\ &= \rho \delta^2 L A_s t, \text{ J} \\ &= \rho \delta^2 V t, \text{ J} \end{aligned}$$

여기서,  $\rho$  : 도체의 고유 저항,  $\Omega\text{cm}$        $\delta$  : 전류 밀도,  $\text{A}/\text{cm}^2$   
 $L$  : 도체의 길이,  $\text{cm}$        $A_s$  : 도체의 단면적,  $\text{cm}^2$   
 $V$  : 도체의 체적,  $\text{cm}^3$

식 (2.1)에서 저항 발열량은 전류의 제곱에 비례하고, 회로 저항과 전류를 흘린 시간(통전 시간)에 비례한다는 것을 알 수 있고, 식 (2.2)에서는 고유저항  $\rho$ 인 도체  $1\text{cm}^3$ 당 매초  $\rho\delta^2(\text{J})$  또는  $0.24\rho\delta^2(\text{cal})$ 의 열이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉 용접부에서는 단위 시간당의 발열량은 소재의 고유저항이 높을수록, 전류 밀도가 높을수록 커짐을 알 수 있다. 전류 밀도의 영향은 동일 한 전류로 용접을 실시한다고 하더라도 통전 경로의 단면적을 줄임으로써 전류 밀도가 증가하는 것만큼의 발열 효과를 얻을 수 있다.

식 (2.1)에 표현된 전류와 시간 그리고, 두 금속의 접촉면에 수직으로 가해지는 압력을 저항용접의 3대 조건이라고 한다. 이 저항용접의 3대 조건에 따라 너트의 생성유무와 성장속도가 좌우된다.

실제의 용접에서는 이 발열량의 일부가 용접에 사용되며, 나머지는 용접기의 전류 공급회로와 피용접재 내부의 저온 영역으로 손실되어 용접 공정에서의 에너지 효율을 나쁘게 한다. 즉, 저항 용접에서 발생하는 열량은 용접부의 온도 상승에 기여하는 것은 물론 전극-피용접재 계면을 통한 열손실과 피용접재의 다른 부분도 가열하게 되는 것이다. 이러한 요소들은 기존의 열전달 이론으로 해석이 가능하다.

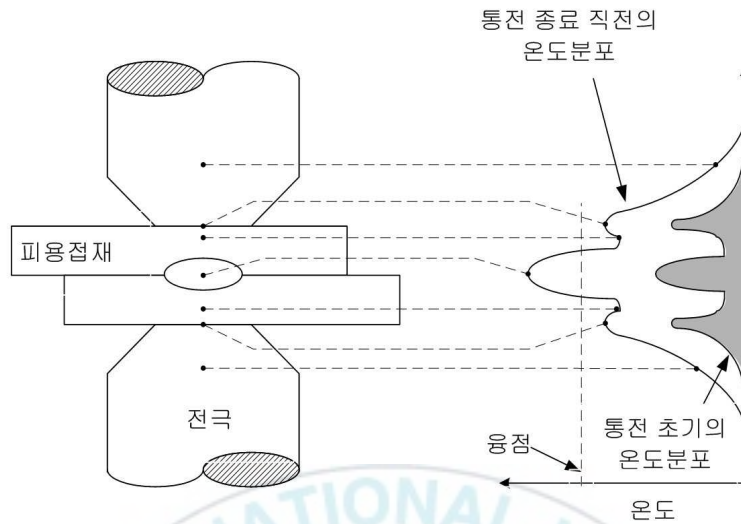


Fig. 2.1 Temperature distribution in resistance welding

Fig. 2.1은 이러한 해석의 기초 단계로서 저항 용접부의 모양을 설명하고 있다. 여기에서 계산의 단순화를 위해서는 일반적으로 다음과 같은 가정을 한다.

- 전극 방향의 열전달을 X방향이라고 한다.
- X방향으로만 열의 손실이 있다.
- 용접부 형성에서의 프링징(fringing) 효과가 없어서 용접전류는 소재의 두께 방향으로 균일하게 흐른다.
- 전극- 피용접재 계면의 온도는 항상 일정하다.
- 고유 저항 이외의 각종 물리적 특성은 온도 의존성이 없다.
- 전극- 피용접재 계면 및 피용접재- 피용접재 계면에서는 접촉 저항이 없다.

이러한 가정하에서 해석을 하면 용접부의 중심 온도인  $\theta_m$ 는 재료의 용점 또는 그 온도를 약간 넘는 일정한 값이 된다. 그러나 이러한 해석은 실제로 용접을 실시할 때 잘 맞지 않는 경우가 있다. 그것은 해석을 위해서 도입되었던 가정들의 영향에 기인하기 때문이다.

### 2.1.2 저항 용접부 각부의 명칭

Fig. 2.2는 저항 용접부 단면의 각부 명칭을 나타낸 것이다<sup>3)</sup>.

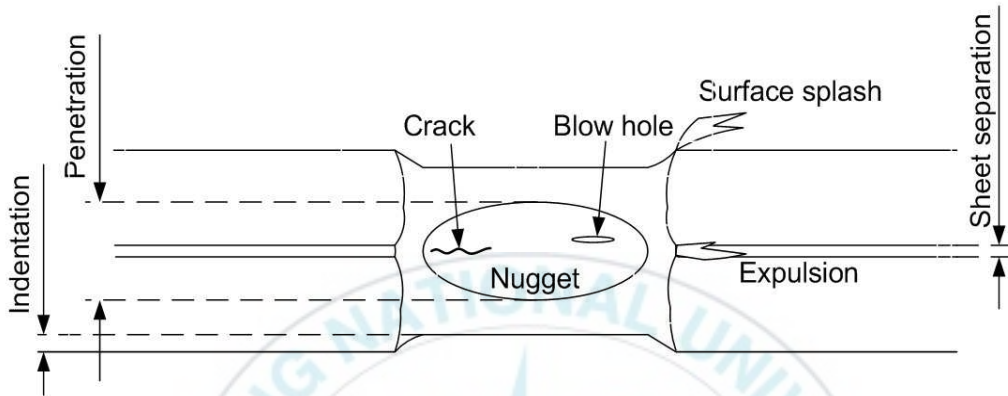


Fig. 2.2 Appellation of welding zone

- 1) 너깃(Nugget) : 용접결과로 접합부에 생기는 용융 응고한 부분으로서 일반적으로 접합면을 중심으로 바둑돌 모양으로 형성되어 있다.
- 2) 코로나 본드(Corona bond) : 너깃 주위에 존재하는 링형상의 부분으로서 실제 용융하지는 않고 열과 압력을 받아서 고상으로 압접된 부분을 말한다. 이 부분은 접합부 강도에는 기여하지 않고 비파괴 검사 시의 너깃 치수를 크게 평가하기 쉽게 하는 부분이므로 주의가 요구 된다.
- 3) 오목자국(Indentation) : 집극팁이 가압력으로 모재에 파고 들어가서 오목하게 된 부분을 말한다. 이와 같은 깊이를 오목깊이라고 한다.
- 4) 용입(Penetration) : 피용접재가 녹아들어난 깊이로서 너깃의 한쪽 두께와 같다고 할 수 있다.
- 5) 기공 (Blow hole) : 너깃 내부에서 용융 중에 발생한 기포가 응고 시에 이탈하지 못하고 남아 있는 공동을 말한다. 일반적으로 너깃의 중앙부에 발생하며 과대한 전류나 부족한 가압력으로 인하여 용융금속이 날아간 자리에 형성된다.

6) 중간날림(Expulsion) : 용융금속이 코로나 본드를 파괴하고 외부로 튀어 나가면서 날리는 것을 말한다. 점용접이나 프로젝션용접에서 가장 해결하기 어려운 문제 중 하나라고 할 수 있다.

7) 표면 날림(Surface flash) : 전극과 피용접재의 접촉면에서 피용접재나 전극이 용융해서 도전률이 나쁜 전극 소재를 사용하거나 냉각부족 또는 전극 팁 직경이 과서한 경우에 자주 생기고 전극팁의 손상에 가장 큰 영향을 미친다. 한편 "Splash"는 중간날림과 표면날림을 포괄하는 일반적인 용어로 사용되고 있다.

8) 오염(Pick up) : 전극과 모재의 접촉부가 과열되어 전극의 일부분이 모재에 부착하거나 전극과 모재 부분이 오염되는 현상을 말한다. 도금강판을 용접할 경우 도금층이 전극에 부착되어 이러한 현상이 자주 일어나므로 별도의 주의를 요한다.



### 2.1.3 저항용접 3대 조건에 대한 고찰

저항 용접의 3대 조건은 전류, 통전시간, 가압력이지만 여기에 전극을 더하여 저항용접의 4대 조건이라고 하기도 한다.

#### 1) 용접 전류

저항 용접 조건 중에서 용접 전류가 가장 중요하다는 것은 발열량이 전류의 제곱 즉  $I^2R$  또는 전류밀도의 제곱 즉  $\rho_0^2$ 에 직접 비례한다고 하는 것으로부터도 알 수 있다.

Fig. 2.3은 일정한 가압력과 일정 통전시간 하에서 용접전류를 점점 크게 했을 때의 두 판재 저항 용접부 형상이다.

(A)에서는 발열량이 부족하여 용융하지 않고 열영향만 받은 경우이다.

(B)는 너깃이 다소 생겼지만 크기가 매우 작아서 충분한 인장강도를 가지지 못한다.

용접전류가 높아짐에 따라서 두 판재의 접촉부에는 발열량이 전류의 제곱에 비례하여 증가하게 되므로 (B)⇒(C)⇒(D)와 같이 너깃이 커지면서 양쪽 판의 분리가 발생하고, 코로나 본드도 생긴다.

(D)와 같이 용접전류가 과대하면, 판과 판사이의 접촉면에서 발생한 용융금속이 튀어나오는 중간날림이 생겨서 너깃 중에 기공이나 균열이 생기는 수도 있으며, 경우에 따라서는 피용접재의 표면과 전극사이에서도 용융금속이 발생하여 튀어나가는 표면날림도 발생하며 표면에는 심한 오목자국도 남게 된다. 이러한 경우는 주로 전극팁 표면의 오염(Pick up)도 현저하게 된다. 피용접재 표면의 날림현상이나 전극팁의 오염을 감소시키는 데는 알코올과 증류수로 냉각하는 방식이 상당히 유효하다고 할 수 있다.

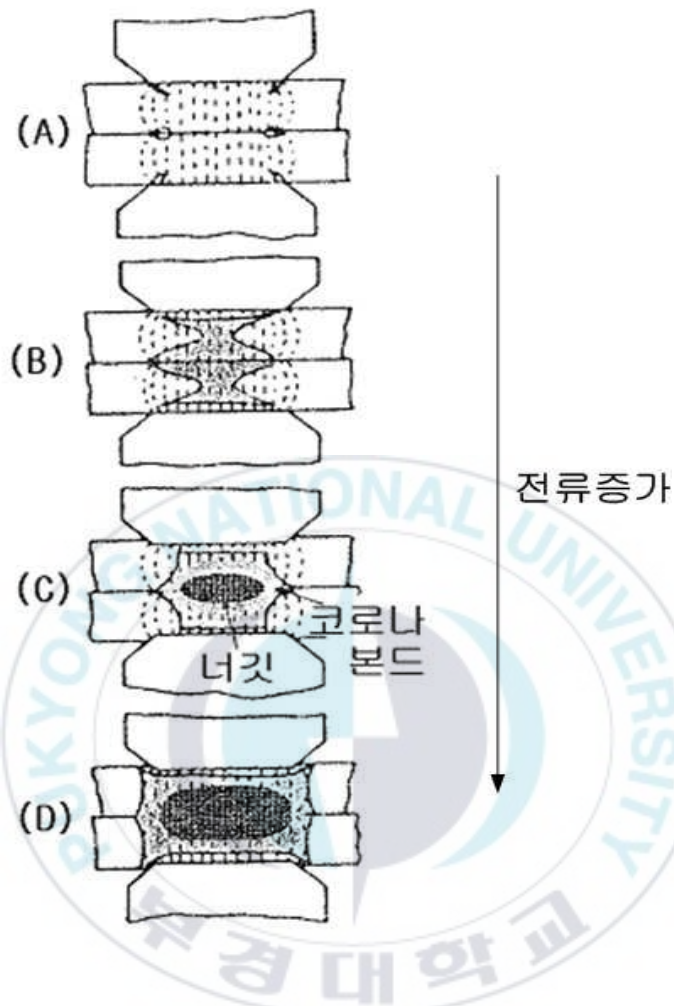


Fig. 2.3 The relation between welding current and nugget size

Fig. 2.4는 용접전류와 저항 용접부의 인장전단강도의 관계를 나타낸 것이다. 용접전류가 증가하면 너깃 단면적이 커져서 인장전단강도는 증가하지만 어느 값 이상으로 커지면 용융금속의 날림이 생기면서 강도는 더 이상 높아지지 않고 강도의 편차는 심하게 되어 품질이 불안정하게 된다.

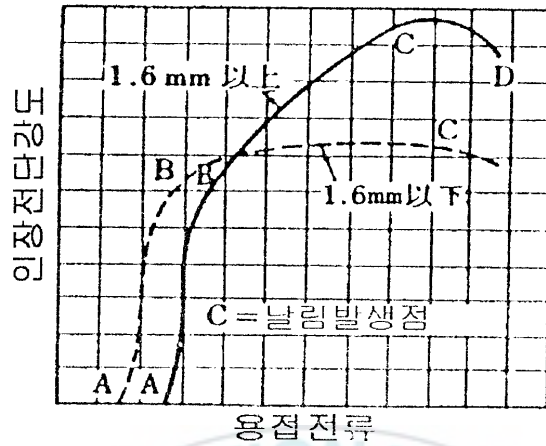


Fig. 2.4 The relation between welding current and TSS

한편, 저항 용접에서는 최대전류 즉 용접전류 이외에 중요한 인자로 매 타점시의 전류변화를 들 수 있다.

최근의 직류 인버터 용접전원(DC inverter welding power source)에서는 종래의 교류 용접기보다 고속제어가 가능하여 파형이 안정되고 일정한 전류가 흐르지만, 최대전류의 변동과 파형의 불안정 등에 의하여 발열량이 변동하게 되고, 용접 품질이 불안정해질 가능성이 높기 때문에 용접전류의 파형 관리는 품질에 대한 신뢰성 확보 차원에서 매우 중요한 기술이다.

## 2) 통전시간

저항 용접에 필요한 저항 발열은  $I^2Rt$  즉 시간  $t(\text{sec})$ 에 비례하기 때문에 대전류 단시간에서도, 소전류 장시간에서도 일정한 열량이 얻어진다. 그러나 열전도에 의하여 잃는 열량은 시간에 따라 증가하기 때문에 전류를 작게 하고 시간만 증가한다고 용접이 되는 것은 아니다. 즉  $I^2Rt$ 가 일정하다고 하여도 적당한 전류와 통전시간을 선택하여야 한다.

전류를 높여서 통전시간을 지나치게 짧게 하면 열전도의 여유가 없기 때문에 용접부는 원통형의 너깃으로 되어 용융금속의 날림과 기포 등이 생기기 쉬우며, 건전한 용접부를 얻기 위해서는 상당한 제어기술이 요구된다.

Fig. 2.5는 적절한 전류로 저항용접을 실시할 때, 통전시간과 너깃직경의 관계를 나타낸 것이다.

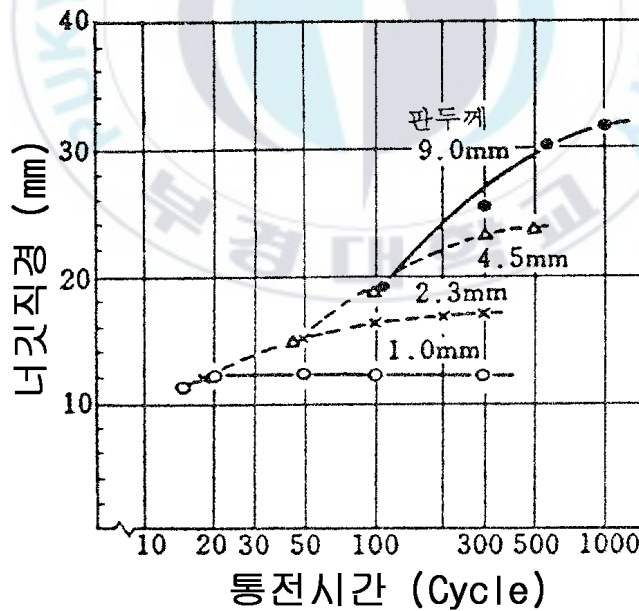


Fig. 2.5 The relation between welding time and nugget size

통전시간이 증가하면 너깃 직경은 증가하지만 어느 정도 이상으로 시간을 길게 하면, 더 이상 너깃 직경은 커지지 않고, 단순히 오목자국만 커질 뿐이다. 이와 같이 너깃직경이 커진 후에도 코로나 본드는 약간 성장하게 된다.

또한 통전시간이 지나치게 커지게 되면 통전 중에도 불구하고 냉각, 응고를 개시하여 너깃 주변부에는 링모양이 생기며, 이때는 오히려 인장전단강도가 저하하게 된다.



### 3) 가압력

저항 용접과 프로젝션용접은 압접 또는 가압용접으로 분류되는 것으로 부터도 알 수 있는 바와 같이 강력한 압력 하에서 저항발열을 일으켜서 용접이 이루어진다. 또한 가압력의 크기에 따라 통전 면적이 변하고 전류 밀도의 발열량에 직접적인 영향을 미치게 되므로, 저항 용접에 있어서 전극 가압력은 매우 중요한 인자이지만 종래의 저항용접 연구에서는 무시되기 쉬운 인자로서 인식되었다.

전극 가압력은 저항 용접에 있어서 자유풀작용의 근원으로서 용접전류가 크게 되면 그에 따라서 가압력도 크게 하지 않으면 용융금속을 억제하지 못하고, 날림과 과대한 오목자국 그리고 기공과 같은 결함이 생긴다. 또한 용접전류를 작게 하면 가압력도 그에 따라 작게 해주지 않으면 발열량이 작게 되어 소위 Cold Weld(용착불량, 또는 냉접)이 발생하게 된다.

Fig. 2.6에는 각종 저항용접에 있어서 용접전류와 전극가압력의 관계를 나타낸 것이다. 적정 용접조건은 이들 곡선 상에 놓이게 된다.

전극 가압력을 부여하기 위해서는 수가압, 족압, 공기압, 유압, 전동가압, 전자가압 등이 있지만, 가장 많이 쓰이는 공기가압에 대하여 검토한다.

공기가압은 에어실린더를 이용하게 되고 가압력의 크기는 공급공기압과 에어실린더 내의 피스톤 면적에 의해 결정된다. 공급공기압에 대한 에어실린더의 출력가압력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$F = AP \beta \text{ ----- (2.3)}$$

여기서, A : 피스톤 단면적 (cm<sup>2</sup>)

P : 공급 공기압 (kgf/cm<sup>2</sup>)

β : 부하율 (%)

위 식의 부하율처럼 가압 실린더의 패킹과 이동 가이드 부의 습동저항 등에 의하여 가압력은 아래와 같이 계산치 보다 감소된다.

$$F_d = (P A + W) - \mu P a \text{ ---- (2.4)}$$

여기서, P : 공급 공기압 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

A : 피스톤 면적 ( $\text{cm}^2$ )

W : 가동부의 중량

$\mu$  : 마찰 계수

a : 상수

즉 전극 가압력은 계의 마찰계수가 크면, 원래의 계획가압력 보다 작게 될 뿐만 아니라 전극가압력의 상승에 시간이 걸리게 된다.

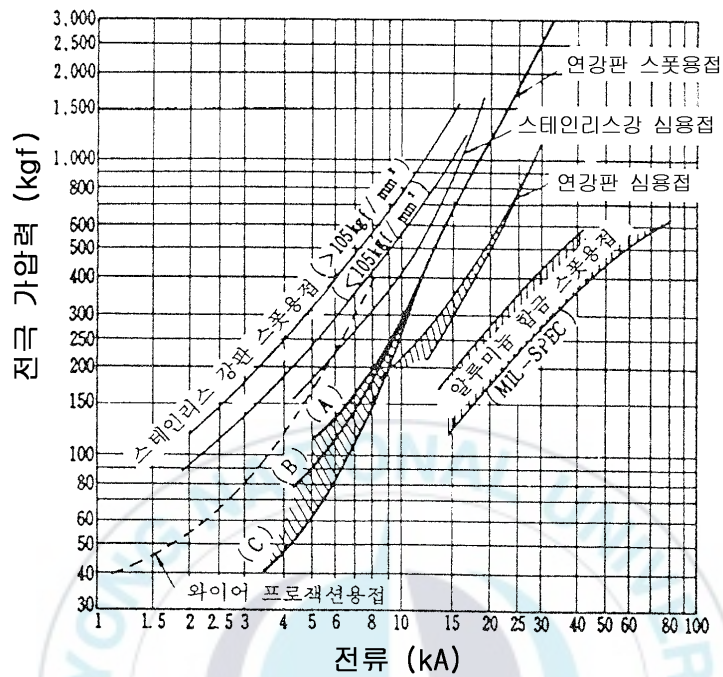


Fig. 2.6 The relation between welding current and Electrode force

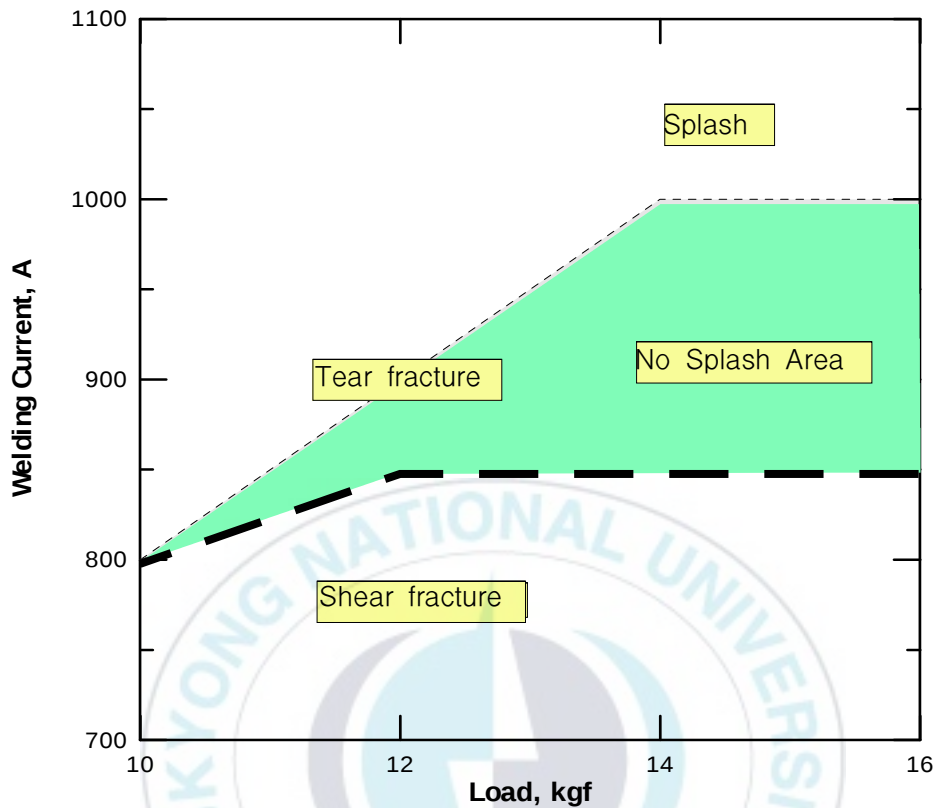


Fig. 2.7 The effect of load and current on fracture shape and splash by STS 304(t0.2)

Fig. 2.7은 경질 STS304(두께0.2mm)에 대하여 가압력을 변화시키면서 용접전류를 증가시켜서 용접하였을 때의 파단형상과 날림에 관한 결과를 나타낸 것이다. 이 피용접재는 적어도 가압력 14kgf이상을 유지하면서 전류 900A전후로 용접하면 날림도 없고 Tear 파단도 얻어지는 안정된 공정을 확보할 수 있는 것으로 확인되었다. 이 가압력 14kgf로 용접하더라도 전류가 1000A이상으로 하면 날림이 생기게 되며, 전류를 850A이하로 하면 Shear 파단이 생기므로 강도가 부족하게 된다.

따라서 피용접재의 두께와 경도에 따라 적절한 요구 가압력은 변하게 되지만, 일반적으로 말하면, 두께가 커질수록 경도가 높아질수록 요구 가압력은 커진다고 할 수 있다.

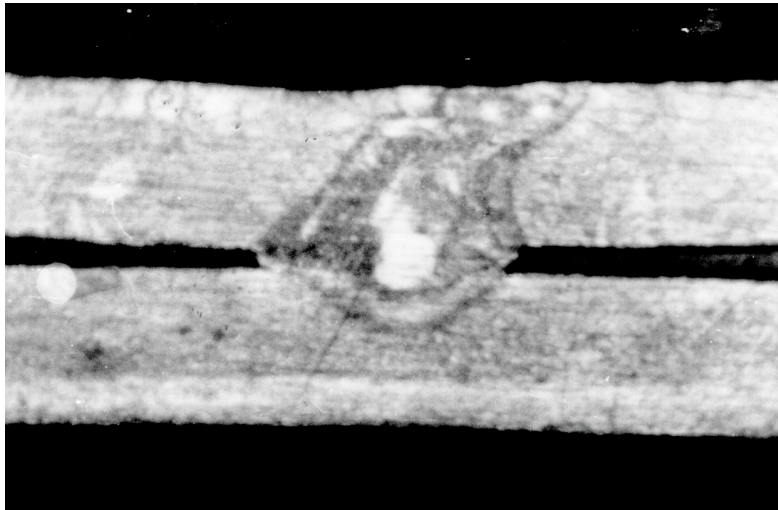


Fig. 2.8 Macro section by low electrode force

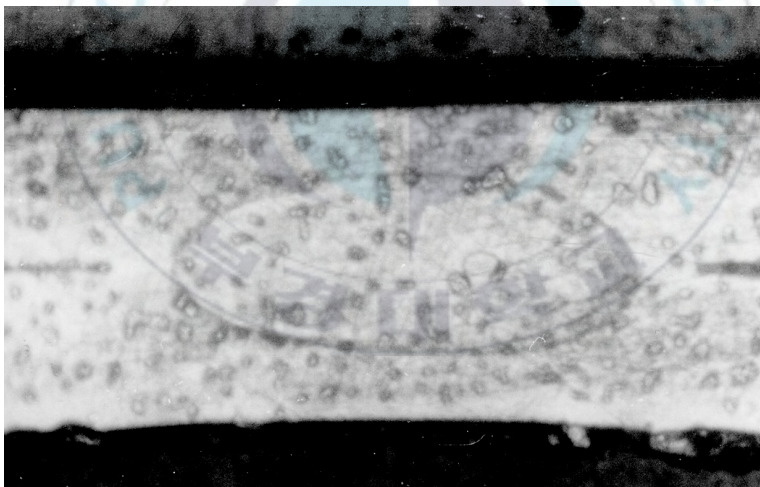


Fig. 2.9 Macro section by suitable electrode force

### 3) 전극

전극은 용접 전력을 피용접재에 전달하는 역할을 하는 것이므로 저항 용접에 있어서 전극의 재질과 형상은 매우 중요하게 다루어지는 부분이다. 용접과정에서 전극 표면의 전류밀도는  $500\text{A}/\text{mm}^2$ 까지 상승하는 것으로 알려져 있어서 양호한 전기 전도도와 함께 고온 강도 또한 전극이 가져야 할 특성의 하나이다.

전극의 형상은 점용접시 가압특성이나 생산성을 크게 좌우하는 요소로서 매우 중요하게 취급, 관리되고 있는 부분이다. 전극형상은 크게 일체형과 캡(cap)형으로 분류된다. 반복사용에 의한 마모나 피용접재의 변화에 따른 교체의 효율성을 위하여 캡형을 주로 사용하고 있다. 전극 선단부의 형상은 용접성과 밀접한 관계가 있으며, 전극 선단부의 치수( $d_e$ )는 목적에 따라 변경할 수 있지만,  $d_e$ 의 결정은 실험적 결과를 바탕으로 다음과 같은 식이 통용되고 있다.

$$d_e = 5 \sqrt{t} \quad (t : \text{피용접재 두께}) \quad \text{-----} \quad (2.5)$$

이러한 기준보다 선단경이 크게 되면 너깃을 만드는데 대전류가 필요하게 되어 비경제적이며, 선단경이 작은 전극을 사용할 경우 전류밀도가 매우 크게 되므로 날림발생이나 오목자국이 크게 된다.

#### 4) 기타 요소들의 영향

저항용접의 3대 조건 외에 용접 품질에 관계되는 요소는 매우 많으며 이들을 정리하면 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 The effect of various parameter on RSW

| 구 분  | 항 목      | 내 용                                         |
|------|----------|---------------------------------------------|
| 피용접재 | 재질       | 조성, 열처리상태, 가공도 등                            |
|      | 치수       | 형상(판, 봉, 관, 이형재 등), 판두께, 판폭, 판두께의 조합, 겹침 매수 |
|      | 표면상태     | 산화피막, 변형, 도금 및 피막의 특성                       |
|      | 후공정      | 열처리, 방청처리, 도장, 성형                           |
| 용접장치 | 전류파형     | 단상교류, 위상제어, 저주파식 등                          |
|      | 가압방식     | 페달식, 공기가압, 유압, 전동가압 등                       |
|      | 가압계의 응답성 | 가동부(질량, 정마찰, 동마찰 특성)                        |
|      | 제어장치     | 비동기식, 준동기식, 동기식 등                           |
|      | 회로 임피던스  | 단상교류식, 저주파식, 정류식, 고주파식, 2차회로의 특성            |
|      | 부속장치     | 용접지그, 이송장치, 자동공급장치 등                        |
| 전극   | 재질       | 조성, 열처리상태, 압도, 가공도 등                        |
|      | 전단형상     | 치수, 형상, 조합                                  |
|      | 냉각상태     | 냉각방식, 냉각수량 등의 냉각조건                          |
|      | 용접전류     | 파형, 전류치                                     |
| 용접조건 | 통전시간     | 각 시퀀스의 통전시간 등                               |
|      | 가압력      | 용접가압력, 단압, 클램프 압력 등                         |
|      | 특수제어     | 예비 및 후통전, 파형제어, 가변압력제어                      |
|      | 설계치수     | 겹침 폭, 점 간격 등                                |

이러한 제반 인자들이 용접부의 특성에 영향을 미치는 정도에는 차이가 있고, 서로 복합적으로 작용하기 때문에, 그 영향 정도를 한마디로 단언하기는 어렵다.

## 2.2 용융 효율

$$Z_{mRSW} = \frac{Q_m \times V_N}{I \times V \times t} \text{-----} (2.6)$$

$$ME_{RSW} = \frac{Z_{mRSW}}{Q_m} = \frac{V_N}{I \times V \times t}, mm^3/J \text{---} (2.7)$$

여기서

$Z_{mRSM}$  : 저항용접에서 용융효율(Melting efficiency) <sup>4), 5)</sup>

$Q_m$  : 용접 금속을 녹이는데 쓴 에너지, J/mm<sup>3</sup>

$V_N$  : 너깃 체적, mm<sup>3</sup>

$I$  : 용접전류, A

$V$  : 접촉저항을 고려한 전압, V

$t$  : 통전시간, sec

식 (2.6)은 저항용접에서 용융효율을 나타낸 것이다. 용융효율은 용접 금속을 녹이는데 쓴 에너지  $Q_m$ 과 너깃체적  $V_N$ 의 곱에서 입열량을 나눈 것이다.

식 (2.7)은 본 연구에 사용한 용융효율  $ME$ 를 나타낸 것이다. 용융효율  $ME$ 는 너깃체적  $V_N$ 을 입열량으로 나눈 값으로 단위를 보면 1J당 몇 mm<sup>3</sup>의 너깃체적을 형성시키는 가로 정의 된다.

## 제 3 장 동일 입열량에서 통전시간과 용융효율 관계 검토를 위한 고속카메라의 적용 실험

### 3.1 서언

저항 용접은 자동차, 가전제품 등 박판 산업에서 중요한 위치를 차지하고 있다.

최근 Arc 용접에서 용융효율에 관한 연구가 많이 보고되고 있다. GAMW에서 동일 각장으로 공정 설계된 필릿 용접부는, CTWD 증가에 따라 용융효율이 증가하여 각변형은 감소하였고, 용접속도 증가에 따라 용융효율이 증가하여 각변형은 감소하였고, 또 Arc 길이 증가에 따라 용융효율이 감소하여 각변형은 증가하였다.<sup>6)</sup> 이와 같이 용융효율이 각변형에 많은 영향을 끼쳤다. 하지만 저항용접에서는 아직까지 용융효율에 관해 보고된 연구는 없었다.

따라서 본 실험에서는 동일 입열량에서 단상AC 전원 및 인버터DC 전원의 용융효율을 비교하고 통전시간이 용융효율에 미치는 영향을 검토하기 위하여 동일한 입열량에서 통전 시간에 따른 용융효율 계산하고 고속 카메라를 사용해 용접 중 너깃부의 가열 용융 상태 촬영하였다.

## 3.2 실험 재료 및 방법

### 3.2.1 실험 재료

본 연구에 사용된 피용접재는 두께 1mm의 냉간압연강판을 사용하였으며, 피용접재의 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 3.1과 Table 3.2에 나타내었다.

Table 3.1 Chemical composition of CR steel sheets (wt.%)

| Alloys | C     | Mn    | P     | S     | Si    | Fe   |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|        | 0.032 | 0.210 | 0.011 | 0.009 | 0.060 | Bal. |

Table 3.2 Mechanical properties of CR steel sheets

| Yield strength | Tensile strength | Elongation |
|----------------|------------------|------------|
| 250Mpa         | 359Mpa           | 40%        |

Fig. 3.1은 용접시험편 모식도이다. 용접 시험편의 형상을 KS D 4043 점 용접 및 프로젝션 용접부의 현장 시험 방법에 준하여 결정하였다<sup>7)</sup>.

Fig. 3.2는 전극 팁의 모식도를 나타낸 것이다. 전극은 도전율 75%이상의 크롬동을 사용하였으며 전극 형상은 직경 16mm, 선단경이 6mm인 CR type 전극을 사용하였다.

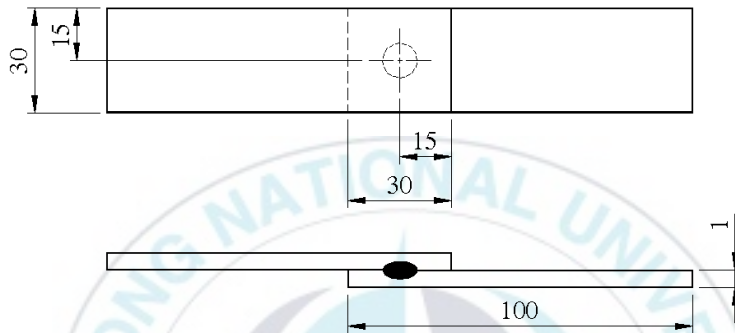


Fig. 3.1 Configuration of welding specimens (Unit : mm)

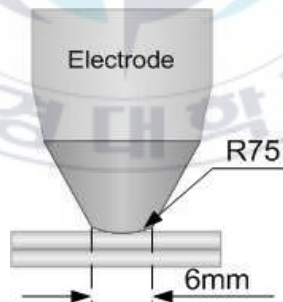


Fig. 3.2 Configuration of electrode tip

### 3.2.2 실험 방법

#### 1) 통전시간과 용융효율 관계 검토 실험

통전시간이 용융효율에 미치는 영향을 보기 위하여 동일한 입열량에서 통전시간을 변경하여 실험을 행하였다.

입열량 계산은 식 (3.1)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} Q &= I^2 R t, \text{ J} \\ &= IVt, \text{ J} \text{ ----- (3.1)} \end{aligned}$$

여기서,  $I$  : 용접 전류, A       $R$  : 저항,  $\Omega$

$V$  : 접촉저항을 고려한 전압, V

$t$  : 통전시간, sec

기준 입열량은 단상AC 전원에서 Peel test로 너깃경이  $5\sqrt{t}$ 되는 950J로 하였다.

Table 3.3은 용접 조건을 나타낸 것이다. 단상AC 및 인버터DC 전원  
에서 입열량은  $950 \pm 9.5J$ 로 하였고, 통전시간은 6, 8, 12, 16, 20, 40cycle로 변  
경하였으며 이때의 전류 및 전압을 Table 3.3과 같다.

Table 3.3 Welding condition for experiments

|           | Welding<br>time      | 6cycle         | 8cycle         | 12cycle        | 16cycle        | 20cycle        | 40cycle        |
|-----------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 단상<br>AC  | Welding<br>condition | 7095A<br>1.37V | 5942A<br>1.19V | 4946A<br>0.96V | 4327A<br>0.83V | 3835A<br>0.75V | 2266A<br>0.63V |
|           | Heat<br>input        | 951J           | 943J           | 950J           | 958J           | 959J           | 952J           |
| 인버터<br>DC | Welding<br>condition | 6812A<br>1.40V | 5728A<br>1.25V | 4542A<br>1.04V | 3885A<br>0.91V | 3373A<br>0.85V | 2133A<br>0.67V |
|           | Heat<br>input        | 954J           | 955J           | 945J           | 943J           | 956J           | 953J           |

용융효율ME 계산은 식 (2.7)로 하였다.

너깃 체적 $V_N$  측정은 너깃의 정중앙부를 절단한 후 부식시켜 디지털  
저를 이용해 너깃 중앙부의 면적을 구하고, 너깃 중앙부의 면적을 좌우로  
나누어 각각 3D 렌더링 하여 체적을 구하였고, 좌우 체적의 평균값을 사  
용하였다.

Fig. 3.3은 너깃 체적을 구하기 위해 너깃 단면과 좌우 Volume을 나타  
낸 것이다.

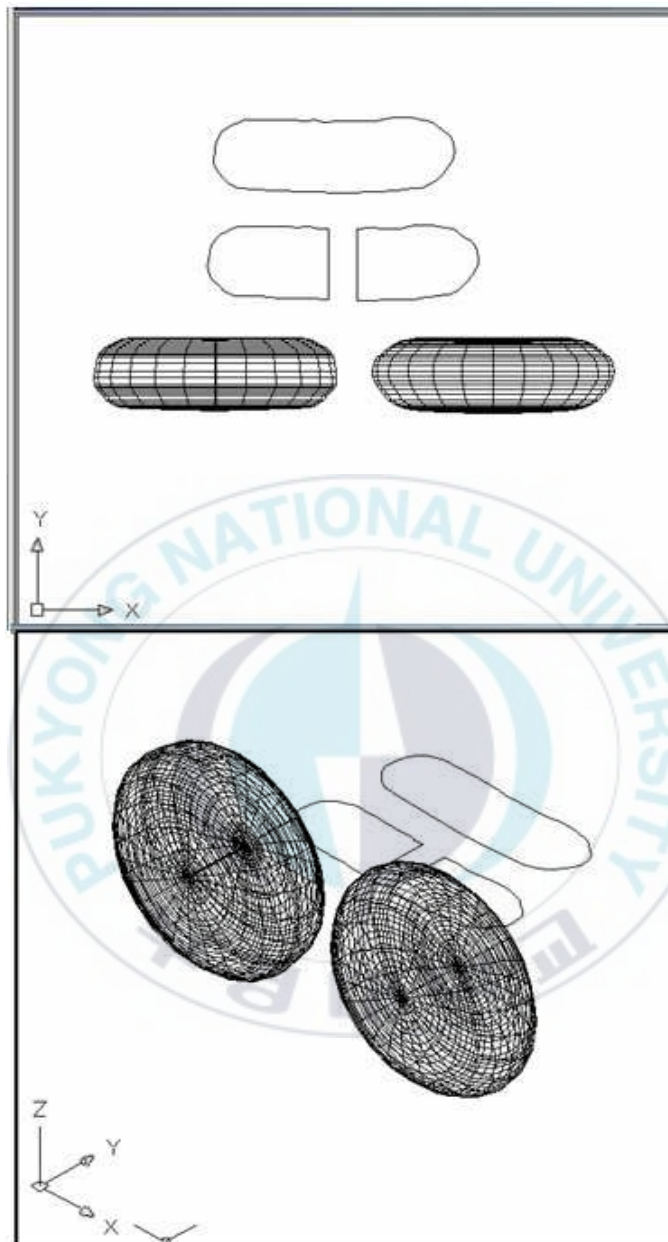


Fig. 3.3 Digitizing and 3D rendering for calculation of nugget volume

## 2) 고속카메라에 의한 촬영 방법

고속카메라는 용접 중 너깃의 가열 용융상태를 관찰하기 위하여 촬영되었다. 고속촬영을 위하여 전극을 Fig. 3.4와 같이 가공하였다. 선단경  $\phi 6$ 인 전극의 절반을 절단하였다. 전극을 절반으로 절단하였으므로 가압력과 입열량을 1/2로 낮춘 100kgf와 475J로 용접하였다.<sup>8, 9)</sup>

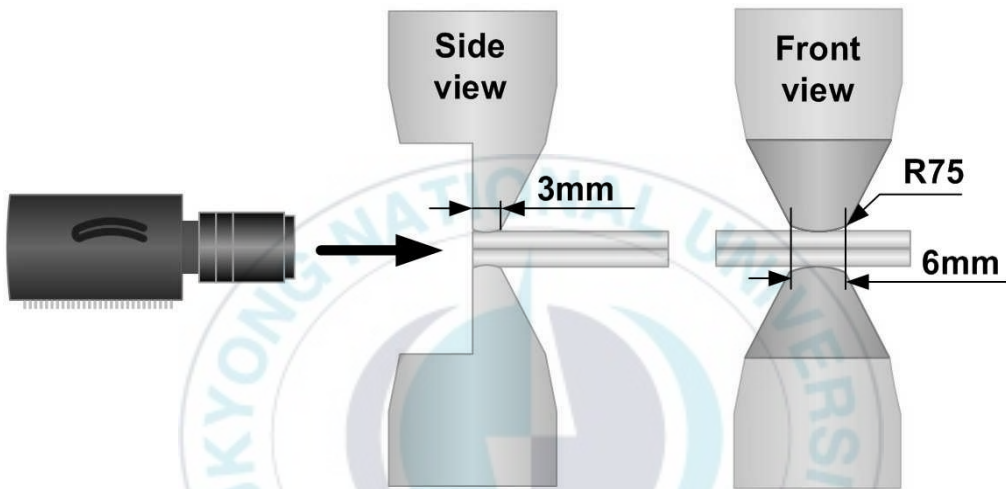


Fig. 3.4 Schematic diagram of electrode shape

Fig. 3.5는 고속촬영 모식도를 나타낸 것이다. 전극에서 275mm 떨어진 곳에 고속카메라를 설치하고 2개의 조명으로 광원을 형성시켜 촬영하였다.

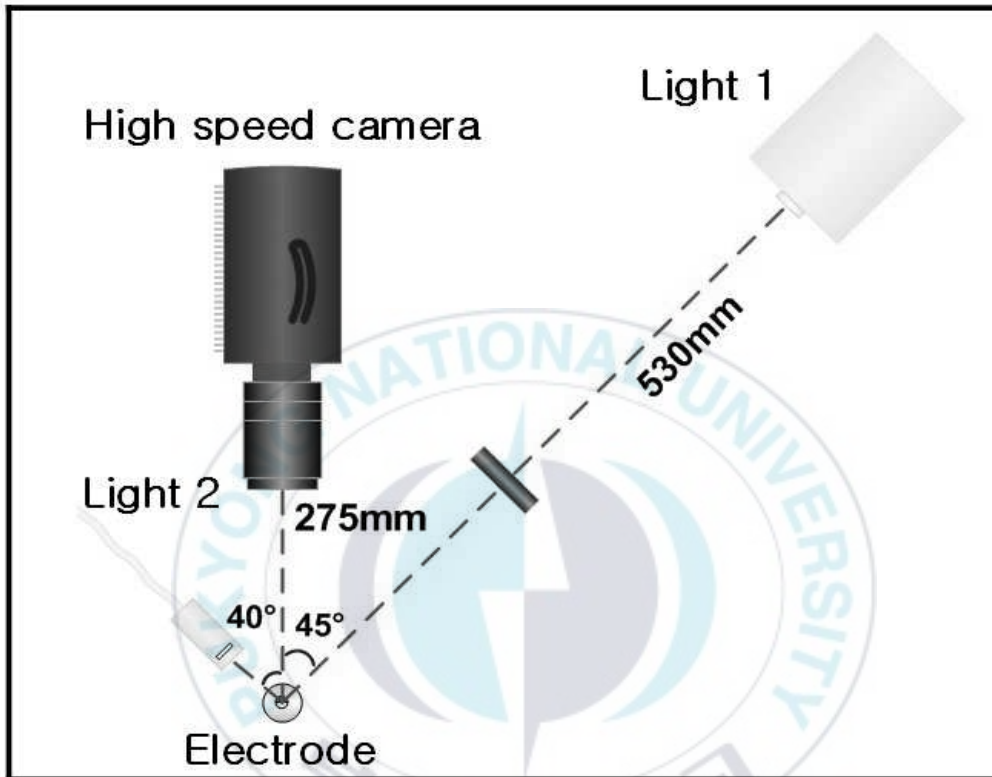


Fig. 3.5 Experimental set up by high speed camera

Table 3.4는 고속촬영 조건을 나타낸 것이다. 고속카메라는 Phantom V 7.2를 사용하였고, 사진은 초당 12,000장을 찍었다. 노출 시간은 78  $\mu$ sec이고, 조명은 250W 2개를 사용하였고, 필터는 PL 및 UV를 사용하였다.

Table 3.4 Photographing condition for high speed camera

| Equipment         | Specification      |
|-------------------|--------------------|
| High Speed camera | Phantom V.7.2      |
| Picture per sec   | 12,000 Picture/sec |
| Exposure time     | 78 $\mu$ sec       |
| Light             | 250W * 2EA         |
| Lens              | 105mm F2.8         |
| Filter            | PL 52mm            |
|                   | UV 82mm            |

용접 전류 및 전압 측정은 각각 20kA 홀센서와 10V 전압 센서를 사용하고 WSM3000N으로 계측하였다<sup>10)</sup>.

### 3.3 실험 결과 및 고찰

#### 3.3.1 통전시간과 용융효율의 관계

Table 3.5는 통전시간에 따른 용융효율의 영향을 보기 위해, 입열량을 950J로 하여 용접했을 때의 외관 사진이다.

동일한 입열량으로 용접했다 하더라도, 통전 시간이 짧아지면 오목자국 (Indentation)이 커졌다. 단상AC 전원의 6cycle 용접시 날림이 발생하였다.

Table 3.5 Indentation by variation of welding time (950J)

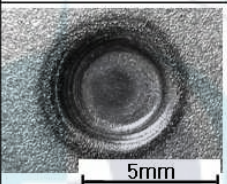
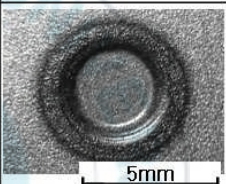
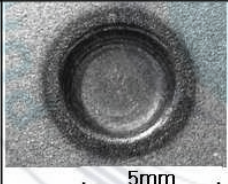
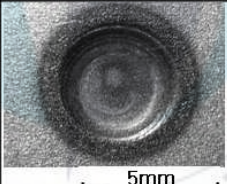
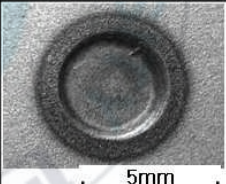
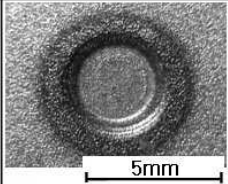
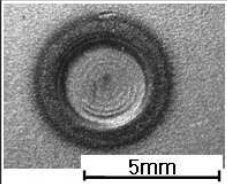
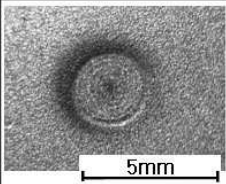
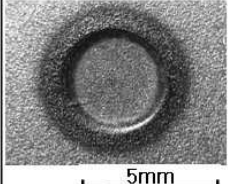
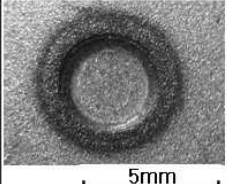
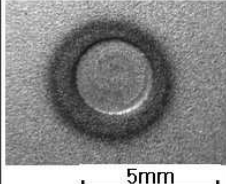
|                 | 6cycle                                                                                      | 8cycle                                                                                     | 12cycle                                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Single phase AC | Splash<br> | <br>5mm   | <br>5mm   |
| Inverter DC     | <br>5mm   | <br>5mm  | <br>5mm  |
|                 | 16cycle                                                                                     | 20cycle                                                                                    | 40cycle                                                                                     |
| Single phase AC | <br>5mm  | <br>5mm | <br>5mm |
| Inverter DC     | <br>5mm  | <br>5mm | <br>5mm |

Table 3.6은 단상AC 전원 및 인버터DC 전원으로 입열량 950J에서 통전 시간에 따른 단면 마크로를 나타낸 것이다.

통전 시간이 짧은 8cycle과 통전 시간이 긴 20cycle를 비교하였을 때, 통전시간이 짧은 경우가 통전시간이 긴 경우보다 더 큰 너깃 면적과 작은 코로나 본드를 가지는 것을 확인 할 수 있다.

또 인버터DC 전원이 단상AC 전원보다 동일 통전시간에서 더 큰 너깃 면적을 가지는 것을 알 수 있다.

단상AC 전원에서 950J로 6cycle 용접시는 날림이 발생하였다.

Table 3.6 Macro section by variation of welding time (950J)

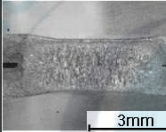
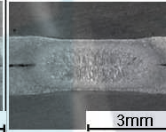
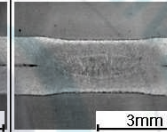
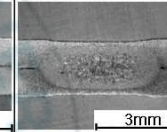
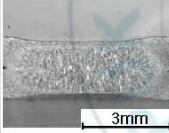
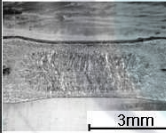
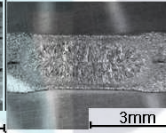
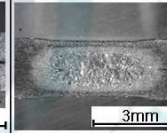
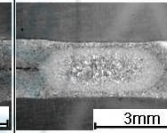
|                 | 6cycle                                                                             | 8cycle                                                                             | 12cycle                                                                            | 16cycle                                                                            | 20cycle                                                                             |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Single phase AC |   |   |   |   |   |
| Inverter DC     |  |  |  |  |  |

Fig. 3.6은 단상AC 전원에서 통전 시간에 따른 입열량과 너깃 체적을 나타낸 것이다. 통전시간 감소에 따라 입열량은 동일하지만, 너깃 체적은 증가하였다.

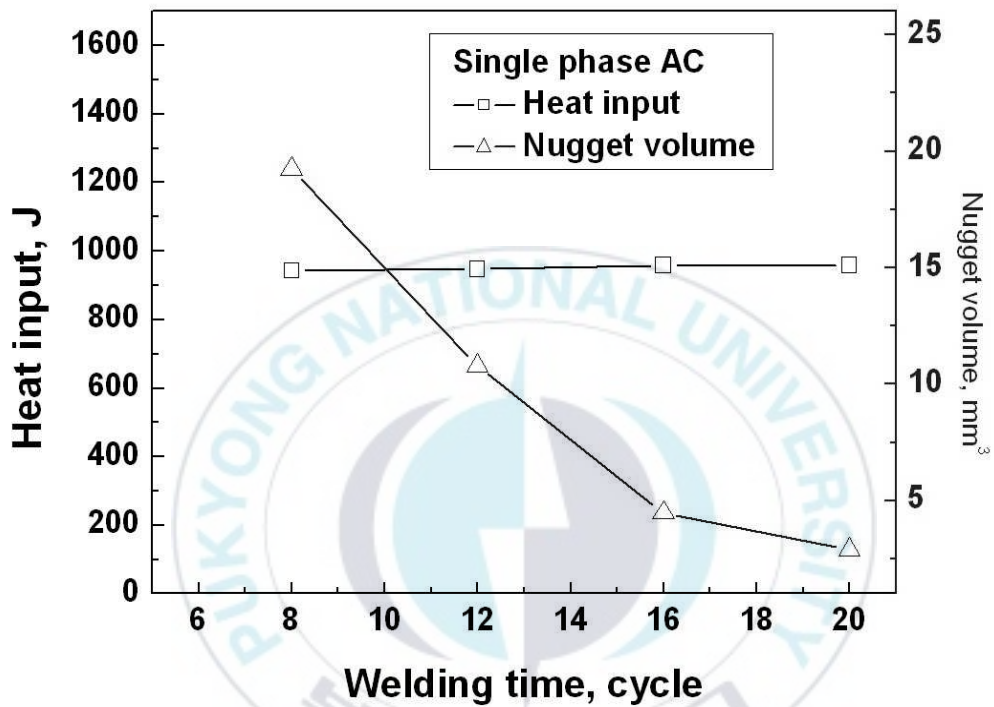


Fig. 3.6 The effect of welding time on heat input and nugget volume in Single phase AC

Fig. 3.7은 인버터DC 전원에서 통전 시간에 따른 입열량과 너깃 체적을 나타낸 것이다. 통전시간 감소에 따라 입열량은 동일하지만, 너깃 체적은 증가하였다. 이는 단상AC 전원과 동일한 경향이다.

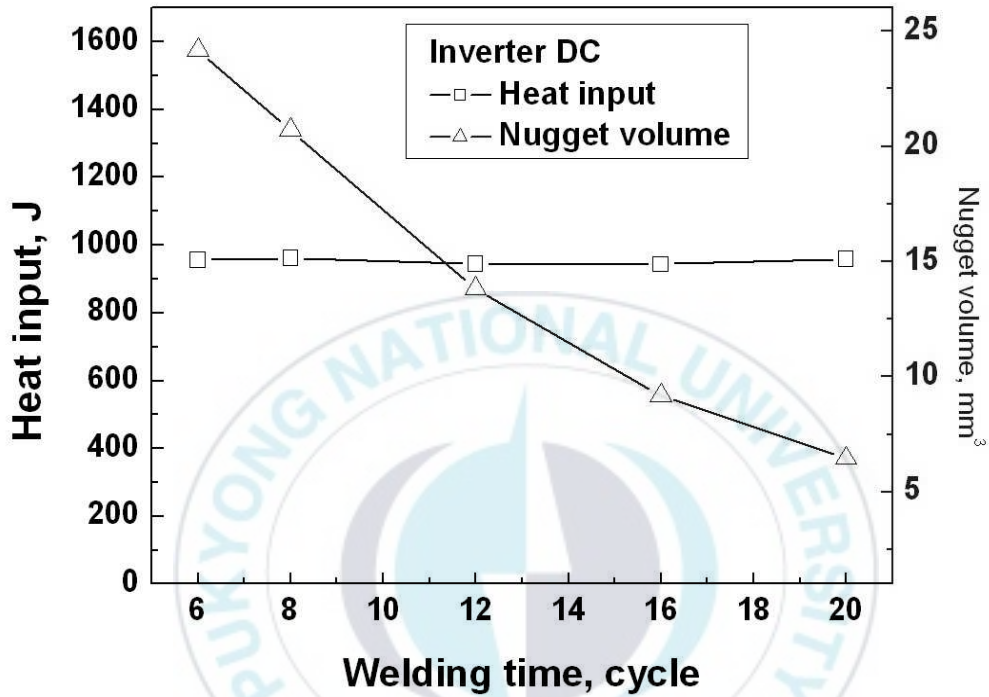


Fig. 3.7 The effect of welding time on heat input and nugget volume in Inverter DC

Fig. 3.8은 단상AC 전원 및 인버터 DC 전원에서 입열량 950J로 용접시 통전 시간에 따른 너깃 체적을 나타낸 것이다. 동일한 입열량으로 용접을 하더라도 통전 시간이 짧아지면 너깃 체적이 증가하였고, 통전시간 40cycle에서 너깃체적은 0mm<sup>3</sup>이었다.

통전시간이 짧아지면 투여된 입열량은 전도열손실로 빠져나가지 않고 너깃을 생성시키는데 투여된 것으로 판단된다.

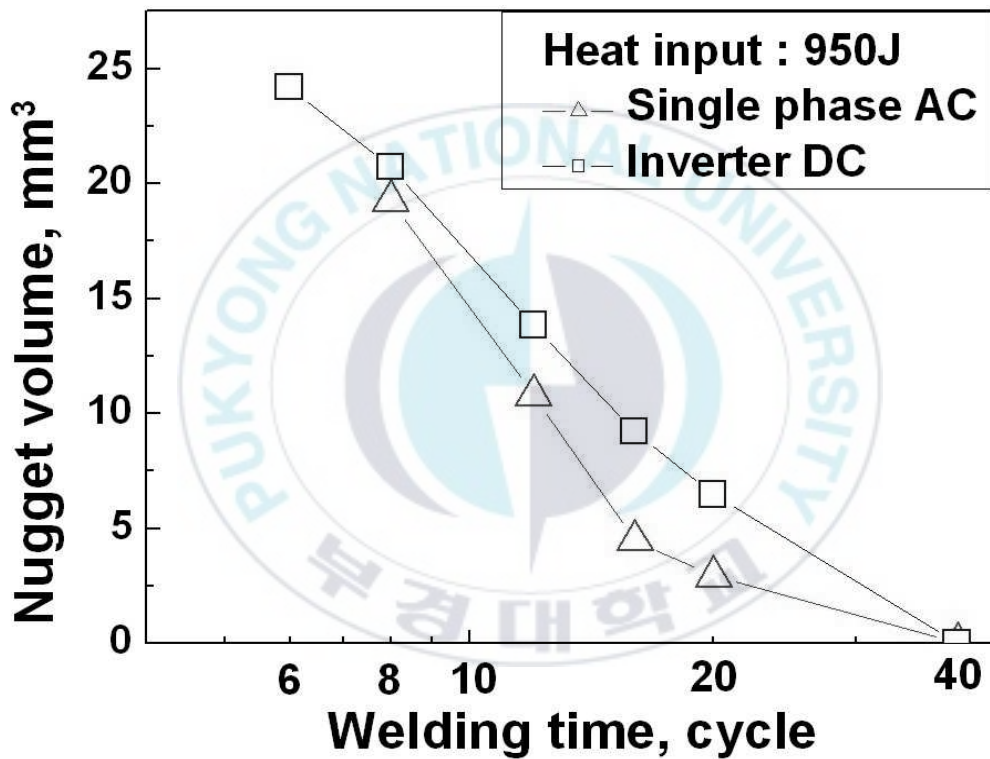


Fig. 3.8 The effect of welding time on nugget volume (950J)

Fig. 3.9는 단상AC 전원 및 인버터 DC 전원에서 입열량 950J로 용접시 통전 시간에 따른 용융효율ME를 나타낸 것이다. 동일한 입열량으로 용접을 하더라도 통전 시간이 짧아지면 용융효율ME가 증가하였고, 통전시간 40cycle에서 용융효율은 0mm<sup>3</sup>이었다.

인버터DC 전원은 단상AC 전원보다 더 큰 용융 효율을 보였고, 더 낮은 통전시간에서 날림 없이 용접되었다.

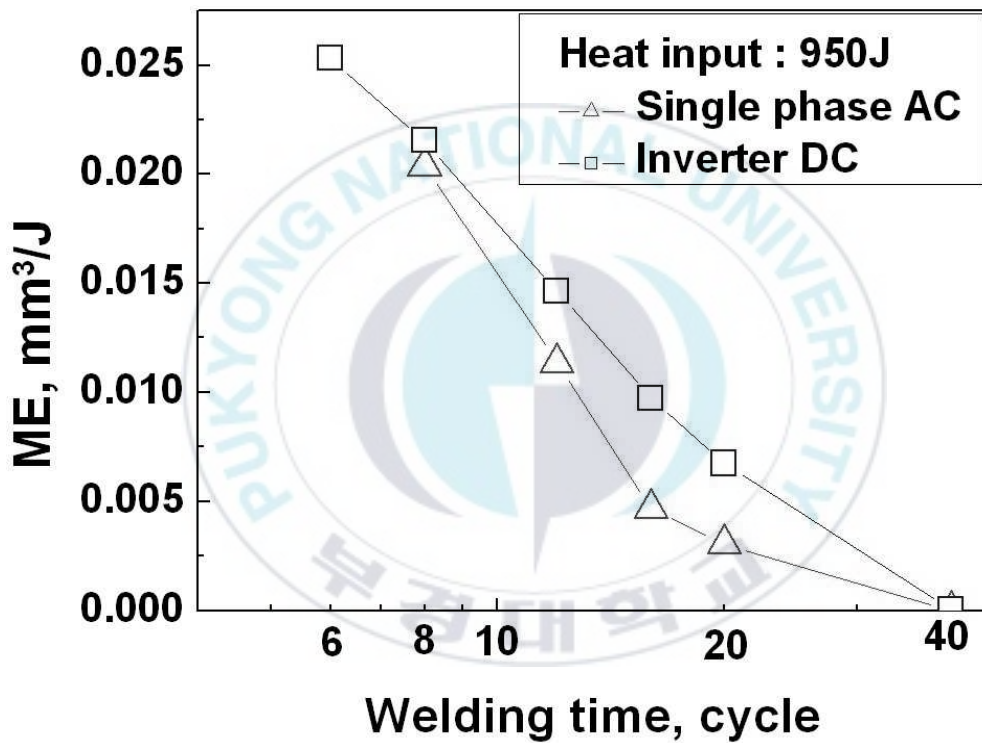


Fig. 3.9 The effect of welding time on ME (950J)

Table 3.7은 인버터DC 전원에서 통전시간에 따른 단면 마크로와 너짓경을 나타낸 것이다. 6~20cycle의 입열량은 950J이고, 4cycle은 715J이다.

인버터DC 전원으로 950J 4cycle 용접시 중간 날림이 발생했지만, 715J에서는 날림이 발생하지 않았다.

Table 3.7 Macro section by variation of welding time

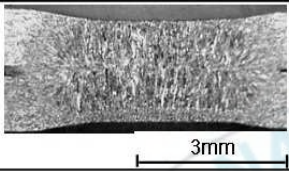
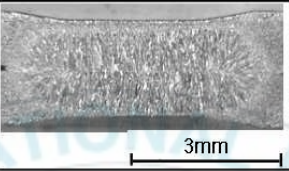
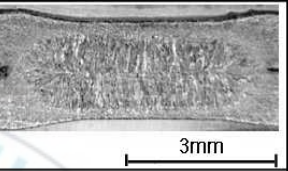
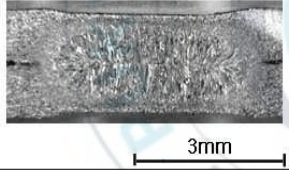
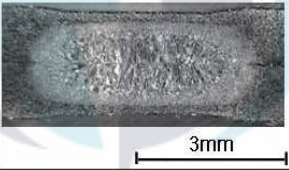
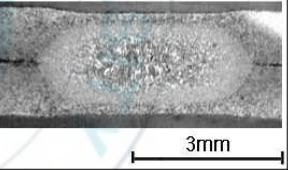
|           | 4cycle                                                                                    | 6cycle                                                                                    | 8cycle                                                                                     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 인버터<br>DC | <br>3mm  | <br>3mm  | <br>3mm  |
| 용접<br>조건  | 7101A, 1.51V<br>715J                                                                      | 6812A, 1.40V<br>954J                                                                      | 5728A, 1.25V<br>955J                                                                       |
| 너짓경       | 4.53mm                                                                                    | 4.89mm                                                                                    | 4.58mm                                                                                     |
|           | 12cycle                                                                                   | 16cycle                                                                                   | 20cycle                                                                                    |
| 인버터<br>DC | <br>3mm | <br>3mm | <br>3mm |
| 용접<br>조건  | 4542A, 1.04V<br>945J                                                                      | 3885A, 0.91V<br>943J                                                                      | 3373A, 0.85V<br>956J                                                                       |
| 너짓경       | 3.97mm                                                                                    | 3.63mm                                                                                    | 3.18mm                                                                                     |

Fig. 3.10은 Table 3.7의 내용을 그래프 화 한 것으로, 인버터 DC 전원  
에서 통전시간에 따른 너깃경을 나타낸 것이다. 통전 시간 6~20cycle인  
꺾은 선형 그래프는 입열량 950J일 때이고, 통전 시간 4cycle인 막대그래  
프는 715J이다.

Fig. 3.11은 인버터DC 전원에서 입열량 950J과 715J일때 통전시간에 따  
른 용융효율ME를 나타낸 것이다. 통전 시간이 짧아지면 용융 효율 ME는  
높아졌다.

통전 시간 4cycle은 715J의 낮은 열량에서도, 용융 효율이 높아 950J  
8cycle과 유사한 너깃경을 가지는 것을 알 수 있다.

따라서 인버터DC 전원으로 통전시간을 짧게 하여 용접하면, 용융효율  
이 높아 낮은 입열량으로도 동일 너깃경을 얻을 수 있을 것으로 판단된  
다.



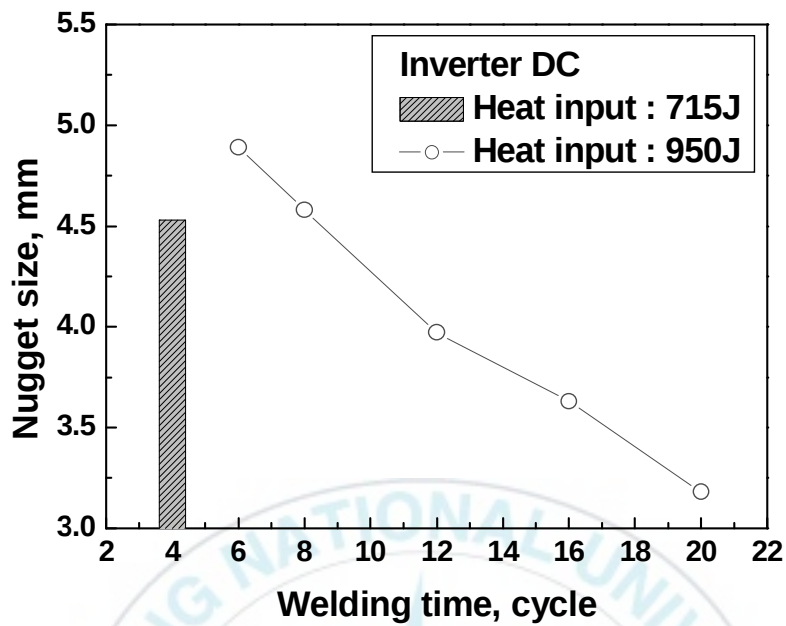


Fig. 3.10 The effect of welding time on nugget size

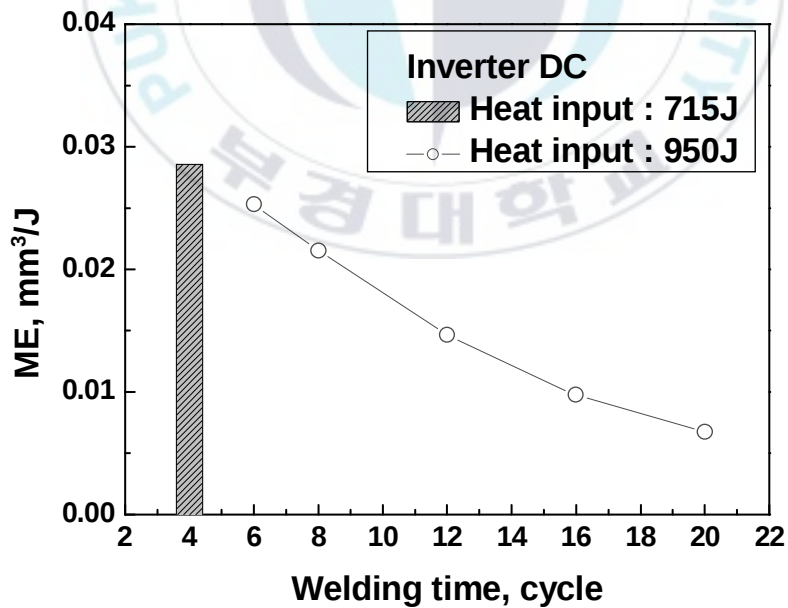


Fig. 3.11 The effect of welding time on ME

### 3.3.2 고속촬영에 의한 통전시간과 용융효율의 관계 검토

Table 3.8은 단상AC 및 인버터DC 전원에서 통전시간 8cycle로 용접시의 파형과 스틸사진을 나타낸 것이다.

단상AC 전원에서 위치①의 스틸 사진은 Peak 전류일 때 용융금속의 모습을 나타낸 것이다. 위치②의 스틸 사진은 Cooling time 마지막 부분으로 용융금속의 크기를 보면 위치①보다 작아진 것을 확인할 수 있다. 위치③의 스틸 사진은 위치②와 같이 Cooling time의 마지막 부분이지만, 총 통전시간의 후반인 위치③이 위치②보다 용융금속이 더 큰 것을 알 수 있다. 위치④의 스틸 사진은 마지막 Half cycle의 Peak 전류일 때 용융금속의 모습을 나타낸 것이다.

단상AC 전원에서 용융금속은 전류파형과 같은 형태를 가진다. 즉, 용접 전류가 Cooling time에서 Peak 전류로 증가 할 때, 용융금속은 증가하고, Peak 전류에서 Cooling time으로 감소 할 때, 용융금속은 감소하였다.

또, 단상AC 전원에서 용접시의 용융금속은 Peak 전류일 때 증가하고 Cooling time일 때 감소함으로 너짓부의 온도변화가 큰 것을 알 수 있다.

인버터DC 전원에서 위치①의 스틸 사진은 용접 초기의 용융금속을 나타낸 것이다. 사진의 화살표는 Faying surface를 나타낸 것으로 Faying surface의 아래는 +전극, 위는 -전극이다. 위치①의 스틸사진에서 용접초기 펄티어 효과에 의해 +전극 쪽에서 -전극보다 발열이 더 많이 되는 것을 확인 할 수 있다.

위치②의 스틸 사진은 용융금속이 발생한 이후로 일단 용융 금속이 생성이 되면 펄티어 효과는 소멸 되는 것으로 판단된다. 위치③과 위치④의 스틸 사진을 보면 단상AC 전원보다 인버터DC 전원이 동일한 입열량에서 더 많은 용융금속이 만들어지는 것을 확인 할 수 있다.

인버터DC 전원에서 용접시의 용융금속은 용접파형에 따라 꾸준히 증가하는 것을 확인 하였다. 따라서 인버터DC 전원은 단상AC 전원보다 용융금속의 온도변화가 작은 것으로 판단된다.

Table 3.8 Comparison of Single phase AC with Inverter DC by waveform and photo (8cycle)

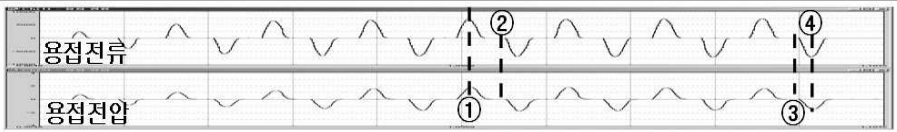
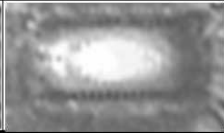
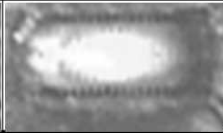
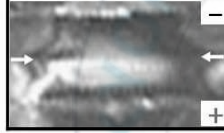
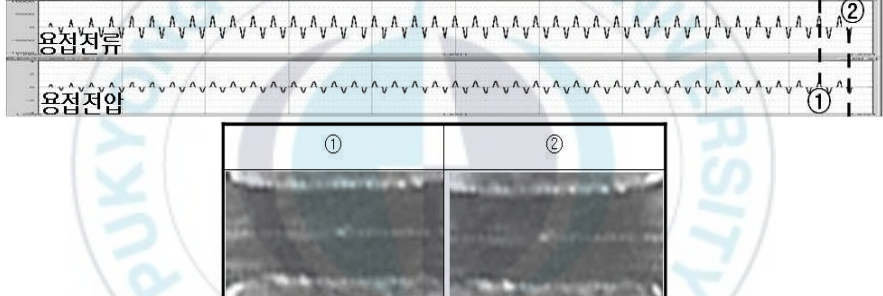
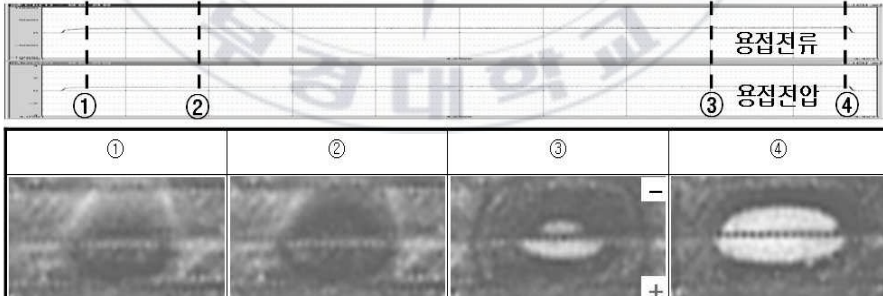
|                       |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Single<br>phase<br>AC |  |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
|                       | ①                                                                                  | ②                                                                                  | ③                                                                                  | ④                                                                                   |
|                       |   |   |   |   |
|                       |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
| Inverter<br>DC        |  |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
|                       | ①                                                                                  | ②                                                                                  | ③                                                                                  | ④                                                                                   |
|                       |  |  |  |  |
|                       |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |

Table 3.9는 단상AC 및 인버터DC 전원에서 통전시간 40cycle로 용접시의 파형과 스틸사진을 나타낸 것이다.

단상AC 전원에서 위치①과 위치②의 스틸 사진은 용접 후반부 Peak 전류에서 용접부를 나타 낸 것으로, 통전 후반부 임에도 불구하고 용융금속이 생기지 않는 것을 확인 할 수 있다.

인버터DC 전원도 단상AC 전원과 마찬가지로 용융금속이 생성되지는 않았지만 위치③과 위치④의 스틸 사진을 보았을 때 인버터DC 전원이 단상AC 전원보다 열 영향부가 큰 것을 확인 할 수 있다.

Table 3.9 Comparison of Single phase AC with Inverter DC by waveform and photo (40cycle)

|                       |                                                                                      |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Single<br>phase<br>AC |   |
| Inverter<br>DC        |  |

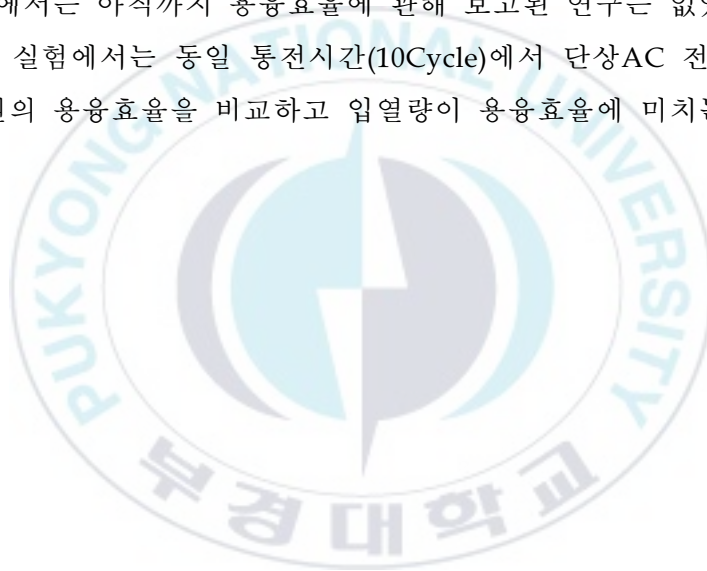
## 제 4 장 동일 통전시간에서 입열량이 용융효율에 미치는 영향 검토 실험

### 4.1 서언

저항 용접은 자동차, 가전제품 등 박판 산업에서 중요한 위치를 차지하고 있다.

최근 Arc 용접에서 용융효율에 관한 연구가 많이 보고되고 있다. 하지만 저항용접에서는 아직까지 용융효율에 관해 보고된 연구는 없었다.

따라서 본 실험에서는 동일 통전시간(10Cycle)에서 단상AC 전원 및 인버터DC 전원의 용융효율을 비교하고 입열량이 용융효율에 미치는 영향을 연구하였다.



## 4.2 실험 방법

Table 4.1은 동일 통전시간에서 입열량과 용융효율 관계를 보기 위한 실험 조건을 나타낸 것이다. 용접 전류는 단상AC 및 인버터DC 전원으로 냉접에서 날림까지 500A씩 증가시키면서 용접하였다.

Table 4.1 Welding condition for experiments

|                 |                 |                                    |
|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| Welding time    | 10cycle         |                                    |
| Electrode force | 250kgf          |                                    |
| Welding current | Single phase AC | Shear ~ Splash (increase per 500A) |
|                 | Inverter DC     |                                    |

### 4.3 실험결과 및 고찰

Table 4.2와 4.3은 단상AC 및 인버터DC 전원으로 동일 통전시간에서 입열량을 변경했을 때의 단면 마크로를 나타낸 것이다.

Table 4.2 Macro section by variation of heat input in Single phase AC

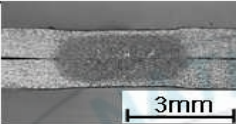
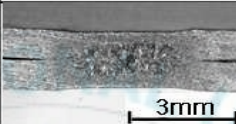
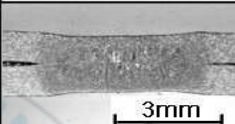
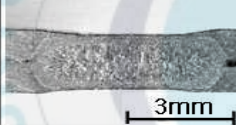
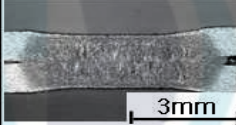
|                  |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Measured current | 4460A                                                                              | 4941A                                                                              | 5385A                                                                               |
| Heat input       | 647J                                                                               | 799J                                                                               | 952J                                                                                |
| Macro section    |   |   |   |
| Measured current | 5845A                                                                              | 6261A                                                                              | 6690A                                                                               |
| Heat input       | 1111J                                                                              | 1247J                                                                              | 1171J                                                                               |
| Macro section    |  |  |  |

Table 4.3 Macro section by variation of heat input in Inverter DC

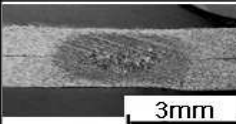
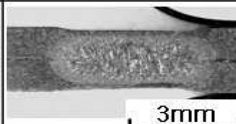
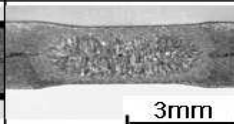
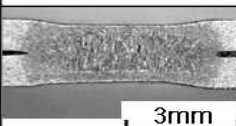
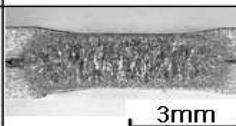
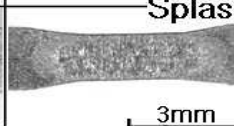
|                  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Measured current | 3637A                                                                               | 4663A                                                                               | 5583A                                                                                |
| Heat input       | 524J                                                                                | 801J                                                                                | 1097J                                                                                |
| Macro section    |  |  |  |
| Measured current | 6089A                                                                               | 6661A                                                                               | 7249A                                                                                |
| Heat input       | 1260J                                                                               | 1424J                                                                               | 1421J                                                                                |
| Macro section    |  |  |  |

Fig. 4.1은 통전시간 10Cycle에서 전원별 측정 전류에 따른 너깃 체적을 나타낸 것이다. 측정 전류 증가에 따라 너깃의 체적은 증가하였고 날림이 발생하면 감소하였다. 인버터DC 전원이 단상AC 전원보다 용접 가능한 전류 범위가 넓었다.

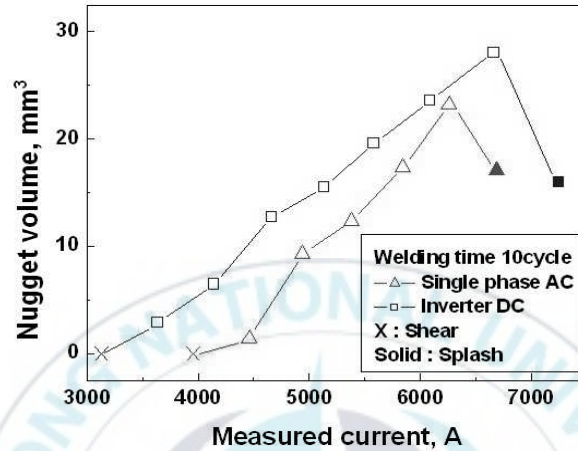


Fig. 4.1 The effect of welding current on nugget volume

Fig. 4.2는 통전시간 10Cycle에서 입열량에 따른 너깃 체적을 나타낸 것이다. 입열량 증가에 따라 너깃 체적은 증가하였고 날림이 발생하면 전압이 떨어져 입열량과 너깃 체적 또한 감소하였다.

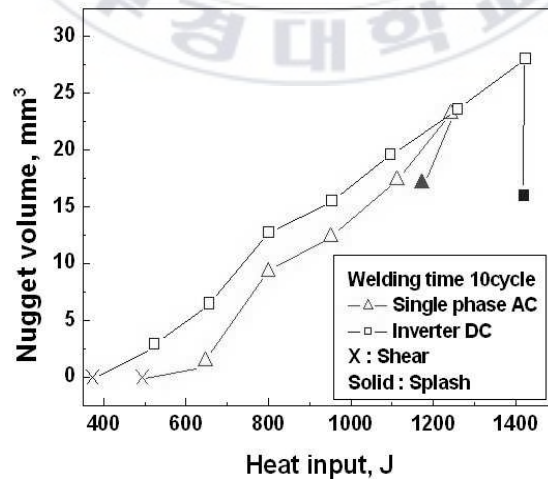


Fig. 4.2 The effect of heat input on nugget volume

Fig. 4.3은 통전시간 10Cycle에서 전원별 측정 전류에 따른 용융효율ME를 나타낸 것이다. 측정 전류 증가에 따라 용융효율ME는 증가하였고 날림이 발생하면 감소하였다. 인버터DC 전원이 단상AC 전원에 비해 용융효율ME이 높았다.

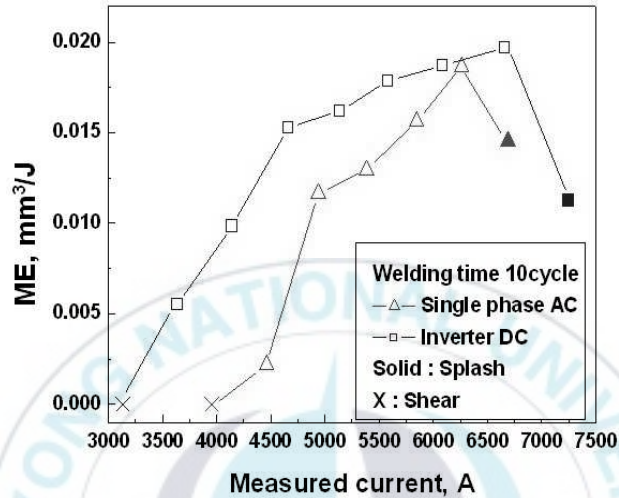


Fig. 4.3 The effect of welding current on ME

Fig. 4.4는 입열량에 따른 용융효율ME를 나타낸 것이다. 입열량 증가에 따라 용융효율ME이 증가하였고, 날림이 발생하면 감소하였다.

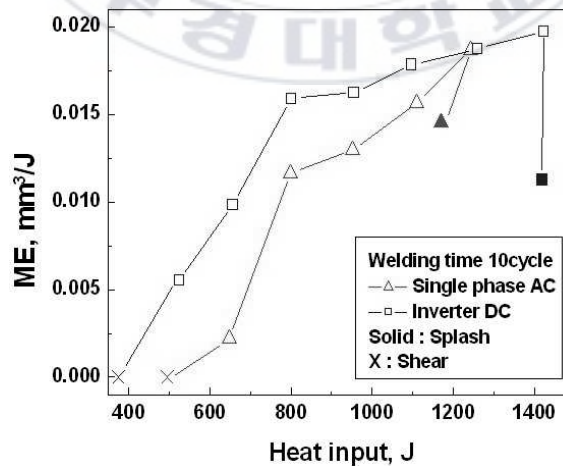


Fig. 4.4 The effect of heat input on ME

## 제 5 장 단상AC 및 인버터DC 전원의 파형 형태가 너깃과 날림에 미치는 영향 검토

Senkara<sup>11)</sup> 등은 Fig. 5.1과 같이 저항 용접 중 2개의 힘이 발생한다고 하였다. 즉, 전극에 의한 힘( $F_E$ )과 액체압력 때문에 생긴 너깃의 힘( $F_N$ )이다. 그리고  $F_N < F_E$  이면 날림이 발생하지 않고,  $F_N \geq F_E$ 이면 날림이 발생한다고 하였다.

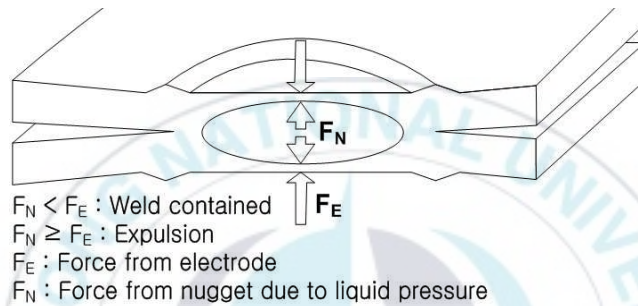


Fig. 5.1 Schematic diagram of the balance of forces considered in the model<sup>11)</sup>

Fig. 5.2는 온도에 따른 액체 너깃의 압력을 나타낸 것이다. 온도가 높을수록 액체 너깃의 압력이 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 식 4)에서 너깃 부 온도의 변화는 압력을 변화 시킨다고 할 수 있다.

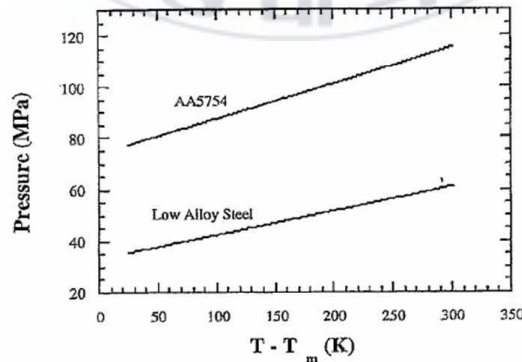


Fig. 5.2 Calculated total pressure in liquid nuggets in a low-alloy steel<sup>11)</sup>

$$dP = \frac{\alpha}{\kappa} dT \text{ ----- 5.1)}$$

여기서, P : 너깃 압력

T : 온도

$\alpha$  : 체적 팽창 계수  $\kappa$  : 압축성 계수

식 5)는  $F_N$ 과 너깃 압력의 관계를 나타낸 것이다.  $F_N$ 은 너깃 압력과  $S_{XY}$ 에 비례한다.

식4)와 5)에서 너깃의 온도 변화는 너깃 압력과  $F_N$ 을 변화 시킨다.

$$F_N = P \times S_{XY} \text{ ----- 5.2)}$$

여기서,  $F_N$  : 너깃에 의한 힘

P : 너깃 압력

$S_{XY}$  : 너깃의 고액계면을 XY면에 투영한 투영면적

Fig. 5.3은 단상AC 및 인버터DC 전원으로 입열량 1200J로 용접했을 때의 순시발열속도 IHR<sup>12)</sup>을 나타낸 것이다. 순시발열속도 IHR은 전류×전압으로 용접 순간순간의 발열 속도를 말한다. 단상AC 전원은 파형에 따라 순시발열속도의 피크 값과 변동이 크다. 이에 비해 인버터DC 전원은 순시발열속도의 피크 값과 변동이 작다.

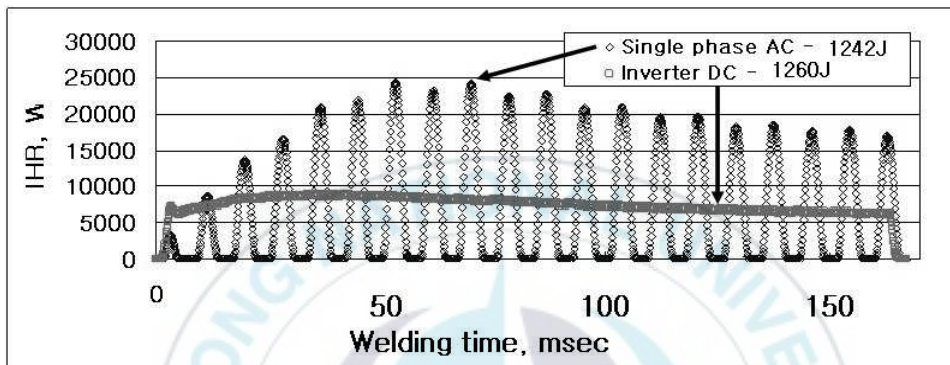


Fig. 5.3 Comparison of instantaneous heating rate in Single phase AC and Inverter DC

Fig. 5.4는 전원별 통전 시간에 따른 온도를 나타낸 것이다. 단상AC 전원은 냉각 시간이 존재하여 너깃부의 온도 변동이 크다. 비록 너깃부의 피크 온도는 인버터DC보다 높아도 피크 온도 유지 시간이 짧아 주위로 열전도가 안 되어 상대적으로 작은 너깃이 생성되는 것으로 판단된다. 이에 비해 인버터DC는 용융금속의 평균 온도가 단상AC에 비해 높고, 냉각 시간이 없어 열전도 시간이 길어져 큰 너깃, 즉 용융효율이 높다고 판단된다.

단상AC 전원이 인버터DC 전원보다 IHR 피크 값 및 IHR 변동이 컸다. 즉 너깃부의 온도 변화가 크고 너깃부의 피크 온도가 높아, Senkara의 논문에서  $F_N$ 의 변동이 크고  $F_N$ 값 또한 커서 인버터DC 전원에 비해 쉽게 날림이 발생하는 것으로 판단된다.

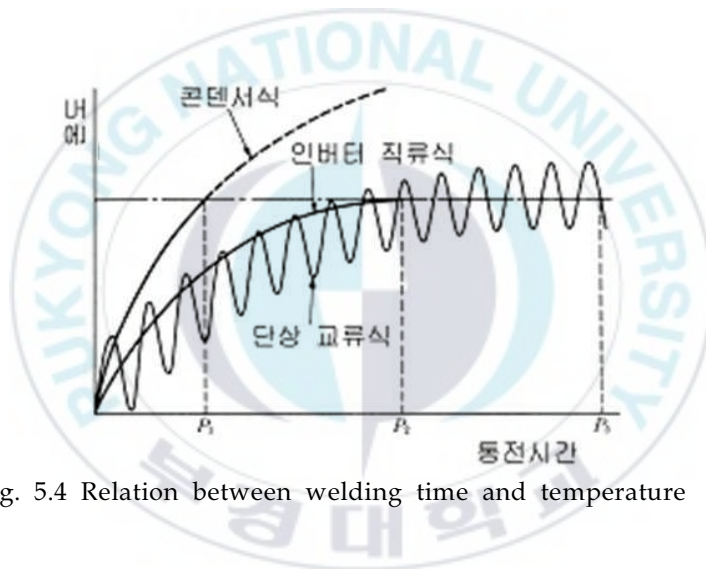


Fig. 5.4 Relation between welding time and temperature

## 제 6 장 결 론

저항 용접에서 입열량과 통전시간이 용융효율에 미치는 영향에 관한 연구를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 12,000PPS의 고속 촬영 결과에 의하면 인버터DC 전원에서는 너깃부의 온도 변화가 그다지 심하지 않았지만 단상AC 전원에서는 전류 파형에 따라 심하게 온도 변화가 생기는 것을 확인 할 수 있었다.
- 2) 너깃부의 온도 변화는 너깃 압력 변동과  $F_N$ 변동을 유발시킨다. 단상AC 전원은 인버터DC 전원에 비해 너깃부의 온도 피크 값 및 온도 변화가 크므로  $F_N$ 이 쉽게  $F_E$ 를 초과할 수 있어 날림이 잘 발생하는 것으로 판단된다.
- 3) 같은 입열량으로 용접할 때 통전시간이 짧아지면 너깃 체적이 증가하였다. 이는 전도열손실이 감소하여 용융효율이 증가하였기 때문이라고 판단된다.
- 4) 같은 통전시간으로 입열량이 증가하면 용융효율이 증가하였고, 인버터DC 전원이 단상AC 전원에 비해 높은 용융효율을 보였다.

## 참 고 문 헌

- 1) 日本學會抵抗溶接研究委員會編 : 抵抗溶接現象とその應用(I), 溶接學會  
術資料No.10(1989年11月), pp.80-90
- 2) 대한용접학회 : 용접 • 접합 편람, (1998), pp.576~586
- 3) AWS Resistance Welder Manufacturers Association : Resistance  
welding manual Fourth edition(1989. 10), pp. 4.1-4.10
- 4) J. N DUPONT and A. R. MARDER 1995, Thermal Efficiency of Arc  
Welding Processes, Welding Journal :406-s to 416-s.
- 5) W. H. Giedt, L. N. Tallerico : GTA welding efficiency :Calorimetric  
and temperature field measurements, Welding Journal, January 1989,  
pp. 29-s~31-s
- 6) 윤승중, 김우열, 조상명 : FCAW에 의한 필릿 용접부의 각변형에 미치  
는 용융효율의 영향, 2006년년도 춘계 학술발표대회 발표논문 , 2006, pp.  
292~294
- 7) KS D 4043 : 점 용접 및 프로젝션 용접부의 현장 시험 방법
- 8) Lane C.T, Sorensen C.D., Hunter G.B., Gedenon S.A, and Eager  
T.W. :Cinematography of Resistance Spot Welding of Galvanized Steel  
Sheet, Welding Journal, Vol.66, No. 9(1987),p260-265
- 9) Upthegrove et al. : A high speed photographic analysis of spot  
welding galvanized steel
- 10) S. M. Cho : Principle of Resistance Welding and Analysis of  
Monitoring Results, 대한용접학회지, 제15권, 제2호(1997)
- 11) J. Senkara, H. Zhang, and S. J. Hu : Expulsion prediction in  
resistance spot welding, welding research, 2004. April : 123s ~132s
- 12) 6. S. M. Cho, J. W. Kim : The Comparison of average dynamic  
resistance and instantaneous dynamic resistance pattern during  
half-cycle for the heat generation phenomena in RSW, Korea welding  
society, Volume 44 (2005), p305~307

## 감사의 글

2004년 2월 용접IT Lab의 낯선 환경에서 배움이라는 열정만을 가지고 첫 발을 디딘지 얼마되지 않은 것 같은데 벌써 3년의 시간이 흘렀습니다. 살면서 많은 선택의 갈림길이 있었지만, 용접IT Lab에서 연구한 것이 최고의 선택이었다고 생각합니다. 2007년 1월 현재 직장인으로 이 글을 쓰며 대학원 생활을 뒤돌아 보니 감회가 새롭습니다.

엔지니어로서 생각하는 방법과 행동하는 방법을 가르쳐 주시고 문제 해결 능력을 길러주신 저의 지도 교수님인 조상명 교수님께 먼저 감사의 마음을 올리고 싶습니다.

학부 및 대학원 과정을 지도해 주시고, 논문 완성까지 격려와 질책을 아끼지 않으셨던 김우열 교수님, 박홍일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님께 진심으로 감사의 마음을 올립니다.

대학원과정을 밟으면서 선배님과 후배님 그리고 대학원 동기들로부터 정말로 많은 도움을 받았습니다.

저희에게 모범이 되어주신 오동수 선배님, 생각의 폭을 넓혀주신 고명훈 선배님, 고민 상담을 많이해주신 김외숙 비서님, 그 누구보다 열정적이신 추용수 형님, 실질적인 사수 고미혜 선배님, 친형처럼 잘해주신 고찬식 선배님, STX 팀원일때 힘든내색 없이 함께해주신 윤승종 선배님, 연구실 생활의 FM을 보여주신 조진안 선배님, 미개척지인 초음파용접의 사수인 김대만 선배님, 직장생활과 연구실생활 모두 잘하시는 이정현 누님, STX 프로젝트를 불출주야 도와주신 고마운 문영덕 선배님, 다이내믹한 추환수 선배님, 학부와 대학원을 함께한 사랑하는 나의 동기 함효식, 기쁠때나 힘들때나 함께해준 고마운 나의 동기 김성덕, 언제나 당당하면서 겸손한 나의 동기 박인기, 열정만큼 냉정하게 사는 아이디어 man 황규민 후배님,

연구실 생활동안 든든하게 내 뒤에서 있어준 나의 부사수 배광무 후배님,  
맡은 임무에 최선을하다는 현명한 김효원 후배님, 자신에게 솔직하고 자  
신의 삶을 꾸준히 설계하는 윤영현 후배님께 고마움을 전합니다.

지금의 제가 될 수있도록 도와주신 졸업선배님들께 감사의 마음을 전하  
며 특히, 더 넓은 세상으로 나갈수 있도록 도와주신 김덕원 선배님께 고  
마움을 전하며, 이 논문이 완성되도록 도와주신 Roxtec Korea의 안성수  
부장님, 박정임 대리님, 채훈 대리님, 이수진씨와 직원들께 감사의 마음을  
전합니다.

끝으로, 지금까지 학업을 계속할 수 있게 뒤에서 묵묵히 지원해주신 부  
모님, 동생 그리고 항상 저를 위해 기도해 주시는 할머니, 외할머니, 외삼  
촌께 고개 숙여 감사의 마음을 전하면서 이 논문을 마칩니다.

