

181/1/20  
3  
=2

工學碩士 學位論文

극성가변 AC 펄스 MIG용접기를  
이용한 아크 브레이징



이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2003年 2月




釜慶大學校 大學院

生産加工工學科

孔 賢 相

孔賢相의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002. 12.26

主 審	工學博士	金雨烈	
委 員	工學博士	徐源贊	
委 員	工學博士	趙相明	

# 목 차

Abstract	1
1장 서론	2
1.1 연구배경 및 필요성	2
1.2 연구목적	3
2장 이론적 배경	4
2.1 MIG 브레이징의 원리와 용적의 이행현상	4
2.1.1 원리	4
2.1.2 용적의 이행 현상	6
2.2 MIG 아크브레이징에서의 극성에 대한 특성	9
2.3 EN 극성비의 정의	12
3장 실리콘브론즈 와이어의 펄스파형 설정	14
3.1 서언	14
3.2 실험재료	15
3.3 실험방법	16
3.4 실험결과 및 고찰	17
3.4.1 주파수와 용적의 크기	17
3.4.2 DC 펄스 파형의 설정	20
3.4.3 AC 펄스 파형의 설정	27
3.5 결 언	29

4장 DC 펄스의 와이어 종류에 따른 비교 -----	30
4.1 서 언 -----	30
4.2 실험 방법 -----	31
4.3 실험결과 및 고찰 -----	32
4.3.1 와이어 종류에 따른 입열량 비교 -----	32
4.3.2 와이어 종류에 따른 용입부 단면 비교 -----	34
4.4 결론 -----	36
5장 극성가변 AC 펄스의 EN극성비효과 -----	37
5.1 서언 -----	37
5.2 실험방법 -----	38
5.3 실험결과 및 고찰 -----	41
5.3.1 EN극성비에 따른 입열량 비교 -----	41
5.3.2 EN극성비에 따른 비드외관 및 용입부 단면 -----	44
5.3.3 EN극성비에 따른 온도실험 -----	47
5.3.4 EN극성비 변화에 따른 변형 실험 -----	50
5.3.5 EN극성비 변화에 따른 인장 실험 -----	52
5.4 결론 -----	54
6장 결론 -----	55
참고 문헌 -----	56

# **The Arc brazing by Variable Polarity AC pulse MIG Welding Machine**

Hyun-Sang Kong

Department of Production & Joining Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University

## **Abstract**

MIG brazing is used for many parts without melting of base metal because of high productivity. Pulsed MIG brazing can be used to further reduce heat input and to improve the process stability. However, a significant amount of zinc in galvanized sheet steel is burned off in the area of brazes. Therefore the brazing method to reduce the heat input is needed. In the brazing for galvanized sheet steel, variable-polarity AC pulse MIG arc brazing can be applied to more decrease the heat input by setting EN-ratio adequately.

Variable-polarity AC pulse MIG brazing alternates between DCEP(Direct Current Electrode Positive) and DCEN(Direct Current Electrode Negative). DCEN is higher wire melting rate than DCEP, while lower temperature of droplet than DCEP. In AC pulse MIG brazing, for fixed brazing current, wire melting rate increases as the EN-ratio increase. For fixed wire feed rate, brazing current decreases as the EN ratio increases.

In this research, we studied for the variable polarity AC pulse MIG arc brazing to decrease the heat input by using ERCuSi-A wire.

As the result of increasing EN-ratio, melting ratio of base metal and burning off of zinc were reduced in galvanized sheet steel.

Key word : Galvanized sheet steel, MIG brazing, Arc brazing, Heat input, EN-ratio, Waveform control, Variable polarity AC pulse MIG arc brazing, Silicon bronze wire

# 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 필요성

MIG 브레이징은 MIG용 전원 장치에 저융점 와이어를 사용하는 브레이징 방법으로서 모재의 용융과 입열을 최소화 할 수 있고, 또한 일반 브레이징 공법에 비해 생산성이 높고 디지털화 하여 품질관리를 할 수 있으므로 와이어의 가격이 비교적 고가임에도 불구하고 자동차 산업 등에서 많이 사용되고 있다.

펄스 MIG 브레이징은 스프레이 이행을 가능하게 하여 스파터와 입열을 줄일 수가 있다. 특히 아연 도금 강판에서 저융점 와이어를 사용하게 되면 아연의 낮은 용점(420℃)과 증발 온도(906℃)로 인하여 발생하는 기공, 용합 불량, 크랙, 스파터등의 문제점을 해결할 수 있으나 여전히 입열이 높아 아연도금층의 손상을 피할 수가 없다. 따라서 더욱 효과적으로 입열을 줄이는 브레이징법이 요구된다.

극성가변 AC 펄스 아크 브레이징법은 DCEP(Direct Current Electrode Positive, 와이어 플러스)보다 와이어의 용융 속도가 높지만 용적의 보유 열량이 작은 DCEN(Direct Current Electrode Negative, 와이어 마이너스) 구간을 두어서 두 구간을 주기적으로 반복하는 브레이징법이다.

## 1.2 연구 목적

최근 선진 외국에서 극성가변 AC 펄스를 이용하여 아크 브레이징을 연구한 바가 있으나 저용점 와이어에 적합한 펄스 파형을 설정하지 못하여 양호한 브레이징부를 얻지 못하였다<sup>1)</sup>.

본 연구는 입열량을 제어 할 수 있는 극성가변 AC 펄스 MIG 용접기에 실리콘브론즈 (ERCuSi-A)와이어를 사용하는 아크 브레이징으로서 모재의 용융, 입열, 변형을 최소화 하는 것을 목적으로 하였다.

실험에서는 적절한 펄스 파형의 검토, DC 펄스 및 극성가변 AC 펄스 MIG 브레이징을 실시하여 비드외관과 단면, 온도변화, 및 브레이징 품질을 관찰하였다.

## 2장 이론적 배경

### 2.1 MIG 브레이징의 원리와 용적의 이행 현상

#### 2.1.1 원리

GMAW(Gas Metal Arc Welding)는 소모 전극을 사용하는 방법으로서 용가재로 작용하는 와이어를 일정한 속도(Wire Feeding Rate)로 용융지에 송급 하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에서 아크가 발생하도록 하는 용접법이다.

이 용접법은 사용되는 보호 가스의 종류에 따라 분류되고 있는데, Ar과 같은 불활성 가스를 사용하는 경우를 MIG(Metal Inert Gas)용접, 순수 탄산가스만을 사용하는 경우를 CO<sub>2</sub>용접, 탄산가스와 Ar가스를 혼합하여 사용하는 경우를 MAG(Metal active Gas)용접 이라고 한다.

MIG 브레이징은 MIG용 전원장치에 저용점 와이어를 소모전극으로 하여 일정한 속도(Wire Feeding Rate)로 용융지에 송급하면서 전류를 통하여 와이어와 모재 사이에서 아크가 발생되도록 하는 브레이징법이다.

Fig. 2.1 에서와 같이 연속적으로 송급되는 와이어는 높은 아크열에 의해 용융되어 모재로 이행하게 되며, 아크 기둥과 용융부위는 가스노즐을 통해 공급되는 보호가스(Shielding Gas)에 의해 주위의 대기로부터 보호 된다.

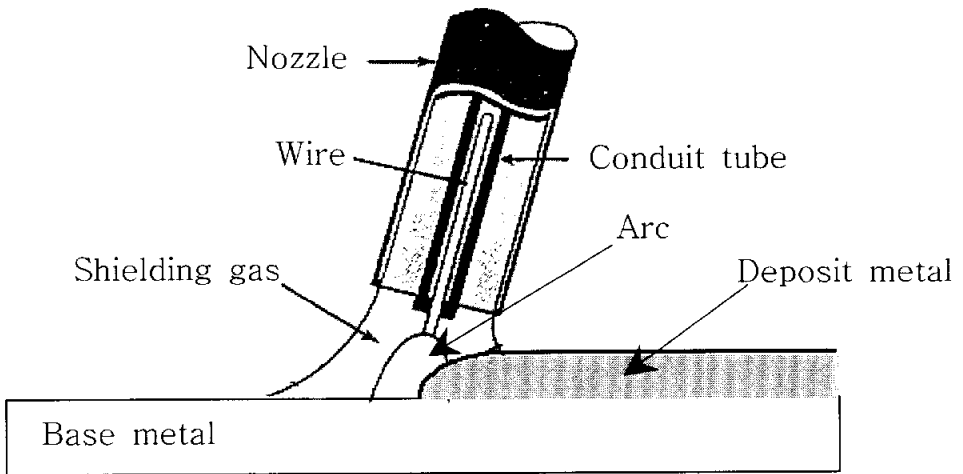


Fig. 2.1 Arc principle of MIG brazing

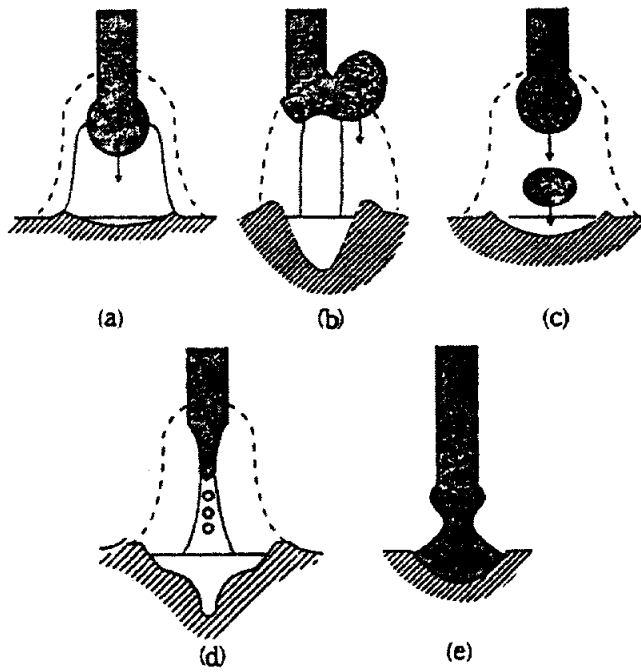
### 2.1.2 용적의 이행현상

GMAW에 있어서 용적이행이란 와이어에서 용융된 금속이 용융지로 이행하는 현상을 말하는 것으로서 단순히 금속이행(Metal transfer)이라고도 한다. 용적이행은 용접재료, 보호가스, 용접조건 등에 따라 여러가지 형태로 나타난다. Table 2.1은 국제 용접학회(IIW)에서 분류하고 있는 용적이행 형태를 나타낸 것이고, Fig. 2.2는 이들 중 GMAW에서 나타날 수 있는 용적이행 형태를 나타낸 그림이다. GMAW에서 용적이 이행하는 현상은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로 와이어 선단에서 생성된 용적이 와이어로부터 이탈되어 금속 방울상태로 아크 기둥을 거쳐 용융지로 이동하는 형태로서 자유비행이행이라고 한다. 이것은 다시 이행하는 용적의 크기에 따라 입상용적이행과 스프레이이행으로 나눌 수 있다. 두 번째는 와이어선단에서 형성된 용적이 용융지와 접촉하여 가교(bridging)를 형성하여 이행하는 형태인데, 이 때 전기적인 단락이 발생하기 때문에 단락이행이라고도 한다.

이 중에서 본 연구에 적용되는 용적이행은 스프레이 이행으로 분류되는 프로젝티드 이행이다. Ar가스를 주성분으로 하는 MIG 또는 MAG 용접에서는 용접전류가 증가함에 따라 특정 전류에서 용적의 크기가 급격히 변화한다. 이러한 전류를 천이전류라고 하는데, 용접전류가 천이전류보다 낮을 때는 입상 용적 이행이 일어나고, 천이전류 이상일 때에는 용적의 크기가 와이어 직경과 비슷하거나 작은 용적이 초당 수백회 정도의 횟수로 이행하는 현상이 일어난다. 이러한 이행형태를 스프레이이행이라고 한다. 스프레이 이행은 전류의 크기에 따라 프로젝티드이행, 스트리밍이행, 로테이팅이행으로 나누게 되는데, 프로젝티드이행은 천이 전류 직상의 범위에서 나타나는 용적이행으로 용적의 크기는 와이어의 직경과 비슷하고, 아크는 매우 안정적이며 소음도 적다. Fig. 2.3은 프로젝티드이행일 때의 아크 현상과 용적의 이행에 대해서 나타낸 것이다.

Table 2.1 The classification of transfer of molten metal (IIW)

Transfer of molten metal	Example
1) Free flight transfer ·Globular transfer - Drop transfer - Repelled transfer ·Spray transfer - Projected transfer - Streaming transfer - Rotating transfer ·Explosive transfer	GMAW (low current) GMAW (CO <sub>2</sub> ) GMAW (MAG, MIG) GMAW (MAG, MIG) GMAW (MAG, MIG) SMAW
2) Bridging transfer ·Short circuiting transfer ·Bridging without interruption	GMAW, SMAW
3) Slag-protected transfer ·Flux-wall-guided transfer	SAW



(a) Drop transfer (b) Repelled transfer (c) Projected transfer  
 (d) Streaming transfer (e) Short circuiting transfer  
 Fig. 2.2 Various type of metal transfer in GMAW

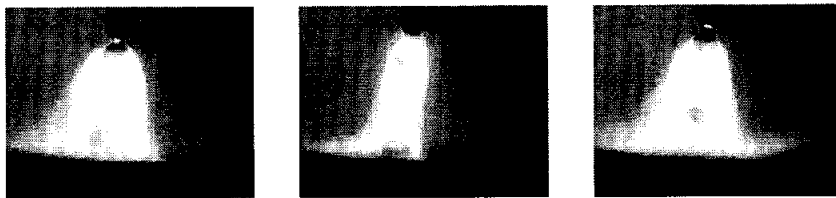


Fig. 2.3 Arc phenomena and transfer of droplet at projected transfer

## 2.2 MIG 아크 브레이징 에서의 극성에 대한 특성

아크는 Fig. 2.4에서 나타낸 바와 같이 양극 전압강하, 음극 전압강하, 아크기둥 전압강하의 3구역으로 구분된다. 이중 양극에서의 전압강하는 1-10V정도이며, 음극에서의 전압강하는 10-20V정도이다. 전자의 무게는 양자에 비해 훨씬 가볍기 때문에 아크에서 전류의 흐름은 전자에 의하여 유지된다. 양극과 양극 전압강하 구역은 아크에서 발생한 전자를 받아들여 아크를 유지시키는 역할을 한다.

음극의 온도가 증가하면 음극 표면에서는 전자가 방출되는데, 이와 같이 고온에서 전자가 방출되는 현상을 열전자 방출현상이라 하며, 음극에서의 전류밀도는 아래 식에 의하여 나타낸다.

$$J = AT^2 \exp(-e\phi/KT) \quad (2.1)$$

여기서, J : 전류밀도

T : 온도

$\phi$  : 일함수

A : 상수

일함수는 음극의 표면에서 전자를 방출하기 위하여 요구되는 전압으로서 재질에 따라 다르다. 음극의 온도가 일정하다면 재질의 일함수가 낮을수록 많은 전자가 방출되어 전류밀도는 증가한다. 용접에서 사용되는 높은 전류를 얻으려면 고온이 요구되며 고온에 의하여 전극으로부터 전자가 방출되려면 전극의 재료로 탄소나 텅스텐과 같이 고온에서 녹지 않는 재질이 요구된다.

TIG 용접과 같이 고 용점재료를 사용하는 경우에는 DCEN일때 전자는 텅스텐 표면에서 방출되어 모재로 집중되어 종모양의 아크가 형성되 용입이 깊어지게 된다. 그러나 DCEP에서는 모재에서 방출된 전자는 전극에 집중되어 충돌하게 되는데 고 용점재료인 텅스텐봉이라 하더라도 첨단부가 손상되어 둥그런 형상이 된다. 이러한 형상으로 인하여 아크가 집중되지 못하여 용입이 얇아지게 된다.

철강이나 알루미늄 등의 소모성 와이어를 음극으로 이용하는 경우는 용접에 필요한 전류를 얻기 위한 온도에 도달하기 전에 와이어가 용융 및 이탈되므로 Eq. 2.1을 이용할 수 없다. 이와 같은 소모성 와이어를 사용하는 경우의 전자 방출 현상을 비 열전자 방출이라 하며 원리는 다음과 같다. 고온에서 음극이 용융되면 음극의 표면이 산화되어 산화막이 형성된다. 일반적으로 산화막의 일함수는 금속에 비해 낮기 때문에 전자는 Fe 나 Al과 같은 금속보다 방출에 소요되는 에너지가 작은 산화막에서 방출된다. 그러므로 낮은 온도에서도 전자가 발생하게 되어 용접에 필요한 높은 전류를 얻을 수 있다. 일반적으로 음극에서의 전류 밀도는  $10^6 - 4 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$  정도로서 양극의 전류밀도( $10^2 - 10^5 \text{ A/cm}^2$ )보다 높으며,

음극에서는 동시에 많은 수의 방출점이 생성되고 이런 방출점에서는 이온 충격에 의해 산화물이 파괴되는 상당히 짧은 시간동안에는 능률이 좋은 전자방출이 지속되지만, 그것이 끝나면 다른 방출점으로 빠르게 이동한다. 따라서 양극과 달리 고정되어 있지 않고 음극 표면상을 불규칙적으로 빠르게 이동하는 특성이 있다<sup>2)</sup>.

저 용접재료를 사용하는 MIG용접의 DCEP의 경우에는 모재에서 발생된 전자가 전극과 충돌되어 아크가 형성되고 전극이 용융하게 되는데 TIG의 DCEP의 경우와 마찬가지로 전극에 엄청난 열이 발생 되어 모재로 이행하기 때문에 용입이 깊어진다.

DCEN의 경우에는 전극에서 방출되는 전자의 음극점이 불규칙하게 발생되어 아크는 집중되지 못하고, 와이어 선단부를 아크가 둘러싼 형태로 되어 있게 된다. 따라서 와이어의 용융은 증가하게 되지만 용적의 온도는 낮게 되어 용입은 DCEP보다 감소하게 된다.

이러한 극성의 특성은 MIG 브레이징에서도 같은 효과를 가지게 된다.

Fig. 2.5는 와이어를 양극으로 사용하는 DCEP(Direct Current Electrode Positive)의 경우와 와이어를 음극으로 사용하는 DCEN(Direct Current Electrode Negative)의 경우를 개략적으로 나타낸 것이다.

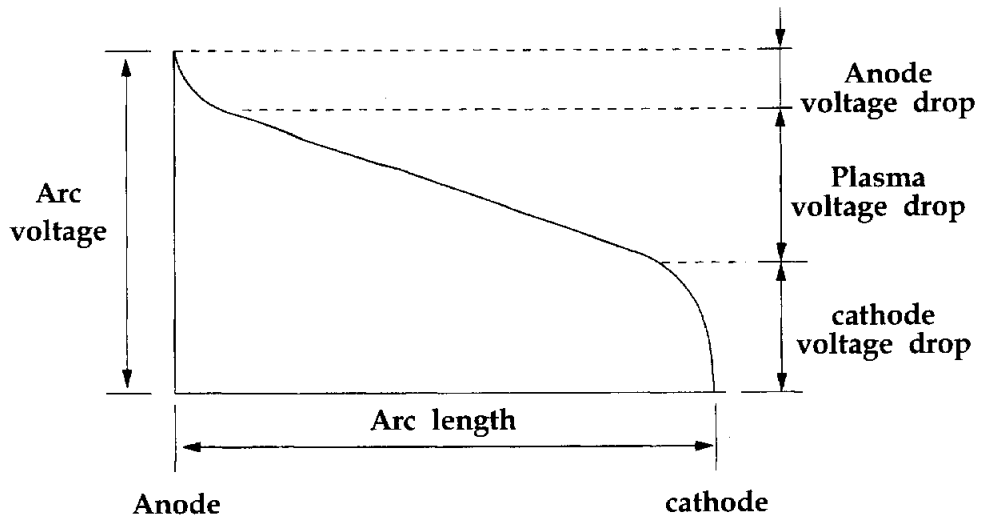


Fig. 2.4 The characteristic of arc Voltage

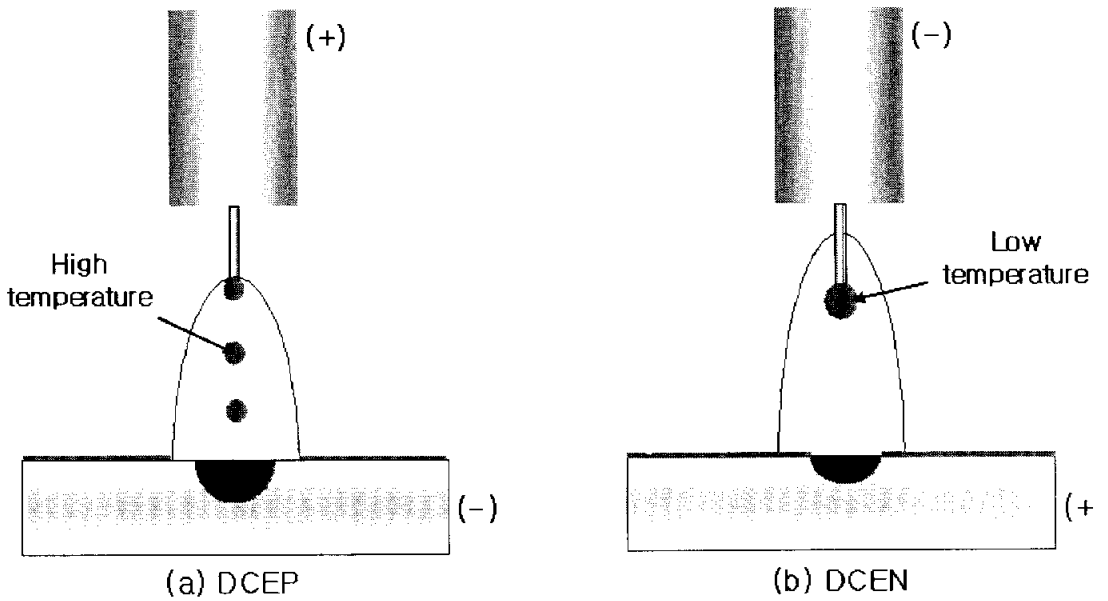


Fig. 2.5 Schematic of DCEN and DCEP

### 2.3 EN 극성비의 정의

AC 펄스 파형은 DCEP와 DCEN을 주기적으로 반복하는 것으로서 Eq.(2.2)과 같이 정의되는 EN 극성비를 적용하여 와이어 용융속도 및 입열량을 제어하였다<sup>3,4)</sup>. Fig. 2.6는 AC 펄스 파형을 개략적으로 나타낸 것이다.

$$\text{EN 극성비} = \left[ \frac{I_{EN} \times T_{EN}}{I_{EP} \times T_{EP} + I_{EN} \times T_{EN}} \times 100(\%) \right] \quad (2.2)$$

여기서,  $I_{EN}$  : DCEN구간의 평균전류(A)

$I_{EP}$  : DCEP구간의 평균전류(A)

$T_{EN}$  : DCEN구간 유지시간(s)

$T_{EP}$  : DCEP구간 유지시간(s)

Fig. 2.7은 Tomoyuki Ueyma 등이 연구한 AI 용접시의 EN 극성비에 따른 와이어 용융속도를 나타낸 것이다. 동일한 용접 전류에서는 EN 극성비가 증가할수록 와이어 용융속도가 높아지고, 동일한 와이어를 용융시키기 위해 필요한 용접 전류는 EN 극성비가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다<sup>3)</sup>.

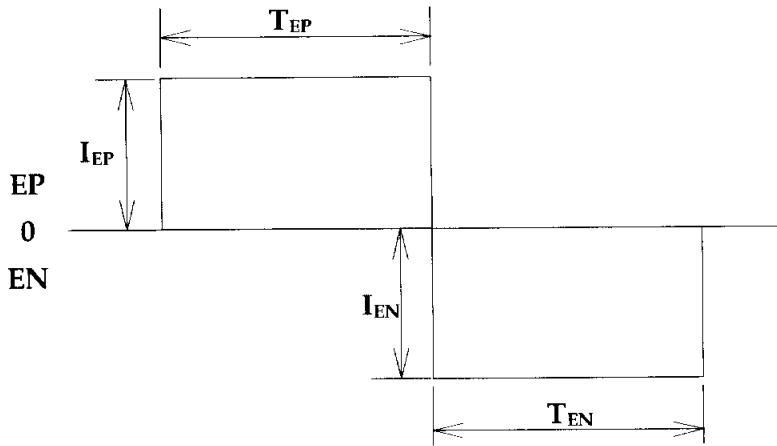


Fig 2.6 Schematic of EN ratio

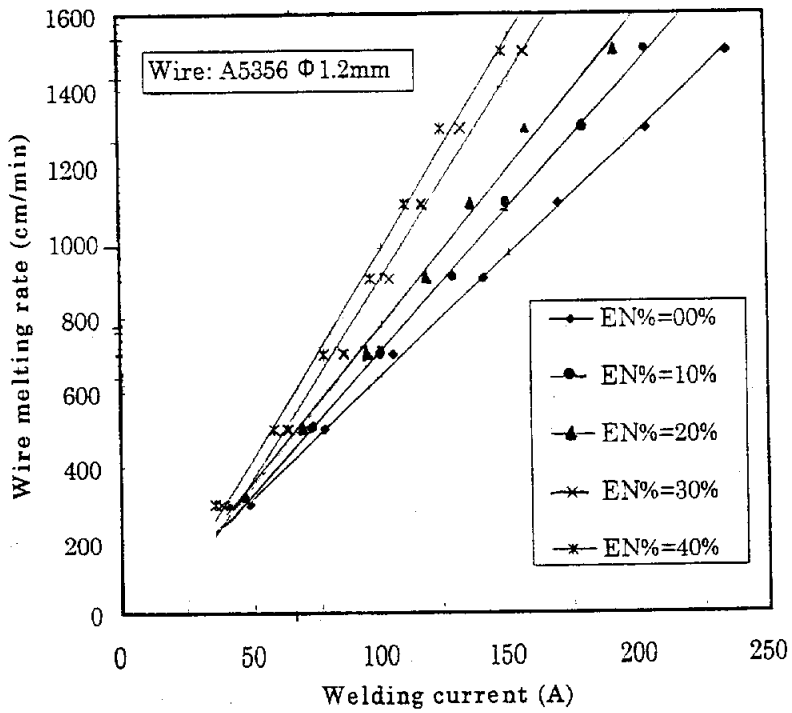


Fig. 2.7 Relationship between EN ratio and Al wire melting rate<sup>31)</sup>

## 3장 실리콘브론즈 와이어의 펄스파형 설정

### 3.1 서언

실험에 사용된 용접기는 극성가변 AI용 용접기로서 전류파형이 AI와이어에 적합하게 설계되어 있다. 따라서 실리콘브론즈 와이어에 적합한 전류파형을 설정할 필요가 있다.

Joseph 등의 연구에서 DC펄스 파형실험에서는 실리콘브론즈 와이어에 적합한 파형을 설정하여 실험을 수행하였으나 AC펄스 파형실험에서는 적절한 파형을 적용하지 못 하였다<sup>1)</sup>.

본 연구에서는 실리콘브론즈 와이어에 적합한 AC펄스 파형을 설정하여 스파터가 없는 양호한 브레이징을 얻는 것을 목적으로 하였다.

DC펄스파형에서 피크전류와 피크시간을 조절하여 원펄스원드롭(1pulse-1drop)스프레이이행되는 파형을 설정한 다음 AC펄스 파형에 적용하여 파형의 적절성을 평가 하였다.

### 3.2 실험재료

본 실험에서 사용된 와이어는 실리콘브론즈 와이어로서 AWS ERCuSi-A(1.2mm) 이다.

Table 3.1에 화학성분을 나타내었다. 모재는 두께 1.2mm의 일반냉연 강판(SPCC)을 사용하였다.

Table 3.1 Chemical composition of ERCuSi-A wire (wt. %)

Cu	Zn	Sn	Mn	Si	Fe	Al	Pb
Bal.	0.013	0.056	0.88	3.08	0.06	0.009	0.008

### 3.3 실험방법

본 연구에서는 실리콘브론즈 와이어를 사용하여 AC 펄스 브레이징에서 단락이 없는 스프레이이행을 하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 적절한 크기의 용적을 이행시키기 위해 펄스 주파수를 먼저 결정하였다.

일반적인 스틸 와이어를 사용하는 펄스 용접법에서는 용적의 크기를 와이어와 비슷하거나 약간 크게 하고 있다. 실리콘브론즈 와이어에서도 용적의 크기를 와이어보다 약간 크게 이행시키기 위해 펄스 파형의 피크전류와 피크시간을 조절하여 적절한 파형을 설정하였다.

DC 펄스파형에서 아크모니터링 시스템을 사용하여 주파수, 단락횟수, 단락 시간비,  $I_p$ 구간시의 단락횟수 등을 계측하여 파형의 적절성을 평가하였고, 적절한  $I_p$ ,  $T_p$ 조건을 AC펄스 파형에 적용하여 단락, 스파터등 브레이징성을 평가하였다.

펄스 주파수와 와이어 송급 속도의 관계는 Eq. 3.1과 같이 하였다.

$$f_p = (Rw \times (\frac{D_w}{2})^2 \times \pi) / ((\frac{D_d}{2})^3 \times \frac{4}{3} \times \pi) \quad (3.1)$$

$f_p$  : 펄스 주파수 (Hz),

$Rw$  : 와이어 송급 속도 (mm/sec)

$D_w$  : 와이어 직경 (mm),

$D_d$  : 용적 직경 (mm)

## 3.4 실험결과 및 고찰

### 3.4.1 주파수와 용적의 크기

Fig. 3.1은 미그 브레이징에서의 주파수에 따른 용적의 크기를 나타낸 것이다. 동일 와이어 송급 속도에서 주파수가 증가 할수록 이행되는 용적의 직경이 작아지는 것을 나타내고 있다.

실험에서는 이행되는 용적의 직경을 와이어보다 약간 크게 하는 것으로 파형을 설정하였다. 용적의 크기가 와이어 직경과 같은 주파수는 121Hz이며, 주파수가 증가할수록 용적의 직경이 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.2 와 Fig. 3.3은 평균전류를 동일하게 유지하고 각각 피크시간과( $T_p$ )과 피크전류( $I_p$ )를 고정 하였을 때 주파수와  $T_p$ ,  $I_p$  관계를 나타낸 그래프이다.

$T_p$ 를 0.8ms로 고정 하였을 때  $I_p$ 변화에 따른 주파수의 관계에서는  $I_p$ 가 증가함에 따라 주파수가 감소하였다.  $I_p$ 를 340A로 고정 하였을 때  $T_p$ 변화에 따른 주파수의 관계에서도  $T_p$ 가 증가함에 따라 주파수가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서  $T_p$ ,  $I_p$ 를 기본 설정치에서 증가 하게 되면 용적의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 용적의 크기를 약 1.34mm로 설정 하였다.

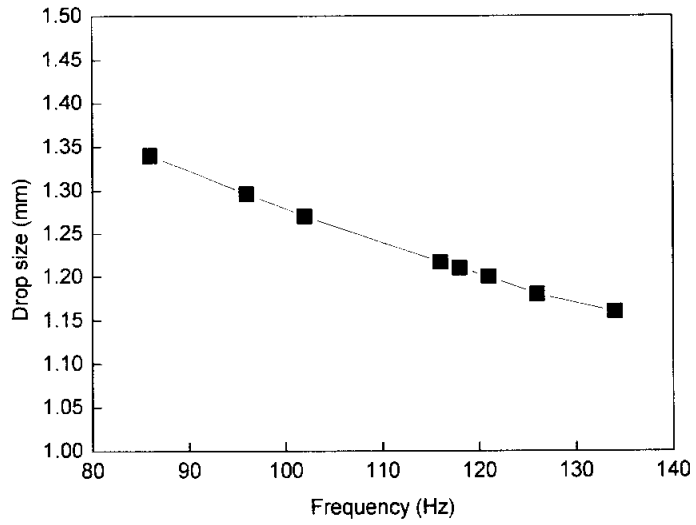


Fig. 3.1 Drop size by frequency in pulse MIG brazing

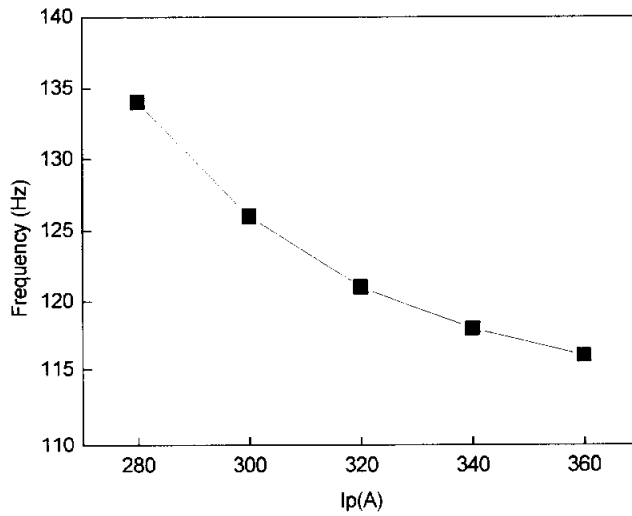


Fig. 3.2 Frequency by Ip in pulse wave  
( Tp 0.8ms)

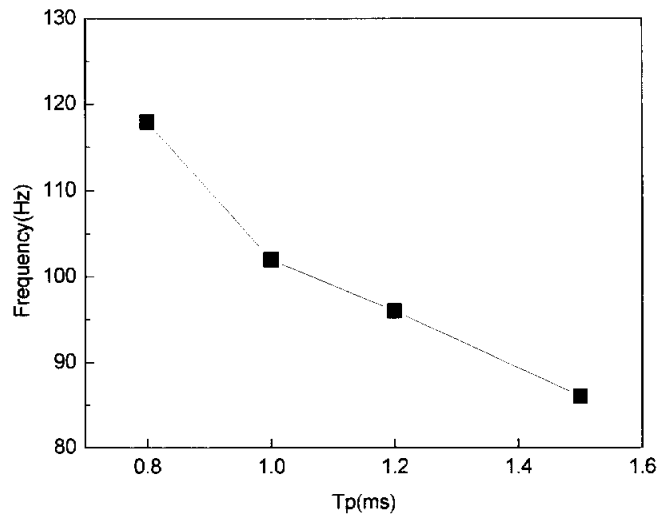


Fig. 3.3 Frequency by Tp in pulse wave  
(Ip 340A)

### 3.4.2 DC 펄스 파형의 설정

#### (1) $I_p$ , $T_p$ 변화에 따른 단락

Fig. 3.4는  $T_p$ 를 0.8ms로 고정하고  $I_p$ 를 변화하여 브레이징을 실시 하였을 때의  $I_p$ 변화에 따른 단락비를 나타낸 그래프이다.  $I_p$ 가 증가할수록 단락비가 감소하다가  $I_p340A$ 에서 가장 작은 단락비를 보이고 있다.

단락비가 작다는 것은 스파터의 발생이 없고 용적의 이행이 스프레이 이행에 가깝다는 것을 의미하므로 실리콘브론즈 와이어에 적합한 피크전류는  $I_p340A$ 라고 판단된다.

Fig. 3.5는  $I_p340A$ 일때의  $T_p$ 변화에 따른 단락비를 나타낸 그래프로서  $T_p$ 가 증가할수록 단락비가 감소하고 있으며  $T_p1.5ms$ 에서 가장 작은 단락비를 보이고 있다. 따라서 피크전류를  $I_p340A$ 로 유지 하였을 때에 가장 적합한 피크시간은  $T_p1.5ms$ 라고 판단된다.

Fig. 3.6은  $T_p$  0.8ms일때의  $I_p$  변화에 따른 피크전류 구간에서의 단락 횟수를 나타낸 그래프로서  $I_p$ 가 증가 할수록 단락 횟수가 감소하고 있고  $I_p340A$  이상에서는 단락이 없었다.

원펄스 원드롭의 스프레이 이행이 되기 위해서는 단락의 발생이 없는 양호한 전류파형이 되어야 한다. 특히 피크전류 구간에서의 단락은 선행 펄스에서의 용적이 원할이 이행을 하지 못하여 후행펄스에의 피크전류 구간중에 단락이 된 것으로 적절하지 못한 용적이행을 의미하며, 또한 단락 해소시의 큰 아크력으로 인하여 스파터 발생의 원인이 된다. 따라서 피크 전류 기간 중에 단락이 가장 작은  $I_p340A$  이상의 피크전류가 원할한 용적 이행에 유리 할 것으로 판단된다.

Fig. 3.7은  $I_p$  340A일때의  $T_p$  변화에 따른 단락수와 순간단락을 나타낸 그래프로서  $T_p$ 가 증가함에 따라 단락수는 감소하고 있다. 또한 전체 단락수에서 순간 단락이 증가하고 장기 단락이 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

원할한 스프레이 이행을 하기 위해서는 단락의 발생이 작은 것이 유리하다. 또한 장기 단락은 스파터 발생을 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

따라서 단락의 횟수가 가장 적고 장기단락의 횟수가 가장 적은  $T_p 1.5\text{ms}$  일때가 가장 적절할 것으로 판단된다.

Fig. 3.8, Fig. 3.9, Fig. 3.10 은  $I_p$ ,  $T_p$  변화에 따른 전류, 전압 모니터링 파형이다.

Fig. 3.8은  $I_p$ ,  $T_p$ 를 변경하지 않은 용접기의 디폴트값으로 브레이징한 것으로서 피크구간과 베이스 전류구간 모두에서 단락이 심하게 발생하는 것을 알 수 있다.

$I_p$  340A로 변경한 Fig. 3.9에서는 피크구간에서 단락이 발생하지 않았고, 베이스 구간에서는 장기 단락이 발생한 것을 알 수 있다.

$I_p$  340A,  $T_p$  0.8 ms 로 변경한 Fig. 3.10 은 베이스 구간에서 약간의 순간단락이 발생하였지만 전체적으로 양호한 파형을 볼 수 있다.

위의 단락비, 피크구간에서의 단락횟수, 장기단락의 횟수 등을 고려하였을 때 단락이 최소로 발생하는 실리콘브론즈 와이어에 적합한 파형은  $I_p$  340A,  $T_p$  0.8 ms 조건의 파형이라고 판단된다.

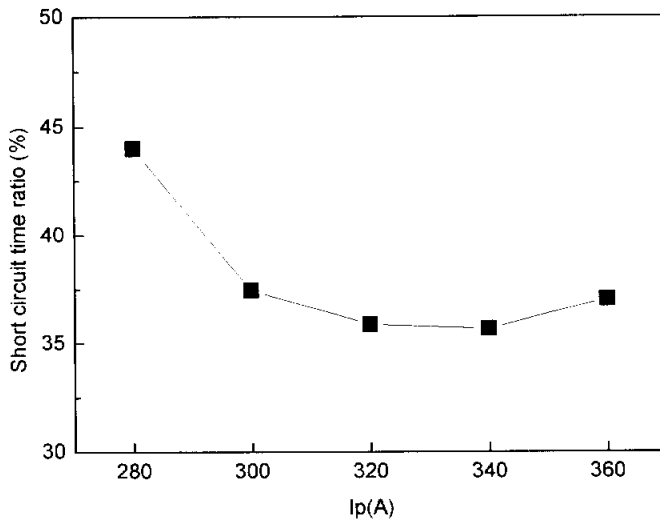


Fig. 3.4 Short circuit time ratio by Ip in pulse wave (Tp 0.8ms)

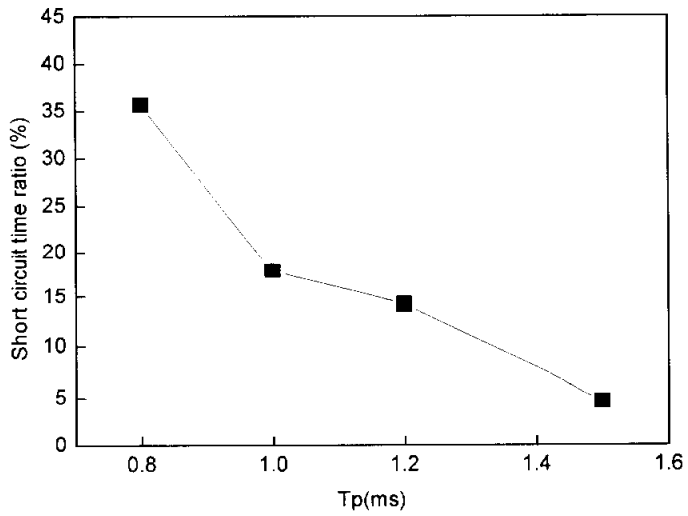


Fig. 3.5 Short circuit time ratio by Tp in pulse wave (Ip 340A)

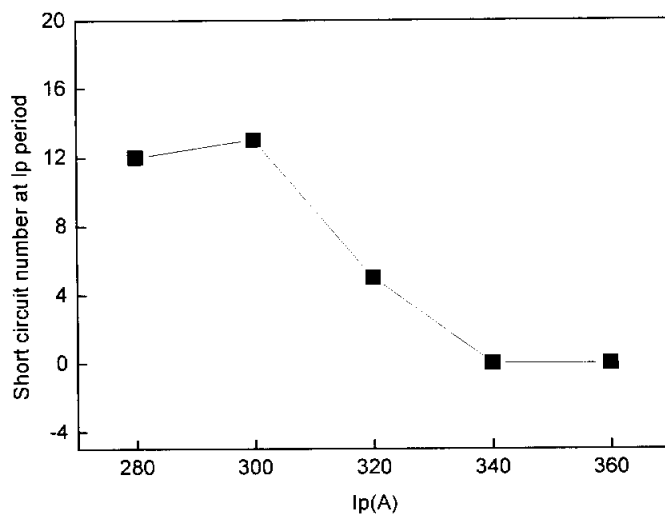


Fig. 3.6 Short circuit number by Ip at Ip period in pulse wave (Tp 0.8ms)

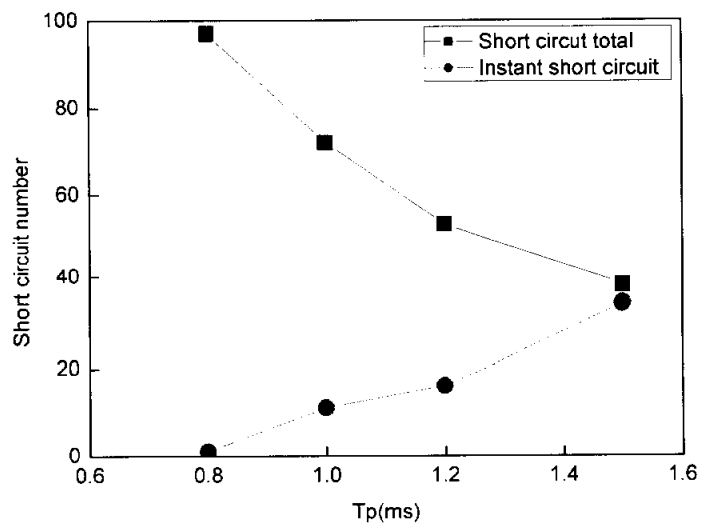


Fig. 3.7 Short circuit and instant short circuit number by Tp in pulse wave (Ip 340A)

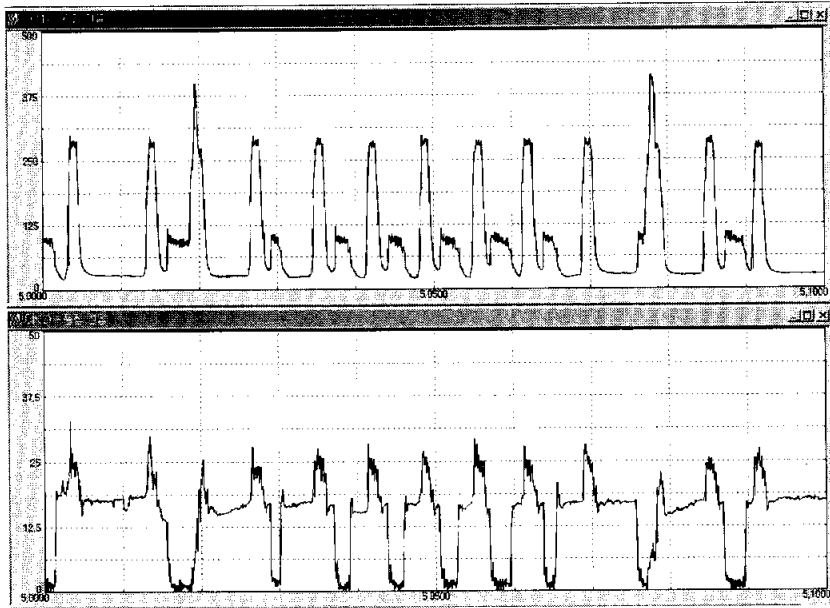


Fig. 3.8 Waveform at  $I_p$  280A,  $T_p$  0.8ms

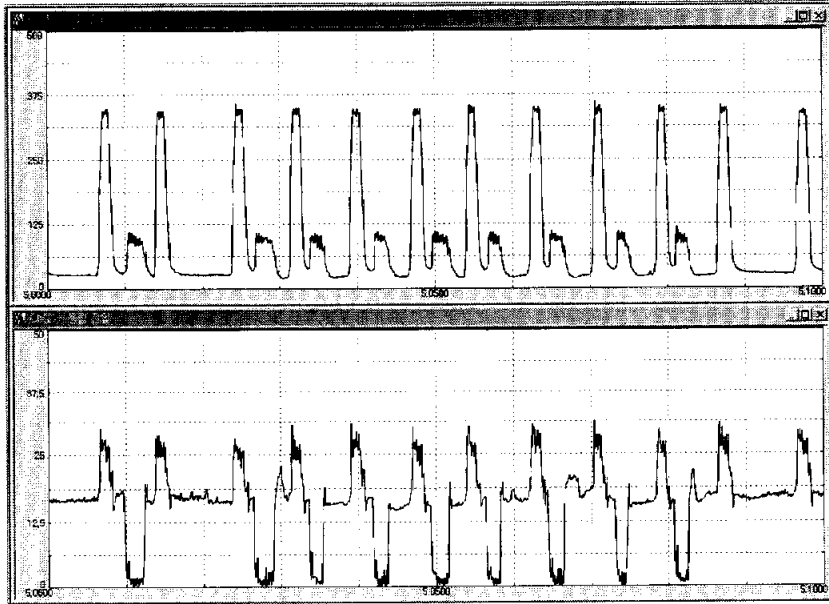


Fig. 3.9 Waveform at  $I_p$  340A,  $T_p$  0.8ms

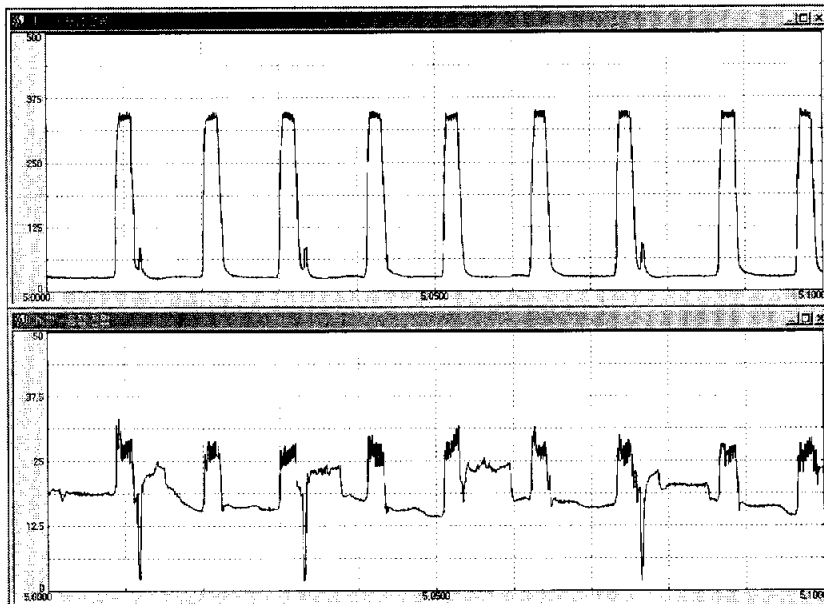


Fig. 3.10 Waveform at  $I_p$  340A,  $T_p$  1.5ms

(2)  $I_p$ ,  $T_p$  변화에 따른 비드외관

Fig. 3.11 은  $I_p$ ,  $T_p$  변화에 따른 비드외관 사진을 나타낸 것이다. 용접기 초기 설정값인  $I_p$  280A,  $T_p$  0.8ms 일 때 비드외관에서는 스패터가 많은 것을 관찰 할 수 있고, 피크전류와 피크시간을 조절한  $I_p$  340A,  $T_p$  0.8ms 일 때에는 스패터가 없는 양호한 비드외관을 관찰 할 수 있다. 위의 실험결과를 통해 DC 펄스파형에서 최적이라고 판단되는  $I_p$  340A,  $T_p$  0.8ms의 조건이 실제 브레이징의 비드 외관에서도 우수한 것으로 나타났다.

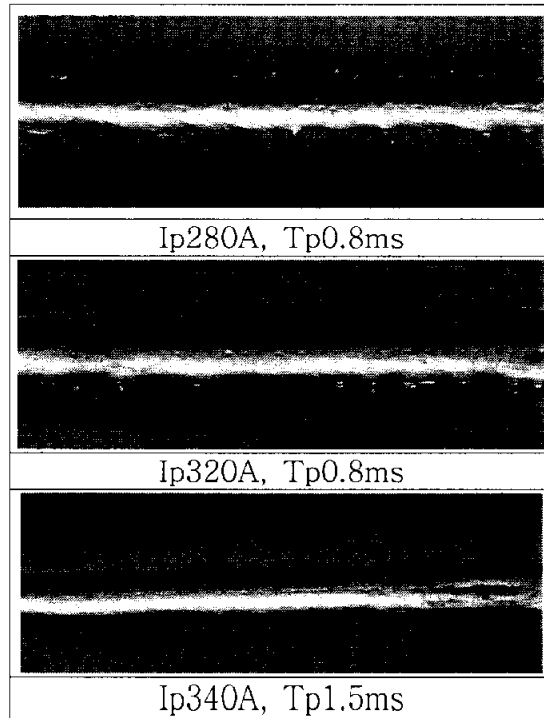


Fig. 3.11. DC pulse MIG brazing  
(Silicon bronze wire, SPCC)

### 3.4.3 AC 펄스 파형의 설정

Fig. 3.12는 실리콘브론즈 와이어에 적합하게 설정된 AC 펄스 파형과 비드외관을 나타낸 것이다. EP구간에서의 피크전류와 피크시간은 DC펄스파형의 최적조건인  $I_p$  340A,  $T_p$  0.8ms로 설정하였고, EN극성비를 적용하였기 때문에 EN 구간이 있는 것을 볼 수 있다. 전류 파형에서 단락의 발생이 없고 비드외관에서 스패터가 없는 양호한 브레이징부를 볼 수 있다.

Fig. 3.13은 Joseph 등이 연구한 일반 극성가변 전류파형과 비드외관을 나타낸 것이다. 실리콘브론즈 와이어를 사용하고 AC펄스 파형으로 브레이징을 하였으나 실리콘브론즈 와이어에 적합한 파형을 설정 하지 못하였다. 따라서 전류파형에서 단락이 심하게 발생하였고, 비드 외관사진에서 브레이징부 주위에 단락으로 인한 스패터가 있는 것을 볼 수 있다<sup>1)</sup>.

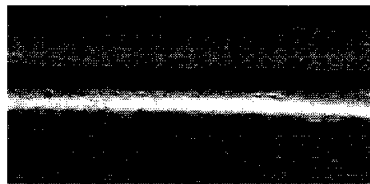
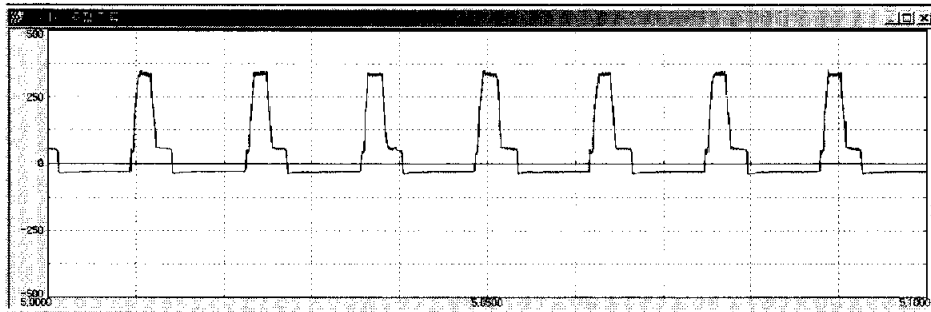


Fig. 3.12 After improvement of waveform in AC pulse MIG brazing

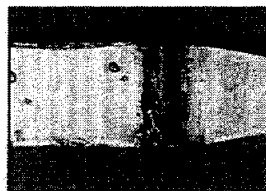
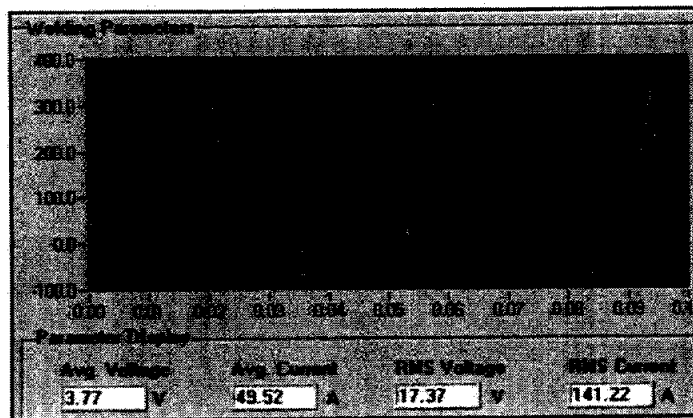


Fig. 3.13 Typical variable polarity MIG waveform in AC pulse MIG brazing<sup>1)</sup>

### 3.5 결론

실리콘브론즈 와이어에 적합한 파형을 설계하는 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주파수에 따른 용적의 크기 관계에서 주파수가 증가할수록 용적의 직경이 작아지는 것으로 나타났다.
- 2) 평균전류를 동일하게 유지 하였을 때  $I_p$ 와  $T_p$ 를 증가시키면 주파수가 감소하는 것을 알 수 있었다.
- 3)  $I_p$ 와  $T_p$ 에 변화에 따른 실험 결과 단락이 최소로 발생하는 실리콘브론즈 와이어에 적합한 파형은  $I_p$  340A,  $T_p$  0.8 ms 조건의 파형이라고 판단된다.
- 4)  $I_p$ ,  $T_p$  변화에 따른 비드외관 관찰에서  $I_p$  280A,  $T_p$  0.8 ms조건의 외관은 많은 스페터를 관찰할 수 있었지만,  $I_p$  340A,  $T_p$  1.5 ms의 조건에서는 스페터가 없는 양호한 비드외관을 관찰 할 수 있었다.
- 5) 실리콘브론즈 와이어에 적합한 AC펄스파형으로 브레이징실험 결과 전류파형과 비드외관에서 단락의 발생이 없었고 양호한 브레이징부를 관찰 할 수 있었다.
- 6) Andy Joseph등의 연구에서는 실리콘브론즈 와이어에 적합한 파형을 설정하지 않아 스페터가 많이 발생 하였으나, 본 연구에서는 적절한 파형의 설정으로 스페터의 발생이 없는 양호한 브레이징부를 얻을 수 있었다.

## 4장 DC 펄스의 와이어 종류에 따른 비교

### 4.1 서언

DC 펄스 MIG 전원에 스틸 와이어와 실리콘브론즈 와이어를 사용하여 용접과 브레이징의 품질을 비교하기 위하여 실험을 수행하였다.

아크모니터링 시스템을 사용하여 획득한 전류와 전압을 분석하여 브레이징중의 입열량을 비교하였고, 용입부 단면 관찰 실험을 통해 용락과 브레이징성을 검토하였다.

## 4.2 실험 방법

DC 펄스 MIG 전원에 의한 와이어 종류에 따른 비교평가를 하기 위해 일반냉연강관과 전기아연도금강관(1.2t)을 사용하여 브레이징 속도 80cm/min 로 일정하게 실험을 하였고, 이때 스틸 와이어와 실리콘브론즈 와이어의 송급 속도는 동일하게 58mm/sec로 유지하여 용접과 브레이징 실험을 실시하였다. 용접중의 평균전류와 평균전압으로 입열량을 계산하였고 용입부 단면을 각각 비교 하였다.

각 와이어에 해당하는 브레이징시의 전류와 전압을 Table 4.1에 나타내었다.

Table 4.1 Current and voltage by kind of wire

Wire	Current (A)	Voltage (V)
Steel wire	220	24
CuSi wire	142	18.3

### 4.3 실험 결과 및 고찰

#### 4.3.1 와이어 종류에 따른 입열량 비교

Table 4.2는 브레이징 속도 80cm/min, 와이어 송급 속도 58mm/sec로 동일하게 유지하였을 때 와이어 종류에 따른 입열량을 나타낸 것으로서 실리콘브론즈 와이어의 입열량이 스틸 와이어의 입열량보다 50% 정도 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 4.1, Fig. 4.2는 와이어 변화에 따른 브레이징시의 전류, 전압모니터링 파형이다. Fig. 4.1의 스틸 와이어의 파형이 Fig. 4.2의 CuSi와이어의 파형에서 보다 피크전류가 높고, 펄스 주기가 짧은 것을 볼 수 있다. 따라서 스틸 와이어의 경우가 CuSi와이어보다 평균전류가 큰 것을 알 수 있다.

Table 4.2 Heat input by kind of wire  
(same wire feed speed, SPCC)

Wire	Heat input (J/cm)
Steel wire	3960
CuSi wire	1948

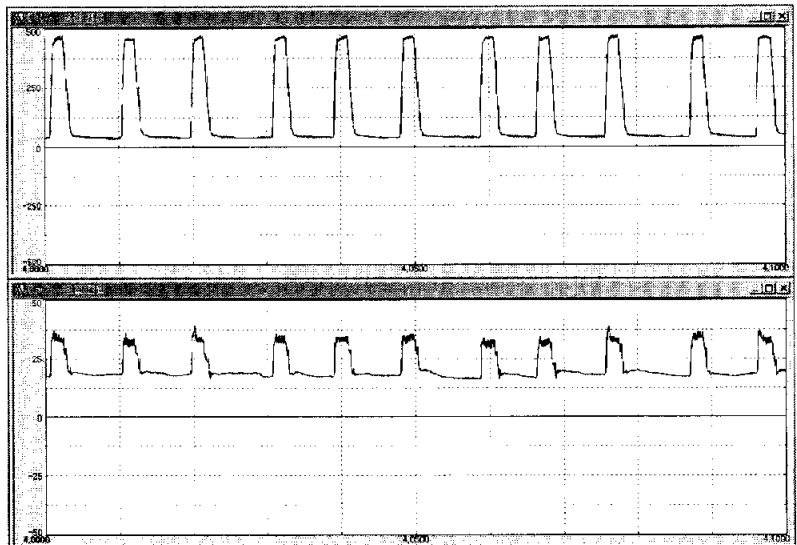


Fig. 4.1 Waveform by Steel wire  
(Wire feed rate: 58mm/sec)

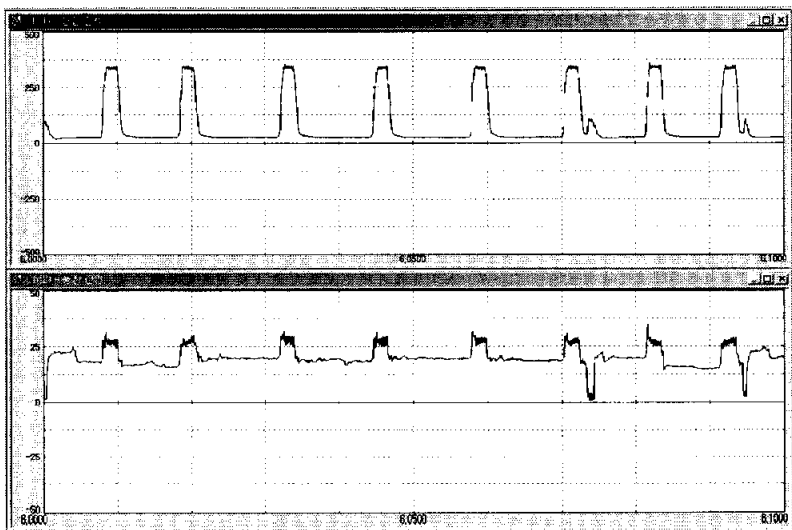


Fig. 4.2 Waveform by Cusi wire  
(Wire feed rate: 58mm/sec)

#### 4.3.2 와이어 종류에 따른 용입부 단면 비교

Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 비드 브레이징과 겹치기이음 브레이징부로서 브레이징 속도 80cm/min, 와이어 송급 속도 58mm/sec일때의 스틸 와이어와 CuSi 와이어에 대한 브레이징성을 평가한 것이다. 스틸 와이어의 경우에는 비드 브레이징과 겹치기이음 브레이징 모두에서 용락이 발생하였지만 CuSi 와이어의 경우에는 비드 브레이징, 겹치기이음 브레이징 모두 양호한 브레이징부를 볼 수 있다. 이는 동일 용착량에 비해 스틸 와이어의 경우가 입열이 과대한 것으로 판단된다.

Fig. 4.5는 전기아연도금 강판에서 동일 와이어 송급속도 일때의 와이어 변화에 따른 실험으로서 비드외관을 관찰한 것이다. 스틸 와이어의 경우는 높은 입열로 인하여 좋지 않은 비드 외관과 아연도금층의 손상폭이 넓은 것을 볼 수 있다. 반면 CuSi 와이어의 경우에는 저입열로 인하여 양호한 비드 외관과 아연도금층의 손상폭이 스틸 와이어보다 훨씬 좁은 것을 볼 수 있다.

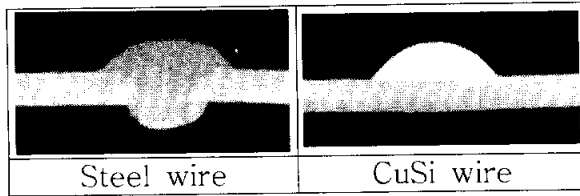


Fig. 4.3 Bead cross-section by kind of wire (same wire feed speed, SPCC)

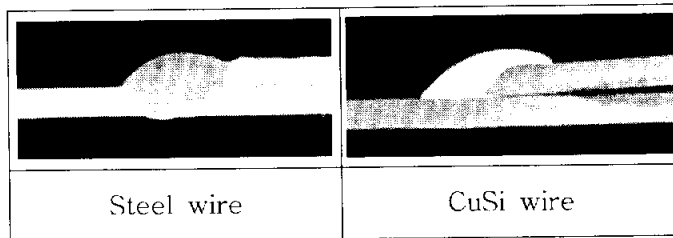


Fig. 4.4 Bead cross-section by kind of wire in Lap joint (same wire feed speed, SPCC)

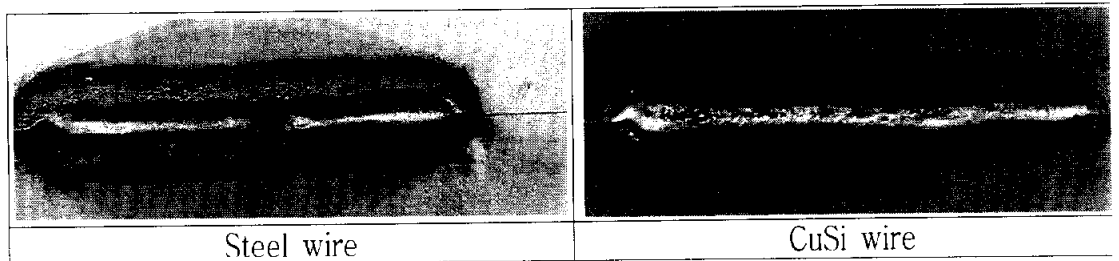


Fig. 4.5 Bead shape by kind of wire in Lap joint (same wire feed speed, EG)

#### 4.4 결론

DC pulse MIG 전원에 의한 스틸 와이어와 실리콘브론즈 와이어의 비교 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 와이어 송급 속도를 동일하게 유지 하였을때 실리콘브론즈 와이어의 입열량이 스틸 와이어에 비해 50%정도로 작게 나타났다.
- 2) 비드외관 및 용입부 단면에서 스틸 와이어를 사용한 경우는 입열량이 커 용락이 발생하였지만 실리콘브론즈 와이어의 경우에는 모재가 용융 되지 않은 양호한 브레이징부를 볼 수가 있었다.
- 3) 전기 아연도금 강판에서 스틸 와이어를 사용한 경우는 아연도금층의 손상정도가 크게 나타났지만 실리콘브론즈 와이어의 경우에는 작게 나타났다.

## 5장 극성가변 AC 펄스의 EN극성비효과

### 5.1 서언

입열량을 제어 할 수 있는 극성가변 AC Pulse MIG 용접기에 실리콘브론즈 와이어를 사용하여 아크 브레이징을 실시하였다. 모재의 용융, 입열량, 변형 등을 최소화 하기 위하여 EN극성비를 적용하여 실험을 수행하였다.

EN극성비 변화에 따른 평균전류와 평균전압을 계측하여 입열량을 계산하였고, 아연도금강판의 비드외관을 관찰하여 아연도금층의 손상정도를 파악하였다. 또한 용입부 단면과 브레이징 직후의 최고 온도, 모재의 변형량과 인장테스트를 실시하였다.

## 5.2 실험방법

브레이징 속도 80cm/min, 와이어 송급 속도 58mm/sec의 조건으로 브레이징 실험을 수행하였고, EN극성비 변화에 따른 전류와 전압을 아크모니터링으로 계측하여 실효전류와 입열량을 계산하였다.

브레이징부 품질 평가와 아연도금층의 손상 정도는 비드외관과 용입부 단면을 통해 관찰하였다.

온도실험은 모재 뒷면에 열전대를 부착하여 EN극성비 변화에 따른 최고 온도(K)를 측정하였다. 사용한 열전대는 CA 열전대이고 Fig. 5.1에 온도 모니터링 시스템의 개략도를 나타내었다. Fig. 5.2는 열전대 부착 위치를 나타낸 것으로서 브레이징부 뒷면에 열전대 3개를 브레이징 시작점에서부터 10mm, 50mm, 50mm의 위치에 각각 부착하였다.

변형실험은 브레이징이 끝난 직후 고정된 클램프를 제거하여 모재의 변형 정도를 측정 하였다. Fig. 5.3은 EN극성비 변화에 따른 변형실험의 시험편 규격을 나타낸 것으로 길이 200mm, 폭30mm, 두께 1.2mm의 냉연강판을 사용했으며, 브레이징부 길이를 120mm로 하였다. Fig. 5.4는 변형량 계측 위치를 나타낸 것으로서 수평선에서부터 모재의 휘어진 부분의 곡률반경을 측정하였다.

브레이징부의 강도를 알아보기 위하여 랩 조인트이음을 실시한 다음 인장시험을 하였다. 순수 인장만을 받게 하기 위해 인장시 양단에 보강재로 고정하여 인장을 실시하였다.

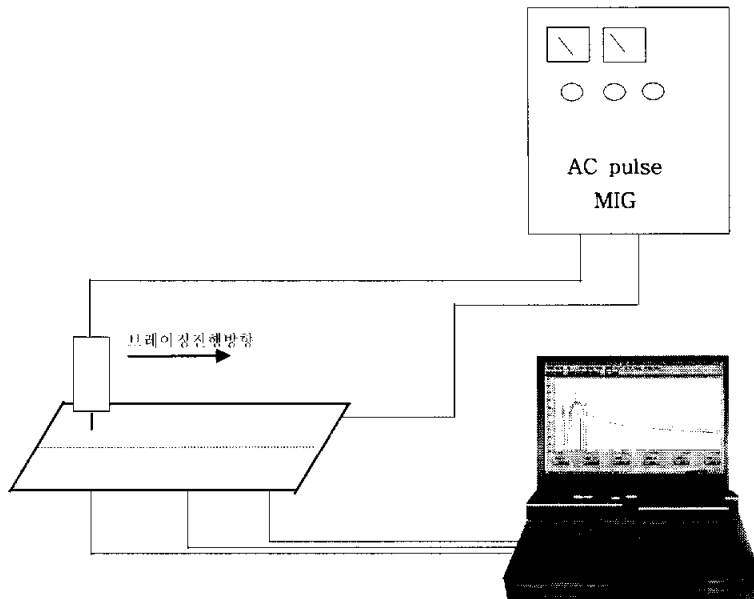


Fig. 5.1 Configuration of Temperature monitoring

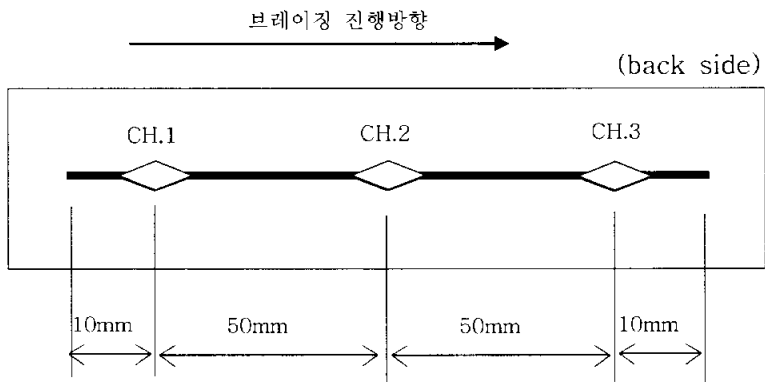


Fig. 5.2 Attach position of thermocouples for measurement of brazing temperature

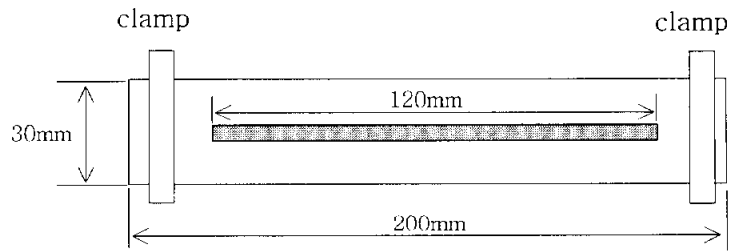


Fig. 5.3 Configuration of specimen for measurement of brazing deformation

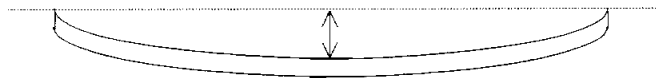


Fig. 5.4 Measure of deflection deformation

## 5.3 실험결과 및 고찰

### 5.3.1 EN극성비에 따른 입열량 비교

Fig. 5.5와 Fig. 5.6은 EN극성비 변화에 따른 전류와 전압의 모니터링 파형으로서 EP구간과 EN구간이 주기적으로 반복되는 AC 파형을 볼 수가 있으며 EN극성비 40%가 EN극성비 20%보다 EN에 해당하는 구간의 면적이 크다.

Fig.5.7과 Fig. 5.8은 브레이징 속도 80cm/min, 와이어 송급 속도 58mm/sec에서의 EN극성비 증가에 따른 실효전류와 입열량을 나타낸 것이다.

극성비가 증가 할수록 실효전류가 작아지고 따라서 입열량이 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 극성비가 증가할수록 와이어의 용융속도가 빨라지기 때문에 동일 송급 속도일때 실효전류가 작아지는 것이라고 판단된다.

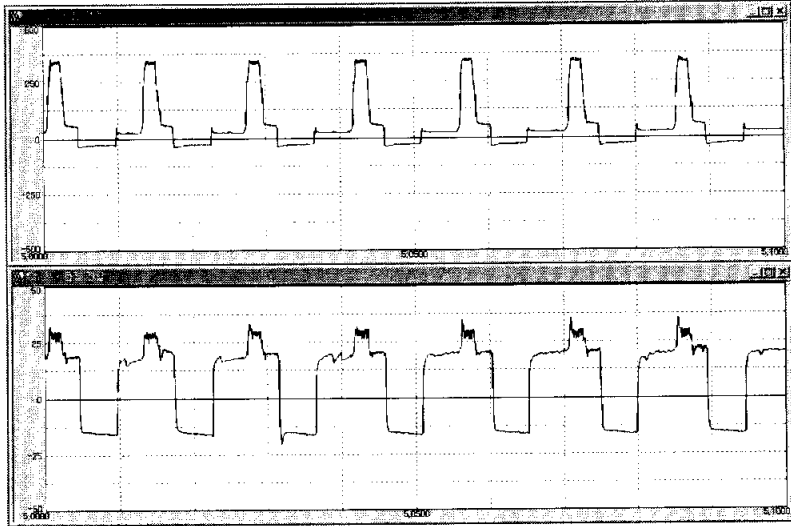


Fig. 5.5 Waveform at EN-ratio 20%  
(setting current 60A, AC pulse MIG)

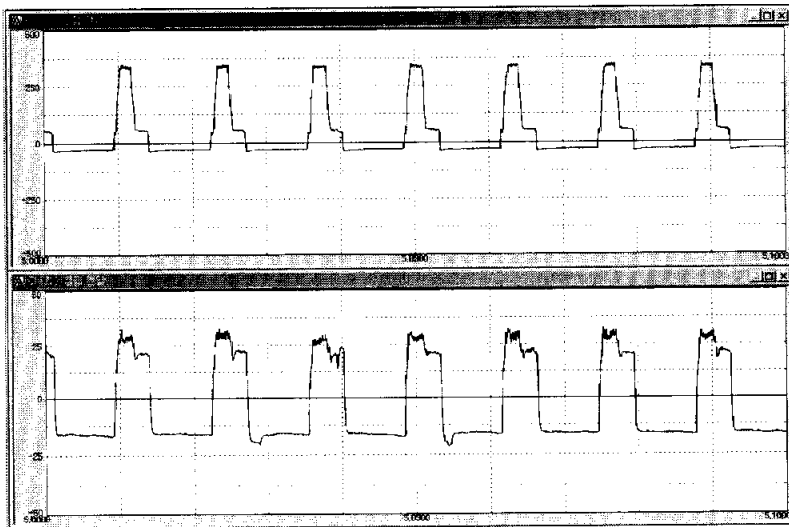


Fig. 5.6 Waveform at EN-ratio 40%  
(setting current 60A, AC pulse MIG)

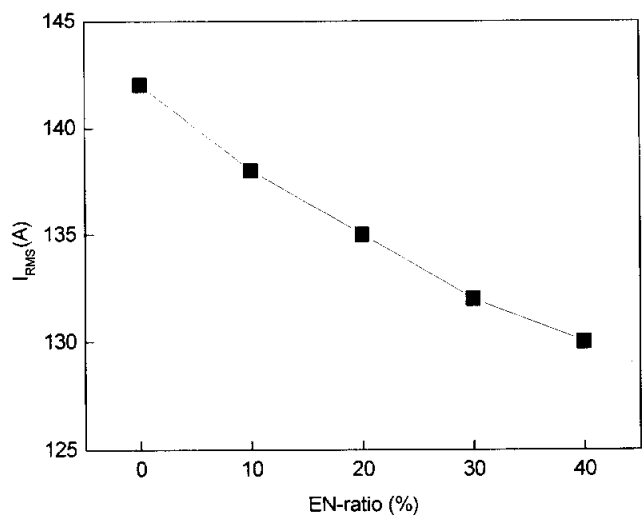


Fig. 5.7  $I_{RMS}$  by EN-ratio  
(same wire feed speed, AC pulse MIG)

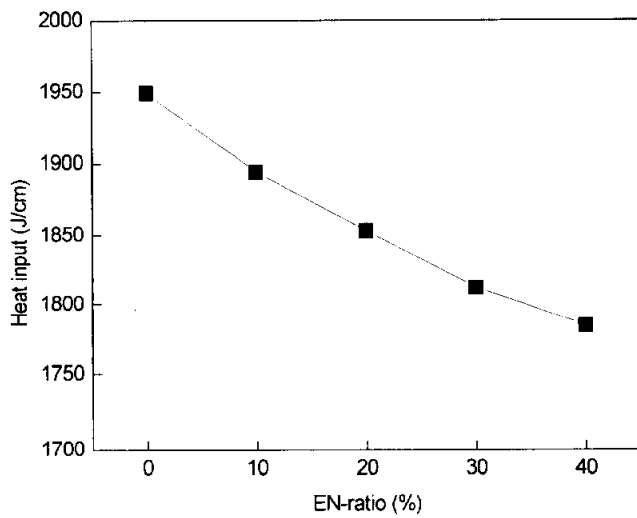


Fig. 5.8 Heat input by EN-ratio  
(same wire feed speed, AC pulse MIG)

### 5.3.2 EN극성비에 따른 비드외관 및 용입부 단면

Fig. 5.9는 아연도금강판의 겹치기이음 브레이징으로서 EN극성비변화에 따른 비드외관 사진을 나타낸 것이다. EN극성비40%가 EN극성비0%보다 입열량이 작아 아연도금층 손상의 폭이 좁은 것을 알 수 있다. 따라서 아연도금강판에 EN극성비를 적용하게 되면 아연도금층의 손상을 최소화하여 브레이징을 할 수 있을 것 이라고 판단된다.

Fig. 5.10은 EN극성비 변화에 따른 비드 브레이징 실험의 용입부 단면을 나타낸 것이다. EN극성비 40%가 EN극성비 0%보다 용적의 온도가 낮아 비드폭이 좁고 비드 높이가 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 5.11과 Fig. 5.12는 냉연강판과 아연도금강판의 겹치기이음 브레이징을 한 것으로서 모두 양호한 브레이징부를 관찰 할 수 있고, EN극성비 40%가 EN극성비 0%보다 입열이 작아 상판모재의 용융이 적고 비드가 다소 볼록한 것으로 나타났다.

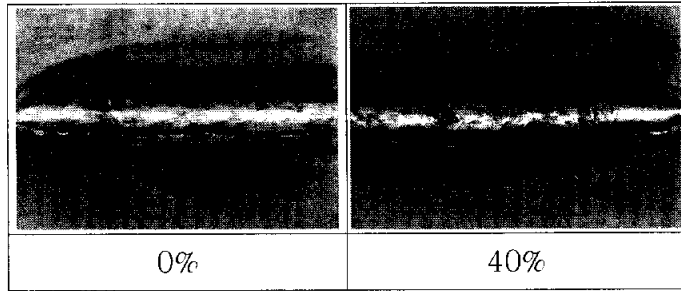


Fig. 5.9 Bead shape by EN-ratio in Lap joint (60A, AC pulse MIG, EG)

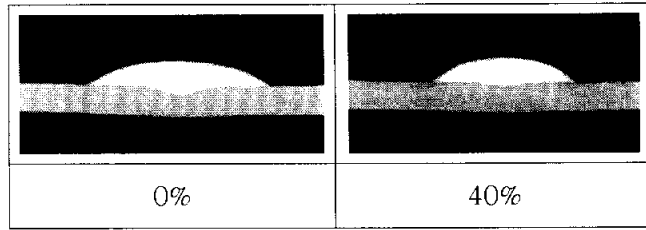


Fig. 5.10 Shape of bead cross-section by EN-ratio (AC pulse MIG, SPCC)

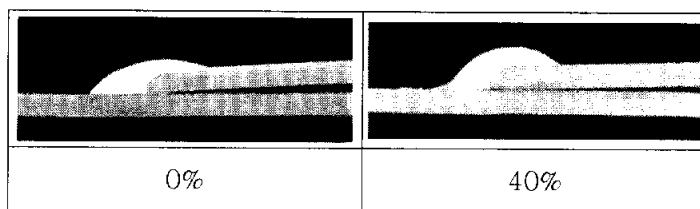


Fig. 5.11 Shape of bead cross-section by EN-ratio in Lap joint (AC pulse MIG, SPCC)

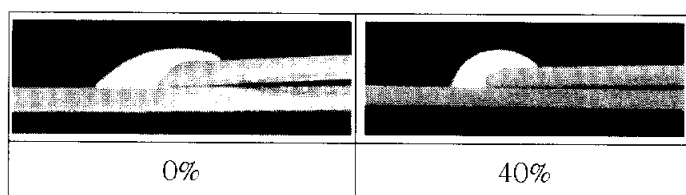


Fig. 5.12 Shape of bead cross-section by EN-ratio in Lap joint (AC pulse MIG, EG)

### 5.3.3 EN극성비에 따른 온도실험

Fig. 5.13과 Fig. 5.14는 EN극성비 변화에 따른 온도 모니터링 곡선을 나타낸것으로서 브레이징 중에는 전압노이즈 때문에 계측을 하지 못하여 브레이징이 끝난 직후의 데이터를 획득하였다. 브레이징부의 가장 마지막에 위치한 CH.3가 가장 높은 온도를 나타내었고 브레이징부의 중간에 위치한 CH.2의 온도가 가장 늦게 저하하는 것을 나타내고 있다.

Table 5.1은 EN극성비0%와 EN극성비40%의 브레이징 직후의 최고온도를 나타낸 것이고 Fig. 5.15는 최고온도를 그래프로 나타낸 것이다. EN극성비 40%가 최고 111K 정도 낮은 온도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 EN극성비40%가 EN극성비0%보다 입열량이 낮기 때문이라고 판단된다.

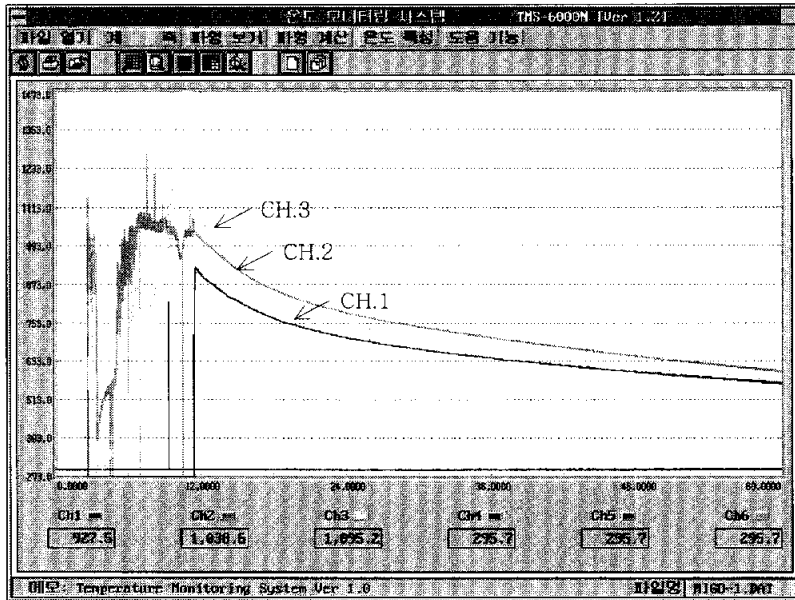


Fig. 5.13 Temperature curve by EN-ratio 0%

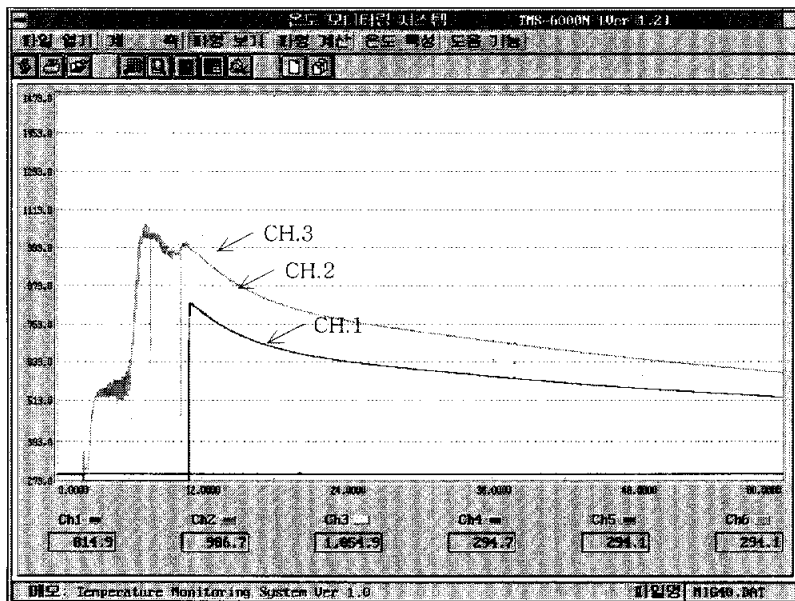


Fig. 5.14 Temperature curve by EN-ratio 40%

Table 5.1 Peak temperature by EN-ratio (K)

	CH.1	CH.2	CH.3
EN극성비0%	930.4	1042	1099.8
EN극성비40%	819.4	990.2	1058.3

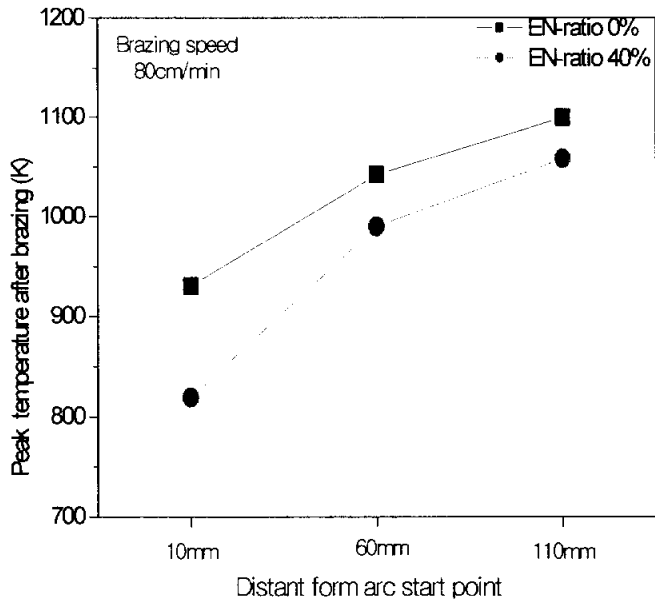


Fig. 5.15 Peak temperature after brazing by EN-ratio  
(Wire feed speed: 58mm/sec, SPCC)

#### 5.3.4 EN극성비 변화에 따른 변형 실험

Fig. 5.16과 Fig. 5.17은 브레이징이 끝난 직후에 클램프를 제거하여 변형된 시험편의 외관을 나타낸 사진이다. 사진에서 Fig. 5.17의 EN극성비40%가 Fig. 5.16의 EN극성비0%보다 변형량이 작은 것을 알 수 있다. 이것은 앞선 실험의 결과에서 나타난 EN극성비40%의 모재 최고온도가 낮기 때문에 변형이 작게 나타난 것이라고 생각된다.

Table 5.2 는 클램프를 제거한 후 변형된 시험편의 곡률반경을 나타낸 것이다. EN극성비40%의 곡률반경이 EN극성비0%보다 27%정도 감소한 것을 알 수 있다.

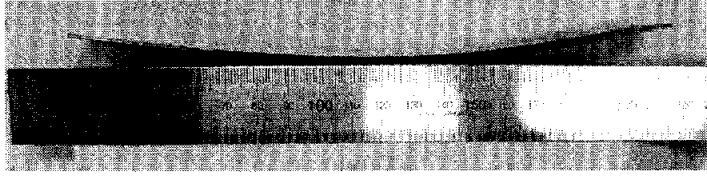


Fig. 5.16 Base metal after brazing  
by EN-raio 0%

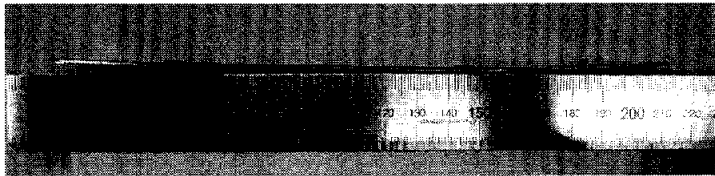


Fig. 5.17 Base metal after brazing  
by EN-raio 40%

Table 5.2 Deflection deformation by EN-ratio

EN-ratio(%)	0	40
Deflection(mm)	13	3.5

### 5.3.5 EN극성비 변화에 따른 인장 실험

Fig. 5.18과 Fig. 5.19는 EN극성비 변화에 따른 랩조인트 브레이징부의 인장 실험후 사진을 나타낸 것이다. 순수 인장만을 받게 하기 위해 모재의 양단에 보강재를 부착하여 인장을 실시하였다.

EN극성비0%와 EN극성비40% 모두 모재에 파단된 것을 볼 수 있어 브레이징부 강도가 우수하다고 판단된다.

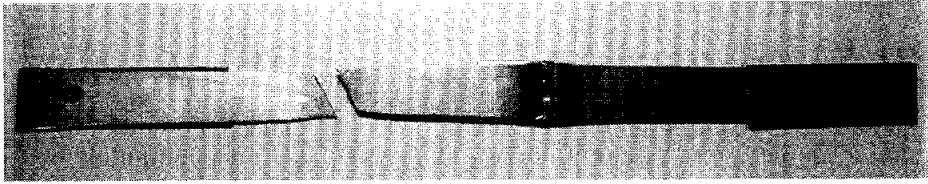


Fig. 5.18 Result of tensile test by EN-raio 0%

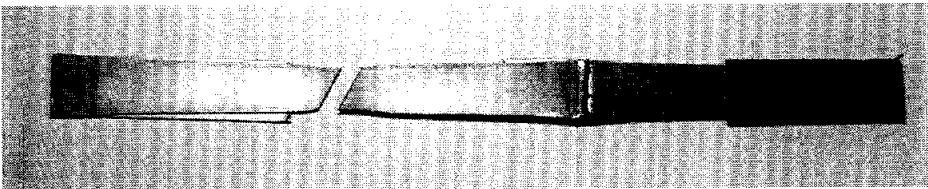


Fig. 5.19 Result of tensile test by EN-raio 40%

## 5.4 결론

EN극성비를 적용한 아크브레이징 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) EN극성비가 증가 할수록 실효전류가 감소하여 입열량이 감소하였다.
- 2) 비드외관 및 용입부 단면에서 EN극성비40%가 EN극성비0%보다 아연도금층의 손상이 작게 나타났고 비드높이가 블록하게 나타났다. 겹치기 이음 브레이징부의 용입 단면관찰에서는 냉연강판과 아연도금강판 모두 EN극성비40%가 상판소재의 용융이 적고 비드가 다소 블록한 것을 알 수 있었다.
- 3) 브레이징부의 뒷면에 열전대를 부착하여 온도를 측정한 결과 EN극성비40%의 온도가 EN극성비0%보다 최고 111K 낮게 나타났다.
- 4) 브레이징 직후에 클램프를 제거하여 변형을 관찰한 결과 EN극성비40%가 EN극성비0%보다 27% 정도 적게 변형을 한 것으로 나타났다.
- 5) 인장시험 결과 EN극성비40%, EN극성비0% 모두 모재에서 파단되어 브레이징부의 강도가 높은 것으로 나타났다.

## 6장 결론

극성가변 AC 펄스 MIG 용접기를 이용한 아크 브레이징 실험에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 극성가변 AC 펄스 MIG 용접기에 실리콘브론즈 와이어를 사용하여 스팬더가 적고 비드외관이 미려한 아크브레이징 조건을 확립할 수 있었다.
- 2) 와이어 송급속도를 동일하게 유지 하였을때 실리콘브론즈 와이어의 입열량이 스틸 와이어에 비해 50%정도로 작아서 용락이 없는 건전한 이음부를 얻을 수 있다.
- 3) 동일 와이어 송급속도에서 EN 극성비가 증가 할수록 실효전류가 작게 되어 입열량이 감소하였다.
- 4) SPCC박판 및 아연도금강판에 대하여 극성가변 펄스 MIG 브레이징을 적용한 결과 EN극성비 40%에서도 안정된 비드가 형성되면서 저입열량으로 인해 용락의 우려가 적고 아연도금층의 손상이 적게 나타났다.
- 5) EN극성비가 증가함에 따라 모재의 최고온도와 변형이 작게 되는 것을 알 수 있었다.
- 6) 실리콘브론즈 와이어를 쓰고 EN극성비를 바꾸면서 AC 펄스 MIG 브레이징으로 제작한 박강판 겹치기 이음부에 대한 인장시험 결과 모두 모재에서 파단되어 브레이징부의 강도가 양호한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. A. Joseph, C. Webb : Variable Polarity Improves Weld Brazing of Galvanized Sheet, Welding Journal, October 2001, 36-40
2. 란카스타 : 溶接아크의物理, 溶接學會, 溶接아크物理研究委員會, 1990, 129-156(in Japanese)
3. T. Ueyama, H. Tong, S. Harada : Improve Sheet Metal Welding Quality & Productivity with AC Pulsed Welding System, IIW Doc. XII-1629-00
4. S. L. Lim : Design Concept and Output Characteristic of AC pulse Waveform for MIG Welding of Al sheet, Master's Thesis of Pukyong National University, 2002.8 (in Korean)
5. T. Mita : New Current Waveform Control for Aluminum Welding, Light Metals Welding, Vol.37 No.5, 1999 (in Japanese)
6. 대한용접학회편 : 용접-접합편람, 대한용접학회, 1998 (in Korean)
7. 대한용접학회 : 용접-접합 용어사전, 2001(in Korean)
8. D. White, J. Jones : Process Modeling With Neural Networks for Pulsed GMAW Braze Welds, The Journal of the Minerals Metals & Materials Society, Vol.49 No.9, 1997

9. B. Godec, V. Grdun : Braze Welding of Galvanised Steel Pipes, Welding in the World, Vol.45, 2001, 49-56
10. Hackl : MIG Brazing of Galvanised Light-Gauge Sheets, Welding in the World, Vol.45, 2001, 57-64
11. S. L. Lim, H. S. Kong, S. M. Cho : Design Concept and Output Characteristic of AC pulse Waveform for MIG Welding of Al sheet, Proceedings of the 2002 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society , 2002 (in Korean)
12. H. S. Kong, S. L. Lim, S. M. Cho : The Effect of EN Ratio in AC Pulse Welding Affected Burn Through on MIG Welding for Sheet Al Metal, Proceedings of the 2001 Annual Autumn Meeting of Korean Welding Society, Vol.38, 2001, 15-18 (in Korean)
13. B. Altshuller : A Guide to GMA Welding of Aluminum, Welding Journal, June-1998, 49-55 (in Japanese)
14. 佐英藤市 : アルミニウム合金用溶込み制御パルスミグ溶接機 センサー NEW AL350, 溶接技術 Gide, Vol. 38, 1998 (in Japanese)

## 감사의 글

처음 연구실 문을 두드린 후 햇수로 5년이란 시간동안 연구실에서 생활했습니다. 집보다는 학교에서 있는 시간이 훨씬 많았고, 그 시간들 속에는 언제나 교수님과 선 후배님들과 같이 있었기에 힘들지만 보람되고 알찬 시간이었습니다.

학부 시절부터 대학원까지 늘 곁에서 지도와 질책을 해주신 조상명 교수님께 머리 숙여 감사를 드립니다.

논문 심사까지 많은 조언과 격려를 해주신 김우열 교수님, 박흥일 교수님, 김성규 교수님, 이병우 교수님, 방국수 교수님, 서원찬 교수님, 이길근 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

연구실 생활을 하면서 많은 도움과 위안이 되었던 졸업동기인 호재와 훈성이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 저희에게 모범이 되어 주시는 오동수 선배님 늘 충고를 해주시는 이광원, 서상균, 김윤수 선배님들에게 감사를 드립니다. 먼저 사회로 진출해 조언해 주신 장경복님, 임성룡님, 최규원님, 하승엽님, 김송미님, 박대규님, 방선희님, 김나영님, 정은경님, 박영신님과 일년 동안 한국전기 연구원에서 밤을 새워 연구를 같이 했던 김태진님 에게도 감사를 드립니다. 항상 옆에서 누나 같이 챙겨주시는 김선희님과 연구와 공부를 같이 했던 대학원생들인 박찬우님, 김진우님, 탁정수님, 고미혜님 함께 실험을 해준 김기정님 예비 대학원생들인 조성우님, 유광선님, 옆에서 항상 도움을 준 박덕조님, 늘 열심이 선배들을 도와주는 조진안님, 박재선님, 허상준님, 김영주님, 김한얼님, 김현준님, 문창민님 에게 감사를 드립니다.

그리고 부족한 저의 옆에서 힘이 되어주었던 박영희님, 이준호선배님, 정욱, 두영, 재용, 태웅, 영찬, 정호, 경준, 창무, 승희, 군성, 정두, 동준, 경화, 지혜, 진화, 지영님 께도 감사를 드립니다.

끝으로 오늘까지 저를 있게 해준 사랑하는 부모님과 동생에게 깊은 감사를 드립니다.