

공학석사 학위논문

GMAW 작업성 및 용접금속  
기계적 성질에 미치는 차폐가스 및  
용접와이어 성분의 영향

2007년 2월

부경대학교 산업대학원

소재프로세스공학과

이 재 형

공학석사 학위논문

GMAW 작업성 및 용접금속 기계적  
성질에 미치는 차폐가스 및  
용접와이어 성분의 영향

지도교수 방 국 수

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007 년 2 월

부경대학교 산업대학원

소재프로세스 공학과

이 재 형

이 논문을 이 재 형의 공학석사  
학위논문으로 인준함

2007 년 2월



주 심      공학박사      김 우 열      (인)

위 원      공학박사      방 국 수      (인)

위 원      공학박사      박 홍 일      (인)

# 목 차

## Abstract

제 1 장 서 론 -----	1
1.1 연구배경 -----	1
제 2 장 이론적 배경 -----	3
2.1 GMAW 용접 -----	3
제 3 장 실험 방법 -----	8
3.1 차폐가스의 영향에 대한 실험 -----	8
3.2 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 비교시험 -----	10
3.3 와이어의 비저항 차이에 따른 비교시험 -----	13
제 4 장 실험 결과 및 고찰 -----	15
4.1 차폐가스에 따른 용접특성 -----	15
4.2 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 용접특성 -----	21
4.3 와이어의 비저항 차이에 따른 용접특성 -----	25
제 5 장 결 론 -----	28
참고 문헌 -----	29
감사의 글 -----	31

**The study on the effects of shielding gas and wire composition on the workability and mechanical properties of weld metal in GMAW**

**Jae-Hyung Lee**

**Department of materials processing engineering,  
Graduate school, Pukyong national university**

**Abstract**

The factors affecting workability and mechanical properties of weld metal in GMAW such as shielding gas, surface active element(S), specific resistance of wire were investigated. These factors were varied independently to get different welding characteristics. By increase of oxygen content in weld metal, toughness of weld metal was decreased. By increase of surface active element(S), surface tension of weld metal decreased. And by different surface treatment of weld wire resulted in different specific resistance and thus showed different deposition rate.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

**GMAW**(GAS METAL ARC WELDING)용접은 소모성 전극을 사용하며 모재와 전극이 전기적 방전에 의해 아크를 발생시키고, 발생된 고온의 아크열을 이용하여 모재와 투입되는 용가재를 녹여서 용접하는 용접기술이다. 또한 GMAW 용접은 와이어가 자동으로 공급되고 대기와의 차폐를 목적으로 공급되는 가스의 종류에 따라 MAG용접(METAL ACTIVE GAS,활성가스로  $\text{CO}_2$  또는  $\text{Ar}+\text{CO}_2$  혼합가스 사용) 또는 MIG용접(METAL INERT GAS,불활성가스로 He 또는 Ar가스 사용)으로 구분되기도 한다.

이러한 GMAW용접은 용가재가 자동으로 공급되므로 자동화가 용이해 대부분 반자동 용접 및 로봇을 이용한 자동용접이 이루어지고 있으며 그에 따라 용접부의 품질 역시 공급되는 와이어의 특성이나 차폐가스등에 의해 상당히 좌우되는 용접방법이다.

그러므로 공급되는 와이어의 및 차폐가스가 용접에 미치는 특성에 대한 관계가 파악된다면 GMAW용접방식으로 작업을 수행함에 있어 보다 근원적인 이해를 바탕으로 적용이 될 수 있을 것이다.

그러나 이러한 GMAW용접에 있어 특히 용가재에 플럭스가 함유되어 있지 않은 솔리드형태의 와이어는 플럭스가 작용하는 아크안정 및 합금원소첨가의 시험을 하기 위해 합금설계후 신선을 위한 원재료(WIRE ROD)를 제조하는것이 상당히 제한적일 수 밖에 없었다.

그러나 본 연구에서는 여러업체에서 생산되는 STS 및 연강용 WIRE ROD를 수급하여 그 각각의 화학성분 차이에 의한 고온에서의 물리적특성의 차이에 따른 최종용접시의 특성을 비교하고자 하였다.

더불어, 차폐가스에 따라서도 시험을 진행하여 이에 대한 물리적특성과 용접특성을 비교하고자 시도하였다.

그러므로 본 연구에서는 GMAW 용접시 용접변수로 작용될 수 있는 용

접와이어의 화학성분과 와이어가 가지는 저항 및 차폐가스의 조성의 차이에 따른 연강 및 스테인리스강 용접특성과 고온에서의 물리적 성질의 관계를 파악하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 여러 가지 조성의 차폐가스와 국내외 여러업체에서 생산되는 연강 및 고장력강용 WIRE ROD(KS YGW12)를 수급하여 아크모니터링 시스템등을 이용하여 평가를 실시하였다.



## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 GMAW 용접

#### 2.1.1 원리

가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding)은 송급되는 와이어가 구리전극을 통과하여 모재와 사이에 발생한 아크로 용가재와 모재를 용융시켜 접합하는 방법이다. 보호 가스에 따라 활성가스( $\text{CO}_2$  가스 또는  $\text{CO}_2+\text{Ar}$ 혼합가스)를 사용하는 MAG용접(METAL ACTIVE GAS) 또는 불활성가스(AR 및 He가스)를 사용하는 MIG용접(METAL INERT GAS)로 나누어지기도 한다.

GMAW용접은 와이어가 자동으로 송급되므로 자동화가 용이하며, 특히 솔리드와이어는 용접후 용접비드표면에 슬래그가 생성되지 않으므로 생산성을 높일 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 GMAW용접의 경우 소모성 전극이 모재와 일정한 간격을 유지하여 아크를 발생시키고 용융금속의 보호를 위해서는 차폐가스의 공급이 필요하다.

이러한 차폐가스의 공급을 통해 아크 및 용융금속이 대기로부터 보호가 되므로 건전한 용접부를 얻기 위해서는 적절한 차폐가스의 사용이 필수적이다. 그러나, 이러한 차폐가스도 단순히 아크 및 용융금속을 보호하는 역할뿐만이 아니고 아크특성에도 영향을 미친다.

Fig.2.2에서는 이러한 차폐가스에 따라 와이어 선단에서 용융된 금속이 이행하는 형태를 전류범위별로 나타내고 있다.

Fig.2.2에서 보는 바와 같이 차폐가스로  $\text{CO}_2$ 가스를 사용할 경우는 저전류에서는 단락이행이 중/고전류에서는 입상이행이 나타나게 된다. 또한, 차폐가스로 혼합가스( $\text{CO}_2+\text{Ar}$ 가스)를 사용할 경우는 저전류에서는 단락이행이 고전류에서는 Spray이행형태를 나타내게 된다.

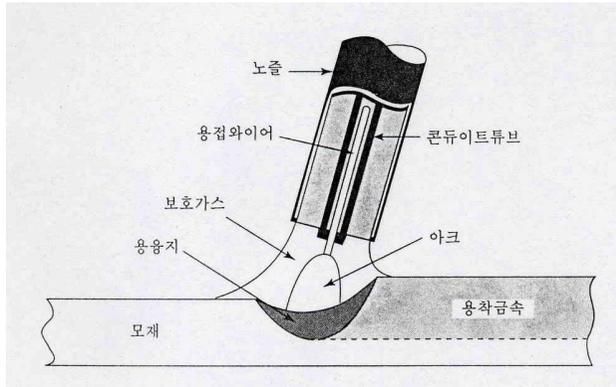
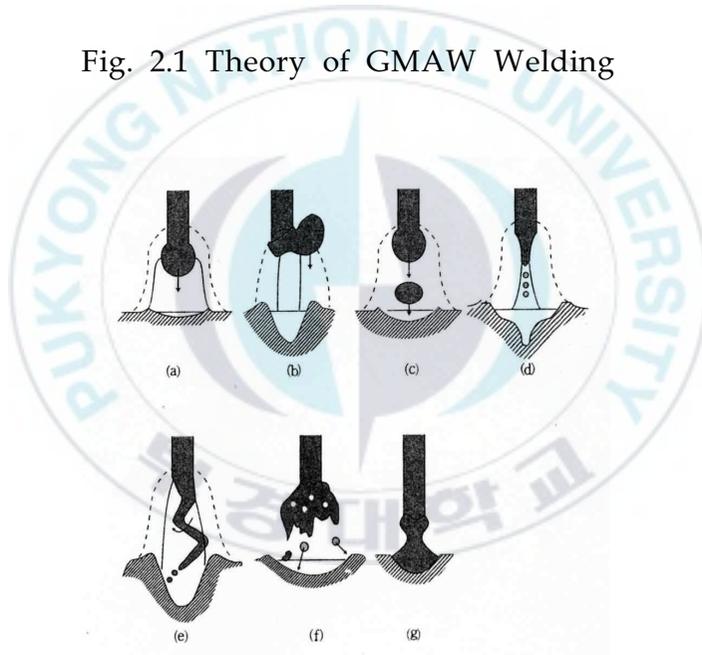


Fig. 2.1 Theory of GMAW Welding



(a) 입상이행 (b) 반발이행 (c) 프로젝티드 이행  
 (d) 스트리밍 이행 (e) 회전이행 (f) 폭발이행 (g) 단락이행

Fig. 2.2 Metal Transfer of GMAW Welding

### 2.1.2 용적의 이행

GMAW용접에서는 아크열에 의해 와이어 선단에 용융된 금속이 생성되고 지속적인 전류인가에 의하여 용융된 금속(용적)이 이탈되게 되는데 이러한 현상을 용적의 이행이라고 한다.

Fig. 2.3에서 보여지는 바와 같이 이러한 이행을 조장하는 인자와 방해하는 인자가 있다.

### 2.1.3 차폐가스에서의 산소(O)의 역할

GMAW용접에서 차폐가스에 첨가되는 산소의 역할은 Fig. 2.3에서 보는바와 같이 용융금속에 산소가 첨가되면 표면장력을 낮추는 효과가 있어 용융금속의 유동성을 향상시킨다.

또한, Fig. 2.4에서 보는 바와 같이 산소(O)는 황(S)과 더불어 표면활성화 원소로 작용하여 고온에서의 용융금속의 대류작용을 표면에서부터 활성화시켜서 용접되어진 용접부의 용입을 깊어지게 하는 효과도 있다고 보고되어진바 있다.<sup>5)</sup>

이러한 산소의 작용으로 고온에서 와이어선단에 용융된 용적은 산소의 첨가에 따라 표면장력이 낮아질 것이고 이는 용적이 와이어 선단에서 이탈되기 쉬운 조건을 제공할 것이다. 따라서, Fig. 2.5에 보여지는 바와 같이 산소의 첨가에 따라 낮아진 용융금속의 표면장력으로 인해 저전류에서의 용적의 이행은 더욱 많아질 것이다.

### 2.1.4 용융금속에서의 황(S)의 역할

앞서 2.1.3에서 설명한 바와 같이 황(S) 또한 산소와 같이 표면활성화 원소로서 용융금속의 표면장력을 낮추는 역할을 한다고 알려져 있다. 따라서, 용가재에 표면활성화 원소인 황(S)의 첨가는 용융금속의 표면장력을 낮추어 저전류 단락이행에서의 초당 단락횟수를 증가시킴과 동시에 용접된 용융금속의 용입깊이를 증가시키는 역할을 한다고 알려져 있다.<sup>5)</sup>

### 2.1.5 용가재의 (비)저항

용접시 와이어의 저항은 아크길이, 와이어 돌출길이, 와이어의 선경, 재질(표면도금 유/무)에 따라 다를 수 있다. 본 연구에서는 와이어의 특성

(표면도금 유/무)을 달리하여 생긴 저항의 차이를 이용하여 시험을 하였다.

와이어의 저항에 따라서는 저항이 클수록 콘택트팁과 와이어 선단사이에 일어나는 전기저항열이 커져서 용융속도가 빨라질 것으로 예상되며, Fig. 2. 5에서 보여지는 바와 같이 와이어의 돌출길이(저항)가 증가함에 따라 용융속도는 빨라지는 것을 알 수 있다.

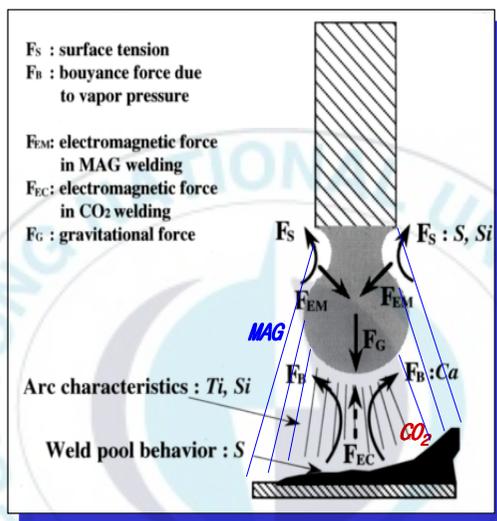


Fig. 2.3 Mechanism of Metal Transfer

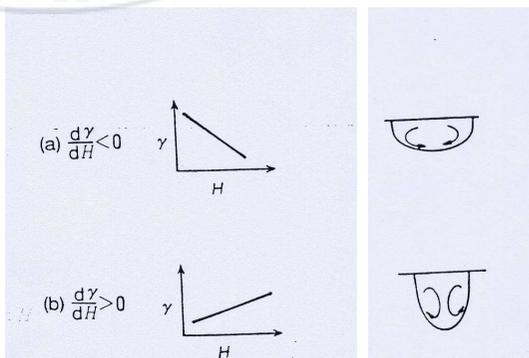
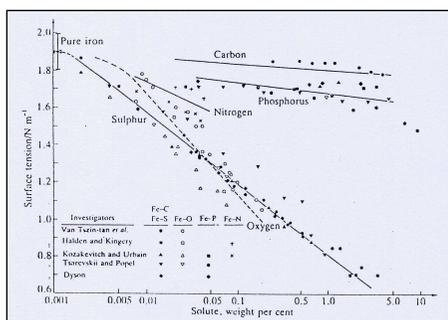


Fig. 2.4 Behavior of surface active elements in weld pool

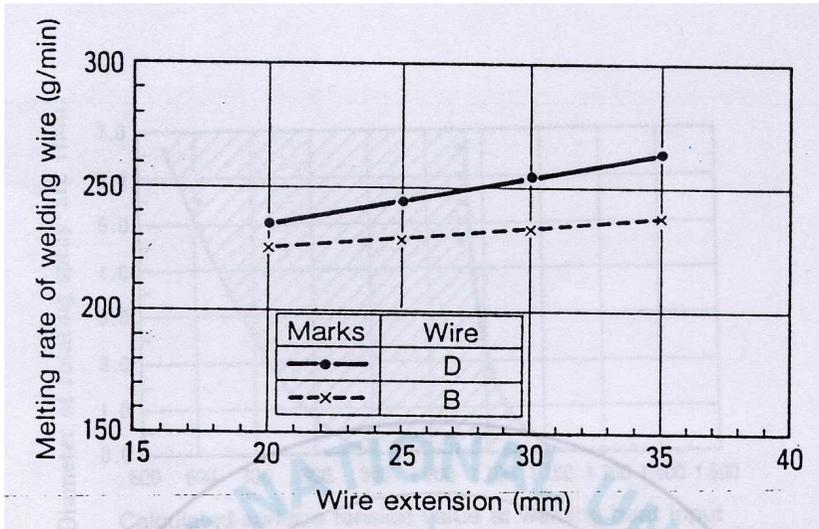


Fig. 2. 5. Effect of wire extension on melting rate of welding wires

## 제 3 장 실험방법

### 3.1 차폐가스의 영향에 대한 실험

#### 3.1.1 차폐가스에 따른 용접특성

현재 연강 및 고장력강 솔리드와이어를 이용하여 용접을 실시하는 경우 국내에 있어서는 대부분 경제적인 이유를 들어 CO<sub>2</sub>가스를 사용한다.

그러나, Fig. 2. 3에서 보여지는 바와 같이 CO<sub>2</sub>가스의 경우는 고온에서 해리된 가스가 아크의 열을 빼앗아 아크가 용적의 아래에서 발생되고 용적의 이행을 방해하는 힘으로 작용하게 된다.

반면, Ar가스를 사용할 경우에는 이러한 반발력의 효과가 없어 아크는 용적을 둘러싸고 발생이 되며 용적의 성장을 유도하지 않으므로 이탈되는 용적의 크기도 적고 이탈된 용적이 용융풀에 미치는 과장도 CO<sub>2</sub>용접에 비하여는 아주 작게 되어 전체적으로 아크의 안정성은 물론 스패터의 발생도 줄일 수 있게 되는 것이다.

또한, 차폐가스에 첨가되는 산소 및 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 양에 따라 표면 활성화원소인 산소(O)의 역할이 나타나므로 본 실험에서는 Ar가스에 산소 및 이산화탄소의 조성을 달리하여 실험을 진행하였다.

본 실험에 사용된 가스의 조성은 표1에 정리하였다.

Table 3.1 Compositions of Shielding gases

구 분	가스 1	가스 2	가스 3	가스 4	가스 5	가스 6
가스종류	Ar 100%	Ar-2%O <sub>2</sub>	Ar-8%O <sub>2</sub>	Ar-2%CO <sub>2</sub>	Ar-10%CO <sub>2</sub>	Ar-15%CO <sub>2</sub>

#### 3.1.2 시험재의 용접조건

시험에 사용된 용가재는 스테인리스 309와이어(AWS ER309, 선경 1.2mm)를 사용하여 다이헨 DIGITAL PULSE500용접전원으로 용접하였으며, 와이어 및 모재의 화학성분은 표2에 정리하였다.

Table 3.2 Chemical Compositions of Welding Wire and Base Metal

구 분	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	비 고
AWS Spec.	0.12	0.3~ 0.65	1.0~ 2.5	0.03	0.03	23.0~ 25.0	12.0~ 14.0	-
ER309	0.07	0.5	1.7	0.02	0.004	23.5	12.7	와이어
STS 304	0.05	0.46	1.1	0.02	0.02	18.3	8.3	모 재

용접은 아래보기 용접의 Bead On Plate(모재 STS304L, 9mm Thickness)조건으로 진행되었으며, 용접속도와 전류, 전압등 용접조건은 표3에 정리하였다.

Table 3.3 Welding Parameters of MIG Welding

구 분	전류(A)	전압(V)	용접속도 (cm/min)	가스유량 (l/min)	비 고
조 건 1	200	24	45	20	단락이행
조 건 2	270	34	45	20	Spray 이행

또한, MIG용접과 더불어 표면활성화원소인 산소(O)의 역할을 보다 자세히 알아보기 위하여 용가재를 사용하지 않는 TIG용접을 Bead On Plate로 진행하였으며, 그 용접조건은 표4에 정리하였다.

Table 3.4 Welding Parameters of TIG Welding

구 분	전류(A)	전압(V)	용접속도 (cm/min)	가스유량 (l/min)	비 고
조 건 1	220	-	20	20	3.2mm전극 (60도 각도)

### 3.1.3 시험재의 시험항목 및 평가방법

시험항목 및 평가방법은 아래의 표5에 정리하였다.

Table 3.5 The method to estimate welding characteristics

시험 항목	평가 방법
Arc 안정성	1. Arc Monitoring System을 이용한 용접파형 측정 2. Spatter량 측정을 통한 평가(입자별: 1mm기준)
Bead 형상	가스종류에 따른 용입형상(비드폭, 높이, 용입) 측정
화학 성분	가스종류에 따른 용접금속의 화학성분 분석 및 비교
기계적 성질	차폐가스별 용접금속의 기계적 성질(인장/충격치) 비교

### 3.2 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 비교시험

#### 3.2.1 시험재의 제조

시험재는 연강 및 고장력강용 YGW12용 WIRE ROD를 사용하였으며, 동일한 제조공정을 사용하여 직경 1.2mm로 선선된 용접재료를 제작하여 사용하였으며 와이어의 표면은 동(Cu) 도금을 실시하였다. 와이어의 화학성분은 표 6에 나타내었다.

Table 3.6 Chemical Compositions of Welding Wire

구 분	C	Si	Mn	P	S	Cu	비 고
KS Spec.	≤0.15	0.55~1.1	1.25~1.9	≤0.03	≤0.03	≤0.50	YGW12
시험재1	0.058	0.90	1.54	0.014	0.014	0.20	-
시험재2	0.051	0.95	1.48	0.013	0.025	0.20	-
시험재3	0.055	0.91	1.43	0.015	0.022	0.16	-

#### 3.2.2 시험재의 용접조건

시험에 사용된 용가제는 연강 및 고장력강용 솔리드와이어(YGW12 Type)를 사용하여 다이헨 DIGITAL PULSE500용접전원으로 용접하였

으며,아래보기 용접의 Bead On Plate(모재 SM490, 9mm Thickness) 조건으로 진행되었으며, 용접속도와 전류, 전압등 용접조건은 표7에 정리하였다.

사용가스는 CO<sub>2</sub>와 혼합가스를 모두 사용하여, 단락이행과 Spray이행을 모두 관찰할 수 있도록 시험하였으며 용가재를 첨가하지 않은 Bead On Plate TIG용접을 통하여 용융금속의 표면장력 차이를 시험하였다.

Table 3.7 Welding Parameters of MIG Welding

구 분	전류(A)	전압(V)	용접속도 (cm/min)	사용가스	비 고
조건1	200	23	120	CO <sub>2</sub>	단락이행
조건2	200	22	100	Ar-20%CO <sub>2</sub>	단락이행
조건3	350	32	40	Ar-20%CO <sub>2</sub>	Spray이행
조건4	200	16	20	Ar100%	TIG용접 (표면장력 시험)

### 3.2.3 시험재의 시험항목 및 평가방법

시험항목 및 평가방법은 아래의 표8에 정리하였다.

Table 3.8 The method to estimate welding characteristics

시험 항목	평가 방법
Arc 안정성	1. Arc Monitoring System을 이용한 용접파형 측정 2. Spatter량 측정을 통한 평가(입자별: 1mm기준)
Bead 형상	시험조건에 따른 용입형상(비드폭, 높이, 용입) 측정
와이어의 표면장력	Taper처리한 전용착금속에의 용가재를 투입하지 않은 TIG용접(Inagaki식)

이 중 전용착금속을 이용한 와이어의 표면장력을 측정하는 방법은 일본의 Inagaki등이 제안한 시험방법과 계산식을 사용하여 계산되었으며 그 방법은 Fig. 3. 1에 나타내었다.<sup>11)</sup>

즉, Fig. 3. 1에 보여지는 바와 같이 시험재의 전용착금속을 테이퍼형

(Taper)으로 기계가공한 시험편(2~5t\*40w\*200l)을 사용하여 용가재없이 TIG(Tungsten Inert Gas)용접으로 비드-온-플레이트 용접을 실시하고, 표면장력은 용락되는 임계두께를 측정하여 Inagaki등이 제안한 다음식을 사용하여 계산하였다.

$$\gamma = 4.3(E \cdot I) / t_{\max} \cdot \sqrt{v}$$

$\gamma$  : 표면장력 (dyne/cm)

$E$  : 용접전압 (V)

$I$  : 용접전류 (A)

$t_{\max}$  : 용락임계 두께 (mm)

$v$  : 용접속도 (cm/min)

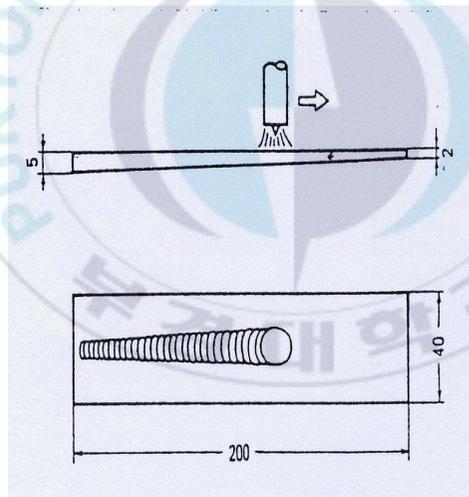


Fig. 3. 1. TIG welding method of tapered steel plate for measuring of surface tension.

### 3.3 와이어의 비저항 차이에 따른 비교시험

#### 3.3.1 시험재의 제조

시험재는 연강 및 고장력강용 YGW12용 WIRE ROD를 사용하였으며, 동일한 화학성분에 비저항의 차이에 의한 용접시험을 위하여 표면에 동도금을 실시한 와이어와 동도금을 실시하지 않고 직경 1.2mm로 선선된 용접재료를 제작하여 사용하였으며 와이어의 화학성분은 표 9에 나타내었다.

Table 3.9 Chemical Compositions of Welding Wire

구 분	C	Si	Mn	P	S	Cu	비 고
KS Spec.	≤0.15	0.55~ 1.1	1.25~ 1.9	≤0.03	≤0.03	≤0.50	YGW12
시험재	0.051	0.95	1.48	0.013	0.025	0.20	-

#### 3.3.2 시험재의 용접조건

시험에 사용된 용가재는 연강 및 고장력강용 솔리드와이어(YGW12 Type)를 사용하여 다이헨 DIGITAL PULSE500용접전원으로 용접하였으며, 아래보기 용접의 Bead On Plate(모재 SM490, 9mm Thickness) 조건으로 진행되었으며, 용접속도와 전류, 전압 등 용접조건은 표10에 정리하였다.

Table 3.10 Welding Parameters of MIG Welding

구 분	전류(A)	전압(V)	용접속도 (cm/min)	사용가스	비 고
조건	350	32	40	Ar-20%CO <sub>2</sub>	Spray이행 (용착효율/속도)

#### 3.3.3 시험재의 시험항목 및 평가방법

시험항목 및 평가방법은 아래의 표11에 정리하였다.

Table 3.11 The method to estimate welding characteristics

시험 항목	평가 방법
와이어 비저항	1. 와이어의 전기전도도를 측정후 비저항 계산 (4단자법 이용) 2. 한국기계연구원 비저항 측정장비 비교
용착속도 (g/min)	동일 조건에서의 단위시간당 용착량 비교
용착효율 (%)	동일 조건에서의 와이어 소모량에 대한 용착금속량 비교



## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 4.1 차폐가스에 따른 용접특성

차폐가스에 따른 용접특성을 시험하는 항목 및 평가방법은 앞서 3.1.3에 소개하였고 육성용접후 최종층인 4층 용접부를 Emission Spark Spectroscope, C/S분석기, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>분석기를 사용하여 표1과 같은 결과를 얻었다.

#### 4.1.1 차폐가스에 따른 화학성분 비교

Table 4.1 Chemical Compositions with Different Shielding Gases

구 분	화학성분(Wt%)									비 고
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	O	
STS304	0.05	0.46	1.1	0.02	0.002	18.3	8.2	-	-	모재
ER309	0.07	0.5	1.7	0.02	0.004	23.5	12.7	0.030	-	용가재
가스1	0.064	0.43	1.63	0.022	0.009	23.58	12.69	0.038	0.022	Ar100%
가스2	0.066	0.41	1.63	0.022	0.009	23.83	12.76	0.049	0.064	Ar-2%O <sub>2</sub>
가스3	0.063	0.37	1.52	0.021	0.009	23.66	12.84	0.055	0.124	Ar-8%O <sub>2</sub>
가스4	0.066	0.43	1.60	0.022	0.009	23.66	12.85	0.048	0.048	Ar-2%CO <sub>2</sub>
가스5	0.084	0.40	1.57	0.022	0.009	23.78	12.87	0.048	0.081	Ar-10%CO <sub>2</sub>
가스6	0.085	0.39	1.56	0.022	0.009	23.92	12.79	0.05	0.088	Ar-15%CO <sub>2</sub>

시험결과 차폐가스내에 산소성분이 많아 질수록 용착금속에서 탈산역활을 하는 Si 및 Mn의 성분은 작아지고 산소의 양은 많아지는 것을 알 수 있다. 따라서, 용착금속부에 많아진 산소의 영향으로 인해 차폐가스를 다르게 사용할 때 용융금속의 표면장력도 차이가 날 것이며 따라서 용입형상도 다르게 나타날 것으로 예상되어 진다.

#### 4.1.2 차폐가스에 따른 용입형상 비교

차폐가스에 표면활성화 원소인 산소량이 증가함에 따라 용착금속에서의 산소량도 증가하는 결과는 앞서 4.1.1의 결과에 나타내었다.

본 실험에서는 용착금속에서 증가된 산소의 량에 따라 용입형상에 어떻게 작용하는지를 시험하였으며, 용접방법은 용가재를 사용하지 않는 TIG용접을 Bead On Plate 자세로 실시하여 용접금속의 단면을 절단후 부식하여 그 차이를 측정하였으며, 그 결과는 표2에 나타내었다.

Table 4.2 Weld Bead Cross Sections with different Shielding Gas

구 분	차폐가스				
	Ar 100%	Ar-2%CO <sub>2</sub>	Ar-2%O <sub>2</sub>	Ar-10%CO <sub>2</sub>	Ar-8%O <sub>2</sub>
용입 (D,mm)	1.0	1.75	1.43	1.35	1.35
폭(W,mm)	4.95	4.88	5.25	5.13	5.68
D/W Ratio	0.20	0.36	0.27	0.26	0.24
산소함량 (%)	0.02	0.05	0.06	0.08	0.12

상기 시험의 결과 용입에 대한 폭의 비를 나타내는 D/W비에 있어 Ar-2%CO<sub>2</sub>차폐가스를 사용한 용접, 즉 용착금속내 산소의 함량이 500PPM인 경우에 용입이 가장 깊은 용접이 되어 늘어난 후 다시 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

이것은 앞서 여러 연구에 있어서의 경향과 유사한 것으로 산소의 함량이 늘어날 수록 용접비드의 표면에는 많은 산화물이 생성되고 이중 용점이 높은 산화물은 용융풀에서 고상으로 존재하며 이러한 산화물들은 용입을 방해하는 요소로 작용하는 것으로 보고 되었으며, 상기 시험의 결과를 Fig. 4. 1에 나타내었다.

#### 4.1.3 차폐가스에 따른 아크안정성 비교

차폐가스에 따른 용접시 아크안정성은 Arc Monitoring System으로 측정된 용접파형과 발생된 스파터량으로 비교하였으며, 파형측정 및 스파터량 측정결과는 표3 및 표4에 나타내었다.

또한, 차폐가스의 종류에 따라 실제 측정된 용접파형의 형태는 Fig. 4. 2

에 나타내었으며 용접과형의 측정은 초당 5000회의 신호를 받을 수 있도록 설정하여 측정되었고, 시험의 오차를 줄이기 위하여 Bead On Plate용 접으로 Auto Carriage를 이용하여 각 조건당 3회의 시험을 실시하여 평균값으로 비교하였다. 측정된 스패터량은 다시 입자의 크기에 따라 1mm 이상의 대립의 스패터와 1mm미만의 소립의 스패터로 구분하여 1/10,000 저울을 이용하여 측정하여 비교하였다.

Table 4.3 Welding wave form measurement results with different Shielding Gases

구 분	차폐가스				
	Ar-2%O <sub>2</sub>	Ar-8%O <sub>2</sub>	Ar-2%CO <sub>2</sub>	Ar-10%CO <sub>2</sub>	Ar-15%CO <sub>2</sub>
전류(A)	201	198	189	193	192
전압(V)	23	22.9	24.6	24.1	24
단락횟수 (회/초)	109.2	118.7	57.2	101.7	113.4

Table 4.4 Spatter Generations with different Shielding Gases

Spatter량 (g)	차폐가스				
	Ar-2%O <sub>2</sub>	Ar-8%O <sub>2</sub>	Ar-2%CO <sub>2</sub>	Ar-10%CO <sub>2</sub>	Ar-15%CO <sub>2</sub>
D ≤ 1mm	0.098	0.407	0.637	0.298	0.302
D > 1mm	0.010	0.113	0.210	0.033	0.025
Total	0.108	0.520	0.847	0.331	0.327

용접과형 측정결과, Ar에 산소(O<sub>2</sub>)와 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 함량을 증가시키수록 즉 차폐가스에 산소량이 늘어날수록 단락횟수가 늘어나는 결과를 얻었다. 이는 용접금속(용적)내에 산소량이 증가하고 이에 따라서 용적의 표면장력도 떨어져 결과적으로 단락횟수가 늘어난 것으로 파악된다.

또한, 전체적으로는 O<sub>2</sub>가스를 사용한 경우가 CO<sub>2</sub>가스를 사용한 경우에 비하여 단락횟수가 많은 것으로 나타났으며 이는 CO<sub>2</sub>가스의 해리작용에

의하여 아크가 용적의 아래부분에 집중되고 이것은 용적의 이행을 방해하는 역할을 하여 산소(O<sub>2</sub>)가스를 사용한 경우에 비해 단락횟수가 줄어든 것으로 파악된다. 이것은 동일한 용접조건에서 용접하여 파형을 측정한 결과 Ar에 CO<sub>2</sub>가스를 사용한 경우에서 전압이 2V정도 높은 것으로 보아 충분히 짐작할 수 있다.

스패터량은 단락횟수가 가장 적은 Ar-2%CO<sub>2</sub>가스를 사용했을때가 가장 많았으며 이것은 단락횟수가 작은 것으로 미루어 와이어선단에 맺힌 용적이 용융지에 닿아 단락까지 되는 시간이 길어진 것으로 파악되고 이 경우 크게 성장된 용적을 단락시키기 위해서는 큰 힘이 필요하고 이에 따라 용융풀에도 큰힘이 전달되어 결과적으로는 많은 스패터량이 발생하였다고 보여진다. 이는 스패터의 입자가 1mm이상의 대립의 스패터발생량이 Ar-2%CO<sub>2</sub>를 사용시에 가장 많이 발생된 것으로 보아 이러한 현상을 예상할 수 있다.

#### 4.1.4 차폐가스에 따른 용착금속의 기계물성치 비교

차폐가스에 따른 용착금속의 기계물성치는 각 차폐가스를 이용하여 Deposite용접을 실시하여 전 용착금속의 인장강도와 V노치 충격값을 비교시험하였으며, 그 결과는 표4에 나타내었다.

Table 4.4 Mechanical Properties with different shielding gas

사용 차폐가스	인장강도 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	충격치 (-20℃,J)	산소(O) 함량 (%)	탄소(C) 함량 (%)
Ar 100%	62.1	33.8	118.6	0.022	0.064
Ar+2%O <sub>2</sub>	62.2	36	94.1	0.064	0.066
Ar+8%O <sub>2</sub>	62.7	32.6	73.5	0.124	0.063
Ar+2%CO <sub>2</sub>	61.5	33	107.8	0.048	0.066
Ar+10%CO <sub>2</sub>	63.2	34.6	83.3	0.081	0.084
Ar+15%CO <sub>2</sub>	63.7	30.4	78.4	0.088	0.085

상기의 표4에 보여지는 바와 같이 전 용착금속의 산소함량은 차폐가스 내의 산소함량이 늘어날수록 증가하고 탄소함량 또한 차폐가스의 탄소함량이 늘어남에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

그에 따라 전 용착금속의 저온 충격치 또한 용착금속의 산소함량이 증가하는것에 반비례하여 감소하며, 인장강도는 탄소함량이 증가함에 따라 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

따라서, 차폐가스내에 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)함량이 늘어 날수록 용착금속의 인장강도는 올라가고 저온인성을 낮아짐을 미루어 짐작 할 수 있다.

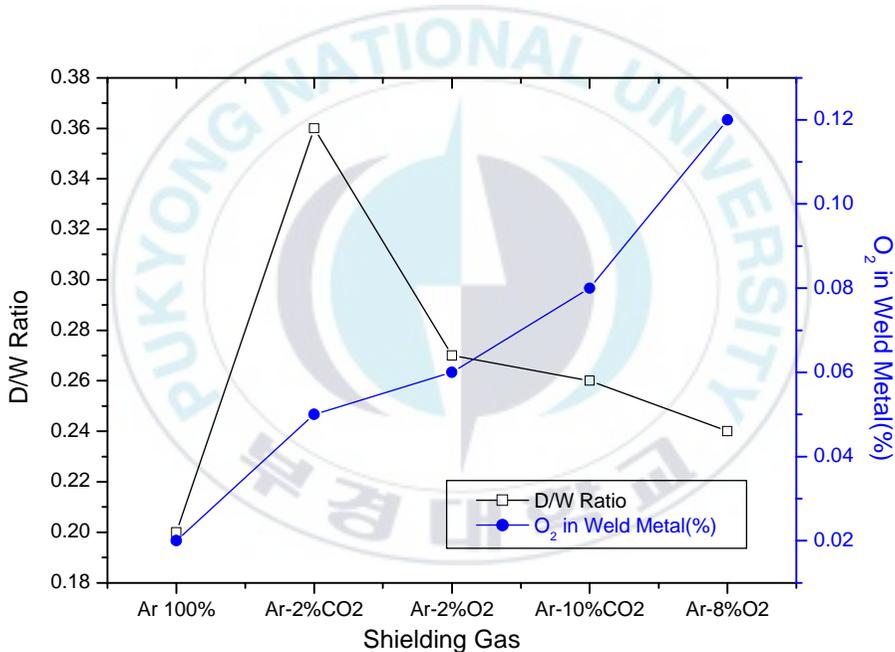
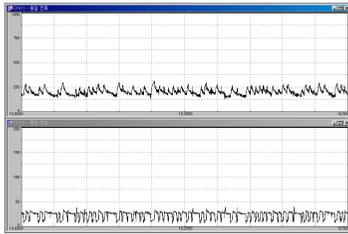
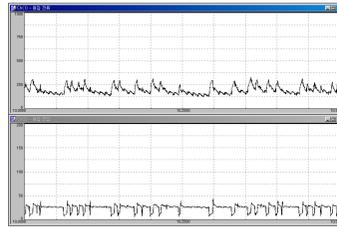


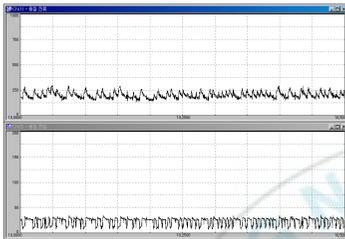
Fig. 4. 1. Depth/Width ratio of Weld Bead Cross Section



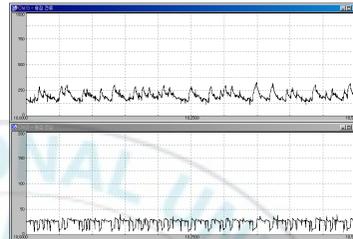
a) Ar-2%O<sub>2</sub>



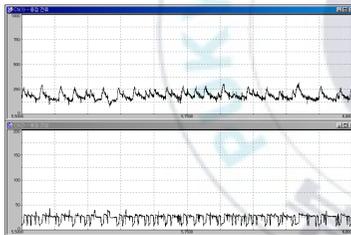
b) Ar-2%CO<sub>2</sub>



c) Ar-8%O<sub>2</sub>



d) Ar-10%CO<sub>2</sub>



e) Ar-15%CO<sub>2</sub>

Fig. 4. 2. Welding Wave Form with different shielding gas

## 4.2 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 용접특성

### 4.2.1 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 아크안정성 비교

용접재료내 황(S)의 차이에 따른 용접특성을 시험하는 항목 및 평가방법은 앞서 3.2.3에 소개하였고 표 5에는 Arc Monitoring System을 이용한 용접과형의 측정결과를 나타내었다. 용접과형의 측정은 앞서의 시험과 마찬가지로 초당 5000회의 신호를 받을 수 있도록 설정하여 측정후 비교하였다.

Table 4.5 Welding wave form measurement results with different S content in welding wire

구 분	전류(A)	전압(V)	단락횟수 (회/초)	비 고
시험재 1	197	22.8	90	S: 0.014
시험재 2	195.8	23.4	98	S: 0.025
시험재 3	196.2	23.2	92	S: 0.022

표 5에서 보여지는 바와 같이 용융금속의 표면장력에 영향을 미치는 S의 함량이 많을수록 단락횟수는 많아지는 결과를 보이고 있다.

이것으로 보아 용접재료내 S함량이 많아 질수록 와이어의 선단에 형성된 용적의 표면장력이 낮아져 와이어가 용융금속에 이행하는 초당 단락횟수도 많아지는 결과가 나온 것으로 보여진다.

또한, 용접중 Spatter발생량은 스패터의 입자별(1mm 기준)로 측정하였으며 그 결과를 표 6에 나타내었다.

표6에서 보여지는 바와 같이 조건1의 경우, 즉 CO<sub>2</sub>를 차폐가스로 사용하여 저전류 단락이행 조건에서 용접한 결과는 S(황)의 함량이 높을수록 1mm이상 대립의 스패터 뿐만이 아니라 1mm미만의 소립의 스패터량이 작아지는 결과를 볼 수 있으며, Mixed Gas(Ar-20%CO<sub>2</sub>)를 차폐가스로 사용하여 저전류 단락이행 조건에서 용접한 결과도 S(황)의 함량이 높을수록 스패터량이 작아지는 결과를 보여주고 있다.

Table 4.6 Spatter Generation Rate with different S content in welding wire

구 분		Spatter Generation rate (g/weld metal 100g)			비 고
		1mm 이상	1mm 미만	Total	
시험재 1	조건 1	1.8	7.3	9.1	S: 0.014
	조건 2	0.8	10.5	11.3	
시험재 2	조건 1	0.7	5.2	5.9	S: 0.025
	조건 2	0.6	9.5	10.1	
시험재 3	조건 1	1.4	7.1	8.5	S: 0.022
	조건 2	0.7	9.8	10.5	

결과로 미루어 S(황)의 함량이 높을수록 와이어선단에 형성된 용적의 표면장력이 낮아져 용적이 용융풀에 이행되는 초당 단락횟수가 많아지고 용적의 이행시 용융풀에 전달되는 힘 또한 작아져 그에 따라 스파터의 발생량도 작아지는 것으로 보여진다.

결과적으로 용접재료내 황(S)의 함량이 많아지면 저전류 단락이행의 조건으로 용접시 와이어 선단에서 용적이 이행되도록 촉진시켜주는 표면장력을 낮추는 것으로 짐작되고, 황(S)의 함량차이에 따른 표면장력의 시험결과는 4.2.3에서 비교해 보았다.

#### 4.2.2 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 용입형상 비교

용접재료내 황(S)의 차이에 따른 용입형상의 비교를 위하여 비교적 아크가 안정한 상태인 스프레이(Spray) 이행모드에서 용접을 실시하여 용착된 금속의 단면을 부식한 후 그에 따른 차이를 비교하였으며, 그 결과를 표 7에 나타내었다. 용입형상은 용접비드의 단면을 관찰하여 용접비드의 폭(Width)과 용입(Depth)를 측정후 용입과 폭의 비, 즉 D/W Ratio를 비교하여 시험하였다.

이것은 앞서의 여러 시험에서도 이용한 측정방법으로 D/W Ratio의 크기가 클수록 폭에 대하여 용입의 깊이가 깊은 것으로 파악되며 이 경우

용융풀에서의 대류현상(Convection)이 온도가 가장 높은 아크직하, 즉 용융금속의 중심부 쪽으로 이동후 외부로 흘러가는 것으로 예측할 수 있으며 이는 용융금속의 온도에 대한 표면장력의 기울기가 음(-)의 방향에서 양(+ )의 방향으로 바뀌었음을 알 수 있다.

Table 4.7 Welding Bead Cross Sections with different S content in welding wire

(단위:mm)

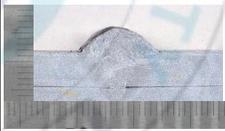
구 분	폭 (Width)	용입 (Depth)	Depth/Width Ratio	용입형상	비 고
시험재 1	13.9	8.4	0.6		S: 0.014
시험재 2	13.9	8.8	0.63		S: 0.025
시험재 3	13.8	8.6	0.62		S: 0.022

표 7에 나타내어진 바와 같이 용접재료내 황(S)의 함량이 많을수록 용접금속의 용입이 깊어지고 용입과 폭의 비(Depth/Width Ratio) 또한 큰 값을 나타낸다. 이것으로 보아 황(S)이 용융금속의 대류(Convection)현상에 영향을 미쳐 용접금속에서 온도가 가장 높은 용접Arc의 바로 밑부분, 즉 용융금속의 중심부를 향한 이동에 영향을 미쳐 깊은 용입을 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4.2.3 용접재료내 황(S)의 차이에 따른 표면장력 비교

용접재료내 황(S)의 차이에 따른 용융금속의 표면장력 비교를 위하여 각기 다른 S(황)함량을 가진 시험재로 전용착금속을 만든후 Taper형으로 가공하여 Inagaki등이 제안한 시험방법으로 TIG용접으로 Bead on

Plate용접시 용락된 두께를 사용한 시험식을 이용하여 표면장력을 측정하였으며 그에 따른 결과를 표 8에 나타내었다.

Table 4.8 Surface Tensions with different S content in welding wire

구 분	Surface Tension ( $10^{-3}N/m$ )	S 함량 (%)	시험편형상 비교		
시험재 1	1038	0.014			
시험재 2	987	0.025			
시험재 3	1019	0.022			
			시험재1	시험재3	시험재2

표 8에 나타내어진 바와 같이 실제 Inagaki등이 제안한 방법으로 시험을 진행한 결과 용접재료내 S(황)의 함량이 많을수록 TIG용접으로 전용착금속에 Bead ON Plate용접을 진행시 보다 두꺼운 쪽에서 용락이 생기고 그 결과 측정되어진 용융금속의 표면장력(Surface Tension,  $10^{-3}N/m$ ) 또한 낮은 값을 나타내었다.

그 결과로 미루어 앞서 여러 연구에서 밝혀진 바와 같이, 용융금속에 황(S)이 첨가되면 첨가되어진 황(S)은 표면활성화 원소로 작용하여 용접금속의 용입을 증가시키고 더불어 표면장력을 낮추어 단락이행에서는 단락이행횟수를 늘리고 스프레이 이행에서는 용융금속의 대류작용(Convection)에 영향을 미쳐 보다 깊은 용입을 나타내게 함을 본 실험의 결과로 확인할 수 있었다.

### 4.3 와이어의 비저항 차이에 따른 용접특성

용접재료(와이어)의 비저항 차이에 따른 용접특성을 시험하는 항목 및 평가방법은 앞서 3.3.3에 소개하였고 표 9에는 시험재의 비저항 측정결과를 나타내었다.

Table 4.9 Specific Resistance  
with different surface Treatment

구 분	비저항( $\mu \Omega \text{cm}$ )	비 고
시험재 1	32.8	동도금 와이어
시험재 2	34.6	무도금 와이어

표 9에서 나타내어지는 바와 같이 동일한 화학성분을 가진 와이어를 동도금을 한 와이어와 동 도금을 하지 않은 와이어로 제조하여 비저항을 측정하였으며, 그 결과 와이어 표면에 동 도금을 하지 않은 무도금 와이어의 전기비저항(Specific Resistance)이 동 도금을 한 와이어에 비하여 높은 결과를 나타내었다.

이것은 와이어 표면의 도금층이 존재하므로 인하여 전류를 인가시 저항을 적게 받기 때문으로 파악된다.

#### 4.3.1 와이어의 비저항 차이에 따른 용착속도 비교시험

와이어의 표면특성 차이에 따른 비저항의 차이에 의한 용접시 용착속도 시험을 진행하였으며 용착속도는 단위시간당 와이어가 녹아서 용융금속이 된 용착량을 기준으로 측정하였으며 시험조건은 스패터로 인한 손실을 최소화하고 정확한 비교를 위해 혼합가스에서 스프레이이행 모드로 실시하였으며 그 결과를 표 10에 나타내었다.

표 10에 보여지는 바대로 동도금와이어에 비하여 무도금와이어의 용착속도(Deposition Rate, g/min)가 빠른 것으로 파악된다.

이는 도금와이어 대비 무도금와이어의 비저항이 크고 도체인 금속은 온도가 상승하면 자유전자의 이동이 활발하여 서로 충돌을 하게 되며 저항은

더욱 상승하게 되며 그러한 비저항의 온도계수는 구리가  $4.1 \times 10^{-3}$ 인데 비해 철은  $6.5 \times 10^{-3}$ 으로 철의 비저항이 더 크고, 고온의 아크열에서 증가된 무도금 와이어의 비저항에 의하여 용착속도가 빠른 것으로 생각되어진다.

Table 4.10 Deposition Rate  
with different surface Treatment

구 분	Deposition Rate(g/min)	비 고
시험재 1	118	동도금 와이어
시험재 2	128	무도금 와이어

용접와이어의 용융속도를 나타내는 다음식을 보면 무도금와이어의 용융속도가 빠른것을 더욱 이해하기 쉽다.

$$\text{용융속도}(V_m) = aI + bIe^2 \quad (a, b \text{는 상수})$$

le : Extension 길이, I : 전류

즉, 와이어의 용융속도는 전류와 Extension 길이에 비례하는 것으로 동일 조건에서 Extension 길이가 길수록 저항열은 증가하고 그에 따라서 와이어의 용융속도 또한 빨라지게 되는 것이다.

또한, 동일한 조건에서 와이어 소모량에 대한 용착금속량인 용착효율 (Deposition Efficiency, %)에 대한 시험을 실시하였으며 그 결과를 표 11에 나타내었다.

Table 4.11 Deposition Efficiency  
with different surface Treatment

구 분	Deposition Efficiency ( % )	비 고
시험재 1	98.4	동도금 와이어
시험재 2	98.7	무도금 와이어

표 10에 나타내는 바대로 표면에 동도금을 실시한 와이어에 비하여 무도금와이어의 용착효율이 높은 것으로 나타났다. 이 결과로 보아 고전류 스프레이 이행모드에서 무도금와이어는 용착속도 뿐만이 아니라 용착효율도 높은 것으로 파악되며 용착효율에 대한 결과로 미루어 용접시 스파터 등으로 소실되는 양이 무도금와이어가 도금와이어 대비 작은 것으로 짐작된다.



## 제 5 장 결 론

용접특성에 영향을 미치는 차폐가스, 용접재료내 황(S)의 함량, 와이어 비저항의 차이에 따른 비교시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 차폐가스내 산소함량이 많을수록 용착금속의 산소함량도 늘어났다.
- (2) 차폐가스내 산소의 함량이 많을수록 용착금속의 충격치는 떨어지고, 탄소함량의 증가에 따라 인장강도는 늘어났다.
- (3) 용접재료내 황(S)의 함량이 많을수록 단위 시간에 이행되는 용적의 횡수(단락횡수)도 많게 나타났다.
- (4) 용접재료내 황(S)의 함량이 많을수록 용접금속의 용입이 깊어지고 용입과 폭의 비(Depth/Width Ratio) 또한 큰 값을 나타내었다.
- (5) 용접재료내 황(S)의 함량이 많을수록 용융금속의 표면장력(Surface Tension)은 낮은 값을 나타내었다.
- (6) 와이어의 표면에 동도금을 한 와이어가 도금을 하지 않은 와이어에 비해 전기 비저항이 낮게 나타났다.
- (7) 동도금와이어에 비하여 전기 비저항이 큰 무도금 와이어에 있어 동일 조건으로 용접시 용착속도(Deposition Rate, g/min)가 상대적으로 빠른 것으로 나타났다.
- (8) 동도금와이어 대비 전기 비저항이 큰 무도금 와이어를 동일조건으로 용접시 용착효율(Deposition Efficiency, %)이 높은 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

- 1) 대한용접학회 : 용접 · 접합 편람, (1998), pp516~521
- 2) International Institute of Welding : THE PHYSICS OF WELDING, (1990), pp38~40
- 3) 형설출판사 : 최신용접공학, (1996), pp8~14
- 4) CLARENDON PRESS · OXFORD : The Physical Properties of Liquid Metal, (1998), pp123~129, pp136~139
- 5) I.B.J. Keene, K.C. Mills, J.W. Bryant, E.D. Hondros : Effect of Interaction between Surface Active Elements on the Surface Tension, Canadian Metallurgical Quarterly, 21-4(1982), 393~403
- 6) Sang K. Choi, Choong D. Yoo : GMA용접의 금속이행 현상에 관한 이론 해석방법, 대한용접학회지, 16-3(1998), 1-8
- 7) 안영호, 이종봉, 염동석 : GMA용접의 용적이행 현상에 미치는 제인자의 영향, 대한용접학회지, 16-1(1998), 17-24
- 8) 안영호, 이종봉, 염동석 : MAG용접의 Arc안정성에 미치는 S의 영향, (1999), 대한용접학회, 제17권, 제1호, (1999), pp1~7
- 9) 안영호, 방국수의 2명 : GMAW용적이행에 미치는 Ca 및 S의 영향, 대한용접학회 추계 학술발표개요집, (1992), pp132~134

10) K. C. Mills and B. J. Keene : Factors affecting variable weld penetration, International Materials Reviews, Vol.35, No.4, (1990), pp185~216

11) Yuukoh Takeuchi and Takao Shimizu : Effect of Chemical Composition of Welding Wire on Metal Transfer of Droplet in High Current MAG Welding, 電氣製鋼 第61卷 第4号, (1990), pp239~249

12) 이재형, 조상명 외 2명 : Copper Free Wire를 이용한 고속 GMA용접 특성 연구(I), 2004년도 대한 용접학회 추계 학술발표대회 발표 논문집, (2004), pp237~239

13) 김희진, 유희수 외 2명 : 단락이행에서의 가스에 따른 고속용접현상, 2005년도 대한 용접학회 추계 학술발표대회 발표 논문집, (2005), pp120~122

## 감사의 글

회사일과 학업을 동시에 하느라 힘들었던 몇 년간 지식뿐만이 아니라 많은 고마움을 받았고, 그 분들이 있었기에 가능했던 과정이라 생각하고 짧게나마 지면을 빌어 감사를 드리고자 합니다.

우선 무엇보다 학업에 대한 필요성을 느끼고 학위달성을 위하여 많은 가르침을 주신 지도교수 방국수 교수님과 여러 교수님께 감사드립니다. 또한, 바쁜 사회생활에서도 지식습득의 중요성을 늘 강조하시어 학업을 시작할 수 있는 기회와 용기를 주셨던 고 김종원 이사님에게도 비록 찾아 뵈 수는 없지만 글로써 대신 진심어린 고마움을 전해드리고 싶습니다.

그리고, 용접산업에 발을 디딜 수 있도록 해주신 고려용접봉 홍민철 회장님과 박병로 부사장님, 항상 도전과 진취적인 사고방식으로 성취욕을 북돋워주신 정상화 전무님, 지식습득과 현장접목의 필요성을 강조하신 정우현 연구소장님 이하 많은 회사 선배님들과 동료들에게도 고마움을 전하고 싶습니다.

마지막으로 힘들고 괴로울 때마다 언제나 저의 편에서 든든한 후원자가 되었던 부모님, 아내와 가족들에게도 사랑이 담긴 감사를 드립니다.