



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.
- 저작권자로부터 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

570MPa급 다층용접금속의 강도 및 충격인성에 미치는  
입열의 영향

指導教授 方國守

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

卞社喆

卞祉喆의 工學碩士 學位論文을 認准함

2007年 2月



主 審      工學博士      金 雨 烈 (印)

委 員      工學博士      朴 興 日 (印)

委 員      工學博士      方 國 守 (印)

# 목 차

Abstract

제 1 장 서 론	1
제 2 장 실험 방법	8
제 1 절 시험재	8
제 2 절 실험 방법	8
제 3 장 실험 결과 및 고찰	15
제 1 절 용접 와이어에 따른 용접금속 강도 및 연성 변화	15
제 2 절 용접조건에 따른 용접강도 변화	19
제 3 절 용접금속 인성	41
제 4 장 결 론	49
참고 문헌	51

감사의 글

# Effects of Heat Input on the Strength and Impact Toughness of Multipass Weld Metal in 570MPa Grade Steel

Ji-Chul Byun

Department of Materials Processing Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University

## **Abstract**

Influence of heat input on the tensile strength and impact toughness of multipass weld metal made with AWS E81T1-Ni1 metal-cored wire was investigated. Welding parameters such as current, voltage and travel speed were varied independently to get different heat inputs. Even though variation of heat input resulted in different microstructure and chemical composition, tensile strength was controlled mainly by the chemical composition of weld metal. An increase of heat input by current resulted in higher recovery of deoxidation elements in weld metal and thus showed an increase of tensile strength in spite of higher heat input.

## 제1장. 서론

건축 철골용접에는 여러 용접법이 적용되고 있으나 가장 대표적인 것에는 box column의 각 이음부에 적용되는 SAW, box column과 diaphragm용접에 적용되는 ESW 그리고 box column과 H-beam의 용접에 적용되는 GMAW 등이 있다<sup>1)</sup>. 이 중 GMAW 용접부는 용접선 길이가 짧고 작용응력이 높아 고품질의 용접부가 요구되며 용접 생산성 향상을 위하여 고 입열 및 고 패스간온도의 용접을 선호한다. 하지만 일반적으로 입열 및 패스간 온도가 증가하면 용접금속 강도와 충격인성이 저하한다고 알려져 있어<sup>2-5)</sup> 용접 작업 시 엄격한 입열 및 패스간 온도관리가 필요하다.

이러한 다층용접시 용접금속의 강도와 인성에 미치는 입열 및 패스간 온도의 영향에 대한 연구는 몇몇 보고되어 있다. Evans 등은 용접 전류와 용접 전압은 일정하게 하고 용접 속도만 달리하여 입열을 0.6, 1.0, 2.2, 4.3kJ/mm로 변경시켜 용접금속의 미세조직 및 기계적 성질의 영향에 대하여 알아 보았다<sup>6)</sup>. 입열의 증가에 따라 용접금속 중 망간과 실리콘이 줄고, pro-eutectoid ferrite는 acicular ferrite 의 감소에 따라 증가하였다. 그 결과 용접금속 항복강도와 인장강도는 저하하며 최적의 충격인성은 약 2kJ/mm 일 때라고 보고 하였다. 한편 Vercesi와 Surian도 AWS E11018-M에 해당하는 저수소계 용접봉을 사용하여 고 입열/고 패스간온도, 중 입열/중 패스간온도, 저 입열/저 패스간온도의 세 경우로 용접한 용접금속의 기계적 성질에 대한 연구를 하였다<sup>7)</sup>. 그들은 고 입열/고 패스간온도일때 인장강도와 항복강도가 저하하는 반면 저 입열/저 패스간온도일때 가장 높은 인장강도와 항복강도를 얻을 수 있으나 항복강도가 규격치 이상을 나타낸다고 하였다. 이러한 입열이 증가에 따른 인장강도 저하는 망간과 실리콘의 높은 산화손실에 기인한다고 보고하였다. 이처럼 일반적으로 다층용접시 입열 증가에 따라 용접금속의 인장강도와 항복강도는 저하하여, 적절한 용접 입열 및 패스간 온도의

범위를 설정하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

인장강도 590MPa급 건축구조용강에 사용되는 AWS E80T1-Ni1 상당 메탈게 용접와이어를 사용하여 철골구조물의 용접을 가정한 다층용접을 행하여 다층 용접금속 강도와 인성에 미치는 입열 및 패스간온도의 영향에 대한 보고도 있다<sup>8)</sup>. Fig. 1-1에 패스간온도를 150°C로 일정하게 유지하며 입열을 19~48kJ/cm로 변경하며 용접한 결과 용접금속의 인장강도와 연신율을 나타내었다. 그림 중에는 강재의 규격치인 인장강도 590MPa과 연신율 20% 이상을 모두 만족하는 영역을 검게 나타내었는데, 이 영역에 들어가는 용접금속은 존재하지 않았다. 즉 대부분의 경우 인장강도는 700MPa 이상을 나타내어 규격치 이상을 나타내나 연신율은 15% 전후로 규격치 이하를 나타내었다. Fig. 1-2에는 이러한 용접금속의 인장강도와 연신율의 상관관계를 나타내었는데 인장강도의 증가에 따라 연신율은 직선적으로 감소하고 있다 (상관계수 0.91). 따라서 인장강도를 저하시키면 연신율의 상승이 기대되어 강도와 연성을 동시에 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

용접금속 인장강도에 가장 큰 영향을 미치는 요인의 하나는 당연히 용접금속 중 합금원소이다. Fig. 1-3에는 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간에 따른 경화도를 나타내는 척도인 탄소당량식을 사용하여 용접금속 인장강도의 변화를 나타내었다. 이때 사용한 탄소당량식은 다음과 같다.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si}{7}$$

예상되는바와 같이 탄소당량의 증가에 따라 인장강도는 직선적으로 증가한다 (상관계수 0.96). 따라서 용접금속의 인장강도를 저하시키기 위하여서는 용접 와이어의 합금원소 억제를 통한 용접금속 탄소당량의 저하가

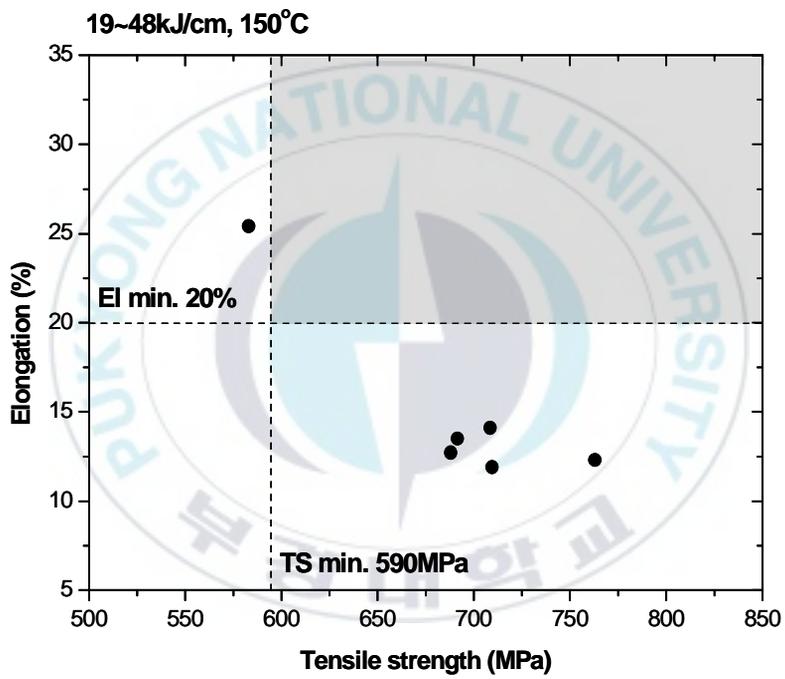


Fig. 1-1 Relationship between weld metal elongation and tensile strength

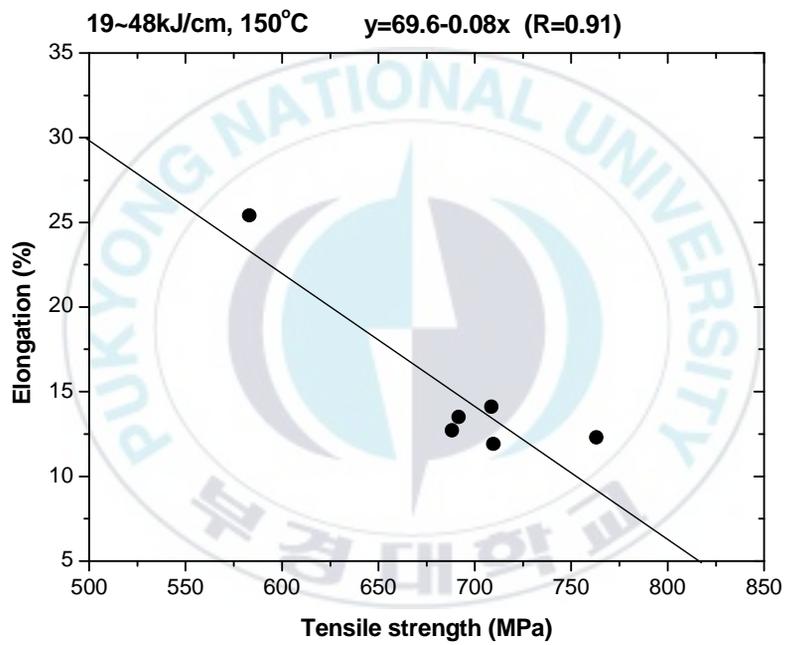


Fig. 1-2 Variation of elongation as a function of tensile strength of weld metal

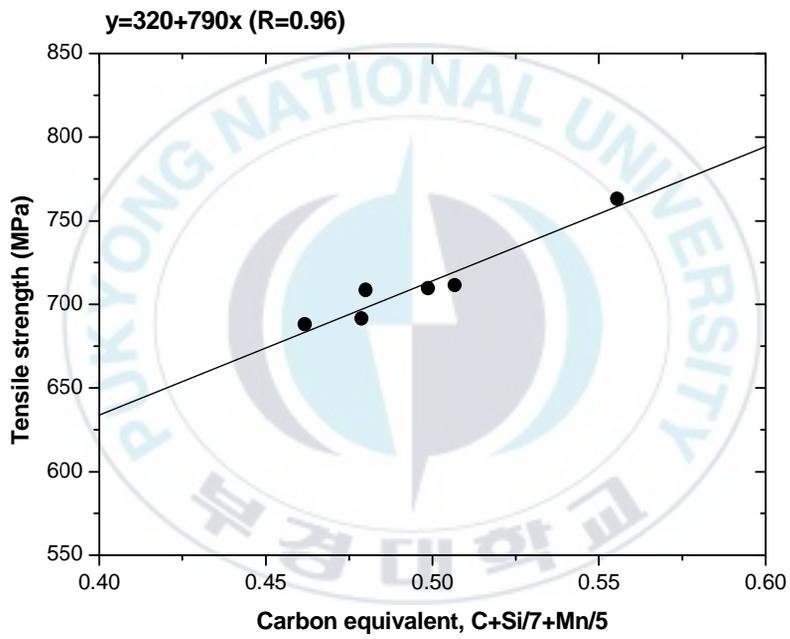


Fig. 1-3 Variation of tensile strength as a function of carbon equivalent in weld metal

유효한 수단임을 알 수 있다.

한편 용접금속의 합금성분은 와이어 자체의 성분뿐만 아니라 용접조건에 따라서도 영향을 받는다. Fig. 1-4에는 용접입열에 따른 용접금속의 탄소당량 변화를 나타내었다. 입열이 증가할수록 탄소당량이 저하하고 있다. 즉 동일한 와이어를 사용하여도 용접조건에 따라 용접금속의 성분이 변하여 인장강도가 변할 수 있음을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 먼저 저 합금성분의 와이어를 시험제조하여 와이어 저 합금화에 따른 용접금속 인장강도와 연성변화를 조사하였다. 한편 용접조건에 따른 용접금속의 성분변화와 그에 따른 강도/연성변화를 조사하기 위하여 입열을 결정하는 용접조건인 전류, 전압 그리고 속도의 변화에 따른 용접금속의 강도와 인성변화를 조사하였다. 특히 전류, 전압 그리고 속도의 영향을 독립적으로 살펴보기 위하여 용접 중 한 조건을 변경하는 경우 다른 두 조건은 항상 일정하게 유지하여 용접을 행하였다.

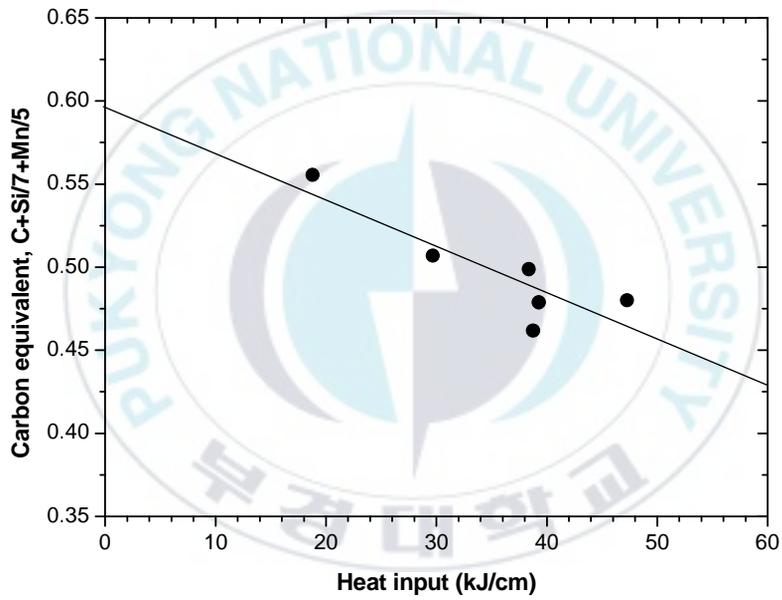


Fig. 1-4 Variation of carbon equivalent in weld metal as a function of heat input

## 제2장. 실험방법

### 제2.1절. 시험재

실험에 사용한 모재는 두께 20mm의 인장강도 600MPa급 압연강으로 Table 2-1에 화학성분과 기계적성질을 나타내었다. Table에는 일본 “건축구조용 고성능 590MPa 강재” (SA440)의 화학성분과 기계적성질도 함께 나타내었다.

### 제2.2절. 실험방법

두께 20mm의 압연강을 양면 0.5mm씩 연삭하여 두께 19mm로 만든 후 single bevel groove로 가공하여 100% CO<sub>2</sub>용접을 행하였다. 가스유량은 25L/min이며 예열온도는 150°C이다. Fig. 2-1에 상세한 이음부 형상을 나타내었다. 용접 와이어 종류에 따른 용접시험은 탄소가 약 0.03~0.05%, 실리콘이 약 0.17~0.42%, 망간이 약 0.82~1.65%로 변경된 직경 1.4mm의 5 종류 용접 와이어를 제조하여 입열량 48kJ/cm, 패스간온도 약305°C의 조건으로 행하였다. Table 2-2에 각 와이어별 상세한 용접조건을 나타내었다.

용접입열 변화 시험은 입열에 영향을 미치는 전류, 전압, 용접속도를 각각 독립적으로 변화시켜 행하였다. Table 2-3에 상세한 용접조건을 나타내었다. 전류변경 시험에서는 전압 32V, 용접속도 35cpm로 일정하게 유지하며 전류만 250~370A로 변경하여 용접하였고, 전압변경 시험에서는 전류 약 425A, 용접속도 25cpm로 일정하게 유지하며 전압만 38~45V로 변경하였으며, 용접속도변경 시험에서는 전류 370A, 전압32V로 일정하게 유지하며 용접속도만 20~35cpm으로 변경하였다. 사용한 와이어는 용접금속 인장시험 결과 5 종류의 와이어 중 가장 높은 인장강도를 나타내는 1번 와이어, 즉 용접금속 성분이 탄소 0.05%, 실리콘 0.42%, 망간 1.65%를 나타내는

Table 2-1 Chemical composition and mechanical properties of base metal

	Chemical composition of base metal (wt%)											Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	Ti	T.S. (MPa)	Y.S. (MPa)	EL. (%)	vE <sub>0</sub> (J)
<b>Base metal</b>	0.037	0.137	1.50	0.006	<0.001	0.197	0.209	0.069	0.043	0.039	0.019	648	491	-	339 (-5 °C)
<b>SA440B</b>	≤0.08	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.008	-	-	-	-	-	-	590-740	440-540	≥20	≥47
<b>SA440C</b>				≤0.020											

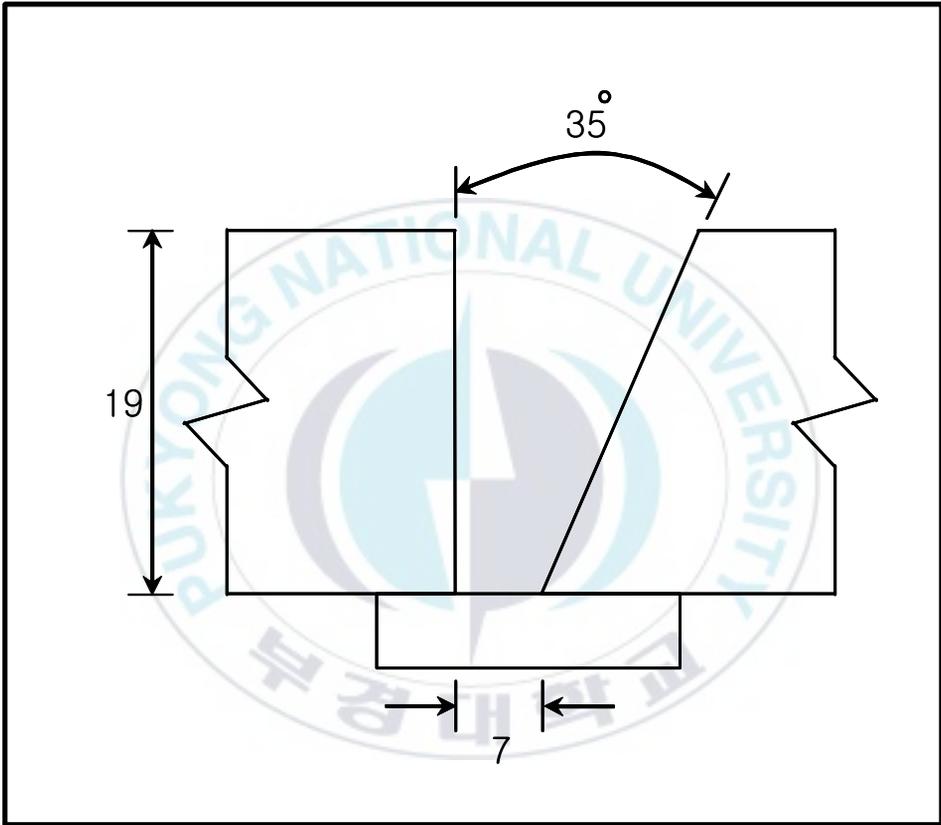


Fig. 2-1 Schematic diagram showing joint detail used in weld metal

Table 2-2 Welding conditions used

Wire	Welding conditions			Heat input (KJ/cm)	Interpass temperature (°C)	Pass number
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)			
1	405	41	21	48	305	4
2	413	40	21	48	305	4
3	408	41	21	48	304	4
4	411	40	21	48	304	4
5	411	40	21	48	303	4

Table 2-3 Welding conditions used

No.	Variable	Welding conditions			Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)	Pass Number
		Current (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)			
1	Current	251	32	35	14	310	10
2		303	33	35	17	310	8
3		370	33	35	21	310	7
4	Voltage	425	38	25	39	309	3
5		427	42	25	42	312	3
6		419	45	25	45	309	3
7	Speed	370	33	35	21	310	7
8		364	32	28	28	312	5
9		373	33	20	37	310	4

직경 1.4mm 와이어를 선택하여 실험하였다. 용접중 패스간온도는 310°C로 일정하며 용접선 길이의 1/2위치에서 groove로부터 10mm 떨어진 곳의 판 표면에서 접촉식온도계를 사용하여 측정하였다.

용접 후 용접금속의 인장 및 충격시험을 행하여 용접금속 기계적 성질을 측정하였다. 인장 시험은 JIS Z3111 A2호(직경 6mm, GL 24mm) 시험편을 용접금속 중앙에서 채취하여 상온에서 시험을 행하였으며, 충격 시험은 판 두께 중앙부에서 표준 Charpy 충격시험편을 채취하여 0°C에서 시험을 행하였다. 이때 노치 위치는 용접금속 중앙으로 하였다. Fig. 2-2에 인장 시험과 충격 시험의 시편채취 요령을 모식도로 나타내었다. 용접금속의 조직은 배율 500배로 광학현미경 사진을 촬영한 후 확대하여 IIW Doc. IX-1533-88에 따라 조직분율을 측정하여 관찰하였다<sup>9)</sup>. 본 실험에서는 편의상 조직을 입계페라이트 (PF), 침상페라이트 (AF), 그리고 제2상을 수반하는 페라이트 (FS)로 대별하였다.

다층용접시 재가열온도에 따른 용접금속 인성변화를 상세히 확인하기 위하여 Gleeble 3200을 사용하여 재가열온도가 다른 용접금속을 모사한 후 용접금속의 인성변화를 조사하였다. 입열량 47kJ/cm로 3층 3패스 용접한 용접금속 최종 패스부에서 모사시편을 채취한 후 입열량 48kJ/cm에 해당하는 열싸이클을 부여하였다. 이때 최고가열온도는 800, 900, 1000, 1200, 1400°C로 달리하였다. 열싸이클 부여 후 시편을 5×5×10mm의 subsize 충격 시험편으로 최종 가공하여 0°C에서 충격시험을 행하였다.

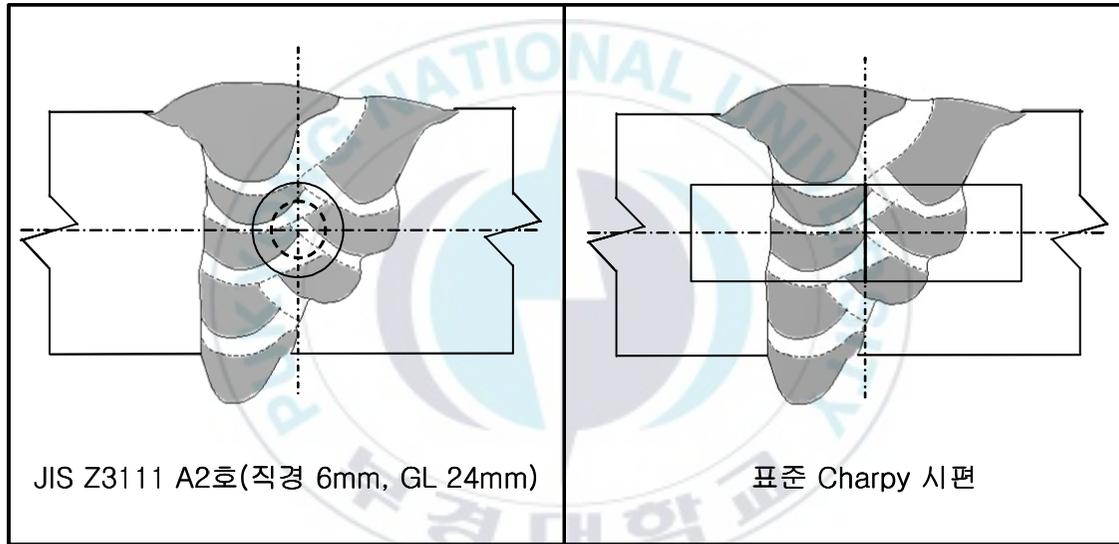


Fig. 2-2 Schematic diagram showing location of tensile and impact test specimen in weld metal

### 제3장. 실험결과 및 고찰

#### 제3.1절. 용접 와이어에 따른 용접금속 강도 및 연성 변화

용접금속 저 강도화에 따른 용접금속 연성 증가를 살펴보기 위하여 용접금속 강도에 가장 큰 영향을 미치는 탄소, 실리콘, 망간을 변경하여 5종류의 용접 와이어를 시험적으로 제조하였다. 이러한 와이어를 사용하여 철골용접 중 가혹한 조건을 가정한 입열 48kJ/cm, 패스간온도 305°C로 용접하여 용접금속을 제작하였다. Table 3-1에 각 용접금속의 화학성분을 나타내었다. 용접금속의 탄소는 0.03~0.05%, 실리콘은 0.17~0.42%, 망간은 0.82~1.65%로 탄소당량으로 환산하면 0.22에서 0.44까지 변하고 있다. Fig. 3-1에 탄소당량에 따른 용접금속 인장강도 변화를 나타내었다. 예상되는 바와 같이 탄소당량이 저하할수록 용접금속 인장강도는 저하하여 0.44에서 589MPa인 반면 0.22에서는 478MPa를 나타내었다. Fig. 3-2에는 이러한 용접금속 인장강도에 따른 연성 변화를 나타내었다. 용접금속 인장강도의 저하에 따라 연성은 증가하여 589MPa에서 33%인 연신율이 478MPa에서 37%를 나타내었다. 그림 중에는 용접금속의 규격치인 인장강도 590MPa과 연신율 20% 이상을 나타내는 영역을 함께 나타내었는데, 그림에서 보는바와 같이 모든 와이어가 연신율의 경우에는 규격치 이상을 나타내나 인장강도의 경우에는 규격치 이하를 나타내고 있다. 즉 시험제조한 5종류의 와이어를 입열 48kJ/cm, 패스간온도 305°C의 가혹한 조건으로 용접하면 용접금속의 인장강도가 규격치를 만족시키지 못함을 나타낸다.

용접금속 인장강도의 이러한 규격미달은 고 입열과 고 패스간온도의 조합에 기인하는 것으로 판단되어, 패스간온도를 310°C로 일정하게 유지한 후 입열을 14~45kJ/cm로 변경시켜 용접하여 강도와 연성을 동시에 만족시키는 최대허용 입열을 조사하였다. 사용 와이어는 5종류의 와

Table 3-1 Chemical composition of weld metal

Chemical composition of weld metal (wt%)													
wire	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	Ti	V	B
1	0.048	0.415	1.65	0.019	0.008	0.054	0.958	0.014	0.026	0.012	0.043	0.0120	0.0035
2	0.039	0.226	0.904	0.015	0.006	0.053	0.764	0.192	0.011	0.009	0.020	0.0106	0.0014
3	0.036	0.205	1.01	0.018	0.007	0.052	0.790	0.186	0.013	0.009	0.029	0.0111	0.0017
4	0.036	0.209	0.976	0.019	0.008	0.047	0.808	0.193	0.014	0.009	0.031	0.0113	0.0019
5	0.033	0.174	0.816	0.017	0.008	0.040	0.812	0.208	0.009	0.006	0.016	0.0087	0.0012

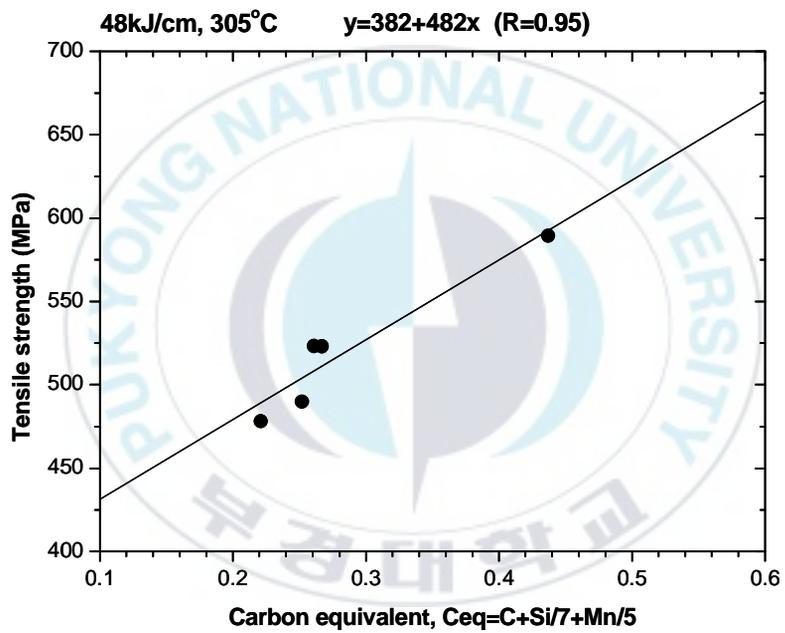


Fig. 3-1 Variation of tensile strength as a function of carbon equivalent in weld metal

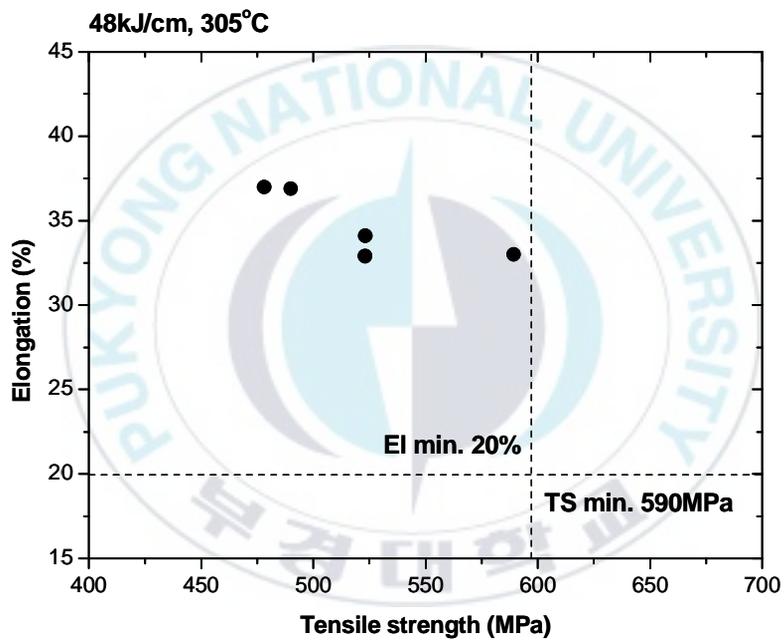


Fig. 3-2 Relationship between elongation and tensile strength of weld metal

이어 중 가장 높은 인장강도 (589MPa)를 나타내는 1번 와이어, 즉 용접 금속 성분이 탄소 0.05%, 실리콘 0.42%, 망간 1.65%를 나타내는 와이어를 선택하였다. 이 와이어는 용접금속 강도가 높을 뿐만 아니라 용접금속 인성도 다섯 와이어 중 가장 높은 값을 나타내었다. Fig. 3-3에 각 와이어의 충격시험 결과를 나타내었는데 그림에서 보는바와 같이 1번 와이어는 0°C에서 132J의 흡수에너지를 나타내어 다른 와이어에 비하여 매우 높은 값을 나타낸다. Fig. 3-4에는 각 용접금속의 대표적인 현미경 조직을 나타내었다. 1번 와이어의 경우 침상페라이트와 입계페라이트 혼합조직을 나타내나, 침상페라이트가 다른 용접금속 보다 아주 치밀하여 고인성이 이러한 치밀한 침상페라이트에 기인함을 알 수 있다.

Fig. 3-5에 1번 와이어를 사용하여 용접한 경우 입열에 따른 용접금속 인장강도, 항복강도 그리고 연신율의 변화를 각각 나타내었다. 인장강도는 입열량 45kJ/cm에서 573MPa을 나타내어 규격치 미달을 나타내나 42kJ/cm 이하에서는 모두 규격치 이상을 나타낸다. 항복강도와 연신율은 전 입열범위에서 규격치 이상을 나타낸다. 따라서 패스간온도를 300°C 전후로 유지하는 경우 본 와이어의 최대허용 입열은 42kJ/cm임을 알 수 있다.

### 제3.2절. 용접조건에 따른 용접강도 변화

앞서 1번 와이어를 사용하여 입열에 따른 용접금속 인장강도와 연신율의 변화를 나타낸 그림에서 보는바와 같이 인장강도는 입열의 감소에 따라 지속적으로 증가하지 않고 최대치를 나타낸 후 다시 감소하는 특이한 모습을 나타낸다. 즉 45kJ/cm에서 573MPa을 나타낸 후 증가하여 21kJ/cm에서 731MPa로 최대치를 나타낸 후 다시 감소하여 14kJ/cm에서 649MPa을 나타낸다. 이러한 점은 일반적으로 입열의 증가와 함께 용접금속의 강도가 감소한다는 경향과 다르다. 용접입열을 결정하는 용

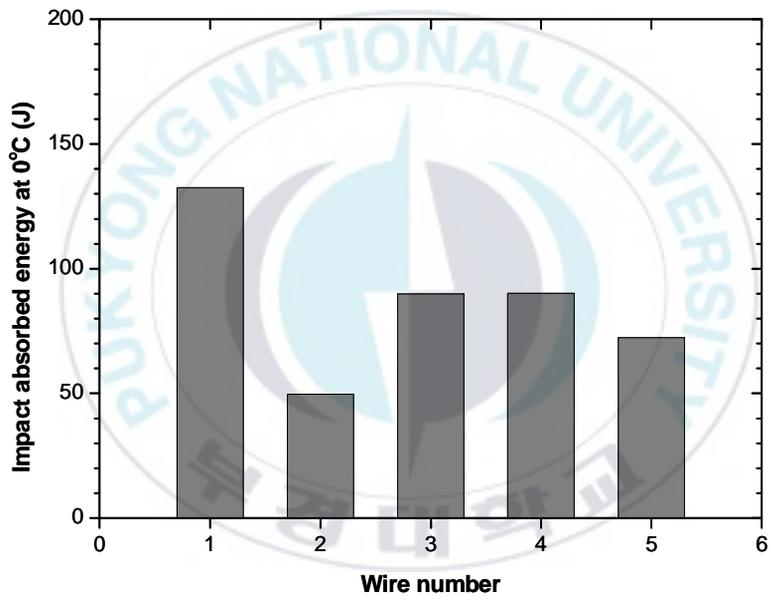


Fig. 3-3 Comparison of impact absorbed energy of weld metal

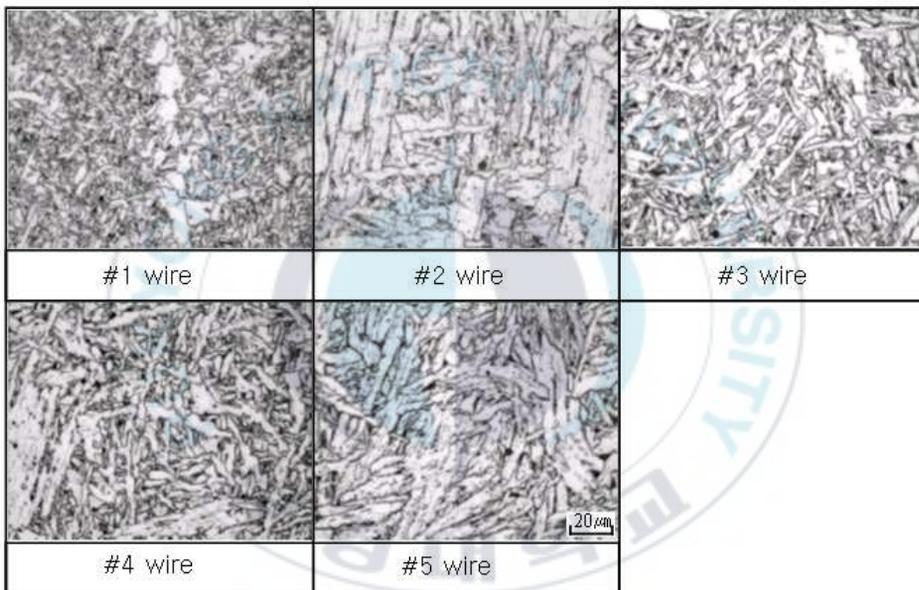


Fig. 3-4 Optical microstructure of weld metals welded with various wires

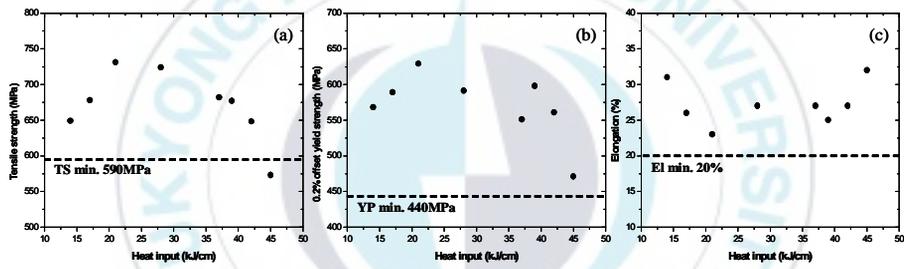


Fig. 3-5 Variation of (a) tensile strength, (b) 0.2% offset yield strength and (c) elongation of weld metal as a function of heat input

접변수는 용접전류, 전압, 속도이며, 용접전류와 전압이 증가할수록, 그리고 용접속도가 감소할수록 입열이 증가한다. 앞서 실험방법에서 설명한 바와 같이 본 실험에서는 이러한 세 변수의 영향을 독립적으로 살펴보기 위하여 입열 14, 17, 21kJ/cm에서는 전압을 32V, 속도를 35cpm로 일정하게 유지하고 전류만을 251, 301, 370A로 변경하였으며, 입열 21, 28, 37kJ/cm에서는 전류를 370A, 전압을 33V로 일정하게 유지하며 속도만을 35, 28, 20cpm으로 변경하였다. 한편 입열 39, 42, 45kJ/cm에서는 전류를 425A, 속도를 25cpm로 일정하게 유지하고 전압만을 38, 42, 45V로 변경하였다. 따라서 입열 14~21kJ/cm는 전류만의 영향을, 21~37kJ/cm는 속도만의 영향을, 그리고 39~45kJ/cm는 전압만의 영향을 독립적으로 나타낸다. 용접금속 인장강도의 변화를 이러한 전류, 전압, 속도만의 변화로 나타낸 것이 Fig. 3-6이다. 전류와 속도의 증가에 따라 인장강도는 증가하나, 전압의 증가에 따라서는 인장강도가 저하한다. 이러한 전압과 속도에 따른 인장강도의 변화는 쉽게 이해된다. 즉 전압의 증가는 입열을 증대시키기 때문에 인장강도는 저하하는 반면, 속도의 증가는 입열을 감소시키기 때문에 인장강도가 증가함을 쉽게 이해할 수 있다. 하지만 전류의 증가는 입열을 증가시킴에도 불구하고 인장강도가 증가하는 특이한 경향을 나타낸다.

일반적으로 입열의 증가에 따른 인장강도의 감소는 용접냉각속도 저하에 따른 입계페라이트 등 고온변태조직의 형성과 조직의 조대화 등 조직적인 요인과 용접금속 중 합금원소 회수율의 변화에 따른 기지강도 자체의 변화에 기인한다고 알려져 있다. 용접조건에 따른 이러한 합금원소 회수율 및 조직의 변화를 살펴보기 위하여 각 조건으로 용접한 용접금속의 화학성분 분석과 현미경 조직검사를 행하였다. Table 3-2에 결과를 요약하였다. 먼저 용접조건의 변경에 따라 합금원소, 특히 탈산원소들인 탄소, 실리콘, 망간, 알루미늄, 티타늄 등의 차이가 뚜렷하게 나타

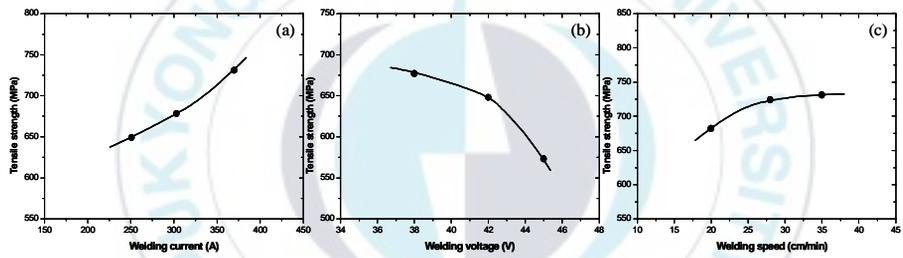


Fig. 3-6 Effect of (a) welding current, (b) welding voltage and (c) welding speed on the tensile strength of weld metal

Table 3-2 Chemical composition, volume fraction of microstructure constituents, and columnar width of weld metals

No	Variable	Chemical composition of weld metal (wt%)								Volume fraction of microstructure (%)			Columnar width ( $\mu\text{m}$ )
		C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B	O	PF	FS	AF	
1	Current	0.036	0.530	1.93	1.05	0.029	0.049	0.0047	0.071	21.8	1.3	76.9	53.8
2		0.038	0.530	1.95	0.930	0.032	0.053	0.0042	0.067	33.3	0.3	66.4	61.3
3		0.047	0.591	2.03	1.00	0.040	0.064	0.0053	0.069	16.5	1.3	82.2	NA
4	Voltage	0.041	0.544	1.87	0.98	0.030	0.048	0.0044	0.063	37.8	2	60.2	80.4
5		0.041	0.473	1.72	1.02	0.025	0.038	0.0044	0.064	43.1	1.2	55.7	87.2
6		0.039	0.372	1.49	0.798	0.024	0.033	0.0028	0.070	50.4	2.1	47.5	90.3
7	Speed	0.047	0.591	2.03	1.00	0.040	0.064	0.0053	0.069	16.5	1.3	82.2	NA
8		0.047	0.577	1.96	0.938	0.040	0.058	0.0049	0.066	25.4	0.9	73.7	NA
9		0.045	0.530	1.91	0.947	0.031	0.043	0.0046	0.055	27.7	1.5	70.8	NA

난다. 먼저 전류의 증가는 이러한 탈산원소들을 지속적으로 증가시키고 있는 반면 전압의 증가는 반대로 탈산원소들을 지속적으로 감소시킨다. 한편 속도의 증가는 탈산원소들을 증가시킨다. 따라서 용접과정 중 전류와 속도의 증가는 와이어 중 탈산원소인 탄소, 실리콘, 망간, 알루미늄, 티타늄의 산화손실을 억제하나 전압의 증가는 반대로 산화손실을 촉진시킬 수 있다.

Fig. 3-7과 Fig. 3-8에는 각 용접조건에서 대표적인 용접금속 현미경조직을 나타내었다. 실험방법에서 설명한 방법으로 각 용접금속에서 primary ferrite (PF), ferrite with second phase (FS) 그리고 acicular ferrite (AF)의 면적백분율을 측정하였다. Table 3-2에 나타낸바와 같이 강도와 인성에 가장 큰 영향을 미치는 고강도/고인성 조직인 AF는 전류의 증가에 따라 76.9%에서 66.4%로 감소한 후 다시 82.2%로 증가한다. 한편 전압의 증가에 따라서는 60.2, 55.7, 47.5%로 지속적으로 저하하며, 속도의 증가에 따라서는 70.8, 73.7, 82.2%로 지속적으로 증가한다. 한편 용접금속 중 주상정 조직이 뚜렷하여 주상정 폭을 측정할 수 있는 경우에는 그 폭도 함께 측정하였다. Table 3-2에 나타낸바와 같이 전압을 변경시킨 경우에만, 즉 입열이 큰 경우에만 주상정이 뚜렷하여 주상정 폭을 모두 측정할 수 있었다. 전압이 증가할수록, 즉 입열이 증가할수록 주상정 폭이 증가하고 있다.

용접조건에 따른 용접금속 인장강도 변화는 상기의 탈산원소 회수율과 조직 등에 영향을 받을 것이다. 먼저 인장강도의 변화를 고강도/고인성 조직인 AF의 변화로 나타낸 것이 Fig. 3-9이다. 그림에서 보는바와 같이 인장강도는 AF의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이나 상관계수는 0.79로 그렇게 커지는 않다. 한편 Fig. 3-10에는 인장강도의 변화를 용접금속 중 합금원소, 즉 탄소당량으로 나타내었다. 인장강도는 탄소당량의 증가와 함께 직선적으로 증가하며 상관계수는 0.94로 AF보다 훨씬

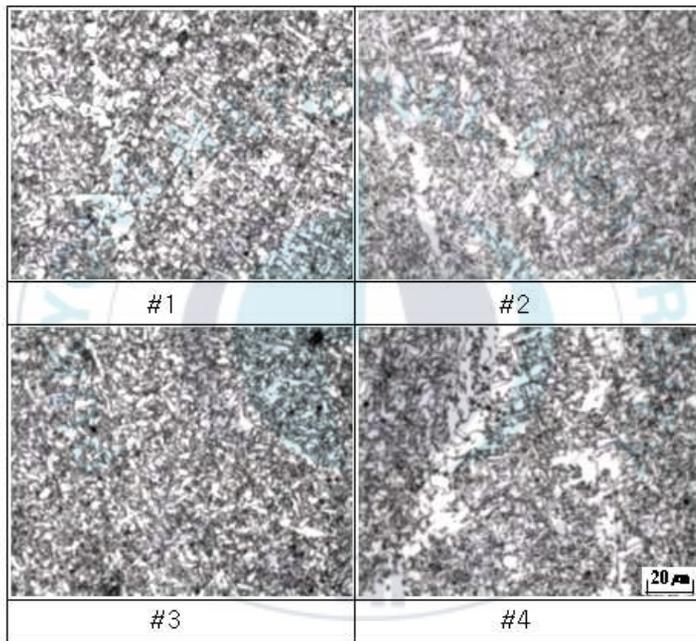


Fig. 3-7 Optical microstructure of weld metal welded with various weld conditions

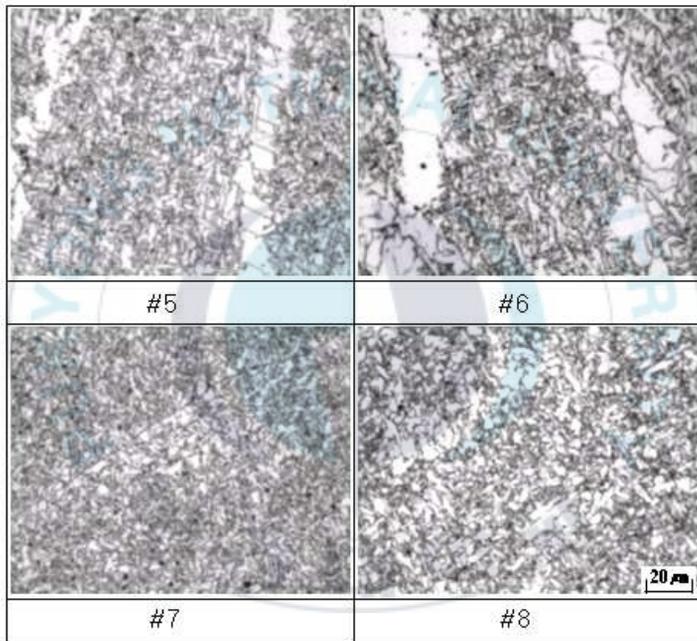


Fig. 3-8 Optical microstructure of weld metal welded with various weld conditions

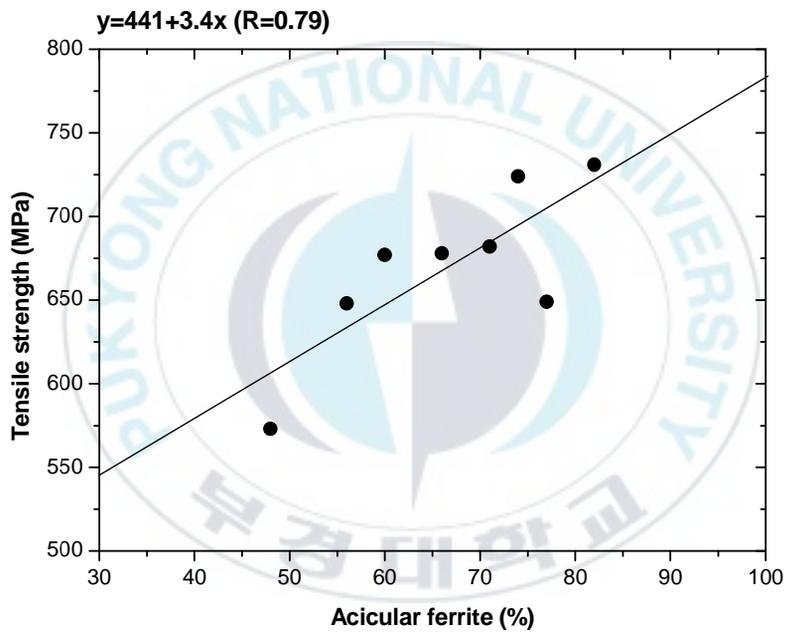


Fig. 3-9 Variation of tensile strength of weld metal as a function of acicular ferrite

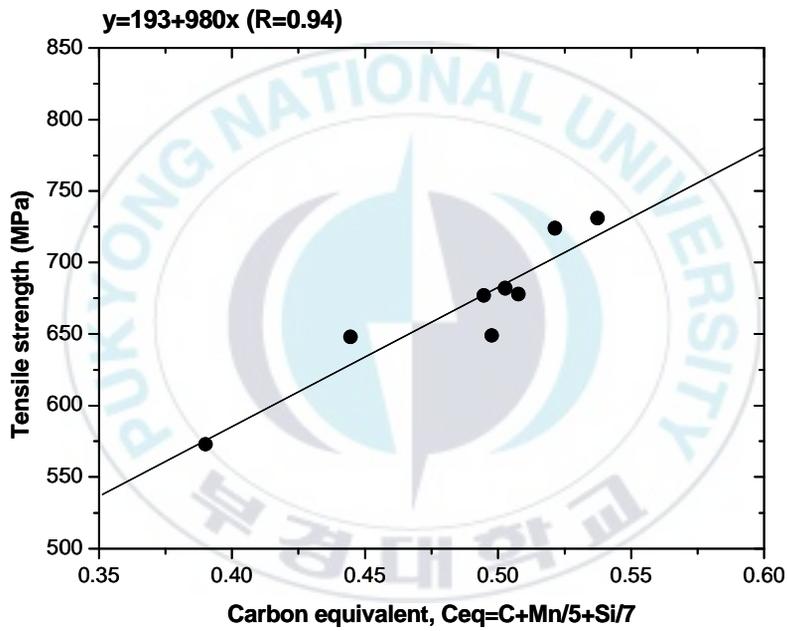


Fig. 3-10 Variation of tensile strength of weld metal as a function of carbon equivalent

높은 값을 나타낸다. 이러한 사실로부터 본 실험조건에서 용접금속 인장 강도는 용접금속 중 합금원소, 특히 탄소, 실리콘, 망간 등의 회수율과 가장 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. Fig. 3-11에 용접전류에 따른 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간의 변화와 그에 따른 탄소당량의 변화를 나타내었다. 앞서 설명한바와 같이 전류의 증가는 탄소, 실리콘, 망간을 증가시키며, 그에 따라 탄소당량도 증가하고 있다. Fig. 3-12에는 전압의 영향을 나타내었는데 탄소는 크게 변화가 없으나 실리콘과 망간은 감소하며, 그에 따라 탄소당량도 저하한다. Fig. 3-13에는 속도의 영향을 나타내었다. 속도의 증가에 따라 탄소는 크게 변하지 않으나 실리콘과 망간은 증가하며 따라서 탄소당량도 증가하고 있다.

용접과정 중 와이어의 탈산원소 손실에 관하여서는 Grong 등의 실험결과가 있다. 그들은 GMA 용접에서 탈산과정을 크게 와이어 팁, 아크기둥, 그리고 용융 풀의 3단계로 나누어 각각의 단계에서 탈산반응을 검토하였다. 탄소는 대부분 와이어 팁에서 반응하여 CO가스로 산화손실된다고 하였다. 실리콘은 대부분 용융 풀에서 산화손실 되나 와이어 팁과 아크 기둥에서도 다음의 반응에 의하여 SiO(g)를 형성하여 소량 손실된다고 하였다. 한편 망간도 대부분 용융 풀에서 산화손실 되나 와이어 팁과 아크 기둥에서도 망간증기로 소량 손실된다고 하였다. 이러한 Grong의 결과를 이용하여 본 실험에서 용접전류, 전압, 그리고 속도에 따른 탈산원소의 회수율 변화를 해석할 수 있다. 먼저 전류가 증가하면 와이어의 용융속도가 증가하여 와이어 팁으로부터 용융 풀로의 용적이행 횟수가 증가한다. 따라서 와이어 팁이나 아크기둥에서 산소와 반응하는 시간이 줄어들어 산화손실의 감소가 일어난다. 먼저 전류의 증가에 따른 용적이행 횟수의 증가를 확인하기 위하여 용접과정 중 용접전류와 아크 전압의 변화를 측정하였다. Fig. 3-14에 전류를 251, 301, 370A로 증가시키며 용접하는 경우 아크전압과 용접전류의 파형을 나타내었다. 와이어

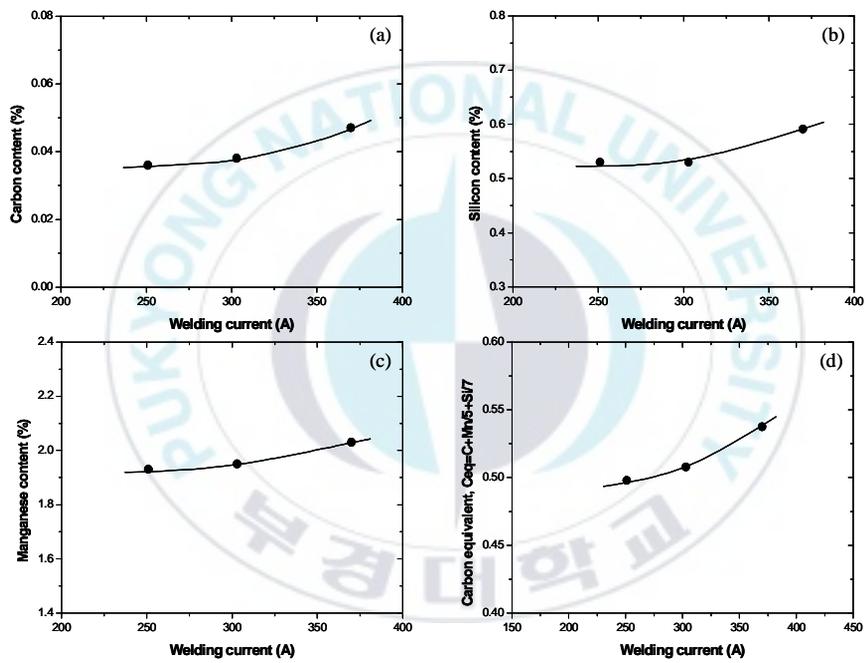


Fig. 3-11 Variation of (a) carbon content, (b) silicon content, (C) manganese content and (d) carbon equivalent in weld metal as a function of welding current

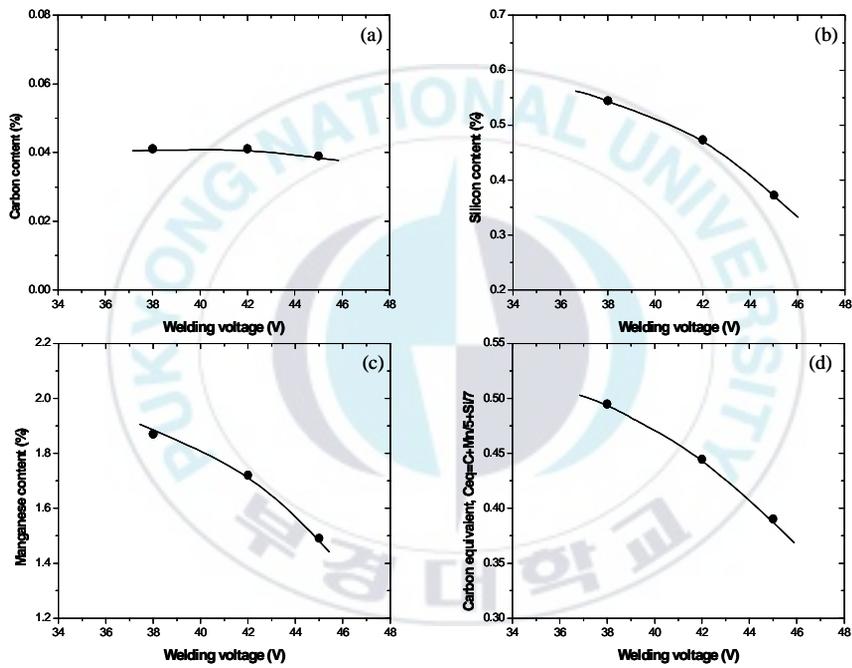


Fig. 3-12 Variation of (a) carbon content, (b) silicon content, (c) manganese content and (d) carbon equivalent in weld metal as a function of welding voltage

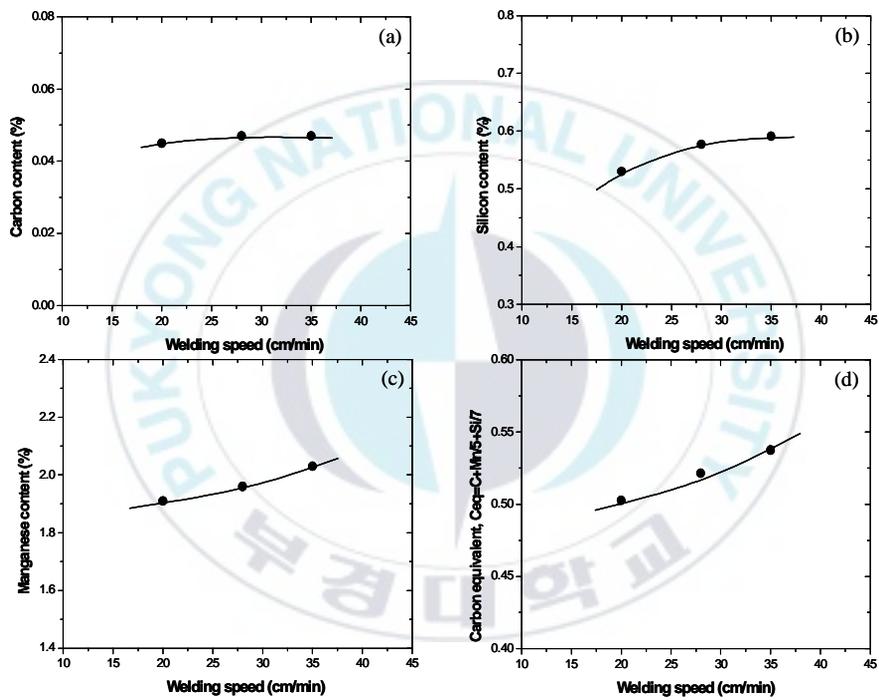


Fig. 3-13 Variation of (a) carbon content, (b) silicon content, (c) manganese content and (d) carbon equivalent in weld metal as a function of welding speed

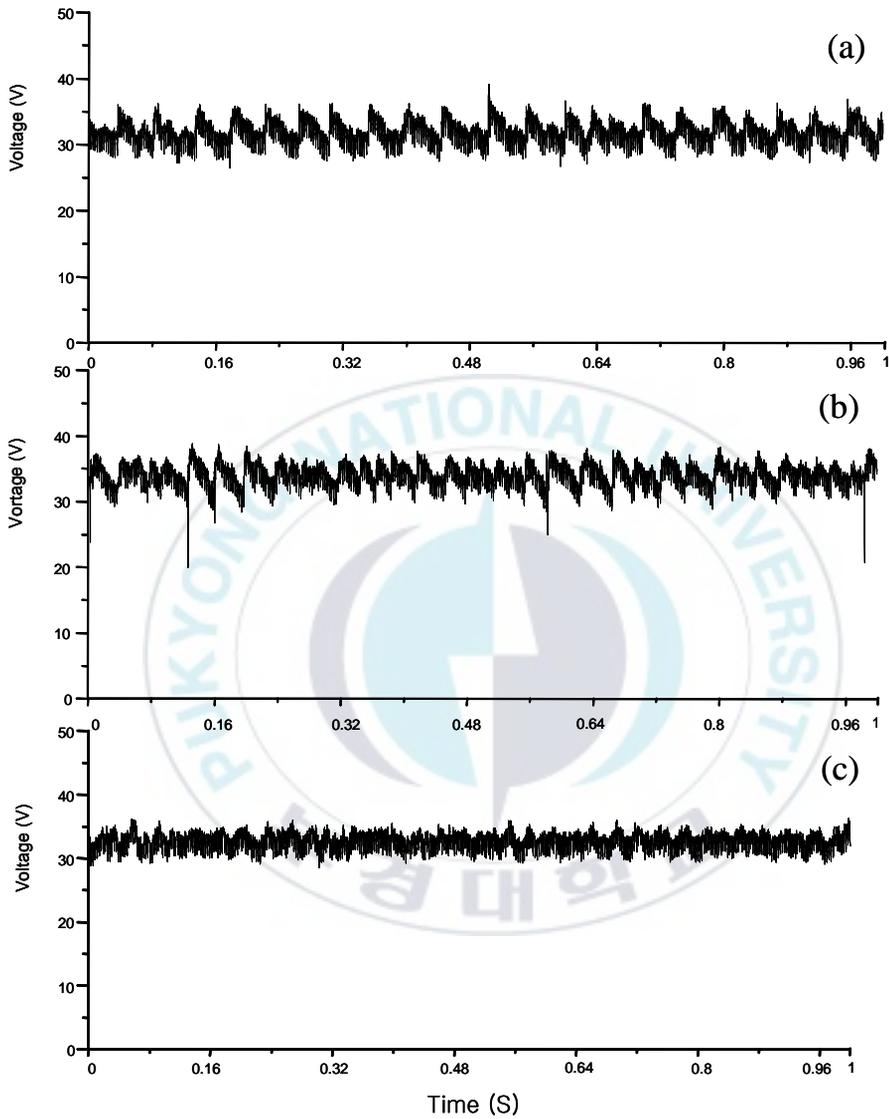


Fig. 3-14 Variation of voltage signal when welding with welding current (a) 251A, (b) 301A, and (c)370A

팁에 매달린 용적이 떨어지는 순간 아크전압이 순간적으로 증가하므로 전압/전류파형으로부터 이행횟수를 계산할 수 있다. 1초 동안 측정된 결과 251A의 경우 23회, 301A의 경우 34회를 나타낸다. 370A의 경우에는 전압/전류파형이 거의 직선적으로 변하고 있는데 이것은 와이어 팁에서 용적이 너무 빠르게 떨어지기 때문에 전압의 변화가 너무 작기 때문이다. 따라서 전류의 증가에 따른 용적이행 주파수의 증가를 확인할 수 있으며, 그 결과 와이어 팁이나 아크기둥에서 산소와 반응하는 시간이 짧아져 산화손실의 감소함을 알 수 있다. 한편 전류의 증가에 따라 용적이행이 증가하면 용적의 크기가 작아져 산소와 접촉하는 전체 표면적은 증가하게 되어 탈산손실을 촉진하는 역할을 하게 된다. 하지만 전체적으로 탈산손실이 감소하는 것으로부터 이러한 표면적 증대효과는 반응시간의 감소효과에 비하여 미미함을 알 수 있다. 다음 아크전압의 증가는 다른 용접변수가 일정하면 아크기둥의 길이를 증가시키는 효과를 나타낸다. 따라서 아크전압이 증가하여 아크기둥의 길이가 길어지면 용적이 아크기둥을 이행하는 시간이 길어져 산소와 반응하는 시간이 길어짐에 따라 산화손실이 증가하게 된다. 한편 용접속도의 증가는 용융 풀의 유지시간을 짧게 하여 산소가 용융 풀로 흡수되는 시간이 짧게 되어 그 결과 산화손실이 감소된다. 본 실험에서 탄소가 전류에만 영향을 받으며 전압이나 속도에는 영향을 받지 않는 점도 탄소의 산화손실은 대부분 와이어 팁에서만 일어난다는 Grong의 실험결과와 잘 일치한다. 또한 앞서 나타낸 전류에 따른 AF조직의 변화도 이러한 합금원소의 변화로 설명할 수 있다. 즉 일반적으로 전류가 증가하여 입열이 증가하면 냉각속도가 저하하여 용접금속에서 AF는 감소하고 대신 PF는 증가한다. 하지만 전류에 따른 용접금속의 조직검사 결과 AF는 전류의 증가에 따라 76.9%에서 66.4%로 감소한 후 다시 82.2%로 증가하였다. 이러한 특이한 현상은 전류의 증가에 따른 탄소, 실리콘, 망간의 증대와 관련이 있다. 즉 전류의

증가에 따라 냉각속도가 저하하나 동시에 탄소, 실리콘, 망간이 증대되어 경화도가 증대되는 결과 냉각속도 저하의 효과가 상쇄되기 때문이다. 따라서 탄소, 실리콘, 망간의 회수율이 큰 370A의 경우에는 큰 입열에도 불구하고 AF가 다시 많아지고 있다.

이상의 실험결과를 Fig. 3-15에 정리하였다. 입열 14~21kJ/cm 구간은 전류의 증대를 나타내는 구간으로 전류의 증대에 따라 용접금속 탄소당량이 증가하여 인장강도가 증가하며, 입열 21~37kJ/cm 구간은 속도의 감소를 나타내는 구간으로 속도의 감소에 따라 탄소당량이 저하하여 그에 따라 인장강도가 저하한다. 한편 입열 39~45kJ/cm 구간은 전압의 증가를 나타내는 구간으로 전압의 증가에 따라 탄소당량이 저하하여 강도가 지속적으로 감소한다. 또한 용접금속 성분이 탄소 0.05%, 실리콘 0.42%, 망간 1.65%를 나타내는 와이어를 사용하여 패스간온도를 310°C로 일정하게 유지하며 용접하는 경우 인장강도와 연성을 동시에 만족하는 최대허용 입열은 42kJ/cm임을 알았다. 앞서 설명한 바와 같이 다른 보고에 따르면 패스간온도를 150°C로 용접하여 용접금속 강도와 연성을 조사한 결과 용접금속 강도는 규격치 이상을 나타내었으나 연신율은 규격치를 만족시키지 못하였다. 이러한 점은 사용한 모재가 0.07%C-0.28%Si-1.84%Mn으로 본 실험에서 사용한 모재 0.04%C-0.14%Si-1.50%Mn보다 높은 합금성분을 나타내는 것과 패스간온도 저하에 기인한 강도 상승이 복합적으로 작용한 결과로 생각된다. Fig. 3-16에는 보고에 의한 결과와, 본실험에서 측정된 모든 용접금속의 강도와 연성을 함께 나타내었다. 입열 및 패스간온도에 따라 인장강도는 500~750MPa의 범위에서 변화하며 강도의 저하와 함께 연신율의 증가가 뚜렷하다. Fig. 3-17에는 용접금속 강도와 연신율이 모두 규격치 이상을 나타내는 입열과 패스간온도를 나타내었다. 강도와 연신율이 모두 규격치 이상을 나타내면 pass로, 하나라도 규격치 미만을 나타내면 fail로 나

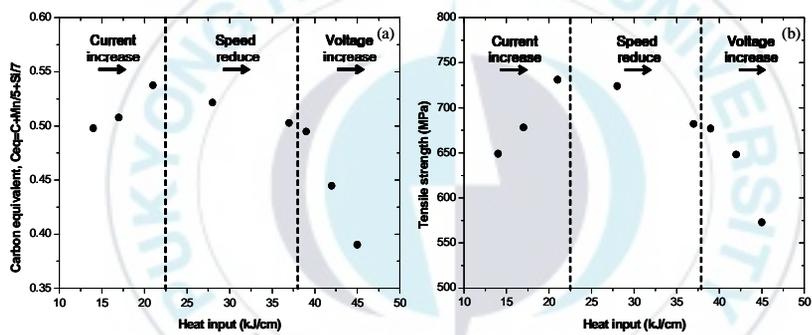


Fig. 3-15 Variation of (a) carbon equivalent and (b) tensile strength of weld metal as a function of heat input

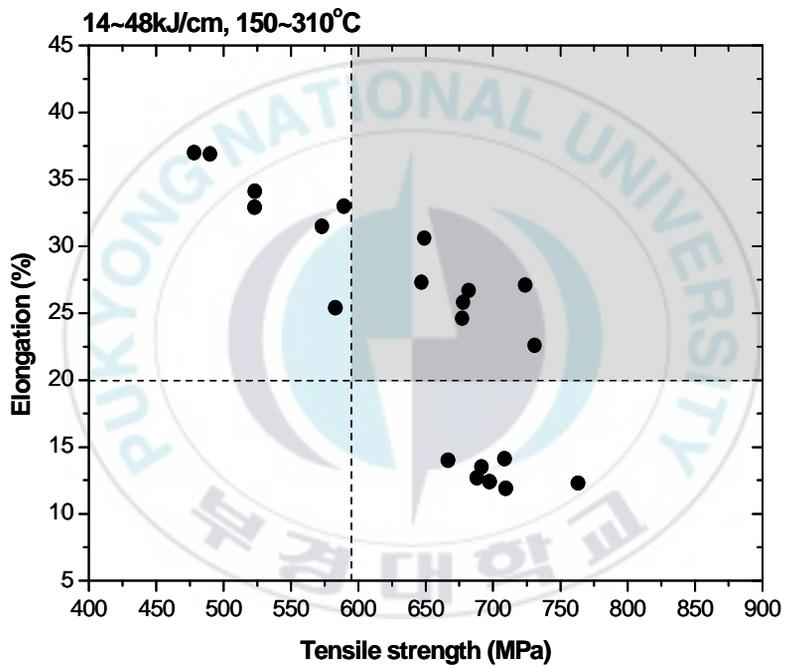


Fig. 3-16 Relationship between elongation and tensile strength of weld metal

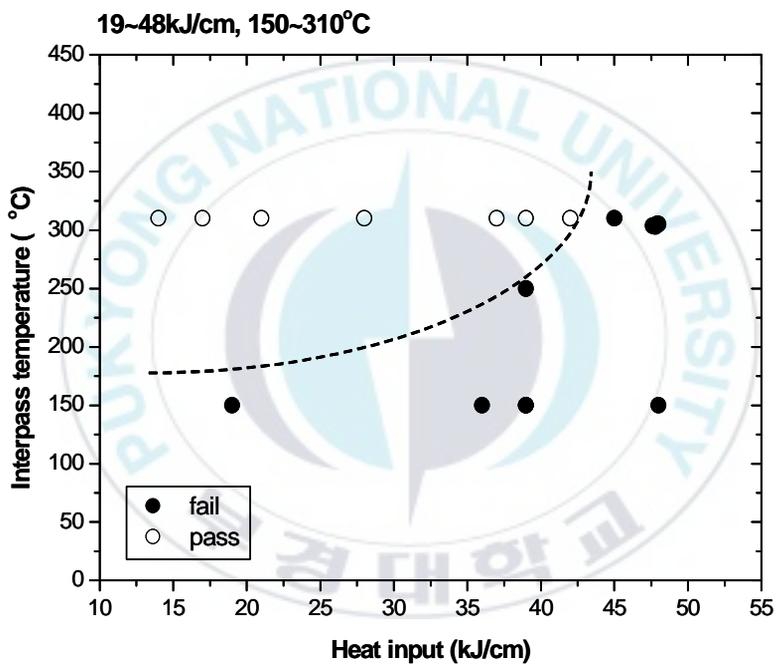


Fig. 3-17 Change of weld metal mechanical properties according to heat input and interpass temperature

타내었다. 앞서 나타낸바와 같이 패스간온도 310°C에서는 입열 42kJ/cm 까지 모두 규격 이상을 나타내다 그 이상의 입열에서 규격 미만을 나타낸다. 한편 패스간온도 150°C에서는 과도한 강도 상승으로 모두 규격 미만을 나타내었다. 이러한 이유는 사용한 모재의 차이에 기인한 과도한 강도 상승도 한 요인으로 생각되어 본 실험의 모재를 사용하여 패스간온도 150°C에서의 실험이 추후 필요함을 알 수 있다.

### 제3.3절. 용접금속 인성

용접금속의 강도뿐만 인성도 용접재료의 사용성능을 결정하는 중요한 요소의 하나이다. Fig. 3-18에 입열에 따른 용접금속 인성의 변화를 나타내었다. 일반적으로 용접금속의 인성은 입열의 증가에 따라 저하한다고 알려져 있으나 그림에서 보는바와 같이 본 실험에서는 두 사이에 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않는다. Fig. 3-19에는 인성변화를 용접금속 인장강도와 용접금속 중 침상페라이트 백분율로 나타내었다. 일반적으로 인성은 강도의 감소에 따라, 그리고 침상페라이트 증가에 따라 증가한다고 알려져 있으나 두 요인 모두와도 일률적인 상관관계를 나타내지 않고 있다. 다층용접에서 용접금속의 인성은 후속패스에 의하여 재가열되어 형성되는 열영향부의 크기에 의하여 영향을 받는다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서도 노치위치가 존재하는 곳에서의 열영향부의 크기를 조사하여 인성과의 상관성을 조사하였다. Fig. 3-20에 입열 45kJ/cm로 3 패스 용접한 경우 노치위치에서의 현미경조직을 나타내었다. 조직은 후속패스에 의하여 영향을 받지 않은 용접금속부, 후속패스에 의하여 영향을 받은 열영향부로 대별되며, 열영향부는 다시 조립의 결정립을 나타내는 조립열영향부와 세립을 나타내는 세립열영향부로 다시 나누어진다. 각 용접조건에서 개개 영역의 길이를 측정된 결과를 Table 3-3에 나타내었다. 입열 및 적층순서에 따라 개개 영역의 길이가 다르다. Fig. 3-21에

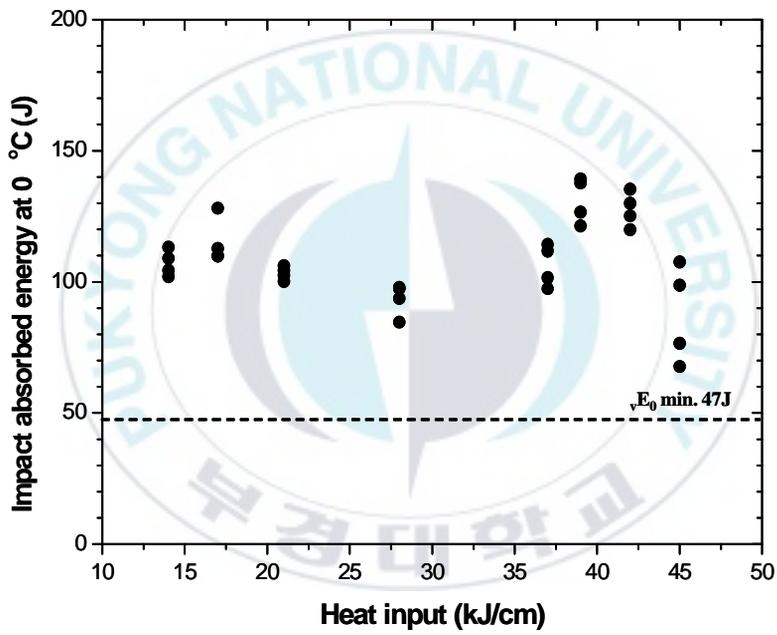


Fig. 3-18 Variation of impact absorbed energy at-0°C of weld metal as a function of heat input

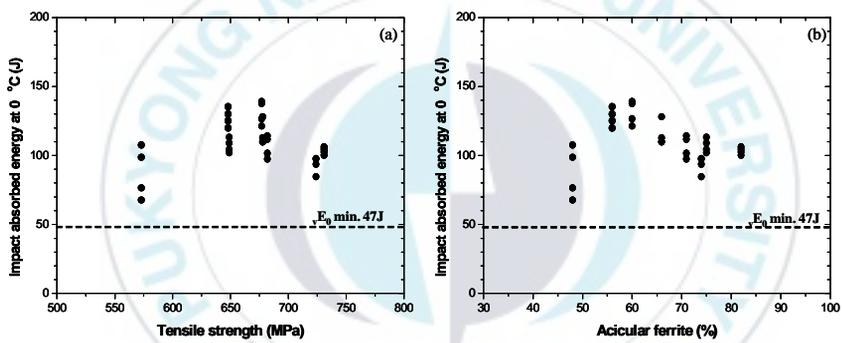
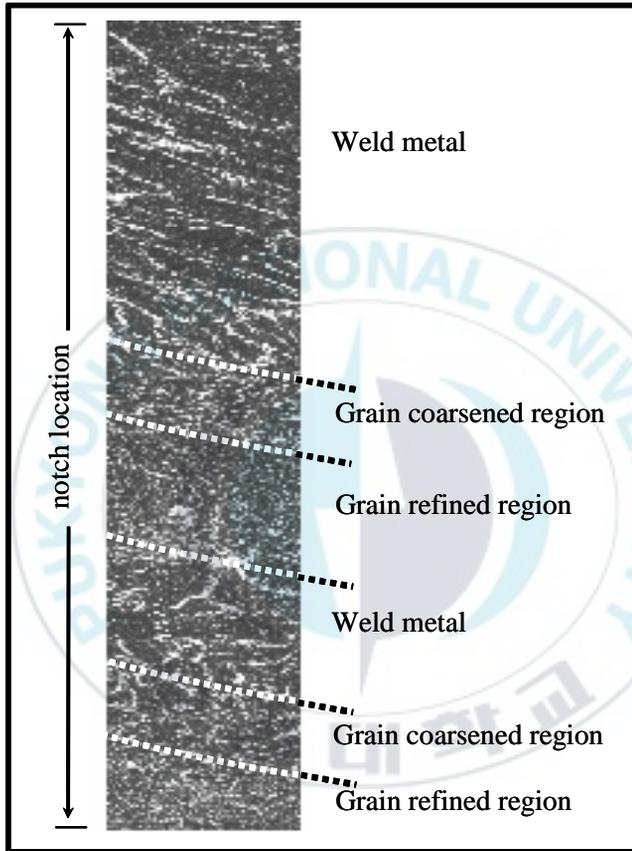


Fig. 3-19 Variation of impact absorbed energy at-0°C of weld metal as a function of (a) tensile strength and (b) acicular ferrite amount



Heat input 45kJ/cm, 3pass

Fig. 3-20 Optical microstructure in notch location  
(heat input 45kJ/cm, 3pass)

Table 3-3 Length of each region on the notch location

Heat input (kJ/cm)	Pass number	Deposition sequence	Length of each region (mm)		
			Weld metal	Grain refined region	Grain coarsened region
14	10		3.6	4.8	1.6
17	8		2.6	6.8	0.6
21	7		4.5	4.4	1.1
28	5		1.2	5.9	2.9
37	4		2.7	6.0	1.3
39	3		8.4	0.7	0.9
42	3		7.2	1.5	1.3
45	3		6.4	2	1.6

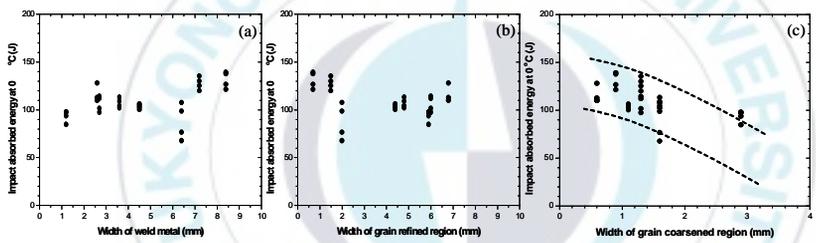


Fig. 3-21 Variation of impact absorbed energy at-0°C of weld metal as a function of (a) width of weld metal, (b) width of grain refined region and (C) width of grain coarsened region

용접금속 인성 변화를 각 영역의 길이로 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 용접금속 인성은 조립열영향부의 길이와 가장 좋은 상관관계를 나타내어, 노치위치에서 조립열영향부의 길이가 증가할수록 인성이 감소함을 나타내고 있다.

이러한 후속패스에 의한 재가열에 따른 용접금속 인성변화를 더욱 상세히 살펴보기 위하여 재가열온도에 따른 용접금속의 인성변화를 조사하였다. 실험방법에서 설명한바와 같이 입열량 47kJ/cm로 용접한 용접금속으로부터 열싸이클재현시편을 채취한 후 입열량 48kJ/cm의 입열량에 상당하는 열싸이클을 부여하였다. 이때 최고가열온도는 800, 900, 1000, 1200, 1400°C로 달리하였으며, 열싸이클 부여 후 subsize 충격시편으로 최종가공하여 충격시험을 하였다. Fig. 3-22에 최고가열온도에 따른 용접금속의 충격시험 결과를 나타내었다. 가열온도 800°C에서 약 60J의 낮은 흡수에너지를 나타낸 후 가열온도 900~1200°C에서 약 80J로 증가한다. 하지만 가열온도가 1400°C로 높아지면 다시 약 70J로 저하한다. 먼저 800°C에서의 낮은 인성은 2상역가열에 따른 고탄소 마르텐사이트 등 취약한 제2상의 형성에 기인하는 것으로 판단된다. 즉 재가열에 의하여 부분적으로 형성된 오스테나이트가 냉각과정에서 마르텐사이트로 변태하거나 혹은 잔류오스테나이트로 남아 인성을 저하하게 된다. 900~1200°C에서의 인성개선은 A<sub>3</sub>변태온도 직상으로 가열되어 미세한 오스테나이트를 형성하는 것에 기인한다. 하지만 가열온도가 1400°C로 높아지면 조대한 오스테나이트를 형성하여 다시 인성이 저하한다. 이러한 사실로부터 후속패스에 의하여 재가열되어 생기는 열영향부내에서도 가열온도에 따라 인성이 매우 다를 수 있다. 하지만 상기의 시험결과에 따르면 다층용접금속의 인성은 조대한 열영향부의 크기에 가장 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

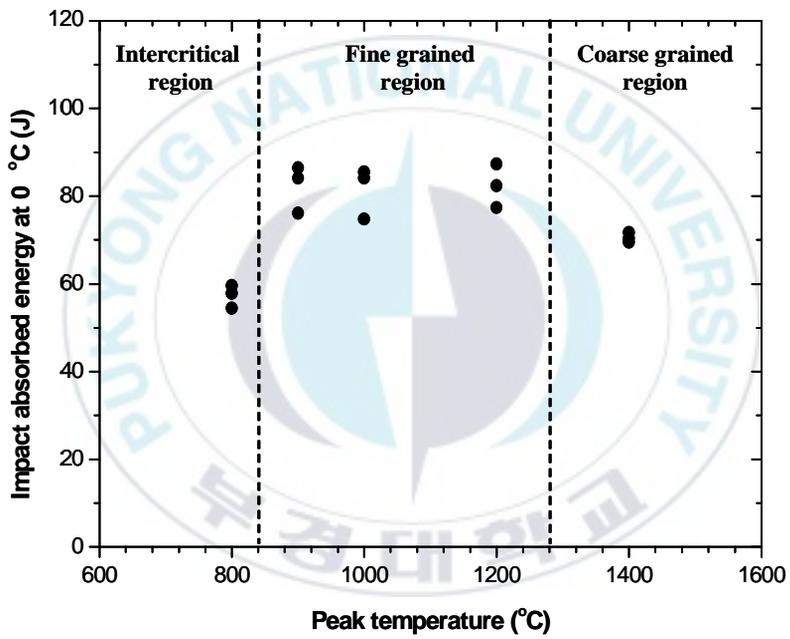


Fig. 3-22 Variation of impact absorbed energy at-0°C of weld metal as a function of peak temperature

## 제4장. 결론

① 용접금속 고강도화에 따른 연성저하를 개선하기 위하여 탄소가 0.03~0.05%, 실리콘이 0.17~0.42%, 망간이 0.82~1.65%로 변경된 용접 와이어를 시험제조하여 입열 48kJ/cm, 패스간온도 305°C로 용접하여 용접금속 강도와 연신율을 조사하였다. 용접금속 탄소, 실리콘, 망간이 저하할수록, 즉 탄소당량이 저하할수록 용접금속 강도는 저하하며 그에 따라 연신율은 증가하였다. 하지만 모든 와이어에서 연신율은 규격치 20% 이상을 나타내나, 인장강도는 규격치 590MPa 이하를 나타내어 용접금속의 과도한 저 강도화는 고 입열, 고 패스간온도와 같은 가혹한 조건에서는 규격치를 만족시키지 못함을 나타내었다.

② 시험제조한 와이어 중 가장 높은 강도를 나타내는 와이어 (용접금속 성분이 탄소 0.05%, 실리콘 0.42%, 망간 1.65%인 와이어)를 사용하여 패스간온도 310°C에서 입열량에 따른 강도와 연신율을 측정된 결과 입열량 42kJ/cm 이하에서 강도와 연신율 모두를 만족시켰다. 따라서 탄소 0.05%, 실리콘 0.42%, 망간 1.65%의 와이어를 사용하는 경우 패스간온도 310°C에서 최대허용 입열은 42kJ/cm이다.

③ 입열에 따른 용접금속 강도의 변화는 용접전류, 용접전압 그리고 용접속도에 따라 다르다. 용접전류와 용접속도의 증가는 와이어 중 탈산원소인 탄소, 실리콘, 망간의 산화손실을 억제하여 용접금속 탄소당량을 증가시키는 결과 강도를 증가시키는 반면, 용접전압의 증가는 산화손실을 촉진시켜 강도를 저하시킨다.

④ 0°C에서 용접금속 충격인성은 전체 용접입열 범위에서 규격

치 40J 이상을 나타내었다. 다층 용접금속 충격인성은 후속패스에 의해 형성되는 조립열영향부 크기와 가장 좋은 상관관계를 나타내어, 조립열 영향부 크기가 증가할수록 감소하였다. 따라서 다층용접시 조립열영향부 형성을 억제하는 적층관리가 필요함을 나타내었다.



## 참고 문헌

1. 菅 哲男 : 高能率化・高効率化に向けた溶接材料の展開, 溶接だより 技術がいど, **44-393** (2003), 1-6 (in Japanese)
2. A. Mukai, T. Nakano, H. Okamoto and K. Morita : Investigation on MAG Welding Wires for Building Structure, *Steel Construction Engineering*, **7-26** (2000), 13-25 (in Japanese)
3. M. Tsukamoto, I. Hatano, K. Tsuji, Y. Murata, Y. Ichinohe : Features of the Newly Developed Solid Wire for CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding under Large Heat Input and High Interpass Temperature Conditions, *Welding Technology*, **51-12** (2003), 93-98 (in Japanese)
4. Y. Yokoyama : The welding Methods for the Requirement of High-Quality Weld in the Steel Building Fabrication, *Welding Technology*, **51-8** (2003), 80-88 (in Japanese)
5. T. Wada, M. Namba and T. Tanaka : Welding Consumables for Building and Civil Engineering, *Journal of the Japan Welding Society*, **59-7** (1990), 32-39 (in Japanese)
6. G. M. Evans : The Effect of Heat Input on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld-Metal Deposits, *Welding Journal*, **61-4** (1982), 125s-132s
7. J. Vercesi and E. Surian : The Effect of Welding Parameters on High Strength SMAW All-Weld-Metal-Part 1:AWS E11018-M, *Welding Journal* , **75-6** (1996), 191s-196s

8. J. C. Byun and K. S. Bang : Effects of Heat Input and Interpass Temperature on the Strength and Impact Toughness of Multipass Weld Metal in 570MPa Grade Steel, Journal of KWS, **24-1**(2006), 64-70
  
9. Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals, IIW Doc. IX-1533-88



## 감사의 글

돌이켜 보면 많은 기대와 각오로 시작한 대학 생활 4년을 여러 교수님들께 많은 지도를 받으며 공부를 했지만, 부족함이 많은 인간 이기에 더 바라고 더 갖기를 원하는 욕망의 욕심은 끝이 없는 듯 합니다. 그 욕심의 하나로 시작했던 대학원 석사라는 과정, 이제 이 논문을 끝으로 6년간의 학교 생활을 정리하려 합니다.

무사히 학교생활을 마치고 사회라는 새로운 환경에 잘 적응 할 수 있도록 밀어주시고 이끌어주신 여러 교수님, 선배님, 후배님들의 성원에 무엇으로 보답을 해야 할지 모르겠습니다만 짧게나마 이 글을 통해 감사의 마음을 전합니다.

석사과정 2년 동안 가장 생각이 남는 분은 집안 사정으로 석사 진학의 꿈을 접을 뻔한 저를 지금 까지 이끌어 주시고, 한편의 논문이 완성 될 때 까지 작은 일 하나하나까지 세세히 지도해주신, 누구 보다 많은 가르침을 주신 지도교수 방국수 교수님께 진심으로 감사의 말씀 드리며, 평생 동안 감사하는 마음 잊지 않겠습니다.

접합, 세미나 수업을 하며 미흡한 저를 많은 가르침으로 이끌어 주신 김우열 교수님, 대학원 학과장으로 조교생활 동안 옆에서 많이 도와 주신 박홍일 교수님, 항상 푸근한 웃음을 잃지 않으신 김성규 교수님, 조교생활 동안 많은 격려의 말로 힘을 불어넣어 주신 조상명 교수님, 항상 호탕하게 대해주신 이병우 교수님, 윗트 있는 말로 웃으며 생활하라 가르쳐 주신 서원찬 교수님, 학과 업무에 대해 많은 가르침을 주신 이길근 교수님, 정말 머리 숙여 감사의 말을 전합니다.

저에게는 대학 생활의 반 이상이라고 해도 과언이 아닐 만큼 소중한 재료용접 연구실, 그 중에서도 학기 초부터 많은 부분을 같이했던 실험실 선배님, 후배들, 실험 부탁 하는 거 싫은 내색 한번 안하고 다해

준 현진 선배, 학부 때 연구실과 인연을 맺게 도와주고 많은 조언을 해준 충선 선배, 실험할 때 마다 묵묵히 옆에서 도와준 동희, 동우, 유나에게 2년 동안 같이 할 수 있어서 기뻐고 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

조교생활 같이 하며 옆에서 많은 조언을 해준 승철이 형, 미혜선배, SEM사진 현상할 때 현상액 냄새 같이 맡으며 옆에서 많이 가르쳐준 지경이형, 힘들 때 마다 소주잔을 같이 부딪혀준 상록이형, 희재형, 경민이, 지봉이, 규민이, 유정이 누나, 유라에게 감사하다라는 말을 전합니다. 힘들 때 마다 힘내라고 용기를 줬던 내 친구들, 민열, 인태, 진욱, 윤희, 자연이에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

마지막으로 동생 대학원 진학 한다고 했을 때 아무 말 없이 뒤에서 후원해준 나의 형, 나쁜 길로 빠지지 않게 항상 노심초사 옆에서 지켜 봐주시고, 이 한편의 논문을 쓸수 있게 믿어주고 격려해준 세상에서 가장 사랑하는 어머니께 이 논문을 바칩니다.

