



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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

**FCAW에서 용접변수에 따른
용접금속 강도 및 와이어
합금원소 회수율 변화**



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

鄭 東 熙

工學碩士 學位論文

**FCAW에서 용접변수에 따른
용접금속 강도 및 와이어
합금원소 회수를 변화**

指導教授 方 國 守

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2009年 2月

釜慶大學校 大學院

소재프로세스공학과

鄭 東 熙

鄭東熙의 工學碩士 學位論文을 認准함

2009年 2月



主 審 工學博士 金 星 圭 (印)

委 員 工學博士 李 吉 根 (印)

委 員 工學博士 方 國 守 (印)

목 차

Abstract

제 1 장 서 론 ----- 1

제 2 장 실험방법 ----- 4

제 1 절 시험재 ----- 4

제 2 절 실험방법 ----- 4

제 3 장 실험결과 및 고찰 ----- 11

제 1 절 용접금속 강도에 미치는 용접변수의 영향 ----- 11

제 2 절 합금성분의 회수율 변화 ----- 35

제 4 장 결 론 ----- 41

참고 문헌 ----- 43

감사의 글

Effects of welding parameters on the weld metal strength and recovery of alloying elements in FCAW

Dong Hee Jung

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

Abstract

600MPa grade weldable steels were gas metal arc welded with flux cored wires to study the effects of welding parameters such as welding current, voltage and travel speed on the tensile properties of weld metal. The results were interpreted in terms of chemical composition and microstructural change in the weld metal. When heat input was increased to 21kJ/cm by increasing welding current, the tensile strength of the weld metal increased. However, the tensile strength of the weld metal decreased when heat input was increased from 21 to 45kJ/cm by reducing travel speed or by increasing voltage. It showed that the decrease of tensile strength in higher than 21kJ/cm was related with the microstructural change. However, the increase of tensile strength in lower than 21kJ/cm was not related with the microstructural change, but caused by the increase of alloying elements such as carbon and manganese in the weld metal. It showed that the variation of the welding parameter resulted in different recoveries of the alloying elements in the wire. The recoveries increased with an increase of welding current and/or travel speed, but they decreased with an increase of voltage. The effects of welding parameters on the recoveries were rationalized with the time available for the reaction with oxygen during welding.

제1장 서론

용접금속의 강도는 주로 용접금속의 미세조직과 첨가되는 합금성분에 의해 결정된다. 이러한 용접금속의 강도는 일반적으로 입열량이 증가할수록 고온변태조직의 형성과 합금원소 회수율의 감소 등으로 인해 저하하는 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ Jose Vercesi^{4,5)} 등은 E11018-M 등 세 종류의 용접봉을 사용하여 피복아크용접한 용접금속의 기계적 성질에 미치는 용접변수의 영향에 대해 연구하였다. 그들은 입열량을 결정하는 용접변수인 전류, 전압 그리고 용접속도를 동시에 변화시킴으로써 입열량을 16.4~22.4kJ/cm로 변경하여 각 용접금속의 화학성분과 기계적 성질을 조사하였다. 그 결과 Fig. 1.1에 나타내었듯이 입열량이 증가할수록 인장강도와 항복강도가 모두 저하하였다. 그들은 이러한 용접금속 강도의 저하는 조직의 연화와 함께 높은 산화손실로 인한 용접금속 내의 망간과 실리콘 양의 감소에 기인한다고 하였다. 한편 Evans⁶⁾는 C-Mn 용접금속의 미세조직과 화학조성에 대한 입열의 영향을 조사하기 위해 용접속도를 변경하여 입열량을 6~43kJ/cm으로 달리하여 용접을 행하였다. 그 결과 입열량이 증가함에 따라 용접금속의 망간과 실리콘의 양이 감소하였고, 입계 페라이트의 양도 증가하였으며 조직의 평균 결정립 크기 또한 증가하여 용접금속의 인장강도 감소를 초래하였다.

앞서 살펴본 바와 같이, 지금까지의 용접금속의 기계적 성질, 특히 강도에 미치는 입열량에 대한 연구는 대부분 입열량을 결정하는 세 변수인 용접전류, 전압, 속도를 동시에 변화시켜 행해졌기 때문에 각 변수의 개별적인 영향을 알 수 없었다. 본 연구에서는 각 변수의 개별적인 영향을 알아보기 위해 용접변수 중 한 조건을 변경하는 경우 다른 변수를 일정하게

하여 각 변수의 영향을 체계적으로 조사하였다. 또한 이를 바탕으로 FCAW에서 용접변수에 따른 와이어 합금원소의 회수율 변화를 정량화하였다.



SMAW conditions

13kJ/cm : 140A-22V-14cm/min

17kJ/cm : 160A-24V-14cm/min

21kJ/cm : 185A-25V-13cm/min

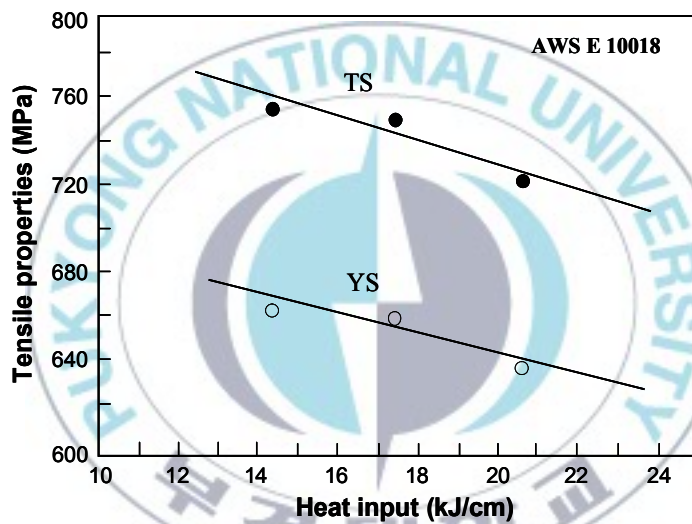


Fig. 1.1 Variation of tensile strength and yield strength of weld metal as a function of heat input

제2장 실험방법

2.1 시험재

실험에 사용한 모재는 두께 20mm의 인장강도 600MPa급 압연강으로 Table 2.1에 화학성분과 기계적 성질을 나타내었다. Table에는 일본 “건축 구조용 고성능 590MPa 강재” (SA440)의 화학성분과 기계적 성질도 함께 나타내었다. 사용한 와이어는 AWS E80T1-Ni1에 해당하는 직경 1.4mm의 플릭스 코어드 와이어로 와이어의 성분 분석은 와이어 그대로의 상태에서 KS D1673 (강의 유도결합 플라즈마 방출 분광분석방법)에 의거하여 이루어졌으며 Table 2.2에 화학성분을 나타내었다.

2.2 실험방법

Table 2.1의 압연강을 양면 0.5mm씩 연삭하여 두께 19mm로 가공한 후 single bevel groove로 가공하여 100% CO₂용접을 행하였다. 가스유량은 25L/min, 예열온도는 150°C로 하였다. Fig. 2.1에 상세한 이음부 형상을 나타내었다.

용접입열량 변화에 따른 용접금속의 강도변화를 알아보기 위해 용접입열 변경시험을 행하였다. 용접입열 변경 시험은 입열에 영향을 미치는 전류, 전압, 그리고 용접속도를 각각 독립적으로 변화시켜 행하였으며 Table 2.3에 상세한 용접조건을 나타내었다. 전류변경시험에서는 전압을 약 33V, 용접속도를 35cm/min으로 일정하게 유지하면서 전류만 251~370A로 변경하였고, 용접속도변경시험에서는 전류와 전압을 일정하게 유지하고 용접속

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	TS (MPa)	YS (MPa)	El (%)	νE_0 (J)
Base metal	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℃)
SA440B	≤0.08	≤0.55	≤1.60	≤0.030	≤0.008	-	-	-	-	-	-	590-740	440-540	≥20	≥47
SA440C				≤0.020											

Table 2.2 Chemical composition of wire

	Chemical composition of wire (wt%)						
	C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B
wire	0.049	0.66	2.58	0.95	0.44	2.12	0.0099

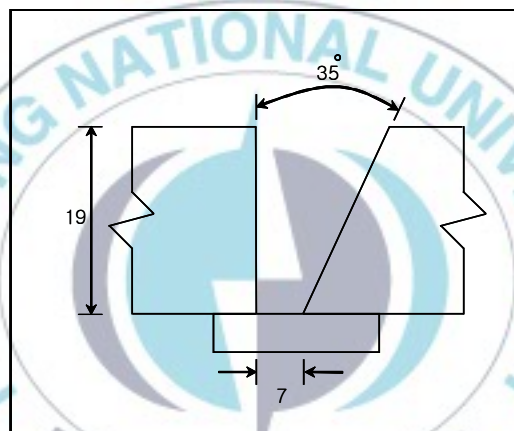


Fig. 2.1 Schematic diagram of joint detail used in the test

Table 2.3 Welding conditions used

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

도를 20~35cm/min으로 변경하였다. 그리고 전압변경시험에서는 전류와 용접속도를 일정하게 하고 전압을 38~45V로 변경하였다. 용접 중 패스간 온도는 310°C로 일정하게 하였고 용접선 길이의 1/2위치에서 groove로부터 10mm 떨어진 곳의 판 표면에서 접촉식온도계를 사용하여 측정하였다.

용접 후 용접금속의 인장시험을 행하여 용접금속의 기계적 성질을 측정하였다. 인장시험은 JIS Z3111 A2호(직경 6mm, GL 24mm) 시험편을 용접금속 중앙에서 채취하여 상온에서 시험을 행하였다. Fig. 2.2에 인장시험 시편 채취 요령을 모식도로 나타내었다. 용접금속의 화학조성은 용접금속의 중앙에서 시편을 채취하여 발광분광분석법으로 분석하였다. 용접금속의 조직분류는 배율 500배로 광학현미경 사진을 촬영하여 IIW Doc. IX-1533-88에 따라 조직분율을 측정하였다.⁷⁾ 본 실험에서는 편의상 조직을 프라이머리페라이트 (PF), 침상페라이트 (AF), 그리고 제2상을 수반하는 페라이트 (FS)로 대별하였다.

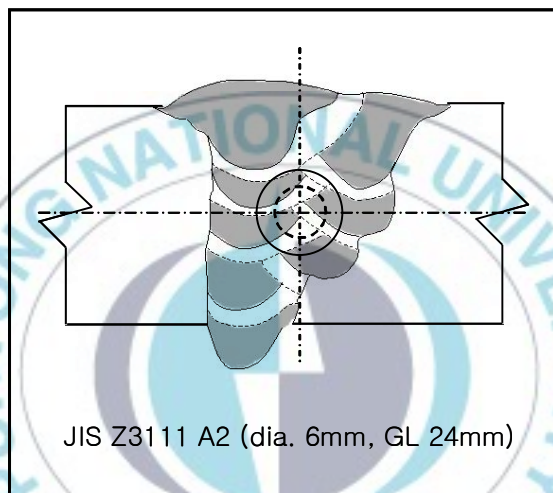


Fig. 2.2 Schematic diagram showing location of tensile test specimen in weld metal

제3장 실험결과 및 고찰

3.1 용접금속 강도에 미치는 용접변수의 영향

Fig. 3.1에 각 용접조건에서의 용접금속의 인장강도를 입열량에 따라 나타내었다. 그림에는 입열량을 변경시키기 위하여 사용한 용접변수의 변화를 함께 나타내었다. 용접금속의 인장강도는 입열량의 증가에 따라 지속적으로 감소하는 것이 아니라 입열량 14~21kJ/cm에서는 증가하여 731MPa로 최대치를 나타낸 후 28kJ/cm부터는 감소하기 시작하여 45kJ/cm에서 573MPa를 나타내었다. 이러한 점은 입열의 증가와 함께 용접금속의 강도가 저하한다는 일반적인 경향과는 차이가 있다. 특히 본 실험범위 내에서 전류의 증가는 입열을 증가시킴에도 불구하고 인장강도를 증가시키는 특이한 경향을 나타내었다. 용접입열을 결정하는 용접변수는 용접전류, 전압 그리고 용접속도이며, 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 35cm/min로 일정하게 유지하고 전류만을 251, 301, 370A로 변경하였으며, 입열 21, 28, 37kJ/cm에서는 전류를 370A, 전압을 33V로 일정하게 유지하면서 속도만을 35, 28, 20cm/min으로 변경하였다. 한편 입열 39, 42, 45kJ/cm에서는 전류를 425A, 속도를 25cm/min로 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. Fig. 3.1의 결과를 살펴보면 전류와 속도의 증가에

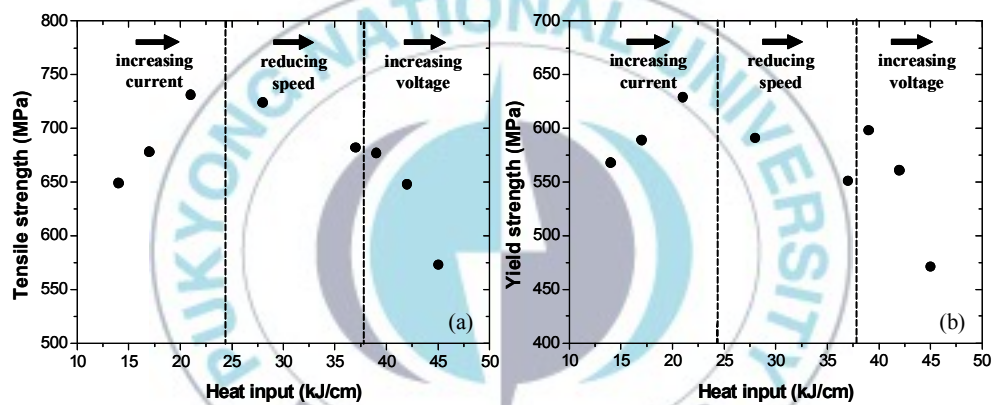


Fig. 3.1 Variation of (a) tensile strength and (b) yield strength of weld metal as a function of heat input

따라 인장강도는 증가하나, 전압의 증가에 따라서는 인장강도가 저하한다. 이러한 전압과 속도에 따른 인장강도의 변화는 쉽게 이해된다. 즉 전압의 증가는 입열을 증대시키기 때문에 인장강도가 저하하고, 속도의 증가는 입열을 감소시키기 때문에 인장강도가 증가함을 쉽게 이해할 수 있다. 하지만 전류의 증가는 입열을 증가시킴에도 불구하고 인장강도가 증가하는 특이한 경향을 나타내고 있으며 항복강도 또한 같은 경향을 나타내고 있다.

일반적으로 입열의 증가에 따른 강도의 저하는 냉각속도 저하에 따른 입계페라이트 등 고온변태조직의 형성 및 조직의 조대화 등의 조직적인 영향과 용접금속 중 합금원소의 회수율 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 3.1에 그 결과를 요약하였는데, 먼저 화학성분 분석결과를 살펴보면, 용접조건의 변경에 따라 합금원소, 특히 탈산원소들인 탄소, 실리콘, 망간, 알루미늄, 티타늄 등의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 즉, 전류의 증가는 이러한 탈산원소들을 지속적으로 증가시키고 있는 반면 전압의 증가에 따라서는 탈산원소들이 지속적으로 감소하고 있다. 한편 속도의 증가에 따라서는 탈산원소들이 증가하고 있다. 따라서 용접과정 중 전류와 속도의 증가는 와이어 중 탈산원소인 탄소, 실리콘, 망간, 알루미늄, 티타늄의 산화손실을 억제하나 전압의 증가는 반대로 산화손실을 촉진시킴을 알 수 있다.

강도와 인성에 가장 큰 영향을 미치는 고강도/고인성 조직인 AF는 Table 3.1에 나타난 바와 같이 전류의 증가에 따라 76.9%에서 66.4%로 감소한 후 다시 82.2%로 증가한다. 한편 속도의 증가에 따라서는 70.8, 73.7, 82.2%로 지속적으로 증가하며 전압의 증가에 따라서는 60.2, 55.7, 47.5%

Table 3.1 Chemical composition and volume fraction of microstructure constituents of weld metals

No.	Variable		Chemical composition of weld metal (wt%)								Volume fraction of microstructure (%)		
			C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B	O	PF	FS	AF
1	Current	251A	0.036	0.530	1.93	1.05	0.029	0.049	0.0047	0.071	21.8	1.3	76.9
2		303A	0.038	0.530	1.95	0.930	0.032	0.053	0.0042	0.067	33.3	0.3	66.4
3		370A	0.047	0.591	2.03	1.00	0.040	0.064	0.0053	0.069	16.5	1.3	82.2
4	Speed	35cm/min	0.047	0.591	2.03	1.00	0.040	0.064	0.0053	0.069	16.5	1.3	82.2
5		28cm/min	0.047	0.577	1.96	0.938	0.040	0.058	0.0049	0.066	25.4	0.9	73.7
6		20cm/min	0.045	0.530	1.91	0.947	0.031	0.043	0.0046	0.055	27.7	1.5	70.8
7	Voltage	38V	0.041	0.544	1.87	0.98	0.030	0.048	0.0044	0.063	37.8	2.0	60.2
8		42V	0.041	0.473	1.72	1.02	0.025	0.038	0.0044	0.064	43.1	1.2	55.7
9		45V	0.039	0.372	1.49	0.798	0.024	0.033	0.0028	0.070	50.4	2.1	47.5

로 지속적으로 저하한다.

용접조건에 따른 용접금속 인장강도 변화는 상기의 탈산원소 회수율과 조직변화 등에 영향을 받을 것이다. 먼저 인장강도의 변화를 고강도/고인성 조직인 AF분율의 변화로 나타낸 것이 Fig. 3.2이다. 그림에서 보는 바와 같이 인장강도는 AF분율의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이나 결정계수는 0.63으로 인장강도에 지배적인 요인이 아님을 알 수 있다. 한편 Fig. 3.3에는 인장강도의 변화를 용접금속의 합금성분, 즉 Pcm으로 나타내었다. Pcm은 용접금속의 경화도를 나타내는 지표로, 다음의 식에 의해 구하였다.

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

인장강도는 Pcm의 증가와 함께 직선적으로 증가하며 결정계수는 0.95로 AF에 비해 훨씬 높은 값을 나타낸다. 이러한 사실로부터 본 실험조건에서 용접금속 인장강도는 용접금속 중 합금원소량과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 이를 더 구체적으로 살펴보기 위해 Fig. 3.4에 용접전류에 따른 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간의 변화를 나타내었다. 앞서 설명한 바와 같이 전류의 증가는 탄소, 실리콘, 망간을 증가시키고 있다. Fig. 3.5에는 용접속도의 영향을 나타내었는데 속도의 증가에 따라 탄소는 크게 변하지 않으나 실리콘과 망간은 증가하고 있다. Fig. 3.6의 전압에 따른 변화를 보면, 용접속도의 영향과 마찬가지로 탄소는 크게 변화가 없으나 전압의 증가에 따라 실리콘과 망간은 저하하였다.

용접과정 중 와이어의 탈산원소 손실에 관하여서는 Grong 등의 실험결과가 있다.⁸⁾ 그들은 GMA 용접에서 탈산과정을 크게 와이어 팁, 아크기둥, 그리고 용융풀의 3단계로 나누어 각각의 단계에서 탈산반응을 검토하

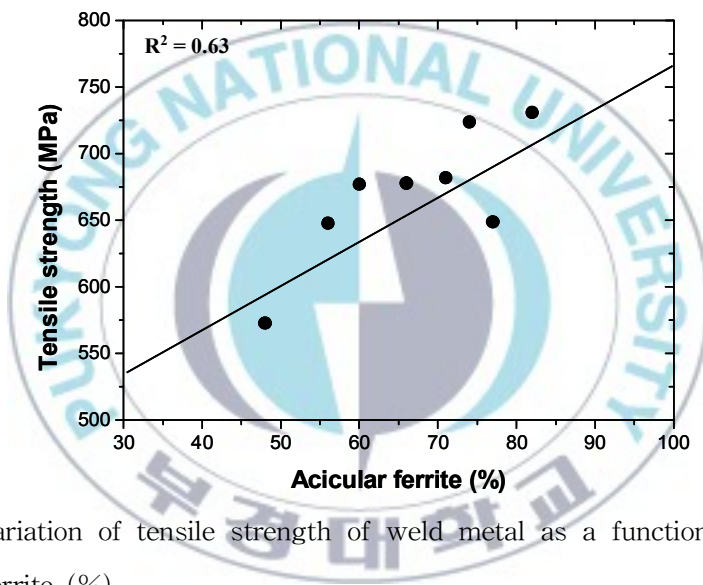


Fig. 3.2 Variation of tensile strength of weld metal as a function of acicular ferrite (%)

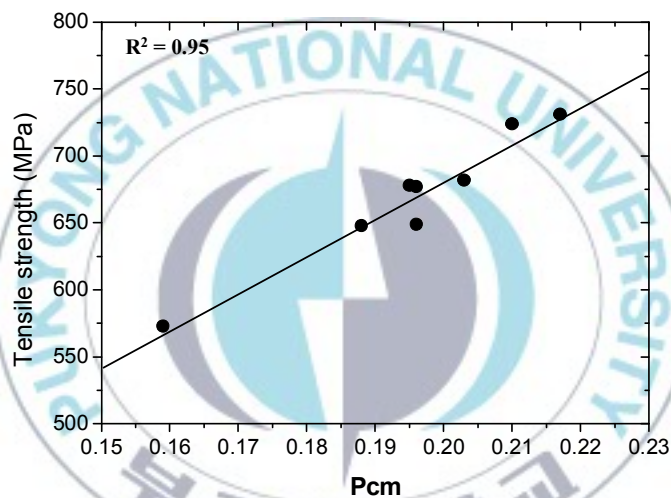


Fig. 3.3 Variation of tensile strength of weld metal as a function of Pcm

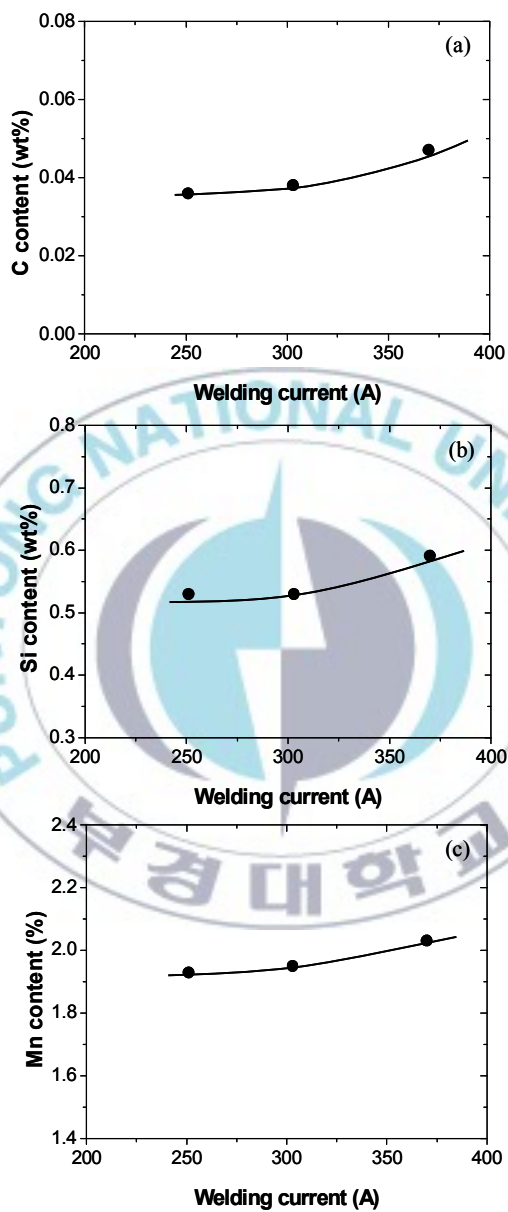


Fig. 3.4 Variation of (a) carbon content, (b) silicon content and (c) manganese content in weld metal as a function of welding current

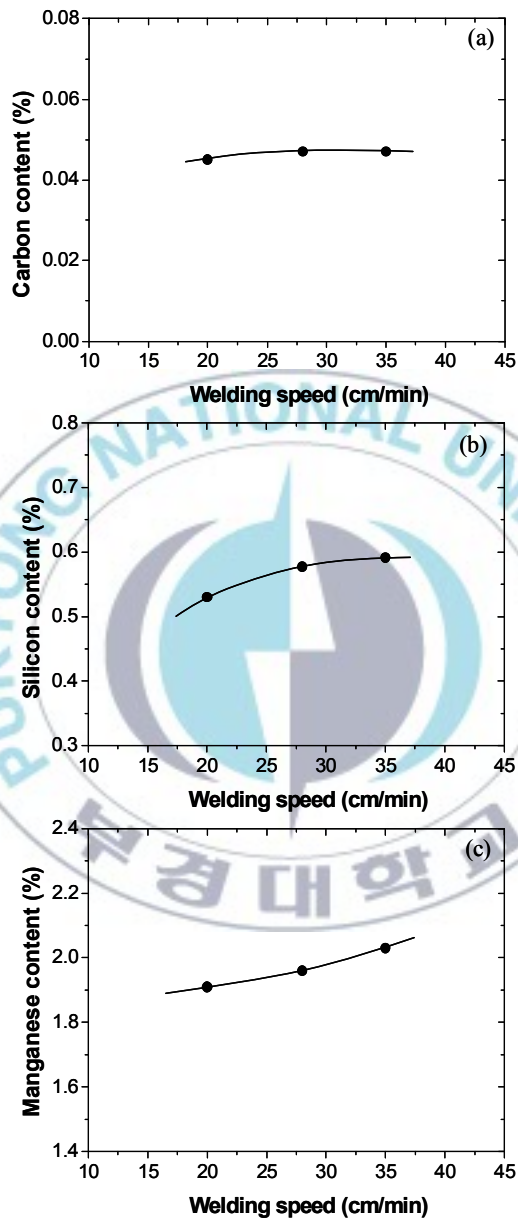


Fig. 3.5 Variation of (a) carbon content, (b) silicon content and (c) manganese content in weld metal as a function of welding speed

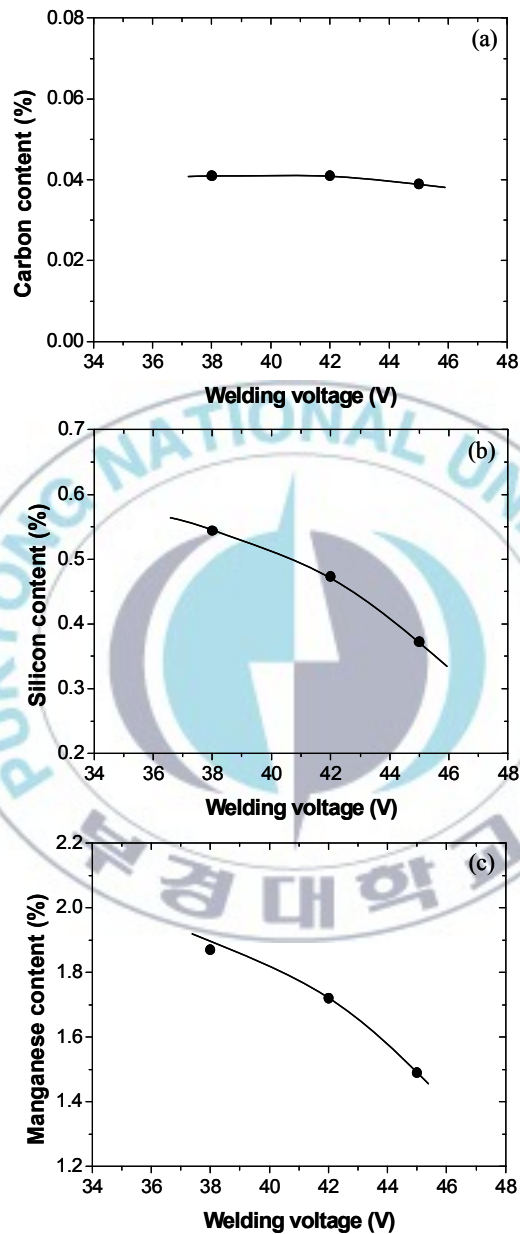


Fig. 3.6 Variation of (a) carbon content, (b) silicon content and (c) manganese content in weld metal as a function of welding voltage

었다. 그들에 따르면 탄소는 대부분 와이어 팁에서 반응하여 CO가스로 산화손실 된다고 하였다. 실리콘은 대부분 용융풀에서 산화손실 되고 와이어 팁과 아크 기둥에서도 SiO(g) 를 형성하여 소량 손실된다고 하였다. 한편 망간도 대부분 용융풀에서 산화손실 되나 와이어 팁과 아크 기둥에서도 망간증기로 소량 손실된다고 한다. 이러한 Grong의 결과를 이용하여 본 실험에서 전류, 전압, 그리고 속도에 따른 탈산원소의 회수율 변화를 해석할 수 있다. 먼저 전류가 증가하면 와이어의 용융속도가 증가하여 와이어 팁으로부터 용융풀로의 용적이행 횟수가 증가한다. 따라서 와이어 팁이나 아크기둥에서 산소와 반응하는 시간이 줄어들어 산화손실의 감소가 일어날 수 있다. 이러한 전류의 증가에 따른 용적이행 횟수의 증가를 확인하기 위하여 용접과정 중 용접전류와 아크전압의 변화를 측정하였다. Fig. 3.7에 전류를 251, 301, 370A로 증가시키며 용접하는 경우 아크전압의 파형을 나타내었는데 와이어 팁에 매달린 용적이 떨어지는 순간 아크전압이 순간적으로 증가하므로 전압파형으로부터 이행횟수를 계산할 수 있다. 1초 동안 측정한 결과 용적이행 횟수는 251A의 경우 23회, 301A의 경우 34회를 나타낸다. 그리고 370A의 경우에는 전압파형이 거의 직선적으로 변하고 있는데 이것은 와이어 팁에서 용적이 너무 빠르게 떨어지기 때문에 전압변화의 주기가 매우 짧기 때문이다. 따라서 전류의 증가에 따른 용적이행 횟수의 증가를 확인할 수 있으며, 탈산원소의 산화손실 감소는 와이어 팁이나 아크기둥에서의 산소와의 반응시간 감소에 의한 것으로 판단할 수 있다. 한편 전류의 증가에 따라 용적이행이 증가하면 용적의 크기가 작아져 산소와 접촉하는 전체 표면적은 증가하게 되어 탈산손실을 촉진하는 역할을 할 수 있다. 하지만 전체적으로 탈산손실이 감소한다는 사실로부터 이러한 표면적 증대효과는 반응시간의 감소효과에 비하여 미미함을 알 수 있다. 한편 전압의 증가는 다른 용접변수가 일정하면 아크

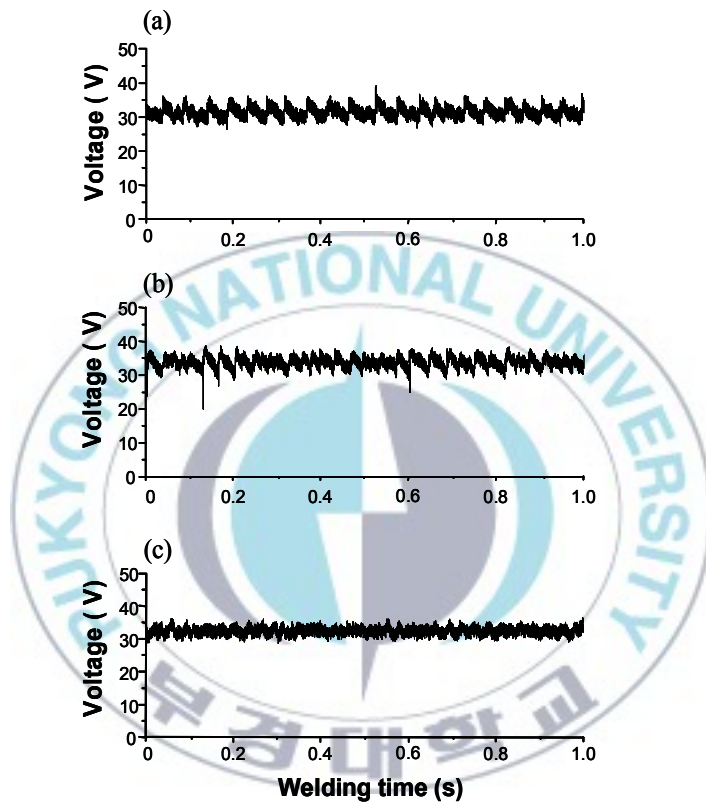


Fig. 3.7 Variation of voltage signal when welding with welding current (a) 251A, (b) 301A and (c) 370A

기둥의 길이를 증가시키는 효과를 나타낸다. 따라서 전압이 증가하여 아크기둥의 길이가 길어지면 용적이 아크기둥을 이행하는 시간이 길어져 산소와 반응하는 시간이 길어짐에 따라 산화손실이 증가하게 된다. 마지막으로 용접속도의 증가는 용융풀의 유지시간을 짧게 하여 산소가 용융풀로 흡수되는 시간이 짧아지게 되어 산화손실이 감소된다. 본 실험에서 탄소는 전류에만 영향을 받으며 전압이나 속도에는 영향을 받지 않는 점도 탄소의 산화손실은 대부분 와이어 팁에서만 일어난다는 Grong의 실험결과와 잘 일치한다. 또한 앞서 나타난 전류에 따른 AF조직의 변화도 이러한 합금원소의 변화로 설명할 수 있다. 즉 일반적으로 입열이 증가하면 냉각속도가 저하하여 용접금속에서 AF는 감소하고 대신 PF는 증가한다. 하지만 전류증가에 따른 용접금속의 조직관찰 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 냉각속도는 저하하나 동시에 탄소, 실리콘, 망간이 증대되어 경화도가 증대되는 결과 냉각속도 저하의 효과가 상쇄되기 때문이다. 따라서 탄소, 실리콘, 망간의 양이 상대적으로 많은 370A의 경우에는 큰 입열에도 불구하고 AF가 다시 증가한다고 판단된다.

이상의 실험결과, 용접금속의 화학성분, 혹은 Pcm은 용접전류와 속도의 증가에 따라 증가하여 용접금속의 강도를 증가시켰다. 하지만 앞선 실험의 결과는 비교적 저입열인 14~21kJ/cm 범위에서 나타난 결과이다. 따라서 이러한 효과가 일반적인 가를 확인하기 위해 Table 3.2에 나타난 것처럼 전압을 약 45V로 고정하고 전류를 386~443A, 용접속도를 24~27cm/min으로 증가시키면서 45kJ/cm의 고입열로 용접을 행하였다. 또한 와이어의 조성이 다를 때도 동일한 효과가 나타나는지 알아보기 위해 다른 조성의 와이어를 사용하여 용접하였다. Table 3.3에 와이어의 화

Table 3.2 Welding conditions used

No.	Welding conditions					Pass number
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)	
10	389	45	24	44	310	3
11	435	45	26	45	310	3
12	443	46	27	45	310	3

Table 3.3 Chemical composition of wire

	Chemical composition (wt%)						
	C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B
wire	0.075	0.51	2.39	0.80	0.30	2.07	0.0099

확조성을 나타내었다. Table 3.4에는 측정된 용접금속 강도변화를 정리하였다. Fig. 3.8에는 용접금속 인장강도 변화를 용접전류와 용접속도의 변화로 나타내었는데 용접전류와 속도가 증가함에 따라 용접금속 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 용접전류와 속도의 증가에 따른 용접금속 인장강도 증가 효과는 저전류 영역뿐만 아니라 고전류 영역에서도 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 이미 설명한 대로 와이어의 탈산원소 손실과 관련이 있다. Table 3.5에 각 용접조건에서 용접금속 화학성분 및 Pcm을 정리하였다. Fig. 3.9에는 용접조건 변화에 따른 Pcm의 변화를 나타내었다. 용접전류와 속도가 증가함에 따라 용접금속 Pcm이 증가하고 있어 강도증가의 한 원인이 Pcm의 증가, 즉 탈산원소량의 증가임을 알 수 있다. Fig. 3.10에는 각 용접금속의 대표적인 미세조직 사진을 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 동일한 입열량으로 용접하였음에도 불구하고 용접조건에 따라 조직이 다르게 나타남을 알 수 있다. 자세한 비교를 위해 Table 3.6에 각 용접금속의 조직분을 측정결과를 나타내었는데 전류와 용접속도가 증가함에 따라 고강도의 AF분율이 증가하고 있어 용접금속 인장강도 증가의 원인이 될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 AF분율 증가는 앞서의 결과와 마찬가지로 용접전류와 속도의 증가에 따른 탄소, 실리콘, 망간 등의 탈산원소량 증대에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 3.11에는 1~12 용접금속의 인장강도와 Pcm의 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 용접조건이나 사용한 와이어에 상관없이 인장강도는 Pcm과 결정계수 0.98의 다음과 같은 직선관계를 나타내고 있다.

$$TS \text{ (MPa)} = 127.3 + 2,770Pcm$$

이러한 사실로부터 본 실험의 용접조건 범위에서 용접금속의 인장강도는

Table 3.4 Tensile properties of weld metals welded with different current and speed

No.	Welding conditions					Tensile properties		
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)	TS (MPa)	YS (MPa)	El (%)
10	389	45	24	44	310	518	425	35
11	435	45	26	45	310	537	433	29
12	443	46	27	45	310	551	436	29

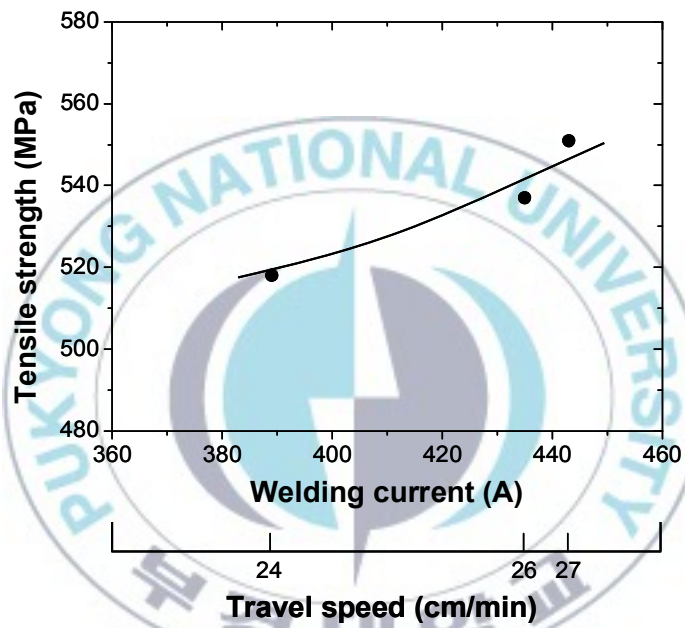


Fig. 3.8 Variation of tensile strength as a function of welding current and speed

Table 3.5 Chemical composition and Pcm of weld metals welded with different current and speed

No.	Welding conditions					Chemical composition (wt%)							Pcm
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)	C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B	
10	389	45	24	45	310	0.045	0.29	1.22	0.77	0.02	0.020	0.0017	0.140
11	435	45	26	45	310	0.048	0.33	1.26	0.67	0.02	0.026	0.0021	0.148
12	443	46	27	46	310	0.049	0.35	1.35	0.73	0.02	0.023	0.0022	0.153

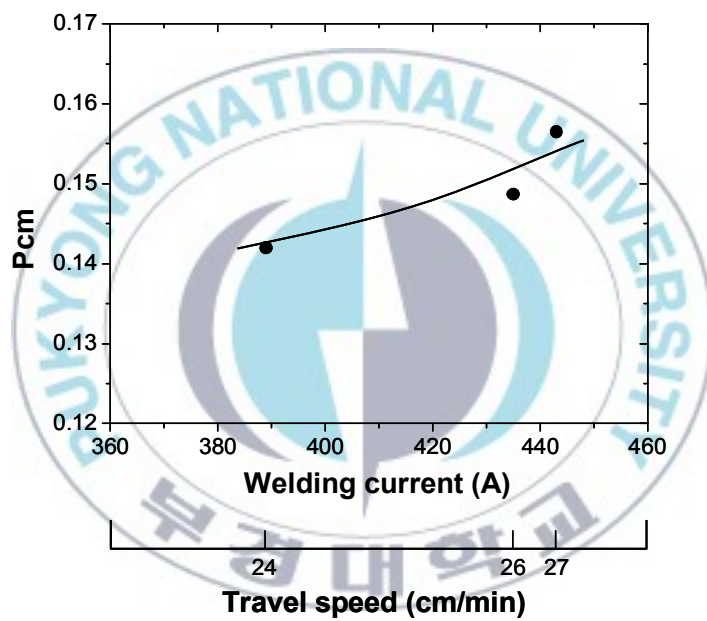


Fig. 3.9 Variation of Pcm as a function of welding current and speed

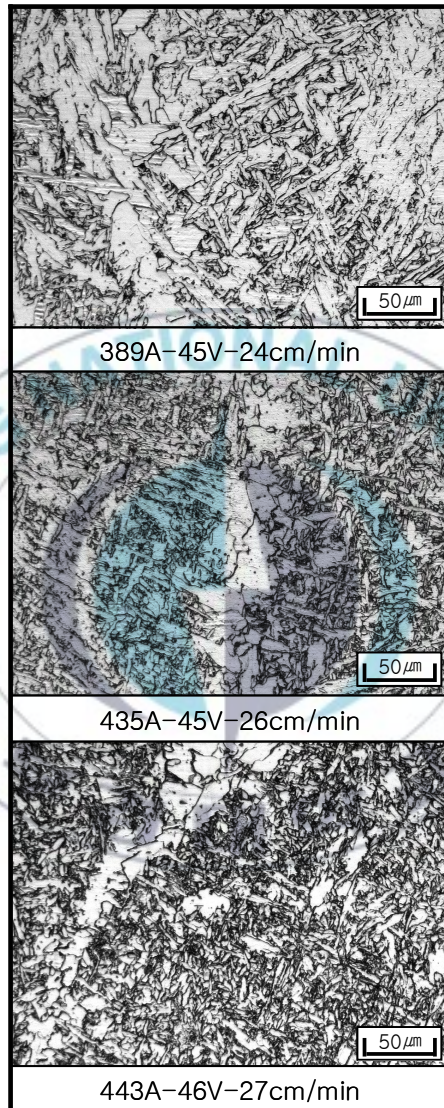


Fig. 3.10 Optical microstructure of weld metals

Table 3.6 Volume fraction of weld metal microstructure

No.	Welding conditions					Volume fraction of microstructure (%)		
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (°C)	PF	FS	AF
10	389	45	24	45	310	50.6	3.6	45.8
11	435	45	26	45	310	31.9	1.9	66.2
12	443	46	27	46	310	22	2.7	75.3

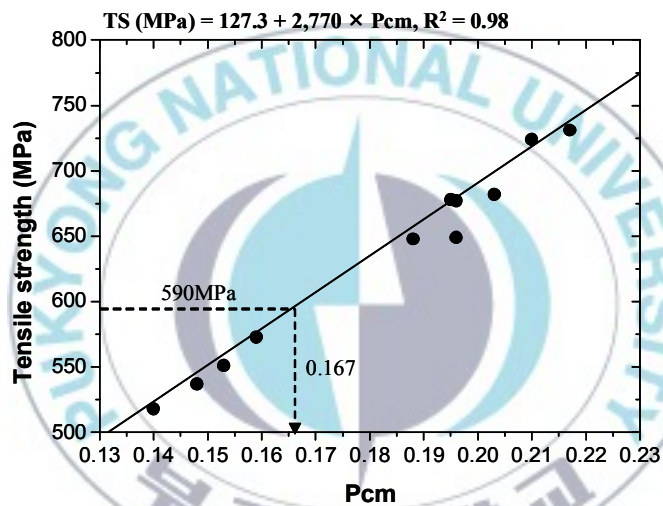


Fig. 3.11 Variation of tensile strength of weld metal as a function of Pcm

용접금속의 화학성분, 즉 Pcm에 의하여 거의 결정됨을 알 수 있다.



3.2 합금성분의 회수율 변화

본 실험에서 용접변수가 와이어의 탈산원소 손실에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 용접변수 변화에 따른 와이어 합금원소, 특히 Pcm에 큰 영향을 미치는 탄소, 실리콘, 망간, 및 보론의 회수율을 회귀분석하였다. 회수율은 용접과정 중 각 성분이 용접와이어로부터 용접금속으로 회수되는 비율을 뜻한다. 회수율을 구하기 위해서는 먼저 각 성분이 모재와 백킹플레이트 (backing plate)로부터 용접금속으로 회수되는 비율을 알아야 한다. 모재와 백킹플레이트의 회수율은 Fig. 3.12에 나타내었듯이 전체 용접금속 면적과 모재와 백킹바가 회수된 면적의 비를 이용해 구하였다. 측정된 회수율을 이용하여 다음과 같이 회수율을 측정하였다.

$$\text{회수율} = (\text{용접금속 성분} - \text{회석율} \times \text{모재 성분}) / \text{와이어성분}$$

Table 3.7에 각 조건에서의 회석율과 함께 상기 식을 사용하여 계산한 각 원소들의 회수율을 나타내었다. 예상되는 바와 같이 각 성분의 회수율은 용접전류와 속도의 증가에 따라 증가하나 전압의 증가에 따라서는 감소하고 있다. 탄소, 실리콘, 망간 그리고 보론의 회수율에 미치는 전류 (I), 전압 (V), 속도 (S)의 영향을 회귀분석한 결과 다음과 같은 관계식들을 얻었다.

$$\text{Recovery of C (\%)} = 92.9 - 2.5V + 0.16I + 0.31S$$

$$\text{Recovery of Si (\%)} = 91.8 - 2.5V + 0.14I + 0.84S$$

$$\text{Recovery of Mn (\%)} = 96.5 - 2.1V + 0.06I + 0.61S$$

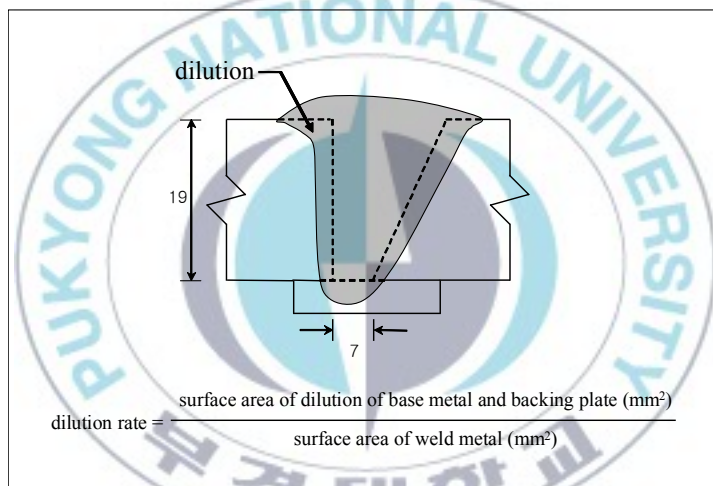


Fig. 3.12 Measurement of dilution rate

Table 3.7 Dilution and recovery of elements

No.	Dilution (%)	Recovery (%)			
		C	Si	Mn	B
1	11.3	64.9	77.9	68.2	47.5
2	14.8	66.4	77.2	67.0	42.4
3	18.8	81.6	85.4	67.7	53.5
4	18.8	81.6	85.4	67.7	53.5
5	18.7	81.7	83.9	65.0	49.5
6	20.9	75.9	75.8	61.8	46.5
7	21.5	67.3	77.2	59.9	44.4
8	20.0	68.4	66.9	54.9	44.4
9	22.9	62.2	51.2	44.4	28.3
10	27.5	46.4	49.3	33.8	17.2
11	22.1	53.0	58.6	38.8	21.2
12	18.1	56.5	63.7	45.3	22.2

$$\text{Recovery of B (\%)} = 84.9 - 2.5V + 0.11I + 0.35S$$

각 식들의 결정계수는 차례대로 0.87, 0.94, 0.87 그리고 0.86이다. 식에서 알 수 있는 것처럼 모든 성분은 공통적으로 용접전류와 속도의 증가에 따라 회수율이 증가하고, 용접전압의 증가에 따라 회수율이 감소하는 경향을 나타내어 와이어 성분변화의 경향과 잘 일치하고 있다. Fig. 3.13에 각 식들을 사용하여 계산한 값과 실측한 값들을 비교하였다.

이러한 회귀식을 사용하면 일정한 용접조건에서 용접금속 강도를 유지하기 위해 와이어에 첨가할 성분, 특히 Pcm에 큰 영향을 미치는 탄소, 실리콘, 망간 및 보론의 양을 계산할 수 있다. Fig. 3.11에 나타내었듯이 용접금속 인장강도 590MPa를 만족시키기 위한 최소 Pcm은 0.167이다. 입열량을 약 51kJ/cm로 가정하고 이때의 용접조건을 전류 470A, 전압 45V, 속도 25cm/min으로 설정하였을 때, 이 용접조건에서 각 성분의 회수율은 위의 회귀식에 대입하여 구해보면 탄소는 63%, 실리콘은 66%, 망간은 45%, 보론은 33%이다. Pcm 0.167을 만족시키기 위한 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간 및 보론의 목표치를 1~12 용접금속의 성분을 토대로 각각 0.045, 0.5, 1.7, 0.004%라고 가정하면, 각 성분의 와이어 첨가량은 목표치를 회수율로 나눔으로써 구할 수 있다. 예를 들어 탄소의 경우 목표 용접금속 성분량이 0.045%이므로 0.045에 회수율 0.63을 나눈 0.07%가 와이어 첨가량이 된다. 따라서 입열량 51kJ/cm, 패스간 온도 310℃의 고입열/고패스간 온도로 용접하여도 용접금속 인장강도가 규격치 이상인 590MPa 이상을 나타내기 위한 와이어의 성분은 0.071% C, 0.76% Si, 3.78% Mn, 0.012% B가 된다. Table 3.8에 AWS, JIS에서 규정한 E8XT1-Ni1 용접와이어의 용접금속 성분과 본 실험에서 목표로 하는 용접금속 성분, 그리고 그 목표를 달성하기 위한 용접와이어의 성분을 정리하였다.

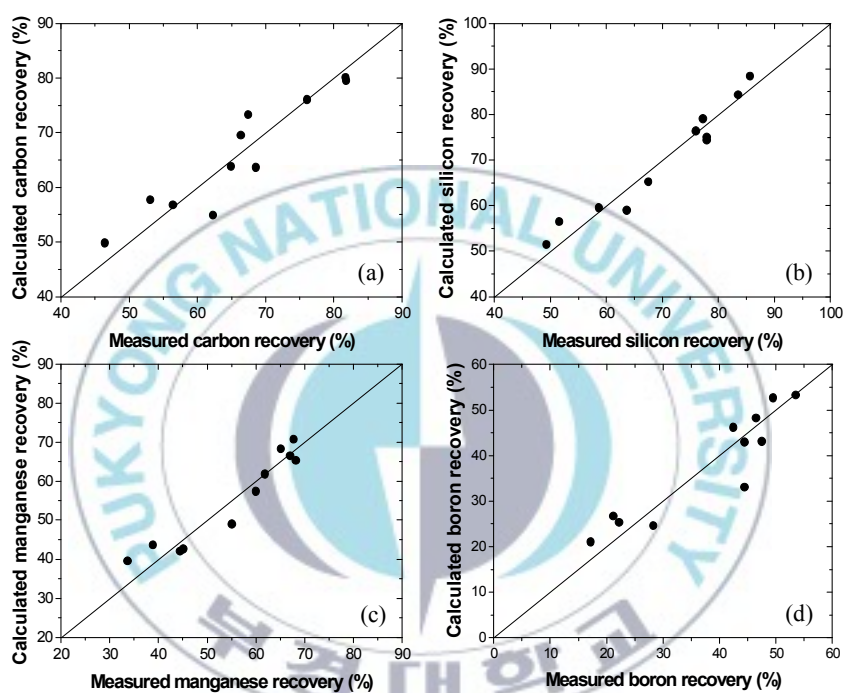


Fig. 3.13 Comparison between calculated and measured element recovery of
(a) carbon, (b) silicon, (c) manganese and (d) boron

Table 3.8 Proposed composition of wire

	C	Si	Mn	B	Pcm
JIS	≤ 0.15	≤ 0.8	≤ 2.0	-	
AWS	≤ 0.12	≤ 0.8	≤ 1.5	-	
Target composition	0.045	0.5	1.7	0.004	0.167
Recovery (%)	63	66	45	33	
Proposed composition (wt%)	0.071	0.76	3.78	0.012	

제5장 결론

용접입열을 결정하는 용접변수인 용접전류, 전압, 속도를 독립적으로 변화시켜 각 변수가 와이어 합금원소 회수율 및 인장강도에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 용접전류와 속도의 증가는 탄소, 실리콘, 망간 등의 산화손실을 억제하여 용접금속의 Pcm을 증가시켜 강도를 증가시키는 반면, 전압의 증가는 산화손실을 촉진시켜 강도를 저하시킨다.

(2) Pcm에 영향을 미치는 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간, 보론 등의 회수율은 용접조건에 영향을 받아 용접전류와 속도가 증가할수록, 그리고 전압이 감소할수록 증가하였다. 다중회귀분석 결과 각 성분의 회수율은 다음 식으로 나타내어진다.

$$\text{Recovery of C (\%)} = 92.9 - 2.5V + 0.16I + 0.31S$$

$$\text{Recovery of Si (\%)} = 91.8 - 2.5V + 0.14I + 0.84S$$

$$\text{Recovery of Mn (\%)} = 96.5 - 2.1V + 0.06I + 0.61S$$

$$\text{Recovery of B (\%)} = 84.9 - 2.5V + 0.11I + 0.35S$$

(3) 탄소, 실리콘, 망간이 각각 0.037, 0.14, 1.5%인 모재를 사용하여 470A-45V-25cm/min으로 용접하는 경우, 용접금속 인장강도와 Pcm은 다

음과 같은 관계를 가지며 인장강도 규격치인 590MPa 이상을 나타내기 위해서는 Pcm이 0.167 이상이어야 한다.

$$TS \text{ (MPa)} = 127.3 + 2,770P_{cm}$$



참고 문헌

1. G. O. Schumann : The Influence of Welding Variables on Weld Metal Mechanical and Microstructural Properties from Conventional and Microalloyed Rutile Flux-Cored Wires, Trends in Welding Research, June (1995), 525-534
2. J. A. Gianetto etc. : Effect of Composition and Energy Input on Structure and Properties of High-strength Weld Metals. Welding Journal, November (1992), 407s-419s
3. B. Dixon and K. Hakansson : Effects of Welding Parameters on Weld Zone Toughness and Hardness in 690MPa steel, Welding journal, April (1995), 122s-132s
4. J. Vercesi and E. Surian : The Effect of Welding Parameters on High Strength SMAW All-Weld-Metal-Part 1, Welding Journal , June (1996), 191s-196s
5. J. Vercesi and E. Surian : The Effect of Welding Parameters on High Strength SMAW All-Weld-Metal-Part 2, Welding Journal , April (1998), 164s-171s
6. G. M. Evans : The Effect of Heat Input on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld-Metal Deposits, Welding Journal, April (1982), 125s-132s
7. Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals, IIW Doc. IX-1533-88, June (1988)
8. O. Grong : A Model for the Silicon-Manganese Deoxidation of Steel

Weld Metals, Metallurgical Transactions A, October (1986), 1797-1807

