

FCAW에서 용접변수에 따른 용접금속 강도 및 와이어 합금원소의 회수율 변화

정동희* · 방국수* · 박 찬* · 장웅성** · 박철규***

*부경대학교

**포항산업과학기술연구소

***KISWEL 연구소

Effects of Welding Parameters on Weld Metal Strength and Recovery of Alloying Elements in FCAW

Dong-Hee Jung*, Kook-Soo Bang*, Chan Park*, Woong-Sung Chang** and Chul-Gyu Park***

*Division of Advanced Materials Science and Engineering, PKNU, Busan 608-739, Korea

**Welding Research Center, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-330, Korea

***R&D Center, KISWEL, Changwon, 642-120, Korea

Abstract

590MPa grade weldable steels were gas metal arc welded with flux cored wires. Welding parameters such as current, voltage, and speed were varied independently. Effects of each parameter on the strength and chemical composition of weld metal were investigated. Increase of voltage caused decrease of weld metal tensile strength due to the low recovery of alloying elements such as carbon and manganese. On the contrary, increase of current and speed resulted in increase of weld metal strength because of higher recovery of the alloying elements.

*Corresponding author : ksbang@pknu.ac.kr

(Received January 11, 2008)

Key Words : FCAW, Welding parameter, Tensile strength, Recovery of elements

1. 서 론

용접금속의 강도는 주로 용접금속의 미세조직과 첨가 되는 합금성분에 의해 결정된다. 이러한 용접금속의 강도는 일반적으로 입열량이 증가할수록 고온변태조직의 형성과 합금원소 회수율의 감소 등으로 인해 저하하는 것으로 알려져 있다¹⁻³⁾. Jose Vercesi⁴⁻⁵⁾ 등은 E11018-M 등 세 종류의 용접봉을 사용하여 피복아크용접한 용접금속의 기계적 성질에 미치는 입열량의 영향에 대해 연구한 결과, 입열량이 증가할수록 조직의 연화와 함께 높은 산화손실로 인한 용접금속 내의 망간과 실리콘 양의 감소로 용접금속 강도가 저하한다고 하였다. 한편 Evans⁶⁾

는 C-Mn 용접금속의 미세조직과 화학조성에 대한 입열량의 영향을 조사하여 입열량의 증가에 따라 용접금속의 탄소, 망간 그리고 실리콘 양이 감소하며 입계페라이트의 양도 증가하여 용접금속 인장강도가 감소한다고 하였다.

지금까지의 용접금속 기계적 성질, 특히 강도에 미치는 입열량에 대한 연구는 대부분 입열량을 결정하는 세 변수인 용접전류, 전압, 속도를 동시에 변화시켜 행해졌다. 본 연구에서는 각 변수의 개별적인 영향을 알아보기 위해 용접전류, 전압, 속도를 독립적으로 변화시켜 각 변수의 영향을 체계적으로 조사하였다. 이를 바탕으로 FCAW에서 용접변수에 따른 와이어 합금원소의 회수율 변화를 정량화하였다.

2. 실험방법

AWS E80T1-Ni1에 해당하는 직경 1.4mm 플럭스 코어드 와이어를 사용하여 100% CO₂용접을 행하였다. 와이어의 성분 분석은 와이어 그대로의 상태에서 KS D1673 (강의 유도결합 플라즈마 방출 분광분석방법)에 의거하여 이루어졌으며 Table 1에 화학성분을 나타내었다. 용접은 입열에 영향을 미치는 용접변수인 용접전류, 전압, 용접속도를 각각 독립적으로 변화시켜서 14~45kJ/cm로 행하였다. Table 2에 용접조건을 나타내었다. 1~3번 조건에서는 전압을 약 33V, 용접속도를 35cm/min으로 일정하게 유지하면서 전류만 251~370A로 변경하였고, 4~6번 조건에서는 전류와 전압을 일정하게 유지하고 용접속도를 20~35cm/min으로 변경하였다. 그리고 7~9번 조건에서는 전류와 용접속도를 일정하게 하고 전압을 38~45V로 변경하였다. 예열은 100℃, 패스간온도는 310℃로 유지하였다. 사용한 모재는 Table 1에 나타낸 화학성분을 가지는 두께 20mm의 인장강도 590MPa급 압연강으로 single bevel groove로 가공하여 사용하였다. 자세한 이음부 형상은 Table 2에 함께 나타내었다. 용접 후 용접금속의 화학조성은 용접금속의 중앙에서 시편을 채취하여 발광분광분석법으로 분석하였다. 인장시험은 직경 6mm, 표점거리 24mm의 환봉시험편을 판 두께 중앙부의 용접금속 중앙에서 채취하여 상온에서 행하였다. 용접금속의 조직은 배율 500배로 광학현미경 사진을 촬영한

후 IIW Doc. IX-1533-88에 따라 조직분율을 측정하여 관찰하였다. IIW에 따르면 입계페라이트와 입내의 다각형 페라이트를 프라이머리 페라이트 (PF), 입내에서 중횡비가 4:1 이하이며 일렬로 배열하지 않는 작은 페라이트를 침상페라이트 (AF), 그리고 입내에서 중횡비가 4:1 이상이며 둘 이상이 일렬로 배열하는 페라이트를 2상을 가지는 페라이트 (FS)로 구분한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접변수에 따른 용접금속 강도변화

Fig. 1에 각 용접조건에서의 용접금속 인장강도를 입열량에 따라 나타내었다. 그림에는 입열량을 변경시키

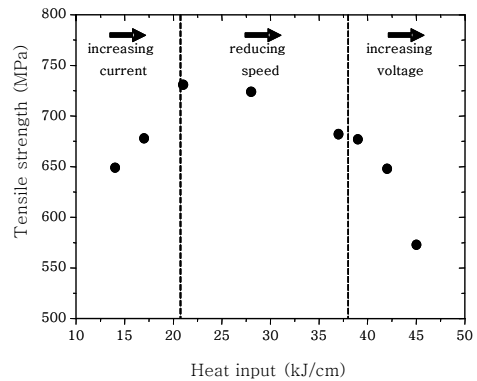


Fig. 1 Variation of tensile strength as a function of heat input

Table 1 Chemical compositions of wire and base plate

	Chemical composition (wt%)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	Ti	B
Wire	0.075	0.51	2.39	-	0.80	-	0.30	-	2.07	0.0099
Base plate	0.037	0.14	1.50	0.197	0.21	0.069	0.04	0.039	0.02	-

Table 2 Welding conditions

No.	Variable	Welding conditions			Heat input (kJ/cm)	Joint configuration
		Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)		
1	Current	251	32	35	14	
2		303	33	35	17	
3		370	33	35	21	
4	Speed	370	33	35	21	
5		364	32	28	28	
6		373	33	20	37	
7	Voltage	425	38	25	39	
8		427	42	25	42	
9		419	45	25	45	

기 위하여 사용한 용접변수의 변화를 함께 나타내었다. 용접금속의 인장강도는 일반적으로 알려진 것과는 달리, 입열량의 증가에 따라 지속적으로 감소하지 않고 입열량 14~21kJ/cm에서는 증가하여 731MPa로 최대치를 나타낸 후 28kJ/cm부터는 감소하기 시작하여 45kJ/cm에서 573MPa를 나타내었다. 즉, 용접금속 인장강도는 용접전류의 증가와 함께 증가하고 속도의 감소와 전압의 증가에 따라 감소함을 나타낸다. 이러한 점은 입열의 증가와 함께 용접금속의 강도가 저하한다는 일반적인 경향과는 차이가 있다. 특히 본 실험범위 내에서 전류의 증가는 입열을 증가시키면서도 불구하고 인장강도를 증가시키는 특이한 경향을 나타내었다.

일반적으로 입열의 증가에 따른 인장강도의 저하는 냉각속도 저하에 따른 고온변태조직의 형성 및 조직의 조대화 등의 조직적인 영향과 용접금속 중 합금원소의 회수율 변화에 기인한다고 알려져 있다. Table 3에 각 용접금속의 화학성분과 현미경 조직분율을 나타내었다. 용접조건에 따라 용접금속의 합금원소, 특히 탄소, 실리콘, 망간, 알루미늄, 티타늄 등 탈산원소량의 변화가 뚜렷하게 나타난다. 예를 들어 탄소는 전류가 251A (조건1)에서 370A (조건3)로 증가함에 따라 0.036%에서 0.047%까지 증가하였고, 실리콘은 속도가 20cm/min (조건6)에서 35cm/min (조건4)으로 증가함에 따라 0.53%에서 0.59%까지 증가하였으며, 망간은 전압이 38V (조건 7)에서 45V (조건 9)로 증가함에 따라 1.87%에서 1.49%로 감소하였다. 즉 전

류의 증가와 속도의 증가는 탈산원소들을 증가시키는 반면, 전압의 증가는 탈산원소들을 지속적으로 감소시킨다. 이러한 사실로부터 전류와 속도의 증가는 와이어 중 탈산원소인 탄소, 실리콘, 망간, 알루미늄, 티타늄의 산화손실을 억제하는 반면, 전압의 증가는 이들의 산화손실을 촉진시킴을 알 수 있다. Fig. 2에는 각 용접금속의 인장강도를 화학성분의 변화를 나타내는 Pcm과 고강도/고인성 조직인 AF 체적분율에 따라 나타내었다. 인장강도는 Pcm의 증가에 따라 직선적으로 증가하며, 결정계수는 0.95로 높은 값을 나타내는 반면, AF 체적분율과는 결정계수 0.63을 나타내어 본 실험범위에서 용접금속 인장강도는 용접금속의 화학성분에 더욱 의존함을 알 수 있다.

이상의 실험결과, 용접금속의 화학성분, 혹은 Pcm은 용접전류와 속도의 증가에 따라 증가하였다. 이러한 효과가 일반적인 가를 확인하기 위해 조성이 다른 와이어를 사용하여, 전압을 약 45V로 고정하고 전류와 용접속도를 증가시키면서 45kJ/cm의 고입열로 용접을 행하여 용접금속의 화학성분과 강도변화를 조사하였다. Table 4에 용접조건, 용접금속의 화학조성 그리고 인장강도를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 입열량은 44~45kJ/cm로 거의 동일하지만 용접금속의 탄소, 실리콘, 망간 등의 합금성분과 인장강도는 용접전류와 속도의 증가와 함께 증가하고 있다. 이는 앞서의 실험에서 확인된 용접변수의 영향이 조성이 다른 와이어와 입열 조건에서도 나타남을 보여준다.

Table 3 Chemical composition and volume fraction of microstructural constituents of weld metals

No.	Chemical composition of weld metal (wt%)											Volume fraction of microstructure (%)		
	C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B	Cr	Mo	Nb	*Pcm	**PF	**FS	**AF
1	0.036	0.530	1.93	1.05	0.029	0.049	0.0047	0.05	0.014	0.014	0.196	21.8	1.3	76.9
2	0.038	0.530	1.95	0.930	0.032	0.053	0.0042	0.06	0.015	0.016	0.195	33.3	0.3	66.4
3	0.047	0.591	2.03	1.00	0.040	0.064	0.0053	0.06	0.015	0.016	0.217	16.5	1.3	82.2
4	0.047	0.591	2.03	1.00	0.040	0.064	0.0053	0.06	0.015	0.016	0.217	16.5	1.3	82.2
5	0.047	0.577	1.96	0.938	0.040	0.058	0.0049	0.06	0.017	0.017	0.210	25.4	0.9	73.7
6	0.045	0.530	1.91	0.947	0.031	0.043	0.0046	0.06	0.016	0.016	0.203	27.7	1.5	70.8
7	0.041	0.544	1.87	0.98	0.030	0.048	0.0044	0.06	0.014	0.015	0.196	37.8	2	60.2
8	0.041	0.473	1.72	1.02	0.025	0.038	0.0044	0.06	0.017	0.016	0.188	43.1	1.2	55.7
9	0.039	0.372	1.49	0.798	0.024	0.033	0.0028	0.07	0.017	0.014	0.159	50.4	2.1	47.5

* Pcm= C+Si/30+Mn/20+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10+5B

**PF, FS and AF means primary ferrite, ferrite sideplate and acicular ferrite, respectively

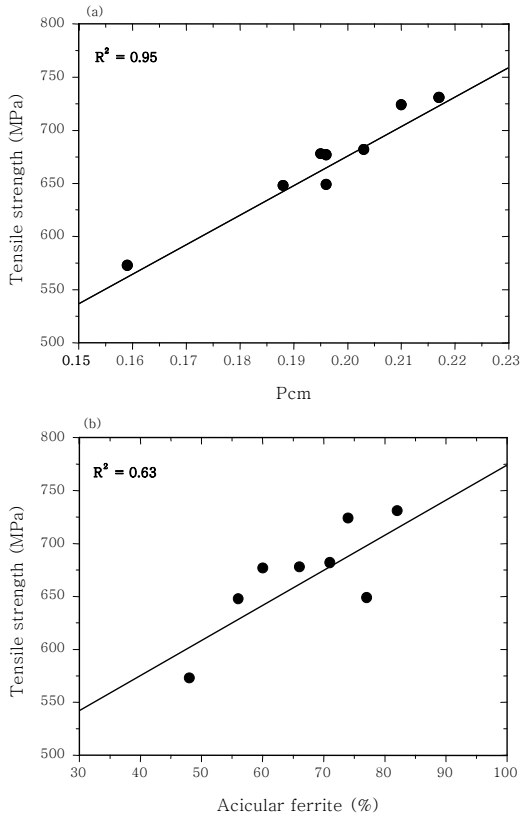


Fig. 2 Variation of tensile strength of weld metal as a function of (a) Pcm (b) volume fraction of acicular ferrite (%)

3.2 와이어 합금성분의 회수율 변화

본 실험에서 사용한 용접변수 변화에 따른 와이어 합금원소, 특히 Pcm에 큰 영향을 미치는 탄소, 실리콘, 망간, 및 보론의 회수율을 회귀분석하였다. 회수율은 아래 식으로 구하였다.

$$\text{회수율 (\%)} = \{(\text{용접금속 성분} - \text{회석율} \times \text{모재성분}) / \text{와이어성분}\} \times 100$$

Table 5에 상기 식을 사용하여 계산한 각 원소들의 회수율을 나타내었다. 표에는 각 용접조건에서 모재의 회석율을 함께 나타내었다. 예상되는 바와 같이 각 성

Table 5 Dilution and recovery of elements

No.	Dilution (%)	Recovery (%)			
		C	Si	Mn	B
1	11.3	64.9	77.9	68.2	42.1
2	14.8	66.4	77.2	67.0	36.1
3	18.8	81.6	85.4	67.7	43.5
4	18.8	81.6	85.4	67.7	43.5
5	18.7	81.7	83.9	65.0	40.2
6	20.9	75.9	75.8	61.8	36.8
7	21.5	67.3	77.2	59.9	34.9
8	20.0	68.4	66.9	54.9	35.6
9	22.9	62.2	51.2	44.4	21.8
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

분의 회수율은 용접전류와 속도의 증가에 따라 증가하나 전압의 증가에 따라서는 감소하고 있다. 용접변수가 각 성분의 회수율에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위해 각 성분의 회수율에 미치는 전류 (I), 전압 (V), 속도 (S)의 영향을 회귀분석한 결과 다음과 같은 관계식을 얻었다. 각 식들의 수정 결정계수는 차례대로 0.81, 0.92, 0.87 그리고 0.83 이다. Fig. 3에 대표적으로 탄소와 망간에 대하여 회귀분석식을 사용한 계산값과 측정치를 비교하였다.

$$\begin{aligned} \text{Recovery of C (\%)} &= 93.3 - 2.5V + 0.16I + 0.3S \\ \text{Recovery of Si (\%)} &= 91.3 - 2.5V + 0.14I + 0.84S \\ \text{Recovery of Mn (\%)} &= 96.8 - 2.1V + 0.06I + 0.6S \\ \text{Recovery of B (\%)} &= 62.6 - 1.69V + 0.06I + 0.42S \end{aligned}$$

식에서 알 수 있는 것처럼 각 원소들은 공통적으로 용접전류와 속도의 증가에 따라 회수율이 증가하고, 용접전압의 증가에 따라 회수율이 감소하는 경향을 나타내어 실험결과와 잘 일치하고 있다.

이러한 회귀식을 사용하여 고입열에서도 용접금속 강도를 유지하기 위하여 와이어에 첨가할 성분, 특히 Pcm에 큰 영향을 미치는 탄소, 실리콘, 망간 및 보론

Table 4 Welding conditions, chemical composition and tensile strength of weld metals

No.	Welding conditions				Chemical composition (wt%)							Tensile strength (MPa)
	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	C	Si	Mn	Ni	Al	Ti	B	
10	389	45	24	44	0.045	0.29	1.22	0.77	0.02	0.020	0.0017	518
11	435	45	26	45	0.048	0.33	1.26	0.67	0.02	0.026	0.0021	537
12	443	46	27	45	0.049	0.35	1.35	0.73	0.02	0.023	0.0022	551

Chemical composition of wire : 0.049C-0.66Si-2.58Mn-0.95Ni-0.44Al-2.12Ti-0.0099B

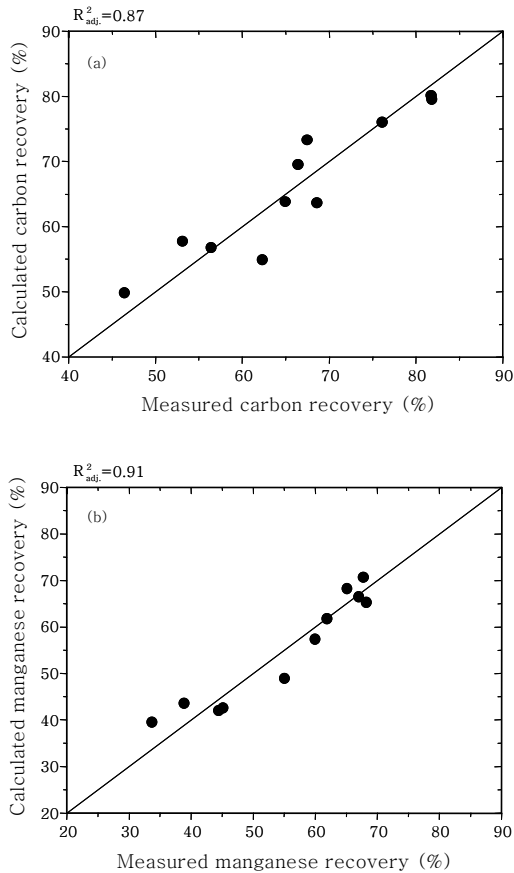


Fig. 3 Comparison between measured and calculated recovery of (a) carbon and (b) manganese

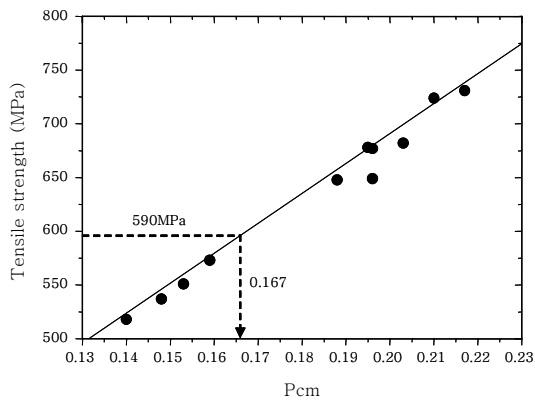


Fig. 4 Variation of tensile strength of weld metal as a function of Pcm

의 양을 계산하였다. Fig. 4에는 각 용접금속의 인장강도 변화를 Pcm으로 나타내었는데 용접금속 인장강도 590MPa를 만족시키기 위한 최소 Pcm은 0.167 임을 알 수 있다. 이러한 Pcm을 만족시키기 위한 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간 및 보론의 목표치를 각각 0.044, 0.6, 1.4, 0.004%라고 가정하면, 각 성분의 와이어 첨가량은 목표치를 회수율로 나눔으로써 구할 수 있다.

예를 들어 용접조건을 470A-45V-25cm/min (입열량 51kJ/cm)로 가정하면 탄소, 실리콘, 망간 및 보론의 회수율은 각각 64%, 65%, 46%, 25%이다. 따라서 탄소, 실리콘, 망간이 각각 0.037, 0.14, 1.5%인 모재를 사용하여 470A-45V-25cm/min 로 용접하는 경우 용접금속 Pcm이 0.167을 만족하기 위하여 와이어에 첨가하여야 할 원소 중 탄소, 실리콘, 망간 및 보론의 양은 각각 0.069, 0.92, 3.04%, 0.016%가 된다.

4. 결 론

용접입열을 결정하는 용접변수인 용접전류 (I), 전압 (V), 속도 (S)를 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) 용접금속 중 탄소, 실리콘, 망간, 보론의 회수율을 다중회귀분석 결과 각 성분의 회수율은 다음 식으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \text{Recovery of C (\%)} &= 93.3-2.5V+0.16I+0.3S \\ \text{Recovery of Si (\%)} &= 91.3-2.5V+0.14I+0.84S \\ \text{Recovery of Mn (\%)} &= 96.8-2.1V+0.06I+0.6S \\ \text{Recovery of B (\%)} &= 62.6-1.69V+0.06I+0.42S \end{aligned}$$

3) 탄소, 실리콘, 망간이 각각 0.037, 0.14, 1.5% 인 모재를 사용하여 470A-45V-25cm/min 로 용접하는 경우, 용접금속 Pcm이 0.167을 만족하기 위하여 와이어에 첨가하여야 할 원소 중 Pcm에 큰 영향을 미치는 탄소, 실리콘, 망간 및 보론의 양은 각각 0.069, 0.92, 3.04%, 0.016%이다.

참 고 문 헌

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 690 MPa 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. O. Grong : A Model for the Silicon-Manganese Deoxidation of Steel Weld Metals, *Metallurgical Transactions A*, vol. 17A, October, 1986, 1797-1807