

570MPa급 용접구조용강 다층 용접금속의 강도 및 충격인성에 미치는 입열 및 패스간 온도의 영향

변지철* · 방국수* · 장웅성** · 박철규*** · 정우현***

*부경대학교 신소재공학부

**포항산업과학연구원 용접센터

***KISWEL 기술연구소

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

Ji-Chul Byun*, Kook-Soo Bang*, Woong-Sung Chang**, Chul-Gyu Park*** and Woo-Hyun Chung***

*Division of Materials Science & Engineering, PKNU, Pusan 608-739, Korea

**Welding Center, RIST, Pohang 790-600, Korea

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

Abstract

570MPa grade weldable steels were gas metal arc welded with various heat inputs and interpass temperatures using flux cored wires. Effects of heat input and interpass temperature on the strength and impact toughness of weld metal were investigated in terms of microstructural change, recovery of alloying elements, and the amount of reheated weld metal. Increase of heat input and interpass temperature resulted in decrease of weld metal strength. This is because of the small amount of acicular ferrite, large columnar size and low recovery of alloying elements such as manganese and silicon. In addition to the microstructural change, weld metal toughness was also influenced by the deposition sequence. It increased with an increase of the amount of reheated weld metal.

* Corresponding author : ksbang@pknu.ac.kr

(Received September 7, 2005)

Key Words : Multipass weld metal, Strength, Toughness, Heat input, Interpass temperature

1. 서 론

건축철골 용접에서 용접길이가 짧은 경우에는 솔리드 와이어에 의한 MAG용접이, 박스기둥 (box column) 등 용접길이가 긴 경우에는 SA용접이 주로 적용되고 있다. 이 중 MAG 용접에 사용되는 솔리드 와이어가 전체 용접재료 사용량의 절반 이상을 차지하고 있으나 근년 용접작업의 고능률화와 자동화에 맞추어 플럭스 코어드 와이어로의 사용도 꾸준히 증가하고 있다¹⁾. 특히 건축철골 용접에 있어서 중요한 부분을 차지하는 기

둥과 보 (beam)의 다층 용접부에는 종래 솔리드 와이어가 대부분 사용되었으나 최근 플럭스 코어드 와이어 사용이 증대되고 있다. 이러한 철골 다층용접 시 입열 및 패스간 온도를 증가시켜 생산성 향상을 꾀하고 있으나 일반적으로 입열 및 패스간 온도가 증가하면 용접금속 강도와 충격인성이 저하한다고 알려져 있어²⁻⁴⁾ 용접 작업 시 엄격한 입열 및 패스간 온도 관리가 필요하다. 특히 1995년 일본에서 지진 시 철골조 용접부가 취성적으로 파단된 것이 발견된 이후 철골 용접부 강도와 충격인성에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다⁵⁻⁸⁾. 그 결과 일본에서는 사용강재 및 적용 와이어에 따른 입열

및 패스간 온도의 관리 기준이 정해지고, 또 기존 와이어보다 높은 입열 및 패스간 온도에서도 사용가능한 와이어가 규격화되게 되었다⁹⁾. 예를 들어 중·고층 건축에서 수요가 많은 인장강도 490MPa급 강재에 대해 입열 40kJ/cm, 패스간 온도 350℃까지 높혀 용접하는 것이 가능한 새로운 규격의 와이어를 제정하였다.

본 연구에서는 높은 입열과 패스간 온도에서도 기계적성질이 우수한 용접재료 개발을 위한 기초연구로, 플럭스 코어드 와이어를 사용한 인장강도 570MPa급 강재의 다층용접 시 입열 및 패스간 온도에 따른 용접금속 강도와 충격인성의 변화를 정량화하고, 다층용접 시 용접금속 강도와 충격인성 지배 요인을 해석하였다.

2. 실험 방법

두께 25mm의 인장강도 570MPa급 용접구조용 압연강을 기공과 보의 용접에 적용되는 싱글 베벨 그루브(single bevel groove)로 가공하여 탄산가스 아크 용접하였다. Table 1에 압연강의 화학조성 및 기계적성질을 나타내었다. 사용한 와이어는 직경 1.4mm의 슬래그계 및 메탈계 플럭스 코어드 와이어로 각각 KS YFW-C602R 및 YFW-C602M에 상당한다. 입열은 18~49kJ/cm, 패스간 온도는 150~320℃로 변경하였으며, 입열 변경 시 패스간 온도는 150℃, 패스간 온도 변경 시 입열은 39kJ/cm로 일정하게 유지하였다. Fig. 1에 이음부 형상 및 각 조건별 적층모양을 나타내었다. 용접 중 패스간 온도는 용접선 길이 (250mm) 중앙에서 그루브로부터 10mm 떨어진 곳의 판 표면에서 접촉식온도계를 사용하여 측정하였다. 용접 후 용접금속 인장 및 충격시험을 행하여 기계적 성질을 측정하였다. 인장시험은 직경 6mm, 표점거리 24mm의 환봉 시험편을 판 두께 중앙부의 용접금속 중앙에서 채취하여 상온에서 행하였으며, 충격시험은 표준 Charpy 충격시험편을 판 두께 중앙부에서 채취하여 -20℃에서 행하였다. 이때 노치는 용접선 길이에 수직으로 용접금속 중앙에 설치하였다. 광학현미경을 사용하여 용접금속 조직관찰을 행하였으며 각 조직별 분율을 IIW법으로¹⁰⁾ 측정하였다. 용접금속의 화학조성은 용접금속의 중앙에서 시험편을 채취하여 발광분광분석법으로 분석하였다.

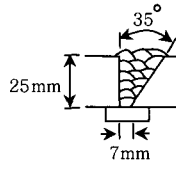





Heat input (kJ/cm)/ Interpass temp.(℃)	Pass number	Deposition sequence
18/150	14	
29/150	9	
39/150	6	
49/150	5	
39/250	6	
39/320	6	

Fig. 1 Schematic diagram showing joint detail and deposition sequence

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접금속 강도

Fig. 2에 입열에 따른 용접금속의 인장강도 변화를 나타내었다. 입열이 18에서 29kJ/cm로 증가함에 따라 인장강도는 저하하나, 그 이상에서는 저하의 정도가 작다. 항복강도는 인장강도보다 약 40~50MPa 정도 낮은 값을 나타내었으나 저하의 경향은 인장강도와 동일하였다. 전 입열범위에서 메탈계 와이어가 슬래그계 보다 약 50MPa 정도 높은 인장강도를 나타내나 두 와이어 모두 모재의 규격 하한치인 570MPa를 상회하고 있다. 예를 들어 메탈계의 경우 입열 증가에 따라 인장강도는 각각 763, 711, 709, 708MPa를 나타내었다. 용접금속의 이런 고강도는 모재의 희석이 하나의 원인

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of base metal

Chemical composition (wt%)											Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	Ti			
0.07	0.29	1.84	0.007	0.001	0.29	0.02	0.31	0.04	0.04	0.01	698	530	28

으로 생각되어 탄소가 0.07%인 기존의 모재 대신 탄소가 0.007%인 가공열처리로 제조된 저탄소형 570 MPa급 강을 사용하여 입열 30kJ/cm로 용접하여 인장강도를 비교하였다. 인장강도는 583MPa를 나타내어 기존의 모재를 사용하여 29kJ/cm로 용접한 경우의 711MPa보다 낮은 값을 나타내었다. 따라서 동일한 규격의 모재라도 화학성분이나 제조방법에 따라 최종 용접금속 강도에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

입열 증가는 용접금속의 냉각속도를 저하시켜 조직에 영향을 미치므로 최종 패스에서의 용접금속 조직관찰을 행하였다. Fig. 3에 나타난 것처럼 두 와이어 모두 18kJ/cm까지는 침상 페라이트가 대부분이나, 29kJ/cm 이상에서는 침상페라이트와 입계페라이트의 혼합조직을 나타내었다. 이런 조직관찰 결과는 앞서의 인장강도 변화와 잘 대응하고 있다. 입열 증가에 따른 냉각속도 저하는 주상정 크기도 증가시켜 입열이 29에서 49kJ/cm로 증가함에 따라 슬래그계는 118, 145, 172 μ m를,

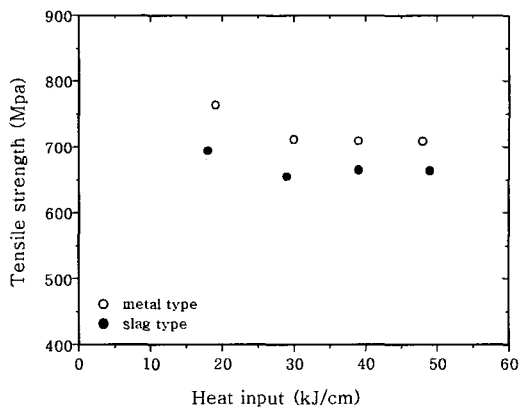


Fig. 2 Variation of tensile strength of weld metal as a function of heat input

메탈계는 141, 153, 165 μ m를 각각 나타내었다.

한편 입열 증대에 따른 용접금속 성분 변화에 대하여서도 알아보았다. Table 2에 각 용접금속의 화학성분

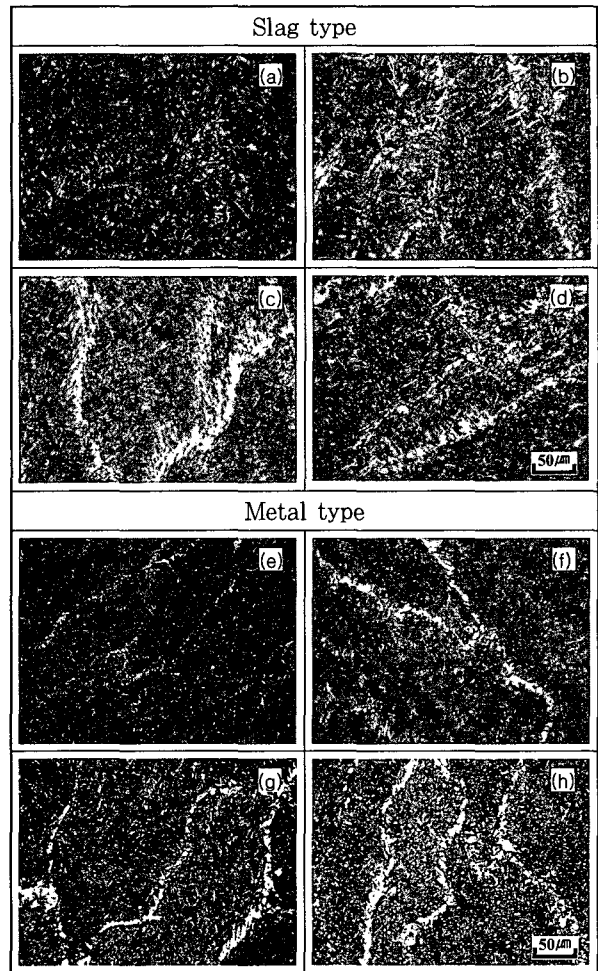


Fig. 3 Optical microstructure of weld metals welded with various heat inputs:(a), (e) 18; (b), (f) 29 ; (c), (g) 39 ; (d), (h) 49kJ/cm

Table 2 Chemical composition of weld metals (wt%)

Wire	Heat input (kJ/cm)	Chemical composition (wt%)											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Nb	Ti	B (ppm)
Metal type	18	0.04	0.63	2.12	0.018	0.006	0.03	1.00	0.02	0.04	0.01	0.06	45
	29	0.05	0.54	1.92	0.017	0.007	0.03	0.92	0.06	0.03	0.01	0.05	38
	39	0.05	0.52	1.86	0.018	0.006	0.03	0.93	0.04	0.03	0.01	0.04	39
	49	0.05	0.51	1.80	0.017	0.006	0.03	0.90	0.05	0.03	0.01	0.04	34
Flux type	18	0.04	0.50	1.49	0.015	0.007	0.03	0.95	0.25	0.01	0.02	0.05	26
	29	0.04	0.47	1.45	0.014	0.006	0.03	0.91	0.25	0.01	0.02	0.05	27
	39	0.04	0.46	1.41	0.016	0.008	0.03	0.95	0.26	0.01	0.02	0.04	25
	49	0.04	0.45	1.35	0.016	0.008	0.03	0.95	0.25	0.01	0.02	0.03	25

을 나타내었다. 입열의 증대에 따라 실리콘, 망간, 티타늄 등이 변화하고 있다. 한 예로 Fig. 4에 입열에 따른 망간의 변화를 나타내었는데 입열의 증대에 따라 망간은 지속적으로 저하하고 있다. 이런 점으로부터 입열을 증가하여 용접을 하게 되면 실리콘, 망간, 티타늄 등 탈산원소들의 산화손실이 증가하여 강도저하의 또 다른 원인이 됨을 알 수 있다. 이러한 탈산원소 산화손실과 입열에 영향을 미치는 용접조건, 즉 용접전류, 아크전압, 용접속도와와의 상관관계를 알아보았다. Fig. 5에 한 예로 용접금속 망간함량에 미치는 용접변수의 영향을 나타내었다. 망간함량은 용접전류와 아크전압과 높은 상관관계를 나타내어, 각각의 값이 증가 할수록 직선적으로 감소하였다. 하지만 용접속도와는 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았다. 이러한 경향은 실리콘과 티타늄에서도 동일하였다.

한편 입열의 증대는 패스 수를 감소시켜 후속패스에 의하여 나타나는 재가열부를 감소시킨다. 이러한 재가열부는 원래의 용접금속보다 낮은 경도를 나타내기 때문에 (Fig. 10 참조) 입열 증대에 따른 재가열부 감소는 인장강도를 증가시키는 효과를 나타낸다. 하지만 본 실험의 결과 입열의 증대는 인장강도를 저하시키고 있

으므로, 입열 증대에 따른 침상페라이트의 감소와 침상 페라이트 자체의 경도 (강도) 저하의 효과가 재가열부 감소의 효과보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6에 패스간 온도에 따른 용접금속의 인장강도 변화를 나타내었다. 패스간 온도의 증가에 따라 인장강도는 지속적으로 저하하고 있으며 메탈계 와이어가 슬래그계 보다 20~50MPa 정도 높은 값을 나타내었다. 용접금속 조직관찰 결과 모든 패스간 온도에서 침상페라이트와 입계페라이트 혼합조직을 나타내나, 패스간 온도의 증가에 따라 침상페라이트는 저하하고 입계페라이트는 증가하며 주상정 폭은 증가하였다. 한 예로 슬래그계 용접금속의 경우 패스간 온도가 150, 250, 320℃로 증가함에 따라 침상페라이트 분율은 82, 80, 76%로 저하하며, 주상정 폭은 145, 168, 180 μ m로 증가하였다. 따라서 입열의 증가와 동일하게 패스간 온도의 증가도 냉각속도를 저하시켜 용접금속의 침상페라이트를 감소시키며 주상정 폭은 증가시킴을 알 수 있다. 한편 패스간 온도 변화에 따른 탈산원소의 손실은 입열에 비하여 그 정도는 크지 않으나 패스간 온도의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 Evans의 실험결과에서도 확인되고 있다³⁾. 그

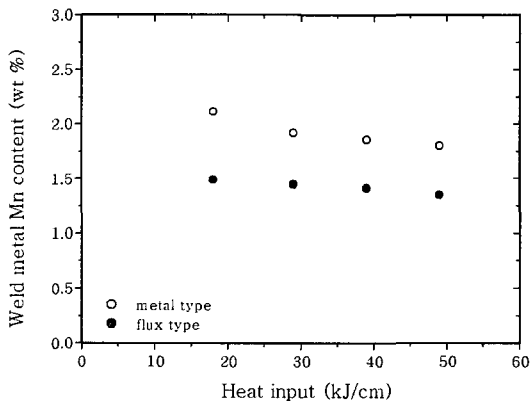


Fig. 4 Variation of weld metal Mn content as a function of heat input

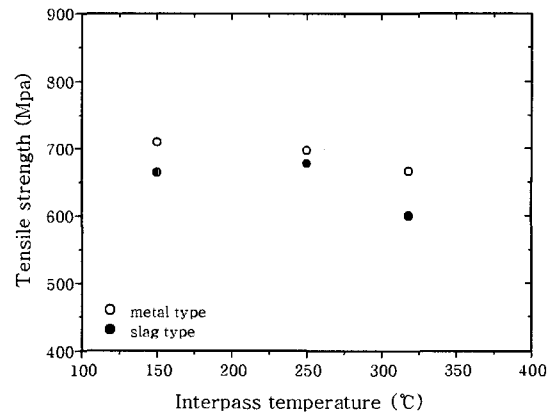


Fig. 6 Variation of tensile strength of weld metal as a function of interpass temperature

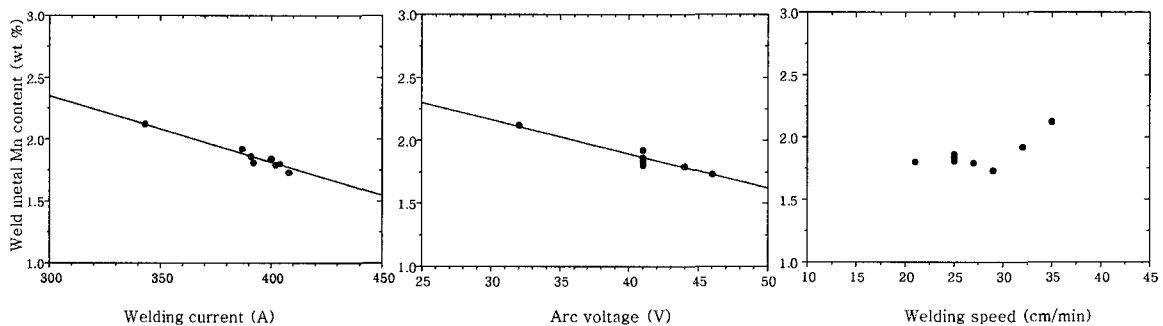


Fig. 5 Effects of welding current, arc voltage and welding speed on the weld metal Mn content

는 C-Mn강을 패스간 온도 20~300℃로 변경하며 용접한 결과, 용접금속의 망간과 실리콘 함량이 패스간 온도의 증가에 따라 저하한다고 하였다. 따라서 입열 및 패스간 온도 증가에 따른 용접금속의 강도 저하에는 냉각속도 저하에 따른 침상페라이트 감소 및 주상정 성장 등의 조직적인 요인 이외에도 탈산원소 산화손실에 기인한 합금원소 저하도 영향을 미침을 알 수 있다.

3.2 용접금속 충격인성

Figs. 7과 8에 충격 흡수에너지에 미치는 입열 및 패스간 온도의 영향을 각각 나타내었다. 입열에 따른 흡수에너지 변화는 두 와이어 모두 뚜렷한 경향을 보이지 않으며 각 조건에서의 흡수에너지 값에도 편차가 매우 크다. 하지만 패스간 온도는 150℃에서 250℃로 증가함에 따라 흡수에너지는 뚜렷이 저하하며 흡수에너지 값의 편차도 비교적 작다. 일반적으로 용접금속 충격인성은 침상페라이트 조직이 증가함에 따라 증가한다고

알려져 있어 흡수에너지 변화와 침상페라이트 분율의 상관관계를 조사하였다. Fig. 9에 한 예로 슬래그계 용접금속의 결과를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 침상페라이트 분율과 흡수에너지는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다. 이런 경향은 메탈계 와이어에서도 동일하였다. 따라서 본 실험에서 용접금속 충격인성은 조직 이외에 다른 요인에 의해서도 영향을 받음을 알 수 있다.

다층용접을 하게 되면 최종 용접금속은 용접조건에 따라 다양한 적층구조를 가지게 된다. 즉 Fig. 1에 나타난 바와 같이 입열이 증가함에 따라 패스 수는 14, 9, 6, 5로 줄어들며, 그에 따라 적층모습도 달라진다. 한 예로 Fig. 10에 메탈계를 사용하여 입열량 49kJ/cm, 패스간 온도 150℃로 용접한 경우 적층모습과 용접금

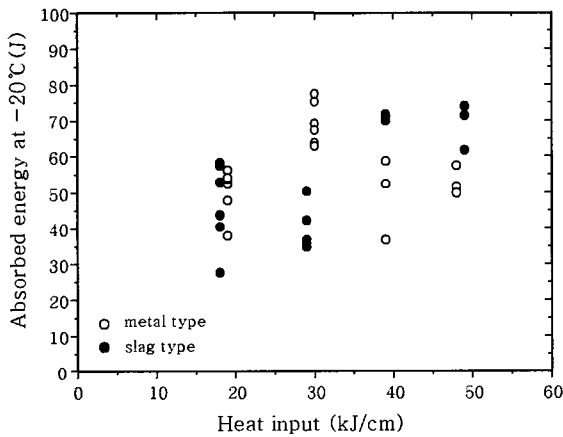


Fig. 7 Variation of impact absorbed energy of weld metal at-20℃ as a function of heat input

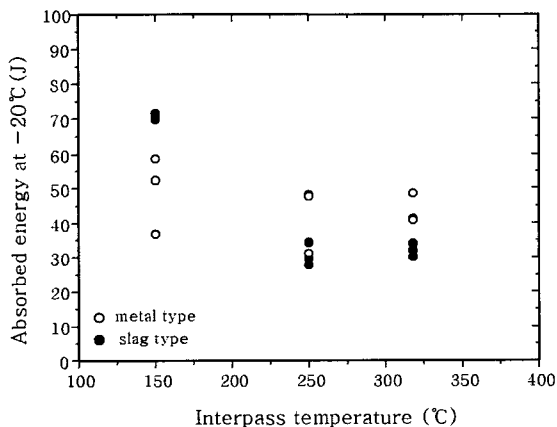


Fig. 8 Variation of impact absorbed energy of weld metal at-20℃ as a function of interpass temperature

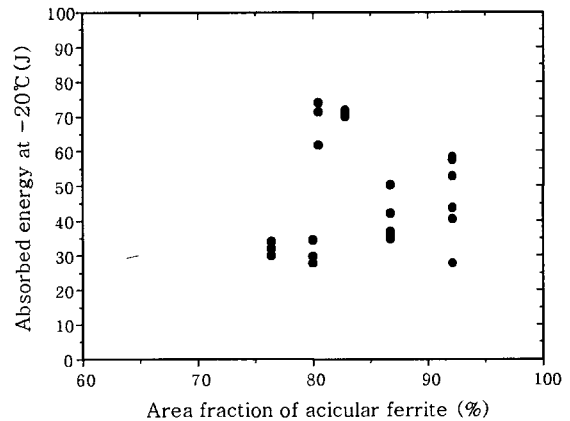


Fig. 9 Variation of impact absorbed energy of weld metal at-20℃ as a function of area fraction of acicular ferrite

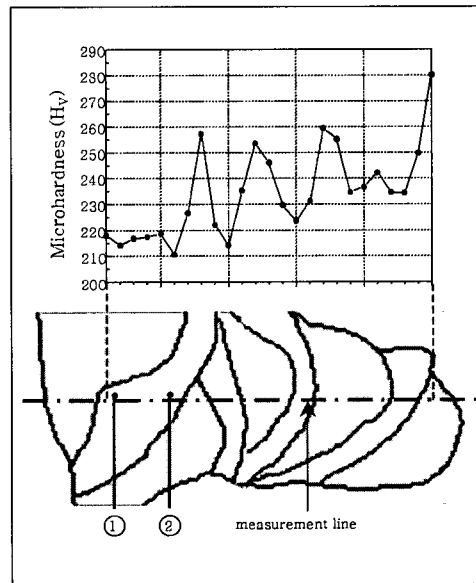


Fig. 10 Deposition sequence and microhardness in weld metal welded with metal cored wire (heat input 49KJ/cm, interpass temperature 150℃)

속 중앙에서 판 두께방향, 즉 노치위치에서의 연속경도를 측정된 결과를 나타내었다. 용접금속에는 후속 패스에 의하여 다시 가열된 부분, 즉 재가열된 영역이 존재하며 (흰 부분), 이 부분은 재가열 되지 않은 영역 (검은 부분)에 비하여 경도가 낮음을 알 수 있다. 재가열 영역에서의 현미경조직 관찰결과를 Fig. 11에 나타내었다. 재가열 영역에서도 후속 패스에 가까운 영역에서는 결정립이 다소 조대하나 (Region ①) 멀리 떨어질수록 매우 미세하다 (Region ②). 다층용접에 의한 이러한 조직 및 기계적성질 변화가 충격인성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 흡수에너지 변화를 충격시험편 노치가 위치하는 곳에서 재가열 영역의 총 길이로 나타내었다. Fig. 12에 메탈게의 경우를 예로 나타내었다. 각 조건에서의 흡수에너지에 여전히 편차가 있으나 흡수에너지는 재가열된 영역의 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이러한 사실로부터 다층 용접금속의 충격인성의 해석은 매우 복잡하며 조직 자체의 요인 이외에도 후속 패스에 의한 재가열 영역의 존재가 인성을 향상시키는 또 다른 요인으로 작용함을 알 수 있다. 한편 입열이 일정하고 패스간 온도만을 변경하여 시험한 경

우는 적층이 동일하여 (Fig. 1 참조) 재가열 영역의 존재도 동일하다. 따라서 재가열 영역의 존재가 큰 영향을 미치지 않아 충격인성은 패스간 온도의 증가에 따라 지속적으로 저하한다. 하지만 입열을 변경하여 시험한 경우는 적층이 달라져 재가열 영역의 존재가 큰 영향을 미치게 되는 것이다. 따라서 입열을 변경하여 다층용접하는 경우 용접금속 충격인성 향상을 위하여서는 적층 관리도 중요함을 알 수 있다.

4. 결 론

KS YFW-C602R 및 YFW-C602M에 상당하는 슬래그계 및 메탈계 플럭스 코어드 와이어로 인장강도 570MPa급 고장력강을 다층용접하여 용접금속 강도와 충격인성에 미치는 입열 및 패스간 온도의 영향에 대하여 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 입열이 18에서 29kJ/cm로 증가함에 따라 두 와이어 모두 용접금속 인장강도는 저하하나, 그 이상에서는 저하의 정도가 작았다. 메탈계 와이어가 슬래그계보다 약 50MPa 높은 인장강도를 나타내나 두 와이어 모두 모재의 규격 하한치인 570MPa를 상회하였다. 이러한 입열 증가에 따른 강도 저하는 칩상페라이트 감소 및 주상정 성장 등 조직적인 요인 이외에 탈산원소 산화손실에 기인한 합금원소 저하에도 영향을 받았다.

2) 패스간 온도가 150에서 320℃로 증가함에 따라 인장강도는 지속적으로 저하하였다. 패스간 온도는 입열 증가와 동일한 조직변화를 나타내었으나, 합금원소 저하 효과는 입열 만큼 크지 않았다.

3) 용접금속 충격인성은 패스간 온도 증가에 따라 저하하였으나 입열 증가에 따라서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이는 후속 패스에 따른 재가열 영역의 존재 때문으로 재가열 영역이 증가함에 따라 충격인성이 증가하는 경향을 나타내었다.

4) 와이어 중 망간, 실리콘, 티타늄 등 탈산원소의 산화손실은 용접 전류와 아크 전압과 높은 상관관계를 나타내나, 용접속도와는 뚜렷한 상관관계를 나타내지 않았다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점 기술개발사업인 “차세대 초대형 구조물용 강재개발 연구”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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

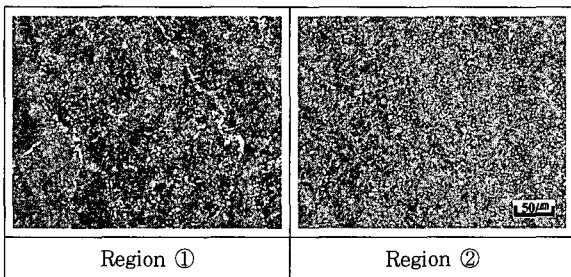


Fig. 11 Optical microstructures of reheated weld metal (region ①,②)

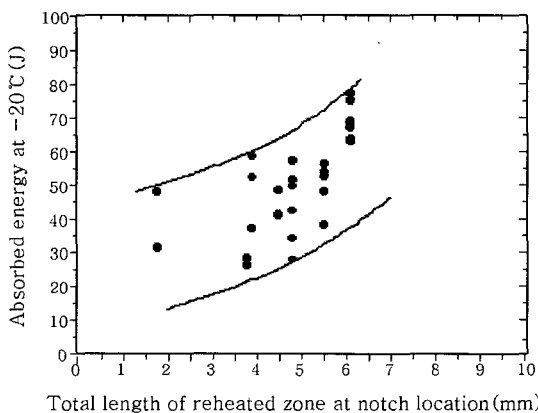


Fig. 12 Variation of impact absorbed energy of weld metal at -20℃ as a function of total length of reheated zone at notch location

- だより 技術かいど, 44-393 (2003), 1-6 (in Japanese)
2. 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
 3. G. M. Evans : Effect of Interpass Temperature on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld-Metal Deposits, *IIW Doc. II-A-460-78*
 4. 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
 5. 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)
 6. M. Tsukamoto, I. Hatano, K. Tsuji, Y. Murata, Y. Ichinohe : Features of the Newly Developed Solid Wire for CO₂ Gas Shielded Arc Welding under Large Heat Input and High Interpass Temperature Conditions, *Welding Technology*, 51-12 (2003), 93-98 (in Japanese)
 7. 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)
 8. 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)
 9. N. Toshihiko : Welding Materials for Building Structure and How to Use, *Journal of the Japan Welding Society*, 70-7 (2001), 21-30 (in Japanese)
 10. Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals, *IIW Doc. IX-1533-88*