

# 하이브리드 용접에 의한 세립강 용접부의 기계적 성질에 관한 연구 Mechanical Property of Ultra Fine Grained Steel Weld by Hybrid Welding

동현우 · 안용식

H. W. Dong and Y. S. Ahn

(접수일 : 2010. 9. 15, 수정일 : 2010년 12월 14일, 채택확정 : 2010년 12월 16일)

**Key Words** : Hybrid Welding(하이브리드 용접), Filler Wire(용가재), Fine Grained Steel(세립강), Hardness(경도), Impact Property(충격특성)

**Abstract** : The effect of Mn and Ti contents in filler wire on the microstructure and mechanical property of weld metal has been investigated after hybrid welding with ultra fine grained (UFG) steel. The microstructure and distribution of alloy compositions at the top region of weld zone were quite different with those at the bottom region after hybrid welding. The bottom region of weld zone contained higher Mn and Ti contents, and consequently the hardness of bottom region was higher than that of top region. With the increase of Mn and Ti contents in filler wire, the volume percent of acicular ferrite in weld metal decreased, and the weld zone showed higher hardness and better impact property.

## 1. 서 론

강재의 사용 환경에 따라서 요구되는 다양한 품질특성들을 만족시키기 위해서 강재 제조공정에 있어 많은 새로운 기술들이 개발되고 있으며 이러한 최신 기술의 적용에 따라 강재의 품질은 강도, 인성 또는 내부식성 측면에서 많은 발전이 되고 있다. 라인파이프용 강에서 요구되는 성질은 고강도와 함께 우수한 저온인성 및 수소 유기균열과 황화수소 응력부식 균열에 대한 저항성이다. 한랭지에서 사용되는 라인 파이프 강에 요구되는 우수한 저온인성을 확보하기 위해서는 강조직의 미세화방법이 적용되고 있다. 하지만 고강도강은 일반적으로 용접성이 열악하다는 단점이 있다. 차세대 구조용으로 개발 중인 세립형 강재 역시 구조물 제작 시 적용되는 용접에 의한 미세조직변화로 용접부 특히 열영향부의 물성이 저하된다. 일반적으로 파이프라인용접에는 서브머지드 아크 용접(SAW, Submerged Arc Welding) 및 고주파 전기저항 용접(ERW, Electric Resistance Welding)이 있다. SAW의 경우에는

ERW에 비하여 상대적으로 용접속도가 느리고, ERW법은 적용할 수 있는 소재 두께 범위가 비교적 좁으면서 강관의 직경 범위에도 제한이 있다. 최근 에 고출력을 가지면서 좋은 빔 특성을 가지는 화이버 레이저(fiber laser)가 큰 주목을 받고 있다. 고출력 레이저는 매질의 냉각문제가 가장 큰 관건인데, 화이버 레이저는 수백  $\mu\text{m}$ 의 지름을 가진 수십m 길이의 공진기 형태를 띠어 부피대비 냉각면적이 가장 크다고 할 수 있다. 화이버 레이저는 또한 시스템의 부피가 매우 작아질 뿐만 아니라 유지관리 비용이 거의 들어가지 않는다는 장점을 가진다. 또한 저입열 특성으로 용접부에서 열영향부의 결정립 조대화를 억제할 수 있고 용접속도가 빠르다. 이러한 많은 장점으로 인해 레이저 용접은 자동차와 조선 분야에 많이 이용되고 있다. 하지만 레이저 용접은 용접 시 접합 부분의 간격조종이 매우 까다롭다는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 보완하기 위하여 최근에는 레이저에 가스메탈 아크(MAG, Metal Active Gas) 용접법을 접목시킨 Fiber Laser-MAG 하이브리드(hybrid)용접법이 사용되고 있다. 하이브리드 용접법은 공정변수가 다양하여 이에 따른 용접부의 야금학적 변화가 체계적으로 정립되어 있지 않고, 이러한 야금학적 변화는 용접부의 기계적 성질을 지

안용식(교신저자) : 부경대학교 신소재공학부  
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr  
동현우 : 부경대학교 신소재공학부

배하므로 이에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 용접 열재현 시험이 아닌 실용접으로 라인파이프에 사용되는 700 MPa급 세립강을 가지고 3 종류의 용접와이어(filler wire)를 사용하여 하이브리드용접을 실시하였고, 용접조건 변수에 따른 용접부의 야금학적 변화를 조사하고 기계적물성 평가를 하여 각 조건이 물성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

## 2. 시험방법

Table 1에서는 본 연구에서 사용된 라인파이프 강재용 세립강(UFG-steel)과 용접에 사용된 용접와이어에 대한화학조성을 나타내었다. 표에서 보면 각 용접봉의 성분이 A, B, C로 갈수록 Mn 및 Ti 함량이 상승하였고, C, Si 등 다른 원소들의 함량은 거의 동일하였다. 레이저-아크 하이브리드용접의 시스템구성을 위하여 10 KW fiber laser(Ytterbium fiber laser, model : YLR 10000) 및 MAG 용접기(DM500)를 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions of UFG steel and welding wires.

| Material  | Chemical composition |      |      |       |       |       |
|-----------|----------------------|------|------|-------|-------|-------|
|           | C                    | Si   | Mn   | P     | S     | Ti    |
| UFG-steel | 0.07                 | 0.25 | 1.95 | 0.011 | 0.002 | 0.02  |
| A wire    | 0.08                 | 0.4  | 0.85 | 0.014 | 0.014 | 0.001 |
| B wire    | 0.06                 | 0.52 | 1.07 | 0.015 | 0.009 | 0.1   |
| C wire    | 0.08                 | 0.5  | 1.35 | 0.012 | 0.01  | 0.15  |

하이브리드 용접 시 용접속도는 2 m/min 이었으며, Ar+CO<sub>2</sub> 혼합가스를 보호가스(shield gas)로 사용하였다. Ar+CO<sub>2</sub> 혼합가스는 고전류 용접에서 자유비행 이행형태 중 스프레이 이행(spray transfer)으로 이루어져 아크가 매우 안정되며 스파터 발생이 적다. 용접시 레이저와 아크와의 거리는 2 mm, 레이저와 아크 용접봉의 각도는 30° 이었다. 하이브리드용접의 레이저 출력, 용접봉 변화를 용접변수로 선택하여 각각의 용접봉을 사용할 때 레이저 출력을 8, 9, 10 Kw로 조건을 변화하면서 실험하였다. 용접와이어의 종류 및 레이저 출력은 용접부의 형상과 특성에도 깊은 관계가 있는 중요 용접변수들이다. 용접 전 피용접부는 모두 그루브(groove)가 공되었다.

용접된 시편은 연마하고, 3 % 나이탈, Lepera 용액으로 에칭한 후 광학현미경(OM, Optical Microscope)과 주사식 전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)으로 용접부의 미세조직을 관찰하고, 용접부에 생성되는 각 상의 분율을 정량적으로 측정하였다. 또한 EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)를 사용하여 용접부에서 용접봉의 화학성분의 회석정도를 확인하였다. 마이크로비커스 경도기를 이용하여 용접부의 top부위에서 bottom방향으로 세로방향으로의 경도변화 및 가로방향으로의 경도분포를 측정하였다. 각 조건에서 수행된 용접부를 포함한 시편을 가지고 인장 실험 및 샤르피(Charpy) V-notch 충격시험을 실시하였으며, 충격 시험 시에는 상온, -20 °C 및 -40 °C의 온도에서 각각 수행하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 용접부의 성분분포

하이브리드 용접의 경우 용접부는 아크 용접과 레이저 용접의 영향을 동시에 받는다<sup>1)</sup>. 아크와 레이저의 영향을 정성적으로 확인하기 위하여 각각 다른 종류의 와이어를 사용하여 용접한 용접부에서 Ti, Mn,의 원소 분포를 EPMA를 이용하여 조사하였다.

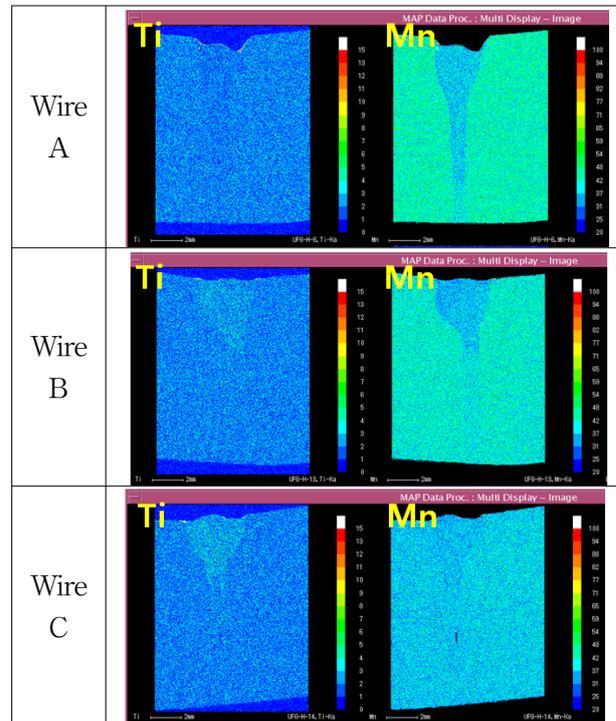


Fig. 1 EPMA analysis showing the distribution of Ti and Mn elements of weld zone after hybrid welding with various filler wires of A, B, and C.

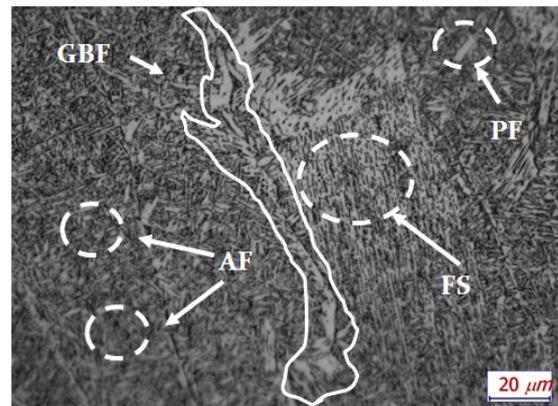
Fig. 1의 EPMA 관찰사진에서 보면 용접부와 모재부의 Ti, Mn 등의 원소의 분포차이는 아크에 영향을 가장 많이 받는 용접금속의 상부에만 존재한다는 것을 알 수 있다. 특히 용접 와이어 B와 C를 사용한 용접부의 경우 용접부 상부에 Ti원소가 많이 분포하고 있음을 뚜렷이 구분할 수 있고 A 와이어를 사용한 경우 용접부에는 Ti원소가 검출되지 않고 있다. Mn 원소를 가장 많이 포함한 C 와이어를 사용한 경우 용접부의 Mn분포는 모재와 거의 비슷하지만, A, B 와이어를 사용한 경우 모재보다 용접부의 Mn 량이 낮은 것을 알 수 있다. 이와 같은 합금성분의 분포는 하이브리드 용접에 있어서 상부와 하부비드에 생성되는 조직이 다르게 나타나 전체적인 기계적물성에도 다른 결과를 나타낼 것이라고 예측된다.

### 3.2 미세조직

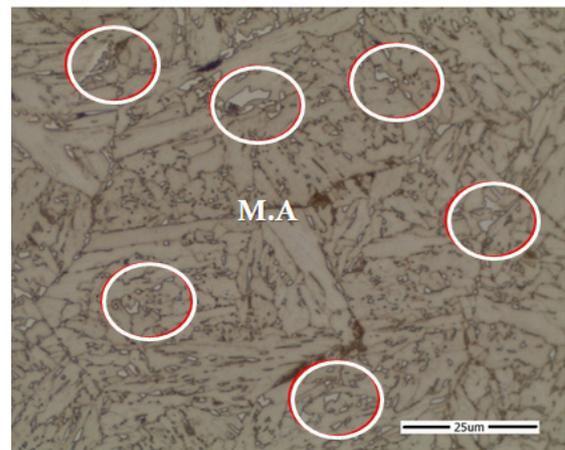
Fig. 2는 하이브리드 용접 후 용접금속(weld metal)과 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone)의 미세조직을 나타내고 있다. 그림에서 용융부(fusion zone)는 침상 페라이트(acicular ferrite, AF), 결정립계 페라이트(grain boundary ferrite, GBF), 다각형 페라이트(polygonal ferrite, PF), 2차상 페라이트(aligned second phase ferrite, FS) 및 마르텐사이트-페라이트(martensite and austenite, M.A.)의 여러 가지 조직으로 형성되어 있다. 충분히 느린 냉각 속도에서 형성되는 평형상태의 다각형 페라이트(PF)와 비교적 빠른 냉각 속도에서 형성되는 침상 페라이트(AF)는 준 평형 상태의 페라이트로서 서로 다른 기계적 특성을 가지고 있다. AF조직은 오스테나이트 입내에서 핵 생성 되어 결정립성장이 불규칙한 방향으로 진행하여 미세하게 형성되고, 결정립계에 이차상으로 존재한다. 또한 AF는 결정립이 미세하고, 내부에 전위밀도가 높아 적당량 형성될 때 강도와 인성이 동시에 상승된다고 알려져 있다<sup>2-5</sup>.

본 연구에서 AF는 용접금속에서 많이 관찰되었다. 한편 M.A 조직은 이상역에서 형성된 오스테나이트가 비평형 성장을 하면서 C, Mn 등이 고르게 분포되지 않고 어느 한쪽으로 농축되어 저온영역까지 불안정한 상태로 잔류하다가 결국 취약한 마르텐사이트로 변태된 것이다. 취약한 M.A 상이 많아 질수록 강의 파괴인성 값이 급격히 저하한다. M.A 조직은 용접금속이 아닌 하부 HAZ부에서 많이 관찰되었다.

Evans<sup>6)</sup>를 비롯한 일부 연구<sup>7-10)</sup>에서는 용접금속 안에 Mn량이 증가하면 침상 페라이트의 량이 증가한다고 보고하고 있지만, 본 연구에서는 Fig. 3에서 나타내는 바와 같이 용접금속 안에 들어가는 용접 와이어의 Mn량이 0.85 %에서 1.35 %로 증가함에 따라 침상 페라이트의 량이 감소하고 GBF 와 FS상들은 증가 하였다. 이러한 이유는 본 연구에서 사용한 용접 와이어 내의 Mn의 함량이 증가함과 동시에 Ti함량이 증가하였기 때문이라고 생각되며 정확한 원인을 밝혀내기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.



(a) Weld metal



(b) HAZ

Fig. 2 Microstructure of a) weld metal and b) HAZ after hybrid welding of UFG steel.

Table 2 Mean intercept ferrite grain size in the weld metal after hybrid weld.

| Filler wire                         | A    | B    | C    |
|-------------------------------------|------|------|------|
| Mn content                          | 0.85 | 1.07 | 1.35 |
| Ferrite grain size( $\mu\text{m}$ ) | 1.08 | 1.34 | 1.78 |

Table 2에서는 용접 와이어의 Mn함량이 많을수록 침상페라이트의 입자크기가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 정도의 크기 차이는 용접부의 기계적물성변화에 미치는 영향이 그다지 크지 않을 것이라고 생각된다.

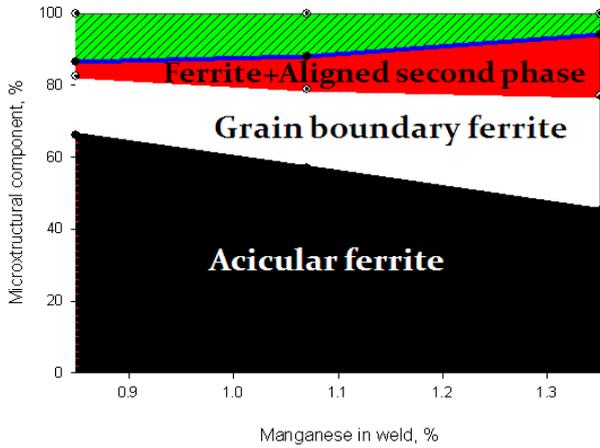


Fig. 3 Influence of manganese on microstructure constituents

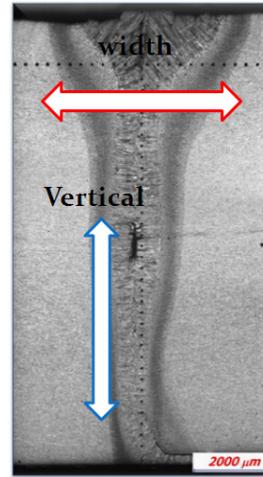
### 3.3 기계적 성질

Fig. 4는 용접부의 마크로조직 및 경도분포를 나타내고 있으며 그림 4(b)에서 보면 용접부는 모재부보다 전체적으로 높은 경도를 나타내고 있으며, 용접와이어 A를 사용하였을 경우 용접 금속의 경도가 다른 조건보다 낮게 나타나고 있다. 이것은 와이어의 화학성분에서 낮은 Mn 및 Ti 함량에 의한 결과라고 생각된다. 또한 용접 금속의 상부에서부터 하부로 갈수록 경도 값이 상승 하는 것을 알 수 있다 [Fig. 4(c)]. 한편 Fig. 4(c)에서 경도가 급격히 감소한 구간은 용접부 하부에 응고균열로 인하여 생성된 결함 때문이다.

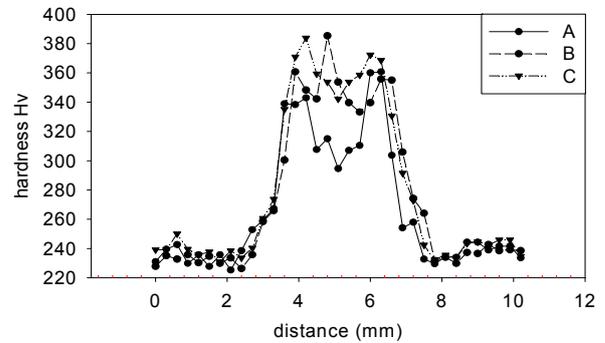
Table 3에서는 인장 테스트의 결과로서 인장강도(TS), 항복강도(YS) 및 연신율(EI)을 나타낸다. 도표에서 나타내는 바와 같이 인장시험 결과는 와이어 A, B, C 모두 비슷하게 나왔다 이것은 파괴 지점이 모두 용접부가 아닌 모재에서 발생했기 때문이다.

Table 3 Tensile test results for welds with various welding wires.

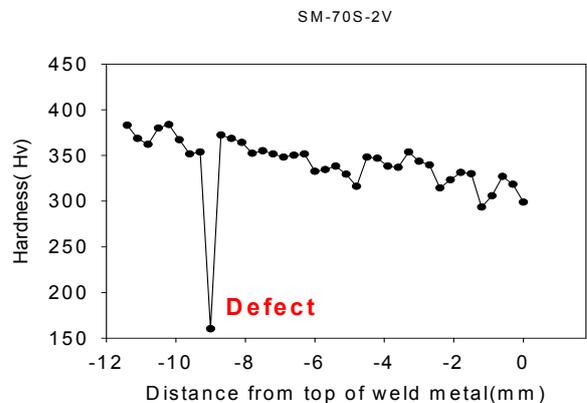
| Wire                    | A     | B     | C     |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| YS (N/mm <sup>2</sup> ) | 646.6 | 652.6 | 637.3 |
| TS (N/mm <sup>2</sup> ) | 701.3 | 705   | 700.3 |
| EI (%)                  | 14.6  | 14.7  | 17.1  |



(a) Macrostructure of weld zone



(b) Hardness variation with width direction



(c) Hardness variation with vertical direction

Fig. 4 Macrostructure(a) and hardness variation (b,c) of weld zone according to the direction after hybrid welding.

Fig. 5의 각 온도에서 실시한 샤르피 충격시험 결과를 보면 와이어의 종류에 관계없이 모든 온도범위에서 시험온도가 상승함에 따라 충격흡수에너지가 높았으며 어떤 시편에서도 뚜렷한 연성취성 전이현상이 나타나지 않았다. Mn 함량이 가장 높으며 결정 입계 페라이트 및 2차상이 가장 많았던 C-와

이어를 사용한 시편에서 충격흡수에너지가 가장 높게 측정되었다.

본 연구에서는 이전의 여러 연구<sup>8-10)</sup>와 반대로 와이어의 Mn 및 Ti 량이 증가함에 따라 침상 페라이트의 량이 감소하고 결정립계에서 생성되는 저온변태상인 GBF 와 FS상의 함량이 증가하였다[Fig. 3]. C-와이어의 경우 -20 °C ~ -40 °C까지도 충격에너지가 140 J 정도로 다른 와이어보다 충격에너지가 뚜렷하게 높게 나타났다. 이것은 C-와이어에 많이 함유된 Mn, Ti 함유원소에 의한 페라이트의 고용강화, 탄화물의 석출로 생성되는 이차상의 증가와 결정립미세화로 인한 결과로 예측되어진다.

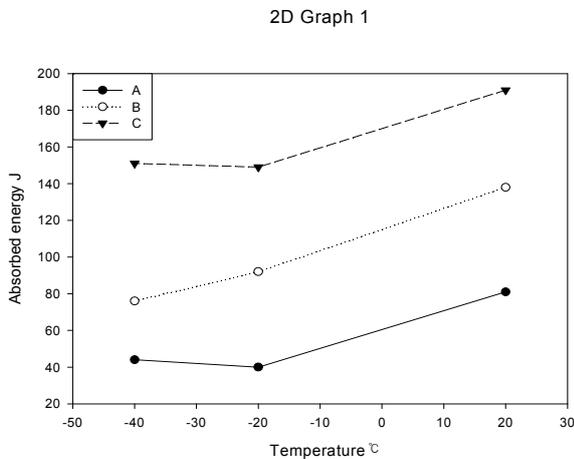


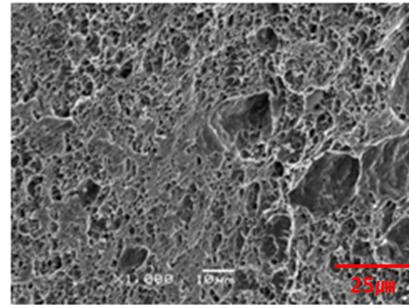
Fig. 5 Effect of wire on as welded on the Charpy V-notch value.

Evans 등<sup>10)</sup>은 유사한 시험편을 가지고 수행한 Charpy V-notch 시험에서 Mn 함량이 1.4 %까지 증가함에 따라 충격에너지도 증가하며, 연성-취성전이현상을 나타내는 충격에너지 경계를 약 100 J 이라고 하였다. 본 연구는 그의 연구결과와 잘 일치하고 있다. Fig. 5에서 보면 C-와이어를 사용한 경우 모두 충격에너지가 100 J을 초과하며 A-와이어의 경우 100 J보다 낮은 값을 보인다.

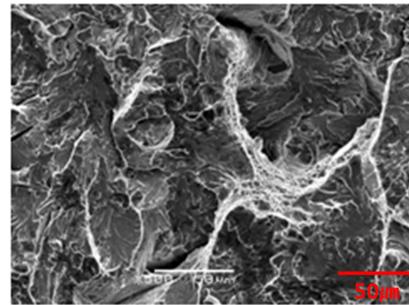
Fig. 6 에서는 B-와이어를 사용하여 용접한 후 각 온도에서 충격파단시험한 후의 파단면을 나타내고 있다. 상온에서는 딩플형상을 띄면서 대부분 연성과취성이 일어났으며 -20 °C에서부터 취성과파괴형상인 벽개 파괴모양이 나타났고 -40 °C에서는 파괴부분의 대부분이 벽개 파괴형상을 보였다.

일반적인 타 연구의 결과<sup>11-12)</sup>에서 보면 충격인성이 취성과파괴로 천이할 때의 충격에너지를 약 100 J 이며 150 J 이상일 때는 완전한 연성과파괴, 50 J 이

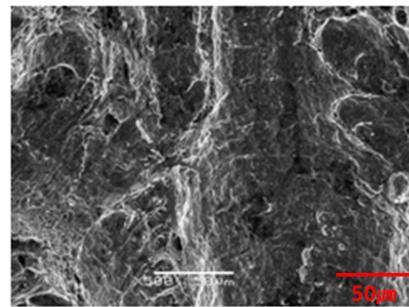
하일 때는 완전한 취성과파괴를 나타내었으면 본 연구의 결과와 잘 일치한다. 즉 C-와이어를 사용할 때는 -40 °C까지 완전한 연성과파괴를 나타내었으나, Mn, Ti 함량이 가장 낮았던 A-와이어를 사용한 경우 충격시험온도 -20 °C에도 완전한 취성과파괴를 나타내고 있다.



(a) R.T



(b) -20 °C



(c) -40 °C

Fig. 6 fractography of broken Charpy V-notch specimen at various test temperatures.

#### 4. 결 론

700 MPa급 고강도 세립강을 가지고 화이버 레이저- MAG 하이브리드 용접을 실시하여 용접부 조직 및 기계적 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용접부에 용접와이어의 원소 분포는 아크에 영향을 가장 많이 받는 용접금속의 상부에 분포하며

하부에는 없는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로 아크의 영향을 받는 상부와 레이저의 영향을 받는 하부의 합금원소 분포를 예측할 수 있다.

2) 용접부의 각각의 조직을 조사한 결과 하이브리드 용접을 했을 때 용접금속에는 acicular 페라이트가 많이 존재하고 martensite-austenite상은 용접부 하부 HAZ쪽에 존재 하는 것을 알 수 있었다.

3) 용접 와이어의 Mn 및 Ti 함량이 증가할수록 용접 금속 조직 내부의 침상 페라이트의 량이 감소하였고 결정 입계 페라이트와 2차상들이 증가하였다.

4) 용접금속의 상부에서 부터 하부로 갈수록 경도값이 상승 하였고 Mn함량이 가장 적은 A 용접 와이어를 사용한 용접금속의 경도값이 가장 낮게 나왔다.

5) 상온, 저온 모두에서 Mn, Ti 함량이 높아질수록 결정 입계 페라이트와 2차상의 분율이 높아지고, 취성파괴 보다 연성파괴가 파괴양상을 지배하여 높은 충격에너지를 나타내었다.

6) 라인파이프 분야에 고강도강의 필요성이 많이 높아지고 있으며 이를 위해 개발된 세립강에 맞는 새로운 용접공정을 위해 용접금속은 Mn, Ti가 복합 첨가된 용접 와이어 가지고 하이브리드 용접법을 사용하여 용접부의 기계적 특성향상에 좋은 결과를 얻었다.

## 참 고 문 헌

1. Ming Gao, Xiaoyan Zeng, Jun Yan, Qianwu Hu, July 2008, "Microstructure characteristics of laser - MIG hybrid welded mild steel", Applied Surface Science, Vol. 254 Issue 18, 15, PP. 5715 - 5721
2. G. Krauss and Steven W. Thompson, 1995, "Ferritic Microstructures in continuously Cooled Low- and Ultralow-carbon steels" ISIJ International, Vol. 35, No. 8, pp. 937-945.
3. C. H. Lee, H. K. D. H. Bhadeshia and H.-C. Lee, November 2003, "Effect of plastic deformation on the formation of acicular ferrite", Materials Science and Engineering A, Vol. 360, Issues 1-2, 15 2003, pp. 249-257.
4. M. Diaz-Freuntes, A. Iza-Mendia and I. Gutierrez, 2003, "Analysis of different acicular ferrite microstructures in low-carbon steels by

electron backscattered diffraction. Study of their toughness behavior". Metall. metal. Trans. Vol. 34, pp. 2505-2516.

5. L. O. Vilarinho and A. Scott, 2004, "Proposal for a modified fowler-milen method to determine the temperature profile in TIG welding at low currents". J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. [online], vol.26, No.1, pp. 34-39.
6. G. M. Evans, 1983, "Effect of carbon on the microstructure and properties of C-Mn all-wled-metal deposits". Welding  $\mathcal{F}$ 62(11) pp. 313~320, Schweissmitteilungen 1982 40(99) 17-31.
7. N. Bailey, 1991, "Bimodality revisited - split behaviour of weld metal". TWI ResBull Vol. 32, pp.110.
8. W. P. Rees, B. E. Hopkins and H. R. Tipler, 1951, "Tensile and impact properties of iron and some iron alloys of high purity". JISI 169 157-68.
9. A. G. Brain and A. A. Smith, 1962, "Mechanical properties of CO2 weld metal". Bri  $\mathcal{F}$  9, pp. 669-77.
10. G. M. Evans and N. Bailey, 1997, "Metallurgy of Basic Weld Metal", Abington Publishing, pp. 31~36.
11. B. W. Lee, J. D. Lee, H. S. Park 2007, "The Effects of heat Input on Grooving Corrosion Behavior in the Welds of Electric Resistance Welding Steel Pipe." J. of the Korea Society for power system engineering , Vol 11, No3, pp. 41~46.
12. C. G. Kim, H. W. Kwak and M. N. Kim 2008, "A Study on the Mechanical Properties of Underwater Wet Arc Welds Using the SM41" J. of the Korea Society for power system engineering , Vol. 12, No. 2, pp. 48~44.