

# H 빔 구조물의 T-Joint에서 용접조건에 따른 용접잔류응력의 영향

\*석 한 길

\*삼척대학교 재료금속공학과

## Effects of Residual Stress with Welding Condition in the Steel Structure of H-beam

Han-Gil Suk\*

\*Dept. of materials and metallurgical engineering Samcheok National University, Samcheok 245-711, Korea

### Abstract

In the welding for the steel structure of H-beam with mild steel and 490N/mm<sup>2</sup> high tensile steel, we applied the fillet weld mostly and 6-8mm weld length(AISC-spec.). And a new developed metal-cored-wire is used in automatic welding as well as semi-automatic welding. In this study we have attempted to raise the welding productivity and to stabilize the quality on horizontal positions of fillet welding with the following items:

- We improved the weld productivity using metal based cored wire with a high deposition rate in the steel structure of H-beam.
- We tested the weldability and evaluated the quality of the weldmetal by horizontal fillet CO<sub>2</sub> welding. The process is carried out in combination with a special purpose metal-based FCW with excellent resistance to porosity and high welding speed.
- We studied the micro structure of the weldmetal by the various welding conditions.
- We studied the effect of welding residual stress by the welding conditions in T-joint.

Therefore, it can be assured that more productive and superior quality of the weldmetal can be taken from this study results.

\* Corresponding author : hangil@samcheok.ac.kr

(Received July 7, 2003)

Key Words : Welding metallurgy, High deposition, FCAW, Welding residual stress, H-beam, Plane deformation element

## 1. 서 론

H빔의 강 구조물 제작에 주로 이용되는 필렛용접은 산업체에서 가장 많이 사용되기 때문에 국내외적으로 용접생산성과 경제성을 향상시키기 위해 꾸준히 연구노력하고 있다. 특히, 선진국에서도 고임금, 수동용접의 저효율성과 환경문제 때문에 용접자동화와 고에너지용접과 같은 고효율 용접법을 개발하고 있으나 종합적이고 체계적인 기초연구가 부족하여 야금분야 및 시공 분야에서는 아직도 기술적으로 해결해야할 난제들이 많다. 즉, 재료별, 용접 기법별, 두께별로 용접성 확보측면과, 고장력강에서는 합금성분이 많기 때문에 고온결

합과 수소지연결함을 비롯하여 기공과 Pit, 과대 각장 등에 민감한 용접결함에 대한 기초연구 등이 수행중이다<sup>1,2)</sup>. 국내에서도 조선, 교량, 건설, 운기, 수송기계 산업 등 다양한 산업체에서 용도별로 후판의 필렛용접에 대한 여러 가지 시공법이 시행되고 있으며, 나아가서 철구조물의 조립 및 제작 시에는 자동화가 가장 용이한 필렛용접부위에서의 생산성 향상을 목적으로 간이 자동 Carriage 및 고속 필렛자동용접 장치가 계속 추진되고 있는 상황이다<sup>3,4)</sup>. 그러나 필렛용접부에서 각장 초과와 더불어 다량의 기공 및 결함을 초래함에 따라 용접 품질에 대한 신뢰성이 저하되고 Grinding과 보수 용접 등으로 Man-hour 손실이 크므로, 생산성향상과 동시에 품질을 안정시키기 위해서는, 적절한 공정에 관

한 기초연구와 신공법에 대한 대책이 시급한 실정이다. 다른 한편 최근 건축용 철골 수요의 비약적 증가와 건축 구조물 등의 대형화와 함께 이것에 대응하기 위한 용접기술도 자동화, 고능률화를 통한 생산효율의 향상이 추구하고 있다. 강 구조물이 대형화됨에 따라 강판도 점차 후판이 채용되고 있으며, 필렛용접 이음부의 경우 그 형상 및 치수는 대상 강재가 후판 일수록 커지므로 용접공정시 대입열에 노출을 피할 수 없고, 이로 인하여 용접금속의 응고조직 및 용접 열영향부의 미세조직, 상의 변화, 크랙 등 결함의 발생빈도 등 그 양상이 대단히 복잡 다양해지게 된다. 지금까지는 대입열을 이용한 용접방법에 대하여 용접조건, Arc 발생현상, 용융금속의 거동 등 용접기술에 관한 연구는 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 용접공정시 대입열에 노출된 용접부의 용접성, 편석 현상, 상변태 등 용접야금에 관한 연구가 필요한 실정이다.

최근 생산성 향상을 위해 기존의 용접와이어 1.2φ를 용접와이어 1.6φ로 변경하여 사용하고 있는 사례가 늘어나고 있다. 이와 관련하여 용접와이어 직경의 변경과 함께 용접조건이 변화하게 되어 제작업체의 자체 물성 실험을 통해 용접부 건전성을 확인하고 있으나 용접 잔류응력에 대해 검증한 연구결과<sup>5)</sup>는 알려져 있지 않다. H 빔 강구조물 제작시 용접부 근방에서는 용접열원에 의해 급속가열·급속냉각의 열사이클을 받으며, 열원의 이동과 함께 온도장이 변화하므로써 용접부에 불균일한 온도분포가 생성된다. 이러한 불균일한 온도분포에 의한 용접변형과 잔류응력이 발생된다. 특히, 잔류응력은 구조물의 좌굴강도, 피로강도 등에 악 영향을 미치는 요인이 되고 있다<sup>6,7)</sup>. 따라서 본 연구에서는 용접와이어와 용접조건에 따른 용접부 잔류응력을 유한요소법을 이용한 2차원 열탄소성 해석을 수행하여 T-joint의 잔류응력의 분포특성을 밝히고, Fillet용접 이음부를 대상으로 용접금속의 응고조직 및 다양한 냉각과정을 거치는 열영향부(HAZ)의 미세조직을 관찰하여 용접와이어 변경에 따른 구조물의 용접부 건전성에 관하여 조사 검토하였다.

## 2 해석모델링

### 2.1 모델링

Fig. 1 은 T-joint 의 전체 해석모델을 보여주고 있으며 크기는 플랜지의 두께가 15mm이고 웹플레이트의 두께가 10mm이며, 용접각장은 모두 7mm로 하였다. Fig. 2는 용접부의 모델형상을 확대하여 보여주고 있으

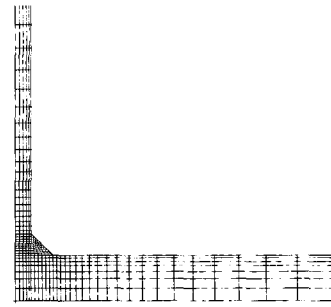


Fig. 1 Analysis model and mesh division

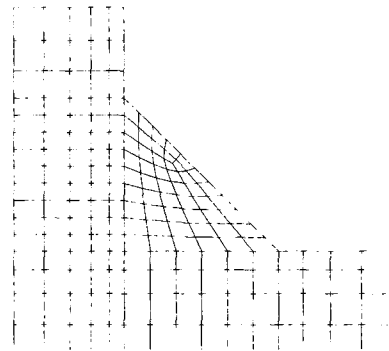


Fig. 2 Mesh division at welding part

며 용접부 근방에서는 온도가 급속냉각 및 급속가열되어 용접열원에 의한 열응력이 크게 발생하므로 요소크기를 조밀하게 하였다.

해석모델은 용접부의 역학적 조건으로부터 3차원 실 구조물을 2차원화하여 2차원 4절점요소를 사용하였으며, 축대칭성을 고려하여 1/2모델을 대상으로 해석을 수행하였다. 또한, 용접열원에 의한 열전달해석과 열응력해석을 언커플링해석(Un-coupled thermo-mechanical analysis), 즉 열전달해석에 의해 온도분포를 구하고, 이를 절점하중으로 하여 열응력해석을 수행하여 잔류응력을 예측하였다. Fig. 3은 열전도해석시 재료 상수의 온도의존성을 보여주고 있으며, Fig. 4는 열응력해석시 기계적성질의 온도의존을 보여주고 있다. Fig. 5는 열

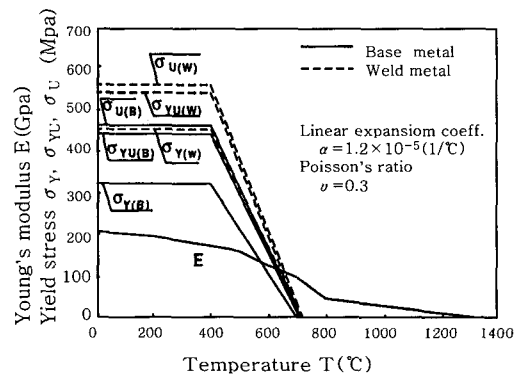


Fig. 3 Physical Constants

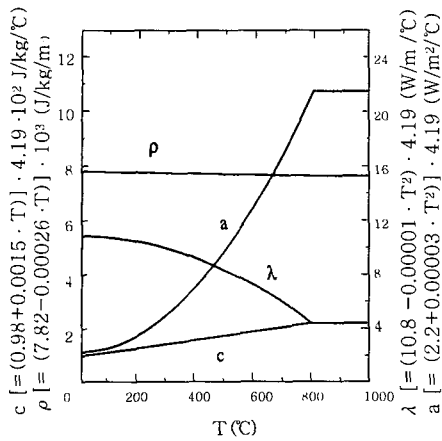


Fig. 4 Mechanical properties

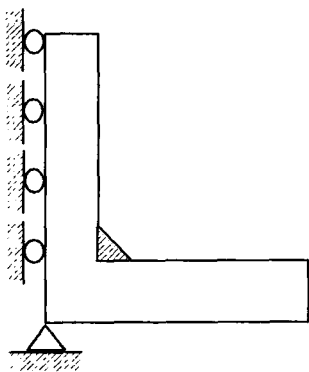


Fig. 5 Boundary Condition for thermal Elastic-Plastic analysis

응력해석시 경계조건을 보여주고 있으며, 이는 시험편의 형상으로부터 자유롭게 수축, 팽창할 수 있도록 강제변형만을 구속하였다.

2.2 용접조건

본 연구에서 사용한 재료는 H빔의 강 구조물 제작에 주로 이용되는 SS400구조용강을 사용하였으며 시험편의

용접은 현장에서 많이 사용하고 있는 CO<sub>2</sub> 용접법을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 CO<sub>2</sub>아크 용접용 와이어 재료는 메탈계 플럭스 코어드 와이어이였으며 AWS A5.20의 각각의 시험방법에 따라서 실시한 ALL WELD METAL의 화학성분 및 기계적성질을 Table 1, Table 2에 나타내었다.

용접에 사용 할 시험의 형상 및 치수는 Fig. 6과 같다. 용접조건은 용접와이어 1.2φ가 2패스, 1.6φ는 1패스용접을 실시하였다. 또한 용접와이어 1.2φ는 1패스용접 후 용접부가 200°C가 되었을 때 마무리(2패스)용접을 실시하였다. Table 3은 용접조건을 보여주고 있다.

각 용접조건에 의한 용접입열(Q)는 식(1)에 따라 계산하였다.

$$Q = \eta \frac{V \cdot I}{v} \text{ (Joule)} \tag{1}$$

식(1)에서 구한 입열량을 식(2)를 이용하여 용접금

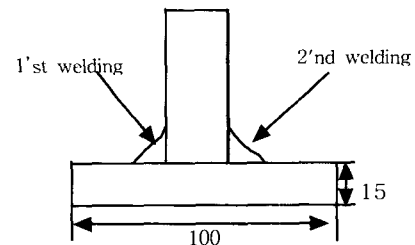
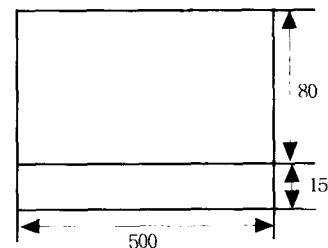


Fig. 6 Shape and dimension of specimen (unit : mm)

Table 1 Chemical composition of weld metal

Chemical composition(wt%)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
0.04	0.50	1.35	0.014	0.010	0.045	0.045	0.020	0.010	0.010

Table 2 Mechanical properties of weld metal

Wire size (mm)	Tension test			V-notch charpy impact test (J)	
	Y.P. (N/mm <sup>2</sup> )	UTS (N/mm <sup>2</sup> )	E.L (%)	Test Temp.(°C)	
				0	-18
1.2φ	530	580	27	97	60
1.6φ	522	575	28	93	53

Table 3 Welding condition

Wire size (mm)	Pass	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed(mm/s)
1.2φ	1	260	31	6.6
	2			
1.6φ	1	340	34	6.6

속의 모델에 단위체적, 단위시간당의 입열량으로 환산하여 적용한다.

$$q = \frac{Q \cdot l}{4.19 \cdot A \cdot l \cdot t} (\text{cal} / \text{mm}^3 \cdot \text{s}) \quad (2)$$

여기서 v: 용접속도(mm/s), V: 전압(V), I:전류(A), Q:입열량(Joule), A: 단면적(mm<sup>2</sup>), l:용접길이(mm), η:용접효율 이다.

### 2.3 조직관찰

용접시편의 미세 조직을 관찰하기 위해 각 조건의 시편을 용접방향에 수직으로 절단하고 mounting한 후 SiC paper로 연마하고 1 μm, 0.3 μm 입자의 알루미늄 분말로 미세 연마하였다. 에칭은 2% nital 용액에 하였으며 조직관찰은 광학 현미경을 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 용접조건에 따른 온도분포 및 잔류응력

#### 3.1.1 온도분포해석 결과

본 계산은 4절점 아이소파라메트릭 2차원요소를 사용하여 열전도해석을 수행하였다. 해석시 용접열원은 순간열원으로 가정하여 1초간 용접부에 열원이 투입되는 것으로 하였다. Fig. 7은 용접와이어 1.2φ 2pass 용접시의 시간에 따른 온도분포이고, Fig. 8은 용접와이어 1.6φ 1pass 온도분포이력을 보여주고 있다. 그림에 나타난 온도이력 위치는 플랜지 상부에서 x방향으로 x=11.4mm(el=336), 12.55mm(el=318), 13.73mm(el=300), 18.23mm(el=18.23)의 위치에서 시간에 따른 결과이다. 결과에 의하면 용접와이어 1.2φ의 온도 결과는 2pass 용접을 수행하여 부재온도가 200℃가 되었을 때 2Pass용접실시하여 2차 온도상승이 발생하는 것을 잘 나타나고 있다.

#### 3.1.2 용접잔류응력 해석결과

2차원 열전도해석에 의해 구한 온도이력을 절점하중

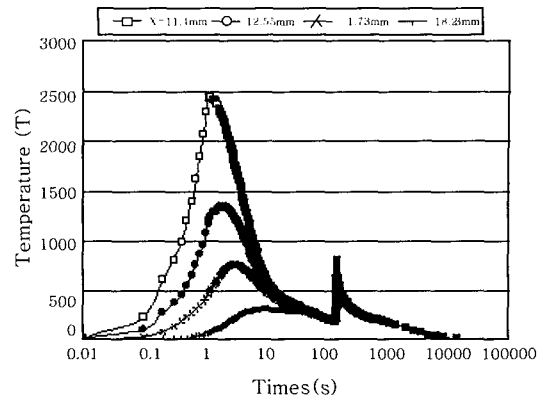


Fig. 7 Thermal cycles at 1.2φ wire

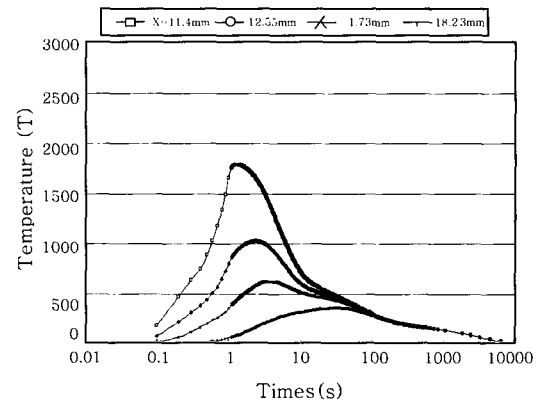


Fig. 8 Thermal cycles at 1.6φ wire

으로 하는 2차원 열응력해석을 수행하여 잔류응력을 계산하였다. 열응력해석에서는 온도분포가 준정상상태를 가지는 용접시험의 중앙에서의 3차원 특성을 구할 수 있는 2차원 평면변형요소를 사용하였다.

Fig. 9는 용접와이어 1.2φ로 용접 할 때 1패스 종료 후 과도응력, Fig. 10은 용접와이어 1.2φ로 용접완료시의 잔류응력을 보여주고 있다. Fig. 11은 용접와이어 1.6φ로 용접완료 후 잔류응력을 보여주고 있다. 또한 결과 값들은 플랜지 위쪽표면의 응력값이며, 좌표는 x는 용접선 직각방향, y는 두께방향 그리고 z는 용접선 방향을 의미한다.

1.2φ용접의 결과에 의하면 x방향의 응력은 1패스 용접후 용접부에서 320MPa인 응력이 2Pass 용접후는 400MPa로 상승하였다. 또한 z방향의 응력은 용접부 근방에서 인장잔류응력이 발생하고 용접부로 멀어지면서 압축잔류응력이 발생하다가 단부에서는 다시 인장응력이 발생하였다. 또한, 플랜지 단부에서 1Pass보다 2Pass에서 20MPa 상승하여 용접부 근방의 인장잔류응력이 증가함을 보여주고 있다.

1.6φ용접의 결과에 의하면 1.2φ의 용접결과와 유사하게 발생하나 x방향(용접선 직각방향)의 응력이 1.2φ

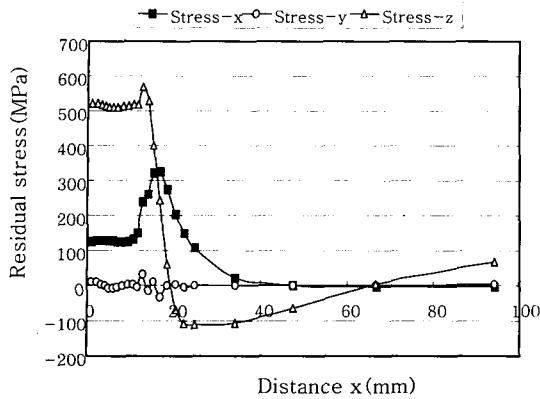


Fig. 9 Transient stress(1.2φ wire, 1Pass)

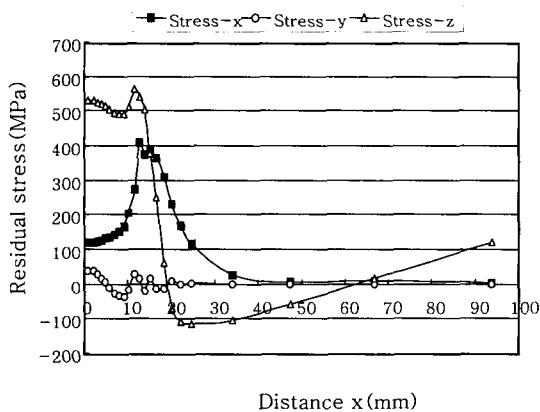


Fig. 10 Residual stress(1.2φ wire, Final Pass)

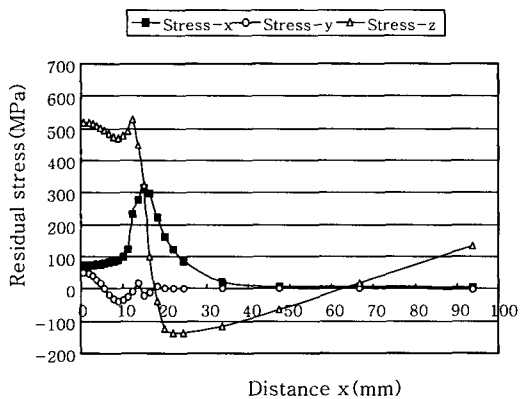


Fig. 11 Residual stress(1.6φ wire)

의 잔류응력이 100MPa정도 크게 발생하였다. 따라서 용접와이어 1.6φ를 적용하는 경우 작업효율성 뿐아니라 용접부의 역학적 조건에서 잔류응력이 작게 발생하여 유리하다고 판단된다.

### 3.2 선경별 H-Fillet 각장 및 각목 비교

Fig. 12는 자동용접의 경우 메탈게 와이어의 선경별 각장, 각목사진이다. 대체적으로 각장이 동일한 이등변 삼각형의 단면형상을 이루고 있음을 알 수 있다. 이러

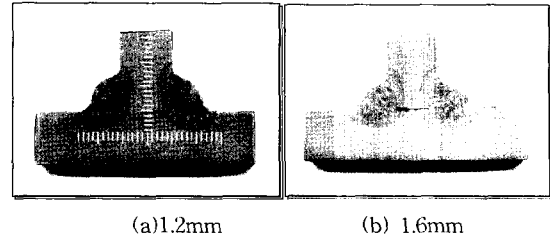


Fig. 12 Comparison of H-fillet weld leg and H-fillet weld throat

한 메탈게 와이어는 FLUX 내부에 METAL 성분이 주종을 이루고 있으므로 용착 효율이 높고 용착속도가 빠르며, FILLET용접시 비드 치짐현상의 발생이 거의 없으므로 대각장용 고용착 재료로서 적합함을 알 수 있다.

### 3.3 용접부 및 HAZ의 미세 조직 관찰

용접은 급속냉각을 수반하는 국부적 응고과정이기 때문에 일반적으로 주상정형태의 불균질한 조직이 발달하게 되며, 미세조직 또한 grain boundary ferrite, side plate ferrite, acicular ferrite 등, 일반적인 주조공정에서 보기 힘든 조직들이 많이 나타난다. 본 연구에서는 Zinc-Primer가 도포된 강판(SS400구조용강)을 MAG법을 사용하여 용접을 행하였다. 용접와이어는 1.2, 1.6φ를 사용하였으며 Fig. 13은 1.2φ의 wire로 자동으로 용접한 용접부의 미세조직 사진이다. Fig. 13(a)는 용착금속의 조직사진이다. 용접한 시편의 용융부는 응고시에 고액 계면에서 시작된 용착금속의 응고가 용접중심선(weld center line)으로 진행하여 일방향으로 길게 성장된 결정을 보이고 있으며 결정립계를 덮고 있는 polygonal 페라이트의 망상조직이 대부분을 차지하고 있으며 일부 Widmanstätten side plate조직도 존재함을 알 수 있다. Fig. 13 (b)는 용융부와 결정립 성장구역의 경계이며 Fig. 13(c)는 결정립 성장 구역으로 조직의 대부분이 Widmanstätten side plate조직이고 일부 polygonal 페라이트가 존재함을 알 수 있다. Fig. 13 (d)는 결정립 미세화 구역으로 polygonal 페라이트가 미세하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 이 구역에서 최고점 온도의 감소(약 1100℃)는 가열동안의 α→γ변태에서 오스테나이트가 적당히 발달할 시간이 없어 결정립 크기가 매우 작은 상태로 존재한 것으로 사료된다. Fig. 13(e)는 모재의 조직으로 거의 대부분이 polygonal 페라이트이고 일부 pearlite조직이 존재함을 알 수 있다. Fig. 14은 1.6φ의 wire로 자동으로 용접한 용접부의 미세조직 사진이다. 전체적으로 1.2φ와 비슷한 미세조직을 보여주고 있다.

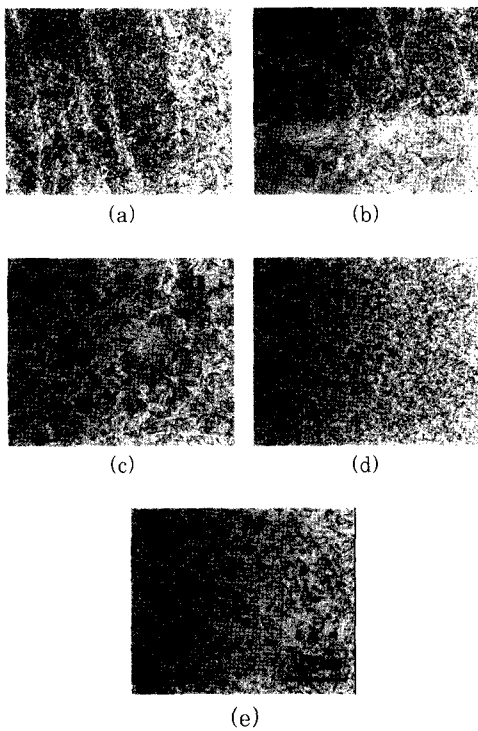


Fig. 13 Optical micrographs in the weld metal and HAZ welded with the metal cored arc welding wire of 1.2φ (by automation) (a) fusion zone (b) interface between fusion zone and grain growth (c) grain growth region (d) grain refine region (e) base metal

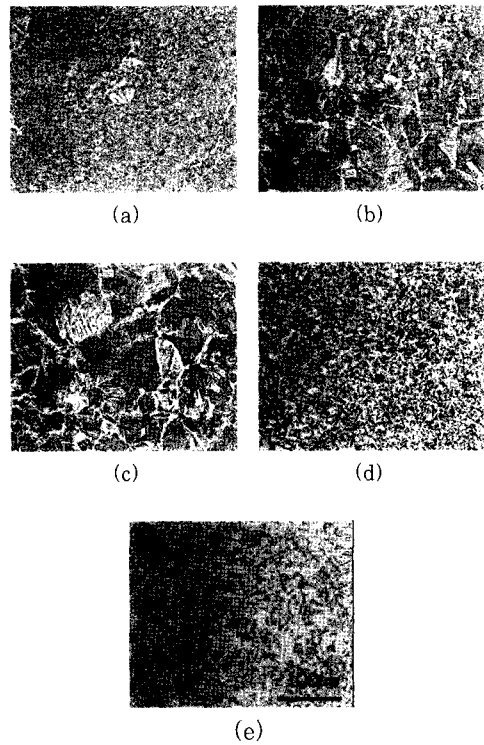


Fig. 14 Optical micrographs in the weld metal and HAZ welded with the metal cored arc welding wire of 1.6φ (by automation) (a) fusion zone (b) interface between fusion zone and grain growth (c) grain growth region (d) grain refine region (e) base metal

#### 4. 결 론

T-joint용접부에서, 용접와이어 직경과 용접조건에 따른 용접잔류응력의 분포로부터 용접부 건전성을 검증하기 위해 유한요소법을 이용한 2차원 평면변형 열응력해석과 미세조직 관찰을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다:

1) 비정상 열전도해석의 온도이력으로부터 용접와이어 1.2φ의 2패스 용접에 의해 용접부 근방의 온도가 700℃정도 재상승 하였고, 용접부 근방의 동일 위치의 온도이력을 보면 용접와이어 1.2φ가 1.6φ보다 약 700℃ 정도 크게 분포하고 있어 입열량이 상대적으로 큼을 알 수 있었다.

2) 열응력해석에 의하면 용접와이어에 관계없이 거의 동일한 잔류응력 분포를 하고 있으나 용접와이어 1.2φ가 용접부에서 x방향의 잔류응력이 100MPa 정도 더 크게 발생하였다.

3) 따라서 용착 효율성과 잔류응력 분포로부터 용접부의 역학적 조건이 생산성 향상을 위해 사용된 대구경 고용착 용접와이어 1.6φ를 사용하였을 때, 더 좋은 이음부를 얻은 것으로 확인되었다.

4) H 빔 제작 시, 기존 사용했던 FCW 1.2mm와 피복 용접봉 대신 대구경 고용착 재료인 메탈게 와이어를 적용시켜 탄산가스 용접법으로 수행한 용접부의 미세조직을 관찰 한 결과 용융부, 열영향부 모두 와이어의 크기에 크게 영향을 받지 않고 비슷한 미세조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. 입열량이 상대적으로 큰 1.6φ의 경우 ferrite의 조직이 약간 조대한 경향은 있으나 전체적으로는 각기 서로 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

5) 결론적으로 대구경 고용착 재료를 사용하여 기존 사용하였던 1.2mm 플럭스 코어드 와이어에 비해 용접 생산성을 향상 시켰고, 조직사진의 고찰 및 열응력 해석을 통해 기존 방법보다 품질면에서 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 산학협력 연구비(101-2001-000-00020-0)지원에 의하여 수행된 내용의 일부이며, 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. R. Killing, H.G. Suk : Auswahl von Schweissverfahren zum kehlnahtschweissen, der Praktiker(DVS), 1998.9., 328-336 (in German)
2. Tetsuo Suga and Fusaki Koshiishi : Trends in Welding Materials and Processes, especially concerning Flux-cored Wire in japanese Shipbuilding IIW Shipbuilding Seminar 1996, 1-24
3. J.G.Youn and D.H.Park : Welding Technologies in the Steel Structure for Building, Journal of KWS, 13-3 (1994), 18-25 (in Korean)
4. J.B.Lee, Y.H.Ahn, S.K.ahn and J.K.Han : Trend and Weldability of Steels for Construction, Journal of KWS, 13-3 (1994), 1-17 (in Korean)
5. 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男 : 溶接工學, 理工學社, 1991, 29-42 (in Japanese)
6. Masubuchi K. : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980, 235-327.
7. 佐藤邦彦 : 溶接構造要覽, 黒木出版社, 1988, 157-169 (in Japanese)