

# 하이브리드 용접과 레이저 용접에 의한 세립강 용접부의 미세조직변화에 관한 연구

## Microstructure Evolution of UFG Steel Weld by Hybrid and Laser Welding

동현우 · 이목영 · 안용식  
H. W. Dong, M. Y. Lee and Y. S. Ahn

(접수일 : 2010년 2월 8일, 수정일 : 2010년 4월 7일, 채택확정 : 2010년 4월 21일)

**Key Words** : Hybrid Welding(하이브리드 용접), Fiber-laser Welding(화이버 레이저 용접), Ultra Fine Grained Steel(세립강), Microstructure(미세조직)

**Abstract** : A laser beam welding and an electric arc welding were combined, and the positive points of each welding method are drawn such as high speed, low thermal load, deep penetration, and high productivity. The fiber laser-MIG conjugated welding, namely the hybrid welding has been studied mainly for the automation industry of a pipeline welding. In this study, the MIG welding was combined with a fiber laser welding to make up the hybrid welding. The weld shapes, microstructures and mechanical properties for weld zones after the hybrid welding or only fiber laser welding were investigated on the 700 MPa grade Ultra Fine Grained(UFG) high strength steel. The amount of acicular ferrite in weld metals and HAZ(heat affected zone) was observed larger after hybrid welding compared with after only laser welding. The Vickers hardness of the top area of the fusion zone after fiber laser welding was higher compared with after hybrid welding.

### 1. 서 론

강재의 사용환경에 따라서 요구되는 다양한 특성들을 만족시키기 위해서 강재 제조공정에 있어서 많은 새로운 기술들이 개발되고 있으며 이러한 최신 기술의 적용에 따라 강재의 품질은 강도, 인성 또는 내부식성 측면에서 많은 발전이 진행되고 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 강재의 조직 미세화방법이 적용되고 있다.

하지만 고강도 강재는 일반적으로 용접성이 열등하다는 단점이 있다. 차세대 구조용으로 개발 중인

세립형 강재 역시 구조물 제작 시 적용되는 용접에 의한 미세조직변화로 용접부의 특히 열영향부의 물성이 저하되리라 예상된다.

강관이 용접과정을 거치면서 급격한 온도 상승과 냉각으로 용접열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)가 형성되고 HAZ 조직은 구 오스테나이트 결정립이 성장하거나 베이나이트 또는 마르텐사이트와 같은 인성이 낮은 조직이 형성되는 문제점이 있다<sup>1-3)</sup>. HAZ에서 조직변화는 용접과정 시 주어지는 열에 의해 변화된다. 용접 입열량의 변화에 따른 페라이트 형성에 대한 연구도 필요하다. 한편 하이브리드와 레이저의 경우 용접속도가 기존의 어떤 용접공정 보다 빠르면서 입열에너지가 매우 작아서 급속학적으로는 열영향부의 취화 경감을 포함하여 용접부 근처에서 발생하는 조직의 조대화를 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 아직 최적화되어 있지 않은 라인파이프 강재의 용접에서 최근 새로운 기술로 각광받고 있는 하이브리드 용접을 접목시켜 최적의 용접공정을 획득하고 각 공정이 최종물성에 미치는

안용식(교신저자) : 부경대학교 재료공학부  
E-mail : ysahn@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6361  
동현우 : 부경대학교 대학원  
이목영 : 포항산업과학연구원 용접연구센터

영향을 분석하기 위하여, 라인파이프 강재용으로 제조된 700 MPa급 세립강을 가지고 화이버 레이저 용접과 하이브리드 2가지 공정을 사용하여 용접조건을 다르게 하여 용접조건에 따른 용접형상과 용접금속의 조직변화를 비교분석하였으며, 이러한 변화가 용접부 물성에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 시험 방법

본 연구에서 사용한 라인파이프에 사용되는 세립강과 하이브리드 용접에 사용한 용접와이어(SM-70)에 대한 화학 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of the used UFG high strength steel and welding wire

Element	C	Mn	Si	P
UFG (wt%)	0.08	1.88	0.23	0.013
	S	Nb	Ti	Fe
	0.029	0.07	0.02	Bal.
SM-70 (wt%)	C	Mn	Si	P
	0.06	1.10	0.41	0.012
	S	Nb	Ti	Fe
	0.011	-	-	Bal.

레이저-아크 용접을 위해서 10 kW 화이버 레이저(Ytterbium fiber laser, model : YLR 10000) 및 MIG 용접기(DM500)를 이용하였고, 하이브리드 용접을 위해 Fig. 1과 같이 레이저 선행 조건에서 MIG 용접이 뒤따르는 용접 시스템을 구성하였다.

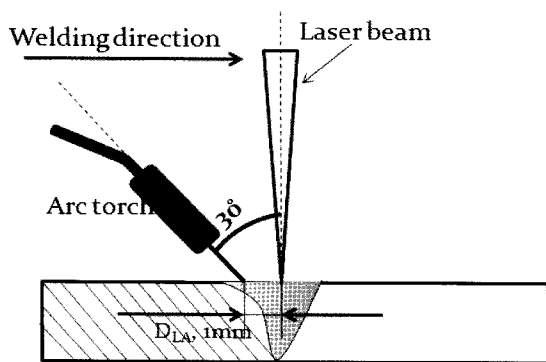


Fig. 1 A schematic view of fiber laser-MIG hybrid welding

하이브리드 용접 시 용접속도는 2 m/min 이었으며, 보호가스로는 Ar가스를 사용하였다. Ar가스의

사용이유는 레이저 용접과 하이브리드 용접 시 용접형상에 큰 영향을 주는 유기 플라즈마의 생성을 감소시키기 위한 것이었다. 하이브리드 용접의 레이저와 아크와의 거리는 1 mm, 레이저와 아크 용접와이어의 각도는 30° 이었다. 변수로는 레이저 단독과 하이브리드 레이저 출력, 초점 위치(focal length), 아크발생 시의 전류, 전압 등을 다르게 선택하여 Table 2의 조건에 따라 실험하였다. 레이저 단독 실험 시 용접속도, Ar 가스 유입속도는 같게 하고 레이저 출력과 초점 위치를 다르게 선택하여 Table 3의 조건에 따라 실험하였다. 두께 방향으로의 초점 위치는 용접하려는 재료의 두께 방향으로 어떤 특정한 위치에 에너지의 집속점을 두는 가상의 점으로서 용융에 필요한 에너지 효율 및 용접부의 형성 특성에도 깊은 관계가 있는 중요 용접변수의 하나이다.

미세조직 관찰을 위해 용접된 시편을 연마하고, 3% 니탈 용액으로 에칭한 후 OM 과 SEM으로 상분율을 측정하였다. 용접 후 생성되는 HAZ 부분의 결정립 조대화 지역과 전체 HAZ 길이를 측정하여 비교하였다. 용접부의 기계적 특성조사를 위해 위에 실시한 시험 중 H-1 과 F-1조건으로 용접한 용접부의 상부와 하부의 경도를 마이크로비커스 경도기를 이용하여 측정하였다.

Table 2 Conditions of hybrid welding for the 700 MPa grade UFG steel

No.	Power(kW)	Current(A)	Voltage(V)
H-1	6	250	27
H-2	8	250	27
H-3	10	250	27
H-4	8	200	20
H-5	8	250	27

Table 3 Conditions of fiber laser welding for the 700 MPa grade UFG steel

No.	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Power(kW)	9.5	9.8	9.9	10	10	10	10
Focal length	0	0	0	0	-5	-3	-1

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 용접 형상

Fig. 2는 화이버 레이저 용접과 하이브리드 용접

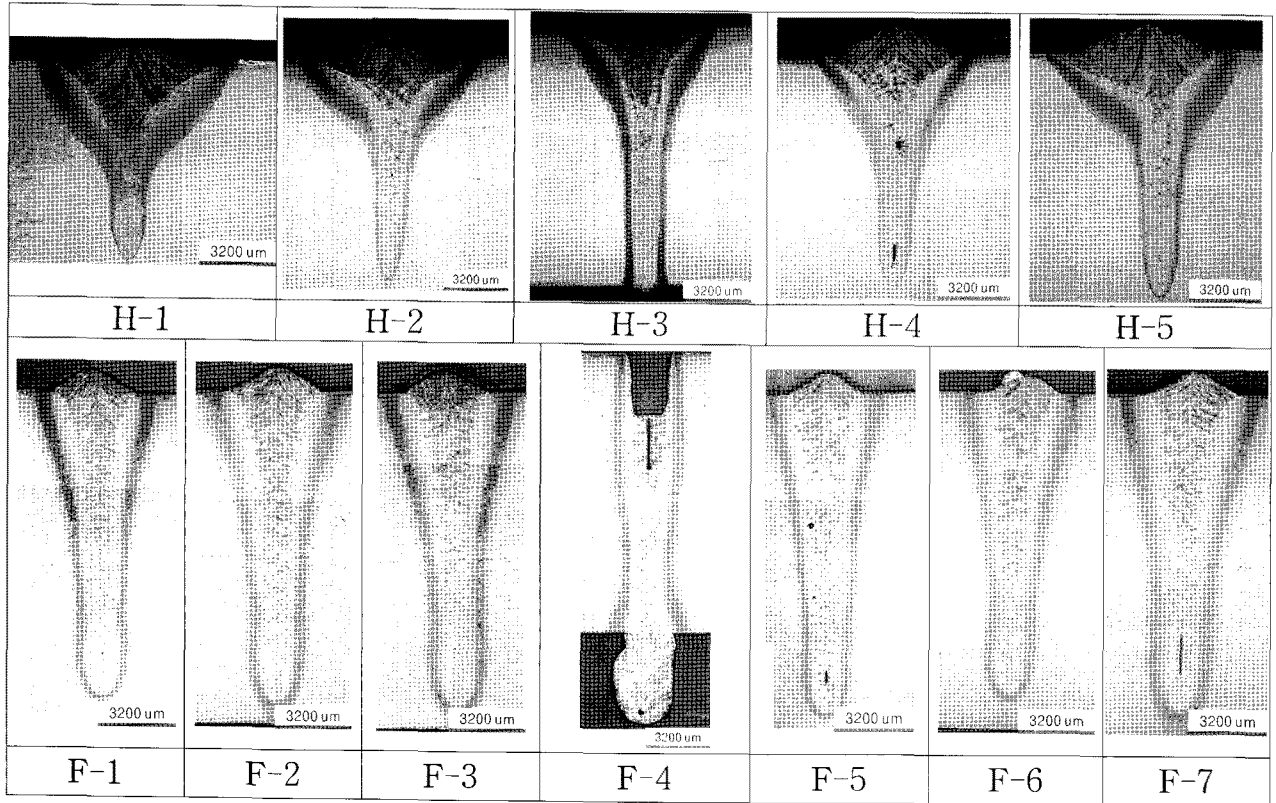


Fig. 2 Microstructure of cross sections of welds after fiber laser(F) and hybrid welding(H)

후의 조직 단면 사진이다, Fig. 2에서 H-1 → H-3 및 F-1 → F-4로 갈수록 화이버 레이저의 출력 및 MIG 전류와 전압값이 높아지는 조건이며 이에 따라 용접 비드 폭이 넓어지면서 reinforcement 옆에 언더컷(undercut)이 발생하였고 용입 깊이도 깊어지는 것을 알 수 있다. H-3 그림에서 나타내는 바와 같이 완전 용입이 되면 넓어지던 용접 비드 폭은 좁아지고 언더컷(undercut)은 사라지고 있다. 하이브리드 용접 시 레이저출력을 일정하게 하고 MIG 용접의 전류와 전압을 상승시켰을 때(H-4 → H-5)는 레이저의 출력 값을 높게 했을 때 보다 용입깊이는 증가하지 않으나 용접비드가 넓어지고 있다. 용입 깊이는 하이브리드 용접과 화이버 레이저 용접 모두 레이저 출력 값에 의해 결정 되었다. 초점위치의 차이에 따라 용접형상이 영향을 받는다는 연구 발표<sup>4)</sup>도 있으나 본 연구에서 화이버 레이저 단독 용접 시 레이저 파워를 일정하게 하고 초점위치(focal length)를 변화시킨 결과 Fig. 2의 (F-4)~(F-7)에서 나타나는 바와 같이 용접 형상의 차이가 뚜렷하지 않았다. 이 결과에 대해서는 앞으로 다양한 레이저출력 및 용접속도 조건 하에서 더 많은 실험을 수행한 후에 고찰하여야 한다고 생각된다.

### 3.2 미세조직

Fig. 3에서는 하이브리드 용접 후 용접부 조직을 나타내고 있다. 용접부는 침상 페라이트 (acicular ferrite, AF), 초석 페라이트 (proeutectoid ferrite, PF(G)), 다각형 페라이트 (polygonal ferrite, PF(I)) 및 aligned side plate ferrite (FS(A))의 여러 가지 조직으로 형성되어 있다.

충분히 느린 냉각 속도에서 형성되는 평형상태의 다각형 페라이트와 비교적 빠른 냉각 속도에서 형성되는 침상 페라이트(AF)는 준평형 상태의 페라이트로써 서로 다른 기계적 특성을 가지고 있다. 침상 페라이트는 오스테나이트 입내에서 핵 생성되어 결정이 불규칙한 방향으로 미세하게 형성되고, 결정립계에 이차상이 존재하여 평형상태의 다각형 페라이트보다 강도가 높고 인성도 우수하다고 알려져 있다<sup>5)</sup>.

두 용접공정 후 HAZ의 미세조직은 용접 중 결정립성장온도 이상으로 가열된 결정립 조대화 영역과, 성장온도 이하로 가열된 결정립 미세화 영역으로 크게 구분될 수 있으며 Fig. 4에 나타나고 있다. 이 두 영역사이에는 혼립역도 존재한다. 결정립 조대화 영역은 용접금속 바로 옆에 생성이 되며 결정립 미세화 영역은 결정립 조대화 영역 옆에 연속적

으로 생성된 구간이다.

화이버 레이저용접과 하이브리드 용접 두 공정 모두 용접속도는 빠르지만 하이브리드 용접의 경우 입열량이 화이버 레이저 용접보다 크기 때문에 하이브리드 용접의 경우는 HAZ의 폭은 레이저 단독보다는 크게 나타났다.

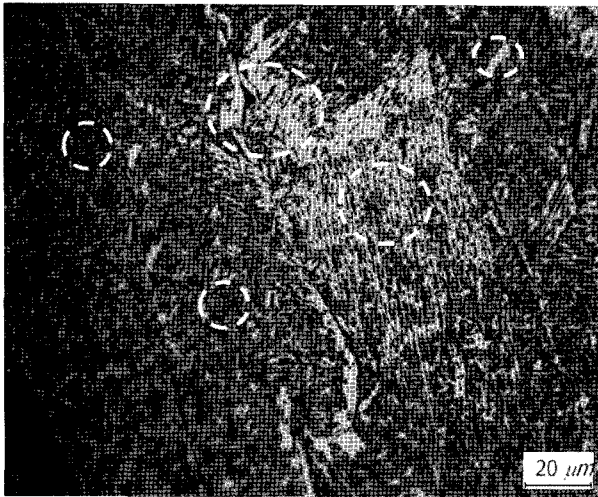


Fig. 3 Microstructure of fusion zone of hybrid welded UFG showing acicular ferrite(AF), proeutectoid ferrite(PF(G)), polygonal ferrite (PF(I)) and aligned side plate ferrite(FS(A))

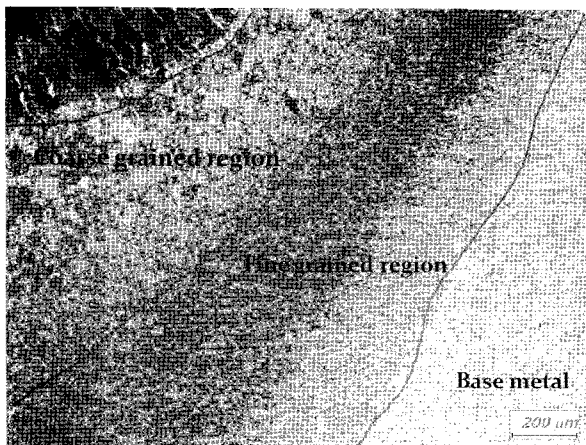


Fig. 4 Microstructure of weld zone after hybrid welding with the condition of H-1

Table 4에서는 각 용접 조건 후 용접금속의 조직분율을 측정된 결과를 나타내고 있다. 하이브리드 용접의 경우 AF가 조직 중 대부분을(80%) 점유하고 있으며 FS 조직은 극히 적은 분율만 관찰되었다. 화이버 레이저 용접 단독의 경우 AF조직은 60%로 하이브리드 용접 후 보다 훨씬 적은 분율을 점유하고 있다. AF 조직이 많이 발생하면 일반적으

로 강도 및 인성이 우수하다고 알려져 있으므로 조직 관찰 결과로 볼 때 하이브리드 용접이 화이버 레이저용접 단독의 경우보다 더 좋은 용접부 조직을 형성한다는 것을 알 수 있다.

Table 4 Results of the quantitative metallography on the weld metals after hybrid and only fiber laser welding

Welding	AF	FS(A)	PF(G)/ PF(I)
Hybrid	80.0%	3.7%	16.2%
Fiber laser	59.8%	12.8%	27.3%

입열량이 증가함에 따라 HAZ의 폭도 넓어지고 HAZ 내부의 결정립 조대화 지역의 넓이도 증가하였다. HAZ의 결정립 조대화 지역은 그림 5와 6에서 나타내는 바와 같이 아크용접의 영향을 크게 받아 용접부의 영역이 확대된 상부와 상대적으로 아크용접의 영향을 덜 받아 용접부가 좁게 형성된 하부로 구분될 수 있다. 결정립을 측정하여 평균값을 비교한 결과 상부의 결정립이 하부 보다 크게 나타났다. HAZ에서 결정립이 성장하는 속도는 용접 입열량과 모재의 열적, 기계적 이력과 관계가 있으며, HAZ의 성질은 용융역과 모재의 성질과는 크게 다르다. 텀퍼링한 재료와 냉간가공재에서 HAZ는 가열되는 온도에 따라서 결정립이 조대한 영역과, 결정립의 성장온도 이하로 가열된 결정립 미세화 영역으로 구분할 수 있는데, 표 5에서는 두공정의 결정립 미세화 지역의 평균결정립과 모재의 결정립 크기를 비교하였다. 그 결과 모재의 결정립(4.07  $\mu\text{m}$ )이 가장 크고 화이버 레이저 용접(2.37  $\mu\text{m}$ ) → 하이브리드 용접(1.75  $\mu\text{m}$ )의 순으로 결정립이 크기가 작았다.

Table 5 The comparison of the average grain size of base metal the fine grained region

	Base metal	Fine grained zone	
		Hybrid	Fiber laser
Grain size	4.07 $\mu\text{m}$	1.75 $\mu\text{m}$	2.31 $\mu\text{m}$

### 3.3 용접부 경도

탄소함량이 적은 강재에서 열영향부의 평균 경도는 모재의 2배 정도로 알려져 있다<sup>6-10</sup>. HAZ 조직은 일반적으로 마르텐사이트, 베이니틱(bainitic) 페라이트 및 폴리고날(polygonal)페라이트로 구성되어 있다. 용접조건 중 H-1과 F-1조건으로 용접한 용접

부의 상부와 하부영역에서 각각 비커스 경도를 측정하였다. Fig. 5와 6에서 보면 모재의 비커스 경도는 약 220~240 Hv 이었다. HAZ부분과 용접금속의 경도는 모재보다 정도값이 2배 정도 높게 나왔으며 이는 이 영역에서 복잡한 침상형 페라이트와 베이니트 페라이트의 형성에 기인한 것으로 판단된다.

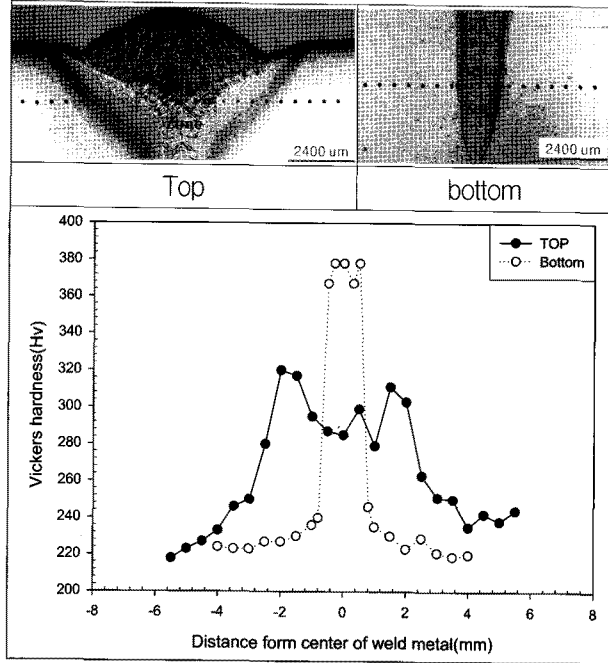


Fig. 5 Hardness and macrostructures of weld metal after Hybrid welding

한편 용접금속의 경도는 침상 페라이트의 분율이 높았던 하이브리드 용접의 정도 값이 하이버 레이저 용접과 비교 했을 때 상부는 낮았지만 하부는 상대적으로 높게 나타났다[Fig. 5, 6]. 이것은 하이브리드 용접 시 상부는 아크용접에 영향을 받고 하부는 레이저 용접의 영향을 받기 때문인데, 즉 상부의 용접금속은 아크용접 시 용접와이어의 용융에 의해 와이어의 합금성분이 확산되어 들어감으로서 화학조성이 달라지고 미세조직의 차이가 발생하였기 때문이라고 판단된다. 반면에 하이버 레이저 용접만을 실시하였을 경우에는 용접와이어를 사용하지 않았기 때문에 그림 6에서 나타내는 바와 같이 용융부의 상부와 하부사이의 정도차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다.

하이브리드 용접의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 용접부에서 기계적 특성에 유리한 침상 페라이트가 많이 형성되고 저입열 용접에 의한 장점들이 많이 있는데 반하여 용접금속부의 하부에서 발생하

는 급격한 정도 상승은 인성저하를 가져와 결합의 원인이 될 수 있으므로 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

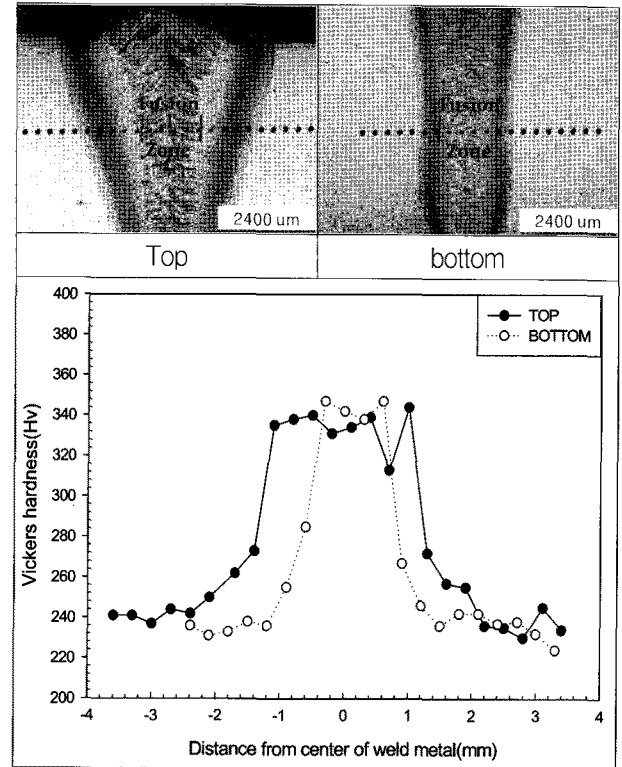


Fig. 6 Hardness and macrostructures of weld metal after fiber laser welding

#### 4. 결 론

700 MPa급 고강도세립강을 가지고 fiber laser-MIG hybrid 용접을 실시하여 용접부 조직 및 경도를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) MIG와 하이버 레이저 용접을 결합한 하이브리드 용접 시 용입깊이는 레이저 출력에 크게 영향을 받으며, MIG의 전류, 전압이 높아져도 큰 변화가 없었다. 한편 레이저 초점위치의 변화에 따른 용접형상은 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다.

2) 강도 및 인성이 우수하다고 알려진 침상 페라이트의 분율은 하이브리드 용접의 경우가 하이버 레이저 단독용접 시보다 용접금속에서 더 많이 나타났다.

3) 하이브리드 용접의 에너지 비율 및 입열량이 하이버 레이저 용접보다 높고 냉각속도 또한 감소함으로서 HAZ 폭과 HAZ의 결정립 조대화 지역이 넓었다. 또한 결정립 조대화지역의 결정립크기 역시

하이브리드 용접을 실시하였을 때가 더 크게 나타났다.

4) 하이브리드 용접 시 용접금속의 상부는 아크용접의 영향을 많이 받기 때문에 아크 용접와이어의 용융 및 냉각속도의 차이로 인하여 용접금속에 생성되는 미세조직이 다르게 나타났으며 따라서 하부의 경도가 상부 보다 40 Hv정도 더 높았다. 반면 화이버 레이저 단독용접의 경우에는 상하부의 경도 차이가 없었다.

5) 본 연구에서 용접 후 발생하는 용접형상 및 용접금속에 생성되는 미세조직의 변화 및 용접부 경도를 비교해 볼 때, 화이버 레이저 용접공정이 가지고 있는 자동화 용접의 한계를 레이저 와 MIG 두 가지 공정을 융합시킨 하이브리드공정에 의하여 충분히 보완할 수 있다는 것을 보여주었으며, 하이브리드 용접은 향후 다양한 자동화 용접분야에 발전 및 적용이 가능하다고 판단된다.

"Dissolution of Carbide Particles at the Heat Affected Zone of laser Welded Low Carbon Steel", J. of the Korean Welding Society, Vol. 20, No. 6, pp. 85~91.

9. B. W. Lee, J. D. Lee and 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, No. 3, pp. 41~46.
10. 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.

### 참고 문헌

1. K. T. Corbett, R. R. Bowen and C. W. Petersen, 2004, "High-strength steel pipeline economics", Intern. J. of Offshore and Polar Engineering, Vol. 14, pp. 75~80.
2. J. Y Koo et. al., 2003, "Metallurgical Design of Ultra Strength Steels for Gas Pipelines", Proc. of The Intern. Offshore and Polar engineering Conf., pp. 2260~2268.
3. R. Denys, 2000, "Pipeline Technology", Elsevier, Amsterdam, Vol. I, pp. 1~5.
4. 대한용접.접합학회, 2009, "용접.접합 편람 III. 공정 및 열가공", pp. 141~144.
5. M. Enomoto, 1998, "Kinetics of austenite to ferrite transformation in 3 mass% Mn low carbon steels", Materials Transactions, Jim, Vol. 39, No. 1, pp. 189~195.
6. I. Masumoto and M. Kutsuna, 1986, "Some special structures of HAZ by laser beam welding", Proc. int. Conf., JOM-3, pp. 256~261.
7. M. Kutsuna and A. Kikuchi, "Thermal cycles and microstructures in laser welding of carbon steel", IIW Doc. IV, pp. 593~597.
8. K. C. Kim, H. K. Cho and H. S. Jeong, 2002,