

API X-100의 레이저-아크 하이브리드 용접성에 미치는 용접와이어의 영향

김 성 욱^{*,†} · 이 목 영^{*}

^{*}포항산업과학연구원

The Effects of Welding Wires on the Weldabilities of API X-100 with Laser-Arc Hybrid Welding

Sungwook Kim^{*,†} and MOK-Young Lee^{*}

^{*}Research Institute of Industrial Science & Technology, Pohang 790-330, Korean

[†]Corresponding author :sungwook@rist.re.kr

(Received October 22, 2014 ; Revised October 28, 2014 ; Accepted October 30, 2014)

Abstract

In this study, API-X100 steel pipes were welded with various kinds of welding wires in the laser-arc hybrid welding process. 10kW fiber laser source was combined to MIG arc welding process. API X-100 steel of base metal was of 16.9mm thickness, and butt welding applied. After welding, full penetration weld was acquired by 1-pass welding. A root porosity and the lack of fusion was observed in some welding conditions. By the mixing the melted wire, acicular ferrite, polygonal ferrite, pro-eutectoid, aligned side plate, and bainite structures were observed at the weld metal. From the observation of hybrid weld, unmixed zone had more Ni and Cr. The unmixed zone was a 1/3 area of the weld metal. As the mechanical test of the hybrid welding, tensile test and impact test applied. From the tensile test, all of the welding except SM70S was fractured at the base metal. The result of the impact test at -30 degree C led 60J~320J of the absorbed energy. The result of the low-absorbed energy might be from the coarse equiaxed structures of the weld metal.

Key Words : API X-100 pipe, Laser-arc hybrid welding, Fiber laser, Filler wire

1. 서 론

에너지 자원의 매장지역이 수요처와 거리가 멀고, 지진의 위험도 증가, 심해 혹은 극지방에 위치하는 등 채굴환경이 갈수록 악화됨에 따라 파이프라인용 고강도 API 강재의 수요도 증가하고 있다¹⁻²⁾. 이러한 고강도 API 강재는 강도 뿐 만 아니라 저온취성에 대한 인성도 동시에 요구된다.

에너지수송을 위한 파이프라인용 원주용접은 1911년 필라델피아에서 수동 산소-아세틸렌 용접으로 시작된 이래²⁾, 장거리를 위한 자동화 용접까지 발전하였으며, 용접공정도 Flash Butt Welding, Friction Stir Welding, Laser welding 등 다양하게 발전하고 있다. 이 중에서 레이저 용접은 고밀도에너지 열원으로

용접 시 소재의 변형이 적고, 비접촉으로 용접함으로써 소재의 제약이 거의 없는 공정기술이지만, 빔직경이 작기 때문에 이음부 간극이 큰 경우에는 적용이 어려운 단점이 있다.

이러한 레이저용접의 단점을 보완하는 하이브리드 용접은 레이저와 아크용접을 동시에 수행하는 것으로, MIG 용접이 전극으로 적용되는 용접와이어에 의하여 간극을 채워주기 때문에 레이저 단독용접에 비하여 간극 허용도를 향상시켜준다³⁾.

레이저-아크 하이브리드 용접에 대한 구체적인 연구는 1970년대 후반 영국의 W.M. Steen³⁾에 의하여 시작되었으며, 최근에는 side pumping 방식의 파이버 레이저를 이용한 파이프 원주용접에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁾. EWI의 Ian D Harris⁵⁾은 고강도 API X-100 파이프라인에 대한 레이저-아크 하이브

리드 용접연구, IDMEC의 R. Miranda 등⁶⁾은 API X-100에 대한 파이버 레이저 특성연구 등을 수행하였다.

본 연구에서는 API-X100 강관의 원주용접을 위한 기초연구로써 몇 가지 용접와이어를 대상으로 레이저-아크 하이브리드 용접을 실시하고, 용접특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 사용 재료

2.1 모재

본 연구에 사용된 모재는 API-X100 강재로 두께는 16.9mm이고, 레이저-아크 하이브리드 용접을 위해 모재는 Fig. 1과 같이 맞대기로 가공하였다.

2.2 용접와이어

용접와이어는 solid 및 flux cored 와이어를 사용하였으며, 각 조성은 Table 1과 같다. 각 와이어별 인장강도는 SM-70s(560N/mm²), SM-80G(660N/mm²), SM-100(770N/mm²), SM-110(927N/mm²), SC-81(640N/mm²), SC-91K2(650N/mm²)이고, 연신율은 SM-70S (28%), SM-80G(24%), SM-100 (18.2%), SM-110(16.2%), SC-81(25%), SC-91K2 (28%) 이다.

3. 실험 방법

3.1 용접장비

본 연구에서 레이저-아크 하이브리드 용접을 위해 구

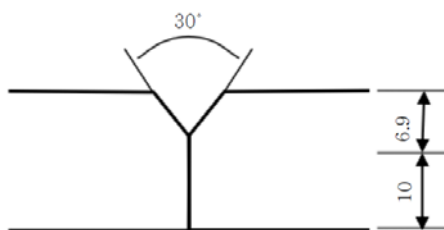


Fig. 1 Joint preparation for butt welding

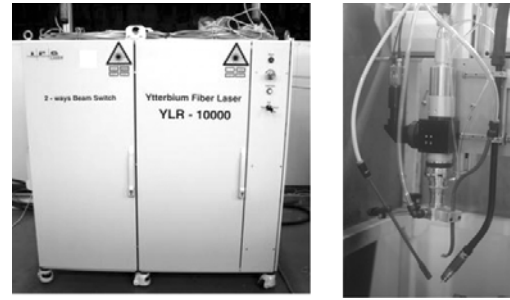


Fig. 2 10kW Fiber laser source (YLR10000) and hybrid torch head

성한 시스템은 다음과 같다.

레이저는 10kW급 파이버레이저(IPG, YLR 10000)를 사용하였으며, 아크열원은 MIG (Daihen, DM500)를 사용하여 Fig. 2에서와 같은 하이브리드 용접헤드를 구성하였으며, 로봇에 장착하여 용접을 진행하였다.

3.2 용접조건

레이저-아크 하이브리드 용접은 완전용입을 유도하기 위해 Fig. 3과 같이 레이저 선행, 아크 후행으로 적용하였으며, 레이저와 아크는 30도 각도를 유지하도록 하였다. 레이저와 아크의 간극 D_{LA} 는 1mm로 하였으며, 레이저출력 9~10kW, 용접속도 2m/min, 초점거리 -5mm 및 아크 전류 250~300mA, 전압 21~26V, 와이어 직경1.2mm, 와이어 공급속도 8~11m/min, 보호

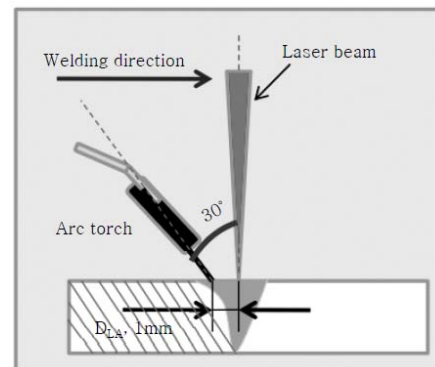


Fig. 3 Schematic diagram of laser-arc hybrid welding

Table 1 Chemical composition of wires (wt.%)

	Wire	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	V
Solid wire	SM-70s	0.08	0.4	0.85	0.014	0.014				
	SM-80G	0.08	0.5	1.35	0.012	0.01	0.28			
	SM-100	0.08	0.5	1.65			0.3	1.5	0.3	0.1
	SM-110	0.1	0.75	1.8			0.55	2	0.3	
Flux Cored wire	SC-81	0.03	0.35	1.25	0.011	0.012		0.95		
	SC-91K2	0.04	0.35	1.35	0.012	0.011	0.09	1.5		

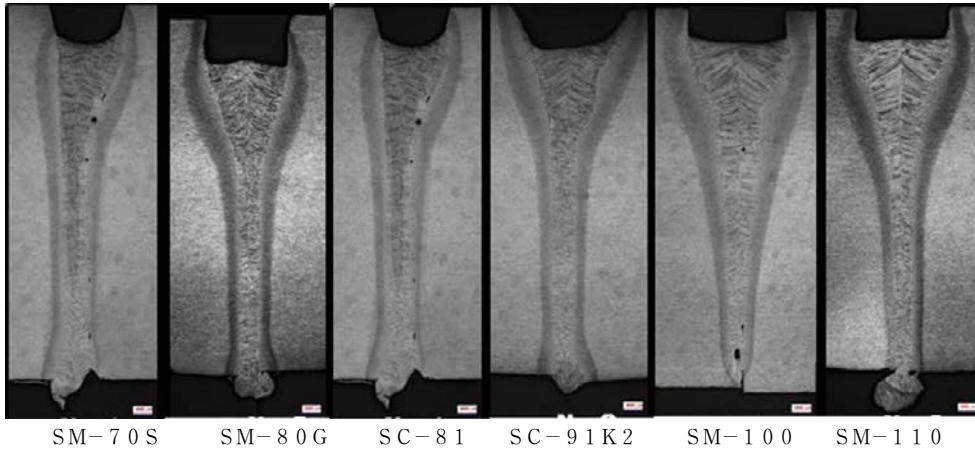


Fig. 4 Cross section of laser-arc hybrid welds

가스 18%CO₂, 25L/min으로 실시하였다.

용접부의 미세조직은 Nital solution로 에칭한 후, 광학현미경을 이용하여 매크로 및 마이크로 조직을 관찰하였으며, 상분율은 광학현미경으로 촬영한 사진을 이미지분석기 (Image pro 5.1)를 이용하여 측정하였다.

한편, 용접부의 M/A constituent의 유무를 구별하기 위해서 Lepera 용액을 사용하여 부식시킨 후 미세조직을 관찰하였다. 이 때 사용한 Lepera 용액의 조성은 다음과 같다.

- Reagent 1: 1g Na₂S₂O₅ 100ml distilled water
- Reagent 2: 4g dry picric acid, 100ml ethanol

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 용접부 미세조직

Fig. 4는 레이저-아크 하이브리드 용접에 따른 용접부 매크로 단면을 나타낸 것이다. 용접조건은 모두 완전용입되는 조건으로 설정하였다. 용접부 단면을 보면 모두 완전용입이 되어있는 것을 볼 수 있으며, 상부의 경우 용입부족(lack of fusion) 상태이나 2차충진공정(filling pass)을 거치면 문제가 없을 것으로 보인다. 다만 일부 루트쪽에서의 기공발생 및 용입부족은 문제가 될 수 있다.

Fig. 5는 용접와이어별 레이저-아크 하이브리드 용접부의 미세조직을 나타낸 것이다. 용착금속 내부는 페라이트, 베이나이트로 구성되어 있으며, 짙은 회색으로 보이는 부분은 침상페라이트(Acicular Ferrite: AF)이고, 희게 보이는 부분은 결정립계 페라이트 (Grain boundary ferrite: GBF) 및 페라이트 사이드플레이트(Ferrite Side Plate: FSP)이다.

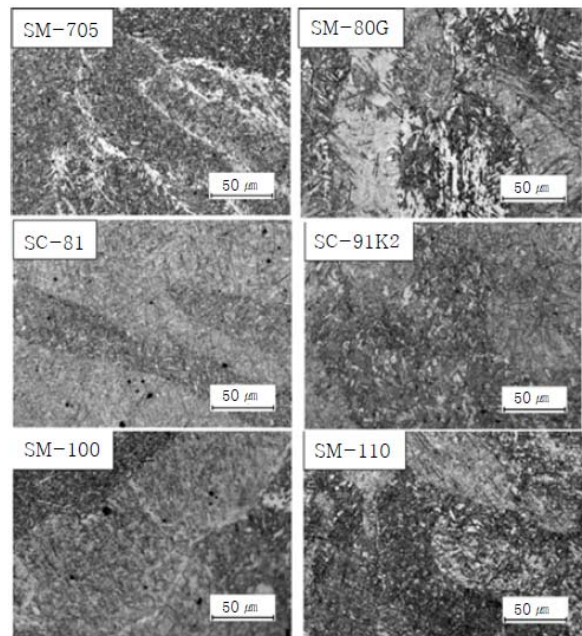


Fig. 5 Microstructures of laser-arc hybrid welds

Table 2 Microstructural composition(%)

Wire	Acicular	Polygonal	Proeutectoid	Aligned side plate	Bainite
SM-70s	79.6	0.7	0.2	0	19.5
SM-80G	85.7	6.1	4.1	1.8	0.5
SC-81	94.5	2.6	1.2	0.5	1.3
SC-91K2	87.2	8.7	0	0	5.8
SM-100	95.3	0.8	2.4	1.5	0
SM-110	80.83	2	0.7	0	16.5

Table 2는 용착금속의 미세조직을 용접 와이어별로 정량분석한 결과이다. 표에서 볼 수 있듯이 침상페라이트는 와이어 종류에 따라 80~95%의 차이를 나타내고

있으며, 나머지는 결정립계페라이트, 페라이트사이드 플레이트 및 베이나이트였다.

일반적으로 침상페라이트는 고분율로 형성되면 인성 향상을 가져오지만, 항상 선형적인 관계 만을 보이지는 않는 것으로 보고되고 있다. 특히, 적정 침상페라이트 분율에 대하여 많은 연구가 진행되었는데, 그 중 Zhang 등⁷⁾은 60~80%, Dallam 등⁸⁾은 90%로 보고하고 있다.

일반적으로 용착금속 내 Mn, Ni 및 Si는 인성과 밀접한 관계를 가지며, Evans⁹⁾는 용접부 인성에 대한 Mn과 Ni의 영향에서 Ni이 0 wt%인 조건에서 Mn이 1.4%인 경우 가장 좋은 인성을 보인다고 하였다. 또한 Ni는 침상페라이트를 촉진시켜 인성을 향상시키나 Mn과의 상호작용으로 인하여 큰 인성변화를 보인다. 즉, 저Mn인 경우 Ni이 증가할수록 인성향상이 기대되나, 고Mn인 경우 Ni이 증가할수록 인성에 악영향을 미친다. 또한 침상페라이트량도 0~0.5 wt% Ni까지는 동등 또는 약간 감소하다가 그 이후 증가하는 경향을 보인다.

Si는 경도/강도를 향상시켜 인성을 감소시키는 것으로 알려져 있으며, 특히 국부적인 초석 페라이트로의 변태를 촉진시키고, 탄소량이 높은 잔류 오스테나이트를 유발하여 M-A변태를 촉진시킨다.

Fig. 6에서와 같이 Lepera solution을 적용한 결과 CG-HAZ를 제외한 용착금속, FG-HAZ, 모재에서 M/A constituent가 관찰이 되었다. 이러한 결과는 CG-HAZ의 경우 AC3 온도이상의 영역에서 열처리되는 효과를 통하여 M/A constituent가 분해가 되었기 때문인 것으로 사료된다.

4.2 용접와이어 혼합분석

한편, 레이저 하이브리드 용접부 내의 미혼합 영역을 파악하기 위한 EPMA 분석을 실시하였다.

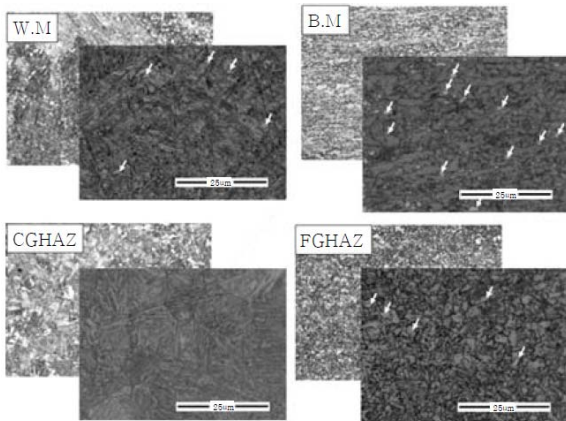


Fig. 6 Lepera solution applied microstructures of laser-arc hybrid welds

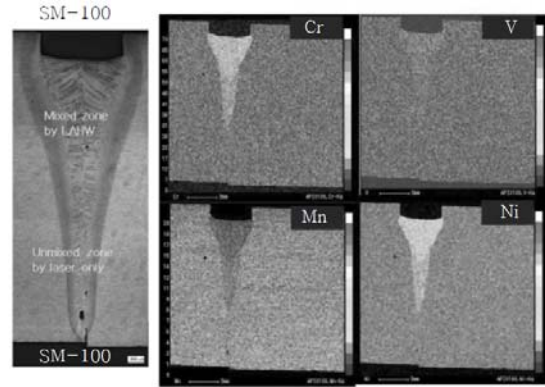


Fig. 7 EPMA analysis of laser-arc hybrid weld

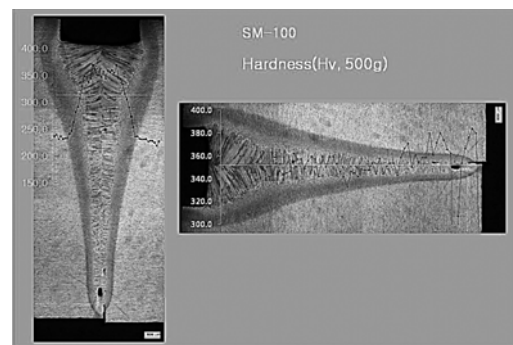


Fig. 8 Micro-hardness of laser-arc hybrid weld

용접시편은 모재보다 비교적 Ni(1.5wt%), Cr(0.3wt%)이 많이 적용된 SM-100 와이어를 사용한 용접부를 선택하였다.

그 결과 Fig. 7에서와 같이 Ni와 Cr이 상부에서 더 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이는 용착금속 내부에서 불균일한 혼합이 발생하고 있는 것을 보여주고 있는 것이다.

용착금속 내부를 가로질러 Cr이 급격한 변화를 보이고 있는 것을 관찰할 수 있으며, 미혼합 영역은 전체 용착금속 길이에서 약 1/3을 차지하고 있는 것으로 파악되었다.

미혼합 영역이 미소경도에 영향을 주는지 파악하기 위해 용착금속을 가로질러 미소경도를 측정하였다. Fig. 8에서와 같이 오차범위내에서 큰 차이는 없었으나 전체적으로는 약간 상승하는 경향을 나타내는 것으로 파악되었다.

4.3 하이브리드 용접부 기계적 물성

용접 와이어의 종류에 따른 용접부 강도를 평가하기 위하여 인장시험을 하였다. Fig. 9는 인장시험결과를 나타낸 것으로 SM70S의 경우 융합불량으로 강도 편차

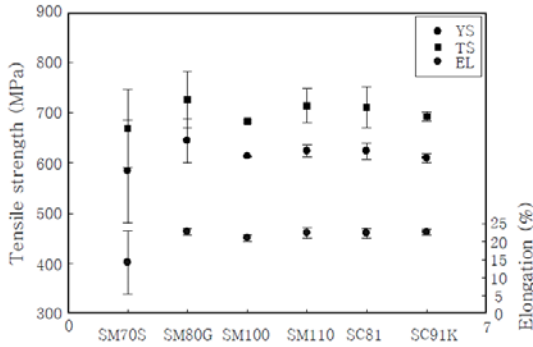


Fig. 9 Tensile strength and elongation of weld with welding wires

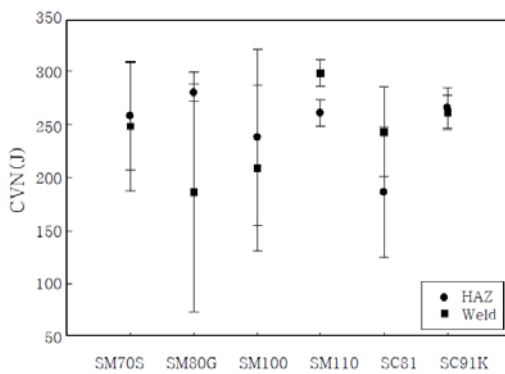


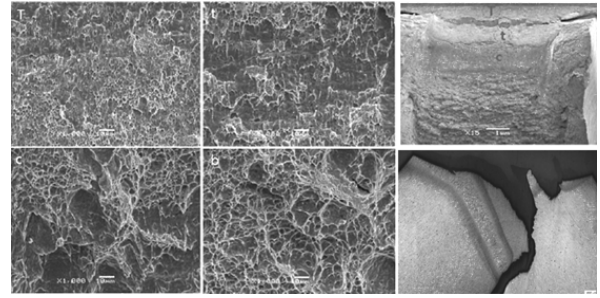
Fig. 10 Charpy impact energy of weld with welding wires

가 발생하였으며, 그 외는 전부 모재 파단을 보였다.

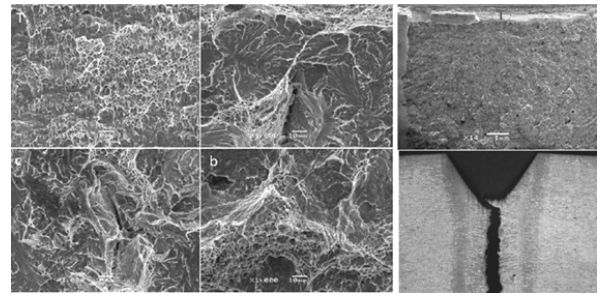
API X-100 강재의 레이저-아크 하이브리드 용접부의 저온 인성을 알아보기 위하여, 영하 30도에서 충격 시험을 하였다.

Fig. 10은 와이어의 종류 및 노치 위치에 따른 충격 흡수에너지를 나타낸 것으로 60J~320J의 극심한 편차를 보인다. 충격 흡수에너지의 평균값은 용융부 노치 242J 및 열영향부 노치 241J이었다.

용접부 저온인성값의 편차의 원인을 알아보기 위하여 충격파면의 SEM 관찰을 하였다. Fig. 11(a)는 용접 와이어로 SM70S를 사용한 용접부의 파면을 나타낸 것으로 영하30도에서 충격흡수에너지가 300J 이상인 경우이다. 전체적으로 파면은 연성파괴의 경향을 나타내며, 균열전파 경로는 용접부 중앙에서 시작되어 열영향부-모재로 전파되었다. Fig. 11(b)는 용접 와이어로 SM-80G를 사용한 용접부의 파면을 관찰한 것이며, 노치 시작지점 및 끝일부를 제외하고는 취성 벽개파면을 나타내었다. 균열전파 경로는 용접부 중앙에서 시작되어 용착금속 내부 그대로 전파되었다. 이와 같이 고강도 API X-100 강재의 레이저-아크 하이브리드 용접부



(a) SM-70S



(b) SM-80G

Fig. 11 Fractography and crack propagation after impact test

에서 저온인성이 저하되는 원인은 기공, 개재물, 융합 불량 등 용접결함과 더불어 조대한 등축정 구조조직에 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

이상과 같이 본 연구를 통하여 API X-100 강관의 레이저-하이브리드 용접성에 미치는 용접와이어의 영향은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 하이브리드 용접 시 용접와이어는 모재와의 용융 과정을 통하여 다양한 미세조직을 형성하였으며, 와이어에 따라 80~95%의 침상페라이트와 결정립계페라이트, 페라이트 사이드 플레이트 및 베이나이트 등으로 구성되었다.

2) Lepera solution을 적용하여 M/A constituent가 관찰한 결과 CG-HAZ를 제외한 용착금속, FG-HAZ, 모재에서 M/A constituent가 관찰이 되었으며, CG-HAZ의 경우에는 AC3 온도이상의 영역에서 열처리되는 효과를 통하여 M/A constituent가 분해가 되었기 때문에 관찰되지 않았다.

3) 레이저 하이브리드 용접부 내의 미혼합 영역을 파악한 결과 Ni와 Cr이 상부에서 더 많이 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 미혼합 영역은 전체 용착금속 길이에서 약 1/3을 차지하고 있는 것으로 파악되었다.

4) 용접와이어의 종류에 따른 용접부 강도를 평가하기 위하여 인장시험과 충격시험을 실시한 결과 융합불

량이 나타난 SM70S를 제외하고는 모두 모재 파단을 나타내었다. 영하 30도에서 충격시험을 실시한 결과 흡수에너지는 60J~320J의 극심한 편차를 나타내었으며, 낮은 충격치는 조대한 등축정 구조조직에 기인하는 것으로 판단된다.

Reference

1. Y.N.Ahn et al.: Laser arc hybrid welding for offshore pipeline construction, Proceedings of KWJS 2013, **110** (in Korean)
2. Sang-Ho Uhm et al.: Behaviors of Microstructures and Properties in API X70 SAW Weld, Journal of KWS, **23-2** (2005), 66-74 (in Korean)
3. Mok-Young Lee et al.: Technical Investigation on Nd:YAG Laser-GMA Hybrid Welding, Journal of KWS, **22-1** (2004), 26-31 (in Korean)
4. Thomas O. Miesner et al.: Oil and Gas Pipeline, Penn-Well Corp. 2006, 357
5. W.M.Steen et al.: Arc Augmented Laser Welding, Advances in Welding Processes Proceedings, 4th International Conference, Harrogate, U.K. May 9-11, 1978
6. M.Y.Lee et al.: Laser-arc hybrid welding, J. RIST, **18-1**(2004), 16-23
7. EWI Project No. 49191CPQ: Fiber Laser-Based Hybrid Automated Pipe Girth Welding, April 30, 2008
8. R.Miranda et al.: Characterization of fiber laser welds in X100 pipeline steel, Materials & Design, **30-7** (2009), 2701-2707
9. Z.Zhang et al.: Influence of Mn and Ni on the Microstructure and Toughness of C-Mn-Ni Weld metals, Welding Journal, **76-5**(1997), 183S-190S
10. C.B.Dallam et al.: Flux composition Dependence of Microstructure and Toughness of Submerged Arc HSLA Weldment, Welding Journal, **64**(1985), 140S-151S
11. G.M.Evans: The effect of Nickel on Microstructure and Properties of C-Mn all Weld Metal Deposits, Welding Research Abroad, **41**(1991), 70-83



- 김성욱
- 1973년생
- 포항산업과학연구원
- 용접야금 및 이중금속용접/접합
- e-mail : sungwook@rist.re.kr



- 이목영
- 1965년생
- 포항산업과학연구원
- 대출력화이버레이저용접, 하이브리드용접
- e-mail : accelee@rist.re.kr