

EH36 TMCP강의 50mm 1 패스 일렉트로가스 용접부의 조직 및 충격특성

이해우* · 고대은**

Microstructures and Impact Properties of 50mm Single Pass
Electrogas Weldment for EH36 TMCP steels

H.W. Lee* and D.E. Ko**

Key Words : Electrogas welding(일렉트로 가스 용접), Grain-boundary ferrite(결정립계 페라이트), High heat-input welding(대입열 용접), Upper bainite(상부 베이나이트), Acicular ferrite(침상페라이트)

Abstract

Microstructures and mechanical properties of weldments were studied for EH36 TMCP higher-strength hull steel with electrogas welding process. In case of a newly designed EH36 TMCP steel for large heat input welding process, the microstructure of HAZ shows more narrow width of grain coarsened region than that of conventional EH36 TMCP steel. In the microstructure of a newly designed EH36 TMCP weldments, the amount of acicular ferrite, which is beneficial to impact toughness, increased while the amount of grain-boundary ferrite decreased. Charpy V-notched impact tests show that a newly designed EH 36 TMCP steel weldment satisfies all the requirement of specifications, especially at the fusion line +2mm where the conventional EH36 TMCP steel fails to exceed the requirement.

1. 서 론

대입열 용접은 최근 생산성 향상 및 원가 절감 차원에서 적극 활용되고 있는 용접 프로세스이다. 대입열 용접법은 크게 서브머지드 아크 용접(SAW), 일렉트로 슬래그 용접(ESW) 및 일렉트로 가스용접(EGW) 등이 있으나 과도한 용접입열로 인한 용착금속 및 열영향부의 인성저하로 사용에 제한을 받고있다.^{1,2)} 용접부 인성에 영향을 미치는 인자로는 모재의 탄소당량

(Ceq), 용접재료의 화학조성, 냉각속도 및 초기 오스테나이트(prior austenite) 결정립 크기 등이 있으며 용접 공정에 따라서 플럭스 코어드 아크용접(FCAW) 과 같은 저입열 용접의 경우 용접부 최고온도에서 변태가 완료되는 온도까지 냉각속도가 빠르기 때문에 Widmanstätten 조직이나 상부베이나이트(upper bainite) 조직이 생성되어 인성저하를 초래하는 반면 대입열 용접시에는 오스테나이트 결정립이 조대화 될 뿐만아니라 결정립계 페라이트(grain-boundary ferrite) 폭이 커지고 다각화 되면서 인성이 우수한 침

※ 1999년 1월 11일 접수

* 정회원, 삼성중공업 조선플랜트 연구소 용접연구팀

** 비회원, 삼성중공업 조선플랜트 연구소 용접연구팀

• 이해우 : hwl8248@samsung.co.kr

상페라이트(acicular ferrite) 분율을 감소시키기 때문에 낮은 인성을 나타낸다고 알려져 있다.³⁻⁵⁾

이런 문제점으로 인해 현재 일렉트로가스 용접의 적용 최대 두께는 35mm 이하이지만 적용두께를 증가시키는 방향으로 강재 및 용접재료가 개발되고 있다. 강재의 경우 탄소함유량을 낮추는 대신 초기 결정립 크기를 미세화시키기 위해 미량 첨가된 Nb, Ti 등이 prior austenite grain boundary 등에서 탄화물 및 질화물로 석출되어 인성이 우수한 침상페라이트 생성을 촉진한다고 알려져 있으며 용접재료에 Ni를 첨가함으로써 결정립계 페라이트와 상부베이나이트 생성을 억제하고 침상페라이트를 생성시켜 용접금속의 인성을 향상시킨다고 보고되고 있다.⁶⁻⁸⁾

따라서 본 연구에서는 기존에 사용되고 있는 강재 및 용접재료와 대입열용으로 개발된 강재 및 용접재료에 대해 50mm 1 pass 일렉트로 가스 용접을 실시한 후 미세조직 및 충격특성을 비교 분석함으로써 개발강재의 대입열 용접가능성을 파악하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에서는 선급용 강재 EH 36 TMCP 고장력 강을 사용하였고 기존 사용강재와 대입열용으로 개발된 강재를 구분하여 용접하였으며 시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 모재/용접금속 화학조성

모재 및 용접부의 화학조성을 Table 1에 나타내었으며 건식분석 방법인 스펙트로 분석기(Spectrovac-2000, USA)로 3회 분석하여 평균값을 기록하였다.

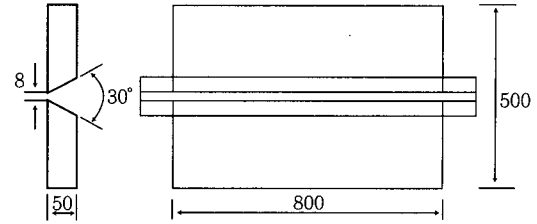


Fig. 1 Schematic drawings of welding joint

2.3 용접장치 및 용접조건

본 실험은 600A DCRP power source, 용접와이어는 AWS 70T-2에 해당되는 재료를 사용하여 실시하였으며 용접조건은 Table 2에 기록하였다.

2.4 경도시험

경도시험은 비커스 경도기를 사용하여 하중 10kg, 하중부여 시간을 10초로 하였으며 용접비드 표면 10mm 위치에서 1mm 간격으로 경도를 측정하였다.

2.5 충격시험

Charpy V-notch 충격시험을 0℃, -20℃ 및 -40℃에서 실시하였다. 시험편은 용접비드 상부에서 10mm 위치에서 채취하였으며 용착금속, Fusion line+2mm, Fusion line+7mm 및 모재로 구분하여 실험하였다.

2.6 미세조직 시험

용접부의 미세조직을 조사하기 위하여 연마 및 정마 후 3% nital에서 10초간 부식한후 광학현미경으로 관찰하였다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of base metal and weld metal for EH36 TMCP steels

		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Nb	Ti	Ceq	Y.S. (N/mm ²)	T.S. (N/mm ²)	EI (%)
Spec. (ABS)		0.18 max.	0.10 ~0.50	0.90 ~1.6	0.035 max.	0.035 max.	0.40 max.	0.35 max.	0.02 ~0.05	0.02 max.	-	355 min.	490 ~620	21 min.
Base metal	A	0.09	0.39	1.41	0.017	0.007	0.06	-	0.02	-	0.329	395	523	30.5
	B	0.07	0.25	1.41	0.013	0.009	0.20	0.18	0.02	0.014	0.330	390	520	31.4
Weld metal	A	0.06	0.35	1.62	0.018	0.014	0.03	0.03	-	-	0.334	412	553	24.6
	B	0.06	0.20	1.47	0.017	0.013	1.97	0.07	-	0.024	0.441	428	563	17.8

A : Conventional EH36 TMCP
 B : Newly designed EH36 TMCP
 $Ceq = C + Mn/6 + (Cu+Ni)/15 + (Cr+Mo+V)/5$

Table 2. Welding conditions / Welding materials

용접전류(A)	전압(V)	용접속도(cm/min)	용접입열(kJ/cm)	
410	37	2.02	450	
- Weaving 폭 : 30mm - Dwell time : Back side 0.5초, Face side 0.7초				
Base metal	Consumable : AWS Spec. (brand name)	Wire (ϕ)	Backing material	Shielding gas
Conventional EH36 TMCP	A5.26 EG70T-2 (DWS 43G)	1.6	BS-8A	100% CO ₂
Newly designed EH36 TMCP	A5.26 EG70T-2 (DWS 1LG)	1.6		

2.7 산소 및 질소분석

모재 및 용착금속의 산소 및 질소 분석은 Leco사의 질소 산소 분석기(TC-436)를 이용한 적외선 흡수방식으로 측정하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

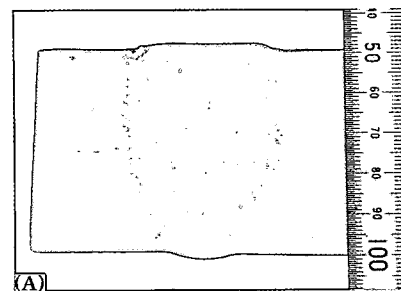
Table 3. Oxygen and Nitrogen contents in base metal and deposited metal

		Conventional EH 36 TMCP	Newly designed EH 36 TMCP
Base metal	O ₂	0.0015	0.0018
	N ₂	0.0035	0.0025
Deposited metal	O ₂	0.0710	0.0380
	N ₂	0.0053	0.0027

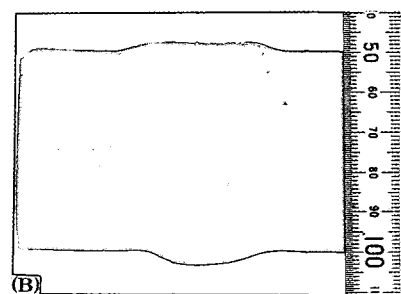
3. 결과 및 고찰

3.1 Macro/micro 조직

Fig. 2는 50mm 1 pass 일렉트로 가스 용접부의 macro 조직으로 용착금속과 모재가 뚜렷이 구분된다. Fig. 3은 200배로 미세조직을 연속 관찰한후 25배로 축소 인화한 용접부의 미세조직이다. 기존 강재의 미세조직인 Fig. 3(A)는 동일한 용접조건임에도 불구하고 대입열용으로 개발된 강재인 Fig. 3(B)보다 결정립 조대화 영역이 더 넓게 형성되어 있음을 알 수 있다. 이와같은 이유는 개발강재에 함유된 Ti등이 탄화물 또는 질화물을 형성하여 결정립 성장을 억제한 것으로 사료된다. Fig. 4는 기존에 사용하였던 강재 및 용접재료에 대한 용접부의 미세조직이다. Fig. 4(A)는 모재의 조직으로 다각형 페라이트(polygonal



(A) conventional EH36 TMCP steel



(B) newly designed EH36 TMCP steel

Fig. 2 Macrostructure of weld joints

ferrite)와 펄라이트(dark area) 및 베이나이트(bright grey area)로 구성되어 있음을 알 수 있으며 결정립 크기가 as-rolled 강재나 normalized 강재보다 상대적으로 미세함을 알 수 있다. 이와같이 TMCP 강재의 결정립이 더 미세한 이유는 as-rolled 강재나 normalized 강재의 경우 최종압연후 공기중에서 냉각시키는데 비해 TMCP강은 제어압연(controlled rolling) 공정에서 압연이 끝난 직후인 Ar₃ 온도 바로 위 온도에서 변태가 완료되는 Ar₁ 온도에 도달할 때까지(800~500℃) 물분사 장치를 이용하여 가속냉각(accelerated cooling)을 실시함으로써 재결정이 억제되고 결정립 내부에 변형밴드(deformation band)

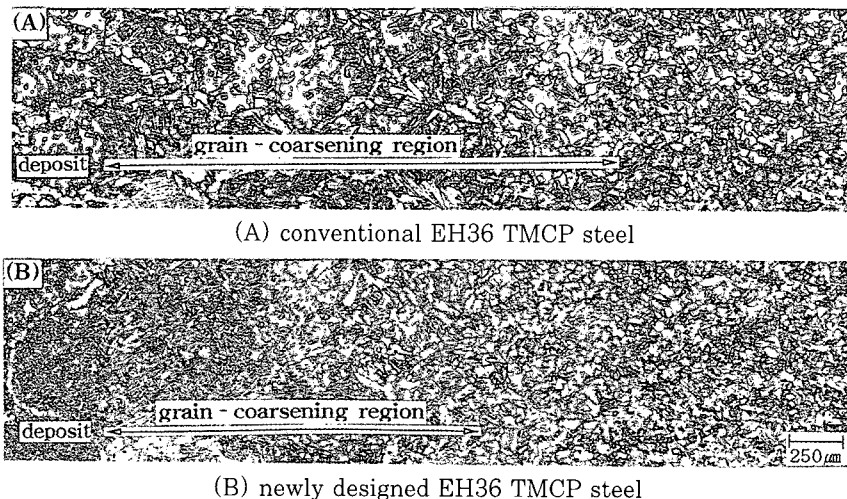


Fig. 3 Montage optical micrograph showing overall view of weldment microstructures

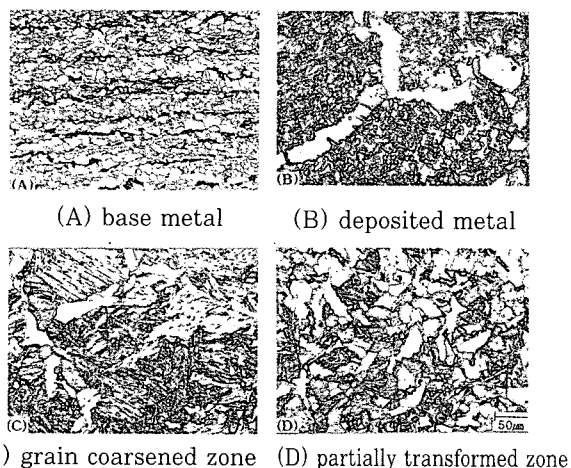


Fig. 4 Microstructure of weld joints for conventional EH36 TMCP steel

를 형성시켜 페라이트 핵생성 자리를 증가시키기 때문이다. 결정립 조대화 영역인 Fig. 4(B)는 용착금속의 미세조직으로 희게 보이는 부분이 결정립계 페라이트 (grain-boundary ferrite)이고 결정립계 페라이트 주위에 검게 보이는 부분이 침상페라이트(acicular ferrite)이다. 결정립계 페라이트 형상이 조대화 및 다각화되어 있음을 알 수 있는데 입열량이 증가될수록 이런 현상은 현저해진다. Fig. 4(C)는 용접입열에 의해 1200℃ 이상으로 가열되었다가 냉각된 조직으로 이 온도 범위에서는 오스테나이트 결정립은 급속히 조대화되며, 냉각속도가 매우 빠른 경우 연강에서도 마르텐사이트 변태가 가능한 영역이다. Fig. 5는 대입열용으로 개발된 용접부의 미세조직으로 Fig. 5(A)는 모재의 미세조직이다. 기존 강재인 Fig. 4(A)에 비해 결정립은 더 미세한 반면 펄라이트 밴드는 적게 생성되어 있음을 알 수 있다. 이는 Ti 첨가로 인한 결정립

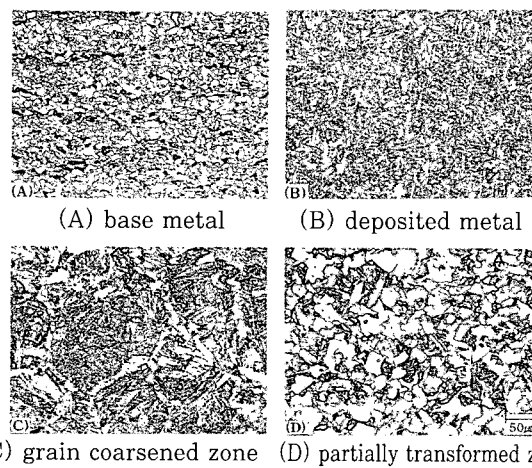


Fig. 5 Microstructure of weld joints for newly designed EH36 TMCP steel

미세화와 상대적으로 낮은 탄소의 영향이라 판단된다. 용착금속의 미세조직인 Fig. 5(B)는 기존 용접재료를 사용한 Fig. 4(B)보다 결정립계 페라이트는 거의 생성되지 않은 반면 인성이 우수한 침상페라이트량은 상대적으로 많이 변태되어 있음을 알 수 있는데 이는 개발된 용접재료에 첨가된 Ni의 영향이라 판단된다. Fig. 5(C)는 결정립 조대화 영역의 조직으로 기존강재인 Fig. 4(C)보다 결정립계 페라이트의 폭이 더 좁고 침상페라이트 형상도 더 미세하게 변태되어 있음을 알 수 있다. 부분 변태 영역(partially transformed zone)의 미세조직인 Fig.5(D)는 기존강재인 Fig.4(D)와 큰 차이를 발견 할 수 없었다.

3.2 경도분포

Fig. 6은 경도분포 곡선이다. FCAW와 같은 저입열

용접시 용융선(fusion line) 바로 옆에서 최대경도 (peak hardness)가 나타나는 것과는 달리 두 용접부 모두 열영향부에서 최대경도값이 나타나는 전형적인 대입열 용접부의 경도분포를 보여주고 있다. 또한 용착금속의 경우 경도차가 거의 없는데 비해 부분 변태 영역(partially transformed zone)에서 개발강재가 기존강재보다 Hv 10정도 연화현상이 나타났으며 이는 상대적으로 낮은 탄소의 영향이라 판단된다.

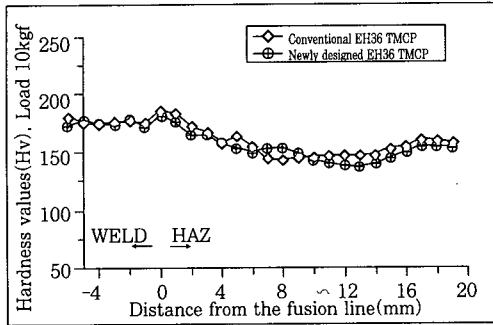


Fig. 6 Hardness profiles of 10mm distance from weld surface

3.3 충격특성

Fig. 7은 용착금속의 충격특성 그래프로 개발제품의 경우 모든 선급의 요구치인 34J(-20℃ 기준)을 만족한 반면 기존제품은 시험온도 -20℃에서 선급요구치를 만족하지 못하였다. Fig. 8 및 Fig. 9는 충격시험 온도 0℃ 및 -20℃에서의 용접부 충격특성 그래프이다. 모재 및 Fusion line+7mm에서는 기존제품 및 개발제품 모두 시험온도에 관계없이 우수한 흡수에너지를 나타내고 있으나 용착금속 및 Fusion line+2mm에서는 기존제품의 경우 개발제품에 비해 낮은 충격특성을 보이고 있다.

특히 기존제품의 경우 용착금속과 Fusion line+2mm 시험편은 충격시험온도 -20℃에서 선급 요구치를 만족하지 못하고 있다. 이와같이 강재 및 용접재료에 따라 충격흡수에너지가 큰 차이를 보여주고 있는데 이에 대해서는 화학조성 및 용착금속내 산소량으로 설명이 가능하다. 용접재료에 지배적인 영향을 받는 용착금속의 경우 개발제품의 Ni 함량이 1.97%로 높은 반면 기존제품에서는 0.03%로 아주 낮게 나타났다. 높은 충격특성을 얻기 위해서는 용접부 미세조직중 침상페라이트가 고분율로 생성되어야 하고 동시에 결정립계 페라이트나 Widmanstatten조직 및 상부베이나이트 조직이 최소로 형성되어야 한다⁶⁾. Ni 과 Mn은 결정립계 페라이트와 상부베이나이트 생성을 억제하고 침상페라이트 생성을 쉽게 함으로써 우수한 충격특성을 나타낸다고 알려져 있다⁶⁾. 또한 용착금

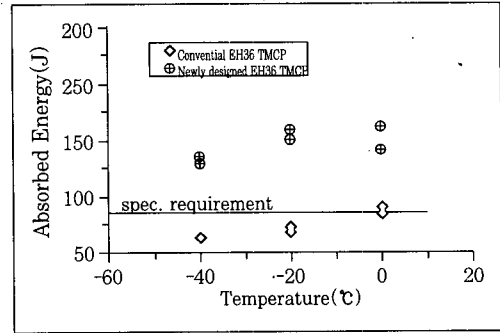


Fig. 7 Results of Charpy V-notch impact test for weld metal

속내 산소량은 충격치와 깊은 관련이 있다고 보고되고 있는데 산소는 용착금속 내에서 0.03μm 미만의 매우 미세한 산소 개재물로 분산되어 있으며 산소 개재물이 증가될수록 취성과괴 양상도 그만큼 민감하다고 알려져 있다¹⁰⁾. 그러나 산소량이 200ppm 이하로 너무 부족한 경우에도 낮은 충격특성을 보이는데 이는 페라이트-펄라이트 기지조직에 부정합 결정구조를 생성시킬 가능성이 높으며 또한 용착금속으로 응고될때 S 또는 P의 석출물 형상이 globular 형태에서 film-like 형태로 바뀌게 되어 소성변형을 어렵게 한다고 보고되고 있다¹⁰⁾. 또한 350ppm 이상이면 비금속 개재물이 결정립계를 따라 석출하여 외력을 받게 되면 이 부분에서 균열의 핵으로 생성되어 낮은 인성을 유발시키는 원인이 된다고 알려져 있으며 이와 같은 결론을 종합해볼 때 용착금속의 산소량은 250 ~ 350ppm가 적정량을 알 수 있다¹⁰⁾. 용착금속에서 개발제품이 기존제품보다 우수한 충격특성을 보이는 것은 인성을 향상시키는 Ni 합금원소 첨가 뿐만아니라 Table 3에 나타난 것과 같이 용착금속 산소량에서도 알 수 있다. 열영향부 충격인성 또한 기존강재에 비해 개발강재에서 우수한 특성을 나타내고 있으며 특히 fusion line + 2mm에서는 기존강재가 선급요구치 34J를 만족하지 못하는 반면 개발강재는 350J 이상 우수한 인성을 나타내었다. 이와같이 열영향부에서 높은 인성을 나타내는 것은 Fig. 4 및 Fig. 5의 미세조직에서 알 수 있듯이 기존강재의 경우 인성저하에 직접적인 영향을 미치는 결정립계 페라이트 폭이 커지고 다각화된 반면 개발강재는 결정립계 페라이트의 생성 분율이 상대적으로 적게 형성되었기 때문으로 사료된다. 즉 동일한 용접입열에서 미세조직이 큰 차이를 보이는 것은 초기 결정립 크기와 합금원소로 설명을 할 수 있으며, Mn이 0.6~1.8% 첨가된 강에서 Ti이 5~250ppm 정도만 첨가되어도 인성을 크게 향상시킨다는 연구결과가 있다¹¹⁾. 즉 개발강재에 첨가된 Ti이 고온에서 비교적

안정한 TiN 등의 석출물 형성을 통해 prior austenite grain의 미세화를 도모함으로써 결정립계 페라이트 핵생성을 촉진할 것이며 따라서 제한된 변태 에너지하에서 페라이트 성장 지연 및 용접부 인성에 나쁜 영향을 미치는 고용질소의 양을 감소시키는 효과등이 복합적으로 작용되어 높은 인성을 나타낸 것으로 판단된다.

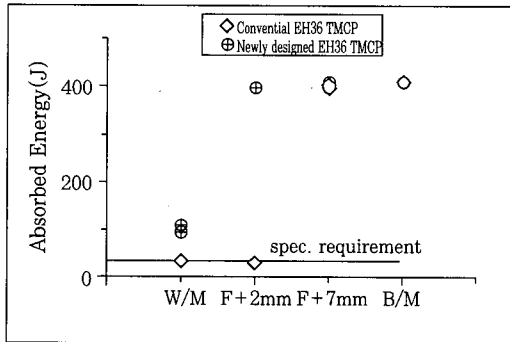


Fig. 8 Results of Charpy V-notch impact test at 0°C

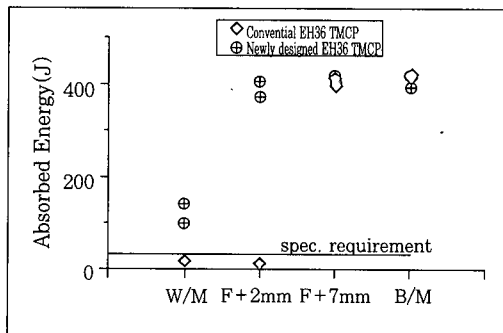


Fig. 9 Results of Charpy V-notch impact test at -20°C

4. 결 론

선급용 강재 EH36 TMCP 50mm를 일렉트로가스 용접후 합금원소 변화에 따른 미세조직, 경도특성 및 충격특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 대입열용으로 개발된 강재의 열영향부 미세조직이 기존사용 강재보다 결정립 조대화 영역이 좁게 형성되었으며 용착금속의 미세조직 또한 결정립계 페라이트량은 감소한 반면 인성이 우수한 침상 페라이트 분율이 증가하였다.

2) 경도측정 결과 열영향부 부분변태 영역에서 개발강재가 기존강재에 비해 Hv 10정도 연화현상이 나타났다.

3) 충격특성 고찰결과 기존사용 강재의 경우 용착금속 및 Fusion line+2mm에서 선급요구치 34J을 만족하지 못한 반면 대입열용 개발 강재는 선급요구치를 만족하였으며 특히 Fusion line+2mm에서 우수한 충격특

성을 보임으로써 대입열 용접 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 이해우, 강성원의, 일렉트로 가스 용접부의 조직 및 인성에 관한연구, 대한용접학회지, 제14권 1호, (1996), pp.68~74.
2. C.B Dallam, S.Liu and D. L Olson, Flux Composition Dependence of Microstructure and Toughness of Submerged arc HLSA Weldments, Welding Journal, Vol. 64, No. 5, (1985), pp.140~151.
3. E. Levine and D. C. Hill, Toughness in HSLA Steel Weldments, Metallurgical Transactions, (1977), pp.360.
4. 佐藤邦彦 : 溶接 構造 要覽, (1983), pp.37~40.
5. A. Joarder, S. C. Saha and A. K. Ghose, Study on Submerged Arc Weld Metal and Heat Affected Zone Microstructures of a Plain Carbon Steel, Welding Research Supplement, (1991), pp.141~146.
6. Brownlee, Effect of Al and Ti on the Microstructure and Properties of Microalloyed Steel Weld Metal, (1986), pp.245~250.
7. J. H. Chen, T. D. Xia and C. Yan, Study on Impact Toughness of C-Mn Multilayer Weld Metal at -60°C, Welding Research Supplement, (1993), pp.19~27.
8. Lathabai. S and Stout. R. D, Shielding Gas and Heat Input Effect on Flux Cored Weld Metal Properties, Welding Journal, Vol. 58, No. 11, (1987), pp.303~313.
9. H. W. Lee, S. W. Kang and D. S. Um, A Study on Transverse Weld Cracks in Thick Steel Plate with the FCAW Process, Welding Journal, Vol. 77, No.12, (1998), pp.503~510.
10. N. N. Potapov, Oxygen Effect on Low-Alloy Steel Weld Metal Properties, Welding Journal, Aug., (1993), pp.367~370.
11. G. M. Evans, The Effect of Titanium in Manganese-Containing SMA Weld Deposits, Welding Journal, March, (1993), pp.123~133.