

HSLA-100강용 무예열 GMA 용접재료 개발

박형근·김희진·박철규

Development of Preheat-free GMA Welding Wire for HSLA-100 Steel

Hyung Kun Park, Hee Jin Kim and Chul-gyu Park

1. 서 론

콘테이너선을 비롯한 선박과 해양 구조물 같은 강구조물은 대형화되는 동시에 경량화가 지속적으로 추진되면서 구조물에 적용되는 강재의 고강도화가 진행되어 왔다¹⁻⁵⁾. 이러한 경향은 운용성과 기동성을 중시하는 군수용 선박에서도 동일하게 진행되고 있다⁶⁾. 예를 들면, 잠수함과 수상함 등의 선체 재료로 사용되는 강재는 ksi 단위의 항복강도에 따라 HY-80, HY-100, HY-130 등으로 구분되어 지는데, 고강도화에 따라 현재는 HY-100강이 보편화되어 있으며 HY-130강은 적용 검토 단계에 있다.

HY강은 미국의 MIL 규격으로 규격화되어 있는 강종인데^{7,8)}, 국내에서 개발한 동급의 강재는 DS-80, DS-100, DS-130강으로 명명되어 있다. 이러한 HY강(또는 DS강)은 강도 확보를 위하여 0.14 wt% 수준의 탄소와 다량의 합금원소(Cr, Mo 등)를 함유한다. 그럼으로 HY강은 용접성이 매우 열악하고 용접열영향부에서 저온균열 발생 가능성이 매우 높은 강종이다. 이러한 이유 때문에 HY강 용접에서는 100°C 이상의 예열 및 층간온도를 유지하여야 하고 용접입열을 일정 수준 이하로 하여야 한다⁶⁾. 이러한 제한 사항은 용접생산성을 크게 저하시키기 때문에 이러한 문제점을 해소하고자 개발된 강재가 HSLA강이다. 본 강재 역시 미국 군사규격에 HSLA-80 및 HSLA-100강으로 규격화 되어 있으며⁹⁾, 국내에서 개발된 동급의 강재는 PFS-560 및 PFS-700강으로 명명되어 국방규격으로 규격화되어 있다¹⁰⁾. HSLA강(또는 PFS강)은 탄소함량이 0.04 wt% 수준으로 매우 낮으며, 저탄소에 따른 강도 저하를 보상하기 위하여 Cu를 첨가한 강종이다. 이러한 조성을 가지는 HSLA강은, 기존의 HY강과는 달리, 용접성이 우수하여 용접예열을 하지 않아도(no-preheat condition) HAZ 저온균열은 발생하지 않는다¹¹⁾. 그럼으로 HSLA강은 무예열 용접이 가능한 강재

인 것이다. 그런데, HSLA강에 기존 HY강에 사용하던 용접재료를 사용하여 무예열 용접하게 되면, 용착금속부에서 저온균열이 발생한다^{11,12)}. HSLA강은 무예열 용접성이 확보되어 있기 때문에 HAZ에서는 균열이 발생하지 않으나 기존의 용접재료는 무예열 용접성이 확보되어 있지 않아서 용착금속부 균열이 발생한다. 이러한 사실이 확인됨에 따라 HSLA강의 무예열 용접성은 무예열 용접이 가능한 용접재료(이하 '무예열 용접재료'라 칭함)가 개발되어야 온전히 활용될 수 있다¹³⁾. 이러한 필요성 때문에 무예열 용접재료 개발 연구가 1990년 이후 미국에서 수행되었다. 개발 과정에서 여러 가지 방안이 제안되었는데, 그 중의 하나가 저탄소계 GMAW용 용접와이어이다. 저탄소계 GMAW용 용접와이어는 탄소 함량이 약 0.03%이고, 강도 확보를 위해 Mn, Ni, Mo 등을 첨가하였다¹³⁻¹⁵⁾. 하지만 아직 이러한 용접재료가 상용화되었다는 보고는 접하지 못하였다.

국내에서도 유사한 연구가 2005년부터 수행되어 최근 800MPa급 강도를 가지면서 무예열 용접 가능한 GMAW용 용접재료 뿐만 아니라 SAW용 및 FCAW용 용접재료도 개발되었다. 그리고 이들 재료는 한국선급에서 제정한 '무예열 고강도 용접재료 승인 및 검사 지침'에 의거하여 기술시험평가를 실시하여 무예열 용접성 및 군수용 사용적합성 인증을 획득하였다. 본 기술보고에서는 GMAW용 용접재료에 대해 소개하고자 한다. 소개하고자 하는 GMA 용접재료는 무예열 용접성을 확보하기 위하여 C함량을 0.01% 수준으로 낮추었으며 와이어의 표면을 최적 관리하여 확산성수소량을 최소화 하였다. 그리고 본 용접재료는 혼합가스용으로 개발되어 Ar+(5~20)%CO₂ 조성의 보호가스를 사용하도록 개발되었다.

2. 용접와이어의 화학조성

무예열 용접와이어의 화학조성은 Table 1과 같다.

Table 1 Typical composition of preheat-free GMA welding wire

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	others	Fe
0.015	0.4	1.5	0.003	0.001	3.4	1.0	Al, Ti	bal.

탄소함량은 0.015 wt% 수준으로 매우 낮으며, 주요 합금원소로 Mn, Ni, Mo 등이 첨가되어 있다. 기타 합금원소로서 Al 및 Ti가 소량 첨가되어 있으며, 불순물 원소인 P, S는 최저 수준으로 관리되어 있다. 본 용접 재료에서 탄소함량을 극저(ultra-low) 수준으로 한 것은 저온균열 저항성을 향상시키고, 냉각속도에 따른 강도 변화를 최소화하고자 한 것이다¹⁶⁾.

3. 확산성수소량

두 가지 보호가스(Ar+5%CO₂ 및 Ar+20%CO₂)에서 측정된 확산성수소량은 Table 2와 같다. 이들은 모두 측정 시점을 달리하여 5회 이상 측정된 결과들의 범위를 보여 주는 것이다. 측정방법은 gas chromatograph (GC)법을 주로 사용하였으며, GC결과를 검증하기 위하여 수은법으로 재 측정된 경우도 있다. Table 2에서 보듯이, 확산성수소량은 보호가스의 영향을 받으며, 보호가스 중의 CO₂함량이 증가함에 따라 저하한다. 이러한 보호가스와 확산성수소량의 상관관계로 인하여 Ar+20%CO₂를 사용하는 경우에는 2.0ml/100g 이하로, Ar+5%CO₂의 경우에는 2.5ml/100g 이하로 관리 가능함을 보여 준다.

4. 무예열 용접성

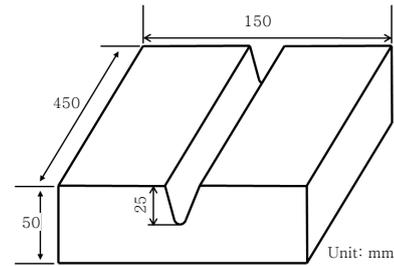
개발 용접재료에 대한 무예열 용접성 평가는 '다층구속균열시험'으로 하였으며, 시험편은 Fig. 1(a)와 같다. 본 시험편의 이면에는 사각형의 지그를 부착하여 시

Table 2 Diffusible hydrogen content of preheat-free GMA welding wire

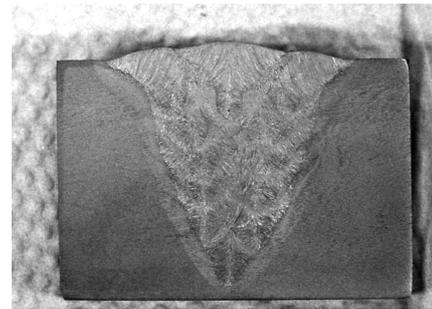
Shielding gas	Ar+5%CO ₂	Ar+20%CO ₂
Diffusible hydrogen content (ml/100g)	1.8~2.3	1.1~1.9

Table 3 Chemical composition of weld metals

Shielding Gas	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu
Ar+5%CO ₂	0.026	0.32	1.33	0.002	0.004	3.31	0.98	0.31
Ar+20%CO ₂	0.029	0.25	1.18	0.003	0.003	3.43	1.04	0.43



(a)



(b)

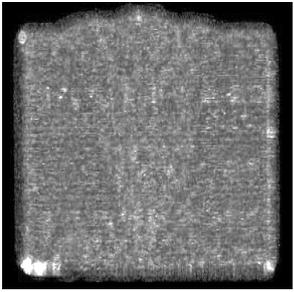
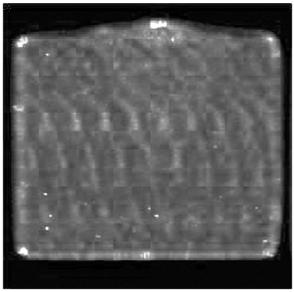
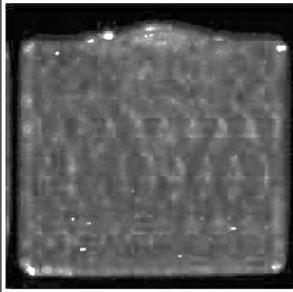
Fig. 1 Multi-pass restraint weld metal cracking test: (a) specimen geometry, (b) macro-structure

험 판재를 완전히 구속시켰다. 모재는 50mm 두께의 PFS-700강인데, 본 강재의 화학조성은 기 보고한 바 있다¹⁷⁾.

시험편 제작시 두 가지 보호가스(Ar+5%CO₂, Ar+20%CO₂)를 사용하였다. 두 가지 시험편 모두 예열 온도는 상온으로 하였으며, 패스간 온도는 50℃ 이하로 유지하였다. 용접후 100℃까지는 자연냉각시키고, 그 이후에는 드라이아이스로 판재를 냉각시켰다. 용접이 완료된 구속균열시험편의 횡 단면에서 용접부를 관찰한 매크로 조직은 Fig. 1(b)와 같다. 그리고 용착금속 중앙부에서 분석한 화학조성은 Table 3과 같다. 탈산제로 작용하는 Mn과 Si함량에 있어서 차이를 보여 준다.

용접이 완료된 시험편은 대기 중에서 72시간 방치하고, 초음파 탐상시험으로 결함 여부를 확인하였는데, 어떠한 결함도 검출되지 않았다. 그래서 구속균열시험편을 횡 방향으로 절단하여 Scanning acoustic microscope (SAM)로 관찰하였다. 이는 초음파 탐상의 한계로 검출하지 못하는 미세결함의 존재 유무를 확인하기 위한 것이다. Fig. 2는 SAM 결과인데, 어떠한 결함도 보여

Fig. 2 Result of SAM examination

보호가스	Ar+5%CO ₂		Ar+20%CO ₂	
확산성수소량	2.30 ml/100g		1.11 ml/100g	1.94 ml/100g
UT Scan 결과				

주지 않는다. 이러한 결과로부터 개발 용접재료는 무예열용접성을 온전히 확보하고 있음이 검증되었다.

5. 무예열 용착금속부 기계적성질

용착금속의 기계적성질은 전용착시험편을 제작하고, 시험편의 용착금속부에서 측정하였다. 전용착시험용 용접강판은 두께 25mm인 PFS-700강이며, 이를 V-개선으로 가공하고 루트 간격은 6mm로 하여 아래보기 자세로 용접하였다. 용접은 무예열과 층간온도를 50℃ 이하로 유지하여 수행하였다. 전용착시험편도 두 가지 보호가스(Ar+5%CO₂, Ar+20%CO₂)를 사용하여 제작하였다. 용착금속부에 대한 기계적시험으로 인장시험과 충격시험을 실시하였다. 충격시험은 -18℃와 -50℃에서 각각 3개 이상의 시험편을 시험하였다. 그리고 Ar+20%CO₂를 보호가스로 사용한 시험편에 대해서는 MIL 규격이¹⁸⁾ 규정하는 동적파열시험(dynamic tear test, DT 시험)을 ASTM E 604에 의거하여 0℃와 -30℃에서 수행하였다¹⁹⁾.

각각의 용착금속에 대해 수행한 기계적시험의 결과는 Table 4와 같다. 보호가스 중의 CO₂함량이 높으면 용착금속 중의 Mn, Si 함량이 낮아지고 산소량이 증가하여 강도 및 충격인성이 저하하는 것이 일반적이다. 이러한 경향이 Table 4에서도 나타나고 있다. 즉 Ar+20%CO₂에서 강도 및 충격치가 저하되었음을 보여주

는데, 이 경우에도 항복강도는 816MPa, 인장강도는 870MPa, -50℃에서의 충격치는 71J을 보여 주었다. 이들은 모두 MIL 규격이¹⁸⁾ 요구하는 최저치를 모두 만족시켰다. 그리고 DT에너지도 MIL 규격 요구치를 만족시켰다.

6. 예열온도의 영향

개발된 용접재료는 무예열 용접용을 목표로 하여 PFS-700강에 적용하기 위해 개발된 재료이다. 그러나 본 용접재료를 HY-100(또는 DS-700)강에 적용하기 위해서는 HY-100강에 적용되는 예열 및 층간온도 조건에서 기계적성질을 만족시켜야 한다. 이를 확인하기 위하여 예열조건에서 전용착시험편을 제작하여 기계적성질을 확인하였다. 모재는 PFS-700강과 DS-100강을 사용하고, 보호가스는 Ar+5%CO₂와 Ar+20%CO₂로 하였다. 시험에 사용된 모재와 보호가스의 조합 그리고 예열/층간 온도는 Table 5와 같다. 어떠한 경우에도 예열 및 층간온도가 150℃를 초과하지 않도록 하여 MIL 규격을 엄격히 준용하였다¹⁸⁾. 각각의 조건에서 제작된 시험편에서 수행한 기계적시험 결과는 Table 5와 같은데, 무예열조건에서 얻어진 결과(Table 4)를 삽입하였다. 이 표에서 알 수 있듯이, PFS-700강의 경우에 있어서 80℃의 예열조건의 기계적성질은 무예열조건과 유사한데, 150℃로 예열온도가 상승하면 인장강

Table 4 Mechanical properties of weld metals

Shielding Gas	Tensile properties			Impact Energy(J)		DT Energy(J)	
	Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	El.(%)	-20℃	-50℃	0℃	-30℃
Ar+5%CO ₂	796	895	20	160	105	-	-
Ar+20%CO ₂	816	870	20	101	71	1235	856
MIL 규격 ¹⁸⁾	700~850	-	17	>81	>61	>800	>540

Table 5 Mechanical properties of weld metals deposited with preheating

Base Metal (Shielding gas)	Preheating Temperature	Tensile properties			Impact Energy(J)	
		Y.S.(MPa)	T.S.(MPa)	El.(%)	-20℃	-50℃
PFS-700 (Ar+5%CO ₂)	T< 50℃	796	895	20	160	105
	~80℃	788	878	18	-	105
	~150℃	795	830	22	-	140
PFS-700 (Ar+20%CO ₂)	~150℃	776	822	21		112 (-60℃)
DS-100 (Ar+20%CO ₂)	~150℃	830	875	21	133	105

도가 크게 저하하였고 충격치는 증가하였다. 그러나 모든 경우에 있어서 인장강도는 800MPa 이상을 보여 주었으며, 항복강도는 예열온도에 무관하게 일정한 수준을 보여 주었다. DS-100강의 용접부는 150℃의 예열조건에서도 높은 강도를 보여 주고 있는데, 이는 모재 희석으로 용착금속의 C함량이 증가하였기 때문으로 사료된다.

7. 현장 적용성 평가

지금까지 기술한 내용은 용접재료를 평가하기 위하여 전용착시험을 수행한 결과이나, 실제 잠수함 건조에 적용되는 개선 형상과 용접자세에서 용접 시험편을 제작하고 평가하는 것이 필요하다. 평가를 위하여 시험편 제작과 평가는 국내 중공업사에 의뢰하였으며 그 결과를 보고하고자 한다.

중공업사에서는 자체적으로 확산성수소량을 측정하였는데, 결과는 1.19 ml/100이었다. Fig. 2의 결과와 비교하여 보면 하한치에 가깝다. 기계적시험을 위한 판재는 두께가 40mm인 PFS-700강이다. 개선 형상은 그루브 각도가 45도인 X-개선으로 하였다. 보호가스는 Ar+20%CO₂를 사용하고, 초층 용접을 위하여 이면에 세라믹 백킹재를 부착하였으며, 용접자세는 아래보기 자세와 입향상진 자세로 하였다. 아래보기 자세에서는 자동 이송장치를 사용하였으며, 입향상진 자세는 반자동으로 용접사가 용접하였다. 각각의 자세에서 적용된 용접조건은 Table 6과 같다. Fig. 3 와 Fig. 4는 각각의 자세에서 용접된 용접비드의 외관이다.

Table 6 Welding conditions

Welding Position	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cpm)	Interpass Temp. (℃)
Flat	240	23~26	23~34	70~110
Vertical up	130~140	16~17	6~12	70~110

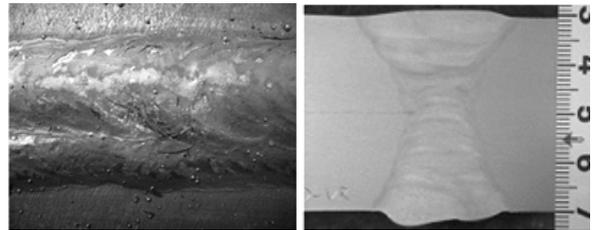


Fig. 3 Flat position weld, (a) bead appearance and (b) macrostructure

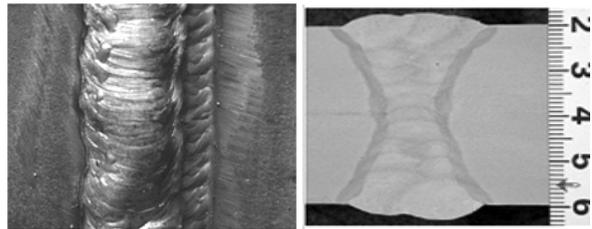


Fig. 4 Vertical-up position weld, (a) bead appearance and (b) macrostructure

기계적시험으로서 횡향 인장시험, 경도시험, 굽힘시험과 충격시험을 실시하였다. 충격시험은 표면부와 루트부에서 채취하였는데, 표면부 및 루트부 각각에서 WM, FL, FL+1mm, FL+3, FL+5mm 위치에서 각각 3개의 시험편을 채취하여 -51℃에서 시험하였다. 2개의 횡향 인장시험편과 4개의 굽힘 시험편을 채취하여 시험하였다. Table 7은 횡향 인장시험, 경도시험 및 굽힘시험 결과를 보여 준다. 횡향 인장시험편은 모두 모재에서 파단되었는데, 이는 용착금속(WM)의 경도가 모재(BM)보다 높기 때문이다. Fig. 5와 Fig. 6은 충격시험 결과이다. 충격치는 용착금속부에서 가장 낮았지만 90J 이상을 나타내었으며, 루트부가 표면부보다 약 10J 정도 낮았다.

전반적으로 기존에 사용하던 타사제품과 비교하여 충격치에서는 보다 우수하다는 평가를 받았는데, 입향상

Table 7 Mechanical properties of welded joints

Welding Position	Transverse Tensile Test		Hardness, Hv(10kg)			Side Bend
	Fracture St. (MPa)	Fracture Location	WM	HAZ	BM	
Flat	859, 859	BM	288~301	281~316	289~290	Good
Vertical up	818, 824	BM	281~321	281~313	272~283	Good

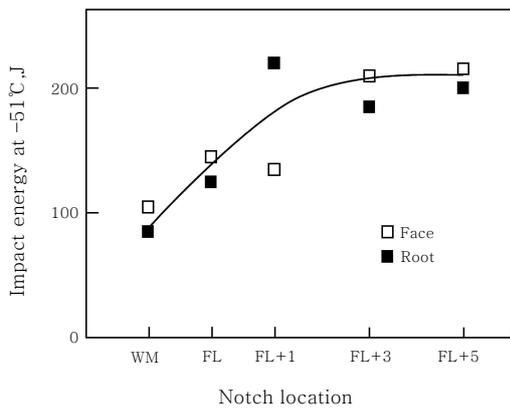


Fig. 5 Impact properties of welded joint made in flat position

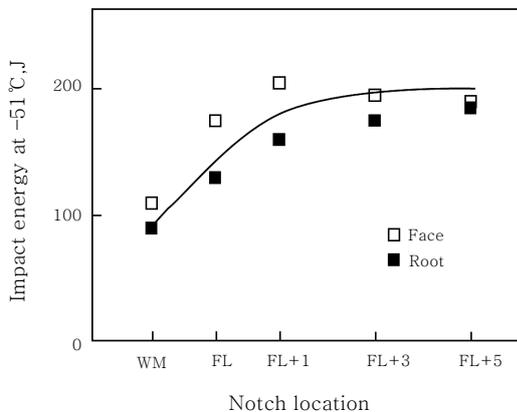


Fig. 6 Impact properties of welded joint made in vertical-up position

진 작업성에 있어서 140A 이상의 전류에서는 처짐현상이 발생하여 개선이 필요하다는 의견을 제시하였다. 이러한 문제점은 향후 펄스 용접전원을 사용하여 해결하는 방안을 모색하고자 한다.

8. 맺 음 말

무예열 강재인 PFS-700강의 잇점을 최대한 활용하기 위해서는 무예열 용접이 가능한 용접재료를 사용해야 하며, 그러한 성능을 확보한 용접재료가 최근 국내

에서 개발되었다. 본 기술보고에서는 그 중의 하나인 GMAW 용접재료의 제반 특성에 대해 기술하였다. 개발 용접재료는 Ar+(5~20)CO₂의 조성을 가지는 혼합가스용이며, 무예열 조건에서 저온균열은 발생하지 않으며, MIL 규격이 요구하는 모든 기계적성질을 만족하였다. 그리고 본 재료는 기 보고된 바와 같이 폭파변형 시험에서도 적합판정을 받았다¹⁷⁾. 그리고 최근 한국선급이 주관하여 ‘무예열 고강도 용접재료 승인 및 검사 지침’이 제정하였는데, 이 지침에 의거 무예열용(PFS-700강용)뿐만 아니라 예열용으로도 인증을 득하여, 개발 용접재료는 HY-100강 용접에도 사용 가능하다. 지금까지 전량 수입에 의존하던 잠수함용 용접재료가 국산화되었으며, 개발된 용접재료가 향후 계획되고 있는 한국형 잠수함 건조에 적용될 수 있기를 기대한다.

후 기

본 연구는 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 그리고 본 연구 개발 과정에서 용접시편 제작 및 평가에 도움을 주신 현대중공업(주) 및 대우조선해양(주) 관계자분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. S. Deshimaru, I. Hirai, K. Amano, S. Ueda, T. Uemura, K. Tsubota: Production of heavy-gauge steel plates suitable for high-heat input welding in the arctic region, Kawasaki Steel Technical Report, **no. 17**(Oct. 1987), 34
2. Y. Tomita, T. Haze, N. Saito, T. Tsuzuki, Y. Tokunaga, K. Okamoto: Development of 590-MPa class high tensile strength steel with superior HAZ toughness by copper precipitation hardening, *ISIJ Int.*, **34** (1994), 836
3. K. Hirata, T. Nakagawa, S. Takeda, Y. Hashi, M. Tada: World's first development and application of HTSS(high tensile strength steel) with yield stress of 47kgf/mm² to actual ship hull structure, *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, **44** (2007), 38
4. S. Suzuki, K. Ichimiya, T. Akita: High tensile strength steel plates with excellent HAZ toughness

- for shipbuilding, JFE Technical Report, **no. 5**(Mar. 2005), 24
5. K. Ichimiya, H. Sumi, T. Hirai: 460MPa-yield-strength-class steel plate with JFE EWEL technology for large-heat-input welding, JFE Technical Report, **no. 11**(Jube. 2008), 7
 6. Hee Jin Kim, Bong Yong Kang: Consideration of preheating temperature criteria for HY-steels, J. of KWS, **20** (2002), 631 (in Korean)
 7. MIL-S-16216: Steel plate, alloy, structural, high yield strength (HY-80 and HY-100)
 8. MIL-S-24371: Steel plate, alloy, structural, high yield strength (HY-130)
 9. MIL-S-24645: Steel plate, sheet, or coil age-hardening alloy, structural, high yield strength (HSLA-80 and HSLA-100)
 10. KSD 9515-3001-1: High strength low alloy steel, weldable
 11. E. J. Czyryca, R. e. Link, R. J. Wong, D. A. Aylor, T. W. Montemarano, J. P. Gudas: Development and certification of HSLA-100 steel for naval ship construction, Naval Engineering J., **102-3** (1990), 63
 12. H. J. Kim, B. Y. Kang: Effect of microstructural variation on weld metal cold cracking of HSLA-100 steel, ISIJ Int., **43** (2003), 706
 13. A. Cullison: Two paths, one goal: a consumable to weld HSLA 100, Welding J., **73-1** (1994), 51
 14. J. J. DeLoach, C. Null, S. Fiore, P. Konkol: The right welding wire could help the U. S. navy save millions, Welding J., **78-6** (1999), 55
 15. K. Sampath: Constraints-based modeling enables successful development of a welding electrode specification for critical navy applications, Welding J., **84** (2005), 131s
 16. Jun-suck Seo, Hyung Kun Park, C. H. Lee, Hee Jin Kim: Development of high Strength GMA welding wire with ultra-low carbon content, J. of KWJS, to be published
 17. Tae-won Park, Young-beum Song, Jin-young Kim, Sung-ho Yang, Chul-gyu Park, Jun-suck Seo, Hee Jin Kim: Explosion Bulge test underwater of 800MPa grade pre-heat free welding plate, J. of KWJS, **28** (2010), 671 (in Korean)
 18. MIL-E-23765/2E(SH): Electrodes and rods-welding, bare, solid, or alloy cored: and fluxes, low alloy steel
 19. ASTM E 604: Standard test method for dynamic tear testing of metallic materials



- 박형근
- 1981년생
- 한국생산기술연구원
- 용접재료 개발, 용접공정 개발
- e-mail : phk0217@kitech.re.kr



- 김희진
- 1953년생
- 한국생산기술연구원
- 용접재료 개발, 용접공정 개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr



- 박철규
- 1964년생
- 고려용접봉(주)
- 용접재료 개발
- e-mail : pchulg@hotmail.com