TMCP강의 용접 공정별 입열량에 따른 용접부 물성 평가 및 비교

최철영* · 지창욱* · 김형찬** · 남대근** · 김정돈*** · 김순국**** · 박영도****,†

*부산대학교 재료공학과

**한국생산기술연구원 동남권지역본부

***한창엔지니어링 기술연구소

****동의대학교 신소재공학과

Evaluation and Comparison of Weldabilities with Various Welding Processes on TMCP Steels

Chul Young Choi* Chang Wook Ji*, Hyung Chan Kim**, Dae-Geun Nam**,
Joungdon Kim***, Soon Kook Kim**** and Yeong-Do Park****,†

*School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Dongnam Regional Division, Korea Institute of Industrial Technology, Busan 618-230, Korea

***Research and Development, Hanchang Engineering, Busan 608-736, Korea

****Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

†Corresponding author : ypark@deu.ac.kr

(Received February 3, 2014 ; Revised February 13, 2014 ; Accepted February 24, 2014)

Abstract

This paper has an aim to evaluate microstructure and fracture toughness of TMCP steel weldment applied for off-shore wind tower with the focus on the effect of heat input on the weldment with various welding processes; FCAW(13kJ/cm and 30kJ/cm), SAW(62kJ/cm), and EGW(177kJ/cm). Based on experimental results developed from this study, it was found that the impact toughness of top side for TMCP steel weldments with heat input up to 62 kJ/cm satisfied the required minimum value except the EGW(177kJ/cm). The heat input and microstructure are the main factors of impact toughness. The heat input of 13kJ/cm on back side with low heat input increased the amount of grain boundary ferrite which has low impact toughness, and heat input of 177kJ/cm on top side is significant enough to produce the austenite grain growth. The compositions and sizes of inclusions which are the dominant factors for the formation of acicular ferrite were analyzed by OM and EDS. As the heat input increased, the inclusions also grew and a nucleation site decreased. The size of nonmetallic inclusions and the crack width was nearly similar, therefore the inclusions were related with the crack propagation.

Key Words : TMCP, Wind tower, FCAW, SAW, EGW

1. 서 언

최근 국제사회에서는 에너지 사용량의 급격한 증가와 자원고갈 및 환경규제 등으로 인해 지속 가능한 에너지의 전환이 요구되고 있으며, 특히 신재생 에너지로 대두되고 있는 풍력발전은 비교적 효율이 높고 시장경쟁력을 갖추고 있어 범세계적으로 기술개발 및 시장확

대가 진행되고 있다.

초기 풍력발전 시장은 육상 위주로 발달되었으나 육상단지의 포화, 터빈의 대형화, 환경 및 민원 등의 여러 가지 문제로 인해 최근에는 심해 환경에서 양호한 풍황(wind condition)을 지닌 해상 풍력발전이 새로운 대안으로 각광받고 있다. 그러나 심해환경의 해상 풍력발전은 저온 및 가혹한 환경에 설치되므로 해상구조물과 유사하게 약 20년 이상 장시간 품질유지를 위

한 구조물의 건전성 확보가 무엇보다 우선 시 된다. 특히 타워의 경우 블레이드 회전으로 인한 진동, 저항, 하중 및 충격 등에 대한 내구성이 확보되어야 하며, 그로 인해 타워에 사용되는 강재의 재질과 물 밴딩으로 제작된 원형강재 이음부 용접기술이 타워의 품질을 좌우하게 된다. 또한 용접능률 향상과 시공 등에서의 비용을 저감하기 위해 대입열 용접공정을 적용하고 있으나, 대입열 용접공정을 적용한 경우, 용접부 입열량이 50 kJ/Cm 이상이 되면 용접부 열영향부(Heat Affected Zone)의 인성이 현저하게 저하되는 단점으로 인하여 용접 시공에 제한을 받고 있는 실정이다. 해상용 풍력타워 용접부 설계를 위해서는 대입열 용접에도 불구하고 충격인성 등의 기계적 물성을 만족하는 용접공정의 적용이 선행되어야 하며, 또한 용접 특성이 우수한 강재를 개발하여야 한다. 이와 같은 이유로 인하여 기존 구조용 강재보다 다양한 성능을 보유하는 고성능 강재의 개발이 많이 진행 되었으며, 특히 대입열 용접에서의 용접부 성능을 확보할 수 있고, 타 강종에 비해 용접성이 우수한 TMCP강의 개발이 그 사례이다. 이러한 TMCP강재의 제조공법은 가속냉각 및 제어압연공정을 통하여, 결정립이 미세할 뿐만 아니라 낮은 합금성분으로 인해 용접 균열에 대한 저항성이 증가되어 대입열 용접 시 용접성이 양호한 것으로 알려져 있다¹⁾.

따라서 본 기술논문에서는 해상풍력타워 제작 시 적용 가능한 용접공정인 FCAW(Flux Core Arc Welding), SAW (Submerged arc welding) 및 EGW (Electro Gas Welding) 공법으로 TMCP강재의 용접을 실시하여, 각각의 용접방법에 따라 입열량을 변화시켜, 용착 금속부 및 열영향부의 미세조직 및 충격인성을 평가하였다. 특히 해상풍력발전기 타워가 설치되는 입지의 심해조건을 고려하여 미세조직에 따른 저온 충격인성의 특성에 대해 비교평가를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 모재 및 용접조건

본 연구에서 사용된 강재는 EH36 grade TMCP강이며, 일반적인 후판 강재 용접에 적용 가능한 FCAW, SAW 및 EGW의 용접방법으로 비교 및 평가하였다. 강재

의 화학조성 및 기계적 물성은 Table 1에 나타내었고, 시험편의 재원은 길이(L) = 1,000mm, 폭(B) = 200mm 및 두께(t) = 35mm 이다. 접합부 형상은 개선각 30°, 45° 및 70°로 각각 한면(V) 및 양면(X)개선을 실시하였으며, 루트갭은 현장여건을 감안하여 6mm로 선정하였다(Fig. 1). 용접와이어는 AWS 기준으로 FCAW(A5.29 E81 T1-K2), SAW(5.17 F7 A8-EH14) 및 EGW(A5.26 EG 70T-2)를 사용하였으며, 각각의 용접방법에 따른 입열량은 Table 2에 나타내었다. FCAW 용접의 경우 입열량을 13, 30 kJ/cm, SAW 용접의 경우 입열량은 62 kJ/cm, EGW 용접의 경우 177 kJ/cm 로 실험을 진행하였다.

2.2 충격시험(charpy impact test)

충격시험은 선급 고장력강의 EH규격을 목표로 제조된 강으로서 선급의 기준과 유사한 0°C, -30°C 및 -50°C로 온도 조건에서 선급에서 요구하는 최소 충격인성인 34J을 기준으로 하여 비교 및 평가를 하였다. 시험편 준비방법은 먼저Macro부식을 실시한 후 Notch 위치를 용융부(fusion zone), 용융선(fusion line), 용융선에서 2mm 및 5mm 위치에 선정하여 표준 샤르피(Charpy) 충격 시험편을 가공하였다. 그리고 입열량 변화에 따른 충격 시험을 실시 (ASTM E23 기준) 하고, Notch 위치 별 충격인성 차이를 비교하였다.

2.3 용접부 합금성분 및 미세조직

용접부 합금성분은 건식분석 방법인 OES(Optical Emission Spectroscopy)를 이용하여 전면(front side), 후면(back side) 및 루트부(Root face)에서 각각 3회 분석 후, 평균값을 기록하였으며, 용접부 미세조직은 나이트(Nital) 4% 용액을 이용하여 광학현미경(Optical Microscopy) 및 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)으로 각각의 시험편들을 비교·분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화학성분 분석

Table 3은 각각의 용접 입열량을 기준으로 분류된

Table 1 The chemical composition and mechanical property of EH36-TMCP steel

Material	Chemical compositions (wt%)								Mechanical properties		
EH-36 TM steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	YP (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)
	0.14	0.5	1.6	0.03	0.025	0.02	0.01	0.015	345	470-630	22

Fig. 1 Macro-section of weldments with respect to welding heat input: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm, (c) 62 kJ/cm and (d) 177 kJ/cm

용접부 OES(optical emission spectroscopy) 화학 성분 분석 결과이며, 일반적으로 Ni 및 Mn 등의 화학

성분은 용접부 파괴인성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Evans 등은 Mn과 Ni의 상호작용에 따라 용접부 파괴인성이 증가 또는 감소되는 경향에 대해 보고하였으며, 특히 1.4%의 Mn에서 가장 좋은 인성을 확보할 수 있다고 보고하였다²⁾. 이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 각각의 입열량을 기준 용접부 화학 성분 분석을 진행하였다. 그 결과, 대부분의 조건에서 화학조성 편차가 크지 않기 때문에 파괴인성에 미치는 영향이 적을 것으로 판단된다. 다만 62kJ/cm에서의 Mn 화학조성은 타 입열에 비해 높은 수치를 보이지만, 상대적으로 낮은 Ni의 화학조성으로 인하여 Evans 등이 주장한 Mn 및 Ni의 상호작용을 고려한다면 그 영향은 매우 미비할 것으로 판단된다.

3.2 충격인성 및 미세조직

일반적으로 충격인성에 영향을 미치는 주요인자로는 화학조성 및 용접금속 내의 산소량 등이 있으며, 용접 재료에 지배적인 영향을 받는 용접금속의 경우 Ni 또는 Mn 함량이 충격인성에 매우 중요한 역할을 하게 된다³⁾. 특히 용접부 미세조직으로는 침상 페라이트(acicular ferrite)가 저분율로 생성되는 경우, 결정립계 페라이트(grain boundary ferrite), Widmanstätten 페라이트, 상부 배이나이트(bainite)의 생성 및 오스테나이트(austenite) 결정립이 조대화 되는 경우 등이 충격인성을 저하시키는 원인으로 보고 되었다^{4,5)}. Fig. 2는 각각의 입열량에 따른 전면부(front side) 충격인성 결과이며, 충격지표는 선급에서 요구하는 최소 충격인성인 34J을 기준으로 하였다. 실험 결과 13 kJ/cm, 30 kJ/cm,

Table 2 The welding parameters used for each welding processes.

Heat Input (kJ/cm)	Weld Process	Position	Ampere (A)	Volt (V)	speed (cm/min)	Number of Pass	
						Top	Bottom
13	FCAW	1G	280	31	41	37	-
30	FCAW	2G	220	26	12	15	-
62	SAW	1G	800	34	26	6	1
177	EGW	3G	380	38	4.9	1	-

Table 3 Chemical compositions of welding heat input from OES spectrum analysis

Heat Input (kJ/cm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	*C _{eq}
13	0.05	0.40	1.25	0.02	0.010	0.017	1.26	0.01	0.004	0.21
30	0.05	0.38	1.23	0.02	0.010	0.018	1.23	0.01	0.006	0.20
62	0.09	0.26	1.67	0.02	0.008	0.023	0.08	0.06	0.006	0.25
177	0.06	0.29	1.45	0.02	0.010	0.023	1.57	0.02	0.058	0.22

Fig. 2 Charpy impact test results with respect to heat input from first side: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm, (c) 62 kJ/cm and (d) 177 kJ/cm

62 kJ/cm 및 177 kJ/cm의 모든 입열 조건에서 충격인성이 34 J 보다 훨씬 높았지만, Fig. 2(d) 177 kJ/cm의 -50 °C 조건에서만 용융부(Weld Metal)에서의 충격인성이 35 J로 선급기준에 거의 근접하였다. 다른 조건에 비하여 상대적으로 낮은 충격인성의 원인을 분석하기 위하여 용융부 미세조직을 관찰하였다. Fig. 3은 입열량의 변화에 따른 전면부(first side) 용접부의 미세 조직 사진이다. 용융부의 미세조직은 입열량에 따라 결정립 크기에 차이가 있으며, 또한 불규칙한 방위 관계가 존재하였다. 특히 Fig. 3(d)에서는 높은 입열로 인하여 주상정(columnar structure) 형태의 조대한 오스테나이트 결정립이 타 입열량에 비해 상대적으로 크게 분포되어 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 오스테나이트 결정립의 조대화로 인하여 용접부 충격인성이 저하 된것으로 판단된다. 또한 용접부에서의 높은 입열량으로 인하여 냉각속도가 감소하여 고온 변태상의 형성이 용이할 뿐만 아니라, 조대한 미세조직에 기인한 경화능 또한 감소하였기 때문에 충격인성이 감소 한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 입열량 변화에 따른 후면부(back side)의 충격인성 결과이다. 모든 입열 조건에서 선급기준을 만족하는 34 J 이상의 충격인성이 확인되었다. 그러나,

Fig. 4(a)에 도시 된 13 kJ/cm의 -50 °C 용접부에서는 선급 기준의 충격인성을 만족하였지만 충격인성(39J)이 다른 입열 조건에 비하여 낮았다. 이러한 낮은 충격인성의 원인을 판단하기 위하여 미세조직을 관찰하여 각각의 상에 따른 상분율을 비교해보았다. Fig. 5는 입열량의 변화에 따른 후면부(second side) 용접부의 미세 조직 사진이다. Table 4에 각 입열량 수준별 Front side와 Back side 용접부의 침상 페라이트(acicular ferrite)와 결정립계 페라이트(grain boundary ferrite)의 분율 정리 하였다. Fig. 5 및 Table 4의 결과를 바탕으로, 13 kJ/cm 입열량 Fig. 5 (a)의 조건에서의 ferrite 분율을 비교해 보면, 타 입열조건에 비해 상대적으로 높은 결정립계 페라이트 상이 관찰되었고, 30kJ/츠 (Fig. 5(b)) 및 177 kJ/츠(Fig. 5(c))에서는 미세조직 상분율 중 침상 페라이트가 약 95% 이상, 결정립계 페라이트가 약 5% 미만으로 확인되었다(Table 4). 낮은 충격인성을 보인 13 kJ/cm입열의 경우, 결정립계 페라이트가 21.9% 인 반면, 충격인성을 향상시키는 침상 페라이트가 약 78.1 %로 다른 입열 조건에 비해 다소 낮은 것을 알 수 있다(Table 4). 낮은 입열량으로 인하여 오스테나이트 결정립이 감소하였고, 상대적으로 결정립계 페라이트의 생성을 증가시

Fig. 3 Optical microscopy of weld metal with respect to heat input from front side: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm, (c) 62 kJ/cm and (d) 177 kJ/cm

켰기 때문에 결정립계 페라이트는 증가하게 되고, 탄화물의 집적으로 인해 균열 경로를 제공하는 역할을 하게 된다⁶⁾. 이와 같은 원인으로 인하여 13kJ/cm의 입열조건에서 용접부 충격인성이 감소하였다고 판단된다.

3.3 비금속 개재물

일반적으로 비금속 개재물은 용접 시 입열량의 증가에 따라 성장되는 것으로 알려져 있으며 Ni, Mn 및 Mo 등의 합금원소는 침상 페라이트 형성을 촉진시킨다. 또한 Ashby는 비금속 개재물 크기가 0.2 μm 이하일 경우에는 핵 생성을 위한 충분한 에너지를 갖지 못하고, 1.5 μm 이상에서는 단위 면적당 비금속 개재물의 개수가 적어지기 때문에 침상 페라이트 핵 생성처(Nucleation Site)가 감소된다고 보고하였다⁷⁾. 입열량의 변화에 따른 비금속 개재물의 형성 및 성장이 충격인성에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 비금속 개재물과 개재물의 성분에 대하여 분석해보았다. 입열량 차이에 따른 용접부 내의 비금속 개재물을 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 대부분의 비금속 개재물은 수 μm 내의 크기로 흰색에 둥근 형상을 띄고 있으며, 개재물 주변을 따라 흰색의 침상 페라이트 및 결정립계 페라이트 등이 분포하였다.

비금속 개재물의 화학성분을 EDS를 이용하여 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 낮은 입열 조건에서는 O, Ti 및 Mn 등이 높은 입열 조건에 비해 상대적

으로 높게 검출되었으며, 이 같은 결과를 바탕으로 대부분의 비금속 개재물이 티타늄 산화물 또는 망간 산화물인 것으로 판단된다. 티타늄 산화물은 lattice matching 이론에 의해 침상 페라이트를 촉진시키는 것으로 알려져 있으며⁶⁾, Mn 산화물은 오스테나이트 안정화 원소로써 비금속 개재물과 더불어 침상 페라이트 성장을 촉진하는 것으로 알려져 있다⁹⁾. Fleck 등은 비금속 개재물은 그 크기에 따라 침상 페라이트 생성 정도가 달라진다고 보고하였으며¹⁰⁾, 이를 바탕으로 본 연구에서도 비금속 개재물의 크기를 측정하였다. 입열량의 차이에 따라 용접부의 개재물 크기를 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 비금속 개재물 크기는 replica 실험을 통하여 각각의 용접부에서 300개씩 측정하였다. 그 결과 입열량이 증가할수록 비금속 개재물의 크기는 증가되었으며, 이는 입열량의 증가와 함께 비금속 개재물도 성장하는 것으로 관찰되었다. Fig. 7(a)의 13 kJ/cm 및 Fig. 7(b)의 30 kJ/cm에서도 Ashby의 연구결과와 유사하게 침상 페라이트를 생성하기에 충분한 크기의 비금속 개재물이 분포하였다. 그러나 Fig. 7(d)의 177 kJ/cm에서는 높은 입열에 의해 단위 면적당 비금속 개재물의 개체수가 감소되었다. 이로 인하여 침상 페라이트 핵 생성처가 감소하여 침상 페라이트의 생성이 감소한 것으로 판단된다. Fig. 7(c)의 62 kJ/cm 입열량에서는 비금속 개재물의 크기 및 분포가 감소하였다. Table 3의 결과를 보면, 62 kJ/cm의 입열량에서의 Ni 함량은

Fig. 4 Charpy impact test results of heat input from back side: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm and (c) 177 kJ/cm

0.08%로 타 입열량에 비해 약 15~19배 적었다. 결국 용접부의 낮은 Ni함량으로 인하여 비금속 개재물의 성장속도가 감소한 것으로 판단된다. 낮은 충격인성의 결과 값을 가진 충격시험편의 파단 경로 및 파단 형태를 분석하기 위해 SEM을 통하여 미세조직을 관찰해보았다. Fig. 8은 13 kJ/cm 입열량 조건(후면부) 과 입열량 177 kJ/cm 입열량 조건(전면부)에서의 충격시험편의 파단면을 관찰한 결과이다. 두 시험편의 파단면을 관찰한 결과, 두 시험편 모두 결정립계 페라이트를 경계로 파단이 발생되었고, 파단형태는 취성파괴의 형태를 보이고 있으나 부분적으로 연성파괴도 발생되었다. Farrar 와 Okada 등이 보고한 바와 같이 결정립계

Fig. 5 Optical microscopy of weld metal depending on heat input from back side: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm and (c) 177 kJ/cm

Table 4 Microstructural constituents of acicular ferrite and grain boundary ferrite

Heat Input (kJ/cm)	Location	AF	GBF
13	Front side	98.9	1.1
	Back side	78.1	21.9
30	Front side	95.3	4.7
	Back side	99.1	0.9
62	Front side	94.2	5.8
	Back side	96.7	3.3
177	Front side	99.3	0.7
	Back side	99.1	0.9

Fig. 6 SEM micrograph of inclusion weld metal with respect to heat input: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm, (c) 62 kJ/cm and (d) 177 kJ/cm

Table 5 Chemical compositions of welding joints measured from EDS spectrum analysis

Heat Input (kJ/cm)	C	O	Cu	S	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Total
13	3.4	14.1	3.1	1.3	2.3	3.0	13.6	8.7	50.5	100
30	6.9	12.5	1.7	1.2	2.3	1.8	11.7	6.5	55.4	100
62	6.3	6.8	3.3	1.6	4.3	1.2	4.6	3.9	68.0	100
177	3.1	2.0	1.0	1.1	0.6	0.7	0.9	2.8	87.8	100

페라이트가 균열 진전의 이동경로를 제공하여 충격인성에 유해한 영향 미쳤을 것으로 사료된다^{11,12)}. Fig. 8(a)의 13 kJ/cm 입열량조건의 경우 후면부는 결정입계를 따라 파단이 진행되면서 내부에서 균열이 발생하였다. 이는 침상 페라이트 조직에 의해 균열 진전의 방해 받아 내부에서 균열이 일부 진행되었기 때문이다. Fig. 7(d)의 비금속 개재물 크기와 Fig. 8(b)의 등근 형태의 균열폭이 유사한 크기인 것으로 관찰되었다. 이는 Koh가 보고한 것과 같이 초기 균열발생 시 비금속 개재물에 의해 불균일 응력분포가 발생되어 균열이 진행되었기 때문이다¹³⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 해상풍력타워 제작 시 적용 가능한 용접공정인 FCAW, SAW 및 EGW에 따라 입열량을 변

화시켜 기계적 물성평가를 실시하였으며, 특히 해상풍력타워의 심해조건 설치를 고려하여 저온 충격인성에 대해 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 화학성분 분석결과, 각각의 입열에 따른 용접부는 상대적인 화학조성 편차가 크지 않아 파괴인성에 미치는 영향이 미비한 것으로 판단된다.

2) 177 kJ/cm의 입열 조건, -50℃에서 충격인성이 감소한 이유는 전면 용융부의 경우 높은 입열에 의한 고온 변태상의 형성과 조대한 미세조직 형성으로 판단된다.

3) 13 kJ/cm의 입열 조건, -50℃에서 후면 용접부 충격인성이 감소하였다. 이는 결정립계 페라이트가 많이 형성되었고, 상대적으로 충격인성을 증가시키는 침상페라이트가 낮은 비율로 형성되고, 탄화물의 집적으로 균열을 제공하는 역할을 하였기 때문이다.

4) 낮은 충격인성을 보인 용접부 파단면을 관찰한 결과, 비금속개재물의 크기와 거의 유사한 균열폭이 관찰

Fig. 7 Size of inclusion in weld metals with respect to heat input: (a) 13 kJ/cm, (b) 30 kJ/cm, (c) 62 kJ/cm and (d) 177 kJ/cm

Fig. 8 SEM microstructures of fracture surface on weld metal: (a) 13 kJ/cm and (b) 177 kJ/cm

되었으며, 초기 균열발생 시 비금속 개재물에서 불균일 응력분포가 발생되어 균열이 진행된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음. (S2046923, 친환경 LNG 선박용 가스 연료장치의 초저온 연료 저장 용기 개발)

References

1. H. J. Kim : TMCP강의 개발 및 적용, Journal of KWS

4-2 (1986), 1-11 (in Korean)

- 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
- Y. T. Shin, S. W. Kang and M. H. Kim : Evaluation of Fracture Toughness and Microstructure on FCA Weldment According to Heat Input, Journal of KWS. **26-3** (1988), 265-274 (in Korean)
- J. K. Brownlee, D. K. Matlock and G. R. Edwards, Effect of Al and Titanium on the Microstructure and Properties of Microalloyed Steel Weld Metal, Advances in Welding Science and Technology. 245(1986)
- H. W. Lee and D. E. Ko : Microstructures and Impact Properties of 50mm Single Pass Electrode Gas Weldment for EH36 TMCP steels, Journal of KWS. **17-3** (1999), 244-249 (in Korean)
- H. J. Kim and B. Y. Kang, Effect of Microstructure on Cold Cracking in Weld Metal, Journal of KWS. **21-1** (2003), 8-13 (in Korean)
- M. F. Ashby and K. E. Easterling : A First Report on Diagrams for Grain Growth in Welds, Acta Metallurgica. **30** (1982), 1969-1978
- H. J. Kim and B. Y. Kang : Role of Non-Metallic Inclusions on the Nucleation of Acicular Ferrite, Journal of KWS. **18-6** (2000), 696-703 (in Korean)
- J. H. Lee, S. H. Kim, B. H. Yoon, H. T. Kim, S. C. Kil and C. H. Lee : Microstructural Characteristics

- of 800MPa Grade High Strength Steel Weld Metals, Journal of KWJS. **29-1** (2011), 65-73
10. N. A. Fleck, O. Grong, G. R. Edwards and D. K. Matlock, The Role Metal Wire and Flux Composition in Submerged Arc Weld Metal Transformation Kinetics, Welding Journal. **65-5** (1986), 113-121
11. R. A. Farrar and P. L. Harrison : Acicular Ferrite in Carbon Manganese Weld Metals: An Overview, Journal of Materials Science. **22-11** (1987), 3812-3820

12. H. Okada, Effects of M-A Constituents on Fracture Behaviour of Weld HAZs: Deterioration and Improvement of HAZ Toughness in 780 and 980MPa Class HSLA Steels Welded with High Heat Input (5th report), Welding International. **8-9** (1995), 621-628
13. J. H. Koh : Determination of Lamellar Tearing Initiation Temperatures and the Effect of Non-metallic Inclusions on Tear, Journal of KWS. **10-2** (1992), 43-50 (in Korean)

- 최철영
- 1977년생
- 부산대학교 재료공학과
- 용접야금, 저항용접, 후판용접
- e-mail : bassxx@hanmail.net

- 지창욱
- 1981년생
- 부산대학교 재료공학과
- 저항용접, 용접야금, 전기화학
- e-mail : jcw30749@nate.com

- 김형찬
- 1970년생
- 한국생산기술연구원
- 전기화학, 표면처리, 부방식
- e-mail : chancpu@kitech.re.kr

- 남대근
- 1970년생
- 한국생산기술연구원 수석연구원
- 표면개질, 브레이징, 연료전지 부품
- e-mail : dgnam@kitech.re.kr

- 김정돈
- 1974년생
- (주)한창엔지니어링 R&D센터
- 생산자동화, 기계설계, 초저온공학
- e-mail : jungdon.kim@gmail.com

- 김순국
- 1961년
- 동의대학교 신소재공학과
- 분말야금, 주조 및 복합재료
- e-mail : ksk@deu.ac.kr

- 박영도
- 1970년생
- 동의대학교 신소재공학과
- 용접야금, 저항용접, 수소취성
- e-mail : ypark@deu.ac.kr