

# 대입열 EH36-TM강의 Tandem EGW 용접부 미세조직 및 기계적 성질

정홍철\* · 박영환\* · 안영호\* · 이종봉\*

\*POSCO 기술연구소 접합연구그룹

## Mechanical Properties and Microstructures of High Heat Input Welded Tandem EGW Joint in EH36-TM Steel

Hong-Chul Jeong\*, Young-Hwan Park\*, Young-Ho An\* and Jong-Bong Lee\*

\*POSCO Technical Research Labs., Pohang 790-785, Korea

### Abstract

In the coarse grained HAZ of conventional TiN steel, most TiN particles are dissolved and austenite grain growth easily occurs during high heat input welding. To avoid this difficulty, thermal stability of TiN particles is improved by increasing nitrogen content in EH36-TM steel. Increased thermal stability of TiN particle is helpful for preventing austenite grain growth by the pinning effect. In this study, the mechanical properties and microstructures of high heat input welded Tandem EGW joint in EH36-TM steel with high nitrogen content were investigated. The austenite grain size in simulated HAZ of the steel at 1400°C was much smaller than that of conventional TiN steel. Even for high heat input welding, the microstructure of coarse grained HAZ consisted of fine ferrite and pearlite and the mechanical properties of the joint were sufficient to meet all the requirements specified in classification rule.

\* Corresponding author : jeonghc@posco.co.kr

(Received December 30, 2006)

Key Words : EH36-TM steel, Tandem EGW joint, HAZ toughness, Austenite grain size, TiN articles, High nitrogen content

## 1. 서 론

최근 건조되는 선박은 점차로 대형화 추세에 있으며 특히 컨테이너선은 10,000TEU급 이상의 초대형 컨테이너선이 건조되고 있다. 이러한 대형 컨테이너선의 상부구조 및 Hatch coming부위에는 70mm두께이상의 고강도 후물재가 사용되고 있으며, 또한 용접생산성의 향상을 위하여 대입열 용접이 많이 적용되고 있는 추세이다.

그러나 대입열 용접을 적용하면 강재의 용접열영향부 중 특히 용융선 근처의 용접열영향부는 결정립 조대화 및 취약한 미세조직 형성으로 대입열 용접부 인성이 크게 저하하고 모재에 가까운 용접열영향부에서는 연화가

발생하여 용접부의 강도가 저하되는 문제점이 있다. 이러한 대입열 용접부의 문제점을 해결하기 위하여 철강사들은 대입열 용접열영향부 미세조직 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

종래부터 AlN 및 TiN 등의 미세한 석출물을 이용한 용접열영향부의 고인성화 기술이 실용화되고 있지만 대입열 용접시 용융선 근처의 용접열영향부는 1400°C 이상으로 가열되어 석출된 기존 석출물이 분해되거나 성장하여 오스테나이트 결정립은 조대화되고 냉각과정에서 취약한 미세조직이 형성되어 대입열 용접열영향부의 인성이 저하하는 요인이 되고 있다<sup>1)</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Yamamoto 등<sup>2)</sup>은 질화물보다 고온에서 안정한 Ti-산화물을 이용하여 조대화된 오스테나이트 결정립내에 인성이 우수한 IFP(Intragranular

Ferrite Plate, 입내 침상 페라이트)를 형성시키는 Ti-산화물상을 개발하였다. 최근에는 강재내에 산화물 및 탄 질화물을 미세하게 분산시켜 대입열 용접시 용접 열영향부내에서 입내 침상 페라이트 변태를 촉진시켜 대입열 용접열영향부 인성을 확보할 수 있는 HTUFF (Super High HAZ Toughness Technology with Fine Microstructure imparted by Fine Particles) 강도 개발되었다<sup>3)</sup>. HTUFF강의 경우 대입열 용접열영향부의 오스테나이트 결정립 크기는 약 100 $\mu$ m 수준이라고 보고하고 있다.

한편 TiN석출물은 열역학적으로 안정하고 낮은 solubility로 인하여 결정립 미세화에 효과적인 석출물이라고 알려져 있다<sup>4-6)</sup>. 그러나 일반 TiN강의 대입열 용접열영향부에서 용접열에 의하여 미세 TiN석출물이 분해되거나 성장하여 본래의 기능을 상실하여 오스테나이트 결정립 조대화를 초래하고 있다. TiN석출물의 고온 안정성을 증가시키기 위한 한가지 방법은 질소량을 증가시켜 Ti/N비를 hypostoichiometric composition으로 유지하는 것이다. 즉 Fig. 1과 같이 오스테나이트 온도 영역에서 온도에 따른 평형상태의 TiN의 solubility product를 비교하여 보면 동일 Ti함량의 조건에서 질소량을 증가시키는 것이 통상수준의 질소함량에서보다 고온에서 기지에 고용되는 Ti양이 감소하여 TiN석출물이 분해되거나 성장되는 양이 감소하여 TiN석출물의 고온안정성을 대폭 증가시킬 수 있다<sup>7)</sup>.

따라서 본 연구에서는 이러한 고온에서 안정한 TiN 석출물을 미세분산시킨 대입열 선급재(EH36-TM)의 현장생산재에 대하여 대입열 Tandem EGW 용접부 기계적 성질과 미세조직에 대하여 조사하였다.

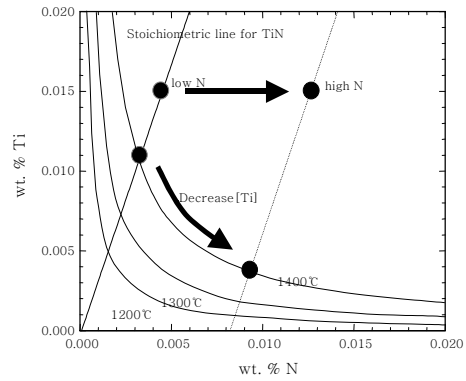


Fig. 1 Solubility product of TiN in austenite temperature range

## 2. 시험재 및 실험방법

### 2.1 시험재

본 연구에 사용한 시험재는 현장생산재인 두께 80mm의 선급재인 대입열 EH36-TM강을 사용하였다. 시험재의 화학성분은 Table 1에 나타내었다. 시험재는 탄소함량이 0.06%이고, 미세 TiN 석출물의 고온 안정성 향상을 위하여 고질소가 첨가된 것이 특징이다. 시험재의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 시험재의 항복강도 및 인장강도는 각각 444MPa 및 562MPa를 나타내었다. 또한 시험재의 -40°C에서의 충격인성은 311J로 선급 규격에서 요구하는 수준을 모두 만족하였다.

### 2.2 실험방법

본 연구에서는 TiN석출물의 고온 안정성을 조사하기 위하여 용접열cycle재현 시험기를 이용하여 시험재의 재현 용접열영향부의 오스테나이트 결정립 크기를 조사

Table 1 Chemical composition of material used (wt%)

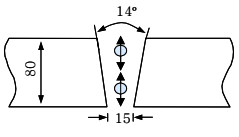
	C	Si	Mn	P	S	S-Al	Others	Ceq*
EH36-TM steel	0.06	0.12	1.54	0.004	0.002	0.023	Cu Ni, Ti, N	0.36

\* C<sub>eq</sub>(%) = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15

Table 2 Mechanical properties of material used

Thick. (mm)	Tensile Properties				Charpy properties				
	Position-Direction	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	Position-Direction	vE <sub>-40°C</sub> (J)			Ave.
						1	2	3	
80	1/4 thick. -T	444	562	23	1/4thick. -L	330	301	303	300
	Spec.	≥355	490~630	≥21		≥35			≥50

Table 3 Tandem EG welding condition and welding consumables used

Groove detail	Shielding Gas	Welding consumables	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
	100%CO <sub>2</sub> 45 ℓ/min	CS-71ETF (1.6mm)	400	44	32	627
		CS-71ETR (1.6mm)	360	44	32	

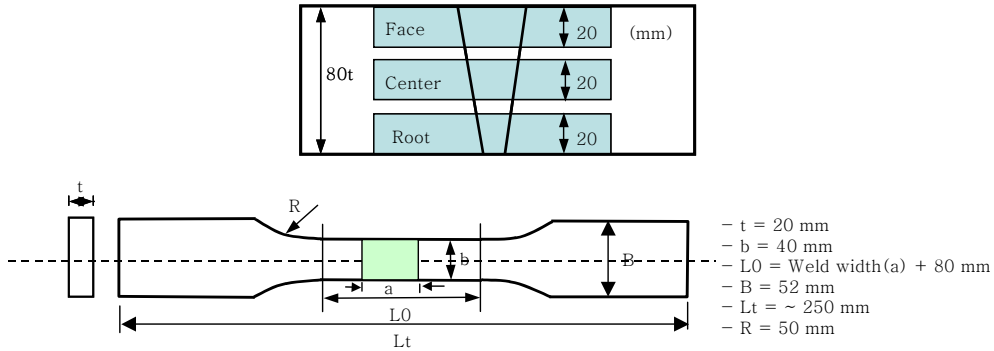


Fig. 2 The position of tension test specimen and configuration of tension test specimen in Tandem EG welded joint

하였다. 최고가열온도는 1200에서 1400℃로 변화시켜 급가열시키고 1초간 유지시킨 후 급냉시켜 Image analyzer를 통하여 평균 오스테나이트 결정립 크기를 조사하였다. 재현 용접열영향부내의 석출물은 TEM replica를 이용하여 관찰하였다. 또한 대입열 용접부 특성을 평가하기 위하여 대입열 Tandem EGW용접을 실시하고 용접부에 대하여 용접부 기계적 성질과 미세 조직을 조사하였다. Table 3에서는 Tandem EGW용접조건을 나타내었다. 용접입열량은 627kJ/cm를 적용하였으며, 본 실험에 사용한 용접재료는 국산 Tanem EGW 용접재료인 CS-71ETF/71ETR(1.6mm dia.)을 사용하였다. Fig. 2에는 용접부 인장시험편의 형상을 나타내었고, 각 두께별 평가 부위를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 시험재의 최고가열온도에 따른 재현 용접열영향부의 오스테나이트 결정립 크기변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 최고가열온도가 증가함에 따라 오스테나이트 결정립의 크기는 증가하고, 통상의 TiN강의 경우에서도 최고가열온도가 1400℃에서의 오스테나이트 결정립 크기는 약 200μm이상으로 증가한다<sup>8)</sup>. 그러나 본 시험재의 경우 최고가열온도가 1400℃에서 측정된 오스테나이트 결정립 크기는 55μm수준으로 일반강의 약 1/4수준으로 오스테나이트 결정립 크기가 미세함을

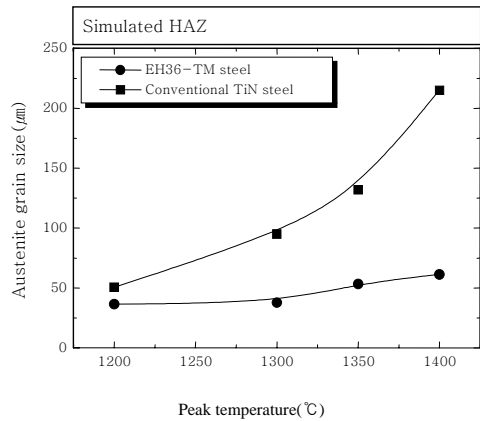


Fig. 3 Variation of austenite grain size in simulated HAZ with peak temperature

알 수 있고, 이것은 고온에서 안정한 TiN석출물에 기인한 것으로 모재 상태에서 존재하는 TiN석출물이 고온의 용접열영향부에서도 안정하게 존재하여 오스테나이트 결정립 성장에 pinning역할을 하는 것으로 사료된다. Fig. 4는 시험재를 최고가열온도로 가열한 후 급냉하여 오스테나이트 결정입체를 부식시켜 오스테나이트 결정립 크기를 나타낸 조직사진이다. 최고가열온도가 증가함에 따라 오스테나이트 결정립 크기는 증가하는 경향을 보이고 있지만 최고가열온도가 1400℃인 경우에서도 시험재는 약 55μm 크기의 오스테나이트 결정립 크기를 보이고 있는 반면에 동일 조건에서의 일반

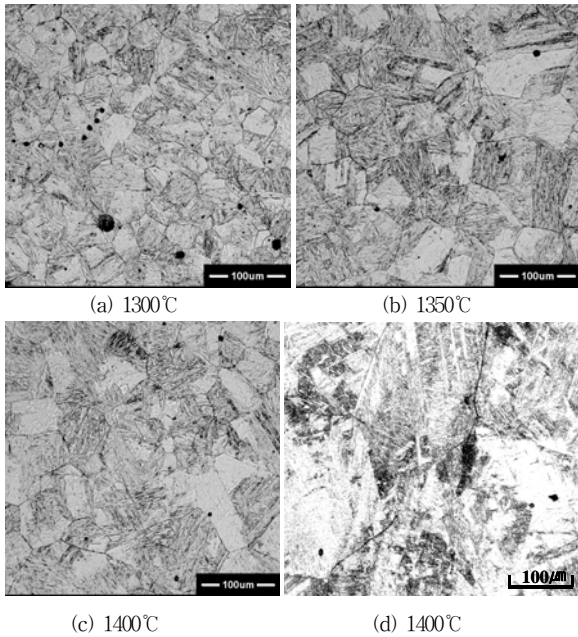


Fig. 4 The microstructure showing austenite grain boundary after heating to peak temperature and quenching a) 1300°C b) 1350°C c) 1400°C in EHB6-TM steel d) 1400°C in conventional TiN steel

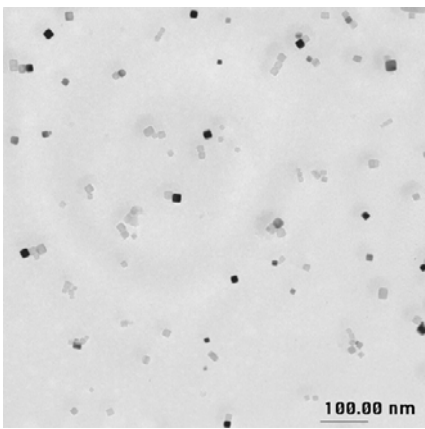


Fig. 5 The TEM micrographs of TiN particles in simulated HAZ

TiN강의 재현 용접열영향부 오스테나이트 결정립은 약 200 $\mu$ m크기 이상의 크기를 보이고 있다. Fig. 5는 최고 가열온도를 1400°C로 하고  $\Delta t_{800-500}$ 를 60초인 재현 용접열영향부의 석출물을 TEM replica를 이용하여 관찰한 사진이다. 대입열 EHB6-TM강의 재현 용접열영향부내에는 20~30nm크기의 미세한 TiN석출물이 다수 존재하고 있으며, 이러한 TiN석출물은 고온으로 가열되어도 분해되거나 거의 성장하지 않고 존재하여 오스테나이트 결정립 성장억제에 기인하는 것으로 사료된다. Fig. 6은 627kJ/cm의 입열량으로 80mm두께의

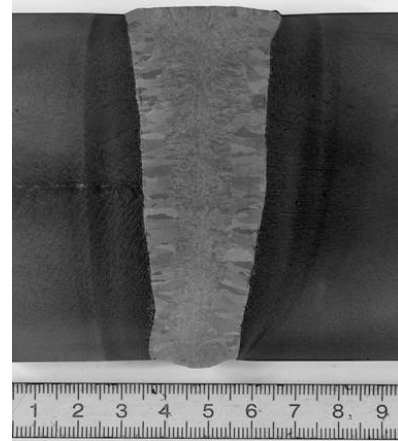


Fig. 6 Macrostructure of Tandem EG welded joint (627kJ/cm)

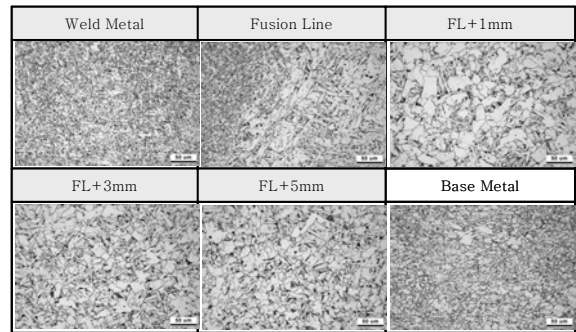


Fig. 7 Microstructure of Tandem EG welded joint

시험재에 대하여 Tandem EGW 용접부의 Macro조직 사진을 나타낸 것이다. 용접금속은 과도한 입열량으로 인하여 조대한 주상정 조직을 보이고 있다. Fig. 7은 Tandem EGW 용접부의 부위별 미세조직을 관찰한 사진이다. 용접금속은 대입열 용접에서도 미세한 침상 페라이트로 구성되어 있으며, 용융선(Fusion line)부위는 통상적인 조대한 결정립에 조대한 입계 페라이트 및 Widmanstatten 페라이트와는 달리 입계 페라이트가 크게 연결되어 있지 않고 나누어져 있으며, 입내에는 침상 페라이트 조직을 보이고 있다. 이것은 전술한 고온에서 안정한 TiN석출물이 대입열 용접열영향부에서 오스테나이트 결정립 성장을 억제하고 입내 침상 페라이트 변태를 촉진하기 때문인 것으로 사료된다. FL+1mm에서도 약간 조대한 등근형태의 polygonal 페라이트가 주로 형성되어 있으며, FL+3mm 및 FL+5mm위치로 갈수록 미세한 polygonal 페라이트 조직 및 펄라이트 조직으로 구성되어 있다. 이것은 용접금속부에서 멀어질수록 가열되는 온도가 낮아져 오스테나이트 결정립 성장은 억제되고 분해되지 않고 존재하는 미세한 TiN석출물이 냉각과정에서 페라이트 변태

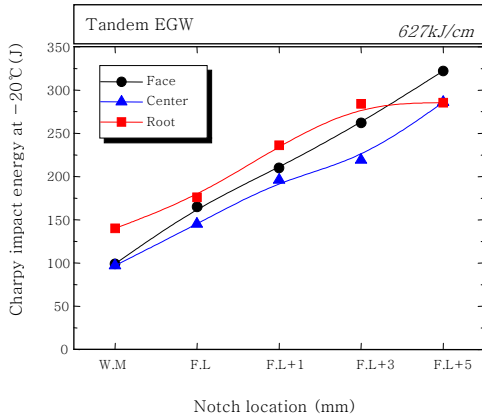


Fig. 8 Charpy impact energy of Tandem EG welded joint of EH36-TM steel

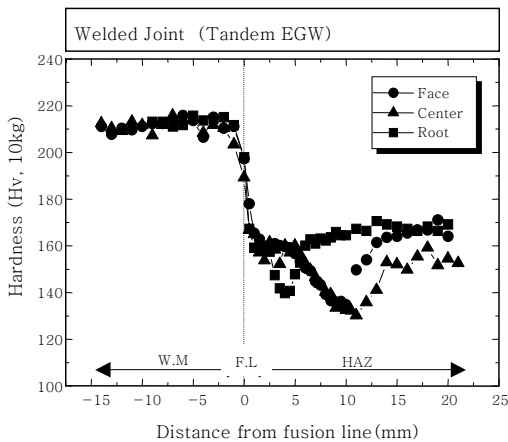


Fig. 9 Hardness distribution of Tandem EG welded joint of EH36-TM steel

를 촉진하는 것으로 판단된다. Fig. 8은 627kJ/cm의 입열조건에서의 Tandem EGW 용접부의 부위별 -20°C 충격인성을 나타낸 것이다. 용접부 부위(용접금속, F.L, F.L+1mm, F.L+3mm, F.L+5mm)별 및 위치(Face, Center, Root)별 전 범위에서 모두 약 100J이상의 -20°C 충격인성을 보이고 있으며, 선급 규격에서 요구하는 34J이상의 충격인성을 충분히 만족하고 있다. 이것은 전술한 용접부의 미세조직과 연관시켜 보면 고온에서 안정한 고질소 TiN석출물이 대입열 용접열영향부에서 오스테나이트 결정립 성장을 크게 억제하여 용접열영향부의 경화능력을 감소시키고 또한 페라이트 변태를 촉진시켜 대입열 용접열영향부의 충격인성을 확보할 수 있는 것으로 사료된다. Table 4는 대입열 Tandem EGW 용접부의 인장특성을 나타낸 것이다. 대입열 용접부의 다른 한가지 어려움은 대입열 용접열영향부의 연화이다. 즉 대입열 용접시 용접열영향부중 모재에 가까운 용접열영향부에서는 페라이트의 조대화로 인하여 용접부의 연화가 발생하여 규격에서 요

Table 4 Mechanical properties of Tandem EG welded joints

Direction	Position	YS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	Fractured position
L	Face	390	503	25	HAZ
		389	503	24	HAZ
		395	507	24	HAZ
	Center	381	499	24	HAZ
		382	499	23	HAZ
		384	488	21	HAZ
	Root	393	488	25	HAZ
		395	506	24	HAZ
		395	506	25	HAZ
EH36 spec.		≥355	490~630	≥21	-

구하는 강도보다 인장강도가 저하하는 문제가 있다. 그러나 본 시험재의 경우 627kJ/cm의 용접입열범위에서도 Face, Center 및 Root부의 인장시험 결과 모두 용접열영향부에서 파단이 되었지만 인장강도는 499~507MPa 범위로 선급규격에서 요구하는 490~630MPa 범위를 모두 만족하고 있다. Fig. 9는 대입열 Tandem EGW 용접부의 경도분포를 나타낸 것이다. 용접금속부는 약 210Hv의 경도 범위를 보이고 있으며, F.L근처의 용접열영향부에서의 경도는 약 160Hv를 보이고 있으나 Root부의 경도분포는 약 140Hv로 감소하고 10mm위치에서 Center부의 경도가 가장 낮은 분포를 보이고 있다. 이것은 용접열영향부중 용접열에 의하여 모재의 페라이트가 성장하여 경도가 낮아지는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

두께 80mm의 대입열 EHB6-TM강에 대하여 627kJ/cm의 입열량을 적용한 Tandem EGW 용접부의 미세조직과 기계적 성질을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대입열 EHB6-TM강의 재현 용접열영향부 1400°C에서의 오스테나이트 결정립 크기는 약 55 $\mu$ m 수준으로 일반 TiN강의 오스테나이트 결정립 크기보다 매우 작은 수준이며, 이것은 고질소 TiN석출물의 고온 안정성에 기인한다.
- 2) 대입열 EHB6-TM강의 Tandem EGW 용접부의 충격인성 평가결과 용접부 전 범위에서 선급 규격에서 요구하는 충격인성 수준을 충분히 만족하였고, 특히 국산 용접재료를 사용한 Tandem EGW 용접금속부의 -20°C 충격인성도 100J이상의 충격인성을 확보할 수 있었다.

3) 대입열 EH36-TM강의 Tandem EGW 용접부의 인장시험결과 파단은 용접열영향부에서 파단이 일어났으나 용접부 인장강도값은 약 499MPa급 이상으로 선급에서 요구하는 인장강도 범위를 모두 확보하였다.

### 참 고 문 헌

1. I. Watanabe et al : Metal Construction, May(1984), 311-315
2. K.Yamamoto, S.Masuda, T.Haze, R.Chijiwa and H. Mimura, Residual and Unspecified Elements in Steel, ASTM STP 1042(1989), 266-284
3. 新日鐵技報 第380号, 2p, 2004
4. Kanazawa,S., Nakashima,Y., Uchino.K., Yano. S and Matsuda.S: Transactions ISIJ, 16(1976), 486
5. Kasamatsu K et al : Tetsu-to-Hagane , 65(1979), 8, 1232-1241
6. Threadgill P. L. : Welding Institute Research Bulletin, 22(1981), 7, 189-196
7. H.C.Jeong et al:International Journal of Korean welding Society, 2-1, 2002, 25p
8. H.C. Jeong et al. : Second International conference on advanced structural steels, April 14~16, 2004, Shanghai, China, 965