대입열 용접 공법과 일반 용접 공법 하에서의 고망가니즈강 물리적 성질과 미세조직 비교

박태욱*[†] · 정동희** · 박지현* · 김종호* · 한일욱***

*삼성중공업 조선해양연구소 생산기술연구센터 용접연구

**삼성중공업 조선해양연구소 생산기술연구센터 재료도장연구

***포스코 철강솔루션연구소 고Mn강특화솔루션TF팀

Changes in the Mechanical Properties and Microstructure of High Manganese Steel by High Heat Input Welding and General Welding Processes

Tae-Uk Park*[†], Dong-Hee Jung**, Ji-Hyun Park*, Jong-Ho Kim*, and Il-Wook Han***

*Welding Research, Production Technology Research Center, Samsung heavy industries,
Geoje, 53261, Korea

**Material and coating Research, Production Technology Research Center, Samsung heavy industries,
Geoje, 53261, Korea

***High Mn Steel Solutions TF Team, Steel Solution Research Lab., POSCO, Pohang, 37878, Korea

[†]Corresponding author: tae-uk.park@samsung.com

(Received August 9, 2021; Revised August 19, 2021; Accepted September 23, 2021)

Abstract

The demand for liquefied-natural-gas-fueled tanks on ships is growing in accordance with IMO 2020 regulations. The use of high manganese steel has increased recently, as this material can be applied at cryogenic service temperatures according to IGF code and has economic advantages over other materials. In this study, the high heat input welding process, which involves one-side submerged arc welding (SAW) welding with cut wire, is investigated to increase the productivity of high manganese fuel tank welding. The Flux cored arc welding and SAW welding processes are also evaluated and compared with the high heat input welding process. The mechanical properties of high manganese steel satisfied the class requirements and no precipitates were found in the weldment and heat-affected zone.

Key Words: High manganese steel, High heat input, Impact absorb energy, Micro structure

1. 서 론

IMO (International Maritime Organization, 국제해사기구)에서는 2020년부터 선박 연료유의 황 함량 규제를 기존 3.5 % 에서 0.5 % 로 강화하였다. 강화된 IMO의 규제를 만족시키기 위해서는 저황유의 사용, 스크러버의 장착 그리고 NG(Natural Gas, 천연가스)를 사용하는 방법이 있다. IMO의 규제와는 별도로 유럽 일부 항만과 싱가포르에서는 개방형 스크러

버 사용을 금지하는 지역도 있어 NG 를 연료로 사용하는 선박 발주가 증가하고 있다. NG를 선박 연료유로 사용할 경우 영하 163도에서 600분의 1로 부피를 감소시켜 LNG(Liquid Natural Gas, 액화천연가스)로 만들어 적재 효율을 향상 시키는 것이 가장 효율적인 선택이다.

선박의 연료탱크로 사용할 수 있는 소재는 IGF (International code of safety for ships using gases or other low-flash point fuels)에 등재되어 있으며 이중 NG 의 액화 온도인 영하 163도를 만족시키며 사용

수 있는 소재는 9% 니켈강, 오스테나이트계 스테인리스 스틸, 알루미늄 5083, Invar(인바)이다. 추가적으로 2019년 1월 IMO의 Interim Guideline 에 고망가니즈강이 사용될 수 있도록 등재됨에 따라 총 5종의 소재가 LNG 연료탱크 소재로 사용될 수 있으며 이 중 고망가니즈강은 다른 소재에 비하여 고가의 Ni 및 타 합금 원소들 대신 이들 원소 대비 저렴한 Mn 을 다량으로 첨가하여 경제적인 소재로서의 장점이 있다.

선박의 연료탱크는 독립형으로 설계, 제작되어 선박의 선각에 탑재되는 것이 조선소에서 안벽 작업기간을 최소화할 수 있기에 유리하며 탱크 자체 중량 저감을 위하여 강도가 높은 소재가 사용되어야 한다. 그리하여 과거에는 9% 니켈강이 독립형 탱크로 주로 사용되어 왔으나 Ni가 용접재료 사용으로 인한 높은 자재 비용, 용접재료가 소재와는 다른 재질로 이루어져 있어 개선 시공 후 다층 용접이 필수적으로 요구되어 생산성이 높지 않은 단점이 있다. 반면 고망가니즈강의 용접은 동종의 고망가니즈 용접재료를 사용하여 9% 니켈강 용접재료인 Ni 기 용접재료보다 저렴하며 개선 시공 없는 two-run 용접 공법 또한 적용 가능하여 생산성 향상을 도모할 수 있다. 그리하여 최근 고망가니즈강을 적용하여 LNG 연료탱크를 제작하는 경우가 증가하고 있으며 이와 관련된 용접 기술 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 다양한 용접공법 중 FCAW(Flux Cored Arc Welding), SAW(Submerged Arc Welding), GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)는 검토되어 실선에 적용되고 있다.

고망가니즈강을 이용한 연료탱크 제작 생산성을 더욱 향상 시키기 위하여 본 연구에서는 Cut wire를 이용한 편면 SAW(이하 편면 SAW) 용접 공법을 선택하였다. 본 용접공법은 기존 SAW two-run 용접 공법 대비 턴오버가 요구되지 않는다는 장점이 있는 반면에 1 패스 용접으로 작업이 마무리되기 때문에 기존 용접 공법 대비 많은 입열이 투입 된다. 일반적으로 대입열 용접에서는 소재의 물리적 성능이 저하되기 때문에 고망가니즈강도 편면 SAW 용접 하에서 열영향부와 용접부 성능 확인이 필수적이다. 그와 더불어 일반적으로 널리 사용되는 FCAW 와 FCAW+SAW 복합용접공법의 경우도 비교 평가되었다.

2. 사용 재료

Table 1 은 본 시험에 사용된 POSCO 社의 고망가니즈강인 SLMN400A 14 mm와 20 mm 화학성분 조성을 나타낸 것이다.

본 시험에 사용된 SAW, FCAW 용접재료의 용착금속 화학성분을 Table 2 에 나타내었으며 일부 화학성분은 Cr 당량($Cr + 1.5Si + Mo + 5V + 3Al + 0.5Nb + 1.5Ti$) 및 Ni 당량($Ni + 0.87Mn + 0.33Cu + 30C + 30(N-0.045)$, When N is 0~0.2)으로 나타내었으며 Cut wire 의 성분은 Table 3 에 나타내었다.

FCAW 및 SAW 용접재료는 상용화된 제품을 사용하였으나 용착량을 증대시키기 위한 Cut wire 는 직경

Table 1 Chemical composition of SLMN400A

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Fe
SLMN400A 14 mm	0.433	0.312	24.257	0.013	0.001	0.350	3.582	0.326	Bal.
SLMN400A 20 mm	0.426	0.267	24.234	0.014	0.001	0.322	3.574	0.313	Bal.

Table 2 Chemical composition of deposit metal of FCAW and SAW

	C	Si	Mn	P	S	Ni equivalent	Cr equivalent	Fe
FCAW deposit	0.32	0.54	19.96	0.006	0.001	28.27	2.29	Bal.
SAW deposit	0.47	0.92	20.84	0.009	0.005	31.62	5.94	Bal.

Table 3 Chemical composition of deposit metal of Cut wire

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Fe
Cut wire deposit	0.432	0.76	24.61	1.84	3.17	1.31	0.09	Bal.

1.0 mm, 길이 1.0 mm 를 가지는 복합 와이어 형태로 특수 제작 하였다.

3. 실험 방법

편면 SAW 용접을 적용하기 위한 모재의 형상은 Fig. 1 (a) 에 나타내었으며 모재는 14 mm 두께의 판재에 개선각 40 °를 주었고 2 mm 의 루트갭을 설정하였다. 그 후 표면에서 5 mm 정도 낮게 Cut wire 를 살포하였고 원활한 백비드 형성을 위하여 세라믹 백킹재를 용접 이면에 부착하였다.

직경 4.0 mm 의 용접와이어를 사용하여 용접 전류는 820 A, 용접 전압 36.0 V, 용접 속도 19.8 CPM (cm/min)을 적용하여 8.94 kJ/mm 의 입열량을 시편에 인가하였으며 이 때 전류 극성은 교류(AC)이다.

대입열 편면 SAW와 일반 용접 공법과의 차이 확인을 위해 추가로 상대적으로 입열이 적은 다층 FCAW, 다층 FCAW+SAW 혼합 용접공법을 고망가니즈강에 적용하였으며 그 때 용접 시편의 형상은 Fig. 1 (b) 와 같다. 이들 시편은 모재 20 mm 두께에 개선각 50도를 시공하고 루트갭은 4~5 mm 정도로 유지하였으며 백비드 형성을 위하여 세라믹 백킹재가 이면에 부착되었다. SAW 공법 적용 시 용락을 방지하기 위하여 FCAW 3 pass 가 선행되어 용접되었다.

다층 FCAW 공법 용접 시편에 인가된 입열량은 1.09~2.16 kJ/mm 이며, 다층 FCAW 와 SAW 혼합 용접 적용 용접 시편에 인가된 입열량은 FCAW 1.38~1.79 kJ/mm, SAW 3.39~3.68 kJ/mm 이다. 이 때 용접와이어의 직경 및 전류 극성은 FCAW 와이어 직경 1.2 mm, 직류 역극성 (DCEP), SAW 와이어 직경 4.0 mm, 교류(AC)이다.

물리적 성질 평가를 위하여 DNV 선급룰에 따라 각각의 용접 시편에서 가로방향 인장시험편 2개, 측면 굽힘시험편 4 개, 사르피 V 노치 충격시험편 5 조(1 조 당 3 개 시험편), 마크로 및 경도 시험편 1 개를 채취하였다. 인장시험은 ASTM E8M, 굽힘시험은 ASTM E190, 충격시험은 ASTM E23, 경도 시험은 ASTM

Fig. 1 Welding groove shape of (a) SAW welding with cut wire and (b) FCAW and FCAW+SAW multi pass welding

E92 그리고 마크로 시험은 ASTM E340 에 의거하여 수행되었다.

추가적으로 마크로 시험편에서 각 용접공법 및 입열에 따른 용접부와 열영향부의 미세조직 또한 비교 평가되었다.

미세조직 관찰을 위한 시험편은 연마 및 Polishing 후 10% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 용액에서 5~15초 Etching 하여 광학현미경 및 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하여 분석을 실시하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 물리적 성질 평가 결과

각 용접시편에서 채취한 가로방향 인장시험 결과는

Table 4 Test results of transverse tensile test

Welding process	Specimen size (mm × mm)	Tensile strength (MPa)	Fracture location
SAW with cut wire	14.75 × 25.00	743	Weld metal
	14.84 × 24.98	742	Weld metal
FCAW	20.66 × 25.06	754	Weld metal
	20.54 × 25.04	764	Weld metal
FCAW+SAW	21.04 × 25.29	689	Weld metal
	20.95 × 25.58	681	Weld metal

Table 4 에 나타내었으며 용접 공법과 입열량에 관계 없이 모두 용접부에서 파단되어 투입된 용접 입열에 의한 고망가니즈강 열영향부 인장강도 감소 정도는 확인할 수는 없었다. 용접부 강도는 편면 SAW 용접 공법이 FCAW+SAW 혼합 용접공법에 비하여 높음을 확인할 수 있었으며 편면 SAW의 경우 투입된 용접 입열은 높지만 cut wire 의 화학성분 중 망간함유량이 높기 때문에 용접부 강도가 증가하였을 것으로 판단된다. 모든 용접공법에서 DNV 선급 요구치인 인장강도 최소 660 MPa 을 모두 만족하였다.

측면 굽힘시험은 굽힘지그 반경 19 R로 수행되었으며 그 때 굽힘 각도는 180 ° 였다. 각 용접시험편에서 각각 4 개의 굽힘시험이 수행되었으며 모두 파단은 없었으며 길이 3 mm 를 초과하는 개구 또한 확인되지 않았다. 충격시험편은 앞서 서술한 것과 같이 10 X 10 사르피 V 노치 2 mm 로 가공되었으며 충격시험편을 채취한 위치는 표면에서 2 mm 지점에서 용접부 (Weldmetal, W/M), 용융부(Fusion Line, F/L), 용융부+1 mm (Fusion Line + 1 mm, F/L+1), 용융부+3 mm (Fusion Line + 3 mm, F/L+3), 용융부+5mm (Fusion Line + 5 mm, F/L+5) 이

다. 충격시험을 실시한 온도는 -196 °C 이며 각 위치에서 3개의 충격시험편으로 시험이 실시되었다. FCAW 와 SAW 의 혼합용접 공법의 경우 SAW 용접부에서 충격시험편이 채취되었고 시험 결과는 Fig. 2 에 나타내었다. 모든 용접공법과 시험편 채취위치에서 IGF, DNV 선급에서 요구하는 최소 27 J 을 모두 상회하였다.

각 용접부의 단면의 용접부, 열영향부, 모재부에 Fig. 3 의 위치에 Hv10 (Vickers hardness, 시험하중 10 kgf) 으로 경도 측정을 수행하였고 그 때 경도 값은 Table 5 에 나타내었다. 대입열인 편면 SAW 용접부의 GCHAZ 경도가 다른 용접공법에 비하여 낮음을 확인할 수 있다.

Fig. 3 Hardness testing locations

Fig. 2 Impact test results of (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding

Table 5 Hardness test results of welding specimen (Hv10)

Welding process	Base metal			HAZ					Weld metal		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SAW with cut wire	241	243	245	201	198	190	189	192	203	196	204
FCAW	275	282	280	289	275	240	230	261	232	237	239
FCAW+SAW	257	245	256	276	248	242	239	224	238	226	237

Fig. 4 Macro etch test for (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding

Fig. 5 Typical weldment micro structure of (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding

Fig. 6 Weldment SEM image of (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding

각 용접부의 단면 마크로 시험결과는 Fig. 4 에 나타내었으며 ISO 5817 level B 의 요구치를 만족함을 확인하였다.

물리적 성질 평가 결과 편면SAW 용접 공법, FCAW 용접 공법 그리고 FCAW+SAW 혼합 용접 공법 모두 DNV 선급물과 IGF code 에서 요구하는 요구치를 모두 만족하는 결과를 얻었다.

4.2 미세 조직 평가 결과

4.2.1 용접부 미세 조직 평가 결과

Fig. 5는 각 용접공법 별 용접금속의 대표적인 미세 조직이다. FCAW+SAW 용접부의 경우 SAW 용접부의 마지막 패스의 용접금속 관찰결과를 나타내었다. 모

든 용접금속은 Columnar dendritic structure를 나타내고 있으며 입열량이 큰 공법일수록 느린 냉각속도로 인해 Grain size 와 Secondary dendrite arm spacing이 더 큰 경향을 나타내었다.

Fig. 6에는 용접금속의 SEM image를 나타내었다. 개재물의 양은 FCAW에서 가장 많았으며 일반SAW와 편면 SAW는 유사한 수준이었다. Fig. 7에 개재물의 성분을 나타내었으며 편면 SAW와 일반 SAW 용접금속에서는 주로 Al-Mn 계열 산화물 형태 개재물이 관찰되었고 FCAW 용접금속에서는 Mn 산화물이나 Mn-Si 산화물 계열 개재물이 관찰되었다. 고망가니즈강에서 발생하기 쉬운 응고균열, 기공과 같은 결함이나 물리적 성질을 저해할 수준의 석출물은 관찰되지 않았다.

Fig. 7 Weldment SEM image and chemical analysis of inclusion for (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding

Fig. 8 Typical heat affected zone micro structure of (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding (× 50)

Fig. 9 Typical heat affected zone micro structure of (a) SAW welding with cut wire, (b) FCAW and (c) FCAW+SAW multi pass welding (× 200)

4.2.2 열영향부 미세 조직 평가 결과

열영향부의 미세조직은 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타나 있으며 열영향부의 경우 용접 입열로 인한 결정립 성장이 관찰되었다. 본 시험 조건에서는 입열량이 8.94 kJ/mm인 편면 SAW와 입열량이 3.39~3.68 kJ/mm의 FCAW+SAW 혼합 용접공법의 열영향부 결정립은 최대 약 300 μm 까지 성장함을 확인할 수 있었으며 입열량이 1.38~1.79 kJ/mm FCAW의 경우 열영향부 결정립은 최대 약 150 μm 까지 성장함을 확인하였다. 또한 열영향부에서 물리적 성질을 저해할만한 석출물은 관찰되지 않았다. 편면 SAW와 일반 SAW의 열영향부 최대 결정립 크기는 유사하나 입열량이 가장 많은 편면 SAW 경우 조대한 결정립의 양이 일반 SAW 대비 많

기 때문에 낮은 경도를 보인 것으로 판단된다.

시험된 용접공법의 열영향부는 용접금속과 마찬가지로 8.94 kJ/mm의 대입열 조건에서도 액화균열 등의 결함이 없는 건전한 용접부를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

고망가니즈강의 용접 생산성 향상을 도모할 수 있는 대입열 편면 SAW 용접 공법 그리고 일반적인 다층 FCAW 용접 공법, 다층 FCAW+SAW 혼합 용접 공법을 비교 평가한 결과 모든 용접공법에서 선급에서 요구하는 물리적 성질을 모두 만족하였음을 확인할 수 있었으며 입열이 증가하더라도 용접부와 열영향부에 물리

적 성질을 저하할 만한 석출물은 관찰되지 않았다.

따라서 고망가니즈강에 8.94 kJ/mm 정도의 대입열이 인가되는 용접공법이 실제 구조물 생산에 적용되더라도 그 성능에서는 문제가 없을 것으로 판단된다.

ORCID: Tae-Uk Park: <http://orcid.org/0000-0001-5798-1186>

ORCID: Il-Wook Han: <http://orcid.org/0000-0002-1179-3339>

References

1. DNVGL, Energy transition outlook 2020 executive summary, A global and regional forecast to 2050.
2. I. W. Han, J. G. Yun, B. G. Lee, and C. Y. Kang, Effect of Tensile Properties and Microstructure on the Heat Input of Ni-Doped High Manganese Welding Wire, *J. Weld. Join.* 36(1) (2018), 10-17.
<https://doi.org/10.5781/jwj.2018.36.1.1>
3. K. H. Yun, Research on welding technology of high Mn steel using commercial welding consumable, *The Korean Welding and Joining Conference, (KWJC)* Gwangju, Korea (2015) 58-58.
4. M.S. Yi and J. K. Seo, Residual Stress Study of High Manganese Steel Riser Pipe Manufactures by Longitudinal Butt Welding (1) : Residual Stress Measurement and FE Analysis, *J. Weld. Join.* 39(2) (2021), 135-143.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.2.1>
5. I. W. Han, J. B. Eom, J. G. Yun, B. G. Lee, and C. Y. Kang, Microstructure and Hardness of 1st layer with Crystallographic Orientation of Solidification, *J. Weld. Join.* 34(5) (2016), 77-82.
6. J. K. Choi, S. G. Lee, Y. H. Park, I. W. Han, and J. W. Morris, Jr, High Manganese Austenitic Steel For Cryogenic Applications, *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece (2012).
7. B. Kim, S. Uhm, C. Lee, and J. Lee, Effects of inclusions and microstructures on impact energy of high heat-input submerged-arc-weld metals, *J. Eng. Mater. Technol.* 127 (2) (2005), 204-213.
<https://doi.org/10.1115/1.1857933>
8. DNVGL-RU-SHIP, Rules for Classification- Part 2 Materials and welding-Chapter 4; Fabrication and testing, DNVGL (2020).
9. E. Curiel-Reyna, A. Herrera , V. M. Castaño, and M. E. Rodriguez, Influence of Cooling Rate on the Structure of Heat Affected Zone After Welding a High Manganese Steel, *Mater. Manuf. Process.* 20(5) (2005) 813-822.
<https://doi.org/10.1081/amp-200055142>