저장탱크용 TMCP 강재의 대입열 용접 특성

류강목^{*,†} · 김대우^{**} · 이진우^{*} · 방환철^{***} · 박철규^{***} · 정홍철^{*}

^{*}포스코 철강솔루션마케팅실 접합연구그룹

^{**}포스코 포항연구소 강재1연구그룹

^{***}고려용접봉 중앙연구소

High Heat Input Electro-gas Arc Welding of TMCP Plate for Steel Storage Tanks

Kang-Mook Ryu^{*,†}, Dae-Woo Kim^{**}, Jin-Woo Lee^{*}, Hwan-Cheol Bang^{***},
Chul-Gyu Park^{***}, and Hongchul Jeong^{*}

^{*}Welding & Joining Research Group, Steel Solution Marketing Dept., POSCO, Pohang, 37859, Korea

^{**}Plate Research Group 1, POSCO, Pohang, 37859, Korea

^{***}R&D Center, KISWEL, Changwon, 51544, Korea

[†]Corresponding author : kmryu@posco.com

(Received November 24, 2017 ; Revised December 7, 2017 ; Accepted December 19, 2017)

Abstract

Tensile strength, 485~550MPa grade of Quenching & Tempering or Normalizing heat-treated SA-537/A537 steels has been widely used as a steel for storage tanks. Since these steels have high crack sensitivity due to the relative high carbon equivalent, low heat input welding processes such as SMAW, GMAW or FCAW are commonly used for fabrication of storage tank. In this study, we have developed thermo-mechanical control process-type SA-841/A841 steels guaranteeing 1-pass high heat input EGW to increase welding productivity as well as superior quality of welded joints to normal low heat input welding processes. Besides, alloy design in base metal and TMCP process have been also optimized to obtain proper impact toughens in HAZ. As a result, excellent impact toughness at low temperature has been obtained in coarse grain HAZ (CGHAZ) under 340kJ/cm of heat input condition in 40mm thickness plates. Besides, more than 100J of absorbed energy at -10°C have been achieved by optimizing welding consumables for A841 with high input welding.

Key Words : Heat input, EGW, TMCP, HAZ

1. 서 론

저유가 기조가 장기화 되면서 중동지역의 오일터미널 프로젝트가 활발해지고 있으며, 유가 회복을 대비한 산유국들의 시장 영향력 확대, 북미지역 오일세일, 오일샌드 등의 비 전통에너지 추출 프로젝트 확대 등으로 인한 중소형 탱크를 기반으로 하는 원유 저장고의 수요가 지속되고 있다. (Fig. 1) MEED(Middle East Economic Digest, 중동지역 경제 전문지)는 중동지역의 경우, 연 6~800천 톤의 저장탱크용 강재 수요가 전망된다고 보고하고 있다.

대기압 하에 운영되는 저장탱크의 재질선정, 설계, 제작, 시험 및 검사 등은 API Standard 650¹⁾ (Welded steel tanks for oil storage)에 근거하고 있으며, 40mm 이하의 고장력강 Shell plate로써 Normalized steel, Quenched and Tempered steel(Material group VI)이 일반적으로 적용되고 있다. 하지만 열처리강재의 경우, 통상 Ceq.가 높아 용접시 균열에 대한 민감도가 높으며, 용접시공시 저입열에 의존하는 경우가 많아 효율성 저하, 수동용접에 기인한 용접사 기능 차이에 의한 용접품질 편차 발생 등의 문제가 꾸준히 지적되고 있다.

따라서 본 연구를 통해 기존의 열처리강재를 저 Ceq.의 TMCP재로 전환하여, 용접성을 확보하는 동시에, 저

Fig. 1 Farm of steel storage tank

Table 1 Strategy for welded storage tank project

As-was	To-be
A537-Cl.1 (N)	A841-B-Cl.1 (TMCP)
A537-Cl.2 (QT)	A841-B-Cl.2 (TMCP)
A573-70 (AR/N)	A573-70 (AR/TMCP)
A516-70 (AR/N)	A516-70 (AR/TMCP)

장탱크를 제작하는 과정에서 1-pass 대입열 용접을 적용하여 고효율 용접 시공환경을 제공하고자 하였다. 저온(-10°C)에서의 충격 인성확보를 위해 고온에서 안정한 50nm 이하의 TiN Particle을 Matrix에 미세하게 분산시켜 대입열 용접시 HAZ에서 발생하는 Prior austenite grain 성장을 억제하였으며²⁾, 당사 강재에 최적화 설계된 대입열 용접재료(Self-shielded type, CO_2 - shielded type)를 적용함으로써 용접부의 우수한 기계적 물성을 확보할 수 있었다.

2. 대입열 용접 솔루션

2.1 대입열 A841-B-Cl. 2 강재

TMCP type의 A841강은 Normalizing 또는 Quenching and Tempering 열처리 공정에 의해 제조되는 A537 강을 대체할 수 있는 압력용기 용강이며 ASME Section VIII Div. 1, 2³⁾의 보일러 및 압력용기용강 부분에 규격화되어 있다. A841 강은 인장강도 및 인성 보증 범위가 A537과 동일하기 때문에, PWHT(Post Weld Heat Treatment) 후에도 재질 안정성이 확보될 수 있다면 열처리를 생략함으로써, 제조공정을 단순화하여 생산단가 및 제조시간을 낮출 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2 Comparison of manufacturing process between conventional heat treatment process and advanced TMCP: (a) Conventional rolling (b) Conventional TMCP (c) Improved TMCP

Fig. 3 Tensile strength after PWHT

이런 압력용기용 강은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 일반 압연 후 공랭 과정을 거쳐 재가열 한 다음 Normalizing 또는 QT 열처리를 통해 통상 제조된다. TMCP 공정 적용시, 미세결정 영역 사상압연을 포함하여 Ferrite가 일부 생성되는 온도에서 가속냉각을 통해 잔여 Austenite를 모두 Acicular ferrite 조직으로 변태시킴으로써, 적절한 강도화 인성을 확보할 수 있다. 하지만 통상 TMCP의 냉각종료 온도가 PWHT가 적용되는 온도인 $595\sim 620^{\circ}\text{C}$ 보다 낮은 온도에서 제어되기 때문에 PWHT 후 전위 Recovery에 의해 강도가 하락되는 정도가 매우 큰 단점이 있다.

이와 같은 문제점을 최소화 하기 위하여, 본 연구에서는 냉각개시 시점과 가속냉각 속도를 상향시켜 저온변태 상 분율을 증대시키되, 고온 냉각종료 후 서냉 과정에서 Recovery가 먼저 발생하도록 제어함으로써, PWHT 후 품질편차를 극소화 하였다. (Fig. 3, Fig. 4)

용접에 의해 모재는 높은 온도로 가열되며, 큰 용접 입열량은 느린 냉각속도를 초래하며 결국, 오스테나이트 결정립의 조대한 성장을 야기시키고, 냉각되면서 저온노치 인성에 취약한 Proeutectoid ferrite, Widmanstätten ferrite 등의 미세조직을 형성한다. 용접에서 발생하는 조립역의 성장거동을 모사하기 위한 용접 열사이클시험

Fig. 4 Microstructure of A841-B-Cl.2

Fig. 5 Variation of AGS with peak temperature

Fig. 6 Dispersion of TiN particles in A841-B-Cl.2

을 실시하였으며, Peak 온도에 도달시킨 후 Quenching 하여 AGS를 측정하였다. (Fig. 5)

Fig. 5에서 비교재로 선택된 Conventional steel, High nitrogen steel은 강재에 첨가되는 Ti와 N의 중량비로 구분했으며 각각 Ti/N=3.4, Ti/N=1.5이다. 용접 후 조립역에서의 AGS성장 억제에는 고온에서도 안정한 미세 TiN Particle에 의한 Pining효과로 사료된다⁴⁾.

Fig. 6은 A841-B-Cl.2강에 미세하게 분산된 30~

(a) A537-Cl.2

(b) A841-B-Cl.2

Fig. 7 Comparison of AGS after EGW between (a) A537-Cl.2 and (b) A841-B-Cl.2

50nm의 TiN particle을 보여준다.

Fig. 7은 40mm 두께의 A537-Cl.2, A841-B-Cl.2 강의 대입열 용접(입열량 250kJ/cm) 후 FL에서의 미세조직을 나타낸다. A841-B-Cl. 2강의 경우 평균 AGS는 CGHAZ에서 약 50~100μm 로써, A537-Cl. 2에 비해 매우 억제된 AGS 성장을 보이며, CGHAZ의 분포 폭에서도 큰 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

2.2 대입열 Welding Consumables

대입열 용접에는 Electro-gas arc weld 공정이 적용되었으며, 용접재료는 내부에 Flux가 충전되어 있는 Tubular type의 FCW(Flux Cored Wire)를 사용하였다. Flux는 용접금속의 합금성분을 첨가해주는 역할 외에도 아크 안정, Droplet 제어, 원활한 Slag 유동, 탈산 및 탈질 등의 효과를 위해 설계된다. FCW에는 용접시 보호가스의 필요 유무에 따라 Self-shielded FCW, CO₂-shielded FCW로 다시 구분되며, Self-shielded FCW의 경우 용접시 발생하는 Protective slag와 분해 가스에 의해 Molten pool을 대기로부터 보호할 수 있기 때문에 별도의 보호가스가 요구되지 않는다. 주로 옥 외 용접 작업시 바람에 의해 Shielding gas(CO₂)가 제 역할을 못하거나 가스공급이 원활하지 못한 경우에 적용되고 있다⁵⁾. 본 연구를 통해 개발된 당사 대입열 강재에 최적화된 Type별 FCW의 기계물성, 주요 화학조성 및 매크로 조직은 Table 2, 3 및 Fig. 8에 표기되어 있다.

Table 2 Mechanical properties of FCW

Type	Mechanical Properties			
	YS MPa	TS MPa	El %	IV@-10℃ J
Self-shielded FCW	490	605	25	105
CO ₂ -shielded FCW	460	570	27	180

Table 3 Chemical composition of FCW

Type	Chemical Composition, weight %					
	C	Mn	Si	Ni	Mo	P,S
Self-shielded FCW	0.04	1.4	0.3	1.3	0.3	0.02
CO ₂ -shielded FCW	0.01	1.2	0.06	1.7	0.2	0.02

Fig. 8 Macrostructure of (a) Self-shielded EGW and (b) CO₂-shielded EGW

당사 대입열 A841-B-C1. 2 강재의 최적의 용접조건을 도출하기 위해 Pre-qualification Test(PQT)를 실시하였다. Self-shielded EGW의 경우, 아크안정성 및 가스 발생을 목적으로 첨가되는 CaCO₃, BaCO₃ 등과 같은 Carbonate (탄산염), CaF₂ 등의 Fluoride(불화물)에 의해 과다 발생하는 Slag와 Fume의 효과적인 제거를 위해 개선팅도는 40°로 충분히 넓게 확보하였다.

Table 4 Welding condition

Steel Grade	A841-B-C1.2 (40mm Thickness)	
Welding consumable	K-ES3 (φ2.4) from KISWEL	K-EG3 (φ1.6) from KISWEL
Welding process	Self-shielded EGW	CO ₂ -shielded EGW
Shielding Gas	-	CO ₂ 100% (40~45l/min)
Current	520A	400A
Voltage	40V	40V
Travel Speed	4.6cpm	4.1cpm
Heat Input	271kJ/cm	234kJ/cm

(a)

(b)

Fig. 9 Welded specimen: (a) Self-shielded EGW, (b) CO₂-shielded EGW

Self-shielded EGW, CO₂-shielded EGW의 입열량은 각각 271 kJ/cm, 234kJ/cm 이며, UT 결과 Slag inclusion, Porosity 등과 같은 용접 결함은 검출되지 않았다. Fig. 9은 용접 후의 시험편의 모습이다.

3. 실험결과 및 고찰

ASTM A370 기준에 의거하여 As-EGW, PWHT(620℃, 2hr) 조건에서 횡방향 인장시험, 저온충격시험, 경도시험, 굽힘시험을 실시하였다. 용접부 횡방향 인장시험 결과 모든 시험편은 모재에서 최종 파단되었으며, 규격에서 요구하는 값인 550MPa 이상의 인장강도를 확보할 수 있었다. (Table 5)

충격시험은 Weld metal, FL, FL+1mm, FL+3mm, FL+5mm에 노치를 가공하여 -10℃로 냉각한 후 실시하였다. 모든 시험편에서 연성파단 되었으며, 요구값인 평균 48J 이상을 확보할 수 있었다. 노치인성이 가장 취약한 구간인 CGHAZ의 영역에서도 100J 이상의 우수한 흡수에너지를 확보할 수 있었다. Fig. 10은 충격시험 결과를 보여준다.

Table 5 Transverse tensile test results

Welding process	Heat treatment	YS MPa	TS MPa	El. %	Fractured position
Self-shielded EGW	As-EGW	461	591	27	Base metal
		459	594	26	Base metal
	PWHT	453	579	22	Base metal
		457	582	21	Base metal
CO ₂ -shielded EGW	As-EGW	436	586	28	Base metal
		436	581	27	Base metal
	PWHT	426	565	23	Base metal
		428	566	21	Base metal

4. 결 론

본 연구에서는 저장탱크용 대입열 강재 및 강재에 맞춤 설계된 용접재료 개발, 용접시공 조건 최적화가 수행되었다. 본 연구를 통해, 저장탱크에서 통상적으로 적용되고 있는 QT, Normalizing 등의 열처리강재를 대입열 용접성능이 우수한 TMCP강재로 대체할 수 있는 솔루션 기반을 마련하였으며, 실험을 통해 검증하였다. 본 연구를 기반으로 향후 소재에 대한 비용절감, 고능률 용접에 의한 공기 단축을 통해 궁극적으로 저장탱크 제작사로 하여금 원가절감을 구현할 수 있는 솔루션이 되기를 기대한다.

ORCID: Kang-Mook Ryu : <http://orcid.org/0000-0002-5990-4413>
 ORCID: Hongchul Jeong : <http://orcid.org/0000-0002-2051-9438>

Fig. 10 CVN Impact test results

References

1. API Standard 650, Welded Steel Tank for Oil Storage, 12th edition, July, (2013)
2. Hong-Chul Jeong, Young-Hwan Park, Young-Ho An and Jong-Bong Lee, Mechanical Properties and Microstructures of High Heat Input Welded Tandem EGW Joint in EH36-TM Steel, *Journal KWJS*, 25(1) (2007), 57-62
3. ASME Section VIII, Boiler and Pressure Vessel, 2nd edition, (2000)
4. H. C. Jeong, Y. H. An and W. Y. Choo, The Effects of TiN Particles on the HAZ Microstructure and Toughness in High Nitrogen TiN Steel, *International Journal of Korean Welding Society*, 2(1), 25-28
5. Dong-hyun Van, Hyun-su Park, Kyeng-kun Yun, Jin-woo Lee and Kang-muk Ryu, Evaluation of weldment using G-shielded flux cored wire & S-shielded flux cored wire in EGW process, *Abstracts of KWJS*, 63 (2015), 88