9% Ni강의 Alloy 625 용접재료 적용에서 GTAW와 FCAW의 고온균열 발생 특성 비교

나기범* · 이창익* · 박정현* · 조상명*,*

*부경대학교 신소재시스템공학과

A Comparison of Hot Cracking in GTAW and FCAW by Applying Alloy 625 Filler Materials of 9% Ni Steel

Ki Beom Na*, Chang Ik Lee*, Jung Hyun Park* and Sang Myung Cho*,*

*Dept. of Materials system Engineering, Pukyong Nat'l Univ, Busan, 48513, Korea

*Corresponding author : pnwcho@pknu.ac.kr (Received December 14, 2018 ; Revised January 10, 2019 ; Accepted June 28, 2019)

Abstract

Recently, demand for LNG storage and fuel tanks has been increasing due to the International Maritime Organization(IMO) regulations on sulfur oxides and greenhouse gas emission. In the production of LNG tanks, 9% Ni steel is used and Alloy 625 or Hastelloy wire are used as the filler materials. In the FCAW welding process using Alloy 625 consumables, when using high current to increase productivity, hot cracking frequently occurs as well as welding defects such as lack of fusion due to arc instability. In this study, the hot cracking characteristics of FCAW and GTAW using Alloy 625 consumables in 9% Ni steel welding were compared through the FISCO hot cracking test.

Key Words : 9% Ni steel, Alloy 625, GTAW, FCAW, Hot crack

1. 서 론

최근 IMO는 황산화물 배출규제 및 온실가스 배출규 제를 강화함에 따라 청정연료인 LNG의 사용이 세계적 으로 급증하여 LNG 저장탱크 및 LNG 연료탱크의 수 요가 증가하고 있다¹⁻⁴⁾. LNG 탱크 제조에서는 9% Ni 강이 사용되고 있으며 그 용접 재료로 인코넬 혹은 inconel계 와이어 혹은 하스텔로이계 와이어를 사용하고 있다⁵⁾. Alloy 625 용접와이어를 사용한 FCAW공정에 서 생산성 증가를 위해 전류를 올리게 되면 고온균열이 자주 발생할 뿐만 아니라 아크불안정으로 융합불량과 같은 결함이 발생한다. Ni계 합금인 Alloy 625 용접 시 가장 큰 문제는 Nb, Mo, Ti, C 등이 응고 마지막 단계에서 제2상을 형성하려는 경향이 강하고 이 제 2 상들은 합금의 응고온도 구간을 증가시킨다⁶⁻⁹⁾. 즉, 응 고 마지막 단계에서 저융점 공정상(y/NbC, y/Laves) 의 액상필름이 수지상 경계에 형성된다. 또한, FCW(Flux Cored Wire)는 solid wire와 달리 플럭스 성분에 슬 래그를 형성하는 Si와 Mn이 다량 함유되어 있고, 이런 Si와 Mn화합물이 합금의 응고온도 범위를 증가시킨다. 결정립계에 형성된 이러한 저융점 액상필름에 인장변형 이 작용하면 균열이 발생한다. 본 연구의 목적은 9% Ni 강 모재에 대해 Alloy 625 용접재료를 사용하여 FCAW 와 GTAW에서 고온균열의 발생 특성을 규명하는 것이다. 이를 위하여 9% Ni강 모재의 맞대기 이음부에 FCAW와 GTAW에서 전류와 용접속도를 증가시키며 FISCO 균 열시험^{5.10)}을 진행하였다.

2. 사용 재료

Table 1은 본 연구에서 사용된 모재인 9% Ni강

Journal of Welding and Joining, Vol.37 No.4(2019) pp357-362 https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.4.10

 Table 1 Chemical composition of base metal(wt%)

Ni	C	Mn	Fe	Р	S	Si	Al
9.448	0.051	0.660	Bal.	0.010	0.001	0.252	0.023

Table 2 Chemical composition of FCW 625(wt%)

С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni
0.030	0.340	0.400	0.003	0.005	21.80	Bal.
Мо	Cu	Nb+Ta	Fe	Nb		
8.520	0.130	3.400	0.700	3.420		

Table 3 Chemical composition of C-Filler 625(wt%)

C	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni
0.010	0.071	0.057	0.007	0.004	22.64	Bal.
Мо	Cu	Ti	Fe	Nb	Al	
8.820	0.002	0.199	0.248	3.762	0.160	



Fig. 1 Cross section of filler metal

(ASTM 553-1)의 조성을 나타낸 것이다. Table 2는 FCAW용접재료인 직경이 1.2 mm인 FCW(ENiCrMo3Ti)의 조성을 나타낸 것이다. Fig. 1은 GTAW에서 사용한 단면적 5.5 mm²의 C형 용가재(ERNiCrMo-3)의 단면이다. Table 3은 C형 용가재의 조성을 나타 내었다.

3. 실험 방법

3.1 실험 절차

Fig. 2는 FISCO 실험 장치의 모식도를 나타낸 것이 다. 볼트를 118 N·m의 토크로 구속하여 용접을 진행 하였다. Table 4는 FISCO 실험에 사용한 모재 디자



Fig. 2 Schematic of FISCO test

Table 4 FISCO test condition

Length of base metal (mm)	200
Witdh of basemetal (mm)	120
Thickness of Base metal (mm)	12
Gap (mm)	2
Groove angle (°)	60
Restraint torque of Bolt (N·m)	118



Fig. 3 Crack test result of Hastelloy and Alloy 625 wire in FCAW¹¹⁾

인과 구속 조건을 나타내었다. 200 × 150 × 12 mm 크기의 모재를 2 mm갭으로 유지하여 1패스 용접 하였 다. Fig. 3은 Alloy 625용접재료를 사용한 9% Ni강 FCAW의 FISCO 시험 관련 선행연구⁵⁾ 결과이다. Fig. 3의 파란 실선은 하스텔로이계 용접재료를 사용했을 때 고온균열 특성이고, 검은 파선은 Alloy 625 용접재료 를 사용했을 때의 고온균열 특성이다. 본 연구에서는 Alloy 625 용접재료의 고온균열 특성을 참고하여 실험을 진 행하였다.

Table 5는 9% Ni강 모재에 대한 Alloy 625용접재 료를 사용한 FCAW의 FISCO 용접 균열 실험의 상세 용접조건을 나타낸 것이다. 용접속도 30 cm/min일 때 200 A와 용접속도 50 cm/min일 때 200 A와 220 A에서 실험하였다. Table 6은 9% Ni강 모재에 대한 Alloy 625용접재료를 사용한 GTAW의 FISCO 용접

 Table 5
 Welding condition of FCAW

Shield gas	Ar+CO ₂ 20%		
Filler metal	ENiCrMo3Ti (1.2mm)		
Welding speed (cm/min)	30	50	50
Voltage (V)	26.9	26.9	28.1
Current (A)	200	200	220
Wire feeding rate (cm/min)	910	910	1070
Heat input per unit length (kJ/mm)	1.08	0.65	0.74

 Table 6
 Welding condition of GTAW

Shield gas	Ar+H27%				
Filler metal	ERNi	RNiCrMo-3 C-Filler (5.5mm ²)			
Welding speed (cm/min)	30	35	50		
Voltage (V)	18.5	18.5-24.0	19.0-24.0		
Current (A)	200	280-430	200-400		
Wire feeding rate (cm/min)	97	114	108-163		
Heat input per unit length (kJ/mm)	0.071	0.91-1.62	0.61-1.02		
Heat input ratio (kJ/mm ³)	0.040	0.051-0.091	0.034-0.057		

균열 실험의 상세 용접조건을 나타낸 것이다. GTAW 실험에서 FCAW와 동일한 전류와 용접속도에서 실험 하였고, 추가로 용접속도 35 cm/min에서는 30 A 단 위로 전류를 증가시키며 430 A까지 실험하였으며, 50 cm/m-in에서는 60 A 단위로 전류를 증가시키며 400 A까지 실험하였다.

3.2 측정 방법

Heat input ratio
$$(\frac{J}{mm^3}) = \frac{\text{Heat input per unit length}(\frac{J}{mm^3})}{\text{Depositiom area}(mm^2)}$$
 (1)

본 연구에서 고온균열의 측정방법은 첫 번째로 육안 검사를 시행하였다. 두번째로 FISCO 실험 후 용접 비 드에 액체 침투 탐상 시험(PT)을 하였다. 용접 비드에 침투액이 현출되면 고온균열이 발생한 것으로 판단하였 다. 식 (1)은 입열량비(H_R)의 식을 나타내며 단위길이 당 입열량(이하 입열량)에 용착단면적을 나누어 산출하 였다. 입열량과 H_R을 구하기 위해 용접속도는 용접 로 봇티칭에 의해 구하였고 전류, 전압 값과 와이어 송급 속도 값은 용접 파형 모니터링 시스템에 출력된 값을



Fig. 4 Hot cracking behavior using FCAW

통해 계산하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 FCAW의 고온균열 특성

Fig. 4는 Alloy 625 용접재료를 사용한9% Ni강 FCAW의 FISCO 군열 실험 결과이다. Fig. 5는 실험에 사용한 시험편의 횡단면을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에 서는 고온군열이 발생하지 않았고 Fig. 5(b), Fig. 5(c) 에서는 고온군열이 발생하여 선행연구⁵⁾와 동일한 실험 결과를 얻었다.

4.2 GTAW의 고온균열 특성

Fig. 6은 Alloy 625 용접재료를 사용한 9% Ni강 GTAW 의 FISCO 균열 실험 결과이다. 용접속도 35 cm/min에 서 최대 400 A까지 고온균열이 발생하지 않았고 430 A 에서 최초로 고온균열이 발생하였다. 용접속도가 50 cm/min일 때는 340 A까지 고온균열이 발생하지 않았



Fig. 5 Macro section of FISCO test spicemen by FCAW (a) Current: 200A, welding speed: 35cm/min (b) Current: 200A, welding speed: 50cm/min (c) Current: 220A, welding speed: 50cm/min



Fig. 6 Hot cracking behavior using GTAW



Fig. 7 Macro section of FISCO test spicemen in GTAW (a) Current: 340A, welding speed: 50cm/min (b) Current: 400A, welding speed: 35cm/min (c) Current: 400A, welding speed: 35cm/min (c) Current: 430A, welding speed: 50cm/min

고 400 A에서 최초로 고온균열이 발생하였다.

Fig. 7(a)는 고온균열이 발생하지 않은 용접속도 35 cm/min일 때 340 A에서 횡단면이고, Fig. 7(b)는 고 온균열이 발생한 용접속도 35 cm/min일 때 400 A 에서 횡단면이다. Fig. 7(c)는 용접속도 50 cm/min 일 때 400 A에서 고온균열이 발생하지 않은 횡단면이 고, Fig. 7(d)는 용접속도 50 cm/min일 때 430 A에 서 고온균열이 발생한 횡단면이다.

4.3 GTAW와 FCAW의 고온균열 발생 특성 비교

동일한 전류와 용접속도에서 FCAW와 GTAW의 고온 균열 발생 특성을 비교하였을 때 용접속도 30 cm/min

에서 전류 200 A일 때는 모두 고온균열이 발생하지 않 았다. 하지만 용접속도 50 cm/min일 때 200 A와 220 A에서 FCAW는 고온균열이 발생하였지만 GTAW 는 발생하지 않았다. Fig. 8은 전류220A와 용접속도 50 cm/min에서 용접부 미세조직이다. Fig. 8(a)는 고온균열이 발생한 FCAW의 미세조직이고, Fig. 8(b) 는 고온균열이 발생하지 않은 GTAW의 미세조직이다. Fig. 8(a)에서 2-10 µm 크기와 다수의 2 µm 이하 크 기의 저융점 개재물을 관찰할 수 있다. Fig. 8(b)에서 는 2 µm 이하 크기의 저융점 개재물을 확인하였고 그 수 가 Fig. 8(a)보다 적은 것을 관찰할 수 있다. GTAW 용가재인 C형 용가재에는 FCAW와 달리 슬래그를 형 성하는 플럭스가 없다. 따라서 고상선 온도를 낮추어 응고온도 범위를 증가시키는 저융점 개재물의 양이 현 저히 작기 때문에 고온균열이 발생하지 않았다고 판단 가능하다.

입열량 관점에서는 용접 속도 50 cm/min일 때 전류 200 A와 220 A에서FCAW의 입열량은 0.65 kJ/mm와 0.74 kJ/mm이고, GTAW의 입열량은 0.42 kJ/mm와 0.48 kJ/mm이다. 즉, GTAW의 입열량이 FCAW의 입열량 대비 약 35%가 작다. FCAW의 아크효율은 66-85%이고 GTAW의 아크 효율은 21-48%¹²⁾로 달라 실제 로 용접금속에 작용하는 유효 입열량은 달라진다. 따라서 용접금속에 작용하는 유효한 입열량은 FCAW보다 GTAW



Fig. 8 Microstructure of alloy 625 welding in 9% Ni steel(Current: 220A, welding speed 50cm/min) (a) FCAW (b) GTAW

가 35% 이상 낮아져 응고속도가 더욱 빨라지기 때문에 구속 변형이 작으므로 고온균열이 발생하지 않았다고 판 단된다.

4.4 GTAW에서HR에 따른 고온균열 발생 특성 비교

Fig. 9은 GTAW에서 Alloy 625 용접재료를 사용하 여 전류 280 A, 용접속도 50 cm/min로 같게 하면서 용착단면적을 17.9 mm²와 11.9 mm²로 다르게 한 FISCO 균열시험편에 대한 PT 결과이다. Fig. 9(a)는 고온균열이 발생하지 않았음을 보여주고 있고, Fig. 9(b)는 고온균열이 발생한 것을 보여주고 있다. 본 실 험으로 H_R에 따라 고온균열 발생 특성이 다르다는 것 을 확인하였다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)의 입열량은 동 일하지만 용착단면적이 17.9 mm²에서 11.9 mm²으로 감소했기 때문에 H_R은 Fig. 9(b)가 35% 증가하였다. 용착단면적의 감소로 H_R이 높아지면 모재로 투입되는 열량이 증가하여 모재 용융량이 증가함에 따라 용융금 속의 모재 희석률 증가가 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 10은 H_R에 따른 모재 용융량의 모식도이다. 동 일 입열량에서 용착단면적이 커 H_R이 낮으면 그루브 벽 면 용융량이 작고, 용착단면적이 작아H_R이 커지면 그루 브 벽면 용융량이 많기 때문에 고온균열이 발생하기 쉬 움을 보여준다. 모재의 P함량이 용가재보다 1.43배 높 아 모재 희석률이 증가하게 되면 저융점 개재물인 P화 합물 양이 많아진다. 또한 모재의 C가 용가재보다 5배 많아 저융점 개재물인 NbC와 Laves상의 양이 현저히



(b) $H_R=0.052 k J/mm^3$





Fig. 10 Schematic of base metal melting amount by H_R

증가하여 고상선 온도가 낮아져 응고온도 범위가 증가 하게 된다. Lippold, J.C⁸⁾와 Cieslak M. J.⁹⁾의 선행 연구에서 NbC와 Laves 상의 양이 증가하면 고온균열 이 쉽게 생긴다는 것을 보여주고 있다. 즉, H_R이 높아 지면 용융금속 내에 많은 저융점 개재물을 포함하게 되 고 응고온도 범위가 넓어지게 되어 고온균열이 발생한 것으로 판단된다.

5. 결 론

9%강의 Alloy 625 용접재료 적용에서 FCAW와 C 형 용가재를 사용한GTAW의 고온균열 발생 특성 비교 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 9% Ni 강의 Alloy 625 용접재료 적용에서 FISCO 실험 결과 FCAW는 용접속도 50 cm/min일 때 200 A, 220 A 모두에서 고온균열이 발생하였지만, 동일한 전 류, 용접속도와 용착단면적에서 GTAW는 고온균열이 발 생하지 않았다.

2) FCAW에서 고온균열이 발생한 용접조건에서 GTAW 에서는 고온균열이 발생하지 않은 첫번째 원인은 GTAW 에서 사용한 C형 용가재에는 플럭스가 없어 용융금속 에 저융점 개재물의 양이 작기 때문에 고온균열이 발생 하지 않았다고 판단된다.

3) FCAW에서 고온균열이 발생한 용접조건에서 GTAW 에서는 고온균열이 발생하지 않은 두번째 원인은 FCAW 대비 GTAW의 전압이 낮아 입열량이 약 35% 작았기 때문인 것으로 판단된다.

4) GTAW는 용접속도 35 cm/min에서 최대 400 A, 용접속도 50 cm/min에서는 최대 340 A까지 고온 균열이 발생하지 않았다.

ORCID: Ki Beom Na: https://orcid.org/0000-0003-0623-9664 ORCID: Chang Ik Lee: https://orcid.org/0000-0002-5179-6614 ORCID: Jung Hyun Park: https://orcid.org/0000-0003-1057-0915 ORCID: Sang Myung Cho: https://orcid.org/0000-0001-6258-3625

References

- Y. K. Kim, Y. W. Kim, J. H. Kim, Welding residual stress and strength of thick 9% nickel steel plate, *J. Korean Soc. Power Sys. Eng.* 18(4) (2014) 85-90. https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.4.085
- J. H. Kim, K. T. Shim, Y. K. Kim, B. W. Ahn, Fatigue Crack Growth Characteristics of 9% Ni Steel Welded Joint for LNG Storage Tank at Low Temperature, *J. Korean Weld. Join. Soc.* 28(5) (2010) 45-50. https://doi.org/10.5781/kwjs.2010.28.5.045
- 3. T. W. Kim, Y. S. Suh, K. B. Jang, M. S. Chun, K. D. Lee, K. H. Cha, A study and design on tank container

for fuel tank of LNG fueled ship, *J. Soc. Nav. Archit. of Korean*, 49(6) (2012) 504-511. https://doi.org/10.3744/snak.2012.49.6.504

- S. H. Cho, M. J. Sim, Y. J. Jung, I. S. Kim, A study on thermal performance evaluation procedures of LNG Fuel Tank. *J. Korean Inst. of Gas.* 22(3) (2018) 45-52.
- 5. Kobelco, Kobelco welding today, *Kobe steel, LTD.*, Tokyo, Japan, 14(2) (2011), 6.
- J. S. Kim, H. W. Lee, A study on effect of intergran- ular corrosion by heat input on Inconel 625 overlay weld metal. *Int. J. Electrochem. Sci. 10* (2015) 6454-6464.
- R. J. Patterson, O. Milewski, GTA weld Cracking-alloy 625 to 304, *Weld. J.* 64(8) (1985) 227.
- J.C. Lippold, J. W. Sowards, G. M. Murray, B. T. Alexandrov, A. J. Ramirez, Weld solidification cracking in solid solution strengthened Ni-base filler metals. *Hot cracking phenomena in welds II*, (2008) 147-170. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78628-3_9
- 9. M. J. Cieslak, The welding and solidification metallurgy of alloy 625, *Weld. J.* 70(2) (1991)
- G. M. Goodwin, Test methods for evaluating hot cracking review and perspective, *Oak Ridge National Lab.*, (1990) 4-22.
- N. Christensen, Distribution of temperatures in arc welding. Br. Weld. 12(2) (1965) 54-75.