

해양용 UNS S32654강의 기술 개발 현황

신 용 택*†

*동아대학교 조선해양플랜트공학과

UNS S32654 for Demanding Offshore Applications

Yong-Taek Shin*,†

*Dept. of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University, Busan 656-710, Korea

†Corresponding author : ytshin@dau.ac.kr

(Received October 17, 2015 ; Revised October 27, 2015 ; Accepted October 27, 2015)

Abstract

Nickel alloy, especially Alloy 625, is used widely in industrial applications such as aerospace, chemical, petrochemical and marine applications due to their good mechanical properties, excellent fabricability, weldability and good corrosion resistance. Especially, it is obviously applied in FPSO's moon pool structure and caisson tubular of CPF under seawater environment. Recently, UNS S32654 was developed to substitute alloy 625 because of high cost price. In this study, mechanical properties and corrosive properties of UNS S32654 are reviewed and proposed its applications.

Key Words : UNS S32654(654SMO), UNS S31254, UNS34565, N06625(ALLOY 625)

1. 서 론

니켈기 합금은 내식, 내열성 그리고 저온인성이 탁월하여 고효율 에너지 설비 및 고온부식환경에 광범위하게 적용되고 있다. 특히, alloy 625강은 니켈기 합금의 대표적인 강으로써, 용접 후에 발생하는 균열을 최소화함으로써 터빈 케이싱, 연소실 라이너 및 원전기기¹⁾ 등 내열, 내식성을 요구하는 환경에 주로 사용되고 있다. 최근에는 해양구조물 탑사이드(Topside)에도 그 사용 빈도가 증가하고 있으며, 특히 해수환경하에 있는 FPSO의 Moon pool 구조 및 CPF(Central Processing Facility)의 caisson tubular등에 오버레이 용접기법을 이용하여 사용되고 있다. FPSO(Floating Production, Storage and Off-loading Vessel)의 모든 블록은 Moon pool 블록을 중심으로 탑재된다. (Fig. 1)²⁾ Moon pool이란 FPSO선의 선체를 바람, 조류, 파도 등의 영향이 가장 작은 방향으로 선수가 향하게 하고(weather vaning), 선체 상부에 설치되어 있는 모듈로 원유를 원활히 보낼 수 있도록 기름 호스의

가이드 역할을 하는 Turret이 설치되는 구조물이다. 이러한 Moon pool 블록 제작 시 해수부식에 견딜 수 있게 설계되고 있으며, 현재, 스트립 오버레이 용접을 이용한 cladding 방식을 이용하여 제작되고 있다. 즉, 직경 20m 이상의 대형 원통형 판 내부에 두께 20mm 이상으로 오버레이 용접을 수행하고, 이후, 기계가공으로 설계 치수를 맞추는 방식으로 작업을 하게 된다. 이러한 기계 가공으로 제거되는 alloy 625는 타 강종 대비 고가임에 따라 산업체의 원가 절감 측면에서 다양한 고려가 필요하다. 그 일환으로 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강의 잠재적 수요가 증가하고 있고, 특히, 해수 환경 및 해양프로세스 파이프에 적용 범위가 증가하고 있다. 이들 중 UNS S32654는 높은 강도와 내식성을 함유하고 있어 해수 환경 및 해양프로세스 파이프 적용이 충분히 가능할 뿐만 아니라, Inconel 625의 대체재로서도 충분한 특성을 보유하고 있어 현장에서 원가 경쟁력을 확보할 수 있는 기회를 제공할 수 있다. 이에 본 고에서는 UNS S32654의 재질 특성 및 관련 기술 동향을 소개하고자 한다.

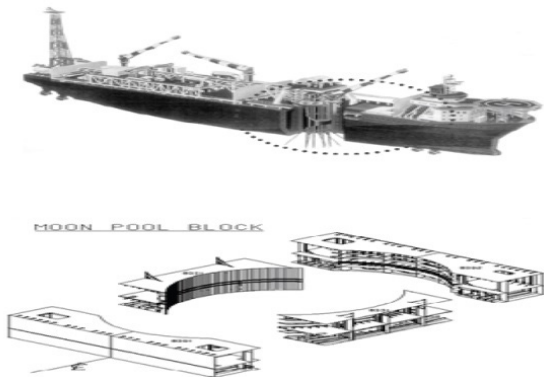


Fig. 1 Moon pool structure of FPSO

2. 본 론

2.1 개발 배경

수년간 내식 재료에 대한 요구가 계속 증가됨에 따라, 수 많은 슈퍼오스테나이트 스테인리스강이 개발되었다. 70년대 6Mo강인 UNS S31254 (254SMO)가 개발된 이후, 해수환경의 해양 산업에 광범위하게 사용되고 있다. 또한, Mo를 낮추고, Cr 및 N을 더 첨가하여 더 나은 내식성을 가진 UNS S34565도 개발되었다. 그러나, 이러한 재질은 심각한 crevice 환경이나 온도가 상승하는 거친 조건의 환경(예, 열교환기)에서는 적용 하는데 제한적이다. 이런 환경에서는 니켈기 합금 또는 티타늄 재질이 그 역할을 수행하고 있다. 이런 이유로 인하여 제 2세대 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강인 UNS S32654 (654SMO)가 개발되었다. UNS S32654 재질은 뛰어난 내식성과 기계적 특성을 보유하고 있어, 일부 니켈합금을 대체하기에 충분한 것으로 평가되고 있다.

2.2 기계적 특성

UNS S32654는 Table 1에서 보는 바와 같이 타 재질 대비 높은 인장특성을 보유하고 있을 뿐만 아니

Table 1 Mechanical properties at room temperature, minimum values according to ASTM A 240, B 443 and B 575

UNS	YP(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
S31254	310	690	35
S34565	415	795	35
S32654	430	750	40
N06625	379	758	30
N10276	283	690	40
N06022	310	690	45

Table 2 Tensile properties at elevated temperature

Temp.(°C)	Amb.	50	100	200	300	400
0.2%YP	427	386	352	317	303	296
TS	750	724	682	620	586	558

라, 연성 및 인성을 모두 뛰어난 특성을 가지고 있다.^{3,4,5)} 또한, Table 2에서 보는 바와 같이 고온에서의 인장 특성도 우수한 것으로 평가된다.⁶⁾ 이런 높은 강도는 고온에서의 인장특성을 요구하는 부위뿐만 아니라, 제품의 두께 절감을 통한 가격 경쟁력에 도움이 될 수 있다. 냉간가공특성 또한 다른 오스테나이트 스테인리스강과 동일하게 우수한 것으로 알려져 있다. 높은 강도와 연성으로 인하여 가공시 높은 하중과 스프링백에 대한 보다 많은 허용치가 필요하지만, 열교환기에 사용될 정도로 좋은 가공성을 가지고 있다. 고온성형은 통상 1100~1200°C에서 가능하지만, 1150°C 이상에서 어닐링하고 퀴칭하여 2차상의 생성을 억제해야 한다. 기계가공에 있어서는 높은 강도, 인성 및 가공경화로 인하여 다른 오스테나이트 스테인리스강보다 좀 더 관심을 두어야 한다. 즉, 견고한 설비와 낮은 생산 속도 및 우수한 연마제를 필요로 한다.

2.3 내식성 특성

UNS S32654의 내식성에 대하여 동일 계열의 UNS S31254, UNS34565 및 니켈합금인 UNS N06625 (ALLOY 625) 및 UNS N06022와 서로 비교하였다.

비교 대상재간의 일반적인 화학성분을 Table 3에 나타내었다. 공식부식은 ASTM G150⁷⁾에 따라서 CPT를 평가하였다. ASTM G150에서는 표준용액으로 1M NaCl를 제시하고 있으나 S32654와 같은 고합금강은 90°C에서도 피팅을 보이지 않는 경우가 많아, 3M NaBr를 사용하기도 한다. Table 4에 결과를 보여주고 있는데, S32654가 니켈합금대비 우수한 CPT를 보여주고 있다. 틱새부식은 ASTM G48 Method D와 F를

Table 3 Designation and typical chemical compositions

Designation	Typical chemical composition (wt%)						
	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn	Others
UNS							
S31254	0.01	0.20	20	18	6.1	-	Cu
S34565	0.02	0.45	24	17	4.5	5.5	-
S32654	0.01	0.50	24	22	7.3	3.0	Cu
N06625	<0.10	-	22	62	9.0	-	Nb, Ta, Fe
N10276	<0.01	-	15	57	16.0	-	W, Fe
N06022	<0.010	-	22	56	13.0	-	W, Fe

Table 4 Critical pitting temperature (CPT) under potentiostatic control in 3M NaBr(°C)

UNS	Thick. (mm)	Specimen no.			Average
		1	2	3	
S31254	5.0	32.2	32.7	-	32.5
S34565	9.2	48.9	49.7	49.3	49.3
S32654	13.8	>90	85.6	>90	>88.5
N06625	3.0	50.8	52.9	52.9	52.2
N10276	3.18	80.1	81.5	81.6	81.1
N06022	3.1	74.7	61.9	-	68.3

Table 5 Critical crevice temperature (CCT) in 6% FeCl₃ + 1%HCl, ASTM G48 Methods D and F

UNS	Thick. (mm)	CCT(°C)	
		Method D	Method F
S31254	4.0	30	35.0
	6.0	-	37.5
S34565	8.8	-	40.0
S32654	3.0	65	57.5
	2.3	-	55.0
N06625	3.0	40	22.5
N10276	3.1	50	40.0
N06022	3.1	60	57.5

이용하여 결정한다⁸⁾.

Table 5에서는 CCT 결과⁹⁾를 보여주고 있는데, 슈퍼 오스테나이트 스테인리스강이 니켈합금대비 동등 수준의 내식성을 보여주고 있다. 또한, Table 6의 장기부식시험에서도 니켈합금대비 우수한 결과를 보여주고 있다⁹⁾.

Table 7에서는 해수환경에서의 틈새부식 시험 결과를 보여주고 있는데, 타 재질대비 우수한 내식성을 보여주고 있다.¹⁰⁾ Table 8에서는 45~70°C의 해수온도에서 열교환기의 재질로 사용되는 환경을 고려하여 3달 동안 진행된 틈새 부식 시험결과를 보여주고 있다.¹¹⁾ 전체 시험편(괄호)에서 부식이 발생된 수를 보여주고 있는데, S31254(6 Mo강) 및 UNS06625(alloy 625)대비 우수한 결과를 보여주고 있다.

Table 8 Result of PHE and coupon test in chlorinated (2 ppm Cl₂) seawater (North Sea)

Seawater Temp.	S31254		S32654		N06625		N10276	
	PHE	Coupons	PHE	Coupons	PHE	Coupons	PHE	Coupons
45°C	5 (5)	0 (6)	0 (5)	0 (6)	-	3 (6)	5 (5)	3 (6)
50°C	5 (5)	-	0 (5)	-	-	-	5 (5)	-
60°C	-	-	0 (13)	-	-	-	-	-
70°C	-	-	0 (13)	-	-	-	-	-

PHE : Plate Heat Exchanger

Table 6 Results from crevice corrosion testing in 6% FeCl₃ at 50°C for 500h

UNS	Thickness (mm)	Weight loss (mg)	Corr. Rate (g/m ² h)	No. of crevices attacked	Max. crevice depth (mm)
S31254	3.0	906.1	0.615	24	0.711
S32654	3.1	0	0	0	-
N06625	3.0	1183.5	0.810	24	1)
N10276	3.1	38.1	0.027	20	0.184
N06022	3.1	32.0	0.022	24	0.299

Note 1) attack penetrating the specimen

Table 7 Crevice corrosion in chlorinated (10 ppm Cl₂) seawater at 45°C

UNS	Number of crevice sites		Max. crevice depth(mm)
	Crevice corrosion	Total	
S31254	7	8	0.98
S32654	0	8	-
N06625	8	8	0.47
N10276	7	8	0.31

스테인리스강의 내식 순위를 결정하기 위하여 식(1)을 대부분 사용한다. Table 9에 보는 바와 같이 식(1)을 사용한 PREN은 UNS32654가 니켈 합금 대비 낮은 결과를 보여주고 있다. 그러나, 니켈합금에 있어 PREN에 대한 많은 연구^{12,13,14)}가 진행되었고, 이를 식(2,3,4)에서 보여주고 있다. 이들 식을 이용한 PREN 값은 오히려 동등한 수준으로 나타나고 있다. 어느 식이 좀 더 정확하다고는 할 수 없으나, 전반적인 내식성은 니켈합금과 대비하여 동등한 수준으로 판단된다.

$$\text{식(1) PREN} = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5x\%W) + 16x\%N$$

$$\text{식(2) PREN} = \%Cr + 1.5x(\%Mo + \%W + \%Nb) + 30x\%N$$

$$\text{식(3) PREN} = \%Cr + 3.3x\%Mo + 11x\%N + 1.5x(\%W + \%Nb)$$

Table 9 Calculated PRE values using different equations

UNS	Eq.(1)	Eq.(2)	Eq.(3)	Eq.(4)
S31254	43	35	42	29
S34565	46	44	44	31
S32654	56	50	54	35
N06625	52	43	59	43
N10276	65	46	75	46
N06022	69	46	69	46

$$\text{식(4) } \text{PREN} = \%Cr + 1.5x(\%Mo + \%W + \%Nb)$$

2.4 용접특성

UNS S32654는 기존의 오스테나이트 스테인리스강에 적용하는 용접법을 동일하게 사용할 수 있으나, 용가재 없이 용접할 때, 크롬, 니켈, 몰리브덴 편석이 발생될 수 있으므로 용가재를 사용해서 용접하는 것이 좋다. 용가재는 AWS A 5.14 ERNiCrMo-13에 해당하는 제품을 사용할 수 있다. 본 용가재는 UNS S34565 뿐만 아니라, alloy625, 825등에도 적용 가능하다. Avesta사에서 직경 2.4mm에 대해서 300~400A, 29~33V 및 직경 3.2mm에 대해서는 350~450A, 29~33V를 제시하고 있으며, 입열량은 최대 1.5 kJ/mm 및 층간온도를 최고 100°C로 추천하고 있다. 또한 개선형상은 완전용입이 가능하고, 모재와의 희석을 최소화 할 수 있는 것을 제시하고 있다. GTAW용접에서는 100%Ar 또는 Ar+3~5%N의 보호가스를 사용하는 것이 좋고, PAW 용접에서는 100%Ar 또는 Ar+10%N+5%H를 사용할 수 있다. 9%니켈강에 대하여 alloy 625용접재료를 사용하는 경우, Ar+30%He 가스를 사용하여 양호한 용접부 품질을 확보할 수도 있다. 백킹가스로는 질소+10% 수소가스를 사용할 수 있다.

2.5 적용 가능성

S31254(6Mo강) 및 S32750(SDSS)은 해양 구조물의 해수 파이프에 다양하게 적용되고 있다. 그러나 염화물과 crevice가 존재하는 35°C 이상의 환경에서는 부식이 발생된다. S32654는 주기적으로 온도가 70°C 까지 상승하는 해수 냉각환경에서 S31254를 대체 가능한 걸로 보고되고 있다.¹⁵⁾ 동일 환경에서 플랜지 및 threaded nozzle에 사용된 S31254는 틈새 부식이 발생되었고, 오버레이 용접한 N06625에서도 부식이 발생된 것으로 보고되고 있다.

최근 해수 냉각 열교환기에서 티타늄을 적용한 사례

가 보고되고 있는데¹⁶⁾, 오히려, 해수에서의 뛰어난 내식성과 니켈합금 동등 이상의 내식성을 함유한 S32654를 대체재로 활용해 볼 가능성이 존재한다. 게다가 S32654는 고강도, 고연성을 보유하고 있으므로 열교환기와 같이 복잡한 형상의 성형에 유리한 점이 있다.

해저파이프는 주로 높은 염화물과 황화수소 및 이산화탄소를 함유한 분위기에 노출되는 경우가 많다. 이런 환경에서는 종종 니켈기 합금 클래드강을 많이 사용한다. S32654를 사용하는 경우 합금원소의 절약과 뛰어난 기계적 특성으로 인하여 원가절감을 기대할 수 있을 수 있다. 또한 해저 플렉스블 파이프에 사용되는 듀플렉스 재질을 본 재질로 변경시 부식 문제를 해결 할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이, S32654재질은 환경에 따라 DSS에서부터 니켈합금을 대체할 수 있으므로 해양공사 원가 경쟁력에 도움이 될 수 있으므로 다양한 적용성 평가를 수행해 볼 가치가 있다고 판단된다.

3. 결 론

본 장에서는 S32654의 재질 특성 및 다양한 적용 가능성에 대하여 살펴보았다. 국부 내식성은 6 Mo강인 S31254 및 S34565보다 우수하고, 성능은 N06625, UNS N10276, UNS N06022와 동등 이상의 수준을 가지고 있음을 확인하였다. 따라서, 조선, 해양 산업에서의 보다 많은 활용이 기대된다.

References

1. I.C. Jung, D.N. Shim, J.G.Byun, Overlay Welding of Inconel Material for Nuclear Power Components, *J. of KWJS*, 27 (2) (2009), 4-6 (in Korean)
2. S.W. Han, J.S. Lee, S.I. Kim, A Study on the Weld-Induced Deformation and Residual Stress Analysis at FPSO Moon Pool Structure, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48 (5) (2011), 473-478
3. ASTM A240/240M - 11a (2011), Standard specification for Chromium-Nickel Stainless Steels Plate, Sheet and Strip for Pressure Vessels and for General Application, *ASTM International*
4. ASTM B443-00 (2009), Standard Specification for Nickel - Chromium - Molybdenum - Columbium Alloys (UNS N06625) and Nickel - Chromium - Molybdenum - Silicon Alloy (UNS N06219) Plate, Sheet and Strip, *ASTM International*
5. ASTM B575 - 10 (2010), Standard Specification for Low - Carbon Nickel - Chromium - Molybdenum, Low - Carbon Nickel - Chromium - Molybdenum - Copper, Low - Carbon Nickel - Chromium - Molybdenum - Tantalum, Low - Carbon Nickel - Chromium -

Molybdenum - Tungsten, and Low - Carbon Nickel - Molybdenum - Chromium Alloy Plate, Sheet, and Strip, *ASTM International*

6. Outokumpu, Type 654 SMO, UNS S32654 datasheet,
7. ASTM G150 - 99 (2010), Standard Test Method for Electrochemical Critical Pitting Temperature Testing of Stainless Steels, *ASTM International*.
8. ASTM G48 - 03 (2009), Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution, *ASTM International*.
9. E. Johansson, R. Pettersson, S. Mameng, E. Alfonsson, 654 SMO®: Moving the boundaries of stainless steel and challenging Ni-base alloys, *A corrosion management and applications engineering magazine from Outokumpu*, 2(2012)
10. D. Feron, B. Wallen, Effect of high concentrations of chlorine and sulfide on stainless alloys in seawater, *CORROSION* 93, 93498, (New Orleans, LA, NACE International, March 12-14, 1993).
11. B. Wallen, L. Wegrelius, Performance of a Highly Alloyed Stainless Steel in Seawater Cooled Plate Heat Exchanger, *EUROCORR 2000*, (London, The European Federation of Corrosion, September 10-14, 2000).
12. S. A. McCoy, B. C. Puckett, and E. L. Hibner, High performance age-hardenable nickel alloys solve problems in sour oil and gas service, *Stainless Steel World* 14, (2002), 48-52.
13. C. Thornton, C. Cooper, Overmatching Superalloy Consumable Inco-weld® 686CPT® Broadens its Applications to Include Welding Super Austenitic and Super Duplex Stainless Steels, *Stainless Steel World* 2004, (Houston, TX, KCI Publishing, 20-22 October, 2004).
14. E. L. Hibner, C. S. Tassen, and J. W. Skogsberg, Effect of Alloy Nickel Content vs. PREN on the Selection of Austenitic Oil Country Tubular Goods for Sour Gas Service, *CORROSION* 98, 106, (San Diego, CA, NACE International, March 22-28, 1998).
15. J. Olsson, W. Wasielewska, Applications and experience with a Superaustenitic 7Mo stainless steel in hostile environments, *Materials and Corrosion* 48 (12) (1997): 791-798.
16. O. Persson, L. Novak, K. Nilsson, and D. Klint, The Use of Corrosion Resistant Alloys (CRAs) in Compact Plate Heat Exchangers in Seawater, *CORROSION* 2007, 07249, (Nashville, TN, NACE International, 11 -15 March, 2007).



- 신 용 택
- 1968년생
- 동아대학교 조선해양플랜트공학과
- 용접 강도 및 야금
- e-mail: ytshin@dau.ac.kr