

멤브레인형 LNG 탱크용 오스테나이트계 스테인리스강의 저온강도 및 피로강도에 관한 연구

이해우* · 신용택* · 박정웅* · 이재원* · 강창룡**

A Study on Low Temperature Strength and Fatigue Strength of
Austenitic Stainless Steel for Membrane Type LNG Tank

H.W.Lee*, Y.T.Shin*, J.U.Park*, J.W.Lee* and C.Y.Kang**

Key Words : Membrane type(멤브레인 형), LNG(액화천연가스), GTAW(가스 텅스텐 아크 용접), Twin(쌍정), Pro-eutectic ferrite(초정 페라이트), Fatigue strength(피로강도)

Abstract

Feasibility study of the application of a developed annealed austenitic stainless steel at cryogenic temperature has been performed for membrane tank of LNG ship. Chemical properties of developed stainless steel are compared with a domestic commercial stainless steel and a foreign stainless steel which are used for LNG ships. Tensile properties at cryogenic temperature and fatigue strength at room temperature are measured for butt and lap joints which are TIG welded specimens. Developed stainless steel having a small amount of titanium component shows the finest grain size in the HAZ, compared with the other stainless steels studied. Tensile strength, elongation and fatigue strength of the developed stainless steel are equal to those of the foreign stainless steel studied and are higher than the domestic commercial stainless steel studied.

1. 서 론

오스테나이트계 스테인리스강은 강도, 인성, 내식성 및 용접성이 우수하기 때문에 저온에서 고온에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다. 특히 어닐링된 오스테나이트계 스테인리스강은 연신율과 인성이 대단히 우수하므로 LNG(Liquefied Natural Gas)선과 같이 극저온에서도 범용적으로 사용되는 재료이다¹⁻³⁾. LNG선의 cargo containment은 크게 독립탱크형인 Moss형(AI 합금사용)과 선체일체형인 멤브레인형으

로 대별되며 선체일체형에는 Invar 강을 사용하는 GT(Gas Transport)형과 오스테나이트계 스테인리스 강을 사용하는 TGZ(Technigaz)형으로 구분된다. 1.2mm 오스테나이트계 스테인리스강 304L을 사용하는 선체일체형의 TGZ형은 국내에서 처음 적용되어 건조되는 탱크이다. 즉 -163℃의 액화천연가스가 스테인리스강 표면에 바로 접촉된다는 점에서 극저온에서의 물성치는 중요한 의미를 가진다. 따라서 본 연구에서는 LNG선 용으로 사용 실적이 있는 외국의 U사 제품을 비교재로 사용하여, 범용적으로 사용되는

* 1999년 12월 23일 접수

* 정회원, 삼성중공업 조선, 플랜트 연구소 용접연구팀

** 비회원, 부경대학교 금속공학과

• 이해우 : hwl8248@samsung.co.kr

304L 스테인리스강과 LNG선 용으로 국내 P사에서 개발된 재료에 대한 미세조직, 화학조성, 저온인장 및 피로강도를 상호 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 모재 및 용접방법

본 연구에 사용된 강재는 오스테나이트계 스테인리스강 304L로써 국내에서 생산되어 범용적으로 사용되고 있는 강재와 LNG선 용으로 국내 P사에서 개발된 강재 및 외국의 U사 제품등 3가지를 사용하였다. 용접은 맞대기 이음부(butt joint)와 겹침 이음부(lap joint)로 구분하여 가스 텅스텐 아크용접(GTAW)을 실시하였으며 용가재(filler metal)는 사용하지 않았다. 시험편 형상은 Fig. 1에, 용접조건은 Table 1에 각각 나타내었다.

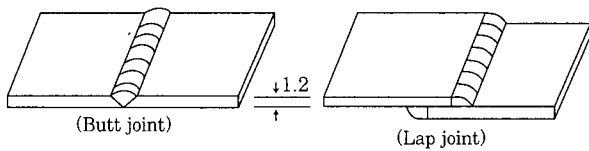


Fig. 1 Schematic drawings of welding joint

Table. 1 Welding parameters

current (A)	voltage (V)	weld speed (cm/min.)	heat input (kJ/cm)	flow rate (l/min.)	shielding gas
47	9	9~10	2.5~2.8	12~15	100% Ar

모재의 화학조성은 건식방법인 스펙트로 분석기(spectrovac-2000, USA)로 3회 분석하여 평균값을 기록하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 용접부의 미세조직은 그라인딩 및 폴리싱후 전해부식

으로 시험편을 부식시킨후 광학현미경으로 관찰하였으며 부식액은 Oxalic acid 10g + H₂O 1000ml를 사용하였다.

2.2 인장 및 피로시험

인장시험기(Shimadzu DCS - 25T)에 각 온도별로 인장시험이 가능하도록 챔버를 부착하였다. 또한 챔버 내에 프로펠라를 부착하여 온도를 일정하게 유지하였으며 냉매로는 액체질소 및 알콜을 단독 또는 혼합하여 사용하였다.

피로시험에 사용된 시험기(Instron 8502)는 동적하중 ±25ton 용량의 유압식으로 응력비 R=0.1인 편진하중 제어 방식으로 상온에서 피로시험을 실시하였고 하중 파형은 정현파로 이때 부하속도는 4Hz로 하였다. 피로시험은 개발된 강재와 외국의 U사 강재에 대하여 반복수 2×10⁶까지 실시하였으며 반복수까지 파단되지 않은 경우를 피로한도로 정의하였다. 사용된 피로시험편 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

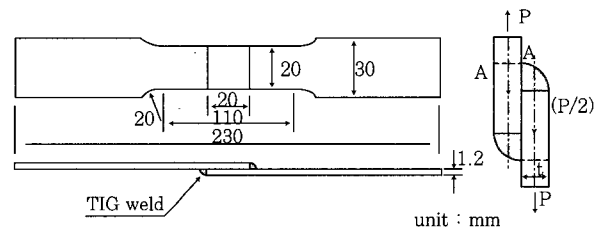


Fig. 2 Configuration of fatigue test specimen

3.결과 및 고찰

3.1 미세조직

본 연구에 사용된 오스테나이트계 스테인리스강

Table 2. Chemical composition of base metal

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti
Specification (JIS 304L)	0.030 max	2.00 max	1.00 max	0.045 max	0.030 max	9.00~13.00	18.00~20.00	-
A	0.015	1.28	0.60	0.010	0.020	10.26	18.2	
B	0.018	1.36	0.61	0.007	0.016	10.22	18.2	0.02
C	0.020	1.50	0.61	0.005	0.007	10.53	18.3	

Identification A : commercial austenitic stainless steel
 B : developed austenitic stainless steel for LNG
 C : foreign stainless steel

304L의 모재의 미세조직을 Fig. 3의 (A), (C) 및 (E)에 나타내었다. 일반적인 용도로 사용되고 있는 304L의 미세조직을 나타낸 (A)의 경우 오스테나이트 결정입내에 쌍정(twin)이 잘 발달되어 있음을 알 수 있다. LNG선용으로 개발된 (C)의 경우 (A)보다 결정립이 미세하여 오스테나이트 결정립에 압연시 발생된 압연 flow line이 혼재해 있음을 알 수 있으며 비교재로 사용된 외국 강재 (E)는 결정립은 미세하나 (C) 처럼 압연 flow line은 잘 관찰되지 않고 있다. 용접부 중 용융선 바로 옆의 열영향부 미세조직을 (B), (D) 및 (F)에 나타내었는데 용접부의 조직은 오스테나이트 기지조직에 델타 페라이트가 망상조직(network structure)으로 연결되어 있는 Vermicular 페라이트와 소량의 Lathy 페라이트가 혼재해 있다. 이와같은 조직은 초정 페라이트(pro-eutectic ferrite)로 응고한 용착금속의 전형적인 조직으로 수지상(dendrite)을 따라 Vermicular 페라이트가 생성되어 있음을 알 수 있다⁵⁻⁶⁾. 페라이트 생성은 냉각속도가 느릴수록 즉 고입열 용접일수록 페라이트에서 오스테나이트로 상변태가 일어날 수 있는 시간이 길어져 용착금속내의

페라이트량은 감소하게 된다. 용접부 조직은 큰 차이를 보이지 않은 반면 용융선(fusion line) 바로 아래의 열영향부에서는 모재의 종류에 따라 큰 변화를 보이는데 범용적으로 사용되고 있는 강재의 열영향부를 나타낸 (B)는 결정립 조대화 현상이 뚜렷한 반면 LNG선용으로 개발된 강재의 미세조직인 (D)는 (B)와 비교하여 결정립이 크게 조대해져 있지 않음을 알 수 있다. 이와같은 이유는 prior 오스테나이트 결정립이 더 미세할 뿐만 아니라 Table 2의 화학조성에 나타난 것처럼 LNG선 용으로 개발된 강재에 미량 첨가된 Ti이 질화물등을 형성하여 결정입계에 우선적으로 석출됨으로써 동일한 입열에서 상대적으로 결정립 성장을 둔화시킨 것으로 사료된다. 또한 비교재로 사용된 외국 강재 (F)는 (B) 및 (D)의 중간정도의 크기로 결정립이 성장되어 있음을 알 수 있다.

3.2 인장 특성

Fig. 4 및 Fig. 5에서는 각 온도별 모재의 인장강도와 연신율을 나타내고 있다. 온도변화에 따른 인장특성을 나타낸 Fig. 4는 시험온도가 낮아질수록 인장강도가 높아지는 경향을 보이는데 이는 준안정 오스테나이트 조직을 갖는 304L 스테인리스강의 인장성질은 소성변형에 의해 생성되는 가공유기 마르텐사이트와 밀접한 관계가 있으며 생성되는 마르텐사이트량은 변형온도와 변형량에 따라 달라지기 때문에 인장성질 또한 시험온도에 따라 다르게 나타난 것으로 판단된다⁷⁾. Fig. 5는 시험온도에 따른 연신율 그래프로써 인장시험 온도가 낮아질수록 연신율이 낮아지는 경향을 보이

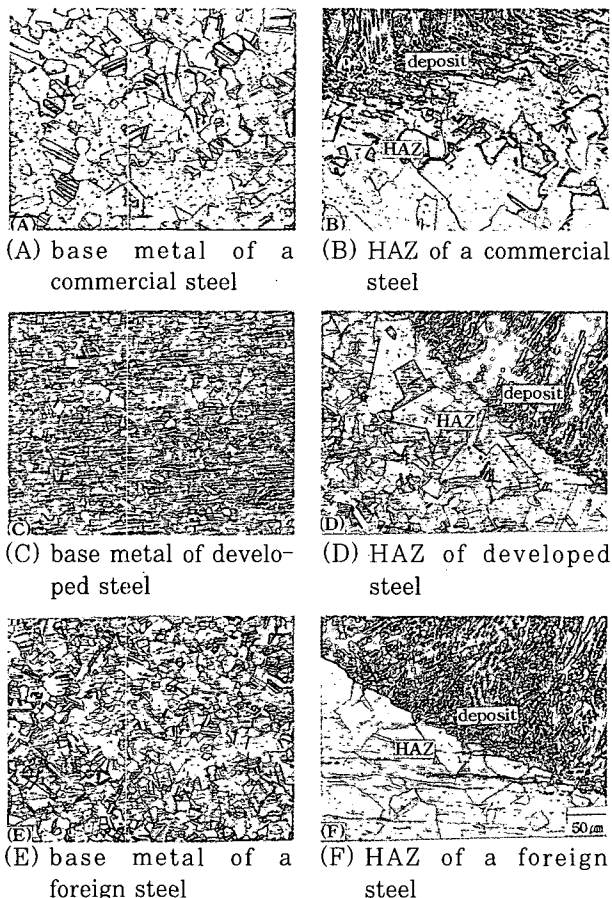


Fig. 3 Microstructure of base metal and heat affected zone for 304L weldments

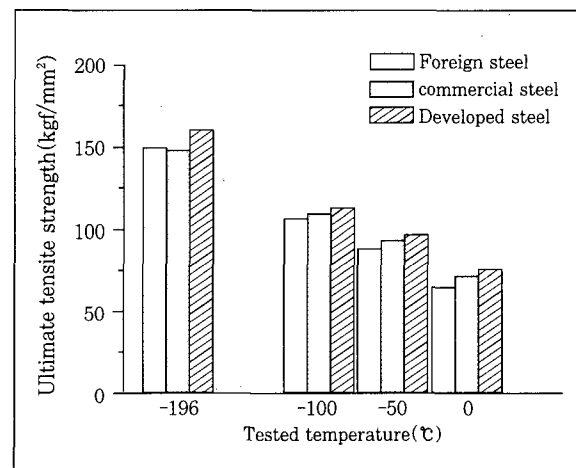


Fig. 4 Comparison of tensile strength for various base metals of 304L stainless steel for different test temperature conditions

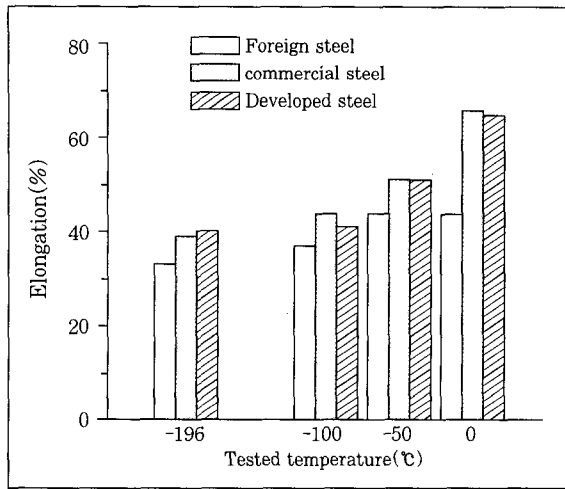


Fig. 5 Comparison of ultimate tensile elongations for various metals of 304L stainless steel for different test temperature conditions

고 있으나 극저온 상태인 -196℃에서도 30% 이상의 높은 연신율을 나타내고 있으며 특히 LNG선용으로 개발된 강재와 외국강재 모두 범용적으로 사용되고 있는 강재보다 우수한 연신율을 보이고 있다. 이는 Fig. 3의 미세조직에서 알 수 있듯이 외국 U사 및 국내 개발강재가 범용적으로 사용되는 강재보다 결정립이 미세하고 오스테나이트 결정입내에 쌍정이 잘 발달되어 높은 연신율을 나타낸 것으로 생각된다. 각 온도별 용접부의 인장강도를 Fig. 6에 나타내었는데 앞에서 고찰한 모재의 인장강도보다 전반적으로 낮은 값을 보이고 있다. 이는 구조조직원 용접부에 비해 모재의 경우 균일하고 미세한 조직과 소성변형에 의한 가공유기 마르텐사이트 생성 및 슬립등이 상대적으로 잘 발달하였기 때문에 낮은 인장강도를 갖는 것으로 판단된다. 또

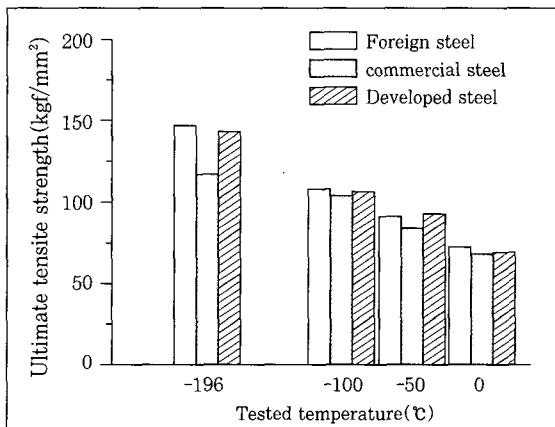


Fig. 6 Comparison of tensile strength for various weldments of 304L stainless steel for different test temperature conditions

한 범용적으로 사용되고 있는 강재가 LNG선용으로 개발된 강재와 외국 U사 강재 보다 인장강도 및 연신율이 상대적으로 낮게 나타내었다.

3.3 피로 특성

접침이음부(lap joint)를 가진 시험편의 피로시험 결과를 공칭응력범위(ΔS)를 기준으로 상온에서 작성한 S-N선도를 Fig. 7에 나타내었다. 고응력인 경우 외국 U사 강재가 개발된 강재보다 상대적으로 우수한 피로강도를 보였으나 응력이 낮아질수록 개발된 강재가 높은 피로강도를 나타내었으며 피로한도는 두 시험편 모두 12kgf/mm²이었다. 파단된 시험편은 모두 toe에서 파단이 발생되었는데 이는 형상변화에 따른 응력집중이 원인인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 상온에서 피로시험을 실시하였으나 실제 적용이 되는 LNG선과 같은 저온 조건에서의 피로강도는 일반적으로 증가하는 것으로 알려져 있다⁸⁻¹⁰. Forrest는⁸ 노치가 없는 시험편과 노치가 있는 시험편 모두 온도가 감소함에 따라 피로강도가 증가한다고 보고하였고 Mann도⁹ 대부분 금속재료의 피로강도는 온도 감소에 따라 증가한다고 발표하였다. Spretnak등은¹⁰ 304 스테인리스강에 대한 저온 피로시험을 실시하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었는데 노치가 없는 시험편의 피로강도는 온도가 감소할수록 피로강도가 현저히 증가하였으나 노치가 있는 시험편은 큰 차이가 나지 않는다고 결론을 얻었다. 따라서 상온에서 실험하여 얻어진 본 연구의 피로강도 결과는 저온으로 갈수록 피로강도가 향상되는 효과가 있으므로 상온 및 영하 163℃에서 피로를 받는 LNG선 재료로 사용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

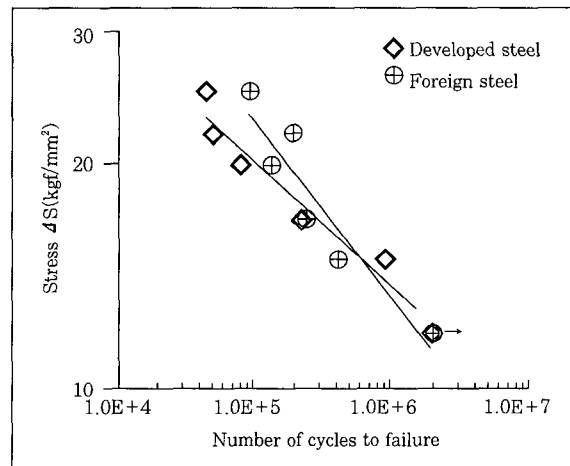


Fig 7. Results of fatigue test for developed and Foreign steel

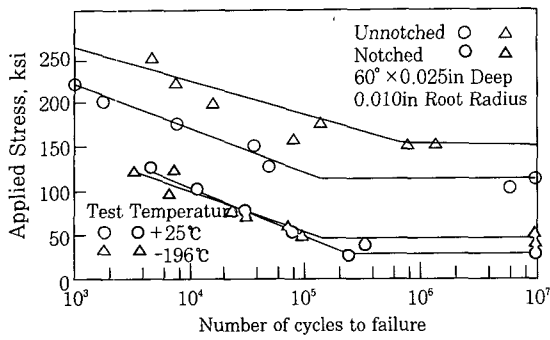


Fig. 8 S-N behavior of austenitic stainless steel 304 at 25 and -196°C⁽¹⁰⁾

4. 결 론

범용적으로 사용되고 있는 재료 및 LNG 선용으로 개발된 오스테나이트계 스테인리스강 304L과 이미 LNG 선용으로 사용실적이 있는 외국 U사 제품에 대하여 화학조성, 미세조직, 저온인장 및 피로강도를 상호 비교 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모재의 결정립이 미세할수록 용접 열영향부의 결정립 조대화 현상은 억제되었으며 LNG 선용으로 개발된 국내 강재의 열영향부에서 결정립 조대화 현상이 가장 적게 일어났다.
2. 모재와 용접부의 인장강도 및 연신율 분석결과, LNG 선용으로 개발된 국내강재와 외국 U사 제품의 경우 유사한 결과를 보이며, 특히 범용적으로 사용되는 재료보다 상대적으로 우수하였다.
3. 피로시험 결과 고응력에서는 외국 U사 제품이, 저응력에서는 LNG 선용으로 개발된 국내 강재가 상대적으로 우수한 피로강도를 보였으며 상온에서의 피로한도(2×10^6)는 두 제품 모두 12kgf/mm²이었다.

참 고 문 헌

1. J. C. Lippold, W. A. Baeslack and I. Varol:

Heat-affected zone liquation cracking in austenitic and duplex stainless steels, *Welding journal*, January, 1992 pp 1-14

2. T. G. Gooch and J. Honeycombe: Microcracking in fully austenitic stainless steel weld metal, *British welding journal*, Vol.9, 1970, pp 375-380

3. F. C. Hull : Effect of delta ferrite on the hot cracking of stainless steel, *Welding journal*, Vol.46(9), 1967, pp 399-409

4. AWS D1.1, 98 Commentary on structural welding code-steel, Design of welded connections.

5. V. Shankar, T.P.S. Gill, S. L.Mannan And S. Sundaresan : Evaluation of hot cracking in nitrogen-bearing and fully austenitic stainless steel weldments, *Welding journal*, May, 1998, pp 193-201

6. Kotecki D.J. and Siewert T. A.: WRC-1992 constitution diagram for stainless steel weld metal, *Welding journal* 71(5) pp171-178

7. 강창룡 : 스테인리스강의 기계적 성질에 미치는 변태유기 소성에 관한연구, 박사학위논문, 동아대, 1991, pp 22-26

8. P.G. Forrest : *Fatigue of metals*, New York, Pergamon press, 1962

9. J. Y. Mann : *Fatigue of materials*, Australia, Melbourne university predd, 1976

10. J. W. Spretnak, M.G. Fontana and H.E. Brooks : Notched and unnotched tensile and fatigue properties of ten alloys at 25 and -196°C, *Transactions ASM*, Vol.43 1951, pp 547-548