

GT-Membrane형 LNG선 Lap 이음부의 허용응력에 관한 검토

대우조선공업(주) 한 명수*
대우조선공업(주) 한 중만
대우조선공업(주) 한 용섭

1. 서 론

GT-Membrane 방식 LNG선의 화물격납설비는 박판의 Invar(Fe-36%Ni)강을 저항 Seam 용접 또는 TIG 용접한 1, 2차 Membrane으로 구성되어 있다. 이러한 박판 용접 구조물에서의 피로 안전성은 주로 용접 이음부에서의 피로균열 발생의 유무에 좌우되며 따라서 선박 설계수명 동안 각 구조이음부에서의 피로누적손상도가 피로균열 발생을 초래하는 손상도에 비해 충분히 안전한 값이 되도록 선체 구조 강성의 설계를 행해야 한다.

본 연구에서는 GT-Membrane 방식 LNG선의 화물격납설비의 건조에 적용되는 이음방법 중 구조적으로 가장 취약한 이음부인 Lap 이음부의 피로강도와 허용응력에 관하여 검토하였다. 또한 화물격납설비와 선체 Inner hull과 결합되는 천이 이음부(Transition joint)인 Invar/Stainless강 Lap 이음부에 적용되는 종래의 용접방법인 용재공급 수동 TIG용접을 용재 무공급 자동 TIG용접법으로 대체하기 위해 자동 TIG용접법에 의한 Invar/Stainless강 Lap 이음부의 강도특성에 관해서도 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험재료 및 시험편

Table 1은 시험재인 Invar 강의 화학적 성분을, Table 2는 두께가 0.7mm, 1.0mm, 1.5mm인 Invar강 모재의 상온 하에서의 인장시험 결과를 각각 나타낸 것이다. 인장시험 결과 모재의 두께가 1.0 mm인 경우의 항복강도 및 인장강도가 가장 낮았지만 그 값은 G.T.에서 규정하는 기준을 만족하였다.

Invar/Invar Lap 이음부의 피로시험에 적용한 Invar 상/하 부재의 두께는 각각 1.5mm/1.5mm와 1.5mm/0.7mm 두 종류였으며, 적용한 용접법은 수동 TIG 및 자동 TIG 용접이었다. 용재 무공급 자동 TIG 용접법에 의한 Invar/Stainless강 (이하 "Invar/SUS"로 표기) Lap 이음부는 상/하부재의 두께는 1.5mm/8.0mm이었다.

Table 1 Nominal Chemical Compositions of Fe-36% Ni (Invar) Steel(wt.%)

C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
0.04 max.	0.25max.	0.2 ~ 0.4	0.012 max.	0.012 max.	35 ~ 36.5	Bal.

Table 2 Mechanical Properties of Invar Steel(R.T.)

Material		Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	El. (%)
INVAR (mm) 0.5, 1.0	Requirements	≥ 275	≥ 460	≥ 30
	Test Results	335.5 ~ 358.1	476.8 ~ 499.3	32 ~ 37

2.2 실험방법

피로시험에 사용한 시험장비는 동적하중 ±250 KN 용량의 유압식 피로시험기를 사용하였고 전 실험을 통하여 응력비는 R=0로 하였으며 부하속도는 25~40 Hz로 하였다. 피로시험은 반복수 N=2x10⁶ 까지 실시하였으며 그 때까지 파단하지 않은 시험편은 미 파단하는 것으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Invar/Invar Lap 이음부의 탄성 FEM 해석

용접부에 대한 피로시험은 시험편의 앞면과 뒷면을 구속하지 않고 Lap에 의한 Misalignment로 인해 인장시 굽힘변형이 자유롭게 발생하는 조건(이하 "자유 변형조건")으로 행하였다. 이와 같은 조건으로 피로시험을 행한 결과 Invar/Invar의 1.5mm/1.5mm Lap 이음부는 Root부에서 균열이 발생하여

Lap의 목부분중 하중방향과 거의 직각인 단면에서 최종파단이 발생하였지만 Invar/Invar의 1.5mm/0.7mm Lap 이음부는 용접 Toe부에서 피로균열이 발생하여 최종 파단됨으로서 최종 파단영역이 이음부재의 치수에 따라 각기 달랐다. 이와 같은 실험결과를 고찰하기 위해 FEM에 의해 Lap 이음부의 탄성응력해석을 수행하였다.

Table 3은 자유변형조건 모델의 상부 Lap 부재에서의 공칭응력이 98MPa(10kg/mm²)일 때의 해석결과이다. 해석결과 최대 탄성응력집중은 1.5mm/1.5mm의 경우 Root부에서 발생하였고 1.5mm/0.7mm의 경우 Toe부에서 발생하여 피로시험 결과와 동일한 결과를 보여 주고 있다.

Table 3 Results of elastic finite element analysis (Free deformation model)

	Nominal Stress (MPa)	Location of Max. Stress	K _t
1.5/1.5	98.1	Root	8.0
1.5/0.7	98.1	Toe	9.32

3.2 Invar/Invar Lap 이음부의 피로강도

Fig.1은 Invar/Invar의 1.5mm/1.5mm, 1.5mm/0.7mm 수동 및 자동 Lap 이음부의 피로시험결과를 Lap의 상부 이음부재(두께 1.5mm)에 작용하는 공칭응력범위(ΔS)를 기준으로 하여 작성한 S-N 선도이다. 상부 이음부재에 대한 공칭응력을 기준으로 하는 경우의 피로선도는 1.5mm/1.5mm가 1.5mm/0.7mm보다 더 상위에 있으며, 같은 이음부재 치수에서 용접법의 차이에 따른 차이는 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 한편 이음부재의 치수 및 용접법에 의존하지 않는 피로선도를 작성하는 것이 피로설계 간략화의 관점에서 합당하지만, Fig.1과 같이 실험결과를 공칭응력으로 평가하는 경우 용접법 및 이음부재치수의 상이에 따라 각기 다른 피로선도를 얻게 되며, 이는 앞서 설명한 것과 같이 Lap 이음부재치수의 상이에 따른 파단위치 및 극부응력집중의 차이에 기인하는 것이다.

Fig.2는 피로시험 결과를 파단위치에서의 실단면응력범위(ΔS_{if})를 기준으로 하여 나타낸 것이다. 즉, 1.5mm/1.5mm Lap 이음부는 Lap 목부에서의 응력범위가, 1.5mm/0.7mm Lap 이음부는 하부 Lap 이음부재(두께 0.7mm)에서의 응력범위가 ΔS_{if} 로 된다. 그림에 나타난 것과 같이 ΔS_{if} 에 의하는 경우 용접법 및 Lap 이음부 부재치수에 관계없이 Invar Lap이음부의 피로특성을 하나의 피로선도로 나타낼 수 있었으며, 따라서 본 연구에서는 Lap 이음부 피로선도를 ΔS_{if} 에 기준하여 작성하였다. 한편 Fig.2에는 실험결과를 회귀해석하여 얻은 P=50% 및 P=5% 피로선도가 함께 나타나 있으며, P=5% 피로선도는 본 연구에서 Lap 이음부 설계피로선도로 사용되었다.

3.3 누적피로손상도와 허용응력

Invar Lap이음부의 설계피로곡선에 대한 평균응력 평가법으로서 수정 Goodman's rule 및 Smith's rule을 사용하였으며 파랑하중의 분포식은 선급 Rule 제안식 및 파랑하중분포를 지수분포로 가정한 직접 계산식을 사용하여 각 평균응력에 대응한 허용응력값의 비교를 행하였다. 또한 누적손상도는 Miner식으로 계산하였다.

Fig.3은 $S_m = 0, 20, 50, 80, 100, 150$ MPa 로 하였을 때의 Lap 이음부에서의 발현확률 10^{-8} 인 최대응력(σ_{max})의 변화에 따른 누적 피로손상도의 변화를 선급 Rule 제안식을 적용하여 얻은 결과를 나타내고 있다. 이 때 평균응력의 영향은 Smith's rule로 평가하였다. 평균응력이 증가함에 따라 동일한 누적 피로손상도 (ΣD)를 주는 σ_{max} 값이 감소함을 알 수 있다.

IMO Gas Code에서의 누적손상도 제한치는 $\Sigma D \leq 0.5$ 이므로 이것을 만족하는 발현확률 10^{-8} 에서 의 최대 응력진폭이 허용응력으로 된다.

ΣD 의 계산방법으로 Rule 기준을 사용하고 ΣD 의 Usage Factor를 0.5 및 0.25로 하였을 경우, 각 평균응력 평가법에 따른 평균응력과 최대 허용응력과의 관계를 Fig.4에 나타내었다. 그림에서 Usage Factor를 0.5에서 0.25로 낮출 경우 허용응력은 대략 10MPa 정도 낮아지게 된다.

3.4 Invar/SUS Lap 이음부의 피로강도

GT-Membrane 방식의 LNG선은 선체의 Inner hull과 화물적납설비인 Membrane을 결합하는 천이 이음부로서 두께 8mm인 Stainless강과 두께 1.5mm인 Invar강과의 Lap 이음부가 설치되며 GT에서는 이 이음부를 AISI 308L급 용접재료를 사용한 수동 TIG용접으로 시공하도록 권장하고 있다. 그러나 이와 같은 용접법으로 시공하는 경우 협소한 작업공간 내에서의 긴 용접장, 불안정한 용접자세 및 수평용접의 난이성과 같은 시공환경이 적정품질을 관리하는데 대한 장애로 대두된다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고 부수적으로 용접 생산성의 향상을 도모하기 위하여 용접재료를 사용하지 않는 자동 TIG 용접을 Invar/SUS Lap 이음부에 적용할 목적으로 그 용접부의 강도상의 검토를 행하였다.

Fig. 5는 자동 TIG용접에 의한 Invar/SUS Lap 이음부의 피로시험결과를 나타낸 것이다. 또한 그림에는 비교를 위하여 기존의 Process인 수동 TIG 용접법에 의해 제작된 Invar/SUS Lap 이음부의 피로 시험결과를 문헌으로부터 인용하여 나타내고 있다. 자동 TIG용접에 의한 Invar/SUS Lap 이음부의 피로강도가 수동의 그것에 비해 높게 나타나고 있으며, 이것으로부터 본 실험조건에 의해 제작된 Invar/SUS Lap 이음부는 기존의 Process에 의한 것과 비교하여 강도면에서 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

GT Membrane 방식 LNG선의 1, 2차 Membrane재료로 적용되는 Invar(Fe-36%Ni)강 Lap 용접부에 대하여 피로시험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Invar/Invar Lap 이음부의 피로시험 결과를 파단면에서의 실단면응력에 기준하여 정리함으로써 이음 부재치수에 영향을 받지 않는 합리적인 설계피로선도를 작성할 수 있었다.
- 2) 허용응력을 계산할 때 평균응력은 Smith's rule에 의해 파랑하중의 분포식은 선급 Rule제안식을 사용하는 것이 더욱 안전한 허용응력을 나타내었다.
- 3) Invar Lap 이음부에 대한 일정누적손상도 조건하에서의 허용응력과 평균응력과는 선형관계를 나타내었다.
- 4) 용재 무공급-자동 TIG용접에 의한 Invar/SUS Lap 이음부의 피로강도는 기존의 용접 Process의 피로강도와 비교하여 충분한 성능을 나타내었다.

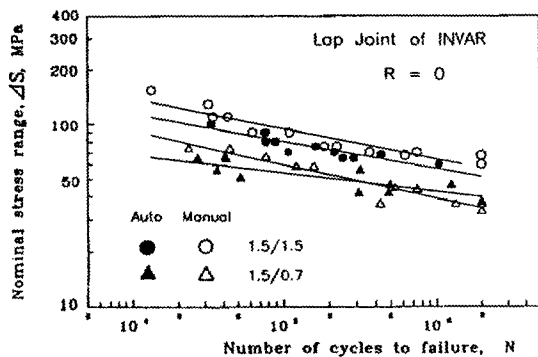


Fig. 1 Fatigue test result of INVAR lap joint

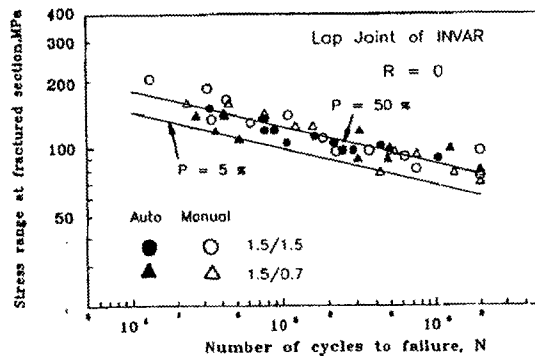


Fig. 2 S-N curve based on stress at fracture section of lap joints

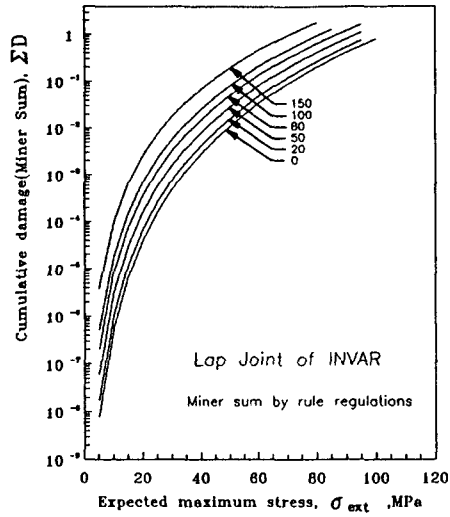


Fig. 3 Variation of cumulative damage (Mean stress cor. by smith's)

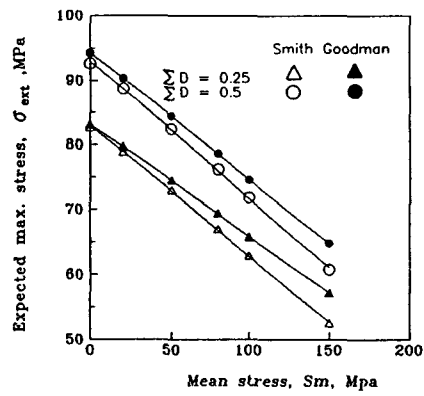


Fig. 4 Maximum allowable stress correspond to mean stress

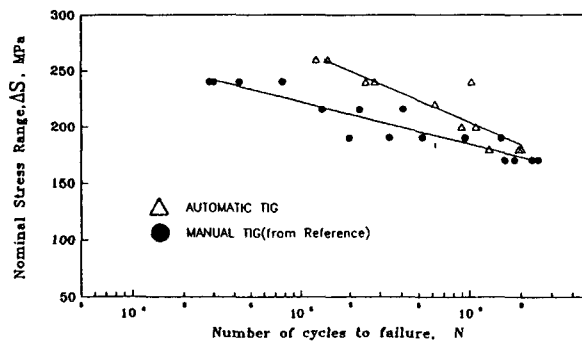


Fig. 5 Fatigue test results of INVAR/STAINLESS steel lap joint