

LNG선용 INVAR(Fe-36%Ni)강 Lap 이음부의 피로강도와 허용응력에 관한 연구

한명수* · 한종만* · 한용섭*

A Study on the Fatigue Strength and Allowable Stress of INVAR(Fe-36% Ni) Steel Lap Joint Applied to Cargo Containment of LNG Carrier

M. S. Han*, J. M. Han* and Y. S. Han*

Key Words : Invar Steel(Fe-36%Ni강), Lap Joint (겹치기 이음), Throat Thickness (목두께), Allowable Stress (허용응력), Mean Stress (평균응력), Nominal Stress (공칭응력), Design Fatigue Curve (설계피로선도), Fatigue Strength Reduction Factor (피로강도 감소계수), Cumulative Damage (누적 피로손상도)

Abstract

This paper is to evaluate the fatigue strength of lap joints of materials applied to LNG carrier cargo containment of GAZ-TRANSPORT(GT) type, which was welded by manual and automatic TIG welding process. The thicknesses of lapped members were 1.5 mm/1.5 mm or 1.5 mm/0.7 mm in Invar to Invar joint, and 1.5 mm/8.0 mm in Invar to stainless steel joint, respectively. These lap joints were mainly applied to the membrane fabrication of GT-LNG carrier.

Fatigue tests of Invar/Invar lap joints were conducted under the stress ratio $R=0$ at room temperature. The effect of mean stress and cumulative fatigue damage on the allowable stress of Invar lap joint was evaluated on the basis of test results.

Fatigue test was also conducted on Invar/Stainless steel lap joints welded by automatic TIG process without filler metals. The fatigue test of the joint was carried out under the same conditions as those of Invar/Invar lap joints. The fatigue strength of the joint welded without filler metal was comparable to those welded with filler metal quoted from reference. The fatigue strength of In-

* 정회원, 대우조선공업(주) 기술연구소

var/stainless steel lap joint was only dependent on the lap throat thickness, and not on the welding process. Based on test results, the applicability of TIG welding process without filler metal in Invar/stainless steel lap joint was reviewed by controlling welding variables to assure the valid throat thickness of lap joints.

1. 서 론

타 연료에 비해 환경오염이 극히 적은 청정에너지인 액화 천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)는 국내에서 도시가스의 형태로 수요가 형성되기 시작하여 현재에는 발전의 에너지원으로도 사용되고 있다. 향후 LNG는 적용분야의 확대로 2006년 까지는 연간 약 900만 Ton으로 그 수요량이 증대할 것으로 예상되고 있으며 이의 안정공급을 위하여 필요한 LNG선의 최소 척수는 125,000M³ 형으로 7 척으로 추정되고 있다¹⁾. 이에 따라 국내에서는 이들 LNG선의 건조계획을 수립하고 국내 다수 선사가 공동 선주제를 형성하여 소요 선박량의 일부를 발주하여 현재 건조중에 있으며, 잔여 소요량도 차례로 발주할 예정이어서 국내 조선업체들이 그 수주를 위해 의욕적으로 참여하고 있다. 또한 세계적으로 LNG 매장량은 수요의 폭증을 고려하더라도 향후 수 십년간 사용하기에 충분하기 때문에 환경보호와 저가원료에 대한 세계적 관심 고조에 따라 수요의 급증이 예상되며, 이로부터 LNG선 건조기술의 확립은 시급한 것이라 할 수 있다.

한편 폭발성이 있는 액화가스를 운반하는 LNG선은 타 선종과는 달리 고도의 안전성 및 신뢰성이 요구되기 때문에 IMO(International Maritime Organization)에서는 이들의 국제적인 표준을 정하기 위해 Gas Code²⁾를 제정하였으며 LNG선에 대한 각국의 관련규칙 및 선급협회의 규칙도 이를 근거로 하여 정해져 있다.

IMO Gas Code 내의 규정 중 화물의 안전한 보관유지와 직접적으로 관련이 있고 안전성과 신뢰성 측면에서 가장 신중히 고려해야 할 화물격납설비(Cargo containment system)의 강도와 안전성에 관한 규정은 화물격납설비의 구조방식에 따라 각기 달리 정해져 있다. 이들 중 Membrane 방식의 LNG선에 대해 규정된 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 선체운동, 가속도, 선체와 화물 격납설비(이하

“Membrane”으로 표기)와의 상호작용력을 고려한 Membrane부의 상세구조해석

(2) Membrane과 방열구조의 정적 및 동적 하중하의 소성변형과 피로파괴에 대한 안전성의 검토

(3) 최악 해상상태의 가정하에서 1, 2차 Membrane의 모서리부 및 용접 이음부에서 발생하는 변형률로 인한 구조적 안정성의 모델시험을 통한 검토 이들 규정의 검토를 위해서는 상세 구조해석의 수행은 물론 적용재료 및 이들의 각종 용접 이음부 특성에 관한 기본적인 Data를 확보하여야 한다.

본 연구는 GT Membrane 방식 LNG선의 화물 격납설비의 1, 2차 Membrane 재료로 사용되는 INVAR강(Fe-36% Ni강) 및 그 용접이음부(Lap joint)의 피로강도와 피로강도에 미치는 허용응력에 관하여 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험재료 및 시험편

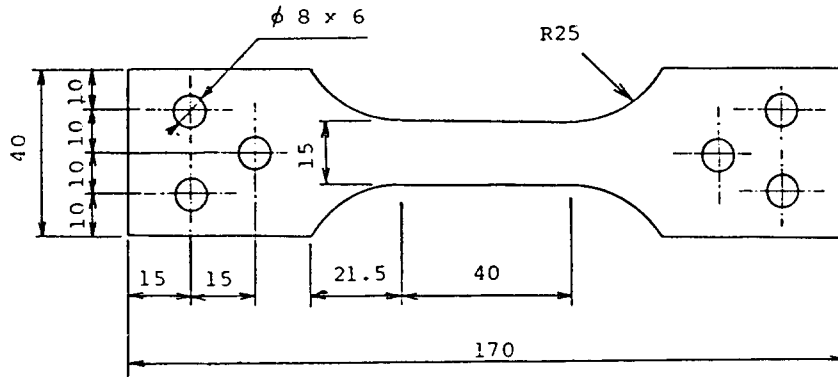
Table 1은 시험재인 INVAR 강 의 화학 성분⁴⁾를 보여주고 있으며, Table 2에는 두께가 0.7 mm, 1.0 mm, 1.5 mm인 INVAR강 모재의 상온 하에서의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. 본 실험에 사용한 시험편 형상 및 치수는 KS B 0801의 13 B호 시험편

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

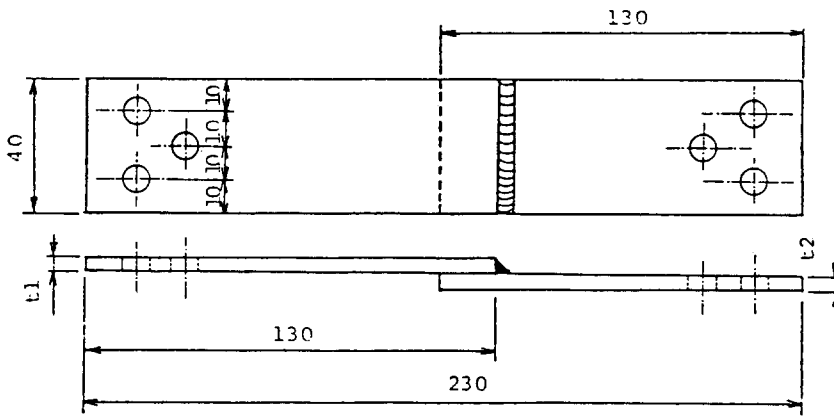
C	Si	Mn	S	P	Ni	Fe
max. 0.04	max. 0.25	0.2~0.4	max. 0.012	max. 0.012	35~36.5	Bal.

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

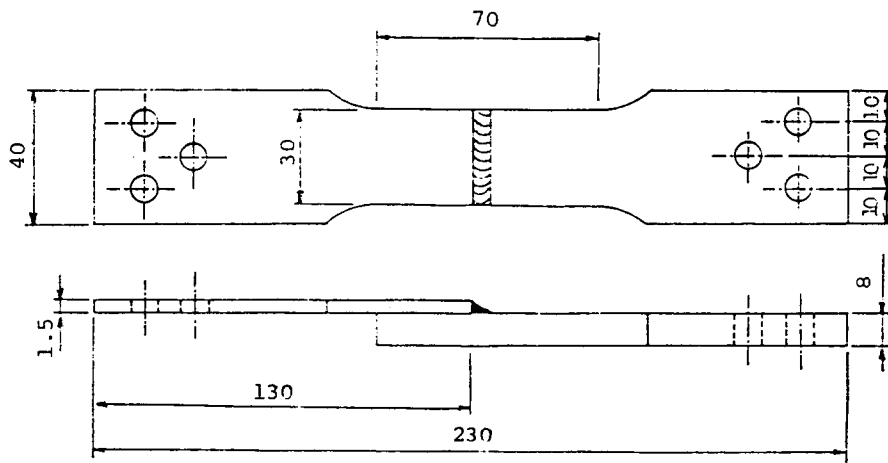
Materials		Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	Elongation (%)
	INVAR(mm)	Requirement	≥ 275	≥ 460
0.5, 1.0, 1, 5	Test Results	335.5~358.1	476.8~499.3	32~37



(a) Parent material



(b) INVAR/INVAR lap joint



(c) INVAR/Stainless lap joint

Fig. 1 Configuration & dimensions of test specimens

Table 3. TIG Welding Condition of Lap Joint

Welding Method	Part Materials	Part Thickness (t_1/t_2) (mm)	Current (A)	Speed (mm/min.)	Pulse Time (sec.)
Automatic TIG	INVAR/INVAR	1.5/1.5	110	260	0.03/0.03
	INVAR/INVAR	1.5/0.7	75	270	0.03/0.03
	INVAR/SUS	1.5/8.0	115	145	0.03/0.03
Manual TIG	INVAR/INVAR	1.5/1.5	45	90	-
	INVAR/INVAR	1.5/0.7	25	85	-

규정에 따랐다. 인장시험 결과 모재의 두께가 1.0 mm인 경우의 항복강도 및 인장강도가 가장 낮았지만 그 값은 G.T에서 규정하는 기준⁴⁾을 만족하였다.

INVAR강 모재에 대한 피로시험은 두께가 1.5 mm인 판재에 대해서만 하였으며, 그 시험편 형상과 치수는 Fig.1 (a)에 나타나 있다. Fig.1 (b)와 (c)는 Lap 이음부 피로시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다. Fig.1(b)는 INVAR/INVAR Lap 이음부의 경우로 Lap되는 INVAR 상/하 부재의 두께는 각각 1.5 mm/1.5 mm와 1.5 mm/0.7 mm 두 종류였으며, 적용한 용접법은 수동 TIG 및 자동 TIG 용접이었다. Fig.1(c)는 상/하부재의 두께가 1.5 mm/8.0 mm인 INVAR/Stainless강(이하 "INVAR/SUS"로 표기) Lap 이음부의 경우로서 이 때에 사용한 용접법은 자동 TIG용접이었다.

Table 3은 Lap 용접이음부의 각 부재두께, 적용 용접법에 따른 용접조건이다. 수동 TIG용접에 의한 시험편은 실선의 건조 조건을 고려하여 폭이 40 mm인 개개의 Lap 시험편에 용접을 하여 시험편에 용접 개시부 및 Crater부가 존재하도록 제작하였다.

2.2 실험방법

피로시험에 사용한 시험장비는 동적하중 ± 250 KN 용량의 유압식 피로시험기였다. 피로시험 결과로부터 P-S-N 선도를 작성하기 위하여 JSME S002-1981⁵⁾에 따라 피로시험을 행하였다. 전 실험을 통하여 응력비(Stress ratio)는 R=0로 하였으며 부하속도>Loading rate)는 25~40 Hz로 하였다. 피로시험은 반복수 N=2×10⁶ 까지 실시하였으며 그 때까지 파단하지 않은 시험편은 미 파단하는 것으로 하였다. 그러나 모재의 피로시험시에는 1개의 시험편에 대하여 1×10⁷의 반복수까지 피로하중을 가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Lap 용접부의 형상과 조직

본 실험에 사용한 Lap 시험편을 광학현미경으로 관찰하여 Lap 이음부의 치수를 측정한 결과 모든 시험편의 이음부 치수는 GT에서 권장하는 최소 허용치수를 만족하였다.

Photo.1은 자동 TIG용접에 의한 INVAR/INVAR (1.5 mm/1.5 mm) Lap 이음부의 거시적 형상(×40)을 보여 주고 있으며, Photo.2는 자동 TIG용접에 의한 INVAR/SUS(1.5 mm/8.0 mm) Lap 이음부의 거시적 형상(×40)을 보여 주고 있다. 모재는 오스테나이트 단상조직이며 사진에서 INVAR강 모재내의 횡방향의 줄무늬는 냉간 압연에 의한 가공 변형으로 생긴 Band이다. 한편 용접부는 Cell 구조를 나타내고 있는데 이것은 박판의 경우 두께 방향으로의 온도변화가 작기 때문에 결정의 성장방향이 주로 용접선 방향으로 일어나기 때문이다⁶⁾.

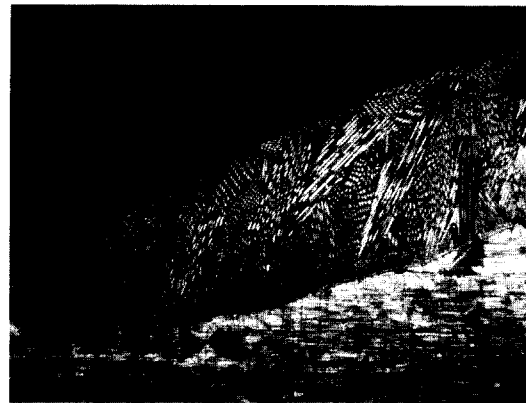


Photo. 1 Macrograph of INVAR/INVAR lap joint(1.5/1.5) by automatic TIG welding

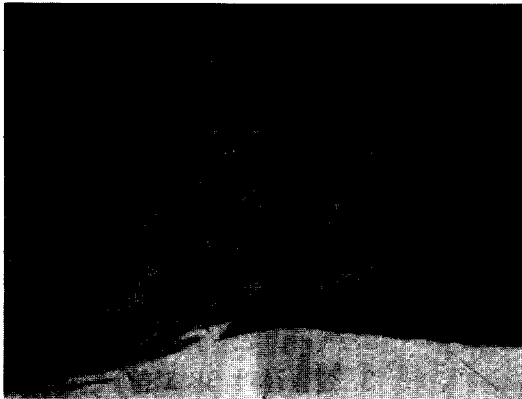


Photo. 2 Macrograph of INVAR/STAINLESS steel lap joint(1.5/8.0) by automatic TIG welding without filler metal

3.2 INVAR강 모재의 피로강도

Fig.2는 1.5 mm 두께의 INVAR강 모재의 피로시험 결과를 양 대수 좌표상에 표시한 것이다. 이 때 좌표의 세로축은 공칭응력범위(Nominal stress range, ΔS)를 기준으로 하였다. 또한 그림에는 실험에서 얻은 Data를 통계처리하여 얻은 파괴확률 $P = 50\%$ 와 $P = 5\%$ 피로선도를 보여 주고 있으며, 또한 본 실험 결과와의 비교를 위해 같은 두께의 INVAR강 모재에 대한 기존의 시험 결과⁷⁾도 함께 나타내었다. 그림으로 부터 본 실험결과와 타 연구 결과는 거의 동일함을 알 수 있다.

파괴확률 5% ($P = 5\%$)의 피로선도는 본 연구에서 INVAR 모재의 설계 피로선도(Design fatigue curve)로 사용되었다.

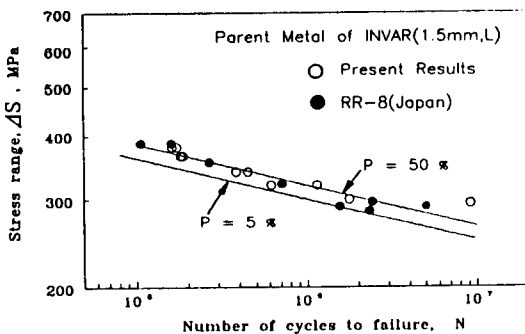


Fig. 2 Best fit & fatigue design curve of 5% - survival and comparison with other results

3.3 INVAR/INVAR Lap 이음부의 탄성 FEM 해석

용접부에 대한 피로시험은 시험편의 앞면과 뒷면을 구속하지 않고서 Lap에 의한 Misalignment로 인해 인장시 굽힘변형이 자유롭게 발생하는 조건(이하 "자유 변형조건")으로 행하였다. 이와 같은 조건으로 피로시험을 행한 결과 INVAR/INVAR의 1.5 mm/1.5 mm Lap 이음부는 Root부에서 균열이 발생하여 Lap의 목부분중 하중방향과 거의 직각인 단면에서 최종파단이 발생하였지만 INVAR/INVAR의 1.5 mm/0.7 mm Lap 이음부는 용접 Toe부에서 피로균열이 발생하여 최종파단됨으로서 최종파단영역이 이음부재의 치수에 따라 각기 달랐다. 이와 같은 실험결과를 고찰하기 위해 FEM에 의해 Lap 이음부의 탄성응력해석을 행하였다.

FEM 해석 모델의 형상 및 치수를 Fig.3 (a)에 나타내었다. 용접부 근방의 모델치수는 시험편의 것과 동일하게 하였으며 용입길이(L_a)는 자동과 수동 TIG용접에 의한 것의 평균으로 1.5 mm/1.5 mm에 대해서는 2.5 mm, 1.5 mm/0.7 mm에 대해서는 1.8 mm로 하였다. 또한 모델 형상의 간략화를 위하여 용접 비드의 외관은 직각삼각형으로 가정하였으며 용접 개시부 및 Creater부를 제외하면 Photo.1에 나타난 것과 같이 Toe부에서 Under Cut 및 비드의 형상불량이 관찰되지 않았기 때문에 Toe부에서의 용접결함에 의한 추가 응력집중은 해석에서 고려하지 않았다.

Fig.3 (b)와 (c)는 1.5 mm/1.5 mm, 1.5 mm/0.7 mm Lap 용접부 모델의 요소분할 및 경계조건을 개략적으로 나타낸 것이다. Fig.3 (b)는 본 실험조건인 두께방향 자유변형 조건시의 모델 경계조건을 나타내고 있으며, Fig.3 (c)는 실험탱크내에서의 용접부 구속조건과 유사한 것으로서 Lap 용접부 뒷면에서 두께 방향으로의 면의 변형을 구속한 해석모델을 나타내고 있다. 요소분할시 단위요소의 형상은 사각형상의 8 절점 Isoparametric 요소로 하였으며, 최소 Mesh size를 0.05 mm로 하여 모델 내부로부터 자유표면으로 갈수록 점점 분할하였다. 이 때의 절점수 및 요소수는 1.5 mm/1.5 mm의 경우 1294개와 1175개 이었으며, 1.5 mm/0.7 mm의 경우는 1097개와 953개 이었다.

하중조건은 Fig.3 (a)에 나타난 바와 같이 상부

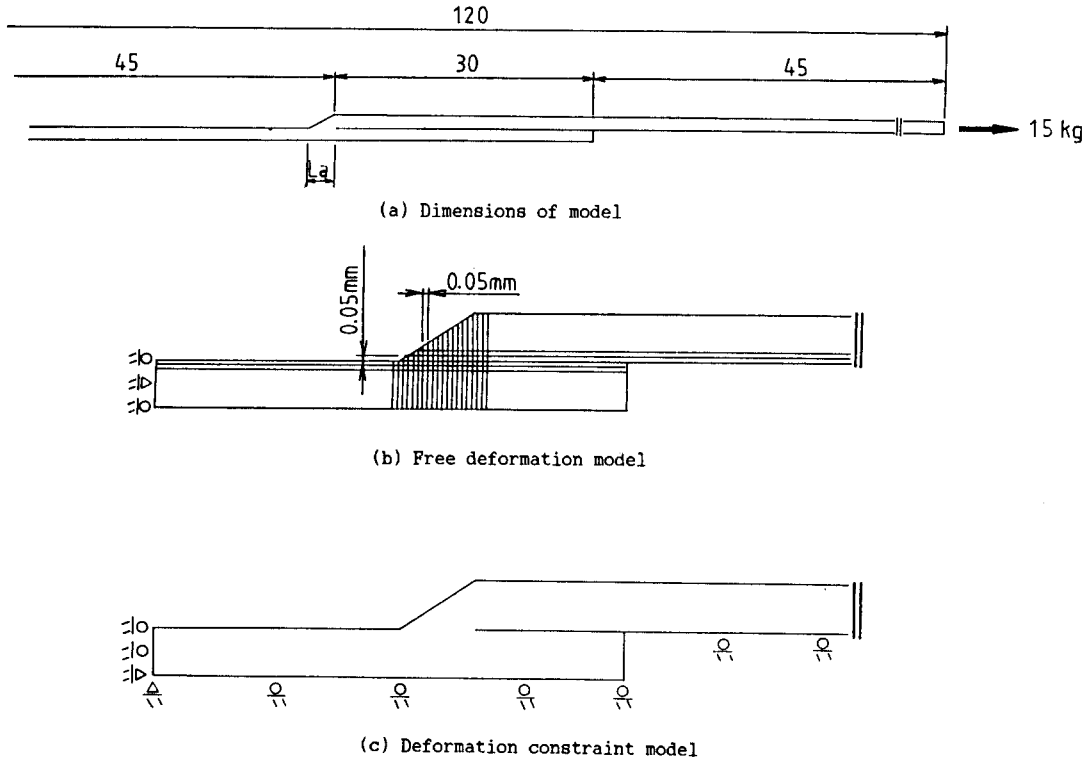


Fig. 3 Dimensions & mesh division of FEM model

Lap 부재 단부에서 시험편 길이방향과 평행한 수평력만을 가하는 것이었다. 본 해석은 범용 Package인 ANSYS 4.4A를 이용하여 수행하였다.

Table 4는 자유변형조건 모델의 상부 Lap 부재에서의 공칭응력이 98MPa(10kg/mm²)일 때의 해석 결과를 요약한 것이다. 해석결과 최대 탄성응력집중은 1.5 mm/1.5 mm의 경우 Root부에서 발생하였고 1.5 mm/0.7 mm의 경우 Toe부에서 발생하여 피로 시험 결과와 동일한 결과를 보여 주고 있다. 즉 Lap 용접부 부재치수의 상이에 의해 최대 탄성응력집중점은 각기 달리 나타나게 되며 이러한 최대 탄성응력집중점에서 피로균열이 발생하여 최종파단에 이르게 됨을 알 수 있었다.

Table 4. 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

Fig.4 (a)와 (b)는 자유변형 조건인 모델의 하중 부하 전후의 변형상태를 각각 나타낸 것이다. 하중 전달중심의 Misalignment로 인해 발생한 Moment는 이음부 근방에서 이음부를 회전시키려는 구동력으로서 작용하고 이로 인해 상/하 부재는 굽힘변형을 일으킨다. 그런데 상,하 부재의 굽힘강성이 같은 1.5 mm/1.5 mm의 경우는 상/하 부재가 대칭적으로 변형하려 하고 이로 인해 Lap Root부를 열려는 Tearing Force가 발생함으로써 Root부에는 큰 응력집중이 발생하게 된다. 한편 1.5 mm/0.7 mm의 경우에는 상대적으로 굽힘강성이 작은 0.7 mm 두께의 부재가 큰 굽힘변형을 하여 이로 인해 Lap Toe부에 인장굽힘 응력이 추가로 발생함으로써 Toe부에서 최대 탄성응력집중이 발생하게 된다. 이와 같이 부재 두께의 차이에 따라 모델의 변형양상이 달라짐으로써 최대 탄성응력집중점이 달라짐을 알 수 있다.

Table 5는 Lap 상부 부재에서의 공칭응력이 98 MPa(10kg/mm²)이고, Fig.3 (c)의 면외변형 구속조

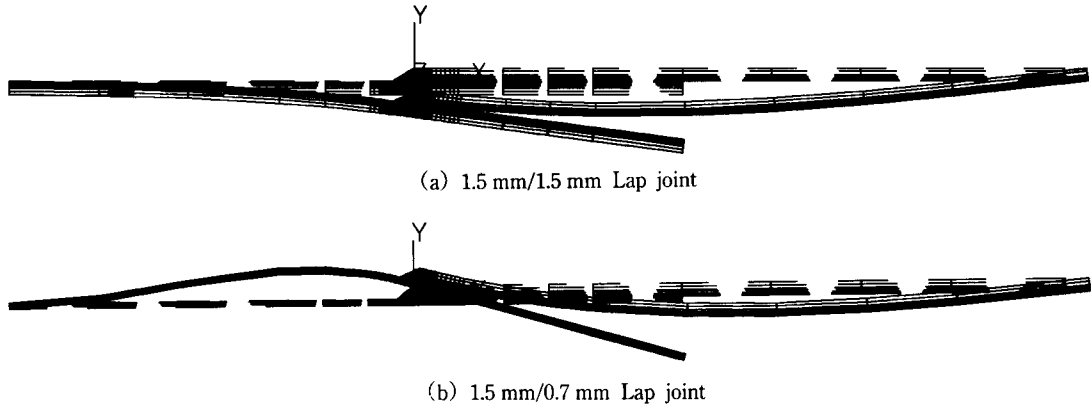


Fig. 4 Deformation behaviors of free deformation models

Table 5. Results of elastic finite element analysis (Constraint model)

	Nominal Stress (MPa)	Location of Max. Stress	K _t
1.5/1.5	98.1	Root	3.51
1.5/0.7	98.1	Toe	3.75

건 일 때의 해석결과이다. 최대 탄성응력집중점은 각각 앞의 자유변형 조건에서와 일치하지만 응력 집중계수가 상당히 낮아짐을 알 수 있다. 이는 Misalignment 로 인한 Moment가 횡방향의 구속에 의해 소실되어 순수한 구조적 불연속에 의한 응력 집중 효과만이 나타나기 때문이다.

이러한 해석의 결과로 부터 실선조건과 유사한 면외변형 구속조건 (Fig.3 (c))에 비해 본 실험조건인 자유변형조건 (Fig.3 (b))에서의 응력분포 양상이 더욱 가혹하게 나타나므로, 자유변형조건인 본 실험결과로 부터 실선의 피로강도를 평가하는 경우 실선에서의 구속조건에 의한 것과 비교하여 더욱 안전측으로 됨을 알 수 있다.

3.4 INVAR/INVAR Lap 이음부의 피로강도

Fig.5는 INVAR/INVAR의 1.5 mm/1.5 mm, 1.5 mm/0.7 mm 수동 및 자동 Lap 이음부의 피로시험 결과를 Lap의 상부 이음부재(두께 1.5 mm)에 작용하는 공칭응력범위(ΔS)를 기준으로 하여 작성한 S-N 선도이다. 상부 이음부재에 대한 공칭응력을 기준으로 하는 경우의 피로선도는 1.5 mm/1.5 mm가

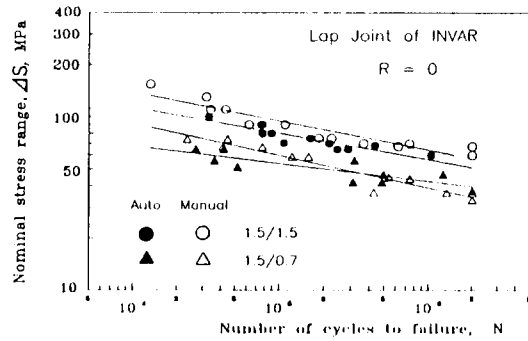


Fig. 5 Fatigue test result of INVAR lap joint

1.5 mm/0.7 mm보다 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.5와 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 국부응력집중의 차이에 기인하는 것이다.

Fig.6은 Lap 용접부 피로시험 결과를 Lap 목부에서의 실단면응력범위(Net section stress range, ΔS_n)에 기준하여 작성한 피로선도를 나타내고 있다. ΔS_n 에 기준하여 INVAR Lap 이음부의 피로선도를 작성하면 이음부재 치수의 영향을 받지 않는 설계선도를 얻을 수 있다³⁾고 보고된 바 있으나, 본 실험에서는 그림에 나타난 것과 같이 Lap 부재치수,

용접법의 상이에 따라 각기 다른 피로선도가 얻어졌다.

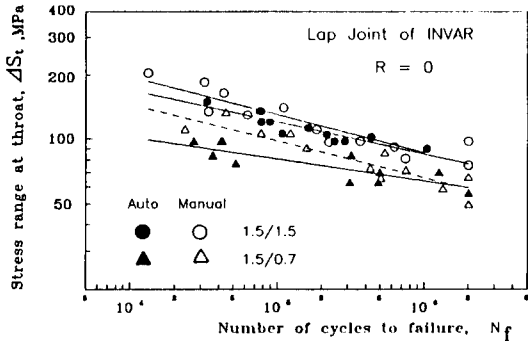


Fig. 6 S-N curves of INVAR lap joints based on throat stress range

Fig.7은 피로시험 결과를 파단위치에서의 실단면응력범위(ΔS_{if})를 기준하여 나타낸 것이다. 즉, 1.5 mm/1.5 mm Lap 이음부는 Lap 목부에서의 응력범위가, 1.5 mm/0.7 mm Lap 이음부는 하부 Lap 이음부재(두께 0.7 mm)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 이음부의 ΔS_{if} 에 기준하여 작성된 피로선도에 대해 고찰을 하였다. 한편 Fig.7에는 실험결과를 회귀해석하여 얻은 P=50% 및 P=5% 피로선도가 함께 나타나 있으며, P=5% 피로선도는 본 연구에서 Lap 이음부 설계피로선도로 사용되었다.

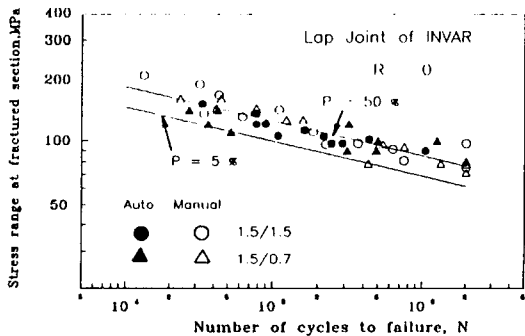


Fig. 7 S-N curve based on stress at fractured section of lap joints

3.5 평균응력을 고려한 피로선도의 수정과 손상기준

3.5.1 평균응력을 고려한 피로선도의 수정

INVAR강 모재 피로선도와 INVAR/INVAR Lap 이음부의 피로선도에 대한 모재와 용접부의 평균응력에 대한 영향은 수정 Goodman's Rule과 Smith's Rule에 의해 평가하였다. Fig.8은 Smith's Rule로

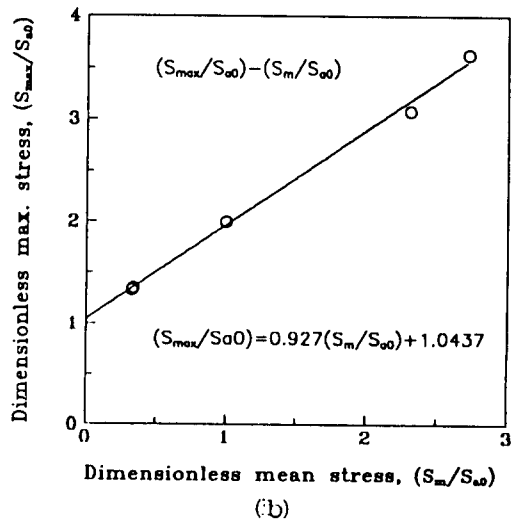
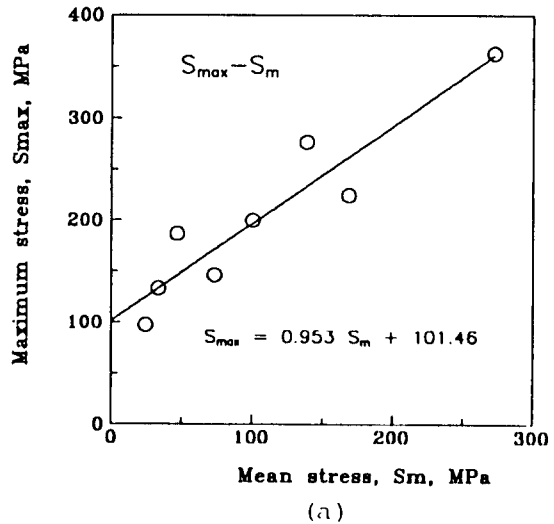


Fig. 8 Mean stress correction data for INVAR lap joints

평균응력의 영향을 평가하기 위해 문헌⁸⁾으로 부터 인용한 평균응력과 최대응력과의 관계((a))와 그것들을 응력비, R=0에서의 응력진폭(S₉₀)으로 무차원화 했을 때의 관계((b))를 각각 나타낸 것이다. 단 이들 관계는 응력비, R과 파단수명, N_f가 각각

$$-0.5 \leq R \leq 0.5$$

$$10^4 \leq N_f \leq 2 \times 10^6 \quad (1)$$

인 조건에서 구한 것이다. Fig.8 (b)의 관계로 부터 임의의 평균응력, S_{mi}에 대한 상당응력진폭, S_{ai}는

$$S_{ai} = B \cdot S_{90} + (A-1)S_{mi} \quad (2)$$

단, S₉₀는 R=0 에서의 응력진폭(Stress amplitude)

로 된다. 식(2)의 계수 A, B의 값을 구하여 Fig.8 (b) 내에 나타내었다.

3.5.2 피로손상기준

(1) Rule에서의 손상기준

누적피로손상도(Cumulative damage)는 Miner식으로 계산한다. 즉,

$$\Sigma D = \Sigma \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

이때 손상도 계산에 사용되는 Staircase 반복수, n_i 및 응력진폭 S_{ai}는 각각 DNV¹⁰⁾ 및 KR Rule¹¹⁾에 의해,

$$n_i = 0.9 \times 10^i$$

$$S_{ai} = \frac{17-2i}{16} \cdot \sigma_{ext} \quad (4)$$

$$i = 1, 2, \dots, 8$$

로 된다. 식(4)에서 σ_{ext}는 초과확률 Q=10⁻⁸에서의 파랑하중에 의한 응력의 특성극치로 정의된다. 한편, 임의의 평균응력에서의 피로설계선도는

$$N = a \cdot S^b \quad (5)$$

로 수식화되므로 식(4), (5)를 식(3)에 대입하여 정리하면,

$$\Sigma D = \frac{0.9}{a} \cdot \left(\frac{\sigma_{ext}}{16}\right)^b \cdot \sum_{i=1}^8 (17-2i)^b \cdot 10^i \quad (6)$$

로 된다.

(2) 직접계산에 의한 손상기준 (Damage by Direct Calculation)

① 하중조건

3모수 Weibull 분포의 확률 밀도 함수(Probability Density Function : 이하P.D.F)는,

$$f(x) = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{x-\beta}{\lambda}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-\beta}{\lambda}\right)^\alpha\right], \beta < x < \infty \quad (7)$$

여기에서 α : 형상 Parameter
β : 위치 Parameter
λ : 척도 Parameter

이다. 따라서 x를 초과할 초과확률(Exceedance Probability), Q(x)는,

$$Q(x) = 1 - \int_0^x f(u) du = \exp\left[-\left(\frac{x-\beta}{\lambda}\right)^\alpha\right] \quad (8)$$

로 된다.

한편 액체화물운반선에 대하여, 선박의 사용수명 동안 선체가 받는 파랑하중 Spectrum의 유형을 참고문헌^{11, 12)}으로 부터 β=0, α=1인 지수분포로 가정하고, 초과확률이 10⁻⁸인 파랑응력의 특성극치를 σ_{ext}로 하면 식 (8)로 부터 아래의 식이 얻어진다.

$$\lambda = \frac{\sigma_{ext}}{8 \cdot \ln 10} \quad (9)$$

② 손상기준

임의 파랑응력의 반복수를 n으로 하면 σ_a ~ σ_a + dσ_a 간의 파랑응력 반복수의 기대치 E[n(σ_a)]는 식 (10)로 표시된다.

$$E[n(\sigma_a)] = n \cdot \left(\frac{1}{\lambda}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\sigma_a}{\lambda}\right)^\alpha\right] d\sigma_a \quad (10)$$

누적 피로손상도를 Miner식에 의해 식 (5) 및 식 (10)을 이용하여 전 파랑응력에 대해 계산하면,

$$\Sigma D = \int dD = \frac{n}{a \cdot \lambda} \int \left[\sigma_a^b \cdot \exp\left[-\left(\frac{\sigma_a}{\lambda}\right)\right] \right] d\sigma_a$$

$$= \frac{n}{a} \cdot \lambda^b \cdot \Gamma(b+1) \quad (11)$$

로 된다. (단, $\Gamma(b+1)$ 은 $b+1$ 에 대한 Gamma 함수이다.)

식 (9)를 식 (11)에 대입하면,

$$\Sigma D = \frac{10^8}{a} \left(\frac{\sigma_{ext}}{8 \cdot \ln 10} \right)^b \cdot \Gamma(b+1) \quad (11)$$

로 되어 파랑응력의 분포식으로 부터 누적 피로손상도의 식이 유도된다.

3.5.3 누적피로손상도와 허용응력

Fig.9는 INVAR 모재(두께 1.5 mm)에 작용하는 평균응력(S_m)을 0, 20, 50, 80, 100, 150 MPa로 하였을 때 σ_{ext} 의 변화에 따른 누적 피로손상도(Cumulative damage)를 Rule 기준(식(6))에 의해 계산하여 나타낸 것이다. 이 때 화물의 적하(Loading

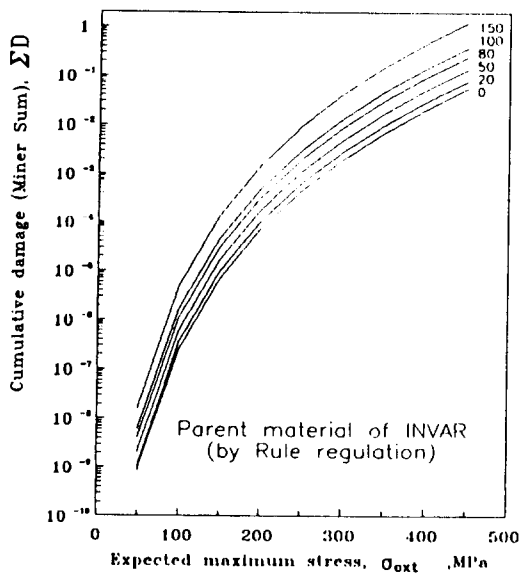


Fig. 9 Variation of cumulative damage

와 제하(Unloading)에 의한 누적손상은 고려하지 않았다. IGC²⁾ 및 각 선급의 Rule^{9,10)}에 의하면 이러한 누적손상도에 대한 Usage Factor는 0.5이기 때문에 임의의 평균응력에 대한 최대허용응력(Maximum allowable stress), $(\sigma_{ext})_{max}$ 의 조건은

$$\Sigma D = 0.5 \quad (12)$$

로 된다. Fig.9에 나타난 것과 같이 INVAR강 모재의 경우 각 평균응력에 대한 최대 허용응력값은 모두 항복응력을 초과하고 있기 때문에 모재부에서의 피로파괴 발생가능성은 거의 없을 것으로 판단된다.

Fig.10은 $S_m=0, 20, 50, 80, 100, 150$ MPa 로 하였을 때의 Lap 이음부에 대한 최대 허용응력의 변화에 따른 누적피로손상도를 Rule 기준(식(6))을 적용하여, Fig.11은 직접계산법(식(11))을 적용하여 얻은 결과를 각각 나타내고 있다. 이 때 평균응력의 영향은 Smith's Rule로 평가하였다. 평균응력이 증가함에 따라 동일한 누적 피로손상도 (ΣD)를 주는 σ_{ext} 값이 감소함을 알 수 있다.

Smith's Rule로 평균응력의 영향을 평가할 시 Lap 이음부의 $\Sigma D=0.5$ 에서의 각 평균응력에 대한 최대 허용응력, $(\sigma_{ext})_{max}$ 을 Rule 기준과 직접계산법으로 구한 결과를 각각 비교하여 보면 Rule 기준에 의해

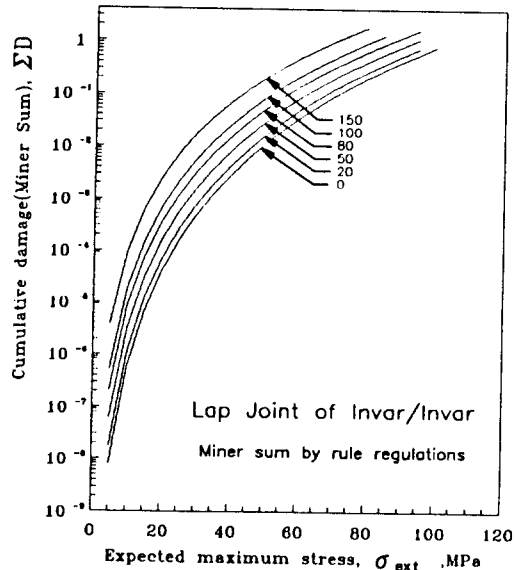


Fig. 10 Variation of cumulative damage (Mean stress corrected by Smith's)

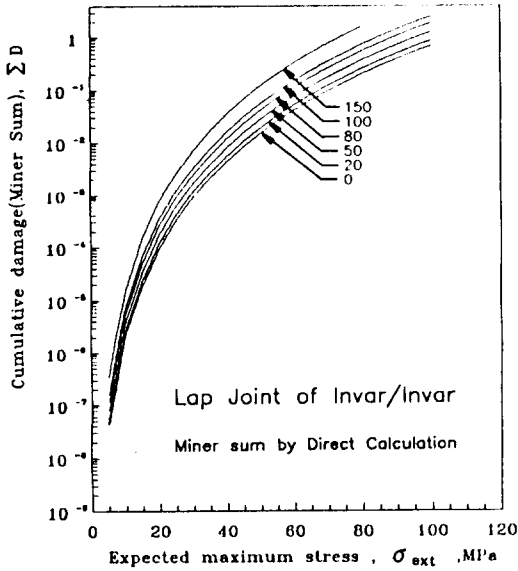


Fig. 11 Maximum allowable stress correspond to mean stress

구해진 허용응력값이 직접계산법에 의한 것 보다 낮은 값을 나타내고 있으며, 이것으로부터 같은 조건인 경우 Rule 기준에 의해 평가하는 것이 안전한 평가방법이라고 생각된다.

앞서 고찰한 허용응력에 관하여 그 값이 규격에서 정한 $\Sigma D \leq 0.5$ 를 만족한다 할지라도 피로설계의 측면에서는 그 안전성에 문제가 있을 수 있으므로 보편적으로 ΣD 값이 0.5 보다 훨씬 낮도록 안전설계를 행하고 있으며 그 값의 크기는 구조체내의 상세이음부의 강도상의 중요도 및 부하하중의 유형에 따라 설계자에 의해 각기 달리 결정된다^{3, 13)}.

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.12에 나타내었다. 그림에서 Usage Factor를 0.5에서 0.25로 낮출 경우 허용응력은 대략 10MPa 정도 낮아지게 된다. 한편 평균응력 평가법으로서 Smith's Rule이 수정 Goodman's Rule 보다 더욱 안전한 허용응력을 나타냄을 알 수 있다.

또한 그림에서 허용응력과 평균응력은 선형관계를 나타내며 이로부터 임의의 Usage Factor에 대한 평균응력과 허용응력(진폭)의 관계가 단순한 선형식으로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 참고로 Usage

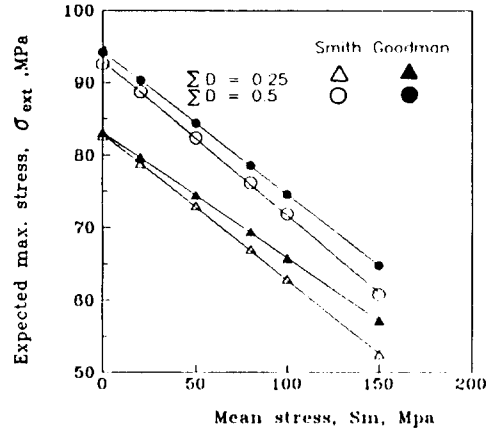


Fig. 12 Relationship between penetrated length(L_p) & lap throat(L_n)

factor가 각각 0.5, 0.25이고 평균응력의 영향을 Smith's rule로 평가하였을 때 본 실험결과로부터 얻어진 평균응력과 허용응력(진폭)과의 관계는 각각 다음과 같다.

$$\Sigma D \text{ 0.5 인 경우 : } \sigma_{ext} = 92.893 - 0.212 \cdot S_m \text{ (MPa)}$$

$$\Sigma D \text{ 0.25 인 경우 : } \sigma_{ext} = 92.893 - 0.212 \cdot S_m \text{ (MPa)}$$

3.6 INVAR/SUS Lap 이음부의 피로강도

3.6.1 INVAR/SUS Lap이음부 용접시공법 변경의 배경

GT Membrane방식의 LNG선은 선체의 Inner hull과 화물격납설비인 Membrane을 결합하는 천이 이음부(Transition joint)로서 두께 8 mm인 Stainless강과 두께 1.5 mm인 INVAR강과의 Lap 이음부가 설치되며 GT에서는 이 이음부를 AISI 308L급 용접재료를 사용한 수동TIG용접으로 시공하도록 권장하고 있다. 그러나 이와 같은 용접법으로 시공하는 경우 협소한 작업공간 내에서의 긴 용접장, 불안정한 용접자세 및 수정용접의 난이성과 같은 시공환경이 적정품질을 관리하는데 대한 장애로 대두된다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고 부수적으로 용접생산성의 향상을 도모하기 위하여 용접재료를 사용하지 않는 자동 TIG용접을 INVAR/SUS Lap이음부에 적용할 목적으로 그 용접

부의 강도상의 검토를 행하였다.

3.6.2 자동용접(용재 무공급)에 의한 INVAR/SUS Lap 이음부의 특성 검토

Fig.13 은 Table 3의 INVAR/SUS에 대한 용접조건을 적용하여 제작된 시험편의 양측면에서의 목두께와 용입길이의 측정결과를 나타낸 것이다. 이 용접부의 거시적인 형상은 앞의 Photo.2에 나타나 있다. 그림으로 부터 시험편의 목두께는 GT의 요구치를 모두 만족하고 있으며 이 결과로 부터 적정 용접조건을 선택여하에 따라 용재의 공급없이도 적절한 이음부 치수의 확보가 가능함을 알 수 있다. Photo. 3은 용재무공급-자동 TIG용접을 적용하여 INVAR/SUS Lap 이음부의 Mock-up 시공을 하는 작업을 보여 주고 있다.

Table 6은 자동 TIG용접에 의한 INVAR/SUS Lap이음부의 인장시험결과를 나타낸 것이다. 인장 시험편은 ASME CODE⁽⁴⁾의 규정에 따라 가공하였다. 목부에서의 유효 단면적(Effective area)에 기준한 파단강도는 INVAR 모재에 대한 인장강도 요구치인 460MPa를 만족하였다.

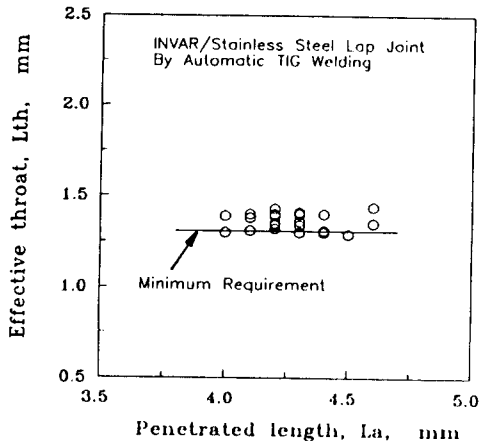


Fig. 13 Relationship between penetrated length(L_a) & lap throat(L_{th})

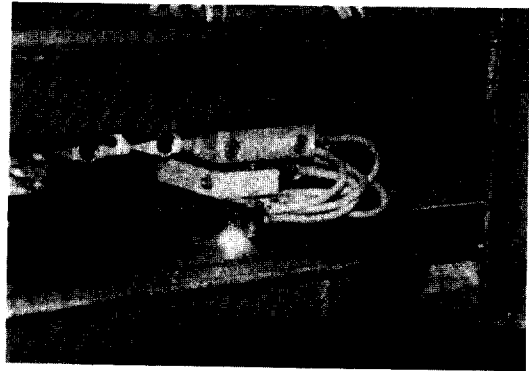


Photo. 3 Photograph of automatic TIG welding without filler metal

Fig.14는 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 피로시험결과를 문헌⁽⁵⁾으로 부터 인용하여 나타내고 있다. 자동 TIG용접에 의한 INVAR/SUS Lap이음부의 피로강도가 수동의 그것에 비해 높게 나타나고 있으며, 이것으로 부터 본 실험조건에 의해 제작된 INVAR/SUS Lap 이음부는 기존의 Process에 의한 것과 비교하여 강도면에서 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

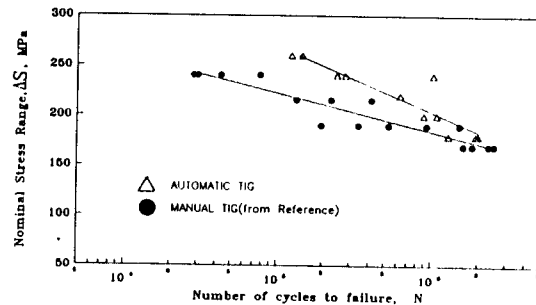


Fig. 14 Fatigue test results of INVAR/STAINLESS steel lap joint

Table 6. Monotonic tensile test result

Width (mm)	Throat Size (mm)	Section Area (mm ²)	Fracture Load (N)	Fracture Strength (MPa)	Fracture Region
19.7	1.32	26.0	13,565	521.7	Throat

3.7 INVAR강 Lap 이음부의 피로강도 향상방안

Fig.15는 상부 Lap 부재(INVAR 1.5')에서의 반복응력에 기준한 Lap 이음부의 피로강도를 모재의 피로강도로 나누어 얻어진 피로강도 감소계수(K_f)의 반복수에 따른 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 INVAR/SUS Lap 이음부의 피로강도 감소계수는 INVAR/INVAR Lap 이음부의 그것에 비해 훨씬 낮음을 알 수 있다. 이것은 INVAR/SUS 이음부의 목두께가 INVAR/INVAR 이음부의 그것에 비해 상대적으로 큰 것도 하나의 요인이 되겠으나, 그 주된 요인은 INVAR/SUS Lap 하부 부재인 Stainless강 판에 의해 면외변형이 구속되기 때문인 것이라 생각된다.

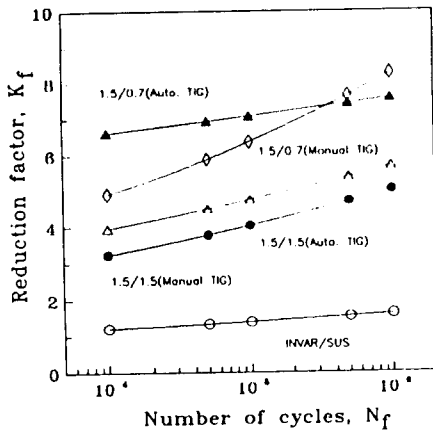


Fig. 15 Fatigue reduction factors of lap joints

따라서 실선 운항중 각 이음부에 작용하는 사용하중을 고려한다 하더라도 실선 용접 시공시 용접부 품질관리상의 주안점은 INVAR/INVAR Lap 이음부에 더욱 비중있게 주어져야 할 것으로 판단된다. 특히 공칭응력에 기준한 INVAR/INVAR의 1.5 mm/0.7 mm Lap 이음부의 피로강도가 가장 낮게 나타나고 있고, 이 이음부의 피로강도는 용접 Toe부의 형상과 밀접한 관계가 있으므로 그 제어에 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다. 또한 실선에서의 1.5 mm/0.7 mm Lap 이음부중 수동 TIG용접법이 적용되는 부위에 대해서는 용접후 별도의 적절한 용접 마무리작업을 행하는 것도 피로강도 향상의 측면에서 유효한 것이라 생각된다.

4. 결 론

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

1) INVAR/INVAR Lap 이음부의 피로시험 결과 1.5 mm/1.5 mm의 Lap 이음부는 Lap 목부에서 파단이 발생 하였으나 1.5 mm/0.7 mm Lap 이음부의 경우 Toe부에서 파단이 발생하였다.

2) INVAR/INVAR Lap 이음부의 피로강도 향상을 위해서는 1.5 mm/1.5 mm의 경우 유효 목두께 치수를 가능한 한 크게 하는 것이, 1.5 mm/0.7 mm의 경우는 Creater Toe부에서의 국부적인 Bead형상의 제어를 위한 용접 후 처리에 주의를 기울이는 것이 바람직하다.

3) INVAR Lap 이음부에 대한 일정누적손상도 조건하에서의 허용응력과 평균응력과는 선형관계를 나타내었다. 본 실험결과로 부터 $\Sigma D_{0.5}$ 및 $\Sigma D_{0.25}$ 인 조건에서 얻어진 평균응력과 허용응력(진폭)과의 관계는 각각 다음과 같다.

$$\Sigma D_{0.5} \text{ 인 경우 : } \sigma_{ext} = 92.893 - 0.212 \cdot S_m \text{ (MPa)}$$

$$\Sigma D_{0.25} \text{ 인 경우 : } \sigma_{ext} = 92.893 - 0.201 \cdot S_m \text{ (MPa)}$$

4) 용재 무공급-자동 TIG용접에 의한 INVAR/SUS Lap 이음부의 피로강도는 기존의 용접 Process에 의한 것의 피로강도와 비교하여 충분한 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

- 1) 한국해운기술원 : 해운산업정보, Vol. 567, (1990)
- 2) IMO : CODE FOR THE CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF SHIPS CARRYING LIQUEFIED GASES IN BULK, (1982)
- 3) 座間, 外 6人 : 멤브레인 방식 LNG船의 強度와 傳熱特性, 三菱重工技報, Vol.21 No.2, (1984),

- pp.225~265
- 4) GAZ TRANSPORT : Specification for the Supply of Fe-36% Ni Alloy Strips, GAZ TRANSPORT EXT. DOCUMENT No 2521, (1972)
 - 5) JSME : Standard Method of Statistical Fatigue Testing, JSME S002-1981, (1981)
 - 6) JWS : Metallographic Atlas of Steel, Special Alloy Steel and Non-ferrous Metal Welds, (1984), p.317
 - 7) 日本造船研究協會 : LNG 運搬船の安全基準に關する調査研究報告書, L-3 疲勞強度, Rep. No.51R, (1976)
 - 8) 中村, 外 3人 : 機械の疲勞壽命設計, 養賢堂 (1983), p.133
 - 9) DNV : Rule for Classification of Ships, Part 5 Chapter 5, (1992)
 - 10) KR : 선급 및 강선규칙 등 실무지침, 제 4편 5장, (1992)
 - 11) 日本造船研究協會 第 134 研究部會 : 船體構造部材の許容應力に關する研究, (1975)
 - 12) SSC-318 : Fatigue Characterization of Fabricated Ship Details for Design, (1983)
 - 13) 永元 外 4人 : 球形タンク方式LNG船のタンク船體材料と信賴性, 三菱重工技報, Vol.21 No.2, (1984), pp.45~53
 - 14) ASME : Boiler & Pressure Vessel Code Sec.IX, Welding and Brazing Qualification, (1989)
 - 15) GT : Message on the Fatigue Test of Welds, Message No.92.1282, (1992)