

## GT Membrane형 LNG선의 용접기술과 용접부 강도

한 중 만\* · 한 용 섭\*

### Review on Welding Technology and Welded Joint Strength of GT Membrane Type LNG Carrier

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

#### 1. 서 론

액화 천연 가스(Liquefied Natural Gas ; LNG)는 타 연료에 비해 환경오염이 극히 적은 청정 에너지 원으로서 국내에서는 도시가스의 형태로 수요가 형성되기 시작하여 현재에는 발전의 에너지원으로도 사용되고 있으며 앞으로 그 수요 및 적용 분야가 꾸준히 증대될 것으로 예상되고 있다. 이러한 추세에 맞추어 국내에서도 이의 안정공급을 위한 자국선 보유의 필요성에 의해 국내 몇몇 조선소에서 LNG 선이 건조중이거나 계획되어 있다. 또한 세계적으로 LNG 매장량은 수요에 비해 향후 수십년간 사용하기에 충분한 물량이 될 것으로 예상되기 때문에 환경보호와 저가연료에 대한 세계적 관심 고조에 따라 수요의 급증이 예상되며 이로 부터 LNG선 건조기술의 확립은 시급하며, 특히 LNG선 건조의 핵심기술의 하나인 용접기술의 확보는 안전성 측면에서 대단히 중요한 과제라고 할 수 있다.

본 보에서는 세계적으로 운항되고 있는 다수의 LNG선형 중 프랑스 GAZ TRANSPORT사에 의해 개발된 Membrane형 LNG선의 화물격납설비의 용접기술에 대하여 개략적으로 소개하고자 한다.

#### 2. LNG선의 개요

LNG의 주성분은 메탄( $CH_4$ )으로 비점이  $-162^{\circ}C$ 이기 때문에 대기압하에서  $-162^{\circ}C$ 로 낮추면 천연 가스는 액화하게 되고 체적은 1/600으로 감소하게 된다. 이와 같이 대기압 상태의 극저온 화물을 보관하는 LNG Tank의 내부는  $-162^{\circ}C$ 의 극저온인 환경하에서도 충분한 기계적 성질을 갖는 재료로 구성된다. 한편, 이 화물이 누설되면 선체의 취성과파괴는 물론이고 폭발과 화재로 인한 엄청난 인적, 물적 피해를 초래할 위험성이 있다. 따라서 LNG선의 설계 및 건조시에는 특별한 기술과 주의를 요하고 있으며, 특히 LNG Tank의 구조해석, 용접 및 조립기술, 그

\* 정회원, 대우조선공업(주) 기술연구소

리고 방열기술 등은 LNG선의 건조시에 있어서 가장 핵심이 되는 기술분야라고 할 수 있다.

IMO Gas Code<sup>1)</sup>에서 LNG선은 화물격납설비의 재료, 구조강도, 지지구조, 열신축 대책, 방열구조, 2차 방벽구조들을 어떻게 기능적으로 구성시킬 것인가에 따라 다수의 형식으로 분류된다. 이들 중 현재 국내에서 건조중인 LNG선은 IMO Gas Code에서 규정하는 독립 Tank Type B형(Independent Tank Type B)인 Moss 방식과 Gaz Transport Membrane 방식의 2종류이며, 향후 Technigaz Membrane 방식 LNG선의 건조도 계획되고 있는 것으로 알려지고 있다.

표 1은 이들 3종류의 형식에서의 몇가지 특성들을 비교하여 나타낸 것이다<sup>2,3)</sup>. Moss 방식의 LNG Tank의 재료로서는 9% Ni강 또는 A5083-0 합금을 사용하여 왔으나 최근의 건조 실적을 보면 취성파괴의 방지가 더욱 용이한 A5083-0의 Al 합금을 사용하는 경향이 두드러지고 있다. Membrane 방식 LNG선중에서 TG Membrane방식의 Tank에는 오스테나이트계 스테인레스강을 사용하며 Membrane에 파형의 Corrugation부를 만들어 이것의 변형으로 열신축에 대처하는 반면, GT Membrane방식의 Tank에는 열팽창율이

극히 낮은 Invar강을 사용함으로써 별도의 열신축 대책이 필요없다.

GT Membrane방식의 LNG선 Tank구조의 개략을 그림 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 Tank에는 Corner부에 45°로 경사가 진 경판이 설치되므로 전후 방향으로 팔각주 형상을 가지며, 선저, 선측 및 횡치격벽이 2중 선각구조로 구성되고 내측 선각의 내측부터 2차 단열상, 2차 Membrane, 1차 단열상, 1차 Membrane을 차례로 설치하는 반복구조로 되어 있다. 1, 2차 Membrane 재료로는 일반적으로 두께가 0.7mm(모서리부는 약 2.0mm)인 Invar강이며, 폭 400mm로 Flanging되어 그림 1과 같이 단열상자에 설치되어 있는 0.5mm두께인 Tongue라고 하는 부재에 순접되어 직선적으로 자동용접된다. 1, 2차 방열상자는 합판재로서 내부에 필라이트의 분말이 충전되어 있으며 Stud bolt, Nut 등의 고정용구에 의해서 선체 내측선각에 취부된다. 방열상자 사이 및 방열상자/내측선각 사이에 존재하는 틈에는 유리섬유, 각종 Plastic foam이 충전된다. Membrane은 기밀의 기능뿐이며, LNG의 하중은 전부 단열상자로 지지되고 선체구조에 전해진다.

표-1 LNG선의 주요 Tank 방식의 개요

특성	Membrane 방식		MOSS 방식	
	GAZ TRANSPORT 방식	TECHNIGAZ 방식		
Tank 방식	Invar Membrane 방식	파형(波形) Membrane 방식	구형(球形) 독립 tank 방식	
Tank의 특성	Invar강의 채용으로 형상적 열신축 대책이 불필요	Membrane 파형부의 변형으로 열신축이 흡수	단순형상으로 고정도의 응력 해석 가능	
Tank 재료	Invar 강 (36%Ni 강)	오스테나이트계 Stainless 강	Al 5083-0 합금	
열신축 대책	Invar는 선팽창 계수가 매우 작기 때문에 열신축량이 문제가 되지 않음	Membrane 파형의 변형으로 열신축이 흡수	Tank, Skirt의 변형에 의해 열신축이 흡수	
방 열	Perlite내장 합판상자	Mark I	Polystyrel Foam	
		Balsa재		Polyurethane Foam
2차 방벽	Invar Membrane	특수합판	Triplex (Sandwich GRP/Al)	Triplex 혹은 방열재

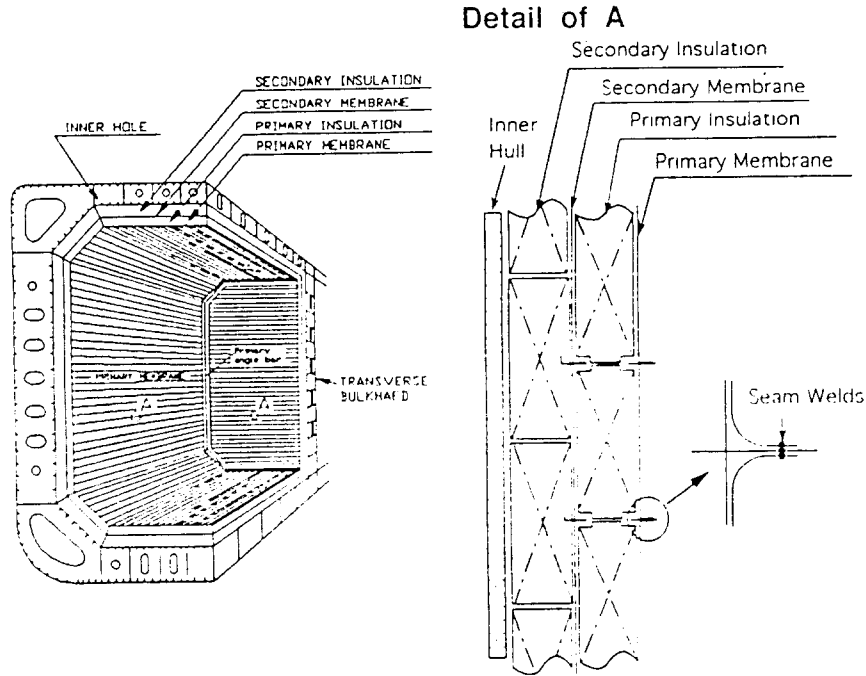


그림 1 GT Membrane 방식 LNG선의 Tank 내부 개략도

### 3. GT Membrane형 LNG선의 용접기술

#### 3.1 Invar강의 재료특성

LNG선에서는 화물 Tank의 설계온도가 매우 낮다고 하는 것이 가장 큰 특징이므로 화물 Tank의 저온대책이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다. 화물 Tank 재료에 요구되는 일반적인 특성으로서 첫째, 저온에 견딜 것, 둘째, 내식성이 양호할 것, 셋째, 성형 가공성이 양호할 것, 넷째, 용접성이 양호할 것 등이다. 이와 같은 요구사항을 만족하는 재료로서 GT Membrane방식 LNG선에서는 Tank재료로서 Invar강을 사용하고 있다. 표 2는 Invar강의 공시 화학성분을 나타낸 것이다<sup>4)</sup>. 표 2에서와 같이 Invar강은 Fe-base에 36 wt.% 전후의 Ni이 첨가되어 있으며, 금속학적 결정구조는 FCC인 오스테나이트 단상구조로서 냉간 압연에 의해 박판으로 제조된다.

표 3은 Invar강의 몇가지 물리적 특성치를 연강과

표-2 Invar강 (Fe-36% Ni강)의 공시 화학성분 (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.

비교하여 나타낸 것이다. Invar강의 열팽창계수는 연강의 약 1/10, 오스테나이트계 스테인레스강의 약 1/15 정도로 매우 낮다. 또한 열전도계수는 연강의 약 1/10 정도이고, 용융온도와 평균비열 모두가 낮기 때문에 용접시 용접부에 쉽게 열이 집중되어 낮은 입열량으로도 용접할 수 있게 된다. 또한 탄성계수가 낮은 것은 낮은 열팽창계수와 더불어 용접잔류응력 및 열응력의 완화에 유리하다<sup>5)</sup>.

그림 2는 두께가 0.5~1.5 mm인 Invar강의 압연 방향(L) 및 압연직각방향(C)으로의 0.2%내력, 인장강도 및 연신률의 온도에 따른 변화거동을 나타낸 것이다<sup>6)</sup>. 오스테나이트계 재료의 일반적인 특성인 저온에서의 강도증가 경향이 나타나며 연신률은 그

표-3 Invar강의 물리적 특성치 비교표

재료명	평균밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	용융온도 (°C)	열팽창계수 (×10 <sup>-6</sup> /g/°C)	평균비열 (cal/g/°C)	열전도계수 (cal/cm/S/°C)	탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )
Invar 강	8.14	1450	1.1~1.5	0.092	0.020~0.035	14,500
연강	7.86	1500~1527	12	0.11	0.12	21,000

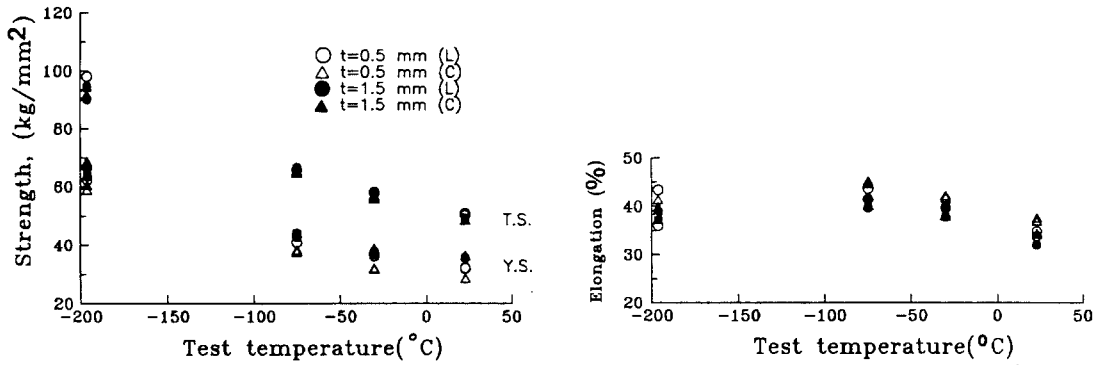


그림 2 INVAR 강의 온도에 따른 정적강도의 변화

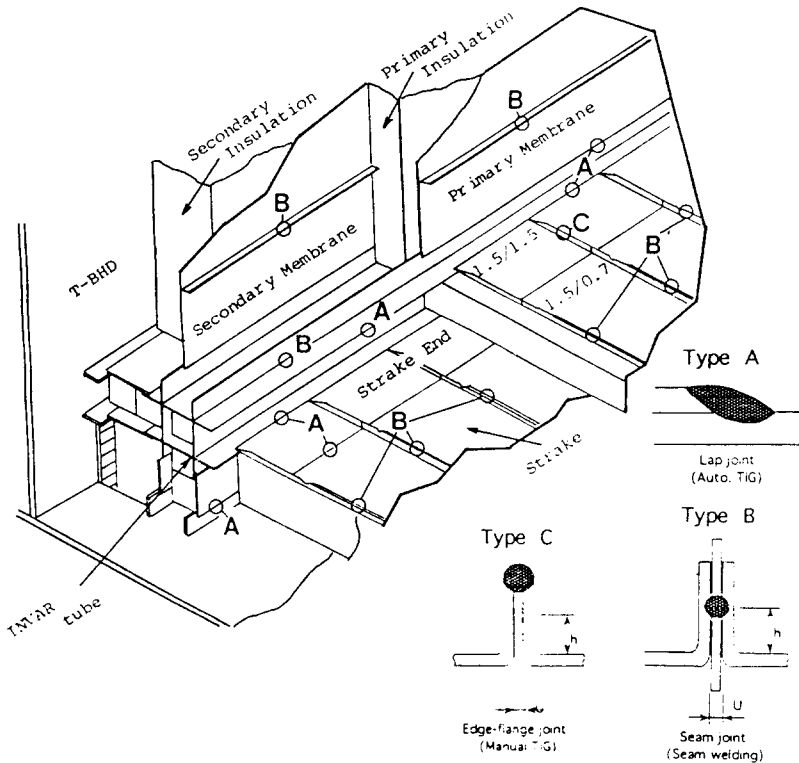


그림 3 GT Membrane에서의 용접이음부 개략도

다지 변화하지 않는다. 또한 인장특성은 인장방향에 거의 관계없이 균일하게 나타나고 있다.

### 3.2 GT Membrane에의 적용 용접법의 종류

GT Membrane의 제작에 적용되는 용접법은 크게 저항 Seam용접과 GTAW이며, 이들의 대부분은 자동 용접법이다. GT Membrane내에 존재하는 이음부의 형상 및 그에 적용하는 용접법의 일례를 그림 3 과 표 4에 각각 나타내었다<sup>7)</sup>. 그림에서와 같이 대부분의 이음부에 자동 용접법이 적용되며 자동 용접법을 적용하기 곤란한 일부 용접부에 한하여 수동 GTAW를 적용하게 된다. 또한 Membrane내의 거의 모든 용접부는 용접시 용재를 사용하지 않는 Autoge-

nous 용접부로 되어 있으며, 최근까지 선체의 Inner hull과 Membrane을 연결하는 철티 이음부인 스테인레스강 Anchoring bar와 Invar strake간의 이종재료 용접 이음부에 용가재(AISI 308L계열)를 사용한 GTAW로 시공하도록 GT의 Document 에서 권고되어 있었으나 최근 이 용접부 역시 Autogenous 용접법으로 시공하는 것이 승인되었다<sup>7)</sup>.

### 3.3 Invar강의 용접성

#### 3.3.1 Invar강 용접 균열 특성

Invar강은 조직학적으로는 완전 Austenite 단일상 조직이므로 용접시에 고온균열이 발생하기 쉽다고 하는 문제가 있어 왔으나, S, P등의 유해원소 함유

표-4 GT방식 LNG선 화물격납설비의 용접이음부의 용접법과 재질

번호	이음 부재 명칭	적용 용접법	용접부 종류	이음부재 두께(mm)
1	Raised Edge	저항 Seam	Seam	1) 0.7/0.5/0.7 2) 1.0/0.5/1.0 3) 1.5/0.5/1.0
2	Strake End/Strake	자동 TIG 수동 TIG <sup>1)</sup>	Lap	1) 1.5/0.7 2) 1.0/0.7
3	Strake/Dihedral	자동 TIG	Lap	1.0/0.7
4	Strake End/Longi. Corner (Oblique)	자동 + 수동 TIG	Lap	1.0/0.7
5	Strake End/Longi. Corner (Oblique)	자동 TIG 수동 TIG <sup>1)</sup>	Lap	1.5/1.5
6	Raised edge abutment	수동 TIG	Enge-Flange	1) 0.7/0.5/0.7 2) 1.5/1.5
7	Invar tube	저항 Seam	Seam	1.5/1.5/1.5
8	Invar/Anchoring bar <sup>2)</sup>	자동 TIG	Lap	1.5/8.0
9	Strake/Pump column base support	수동 또는 자동 TIG <sup>3)</sup>	Lap	1.5/1.0

- 1) 자동용접이 불가능한 용접부 또는 수정용접시에 수동 용접법을 적용한다.
- 2) 기존에는 용재를 사용한 수동 TIG용접법을 적용하였으나 '93. 9부로 용재 무공급 자동 TIG용접법의 적용이 승인되었다.
- 3) ANSI 308L급의 용가재를 사용하여야 한다.

량의 제한, 탈산제와 Ti의 소량 첨가등이 고온균열의 발생방지에 유효하다는 결과들이 제강과정에 고려됨으로써 현재에는 거의 문제가 되지 않고 있다<sup>8)</sup>.

그런데 Membrane 건조시와 보수용접시에 미리 시공된 용접부에 추가로 용접하거나, 용접 Bead가 교차하는 부분에는 다음 패스의 용접열을 받은 제 1 패스 Bead에서 종종 균열이 발생한다는 보고가 있어 왔다. 이와 같이 용가재를 공급하지 않고 보수 용접을 하거나 용접 Bead가 겹쳐지는 경우에 생기는 균열은 특별히 용가재를 개선하여 균열방지를 할 수 없고 시공상의 기술로 해결해야 하거나 모재의 성분조정에 의해 해결해야 하는 어려운 점이 있다. 이러한 균열은 Bead가 약 850°C 정도로 가열되었을 때에 결정의 입계에서 취성이 강한 석출물(MnS, MnO, AlN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이 석출함에 의해 입계가 취화되어 발생한 균열로서 600~1000°C의 온도 범위에서 균열전파가 발생하여 성장하고 용접균열 발생 기구가 고온균열과는 달리 입계취화에 기인하는 연성저하균열(Ductility dip crack)인 것으로 알려져 있다<sup>9)</sup>. 사진 1, 2 는 Invar강에 대하여 GTAW로 십자형의 교차 Bead를 Bead-on-plate 용접할 시에 제 1패스 Bead에 나타난 연성 저하 균열의 균열면 양상을 SEM으로 촬영한 사진이다<sup>9)</sup>. 사진 1에서 파단면은 주상정에 의한 방향성을 가진 입계파면이 나타나지만 응고균열과 액화균열에서와 같은 부드러운 흔적은 보이지 않고 입계의 능선이 모나게 보이는 특징이 있다. 사진 2는 고배율로서 관찰한 파면을 나타낸 것으로서 파면상에 미세 Dimple, Void 혹은 줄무늬 모양이 관찰되는 것으로 부터 입계석출 혹은 입계편석이 균열을 일

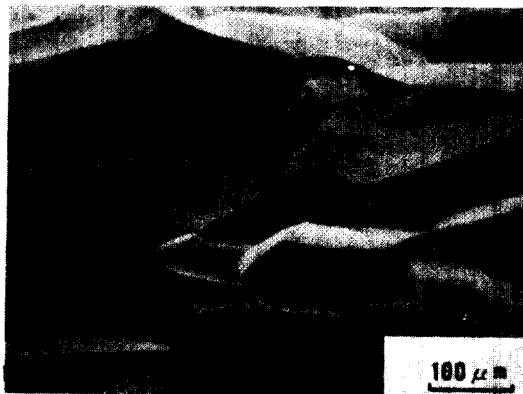


사진 1 연성저하균열의 SEM 사진

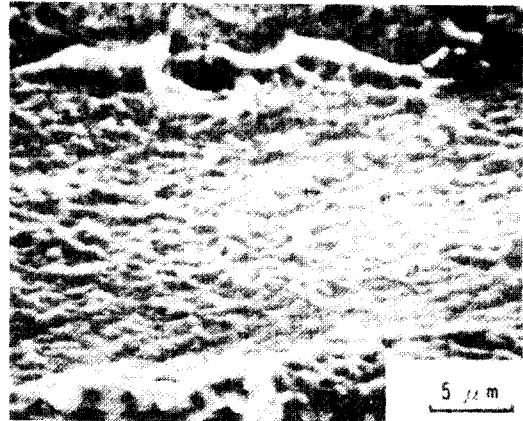


사진 2 고배율로 관찰한 연성저하균열면(사진 1)의 Micro 파면

키는 원인이 됨을 나타내고 있다. 이와 같은 연성 저하 균열은 Invar의 경우 고온(600~1000°C)에서의 용접부의 연신률이 12% 이하로 될 때 발생한다고 알려져 있다<sup>8)</sup>. 연성 저하 균열의 방지책으로서는 다음과 같은 방법을 들 수 있다<sup>9)</sup>.

- 1) 용접전류(특히 제 1 패스)를 낮게 하는 것이 가장 중요하다.
- 2) 대기중의 산소와 질소가 용융지에 혼입되지 않도록 고순도의 Ar가스로 용융지 및 고온부 전체를 확실히 보호한다.
- 3) 용접할 모재의 부위는 반드시 청결한 상태로 하여 용융지에 불순물로 인한 산소나 질소가 혼입되지 않도록 한다.
- 4) Invar 모재중의 황, 산소, 질소, 알루미늄등과 같은 불순물의 함량을 저감시킨다.
- 5) 용접변형에 대한 구속이 심하지 않도록 한다. 등이다.

한편 GT의 규정에서는 이와 같은 연성 저하 균열을 비롯한 Invar강의 용접균열 감수성을 확인하기 위하여 일정량의 공급물량마다 시료를 채취하여 그림 4에 나타난 것과 같은 형상과 치수를 가진 5개의 시험편에 대하여 표 5의 용접조건으로 시험 용접을 행하여 균열 발생의 유무를 확인하도록 요구하고 있다<sup>4)</sup>.

균열 발생 여부의 확인 방법으로는 Dye-check에 의한 육안검사를 요구하며 여하한 균열의 발생도 허용되지 않는다.

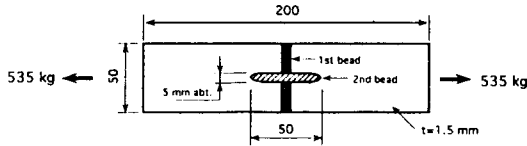


그림 4 Cross bead test의 시험편과 용접방법

표-5 십자형 교차비드(Cross bead) 시험 용접조건 (GT)

용접전류 (A)	용접속도	아크길이	Bead폭	부하하중
제1패스	제2패스	(mm/min)	(mm)	(kg)
60	60	100	1.5~1.6	535

3.3.2 GTAW 용접조건에 따른 용입형상

표 4에 나타난 것과 같이 GTAW의 용접부 형상은 Lap 이음부가 대부분이며, 하부 이음부재의 두께는 0.7mm인 경우가 많다. 따라서 이와 같은 박판의 용접에 따른 용락 및 과도한 Back Bead 돌출등의 결함을 방지함과 동시에 이음부의 강도 유지에 요구되는 적정 용접부 치수를 얻기 위해서는 이음부의 치수 및 형상에 따른 용접조건 선정 및 관리가 매우 중요하다. Invar 박판의 GTAW에는 Low Pulse TIG 용접을 적용하므로 용접 전류(Peak 전류), 속도, Pulse 주기, 하위 Pulse 전류(Background pulse current) 등이 주요한 용접 변수로 된다.

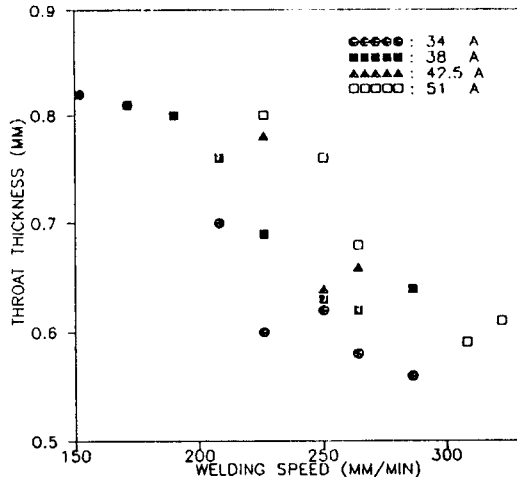


그림 5 용접조건(하위 pulse 전류, 용접속도)에 따른 Lap 이음부의 목두께 변화

그림 5에는 하위 Pulse 전류와 용접 속도의 변화에 따른 Lap 이음부 각목 치수의 변화를 나타낸 것이다<sup>10)</sup>. 하위 Pulse 전류가 커짐에 따라, 또는 용접 속도가 느려짐에 따라 평균 용접입열이 증가하기 때문에 각목이 증가함을 보이고 있다. 그러나 하위 Pulse 전류값이 용접 전류(Peak current)에 근접하여 가면 냉각효과가 충분하지 못하여 용융지(Melting pool)가 흘러내리거나 사진 3에 나타난 것과 같은 용락(Burn through)이 발생할 가능성이 커진다. 반대로 하위 Pulse 전류가 용접 전류에 비해 너무 낮아지면 용입이 충분히 이루어지기 전에 하위 Pulse 전류에 의한 냉각이 급격하게 되어 사진 4에서와 같은 불균일한 용입이 얻어지게 된다.

그림 6은 상/하 Pulse 시간, 용접속도의 변화에 따른 용입 깊이의 변화를 나타낸 것이다<sup>10)</sup>. 하위 Pulse 시간에 비해 상대적으로 상위 Pulse 시간이 길어질수록 용입이 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나



사진 3 Lap 이음부에서의 불균일 용입 현상



사진 4 Lap 이음부에서의 용락(과대용입) 현상

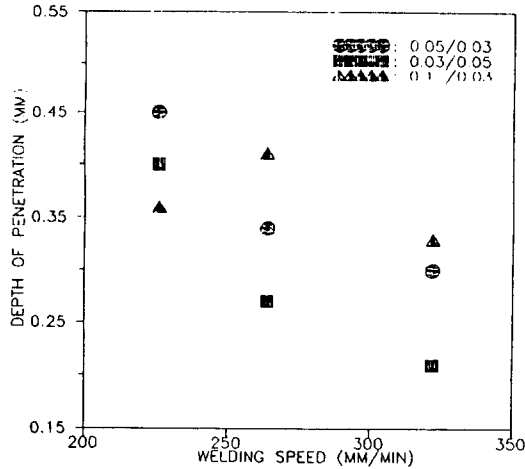


그림 6 용접조건(pulse 시간, 용접속도)에 따른 Lap 이음부의 용입깊이 변화

Pulse 주기가 길어질수록 Bead면이 거칠어지게 되고 위치에 따른 용접부 치수의 편차가 커지게 된다. 이러한 현상은 하위 Pulse 시간은 용융뒤에 수반되는 냉각시간을 지배하므로 하위 Pulse시간이 길어질수록 상위 Pulse 시간동안 이루어진 각 용융지의 간격이 커지게 되기 때문이다.

이와 같은 실험을 통하여 얻어진 Invar강 Lap 자동TIG용접의 실 시공 표준 용접조건의 일례를 표 6에 나타낸다.

표-6 Invar강 Lap 자동 TIG 용접조건 예

이음부재 두께 (mm)	용접 전류 (A)	상/하 Pulse 전류비 (%)	용접 속도 (mm/min)	상/하 Pulse시간 (Sec.)
1.5/0.7	75	50	270	0.03/0.03
1.5/1.5	110	50	260	0.03/0.03

### 3.4 용접부 검사와 허용기준

#### 3.4.1 GTAW 이음부

GTAW에 의한 시험 용접부에 대하여 행해지는 검사방법은 크게 이음부 절단면의 야금학적 관찰을 통한 용접 이음부 치수검사 및 Bead형상의 적합성, 용접결함 발생 유무를 확인하기 위한 육안검사로

표-7 Invar/Invar Lap 이음부 치수 허용기준

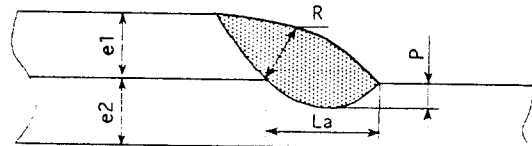
e1 (mm)	e2 (mm)	L (mm)	R (mm)		P (mm)
			Nominal <sup>1</sup>	Minimal <sup>2</sup>	
1.0	0.7	> 1.3	> 0.7	> 0.6	0.2~0.7
	1.0	> 1.5	> 0.7	> 0.6	0.2~1.0
	1.5	> 2	> 0.7	> 0.6	0.2~1.5
1.5	0.7	> 1.3	> 0.8	> 0.75	0.2~0.7
	1.5	> 2	> 0.9	> 0.8	0.2~1.5
	1.0	> 1.5	> 0.9	> 0.85	0.2~1.0

1. 용접승인시험(WPQT)시 용접변수(전류, 속도 등)의 선택을 위한 기준으로 사용된다.
2. 야금학적 검사시의 허용 최소 목두께.

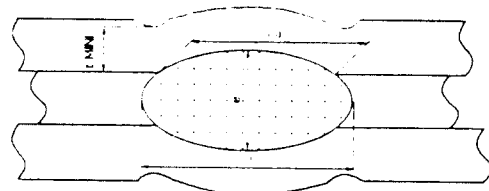
나누어진다.

표 7은 Invar/Invar Lap 이음부에서의 부재치수에 따른 허용 용접부 치수에 대한 GT 요구사항을 나타낸 것이다. 표에서의 치수기호는 그림 7(a)에 나타낸 것과 같다. 표에 나타낸 치수 요구사항이 시험편에서 채취된 3개의 절단면중 적어도 2개에 대하여 만족 되어야만 한다.

절단면에서의 용접부 Bead형상은 그림 8의 (a)와 (b)에 나타낸 것과 같도록 요구하고 있으며, (c)와 (d)에 나타낸 형상은 허용되지 않는다. 또한 Lap 이음부에서 용락(Burn through)이 발생했을 경우 그 부위 용접부 이면의 형상이 그림 9의 (a)와 (b) 또는 (c)일 것을 요구하고 있으며, (d)에 나타낸 것과 같이 약간 오목한 용락 이면부 형상을 가진 Bead의 길이가 50



(a) Lap joint



(b) Seam joint

그림 7 Lap 이음부와 Seam 이음부의 용접부 치수 기호



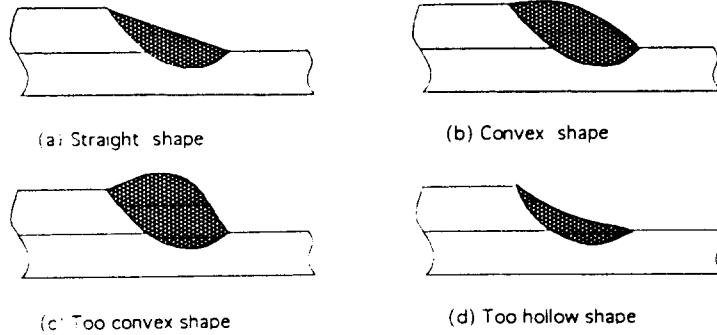


그림 8 GTAW에 의한 Lap 이음부의 형상의 허용기준

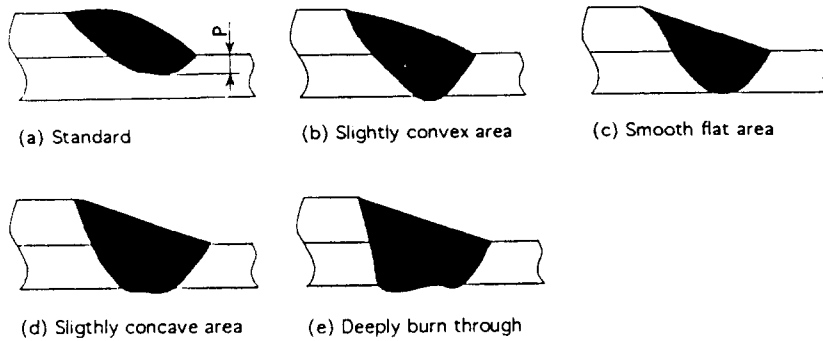


그림 9 용락된 Lap 이음부의 형상에 대한 기준

mm를 초과하거나, (e)에 나타난 과용락 이음부는 허용되지 않는다.

3.4.2 Seam 이음부

1) Seam 이음부의 용접전 취부 정도(精度)

Membrane내의 Raised edge부의 3중 겹치기 Seam

용접부의 용접전 허용 취부 정도를 그림 10에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 두께가 0.5 mm인 Tongue의 양면으로 두께 0.7mm인 Strake를 취부할 시의 정도는 그림에 나타난 치수 공차 이하인 것을 요구하고 있다. 용접전 치수 정도를 만족하는 이음부에 대한 본 용접전의 Tack용접 방법을 그림 11에 도식적으로 나타내었다. Tack용접은 Spot용접 간격이 그림에서와 같이 100~200mm가 되도록 일정하게

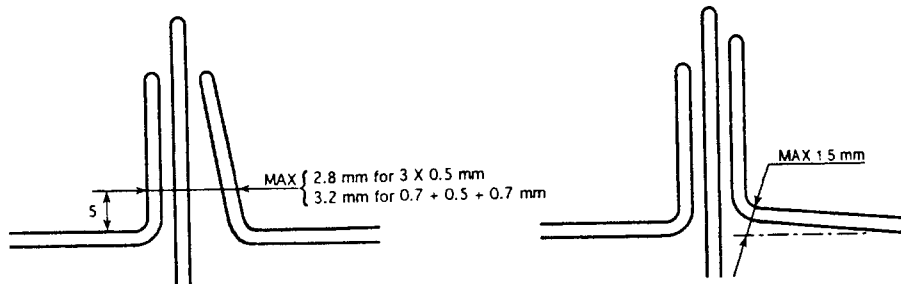


그림 10 Seam 이음부의 용접전 취부정도

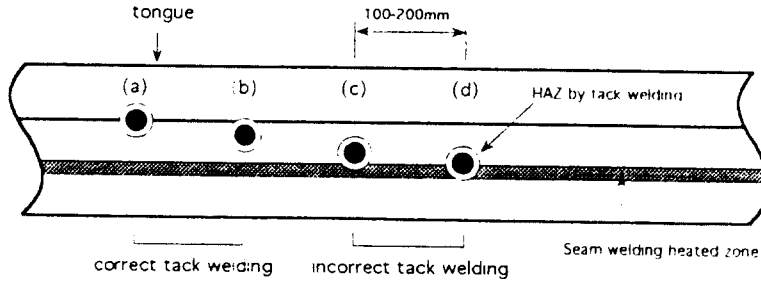


그림 11 Seam 이음부에서의 Tack 용접방법

행하고 Seam용접후 두 용접부의 열영향부가 교차하지 않도록(그림 11의 (a) 또는 (b)의 형상) 요구하고 있다. 이것은 앞서 설명하였던 것과 같이 Seam용접의 열영향으로 인한 Tack용접부에서의 연성 저하 균열 발생을 방지하기 위한 목적 때문이다.

2) 용접부 치수 요구사항과 용접결합

Seam이음부는 이음되는 부재 치수의 상이에 따라 규격에 정해진 값 이상의 너깃부 치수를 가지도록 요구하고 있으며, 그 예로서 두께 0.7mm인 Strake의 Seam 이음부에 대한 너깃부 치수 요구사항을 표 8에 나타내었다<sup>7)</sup>. 표에서의 치수기호는 그림 8 (b)에 나타낸 것과 같다.

표-8 두께 0.7mm의 Strake의 Seam 용접부 너깃부 치수 요구사항

이음부재 치수	L <sub>s</sub> (mm)	L <sub>a</sub> (mm)	e (mm)	t (mm)
$\begin{array}{ c } \hline 0.5 \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{ c } \hline 0.7 \\ \hline \end{array}$	> 1.2	> 0.9	> 0.9	> 0.6
$\begin{array}{ c } \hline 0.5 \\ \hline \end{array}$ $\begin{array}{ c } \hline 1.0 \\ \hline \end{array}$	> 1.2	> 0.9	> 0.9	> 0.9

GT에서는 Seam 이음부에서 발생하는 용접결합을 결합의 유형(Type)에 따라 Type X와 Type W의 두 가지로 대별한다. Type X는 너깃부내의 결정입계 편석에 기인하는 결합이며, Type W는 너깃내에서 발생한 기공(Porosity)에 해당하는 결합이다. 각 유형의 결합은 결합의 중요도에 따라 0, 1, 2, 3, 4로 세분된다. 결합의 허용 기준으로서 각 유형에서 0은

결합발생이 없는 경우에 해당하며, 1~3은 허용할 수 있는 결합정도이며 각 유형에 대하여 3 결합(X3, W3)이 최대 허용 결합으로 된다. 각 유형에 대한 4 결합은 반드시 제거한 후 보수용접하도록 되어 있다. 그러나 결합의 허용 기준에 대한 GT의 규정에서 결합의 절대치수는 명시되어 있지 않으며 단지 정성적인 관찰에 의해 결합의 등급을 나누고 있기 때문에 발생 결합의 허용 유무와 관련하여 논의의 여지가 있는 것으로 생각된다.

4. Invar강 용접 이음부의 강도

GT Membrane 방식 LNG선의 화물격납설비는 Lap 이음부, Seam 이음부, Edge-flange 이음부에 의해 조립된다. 이들중 구조적인 강도와 관련하여 중요한 이음부는 Lap이음부와 Seam이음부이며 이중에서도 Lap 이음부는 구조적으로 가장 취약한 이음부로서 피로 안전성 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다.

그림 12는 Invar Lap 이음부의 피로강도선도를 나타낸 것이다<sup>10)</sup>. 모든 실험 Data는 파단위치에서의 실단면응력범위( $\Delta S_{II}$ )에 기준하여 나타내어졌으며, 그림에 나타난 것과 같이  $\Delta S_{II}$ 에 의하는 경우 용접법 및 Lap 이음부 부재치수에 관계없이 Invar Lap 이음부의 피로특성을 하나의 피로선도로 나타낼 수 있는 것을 알 수 있다.

한편 IMO Gas Code에서는 LNG선의 피로에 대한 누적 손상계수(Cw)를 0.5 이하로 제한하고 있기 때문에 위의 실험결과에 평균응력( $S_m$ )을 고려하여 누적 손상계수가 0.5이하가 되는 Lap이음부에 대한 허용응력( $\sigma_{ex}$ )을 평균응력( $S_m$ )과의 관계로 나타내면 아래의 식과 같이 된다.

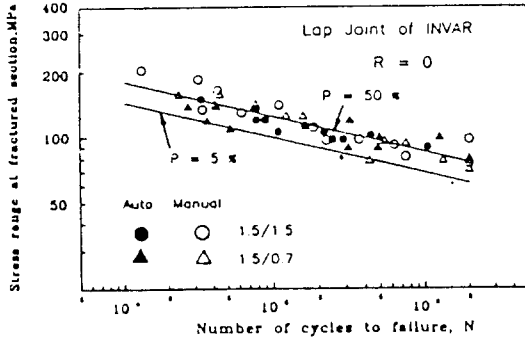


그림 12 Invar Lap 이음부의 피로강도 곡선

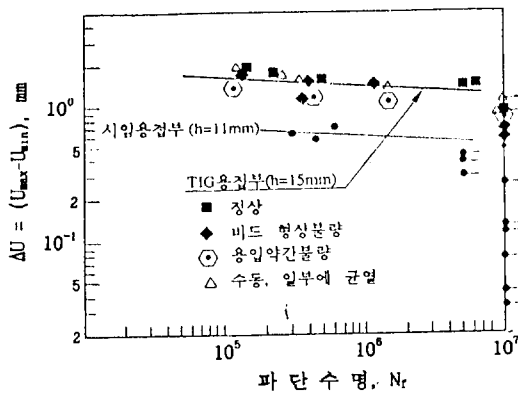


그림 13 Invar Seam 및 Edge-flange 이음부의 피로강도 곡선

$$\sigma_{ext} = 92.893 - 0.212 \cdot S_m \text{ (MPa)}$$

그림 13은 Invar Seam 이음부와 Edge-flange 이음부에 대하여 횡방향 변위를 제어하여 피로시험한 결과이다<sup>5,12)</sup>. 이와 같은 용접부의 변형능력은 그림 3에서 개구량 U와 용접부의 높이 h의 함수로 나타난다. 즉 개구량 U가 커지면 쉽게 피로파괴하며 h는 커질수록 큰 변형능력을 가지게 되며 이것을 U/h<sup>2</sup>으로 정리하여 그림 12의 세로축으로 잡은 것이다. 이 결과를 보면 h=11mm인 Seam 용접부는 U가 0.4mm 이하일 때, h=15mm인 Edge-flange 용접부는 U가 0.7mm 이하일 때 1%미만의 피로파괴확률로 된다.

### 5. 결론

이상과 같이 GT Membrane 방식 LNG선의 1, 2차 Membrane의 제작시의 용접기술 및 용접 이음부의 강도에 대하여 개략적으로 검토하였다. Membrane 재료인 Invar강은 그 적용 두께가 매우 얇은 박판이기 때문에 용접이음시 용락 및 용접결함등을 방지할 수 있는 용접기술 및 시공상의 고려가 LNG선 전체의 안전성 측면에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 또한 근본적으로 Membrane 부재는 구조강도를 부담하는 강도부재는 아니라 하더라도 선체로부터 전달되는 하중은 필연적으로 받게 되므로 이 하중에 의해 피로파괴가 발생하지 않도록 용접부의 적정 강도를 유지하는 것이 중요하다.

### 참고문헌

1. IMO : CODE FOR THE CONSTRUCTION AND EQUIPMENT OF SHIPS CARRYING LIQUEFIED GASES IN BULK, 1982
2. Bureau Veritas : Classification of Gas Carrier, BV, 1992
3. 小野, 外 2人 : LNG船 LPG船의 技術展望, 三菱重工技報, Vol.21 No.2, 1984, p.158
4. GAZ TRANSPORT : SPECIFICATION FOR THE SUPPLY OF Fe-36%Ni ALLOY STRIPS, GT Ext. Doc. No 252 1,1985
5. 조상명 : LNG탱커용 저온재료의 특성과 용접성, (사)한국선급, 1991, p.36
6. 日本造船研究協會 : LNG運搬船의 安全基準に關する 調査研究報告書(そのI), 1976, pp.194~200
7. GAZ TRANSPORT : WELDING HANDBOOK 435 H, GT Ext. Doc. No 435, 1993
8. 張月端 : Fe-36%Ni合金 인바어의 溶接における 延性低下割れに關する 基礎的研究, 日本大阪大學 博士學位論文, 1986
9. 日本溶接學會 溶接冶金研究委員會 : 鐵鋼溶接部 破面寫眞集, 黒木出版社, 1982, pp.66~69
10. 이은배 외 2인 : Invar의 티그용접시 용접조건이

용입에 미치는 영향, 대한용접학회, 학술발표대회  
개요집, 1991, pp.79~80

11. 한명수 외 2인 : LNG선용 INVAR강재 Lap용접  
부의 피로강도 검토, 대한용접학회, 학술발표대회

개요집, 1992, pp.222~224

12. 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(そのII), 1976, pp.165~166