20주년 기념 특집 : 용접기술의 응용

LNG저장탱크의 9%Ni강 용접부설계 및 용접기술 현황

김 형 식 · 김 우 식

Investigation of Welding Joint-Design and Technique for 9%Ni Steel of LNG Storage Tank

Hyoung-sik Kim and Woo-sik Kim

1. 서 론

국내의 LNG인수기지는 평택, 인천 및 통영에 위치하고 있는데, 평택은 지상식 멤브레인형 저장탱크가 운용중이고, 인천과 통영에는 지상식 9%니켈형과 지하식 멤브레인형 LNG저장탱크가 건설/운용되고 있다. 지상식의 경우 용량은 100,000~160,000m^{3}이며 지하식의 경우에는 200,000m^{3}의 용량을 갖고 있다.

LNG의 주성분은 메탄으로 비등점은 -161.5℃이다. 이러한 초저온 상태에서 LNG를 저장하는 재료로는 9%니켈강, 스테인리스강, 인바, 알루미늄합금 등이 사용되어져 왔다. 현재에는 지상식의 경우 두께 10~30mm의 9%니켈강이 주로 이용되며 멤브레인형의 경우는 1.2~2mm 두께의 스테인리스강이 사용된다. 본 논문에서는 9%니켈강의 용접에만 초점을 맞추어 서술하였다.

9%니켈강의 경우 용접봉은 모재의 성분과 동일한 성분계가 있지만 대부분의 경우 초저온에서 더욱 안정한 오스테나이트계열의 고니켈계가 사용되고 있다. 이제까지 현장에서의 9%니켈강의 용접시공기술에 대한 논문들이 학회지에 다수 발표되었다[1,2] .

하지만 규격에 근거한 강도설계 측면에서의 용접이음매 효율 검토는 이루어지지 못하였다. 따라서 본 논문에서는 LNG저장탱크 용접부의 강도설계 개념에 기초한 이음매 설계내용과 현재 사용되는 용접공정 및 기술을 고찰해보겠다.

2. LNG저장탱크의 구조

LNG저장탱크의 형식으로는 단일방호식, 이중방호식, 완전방호식와 멤브레인식 LNG저장탱크로 분류한다[3]. 현재 국내에서는 완전방호식 LNG저장탱크를 주로 건설하고 있다. 완전방호식 LNG저장탱크란 독립적으로 초저온의 LNG를 저장할 수 있는 용기가 이중으로 구성되어 있고 각 용기간의 가스의 이동을 조절할 수 있는 탱크를 말한다.

Fig. 1에 LNG저장탱크의 단면도를 나타내었다. 두개의 용기는 위치에 따라 내조(inner tank)와 외조(outer tank)로 분류하는데 그림에서 알 수 있듯이 내조는 9%니켈강으로 되어있고 외조는 코너부에 9%니켈강 라이너와 단열재가 바닥에서 5m 까지 시공되어 있는 콘크리트로 되어있다. 그리고 원통형의 내조에는 9% 니켈강으로 스티프너가 설치되어 있는데 이는 퍼얼라이트 가루로부터 오는 원통의 붕괴압력을 견디게 하기 위해서 이다[4].

3. LNG저장탱크의 용접부 설계

3.1 설계규격

LNG저장탱크의 기본설계규격은 API 620이다. 그리고 선택적으로 BS 7777, BS 5500, ASME Section Ⅷ의 div.1 & 2가 사용된다.

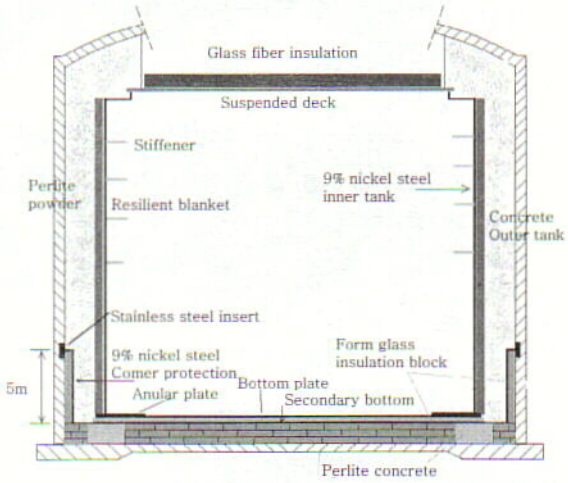

Fig. 1 Full containment LNG storage tank

3.2 내조벽체(inner wall)의 설계

Fig. 1에서 보는 바와 같이 내조는 벽체(wall), 스티프너(stiffener), 바닥(bottom), 에뉼라(annular plate)로 구성된다.

LNG는 초저온의 액체이기 때문에 열하중이 고려되어 각 구성요소의 두께가 계산될 것으로 생각할 수 있다. 하지만 LNG저장탱크의 내조는 단순히 LNG의 무게를 견딜 수 있도록 설계된다. 왜냐하면 Fig. 1의 수축성 블랑켓(resilient blanket)에 의해 내조가 자유롭게 이동하기 때문에 열하중에 의한 응력이 발생하지 않기 때문이다. 따라서 내조의 설계는 다음의 식(1)에 의해 LNG의 무게에 견딜 수 있는 9%니켈강 내조의 두께를 계산한다[5].

$$t = \frac{T_2}{S_{ts} E} + ca \qquad (1)$$

여기서 t=벽체두께, T_2=LNG의 무게에 의한 수평압, S_{ts}=최대허용응력, E=이음매효율, ca=부식여유이다. Table 1과 2에 내조설계에 사용하는 9%니켈강, 용접금속이 강도와 최대허용응력 S_{ts}를 나타내었다.

Table 1에서 보는 바와 같이 9%니켈강 모재의 경우 ASTM A353과 A553이 사용되고 있다. 하지만 강도가 모재보다 낮은 오스테나이트 계열의 용접금속을 사용하기 때문에 LNG저장탱크의 내조벽체 설계에 있어서는 용접금속의 강도가 설계 기준이 된다. 따라서 A353이든 A553이든 모재의 강도와 무관하게 설계된다. 한국가스공사의 저장탱크의 경우에는 A553이 주로 이용되고 있다. 그리고 용접금속의 강도는 규격이 허용하고 있는 최고강도 400MPa까지 사용한다. 실제 벽체의 용접에 사용되는 Yawata weld B(M)F도 항복강도가 416MPa로 이보다 높은 것을 알 수 있다.

Table 2의 허용응력의 경우 정상상태에서는 최대허용응력이 약 2/3YS정도로 하고 있다. 하지만 지진과 같은 비상상태의 경우에서는 OBE(operating base earthquake), SSE(safe shutdown earthquake) 내진조건에서 최대허용응력을 0.85YS이상으로 설계한다[6].

Table 1 Strength of 9% nickel steel

Material	Strength(MPa)		Elongation (%)
	YS	UTS	
A353	Min515	690~825	Min 20
A553	Min585	690~825	Min 20
Weld (Yawata B(M)F	418	678	Min 40
Max value for weld in API620	400		

Table 2 Maximum allowable stresses

Code	Allowable stress
API 620	Lesser of 2/3YS or 1/3 UTS
BS 5500	Lesser of 2/3YS or UTS/2.35
ASME sec. Ⅷ div.1	1/4UTS
ASME sec. Ⅷ div.2	1/3UTS

3.2.1 내조벽체의 용접부 설계

내조벽체의 경우 용접금속의 최대항복 강도인 400 MPa를 기준으로 설계된다. API620에서의 최대허용응력은 안전계수를 2/3를 사용하여 266.6MPa가 된다. 그리고 지진시에는 이보다 훨씬 높은 340MPa의 응력까지 발생하도록 설계하고 있다.

그러므로 이와 같은 높은 응력에 견디기 위해서는 벽체에서의 모든 용접부의 이음매 효율이 1이 되도록 설계해야 한다. 일반적으로 용접이음매효율은 이음매형태와 비파괴검사요건으로 결정된다.

Table 3에 API620의 형태별 용접이음매효율을 나타내었다. 이음매효율이 1이 되기 위해서는 맞대기용접부로 설계하고 가우징에 의해 후면 용접을 하고 100% 방사선투과시험을 수행하면 된다. 이 기본요건에서 벗어나게 되면 이음매효율이 떨어지게 된다. Fig. 2, 3에 벽체의 수평용접부 및 수직용접부의 이음매 형상을 나타내었다.

벽체의 수평용접의 경우 SAW 자동용접방법으로 용접된다. 용접봉은 열간 내균열성과 강도가 우수한 Hastealloy계통의 용접봉이 사용된다. Fig. 2에서 보는

Table 3 Joint efficiency in API 620

Joint type	RT	Joint efficient
Double welded butt	Spot	0.85
	Full	1
Single welded butt with backing strip	Spot	0.75
	Full	0.85
Single welded butt without backing strip	-	0.70
Double fillet lap joint	-	0.65~0.70
Single fillet lap joint	-	0.35
Plug weld	-	0.80

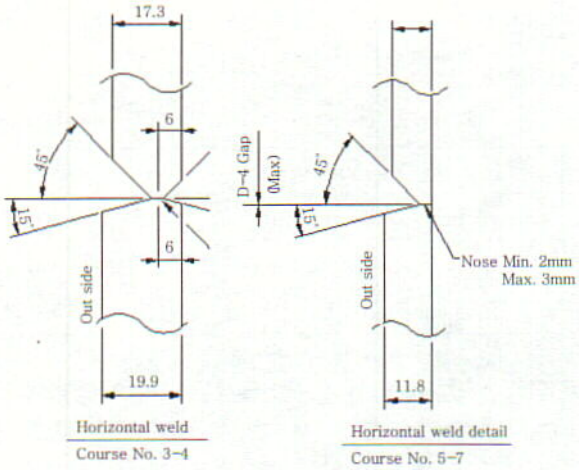

Fig. 2 Weld joint shape for horizontal weld of inner tank wall[7)]

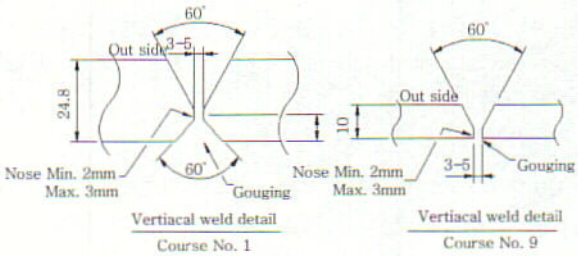

Fig. 3 Weld joint shape for vertical weld of inner tank wall[7)]

바와 같이 V자형 개선에 두꺼운 판재일수록 후면 nose를 크게 한다(2~6mm).

벽체의 수직용접부의 경우에는 SMAW 공정에 의해 용접된다. 용접봉은 inconel계가 사용된다. Fig.3에서 보는 바와 같이 수평용접부와 동일한 개선형상으로 용접한다.

강도설계시 이음매효율을 1로 사용하기 위해서는 용접 후 루트부의 가우징을 하고 후면용접을 한 후 용접부의 100%에 대해서 방사선투과시험을 실시한다.

3.2.2 스티프너의 용접부설계

스티프너의 경우 LNG의 액압에 견디도록 설계하는 것이 아니고 외부하중인 단열재 퍼얼라이트 가루에 의한 원통의 붕괴에 저항하는 모멘텀을 갖도록 설계된다. 그러므로 발생되는 응력 자체는 매우 낮으며 형상적으로 외부하중에 의한 붕괴를 방지하도록 되어있다.

Fig. 4에 스티프너의 용접이음매 형태를 나타내었다. 스티프너와 벽체의 용접은 양면 필릿용접이 사용되고 스티프너 간의 용접에는 백킹 플레이트를 사용한 맞대기용접이 사용된다. 또한 비파괴 검사도 PT만을 수행하게 된다. Table 3에 의하면 이들의 이음매효율은 각각 0.75, 0.7정도이다.

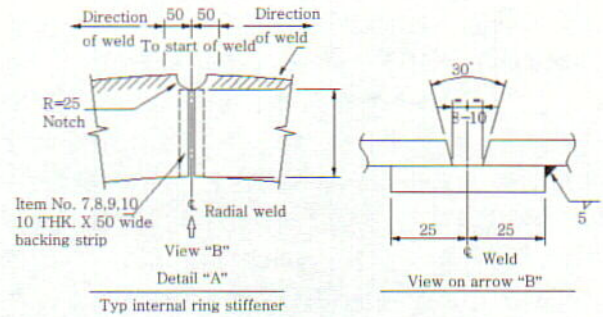

Fig. 4 Shape of weld joint for stiffener[1)]

3.2.3 바닥의 용접부 설계

바닥의 경우에는 LNG의 무게에 의한 하중이 대부분 바닥하부에 존재하는 단열재(formglass)에 의해 지탱된다. Fig. 5에 바닥의 이음매 형상을 나타내었다. 바닥에 가해지는 하중은 크지 않기 때문에 이음매효율이 낮은 필릿용접부로 설계해도 충분하다. 즉 바닥의 9% 니켈강은 하중을 견디기 위한 것이 아니고 단지 기밀성을 유지하기 위한 것이다. 따라서 이음매효율이 낮은 단일, 이중, 삼중의 필릿형태로 이음매를 설계한다.

3.2.4 에뉼라의 용접부설계

에뉼라 판재는 지진발생 시에 탱크의 요동에 의해 내조 벽체 하단부에 발생하는 압축응력에 의해 엘리펀트

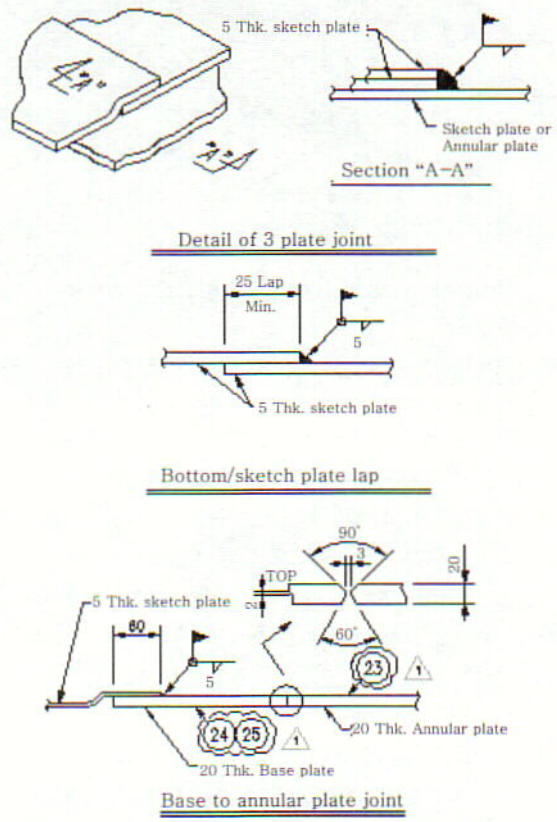

Fig. 5 Shape of weld joint for bottom[1)]

균열(elephant crack)이 발생하지 않도록 폭과 두께를 설계한다. 에뉼라 플레이트의 폭이 넓을수록 상부에 존재하는 LNG의 무게에 의해서 탱크가 지탱되므로 지진시 안정성을 갖게되며 두께가 두꺼울수록 판재의 강성에 의해 탱크의 요동이 억제된다. 에뉼라 판재에는 지진시에 상당히 큰 응력이 발생하게 된다. 따라서 이음매효율이 1이 되도록 설계한다. Fig. 6에 에뉼라 판재와 벽체 그리고 에뉼라 판재들간의 용접이음매 형상을 나타냈었다. 에뉼라 판재와 벽체의 용접은 완전용입에 의한 용접이 시행된다. 하지만 현실적으로 초음파검사나 방사선투과시험의 적용이 어려운 실정이다. 따라서 PT와 vacuum box test를 수행한다. 에뉼라 플레이트 간의 용접에 경우에는 맞대기 형태로 용접부를 설계한 후 바닥으로부터 1m정도 들어서 용접한 후 방사선투과시험을 수행하고 다시 바닥에 내려놓는 상당히 번거로운 공정으로 용접부의 이음매효율 1이 확보된다.

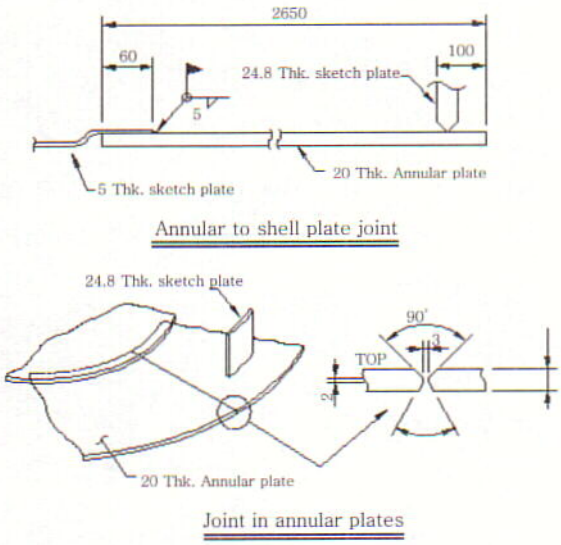

Fig. 6 shape of weld joint for annular[1]

3.3 콘크리트 외조 코너프로텍션 용접부 설계

외조는 콘크리트탱크이다. 다만 콘크리트탱크 하부 코너부는 내조의 LNG유출시 콘크리트 코너부를 보호하기 위해 Fig. 1에서와 같이 단열재와 9%니켈강 라이너를 설치하게 된다. 이의 설계는 ASME section 8 div2 appendix4에 따라 설계된다. 이 규격은 하중을 1차하중과 2차하중으로 분류하고 1차하중, 2차하중, 전체하중에 대해 각각 다른 허용응력을 사용한다.

Table 4에 최대허용응력과 LNG유출시 발생하는 응력을 나타내었다. 발생하는 응력도 매우 크고 전체하중의 최대허용응력이 용접금속 항복강도의 2배까지 사용하는 소성설계가 이루어진다. 그러므로 이음매효율 1이 확보될 수 있도록 극히 신중한 용접부 관리가 필요하다.

Table 4 Maximum allowable stresses for corner protection liner.

Stress intensity	Allowable stress	Calcu. result
Primary membrane	YS	377
Local primary membrane	1.5YS	340
Primary membrane+bending	1.5YS	570
Primary+secondary	2YS	572

Fig. 7에 코너 프로텍션부의 이음매형상을 나타내었다. 코너 프로텍션의 경우 단열재와 접촉한 상태로 용접해야 하기 때문에 백킹 플레이트를 사용하여 맞대기 용접을 하게 된다. API 620의 Table 3에 의하면 이러한 백킹 플레이트를 사용한 단면용접의 경우에는 100% 방사선투과시험을 해도 이음매 효율이 0.85밖에 되지 못한다.

코너프로텍션의 경우에는 설계코드가 ASME section Ⅷ div.2 이다. 이 규격에서는 모든 용접부의 이음매효율이 1이 되도록 설계하는 것이 전제된 규격이다. 왜냐하면 이음매효율이 1이 아니고는 용접금속의 항복강도를 초과하는 소성설계가 불가능하기 때문이다.

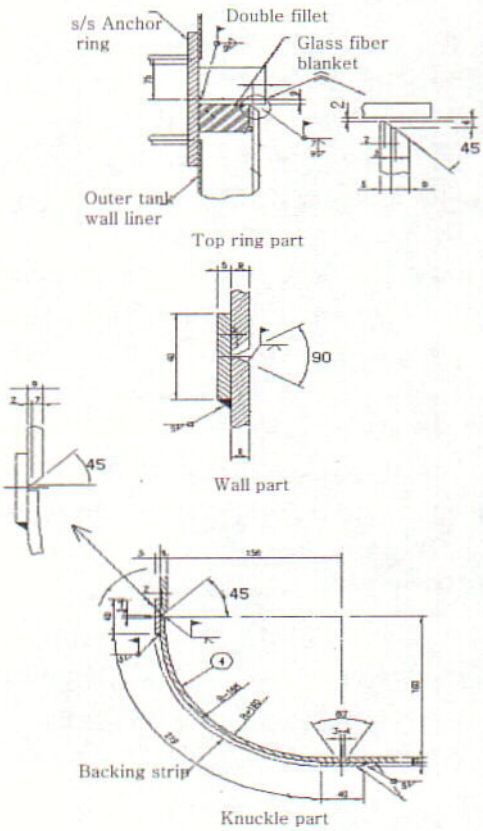

Fig. 7 Shape of weld joint for corner protection liner plate[7]

현실적으로 백킹 플레이트를 사용한 단면용접부의 이음매효율이 1이 되기는 어렵지만 이음매효율을 1로 근접시키기 위해서는 체적비파괴검사를 수행하는 것이 최선책이다. 하지만 그나마도 접근성이 한쪽 면에서만 가능하므로 방사선투과시험은 불가능한 상태이고 초음파검사도 dead zone이 발생하여 어려움이 있다. 따라서 dead zone을 매우 작게 한 초음파탐촉자의 개발과 이의 사용방법에 대한 확립이 필요한 실정이다. 현재는 용접공정을 신중하게 조절하고 용접하며 비파괴검사로 PT만을 수행할 수밖에 없는 실정이다. 하지만 현재 건설되고 있는 한국가스공사의 통영 6,7호기 LNG저장탱크의 경우에는 초음파검사의 적용이 적극적으로 검토되고 있다.

4. 용접공정

현재 LNG저장탱크의 9%니켈강에 적용하고 있는 용접방법에는 SMAW(Shield Metal Arc Welding)과 SAW(Submerged Arc Welding)이다. 이들 공정들은 용접자세나 경제성에 따라 LNG저장탱크의 위치별로 적용하게 된다.

Table 5에 탱크의 위치별 적용되는 용접공정을 나타내었다.

Table 5 Weld consumables

Process	Application point	Weld metal
SAW	Shell horizental	Hastealloy
SMAW	Shell vertical Annular Bottom Corner protection Stiffener	Inconel
	Repair of SAW	Hastealloy

4.1 9%니켈강의 용접상의 문제

9%니켈강용 용접재료는 용접금속의 강도 및 열팽창계수가 모재와 비슷하고 극저온에서의 높은 충격인성이 요구되며 용접작업성도 우수하여야 한다. 특히 LNG 탱크와 같은 대형 구조물은 용접 후 열처리가 불가능하기 때문에 용접된 상태에서 우수한 저온인성을 확보할 수 있어야 한다. 이러한 특성을 만족하는 재료로서 종래부터 고니켈계 합금이 주로 사용되고 있으나 고니켈계 합금을 이용하여 9%Ni강을 용접하는 것은 일종의 이종재료 용접이기 때문에 용접시공 시 여러 가지 주의점이 필요하다. 일반적으로 나타나는 문제점은 Table 6과 같이 요약할 수 있다[8].

Table 6 Welding problems of 9%Ni steels with high nickel alloy consumables

Item	Problems
Crack	High temp. crack (especially in crater)
Penetration	Lack of penetration
Dilution	weld metal dilution
Thermal expansion coefficient	Thermal stress due to different thermal expansion coefficient between base metal and weld metal
Strength	Soft weld metal
Cost	Expensive high nickel weld consumables

4.1.1 용접금속의 고온균열

니켈계 합금은 오스테나이트 조직이기 때문에 기본적으로 고온균열이 발생하기 매우 쉽다. 따라서 용접조건이 내균열성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 용접전류, 운봉비가 높을수록 균열이 발생하기 쉽다. 따라서 균열이 없는 건전한 용접금속을 얻기 위하여서는 용접전류 및 용접속도를 너무 높이지 않도록 하여야 하며, 특히 초층용접 등 구속이 큰 부분에서는 충분한 관리가 필요하다. 또 crater부는 균열이 일어나기 쉬우므로 특히 주의하여야 한다.

4.1.2 용접열영향부의 균열

고니켈기합금으로 9%니켈강을 용접하는 경우에는 용접열영향부에 균열이 발생할 가능성은 거의 없지만 흡습한 용접재료를 사용한 경우에는 열영향부에 저온균열이 발생할 가능성이 있다. 니켈계 합금의 용접금속은 상온에서 확산성수소가 전혀 없기 때문에 이러한 수소는 용접금속의 냉각과정 중 용접금속으로부터 열영향부로 확산된 것으로 추측되어 균열은 수소에 기인한 지연균열이라고 생각된다. 따라서 용접부의 기름, 수분 등을 완전히 제거하고, 용접봉 및 플럭스를 충분히 건조하여야 하며 한냉지에서 용접할 시에는 모재를 예열하는 등 주의를 필요로 한다.

4.1.3 성분의 희석

9%니켈강과 니켈계 합금은 화학성분이 크게 상이하기 때문에 9%니켈강 모재의 희석이 용접금속 성능에 큰 영향을 미친다. 모재 희석율이 높을수록 강도가 저하하므로 필요 강도를 확보하기 위하여서는 지나친 모재 희석을 피하여야 하며, 특히 SAW나 자동 TIG 용접법을 이용한 판의 아래보기 용접에서는 루트 간격과 용접조건을 적절히 조정하고 가능한 한 다층용접을 실시한다.

4.1.4 용입부족

니켈계 합금은 9%니켈강에 비하여 융점이 150°C 정도 낮기 때문에 탄소강의 용접에 비해 용입량이 작아 용입불량을 일으키기 쉽다. 특히 수직 및 위보기(over head) 자세 용접에서는 용접비드가 볼록한 모양이 되기 쉽다. 따라서 홈각도를 넓게 하고 용접봉 및 와이어 직경을 작게 하여 용접전류를 제어하는 등, 용접조건 및 시공상의 주의가 필요하다.

4.1.5 아크쏠림

연강에 비해 니켈을 함유하는 강은 자장의 영향으로 자성을 띄기 쉬워 9%니켈강 용접에 있어서는 자기 아크쏠림이 문제로 된다. 자화된 9%니켈강에서는 아크쏠림에 의해 용접금속부가 한 쪽으로 치우쳐 융합불량이 발생하기도 하고, 심한 경우에는 용접이 불가능하게 된다. 9%Ni강은 탈자처리를 하여 50Gauss 미만이 되도록 출하하고 있어 운송시에 자화되지 않도록 세심한 주의를 하여야 한다. 또 arc air gouging 및 grinding 시에도 강판 단면에 80~100Gauss 정도의 큰 자장이 발생될 수 있으므로 주의해야 한다. 용접전원도 직류보다 교류를 사용하면 아크쏠림을 방지할 수 있다. 이러한 목적을 위해 9%니켈강 용접을 위해 교류 전용 수동용접봉이 개발되어 적용되고 있는데 대표적인 상품으로는 일철공업의 Yawata Weld B(M) 제품등이 있다.

4.2 현재 적용되는 용접공정

4.2.1 SMAW

SMAW는 용접방법중 가장 최초에 사용되었다. 자동화가 이루어진 벽체의 수평용접부와 에뉼라 용접을 제외하고 SMAW수동용접이 사용되고 있다. 이 공정의 경우 입열량이 낮기 때문에 균열에 대한 문제가 적어 inconel계 용접봉이 사용한다. 가용접이나 자동용접부의 보수용접에서는 hastealloy계 용접봉이 사용된다.

4.2.2 SAW

SAW 자동용접은 주로 벽체의 수평부분의 용접에 주로 사용되고 있다. 적용초기에는 inconel계 용접봉이 주로 사용되었으나 용입에 의한 희석량이 증가하면서 강도저하가 일어나고 내균열성과 작업성이 문제가 되어 1972년경부터 hastealloy를 사용하게 되었다. 직류전원으로 1.6mm 또는 2.4mm 단일와이어를 사용하여 횡향으로 용접하는 것이지만 일부 교류전원을 사용하여 하향으로 용접하는 경우도 있다. 또한 용접량이 많은 벽체와 에뉼라의 T이음부에는 tandem SAW법이 사용되고 있다.[8]

5. 용접기술의 과제와 향후전망

국내의 9%니켈강의 용접기술은 1990년대에 한국가스공사 인천생산기지에 9%니켈강형 LNG저장탱크를 건설하면서부터 발전해왔다. 하지만 현재까지 다양한 종류의 용접방법이 적용되지 못하고 초기부터 사용하고 있던 SMAW와 SAW만을 반복하여 사용하고 있다.

Table 7에서 보는바와 같이 이러한 용접기술은 1970년대 이전부터 사용했던 공정이다. 그 이후에 벽체의 용접금속에 대한 고품질화를 위해 GTAW공정이 개발되어 1980년대 이후 폭넓게 적용되고 있으나[8] 국내에서는 전혀 사용하지 않고 있다. 특히 GTAW는 용접후 보수가 거의 발생하지 않아 용접생산성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이외에 GMAW공정도 개발되어[9] 적용되고 있다. 품질 및 경제성확보 측면에서 이러한 새로운 용접공정의 도입도 적극 검토해 볼만한 사항이다.

Table 7. Development of welding processes in 9%nickel steel for LNG tank

Time	Shell		Bottom			
	Vertical	Horizental	Bottom	Annular	Bottom & annular	Shell & annular
	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW	SMAW
'70	GTAW	SAW	SAW, GTAW		SMAW, SAW	
'80				SAW		
	GTAW (MC)	SAW, GTAW (MC)	GTAW, GTAW(MC)	GTAW (MC)	SAW, GTAW (MC)	SMAW, SAW-T
'90						

*SAW-T: Tandem SAW, GTAW(MC) Magnetic controlled

벽체와 에뉼라의 용접부, 코너프로텍션 라이너의 용접부 등에는 상당히 큰 응력이 발생하는 지점임에도 불구하고 현실적으로 접근성이 제한되어있어 방사선투과시험이 곤란하다. 그러므로 이러한 용접부에 대해 적용할 수 있는 체적비파괴검사로 초음파검사나 와전류탐상법 등의 절차를 개발하는 것이 필요하다.

현재까지 국내에서는 시공기술에 국한되어 9%니켈강의 용접기술이 발전되어 왔다. 최근까지 용접재료에 대한 개발에 대해서는 연구실적이 전무한 상태였다. 1999년에 포항제철, 현대종합금속(주)과 한국가스공사

가 공동으로 9%니켈강의 용접봉을 개발 완료한 상태이나 경제성 등의 문제로 실제로 생산을 못하고 있는 실정이다.

한편 경제성 제고 측면에서 전세계적으로 저니켈계 용접봉의 개발이 주목받고 있다. 탱크대형화 추세에 따라 점차 9%니켈강이 두꺼워져 강도가 높은 저니켈계 용접봉을 사용함으로써 상당한 경제성 향상이 기대되기 때문이다. 실제로 TGS-9N이라는 11.2%니켈을 함유한 용접봉이 생산되고[2] 있으나 아직까지 현장에 적용되었다는 보고는 없다.

6. 결 론

국내에서도 9%니켈강형 LNG저장탱크의 설계능력이 확보됨에 따라 용접부 설계에 있어서도 많은 부분에서 독자적인 결정이 가능한 상태이다. 향후 산학연 공동연구를 통해 LNG저장탱크의 9%니켈강용접에 대해 새로운 용접공정의 채택과 아울러 용접재료의 국산화를 통해 9%니켈강의 용접기술 발전을 추구해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이광희, 전혁상 : LNG저장탱크의 현장용접시공기술의 현상 및 전망,대한용접학회지, **3-3**(1995), 8~17
2. Haruya KOUZUKI et al : 지상식 LNG탱크의 용접기술 현황과 향후 동향, Jounal of KWS, vol 13, No. 3, Sep.,1995, 18~33
3. BS7777, "Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service", part 2
4. Whessoe , "shell stiffening design" document no. 74.D04.ME.023
5. API 620, "Design and construction of large, welded, low-pressure storage tank", appendix Q
6. Whessoe , "seizmic wall design" document no. 74. D02.ME.023
7. 한국가스엔지니어링,"drawing of 9% Ni type LNG storage tanks for Tongyong 6&7
8. 한국가스공사, "9%Ni강 용접봉 개발",최종보고서, 1999, 7
9. Richard E. et al, "Welding stainless and 9% nickel steel cryogenic vessel", Welding Journal 7, Nov., 1995, 45~50

• 김형식(金亨式)
• 1965년생
• 한국가스공사 연구개발원
• LNG저장탱크 설계
• e-mail: hskim@kogas.re.kr

• 김우식(金愚植)
• 1963년생
• 한국가스공사 연구개발원
• 배관 재료거동 및 건전성평가
• e-mail: wskim@kogas.re.kr