

## 액화천연가스 저장탱크 9% 니켈강 용접부의 방사선투과시험 필름에 나타나는 밴드형상의 지시 해석

### Interpretation for Band-Type Indication on Radiography of 9% Ni Steel Welds for LNG Storage Tanks

이승현\*, 이승림\*\*†, 이영순\*\*\*

Seung Hyun Lee\*, Seung Rim Lee\*\*† and Young Soon Lee\*\*\*

**초 록** 초저온 액화가스인 LNG의 저장탱크에 사용되는 9% 니켈강은 Inconel 혹은 Hastelloy 계열 용접봉을 사용하여 용접되며, 용접부는 저합금강과 오스테나이트 스테인리스강의 이종금속 용접부와 유사한 특성을 가지고 있다. 용접부에 대한 방사선투과시험 시 용접조건에 따라 밴드형태의 지시가 방사선투과 필름 상에 나타나곤 한다. 따라서 본 연구에서는 이에 대한 해석을 위하여 재료, 방사선투과시험, 초음파탐상시험, 액체 침투탐상시험 및 조직시험을 통하여 의사지시 여부를 확인하였으며, 방사선투과시험 해석 및 밴드형태 지시의 발생 원인을 제시하였다.

**주요용어:** 9% 니켈강, 밴드상 지시, 결합해석, 방사선투과시험

**Abstract** 9% nickel alloy steels used for LNG, cryogenic liquid, storage tank are welded with dissimilar Inconel or Hastelloy welding rod and the weldment shows similar characteristic with the dissimilar metal weld of low carbon steel and austenitic stainless steel. Band type indications are sometimes shown on the film during radiography test of the weldments. Thus this study identified whether the indications are non-relevant indications through material, radiographic test, ultrasonic test, liquid penetrant test and microstructure analysis and also proposed radiography film interpretation and cause of band type indications.

**Keywords:** 9% Ni Steel, Band-Typed Indication, Flaw Interpretation, Radiographic Test

#### 1. 서 론

기후변화협약 등의 환경문제와 에너지 다변화 정책 등에 따라 천연가스의 사용이 점진적으로 늘어나고 있다. 우리나라에서는 초저온 액체인 액화천연가스 형태로 천연가스를 도입하고 있으며, 액화천연가스의 저장을 위하여 대규모의 인수기지와 저장탱크를 증설하고 있다. 우리나라에서 설치되고 있는 액화천연가스 저장탱크는 콘크리트 외부 탱크와 강

재의 내부 탱크를 갖고 있다. 액화천연가스 저장탱크의 내부 탱크에 적용되는 강재로는 오스테나이트계 스테인리스강을 멤브레인 형태로 성형하고, 이를 용접하여 설치하는 멤브레인식과 후판의 9% 니켈강을 용접하여 설치하는 완전방호식으로 크게 구분할 수 있다. 완전방호식 액화천연가스 저장탱크에 적용되는 9% 니켈강은 액화천연가스 저장온도인 -162℃ 부근에서도 우수한 저온인성과 강도를 지니는 페라이트계 재료로서 열팽창계수가 작으며 용접

Table 1 Chemical composition of base metal [2]

Spec.	Chemical Composition (wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
A553 type I	≤0.13	0.13-0.45	≤0.98	≤0.035	≤0.035	8.40-9.60

Table 2 Chemical composition of filler metal [3], [4]

Spec.	Chemical Composition (wt%)									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	W	Ni
YS9Ni/FS9Ni-H	≤0.10	≤1.5	≤3.5	≤0.02	≤0.015	-	≤20.0	10.0-25.0	-	≥55.0
US709S/PFN-4	0.009	0.759	0.197	0.007	0.016	1.97	10.82	17.06	0.03	70.52

Table 3 Mechanical properties of base metal [2]

Spec.	Tensile Properties		Impact Properties	
	T.S (MPa)	El. (%)	longitudinal (Joule)	Transverse (Joule)
A553 Type 1	690 - 825	20.0	34	27

Table 4 Mechanical properties of filler metal for SAW [3], [4]

Electrodes	Dia. (mm)	Tensile Properties		Impact Properties	
		T.S (MPa)	El. (%)	R.T. (Joule)	-196℃ (Joule)
YS9Ni/FS9Ni-H		≥660	≥20	-196℃, ≥34	
US-709S/PFN-4	2.4 Flux	727.1	43.4	65.7	52.9

성이 우수하다. 하지만, 9% 니켈강 용접부는 인코넬(inconel)계 혹은 하스텔로이(hastelloy)계 용접봉을 사용하는 이중용접부로서 오스테나이트계 스테인리스강 용접부와 유사한 형태의 용착부를 갖는다.

9% 니켈강의 용착부는 인코넬계 혹은 하스텔로이계의 고니켈 용접봉이 사용되어 이중용접으로 인한 밴드형태 등의 지시가 방사선투과시험 필름 상에 나타나는 경우가 종종 있는 것으로 액화천연가스 저장탱크 건설현장으로부터 보고되고 있으며, 인코넬계 혹은 하스텔로이계의 고니켈 용접봉을 사용하는 오스테나이트계 스테인리스강의 용접부와 같은 이중용접부에서도 이와 유사한 형태의 지시가 나타나는 경우가 보고되고 있다[1].

따라서 본 연구의 목적은 그동안 논란이 되었던 밴드형태의 지시에 대하여 조사·분석 및 초음파시험 등으로 밴드형태 지시의 발생 원인을 규명하고 해석에 대한 지침을 제시하고자 한다.

## 2. 모재 및 용가재의 성분 및 기계적 성질

Table 1과 Table 2는 모재와 용가재의 주요 화학성분을, Table 3과 Table 4는 모재와 용가재의 기계

적 성질을 보여주고 있다. 본 표에서와 같이 9% 니켈강 용접부는 모재인 9% 니켈강과는 화학적, 기계적 특성이 다른 인코넬, 하스텔로이계의 고니켈 용가재로 용접을 함으로 이중금속 용접부가 된다.

## 3. 9% 니켈강 용접

용접에 적용되는 용접재료는 용접금속의 강도 및 열팽창계수가 모재와 비슷하고 극저온에서 높은 인성이 요구되며 동시에 용접작업성도 우수하여야 한다. 액화천연가스 저장탱크와 같은 구조물은 용접 후 열처리가 곤란하기 때문에 용접된 상태에서 우수한 저온 인성을 확보할 수 있어야 한다. 그러므로 9% 니켈강의 경우 용접봉은 모재와 동일한 성분계의 용접봉을 사용할 수 있지만, 실제 용접에서는 저온에서 더욱 안정한 오스테나이트계의 고니켈 합금인 인코넬계 합금이 가장 널리 사용되고 있으며, 액화천연가스 저장탱크의 측판의 원주용접부, 바닥판 등 용접선이 길고 높은 전류를 사용하는 자동 용접을 적용하는 SAW의 경우에는 고온균열 발생을 감소하기 위하여 Mo를 첨가한 하스텔로이계 합금을 사용하고 있다[5].

#### 4. 9% 니켈강 용접부 결함

9% 니켈강 용접부에 발생하는 대표적인 결함은 고온균열, 기공, 언더컷, 블로홀(blow hole), 융합불량 등으로 선상이나 점상의 형태를 갖고 있으며, 결함의 발생원인으로는 용접금속중 주상정의 성장에 의한 수축으로 주변부의 인장응력 작용, 입계액화 또는 불순물의 입계편석 등이며, 결함의 발생 위치는 주로 모재 또는 다층용접금속의 열영향부 결정립계 등에서 발생된다.

9% 니켈강의 용착부는 특성이 크게 다르고 결정 입도도 조대화되어 방사선투과시험 시 조대결정에 의해 X선 회절 현상과 모재와 용착금속의 흡수계수의 차이 등에 기인한 밴드(band)상 등의 지시가 필름 상에 있어 결함으로 판정되는 사례가 있었으며, 지시형태가 일반적으로 나타나는 결함과는 달라 결함여부에 대한 논쟁이 있어왔다.

#### 5. 9% 니켈강 용접 및 용접부 비파괴시험

##### 5.1. 용접

용접은 액화천연가스저장탱크 용접절차서에 따른 서브머지드아크용접(SAW)으로 groove의 두께는 10~30 mm이고 용가재의 직경은 2.4 mm의 것을 사용하였다. 용접은 2G 자세로 150℃의 용접중간온도를 유지하였으며, 직류역극성을 적용하여 30~63 cm/min의 속도를 유지하였다[4].

##### 5.2. 9% 니켈강 용접부 비파괴시험

용접부의 신뢰성 향상을 통하여 액화천연가스 저장탱크의 건전성 확보 및 제조원가 절감을 위하여 수직 및 수평방향 동체 이음매 용접부에는 방사선투과시험을 적용하고, 방사선투과시험을 실시하지 않는 맞대기 용접부 및 노즐과 맨홀넥, 플랜지 용접부에는 액체침투탐상시험을 적용하여야 한다[6].

용접부 전 길이에 대해서 방사선투과시험을 실시하고, 투과사진 등급분류에 따른 2급 이상의 것이어야 한다[7].

9% 니켈강 용접부에 대한 방사선투과시험 후 결함판정은 KS B 0845 부속서 4의 기준에 따라 평가하며, 3류 이하의 결함으로 분류될 경우 불합격 결함 지시에 해당되므로 밴드형상의 지시가 실제 결함인

지 여부를 확인하기 위하여 표면조직, 초음파탐상시험 및 액체침투탐상시험을 실시하여 평가하였다.

##### 5.3. 방사선투과시험 조건

9% 니켈강 용접부에 대한 방사선투과시험은 액화천연가스 저장탱크 제작 시 적용하는 방사선투과시험 절차서에 따라 휴대용 X-ray 발생장비를 사용하여 290 KVP에서 약 36초 및 42초 노출하였고, 초점의 크기는 폭 1.5 mm, 길이 2.7 mm, 선원거리는 600 mm로 하였으며, 필름의 크기는 폭 114 mm, 길이 309 mm의 것으로 사용하였다. 모재의 두께는 10 또는 15 mm를 대상으로 하였다. 촬영 시 전후방에 각각 0.127 mm의 연납스크린을 적용하였고, 산란방지납판도 동시에 적용하였다. 용접부의 모양은 V 홈이고, 투과두께는 12 mm와 17 mm이다. 또한 노출 후에 필름은 20℃에서 5분간 현상하였고 필름의 농도는 2.0~4.0, KS 투과도계를 적용하였다.

#### 6. 시험 결과 및 토론

Fig. 1은 액화천연가스 저장탱크 제작에 사용된 부재를 대상으로 5.3에 따라 촬영한 9% 니켈강의 용접부의 방사선투과시험 필름에 나타나는 밴드형태의 지시 사진과 이를 스케치한 것이다. Fig. 1의 ①이 지시하는 것과 같이 용접선 중앙의 상부에 용접선을 따라 긴 선상(이하 “밴드”)의 지시가 발견되었다.

Fig. 2는 9% 니켈강 용접부의 단면 형상 및 필름에서의 감광부위를 도시한 스케치로서 밴드 형태의 지시가 나타나는 부분은 모재와 용착금속의 경계부(fusion boundary)임을 알 수 있다. 밴드형태의 지시 위치가 용접 경계부에서의 위치와 다른 것은 선원의 위치가 용접부의 위치에 따른 편차로 판단이 된다.

방사선투과 필름 상에 나타나는 밴드형태의 지시는 발생부위가 모재와 용착금속의 경계부에 위치하

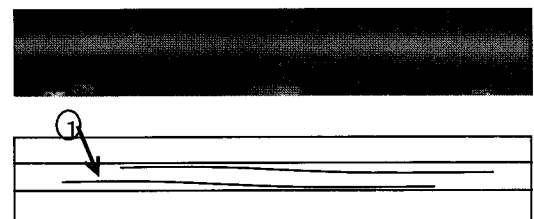


Fig. 1 A band type indication on a radiograph film of 9% Ni steel weld

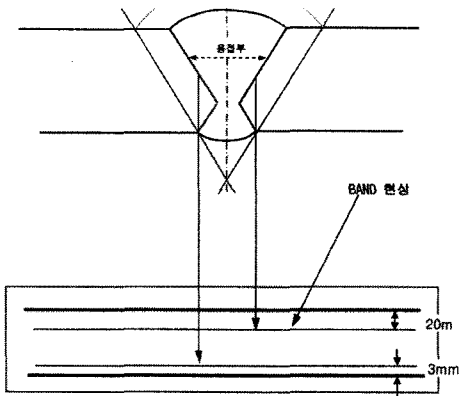


Fig. 2 Scheme of weldment and film indication



Fig. 3 Flaw indications on a radiograph film of 9% Ni welds

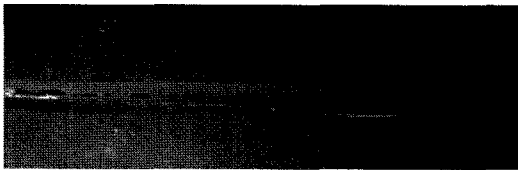


Fig. 4 Penetrant test result of Fig. 3 welds

여 일반적으로 비드중앙에서 용접방향에 평행하게 발생하는 고온에서 발생하는 균열과는 다소 차이가 있으나 위치 상 융합불량 등의 결함 지시와 매우 유사한 형태를 갖고 있다. 또한 밴드형태의 지시 발생위치는 연성저하균열이나 액화균열이 발생하는 위치와 거의 동일하다.

Fig. 3과 Fig. 4는 9% 니켈강에 나타난 선상의 결함을 촬영한 필름과 실제 결함 지시사진으로, 이 필름의 촬영조건도 5.3의 제시한 바에 따랐다. Fig. 4는 Fig. 3에 지시된 결함을 확인하기 위하여 9% 니켈강 용접부 표면에 액체침투탐상시험을 실시한 결과로, 방사선투과시험으로 나타난 밴드형상 지시와 무관한 실제 결함임을 확인할 수 있다.

9% 니켈강 저장탱크 용접부에 대한 방사선투과시험 결과, 나타나는 필름 이미지 형태는 일반탄소강 용접부 방사선투과시험 필름에서 나타나는 이미지와 상이한 형태의 지시를 나타내는 것이 확인되었다.

초음파탐상시험은 선형성 결함에 대한 검출 감도가 우수하여 선형 결함의 존재여부를 판별하는데 우수한 검사기법이다. 따라서 밴드형상의 지사가

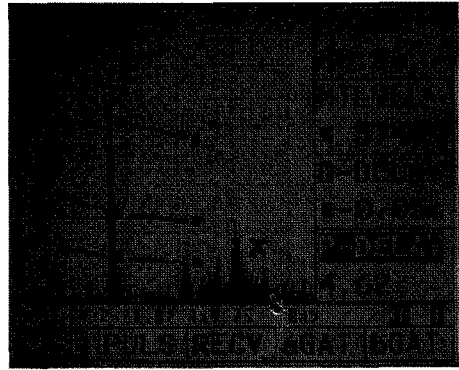
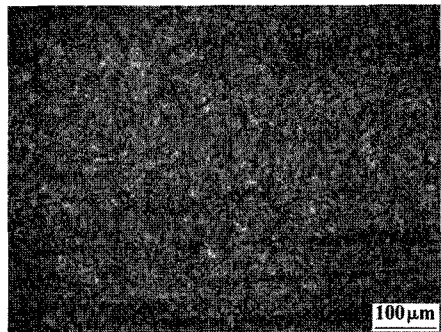
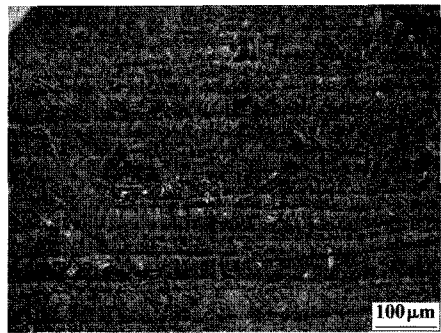


Fig. 5 A general UT scan screen of 9% Ni steel weldment



(a) base metal



(b) HAZ

Fig. 6 Microstructure of 9% Ni steel

발견된 용접부의 결함여부를 평가하기 위하여 KS B 0896에 따라 초음파탐상시험을 실시하였다. 밴드형상 지시부위에 대한 초음파탐상시험 결과, 내부 결함과 관련된 지시는 검출되지 않았다(Fig. 5). 또한 표면에 액체침투탐상시험(KS B 0816)을 수행하였다. 용접부 표면에서부터 1mm 깊이마다 용접부 표면을 연삭하여 결함 존재 여부를 확인하였으나 결함은 발견되지 않았다.

또한 방사선투과시험에 밴드형태의 지시가 나타난 부분에 대하여 광학현미경으로 관찰한 결과 표

면에서의 긴 선상의 지시를 나타낼만한 결함을 발견하지 못하였다(Fig. 6). 모재 및 용접 열영향부의 조직은 전형적인 템퍼링된 마르텐사이트(tempered martensite)이다.

저합금강과 오스테나이트강의 이중용접 경우에도 용접부위에 밴드형상의 지시가 발견되었는데, 이는 용접부 조직은 오스테나이트상 위에 마르텐사이트 조직이 존재하고, 입계는 오스테나이트 상을 가지며 모재의 원래 조직에 비해 조직이 성장하기 때문에 저합금강과 인코넬계 버터링 용접계면의 매우 조대화된 부위에서 검정색 밴드가 존재하며 이는 니켈성분에 의한 것이라고 하였다[8]. 9% 니켈강 용접부 또한 이와 유사한 이중금속 용접부로서 밴드형상의 지시 발생위치가 용접계면에 위치하고 있고, 조직 또한 템퍼링된 마르텐사이트 조직으로 모든 특성이 저합금강과 오스테나이트강의 이중용접의 경우와 유사하다. 따라서 용접부와 모재 사이의 계면에 니켈의 집적에 의한 방사선 흡수계수 차이 또는 마스크 적용에 의한 것으로 추정한다.

## 7. 밴드 형태 지시 해석 제안

방사선투과시험 만으로는 실제 용접부의 결함지시와 매우 유사하므로 초음파탐상시험 및 액체침투탐상시험을 수행하여 실제 결함여부를 확인하고 밴드형상에 대하여는 의사지시로 판단하여야 한다.

JIS Z 3106에서도 X-선 회절에 의하여 스테인리스강 용접부의 방사선투과시험 필름에 나타나는 솔상(brush-type indication) 등의 지시가 나타날 수 있으며, 이를 확인하는 방법으로는 참고사진 비교, 촬영기법에 의한 방법을 제시하고 있다[9]. 회절상의 경우 9% 니켈강 용접부의 경우에도 동일하게 적용할 수 있으나 밴드형태 지시에 대하여는 적용되지 않은 경우가 있다.

## 8. 결 론

액화천연가스 저장탱크에 적용되는 9% 니켈강 용접부에 대한 방사선투과 필름에 나타나는 밴드형태의 지시에 대해 여러 평가시험을 수행한 결과, 얻은 중요한 결론은 다음과 같다.

1) 방사선투과시험 만으로는 용접부의 실제 결함지시와 매우 유사하므로 초음파탐상시험 및 액체침투탐상시험을 수행하여 실제 결함여부를 확인

하고 밴드형상에 대하여는 의사지시로 판단하여야 한다. 이와 같이 정확한 시험결과 평가를 통해 불필요한 용접부 수리를 하지 않아야 한다.

2) 밴드형상의 지시 발생 원인은 아직 확립되지 않았으나, 저합금강과 오스테나이트강의 이중용접의 경우와 같이 이중용접에 의한 모재와 용접부의 경계면에 니켈 성분의 집적 또는 마스크 적용 등에 의한 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 가스플랜트사업단의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Yutaka Maruyama, "Radiography for stainless steel welds," Journal of Japanese Society for Nondestructive Inspection, Vol. 53, No. 12, pp. 755-762 (2004)
- [2] ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section II, SA-553/SA-553M "Pressure vessel plates, alloy steel, quenched and tempered 8 and 9 percent nickel" (2004)
- [3] JIS Z3333-1999, "Submerged arc welding solid wires and fluxes for 9% nickel steel, YS9Ni/FS9N i-H" (1999)
- [4] KOGAS, "Welding procedure qualification," (2003)
- [5] 장용성, 김영천, 장기훈, 정현호, "국산 극저온용 Ni기 용접재료 특성 평가", RIST 연구논문 제14권 제2호, pp. 155-163 (2000)
- [6] 한국가스안전공사, "KGS AC 115(액화천연가스용 저장탱크의 제조의 시설·기술·검사 기준)" (2008)
- [7] 한국가스안전공사, "KGS AC 111(고압가스용 저장탱크 및 압력용기 제조의 시설·기술·검사 기준)" (2008)
- [8] 양인수, 탁영지, 김성재, 오환섭, "저합금강과 오스테나이트 스테인리스강의 버터링 이중용접부에서의 기계적 성질의 거동", 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp. 189-194 (2003)
- [9] JIS Z 3106, "Methods of radiographic examination for welded joints in stainless steel," (2001)