

불균형 이음형상을 가지는 스테인리스 파이프의 용접특성

The Characteristics of Disproportional Welded Joint for Stainless Steel Pipe

최우현, 김종삼
(주)한진중공업, 기술지원팀

1. 서 론

Austenite계 stainless강의 경우 저온에서의 기계적 성질과 내식성이 매우 양호하므로 저온 화물의 저장시설이나 액화천연가스 운반선(LNG선) 등에서 액화물의 이송을 위한 배관재로서 널리 사용되고 있다.

위 소재의 적용에 있어서는 사용 특성상 두께가 얇으면서 큰 지름을 가지는 pipe가 많이 적용되고 있으며 이러한 재료의 특징으로 인해 용접변형의 가능성이 많다. 특히, 얇은 두께를 가지는 대구경 pipe의 용접이음부의 경우는 원소재의 생산특성이나 설치작업과정 등에서 misalignment가 발생되거나, 용접입열에 의한 변형으로 shrinkage(angular distortion)가 발생 되는 등, 용접이음부에서 불연속이나 불균형부가 발생되게 된다.

본 연구는 STS 316L #10 pipe의 TIG 용접부에 대해서 misalignment와 shrinkage가 발생된 경우를 여러가지 case별로 구분하여 각각의 특성을 용접시험 및 이론적 해석을 통해 용접부의 안전성 여부를 검토하여, 실제 작업특성 및 품질의 적정성을 고려한 현실적인 기준을 제시하고자 하였다.

2. 현상파악

2.1 재료특성

Austenite stainless steel은 극저온에서의 기계적 특성 및 내식성이 양호하므로 초저온 액화가스나 화학제품의 이송을 위한 piping system의 소재로 많이 적용되고 있으며, 사용압력이 낮은 LNG선 등에서는 비교적 부재의 두께가 얇은 STS 316L pipe가 사용되고 있다.

소재	항복강도	인장강도	연신율	열전도도	열팽창계수	사용조건
STS 316L	175N/mm ² min.	480N/mm ² min.	40%	4x10 ⁻² cal/cm/sec°C	17x10 ⁻⁶ /°C	상온~-163°C

Table 1. LNG선 cargo pipe용 STS 316L의 재질 특성

2.2 작업특성

LNG선에 사용되고 있는 STS 316L pipe의 경우, 사용압력이 크지 않으므로 두께가 얇은 pipe(#10s)가 TIG 용접작업에 의해 설치되는데, 이송화물이 폭발성을 지닌 초저온 액화물이기 때문에 최고의 용접품질이 요구된다. 하지만 열전도도가 낮고 열팽창계수가 큰 소재의 특성상 대구경 pipe의 경우에는 초기설치 작업시의 misalignment나 용접후의 함몰변형(shrinkage)이 발생되게 되므로 변형을 감소시키기위한 적정 Jig의 활용, 입열량의 제한, 등 각각의 작업 단계마다 상당한 주의가 요구된다. 따라서, 원소재의 생산단계에서부터 설치, 용접, 등 각각의 단계마다 rule에서 요구하는 조건을 만족시키기위한 품질관리가 엄격하게 유지되고 있다.

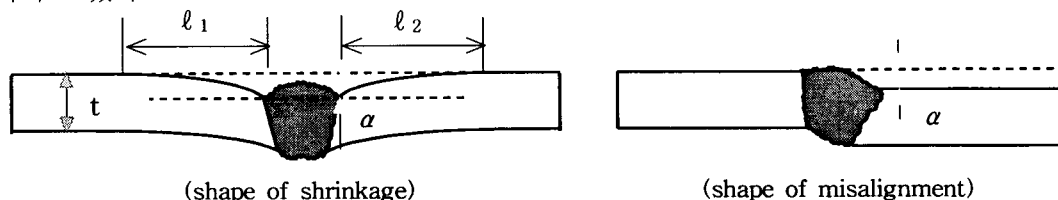


Fig 1. 용접후 발생하는 변형의 경향

2.3 현상파악

불균일 이음형상을 가지는 용접부는 일반적으로 300A 이상의 대구경 pipe에서 많이 발생되고 있다. 대구경의 pipe나 fitting류의 경우 제품의 생산시에 발생하는 오차값에 의해서 misalignment가 발생되고 있으며, 함몰변형(shrinkage)은 용접입열에 의한 각변형(angular distortion)형태로 발생되고 있다. 전반적으로 misalignment와 shrinkage가 복합적으로 발생하는 경우가 많으나 변형값(α, ℓ)은 shrinkage의 경우에서 크게 나타나고 있다.

pipe size	부재두께	변형길이(ℓ_1)	변형길이(ℓ_2)	misalignment(α)	shrinkage(α)
100A 이하	3.05 mm	60 mm	60 mm	0.1~0.5 mm	0.3~0.8 mm
100A~250A	4.19 mm	80 mm	80 mm	0.1~0.7 mm	0.5~1.3 mm
300A~600A	6.35 mm	80 mm	80 mm	0.1~1.0 mm	0.5~2.7 mm

Table 2. LNG선의 Cargo pipe 설치시 발생된 각종 변형값

3. 실험방법

3.1 용접성 실험

Rule과 practice에서 규정하고있는 허용치 이상의 용접변형 발생부에 대하여 기계시험을 실시하였다. shrinkage의 경우는 과도한 함몰변형이 발생된 실작업부에서 시험편을 직접 채취하였고, misalignment의 경우는 인위적으로 시험편을 제작하여 각각 상온(21℃)과 초저온 상태(-196℃)로 구분하여 인장과 굽힘시험을 실시하였다.

구분	test 모재	ℓ_{max}	α_{max}	test 조건	인장강도	굽힘(R&F)
Misalignment	STS 316L 300A (4.57mm)	--	2.5 mm	상온 (21℃)	573 N/mm ²	양호
				저온(-196℃)	860 N/mm ²	양호
Shrinkage	STS 316L 600A (6.35mm)	40 mm	3.5 mm	상온 (21℃)	557 N/mm ²	양호
				저온(-196℃)	894 N/mm ²	양호

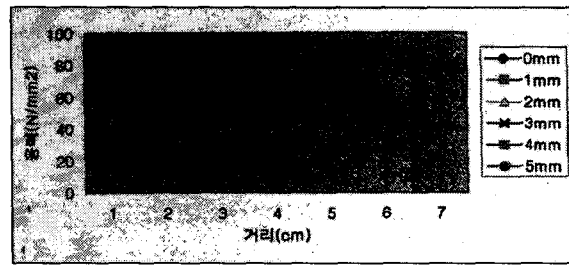
Table 3. STS 316L pipe 불균일 용접부에 대한 기계시험 결과

3.2 용접부 강도해석

용접변형의 불균일정도(ℓ, α)가 변화됨에 따른 응력의 발생정도 및 분포사황을 이론적으로 해석하기위해 실제 조건중의 최대응력하에서 misalignment와 shrinkage 발생된 경우를 가정하여 변형요인인 ℓ 과 α 값의 변화정도에 따른 최대응력값과 응력발생부를 확인하였다.

$\ell \setminus \alpha$	0	1	2	3	4	5
10	27.8	34.3	44.6	56.3	70.5	88.6
20	27.7	34.3	42.2	51.8	61.4	72.5
30	27.0	33.2	40.5	48.4	56.8	65.9
40	26.8	33.0	39.9	47.2	54.9	63.1
50	26.7	32.8	39.5	46.5	53.8	61.4
60	26.6	32.8	39.2	46.0	53.1	60.4

(case1. condition of shrinkage)



$\ell \setminus \alpha$	0	1	2	3	4	5
10	26.7	26.0	25.4	27.6	31.3	35.0
20	26.9	26.2	25.5	28.1	32.0	35.9
30						
40						
50						
60	27.6	26.9	26.2	26.7	30.0	33.3

(case2. condition of misalignment)

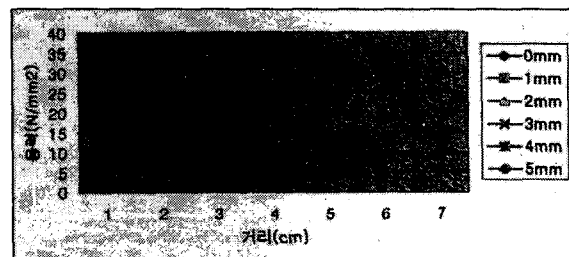


Table 4. FEM 해석에 의한 불균일 용접부 ℓ, α 값의 변화에 따른 case별 최대응력값

4. 결과 고찰

4.1 기계시험 결과

일반적으로 STS 316L pipe의 용접작업은 보통강(mild steel)과 유사하나 용접입열의 하향 조절이 요구되는데, 일반적으로 root gap이 넓고 과도한 용접입열이 이루어진 경우가 용접 변형(shrinkage)의 정도가 특히 심하게 나타나는 경향이 있었다. 하지만 용접이음부의 기계적 특성은 정상적인 용접부와 허용치 이상의 변형이 발생된 용접부와 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 두께가 얇은 부재의 용접 이음부에서 발생된 용접변형은 강도상으로 별다른 영향이 없는 것으로 판단할 수 있게 한다. Table 3은 허용치 이상의 변형이 발생된 경우에서의 기계적 시험결과로 전체적인 결과값이 양호하게 나타나고 있다. 실제 사용환경을 고려한 -196°C 에서의 기계적 성질은 상온에서보다 오히려 높은 특성을 나타내고 있다.

4.2 FEM 해석 결과

실제 pipe system 상에서 최대의 응력값을 가지는 부분에 대해서 실질적으로 일어날 수 없는 과도한 변형상태를 가정한 최악의 경우에서도 해당 단면요소의 응력값에 대한 해석결과값은 상당히 안전한 것으로 확인되고 있다. Table 4는 STS 316L 450A pipe의 불균일 용접부에 대한 FEM 해석 결과로 shrinkage의 경우가 misalignment의 경우보다 상대적으로 높은 하중값을 나타내고 있다. 최대응력값은 화물의 이송시 발생하는 수축력에 의해 응력이 발생하는 경우로서, $l=10\text{mm}$, $a=5\text{mm}$ 의 shrinkage가 발생 되었을 시에 pipe 외부쪽 열영향부 상에 $88.6\text{N}/\text{mm}^2$ 로 나타나고 있다. 이는 재료의 항복강도가 $175\text{N}/\text{mm}^2$ 이상인 것을 고려하면 수축팽창에 의한 피로하중이 발생된다 하더라도 강도상으로는 안전할 것으로 판단된다. 따라서 실제 작업 사항에서는 본 해석에서 가정한 최악의 경우가 발생 될 수 없으므로, 실 작업부에서의 합몰변형이 $1/4t$ 가 넘을 경우 이를 불량부분으로 판정하여 재작업이(cutting & repair) 이루어진 것은 필요 이상의 수정작업이 실시된 것으로 판단 할 수 있다.

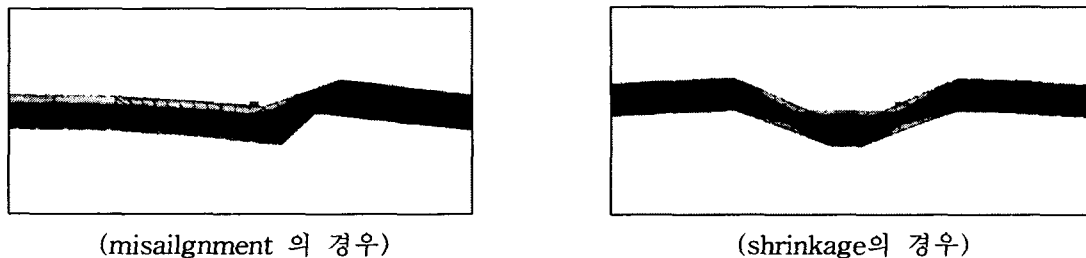


Fig 2. FEM 해석 결과에 의한 최대응력 발생시의 contour plots

4.3 적정 품질 확보를 위한 조건의 검토

얇은 두께를 가지는 STS 316L pipe 용접작업에서 불균일 이음형상(변형)은 일반적으로 300A 이상의 대구경 pipe에서 많이 발생되고 있다. 기본적으로 pipe나 fitting류의 경우는 제품의 생산시에 발생하는 오차값이 설치단계에서 적용되는 오차범위를 상회하여 설치작업시 과도한 misalignment가 발생하는 경우가 될 수 있으므로 생산단계에서 허용오차값을 줄여 줄 필요성이 있다. 또한 STS 316L pipe의 용접작업시 발생하는 변형량을 줄이기 위해서는 작업실정에 적합한 process의 개선(skip sequence)과 적정 jig의 활용 및 과도한 용접입열의 제한이 필요하다.

두께가 얇은 Austenitic stainless steel pipe의 용접작업에서 어느정도의 변형발생은 재료의 특성상 피할 수 없지만 저온에서 기계적 특성이 양호한 점과 사용환경에 대한 test 등을 실시하여 적정 품질의 범위를 고려할 필요가 있다.

본 test 결과를 종합적으로 고려한다면 현재 적용되고 있는 변형 허용값($1/4t$)을 국부적으로 상회(max. $1/2t$)하는 부분이 존재하더라도 일정 범위만을 가지는 경우에 대해서는 허용

기준이 선택적으로 확대되어도 사용 목적상의 품질에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

5.1 용접변형 감소방안

얇은 두께를 가지는 대구경 STS 316L pipe의 경우는 용접 입열에 의한 변형(shrinkage & misalignment)의 발생가능성이 크다. 특히, 대구경 pipe나 fitting류의 경우는 사용제품의 생산 단계에서부터 발생하는 오차(치수, 진원도 등)를 줄일 수 있는 특별한 품질관리가 요구된다. 또한 용접작업시 변형이 적은 용접법(skip sequence)이나 적정 gap의 유지 및 작업상황에 적합한 Jig의 사용과 적절한 입열에 의한 용접시공이 이루어지면 rule에서 정하는 기준을 만족시킬 수 있다. 이를 위해서는 용접작업자의 기량확보가 필수적일 것이나, 300A 이상의 대구경 STS 316L pipe의 용접작업시는 과대입열이 방지되어야 변형을 줄일 수 있다는 용접사의 의식이 필요하다.

5.2 작업기준의 재정립

얇은 두께를 가지는 Austenitic stainless steel pipe의 경우 재료의 특성상 어느정도의 변형 발생은 불가피하다. 하지만 저온에서의 기계적 특성이 양호한 점과 본고에서의 시험결과를 종합적으로 고려하면 STS 316L pipe의 용접작업시 발생하는 부분적인 변형에 대해서 $\alpha \leq 1/4t$ 의 기준이 그대로 적용되는 것은 필요이상의 품질을 요구하는 것으로 판단되므로 두께가 얇은 STS 316L pipe #10s(6.5mm 이하)에 대해서 다음과 같은 작업기준을 제시하고자 한다.

1)일반적 용접작업시의 허용변형 기준

$$: \alpha \leq 1/4t,$$

2)국부적 불균일 형상을 가지는 부분에 대한 허용변형량 기준

$$: \alpha \leq 1/2t, \quad l \geq 20\text{mm}, \quad (\text{condition of shrinkage})$$

상기 기준은 극저온 환경에서 사용되는 Austenitic stainless steel pipe system의 경우를 복합적으로 고려한 경우이므로 내부식성 환경만을 고려하는 일반적인 pipe system에서는 허용변형 기준값의 확대 적용도 가능할 것이다.

【참 고 문 헌】

- [1] “용접·접합 편람”, 대한용접학회, 1998.
- [2] “Welding Handbook”, Vol-1,2. 8th edition AWS, 1991.
- [3] “Stainless steel manual”, Vol-1, 삼미특수강, 1982.
- [4] “용접야금학” Kenneth Easterling. 강춘식 역. 1988.
- [5] “HQS”, 한진중공업, 1993.
- [6] “STS pipe 용접부 구조해석 결과보고서”, 한진중공업, 1999