

## 소성변형에 따른 API-X65 강재의 HIC 균열 저항성 평가

유희수<sup>\*,†</sup> · 서준석<sup>\*</sup> · 김희진<sup>\*</sup> · 이동연<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>한국생산기술연구원 용접접합연구그룹

<sup>\*\*</sup>세아제강 기술연구소 신재료연구부

### Evaluation HIC Crack Resistance for Plastic Deformation of API-X65 Plate

Hoi-Soo Ryoo<sup>\*,†</sup>, Jun Seok Seo<sup>\*</sup>, Hee-jin Kim<sup>\*</sup> and Dong-Eon Lee<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Korea Institute of Industrial Technology, Advanced Welding & Joining R&D Group

<sup>\*\*</sup>SeAH Steel Corp., Technical Research Institute New Material Research

<sup>†</sup>Corresponding author : hsryoo@kitech.re.kr

#### 1. 서 론

원유의 매장량의 고갈로 유전 깊이가 점차 깊어지고 원유의 품질이 낮아짐에 따라 원유 및 천연가스 속에 불순물 함량 특히, 산성 유화수소(sour gas H<sub>2</sub>S)가 많이 함유되어 있어 이를 수송하는 라인 파이프는 수소 유기균열(hydrogen induced cracking, HIC)의 발생 위험성이 높아지며, 이를 위해서 더 높은 기계적 특성과 더 높은 HIC 및 SSCC(sulfide stress corrosion cracking)의 저항성이 요구된다<sup>1-3)</sup>.

라인 파이프에서 발생하는 HIC 균열기구는 이미 보고된 바와 같이 일정 농도이상의 황화수소(H<sub>2</sub>S)가스를 함유한 사우어가스(sour gas)가 수소이온(H<sup>+</sup>)을 발생시키고, 이러한 분위기에 강재가 노출되면 수소원자는 강재표면에 흡착되고, 흡착된 수소원자는 확산에 의하여 강재 내부로 유입된다. 강재내부로 확산된 수소원자는 계면 에너지가 높은 연신된 비금속개재물(주로 MnS) 표면에 집적되어 수소분자로 결합하여 계단식 균열균으로 발생한다<sup>3-4)</sup>.

원유/천연가스 수송용 강관에서 HIC 균열이 발생하면 대형 사고를 유발할 수 있기 때문에 강관용 소재 및 강관 용접부의 수소유기균열의 신뢰성 확보는 라인 파이프용 용접강관 제조의 핵심 기술이다.

강관용 소재 및 용접강관의 HIC 균열 저항성 보증을 NACE TM 0284 규격 시험으로 수행하여<sup>5)</sup> 강관용 원소재의 HIC 균열 저항성은 보증되었다고 하지만 용접 강관으로 제조한 경우 용접부에서 HIC 균열이 발생하

지 않고, 강관 원소재부에서 HIC 균열이 발생하는 경우가 있다. 이러한 원인은 강관을 강관으로 제조시 프레스밴딩 또는 롤밴딩 등의 소성변형을 주는데, 이때 소성변형으로 인하여 원소재의 HIC 균열 저항성이 저하된다고 보고한 바 있다<sup>6)</sup>.

그러나 미세조직이 우수한 경우 소성변형량이 증가하여도 HIC 저항성이 저하되지 않으며, 밴드구조를 갖는 미세조직일 경우에 소성변형에 따라 HIC 균열 발생률이 높다고 하였다<sup>7)</sup>.

따라서 본 보고에서는 강관에서 인장시편을 채취하여 강관 제조시와 유사한 소성변형량과 그 이상의 소성변형량을 인장시편에 인가하여 HIC 시험을 수행하고 시험결과로부터 원소재의 소성변형에 대한 HIC 저항성을 검증하고자 하였다.

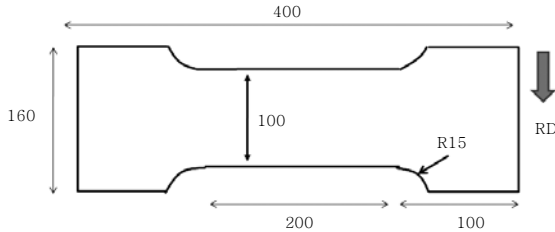
#### 2. 실험방법

##### 2.1 시험용 강재

시험에 사용된 강재는 API 5L X65급이며, 두께가 다른 19.5mm 및 25mm 판재를 사용하였으며, 대표적인 성분을 Table 1에 나타내었다. 판재를 강관으로 제조할 경우 압연수직방향(transverse direction, TD)으로 변형되고, 압연방향(rolling direction, RD)으로 변형되지 않기 때문에 판재의 TD로 인장시편을 채취하였고, 인장시편에서 HIC 시험용 시편을 채취하기 위해서 폭을 100mm로 하였다. Fig. 1에 시편의 치수와 모양을 나타내었다.

**Table 1** Typical chemical compositions of API-X65 steel plate

Plate	Chemical composition (wt.%)					
	C	Si	Mn	P	S	Ni
19.5mm	0.047	0.25	1.21	0.008	0.006	0.187
25mm	0.051	0.25	1.21	0.008	0.006	0.185



**Fig. 1** Tensile specimen for plastic deformation

판재를 강관으로 제조할 경우 내경의 변형이 없다고 가정하면 외경으로 갈수록 변형량이 증가한다. 본 실험에서는 판재 중심부의 변형량을 기준으로 하였고, 강관 제조사에서 19.5mm 판재는 외경이 914mm 강관을, 25mm 판재는 외경이 765mm 강관을 제조함으로써 이를 기준으로 변형량을 계산하였다. 내경과 중심부 원길이 변화를 계산하면 19.5mm 판재의 중심부는 2.2%로 변형되며, 25mm는 3.5% 변형된다. 따라서 19.5mm 판재는 각각 2, 4, 6% 변형을 주었으며, 25mm 판재는 각각 3, 5, 7% 변형을 주었다. 변형은 300 ton 인장시험기를 사용하였으며, 소성변형 후 100mm×20mm×강관두께가 되도록 HIC 시편 3개씩 채취하였고, 무변형의 시편도 채취하였다. 시편 절단시 변형된 표면이 충분히 제거되도록 모든 면을 기계가공하고, 순차적으로 연마한 다음 320번의 연마지로 최종 연마한 후 최종적으로 아세톤으로 탈지하였다. 탈지 후 SAM(scanning acoustic microscope)을 이용하여 2차원 초음파 탐상으로 초기 시편의 결함상태를 관찰하였다.

**2.2 HIC 시험**

HIC 시험은 RS D 0004<sup>8)</sup> 신뢰성 평가기준으로 수행하였다. 시험에 사용된 용액은 강산성의 "A용액"으로 5%NaCl 용액에 초산을 첨가하여 pH를 2.6 ~ 2.8의 범위로 하였으며, 96시간 동안 황화수소 가스를 지속적으로 주입시켜 포화상태를 유지하였다. 시험온도는 24±2℃로 일정하게 유지하였다.

HIC 시험 후 균열 관찰을 위하여 RS D 0004 규격에 따라 초음파 탐상하여 균열 위치를 확인하고 균열이

가장 크게 관찰되는 곳 3부위를 절단하여 균열발생률을 측정하였다. 초음파 탐상장비는 약 20mm두께까지 관찰됨으로 25mm 두께 시편의 경우 앞뒷면을 관찰하였다.

**3. 시험결과 및 고찰**

**3.1 초음파 탐상**

Fig. 2는 19.5mm 판재의 원소재와 소성변형량을 달리하여 HIC 시험 후 초음파 탐상한 SAM 이미지를 나타내었다. 소성변형량과 관계없이 조대한 균열은 검출되지 않았다.

Fig. 3은 25mm 원소재와 소성변형량을 달리한 시편에 대하여 HIC 시험 후 초음파 탐상한 SAM 이미지를 나타내었다. 소성변형이 없는 원소재에서 미세한 결함이 검출되었다. 그러나 소성변형된 판재의 경우 조대한 균열이 관찰되었다. 균열이 발견되지 않은 시편도 있었다. 그리고 초음파 탐상결과 조대한 균열은 시편의 중심부에 존재하였다. 시편 절단 후 관찰 결과 Fig. 4에

strain	SAM image
0%	
2%	
4%	
6%	

**Fig. 2** SAM images of 19.5mm thickness specimens after HIC test

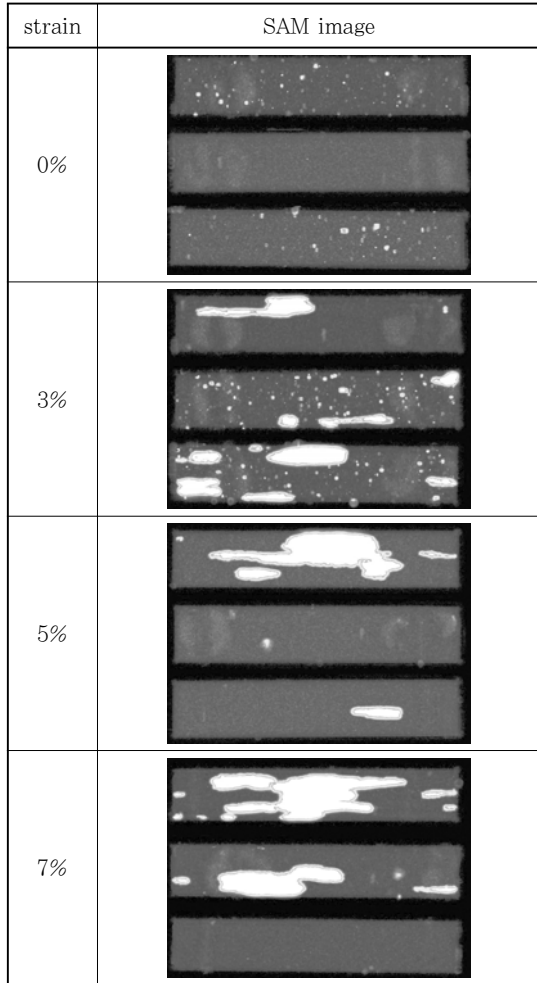


Fig. 3 SAM images of 25mm thickness specimens after HIC test

보인바와 같이 균열은 중심부를 따라 진전하였으며, 이는 중심편석에 의한 균열로 판단되었다.

### 3.2 균열 발생률

균열 발생률을 측정하기 위하여 RS D 0004규격에 의하여 가장 균열이 크다고 판단되는 3곳을 절단하여 균열의 길이와 폭을 측정하였다. 측정된 값으로부터 가로방향의 균열 길이의 합 비율인 CLR(crack length ratio), 균열 두께의 합 비율인 CTR(crack thickness ratio), 그리고 균열 면적의 합 비율인 CSR(crack sensitivity ratio)를 계산하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다.

19.5mm 판재의 경우 소성변형 진후에 대하여 균열 발생률은 크게 변하지 않았으며, Table 3의 RS D 0004 규격의 HIC 저항성 등급을 기준으로 소성변형 진후에 모두 B등급으로 판정되었다. 즉 19.5mm 판재는 강관을 제조하여도 최소 B등급 강관을 판정받을 수 있을

Table 2 Cracking ratio after HIC test

specimens	strain	cracking ratio(%)		
		CLR	CTR	CSR
19.5mm	0	1.22	0.37	0.039
	2	1.17	0.029	0.003
	4	2.22	0.029	0.003
	6	0.83	0.029	0.003
25mm	0	0.667	0.015	0.0003
	3	25.89	0.068	0.0049
	5	22.11	0.067	0.0048
	7	29.36	0.0048	0.0028

Table 3 Class of HIC cracking resistance of welding steel pipe<sup>8)</sup>

class	CLR	CTR	CSR
A		0.0 %	
B	10.0 %	3.0 %	0.5 %
C	15.0 %	5.0 %	1.5 %



Fig. 4 Centerline cracking of 25mm thickness specimen(3% plastic stain) after HIC test

것이다.

그러나 25mm 판재의 경우 변형전에는 B등급 소재 이지만 소성변형후 HIC 균열 발생률이 20% 이상으로 높게 나왔으며, RS D 0004 기준에 부적합하였다. 즉 25mm 판재는 강관으로 제조시 HIC 저항성 부적합 판정이 나올 것이라 판단된다. 실제로 25mm API 5L × 65 강관에서 CLR이 0%인 강재를 강관으로 제조할 경우 CLR이 20% 발생하였다는 실험 보고가 있다<sup>6)</sup>. 따라서 인장시편에 의한 HIC 균열 저항성 평가방법은 강관제조 후 HIC 저항성 모사가 가능하다고 판단된다.

### 3.3 미세조직

미세조직이 불균질 하거나 중심부 편석은 HIC 저항성을 낮춤으로 미세조직과 중심부 편석으로 HIC 균열

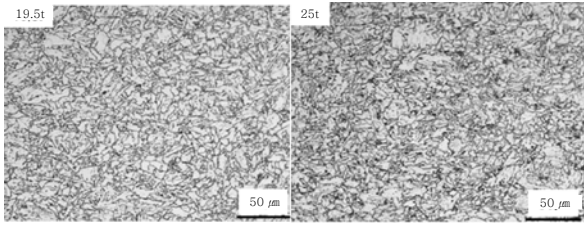


Fig. 5 Microstructure of quarter position

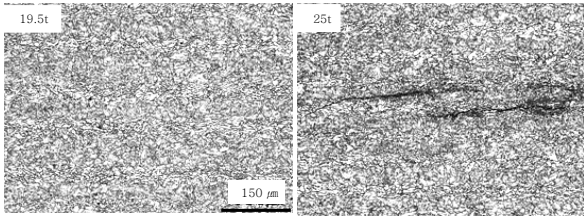


Fig. 6 Microstructure of center position

저항성에 대한 예측이 가능한지 검토하였다.

Fig. 5에 두 판재의 1/4 두께 지점의 미세조직 나타내었다. 19.5mm 판재가 25mm 판재보다 더 균질한 미세조직을 보였지만, 25mm 판재의 경우 HIC에 취약한 밴드조직<sup>7)</sup>이 보이지 않았다. 또한 Fig. 6에 중심부 미세조직을 보였는데, 미세조직으로는 중심부 편석을 구분하기 어려웠다. 따라서 미세조직이 유사한 상황에서 미세조직상으로 HIC 저항성에 대한 민감성을 판단하기 어려웠다. 특히 25mm 판재의 균열 주변의 미세조직을 관찰하였는데, 조직 차이를 구별하기 어려웠다.

#### 4. 결 론

미세조직이 유사하고 두께가 다른 API 5L X65 판재에서 TD로 인장시편을 채취하여 소성변형에 따른 HIC 저항성 평가 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미세조직이 균질한 강재의 경우 소성변형에 따라 HIC 저항성이 감소하지 않았다.
- 2) 미세조직은 균질하나 중심 편석이 존재할 경우 판재 상태에서 수소유기균열이 발생하지 않았지만 소성변형에 의하여 판재 중심부에 HIC 균열이 발생하였다.
- 3) 인장시편에 의한 HIC 저항성 평가방법은 강관의 HIC 저항성 모사가 가능하였다.

#### 참 고 문 헌

1. NACE Standard MR0117-93: Sulfide stress cracking resistant metallic materials for oilfield environment, NACE, Houston, TX, USA(1993)
2. E. M. Moore and D.A. Hansen: Specifying linepipe suitable for safe operation in sour, Wet service, J. Energy Resources Technology, **104-6** (1982), 134
3. R.D. Kane and M.S. Cahard: Role of H<sub>2</sub>S in the behavior of engineering alloys: a review of literature and experience, Corrosion/98, Paper, **274**, NACE international(1998), 274/1
4. H.J. Kim, Y.R. Park and B.Y. Kang: Mechanism and characteristics of hydrogen induced cracking of welded pipe, Journal of KWS, **22-1** (2004), 14-17(in Korean)
5. NACE TM 0284-96: Evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking.
6. J.S. Seo, H.J. Kim and H.S. Ryoo: Evaluation of HIC resistance for thick-wall welded pipe, Journal of KWS, **23-3** (2005), 246
7. I. Cerny, D. Mikulova and M. Cipera: Contribution to hydrogen induced cracking of high-pressure pipeline materials after plastic deformation, 20th International Metallurgical & Materials Conference ,METAL-2011, Brno Czech Republic, 2011
8. RS D 0004: Welded steel pipe for resistance to hydrogen induced cracking (in Korean)



- 유희수
- 1965년생
- 한국생산기술연구원, 용접접합연구그룹
- 디지털용접전원개발, 자동제어, 집합조직
- e-mail : hsrwoo@kitech.re.kr



- 김희진
- 1953년생
- 한국생산기술연구원, 용접접합연구그룹
- 용접전원파형제어, 용접재료개발
- e-mail : kimhj@kitech.re.kr



- 서준석
- 1979년생
- 한국생산기술연구원, 용접접합연구그룹
- 용접재료개발
- e-mail : jss3953@kitech.re.kr



- 이동언
- 1969년생
- 세아제강 기술연구소
- 내sour 강관 연구
- e-mail : delee@seahsteel.co.kr