

API 후육 용접 강관의 HIC 저항성 평가

Evaluation of HIC Resistance for API Thick-wall Welded Pipe

^{1,2)}서준석, ²⁾김희진, ²⁾유희수, ¹⁾고진현

¹⁾한국기술교육대학교

²⁾한국생산기술연구원

1. 서 론

천연가스나 원유는 한정된 지역에서 생산되어 전 세계로 수송해 사용하게 된다. 천연가스나 원유를 수송하기 위한 방법으로는 여러 가지가 있는데, 기존의 선박이나 철도를 통한 수송방법 보다는 파이프라인을 통한 수송 방법이 경제적이기 때문에 가장 선호하는 수송 방법이 되었다. 따라서 천연가스 수송용 라인 파이프는 세계적으로 많은 수요가 예상되며, 보다 많은 양을 빠른 시간에 수송하기 위한 방법으로 라인파이프의 고강도화가 이루어지고 있다.

라인파이프를 통한 수송 방법이 경제적이라는 장점이 있지만, 라인파이프를 사용 중 균열이 발생하면 대형 참사로 이어질 수 있다는 단점이 있다. 균열이 발생하는 원리를 간단히 보면 강재가 황화수소(H₂S)가스에 노출되어서 수소의 강재침입을 촉진시켜 수소유기균열(hydrogen induced cracking, 이하 HIC 균열이라 칭함)이 발생할 위험성이 높아진다. 따라서 이러한 환경에 사용하는 강관은 원자재 선정 과정에서 이를 충분히 고려해야 하며, 제조 후에는 각각의 균열에 대한 감수성을 평가해 사용 적합성이 입증되어야 한다.

최근 국내에서 HIC 보증용 후육 강재가 개발되었으나, 강관 제조 후 신뢰성 인증 부적합 판정을 받았다. 따라서 본 발표에서는 후육 용접 강관의 신뢰성 저하 원인을 규명하고, 국산 강재와 외산 강재의 HIC 저항성을 비교평가를 통한 국산 강재의 신뢰성 수준을 확인해 보았다.

2. 수소유기균열

2.1 발생원인 및 균열형상

강재 내부로 원자 상태의 수소가 침입하면 침입된 수소는 비금속개재물의 계면에 집중된다. 계면에 집적된 수소원자들은 재결합하여 수소분자를 형성하여 강재의 두께방향으로 강한 압력이 작용된다. 이러한 압력에 의해 재료 내부에서 그림 1과 같이 계단 모양의 균열이 발생되는데, 이러한 균열형상의 특징으로부터 수소유기균열을 계단형 균열(stepwise cracking)이라고 부르기도 한다. 이러한 균열은 외부 응력이 존재하지 않는 상태에서 발생하며, 발생정도는 강종의 S 함량 및 비금속개재물의 형상에 크게 의존한다. 강종의 S의 양이 증가하면 연신된 형상의 MnS개재물의 양이 증가하여 수소유기균열에 대한 저항성이 저하한다. 따라서 수소유기균열 저항성을 향상시키기 위해서 S의 함량을 최소화하고 개재물의 형태를 구상화시키는 방법이 사용되고 있다. 그런데 용착금속에서는 모든 개재물이 산화물형태로써 구형의 형상을 하고 있기 때문에 수소유기균열이 발생하지 않는 것이다.



그림1. 수소유기균열 형상

2.2 내수소유기균열 보증 강재

실험에 사용된 강관은 국산 강관과 외산 강관으로 나눌 수 있다. 국산 강관의 원 소재는 P사에서 공급된 강재를 강관 제조업체인 C사(25mm), S사(17.5mm)사에서 SA 용접으로 제작되었다. 국산 강재는 API 5L X-65 급으로서 HIC 보증용 강재이다. 외산 강관은 API 5L X-60 급으로서 HIC 보증용 강재이다. Europipe(17.5mm)와 Dalmine(28mm)사의 강관을 사용하여 HIC 실험을 했다. 강재의 두께와 제작 공정이 서로 다른 2종의 국산 강관과 유사한 두께의 외산 강관을 비교하여 두께와 제작 공정의 비교평가가 이루어지도록 하였다. 특히 C사에서 제작된 후속 강관의 경우 신뢰성 인증 부적합 판정을 받았는데, 제작 공정 중 신뢰성 저하 원인이 소성변형에 의한 것인지 확인하기 위해 인장 시편을 만들어 소성변형을 시킨 후 HIC 시험을 해 보았다. 다음 표 1은 시험에 사용한 강재의 제품 현황을 보여준다.

표1. 제품 현황

구 분	A (국산)	비교대상B (국산)	비교대상C (외산)	비교대상D (외산)
신뢰수준	개발단계	개발단계	상업생산단계	상업생산단계
제 조 사 /국명	S 사 /한국	C 사 /한국	Dalmine /이태리	Europipe /독일
제 품 명 (일반 호칭)	천연가스 수송용 용접강관 (내HIC 강관)	천연가스 수송용 용접강관 (내HIC 강관)	천연가스 수송용 용접강관 (내HIC강관)	천연가스 수송용 용접강관 (내HIC강관)
강관규격 (두께)	API X-65 (17.5mm)	API X-65 (25mm)	API X-60 (28mm)	API X60 (17.5mm)
제작공정	롤밴딩	프레스밴딩	UOE공정	UOE 공정
용 도	천연가스 수송용	천연가스 수송용	천연가스 수송용	천연가스 수송용
주 사용처	사우어가스 수송용	사우어가스 수송용	사우어가스 수송용	사우어가스 수송용

3. 장 실험 방법

3.1시편 채취위치 및 방법

a)강관

수소유기균열 시험을 실시하기 위하여 각각의 시편을 신뢰성 평가 규격(RS D 0004)에 의거하여 채취하였다. 본 실험에서는 강관의 밴딩으로 인한 내수소유기균열 저항성을 평가하기위해 강관을 밴딩하기 전과 밴딩 후에 대하여 실험을 했다. 따라서 밴딩전과 후 용접부와 모재부(용접부의 90°, 180° 위치)에서 각 3개씩, 밴딩전 9개 밴딩후 9개의 시편을 제작 했다.

용접부에서 채취하는 시편은 길이 방향이 용접 방향과 수직이며, 시편의 크기는 100mm(길이)X 20mm(폭)X최대 두께가 되도록 채취했다. 모재부 시편 채취는 강재의 압연 방향과 평행한 방향(강관의 길이 방향)으로 채취했다.

시편 전처리는 사포로 #320까지 한쪽 방향으로 연마하였다.

b)인장 시편

강관을 강관으로 제조하면 강재의 Center-line을 기준으로 강관의 외부에 인장변형(Tensile Strain)이 작용하게 된다. 위 작용이 HIC 저항성을 떨어뜨리는지 확인하기위해 강관제조 공정과 동일한 조건으로 인장변형이 작용하도록 인장 시편(API 5L X65, 25mm-국산 강재)을 제조하였다. 시편을 만든 후 인장시편을 300 Ton 인장 시험기를 사용하여 각각의 변형량이 3, 4, 6.5%가 되도록 만든 후 한 개의 인장시편에서 5개씩 시편을 채취하였고, 앞의 방법과 동일한 방법으로 시편 전처리를 하였다. 다음 그림 2에서 인장 시편의 크기와 변형 방향을 나타낸다.

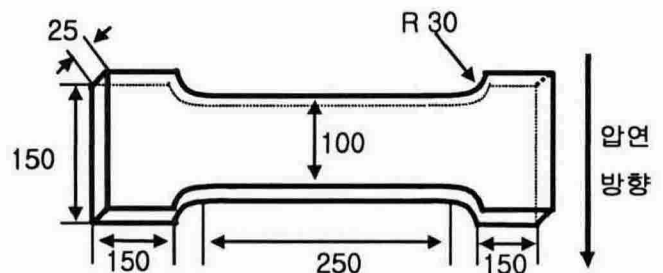


그림 2 인장 시편의 개략도

3.2 수소유기균열 실험

전처리를 마친 시편은 시편의 넓은쪽 표면이 바닥과 수직이 되도록 용기에 장입하며, 용기와 시편이 접촉되지 않도록 시편과 시편사이에 절연봉을 삽입한다. 실험에 사용되는 용기는 투명한 유리로 H₂S gas 방출여부를 쉽게 하기 위해서이다.

실험에 사용된 용액은 Solution A(강산성)를 사용하였으며, 용액의 온도는 24±2℃로 유지했다. 시편을 장착한 지그를 시험 용기내에 장입한 뒤, 용액을 장입하게 되는데, 용액중의 용존 산소가 시험 중의 시편에 부식 생성의 원인이 되므로 이를 제거하기위해 용액 주입 전과 주입 후에 Ar gas로 충분히 purging 한다. 용존 산소가 0.1ppm 이하가 되면 황화수소 가스를 분당 200ml로 1시간 이상 포화시킨 후 실험을 시작한다. 시편이 장입된 상태에서 시험은 96시간 실시하며, 수시로 황화수소 가스 방출 여부를 확인했다.

3.3 균열 탐상 및 균열 측정

수소유기균열 실험이 끝나면 RS D 0004 규격에 의거해 시편을 절단하기 전에 시편을 초음파 탐상하여 균열 위치를 확인하고, 균열이 가장 집중된 부위를 선택적으로 선정하여, 선정된 부위를 그림 3과 같이 절단하여 균열발생률을 측정하였다.

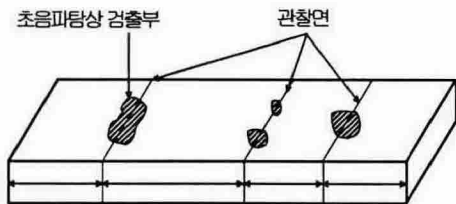


그림 3 RS D 0004규격에 의한 관찰면

4. 결과

4.1 초음파 탐상 결과

a)강관

국산 강관 2개, 외산 강관 2개 총 4개의 강관을

사용하여 HIC 시험을 수행한 후, 각각의 시편에 대하여 초음파 탐상을 했다. 초음파 탐상결과 국산 강관의 경우 S사에서 제작한 강관(17.5mm)의 경우 용접부 시편의 모재부에서만 약간의 균열이 검출되었으며, 모재부 시편에서는 거의 균열이 발생하지 않았다. 하지만 시편 표면에서는 약간의 브리스터가 발생하였다.

C사에서 제작된 강관(25mm)의 초음파 탐상 결과에서는 용접부 시편에서 약간의 균열이 검출되었으며, 모재부 시편에서는 다량의 균열이 검출되었다.

외산 강관도 위의 방법과 동일하게 HIC 시험 후 초음파 탐상을 해보았다. Europipe(17.5mm)의 초음파 탐상 결과에서는 용접부와 모재부 시편 모두에서 다량의 균열이 발생한 하였다. 하지만 시편 표면에서 다량의 브리스터가 나타났는데, 초음파 탐상시 시편 표면의 브리스터가 균열로 검출되었다.

Dalmine(28mm)사에서 제작된 강관의 초음파 탐상 결과에서는 결함이 거의 발생하지 않았다. 위 결과는 국내 강관(25mm)과 비교해 보면 매우 대조적이었다.

b)인장시편

국산 강재 회사인 P사에서 공급된 강관을 사용하였는데, 인장시험 후 인장시편 각각의 소성변형률이 0, 3.5, 4, 6.5%인 HIC 시편을 HIC 시험 후 초음파 탐상을 해본 결과 소성변형률이 증가할수록 검출되는 결함의양이 증가하는것을 알 수 있었다. 이것은 강관 제조공정 중 소성변형률이 증가할수록 HIC 균열발생률이 증가하고, HIC 저항성은 감소한다는 것을 보여주는 결과이다.

4.2 균열 발생률

a)강관

용접부의 균열 발생을 측정은 RS D 0004에 의거해 시편을 절단하고 모재부 시편의 절단 방법은 초음파 탐상 결과에 의거해 균열 발생 정도가 가장 높은 3군데 위치를 선택해 절단하고, 압연 방향에 수직으로 절단한다.

절단면에서 균열이 관찰되면 균열의 길이와 폭의 길이를 측정해 CLR, CTR, CSR을 시험편 각각에 대해 계산했다.

균열발생률을 측정해본 결과 국산 강관의 경우

S사에 제작된 17.5mm의 강관은 용접부시편의 모재부에서 CLR이 최대 4.3%로 나타났으며, 모재부의 시편에서는 균열이 발생하지 않았다.

C사에서 제작된 25mm의 강관의 균열 발생률은 용접부 시편에서는 균열이 발생하지 않았고, 모재부 시편에서는 CLR이 최대 21.2%로 나타났다. S사에서 제작된 강관의 CLR과 비교하면 균열발생률의 차이가 심한 것을 알 수 있다. 또한 CLR이 15%이상이 되면 신뢰성인증규격인 C 등급에도 미치지 못하는 결과이다. 또한 국산 강관의 경우 후속 용접강관으로 갈수록 HIC 저항성이 매우 감소하는 것으로 나타났다.

외산강관도 위와 같은 방법으로 초음파 탐상결과에 의거해 시편을 절단하여 균열발생률을 측정하였다. Europipe의 17.5mm 강관의 경우 초음파 탐상 결과에 의해 시편을 절단하여 균열 발생률을 측정하였는데, 초음파 탐상에서 결함으로 나타난 것들이 대부분 브리스터 이었다. 이때 발생한 브리스터는 대부분 시편 표면에서 1mm 이내에 존재하였는데, RS D 0004의 규격에서 시편 표면 1mm 이내에 발생한 균열은 균열로 간주하지 않는다는 원칙에 의해 브리스터는 균열발생률 측정시 균열에서 제외시켰다. 브리스터를 제외한 균열의 균열발생률을 측정한 결과 용접부 시편에서 CLR이 최대 13.4%로 나타났다. 이것은 국산 강관 중 S사에서 제작된 강관과 비교해보면 강관두께가 17.5mm의 경우 HIC 저항성은 국산강관이 매우 뛰어나다는 뒷받침을 해주는 결과이다.

Dalmine사에서 제작된 28mm의 강관의 균열발생률을 측정해본 결과 초음파 탐상 결과와 동일하게 균열을 찾을 수 없었다. 이번 HIC 시험에서 유일하게 균열발생률이 0%로 나타났다. 국산 강관의 비슷한 두께인 C사에서 제작된 강관과 비교해보면 균열발생률의 차가 매우 심한 것을 알 수 있다.

위에서 측정한 강관의 균열 발생률을 다음 표2에서 간단히 나타낸다.

규격	두께 (mm)	CLR (최대치)	인증가능 등급	제조사
API X-65	17.5	4.3%	B	S사(한국)
	25	21.2%	등급 외	C사(한국)
API X-60	17.5	13.4%	C	Europipe(독일)
	28	0%	A	Dalmine(이태리)

표2. 강관 균열 발생률

b)인장 시편

초음파 탐상 결과에 의거해 균열이 가장 많이 발생한곳 3곳을 선택 후 시편을 절단해 균열발생률을 측정한 결과 소성변형률이 증가할수록 균열 발생률도 심하게 증가하였다. 소성변형률이 0% 일때는 균열이 거의 발생하지 않았지만, 소성변형률이 6.5% 의 경우 CLR이 최대 26%까지 증가하는 것을 확인 했다. 결국 C사에서 제작된 강관에서 균열발생률이 높게 나타난 것은 소성변형에 의한 HIC 저항성이 떨어졌기 때문에 발생한 것이다.

5. 결론

천연가스 수송용 용접강관의 HIC 저항성을 비교 평가해 본 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강재의 두께가 17.5mm 일 경우 국산 강관이 외산 강관에 비해 HIC 저항성이 높았다.
- 2) 25mm 이상의 후속 강관에서는 국산 강관의 HIC 저항성이 급격히 감소하였다.
- 3) 강관의 소성변형률이 증가할수록 HIC 저항성은 급격히 감소하였다.

참고문헌

1. NACE TM 0284-96: Evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking
2. RS D 0004: Welded steel pipe for resistance to hydrogen induced cracking(in Korean)