

후육 용접 강관의 HIC 저항성 평가

서준석* · 김희진* · 유희수*

*한국생산기술연구원

Evaluation of HIC Resistance for Thick-wall Welded Pipe

Jun Seok Seo*, Hee Jin Kim* and Hoi-Soo Ryoo*

*Korea Institute of Industrial Technology, Cheon-an 330-820, Korea

Abstract

It is required for the steel materials used in the sour environment to have sufficient resistance to hydrogen induced cracking(HIC). For line pipe steels, HIC resistance could be varied during pipe making process due to the large plastic deformation applied in the thick-wall pipe. In order to figure out such effect, HIC tests were performed not only in the plate condition but in the pipe condition and their results were compared in terms of cracking ratio. Test results demonstrated a detrimental effect of plastic deformation to HIC resulting in a substantial increase in the cracking ratio after pipe forming process. All of the cracks found in the pipe material were located in the outer layer of pipe where the tensile strain was resulted during pipe forming stage. In order to understand the HIC resistance of the pipe but in the plate condition, it was suggested to pre-strain the plate to some extent before the HIC test.

* Corresponding author : kimhj@kitech.re.kr

(Received February 14, 2005)

Key Words : Hydrogen induced cracking, Thick-wall pipe, Cracking ratio, Press bending

1. 서 론

최근 양질의 천연가스나 원유가 고갈됨에 따라 부식성이 강한 물질이 다량 함유된 자원까지 채굴하게 되었으며, 채굴된 천연가스나 원유는 파이프 라인(pipe line)을 통하여 이송하게 된다. 그런데 황화수소(H_2S) 가스 농도가 일정 수준 이상이면 이를 사우어 가스(sour gas) 분위기라 하는데¹⁾, 이러한 분위기에 강관이 노출되면 수소유기균열(hydrogen induced cracking, 이하 'HIC 균열'이라고 함)이 발생할 위험성이 높아진다²⁾. HIC 균열의 발생기구에 대해서는 이미 보고한바 있는데³⁾, HIC 균열은 수소취성의 일종으로서 강재 내부로 유입된 수소 원자가 비금속개재물 표면에 집적되어 계단식 균열균으로 발전되어 나타나는 것이 일반적인 특징이다⁴⁾. 이러한 균열이 발생하면 대형 사고를 유발할 수 있기 때문에 사우어 가스 분위기에 사용되는 강관(welded pipe)은 원자재 선정 과정에서 이를 충

분히 고려하여야 하며, 제조 후에는 HIC 균열에 대한 감수성을 평가하여 사용 적합성이 입증되어야 한다. 비록 원자재인 강판(steel plate) 상태에서 사용 적합성이 보증 되었다고 하더라도 강관을 제조하는 과정에서 강관에 부가되는 소성변형에 의해 균열저항성이 변화할 수 있는 것이다. 그럼에도 이를 검토한 연구 보고는 찾아볼 수가 없었기에 본 연구에서는 원자재인 강판과 동일 자재로 제조된 강관의 HIC 균열에 대한 저항성을 각각 평가하여 HIC 저항성의 차이 여부를 확인하고, 차이가 확인되는 경우에는 이에 대처하는 방안을 제안하고자 하였다.

2. 시험용 강재 및 시험 방법

2.1 시험용 강재

HIC 균열 비교 평가 시험에 사용된 강재는 25mm 두께를 가지는 API 5L X-65급 강판과 강관이다. 시

험에 사용한 강재는 sour service 용으로 제작된 것인데, 강관의 화학조성은 Table 1에서 보여 주는 바와 같다. 여기서 알 수 있듯이 본 소재는 비금속개재물의 양을 최소화하기 위해 S의 함유량은 0.001% 수준으로 유지하였으며 Ca를 소량 첨가하여 비금속개재물을 구상화 처리하였다. 강관은 강판을 프레스벤딩(press bending)으로 가공하여 서브머지드아크용접(SA용접)으로 심용접을 실시해 제조된 것이다. 프레스벤딩 과정은 Fig. 1에서 보여주고 있다. 프레스벤딩은 강판을 국부적으로 눌러서 최종 단면을 O 모양으로 제조하는 과정이다. 강관의 직경은 30인치로 하였다. 벤딩작업이 종료되면 SA용접으로 강관의 내부에 2패스 용접을 하고, 외부에 3패스 용접하여 강관을 제조하였다. 강관 제조 시에 적용되는 벤딩가공으로 모재에는 가공경화가 발생하는데, 이로 인하여 모재의 강도는 증가하고 연신율은 감소하게 된다. 이러한 기계적 성질 변화를 Table 2에서 보여주고 있다. 이 Table에서 보여주듯이 항복 강도의 증가는 크지 않았으나 연신율은 크게 감소하였다.



Fig. 1 Press bending of steel plate

Table 1 Chemical compositions of test specimens(wt-%)

Chemical composition(%)					
C	Si	Mn	P	S	Ca
0.0492	0.296	1.240	0.005	0.001	0.0018

Table 2 Tensile property before and after bending

Specimen Condition	Yield strength [Mpa]	Tensile strength [Mpa]	Elongation [%]
as-plate condition (before bending)	447.9	536.1	43.7
as-pipe condition (after bending)	478.6	604.6	27.6
Weld metal	510.3	604.2	19.3

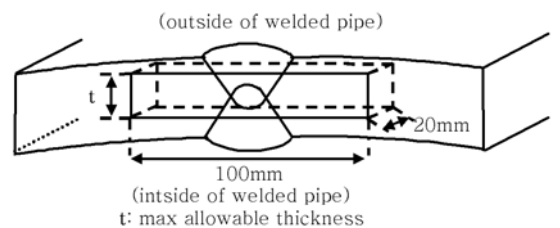
2.2 시편 채취 위치

한 장의 강관에서 강관 시편을 채취하고, 나머지 강관을 가지고 강관을 제조하였다. 강관 시편은 강관의 중앙부(1/2W)에서 채취하였으며, 채취된 강관 시편에서 HIC 시편을 가공하였다. HIC 시험편의 크기는 100X20X23mm(길이X폭X최대 두께)인데, 시편의 길이 방향이 압연 방향과 평행하도록 하였다. 강관에서는 바로 인접한 부위에서 모두 6개의 시편을 채취하였다.

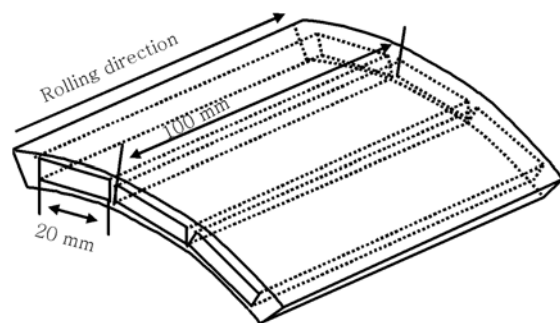
강관에서는 모재부와 용접부에서 각각 시편을 채취하였다. 모재부 시편은 강관의 길이 방향(강관의 압연 방향과 동일함)으로 채취하였으며, 용접부 시편은 용접부에 수직인 방향으로 채취하였다. 시편의 두께는 채취 가능한 최대 두께(23mm)로 하였다. 모재부 시편은 용접부로부터 90° 및 180° 위치에서 각각 채취하였으며, 한곳에서 3개의 시편을 채취하였다. Fig. 2는 시편 채취 위치 및 크기를 보여 준다. 기계 가공된 HIC 시험편은 기계 가공으로 인한 표면을 제거하기 위해 #320 사포까지 연마하였다⁵⁾.

2.3 실험 방법

HIC 실험에 사용되는 실험 장치 및 평가방법에 대해서는 본 학회지를 통하여 기 보고한바 있다⁶⁾. 시험 장치는 크게 3가지로, 즉 가스 공급 장치, 반응용기, 중화조로 구분된다. 시험에 사용된 가스는 황화수소와 질소이며, 반응용기에는 황화수소를 포화시킨 용액과 시



(a) welded joint



(b) base metal

Fig. 2 Location of specimens taken from SA-welded pipe

편이 장입되며, 중화조에는 10% NaOH 용액이 들어 있어 반응용기에서 배출되는 황화수소를 중화시켜 대기 중으로 방출하게 된다.

HIC 시험에 사용된 용액은 강산성의 "A 용액"으로 5% NaCl 용액에 초산을 첨가하여 pH를 2.6-2.8의 범위로 맞춘 것이다. 용액과 시편이 준비되면 준비된 용기에 시편을 장입하고 용액을 주입한다. 이때 용액의 용존 산소를 제거하기 위해 아르곤을 주입하여 용존 산소를 완전히 제거 한다. 용존 산소가 완전히 제거되면 시험 용액에 황화수소를 과포화 시키고, 이후에도 황화수소를 지속적으로 주입시켜 96시간동안 포화 상태를 유지시킨다. 실험이 진행되는 동안 용액의 온도는 24±2℃로 일정하게 유지시켜 주었다⁷⁾.

2.4 초음파 탐상

96시간의 HIC 실험이 종료되면 균열발생 정도 및 균열발생 위치를 확인하기 위하여 scanning acoustic microscope(SAM)를 사용하여 2차원적인 초음파 탐상을 실시하였다. 초음파 탐상으로 균열 위치가 확인되면 RS D 0004의 규격에 의해 시편을 절단 하였다. 용접부의 시편 절단 위치는 다음 Fig. 3(a)와 같으며, 균열 위치에 관계없이 규격에서 정한바대로 절단하였다. 모재부는 초음파 탐상 결과 균열이 가장 많이 나타난 위치 3곳을 선택하여 압연 방향과 수직인 방향으로 절단하였는데, 이러한 절단 방법은 Fig. 3(b)에서 보여 주고 있다⁵⁾.

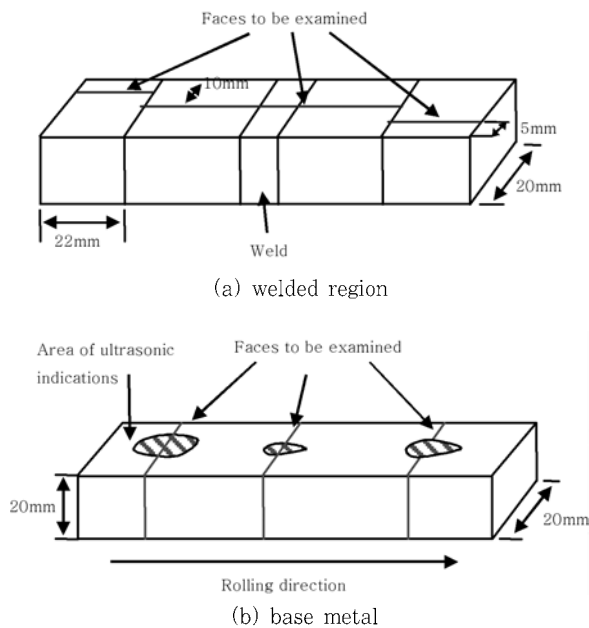


Fig. 3 Location of cutting line determined by UT image

3. 실험 결과

3.1 초음파 탐상 결과

1) 강판

원자재(as-received plate)의 상태를 확인하기 위하여 강판상태에서 채취한 6개의 시편에 대해 초음파 탐상을 실시하였다. Fig. 4는 대표적인 초음파 탐상 결과인데, 결함신호를 보여 주지 않고 있다. 마찬가지로 나머지 시편 어디에서도 결함신호는 발견되지 않았다. 그러므로 HIC 시험 전에는 강판 내에 균열이 전혀 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4에서 보여준 시편에 대해 HIC 시험을 실시하고, 시험 후 6개 시편에 대해 초음파 탐상을 실시하였다. 초음파 탐상한 결과를 Fig. 5에서 보여 주고 있다. 여기서는 미세한 신호가 분산되어 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 시편을 절단하여 단면을 고배율로 관찰하여 보면, 일부에서는 조대한 비금속개재물로부터 생성된 미세균열들이 존재함을 확인할 수 있었다. 그러

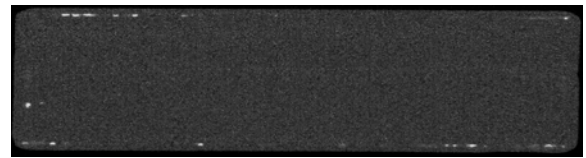


Fig. 4 SAM image of steel plate before HIC test

Specimens ID	SAM Image
BB 1	
BB 2	
BB 3	
BB 4	
BB 5	
BB 6	

Fig. 5 UT images of HIC specimens taken from steel plate

나 대부분의 신호는 균열과 무관한 것이었다.

2) 강관

강관에서 채취한 시편에 대해 HIC 시험을 실시한 후에 초음파탐상을 실시한 결과를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 먼저 용착금속부(W1, W2, W3의 중앙부)에서는 균열이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 서론에서도 언급하였듯이 HIC균열은 주로 연신된 비금속개재물에서 발생하는데, 용착금속부에 존재하는 비금속개재물은 모두 구형의 형태를 하고 있기 때문에 HIC 균열이 발생하지 않은 것이다. 그러나 용착금속부 주위에 있는 모재부에서는 전형적인 균열 신호가 나타나고 있었다. 그리고 용접부의 90°방향 모재와 180°방향 모재에서는 몇 개의 시편(R1, R3, B2)에서 커다란 균열이 다수 발생하였음을 확인할 수 있었다. 이들을 강관 상태에서 초음파 탐상 한 결과(Fig. 5)와 비교해 보면 신호가 나타나는 면적에 있어서 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다.

3.2 Cracking Ratio 측정 결과

초음파 탐상이 끝나면 탐상 이미지를 토대로 RS D

Specimens	Specimens ID	SAM Image
Welded region	W1	
	W2	
	W3	
Welded region + 90° (base metal)	R1	
	R2	
	R3	
Welded region + 180° (base metal)	B1	
	B2	
	B3	

Fig. 6 UT image of HIC specimens taken from welded pipe

0004 규격에 의해 시편을 절단하여 균열발생률을 정량적으로 측정한다. 측정결과는 가로 방향의 균열의 합인 CLR, 두께 방향의 균열의 합인 CTR, 균열 면적의 합인 CSR이다.

1) 강관

초음파 탐상 결과(Fig. 5)에 의해 균열이 가장 밀집된 3곳을 선정하여 시편을 절단하여 균열발생률을 측정해 보고자 하였으나 저배율에서는(X100) 균열을 확인하지 못하였다. 이를 보다 고배율로 확인하여 보면, 조대한 비금속개재물에서 발생한 미세균열을 일부 확인할 수 있었다. 결과적으로 RS D 0004 규격이 정한 바에 따라 평가한 균열발생률(CLR, CTR, CSR)은 모두 0% 이었다. 그러므로 Fig. 5의 SAM에서 보여주는 미세한 신호의 일부는 균열길이(crack length)로 확인하기 어려울 정도로 미세한 균열에 기인한 것이지만, 대부분은 균열과 관계없이 나타나고 있었다. 아직 확실히 규명되지는 않았지만, SAM에서 나타나는 UT 영상은 조대한 비금속개재물 표면상태 변화와 관련된 것으로 생각된다.

2) 강관

용접부는 앞의 Fig. 3(a)와 같이 정해진 규격으로 절단하여 균열발생률을 측정하고, 모재부는 초음파 탐상, 결과 균열이 가장 밀집된 3곳을 선정하여 절단하고 균열발생률을 측정하였다. 초음파 탐상 결과 용접부 시편에서는 모재측에 한하여 균열이 발생한 것을 확인했지만, 정해진 규격에 의해 절단했기 때문에 균열발생률은 0% 이었다⁵⁻⁶⁾.

용접부로부터 90° 방향 모재에서는 R1, R3 시편에서 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 또한 용접부의 180° 방향 모재 시편에서는 B2 시편에서만 균열이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 절단된 시편의 단면에서 측정된 균열발생률(CLR, CTR, CSR)은 Table 3과 같다. R1, R3, B2 시편에서는 CLR이 20% 이상 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 앞서 실험한 강관의 경우 CLR이 0%인 것과 비교하면 매우 높게 나타난 것이다. 상기한 3개의 시편을 제외한 모재 시편에서는 균열이 확인되지 않아서 CLR은 모두 0% 이었다. 즉 강관의 경우에 있어서 균열발생률은 위치에 따라 커다란 편차를 보여주고 있는 것이다.

4. 검 토

상기한 실험 결과로부터 얻을 수 있는 결론은 강관상

Table 3 Cracking ratio measured in pipe condition

specimens	specimens ID	cracking ratio(%)		
		CLR	CTR	CSR
Welded region	W-1	0	0	0
	W-2	0	0	0
	W-3	0	0	0
Welded region + 90° (base metal)	R-1	21.2	1.61	0.45
	R-2	0	0	0
	R-3	20.5	2.61	0.54
Welded region + 180° (base metal)	B-1	0	0	0
	B-2	20.3	3.12	0.59
	B-3	0	0	0

태에서는 균열발생률이 0%이었던 것이 강관으로 제작된 후에는 균열발생률이 20%로 증가할 수 있다는 것이다. 사우어 분위기에 사용되는 강관은 CLR이 15% 이하이어야 하는 것이 국제적인 요구사항인데, 이를 기준으로 하면 본 연구에서 제작된 강관은 부적합한 것이다. 즉 사용적합하다는 평가를 받은 강관을 원자재로 하여 제작된 강관이 사용 부적합하게 되었다는 것이다. 이와 같이 HIC 저항성에 있어서 차이가 나타난 원인을 강관 제조과정에서 부가된 소성변형에 기인한 것으로 설명하고자 한다.

원자재인 강관으로 강관을 제조하기 위해서는 밴딩과 같은 기계가공 과정(Fig. 1)을 거쳐야 하는데, 강관을 밴딩하면 강관의 아래 부분 즉 강관의 외부는 인장변형(tensile strain)이 작용하고, 강관의 내부는 압축변형(compressive strain)이 작용한다. 본 시험에서 사용한 강관의 직경이 30인치인 것을 고려하면, 강관의 외경에서 나타나는 변형량은 3.4% 정도이다. 이러한 계산 과정을 Fig. 7에서 도식적으로 보여주고 있다. HIC 시험 후 초음파 탐상 결과를 보면, 강관 내부에서

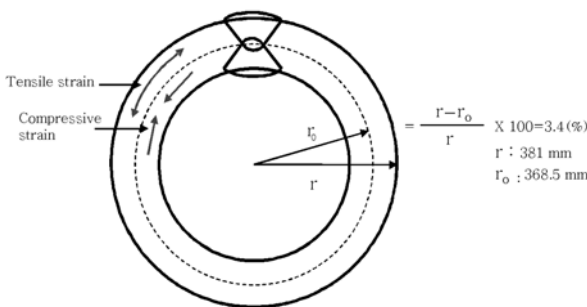


Fig. 7 Estimated strain applied in pipe condition

는 균열이 발생하지 않고 강관 외부에서만 균열이 발생하였다. 이는 강관의 외부에 인장 응력이 작용하여 HIC균열의 발생이 보다 용이하였던 것으로 판단된다. 그리고 3개의 시편을 모두 동일한 위치에서 채취하였음에도 불구하고, Table 2와 같이 균열발생률에 있어 커다란 차이가 있는 것은 제조방법에 기인한 것으로 생각된다. 강관을 제조함에 있어 롤밴딩과 프레스밴딩이 있는데, 후속관의 경우에는 프레스밴딩이 적용된다. 롤밴딩으로 제조된 강관은 소성변형이 위치에 관계없이 균일하게 나타나지만, 프레스밴딩에 의해 생산된 강관은 소성변형이 국부적으로 작용하고 있는 것이다. 따라서 인접한 위치에서 채취한 시편이라고 하더라도 소성변형량에 있어서 커다란 차이가 발생할 수 있는 것이다. 결국에는 균열발생률에 있어서도 국부적으로 커다란 차이를 보여 줄 수 있는 것이다. 이러한 상황을 고려한다면, 강관 원자재의 수소유기균열 저항성 평가는 일정 수준의 소성변형을 부가한 상태에서 HIC 시험을 수행하는 것이 보다 합리적일 것이다. 그리고 이를 표준화하기 위해서는 소성변형량이 HIC 저항성에 미치는 영향을 보다 체계적으로 확인해 볼 필요가 있다.

5. 결 론

25mm 두께를 가지는 API X-65급 강관으로 30인치 직경의 용접강관을 제조하고, 강관과 강관의 수소유기균열(HIC) 저항성을 비교·평가한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강관 상태에서는 균열발생률이 0%에 가까웠으나, 동일한 강재를 사용하여 제조된 강관의 경우에는 국부적으로 매우 넓은 영역에서 균열이 발생하여 CLR 기준으로 20% 이상의 균열발생률을 보여 주었다.
- 2) 강관 제조 과정에서 강관에 부가되는 소성변형에 의해 내수소유기균열 저항성이 국부적으로 크게 저하될 수 있음을 확인 하였다. 따라서 강관제조 용 강관을 평가함에 있어서는 제조 공정을 고려하여 새로운 기준을 수립할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

1. NACE Standard MR0175-93: 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. Hee Jin Kim: Mechanism and Characteristics of Hydrogen Induced Cracking of Welded Pipe, Journal

- of the Korea Welding Society **22-1**(2004), 14-17(in Korean)
4. E. M. Moore, J. J. Warga: Factors influencing the hydrogen induced cracking sensitivity of pipeline steels, *Materials Performance*, **15-6** (1976), 17
 5. RS D 0004: Welded steel pipe for resistance to hydrogen induced cracking, MOEIC, Korea (in Korean)
 6. Hee Jin Kim: Evaluation Method for the Resistance to Hydrogen Induced Cracking, *Journal of the Korea Welding Society* **22-2**(2004), 8-12 (in Korean)
 7. Test device for four point bending sulfide stress corrosion cracking, under patent processing, Korea (2003)