

수소유기균열 저항성 평가기준

김희진

Evaluation Criteria for the Resistance to Hydrogen Induced Cracking

Hee-Jin Kim

1. 서론

지하로부터 채굴되는 천연가스의 황화수소가스 농도가 일정 수준 이상이면 이를 사우어가스(sour gas)분위기라고 하는데¹⁾, 이러한 분위기에 강재가 노출되면 수소유기균열(hydrogen induced cracking, 이하 'HIC균열'이라고 함)이 발생할 위험성이 높아진다. HIC균열의 발생기구에 대해서는 이미 보고한 바 있는데²⁾, 이러한 균열은 짧게는 수개월 만에 나타나기도 하지만 길게는 5~7년 정도 사용한 후에 발생되기도 한다³⁾. 따라서 이러한 환경에서 사용하고자 하는 강재에 대해서는 미리 사용적합성을 평가하여, 실제 사용하는 동안에 HIC균열이 발생하지 않을 것임을 보증하여 주어야 한다. 이를 위해서는 HIC균열을 단시간에 재현할 수 있는 실험실적 시험방법이 있어야 하며, 다음으로는 시험결과에 근거하여 사용적합성을 판단할 수 있는 평가기준이 있어야 한다. 시험방법에 있어서는 전보에 기술한 바와 같이⁴⁾ NACE TM 0284로 규격화 되어 국제적으로 통용되고 있는데, 이를 통상적으로 'HIC시험'이라고 부른다. HIC시험에서는 실제 사용환경보다 매우 가혹한 조건을 채택하여 강재의 수소유기균열 저항성을 신속히 비교 평가할 수 있도록 한 것이다. 그러나 본 규격은 시험방법만을 제시하고 있을 뿐, 재료의 사용적합/부적합 판정에 필요한 평가기준에 대해서는 언급하고 있지 않다. 그렇기 때문에 사용자들은 자체적으로(다소는 임의적으로) 평가기준을 설정하여 사용적합성을 판단할 수밖에 없는 실정이다. Table 1은 현재 산업계에서 적용하고 있는 다양한 기준들을 보여주고 있는데, 이들은 모두 HIC시험 결과로부터 얻어진 CLR, CTR, CSR 값의 최대 허용치를 규정하고 있다는 공통점이 있다. 기준(specification) 1은 CLR, CTR, CSR값을 각각 15%, 5%, 1.5% 이하로 규정하고 있으며, 기준 2는 CTR을 최대 0.1mm로 규정하면서 CSR은 별도로 규정하지 않고 있다. 기준 3과 기준 4는 기준 1과 동일하게 CLR, CTR, CSR값으로 규정

하고 있는데, 각각의 기준치를 보다 엄격하게 적용하고 있다. 여기서 유의하여야 할 사항은 HIC시험에서 어느 정도 균열이 발생하여도 이를 허용한다는 것이다. 즉 기준 1에서는 HIC시험에서 균열이 발생하여도, 이를 정량화한 CLR값이 15% 이하이면 사용적합하다고 판단하는 것이다. 즉 HIC시험에서 균열이 발생하지 않으면 좋겠지만, 균열이 발생하더라도 균열발생 정도가 어느 정도 이하이면 실제 사용환경에서는 수소유기균열이 발생하지 않을 것이라고 보증할 수 있다는 것이다. 그런데 그러한 보증 요구치가 Table 1에서 보여주는 바와 같이 매우 다양하게 제시되고 있으며, 최근 강관 수요가들은 허용기준을 보다 엄격하게 한정된 기준들을 선호하고 있다는 것이다.

본 보고에서는 그러한 기준들이 어떠한 근거를 가지고 도출되었는가에 대해 보고하고자 한다. 그리고 이들 기준을 적용함에 있어 고려하여야 할 사항 그리고 개선되어야 할 사항에 대해 보고하고자 한다.

2. 평가기준의 근거

실제 사용조건보다 다른 조건, 즉 보다 가혹한 시험조건에서 평가한 시험결과를 근거로 대상 강재의 사용적합성을 판단한다고 하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 판단은 결국 과거의 경험과 엔지니어의 판단에 의존할 수밖에 없는데, 수소유기균열에 대한 저항성에 있어서도 그러한 과정을 거쳐 상기한 기준들이 제시된

Table 1 Various criteria for qualification

	CLR	CTR	CSR
Specification 1	15	5	1.5
Specification 2	15	0.1	-
Specification 3	10	3	0.5
Specification 4	8	1	1

것으로 판단된다. 그러한 과정을 살펴보면 다음과 같다.

재료의 사용적합성을 제시하기 위해 가장 중요한 사항이 사용환경과 시험환경의 상관성을 입증하는 것이다. 이를 위하여 과거 연구자들은 사용 중에 균열이 발생한 재료를 채취하여 NACE에서 규정된 HIC시험을 실시함으로써 입증하였다. Table 2는 Moore 등³⁾이 보고한 자료로써, 강재의 사용 이력과 HIC시험 결과를 보여 주고 있다. 여기서는 HIC시험결과를 시험에 적용한 시편의 숫자 대비 균열이 발생한 시편수로 표현하고 있다. 이들의 결과를 보면 사용 중에 균열이 발생한 강재는 HIC시험에서 균열이 발생할 확률이 매우 높다는 것을 알 수 있다. Gas line #1은 사용한 지 1개월 만에 수소유기균열이 심하게 발생한 강재인데, 이를 채취하여 HIC시험을 실시한 결과를 보면 9개 시편 모두에서 균열이 발생하였다. 그리고 5년 사용한 후에 균열이 발생한 gas line #4에서는 18개 시편 중 11개의 시편에서, 7년 사용한 후에 균열이 발생한 separator #1은 36개의 시편 중 10개의 시편에서 균열이 발생되었다고 보고하고 있다. 그리고 30년을 사용하여도 균열이 발생하지 않은 강재(separator #2 및 gas line #2)에 있어서는 HIC시험에서도 전혀 균열이 발생하지 않고 있다. 특이한 사항은 18년 동안 균열이 발생하지 않은 gas line #3가 HIC시험에서는 9개 중에 1개의 시편에서 균열이 발생하였다는 것이다. 이러한 시험결과로부터 강관의 수명과 HIC시험결과 사이에는 상관관계가 있음을 알게 되었다. 그리고 HIC시험에서 균열이 발생되더라도 발생빈도수가 극히 낮으면 20년 이상의

수명을 보증할 수 있다는 것이다.

이러한 시험결과를 정량화하기 위하여 Table 2의 HIC시험결과를 CLR(crack length ratio)값으로 표현한 것이 Table 3이다. 이 표에서 보듯이 사용 중에 균열이 발생하지 않은 gas line #3은 CLR값이 4.5%로 낮은 수치를 보여 준 반면, 균열이 발생한 gas line #1, #4 및 separator #1에서는 CLR값이 50%이상으로 나타나고 있다. 따라서 사용적합성 기준을 CLR로 제시하고자 한다면, 4.5%와 50% 중간의 어떠한 수치로 설정하여야 할 것이다. 그런데 이들 두 수치의 차이가 너무 크기 때문에 추가시험을 실시하게 되었다. 추가시험 결과는 Table 4에서 보여 주고 있는데, 이에 사용한 강재가 실제 사용환경에서 어떠한 거동을 보여 주었는지에 대해서는 언급하지 않았다. 그러나 본 시험결과가 의미하는 것은 CLR값이 15%를 초과하게 되면 균열이 발생하는 시편의 빈도수가 급격히 증가한다는 사실이다. 즉 CLR값이 15% 이하이면 1/9, 1/12, 3/12이던 균열발생 빈도수가 15%이상으로 증가하면 6/9으로 급격히 증가하고 있는 것이다. 이러한 시험결과를 근거로 하여 초기 설계엔지니어들은 CLR 15% 이하이면 사용환경에서 설계수명(통상 30년) 동안 수소유기균열이 발생하지 않을 것이라고 판단하고 Table 1의 기준 1을 제시하였던 것이다. 그리고 이러한 기준을 적용하게 되면서부터 사용 중에 수소유기균열이 발생하지 않게 되었다고 한다.

한편 기준 1이 제시되면서부터 강재 품질은 향상되어

Table 2 Correlation between service failure and HIC test³⁾

Identification	Service Details			HIC Result (NSC)
	Service Condition	Service Life	Performance	
Gas Line #1	T=85°C H ₂ S=3.4m/o	1mnrh	Service Cracking	9/9 Cracked
Gas Line #4	T=85°C H ₂ S=1.5m/o	5yrs	Cracks	11/18 Cracked
Separator #1	T=85°C H ₂ S=1.2m/o	7yrs	Cracks	10/36 Cracked
Gas Line #3	T=85°C H ₂ S=3.7m/o	18yrs	No Cracking	1/9 Cracked
Separator #2	T=85°C H ₂ S=6.1m/o	29yrs	No Cracks	No Cracks
Gas Line #2	T=85°C H ₂ S=7.0m/o	30yrs	No Cracking	No Cracks

Table 3 Quantification of service failure³⁾

Sample No.	Service Performance	HIC test Results	CLR(%)
Gas line #3	No Crack in 18 yrs	1/9	4.45
Gas line #4	Crack in 5yrs	11/18	58.32
Gas line #1	Severe crack in one month	7/9	497.6
Separator #1	Crack in 7yrs	10/36	1220

Table 4 Additional HIC test result³⁾

Sample No.	Service Performance	HIC test Results	CLR(%)
16	-	1/9	9.65
8	-	1/12	12.0
9	-	3/12	13.79
20	-	6/9	18.85
14	-	6/9	39.8
19	-	6/9	132.85

보다 엄격한 기준도 만족시킬 수 있게 되었는데, 이러한 품질향상에 기인하여 설계엔지니어들은 평가기준을 하향 조정하여 기준 2, 3, 및 4 등이 제시하게 되었던 것이다. 즉 이러한 기준들은 사용실적에 근거를 가지고 있는 것이 아니고 강제 품질이 지속적으로 향상됨에 따라 제시될 수 있었던 것이다. 단지 기준 2에서 CTR을 최대 0.1mm로 규정하고 있는 것은 CTR이 두께 감소를 유발하기 때문에 특별히 규제할 필요가 있다고 생각하여 제시하고 있는 것이다.

3. 평가 기준에 대한 고찰

3.1 시험조건에 대한 고찰

전보에서 설명한 바와 같이 HIC시험에 사용되는 부식용액은 A용액과 B용액의 두 가지가 있으며, 시편 절단 방법은 균등분할과 선택분할이 있다. 그리고 B용액 보다는 A용액이, 균등분할 보다는 선택분할이 보다 엄격한 조건임을 보고한 바 있다. 예를 들면 B용액에서는 균열이 발생하지 않는 강재라고 하더라도 A용액에서는 균열이 발생할 수 있으며, 선택분할을 하면 균열발생율이 약 2배 이상 증가하게 된다는 것이다. 그럼으로 시험조건에 따라 균열발생 정도는 차이를 보여 줄 수 밖에 없는데, 초기에 NACE에서 규정한 HIC시험 조건은 B용액과 균등분할이라는 조건이었다. 그리고 앞에서 보여준 현장사례와 HIC시험결과와 상관성을 입증함에 있어서도 이러한 초기조건이 사용되었다. 즉 CLR(15%)라는 기준이 제시된 것은 B용액과 균등분할이라는 조건에서 시험한 HIC결과를 근거로 하여 제시 되었다는 것이다.

그럼에도 불구하고 최근의 경향은 보다 보수적인 기준안을 마련하고자 하고 있기 때문에 A용액과 선택분할을 선호하고 있다. 즉 평가기준은 B용액과 균등분할에 의해 얻어진 결과를 근거로 제정하였는데, 실체는 A용액과 선택분할이라는 조합으로 실험하도록 규정하고 있는 것이다. 이러한 모순에 대해서는 여러 문헌에서 언급하고 있는데, 설계를 주관하는 엔지니어링 회사들은 이를 받아들이지 않고 있는 것이다.

3.2 강재품질의 균질성

Table 1에서 짐작할 수 있듯이, 동일한 강재를 동일한 조건에서 HIC시험을 수행하여도 시편에 따라 균열 발생 정도에 있어서는 커다란 차이를 보여준다. 예를 들면, gas line #4의 경우에 있어서 18개의 시편 중에서 11개의 시편에서는 균열이 발생하였지만 나머지 7

개의 시편에서는 균열이 발생하지 않았다는 것이다. 이러한 사실은 HIC균열이 국부적으로 발생하고 있다는 것을 의미하며, 이는 강재의 품질이 HIC균열 감수성에 관한한 균일하지 않다는 것을 의미한다. 이러한 불균질성이 현재 생산되고 있는 강재에서도 나타나고 있는지 확인하기 위하여 저자들은 다음과 같은 실험을 실시하였다.

'HIC보증용'으로 생산된 강판을 구매하여, 폭방향으로 1/4W 되는 위치에서 길이방향으로 9개의 시편을 채취하였다. 제조회사가 본 강재를 HIC보증함에 있어서 용액B를 사용하였는데, 시험결과는 CLR(0%), CTR(0%), CSR(0%)라고 보고되었다. 따라서 용액B를 사용하는 시험조건에서 본 강재는 전혀 균열이 발생하지 않는 강재라고 할 수 있다. 그러나 강재의 품질 균질성을 확인하기 위해서는 시험 후에 시편에 균열이 존재해야 하기 때문에, 확인시험에서는 보다 부식력이 강한 용액A를 사용하였다. 그리고 시험 후에는 균열발생율은 두 가지 분할 방법(NACE규격에 의한 균등분할 및 RS규격에 의한 선택분할) 모두를 적용하여 각각에 대해 측정하였다. 시편마다 3개의 분할면에서 균열발생율을 측정하게 되는데, 측정한 시험결과를 Table 5와 6에 정리하여 보여 주었다. 일반적으로 균열발생율은 3개의 절단면에서 측정한 균열발생율을 평균하여 시편단위로 보고하는 것이 일반적인데, 본 시험의 목적이 강재 품질의 균질성을 확인하고자 하는 것이기 때문에 절단면 3곳에서 측정한 결과를 모두 제시하였다.

Table 5는 NACE규격에 의거하여 시편을 균등분할하여 각각의 분할면에서 측정한 균열발생율이다. 모두 9개의 시편을 사용하였으므로 전체 분할면은 27면이 된다. H1-1시편에 있어서는 분할면 3곳 모두에서 균열이 관찰 되지 않은 경우이다. 따라서 시편의 균열발생율(CLR, CTR, CSR)은 모두 0%가 된다. 한편 H1-2시편에서는 3곳의 분할면 모두에서 균열이 발생한 시편이다. 분할면 각각에서 측정한 CLR값은 6.7%, 3%, 2.3%이었으며, 이들을 평균하여 얻어진 시편 단위의 CLR값은 5.2%가 되어 최대치를 기록하였다. 즉 시편 단위의 CLR값은 최소 0%에서 최대 5.2%의 범위에 있게 되는 것이다. 그러나 CLR값을 분할면 단위로 세분하여 보면 최소치는 0%이지만 최대치는 H2-3시편에서 기록한 10.3%가 된다. 이렇게 평가단위를 분할면 차원으로 세분화하면, 측정치의 분산 폭이 증가하여 표준편차(σ)가 증가하게 된다. CLR의 경우를 예로 들면, 시편단위에서 1.51%이었던 표준편차가 분할면 단위에서는 2.68%로 증가하였다. 그러나 CLR의 평균치(m)는 시편단위와 분할면 단위에서 모두 2% 수준으

Table 5 Result of crack ratio determined by NACE sectioning method

Sample ID	Crack Ratio(%)		
	CLR	CTR	CSR
H1-1	0, 0, 0 (0)	0, 0, 0 (0)	0, 0, 0 (0)
H1-2	6.7, 3, 2.3 (5.2)	1.3, 0, 0 (0.4)	0, 0, 0 (0)
H1-3	6, 2.6, 0 (2.9)	2, 0, 0 (0.7)	0.3, 0, 0 (0.1)
H2-1	0, 0, 6.3 (2.1)	0, 0, 1.7 (0.6)	0, 0, 0.3 (0.1)
H2-2	1.7, 0, 3.7 (1.8)	1.3, 0, 0.7 (0.7)	0, 0, 0 (0)
H2-3	10.3, 0, 0 (3.4)	2.1, 0, 0 (0.7)	0.3, 0, 0 (0.1)
H3-1	0, 1.3, 0 (0.4)	0, 0.1, 0 (0)	0, 0, 0 (0)
H3-2	0, 3.3, 4.3 (2.5)	0, 0.7, 1.3 (0.7)	0, 0.1, 0.2 (0.1)
H3-3	0, 0, 3 (1)	0, 0, 0.7 (0.2)	0, 0, 0.1 (0)
Average(m)	2.02 (2.14)	0.44 (0.44)	0.05 (0.04)
Standard Deviation(σ)	2.68 (1.52)	0.68 (0.29)	0.1 (0.05)

Table 6 Result of crack ratio determined by RS sectioning method

Sample ID	Crack ratio(%)		
	CLR	CTR	CSR
H1-1	5, 2.8, 3.7 (3.8)	1.3, 0, 0 (0.4)	0.2, 0, 0 (0.1)
H1-2	6.3, 8.7, 8.3 (7.8)	1.3, 4, 1.3 (2.2)	0.3, 1.0, 0.1 (0.5)
H1-3	3.3, 2.2, 5 (3.5)	0, 0, 2 (0.7)	0, 0, 0.3 (0.1)
H2-1	8.3, 7.7, 6.3 (7.4)	1.7, 2.3, 1.7 (1.9)	0.4, 0.3, 0.3 (0.3)
H2-2	3.7, 0, 4.3 (2.7)	0.7, 0, 0.7 (0.5)	0.1, 0, 0.1 (0.1)
H2-3	10, 13.3, 12.8 (12)	2.4, 3, 4.7 (3.4)	0.5, 0.6, 1.3 (0.8)
H3-1	4.3, 2.3, 0 (2.2)	0, 2, 0 (0.7)	0, 0.1, 0 (0)
H3-2	4.3, 3.7, 5 (4.3)	1.3, 1, 1.3 (1.2)	0.2, 0.1, 0.2 (0.2)
H3-3	3, 3.7, 0 (2.2)	0.7, 0.7, 0 (0.5)	0.1, 0.1, 0 (0.1)
Average(m)	5.11 (5.1)	1.26 (1.28)	0.23 (0.24)
Standard Deviation(σ)	3.39 (3.12)	1.22 (0.96)	0.31 (0.25)

로 동일하였다. 이와 같은 경향, 즉 평균치는 동일하나 표준편차가 증가하는 경향은 CTR 및 CSR에서도 동일하게 나타나고 있다. 이러한 결과로부터 HIC보증용으로 생산된 강재라 하더라도 위치에 따라 HIC감수성에 있어서는 커다란 차이가 있음을 확인할 수 있었는데, 그러한 감수성의 차이는 품질의 불균질성에 기인하는 것이다. 그리고 본 실험을 통하여 불균질성을 정량화함에 있어 분할면 단위에서 얻어진 표준편차가 유용하게 활용될 수 있음을 보여 주었다.

한편 선택분할을 한 경우에 있어서는, Table 6에서 보여주는 바와 같이, CLR의 최소치가 H3-1 및 H3-3 시편에서 나타난 0%이었고 최대치는 H2-3시편에서 나타난 13.3%이었다. 그리고 시편단위에서는 최소치가 2.2%, 최대치가 12%로 측정되었는데, 분할면 단위에서 측정한 결과와 유사하게 나타나고 있다. 이러한 결과에 기인하여 시편단위의 표준편차(3.12%)와 분할면 단위의 표준편차(3.39%)도 유사하였다. 이러한 경향은 CTR 및 CSR에서도 동일하게 나타나고 있다. 결국 선택분할을 한 경우에 있어서도 품질의 불균질성을 확인할 수 있었으며, 표준편차가 확대됨을 알 수 있었다. 그리고 불균질성을 평가함에 있어, 선택분할을 한 경우에는 시편단위의 표준편차 또는 분할면 단위의 표준편

차가 모두 유용할 것으로 판단된다.

4. 새로운 평가기준의 제안

균열발생율의 분포를 보다 시각적으로 보여 주기 위하여, 27개의 분할면에서 측정된 CLR값의 빈도수를 막대그래프로 그려 보았다. Fig. 1은 NACE규격에 의거하여 균등분할 한 경우인데, 절반 이상의 측정치가 0~1% 범위에 집중되어 있다. 그리고 전체적으로는 지수함수적인 분포를 하고 있다. 한편 RS규격에 의해 선택분할 하여 측정된 결과는 Fig. 2에서 보여 주고 있는데, 이는 정규분포에 가까운 모양을 하고 있다. 이를 정규분포라 가정하면, 균열발생율(X)은 평균값(m)과 표준편차(σ)에 의거하여 다음과 같이 확률(P)적으로 표현할 수 있게 된다.

$$P [m-\sigma \leq X \leq m+\sigma] = 0.6827$$

$$P [m-2\sigma \leq X \leq m+2\sigma] = 0.9545$$

$$P [m-3\sigma \leq X \leq m+3\sigma] = 0.9973$$

결국 표준편차가 작으면 작을수록 측정치가 평균치 가까이 집중되기 때문에 품질의 균질성이 확보되는 것이다. 평균치가 동일하다고 하더라도 표준편차가 크게 되면 균질성이 저하하여, 국부적으로는 평가기준을 만

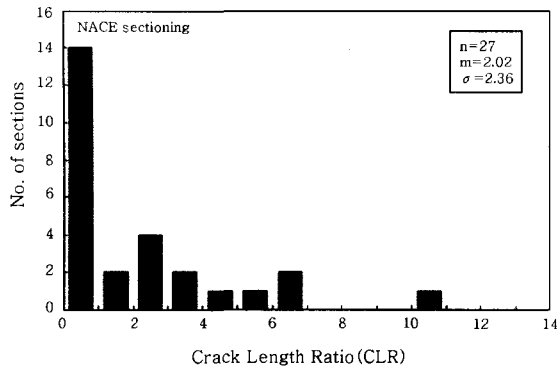


Fig. 1 Variation of CLR measured by NACE sectioning method

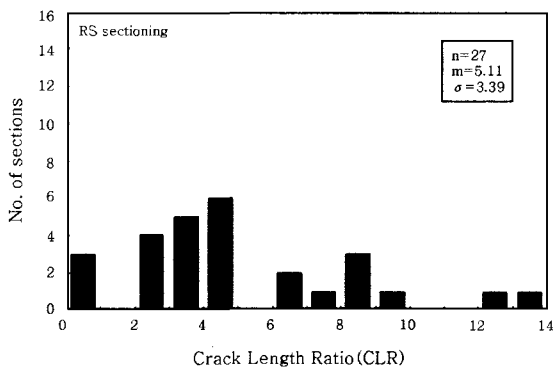


Fig. 2 Variation of CLR measured by RS sectioning method

족시키지 못하는 경우도 발생할 수 있는 것이다.

강재의 수소유기균열에 대한 저항성을 판단하는 기준으로써 시편단위의 균열발생율이 기준치 이하가 되어야 한다는 요건도 중요하지만, 이것만으로 품질의 균질성이 확보되지 않는다. 시판되고 있는 강재에 있어서 수소유기균열이 국부적으로 발생한다는 점을 고려하면, 품질의 불균질성을 고려한 새로운 기준이 필요한 것이다. 이러한 점을 고려하여 본 기술보고에서는 $m+3\sigma$ 가 기준치 이하(예를 들면 CLR의 경우 15% 이하)가 되도록 하는 새로운 기준안을 제시하고자 한다. Fig. 2의 경우에 있어서는 $m+3\sigma=5.11+3(3.39)\approx 15$ 로 계산되어, $P[CLR\leq 15\%]$ 일 확률이 99.7% 이상인 것이다. 이러한 통계적 처리는 균열발생율의 빈도수가 정규분포를 하고 있다는 가정에서 출발하고 있기 때문에 균열발생율을 측정함에 있어 선택분할 방법을 적용하여야 할 것이다.

4. 맺음말

황화수소가스를 함유한 원유 또는 천연가스 수송용으로 사용하는 강재 및 용접강관의 수소유기균열 감수성을 정량화함에 있어 CLR, CTR, CSR 등이 사용되고 있다. 그리고 사용자들은 이러한 3가지 지수의 상한치를 규정함으로써 강관의 사용적합성을 보증 받고 있다. 그런데 상한치에 대한 규정이 설계자에 따라 다양하면서도 점차 보다 엄격해 지는 경향이 있다. 이러한 경향은 실증적 근거를 가지고 진행되는 상황은 아니고, 단지 강재의 품질이 향상되면서 보다 엄격한 기준도 만족시킬 수 있었기 때문이다. 즉 강재의 수소유기균열저항성이 지속적으로 향상되면서 수요가의 요구수준이 필요 이상으로 높아지고 있는 것이다. 한편 HIC보증용 강재라고 하더라도 HIC균열이 국부적으로 발생할 수 있다는 특성을 감안하면, 기준을 하향 조정하여 보다 엄격하게 하는 것만큼이나 품질의 균질성을 확보하는 것도 매우 중요하다고 하겠다. 본 보고에서 보여 주었던 동일한 강재에서 인접한 위치에서 시편을 채취하였음에도 불구하고 HIC균열 발생 정도는 커다란 차이를 보여 주고 있기 때문이다. 따라서 향후 HIC보증용 강재를 생산함에 있어 철강회사는 품질의 균질성을 확실히 확보하여야 할 것이며, 사용자는 균질성을 온전히 검증할 수 있는 평가방법을 제시할 수 있어야 할 것이다. 본 보고에서는 평가방법의 하나로 분할면 단위에서 측정된 균열발생율의 표준편차를 활용하는 방안을 제시하였다.

참고 문헌

1. NACE Standard MR0175-93: Sulfide stress cracking resistant metallic materials for oilfield equipment, 1993, NACE, Houston, USA
2. H. J. kim, Y. R. Park, B. Y. Kang: Mechanism and characteristics of hydrogen induced cracking of welded pipe, J. of KWS, 22-1, (2004), 14(in Korean)
3. E. f. Moore and D. A. Hansen: Specifying linepipe suitable for safe operation in sour, wet service, J. Energy Resources Technology, 104-6, (1982), 134
4. Hee-Jin Kim, Yeong-Rok Park, Hoi-Soo Ryoo: Evaluation method for the resistance to hydrogen induced cracking, J. of KWS, 22-2, (2004), 106(in Korean)



· 김희진(金喜珍)
 · 1953년생
 · 한국생산기술연구원, 정밀접합용접팀
 · 용접전원파형제어, 용접재료개발
 · e-mail: kimhj@kitech.re.kr