특집 : 용접부 결함평가 방안

가스배관 원주용접부의 결함평가 기준에 대한 고찰

김 우 식

A Review for Defect Assessment Criteria of Girth Weldment in Gas Pipeline

Woo-Sik Kim

1. 서 론

가스배관 현장시공과정에서 원주용접부 결함에 대한 올바른 평가는 배관의 안전확보와 효율적 운용에 매우 중요한 분야로서, 비파괴시험으로 나타난 결함에 대한 허용수준이나 기준의 사용이 필요하다. 이 경우 작업자품질기준에 기초한 허용(WMS, Workmanship Standard)과 파괴역학에 기초한 허용(ECA, Engineering Critical Analysis)사이에 차이가 있다. 작업자품질기준은 경험이나 실험적 작업에 근거하고 있어 허용수준이 인위적이고 보수적이고, 기준이하의 결함은 아무런 고려 없이 허용된다. 만일 더 심각한 결함이 나타난 경우 거부가 항상 올바른 결정은 아닐 수 있는데, 이는 작업자기준을 벗어난 결함의 상당수가 안전에 해가되지 않은 것이며 보수한 경우가 결함을 보수하지 않고 남겨두는 경우보다 용접부 안정성에 해가 더 되는 경우가 있기 때문이다.

용접부 결함의 또 다른 선택기준으로 파괴역학에 근거한 공학적 해석기법(ECA)이 있다. 이때 결함을 포함한 용접부가 파괴를 일으키는 상황에 도달하지 않고 그 목적에 적합한가를 고려해야 한다. 이 과정은 부가적인 시험(예, CTOD)이 수행될 때 가능한데 결함의 완벽한 응력해석과 상세한 비파괴시험(결함크기와 방향에 대한 정보)이 필요하다.

본 고에서는 국내외 가스배관 건설현장의 원주용접부위 결함평가에 적용되는 작업자기준과 공학적 해석기법에 대해 알아보고, 각 규격을 비교하여 향후 평가기준 설정 방향을 모색해 본다.

2. 용접부 결함평가 기준 비교

2.1 작업자기준과 공학적 해석기법 차이

지금까지 결함이 배관이나 용접부 건전성에 미치는 영향보다는 비파괴검사기술에 연구의 초점이 있었던 것이 사실이다. 작업자기준은 매우 보수적이며 나라마

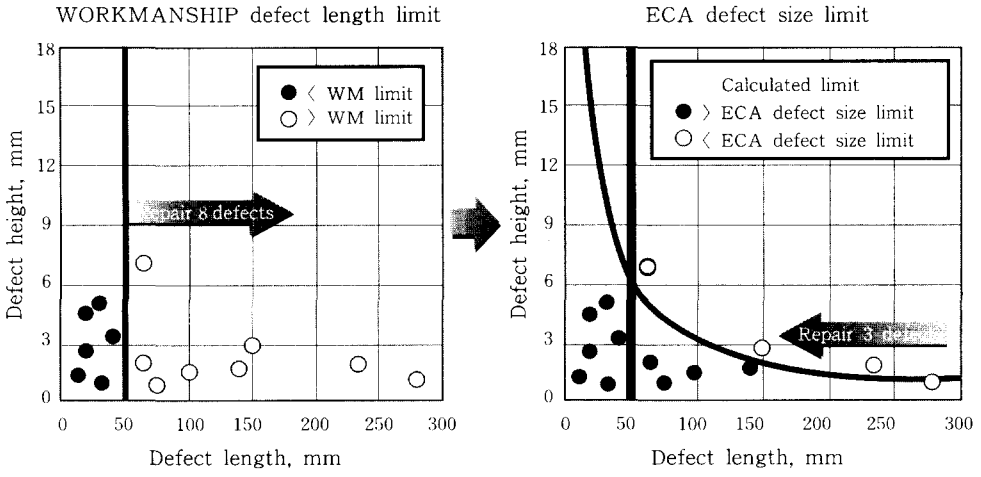

Fig. 1 Comparison between workmanship (WMS) and engineering critical assessment (ECA) defect limit (1)

다 서로 상이하다. 용접공정도 수동용접을 기본으로 하고 있으며, 재료의 용접성향상, 공정개발, 용접 소모재 발달을 감안하지 못하고 있다. 즉, 안전하기는 하지만 배관설계나 재료에 대한 기본을 반영하지 못하여 과도한 보수를 요구하고 있다. 그림 1은 작업자기준과 공학적 해석기법을 동일 결함에 적용하였을 때 보수횟수를 나타낸 것이다.

작업자기준은 사고에 의한 피해우려가 큰 지역이나 위험도가 높을 것으로 판단되는 지역에 배관을 설치하는 경우 엄격하게 적용되는 신뢰성 높은 기준으로서, 파괴역학적인 해석없이 경험에 의존하여 배관의 허용결함길이를 규정하여 보수 또는 사용 허용 여부를 결정한다. 이 기준은 배관에 작용하는 응력이나 파괴인성치 등을 고려하지 않은 채 비파괴 검사 후 검출된 결함의 길이만으로 판정함으로써 지나친 경직성 및 보수성을 내포하고 있다. 결함의 길이와 깊이를 함께 고려한 공학적 해석기법의 경우 보수할 결함의 숫자가 크게 감소할 수 있음을 그림 1에서 알 수 있다. 작업자기준을 벗어난 많은 원주용접결함들이 실제로는 배관안전에 위험을 주지 않으며, 결함을 보수하는 경우가 그대로 두는 경우보다 더 위험을 초래할 수 도 있다. 작업자기준 인자와 안전도 수준 정량화와의 관계를 재정립할 필요가 있는 것이다.

현재 배관 재료가 고인성 고강도 재질로 지속적으로 변화하고 있다. 이에 따라 배관두께가 얇아지고 작은 구경의 용접봉을 사용하는 추세이다. 이에 반해 작업자 기준은 배관관경, 배관두께, 배관등급, 용착금속 강도불일치 정도, 배관망 운용조건 등에 관계없이 동일한 기준이 적용되고 있다. 대표적인 작업자 기준으로는 API STD 1104 Section 9,(Welding of Pipelines and Related Facilities-Acceptance Standards for Nondestructive Testing)과 KS B 0845(강 용접부의 방사선 투과시험방법 및 투과사진 등급분류 방법)에 기초한 산업자원부 고시 "배관등의 용접 및 비파괴시험 기준 등이 있다. API 기준과 국내 기준의 주요내용은 표 1에 비교 수록하였다.

공학적 해석기법은 작용응력, 결함영역의 기계적 강도, 인성, 결함형상 등을 모두 고려한 방안으로서, 결함의 발생이 빈번한 특정부위에 대한 구체적인 해석기법을 개발하여 FFP형식으로 적용하는 것이 일반적이다. 초음파검사의 결과도 유용하며 파괴와 소성붕괴거동 모두를 해석할 수 있다. 현재 배관재질을 감안할 때 취성파괴는 심각한 문제는 아니다. 용접부결함은 인성보다 기계적특성(항복강도, 항복강도/인장강도)에 좌우되며 이 경우 한계하중, 소성붕괴해가 결함평가에 주효하다.

배관 원주용접부 손상은 대부분 소성붕괴이다. 미검출 용접결함이 존재할 때 재료인성이 취성파괴를 방지하도록 높아야 하므로 샤피충격요구치가 필요하다. 가스배관의 경우 설계온도(국내의 경우 40~-30℃)

Table 1 Comparison between KOREA WMS and USA WMS

구분	API 1104		KS B 0845/산자부 고시
적용 범위	• 탄소강관 저합금강관의 가스금속아크용접에 적용		• 강의 용접이음부에 적용
기 공 (porosity)	산재된 기공	• 개개의 크기가 3.17 mm 이하일 것	• 제1종 및 제4종 결함으로서 결함분류가 3류 이하일 것
	집단 기공	• 집단 기공의 직경이 12.7 mm 이하일 것	
	선형 기공	• 개개의 길이가 12.7 mm 이하일 것	
슬래그 (slag)	파이프 외경 2⅜" 이상	• 개개의 길이가 50.8 mm 이하일 것	• 제2종 결함으로서 결함분류가 3류 이하일 것
	파이프 외경 2⅜" 이상	• 개개의 길이가 공칭 벽두께의 3배 이하일 것	
균열 (cracks)	• 용접부의 크기나 위치에 관계없이 불합격		• 제3종 결함으로서 4류로 판정 (불합격)
용 락 (burn-through)	• 제개개의 길이가 6.35 mm 이하일 것 • 제용접길이 304.8 mm당 12.7mm (4.2%) 이하일 것		• 개개의 길이가 6 mm 이하일 것 • 용접길이 300 mm당 12mm (4%) 이하일 것
언더컷 (undercut)	• 제용접길이 304.8 mm당 50.8mm (16.7%) 이하일 것		• 교용접길이 300 mm당 50mm (16.7%) 이하일 것

에서 용착금속 충격에너지가 40J 이상이면 원주용접 결함에 의한 파손은 소성붕괴가 대부분이다. 인성증가가 결함크기 한계증가를 의미하지는 않는다. 이는 유동응력과 결함크기에 대한 작용응력의 관계를 나타내는 소성붕괴 수식에 인성인자가 포함 안되기 때문이다. 배관 원주용접부의 공학적 해석기법은 비교적 단순하다. 파괴조건이 인성보다는 배관 두께나 관경 같은 기하학적 재료특성에 의해 조절되기 때문이다.

2.2 결함평가 관련 규격 비교

현재 각국의 규격으로 존재하는 공학적 해석기준들은 서로 다른 접근방식과 입력인자들을 갖고 있어 동일사안에 대해 서로 다른 결과를 제시하고 있다. 이는 배관운용회사들에게 혼동을 유발시킬 수 있는 사안으로 많은 ECA 방안이 제거되고 가능하면 한가지 방법으로 대체가 되어야 한다.

표 2에 현재 사용중인 주요 결함평가 규격들의 적용한계를 나타내었다. 표에서 서로 다른 가정과 적용대상을 갖고 있음을 알 수 있다. 용접잔류응력이나 잔류변형의 입력요소가 허용결함크기나 필요한 CTOD 파괴인성 값의 변화에 대한 주요인 이다.

CSA Z184방안은 잔류응력에 대한 고려가 없다. 이는 실험에 근거하고 있는데 잔류응력에 대한 영향은 깊이 있는 논의가 필요하다. 또한 결함이 평가될 수 있는 응력의 범위가 차이가 있다. BS4515와 CSA Z184방법은 항복응력을 넘는 응력을 허용하지 않는 반면에 PD6493평가는 이론적으로 더 높은 응력을 허용하지만 소성붕괴과정 때문에 응력은 항복점 이하를 유지해야만 한다. API 1104 에서는 변형이 0.6%까지 다루고 WES 2805는 작용변형에 대한 명확한 제한은 없다. 또한 대부분의 규격이 기본적으로 제한된 양의 소성변형으로 선탄성 파괴역학에서 유추된 것이다. 따라서 결함이 더 큰 변형(즉 1% 이상)에 직면한다면 다른 방법에 의한 평가가 필요하다. 용접부 접합효과 즉 용착금속과 모재사이의 다른 응력-변형관계는 대부분 방안에서 고려되지 않고 있다. 용착금속 항복강도 불일치, 항복강도/인장강도 비와 같은 용접부 특성에 대한 연구도 반드시 필요한 분야이다.

BS4515와 API1104는 가장 단순한 방법이며 따라서 일반적으로 (항상은 아니다) 더 보수적이다. 그렇다고 현재 사용중인 여러 규격 중 어느 방법도 제외시킬 수는 없다. 여러 방법에 대한 결과검토가 이루어져야 한다. 유한요소해석에 기반한 것은 반드시 실험으로 검증을 해야 하는데 특히 실크기 배관시험(full scale pipe test) 데이터가 필요하다. 실험적 접근이 즉시 활용 가능한 유용한 정보를 제공한다는 것과 배관재료와 운용조건이 이론과 항상 일치하지 않는다는

Table 2 Application limits of different assessment methods

	Modif. COD-model	Line-spring	PD 6493	WES 2805	CSA Z184	API 1104	BS 4515
Application							
	plates	plates	plates	plates	-	-	-
	-	pipes	pipes	pipes	pipes	pipes	pipes
Dimensions							
Thickn.	-	-	t〉10mm	-	-	-	10〈t〈30mm
Diam.	-	-	-	-	-	-	〉200mm
Stresses							
Yield str.	-	-	-	-	-	-	〉250 MPa 〈500 MPa
Resid. str.	-	-	〉0.	variable	0.	yield str.	yield str.
Defect							
Surface	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
Buried	no	no	yes	yes	yes	yes	yes
Max. depth	-	-	plast. collapse	0.5t	0.5t	0.5t	3mm
Max. length	-	-	-	-	0.1D	0.4D	-

Table 3 Comparison of different assessment methods

ECA (Girth Weld Defect)	API 1104 App. A	BS 4515 App. H	CSA Z662 App. K	BSI PD6493	WES 2805
Brittle Fracture					
CTOD	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Max. applied stress	0.5% axial strain	SMYS	1.03 SMYS	-	-
Plastic Collapse					
Plastic collapse assessment	No	Yes	Yes	Yes	No
Flow stress	No	1.1 SMYS	SMYS	1.2 SMYS	No
Criterion	No	Willoughby	CSA Method	BSI Method	No
Max. Defect Size					
Length.	0.4 D	0.016 Dt	0.1πD	-	-
Depth.	0.5 t	3.5mm	0.5t	-	-

것을 감안하여야 한다.

표 3은 각 평가방법들에서 적용하고 있는 원주용접부 결함평가 방안에 대한 비교를 나타낸 것이다. 취성파괴의 평가방법으로 균열선단개구변위(CTOD)는 모두 적용하고 있으며 최대작용응력은 차이가 있다. 최근에 개발된 강관의 파괴거동은 소성붕괴형태를 나타내는데, 각 평가방안들 중 BS 4515, BSI PD 6493, CSA Z662 등은 소성붕괴평가를 적용하고 있으며, 이 경우에도 평가기준은 각각 다르다. 표에서 최대 결함크기 면에서도 각 규격은 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다.

2.3 결함평가 방안의 적용[5)]

결함평가 방안에 의해 평가될 수 있는 결함은 우선 평면 결함으로 균열, 융합 부족, 용입불량, 언더컷, 루트 언더컷, 콘케비티(오목한 부분), 오버랩 등이 있고, 비평면 결함으로 케비티와 고체 게재물이 있으며, 형상의 불완전으로 미스얼라인먼트와 불완전 외형이 있다. 분석 가능한 파괴형태로는 단순파괴, 피로파괴, 잔존 단면의 과부하에 의한 항복, 저장용기의 누설, 부식, 침식, 부식피로, 응력부식 파괴, 불안정성(버클링), 크립 또는 크립과 피로의 상호작용 등이 있다.

기준을 이용한 분석을 하기 위해서는 다음과 같은 단계를 거친다.

(a) 결함의 형태를 분류한다. 즉 평면, 비평면, 형태
(b) 특정한 구조물과 연관되는 필수자료를 설정한다.
(c) 결함의 크기를 결정한다.
(d) 다음의 만족도(acceptability)를 결정한다.
  (1) 단순파괴, 잔존 단면부의 과부하에 의한 항복, 누설, 부식/침식, 응력부식, 버클링의 최종 파손형태에 대한 한계 크기를 결정한다.
  (2) 구조물의 설계수명 내에서의 피로, 틈부식, 부식피로, 크립균열성장, 크립과 피로의 상호작용의 부가한계 균열성장(sub-critical crack growth) 메카니즘에 의해 위에서 결정한 한계크기까지 도달할 것인가를 평가한다.
  (3) 만약 안전계수를 포함하여 결함이 한계크기까지 성장하지 않는다면 구조물은 안전하다.

분석에 필요한 입력정보는 재료의 변형, 열이력, 적절한 환경조건이 고려돼야 한다. 평가에는 수송, 설치, 시험 시에 발생하는 하중을 포함하는 모든 하중이 고려 되야 한다. 어떤 경우에는 과실이나 사고조건까지 고려하는 것이 필요하며, 국부하중 및 미스얼라인먼트(misalignment)에 의한 하중의 효과까지 고려되어야 한다. 또한 다음과 연관된 자료가 필요하다.

(a) 결함의 위치 및 방향
(b) 구조 및 용접 기하학적 구조, 용접 절차서
(c) 응력과 천이를 포함하는 온도
(d) 항복 또는 0.2% 강도, 인장강도, 탄성계수(어떤 경우에는 완전한 엔지니어링 응력/변형 곡선이 필요하다.)
(e) 피로/부식피로 S/N과 균열 성장 자료
(f) 파괴인성(K_{IC} 또는 CTOD) 자료 (어떤 경우에는 샤르피 V노치 자료 혹은 J-contourinteg-

ral 시험으로부터 평가한다.)

(g) 크립 파괴(rupture), 크립균열성장과 크립피로 자료

(h) 부식과 응력부식균열파괴($K_{I\,SCC}$) 자료

정량적인 균열의 크기와 형태가 요구되는 목적에의 부합성 평가 측면에서 비파괴검사는 필수적이다. 그러한 정보에는 결함 길이, 결함 높이, 결함 위치, 주응력 방향에 대한 결함 방향, 단면의 평면 또는 비평면 여부의 전부 또는 일부가 포함된다.

2.4 원주용접부 건전성 평가

가스배관 원주용접부 건전성 평가시 고려해야될 사항은 결함의 위치와 크기, 재료 특성, 배관운용조건 등이다. 이와 함께 결함검출능력, 용접공정, 배관사양, 배관설계조건 등도 감안해야만 한다. 결함길이만을 검토하는 작업자기준와는 달리 결함의 길이, 높이, 위치 등을 모두 감안하는 공학적 해석기준의 사용적합성평가는 각종 실험데이터에 근거한 결함평가를 수행한다. 이때 입력인자로서는 용접강도 불일치, 항복강도/인장강도 비, 배관두께, 검사기술, 피로, 결함상호작용 등이며, 취성파괴와 소성붕괴에 대한 평가를 수행해야 한다.

원주용접부 결함허용 기준에서 고려해야 될 사항으로 용착금속의 강도가 있다. 일반적으로 용접된 배관이 모재의 항복강도을 넘어야 되기 때문에 용착금속의 인장특성이 더 크게(overmatch) 설계된다. 만일 용착금속이 더 낮은(undermatch) 인장특성을 보인다면 소성변형은 용착금속에 집중될 것이다. 용착금속이 낮은 인성을 갖은 상태에서 결함이 포함되어 있다면 이는 용접부의 취성파괴 위험성을 내포하고 있는 것이다. 대체로 배관은 소성변형이 적용되도록 설계되지 않으며, 내압은 배관항복강도보다 작은 응력이 배관재료에 걸리도록 한다(보통 72%SMYS). 배관에서 원주용접부의 길이방향응력은 원주방향응력의 절반이므로 원주용접부는 작용응력의 결과로 소성변형되지는 않을 것이다. 그러나 해양 배관들은 설치나 운용중에 소성변형되는 경우가 있는데 이 경우 overmatch의 필요성이 분명해진다.

강도적불균질 정도에 대한 측정기술은 통용되는 것이 아직 없는 상태이다. 배관 인장특성은 원주방향 판상 시험편으로 시험하며 용접부 인장시험은 원주방향으로 봉상시험편 전체가 용접부가 되록록 하여 실시하고, 용접부를 가로지르는 인장시험은 배관 길이방향의 판상시험편으로 실시한다. 배관 항복강도는 길이방향에서 더 작으며, 전체가 용접부인 시험편은 용접부 단면의 일 부분만을 나타내고, 용접부를 가로지르는 인장시험은 용착금속 항복강도를 측정할 수는 없다. 용접부 인장특성을 시험하는 많은 제안이 있지만 아직 규격이나 시험 기준으로 받아들여지는 것은 없는 상태이다[7].

Denys는 배관 원주용접부의 용착금속 항복강도의 변화에 대해 소형 광폭판상시험을 실시하였다[8]. 그 결과 통상적인 배관 항복강도 분포(SMYS+120MPa)에서는 용착금속 항복강도가 SMYS+80MPa가 적당하며, 배관 항복강도가 SMYS+80MPa인 경우에는 용착금속 항복강도는 SMYS+53MPa가 타당하다고 제안하였다.

캐나다 Nova 가스에서는 X80등급배관의 용착금속 항복강도를 배관보다 낮게 설계한 바 있다[9]. 용착금속의 높은 강도를 위해 고합금 용접 소모재를 사용하면 인성과 균열저항성이 낮아 질 수 있다는 사항을 고려한 결과이다. 원주 용착금속의 약간 낮은 항복강도는 결함이 작고 작용응력이 탄성이며 용접부가 좋은 인성을 갖는 상태에서 문제가 되지는 않는다. 그러나 해양배관과 같이 변형기준 설계의 경우에는 이러한 접근은 맞지 않는다. 작용변형, 재료인성, 허용결함크기간의 상호작용에 대한 고려가 있어야 한다. 따라서 점차 고강도 대구경화 되어 가는 추세에 있는 가스배관의 경우 설치 지역의 환경에 따라 용접공정의 선택과 용접부위 결함허용기준 적용 코드의 적용에 대한 검토가 반드시 필요하다.

3. 요 약

결함평가에 사용되는 작업자기준과 공학적 해석기준에 대한 비교와 각국에서 가스배관 원주용접부 결함평가에 사용하는 규격에 대한 검토를 수행하였다. 우리나라 가스배관 시공에는 API 1104를 기준으로 사용하고 있으며, 결함평가기준은 KSB 0845를 따르고 있다. 가스배관 용접부에 대해 안전성과 효율성이 겸비된 새로운 결함평가방안을 구축하기 위해 실배관 파열시험 및 대변형시험이 국내외에서 지속적으로 수행하고 있다.

참 고 문 헌

1. Denys, R.M., Pipe Line & Gas Industry (September 1999), 35
2. Scott, P.M., Canadian Metallurgical Quarterly, 32-3(1993), 223
3. Americal Petroleum Institute, API Standard 1104,

Appendix A(1995)
4. Canadian Standards Association, CSA Z662, Appendix K(1996)
5. BSI-PD6493(1991)
6. Knauf, G. and P. Hopkins, 3R International, 35, 10-11(1996), 620
7. Denys, R.M., Proc. of the Second International Conference on Pipeline Technology, Ostend 11-14 (Sep 1995), 591
8. Denys, R.M., Proc. of the Second International Conference on Pipeline Technology, Ostend 11-14 (Sep 1995), 555
9. Glover A.G., Horsley D and Dorling D.V., Proc. of the Second International Pipeline Conference, Alberta Canada 7-11 (June 1998), 659

• 김우식(金愚植)
• 1963년생
• 한국가스공사 연구개발원
• 배관 파괴거동 및 건전성평가
• email: wskim@kogas.re.kr