

가스배관 원주용접부의 결함평가 기준에 대한 고찰

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

김우식, 고영태

한국가스공사 연구개발원, 경기도 안산시

1. 서론

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

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

2. 본론

2-1. 작업자기준과 공학적해석기법 차이

지금까지 결함이 배관이나 용접부 건전성에 미치는 영향보다는 비파괴검사기술에 연구의 초점이 있었던 것이 사실이다. 작업자기준은 매우 보수적이며 나라마다 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 공학적해석기법을 동일 결함에 적용하였을 때 보수횟수를 나타낸 것이다. 배관 용접부에 발생한 결함의 깊이만을 감안하는 작업자기준에 비해 결함의 길이와 깊이를 함께 고려한 공학적해석기법의 경우 보수할 결함의 숫자가 크게 감소할 수 있음을 알 수 있다. 작업자기준을 벗어난 많은 원주용접결함들이 실제로는 배관안전에 위험을 주지 않으며, 보수하는 경우가 더 위험을 초래할 수도 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.

이에 반해 공학적해석기법은 작용응력, 결함영역의 기계적 강도, 인성, 결함형상 등을 모두 고려한 방안이다. 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 샤프트충격요구치가 필요하다. 가스배관의 경우 설계온도(국내의 경우 40~-30℃)에서 용착금속 충격에너지가 40J 이상이면 원주용접결함에 의한 파손은 소성붕괴가 대부분이다. 인성증가가 결함크기 한계증가를 의미하지는 않는다. 이는 유동응력과 결함크기에 대한 작용응력의 관계를 나타내는 소성붕괴 수식에 인성인자가 포함 안되기 때문이다. 배관 원주용접부의 공

학적해석기법은 비교적 단순하다. 파괴조건이 인정보다는 배관 두께나 관경 같은 기하학적 재료특성에 의해 조절되기 때문이다.

2-2. 결함평가 관련 규격 비교

현재 각국의 규격으로 존재하는 공학적해석기준들은 서로 다른 접근방식과 입력인자들을 갖고 있어 동일사안에 대해 서로 다른 결과를 제시하고 있다. 이는 배관운용회사들에게 혼동을 유발시킬수 있는 사안으로 많은 ECA방안이 제거되고 가능하면 한가지방법으로 대체가 되어야 한다.

표 1에 현재 사용중인 주요 결함평가 규격들의 적용한계를 나타내었다. 표에서 서로 다른 가정과 적용대상을 갖고 있음을 알 수 있다. 용접잔류응력이나 잔류변형의 입력요소가 허용결함크기나 필요한 CTOD파괴인성값의 변화에 대한 주요인이다. CSA Z184방안은 잔류응력에 대한 고려가 없다. 이는 실험에 근거하고 있는데 잔류응력에 대한 영향은 깊이있는 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 선단성파괴 역학에서 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 규격중 어느 방법도 제외시킬 수는 없다. 여러방법에 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 것을 감안하여야 한다.

2-3. 원주용접부 건전성 평가

가스배관 원주용접부 건전성평가는 위에서 명기한 여러 규격의 결함평가방안에 기초하고 있다. 이때 고려해야될 사항은 결함의 위치와 크기, 재료 특성, 배관운용조건 등이다. 이와 함께 결함검출능, 용접공정, 배관사양, 배관설계조건 등도 고려해야만 한다. 결함길이만을 검토하는 작업자기준(WMS)와는 달리 결함의 길이, 높이, 위치 등을 모두 감안하는 공학적해석기준(ECA)의 사용적합성평가(Fitness-for-purpose)는 각종 실험데이터에 근거한 결함평가를 수행한다. 이때 입력인자로서는 용접 강도 불일치, 항복강도/인장강도 비, 배관두께, 검사기술, 피로, 결함상호작용 등이며, 취성파괴와 소성붕괴에 대한 평가를 수행한다.

3. 요약

결함평가에 사용되는 작업자기준과 공학적해석기준에 대한 비교와 각국에서 가스배관 원주용접부 결함평가에 사용하는 규격에 대한 검토를 수행하였다. 우리나라 가스배관 시공에는 API 1104를 기준으로 사용하고 있는데, 현재 가스배관 용접부에 대한 실패관 파열시험 및 대변형시험을 통해 결함 평가방안에 대한 검증작업을 지속적으로 수행하고 있다. 이를 통해 안전성과 효율성이 겸비된 새로운 결함평가방안을 구축할 계획이다.

4. 참고문헌

- 1) Denys, R.M., Pipe Line & Gas Industry, September (1999) 35
- 2) Scott, P.M., Canadian Metallurgical Quarterly, Vol 32, No. 3, 91993) 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

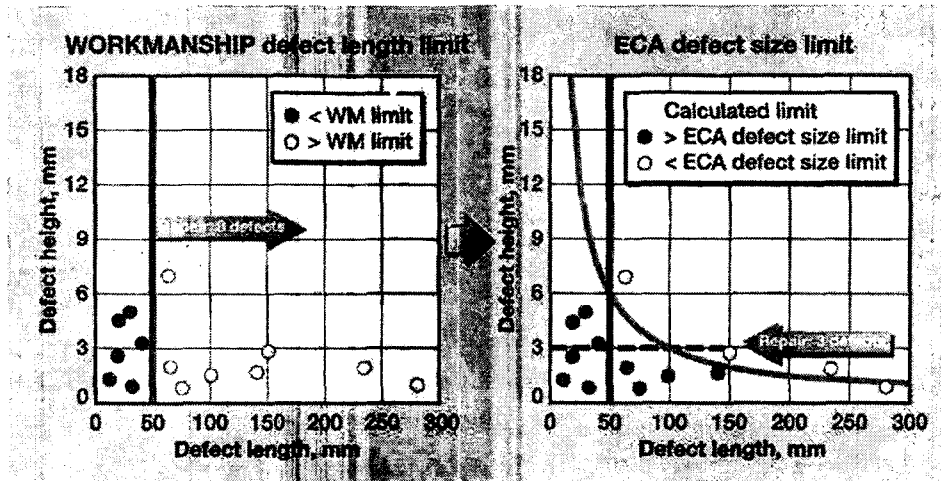


Fig. 1. Comparison between workmanship (WMS) and engineering critical assessment (ECA) defect limit (1)

Table1. 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.	-	-	$t > 10\text{mm}$	-	-	-	$10 < t < 30\text{mm}$
Diam.	-	-	-	-	-	-	$> 200\text{mm}$
Stresses							
Yield str.	-	-	-	-	-	-	$> 250\text{MPa}$ $< 500\text{MPa}$
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	-