

배관용접 부위의 균열형 결함에 대한 손상평가도에 의한 사용적합성 평가 Fitness-for-service for crack-like flaws of pipeline weldment using failure assessment diagram.

백중현, 김영표, 김우식
한국가스공사 연구개발원 배관연구센터

1. 서 론

천연가스 배관의 운용 및 유지보수시 배관 파괴와 변형에 대한 안전성과 최적의 운용조건 결정에 따른 경제성을 확보하기 위하여 우선적으로 정립되어야 하는 것은 파괴역학에 바탕을 둔 손상평가도(FAD, Failure Assessment Diagram)이다. 파괴역학의 주요 구성인자인 재료의 파괴인성, 작용응력, 결함의 크기에 대한 정확한 정보로 구성되는 손상평가도를 확립할 경우, 사용적합성(FFS, Fitness-for-Service)에 대하여 효과적이고 용이하게 평가를 내릴 수 있다. 손상평가도(FAD)는 선형파괴역학이 성립하는 취성영역으로부터 소성붕괴영역까지의 모든 파괴가능성에 대하여 응력확대계수와 작용하중의 변수를 대입하여 평가할 수 있는 방법이다. 손상평가도에 대한 산업계에서의 사용은 1976년 영국의 중앙전력청에서 사용된 R6 [1]이며, 이후 Published Draft 형태로 1980년 PD 6493이 BSI에서 발간되었고 [2], 이에 대한 개정판이 1991년 [3] 출간된 이후 1999년에는 정식 규격으로 BS 7910이 제정되어 석유 및 가스설비의 사용적합성 평가에 사용되고 있다 [4]. 미국에서는 ASME Sec. XI에서 [5] 원자력설비에 대한 결함평가 절차 및 사용적합성 평가과정을 나타내고 있으며 석유화학설비에 대한 사용적합성 평가는 API에서 API RP 579를 제정하고 사용하고 있다 [6]. 일본에서는 원전설비에 대한 사용적합성 평가 code를 2000년에 일본기계학회와 일본고압협회가 공동으로 연구하여

사용하고 있으며 [7], 또한 일본용접학회에서 제정한 용접부에 대한 결함평가법인 WES 2805가 1976년 초판이 제정된 이후 1980년 부분 수정을 거쳐 최신판은 1997년도에 출판되었다 [8]. 중국에서는 1985년에 CVDA-84가 [9] 압력용기에 대한 결함평가법으로 제정되고 1990년에 5개간 국가연구과제를 통하여 1995년에 SAPV-95가 [10] 제정되어 사용되고 있다. 프랑스에서는 원전설비에 대한 결함평가법으로 RSE-M code가 제정되어 사용되고 있다 [11]. 이러한 사용적합성 평가법이 국외에서는 Standard 또는 code화하여 결함 발견시나 가동조건의 변환시 구조물의 사용적합성을 확보하기 위하여 많이 사용하고 있다. 초기에 구조물의 특성을 고려한 손상평가도를 구축하기는 많은 노력을 요하지만 일단 확보된 후에는 구조물의 결함발견시 결함크기와 응력값을 대입하면 손쉽게 구조물의 파괴에 대한 안전성을 평가할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 외경 30인치, 두께 17.5 mm인 API 5L X65등급인 가스배관 모재와 심 및 원주 용접부에 대하여 국내 배관 환경 및 운용조건에 맞게 개발된 3단계의 평가단계로 이루어진 KOFAD (KOgas Failure Assessment Diagram)로 명명된 손상평가 절차를 확립하였으며, 이를 활용하여 천연가스배관의 사용적합성 평가방안을 구축하였다.

2. 실험방법

천연가스 배관의 사용적합성 평가를 위해서는

결함이 존재하는 부위의 인장물성 및 파괴인성 평가가 수행되어야 한다. 천연가스 배관은 길이 방향으로 심용접부와 원주 방향으로 원주용접부를 포함하고 있으며, 이들 용접부는 모재, 용착금속, 열영향부의 세 영역으로 구성되어 있다. 모재에 대해서는 상,중 및 하층부에서 인장 시험편을 채취하였고, 시험편 크기는 ASTM E8-91을 따라 게이지 길이가 25mm인 판상 인장 시험편을 사용하여 인장시험을 수행하였다. 열영향부는 모재와 용착금속에 비해 그 영역이 협소해 원주용접부와 심용접부에서 용착금속 정중앙에서 시작해 0.5mm 간격으로 세등분하여 게이지 길이 12.5mm인 인장시험편을 채취하였다. 손상평가도의 Y축을 작성하기 위해서 평가대상 재료의 파괴인성이 요구된다. 이는 손상평가도의 y축 좌표를 나타내는 K_{Ic} 값이 K/K_{mat} 로 정의되므로, 분모항으로 파괴인성인 K_{Ic} 값이 사용된다. 본 연구의 대상물인 천연가스 배관은 지름 762mm, 두께 17.5mm로 반경에 비해 두께가 상대적으로 얇아서 ASTM E399에서 제시하고 있는 규격으로 K_{Ic} 시험이 불가능하다. 따라서 K_{Ic} 시험을 대체하기 위해 CTOD 시험을 BS 7448 규격에 따라 시험편을 제작하였다. CTOD 시험시 인장물성 평가와 유사하게 원주용접부와 심용접부의 결함 발생 가능 부위별로 시험을 수행하였으며 배관 두께 방향으로의 압연에 의한 물성변화를 고려해 주기 위해 균열침단의 위치별로 시험을 수행하였다.

3. 실험결과

배관의 모재 부위의 상층과 하층은 인장강도는 오차범위 5% 이하로 겹치므로, 하나의 대표 진동력-진변형률 곡선으로 간주해 안전성 평가에 적용하였다. 중앙부의 경우, 상층부와 하층부보다 인장강도와 항복강도가 낮기 때문에 중앙부의 인장곡선을 또 다른 하나의 대표 인장곡선으로 설정해, 결함이 이 영역에 있을 때 중앙부 대표 인장곡선을 이용하였다. 따라서 결함이 모재 부분에 존재하며 배관 두께의 1/3 이하의 내·외부 표면결함일 경우와, 모재 내의 내부결함이나 배관 두께의 1/3 이상의 내·외부 결함의 경우 다른 인장곡선을 대표곡선으로 사용하였다. 용착금속의 인장시험 결과로부터 원주용접부의 용착금속과 심용접부의 용착금속은 인장곡선이 상이하였다. 따라서 원주용접부의 용착금속에 결함이 존

재할 경우와 심용접부의 용착금속에 결함이 존재할 경우에 대한 대표 인장곡선을 각각 따로 사용하였다. 열영향부의 인장시험으로부터 원주용접부의 상·중·하에서 열영향부의 대표인장곡선과 심용접부의 상·중에서 열영향부의 대표인장곡선을 얻었다. 열영향부 대표 인장곡선은 열영향부가 모재와 용착금속에 비해 상대적으로 취약한 점을 감안해 사용적합성 평가시 안전성을 높이기 위해서 각각의 영역에 해당하는 여러 열영향부 인장곡선 중 항복강도가 가장 낮은 인장곡선을 선택하였다. CTOD 시험을 통한 파괴인성 시험 결과 모재부, 용접부, 열영향부위의 파괴인성치는 다른 값을 나타내고 있었다. 따라서 손상평가를 작성하기 위해서는 결함위치에 존재하는 파괴인성치를 사용하였다. 이상의 인장물성치와 파괴인성 데이터를 사용하여 API 5L X65 배관에 결함이 존재할 경우 결함깊이, 위치, 방향별로 가스 배관에 대한 사용적합성 평가를 실시 할 수 있으며 그림 1은 외경 30인치 두께 17.5 mm인 API 5L X65 배관에 배관길이 방향으로 900mm, 깊이 8.75mm인 반타원형 결함이 존재할 경우에 대한 사용적합성 평가를 가장 높은 단계인 STEP 3에서 실시하고 운영압력을 초기 설정치 10 MPa에서 11, 12, 13, 및 14 MPa로 증가함에 따른 결함의 위험성을 평가하는 민감도 해석을 실시한 결과이다. 가스배관의 운전압력이 12 MPa를 지나면 배관의 사용적합성은 위험해지는 단계로 진행됨을 알 수 있다. 그림 2와 3은 운전압력이 12 MPa 이고 결함의 조건이 그림 1과 같을 경우 균열형 결함이 배관 모재부와 열영향부에 위치함에 따른 사용적합성 평가 결과를 나타낸 것이다. 모재부에 결함이 존재할 경우에는 안전한 평가를 나타내나 용접 열영향부위에 존재하면 결함은 위험한 단계로 전이됨을 알 수 있다.

4. 결 론

국내 운용중인 천연가스 수송용 배관인 API 5L X65 배관에 대한 사용적합성 평가를 실시하였으며, 결함 위치에 따른 평가의 정확성을 기하기 위하여 배관의 인장강도, 항복강도, 용력-변형선도, 파괴인성치를 배관 모재부에 용접부 및 열영향부에서 구하였으며, 본 연구에서 개발한 프로그램에서는 배관물성 또는 운전조건을 변화시켜 그에 따른 민감도 해석이 가능한 KOFAD

프로그램을 개발하였다. 또한 결함 평가를 위해서는 평가대상 위치의 정확한 인장물성과 파괴인성을 사용하여야만 정확한 사용적합성 평가가 이루어진다.

참고문헌

[1] R6, Assessment of the Integrity of Structures containing defects., R6 : CEGB Report R/H/R6, 1976; Revision 1, 1977; Revision 2, 1980; Revision 3, 1986.

[2] BS PD 6493, Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints. British Standards Institution, London, 1980.

[3] BS PD 6493, Guidance on Methods for assessing the Acceptability of flaws in Fusion Welded structures. British Standards Institution, London, 1991.

[4] BS7910, Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures, British Standards Institution, 1999.

[5] ASME Boiler & Pressure Vessel code, Section XI, 1998.

[6] API Recommended Practice 579, First Edition, January 2000, American Petroleum Institute, 2000.

[7] MITI Notification No. 501, Technical standard for nuclear power plant components, 1980.

[8] WES 2805, Method of Assessment for Flaws in Fusion Welded Joints with Respect to Brittle Fracture And Fatigue Crack Growth, Japan Welding Engineering Society, 1997.

[9] Drafting group of CVDA-84, Procedure of Pressure Vessel Defect Assessment, Press Vess Technol, 1985;1(1):1.

[10] SAPV-95, Safety Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, 1995.

[11] RSE-M code, Rules For in-Service Inspection of Nuclear Power Plant Component, 1997, AFCEN, Paris.

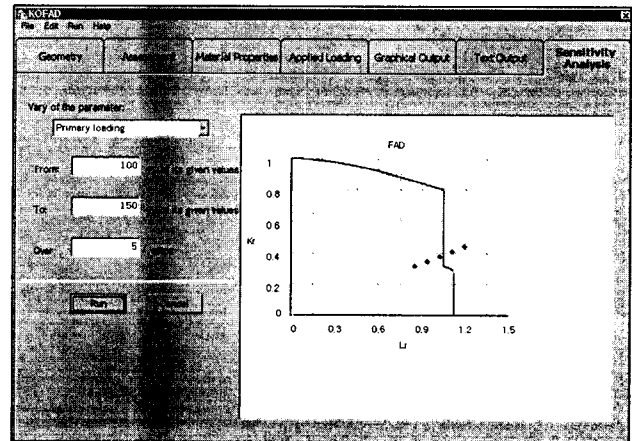


Fig. 1. Sensitivity analysis on the defect in the base metal.

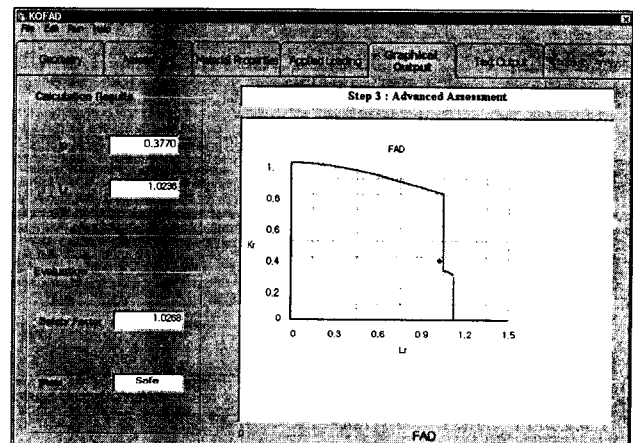


Fig. 2. Result of failure assesment on the base metal.

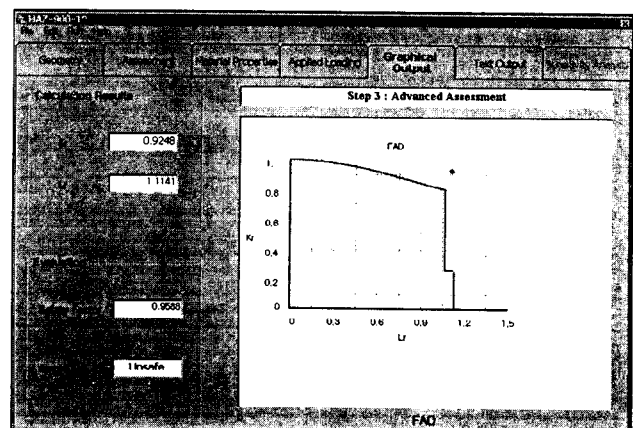


Fig. 3. Result of failure assesment on the HAZ of seam weld.