

손상평가도에 의한 가스배관의 균열형 결함에 대한 사용적합성 평가

백중현, 김영표, 김우식
한국가스공사 연구개발원 배관연구센터

Fitness-for-Service for Crack-like Flaws of Natural Gas Pipeline Using Failure Assessment Diagram.

Jong-hyun Baek, Young-pyo Kim, Woo-sik Kim
Pipeline Technology Center, R&D Div., KOGAS

1. 서론

천연가스 배관의 운용 및 유지보수를 수행할 때 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. 파괴역학이 발달하기 전에는 주로 천이적 접근법을 사용하였다. 이는 구조물 건설 전에 최소요구 충격인성 및 천이거동을 평가하는 것으로 샤피충격에너지값으로 대표된다. 현재는 파괴역학을 대부분 사용하는데, 파괴역학의 주요 구성인자인 재료의 파괴인성, 작용응력, 결함의 크기에 대한 정확한 정보로 구성되는 손상평가도를 확립할 경우, 천연가스 배관의 사용적합성(FFS, Fitness-for-Service)에 대하여 효과적이고 용이하게 평가를 내릴 수 있다. 이는 배관의 안전성을 확보하고 안전도에 대한 여유분(Margin of Safety)을 정량적으로 평가함에 따라 배관의 경제적인 운용이 가능하다는 큰 장점을 갖고 있다.

손상평가도(FAD)는 선형파괴역학이 성립하는 취성영역으로부터 소성분괴영역까지의 모든 파괴가능성에 대하여 응력확대계수와 작용하중의 변수를 대입하여 평가할 수 있는 방법이다. 손상평가도에 대한 산업계에서의 사용은 1976년 영국의 중앙전력청 (Central Electricity Generating Board, CEGB)에서 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 산업설비의 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 제정하여 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 5개년 국가연구과제를 통하여 1995년에 SAPV-95가 [10] 중국표준으로 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 API 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 손상평가도를 제시하고, 이를 활용하여 천연가스배관의 사용적합성 평가방안을 구축하고자 한다.

2. 실험방법

천연가스 배관의 사용적합성 평가를 위해서는 결함이 존재하는 부위의 인장물성 및 파괴인성 평가가 수행되

어야 한다. 본 연구의 안전성 평가 대상물인 API 5L X65 천연가스 배관의 경우, 압연된 판재를 용접과정을 통해 제작하므로 인장물성 평가에 있어 압연시 나타나는 표면의 물성 변화 및 용접에 의한 물성변화를 고려해야 한다. 천연가스 배관은 길이 방향으로 심용접부와 원주 방향으로 원주용접부를 포함하고 있으며, 이들 용접부는 모재, 용착금속, 열영향부의 세 영역으로 구성되어 있다. 따라서, 영역별 인장물성의 대표값을 결정하는 것은 손상평가도 이용에 있어 필수 사항이다. 모재에 대해서는 상,중 및 하층부에서 인장 시험편을 채취하였고, 시험편 크기는 ASTM E8-91을 따라 게이지 길이가 25mm인 subsize 관상 인장 시험편을 사용하여 인장실험을 수행하였다. 배관의 원주 및 심용접부에서는 용접부 제작시 불가피하게 재료에 열이 가해져 미세조직의 변화가 생기게 되고, 이로 인해 용착금속과 모재 사이에 열영향부가 존재한다. 경우에 따라서 열영향부의 강도와 인성이 주변보다 감소하기 때문에 열영향부에 결함이 존재하게 되면 위험도가 더 높을 수 있다. 따라서 열영향부에 결함 존재 시 기존에는 용착금속이나 모재의 인장물성을 사용한다. 반면, 열영향부의 인장물성을 정확히 평가하고 대표인장곡선을 얻는 것이 결함에 대한 안전성 평가에 있어 매우 중요한 작업이다. 열영향부는 모재와 용착금속에 비해 그 영역이 협소해 게이지 길이 25mm의 subsize 인장시험편의 채취가 불가능하다. 이에 본 연구에서는 그림 1-a와 같이 원주용접부와 심용접부에서 용착금속 정중앙에서 시작해 0.5mm 간격으로 세등분하여 게이지 길이 12.5mm인 마이크로 인장시험편을 채취하였다. 손상평가도를 작성하기 위해서 평가 대상 재료의 파괴인성이 요구된다. 이는 손상평가도의 y축 좌표를 나타내는 K_{IC} 값이 K/Kmat로 정의되므로, 분모항으로 파괴인성인 K_{IC} 값이 사용된다. 본 연구의 대상물인 천연가스 배관은 지름 762mm, 두께 17.5mm로 반경에 비해 두께가 상대적으로 얇아서 ASTM 399에서 제시하고 있는 규격으로 K_{IC} 시험이 불가능하다. 따라서 K_{IC} 시험을 대체하기 위해 CTOD 시험을 BS 7448 규격에 따라 그림 1-b와 같이 제작하여 수행하였다. CTOD 시험 시 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 진응력-진변형률 곡선으로 간주해 안전성 평가에 적용이 가능하다. 중앙부의 경우, 상층부와 하층부보다 인장강도와 항복강도가 낮기 때문에 중앙부의 인장곡선을 또 다른 하나의 대표 인장곡선으로 설정해, 결함이 이 영역에 있을 때 중앙부 대표 인장곡선을 이용 하였다. 따라서 결함이 모재 부분에 존재하며 배관 두께의 1/3 이하의 내·외부표면 결함일 경우와, 모재 내의 내부결함이나 배관 두께의 1/3 이상의 내·외부 결함의 경우 다른 인장곡선을 대표 곡선으로 사용하였다. 용착금속의 인장실험 결과로부터 원주용접부의 용착금속과 심용접부의 용착금속은 인장곡선이 상이함을 알 수 있다. 따라서 원주용접부의 용착금속에 결함이 존재할 경우와 심용접부의 용착금속에 결함이 존재할 경우에 대한 대표 인장곡선을 각각 따로 사용하였다. 열영향부의 인장실험으로부터 원주용접부의 상·중·하에서 열영향부의 대표인장곡선과 심용접부의 상·중에서 열영향부의 대표인장곡선을 얻을 수 있다. 열영향부 대표 인장곡선은 열영향부가 모재와 용착금속에 비해 상대적으로 취약한 점을 감안해 사용적합성 평가 시 안전성을 높이기 위해서 각각의 영역에 해당하는 여러 열영향부 인장곡선 중 항복강도가 가장 낮은 인장곡선을 선택하였다. CTOD 시험을 통한 파괴인성 시험결과 모재부, 용접부, 열영향부위의 파괴인성치는 다른 값을 나타내고 있었다. 따라서 손상평가도를 작성하기 위해서는 결함위치에 존재하는 파괴인성치를 사용하였다. 이상의 인장물성치와 파괴인성 데이터를 사용하여 API 5L X65 배관에 결함이 존재할 경우 결함 길이, 위치, 방향별로 운용배관에 대한 사용적합성 평가를 실시 할 수 있으며 그림 2는 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.

4. 결론

국내 운용중인 천연가스 수송용 배관인 API 5L X65 배관에 대한 사용적합성 평가를 실시하였으며, 결함 위치에 따른 평가의 정확성을 기하기 위하여 배관의 인장강도, 항복강도, 응력-변형선도, 파괴인성치를 배관 모재

부에 용접부 및 열영향부에서 구하였으며, 본 연구에서 개발한 프로그램에서는 배관물성 또는 운전조건을 변화시켜 그에 따른 민감도 해석이 가능한 KOFAD 프로그램을 개발하였다.

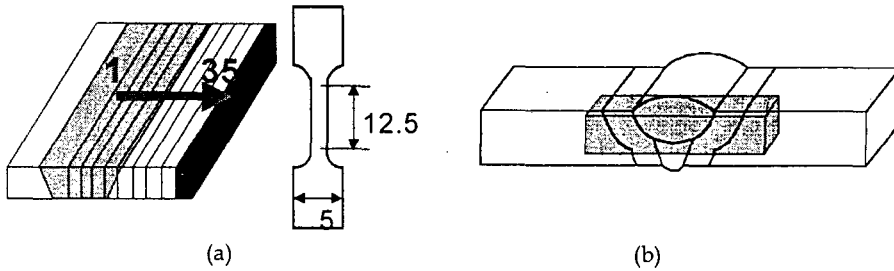
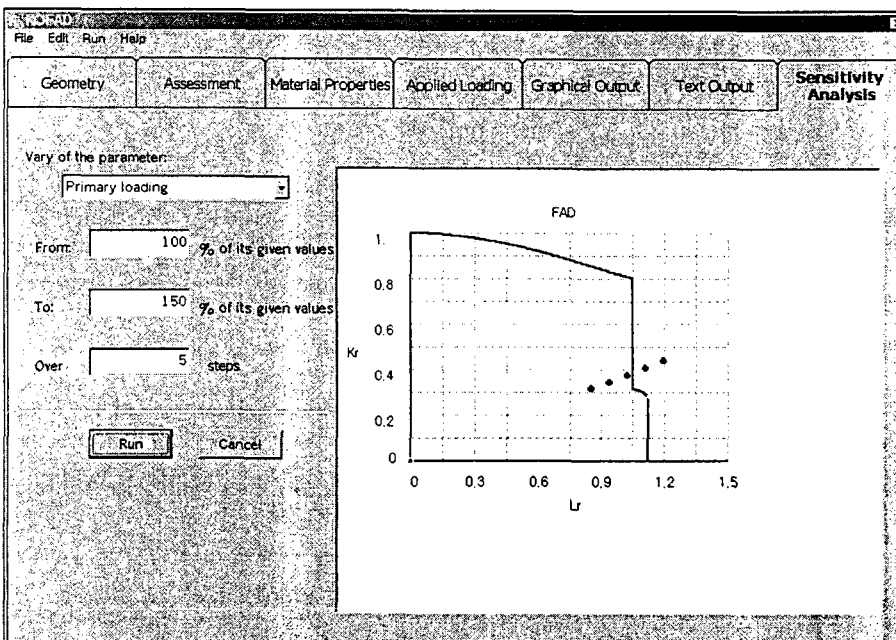


Fig. 1. Tensile specimen and CTOD specimen

Table 1. True Tensile properties of weldment.

Properties		YS (MPa)	UTS (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Position				
Base metal	Longitudinal (upper)	497	617	209
	Longitudinal (middle)	435	598	209
	Longitudinal (lower)	505	624	209
	Circumferential (upper)	488	631	210
	Circumferential (middle)	453	601	210
	Circumferential (lower)	499	625	210
Girth Weld Metal		530	678	212
Seam Weld Metal		568	681	212
HAZ (girth)		423	550	210
HAZ (seam)		396	567	210

Fig 2. Sensitivity analysis on the defect in the base metal.



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.