

가스배관의 안전성 평가방안에 대한 고찰 (I)

-용접부위 파괴 및 피로특성을 중심으로-

김우식, 고영태
한국가스공사 연구개발원

1. 서론

전국에 천연가스를 공급하기 위해 지하에 매설된 가스배관은 파괴 또는 파손 발생시 경제적, 인적인 면에서 대형 재해를 일으킬 뿐만 아니라 에너지의 안정한 공급이 위협받게 되어 산업적인 면에서도 큰 손실을 유발하게 된다. 가스배관에 대하여 적합한 파괴안전성 평가를 수행하고, 불가피한 손상이 발생할 경우 사용적합성평가(Fitness For Service)를 통해 대처방안을 수립할 경우, 에너지 공급의 안정화 및 경제적, 사회적 손실의 방지를 이루며 안전하고 효율적인 배관망 운용을 할 수 있다. 이러한 평가기술은 다른 대규모 강 용접구조물의 안전성 평가에도 확대 적용할 수 있으며, 이에 따라 국내 엔지니어링기술 향상 효과는 물론, 안전성 평가기술의 해외경쟁력 확보로 인한 해외기술의 국내기술이전 비용절감 효과까지 이를 수 있다. 이에 한국가스공사 연구개발원에서는 가스배관의 건전성확보를 위한 제반 연구를 수행하고 있으며, 특히 사용적합성평가 방안 구축을 위해 노력하고 있다. 그동안 안전성평가의 기본으로 삼고 있던 과거의 규격들이 현재의 배관재료, 용접시공, 비파괴검사, 배관운용 및 유지체제 등을 고려할 때 현실과 동떨어진 너무 보수적인 판단을 내릴 수 있다. 따라서 실험적, 분석적 작업을 통해 안전이 확보된 상태에서 기존의 guideline 안전도의 보수적인 면을 제거하고, 불필요한 보수나 교체 비용 없이 배관의 수명을 연장하는 방안을 강구해야 한다.

본 고에서는 지하매설 가스배관의 안전성 평가 방안에 필요한 여러 사항 중 가스배관 용접부위 파괴 및 피로특성 평가, 실제크기 배관시험(full scale pipe test)에 대하여 알아보았다.

2. 가스배관 용접부위의 파괴 및 피로특성 평가

대형 강 구조물의 파괴에 대한 안전성 확보는 구조용재료로 철강이 사용된 이래로 해결해야 하는 가장 중요한 문제 중 하나로 취급되어 왔다. 특히 저장탱크나 압력용기, 교량 등과 같은 대형 강 구조물의 파괴사고는 큰 경제적, 인적손실을 가져왔다. 이 중에서도 취성파괴와 같이 변형을 수반하지 않고 빠른 속도로 진행되는 경우에는 그 피해가 매우 크게 되므로 반드시 방지되어야 하고 만일의 경우의 발생 시에도 그 피해를 최소화할 수 있어야 한다.

이러한 취성파괴의 원인은 다음의 세 가지로 나눌 수 있다. 우선 사용재료의 기본적

인 강도와 저온 인성의 부족, 둘째로 용접부위의 인성열화와 결합 및 잔류응력, 셋째로 구조 불연속부에서의 응력집중이다. 현재는 구조물의 설계와 재료의 기본적인 성질은 취성파괴 문제를 거의 해결하고 있어, 안전성 평가에 가장 중요한 인자는 복잡한 야금학적, 역학적 특성을 지닌 용접부위이다. 용접구조물에 있어서 용접부가 차지하는 비율은 지극히 작은 경우가 많다. 하지만 용접부에는 각종 초기결함(진전하는 피로균열, 환경에 의한 균열 등 포함), 용접 형상 연속성의 불량에서 유래하는 국부적 응력·변형의 집중, 잔류응력, 구속응력, 용접부가 가지는 숙명적인 야금학적 특성의 불균질성, 용융선 및 열영향부에서의 용접열변형 사이클에 의한 재료의 국부적 열화 등 여러 가지 취성파괴 촉진인자가 복합되어 있어 용접구조물 전체의 건전성에서 용접부위가 가지는 의의는 대단히 중요하다. 실제로 해양구조물등 대형 용접강구조물의 취성파괴 대부분이 용접부에서 발생하였고, 이러한 파괴 사례가 새로운 강재 개발을 유도했다는 사실에서 용접부의 파괴안전성 평가의 중요성을 알 수 있다.

가스배관의 경우에도 안전성 확보를 위하여 가장 먼저 평가해야 할 대상은 원주용접부 및 심용접부이다. 가스배관 용접부 파괴연구는 용접부의 파괴거동과 그에 영향을 미치는 특성인자들을 연구함으로써 용접부의 파괴성능을 제어하여 안전성을 확보하는데 있다. 이러한 특성인자는 역학적 인자와 금속학적 인자로 구분되고, 다시 다층용접 열영향부의 특성인자를 규정짓는 변수는 강재 고유의 내부변수와 용접조건의 외부변수로 나뉠 수 있다. 여기서 강재 고유의 내부변수란 강관 소재의 변태온도, 결정립 조대화 온도, 탄소당량, 열적 특성 및 판의 두께 등을 의미하고, 용접조건의 외부변수란 용접시공시의 입열량, 예열(혹은 pass간 온도), 후열처리, 용접공정, 용접부 형상 및 용접재료의 모재와의 물성차이 등을 의미한다. 이 내부변수와 외부변수가 복합적으로 열영향부의 파괴특성에 영향을 미치는 금속학적, 역학적 인자를 유발하게 되고, 다시 이 인자들에 의하여 용접열영향부의 파괴 및 피로성질이 결정되는 것이다.

가스배관 용접부파괴에 영향을 미치는 금속학적 인자란 미세조직의 변화를 반영하는 인자로서, 도상 마르텐사이트, 혹은 M-A 조직이라고 불리우는 이상 취화조직의 존재로 인한 국부취화영역(Local Brittle Zone)현상과 용접열사이클에 의한 열영향부내의 결정립 크기 변화, TMCP강의 제조상의 특징(가속냉각)에 기인하여 대입열 용접시 발생하는 조직의 불안정 등을 들 수 있다.

배관 용접부 파괴에 관련된 역학적 인자로서 가장 중요하게 연구되고 있는 대상은 용접 잔류응력과 강도적 불균질성이다. 용접시에는 용접열로 인하여 국부적으로 수축, 팽창 등의 열소성 변형이 발생하게 되고 이 변형은 주위의 구속이나 어떠한 힘에 의하여 용접부 주위에 높은 용접 잔류응력을 발생시키게 된다. 용접부의 잔류응력은 재료의 변형과 응력부식균열의 유발, 미세균열과 같은 초기결합발생의 증가 등을 통하여 파괴인성과 피로강도를 저하시키므로, 잔류응력의 크기와 분포의 정량적인 평가가 매우 중요하다. 배관 용접부의 경우 심용접부와 원주용접부 각각의 용접선방향과 용접선수직방향, 배관 내부 및 외부에 따라 다양한 용접잔류응력의 분포가 가능하므로 이들에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 또한, 90년대 가장 활발히 연구되고 있는 용접부 파괴영향인자인 용접부의 용착금속과 모재의 강도차에 의하여 발생하는 강도적 불균질성(배관

용접부의 경우는 overmatching-즉, 용착금속의 강도가 모재에 비하여 상대적으로 크기 때문에 발생하는 문제들)이다. 강도적 불균질의 존재는 첫째로 균열첨단 부근에서 응력과 변형률의 변화가 일어나므로 적절한 파괴지표변수를 설정해야하는 문제점과, 둘째로 균열첨단주위의 소성구속도 즉 응력다축도의 변화에 기인한 파괴한계에 영향을 미친다. 위에서 언급한 배관용접부의 파괴특성에 미치는 금속학적, 역학적 인자들에 대한 분석이 끝나면, 이들 인자들을 고려한 파괴역학적 인성시험법 및 파괴시험법을 개발하여야 한다.

파괴역학적 개념이 발달하기 전에는 재료인성을 대표하는 지표로서 V-노치 샤피 충격특성과 건설과 가동실적에 따른 경험공학적인 사용한계가 이용되었지만, 현재는 여러 가지 파괴역학에 기초한 파괴인성 평가법이 개발되어 이용되고 있다. 표 1에 파괴역학에 기초한 파괴인성평가법을 소개하였다. 70년대까지는 용접부의 파괴인성 평가를 위해 주로 샤피 V-노치 충격시험이 이용되었다. 샤피시험은 시험법이 단순하고, 미세조직이 다양한 열영향부내 여러 위치에서 기계적 결합의 도입이 용이하며, 해석이 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 단순히 충격에 따른 파괴에너지의 물리량만을 나타내며, 균열 주위의 응력장을 고려한 균열의 발생과 전파 등 파괴역학적 개념들을 무시하여 실질적인 파괴인성의 평가에는 많은 부족함이 있다. 현재 배관용접부의 경우 낙하충격시험(DWTT) 요구치를 명시하는 경우가 늘어나고 있으나 이 역시 실크기에 접근하였을 뿐 천이적 인성시험법에 불과하여 파괴역학적 분석에 사용되기에는 부족하다.

1979년에 BS 5762에 CTOD시험 규격이 정해진 이후에 1980년대부터 샤피충격시험과 더불어 용착금속과 열영향부의 3점 굽힘 CTOD시험이 용접부의 파괴인성평가에 널리 이용되고 있다. 3점 굽힘 CTOD시험법은 샤피충격시험과 같이 열영향부에서 위치에 따른 기계적 결합의 도입이 용이하고, 탄소성 파괴역학에 기초하고 있으며, 파괴역학에 기초한 다른 시험법인 K_{Ic} 나 J_{Ic} 평가법과는 달리 평면변형조건을 완화하여 실질적으로 사용되는 구조재와 같은 두께를 사용하여 평가를 할 수 있고, 소형인장시험편보다 시험편의 제작이 용이한 장점이 있다. 용접부 파괴역학시험방법은 아직 규격화가 이루어지지 않고 있다. 따라서 앞서의 인자들을 최대한 고려하여 그 영향들을 반영한 배관 용접부 파괴역학시험법을 개발하여야 한다. 이때 중요한 점은 배관이 가지고 있는 곡률로 인하여 실두께 시험이 어렵다는 점인데, 이를 극복하기 위하여 해외에서 연구되고 있는 CTOA 시험법 등의 적합성에 대한 검토도 병행할 필요가 있다.

3. 실제크기 배관 시험

매설배관을 운용하면서 발생하는 여러 문제들은 기존의 일반화된 구조물에서 생기는 문제에 매설환경이라는 문제가 추가된다. 이러한 비표준화 내지 비일반화된 환경에서 배관의 거동 메커니즘을 이해하고 정의함으로써 설계와 건설, 사용 중의 안전성과 신뢰성을 확보하는데 효과적인 시험법이 실제크기 배관시험(full scale pipe test)이다.

실제크기 시험은 실험실 규모로 실험적 인자를 모사하는 laboratory full scale 시험과 배관의 건설장소와 유사한 환경에 일정규모의 실제 배관을 직접 매설한 후 운영하

는 field full scale 시험법으로 구분된다. laboratory full scale 시험은 field full scale 시험에 비해 소규모이고, 평가하고자 하는 실험 인자의 선택이 가능하여 다양한 사용 조건을 구현할 수 있으며, 인위적인 가속시험이 가능한 점 등 시험기간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실제 상황과 모사상황 사이에서 발생하게 되는 크기효과를 극복하는 것과 평가하고자 하는 실험변수에 대한 실험실 규모의 적합화 내지 모델링화가 중요하다.

이에 비해 field full scale 시험은 시험소의 설치장소 선정에 있어 신중함이 요구되고 설치 및 유지비용 등의 경제적인 불리한 점이 있으나, 실제 매설 배관이 겪게 되는 상황을 똑같이 미리 경험함으로써 배관의 설계 건설시 요구되는 물성치의 예측과 건설 전후 예견될 수 있는 문제를 미리 해결할 수 있다는 장점이 있다. 그림 1은 실제크기배관에서 여러 형태의 외부응력을 받을 때 배관변형거동에 대한 시험을 위한 장치의 예이다. 이를 통해 굽힘응력, 인장응력, 압축응력 및 내부압력 등이 가해질 때 배관 결합의 형태와 보수방법에 따른 배관 안전성평가를 할 수 있다.

실제크기 배관시험은 배관에 요구되는 물성치를 검증하는 건설 전 안전성 검사와 매설장소의 환경학적, 지리학적 인자에 대한 사용중 배관거동 예측을 위한 배관 사용 환경의 검사로 나누어 질 수도 있다. 실제크기 배관시험의 실험적 변수들은 매설장소의 온도, 습도의 변화, 지하수의 영향, 밀도, 입경, 공극, 성분 등의 토양특성, 배관의 매설 깊이, 지반의 변화, 토양/배관의 상호 작용, 주기적인 외부환경에 의한 하중변화, 배관의 직경 및 두께 등 다양하다.

미국, 캐나다, 러시아, 유럽에서는 배관 제조회사들과 가스회사에 의해 실제크기 배관시험이 주도적으로 수행되고 있다. 배관 제조회사들은 가스회사의 향상된 성능의 배관재 요구에 맞추어 새로 강재 개발을 한 경우 실제크기 배관시험을 통한 물성평가를 하고 있으며, 가스회사들은 배관운용시 발생하는 문제들을 국제적으로 회사간 교류에 의해 실제크기 시험 프로그램을 이용하여 정보를 확충하고 있다.

4. 요약

가스배관의 안전성확보에 필요한 용접부의 파괴 및 피로특성을 평가하기 위해서는 1) 용접부위 파괴특성에 대한 금속학적 및 역학적 영향인자의 분석 및 정량화, 2) 특성 영향인자를 반영한 파괴역학 시험법 개발과 배관의 곡률 효과를 극복할 수 있는 실험적 파괴역학 시험법의 개발, 3) 개발된 시험법을 이용한 용접부 파괴 및 피로시험시 매설배관이라는 환경의 모사로 실제 가스배관의 파괴성능 및 피로수명의 예측 등에 대한 검토가 요구된다.

실제 크기배관을 사용하여 배관 내·외부 응력 및 환경에 따른 배관파괴와 변형거동을 파악하는 시험은 배관의 효율적인 운용에 필요한 각종 데이터를 효과적으로 제공할 수 있다.

5. 참고문헌

- 1) M. Toyoda : J.Jpn. Weld. Soc., 62, (1993) p. 603
- 2) L. Devillers, D.Kaplan, and P. Testard : Weld Int., 9 (1991) p. 128
- 3) Koji Yoshizaki, Hirokazu Ando and Noritake Oguchi: 2nd International Pipeline conference proceedings, ASME (1998) Vol. II, p. 733

Table1. Test Methods for Evaluation of Fracture Toughness Based on Fracture Mechanics.

Fracture Characteristics		Parameters	Test Methods	Standards
Initiation	Static Loading	K_{Ic}	Compact Tension 3-Point Bending	ASTM E399, BS7448
		J_{Ic}		ASTM E813, BS7448
		CTOD		BS7448, ASTM E1290
		K_{Ic} CTOD	Deep Notch Wide Plate Tension	no standard
	Dynamic Loading	K_{Ic}	Compact Tension 3-Point Bending	ASTM E399
		J_{Ic}		ASTM E813
		CTOD		BS7448, ASTM E1290
		K_d	Instrumented Charpy	(EPRI standard)
Propagation	Dynamic Analysis	K_{ID}	Compact Crack Arrest	no standard
Arrestability	Static Analysis	K_{Ia}	Compact Crack Arrest	ASTM E1221
		K_{ca}	ESSO Double Tension	WES

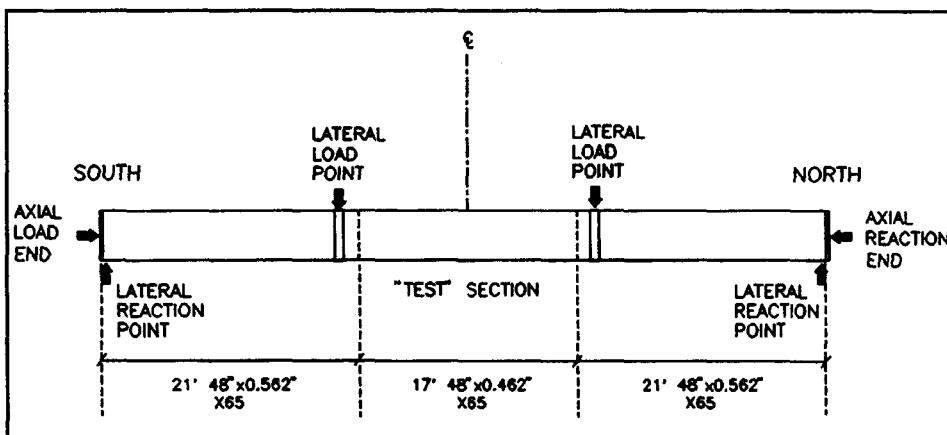


Fig. 1. The Example of Full Scale Pipe Test Facility