

배관 용접부에 존재하는 결함의 피로수명 평가

김영표 · 김우식

The Fatigue Life Prediction of Defect in Pipeline Weldment

Young-Pyo Kim and Woo-Sik Kim

1. 서 론

재료의 수명은 유한하며, 사용중에 재료가 처한 환경 및 조건에 의하여 변화한다. 재료를 사용하는 중에 가해지는 여러 가지 물리, 화학적 작용에 의하여 재료에 손상이 축적되어 설계조건 이하에서 파괴가 일어나거나 일어날 우려가 있을 때 재료는 수명을 다하게 되며, 특히 구조재료에 있어서는 피로 및 부식기구가 수명을 결정하는 주된 기구이다. 피로에 의한 파괴 시에는 일반적으로 파괴의 전조라 할 수 있는 거시적인 변형을 야기하지 않으며 균열성장속도가 지수적으로 증가함으로 인하여 최종적인 파괴가 대부분 돌발적으로 예기치 못하게 발생하여 피해를 증대시킨다. 따라서 구조물의 설계 시 피로파괴의 예방을 위한 고려가 필수적이다.

반복적인 내압의 변화가 있는 배관은 결함의 성장으로 피로파괴가 발생할 수 있다. 특히 고압의 가연성 가스나 액체를 수송하는 배관이 피로에 의해 파괴되는 경우에는 엄청난 재산적, 인적손실을 발생시킬 수 있다. 결함은 배관 모재보다는 용접부에서 발생할 확률이 더욱 크다. 따라서 배관운용회사들은 배관의 안정적인 운용을 위하여 건설후 일정한 시기가 경과한 후 주로 수압시험(hydrostatic test) 이나 운전중인 상태에서 비파괴검사(in-service inspection)를 수행하고 있다.

배관용접부의 건전성 확보와 비파괴검사 비용과 유지보수비용을 절감하기 위해서는 결함의 보수기준 확립, 사용적합성 평가 및 비파괴검사 주기 결정등 기술적인 검토가 필요하다.

결함의 보수여부를 판단하기 위해서는 결함부위, 결함종류, 결함크기, 작용하중, 사용재료의 기계적 특성 및 파괴인성 데이터를 활용하여 사용적합성 평가를 수행하여야 한다. 손상평가도를 활용한 사용적합성 평가는 배관에 존재하는 결함의 현 상태에 대한 사용적합성은 평가할 수 있지만 결함의 수명 및 검사 주기를

결정할 수는 없다. 현 상태에서 안전한 결함이라 하더라도 반복적인 피로하중에 의해 결함이 성장하여 파괴될 수 있다. 천연가스배관의 경우 내압은 일년 중은 물론 하루에도 여러 차례 주기적인 변화를 보이는데 이러한 내압의 변화가 천연가스배관에 존재하는 결함에 미치는 영향에 대하여 평가하여야만 수명예측 및 비파괴검사 주기 결정이 가능하다.

배관 용접부에 존재하는 결함의 성장거동을 파악하여 잔류수명을 정확히 평가하기 위해서는 배관재료의 기계적 특성과 파괴인성, 배관 및 결함의 기하학적 형상과 응력확대계수의 관계, 작용하중과 운전압력의 변화, 부위별 균열성장속도 및 수압시험 압력 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

본고에서는 피로균열 성장에 대한 일반사항과 배관용접부 결함의 피로수명평가 방안에 대하여 알아보려고 한다.

2. 피로균열 성장거동

피로파괴의 예방을 위하여, 기존에는 총 수명개념에 입각한 고려를 설계시 반영하여 왔다. 균열이 존재하지 않는 시편에 일정 응력 또는 일정 변형량을 가하여 응력-주기(S-N) 또는 변형-주기(ϵ -N) 관계를 구하고, 설계시에는 요구 수명에 따라 응력 또는 변형량이 알맞도록 안전인자를 조절하는 것이다. 이 경우 대부분의 피로수명은 균열의 발생 과정이 차지하게 된다. 특히, 강과 같이 피로한이 존재하는 재료에서는 안전계수를 증가시켜 이론상 무한 수명 설계가 가능하다.

그러나, 실제 재료에서는 주조 결함, 용접결함 및 노치부등이 존재하여 균열로 작용하거나 응력을 집중시켜 균열의 발생을 촉진시킴으로 인하여 피로한 이하에서도 파괴가 일어날 수 있어 피로한보다도 보수적인 설계가 바람직하다.

심한 반복하중에 노출되며 파괴시 돌이킬 수 없는 결과를 초래함에 따라 피로 파괴의 방지가 필수적인

반면, 경량화 혹은 유지보수 비용의 절감을 위해 안전 계수의 최소화가 요구된다. 따라서 기존의 지나치게 보수적인 설계를 대신하면서도 신뢰할 수 있는 개념으로서 새로이 손상허용 설계 개념이 도입되었는데, 이는 제어가 가능한 선에서의 손상을 허용하는 것으로, 안정적 균열성장 및 파단전 누설의 두 가지로 크게 나눌 수 있다.

안정적 균열성장에서는 비파괴 검사법으로 측정할 균열의 크기와 여기에 가해지는 하중으로부터 균열에서의 응력상태를 측정하고, 이를 이미 알려진 균열성장속도와 비교하여 잔류수명예측 및 적절한 유지, 보수간격을 도출해낸다.

이를 위해서는 복잡한 형태의 균열과 하중조건으로부터 일반화된 형태의 하중 분포를 계산할 수 있어야 하며, 또한 이렇게 구해진 하중 분포가 동일할 경우에는 상이한 형태 및 하중 이력하에서도 동일한 예측이 가능하여야만 한다. 이에 선형파괴역학 및 유사성 개념이 적용되어 균열첨단에서의 응력장을 응력확대계수(K)의 형태로 대표하게 되었다. 이후 Paris에 의하여 K_{max} 와 K_{min} 의 차이인 ΔK 가 피로균열성장속도(da/dN)의 기준척도로 채택되어 오늘에 이르고 있다. Paris는 또한 피로균열성장속도와 ΔK 를 log 척도로 동시에 나타낼 경우 직선 구간이 나타남을 발견하고, 다음의 식으로 표시하였다¹¹⁾.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{1}$$

- a = crack depth
- N = number of pressure cycles
- da/dN = the rate of crack growth per cycle
- ΔK = stress intensity factor range
- C = constant

여기서 C와 m은 재료상수로, 하중비, 하중주파수 및 실험분위기 등에 따라 달라지는 값인데, 금속재료에서 m은 2.3~6.7의 범위를 가진다²¹⁾.

피로균열성장거동은 일반적으로 그림 1과 같이 세 가지 영역으로 나뉘어 진다.

영역 I에서는 ΔK 가 감소함에 따라 피로균열성장속도가 급격히 감소하는 구간으로, 일반적으로 피로균열성장속도가 10^{-9} m/cycle 이하인 구간이다. 이를 피로균열성장이 시작되는 임계 구간(near-threshold region)으로 부르며 주로 모드 II의 전단에 의하여 입내파괴 형태로 균열이 성장한다. 특히 피로균열성장이 시작되는 임계점에서의 ΔK 를 특히 임계응력확대계수 범위, ΔK_{th} 라 표기하여 피로균열성장의 시작점으로 삼는데, 일반적으로는 실험시간 및 균열길이 측정의 편의상 피로균열성장속도가 1×10^{-10} m/cycle 이하인

점을 ΔK_{th} 로 나타낸다. 이 영역에서의 피로균열성장속도는 동일한 재료에서도 하중비, 하중 주파수 및 실험분위기 등에 따라 크게 다르게 나타난다.

영역 II는 Paris 식을 만족하는 형태로 균열성장속도가 ΔK 에 의하여 변화하는 구간으로, 이 구간에서의 피로균열성장은 모드 I과 모드 II의 혼합형태로 일어나며 피로 줄무늬(striation)가 관찰되기도 한다. 여기서의 피로균열성장거동 역시 여러 가지 인자에 의하여 영향을 받으나 특히 항복강도, 탄성계수 등의 재료 고유값에 의하여 지배되며, 미세구조에 대한 민감도가 영역 I에 비하여 낮게 나타난다. 이 구간에서의 피로균열성장거동은 재료에 따라 일정하고 시험이 용이하며 간단한 수식으로 표현할 수 있어 설계에 주로 반영되어 왔다.

영역 III는 K_{max} 가 재료의 파괴인성에 해당하는 K_c 에 도달함에 따라 급격히 피로균열성장속도가 증가, 최종적으로 파괴에 이르는 구간으로, 반복하중 외에도 정적하중이 파괴에 영향을 미친다. 따라서 입계파괴, 2차균열 및 연성파괴 등이 관찰된다.

실제 설계에는 영역 II에서의 피로균열성장거동이 주로 반영되고 있다. 그러나, 실제 재료수명의 대부분은 피로균열성장속도가 낮은 영역 I에서의 피로균열성장이 차지하고 있다는 것을 고려할 때, 임계영역에서의 피로균열성장거동에 대한 연구는 미세조직, 하중조건 및 실험분위기 등 제반인자의 영향 평가라는 학문적 측면 뿐 만 아니라 실제적인 수명예측 및 평가라는 실용적 측면에서도 중요하다.

이는 유동응력과 결함크기에 대한 작용응력의 관계를 나타내는 소성붕괴 수식에 인성인자가 포함 안되기 때문이다. 배관 원주용접부의 공학적 해석기법은 비교적 단순하다. 파괴조건이 인성보다는 배관 두께나 환경 같은 기하학적 재료특성에 의해 조절되기 때문이다.

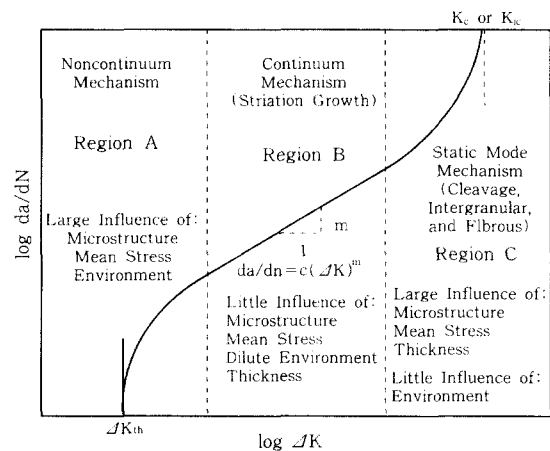


Fig. 1 Schematic variation of fatigue crack growth rate as a function of stress intensity range.

3. 피로균열성장에 영향을 미치는 인자

3.1 응력비

응력비($R=K_{min}/K_{max}$)는 균열성장속도에 커다란 영향을 미친다. 일반적으로 응력비의 민감도는 재료에 따라 서로 다르지만 일정한 ΔK 에서 응력비가 증가할수록 균열성장속도는 증가한다. 응력비가 균열성장속도에 미치는 영향에 대하여 Walker은 다음과 같은 식을 제안하였다³⁾.

$$\frac{da}{dN} = C[(1-R^m)K_{max}]^n \quad (2)$$

이 식을 사용하기 위해서는 지수 n 과 m 을 결정하여야 한다.

3.2 환경적 효과

피로균열성장속도는 환경에 큰 영향을 받는다. 이 효과는 많은 기계적 변수, 야금학적 변수 및 화학적 변수들과 이에 대한 상호작용으로 인하여 매우 복잡하다. 가스배관과 같이 지하에 매설되어 있는 배관은 토양 환경에 따라 다양한 부식분위기에 노출되어 있다. 부식분위기 뿐만 아니라 가스배관을 방식시키기 위해 흘려주는 음극방식전위도 재료의 파괴인성과 피로균열성장속도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁴⁻⁸⁾.

3.3 잔류응력

배관용접부와 같이 용접구조물은 잔류응력이 존재한다. 용접구조물의 잔류응력 크기와 변화양상에 영향을 미치는 인자들은 구속효과를 포함한 용접절차, 용접부의 기하학적 형상, 용접부와 모재의 특성 및 용접후열처리등이다.

잔류응력이 피로균열속도에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 수행되었지만 서로 다른 의견들을 보고하고 있다^{9,10)}. 아직까지 잔류응력의 효과와 특히 균열성장에 따른 잔류응력 재분포에 대한 문제는 풀리지 않은 상태이다.

4. 배관 용접부 결함의 피로수명 평가

배관 용접부는 다양한 형태의 결함이 존재할 수 있다. 배관 용접부에 존재하는 결함에 대하여 BS 7910은 표 1과 같이 평면결함(planar flaw), 비평면결함(non-planar flaw)과 형상결함(shape imperfection)으로 분류하고 있다¹¹⁾. 표 1에서 결함의 분류

가 다른 경우에는 다른 사용적합성 평가 및 피로수명 평가 절차를 요구한다.

여기에서는 배관 용접부에 존재하는 균열과 같은 평면결함에 대해서 공학적 결함평가 기준을 사용하여 건전성을 평가하고 이로부터 결함의 수명을 평가하는 절차를 설명하였다.

Table 1 Classification of the various types of weld flaw

Classification	Weld Flaw
Planar flaws	<ul style="list-style-type: none"> · Cracks · Lack of fusion or penetration · Undercut, concavity and overlap(on some occasions, undercut in welds are treated as shape imperfections)
Non-planar flaws	<ul style="list-style-type: none"> · Cavities and solid inclusion (on some occasions, cavities and solid inclusion are treated as planar imperfections) · Local thinning due to corrosion
Shape imperfections	<ul style="list-style-type: none"> · Misalignment · Imperfect profile

4.1 초기 및 최종 결함크기의 결정

배관 압력변화가 결함에 미치는 영향은 선형탄성과 파괴역학을 바탕으로 평가한다. 선형탄성파괴역학을 적용하기 위해서는 고려하는 결함이 균열이라 가정한다. 배관에 작용하는 응력이 탄성범위이고 균열이 미세하게 성장하기 때문에 선형탄성파괴역학의 적용은 타당하다 할 수 있다.

배관내에는 수명 초기에 존재할 수 있는 최악의 결함이 존재한다고 가정한다. 여기서 최악의 결함이란 결함의 크기, 위치, 방향 등을 종합적으로 판단하여 결정된다. 일반적으로 결함의 검출은 비파괴시험에 의존하므로 비파괴시험으로 검출할 수 없는 결함의 최대 크기에 안전계수를 고려하여 결함의 크기를 결정한다. 또는 실제 구조물의 가동중검사를 수행하여 검출된 결함의 크기, 형상 및 방향들을 이상화하여 결함의 크기를 결정하기도 한다.

비파괴검사에 의한 결함 검출 외에도 배관건설 직후 배관의 안전성을 평가하기 위해서 수행하는 수압시험에 의해 초기 결함의 크기를 결정할 수 있다. 배관에 존재하는 결함이 매우 크다면 수압시험시 발견되어 제거될 것이다. 만약 이러한 결함이 수압시험에 의해 파괴되지 않을 정도의 크기를 가지고 있다면 이러한 결함은 배관 내에 존재하고 반복적인 압력변화에 의해

성장하게 될 것이다.

그림 2는 이러한 상황에 대하여 파괴압력에 대한 균열크기의 관계를 보여주고 있다. 그림 2(a)에서 초기 수압시험으로 a^T 보다 더 큰 결함은 파괴된다는 것을 의미한다. 그림 2(a)에서 배관이 실제 운전되는 최대 운전압력(MOP)에서는 a^T 보다 더 큰 균열이라도 파괴되지 않고 배관 내부에 존재할 수 있다. 만약 운전 중인 배관내의 결함이 성장할 수 있다면 그림 2(b)에 나타낸 것과 같이 t^2 시간 후 존재하는 a^T 크기의 결함은 a^S 크기로 성장할 것이다. 결함이 a^S 크기로 성장하면 최대운전압력에서 배관은 파괴될 것이다. 그러나 이러한 상황이 예상되고 만약 균열성장속도를 예측할 수 있다면 배관관리자는 결함이 a^S 크기에 도달하기 전에 재시험을 위한 시간 간격을 설정할 수 있다.

배관에 길이방향으로 존재하는 표면균열의 파괴압력 예측은 Maxey에 의해 개발된 아래 실험식이 사용되고 있다¹²⁾. 이 식의 파괴압력에 수압시험 압력 혹은 최대운전압력을 대입하여 초기 혹은 최종 균열의 크기를 계산할 수 있다.

$$\left(\frac{12C_V}{A_V}\right) \frac{1}{4L\sigma^2} = \ln \left(\sec \left\langle \frac{\pi}{2} \left[\frac{M_p \sigma_p}{\sigma} \right] \right\rangle \right) \quad (3)$$

$$M_p^{-1} = \left[1 - \frac{A}{A_0} \right] / \left[1 - \frac{A}{A_0} M_T^{-1} \right] \quad (4)$$

$$M_T = \left(1 + 0.62756 \frac{L^2}{Dt} - 0.0003375 \frac{L^4}{D^2 t^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

C_V = upper shelf Charpy V-notch impact energy

A_V = area of Charpy V-notch specimen

E = elastic modulus

L = axial length of the surface crack

σ = flow stress(yield stress + 68.95MPa)

σ_p = failure stress

D = nominal outside diameter of the pipe

t = nominal wall thickness of the pipe

A = the area of metal missing

A_0 = the area of metal which would be present if there were no flaw

4.2 작용하중 및 피로주기 결정

결함의 수명을 평가하기 위해서는 실제 구조물에 작용하는 하중 및 작용하중의 반복 주기를 평가하여야 한다.

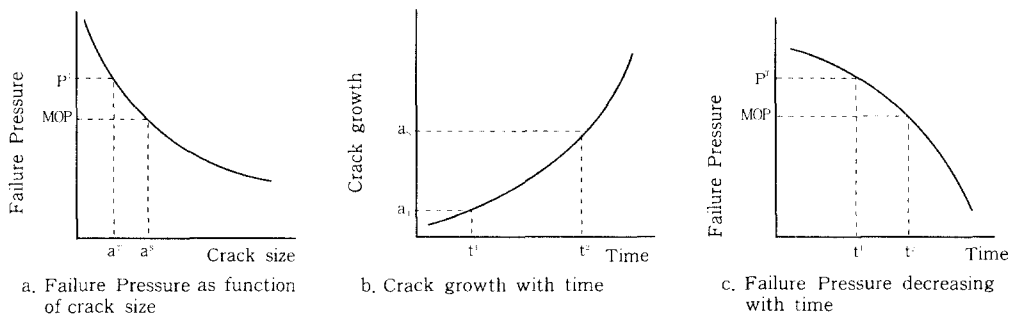
그림 3은 한국가스공사가 운영하고 있는 공급관리소에서 천연가스 배관의 압력 변화를 측정 한 결과로서 40kgf/cm²에서 70kgf/cm² 사이에서 변화하고 있음을 알 수 있다. 내압에 의해 가스배관에 작용하는 공칭응력을 계산할 수 있으며 이 단계에서는 결함을 고려할 필요는 없다. 내압외에 굽힘응력 및 용접부 잔류응력 등의 하중이 작용하는 경우에는 이에 대해서도 고려하여야 한다.

그림 3에서 천연가스배관의 압력변화 주기는 하루에 1~2번 정도인 것으로 나타났다. 이러한 압력변화는 가스 공급량, 사용량, 시간별 혹은 계절별로 약간의 차이는 있다.

4.3 응력확대계수 해석

압력 변화는 배관에 반복하중을 부가하게 되고 만약 가스배관 용접부에 균열이 존재한다면 이러한 응력으로 인하여 균열은 성장하게 된다. 이러한 작용응력으로 인하여 균열에 미치는 응력확대계수는 Newman과 Raju에 의해 제안된 해를 사용한다¹³⁾.

$$K = YS \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \quad (6)$$



P = Hydrostatic(proof) test pressure a^T = Largest crack size to withstand pressure test before failure
 MOP = Max. operating pressure a^S = Largest crack size to withstand MOP before failure

Fig. 2 Effect of crack growth on pipeline integrity

- K = stress intensity factor
- S = applied stress
- a = depth of surface crack
- Y = stress intensity boundary correction factor
- Q = shape factor of elliptical crack

위 식을 사용하여 배관 용접부에 존재하는 균열의 K 값을 계산하거나 유한요소해석으로 K 값을 구한다. 응력확대계수는 부가된 응력에 비례하기 때문에 응력확대계수범위 (ΔK)는 부가된 응력의 변화(ΔS)에 비례한다. 즉 변화하는 응력은 응력확대계수를 변화시키고 응력확대계수의 변화에 의해 균열은 성장하게 된다. 응력확대계수는 응력에 관계하는 함수임과 동시에 균열의 크기에 대한 함수이다.

4.4 파괴인성 결정

구조물에 사용된 재료에 대한 파괴인성치(K_{Ic})를 구한다. 대체로 핸드북에 나와 있는 값을 이용하나 그렇지 못한 경우에는 가동온도, 결함의 위치(용착금속, 열영향부 혹은 모재) 및 방향을 고려하여 ASTM E399에 준한 시험을 시행하여 K_{Ic} 를 구한다.

4.5 취성파괴 평가

K 값과 K_{Ic} 값을 비교하여 취성파괴 여부를 판단한다. 또한 이 식을 적용하여 임계응력이나 임계균열길이를 구할 수 있다. 물론 이때 안전계수를 고려하는 것이 일반적이다.

배관 결함부에 작용하는 K 값이 안전계수를 고려하여 K_{Ic} 보다 작을 때 현 상태의 결함은 계속적으로 사용이 가능하다고 판단한다. 그러나 다음 검사주기를 결정하기 위해서는 피로수명평가를 수행하여야 한다.

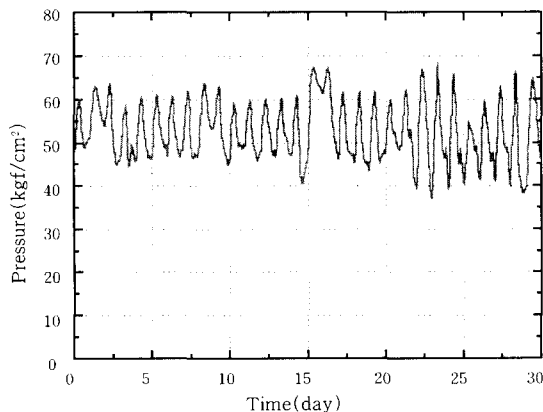


Fig. 3 Pressure versus time for a typical natural gas pipeline.

4.6 피로특성 평가

균열성장속도는 임계응력확대계수범위, ΔK_{th} 값 위에서는 ΔK 값에 대하여 식 (1)을 따르며 ΔK_{th} 보다 작은 ΔK 에서는 균열이 성장하지 않는다. 배관 모재, 열영향부 및 용착금속부에 대하여 피로균열성장거동을 평가하기 위해서는 가동온도, 가동환경, 배관재질 및 용접조건등을 고려하여 ASTM E647에 준하여 시험을 수행하여 Paris law의 상수 C와 m 값을 구하여야 한다.

실험에 의해 피로균열성장거동을 평가하는 것이 가장 정확하나 실험이 어려운 경우에는 핸드북에 나와있는 값을 이용할 수 있다. BS 7910에는 배관의 항복강도, 응력비, 가동온도와 가동환경에 따라 Paris law의 상수 C와 m 및 ΔK_{th} 값을 제시하고 있다.

그림 4는 항복강도가 700MPa 이하인 재료가 100℃ 이하의 온도에서 부식환경이 아닌 상태에서 운전하는 경우에 대하여 BS 7910에서 제시한 피로균열성장곡선이다. 그림 4에는 배관모재의 경우 R이 증가하는 경우 피로균열성장속도가 증가함을 보여주고 있다. 또한 용접부에 대한 피로균열성장속도는 R이 0.5 보다 큰 경우의 피로균열성장곡선을 사용하도록 권장하고 있다.

4.7 피로수명 평가

식(1)을 N에 대하여 적분하면 다음 식과 같이 표현된다. 앞에서 구한 공칭응력, 초기균열, 임계균열, 재료상수(C, m)등을 아래 식에 대입하면 수명말기까지 허용할 수 있는 반복하중 작용횟수를 구할 수 있다. 그림 3과 같은 압력변화 데이터를 기초로 하여 파괴까

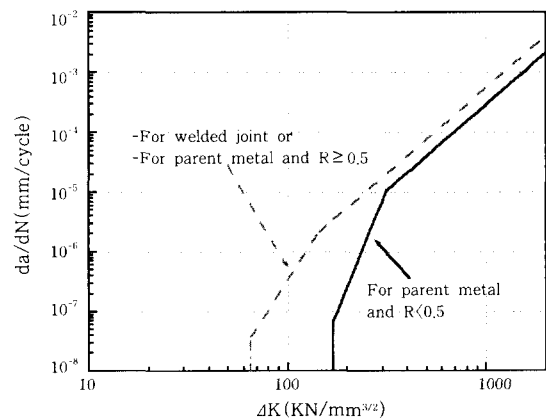


Fig. 4 Recommended fatigue crack growth laws for steels with yield strengths $\leq 700N/mm^2$ and operating in air or other non-aggressive environments at temperatures up to 100℃

지 반복작용횟수를 반복하중 주기로 나누어 파괴까지 걸리는 시간을 계산할 수 있다.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (7)$$

위와 같은 절차에 따라 평가된 피로파괴 수명은 배관의 비파괴검사 혹은 수압시험 주기를 결정하기 위해 사용한다.

세계 각국의 배관운용회사들은 피로파괴에 의한 잔류수명을 예측하기 위한 연구를 많이 수행하고 있다. 그러나 안전계수(safety factor)는 각 회사들이 자체적으로 기준을 설정하고 있으며 이에 대한 표준이나 규격은 없는 상태이다. 일반적으로 사용하고 있는 안전계수 값은 2이다. 이는 피로파괴가 발생할 것으로 예상되는 기간의 절반이 지난 후 배관을 비파괴검사로 다시 검사하거나 수압시험을 다시 수행해야 함을 의미한다.

5. 요약

본고에서 피로균열성장에 대한 일반사항과 배관용접부 결함의 피로수명평가 방안에 대하여 알아보았다.

고압의 가연성 가스나 액체를 수송하는 배관이 피로에 의해 파괴되는 경우에는 엄청난 재산과 인적 손실을 발생시킬 수 있다. 따라서 배관운용회사들은 배관의 안정적인 운용을 위하여 다양한 환경에 노출되어 있는 배관의 피로특성을 정확히 평가해야 한다.

참고 문헌

1. P. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME (December 1963), 528-534
2. J. F. Throop and G. A. Miller, "Optimum Fatigue Crack Resistance", in Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys, ASTM STP 467, American Society for Testing and Materials, (1970) 154
3. K. Walker, "The Effect of Stress Ratio during Crack Propagation and Fatigue for 2024-T3 and 7075-T6 Aluminum", in Effects of Environment and Complex

- Load History on Fatigue Life, ASTM STP 462, American Society for Testing and Materials (1970)1
4. 김형식, 김철만, 김우식, "음극방식에 의한 수소취성이 매설 천연가스배관의 노치인장 성질에 미치는 영향", 재료강도심포지움 (1998) 555~562
5. 김철만, 김우식, "매설 가스배관의 음극방식이 배관의 파괴인성에 미치는 영향", 2001년도 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A (2001)573~578
6. O. Vosikovsky, "Effects of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in X70 Pipeline Steel in Air and Saltwater", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 8, No. 2 (March 1980)68~73
7. Robert P. Wei, "Mechanistic Considerations of Corrosion Fatigue of Steels", Proceedings of Evaluation of Materials Performance in Severe Environments 89, November 20-23 (1989)71-85
8. Hiroshi Ouchi and Junichi Kobayashi, "Effects of Environmental Variables on Fatigue Crack Growth Rate in Steel Immersed in Seawater", Proceedings of Evaluation of Materials Performance in Severe Environments 89, November 20-23 (1989)183~190
9. Y. W. Shi, B. Y. Chen and J. X. Zhang, "Effects of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Welds of a Pipeline Steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, No. 6 (1990)893~902
10. 최용식, 김영진, 우홍식, "Butt 용접부에서 잔류응력이 피로균열성장거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구(1)", 대한용접학회지, 16-4 (1988)27~34
11. BS 7910, "Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures", British Standard
12. Kiefner, J. F., Maxey, W. A., Eiber, R. J. and Duffy, A. R. "Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders", Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials (1973)461-481
13. J. C. Newman, Jr. and I. S. Raju, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Cracks, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2 (1981)185-192



- 김영표(金英杓)
- 1968년생
- 한국가스공사 연구개발원
- 배관 용접 및 건전성평가
- email: ypkim@kogas.re.kr



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