

가스 배관에 적용가능한 in-situ 건전성 평가기술 현황

남승훈, 박종서, 김정민
한국표준과학연구원 강도평가그룹

The status of in-situ integrity evaluation technology applicable to gas pipe line

Seung Hoon Nahm, Jong Seo Park, Jeong Min Kim
Strength Evaluation Group, Korea Research Institute of Standard and Science

1. 서론

재료의 물성 저하를 평가하는 여러 가지 비파괴적 방법들이 있지만 장시간 사용에 따른 열화정도를 판별할 수 있는 정량적인 비파괴평가법은 아직까지 큰 성과를 얻지 못하고 있다. 산업현장에서 사용되는 설비들은 그 특성상 재료의 미시적인 변화에서부터 거시적 결함에 이르기까지 많은 요인들에 의하여 열화정도를 판별할 수 있기 때문에 사용조건이나 환경에 따라 각기 별도의 평가방법이 응용되고 있다. 현재 구조물의 손상평가에 대한 비파괴적 검출방법으로는 경도법[1], 입계부식법[2], 전기저항법[3], 자기특성 측정법[4], 초음파법[5], 압입시험법[6] 등이 있다.

국내에서 주로 사용되던 경도법[1], 입계부식법[2] 등과 같은 기존의 일부 평가기술은 정성적 판단에 의존한다거나 측정 정밀도가 떨어진다는 단점이 있기 때문에 이를 보완할 수 있는 비파괴적 평가방법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 측정방법이 간편하며 정밀도 높은 정량적 측정결과를 얻을 수 있는 몇몇 평가기술이 그 동안 많은 관심을 받아 왔다. 그 중에서 전기비저항법[3]은 초기의 열화손상정도를 판별하는 데는 유용하지만 장시간 열화된 소재의 손상정도를 판별하는 데는 한계가 있으며, 자기특성 측정법[4]은 장시간 사용된 소재의 열화정도를 판별하는데 우수하다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 배관설비의 건전성 평가에 적용 가능성이 있는 일부 비파괴적 평가기법에 대하여 간략하게 소개하고자 한다.

2. 압입시험법

2.1 시험장치 및 시험방법

산업 현장에서 인장물성을 측정하기 위해서는 가볍고 운반하기 편리하며 측정의

정밀성도 함께 갖춘 제품이 사용되어야 한다. 이를 위해 산업 현장 적용을 목적으로 설계된 압입시험기가 요즘 국내업체에서도 개발하여 판매중이다.

압입시험기는 가해지는 하중에 대한 변위값을 실시간으로 읽어들이 수 있도록 구성되어 있으며, 압입하중-변위곡선의 형태를 가진 데이터는 분석 프로그램을 탑재한 노트북 컴퓨터를 통해 현장에서 다양한 물성값으로 변환될 수 있다. 변환가능한 물성 및 데이터에는 경도, 유동곡선, 항복강도, 가공경화지수, 인장강도 등이 있다.

현재 시판되고 있는 압입시험기는 정밀한 영역에서의 제어가 용이하고 정확한 운동이 가능한 서보모터를 채용하여 하중을 인가한다. 이때 가해지는 하중에 대해 하중 센서와 변위센서를 통해 변위와 관련한 신호를 제어함으로써 원하는 조건에서의 압입을 가능하게 한다. 변위센서는 초기 압입 위치를 선정하기까지는 하중부와 같이 움직이게 되고, 압입이 시작되는 경우 특수 제작된 홀더가 빠지면서 압입자가 느끼는 변위를 그대로 읽어 들일 수 있다. 또한 시험편의 곡률과 거칠기로 인해 일어날 수 있는 오차를 최소화할 수 있도록 설계되어 있다.

압입시험 후 압입하중-변위곡선을 얻을 수 있으며, 노트북 컴퓨터에 탑재된 물성분석 소프트웨어를 통하여 유동곡선, 항복강도, 인장강도, 가공경화지수, 경도값을 현장에서 즉시 산출할 수 있다. 또한 하중-변위곡선의 중첩 기능을 통하여, 열화소재의 물성 변화 또한 즉석에서 비교할 수 있는 프로그램을 갖추고 있다.

2.2 인장특성을 이용한 건전성 평가

가공경화지수는 재질 열화도 평가의 새로운 변수로서 제안되고 있다. 가공경화지수의 장점은 재료의 강도특성과 파괴특성에 대한 정보를 동시에 제공한다는 점이다. 일반적으로 열화가 진행될수록 재료는 강도특성(연화 또는 경화)과 파괴특성(취화 또는 피로 등)의 변화를 동시에 수반하게 된다. 재료의 강도적 변화만을 나타내는 변수인 항복강도 및 인장강도와는 달리 가공경화지수는 재료의 변형능력과 관련되는 인자인 취화를 나타내는 변수로도 해석 가능하다. 이는 가공경화지수가 인장시험 시 최대하중에서의 진변형률 값인 균일 연신율과 동일한 값을 나타내기 때문이다. 따라서 Larson-Miller 파라미터 등과 같은 열화평가 파라미터의 변화에 따른 가공경화지수의 변화를 관찰하면 건전성 평가가 가능하다고 판단된다.

재료의 변형능력을 나타내는 또 다른 변수인 항복비(항복강도/인장강도) 또한 열화 평가 변수로서의 사용가능성이 검토되고 있다. 일부 연구결과에서는 항복비가 열화평가변수로서 가능하다는 보고도 있다.

3. 경도법

경도법은 시험이 간편하고 실용화 가능성이 가장 높은 방법 중의 하나로 알려져 있다. 경도를 알면 재료의 다른 성질, 예를 들면 강도, 내마모성, 변형저항 등을 알 수 있기 때문에 경도값 자체를 알기 위해서 뿐만 아니라 그 밖의 다른 성질을 추측하기 위해서 경도시험을 한다. 따라서 경도시험을 하여 다른 성질을 추측하고자 할 때에는 알고자하는 성질에 민감한 경도시험법을 선택하는 것이 가

장 중요하다. 또한 경도와 다른 성질과의 상관관계는 이론적인 것이 아니고 경험적인 것이며, 경도값은 측정 조건에 따라 상당히 변하기 때문에 시험 조건을 일정하게 해 주어야 한다.

3.1 경도 감소량을 이용하는 경우

손상재와 무부하가열재와의 경도차, ΔH_V 를 구하여 경도 감소량과 크리프 손상과의 관계로부터 크리프 손상량을 추정하는 방법이다. 일부 소재에서 경도차, ΔH_V 는 일정한 폭을 갖고, 크리프 손상도의 증가에 따라 직선적으로 증가하는, 좋은 상관관계를 나타내고 있다.

3.2 경도값을 이용하는 경우

크리프파단시험 결과와 경도간에는 아래와 같은 상관 관계가 있다.

$$(20 + \log t_r) = C(\sigma)H_V + D(\sigma) \quad (1)$$

여기서 T는 절대온도이고 t_r 은 크리프파단시간이다. C(σ)와 D(σ)는 응력, σ 만의 함수이며 실기의 경도를 측정하면 경년열화 후의 크리프파단시간을 알 수 있어 잔여 수명을 예측할 수 있다.

3.3 경도비를 이용하는 경우

경년열화에 의한 경도 저하는 단순 가열에 의한 영향과 응력에 의한 영향으로 구분할 수 있다고 생각하여 시간·온도 변수를 이용한 새로운 변수, G를 식 (2)와 같이 정의하고, 응력이 부가되는 경우에는 그에 의한 영향으로 ΔG 만큼의 변화가 일어난다고 생각하였다.

$$G = \log T + \log(20 + \log t) \quad (2)$$

T : 절대온도, t : 시간

결국 경도 변화(연화)는 식 (3)을 이용하여 시간·온도·응력 변수, G'으로 정리할 수 있다.

$$G' = G + \Delta G \quad (3)$$

4. 전기비저항법

DC 전류에 의한 측정의 경우, 간격이 작은 4 point-probe를 사용하여도 대략 극간간격정도의 깊이까지의 부피평균적인 값을 측정한다고 보는 것이 타당하므로 열화의 정도가 표면(1 mm 이하)에 집중되는 경우에는 열화의 측정 감도가 더욱 감소한다고 볼 수 있다. 표면에 국한된 부분의 전기전도도는 미시적인 조대

화와 석출이외에, 또 다른 열화의 주요 요인인 입계면의 박리, void등에 의하여 민감하게 변화할 가능성을 갖게 된다.

본 시험법은 실기 부재에서 직접 금속재료의 열화도를 평가하기 위해 개발된 시험법이다. 시험방법 및 절차는 아래와 같다.

4.1 시험편 및 시험장치

시험편의 표면상태는 1200#의 emery paper로 마무리 한 정도를 원칙으로 한다.

가) 시험설비

시험편에 전류를 공급하는 장치로는 정확도가 0.05 % 이상 되는 전류공급기의 사용이 권장되며, 가능한 한 전류량을 표준저항기와 전류측정기를 사용하여 연속적으로 측정해야 한다. 그리고 시험편의 전압은 1 nV 단위까지 측정할 수 있는 정확도가 0.1% 이상인 nano-voltmeter의 사용이 권장된다.

나) 전류 입·출력선 및 시험치구

전류 입·출력선을 점용접하여 전기비저항을 측정하는 경우는 전류입력선과 전압측정선으로 직경 0.5 mm의 chromel 열전대선의 사용이 권장된다. 또한 접촉식으로 전기비저항을 측정할 경우는 전류 입·출력선으로 직경 1.0 mm의 구리선의 사용이 권장된다. 특히 접촉식의 경우 시험온도의 유지를 위해 알루미늄으로 만든 차폐용 시험상자의 사용이 권장된다.

4.2 시험방법

가) 시험편의 설치 및 크기 측정

전류입력선을 전류공급기에 연결하고 전압측정선을 nano-voltmeter에 연결한다. 특히 접촉식의 경우는 시험편과 탐촉자가 잘 압착되도록 한다. 그리고 시험편의 크기는 최소한 0.01 mm 단위까지 측정해야 측정오차를 줄이기 위해 10 회 이상 반복 측정해야 한다.

나) 시험온도

시험온도는 25 ℃를 기준으로 하고 시험온도의 제어 및 기록을 실시한다. 시험온도는 설정온도에 대한 요동온도의 폭이 0.5 % 이내가 되도록 유지시켜야 한다. 또한 시험온도에 도달한 후 시험에 착수할 때까지의 유지시간을 30분을 원칙으로 한다.

다) 전압측정

전압측정시에 상당히 큰 오차를 야기하는 점점의 온도변화에 따른 열기전력의 영향을 줄이기 위하여 전류의 방향을 바꾸어 전압을 측정하여 정방향과 역방향에서 얻은 두 전압의 평균값을 사용해야 한다. 이때 동상신호에 의한 잡음신호의 영향을 최소화시키기 위하여 동일한 접지를 사용해야 한다.

5. 자기적 특성

5.1 시험장치 및 시험방법

B-H loop을 측정하기 위한 장치의 개략도는 Fig. 1 과 같다. B-H loop을 측정하기 위한 장치는 시편에 자화력을 인가하기 위한 파형발생기(waveform generator)와 전력증폭기(power amplifier), 자화력 측정을 위한 션트(shunt)저항 (1Ω), 그리고 자속밀도 측정을 위한 자속계(fluxmeter)로 구성된다. 전기장판을 이용하여 E형 yoke를 만들고 이 yoke에 자속밀도측정용 코일(B-search coil)을 양쪽 끝에 각각 80회씩 총 160회, 자기장 인가용 코일(magnetizing coil)을 가운데에 440회 권선한다. 션트(Shunt)와 자속계(fluxmeter)에서 읽혀진 값은 디지털 오실로스코프에서 digitized된 후 컴퓨터에서 data를 처리한다. 디지털 오실로스코프에서 얻은 data는 각각의 offset을 맞춘 후, 다음의 식(4)과 식(5)에 의해 B와 H의 data를 구하고 그 data로부터 Fig. 2와 같은 B-H loop(자기이력곡선)을 구한다.

$$H = \frac{N_1 I}{l_{eff}} \quad (\text{A/m}) \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{N_2 A} \Delta\Phi \quad (\text{T}) \quad (5)$$

여기서 N_1 은 1차코일(magnetizing coil), N_2 는 2차코일(B-search coil), l_{eff} 는 유효자기경로(effective magnetic path length), A 는 단면적, $\Delta\Phi$ 는 자기선속량의 변화를 나타낸다.

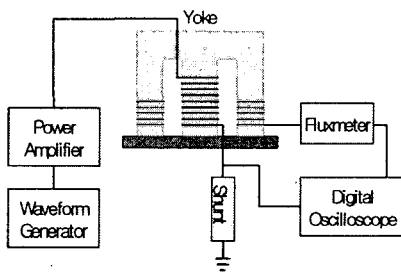


Fig. 1. Schematic diagram of the constructed B-H loop tracer.

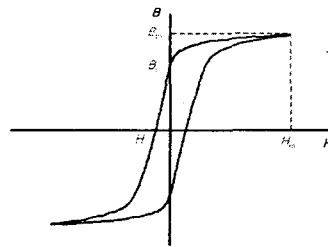


Fig. 2. B-H loop.

5.2 B-H loop

자기장 인가용 코일에 전류 I 를 흘려주면 자화력 H 가 발생하고 시편에는 인가된 자화력에 의해 자속밀도 B 가 발생하게 된다. 이와 같이 자화력에 대한 자속밀도의 곡선을 자기이력곡선이라 한다. 자기이력곡선 상에서 자화력(H)이 0일 때의 자속밀도는 잔류자속밀도(residual magnetic flux density) B_r 이라 하고, 자

속밀도(B)가 0일 때의 음의 자화력 절대값을 보자력(coercive force) H_c 라 한다. 또한 자기이력곡선상의 끝부분인 자속밀도 및 자화력의 최대값을 각각 최대자속 밀도(maximum magnetic flux density) B_m , 최대자화력(maximum magnetizing force) H_m 이라 한다.

6. 결론

본 연구에서는 주로 고온사용설비에서 적용되던 손상평가기술에 관한 국내외 연구동향, 그 것에 기초한 건전성평가법의 개요를 소개하였다. 손상평가기술은 통상 대상이 되는 강종이나 기기에 따라 크게 다른 것이 보통이다. 강종이나 기기마다 손상량 평가법이나 잔여수명측정법이 다르다고 해도 과언이 아니다. 또 모든 경우에 유효한 단일 손상량 계측법은 개발되어 있지 않은 상황이지만, 수명 평가법은 보다 정확하고 보다 간편한 것이 이상적이다. 비파괴법은 간편하긴 하지만 데이터의 흐트러짐의 평가, 응력집중부의 계측법, 실부품에서는 피할 수 없는 피로-크리프 상호작용의 평가 등에 대한 향후 연구가 필요하다. 해석법과 비파괴법은 서로 상호 보완하는 것으로 앞으로 이들 기술의 발전이 기대된다. 따라서 고정도의 손상량 계측이나 잔여수명 추정에 대해서는 신뢰성이 높은 가능한 많은 방법을 사용하여 종합적으로 판단할 필요가 있다.

7. 참고문헌

1. 김정기, 남승훈, 김엄기, “미소 비커스경도에 의한 Cr-Mo-V강의 경년열화 평가”, 열처리공학회지, 11(1), 54-61, (1998)
2. 김정기, 윤재영, 송기욱, 이주진, 정세희, “입계부식법에 의한 플랜트용 고온기기의 경년재질열화 평가에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 15(3), 898-906, (1991)
3. 남승훈, 유광민, 류제천, “전기비저항을 이용한 금속합금 열화도 평가기술”, 비파괴검사학회지, 21(5), 532-541, (2001)
4. 유권상, 김용일, 남승훈, 유광민, 조육, 손대락, “가역 투자율 측정에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강 of 열화도 평가”, 비파괴검사학회지, 20(5), 445-450, (2000)
5. 정현조, 남승훈, 장경영, 남영현, “비선형 음향효과에 의한 고온 재료의 파괴인성 열화도 평가”, 비파괴검사학회지, 20(5), 424-430, (2000)
6. 이종민, 남영현, 남승훈, 이승석, 이억섭, “Spherical indentation testing에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강 of 기계적 물성 평가”, 대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 A, 266-271, (2001)