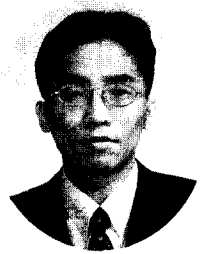


피로균열진전거동의 평가를 위한 균열길이 측정법 : 직류전위차법

.....
한승호



한국기계연구원 구조시스템부 선임연구원
전공은 재료기동 및 피로파괴역학이며,
관심분야는 구조물의 안전성 및
피로수명평가이다.

머리말

철강구조물의 부재 내에 노치나 균열이 존재할 수 있고, 외부의 피로 하중에 의하여 취약부에서 발생한 균열이 진전하여 전구조물의 최종파손을 야기시킬 수 있다. 부재를 보다 안전하게 사용하고 또한 신뢰성을 확보하기 위해서는 이미 손상된 부재에서 균열의 진전상태를 계측할 수 있는 방법이 확립되어야 하고, 파괴역학적 파라미터를 이용한 사용재의 균열진전거동특성이 평가되어야 한다.

균열길이의 측정방법은 지금까지 많은 연구자들에 의하여 개발되어져 왔는데, 크게 광학현미경을 이용하여 육안으로 직접 균열길이를 측정하는 방법과 컴플라이언스, 초음파, AE 또는 전기적 신호를 통하여 얻어진

결과로부터 균열길이를 환산하는 간접적인 방법으로 대별된다. 대부분의 균열길이의 측정방법은 많은 수작업이 요구되고, 특히 하한계응력확대계수영역의 미세한 균열진전량을 측정하기에는 어려움이 따르고 있다. 이에 대하여 전도체 시험편에 일정전류를 흐르게 하고 균열길이의 증가에 따라 변화하는 전위차로 이를 균열길이를 평가하는 전기적인 측정방법이 있다. 이 방법은 실험장치가 비교적 간단하고 미세한 균열길이의 측정이 용이하여 균열길이의 직접적인 측정이 곤란한 고온역 그리고 충격하중하에서의 균열길이 측정에 이용이 확대되고 있다.

이 글에서는 여러 균열길이 측정방법의 장·단점에 대하여 고찰하고, 그 중 많은 장점을 갖고 있는 직류전위차법의 실험방법을 소개한다.

균열길이 측정법

균열길이 측정법은 크게 직접적인 측정방법과 간접적인 측정방법으로 나누어지는데, 이들 방법의 장·단점 및 특징은 다음과 같다.

(1) 직접적인 측정방법

① 광학현미경에 의한 측정법

이 방법에 의한 측정방법은 실험 장비가 매우 간단하고 간편하며 보정곡선이 불필요하다. 그러나 내부의 균열진전특성 관찰이 불가능하고 정교한 균열길이의 측정이 곤란하다. 그리고 시험편 표면의 연마상태가 양호하여야 하고 균열길이 측정시 작업자가 대기하고 있어야 하는 단점을 갖고 있으나, 최근 CCD카메라와 화상처리프로그램을 이용한 방법이 소개되고 있어 이의 단점이 극복되고 있다.

② 파면검출에 의한 측정법

이 방법은 파괴검출에 의한 방법과 비치마크(beach mark)법에 의한 것으로, 전자는 파괴인성평가시험에 그리고 후자는 피로균열진전거동의 평가에 주로 이용되고 있다. 비치마크법은 하중 또는 환경의 급격한 변화에 따라 피로파면상에 나타나는 프레팅(fretting)산화물의 결과인 균열선단의 흔적인 비치마크로부터 균열길이를 측정하는 것이다. 이 방법은 피로균열진전거동의 파악이 어려운 용접이음부 등의 균열진전양상을

정량적으로 계측할 수 있다. 파괴검출에 의한 측정법의 단점은 한 개의 시험편에 대하여 연속측정이 불가능하지만 비치마크법은 비치마크의 형상 및 개수로부터 균열진전경로, 균열발생수명 및 전파수명 등을 추정할 수 있다. 그러나 비치마크의 형상이 불명확하면 균열진전양상에 대한 정보를 얻기 어려운 점도 있다.

(2) 간접적인 측정방법

① 컴플라이언스법

균열선단 근방의 변위를 게이지를 이용하여 측정하고, 여기서 얻어진 컴플라이언스변화를 균열길이로 환산하는 방법이다. 이 방법은 피로균열진전거동 평가에 대표적으로 이용되고 있다. 이 방법은 컴플라이언스와 실제균열길이와의 관계적인 보정곡선이 필요하다. 또한 피로균열진전속도가 낮은 경우 측정되는 컴플라이언스값이 미세해져지고, 하중반복속도가 높은 경우 균열개구변위측정이 곤란하여 균열길이측정에 어려움이 따른다. 또한 고온, 충격하중하에서의 적용에 문제점이 있다.

② 초음파법

시험체에 초음파를 보내어 이의 반사, 투과 및 회절하는 정도를 보정하여 균열길이의 유무를 확인하는 방법으로 비파괴검사법으로 활용되고 있다. 내부균열의 정량적인 계측에 유리하나, 장비가 고가이고 부식 환경에서의 적용에 문제가 있다.

③ AE(acoustic emission)법

시험체에 센서를 부착하여 균열면에서 발생하는 탄성응력파(AE)의 파형, 주파수스펙트럼과 진폭의 분포를 균열길이로 환산하는 방법으로 응력부식 및 고온역에서의 균열길이 측정에 이용되고 있다. 특히 균열개시점의 측정에 높은 민감도를 갖고 적용할 수 있는 장점을 갖고 있으나, 균열길이가 크게 증가함에 따라 AE방사가 미약해져 균열길이의 정량적 측정에 부적합한 단점이 있다.

④ 전기적인 측정법

일정 전류가 흐르는 시험체에 증가하는 균열길이에 따라 변화하는 전위차를 측정하여 이를 균열길이로 환산하는 방법이다. 사용되는 전류에 따라 교류전위차법과 직류전위차법으로 나눌 수 있다. 교류전위차법에서는 교류에서 나타나는 표면효과(skin effect)로 표면부에서 발생하는 균열측정이 용이하여 균열개시점의 평가에 유리한 점이 있고, 직류전위차법은 교류와는 다르게 전류가 시험편 표면과 내부에 균일하게 흐르므로 시험편 내부 균열길이의 변화를 비교적 정확히 측정할 수 있다.

직류전위차법

직류전위차법은 시험편에 일정전류를 흐르게 하고 피로시험 중 증가하는 균열길이에 따라 시험편 단면

적이 감소하면서 발생하는 전위차의 변화를 측정하여 이를 균열길이로 환산하는 방법이다.

실험방법과 장비가 비교적 간단하고 경제적이며 전산화가 편리한 장점을 들 수 있다. 그리고 피로시험 중 시험편에 가해지는 하중의 주기에 전위차가 큰 영향을 받지 않고 장시간 사용이 가능하여 균열길이의 직접적인 측정이 곤란한 고·저온도역 그리고 진공상태에서 직류전위차법이 효과적으로 이용될 수 있다. 또한 피로시험 중 미세한 균열길이의 변화를 측정할 수 있어, 하한계응력 확대계수치의 정확한 측정은 물론 이의 균열단함 정도를 평가하는 방법이 개발되고 있다.

단점으로는 서로 다른 전도체가 연결되어 있는 곳에 전류가 흐를 때 발생하는 thermal electromotive force(EMF)효과를 들 수 있다.

EMF 효과는 미세전압을 변화시켜 측정된 균열길이에 오차가 발생하게 된다. 이러한 현상을 막기 위하여 전위차가 측정되는 전압단자간의 온도를 일정하게 유지시켜야 한다. 또한 시험편의 온도변화에 따라 전위차가 민감하게 변화하는 경우가 있으므로 온도가 급격히 변화하는 시험조건에서는 직류전위차법의 적용에 많은 어려움이 따른다.

섬유강화복합재료와 같은 부도체 시험편에 직류전위차법의 적용이 곤란한 점이 있으나, 시험편 표면부에

전도체인 포일 또는 필름을 부착하여 이로부터 균열길이를 측정하는 replicate film method를 활용하는 방법이 제한적으로 적용될 수 있다.

직류전위차법을 이용한 균열길이 측정시 유의해야 할 일반적인 사항은 다음과 같다.

① 시험편과 시험기 사이에 전기적 절연

전위차 측정시 시험편에 가하여지는 전류가 시험기 몸체에 흐르게 되면 측정되는 미세전위차에 영향을 주어, 시험편과 시험기 사이에 전기적 절연장치가 필요하다. 일반적으로 저항비가(Q시험기/Q시험편) 10⁴ 이상인 경우 추가적인 절연장치가 필요치 않다.

② 전류단자와 전압단자의 위치선정
보정곡선 $U/U_0=f(a/W)$ 의 산출을 위하여 전류, 전압단자의 위치설정에 유의하여야 한다. CT-시험편의 경우 하중점 상·하단부와 시험편 전면 상·하부에서 전류단자가 위치하는 것이 있고, 전압단자는 시험편 노치부 전면부에 위치한다.

③ 일정한 초기전위차 U_0 의 설정
피로시험을 시작하기 전에 전류의 세기를 조절해야 하는데, 이를 통하여 시험편 초기균열길이에 해당하는 초기전위차 U_0 의 값을 일정하게 유지시킨다.

④ 균열길이의 선형보정
시험 중 발생하는 균열길이의 오차는 선형적으로 변한다는 가정하에

과면관찰로부터 얻어진 초기, 최종균열길이 오차의 크기로부터 시험기간 직류전위차법에 의하여 얻어진 균열길이를 보정한다.

단자의 위치선정 및 초기전위차 설정

그림 1은 직류전위차법에 의하여 피로균열길이를 측정하기 위한 시험편 형상 및 피로시험장치의 모식도이다.

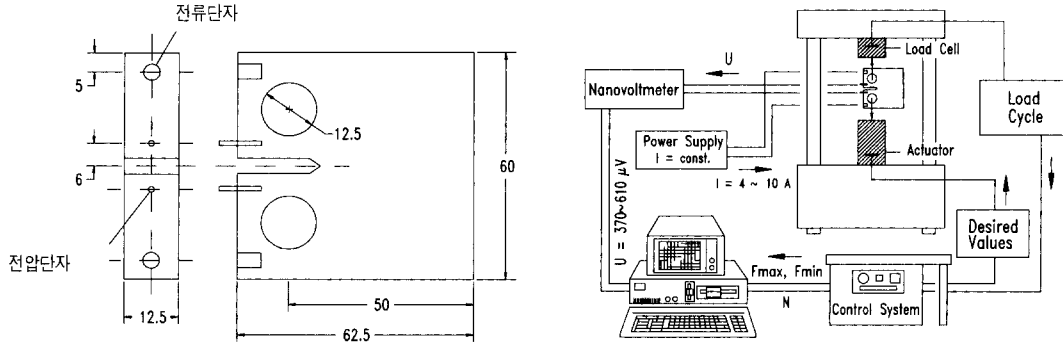
일정전류(4-10A)는 시험편의 전류단자를 통하여 흘러 들어가고, 실험중 증가하는 균열길이에 따라 변하는 미세전위차(370-650 μ V)는 전압단자에서 나노볼트미터를 이용하여 측정된다. 측정된 전위차는 시험기에 연결된 PC로부터 균열길이로 환산된다.

측정되는 전위차는 전압단자에서 발생하는 EMF의 효과로 오차를 갖게 되고, 시험실의 온도변화에 따라 발생하는 전압단자간의 온도차가 발생하여 균열길이의 정확한 측정을 어렵게 하므로 전압단자주위를 유리 섬유 등으로 단열 시킨다. 피로시험 중 시험편의 온도상승으로 인한 전위차의 변화를 막기 위하여 피로시험 전에 시험편을 정하중 하에서 약 1시간 정도 유지시킨 후 이때의 전위차를 U_0 로 취한다.

보정곡선의 산출

보정곡선을 산출할 때에 전류단자의 위치는 크게 두 곳으로 나누어 불

〈그림 1〉 직류전위차법을 이용하여 균열길이 측정을 위한 시험편 형상 및 피로시험장치



수 있는데, 시험편 하중점 상·하부에 전류를 공급하는 방식과 시험편 전면 상·하부에 전류를 가하는 방법이다.

시험편 하중점 상·하부에서 전류를 공급하는 방식의 경우 Johnson에 의하여 MT-시험편의 균열길이에 따른 전위차의 관계는 이론적으로 유도된다. 전류가 시험편을 통하

여 일정하게 흐른다는 가정하에 SENB-, MT- 그리고 CT-시험편의 균열길이는 이 이론식으로 측정할 수 있다.

그러나 시험편 하중점 상·하부에서 전류를 공급하는 경우 전류단자의 설치에 어려움이 따르고 보정곡선으로 균열길이를 측정하는 경우 많은 오차가 발생하므로, 전류단자

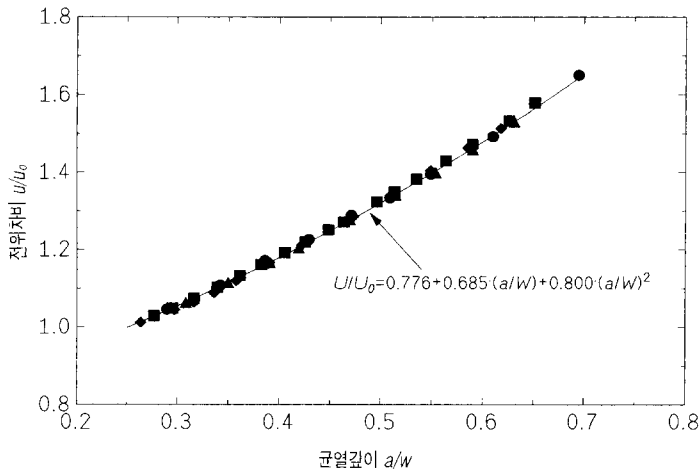
를 시험편 전면부 상·하부에 설치하고 실험적으로 보정곡선을 구한다.

전위차값의 필터링 처리

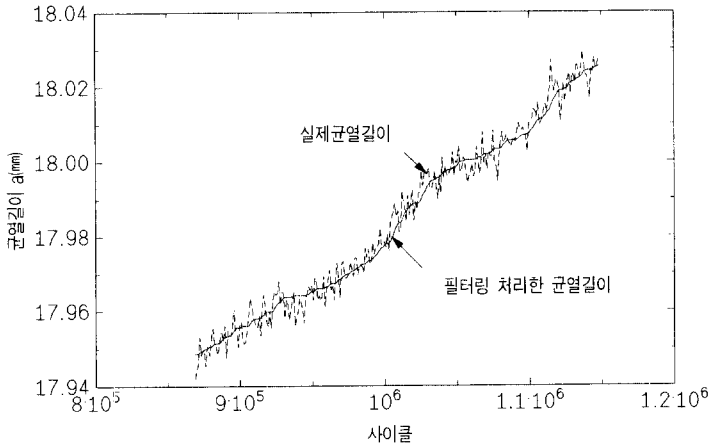
하한계응력확대계수영역에서는 직류전위차법을 이용하여 균열길이를 측정하는 경우 전위차가 매우 미세하게 변화한다. 외부적인 영향인자(온도, 습도)는 측정된 전위차에 영향을 주어 잡음이 발생하여 균열길이를 산출할 때 그 정확도가 떨어질 위험성이 있다. 따라서 하한계응력확대계수영역에서 피로균열진전거동의 측정시 미세하게 변화하는 전위차를 보정할 수 있는 필터링처리가 요구된다.

그림 3은 하한계응력확대계수영역에서 직류전위차법을 이용하여 주어진 사이클수에 대하여 측정된 피로 균열길이의 변화를 보여주고 있다. 필터링 처리를 하지 않은 결과에서

〈그림 2〉 실험에서 얻어진 보정곡선의 결과



〈그림 3〉 하한계응력확대계수영역에서 필터링 처리한 결과



약 0.01mm 정도의 잡음이 들어 있는 것이 관찰된다. 이를 필터링 처리함으로써 피로시험 중 발생하였던 잡음을 제거할 수 있고 보다 신뢰할 수 있는 정확한 피로균열길이를 측정할 수 있다.

단험현상으로 발생할 수 있는 두 균열길이간의 차이를 분석하고 직류전위차법에 의하여 얻어진 균열길이를 실제균열길이를 보정한다.

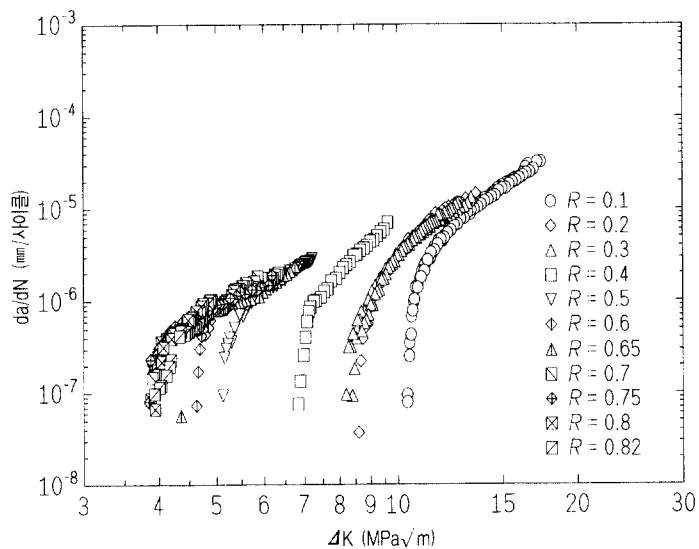
균열길이의 보정

하한계응력확대계수영역에서는 응력비 $R(P_{min}/P_{max})$ 이 낮은 경우 ($R \leq 0.6$) 균열단험현상이 현저히 발생하여 균열선단면이 서로 접촉하게 되어 직류전위차법에 의한 균열길이 측정시 오차가 발생할 수 있다. 이때 균열길이의 선형보정을 통하여 이 오차를 보정할 수 있다. 균열길이의 선형보정은 균열길이의 오차가 선형적으로 변한다는 가정하에 파면관찰을 통하여 얻어진 초기, 최종균열길이와 직류전위차법에 의하여 얻어진 균열길이를 비교하여 수행된다. 균열

용 용 예

하한계응력확대계수영역에서는 피로균열진전속도가 낮아 일정하중진폭시험에 의한 피로균열진전거동의 평가가 어렵기 때문에 ΔK -감소시험이 추천되고 있다. 피로시험 중 R 을 일정하게 유지하며 ΔK 값을 지수함수적으로 감소시킨다. 그림 4는 ΔK -감소시험으로 직류전위차법에 의한 균열길이 측정으로 얻어진 강도의 피로균열진전속도 da/dN 과 응력확대계수범위 ΔK 로 표현되는 피로균열진전거동의 양상을 보여주는 결과이다. R 이 커짐에 따라 빠른 피로균열진전거동을 보이고, 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 는 현저하게 낮게 나타나는 경향을 보여주고 있다.

〈그림 4〉 하한계응력확대계수영역에서 M3강의 피로균열진전거동



(그림 5) 강의 ΔK_{th} -R의 관계

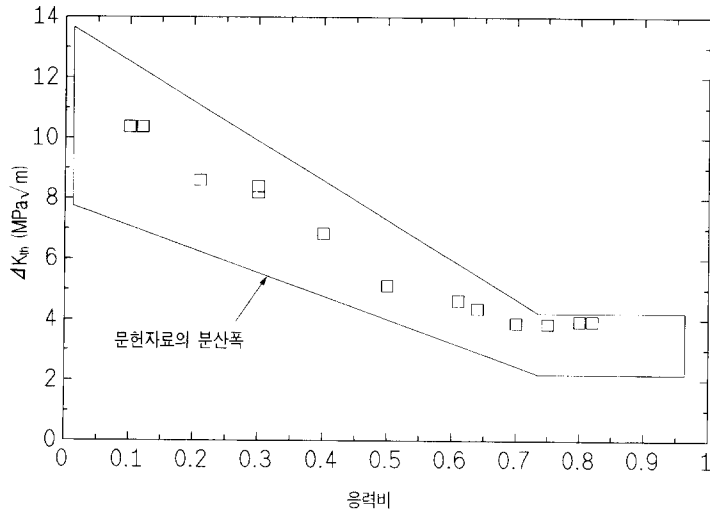


그림 5는 사용재의 ΔK_{th} 를 이미 발표된 구조용강재의 결과(분산폭)와 함께 나타내어 이들을 비교하여 보았다. 사용재의 결과는 분산폭과 서로 잘 일치하고 있어 직류전위차법으로 얻어진 ΔK_{th} 값이 매우 신뢰할 수 있는 것임을 확인할 수 있다.

로 Paris영역은 물론 하한계응력확대계수영역에서도 미세하게 증가하는 균열길이 측정이 가능하였다. 따라서 보다 신뢰할 수 있는 피로균열진전거동의 평가가 요구되는 경우 직류전위차법의 활용도가 크다.

(권재도 위원)

맺음말

이 글에서는 균열길이 측정법인 직접적인 측정방법과 간접적인 측정방법의 장·단점에 대하여 살펴보았고, 특히 간접적인 측정방법인 직류전위차법의 실험방법과 이의 응용결과를 소개하였다. 균열길이 측정에 있어서는 실험조건에 가장 맞는 방법을 택하여야 함은 당연하며, 직류전위차법에 의한 균열길이의 측정으