

광-적외선 열화상 검사기술에서 결함크기 측정 불확도 Uncertainty Analysis in Defectizing Light Induced Infrared Thermograph

*최만용¹, #강기수¹, 박정학¹, 김원태²

*M. Y. Choi¹, #K. S. Kang(kskang@kriss.re.kr)¹, J. H. Park¹, W. T. Kim²

¹ 한국표준과학연구원 안전그룹, ² 공주대학교 생물산업기계공학과

Key words : Infrared Thermography, Defect size, Uncertainty

1. 서론

각종 구조물에 존재하는 결함의 크기를 정량적으로 평가하고 자하는 노력이 다양한 검사 기법으로 행해지고 있다. 이러한 검사결과로부터 정의된 결함의 크기는 구조물 건전성평가 및 제품의 불량 여부를 판단하는데 중요한 역할을 하게 된다. 지금까지 측정결과의 신뢰성에 관한 정량적인 방법의 표현으로서 오차(Error)나 오차분산을 오랫동안 사용해 왔으나, 참값을 영원히 알 수 없기 때문에 명시된 측정결과의 신뢰성에는 의심이 남아 있을 수밖에 없다. 이에 따라 국제적으로 측정결과의 신뢰성을 판단할 수 있는 척도로서 불확도 개념이 도입되고, 국제표준화기구(ISO)가 여러 국제기구와 합동으로 “측정불확도 표현지침”을 발간하였으며, 한국표준과학연구원에서도 국문판 “측정불확도 표현지침”을 발간하여 활용하고 있다¹. 측정불확도는 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영한 개념이다. 즉, 측정결과에 대해 계통효과를 완전하게 보정할 수 없으며, 반복 측정에 있어서 우연효과가 있기 때문에 항상 측정결과는 추정치에 불과하게 된다. 또한, 적절한 보정을 한 후의 측정결과가 우연히 참값에 매우 가까운 경우에 오차는 매우 작을 수도 있으나, 측정결과와 불확도는 매우 클 수도 있기 때문에 불확도와 오차는 구별하여야 한다². 본 논문에서는 광-적외선 열화상기법을 이용한 결함의 크기측정에 있어서 측정결과의 신뢰성을 증대하기 위해 불확도 요인을 분석하고 이에 따른 불확도 평가결과를 제시하였다.

2. 광-적외선 열화상 시스템 구성

광-적외선 열화상 기법은 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 본 논문에서는 결함검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수로 입사되는 열원(heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 이 기법은 외부 자극원으로서 광(할로겐 램프)을 사용하여 대상체에 조화함수로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다³. 측정 불확도 평가사례를 제시하기 위해서 사용된 시험편은 스테인레스강 (STS304)으로 시험편 내부에 직경 20 mm의 인공결함(back-drilled-bottom-plate defects)이 가공되어 있다. 적외선 열화상 시스템은 프랑스 Cedip사의 Silver 480 상용제품을 사용하였다.

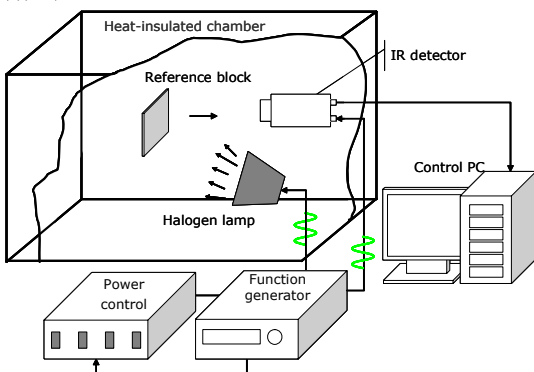


Fig. 1 Schematic of light induced infrared thermography system

3. 측정 불확도 평가

3.1 측정의 수학적 모델 설정

적외선 열화상기술에서는 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소수(pixel)로 크기를 대략적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기측정을 위해서는 먼저 지지자를 이용하여 적외선 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 구하고, 단위 화소에 대응하는 길이를 결함이 차지하는 화소수에 곱함으로써 결함의 크기를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm) D 는 식(1)과 같이 표현된다.

$$D = M \times \frac{L}{P} \quad (1)$$

여기에서 L 는 지지자(calibrator)의 길이(mm), P 는 지지자의 길이에 대응하는 화소수(pixel), M 는 결함이 차지하는 화소수(pixel)이다.

3.2 합성표준불확도 관계식 유도

불확도 전파법칙에 따라 수학적모델로부터 각 입력량의 상관관계를 고려하여 합성표준불확도 관계식을 다음과 같이 유도한다.

$$u_c(D) = \sqrt{c^2(L) \cdot u^2(L) + c^2(P) \cdot u^2(P) + c^2(M) \cdot u^2(M)} \quad (2)$$

3.3 각 입력량에 대한 표준불확도 산출

수학적모델에서 입력량은 L, P, M 이 되고 각 입력량에 대해 표준불확도를 다음과 같이 구할 수 있다.

3.3.1 지지자 길이의 표준불확도, $u(L)$

캘리퍼스 교정절차(C-01-1-0120-2000, KRISS)에 의해 교정된 디지털 캘리퍼스를 이용하여 30 mm의 지지자의 길이를 10회 반복 측정하여 얻은 결과가 다음과 같을 때,

30.02	29.93	29.93	29.97	30.12
29.82	29.99	29.95	30.06	30.06

반복측정의 평균값 \bar{q} 에 대한 표준편차 $s(\bar{q})$ 를 구하면 측정 반복성으로 인한 A형 불확도 $u_A(L)$ 와 자유도 $\nu_A(L)$ 는 다음과 같다.

$$u_A(L) = s(\bar{q}_i) = \frac{s(q_i)}{\sqrt{n}} = 0.028, \quad \nu_A(L) = n-1 = 9$$

길이 측정에 사용된 디지털 캘리퍼스의 확장불확도는 0.014 mm이므로(C-01-1-0120-2000, KRISS) 분해능에 의한 지지값의 산포범위는 ± 0.007 mm가 되며, 직사각형 확률분포로 가정하여 B형 표준 불확도는 다음과 같다.

$$u_B(L) = \frac{0.007}{\sqrt{3}} = 0.004, \quad \nu_B(L) = \infty$$

따라서, 지시자 길이의 표준 불확도 $u(L)$ 와 유효자유도 $\nu_{eff}(L)$

$$u(L) = \sqrt{u_A^2(L) + u_B^2(L)} = 0.029$$

$$\nu_{eff}(L) = \frac{u^4(L)}{\frac{u_A^4(L)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(L)}{\nu_B}} = 9$$

3.3.2 지시자 길이에 대응하는 화소수의 불확도, $u(P)$

지시자를 측정된 적외선 카메라의 영상에서 지시자에 해당되는 화소수를 10회 반복 측정된 결과가 표 2.1과 같을 때, 측정결과로부터 A형 불확도 계산 결과는 다음과 같다.

38	39	37	38	38
37	37	38	38	38

반복측정의 평균값 \bar{q} 에 대한 표준편차 $s(\bar{q})$ 를 구하면 측정 반복성으로 인한 A형 불확도 $u_A(P)$ 와 자유도 $\nu_A(P)$ 는 다음과 같다.

$$u_A(P) = s(\bar{q}_i) = \frac{s(q_i)}{\sqrt{n}} = 0.211, \quad \nu_A(P) = n - 1 = 9$$

화소수 측정에 사용되는 소프트웨어의 분해능은 1 pixel이므로 분해능에 의한 지시값의 산포 범위는 ± 0.5 pixel이 되며, 직사각형 확률분포로 가정하여 B형 표준 불확도 $u_B(P)$ 와 자유도 $\nu_B(P)$ 는 다음과 같다.

$$u_B(P) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289, \quad \nu_B(P) = \infty$$

따라서, 지시자 길이에 대응하는 화소수의 표준불확도 $u(P)$ 와 유효자유도 $\nu_{eff}(P)$

$$u(P) = \sqrt{u_A^2(P) + u_B^2(P)} = 0.357$$

$$\nu_{eff}(P) = \frac{u^4(P)}{\frac{u_A^4(P)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(P)}{\nu_B}} = 74$$

3.3.3 결함에 대응하는 화소수의 불확도, $u(M)$

결함을 측정된 적외선 카메라의 영상에서 결함에 대응되는 화소수를 10회 반복 측정된 결과가 다음과 같을 때,

25	26	24	25	25
26	27	23	27	25

3.3.2와 같은 방법으로 결함 길이에 대응하는 화소수의 표준불확도 $u(M)$ 와 유효자유도 $\nu_{eff}(M)$ 를 구할 수 있다.

$$u(M) = \sqrt{u_A^2(M) + u_B^2(M)} = 0.507$$

$$\nu_{eff}(M) = \frac{u^4(M)}{\frac{u_A^4(M)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(M)}{\nu_B}} = 20$$

3.4 합성표준불확도 계산

입력량의 상관관계를 고려한 합성표준불확도는 $u_c(D)$ 와 유효자유도 $\nu_{eff}(D)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_c(D) &= \sqrt{c^2(L) \cdot u^2(L) + c^2(P) \cdot u^2(P) + c^2(M) \cdot u^2(M)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial L}\right)^2 \cdot u^2(L) + \left(\frac{\partial D}{\partial P}\right)^2 \cdot u^2(P) + \left(\frac{\partial D}{\partial M}\right)^2 \cdot u^2(M)} \\ &= \sqrt{\left(\frac{M}{P}\right)^2 \cdot u^2(L) + \left(\frac{ML}{P^2}\right)^2 \cdot u^2(P) + \left(\frac{L}{P}\right)^2 \cdot u^2(M)} \\ &= 0.445 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_{eff}(D) &= \frac{u_c^4(D)}{\frac{c^4(L) \cdot u^4(L)}{\nu_{eff}(L)} + \frac{c^4(P) \cdot u^4(P)}{\nu_{eff}(P)} + \frac{c^4(M) \cdot u^4(M)}{\nu_{eff}(M)}} \\ &= 29 \end{aligned}$$

여기에서 $L = 29.985$ mm, $u(L) = 0.029$ mm, $\nu_{eff}(L) = 9$, $P = 37.80$ pixel, $u(P) = 0.357$ pixel, $\nu_{eff}(P) = 74$, $M = 25.30$ pixel, $u(M) = 0.507$ pixel, $\nu_{eff}(M) = 20$ 를 각각 사용하였다.

3.5 불확도 총괄표 작성

각 불확도 성분의 표준불확도, 확률분포, 감도계수, 불확도 기여량 및 자유도, 그리고 합성표준불확도를 나타낸 총괄표를 작성하는 것으로 본 논문에서는 지면관계상 생략하였다.

3.6 확장불확도 계산

유효자유도 “29”에 대해 t-분포도 신뢰수준 95 %일 때, $k = 2.04$ 이므로, 확장불확도는 $U = k \cdot u_c(D) = 0.908$ mm가 된다.

3.7 불확도 보고

“결함 측정결과는 $D = 20.069 \pm 0.908$ mm 이다.”

여기서, \pm 기호 다음의 숫자는 (확장불확도) $U = k \cdot u_c(D)$ 의 값이며, 이 값은(합성표준불확도) $u_c(D) = 0.445$ mm와 자유도 $\nu = 29$ 에 대한 t분포에 근거한(포함인자) $k = 2.04$ 으로부터 결정되었고, 이는 95 %의 신뢰수준을 갖는 것으로 추정되는 구간을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 광-적외선 열화상을 이용하여 결함크기를 측정하는데 있어 발생하는 측정 불확도를 평가하였다. 측정 불확도를 평가함으로써 기존 결함의 크기를 단순히 오차의 개념으로 표현함에 있어서 발생 가능한 오류를 최소화할 수 있으며, 측정 결과에 대한 신뢰성을 부여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국표준과학연구원, “측정불확도 표현지침”, KRIS-99-070-SP, 1999.
2. 최주호, 홍성수, “압력측정 시스템의 불확도 평가”, 한국군사과학기술학회지, 5(1), 15-23, 2002.
3. 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, “위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가”, 비파괴 검사학회지, 27(4), 321-327, 2007.