

비파괴검사 평가를 위한 시간-분해 펄스열화상의 최적화에 관한 제고

Remarks on of Optimizations of Time-Resolved Pulse Thermography for Nondestructive Testing Evaluations

김원태 (적외선열화상분과위원장, 공주대학교)

E-mail: kwt@kongju.ac.kr

요 약 펄스 열화상에서 서모그램 등 데이터의 플롯에 의해 표시되어지는 로그-로그 플롯을 활용해서 특정하게 정류(rectification)하여 펄스 서모그램을 잘 사용하도록 정의하고 열화상 신호복원(thermographic signal reconstruction; TSR) 기법에 의해 실험 데이터를 피팅하도록 한다, 이와 같은 물리적인 해석 및 수학적 대수 기법에 의해 펄스열화상은 단순하면서도 효율적인 정규화가 가능하게 될 수 있다. 펄스열화상의 최적화는 로그대수 유도도 비교되는 콘트라스트(contrast)의 초기 검출과 TSR의 사용이라는 두 가지 돋보이는 접근 방법에 기반하여 이루어진다. 펄스자극열화상을 최적화하기 위해서 두 개의 매개변수, 즉 결함 콘트라스트의 신호 대 잡음비와 추출에 대한 선인식을 고려하는 것이 필요하다.

1 서 론

수년간에 걸쳐 일반적으로 펄스열화상(pulse thermography; PT)으로 일컫는 시간-분해 열화상을 적용한 비파괴평가에 관해 많은 연구가 진행되어 왔다[1,2]. 진폭 또는 진폭 콘트라스트 영상에 의해 그 결과가 구성되는 시간-분해 펄스 열화상은 위상잠금열화상(locked-in thermography; LT)[3]과 펄스 또는 펄스-콘트라스트 위상으로 이어지는 펄스위상열화상(pulse phase thermography; PPT)[4]과 비교할 때 수용할 수 없을 정도로 취약한 것으로 인식되고 있다. 이러한 취약성이 발생하는 이유는 테스트 샘플의 광학적 상태량(흡수율과 반사율)의 공간 변동성에 따른 온도 상승 및 자극하는 열유속에 강력히 의존하기 때문이다. 이 의존성은 효율적인 처리의 여부에 따라 사실이 아니기도 하다. 이와같이 앞서 지적된 문제점의 잘못된 인식은 종종 위상에 근거한 펄스 기법이 불완전함 또는 바람직하지 않은 정규화 진폭 영상을 생성하는 데이터 프로세싱에 의거한다. 이는 조약한 진폭으로 수행된 PT 실험에 비교되는 편향된 비교들에 의해 검증되고 있다. 따라서, 객관성 및 공정한 비교의 부족이 최근에

여러 문헌들을 통해 클로즈업되고 있다[5].

더구나, 비교 방법 각각의 정성적인 것들을 판단하게끔 하는 정량화 기준들의 부족으로 비교들이 너무 정성화 되어 있다. 그럼에도 불구하고, 최근에는 테스트된 방법들의 결함 검출능을 특징하는 신호 대 잡음비(signal to noise; SNR)를 사용하여 비교하는 연구 결과들이 부분적으로 진행됨에 따라 데이터를 비교하고 판단하는 것이 엄격해야 한다[6,7]. 최종적으로, 상기 언급된 상황은 시간-분해 열화상의 잘못된 인식은 이 방법이 널리 사용되는 미국과 같은 나라에서는 사실이 아닌 것으로 인식되어 있고 가장 복잡하지만 다용도의 열적 비파괴검사(Nondestructive Testing; NDT) 기법으로 인식되어 있다.

2. 펄스열화상을 잘 사용하는 방법에 관해

본 절에서는 서론에서 문제로 삼았던 펄스열화상(PT)에 대한 LT나 PPT 등 타 방법과의 비교에 대한 문제를 거론함에 앞서, 우선적으로, 펄스열화상(PT)을 잘 사용하기 위한 몇 가지 규칙들에 대해 간략히 서술하도록 한다. 이를 통해서 펄스 열화상이 빈번하게 적용되어진다면 보다 매력있

는 기술이 되고 정밀함을 갖게 되어 경쟁력 있는 열영상 결함검출기법으로 비교될 것이다.

2.1. 온도 상승 및 열 콘트라스트의 정의

PT방법에서, 결함의 검출 및 특성화는 의심되는 영역(zone)과 건전영역 사이에서의 부속하는 상태적 열적 콘트라스트, Cr의 검출 및 특성화에 의존한다. 따라서 콘트라스트의 정의를 엄격히 사용하는 것이 필요하다. 특별하게, 온도 상승의 시간과 공간잡음을 비교한 콘트라스트의 취약성 때문에 테스트된 구조의 각각 및 모든 점들의 개개 초기온도를 고려하는 것과 등은 상태가 펄스 발생 전에 존재하는 것으로 단순히 가정하지 않는 것이 필요하다(시간 $t=0-\epsilon$). 서모그램의 시작에 대한 최적처리를 위해 시간 적도의 원점은 펄스의 에너지 값 중심이 되어야 한다는 것을 상기하도록 한다[8].

고려해야 할 매개변수 온도상승은 다음과 같다

$$\Delta T_{x,y}(t) = T_{x,y}(t) - T_{x,y}(0-\epsilon) \quad (1)$$

그리고 관련 콘트라스트는 다음과 같다.

$$Cr_{x,y}(t) = \frac{Ca_{c,t}}{\Delta T_{S_{xy}}(t)} = \frac{\Delta T_{d_{xy}}(t) - \Delta T_{S_{xy}}(t)}{\Delta T_{S_{xy}}(t)} = \frac{\Delta T_{d_{xy}}(t)}{\Delta T_{S_{xy}}(t)} - 1 \quad (2)$$

여기서, $Ca_{x,y}(t)$ 는 결함부(첨자 d)와 건전부(첨자 S) 사이의 절대 콘트라스트이다. 건전부에 대한 정의를 내리는 문제는 다음 절에서 기술하도록 한다. 펄스 응답의 분석은 일반적으로 온도의 절대적 측정치일 필요는 없다. 카메라에 의해 발생되어지는 전기신호는 온도에 비례하는 것으로 충분하며 보상곡선의 선형화를 허용하는 약간의 온도값 상승으로 보면 된다.

2.2. 서모그램의 그래픽 묘사 - 정류화

Fig. 1에 보여지는 것처럼 펄스열화상을 이용하기 위해서는 직교좌표계가 아닌 로그-로그 좌표계에서 서모그램을 플롯하는 것이 필수적이다. 한 예로 설정된 카메라로부터의 실험으로부터 살

펴보도록 한다[9]. 검게 코팅된 탄소재료로부터 서모그램은 4 ms 지속 플래시에 대한 코팅된 1 cm 두께의 듀랄루민판의 전면 부상에 대해서 모그램이 얻어진다. IR카메라의 영상율은 200 Hz이다. 직교좌표계에서 곡선은 시험조건과 시험체에 관한 어떠한 흥미있는 정보도 실질적으로 제공하지 않는 반면에, 로그-로그 곡선의 것과 똑 같지는 않다. 이러한 펄스 서모그램의 로그-로그 묘사는 오래전부터 알려져 있다[1,10,11]. 로그-로그 묘사는 이면의 물리적 현상을 드러나게 하는 정류(rectification)를 나타내는 것으로 지난 삼십년에 걸쳐 매우 잘 서술되어 왔다[12].

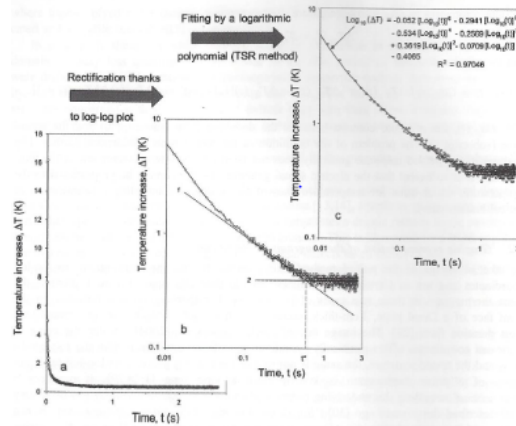


Fig. 1 Log-log plots for experimental thermograms of pulse thermography; (a) experimental pulsed thermograms in 4 ms illumination on a 1 cm-thick dural plate with carbon-black coating[1], (b) rectification to log-log plot, (c) fitting of the log-log curve by TSR method[9]

Fig. 1(a)에서 보여지는 것처럼 서모그램이 0.1초와 0.3초 사이에 경사도가 -1/2(line 1)로 같은 것으로 직선에 의해 잘 서술되어 있음을 알 수 있다. 이것은 1차원 열전달과 반무한 매체의 가정들이 실험의 초기에 잘 맞다는 것을 확인해준다. 실험 끝부분에서, 서모그램은 준-단열상태에 해당하는 수평의 안정세를 보여준다. 이것은 열손실이 적어도 3초에 이르기까지에는 무시할 만한 것으로 고려될 수 있음을 설명한다. 서모그램의 시작은 -1/2 경사도의 직선과는 벗어나는데 이것은 탄소재료에 검게 코팅이 되어있다는 것을 나타내는 것이다. 검은 탄소재의 방사율은 매우 낮으므로 매우 높은 온도 상승을 만들어낸다. 만

약에 펄스 지속기간이 더 짧아지고 프레임율이 더 높아지게 되면 또 다른 $-1/2$ 경사도 직선이 발견되어질 것이다. 정성값에 의한 이동된 ΔT 는 $\frac{\epsilon_{Dural}}{\epsilon_{coating}}$ 이다. 따라서, 로그-로그 플롯은 듀랄루민의 열적 상태량을 확인하는 것으로 고려되어서는 안되는 서모그램의 부분을 보여주기 때문에 유용하다. 마지막으로 line 1과 line 2를 가로지르는 것에 상응하는 시간으로 매개변수 $\frac{\kappa}{L^2}$ 를 신속히 확인한다. 여기서 κ 는 듀랄루민의 확산계수이고 L 은 판의 두께이다 그리고 이에 대한 상관식은 다음과 같다.

$$\frac{\kappa}{L^2} = \frac{1}{\pi t^*} \quad (3)$$

2.3. 열화상 신호 재구축 접근 방법

Shepherd[13] 등에 의해 제안된 TSR방법은 잘 알려진 것으로 비파괴평가에 널리 사용되어 오고 있다. 펄스열화상 실험에 대해 사용되는 방법은 다음과 같다.

- 실험 데이터의 로그-로그 플롯 서모그램 피팅:
대수로그 다항식에 의해 실험 데이터를 로그-로그 플롯한 서모그램 피팅에 관한 식은 다음과 같다.

$$\ln(\Delta T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 [\ln(t)]^2 + \dots + a_n [\ln(t)]^n \quad (4)$$

펄스 가열에 대해 특히 잘 어울리는 이 피팅은 종종 대수 로그리즘 피팅 단열(LFA; logarithmic fitting adiabatic)이라고 부른다[13].

- 일련의 온도 상승 영상을 $\Delta T(i, j, t)$ 로 교체:
온도 상승 $\Delta T(i, j, t)$ 는 다항식 계수, $a_0(i, j), \dots, a_n(i, j)$ 의 $(n+1)$ 개의 일련의 영상에 의해 교체된다. 이 연산은 데이터 량을 급격히 줄여준다. 이 $(n+1)$ 개의 영상으로부터, 전체의 열화상 시퀀스를 재구축하는 것이 가능하다.
- 일시적인 잡음(temporal noise):
일시적인 잡음의 제한된 증분으로 유도항들을 서모그램의 첫 번째 및 두 번째 대수로그 유도

항들에 대해 다항식으로부터 직접 얻고 NDE 목적으로 사용한다. 결합 깊이를 규명하는데 첫 번째 항의 대수로그 유도는 펄스조건에 대해서는 Cielo[10], 계단조건에 대해서는 Murphy 등[11] 문헌에 의해 서술되어 있다.

3. 열화상 영상의 정규화

3.1. 단순하고 효율적인 정규화

표면결함 현존의 경우를 배제하고 열펄스 증착을 따르게 하는 냉각의 매우 초기 순간동안, 시험체의 열적거동은 z방향에서 분출율, e_z ,에 의해 특성화된 반무한 동질의 매체에서 발생하는 것과 같은 것으로 고려할 수 있다. 표면온도 시간 전진은 매우 간단한 법칙에 따른다.

$$\Delta T_{x,y}(t) = \frac{Q_{x,y}}{e_z \sqrt{\pi t}} \quad (5)$$

내부결함의 영향이 느껴지기 시작할 때, 표면온도 전진은 보다 복잡해지고 한 지점에서 다른 지점으로 달라진다. 그럼에도 불구하고, 결함을 검출하고 특성화하기 위한 서모그램 분석은 국소가 열 -보여진 표면에 의해 국소적으로 방사되고 카메라 검출기에 의해 기록된 적외선 복사열-이 표면의 가능한 비완전 조도와(또는) 광학적 상태량(소스 스펙트럼 영역내 흡수율과 카메라 스펙트럼 영역 내에서 적외선 방사율)의 변동에 독립적이 되어야 한다. 이에 대한 해법은 펄스 발생에 충분히 근접한 시간 t' 에서 IR카메라에 의해 기록된 국소 온도 상승을 정규화하는 것으로 구성된다[14].

$$\overline{\Delta T_{x,y}}(t) = \frac{\Delta T_{x,y}(t)}{\Delta T_{x,y}(t')} \quad (6)$$

이 시간 화소방향 연산은 각 화소에 시간 t' 에서 정규화된 온도 상승에 1에 해당하는 값을 준다. 로그-로그 다이어그램에서 그래프 관점으로부터, 서모그램 $\Delta T_{x,y}(t)$ 의 병진을 온도축에 평행하게 하여 각각의 서모그램과 모든 화소가 그 나름의 병진되어 연산하게끔 한다. 최종적으로, 정규화된 온도 영상들로부터 유도된 상대적인 콘트라스트 영상들이 조악한 온도 영상들로부터 유도된 것들과는 같지 않다는 것을 주목할 필요가 있다.

$$\overline{Cr}_{x,y}(t) = \frac{\Delta \overline{T}_{x,y}(t)}{\Delta T_{x,y}(t)} - 1 \neq Cr_{x,y}(t) \quad (7)$$

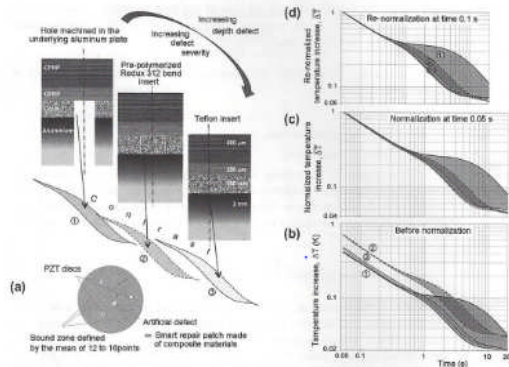


Fig. 2 Thermograms fitted by TSR containing three artificial defects at $t'=0.05s$; (a) efficiency of normalization, (b) crude thermograms, (c) pulsed thermograms, (d) normalized thermograms by TSR method[9]

Fig. 2는 알루미늄 평판 위에 복합재료를 접착 재료 붙여 만들어진 보수패치의 경우에 정규화의 영향이 상당히 보여지는 것을 보여주고 있다. 이러한 복잡한 구조물의 열화상 NDE는 여러 문헌을 통해 연구된 바가 있다[15,16]. 하단 Fig. 2(b)의 조악한 서모그램과 정규화된 서모그램의 그림인 Fig. 2(c)를 비교해보면, 똑같은 작은 쿠폰을 결함부에 하나, 건전부에 하나 이렇게 두 점에서 얻은 서모그램뿐만 아니라 서로 다른 인공결함을 포함한 동일 패치 상에서 서로 다른 실험으로 얻어진 서모그램에서도 정규화는 비교가 가능함을 알 수 있다. 이러한 정규화의 효율성에 대한 최근의 또 다른 예시로는 문헌[7]에서도 확인할 수가 있으며 계단 가열 실험에서의 정규화에 대해서도 유사한 접근법이 사용되어지고 있다[14].

3.2. 정규화의 최적화

앞서 보인 바와 같이, 정규화를 위해서는 식(2)가 시간 t' 에서 적용될 수 있어야 한다. 이 시간 t' 에 관련되는 발산길이와 두께가 같은 재료의 얇은 층이 깊이에서 동질인 것으로 고려될 수 있는 경우에만 정규화가 가능하다. 재료의 특성에 의해 재료가 강화섬유의 면에서나 겹으로 만들어진 면에서, 복합재료에서 중요한 것은 재료가 동

질이 될 수 없다는 것이다. 이러한 재료 형태를 갖는 발산길이 펄스 100 ms 후 3×10^{-7} m2/s인 카본 에폭시를 고려해 보도록 한다[9]. 표면의 가열은 두께의 층이 300 μ m까지 영향을 받으며 푸리에 수는 $1/\pi$ 이고 거친 세겜의 강화 두께로 되어 있다. 많은 주기적 패턴이 표면에 평행하므로 재료가 만족할만한 열적 동질성을 갖기에는 충분하다. 보다 더 짧은 깊이에 대해, 국소적으로 불균질성이 있을 수 있다.

- 접촉제인 수지의 내용물에서 필연적으로 변형이 있다. 이것을 스킨(skin) 효과라 한다.

Fig. 2(c)으로부터, 이에 대한 설명은 시간 $t' = 0.05$ 초에서 이루어진 정규화(5번째 영상)는 서모그램을 시간 $t < 0.4$ 초에 이르기까지 엄격하게 포개어질 수 없게 된다는 것을 현재의 경우에 나타낸다. Fig. 2(d)로부터, 다른 한편으로는 정규화가 $t' = 0.1$ 초에서 달성된다면 결함들과 링크된 콘트라스트들 간에 비교가 보다 더 좋은 조건(대체로 $t < 0.4$)에서 이루어지므로 모든 서모그램들이 경사도 $-1/2$ 의 단일 직선에 합병되고, 적어도 $t = 4$ 초까지 세 개의 시험부위 중 건전부에 상응하는 모든 서모그램들이 단일 곡선에 잘 합병된다. 나중에, 이들 곡선들은 시험이 거듭됨에 따라 완벽하게 재생될 수 없는 대류 열손실에 기인하여 증간화가 된다.

테프론이 삽입된 Fig. 2의 결함#3으로부터, 복합재 상위층의 불균질성 영향은 보다 취약한 결함의 검출에 대해서는 특히 난감하다. 사실상 이러한 테스트 동안 결함부의 서모그램은 건전부의 것에 비해 보다 크게 되어 마치 결함이 표면에

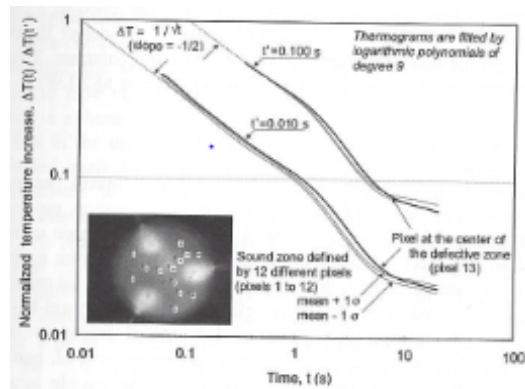


Fig. 3 Optimization of the normalization for the composite material for defect #3[9]

있는 것처럼 첫 번째 영상이후 저항성 결함이 있는 것으로 나타난다. 이것은 테프론이 1.05 mm의 깊이에 삽입된 것으로 그런 경우는 아니다.

Fig. 3은 후반부 정규화의 유의한 효과를 나타낸 것이다. 보다 더 좌표의 척도를 크게 해서 이러한 보다 더 취약한 결함에 상응하는 서모그램들의 결과들을 보여주고 있다. 시간 $t' = 0.01$ 초(첫번째 영상) 대신에 $t' = 0.1$ 초(펄스에 따른 열번째 영상)을 사용하면 초기 콘트라스트가 사라지고 건전부에서 산포도가 줄어들게 되어서 건전부의 공간 잡음으로부터 생겨나오는 콘트라스트의 시간 정위를 용이하게 한다. 결함에 기인한 콘트라스트의 출현시간보다 더 낮도록 제한하는 것으로 이러한 시간 t' 의 최적화는 시간 t' 를 가능한 한 더 크게 하여 얻어지는 것으로 펄스 열화상의 최적화가 구성되어 있다.

4. 결론

본고에서는 로그-로그 플롯을 활용해서 펄스 서모그램을 잘 사용하도록 정의하고 정류를 거쳐 TSR에 의해 피팅된 펄스열화상이 효율적인 정규화를 거쳐 최적화하는 프로세스에 대하여 고려하였다. 소개된 실험 및 모사 문헌들로부터 펄스 자극 열화상을 최적화하기 위해 두 개의 매개변수인 1) 결함 콘트라스트의 신호 대 잡음비와 2) exploitation의 조발성을 소개하였다. 이로부터 펄스열화상 기법에서 열영상이 질적으로 크게 개선(흐릿함 감소)되고 식별된 결함 매개변수(깊이와 열저항)의 정확도가 더 좋아진다는 것을 보여주고 있다.

후기

"이 원고는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0007784)."

참고문헌

- [1] D. L. Balageas, J. C. Krapez and P. Cielo, "Pulsed photothermal modelling of layered material," *J. of Applied Physics*, Vol. 59, No. 4, pp. 348-357 (1986)
- [2] D. L. Balageas, A. A. Deom and D. M. Boscher, "Characterization and non-destructive testing of carbon-epoxy composites by a pulsed photothermal method," *J. of Materials and Evaluation*, Vol. 45, No. 4, pp. 461-465 (1987)
- [3] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. of Applied Physics*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)
- [4] X. Maldague and S. Marinetti, "Pulse phase thermography," *J. of Applied Physics*, Vol. 79, pp. 2694-2698 (1996)
- [5] S. G. Pickering and D. P. Almond "An evaluation of the performance of an uncooled microbolometer array infrared camera for transient thermography NDE," *J. of Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 22, No. 22, pp. 63-70 (2002)
- [6] M. A. Omar and Y. Ahou, "Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE technique," *Infrared Physics & Technology*, Vol. 51, No. 4, pp. 300-306 (2008)
- [7] S. G. Pickering and D. P. Almond "An evaluation of the performance of an uncooled microbolometer array infrared camera for transient thermography NDE," *NDT&E International*, Vol. 69, No. 8, pp. 935-942 (2011)
- [8] T. Tazumi and Y. Takahashi, "Novel finite pulse-width correction in flash thermal diffusivity measurements," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 52, No. 9, pp. 1411-1413 (1981)
- [9] D. L. Balageas, "Thickness or diffusivity measurements from front-face flash experiments using the TSR (thermographic signal reconstruction) approach," *QIRT 2010 Proc.*, X. Maldague Ed., QC, Canada, pp. 873-880 (2010)
- [10] P. Cielo, "Pulse photothermal evaluation of layered materials," *J. of Applied Physics*, Vol. 56, No. 1, pp. 230-234 (1984)

- [11] J. C. Murphy, L. C. Aamodt and G. C. Wetsel, "Coating thickness determination using time dependent surface temperature measurements," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 6A, pp. 277-284 (1987)
- [12] H. Schenck, "Theory of Engineering Experimentation," 3rd Ed. Hemisphere Publishing Co., (1979)
- [13] S. M. Shepard, J. R. Lhota and T. Ahmed, "Measurements limits in flash thermography," *Thermosense XXXI, SPIE Proc.*, 2009-T-1, pp. 72990-72997 (2009)
- [14] V. Vavilov, "Nondestructive Testing Handbook," Vol. 5, Book 1: Thermal/infrared testing, Moscow-Spektr Publishing House (2009)
- [15] D. L. Balageas, P. Delpech, D. Boscher and D. Deom, "A new developments in stimulated infrared thermography applied to nondestructive testing of laminates," *Review Progress in QNDE*, Vol. 10A, pp. 1073-1081 (1991)
- [16] D. L. Balageas, B. Chapuis, G. Deban and F. Passilly, "Improvement of the detection of defects by pulse thermography thanks to TSR approach in the case of a smart composite repair patch," *QIRT Journal*, 2010b, Vol. 7, No. 2, pp. 167-187 (2010)