

위상잠금 적외선 열화상에서의 위상 추출 알고리즘

Phase-Extraction Algorithm over a Lock-in Infrared Thermography

김노유

Nohyu Kim

위상잠금 적외선 열화상 기술에서 결함 정보를 추출하는 데는 반사된 적외선 변조파의 크기와 위상을 모두 사용할 수 있지만 위상정보는 특히 국부적인 표면 방사율(surface emissivity)의 변화에 둔감한 특성을 가지고 있어 그동안 노이즈가 많은 경우 폭넓게 사용되어 왔다. 외부 열원에 의해 조화함수로 가진된 대상체의 온도 변화는 크게 과도상태 신호(transient state)와 정상상태 신호(steady state)로 분리될 수 있다. 과도상태는 외부 열원의 에너지가 시간에 따라 검사체에 누적되면서 변화하는데 시간상수(time constant)에 관한 지수함수에 의해 표시되며, 정상상태에서의 검사체의 온도변화는 재료의 열확산길이(thermal diffusion length)에 의해 외부 열원의 위상과 일정한 차이를 나타낸다. 외부열원 입력으로부터 검사체에 의해 변조된 신호의 크기와 위상을 추출하기 위한 세 가지 이미지 프로세싱 방법을 설명하고 각 방법의 성능을 비교하였다.

1. Fourier Transform Method(FTM)

푸리에 변환 기법은 적외선 변조 신호의 위상과 크기를 결정하는 가장 효과적이면서도 많이 활용되는 방법으로서 이산 푸리에 변환 알고리즘(discrete Fourier transform, DFT)이 사용된다[1]. 검사 대상체의 특정 위치 (x, y) 에서 발생하는 적외선 신호를 다음과 같이 주파수 f 와 위상

$\phi(x, y)$ 를 가지는 사인파로 정의하면

$$A(x, y, t) = A_s(x, y) \exp[i(2\pi ft + \phi(x, y))] \quad (1)$$

으로 표현할 수 있고 이 신호로부터 크기 $A_s(x, y)$ 와 위상 $\phi(x, y)$ 를 계산하기 위해 양변을 시간변수에 대해 푸리에 변환하면

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{A_s(x, y, t)\} &= A(x, y, w) \\ &= A_s(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \delta(w - 2\pi f) \end{aligned} \quad (2)$$

이 되고 이로부터 크기와 위상을 다음처럼 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_s(x, y) &= |A(x, y, w)| \\ &= \sqrt{[\operatorname{Re}A(x, y, w)]^2 + [\operatorname{Im}A(x, y, w)]^2} \\ \phi(x, y) &= \operatorname{Phase}[A(x, y, w)] \\ &= \tan^{-1} \left\{ \frac{\operatorname{Im}[A(x, y, w)]}{\operatorname{Re}[A(x, y, w)]} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

시간에 관한 이산신호 $A_s(x, y, n)$ 에 대해서는 이산 푸리에 변환 $A(x, y, k)$ 을 다음과 같이 결정할 수 있으며

$$\begin{aligned} A(x, y, k) &= \sum_{n=1}^N A(x, y, n) \exp[-i(2\pi kf \frac{n}{N})], \\ k &= 1, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

이 때 이산 신호 $A(x,y,n)$ 의 크기와 위상 값은 연속신호의 경우와 같은 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_s(x,y) = \sqrt{\text{Re}[A(x,y,k)]^2 + \text{Im}[A(x,y,k)]^2} \quad (5)$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[A(x,y,k)]}{\text{Re}[A(x,y,k)]} \right\}$$

2. Four-Point Correlation Method(FPCM)

이 방법은 처음 Busse[2]에 의해 제안되었는데 시간 축에서 같은 위상 차이를 가지는 네 지점의 신호로부터 크기와 위상을 추출하는 방법이다. 변조된 신호의 크기와 위상을 계산하는 방법은 가진 열원 신호의 주기를 T라 할 때 위치 (x,y) 에서 $T/4$ 의 등 간격으로 차례로 측정된 네 개의 측정 데이터 $S_1(x,y)$, $S_2(x,y)$, $S_3(x,y)$, $S_4(x,y)$ 로부터 다음식과 같이 결정한다.

$$A_s(x,y) = \sqrt{(S_3 - S_1)^2 + (S_4 - S_2)^2},$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{S_3 - S_1}{S_4 - S_2} \right) \quad (6)$$

통상 이 방법에 의해서 변조 적외선 신호의 크기와 위상을 계산할 때는 노이즈를 최소화하기 위하여 네 점에서의 데이터 대신에 많은 수의 측정 데이터를 평균하여 결정하는 것이 보통이다.

3. Digital Lock-in Correlation Method(DLICM)

DLICM 방법은 협대역에서 두 신호간의 상관관계를 이용하여 변조 적외선 신호의 크기와 위상을 추출하는 방법이다. 적외선 신호에서 가장 지배적인 정보를 포함하는 기본 조화 성분만을 추출하고 그외 고조파 성분들은 제거하는 기법으로서 기준이 되는 조화신호와 측정신호간의 상관도를 계산하여 수행된다. 이때의 기준함수로는 사인함수와 코사인 함수를 사용하며 두 개의 채널을 통해 동시에 한 채널에서는 사인함수와 동기되는 신호성분을 계산하고 다른 채널에서는 코사인 함수와 동기되는 성분들을 계산함으로써 변조 적외선 이산 신호 $A(x,y,n)$ 의 크기와 위상을 결정한다.

다. 사인파를 기준함수로 하는 채널에서의 사인파 성분 S_0 와 코사인 채널로부터 계산되는 코사인 성분 $S_{\pi/2}$ 의 추출은 다음과 같은 기준 사인파와 코사인파와의 상관관계로부터 이루어진다.

$$R_c(n) = \cos(2\pi \frac{n-1}{N}), n=1,2..N \quad (7)$$

$$S_0 = \text{Corr}[A(x,y,n), R_s(n)]$$

$$= \frac{c}{N} \sum_{n=1}^N A(x,y,n) \sin(2\pi \frac{n-1}{N}) \quad (8)$$

$$S_{\pi/2} = \text{Corr}[A(x,y,n), R_s(n)]$$

$$= \frac{c}{N} \sum_{n=1}^N A(x,y,n) \cos(2\pi \frac{n-1}{N}) \quad (9)$$

식(8), (9)에서 Corr은 상관도(correlation)를 나타내는 연산자이며 c는 스케일 상수로서 두 식으로부터 이산 신호 $A(x,y,n)$ 의 크기와 위상 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_s(x,y) = \sqrt{S_0^2 + S_{\pi/2}^2},$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{S_{\pi/2}}{S_0} \right\} \quad (10)$$

4. 알고리즘의 성능 비교

앞에서 기술된 세 가지 기법들의 성능을 비교하기 위해 Liu[3]는 동일한 시편에 대해 얻어진 적외선 열화상 이미지에 대해 각 방법의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)와 계산 속도를 조사하였다. 사용된 시편은 ANSI 1045 강판으로서 그림 1과 같이 배면에 인공 구멍 결함을 가지고 있으며 가진 주파수는 0.12 Hz, 샘플링 주파수는 37 Hz로서 총 1110개의 프레임 이미지를 얻은 후 FTM, FPCM, DLICM 세 가지 방법으로 각각 적외선 열화상을 생성하였다. 우선 각 방법을 이용하여 얻어진 적외선 이미지(크기)를 비교하여 보면 그림 2에 나타난 바와 같이 FTM방법이 다른 방법에 비해 결함의 이미지가 상대적으로 선명하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 점을 좀 더 구체적으로 나타내기 위해 결함부위(점선)에서의 온도 변화 그래프를 그림 2 하단에 나타

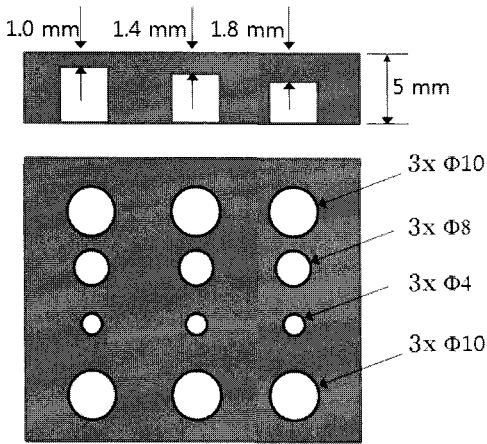


그림 1. 성능 평가를 위한 시편

내었는데 FTM 방법이 결함부와 비결함부의 대비가 가장 큰 것을 알 수 있다. 특히 Fig. 3의 위상을 이용한 경우 FTM 방법이 세 가지 방법보다 더 우수한 것으로 나타났다. Liu는 이것을 정량적인 수치로 비교하기 위해 신호 대 잡음비 (SNR)를 정의하고 이 값으로부터 각 방법의 성능을 조사하였다. SNR는 결함부위 신호의 평균값과 건전 부위에서 얻어진 신호의 평균값의 차를 구한 후 결함이 없는 부분에서 얻어진 신호의 표준편차로 나눈 값으로 정의하였는데 각 방법에 대한 SNR 값을 그림 4(a)에서 나타내고 있다. 이 그림에서 SNR을 비교해 보면 FTM이 가장 높고 그 다음이 DLICM 방법이며 FPCM가 가장 낮아 FPCM 방법의 열화상 이미지가 가장 품질이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이에 반해 영상 이미지

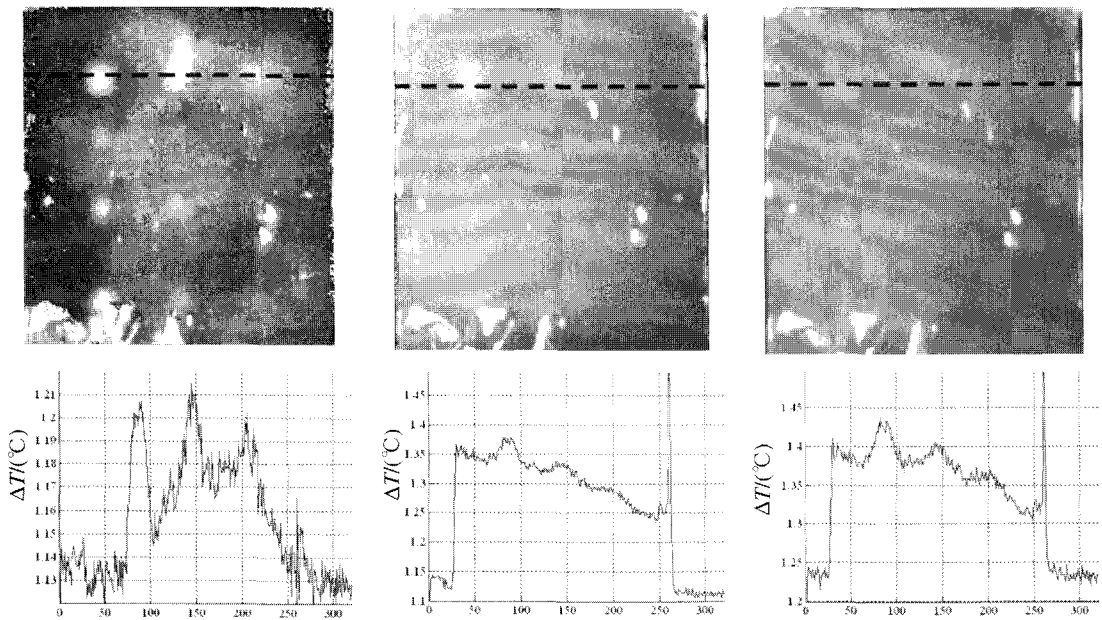


그림 2. FTM, FPCM, DLICM에 의한 열화상 이미지(크기) 및 온도분포(점선부)

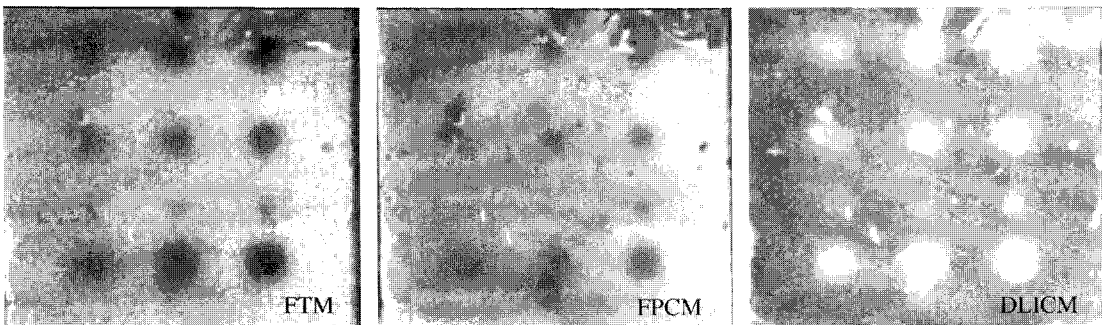


그림 3. FTM, FPCM, DLICM에 의한 열화상 이미지(위상)

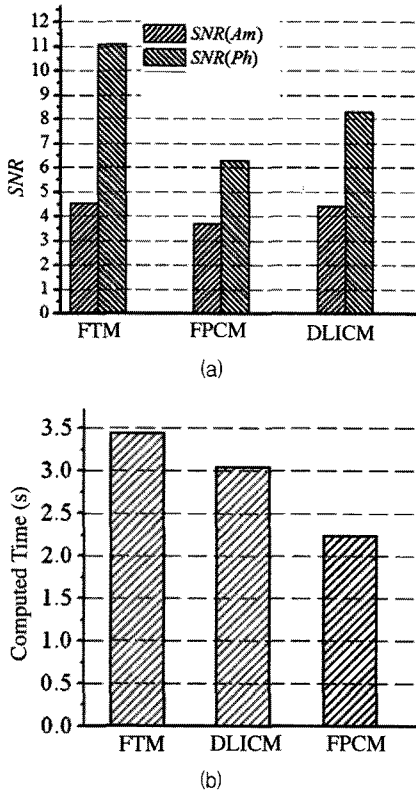


그림 4. 위상추출 알고리즘의 성능비교: SNR(a) 및 계산시간(b)

계산에 소요되는 시간을 조사해 보면 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 FPCM 방법이 가장 적고 FTM 방법이 제일 시간이 많이 걸리는 것으로 나타났다. 즉 화상처리 속도 면에서는 FPCM 방법이 가장 우수하고 화상 이미지의 품질은 FTM 방법이 가장 높은 것으로 평가되었다.

참고문헌

- [1] J. Liu, J. Dai, Y. Wang, H. Liu and Z. Wang, "An IR lock-in thermography nondestructive test system based on the image sequence processing," 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28, Shanghai, China (2008)
- [2] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Revue Générale de Thermique*, Vol. 37, Issue 8, pp. 693-703 (1998)
- [3] J. Liu, Y. Wang and J. Dai, "Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT," *Infrared Physics & Technology* 53, pp. 348-357 (2010)