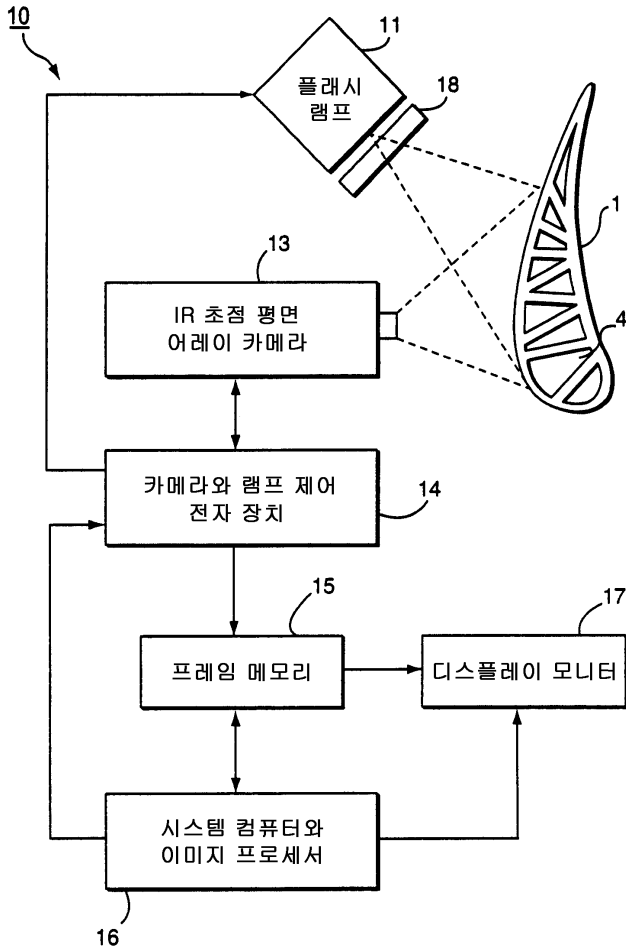


대표도



특허청구의 범위

청구항 1.

픽셀 어레이(array of pixel)로서 가시화되는(visualized) 표면을 구비한 피검체(object)의 두께(thickness)를 결정하는 방법으로서,

- a) 상기 피검체 표면을 급속하게 가열하는 단계와,
- b) 일련의 IR 이미지(a sequence of IR image)로 픽셀 강도(pixel intensity)를 기록하는 단계-상기 이미지 각각은 단계 (a)에서 상기 피검체 표면을 가열한 다음 경과된 시간에 관련된 순차적 프레임 번호(frame-number)를 할당받음 -와,
- c) 프레임 번호 값에 기반하여 상기 순차적 이미지 프레임의 픽셀에 대응하는 온도 대 시간 (temperature-verses-time : T-t) 데이터를 전개(developing)하는 단계와,
- d) 단계(c)에서 전개된 상기 T-t 데이터를 실수 성분과 허수 성분(Real and imaginary components)을 포함하는 복소 주파수 도메인(complex frequency-domain) 데이터로 변환(transforming)하는 단계와,
- e) 적어도 상기 복소 주파수 도메인 데이터 및 상기 피검체에 대한 열 유속 펄스 이동 특성 시간(heat-flux pulse migration characteristic time)에 기반하여 픽셀에 대응하는 상기 피검체 상의 포인트에 대하여 두께 값을 결정하는 단계를 포함하는

피검체 두께 결정 방법.

청구항 2.

제 1 항에 있어서,

상기 피검체는 플래시 램프 장치를 사용하여 가열되는

피검체 두께 결정 방법.

청구항 3.

제 1 항에 있어서,

픽셀에 대응하는 상기 온도 대 시간(T-t) 데이터를 전개하는 상기 단계는 상기 T-t 데이터를 정규화하는 단계를 더 포함하되,

상기 정규화 단계는

i) 상기 T-t 데이터에서 니 부분(knee-portion)을 식별하고 상기 니 부분에 대응하는 시간 값의 범위보다 더 큰 시간에 데이터 클립 포인트(data clipping point)를 선택하는 단계와,

ii) 단계(i)에서 식별된 상기 데이터 클립 포인트에서 상기 T-t 데이터를 클립하고 상기 데이터 클립 포인트에서의 온도 값과 동일한 T-t 데이터 값으로 상기 데이터 클립 포인트보다 더 큰 시간 값에 대한 상기 T-t 데이터를 상수 패딩(constant-padding)하는 단계와,

iii) 상기 데이터 클립 포인트보다 더 큰 시간 값에 대한 상기 T-t 데이터가 0과 같아지도록 상기 T-t 데이터를 바이어스 값으로 오프셋(offsetting)하는 단계를 포함하는

피검체 두께 결정 방법.

청구항 4.

제 1 항에 있어서,

복소 주파수 도메인 데이터를 생성하도록 상기 T-t 데이터를 변환하는 단계는 상기 T-t 데이터의 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 수행함으로써 성취되는

피검체 두께 결정 방법.

청구항 5.

제 3 항에 있어서,

상기 데이터 클립 포인트(T_{Cpt}) 선택 단계는 상기 특성 T-t 데이터 커브를 따라 상기 식별된 니 부분의 종단 근처 영역으로부터 선택된, 적어도 시간 $t = L^2/\pi^2\alpha$ - 여기서 L은 상기 피검체의 두께(cm)이고 α 는 상기 물질의 열 확산도(cm^2/sec)임 -보다 더 큰 값의 다수의 인접한 클립 포인트를 이용함으로써 전개되는 이미지를 경험적으로 비교하는 단계를 더 포함하는

피검체 두께 결정 방법.

청구항 6.

IR 감지 초점 평면 어레이 카메라(IR sensitive focal-plane array camera)를 이용하여 피검체의 두께를 결정하는 적외선 (IR) 과도 서모그래피 방법으로서,

- a) 상기 피검체의 일련의 IR 이미지 프레임으로부터 픽셀 강도 데이터를 획득하는 단계- 상기 이미지 프레임 각각은 다수의 픽셀을 포함하고 경과 시간에 관련된 순차적 프레임 번호를 할당받음 -와,
- b) 순차적 이미지 프레임에 대한 프레임 번호 값에 기반하여 단계(a)에서 획득되는 픽셀 강도 데이터로부터의 픽셀에 대응하는 온도 대 시간(T-t) 데이터를 전개하는 단계와,
- c) 단계(b)에서 전개된 상기 온도 대 시간 데이터에 대하여 고속 푸리에 변환을 수행하여 실수 성분 및 허수 성분을 포함하는 주파수 도메인 데이터를 생성하는 단계와,
- d) 단계(c)에서 획득된 상기 주파수 도메인 데이터의 실수 성분 부분의 미분 데이터(derivative data)를 결정하는 단계와,
- e) 상기 미분 데이터에서 피크 주파수 값(f_{Re})을 식별하는 단계와,
- f) 단계(e)에서 식별되는 상기 피크 주파수 값(f_{Re})에 기반하여 두께 값(L)을 결정하는 단계를 포함하는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 7.

제 6 항에 있어서,

두께 값(L)은 관계식 $(L^2/\pi^2\alpha)f_{Re} = 0.093$ - 여기서 L은 상기 피검체의 두께(cm)이고 α 는 상기 물질의 상기 열 확산도 (cm^2/sec)임 -에 따라서 f_{Re} 에 대한 정량적(quantitative) 값으로부터 결정되는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 8.

제 6 항에 있어서,

두께 값(L)은 두 관계식 $T_c = 4L^2/\pi^2\alpha$ 및 $T_c f_{Re} = 0.372$ - 여기서 T_c 는 피검체의 열 유속 펄스 이동 특성 시간 값이고, L은 상기 피검체의 두께(cm)이며 α 는 상기 피검체의 열 확산도임 -에 따라서 f_{Re} 에 대한 정량적 값으로부터 결정되는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 9.

제 6 항에 있어서,

상기 피검체는 플래시 램프 장치를 사용하여 가열되는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 10.

제 6 항에 있어서,

픽셀에 대응하는 상기 온도 대 시간(T-t) 데이터를 전개하는 상기 단계는 상기 T-t 데이터를 정규화하는 단계를 더 포함 하되,

상기 정규화 단계는

i) 상기 T-t 데이터에서 n 부분을 식별하고 상기 n 부분에 대응하는 시간 값의 범위보다 더 큰 시간에서 데이터 클립 포인트를 선택하는 단계와,

ii) 단계(i)에서 식별된 상기 데이터 클립 포인트에서 상기 T-t 데이터를 클립하고 상기 데이터 클립 포인트에서의 온도 값과 동일한 T-t 데이터 값으로 상기 데이터 클립 포인트보다 더 큰 시간 값에 대한 상기 T-t 데이터를 상수 패딩(constant-padding)하는 단계와,

iii) 상기 데이터 클립 포인트보다 더 큰 시간 값에 대한 상기 T-t 데이터가 0과 같아지도록 상기 T-t 데이터를 바이어스 값으로 오프셋(offsetting)하는 단계를 포함하는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 11.

제 10 항에 있어서,

상기 데이터 클립 포인트(T_{Cpt}) 선택 단계는 상기 특정 T-t 데이터 커브를 따라 상기 식별된 n 부분의 종단 근처 영역으로부터 선택된, 적어도 시간 $t = L^2/\pi^2\alpha$ - 여기서 L은 상기 피검체의 두께(cm)이고 α 는 상기 물질의 열 확산도(cm^2/sec)임 -보다 더 큰 값의 다수의 인접한 클립 포인트를 이용함으로써 전개되는 이미지를 경험적으로 비교하는 단계를 더 포함하는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 12.

IR 감지 초점 평면 어레이 카메라(IR sensitive focal-plane array camera)를 이용하여 피검체의 두께를 결정하는 적외선(IR) 과도 서모그래피 방법으로서,

a) 상기 피검체의 일련의 IR 이미지 프레임으로부터 픽셀 강도 데이터를 획득하는 단계- 상기 이미지 프레임 각각은 다수의 픽셀을 포함하고 경과 시간에 관련된 순차적 프레임 번호를 할당받음 -와,

b) 순차적 이미지 프레임에 대한 프레임 번호 값에 기반하여 단계(a)에서 획득되는 픽셀 강도 데이터로부터의 픽셀에 대응하는 온도 대 시간(T-t) 데이터를 전개하는 단계와,

c) 단계(b)에서 전개된 상기 온도 대 시간 데이터에 대하여 고속 푸리에 변환을 수행하여 실수 성분 및 허수 성분을 포함하는 주파수 도메인 데이터를 생성하는 단계와,

d) 단계(c)에서 획득된 상기 주파수 도메인 데이터의 허수 성분 부분의 피크(peak) 주파수 값(f_{Im})을 결정하는 단계와,

f) 단계(d)에서 식별된 상기 피크 주파수 값(f_{Im})에 기반하여 두께 값(L)을 결정하는 단계를 포함하는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 13.

제 12 항에 있어서,

두께 값(L)은 관계식 $(L^2/\pi^2\alpha)f_{Im} = 0.187$ - 여기서 L은 상기 피검체의 두께(cm)이고 α 는 상기 물질의 상기 열 확산도(cm^2/sec)임 -에 따라서 f_{Im} 에 대한 정량적(quantitative) 값으로부터 결정되는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 14.

제 12 항에 있어서,

두께 값(L)은 두 관계식 $T_c = 4L^2/\pi^2\alpha$ 및 $T_c f_{Im} = 0.748$ - 여기서 T_c 는 피검체의 열 유속 펄스 이동 특성 시간 값이고, L은 상기 피검체의 두께(cm)이며 α 는 상기 피검체의 열 확산도임 -에 따라서 f_{Im} 에 대한 정량적 값으로부터 결정되는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 15.

제 12 항에 있어서,

상기 피검체는 플래시 램프 장치를 사용하여 가열되는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 16.

제 12 항에 있어서,

픽셀에 대응하는 상기 온도 대 시간(T-t) 데이터를 전개하는 상기 단계는 상기 T-t 데이터를 정규화하는 단계를 더 포함하되,

상기 정규화 단계는

i) 상기 T-t 데이터에서 니 부분을 식별하고 상기 니 부분에 대응하는 시간 값의 범위보다 더 큰 시간에서 데이터 클립 포인트(T_{Cpt})를 선택하는 단계와,

ii) 단계(i)에서 식별된 상기 데이터 클립 포인트에서 상기 T-t 데이터를 클립하고 상기 데이터 클립 포인트에서의 온도 값과 동일한 T-t 데이터 값으로 상기 데이터 클립 포인트보다 더 큰 시간 값에 대한 상기 T-t 데이터를 상수 패딩(constant-padding)하는 단계와,

iii) 상기 데이터 클립 포인트보다 더 큰 시간 값에 대한 상기 T-t 데이터가 0과 같아지도록 상기 T-t 데이터를 바이어스 값으로 오프셋(offsetting)하는 단계를 포함하는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 17.

제 16 항에 있어서,

상기 데이터 클립 포인트(T_{Cpt}) 선택 단계는 상기 특성 T-t 데이터 커브를 따라 상기 식별된 니 부분의 종단 근처 영역으로부터 선택된, 적어도 시간 $t = L^2/\pi^2\alpha$ - 여기서 L은 상기 피검체의 두께(cm)이고 α 는 상기 물질의 열 확산도(cm^2/sec)임-보다 더 큰 값의 다수의 인접한 클립 포인트를 이용함으로써 전개되는 이미지를 경험적으로 비교하는 단계를 더 포함하는

IR 과도 서모그래피 방법.

청구항 18.

픽셀 어레이로 시각화될 수 있는 표면을 갖춘 피검체의 두께를 결정하는 장치로서,

상기 피검체 표면을 급속 가열하는 가열 소스(heat source)와,

일련의 IR 이미지에 픽셀 강도를 기록하기 위한 수단과,

IR 이미지에 할당된 프레임 번호 값에 기반하여 기록되어 있는 픽셀 강도로부터 온도 대 시간 데이터를 결정하기 위한 수단과,

온도 대 시간 데이터를 복소 주파수 도메인 데이터로 변환하기 위한 수단과,

상기 피검체에 대한 상기 복소 주파수 도메인 데이터 및 과도 열 펄스 특성 시간에 기반하여 피검체의 두께를 결정하기 위한 수단을 포함하는

피검체 두께 결정 장치.

명세서

기술분야

본 출원은 1999년 7월 21일에 출원된 미국 가특허 출원 제 60/144,886호의 우선권을 주장하며, 그 전체 내용이 본 출원에서 참조로써 인용된다.

본 발명은 피검체(object)의 두께를 결정하는 서모그래피 비파괴 검사 기법(thermographic nondestructive testing techniques)에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 본 발명은 두께를 결정하기 위하여 고속 푸리에 변환 열 공진 함수를 이용하는 열 데이터 이미지 프레임의 스택을 분석하기 위한 적외선 과도 서모그래피(infrared transient thermography)에 관한 것이다.

배경기술

수년 동안, 주조 금속(cast metal) 및 기타 고형(solid) 피검체의 단면 두께를 결정하는데 다양한 비파괴 초음파(ultrasonic) 측정 기법이 이용되어 왔다. 통상적으로, 피검체는 그 피검체의 한쪽 표면을 관통하여 그 반대편 표면에서 내부로 반사되는 초음파로 검사된다. 반사파를 수신하는데 필요한 시간을 근거로 하여, 반대편(뒤쪽)까지의 거리가 결정(즉, 그 지점에서 피검체의 두께를 제공함)된다. 불행히도, 일반적으로 대부분 피검체의 단면 두께를 조사하기 위하여 이러한 종류의 초음파 측정법을 이용하려면 트랜스듀서(transducer)로 그 전체 표면에 대하여 부담스럽고 시간 소모적인 기계적 스캐닝을 수행할 필요가 있다. 또한, 트랜스듀서와 피검체 표면 사이에서 직접적 음향 접촉(intimate sonic contact)을 조성하기 위해서는, 연속적 액체 접촉 매질(a stream of liquid couplant)을 그 표면에 인가하거나, 그렇지 않으면, 그 피검체 전체를 접촉 매질에 잠기도록 하여야 한다. 그러나, 그러한 방법은 대개 여러 가지 구조적 이유나 물질적 이유로 인하여 별로 실용적이지 않으며 나아가 실현 가능하지 않을 수도 있다. 예컨대, 기하학적으로 복잡한 부분을 스캐닝하고 분석할 수 있는 초음파 시스템은 전형적으로 매우 비싸고 복잡하다. 또한, 트랜스듀서가 대규모 피검체의 표면에 대하여 기계적 스캐닝을 수행하는 것은 글자 그대로 수 시간이 걸릴 수 있다.

또한, 소정의 금속 피검체에 대하여 초음파 측정법을 이용하는 경우에는, 그 금속의 내부 결정 방향 및 구조가 획득된 데이터를 부정확하게 하는 등 바람직하지 않은 잡음 및 방향성 효과(directional effect)를 야기할 수 있다. 이러한 초음파 측정법의 본질적 한계는 요즘 터빈 에어포일(contemporary turbine airfoil)에서 종종 이용되는 결정형(crystalline) 또는 "방향성" 금속으로 구성된 소자를 테스트하는 경우 특히 부적합한 것으로 판명된다.

반면, 적외선(IR) 과도 서모그래피는 피검체를 통한 시간적 열 이동 측정(temporal measurements of heat transference)에 의존하여 피검체의 구조 및 무결성(integrity)에 관한 정보를 제공하는 보다 더 다양한 목적의 비파괴 테스트 기법이다. 피검체를 통한 열 흐름은 피검체를 구성하는 물질의 미세 구조(micro-structure) 및 단결정(single-crystal) 방향에 의하여 실제적 영향을 받지 않기 때문에, 적외선 과도 서모그래피 분석은 초음파 측정법에서 발생하는 한계에서 근본적으로 자유롭다. 대부분의 초음파 기법과 달리, 과도 서모그래피 분석 방법은 테스트되는 피검체의 사이즈, 윤곽이나 형상에 의해서 별로 방해받지 않으며, 나아가, 표면 영역이 넓은 피검체를 테스트하는 경우 대부분의 통상적 초음파 방법보다 10 내지 100배 빨리 달성될 수 있다.

과도 서모그래피에 관하여 알려진 한 가지 현대적 애플리케이션(이러한 애플리케이션은 고형의 비금속 합성물(composite) 내에서 플로우(flaw)의 사이즈 및 상대적 "위치"(깊이)를 결정하는 능력을 제공함)는 "Nondestructive Testing : Transient Depth Thermography"라는 명칭으로, Ringermacher 등에게 허여된 미국 특허 제 5,711,603호에 개시되어 있으며 본 명세서에서 참조로써 인용되고 있다. 기본적으로, 이러한 기법은 피검체의 표면을 가열하는 단계와, 그 피검체 표면상의 매우 작은 영역, 즉 "분해 요소(resolution element)"의 시간에 따른 온도 변화를 기록하는 단계를 포함한다. 이들 표면 온도 변화는 피검체를 통한 열 흐름의 동적 특성에 관련되는데, 이는 플로우의 존재 여부에 의하여 영향을 받는다. 따라서, 플로우의 사이즈 및 플로우의 "상대적"(즉, 피검체 내의 다른 플로우에 대하여 상대적인) 깊이를 나타내는 값은 피검체 표면상의 분해 요소 각각에서 발생하는 온도 변화를 주의깊게 분석하여 이를 기초로 결정될 수 있다. 앞서 참조된 Ringermacher 특허에서 명시적으로 기술되어 있지는 않지만, 상대적 깊이 값에 비교하기 위하여 이미 알려져 있는 깊이에서 공동(void)을 가지는 "표준 블록(standard block)"이나 피검체의 열적으로 두꺼운("무한 반공간(infinite half-space)") 기준(reference) 영역이 서모그래피 데이터 획득 및 분석의 일부로서 포함되지 않는다면, 플로우의 "실제(actual)" 깊이(즉, 피검체 표면으로부터의 플로우의 깊이)가 결정될 수 없다.

과도 서모그래피를 이용하는 정확한 열 측정법을 성취하기 위하여, 그 피검체의 표면은 피검체의 다른 나머지 부분이 많이 가열되지 않을 만큼 충분히 짧은 시간 주기동안 특정 온도까지 가열되어야 한다. 검사 대상이 되는 피검체의 두께와 물질 특성에 따라서, 통상적으로 석영 램프(quartz lamp)나 고강도 플래시 램프(high intensity flash lamp)가 이용되어 적절한 크기 및 지속 시간을 갖는 열 펄스를 생성한다. 그러나, 피검체 표면을 가열하는데 이용되는 특정 메카니즘은 서모그래피 모니터링을 허용하기에 충분한 온도까지 표면을 신속하게 가열할 수 있는 임의의 수단(예컨대, 펄스형 레이저 광선(pulsed laser light))일 수 있다. 일단 피검체의 표면이 가열되면, 표면에 대한 온도 변화의 그래픽 기록이 얻어지고 분석된다.

통상적으로, 적외선(IR) 비디오 카메라는 피검체 표면을 가열한 다음 그 순차적 열 이미지를 기록하고 저장하는데 이용된다. 각각의 비디오 이미지는 고정된 수의 픽셀로 구성된다. 여기서, 픽셀은 촬영되는 피검체 표면상의, 소위 "분해 요소"라고 불리는, 사각형 영역에 대응하는 이미지 어레이나 프레임내의 작은 화소(picture element)이다. 각각의 분해 요소에서의 온도는 대응 픽셀의 강도에 직접적으로 관련되므로, 피검체 표면의 분해 요소 각각에서의 온도 변화는 픽셀 콘트라스트(contrast)의 변화라는 관점에서 분석될 수 있다. 저장된 IR 비디오 이미지는 동일한 시점에 있는 개별적 픽셀 강도로부터, 이미 알려져 있는 시점을 나타내는, 특정 이미지 프레임에 대한 평균 픽셀 강도를 뺀으로써 이미지 프레임에서의 각 픽셀의 콘트라스트를 결정하는데 이용된다.

각 픽셀에 대한 콘트라스트 데이터가 시간 도메인(즉, 많은 이미지 프레임에 걸쳐)에서 분석되어 콘트라스트 커브 데이터의 "변곡점(inflexion point)" 발생 시간을 식별하는데, 이는 피검체 내의 플로우의 상대적 깊이에 수학적으로 관련된다. 기본적으로, 고정된(consistent) 물질로 구성되고 두께가 L인 예시적 "판 유사(plate-like)" 피검체에 이동 열유속 펄스(heat flux pulse)가 인가되면, 피검체 상에 도달하는 이동 열유속 펄스는 그 피검체를 관통하여 반대편(뒤쪽 벽)까지 가서 촬영되는 앞표면으로 다시 돌아오기까지 소정의 "특성 시간(characteristic time)"(T_c)이 걸린다. 이러한 특성 시간(T_c)은 피검체의 두께 및 소정의 물질의 열 확산도(thermal diffusivity)에 관련되며, 다음의 방정식에 따른다.

$$T_c = 4L^2/\pi^2\alpha \text{ 방정식(1)}$$

여기서, L은 피검체의 두께(cm)이고 α 는 물질의 확산도(cm^2/sec)이다. (피검체는 또한 피검체 반대편 열유속 소스쪽으로부터 열적으로 촬영될 수 있다. 이는 단지 T_c 의 값이 4의 인수로써 달라지도록 한다.)

경험적으로, 열 펄스가 판 유사 피검체에 도달한 다음, 그 피검체의 동일 측(즉, 앞쪽)에서 관찰되는 표면 온도도 또한 그 두께 및 그 물질의 열 확산도에 의존하는 형태로 상승한다는 것을 알 수 있다. 나아가, 그 표면의 시간 대 온도($T-t$) 히스토리(history) 그래프로부터, $T-t$ 커브상의 고유 포인트(소위 "변곡점")의 관점에서, 특성 시간(T_c)을 결정할 수 있다. 변곡점(t_{infl})은 $T-t$ 커브 상의 최대 경사 포인트(즉, 피크-경사 시간(peak-slope time))에 의하여 표시되고, 다음의 방정식에 의하여, 특성 시간(T_c)에 관련된다.

$$t_{\text{infl}} = .9055 T_c \text{ 방정식(2)}$$

전술된 방정식(2)에 의하여 표현되는, 변곡점과 특성 시간 사이의 관계는 1차원(1-D) 뿐만 아니라 2차원(2-D)적 열 흐름 분석에 있어서 대략 1%까지 정확하다. 일단 변곡점(t_{infl})이 $T-t$ 응답으로부터 결정되면, 피검체의 상대적 두께(L)가 이미 알려진 물질의 열 확산도(α)를 이용하여 방정식(1)로부터 결정될 수 있고, T_c 의 실제 값이 방정식(2)로부터 결정될 수 있다.

이에 관하여, 앞서 정의된 피크-경사 시간(변곡점)과 물질 "특성 시간" 사이의 열 흐름 불변 관계(heat flow invariant relation)에 관한 보다 상세한 설명은, 본 명세서에서 참조로써 인용되고 있는, Plenum Press, New York에 의하여 1998년 5월에 "Towards A Flat-Bottom Hole Standard For Thermal Imaging"이라는 명칭으로 발표된, Ringermacher 등에 의한 기사, *Review Of Progress In Quantitative Evaluation*에서 찾아볼 수 있다.

불행히도, 전술된, Ringermacher 등에게 허여된 미국 특허 제 5,711,603호의 장치 및 방법은 단지 측정치의 "상대적" 깊이만을 생성한다. 이는 원하는 지점에서 금속 피검체의 실제 깊이에 대한 정량적 값을 얻는데 이용될 수 없다. 결과적으로, 금속 피검체의 실제 두께를 결정할 수 있는 IR 과도 서모그래피를 수행하고 획득된 데이터를 처리하는 개선된 방법이 필요로 된다. 그러한 방법 및 장치 중 하나가 1999년 4월 4일에 출원된, 함께 양도되어 계류중인 Ringermacher 등의 미국 특허 출원(Ser. No. 09/292,886)에 개시되어 있다. 기본적으로, 그 출원에 개시된 장치는 유사한 물질로 구성되고 이미 알려져 있는 두께를 갖는 부분을 포함하는 슬래브 표준 기준 피검체와 함께 원하는 피검체의 표면을 급속하게 가열하기 위하여 IR 이미지 데이터 획득용 초점 평면 어레이 카메라(focal plane array camera for IR image data acquisition) 및 고전력 플래시 램프(high-power flash lamp)를 이용한다(검사되는 피검체의 "열적으로 두꺼운" 섹션은 선택적으로 "무한 반공간" 열 기준으로서 이용될 수 있다). 두께가 이미 알려져 있는 부분을 포함하는 유사한 물질로 구성된 슬래브 피검체(slab object)는 동일한 이미지 프레임 내에서 "무한 반공간(infinite half-space)" 기준 표준(reference standard)으로 이용된다(선택적으로 피검체의 "열적으로 두꺼운" 부분이 기준으로 이용될 수 있음). 플래시 램프는 장파장(long-wave) IR "여광(afterglow)" 방출을 최소화하고 열 측정의 정확도에 영향을 주는 백그라운드 방사 효과(background radiation effect)를

줄이는 스펙트럼 튜닝형 광학 필터(spectrally tuned optical filter)를 갖추고 있다. 플래시 램프를 점화한 다음 사전 결정된 수의 IR 이미지 프레임이 획득되고 사전 결정된 시간 주기에 걸쳐 기록되어 피검체 표면(및 기준 표준)의 온도-시간(T-t) 히스토리를 전개한다. 이미지 내의 각각의 픽셀마다 콘트라스트 대 시간 데이터가 전개되어 그 픽셀 위치에 대응하는 위치에서 피검체의 두께를 결정한다.

전술된 방법에 있어서, 각각의 픽셀의 온도-시간 데이터로부터 슬래브 기준 표준의 온도-시간 데이터(또는 피검체의 열적으로 두꺼운 "딥(deep)" 기준 영역의 온도-시간 데이터)를 뺀으로써 콘트라스트-시간 데이터가 얻어진다. 불행히도, 이러한 방법은 표면 균일성(surface uniformity)이 일정하지 않은 피검체를 촬영하는 경우 어느 정도 에러를 가져올 수 있다는 단점을 안고 있다. 나아가, 이는 이미지 내에 슬래브 표준이 존재할 것을 요구하거나 피검체의 딥 기준 영역(그러한 기준 영역이 이용 가능하다고 가정하는 경우)으로부터 온도-시간 데이터를 이용할 것을 요구한다. 또한, 일반적으로, 광 흡수(optical absorption)를 강화하고 표면 균일성을 개선하기 위하여 촬영 이전에 그 피검체의 표면(및 슬래브 표준)에 특수한 코팅 처리를 하여야 한다.

발명의 상세한 설명

본 발명은 고속 적외선(IR) 과도 서모그래피를 이용하여 피검체의 실제 두께를 결정하고 디스플레이하기 위한 비파괴 테스트 방법 및 장치에 관한 것이다. 개선된 고속 IR 과도 서모그래피 분석 방법이 이용되어 피검체의 두께를 정확하게 측정하고 원하는 피검체상의 영역에서 그 단면 두께를 나타내는 비주얼 코드형 디스플레이(visual coded display)를 제공하는 데 이용된다. 이러한 개선된 방법의 주요 특징은, 고속 푸리에 변환 공진 함수를 이용하여 두께를 결정한다는 것이다. 한 가지 바람직한 특징은 본 발명의 과도 서모그래피 방법이 이미지 내에 기준 슬래브 표준이 존재할 것을 요구하지 않으며 피검체 상에서 이용할 수 있는 기준 영역을 요구하지도 않는다는 점이다. 또한, 검사되는 피검체의 광 흡수를 강화하고 표면 균일성을 개선하기 위한 특별한 표면 처리나 특별한 표면 코팅 등을 필요로 하지 않는다.

기본적으로, 본 발명은 급속하게 가열된 피검체의 온도 대 시간(T-t) 응답 커브에 대한 고속 푸리에 변환(FFT)의 실수 및 허수(Real and Imaginary) 성분을 분석하여 피검체를 통해서 열 펄스가 통과(transit)하는 특정한 특성 시간(T_c)에 직접적으로 관련되는 주파수 값을 획득하는 방법 및 장치를 제공한다. 일단 그 특성 시간이 알려지면, 이는 방정식(1)에 따라 원하는 지점에서 피검체의 두 표면 사이 두께에 대한 정량적 값(L)을 계산하는데 이용될 수 있다. 초기에 T-t 응답은 사전 결정된 관측 주기에 걸친(바람직하게는 피검체의 동일 면(same-side)("정면(front-side)"))을 관측하여 얻어지는 연속적 IR 카메라 이미지 프레임으로 획득된 열 데이터로부터 결정된다. (이상적으로, 이러한 관측 주기는 전술된 방정식(1)에 의하여 결정된 예상 특성 시간 및 평가되는 피검체의 두께 추정치(estimation)보다 적어도 얼마간 더 길다).

본질적으로, 획득된 열 데이터가 모여서 이미지에서의 각 픽셀마다 개별적 T-t 응답 커브를 형성한다. 그런 다음 각각의 픽셀과 연관된 T-t 응답 커브 데이터가 정규화되고 고속 푸리에 변환(FFT)이 수행되어 그 데이터를 주파수 도메인으로 변환한다. 그런 다음 복소 FFT의 실수 성분(또는 이와 달리 허수 부분)이 분석되어 주파수 도메인에서 T-t 응답의 변곡점을 배치한다. 이러한 변곡점에서의 주파수 값은 다음의 방정식(3) 및 방정식(4)에 의하여 주어지는 관계식에 따라서 열 특성 시간(T_c)에 관련된다.

$$T_c f_{Re} = 0.372 \text{ 방정식(3)}$$

$$T_c f_{Im} = 0.748 \text{ 방정식(4)}$$

여기서, f_{Re} 는, 각각의 픽셀에 관련된 T-t 응답 데이터의, 변곡점에서의 고속 푸리에 변환의 실수 성분이고, f_{Im} 은 그 변곡점에서의 고속 푸리에 변환의 허수 성분이다.

T-t 응답 데이터의 FFT의 실수 성분은 변곡점에서의 주파수 반폭(half-width)이 특성 시간(T_c)에 직접적으로 관련되는 "공진 함수(resonance function)"(주파수 도메인에서 "열 흡수(thermal absorption)" 함수와 같이 동작함)이다. 유사하게, T-t 응답 데이터에 대한 FFT의 허수 성분은 주파수 피크(f_{Im})가 특성 시간(T_c)에 직접적으로 관련되는 "피크형 함수(peaked function)"(주파수 도메인에서 "열 분산(thermal dispersion)" 함수와 같이 동작함)이다. 따라서, 주파수 도메인에서의 변곡점의 위치 및 그에 따른 특성 시간의 결정은 FFT의 실수 성분의 미분 함수의 피크를 식별하거나 또는 FFT의 허수 부분의 피크 값을 식별함으로써 이루어진다.

도 1에 도시된 바에 따르면, 본 발명에 따르는 장치는 특별한 광학 필터를 구비한 하나 이상의 고전력 플래시 램프와, 데이터 획득용 IR 감지 초점 평면 어레이 카메라와, 디스플레이 모니터를 포함하는 촬영 시스템을 포함한다. 컴퓨터 시스템은 촬영 시스템을 제어하고, IR 카메라를 통하여 획득된 표면 온도 데이터를 기록하고 분석하며, 피검체의 두께에 정확히 대응하는 컬러 또는 그레이 패턴-키형(gray pattern-keyed) 이미지를 디스플레이 모니터 상에 제공한다.

표면 온도 데이터의 획득은 플래시 램프를 점화하여 피검체의 표면을 비추으로써 시작된다. 특별하게 튜닝된 광학 필터가 이용되어 3-5 마이크로 IR 방사선(radiation) 전체를 흡수 및/또는 플래시 램프로 후방 반사한다. 이는 바람직하지 않은 장파장 IR "여광(afterglow)" 방출- 전형적으로 램프가 꺼진 다음 플래시 램프내의 과열된 금속 요소에 의하여 생성됨 -이 피검체나 카메라에 도달하는 것을 방지한다.

플래시 램프가 점화된 다음 사전 결정된 수의 이미지 프레임이 일정한 시간 주기에 걸쳐 기록된다. 기록된 이미지 프레임 각각은 사전 결정된 $n \times m$ 이미지 픽셀 어레이(그 강도는 프레임 데이터가 획득된 시간에 피검체의 표면 온도와 상관관계에 있음)로 구성되며, 각각의 픽셀은 이미지 프레임 내에서 특정한 분해 요소에 대응하는 지정 위치(x,y)를 갖는다. 그런 다음 기록된 IR 이미지 데이터가 이용되어 피검체 표면상의 피검 영역 상의 모든 요소 영역 즉 "분해 요소"에 대한 온도-시간(T-t) 히스토리를 전개한다. 그런 다음, 각각의 픽셀마다 히스토리 T-t 데이터에 의하여 형성된 특성 커브에서 "니(knee)" 포인트가 식별된다. 모든 픽셀에 대한 데이터를 정규화하기 위하여, T-t 데이터 커브가 클립되고(clipped) 상수 패드되어(constant-padded) 바로 다음 클립 포인트에서의 커브 값과 동일한 일정 온도 값을 갖는 연속적인 "평평한" 커브 부분을 생성한다.

그런 다음 FFT의 실수 부분의 수학적 미분 커브가 계산되어 주파수 도메인에서 T-t 응답 데이터의 변곡점(f_{Re})을 식별한다. 미분 커브는, 예컨대, 3-포인트 데이터 샘플링(제 1 및 제 3 샘플 포인트 분리(separation)는 제 2 샘플 포인트에서의 이미지 프레임 번호 값에 비례적으로 관련됨)을 이용함으로써 정확하게 계산될 수 있다. 바람직하게, 미분 계산에서의 로컬 "피크" 전체가 식별되고 필터링된다. (예컨대, 가중 함수가 이용되어 그와 같이 로컬화된 임의의 피크에 대한 가중치를 조정해서 실제 변곡점 주파수를 매우 잘 식별할 수 있다). 최종적으로, 각각의 픽셀에 대응하는 위치에서 특성 시간(T_c) 및 피검체의 두께(L)가 방정식(1) 및 방정식(3)에 따라서 정량적으로 결정된다.

이와 달리, FFT의 허수 성분에서의 피크가 이용되어 주파수 도메인에서 T-t 응답 데이터의 변곡점(f_{Im})을 식별할 수 있다. 이러한 경우에, 그 피크는 임의의 통상적 계산 방법에 의하여 용이하게 결정될 수 있다. 각각의 픽셀에 대응하는 위치에서 특성 시간(T_c) 및 피검체의 두께(L)가 방정식(1) 및 방정식(4)에 따라서 정량적으로 결정된다.

실시예

도 1은 피검체(예컨대, 내포 공동(intentional void)(4)을 포함하는 금속 터빈 에어포일(1))의 두께를 결정하고 디스플레이 하기 위한 예시적 IR 과도 서모그래피 시스템(10)을 도시하고 있다. 다음의 설명에 있어서, 속이 비거나 절반 정도 빈 피검체(즉, 내포 공동을 포함하고 있는 피검체)의 관점에서 피검체의 "두께"는 앞쪽 벽이나 표면 두께를 지칭한다.

도 1에 도시된 바에 따르면, 플래시 램프 열-펄스 소스(11)가 이용되어 측정되는 피검체의 표면을 급속하게 가열한다. 플래시 램프 열-펄스 소스(11)로 적합한 장치의 하나로, 예컨대, 4개 또는 8개의 고속, 고휘력 전력 포토그래픽 플래시 램프가 있을 수 있는데, 각각의 램프는 약 4.8 킬로줄(Kilo-joules) 출력을 할 수 있고 개별적 전력 공급원을 구비한다(예컨대, Speedotron Corp. in Chicago, IL에 의하여 제조된 플래시 램프).

금속이 비금속보다 훨씬 빠른 열 전도 속도를 갖기 때문에, 금속에서의 열 흐름의 특성 시간이 예컨대, 플라스틱이나 여타의 합성물보다 훨씬 더 빠르다. 결과적으로, 통상적인 IR 서모그래피(일반적으로 비금속으로 제한됨)를 금속에 적용하고자 하는 경우, 인가된 열을 정확하게 차단할(sharp cutoff) 필요가 있다. 이를 달성하기 위하여, 플래시 램프(11) 및 대상 피검체(1) 사이에서 3-5 마이크로(micron) 반사성 필터(reflective filter)(18)가 이용되어 플래시 램프가 노출된 다음 냉각되는 동안 피검체를 잔류 열(residual heat)에 노출되지 않도록 한다.

실제로, 하나 이상의 필터가 이용될 수 있다(예컨대, 각각의 플래시 램프마다 하나씩 이용될 수도 있음). 이들 필터는 직접적 장파장 방사선(전형적으로, 플래시 램프에서 과열된 금속 요소의 "여광"으로부터 생성됨)이 플래시 램프를 벗어나서 타겟에 도달하거나 또는 그렇지 않으면 초점 평면 어레이 카메라(13)로 후방 반사되지 않도록 동작한다. 플래시 램프(11)로

부터의 그러한 1차 여광 방사선은 초기의 열 데이터 획득 동안 목표 피검체로부터의 장파장 IR 방출에 대항하여 이를 방해하며, 이에 따라 실제 타겟 발생형 IR 방사선을 약화시키고 궁극적 이미지 콘트라스트 및 품질을 저하시킨다. 그러므로, 이와 같은 특별한 필터를 이용하면 충분히 정확한 열 펄스를 생성하여 금속에서 더 짧은 열 이동시간이 검출되도록 한다.

도 1에 도시된 예시적 실시예에서, 플래시 램프 필터(18)는 PyrexTM, 퓨즈형 석영(fused quartz), BK7TM, 또는 가시 광선 및 UV 광선에 대하여 투명하고 적외선 반사성 코팅(infrared reflective coating)으로 플래시 램프 대면 측(facing side) 상에서 코팅되어 3-5 마이크론 범위의 전체 방사선을 플래시 램프로 후방 반사하는 기타 광학 물질로 구성될 수 있다. (광학 유리 및 코팅형 필터는 예컨대, Oriel in Stratford, CT와 같은 범과학용 광학 및 광학 유리 제조자에 의하여 획득되거나 특별히 제조될 수 있다).

열 펄스 조명형(heat-pulse illuminated) 피검체(1)의 표면 온도 측정치가 IR 감지 초점 평면 어레이 카메라(13)(예컨대, Amber Engineering - a Raytheon Company- located in Goleta, Ca.에 의한 Radiance HS 적외선 카메라가 이용 가능할 수 있음)와, 제어 전자 장치(control electronics)(14)와, 프레임 데이터 메모리(frame data memory)(15)와, 제어 컴퓨터/이미지 프로세서(16)와, 디스플레이 모니터(17)를 포함하는 적외선 감지 촬영 시스템을 이용해서 획득된다.

열 데이터의 획득은 바람직하게 광학 트리거링(triggering)이나 기타 적합한 방법에 의하여 플래시 램프 점화 시간에 개시된다. 플래시 램프 점화는 시스템 컴퓨터(16)(예컨대, Amber Corp.에 의한 ImageDeskTM 프레임 획득 시스템) 상에서 구동하는 통상적 비디오 프레임 획득 소프트웨어나, 기타 통상적 프레임 획득 및 플래시 램프 제어 소프트웨어(예컨대, Thermal Wave Imaging Inc. in Lathrup Village, MI에 의하여 상업적으로 이용 가능한 소프트웨어)에 의하여 관리되는 통상적 플래시 램프 전자 장치(14)를 통하여 제어된다.

시스템 제어 컴퓨터/이미지 프로세서(16)는 본 발명의 방법에 따라서 디지털 이미지를 프로세싱하고 디스플레이 함에 더하여 주변 장치를 제어하고 및 통신하는 기능을 수행할 수 있는 특별히 프로그램된 범용 디지털 컴퓨터이다. 시스템 컴퓨터(16)는 카메라 및 램프 전자 장치(14)와 프레임 데이터 메모리(15)를 제어하여 장래 분석을 위해서 메모리 내에 저장된 사전 결정된 수의 순차적 피검체 표면 열 이미지 프레임들을 획득한다.

바람직하게, 열 촬영 프로세스를 개시하기 이전에, IR 카메라(13)는 이제 설명될 "전계" 이중 이미지 교정 기법("full-field" dual-image calibration technique)을 이용하여 교정된다. 기본적으로 이러한 교정 기법은 두 개의 "흑체(black-body (BB))" 이미지 교정 기준, 즉 (1) 실온의 평평한 흑판(flat black-plate)을 이용하는 흑체 "냉각(cold)" 소스와, (2) 가열된 평평한 흑판을 이용하는 흑체 "열(hot)" 소스를 이용한다. 예컨대, 흑체 "냉각" 소스 교정 이미지를 획득하기 위하여, 카메라 렌즈에 대해서 45°각도로 정렬된 실온의 평평한 흑판을 둘러싸는 평평한 흑색 페인트형 박스가 렌즈 바로 앞에 배치된다. 흑체 "열" 소스 교정 이미지를 획득하기 위하여, 평평한 흑판을 가열(공칭적으로 주변 온도가 약 10°C 올라갈 때까지)한 다음 카메라 렌즈가 그 동일한 평평한 흑색 페인트형 박스 유닛 안으로 배치되어 그 카메라가 가열된 판을 전계에 걸쳐 촬영하도록 한다. 전술된 이중 이미지 교정 기법이 바람직할지라도, (고(high) 콘트라스트 촬영 및 개선된 열 정확도(accuracy)를 획득하는데 있어서 중요한) 이미지 필드내의 균일성을 최대화하는 임의의 교정 기법이 이용될 수 있다.

촬영 처리 동안 얻어진 각각의 이미지 프레임은 N×N 픽셀(각각의 픽셀은 피검체 표면상의 분해 요소에 대응함)로 구성되는데, 여기서 N은 원하는 해상도 및 정확도에 따라서 전형적으로 128 또는 256이다. 각각의 픽셀은 약 2 바이트의 저장 메모리를 점유하며, 예컨대 12 비트나 또는 더 긴 이진수로 표시될 수 있다. 저장된 이미지 프레임은 프레임 번호 값이 증가하는 순서로 식별되어 플래시 램프(11)에 의해서 전해진 열 임펄스(impulse)에 충돌된 다음 사전 결정된 주기 동안 피검체(1)의 앞표면에 대한 온도 대 시간(T-t) 특성의 히스토리 기록을 제공하도록 함께 기능한다.

금속 피검체 평가 동안, 제어 컴퓨터(16)가 플래시 램프(s)(11) 점화를 트리거한 다음, 이미지 데이터 프레임이 카메라(13)로부터 획득되고 이미지 상의 각각의 분해 요소에서의 IR 강도가 프레임 데이터 기록기(frame data recorder)(15)에 디지털적으로 기록되고 저장된다. 피검체 물질에 대하여 평가된 적어도 하나의 "특성 시간"이 지속되는 동안 중요한(meaningful) T-t 히스토리를 획득하기에 충분한 사전 결정된 수의 순차적 이미지에 대하여 데이터 획득이 계속된다. 획득되는 이미지 프레임의 전체 수는 원하는 정확도 및 이미지 해상도에 의존하여 변화할 수 있으며 초당 550 프레임 정도의 데이터 획득 속도를 가질 수 있다.

프레임 데이터 기록기(15)는 프로세서(16) 내부의 통상적 디지털 메모리이거나 그 프로세서(16)에 의하여 액세스 가능한 임의의 적합한 비디오 프레임 데이터 저장 장치일 수 있다. 획득된 순차적 열 이미지 프레임 각각은 실제 시간 경과에 대응하여, 증가하는 프레임 번호 값(Z)을 할당받는다. 그런 다음 결과적인 데이터 프레임 "스택(stack)"이, 앞서 개괄된 1차원

적 열 흐름 분석 방법을 이용하여 분석된다. 본 방법에 따르면, 본 발명의 방법은 "변곡점"이나 피크 경사 시간의 위치, 즉 T-t 데이터 커브 상에서 최대 경사 시점을 식별함에 의존하는, 이미 알려져 있는 열 불변 특성(순차적 IR 이미지 프레임에 걸쳐 각각의 이미지 픽셀의 온도 대 시간(T-t) 히스토리에서 입증됨)을 이용한다.

도 2를 참조하면, 본 발명의 열 공진 촬영 기법을 이용하는 과도 IR 서모그래피를 수행하는 예시적 처리 단계를 보여주는 흐름도가 도시되어 있다. 이들 단계는 예컨대, 통상적 프로그래밍 기법을 이용하여, 적절하게 프로그래밍된 컴퓨터(16)(도 1)에 의해서 구현될 수 있다.

초기에, 블록(20)에서 표시된 바와 같이, 피검체(1)의 검사 영역이 식별되고(즉, IR 카메라가 검사 영역에 초점 맞추어짐), 시스템 조작자가 그 피검체를 조사하기 위하여 관련되는 파라미터에 대한 정보, 예컨대 피검체의 열 확산 계수 등을 선택하고 입력한다. 그런 다음, 도 2에서 블록(20)으로 표시되는 바와 같이, 시스템 제어 컴퓨터는 플래시 램프(11)를 점화하고 초점 평면 어레이 IR 카메라(13)로부터 이미지 프레임 데이터 획득을 개시하도록 플래시 램프 전자 장치에 대하여 지시한다. 블록(21)에서 표시되는 바와 같이, 데이터 획득이 사전 결정된 수의 순차적 이미지 프레임에 걸쳐 수행되고 그런 다음 각각의 획득된 이미지 프레임을 순차적 프레임 번호(Z)로 식별한 다음 그 이미지 시퀀스가 프레임 메모리(15)에 저장된다.

그런 다음, 블록(22)에 표시된 바와 같이, 순차적 프레임 전체에 대하여 피검체 표면상의 피검 영역의 분해 요소 위치 각각에 대응하는 열 이미지내의 각 픽셀에 대한 열 데이터가 식별된다. 참조 번호(23)에서 표시되는 바와 같이, 평가될 픽셀 하나가 선택된다. 그런 다음, 참조 번호(24)에서 표시되는 바와 같이, 세로 시간 좌표로서 프레임 번호를 이용하여 각각의 픽셀에 대한 T-t 커브 데이터가 전개된다. 또한, 초기 IR 가열 "플래시"의 시간(프레임 번호)이 식별되고, 제 1 불포화 데이터 프레임이 식별된다.

그런 다음, 참조 번호(25)에서 표시되는 바와 같이, 각각의 픽셀마다 각각의 특성 T-t 데이터 커브에서 "니" 부분이 식별된다. 그런 다음, 각각의 픽셀의 T-t 데이터 커브는 클립되고 상수 패드되어 이러한 "니-부분" 바로 다음 그 클립 포인트에서의 T-t 데이터 값과 동일한 상수 온도 값을 가지는 연속적인 "평평한" 커브 부분을 생성한다. 바람직하게, 공칭적으로 그 커브의 니 부분에 대응하는 시간 값의 범위보다 약간 더 크고 적어도 시간 $t = L^2/\pi^2\alpha$ 보다 더 큰 데이터 클립 포인트(T_{Cpt})가 선택된다. 선택된 클립 포인트(T_{Cpt})가 반드시 시간상 정확한 값이나 포인트여야 하는 것은 아니지만, 그 선택은 생성되는 임의의 이미지의 최종 품질에 영향을 줄 것이다. 따라서, 적절한 클립 포인트를 선택하는 것은 특성 T-t 데이터 커브를 따라서 식별된 니-부분의 중단 가까운 영역으로부터 선택된, 적어도 시간 $t = L^2/\pi^2\alpha$ 보다 더 큰 값을 가지는 다수의 인접한 클립 포인트를 이용하여 전개되는 이미지를 경험적으로 비교하여 적절한 클립 포인트를 가장 잘 선택할 수 있다. 또한, 이미지에서의 전체 픽셀에 대한 데이터를 정규화 하기 위하여, 그 상수 온도 값에 대응하는 "평평한" 부분이 0과 같아지도록 각각의 픽셀에 대한 T-t 커브가 선택된 바이어스(bias) 값으로 오프셋된다.

그런 다음, 단계(26)에서 표시되는 바와 같이, 고속 푸리에 변환(FFT)이 정규화된 커브 데이터에 대하여 수행되고 결과적인 변환 데이터의 실수 및 허수 성분 부분이 분석되어 주파수 도메인에서 변곡점을 식별할 수 있다. 실수 성분 부분이 선택되는 경우라면, 블록(27,28)에서 표시되는 바와 같이, 먼저 FFT 실수 부분의 수학적 미분 계수가 결정된다. 미분 데이터를 계산하기 위하여, 가변 폭 베이스 인터벌이 이용될 수 있다. 예컨대, 실수 성분 데이터 커브를 따라서 선택된 임의의 포인트에 있어서, 미분 계수를 계산하기 위한 베이스 인터벌이 IR 이미지 프레임 번호(Z)의 제곱근에 비례하도록 정해진다.

그런 다음, 단계(28)에서는, 미분 커브에서의 전체 로컬 피크가 식별되고 가중치 "가중" 필터가 이용되어 변곡점(t_{inf})으로 이용할 적절한 피크를 결정한다. 예컨대, 전체 피크 프레임 및 진폭의 리스트가 컴퓨터 메모리에 유지될 수 있다. 이 리스트에 대하여 사전 결정된 적절한 가중 함수를 적용함으로써, 각각의 피크의 가중치를 조정하여 예컨대, 데이터 획득 시간 초기에 발생하는 잡음 효과가 효과적으로 감소될 수 있게 하는 것이 가능해진다. 그런 다음 그 피크들이 가중치/가중이 감소하는 순서로 정렬되고 가장 큰 가중값을 가지는 피크(즉, 가장 중요한 피크)가 변곡점을 표시하는 것으로 선택된다. 단계(30)에서 표시되는 바와 같이, 전술된 방정식(1) 및 방정식(3)에 따라서 이 피크에서의 주파수(f_{Re})가 이용되어 각각의 픽셀에 대응하는 위치에서의 특성 시간(T_c) 및 피검체의 두께(L)가 정량적으로 결정된다.

이와 달리, 단계(27,28) 대신에, 단계(29)에서 표시되는 바와 같이, T-t 응답 데이터에 대한 FFT의 허수 성분 부분에서의 피크가 이용되어 주파수 도메인에서의 변곡점을 식별할 수도 있다. 이러한 경우, 일반적으로 통상적인 계산 방법을 이용하여 허수 성분에서의 피크가 결정될 수 있다. 그런 다음, 단계(30)에 표시된 바와 같이, 전술된 방정식(1) 및 방정식(4)에 따라서 피크에서의 주파수(f_{Im})가 이용되어 각각의 픽셀에 대응하는 위치에서의 특성 시간(T_c) 및 피검체의 두께(L)가 정량적으로 결정된다.

최종적으로, 단계(31)에서, 계산된 두께 값(L)이 메모리에 저장되고 이를 이용하여 디스플레이 또는 프린트를 위한 피검체 표면상의 피검 영역에 대한 컬러 매핑형 또는 그레이 스케일 이미지(각각의 컬러나 그레이 명암은 특정한 두께에 대응함)가 구성된다. 그런 다음, 단계(23)로의 화살표에 따라 표시된 것처럼, 그 다음 픽셀이 선택되고, 전술된 단계들이 IR 이미지를 구성하는 각각의 픽셀마다 다시 수행된다. 전술된 장치와 관련하여 열 데이터 획득 및 분석을 위한 전술된 단계들을 이용하는 과도 서모그래피 분석을 수행함으로써, 검사되는 피검체의 일부를 구성하거나 그에 연결될 수 있는 내부 구조(예컨대, 도 1에 도시된 터빈 에어포일 내에서 종종 발견되는 리브 유사(rib-like) 구조)나 밀접하게 이격된 뒷벽에 대하여도 벽 두께 값이 정확하게 얻어질 수 있다. 또한 필요한 경우, 확산 상수, 데이터 분석 시작 포인트 및 컬러 매핑 범위 등과 같은 다양한 파라미터 값의 입력 및 선택이 시스템 제어 컴퓨터의 통상적 프로그래밍을 통하여 자동화된다.

마지막으로 도 3을 참조하면, 다수 계층형(multi-tiered) 피검체 블록에 대한 적외선 과도 서모그래피 디스플레이의 다이어그램이 도시되어 있다. 도 3에 도시된 피검체 블록(32)은 서로 다른 두께의 6개의 사각형 섹션을 갖는다. 이미지의 오른쪽 쪽에서 디스플레이되는 바-스케일의 두께 키(bar-scale thickness key)에서 유사한 컬러나 명암에 대응하는 생성 이미지 내의 서로 다른 컬러나 그레이 톤 음영(서로 다른 음영으로 도시됨)에 의하여 6개 섹션 각각의 두께가 표시된다. 이러한 예에서, 바-스케일은 0.013 내지 0.056 인치의 범위에 걸친 두께 표시를 포함하고 있지만, 당업자라면 이와 다른 범위의 두께 값을 가지는 디스플레이형 바 스케일이 본 발명에서 용이하게 구현될 수 있음을 알 것이다.

본 발명은 현재 가장 일반적이고 바람직한 것으로 간주되는 실시예와 관련되어 설명되고 있지만, 본 발명은 설명된 실시예로 제한되지 않으며, 오히려, 첨부된 청구범위의 사상과 영역 내에 포함되는 다양한 변형 및 등가의 실시예들을 커버하도록 의도된다.

도면의 간단한 설명

본 발명에 의하여 달성되는 목적 및 이점은 특히 첨부 도면을 참조하여 현재 바람직한 실시예에 관한 다음의 상세한 설명을 면밀히 검토함으로써 이해할 수 있다.

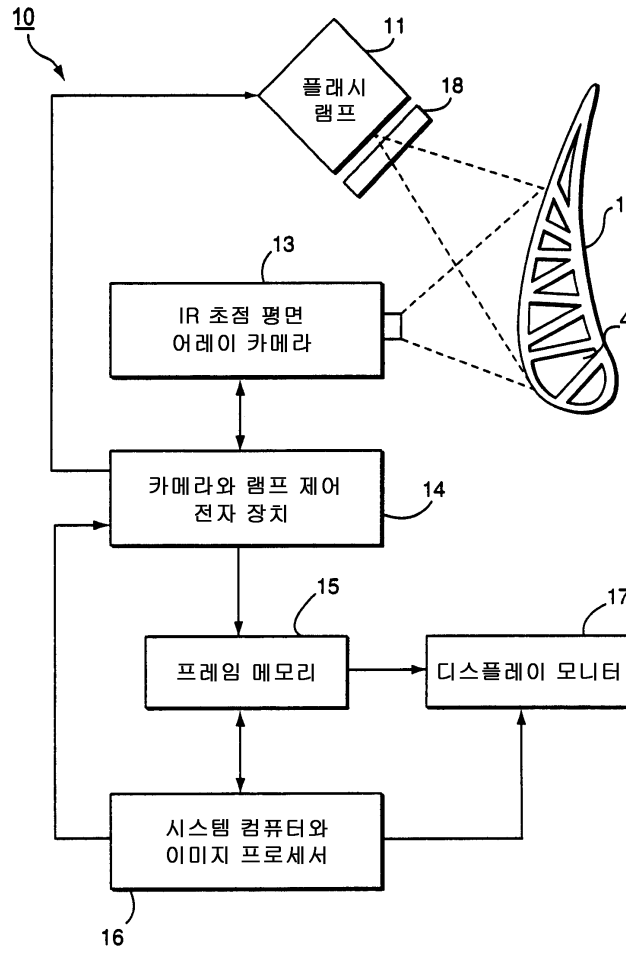
도 1은 본 발명에 따르는 피검체의 실제 두께를 결정하고 디스플레이하기 위한 예시적 적외선 과도 서모그래피 시스템 장치를 도시하는 개략도,

도 2는 본 발명에 따라서 도 1의 시스템에 의하여 수행되는 적외선 이미지 데이터 획득 및 분석의 과정을 도시하는 흐름도,

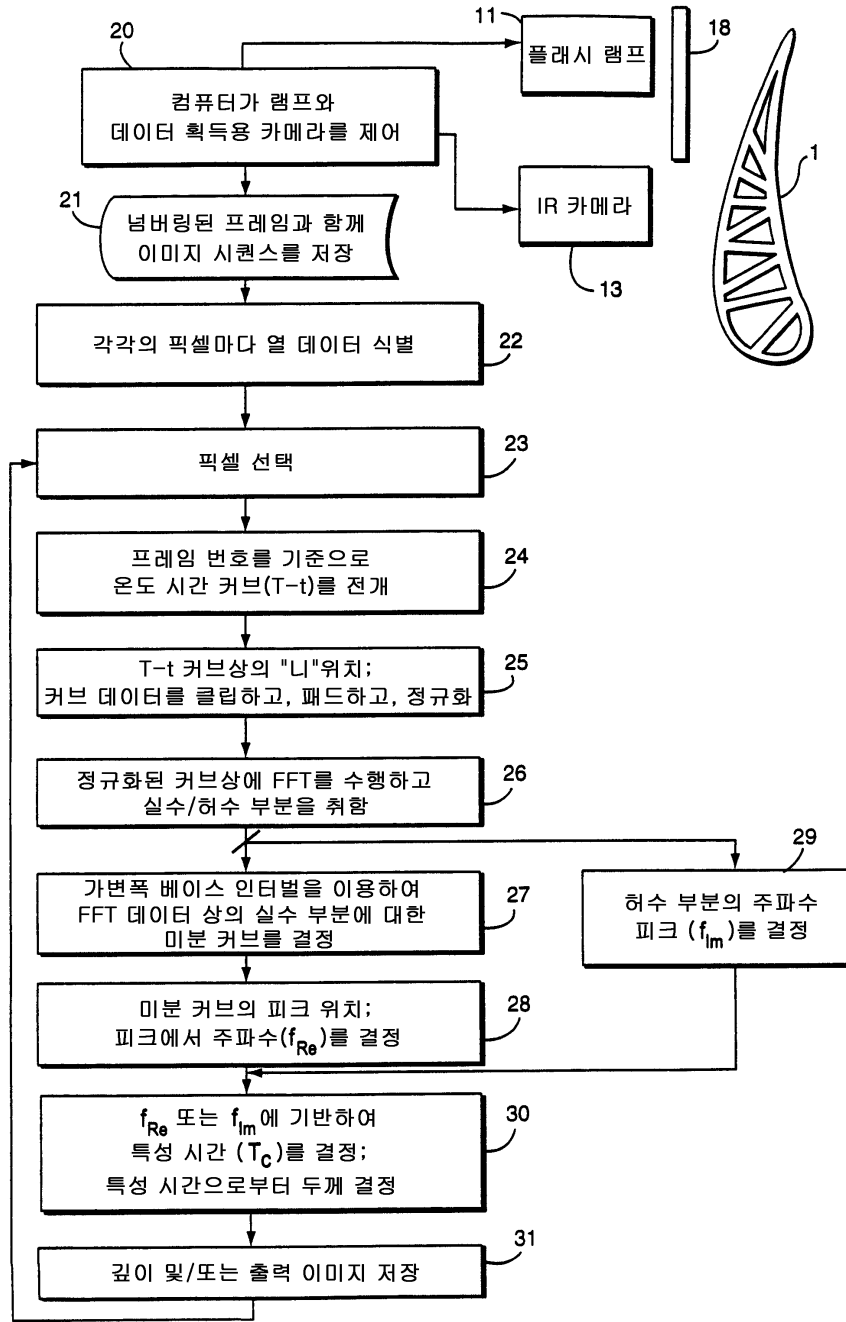
도 3은 다수 계층형 피검체의 예시적 IR 과도 서모그래피 이미지 디스플레이를 도시하는 도면.

도면

도면1



도면2



도면3

