

위상잠금 전단간섭계를 이용한 비파괴검사

Nondestructive Testing Using Lock-in Shearography

김경석(학술제4분과 위원장)

Kyeong-Suk Kim

E-mail: gsckim@chosun.ac.kr

1. 서 론

스펙클전단간섭법이라 불리는 전단간섭계를 이용한 결함 검사 기술(shearography 또는 speckle shearing interferometry, SSI)은 광응용 계측 기술 중 대표적인 비파괴검사 방법이다. 지금까지 개발되어 활용되고 있는 레이저를 이용한 광응용 계측 기술에는 홀로그래피 간섭법(holography 또는 holographic interferometry, HI)과 홀로그래피 간섭법에서는 잠음성분으로 간주되어 제거하려고 했던 스펙클을 이용한 기술인 스펙클 간섭법(speckle interferometry, SI), 그리고 모아레 줄무늬를 이용한 모아레 간섭법(Moire interferometry, MI) 등으로 크게 분류할 수 있다. 이들 중, 스펙클 간섭법은 측정 결과로부터 변위 정보를 직접 얻을 수 있는 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)과 변위 정보의 미분값 또는 1차 도함수를 얻을 수 있는 스펙클전단간섭법으로 구분할 수 있다[1].

ESPI는 주로 측정 대상체의 변위 정보를 직접 얻을 수 있는 장점을 이용하여, 진동, 굽힘과 같은 외력에 의한 측정 대상체의 면외 변위 측정과 인장, 압축 등에 의해 발생하는 응력과 변형율과 같은 외력에 의한 측정 대상체의 면내 변위 측정에 사용되고 있다. 특히 면내 변위 측정을 위해서는 간섭계의 특성상 측정환경이나 외란에 의해 측정 결과가 크게 영향을 받기 때문에 주로 광학 정반이 설치되어 있는 실험실 환경에서 사용된다.

스펙클전단간섭법은 변위에 대한 미분값을 얻게 되어 측정 결과가 나비 형상 또는 황소의 눈과 같은 특별한 패턴으로 나타나므로 주로 결함 측정용으로 사용되고 있다. 또한 간섭계의 특성상 측정 환경이나 외란이 측정 결과에 별다른 영향을 주지 않기 때문에 작업 현장에 직접 사용할 수 있다는 장점을 지니고 있어 비접촉식 비파괴 결함 검사 기술로 많이 사용되고 있다. 최근에는 스펙클전단간섭법의 측정 결과를 적분하여 ESPI를 이용하여 측정된 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있는 방법이 제시되어 결함 측정 외에도 면내외 변위 측정에도 활용되고 있다.

이 강좌에서는 전단간섭계에 최근 열화상 기술에서 사용되고 있는 위상잠금 기능을 추가하여 측정 감도를 향상시킬 수 있는 위상잠금 전단간섭계에 대한 측정 원리를 설명하여 독자들이 보다 쉽게 전단간섭계를 이용한 비파괴검사 기술에 대해 이해할 수 있도록 하고자 한다.

2. 일반적인 스펙클전단간섭법의 원리

2.1. 스펙클과 줄무늬 형성

스펙클(speckle)은 간섭성이 좋은 레이저를 측정 대상체의 표면에 조사하였을 때 표면의 광학적 거칠기가 조사하는 레이저의 파장보다 클 경우 발생하는 그림 1에 나타난 것과 같은 입자형태의 반점 모양을 말한다. 대상체의 표면에 조사

한 레이저는 대상체 표면의 거칠기로 인해 표면에서 난반사되며, 난반사된 광들이 서로 간섭을 일으켜서 스페클 패턴을 형성하게 된다[2].

스페클의 크기는 관찰하는 방법에 따라 조금 차이가 있으나, 최근에는 카메라 렌즈에 의한 결상계를 사용하므로 주관적 스페클(subjective speckle)의 크기를 의미한다. 주관적 스페클의 크기는 $S_{sub} = 1.22(1+M)\lambda \frac{F}{M}$ 로 정의된다. 여기서, M 은 렌즈 확대배율, λ 는 조사한 레이저의 파장, F 는 렌즈의 f-number이다. 만약, 사용한 렌즈의 광학배율을 1, 레이저의 파장을 532 nm, 렌즈의 f-number를 1.2라 하면 주관적 스페클의 크기는 약 37.85 μm 가 되며, 대상체의 표면에서의 스페클 크기는 약 795.2 nm가 된다.

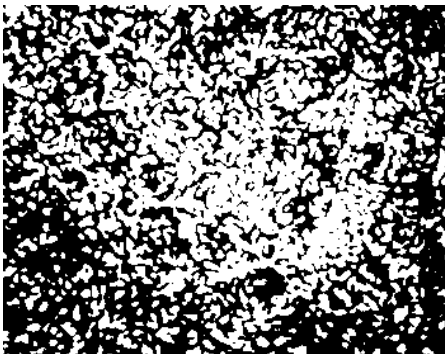


그림 1. 스페클 형상

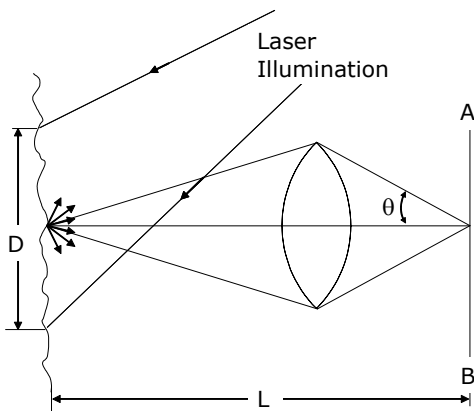


그림 2. 주관적 스페클 패턴의 형성

동일한 파장을 갖는 두 개의 광파가 중첩되는 경우에는 간섭을 일으키게 된다. 변화의 기준이 되는 기준파(reference wave)와 대상체에 대한 정보를 포함하고 있는 물체파(object wave)가 서로 중첩하면 간섭을 일으키며, 두 광파의 합성광에 대한 강도는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$I = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \tag{1}$$

여기서, I 는 합성광의 광강도, I_O 는 물체파의 광강도, I_R 은 기준파의 광강도, ϕ 는 물체파와 기준파의 위상차이다.

측정 대상체에 변형이 발생할 경우, 변형이 일어나기 전과 후의 합성광의 광강도를 얻은 후, 이들을 감산 처리하면 밝고 어두운 스페클 간섭 줄무늬(fringe)를 얻을 수 있다. 변형 전과 후의 광강도를 각각 I_{before} 와 I_{after} 라 하면 이들은 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$I_{before} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \tag{2}$$

$$I_{after} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \Delta\phi)$$

여기서, $\Delta\phi$ 는 대상체의 변형에 의한 위상변화이다.

변형 전과 후의 두 개의 광강도의 감산처리는 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$I_{subtract} = I_{before} - I_{after} \tag{3}$$

$$= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)$$

2.2. 전단간섭계

스페클 전단 간섭법에서 구성하는 간섭계는 마이켈슨 간섭계의 변형이라 할 수 있다. 그림 3에 전단간섭계를 개략적으로 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 기준광을 만들어주기 위한 기준 거울(reference mirror)과 기준광에 대해 물체광이 상대변위를 갖도록 하는 전단 거울(tilting mirror)로 구성되어 있다. 기준 거울에는 변형 정보를 얻기 위해 기준광의 위상을 조절할 수 있도록 PZT(piezoelectric transducer)를 부착하며, 전단 거울은 기준 거울을 통해 들어오는 이미지와 일정

량만큼 전단이 일어날 수 있도록 기울기를 조절한다. CCD 카메라를 통해 기준 거울과 전단 거울을 거쳐 들어오는 전단된 이미지(광파의 중첩)를 얻게 된다.

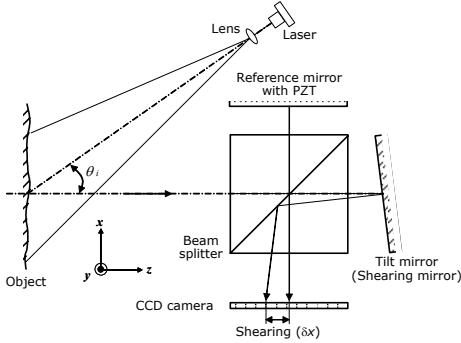
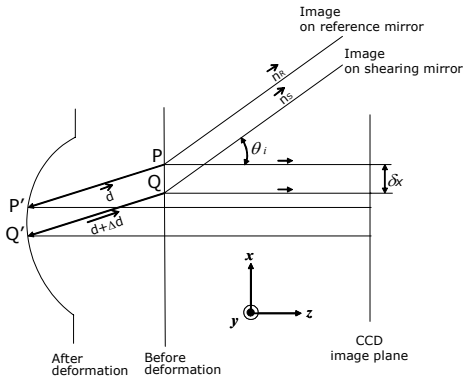
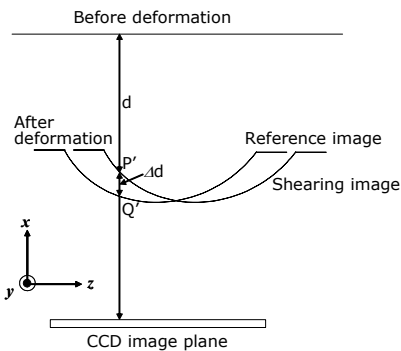


그림 3. 전단간섭계 개략도



(a) 광경로 변화 추적



(b) 전단에 따른 파면의 중첩

그림 4. 전단간섭계에서의 광경로 변화

그림 4(a)로부터 점 P 와 Q 가 물체 변형 \vec{d} 에 의해 점 P' 과 Q' 으로 이동할 때 위상차는 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} [d_z(1 + \cos\theta_i) + d_x \sin\theta_i]$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(d_z + \Delta d_z)(1 + \cos\theta_i) + (d_x + \Delta d_x) \sin\theta_i] \quad (4)$$

Δd 를 테일러 급수를 이용하면 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d_z}{\partial x} \delta x + \frac{\partial^2 d_z}{\partial x^2} \frac{\delta x^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^{(n-1)} d_z}{\partial x^{(n-1)}} \frac{\delta x^{(n-1)}}{(n-1)!} \quad (5)$$

x 축 방향에서의 전단의 크기(전단량) δx 를 매우 작게 하면 식(5)에서 2차 미분항 이상의 고차항은 무시할 수 있으며, 각각의 방향 $i=1, 2, 3$ 에 대해 식(6)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial x_i} \delta x \quad (6)$$

이 값을 식(4)에 대입하고 광파의 조사각 $\theta_i \approx 0$ 이라 가정하면 d_x 성분을 무시할 수 있으므로, 식(4)로부터 대상체의 변형에 의한 위상 변화량을 식(7)을 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_Q - \Delta\phi_P \cong \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_z}{\partial x} \delta x \quad (7)$$

물체의 상대변위 $\frac{\partial d_z}{\partial x}$ 에 대해서 정리하면 식(8)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial d_z}{\partial x} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\phi \frac{1}{\delta x} \quad (8)$$

식(8)에 의해, 전단의 크기가 매우 작을 경우 면의 변위에 대한 미분값 $\frac{\partial d_z}{\partial x}$ 을 직접 측정할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

식(2)의 대상체의 변형에 의한 위상변화 $\Delta\phi$ 를 정량적으로 구하기 위해서는 미지수가 3개이므로 최소한 3장 이상의 스페클 패턴 이미지를 얻어야 한다. 이 때, 광파의 위상에 일정량만큼씩 변화를 주게 되며, 획득한 여러 장의 스페클 패턴으로부터 위상을 구하기 위해 위상이동법을 사용한다.

또한, 위상이동법을 이용하여 구한 위상변화 $\Delta\phi$ 는 결이 겹쳐져 있는 상태이므로 위상결필침 (phase unwrapping) 방법을 적용한다.

3. 위상잠금(Lock-in) 스펙클 전단 간섭법의 원리

그림 5와 그림 6으로부터 알 수 있듯이 위상잠금 전단 간섭계에서는 강도를 제어할 수 있는 히터(램프)를 이용하여 대상체를 주기적으로 가열함으로써 시간적인 변형이 발생하도록 한다는 점이 일반적인 전단간섭계를 이용한 방법과의 차이라고 할 수 있다[3].

위상잠금 기술을 적용하기 위해서는 대상체의 표면 온도가 주기적으로 변화하도록 하여 주기적인 열확산이 일어나도록 한다. 이 때, 열확산은 대상체의 내부로 진행되며, 이것은 열적파동 또는 열전파로 간주할 수 있다. 이 열적파동은 열적 경계에서 초기 열적파동과 중첩되는 대상체의 표면으로 반사된다. 이 방법에서는 가열 히터의 강도를 제어하기 때문에, 변조된 온도장의 각 측정점에서의 위상각과 크기가 변한다. 따라서 가열 히터의 변조 주파수에서 진동하는 결함으로 인한 변형의 변화를 해석할 수 있다.

획득한 스펙클 패턴 이미지를 해석하는 원리는 위상잠금 적외선 열화상기법에서 사용한 해석 방법과 동일하다. 열에 대한 위상 정보를 가지고

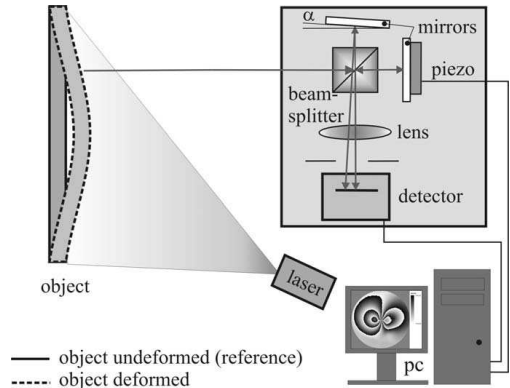


그림 5. 일반적인 전단간섭계의 구성

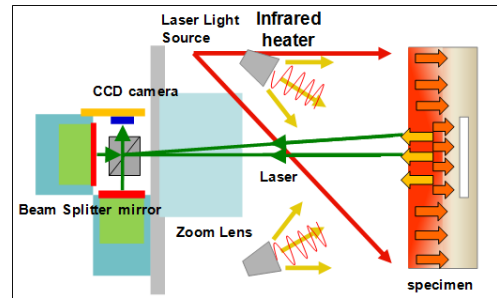


그림 6. 위상잠금 전단간섭계의 구성

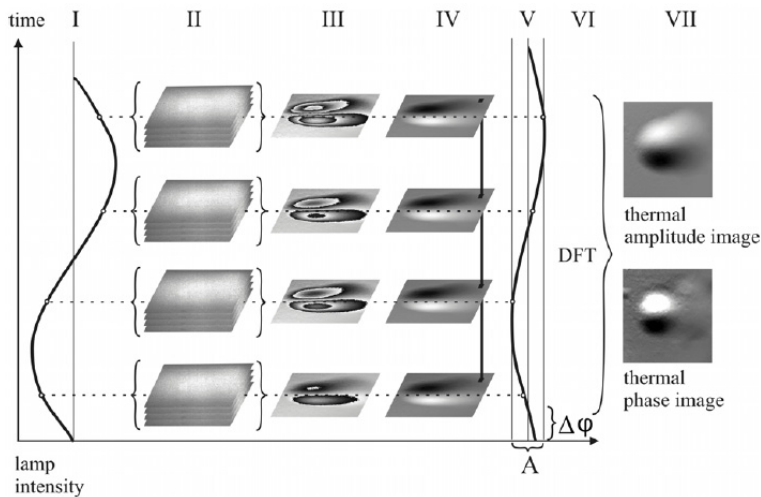


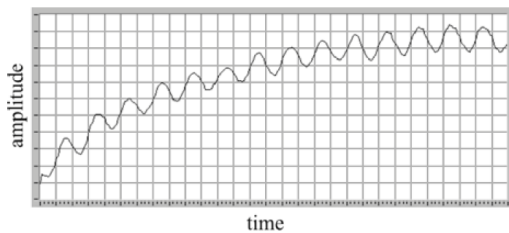
그림 7. 위상잠금 전단간섭계를 이용한 결함 검사 과정

있는 스펙클 패턴 이미지는 외부 환경이나 외관에 대해 매우 둔감하다. 위상잠금 전단간섭계를 이용한 결합 검사 과정을 그림 7에 개략적으로 나타냈다.

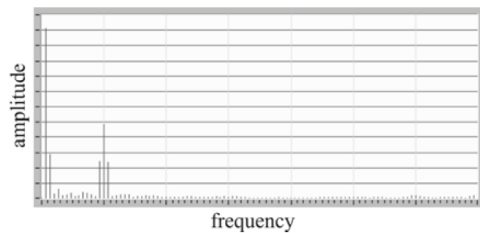
- I 단계: 측정 대상체를 강도를 주기적으로 변조할 수 있는 가열장치(히터 또는 램프)에 의해 광학적으로 가진(가열)한다.
- II 단계: CCD 카메라를 이용하여 대상체 표면의 스펙클 패턴 이미지를 연속적으로 저장한다. 변형 위상을 정량화하기 위해, PZT를 이용하여 스펙클 패턴 이미지 사이에 $\pi/4$ 만큼씩 광로길이의 변화를 준다.
- III 단계: 4장씩의 스펙클 패턴 이미지를 이용하여 얻은 결과이미지로부터 실시간으로 위상을 계산한다. 첫 번째 위상 이미지는 기준 이미지로 사용되며, 연속되는 모든 위상 이미지로부터 감산처리 된다. 이러한 시간적 위상이동은 기존의 위상이동법에 의한 공간적 위상이동에 비해 보다 뚜렷한 휘도(contrast)를 갖는 줄무늬 패턴 이미지를 얻을 수 있도록 한다. 그림 7에서는 가진 주기당 4장의 위상 이미지를 얻는다. 실제로는 최대 100장 이상의 위상 이미지를 얻을 수 있다.
- IV 단계: 위상 결편침 알고리즘을 이용하여 줄무늬 패턴을 변형 구배의 높이 프로파일로 변환한다.
- V 단계: 이들 변조되지 않은 위상 이미지는 변조 주파수에서 시간에 따라 각 측정점(화소, pixel)의 변형 구배가 얼마나 변했나 하는 정보를 포함하고 있다. 이와 같은 정보를 추출하기 위해, 가진한 변조 주파수에서 시간적 신호 변화에 대해 각 측정점에서 위상 이미지들을 해석한다. 이 때, 신호에서 모든 다른 변화는 무시된다.

- VI 단계: 필터링은 가진 주파수에서 DFT(discrete Fourier transformation)를 사용하여 위상 이미지들의 수직열을 따라 각 측정점에서 실행된다.
- VII 단계: 이 방법을 통해, 모든 위상 이미지에 담겨있던 정보는 최종적으로 오직 두 장의 이미지로 줄어들게 된다. 두 장의 이미지는 각각 위상잠금 진폭 이미지(변조 효과의 국소적인 높이를 보여줌)와 위상잠금 위상 이미지(가진과 대상체의 반응 사이의 국소적인 열적 위상 지연을 나타냄)이다. 위상 이미지와 위상잠금 위상 이미지를 구분하는 것이 중요하다. 위상 이미지는 시간적 위상이동, 즉 광경로 길이의 시스템적인 변화와 그와 함께 두 광파의 위상차에 의해 얻어지는 높은 휘도를 갖는 간섭 이미지이다. 그러나 위상잠금 위상 이미지는 위상 이미지의 시간적 해석 결과로 얻어지는 이미지이다. 각 측정점에 대한 가진과 대상체의 반응 사이의 변조된 열유속의 국소적인 시간적 지연에 대응하는 위상각을 보여준다.

그림 8에 시간과 주파수 도메인에서의 한 측정점에 대한 신호를 나타냈다. 변형 구배의 사인과 변조는 일반적으로 증가하는 신호에 겹쳐져서 보인다. 이 신호의 스펙트럼은 두 개의 피크를 보여준다. 최저 주파수에서 일어나는 왼쪽 피크는 램프에 의해 유도되는 열이 대상체 주위에서 빠르게 소멸될 수 없기 때문에 대상체가 서서히 가열되는데 따른 것이다. 즉, 안정된 상태에 도달하기까지 얼마간의 시간이 소요된다. 두 번째 피크는 가진(위상잠금, lock-in) 주파수에서 램프의 변조에 관련된 것이다. 이 주파수에서, DFT가 적용된다. 이 스펙트럼 분리에 의해 느린 가열에 의



(a) Time domain



(b) Frequency domain

그림 8. 시간과 주파수 도메인에서의 한 측정점에 대한 신호

해 발생하는 물체의 전체 변형은 제거되고, 오직 위상 이미지에 기여하는 변조 주파수에 대한 신호만이 변화한다.

위상잠금 전단간섭계를 이용한 결함 검사 방법은 결함을 매우 쉽게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 이 방법은 열적파동의 사용과 직접적으로 연결된다. 열적파동의 크기가 $1/e$ (약 37%)로 감소하는 깊이인 열확산 길이 μ 는 가진 주파수에 의존하며 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\mu = \sqrt{\left(\frac{2\lambda}{\omega \cdot \rho \cdot c_p}\right)} \quad (9)$$

여기서, λ = 열전도도, ρ = 밀도, c_p = 비열량, ω = 가진 주파수 이다.

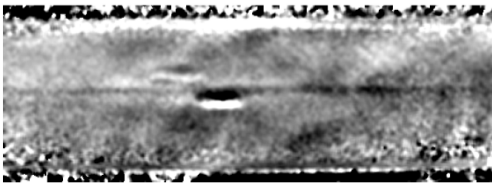
흔동을 피하기 위해, 진동해석을 위해 사용되는 이미 잘 알려진 간섭적 방법들과 큰 차이가 있다는 점을 강조한다. 이들 간섭적 방법은 탄성

파를 사용하고 진동 노드를 보여주는 반면에, 위상잠금 전단간섭법은 동적 열전도(열적파동)에 기반을 두고 있으며, 매우 낮은 주파수(1 Hz 이하)에서 사용된다.

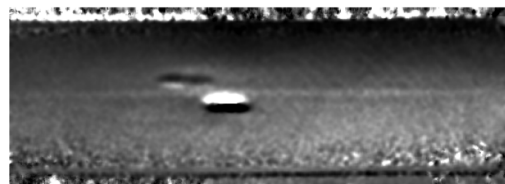
4. 실험 사례

4.1. CFRP 헬리콥터 꼬리 로터 축

헬리콥터의 꼬리 로터 축에 사용되는 것과 같은 CFRP관에 충격손상이 발생했다. 위상잠금 전단간섭법을 이용하여 결함을 측정하였으며, 그림 9에 위상 이미지를 나타냈다. 그림 9는 향상된 신호 대 잡음비를 보여주고 있으며, 또한, 그림 9(a)에서와 같이 대류 이미지에서 대류에 의한 외란의 영향이 없으며, 따라서 충격 손상 측정에 매우 신뢰성이 높다고 할 수 있다.



(a) 대류에 의한 외란 작용



(b) 위상잠금 전단간섭법 위상 이미지 (0.1 Hz)

그림 9 충격손상을 입은 CFRP 튜브의 위상잠금 전단간섭계를 이용한 실험 결과

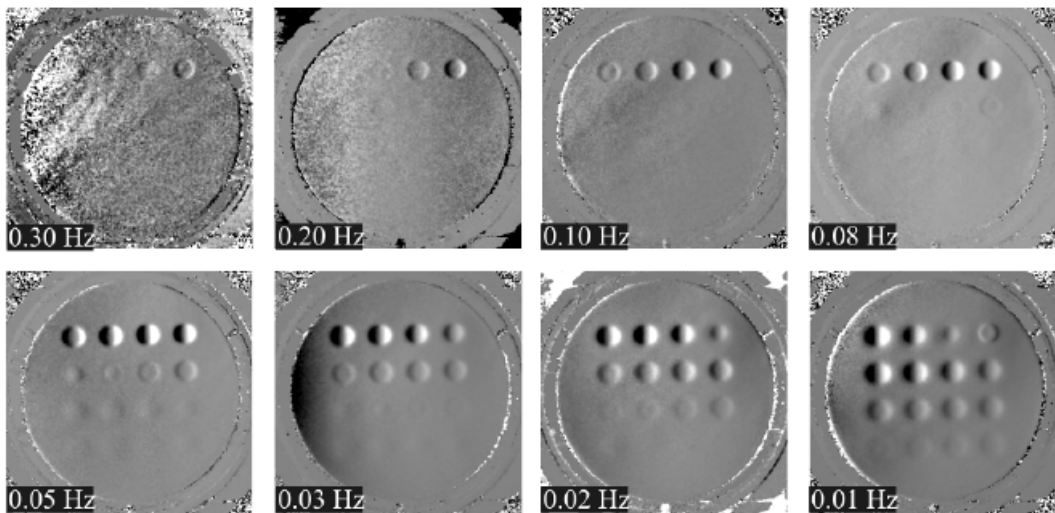


그림 10. 위상잠금 전단간섭계를 이용한 서로 다른 높이의 홀을 가공한 PMMA 디스크의 가진 주파수에 따른 실험 결과

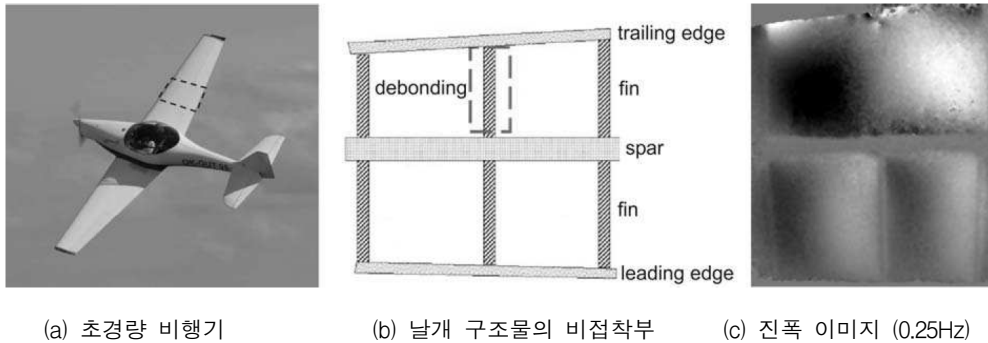


그림 11. 위상잠금 전단간섭계를 이용한 초경량 비행기 날개의 비접착부 측정 실험 결과

4.2. 깊이 측정

변조 주파수의 영향을 확인하기 위해, 다른 깊이를 갖는 홀을 가공한 PMMA 디스크를 위상잠금 전단간섭법으로 측정하였다. 열확산에 따른 주파수를 갖는 열적파동은 신호발생기로 가해질 때, 깊이에 대한 프로파일은 주파수의 진동에 의해 측정된다. 그림 10은 PMMA 디스크에 대해 가진 주파수에 따른 실험 결과를 보여주고 있다.

4.3. 초경량 비행기 날개의 비접착부 측정

초경량 비행기의 프레임은 보통 폼 코어와 GFRP와 같은 샌드위치 재료로 구성되어 있다. 열탄성파는 크게 감쇄되고 이들 재료내에서 산란되기 때문에 비파괴검사가 매우 어렵다. 작용하중 하에서 구조물의 변형을 모니터링 해서 결함을 측정하는 전단간섭계는 이러한 재료의 비파괴 검사에 좋은 선택이 될 것이다. 열적파동이 내부 결함에 도달할 정도로 충분히 구조물 내로 깊이 확산되지는 못하지만, 위상잠금 전단간섭계를 이용한 방법도 결함 검사 확률을 높일 수 있다. 위상잠금 위상 이미지는 표면 내부 깊숙이 존재하는 결함을 보여주지는 못하지만 진폭 이미지가 국소 변조 높이를 보여주기 때문에, 위상잠금 전단간섭계를 초경량 비행기 날개의 비접착부를 찾는 데 사용할 수 있다.

5. 맺음말

전단 간섭계는 최근 십여년간 국내에서도 다양한 분야에 적용이 되고, 많은 연구자들에 의해 연구가 수행되면서 기본 원리와 스펙클 패턴의 해석에 대한 내용들이 많이 보급되었다. 이 강좌에서는 이러한 전단간섭계에 적외선 열화상 기법에서 사용하고 있는 위상잠금 방법을 적용한 새로운 기술에 대해 소개하였다. 국내에서는 이 분야를 연구하는 연구자가 거의 없으며, 국외에서도 몇몇 연구자에 의해서 연구가 수행되고 있는 상태이다. 되도록 많은 내용을 담고자 하였으나 미진한 부분이 많을 것이라 생각되며, 이 부분은 양해를 부탁드립니다. 끝으로, 이 강좌가 비파괴검사 분야의 발전에 일조하기 바란다.

참고문헌

- [1] G. L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, New York (1995)
- [2] H. S. Chang, "Quantitative measurement of out-of-plane deformation using the shearography," Doctor's Dissertation, Chosun University (2006)
- [3] Ph. Menner, H. Gerhard and G. Busse, "Lock in-interferometry: Principle and applications in NDE," The 10th Int. Conf. of the Slovenian Soc. for Non-Destructive Testing (2009)