

레이저 스페클 간섭법을 이용한 열변형 측정에 기초한 결함검출

Defect Detection Based on Measurement of Thermal Deformation

Using Laser Speckle Interferometry

*곽재호¹, 김민근¹, 김현민¹, 최태호², 강기수³, 양승필⁴, #김경석⁵

*J. H. Kwag¹, M. K. Kim¹, H. M. Kim¹, T. H. Choi², K. S. Kang³, S. P. Yang⁴, #K. S. Kim⁵(gsckim@chosun.ac.kr)
 조선대학교 대학원¹, 조선대학교 산학협력단 레이저센터², 한국표준과학연구원 안전그룹³, 동아인제대학교 안경광학과⁴,
 #조선대학교 기계설계공학과⁵

Key words : ESPI(Electronic speckle pattern interferometry), Thermal deformation, Defect detection, Heat conduction

1. 서론

열교환기는 기계, 항공, 산업현장 및 가정용 공기조화 시스템으로부터 큰 공장의 화학 공정이나 자동차 및 발전에 이르기까지 넓은 범위의 응용분야에 실제적으로 많이 쓰이고 있다. 이러한 열교환기 시스템은 열전달에 의해 온도변화가 발생하게 되고 온도의 차이에 따른 열변형, 열응력 등이 발생하게 된다. 열에 의한 변형 및 응력은 진동 및 소음의 원인이 되기도 하며, 결함의 성장을 가속화시켜 구조물에 급속한 변형을 일으키게 되고, 과도한 열변형은 구조물 본래의 목적에 부합하지 않을 수 있다. 이러한 이유로 구조물에 발생하는 열변형 및 결함을 사전에 검출하는 것이 중요하다. 재료의 열변형 측정에는 스트레인게이지, 모아레기법 등이 이용되고 있지만, 스트레인게이지 기법은 온도, 변형량, 피로, 환경 등에 의해 사용이 제한적이다. 또한 모아레기법은 가간섭 광원을 사용하는 홀로그래피 간섭법이나 위상측정 간섭계에 비해 정밀도가 떨어지고, 온도가 높아지면 격자가 산화되는 문제점이 있다. 최근에는 이러한 변형측정 기법들의 한계를 극복하기 위해 스페클 기법을 주로 이용하고 있다. 스페클 기법은 비접촉, 비파괴에 의한 변형 및 결함의 정량화[1]가 가능하며, ESPI는 3000°C 이상에서 간섭무늬를 얻음으로써 적용 가능성을 확인하였고, 전단간섭계 또한 고온에서 열에 의한 변형을 측정하였다. 본 연구에서는 레이저 스페클 간섭법을 이용하여 열전도에 의한 온도변화로 인해 알루미늄 시험편에서 발생하는 열변형을 측정하여, 이를 통해 대상체에 존재하는 결함을 검출하고, 이때의 최적 결함 검출 시간을 찾고자 하였다.

2. 스페클패턴간섭법의 원리

ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry : 전자처리스페클 패턴 간섭법)의 원리는 집속성과 간섭성이 우수한 레이저 광원을 바탕으로 물체빔(object beam)과 참조빔(reference beam)의 간섭에 의해 물체의 정보를 기록하고, 이 기록된 정보를 재생하거나 변형 전후의 정보를 비교함으로써 대상체의 변형을 측정하기 위해 활용되고 있다. Fig. 1은 면외변위 측정을 위한 ESPI 간섭계를 나타내었다.

광원으로부터 나온 빔은 광분리기(beam splitter)를 통하여 CCD 카메라에 직접 입사되는 참조빔과 대상체에 조사되어 반사된 빔이 CCD 카메라에 입사되는 물체빔으로 각각 나누어진다. 두 개의 빔은 카메라 앞에서 간섭을 일으키고 간섭된 이미지가 CCD 수광소자에 결상된다. 식(1)은 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형전(I_{before})과 변형후(I_{after}) 빔의 세기 분포식이다.[2]

여기에서 I_R 과 I_O 는 참조 빔과 물체 빔의 강도이며, ϕ 는 물체빔과 참조빔의 초기위상, $\Delta\phi$ 는 물체의 변위에 의한 위상차이다.

$$\begin{aligned} I_{before} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos \phi \\ I_{after} &= I_R + I_O + 2\sqrt{I_R I_O} \cos(\phi + \Delta\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

ESPI에서는 두 식의 밝기분포를 감산처리 함으로써 식(2)와 같은 수식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} I &= I_{after} - I_{before} \\ &= 2\sqrt{I_R I_O} [\cos(\phi + \Delta\phi) - \cos \phi] \end{aligned} \quad (2)$$

ESPI의 면외변형 측정 원리는 확산된 물체빔이 대상체에 조사될 때 임의의 변형이 대상체에 발생하면, 대상체의 임의의 한 점은 변형에 의해 다른 한 점으로 이동하게 되고, 이때 발생하는 물체빔의 광경로차는 식(3)으로 나타낼 수 있으며, 이를 다시 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o + n_s) d \quad (3)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_o + \cos \theta_s) d \quad (4)$$

이때, $\Delta\phi$ 는 변형에 의한 위상변화이고, λ 는 레이저의 파장, n_o 는 조사방향벡터, n_s 는 관측방향벡터, θ_o 는 대상물의 표면과 물체빔의 조사방향이 이루는 입사각, θ_s 는 대상물의 표면과 관측 방향이 이루는 관측각이다. 이때 관측방향이 대상물의 표면과 수직하다고 하면, $\cos \theta_s = 1$ 이 되므로, 식(4)는 식(5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_o) d \quad (5)$$

따라서, 식(5)를 이용하면 대상물에 발생한 변형을 구할 수 있다.

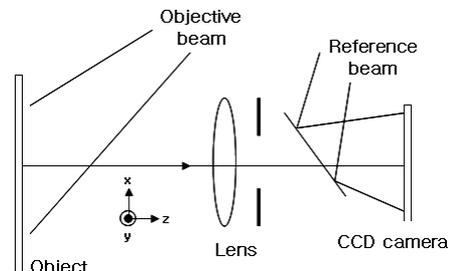


Fig. 1 Out-of-plane displacement sensitive interferometer

3. 시험장치 및 시험편

본 연구에서는 독일 Ettemeyer사의 3D-ESPI 상용 시스템(Q-300)을 이용하였으며, 최대출력이 2W, 파장이 532nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였다.

Fig. 2에는 본 연구에서 사용한 시험편의 형상 및 치수를 나타냈다. 시험편은 200×150×50mm의 알루미늄 시험편을 사용하였다. 결함의 유무에 따른 열변형을 비교하기 위해, 시험편의 한쪽 면에 길이 60mm, 결함폭 2mm의 결함을 가공한 시험편과 결함이 없는 시험편에 대해 각각 실험하였다.

결함이 존재하지 않는 시험편의 열전도에 의한 변형량을 측정하기 위해, 100×70×30mm의 Al 재질의 열원을 진공 챔버에서 50°C 까지 가열한 후 Fig 2에서 보는 바와 같이, 열원을 시험편 상부에 위치시켜 열전도에 따른 시험편의 열변형을 측정함으로써 결함을 검출하였다.[3]

이때 온도변화는 비접촉 온도계(Auto Pro, Raytek사)를 사용하였고, 측정시 실내 온도 26°C, 열원은 온도 50°C에서 실험할 수 있도록 하였으며 a, b, a', b' 위치의 시간에 따른 열변형을 측정하였다.

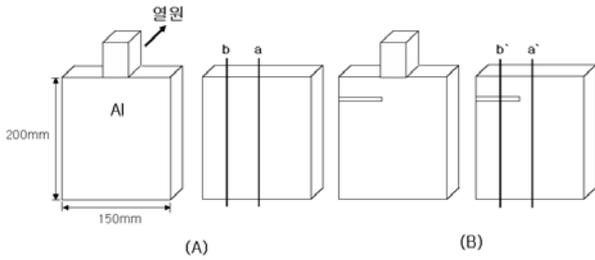


Fig. 2 Specimen and position of thermal deformation acquisition

4. 실험 결과

Fig. 2에서 나타난 바와 같이, 결함이 있는 시험편과 결함이 없는 시험편에 대해 열전도에 의한 열변형을 각각 측정하였으며, Table 1에 열전도의 시간에 따른 위상지도의 변화와 결편칩 결과를 나타내었다.

Table 1 Phase-map and unwrapped images of specimens without defect(A specimen) and with on defect(B specimen)

Type	A specimen		B Specimen	
	phase map	unwrapped	phase map	unwrapped
3sec				
5sec				
10sec				
20sec				

열전도에 따른 변형의 결과를 비교하기 위하여 Fig. 2의 a,a' 부분의 변형 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 결함부위의 열전도에 따른 변형을 비교하기 위하여 b'부분을 Fig. 4에 나타내었다.

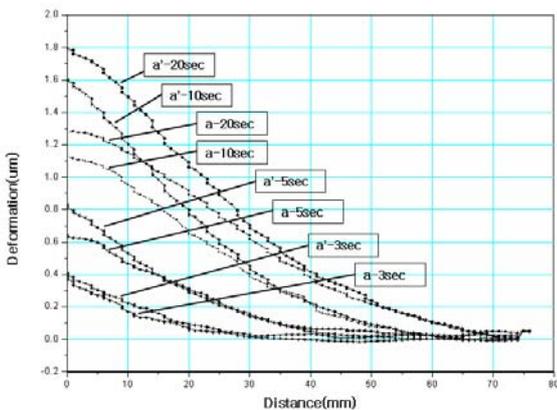


Fig. 3 Comparison of deformation profiles on the center line(a,a') of specimens according to the time variation

Fig 3에서 보는바와 같이, 두 시험편의 중앙부(a, a')의 열변형 프로파일 비교를 통해 a'의 값이 a의 값보다 전반적으로 높게 측정됨으로써 결함의 존재가 중앙부의 열변형에 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한, Fig. 4에서와 같이, 결함위치(b)에서의 열변형 프로파일을 통하여 결함을 기준으로 상부와 하부가 서로

다른 거동을 보이고 있음을 확인하였다. 최적의 결함 검출 시간을 찾기 위해, b' 위치에서의 열변형의 최고값과 최저값의 평균의 차를 Δd 로 정의하고, 전도체의 온도를 각각 50°C, 70°C, 80°C, 100°C로 하였을 때의 시간 변화별 Δd 를 비교하여 그결과를 Fig. 5에 나타냈다.

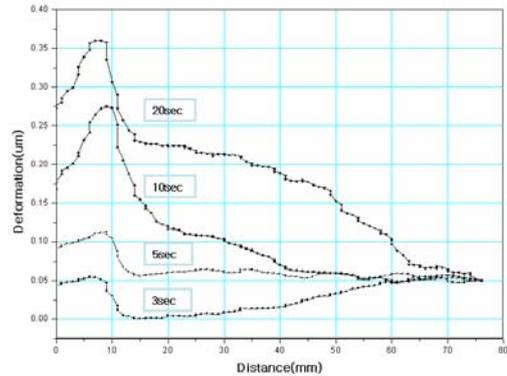


Fig. 4 Deformation profile on the line(b') of specimen according to the time variation

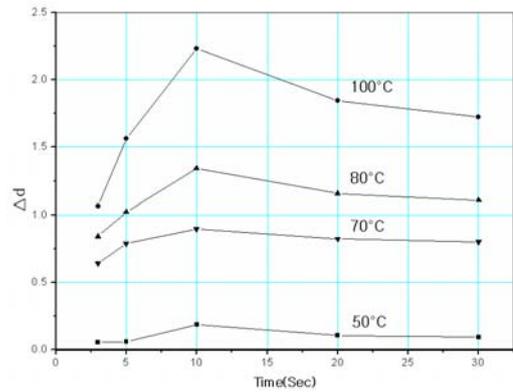


Fig. 5 Deformation difference, Δd , according to the temperature of a heat conductor

Fig. 5에서 보는 바와 같이 전도체의 온도변화와는 무관하게 시간에 따른 Δd 가 열전도 시작후 10초 일때 가장 크게 검출됨을 알 수 있었다. 또한 시간이 지남에 따라 Al 재료의 특성상 열확산이 크고, 재료의 열용량과 관련이 있어, 시간에 따른 결함부위의 Δd 가 작아지는것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 레이저 스펙클 간섭법을 이용하여 열전도에 따른 열변형을 측정하였다. 이를 통해 열전도에 따른 결함의 위치 검출과 결함부의 열변형 측정이 가능하였고, 열전도 시간이 10초 일때 결함 검출이 가장 용이함을 알 수 있었다. 또한 열전도에 따른 결함 부위의 변형이 상대적으로 크게 나타나며 결함의 위치를 기준으로 상하부가 서로 다른 거동을 보임으로써 결함을 검출할 수 있었다.

참고문헌

1. Fulton, J. P., Deaton, J. B., Rogowski, R. S. and Namkung, M., "Capabilities and Limitations of Electronic Shearography for Detection of Cracks in Thin Plates," Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 365-372, 1994
2. Jones.R and Wykes, C., "Holographic and Speckle interferometry: A discussion of the theory, partice and application of the techniques", 2nd Edition, Cambridge University Press, 1989.
3. Steinchen, W., Yang, L.. "Digital Shearography for Quantifying heat plow rate" in Digital Shearography, 245-261, 2003.