

전자처리 스펙클패턴 간섭법을 이용한 결함있는 재료의 열변형에 관한 연구 A study on the thermal deformation of material with a defect using the ESPI

*이건정¹, 아흐터 나심¹, 김우진², 정현철³, #김경석³

*K. J. Lee¹, N. Akhter¹, W. J. Kim², H. C. Jung³, #K. S. Kim³(gsckim@chosun.ac.kr)
조선대학교 대학원¹, 조선대학교 산학협력단 레이저센터², #조선대학교 기계설계공학과³

Key words :ESPI, Thermal deformation , Defect detection, Heat conduction

1. 서론

고온화에서 열교환기나 압력 파이프 등의 재료에 결함이 있을 경우 시스템은 열전달에 의한 온도차에 의해 열변형, 열응력 등이 발생하게 된다. 열에 의한 변형 및 응력은 진동 및 소음의 원인이 되며, 결함의 성장을 가속화시켜 구조물에 급속한 변형을 일으키게 된다. 이러한 과도한 열변형은 구조물 본래의 목적에 부합하지 않을 수 있다. 또한, 사출 금형시 금형에 결함이 있을 경우 열변형에 의해 정밀 금형제품의 치수 불량을 발생시켜 고정밀 금형제품의 생산이 어렵게 된다. 이러한 이유로 구조물에 발생하는 열변형 및 결함을 사전에 검출[1]하는 것이 중요하다. 열변형 측정 방법 중 기존 방법으로는 Strain gage, Moiré method[2], Dummy gage등 많이 이용되고 있으나, 접촉식이고, 계측기 자체의 열적 영향, 고온에서의 열 보상 등 많은 제한사항이 있다. 이러한 문제점은 전자처리 스펙클패턴 간섭법을 이용하여 물체의 형상에 관계없이 대상체 전체에 대하여 실시간 비접촉 검사[3]를 행함으로써 기존 방법의 문제를 해결할 수 있다. 본 연구에서는 결함의 영향에 대한 열전도로 인해 알루미늄 시험편에서 발생하는 열변형을 측정하여 시험편 결함에 대한 시간 및 위치의 열변형 거동을 측정하였다.

2. 전자처리 스펙클패턴 간섭법(ESPI)의 원리

광원으로부터 나온 광은 광 분리기(beam splitter)를 통하여 CCD 카메라에 입사되는 참조광과 대상체에 반사된 광이 CCD 카메라에 입사되는 물체 광으로 각각 나누어진다. 두 개의 광은 간섭을 일으키고 간섭된 이미지가 CCD 수광소자에 결상된다. 식(1)은 CCD 카메라의 수광소자에 기록되는 변형전(I_{before})과 변형후(I_{after}) 광의 세기 분포식이다[4]. 여기에서 I_R 과 I_O 는 참조광과 물체 광의 강도이며, ϕ 는 물체광과 참조광의 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 같이 된다.

$$I = 2\sqrt{I_R I_O} [\cos(\phi + \Delta\phi) - \cos \phi] \quad (2)$$

ESPI의 면의변형 측정 원리는 확산된 물체광이 대상체에 조사될 때 임의의 변형이 대상체에 발생하면, 대상체의 임의의 한 점은 변형에 의해 다른 한 점으로 이동하게 되고, 이때 발생하는 물체광의 광경로차는 식(2)으로 나타낼 수 있으며, 이를 다시 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos\theta_o + \cos\theta_s) d \quad (3)$$

이때, $\Delta\phi$ 는 변형의 위상변화, λ 는 레이저 파장, θ_o 는 대상물과 물체광의 조사방향의 입사각, θ_s 는 대상물의 표면과 관측방향이 이루는 관측 각이다. 이때, 관측방향이 대상물의 표면과 수직하다고 하면, $\cos\theta_s = 1$ 이 되므로, 식(4)와 같이 쓸 수 있으며,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta_o) d \quad (4)$$

식(4)에 의해 대상물에 발생한 변형을 구할 수 있다.

3. 시험장치 및 시험편

Fig 1에서는 시험편의 형상 및 치수와 열변형의 결핵침 이미지를 나타냈다. 결함 있는 재료의 열변형을 측정하기 위해 재료의 한쪽 면에 (2×120×49)mm³ 크기의 인공 결함을 주었다. 결함이 있는 시험편의 열전도에 의한 변형량을 측정하기 위해, (100×100×50)mm³의 Al 재질의 열원을 진공 챔버에서 가열한 후 Fig 1과 같이 시험편의 상단에 위치시켜 열전도로 인한 재료의 열변형을 측정 하였다. 측정부분은 결함으로 인한 상대적 표면적이 커 주위로의 대류가 가장 활발히 일어나며 결함을 가지고 있는 ①, 결함의 중앙부분인 ②, 시험편의 중앙 부분인 ③, 결함 끝인 ④, 결함을 가지고 있지 않으며 재료의 가장자리인 ⑤와 같이 5부분의 세로방향과 열원과 결함의 중간지점인 ⑥과같이 가로방향 프로파일의 측정 통해 결함이 있는 재료의 시간 및 위치별 열변형 거동을 측정하였다.[5] 이때 온도변화는 비접촉 온도계(Auto Pro, Raytek사)를 사용하였고, 측정 시 실내 온도 26℃, 열원은 온도 100℃에서 실험할 수 있도록 하였다. 또한 본 연구에서는 Ettemeyer사의 3D-ESPI 상용 시스템(Q-300)을 이용하였으며, 최대출력이 2W, 파장이 532nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였다.

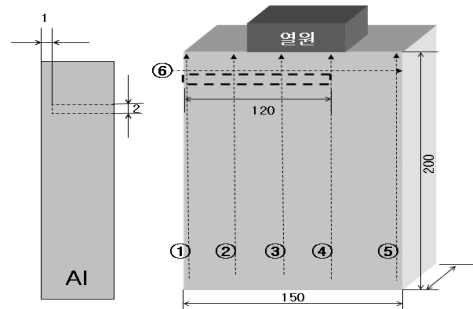


Fig. 1 Shape and dimension of specimen

4. 실험 결과

4.1 Phase Map과 Unwrapping 결과

온도차를 1.0℃로 일정하게 고정하여 시간의 경과에 따른 Phase Map과 결함의 형태가 시각적으로 확인할 수 있도록 결핵침 사진을 Table. 1에 나타내었다. 초기 시간부터 실험 완료시간인 163.7초까지 열전도로 인한 재료의 면의 변형을 측정한 결과 16.6초까지는 결함의 상단부에서 상대적인 변형량이 매우 크게 나타나다 상대적 변형이 큰 부분이 점차적으로 우,하향하는 모습을 Phase Map을 통해 알 수 있다. 이는 좌측은 결함의 영향으로 인해 전도가 지연되는 반면에 우측은 결함이 없는 재료와 같이 열변형 거동을 하므로 전도 속도의 차이로 인한 결과이다.

Table. 1 Variation Phase-map according to the temperature and time and unwrapping image

$\Delta T(^\circ\text{C})$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	Defect Unwrapping image
t1(sec)	0	5	11	45	90	
t2(sec)	1.7	10	16.6	88.2	163.7	
Phase Map						

4.2 시간에 따른 재료의 전도에 의한 열변형

결함에 따른 재료의 열변형을 측정하기 위하여 시간별 위치에 따른 각 부분의 프로파일을 그래프화 하였다.

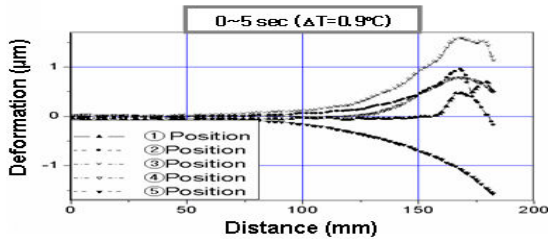


Fig. 2 Thermal deformation between 0sec and 5sec

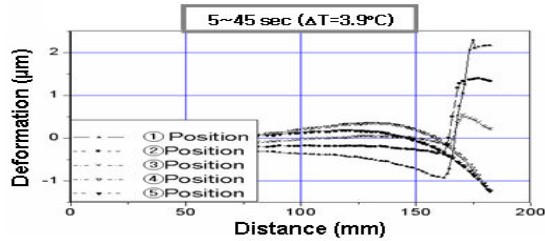


Fig. 3 Thermal deformation between 5sec and 45sec

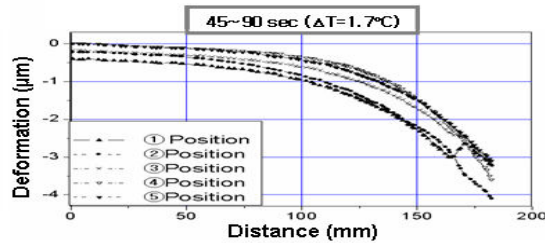


Fig. 4 Thermal Deformation between 45sec and 90sec

초기 시간부터 5초 후 시험편의 열변형은 Fig.2와 같이 ③의 열변형이 약1.5μm로 가장 크게 나타났다. 결함이 없는 ⑤부분의 열변형이 가장 작으며, (-)값으로 수축인 것처럼 보이나 결함부의 초기변형 값이 기준이 되어 상대적으로 작기 때문이다. 초기 시간에서 5초까지 ①부분의 결함부는 재료의 중앙의 결함부에 비해 열변형의 크기가 작았으며 시간이 경과함에 따라 가장 큰 변화를 보여 주었다. 결함이 있는 ①, ②, ③, ④의 결함 검출 또한 가능하였다. 시간이 경과됨에 따라서 실험 종료 시간인 90초에서 열변형 패턴은 Fig. 4와 같이 ①을 제외한 모든 부분이 유사하며 ①부분만이 결함 검출이 가능하였다.

4.3 일정한 온도차 (1.0°C)에서 위치에 따른 열변형

일정한 온도차에 의한 재료의 열변형을 측정하기 위해 온도차를 1.0°C로 고정하여 측정한 프로파일을 그래프화 하였다.

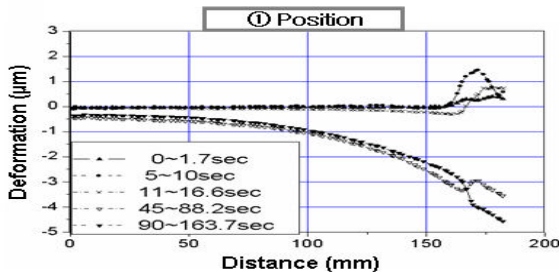


Fig. 5 Thermal deformation of ① position

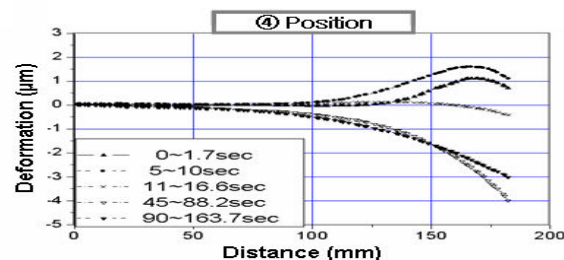


Fig. 6 Thermal deformation of ④ position

일정한 온도차에서 위치별 시간의 열변형 측정을 위해 Fig.

5와 Fig. 6을 비교하여 결함의 영향으로 인한 열변형을 측정하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 초기 시간부터 88.2초까지 전체 열변형에 대한 결함부분의 상대적 열변형이 증가하다 90초부터 163.7초 사이에서는 결함부의 열변형이 상대적으로 감소하였으며, 결함 검출 또한 가능하였다. Fig. 6과 같이 열변형은 초기 시간에서 10초까지 결함부의 열변형이 뚜렷하게 관찰되며, 계속해서 증가하다 45초에서 200초 구간에서는 결함부가 관찰되지 않으며, 열변형이 감소하였다.

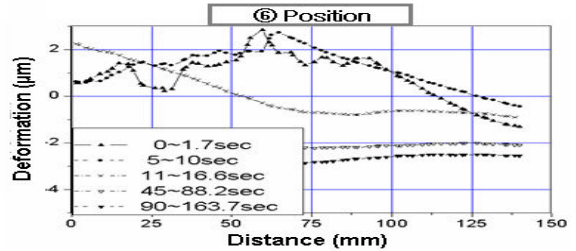


Fig. 7 Thermal deformation of ⑥ position

Fig. 7은 가로방향의 동일 좌표에서 열변형을 측정, 프로파일을 그래프화한 것이다. Fig. 7의 경우 초기 시간에서부터 10초까지 결함부는 재료의 열변형에 비해 상대적으로 변형이 크므로 프로파일 값이 노이즈처럼 측정되었으며, 16.6초 때까지 결함부는 결함이 없는 부분에 비해 열변형이 상대적으로 증가하다 16초부터 163초까지 열변형이 서서히 감소하며, 결함이 없는 부분이 결함부에 변형에 비해 크게 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 ESPI를 이용하여 열전도에 따른 열변형을 측정하였다. 시험편의 위치별 열변형 측정이 가능하였고, 열전도 시간의 경과에 따라 결함부의 열변형은 상대적으로 큰 증가를 보이며 전체적인 열변형이 증가하다 열전도가 진행됨에 따라 서서히 감소함을 알 수 있었다. 시간의 경과에 따라 결함부 ①부분의 열변형이 가장 크게 나타났으며, ②, ③, ④ 순서로 나타났다. 가로방향에서 열변형은 초기에는 결함부의 열변형이 크게 일어나다가 열전도가 진행됨에 따라 서서히 감소하며, 전체적인 열변형 또한 서서히 감소하였다. 실험을 실시한 전 시간에 걸쳐 결함 검출이 용이하였으며 45초부터는 완만한 열변형 선도를 보이며 서서히 감소하였다. 전체적인 열변형 거동을 살펴 본 결과 열전도가 일어나기 시작하면서 45초까지는 결함을 중심으로 상, 하가 다른 거동을 보이다가 열전도가 완전히 이른 시간인 45초 이후에서는 결함의 영향이 상대적으로 크게 감소하여 상, 하 유사한 열변형 거동을 보여주었다.

참고문헌

1. K. S. Kim, Kang, K. S., H. S. Youn, T. H. Choi. "Detecting Sensitive Analysis of Inside Defect in Shearography", Autume Proc. of KSNT, pp.161~166, 2005
2. S.W. Kim, J.T. Oh, M.S. Jung, Y.B. Choi., "Two wavelength Phase Shifting Projection Moire Topography for Measurement of Three Dimensional Profiles With High Step Discontinuities", The Korean Society Mechanical Engineers, A, Vol. 23, No.7, pp.1129~1138, 1999
3. 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, pp. 365-372, 1994.
4. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry: A discussion of the theory, practice and application of the techniques", 2nd Edition, Cambridge University Press, 1989.
5. J. H. Kwag, M. K. Kim, H. M. Kim, T. H. Choi, K. S. Kang, S. P. Yang, K. S. Kim. "Defect Detection Based on Measurement of Thermal Deformation Using Laser Speckle Interferometry", Autume Proc. of KSPE, pp.311~312, 2007