

## 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.9.877>

## 디지털 영상 보정 기법을 이용한 이중 링 구조물의 열변형 측정

김태렬\*, 구남서\*\*

## Measurement of Thermal Deformation of a Double Ring Structure using Digital Image Correlation Technique

Tailie Jin\* and Nam Seo Goo\*\*

## ABSTRACT

In this paper, thermal deformation of a double ring structure using digital image correlation technique (DIC) was measured. The double ring structure consisted of two parts; the inner ring was aluminium which had a large thermal expansion coefficient and the outer ring was titanium which had a small thermal expansion coefficient. We heated the double ring structure from 50 °C to 200 °C in a chamber and at the same time, two cameras captured surface images of the double ring structure. Initially, there was a 21 μm gap between the inner ring and outer ring. The gap was closed at around 80 °C and after that, two rings expanded together. In order to compare the experimental results with analysis results, a finite element analysis was performed using ANSYS. The results of DIC measurement and ANSYS analysis were compared and agreed well.

## 초 록

본 연구에서는 디지털 영상 보정 기법을 이용하여 이중 링 구조물의 열변형을 측정하였다. 이중 링 구조물은 열변형률이 상대적으로 큰 알루미늄 내부링과 열변형률이 상대적으로 작은 티타늄 외부링으로 이루어져 있다. 고온 챔버에서 링구조물을 50 °C부터 200 °C까지 가열하는 동시에 두 대의 카메라로 이중 구조물 표면의 영상을 촬영하였다. 시편의 내부링과 외부링에는 21 μm의 초기 간극이 있다. 이 초기 간극은 약 80 °C에서 접촉하게 되며 이후 같이 팽창하였다. 실험 결과를 해석과 비교하기 위하여 ANSYS를 이용한 유한요소 해석을 수행하였다. 디지털 영상 보정 기법을 사용하여 계측한 이중 링 구조물의 온도에 따른 변위 분포는 유한요소해석의 결과와 잘 일치하였다.

**Key Words** : Digital image correlation technique(디지털 영상 보정 기법), Thermal deformation(열변형), Double ring structure(이중 링 구조)

## 1. 서 론

열변형은 온도의 변화에 따라 구조물이 신장 또는 축소되는 현상을 가리킨다. 항공기, 자동차 등의 기계 구조물은 열 문제가 수반되므로 열변형에 대한 고려가 필요하다. 일반적인 기계 구조물 뿐 아니라 MEMS 패키지 등과 같은 초정밀

† 2011년 4월 6일 접수 ~ 2011년 7월 11일 심사완료

\* 정회원, 건국대학교 대학원 신기술융합학과

\*\* 정회원, 건국대학교 대학원 신기술융합학과

교신저자, E-mail : nsgoo@konkuk.ac.kr

서울특별시 광진구 화양동

기체는 열팽창계수가 다른 재료로 구성되어 있기 때문에 온도의 변화에 따른 구조물의 열변형이 구조물의 고장을 일으키는 주요한 요인으로 확인되었다[1].

열변형을 측정하는 방법에는 변형률 게이지를 사용하는 방법과 모아레 간섭계(Moiré interferometry)를 사용하는 방법이 있다. 변형률 게이지를 사용하는 경우 열출력(thermal output)이라는 오차가 발생하는데 기준 보상 게이지를 사용하면 이를 제거할 수 있다[2,3]. 하지만 변형률 게이지와 접착제는 모두 사용 가능한 온도 범위가 있어 고온 환경에 적용하기 어렵다는 단점이 있다[4]. 모아레 간섭계는 반도체 패키지 또는 MEMS 패키지의 열변형을 측정할 때 많이 사용되는 방법이다.

디지털 영상 보정 기법(digital image correlation technique; DIC)은 디지털 카메라로 촬영된 구조물의 변형 전의 영상과 변형 후의 영상을 비교하여 구조물의 변형을 계산하는 방법이다. 이 방법을 사용하면 변형률 게이지로 측정이 어려운 고온에서도 변형률이 측정이 가능하며 구조물의 전체 영역의 변형을 측정할 수 있다. 그리고 두 대의 카메라를 사용하여 3차원 디지털 영상 보정 기법을 구현하면 구조물의 면내 변형뿐만 아니라 면외 변형도 측정할 수 있다[5].

본 연구에서는 디지털 영상 보정 기법으로 열팽창률이 작은 티타늄 외부링과 열팽창률이 상대적으로 큰 알루미늄 내부링으로 구성된 이중 링 구조물의 열변형을 측정하였으며 이를 유한요소 해석 결과와 비교분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1 실험장치 및 시편

본 연구에서 사용한 비접촉식 변형측정 장비는 독일 GOM 사의 ARAMIS 시스템 4M이다. ARAMIS 시스템은 두 대의 CCD(coupled charge device) 카메라를 사용하여 구조물의 3차원 영상을 촬영하며 이로부터 구조물의 면내와 면외 변형을 모두 측정할 수 있다. 3차원 측정 시 측정 정확도를 높이기 위해서는 두 카메라를 정확히 교정하여야 하며 이를 위하여 두 카메라 사이의 간격, 각도, 카메라와 피사체 사이의 거리, 조리개, 초점 등을 정밀하게 선택해야 한다. ARAMIS 시스템에는 카메라 교정 결과를 분석하는 프로그램이 있으며 교정한 결과 값이 설정된 기준에 미달하는 경우 카메라 교정 다시 해야 한

다. 이 교정 값은 측정결과와 보정에도 사용된다. 또한 구조물의 변형에 강제운동이 포함되어 있다면 이를 제거해야 할 필요가 있는데 ARAMIS 시스템에는 “Movement Correction”이라는 알고리즘이 있어 강제운동을 효과적으로 제거한다.

가열챔버는 미국 Sunsystem 회사의 EC1A를 사용했으며 챔버에는 내부의 시편을 촬영할 수 있도록 창이 있는 것이 특징이다. 챔버는 최고 300 °C까지 가열할 수 있으며 챔버의 내부에는 팬이 있는데 이는 내부에 강제 대류를 만들어서 내부의 온도를 균일하게 만들어준다[6].

가열챔버는 랩뷰 프로그램으로 제어하며 설정한 온도에 도달하면 ARAMIS 시스템에 디지털 영상을 찍도록 트리거 명령을 줄 수 있게 설계하였다. 그림 1은 ARAMIS 시스템과 가열챔버를 이용한 열변형 측정 시스템을 이용하여 실험하는 사진이다.

실험에 사용한 이중 링 구조물은 그림 2와 같이 외부링은 열팽창계수가  $8.8 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 인 티타늄이고 내부링은 열팽창계수가  $22.5 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$ 인 알루미늄으로 이루어져 있다. 표 1에는 링 구조물의 사이즈를 나타내었다. 이중 링 구조물은 가열하면 열팽창률이 큰 내부링이 팽창하면서 열팽창률이 작은 외부링과 일정한 온도에서 접촉하게 되고 그 이상의 온도에서는 같이 팽창한다. 내부링과 외부링이 접촉하는 온도는 식 (1)로 계산할 수 있다[7].



그림 1. ARAMIS와 가열챔버를 이용한 열변형 측정 시스템

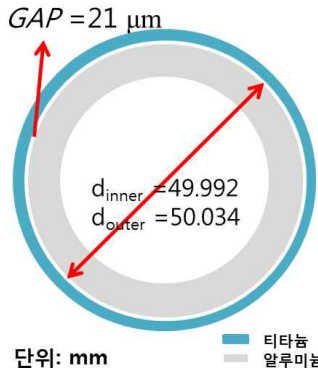


그림 2. 이중 링 구조물의 구조

표 1. 이중 링 구조물의 치수 (단위: mm, 계측기준온도: 25 °C)

	내경	외경	두께	GAP
알루미늄 (내부링)	40.007	49.992	10	0.021
티타늄 (외부링)	50.034	54.010	10	

$$T_{contact} = T_R + \frac{GAP}{\alpha_{AL} \times R_{AL} - \alpha_{TI} \times R_{TI}} \quad (1)$$

여기에서  $T_{contact}$  은 접촉하는 온도,  $T_R$  은 기준온도,  $R_{AL}$  은 내부링 내경의 반지름,  $R_{TI}$  는 외부링 내경의 반지름,  $GAP$  은 외부링 내경의 반지름과 내부링 외경과 반지름의 차이이다.  $\alpha_{AL}$  은 알루미늄의 열팽창계수이고  $\alpha_{TI}$  는 티타늄의 열팽창계수이다.

GAP 0.021 mm, 알루미늄의 열팽창계수인  $22.5 \times 10^{-6}$  m/m/°C, 티타늄의 열팽창계수인  $8.8 \times 10^{-6}$  m/m/°C,  $R_{AL}$  는 24.996 mm,  $R_{TI}$  는 25.017 mm를 식 (1)에 대입하면 접촉온도가 86.36 °C인 것으로 예측되었다. 이는 열팽창계수가 상온의 값으로 일정하다는 가정하에서 계산된 값이다.

## 2.2 실험방법

링 구조물의 열변형을 측정하기 위하여 가열 챔버의 온도를 50 °C부터 200 °C까지 5 °C/min의 속도로 상승시킨다. 5 °C 상승시킨 후 2분 동안 온도를 유지한 후 ARAMIS 시스템으로 시편의 영상을 찍었다. 그림 3은 설정한 가열온도와 실험 중 가열챔버에서 측정된 온도를 표시한 그

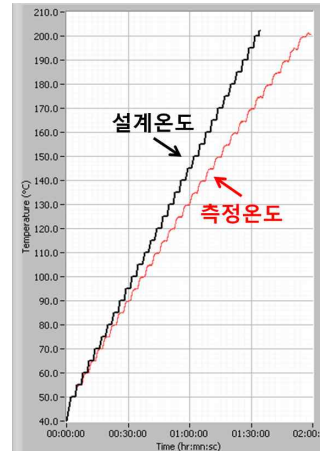


그림 3. 링 구조물의 가열 곡선

래프이다. 가열챔버는 랩뷰기반 프로그램으로 제어하고 설정한 온도에서 ARAMIS 시스템에 영상을 촬영하는 트리거 신호를 보낸다.

DIC를 사용하여 구조물의 변형을 측정할 때에는 구조물의 표면에 스프레이로 대비 (contrast)가 높은 스펙클 패턴(speckle pattern)을 만들어 주어야 하며 본 연구에서는 흰색과 검정색 페인트를 사용하여 흰색 바탕에 검정색 점이 있는 스펙클 패턴을 만들었다. 고온에서 패턴의 변화가 없는 고온용 페인트를 사용하였다.

본 실험에서는 창이 있는 가열챔버 내부에 링 구조물을 세워 놓고 ARAMIS 시스템의 CCD 카메라로 구조물 표면의 영상을 촬영하였다. 링 구조물은 자유롭게 팽창하도록 아무런 구속조건도 주지 않았으며 내부링을 움직여서 링 구조물의 윗 부분에만 간극이 있도록 조정하였다. 이렇게 배치하면 25 °C일 때 링의 아래 부분에서 내부링과 외부링은 접촉한 상태이며 윗부분에는 42 μm의 간극이 존재한다. 알루미늄과 티타늄의 열팽창계수를 고려하면 실험 기준 온도인 50 °C일 때에는 초기 간극은 24 μm가 된다.

## 2.3 이중 링 구조물의 열변형 유한 요소해석

이중 링 구조물의 측정결과와 비교하기 위하여 ANSYS로 비선형 열변형 유한요소해석을 수행하였다. 그림 4의 유한요소 모델은 2400개의 SOLID186 요소로 구성되었고 외부링과 내부링의 접촉하는 부분에는 접촉 요소인 TARGE170을 200개와 CONTA175를 691개 사용하였다.

실험에서 이중 링이 지지대에 놓여 있는 것을 모사하기 위하여 외부링 아래쪽의 절점을 고정하

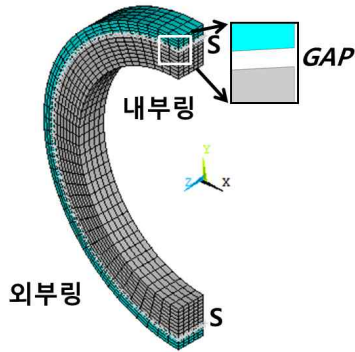


그림 4. 이중 링 구조의 유한요소 모델

표 2. 온도변화에 따른 알루미늄과 티타늄의 열팽창계수와 탄성계수

온도 (°C)	CTE (10 <sup>-6</sup> m/m/°C)		탄성계수 (GPa)	
	AL	TI	AL	TI
25	22.50	8.82	73	113
71	22.86	8.91		
93	23.22	9.00		
148	23.61	9.18		
204	24.03	9.36	62	103

여 특이성(singularity)을 제거하였다.

해석에서 사용한 알루미늄과 티타늄의 온도에 따른 열팽창계수와 탄성계수를 표 2에 나타내었다[8].

### III. 실험 결과 및 해석과의 비교

3.1절에서는 변위 측정 결과와 접촉온도를 설명하였고, 3.2절에서는 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다.

#### 3.1 이중 링 구조물의 변위 측정결과

그림 5는 200 °C일 때의 링 구조물의 Y축 방향 변위를 ARAMIS 시스템으로 측정된 결과이다. 결과에서 좌표축의 중심은 링의 중심에 있고 위쪽은 +Y축 방향이고 오른쪽은 +X축 방향이다. 변위의 중심이 링의 중심에 있기 때문에 그림에서 링은 위와 아래로 팽창하는 형태를 보이고 있다. 그림 5에서 온도가 상승하면서 내부링이 외부링보다 많이 변형되었다는 것을 관찰할 수 있는데 이는 내부링의 열팽창계수가 외부링보다 크고 그 사이에 간극이 있었기 때문이다. 두 링이 접촉한 후에 내부링이 외부링보다 더 팽창한 양

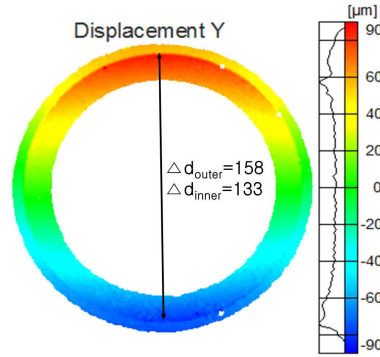


그림 5. ARMIS 시스템으로 측정 한 링 구조물의 Y축 방향의 변위 (50 °C → 200 °C)

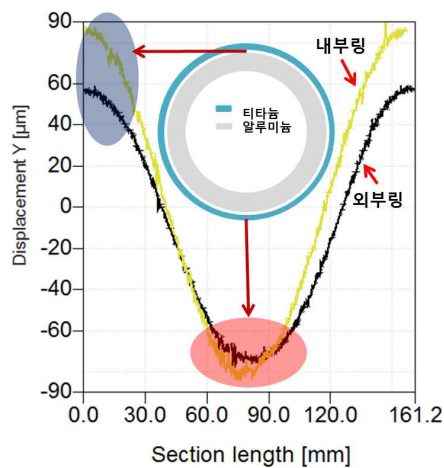


그림 6. 내부링과 외부링의 변위(200 °C)

은 50 °C일 때의 간극의 크기와 같다. 50 °C를 기준온도로 할 때, 온도가 200 °C로 올라가면 외부링의 내경은 133 μm 늘어났고 내부링의 외경은 158 μm 늘어났다. 두 값 사이의 차이는 25 μm로 50 °C일 때 간극인 24 μm에 비하여 1 μm 큰데 이는 측정 상의 오차이다.

그림 6은 200 °C일 때 내부링과 외부링이 인접한 부분의 Y축 방향의 변위를 나타낸 그래프이다. 그림에서 이해를 쉽게 하기 위하여 링의 윗 부분을 원점으로 하는 원주 방향 좌표계를 설정하였다. 즉 Section 값이 0인 부분은 링의 윗부분의 중심이고 Section 값이 78인 부분은 구조물의 아래 부분 중심을 가리킨다. 즉 200 °C일 때 구조물의 윗부분에서 내부링은 외부링보다 초기 간극만큼 더 팽창을 했으며 구조물의 아래 부분에서는 이미 접촉하였다는 것을 확인할 수 있다. 실험을 시작할 때 링 구조물을 세워 놓을 때 내

부링과 외부링이 아래 부분의 중심이 정확하게 접촉해야 하는데 그렇지 않을 경우 그래프에서 최저 변위가 동일한 Section에서 나타나지 않으며 또한 접촉하는 온도와 간극의 크기를 정확하게 측정할 수 없다.

내부링과 외부링의 접촉하는 온도는 75 °C와 80 °C일 때의 링의 측정결과에서 확인할 수 있는데 그 결과는 그림 7과 그림 8에 나타났다. 그림 7은 70 °C에서 5 °C 상승했을 때의 링의 변위를 나타내고 있는데 내부링과 외부링은 접촉하지 않았기 때문에 두 링의 윗부분의 중심에서 내부링과 외부링이 4~5 μm의 변위차이를 보여주고 있다. 하지만 그림 8에서는 내부링과 외부링이 접촉하는 과정인데 80 °C 가 되면 링의 윗부분에서 외부링과 내부링의 변위의 차이가 없으며 모두 Y 방향으로 2 μm 변형하였다는 것을 확인할 수 있다. 이는 내부링과 외부링이 75 °C와 80 °C 사이에서 접촉하였고 그 이후 같이 팽창하고 있다는 것을 나타낸다. 실험에서의 접촉온도가 식 (1)의 결과인 86 °C보다 작은 원인은 식 (1)을 적용할 때 25 °C에서의 물성치를 사용하였기 때문이다.

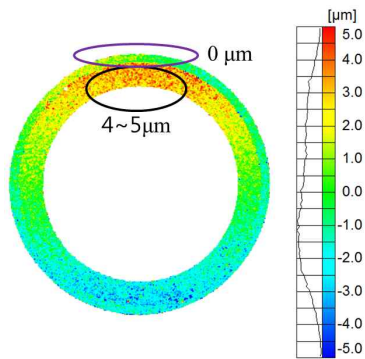


그림 7. 링 구조물의 Y축 방향의 변위 (70 °C → 75 °C)

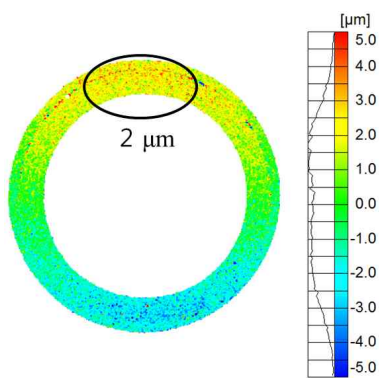


그림 8. 링 구조물의 Y축 방향의 변위 (75 °C → 80 °C)

### 3.3 해석 결과와의 비교

그림 9는 200 °C일 때 유한요소 해석 결과를 나타내고 있다. ANSYS 해석에서는 변위의 원점을 아래 접촉부로 잡았기 때문에 아래 접촉부를 기준으로 위로 변형되는 양상을 나타내고 있다. 그림 5의 실험 결과는 링의 중심이 원점이기 때문에 변형 양상이 다른 것처럼 보이나 실제로는 같은 변형을 나타낸다.

실험과 해석을 수치적으로 비교하기 위하여 직경의 변화를 비교하였다. 200 °C일 때 내부링의 외경은 실험 158 μm, 해석 150 μm로 8 μm의 차이가 있었고 외부링의 내경은 실험 133 μm, 해석 127 μm로 6 μm의 차이가 있었다.

이러한 차이를 더 잘 나타내기 위하여 그림 10에 내부링 외경과 외부링의 외경의 온도에 따른 변화를 나타내었다. 그래프를 보면 알루미늄 내부링은 온도에 따라 일정하게 팽창하였고 티타늄 외부링은 경우 변위 기울기가 작다가 80 °C 부근에서부터 변위가 갑자기 커지는데 이는 내부링과 외부링이 접촉한 후 같이 팽창하기 때문이다.

ARAMIS 시스템의 측정결과와 ANSYS의 유한요소해석 결과를 비교하면 120 °C까지는 1 ~ 2

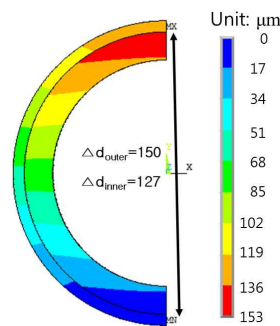


그림 9. 200 °C일 때 링 구조물의 시뮬레이션 Y축 방향의 변위 (50 °C → 200 °C)

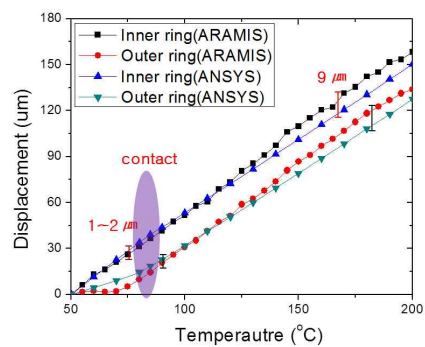


그림 10. 내부링과 외부링의 측정된 변위 결과와 시뮬레이션 변위 결과의 비교 그래프

$\mu\text{m}$ 의 차이가 있었고  $120\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  사이의 온도에서는 최대  $9\text{ }\mu\text{m}$ 의 차이가 있었다. 이러한 차이는 해석에 사용된 재료의 물성치가 이중링 구조물의 물성치와 다르기 때문인 것으로 판단된다. 별도의 연구로 알루미늄의 열팽창계수를 측정하였는데 이를 보면 본 연구의 해석에 사용한 참고문헌[8]의 값보다 큰 값을 갖는 것으로 확인되었으며 이 값을 사용하면 오차가 작아진다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 디지털 영상 보정 기법으로 이중 링 구조물의 열변형을 측정하였다. ARAMIS 시스템으로 측정된 링 구조물의 변위 결과는 특정한 부분의 변위가 아니라 시편 전체 영역의 변위여서 변형후의 변위 분포를 쉽게 관찰할 수 있다. 또한 온도에 따른 알루미늄과 티타늄의 물성을 적용하여 유한요소해석을 진행하였으며 구조물이  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때 ARMIS 시스템과 해석결과의 차이는 최대로  $9\text{ }\mu\text{m}$  이었다.

향후 구조물의 고온 또는 초고온 열변형을 측정할 예정이며 변위뿐만 아니라 변형률과 열응력도 함께 측정할 수 있는 방법을 개발할 예정이다.

#### 후 기

본 논문은 교육과학기술부 재원으로 전북대학교 고온 플라즈마응용연구센터 구축사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 1) 김한준, 주진원, "마이크로 모아레 간섭계를 이용한 초정밀 열변형 측정", 대한기계학회 춘추 학술대회, 2006, pp. 7-12.
- 2) 구남서, 권두영, 김주식, 윤광준, "온도변화와 변형률/응력 계측 기법 및 복합재료의 열팽창 계수 측정의 적용", 한국항공우주학회지, 제 29권 2호, 2001, pp. 76~87.
- 3) VISHAY MICRO-MEASUREMENT, "Strain gage thermal output and gage factor variation with temperature", 2005.
- 4) V.M. DeAngelis and R.A. Fields, "Techniques for Hot Structures Testing", Thermal Structures and Materials for High-Speed Flight, Edited by Earl A. Thornton, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 140, pp. 255-277.
- 5) ARAMIS v5.3.0 User manual, GOM, 2005.
- 6) J.S. Lyons, J. Liu and M.A. Sutton, "High-temperature Deformation Measurements Using Digital-image Correlation", *Experimental Mechanics*, Vol. 36, No. 1, March 1996, pp. 64-70.
- 7) Timoshenko and Gere, *Theory of elastic stability*, 1985.
- 8) MIL-HDBK-5H, *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*, 1998.