

비틀림하중을 받는 기계구조물의 ESPI를 이용한 면내변위 측정에 관한 연구

이학주* · 최은오* · 정찬희* · 장석원†
(2001년 6월 15일 접수, 2002년 1월 22일 심사완료)

A Study on Measurement of In-Plane Displacement using ESPI in Mechanical Structure under torsional load

Hacju Lee, Eunoh Choi, Chanhee Jeong and Seogweon Chang

Key Words: ESPI(전자 스페클 패턴 간섭계), In-Plane Displacement(면내변위), Strain Gauge(스트레인게이지), Torsional Load(비틀림 하중), Laser(레이저)

Abstract

Recently, the mechanical structures applied to many industrial products, especially in electronic products, appear to be miniaturized and complicated. This trend makes it difficult to analyze the stress distribution of those mechanical structures and generates new challenges for precise measurement of strain. In order to solve this measurement problem many optical measurement techniques have been suggested. Among those, the ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) has been considered as one of the most useful tools. But the shortage of recognition and difficulties of measurement have limited its industrial applications in spite of its excellent capabilities. Therefore in this study, not only the verification of the FEA result but the enhancement of industrial application of ESPI was tried by measuring the in-plane displacement of mechanical structure with ESPI, which is difficult to be measured with strain gauge.

1. 서론

최근 산업계 기술동향은 첨단화, 고정도화 그리고 초소형화하고 있으며, 초정밀 가공 기술(nano technology)의 발전에 따른 고정밀의 계측기술이 요구되고 있는 실정이다. 이에 따라 새로운 정밀계측기술 또한 급속히 발전하고 있으며, 특히 비접촉 정밀 계측분야에서는 레이저(laser)를 이용한 광계측 방법이 선호되고 있다. 레이저를

이용한 비접촉 계측방법은 기계구조물의 미소 하중, 미소균열검출, 미소변형계측, 정밀계측 등의 분야에 장점이 있어 관심이 집중되고 있다. 이는 스트레인게이지(strain gauge)계측방법에서의 점(point)계측, 온도보정의 난해함, 부착장소의 조건성 그리고 계측자의 숙련도에 따른 편차 등의 단점을 극복할 수 있기 때문이다.

레이저를 이용한 물체의 변형계측은 홀로그래피 간섭계(holographic interferometry), 모아레 간섭계(moire interferometry), 스페클사진법(speckle photography), 전자스펙클패턴 간섭계(electronic speckle pattern interferometry : ESPI)등 주로 광간섭계를 응용한 방법이다. ESPI는 스페클의 휘도차에 의해 물체 표면에 발생하는 변위를 측정하는 것으로써 Vest,⁽¹⁾ Ennos,⁽²⁾ Jones와 Wykes⁽³⁾에

* 대우전자 품질경영연구소

† 책임저자, 회원, 대우전자 품질경영연구소

Email : swjang@web.dwe.co.kr

TEL : (032)510-7818 FAX : (032)523-6082

의해 도입되면서 발전하였다. 현재 국내에서도 학계를 중심으로 ESPI를 이용한 기계구조물의 변형계측이 활발히 연구되고 있으나, 산업계에서는 인식 부족과 측정의 난해함 등의 이유로 아직 그 활용도가 높지 않다. 그러나, ESPI는 nm단위의 변형도 계측 가능한 정밀도 및 민감도가 우수하며 실시간 검사 및 기록이 가능하고, 레이저 조사 면적 전체가 검사 영역으로 한 번에 계측할 수 있는 등의 장점으로 인하여 정밀측분야에서 빠르게 발전하고 있다.

일반적으로 하중을 받는 구조물 설계에서의 응력 분포는 중요한 설계인자로서 유한요소해석으로 변형 및 응력의 분포를 조사하고 있으며, 실험을 통한 모델의 타당성과 해석결과의 검증은 필수적이다. 그러나 형상이 복잡하거나 미소면적일 경우 스트레인 게이지를 이용한 스트레스-스트레인(stress-strain)계측 방법으로는 한계가 있고 더우기 전면적을 일시에 계측하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 이러한 한계를 극복할 수 있는 계측방법을 이용하여 정밀한 미소변위량의 계측이 절실히 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 비틀림하중을 받고 있는 복잡한 형상을 가진 기계구조물에 대해서 유한요소해석으로 변형량을 계산하였으며, ESPI를 이용한 정적변형량의 정밀 계측으로 시물레이션 모델의 타당성을 검증하였다. 또한 검증된 시물레이션 모델을 이용한 유한요소해석으로 응력분포를 조사하여 구조장성의 안전성을 조사하였다.

2. ESPI 계측 및 유한요소해석

2.1 유한요소해석

유한요소해석 및 ESPI 면내변위 계측 실험 대상은 가정용 전자동 세탁기에 적용되는 기계구조물로서 축이 드럼 케이스(drum case)에 압입된 형태로 비틀림하중을 받는 구조물이다(Fig. 1). 케이스의 재질은 아연도금 강판으로 케이스에 압입된 축으로 탈수모드(mode)에서 세탁조(basket)를 구동하여 회전시킨다. 케이스의 드럼(drum) 외부에는 드럼 브레이크 장치가 있어 회전하는 세탁조를 정지시킬 수 있다. 따라서 전자동 세탁기의 탈수

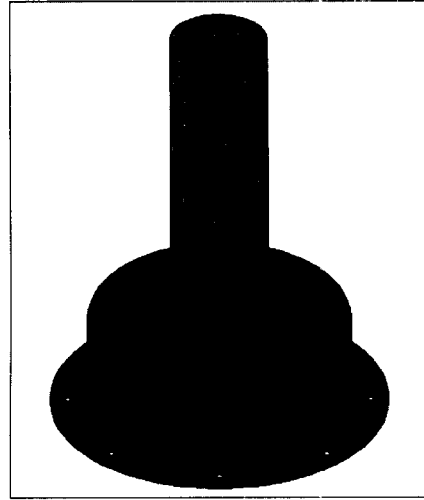


Fig. 1 FE model of drum case

Table 1 Material properties

Items	Values
Modulus of Elasticity	180.5GPa
Poisson's Ratio	0.3
Element Type	Hexa
Ultimate stress	286.1MPa
Yield stress	150.4MPa

모드에서 모터가 기동할 때와 감속할 때 탈수조를 회전시키는 구동축의 상단에는 비틀림 토크가 발생하고 드럼 케이스는 비틀림 토크에 의해 케이스의 곡면부(neck)에 응력이 집중되는 구조이다.

유한요소해석 모델은 Fig. 1에 표시하였으며, 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 해석 Solver는 ABAQUS, Pre/Post Processor에는 PATRAN이 사용되었다.

축과 케이스 기하학적 형상과 메쉬(mesh) 크기에 따라 각각 2계 6면체 요소(2nd order Hexa Element)와 1계 6면체 요소(1st order Hexa Element)를 사용하였고, 총 요소(element)수는 16704개이다. 또한 케이스의 바닥면 볼트자리는 클램핑(clamping) 조건으로 고정했으며 축의 상단부에 MPC(multi point constraint)를 이용하여 토크를 부가하였다.

2.2 전자스펙클패턴 간섭계

가간섭성이 뛰어난 레이저를 물체의 표면에 조사하면 스펙클이라 일컬어지는 반짝이는 작은점들이 물체면 위에 뿌려진 것처럼 보이게 된다. 이때 우리 인간의 눈은 렌즈와 같은 역할을 하여 물체 표면에서 반사된 스펙클이 눈에 결상하게 된다. 이와 같이 렌즈를 이용한 스펙클의 결상을 주관적인 스펙클이라 하며, 이때 주관적 스펙클의 크기는 렌즈와 레이저의 파장과의 관계에 의해 결정된다.⁽²⁾

이렇게 형성된 스펙클에 같은 파장의 레이저 빛을 하나 더(기준빔) 조사하면 두 빛의 간섭이 일어나 스펙클 패턴이 형성된다. 이 스펙클 패턴을 이용하여 물체 표면의 변위 발생 시에 발생하는 변형 전후의 스펙클 패턴을 빼서 줄무늬(fringe)를 만들고 이를 분석하여 위상차 및 변위량을 구하는 것이 스펙클 패턴 간섭계이다. 여기서 CCD 카메라를 사용하여 정보를 수록하고 컴퓨터를 이용하여 전자적으로 화상처리 및 변형정보를 얻는 방법을 전자스펙클패턴 간섭계(ESPI)라 한다.

2.3 ESPI를 이용한 면내변위 계측법⁽⁵⁻⁷⁾

이러한 ESPI를 이용한 면내변위 측정법은 면내 변위에 민감하게 레이저 빛의 조사 방향을 조정하여 측정하는 방법으로서 간섭계를 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 이 측정법은 Lecondertz⁽⁴⁾에 의해 제안된 방법으로 참조광을 따로 사용하지 않고 2개의 물체광을 Fig. 2와 같이 같은 각도로 조사하여 측정하는 것이다. 여기서 y방향이 지면에 수직방향일 때 물체는 xy 평면상에 있고 두 개의 빛이 동일한 각도(θ)로 조사되고 있다.

물체면 위의 P점에서 복사조도 I는 아래와 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \gamma \quad (1)$$

여기서 γ 는 P점에 조사되는 두 빛의 위상차이고, I_1, I_2 는 두 입사광의 복사조도이다. 만약 P점이 \vec{d} (d_x, d_y, d_z)만큼 움직였을 때, 복사조도는 식 (2)와 같이 된다.

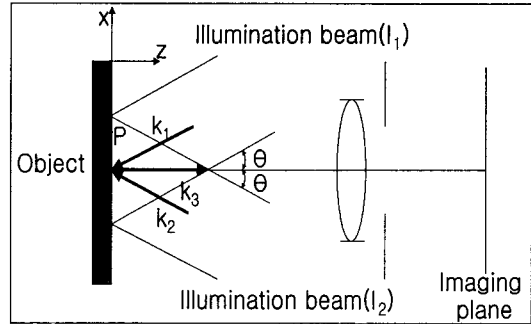


Fig. 2 Schematic diagram of speckle interferometer sensitive to in-plane displacement

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos (\gamma + \Delta \varphi) \quad (2)$$

여기서 $\Delta \varphi$ 는 물체의 움직임에 의하여 생긴 위상차이다. 위상차와 물체의 변위 \vec{d} 와의 관계는 민감도벡터(sensitivity vector)를 이용하여 얻을 수 있는데, 입사광 1에서 총 위상차 (δ_1)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (-\sin \theta i - \cos \theta k)] \\ &\quad \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [d_x \sin \theta + d_z (1 + \cos \theta)] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \vec{k}_1 는 입사광 1의 진행벡터 이고, \vec{k}_3 는 관찰광의 진행벡터이며, i, j, k 는 각각 x, y, z 방향의 단위벡터(unit vector)이다. 이와 같은 방법으로 입사광 2에서 총 위상차(δ_2)를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta_2 &= (\vec{k}_3 - \vec{k}_2) \cdot \vec{d} \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (\sin \theta i - \cos \theta k)] \\ &\quad \times (d_x i + d_y j + d_z k) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [-d_x \sin \theta + d_z (1 + \cos \theta)] \end{aligned} \quad (4)$$

Table 2 Specifications of measuring System

Measuring system	Specifications
Laser	DPSS CW Nd-YAG Max. Power : 500mW
CCD	752(H)×582(V) pixel
Graphic board	ATI 4MB
D/A-board	CIA DDA 06
Frame grabber	PCI image SG

이때 \vec{k}_2 는 입사광 2의 진행벡터이다. 식 (2)에서 $\Delta\varphi$ 는 식 (3), (4)의 차이이므로 두 식을 빼주면

$$\Delta\varphi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)d_x \sin\theta \quad (5)$$

가 된다. 따라서 만약 어두운 줄무늬(dark fringe)가 나타나게 되면 $2n\pi$ 만큼의 위상차가 발생하게 되고, 면내변위 d_x 는 아래와 같이 된다.

$$d_x = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (6)$$

3. ESPI 실험장치구성 및 실험방법

ESPI 계측 시스템은 주변의 진동에 매우 민감하므로 그 영향을 최대한 억제하기 위해 광학 테이블(isolation table)위에 구성하였다. 광원은 파장이 532nm인 Nd-YAG 레이저를 사용하였으며, CCD 카메라, Frame grabber 및 컴퓨터를 이용해 변형 전후의 스펙클 패턴을 기록하고 Data를 처리하였다. Table 2와 Fig. 3에 계측시스템의 사양과 ESPI 광학계의 구성도를 나타내었으며, Fig. 4에는 실험장치 구성도를 나타내었다. 실험에 사용된 레이저를 비롯한 광학, 화상처리 및 데이터 분석은 3D-ESPI 시스템을 사용하였는데, 이 시스템은 3차원적인 변위를 연속적으로 한 번에 측정할 수 있다

본 실험에서는 축의 비틀림하중에 의한 드럼 케이스의 면내변위를 측정하고자 하였으나, Fig. 1과 같은 구조물의 축에서 굽힘하중의 부가 없이

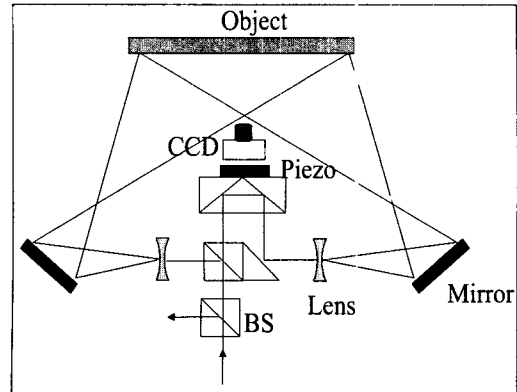


Fig. 3 Schematic diagram of the optical system used in measurement

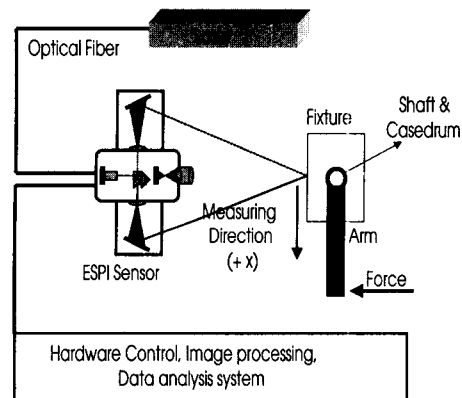


Fig. 4 Top view of measuring system

순수 비틀림하중을 부가하기는 곤란하다. 따라서 순수한 비틀림하중을 부가하기 위해 Fig. 5에 나타난 것과 같은 고정지그(Jig)에 시편을 고정하여 실험하였다.

비틀림하중에 의해서만 변형이 일어난다면 부가 하중의 시계방향, 반시계방향에 따라 비틀림하중 부가 시 면내변위의 방향이 완전히 반대로 나타나게 될 것이다. 그러나 고정지그를 사용하지 않고 축의 끝부분에 펄세이터(pulsator)를 직접 조립하여 비틀림하중을 시계방향과 반시계방향으로 부가하여 면내변위를 측정할 경우, 정반대 방향의 비틀림하중이 부가되었음에도 변위는 -X로 방향이 같게 나타났다. 이는 비틀림하중과 굽힘

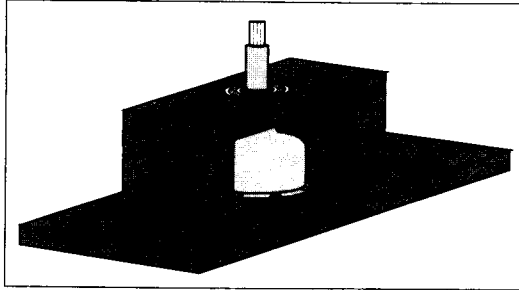


Fig. 5 Schematic diagram of jig

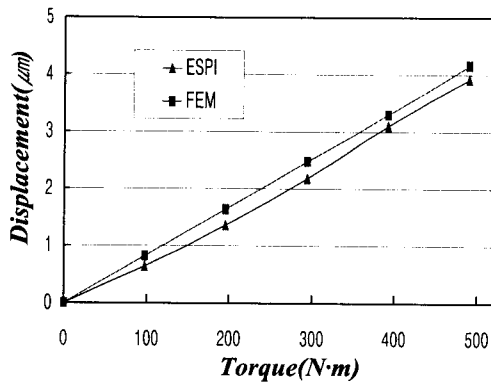


Fig. 6 In-plain displacement of simulations and experiments

하중이 동시에 부가되고 있으며 실제 굽힘하중에 의한 변위가 더 크게 나타난 결과임을 알 수 있었다. 이에 반해 고정지그를 사용하여 동일한 실험을 수행한 결과, 굽힘하중의 부가 없이 비틀림하중에 의한 변형의 결과를 나타낼 수 있었다.

따라서 본 실험에서는 실제의 비틀림하중 조건을 재현하기 위하여 Fig. 5와 같은 고정지그를 사용하였으며, Fig. 4와 같이 축의 중심으로부터 25 cm 길이의 강봉(steel bar)을 연결한 상태에서 인장·압축 게이지(Push-Pull gauge)를 이용하여 비틀림하중을 부가하였다. 드럼 케이스의 바닥면은 광학정반에 완전히 고정하였으며, 비틀림하중을 98N·m부터 최대 490N·m까지 98N·m씩 증가시키면서 드럼 케이스에서 발생하는 면내변위를 측정하였다.

4. 해석 및 실험결과

Table 3 Comparison with simulations and experiments

Torque (N·m)	Displacement(μm)		Error(μm)	Rate(%)
	ESPI	FEM		
98	0.65	0.824	0.174	(26.77)
196	1.36	1.647	0.287	(21.10)
294	2.19	2.470	0.28	(12.79)
392	3.11	3.300	0.19	(6.11)
490	3.93	4.160	0.23	(5.85)

Fig. 6은 비틀림하중 조건에서 바닥에서부터 압입부 상단까지의 면내변위량을 FEM 해석과 실험 결과를 비교하여 나타낸 것으로, 하중의 증가에 따라 총변위량이 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 Table 3에 비틀림하중 부가 시 케이스에서 면내변위량을 유한요소해석과 ESPI 실험의 결과를 나타내었으며, 변위량의 차이와 백분율을 표시하였다.

이때 ESPI에 의한 면내변위량 측정값과 FEM 해석 값은 면내변위 발생이 없는 바닥면에서 압입부 상단까지의 최대 면내변위량값을 사용하였는데, 이는 측정물이 원형인 것을 고려했기 때문이다. 실제 본 연구에 사용된 ESPI 시스템은 계측하고자 하는 면이 평면이 아닌 곡면일 경우 계측 시 곡률을 고려하여 면내변위 값을 보정하지 못하는 단점이 있다. 그러나 본 계측의 경우는 드럼케이스가 완전히 원형의 대칭구조이기 때문에 임의의 한 각도에서 계측하여도 같은 결과를 나타낼 것이며, FEM 해석의 검증을 위하여 비교한 면내변위 값도 이미지면상에서 드럼케이스의 중심축 부위, 즉 이미지 면과 원형의 드럼케이스가 접하는 접점부위에서 발생한 최대 면내변위값만을 사용하였기 때문에 곡률을 고려한 계측값의 특별한 보정이 필요없다.

Fig. 7에 비틀림하중 하에서의 유한요소해석 결과와 ESPI를 이용한 면내변위 측정결과를 비교하여 나타냈다. 여기서 비틀림하중에 의한 전형적인 줄무늬를 얻을 수 있으며, 각 하중조건별로 해석과 실험 결과에서 줄무늬의 양상이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

드럼 케이스의 하단부에는 줄무늬가 넓게 나타

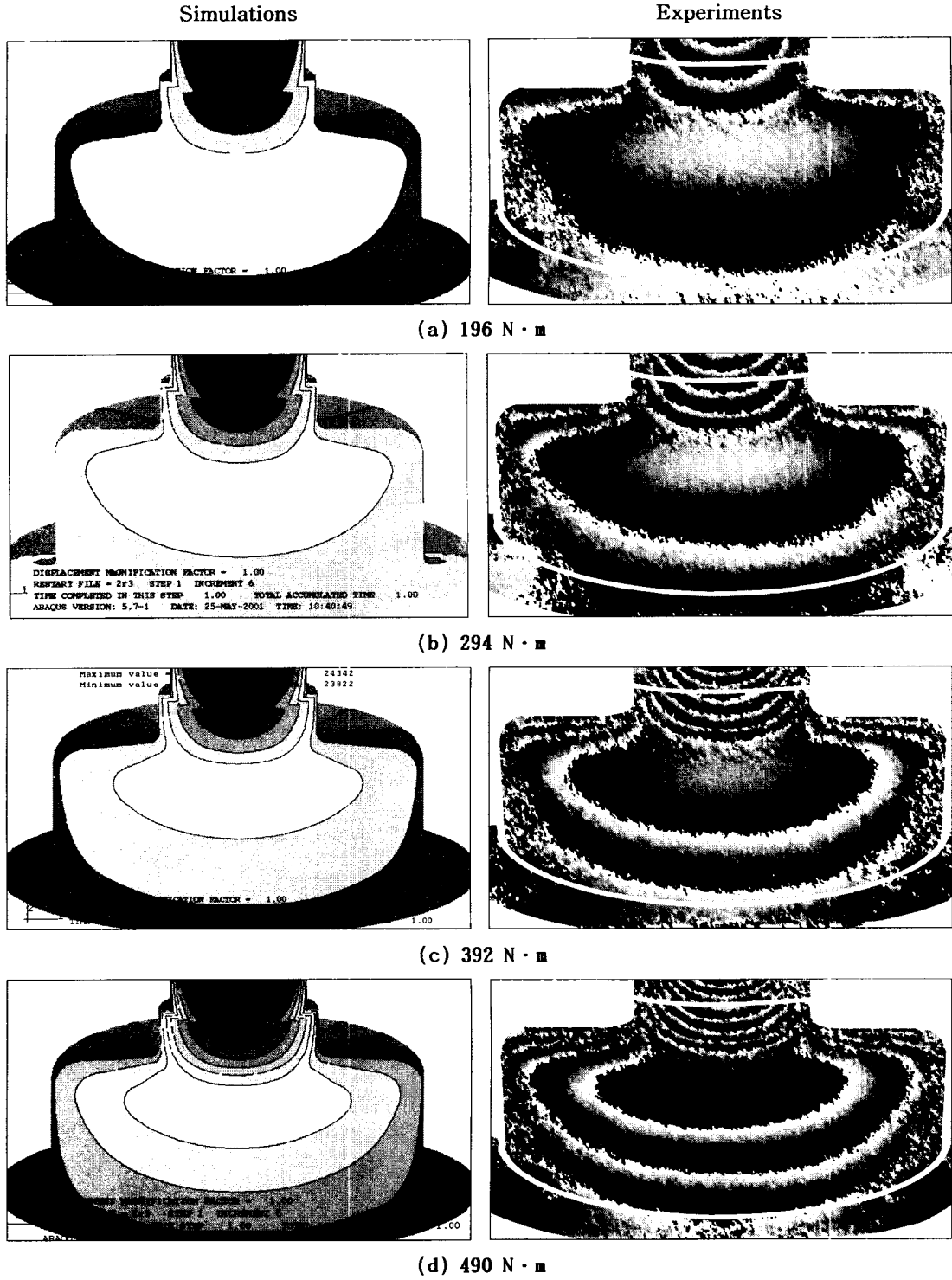


Fig. 7 The results of simulations and experiments - (a) 196N· m, (b) 294N· m , (c) 392N· m, (d) 490N· m

Table 4 Strain of drum case

Torque(N · m)	Strain
98	2.95×10^{-3}
196	5.00×10^{-3}
294	7.50×10^{-3}
392	9.99×10^{-3}
490	12.5×10^{-3}

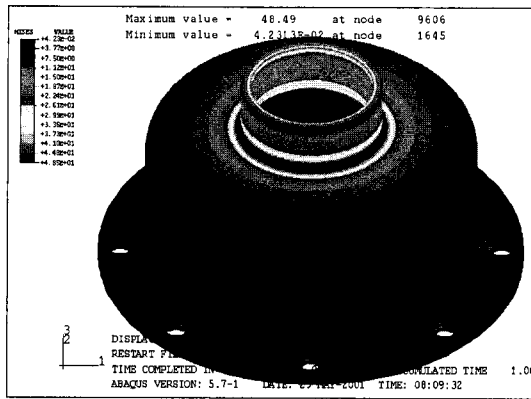


Fig. 8 Stress distribution under torsional load

나는 반면 상단부(압입부)에서는 줄무늬의 간격이 조밀하게 위치하고 있다. 따라서 이 부분에서 주로 면내변위가 발생하고 줄무늬의 간격이 급속하게 커지는 경계부분 즉 압입부가 끝나는 곡면부에서 가장 큰 비틀림하중을 받고 있음을 나타내고 있다.

미소 변위량이 발생하는 미소하중에서는 실험과 해석의 조건 차이로 인한 오차가 발생한다고 볼 수 있으나, 주요 관심 영역인 294N·m 이상의 비틀림하중 조건에서는 해석과 실험의 오차가 상당히 줄어, 490N·m 이상의 비틀림하중 조건에서는 해석과 실험 결과의 오차는 5%대 이하이다. 따라서 Fig. 6과 Fig. 7의 해석 및 실험 결과 정성적인 변형 양상과 정량적인 변위량이 일치하고 있어 유한요소 모델의 타당성이 검증되었다고 할 수 있다.

또한 Table 4에 유한요소 해석으로 구한 스트레인을 나타내었다. 이러한 결과는 스트레인 계

이지의 오차 범위에 속하게 되어 미소 변위일 경우 ESPI를 이용한 면내 변위 계측이 더욱 정확함을 알 수 있다.

Fig. 8은 비틀림하중하에서 드럼 케이스의 응력 분포를 나타낸 것으로써, ESPI 면내변위 계측실험을 통하여 타당성이 검증된 유한요소 모델을 이용하여 응력분포를 조사한 것이다. 비틀림하중 490N·m는 탄성역에 포함되고 응력분포의 양상은 같으므로 여러 비틀림하중 조건 중 490N·m의 비틀림하중 조건에서의 응력분포를 대표적으로 나타내었다. 여기서 축이 압입되는 부분과 케이스가 90°로 꺾여지는 부분에서 응력이 집중되는 것을 알 수 있다.

유한 요소 해석의 결과에서 드럼 케이스는 재료의 항복 응력인 150.4MPa에 비해 490N·m의 토크에서 48.49MPa의 최대 응력이 나타나고 있다. 단순히 정적인 토크만 가해질 경우 1519N·m에서 항복응력에 도달한다. 그러나 실제 상태는 반복하중이 가해지므로 피로안전계수를 고려하면 490N·m의 토크는 최대허용토크에 근접하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 ESPI를 이용하여 측정하고자 하는 영역이 복잡한 형상을 가지거나 면적이 미소하여 기존의 스트레인게이지로는 측정이 불가능한 기계 구조물에 대해 면내 변위를 측정하여 유한요소해석결과와 타당성을 검증하고 해석의 정확도를 높여 구조강성의 안전성을 조사하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 스트레인 게이지에 의한 스트레인 계측의 오차 범위 내에 들 수 있는 미소 하중하의 미소 변위 또는 매우 작은 곡면부 등의 계측에는 ESPI를 이용한 면내변위 계측법이 정밀하고 효과적이며, 일시에 전면적을 계측함과 동시에 정밀성과 반복성을 확보할 수 있어 결과의 신뢰성을 보장할 수 있음을 밝혔다.

(2) ESPI를 이용한 면내변위 계측법으로 유한요소해석 모델의 타당성이 검증되었으며, 타당성이 검증된 모델을 이용하여 응력해석을 수행함으

로써 구조설계 해석의 신빙성을 높일 수 있었다.

(3) ESPI를 이용하여 미소 기계시스템의 정밀 측정과 재료의 변형 거동 측정에 우수하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2000년도 과학기술부 국가지정연구실 사업 (과제번호 : 2000-N-NL-01-C-267) 의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Vest C.M., 1979, *Holographic Interferometry*, New York ; John Willey and sons.
- (2) Ennos A.E., 1975, "Speckle Interferometry," in J.C.Dainty(ed.), "Laser Speckle and Related Phenomena," *Springer Verlag*, Berlin, pp. 203~253.
- (3) Johns R., and Wykes C., 1983, "Holographic and Speckle Interferometry," *Cambridge University Press*.
- (4) Leendertz J.A., 1970, "Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect," *Journal of Physics E : Scientific Instrument*, 3: 214.
- (5) Ettemeyer A., 1996, "Non-contact and Whole Field Strain Analysis with a Laseroptical Strain Sensor," *VIII International Congress on Experimental Mechanics*, Nashville, Tennessee, pp. 10~13.
- (6) Binda L., and Fachini M., 1998, "Electronic Speckle Interferometry for the Deformation Measurement in Masonry Testing," *Construction and Building Materials* 12, pp. 269~281.
- (7) 김정석, 김형수, 1994, "ESPI법과 화상처리에 의한 2차원의 스트레인 측정에 관한 연구," *韓國情密工學會誌*, 제11권, 제1호.