creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

BY: **저작자표시**. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000235941

2008 年 2月
碩士學位論文

개발된 Dual-beam 전단간섭계를 이용한 프레스 및 사출금형의 정량적 변형 측정

朝鮮大學校 大學院

機械設計工學科

李 建 正

개발된 Dual-beam 전단간섭계를 이용한 프레스 및 사출금형의 정량적 변형 측정

Quantitative Measurement of Deformation about Press and Mould Product Using Developed Dual-beam Shearography

2008年 2月 日

朝鮮大學校 大學院

機械設計工學科

李 建 正

개발된 Dual-beam 전단간섭계를 이용한 프레스 및 사출금형의 정량적 변형 측정

指導敎授　　金 庚 錫

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

2007年 10月

朝鮮大學校 大學院

機械設計工學科

李　建　正

李建正의 碩士學位論文을 認准함

委員長　朝鮮大學校　敎授　梁 光 永　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　張 完 植　印

委　員　朝鮮大學校　敎授　金 庚 錫　印

2007年　11月

朝鮮大學校 大學院

- 목 차 -

NOMENCLATURE ····· Ⅳ

List of Tables ····· Ⅵ

List of Figures ····· Ⅶ

List of Photos ····· Ⅸ

ABSTRACT ····· Ⅹ

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구 배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 금형산업의 현황과 연구의 필요성 ····· 3

제 2 장 이 론 ····· 4

제 1 절 레이저의 특징 ····· 4

제 2 절 전자처리 스페클 간섭법 ····· 5

1. Spekle의 형성과 크기 ····· 5

2. 위상이동 기법 ····· 8

제 3 절 광학간섭계 ····· 10

1. 전단간섭계의 해석 ····· 10

2. 변형계측에 이용되는 전단간섭법의 개념 ····· 17

3. Single-Beam Interferometer ····· 19
4. Dual-Beam Interferometer ····· 23

제 3 장 실험 장치 개발 ····· 26
제 1 절 Dual-Beam Interferometer 개발 ····· 26
1. 화상처리 장치 ····· 26
2. Dual-Beam Interferometer 시스템 ····· 27
제 2 절 시험편 및 실험방법 ····· 30
1. 시험편 사양 ····· 30
2. Dual-beam Interferometer의 Single mode 실험 방법 ····· 34
3. Dual-beam Interferometer의 Dual mode 실험방법 ····· 34

제 4 장 실험결과 ····· 36
제 1 절 Dual-Beam Interferometer 실험결과 ····· 36
1. 개발된 장비의 신뢰성 검증을 위한 평판 실험 36
2. LCD 판넬의 형상별 굽힘 강도 비교 실험 ····· 43
제 2 절 Dual-beam Interferometer single mode 실험결과 ····· 46
1. LCD 판넬의 변형 측정 ····· 46
2. 휴대폰 프레임의 열변형 측정 실험 ····· 51

3. 사출 금형의 열변형 측정 실험 ····· 54

제 5 장 결 론 ····· 58

참고문헌 ····· 59

감사의 글 ····· 61

- NOMENCLATURE -

A : Complex amplitude

A_O : Amplitude of object beam

A_R : Amplitude of reference beam

B : Brightness of a point on monitor

c : Light velocity

Δd : Range resolution

$\vec{d}$: Displacement vector of the object point

$\vec{d_1}$, $\vec{d_2}$: Component of the $\vec{d}$

U : Complex wave

U_O : Object wave

U_R : Reference wave

I : Complex intensity

E : Young's modulus

G : Shear modulus

ν : Poisson's ratio

I_O : Intensity of object wave

I_R : Intensity of reference wave

I_{before} : Intensity before deformation

I_{after} : Intensity after deformation

k : Propagation number

K : Proportional constant

n : Fringe order

$\vec{n_o}$: Normal vector along the direction of illumination

$\overrightarrow{n_s}$: Normal vector along the direction of observation

x_O : Direction function of object beam

x_R : Direction function of reference beam

$x,\ y,\ z$: Cartesian coordinate axes

α : Quantity of phase shift

Δ : Relative phase change(deg)

λ : wavelength of laser

ω : Angular velocity

ϕ : Phase of beam

ϕ_O : Phase of object wave

ϕ_R : Phase of reference wave

$\Delta\phi$: Phase difference before and after deformation

V_s : Signal subtracting V_{before} from V_{after}

V_{before} : Output signal of camera before deformation

V_{after} : Output signal of camera after deformation

θ : Illuminating angle

θ_1 : Phase of laser beam 1

θ_2 : Phase of laser beam 2

Δl : Optical path length difference by $\overrightarrow{d}$

Δl_1 : Optical path length difference by $\overrightarrow{d_1}$

Δl_2 : Optical path length difference by $\overrightarrow{d_2}$

γ : Interference fringe visibility

ω : Resonance frequency

- List of Tables -

Table 4.1 The phase-map of according to voltage ····· 38

Table 4.2 The comparison the Dual-beam interferometer and the shearography sensor ····· 39

Table 4.3 The Phase-map image of according to displacement ····· 41

Table 4.4 The deformation value the Dual-beam interferometer and the ESPI sensor ····· 41

Table. 4.5 Phase-map image of according to the shape ····· 44

Table. 4.6 The max value and error according to shape ····· 46

- List of Figures -

Fig. 2.1 Formation of objective speckle and subjective speckle ····· 7

Fig. 2.2 The change in optical path with respect to the displacement $\vec{d}$ ····· 10

Fig. 2.3 Vector diagram to displacement of an object ····· 12

Fig. 2.4 Vector diagram to displacement in x-axis($\vec{d_1}$) ····· 12

Fig. 2.5 Vector diagram to displacement in y-axis($\vec{d_2}$) ····· 13

Fig. 2.6 Vector diagram for phase difference of an object ····· 15

Fig. 2.7 Algorithm of deformation reconstruction ····· 19

Fig. 2.8 Single-beam interferometer ····· 20

Fig. 2.9 Dual-beam interferometer geometry ····· 24

Fig. 3.1 Internal structure of Dual-beam Shearography system ····· 28

Fig. 3.2 Detail of interferometer for Dual-beam interferometer system ····· 29

Fig. 3.3 Jig & Fixture for LCD panel ····· 32

Fig. 4.1 Specimen for out-of-plane deformation experiment ····· 37

Fig. 4.2 Specimen for in plane of measurement stain ····· 40

Fig. 4.3 Specimen for in plane deformation experiment ····· 42

Fig. 4.4 Slope profile of deformation ····· 45

Fig. 4.5 Phase map and unwrapping image of according to voltage ····· 48

Fig. 4.6 Slope profile along the line in photo. 3.5 ····· 50

Fig. 4.7 Phase-map and slope profile according to temperature variation ····· 53

Fig. 4.8 Phase-map and unwrapping image according to Δtemperature ····· 55

Fig. 4.9 Slope profile according to position ····· 57

- List of Photos -

Photo 1.1 Laser speckle on a digital camera image ····· **6**

Photo 3.1 Image processing system ····· **26**

Photo 3.2 Dual-beam Interferometer system ····· **27**

Photo 3.3 Frame of cellular phone ····· **30**

Photo 3.4 Photo of LCD panel ····· **31**

Photo 3.5 Photo of mold base ····· **33**

Photo 4.1 Photo of PZT actuator and PZT controller ····· **37**

ABSTRACT

Quantitative Measurement of out-of-plane Deformation about Press and Mould Product Using Development system

By Kun Jung, Lee

Advisor : Prof. Koung Suk, Kim

Dept. of Mechanical Design Engineering

Graduate School, Chosun University

As researches on speckle interferometry made use of the laser's time and space interference characteristic are continuously developed, those researches are actively studying at home and abroad in these days. Speckle interferometry makes it possible to test a source of light on the whole measuring surfaces and real-time inspection as well as inspect the measurement of the shapes, stress and displacement which is studied in this thesis on the whole measuring surface. As is explained above, because the measurement method using speckle interferometry is capable of highly sensitive and resolving power measurement with non-contact, full-field, and real-time measurement, application of the measurement method using speckle interferometry is on increase. But, recently donation application technology only reach the level to compose the optical interferometer by optical experts or to apply the a high price commercial equipment purchased from abroad. In spite of a lot of advantages technical impact is insufficient. For solving these problems,

in this thesis, we develop the united optical interference system and analysis program to enhance the application as the measurement equipment.

The research on non-destruction laser shearography interfarometry system that has been carried out in this thesis is a part of measuring field of modern laser industry. It has been applied to press and mold, and it is expected to be able to accurately measure through the development of relevant technology such as localization of measuring instrument, development of new interfarometry system and development of image process algorithm. Through the use of development facility, non-destruction laser shearography interfarometry that may be applied during mold process, and thermal deformation and torsion may be observed after processing. Furthermore it has been applied to this equipment to find out the cause of faulty product.

제 1장 서론

제 1 절 연구 배경 및 목적

우리나라의 금형공업은 제조업의 성장과 발전에 따라 함께 성장해 왔다. 이러한 금형 산업은 70년대 중반부터 전자공업 및 중화학공업이 발전되면서 정밀가공용 공작기계가 도입되어 프레스 금형과 플라스틱금형 등이 생산되기 시작하였다. 80년대 후반 정부의 금형공업 육성시책에 힘입어 국내 금형공업은 양적, 질적으로 성장하는 전환기가 되었다. 이때부터 범용 금형을 일본을 비롯한 동남아 각국에 수출하기 시작했고, '1991년 이후 CNC 공작기계와 CAD/CAM 시스템을 도입하기 시작하였다. 금형(金型 · Die & Mould)은 일반적으로 광의와 협의의 의미로 구분하여 정의한다. 광의의 금형은 재료의 소성(塑性 · Plasticity), 전연성(展延性 · Malleability, Ductility), 유동성(流動性 · Fluidity) 등의 성질을 이용하여 재료를 가공성형, 제품을 생산하는 도구로 '틀' 또는 '형(型)'의 통칭이라 할 수 있으며 학술적 의미로도 사용되고 있다. 이에 반해 협의의 금형은 금속재료를 사용하여 만들어진 틀[型]을 말한다. 한편, 기술적 의미에서 금형이란 동일규격의 제품을 대량으로 생산하기 위하여 만들어진 모체가 되는 틀을 말한다. 이러한 금형공업의 장점은 생산제품, 부품의 치수 정밀도가 높고, 제품의 규격이 동일하여 호환성이 있고 조립 생산이 쉬우며, 신제품의 개발 또는 모델의 변경이 쉽다. 또한 제품의 생산시간이 단축되어 부가가치가 높은 산업이다. 그러나 이러한 금형의 불량은 사출금형의 경우 형 내의 고온으로 인해 제품 성형 후 자연 냉각으로 불균일한 수축에 기인하여 발생한다. 성형품의 수축이 두께방향, 유동방향, 유동거리 및 보압의 크기에 대해서 완전히 동일하면, 사출 제품에서는 변형이 발생하지 않는다. 그러나 재료의 각 부위별 온도의 차이로 인해 형 내의 온도가 불균일하여 제품의 수축률이 달라져 제품을 뒤틀어지게 하는 힘이 생기게 된다. 프레스 금형의 한 종류인 LCD 판넬 성형과 핸드폰 프레임 성형과 같은 경우 제

품의 강도 보강을 위해 엠보싱 가공, 비드면 가공 등의 공정을 함으로써 뒤틀림의 보정을 하지만, 제품내부의 불균일한 하중이 발생할 경우 이러한 공정작업으로인해 제품의 뒤틀림이 발생하게 된다. 본 연구를 위해 개발한 장비인 Dual-beam 전단간섭계는 레이저를 이용하여 대상물에 조사한 데이터를 처리하는 화상처리 전단 간섭법이며, 레이저의 특징인 단색성(Monochromaticity), 가간섭성(Coherency), 지향성(Directionality) 등을 이용하였다. 이러한 레이저 산업의 발전은 곧 국가경쟁력에 크게 기여함이 선진국들의 사례를 통하여 잘 알려져 있으며, 본 논문에서 다루고자 하는 비파괴 계측분야에서도 활용가치를 더해가고 있다. 본 논문에서 물체에 대한 변형은 가열과 압전소자 및 변위제어를 이용한 국부적 변위를 가하였으며, 본 연구에서 이용한 Dual-beam 전단간섭계 기법을 금형 산업에 적용시켰다.[1~3] 본 논문의 연구에 이용된 비파괴 레이저 전단간섭 시스템은 최근 레이저 산업의 계측분야의 한 부분에 해당되는 것으로써, 이를 프레스 및 사출 금형에 적용하였으며, 계측기의 국산화, 새로운 간섭시스템 개발, 화상처리 알고리즘 개발 등의 관련기술의 진보로 더욱 정밀하고 정확한 측정이 가능할 것으로 기대된다.

제 2 절 금형 산업의 현황과 연구의 필요성

금형산업은 해마다 수요 및 공급이 늘어나고 있으며 산업 전반에 걸쳐 그 분야가 매우 다양하고 이에 따른 기술 분야 또한 급속하게 발전하고 있다. 이러한 발전은 비단 양 뿐만이 아닌 질적인 향상을 수반하여야한다. 금형 산업은 그 특성상 첫 번째 성형의 시간이 많이 소요되며, 비용이 계속하여 발생하는 개발의 시작점이 된다. 비용이 계속 발생되는 이유는 요구 부품을 성공적으로 생산하기 위해 필요한 제품, 금형, 재료 및 성형조건 등에서 수정작업이 따르기 때문이다. 일단 수정이 완료되고 난 후, 제품은 장기간에 걸쳐 일정하게 생산되어져야 하며, 이때 생산 수량은 수십만 개에서 수억 개까지 대량 생산이 가능하다. 제품의 생산 공정 중에서도 제품설계, 재료, 금형설계 및 성형공정 간의 복잡한 상호작용 때문에 금형, 성형조건 및 재료에 대해 계속적인 개선작업이 가능하다.

사출성형 제품의 경우 사출성형 CAE를 통한 시뮬레이션을 사용함으로서 최적설계를 하여왔다. CEA를 통하여 금형이 제작 전에 금형충전, 보압, 냉각, 제품 수축, 휨 및 구조 특징을 평가 할 수 있지만, 이러한 시뮬레이션은 현재 완전한 툴이 아니므로 CAE 단독으로는 제품의 완벽한 최적 설계는 불가능하다.[(4)] 따라서 본 논문은 전단간섭계(Shearography)기법을 이용하여 사전에 열변형 및 하중에 대한 제품의 변형률, 변위 등을 계측하여 취약 부 및 뒤틀림을 측정하고 이를 보정함으로써 금형 제품의 불량을 감소를 기대한다. 이러한 검사기법은 비파괴 계측분야의 한 부분으로써 외국에서는 산업현장에 많이 활용되고 있으며, 국내에서도 그 적용범위가 늘어나고 있다. 그러므로 이를 금형산업에 적용시켜 보다 연구 발전시키고, 이를 산업에 적용하여 사전에 제품의 불량의 원인을 찾아내 이를 해결함으로써 금형산업의 발전을 모색하여야한다.

제 2장 이론

제 1절 레이저의 특징

LASER는 “복사의 유도방출에 의한 광증폭(Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation)”의 머리글자를 따서 만들어진 말로 Laser는 “신기한 빛”을 만들어 내는 양자역학적 장치로서, 원자가 신비한 방식으로 전자기복사와 상호작용하는 것을 이용한다. 이는 1950년대 초반에 메이저(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation : Maser)가 개발된 이후 이 원리를 가시광선 영역으로 확장시키고자 1958년에 Townes, Schawlow, 에 의해 물리적 조건들이 예언적으로 제시된 이후 1960년 7월에 메이먼(Theodore H. Maiman)에 의해 세계 최초의 레이저인 루비 레이저가 발진되었다. 이후에 도약적인 발전을 통해 현재는 떨어진 각막을 스폿 용접하고, 핵융합 중성자를 발생하고, 씨의 성장을 자극하고, 다이아몬드에 구멍을 뚫고, 작은 물체를 공중에 띄우기까지 한다.[5]

레이저의 특징은 크게 간섭성(공간 가간섭성, 시간 가간섭성), 단색성, 지향성, 고휘도성 4가지로 말할 수 있다. 첫 번째 레이저 광은 음파와 같이 시간적, 공간적으로 위상을 유지한다. 전등 또는 형광등의 보통 광원은 공간적, 시간적으로 일정하지 못함은 물론 광파의 진폭, 주파수가 서로 다른 불규칙한 파의 집합으로 간섭현상이 일어나지 않는다. 파동의 간섭성은 임의의 파가 정확한 사인 곡선과 같은 형태로 전파됨을 말하고, 부분적 파의 간섭현상은 제한된 시간과 공간 내에서 관측되어진 파형이 사인파인 경우를 말한다. 특히 시간적 관점에서 보면, 부분적인 간섭 현상은 시간적 간섭성이라 하며 시간적 간섭은 하나의 연속광선을 간섭계를 사용하여 두 개의 서로 다른 광경로를 가진 두 개의 광선으로 광 경로의 차가 시간지연을 나타나게 될 때 스크린에 간섭무늬를 나타낸다. 간섭무늬의 명암 밝기는 시간 지연에 의하여 생겨진 것이기 때문이다. 두 번째 레이저 빛은 일반적으로 매우 좁은 주파수

폭을 갖는 준 단색이다. 단일 주파수, 즉 단일 색으로 구성된 빛을 말한다. 세 번째 지향성이란 레이저 파면은 평면 또는 약간의 곡률을 가진 구면을 하고 있어서, 다른 방향으로 나아가는 파동은 섞여 있지 않다. 그러므로 좁은 각도의 범위에 일정한 에너지가 집중하고 있는 것이다. 따라서 레이저 광은 가늘고 긴 광으로 보통광원과 다르다는 것을 알 수 있다. 네 번째 고휘도성이란 레이저 광은 평행도가 우수하고 퍼짐성이 아주적은 광이기 때문에 렌즈로 집광하면 파장의 수 배 정도로 집광이 가능하다. 레이저 광의 휘도성이 높다는 것은 빛의 에너지가 고밀도로 됨을 의미한다.

이러한 레이저는 여러 산업분야에서 이용되고 있다. 주위에서 쉽게 레이저가 사용되고 있는 것을 접할 수 있는데 레이저포인터, 비디오, CD 디스크를 읽고, 금속재료를 가공하고 용접하고, 물건의 바코드를 읽어내며, 레이저 프린터, 레이저 마킹에서 이용되며, 최근에는 의료장비로 많은 각광을 받고 있다. 신체의 작은 부분을 절단하거나 안과 수술에서 망막과 같은 예민한 부분을 섬세하게 잘라야 할 때 수술용 절단기구등 많은 분야에서 사용된다. 레이저의 발전은 여러 분야에 정밀도와 시간의 절약을 가져왔다. 본 논문에서는 그러한 레이저의 특징을 이용하여 금형 산업에 적용하였다.

제 2절 전자처리 스페클 간섭법

1. Speckle의 형성과 크기

스페클(speckle)이란 단색성이며 간섭성이 우수한 레이저광이 광학적으로 거친 표면의 물체를 조사하게 되면 물체 표면에서 난반사되어 간섭을 일으키거나 굴절률이 균일하지 않은 매질을 통과 할 때 고운 입자 형태의 밝고 어두운 점이 무질서한 분포를 나타내어 반점 무늬로 나타나는 것을 말한다. 레이저 파장 단위로 볼 때 거울과 같은 표면이 매끄러운 물체를 제외하고는 대부분 물체의 표면은 거칠기 때문에 물체에서 난반사가 일어난다. 레이저가 표면에서 난반사되면서 광들이 겹쳐서 보강간섭과 소멸간섭으로 인하여 나타

나는 무늬를 스페클 패턴(speckle pattern)이라 한다. 이러한 스페클 패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체 표면 변위에 대해 함께 움직이거나 위상변화를 일으켜 물체 표면 변위를 담고 있다. 모든 파장을 가지는 태양이나 백열전구와 같이 백색광을 방출하는 광원으로는 스페클 현상이 나타나지 않고 레이저와 같이 높은 가간섭성을 가질 때 Photo.1과 같이 희고 검은 알갱이 모양의 스페클이 관찰되어진다.[6]

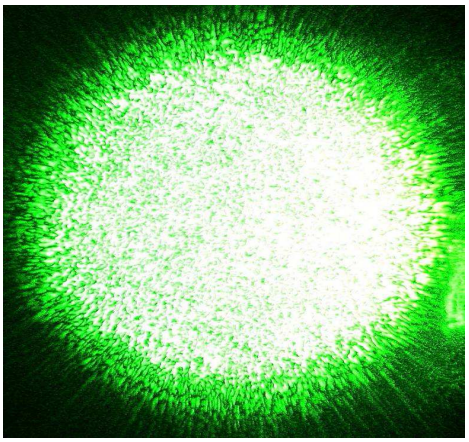
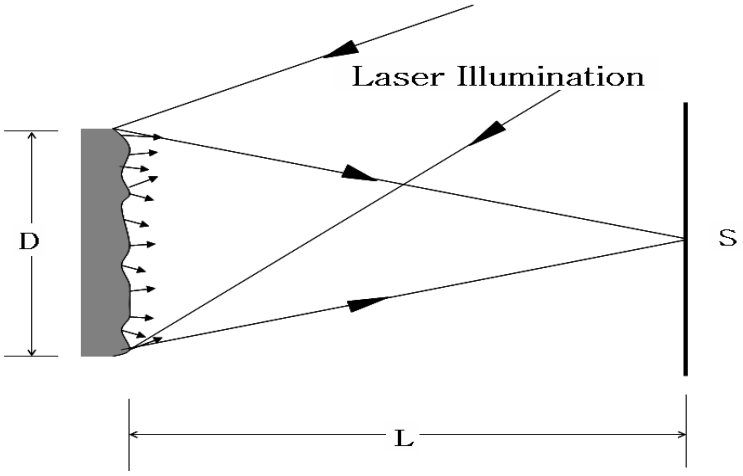


Photo.1 Laser speckle on a digital camera image

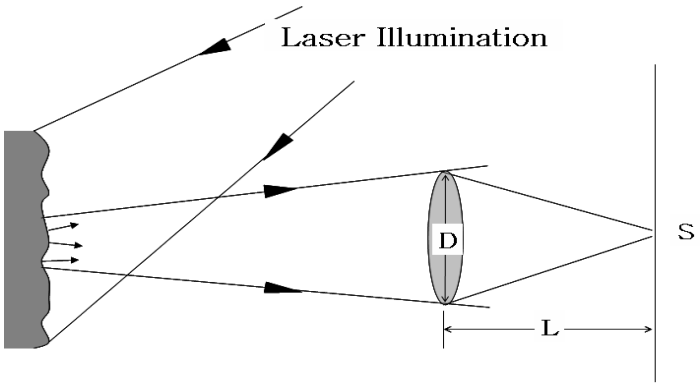
이러한 현상은 표면 각 점에서 산란된 파면과 기타 모든 점에서 발생하는 파면들이 중첩하여 간섭한 결과이며 이들 스페클은 산란파들이 겹치는 공간 어느 곳에서나 위치하게 된다. 상면 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 관측면의 위치에 따라 바뀌게 되는 객관적 스페클과 조사면의 상을 형성할 때 광학계에 의존하여 형성되는 주관적 스페클로 나누어진다. 레이저 광이 물체에 조사된 면적 위의 모든 점은 거리L만큼 떨어진 위치에 있는 관측 면에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로, 확률분포이론에 기초하여 제안된 식 (2.1)로 Objective speckle의 크기를 정의하고 있다.

$$S_o = 1.22\frac{\lambda L}{D} \tag{2.1}$$

S_o : objective speckle의 크기 λ : 레이저의 파장, L : 물체와 결상면 사이의 거리, D : 물체에 조사된 면적



(a) Objective speckle formation



(b) Subjective speckle Formation

Fig. 2.1 Formation of objective speckle and subjective speckle

Fig 2.1는 (a)객관적 스페클(Objective Speckle)과 (b)주관적 스페클(Subjective Speckle)을 나타내고 있다. 즉, 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 유무에 따

라서 구별되며, 그 크기 또한 렌즈의 배율에 따라 달라진다.

주관적 스페클은 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 객관적 스페클과는 다르게 정의하고 있다. 스페클 상관 간섭법에서는 주관적 스페클 패턴을 대부분 사용하고 있으며 주관적 스페클의 크기는 식 (2.2)와 같이 정의된다.

$$S_s = 1.22(1+M)\lambda F \tag{2.2}$$

S_s : 주관적 스페클 크기 M : 렌즈 확대배율, λ : 조사된 레이저의 파장, F : 렌즈의 F/Number.

또한 주관적 스페클의 물체 표면에서 실제 크기는 식 (2.3)으로 정의된다.

$$S_s = 1.22(1+M)\frac{\lambda F}{M} \tag{2.3}$$

스페클의 크기는 사용하는 광원의 파장과 F/Number에 관련된다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달한다.[7~10]

2. 위상이동기법 (Phase Shifting Method)

압전소자(PZT)를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 위상추출 알고리즘은 4단계 위상이동기법(4-step phase shifting method)으로 3개의 미지수를 구하기 위해 $\pi/2$씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식 (2-4)과 같이 얻게 된다.

$$I_1 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos\phi \tag{2.4}$$

$$I_2 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\phi + \pi/2)$$

$$I_3 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\phi + \pi)$$

$$I_4 = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\phi + 3\pi/2)$$

4개의 방정식을 식 (2-5)와 같이 조합하여 CCD 수광소자의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(Phase map)를 형성하게 된다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right) \tag{2.5}$$

ESPI에서 변형해석을 위한 실험에서는 변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상(ϕ_{before})과 변형후의 위상(ϕ_{after})을 각각 구하고 그 차를 구함으로서 실제 물체변형을 식 (2.6)과 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_{before} - \phi_{after} \tag{2.6}$$

그러나, 이 방법은 4개의 방정식을 얻기 위한 위상변조가 이루어지는 시간 동안 안정된 상태를 유지하여야 하며, 위상이동 중에 발생하는 물체의 변형 또는 외부잡음은 오차의 요인이 된다.

제 3절 광학 간섭계

1. 전단간섭계의 해석

Fig. 2.2는 물체의 변형을 벡터성분으로 표현한 것이다[11].

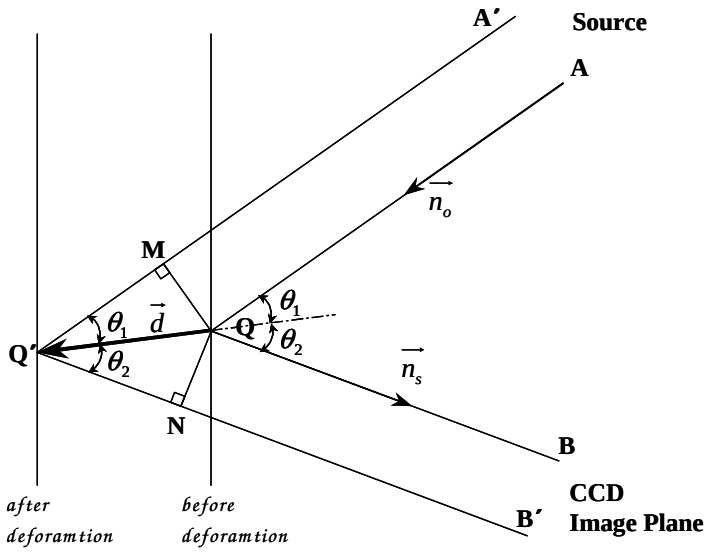


Fig. 2.2 The change in optical path with respect to the displacement $\vec{d}$

외력에 의하여 물체 위의 임의의 점 Q가 점 Q'으로 변하였다면, 두점간에는 위상차가 존재한다. 위상차는 광(光) 경로차에 의해 발행되는데, 이는 변위 $\vec{d}$로 인한다.

$\overline{AQB}$와 $\overline{A'Q'B'}$의 경로차를 Δl이라 하면

$$\Delta l = \overline{A'Q'B'} - \overline{AQB} \tag{2.7}$$
$$= [\overline{A'M} + \overline{MQ'} + \overline{Q'N} + \overline{NB'}] - [\overline{AQ} + \overline{QB}]$$

위 식에서 $\overline{A'M} = \overline{AQ}$, $\overline{QB} = \overline{NB'}$이므로 식 (2.7)은 다음과 같이 된다.

$$\Delta l = \overline{MQ'} + \overline{Q'N} \tag{2.8}$$

식 (2.8)에서 $\overline{MQ'}$, $\overline{Q'N}$을 계산하면

$$\overline{MQ'} = d\cos\theta_1 = \overrightarrow{n_o} \cdot \vec{d} \tag{2.9}$$

$$\overline{Q'N} = d\cos\theta_2 = -\overrightarrow{n_s} \cdot \vec{d} \tag{2.10}$$

식 (2.10)에서 음의 기호가 쓰인 것은 법선벡터 $\overrightarrow{n_o}$에 대해서 법선벡터 $\overrightarrow{n_s}$가 음의 값을 갖기 때문이다. 식 (2.9)과 식 (2.10)에 의해 식 (2.8)를 계산하면

$$\Delta l = (\overrightarrow{n_o} - \overrightarrow{n_s}) \cdot \vec{d} \tag{2.11}$$

이상에서 변위 $\vec{d}$에 의해 발생되는 점 Q와 점 Q'의 위상차 $\Delta\phi$는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}(\overrightarrow{n_o} - \overrightarrow{n_s}) \cdot \vec{d} \tag{2.12}$$

앞서 Shearography는 면외변위를 계측한다고 했다. Fig. 2.3은 면외변위 계측의 구성도이다.

외부 하중에 의해 물체 위의 임의의 점 Q가 점 Q'으로 변하였다면, 이때 두 점간의 변위 $\vec{d}$에 의한 광 경로 차에 의해 위상차가 발생된다. Fig. 2.3에서 변위 $\vec{d}$를 분해하면 식 (2.13)과 같이 나타낸다.

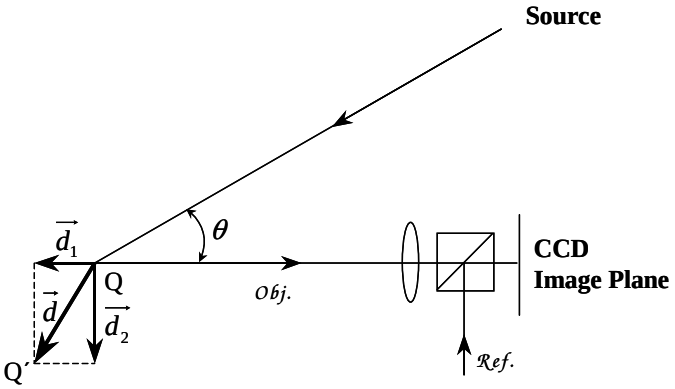


Fig. 2.3 Vector diagram to displacement of an object

$$\vec{d} = \vec{d_1} + \vec{d_2} \tag{2.13}$$

Fig. 2.3을 변위 $\vec{d_1}$만으로 나타내면 다음과 같다.

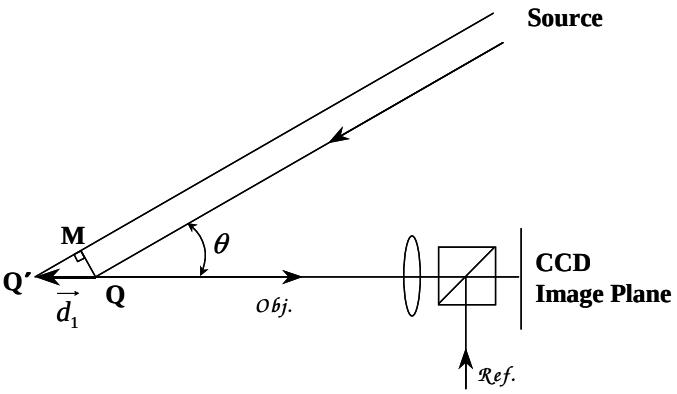


Fig. 2.4 Vector diagram to displacement in x-axis($\vec{d_1}$)

변위 $\vec{d_1}$에 의한 광 경로차를 Δl_1이라 하면

$$\Delta l_1 = d_1 + \overline{MQ'} = d_1 + d_1\cos\theta = d_1(1+\cos\theta) \tag{2.14}$$

Fig. 2.3을 변위 $\overrightarrow{d_2}$만으로 나타내면 Fig. 2.5와 같다.

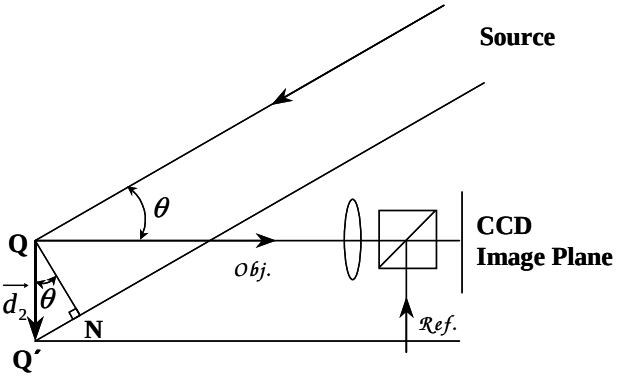


Fig. 2.5 Vector diagram to displacement in y-axis($\overrightarrow{d_2}$)

변위 $\overrightarrow{d_2}$에 의한 광 경로차를 Δl_2라 하면

$$\Delta l_2 = \overline{Q'N} = d_2\sin\theta \tag{2.15}$$

따라서, 변위 $\vec{d}$에 의한 총 광 경로차 Δl은 다음과 같다.

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = d_1(1+\cos\theta) + d_2\sin\theta \tag{2.16}$$

변위 $\vec{d}$에 대한 위상차를 $\Delta\phi$라 하면

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda}\left[d_1(1+\cos\theta) + d_2\sin\theta\right] \tag{2.17}$$

여기서, 면외변위 측정 간섭계에서는 $\sin\theta \leqq \frac{1}{50}(1+\cos\theta)$이므로 식 (2.17)의 두 번째 항인 sin항을 무시하면, z방향의 변위 $\overrightarrow{d_1}$은 식 (2.18)와 같고, 위상차는 식 (2.19)과 같이 쓸 수 있다.

$$d_1 = \frac{\Delta l}{(1+\cos\theta)} = \frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi(1+\cos\theta)} \tag{2.18}$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d_1(1+\cos\theta) \tag{2.19}$$

물체가 외부 하중을 받으면 Fig. 2.6과 같이 결함 부위에서 변형이 크게 발생된다.

물체 위의 임의의 점 P와 변형 후의 점 P', 전단에 의해 점 P'가 이동되는 점 Q와 변형 후의 점 Q'에서의 각각의 위상차는 식 (2.19)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_{after} = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\overrightarrow{n_o} - \overrightarrow{n_s}\right) \cdot \vec{d} \tag{2.20}$$

$$\Delta\phi_{before} = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\overrightarrow{n_o} - \overrightarrow{n_s}\right) \cdot \left(\overrightarrow{d+\Delta d}\right) \tag{2.21}$$

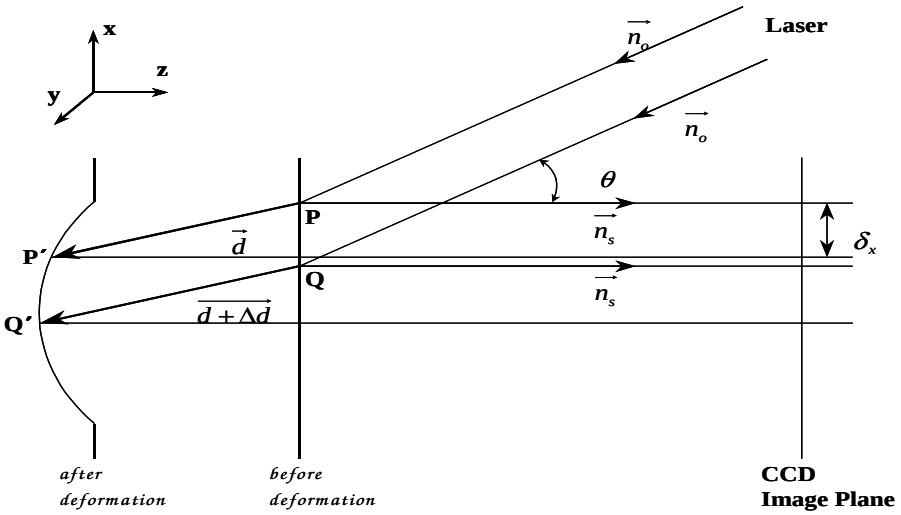


Fig. 2.6 Vector diagram for phase difference of an object

전단 간섭계에서는 두 점 P와 Q사이에서의 변형의 차이를 계측하기 때문에 전단 간섭계에서 간섭무늬가 나타내는 위상차 $\Delta\phi$는 결국 식 (2.22)에서 식 (2.20)를 뺀 것과 같다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_Q - \Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\vec{n_o} - \vec{n_s}\right) \cdot \left[\left(\overrightarrow{d+\Delta d}\right) - \vec{d}\right] \tag{2.22}$$

점 P와 점 Q에서 변형 전후의 위상차를 Fig. 2.6에서 구해보면 식 (2.23)과 식 (2.24)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}\left[d_1(1+\cos\theta) + d_2\sin\theta\right] \tag{2.23}$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}\left[(d_1+\Delta d_1)(1+\cos\theta) + (d_2+\Delta d_2)\sin\theta\right] \tag{2.24}$$

식 (2.22)에서 $\vec{n_o}$와 $\vec{n_s}$는 서로 법선상에 놓여있고, Δd는 테일러 정리를 이용하여 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta d = 0 + \frac{\partial d}{\partial x}\frac{\delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2}\frac{\delta_x^{\,2}}{2!} + \cdots + \frac{\partial^{(n-1)} d}{\partial x^{(n-1)}}\frac{\delta_x^{\,(n-1)}}{(n-1)!} \qquad (2.25)$$

δx는 극히 작은 값이므로, 위 식 (2.25)에서 2차 이상의 고차항은 무시할 수 있다. 그리고 각 방향 $i = 1, 2, 3$에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta d_i = \frac{\partial d_i}{\partial x_i} \cdot \delta x \qquad (2.26)$$

그러므로 식 (2.23), 식 (2.24)의 $\Delta\phi_P$, $\Delta\phi_Q$는 다음과 같이 된다.

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}\left[d_1(1+\cos\theta) + d_2\sin\theta\right] \qquad (2.27)$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\left(d_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x}\delta x\right)(1+\cos\theta) + \left(d_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x}\delta x\right)\sin\theta\right] \qquad (2.28)$$

θ가 작으면 $\sin\theta \cong 0$이므로 점 P와 점 Q에서의 변형 전후의 위상차 $\Delta\phi$는 다음과 같이 된다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_Q - \Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}(1+\cos\theta)\frac{\partial d_1}{\partial x}\delta x \qquad (2.29)$$

$$\Delta\phi \cong \frac{4\pi}{\lambda}\frac{\partial d_1}{\partial x}\delta x \qquad (2.30)$$

위 식에 의해 실험을 통하여 얻은 이미지는 변위량에 대한 미분값 $\frac{\partial d_1}{\partial x}$을 나타냄을 알 수 있으며, 전단량 δ_x에 의해 광학계의 민감도를 높일 수 있다.

2. 변형계측에 이용되는 전단간섭법의 개념

전단간섭법을 적용하는 식(2.30)과 도함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내외 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물의 결함 검출의 민감도를 높이기 위해 전단량을 측정조건에 맞게 임의로 부여하며, 통상 대상물에 존재하는 결함의 1/2정도를 전단량으로 한다. 이 또한 결함의 크기를 알고 있는 경우에 해당되며, 전단량이 50%라고 하는 것은 전단량이 '매우 작다'는 조건을 적용할 수 없게 된다.

본 논문에서 제안하는 사항은 앞에서 언급한 전단간섭법의 이론적 제한사항을 수치미분을 이용하여 표현하고, 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다[12].

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\{d(x) - d(x_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{\partial d}{\partial x}\right)\Delta x \qquad (2.31)$$

ESPI나 전단간섭법 모두 화상처리이므로 식(2.25)와 식(2.30)의 각각의 기호를 변형 f, 대응화소 x_i, 전단량화소 h로 바꾸어 쓰면, 식 (2.32)와 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f′으로 정리하면 식 (2.33)와 같다.

$$f'(x_i)\,h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \qquad (2.32)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \qquad (2.33)$$

식 (2.33)는 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다. 식(2.32)을 식(2.31)에 대입하면 식(2.34)와 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f'h \tag{2.34}$$

Fig. 2.8 에서 표현된 전단간섭계의 전단거울(Mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2.7 (a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 2.7 (b)는 Fig. 2.7 (a)에 표현된 두 값을 감산한 결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2.7 (b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2.7 (c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.

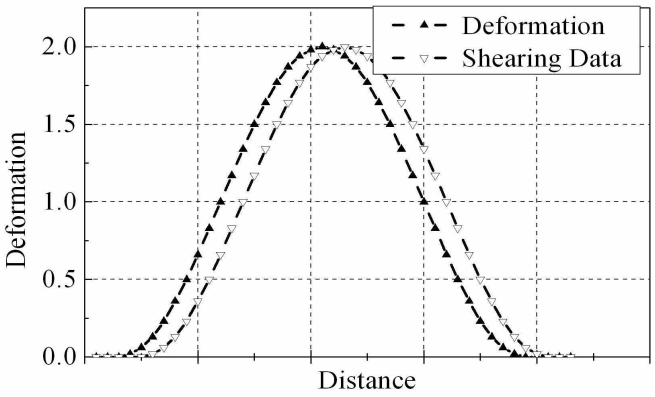


Fig. 2.7 (a) Deformation and shearing data

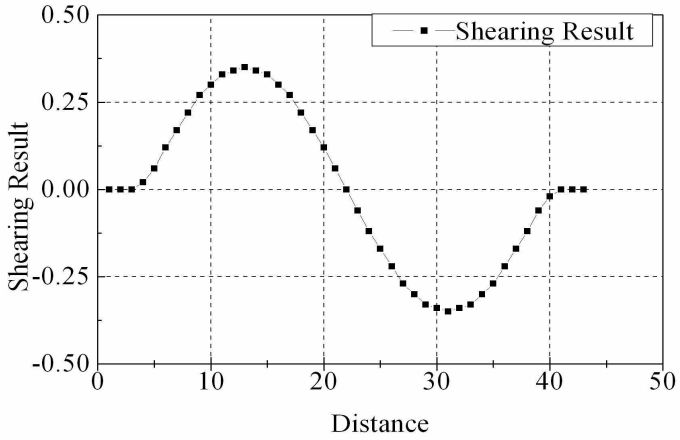


Fig. 2.7 (b) Shearing result

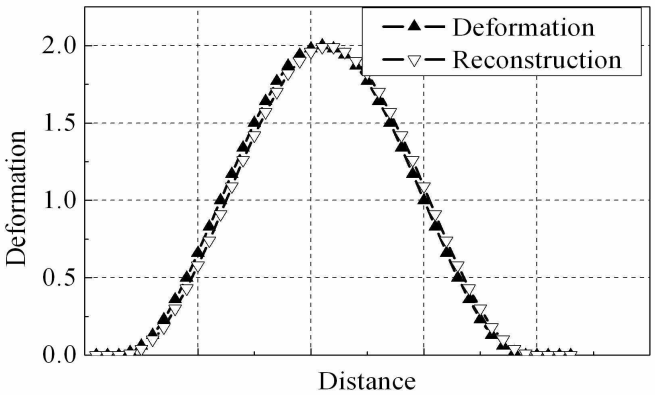


Fig. 2.7 (c) Deformation and reconstruction

Fig. 2.7 Algorithm of deformation reconstruction

3. Single-beam Interferometer

Fig. 2.8에서 보는 바와 같이 전단간섭계(Shearography)에서는 레이저에서 나온 확산광이 물체면에 조사된 후 반사되어 나와서 광분할기(Beam Splitter : B.S)에 의해 두 개의 빔으로 나누어진 후 하나는 위에 있는 Mirror 1에 반사되어 상면에 맺히고, 나머지 하나는 우측에 있는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 기울기(전단량)를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면은 기울어지지 않은 거울에서 반사된 파면

에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 상면에 맺히게 된다. 이렇게 변형 전 물체의 정보를 가진 스페클 패턴과 물체에 변형을 준 후 위에서와 같은 방식으로 저장한 스페클 패턴을 전자적으로 빼주게 되면 간섭줄무늬를 형성하게 된다. 이 간섭줄무늬는 물체표면 변위의 미분값을 나타내고 있으며, 전단거울의 전단방향, 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 선명도 및 형태가 결정이 된다.

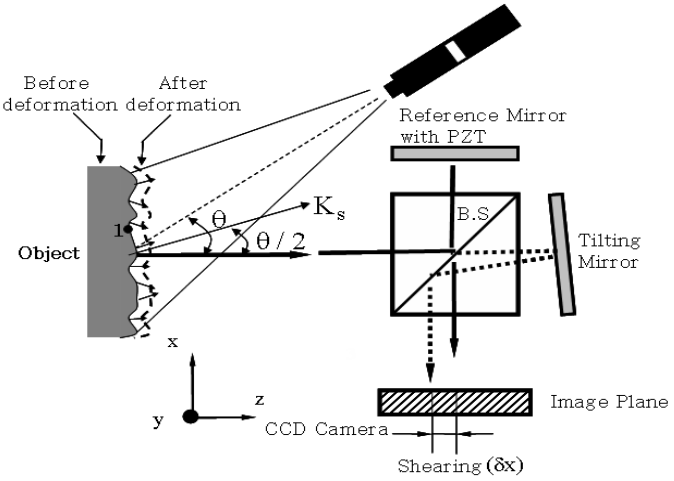


Fig. 2.8 Single-beam interferometer

Single-beam 전단간섭계의 측정 원리는 실험하고자 하는 물체에 확산된 빔이 조사되고 물체 표면으로부터 반사된 빔은 투와이만-그린 간섭계(Twyman-Green Interferometer) 앞에 설치된 CCD 카메라의 상면(Image Plane)에 결상 되어진다. 이때, 물체 위의 점 1은 임의의 거리 δ_x의 거리를 갖고 CCD 카메라의 상면에서 관찰되어진다.

만약, 압전소자(PZT)를 거울(PZT Mirror)과 전단 거울의 반사면이 투와이만-그린 간섭계에서 B.S의 표면과 평행하게 설치되어 있다면, 상면(Image Plane)에서는 한 점으로 맺히게 된다. 그러나 물체위의 각각의 점은 전단 거울에 의해 아주 작은 각으로 전단되어 상면에 두 개의 점으로 맺히게 된다. 전단

거울이 x축 방향으로 매우 작은 각으로 움직이게 된다면, 물체 위의 점 1은 상면에서 x축 방향으로 점 1'만큼 이동한 거리를 갖게 된다. 또한, 전단 거울을 y축 방향으로 전단하였다면 점 1'은 y축 방향으로 놓이게 된다. 첫 번째의 경우를 x-전단 방향, 두 번째를 y-전단 방향이라 부르고, 그 정도를 δ_x, δ_y로 나타내며 이것을 x, y방향의 전단량이라 한다. 각각의 전단 방향에 대한 위상변화는 다음과 같이 나타내진다[13,14].

$$\Delta x = \left(\frac{\partial u}{\partial x} K_S e_x + \frac{\partial v}{\partial x} K_S e_y + \frac{\partial w}{\partial x} K_S e_z \right) \delta x$$

(x-shearing direction) (2.35)

$$\Delta y = \left(\frac{\partial u}{\partial y} K_S e_x + \frac{\partial v}{\partial y} K_S e_y + \frac{\partial w}{\partial y} K_S e_z \right) \delta y$$

(y-shearing direction) (2.36)

여기서, u, v, w는 x, y, z 방향의 변위벡터, e_x, e_y, e_z는 단위벡터이고, δ_x, δ_y는 x, y방향의 전단량, K_S는 민감도벡터이다. 민감도벡터는 레이저 소스가 조사되는 조사광과 CCD 카메라가 보는 방향사이의 각 Θ의 이등분선에 위치한다.

Single-beam 전단간섭계에서 일반적으로 물체 표면에서는 면외 변위 정보만 관찰되므로 $K_S e_x = K_S e_y = 0$, $K_S e_z = |K_S| = \frac{4\pi}{\lambda}$가 된다. 그러므로 식 (2.35)와 식 (2.36)은 다음과 같이 된다.

$$\Delta x = \frac{\partial w}{\partial x} |K_S| \ \delta x = \frac{4\pi \delta x}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x}$$

(x-shearing direction) (2.37)

$$\Delta y = \frac{\partial w}{\partial y} |K_S| \ \delta y = \frac{4\pi \delta y}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y}$$

(y-shearing direction) (2.38)

한편, 이웃하는 두 점에 조사되는 파면을 다음과 같이 나타낼 수 있다[15].

$$U(x,y) = A_1 \exp^{i\theta(x,y)} \tag{2.39}$$

$$U(x+\delta x,y) = A_2 \exp^{i\theta(x+\delta x,y)} \tag{2.40}$$

여기서, $\theta(x,y)$와 $\theta(x+\delta x,y)$는 각 점 1, 2의 위상을 나타내고 (x, y)와 $(x+\delta x, y)$은 점 1, 2의 좌표이고 A_1과 A_2는 이웃하는 두 점의 진폭을 나타낸다.

물체 표면상에서 이웃하는 두 점으로부터 나온 빛은 상면 상에서 서로 간섭하게 된다. 상면상의 한 점에서의 전체 빛의 영역 $U_T = U(x,y) + U(x+\delta x,y)$이고 그 점에서 빛의 세기 I_{before}는 다음과 같이 주어진다.

$$I_{before} = U_T U_T^* = 2I_0(1+\gamma\cos\phi) \tag{2.41}$$

여기서 U^*_T는 U_T의 공액근이다. I_0는 두 이웃하는 점의 평균 세기, $I_0 = (A_1^2 + A_2^2)$를 나타내고 $\gamma[\gamma = 2A_1A_2/(A_1^2 + A_2^2)]$는 명암대비(Contrast)이며 $\phi[\phi = \theta(x+\delta x) - \theta(x,y)]$는 두 점 사이의 임의의 위상각이다.

물체가 외력을 받으면 각 위상간의 변화가 이웃하는 두 점 사이의 변위로 나타나게 된다. 즉, 식 (2.41)은 다음과 같이 된다.

$$I_{after} = 2I_0(1+\gamma\cos\phi') = 2I_0[1+\gamma\cos(\phi+\Delta\phi)] \tag{2.42}$$

여기서 ϕ'은 외력이 작용한 후의 위상 각이고 $\Delta\phi$는 위상 각의 변화이다.

측정 시, CCD 카메라는 변형되지 않은 상태 또는 실험 물체의 초기 상태의 두 점의 세기를 기록한다. 즉 빛의 세기 I_{before}는 식 (2.41)이 된다. 이 빛의 분포는 하나의 프레임으로 저장이 되고 물체가 응력을 받으면 식 (2.42)에

서 I_{after}에 상응하는 각 점의 빛의 분포를 CCD 카메라에 의해 다시 얻게 되어 다른 프레임으로 저장되게 된다.

새로운 빛의 분포가 각 픽셀 상에서 빛의 세기 I_{before}와 I_{after}사이에서 감산처리 된다.

$$I = I_{before} - I_{after} = 4I_0\gamma\left[\sin\left(\sin\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\sin\frac{\Delta\phi}{2}\right] \tag{2.43}$$

식 (2.43)로부터 간섭줄무늬 패턴을 볼 수 있다. Shearogram이라 불리워지는 간섭줄무늬 패턴은 위상각이 $\Delta\phi = (2n+1)\pi$일 때 최대, $\Delta\phi = 2n\pi$일 때 최소 밝기가 되고, 이때 $n = \pm 0, 1, 2, \cdots\cdots$이며 줄무늬의 수를 나타낸다[16,17].

4. Dual-beam Interferometer

변형은 면내 변위의 도함수인 다음의 요소(분력)과 관계가 있다.

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{and} \quad e_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{2.44}$$

여기서, e_x, e_y는 각각 x와 y의 변형성분이다.

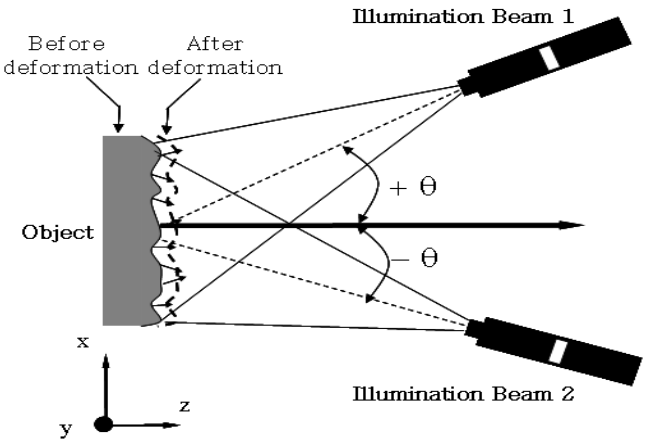


Fig. 2.9 Dual-beam interferometer geometry

Fig. 2.9는 x축 변형을 계측하기 위한 Dual-beam 전단간섭계의 좌표구성이다. 대상체에 대한 측정은 B.S에 의해 나누어진 두 개의 레이저빔을 z축에 대해서 동일한 각도로 번갈아 조사한다. 빔의 방향은 측정의 변형성분에 달려있다. 변형성분의 측정은 그림에서 보듯이 x방향과 평행하고, 두 빔의 입사는 각각 y, z평면에 대칭이다. 위상변화는 오른쪽 빔과 왼쪽 빔이 각각 조사하는 동안의 물체의 변형에 기인한다. 오른쪽 빔에 기인하는 위상변화 ΔR은 다음과 같다.

$$\Delta R = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{[1+\cos(+\theta)]\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\sin(+\theta)\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right\}\delta x \qquad (2.45)$$

여기서 λ는 레이저의 파장이고, δ_x는 게이지 길이에 상당하는 전단량이다. 왼쪽 빔에 의한 위상변화 ΔL은 다음으로 주어진다.

$$\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{[1+\cos(-\theta)]\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\sin(-\theta)\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right\}\delta x \qquad (2.46)$$

측정은 대상체에 한번에 하나의 빔만이 조사된다. 오른쪽 빔의 조사와 함께 0, $\pi/2$, π, $3\pi/2$만큼의 위상이동에 대응하는 네 개의 스페클 이미지는 연속적으로 저장된다. 마찬가지로 왼쪽 빔이 조사되는 동안 네 개의 스페클 위상이동 이미지들도 저장된다. 대상체의 변형 이후의 스페클 이미지는 오직 영(zero) 위상을 나타내어 각각의 조사에 대해 개별적으로 저장된다. 식 (2.45)와 식 (2.46)의 감산은 식 (2.47)과 같다.

$$\Delta R - \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot 2\sin\theta\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\delta x \qquad (2.47)$$

그러므로, x방향의 면내변형은 결정된다. 만일, z 축에 대해서 90도 회전해서 조사가 이루어지면, 전단 방향은 y축과 평행해지고 식 (2.47)은 다음이

된다.

$$\Delta R - \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\sin\theta\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\delta y \tag{2.48}$$

실제로, 어떤 변형 분력은 조사되는 시스템의 방향을 조절하면 측정되어질 수 있다. 면외변위의 도함수도 또한 $(\Delta R + \Delta L)$의 합을 컴퓨터계산에 의해서 또한 결정할 수 있다.

$$\Delta R + \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2(1+\cos\theta)\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta x \tag{2.49}$$

이것은 x방향으로 평행한 전단 방향이다. y방향으로 평행한 전단량이면 다음으로 주어진다.

$$\Delta R + \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2(1+\cos\theta)\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)\delta y \tag{2.51}$$

제 3장 실험 장치 개발

제 1절 Dual-beam Interferometer 개발

1. 화상처리 장치

위상이동 기법을 적용하기 위한 압전소자(PZT) 제어를 위하여 RS-232 통신을 이용하였으며, 레이저 파장의 1/8씩 정밀하게 압전소자(PZT) 구동기를 이동하였다. CCD 카메라는 일본 Panasonic사의 WV-BP314제품을 이용하였다. Photo 3.1는 압전소자(PZT) 구동 및 위상을 얻기 위해 구성한 시스템을 나타낸 것이다. 개발된 시스템을 이용하여 측정결과를 획득하고 해석하는 프로그램은 LabVIEW 7.1을 이용하였다. 이미지 획득 저장 장치는 National Instrument사의 IMAQ 1409를 이용하였다.

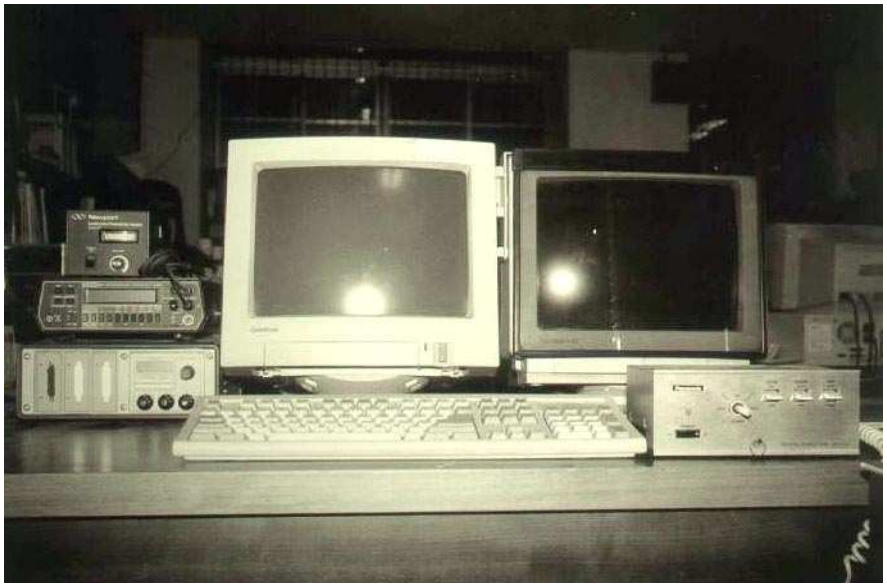


Photo 3.1 Image processing system

2. Dual-beam interferometer 시스템

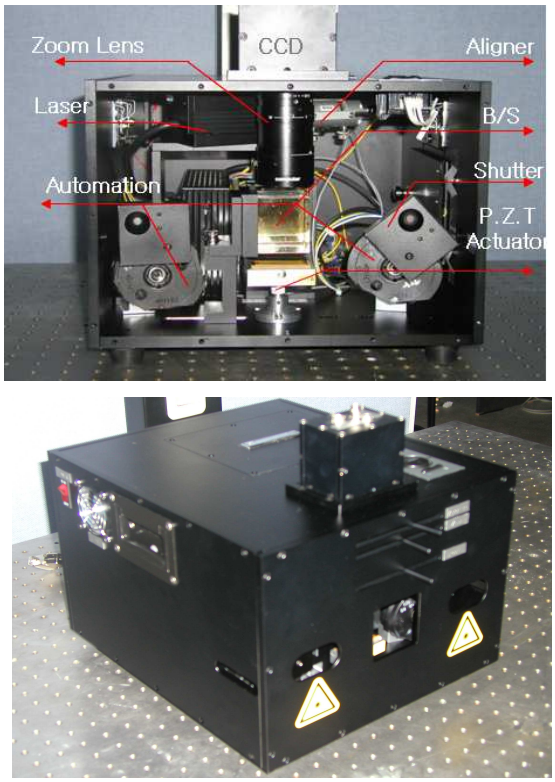


Photo 3.2 Dual-beam Interferometer system

개발된 시스템은 기존 간섭계의 평면적 구성을 탈피하여 광학 부품의 입체적 구성을 통하여 시스템 내부의 공간을 최소화 시켜 소형화된 시스템을 구현하였으며, 측정을 용이하도록 하기 위해 자동화 시스템으로 개발하였다. 셔터에 달려 있는 확산 렌즈는 케이스 상면에 자동 조절장치를 장착하여 대상체의 위치와 크기에 맞도록 하기위해 조사각의 변화를 용이하도록 제작하였고, 전단량을 부여하는 전단(Tilting)거울은 거울의 후면에 모터를 장착하여 전단량을 제어하도록 제작하였다. 또한, 휴대성을 높이기 위하여 시스템 내부에 레이저를 장착하여 별도의 외부 레이저 없이도 실험이 가능하도록 제작하였다. Photo. 3.2는 개발한 Dual-beam 전단간섭계의 사진이다. 내부에 장착되

어 있는 Nd:YAG 레이저로부터 나온 광원은 광파이버(Optical fiber)를 통해 두 개의 빔으로 나누어진다. 두 개로 나누어진 빔 중 하나는 셔터(Shutter)에 의해 차단되어지고, 나머지 하나의 빔은 셔터에 위치한 확산렌즈를 통해 시험편의 전 영역에 걸쳐 조사된다. 시험편을 통해서 반사된 빔은 B.S에 의해 다시 두 빔으로 나뉘어 압전소자(PZT)를 거쳐 위상 이동된 빔과 전단거울에 의해 경사진 빔이 CCD 카메라의 수광 소자에 맺혀 간섭무늬가 결상된다.

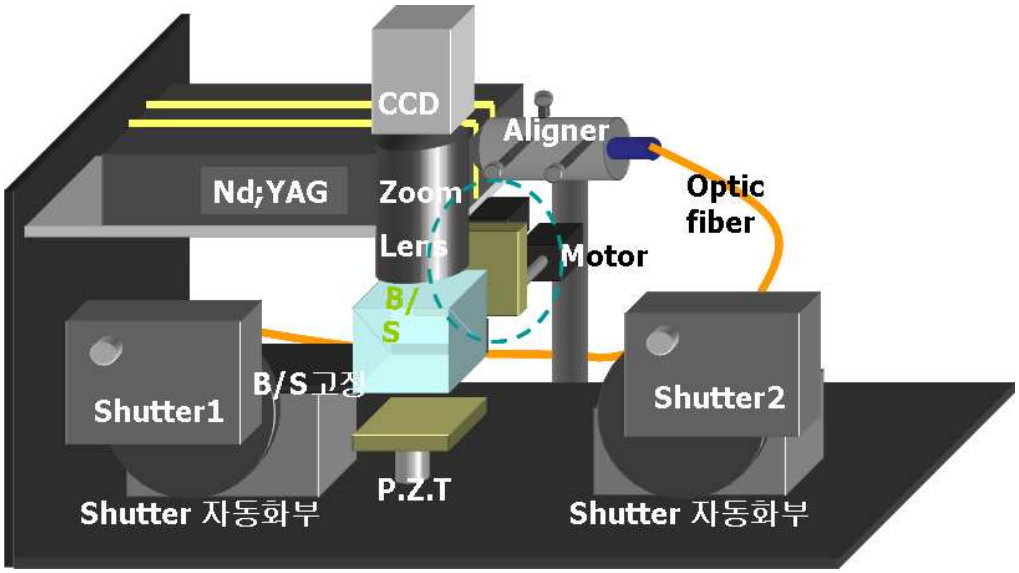


Fig. 3.1 Internal structure of Dual-beam Shearography system

다시, 셔터에 의해 차단된 빔을 통과시키고 기존의 통과했던 빔은 셔터에 의해 차단되어져서 위와 동일한 방법으로 확산렌즈를 통해 시험편의 전 영역에 걸쳐 조사되어지고 반사된 빔은 전단 간섭계로 유입되어지는 과정을 거치게 된다. 이 때, CCD 카메라로부터 받아들인 시험편의 변형 전과 변형 후의 이미지는 프레임 그래버가 내장된 컴퓨터의 화상처리 프로그램에 의해 감산처리 되어지며 모니터 상에 전단 간섭무늬를 출력하게 된다.

Fig 3.1은 Photo. 3.2의 시스템 내부의 광학 부품으로 구성된 Dual-beam 전단 간섭계의 내부 구조를 나타낸다.

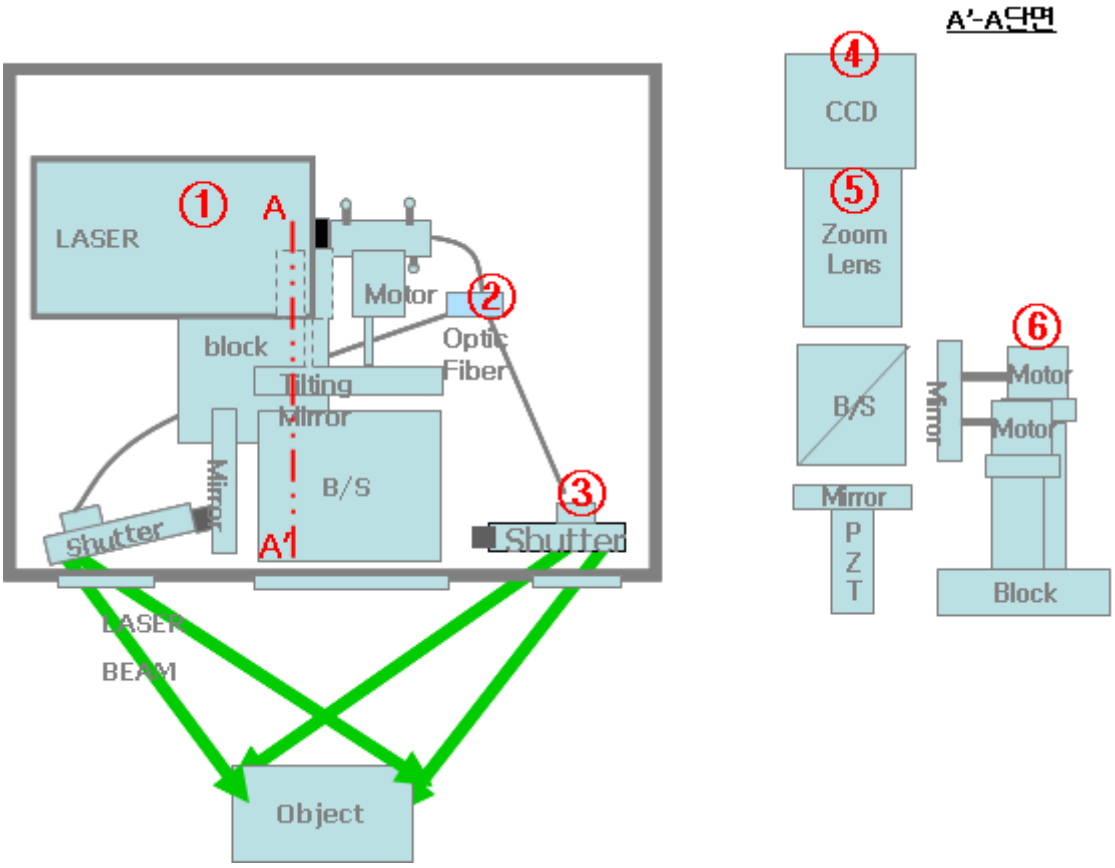


Fig. 3.2 Detail of interferometer for Dual-beam interferometer system

간섭계 내부에 장착된 레이저(Fig. 3.2①)가 광 파이버(Fig. 3.2②)를 통하여 셔터(Fig. 3.2③)의 확산 렌즈를 통하여 대상체에 조사된 후 조사된 이미지를 CCD(Fig. 3.2④)를 통하여 들어온 이미지를 화상처리 장치에 의해 감산처리 되어지며 모니터 상에 전단 간섭무늬를 출력하게 된다. 또한, 모터(Fig. 3.2⑥)가 장착된 전단(Tilting) 거울에 의해 전단량을 부여하게 된다.

제 2절 시험편 및 실험방법

1. 시험편 사양

1.1 휴대폰 프레임 시험편

본 연구에 사용된 시험편의 측정면적은 가로 90mm, 세로 47mm이다. 그리고 Dual-beam 전단간섭계의 Single 모드 열변형 실험을 하기위하여 시험편 양쪽의 5mm는 시험편을 고정하였다.

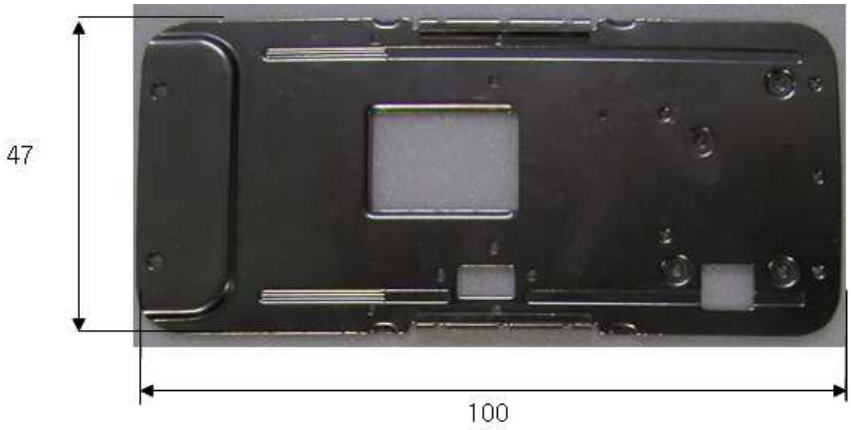
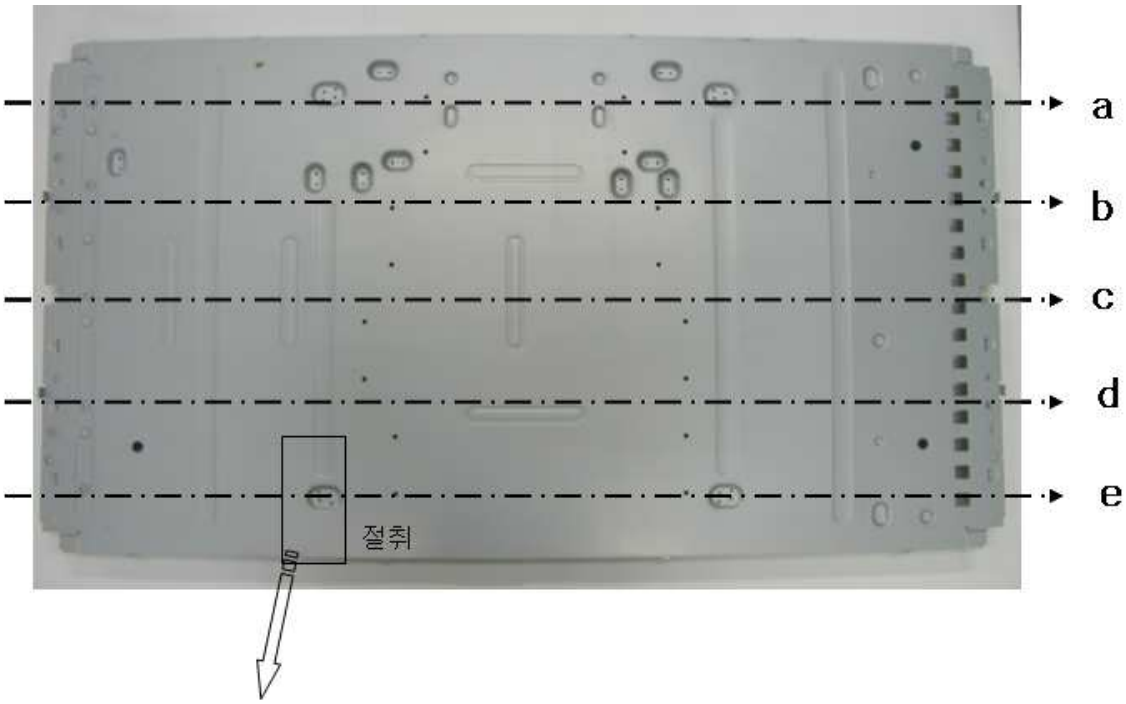


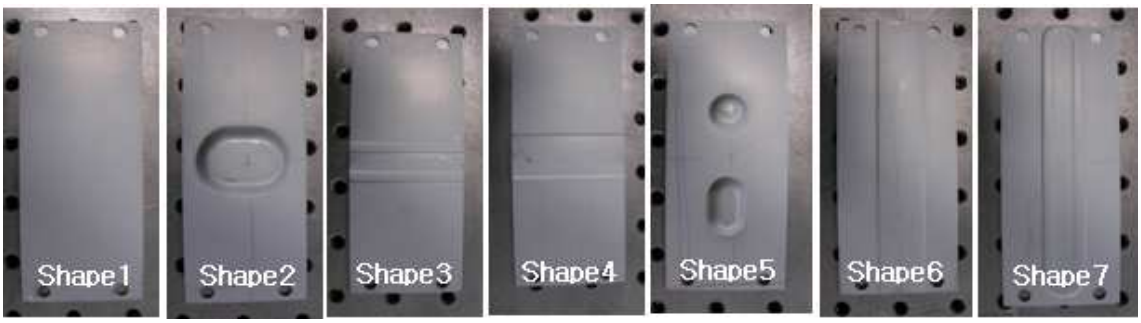
Photo. 3.3 Frame of cellular phone

1.2 LCD 판넬 시험편

Fig. 3.4(a)는 Dual-beam 전단간섭계의 Dual 모드 LCD 판넬의 전체적인 사진이며, Fig. 3.4(b)는 형상별 굽힘 실험을 하기위하여 표면의 형상 별로 절취한 시험편이다. 판넬의 사이즈는 36인치이며 가로, 세로는 800mm, 500mm이며, 절취한 시험편의 크기는 가로, 세로가 120mm, 50mm로써 재질은 SECC이다.



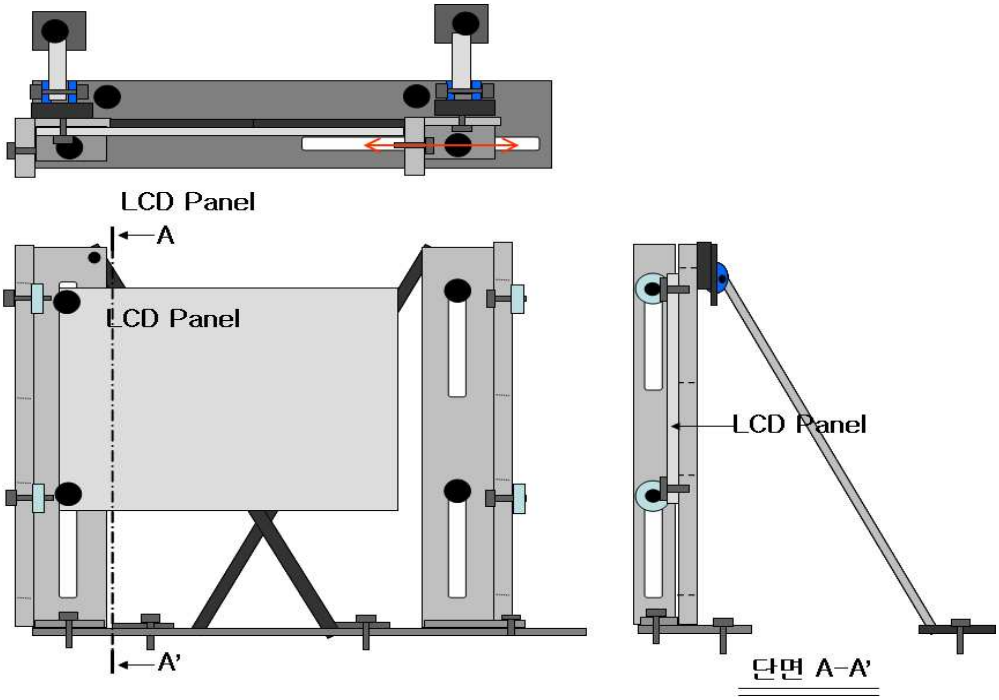
(a) 36“ size LCD panel



(b) Each part of 46" LCD panel

photo. 3.4 Photo of LCD panel

절취하지 않은 LCD판넬의 고정 장치는 Fig. 3.3과 같다.



(a) 2D design of Jig & Fixture

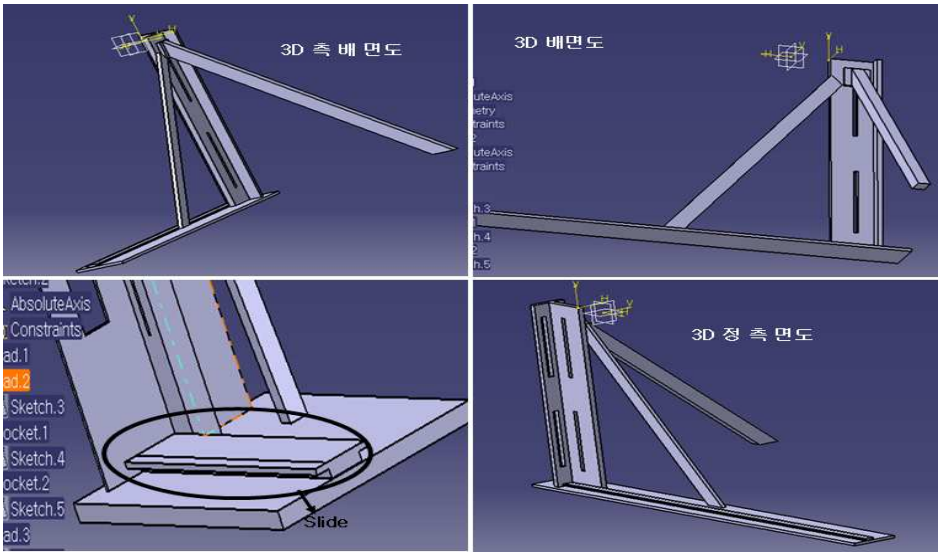


Fig. 3.3 3D model of Jig & Fixture

Fig. 3.3 Jig & Fixture for LCD panel

Fig. 3.3(a)와 같이 LCD판넬을 고정하였으며 판넬의 크기 및 위치별 실험이 가능하도록 제작하였으며, Fig. 3.3(b)는 3D CAD인 CATIA를 이용하여 고정 지그를 입체적인 그림으로 나타내었다.

1.3 사출금형 시험편

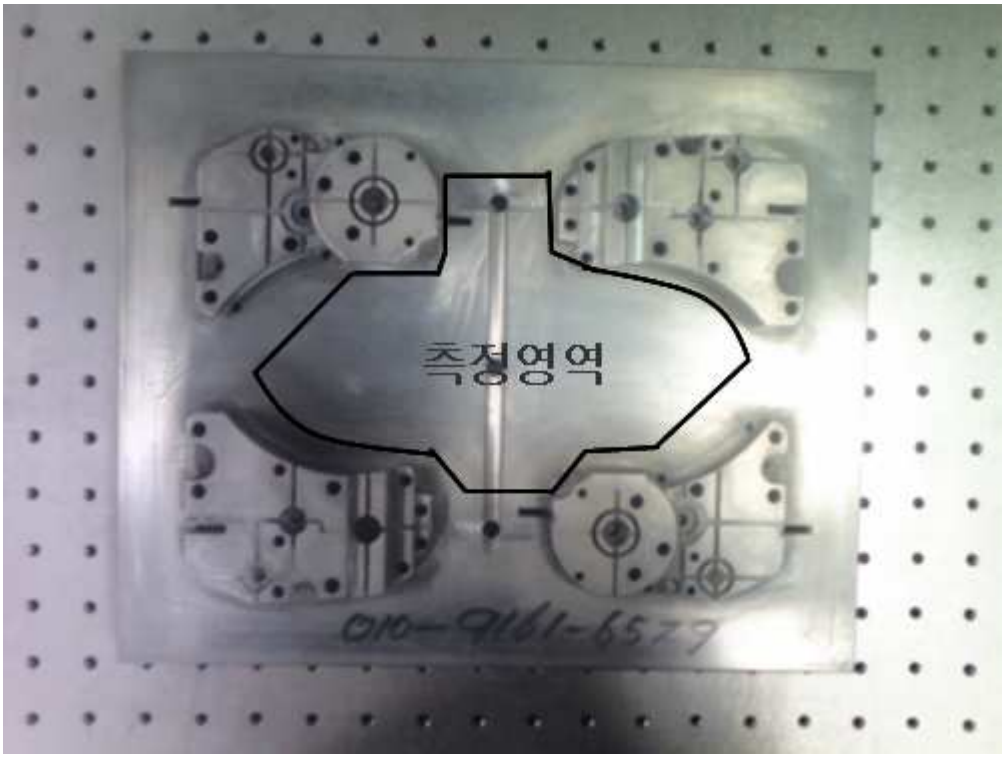


Photo. 3.5 Photo of mould base

시험편은 Dual-beam 전단간섭계의 single 모드 시험편으로써 실제 현장에서 사용한 사출금형으로 세탁기의 커버 부품에 들어가는 제품을 제작하는 금형으로써 재질은 SM 50C 이며, 시험편의 크기는 가로, 세로, 두께가 300mm, 200mm, 50mm 이다. 시험편 수지의 온도는 100°C에서 용융되어 금형 안에 용입되며 이때 금형의 표면온도가 40°C까지 상승하게 된다.

2. Dual-beam Interferometer의 Single mode 실험방법

Single-beam 전단간섭계를 이용하여 복잡한 형상을 갖고 있는 휴대폰 프레임에 가열을 하여 취약 부를 찾아내기 위해 Dual-beam전단간섭계의 Single mode 면외 변형 실험을 실시하였다. 휴대폰을 이용하여 장시간 통화를 할 경우 발열이 되어 프레임 자체적 변형을 수반하게 된다. 이 경우 반도체, LED 액정, 소형부품 등에 영향을 미치게 되어 휴대폰의 수명을 단축시키게 된다. 본 실험에서는 휴대폰의 자체 발열 시 휴대폰에 미치는 영향뿐만 아니라 취약부의 패턴을 보고자 자체 발열 온도보다 높은 45°C까지 가열하였으며, 자연 냉각을 시킴으로써 프레임의 수축 및 변형의 패턴을 측정하였다. 사출금형의 실험은 사출금형 시 수지의 온도가 자연냉각이 될 때 형상이 비대칭인 경우 수축률의 차이로 인해 비틀림이 발생을 하게 된다. 사출금형의 제품 제작 시 제품의 재료와 형상 금형의 두께 별로 차이가 있지만, 본 연구에 사용된 소형 금형의 경우 수지의 온도가 100°C이상 고온으로 금형에 유입되며, 이때, 금형의 표면 온도가 40°C까지 상승하게 된다. 따라서 본 실험에서는 이와 비슷한 조건을 충족시키기 위하여 진공 챔버를 이용하여 시험편 전체적으로 40°C까지 가열한 후 제품의 형상 부분을 가열 장치를 이용하여 국부적으로 100°C까지 가열을 시켜 자연 냉각을 시킴으로써 금형의 형상에 따른 각 부분의 변형을 측정하였다. 각 부분의 변형이 다를 경우 이는 비틀림의 발생으로 예상하였다.

3. Dual-beam Interferometer의 Dual mode 실험방법

Dual-beam 전단간섭계를 이용한 면외 변형실험은 프레스 금형인 LCD판넬의 면외 변형 및 면내 변형률의 위상지도를 획득하였다. 시험편의 표면은 재료의 뒤틀림을 방지하기 위하여 엠보싱 가공, 비드면 가공, 구멍 가공 등 복잡한 형상을 가지고 있다. LCD판넬의 면외 변형 실험은 두 가지 방법으로 실험을 실시하였으며, 실험방법은 LCD판넬의 형상별로 절취를 한 각각의 시

험편의 굽힘을 측정하여 이와 같은 복잡한 형상들이 LCD판넬에 미치는 영향을 측정하였다. 다른 실험 방법은 절취를 하지 않은 LCD판넬 자체를 압전소자(PZT)를 이용하여 후면에서 변위를 가하여 전체적인 면외 변형 형태를 측정하였다. 그 결과를 바탕으로 형상들이 미치는 영향을 분석하였다.

제 4장 실험결과

제 1절 Dual-beam Interferometer Dual mode 실험결과

1. 개발된 장비의 신뢰성 검증을 위한 평판 실험

1.1 면외 변형 실험

개발한 장치인 Dual-beam 전단간섭계를 이용하여 실험을 실시하기 앞서 개발 장비로를 이용하여 얻어진 결과가 신뢰성이 있는지 여부를 판단할 수 있는 실험이 선행되어야 한다. 장비의 신뢰성을 검증하기 위하여 Fig. 4.1과 같이 알루미늄 시험편에 대하여 Photo. 4.1와 같이 압전소자(PZT)와 압전소자(PZT) Controller를 이용하여 시험편의 뒤편에서 변위를 가하였다. 전압 변화에 따라 나타나는 면외 변위를 상용 장비인 3D ESPI Sensor의 측정결과와 비교하여 개발한 장비에 대한 신뢰성을 높이고자 하였다. 개발한 Dual-beam 전단간섭계와 비교대상인 3D ESPI Sensor는 독일 Ettemeyer사의 3D-ESPI 상용 시스템(Q-300)을 이용하였으며, 최대출력이 2W, 파장이 532nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였다.

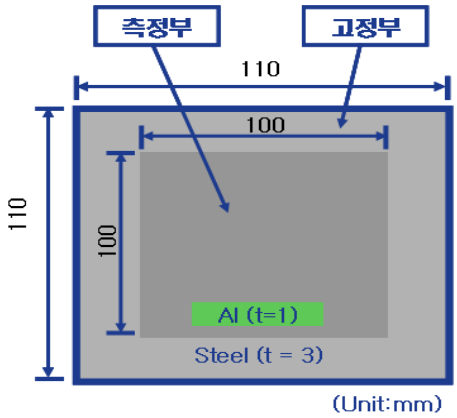


Fig. 4.1 Specimen for out-of-plane deformation experiment

시험편은 스틸판으로 4면을 고정하였으며 측정부와 고정부로 구분된다. 측정부는 백색 스프레이를 사용하여 레이저의 난반사를 용이하게 하였으며, 레이저는 Nd-YAG 레이저를 사용하여 적당한 밝기에서 실험을 실시하였다. 개발한 장치와 상용 3D ESPI Sensor는 동일한 조건하에서 동일한 변위로써 그 결과를 측정하여 Table 4.1에 정리하였다.

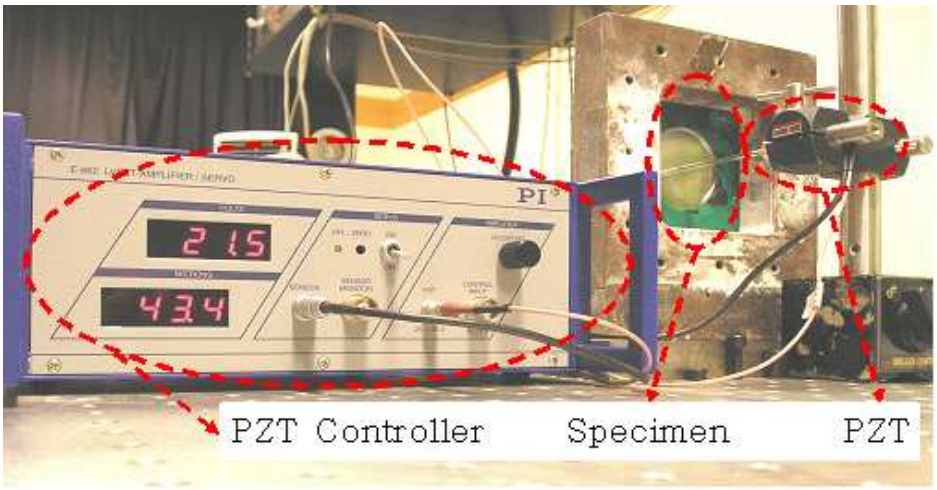
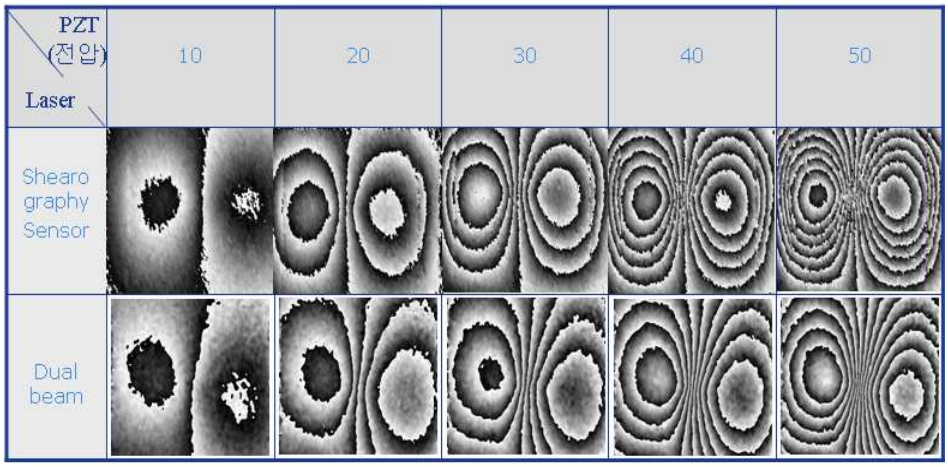


Photo. 4.1 Photo of PZT actuator and PZT contrroller

100Voltage의 전압 하에서 15μm의 변위를 발생시키는 변위 제어 장치인 압전소자(PZT) 액츄에이터는 PI사의 P-841 모델을 사용하였으며, 압전소자(PZT) controller는 E-665를 사용하여 정확한 변위제어를 구동하였다. 상호 통신은 BNC로 하였으며, PC와의 통신은 RS-232를 이용하였다. 본 실험에서 변위 제어에 사용한 Voltage는 10V, 20V, 30V, 40V, 50V이며 그 이상의 전압에서는 Shearography의 분해능을 넘어서는 측정 불가 영역으로 위상 지도가 깨지는 이유로 변형 측정이 불가능하였다.

Table. 4.1 The phase-map of according to voltage



10V에서부터 50V까지 위상지도를 측정한 결과 Dual-beam 전단간섭계와 상용 장비인 Shearography Sensor의 위상지도 줄무늬 수의 동일한 결과를 얻어내었다. Table 4.2는 두 장비의 면외 변형 및 상용 장비에 대한 개발 장비의 오차율을 나타내었다. 10V에서 50V까지 두 장비의 측정 변형은 선형적인 증가를 보여주며, 상용 장비 대비 개발 장비의 오차율은 3.9%를 넘지 않은 안정적인 결과를 보여 주고있다 50V에서 최대 오차율인 3.87%가 측정되었으며, 30V에서는 최소 오차율인 0.72%가 측정되었다. 또한 평균 오차율은 2.51%로써 두 실험 사이의 시간차나 정확한 전압 제어의 문제점 등을 감안한다면 두 장비의 측정 결과가 매우 유사하며 개발된 장비의 신뢰성을 뒷받침해주는 결과를 보여주고 있다.

Table 4.2 The comparison the Dual-beam interferometer and the shearography sensor

PZT (전압)	Dual beam Shearography (㎛)	Shearography (㎛)	Error(%)
10	1.70	1.64	3.53
20	3.65	3.58	1.92
30	5.52	5.56	0.72
40	7.53	7.72	2.52
50	9.82	10.20	3.87

이는 휴대성이 높고 저가의 개발된 장비인 Dual-beam 전단간섭계를 이용하여 고가의 수입제품인 상용 장비를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

면내 변형 실험

상용 장비의 면내 변형 측정은 변형량의 결과를 획득할 수 있음에 반해 개발 장비의 면내 변형은 전단간섭계의 특성상 변형률을 측정하므로 면내 변형의 측정 실험은 면외 변형 측정 실험과 다르게 상용 장비와 정량적 비교를 할 수 없었다.

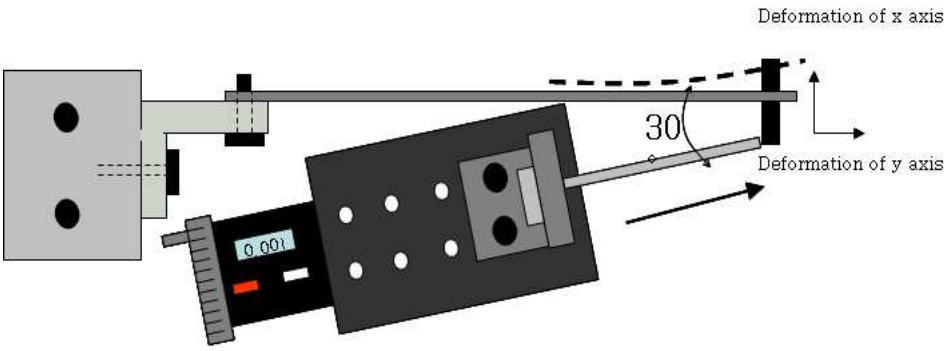


Fig. 4.2 specimen for in plane of measurement stain

면내 변형 실험을 위해 면내와 면외가 동시에 일어나는 시험편을 선정하였다. 변형은 1μm 제어가 가능한 전자식 x-y 스테이지를 사용하여 2μm, 5μm, 10μm, 15μm, 20μm로 변위를 주면서 면내 변형을 측정하였다. 그러나 x-y 스테이지는 변위를 가하는 장치가 아니므로 변형은 상용 장비인 ESPI의 측정값을 신뢰로 실험을 실시하였다. 시험편은 LCD 판넬 중 형상이 없는 시험편을 이용하였다. 면내 변형과 면외 변형이 동시에 측정이 가능하도록 시험편 자체에 각도를 주어 JIG에 고정하였으며 가변기의 각도를 30°로 기울여 시험편에 변형을 가하였다.

Table. 4.3 The phase-map of according to displacement

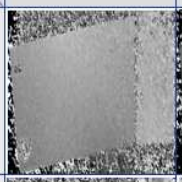
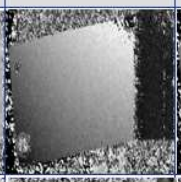
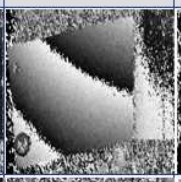
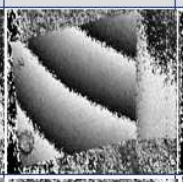
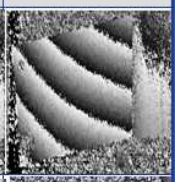
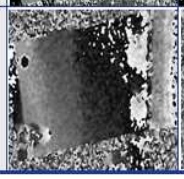
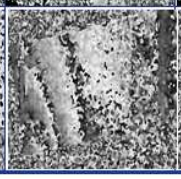
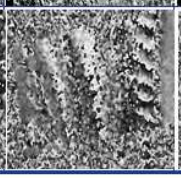
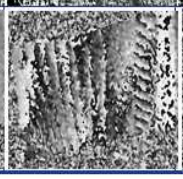
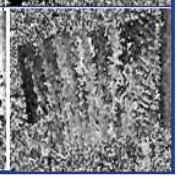
변위 (um) / Laser	2	5	10	15	20
ESPI Sensor					
Dual beam					

Table. 4.3은 상용 장비로써 측정한 변형의 위상지도와 개발 장비인 Dual-beam 전단간섭계로써 측정한 면내 변형률의 위상지도를 나타내었다. 이와 같이 변형의 값이 다른 두 장비를 비교한 이유는 상용 장비인 ESPI의 측정된 면내 변형과 개발 장비의 면내 변형률의 줄무늬 패턴을 확인하여 개발 장비의 변형률의 줄무늬 패턴이 제대로된 측정 결과인지 확인하기 위함이다. ESPI는 비교적 선명한 줄무늬를 보여주었으며, 이미지 또한 선명하게 측정되었다. 이에 비해 개발한 장치인 Dual-beam 전단간섭계의 위상지도 줄무늬는 조밀하게 측정되었으며, 줄무늬의 관찰이 용이하지 않았다. 이는 변형 자체를 측정하는 ESPI에 비해 Dual-beam 전단간섭계의 위상지도는 변형의 구배(변형률)를 나타내므로 줄무늬의 수가 2배 정도 많게 측정 되었다. 또한 ESPI는 변형 전 위상지도와 변형 후 위상지도를 직접 처리하므로 선명한 이미지를 획득할 수 있지만 Dual-beam 전단간섭계는 변형 전과 변형 후의 위상지도를 처리한 후 왼쪽 Beam과 오른쪽 Beam 각각의 위상지도를 한번 더 처리해야 하므로 ESPI와 같은 선명한 위상지도의 획득이 불가능하였다. 또한 Dual-beam 전단간섭계 면내 변형 측정 방법의 성격상 면내 변형과 면외 변형이 동시에 일어나야 면내변형이 측정 되는 이유로 변형을 가하는 순간 화면상에 보이는 변형은 면외 변형이 측정 되므로 면내 변형의 형태는 알 수가 없었다. 상용 장비의 측정 결과는 변위를 가하는 좌측 하단부를 향하여 변형이 발생되지만

개발 장비로 측정한 결과는 변형률이므로 상단부에 비해 변위를 가한 하단부의 줄무늬가 조밀하게 측정되었다. 따라서 개발 장비를 이용하여 물체의 면내 변형률을 측정하였다.

Table. 4.4 The deformation value the Dual-beam interferometer and the ESPI sensor

변위 (um)	Dual beam Shearography (strain)	ESPI (㎛)
2	3.02×10^{-6}	0.30911
5	4.98×10^{-6}	0.64398
10	11.66×10^{-6}	1.44165
15	17.93×10^{-6}	2.04484
20	23.48×10^{-6}	3.66316

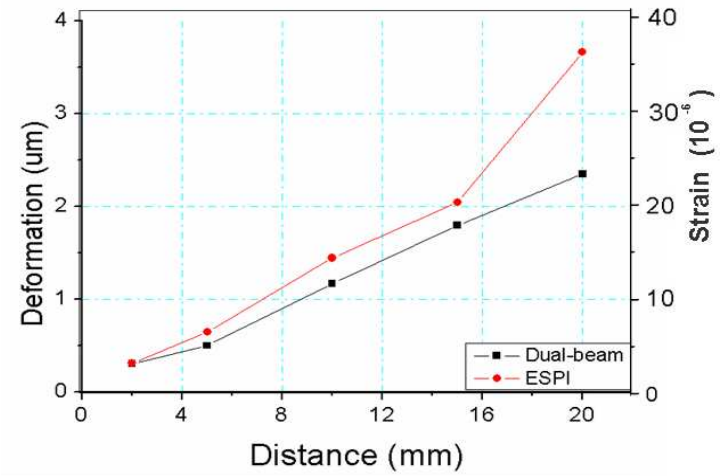


Fig. 4.3 Specimen for in plane deformation experiment

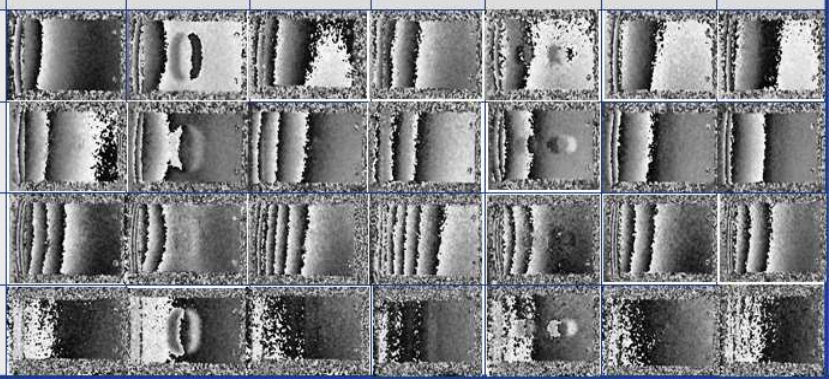
상용 장비인 ESPI의 최대 변형 값과 개발 장비인 Dual-beam 전단간섭계의 변형률의 최대-최소값 차를 측정하여 그 결과를 Table. 4.4에 정리 하였다. 개

발 장비의 측정값은 Fig. 4.2로 나타냈으며, ESPI의 변형이 증가함에 따라 개발 장치인 Dual-beam 전단간섭계의 측정값인 변형률 또한 증가함을 볼 수 있었다. 최대 변형량은 3.67μm이며 측정된 최대 변형률은 23.48×10^{-6}로 두 장비 모두 면내 측정값의 변위가 증가할수록 증가된 결과를 보여주고 있다. 따라서 개발 장비로 측정 된 면내 변형률 값은 ESPI에서 측정된 면내 변형의 변형률임을 확인할 수 있었다.

2. LCD 판넬의 형상별 굽힘 강도 비교 실험

실험결과로서 Table. 4.3은 변위 방향의 우측에서 조사된 확산광으로부터 얻은 Shearography 위상지도(식 2.41)와 방향의 좌측에서 조사된 확산광으로부터 얻은 위상지도(식 2.42)이다. 이러한 위상지도 간섭무늬들을 가산 처리 할 경우 x축 방향성분 ($\partial u/\partial x$)이 제거되어 z축 뱡향 변형성분 ($\partial w/\partial x$)만이 남게 되며, 또한 두 이미지를 감산 처리할 경우 z방향의 변형성분 ($\partial w/\partial x$)이 제거되며 순수한 x방향 변형성분 ($\partial u/\partial x$)만이 남게 된다. 이 수치 연산을 통한 간섭무늬를 정량해석 함으로서 물체의 순수한 x 및 y축 변형률을 직접 계측할 수 있으며 z축 방향의 변형률은 2장 3절의 변형계측에 적용되는 전단간섭법의 개념을 적용하여 변형을 측정하였다.

Table 4.5 Phase-map image of according to the shape

Shape No.	Shape1	Shape 2	Shape 3	Shape 4	Shape 5	Shape6	Shape 7
Phase-map Left							
Phase-map Right							
Phase-map Addition							
Phase-map Sub							

본 논문에서는 Photo 3.6과 같은 다양한 형상을 가진 LCD 판넬과 형상을 가지고 있지 않는 LCD 판넬 절취 시험편을 이용하여 각각의 형상이 굽힘에 미치는 영향을 Dual-beam 전단간섭계를 이용하여 관찰 하였다. Table 4.3은 개발한 장비를 이용하여 Dual-beam으로써 면외 변형 및 면내 변형률을 측정한 위상지도를 나타내었다. Dual-beam 전단간섭계의 특성상 왼쪽 빔을 조사한 위상지도와 오른쪽 빔을 조사한 위상지도를 각각 측정하여 두 이미지의 가산 및 감산한 결과를 나타내었다. Photo 3.5와 같이 각각 다른 LCD 판넬 절취 시험편을 변위 제어 장치를 이용하여 오른쪽 가장자리 끝에서 5 mm지점의 중심부분에 60Voltage의 변위를 가하여 실험을 실시하였다. 형상이 없는 시험편과 형상을 가지고 있는 시험편의 가장자리에 변위를 가하는 이유는 굽힘의 형상을 측정하고자 하기 위함이며, 형상의 모습이 시험편의 굽힘에 미치는 결과를 측정하였다. 그 결과 형상이 없는 Shape1과 형상을 가지고 있는 Shape2, Shape3, Shape4, Shape5, Shape6, Shape7을 비교하여 Fig. 4.3에 나타내었다.

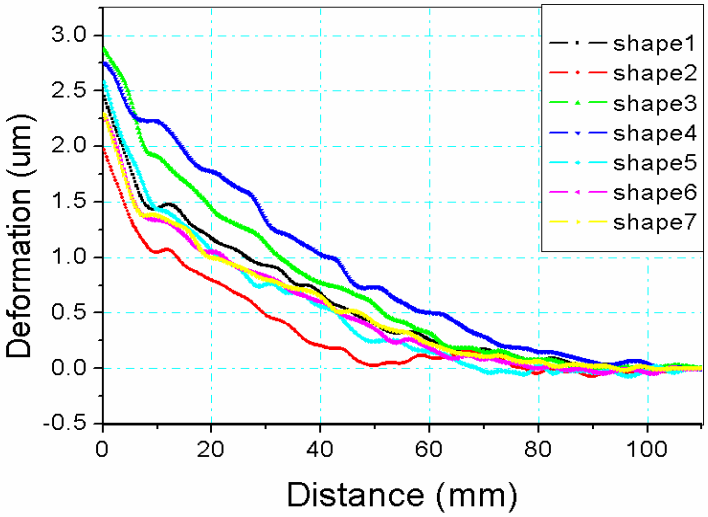


Fig. 4.4 Slope profile of deformation

형상을 가지고 있지 않은 Shape1은 형상이 세로로 길게 있는 Shape6, Shape7과 중심부분의 엠보싱 가공이 되어있는 Shape2, Shape5에 비해 전체적인 굽힘 변형의 측정값이 크게 측정 되었으며, 형상이 가로로 나타나 있는 Shape3, Shape4에 비해 굽힘 변형의 측정값이 작게 측정되었다. 중심에 엠보싱 가공이 되어있는 Shape2와 Shape5를 비교해보면 전체적인 변형 패턴은 유사하게 측정 되었으나 Shape2의 경우 50mm인 위치에서 변형의 크기가 급격히 커짐을 그래프를 통해 알 수 있다. 형상이 세로로 있는 Shape6과 Shape7은 변형의 형태뿐만이 아닌 변형의 크기 또한 유사한 결과를 보여주고 있다. 변형의 형태가 가로로 있는 Shape3과 Shape4는 최대 변형 값은 유사한 결과를 보여주지만, 변형의 패턴이 Shape3에 비해 Shape4의 그래프가 완만한 곡선 형태를 보여주고 있다. 이는 Shape3의 형상이 둥글고 긴 띠 모양의 가공으로 인해 형상계수의 차이로 볼 수 있다. 시험편에 면외 변형만을 가했기 때문에 Phase map sub의 위상지도는 형상에 따라 뚜렷한 차이점이 보이지 않았다. 이는 면내 변형이 발생하지 않았다는 의미이다.

Table 4.6 The max value and error according to shape

	Shape1	Shape2	Shape3	Shape4	Shape5	Shape6	Shape7
Max value	2.45	1.97	2.88	2.75	2.58	2.28	2.29
Comparative value	100	80.36	117.53	112.41	105.21	92.98	93.29

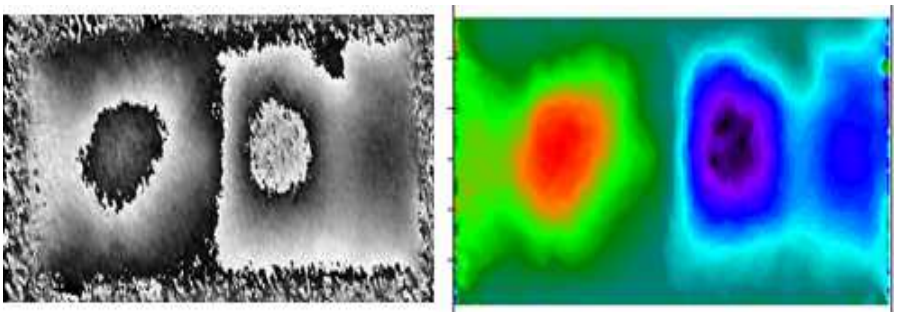
Table 4.5는 각 시험편의 최대 변형량 Max Value와 형상을 가지고 있지 않은 Shape1의 최대 변형 량을 기준으로 각각 형상의 최대 변형 량의 비인 Comparative value를 나타내었다. 형상이 없는 Shape1을 기준으로 Shape3, Shape4, Shape5의 최대 처짐 변형량은 각각 17.53%, 12.41%, 5.21%로 크게 나타났고 변형이 없는 Shape1에 비해 굽힘 강도가 큰 Shape2, Shape6, Shape7의 변형률은 19.64%, 7.02%, 6.71%작게 나타났다. 따라서 각각 형상별 굽힘 강도는 Shape3, Shape4, Shape5, Shape7, Shape6, Shape2순으로 측정 되었다. 이와 같은 결과를 통해서 측정된 굽힘 강도는 가공된 형상의 방향과 형상의 형태에 영향을 미쳤다는 결과를 얻어 내었다.

제 2절 Dual-beam Interferometer single mode 실험결과

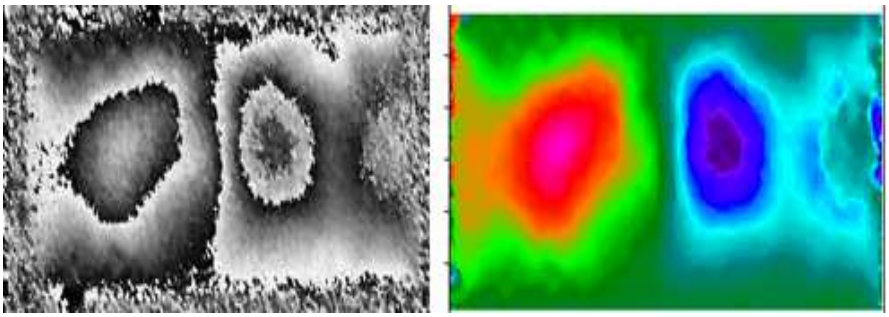
1. LCD 판넬의 변형 측정

LCD 판넬은 TV내의 형광판 및 많은 부품들의 지지역할을 하고 있으므로 비틀림이 이러한 형광판 및 내부 부품들에 많은 영향을 미치게 된다. 이러한 비틀림을 방지하기 위해 LCD 판넬 자체에 비드면, 엠보싱 가공을 하여 판넬 자체의 비틀림을 보강하고 있으나 TV내부의 불균일한 하중이 발생하는 겨우 이러한 형상으로 인해 불규칙한 변형이 생기게 된다. 따라서 어느 한 지점에

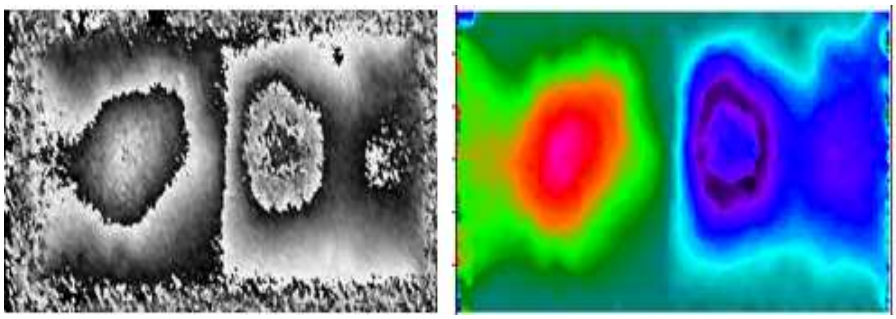
서 변위가 생길 경우 비틀림으로 인해 TV 수명에 지대한 영향을 미치게 되므로 본 논문에서는 한 지점을 중심부분으로 지정하여 중심부분에 변위가 생길 경우 형상에 따라 판넬 자체 변형을 측정하여 비대칭적인 변형을 찾아내어 이를 보완하고자 한다. 판넬 시험편의 사이즈는 29인치 TV 판넬이며 재질은 SECC 이다. 시험편의 고정은 4점 고정으로 고정 지그는 Fig. 3.3과 같다. 또한 중앙의 변위 제어는 압전소자(PZT)이며 절취한 형상별 시험편의 변위 제어 장치와 동일하다. 변위는 위상지도의 관측이 용이한 60V부터 100V까지 10V씩 가하였으며, 개발한 장치인 Single-beam 전단간섭계를 이용하여 전압 변화에 따른 위상지도와 이를 상용 장비인 Shearography의 ISTRA를 이용해 결펼침(Unwrapping)한 결과를 Fig. 4.4에 나타내었다. 이와 같이 상용 장비를 이용하여 결펼침을 행한 이유는 두 장비의 결펼침 알고리즘이 다르므로 두 장비의 결과를 신뢰적으로 비교하기 위함이다.



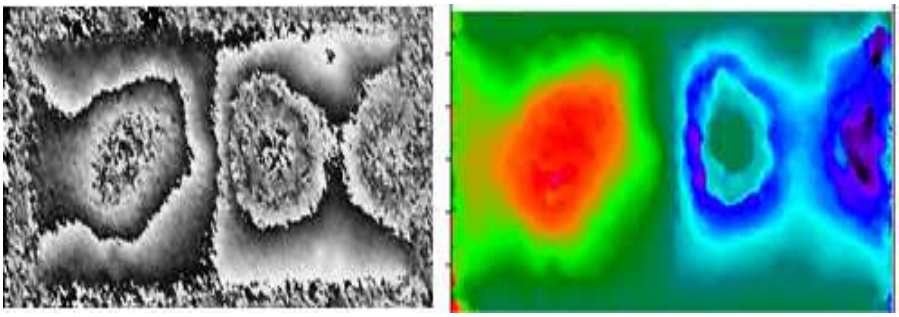
(a) 60 voltage



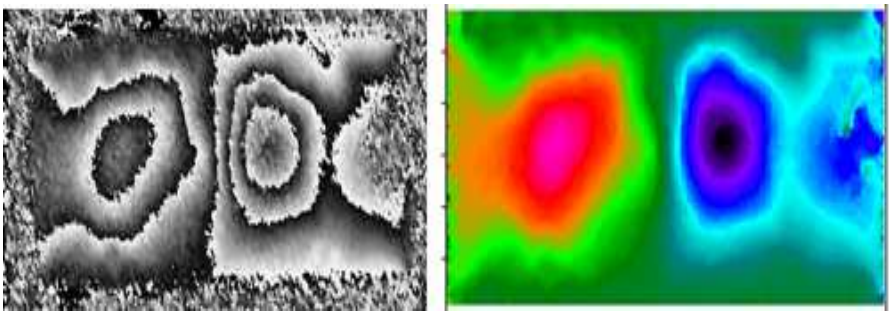
(b) 70 voltage



(c) 80 voltage



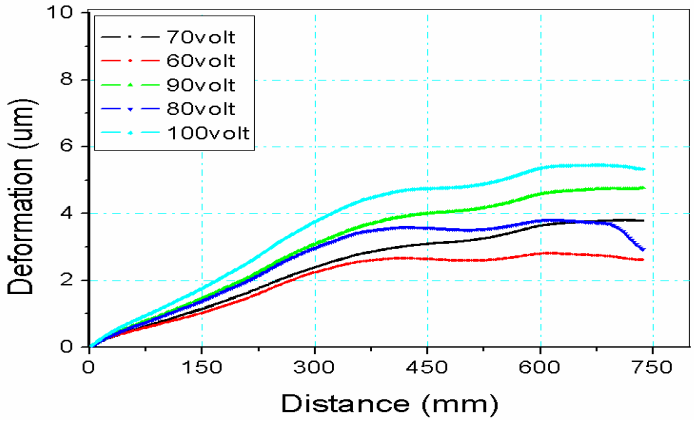
(d) 90 voltage



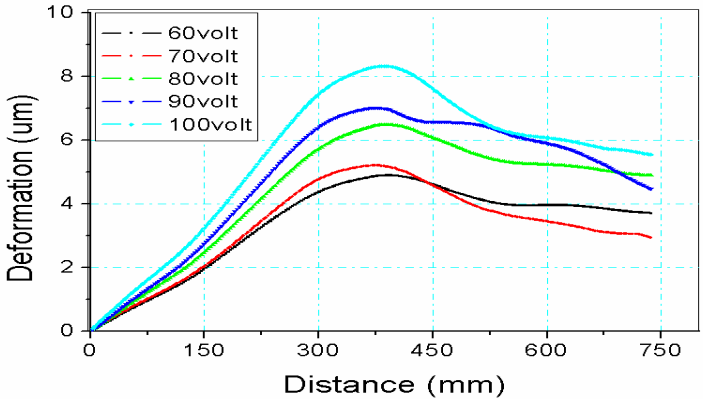
(e) 100 voltage

Fig. 4.5 Phase map and unwrapping image of according to voltage

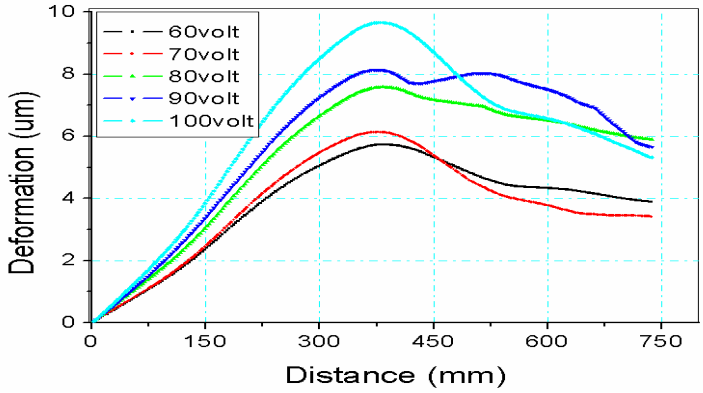
Photo. 3.5의 LCD 판넬 시험편의 각 부분인 (a), (b), (c), (d), (e)부분을 Profile을 그어 Voltage별로 Fig. 4.5에 그래프로 나타내었다.



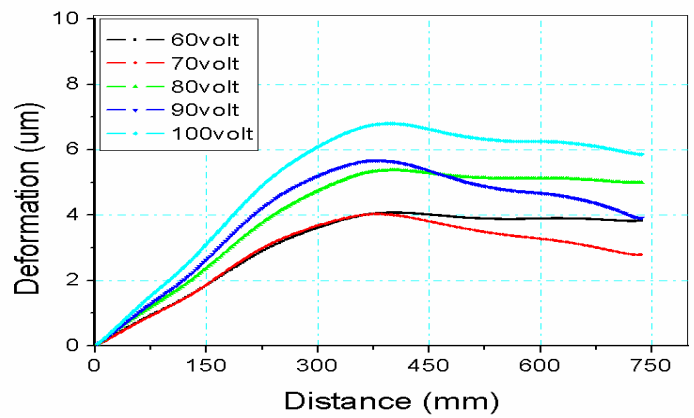
(a) Slope profile (a)



(b) Slope profile (b)



(c) Slope profile (c)



(d) Slope profile (d)

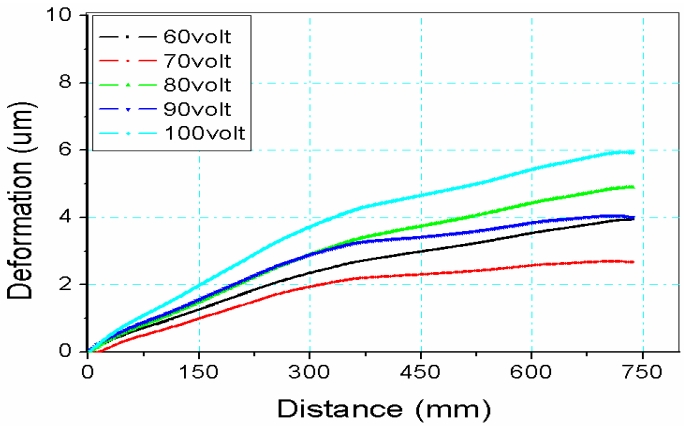


Fig. 4.6(e) Slope profile (e)

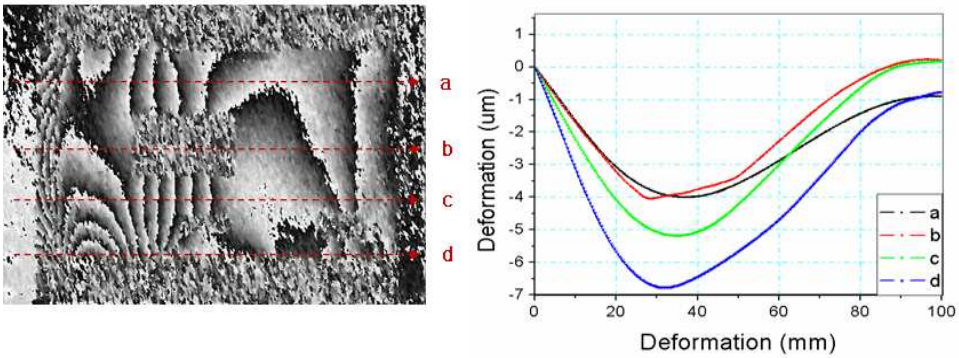
Fig. 4.6 Slope profile along the line in photo. 3.5

Fig. 4.5(a)의 그래프의 경우 변위를 증가 시킬수록 시험편의 우측 변형이 크게 측정되는 것을 알 수 있으며 다른 그래프에 비해 완만한 곡선을 그리며 증가한다. 이는 (e)부분에서도 관찰 되며, 중심부의 변형이 다른 부분에 비해 영향을 적게 미치는 결과이다. Fig. 4.5(b)와 Fig. 4.5(d)는 변위 발생부분으로부터 같은 거리에 위치하고 있다. 하지만, Fig. 4.5(b)의 최대 변형 값이 Fig. 4.5(c)에 비해 크게 측정 되었다. 또한 중심 위치에 대해 같은 거리에 위치해 있는 (a)와 (e)에서는 하단부인 (e)부분의 변형이 (a)에 비해 전체적으로 크게 측정되었다. 이는 판넬의 엠보싱 가공이 하단부에 비해 상단부에 집중되었기

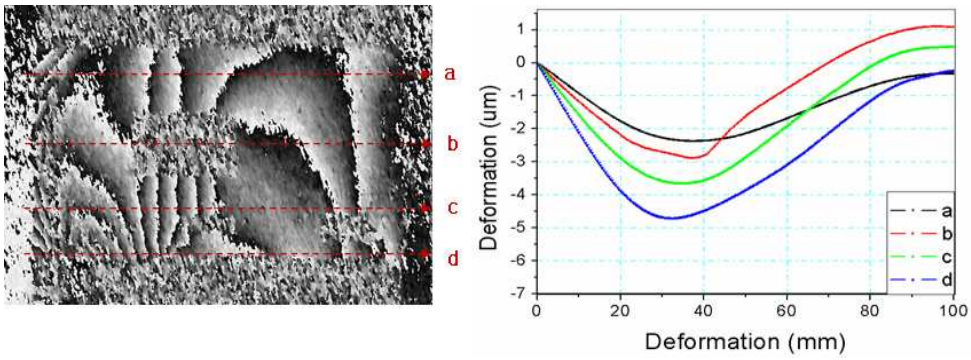
때문으로 사료되며 이러한 가공으로 인해 변형 전 불균형적인 잔류응력의 분포가 생겼다는 것을 말해주고 있다. 비대칭적인 형상인 LCD 판넬의 좌, 우 변형의 분포는 450 mm~750 mm의 부분에서 판넬의 변형이 크게 측정되었으며 0 mm부분의 변형은 거의 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 판넬의 형상을 보면 보강재인 비드 면이 우측에 편중 되어있기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 비드 면과 엠보싱 가공은 제작 시에 비틀림을 보강하기 위해 가공하였지만 제품의 조립 후 제품 내부의 한 점에서 변위가 발생할 경우 비대칭적인 변형을 수반하게 되며 비틀림이 발생하게 된다. 이와 같이 개발한 장비를 이용하여 판넬의 변형을 가하여 상대적 취약 부분과 잔류응력의 분포의 가시적인 판별이 가능하였다.

2. 휴대폰 프레임의 열변형 측정 실험

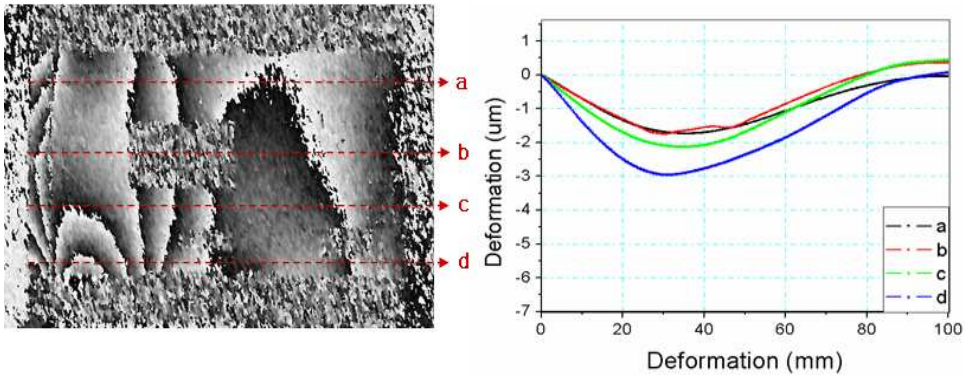
휴대폰에서 프레임은 구멍, 비드면, 반도체 장착부등 크기에 비해 복잡한 형상을 가지고 있으며, 장시간 통화 시 휴대폰 자체 발열에 의해 열변형을 수반하게 된다. 이때 비틀림과 같은 비대칭 변형이 발생하게 되는데 이러한 현상이 생길 경우 반도체, LED 액정, 소형부품 등 상대적으로 취약한 부품의 변형이 발생 되며 이러한 영향은 휴대폰의 수명을 단축시키게 되는 요인 중 하나가 된다. 본 실험에서는 휴대폰의 자체 발열 온도 이상으로 시험편을 가열하여 프레임에 미치는 열변형을 측정하였으며, 그 결과를 바탕으로 상대적 취약 부를 본 장비를 이용하여 측정하였다. 본 실험에 사용된 휴대폰 프레임의 재질은 STS301이며, 온도는 45°C까지 가열한 후 온도 차를 5°C, 4°C, 3°C, 2°C, 1°C 간격으로 자연 냉각을 시키면서 측정하였다. 온도 측정은 비접촉 온도계인 Auto Pro, (Raytek)사를 사용하였다. 가열 장치는 500°C이상 가열이 가능하며, 온도 조절이 가능한 열풍기를 사용하여 시험편의 후면에서 가열을 하였다.



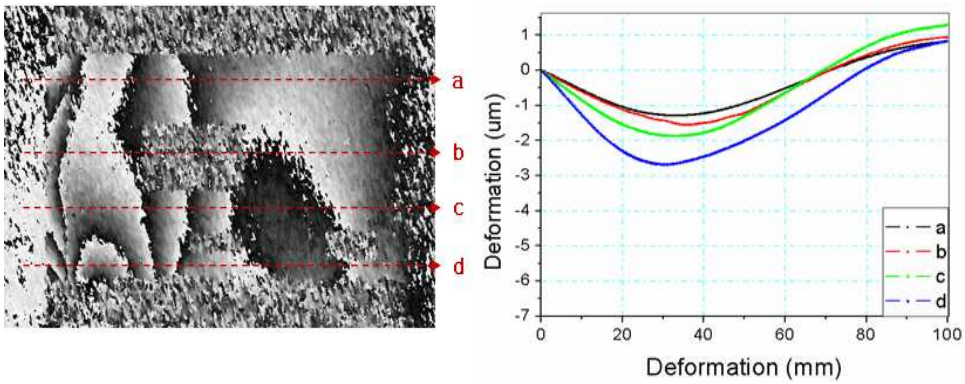
(a) ΔT=5°C



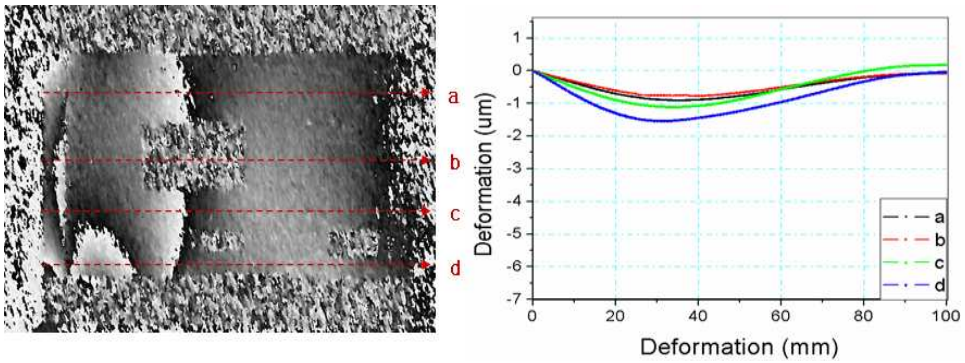
(b) ΔT=4°C



(c) ΔT=3°C



(d) ΔT=2°C



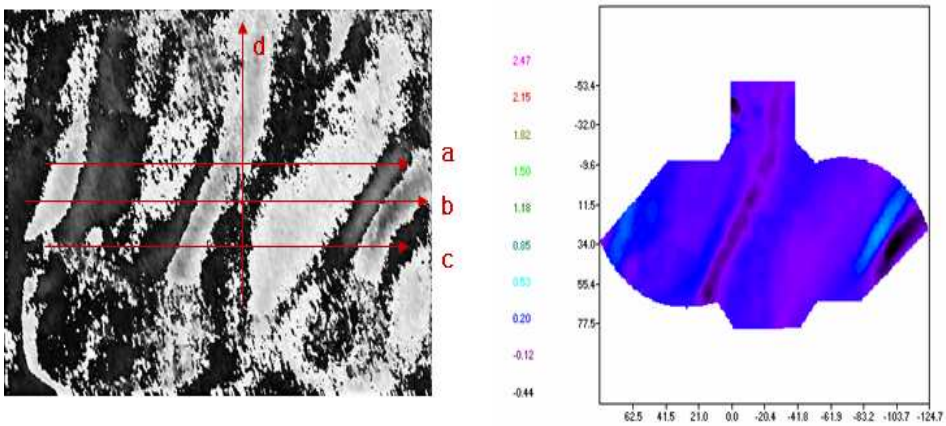
(e) ΔT=1°C

Fig. 4.7 Phase-map and slope profile according to temperature variation

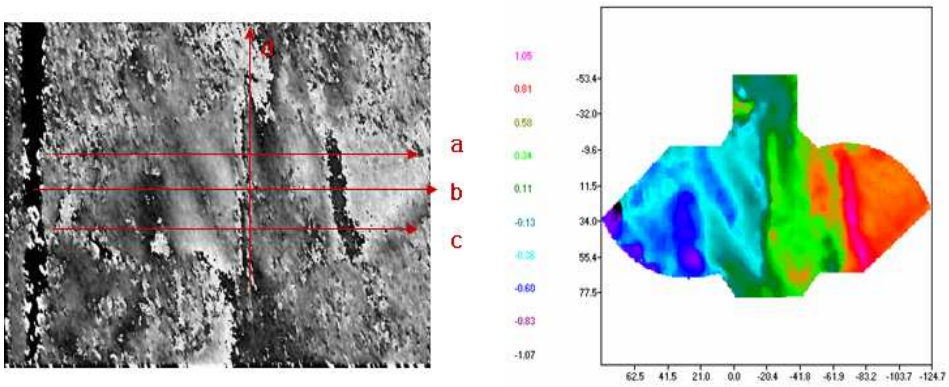
휴대폰의 열변형은 왼편의 아래 부분부터 서서히 열변형이 일어나게 된다. 온도 차가 1°C 일때 시험편의 열변형은 d부분이 가장 많은 열변형이 일어났으며, 시험편의 전체적인 변형이 좌측에 편중 되어 있음을 나타내고 있다. 변형량이 1.5μm로 측정 되었다. 온도차가 2°C일 때 시험편의 열변형은 가장 하단 부인 d부분이 열변형이 가장 활발히 일어났다. 변형량은 2.7μm이며, 전체적인 변형이 좌측에 편중 되어있음을 알 수 있다. 온도차가 3°C, 4°C, 5°C일 때의 열변형 결과 또한 전체적인 열변형이 좌측에 편중 되어 있으며 최대 변형 부분은 d이며, 변형량은 3μm, 4.7μm, 6.8μm으로 측정 되었다.

3. 사출 금형의 열변형 측정 실험

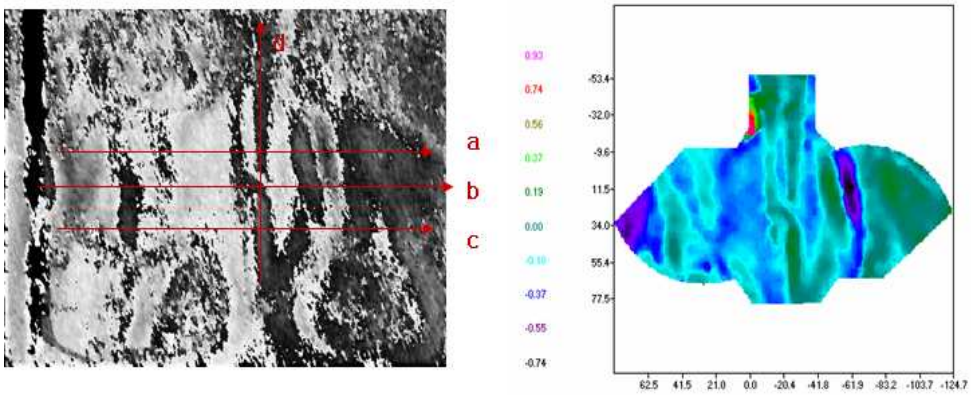
사출금형 시험편의 열변형을 측정하기 위하여 시험편에 열풍기를 이용하여 국부적으로 100°C이상 가열을 하였으며 표면 온도가 40°C가 되었을 때 실험을 실시하였다. 면외 변형의 측정이 용이하도록 양측을 고정하여 실험을 실시하였다. 실제 금형의 열변형을 측정하였으며, 외부 조건은 금형에서 제품 제작 시 조건을 충족하기 위하여 진공 챔버에서 예열을 한 후 가열을 하였다.



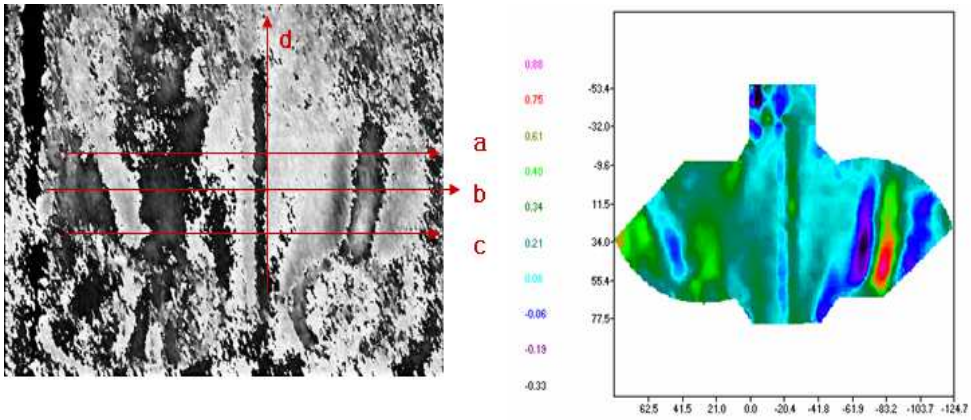
(a)T=20°C→25°C



(b) T=25°C→30°C



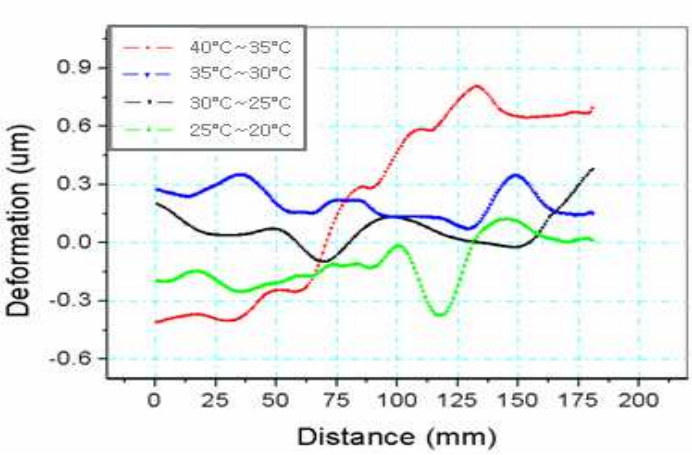
(c) T=30°C→35°C



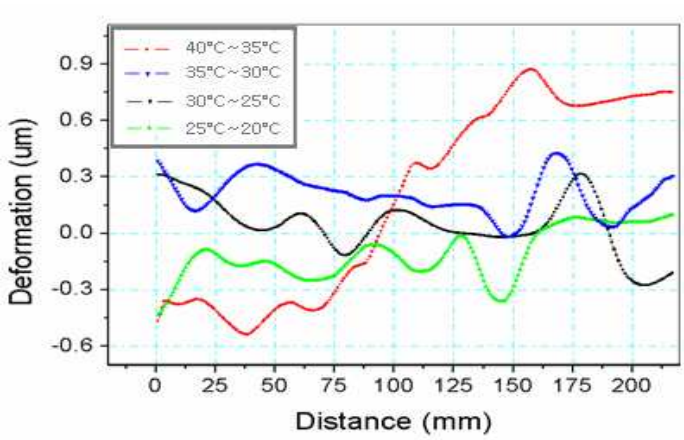
(d) T=35°C→40°C

Fig. 4.8 Phase-map and unwrapping image according to Δtemperature

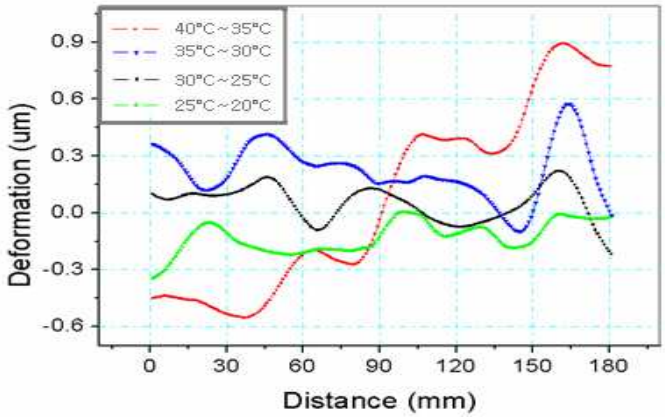
Fig. 4.7은 표면의 온도 변화가 5°C씩 자연 냉각이 발생되었을 때의 위상지도와 결펼침(Unwrapping)결과를 보여주고 있다. 온도 변화가 모두 일정한 5°C에서 실험을 실시하였지만 내부 측정 열변형은 가장 높은 온도일 때인 40°C~35°C에서의 위상지도 줄무늬 수가 가장 많이 측정되었다 이는 외부 온도 변화와 내부의 온도변화의 차이로 볼 수 있다. 수지가 용입되는 내부온도를 측정하여 실험을 실시해야 하지만 이는 측정을 하는 동안 내부 온도의 측정이 불가능하였기 때문에 외부 온도차로 인해 실험을 실시하였다.



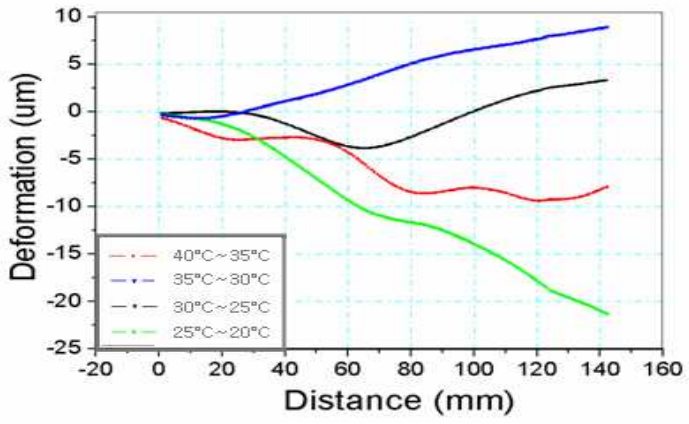
(a) Line (a)



(b) Line (b)



(c) Line (c)



(a) Line (d)

Fig. 4.9 Slope profile according to profile line

Fig. 4.8은 시험편의 온도 변화에 따른 내부 열변형에 대한 각 부분별 프로파일을 그래프로 나타내었다. 시험편의 가로 방향인 (a), (b), (c)와 세로 방향인 (d)을 측정한 결과 세로 방향인 (d)부분의 열변형 패턴은 가로 방향인 (a), (b), (c)에 비해 안정된 그래프를 보여주고 있다. 가로 방향은 (a)부분은 자연냉각에 의해 온도가 떨어질수록 전체적인 변형이 작아지는 것을 알 수 있었다. (a)와 (b)부분의 열변형은 왼쪽에 비해 오른쪽의 열변형이 크게 측정되었으며, 이는 좌, 우의 열변형이 고르지 못해 시험편의 냉각 시 비틀림이 발생할 수 있는 사실을 입증한 결과이며, (d)부분의 열변형은 40mm~100mm사이의 열변형이 다른 부분에 비해 크다는 결과를 얻어낼 수 있었다. 따라서, 초정밀 초소형 부품의 제품 성형 시 이는 치수 불량을 일으킬 수 있으며, 개발한 장비를 이용하여 이를 측정하고 비틀림을 보정하는데 적용시킬 수 있을 것으로 사료된다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 개발한 장치인 Dual-beam 전단간섭계를 이용하여 Sing mode와 Dual mode에서의 면외 변형 및 면내 변형률을 측정하여 실험 방법을 금형 제품 및 금형에 적용을 하였다. 이러한 장비를 이용하여 획득한 정확한 변형 데이터를 금형 산업에 적용하면 초정밀 금형제품의 생산이 가능해 질 것으로 기대된다.

본 논문에서는 금형제품 및 금형을 압전소자와 x,y스테이션을 이용한 국부적 변위 데이터와 가열한 시험편의 자연냉각으로인한 열변형 데이터를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개발한 Dual-beam 전단간섭계를 상용 장비와 비교하여 면외 변형을 측정한 결과 신뢰성을 검증하였다.

2) 면내 변형률을 측정하여 변형률의 정량적인 측정이 가능하였다.

3) 프레스 금형의 LCD판넬에 변위를 가하여 시험편 전면을 측정한 결과 상대적 변형이 큰 부분을 검출할 수 있었으며 변형의 정량적 측정이 가능하였다.

4) LCD판넬의 형상에 따른 굽힘 변형을 측정하여 비교함으로써 가공된 형상이 판넬에 미치는 영향을 예측할 수 있었다.

5) 가열한 휴대폰 프레임의 자연 냉각 시 휴대폰 프레임의 전체적인 열변형을 측정할 수 있었으며, 변형량의 정량적인 측정이 가능하였다.

6) 사출금형의 자연 냉각 시 금형 각 부분의 열변형을 측정할 수 있었으며, 정량적 측정이 가능하였다.

7) 개발한 장비를 이용하여 시험편에 일어나는 변형의 형태가 비대칭적으로 일어나는 것을 알 수 있었으며, 이와 같은 결과를 이용하여 산업현장에서 비틀림 보강에 대한 데이터를 획득하면, 초정밀의 금형제품 제작이 가능 할 뿐 만아니라 불량률을 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Steinchen, W., Yang, L. X., Schuth, M., and Kupfer, G., "Application of shearography to quality assurance", J. Master. Processing Technol. Vol.52, pp141-150, 1995.
2. Ettemeyer, A., "Nondestructive testing of materials using TV-shearography", Technisches Messen(tm), Vol.60, No.7-8, pp274-277, 1993.
3. Hung, Y. Y., "Digital shearography versus TV-holography for nondestructive evaluation", In Proceedings of 27th ISATA, Aachen, Germany, pp513-526, 1994.
4. 정영득, 구본흥 “사출성형해석에 의한 제품 및 금형 설계” 인터비전 2005
5. Eugene Hecht, 1998, "Optics" , Addison Wesley Longman, pp.575~598.
6. Ulf Schnars, Werner Jueptner, 2003, "Digital Holography", Springer, pp 18~20.
7. Robert Jones & Catherine Wykes, 1989, "Holographic and speckle interfeometry" ,Cambridge University Press, pp 153~159.
8. Gary L. Cloud, 1995, "Optical Methods of Engineering Analysis", Michigan State University, pp.444~445,461~463.
9. Sung-woon Yoon, 1996, "A Study on Speckle size and measurable limitations in laser speckle interferometry method", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.5 No.1, pp. 33~42
10. J. Niklewicz and G.D.Slims, 1999, "The Use of Electronic Speckle pattern Interferometry for Determining Non-Uniform Strain Fields", CMMT(MN)056
11. Wykes, Catherime, "Use of electronic speckle pattern interferometry(ESPI) in the measurement of static and dynamic surface

displacements", Optical Engineering, Vol.21, No.3, pp440-406, 1982.
12. 장호섭, “전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법” 工學博士學位論文, 朝鮮大學敎, 2006
13. Hung, Y. Y., "Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing", Opt. Engng, May/June, pp391-395, 1982.
14. Steinchen, W., Yang, L. X., Schuth, M., and Kupfer, G., "Electronic shearography for direct measurement of strains", Proc. SPIE, Vol.2248, pp210-221, 1994.
15. 이찬우, “"Shearography를 이용한 압력용기의 비파괴 검사에 관한 연구" 工學碩士學位論文, 朝鮮大學校, 2000.
16. Chau, F. S. and Ng, T. W., "A real-time digital shearing speckle interferometer", Measmt Sci. Technol., Vol.3, pp381-383, 1992.
17. Nakadate, Suezou, Yatagai, Toyohiko, and Saito, Hiroyoshi, "Digital speckle-pattern shearing interferometry", Applied opitcs, Vol.19(24), pp4241-4246, 1980.