



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2018년 8월

박사학위논문

Dual-beam 전단간섭계의 측정 분해능  
향상에 의한 면내 변위 정량 측정에 대한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

강 찬 근

# Dual-beam 전단간섭계의 측정 분해능 향상에 의한 면내 변위 정량 측정에 대한 연구

A Study on Quantitative Measurement of In-Plane Displacement  
by Improving Measurement Resolution of Dual-Beam  
Shear Interferometer

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

강 찬 근

# Dual-beam 전단간섭계의 측정 분해능 향상에 의한 면내 변위 정량 측정에 대한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2018년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템미래자동차공학과

강 찬 근

강찬근의 박사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 명예교수 양인영 ㉠

위원 조선대학교 교수 김경석 ㉠

위원 조선대학교 교수 김재열 ㉠

위원 조선대학교 교수 정현철 ㉠

위원 포항공과대학교 교수 홍정기 ㉠

2018년 6월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF TABLES .....	III
LIST OF FIGURES .....	IV
Nomenclature .....	VIII
Abstract .....	X
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	4
제 2 장 이론적 배경 .....	5
제 1 절 레이저의 특성 .....	5
제 2 절 파동 방정식과 간섭 .....	7
제 3 절 레이저 스펙클 현상 .....	11
제 4 절 변형률 측정 .....	14
1. 응력 변형률 측정 상태 .....	14
2. 기하학적 관계 .....	16
3. 광학 관계 .....	18
4. 두 개의 빔을 사용한 면내·외 변형률 성분 결정 .....	18
제 3 장 이동 및 위상 지도 평가 .....	23
제 1 절 위상 이동 이론 .....	23

제 2 절 위상 이동 알고리즘 .....	27
1. 3+3 위상 이동 알고리즘 .....	27
2. 4+4 위상 이동 알고리즘 .....	30
제 3 절 위상 지도 평가 .....	31
1. 위상 지도 필터링 .....	31
2. 위상 지도 언래핑 .....	33
제 4 장 실험장치 구성 .....	35
제 1 절 Dual-beam 전단간섭계 .....	35
제 2 절 전자처리 스펙클 패턴 간섭계 (ESPI) .....	42
제 3 절 MTS system .....	44
제 4 절 면내 변위 측정 시험편 제작 .....	45
제 5 장 실험결과 .....	49
제 1 절 측정 분해능 측정 결과 및 해석 .....	49
제 2 절 면내 변위 측정 결과 및 해석 .....	53
제 6 장 결 론 .....	82
참 고 문 헌 .....	83

## LIST OF TABLES

Table 1-1 Summary of the existing approaches for starin measurement .....	3
Table 4-1 Technical data of ESPI system .....	43
Table 4-2 Specification of MTS system .....	44
Table 4-3 Property of SS400 .....	45
Table 4-4 Property of SGCD1 .....	46
Table 4-5 Property of SPFC980 .....	47
Table 4-6 Property of SM45C .....	48
Table 5-1 Single-beam shear interferometer phase map according to deformation variation .....	50
Table 5-2 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SS400 .....	55
Table 5-3 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SGCD1 .....	60
Table 5-4 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SPFC980 .....	65
Table 5-5 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SM45C (X-axis) .....	71
Table 5-6 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SM45C (Y-axis) .....	76



## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Schematic of stimulated emission .....	5
Fig. 2-2 Schematic of laser cavity .....	6
Fig. 2-3 Schematic of 1D wave .....	7
Fig. 2-4 A typical laser speckle pattern .....	11
Fig. 2-5 Formation of objective speckle in free space .....	12
Fig. 2-6 Formation of subjective speckle .....	13
Fig. 2-7 Schematic setup of digital shearography using single-beam illumination .....	17
Fig. 2-8 Schematic arrangement of ESPI for measuring in-plane deformations $u$ and $v$ using the dual-beam illumination method simultaneously .....	19
Fig. 2-9 The experimental setup of digital shearography for pure in - plane strain measurement with two symmetric illumination beams used sequentially .....	20
Fig. 3-1 The experimental setup of temporal phase shift shearography for deformation gradient measurement .....	24
Fig. 3-2 Voltage-to-displacement relationship (V-x curve) of a PZT mirror .....	25
Fig. 3-3 Optical path analysis on a PZT mirror .....	25
Fig. 4-1 Dual-beam shear interferometer configuration for in-plane displacement measurement .....	35
Fig. 4-2 Procedure for in-plane strain measurement using the traditional temporal phase shift shearography system .....	41
Fig. 4-3 Configuration of ESPI system .....	42
Fig. 4-4 MTS system for tensile loading .....	44
Fig. 4-5 SS400 specimen and drawing .....	45
Fig. 4-6 SGCD1 specimen and drawing .....	46
Fig. 4-7 SPFC980 specimen and drawing .....	47

Fig. 4-8 SM45C specimen and drawing .....	48
Fig. 5-1 Experimental for measurement resolution measurement .....	49
Fig. 5-2 Deformation profile according to deformation variation .....	51
Fig. 5-3 Experimental for in-plane deformation measurement .....	53
Fig. 5-4 Measurement area of specimen .....	54
Fig. 5-5 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SS400_0.4kN) .....	56
Fig. 5-6 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SS400_0.8kN) .....	56
Fig. 5-7 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SS400_1.2kN) .....	57
Fig. 5-8 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SS400_0.4kN) .....	57
Fig. 5-9 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SS400_0.8kN) .....	58
Fig. 5-10 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SS400_1.2kN) .....	58
Fig. 5-11 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SS400 .....	59
Fig. 5-12 Deformation profile according to load of ESPI of SS400 .....	59
Fig. 5-13 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SGCD1_0.4kN) .....	61
Fig. 5-14 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SGCD1_0.8kN) .....	61
Fig. 5-15 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SGCD1_1.2kN) .....	62
Fig. 5-16 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SGCD1_0.4kN) .....	62
Fig. 5-17 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SGCD1_0.8kN) .....	63

Fig. 5-18 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SGCD1_1.2kN) .....	63
Fig. 5-19 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SGCD1 .....	64
Fig. 5-20 Deformation profile according to load of ESPI of SGCD1 .....	64
Fig. 5-21 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SPFC980 _0.4kN) .....	66
Fig. 5-22 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SPFC980 _0.8kN) .....	66
Fig. 5-23 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SPFC980 _1.2kN) .....	67
Fig. 5-24 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SPFC980_0.4kN) .....	67
Fig. 5-25 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SPFC980_0.8kN) .....	68
Fig. 5-26 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SPFC980_1.2kN) .....	68
Fig. 5-27 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SPFC980 .....	69
Fig. 5-28 Deformation profile according to load of ESPI of SPFC980 ..	69
Fig. 5-29 Comparison of deformation value of each specimen with load ·	70
Fig. 5-30 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C_X-axis _3kN) .....	72
Fig. 5-31 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C_X-axis _4kN) .....	72
Fig. 5-32 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C_X-axis _5kN) .....	73
Fig. 5-33 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C_X-axis_3kN) .....	73
Fig. 5-34 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C_X-axis_4kN) .....	74

Fig. 5-35 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C_X-axis_5kN) .....	74
Fig. 5-36 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SM45C_X-axis .....	75
Fig. 5-37 Deformation profile according to load of ESPI of SM45C_X-axis	75
Fig. 5-38 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C_Y-axis_3kN) .....	77
Fig. 5-39 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C_Y-axis_4kN) .....	77
Fig. 5-40 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C_Y-axis_5kN) .....	78
Fig. 5-41 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C_Y-axis_3kN) .....	78
Fig. 5-42 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C_Y-axis_4kN) .....	79
Fig. 5-43 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C_Y-axis_5kN) .....	79
Fig. 5-44 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SM45C_Y-axis .....	80
Fig. 5-45 Deformation profile according to load of ESPI of SM45C_Y-axis	80
Fig. 5-46 Comparison of deformation values according to load for rolling direction .....	81

## - NOMENCLATURE -

a	:	Amplitude of the light wave
$a \times b$	:	Length times width of the observed area
A	:	Amplitude of the harmonic vibration
$A_0$	:	Amplitude
D	:	Diameter
E	:	Young's modulus
f	:	Frequency
F	:	Force
G	:	Shear modulus
$I(x,y)$	:	Intensity distribution of an interferogram before loading
$I'(x,y)$	:	Intensity distribution of an interferogram after loading
R	:	Resistor
$R_0$	:	Distance between camera and center point of the investigated object
$R_s$	:	Distance between laser source and center point of the investigated object
$\alpha$	:	Angle of illumination, aperture angle
$\beta$	:	Phase relation of the vibration
$\delta$	:	Phase difference $\delta = \theta' - \theta$

- $\delta x', \delta y'$  : Shearing distance in the image plane
- $\delta x, \delta y$  : Shearing distance on the object's surface
- $\partial$  : Partial differential
- $\gamma$  : Shear deformation
- $\epsilon$  : Normal strain
- $\theta$  : Phase relation of light wave before loading
- $\theta'$  : Phase relation of light wave after loading
- $\phi$  : Relative phase between two points before loading
- $\phi'$  : Relative phase between two points after loading
- $\Delta$  : Relative phase change of the shearogram
- $\Delta_x$  : Relative phase change of the shearogram in the  
x-shearing direction
- $\Delta_y$  : Relative phase change of the shearogram in the  
y-shearing direction
- $\lambda$  : Wavelength
- $\sigma$  : Normal stress
- $\pi$  : Constant

## Abstract

### A Study on Quantitative Measurement of In-Plane Displacement by Improving Measurement Resolution of Dual-Beam Shear Interferometer

Kang Chan Geun

Advisor : Prof. Kyeong-Suk Kim, Ph.D.

Dept. of Mechanical System & Automotive Engineering,  
Graduate School of Chosun University

Strain analysis occupies an important position in the fields of mechanics, mechanical and civil engineering and the automotive and aerospace industry.

It supplies substantial information for designing and dimensioning products as well as providing a scientific basis for optimizing a component's shape and for quality control and assurance. Because of its many advantages, it is expected that shearography will be used for strain measurements in components and structures. Up to now, it has been used mainly for NDT. Existing approaches include: strain gauges or strain gauge arrays, digital image correlation(DIC), digital speckle photography(DSP), holographic interferometry, laser speckle correlation, and digital speckle pattern interferometry(ESPI), and digital shearography as either temporal phase shift digital shearography(TSP-DS) or spatial phase shift digital shearography(SPS-DS).

Strain gauges have been commonly used in the last few decades. Although they are relatively inexpensive, strain gauges provide only localized information, and the spatial resolution is severely restricted by the size and shape of the gauges. Also, strain gauges can only detect an average value in the region covered by the gauge. They can hardly capture peak strains or a high-resolution distribution, particularly in a region with a large strain gradient.

Furthermore, any errors in alignment, wiring, or gluing can lead to unreliable results.

ESPI has been heralded as a new era of full-field microscopic level deformation analysis. However, the technique is too sensitive to external turbulence such as vibration and temperature change to be robust for in field applications. Another consideration of this technique is that it measures deformation directly. To measure the strain, an additional image differential operation is needed that can introduce noise in the final results.

Digital shearography directly measures the deformation gradient or strain components. It has the advantages of being full field, noncontact, highly sensitive, and robust. It has a much higher measurement sensitivity compared to noncoherent measurement methods (such as strain gauge and DIC). Compared to other coherent measurement methods (such as holographic interferometry and ESPI), it is more robust and applicable for in-field tests.

In this paper, in-plane deformation measuring system using shearography was constructed to measure the in-plane deformation of the measuring object and the in-plane deformation of the object was quantitatively measured according to the load and surface treatment conditions of each measuring object. At the same time, we tried to verify the reliability of the proposed technique by performing it simultaneously with the electronic speckle pattern interferometer system, which is another laser application measurement technology. Based on the strong advantages of dual-beam shear interferometry, quantitative measurement of in-plane deformation in a specimen can improve the reliability, safety, soundness and conservativeness of structures such as nuclear power, ships and automobiles. It is expected to contribute to the foundation of energy saving effect and material saving effect by life evaluation as a new growth engine technology of green industry.



# 제1 장 서 론

## 제 1절 연구 배경

스트레인 분석은 기계, 토목, 자동차, 선박 및 항공 우주 산업 분야의 중요한 위치를 차지하고 있다. 이는 제품의 설계 및 치수 선정은 물론 제품의 모양을 최적화하고 품질 관리 및 보증을 위한 과학적 근거를 제공하는데 실질적인 정보를 제공한다. 이러한 많은 이점 때문에 구성 요소 및 구조물의 응력 측정에 shearography가 사용될 것으로 예상되어 지금까지 NDT분야에 주로 사용하고 있다.

Shearography의 다른 중요한 적용은 변형 측정을 위한 것이나 기존 기술은 정적 측정만을 위한 것이다. 스트레인 분석에 있어 최근 몇 년 동안 FEA (Finite Element Analysis)와 같은 수치 해석 방법이 빠르고 안전하게 설계 및 제조 되도록 산업 분야에서 널리 사용되어왔다. 이 수치 해석은 종종 실험 측정 결과가 수치 모델을 만들기 위한 시작 데이터 또는 모델을 개선하기 위한 유효성 확인 데이터로 사용될 수 있으므로 까다로운 변형 측정 도구를 필요로 한다. 한 마디로 모델 제조 설계는 변형 측정 결과로 시작하여 끝난다. 따라서 유효한 실험 변형 측정 도구가 이러한 산업의 초석이 되었으며 일반적으로 사용되는 변형 측정 및 현재 광학 변형 측정 방법의 장점을 보여준다.

Table 1-1에서 보는 바와 같이 현재 스트레인 측정법에 대한 각각의 기술 내용을 보여주고 있다. 기존 변형 측정 방법에 스트레인 게이지 또는 스트레인 게이지 어레이, 디지털 이미지 상관법 (DIC), 디지털 스펙클 촬영 (DSP), 홀로그래픽 간섭계, 레이저 스펙클 상관 및 디지털 스펙클 패턴 간섭계(ESPI), 시간 위상 이동 디지털 Shearography (TPS-DS) 또는 공간 위상 이동 디지털 Shearography (SPS-DS) 중 하나로서의 디지털 Shearography 등을 볼 수 있다.

스트레인 게이지는 지난 수십 년 동안 널리 사용되어 왔으며 비록 상대적으로 값이 싸지만, 스트레인 게이지는 지역화 된 정보만을 제공하며 공간 해상도는 게이지의 크기와 모양에 따라 크게 제한된다.<sup>1</sup> 또한 스트레인 게이지는 게이지로 덮인 영역의 평균값만 탐지 할 수 있고 특히 큰 변형 경사도가 있는 지역에서 정점 변형이나 고해상도 분포를 거의 캡처 할 수 없다. 또한 정렬, 배선 또는 접착에 오류가 있으면 신뢰할 수 없는 결과가 발생할 수 있다.

기계 영상 사진 측량법으로 알려져 있는 DIC는 스트레인 측정을 위한 산업 도구로 받아 들여지는 전 영역 비접촉 기술이며 수백 마이크로 이상의 미소변형을 측정하기 위해 효과적이다.<sup>2,3</sup> 비교적 큰 변형 조건에서 변형 측정의 경우 DIC는 시험 물체의 표면에 흑백 스펙클 패턴을 적용 할 수 있는 이상적인 선택이다. 그러나 DIC는 수백 마이크로 변형 이하의 변형을 측정하기에는 정확하지 않다.

DSP는 DIC와 유사한 기술로서 두 방법 모두 하중 전후의 스펙클 패턴 영역의 회색 값 분포를 추적하기 위해 상관 함수를 사용한다. 차이점은 DIC가 물체 표면에 페인트 된 흑백 스펙클을 사용하는 반면 DSP는 레이저 스펙클 패턴을 직접 사용한다는 점이다.<sup>4,5</sup> 그러나 DSP는 다른 레이저 기반 기술 (ESPI 및 Shearography)에 비해 낮은 해상도를 제공하며 평면 내 민감도만 제공하므로 DSP가 3D 측정을 얻으려면 ESPI나 Shearography와 같은 다른 기술과 결합되어야 한다.<sup>6,7</sup>

ESPI는 전체 영역, 현미경 수준의 변형 분석 시대를 알렸으나 이 기술은 진동 및 온도 변화와 같은 외부 난기류에 너무 민감하여 현장에서의 적용을 위해 내부 구조가 견고합니다.<sup>8</sup> 이 기법의 또 다른 고려 사항은 변형을 직접 측정한다는 것이다. 변형을 측정하기 위해 최종 결과에 노이즈가 발생할 수 있는 추가 이미지 미분 연산자가 필요하다.

디지털 Shearography 측정은 변형 경사도 또는 변형률 구성 요소를 실시간, 비접촉, 전체 영역을 측정하고 매우 감도가 좋고 견고하다는 장점이 있다. 비간섭성 측정 방법 (스트레인 게이지 및 DIC)과 비교하여도 훨씬 더 높은 측정 감도를 가지고 있다. 다른 간섭성의 측정 방법 (홀로그래피 간섭법 과 ESPI와 같은)에 비해 현장에서 더 강력하고 적용이 가능하다.<sup>9</sup>

Table 1-1 Summary of the existing approaches for strain measurement

Current technology	Advantage	Limitations
Strain gauges and gauge arrays	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inexpensive</li> <li>• Applicable both for static and dynamic measurements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restricted by gauge size and shape</li> <li>• Hard to capture peak strain</li> </ul>
Digital image correlation (DIC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robust</li> <li>• Applicable in both static and dynamic measurements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limited resolution (typically &gt; hundreds of microstrains)</li> <li>• Needs surface speckle painting</li> </ul>
Digital speckle photography (DSP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatively low sensitivity</li> <li>• Applicable for both static and dynamic measurement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Only sensitive for in-plane measurement</li> </ul>
Holographic interferometry	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High sensitivity</li> <li>• Mainly applicable in static measurement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Measures deformation directly</li> <li>• Needs further differential operation to obtain strain</li> <li>• Not robust in in-field applications; easy to be disturbed by external turbulence.</li> </ul>
Temporal phase shift digital shearography (TPS-DS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robust, High sensitivity</li> <li>• Measures strain directly</li> <li>• Applicable only in static measurement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Not applicable in dynamic measurement</li> </ul>
Spatial phase shift digital shearography (SPS-DS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robust, high sensitivity</li> <li>• Applicable both in static and dynamic measurements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Measurement speed only limited by camera capability</li> </ul>

## 제 2절 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 면내 변위 측정을 위한 Dual-beam 전단간섭계의 이론을 바탕으로 간섭계 구성 및 표준 시험편 인장을 통한 면내 변위를 측정한다. 위상 이동 기법을 사용하여 하중 전후의 위상 분포를 측정하고 하중 전후 두 위상 분포를 감산하여 변형된 시험 대상체의 변형된 위상 지도를 획득한다. 위상 지도를 획득한 후 이미지 필터링 절차 후에 위상 평가 최종 단계인 언래핑을 수행하여 정량적으로 대상체의 변형량을 획득한다.

비접촉 방식 실시간 측정 기술인 레이저 응용 계측 기술중의 하나인 Dual-beam 전단간섭계 시스템은 기계 구조물에 주로 발생하는 역학적 변형, 회전, 응력변형, 자연부하에 의한 결함, 열변형에 의한 결함등을 측정할 수 있는 시스템이며 측정하는 목적에 따라 면외 간섭계와 면내 간섭계 두 분류로 나뉘게 된다.

Dual-beam 전단간섭계 시스템을 이용한 면내 변위 계측 시스템은 면외 변위 계측 시스템과 구조적으로 다르며 구조적 상이함은 단지 검출 영역이 면내·외의 차이일뿐 구성상 크게 다를 바가 없다.

따라서 본 논문에서는 측정 대상체의 면내 변위를 측정하기 위해 Dual-beam 전단간섭계를 이용한 면내 변위 계측 시스템을 구성하고 각 측정 대상체의 하중 및 표면 처리 조건에 따라 대상체의 면내 변위량을 정량적으로 측정하였다. 동시에 또 다른 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 전차처리 스펙클 패턴 간섭계(ESPI)시스템과 동시에 수행하여 제안된 기법의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

본 논문에서 제안하는 Dual-beam 전단간섭법의 강인한 장점을 바탕으로 대상체에 발생하는 면내 변위의 정량적 측정을 통하여 원자력, 선박, 자동차 등 구조물의 신뢰성, 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있고 녹색 산업의 신성장동력 기술로서 수명 평가에 의한 에너지 절약 효과와 재료 절감 효과의 기반 확립에 기여할 것으로 기대된다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 레이저의 특성

레이저는 자극 방사에 의한 광 증폭의 약자로서 모든 빛은 물질 무늬가 있는 전자 복사이다. 일반적인 광원과 비교할 때 레이저는 높은 단색성, 일관성 및 방향성과 같은 3가지 교유한 장점을 가지고 있다. 레이저는 매우 단색의 광원으로 이상적인 경우 레이저에서 방출되는 모든 광자가 동일한 파장을 갖는다는 것을 의미하기도 한다. 또한 레이저는 유도 방출 현상 및 레이저 공동의 특수 설계를 통해 높은 단색성을 보장한다. Fig. 2-1은 자극 방출의 원리를 보여주고 고전 양자 역학 이론에 따르면 광자의 에너지  $E$  는 다음과 같이 나타난다.

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

여기서  $h$  는 플랑크 상수이고  $\nu$ 는 광자의 주파수이다.

$$c = \nu\lambda \quad (2.2)$$

여기서  $c$ 는 빛의 속도,  $\lambda$ 는 빛의 파장이다. 유도 방출에서 레이저 재료(예를 들어 헬륨 네온 가스)는 특정 에너지  $h\nu$ 에 의한 것이다.

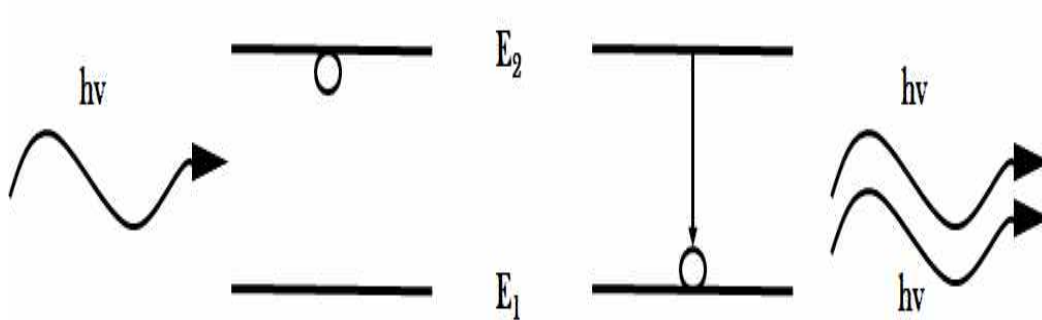


Fig. 2-1 Schematic of stimulated emission

여기에 의해  $E_2$  에너지 레벨의 원자에서 광자가  $E_1$  레벨로 상승하게 된다.  $E_2$  와  $E_1$ 의 에너지 레벨이  $2hv$  에너지의 방사선에 의해 주어진 관계를 충족 시키면 출력된다. 식(2.3)은 에너지 레벨과 출력 레이저 파장 사이의 선형 관계를 나타낸다.

$$E_2 - E_1 = hv = hc/\lambda \quad (2.3)$$

레이저의 단색 성을 보장하는 두 번째 요소는 레이저 공진의 특별한 설계이다. Fig. 2-2에서 보느바와 같이 레이저 공진은 일반적으로 전체 거울, 부분 거울 및 레이저 재료로 구성되고 레이저 공진 길이는 공진 시스템을 형성할수 있도록 신중하게 설계되고 레이저 발진은 공진기의 공진 주파수에서 지속된다. 레이저 공진기의 반대편 끝에 위치한 거울은 동일한 파장에서 더 많은 광자의 유도 방출에 의해 세기를 얻기 위해 전후로 진행할 수 있으며 이로 인해 매체를 통과하는 길이가 길어 증폭이 증가한다.

따라서 레이저 광은 보통 단색성의 특성인 파장에서 매우 순수하고 다중 반사는 공진벽에 평행하게 진행하는 광자만이 두 거울에 반사되기 때문에 평행한 빔을 생성한다. 그러나 실제로 단색(단파장)의 레이저는 거의 없으며 대개 단일 파장 값(중심 파장)을 중심으로 매우 좁은 파장 대역을 가지고 있다. 매우 좁은 파장 대역은 시관적 일관성이라고 불리는 현상으로 인해 생긴다.

레이저는 높은 간섭성의 광원으로서 광학에서 빛의 두 개의 광파는 일정한 위상차와 동일한 파장을 가지면 완벽한 간섭이다. 또한 간섭은 고정 간섭을 가능하게 하는 파의 이상적인 특징이다.

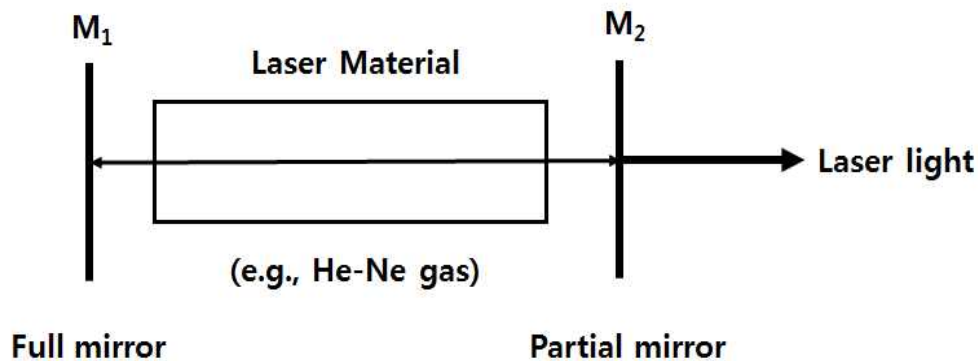


Fig. 2-2 Schematic of laser cavity

## 제 2 절 파동 방정식과 간섭

빛은 전자파로 파장 특성을 가지고 있다. Fig. 2-3은 1차원 파를 보여준다 (빛의 자기장은 무시되고 전기장만 표시). 두 피크 사이의 거리는 레이저의 파장  $\lambda$ 로 정의 된다. 빛의 속도가  $c$ 이기 때문에 빛의 주파수  $f$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.4)$$

여기서 광자와 같은 미세 입자의 빈도를 논의 할 때  $\nu$ 가 일반적으로 입자의 빈도를 나타내는데 사용된다는 점에 유의해야한다. 그러나 거대한 수의 입자가 거시적으로 움직이는 파동의 주파수를 논의 할 때  $f$ 는 파동의 주파수를 나타내기 위해 일반적으로 사용된다. 일반적으로 Fig. 2-3에 제시된 물결은 사인 함수로 간단히 나타낼 수 있다.

$$U = a_0 \sin(\omega t - \Phi) \quad (2-5)$$

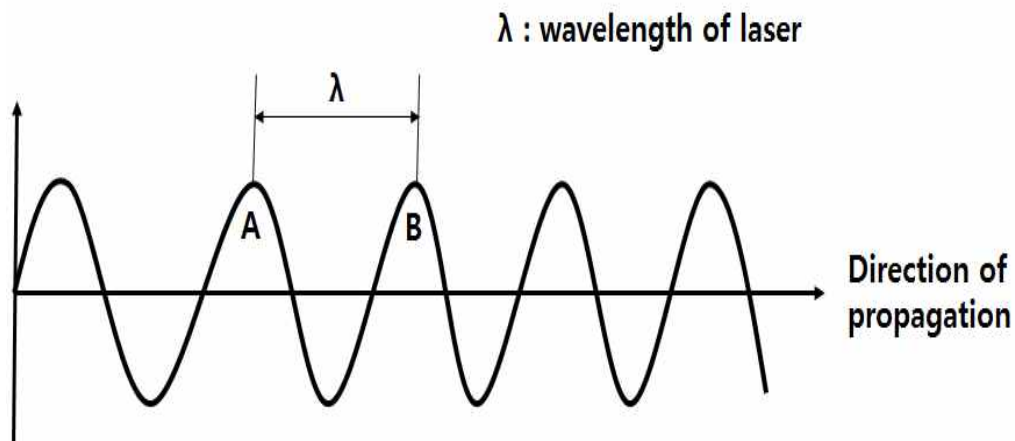


Fig. 2-3 Schematic of 1D wave

여기서  $a_0$ 는 파동의 진폭,  $w$ 는 파동의 각 주파수이며  $2\pi f$ 에 해당하며  $\Phi$ 는 위상각이다. 사인 함수를 사용하여 다중 파의 합을 계산하려면 식(2.4)는 매우 간단하지만 각 파동의 진폭이 같을 때만 가능하다. 진폭이 다른 경우, 사인 함수로서의 표현은 매우 복잡하게 되며 여러 파장의 합계를 처리하는 것보다 편한 방법은 일반적으로 빛의 파장을 복잡한 방식으로 표현하는 것이다. 이 표현에서 광파는 복소수로 기술된다.<sup>10</sup>

$$U = a_0 \exp[i(wt + \Phi)] \quad (2.6)$$

$$U = a_0 e^{iwt} e^{i\Phi} \quad (2.7)$$

여기서  $e^{iwt}$ 는 빛의 색을 결정하고  $e^{i\Phi}$ 는 빛의 위상각을 결정한다.

레이저 간섭의 경우 두 파장은 같은 파장을 가지므로 간섭이 발생할수 없다. 따라서 이 조건에서  $e^{iwt}$  항의 같은 값을 가진다. 이 조건하에서 식 (2.6)은  $\phi = wt + \Phi$ 으로 더 단순화 될 수 있다. 따라서 레이저 광을 다음과 같이 묘사할 수 있다.

$$U = a_0 \exp(i\phi) = a_0 e^{i\phi} \quad (2.8)$$

간섭이란 두 파가 겹쳐서 더 크거나 더 낮은 진폭의 결과 파를 형성하는 현상이다. 두가지 파 사이에서 발생하는 간섭 현상에 대한 다음과 같은 세가지 요구사항이 있다.

1. 두 개의 파는 동일한 파장 또는 주파수를 가져야한다.
2. 두 파는 일정한 위상차를 가져야한다.
3. 두 파의 진동 방향은 서로 직각이 될수 없다.



간섭을 설명하기 위해 일반적인 마이켈슨 간섭계를 사용하며  $M_1$ 과  $M_2$ 에서 반사된 두 개의 광파는 동일한 파장이지만 다른 진폭을 갖는다고 가정한다.

$$U_1 = a_0 \exp(i\phi_1) = a_1 e^{i\phi_1} \quad (2.9)$$

$$U_2 = a_0 \exp(i\phi_2) = a_2 e^{i\phi_2} \quad (2.10)$$

두 파의 합은 다음과 같다.

$$U_T = U_1 + U_2 = a_1 e^{i\phi_1} + a_2 e^{i\phi_2} \quad (2.11)$$

두 결과 파의 강도는 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} I &= U_T \cdot U_T^* = (a_1 e^{i\phi_1} + a_2 e^{i\phi_2}) \cdot (a_1 e^{-i\phi_1} + a_2 e^{-i\phi_2}) \\ &= (a_1^2 + a_2^2) = a_1 a_2 [e^{i(\phi_2 - \phi_1)} + e^{-i(\phi_2 - \phi_1)}] \\ &= (a_1^2 + a_2^2) = 2a_1 a_2 \left[ \frac{e^{i(\phi_2 - \phi_1)} + e^{-i(\phi_2 - \phi_1)}}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.12)$$

만약  $\cos(\phi_2 - \phi_1) = \frac{e^{i(\phi_2 - \phi_1)} + e^{-i(\phi_2 - \phi_1)}}{2}$  를 안다고 가정했을 때,

$$I = (a_1^2 + a_2^2) + 2a_1 a_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (2.13)$$

여기서 강도의 코사인 분포를 찾을 수 있다.  $\phi_2 - \phi_1 = 2n\pi$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  일 때 이를 위상이라고 하고 강도 방정식은 최대값을 가지며 밝은 프린지 또는 스펙클로 보여진다.

$$I_{\max} = (a_1^2 + a_2^2) + 2a_1a_2 \quad (2.14)$$

$\phi_2 - \phi_1 = (2n + 1)\pi$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  일 때 이를 위상차라고 하며 강도 방정식은 최소값을 가지며 어두운 프린지 또는 스펙클로 보여진다.

$$I_{\min} = (a_1^2 + a_2^2) - 2a_1a_2 \quad (2.15)$$

대조의 정의  $\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$  이고, 식(2.14)와 식(2.15)를 대체하면 다음과 같이 표현한다.

$$\gamma = \frac{2a_1a_2}{a_1^2 + a_2^2} \quad (2.16)$$

그러면  $I_0 = (a_1^2 + a_2^2)$ 로 되고 식 (2.13)은 다음과 같이 쓰여진다.

$$I = I_0[1 + \gamma \cos(\phi_2 - \phi_1)] \quad (2.17)$$

식 (2.13)을  $A = (a_1^2 + a_2^2)$  와  $B = 2a_1a_2$  일 때 더 간단히 표현하면,

$$I = A + B \cos(\phi_2 - \phi_1) \quad (2.18)$$

이 형식은 단순성으로 인해 시간적 위상 이동에 일반적으로 사용한다. 식 (2.17)의 경우 위상차의 변화로 인해 강도의 코사인 분포가 보여지며 결국 어둡고 밝은 줄무늬 또는 스펙클이 나타난다. 인접한 두 개의 어두운 줄무늬와 스펙클 사이에서 위상차는  $\phi_2 - \phi_1 = 2\pi$  이다.

### 제 3 절 레이저 스페클 현상

레이저 빛에서 확산 반사(또는 투과)하는 물체를 보거나 사진을 찍을 때 물체의 이미지는 알갱이 모양의 현상을 가지며 무작위로 분포 된 빛과 어두운 스페클로 덮여있는 것 같다. 물체가 움직이면 스페클이 반짝거리고 물체를 기준으로 움직인다. 스페클(speckle)의 이러한 현상은 간섭성이 강한 빛을 사용할 때 내재되어 있고 공간의 관측 지점에서 물체의 모든 조명 지점에서 점으로 흩어지는 복잡한 진폭은 간섭계로 중첩되어 그 지점에서 강도와 위상을 형성한다. 이러한 공간에서의 결과적인 간섭 패턴도 Fig. 2-4에 도시된 것과 같은 스페클 패턴이다.

스페클 패턴은 객관적이고 주관적인 스페클 두가지 범주로 나뉘지며 Fig. 2-5는 자유 공간에 존재하는 레이저 스페클의 객관적 스페클을 보여주고 있다.<sup>11</sup>

객관적 스페클 평균 크기  $\sigma_o$  는 식 (2.19)와 같다.

$$\sigma_o = \frac{\lambda d}{A} \tag{2.19}$$

여기서  $A$ 는 조명 영역의 직경이고  $d$ 는 물체 표면과 검출기 사이의 거리이고  $\lambda$ 는 레이저 광의 파장이다.

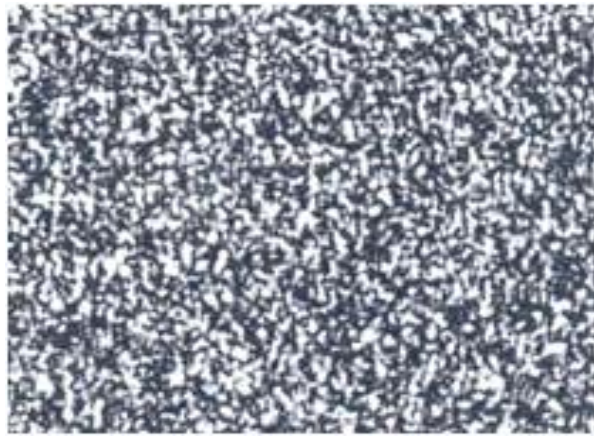


Fig. 2-4 A typical laser speckle pattern

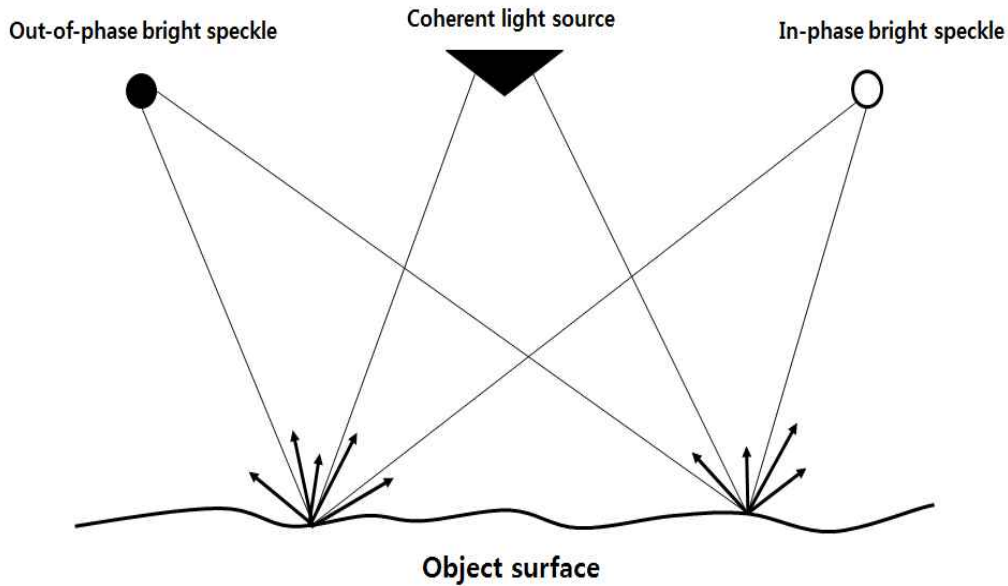


Fig. 2-5 Formation of objective speckle in free space

이미징 시스템을 사용하여 스페클을 관찰하면 그 결과는 주관적 스페클 (Fig. 2-6)과 같으며 그 크기는 객관적인 스페클 패턴 보다는 조리개에 따라 다르다. 주관적인 스페클은 이미지 평면에서 점 확산 함수 복소 진폭의 중첩에 의해 형성되고 이미지면의 각 점에는 물체 표면의 작은 부분에서 반사되는 광선만 등록된다. 따라서 스페클 패턴 크기는 이미지 조리개에 의해 수집된 산란광에 의존하고 스페클 크기는 렌즈 시스템을 통과하는 공간 주파수에 의해 결정된다.<sup>12</sup> 물체 표면을 바라보는 관찰자는 사람의 눈이 Fig. 2-6과 같이 비슷한 조리개와 렌즈 광학을 가지고 있기 때문에 주관적인 스페클 효과를 인지한다. 스페클 평균 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_s = \lambda \frac{f(1+M)}{D} \quad (2.20)$$

여기서  $f$ 는 렌즈의 초점 거리,  $D$ 는 조리개의 크기,  $f/D$ 는 렌즈의 수(조리개의 초점거리),  $M$ 은 배율이다.

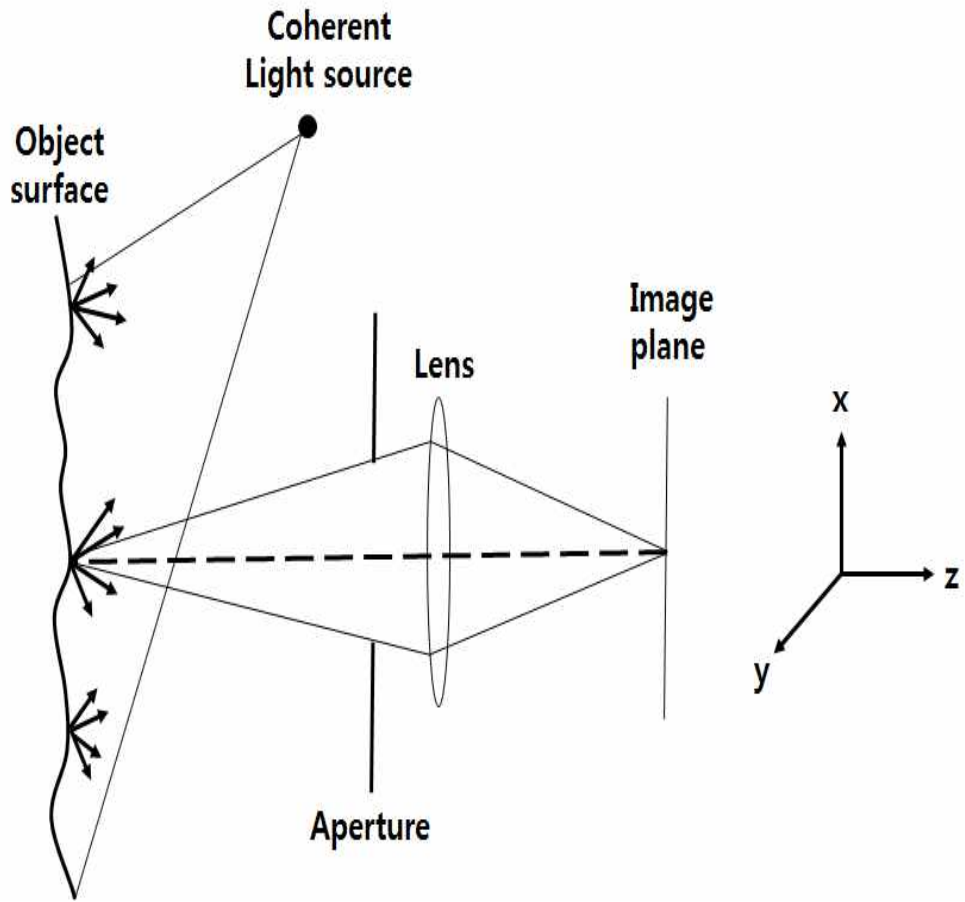


Fig. 2-6 Formation of subjective speckle

## 제 4 절 변형률 측정

### 1. 응력 변형률 측정 상태

외부 힘과 모멘트가 고체부에 작용하면 변형이 발생하며 변형 경사도 행렬은 식 (2.21)과 같이 나타난다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

행렬의 대각선 항은 변형률 성분이고, 대응하는 2차 대각 성분의 조합은 전단 변형률을 산출한다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.22)$$

홀로그래피, 레이저 스펙클 간섭계, 모아레 법, 스트레인 게이지 측정 및 열화상과 같은 실험적 기법은 일반적으로 테스트 대상의 표면만 측정한다. 물체의 표면 (또는  $z$  방향)에 수직 한 정보는 얻을 수 없다. 따라서 변형  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 는 물체의 표면에서만  $x$ 와  $y$ 의 함수이다.

변형 구배  $\partial u/\partial z$ ,  $\partial v/\partial z$  및  $\partial w/\partial z$  (식 2.21의 오른쪽 열)는 이러한 방법으로 직접 측정 할 수 없다. 몇 가지 경우에서의 평면 변형  $\partial w/\partial z$  간접적으로 계산 될 수 있으며 표면 측정 기술을 사용하여 다음 6 가지 구성 요소만 직접 측정 할 수 있다.

$$H^* = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

이러한 이유로 이러한 방법을 사용하면 평면 변형률  $\varepsilon_{xx} (= \partial u/\partial x)$ ,  $\varepsilon_{yy} (= \partial v/\partial y)$  와 전단 변형률  $\gamma_{xy} (= \partial u/\partial y + \partial v/\partial x)$ 만 측정 할 수 있다.

표면 정보를 얻는 기법으로 shearography는 변형 기울기  $\partial u/\partial z$ ,  $\partial v/\partial z$ ,  $\partial w/\partial z$ 를 직접 측정 할 수 없으므로 행렬  $H^*(\partial u/\partial x, \partial u/\partial y, \partial v/\partial x, \partial v/\partial y, \partial w/\partial x, \partial w/\partial y)$ 의 여섯 개 구성 요소에 대한 Shearogram은 변화가 독립적으로 측정 될 수 있음을 알 수 있다. Shearography의 기본 방정식이 다시 한번 제시 될 때, Shearogram의 면내와 면외 조건 사이의 관계가 명확해 진다.

## 2. 기하학적 관계

Fig. 2-7 에서 보는 바와 같이 광원  $L_1$  (Laser  $L_1$ ) 과 CCD 카메라가  $x-z$  평면에 조사 각도  $\theta_{xz}$ 로 위치 될 때, 전단 방향  $x$ 를 나타내는 상대적 위상 변화  $\Delta_{xx}$ 와 전단 방향  $y$ 에 대한  $\Delta_{yx}$ 가 된다. [식 (2.24)와 (2.25)]

$\Delta$ 의 첫 번째 침자는 전단 방향을 나타내며 두 번째 침자는 조명 평면을 나타낸다. ( $x$ 는  $xz$  평면에서의 조명을 의미하고,  $y$ 는  $yz$  평면에서의 조명을 의미한다.)

광원  $L_2$  및 CCD 카메라는  $yz$  평면에서 각도  $\theta_{yz}$ 을 형성하고, 식 (2.26)과 (2.27)에서 전단 방향  $x$ 에 대한  $\Delta_{xy}$  와 전단 방향  $y$ 에 대한  $\Delta_{yy}$ 로 나타낸다.

$$\Delta_{xx} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin\theta \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (2.24)$$

[ x-shearing direction,  $\theta$  in the  $x,z$ -plane ( $\theta_{xz}$ ) ]

$$\Delta_{yx} = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[ \sin\theta \frac{\partial u}{\partial y} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (2.25)$$

[ y-shearing direction,  $\theta$  in the  $x,z$ -plane ( $\theta_{xz}$ ) ]

$$\Delta_{xy} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin\theta \frac{\partial v}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (2.26)$$

[ x-shearing direction,  $\theta$  in the  $y,z$ -plane ( $\theta_{yz}$ ) ]

$$\Delta_{yy} = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[ \sin\theta \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (2.27)$$

[ y-shearing direction,  $\theta$  in the  $y,z$ -plane ( $\theta_{yz}$ ) ]

방정식 (2.24)에서 (2.27)은 보통 shearogram 면내뿐만 아니라, 면외 변위 구배가 포함되어 있음을 보여준다.



앞에서 설명한 것처럼, shearography는 직접 간단하게 표준 조명과 표준 관찰을 통하여 면외 변위  $\partial w/\partial x$  와  $\partial w/\partial y$ 의 유도체를 측정할 수 있으나 조명 각도의 조작으로 식 (2.24) 또는 (2.27)에서 면외 성분  $\partial w/\partial x$  또는  $\partial w/\partial y$ 를 제거 할 수 없다. 감도 벡터  $k_s$  가 결코  $x$  또는  $y$  방향으로 정확하게 떨어지지 않을 것이고 조명 각도  $\theta$  ( $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ )의 조정이 절대로 ( $1 + \cos\theta = 0$ ) 항을 산출하지 않기 때문이다.

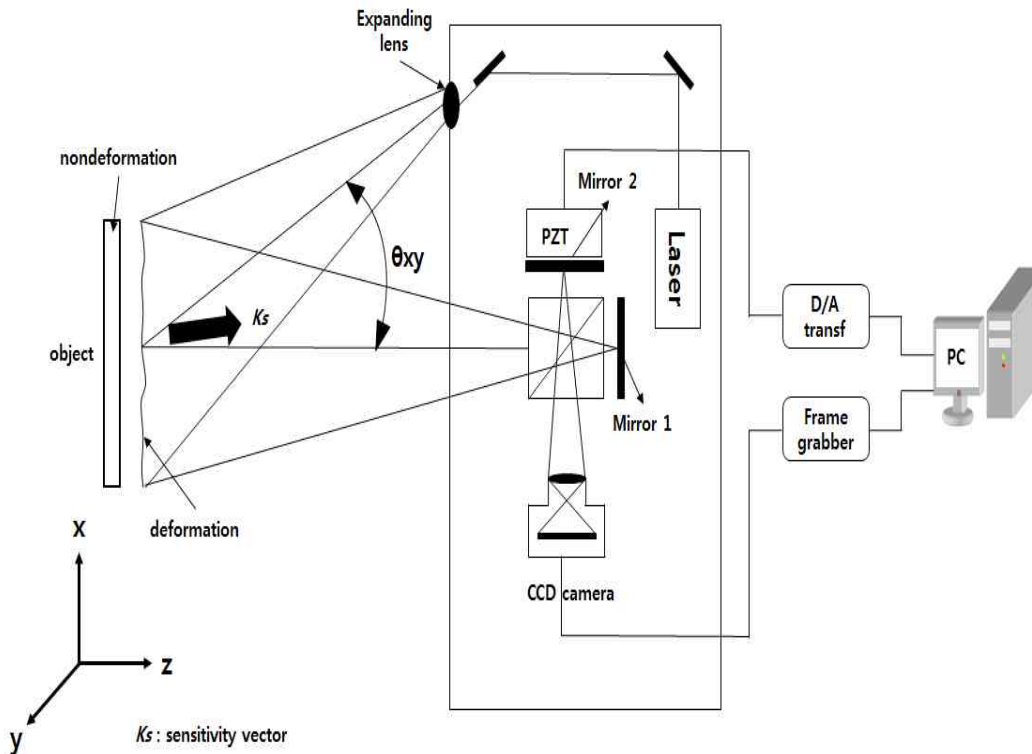


Fig. 2-7 Schematic setup of digital shearography using single-beam illumination

### 3. 광학 관계

면내 항  $\partial u/\partial x$ 를 측정하기 위해 (또는  $\partial u/\partial y$ ,  $\partial v/\partial x$ ,  $\partial v/\partial y$ ) 상기 식의 제 2 항이 제거 되어야 한다. 앞서 언급한  $(1 + \cos\theta)$ 와 같이 두 번째 항은 0이 될 수 없다. 두 번째 항을 제거 하는 유일한 방법은 기울기  $\partial w/\partial x$  또는  $\partial w/\partial y$  자체의 표현을 제거하는 것이다. 이것은 면외 변위 구배  $\partial w/\partial x$  및  $\partial w/\partial y$ 가 0이 되는 변형의 평면 상태의 경우에 발생한다.

이 경우 상기 방정식에서 4개의 면내 항 변형 거동  $\partial u/\partial x$ ,  $\partial u/\partial y$ ,  $\partial v/\partial x$  및  $\partial v/\partial y$  은 비교적 큰 조명 각  $\theta$ 에서 측정 될 수 있다. 전제 조건  $\partial w/\partial x=0$  및  $\partial w/\partial y=0$  없이 복잡한 형상, 경계 조건 및 하중을 갖는 물체의 면내 변형률을 정확하게 측정하는 것은 기존 Shearography 배열을 사용하기 불가능하다. 따라서 변형률 측정을 위한 Shearography의 적용은 여러 가지 장점을 보여주지만 스트레인을 직접 측정하기에는 한계가 있다.

### 4. 두 개의 빔을 사용한 면내·외 변형률 성분 결정

Shearography와 마찬가지로 ESPI는 하나의 빔을 사용하여 순수 면외 변위  $w(x,y)$ 만 측정한다. ESPI는 2개의 빔 조명 방법으로 면내 변위  $u$  및  $v$ 를 측정할 수 있다. (같은 각도에서 반대 방향으로 물체의 표면을 비춘다.)<sup>13,14</sup>

Fig. 2-8 은 두 개의 빔을 사용한 면내 변위  $u$  또는  $v$ 를 측정하기 위한 ESPI의 개략적인 구성도를 보여준다. 이 구성 요소는 같은 각도지만 반대 방향으로 두 개의 빔을 동시에 조명 된다. 조명 빔이  $x,z$  평면에 있을 때 면내 변위  $u(x,y)$ 를 얻고  $y,z$  평면에서 조명될 때 면내 변위  $v(x,y)$ 가 측정된다.

두 개의 빔 방법이 면내 변위를 결정하기 위해 Shearography에서도 사용될 수 있는지에 대한 의문이 제기된다. 동일한 각도에서 서로 마주하지만 상이한 방향을 향하는 2개의 빔이 CCD 카메라 전방에 있는 전단 장치없이 사용된다면 면내 변위 프린지 패턴이 동시에 생성된다. 또한 이미지 평면에서의 면내 변위가 전단된 프린

지 패턴으로 생성된다. 전단 장치를 사용함으로써 이미지 평면에서의 면내 변위에 대해 약간 변화된 프린지 패턴이 생성되고 이 결과를 모아레 효과라고 한다.

모아레 효과에 기인한 면내 변위의 약간 이동된 프린지 패턴의 중첩은 면내 변위를 나타내는 새로운 프린지 패턴을 산출한다.<sup>15</sup> 그러나 면내 변형률선의 대조는 2개의 스펙클 간섭 줄무늬의 모아레 효과 때문에 매우 나쁘다. 게다가 자동 및 수치 해석이 가능하지 않다.<sup>16</sup>

위상이동(Phase-shifting) Shearography를 이용한 면내 변위 측정에 대한 성공적인 결과는 Steinchen, Yang, Schuth 와 Kupfer에 의해 처음 보고 되었다.<sup>17</sup>

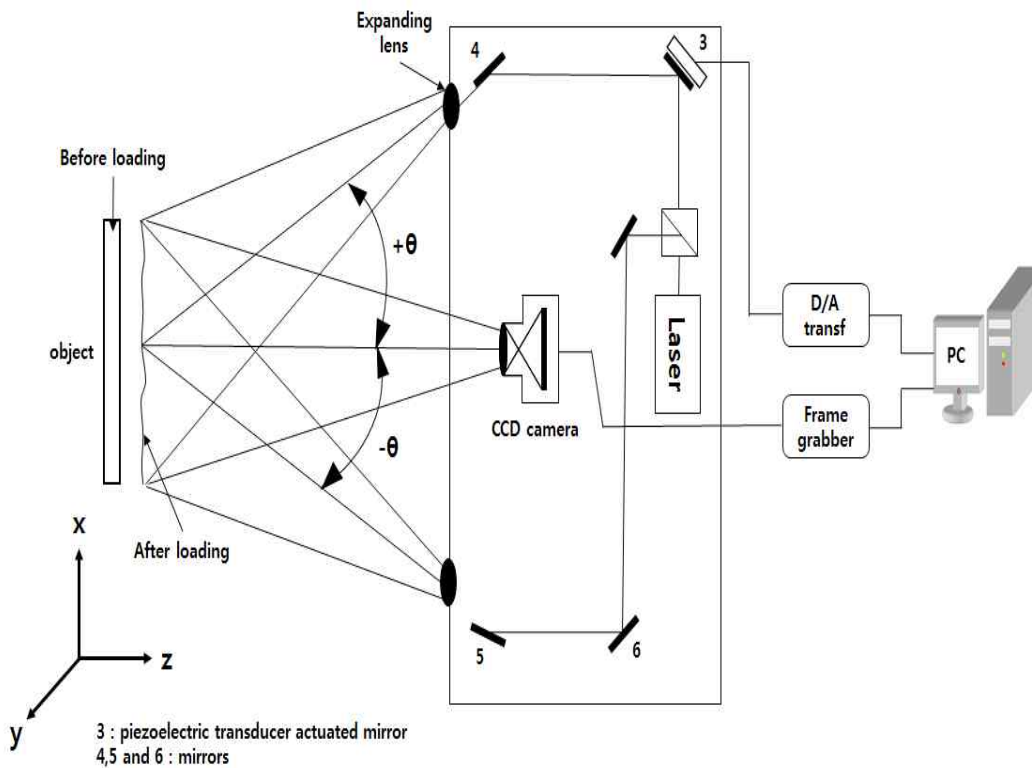


Fig. 2-8 Schematic arrangement of ESPI for measuring in-plane deformations  $u$  and  $v$  using the dual-beam illumination method simultaneously

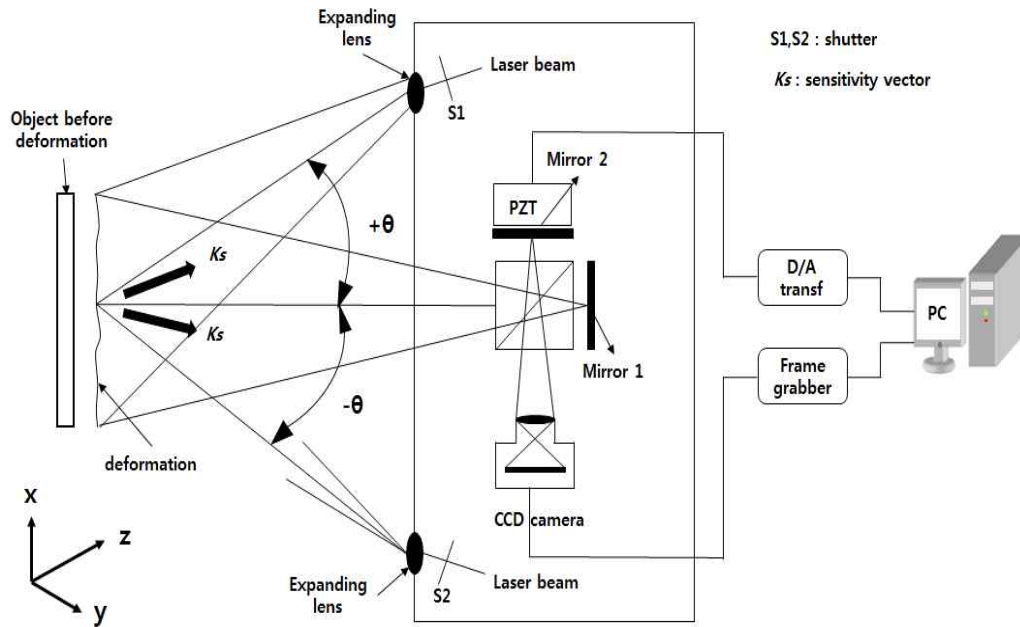


Fig. 2-9 The experimental setup of digital shearography for pure in-plane strain measurement with two symmetric illumination beams used sequentially

Fig. 2-9은 시야 방향에 대해 대칭인 2개의 레이저 빔을 가진 면내 변형률 측정용 디지털 Shearography의 실험 구성도를 나타낸다. 테스트하는 동안 물체는 레이저 빔에 의해 번갈아 조명된다.

처음에는 셔터  $s_1$ 이 열리고  $s_2$ 가 닫힌다. (Shearwin 프로그램에 의해 제어됨)

조명 각도  $+\theta$ 에 대응하는 변형 전의 스펙클 패턴의 위상 분포  $\phi_{+\theta}$ 는 식 (2.28)에서 설명한 바와 같이 계산되어 프레임 저장소 또는 컴퓨터에 저장된다. 셔터  $s_1$ 이 닫히고 셔터  $s_2$ 가 열리게 되면 또한 조명 각도  $-\theta$ 에 대응하는 스펙클 패턴  $\phi_{-\theta}$ 의 위상 분포가 식(2.29)에 의해 계산되어 저장된다.

물체가 변형 된 후 위상 분포  $\phi'_{+\theta}$ 와  $\phi'_{-\theta}$ 은  $\phi_{+\theta}$ 와  $\phi_{-\theta}$ 가 같은 방식으로 계산이 된다. 일단 이들 데이터가 취해지면 조명 빔  $+\theta$ 에 대한 상대적인 위상 변화  $\Delta_{+\theta}$ 는  $\phi'_{+\theta} : \Delta_{+\theta} = \phi'_{+\theta} - \phi_{+\theta}$ 로부터  $\phi_{+\theta}$ 을 빼서 계산 될 수 있다.

유사하게 조명 빔  $-\theta$  에 대한 상대 위상 변화  $\Delta_{-\theta}$  는 또한  $\phi'_{-\theta} : \Delta_{-\theta} = \phi'_{-\theta} - \phi_{-\theta}$  으로부터  $\phi_{-\theta}$  를 뺀 값으로 계산 될 수 있다. 따라서 두 개의 조명 빔에 해당하는 Shearogram의 위상 맵이 얻어진다. Shearwin 프로그램은 셔터  $s_1$  과  $s_2$  를 제어하고 테스트를 수행하며 위상 분포와 상대 위상 변화  $\Delta$  를 계산한다. 조명 빔  $+\theta$  와  $-\theta$  은  $x, z$  평면에 있고 전단이  $x$  방향이면 식 (2.24) 경우에 적용 될 수 있다.

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \sin(+\theta) + \frac{\partial w}{\partial x} [1 + \cos(+\theta)] \right] \quad (2.28)$$

유사하게 조명 빔에 대응하는  $-\theta$ , Shearogram의 상대적 위상 변화  $\Delta_{-\theta}$  는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\partial u/\partial x$  는 측정할 매개변수이다.

$$\Delta_{-\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \sin(-\theta) + \frac{\partial w}{\partial x} [1 + \cos(-\theta)] \right] \quad (2.29)$$

$\sin(-\theta) = -\sin(\theta)$  와  $\cos(-\theta) = \cos(\theta)$  가 주어졌을 때  $\Delta_{+\theta}$  와  $\Delta_{-\theta}$  을 빼서 면외 구성 요소를 제거할 수 있다.

상대 위상 변화  $\Delta_{+\theta}$  와  $\Delta_{-\theta}$  는 위상 이동 기술을 도입하여 각 픽셀 포인트에 결정되었기 때문에 두 Shearogram 사이의 빼기는 Shearwin 프로그램에서 수행할 수 있다.

$$\Delta_I = \Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = \frac{4\pi\delta x \sin\theta}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.30)$$

듀얼 빔 조명 방법은 면내 변위 측정을 위한 holography에서와 같이 사용된다. 물체가 동시에 조영되는 대신 면내 변위 측정을 위한 Shearography와 같이 추가 셔터  $s_1$  과  $s_2$  를 열고 단음으로써 순차적으로 조명된다.

0과 255 사이의 회색 값만 정의된다는 점을 강조해야 한다. 이들은 0과  $2\pi$  사이의 위상 값에 해당하고 디지털 빼기 때문에 0보다 작은 값이나 디지털 덧셈으로 인해 255보다 큰 값은 정의되지 않는다. 앞에서 설명한 것처럼 이 수치는 0보다 작은 값에 대해  $2\pi$  개의 주기 함수를 더하거나 값이 255보다 큰 경우 2를 빼서 0에서 255 사이의 숫자로 변환 할 수 있다. 이 절차는 별도의 정의가 없는 경우 두 위상 맵에 대한 모든 빼기 및 더하기 계산에 대해 실행된다.

면내 변위  $\partial u/\partial x$  와 면외 변위  $\partial w/\partial x$  측정하기 위한 전술한 유도는 Shearography의 감도 벡터를 고려하여 설명할 수 있다. 감도 벡터  $k_s$ 의 방향은 Shearography의 각도  $+\theta_{xz}/2$  아래의 조명 방향  $+\theta_{xz}$  및 조명 방향  $-\theta_{xz}/2$ 의  $-\theta_{xz}$  각도 아래에 있다. 두 개의 Shearogram을 뺀 결과 물체 표면의 면내 방향과 정확히 일치하는 새로운 패턴의 감도 벡터가 산출된다.  $xz$  평면의 조사각  $\pm\theta$  일 때 감도 벡터는  $x$ 방향으로 향하게 된다. 식 (2.30)으로부터  $x$  전단방향에서 면내 변형률  $\partial u/\partial x$ 은  $k_s e_z = k_s e_y = 0$  의 결과로 결정될 수 있다. 두 개의 Shearogram 결과를 더하면 면외 방향에 정확하게 있는 새로운 프린지 패턴에 대한 감도 벡터가 생성된다.  $\partial w/\partial x$  용어는  $k_s e_x = k_s e_y = 0$  이기 때문에 이 방법으로도 측정할 수 있는 것으로 알려져 있다.

## 제 3 장 위상 이동 및 위상 지도 평가

### 제 1 절 위상 이동 이론

#### 1. 위상 이동 기본 사항

더 높은 변형 측정 감도를 얻기 위해서는 더 높은 위상 측정 감도가 필요하게 된다. 이것은 위상 이동 기술 기반의 2세대 디지털 Shearography이며 이 기술은 단순히 위상 이동 Shearography라고도 불린다. 위상 이동 Shearography는 시간적 위상 이동과 공간적 위상 이동으로 나눌 수 있다. Fig. 3-1은 변형 구배 측정을 위한 전형적인 시간적 위상 이동 Shearography 구성을 보여주고 있다.<sup>18</sup>

측정 대상체가 확장된 레이저 빔에 의해 조명이 되고 반사 된 레이저 빔은 Michelson 간섭계를 통과하여 CCD 카메라의 이미지 평면 Array에 초점을 맞춘다. 간섭계에서 Mirror 1을 약간 기울이면 물체의 약간 이동한 두 개의 이미지가 생성되게 된다. 두 스펙클 인터페로그램의 간섭 중첩은 이미지 평면의 각 포인트에서 새로운 스펙클그램을 보여주게 된다. Michelson 간섭계의 전단 장치로서 Mirror 1의 회전을 통해 전단의 크기와 방향을 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다.

시간적 위상 이동을 가능하게 하기 위해 Mirror 2는 PZT(piezoelectric crystal)에 의해 구동되며 PZT가 부착된 Mirror 2를 정확한 변위로 움직여 광 경로에서 추가적인 위상을 생성할 수 있게 된다. 이로 인해 파면의 위상 값을 얻을 수 있다. 위상 이동 기법을 사용하면 하중 전후의 위상 분포를 측정할 수 있으며 하중 전후 두 위상 분포를 감산하여 변형 된 시험 대상체의 변형된 위상 지도를 얻을 수 있다.

결론적으로 실시간 감산처리 프로그램을 통해 하중 전후의 위상 분포를 감산하여 Shearography 위상 프린지 패턴을 형성한다. 위상 분포는 위상 이동 기법을 사용하여 측정한다. Fig. 3-1에서 PZT Mirror는 위상 변화를 달성하기 위한 핵심 구성 요소이며 일정한 전압 변화를 통하여 광 경로에 알려진 추가적인 위상 값의 도입을 허용한다.

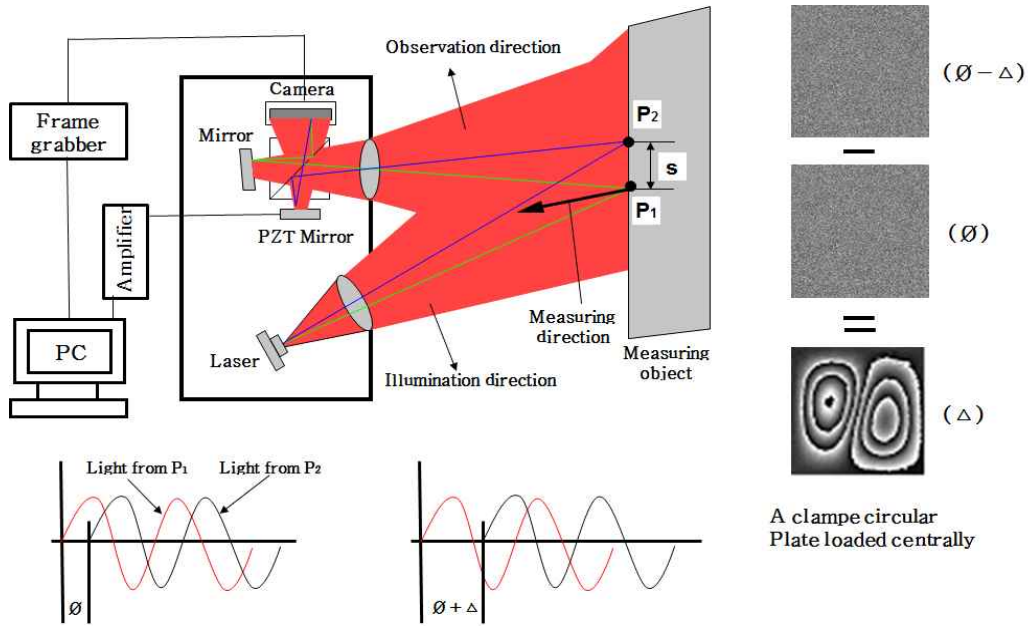


Fig. 3-1 The experimental setup of temporal phase shift shearography for deformation gradient measurement

Fig. 3-2 의  $V-x$  곡선은 이동 거리와 전압 사이의 전체 관계가 선형적이지 않다는 것을 보여주고 있으나  $V-x$  곡선의 일부 구간은 선형 관계를 따른다. 일반적으로  $V-x$  곡선의 선형 부분만 선택하여 사용하고 특정 PZT 부품의 감도 계수는 다음 식(3.1)과 같이 보정할 수가 있다.

$$k = \frac{x_2 - x_1}{\Delta U} \quad (3.1)$$

여기서,  $x_1$  은 PZT의 시작 위치이고,  $x_2$  는 PZT의 끝 위치이며  $U_b$  는 시작 위치의 전압으로  $\Delta U$  는 전압 증가분이다. 보정 후, 감도 인자  $k$  는 PZT에 대해 알려진 상수이다. 그러면, 주어진 전압 증가량에서 PZT의 이동으로 인한 변위  $d$  는 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$d = k \cdot \Delta U \quad (3.2)$$



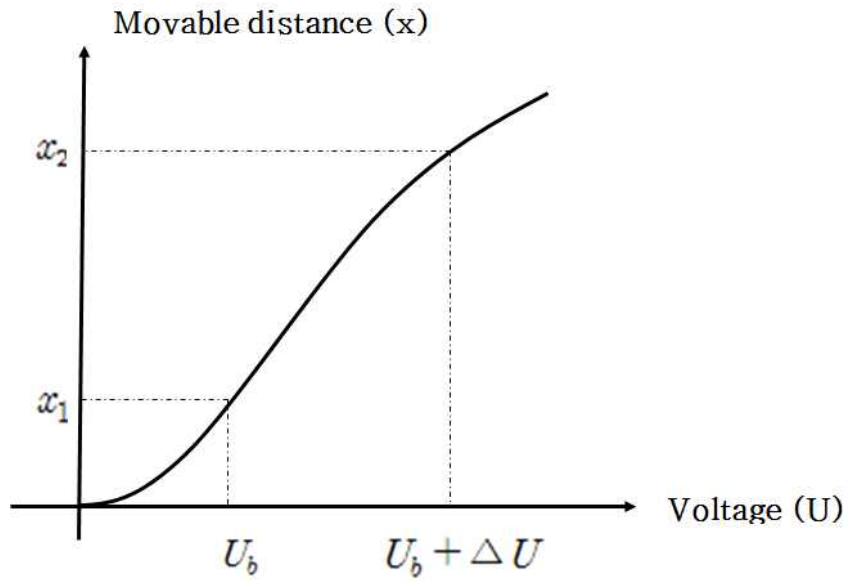


Fig. 3-2 Voltage-to-displacement relationship (V-x curve) of a PZT mirror

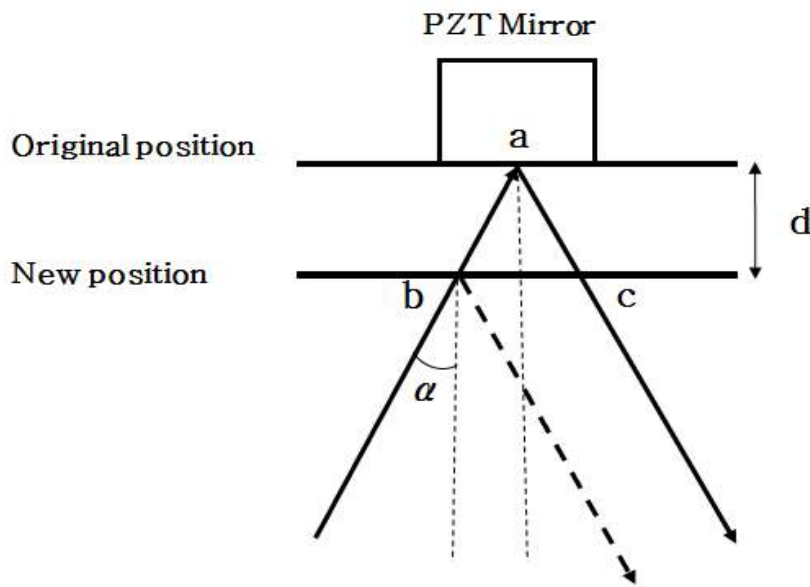


Fig. 3-3 Optical path analysis on a PZT mirror

다음 전압 증가량에 의해 생기는 광 경로차를 계산하고 Fig. 3-3에서 알수 있듯이 입사각이  $\alpha$ 인 PZT Mirror에 입사광이 도달했다고 가정했을 때 PZT에  $\Delta U$  전압을 인가함으로써 변위  $d$ 의 움직임이 도입된다. PZT Mirror에서의  $d$ 의 이동은 광로 변화  $\Delta L_g$  를 유도하며 광로 변화  $\Delta L_o$  는 다음 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$\Delta L_o = n \cdot \Delta L_g = \frac{2dn}{\cos \alpha} = \frac{2nk}{\cos \alpha} \Delta U \quad (3.3)$$

이러한 광 경로 차는 다음과 같은 형태의 위상 값 변화로 변환 될 수 있다.

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L_o = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{2nk}{\cos \alpha} \Delta U \right) = \frac{4\pi nk}{\lambda \cos \alpha} \Delta U \quad (3.4)$$

식 (3.4)는 PZT에 적용된 전압 증가량과 결과적으로 광 경로에서 추가 위상 값 사이의 관계를 나타낸다. Fig. 3-1에서와 같이 Michelson 간섭계가 전단량으로 사용 되고 PZT Mirror는 빛의 수직이므로  $\alpha=0$ ,  $\cos \alpha=1$ 이다. 또한 공기 굴절을  $n=1$ 이므로 식 (3.4)를 다음과 같이 간단하게 할 수 있다.

$$\Delta \phi = \frac{4\pi k}{\lambda} \Delta U \quad (3.5)$$

식 (3.5)로부터 추가적인 90도 위상이 필요하면 필요한 전압 증가량은  $\lambda/8k$  라는 것을 알수 있다.

## 제 2 절 위상 이동 알고리즘

### 1. 3+3 위상 이동 알고리즘

앞에서 하중 전후의 위상 분포를 측정함으로써 변형률 성분에 해당하는 위상 지도(Phase map)는 위상 이동 Shearography를 사용하여 측정할 수 있다.

각각의 단일 스펙클 패턴 이미지에 대한 강도 방정식은 다음과 같이 표현한다.

$$I = I_0(1 + \gamma \cos \phi) = A + B \cos \phi \quad (3.6)$$

여기서  $I$  는 기록된 강도 값 (알려진값)이고  $I_0$  는 배경 (알수없음),  $\gamma$  은 명암 (알수없음) 그리고  $\phi$  는 두 빔의 위상차 (알수없음)이다.

하나를 알려지고 세 개의 미지수를 가지는 식(3.6)을 풀기 위해서는 적어도 세 개의 방정식이 필요하다. 만약 알려진 120도 위상을 강도 방정식에 도입하여 세 방정식을 형성 할 수 있는 경우 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= A + B \cos \phi \\ I_2 &= A + B \cos(\phi + 120^\circ) = A - B \left( \frac{\sqrt{3} \sin \phi + \cos \phi}{2} \right) \\ I_3 &= A + B \cos(\phi + 240^\circ) = A + B \left( \frac{\sqrt{3} \sin \phi - \cos \phi}{2} \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

알려진 추가 위상의 도입을 달성하기 위해 Fig. 3-1의 구성도에서 PZT는 지정된 거리를 이동 하도록 제어 되어야 한다. Mirror가  $\delta l$  만큼 이동할 때 광 경로 길이는 순방향 및 역방향 경로로 인해  $2\delta l$  만큼 변하게 된다. 따라서 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\delta l \quad (3.8)$$

원하는 위상 이동 값을 사용하면 이동량은 다음 식으로 계산된다.

$$\delta l = \frac{\lambda\phi}{2\pi} \quad (3.9)$$

게다가 3개의 위상 이동 단계를 갖는 3개의 스펙클 패턴 이미지를 취함으로써 위상차는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} = \frac{3B\sin\phi}{3B\cos\phi} \quad (3.10)$$

알고리즘의 사소한 문제 중 하나는 arctan 함수를 적용하여 분자와 분모의 부호를 별도로 고려해야 한다는 것이다. 분자와 분모의 부호로부터 위상 관계  $\phi$ 는 0과  $2\pi$  사이의 범위에서 결정될 수 있다.

분자와 분모가 양수이면 위상 값은 첫 번째 사분면에 있고 양의 분자와 음의 분모의 경우 위상 값은 두 번째 사분면에 있다. 음의 분자 및 음의 분모의 경우, 위상 값은 제 3 사분면에 있고 음의 분자 및 양의 분모에 대해서는 위상 값이 제 4 사분면에 놓인다. 만약 위상 값  $2\pi$  가 백색 점에 일치하면, 위상 값 0은 흑점이 된다. 따라서 하드웨어를 디지털화 할 때 8 비트 해상도를 사용하는 경우 256 회색조가 0 과  $2\pi$  사이의 범위를 채운다.

물체가 변형 된 후에도 동일한 과정을 반복하면 세 개의 추가적인 위상 이동 스펙클 패턴 이미지는 다음과 같이 기록 된다.

$$\begin{aligned}
 I'_1 &= A + B \cos \phi' \\
 I'_2 &= A + B \cos(\phi' + 120^\circ) \\
 I'_3 &= A + B \cos(\phi' + 240^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

변형 후 위상차는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\phi' = \arctan \frac{\sqrt{3}(I'_3 - I'_2)}{2I'_1 - I'_2 - I'_3}
 \tag{3.12}$$

그러면 변형에 의한 상대 위상 변화는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta = \begin{cases} \phi' - \phi & \text{for } \phi' \geq \phi \\ \phi' - \phi + 2\pi & \text{for } \phi' < \phi \end{cases}
 \tag{3.13}$$

## 2. 4+4 위상 이동 알고리즘

앞서 설명한 3+3 위상 이동 알고리즘은 시간적 위상 이동 기술을 위한 가장 기본 적인 알고리즘이다. 그러나 4+4 시간적 위상 이동 알고리즘은 빠르고 간단한 계산 절차로 인해 가장 널리 사용되는 알고리즘이다.<sup>19-22</sup>

3+3 위상 이동 알고리즘과 비교할 때 4+4 위상 이동 알고리즘은 각 위상 계산을 위해 4개의 위상 이동 단계를 걸치게 된다. 각 단계마다 90도 위상이 추가 되고 변형되기 전에 4개의 강도 맵이 기록된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= A + B \cos \phi \\
 I_2 &= A + B \cos(\phi + 90^\circ) \\
 I_3 &= A + B \cos(\phi + 180^\circ) \\
 I_4 &= A + B \cos(\phi + 270^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

하중전의 위상차는 다음과 같이 계산할 수 있다

$$\phi = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)}
 \tag{3.15}$$

변형 후 또 다른 4개의 위상 이동 단계와 4개의 스펙클 패턴 이미지들이 취해진다.

$$\begin{aligned}
 I'_1 &= A + B \cos \phi' \\
 I'_2 &= A + B \cos(\phi' + 90^\circ) \\
 I'_3 &= A + B \cos(\phi' + 180^\circ) \\
 I'_4 &= A + B \cos(\phi' + 270^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

변형으로 인한 상대 위상 변화는 식 (3.13)을 사용하여 계산할 수 있다.

## 제 3 절 위상 지도 평가

### 1. 위상 지도 필터링

원래의 위상 지도 이미지는 일반적으로 노이즈로 가득차 있기 때문에 측정 결과에 대해 단일 또는 다중 필터링 작업이 필요하다.<sup>23,24</sup> 디지털 Shearography 위상 지도 평가에서 일반적으로 사용되는 smoothing filter, median filter, mean value filter 및 sine-cosine smooth filter 등이 있다.<sup>25-28</sup>

평균값 필터(Mean value filtering)는 가장 일반적으로 사용되는 선형 평탄 필터이며 주로 평균 효과를 사용하여 랜덤 노이즈를 필터링하는데 사용된다. 평균값 필터에서는  $n \times n$  윈도우는 검사 될 디스플레이 픽셀을 둘러싸는데 사용하고 각 윈도우 내에서 그중 평균 회색 값이 계산되고 필터링 된 후 회색 값으로 평가된다. 따라서 검사 된 픽셀에 대한 평균 그레이 값  $\bar{V}$  은 다음과 같다.

$$\bar{V} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n K(i,j) g(i,j) \quad (3.17)$$

여기서  $n \times n$ 는 윈도우 크기  $K(i,j)$ 는 가중 계수, S는  $n \times n$  연산자 행렬의 계수  $K(i,j)$ 의 합,  $g(i,j)$ 는 윈도우 각 픽셀의 회색 값이다.

평균값 평탄 필터는 윤곽 가장자리에서 회색 값 차이를 부드럽게 하는데 이렇게 하면 부드럽게 한후 전체 이미지의 초점이 흐려지게 보이는 원인이다. 더 큰 연산자 윈도우가 클수록 그 효과가 더 커진다.

일반적인 비선형 연산은 메디안 필터링이며 소음 또는 고주파 충동 노이즈에 가장 많이 사용되는 방법이다. 메디안 필터의 주요 개념은 이미지를 픽셀 단위로 실행하고 각 픽셀 값을 주어진 창 내의 인접한 픽셀의 중앙값으로 대체하는 것이다.

연산자 창의 회색 값은 크기로 분류되고 분류 된 값은 필의 문자열처럼 나뉘지게 된다. 여기서 메디안필터는 평균 필의 등급이다.

이 값은 결과 이미지의 해당 위치에 표시되고 메디안 필터는 점 잡음이 있는 디지털 이미지와 잘 작동한다. 그러나 Shearography가 스펙클 패턴에 의한 기술이기 때문에 메디안 필터는 위상 지도를 필터링하기에 충분치 못하다. 그러나 일반적으로 사용하는 메디안 필터 또는 평균값 필터는 Shearogram 위상 지도를 완벽하게 다듬을 수 없다. 따라서 Shearogram 위상 지도 필터를 위해 특별히 설계된 매우 유명한 smoothing filter를 sine-cosine smoothing filter라고 한다.

sine-cosine smoothing filter의 주요 아이디어는 사인 함수와 코사인 함수에서 톱니파 함수를 변환 한 다음 arctan 함수를 사용하여 점의 위상을 찾는 것이다. 톱니파 이미지에서 0부터 255까지의 회색 값은 사인 그래프의 회색 값 128과 코사인 그래프의 회색 값 255로 변환된다. 톱니파 함수의 회색 값 64, 128 및 192는 사인 그래프의 회색 값 255, 128 및 0에 해당하고 코사인 그래프의 128, 0 및 128에 해당된다.



## 2. 위상 지도 언래핑

필터링 및 평탄화 절차 후에 위상 평가의 최종 단계는 위상 복조 또는 위상 언래핑이다. 일반적으로 평탄화 후 위상 지도는 위상 값이  $+\pi$ 와  $-\pi$  사이이므로 랩핑된 위상지도라고 한다. 오직  $2\pi$  단계만으로 구성된 단계함수를 추가하는 것을 포함한  $2\pi$ 의 불연속을 해결하는 과정을 위상 언래핑, 연속 또는 복조라고 한다.

위상 언래핑은  $2\pi$ 의 모호성을 해결하고 예상되는 물리량을 복구하는 기본기술로서 불연속 위상 분포가 연속 될수 있도록 가장 자리에 위치에  $2\pi$ 의 위상 값을 추가하는 것이다.

상대적 위상 변화  $\Delta$ 의 언래핑 분포는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta = n2\pi + \frac{2\pi}{255}g(i,j) = \left[ n + \frac{g(i,j)}{255} \right] 2\pi = N(i,j)2\pi \quad (3.18)$$

여기서  $n$ 은 프린지 순서의 정수 부분이고  $g(i,j)$ 는 점  $(i,j)$ 의 좌표에 대한 톱니형상 영상 ( $0 \leq g(i,j) \leq 255$ )의 임의의 점 회색 값이다.  $N(i,j)$ 는 임의의 점의 프린지 순서이며 십진수이다.

위상 복조에서의 문제중 하나는 위상 지도에서 프린지에 틈이 있을 때 방향 계산으로 인해 깨진 점이 다른 영역의 위상 값에 큰 영향을 미친다는 것이다. 이 경우 이러한 현상을 피하기 위해 보통 프린지 추정 및 위상 지도 분할에 기초한 지역 위상 언래핑 방법이 사용된다.

지역 위상 언래핑 방법의 기본 개념은 엣지와 엣지 깨진 위치를 검출한 다음 식 (3.18)을 적용하기 전에 깨진 프린지를 고정하는 것이다. 엣지 위치와 엣지 깨진 위치를 찾기 위해 엣지 검출 함수  $E$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$E(x,y) = [g(x,y) - g(x+1,y)]^2 + [g(x,y) - g(x,y+1)]^2 \quad (3.19)$$

여기서  $g(x,y)$ 는 위상 지도에서 포인트  $(x,y)$ 에서의 그레이 레벨이고 엣지는  $2\pi$  불연속점이 발생하는 위치 즉, 그레이 레벨 값이 크게 뛰는 위치이다.

이 방정식은 직각으로 인접한 점에서의  $2\pi$  불연속 점이 수평 또는 수직 방향으로 최대 값을 제공하기 때문에 가장자리를 식별하는데 매우 효과적이다. 따라서 엣지 기능의 갑작스러운 변화를 검사하여 엣지를 결정할 수 있으며 일반적으로 임계 값은 가장자리 점을 식별하도록 설정된다. 엣지 위치가 결정된 후 다음 단계는 끝점 또는 깨진 프린지 위치점을 찾는 것이며 일반적으로 패턴 일치 방법은 가중치를 기준으로 끝점을 찾는데 사용된다.

다음 방정식은 좌표  $(x, y)$ 가 있는 끝점에 일반적으로 사용되는 가중치 함수이다. 이 끝점에는 주변 픽셀(8점)이 모두 포함된다.

$$weight(x, y) = \sum_{j=y-1}^{j=y+1} \sum_{i=x-1}^{i=x+1} E(i, j) \quad (3.20)$$

끊어진 엣지와 끝점을 찾은 후 프린지는 보간법에 의해 깨진 지점에서 위상 값을 삽입하여 엣지를 고정할 수 있다.

다른 일반적인 언래핑 알고리즘은 브랜치 컷(Branch cut) 알고리즘과 Minimum spanning tree 방법이다.<sup>29,30</sup> 브랜치 컷 방법은 프린지 깨짐이 발생하는 지점에서 위상 잔여물을 감지한 다음 브랜치 컷을 피함으로써 전체 위상 지도를 언래핑 한다. Minimum spanning tree 방법은 품질의 순서에 따라 달라지는 언래핑 방법으로 위상 기울기와 관련된 품질 평가 기능을 사용하여 각 픽셀의 위상 품질을 평가한다. 그런 다음 위상은 최상의 위상 품질을 제공하는 경로를 따라 언래핑하는 것이다.<sup>31,32</sup>

마지막으로, 지난 10 년 동안, Fourier ridge method, Fringe skeletonizing method, wavelet transformation method 등과 같은 스펙클 패턴 간섭 줄무늬의 신호 처리에 대한 급속한 발전이 이루어졌다. 그러나 이러한 기술의 대부분은 ESPI 및 shearography와 같은 일반적인 스펙클 패턴 간섭계 방법에 보편적으로 적용 가능하다.

## 제 4 장 실험장치 구성

### 제 1 절 Dual-beam 전단간섭계

기본적인 디지털 전단간섭계 셋업은 면내·외 변형을 측정한다. 조명 각도를 0으로 조정하여 면외 변위를 측정 할 수 있지만 조명 각도를 조정하여 면내를 측정 할 수는 없다. 순수 면내·외 변형 성분을 얻으려면 Dual-beam 전단간섭계 구성이 필요하다.

Fig. 4-1은 면내 변위 측정을 위한 Dual-beam 전단간섭계 구성의 개략도이다. 동일한 파장 ( $\lambda=660\text{nm}$ )을 갖는 시야 방향에 대해 대칭인 2개의 빔은 대상 체 표면을 조사하도록 확장 시켜주고 두 개의 광학 셔터가 각 레이저 앞에 설정된다.

셔터 작동을 통해 두 개의 레이저 빔이 대상 표면을 교대로 비추고 시험 대상체로부터 반사된 파면은 전단 장치에 의해 전단이 되고 CCD 이미지 평면상에 반영 된다. 면내 변위 측정 절차는 면외 변위 측정 절차에 비해 훨씬 더 복잡하며 다음과 같이 단계별 면내 변위 측정 절차를 설명한다.

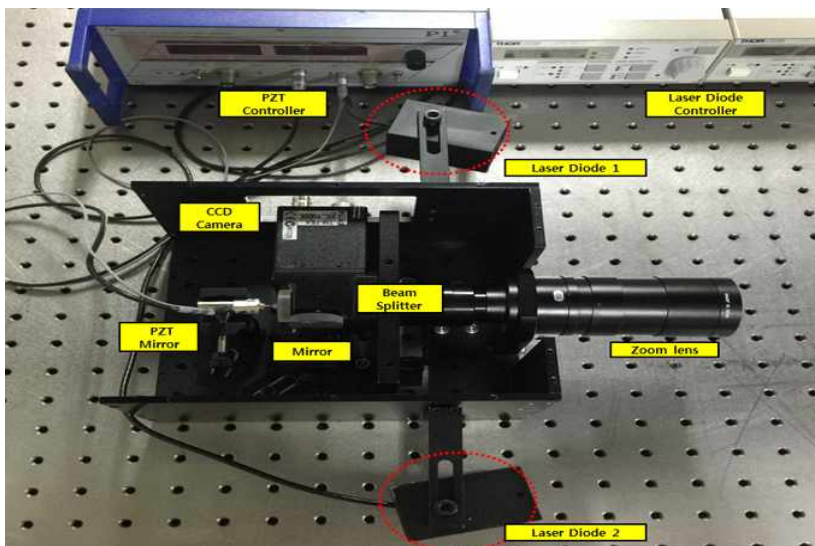


Fig. 4-1 Dual-beam shear interferometer configuration for in-plane displacement measurement

디지털 Shearography 구성을 이용하여 순수 면내 변위 성분을 측정하는 절차는 크게 6단계로 나눌수 있다. 대칭 조명 각도가  $\theta$  인  $XOZ$  평면을 가정할 때 전단 방향  $x$ , 전단량은  $\delta x$  이다.

Step 1 : 측정 대상체에 하중이 작용하기 전에 광학 셔터 1을 열과 셔터 2를 닫으면 빔1이 물체 표면에 비추며 이때  $+\theta$  조명 각도에서 대상체를 측정한다. 4개의 시간 위상 이동 스텝이 적용되고 각 스텝은  $\pi/2$  만큼 위상 증가분을 부가한다.

이때 위상 이동 스펙클 패턴 이미지는 다음과 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= A + B \cos \phi_{+\theta} \\
 I_2 &= A + B \cos(\phi_{+\theta} + \pi/2) \\
 I_3 &= A + B \cos(\phi_{+\theta} + \pi) \\
 I_4 &= A + B \cos(\phi_{+\theta} + 3\pi/2)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

하중을 가하기 전  $+\theta$  조사 각으로부터 측정한 위상은 다음과 같이 나타난다.

$$\phi_{+\theta} = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} \tag{4.2}$$

Step 2 : 측정 대상체에 하중을 가하기 전에 광학 셔터 2를 열고 셔터 1을 닫아서 빔2가 물체 표면을 비추도록 하고 조명 각도  $-\theta$  대상체를 측정한다. 이때 4개의 위상 이동 스펙클 패턴 이미지가 다시 기록된다.

$$\begin{aligned}
 I_5 &= A + B \cos \phi'_{+\theta} \\
 I_6 &= A + B \cos(\phi'_{+\theta} + \pi/2) \\
 I_7 &= A + B \cos(\phi'_{+\theta} + \pi) \\
 I_8 &= A + B \cos(\phi'_{+\theta} + 3\pi/2)
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

하중을 가하기 전  $+\theta$  조사 각으로부터 측정된 위상은 다음과 같이 나타난다.

$$\phi_{-\theta} = \arctan \frac{(I_8 - I_6)}{(I_5 - I_7)} \quad (4.4)$$

Step 3,4 : 측정 대상체에 하중을 가한 후 1,2 단계에서 지정한 절차를 반복해서 이미지 기록을 하고 하중 후의  $+\theta$  와  $-\theta$ 의 조명 각으로부터 측정된 위상이 계산되고  $\phi'_{+\theta}$  와  $\phi'_{-\theta}$  를 얻게 된다.

Step 5 : 측정 대상체의 하중 전후의  $+\theta$  및  $-\theta$  조명 각에 대해 계산된 위상값을 사용하여, 각 조명 각에 대한 하중에 의해 야기되는 상대 위상차는 다음과 같이 계산 된다.

$$\Delta_{+\theta} = \phi'_{+\theta} - \phi_{+\theta} = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} - \arctan \frac{(I'_4 - I'_2)}{(I'_1 - I'_3)} \quad (4.5)$$

$$\Delta_{-\theta} = \phi'_{-\theta} - \phi_{-\theta} = \arctan \frac{(I_8 - I_6)}{(I_5 - I_7)} - \arctan \frac{(I'_8 - I'_6)}{(I'_5 - I'_7)} \quad (4.6)$$

기하학적 관계에 기초하여, 상대 위상차는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{-\theta} &= \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(-\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + [1 + \cos(-\theta)] \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ &= \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ [-\sin(\theta)] \frac{\partial u}{\partial x} + [1 + \cos(\theta)] \frac{\partial w}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (4.8)$$

여기서  $\lambda$  는 레이저의 파장이고 면내 변위는 빨셈 연산에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned}
 \Delta_I &= \Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} \\
 &= \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\
 &\quad - \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left\{ [-\sin(\theta)] \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\
 &= \frac{4\pi\delta x}{\lambda} (\sin\theta) \frac{\partial u}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

면외 항은 가산 연산에 의해 얻어 질 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Delta_{I_0} &= \Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta} \\
 &= \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\
 &\quad + \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left\{ [-\sin(\theta)] \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right\} \\
 &= \frac{4\pi\delta x}{\lambda} (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Step 5 : 마지막으로 순수 면내 변위  $\partial u/\partial x$  와 면외 변위 성분  $\partial w/\partial x$  는 각 위상지도  $\Delta_I$  와  $\Delta_{I_0}$  로 평가할 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\lambda}{4\pi\delta x \sin\theta} \Delta_I \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda}{4\pi\delta x (1 + \cos\theta)} \Delta_{I_0} \tag{4.12}$$

식 (4.1)에서 식 (4.5)는  $x$  방향으로 전단과 조명 빔 그리고  $XOZ$  평면에서 관측했을 때 적용된다.  $YOZ$  평면에서의  $x$  방향의 전단 및 조명 빔 및 관찰을 위해,

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(\theta) \frac{\partial v}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (4.13)$$

$$\Delta_{-\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ [-\sin(\theta)] \frac{\partial v}{\partial x} + [1 + \cos(\theta)] \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\lambda}{4\pi\delta x \sin\theta} \Delta_I \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda(\Delta_{-\theta} + \Delta_{+\theta})}{4\pi(1 + \cos\theta)\delta x} \Delta_I \quad (4.16)$$

$XOZ$  평면에서의  $y$  방향의 전단 및 조명 빔 및 관찰을 위해,

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[ (\sin\theta) \frac{\partial u}{\partial y} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (4.17)$$

$$\Delta_{-\theta} = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[ (-\sin\theta) \frac{\partial u}{\partial y} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (4.18)$$

$$\Delta_I = \frac{4\pi\delta y}{\lambda} (\sin\theta) \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\lambda}{4\pi\delta y \sin\theta} \Delta_I \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda(\Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta})}{4\pi(1 + \cos\theta)\delta y} \quad (4.21)$$

YOZ 평면에서의  $y$  방향의 전단 및 조명 빔 및 관찰을 위해,

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[ (\sin\theta) \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (4.22)$$

$$\Delta_{-\theta} = \frac{2\pi\delta y}{\lambda} \left[ (-\sin\theta) \frac{\partial v}{\partial y} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial y} \right] \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\lambda}{4\pi\delta y \sin\theta} \Delta_I \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda(\Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta})}{4\pi(1 + \cos\theta)\delta y} \quad (4.25)$$

Shearography는 변형을 직접 측정 할 수 있는 장점을 가지고 있으며 (수치 차가 필요 없음). 그러나 응력 측정을 위한 시간 위상 Shearography는 절차는 복잡하고 시간 소모적이어서 동적 하중에 대한 적용이 제한적이다.



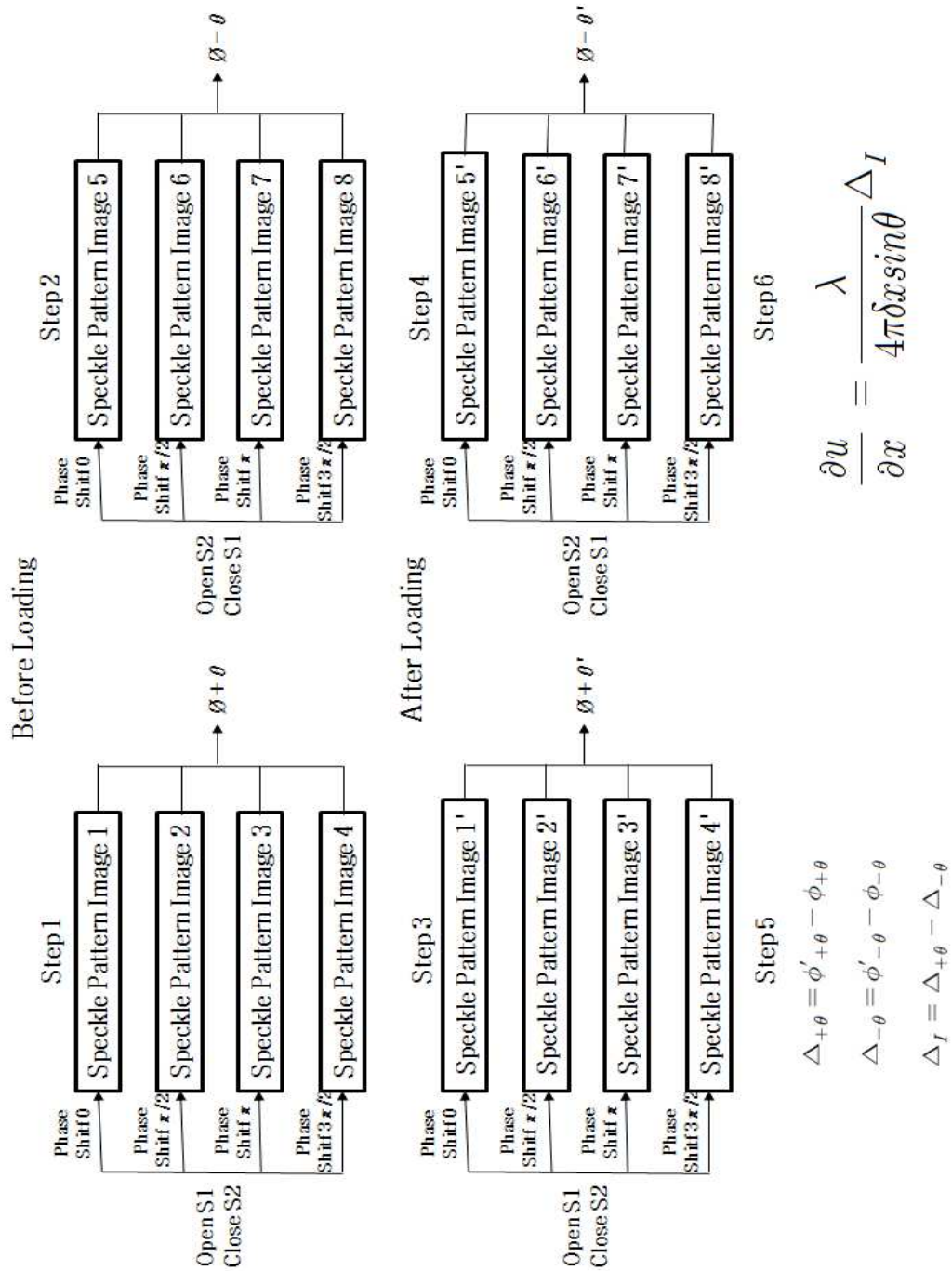


Fig. 4-2 Procedure for in-plane strain measurement using the traditional temporal phase shift shearography system

## 제 2 절 전자처리 스페클 패턴 간섭계 (ESPI)

동적으로 거동하는 대상체에 대한 기계적 물성을 평가하기 위해 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometer)를 이용하여 인장 시험편의 면내 변위를 측정한다. ESPI 시스템은 덴마크 Dantec사의 상용 제품을 사용하였으며 Fig. 4-3과 같이 Sensor, Nd:YAG Laser, Optic fiber, Controller, PC로 구성되어 있다. Table 4-1은 본 시스템의 사양을 보여주고 있다. 시험편의 인장시험시 면내 변위를 측정하기 위해서 상하 Arm으로부터 Laser 빔을 물체에 조사시켜 이를 Phase Shifting 4-step Algorithm 위상 추출을 통해 측정 하였다. 위상 추출을 위해 위상이동은 외부 controller에서 Piezo electronic transducer에 전압차를 주어 제어하고 이를 통해 얻어진 위상지도는 상용프로그램을 이용하여 해석함으로써 면내 변위를 측정 할 수 있다.

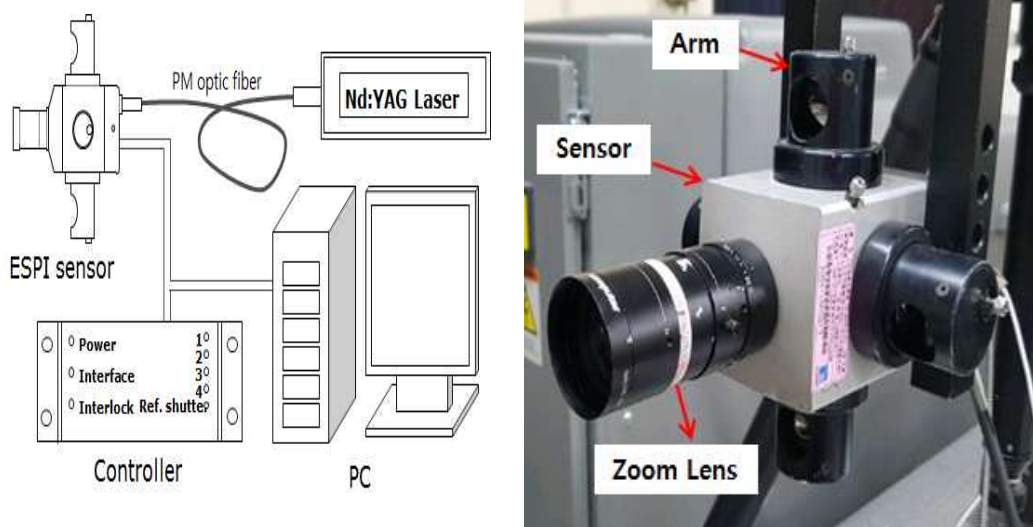


Fig. 4-3 Configuration of ESPI system

Table 4-1 Technical data of ESPI system

Description	Technical data
Operating voltage	12VDC
Measuring resolution	0.03 ~ 1 mm adjustable
Measuring range	static 1 ~ 20 mm per measuring step, any with serial measurement dynamic 0.3 ~ 3 mm amplitude
Measuring area	static up to 1 m <sup>2</sup> dynamic up to 400×600 mm <sup>2</sup> (16"×24")
Working distance	variable, 0.1 ... > 2.5 m (4 ... >60")
Operation modes	automatic, manual, static, dynamic 1D-, 2D-, 3D- operation
Data interface	TIFF, ASCII, Windows metafile
Dimensions of sensor head without illumination arms	80 × 80 × 120 mm <sup>3</sup>
Data acquisition speed	2.5 sec for 3D-analysis
Data analysis	automatic or semi automatic

### 제 3 절 MTS system

시험편에 인장하중을 가하기 위한 인장시험기(MTS Co.)를 Fig. 4-4과 같이 사용하였다. 인장시험기는 미국 MTS 사의 MTS Landmark Servohydraulic Test Systems을 사용하였으며, H/W controller, S/W controller, PC, servo-valve controller, MTS Cooling Sysyem으로 이루어져 있다. Table 4-2는 MTS system(인장시험기)의 제원이다.



Fig. 4-4 MTS system for tensile loading

Table 4-2 Specification of MTS system

Description	Technical data
Force capacity	100 kN (Monotonic: 120 kN)
Available actuator ratings	25 kN
Dynamic stroke	100 mm
Output voltage	±10 V (full scale)
Excitation frequency	10 kHz (±100 mm)
Data sampling rate	122.88 kHz

## 제 4 절 면내 변위 측정 시험편 제작

자동차 산업에서 각종 부품 구성에 사용되며 고성능화와 경량성에 양호한 강판으로 일반구조용 압연강재와 강도를 높여 중량 경감과 성능을 향상시킨 고장력강을 사용하였으며 시험편 길이 200mm, 직경 20mm, 두께 2t의 KS B 0810 규격으로 레이저 커팅하여 제작하였다.

### 1. 일반 구조용 압연강재 (Rolled Steel for General Structure): SS400

일반 구조용 압연강재는 탄소 함유량이 적어 열처리가 되지 않으며 기계 내부의 특정 응력을 받는 부품의 재료보다는 주로 기계를 지탱해주는 부위에 주로 사용이 된다. Table 4-3는 일반구조용 압연강재의 특성을 보여주고 있으며 Fig. 4-5는 가공된 시험편의 도면을 보여주고 있다.

Table 4-3 Property of SS400

	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
SS400	0.046	0.022	0.21	0.00	0.004	-	-

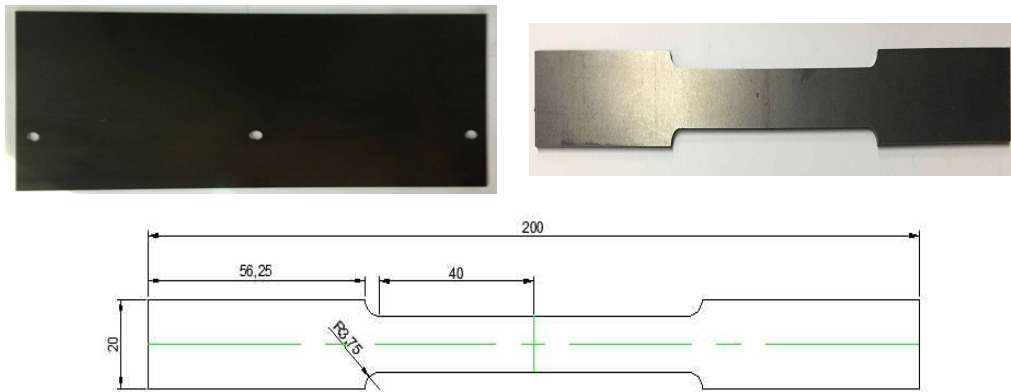


Fig. 4-5 SS400 specimen and drawing

## 2. 용융 아연도금 강판 (Galvanized Sheet Iron): SGCD1

용융한 아연을 도금한 강판. 아연 철판, 아연도 철판, 합석판이라고도 하며, 아연도금강판은 지붕 재료 및 외벽재로서 쓰인다. 도금층은 아연이 54/54(g/m<sup>2</sup>)으로 도금되어 있고 경도는 HRB 35.5 이다. Table 4-4는 용융 아연도금 강판의 특성을 보여주고 있으며 Fig. 4-6은 가공된 시험편의 도면을 보여주고 있다.

Table 4-4 Property of SGCD1

	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
SGCD1	0.0028	0.009	0.129	0.0079	0.0079	-	-

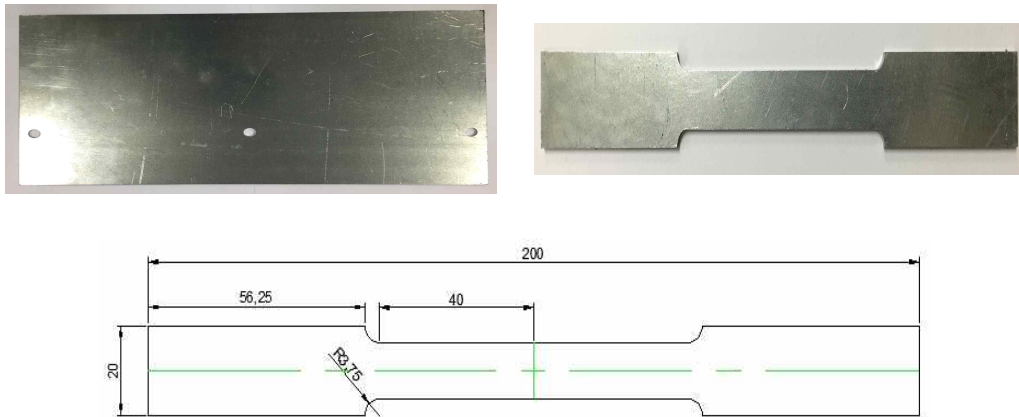


Fig. 4-6 SGCD1 specimen and drawing

### 3. 고장력 강판 (High Tension Steel Plate): SPFC980

연강에 비하여 강재의 두께를 줄일 수 있어, 중량감소 뿐만 아니라 접합 공정수의 감소로 인한 건조비 경감등의 경제적 이익이 있어 생산성 향상과 경량화를 동시에 만족시킬 수 있다. Table 4-5는 고장력 강판의 특성을 보여주고 있으며 Fig. 4-7은 가공된 시험편의 도면을 보여주고 있다.

Table 4-5 Property of SPFC980

	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
SPFC980	0.086	0.20	3.09	0.024	0.002	-	-

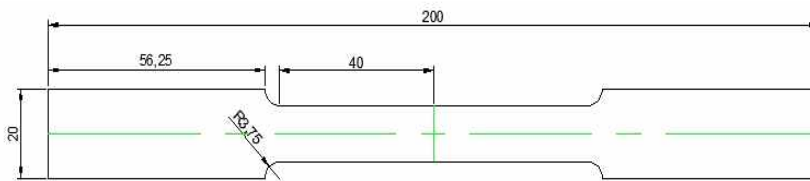
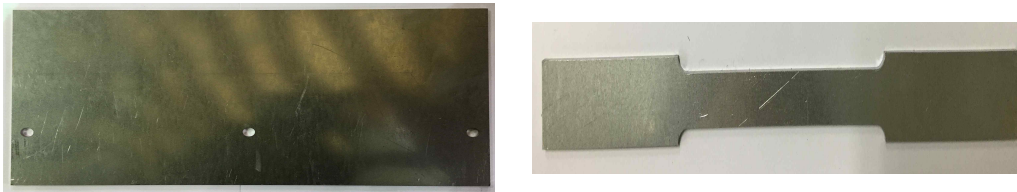


Fig. 4-7 SPFC980 specimen and drawing

#### 4. 기계구조용 탄소강: SM45C

기계구조용 탄소강재는 C(탄소) 0.6%이하의 강을 압연한 채로 혹은 담금질·뜨임하여 기계를 구조적으로 지탱할 수 있는 탄소가 함유된 강을 말하며 기계적 성질이 우수하여 기계부품용 재료 크랭크축, 액슬 샤프트, 연결봉, 키, 녹핀 등에 주로 많이 사용된다. Table 4-6은 기계구조용 탄소강의 특성을 보여주고 있으며 Fig. 4-8은 압연방향에 따라 가공된 시험편의 도면을 보여주고 있다.

Table 4-6 Property of SM45C

	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
SM45C	0.40~ 0.50	0.15~ 0.40	0.40~ 0.80	0.045	≤0.045	-	-

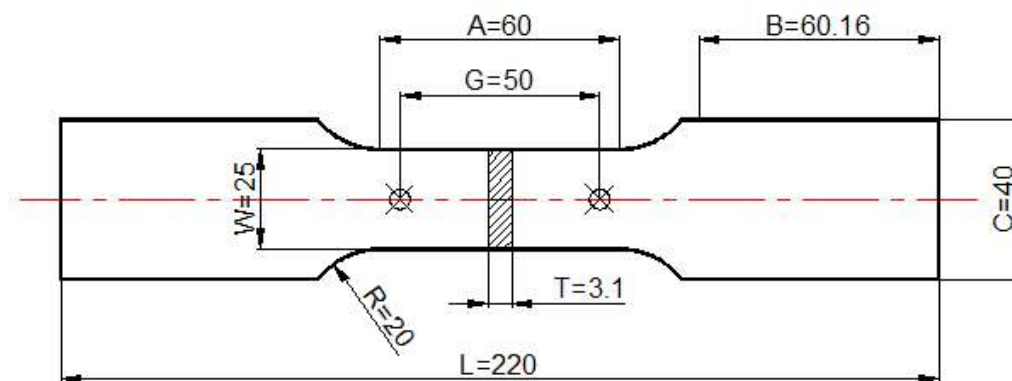


Fig. 4-8 SM45C specimen and drawing



## 제 5 장 실험결과

### 제 1 절 측정 분해능 측정 결과 및 해석

#### 1. 실험 장치 및 방법

Fig. 5-1은 면내 변위 측정을 위한 Dual-beam 전단간섭계 시스템의 측정 분해능을 확인하기 위해 면외 변위량 제어가 가능한 고무 평판 시험편을 사용하여 면외 변위에 따른 면외 변위량을 측정하였다. 면내 변위 측정과 다르게 면외 변위 측정을 위해서 Single-beam을 사용하였으며 평판시험편 후면에 PZT Actuator를 정밀 이송하여 기준값 1,2,3  $\mu\text{m}$  기준으로 30nm씩 변형을 부여하였다.

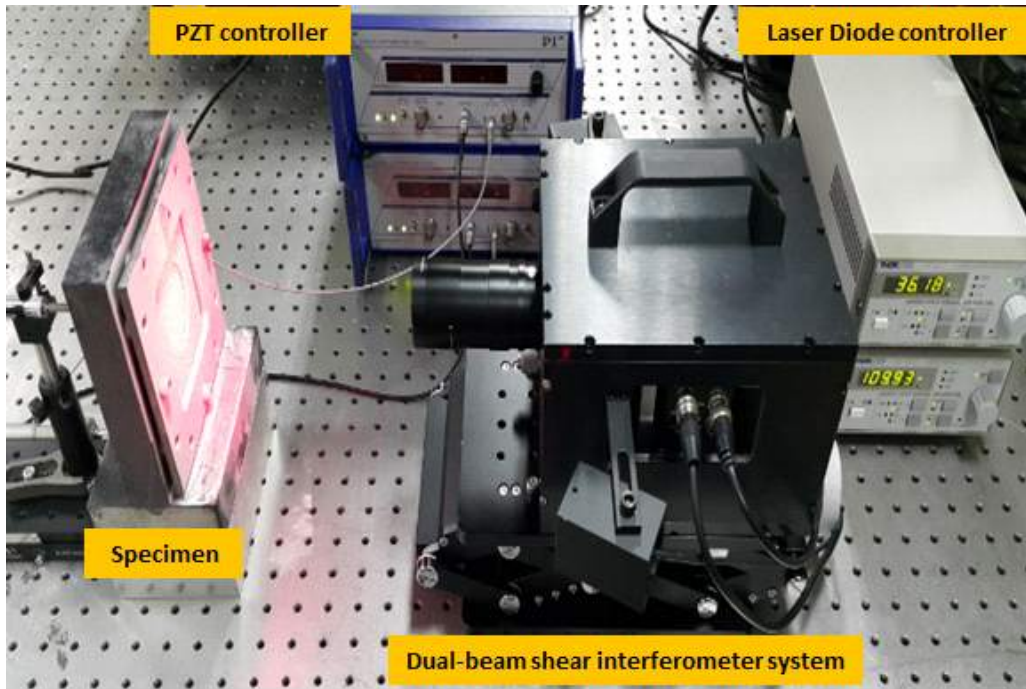
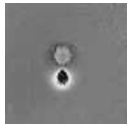

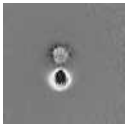


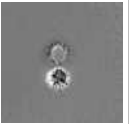














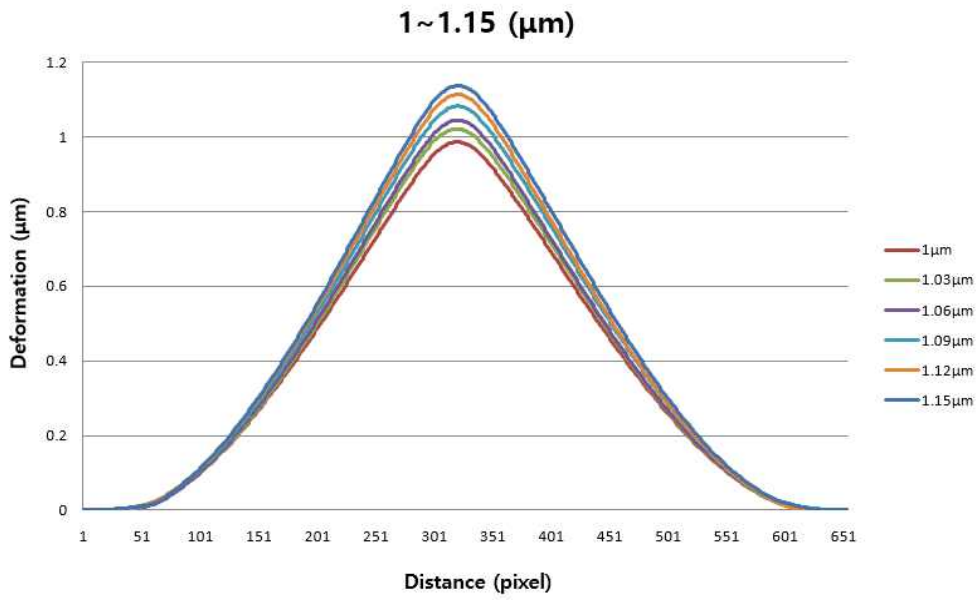
Fig. 5-1 Experimental for measurement resolution measurement

## 2. 실험 결과

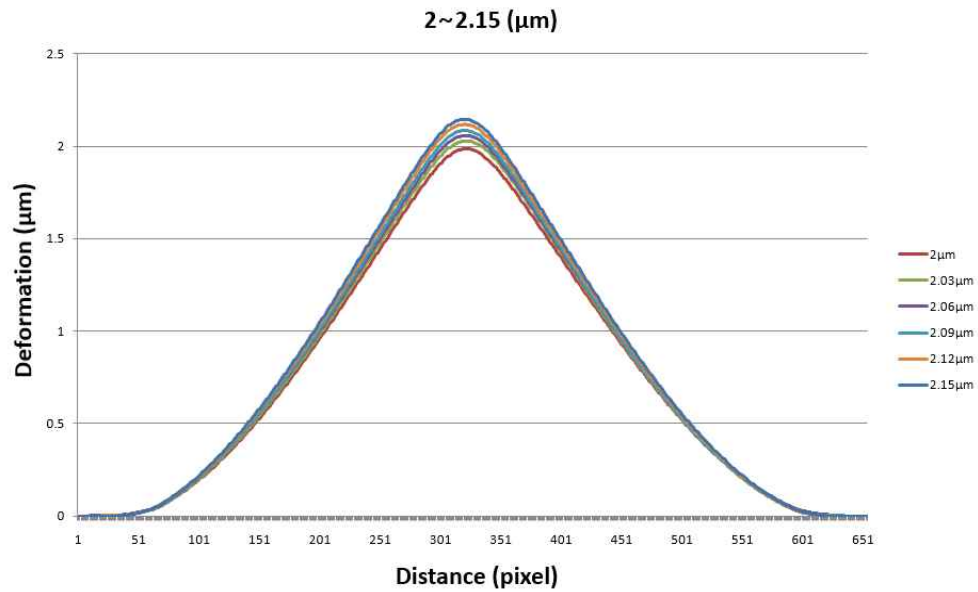
Table 5-1은 Single-beam 전단간섭계 시스템을 이용한 고무 평판시험편의 면외 변위에 따른 측정 결과로써 기준 변화량 1,2,3 $\mu\text{m}$ 에서 30nm씩 면외 변화량을 부여하였을 때 측정된 Phase map의 이미지 처리 과정을 걸친 후 프로파일 데이터 (Fig. 5-2)를 통하여 각 변화량에 따른 변형값을 확인 할 수가 있다.

Table 5-1 Single-beam shear interferometer phase map according to deformation variation

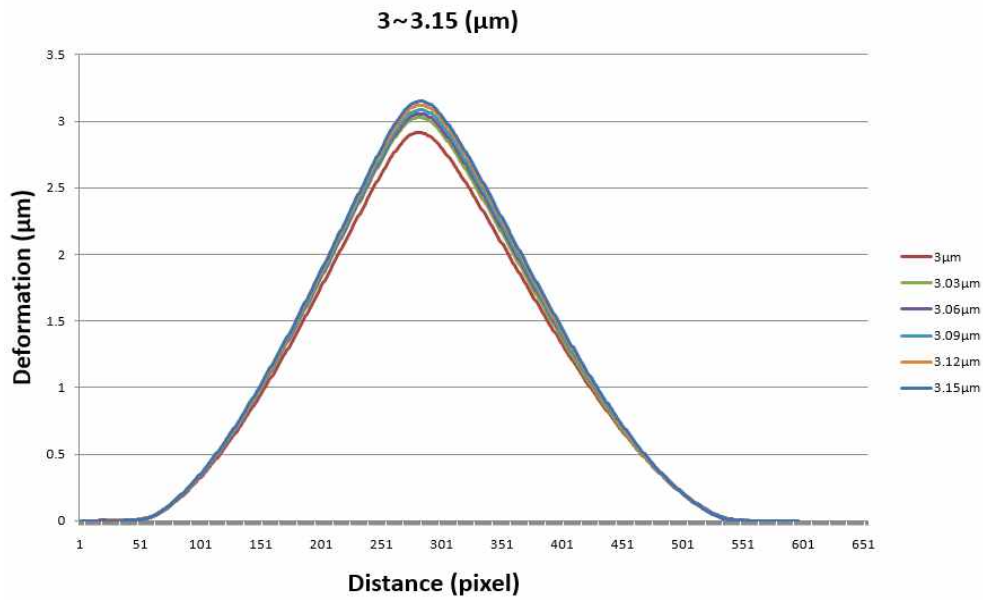
기준값	1	1.03	1.06	1.09	1.12	1.15
Deformation ( $\mu\text{m}$ )	0.986	1.021	1.045	1.082	1.113	1.136
Phase map						
기준값	2	2.03	2.06	2.09	2.12	2.15
Deformation ( $\mu\text{m}$ )	1.986	2.028	2.058	2.085	2.118	2.145
Phase map						
기준값	3	3.03	3.06	3.09	3.12	3.15
Deformation ( $\mu\text{m}$ )	2.915	3.028	3.057	3.085	3.119	3.150
Phase map						



(a) Reference value 1 to 1.5  $\mu\text{m}$



(b) Reference value 2 to 2.5  $\mu\text{m}$



(c) Reference value 3 to 3.5  $\mu\text{m}$

Fig. 5-2 Deformation profile according to deformation variation

기준값 1,2,3  $\mu\text{m}$ 에서 30nm씩 각각의 면외 변위 증가에 따른 변형값을 확인한 결과 측정된 결과 값이 기준값에 동일한 결과 값을 획득하지는 못하였지만 기준값 대비 측정된 결과값의 오차는 약 2.9%로 측정되었다. 또한 Fig. 5-2에서 살펴보면 변형 측정 결과 값에서 분별할 수 있는 최소 증가량을 살펴보면 23~42nm 범위 이내의 증가량을 보여지고 있다. 따라서 면외 변위를 통한 본 논문에서 구성된 전단간섭계 시스템의 측정 분해능은 최소 23nm로 보여진다. 따라서 Dual-beam 전단간섭계 시스템의 판별 가능한 최소 눈금 변화량을 살펴보기 위해 평판의 면외 변위를 통하여 면외 변위 값을 측정함으로써 본 시스템의 측정 분해능을 확인하였다.

## 제 2 절 면내 변위 측정 결과 및 해석

### 1. 실험 장치 및 방법

Fig. 5-3은 Dual-beam 전단간섭계 시스템을 이용한 면내 변위를 정량적으로 측정하는 방법을 검증하기 위한 방법으로 인장실험을 통한 각 시험편의 면내 변위를 측정하였다. 동시에 ESPI 시스템을 이용하여 실험을 하였으며 각각의 측정된 면내 변위값을 획득하여 비교 검증하였다. 일반구조용 압연 강재, 용융 아연도금 강판, 고장력 강판, 기계구조용 탄소강의 각각의 시험편을 탄성구간 내에서의 인장 하중으로 Y축 방향으로 1축 하중만 받도록 실험하였다.

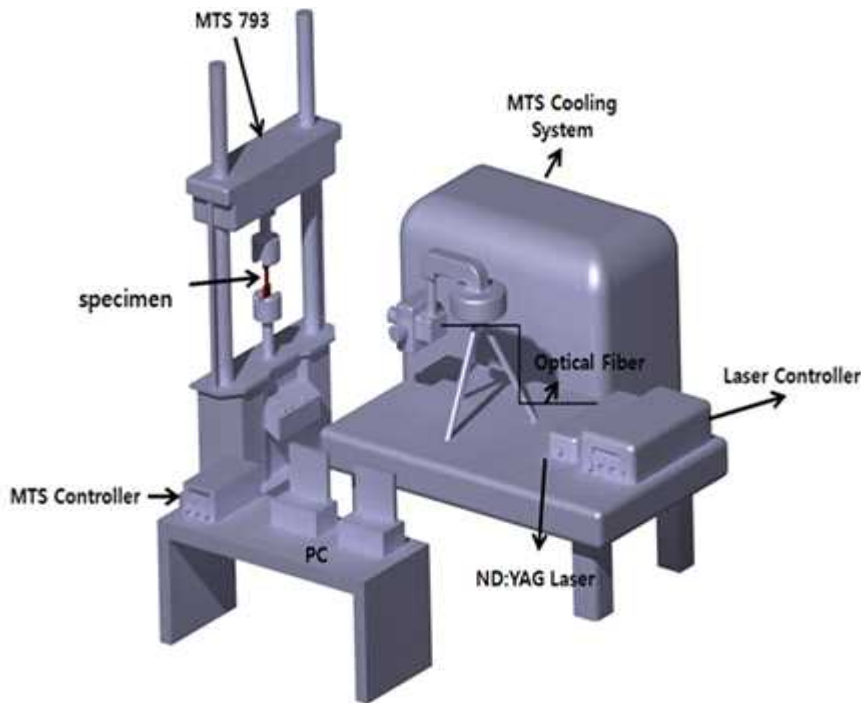


Fig. 5-3 Experimental for in-plane deformation measurement

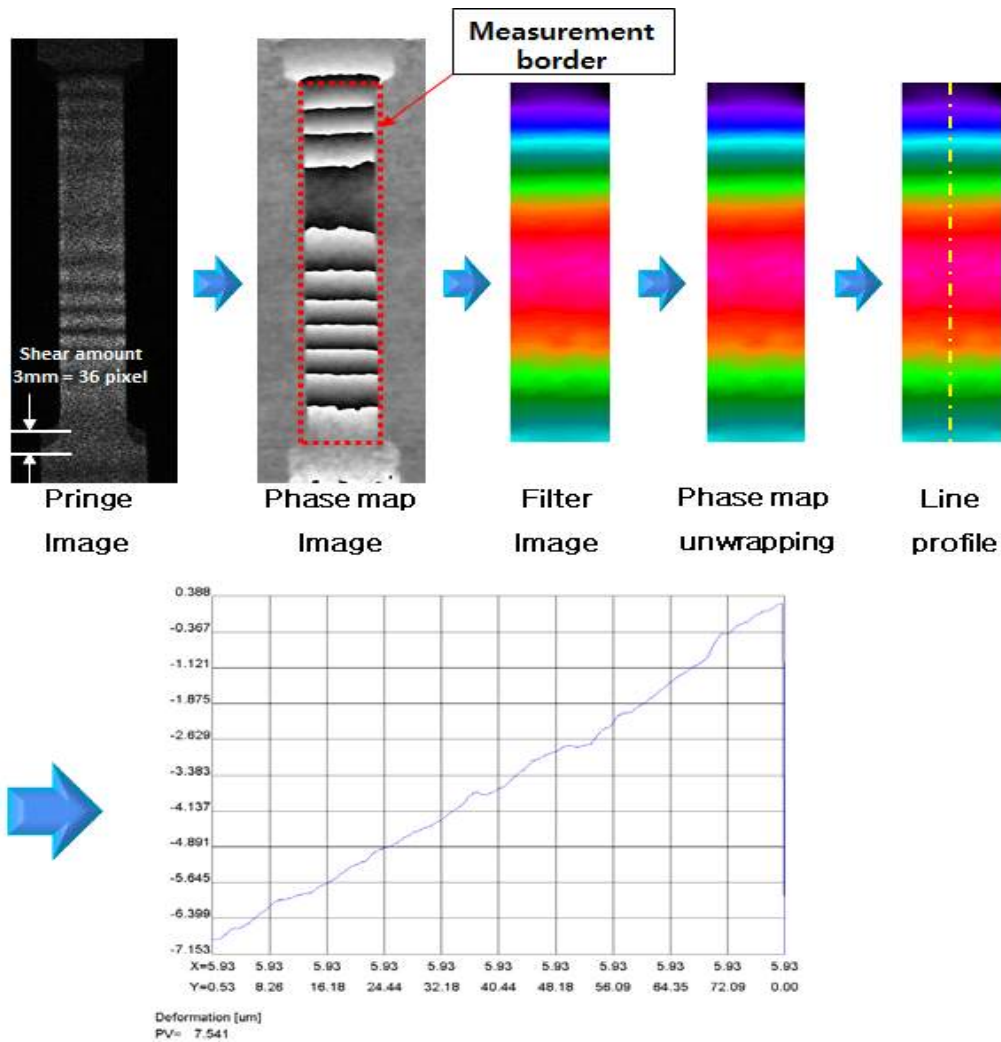


Fig. 5-4 Measurement area of specimen

Fig. 5-4는 실시간 측정된 Fringe 이미지를 이미지 감산처리를 통해 위상 지도를 획득하고 이미지 처리 과정을 걸쳐 최종 Line profile을 통해 면내 변위값을 정량적으로 획득하는 절차를 보여주고 있다. 획득한 그래프를 통하여 프로 파일 위치(pixel)에 따라 deformation 값(PV)을 수치적으로 확인할 수가 있으며 Fringe 이미지에서 보는 바와 같이 Dual-beam 전단간섭계의 전단 방향은 수직방향 90°로 전단량을 3mm (=36pixel)로 고정하여 측정하였다.

## 2. 실험 결과

### 가. 일반구조용 압연강재 : SS400

Table 5-2는 일반구조용 압연강재 재료의 탄성 구간내 하중을 일정하게 증가시키면서 하중 변화에 따른 각 시험편의 면내 변위의 측정 결과를 보여주고 있다. Fig 5-5~5-12는 최종 Line profile을 통하여 획득한 변위값을 그래프로 보여주고 있다.

Table 5-2 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SS400

	Dual-beam 전단간섭계			ESPI		
Force (kN)	0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2
Phase map						
Phase unwrapping						
Deformation ( $\mu\text{m}$ )	7.238	15.165	21.550	7.541	15.042	22.321

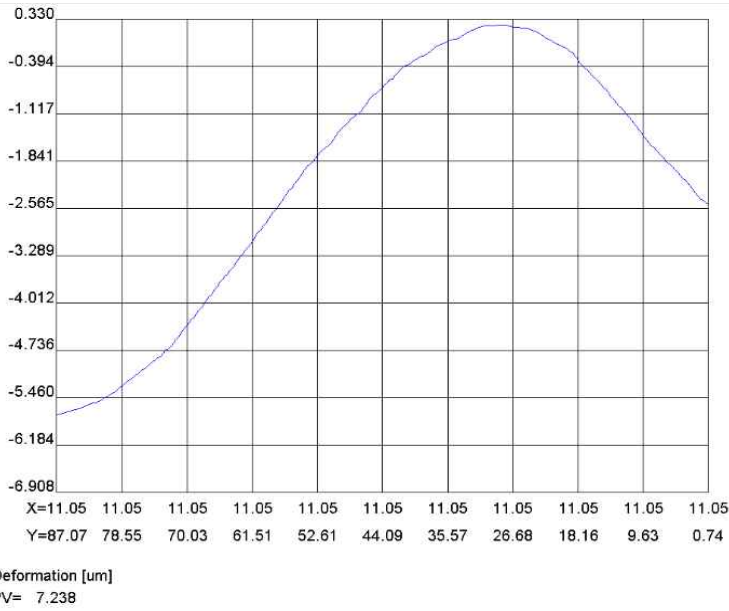


Fig. 5-5 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SS400\_0.4kN)

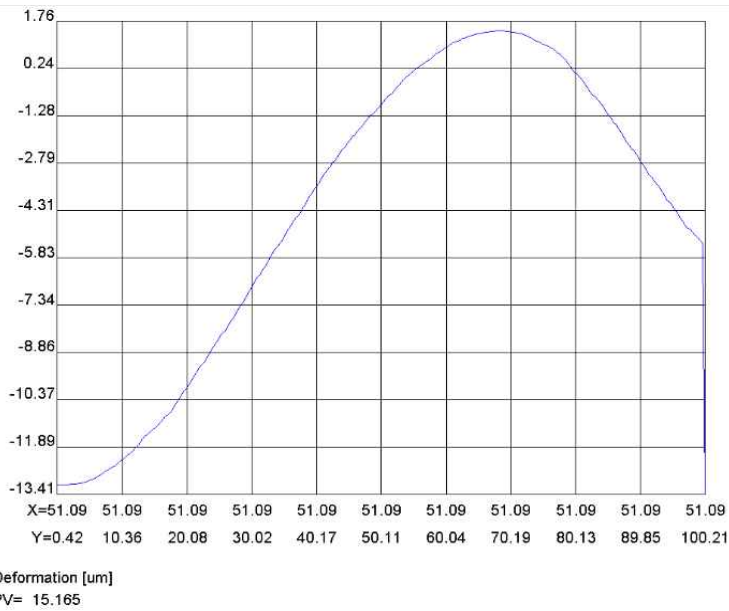


Fig. 5-6 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SS400\_0.8kN)



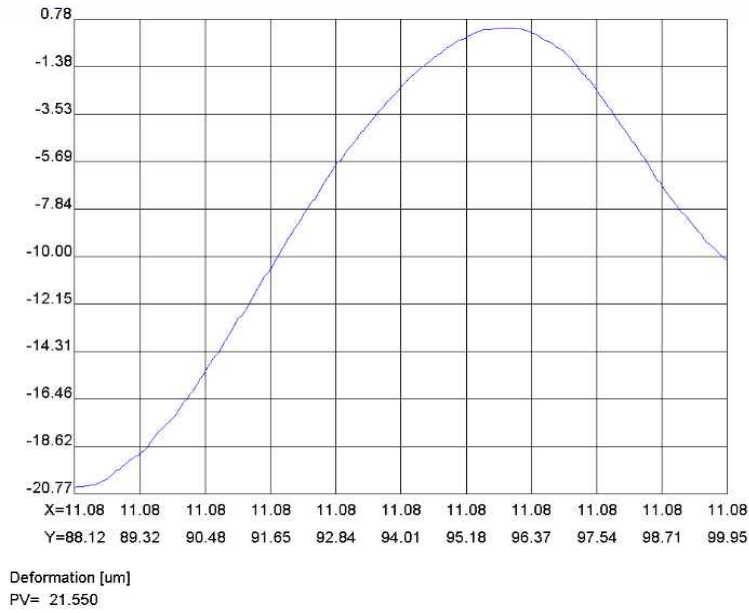


Fig. 5-7 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SS400\_1.2kN)

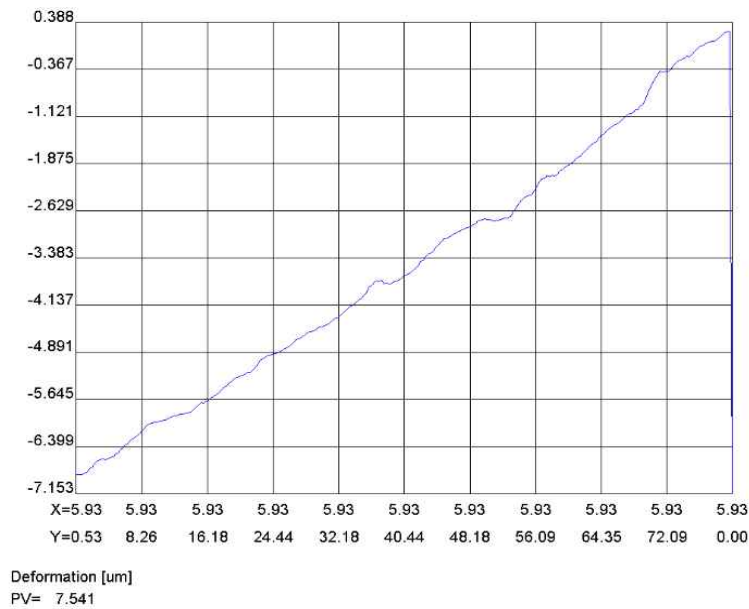


Fig. 5-8 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SS400\_0.4kN)

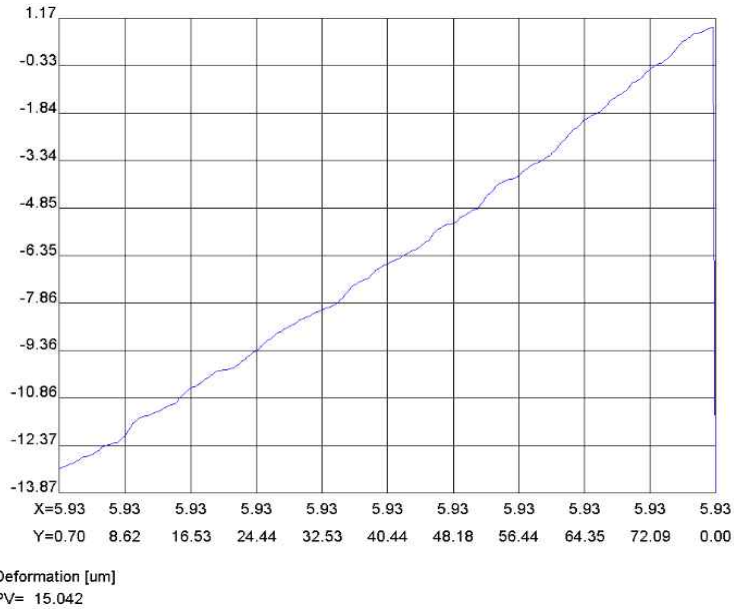


Fig. 5-9 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SS400\_0.8kN)

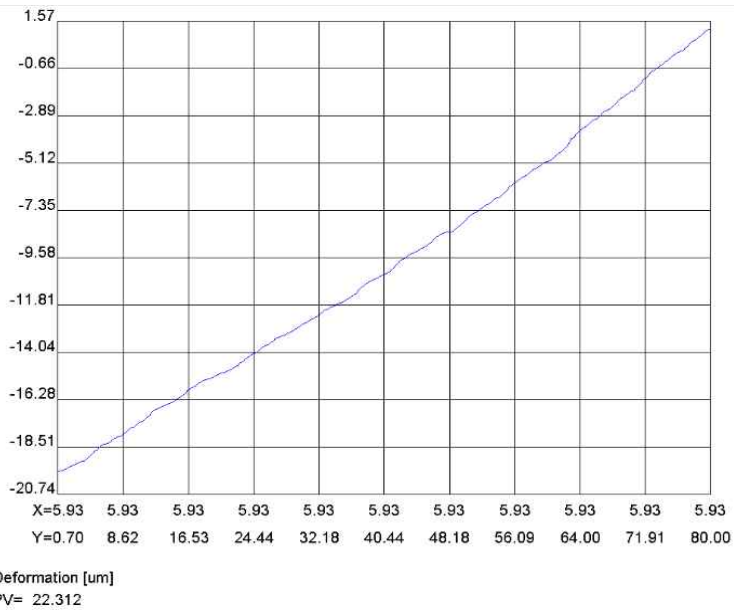


Fig. 5-10 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SS400\_1.2kN)

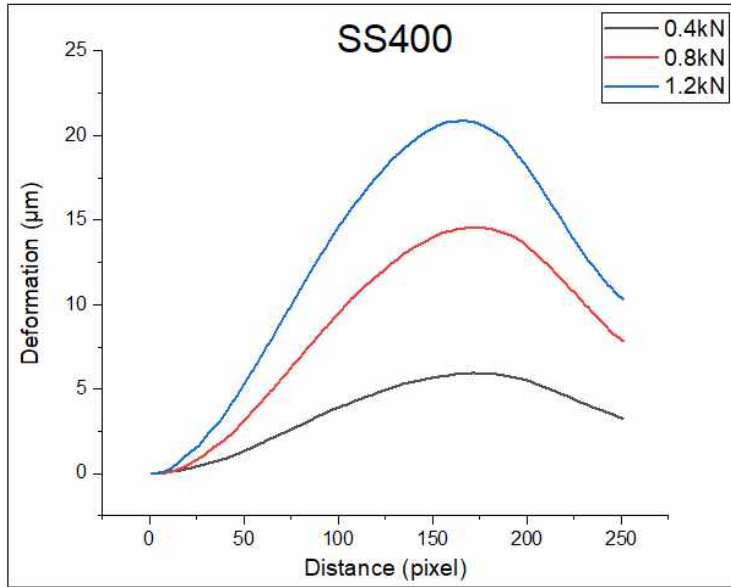


Fig. 5-11 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SS400

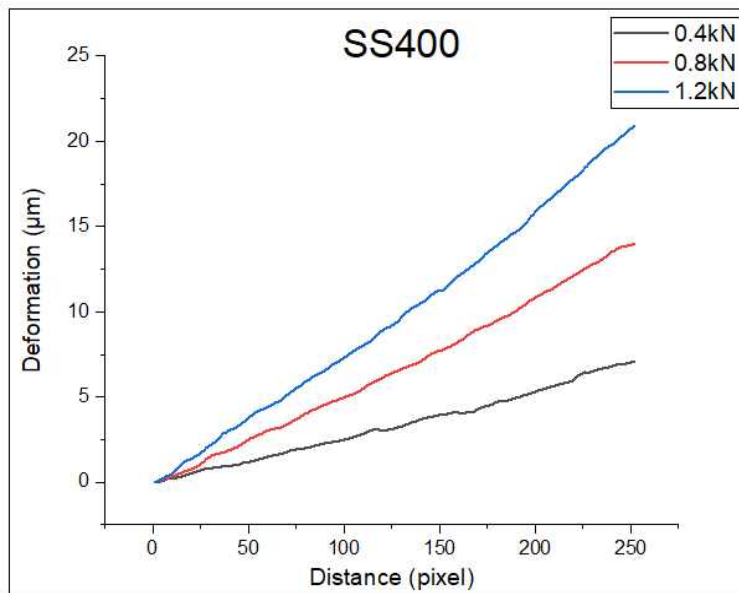

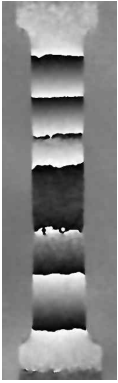
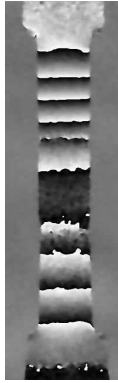


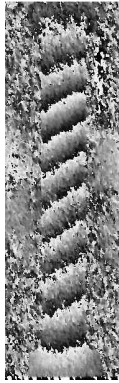
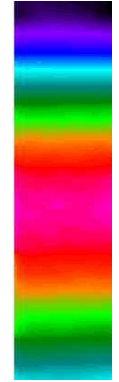


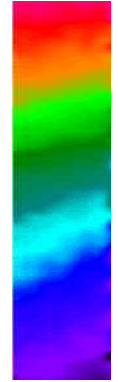
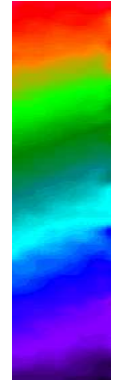



Fig. 5-12 Deformation profile according to load of ESPI of SS400

나. 용융 아연도금 강판 : SGCD1

Table 5-3은 용융 아연도금 강판 재료의 탄성 구간내 하중을 일정하게 증가시키면서 하중 변화에 따른 각 시험편의 면내 변위의 측정 결과를 보여주고 있다. Fig 5-13~5-20은 최종 Line profile을 통하여 획득한 변위값을 그래프로 보여주고 있다.

Table 5-3 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SGCD1

Force (kN)	Dual-beam 전단간섭계			ESPI		
	0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2
Phase map						
Phase unwrapping						
Deformation ( $\mu\text{m}$ )	9.879	19.168	24.650	10.351	19.542	25.893

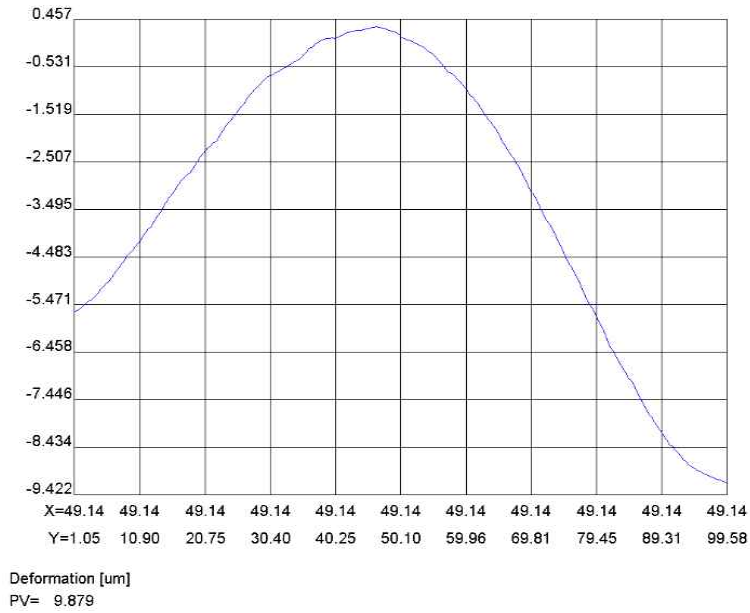


Fig. 5-13 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SGCD1\_0.4kN)

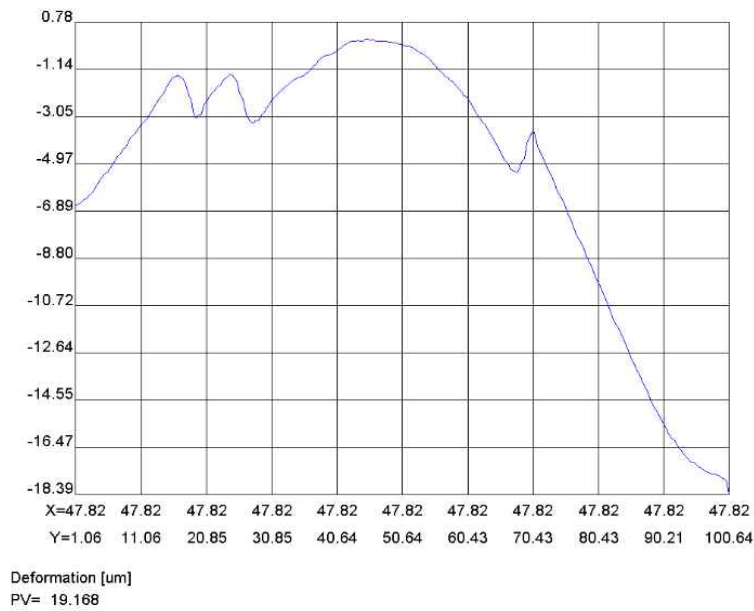


Fig. 5-14 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SGCD1\_0.8kN)

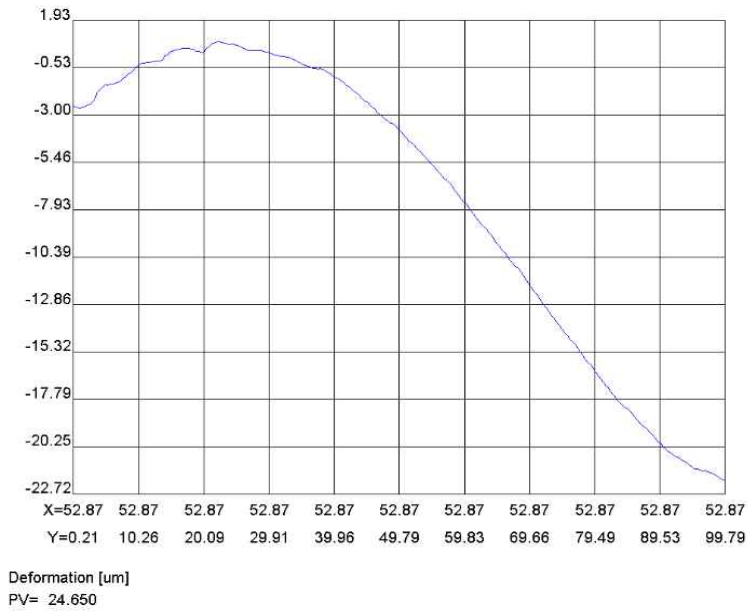


Fig. 5-15 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SGCD1\_1.2kN)

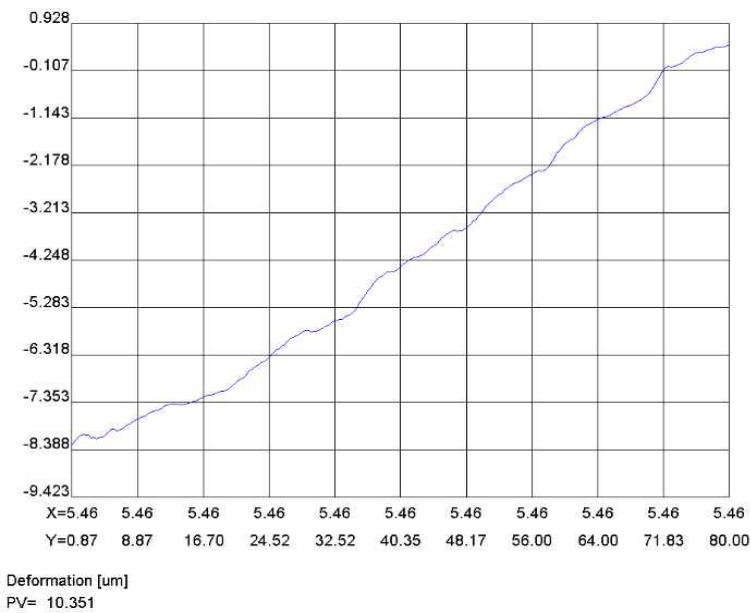


Fig. 5-16 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SGCD1\_0.4kN)

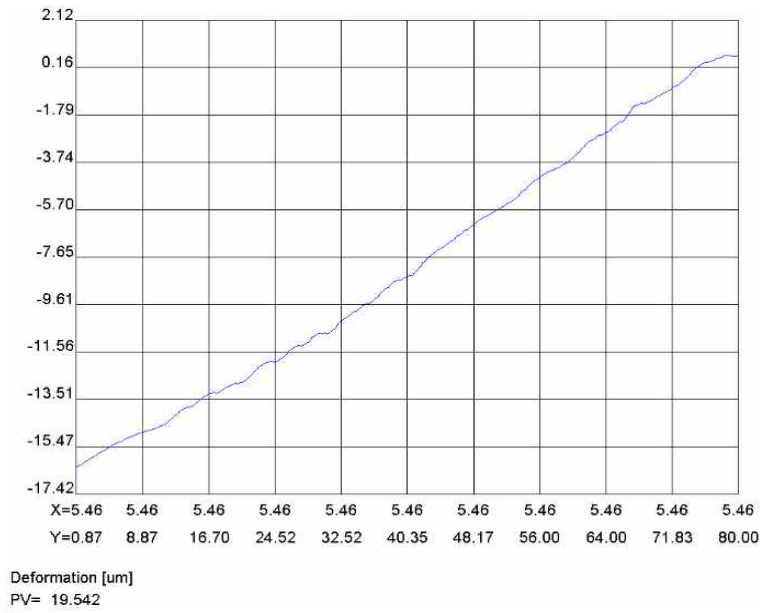


Fig. 5-17 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SGCD1\_0.8kN)

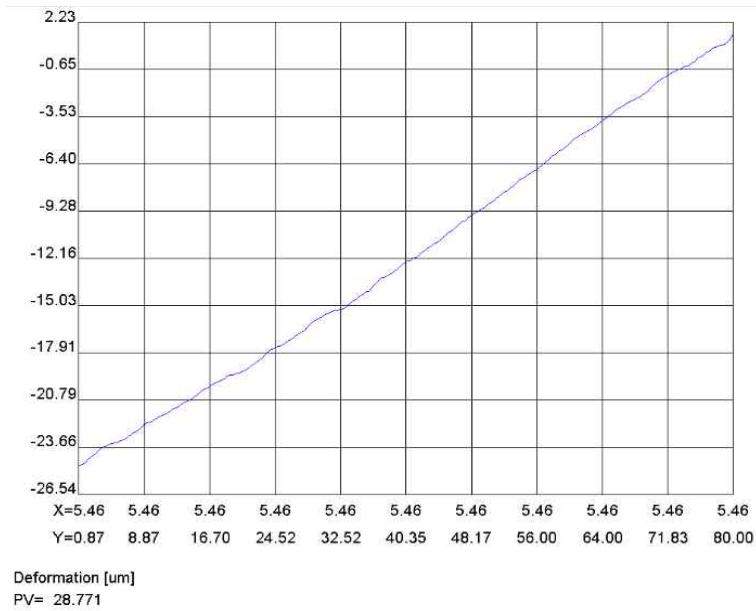


Fig. 5-18 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SGCD1\_1.2kN)

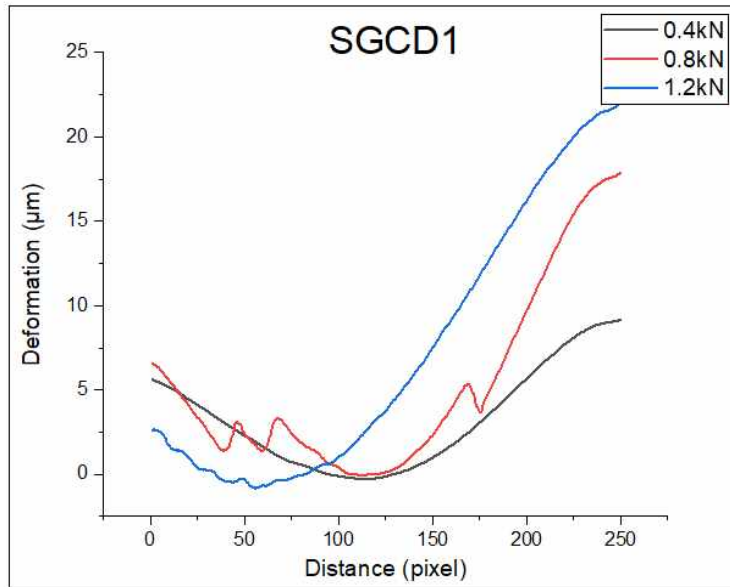


Fig. 5-19 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SGCD1

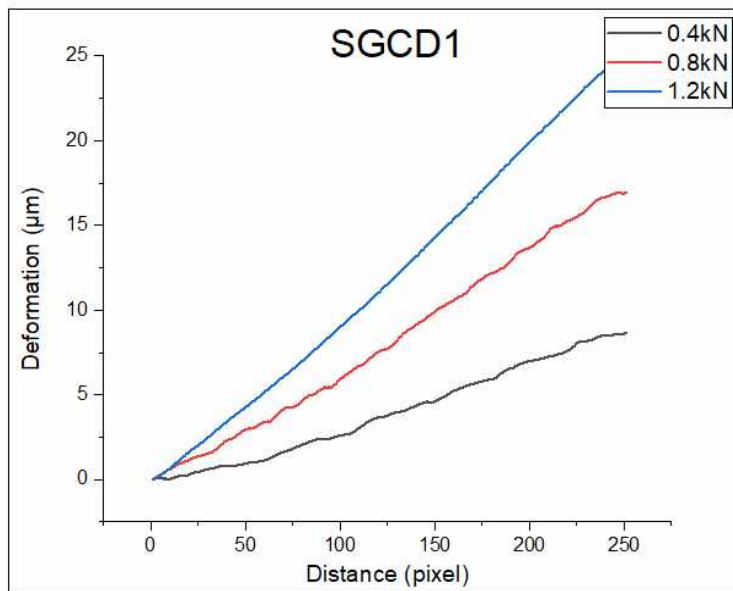


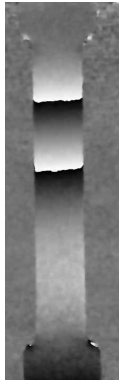


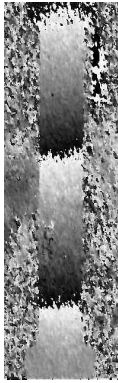
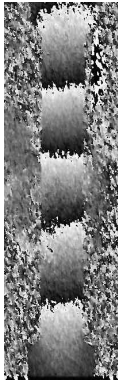
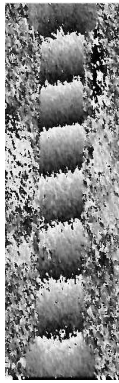

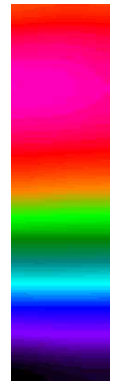

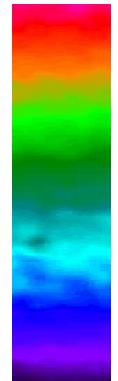


Fig. 5-20 Deformation profile according to load of ESPI of SGCD1



다. 고장력 강판 : SPFC980

Table 5-4은 고장력 강판 재료의 탄성 구간내 하중을 일정하게 증가시키면서 하중 변화에 따른 각 시험편의 면내 변위의 측정 결과를 보여주고 있다. Fig 5-21~5-28은 최종 Line profile을 통하여 획득한 변위값을 그래프로 보여주고 있다.

Table 5-4 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SPFC980

	Dual-beam 전단간섭계			ESPI		
Force (kN)	0.4	0.8	1.2	0.4	0.8	1.2
Phase map						
Phase unwrapping						
Deformation ( $\mu$ m)	7.438	14.195	18.383	7.025	13.617	19.166

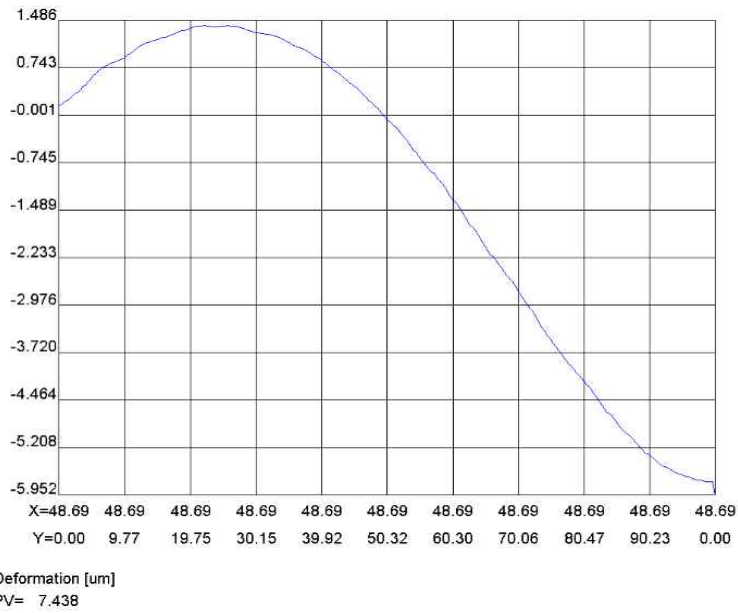


Fig. 5-21 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SPFC980\_0.4kN)

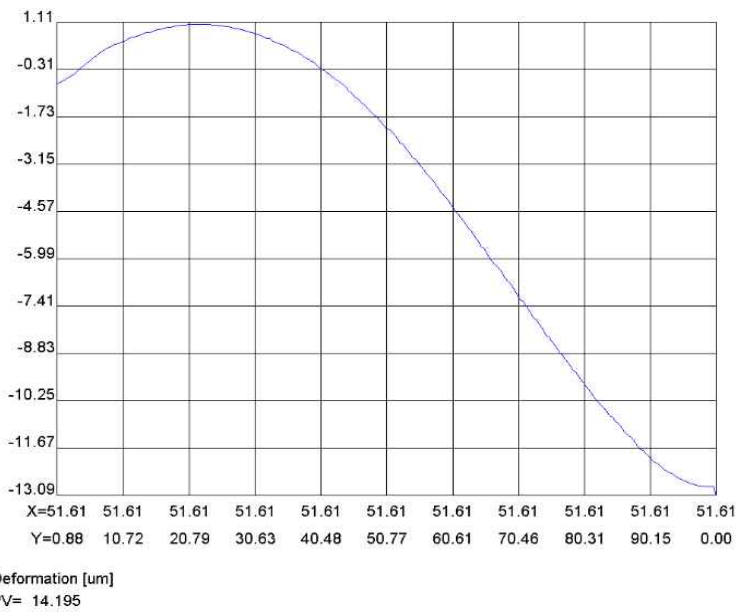


Fig. 5-22 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SPFC980\_0.8kN)

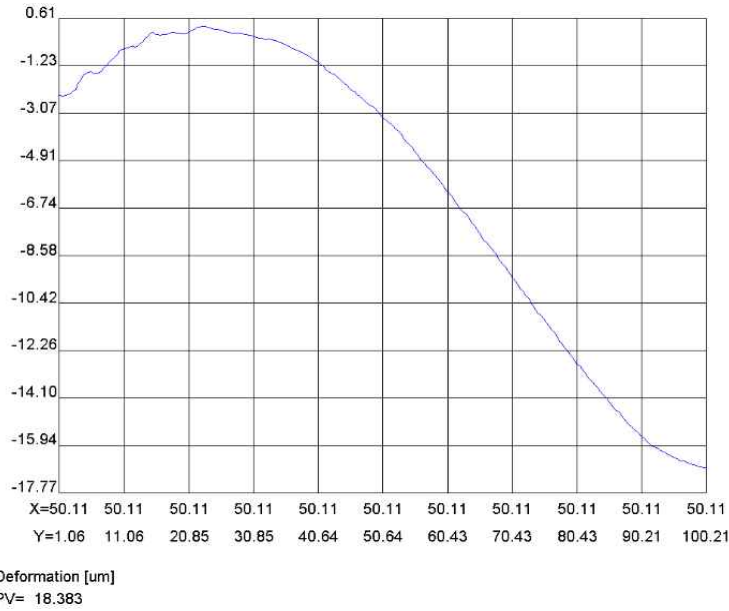


Fig. 5-23 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SPFC980\_1.2kN)

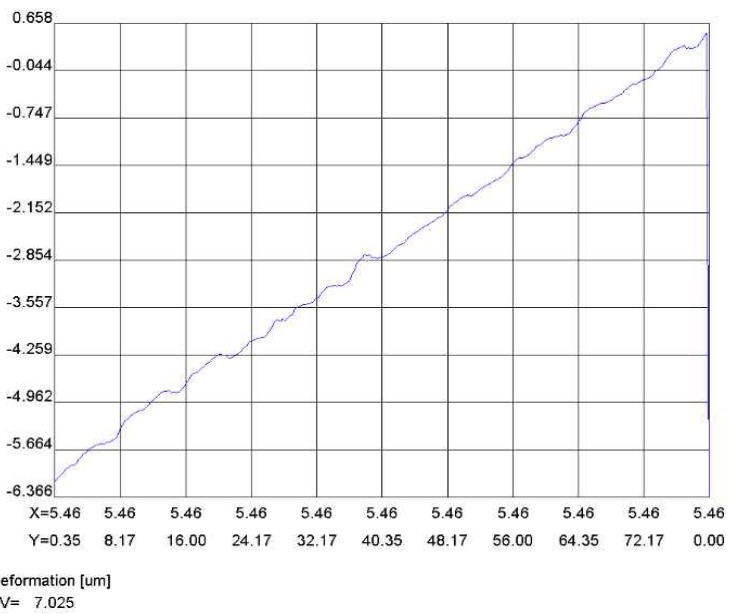


Fig. 5-24 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SPFC980\_0.4kN)

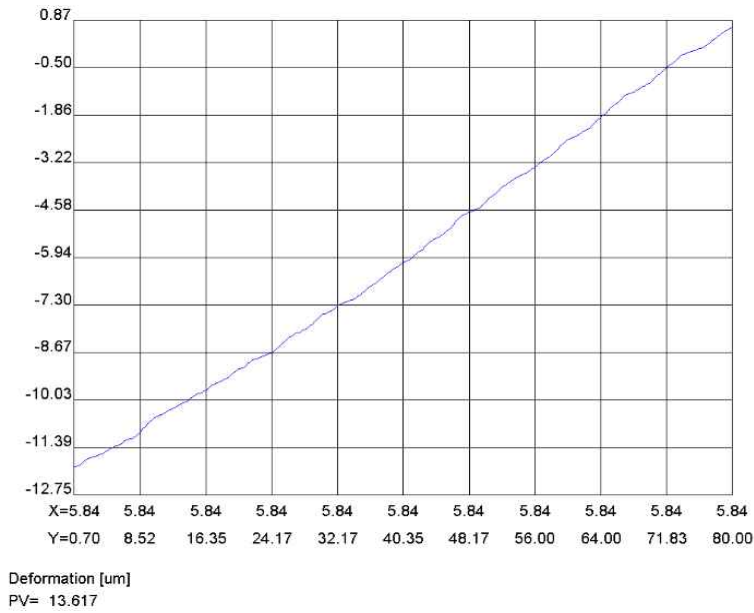


Fig. 5-25 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SPFC980\_0.8kN)

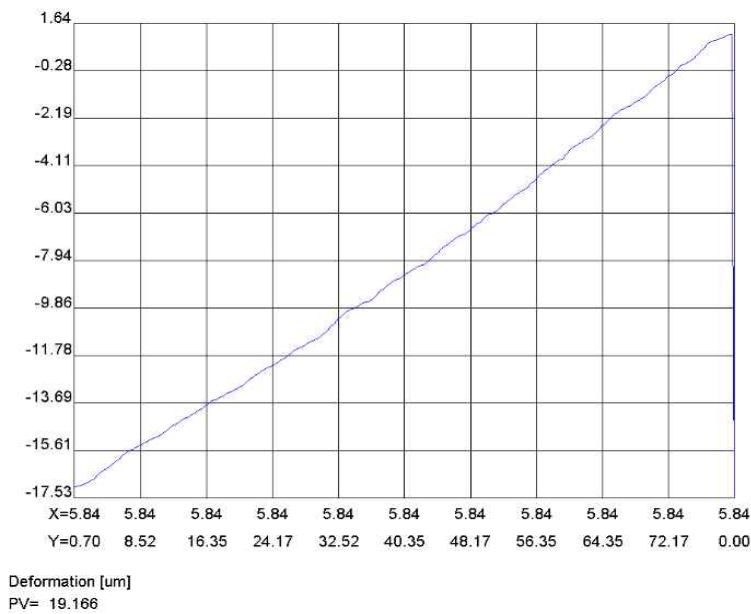


Fig. 5-26 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SPFC980\_1.2kN)

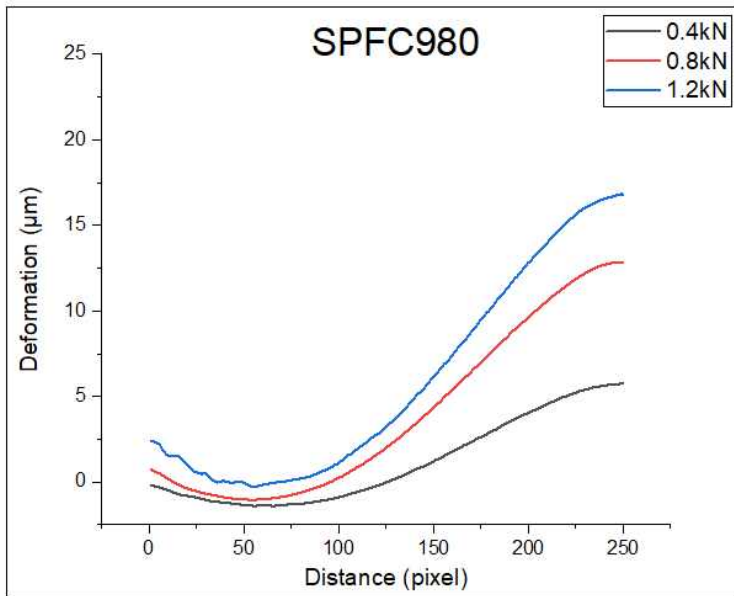


Fig. 5-27 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SPFC980

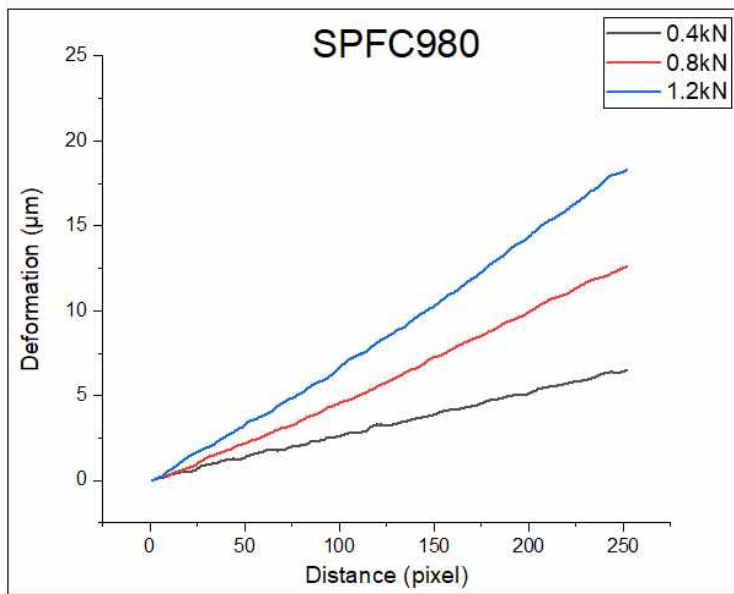


Fig. 5-28 Deformation profile according to load of ESPI of SPFC980

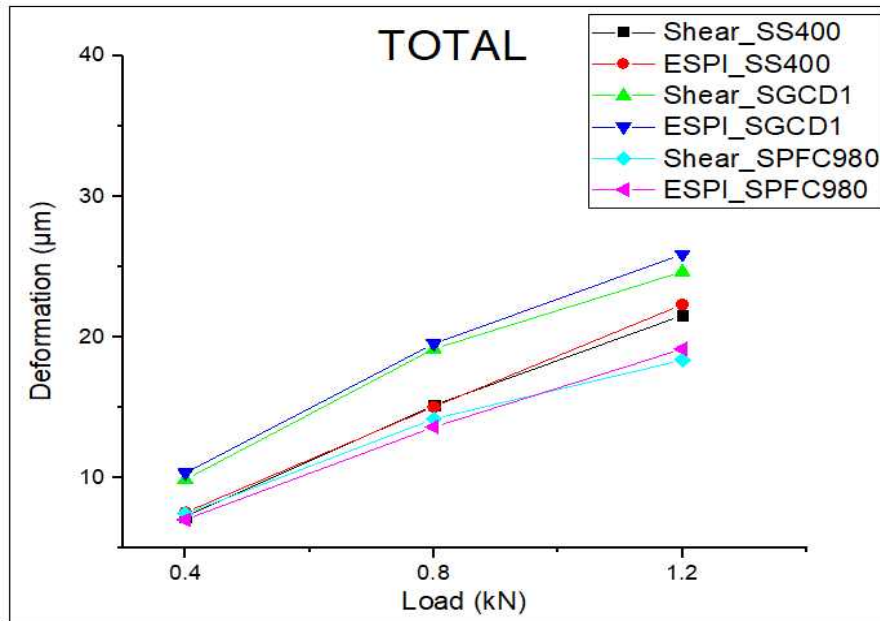


Fig. 5-29 Comparison of deformation value of each specimen with load

Fig. 5-29는 Dual-beam 전단간섭계 시스템을 이용한 일반구조용 압연 강재, 용융 아연도금 강판, 고장력 강판 각각의 시험편의 인장하중에 따른 면내 변위를 측정하였으며 동시에 면내 변위 측정이 가능한 ESPI 시스템과의 측정 결과를 비교 검증하였다. 하중 증가에 따라 Dual-beam 전단간섭계와 ESPI 시스템을 이용한 측정 결과 Phase map에 나타난 줄무늬가 일정하게 증가하는 것을 볼수 있었으며 측정된 Phase map을 살펴보게 되면 줄무늬 가시도가 Dual-beam 전단간섭계 시스템으로 측정된 Phase map이 더 뚜렷하며 주변 외란에 강인한 장점으로 스펙클 노이즈도 덜하여 프로파일 데이터를 확인하였을 때 부드럽게 곡선 선형성을 보여주게 된다. 광계측 기법의 장점인 시험편 전체에 대한 변형을 실시간적으로 측정할 수 있으며 시험편에 작용한 인장하중이 균일하게 분포함을 확인할 수 있었다. 또한 동일한 하중 조건에 각 시험편의 면내 변위 값을 비교해본 결과 고장력 강판의 변형정도가 다른 시험편 보다 덜하다는걸 알 수 있다. 위상지도의 줄무늬 숫자를 통해 간접적으로 변형 정도를 비교할 수가 있으나 정량적으로 측정된 변형값을 확인함으로써 각 시험편의 고유 물리적 특성을 파악할 수 있다.

라. 기계구조용 탄소강: SM45C

(1) 압연방향 X축

Table 5-5는 기계구조용 탄소강 압연방향이 수직방향인 재료의 탄성 구간내 하중을 일정하게 증가시키면서 하중 변화에 따른 각 시험편의 면내 변위의 측정 결과를 보여주고 있다. Fig 5-30~5-37은 최종 Line profile을 통하여 획득한 변위값을 그래프로 보여주고 있다.

Table 5-5 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SM45C (X-axis)

Force (kN)	Dual-beam 전단간섭계			ESPI		
	3	4	5	3	4	5
Phasemap						
Unwrapping						
Deformation ( $\mu\text{m}$ )	10.911	13.109	15.875	11.306	13.438	16.152

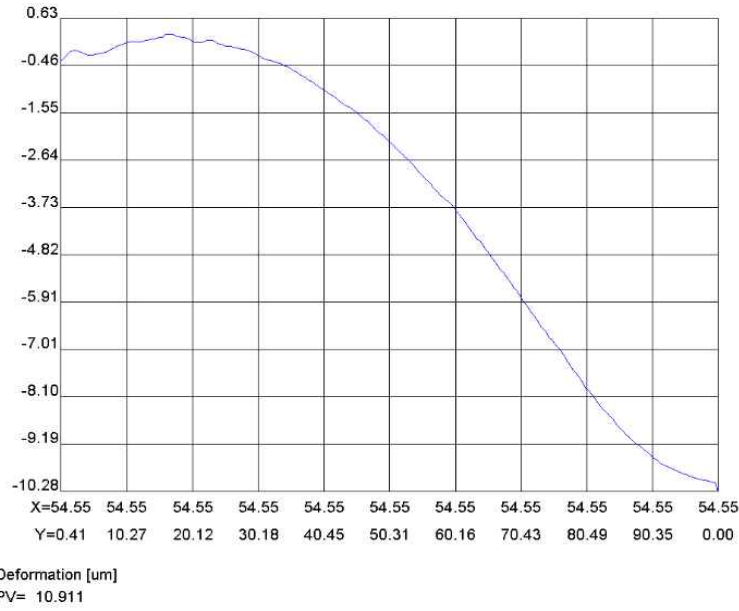


Fig. 5-30 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C\_X-axis\_3kN)

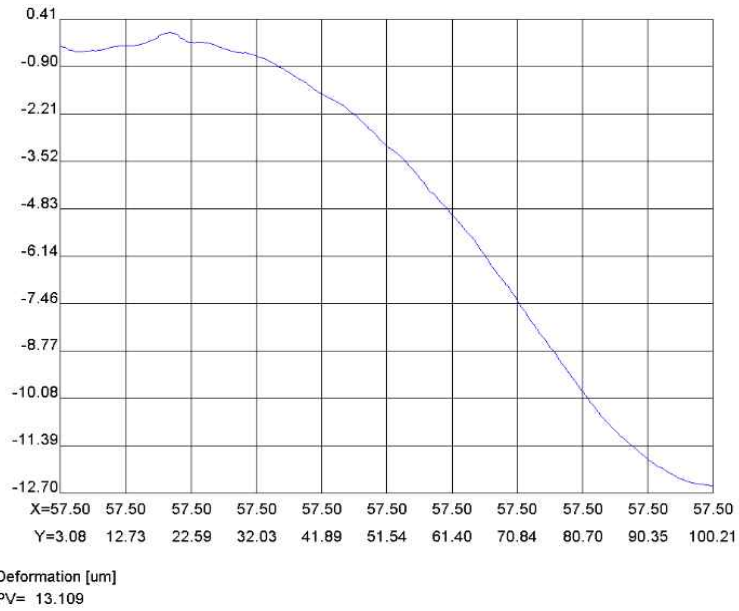


Fig. 5-30 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C\_X-axis\_4kN)



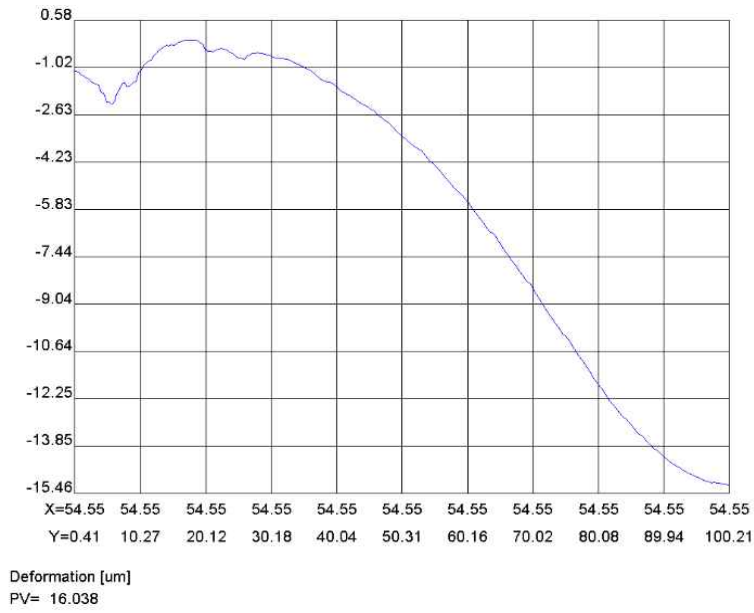


Fig. 5-32 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C\_X-axis\_5kN)

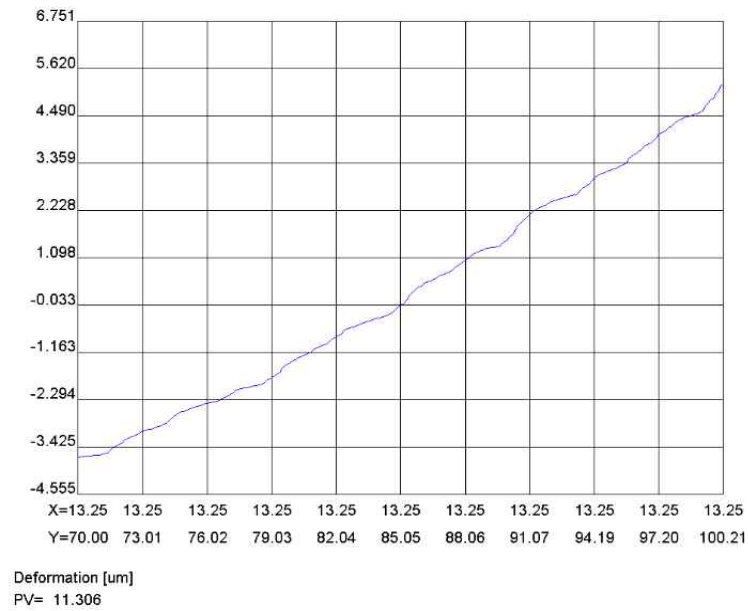


Fig. 5-33 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C\_X-axis\_3kN)

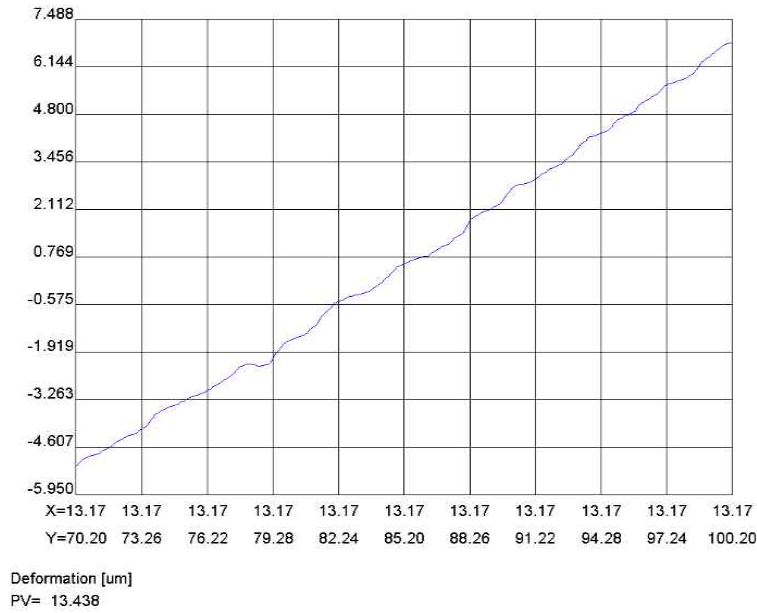


Fig. 5-34 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C\_X-axis\_4kN)

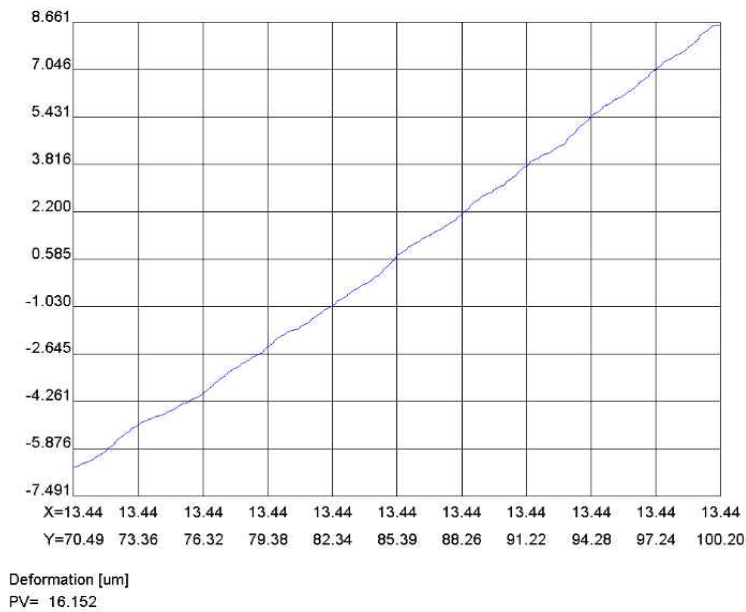


Fig. 5-35 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C\_X-axis\_5kN)

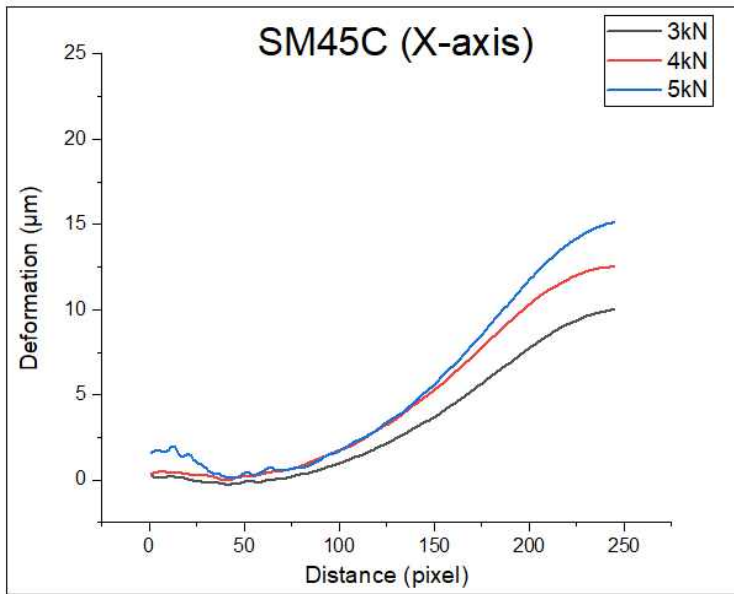


Fig. 5-36 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SM45C\_X-axis

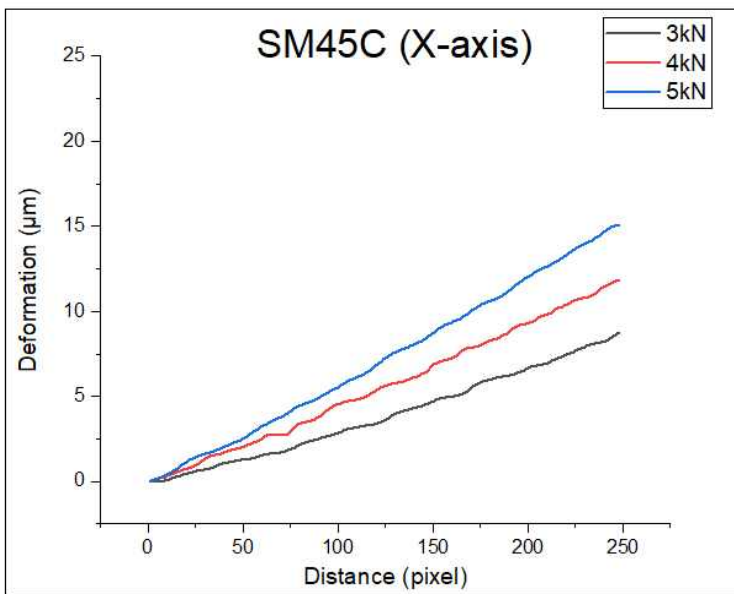


Fig. 5-37 Deformation profile according to load of ESPI of SM45C\_X-axis

(2) 압연방향 Y축

Table 5-6은 기계구조용 탄소강 압연방향이 수평방향인 재료의 탄성 구간내 하중을 일정하게 증가시키면서 하중 변화에 따른 각 시험편의 면내 변위의 측정 결과를 보여주고 있다. Fig 5-38~5-45는 최종 Line profile을 통하여 획득한 변위값을 그래프로 보여주고 있다.

Table 5-6 Dual-beam shear interferometer phase map and phase unwrapping according to load variation of SM45C (Y-axis)

	Dual-beam 전단간섭계			ESPI		
Force (kN)	3	4	5	3	4	5
Phase map						
Unwrapping						
Deformation ( $\mu m$ )	11.008	13.296	16.038	11.695	13.713	16.741

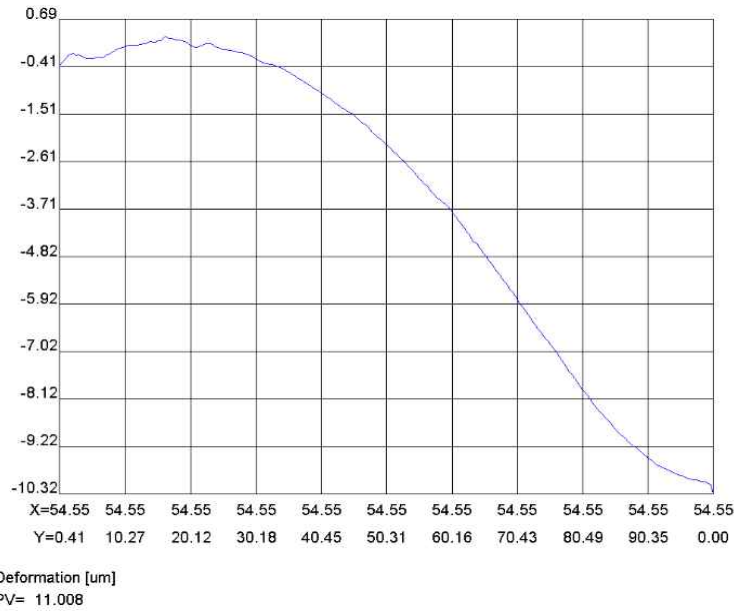


Fig. 5-38 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C\_Y-axis\_3kN)

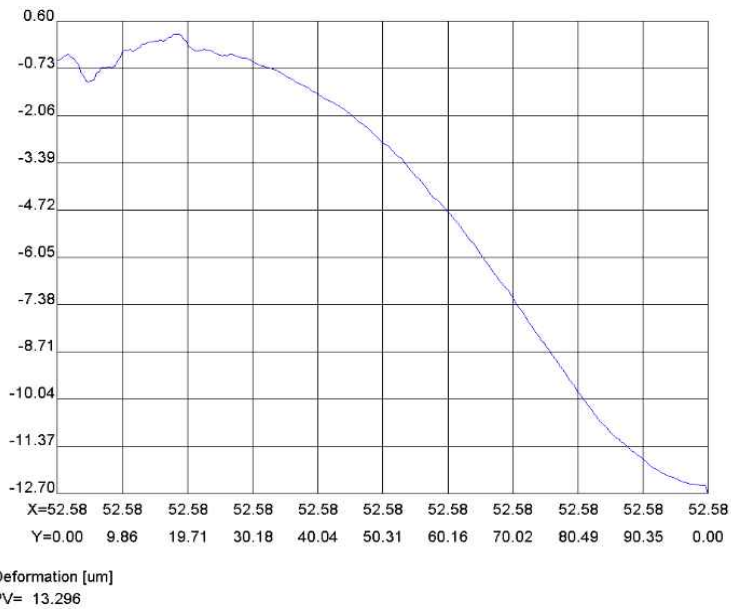


Fig. 5-39 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C\_Y-axis\_4kN)

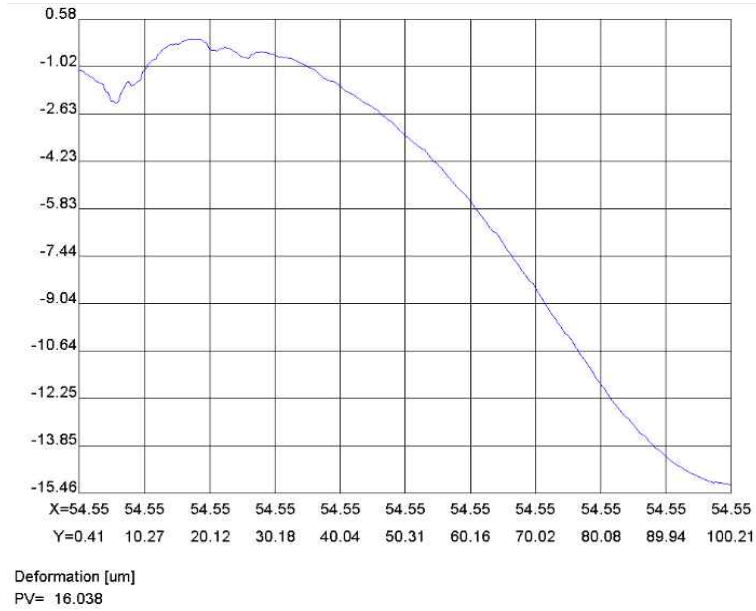


Fig. 5-40 In-plane displacement graph of dual-beam shear interferometer with load variation (SM45C\_Y-axis\_5kN)

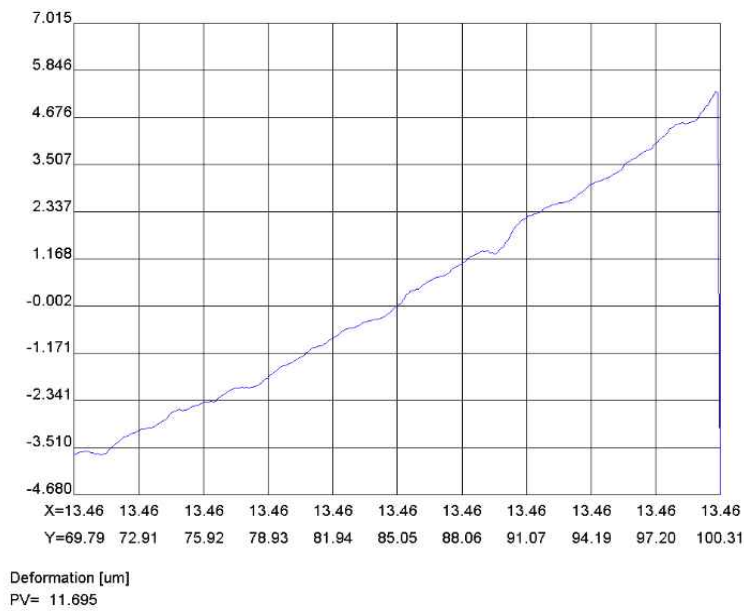


Fig. 5-41 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C\_Y-axis\_3kN)

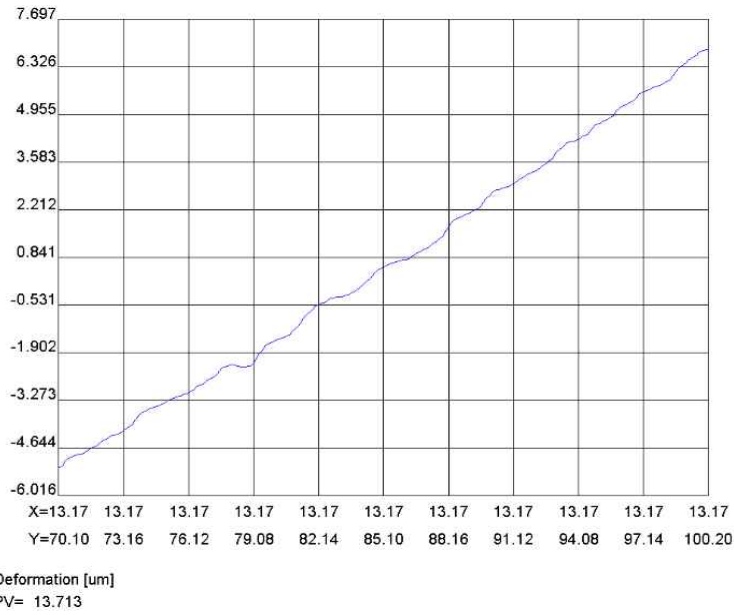


Fig. 5-42 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C\_Y-axis\_4kN)

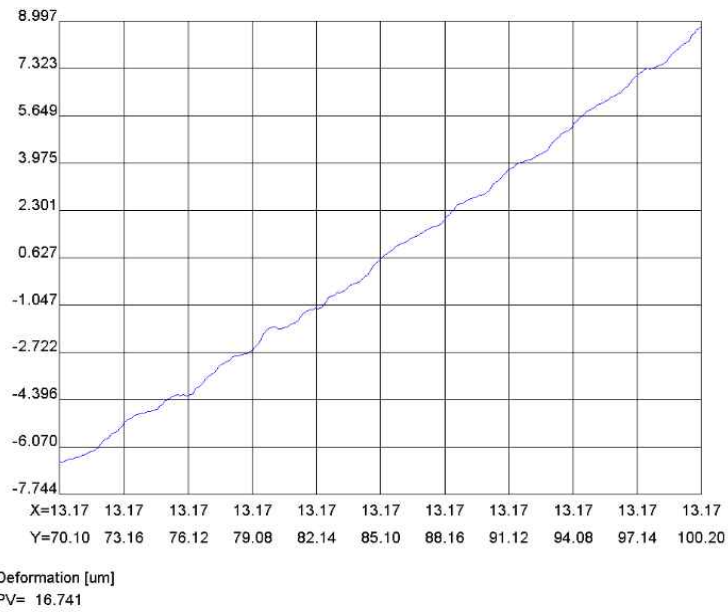


Fig. 5-43 In-plane displacement graph of ESPI with load variation (SM45C\_Y-axis\_5kN)

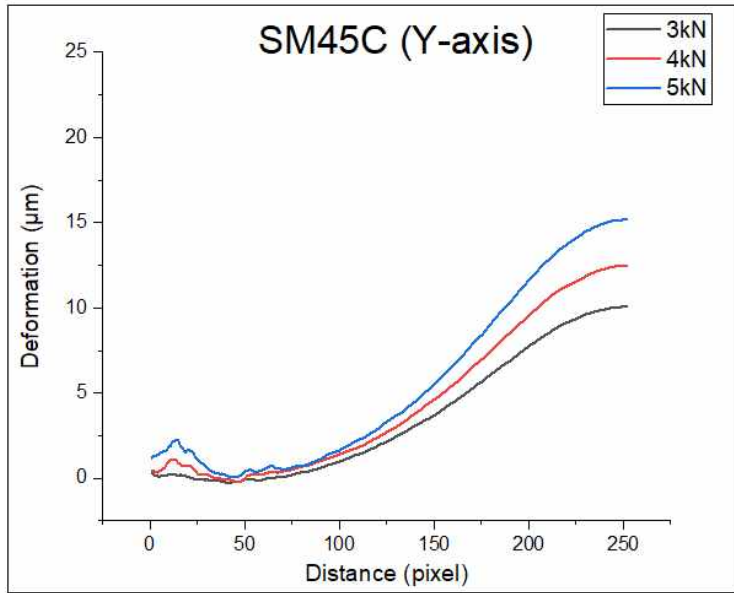


Fig. 5-44 Deformation profile according to load of dual-beam shear interferometer of SM45C\_Y-axis

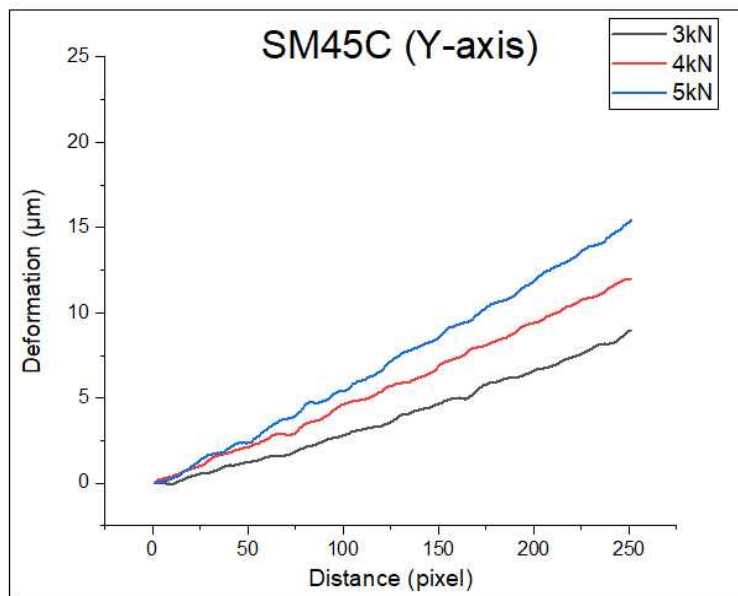


Fig. 5-45 Deformation profile according to load of ESPI of SM45C\_Y-axis



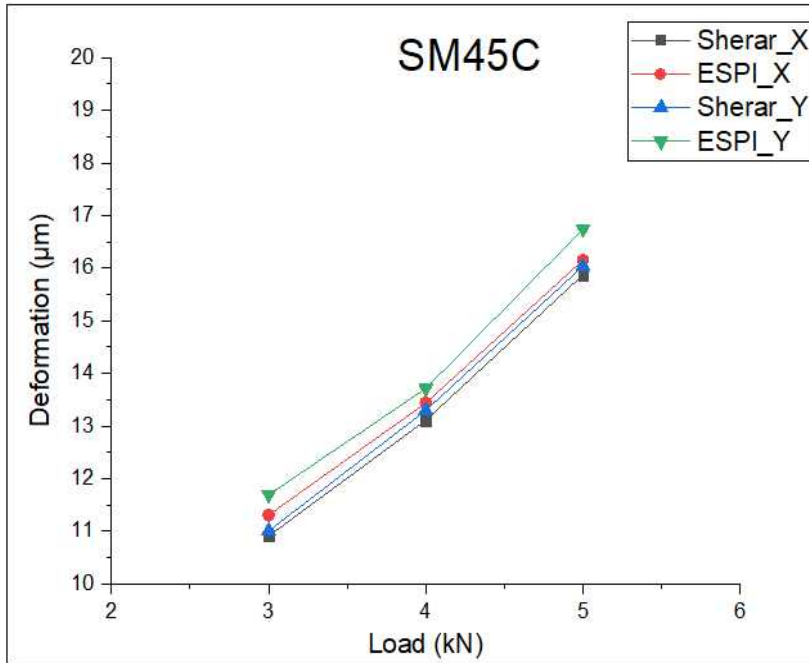


Fig. 5-46 Comparison of deformation values according to load for rolling direction

Fig. 5-46은 기계구조용 탄소강 SM45C의 압연 방향에 따른 각 시험편의 인장하중에 따른 변형값을 보여주고 있다. Dual-beam 전단간섭계 시스템과 ESPI 시스템으로 각각 측정된 결과 ESPI 시스템 측정결과를 기준으로 보았을 때 오차범위 6.2% 이내의 값으로 변형값 차이가 발생하였으며 수평방향으로 압연한 시험편의 변형값이 수직방향으로 압연한 시험편의 변형값보다 크다는 걸 확인할 수 있다. 따라서 각 재료의 압연 방향에 따라 그 변형값이 미소하게 차이가 나타남을 알 수 있다.

## 제 6 장 결 론

본 논문에서는 대상체의 면내 변위 측정을 하기 위해 레이저 응용 계측 기술 중의 하나인 비접촉, 실시간, 고정밀도 측정 장점을 가진 Dual-beam 전단간섭계 시스템을 이용하여 면내 변위를 측정하였다. 기존 ESPI 측정 기법의 진동 및 온도 변화와 같은 변화에 민감하여 현장 적용 활용성이 낮으나 Dual-beam 전단간섭계는 매우 감도가 좋고 주변 외란에 강인하고 견고한 장점을 통하여 산업적 활용을 높이고자 하였다. Dual-beam 전단간섭계 측정은 변형 경사도 또는 변형률 구성요소를 전체 영역을 측정하는 방식으로 대상체의 면내 변위 정도를 정량적으로 측정하는 방법을 제시하였으며 실험 및 데이터 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Dual-beam 전단간섭계 시스템과 ESPI 시스템을 적용하여 시험 대상체의 인장하중에 따른 면내 변위를 측정하였다. 인장하중이 증가함에 따라 시험편의 변형이 커지게 되며 변형 정도에 따라 Phase map상의 줄무늬 숫자가 증가함을 볼수 있다. Dual-beam 전단간섭계 시스템을 적용하여 측정된 Phasemap 이미지와 ESPI 시스템을 적용하여 측정된 이미지를 보게 되더라도 Dual-beam 전단간섭계 시스템으로 측정된 이미지가 더 뚜렷하며 노이즈도 덜 심하다는걸 확인할 수 있다. 따라서 주변 외란의 영향을 덜 받는다는 걸 알수 있다.
- (2) 변형 측정 방법인 스트레인 게이지 계측 기법은 point-by-point 방식의 접촉식 측정 방식으로 시간적 문제와 시험 대상체의 적용의 한계가 있었다. 그러나 광계측 기법은 물체의 변형 측정에는 탁월하지만 외부 진동에 약한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서 제시한 Dual-beam 전단간섭법은 간섭계 특성상 외란에 강하고 견고한 장점을 바탕으로 산업현장에 널리 적용되어질 것으로 사료된다.
- (3) 현재 Dual-beam 전단간섭법은 많은 장점에 불구하고 표준 비파괴 검사기술로 정착하지 못하고 있으며 표준장비 부재에 따른 광계측의 측정치의 표준화에 대한 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구 결과 바탕으로 Dual-beam 전단간섭법에 의한 검사 기술이 표준 검사기술로 정착되길 바란다.

## 참 고 문 헌

1. D. Ryoyama, Y. Sawaki, and M. Ueda, “Experimental study of mechanical analysis in mandibular lengthening: Application of strain gauge measurement,” *Int. J. Oral. Maxillofac Surg.* 33(3), 294–300 (2004).
2. M. Sutton, J. J. Orteu, and H. Schreier, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer Science & Business Media, New York (2009).
3. F. Hild and S. Roux, “Digital Image Correlation,” in *Optical Methods for Solid Mechanics: A Full-Field Approach*, P. Rastogi and E. Hack, Eds., Wiley-VCH, Weinheim, pp. 183–228 (2012).
4. A. Andersson, A. Runnemalm, and M. Sjodahl, “Digital speckle pattern interferometry: Fringe retrieval for large in-plane deformations with digital speckle photography,” *Appl. Opt.* 38, 5408–5412 (1999).
5. R. Zemmamouche, J. Vandenrijt, A. Medjahed, I. de Oliverira, and M. P. Georges, “Use of specklegrams background terms for speckle photography combined with phase-shifting electronic speckle patterns interferometry,” *Opt. Eng.* 54(8), 150692 (2015).
6. M. Sjodahl and H. O. Saldner, “Three-dimensional deformation field measurements with simultaneous TV holography and electronic speckle photography,” *Appl. Opt.* 36, 3645–3648 (1997).
7. R. M. Groves, S. Fu, S. W. James, R. O. Tatam, “Single-axis combined shearography and digital speckle photography instrument for full surface strain characterization,” *Opt. Eng.* 44(2), 025602 (2005).
8. R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
9. W. Steinchen, M. Schuth, L. Yang, and G. Kupfer, “Messung der Dehnungslinien auf der Oberflache von platten und scheibenformigen Bauteilen mittels Shearography,” *Technisches Messen* 61(9), 335–342 (1994).

10. R. Jones and C. Wykes, *Holographic and Speckle Interferometry*, Second Edition, Cambridge Studies in Modern Optics6, Cambridge University Press, Cambridge (1989)
11. D. Gabor, “Laser speckle and its elimination,” *IBM Journal of Research and Development* 14(5), 509–514 (1970).
12. J. W. Goodman, “Statistical Properties of Laser Speckle Patterns,” Chapter 2 in *Laser Speckle and Related Phenomena, Topics in Applied Physics* 9, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 9–75 (1975).
13. Yang, L.X, Steinchen, W., Schuth, M. and Kupfer, G., “Precision speckle pattern and speckle pattern shearing interferometry,” *Measurement–J. Intl Measure. Confed.*, Vol. 16, pp.149–160 (1995).
14. Leendertz, J.A., “Interferometric displacement measurement on scattering surface utilizing speckle effect,” *J. Phys. E, Scientific Instruments*, Vol. 3, pp. 214–218 (1970).
15. Naumann, J., *Grundlagen und Anwendung des in-plane-Moireverfahrens* Reihe 18, *Mechanik/Bruchmechanik*, No. 110 (1992).
16. Tyrer, J.R., Petzing, J.N., “Electronic speckle pattern shearing interferometry,” *Opt. and Las. in Eng.*, Vol. 26, No. 4–5, pp. 395–406 (1997).
17. Aebischer, H.A., Waldner, S., “Strain Distributions made visible with image-shearing speckle pattern interferometry,” *Opt. and Las. Eng.*, Vol. 26, No. 4–5, pp. 407–420 (1997).
18. W. Steinchen and L. Yang, *Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry*, SPIE Press, Bellingham, Washington (2003).
19. V. M. Murukeshan, Ong Lin Seng, and A. Asundi. “Polarization phase shifting shearography for optical metrological applications,” *Opt. Laser Technol.* 30(8), 527–531 (1998)
20. T. Kreis, W. Biedermann, and W. Juptner, “Evaluation of holographic interference patterns by artificial neural networks,” *Proc. SPIE* 2544, 11–24 (1995).

21. K. Creath, "Phase-shifting speckle interferometry," *Appl. Opt.* 24(18), 3053–3058 (1985).
22. Y. Y. Hung, K. W. Long, and J. Q. Wang, "Measurement of residual stress by phase shift shearography," *Opt. Laser Eng.* 27(1), 61–73 (1997).
23. X. Xie, L. Yang, X. Chen, N. Xu, and Y. Wang, "Review and comparison of temporal and spatial phase shift speckle pattern interferometry for 3D deformation measurement," *Proc. SPIE* 8916, 89160D (2013).
24. L. Yang, W. Steinchen, M. Schuth, and G. Kupfer, "Precision measurement and nondestructive testing by means of digital phase shifting speckle pattern and speckle pattern shearing interferometry," *Measurement* 16(3) 149–160 (1995).
25. R. Seara, A.A.Goncalves, and P.B.Uliana, "Filtering algorithm for noise reduction in phase-map images with  $2\pi$  phase jumps," *Appl. Opt.* 37(11), 2046–2050 (1998)
26. B. Pfister "Speckleinterferometrie zur Defektanalyse mit neuen Phasenschiebe methoden," Ph.D. Dissertation, University Stuttgart, Germany (1993).
27. T. Kreis, *Holographic Interferometry: Principles and Methods*, Akademie Verlag, Berlin (1996).
28. D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*, John Wiley and Sons, New York (1998).
29. R. Goldstein, H. Zebker, and C. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," *Radio Sci.* 23(4), 713–20 (1988).
30. J. M. Huntley. "Three-dimensional noise immune phase unwrapping algorithm," *Appl. Opt.* 40(23), 3901–3908 (2001)
31. D. W. Robinson and G. T. Reid, Eds., *Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, CRC Press, Boca Raton, Florida (1993).
32. F. Sawaf and R. P. Tatam, "Finding minimum spanning tress more efficiently in tile based phase unwrapping." *Meas. Sci. Technol.* 17(6), 1428 (2006).

## 감사의 글

2011년도 기계설계공학과 자동화 실험실에 들어와 2년간 석사 생활을 마치고 4년 동안의 박사과정을 거치면서 공부한 것들을 바탕으로 본 박사논문을 쓰게 되었습니다. 대학원 과정동안 많은 어려움과 힘든점이 있었지만 제 주변 많은 분들의 격려와 도움으로 무사히 졸업을 할 수 있게 되어 감사의 말씀을 전합니다.

석사과정부터 박사과정까지 좋은 실험실 환경과 지원으로 연구에 매진할 수 있도록 세심한 지도와 격려를 해주신 지도교수님이신 김경석 교수님께 가장 큰 감사의 말을 전하고 싶습니다. 바쁘신 일정가운데도 본 논문을 위해 심사를 맡아주시고 부족한 부분을 검토해주신 양인영 교수님, 김재열 교수님, 정현철 교수님, 홍정기 교수님께 감사드립니다.

항상 대학원생들과 생활하면서 많은 격려를 아끼지 않으시고 논문에 대한 많은 부분을 살펴봐주신 정현철 교수님, 자동화 실험실의 방장이자 광학적 이론에 대해 많은 도움을 준 주엽이, 자동화 실험실 살림꾼 일철이, 실험실 분위기를 화기애애하게 만들어주는 현일이, 설희, 일본 현지인과 다름 없으신 항서 선배님에게 진심으로 감사드립니다. 그리고 박사과정 시작을 같이한 상채형, 제가 항상 힘들어할 때 정신적으로 큰 힘이 되어줘서 진심으로 감사드립니다.

현재는 졸업하여 각자의 인생길을 가고 있는 선배님과 후배님들께도 감사의 말 전해드리며 항상 격려의 말씀을 해주신 양승필 교수님, 김성식 교수님, 장호섭 박사님, 박찬주 선배님, 후배들에게 한번도 화를 내지 않으셨던 최태호 박사님, 15층 레이저 센터일을 맡고 계신 김우진 선생님과 김세경 선생님께서도 감사말씀 전하고 싶습니다.

제가 박사졸업을 앞둔 시점까지 올 수 있었던 것은 부모님의 희생이 있었기 때문입니다. 부족한 저를 항상 믿어주시고 지원해주신 부모님께 진심으로 감사드리며 항상 건강하시고 행복하시길 바랍니다. 형에게 항상 쓴소리를 하고 자극제가 되어준 하나뿐인 동생 정근이, 내동생을 알뜰살뜰하게 챙겨주는 제수씨께 감사드립니다.

이 모든 분들이 있었기에 지금의 제가 있을 수 있었습니다. 항상 고마움을 가지며 앞으로 맞이할 미래를 위해 더욱 더 노력해가는 모습 보여드리겠습니다.

<b>저작물 이용 허락서</b>					
학 과	기계시스템 미래자동차공학과	학 번	20147206	과 정	박사
성 명	한글: 강 찬 근    한문: 姜 贊 根    영문: Kang, Chan-Geun				
주 소	광주광역시 남구 월산동 303-6번지 덕림빌 B동 402호				
연락처	E-mail : hadis1318@hanmail.net				
논문제목	한글: Dual-beam 전단간섭계의 측정 분해능 향상에 의한 면내 변위 정량 측정에 대한 연구 영문: A Study on Quantitative Measurement of In-Plane Displacement by Improving Measurement Resolution of Dual-Beam Shear Interferometer				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다            음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함</li> <li>2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.</li> <li>3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.</li> <li>4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.</li> <li>5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.</li> <li>6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음</li> <li>7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.</li> </ol> <p style="text-align: center;"><b>동의여부 : 동의(○)    반대( )</b></p> <p style="text-align: center;">2018 년    7 월    10 일</p> <p style="text-align: center;">저작자:    강 찬 근    (서명 또는 인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;"><b>조선대학교 총장 귀하</b></p>					