creative commons

COMMONS DEED

저작자표시 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:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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]I804:24011-200000264628
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2015년 2월
석사학위논문

광 감도 비교를 통한 전자처리 스페클 패턴 간섭계의 최적 측정 조건에 대한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 현 호

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

광 감도 비교를 통한 전자처리 스페클 패턴 간섭계의 최적 측정 조건에 대한 연구

A study on optimal measurement conditions of ESPI by comparing photosensitivity

2015 년 2 월 24 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 현 호

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

광 감도 비교를 통한 전자처리 스페클 패턴 간섭계의 최적 측정 조건에 대한 연구

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2014년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

김 현 호

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

김현호의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교 수 양 인 영 ㊞

위 원 조선대학교 교 수 장 완 식 ㊞

위 원 조선대학교 교 수 김 경 석 ㊞

2014년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF TABLES ..... Ⅲ
LIST OF FIGURES ..... Ⅴ
ABSTRACT ..... Ⅵ

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구 배경 1
제 2 절 연구 목표 및 내용 3

제 2 장 이론적 배경 4
제 1 절 스페클 상관 간섭법 4
1-1. 스페클 형성과 크기 4
1-2. 스페클 상관 간섭무늬 8
제 2 절 물체의 변형정보 추출 12
2-1. 위상이동기법(Phase Shifting) 12
2-2. 결펼침(Unwrapping) 14
제 3 절 광학 간섭계 16
3-1. 면외 변위 측정간섭계(Out-of-plane) 16
3-2. 전단간섭계 17

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실험장치 및 구성 ····· 18
제 1 절 면외 변형 측정 시스템 ····· 18
1-1. 광 감도 측정 시스템 ····· 18
1-2. ESPI System ····· 21
1-3. Shearography System ····· 23
1-4. 해석프로그램 ····· 25
제 2 절 시험편 ····· 29
2-1. 평판 시험편 ····· 29

제 4 장 실험결과 ····· 30
제 1 절 평판 시험편의 면외 변형 측정 결과 ····· 30
1-1. 광 감도에 따른 면외 변형 측정 ····· 30
1-2. 평판 시험편 면외 변형 비교 분석 ····· 36
1-3. 평판 시험편 분석 결과 ····· 45

제 5 장 결론 ····· 54

참 고 문 헌 ····· 55

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table. 3-1 Specification of Power meter ····· 20
Table. 3-2 Specification of Beam splitter ····· 20
Table. 3-3 Technical data of ESPI system ····· 22
Table. 3-4 Technical data of Shearography system ····· 24
Table. 3-5 Design drawings of flat specimen & jig ····· 29
Table. 4-1 Intensity compared with the ND filter ····· 30
Table. 4-2 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 0.6 ㎛ ····· 31
Table. 4-3 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 0.9 ㎛ ····· 32
Table. 4-4 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 1.2 ㎛ ····· 33
Table. 4-5 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 1.5 ㎛ ····· 34
Table. 4-6 Strain analysis of the Unwrapping according to the photosensitivity ····· 35
Table. 4-7 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 0.6 ㎛ ····· 36
Table. 4-8 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 0.9 ㎛ ····· 37
Table. 4-9 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 1.2 ㎛ ····· 38
Table. 4-10 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 1.5 ㎛ ····· 39
Table. 4-11 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 0.6 ㎛ ····· 41
Table. 4-12 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 0.9 ㎛ ····· 42
Table. 4-13 interferometer system phase map analysis results of

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Flat specimen _ 1.2 ㎛ ····· 43
Table. 4-14 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 1.5 ㎛ ····· 44
Table. 4-15 Comparison of Profile Data with deformation of interferometer system ····· 45
Table. 4-16 Comparison with Profile Data according to deformation of the Out-of-plane interferometer ····· 49
Table. 4-17 Comparison with Profile Data according to deformation of the ESPI ····· 49
Table. 4-18 Comparison with Profile Data according to deformation of the Shearogrephy ····· 50
Table. 4-19 Comparison Data of interferometry deformation _ 0.6 ㎛ · 52
Table. 4-20 Comparison Data of interferometry deformation _ 0.9 ㎛ · 52
Table. 4-21 Comparison Data of interferometry deformation _ 1.2 ㎛ · 53
Table. 4-22 Comparison Data of interferometry deformation _ 1.5 ㎛ · 53
Table. 4-23 deformation of interferometer system ····· 54

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Form of laser speckle ····· 4
Fig. 2-2 Principle of objective speckle ····· 5
Fig. 2-3 Principle of subjective speckle ····· 7
Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave ····· 8
Fig. 2-5 Principle of Electronic Speckle Pattern Interferometry fringe pattern formation ····· 10
Fig. 2-6 Phase shifting method ····· 13
Fig. 2-7 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase ····· 14
Fig. 2-8 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase graph ····· 15
Fig. 2-9 Principle of Least square method ····· 15
Fig. 2-10 Out-Of-Plane displacement sensitive interferometer ····· 16
Fig. 2-11 Shearography interferometer ····· 17
Fig. 3-1 system configuration of Out-of-plane interferometer ····· 18
Fig. 3-2 ESPI by comparing photosensitivity ····· 19
Fig. 3-3 Configuration of comparing photosensitivity ····· 19
Fig. 3-4 Device configuration of ESPI ····· 21
Fig. 3-5 Shearography System ····· 23
Fig. 3-6 CCD control program ····· 25
Fig. 3-7 PZT control program ····· 25
Fig. 3-8 Phase map image of front panel and black diagram ····· 26
Fig. 3-9 Phase map Filtering image of front panel and black diagram 27
Fig. 3-10 Profile graph image of front panel and black diagram ····· 28

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A study on optimal measurement conditions of ESPI by comparing photosensitivity

By Kim, Hyun ho
Advisor : Prof. Kim, Kyeong-Suk, Ph. D.
Dept. Advanced Parts & Materials Engineering.
Graduate School of Chosun University.

The Electronic speckle pattern interferometry is one of the optical nondestructive testing technique. Current, non-destructive inspection technology is using industrial machinery, nuclear power plants, heavy plant, shipbuilding ships, aircraft, cars in the field of safety diagnostic tests. One of the non-destructive testing techniques ESPI is best suited for the development and testing of complex components and structures in electronics, automobile design, machining and materials research. It is ideal for the experimental verification of analytical and numerical calculation techniques Purpose of study, by comparing the light sensitivity in measuring the plane deformation of an object, is to obtain the reliability of the out-of-plane deformation interferometer.

A study on the optimum conditions is compared the photosensitivity for ensure reliability to the comparison and verification through the Shearography. and Electronic Speckle Pattern Interferometry

Sherography system is a commercial one from Dantec Dynacmics, German

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

(Q-800 model), and it is composed of shearography sensor, diode laser inside of sensor, controller, and PC. Amount of shear is given in Y direction as 5 mm (0.333mm/pixel), and system utilizes commercial program, ISTRA 4D, for equipment control and filtering/grain treatment.

In this paper, photosensitivity measurement interferometer using a Electronic Speckle Pattern Interferometry theory develope and verify through a comparative experiment of photosensitivity

Devices capable of determining the reference value develope and through the experiment, effective quantitative detection method offer

Using the test method proposed in this paper, the size of the internal defects, shape, check the position with high resolution inspect, the concept of quantitative non-destructive evaluation that is basis to product reliability, safety, health will meet. So laser speckle interferometry will be expected reliable non-destructive inspection

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

제 1절 연구 배경

요즘 다양한 구조물을 안전하게 관리하고 파악하기 위해 신속성, 경제성, 검사대상의 다양성 등의 장점인 비파괴 검사기술을 사용되어 있고 또한 대형 구조물과 소형제품의 신뢰성까지 여러 분야에서 전반적으로 중요한 역할을 담당하고 있다. 그 중요성은 안전진단을 통한 대형사고의 예방에서부터 제품의 신뢰성평가를 통한 기업경쟁력 강화까지 이르고 있다. 본 검사기술을 통한 산업설비의 부재결함을 신속하고 정확하게 검출하여 산업시설물에 대한 제품 경제성부터 건전성 등등을 여러 분야를 확보하여 산업전반에 중요한 역할을 담당할 것이다. 비파괴 검사의 종류로는 많이 알려져 있는 것과 같이 육안검사(Visual testing; VT), 방사선투과시험(Radiographic tasting; RT), 초음파탐상시험(Ultrasonic tasting; UT), 자기탐상시험(Magnetic testing; MT), 침투탐상시험(Liquid penetrant testing; PT), 와류탐상시험(Eddy current testing; ET), 적외선검사(Infrared testing; IRT)등이 있으며, 이중에 표면 또는 표층부의 결함정보를 얻기 위해 외부(Surface)검사로 육안검사, 침투탐상시험, 자분참상시험, 와류탐상시험 등이 사용되며 내부(Volume)검사로 방사선투과시험, 초음파탐상시험 등이 사용되고 있다.[1] 이러한 비파괴 검사기술은 짧은 시간에 많은 대상물을 비접촉, 실시간, 고 분해능으로 검사가 가능한 기술을 원하고 있으며, 이러한 요구들은 Thermography, Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), Shearography등의 광학기반의 비파괴검사기술이 충족할 수 있다.[2,3] 레이저응용 검사기술은 간섭계 기반의 변위측정기술에서 레이저유도초음파, 홀로그래피, 스페클 상관간섭법등의 다양한 분야로 발전하고 있으며, 레이저 스페클 간섭법(Laser speckle interferometry)은 레이저를 이용한 컴퓨터 영상처리기반으로 광학간섭계의 변화를 줌으로써 비접촉 고분해능의 측정정밀도를 갖는 전자처리 스페클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 스페클 전단간섭법(Speckle Shearography)등으로 발전하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴 검사 등의 분야로 적용되고 있다.[4~6] ESPI는 초기 필름을 사용한 Speckle correlation interferometry에서 컴퓨터기술의 발전과 함께 필름을 CCD 카메라로 대체하고 영상처리기술을 융합하여 Digital

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기술로 진화 하였다.[7] 이 기술의 기본개념은 1971년 미국의 Macovski, Ramsey[8], Schaefer와 영국의 Butters, Leendertz[9]가 거의 동시에 개발하였으며 이후 ESPI 기술은 K. Creath[10]에 의해 제안된 위상이동기법을 적용한 Phase shifting ESPI로 발전하면서 간섭정보의 획득에서 최종 표면변위 측정까지 자동화가 가능하게 되었다. 스페클 간섭법에서 변형전과 후의 이미지의 비교처리라는 기본개념은 비파괴 검사 분야로 활용이 가능하고 물체의 내부 또는 외부에 존재하는 결함에 의해 변형 집중이 일어날 때 표면 변위 분포로 나타나게 된다. 이는 스페클 상관간섭법를 이용하여 측정하게 되면 응력집중에서 상관간섭줄무늬의 왜곡으로 나타나게 된다. 이러한 기본 개념을 응용하여 물체 외부 결함을 비접촉, 비파괴, 실시간으로 검사 할 수 있고 전단간섭계는 전자처리 스페클 간섭법과 유사한 간섭신호처리 알고리즘이 있으면서도, 간섭계 구성의 차이로 면외 변위의 1차 미분 값을 직접 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점은 외부환경의 진동외란에 둔감하면서 면외 변위의 변화를 측정함으로써 변형률 해석과 진동해석을 할 수 있으며, 결함의 정량화, 기계구조물 해석등 비파괴 검사 분야에서 매우 유용한 방법으로 활용되고 있다.[11,12] 그러나 지금까지의 연구들은 제품의 건전성평가에서 중요한 개념인 결함의 정량평가를 위한 검출 메카니즘의 규명, 내부결함의 효과적 검출, 검출분해능에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 또한 ESPI의 간섭계 구성은 전단갑섭계와 다른 같은 더욱 정밀하고 민감하기 때문에 같은 광의 세기의 정량화를 위해 누가 어디서 시험을 하여도 동일한 시험 결과를 얻을 수 있는 기술의 신뢰성을 요구 하고 있다. 이를 충족시키기 위해서는 간섭계 내부 구성에 따른 더욱더 정확한 연구가 미흡한 상태이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2절 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 레이저 응용 계측 기술 중의 하나인 전자처리 레이저 스페클 간섭법 (Electronic Speckle Pattern Interferometry)의 이론적 방법을 이용한 레이저 광 감도 제어 기술을 접목시킨 간섭계를 개발하고 광 감도를 비교함으로써 실제 실험을 통해 검증하고자 한다. 또한 실험을 통한 정량적으로 고정밀도 측정할 때의 광량의 데이터를 획득이 가능하고 정량적인 값을 얻을 수 있는 기준치를 정할 수 있는 장치 개발을 실행하고 이를 통하여 측정 결과의 향상 및 적용성을 우수하게 만들어 건전성 평가기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초 연구로서 정량평가를 위한 최적화 및 특성을 효과적인 정량검출방법을 제시 하였다. 본 논문에서 제안하는 검사기법을 이용하여 내부 결함의 크기, 형상, 위치를 고 분해능으로 검사함으로서 제품 신뢰성, 안전성, 건전성, 보수성의 기준이 되는 정량적비파괴평가의 개념을 충족시키고 이를 기반으로 레이저 스페클 간섭법이 신뢰성 있는 비파괴 검사기술로 정착할 수 있을 것으로 기대한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 스페클 상관 간섭법

1-1. 스페클 형성과 크기

레이저 스페클(Laser Speckle)은 레이저의 우수한 간섭성질로 인하여 나타나는 현상으로 레이저를 물체의 표면에 조사하였을 때, 물체의 표면 거칠기(레이저의 파장보다 큰 거칠기)로 인하여 레이저는 산란을 하고, 산란된 레이저 광들이 겹치면서 간섭을 일으킨다. 이 간섭에서 보강간섭과 소멸간섭이 일어나고 Fig. 2-1와 같이 물체 표면에 검은 반점의 형태로 보이게 되며, 이 작은 반점을 스페클이라 한다.[13,14] 이와 같이 밝고 어두운 반점형태의 무늬가 무작위로 변화되는 밝기분포로 나타나는 현상을 스페클 패턴(Speckle Pattern)이라 하며, 물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh Scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클 패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 대상체에 변화가 생기면 레이저의 광 경로에 변화가 생김으로서 각 상태에 따른 스페클이 달라지는데 이는 광 검출기에 각각의 상태를 비교함으로써 물체표면의 거칠기와 변형 등의 정보를 얻을 수 있다.[15]

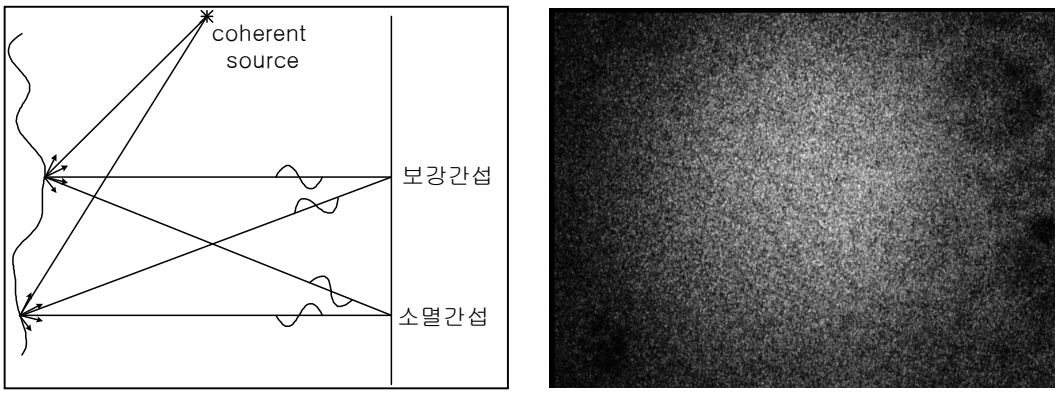


Fig. 2-1 Form of laser speckle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

스페클은 관찰하는 방법에 따라 Objective Speckle과 Subjective Speckle로 나누어진다. Fig. 2-2는 Objective Speckle의 형성을 보여 주고 있다.

Objective Speckle 크기는 물체의 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D 위의 모든 점은 Image Plane에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식(2-1)로 Objective Speckle의 크기를 정의하고 있다.[16]

$$S_{obj} = 1.22\frac{\lambda L}{D} \qquad (2-1)$$

여기서 λ: 조사되는 레이저의 파장, L: 물체와 결상면 사이의 거리, D: 물체에 조사된 면적 이다.

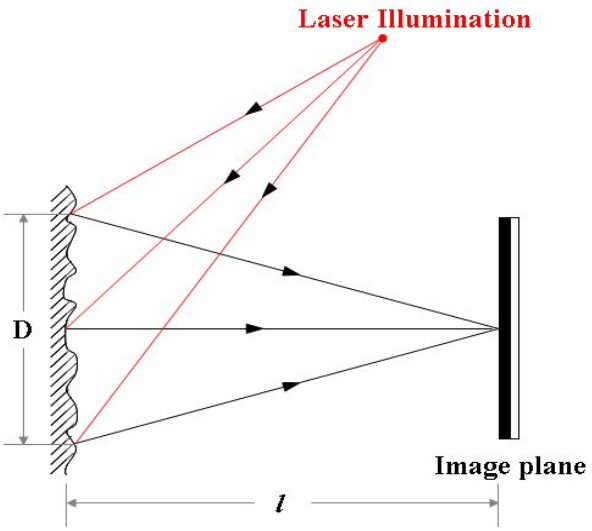


Fig. 2-2 Principle of objective speckle

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2-3은 Subjective Speckle의 원리를 보여 주고 있다. 스페클 상관 간섭법(Speckle Correlation Interferometry)에서는 Subjective Speckle Pattern을 대부분 사용하며, 공간분해능은 Subjective Speckle의 크기에 의존하게 된다. 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의된 Subjective Speckle은 렌즈의 회절한계로 인하여 Objective Speckle과는 다르게 정의된다. 스페클의 공간 분포는 결상 시스템의 회절한계에 의해서 결정되는데, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상하여 물체의 한 점과 결상면의 한 점이 1 : 1 대응이 된다. Fig. 2-3에서 P는 점 Q의 중심에서 회절 패턴을 형성하고 진폭의 분포는 베셀 함수로 설명되고, P점의 빛은 대상물 표면 높이의 무작위적 변화에 따라 Random한 위상을 갖는다는 특징을 가지고 있다.

Subjective Speckle의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 Primary Maximum와 First Minimum사이의 거리(Bessel Function의 1차 최소점 사이의 거리)라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 Subjective Speckle의 크기는 식(2-2)와 같이 정의된다.

$$S_s \approx 0.61\frac{\lambda}{N.A} = 1.22(1+M)\lambda F \qquad (2-2)$$

여기서, $N.A$: Numerical Aperture, M : 렌즈 확대배율, λ : 조사된 레이저의 파장, F : 렌즈의 F-Number이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 줌 렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6 배(1/2 inch format CCD 카메라와 15 inch 모니터(Pixel Pitch: 0.297 mm))를 사용하여 렌즈의 F-Number 1.2로 하였을 때, 실제 모니터 상에 관찰되는 Subjective Speckle의 크기는 37.07 mm가 된다.[17]

$$S_s = 1.22(1+M)\lambda\frac{F}{M} \qquad (2-3)$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

또한 Subjective Speckle의 물체표면에서 크기는 식(2-3)의 S_s로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, Uniform Field와의 조합하여 간섭하는 면외 변위 측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

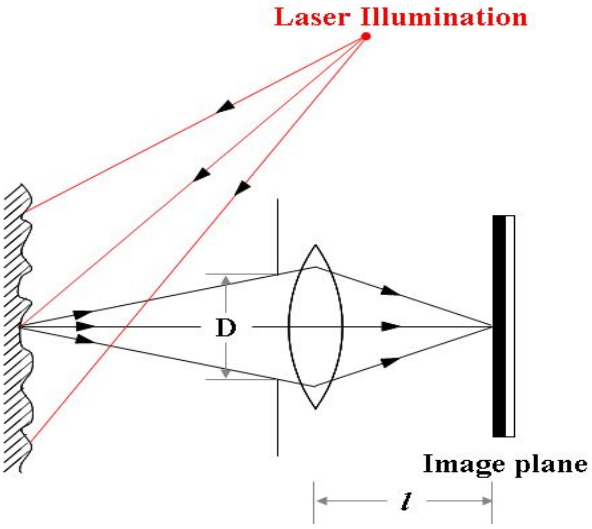


Fig. 2-3 Principle of subjective speckle

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1-2. 스페클 상관 간섭무늬

스페클 상관 간섭무늬(Speckle Correlation Fringe Pattern)는 물체의 변형에 따라 스페클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상 점의 연결로 이루어진 것으로 볼 수 있다. 이러한 상관 간섭무늬는 화상처리장치를 이용하여 변형 전의 스페클 패턴을 기준으로 물체 변형에 따른 스페클 패턴의 변화를 연속으로 감산처리에 의해 실시간으로 관찰할 수 있다. 스페클 상관 간섭문늬 형성을 위한 간섭계는 민감도를 높이기 위해 참조광을 사용하는데 참조광의 종류에 따라 스페클 패턴과 Uniform Field의 합성, 두 스페클패턴의 합성으로 나눌 수 있다. ESPI에서는 전자의 경우를 면외 변위 측정 간섭계로 많이 사용하고, 후자를 면내 변위 측정 간섭계로 많이 사용하고 있다. Fig. 2-4는 두 개의 광의 합성을 나타낸 그림으로 여기에서 참조광(E_R)은 물체광(E_O)에 의해 형성된 스페클을 z-축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 빛의 파동에 대한 진폭은 복소수에 대한 함수로 표면 가능하므로 식(2-4)와 같이 쓸 수 있다.

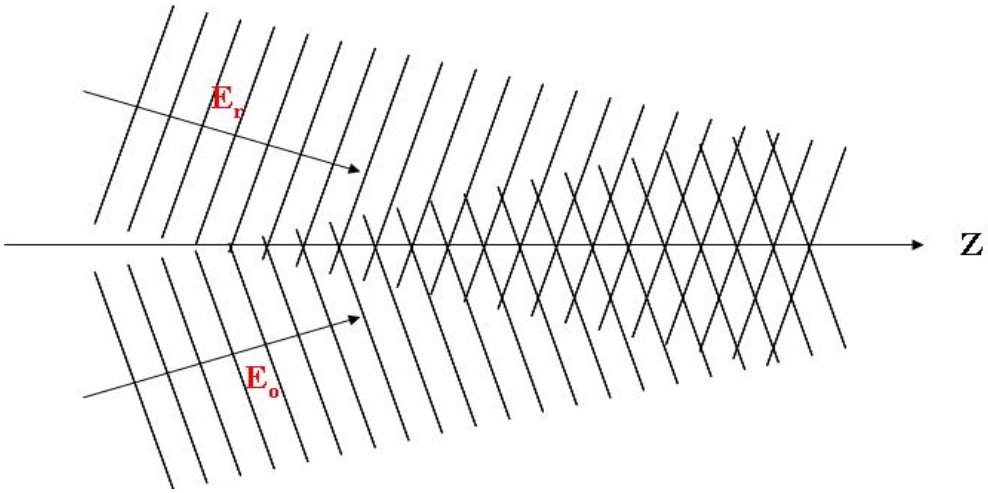


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$u(x, y, z, t) = a e^{i\phi} e^{-i2\pi f t} \tag{2-4}$$

여기서, a는 진폭, ϕ는 공간 위상, f는 주파수를 나타낸다. 일반적으로 공간적인 부분만 다루기 때문에 시간에 의한 부분은 생략이 가능하다. 따라서 공간적인 복소 진폭만을 고려한다면 스페클 간섭에 대한 참조광(Reference Beam)과 물체광(Object Beam)의 진폭은 다음과 같이 식(2-5)와 식(2-6)으로 표현할 수 있다.

$$u_o = a_o \exp[-i(\phi + \frac{2\pi L_o}{\lambda})] \tag{2-5}$$

$$u_r = a_r \exp[-i(\phi + \frac{2\pi L_r}{\lambda})] \tag{2-6}$$

여기서 ϕ는 빔의 임의 위상을 나타내며 L_o와 L_r은 물체광과 참조광의 광로를 나타낸다. 즉 빛의 강도(Intensity)는 진폭 자승의 절대 값에 비례하기 때문에 식(2-7)과 같이 표현한 것이다.

$$I = u \cdot u^* = |u|^2 = a^2 \tag{2-7}$$

따라서, 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 강도(Intensity)는 식(2-8)과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} I &= |u_o + u_r|^2 = u_o \cdot u_o^* + u_o \cdot u_r^* + u_o^* \cdot u_r + u_r^* \cdot u_r \\ &= |a_o|^2 + |a_r|^2 + 2|a_o||a_r|\cos\left[\frac{2\pi(L_o - L_r)}{\lambda}\right] \\ &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r}\cos\phi \end{aligned} \tag{2-8}$$

Collection @ chosun

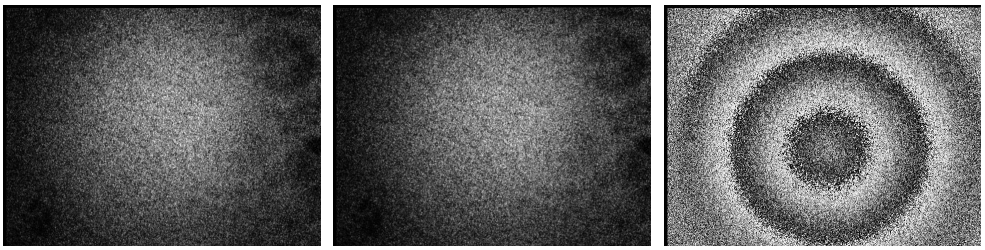
조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

여기서 I : 합성광의 빛의 강도, I_R : 참조광의 빛의 강도, I_O : 물체광의 빛의 강도 ϕ : 물체광과 참조광의 위상차이다. 위상차 ϕ는 다음과 같이 식(2-9)로 표현 할 수도 있다.

$$\phi = \phi_o - \phi_r = knL \qquad (2-9)$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$이고, n은 매질의 굴절률을 나타내며, L은 기하학적인 광 경로차를 나타낸다.

물체의 변형 정보를 나타내는 스페클 상관 간섭무늬는 앞에서 언급한 바와 같이 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 강도(Intensity)들은 CCD 카메라의 cell에 결상되며 출력되는 시그널은 빛의 강도(Intensity)에 비례하므로 대상체의 변형 전·후에 대한 스페클 패턴의 비교를 통해 실시간적으로 가시화된다. Fig. 2-5와 같이 전자처리 스패클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)에서는 물체의 표면 변위를 측정하기 위해 변형전후의 스페클 상태의 감산처리를 통하여 상관간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전후의 CCD 카메라에 기록되어진 스패클 패턴을 아래 식(2-10), 식(2-11)으로 나타낼 수 있다.



(a)Before (b)After (c) phase map

Fig. 2-5 Principle of Electronic Speckle Pattern Interferometry fringe pattern formation

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$I_b = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos\phi \qquad (2-10)$$

$$I_a = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\phi + \Delta\phi) \qquad (2-11)$$

여기서 I_b : 물체변형 전의 합성광의 복사조도, I_a : 물체변형 전의 합성광의 복사조도, Δϕ : Reference Beam과 Object Beam과의 위상차. 변형전후의 두 개의 스페클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식(2-11)과 같이 변형전후의 스페클 패턴의 감산처리를 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} I_s &= I_b - I_a \\ &= 2\sqrt{I_O I_R}\,[\cos\phi - \cos(\phi + \triangle\phi)] \\ &= 4\sqrt{I_O I_R}\,\sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right)\sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)\Big\} \end{aligned} \qquad (2-12)$$

여기서 I_s : 물체 변형 전, 후의 광 분포의 감산 처리된 빛의 강도이다. 실제적으로 모니터에서 관찰되는 빛의 강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의 형태로 나타나게 된다.

$$B = 4K\left|I_o I_R \sin^2(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi)\sin^2(\frac{1}{2}\Delta\phi)\right|^{\frac{1}{2}} \qquad (2-13)$$

여기서 K : 모니터 밝기분포 상수 이다. 식(2-13)과 같이 변형 전후의 스페클을 감산 처리함으로서 나타나는 줄무늬를 스페클 상관 간섭무늬(Speckle Correlation Fringe Pattern)라고 한다.[18-19]

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 물체의 변형정보 추출

2-1. 위상이동기법 (Phase Shifting Method)

PZT를 이용한 위상이동기법은 전단간섭법(Shearography)와 전자처리 스패클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattren Interferometry)에 의해 형성되는 간섭 정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 효과적으로 널리 사용되고 있는 방법이다. 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(2-14)와 같이 나타낼 수 있다.[20-23]

$$\begin{aligned} I_1 &= I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\,cos\phi \\ I_2 &= I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\,cos(\phi + \pi/2) \\ I_3 &= I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\,cos(\phi + \pi) \\ I_4 &= I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R}\,cos(\phi + 3\pi/2) \end{aligned} \qquad (2-14)$$

4개의 방정식을 식(2-15)와 같이 조합하여 CCD pixel의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(Phase Map)를 형성하게 된다.

$$\begin{aligned} I_4 - I_2 &= 2I_0 \sin\phi \\ I_1 - I_3 &= 2I_0 \cos\phi \end{aligned} \qquad (2-15)$$

$$\phi(x,y) = \tan^{-1}\left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right] \qquad (2-16)$$

변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상과 변형후의 위상을 각각 구하고 그 차를 구함으로서 실제 물체변형을 식(2-17)과 같이 측정할 수 있게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\Delta\phi = \phi_{before} - \phi_{after} \tag{2-17}$$

그러나, 이 방법은 4개의 방정식을 얻기 위한 위상변조가 이루어지는 시간동안 안정된 상태를 유지하여야 하며, 위상이동 중에 발생하는 물체의 변형 또는 외부잡음은 오차의 요인이 된다.[24] Fig. 2-6은 결함 정량화 기술 중 위상을 이동하는 방법을 나타내고 있다.

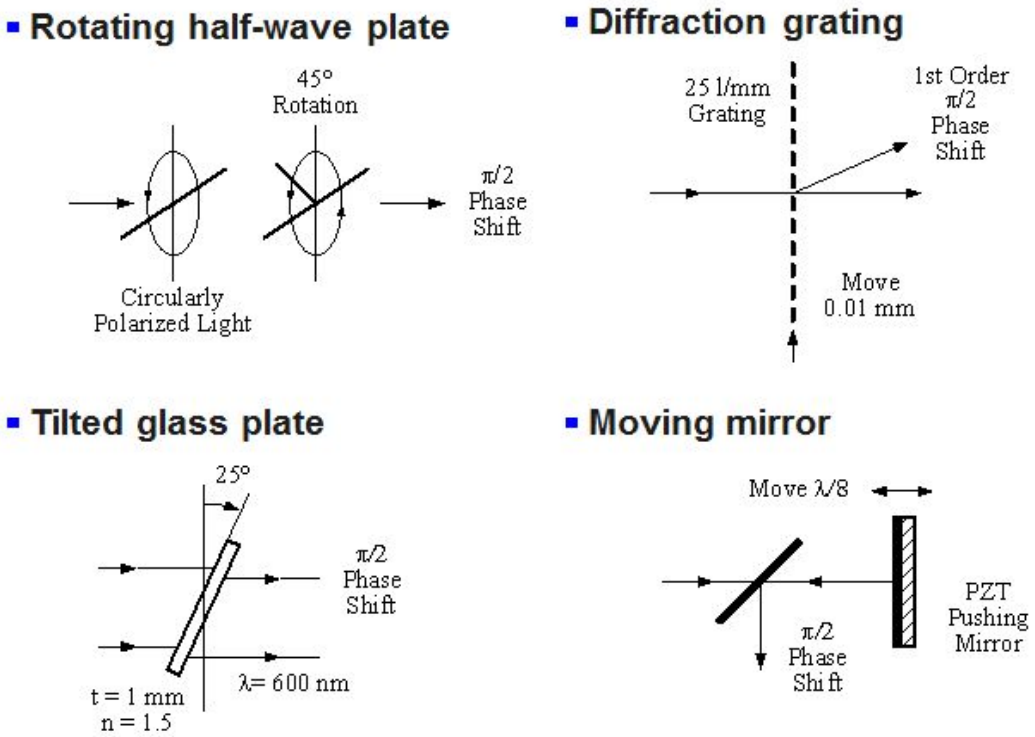


Fig. 2-6 Phase Shifting Method

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2-2. 결펼침(Unwrapping)

결펼침은 위상이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 식(2-16)의 arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위 값을 연속 값으로 변환하여 주는 과정이다. 먼저 arc-tangent 함수는 $0 \sim \pi$의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 연속 위상으로 변환을 위한 결펼침은 식 (2-18)을 이용하여 구하게 된다.

$$\Phi_{unw} = \Phi_{w} + (2\pi \times N) \qquad (2-18)$$

여기에 Φ_{unw} : Unwrapped phase, Φ_{w} : Wrapped phase, N : Fringe Order 이다. 여기서, 결펼침을 위한 차수(N)의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면 N을 증가 또는 감소시키는 방식으로 프린지 차수(Fringe Order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 따라 감도벡터(Sensitive Vector)를 고려하여 구하게 된다. Fig. 2-7에서는 왼쪽의 Wrpped Phase와 오른쪽의 Unwrapped된 Phase의 이미지를 비교하였고, Fig. 2-8에서는 이 때 각 이미지에 Profile을 그었을 때의 위상 그래프를 나타내었다.

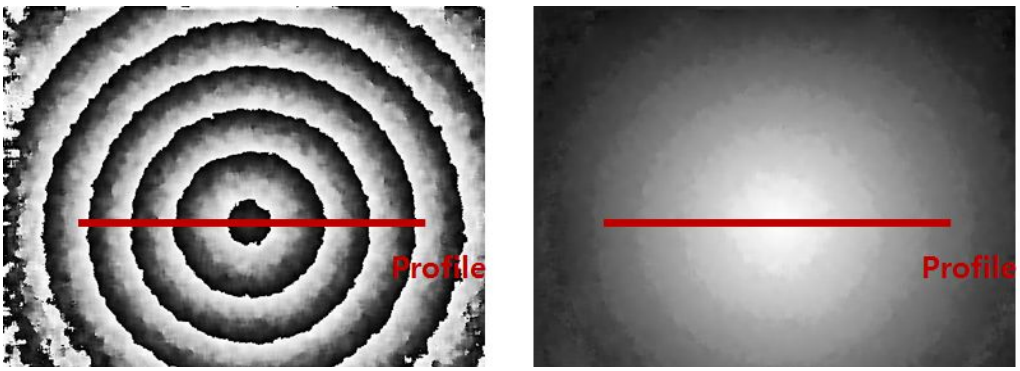


Fig 2-7 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

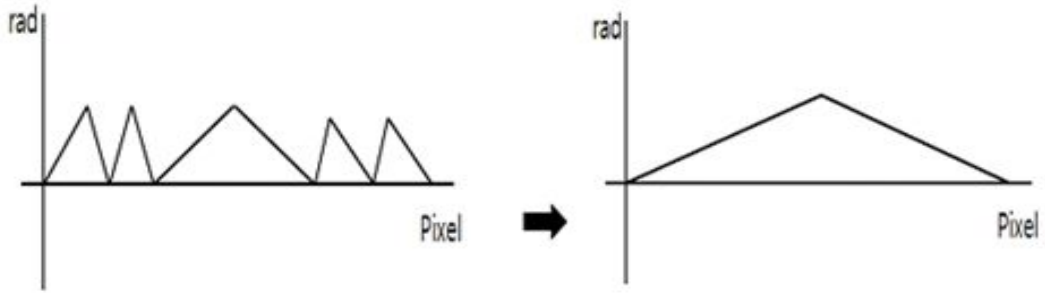


Fig 2-8 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase graph

본 논문에서 Unwrapping Method로 Least Square Method를 사용하였다. Least Square Method(최소자승법)란 오차의 제곱을 물체의 전 영역에 걸쳐 합한 값이 최고가 되도록 하는 방법으로써 수학적으로 이 합을 나타내는 함수의 최소점을 찾는 방법이다. 보다 구체적으로는 오차 값과 이 오차의 변화율을 곱하여 문제 영역 전체에 대해 합한 값이 0 이 되는 해를 구하는 방법이다. Fig. 2-9와 같이 표시된 각 점들은 측정 값 이고 직선은 최소자승법을 사용해 구한 측정값들의 분포를 가장 잘 나타내는 일차함수이다. 즉 이 함수는 (측정값 - 함수값)² 이 최소가 되는 직선이라고 할 수 있다.[25-26]

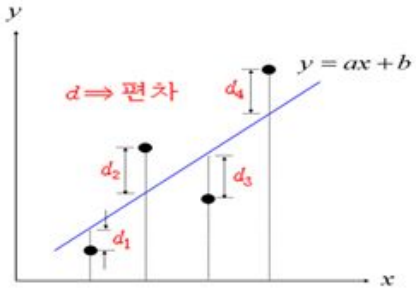


Fig 2-9 Principle of Least square method

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 광학 간섭계

3-1. 면외 변위 측정 간섭계(Out-Of-Plane)

면외 변위 측정을 위한 대표적인 간섭계로서 물체로 직접 조사되는 물체광과 CCD 카메라에 직접 조사되는 참조광으로 나눌 수 있다. 물체 변형 전에 물체광은 참조광과 간섭하여 제 2의 스페클 패턴인 변형 전 스페클 패턴을 형성하고, 물체가 변형 후에 물체광은 참조광과 간섭하여 변형 후의 스페클 패턴을 형성하게 되고 스페클 상관 간섭무늬는 변형 전과 변형 후의 감산처리로부터 형성 되고, 위상이동 기법을 적용하여 변형 전, 후의 위상을 추출하여 대상체의 변형을 측정할 수 있다. 이 때, 발생하는 위상변화량을 식(2-19)으로 나타낼 수 있다.[27-28]

$$\triangle\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\cos\theta_o + \cos\theta_s)d \qquad (2-19)$$

여기서, $\triangle\phi$는 변형에 의한 위상변화이고, λ는 레이저 빔의 파장, θ_o는 대상물의 표면과 물체빔의 조사방향이 이루는 입사각, θ_s는 대상물의 표면과 관측방향이 이루는 관측각, d는 물체빔의 광경로차, n_o는 조사방향이고, n_s는 관측방향 벡터이다.

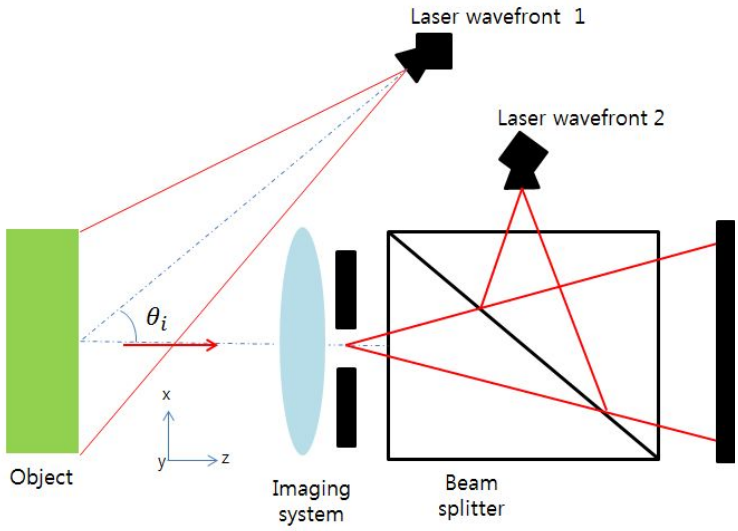


Fig. 2-10 Out-Of-Plane displacement sensitive interferometer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3-2. 전단간섭계

Shearography에서 사용되는 간섭계는 마이켈슨(Michelson)간섭계의 변형된 형태가 많이 사용된다. Fig. 2-11은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 참조광 역할을 하는 Reference Mirror와 상대변위를 만드는 Shearing Mirror로 구성이 되어 있다. Reference Mirror는 위상이동기법을 적용하기 위해 PZT가 장착이 되어 있으며, Shearing Mirror의 기울기의 조절에 따라 전단량이 변하게 된다. CCD 카메라에서 이미지는 참조광과 물체광의 중첩으로 나타나게 되며, 전단량에 의존하여 측정 민감도가 결정되게 된다. Shearography에서 검출하는 최종 변위 정보는 전단량에 의존한 상대 변위량이다. 즉, Shearography는 두 점 사이의 물체의 상대변위 값을 측정하게 되므로 외부환경 진동외란 등에 의한 물체의 강체운동에 둔감한 특성이 있다. Shearography에서 상대변위는 CCD 결상면에서 중첩하여 간섭하는 두 점의 위상차로 구할 수 있다.

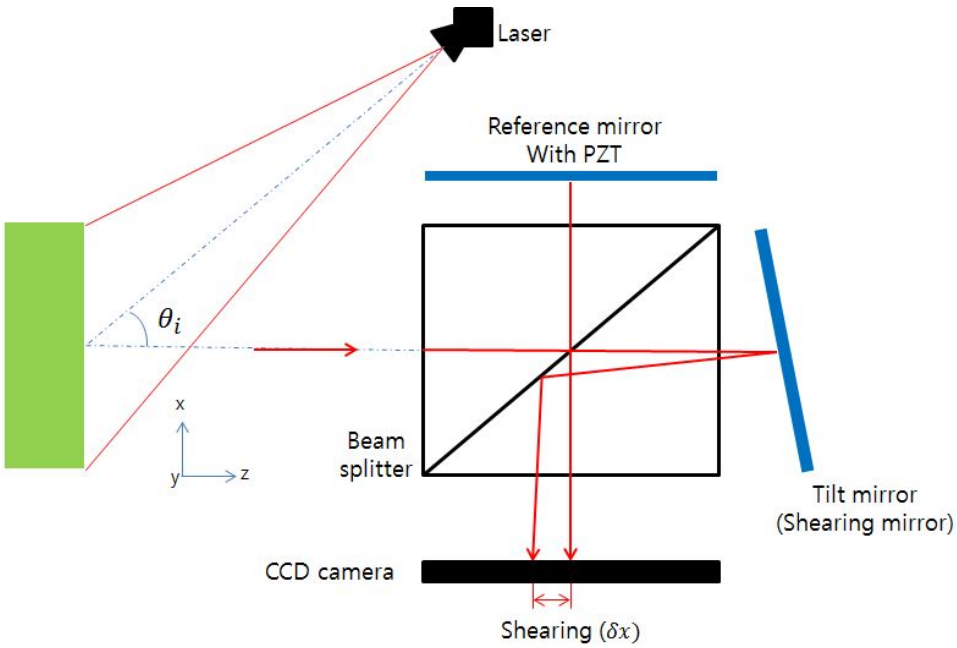


Fig. 2-11 Shearography interferometer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 면외 변형 측정 시스템

1-1. 광 감도 측정 시스템

본 연구에서는 레이저 응용 계측 기술 중 하나인 전자처리 스페클 간섭계(Electronic Speckle Pattren Interferometry)을 이용하여 광 감도 기술을 접목시켜 광 감도를 비교함으로써 정량적으로 고정밀도 측정 할 때의 광량의 데이터 획득이 가능하고 정량적인 값을 얻을 수 있는 기준치를 정하고자 Fig. 3-1에서와 같이 레이저 광 감도 면외 간섭계(Out-of-plane Interferometer) 구성을 통해 실험을 하고자 한다.

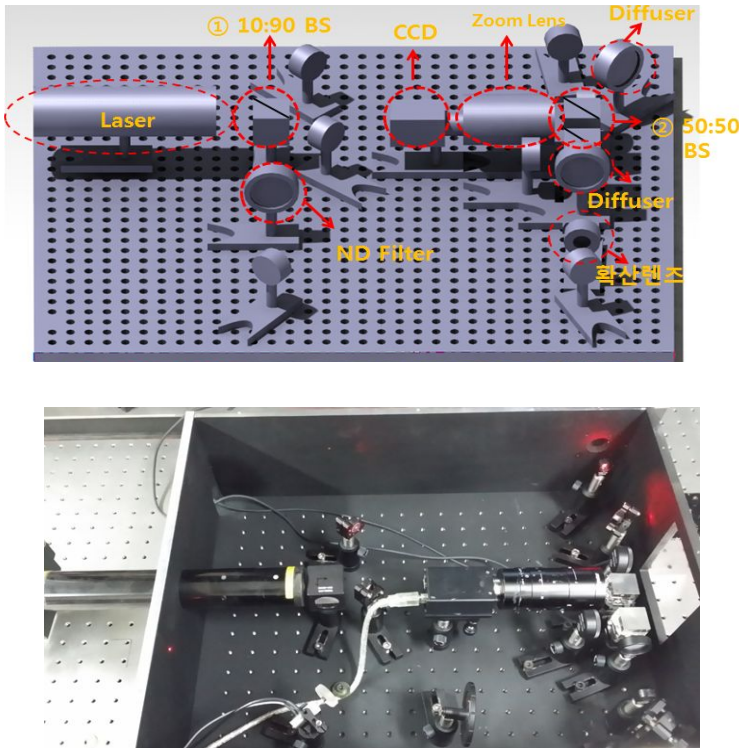


Fig. 3-1 system configuration of Out-of-plane interferometer

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

광 감도를 측정하기 위한 간섭계를 구성하기 위해 Fig. 3-2와 같이 레이저의 세기가 최대인 15 mW 파장 632.8 nm인 He-Ne 레이저를 사용하였고 레이저 빔의 간섭을 이루기 위해 하나의 레이저 빔을 Table. 3-2와 같은 규격의 B.S(Beam Splitter)1,2를 B.S 2은 두 개의 물체광 및 참조광으로 분할시키고 물체광은 측정 대상물의 Diffuser를 통하여 확산 및 조사 되고 물체의 난반사된 광은 B.S 1를 통해 CCD카메라에 간섭을 일으켜 CCD를 통하여 획득되어진 정보를 분석 프로그램을 통하여 변형량을 알 수 있도록 하였다. 또한 Fig. 3-3 과 같이 Power meter를 통한 광량을 비교할 수 있는 시스템을 구축하였다.

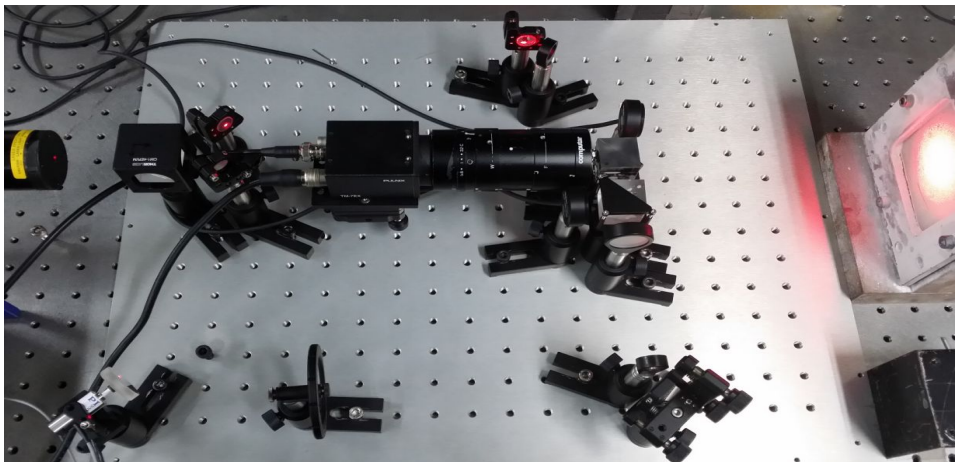


Fig. 3-2 ESPI by comparing photosensitivity

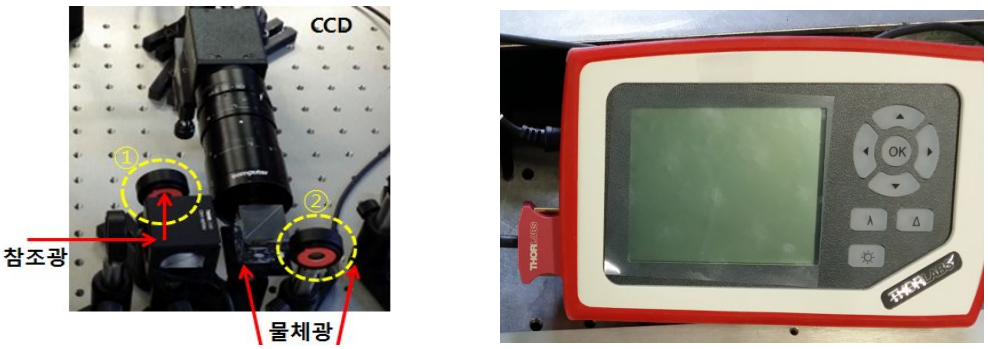


Fig. 3-3 Configuration of comparing photosensitivity

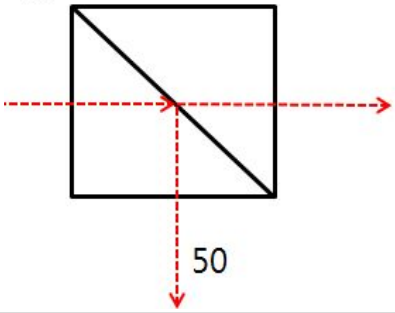
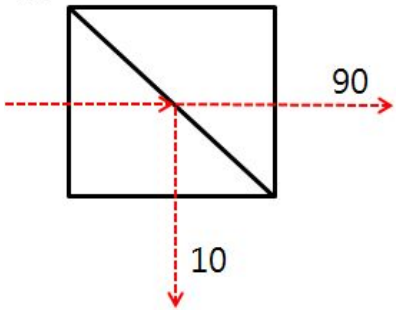
Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Table. 3-1 Specification of Power meter

PM121D	
Display	4" Backlit Digital Display
Applications	All Power and Energy Measurements
Connectivity	USB 2.0
Console Sensor Compatibility	All C-Series Photodiode and Thermal Power Sensors

Table. 3-2 Specification of Beam splitter

BS013	BS025
① 	② 
50:50 (R:T) Non-Polarizing Beam splitter Cube	10:90 (R:T) Non-Polarizing Beam splitter Cube
400-700 nm	400-700 nm
1 "	1 "

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1-2. ESPI System

본 연구에서는 대상물의 면외 변형을 측정할 때 광 감도 면외 변형 간섭계의 실뢰성을 얻기 위해 전자처리 스패클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattren Interferometry)를 이용하여 비교 실험을 하였다. Fig. 3-4와 같이 532nm ND:YAG Laser Source, Laser Controller, Polarization Maintaining Optical Fiber, ESPI Sensor, PC로 구성하였다. 전자처리 스패클 패턴 간섭계의 내부는 x, y, z축 변위를 측정 할 수 도 있지만 대상물의 면외를 측정하기 때문에 실험 조건에 맞게 측정을 할 수 있게 하였다.

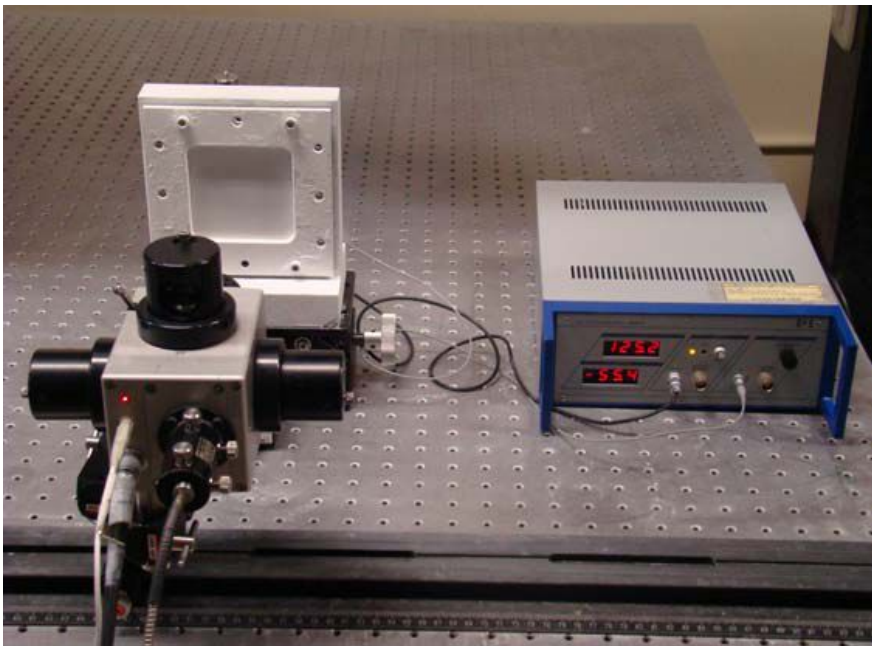


Fig. 3-4 Device configuration of ESPI

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Table. 3-3 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 m2 dynamic up to 400×600 mm2 (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 x 80 x 120 mm3
Data acquisition speed	2.5 sec for 3D-analysis
Data analysis	automatic or semi automatic

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1-3. Shearography System

비파괴 검사(NDT) 방법 중의 하나로 재료의 표면 정보를 제공해주는 측정시스템으로 Shearography(Q-800) 제품을 사용하였다. 이 시스템의 기술은 비접촉식이며 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나눠지지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사한 빛이 난반사 되 광 분할기 즉 B.S에 의해 두 개의 빛으로 나눠진 후 두 빛이 각각 두 개의 Mirror로 전단량과 전단방향에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정되는 시스템으로 구성되어 있다. 또한 Fig. 3-5와 같이 고해상도 CCD 카메라 Shearography 센서, 센서 내부에 장착된 Diode laser, Controller로 구성이 되어 있다. 레이저는 Diode Laser (파장: 780 nm, 출력: 50 mW)를 사용하며, 센서 양측면의 암에 장착된 확산된 레이저 광을 직접 물체로 조사하여 측정 할 수 있다.

Fig. 3-5 Shearography System

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Table. 3-4 Technical data of Shearography system

Description	Technical data
CCD-resolution	1392 × 1040 pixel
Standard C-mount lens	Zoom f=1.4/6... 12mm
Inspection Speed	Typically 300mm×300mm /20s
Shear direction	up to 1/20 the field-of-view, fully adjustable(software controlled)
Shear Angle	0-180° , fully adjustable (software controlled)
Meauring Area	300mm×300mm with 2 laser diode
Measuring Sensitivity	0.03㎛/shear distance
Sensor Head Dimension	W×H×D = 70×70×160㎣
Laser	Diode 50mW, 780nm
Laser Diodes	up to 870mW

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1-4. 해석 프로그램

레이저 광 감도 간섭계를 구성하고 대상의 면외 변형을 측정 할 때 데이터 처리를 할 수 있는 LabVIEW를 이용한 프로그램 개발을 진행 하였다. Fig. 3-6와 같이 실시간 영상을 처리 할 수 있는 프로그램을 개발 전체적인 구동 시스템을 보여주고 있고 Fig. 3-7와 같이 PZT Controller를 PC로 제어하기 위하여 RS-232 통신 포트를 이용하여 레이저 파장의 1/4씩 정밀하게 디지털 신호를 제어하여 전압을 조절 PZT Actuator를 이송하였다.

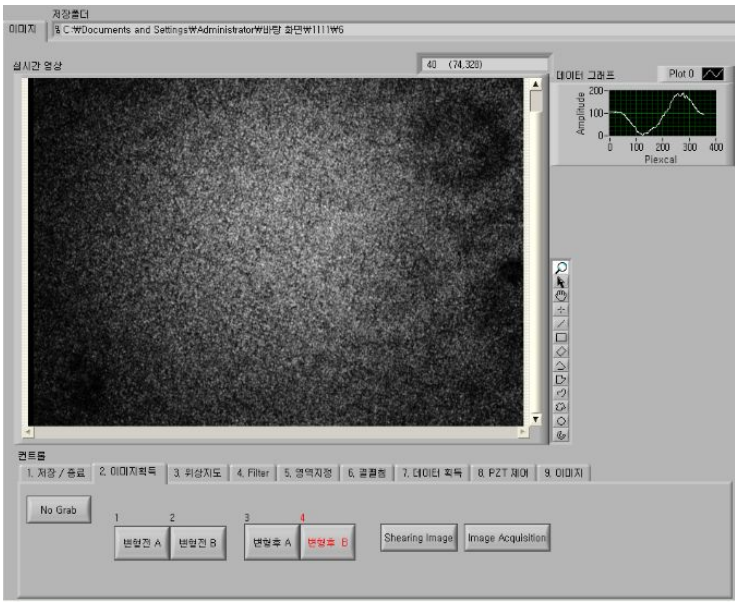


Fig. 3-6 CCD control program

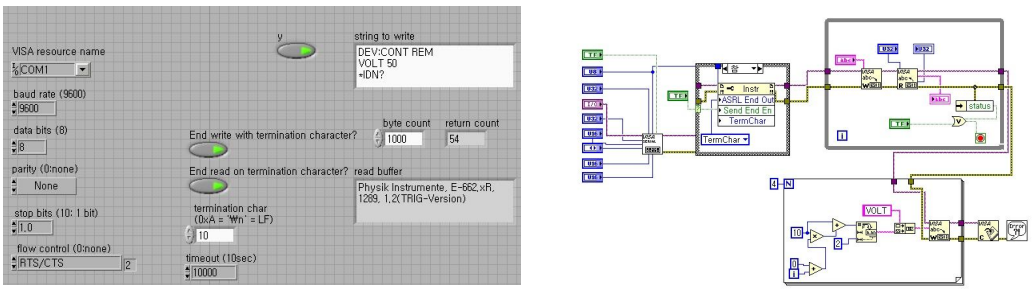
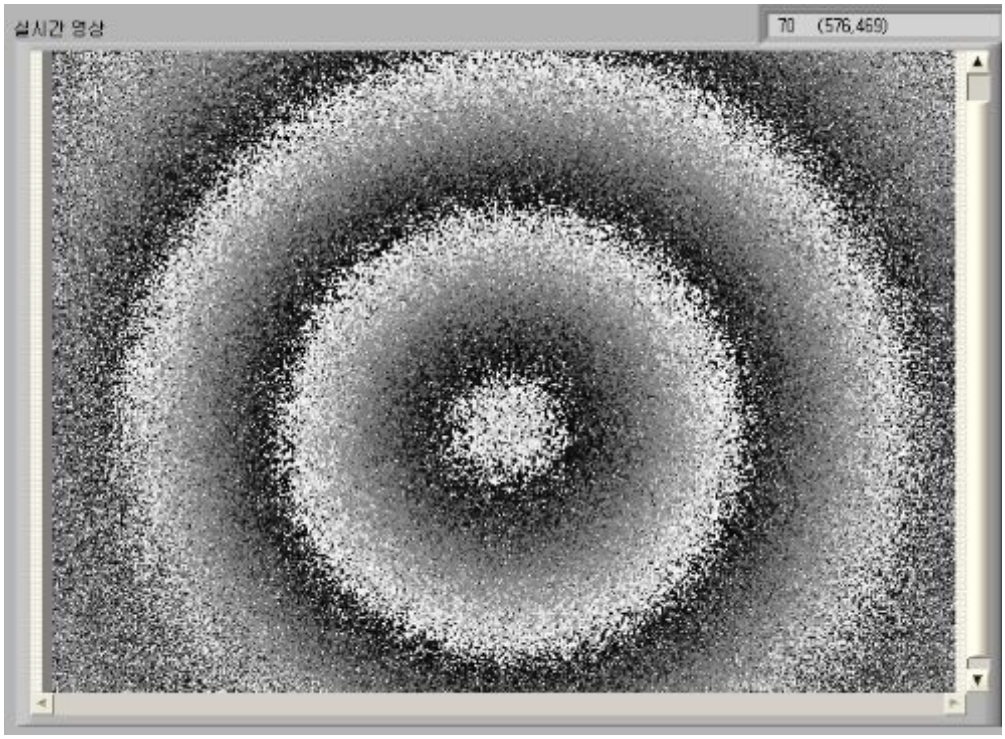


Fig. 3-7 PZT control program

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3-8, Fig. 3-9는 CCD카메라를 통해 4-Step를 거쳐 얻어진 위상이동 Phase map을 Phase Filtering으로 보정하고 Fig. 3-10에서 변형부의 Line Profile를 그어 Line Profile에 해당하는 데이터를 엑셀파일로 저장하는 단계이다.



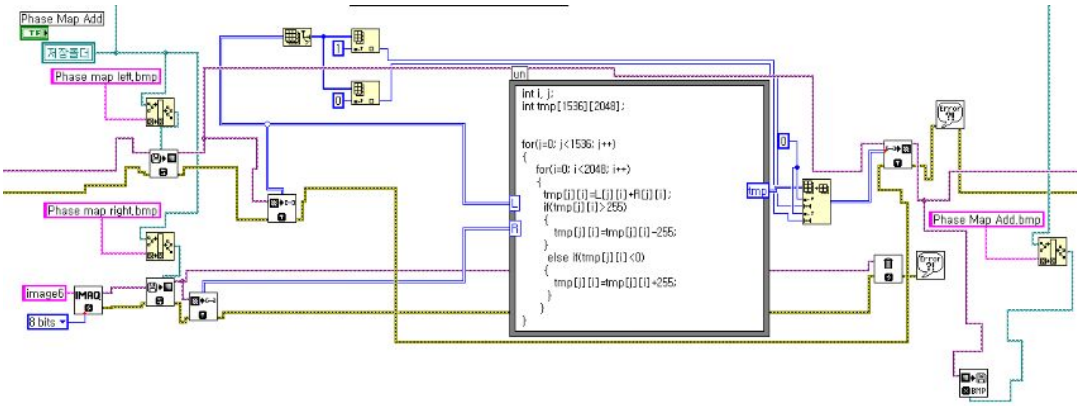
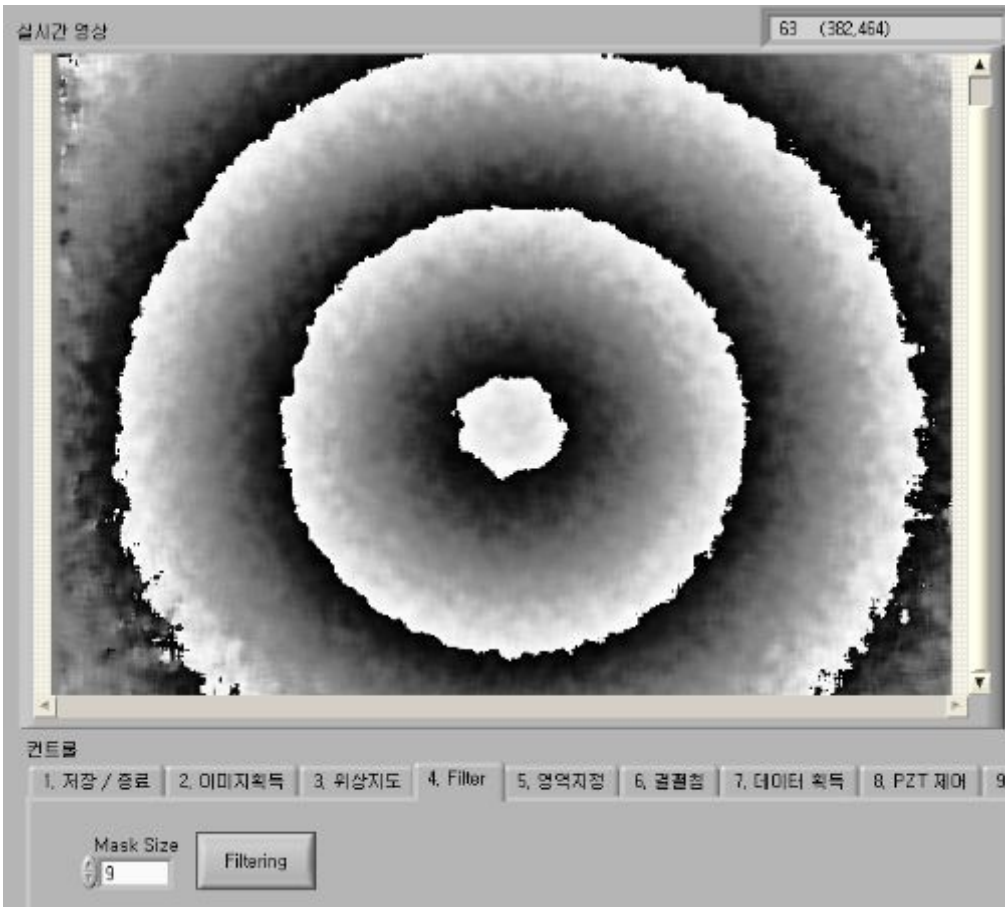


Fig. 3-8 Phase map image of front panel and black diagram

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



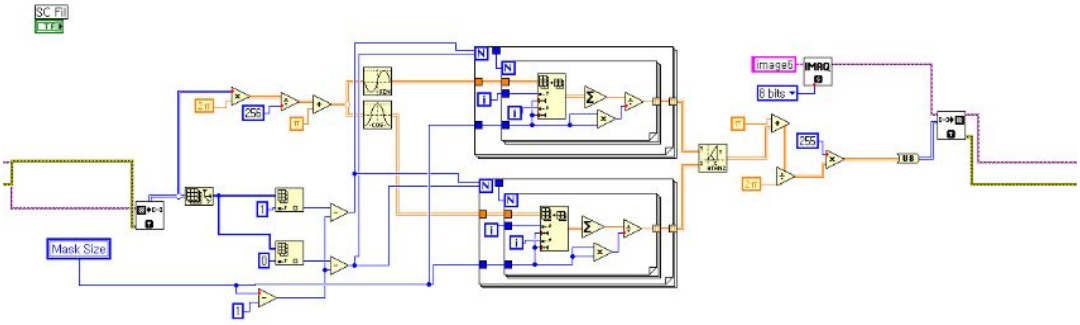
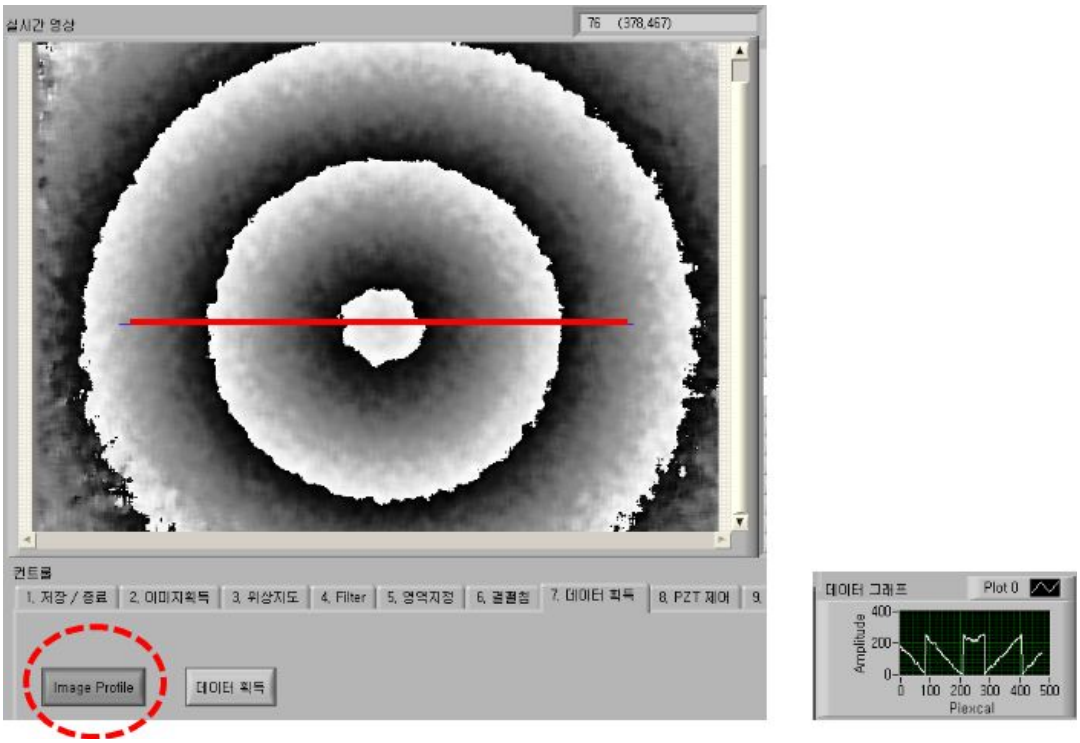
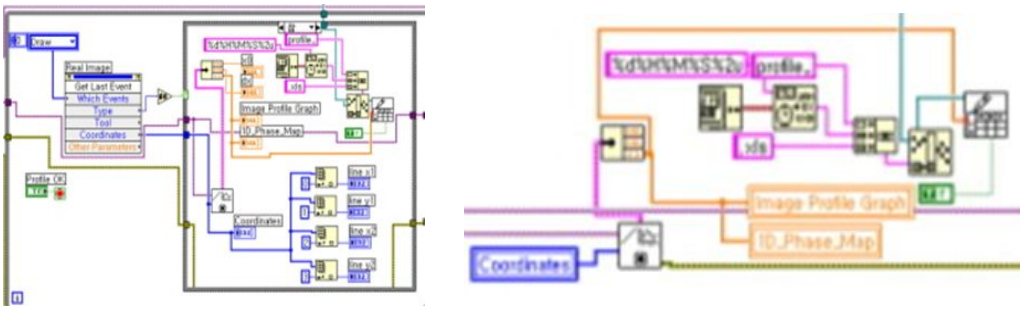


Fig. 3-9 Phase map Filtering image of front panel and black diagram

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY





(a) Line Profile (b) Same Profile

Fig. 3-10 Profile graph image of front panel and black diagram

Collection @ chosun

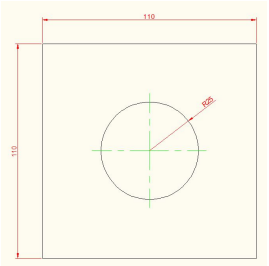
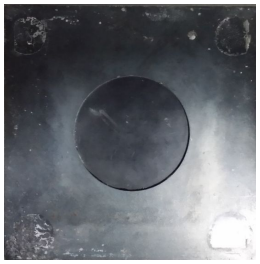
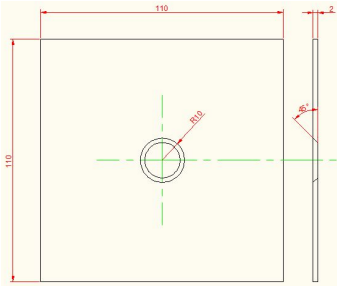
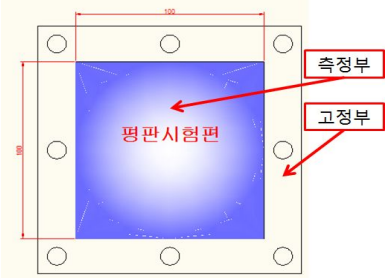
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 시험편

2-1. 평판 시험편

레이저 광 감도 간섭계 검증용 시험편 제작을 위한 평판 시험편을 제작하였다. Table. 3-5와 같이 경화형상이 적고 신율이 좋은 400 ~ 600 %인 실리콘의 제질을 이용하였고 두께 3 mm인 철판(110 mm X 110 mm)에 지금 50 mm인 원공을 만들고 실리콘을 부착 하였다. 또한 면외 변형을 위한 PZT Actuator를 이용하여 마이크로 급 분해능 확보를 위한 시험편 지그 제작을 하였다.

Table. 3-5 Design drawings of flat specimen & jig

평판시험편 및 지그 도면	제작품
	
	
	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

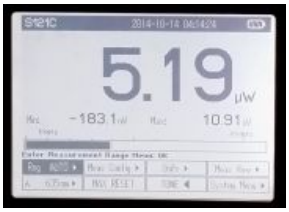
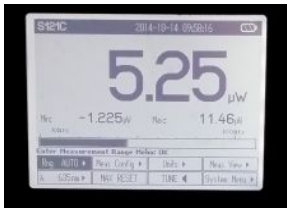
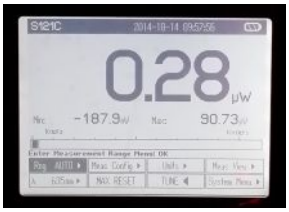
제 4 장 실험결과

제 1 절 평판 시험편의 면외 변형 측정

1-1. 광 감도에 따른 면외 변형 측정

물체 변형 전·후 Object Beam(물체광)은 Reference Beam(참조광)과 간섭하여 스페클 패턴인 변형 전·후 스페클 패턴을 형성하게 된다. 스페클 상관 간섭무늬는 변형 전·후의 감산처리로부터 형성된다. 이 때 광의 세기를 동일하게 맞추거나 다르게 했을 때의 측정 데이터를 비교해 보고 적합한 광의 세기를 알아낸다. 광의 세기를 ND Filter를 통하여 Object Beam(물체광)과 Reference Beam(참조광)의 광량을 Power meter를 이용하여 측정 하였고 각각의 빛의 세기를 비교하여 측정하였다.

Table. 4-1 Intensity compared with the ND filter

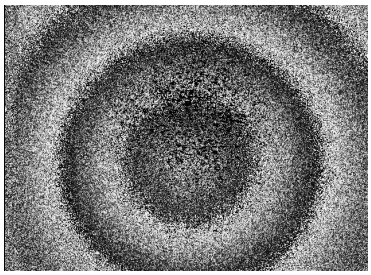
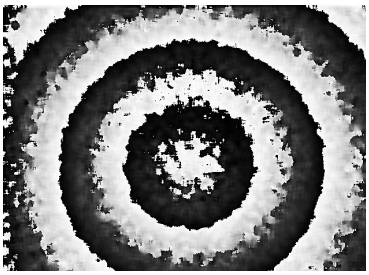
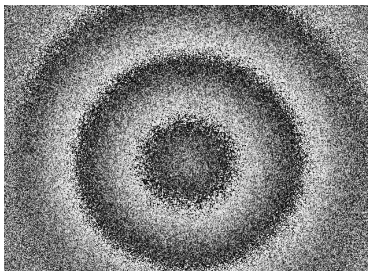
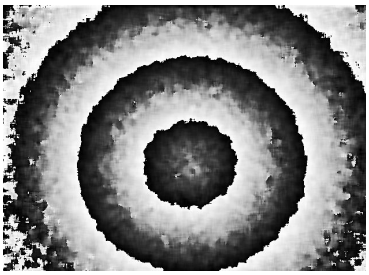
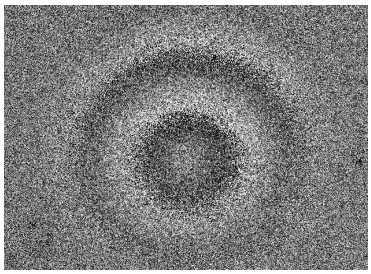
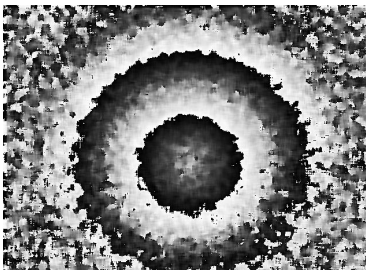
	ND Filter	Object beam	Reference beam
20			
110			
200			

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ND filter를 통하여 광의 세기를 조절하고 광량을 Power meter를 이용하여 측정하였다. 각각의 Phase map & Unwrapping의 이미지를 얻어 비교 분석 하였다. 그 결과 빛의 세기가 너무 크거나 작을 때 간섭무늬가 깨짐 현상이 보였고 광량이 비슷하면 할수록 간섭무늬가 잘 나타나며 데이터 또한 정밀하게 측정 되는걸 확인할 수 있었다. Table 4-2, Table 4-3, Table 4-4, Table 4-5에서는 빛의 세기에 따른 평판시험편을 각 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 ㎛ 만큼의 변형을 주어 측정한 Phase map & Filtering 이미지를 나타내었고 Table 4-6에서는 빛의 세기에 따른 각 변형 별 Unwrapping 결과를 나타내었다.

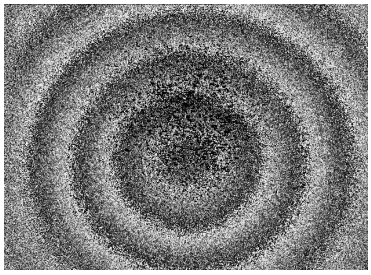
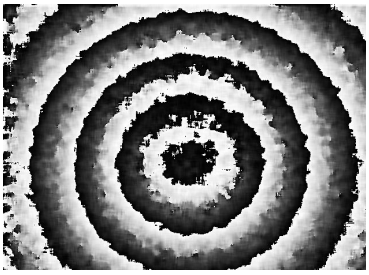
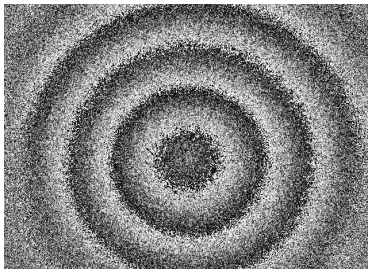
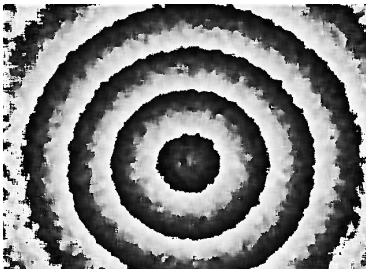
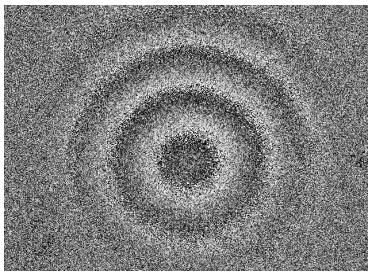
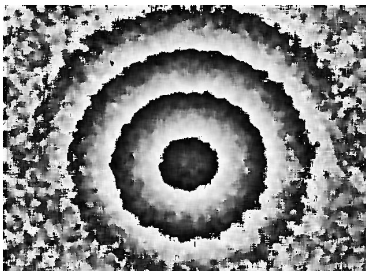
Table. 4-2 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 0.6 ㎛

ND filter	phase map	filtering
20		
110		
200		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

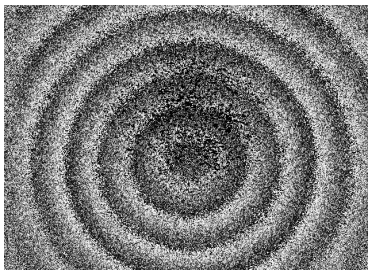
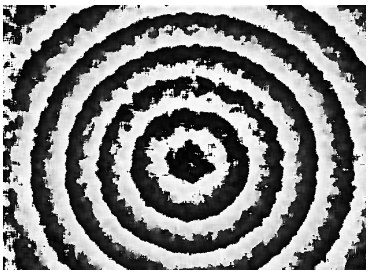
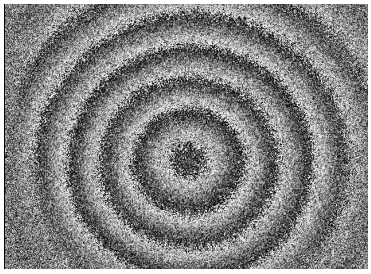
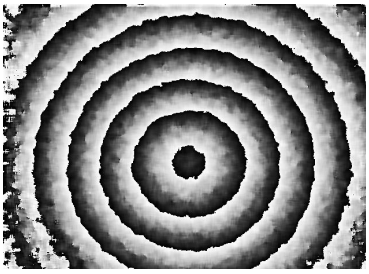
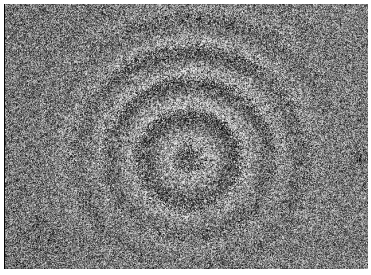
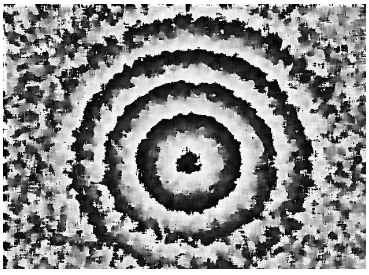
Table. 4-3 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 0.9 ㎛

ND filter	phase map	filtering
20		
110		
200		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

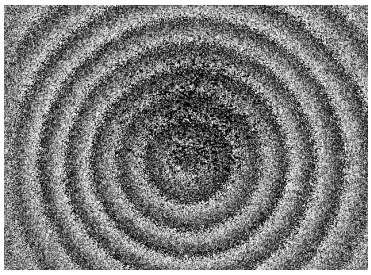
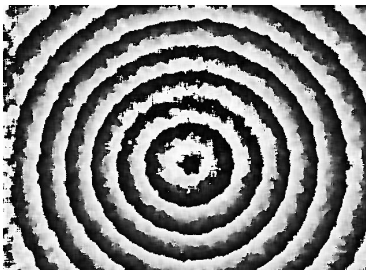
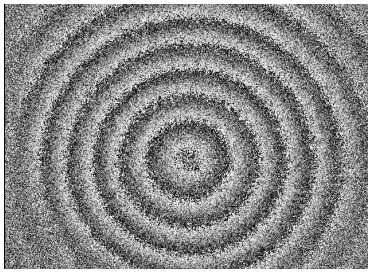
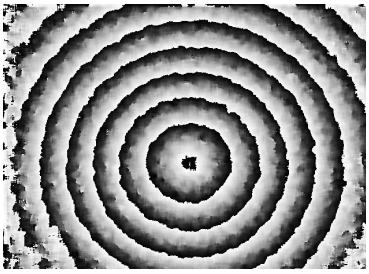
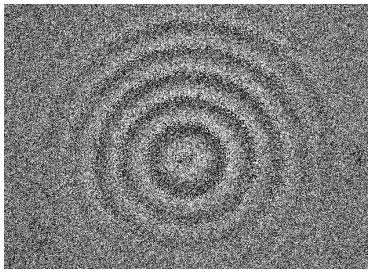
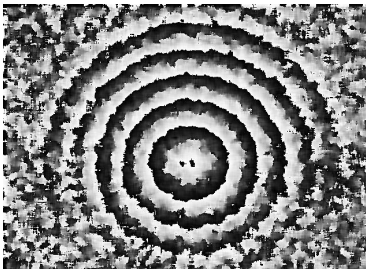
Table. 4-4 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 1.2 ㎛

ND filter	phase map	filtering
20		
110		
200		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

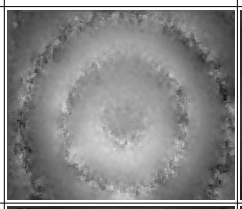
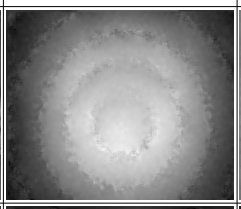
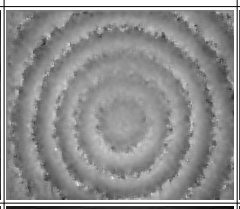
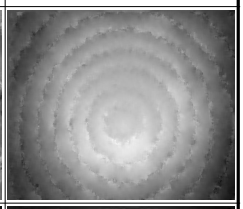
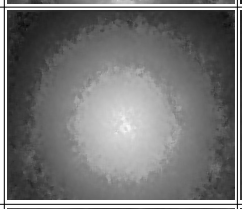
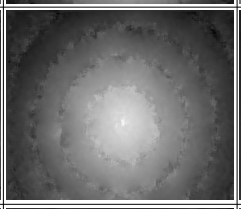
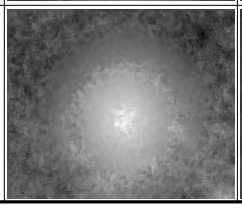
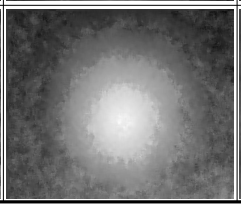
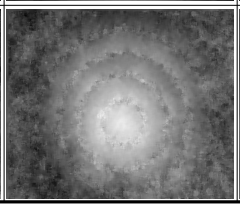
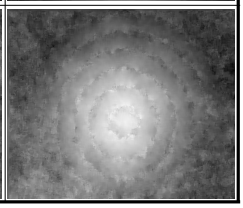
Table. 4-5 Strain analysis of the phase map and filtering according to the photosensitivity _ 1.5 ㎛

ND filter	phase map	filtering
20		
110		
200		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-6 Strain analysis of the Unwrapping according to the photosensitivity

ND filter	Unwrapping			
	0.6	0.9	1.2	1.5
20				
110				
200				

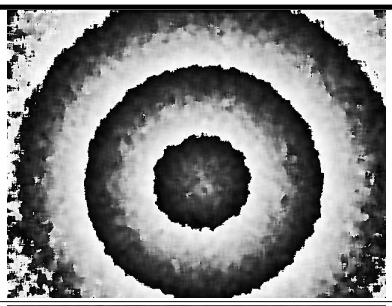
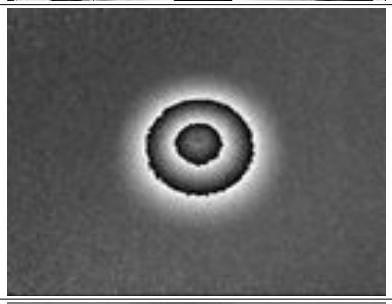
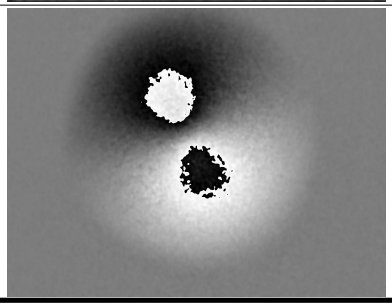
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1-2. 평판 시험편 면외 변형 비교 분석

레이저 광 감도 면외 간섭계(Out-of-plane Interferometer)를 이용하여 광 감도를 측정된 빛의 세기를 보았을 때 참조광과 물체광의 광량이 비슷할 때 변형 값의 오차의 차이가 크지 않았으므로 ND Filter의 값인 110 정도일 때의 광량으로 전자처리 스페클 간섭계(Electronic Speckle Pattren Interferometry), 전단간섭계(Shearography)와 데이터를 비교를 위한 Phase Filtering를 나타내었다.

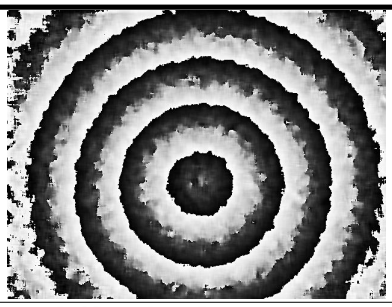
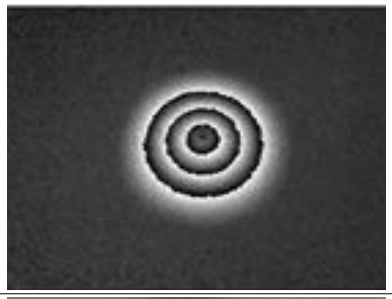
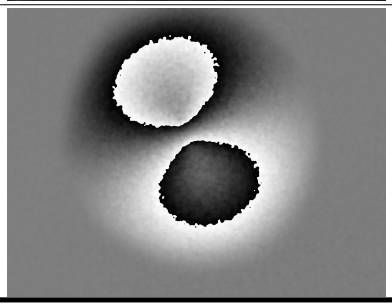
Table. 4-7 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 0.6 ㎛

Deformation	0.6 ㎛
Out-of-plane interferometer	
ESPI	
Shearography	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

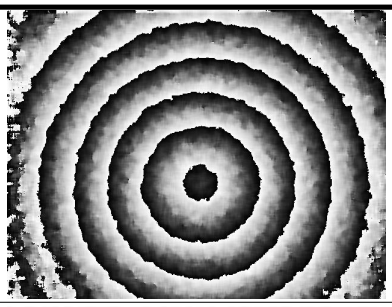
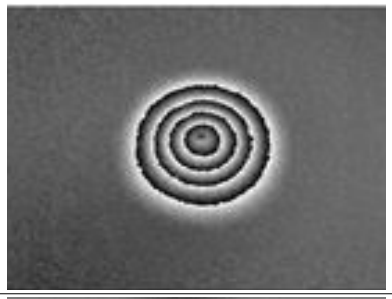
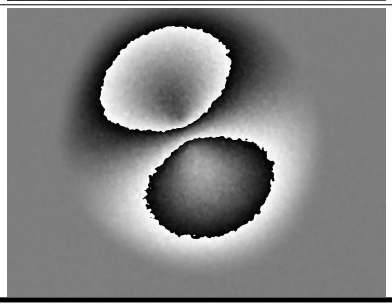
Table. 4-8 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 0.9 ㎛

Deformation	0.9 ㎛
Out-of-plane interferometer	
ESPI	
Shearography	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

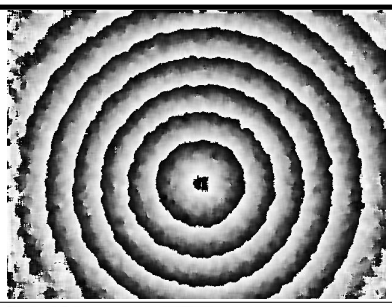
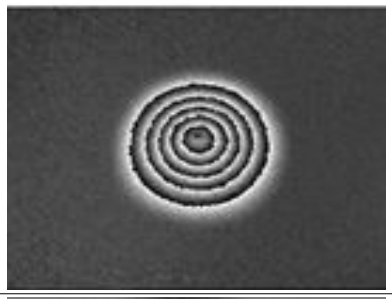
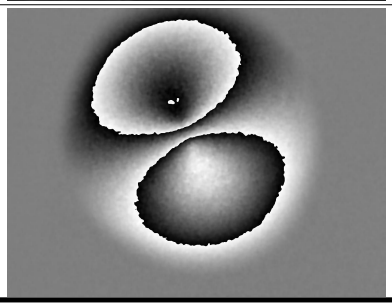
Table. 4-9 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 1.2 ㎛

Deformation	1.2 ㎛
Out-of-plane interferometer	
ESPI	
Shearography	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-10 Comparison of phase map with deformation of Interferometer system _ 1.5 ㎛

Deformation	1.5 ㎛
Out-of-plane interferometer	
ESPI	
Shearography	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

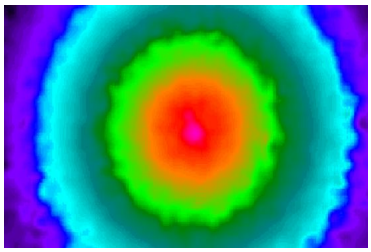
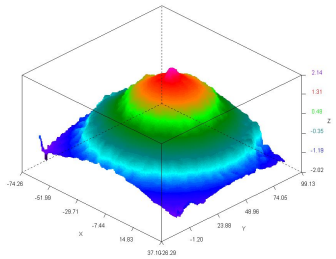
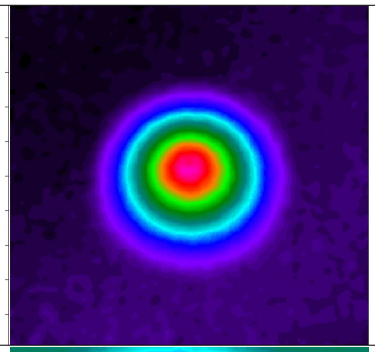
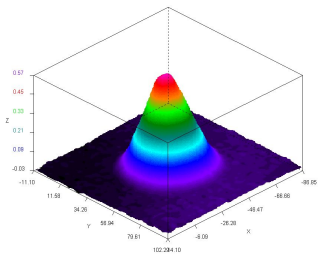
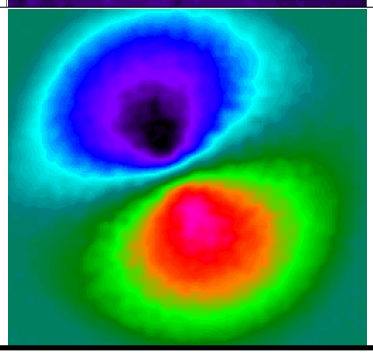
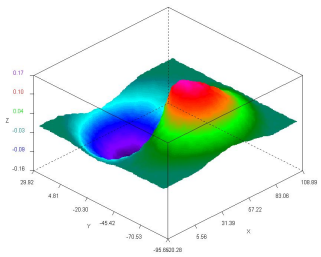
위의 Phase Filtering된 이미지를 분석해 본 결과 평판 시험편에 주어진 변형이 클수록 각 Phase map에 나타난 간섭 줄무늬의 수가 점차 증가함을 알 수 있었고 이를 통해 변형 및 변형량이 증가함을 알 수 있었다.

Table. 4-11, Table. 4-12, Table. 4-13, Table. 4-14은 변형 및 변형량을 정량적으로 계산하기 위해 전단간섭계(Shearogrephy), 레이저 광 감도 면외 간섭계(Out-of-plane Interferometer), 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattren Interferometry)로부터 얻은 위상지도를 프로그램을 이용하여 분석하여 각각의 변형에 따른 Color Image, Profile of 3D를 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

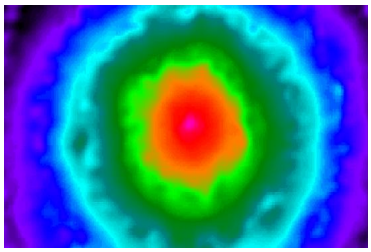
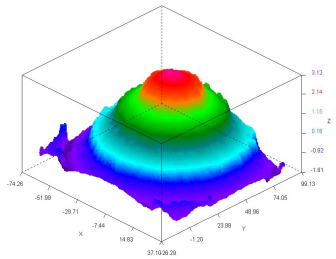
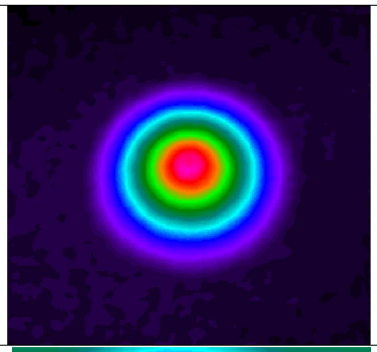
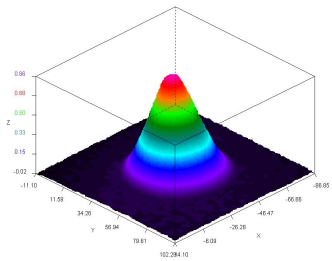
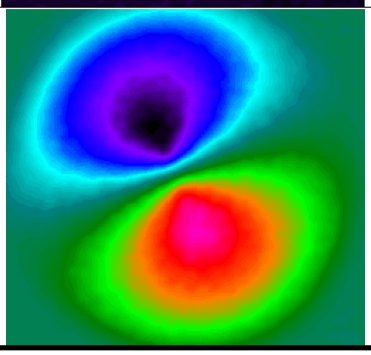
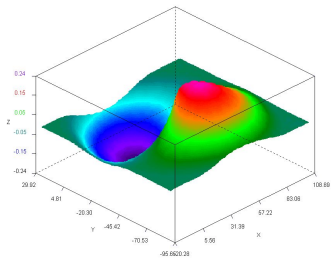
Table. 4-11 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 0.6 ㎛

	Color Image	Profile of 3D
Out-of-plane interferometer		
ESPI		
Shearography		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

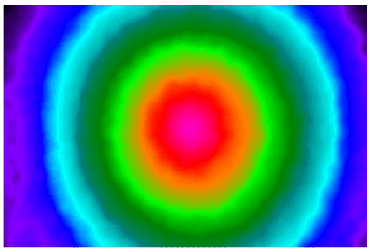
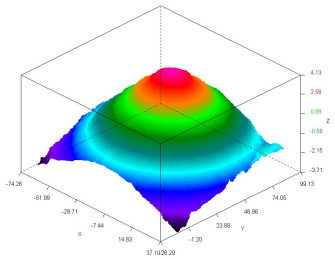
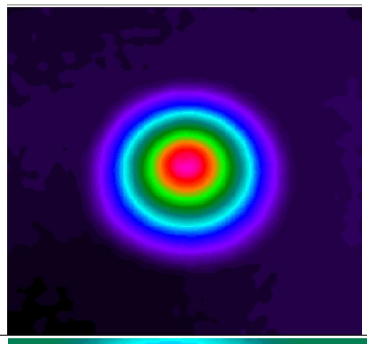
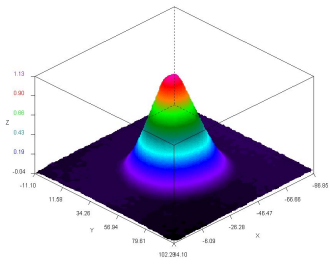
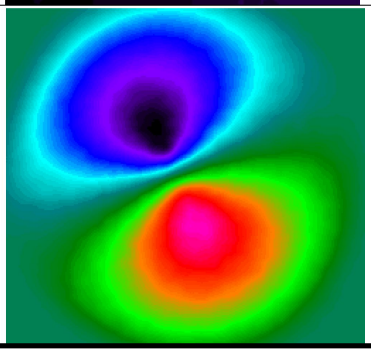
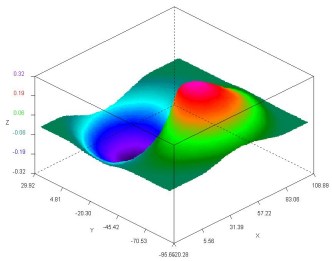
Table. 4-12 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 0.9 ㎛

	Color Image	Profile of 3D
Out-of-plane interferometer		
ESPI		
Shearography		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

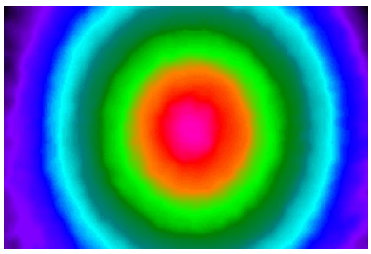
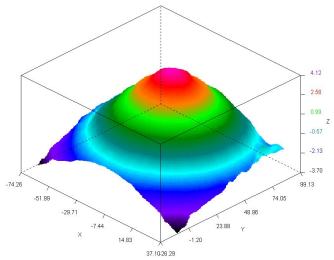
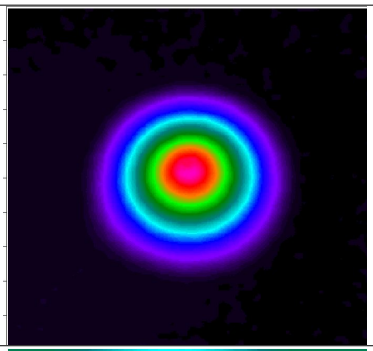
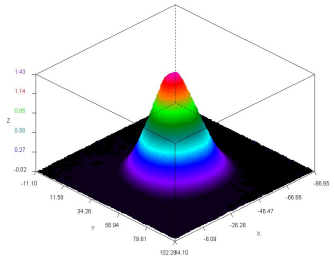
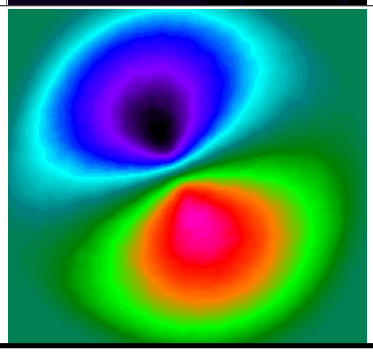
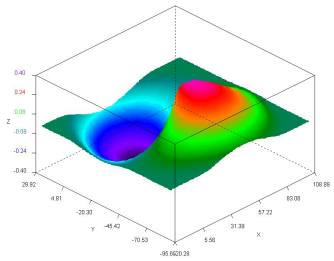
Table. 4-13 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 1.2 ㎛

	Color Image	Profile of 3D
Out-of-plane interferometer		
ESPI		
Shearography		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-14 interferometer system phase map analysis results of Flat specimen _ 1.5 ㎛

	Color Image	Profile of 3D
Out-of-plane interferometer		
ESPI		
Shearography		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

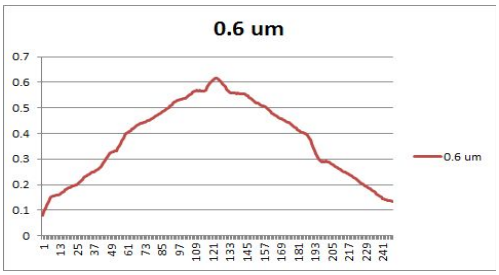
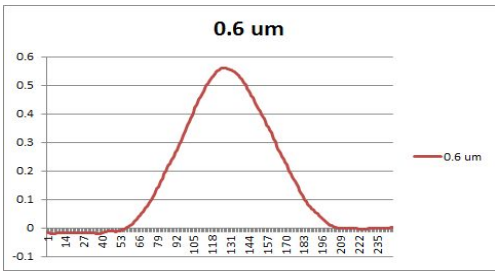
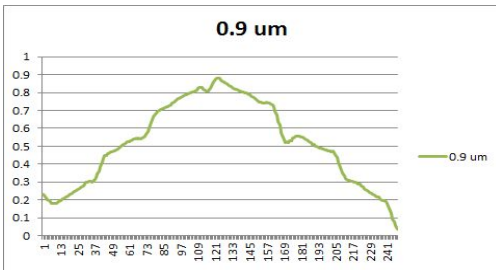
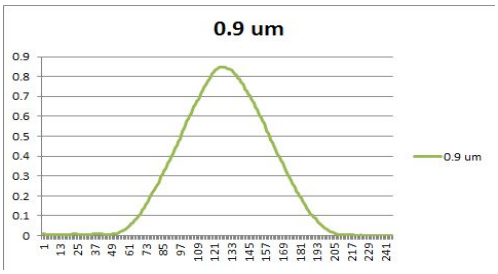
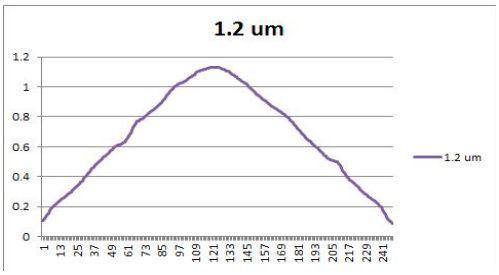
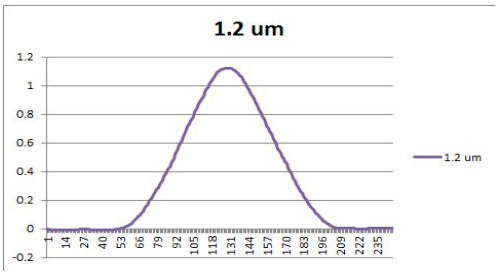
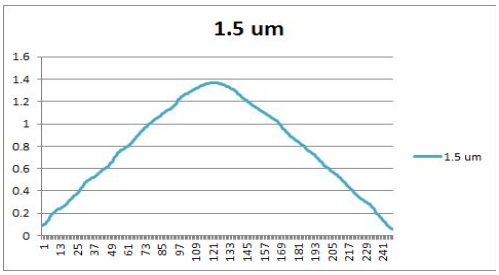
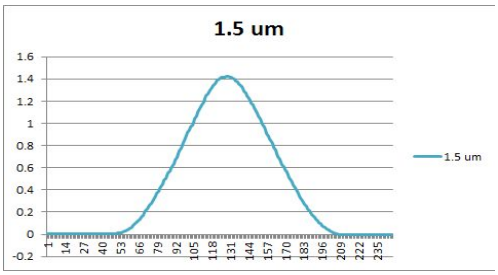
1-3. 평판 시험편 분석 결과

레이저 광 감도 면외 간섭계 (Out-of-plane Interferometer), 전단간섭계 (Shearogrephy), 전자처리 스페클 패턴 간섭계 (Electronic Speckle Pattren Interferometry)의 데이터로부터 평판 시험편에 가해지는 변형 값을 구하고 Total Data를 획득한 후 Profile Data 값을 비교 하였다. 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 ㎛ 의 면외 변형을 주어 레이저 광 감도 간섭계, 전자처리 스페클 간섭계, 전단간섭계의 데이터를 비교했을 때 전차처리 스페클 간섭계의 데이터 오차범위는 약 4.5 % 이며 광 감도 간섭계를 이용하여 빛 의 세기를 동일하게 중첩시켜 측정한 오차범위 약 5.25 %, 전단간섭계 오차범위는 5.87 %로 측정 되었다.

Collection @ chosun

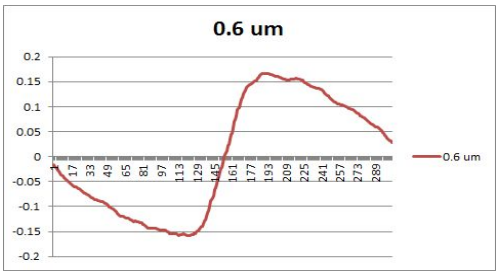
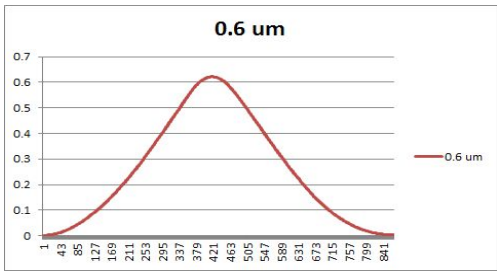
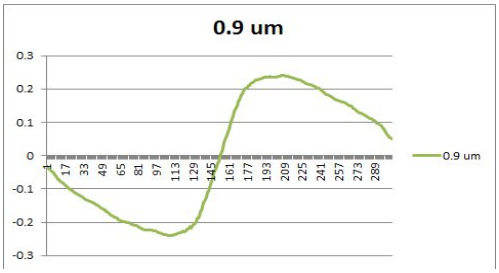
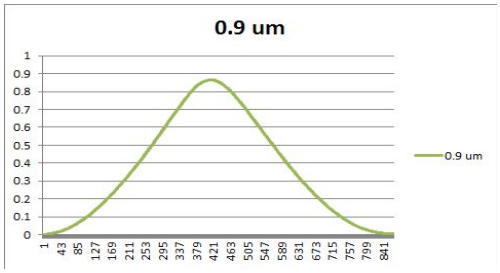
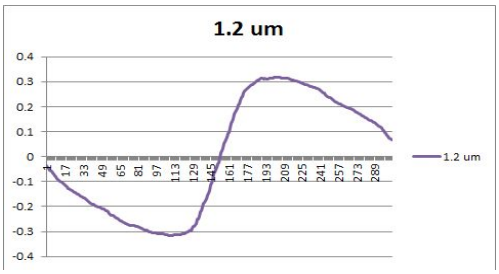
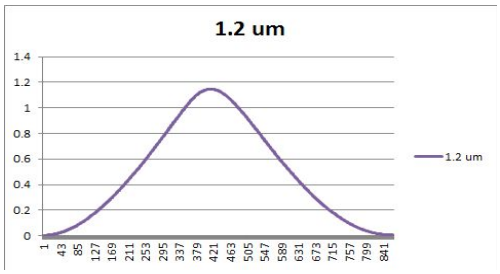
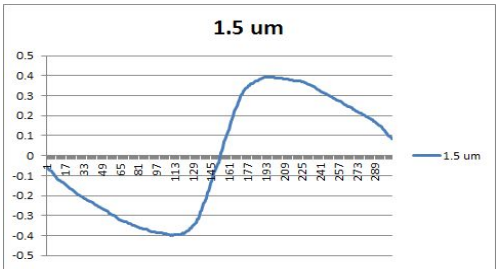
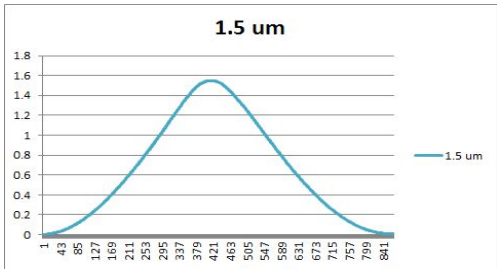
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-15 Comparison of Profile Data with deformation of interferometer system

Out-of-plane interferometer	ESPI
	
	
	
	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Shearogrephy	
differential	integral
	
	
	
	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-16, Table. 4-17은 평판 시험편에 각각 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 ㎛의 변형에 따른 레이저 광 감도 면외 간섭계(Out-of-plane Interferometer), 전자처리 스페클 간섭계(Electronic Speckle Pattren Interferometry)의 데이터를 합쳐서 Total Data Graph를 나타내었다. 또한 Table. 4-18에서 전단간섭계(Shearogrephy)데이터의 미분 값을 이미지의 Pixel 값에 스케일 값을 나눠 실제 대상물의 길이를 획득한 후 적분 값으로 계산을 하여 측정하여 데이터 값을 비교하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-16 Comparison with Profile Data according to deformation of the Out-of-plane interferometer

Out-of-plane interferometer

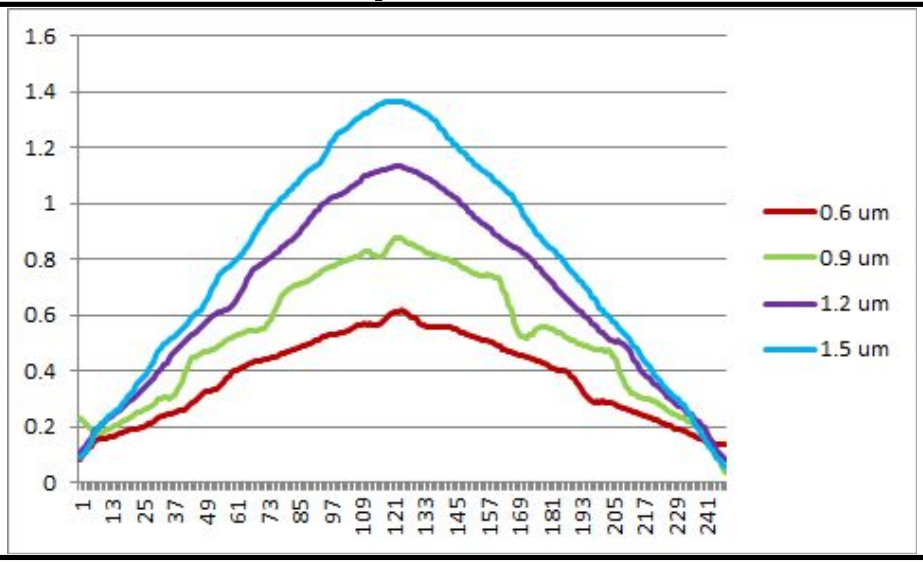
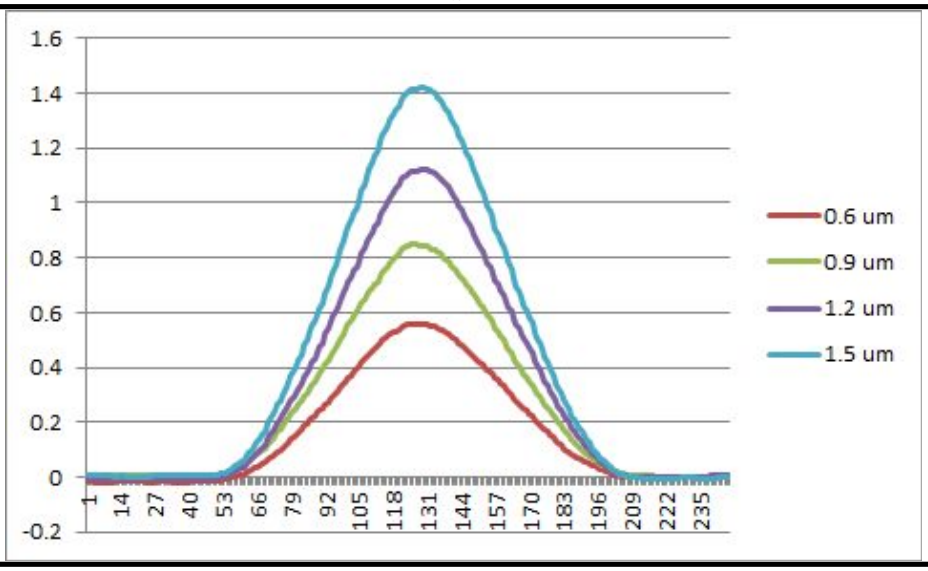


Table. 4-17 Comparison with Profile Data according to deformation of the ESPI

ESPI

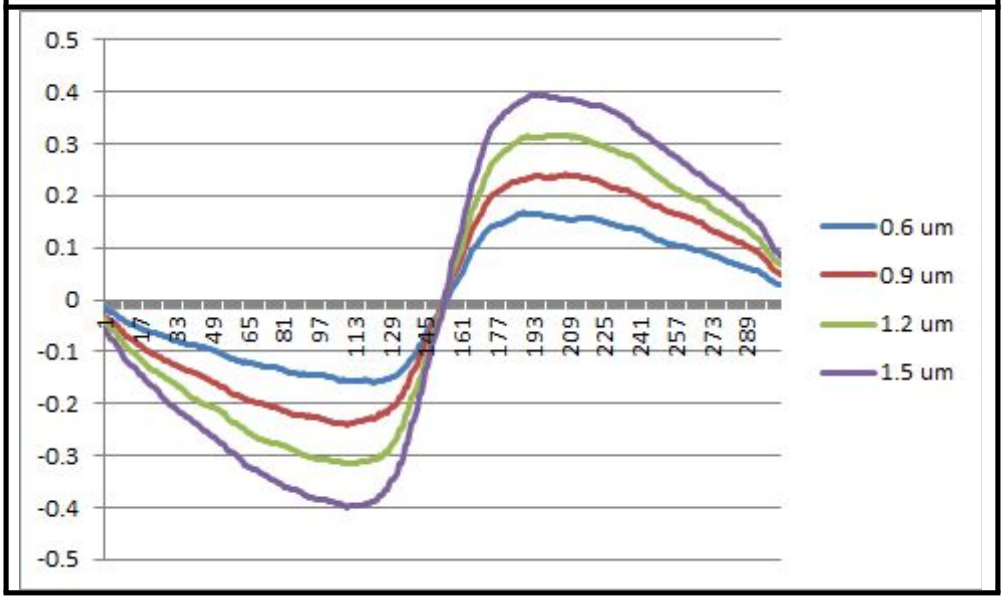


Collection @ chosun

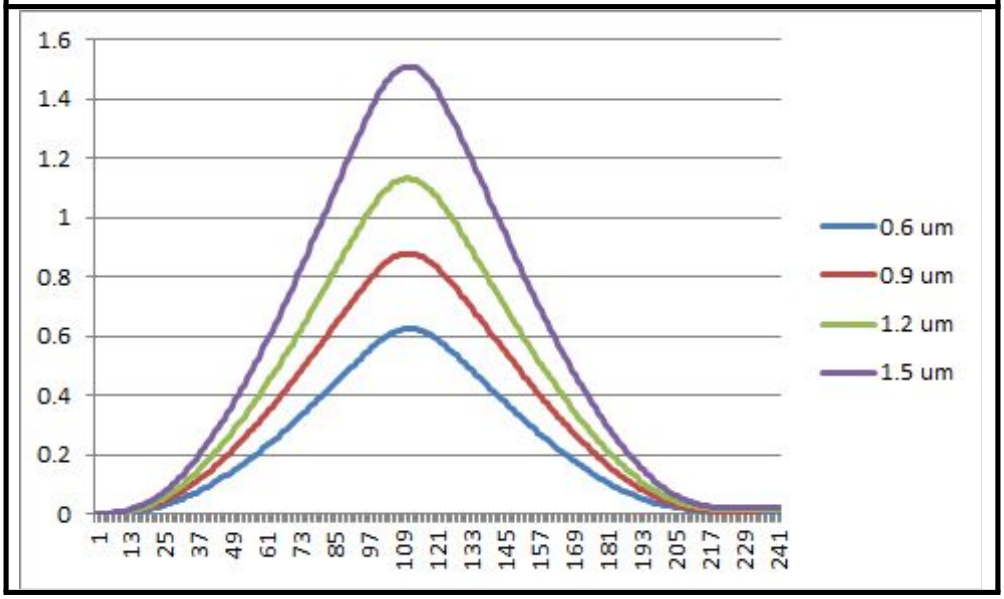
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-18 Comparison with Profile Data according to deformation of the Shearogrephy

Shearogrephy (differential)



Shearogrephy (integral)



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-19, Table. 4-20, Table. 4-21, Table. 4-22는 평판 시험편에 각각 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 ㎛ 변형을 주어 측정된 전자처리 스페클 간섭계(Electronic Speckle Pattren Interferometry), 전단간섭계(Shearogrephy), 레이저 광 감도 면외 간섭계(Out-of-plane Interferometer)의 Data를 비교한 그래프를 나타낸 것이고 레이저 광 감도 간섭계는 다른 상용 장비 보다 우선 진동과 잡광의 제거하기 위한 시스템이 부족한 상태에서 실험을 진행하여 Data가 정밀하게 측정하는데 어려움이 있었다. 하지만 Table. 4-23에서와 같이 변형의 Max 측정값의 오차는 실제 변형의 크기와는 크게 다르지 않았다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-19 Comparison Data of interferometry deformation _ 0.6 ㎛

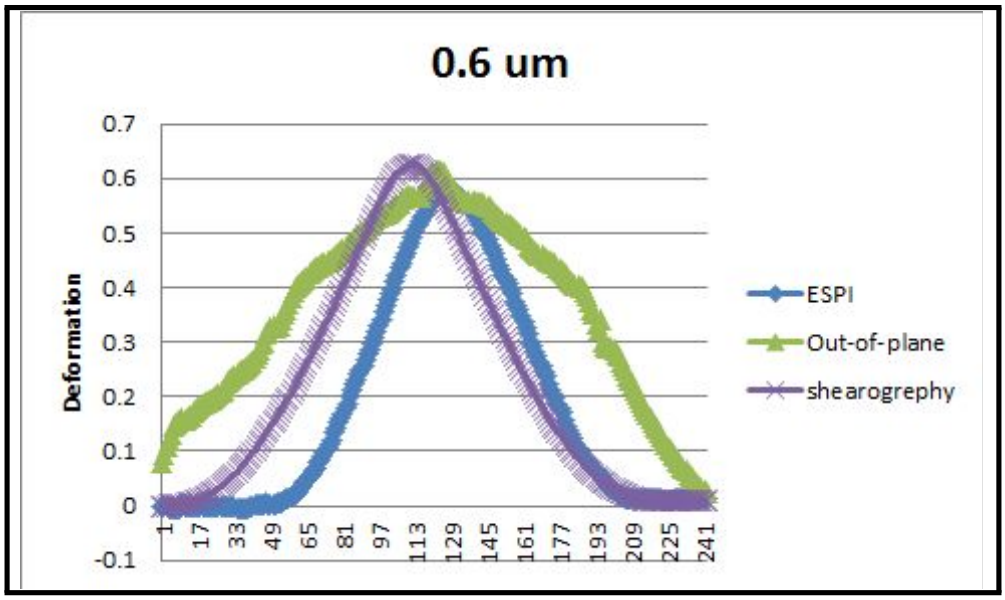
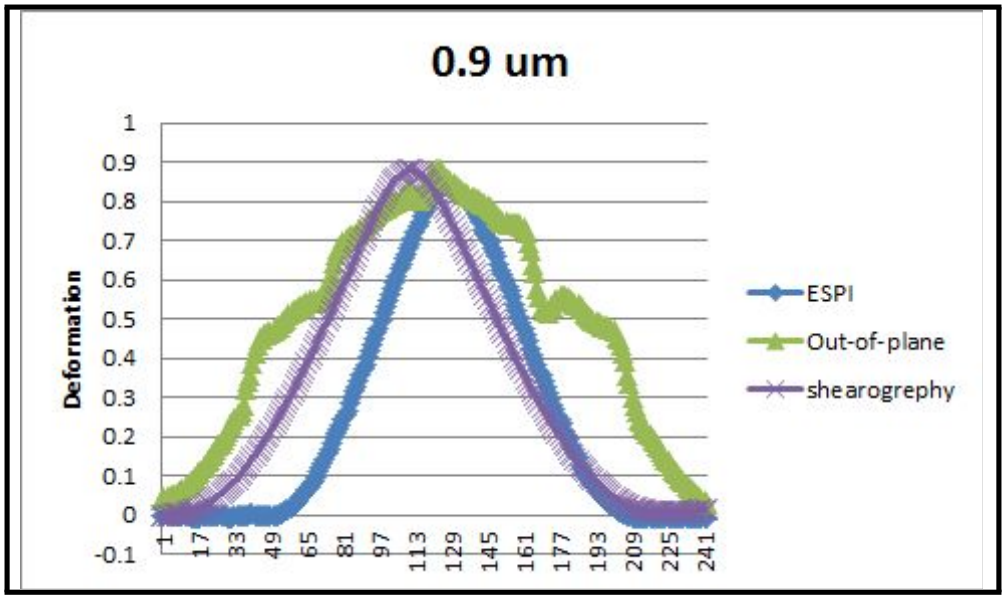


Table. 4-20 Comparison Data of interferometry deformation _ 0.9 ㎛



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-21 Comparison Data of interferometry deformation _ 1.2 ㎛

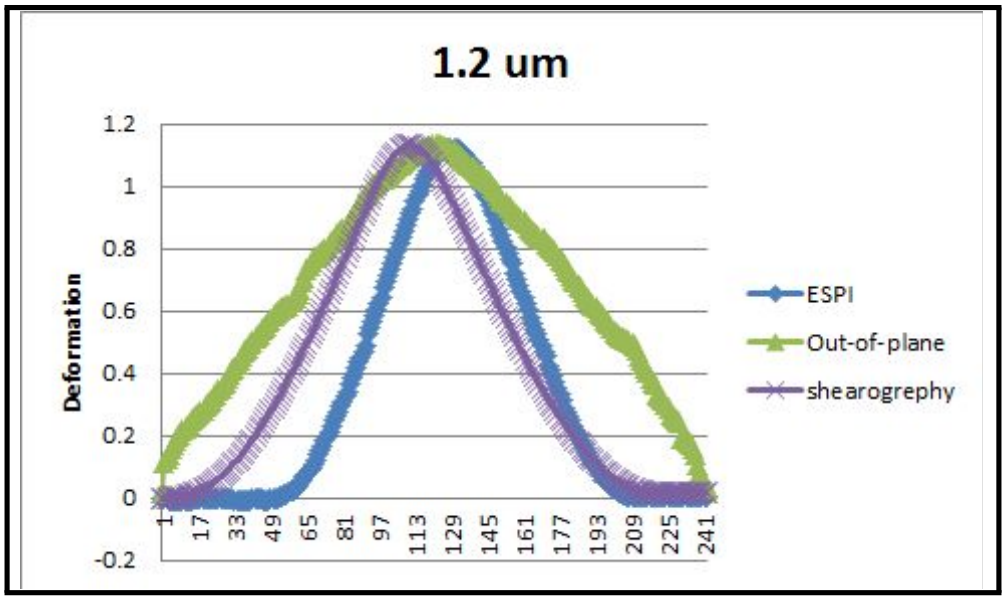
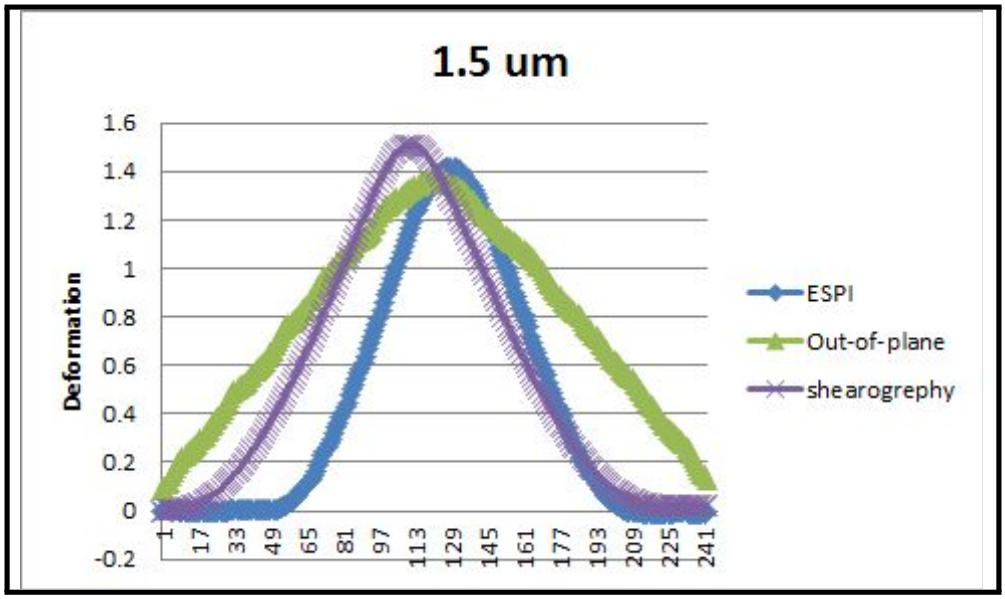


Table. 4-22 Comparison Data of interferometry deformation _ 1.5 ㎛



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4-23 deformation of interferometer system

Deformation [㎛]	0.6	0.9	1.2	1.5
Out-of-plane interferometer [㎛]	0.62	0.88	1.13	1.36
ESPI [㎛]	0.56	0.85	1.19	1.42
Shearogrephy [㎛]	0.62	0.865	1.145	1.55

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 5 장 결 론

본 논문에서는 기존 비파괴검사기술의 기술적 손실을 보완하기 위해 레이저 응용 계측 기술 중의 하나인 레이저 스패클 간섭법(ESPI)의 이론적 방법을 이용하여 레이저 광 감도 제어 기술을 접목시킨 간섭계를 개발을 하였고 광 감도를 비교함으로써 실제 광 감도 차이에 따른 정량적 데이터를 획득한 후 다른 비파괴검사기술인 ESPI와 Shearography를 사용하여 동일 한 실험을 진행하여 데이터를 비교분석을 통한 검증을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 평판 시험편에 각각 다른 변형을 주는 동시에 광 감도를 ND filter를 통해 조절하여 Object Beam(물체광)과 Reference Beam(참조광)의 광량 차이를 다르게 했을 때 데이터 비교 결과 광량의 차이가 크거나 작을 때 간섭무늬의 깨짐 현상을 볼 수 있었고 광량의 차이가 비슷하면 할수록 간섭무늬가 잘 나타나며 데이터 또한 정밀하게 측정 되는 걸 확인 할 수 있었다. 또한 변형의 크기가 클수록 데이터 값의 오차는 더욱 높아졌다. 따라서 정밀한 측정을 할 시에 광량의 차이는 중요하다고 보여 진다.

2) 레이저 광 감도 간섭계로 측정된 면외 데이터를 전단간섭계(Shearogrephy)와 전자처리 스페클 패턴 간섭계(Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 비교 결과 각각의 평판 시험편의 변형의 오차범위는 있었지만 Max 값의 측정 데이터는 비슷한 결과를 얻어지는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안하는 광 감도 세기는 Object Beam(물체광)과 Reference Beam(참조광)의 차이가 비슷하면 할수록 데이터의 결과 값은 더욱 정밀해지며 오차가 줄어들었으며 전단 간섭계와 전자처리 스페클 패턴 간섭계의 오차도 줄일 수 있었다. 본 논문에서 제안하는 광 감도는 건전성 평가 기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 중요한 역할을 하고 있고 광 감도 조절을 할 수 있는 시스템을 개발하여 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참 고 문 헌

1. 한국비파괴검사학회, 박은수, 박익근. “비파괴검사개론”, 서울: 도서출판 골드, 2000.
2. Ettemeyer, A.. Technical engineering note laser shearography for inspection of pipelines. J.Nucl. Eng. Design 1996;160:237.40.
3. edited Ratogi, P.K. and Inaudi, D.. Trends in Optical Non-destructive Testing and Inspection, London: Elsevier, 2000
4. 김경석. 『CW 레이저 스페클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
5. Jung Hyunchul. Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor thesis, Chosun University, 2004.
6. 양승필. 『ESPI에 의한 引張荷重 下에서의 複合 積層板의 振動 擧動에 關한 硏究』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2000.
7. Cloud, G. L.. Optical methods of Engineering Analysis, London: cambridge University Press, 1990, pp. 469.
8. Macovski, A., Ramsey, S.D., Schaefer, L.F.. “Time-Lapes Interfrometry and Contouring Using Television Systems.” Applied Optics 10:27722-2727, 1971.
9. Butters, J.n. and Leenertz, J.A.. “Speckle Patten and Holographic Techniques in Engineering Metrology.” Optics & Laser Technology 3:26-30, 1971.
10. Creath, K.. “phase-shifting Speckle Interferometry.”, Applied Optics 24:3053, 1985.
11. Hung, Y. Y., "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge." Applied Optics 14:618-622, 1975
12. Hung, Y. Y., Digital shearography versus TV holography for non destructive evaluation. J Opt Lasers Eng 1997;26:421.36.
13. 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, “위상잠금 광-적외선 열화상을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가,” 비파괴검사학회지, Vol.27, No. 4, pp.

Collection @ chosun

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

321-327, 2007.

14. Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18-20, 2003

15. J. C. Dainty, “Laser speckle and related phenomena 2nd edition”, New York : Springer-Verlag, 1984.

16. Ulf Schnars, Werner Jueptner, “Digital holography”, Springer, pp. 18-20, 2005.

17. M. H. Horman, "An applicationi of wavefront reconstruction to interferometry", Appl. Opt., Vol. 4, pp. 333-336, 1965.

18. P. K. Rastogi, "Digital speckle pattern interferometry and related techniques", John Wiley & Sons Ltd., pp. 59-139, 2001.

19. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.

20. K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," Progress in Optics XXVI, pp. 349-393, 1988

21. K. Hibino, B. F. Oreb, D. I. Farrant, and K. G. Larkin, "Phase shifting for nonsinussoidal waveforms with phase-shifting errors," J. Opt. Soc. Am. A 12, pp. 761-768, 1995

22. K. Hibino, B. F. Oreb, D. I. Farrant, and K. G. Larkin, "Phase shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts," J. Opt. Soc. Am. A 14, pp. 918-930, 1997

23. K. S. Kim, H. C. Jung, K. S. Kang, J. K. Lee, S. S. Jang, J. K. Hong, "In-plane strains measurement by using the electronic speckle pattern interferometry", KSME International Journal, Vol. 12, pp. 215-222, 1998.

24. Malacara, Daniel, Servin, Manuel, Malacara, Zacarias, 2005, “Interferogram Analysis For Optical Testing”, pp455-456

25. Charette P. G. and Hunter I. W., "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content", Appl. Opt, Vol. 35, pp. 3506-3513, 1996.

26. Bone D. J., "Fourier fringe analysis: two-dimensional phase unwrapping problem", Appl. Opt., Vol. 30, pp. 3627-3632, 1991.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

27. K. S. Kim, H. S. Chang, S. S. Lee, H. C. Jung, J. H. Kwag, "Quantitative Comparison of Out-of-Plane Deformation Measured by Dual-Function Interferometer System", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 1, pp. 33-39, 2008.
28. 장호섭. 『전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2006.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감사의 글

2013년 대학원 생활을 시작하고 짧지 않은 2년이지만 정말 짧게 느껴지는 대학원 생활을 하고 배운 것을 토대로 논문을 마무리 하였습니다. 2년이란 긴 시간동안 많은 일들을 느꼈지만 모두 다 소중한 시간들이였고 추억으로 간직될 것 같습니다. 제가 이렇게 생활하기까지 바른길로 나아갈 수 있도록 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 대학원 생활을 할 수 있게 해주시고 세심한 지도와 격려로 대학원 생활을 알차게 보낼 수 있게 해주신 김경석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문을 심사를 해주신 장완식 교수님, 양인영 교수님께도 감사드리며 매 학기 큰 열정으로 심도 있는 강의를 통해 가르침을 주신 나기대 교수님, 김택현 교수님, 정낙규 교수님, 김지훈 교수님, 박정우 교수님께도 감사드립니다.

항상 대학원생과 같이 생활하면서 질책과 격려를 아끼지 않으시고 많은 가르침을 주신 정현철 박사님, 지금은 실험실에 계시지 않고 무지기공 연구소장님으로 계시지만 저에게 많은 질문과 가르침을 주신 장호섭 박사님께도 감사하는 마음을 전합니다. 대학원에 들어와 많은 도움을 주신 김우진 선생님, 김세경 선생님, 조언을 아끼지 않고 좋은 이야기를 많이 해주신 태호형, 저와 함께 실험실을 떠나지만 큰 여운을 남기신 혜준형, 실험실에서 가장 중요한 사람 상채형과 찬근형, 형들 때문에 진짜 편한 실험실 생활을 하였고 여러 가지 재미있는 추억들이 많았습니다. 그라고 선배이자 친구인 상우도 고맙고 하나뿐인 동기인 현일이 고생 많았다. 남은 1년 동안 더욱더 탄탄한 실험실을 이끌고 갈 주엽형, 성훈, 현준이, 나연이 졸업하기 전까지 준비 잘 해서 좋은 결과가 있었으면 좋겠습니다. 후배이지만 많은 걸 배웠고 부족한 선배들 밑에서 고생들이 많았다.

마지막으로 항상 믿어주시고 묵묵히 안부를 물어보신 아버지, 세심하게 신경써주시는 사랑하는 어머니, 그리고 우리가족에 진정한 버팀목이자 든든한 형에게도 고맙다는 말을 전합니다. 이 모든 분들이 있었기에 2년 동안 편안히 대학원 생활을 할 수 있었다고 믿고 있습니다. 항상 감사하게 생각하며 한분 한분 제 기억속에 남아 있을 것이고 사회에 나가 꼭 다른 사람들에게 기억에 남은 사람이 되도록 노력하겠습니다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재공학과	학 번	20137109	과 정	석사
성 명	한글: 김 현 호 한문: 金 鉉 澔 영문:Kim, Hyun-Ho				
주 소	광주광역시 서구 유촌동 845-2번지 아덴빌 401호				
연락처	e-mail : khh861106@gmail.com				
논문제목	한글: 광 감도 비교를 통한 전자처리 스페클 패턴 간섭계의 최적 측정 조건에 대한 연구 영문: A study on optimal measurement conditions of ESPI by comparing photosensitivity				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2015 년 2 월 일

저작자: 김 현 호 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

Collection @ chosun