



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 2월  
석사학위 논문

전단간섭계를 이용한 플랜트 압력 직관  
및 곡관의 내부결함의 길이 및 두께에  
대한 정량적 측정

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

양 준 호

# 전단간섭계를 이용한 플랜트 압력 직관 및 곡관의 내부결함의 길이 및 두께에 대한 정량적 측정

Quantitative Measurement on Length and Thickness of  
Inside Defect of Straight and Bent Pressure Piping for  
Plant using Shearography

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

양 준 호

전단간섭계를 이용한 플랜트  
압력 직관 및 곡관의 내부결함의  
길이 및 두께에 대한 정량적 측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2017년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

양 준 호

# 양준호의 석사학위 논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	양인영	
위원	조선대학교	교수	정현철	
위원	조선대학교	교수	김경석	

2017년 11월

## 조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
ABSTRACT .....	IV
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	4
제 2 장 이론적 배경 .....	6
제 1 절 스페클과 간섭무늬 .....	6
1. 스페클(Speckle) .....	6
2. 간섭무늬(Fringe Pattern) .....	9
제 2 절 정량적 해석을 위한 대상 체의 변형정보 추출 .....	14
1. 위상이동(Phase Shifting) .....	14
2. 결펼침(Unwrapping) .....	16
제 3 절 광학 간섭계 .....	18
1. 면외 간섭계 .....	18
2. 전단 간섭계(Shearography) .....	19

제 3 장 실험장치 및 시험편 .....	24
제 1 절 실험장치 .....	24
1. 전단 간섭계 시스템 .....	24
2. 공압 제어 장치 .....	26
3. 정밀 변형 발생 장치 .....	26
제 2 절 시험편 .....	27
1. 직관 압력배관 .....	27
2. 곡관 압력배관 .....	29
제 4 장 실험방법 및 실험결과 .....	31
제 1 절 간섭계 구성 .....	31
1. 간섭계 .....	31
2. 위상이동 제어 프로그램 .....	31
3. Filtering 및 Unwrapping 프로그램 .....	32
4. 간섭계 제어 및 이미지 처리 프로그램 .....	33
제 2 절 간섭계 측정 실험 .....	36
1. 측정 방법 .....	36
2. 면외 변형 측정 .....	37
3. 면외 변형 측정 결과 .....	41
제 3 절 직관 및 곡관 압력배관 측정 실험 .....	42
1. 직관 압력배관 해석 결과 .....	42

2. 직관 압력배관 내부 결함 측정 .....	44
3. 곡관 압력배관 해석 결과 .....	52
4. 곡관 압력배관 내부 결함 측정 .....	54
제 5 장 결론 .....	62
참 고 문 헌 .....	64



## LIST OF TABLES

Table 3-1 Specification of Shearography system .....	25
Table 3-2 Defect Specification .....	28
Table 3-3 Defect Specification .....	30

## LIST OF FIGURES

Fig. 1-1 Type of Corrosion Secondary in a Nuclear Power Plant	2
Fig. 1-2 Examples of pipe damage	2
Fig. 1-3 Examples of Pipe Wall-thinning Defects	3
Fig. 2-1 Form of laser speckle	6
Fig. 2-2 Objective speckle	7
Fig. 2-3 Subjective speckle	7
Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave	11
Fig. 2-5 Four-step cross algorithm	15
Fig. 2-6 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase	17
Fig. 2-7 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase graph	17
Fig. 2-8 Out-of-plane displacement sensitive interferometer	19
Fig. 2-9 Shearography interferometer	20
Fig. 3-1 Schematic of shearography system	24
Fig. 3-2 Sensor of shearography system	25
Fig. 3-3 Pneumatic control device	26
Fig. 3-4 Schematic diagram of the precision deformation device	26
Fig. 3-5 Precision deformation generator	27
Fig. 3-6 2D Design drawing & 3D Design drawing	27
Fig. 3-7 Intuitive pressure piping	28
Fig. 3-8 Defect Type	29
Fig. 3-9 2D Design drawing & 3D Design drawing	29
Fig. 3-10 Bent pressure piping	30
Fig. 4-1 Schematic diagram of deformation measurement interferometer	31
Fig. 4-2 5-step phase map	32
Fig. 4-3 Goldstein unwrapping	32

Fig. 4-4	Obtained phase map .....	33
Fig. 4-5	Image before deformation .....	34
Fig. 4-6	Image after deformation .....	34
Fig. 4-7	Phase map .....	35
Fig. 4-8	Image filtering .....	35
Fig. 4-9	Unwrapping .....	36
Fig. 4-10	Experimental configuration of laser interferometer precision strain .....	37
Fig. 4-11	Comparison of deformation measurement results of precision deformation generator .....	39
Fig. 4-12	Straight sense of shape analysis results .....	42
Fig. 4-13	Graph of intuitive deformation analysis result .....	42
Fig. 4-14	Straight sense of force analysis results .....	43
Fig. 4-15	Graph of intuitive stress analysis result .....	43
Fig. 4-16	Bent sense of shape analysis results .....	52
Fig. 4-17	Graph of bent deformation analysis result .....	52
Fig. 4-18	Bent sense of force analysis results .....	53
Fig. 4-19	Graph of bent stress analysis result .....	53

## ABSTRACT

### Quantitative Measurement on Length and Thickness of Inside Defect of Straight and Bent Pressure Piping for Plant using Shearography

Jun-Ho Yang

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

Dept. of Mechanical System Engineering.

Graduate School of Chosun University

Plant refers to an industry that supplies facilities capable of producing products such as electricity, oil, gas, freshwater, etc., or builds a factory. This refers to equipment, factory equipment and production equipment that supplies raw materials and energy to obtain physical and chemical actions in order to obtain energy. As a result, plumbing plays a very important role. However, the piping is placed in various environmental conditions such as position, temperature, fluid, gas, solid, purpose of use and piping thickness, etc. For reasons such as productivity and stability, piping erosion, corrosion, damage Various plumbing defects are very important and sensitive part. Plant piping has various degrees of damage depending on the intended use and environmental conditions. Measurement of defects is very important for reasons such as productivity and safety.

In the case of nuclear power, the T-shaped pipe and elbow installation are inevitable for spatial restriction. Vortex flow and turbulence are generated, causing pipe wall thickness to decrease and

accelerate. When piping is severely corroded, if leaks occur, damage on property such as property loss, human and physical damage due to shutdown will continue. Leakage due to defects such as welding, work, material, pipe washing, pressure, temperature, material failure occur.

By using optical technology of the shear interferometer, it replaced the technology which discriminated the defect with the naked eye, it is an extended one, a microscopic structure not visible with the naked eye or a discrimination difficult to use defect signal using light signal To quantitatively inspect defects. Since the optical measurement nondestructive inspection is different from the conventional inspection method and it is not a contact type but a long distance measurement in a noncontact manner, it is possible to measure a long distance where it is possible to measure an object that is difficult to obtain due to a threat of safety such as high temperature, By diffusing and using light in the system, it is possible to measure in a wide area. Measurement of the MEMS size is also possible with a large structure, and recently, it has been actively researched in various fields, up to NEMS. In the optical measurement non-destructive inspection, defect measurement tests are conducted in the aerospace industry, wind turbine blades, the appearance of automobiles, piping in the plant industry, etc., mainly in developed countries, and gradually its fields are expanded. In advanced countries, active research and development is being conducted mainly for the country, mainly for the purpose of user's convenient apparatus and program development.

In this research, by making an interferometer by making full use of the advantages of a shear interferometer, we can control defects of piping used in nuclear power, chemical, steel industry and so on, through acquisition and processing of images To quantitatively evaluate the size, position, deformation information and defects of the defect of the object.

Therefore, in this research, we perform simple measurement using a

shear interferometer, measure internal defects and deformations in real time in high precision, shorten the measurement time and at the same time, through simple image processing, highly precise and quantitative We develop a system that can be evaluated and construct an interferometer. We develop an image processing program and a Filtering and Unwrapping program via a phase shift control program and a CCD camera and try to quantitatively measure the deformation of defects occurring in the target body.

As a result, it is possible to measure the defective part inside the pressure piping that may occur during actual operation in the plant pressure piping used in the current plant industry site, and constitute a shear interferometer for performing highly accurate measurement. Perform post-experimental analysis on measurement of quantitative out-of-plane deformation of pressure piping with internal defects according to the pressure resistance of plant pressure piping. In order to measure the out-of-plane deformation of the pressure piping, test specimens are made with piping of intuitive bending pipes using plastics to fabricate defects of arbitrary length and thickness inside each pipe to detect defects I would like to quantitatively measure the Byeongwa strain using a shear interferometer.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

플랜트는 전력, 석유, 가스, 담수 등 제품을 생산할 수 있는 설비를 공급하거나 공장을 지어주는 산업을 말하며, 이는 에너지를 얻기 위해 원료나 에너지를 공급하여 물리적, 화학적 작용을 하게 하는 장치나 공장 시설 또는 생산 시설을 말한다. 또한, 플랜트 산업은 제품을 제조하기 위한 기계, 장비 등의 하드웨어와 설치 및 엔지니어링, 소프트웨어, 시공, 유지보수가 모두 포함된 종합 산업이다.

이에 따라 플랜트에서 배관은 매우 중요한 역할을 한다. 하지만 배관은 위치, 온도, 유체, 기체, 고체, 사용목적 및 배관의 두께 등으로 다양한 환경조건에 놓여 있으며, 생산성과 안정성 등의 이유로 배관의 침식이나 부식, 손상 등 다양한 배관결함은 매우 중요하며 민감한 부분이다. 원전의 경우 2차 계통에 설치되어 있는 배관은 제한적인 공간에 터빈, 복수기, 열교환기 등의 기기와 함께 효율적으로 배치하려다 보니 T자관이나 elbow와 같은 컴포넌트의 설치는 필연적이지만, 그로인해 와류나 난류를 발생시켜 배관 두께 감육을 가속시킨다. 또한 원전은 장기간, 고온, 고압 조건에서 운전을 하기 때문에 배관 감육 손상의 발생 가능성은 상시 가지고 있으며, 이를 예방하기 위하여 매주기 검사를 수행하거나 필요시 운전 정지 후 정비나 교체를 하고 있다. 배관 두께 감육 손상의 원인으로 침식, 부식, 유동가속부식 등이 있다.

정유 및 석유화학 플랜트 등의 산업에서는 배관의 부식이 심하게 발생하여 누설이 발생하면 조업중단에 따른 재산상의 손실, 가스중독, 화재 및 폭발 등으로 인한 인적, 물적 등의 손해를 가져 온다. 배관 손상은 열응력 열 신축 불량, 열처리 유무와 처리 불량, 재질 방식 불량, 설치공사 점검불량 등으로 부식과 마모가 일어나고 용접, 작업, 재질, 관내세정 등의 불량으로 인한 누설, 압력, 온도, 재질 불량 및 유체조성 등으로 인한 진동피로 등의 파괴, 지반침하나 지진 등의 환경적인 이유로 인한 폐쇄가 있다.



Fig. 1-1 Type of Corrosion Secondary in a Nuclear Power Plant

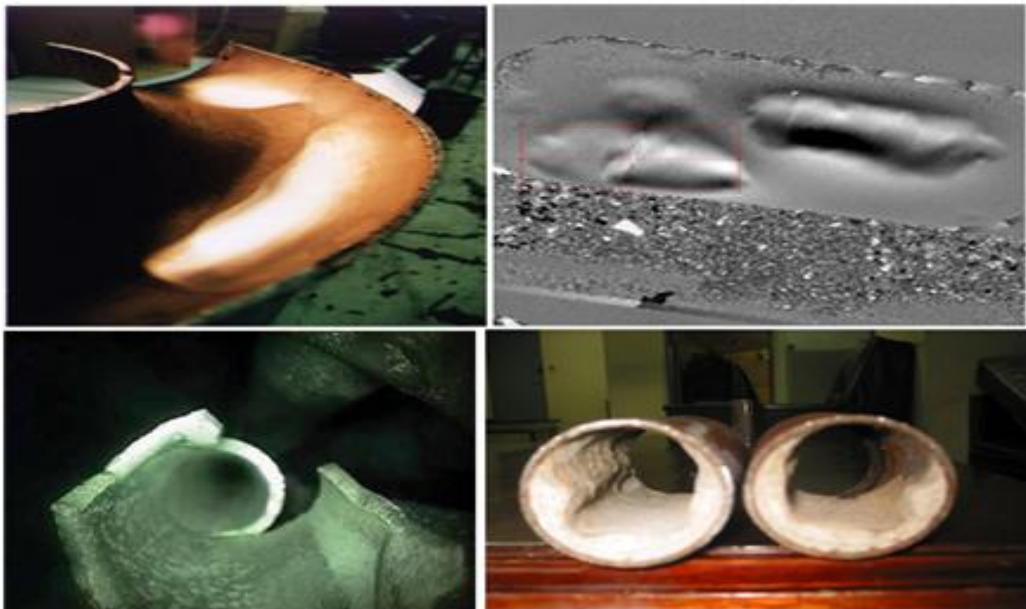


Fig. 1-2 Examples of pipe damage



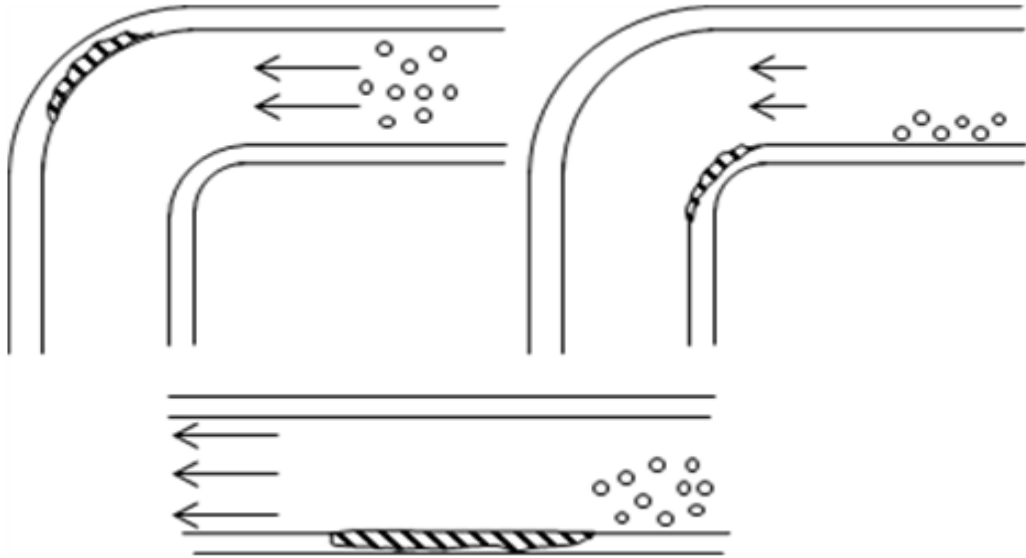


Fig. 1-3 Examples of Pipe Wall-thinning Defects

배관 비파괴 검사는 방사선을 투과시켜 필름에 감광시킨 후 현상하여 관찰함으로써 재료 내부 또는 외부의 불연속 유무를 검사하는 방사선 투과검사, 초음파의 반사를 탐지하여 내부 또는 표면 불연속부의 존재와 그 위치를 확인하는 초음파탐상검사, 철 및 철 합금강의 표면 또는 그 근처에서 crack과 유사 불연속 부를 탐지하는 방법으로 주로 자성재료에 불연속 부를 나타낼 수 있게 만든 자성분말을 뿌려 탐상하는 자분탐상검사, 침투 액을 이용하여 비 다공성 비철 금속과 재료표면의 불연속부의 탐지를 위한 침투탐상검사를 기준으로 하고 있으며, 최근에는 로봇을 이용한 피그로 배관 검사 등 다양한 검사 방법의 개발을 통한 적용을 모색하는 중이다.

## 제 2 절 연구목표 및 내용

본 연구에서 사용하는 전단간섭계는 광학적 기술을 사용하여 육안으로 결함을 판별하였던 기술을 대체하고 확장 되는 것으로 육안으로 보이지 않는 미세한 구조나 판별이 어려운 결함을 빛의 신호를 사용하여 결함을 정량적으로 검사하는 기술이다. 기존의 검사 방법과는 다르게 접촉식이 아닌 비접촉식으로 원거리 측정이 가능하므로 고온, 고전압, 방사선 등의 안전의 위협으로 접근하기 어려운 대상 체의 측정이 가능한 원거리 방식이며, 빛을 확산하여 사용함으로써 넓은 영역의 측정이 가능하다. 전단간섭계는 현재 여러 산업분야에 사용될 정도로 주변 환경의 영향에 덜 민감한 계측기임과 동시에 정밀 측정이 가능하며, 이 기술을 이용하여 측정 시 편리하고 비접촉, 비파괴 방식으로 확산광을 사용함으로써 실시간으로 측정을 한 후 이미지 처리를 통해 결함 정보를 획득할 수 있는 우수한 장점들을 많이 가지고 있다. 또한, 전단간섭계의 장점을 서터 설치를 통한 기능 결합 간섭계를 만든 후 제어함으로써 원자력, 화학 및 제철 산업 등에 사용되는 배관과 그 배관의 변형 및 결함을 정밀 측정하고 이미지 획득 및 처리를 통해 대상물의 결함의 크기나 위치 및 변형 정보와 결함을 정량적으로 측정하고자 한다.

이에 따라 전단간섭계를 이용한 손쉬운 계측을 하며 내부 결함 및 변형을 실시간으로 정밀 측정하여 측정시간 단축과 동시에 손쉬운 이미지 처리를 통해 정밀하고 정량적인 평가가 가능한 시스템을 개발하고 간섭계를 구성하며, 위상 이동 제어 프로그램과 CCD 카메라를 통한 이미지 처리 프로그램 그리고 Filtering 및 Unwrapping 프로그램을 개발하여 대상 체에 발생하는 결함의 변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

이로 인해 현재 플랜트 산업현장에서 사용하는 플랜트 압력배관에 실제 가동 중 일어날 수 있는 압력배관 내부의 결함 부 측정이 가능하며, 고 정밀 측정을 실시하기 위해 전단간섭계를 구성하고, 플랜트 압력배관의 내압에 따른 내부결함이 있는 압력배관의 정량적인 면외 변형 측정에 대하여 실험 후 해석을 수행한다. 압력배관의 면외 변형 측정을 위해 플라스틱을 이용해 시험편을 직관 및 곡관 배관으로 제작하고, 각각의 배관 내부에 임의의 길이와 두께가 다른 결함

부를 제작하여 결함 검출과 변위 변형 측정을 전단간섭계를 통해 정량적으로 측정하고자 한다.

본 연구에서 사용하는 전단간섭계를 이용하여 플랜트 산업현장의 압력배관에 서 발생하는 변위 변형을 정량적으로 측정할 수 있으며, 전단간섭계의 장점인 외부 환경에 영향을 받지 않는 강한 장점을 바탕으로 전단간섭계의 산업현장에 서의 적용 성을 높이고, 원자력발전소 및 각종 구조물의 안전성, 건전성, 보수 성을 증진시킬 수 있는 기반을 마련 할 수 있을 것으로 기대한다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 스페클과 간섭무늬

#### 1. 스페클(Speckle)

레이저 스페클(laser speckle)은 단색성(monochromaticity) 및 지향성(directionality)을 띄며, 레이저의 우수한 간섭성(coherency)으로 인한 성질을 갖는 현상으로 임의의 대상 체에 조사된 레이저 빛은 대상 체의 표면에 어른거리는 입자가 발생한다. 이러한 어른거림은 대상 체의 표면에 난반사 된 빛이 공간상에서 서로 간섭을 일으키고, 이러한 간섭 효과가 밝고 어두운 부분이 무질서하게 분포를 이루게 되는데, 이를 스페클(speckle)이라 하며 Fig. 2-1은 레이저 스페클의 형태이다.

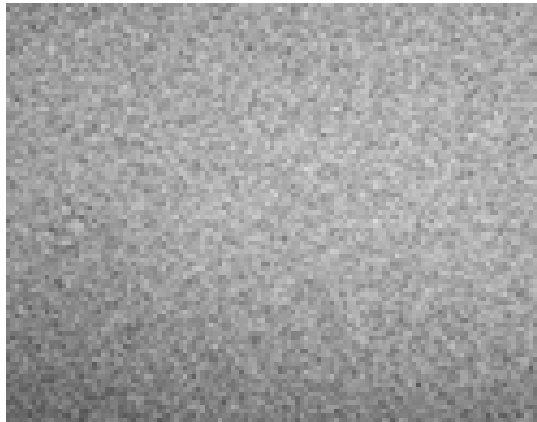


Fig. 2-1 Form of laser speckle

스페클은 레이저의 가 간섭성과 대상 체 표면의 거친 부분 때문에 발생하고, 대상 체 표면의 거친 부분이 조사되는 레이저 빛의 파장정도나 그보다 높을 때 나타난다. 이 스페클은 또 다른 스페클과 간섭을 이루어 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 대상 체 표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상 변화를 일으켜 대상 체 변위의 광 검출기에 빛의 강도(Intensity) 분포로 기록되어진다. 스페클을 나눌 때

objective speckle과 subjective speckle로 나누어지는데, Fig. 2-2는 objective speckle을 나타낸 것이며, Fig. 2-3은 subjective speckle을 나타낸 것이다.

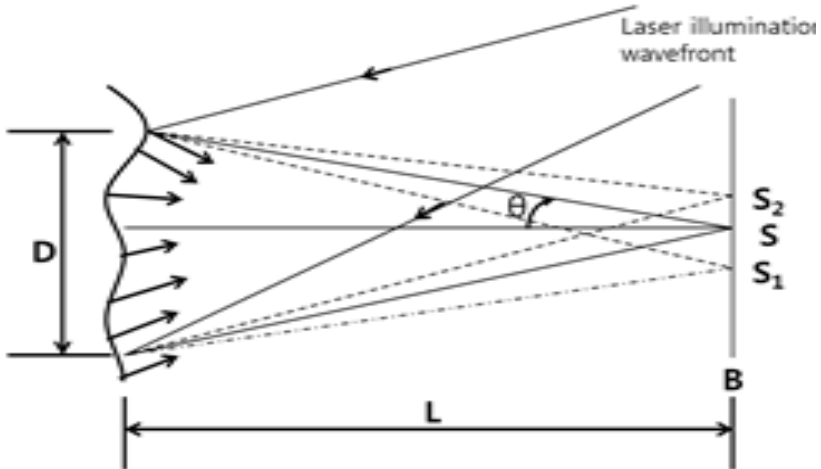


Fig. 2-2 objective speckle

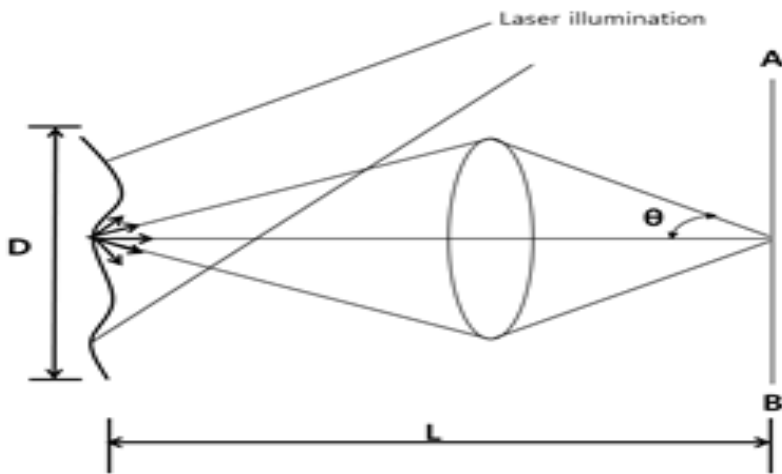


Fig. 2-3 subjective speckle

objective speckle과 subjective speckle은 결상 렌즈의 사용 여부에 따라 두 스펙클의 차이가 구별되며, 크기 또한 다르게 형성된다. 스펙클의 크기는 결상면 (image plane)에서 형성되는 최대의 밝기 점과 최소의 밝기 점 사이의 거리를 스펙클 크기라 말하며, 서로 빛의 강도 사이 거리를 스펙클 크기로 추정할 수 있다. 대상 체의 스펙클 크기의 정의는 대상 체 표면의 면적에 레이저 빛이 조사되고, 그 면적 위의 모든 점은 AB 면(viewing plane)에 형성되는 스펙클에 영향을 주게 되고, 확률 분포 이론에 의하여 제안한 식(2-1)으로 objective speckle을 정의할 수 있다.

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

여기서  $\lambda$ : 조사되는 레이저의 파장,  $L$ : 대상 체와 결상면 사이의 거리,  $D$ : 대상 체에 조사된 면적이다.

스펙클 상관 간섭법(speckle correlation interferometry)에서는 subjective speckle을 사용하고 있으며, 공간분해능은 subjective speckle의 크기에 의존한다. 이러한 subjective speckle은 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스펙클로 정의하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게 구분되어 진다. 즉, 결상렌즈는 대상 체 표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로 대상 체의 한 점과 결상면의 한 점이 1:1 대응이 된다. 따라서 수차가 없는 렌즈라면 결상면에 형성되는 스펙클의 강도는 대상 체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나 실제 결상렌즈의 회절한계에서는 한 점으로 결상을 하지 못함으로서 결상면에 대응하는 대상 체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기 만큼이 결상면 위의 스펙클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 subjective speckle의 크기는 조셉 프라운호퍼(Joseph Fraunhofer)의 회절이론에 따라 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 초기 최대 밝기와 첫 번째 최소 밝기사이의 거리(Bessel 함수의 1차 최소 밝기사이의 거리)라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 subjective speckle의 크기는 다음 식(2-2)와 같이 같다.

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

여기서,  $N.A$  : Numerical aperture,  $M$  : 렌즈 확대배율,  $\lambda$  : 조사된 레이저의 파장,  $F$  : 렌즈의 구경비(f-number) 이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 크기는 측정 대상 체의 공간분해능을 결정한다. 실제 줌렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6배(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 37.07mm가 된다. 또한 subjective speckle의 대상 체 표면에서 크기는 다음 식(2-3)과 같다.

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

위의 조건에서 대상 체 표면에 형성된 스페클의 크기는 778.78nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, 같은 면과 조합하여 간섭하는 면외 변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD 픽셀 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

## 2. 간섭무늬(Fringe Pattern)

간섭(Fringe)이란 두 개의 가 간섭성의 beam이 서로 만났을 때 beam의 강도가 주기 별로 증가 또는 감소하는 현상을 말한다. 두 beam이 서로 중첩될 때 형성하는 빛의 강도의 분포는 다음 식(2-4)와 같다.

$$I = A(x,y) + B(x,y)\cos[(k_1 - k_2)r - (\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] \quad (2-4)$$

$A(x,y)$ 는 바이어스(Bias) 강도,  $B(x,y)$ 는 변조파의 강도,  $k_i, w_i, \phi_i (i = 1,2)$ 는 각각 I번째 빔의 파수, 각 주파수, 초기 위상 값을 나타내고,  $B(x,y)/A(x,y)$  간섭무늬의 명암(Contrast), 즉 가 간섭도(Visibility)를 나타낸다.

스페클 간섭무늬(Speckle Fringe Pattern)는 대상 체의 변형에 따라 스페클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상 점의 연결로 이루어진 것이라 할 수 있다.

화상처리장치를 통하여 변형 전의 스페클 패턴을 기준으로 대상 체 변형에 따른 스페클 패턴의 변화를 연속으로 감산처리 하여 실시간으로 관찰이 가능하게 되어 진다.

간섭무늬는 두 갈래의 파동이 만날 때 일으키는 상쇄, 보강간섭에 의해 형성되는 무늬인데, 진동수가 다른 파동끼리는 간섭현상을 일으키지 않으므로 여러 진동수의 빛이 섞인 백색광의 경우 각 진동수별로 각각의 간섭무늬를 형성한다. 즉, 간섭무늬가 시간과 함께 변하지 않고 안정하기 위해서는 파동끼리 완전히 겹치거나 파동의 위상차가 일정하게 유지됨이 필요한데, 이 조건을 만족시키는 파동은 간섭성을 갖는다고 할 수 있다. 스페클 간섭무늬의 형성은 일반적으로 대상 체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 대상체 광(object beam), 대상체 광의 위상변화의 기준인 광원의 참조 광(reference beam)이 필요하다. Fig. 2-4는 두 개의 광에 따른 합성을 나타낸 것이며, 여기에서 참조 광( $E_R$ )은 대상체 광( $E_O$ )에 의해 형성된 스페클을  $z$ -축에 민감하도록 기준면을 제공한 역할을 한다. 빛의 파동에 대한 진폭은 복소수에 대한 함수로 표현 가능하므로 다음 식 (2-5)와 같다.



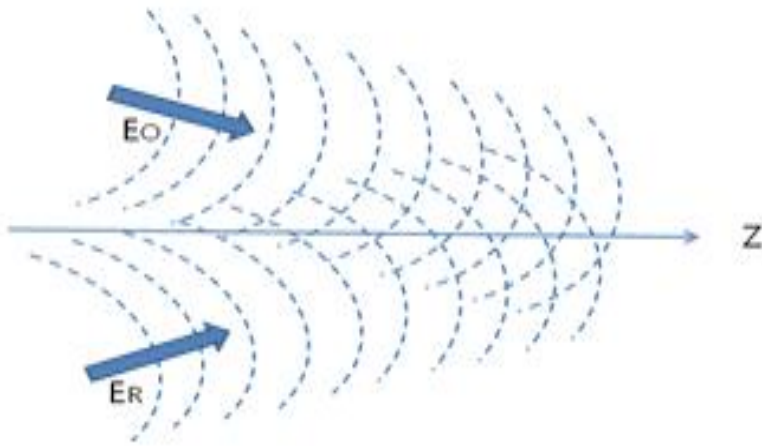


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

$$\begin{aligned}
 E_O &= A_O \cos(\delta_O - wt) \\
 E_R &= A_R \cos(\delta_R - wt)
 \end{aligned}
 \tag{2-5}$$

여기서  $E_O$  : 대상체 광,  $A_O$  : 대상체 광의 진폭,  $\delta_O$  : 대상체 광의 초기위상,  
 $E_R$  : 참조 광,  $A_R$  : 참조 광의 진폭,  $\delta_R$  : 참조 광의 초기위상,  $w$  : 진파속도,  $t$  :  
 시간이다. 참조 광과 대상체 광은 간섭계로 인해 같은 공간상에서 중첩할 수 있으  
 며, 이때 발생한 합성 광  $E$ 는 다음 식(2-6)과 같다.

$$E = E_R + E_O
 \tag{2-6}$$

합성광을 CCD 카메라에서는 광강도로 나타내게 되며, CCD 카메라 하나의 화소  
 에 기록되는 빛의 강도는 다음 식(2-7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 I &= |A_O^2| + |A_R^2| + 2|A_O||A_R|\cos\phi \\
 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos\phi
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

여기서  $I$  : 합성 광의 빛의 강도,  $I_R$  : 참조 광의 빛의 강도,  $I_O$  : 대상체 광의 빛의 강도  $\phi$  : 대상체 광과 참조 광의 위상차이다. 실제적으로 획득되는 빛의 강도는 화소의 크기에 대한 평균값으로 스펙클의 크기가 화소의 크기보다 작다면 하나의 화소에 포함된 스펙클들의 평균 빛의 강도가 기록되어 진다. ESPI에서는 대상체의 표면 변위를 측정하기 위해 변형전후의 스펙클 상태의 감산처리를 통하여 상관 간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전후의 CCD 카메라에 기록되어진 스펙클 패턴을 다음 식(2-8, 2-9)과 같이 나타내게 된다.

$$I_{before} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos\phi \tag{2-8}$$

$$I_{after} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R}\cos(\phi + \Delta\phi) \tag{2-9}$$

여기서  $I_{before}$  : 대상체 변형 전의 빛의 강도,  $I_{after}$  : 대상체 변형 후의 빛의 강도,  $\Delta\phi$  : 대상체 변형에 따른 위상변화  
 변형전후의 스펙클 패턴에 대한 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 다음 식(2-10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 I_{sub} &= I_{before} - I_{after} \\
 &= 4\sqrt{I_O I_R}\sin(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi)\sin(\frac{1}{2}\Delta\phi)
 \end{aligned}
 \tag{2-10}$$

여기서  $I$ : 대상 체 변형전후의 빛의 강도 분포의 감산 처리된 빛의 강도  
 실제로 모니터에서 관찰되는 비츠이 강도 분포는 음의 신호가 정류된 다음 식  
 (2-11)과 같다.

$$B = K \left| \sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2} \Delta\phi\right) \right| \quad (2-11)$$

여기서  $K$ : 모니터 밝기분포 상수이다. 식 (2-11)과 같이 변형 전후의 스페클  
 을 감산 처리함과 동시에 나타내어지는 줄무늬를 스페클 상관 간섭무늬(speckle  
 correlation fringe pattern)라고 한다. 식(2-11)에서 대상 체의 변형에 의한 위  
 상변화( $\Delta\phi$ )를 추출함으로서 대상 체의 변형을 측정할 수 있다.

## 제 2 절 정량적 해석을 위한 대상 체의 변형정보 추출

제 1절에서 제시한 식 (2-10)은 4개의 미지수가 존재함과 동시에 대상 체의 변형에 따른 위상변화를 직접 추출할 수 없게 된다. 대상 체의 변형위상을 추출하는 방법에는 다음과 같은 방법이 있다. 등 간격의 간섭무늬에 대해 화상처리를 이용하여 간섭무늬로부터 line를 추출하고 이 사이를 보간 함으로서 대상 체의 변형을 추출하는 방법, 상관간섭무늬 분포에 대한 2D 감산-합산 처리에 의한 방법(2D subtraction-addition method), 공간 위상이동 기법(spatial phase shifting method)을 이용하여 위상의 추출 등의 방법을 이용한다. 이러한 방법 중에서 K. Creath<sup>21</sup>에 의해 제안된 시간의존성 위상이동기법(temporal phase shifting method)은 가장 적용이 용이하고 효과적인 방법으로 위상이동기법은 식(2-8)에서 제시한 3개의 미지수( $I_1, I_2, \phi$ )를 구하기 위해 Piezo-electro transducer(PZT)를 참조광의 빛의 경로에 삽입하고 위상변조 하여 3개 이상의 방정식을 얻어 위상을 구할 수 있다. 위상이동기법을 적용하여 변형 전과 후의 위상을 구함으로써 대상 체의 변형위상을 직접 추출할 수가 있다.

### 1. 위상이동(Phase Shifting)

PZT를 이용한 위상이동기법은 전자 처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)과 전단간섭법(Shearography)에 의해 형성되는 간섭으로 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 효과적이고 널리 사용되고 있는 방법이다. 위상추출 알고리즘의 4단계 위상이동기법으로 3개의 미지수를 구하기 위해  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 씩 위상을 이동하여 다음 식과 같이 4개의 방정식으로 표현되는 스펙클 패턴을 기록하게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \varnothing \\
 I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varnothing + \pi/2) \\
 I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varnothing + \pi) \\
 I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varnothing + 3\pi/2)
 \end{aligned}
 \tag{2-12}$$

4개의 방정식을 다음 식(2-13)과 같이 조합하여 CCD 화소의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상 점들의 연결이 위상지도를 형성한다.

$$\varnothing(x,y) = \tan^{-1} \left( \frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \right)
 \tag{2-13}$$

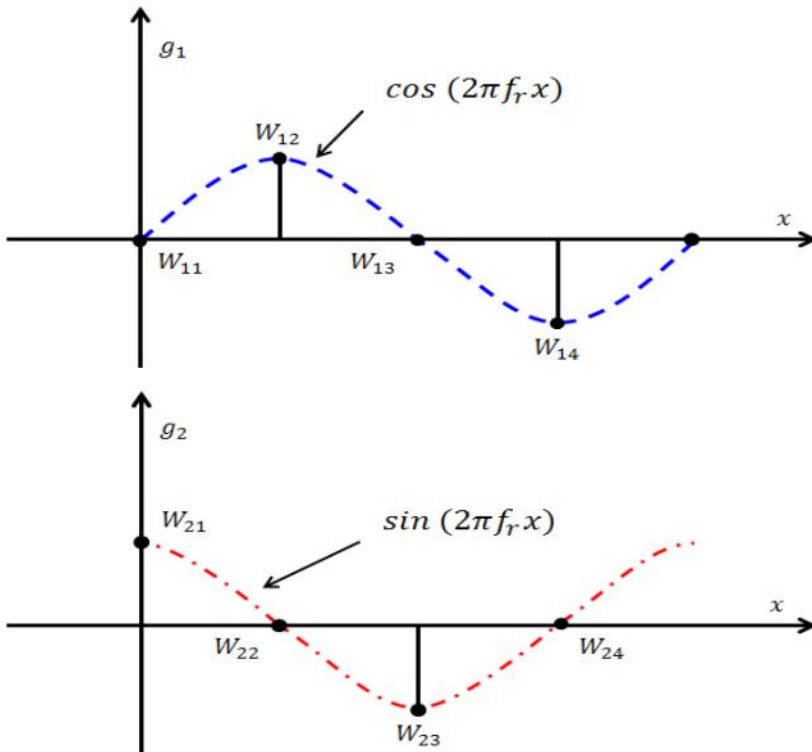


Fig. 2-5 Four-step cross algorithm

## 2. 결핍침(Unwrapping)

위상 이동에 의해 얻어진 변형 량을 정량적으로 나타내는 위상은 arc-tangent 함수로 계산되었기 때문에 불연속적으로 거칠게 나타나는 형상으로 이를 해결하기 위해 위상지도의 분리된 위상정보를 변형 기울기로 나타내고 이를 정량적으로 해석하기 위해 결핍침 단계가 필요하다. 대상물의 형태가 복잡하고 noise가 많은 위상지도는 이미지가 깨지는 현상 및 왜곡현상 발생이 심하여 해석에 어려움이 따른다. 이에 따라 결핍침은 위상이동에서 위상을 구하기 위해 사용되는 arc-tangent 함수가 갖는 불연속적 현상을 해결하기 위해 불연속의 변위 값을 연속 값으로 바꿔주는 단계이다. 먼저 arc-tangent 함수는  $0 \sim \pi$ 의 주기로 불연속이므로 그 주기를  $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 연속 위상으로 바꿔주기 위한 결핍침은 다음 식(2-14)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \quad (2-14)$$

여기서  $\phi_{unw}$  : unwrapped phase,  $\phi_w$  : wrapped phase,  $N$  : fringe order  
 여기서, 결핍침을 위한 차수( $N$ )의 결정은 위상 전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 이용한다. 각 화소 전후의 위상 값을 비교하여 임의로 정한 문턱 값과 비교하여 조건에 만족하면  $N$ 을 증가 또는 감소시키는 방식으로 간섭 차수(fringe order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 의해 감도벡터(sensitive vector)를 고려하여 구한다. 의 기하학적 구성에 따라 감도벡터(sensitive vector)를 고려하여 구하게 된다. Fig. 2-6에서 왼쪽의 wrapped phase의 image와 오른쪽의 unwrapped phase의 image를 비교하였고, Fig. 2-7에서는 이 때의 각 image에 profile line을 그어 phase graph를 나타냈다.

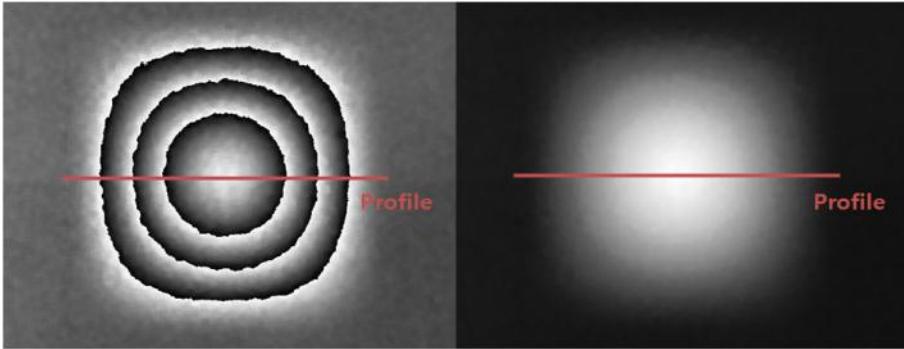


Fig. 2-6 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase

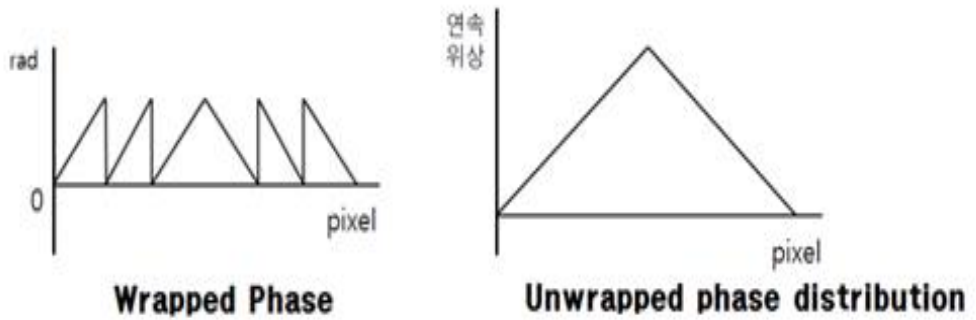


Fig. 2-7 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase graph

## 제 3 절 광학간섭계

스펙클 패턴을 이용하여 대상 체 표면에 발생하는 변형 전후의 스펙클 패턴을 빼서 줄무늬를 만들고 이를 분석하여 위상차 및 변위 량을 구하는 것이 스펙클 패턴 간섭계다. 이 간섭계에 CCD 카메라를 이용하여 정보를 수록하고 컴퓨터를 이용하여 데이터를 획득하여 변형 정보를 얻는 방법을 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)이라 한다. 이 스펙클 패턴 간섭법에는 변형 측정 방법에 따라 면외 변위 측정 간섭계와 면내변위 측정 간섭계로 나눌 수 있다. 이 두 간섭을 일으키는 두 beam을 물체광과 참조광이라 정의하며 이 두 beam 중 참조광이 대상 체 조사 면에서 난반사된 스펙클 간섭인지 조사되지 않은 간섭인지에 따라서 면외 변위 와 면내 변위 간섭계로 결정된다. 본 연구에서는 시험편 배관에 압력을 넣어 그 압력에 따른 내부결함의 길이 및 두께를 측정하기 위해 면외 변형 간섭계를 구성하여 실험을 실시하였다.

### 1. 면외 간섭계

면외 변위 측정을 위한 간섭계는 Fig. 2-8과 같다. 대상 체로 직접 조사되어 subjective speckle을 형성하는 물체광과 objective speckle을 형성하는 참조광으로 나눌 수 있다.

변형 전의 물체의 objective speckle pattern은 참조광과 간섭하여 제2의 스펙클 패턴으로 변형 전 스펙클 패턴을 형성하게 된다. 스펙클 상관 간섭무늬는 변형 전과 후의 스펙클 패턴의 감산처리로부터 형성 되고, 위상이동 기법을 적용하여 변형 전후의 위상을 추출 후 물체의 변형을 측정할 수 있다. 면외 변위 정량해석을 위한 물체광의 광로 추적으로부터 다음 식(2-15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_z = \frac{\lambda}{2\pi(1 + \cos\theta_i)} \Delta\phi \quad (2-15)$$



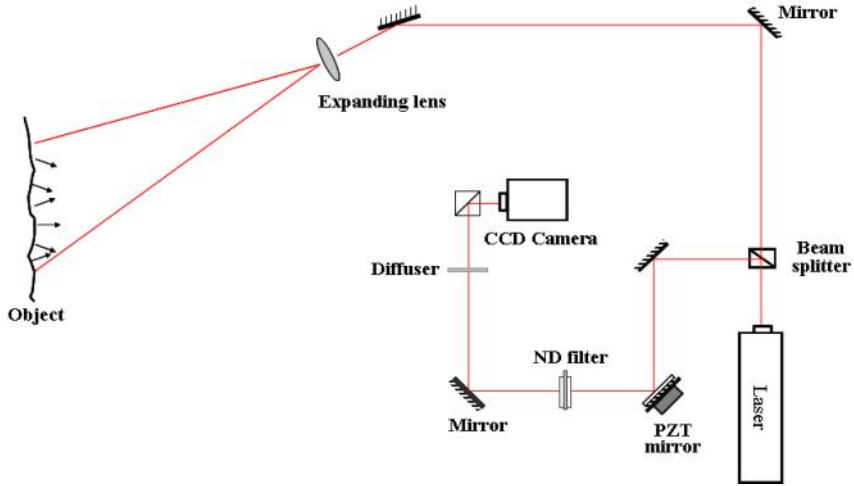


Fig. 2-8 Out-of-plane displacement sensitive interferometer

## 2. 전단 간섭계 (Shearography)

전단간섭계의 개략도는 Fig. 2-9에 나타나 있다. ESPI와 달리 전단간섭계는 레이저의 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상 체에 조사된다. 이때 스펙클의 발생은 ESPI와 동일하지만 난반사된 빛이 광 분할기(BS)에 의해 두 개의 빛으로 나뉘는 뒤, 하나의 빔은 reference mirror에 입사/반사되어 상면에 맺히게 되고 다른 하나는 shearing mirror에서 반사되어 다시 광 분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때 shearing mirror에 임의의 기울기를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면이 reference mirror에서 반사된 파면에 대해 수평으로 Shearing 되어 CCD 카메라 상면에 이미지로 맺히게 된다. 이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 ESPI와 동일하지만, 변형 전·후의 이미지를 감산 처리하는 과정에서 간섭 줄무늬는 ESPI와 달리 대상 체에 발생한 면외 변형 도함수의 결과를 표현하게 된다, 또한 shearing mirror를 전단거울이라 하며 shearing mirror가 기울어진 방향을 전단 방향 즉 기울어진 각도를 전단 량이라 한다. 전단방향과 전단 량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다. 이런 전단간섭계는 대상 체에 레이저 빛이 조사될 때 임의의  $P_1$ 과  $P_2$  사이에  $\phi = \phi(x, y)$  와  $\phi_1 = \phi(x + \delta x, y)$  관계되는 위상차를 가지게 되는데 증첩에 의해 서로 간섭이 이뤄진다. 이때 위상차는 다음 식(2-16)과

같다.

$$\phi = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (2-16)$$

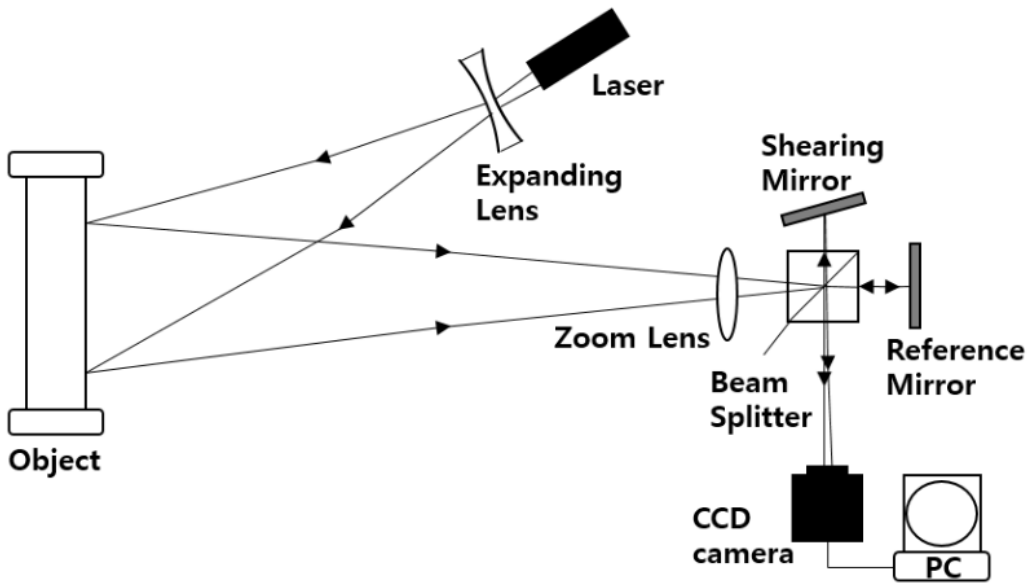


Fig. 2-9 Shearography interferometer

변형에 따른 위상차의 변화( $\Delta\phi$ )는 다음 식(2-18)과 같으며, 이는 면의 변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현하며, 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭 줄무늬는 다음 식(2-17)과 같이 나타 낼 수 있다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며 모든 광 계측의 기본 식으로 사용된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \vec{n}_i - \vec{n}_v \right) \cdot \vec{d} \quad (2-17)$$

이때 식 2-17과 차이점은 식 2-19에 나타낸 것과 같이  $\vec{d}$  와  $\vec{d}'$ 은 임의의 P에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi = (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_1) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot (\vec{d} - \vec{d}') \quad (2-19)$$

레이저 빛이 대상 체에 조사되는 각도와 상면의 관측 각도가 수직하면 식 (2-19)을 다음 식(2-20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-20)$$

$\Delta d$ 는 테일러급수에 의해 식 2-21과 같이 나타낼 수 있으며  $\Delta x$ 는 상면에서 전단 량  $\delta x$ 와 같고 이 값은 매우 작기 때문에 식(2-21)에서 2차 이상의 고차 항을 무시하면 다음 식(2-22)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial d}{\partial x} \right) \delta x \quad (2-22)$$

전단간섭법의 이론식을 표현할 때는 전단 량이 충분히 작다는 조건을 이용하여 미분으로 나타낸다.

$$f'(x_1) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-23)$$

전단간섭계를 수치미분을 이용하여 나타내고 전단간섭계에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상 체에 발생하는 변형을 정량적으로 측정하면 실제 전단간섭계를 이용한 측정결과는 식(2-24)과 같이 대상 체에 발생하는 변형을 전단시켜 나타내며, 변형  $\Delta d$  는 다음 식(2-25)과 같이 나타낸다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-24)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1i} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-25)$$

식 2-24와 식 2-25의 기호를 변형  $-f$ , 대응화소  $-x_i$ , 전단 량 화소  $-h$ 로 바꾸어 사용하면 식 2-26과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 다시  $f'$ 으로 정리하면 식 2-27과 같이 나타낼 수 있다.

$$f'(x_i)h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (2-26)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i+h) - f(x_i)}{h} \quad (2-27)$$

식 2-27을 식 2-26에 대입하면 식 2-28과 같이 나타낼 수 있으며 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f' h \quad (2-28)$$

전단간섭계를 이용하여 대상 체에 발생하는 면외 변형을 측정할 수 있다.

## 제 3 장 실험장치 및 시험편

### 제 1 절 실험장치

#### 1. 전단간접계 시스템

전단간접계 시스템은 독일 DANTEC DYNAMICS 사의 상용 Shearography 시스템(Q-800HR model)을 사용하였으며, 구성은 Fig. 3-1과 같이 Shearography 센서, 센서 내부의 Diode laser, Controller, PC로 구성되어 있다. 상용 프로그램인 ISTRA 시스템을 이용하여 장치의 제어, 결별침, 필터링을 수행한다. 레이저는 Diode laser(출력 : 50 mw, 파장 : 780nm)를 이용하였으며, 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 Diode를 이용해 확산된 레이저 광을 직접적으로 대상 체에 조사된다. 전단 량과 전단반향은 센서 내부의 모터를 ISTRA 4D 프로그램을 이용하여 전단 각도와 화소를 설정하여 조절할 수 있다. system은 PZT에 의해 위상이동이 되며 4단계 위상이동기법을 적용하여 위상지도를 얻게 된다. 최종 위상지도는 상용 프로그램을 이용하여 해석함으로써 상대 변위 량을 얻을 수 있다. Table 3-1에 Shearography 시스템의 사양을 나타내고 있다.

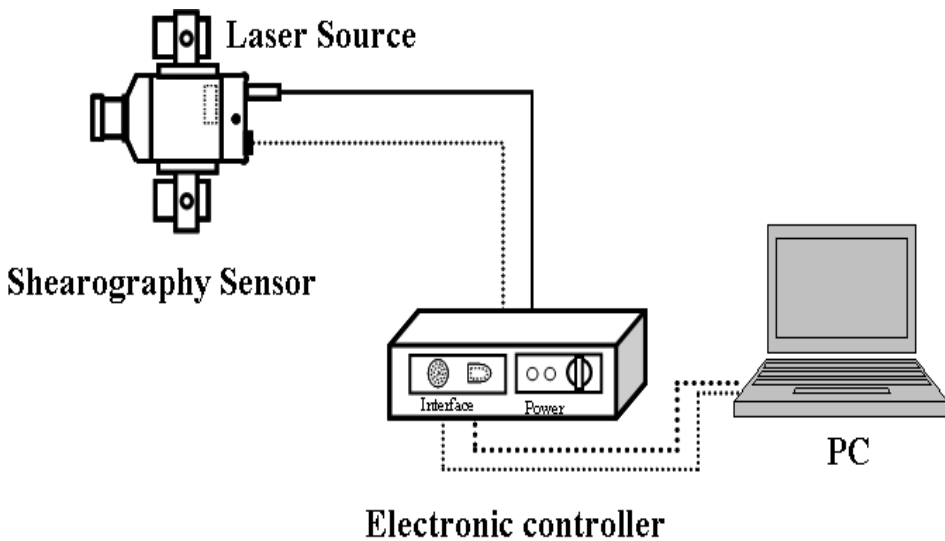


Fig. 3-1 Schematic of shearography system

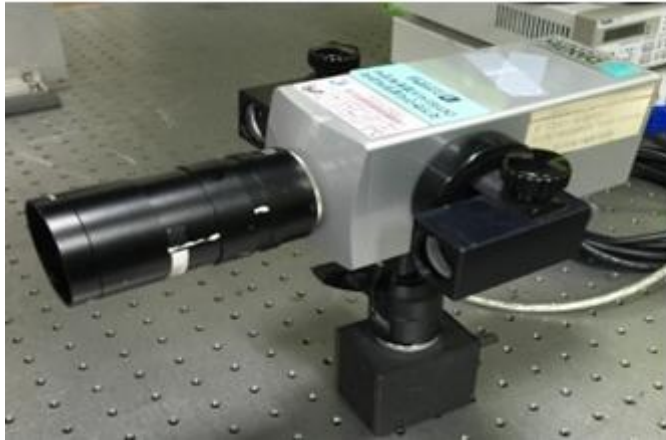


Fig. 3-2 Sensor of shearography system

Table 3-1 Specification of Shearography system

Description	Technical data
CCD-resolution	1392 × 1040 pixel
Objective Connection	C-Mount 1/2" image field
Operating voltage	12V DC
Shear angle	0-3°
Shear direction	0-90°
Measuring resolution	according to illumination arm, distance and wave length: 0.03 μm/shear distance
Measuring area	Up to 1.2 x 0.8 m2 (with external laser)
Laser (Built-in)	Diode 50 mW, 780 nm
Sensor head dimension	W×H×D = 70×70×160 mm3

## 2. 공압 제어 장치

PVC 재질인 배관 내부에 결함의 변형을 주기 위해 공압 제어 장치를 개발함으로써 직관 및 곡관의 깊이 및 두께에 대한 내부결함 변형을 측정한다.



Fig. 3-3 Pneumatic control device

## 3. 정밀 변형 발생 장치

20 $\mu$ m급 PZT를 이용하여 정밀 변형을 발생시키고, 그때 4-Step 위상이동이 일어나며 위상이동에 따라 변형되는 레이저의 파장을 측정함으로써 정밀한 변형량을 측정할 수 있는 장치를 제작한다.

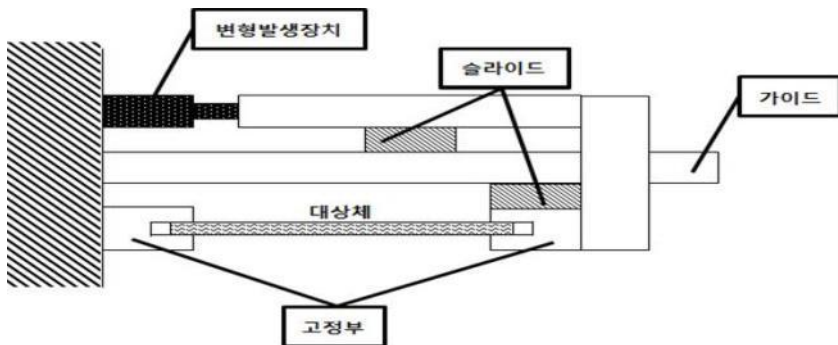


Fig. 3-4 Schematic diagram of the precision deformation device



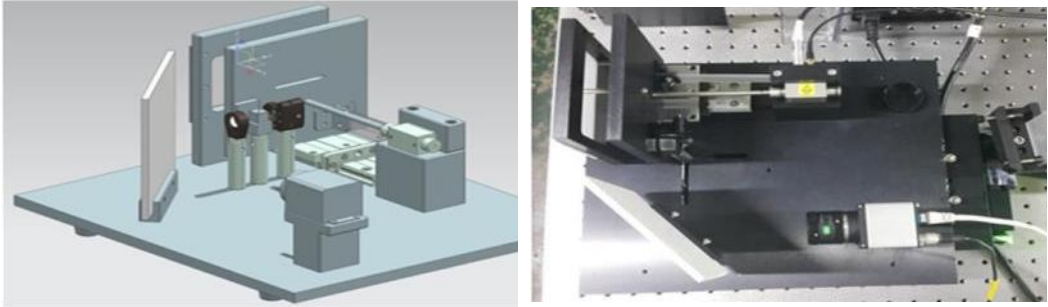


Fig. 3-5 Precision deformation generator

## 제 2 절 시험편

### 1. 직관 압력배관

PVC 재질의 배관 내부에 결함을 가공하여 아래 도면과 같은 직관 압력배관을 제작하였다.

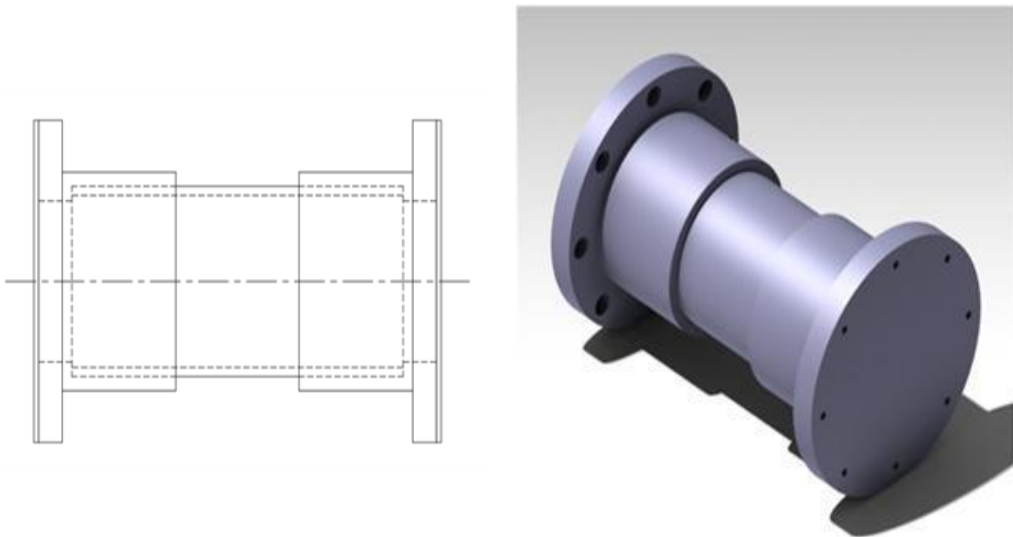


Fig. 3-6 2D Design drawing & 3D Design drawing



Fig. 3-7 Intuitive pressure piping

Table 3-2 Defect Specification

(단위 : mm)

	두 께	폭	길 이	두 께	폭	길 이	두 께	폭	길 이	두 께	폭	길 이
직 관	1	5	20	2	5	20	3	5	20	4	5	20
			40			40			40			
			60			60			60			
			80			80			80			
		10	20		10	20		10	20		10	20
			40			40			40			
			60			60			60			
			80			80			80			
		15	20		15	20		15	20		15	20
			40			40			40			
			60			60			60			
			80			80			80			
		20	20		20	20		20	20		20	20
			40			40			40			
			60			60			60			
			80			80			80			

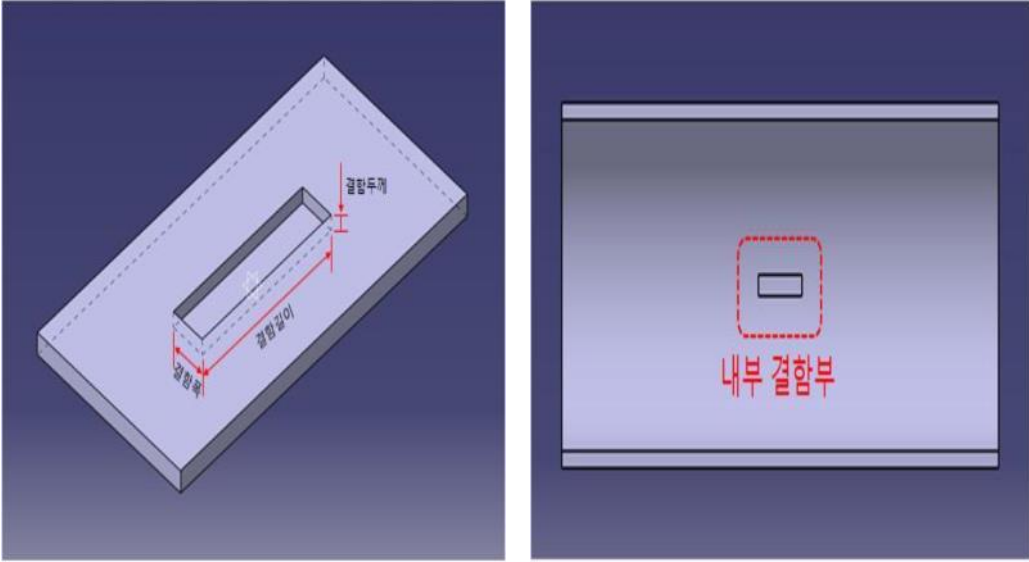


Fig. 3-8 Defect Type

## 2. 곡관 압력배관

PVC 재질의 배관 내부에 결함을 가공하여 아래 도면과 같은 곡관 압력배관을 제작하였다.

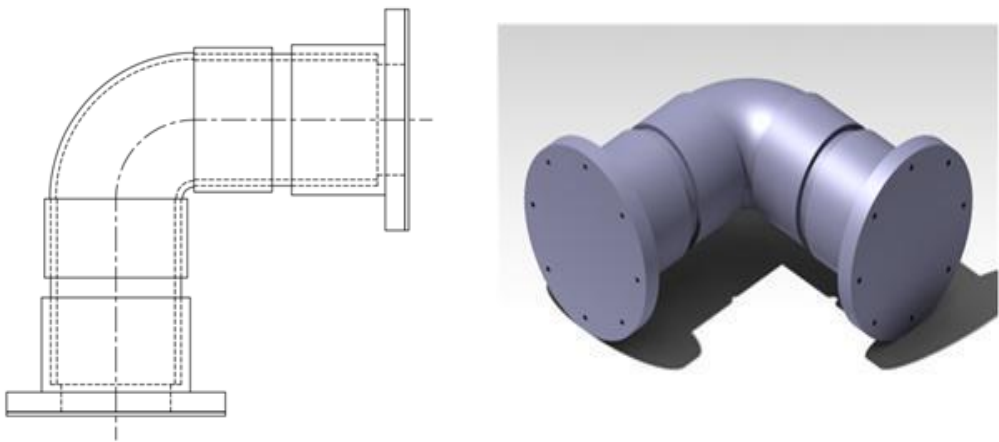


Fig. 3-9 2D Design drawing & 3D Design drawing



Fig. 3-10 Bent pressure piping

Table 3-3 Defect Specification

(단위 : mm)

	두께	폭	길이	두께	폭	길이	두께	폭	길이	두께	폭	길이		
직관	1	5	20	2	5	20	3	5	20	4	5	20		
			40			40			40					
			60			60			60					
			80			80			80					
		10	20		10	20		10	20		10	20	10	20
			40			40			40					
			60			60			60					
			80			80			80					
		15	20		15	20		15	20		15	20	15	20
			40			40			40					
			60			60			60					
			80			80			80					
	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20				
		40		40		40								
		60		60		60								
		80		80		80								

## 제 4 장 실험방법 및 실험결과

### 제 1 절 간섭계 구성

#### 1. 간섭계

내부 결함 측정 장치 개발을 위한 레이저 변위 변형의 측정 간섭계를 구성한다. 구성은 Laser, Beamsplitter, Shutter, Lens, Mirror, Shearing Mirror, PZT Mirror, Zoom Lens, CCD Camera, Space 등 광학 부품을 이용하고, 간섭계 내부의 광 경로에 셔터를 장착하여 측정 방식에 따라 변위 변형 측정 시에는 셔터 1 또는 셔터 2를 차단시킨다.

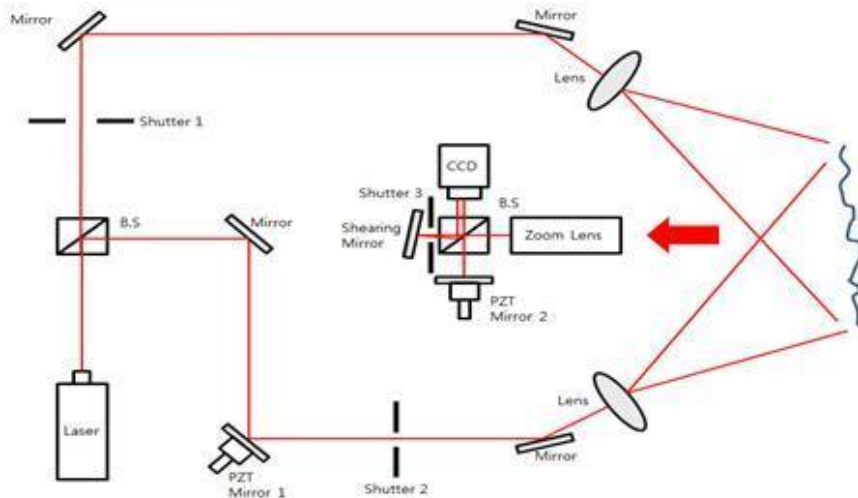


Fig. 4-1 Schematic diagram of deformation measurement interferometer

#### 2. 위상이동 제어 프로그램

4분법 위상이동 기법에서 5분법 위상이동 기법으로 향상시키기 위해 PZT의 세밀한 제어를 통해 획득되는 이미지 수를 늘려 위상지도 데이터의 정확도 향상 및 정밀도를 향상 시킨다.

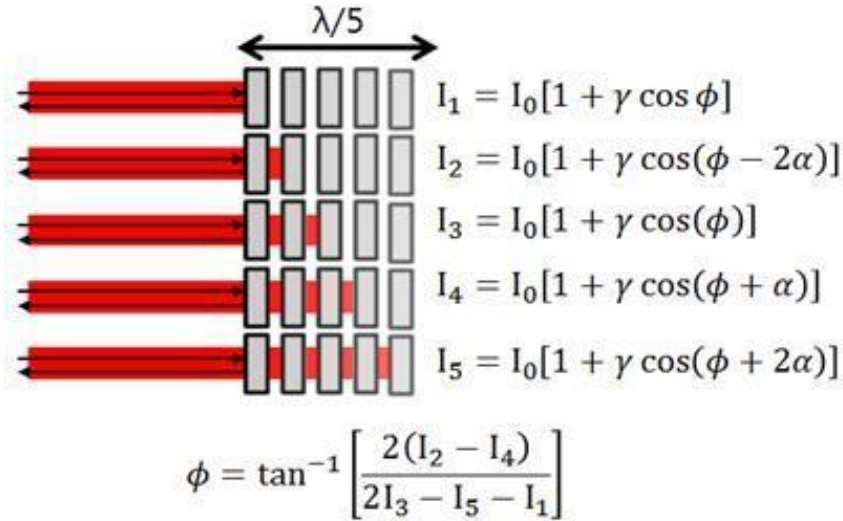


Fig. 4-2 5-step phase map

### 3. Filtering 및 Unwrapping 프로그램

위상지도 이미지의 외부요인에 의한 노이즈를 제거하기 위한 Filtering 프로그램 개발로 위상단면의 위상 값 분포가 Gray Level에 따라 크면 감산하고 작으면 가산하는 계산 방법을 수행한다. 이중 연산 시 사용하는 메모리 용량이 작고 연산 시간이 짧으면 빠른 연산이 가능하며 Wrapped data의 변화가 적은 Goldstein unwrapping method를 사용한 프로그램을 개발하여 적용 한다.



Fig. 4-3 Goldstein unwrapping

## 4. 간섭계 제어 및 이미지 처리 프로그램

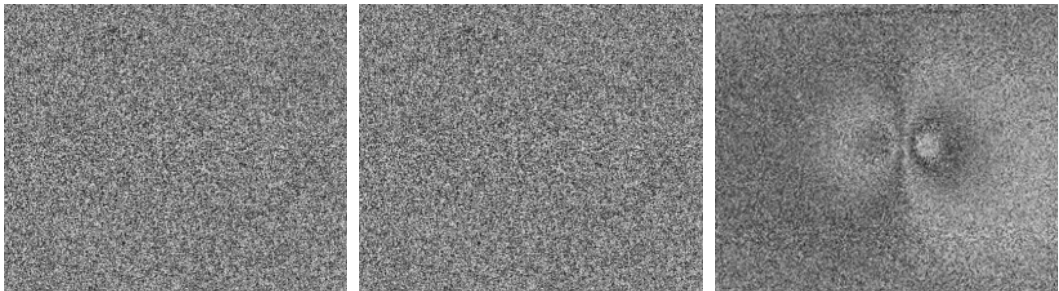
### (1) 5-Step 위상이동 개발

이미지를 획득하기 위해 4-Step 위상이동에서 5-Step 위상 이동으로 개선함에 따라 더욱 정밀하고 정확한 위상이동 변위정보를 획득한다. 정확한 위상정보로 스펙클 패턴을 저장할 수 있으며, 개선된 수식으로 표현한다.

$$\begin{array}{l}
 I_1(x,y) = I_0(x,y) + I_M(x,y)\cos[\varphi(x,y)] \\
 I_2(x,y) = I_0(x,y) - I_M(x,y)\sin[\varphi(x,y)] \\
 I_3(x,y) = I_0(x,y) - I_M(x,y)\cos[\varphi(x,y)] \\
 I_4(x,y) = I_0(x,y) + I_M(x,y)\sin[\varphi(x,y)]
 \end{array}
 \rightarrow
 \begin{array}{l}
 I_0 = \gamma\cos(\phi - \pi) \\
 I_1 = \gamma\cos(\phi - \frac{\pi}{2}) \\
 I_2 = \gamma\cos\phi \\
 I_3 = \gamma\cos(\phi + \frac{\pi}{2}) \\
 I_4 = \gamma\cos(\phi + \pi)
 \end{array}$$

[4-step 스펙클 패턴]
[5-step 스펙클 패턴]

5장의 위상 이미지를 순차적으로 계산하고, 이미지를 통해 Phase map을 획득하고 위상정보를 저장한다. 위상 정보는 다섯 단계의 기준 이미지를 더하고 빼는 과정을 통해 대상물의 변형된 위상 이미지를 획득한다.



(a) Before

(b) After

(c) Phase map

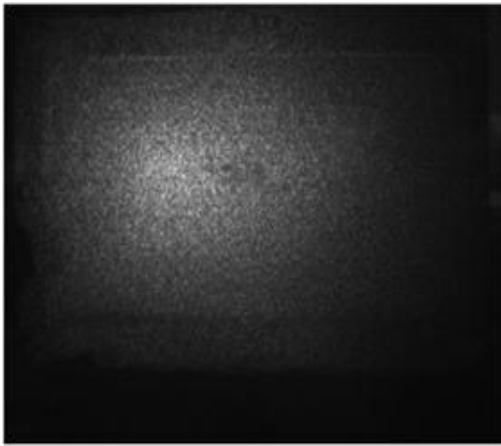
Fig. 4-4 Obtained phase map



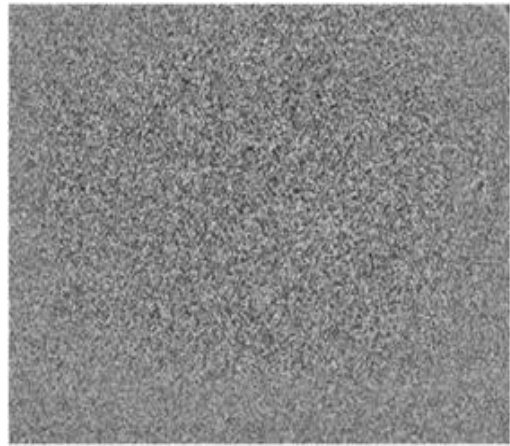
(2) 이미지 처리 프로그램

실시간으로 이미지를 획득하고 이미지의 픽셀 Data를 저장한다. Phase map 분석, Unwrapping 이미지 처리 과정 및 변형 결과 분석 프로그램을 이용한다.

(3) 간섭계를 이용한 변형 측정 방법

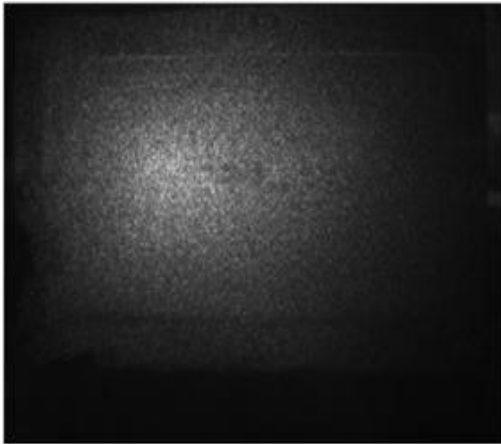


(a) 변형 전 이미지

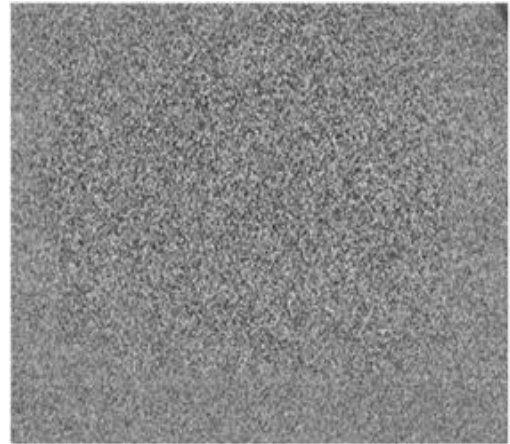


(b) 변형 전 Phase map

Fig. 4-5 Image before deformation



(a) 변형 후 이미지



(b) 변형 후 Phase map

Fig. 4-6 Image after deformation



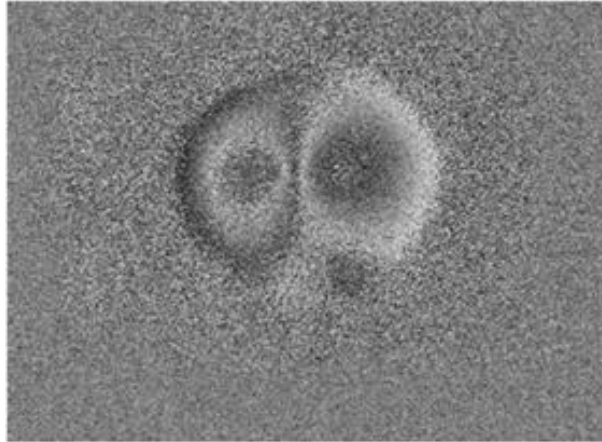
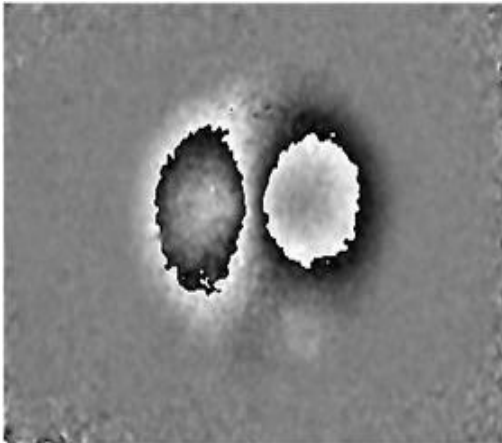
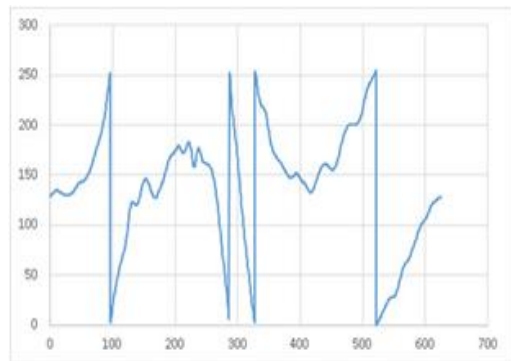


Fig. 4-7 Phase map

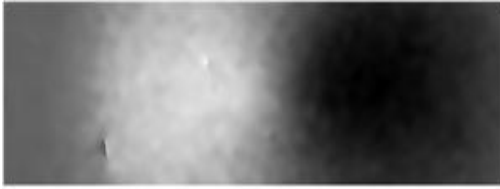


(a) 필터링 이미지

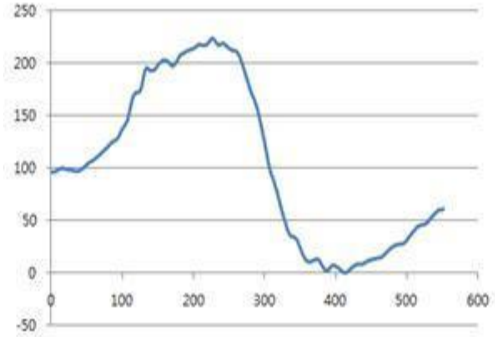


(b) 필터링 이미지 그래프

Fig. 4-8 Image filtering



(a) Goldstein



(b) Goldstein 그래프

Fig. 4-9 Unwrapping

## 제 2 절 간섭계 측정 실험

정밀변형장치에 부착된 압전소자(PZT Actuator)를 이용하여 변형을 수 나노미터씩 발생시켜 파장이 확인된 마이켈슨 간섭계로 변형 값을 측정한다. 이때 발생된 변형을 개발한 측정 장치로 측정하여 분해능을 확인한다.

### 1. 측정 방법

측정 장치와 측정 장치의 전면에 정밀 변형 발생 장치를 설치하고, PZT를 이용하여 변형을 부여하며, 마이켈슨 간섭계로 변형 값을 측정한다. 개발된 측정 프로그램을 통해 측정 결과를 확인하고, 전기 마이크로미터를 이용하여 PZT의 이송량을 측정 후 결과 값과 비교한다.

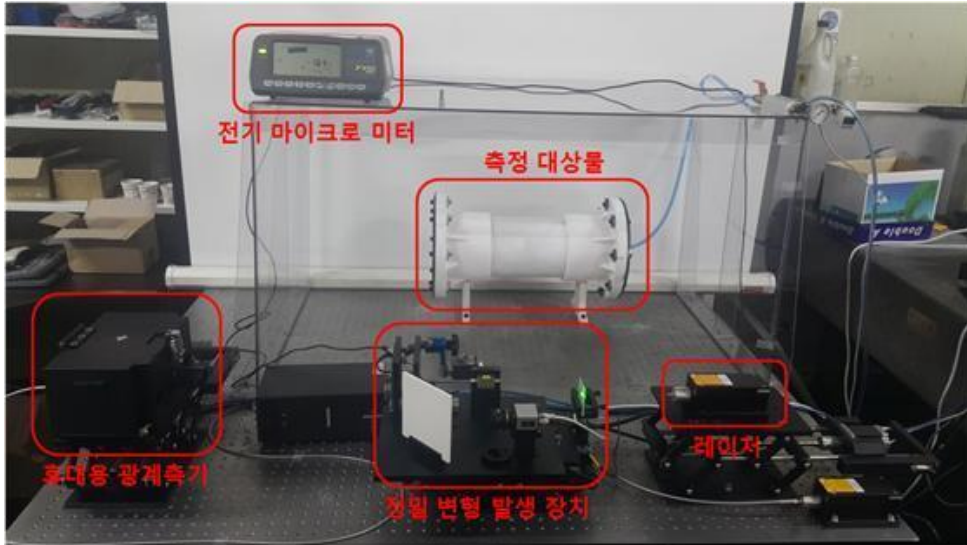
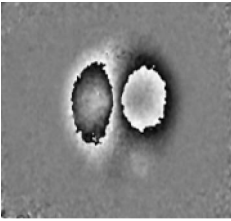
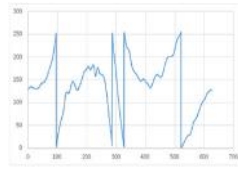
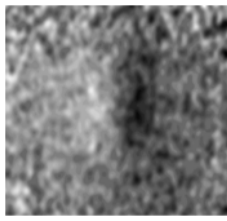
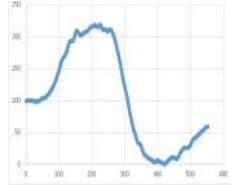
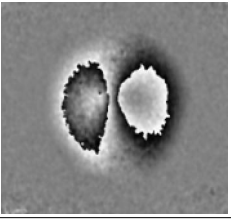
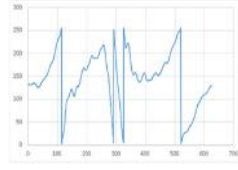
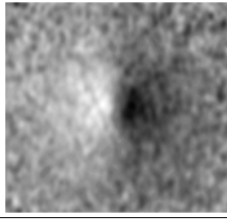
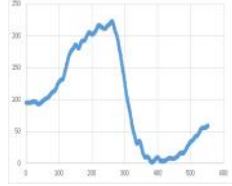
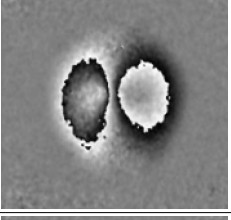
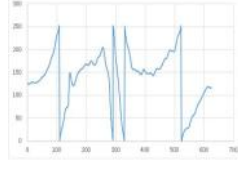
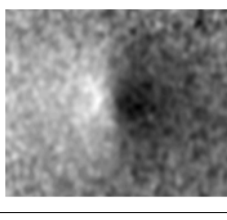
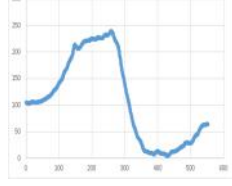
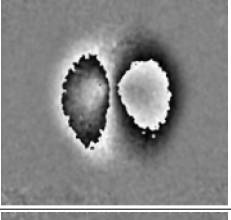
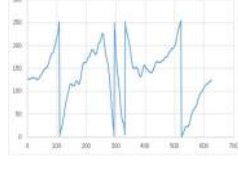
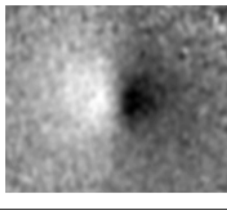
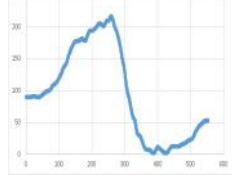
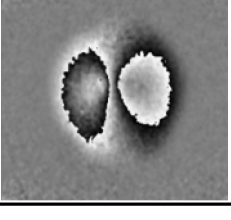
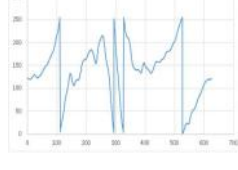
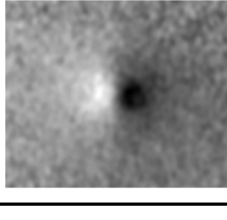
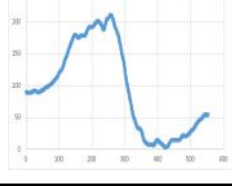


Fig. 4-10 Experimental configuration of laser interferometer precision strain

## 2. 면외 변형 측정

정밀변형장치에 부착된 대상 체의 변형을 동일한 조건으로 반복 5회 측정한다. 개발된 장치를 이용한 변형 량 측정 결과는 5회 평균 0.996이고, 전기 마이크로미터를 이용한 PZT의 이송 량은 5회 평균 1.006으로 두 결과의 오차는 0.01이다.

구분	전기마이크로미터 [um]			간접계측정결과[um]			오차
	변형전	변형후	변형량	최대값	최소값	변형량	
1st	0.09	1.09	1	0.981	-0.015	0.996	0.004
2nd	-0.02	0.99	1.01	0.983	-0.013	0.996	0.014
3rd	0.01	1.01	1	0.981	-0.014	0.995	0.005
4th	0.06	1.07	1.01	0.982	-0.012	0.994	0.016
5th	0.09	1.1	1.01	0.984	-0.015	0.999	0.011
평균	0.046	1.052	1.006	0.9822	-0.0138	0.996	0.01

	Phase map	Phase map Profile	Goldstein	Goldstein Profile
1s t				
2n d				
3r d				
4t h				
5t h				

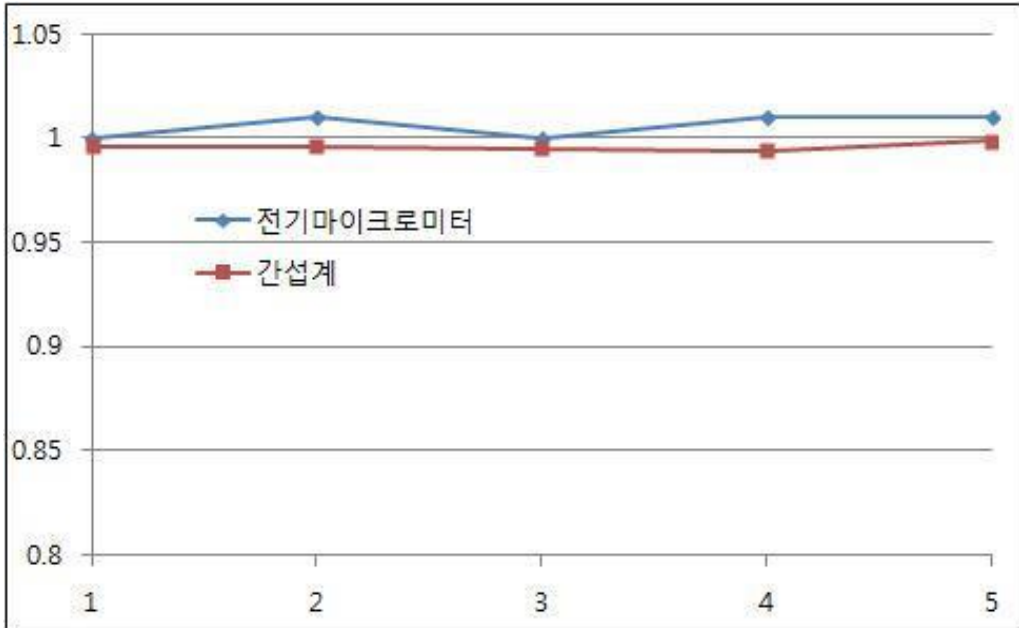
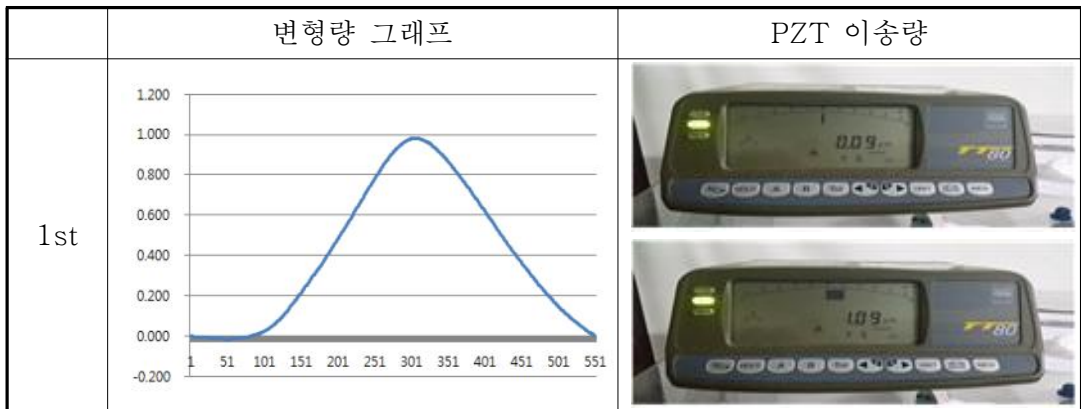


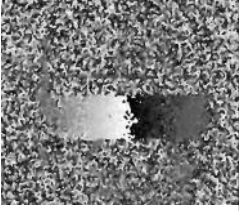
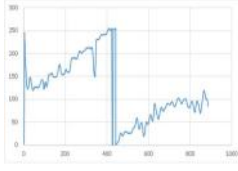

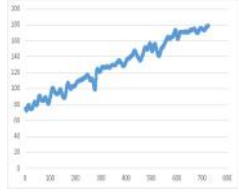
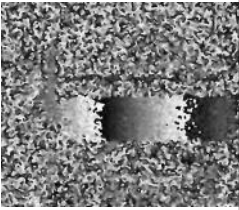
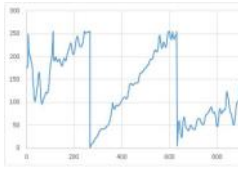

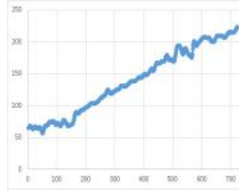
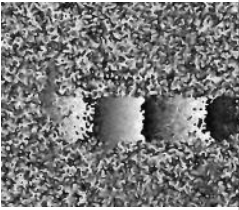
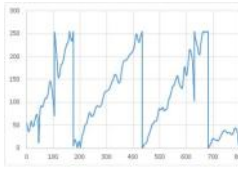

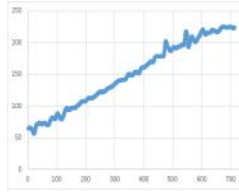
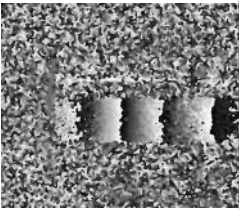
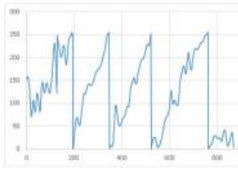

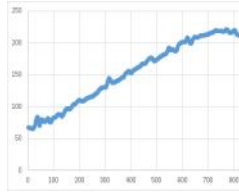
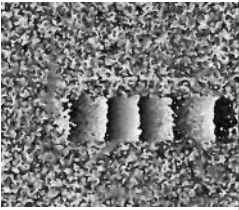
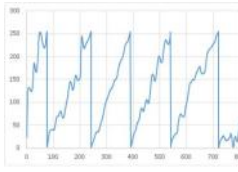

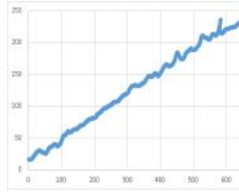
Fig. 4-11 Comparison of deformation measurement results of precision deformation generator



2nd		
3rd		
4th		
5th		



### 3. 면외 변형 측정 결과

	Phase map	Phase map Profile	Goldstein	Goldstein Profile
0.5 $\mu\text{m}$				
1 $\mu\text{m}$				
1.5 $\mu\text{m}$				
2 $\mu\text{m}$				
2.5 $\mu\text{m}$				

### 제 3 절 직관 및 곡관 압력배관 측정 실험

#### 1. 직관 압력배관 해석 결과

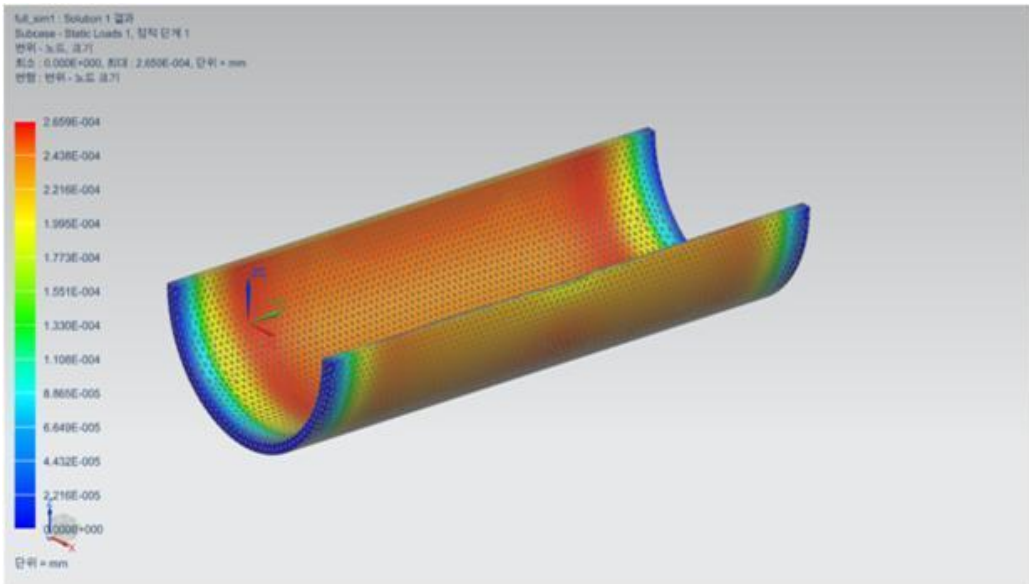


Fig. 4-12 Straight sense of shape analysis results

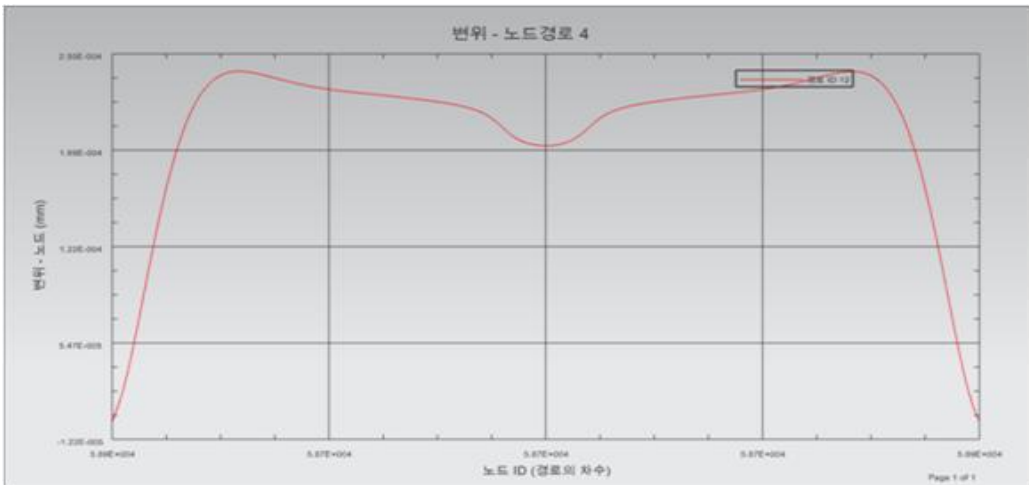


Fig. 4-13 Graph of intuitive deformation analysis result



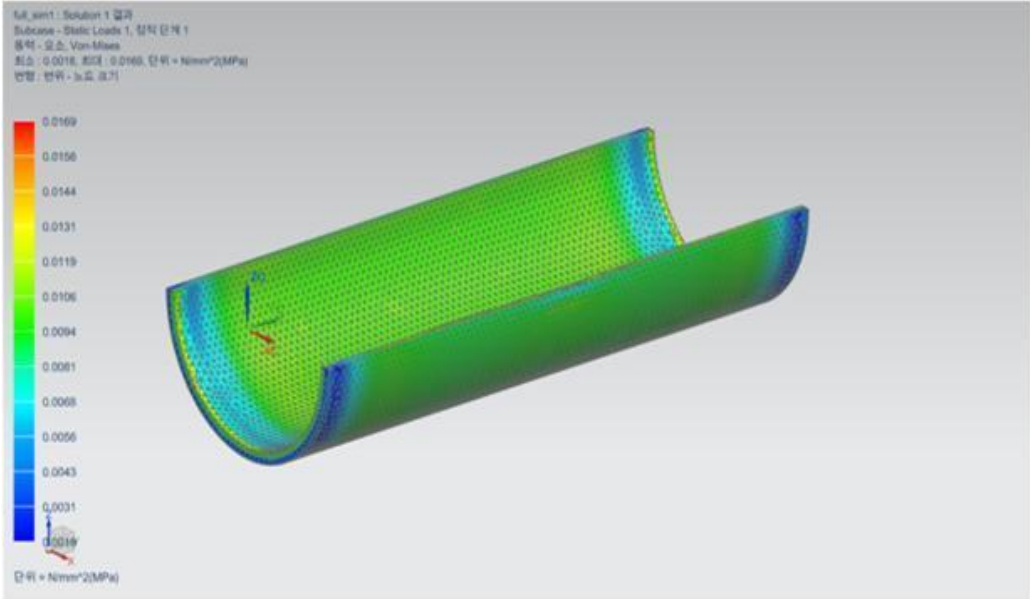


Fig. 4-14 Straight sense of force analysis results

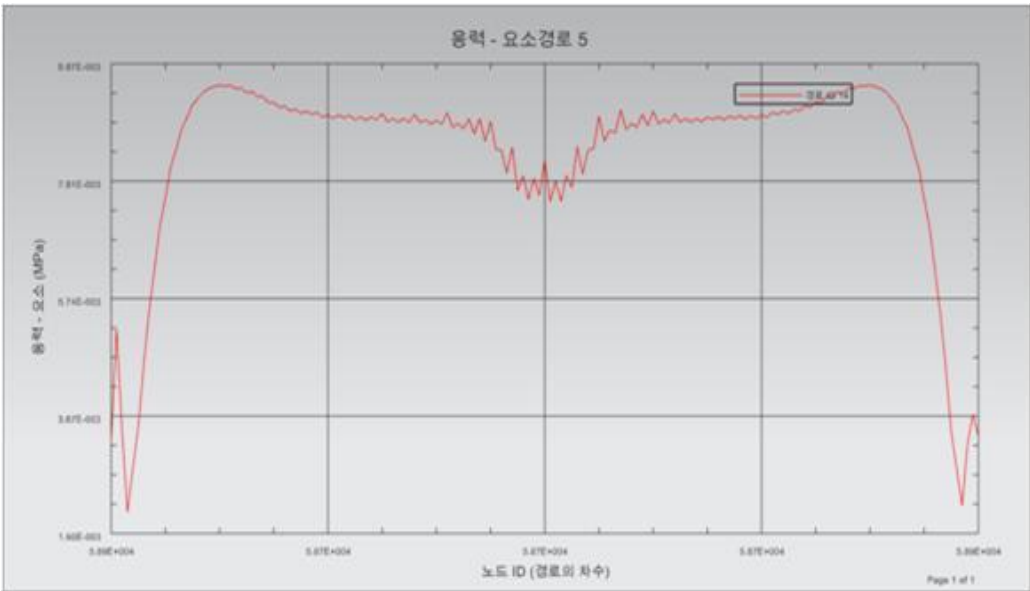


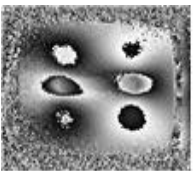
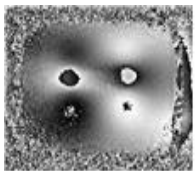
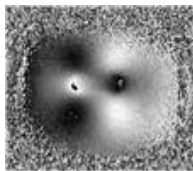
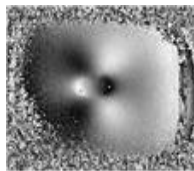
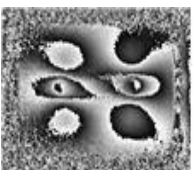
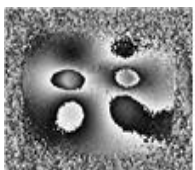
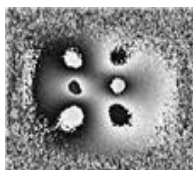
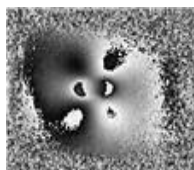

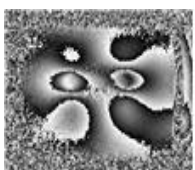


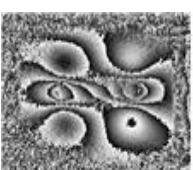

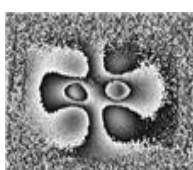

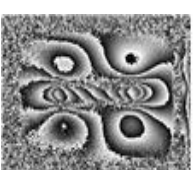


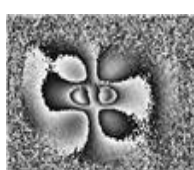
Fig. 4-15 Graph of intuitive stress analysis result

## 2. 직관 압력배관 내부 결함 측정

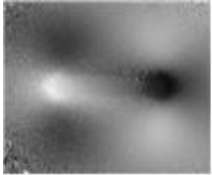
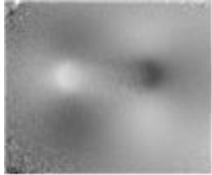
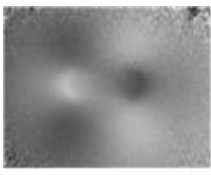
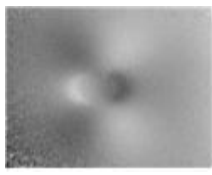
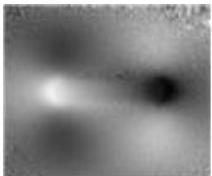
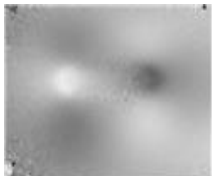
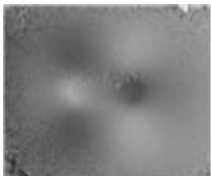

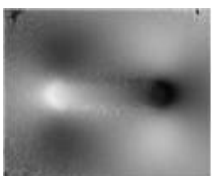

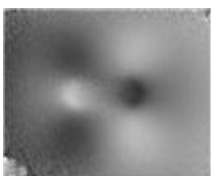

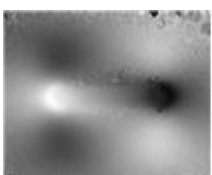
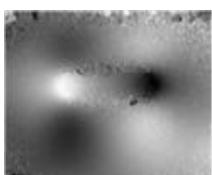
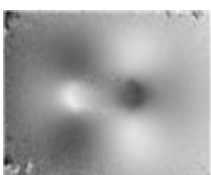
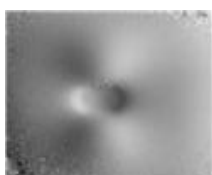
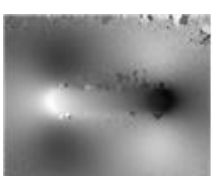
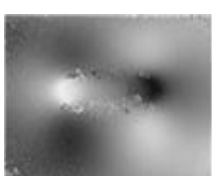
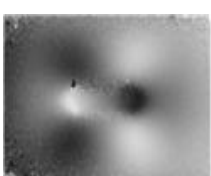
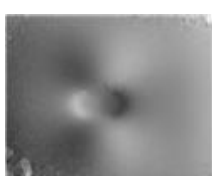
### (1) 결함 길이별 측정 결과

- 결함 두께 : 3mm
- 결함 폭 : 15mm
- 결함 길이 : 80mm, 60mm, 40mm, 20mm

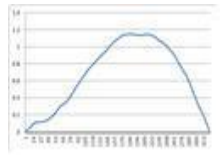
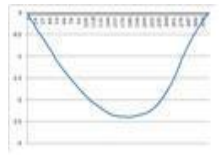
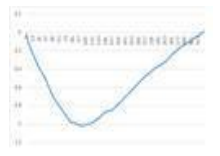
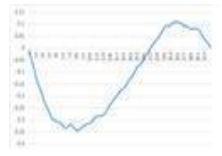
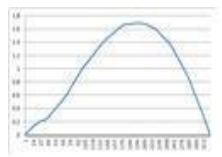
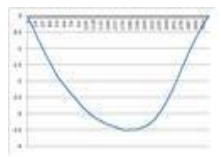
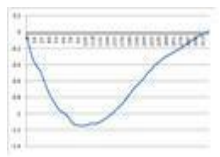
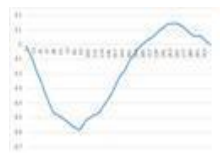
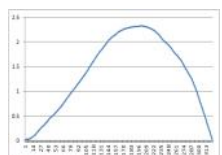
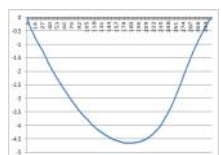
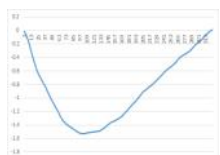
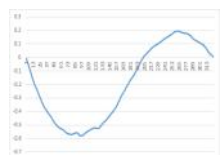
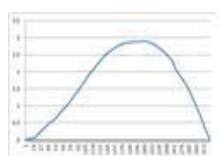
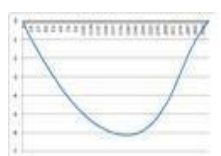
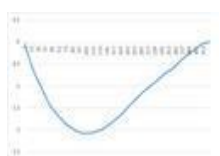
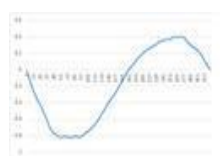
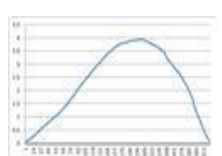
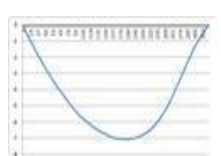
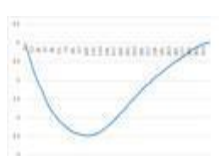
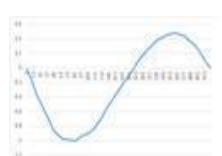
#### ◆Phase map

압력 \ 길이	80mm	60mm	40mm	20mm
0.02MPa				
0.03MPa				
0.04MPa				
0.05MPa				
0.06MPa				

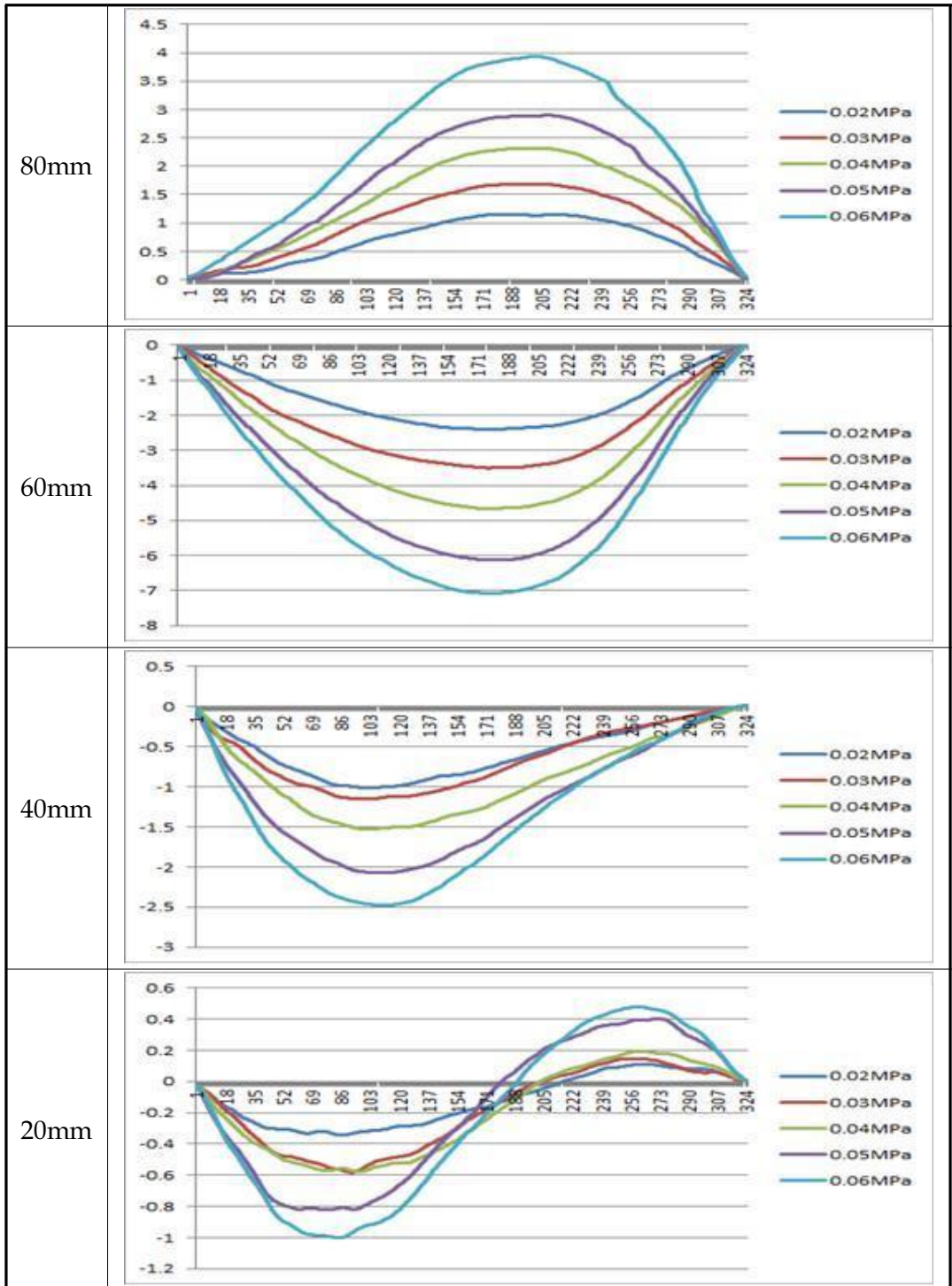
◆Phase map unwrapping image

길이 압력	80mm	60mm	40mm	20mm
0.02MPa				
0.03MPa				
0.04MPa				
0.05MPa				
0.06MPa				

◆ Profile of unwrapping image

길이 압력	80mm	60mm	40mm	20mm
0.02MPa				
0.03MPa				
0.04MPa				
0.05MPa				
0.06MPa				

◆ 길이별 압력 변화에 따른 측정 결과 비교

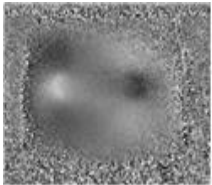
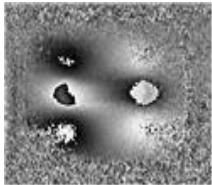
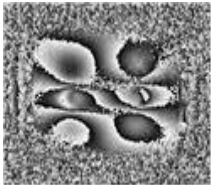
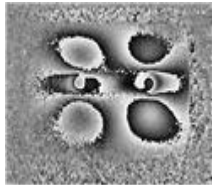
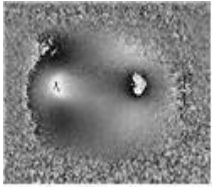
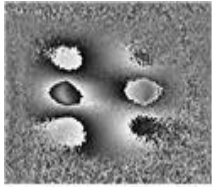
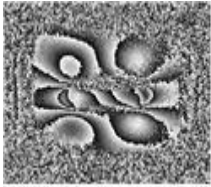

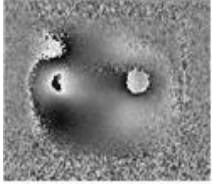
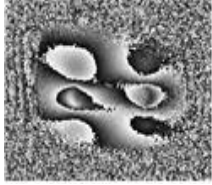
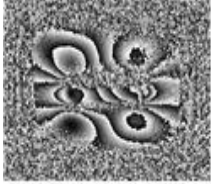
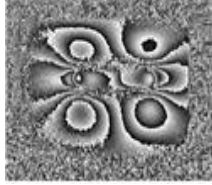

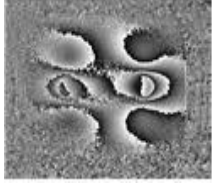










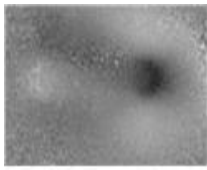
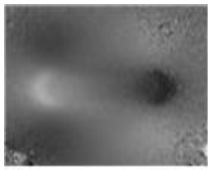
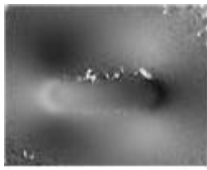
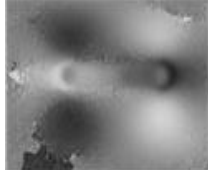
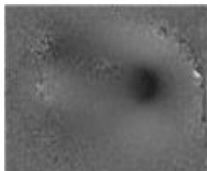
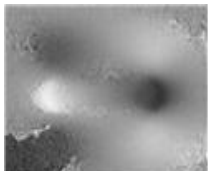
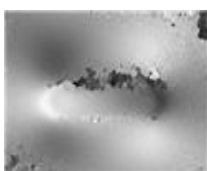
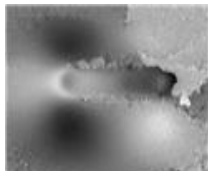
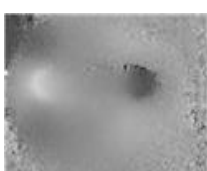

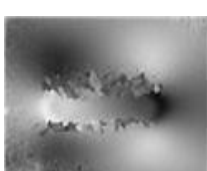
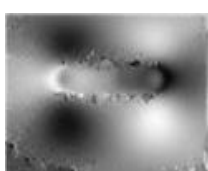
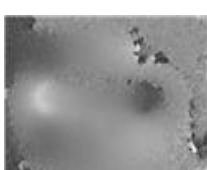
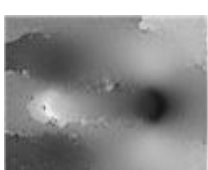
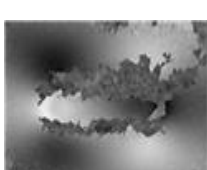
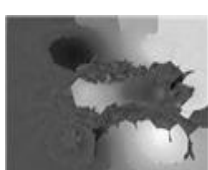
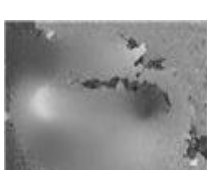
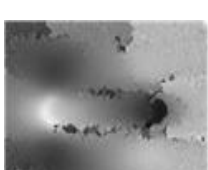
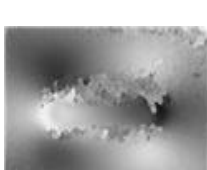
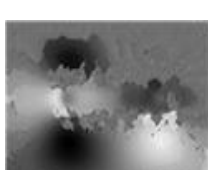
(2) 결함 두께별 측정 결과

- 결함 길이 : 80mm
- 결함 폭 : 20mm
- 결함 두께 : 1mm, 2mm, 3mm, 4mm

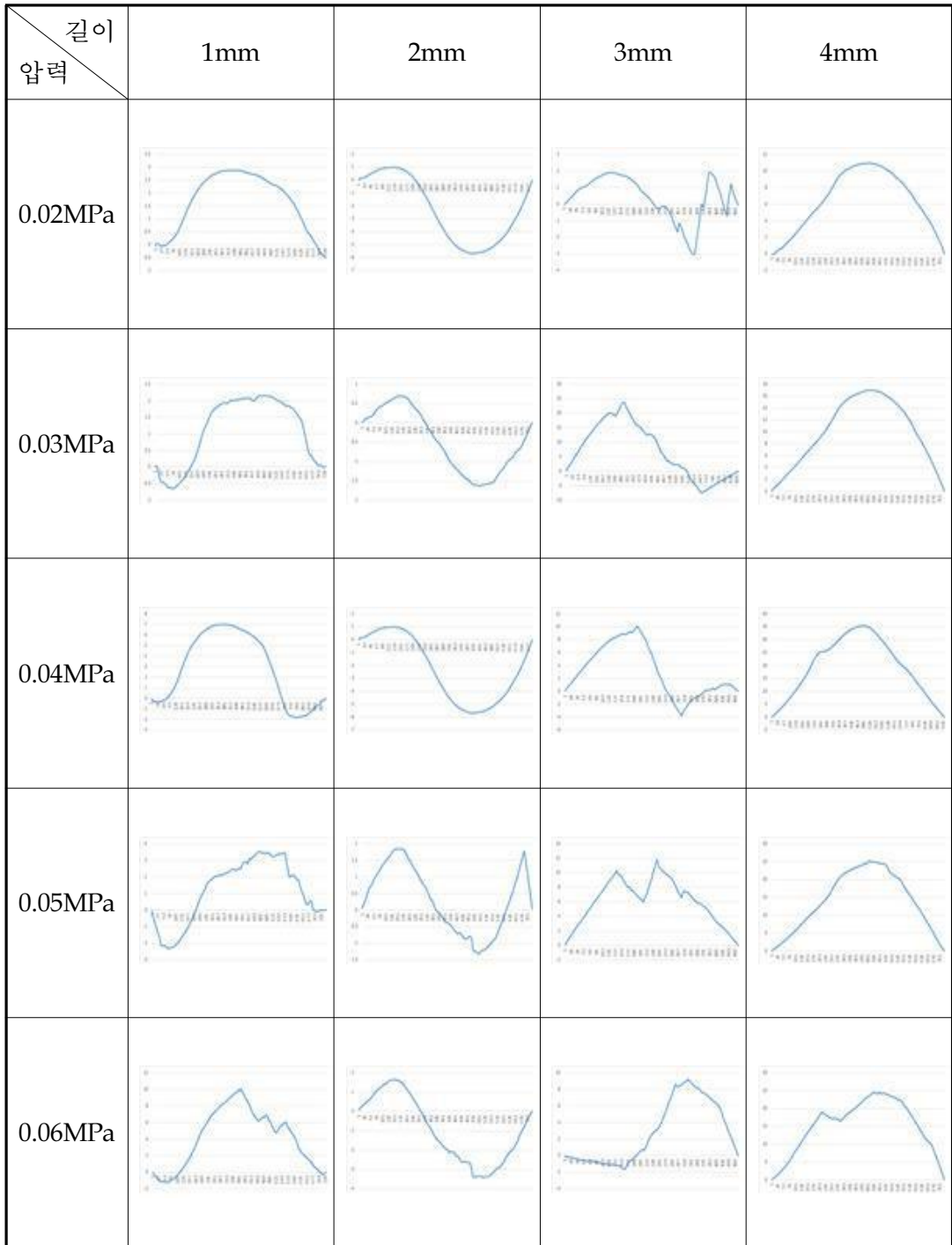
◆Phase map

길이 압력	1mm	2mm	3mm	4mm
0.02MPa				
0.03MPa				
0.04MPa				
0.05MPa				
0.06MPa				

◆Phase map unwrapping image

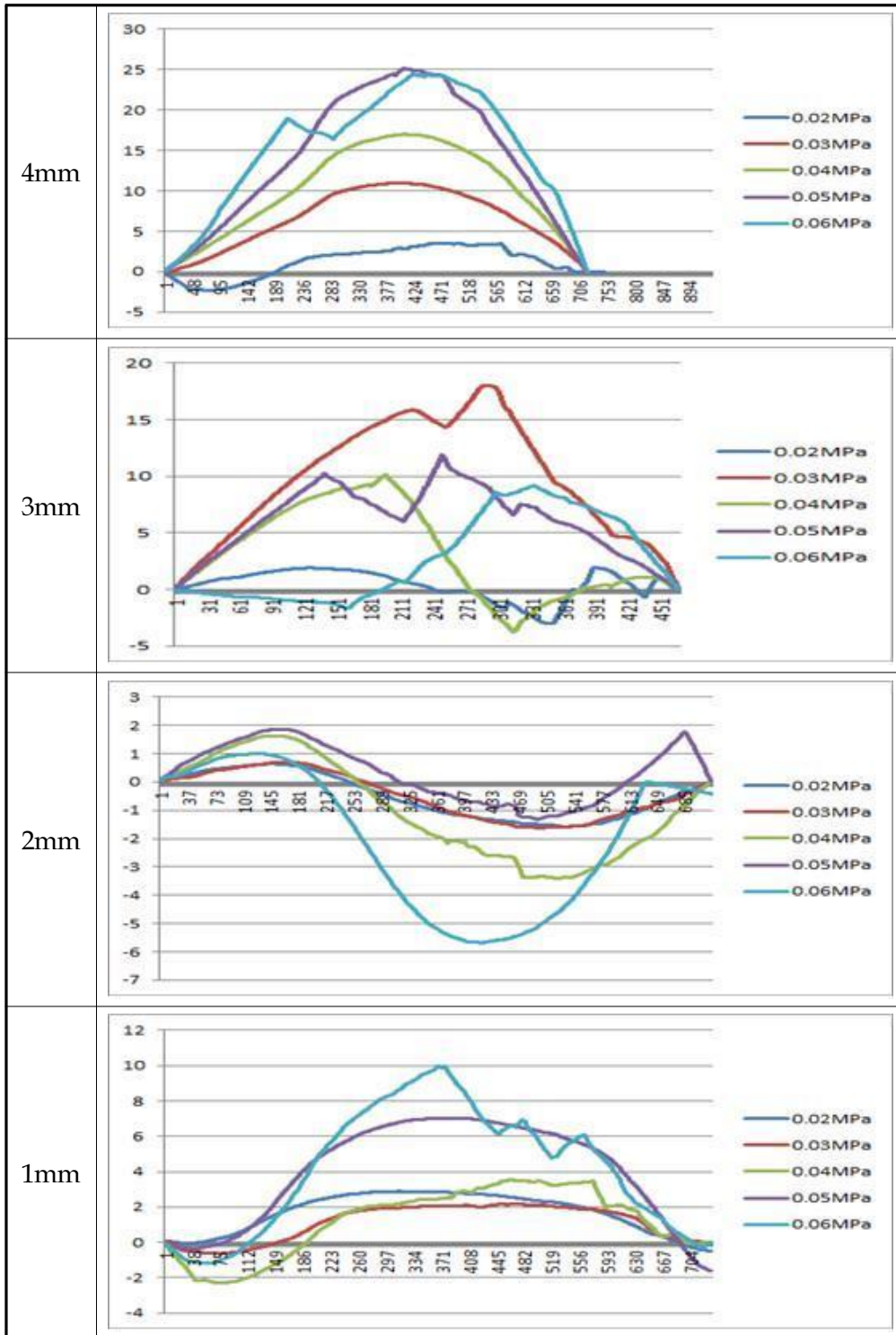
길이 압력	1mm	2mm	3mm	4mm
0.02MPa				
0.03MPa				
0.04MPa				
0.05MPa				
0.06MPa				

◆ Profile of unwrapping image





◆ 두께별 압력 변화에 따른 측정 결과 비교



### 3. 곡관 압력배관 해석 결과

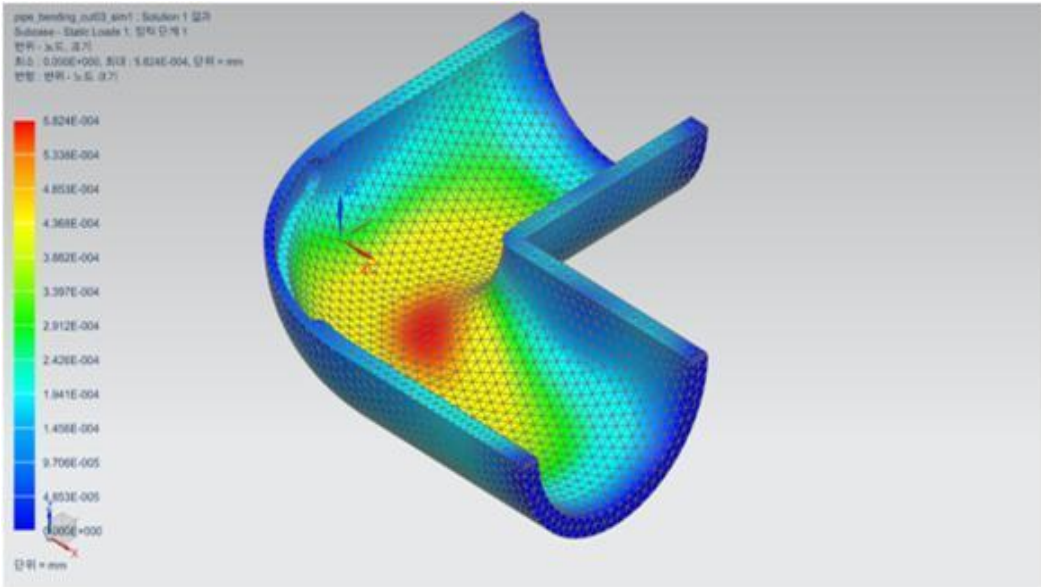


Fig. 4-16 Bent sense of shape analysis results

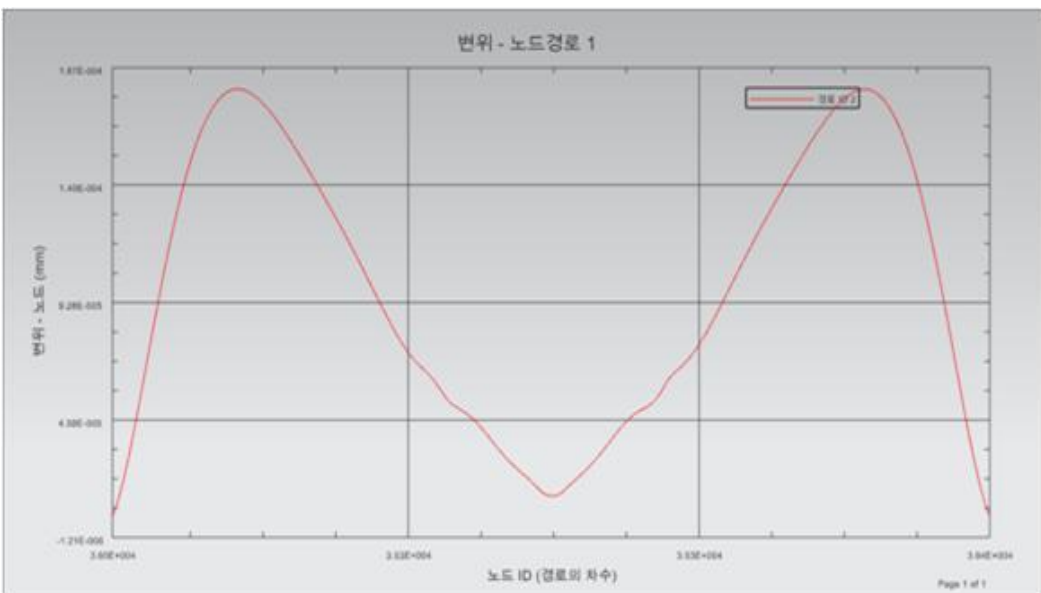


Fig. 4-17 Graph of bent deformation analysis result

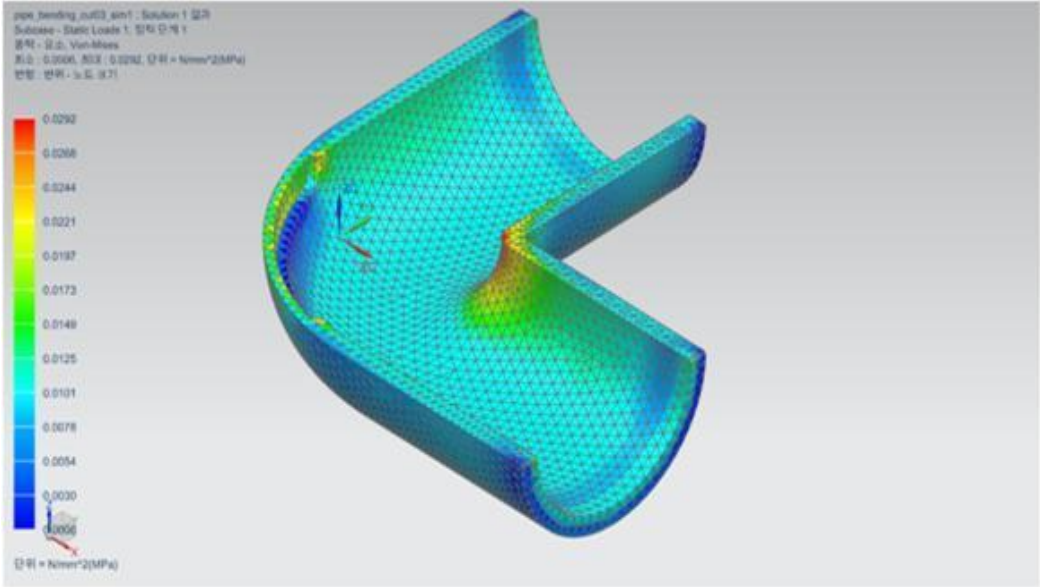


Fig. 4-18 Bent sense of force analysis results

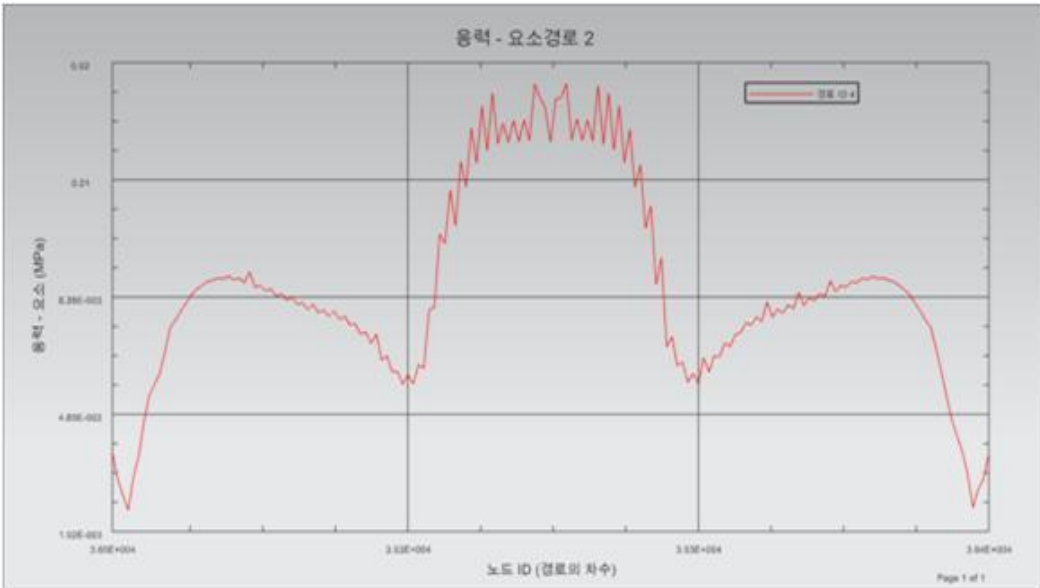




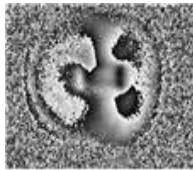

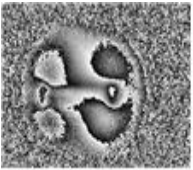


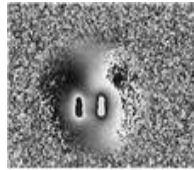

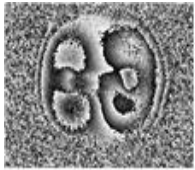
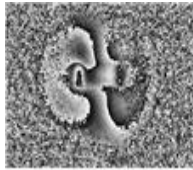

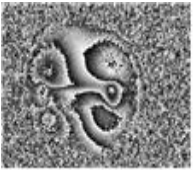
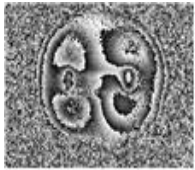
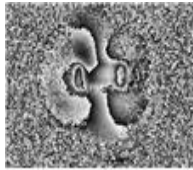

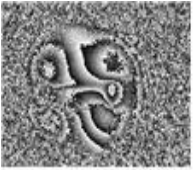
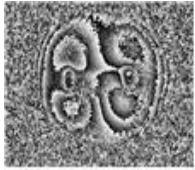
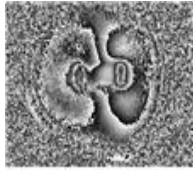
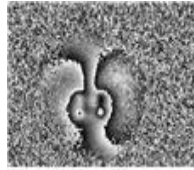
Fig. 4-19 Graph of bent stress analysis result

#### 4. 곡관 압력배관 내부 결함 측정

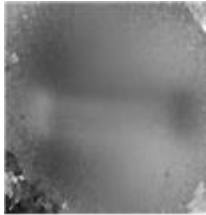
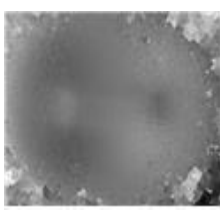

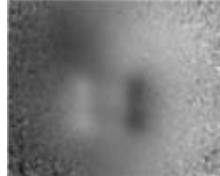
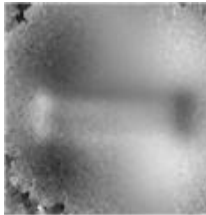
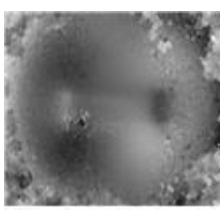
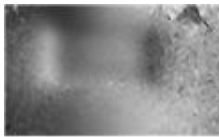
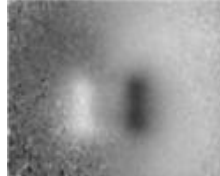
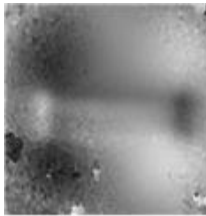
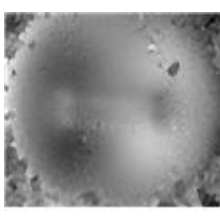



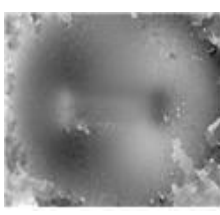
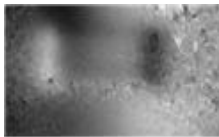
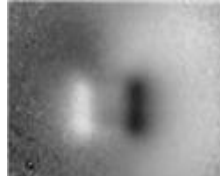
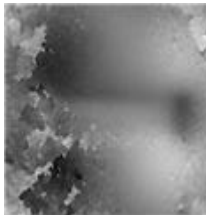
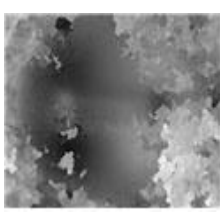

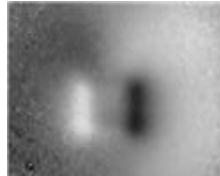
(1) 결함 길이별 측정 결과

- 결함 두께 : 3mm
- 결함 폭 : 15mm
- 결함 길이 : 80mm, 60mm, 40mm, 20mm

◆Phase map

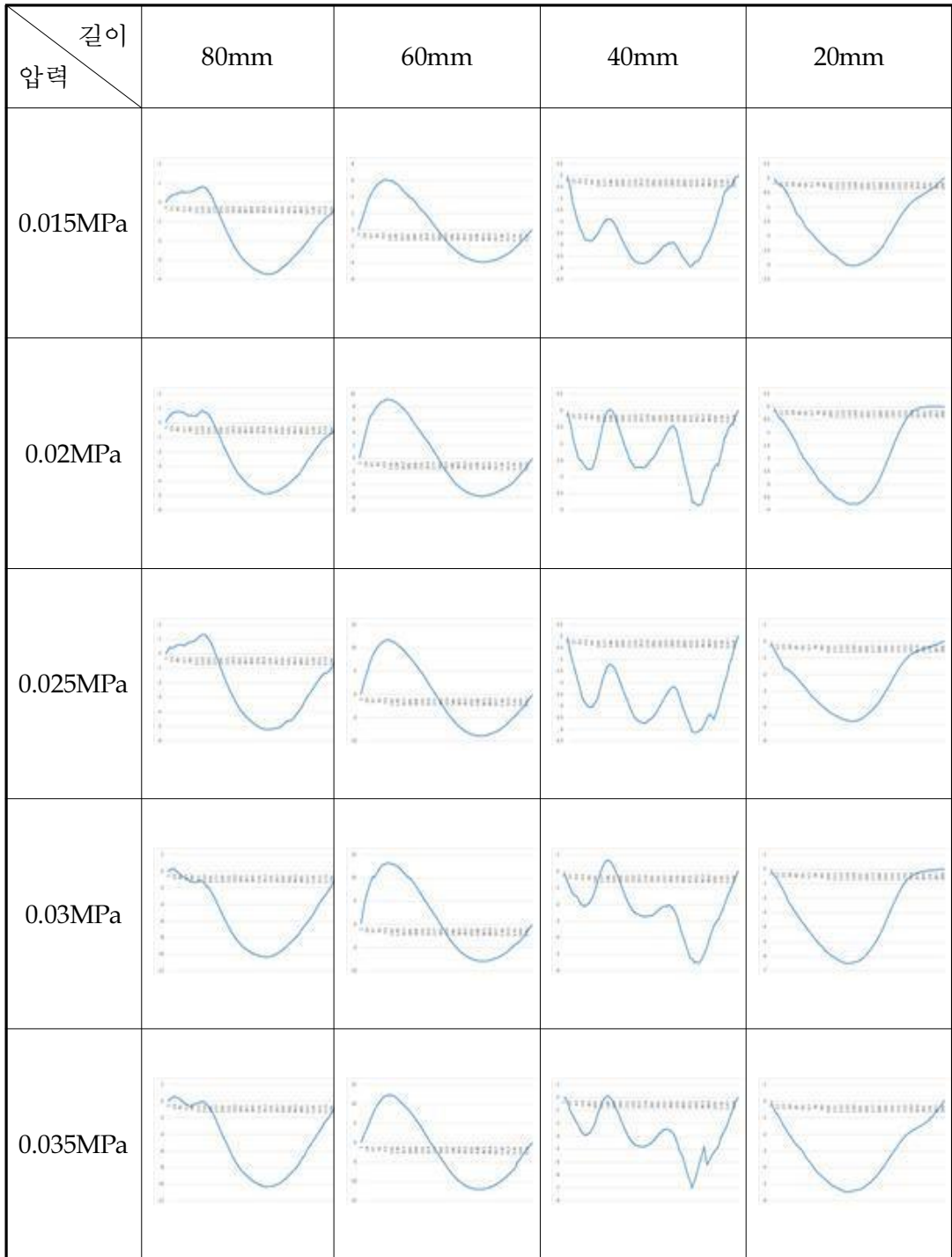
길이 \ 압력	80mm	60mm	40mm	20mm
0.015MPa				
0.02MPa				
0.025MPa				
0.03MPa				
0.035MPa				

◆Phase map unwrapping image

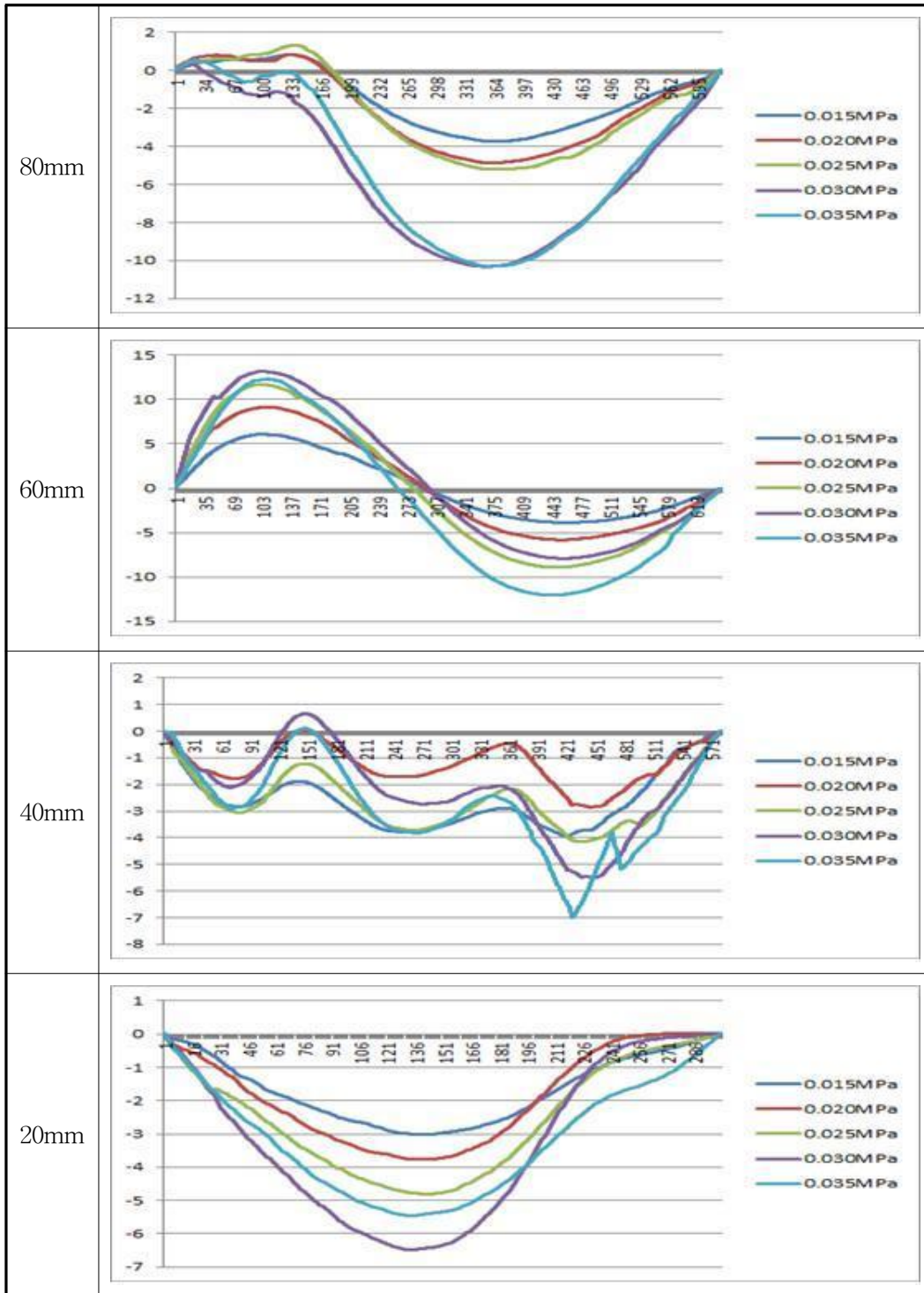
길이 압력	80mm	60mm	40mm	20mm
0.015MPa				
0.02MPa				
0.025MPa				
0.03MPa				
0.035MPa				



◆Profile of unwrapping image



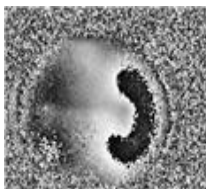



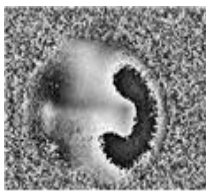
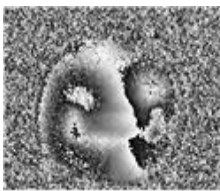
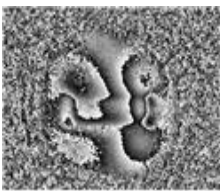
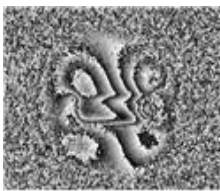
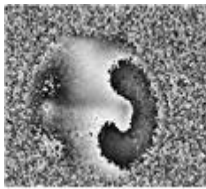

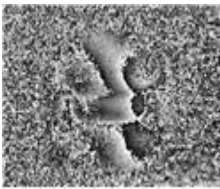
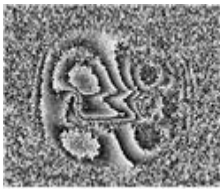

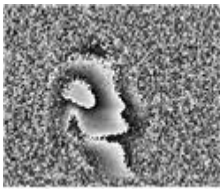
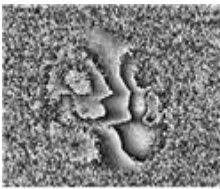


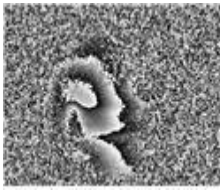


◆길이별 압력 변화에 따른 측정 결과 비교



(2) 결함 두께별 측정 결과

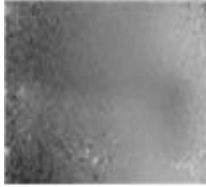
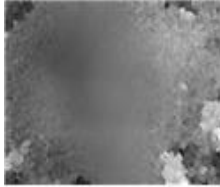
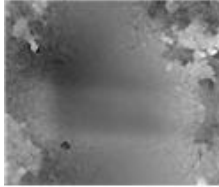
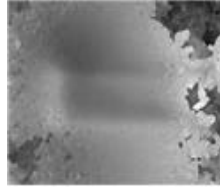

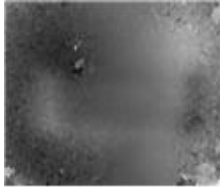
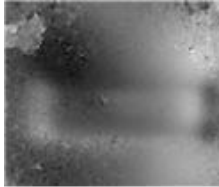
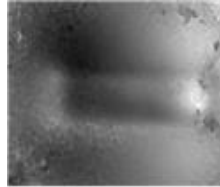

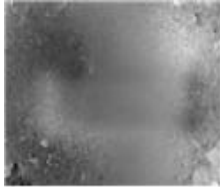
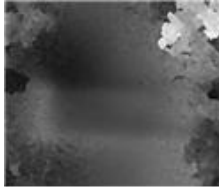
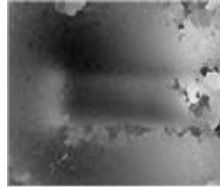
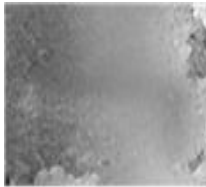
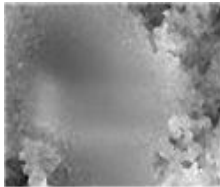
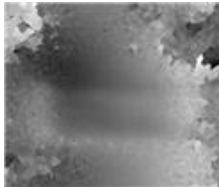
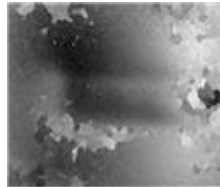

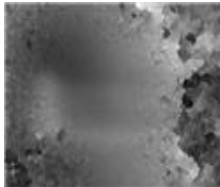
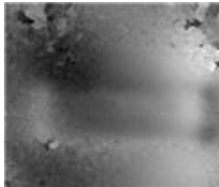
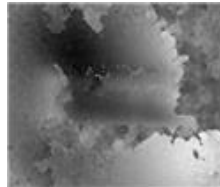
- 결함 길이 : 80mm
- 결함 폭 : 20mm
- 결함 두께 : 1mm, 2mm, 3mm, 4mm

◆Phase map

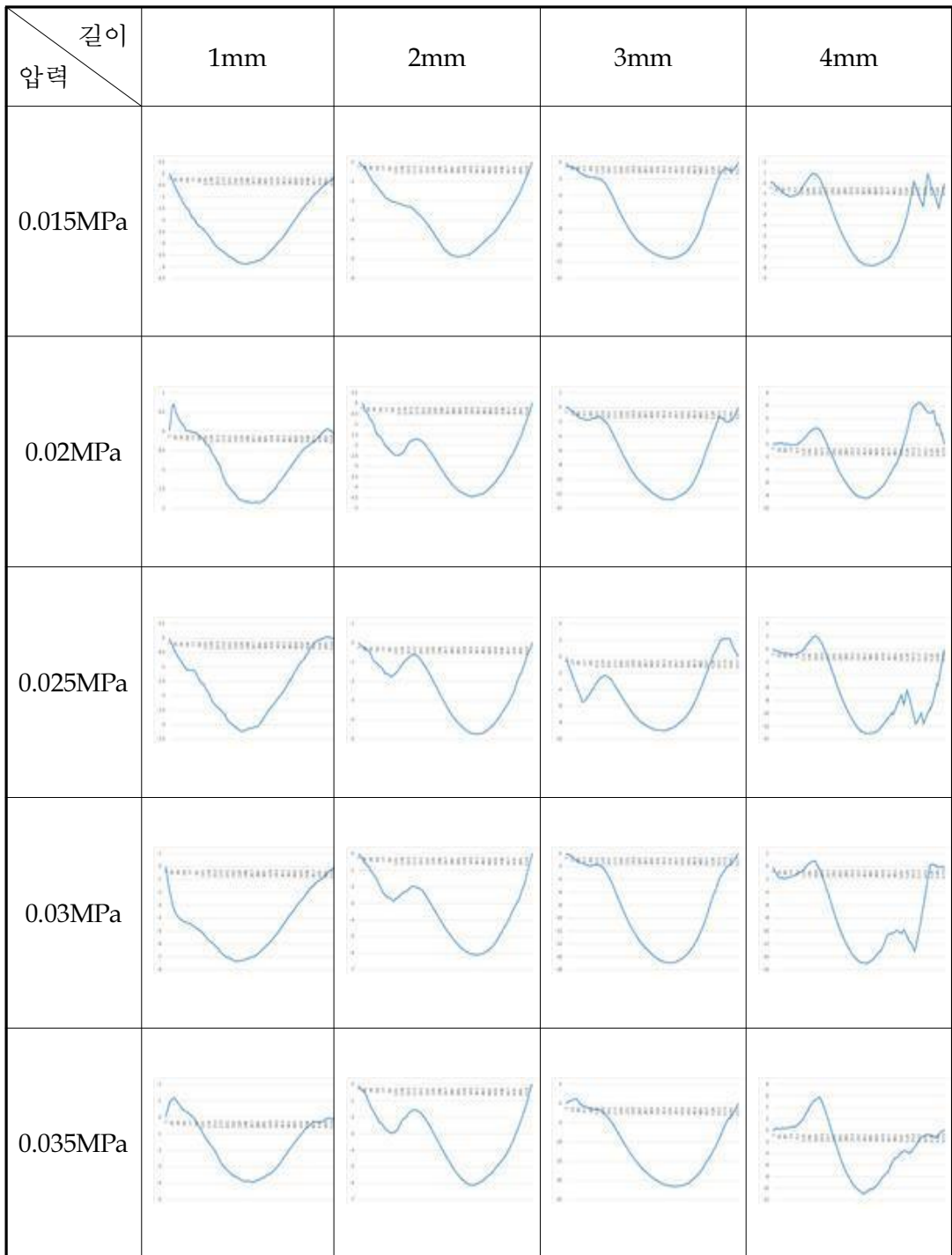
길이 압력	1mm	2mm	3mm	4mm
0.015MPa				
0.02MPa				
0.025MPa				
0.03MPa				
0.035MPa				



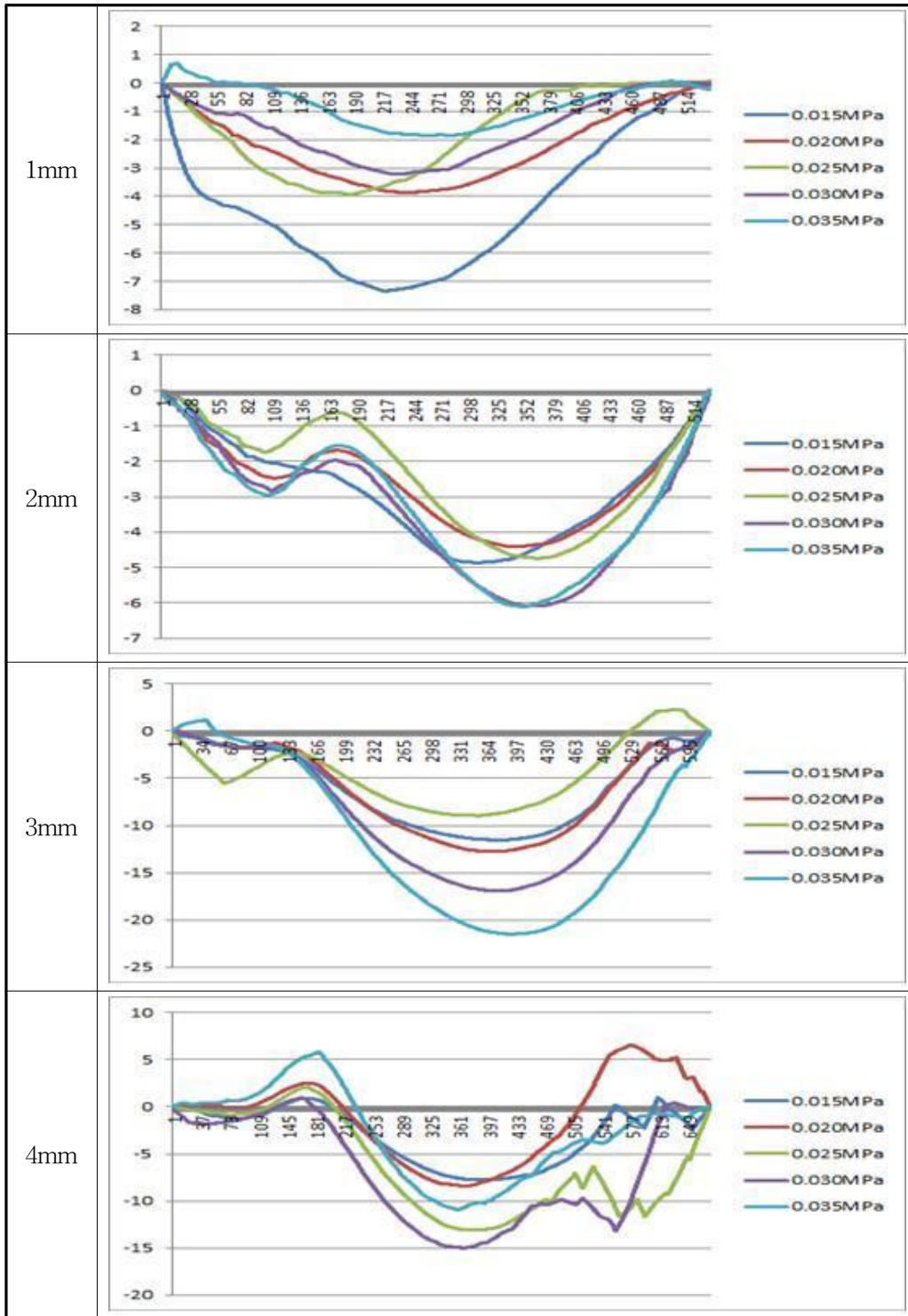
◆Phase map unwrapping image

길이 압력	1mm	2mm	3mm	4mm
0.015MPa				
0.02MPa				
0.025MPa				
0.03MPa				
0.035MPa				

◆Profile of unwrapping image



◆ 두께별 압력 변화에 따른 측정 결과 비교



## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 전단간섭계의 고 정밀 정량측정이 가능하다는 장점을 이용하여 전단간섭계의 산업현장에서의 실제 활용을 높이고자 하였다. 플랜트 현장에서의 실제 발생 가능한 직관 및 곡관의 압력배관에 내부결함을 제작하여 전단간섭계를 이용해 면외 변형 결함을 통한 간섭계를 이용하여 정량적으로 측정 하였으며, 내부결함의 길이 및 두께별로 확인하였다. 또한, 실험 중 전단간섭계의 정밀함을 분석하기 위해 정밀 변형 발생 장치를 제작하여 대상 체의 특성 파악을 위한  $0.01\mu\text{m}$ 급 미소 변화를 통해 정밀 제어가 가능하도록 제작하였다. 이를 통해 앞서 서두에 말했듯이 고 정밀 정량측정을 이용하여 플랜트 압력배관의 직관 및 곡관의 내부결함에 대한 길이 및 두께를 정량적으로 측정함으로써 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 제안된 전단간섭계 계측방법은 고 정밀 정량변형측정과 외란에 강하다는 장점을 통해 산업현장 적용성이 매우 높은 비파괴계측 기법이다.

2) 결함 길이별 결함 측정 실험에서 획득한 Phase map의 profile의 결과 중 80mm의 결함에 0.2MPa의 그래프와 0.6MPa의 그래프를 비교하였을 때 줄무늬의 변화에 따라 그래프의 양 끝단에 생기는 수직의 그래프를 확인할 수 있다.

3) 이는 Phase map의 이미지에서 확인할 수 있듯이 줄무늬의 경계를 나타낸 구간이며 줄무늬가 개수가 많아질수록 수직의 그래프가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

4) Phase map이미지와 unwrapping이미지를 비교하였을 때 unwrapping이미지에서 기존의 줄무늬가 사라지고 명암차이가 분명해지는 것을 확인할 수 있다.

5) 결함이 있는 압력배관의 변형측정은 ESPI는 측정 시 결함부분과 배관 전체에 발생하는 실제변형을 측정하나 noise가 심하며, 전단간섭계로는 측정이 간편하나 압력배관 자체의 팽창으로 인한 변형을 확인할 수 없어 결과의 신뢰성이 낮음을

확인하였다.

6) 결함이 있는 압력배관의 전단 량 변화에 따른 변형 값의 최대치 비교를 통하여 전단 량이 증가할 때 최대 변형 량은 감소가 됨을 알 수 있으며, 이를 토대로 전단 량이 0일 때의 정량적인 변형 값의 최대치를 유추 할 수 있다. 전단 량이 0 일 때의 변형 량을 결함부와 비 결함부의 변형 량의 합이라 정의할 수 있다.

위와 같은 연구결과로 제안된 전단간섭계는 외부환경에 영향을 미치지 않고, 결함이 있는 대상 체에 외력이 가해지면 그 결함부위에서 응력 집중현상이 발생하면서 변형을 일으킨다. 이러한 면 외적으로 발생하는 변형을 레이저 간섭을 통해 고정밀 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이를 이용해 내부결함 정량측정 및 비접촉, 비파괴 측정으로 원거리 및 정밀한 결함 측정이 가능하며, 산업현장과 실험실 환경에서의 적용성이 좋고, 실시간으로 빠른 측정이 가능할 뿐 아니라 다양한 분야에서 다방면으로 활용도가 크게 쓰이게 될 것으로 기대한다.

## 참 고 문 헌

- [1] Hung, Y. Y.. "Speckle-shearing Interferometric technique: A full-field strain gauge." Applied Optics Vol. 14 pp. 618-622, 1975
- [2] Hung, Y. Y., "A Speckle-shearing Interferometry: A tool for Measuring Derivatives of Surface Displacement," Optics Communication, Vol. 11, pp. 132-135, 1974.
- [3] Butters, J. N. and Leendertz, J. A., "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology," Optics & Laser Technology, Vol. 3, pp. 26-30, 1971.
- [4] Hung, Y. Y., Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation, J. Opt. Lasers Eng., Vol. 26, pp. 421-436, 1997
- [5] Hogmoen, K., Lokberg, O. J., "Detection and Measurement of Small Vibrations using Electronic Speckle Pattern Interferometry," Applied Optics, Vol. 16, pp. 1869-1875, 1977.
- [6] 김경석, 『CW 레이저 스펙클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내 변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
- [7] C. J. Tay, H. M. Shang, A. L. Neo, "Measurement of slopes and profile of an optical lens by shearography," Measurement, Vol. 18, pp. 185-191, 1996.
- [8] Leendertz, J. A., and Butters, J. N., "An Image Shearing Speckle Pattern Interferometer for Measuring Bending Moments," J. Phys. E: Scientific Instrument, Vol. 6, pp. 1107, 1973.
- [9] Hung, Y. Y., "Shearography: a New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing," Optical Engineering, Vol. 21, pp. 391, 1982.
- [10] Steinchen, W., Yang, L.. Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry, Washington, SPIE Press, 2003.

- [11] 강영준, 박낙규, 유원재, 김동우, “전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정에 관한 연구(Ⅱ).” 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 4, pp. 402-410, 2002.
- [12] 문상준, 강영준, 백성훈, 김철중, “실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정법,” 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 4, pp. 1233-1240, 1996.
- [13] Valera, J. D. R., Jones, J. D. C., and Lokberg, O. J., "Exact vibration amplitude derivative measurement with TV shearography," Meas. Sci. Technol., Vol. 7, pp. 1869-1875, 1977.
- [14] Vikhagen, E., "Vibration measurement using phase shifting TV-Holography and digital image processing," Optics Communications, Vol. 69, No. 3,4, pp. 214-218, 1989.
- [15] W. Steinchen, G. Kufer, P. Mackel, F. Vossing., "Determination of strain distribution by means of digital shearography," Measurement, Vol. 26, pp. 79-90, 1999.
- [16] Steinchen, W., Yang, L., Kupfer, G., Mackel, P., and Thiemich, A., "Vibration analysis by digital speckle pattern shearing interferometry," Proc. SPIE, Vol. 3098, pp. 158-165, 1997.
- [17] Hogmoen, K. and Lokberg, Ole J., "Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry," Applied Optics, Vol. 16, No. 7, pp. 1869-1875, 1977.
- [18] Fulton, J. P., Deaton, J. B., Rogowski, R. S., Namkung, M., "Capabilities and Limitations of Electronic Shearography for Detection of Cracks in Thin Plates," Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, pp. 365-372, 1994.
- [19] Y. Y. Hung, "Applications of digital shearography for testing of composite structures," Composites Part B, Vol. 30, pp. 765-773, 1999.
- [20] W. steinchen, L. X. Yang, G. Kufer, P. Mackel, F. Vossing., "Strain analysis by means of digital shearography : potential, limitations, and demonstration," Journal of strain analysis, Vol. 33, No. 2, pp. 171-182, 1998.



- [21] Jones, R., and Wykes C., Holographic and Speckle Interferometry: A discussion of the theory, practice and application of the techniques, 2nd Edition, New York: Cambridge University Press, 1989.
- [22] Cloud, Gary L., Optical Methods of Engineering Analysis, New York: Cambridge University Press, 1995, pp. 393-491.
- [23] 강영준, 권용기, “진동해석을 위한 전자전단간섭계의 개발,” 대한기계학회 논문집(A), Vol. 21, No. 12, pp. 2047-2054, 1997.
- [24] L. X. Yang, W. Steinchen, G. Kufer, P. Mackel, F. Vossing., "Vibration analysis by means of digital shearography," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 30, pp. 199-212, 1998.
- [25] Creath, K., Temporal Phase Measurement Methods, in Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques, ed. Robinson, David W. and Reid, Graeme T., London: IOP Publishing, 1993, pp. 94-140.
- [26] Creath, K., "Phase-shifting speckle interferometry," Applied Optics Vol. 24, No. 18, pp. 3053-3058, 1985.
- [27] Malacara, D., Servin, M., and Malacara, Z., Interferogram Analysis for Optical Testing, New York: Marcel Dekker, 1998, pp. 381-408
- [28] Huntley, J. M., Automated analysis of Speckle Interferograms in Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, ed. Rastogi, P. K., Chichester, John Wiley & Sons, 2001, pp. 49-139.
- [29] 강기수, 『레이저 스펙클 간섭법을 이용한 내부결함의 정량평가』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2005.
- [30] 양준호, 신주엽, 최태호, 정현철, 김경석, “전단 간섭법을 이용한 ASTM-A106Gr.b 재질의 배관 시험편 누설 측정” 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.73-74, 2016

<b>저작물 이용 허락서</b>					
학 과	기계시스템공학과	학 번	20167305	과 정	석사
성 명	한글: 양 준 호    한문: 梁 俊 鎬    영문: Jun-Ho Yang				
주 소					
연락처					
논문제목	한글: 전단간섭계를 이용한 플랜트 압력 직관 및 곡관의 내부결함의 길이 및 두께에 대한 정량적 측정  영문: Quantitative Measurement on Length and Thickness of Inside Defect of Straight and Bent Pressure Piping for Plant using Shearography				
<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;">동의여부 : 동의( ○ )    반대(    ) .</p> <p style="text-align: center;">2017 년    12 월</p> <p style="text-align: center;">저작자:    양 준 호    (인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em; font-weight: bold;">조선대학교 총장 귀하</p>					