



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](#)

2016년 2월

석사학위논문

# 전단간섭법을 이용한 압력배관 면외변형 정량측정

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 현 준

# 전단간섭법을 이용한 압력배관 면외변형 정량측정

A study on measurement to out-of-plane deformation of pressure piping by shearing interferometry

2016 년 2 월 25 일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 현 준

# 전단간섭법을 이용한 압력배관 면외변형 정량측정

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2015년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

이 현 준

이현준의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 지 훈 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

위 원 조선대학교 교수 정 현 철 ㉠

2015년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF TABLES .....	I
LIST OF FIGURES .....	II
ABSTRACT .....	IV
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	3
<b>제 2 장 이론적 배경 .....</b>	<b>4</b>
제 1 절 레이저와 스펙클의 특징 .....	4
1-1. 레이저 스펙클 .....	4
1-2. 프린지패턴의 형성 .....	8
제 2 절 물체의 변형정보 추출 .....	11
2-1. 위상이동기법 .....	11
2-2. Unwrapping (결필침) .....	13
제 3 절 광학 간섭계 .....	15
3-1. 면외변형 측정 및 해석 .....	15
3-2. 전단간섭계 및 전단간섭무늬의 해석 .....	20

3-3. 압력배관 결함 깊이 검출 및 해석 .....	23
제 4 절 유한요소법(Finite Elements Method) .....	26
4-1. 유한요소법(Finite Elements Method) .....	26
4-2. 유한요소법 기본과정 .....	27
제 3 장 실험장치 및 구성 .....	29
제 1 절 측정 시스템 .....	29
1-1. 전단간섭계(Shearography) 구성 .....	29
1-2. 면외변형 측정 소프트웨어 개발 .....	31
1-3. Shearography 상용장비 .....	36
1-4. 유한요소해석 프로그램 .....	38
제 2 절 시험편 제작 .....	40
2-1. 고무평판 시험편 제작 .....	40
2-2. 압력배관 시험편 제작 .....	41
제 4 장 실험방법 및 실험결과 .....	44
제 1 절 고무평판 면외변형 측정 .....	44
1-1. 실험방법 .....	44
1-2. 실험결과 .....	46

제 2 절 압력배관 면외변형 측정 .....	52
2-1. 실험방법 .....	52
2-2. 실험결과 .....	54
제 3 절 압력배관 유한요소 해석 .....	66
3-1. 유한요소 해석 결과 .....	66
제 5 장 결론 .....	76
참 고 문 헌 .....	78

## LIST OF TABLES

Table. 3- 1 Components of the development system .....	30
Table. 3- 2 Specification of shearography system .....	37
Table. 3- 3 Material Properties of SS400 .....	41
Table. 3- 4 Specification of shearography system .....	41
Table. 4- 1 Phasemap and line profile of pressure pipe .....	47
Table. 4- 2 Unwrapping profile and Integral profile .....	48
Table. 4- 3 Experiment result of detecting deformation using shearography system .....	49
Table. 4- 4 Deformation detection result and error comparison ..	51
Table. 4- 5 Result of detecting out-of-plane deformation test .....	54
Table. 4- 6 Result of out-of-plane Deformation comparison .....	61
Table. 4- 7 Each specimens defect length and defect pixel .....	62
Table. 4- 8 Residual thickness calculations .....	63
Table. 4- 9 Result of measurement depth comparison .....	64
Table. 4-10 Compare defect detection experiment results .....	65



Fig. 3-10 Result of Pre-processing .....	38
Fig. 3-11 Result of Solving .....	39
Fig. 3-12 Result of postprocessing .....	39
Fig. 3-13 The rubber reputation specimen .....	40
Fig. 3-14 Fabricated pressure piping(Straight pipe) .....	42
Fig. 3-15 Pressure Piping (straight) design drawings .....	42
Fig. 3-16 Pressure Piping (straight) 3D modeling .....	43
Fig. 3-17 Pressure Piping (straight) defect Information .....	43
Fig. 4- 1 Out-of-plane deformation experiments envisioned .....	44
Fig. 4- 2 Measurement out of plane deformation using Shearing interferometer .....	45
Fig. 4- 3 Out-of-plane deformation generating device .....	45
Fig. 4- 4 Image for Shearing distance measurement .....	46
Fig. 4- 5 Result of detecting deformation .....	50
Fig. 4- 6 Out-of-plane deformation detection results compare .....	51
Fig. 4- 7 Out-of-plane deformation interferometer .....	52
Fig. 4- 8 Image for Shearing distance measurement .....	53
Fig. 4- 9 Compare up to the amount of deformation according to pressure changes .....	61
Fig. 4-10 Each pressure pipe specimens defect detection image .....	62
Fig. 4-11 Result of Defect depth measurement according to pressure change .....	65
Fig. 4-12 Pressure pipe 3D modeling .....	66
Fig. 4-13 Analysis result of Pressure pipe (non-defect specimens) .....	67
Fig. 4-14 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-1) .....	68
Fig. 4-15 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-2) .....	70
Fig. 4-16 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-3) .....	72
Fig. 4-17 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-4) .....	74

## ABSTRACT

### A study on measurement to out-of-plane deformation of pressure piping by shearing interferometry

Lee Hyun Jun

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

Dept. Mechanical System Engineering

Graduate School of Chosun University

At Non-contact and Non-destructive testing technique like ESPI Digital holography. Recently, The study about deformation measurement of defect in specimen is actively being done by using speckle pattern like digital holography and shearing interferometry. Of the optical interferometers typically using a laser, Measurement method to measure the deformation amount is an electronic speckle pattern interferometry process (ESPI). However, ESPI can be measured precisely by the strain generated in the object but, may be disturbed at the industry without the anti-vibration table which decrease external vibration.

Therefore, we don't encourage experts to use it at the industry. Another way, Shearing interferometry known as one of laser interferometers is usefully being used in the way of Non-destructive test to quantitatively analyze defects and structural of machine because it is relatively less sensitive to vibrations and external impacts. In this study, we tested pressure pipe defect length and the internal pressure change to figure out the out-of-plane deformation.

Prior to the pressure pipe defect detection test, we organized a shearing interferometer to use the optical component. To carry out the reliability test of a shearing interferometer

composed of optical components, The measurement of pressure pipe's out-of-plane deformation and an experiment of defect detection were carried out after the shearography system and out-of-plane deformation testing of rubber were conducted and secured the reliability of development equipment. In addition, to test the out-of-plane deformation of the pressure vessel, The out-of-plane deformation was measured, after we produced a test piece in straight form and differed from size and shape of the defects that have been produced in the inside of each specimen. The pipe specimens are adopted from SS400 which is used for pipe line system. The defect remaining in material was quantitatively determined for the extracted objects by developing the program for Image enhancement and deformation information. Using the measured defect and deformation information presented interworking with finite element analysis. Findings, The conventional shearing interference method are referred to as shearing amount in the upper surface shear amount is applicable to any values of distance units, in this paper, the shearing amount by applying the image processing techniques to apply the shearing amount by the number of pixels it was confirmed that the can. In addition, lateral shearing interferometer and compared results with commercial equipment interferometer Shearography system configured based on the out-of-plane deformation measurements of commercial equipment in the measurement with the interferometer configured for measuring deformation of the rubber flat plate showed an average error of 2.4%. The lateral pressure pipe via a change of pressure results in deformation measurement 0.05~0.25Mpa experiment was to detect the respective maximum out-of-plane deformation.

Increase the amount of deformation due to the pressure difference between each specimen were similar, when compared to the specimen, this was the biggest flaw is the amount of deformation of the SS-1-1-1 most common defect is the smallest amount of deformation of the SS-1-1-4 this showed the smallest. Pipelines pressure sizing experiment to obtain the installation, the image in the object surface of the transparent character immediately before the experiment, using the number of pixel for the 5mm proposed a method to infer the length and width of the defect. For the experiments, the size of the longest defect SS-1-1-1 showed the actual processing of the length and approximately 4.1% error when the smallest SS-1-1-4 was an error of 2.9%. The lateral size of the defect obtained from the deformation amount and the defect detection test using the shearing interferometer, width and depth of the information could be used by the FEM tool such as finite element analysis to know the maximum pressure and maximum defect length by deformation.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 배경

산업현장에서 많이 사용되는 산업 설비 및 부재들은 결함이 발생할 가능성이 높고, 결함 발생 시 설비 및 부재의 파괴를 초래하여 막대한 손실이 발생한다. 따라서 파괴가 일어나기전에 결함을 검출하여 사고를 미연에 방지하기 위해 다양한 비파괴 검사기술을 이용하여 검사하고 있다. 또한 비파괴 검사기술을 통한 산업설비의 부재결함을 신속하고 정확하게 검출하여 산업시설물에 대한 제품 수명성, 경제성, 건전성등을 확보하여 산업전반에 중요한 역할을 가능하게 한다. 이러한 비파괴 방법들은 접촉식이거나 대상물에 전처리를 필요한 문제점이 있으나, 레이저를 이용한 계측 방법은 비접촉식 검사방법이며, 특별한 전처리 없이 비파괴 검사를 수행할 수 있다. 또한 레이저의 시간적·공간적인 가간섭성을 이용하여, 정밀한 수준으로 대상물 전체 영역에 걸쳐 실시간측정 및 해석할 수 있다.[1][2]

레이저를 이용한 광학간섭계중 대표적으로 변형량을 측정하기 위해 사용되는 측정방법은 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)이다. 하지만, ESPI는 대상물에 발생하는 변형을 정밀하게 측정할 수 있으나 외부에서 발생하는 외란에 매우 민감하여 외부진동을 감쇠하는 방진 테이블이 없는 산업현장에서는 그 적용성이 매우 낮다.

레이저 스펙클을 이용하는 또 다른 방법 변형측정 방법인 전단간섭법(Shearography)은 광학간섭계를 적절하게 구성하여 변형의 도함수 성분을 구할 수 있다는 개념으로, 이를 이용하여 변형을 정보를 직접 획득할 수 있다. 개발 당시 전단간섭법은 기울기를 측정하기 위하여 개발되었으며, 이는 넓은 영역 전체에 발생하는 변형의 기울기를 동시에 측정하는 스트레인게이지와 동일하다고 할 수 있다

전단간섭법은 ESPI시스템과 비교하였을 때, 간섭계의 구성이 비교적 간단하다. 때문에 시스템 개발과정에서 제품의 크기를 상대적으로 소형화 시키기 유리하다.[3]

전단간섭계는 대상물에 결함이 있을 경우, 외력이 가해지면 응력집중이 발생하며, 강체변형은 변형률 변화를 발생시키지 않기 때문에 전단간섭법은 대상물의 결함을 계측하는데 매우 우수하며, 외란에 매우 강한 장점을 바탕으로 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 많이 사용되고 있다.

또한 ESPI보다 레이저의 가간섭거리가 상대적으로 짧아도 측정이 가능하며, 전단간섭법의 응용 영역은 더욱 증가하여 대상물의 진동해석에도 사용되고 있으며, 결함의 정량화, 복합재 구조물의 해석 등 비파괴 검사분야에서 유용한 방법으로 활용이 되고 있다.[4][5]

현재까지의 전단간섭법을 이용한 연구는 전단간섭계를 이용하여 대상물 내부에 있는 결함의 형상을 검출하고 면외변형에 대한 정보를 획득하는데 그쳐 대상물에 대한 정밀한 진단과 교체 및 수리에 대한 여부를 파악하는데 한계가 있어 산업현장에서의 적용성이 다소 떨어진다.

따라서 검출된 결함의 정보를 이용하여 대상체에 대한 정확한 진단 및 조치를 취할 수 있는 방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

## 제 2 절 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 전단간섭법을 이용한 비파괴 측정검사 활용을 높이고자, 전단간섭법을 이용한 시스템을 개발하고 CCD camera를 이용한 이미지 처리 프로그램을 개발하여 대상물에 발생하는 결함의 가시화와 면외변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

사용된 전단간섭법의 기본 개념은 전단간섭법이 기본적으로 화상처리 방법임을 감안하여, 전단간섭법의 가장 중요한 변수인 전단량을 상면에서의 화소수로 변환하고, 측정결과에 적용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 측정할 수 있다는 것이다.

전단간섭계를 광학부품을 이용하여 구성하고, 구성된 전단간섭계의 검증을 위해 고무평판에 pzt actuator가 가하는 면외변형을 전단간섭계와 상용장비 Shearography 시스템으로 측정 후 비교한다. 또한 내압의 변화에 따른 내부 결함이 있는 압력용기의 결함 계측 및 면외변형 정량계측에 대하여 실험과 해석을 수행한다. 압력용기의 면외변형 실험을 위해 시험편을 직관 형태로 제작하였으며 각 시험편 내부에 제작된 결함의 크기와 형상을 달리하여 결함 검출과 면외변형 측정을 함께 실험하였다. 검출된 결함의 길이와 폭, 두께를 이용하여 유한요소해석과의 연동을 제시한다.

본 논문에서 제안된 기법은 전단간섭법을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 정량적으로 측정할 수 있으며, 전단간섭법의 장점인 간단한 간섭계의 구성과 저렴한 레이저의 사용, 그리고 외란에 강인한 장점을 바탕으로 전단간섭법의 산업적 현장적용성을 높이고, 비파괴 검사기법으로서 레이저 간섭법이 다양한 방면으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 레이저와 스페클의 특징

#### 1-1. 레이저 스페클(laser speckle)

레이저 빛은 대상물의 표면에서 난반사 된 빛이 공간상에서 서로 간섭을 일으키고, 이러한 간섭효과가 밝고 어두운 부분이 무질서하게 분포하는 어른거림의 형태로 나타나는데 이를 스페클효과라 한다. Fig.2-1은 레이저 스페클을 보여주는 그림이다.

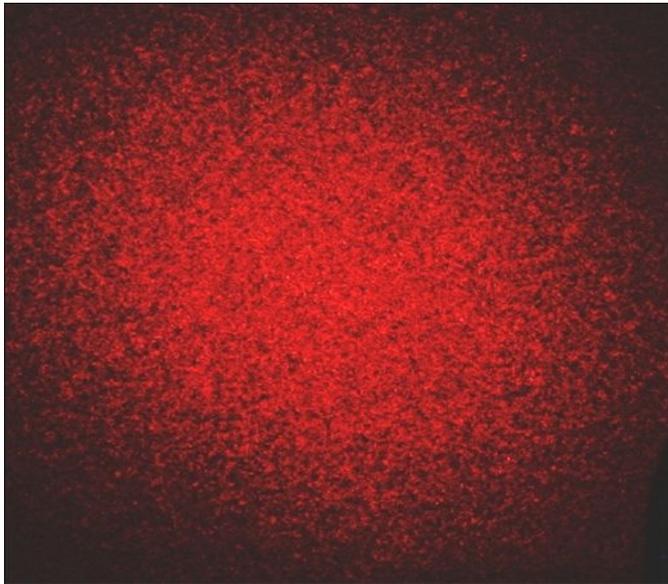


Fig. 2-1 From of laser speckle

스페클은 종류에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나누어지는데, 이 둘의 차이점은 결상 렌즈의 사용 여부에 따라서 달라진다.

objective speckle은 대상물의 표면에 빛을 비출 때, 대상물의 각 점에서는 흡수와 재 방사가 일어나는데, 재 방사가 일어나는 점에서는 2차 파면과 유사한 구면 파를 생성한다. Fig. 2-2는 objective speckle의 원리를 나타낸 계략

도며 그림에서와 같이 공간상의 평면에만 의존성이 있으며, 결상 렌즈는 사용하지 않는다.

objective speckle 크기는 물체의 Fig.2-2에서 표시된  $D$ 의 면적에 레이저광이 조사되고 면적  $D$  위의 모든 점은 plane에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 제안한 Eq.(2-1)로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다[6].

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

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

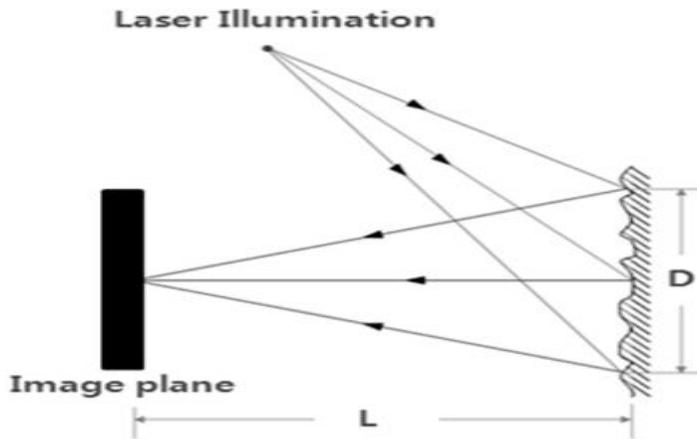


Fig. 2-2 Principle of objective speckle

subjective speckle은 레이저를 물체에 비출 때, 표면의 이미지가 형성 되고, 빛의 세기가 변화하는 이미지가 보일 때 생기는 것을 말하며, 조사 면의 상을 형성할 때 광학계에 의존하여 형성 된다. objective speckle과 다르게 ESPI와 같이 결상렌즈를 사용할 때 발생한다.

Fig. 2-3은 subjective speckle의 원리를 보여 주고 있다. 전자처리 스페클 패

턴 간섭법에서는 subjective speckle을 사용하며, 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의된 subjective speckle은 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게 정의된다. speckle의 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 함수(Bessel function)로 설명되고, P점의 빛은 대상물 표면 높이의 무작위적 변화에 따라 random한 위상을 갖는다는 특징을 가지고 있다.

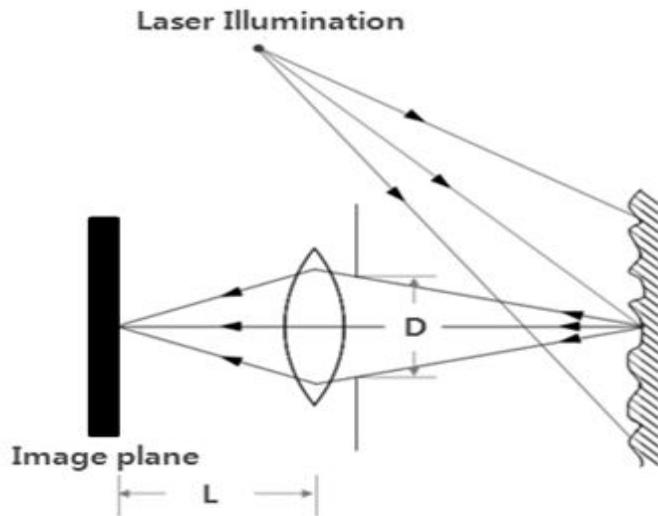


Fig. 2-3 Principle of subjective speckle

subjective speckle의 크기는 조셉 프라운호퍼(Joseph Fraunhofer)의 회절이론에 따라 중앙의 최대 밝기가 1차 최소밝기와의 중첩이 일어났을 때의 거리로 정의하고 있으며, 결상면에서 형성되는 subjective speckle의 크기는 다음 식과 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. speckle은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 zoom 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.

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

또한 subjective speckle의 물체표면에서 크기는 Eq.(2-3)의  $S_s$ 로 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 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

## 1-2. 프린지 패턴의 형성

두 갈래의 파동이 만났을 때 일으키는 상쇄, 보강간섭에 의해 형성되는 무늬를 프린지패턴이라고 하는데, 진동수가 다른 파동끼리는 간섭현상을 일으키지 않으므로 여러 진동수의 빛이 섞인 백색광의 경우 각 진동수마다 각각의 간섭무늬를 형성한다. 즉, 간섭무늬가 시간과 함께 변하지 않고 안정하기 위해서는 파동끼리 완전 겹치거나 또는 파동의 위상차가 일정하게 유지되는 것이 필요하다. 이 조건을 만족시키는 파동은 서로 간섭성을 갖는다고 한다. 스펙클 간섭무늬의 형성을 위해서는 일반적으로 물체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 물체광(Object Beam), 물체광의 위상변화의 기준이 되는 광원을 참조광(Reference beam)이 필요하다. Fig. 2-4는 두 개의 광의 합성을 나타낸 그림으로 여기에서 참조광( $E_R$ )은 물체광( $E_O$ )에 의해 형성된 스펙클을 z-축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 빛의 파동에 대한 진폭은 복소수에 대한 함수로 표현 가능하므로 Eq.(2-4)와 같이 쓸 수 있다. [7]

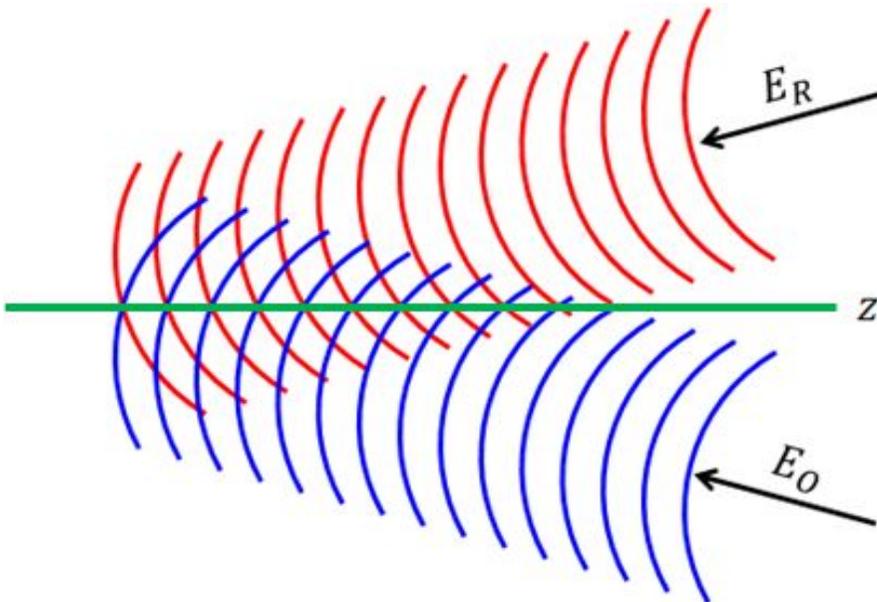


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

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

여기서,  $a$ 는 진폭,  $\phi$ 는 공간 위상,  $f$ 는 주파수를 나타낸다. 일반적으로 공간적인 부분만 다루기 때문에 시간에 의한 부분은 생략이 가능하다. 따라서 공간적인 복소 진폭만을 고려한다면 스펙클 간섭에 대한 물체광(object beam)과 참조광(reference beam)의 진폭은 다음과 같이 Eq.(2-5)와 Eq.(2-6)으로 표현할 수 있다.

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

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

Eq.(2-7)은 물체광과 참조광의 중첩에 의한 빛의 강도(intensity)를 표현한 것이다.

$$\begin{aligned}
 I &= |u_o + u_r|^2 = u_o \cdot u_o^* + u_o \cdot u_r^* + u_r \cdot u_o^* + u_r \cdot u_r^* \\
 &= |a_o|^2 + |a_r|^2 + 2|a_o||a_r|\cos\left[\frac{2\pi(L_o - L_r)}{\lambda}\right] \\
 &= I_o + I_r + 2\sqrt{I_o I_r} \cos\phi
 \end{aligned} \quad (2-7)$$

여기서  $I$ : 합성광의 빛의 강도,  $I_R$ : 참조광의 빛의 강도,  $I_O$ : 물체광의 빛의 강도  $\phi$ : 물체광과 참조광의 위상차이다. Fig. 2-5와 같이 전단간섭법에서는 물체의 표면 변위를 측정하기 위해 변형전후의 스펙클 상태의 감산처리를 통하여 상관간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전후의 CCD 카메라에 기록되어진 스펙클 패턴을 아래 Eq.(2-8), Eq.(2-9)으로 나타낼 수 있다.

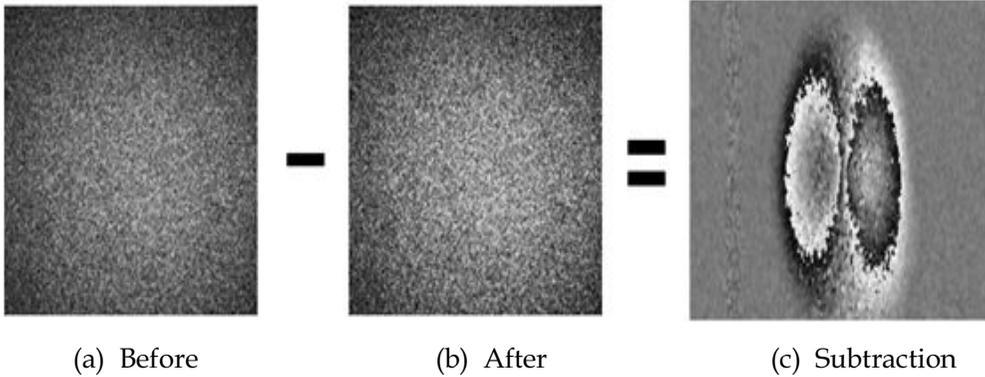


Fig. 2-5 The fringe pattern formation depend on deformation

$$I_b = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \quad (2-8)$$

$$I_a = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2-9)$$

여기서  $I_b$  : 물체변형전의 빛의 강도,  $I_a$  : 물체변형후의 빛의 강도,  $\Delta\phi$  : 물체변형에 따른 위상변화이다. 변형전후의 두 개의 스펙클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 Eq.(2-10)과 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_s &= I_b - I_a \\
 &= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)
 \end{aligned} \quad (2-10)$$

여기서  $I_s$  : 물체변형전후의 광 분포의 감산 처리된 빛의 강도이다. 실제적으로 모니터에서 관찰되는 빛의 강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의 형태로 나타나게 된다.[8]

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

## 제 2 절 물체의 변형정보 추출

### 2-1. 위상이동기법

PZT를 이용한 위상이동기법은 전단간섭법(Shearography)에 의해 형성되는 간섭으로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 효과적으로 널리 사용되고 있는 방법이다<sup>26-29)</sup>. 위상이동 기법은 PZT에 의하여  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 씩 위상을 이동하여 다음 식과 같이 4개의 방정식으로 기록하게 된다. 본 논문에서는 위상이동 기법의 4-Step으로 대상물의 변형측정이 가능하고 오차를 최소화하기 위하여  $\pi/2$  위상이동을 사용하였다. 전체 표면에서의 한 점에서 기록된 빛의 강도는 Eq.(2-12)과 같이 나타낼 수 있다[9].

$$I = I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + \alpha_i)] \quad (2-12)$$

위 식에서,  $I$  : 선명도,  $\phi$  : 위상,  $\alpha_i$  : 위상 이동 값을 의미한다. 4-Step technique은 연속적인 위상 이동에 의한 서로 다른 위치에서의 위상 값을 얻기 위하여 사용된다. 물체에 변위가 발생하면 새롭게 얻어진 화상을 다시  $\pi/2$ 씩 3번 위상이동 시킨 후에 저장하여 저장된 이미지를 이용하여 변형 전, 후의 각각의 위상정보를 획득, 감산 처리하여 줄무늬(Fringe pattern)를 생성하게 된다. 즉, 참조광의 위상을  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 로  $\pi/2$ 씩 이동시켜 이들을 4단계 위상이동 기법에 의해 위상 값( $\phi$ )를 구하는 방법이다. 위 식에 의거하여 획득한 위상이미지를 Eq.(2-13), Eq.(2-14), Eq.(2-15)을 이용하여 위상 값을 계산하고 변형 전, 후의 이미지를 감산처리를 통하여 4-Step 위상지도를 얻을 수 있다[13]. 레이저 파장에 관련한 위상의 이동은 CCD 카메라와 위상을 이동시킬 수 있는 정밀한 장치와 컴퓨터를 이용해서 가능하다. CCD 카메라에서 저장된 이미지를 처리하면 대상물에 대한 위상정보를 획득할 수 있다. 이 개념은 Fig.2-6 에 설명되어 있는데, 먼저 대상물이 변형전의 상태로, 간섭성이 좋은 빛이 대상물의 표면에 조사되고, 물체에 부딪혀 산란되는 물체광은

점 P로부터 점 Q에 있는 검출기에 도달한다. 또한 참조광은 물체광과 거의 일치하도록 검출기에 수직으로 입사된다. 물체에 변형이 발생하여 거리  $dz$ 만큼 점 P에서 점Q방향으로 이동하였다고 하면, 물체광이 Eq.(2-16) 만큼 위상 이동이 일어나기 때문에 간섭 무늬는 변하게 된다.[10]

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \\
 I_2 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + \pi/2)] = I_0 [1 - \sin \phi] \\
 I_3 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + \pi)] = I_0 [1 - \cos \phi] \\
 I_4 &= I_0 [1 + \gamma \cos (\phi + 3\pi/2)] = I_0 [1 + \sin \phi]
 \end{aligned}
 \tag{2-13}$$

$$\begin{aligned}
 I_4 - I_2 &= 2I_0 \sin \phi \\
 I_1 - I_3 &= 2I_0 \cos \phi
 \end{aligned}
 \tag{2-14}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right]
 \tag{2-15}$$

$$\phi_2 = 4\pi d_z / \lambda
 \tag{2-16}$$

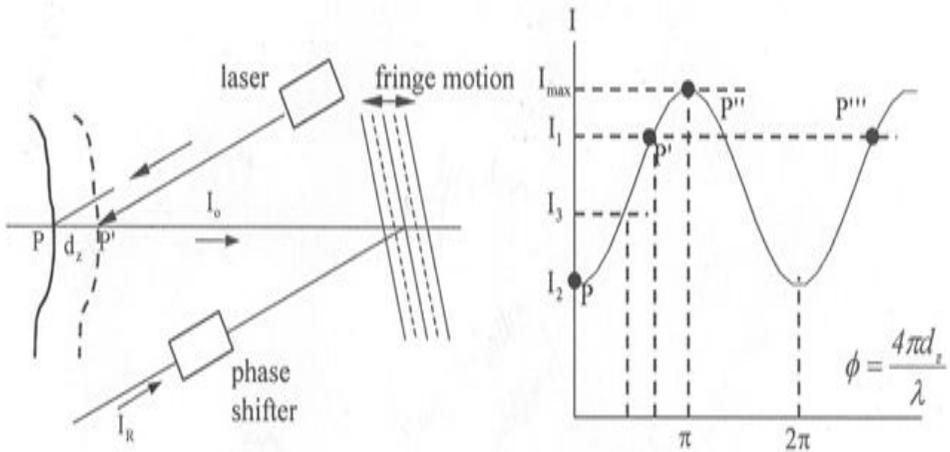


Fig. 2-6 Configuration of Phase shifting

## 2-2. Unwrapping (결별침)

위상 이동 기법에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상은 arc-tangent 함수로 계산이 되었기 때문에 불연속성을 가지는 톱니 바퀴형상으로 나타나기 때문에 이러한 불연속성을 해결하기 위해 불연속성을 연속성으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보를 획득하기 위해서 Phase Unwrapping 과정을 거치게 된다. 대상물의 형태가 복잡하고 노이즈가 많은 위상지도는 이미지의 깨짐 현상 및 왜곡의 발생이 심하여 해석에 있어 상당한 어려움이 있다. 결별침은 위상이동기법에서 위상을 구하기 위해 사용되는 arc-tangent 함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 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 결별침은 Eq.(2-17)을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_w + (2\pi \times N) \quad (2-17)$$

여기에  $\phi_{unw}$  : unwrapped phase,  $\phi_w$  : wrapped phase,  $N$  : fringe order 이다. 여기서, 결별침을 위한 차수( $N$ )의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면  $N$ 을 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 Image를 비교하였고, Fig. 2-8에서는 이 때 각 Image에 Profile을 그었을 때의 위상 graph를 나타내었다.

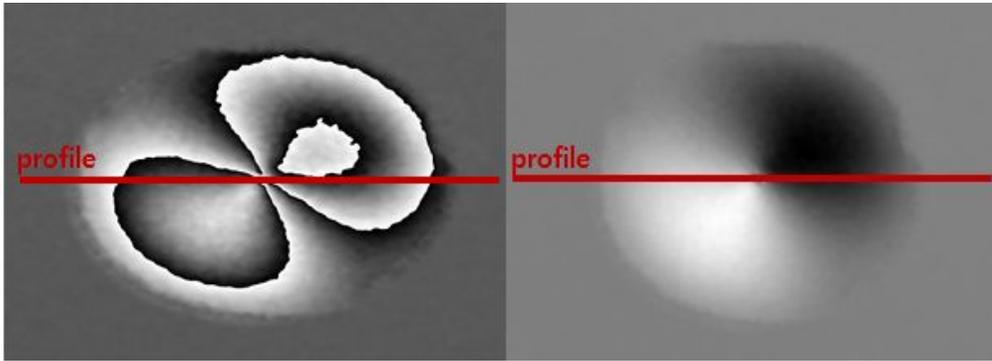


Fig. 2-7 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase

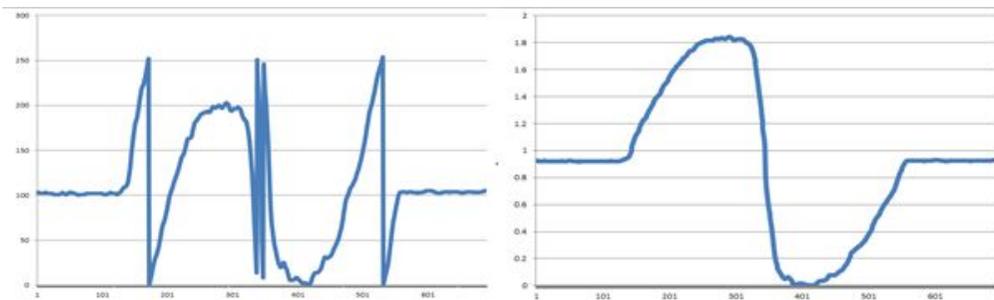


Fig. 2-8 Comparison wrapped phase and Unwrapped phase graph

본 논문에서 Unwrapping method로 least Square Method를 사용하였다. Least Square Method(최소자승법)란 Data가 주어졌을 때, 오차의 제곱을 물체의 전 영역에 걸쳐 합한 값이 최소가 되도록 하는 방법으로써, 이를 일반적으로 실험을 행할 때 실험 값( $x, y$ )을 얻는다고 할 때, 이 Data들의 규칙성을 찾기 위해서 두 변수 간에 상관 관계를 함수로 표현해서 나타내서 하나의 공식으로 표현함으로써 두 변수 간의 상관 관계를 찾을 수 있게 해주는 방법이다. 보다 구체적으로는 직선으로 표현 하면서 각각의 에러를 최소화 하여 0이 되는 해를 구하는 방법이다.[11],[12]

### 제 3 절 광학 간섭계

#### 3-1. 면외변형 측정 및 해석

먼저 대상물이 관측면에서 초점을 맺는 것을 생각하면, Fig. 2-9에서 보는 것처럼 S에서 확산하는 빛이 대상물에 조사되고, 이때의 광경로는 1로 표현할 수 있으며, Eq.(2-18)과 같다.

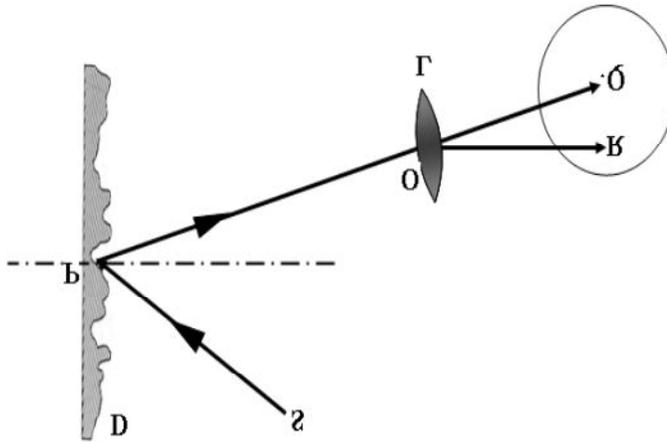


Fig. 2-9 The optical path of a ray : image-plane viewing

$$l = SP + l_p + PO + OR \quad (2-18)$$

여기서, SP와 PO는 대상물 표면의 임의의 P의 주변영역에서 S와 O까지의 평균거리이고,  $l_p$ 는 대상물 표면의 무작위적 높이 변화에 따른 광경로이다.

Fig. 2-10에서 관측면의 Q는 T에서 확산 조사되는 것으로 생각할 수 있으며, 대상물의 임의의 영역이 렌즈 조리개를 통하여 초점을 맺는다. 이를 전체 광경로로 표현하면 Eq.(2-19)로 나타낼 수 있다.

$$l = SP + l_p + TQ - PT \quad (2-19)$$

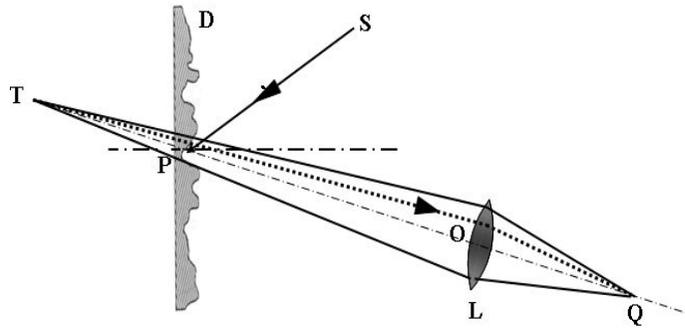


Fig. 2-10 The optical path of a ray : defocussed viewing

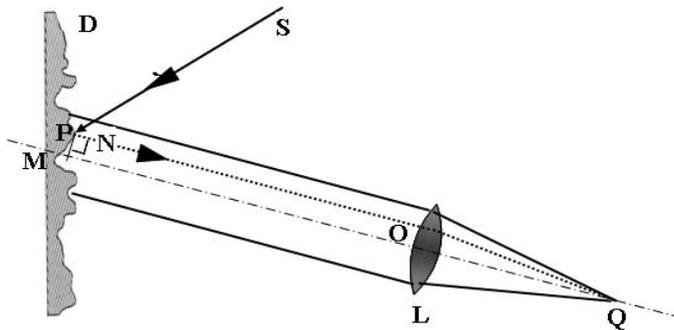


Fig. 2-11 The optical path of a ray : focal plane viewing

관측면이 렌즈의 초점면일 때, T의 위치가 무한대일 때 더 정확하며, 관측면의 Q에 조사되는 모든 광선은 MQ에 평행하게 된다. 관측면의 한점에 조사되는 면적은 대상물에서 관측 렌즈 조리개에 투사되는 영역이며, 관측면이 심하게 기울어 있지 않으면, 그 면적은 관측 렌즈 조리개의 면적과 거의 같다. S부터 P를 거쳐 Q까지의 광경로는 Eq.(2-20)와 같이 표현할 수 있으며, S부터 Q까지 광경로는 i) 경로 S부터 P까지, ii) 표면의 높이변화와 관련한 경로  $l_p$ , iii) 경로 S부터 P까지로 구성된다.

$$l = SP + l_p + MQ + PN \quad (2-20)$$

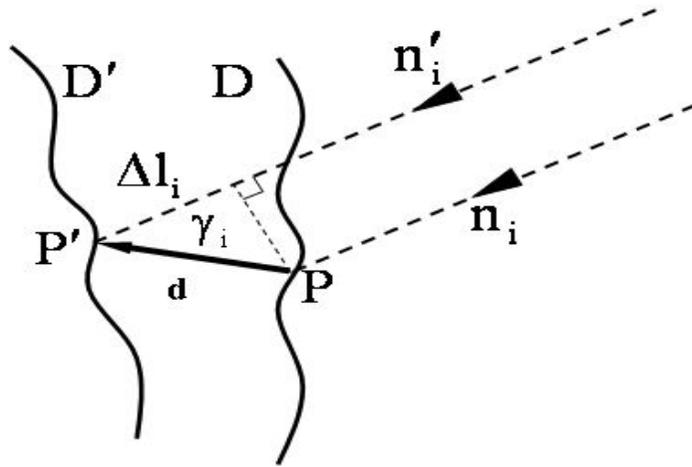


Fig. 2-12 The illuminating wavefronts introduced by a surface displacement

대상물에 변형이 발생하였을 때,  $i$ )에 의한 경로 변화는  $\Delta l_i$ 이며, 실제적인 간섭계의 배열을 고려할 때  $SP \gg d$ 이기 때문에 Eq.(2-21)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta l_i = SP' - SP = d \cos \gamma_i$$

$$\Delta l_i = \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{d} \quad (2-21)$$

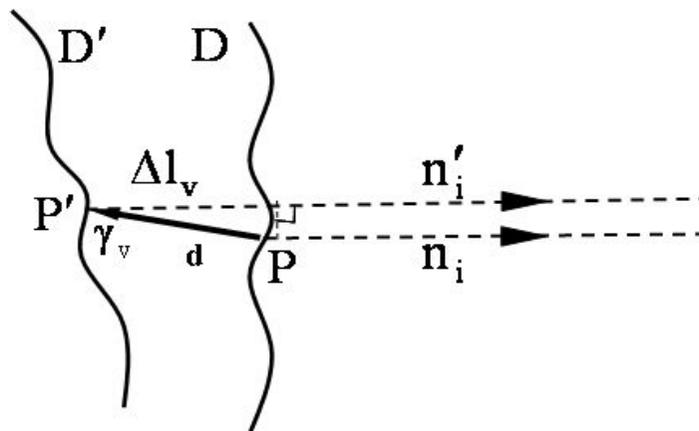


Fig. 2-13 The scattered wavefronts introduced by a surface displacement

대상물의 표면이 변형하여도  $\Delta l_p$ 는 변하지 않는다고 가정할 수 있으며, iii)와 관련된 경로  $\Delta l_2$ 의 변화는 Fig. 2-13에 표현된 Eq.(2-22)과 같다. Fig. 2-11에서 SP와 SP', PQ와 P'Q는 서로 평행한 것으로 가정한다.

$$\begin{aligned}
 \Delta l_v &= d \cos \gamma_v \\
 \Delta l_v &= -\mathbf{n}_v \cdot \mathbf{d}
 \end{aligned}
 \tag{2-22}$$

변형에 의한 전체의 위상변화는 Eq.(2-23)로 표현되며, 모든 광계축의 기본식이 된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_v) \cdot \mathbf{d}
 \tag{2-23}$$

여기서,  $\mathbf{n}_i$ 는 조사방향이고,  $\mathbf{n}_v$ 는 관측방향이며, Eq.(2-21)는 면외변형 뿐만 아니라 면내변형의 줄무늬 패턴에도 적용되며, 대상물에 조사되는 입사각과 관측각이 다르면 위상변화는 Eq.(2-23)를 조사각과 관측각으로 표현하면 Eq.(2-24)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i + \cos \theta_v) d
 \tag{2-24}$$

여기서,  $\theta_i$ 은 대상물 표면의 수직면과 조사면과의 각도이며,  $\theta_v$ 는 관측면과 이루는 각이다.

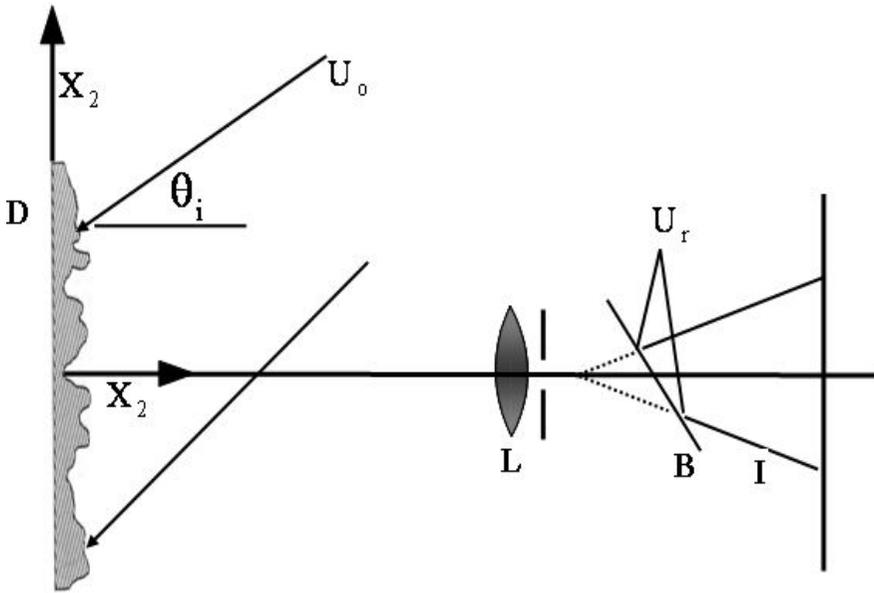


Fig. 2-14 A diagrammatic arrangement of an out-of-plane displacement

Eq.(2-24)를 이용하여 Fig. 2-14와 같이 면외변형 측정에 민감한 간섭계를 구성할 수 있으며, 물체광  $U_0$ 이 물체에 조사되고 난반사된 빛이 광분할기 (Beam Splitter : B.S)에 입사되고, 참조광  $U_r$ 이 물체를 거치지 않고 직접 광분할기에 입사된다. 이렇게 입사된 두 빛에 의한 간섭이 일어나고, 대상물에 변형이 발생할 때, 참조광에 비하여 물체광의 위상이 변화한다. 또한 관측각  $\theta_v = 0$ 이므로 Eq.(2-24)는 Eq.(2-25)과 같이 표현되고, 대상물에 발생하는 변형을 계산할 수 있는데 이는 Eq.(2-26)와 같다.[13]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_i) d \quad (2-25)$$

$$d = \frac{\lambda}{2\pi (1 + \cos \theta_i)} \Delta\phi \quad (2-26)$$

### 3-2. 전단간섭계 및 전단간섭무늬의 해석

Fig. 2-15은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스페클의 발생은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD의 상면(Image plane)에 맺히게 된다.[19]

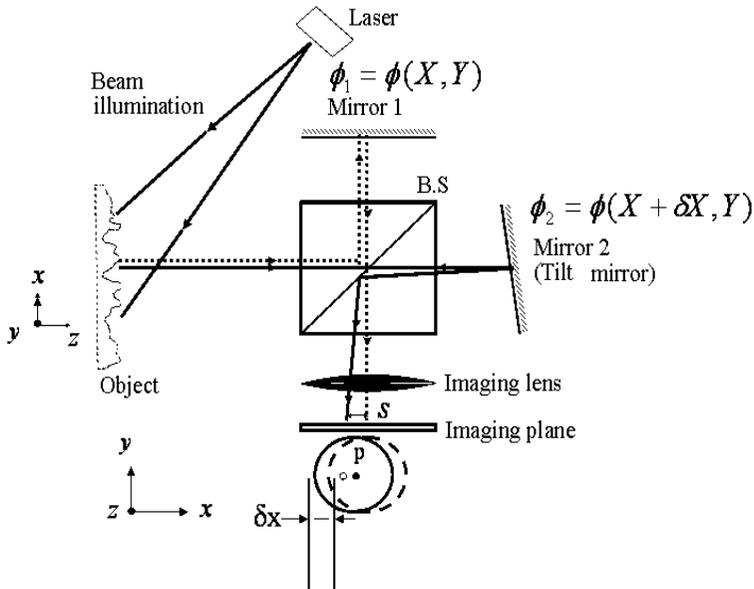


Fig. 2-15 Speckle pattern shearing interferometry

이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 면외변형측정 간섭계와 동일하며, 변형 전 후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 면외변형측정 간섭계와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다.

Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향,

기울어진 각도를 전단량이라고 하고  $\delta_x$ 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다.

이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의  $P_1$ 과  $P_2$ 에  $\phi_1 = \phi(x, y)$ 와  $\phi_2 = \phi(x + \delta_x, y)$ 와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 다음과 같다.

$$\phi = \phi(x + \delta_x, y) - \phi(x, y) \quad (2-27)$$

변형에 의한 위상차의 변화  $\Delta\phi$ 는 Eq.(2-28)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하며, 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 ESPI와 유사하기 때문에 Eq.(2-24)를 이용하게 된다. 이때 Eq.(2-24)와 차이점은 Eq.(2-28)에 표현한 바와 같이  $\mathbf{d}$ 와  $\mathbf{d}'$ 은 임의의  $P$ 에 조사된 두 점의 각각의 변형이다[14][15].

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi = (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_2) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (2-28)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_v) \cdot (\mathbf{d} - \mathbf{d}') \quad (2-29)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 Eq.(2-29)을 Eq.(2-30)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-30)$$

$\Delta d$ 는 테일러급수에 의해 Eq.(2-31)와 같이 표현할 수 있으며,  $\Delta x$ 는 상면에서 전단량  $\delta_x$ 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 Eq.(2-31)에서 2차 이상의 고차항은 무시하면, Eq.(2-31)은 Eq.(2-32)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots\end{aligned}\tag{2-31}$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial d}{\partial x} \right) \delta x\tag{2-32}$$

### 3-3. 압력배관 결함 깊이 검출 및 해석

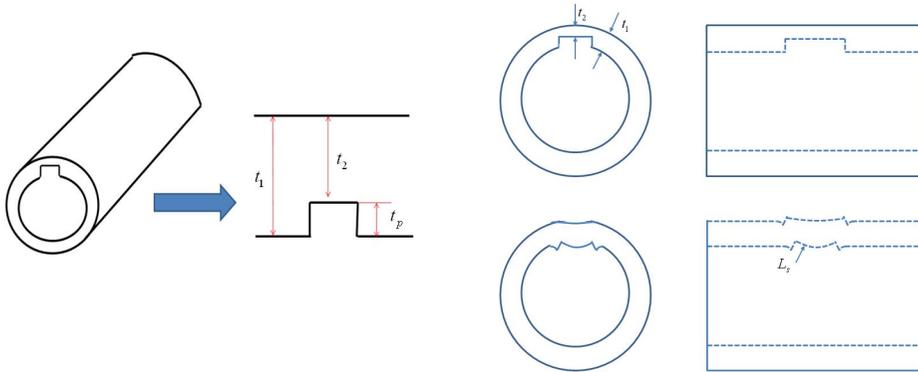


Fig. 2-16 Thickness defects due to changes in pressure

본 연구에서 압력용기의 결함깊이를 측정하기 위하여 기본 개념은 압력용기에 압력을 가하였을 경우 시험편이 변형전에서 변형후로  $\delta$ 만큼 늘어남을 확인할 수 있다. 이를 착안하여 전단간섭계측 시스템을 이용하여 압력용기의 내압변화에 따른 면외변형을 측정하여 대변형량, 압력, 결함깊이를 이용하여 압력용기의 결함깊이를 정량평가하였다. 압력용기 결함깊이의 측정은 Fig. 2-16에서 나타낸 것과 같이 내압변화에 따른 결함깊이는 내부표면과 내부표면 간의 두께과 결함표면과 외부표면 간의 두께차이를 통해 Eq.(2-33)로 구할 수 있다.

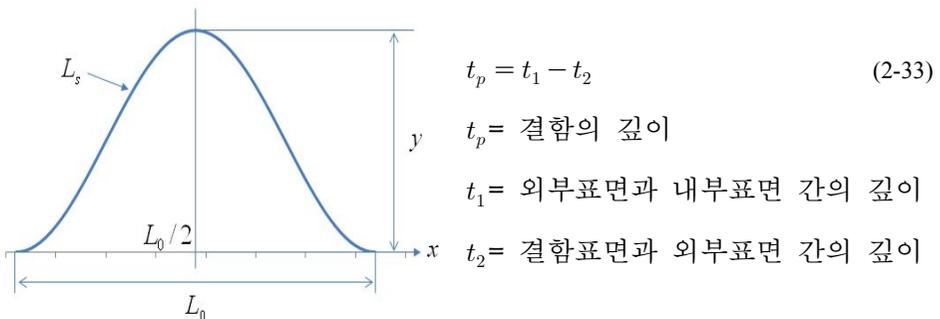


Fig. 2-17 Surface deformation internal defect by external load

y에 대한 함수는 Eq. (2-34)로 표현, y함수의 변의 길이(호의 길이)를 Eq. (2-35)과 같이 구한다. Eq. (2-35)에서  $L_s$ 는 전단간섭계를 통하여 측정된 결과를 적분을 취하여 계산한다.

$$y = k(1 - \cos \frac{2\pi}{L_o}x) \quad (2-34)$$

$$L_s = L_o \frac{k \cdot 2\pi \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o}}{2} \sqrt{(k \cdot \frac{2\pi}{L_o} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o})^2 + 1} + \frac{1}{2} \ln \left| k \cdot \frac{2\pi}{L_o} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o} + 1 \sqrt{(k \cdot \frac{2\pi}{L_o} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_o})^2 + 1} \right| \quad (2-35)$$

변형량  $\delta$ 는 결함 부위를 평판으로 가정하고, 인장력을 받는 빔과 같다고 가정하게 되면, Eq. (2-36)로 표현한다.  $L_s$ 의 호의 길이를 구한 값은 변형전의 길이와 연신된 변형량  $\delta$ 의 합으로 표현한다.

$$L_s = L_o + \delta \quad (2-36)$$

( $L_s$  = 변형의 변위 길이,  $L_o$  = 결함의 길이,  $\delta$  = 변형량)

$L_o$ 는 Fig. 2- 17와 같이 전단간섭계를 통하여 획득된 미분 기울기를 통하여 적분을 수행하고, 변형량 기울기를 통하여 양 끝단의 길이를 통하여 획득, Eq.(2-36)를 정리하여 Eq.(2-37)와 같이 나타냄

$$L_s - L_o = \delta = \frac{PL_o}{bt_2E} \quad (2-37)$$

$P$ =압력,  $b$ =시험편 결함의 폭,  $t_2$ =결함표면과 외부표면 간의 깊이,  $E$ = 탄성계수

Eq.(2-37)의 미지변수  $t_2$ 를 구하기 위해 Eq.(2-38)와 같이 표현 할 수 있다

$$t_2 = \frac{bE(L_s - L_o)}{PL_o} \quad (2-38)$$

$t_2$  = 결함표면과 외부표면 간의 깊이

Eq.(2-38)를 이용하여  $t_p$ 에 대한 배관의 결함깊이를 구하는 식을 Eq.(2-39)과 같이 최종적으로 표현한다.

$$t_p = t_1 - t_2 \quad (2-39)$$

$t_p$  = 결함의 깊이

위의 Eq.(2-39)을 이용하여 전단간섭계를 이용하여 배관 시험편의 변형량 및 결함의 깊이를 획득 할 수 있으며 획득한 결함의 길이와 변형량을 이용하여 배관 결함부의 깊이를 획득할 수 있다.

## 제 4 절 유한요소법 (Finite Elements Method)

### 4-1. 유한요소법 (Finite Elements Method)

유한요소법 (Finite Elements Method:FEM)은 공학문제를 수치적으로 푸는 매우 조직적인 방법의 하나이다.

유한요소법을 타 근사 방법과 비교하는 관점에서 그 특징을 한 마디로 요약한다면 유한요소(Finite Element)라 불리는 물리적으로 혹은 편의상 나누어진 요소 위에 정의된 특정성질의 기저함수(Basis function)를 주어진 문제에 맞는 어떤 적분형의 원리에 사용하여, 연속체 문제를 유한차원 문제로 수식화 하는 근사적 방법이다. 이 정의에서 위의 두 가지 특징이 타 근사 방법과 구별되게 하는 요점이 된다.

예를 들어 소위 Ritz 법에서는 근사함수, 즉 기저함수(basis function)를 선택하는 데에 있어서 유한요소법에서 요구되는 특정성질과 다르고, 유한차분법(finite difference method)은 적분 원리와는 상관없이 미분을 차분(difference)으로 바꾸어 수식화하는 것이다.

특정 성질의 기저함수라 함은 문제에서 구하고자 하는 함수의 값을 소위 절점에서의 값으로 보간하게 되는데, 이 보간함수를 위한 기저함수가 해당 절점에서는 1의 값을, 다른 모든 절점에서는 영의 값을 가지는 함수로, 이 기저함수에 곱해질 계수가 절점에서 찾으려 하는 함수 값과 같게 되어 바로 절점 값을 나타낸다. 그리고 적분형 원리라 함은 에너지 최소화정리와 같은 원리로 변분법에서 다루는 적분량을 최소화 시키는 원리에 기본을 두고 있기 때문에, 분할된 각 요소에서 적분을 계산하여 같은 요령으로 전체 영역에 대해 합치는 방식이라는 것이다. 이러한 두 특성 때문에 유한요소 해석 절차에서 주요 관심은 각 요소에 해당하는 대표적인 작업만 하여 소위 요소 행렬을 구하는 것으로 전체 방정식은 간단한 조립과정으로 얻을 수 있다. 이러한 절차는 아주 일관된 작업이므로 이루어지는 범용 프로그램의 개발이 가능한 것이다.[14]

## 4-2. 유한요소법의 기본과정

유한요소법으로 어떤 문제를 해석하고자 할 때 다음에 열거한 5가지 기본과정을 거쳐서 유한요소 방정식을 유도하고 그 해를 구하여 문제를 취급한다.

### ① 영역의 분할

취급하려는 문제의 전체 영역을 적절한 요소로 분할, 구성하고 절점과 요소들을 정의한다.

이는 유한요소법을 적용할 때 가장 기본이 되는 과정이다.

### ② 형상함수의 선정

주어진 문제와 전체 영역을 구성하는 요소의 형태에 따라 다루려는 문제의 주어진 조건들을 만족하며, 정해에 수렴하기 위한 조건들을 만족하는 형상함수를 적절히 선정한다.

만일 적절하지 못한 함수를 택하게 되면 그 결과에 신빙성을 부여할 수 없다.

### ③ 요소의 유한요소방정식의 유도

요소의 포텐셜을 구하여 변분법에 의하거나 주어진 미분방정식을 직접 이용하여 가중잔여법에 의해 미분방정식과 등가인 유한요소방정식을 구성한다.

### ④ 전체영역에 대한 유한요소방정식의 구성

③의 과정에서 구한 각 요소의 유한요소방정식을 조립하여 전체 영역에 대한 것을 구성한다.

여기에서 최종적인 방정식은 다원연립방정식의 형태로 구해진다.

이 연립방정식에 주어진 경계조건이나 초기조건 등을 대입하여 변형한 후 그 연립방정식의 해를 구한다. 이렇게 해서 영역변수의 절점값으로 미분방정식의 해가 주어진다.

⑤요소의 결과로서 생기는 물리량을 계산

영역변수의 절점값이 구해지면 각 요소에서 응력 등의 물리량을 계산한다.

유한요소법을 적용할 때 이상의 과정을 거쳐서 컴퓨터 프로그램에 의해 문제를 취급하는데, 전 과정을 프로그램으로 해결할 수도 있고, ②의 과정에서 ⑤의 과정만 프로그램 내에서 처리 할 수도 있다.[14]

## 제 3 장 실험장치 및 구성

### 제 1 절 측정 시스템 구성

#### 1-1. 전단간섭계(Shearography) 구성

본 연구에서는 압력배관 면의 변형 측정을 위하여 광학부품을 이용해 전단간섭계(Shearography)시스템을 구성하였다. Fig.3-1은 전단간섭계의 계략도이다. 아래의 계략도를 토대로 구성한 전단간섭계는 광원인 ND:YAG LASER(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) source와 광을 반사하는 Mirror, 반사된 광을 확산하여 대상체 표면에 조사하는 Expanded Lens, 빔을 분리하는 Beamsplitter, 위상이동을 조절하기 위한 PZT Mirror, 전단각과 전단량을 조절하기 위한 Shearing Mirror(tilting mirror), 이미지획득을 위한 CCD camera가 사용되었다. LASER에서 발진된 광은 미러와 렌즈를 통해 대상체 표면으로 조사되어 대상체 표면에서 난반사된 후 줌렌즈와 Beamsplitter를 거쳐 각각 PZT Mirror와 Shearing Mirror(Tilting Mirror)에서 반사된 후 CCD camera의 Image plan에 맺히게 된다.

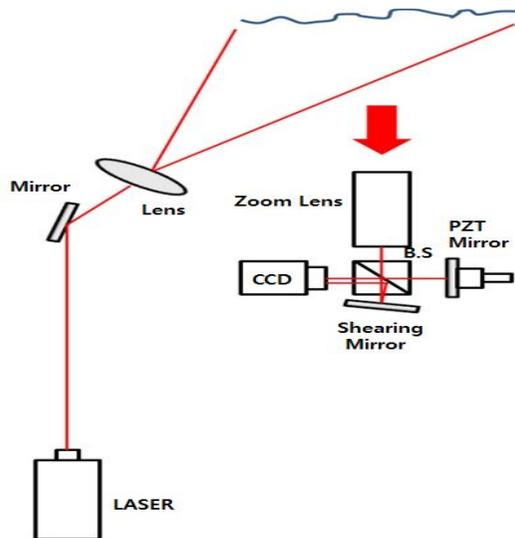


Fig. 3-1 Schematic diagram Shearing interferometer

CCD camera는 USB 3.0 CCD Camera(Basler Ace acA1300-30um Monochrome)를 사용하였으며 위상이동을 제어하기 위해 THORLABS 사의 PZT Actuator를 사용하였다.

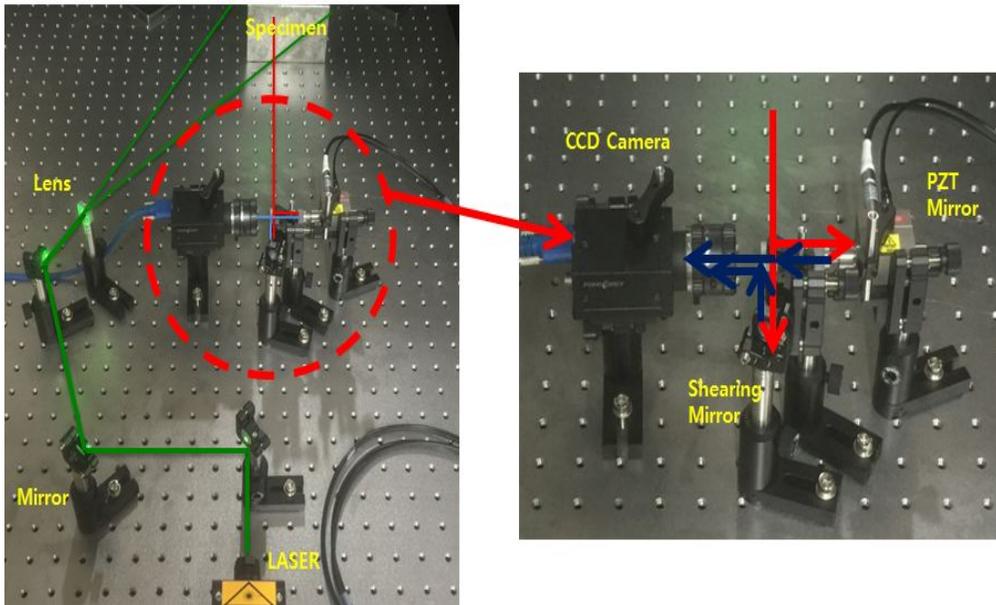


Fig. 3-2 Shearing interferometer

Table 3-1 Components of the development system

부품명	수량
ND;YAG LASER	1
CCD Camera	1
Qube Beam Splitter	1
PZT Actuator	1
PZT Controller	1
Mirror	5
Expanded Lens	1
각종 광학부품 및 고정 Holder	

## 1-2. 면외변형 측정 소프트웨어 개발

구성된 전단간섭계를 이용하여 면외변형을 측정하기 위해 National Instrument사의 LabVIEW 2012을 이용하여 변형측정 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 간섭계를 제어하는 부분과 변형이미지 획득 후 분석하는 부분으로 나뉜다.

프로그램 구동시 우선적으로 카메라를 이용한 이미지 획득 후 이를 분석하는 순서로 프로그램이 구동된다. 간섭계 제어에 필요한 프로그램은 크게 두가지로 나뉜다. 변형 전과 후의 이미지를 획득하는 카메라 제어 프로그램과 PZT Mirror를 제어하는 PZT제어 프로그램으로 나뉜다.

카메라 제어 프로그램은 PZT가 1step 이동했을시 1장을 촬영하는 알고리즘으로 개발되었으며 Reference Image 4장을 획득한 후 실시간으로 들어오는 정보를 감산처리 한다. 이후 대상체에 변형이 생긴 후 같은 방법으로 4장을 획득 한 후 변형 전과 후의 이미지를 이용하여 분석한다.

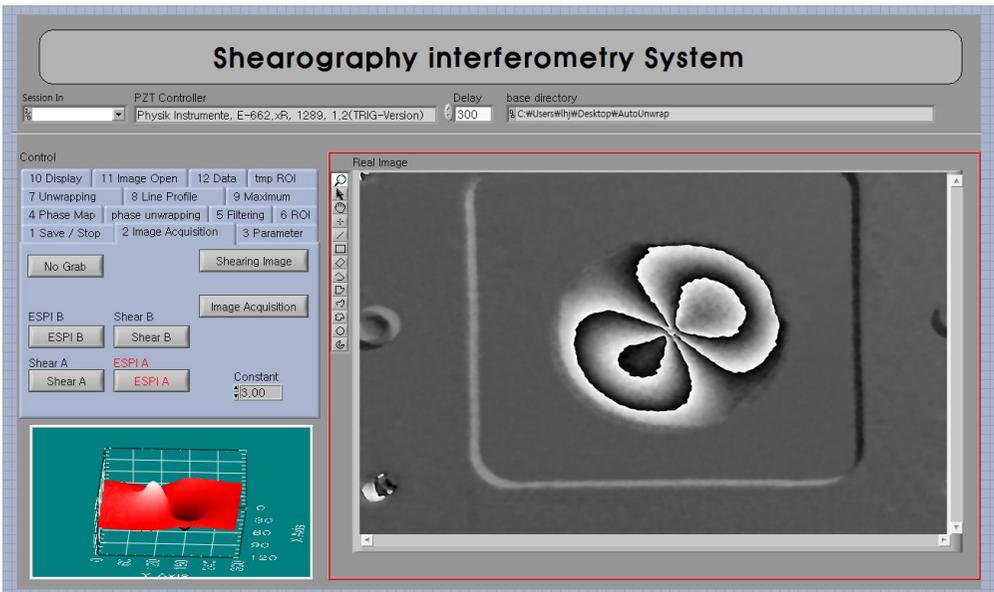


Fig. 3-3 Shearography interferometry program using LabVIEW

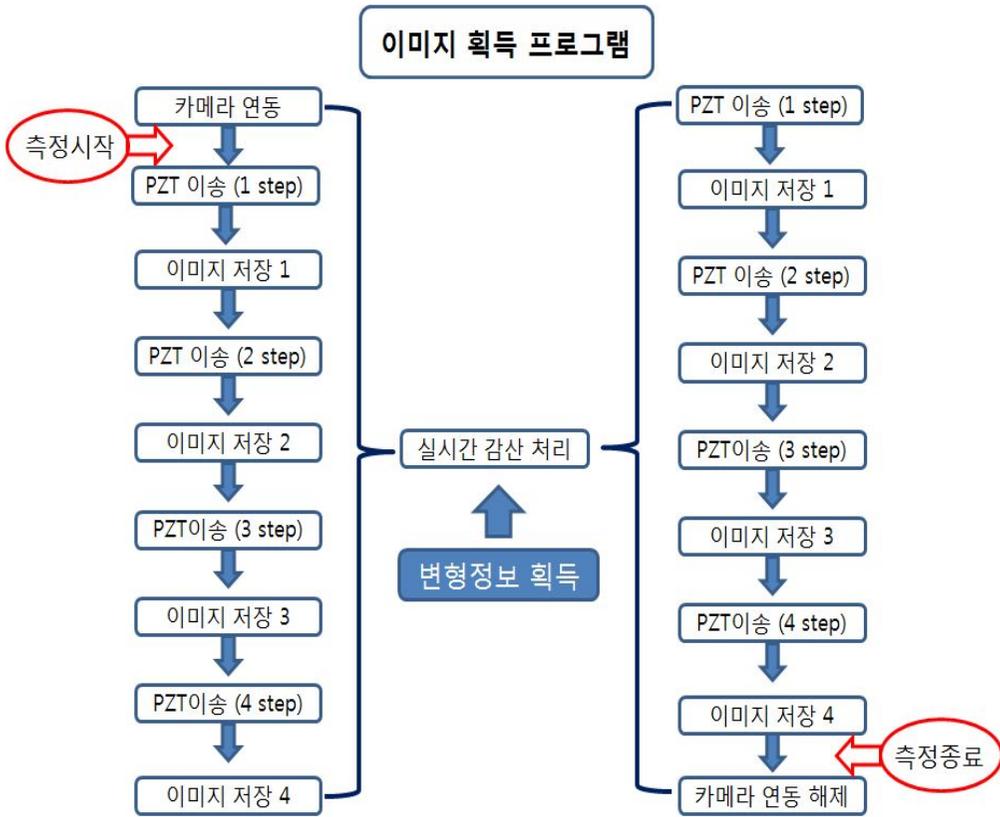


Fig. 3-4 The image acquiring program algorithm

위상이동 기법을 적용하기 위하여 반드시 필요한 PZT 제어를 위하여 RS-232통신을 이용하였으며, 레이저 파장의 1/4씩 정밀하게 PZT Actuator를 작동하도록 하였다.

카메라 제어 프로그램을 이용하여 획득한 이미지들은 이미지분석 프로그램에서 면외변형량 측정에 사용된다. 기존에 획득한 이미지는 감산처리하여 얻어진 결과를 Phase map이라고 하며 Phasemap은 위상정보를 포함하고 있다.

위상정보를 해석하기 위해서는 Phasemap에 존재하는 노이즈를 제거한 후 unwrapping을 실시하여 최종적으로 분석할 수 있다.

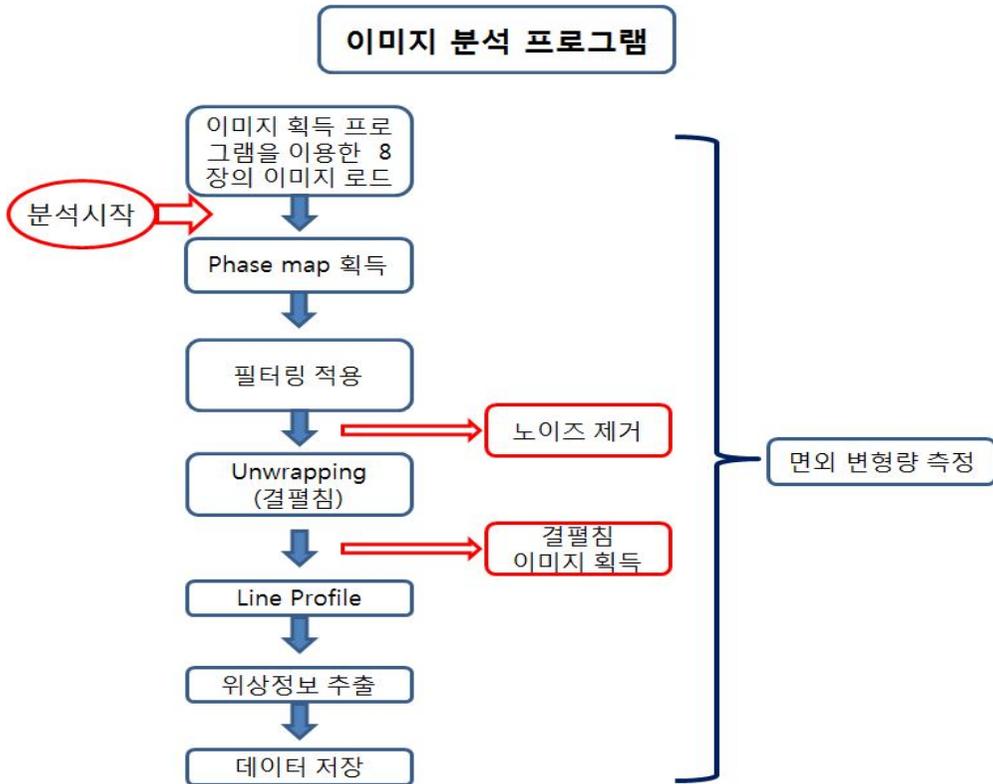


Fig. 3-5 Image analysis program algorithm

Phasemap를 해석하여 변형을 정량화하기 위하여 결필침을 수행하게 되는데, 노이즈가 포함된 Phasemap는 정량화 결과에 치명적인 오류를 포함하게 된다. 이러한 이유로 결필침 전에 반드시 Phasemap에 포함된 노이즈를 완벽하게 제거해야 한다. 필터링 알고리즘을 이용하여 Phasemap에 존재하는 노이즈를 제거 한 후 Unwrapping 알고리즘을 이용하여 이미지를 결필침한다. 결필침은 필터링된 Phasemap의 위상값을 읽어들이고, 전 후 화소에 대한 위상차를 계산하여, 위상차의 절대값이 임계값( $3\pi/2$ )보다 크다면 전 후 화소 사이에서  $2\pi$ 의 차이가 있는 것으로 판단하고, 별도의 배열에 차수의 변화를 저장한다. 이때 계산된 위상차가 0(zero)보다 크다면 차수가 감소한 것으로 하

고, 0보다 작다면 차수가 증가한 것으로 하여 차수를 저장한다. 이렇게 저장된 차수에  $2\pi$ 를 곱하고 해당되는 Phasemap의 위상값을 더해주면 대상물에 발생한 변형의 결과를 정량적으로 획득할 수 있게 되는데 이를 Fig. 3-6에 흐름도로 표현하였으며, Fig. 3-7 (a)는 임의의 Phasemap를 결렬침이 적용되기 전, 후의 관계를 표현하였다. 이때 점선은 Phasemap값이며, 실선은 결렬침된 실제 변형의 결과를 나타내는 것이다. Fig. 3-7 (b)는 결렬침한 결과의 2차원 표현이다.

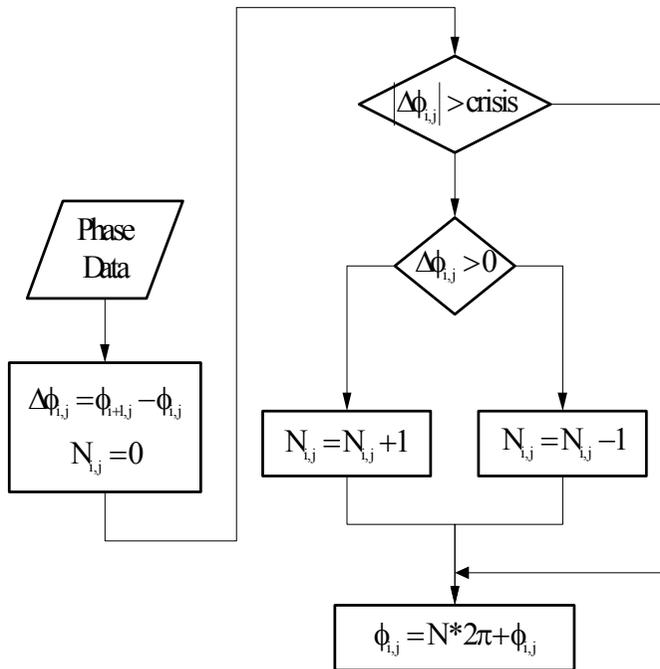
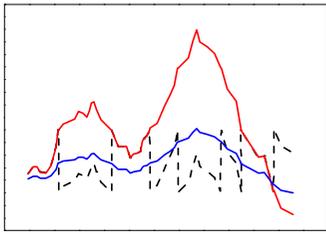
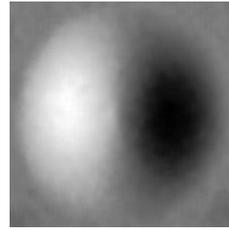


Fig. 3-6 Flowchart of unwrapping

또한 Fig. 3-7의 (b)는 컴퓨터의 이미지 표현 한계 때문에 0~255사이의 회색조로 표현되었지만, 실제 계측결과는 별도의 배열에 저장되며, 수치상 표현이 가능하다.



(a) Line profile



(b) 2D Image

Fig. 3-7 Result of unwrapping

### 1-3. Shearography 상용장비

비파괴 검사(NDT) 방법중의 하나로 재료의 표면 정보를 제공해주는 측정시스템으로 DANTEC DYNAMICS (덴마크) 사의 상용 Shearography(Q-800) 제품을 사용하였다. 이 시스템의 기술은 비접촉식이며 재료의 내부 품질에 대한 신속하고 정확한 정보를 제공하는 비파괴 테스트를 위한 휴대용 소형 측정 시스템으로서 Fig. 3-1와 같이 Shearography 센서, 고해상도 CCD 카메라, 센서 내부에 장착된 Diode laser, Controller로 구성이 되어 있다. 레이저는 Diode laser (파장: 780 nm, 출력: 50 mW)를 사용하며, 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 Diode를 통해 확산된 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사된다. 센서 내부 모터 제어를 통한 전단량과 전단방향, 전단각도를 조절할수 있으며 PZT 제어를 통한 4단계 위상이동기법을 적용하여 위상지도(Phase Map)를 얻게된다. 전체 시스템은 ISTR 4D 소프트웨어 플랫폼을 이용하여 노트북 PC에서 제어된다.



Fig. 3-8 Shearography System

Table 3-2 Specification of shearography system

Technical Data	Q-800
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)
Measuring Area	300mm×300mm with 2 laser diode
Measuring Sensitivity	0.03 $\mu$ m/shear distance
Sensor Head Dimension	W×H×D = 70×70×160mm <sup>3</sup>
Laser	Diode 50mW, 780nm
Laser Diodes	up to 870mW

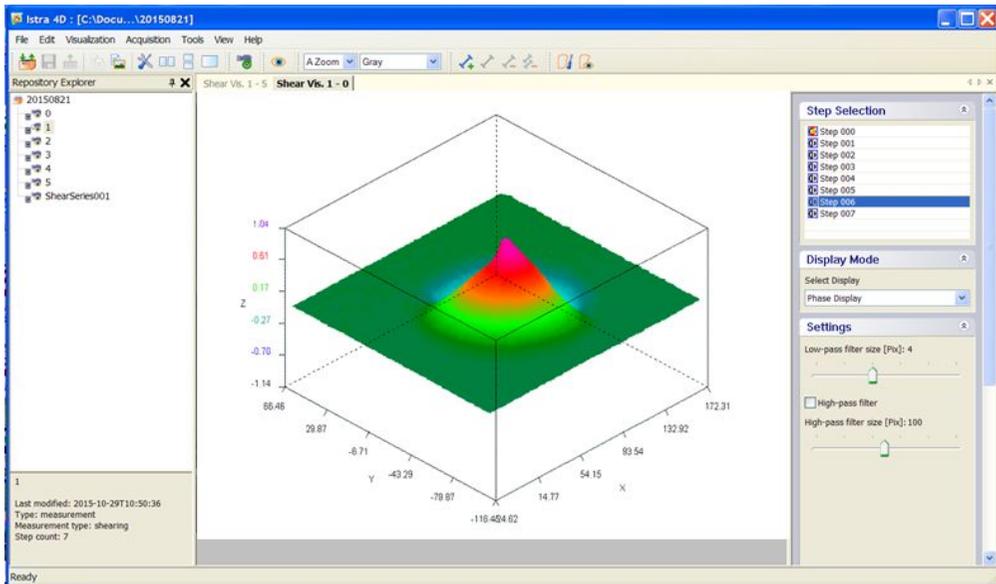


Fig. 3-9 Shearography System program

#### 1-4. 유한요소해석 프로그램

CAE(Computer Aided Engineering)란 통상 컴퓨터를 이용한 설계제품의 공학적 평가, 모의시험, 최적화, 검증, 시각화, 해석/분석 과정을 통해 양질의 제품 생산과 개발기간, 제품단가, 개발비용등의 감소와 안전성 등 다양한 인자를 감안한 효과적 설계 대안을 제시하는 설계업무를 지칭한다.

CAD(Computer Aided Design)는 컴퓨터를 이용/응용한 설계이며 CAM(Computer Aided Manufacturing)은 컴퓨터를 이용/응용한 제조/제작을 나타낸다. 유한요소해석에는 기본적으로 3단계의 절차를 거쳐 진행하는데 첫 번째로 해석하고자 하는 대상물을 프로그램을 통해 제작하는 Pre-processing 단계가 있다. Fig. 3-10는 Pre-processing(NX 8.5)의 구동화면이다.

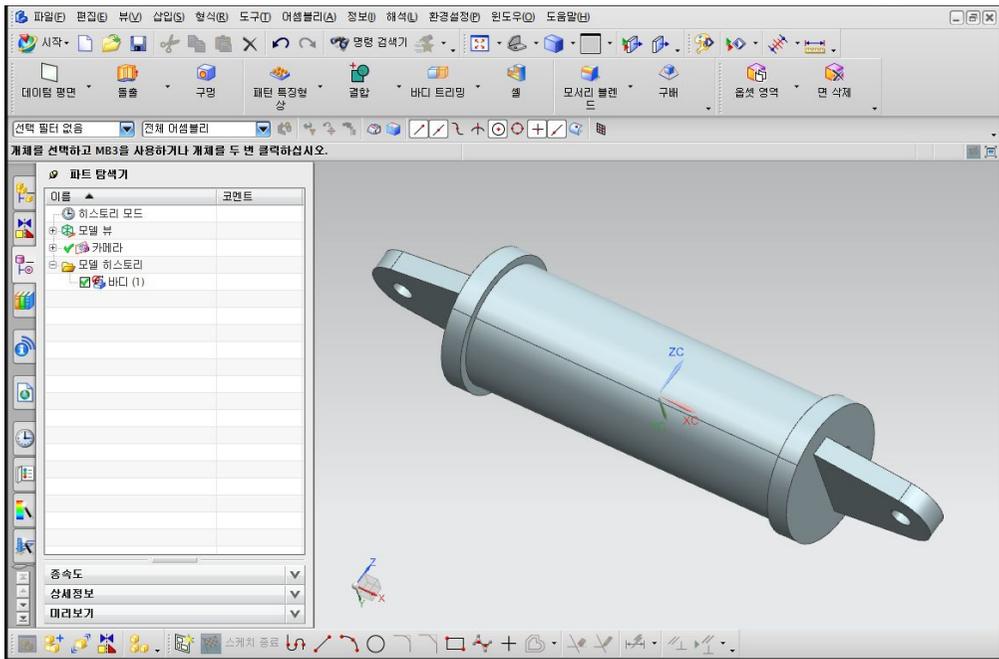


Fig. 3-10 Result of Pre-processing

Pre-processing 단계에서 설계된 모델을 유한요소해석하기 위해 두 번째 단계인 solver를 이용하여 모델의 재료와 물성값을 입력하고 변수조건을 입력한

다. 또한 측정하고자 하는 영역을 설정하고 구속조건을 부여한다.

Fig. 3-11은 NX 8.5 version에 있는 Solver인 NASTRAN을 이용한 대상물에 작용하는 하중 및 구속조건을 표현한 그림이다. Fig. 3-12은 Solver를 이용하여 해석한 데이터를 그래프화 시켜주는 postprocessing의 모습이다.

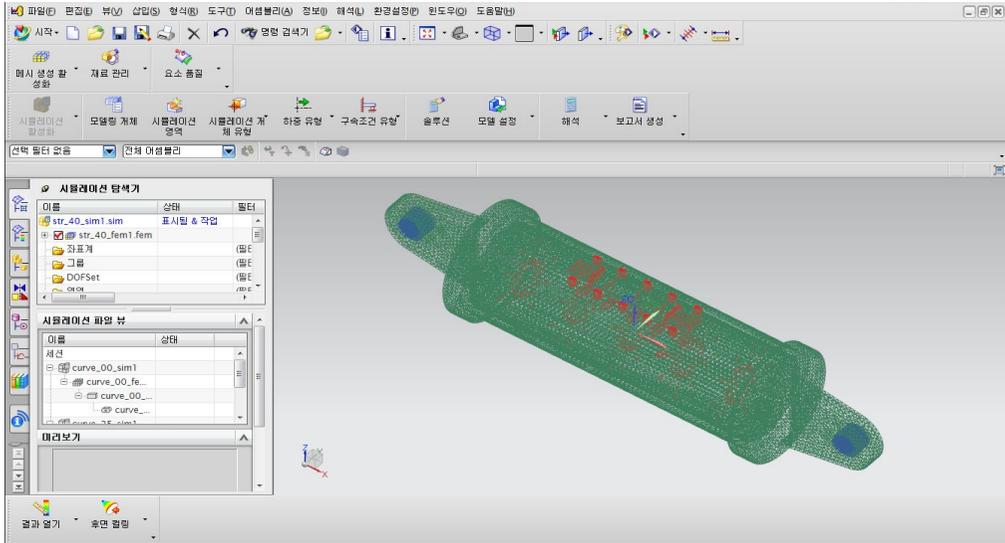


Fig. 3-11 Result of Solving

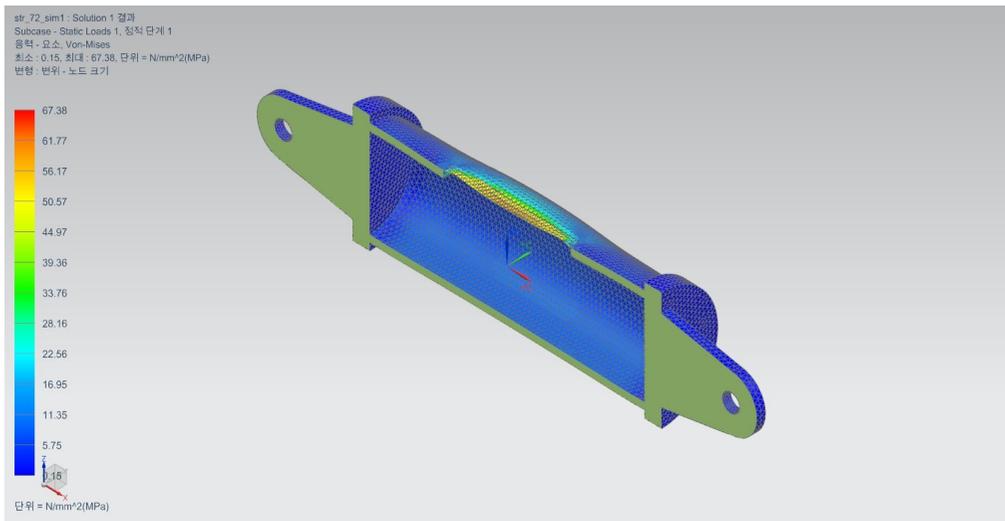


Fig. 3-12 Result of postprocessing

## 제 2 절 시험편 제작

### 2-1. 고무평판 시험편 제작

면외변형 측정 시스템의 신뢰성 검증을 위해 고정프레임 재질은 Steel 이고, 평판의 4면을 서로 고정시킨 고무평판 시험편을 제작하였다. 측정부의 크기는 100×100으로 설정하여 제작하였다. 고무시험편을 고정하기 위해 외각 프레임 내부에 위치할 폴리머판 중심부에 지름 50mm의 홀을 가공하여 제작하였다. 폴리머 판 위에 고무를 본드를 이용하여 접착한 후 스틸소재의 고정용 지그에 고정하여 제작하였다. Fig.3-13는 고무평판 시험편의 제작 도면과 제작된 형상이다.

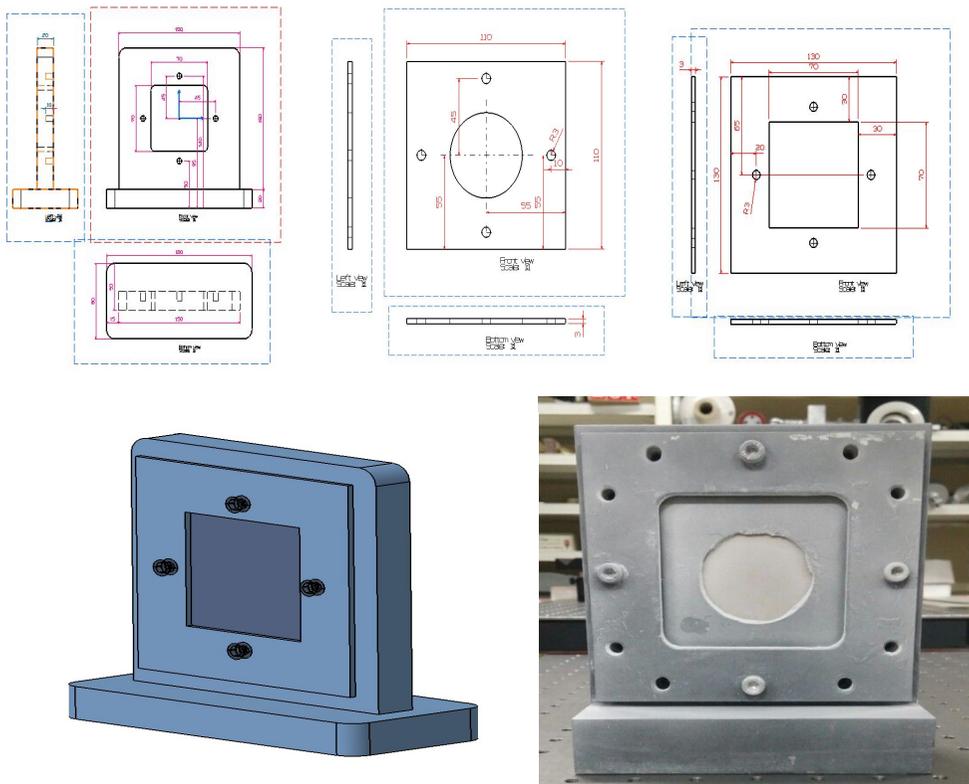


Fig. 3-13 The rubber reputation specimen

## 2-2. 압력배관 시험편 제작

압력배관의 재질은 현재 발전 플랜트 배관계에서 일반적으로 사용되는 탄소강 계열인 SS400을 사용하였으며 Fig. 3-14와 같이 직관형태로 제작되었다. 각 시험편마다 결함의 폭과길이 의 변화를 주어 제작하였고, 결함의 위치는 동일한 위치에 가공하였다. Fig. 3-15, 3-16은 직관의 2D 설계도면과 3D 모델링이다. Table 3-1은 시험편 제작에 사용된 SS400 재질의 정보이다.

**Table 3-3 Material Properties of SS400**

Base Metal Price	2.9 % rel
Density	7.8 g/cm <sup>3</sup> (490 lb/ft <sup>3</sup> )
Elastic (Young's, Tensile) Modulus	210 GPa (30 x 10 <sup>6</sup> psi)
Electrical Conductivity	12 % IACS
Elongation at Break	25 %
Specific Heat Capacity	480 J/kg-K
Strength to Weight Ratio	62 kN-m/kg
Tensile Strength: Ultimate (UTS)	480 MPa (70 x 10 <sup>3</sup> psi)
Tensile Strength: Yield (Proof)	270 MPa (39 x 10 <sup>3</sup> psi)
Thermal Conductivity	50 W/m-K
Thermal Diffusivity	13
Thermal Expansion	11 μm/m-K

**Table 3-4 Specification of shearography system**

	길이(L, mm)	폭(H, mm)	깊이(D, mm)
SS-1-1-1	150	20	7.2
SS-1-1-2	100		
SS-1-1-3	70		
SS-1-1-4	30		

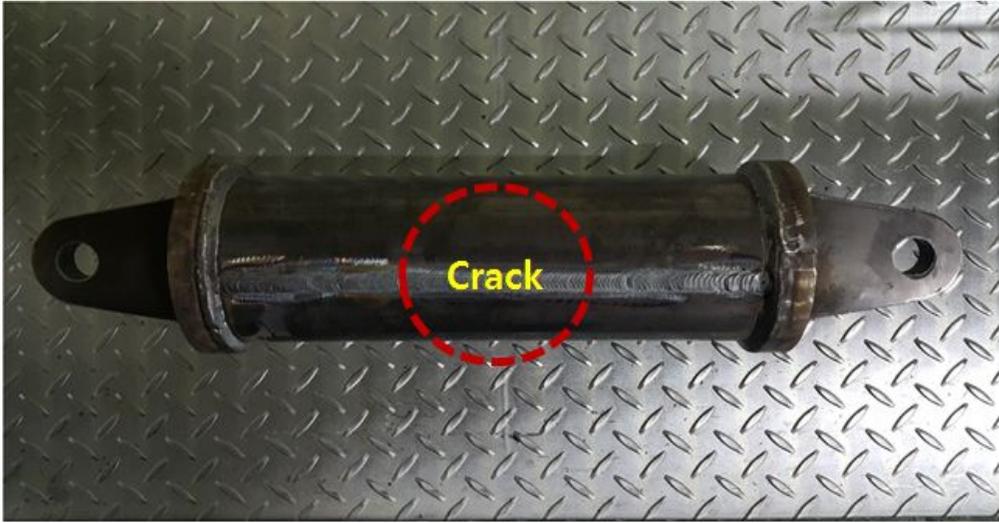


Fig. 3-14 Fabricated pressure piping(Straight pipe)

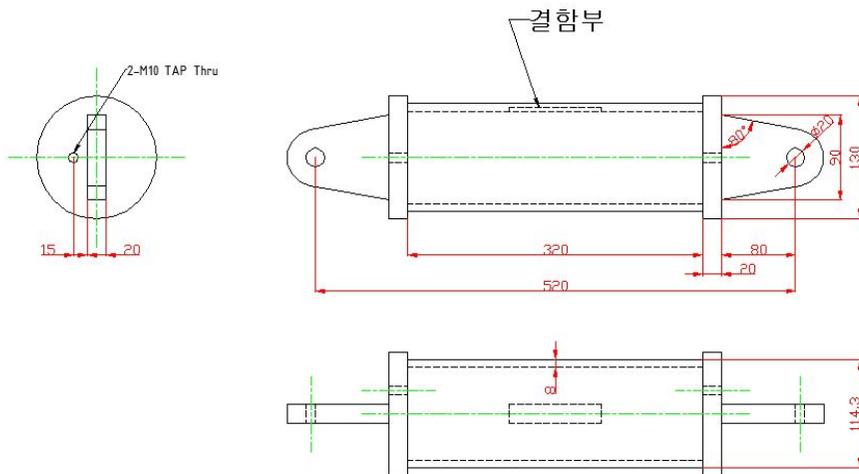


Fig. 3-15 Pressure Piping (straight) design drawings

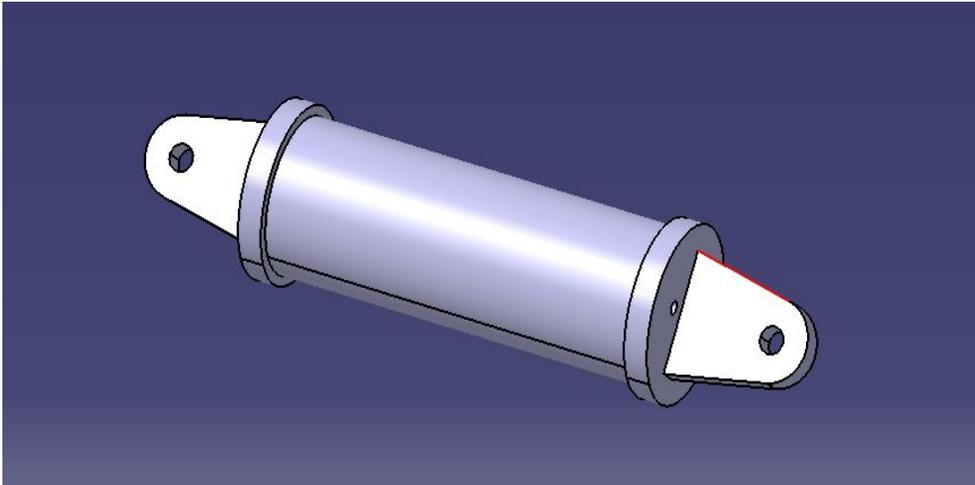


Fig. 3-16 Pressure Piping (straight) 3D modeling

직관시험편의 결함깊이(D)는 7.2mm, 폭(H)는 20mm로 일정하게 제작하였으며 30, 70, 100, 150mm의 길이(L)변화를 주었다. 결함의 형상 및 위치는 Fig.3-17에 표현되었다.

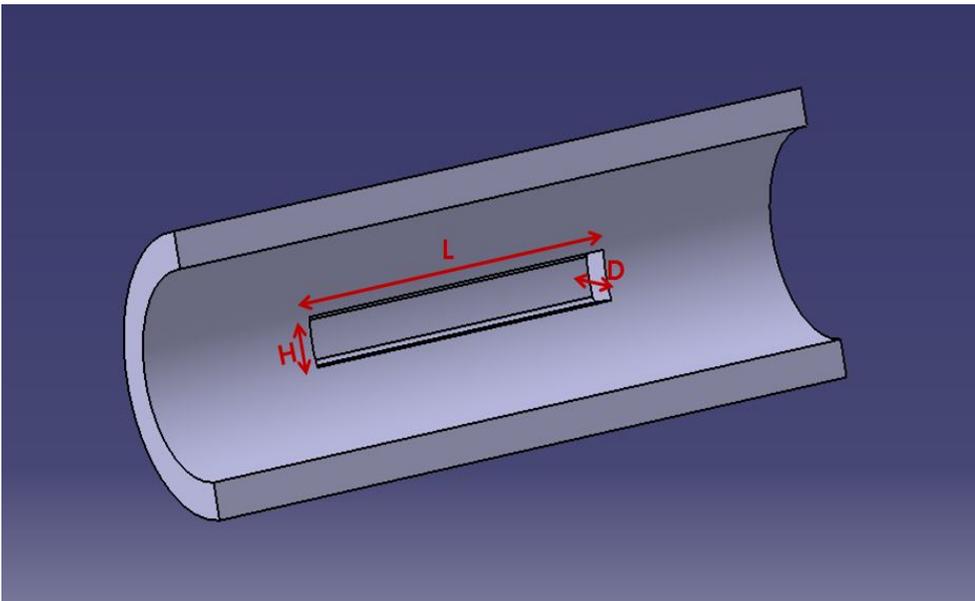


Fig. 3-17 Pressure Piping (straight) defect Information

## 제 4 장 실험방법 및 결과

### 제 1 절 고무평판 면외변형 측정

#### 1-1 실험방법

개발된 전단간섭계의 신뢰성 검증을 위하여 고무평판에 발생하는 면외변형을 측정하였으며, 이를 상용장비 Shearography System과 동일조건으로 측정하여 변형량을 비교하였다.

실험방법은 고무평판 시험편에 PZT actuator를 이용하여 고무평판 중심부를 밀어 표면의 면외변형을 전단간섭계를 이용하여 측정 비교하였다.

Fig. 4-1은 개발된 전단간섭계와 상용장비 Shearography 시스템을 이용한 고무평판 면외 변형 측정 구상도이다.

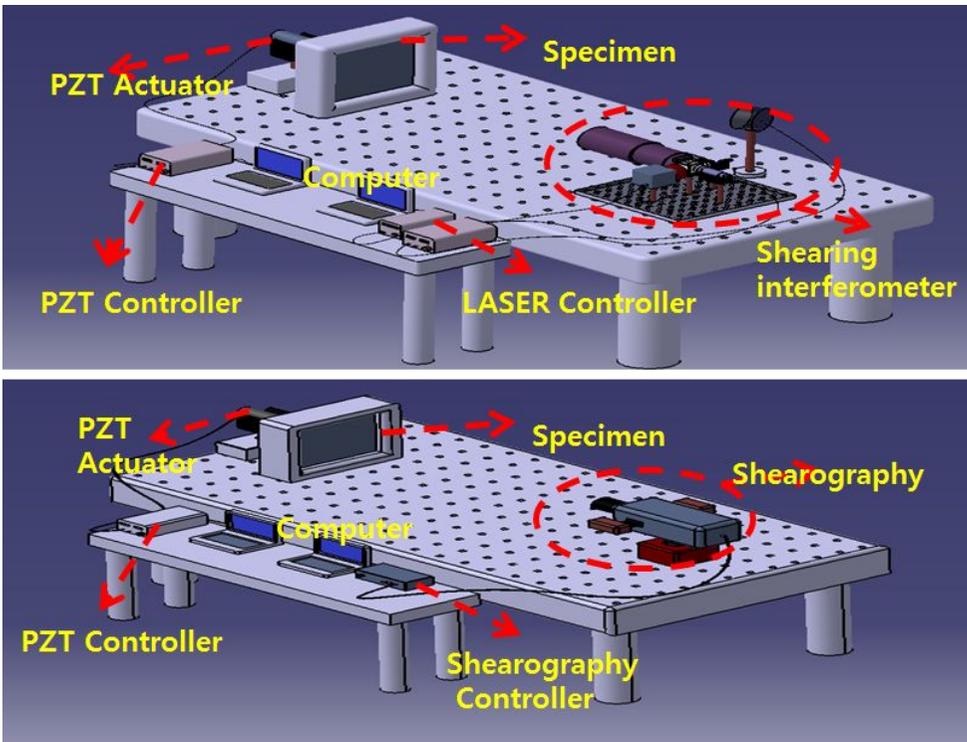


Fig. 4-1 Out-of-plane deformation experiments envisioned



Fig. 4-2 Measurement out of plane deformation using Shearing interferometer

변형을 발생하는 PZT actuator는 PZT Controller를 이용하여 전압변화를 이용하여 이송변형을 제어하였으며, 이송된 PZT가 고무판에 외력을 가하도록 하여 변형량을 조절할 수 있도록 하였다. 실험은 전단량을 16.7 pixel로 일정하게 하고, PZT를 이용하여 변형을 일정하게 증가시키면서 측정하는 방법으로 진행하였으며 변형은  $1\mu\text{m}$ 에 해당하는 전압(volt)을 단계적으로 증가시키면서  $5\mu\text{m}$  까지 증가 시키며 변형을 확인하였다.

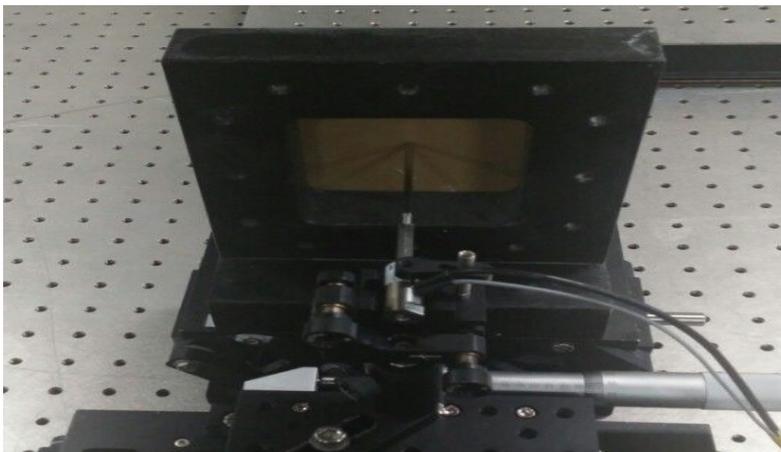


Fig. 4-3 Out-of-plane deformation generating device

## 1-2 실험결과

고무평판 시험편에 1~5 $\mu\text{m}$ 의 변형을 pzt actuator를 이용하여 변형을 가한 후 구성된 전단간섭계와 Shearography 상용장비 시스템을 이용하여 측정하였다. 전단간섭법을 이용한 변형측정은 면외변형측정에 사용되는 ESPI시스템과 다른 형태의 줄무늬 패턴을 나타내는데, ESPI시스템은 단일 폐곡선의 형태로 변형의 크기를 표현한다. 하지만 전단간섭법은 1개의 변형을 2개의 줄무늬 패턴으로 표현한다. 따라서 Phasemap data를 제안된 전단간섭계 정량적 측정을 위한 적분 방법을 이용하여 적분하여 데이터를 획득하였다. Phasemap을 이용한 데이터 획득에는 Shearing angle(전단량)과 Shearing distance(전단각)의 정보를 함께 입력하고 계산해야 정확한 데이터를 획득 할 수 있다.

전단량과 전단각은 대상체 표면에 투명자를 설치하고 전단각과 전단량을 찍어 계산할 수 있다. 본 실험에서의 전단각은 45°이며 전단량은 12pixel로 고정하였다. Fig. 4-4는 고무평판 실험 전 전단각과 전단량의 정보를 얻기 위해 촬영된 이미지이다.

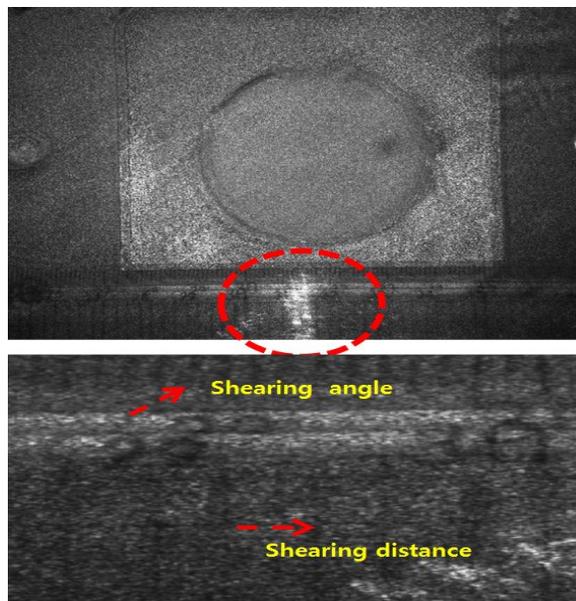


Fig. 4-4 Image for Shearing distance measurement

Table 4-1 Phasemap and line profile of pressure pipe

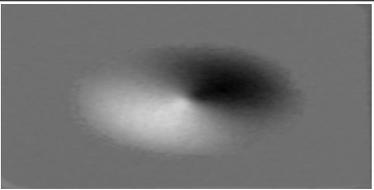
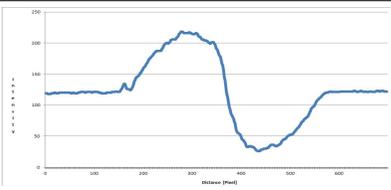
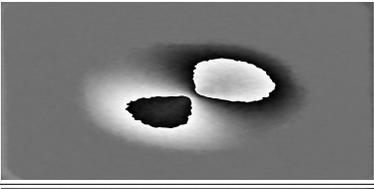
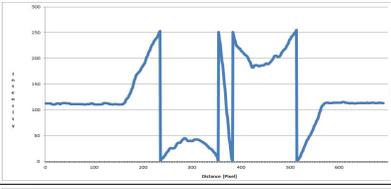
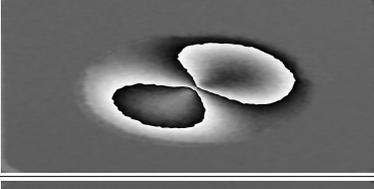
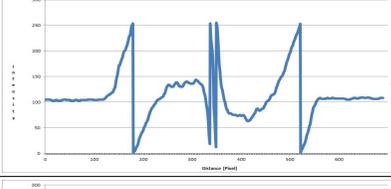
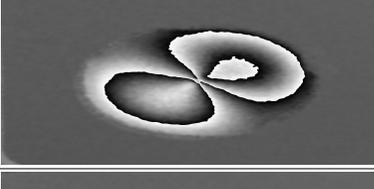
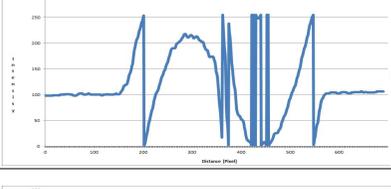
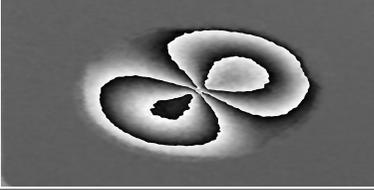
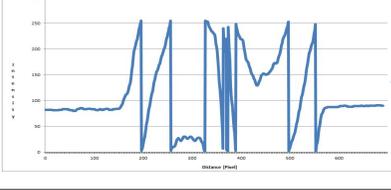
Deformation	Shearing interferometer	
	phasemap	profile
1 $\mu$ m		
2 $\mu$ m		
3 $\mu$ m		
4 $\mu$ m		
5 $\mu$ m		

Table.4-1은 구성된 전단간섭계를 이용하여 실험한 결과의 Phasemap과 Profile이다. 위 그림에서 볼 수 있듯이, 줄무늬가 증가함에 따라 Profile상에서 수직의 그래프가 많아지는 것을 확인 할 수 있다. Profile은 Phasemap의 이미지상에서 표현되는 Intensity값을 0~255 숫자를 이용하여 그래프화 한 것이다. Table 4-2는 phasemap을 unwrapping한 후, profile을 획득한 그래프와 적분한 profile이다.

Table 4-2 Unwrapping profile and Integral profile

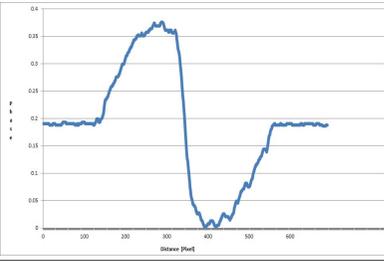
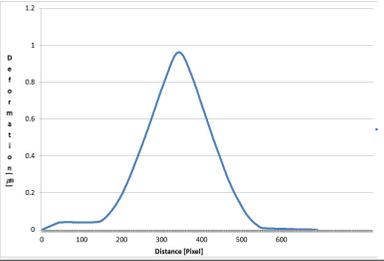
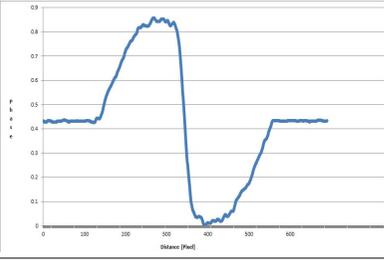
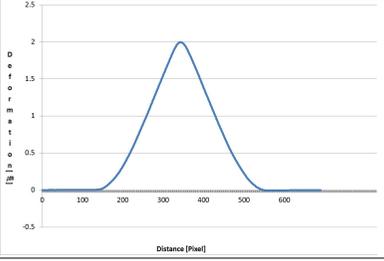
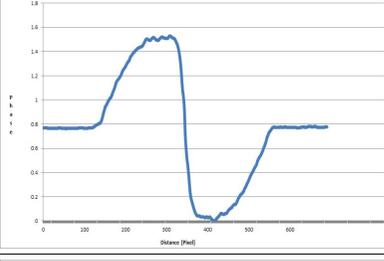
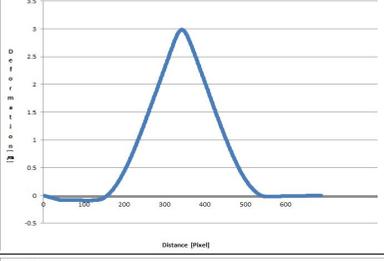
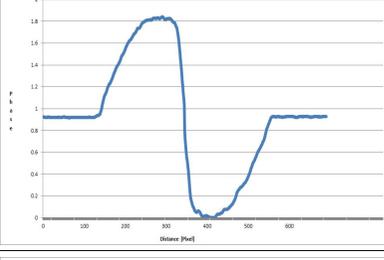
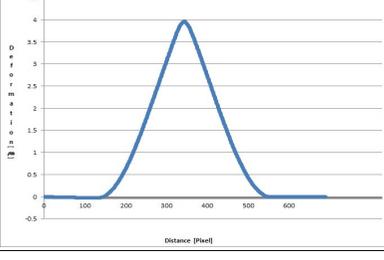
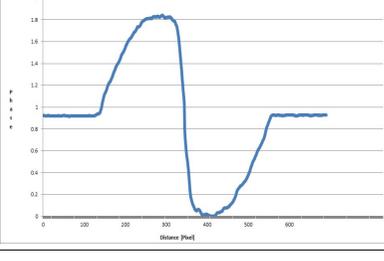
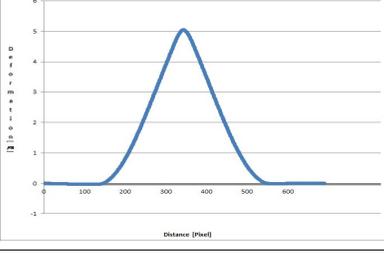
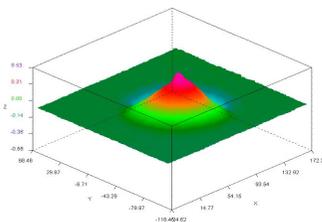
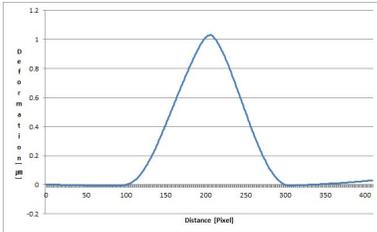
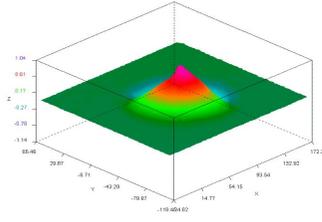
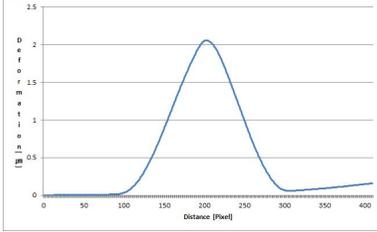
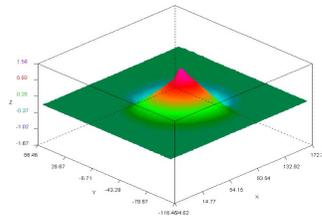
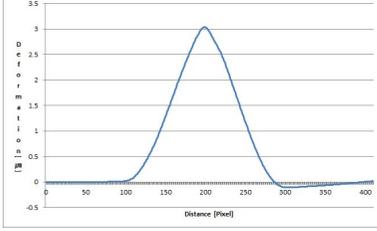
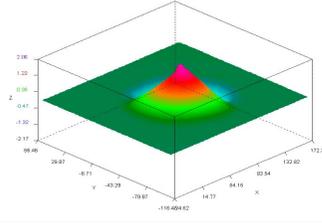
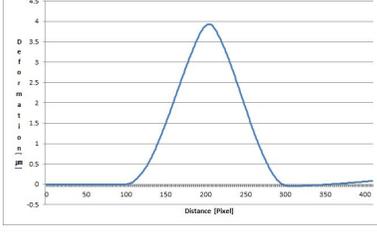
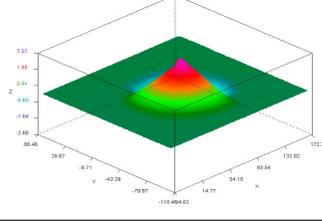
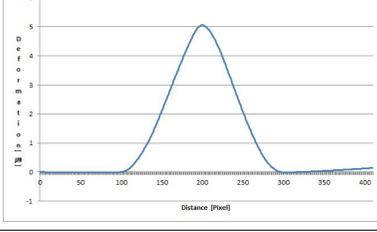
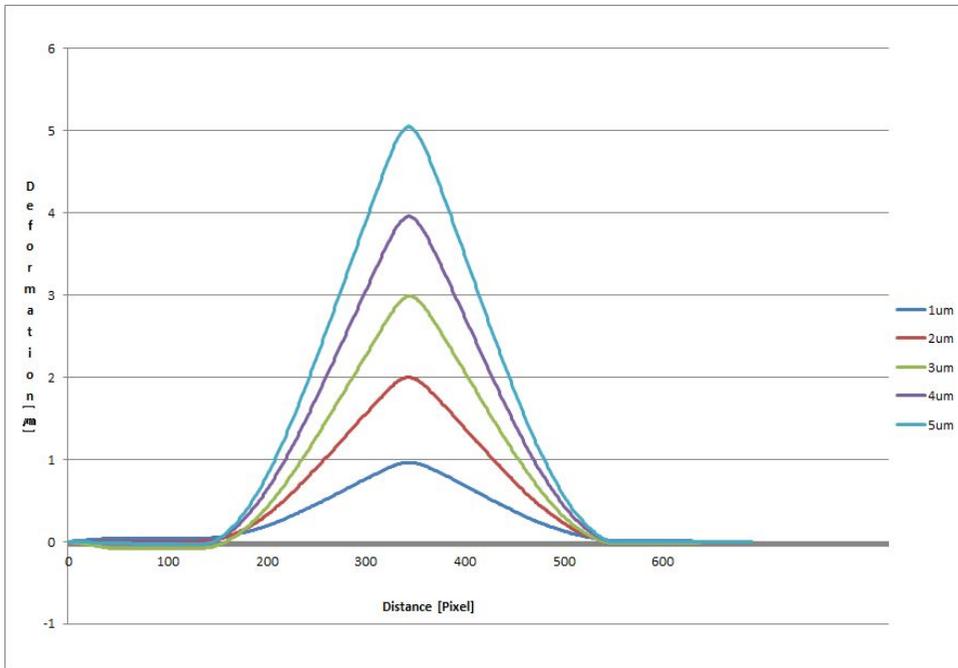
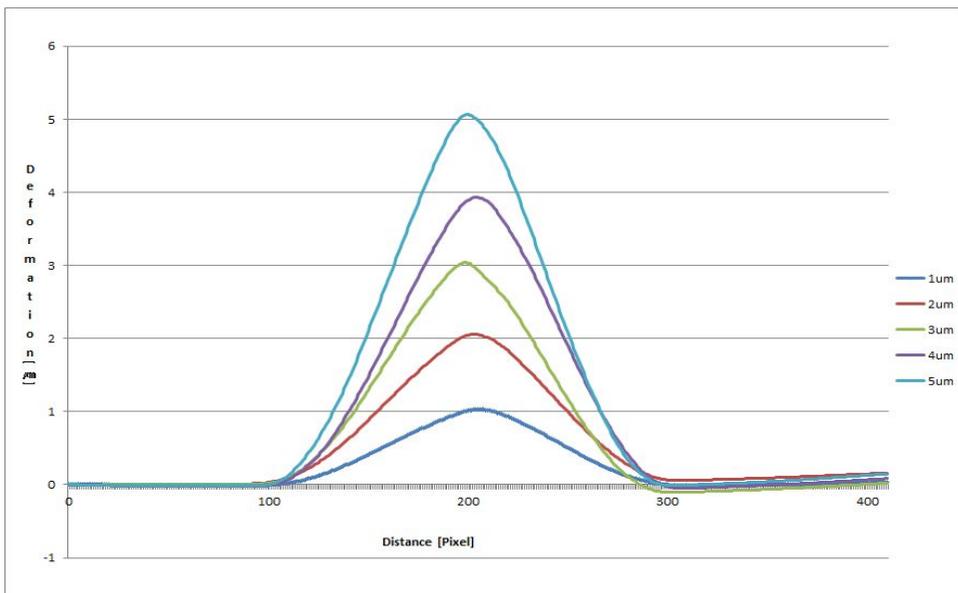
Deformation	Shearing interferometer	
	unwrapping profile	Integral profile
1 $\mu$ m		
2 $\mu$ m		
3 $\mu$ m		
4 $\mu$ m		
5 $\mu$ m		

Table 4-3 Experiment result of detecting deformation using shearography system

Deformation	Shearography system	
	3D plot	profile
1 $\mu$ m		
2 $\mu$ m		
3 $\mu$ m		
4 $\mu$ m		
5 $\mu$ m		



(a) Shearing interferometer profile



(b) Shearography system profile

Fig.4-5 Result of detecting deformation

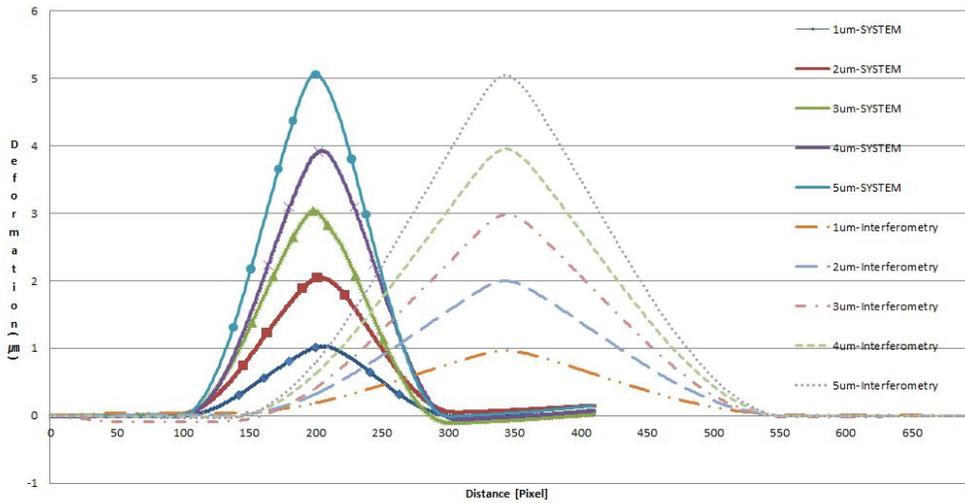


Fig.4-6 Out-of-plane deformation detection results compare

Table 4-4 Deformation detection result and error comparison

Deformation	Shearing interferometer	error(%)	Shearography System	error(%)
1 $\mu\text{m}$	0.96 $\mu\text{m}$	3.75 %	1.03 $\mu\text{m}$	3 %
2 $\mu\text{m}$	1.99 $\mu\text{m}$	0.61 %	2.05 $\mu\text{m}$	5.57 %
3 $\mu\text{m}$	2.96 $\mu\text{m}$	3.77 %	3.04 $\mu\text{m}$	4.22 %
4 $\mu\text{m}$	3.95 $\mu\text{m}$	4.94 %	3.92 $\mu\text{m}$	7.06 %
5 $\mu\text{m}$	5.04 $\mu\text{m}$	4.04 %	5.05 $\mu\text{m}$	5.65 %

구성된 전단간섭계에서 획득한 데이터는 도함수 형태의 데이터로써 제안된 적분법에 의해서 적분한 후, 상용장비 데이터와 비교를 하였다.

Table 4-4은 간섭계 데이터와 상용장비 데이터를 이용하여 측정된 각 변형량 별 최대변형량을 측정된 데이터를 정리한 표이다.

간상용장비의 면외변형 측정결과를 기준으로 구성된 간섭계는 평균 2.4%의 오차를 보였다.

## 제 2 절 압력배관 면외변형 측정

### 2-1 실험방법

제작된 압력배관 시험편 내부의 결함을 검출하기 위해 전단간섭계를 구성하여 실험을 진행하였다. 실험은 고정된 압력배관에 유압장치를 이용하여 0.05Mpa의 압력변화를 5단계로 가하여 시험편 내부에 가공된 결함부에서 생기는 면외변형을 측정하고 결함의 형상 및 깊이를 측정한다. Fig.4-7은 전단간섭계를 이용한 압력배관의 면외변형 측정을 위해 구성된 전단간섭계이다.

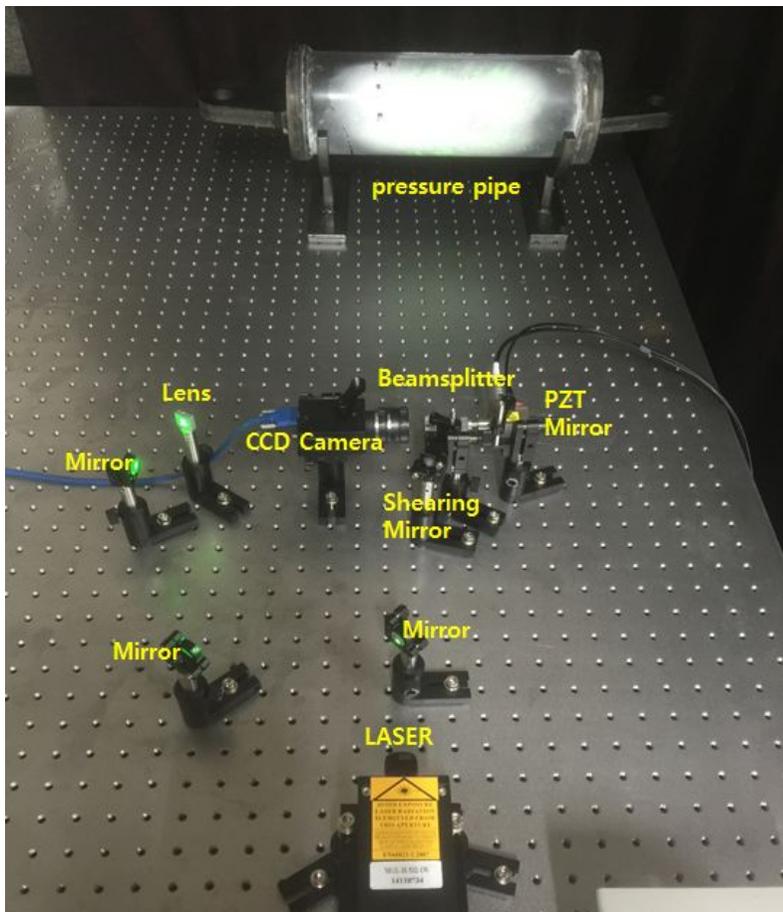


Fig. 4-7 Out-of-plane deformation interferometer

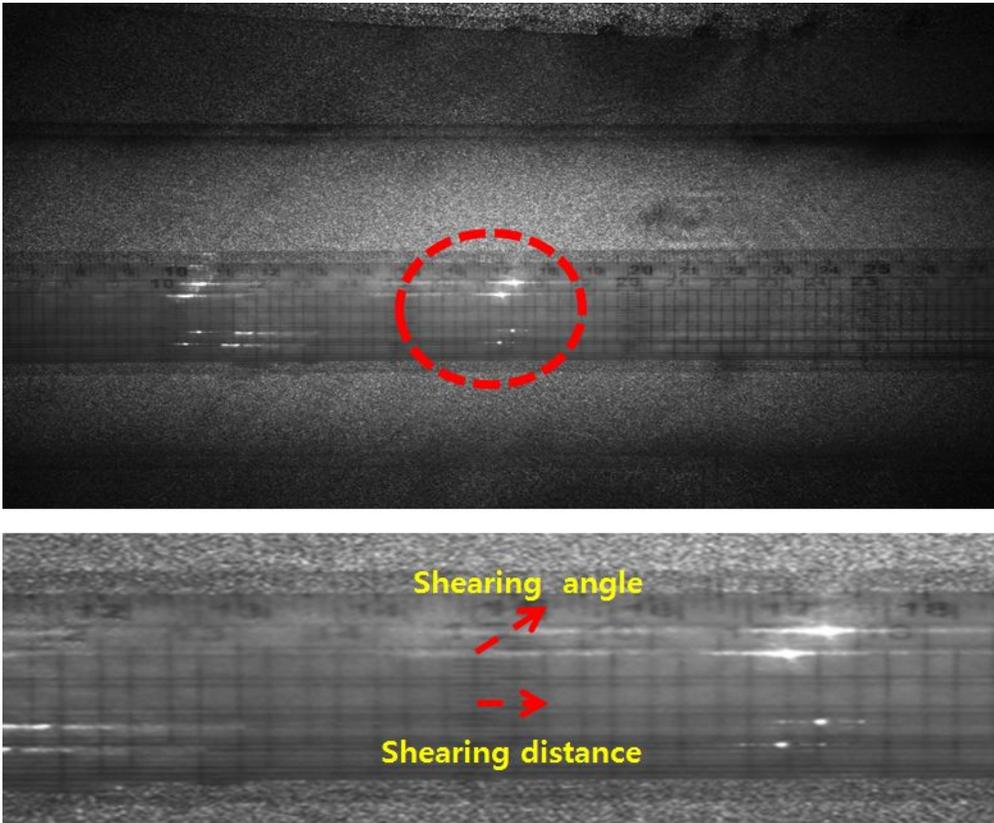


Fig. 4-8 Image for Shearing distance measurement

구성된 전단간섭계를 이용한 압력배관 면외변형 측정을 위해 전단량 (Shearing distance)과 전단각(Shearing angle)을 Tilting Mirror를 이용하여 조절하였다. 전단량과 전단각은 실험자가 pc에서 보여지는 상을 보면서 직접 조절해야 하기 때문에 정확한 수치로 고정하기 어렵다. 따라서 실험직전에 시험편 표면에 투명자를 설치하고 전단각과 전단량이 포함된 이미지를 획득하고 이를 이용해 실험 후 분석하고 데이터 보정을 실시한다. 설치된 투명자의 눈금으로부터 5mm에 해당하는 pixel의 값을 얻을수 있으며 이를 이용하여 19pixel에 해당하는 2.8mm를 산출해 낼 수 있다.

본 실험에서의 전단량은 19pixel(2.8mm)이며 전단각은 45°이다.

## 2-2 실험결과

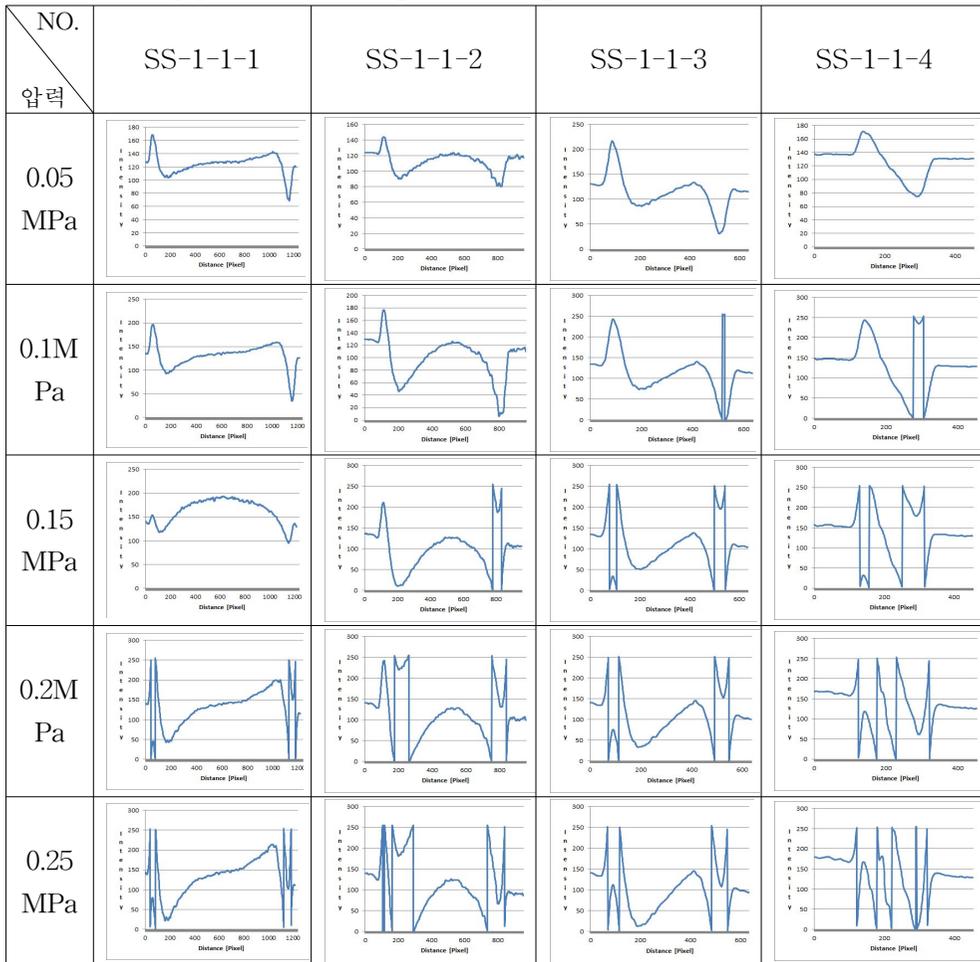
가. 전단간섭계를 이용한 면외변형량 측정

Table 4-5 Result of detecting out-of-plane deformation test

(a) Phase map

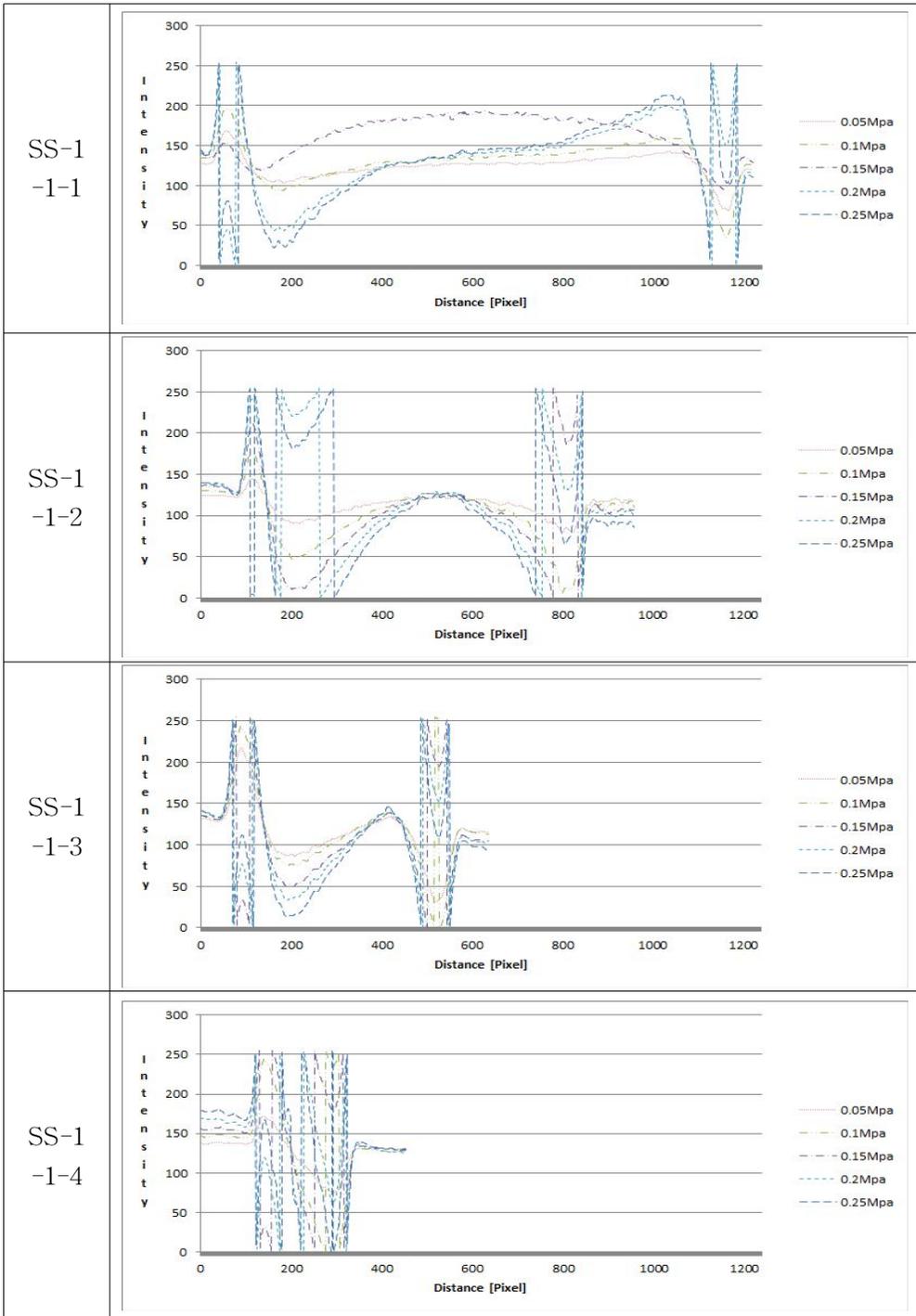
NO. 압력	SS-1-1-1	SS-1-1-2	SS-1-1-3	SS-1-1-4
0.05 MPa				
0.1 MPa				
0.15 MPa				
0.2M Pa				
0.25 MPa				

(b) PhaseMap profile of according to the change Pressure



직관 시험편의 압력변화별 실험에서 획득한 Phase map의 Intensity profile의 결과 중 ss-1-1-1시험편 0.05Mpa의 그래프와 0.25Mpa의 그래프를 비교하였을 때 줄무늬의 변화에 따라 그래프의 양 끝단에 생기는 수직의 그래프를 확인할 수 있었다. 이는 Phasemap의 이미지에서 확인할 수 있듯이 줄무늬의 경계를 나타낸 구간이며 줄무늬가 개수가 많아질수록 수직의 그래프가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

(c) A comprehensive phasemap profile

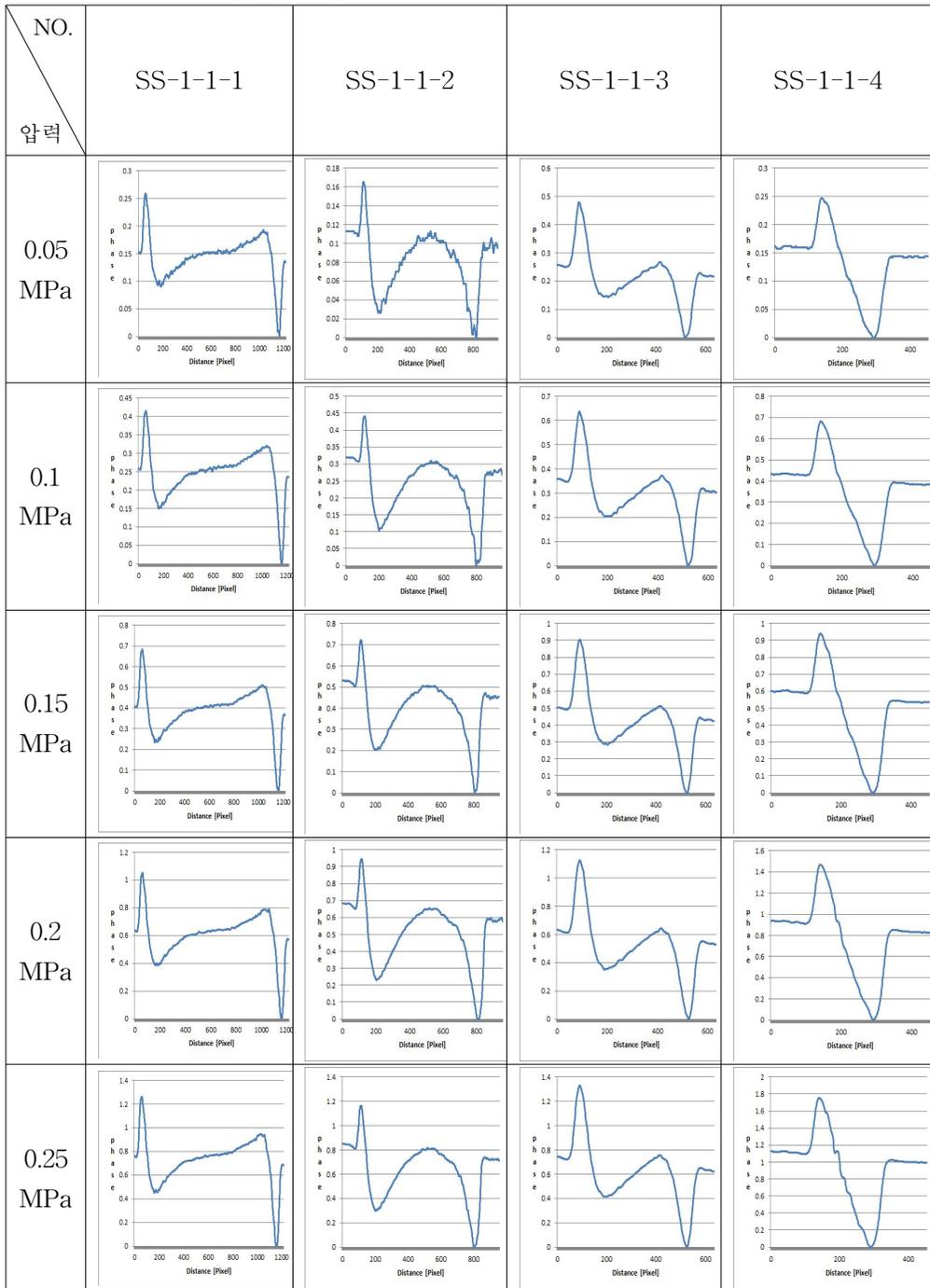


(d) Unwrapping image of phasemap

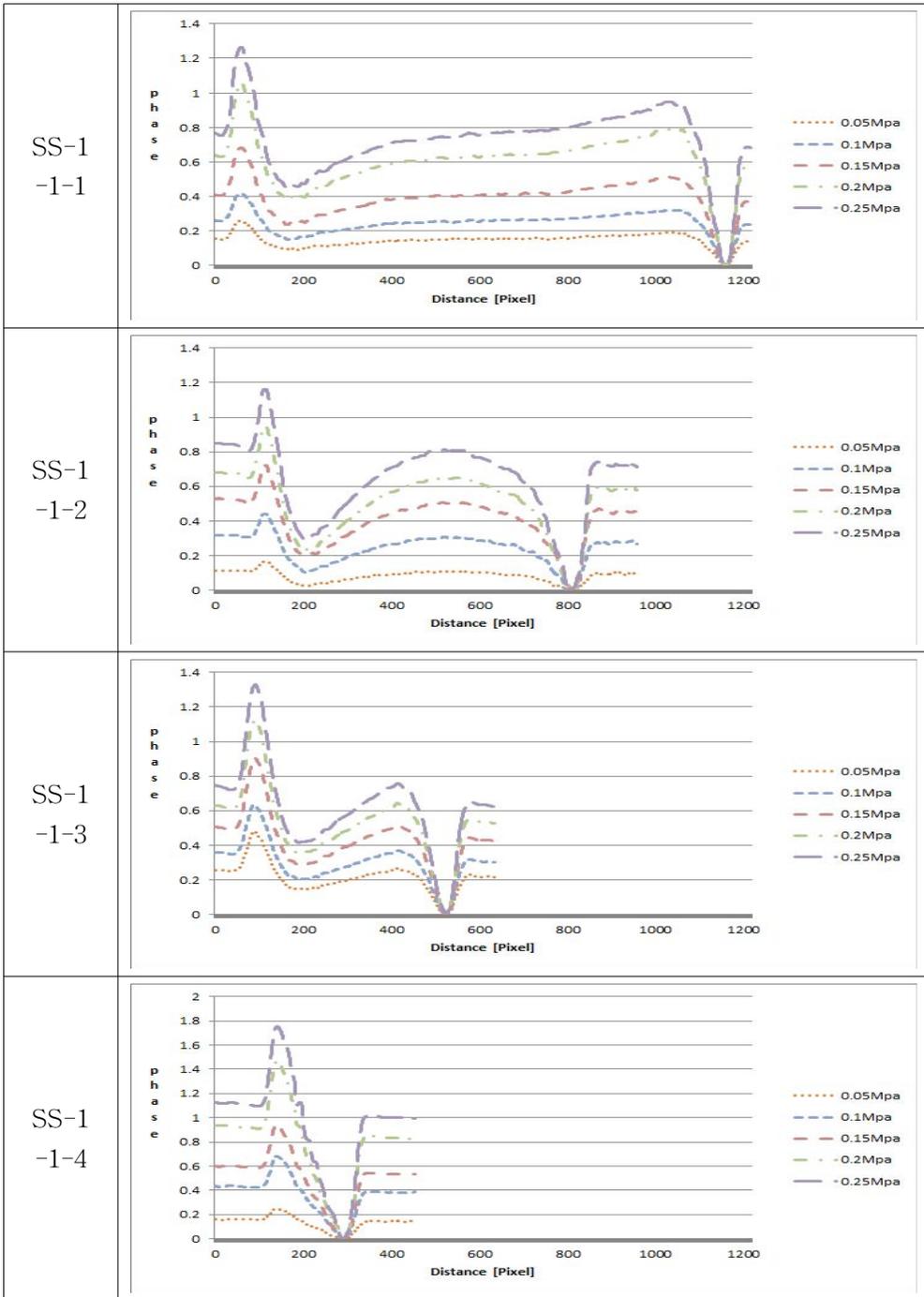
NO. 압력	SS-1-1-1	SS-1-1-2	SS-1-1-3	SS-1-1-4
0.05 MPa				
0.1 MPa				
0.15 MPa				
0.2 MPa				
0.25 MPa				

Phase map unwrapping 이미지는 기존에 획득한 Phasemap 이미지를 개발 프로그램을 이용하여 이미지 개선 프로세스를 통과한 후 출력된 이미지이다. Phasemap 이미지와 unwrapping 이미지를 비교하였을 때 unwrapping 이미지에서 기존의 줄무늬가 사라지고 명암차이가 분명해지는 것을 확인 할 수 있다. 아래의 그래프와 기존 Phasemap 그래프를 비교해보았을 때 수직의 그래프 형태가 사라지고 원만한 형태의 그래프로 변화된 것을 확인 할 수 있다. 결함길이 30mm의 unwrapping 이미지 중 0.2Mpa와 0.25Mpa의 이미지를 보면 중앙에서 오른쪽끝으로 흰색 선이 생긴 것을 확인 할 수 있는데, 이는 이미지 개선프로그램의 오류이며 추후에 개선해야할 사항이다.

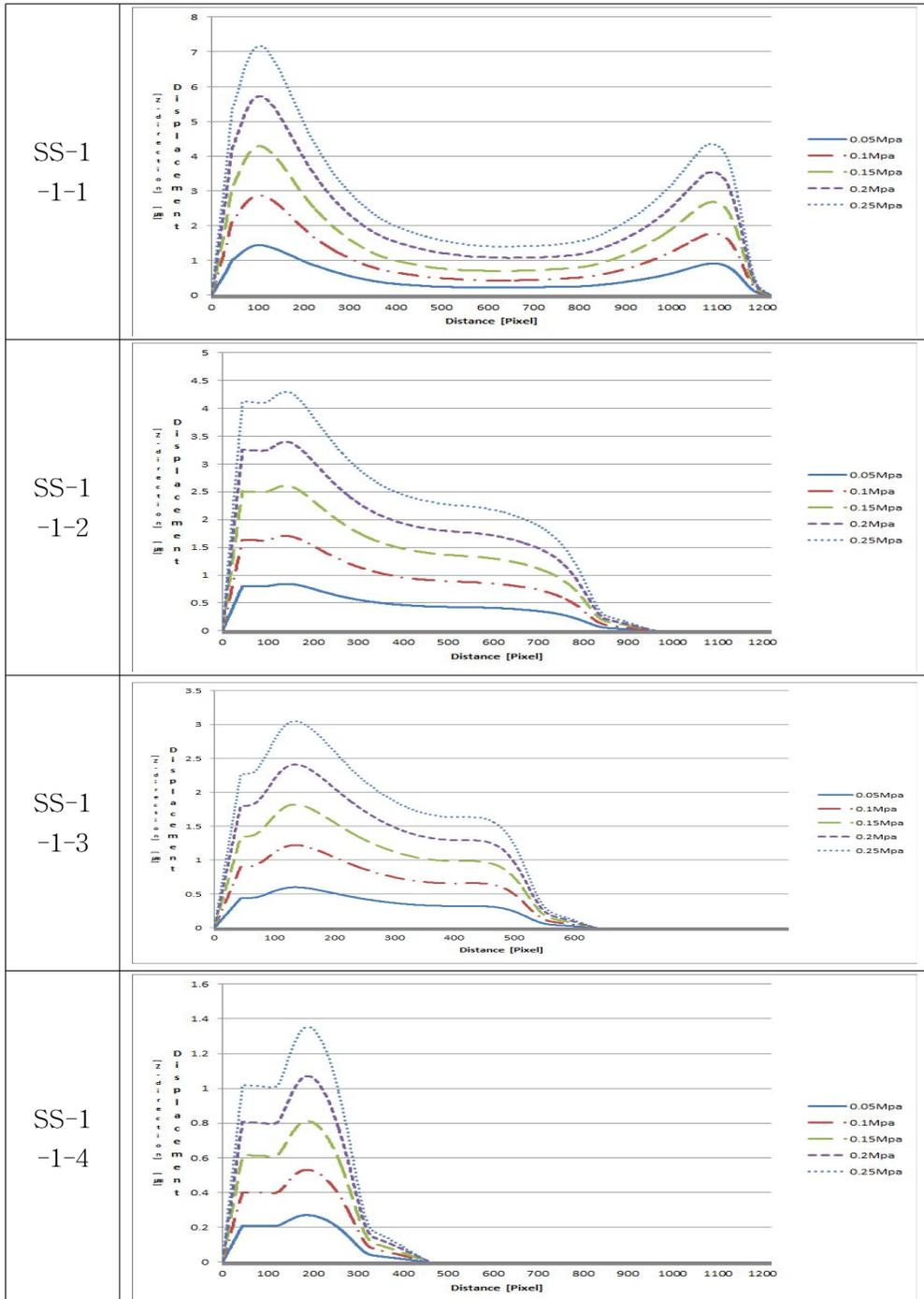
(e) Profile of unwrapping image



(f) A comprehensive unwrapping image profile



(g) Result of out-of-plane deformation measurements each test specimen



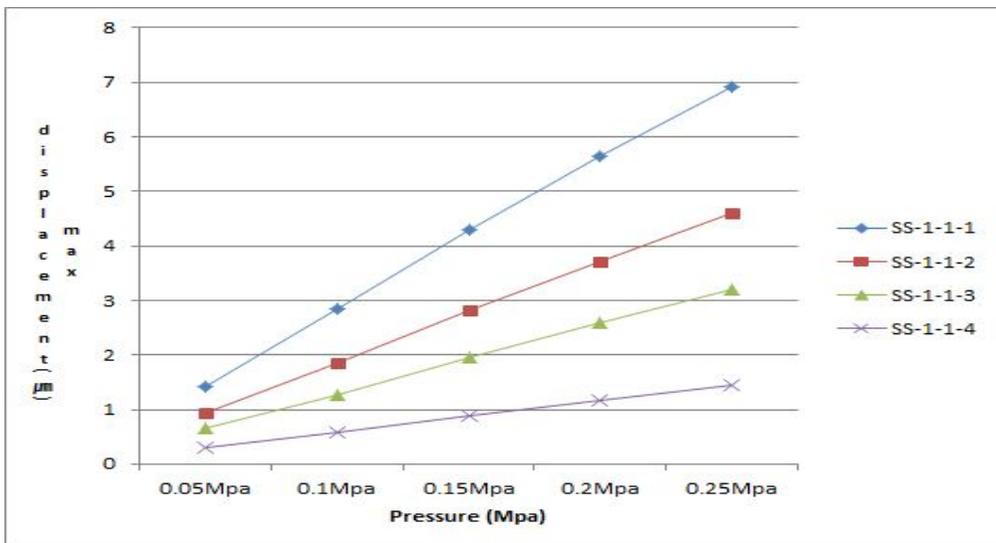
**Table 4-6 Result of out-of-plane Deformation comparison**

NO. 압력	SS-1-1-1	SS-1-1-2	SS-1-1-3	SS-1-1-4
0.05 MPa	1.43 $\mu\text{m}$	0.94 $\mu\text{m}$	0.65 $\mu\text{m}$	0.29 $\mu\text{m}$
0.1 MPa	2.85 $\mu\text{m}$	1.85 $\mu\text{m}$	1.28 $\mu\text{m}$	0.57 $\mu\text{m}$
0.15 MPa	4.29 $\mu\text{m}$	2.81 $\mu\text{m}$	1.96 $\mu\text{m}$	0.88 $\mu\text{m}$
0.2 MPa	5.64 $\mu\text{m}$	3.72 $\mu\text{m}$	2.58 $\mu\text{m}$	1.16 $\mu\text{m}$
0.25 MPa	6.92 $\mu\text{m}$	4.61 $\mu\text{m}$	3.21 $\mu\text{m}$	1.44 $\mu\text{m}$

본 실험을 통해서 압력배관 내에 존재하는 결함의 영향으로 압력변화별 면외 변형량이 검출 된 것을 확인 할 수 있다.

Table 4-6는 결함길이별 압력배관 시험편의 압력변화별 면외변형 최대 변형량을 모아둔 표이다.

Fig. 4-9는 결함크기별 시험편의 압력변화별 최대 변형량을 표시한 그래프이다.



**Fig. 4-9 Compare up to the amount of deformation according to pressure changes**

나. 전단간섭계를 이용한 검출 결함 정보

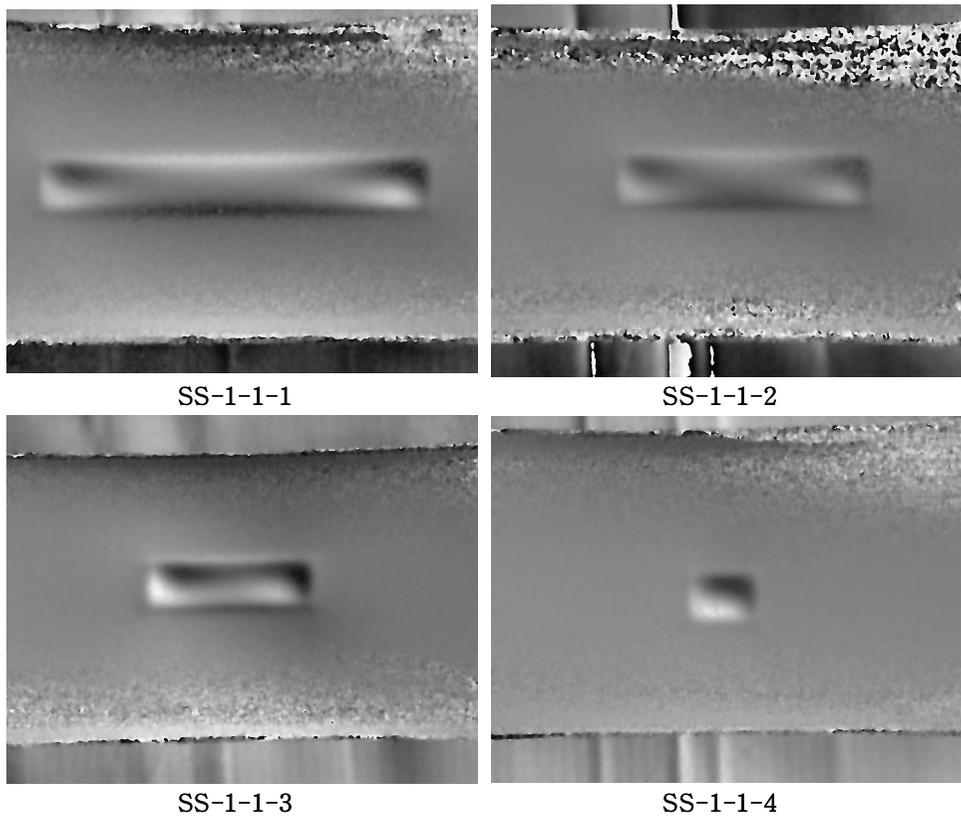


Fig.4-10 Each pressure pipe specimens defect detection image

Table 4-7 Each specimens defect length and defect pixel

Specimen	Width		Heigh	
	SS-1-1-1	1062 pixel	156.18 mm	155 pixel
SS-1-1-2	712 pixel	104.71 mm	150 pixel	22.06 mm
SS-1-1-3	487 pixel	71.62 mm	145 pixel	21.32 mm
SS-1-1-4	210 pixel	30.88 mm	138 pixel	20.29 mm

Table 4-7는 결함검출 실험을 통해 얻은 각 결함길이별 pixel정보를 mm로 환산한 결과이다. 결함크기와 높이 정보는 가장 낮은 압력에서 변형이 최소로 일어날 때 시험편의 형상이 나타나는데 이때의 이미지정보를 이용하여 계산한다. 그렇기 때문에 변형이 비교적 다른 시험편보다 큰 SS-1-1-1의 시험편의 길이가 다른 결함의 길이보다 오차가 큰 것으로 나타났다. 이는 동일 압력을 가해도 SS-1-1-1의 변형이 크기 때문에 오차가 큰 것으로 보인다.

( $\Delta P$ 는 실험조건인 압력변화,  $\delta$ 는 면외변형의 최대 변형량,  $t_1$ 은 초기 배관의 두께,  $t_2$ 는 결함에 의해 제거된 후 남은 배관의 두께,  $L_s$ 는 측정된 결함 길이와 최대변형량의 합이다.)

**Table 4-8 Residual thickness calculations**

**(a) SS-1-1-1**

$\Delta P$ (Mpa)	$\delta$ ( $\mu m$ )	$t_1$ (mm)	$L_s$ (mm)	$t_2$ (mm)
0.05	1.43	8	156.1779	0.88
0.1	2.85	8	156.17932	0.87
0.15	4.29	8	156.18076	0.88
0.2	5.64	8	156.18211	0.86
0.25	6.92	8	156.18339	0.85

**(b) SS-1-1-2**

$\Delta P$ (Mpa)	$\delta$ ( $\mu m$ )	$t_1$ (mm)	$L_s$ (mm)	$t_2$ (mm)
0.05	0.94	8	104.70682	0.83
0.1	1.85	8	104.70773	0.82
0.15	2.81	8	104.70869	0.83
0.2	3.72	8	104.7096	0.82
0.25	4.61	8	104.71049	0.82

(c) SS-1-1-3

$\Delta P$ (Mpa)	$\delta$ ( $\mu m$ )	$t_1$ (mm)	$L_s$ (mm)	$t_2$ (mm)
0.05	0.65	8	71.618297	0.81
0.1	1.28	8	71.618927	0.80
0.15	1.96	8	71.619607	0.82
0.2	2.58	8	71.620227	0.81
0.25	3.21	8	71.620857	0.80

(d) SS-1-1-4

$\Delta P$ (Mpa)	$\delta$ ( $\mu m$ )	$t_1$ (mm)	$L_s$ (mm)	$t_2$ (mm)
0.05	0.29	8	30.882643	0.80
0.1	0.57	8	30.882923	0.79
0.15	0.88	8	30.883233	0.81
0.2	1.16	8	30.883513	0.80
0.25	1.44	8	30.883793	0.79

Table 4-9 Result of measurement depth comparison

NO. / $\Delta P$	SS-1-1-1	SS-1-1-2	SS-1-1-3	SS-1-1-4
	tp(mm)	tp(mm)	tp(mm)	tp(mm)
0.05 MPa	7.12	7.17	7.19	7.20
0.1 MPa	7.13	7.18	7.20	7.21
0.15 MPa	7.12	7.17	7.18	7.19
0.2 MPa	7.14	7.18	7.19	7.20
0.25 MPa	7.15	7.18	7.20	7.21

제시된 계산식을 통하여 구한 결함깊이를 Table4-9에 정리하였다.

표에서 볼 수 있듯이, 실제 결함 가공길이의 7.2mm에 근접한 데이터를 보인 시험편은 SS-1-1-4번 시험편이다. 길이, 폭 측정시 픽셀값의 오차를 많이 보였던 SS-1-1-1번 시험편은 결함깊이에서도 다른 시험편과 비교적 큰 오차를 보였다.

Table 4-10 Compare defect detection experiment results

specimen	Width (mm)	Heigh (mm)	Defect depth (mm)
SS-1-1-1	156.18	22.79	7.132
SS-1-1-2	104.71	22.06	7.176
SS-1-1-3	71.62	21.32	7.192
SS-1-1-4	30.88	20.29	7.202

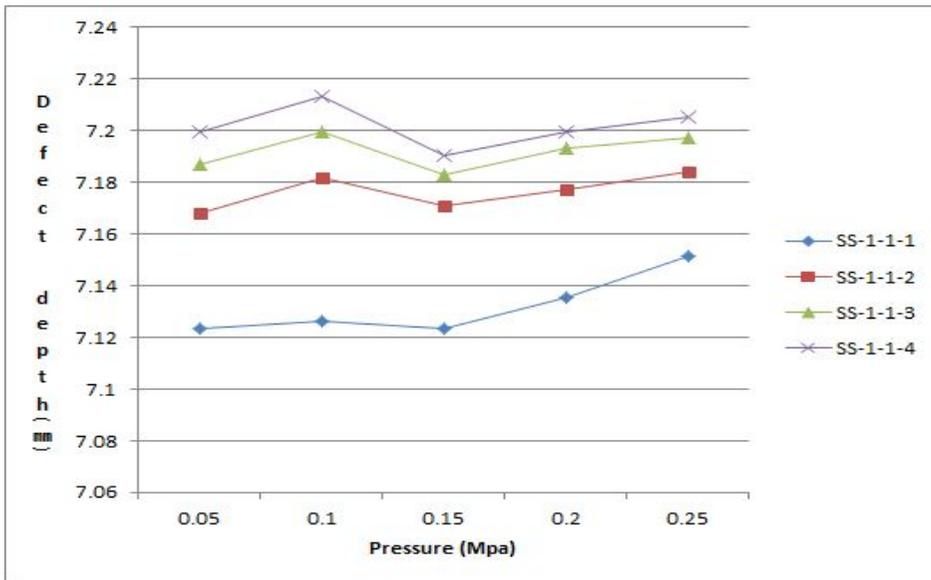


Fig. 4-11 Result of Defect depth measurement according to pressure change

기존 전단간섭계를 이용한 데이터는 x,y축에 한하여 결함의 위치와 크기를 파악하기 위해 사용되었지만 제안된 깊이측정 방법을 이용하여 결함의 깊이까지 파악할 수 있게 되었다. 따라서 전단간섭계를 이용한 결함검출 능력이 전보다 향상되었으며 검출된 결함의 형상정보를 이용하여 결함이 대상체에 미치는 영향을 미리 예측해 볼 수 있다.

## 제 3 절 압력배관 유한요소 해석

### 3-1 유한요소 해석 결과

전단간섭계를 이용한 압력배관 면외변형 측정 및 결함 검출 실험을 통해 획득한 결함정보를 이용하여 유한요소 해석을 진행하였다.

실제 시험편에 가공된 결함의 형상과 동일 형상으로 가공하고, 길이, 폭, 깊이는 전단간섭계를 이용하여 면외변형 실험 및 결함측정 실험에서 획득한 데이터를 이용하여 배관형상을 3D 모델링을 하였다.

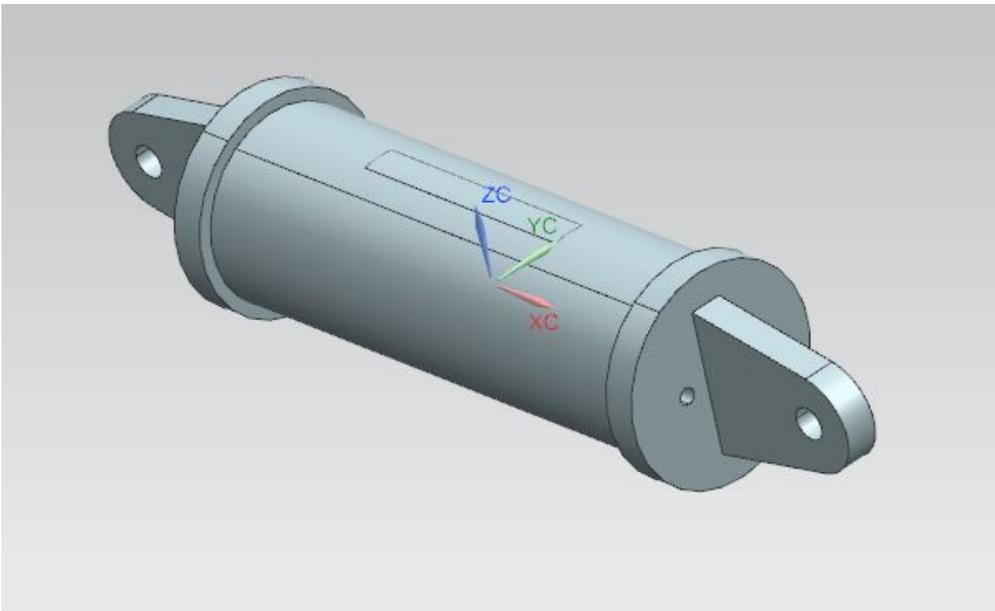


Fig. 4-12 Pressure pipe 3D modeling

모델링된 압력배관 시험편에 steel재질을 할당하고, 3D 사면체 메시를 적 5mm사이즈로 적용시켰다. 배관시험편 양 끝단에 있는 프린지의 Hole을 고정하는 구속조건을 주고, 압력배관 내부에서 유체압력이 작용하도록 하중조건을 부여하였다.

가) 압력배관(직관) 결함(無) 해석 결과

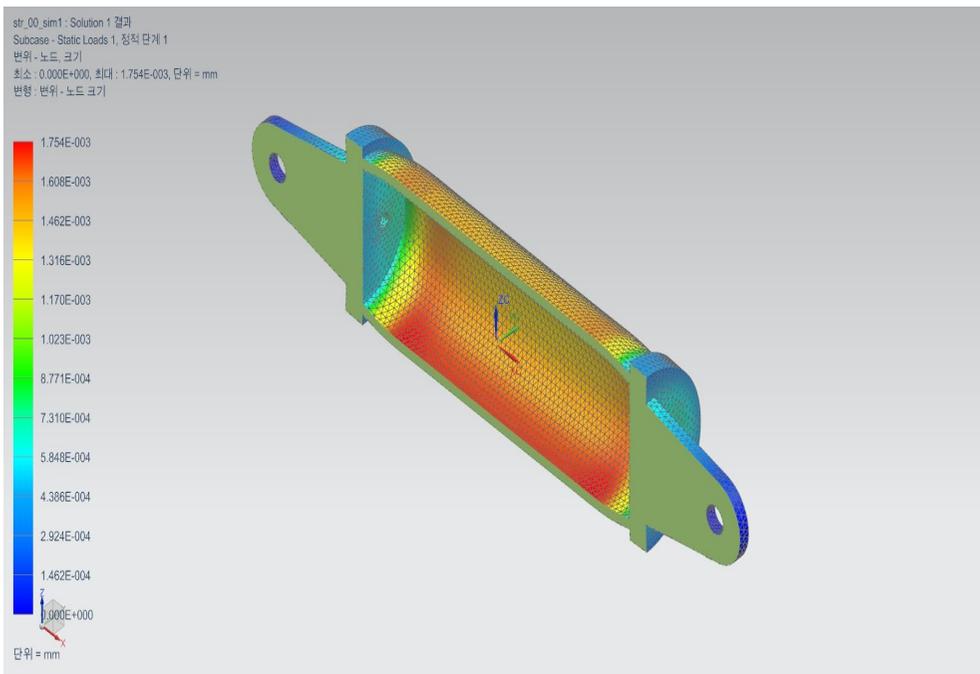
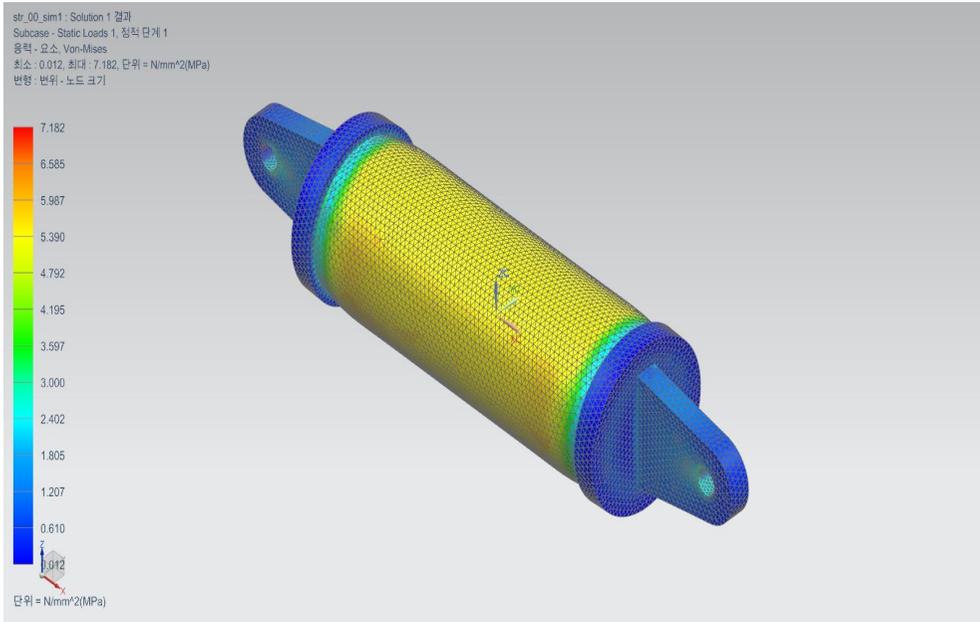
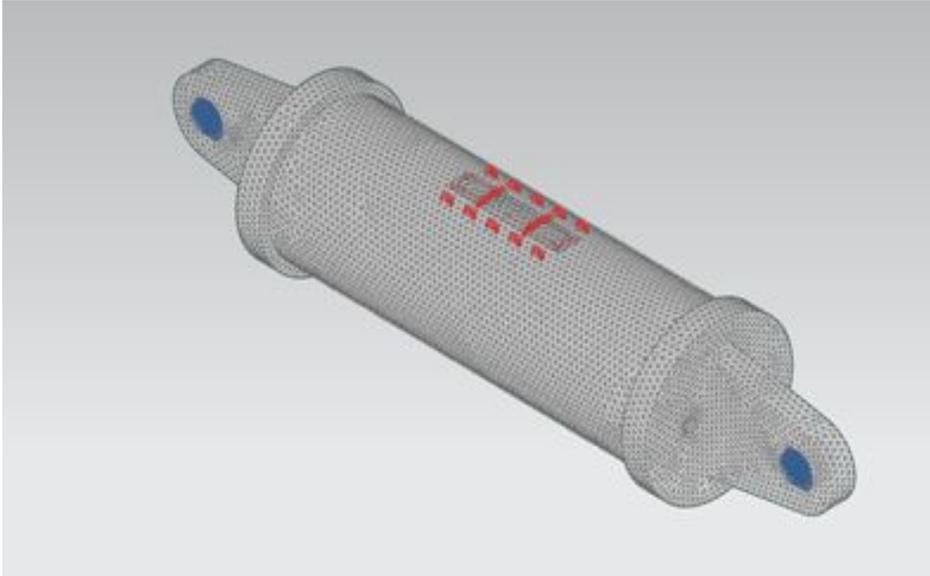


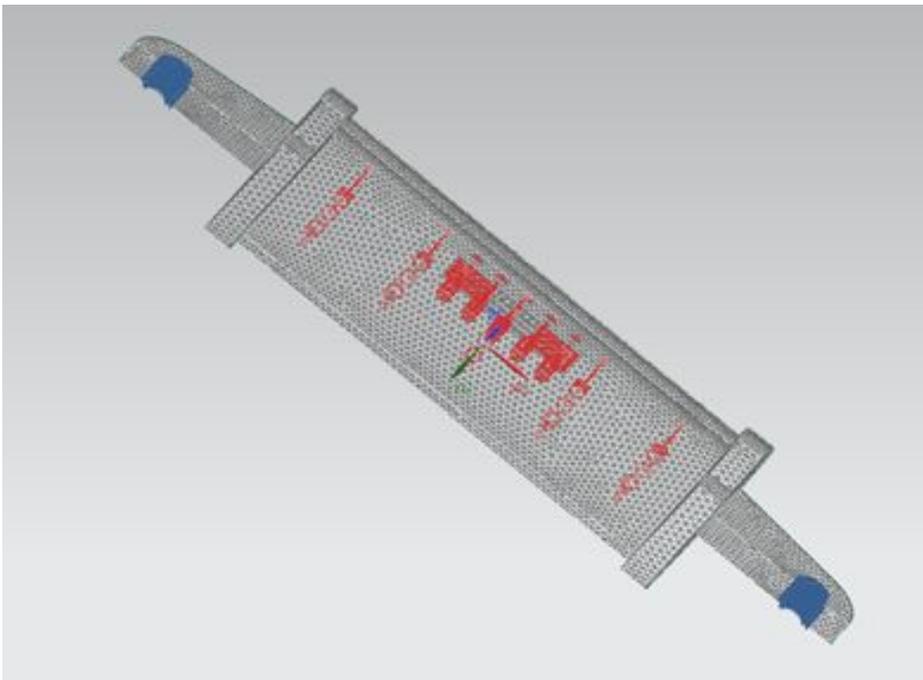
Fig. 4-13 Analysis result of Pressure pipe (non-defect specimens)

나) 압력배관 결함해석결과

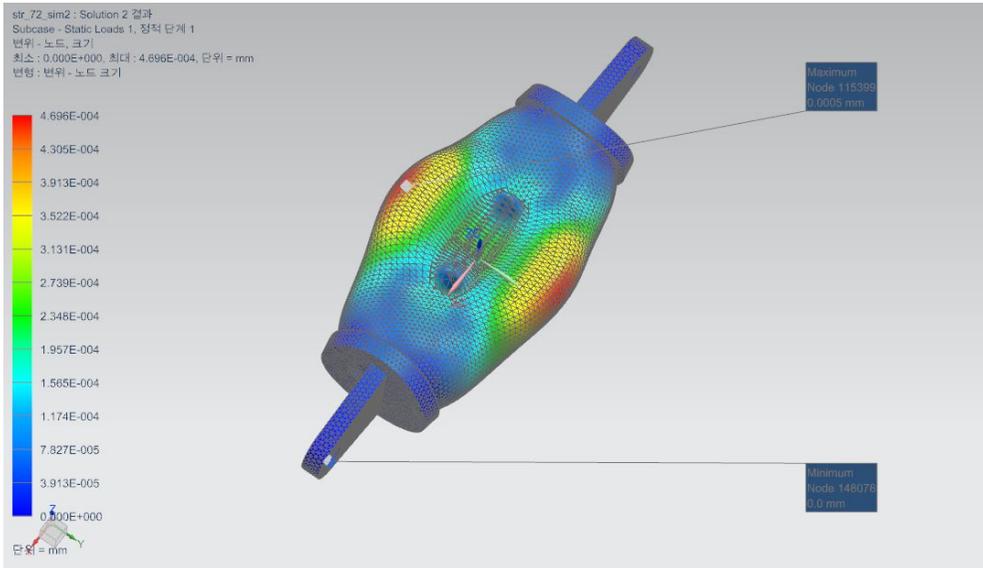
(1) SS-1-1-1 (깊이 7.132mm, 폭 22.79mm, 길이 156.18mm)



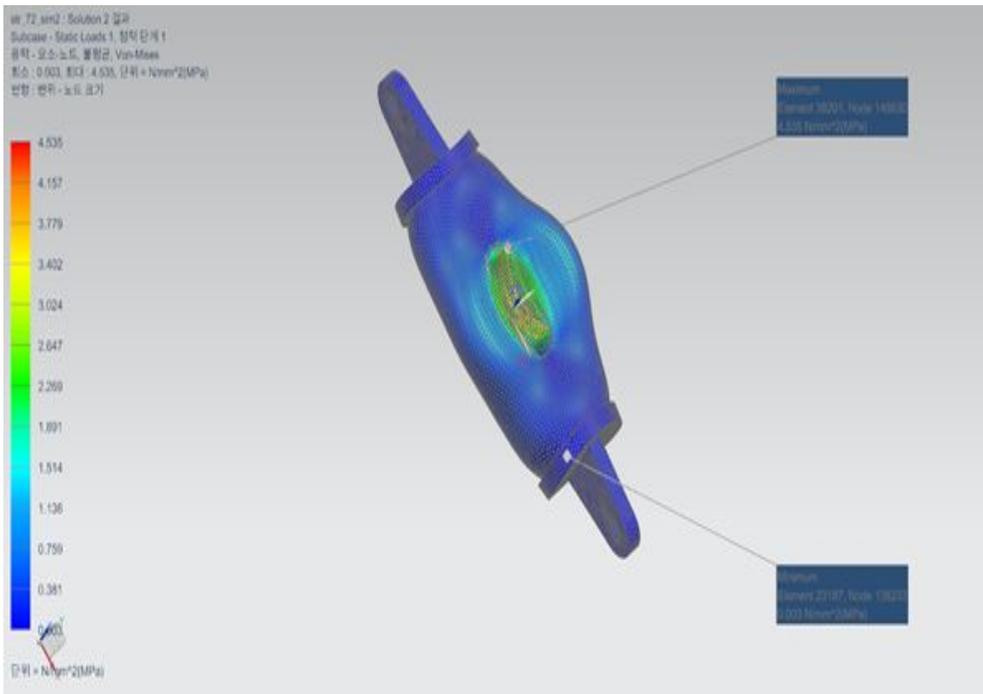
(a) Constraints



(b) Loading condition



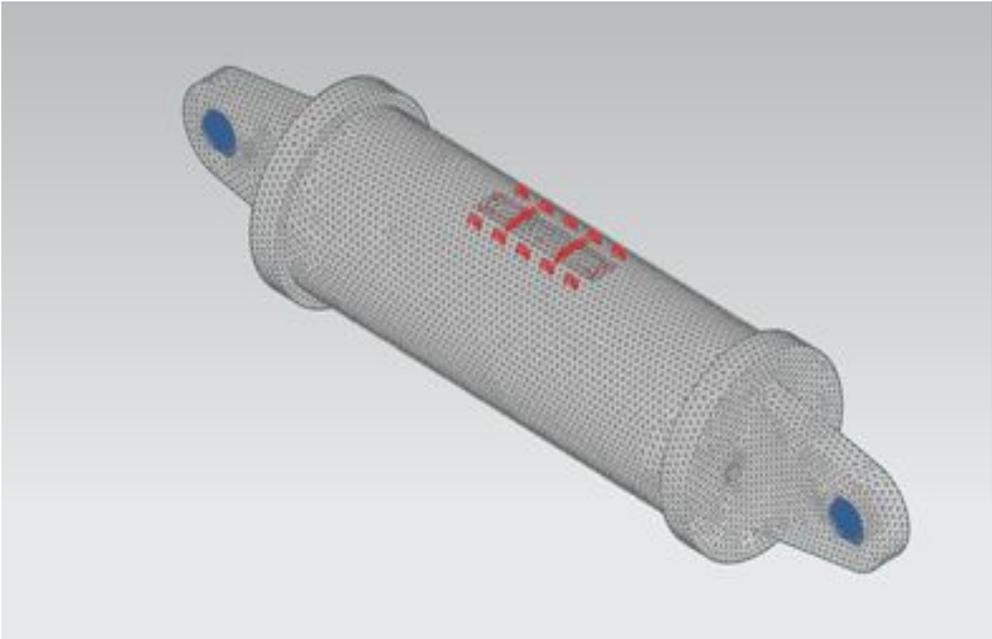
(c) maximum amount of deformation



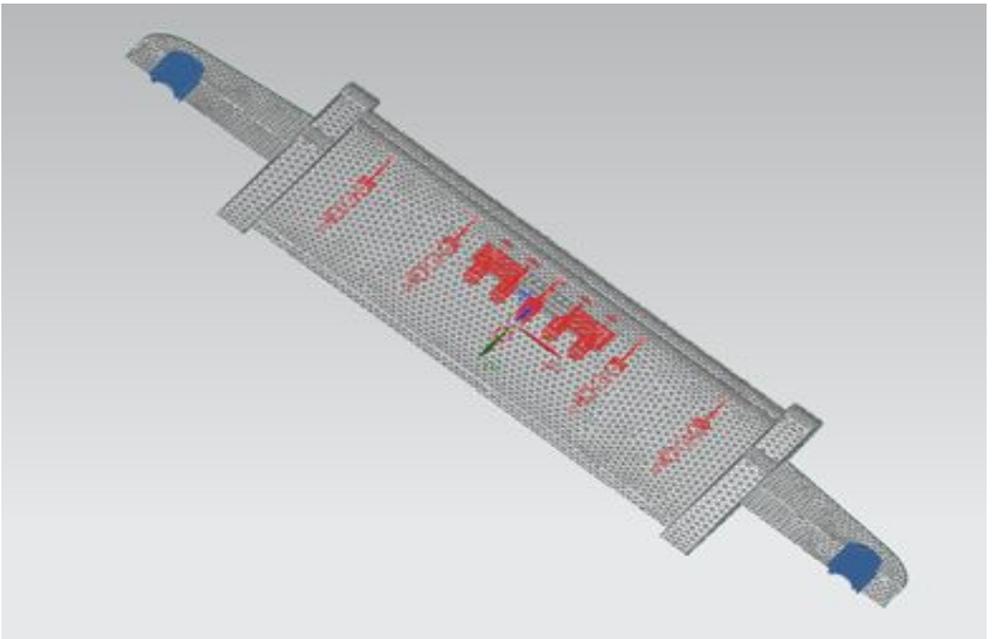
(d) Maximum pressure

Fig. 4-14 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-1)

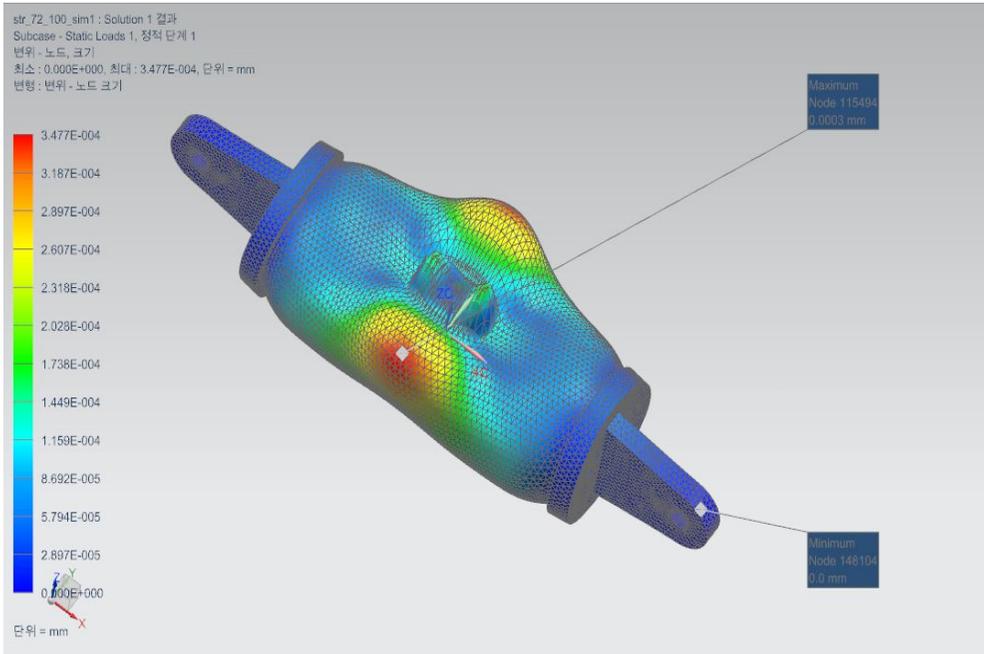
(2) SS-1-1-2 (깊이 7.176mm, 폭 22.06mm, 길이 104.71mm)



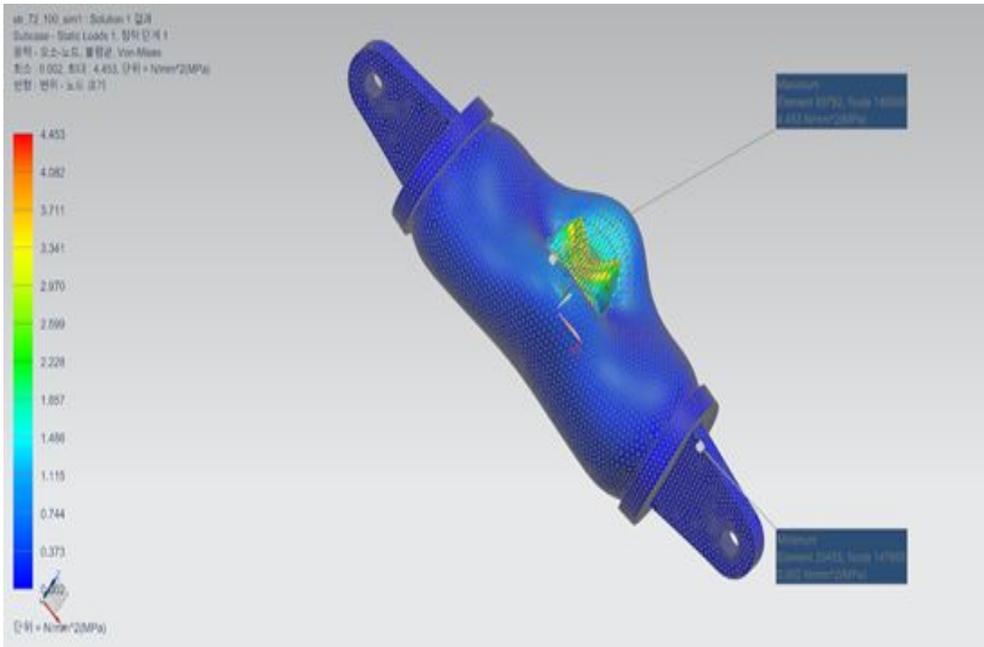
(a) Constraints



(b) Loading condition



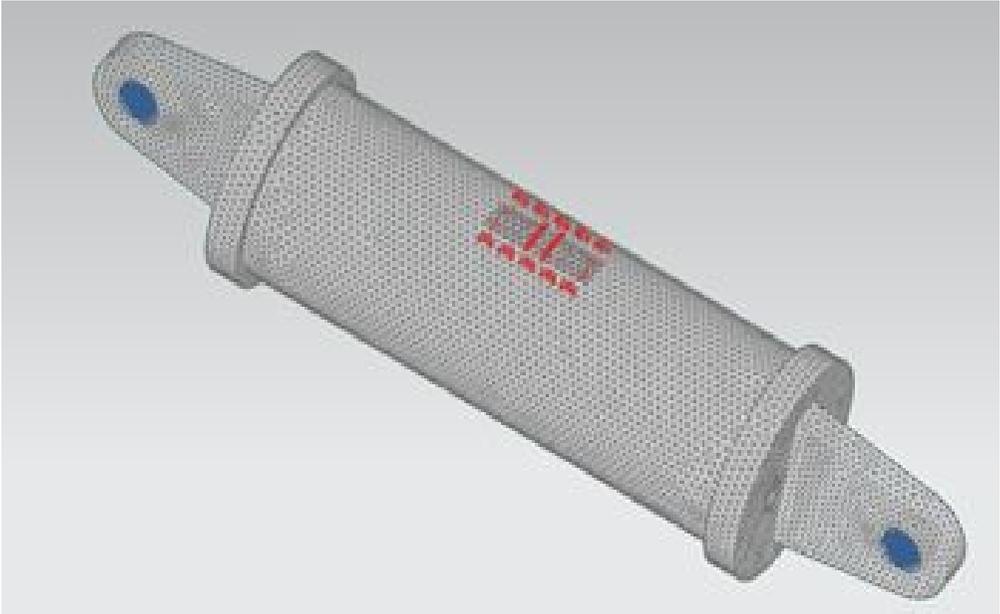
(c) maximum amount of deformation



(d) Maximum pressure

Fig. 4-15 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-2)

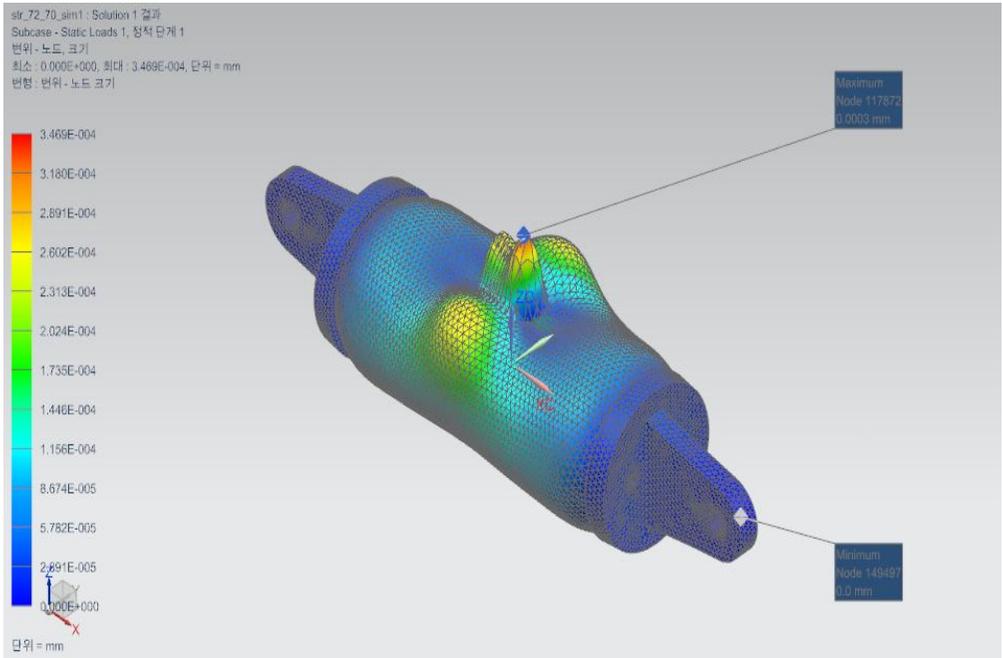
(3) SS-1-1-2 (깊이 7.192mm, 폭 21.32mm, 길이 71.62mm)



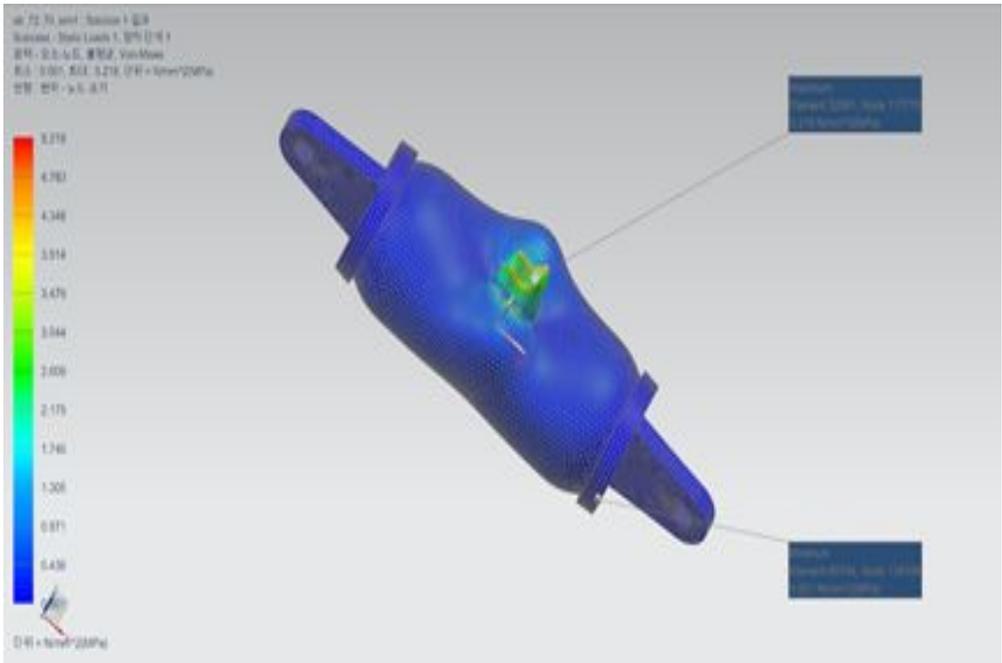
(a) Constraints



(b) Loading condition



(c) maximum amount of deformation



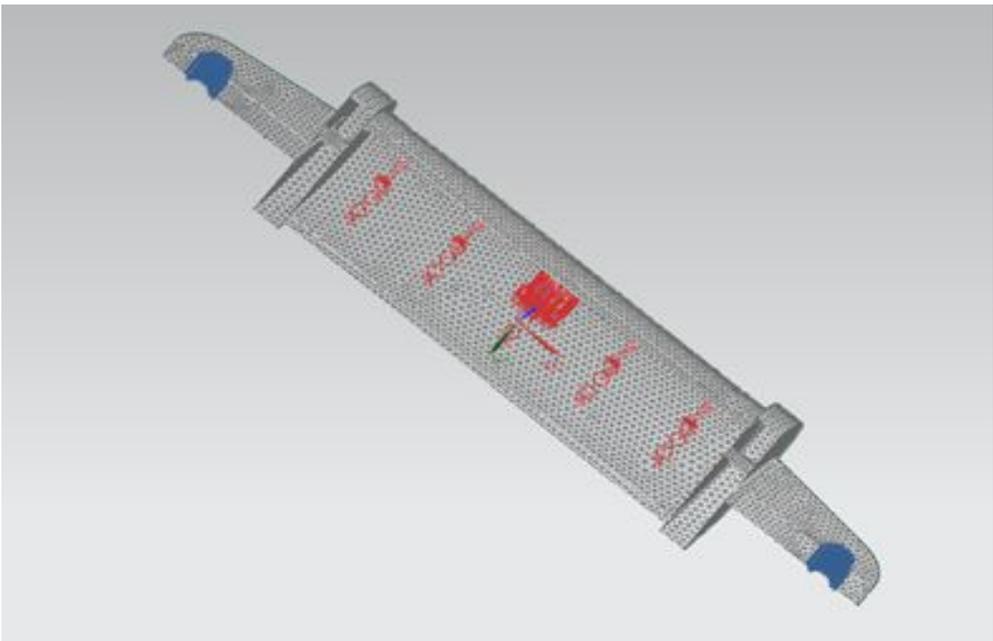
(d) Maximum pressure

Fig. 4-16 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-3)

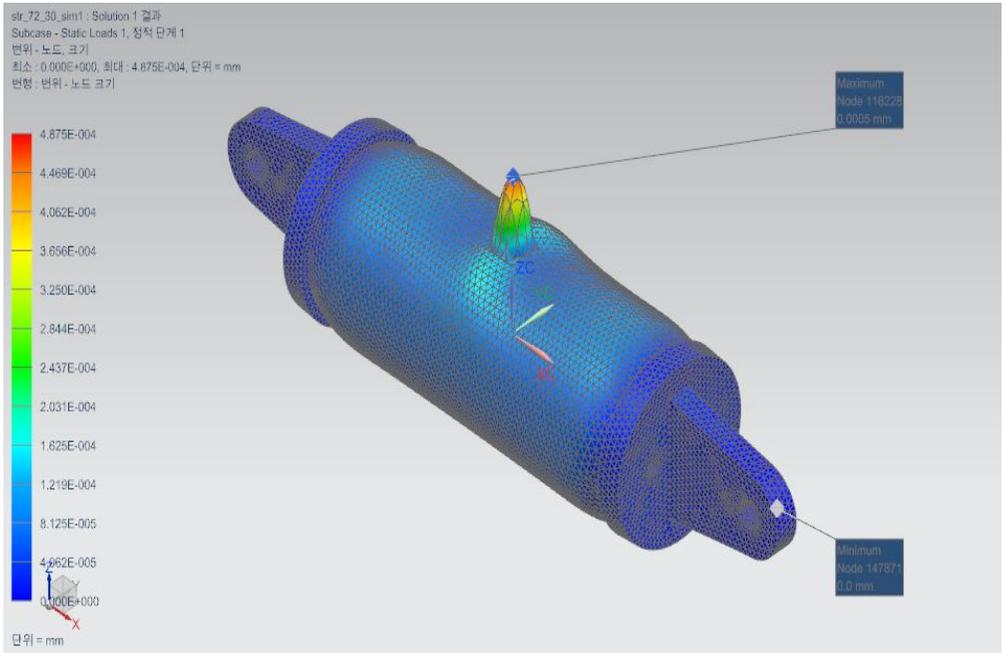
(4) SS-1-1-4 (깊이 7.202mm, 폭 20.29mm, 길이 30.88mm)



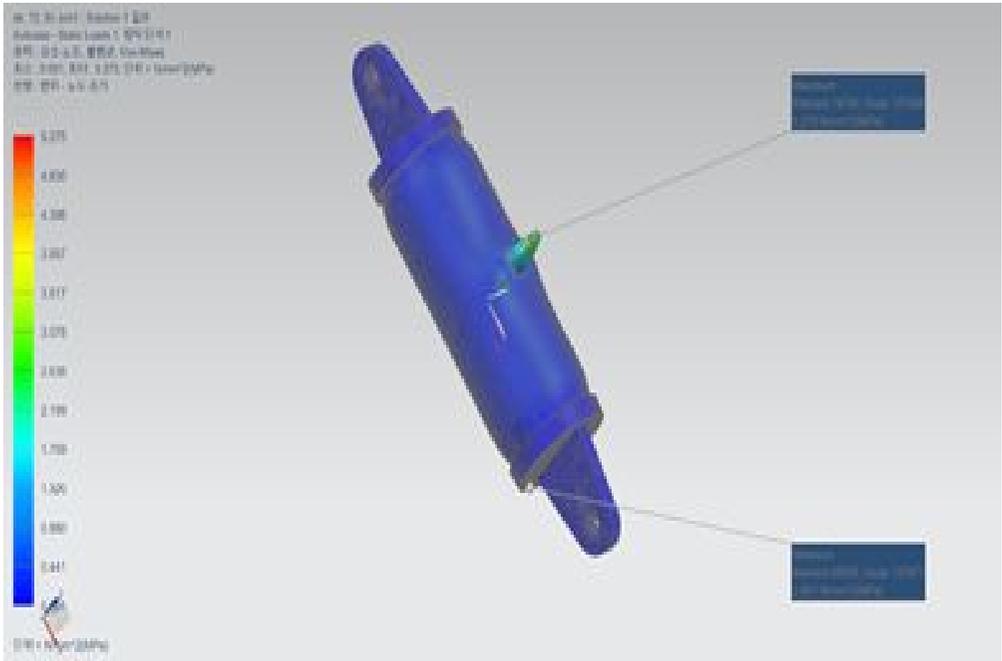
(a) Constraints



(b) Loading condition



(c) maximum amount of deformation



(d) Maximum pressure

Fig. 4-17 Pressure pipe deformation analysis (SS-1-1-4)

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 레이저를 이용한 비파괴검사 방법중 하나인 전단간섭법을 광학 부품을 이용하여 구성했으며 이미지 개선 및 변형정보 추출을 위한 프로그램을 개발하여 물체 내부에 존재하는 결함의 정량적 측정 하고, 측정된 결함 및 변형 정보를 이용하여 유한요소 해석과의 연동을 제시 하였다.

광학부품을 이용하여 구성된 전단간섭계의 신뢰성 검사를 위해 상용장비 Shearography 시스템과 고무평판 면외변형 측정 실험을 진행해 개발장비의 신뢰성을 확보 후 이를 바탕으로 압력배관 면외변형 측정 및 결함검출 실험을 진행하였다. 최대 면외변형량과 검출된 결함의 길이와 폭을 이용하여 결함의 깊이를 유추할 수 있으며 전단간섭계로부터 얻은 모든 결함정보를 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 해석해보았다.

본 논문을 통해 레이저 전단간섭계와 다른 검사방법의 연동을 높여 레이저 비파괴 기술의 활성화 및 배관계통 안전진단에 도움이 될 것으로 사료된다.

1. 제안된 방법의 전단간섭법은 고정밀 변형측정하는 ESPI 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점이 통합된 산업현장적용성이 매우 높은 면외변형의 정량측정이 가능한 전단간섭법이다.
2. 기존의 전단간섭법은 전단량을 상면에서의 전단량이라 하고 거리단위의 임의의 값을 적용하고 있는데, 본 논문에서는 전단량을 화상처리기법을 적용하여 전단량을 화소수로 적용시킬 수 있음을 확인하였다.
3. 고무평판의 면외변형 측정에 대하여 구성된 전단간섭계와 상용장비 Shearography 시스템과의 비교실험 결과는 간섭계를 이용한 측정에서 상용장비의 면외변형 측정결과를 기준으로 구성된 간섭계는 평균 2.4%의 오차를 보였다.

4. 압력배관 면외변형측정 실험의 결과 0.05~0.25Mpa의 압력변화를 통해 각각의 최대 면외변형량을 검출 할 수 있었다. 각 시험편마다 압력차이에 따른 변형량 증가율은 비슷하였으나, 시험편을 비교하였을 때, 결함이 제일 큰 SS-1-1-1의 변형량이 가장 컸으며, 결함이 가장 작은 SS-1-1-4의 변형량이 가장 작은 것으로 나타났다.

5. 압력배관 결함크기 측정 실험에서는 실험직전에 대상체 표면에서 투명자를 설치하고 이미지를 획득하여 5mm에 해당하는 pixel의 수를 이용하여 결함의 길이와 폭을 유추하는 방법을 제시하였다. 실험결과 결함의 크기가 가장 길었던 SS-1-1-1의 경우 실제 가공된 길이와 약 4.1% 오차를 보였으며 가장 작은 SS-1-1-4의 경우 2.9%의 오차를 보였다.

6. 전단간섭계를 이용한 면외변형량 및 결함검출 실험에서 획득한 결함의 크기, 폭, 깊이의 정보를 이용하여 FEM tool을 이용하여 유한요소해석 결과 결함 길이별 최대 허용압력 및 최대 변형량 등을 알 수 있었다.

위와 같은 결과로 제안된 방법의 전단간섭법은 고정밀 계측이라는 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점을 통합하여 면외변형의 고정밀 정량측정, 변형률의 측정 및 결함의 검사 등 산업현장에서 적용성이 높은 계측기법을 제시하였다.

## 참 고 문 헌

1. 권호영, 임종국, 박종건 “ 비파괴검사 기초론”, 선학출판사, 2000
2. Kearns, W. H. "Welding handbook", American Welding Society, 7th edition, Vol. 5, pp. 276-311, 1984.
3. 김경석. 『CW 레이저 스펙클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
3. Jung Hyunchul. Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor thesis, Chosun University, 2004.
5. 양승필. 『ESPI에 의한 引張荷重 下에서의 複合 積層板의 振動 舉動에 關한 研 究』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2000.
6. Hogmoen, K., Lokberg, O. J., "Detection and Measurement of Small Vibrations using Electronic Speckle Pattern Interferometry," Applied Optics, Vol. 16, pp. 1869-1875, 1977.
7. Leendertz, J. A. and Butters, J. N., "An Image Shearing Speckle Pattern Interferometer for Measuring Bending Moments," J. Phy.E.Scientific Instrument, Vol. 6, pp.1107, 1973.
8. Hung, Y. Y., "A Speckle-Shearing Interferometry: A tool for Measuring Derivatives of Surface Displacement," Optics Communication, Vol. 11, pp.132-135, 1974
9. Hung, Y. Y., "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge." Applied Optics 14:618-622, 1975
10. Hung, Y. Y., Digital shearography versus TV holography for non destructive evaluation. J Opt Lasers Eng 1997;26:421.36.
11. Vageswar, A., Balasubramanian, K., Krishnamurthy, C.V., Jayakumar, Ra., T. B. "Periscope infrared thermography for local wall thinning in tubes," NDT&E International, Vol.42, pp.275-282, 2009.
12. Shen G. and Li. T, "Infrared thermography for high-temperature pressure pipe," Insight, Vol.49, pp.151-153, 2007.
13. 장호섭. 『전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법』, 광주: 조선대학교

박사학위논문, 2006.

14. 이주성. “유한요소법의 기초”

15. Jang H. S., "Quantitative measurement method of out-of-plane deformation using the shearography", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2006.

16. 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.

17. Cloud, Gary L., Optical Methods of Engineering Analysis, New York: Cambridge Universe Press, 1995, pp.393~491

18. Kang K. S. “Quantitative Evaluatin of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry”, Chosun Univ., ph.D Dissertation, 2005

19. Steinchen, W., Yang, L.. Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry, Washington, SPIE Press, 2003.

20. 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.

21. Gary L. Cloud, “Optical Methods of Engineering Analysis”, Cambridge University, 1998, pp. 395~408, 440~491.

22. Pramod K. Rastogi, “Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques”, John Wiley & Sons Ltd., 2001, pp.59~139

23. 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.

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

25. 강영준, 박낙규, 유원재, 김동우, “전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부 결함 측정에 관한 연구(II).” 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 4, pp.402-410, 2002.

26. 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.

27. 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.
28. Cloud, Gary L., *Optical Methods of Engineering Analysis*, New York: Cambridge Universe Press, 1995, pp.393~491.
29. 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.
30. Creath, K., "Phase-shifting speckle interferometry," *Applied Optics* Vol. 24, No. 18, pp. 3053~3058, 1985.
31. Malacara, D., Servin, M., and Malacara, Z., *Interferogram Analysis for Optical Testing*, New York: Marcel Dekker, 1998, pp.381~408.
32. 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.
33. Chungi Ki Hong, Hyun Surk Ryu, Hyun Choon Lim, "Least-squares fitting of the phase map obtained in phase-shifting electronic speckle pattern interferometry," *Optics Letters*, Vol. 20, No. 8, pp. 931-933, 2004.

## 저작물 이용 허락서

학 과	기계시스템공학과	학 번	20147105	과 정	석사
성 명	한글: 이 현 준    한문: 李 弦 俊    영문: Lee, Hyun-Jun				
주 소	전라남도 목포시 상동 우성아파트 105동 702호				
연락처	e-mail : leehj0102@hanmail.net				
논문제목	한글: 전단간섭법을 이용한 압력배관 면외변형 정량측정 영문: A study on measurement to out-of-plane deformation of pressure piping by shearing interferometry				

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    12 월    10일

저작자:    이 현 준    (서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**