



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
석사학위논문

스펙클 전단간섭법을 이용한 마이크로급
변형 분석을 기초한 원전배관
감육 결함부 크기별 정량평가

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

장 선 도

스펙클 전단간섭법을 이용한 마이크로급
변형 분석을 기초한 원전배관
감육 결함부 크기별 정량평가

Quantitative Evaluation by Size of Wall-thinning Defect
in Pipeline of Nuclear Power Plant based on
Micro-scale Deformation Analysis Using Speckle
Shearing Interferometry

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

장 선 도

스펙클 전단간섭법을 이용한 마이크로급
변형 분석을 기초로 한 원전배관
감육 결함부 크기별 정량평가

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2017년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

기계시스템공학과

장 선 도

장선도의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 김 재 열



위 원 조선대학교 교수 정 현 철



위 원 조선대학교 교수 김 경 석



2017년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구목표 및 내용	2
제 2 장 이론적 배경	3
제 1 절 전단간섭계(Shearography)	3
1. 레이저 스페클의 산업적 활용	3
가. 스페클(Speckle) 이론	3
나. 면외변형 측정 간섭계 및 해석	8
2. 물체의 변형정보 추출	13
가. 위상이동기법(Phase shifting method)	13
나. 이미지 필터링(Image Filtering)	15
다. 결꺾침(Unwrapping)	16
3. 전단 간섭계(Shearography)	18
가. 전단간섭계의 원리	18
나. 전단간섭계를 적용한 변위측정	22
제 3 장 실험장치 및 구성	25

제 1 절 기초실험을 위한 전단간섭계 구성	25
제 2 절 PZT Actuator을 이용한 변위 측정 장치	27
제 3 절 고무평판 시험편	28
제 4 절 배관 내부 결함 측정용 전단간섭계 구성	29
제 5 절 원전배관 시험편(ASTM A53 Gr . B)	30
제 4 장 실험방법 및 결과	32
제 1 절 전단간섭계를 이용한 결함 측정 시스템	32
1. 고무평판 시험편을 이용한 검증	32
2. 실험결과(고무평판 시험편)	33
3. 원전배관 시험편의 내부 결함 측정	37
4. 실험결과(원전배관 시험편)	38
제 5 장 결론 및 고찰	45
참 고 문 헌	46

LIST OF TABLES

Table 3-1 Specification of Shearography system	26
Table 3-2 Technocal data of PZT control device	28
Table 3-3 Internal defect size of ASTM A53 Gr.B specimen	31
Table 4-1 Basic deformation test conditions	32
Table 4-2 Phase map & Filtering image by micro-deformation	33
Table 4-3 Unwrapping & Line profile by micro deformation	35
Table 4-4 Measurement conditions of pressure pipe specimen	38
Table 4-5 Deformation data for defective width	39
Table 4-6 Profile data for defective width	41
Table 4-7 Comaprison of deformation according to defective width in pressure pipe specimen	43

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Speckle pattern before the deformation	3
Fig. 2-2 Speckle pattern after the deformation	3
Fig. 2-3 The scattering of light by a rough surface	4
Fig. 2-4 The fringe pattern formation depend on deformation	7
Fig. 2-5 The optical path of a ray : image-plane viewing	8
Fig. 2-6 The optical path of a ray : defocussed viewing	9
Fig. 2-7 The optical path of a ray : focal plane viewing	9
Fig. 2-8 The illuminating wavefronts by a surface displacement	10
Fig. 2-9 The scattered wavefronts by a surface displacement	10
Fig. 2-10 A arrangement of an out-of-plane displacement	11
Fig. 2-11 4-step phase shifting method	14
Fig. 2-12 3×3 mask with the some coefficient	15
Fig. 2-13 Example Unwrapping process	16
Fig. 2-14 Examples of the wrapped and unwrapped phase data	17
Fig. 2-15 Speckle pattern shearing interferometry	18
Fig. 2-16 Measurement result of deformation by shearography	24
Fig. 3-1 Configuration of shearography system and Q-800HR	25
Fig. 3-2 PZT deformation translation device	27
Fig. 3-3 PIMikroMove (TM)program	27
Fig. 3-4 Plate specimen	28
Fig. 3-5 Shearography system to measure defects in piping	39
Fig. 3-6 ASTM A53 Gr.B pressure pipe specimen	30
Fig. 4-1 Shearography system for micro-deformation measurement ·	32
Fig. 4-2 Defect measurement system of pressure pipe specimen	37
Fig. 4-3 Information for internal defect size	37

ABSTRACT

Evaluation of Thinning Defect Size in Nuclear Piping by Micro-scale Deformation Test Based on Shear Capacity by Using Shearography Interferometry

By Sun-do Jang

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

Dept. of Mechanical System Engineering

Graduate School, Chosun University

Corrosion and cracks can occur in the piping part of high temperature and high pressure environment at the fragile part of the nuclear power plant when this defect grows. Particular, there is a possibility of radiation leakage accident when leakage defects in the piping section of the primary system occur, so accurate inspection of corrosion and cracking is required. Flow-Accelerated Corrosion(FAC) inside the piping section often generates thinning phenomenon due to corrosion of piping section, and FAC is greatly affected by piping section environmental factors such as temperature and pressure. Therefore, there is a need for a non-destructive early diagnosis technique to inspect the corrosion into piping using the nuclear power plant. The shearing interferometry method, which is a non-contact method using a laser that is handled in this research, can acquire distortion information directly with a digital-based technology that can properly construct an optical interferometer and obtain information of deformation. While shearing interferometers have interference signal processing algorithms such as ESPI, there is an advantage that the first derivative value of out-of-plane displacement can be directly measured due to the difference in configuration of the interferometer. These advantages can be analysed for distortion and vibration

analysis by measuring changes in out-of-plane displacement while being insensitive to oscillation disturbance in the external environment and can be applied to non-destructive inspections such as quantification of defects.

In this paper, shearography, which is a non-contact method using a laser that is handled. One diffuse light is applied on target, and diffused reflection from speckle is split into two lights. One is introduced to mirror 1 and reflected to image plane. The other is reflected from mirror 2, and formed on image plane through light splitter. Meanwhile, according to arbitrary angle in mirror 2, image from mirror 2 will be horizontally sheared from the one from mirror 1, and is formed at image plane of CCD. Mirror 2 is called as shearing mirror, and inclined angle is denoted as shearing amount, δx . Because of the influence of shearing direction and amount of shear, interference stripe is formed. We used a commercially available device (Q - 800 HR) to measure deformation due to micro-deformation of plate specimen, and constructed a system for basic experiment of plate specimen. the shear angle was the same, and the shear amount and deformation amount were given for each size. the larger the shear amount and deformation in the basic experiment using the plate specimen test evaluation, the phase map image is clearly clear. piping test pieces with different widths of defects were created by duplicating the piping used for the secondary piping system. in order to quantitatively confirm the displacement of the defective part, it was confirmed that the displacement corresponding to the pressure when provided in the form of a graph was using a line profile after the image filtering, and there was a little difference.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

원자력발전소에서 위약부분은 고온, 고압 환경의 배관부에서의 부식 및 균열발생이며 이 결함들이 성장하는 경우 배관부의 누설이 발생할 수 있다. 특히 2차 계통의 배관부 누설결함이 발생하는 경우 방사능 유출사고로 이어질 수 있기 때문에 정확한 검사기술이 요구된다. 배관부의 부식에 의한 감육현상은 배관부 내부의 FAC)에 의해 발생하는 경우가 많으며 FAC는 온도, 압력 등 과 같은 배관부의 환경적 요인들에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 원자력 발전소의 배관부의 부식상태에 대한 비파괴적 조기 진단기술의 필요성이 요구된다. 그에 따른 비파괴 안전진단을 통해 대형 사고의 사전예방으로부터 검사대상의 신뢰성 평가까지 얻어 원전산업을 주력으로 하는 기업경쟁 강화에 큰 기반을 둘 것이다. 비파괴 검사는 크게 내부검사, 외부검사로 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 내부(Volume)검사법에는 초음파 탐상검사, 방사선 투과검사를 들수 있으며 외부(Surface)검사로는 육안검사, 자분탐상검사, 침투탐상검사 등을 들수 있다. 이러한 비파괴 검사방법들은 접촉식이거나 측정 대상물에 전처리 과정을 거치는 문제점이 있으나 레이저를 이용한 검사방법은 비접촉식이며 전처리 과정을 수반하지 않는 장점이 있다. 또한, 작업 시 방사능 및 기타 유해물질로부터 작업자의 안전을 확보할 수 있다. 일반적으로 변형을 측정하는 방법은 접촉식과 비접촉식으로 크게 분류할 수 있으며 접촉식 변형측정 방법은 스트레인게이지와 가속도계 등이며 비접촉식 변형측정 방법은 레이저를 이용하여 계측하는 방법이 있다. 특히, 비파괴 검사를 위한 스펙클 상관 간섭법은 컴퓨터 영상기술의 발전으로 전자처리 스펙클 간섭법(ESPI)과 전단간섭법(Shearography)으로 발전하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴검사 등의 여러 분야에 적용되고 있다. 본 논문에서 다루질 스펙클 기법 중 전단간섭법(Shearography)은 변형의 도함수 성분을 구할 수 있는 개념으로 대상물의 결함이 있을 경우, 외력으로 인한 응력집중은 강체의 변형을 발생시키지 않기 때문에 대상물의 결함을 측정하는데 용이하다. 또한 전자처리 스펙클 간섭법(ESPI)에 비해 외란에 강하다는 장점이 있어 실제 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 이러한 전단간섭법(Shearography)의 원리 및 이해를 바탕으로 시스템 구성을 통해 실제 원전 2차 계통에서 가동 중인 배관을 모사하여 감육(배관의 두께감소)에 따른 면내변위를 측정하고자한다.

제 2 절 연구목표 및 내용

최근기계 장치 산업을 중심으로 하는 기계 설비나 구조물, 시설 고도화 집약화 되어 하나의 시스템으로 제어되고 있다. 따라서 이것을 구성하는 장치 및 기계류의 이상이나 고장이 생산시스템이나 설비에 미치는 영향은 종래와는 생각할 수 없을 정도로 클 수 있다. 이와 같은 생산시스템이나 설비를 안전함과 동시에 효율 좋게 유지관리하기 위해서는 대상이 되는 시스템이나 설비 또는 그들을 구성하는 기계부품의 상태를 정량적으로 파악하는 것이 중요하다. 특히, 원자력 배관에서 유동 가속부식에 의한 배관의 두께 감소(감육)현상은 탄소강 배관의 건전성을 저하시키는 주요 손상 메커니즘 중 하나로 여겨지고 있다. 따라서 탄소강 배관에서 감육결함은 원전 배관의 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 배관계통에서의 감육 결함을 예측하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구되고 있다. 본 논문에서는 원전에서 사용되는 기존검사방식을 탈피하고 새로운 비접촉식 레이저 결함 검사를 도입하여 작업자의 안전을 고려하고 방사능 노출로부터 최소화하면서 원전배관 내부유동현상으로 인한 감육 깊이의 정도를 측정 및 정량화하여 배관누수사고를 사전에 예방하는데 그 의미를 두고 있다. 따라서 광계측을 이용한 원자력 배관 결함의 비접촉 비파괴 정량 평가를 통한 원자력 기기의 안정성 확보와 신뢰성 향상에 있다. 또한 광계측 비파괴 검사기술의 원자력 배관계열 현장적용을 위한 기초기술 확보 및 광계측 검사기술의 선진화 및 표준화에 연구 목표를 두고 있다. 따라서 본 논문에서는 전단간접계(Shearography)를 이용하여 고무평판의 미세변형에 따른 변형 측정을 시작으로 배관시험편의 압력변화에 따른 결함부의 변형의 정도를 비교하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 전단간섭계(Shearography)

1. 레이저 스펙클의 산업적 활용

가. 스펙클(Speckle) 이론

최근의 산업기술은 초고온, 극저온과 같은 극한환경과 고분해능을 요구하고 있으며, 계측 및 검사기술도 이러한 기술적 요구에 부합하여야 한다. 레이저 스펙클 간섭법(Laser speckle interferometry)은 레이저를 이용하여 광학간섭계의 변화만으로 비접촉고분해능으로 물체의 변형 및 응력해석, 비파괴검사, 진동해석에 활용이 되고 있다. 이 기술은 한번의 측정으로 레이저가 조사되는 면적전체를 동시 측정이 가능하고, 실시간 계측 및 검사가 가능하다. 또한, 단색성(monochromaticity)을 띄며 간섭성이 좋은 레이저 광이 Fig. 2-1와 같이 거친 표면에 반사되거나 굴절률이 균일하지 않는 매질을 통과할 때 Fig. 2-2와 같이 고운 입자 형태의 밝고 어두운 점이 무질서한 분포를 이루고 있다.



Fig. 2-1 Speckle pattern before the deformation

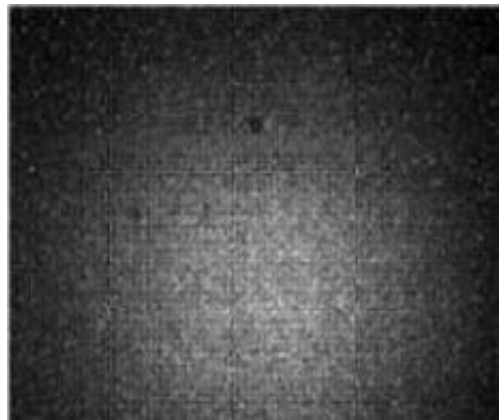


Fig. 2-2 Speckle pattern after the deformation

스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나눌 수 있으며, 이 둘의 가장 큰 차이점은 결상렌즈의 사용여부에 따라 구분되며, 스페클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점 사이의 거리를 스페클의 크기라 정의하고 있다. 즉, 서로 상관하지 않는 광강도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다. Object Speckle은 관측면의 위치에 따라 변화하게 되며, 대상물의 표면에 빛이 비추어질 때 대상물 표면의 모든 점에서는 흡수와 반사가 일어나는데, 반사가 일어나는 점은 Huygens-Fresnel의 2차 파면과 유사한 구면파를 생성한다. 표면의 모든 점으로부터 산란된 빛의 진폭의 합은 공간상의 임의의 한 점에서 빛의 복소진폭의 합으로 나타난다. 이를 Fig. 2-3에 나타내었다.

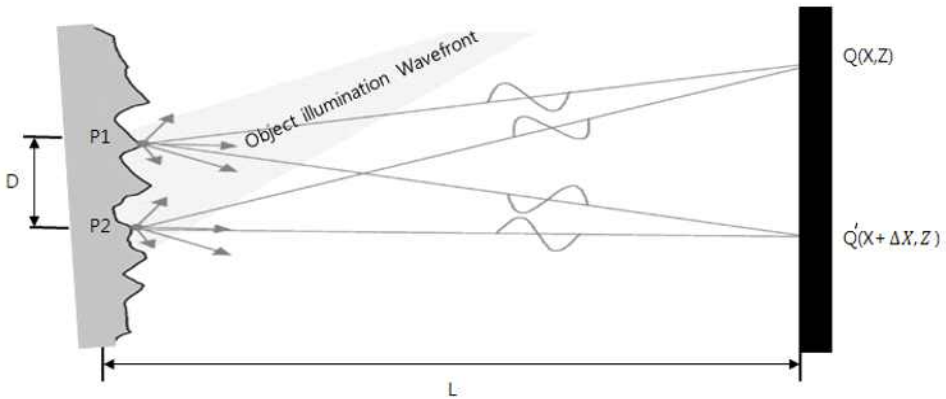


Fig. 2-3 The scattering of light by a rough surface

대상물 표면의 모든 점은 Q에 영향을 주게 되며, Q와 인접한 Q' 사이가 Δx 라고 하고, P₁과Q, P₂와 Q까지의 경로차는 s이며, P₁과Q, P₂와 Q'까지의 경로 차는 s'이라고 할 때, s와 s'과의 상대적인 경로변화는 식.(2-1)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 s &= (P_1Q - P_2Q) \simeq \frac{xD}{L} + \frac{D^2}{2L} \\
 s' &= (P_1Q' - P_2Q') \simeq \frac{xD}{L} + \frac{D^2}{2L} + \frac{\Delta xD}{L} \\
 \Delta s &= s' - s = \frac{\Delta xD}{L}
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

Δs 가 파장보다 상당히 작다면, 상대적 위상은 근사적으로 동일하지만, $\Delta xD/L \simeq \lambda$ 라면 인접한 점과의 위상은 전혀 다르기 때문에, Q와 Q' 에서 빛의 강도는 상호 연관성이 없게 된다. 이렇게 상호 연관성이 없게 되는 거리 Δx 의 2배를 스페클의 크기라고 할 수 있으며, 거리는 식.(2-2)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_o = 1.22 \frac{\lambda L}{D}
 \tag{2-2}$$

이와 같이 Objective Speckle은 공간상의 평면에만 의존성이 있으며, 결상렌즈를 사용하지 않는다. 하지만, Subjective Speckle은 ESPI와 같이 결상렌즈를 사용할 때 발생하며, 스페클의 공간분포는 결상시스템의 회절한계에 의해 결정된다.

즉, Fig. 2-3의 대상물 위의 P₁에서 반사된 빛은 렌즈 L을 통과하면서 결상면의 Q에 회절 무늬를 형성한다. Q에 형성되는 회절무늬의 진폭 분포는 제 1종베셀함수로 설명할 수 있고, Q는 P₁과 P₂사이의 거리의 2배이다. 이러한 관계를 이용하여 결상시스템에서 얻어지는 스페클의 크기는 거리 QQ' 의 2배이고, 베셀함수를 이용하여 식.(2-3)와 같다.

$$S_s = \frac{2.44\lambda v}{a}
 \tag{2-3}$$

여기서, a는 렌즈 조리개의 지름이며, v는 렌즈로부터 결상면까지 거리를 나타낸다. Fig. 2-2에 표현된 것처럼 렌즈 조리개를 통과한 스페클은 Airy Disc모양의 회절

패턴을 보이므로, 각각의 스페클의 크기는 식.(2-4)와 같이도 표현할 수 있다.

$$S_s \approx 1.22(1 + M)\lambda F \quad (2-4)$$

여기서, M: 렌즈 확대배율, λ : 조사된 레이저의 파장, F: 렌즈의 f-number이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 실험에서 줌렌즈 광학배율 1배, 파장 532nm 레이저, 비디오배율 47.6배를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 때, 모니터 상에 관찰되는 subjective speckle의 물체표면에서의 크기는 식.(2-5)와 같이 정의된다.

$$S_s \approx 1.22(1 + M)\lambda \frac{F}{M} \quad (2-5)$$

위의 조건식을 보면 물체 표면에서 형성되는 스페클의 크기는 778.78nm라 할 수 있다. 대체적으로 스페클의 크기는 CCD카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며 uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 이상적인 스페클의 크기는 CCD pixel 하나당 한 개의 스페클이 존재할 때다.

카메라 신호는 입력된 빛의 세기에 비례하기 때문에 변형에 대한 간섭무늬 형상은 변형 전 (I_{before})과 변형 후 (I_{after})의 각각의 이미지를 저장하고, 저장된 이미지를 합산 및 감산처리하여 변형에 따른 간섭무늬를 나타낼 수 있다.

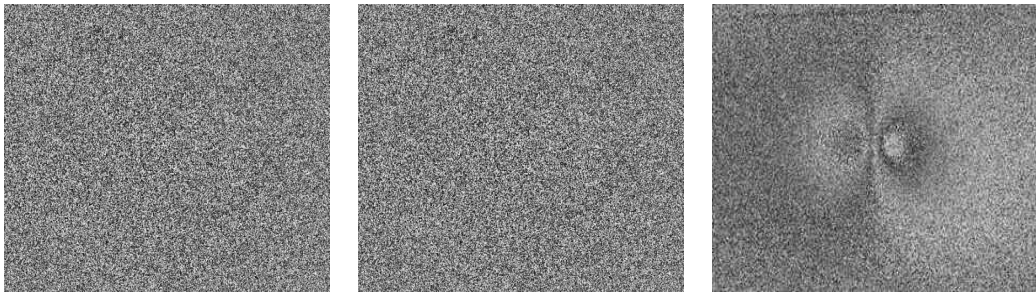
$$I_{before} = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \quad (2-6)$$

$$I_{after} = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos (\phi + \Delta\phi)$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{add}} &= I_{\text{before}} + I_{\text{after}} \\
 &= 2I_0(1 + \gamma \cos \phi) + 2I_0[(1 + \gamma \cos(\phi + \Delta \phi))] \\
 &= 4I_0 + 2I_0\gamma[\cos \phi - \cos(\phi + \Delta \phi)] \\
 &= 4I_0 + 4I_0\gamma \left[\cos\left(\phi + \frac{\Delta \phi}{2}\right) \cos \frac{\Delta \phi}{2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

여기서, I_{before} : 물체변형전의 광강도, I_{after} : 물체변형후의 광강도, $\Delta \phi$: 물체변형에 따른 위상변화이다. 변형전후의 두 개의 스펙클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식.(2-8)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, I_{add} 은 물체변형전후의 광강도 분포의 감산 처리된 광강도이다.

$$\begin{aligned}
 I_{\text{add}} &= |I_{\text{before}} - I_{\text{after}}| \\
 &= 4I_0\gamma \left[\sin\left(\phi + \frac{\Delta \phi}{2}\right) \sin \frac{\Delta \phi}{2} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2-8}$$



(a) Before image

(b) After image

(c) Subtraction image

Fig. 2-4 The fringe pattern formation depend on deformation

나. 면외변형 측정 간접계 및 해석

먼저 대상물이 관측면에서 초점을 맺는 것을 생각하면, Fig. 2-5에서 보는 것처럼 S에서 확산하는 빛이 대상물에 조사되고, 광경로 l는 식.(2-9)과 같이 표현할 수 있다.

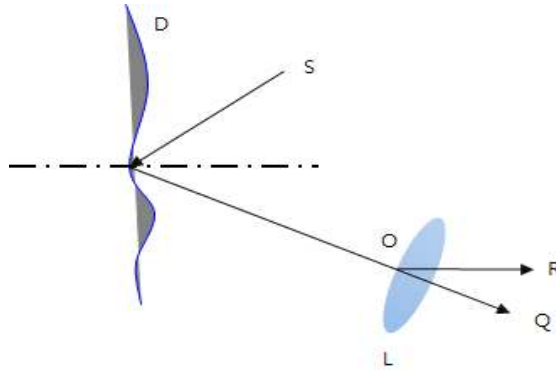


Fig. 2-5 The optical path of a ray : image-plane viewing

$$l = SP + l_p + PO + OR \quad (2-9)$$

여기서, SP와 PO는 대상물 표면의 임의의 P의 주변영역에서 S와 O까지의 평균 거리이고, l_p 는 대상물 표면의 무작위적 높이 변화에 따른 광경로 이다. Fig. 2-6에서 관측면의 Q는 T에서 확산 조사되는 것으로 생각할 수 있으며, 대상물의 임의의 영역이 렌즈 조리개를 통하여 초점을 맺는다.

$$l = SP + l_p + TQ - PT \quad (2-10)$$

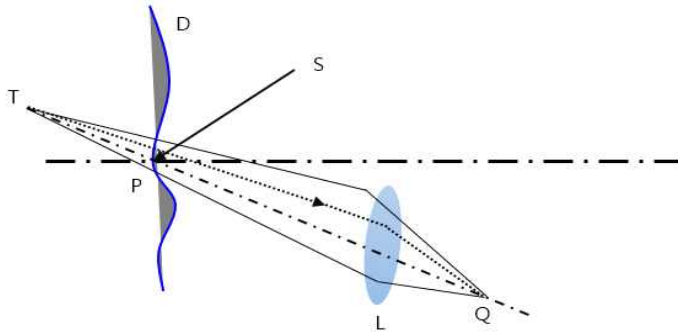


Fig. 2-6 The optical path of a ray : defocused viewing

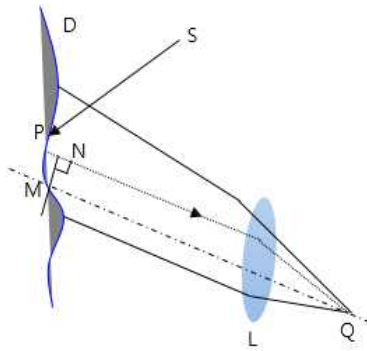


Fig. 2-7 The optical path of a ray : focal plane viewing

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 경로는 i) 경로 S부터 P까지, ii) 표면의 높이변화와 관련 경로 l_p , iii) 경로 S부터 P까지로 구성된다.

$$l = SP + l_p + MQ + PN \quad (2-11)$$

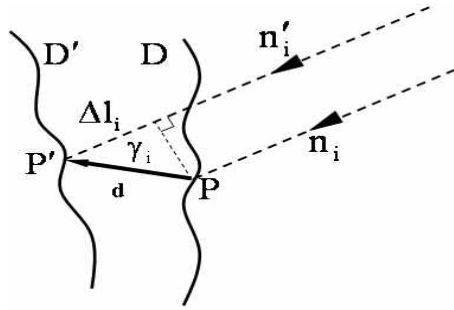


Fig. 2-8 The illuminating wavefronts by a surface displacement

대상물에 변형이 발생하였을 때, i)에 의한 경로 변화는 Δl_i 이며, 실제적인 간섭계의 배열을 고려할 때 $SP \gg d$ 이기 때문에 식.(2-12)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Delta l_i &= SP' - SP = d \cos \gamma_i \\
 \Delta l_i &= \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{d}
 \end{aligned}
 \tag{2-12}$$

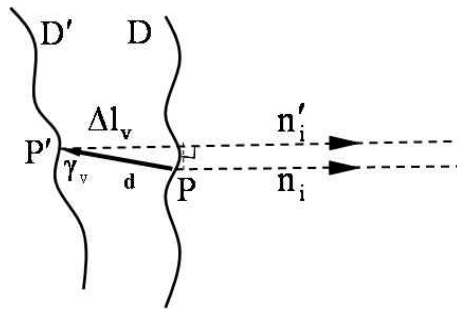


Fig. 2-9 The scattered wavefronts by a surface displacement

대상물의 표면이 변형하여도 Δl_p 는 변하지 않는다고 가정할 수 있으며, iii)와 관련된 경로 Δl_2 의 변화는 Fig. 2-9에 표현된 식.(2-13)과 같다. Fig. 2-7에서 SP와 SP', PQ와 P'Q는 서로 평행한 것으로 가정한다.

$$\Delta l_v = d \cos \gamma_v$$

$$\Delta l_v = -\mathbf{n}_v \cdot \mathbf{d}$$
(2-13)

변형에 의한 전체의 위상변화는 식.(2-14)로 표현되며, 모든 광계측의 기본식이 된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_v) \cdot \mathbf{d}$$
(2-14)

여기서, \mathbf{n}_i 는 조사방향이고, \mathbf{n}_v 는 관측방향이며, 식.(2-14)는 면외변형 뿐만 아니라 면내변형의 출무늬 패턴에도 적용되며, 대상물에 조사되는 입사각과 관측각이 다르면 위상변화는 식.(2-14)를 조사각과 관측각으로 표현하면 식.(2-15)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i + \cos \theta_v)d$$
(2-15)

θ_i 은 대상물 표면의 수직면과 조사면과의 각도, θ_v 는 관측면과 이루는 각이다.

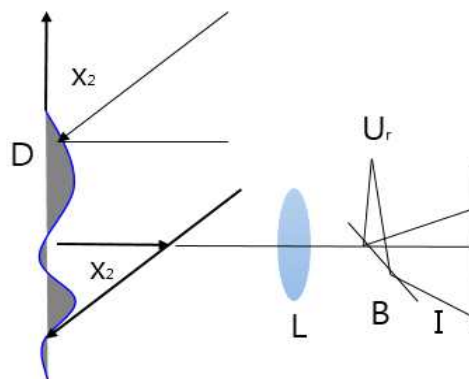


Fig. 2-10 A arrangement of an out-of-plane displacement

식.(2-15)를 이용하여 Fig. 2-9와 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 식.(2-15)은 식.(2-16)와 같이 표현되고, 대상물에 발생하는 변형을 계산할 수 있는데 이는 식.(2-17)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(1 + \cos\theta_i)d \quad (2-16)$$

$$d = \frac{\lambda}{2\pi(1 + \cos\theta_i)} \Delta\phi \quad (2-17)$$

2. 물체의 변형정보 추출

가. 위상이동기법(Phase shifting method)

PZT Mirror를 이용한 위상이동기법은 전단간섭법에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 4단계 위상이동기법을 통해 위상의 변화를 바탕으로 Phase map(위상지도)를 형성한다. 기존 정량화 기술은 변형해석에 있어 줄무늬 사이에서 변위정보를 얻을 수 있다. 즉, 정밀도가 레이저 파장의 1/2로 제한을 받았으며 물체의 전체적인 변위를 측정하는 방식이었다. CCD Camera의 Pixel 각각에서 레이저의 위상값($\angle \phi$)을 얻기 위해서는 상관간섭무늬를 표현하는 식에서 3개의 미지수(I_R , I_O , ϕ)를 구해야 한다.

$$I = 4\sqrt{I_R I_O} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right)\sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right) \quad (2-18)$$

본 연구에서 사용한 위상추출을 알고리즘은 4단계 위상이동기법(4-step phase shifting method)으로 3개의 미지수를 구하기 위해 $\pi/2$ 씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식.(2-19)과 같이 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi \\
 I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi/2) \\
 I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi) \\
 I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + 3\pi/2)
 \end{aligned} \quad (2-19)$$

4개의 방정식을 식.(2-20)와 같이 조합하여 CCD Pixel의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결된 위상지도(phase map)을 형성하게 된다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right) \quad (2-20)$$

변형해석을 위한 실험에서는 변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상(ϕ_{before})과 변형후의 위상(ϕ_{after})을 각각 구하고 그 차를 구함으로써 실제 문체변형을 식.(2-21)과 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_{before} - \phi_{after} \quad (2-21)$$

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

위상이동기법에 의해 얻어진 4개의 스펙클패턴을 처리하여 위상지도를 얻을 수 있다. 이 위상지도는 artan 함수의 특성으로 인하여 물체 변위 값을 2π 의 간격의 줄무늬 형태로 Fig. 2-10와 같이 나타낼 수 있다.

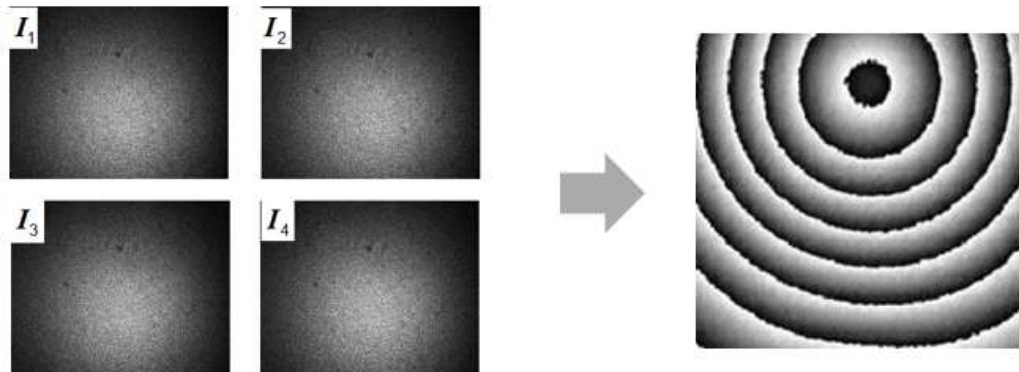


Fig. 2-11 4-step phase shifting method

나. 이미지 필터링 (Image Filtering)

위상이동방법을 적용하여 얻어진 위상의 정보는 함수의 특성상 일정하게 반복하면서 각각 위상의 불연속점을 가지도 있으며 노이즈가 많이 포함되어 있다. 이러한 노이즈들은 결필침 단계에서 가장 중요한 위상값이 급격하게 변하는 부분을 인식하는 단계에서 오류를 발생하게 하는 요인이다. 즉, 차수를 인식하는데 있어서 에러가 발생하는 것은 대상물의 정량해석 결과에 에러를 포함시키게 된다.

이미지 필터링의 기본 개념은 영상내의 특정한 위치에서 마스크 아래에 있는 화소의 밝기와 마스크 계수들 간의 곱을 합한 것이다. Fig. 2-11은 일반적인 3×3 마스크를 보여준다. 임의의 위치에서 마스크 아래에 있는 화소들의 명암도를 Z_1, Z_2, \dots, Z_9 으로 표시하면 선형 마스크의 응답은 식.(2-22)와 같다.

$$R = W_1 Z_1 + W_2 Z_2 + \dots + W_9 Z_9 \quad (2-22)$$

노이즈들은 감소시키기 위하여 메디안 필터링, Smoothing, π 위상이동, 위상필터링 등 여러 가지의 효율적인 필터링 단계를 거치면 위상 정보의 손상을 최소화하고 잡음을 제거할 수 있다.

W_9	W_2	W_3
W_8	W_1	W_4
W_7	W_6	W_5

Fig. 2-12 3×3 mask with the some coefficient

다. 결렬침(Unwrapping)

위상지도(Phase map)의 분리된 위상정보를 변형기울기로 표현하고 이를 정량해석을 위해 Unwrapping 기술이 필요하다. 위상이동기법에 의해 얻어진 변위를 정량적으로 표현하는 위상지도는 위상을 추정하기 위한 arctangent함수의 modulo- 2π 특성으로 인해 $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 구성된 톱니 바퀴형상으로 모호성을 가지게 된다.

이렇게 arc-tangent함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 변환하여 주는 과정을 위상 결렬침(Phase Unwrapping)이라 하고 이에 대한 예를 Fig. 2-14에 나타내었다. 현재 보유하고 있는 기술은 Line scanning기법으로 노이즈가 거의 없고 형태가 간단한 위상지도는 해석이 가능하지만 형태가 복잡하고 노이즈가 있는 위상지도의 경우에는 이미지의 깨짐 현상 및 왜곡이 발생하여 해석에 어려움이 발생한다.

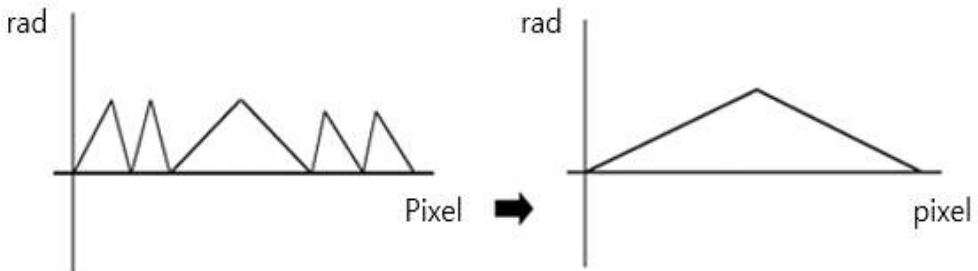


Fig.2-13 Example Unwrapping process

위상 결렬침을 하기 위해서는 먼저 arc-tangent함수가 $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를 $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 이를 연속 위상으로 변환하여야 한다. 식.(2-23)을 이용하여 결렬침된 위상을 구하게 된다.

$$\phi_{unwrapping} = \phi_{wrapping} + 2\pi N \quad (2-23)$$

Fig.2-15는 결렬침(Unwrapping)전 위상지도(Phase map)이미지의 진행 결과가

며, 개발된 Least square기법을 통하여 결핍침 후 얻은 위상지도 이미지와 Line Profile의 진행예시이다. 본 연구는 Least square을 통해 결핍전후 결과를 비교해보면서 전보다 결핍침의 노이즈가 많이 감소하였고, 결과 값이 결핍침 전의 불연속점들이 연속적으로 이어지며 위상지도를 알 수 있다.

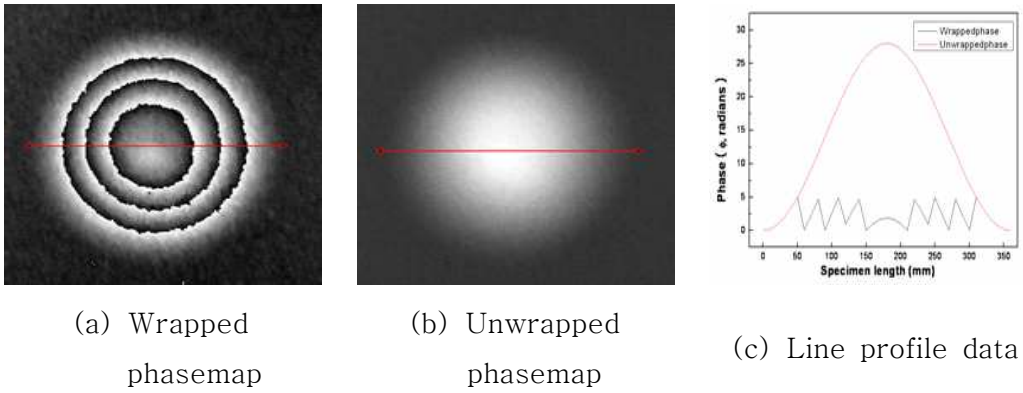


Fig. 2-14 Examples of the wrapped and unwrapped phase data

3. 전단간섭계 (Shearography)

가. 전단간섭계의 원리

Shearography에서 사용되는 간섭계는 마이켈슨(Michelson)간섭계의 변형된 형태가 가장 많이 사용된다. Fig.2-16은 전단간섭계의 원리를 개략적으로 보여주고 있다. 전단간섭계를 이용한 줄무늬 해석방법은 임의의 점 P에 물체빔이 조사 될 때 전단량에 의해 발생하는 두 점의 변형을 식.(2-24)에서 보는 바와 같이 d 와 d' 에 의한 차이로 표현한다. n_o 는 조사방향이고, n_s 는 관측방향 벡터이다.

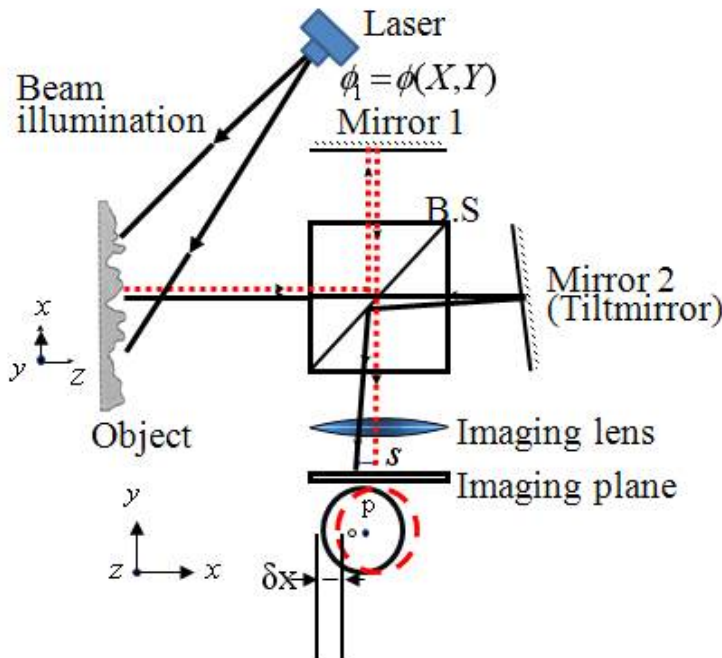


Fig. 2-15 Speckle pattern shearing interferometry

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

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-25)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 식.(2-26)과 같이 표현할 수 있으며, x 방향의 변형 Δx 는 상면에서 전단량 s 와 같다. 이 값은 매우 작기 때문에 식.(2-26)에서 2차 이상의 고차항을 무시할 수 있으며, 식.(2-25)를 식.(2-27)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \end{aligned} \quad (2-26)$$

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{d(x) - d(x_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) s \quad (2-27)$$

레이저로부터 나온 광원은 Beam Expander를 통해 시험편에 확산 조사되고 대상체 표면으로부터 반사된 빛은 Beam splitter에 의해 두 개의 빔으로 나뉘게 된다. PZT Mirror와 Mirror2로 각각 들어 온 빔은 다시 CCD카메라로 들어가며, 이때 PZT Mirror에서는 위상변화가 일어난 광원이 들어가게 되고 Mirror2에서는 Shearing된 광원이 들어가게 되며 Image Plane상에서 만나는 두 광원은 서로 간섭을 일으키게 된다. Shearing에 따라 위상의 변화는 다음 식들로 나타낼 수 있으며, P점에서의 위상차는 식.(2-28)와 같이 나타낼 수 있고 식.(2-29)는 Q점에서의 위상차를 나타낸다.

$$\Delta \phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{d}) \quad (2-28)$$

$$\Delta \phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot (\vec{d} + \vec{\Delta d}) \quad (2-29)$$

전단간섭계는 두 점 P와 Q사이에서의 변형이 차이를 계측하기 때문에 전단간섭계에서 간섭무늬가 나타내는 위상차 $\Delta \phi$ 는 식.(2-28)에서 식.(2-29)를 뺀 결과 값과 같고, 그 식은, 식.(2-30)과 같이 나타낼 수 있다. 또한, P점과 Q점에서 변형 전후의 위상차를 직접 구해보면 식.(2-31)과 식.(2-32)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_o - \vec{n}_s)[(\vec{d} + \Delta\vec{d}) - \vec{d}] \quad (2-30)$$

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 + \cos\theta)d_1 + \sin\theta d_2] \quad (2-31)$$

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda}[(1 + \cos\theta)(d_1 + \Delta d_1) + \sin\theta(d_2 + \Delta d_2)] \quad (2-32)$$

위의 식.(2-30)에서 \vec{n}_o 와 \vec{n}_s 는 서로 법선 상에 놓여있고, Δd 는 테일러 정리를 이용하여 정리하면 식.(2-33)과 같이 전개할 수 있다. 또한, Δx 는 상면에서 S_x 와 같고 이 값은 매우 작기 때문에 식.(2-33)은 식.(2-34)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} + \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots \quad (2-33)$$

$$\Delta d = \sum_i \frac{\partial d_i}{\partial x_j} S_x \quad \text{단, } i=1,2,3 \quad (2-34)$$

그러므로, 식.(2-34)에서 Δd_1 과 Δd_2 를 구해서 이 값을 식.(2-32)에 대입하면 식.(2-35)로 정리 할 수 있다. 또한, θ 가 작으면, $\sin\theta \cong 0$ 이므로, 식.(2-36)과 같이 정리할 수 있으며 식.(2-37)와 같은 결과식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\phi_Q = \frac{2\pi}{\lambda} [(1 + \cos\theta)(d_1 + \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x) + \sin\theta(d_2 + \frac{\partial d_2}{\partial x} S_x)] \quad (2-35)$$

$$\Delta\phi = \Delta\phi_Q - \Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta) \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \quad (2-36)$$

$$\Delta\phi \cong \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial d_1}{\partial x} S_x \quad (2-37)$$

실험에서 이미지를 구했을 때 등고선은 $\frac{\partial d}{\partial x}$ 의 미분값이며 전단량 S_x 에 의해 이미지의 선명도가 달라짐을 알 수 있다. 위의 식.(2-37)에서 알 수 있듯이 Shearography는 작은 전단량의 경우에 면외 변위량에 대한 미분값을 직접 측정할 수 있음을 알 수 있다. 전단량 ∂x 가 작을수록 도함수에 가까워지게 되며, 전단량에

의해 광학계의 민감도(상대변위)을 조절할 수 있다. Shearography는 간섭계의 특성으로 물체 면외변위의 전단량만큼 떨어진 두 점의 상대변위 값을 측정한다.

나. 전단간섭계를 적용한 변위 측정

전단간섭법은 그 측정결과를 변형의 도함수(Derivative), 구배(Gradient), 기울기(Slop)등으로 표현하고 있으며, 거의 모든 연구자들이 사용하고 있는 전단간섭법의 이론식을 표현할 때는 “전단량이 충분히 작다”는 조건을 적용하여 미분으로 표현하고 있다.

$$f'(x_i) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-38)$$

전단간섭법을 적용하는 식(2-38)과 도함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내외 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물의 결함 검출의 민감도를 높이기 위해 전단량을 측정조건에 맞게 임의로 부여하며, 통상 전단량이 ‘충분히 작다’는 조건을 만족하지 못한다. 이러한 조건을 보완하기 위해서 앞에서 언급한 전단간섭법의 이론적 제한사항을 수치미분을 이용하여 표현하고, 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다. 실제 전단간섭법을 이용한 측정결과는 식(2-39)과 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형 Δd 는 식(2-40)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-39)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-40)$$

식(2-40)에서 고차 항을 무시하면, 식(2-41)와 같으며, 이를 식(2-39)에 대입하면 식(2-42)과 같다.

$$\Delta d = d(x) - d(x_0) \approx \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} \quad (2-41)$$

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{d(x) - d(x_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) \Delta x \quad (2-42)$$

이는 대상물에 발생하는 변형의 한 점과 전단량 만큼 떨어진 두 점의 연속적인 차이와 같으며, 이 결과는 직접적으로 적분을 적용할 수가 없으나, 전단간섭법은 화상처리이므로 변형 f , 대응화소 x_i , 전단량 화소 h 로 바꾸어 쓰면, 식 (2-43)과 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f' 으로 정리하면 식 (2-44)과 같다.

$$f'(x_i)h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (2-43)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-44)$$

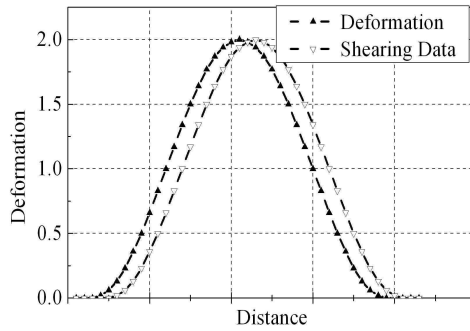
테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다. 측정된 결과는 식(2-45)과 같이 수치적분이 가능하다.

$$\Delta \phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f'h \quad (2-45)$$

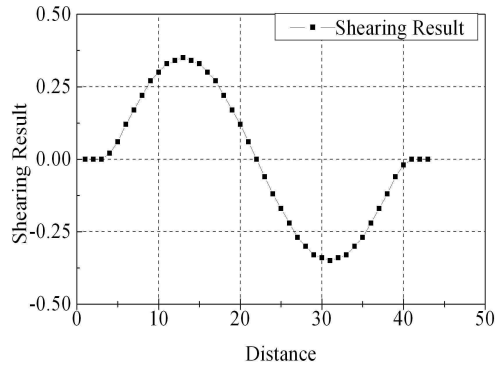
전단간섭계의 전단거울이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2-17(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동되어 나타난다. Fig. 2-17(b)는 Fig. 2-17(a)에 표현된 두 값을 감산한 결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2-17(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2-17(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정

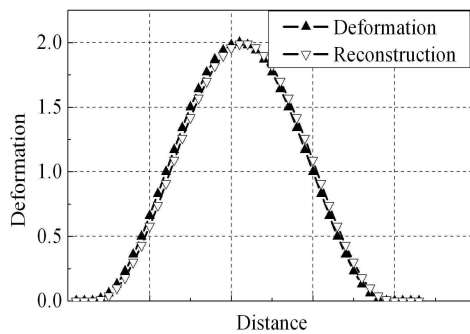
할 수 있음을 나타낸다.



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2-16 Measurement result of deformation by shearography

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 기초실험을 위한 전단간섭계 구성

물체의 변형에 따른 스펙클패턴의 변화를 연속적으로 감산처리에 의해 실시간으로 관찰할 수 있는 전단간섭계 시스템을 구성하여 마이크로급 변형에 따른 기초실험을 실시하였다. 기초실험에서 사용된 전단간섭계는 독일 DANTEC DYNAMICS 사의 상용 제품인 Q-800HR 모델을 이용하였으며, 구성은 Fig. 3-1과 같이 Shearography 센서, 센서 내부에 장착된 Diode laser, Controller, PC로 구성되어 있다. System은 상요 프로그램인 INSTRA 4D를 이용하여 장치의 제어와 필터링과, 결필침을 수행한다. 레이저는 Diode laser(출력: 50mW, 파장: 70nm)를 사용하며, 센서 양측면의 are에 장착된 2개의 Diode를 통해 확산된 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사된다. 전단량과 전단각도는 센서 내부의 모터를 자체프로그램을 이용하여 조절할 수 있다. System은 PZT에 의해 위상이동이 되며 4단계 위상이동기법을 적용하여 위상지도(Shearogram)를 얻게 된다. 최종 위상지도는 상용 프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH)을 이용하여 해석함으로써 상대변위량을 얻게 된다.

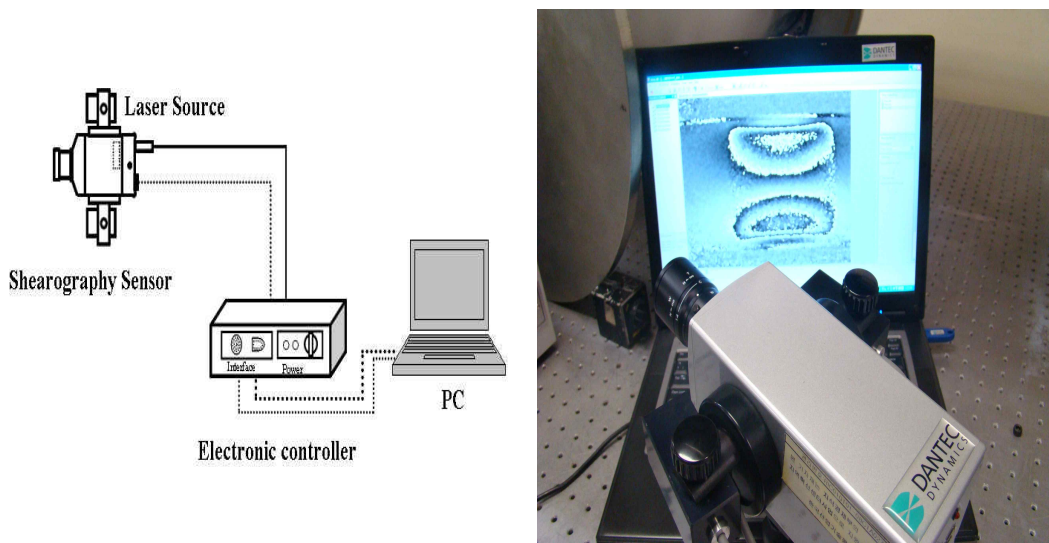


Fig. 3-1 Configuration of shearography system and Q-800HR

Table 3-1 Specification of Shearography system

Description	Technocal data
Operating voltage	12V DC
CCD-resolution	1392 × 1040 pixel
Objective Connection	C-Mount 1/2 " image field
Shear angle	0-3°
Shear direction	0-90°
Measuring area	Up to (1.2 × 0.8) m ² (with external laser)
Measuring resolution	according to illumination arm, distance and wave length: 0.03μm/shear distance
Sensor head dimension	W × H × D = (70 × 70 × 16) m ³
Lase (Built-in)	Diode 50mW, 780nm

제 2 절 PZT Actuator을 이용한 변위 측정 장치

위상기법 적용 및 변형량을 마이크로급 단위로 직접 컨트롤하기 위해 Fig. 3-2와 같이 PZT마이크로급 변형량 이송장치를 구성하였고, Fig. 3-3에 나와 있듯이 PI사의 자체적이 컨트롤러 프로그램인 PIMikroMove(TM)을 본 연구를 수행하기 위해 사용하였다.

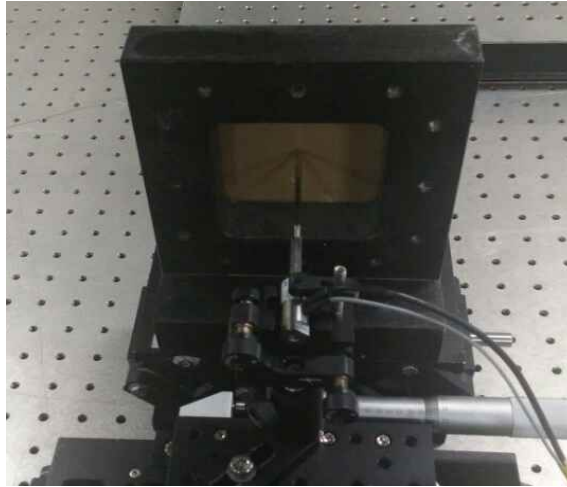


Fig. 3-2 PZT deformation translation device



Fig. 3-3 PIMikroMove (TM)program

Table 3-2 Technocal data of PZT control device

Description	Technocal data
Operating voltage	selectable 110 - 230 VAC, 50/60 Hz
Typical mean power consumption	Max. 100W + Monitor Consumption, depending on system configuration
Dimensions H × W × D	380 × 560 × 600 (mm ³)
Ambient operative temperature range	15 - 35 °C
Store temperature	-10 - 50 °C
Piezo output voltage	-20 - +120 VDC
Power supply output voltage	12 VDC
Power supply output current	Typ. 300mA

제 3 절 고무평판 시험편

재질은 Steel이고, 평판의 4면을 서로 고정시킨 고무평판 시험편 Fig. 3-4 을 제작하였다. 측정부의 크기는(100mm × 100mm)이고, 레이저 다이오드의 난반사를 용이하게 하기 위해 백색 무광 스프레이를 사용하였다.

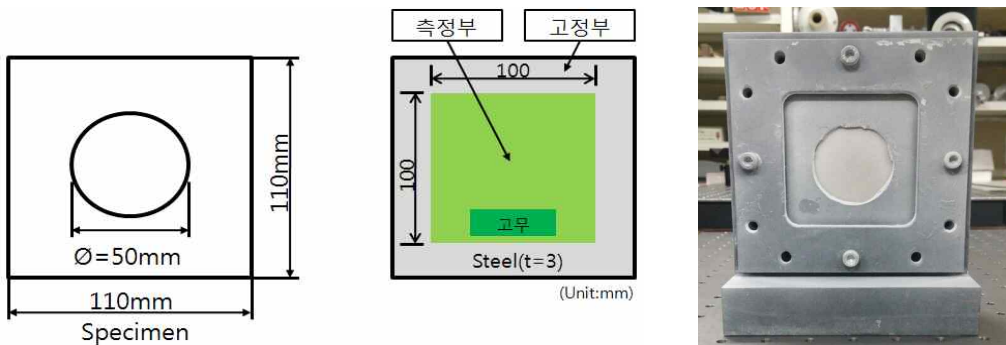


Fig. 3-4 Plate specimen

제 4 절 배관 내부 결함 측정용 전단간섭계 구성

배관 내부 결함 측정용 전단간섭계 시스템은 면외 변형 측정이 가능하도록 구성하였다. Fig. 3-5에서 보는바와 같이 시스템 내부는 Zoom lens, CCD camera, PZT Actuator mirror, Shearing mirror 등으로 구성하였고, 외부에는 Laser diode를 광원으로 하기 위해 Diode arm을 고정부를 제작하였다.

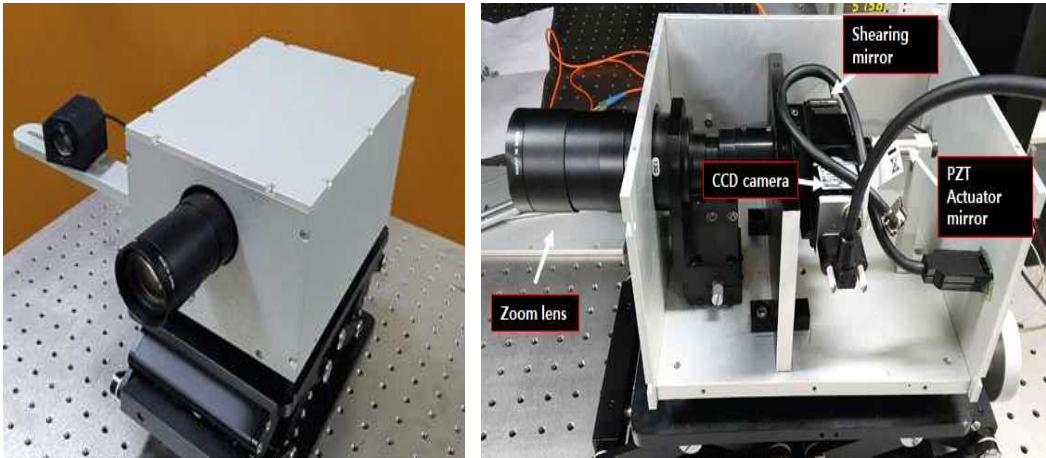


Fig. 3-5 Shearography system to measure defects in piping

제 5 절 원전배관 시험편 (ASTM A53 Gr . B)

원전배관 2차 계통에 사용되는 배관을 모사하여 인공적으로 180° 결함각도로 임의의 결함을 축방향인 길이방향으로 2개를 제작하였으며 각각의 배관 내부에 총 4개의 결함을 가공하였다. Fig. 3-6은 배관 시험편의 형상과 치수를 보여주고 있으며 시험편의 재질은 ASTM A53 Gr.B 타입으로써 인장강도는 최소415Mpa이고, 항복강도는 240Mpa이다. Table 3-3은 2개의 시험편의 결함 깊이, 결함 폭, 결함 길이 조건별로 보여주고 있다.

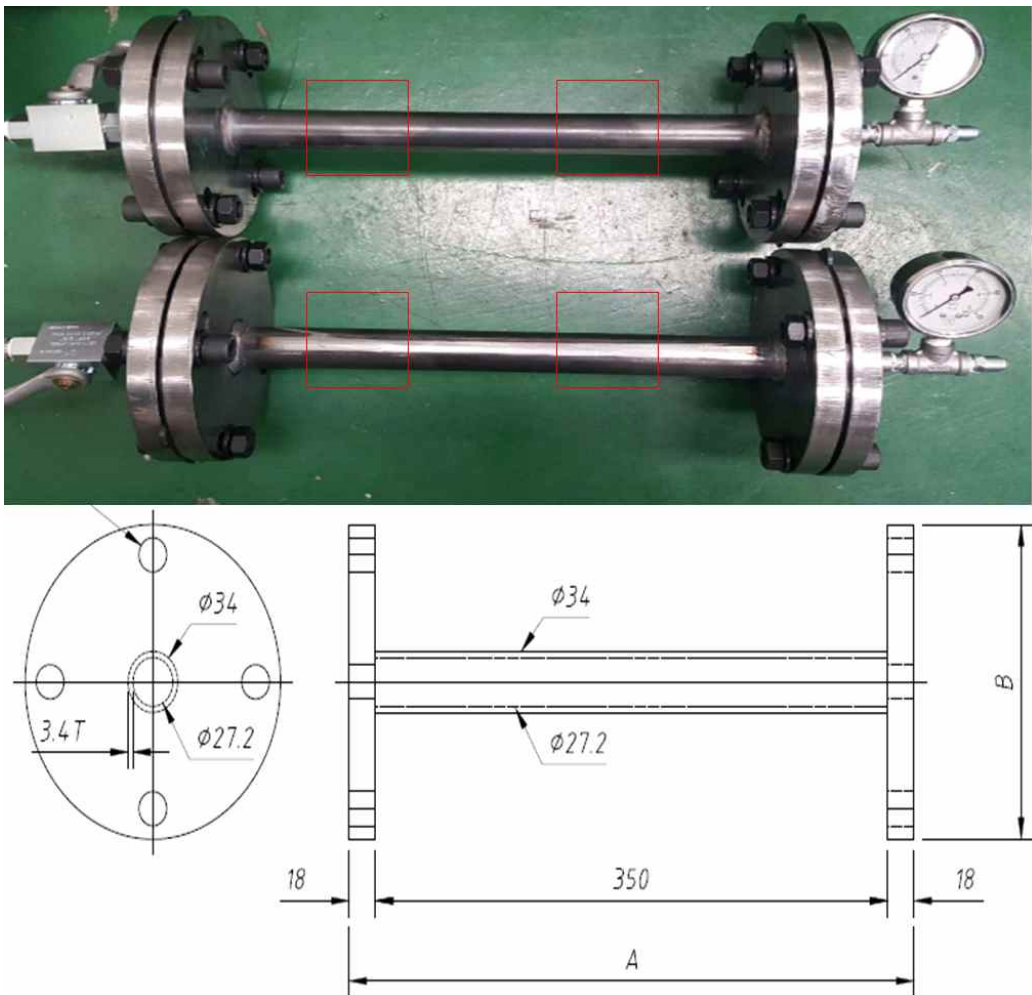


Fig. 3-6 ASTM A53 Gr.B pressure pipe specimen

Table 3-3 Internal defect size of ASTM A53 Gr.B specimen

ASTM A53 Gr.B pressure vessel specimen			
No.1	Thickness tp(mm)	Length(mm)	Width(mm)
ASTM A53 Gr.B specimen	3/4tp	10mm	5.0mm
			5.1mm
No.2	Thickness tp(mm)	Length(mm)	With(mm)
ASTM A53 Gr.B specimen	3/4tp	10mm	5.2mm
			5.3mm

제 4 장 실험방법 및 결과

제 1 절 전단간섭계 시스템 이용한 결함 측정 시스템

1. 고무평판 시험편을 이용한 검증

고무평판의 미세변형에 따른 변형량을 측정하기 위해 Fig. 4-1과 같이 상용장비(Q-800HR)을 이용하여 고무평판 기초실험을 위한 시스템을 구성하였다. 전단각도는 동일하게 하고 전단량과 변형량은 크기별로 부여하였다. Table. 4-1는 본 실험을 수행하기 위한 조건값에 대한 표이다.

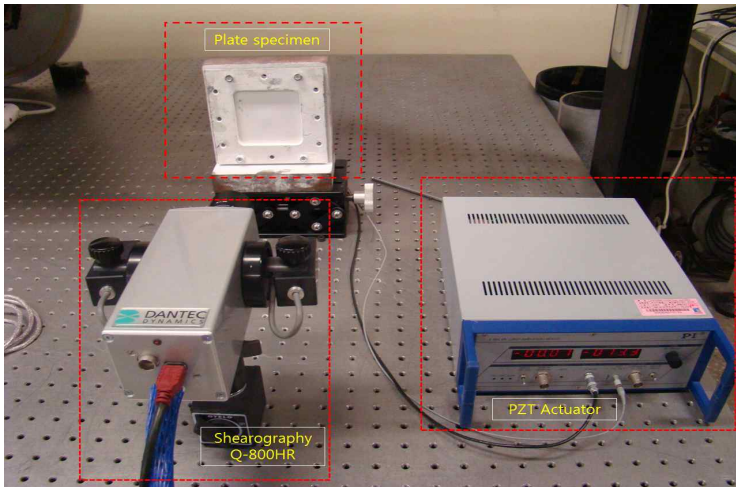


Fig. 4-1 Shearography system for micro-deformation measurement

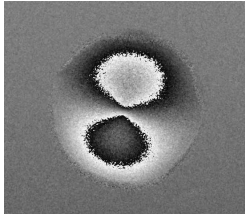
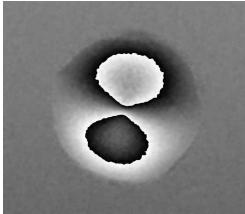
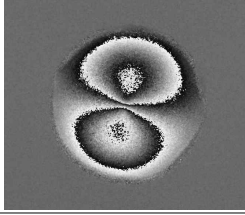
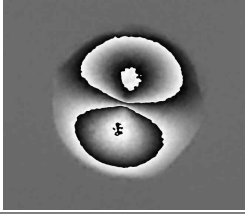
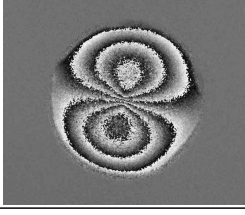
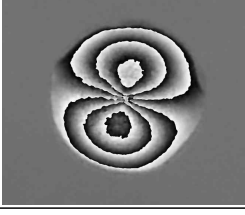
Table 4-1 Basic deformation test conditions

Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Deformation (μm)
90	3	0.5
		1.0
		1.5
	5	0.5
		1.0
		1.5
	7	0.5
		1.0
		1.5

2. 실험결과(고무평판 시험편)

평판시험편을 이용한 기초실험에서 볼 수 있듯이 Table 4-2에서 보면 전단량과 변형량이 클수록 Phase map 이미지가 대체적으로 선명하다는 것을 알 수 있다. Phase map을 보다 선명하게 확인하고 조건 값에 따른 변형의 정도의 차이를 정량적으로 확인하기 위하여 Table 4-3에서 보는바와 같이 각각의 조건에 대하여 Unwrapping작업과 Profile작업을 하였다. Line profile 작업을 통하여 미세변형이 크면 클수록 그래프의 선이 부드럽게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Table 4-2 Phase map & Filtering image by micro-deformation

Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Deformation (μm)	Phase map	Filtering
90	3	0.5		
		1.0		
		1.5		

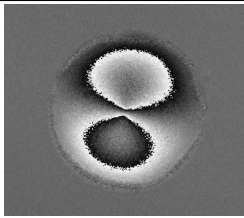
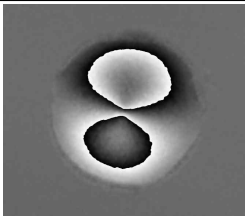
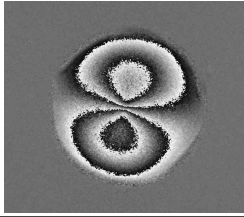
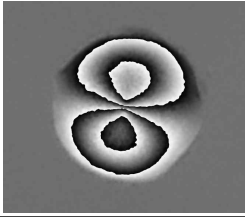
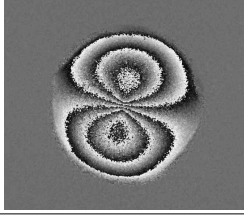
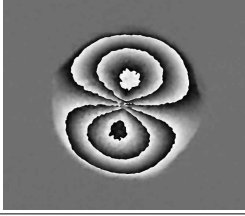
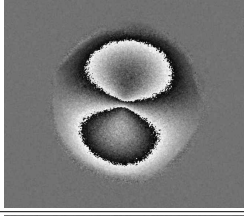
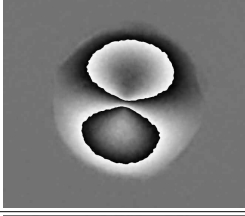
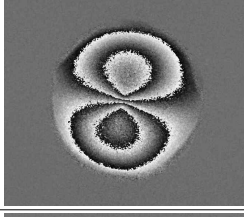
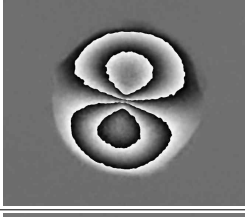
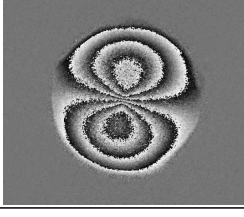
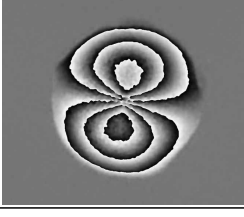
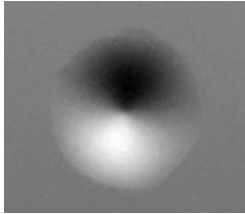
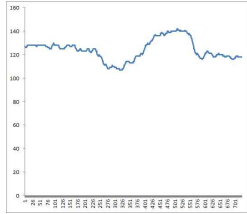
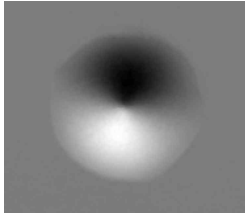
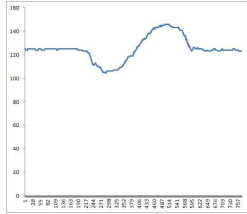
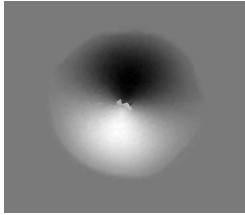
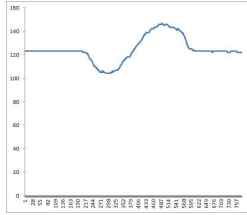
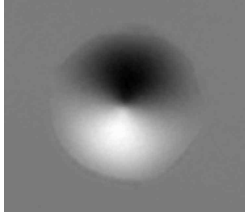
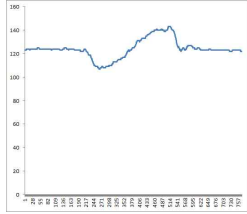
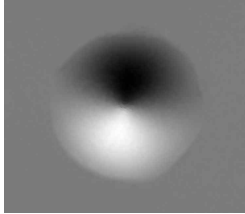
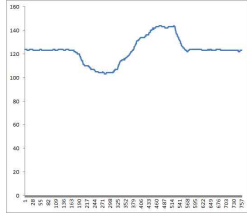
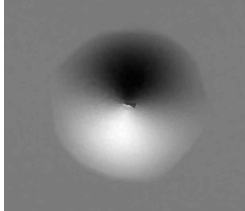
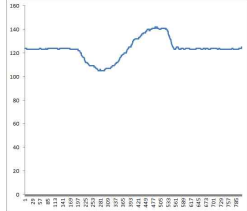
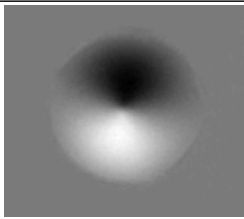
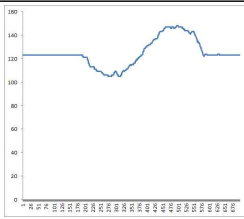
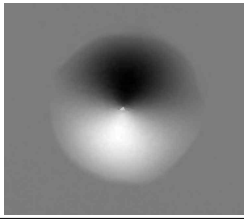
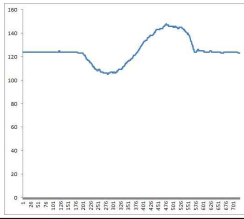
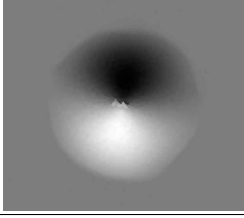
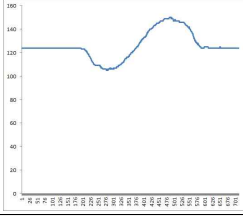
90	5	0.5		
		1.0		
		1.5		
90	7	0.5		
		1.0		
		1.5		

Table 4-3 Unwrapping & Line profile by micro deformation

Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Deformation (μm)	Unwrapping	Line profile
90	3	0.5		
		1.0		
		1.5		
90	5	0.5		
		1.0		
		1.5		

90	7	0.5		
		1.0		
		1.5		

3. 원전배관 시험편의 내부 결함 측정

본 논문에서는 서로 다른 압력 조건하에서 배관시험편 내부 결함 폭의 크기에 따른 변형 정도를 Phase map으로 획득 및 이미지 처리하여 Line profile을 이용한 변형정보를 정량적으로 비교하고자 한다. 그에 따른 측정 대상체인 시험편은 실제 원전배관 2차계통에서 사용되는 배관을 모사하여 제작하였다. 원전배관 내부 결함을 측정하기 위한 전반적인 시스템은 Fig. 4-3에서 보는바와 같다.

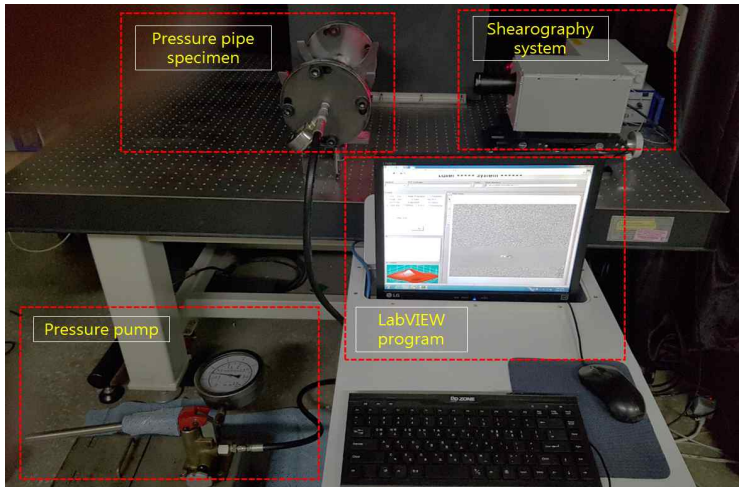


Fig. 4-2 Defect measurement system of pressure pipe specimen

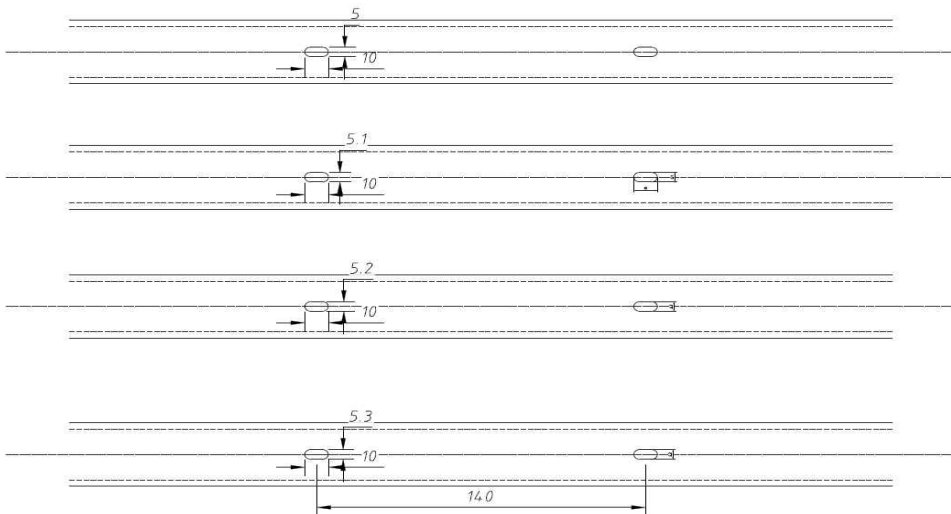


Fig. 4-3 Information for internal defect size

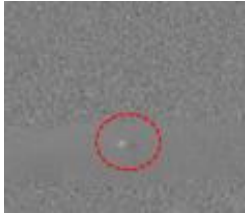
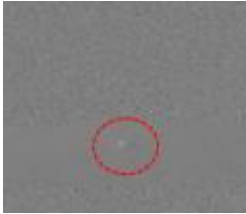
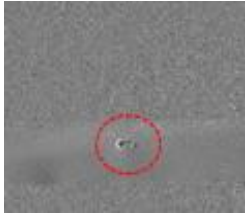









4. 실험결과(원전배관 시험편)

원전배관 2차계통에 사용되는 배관을 모사하여 ASTM A53 Gr.B탄소강 배관시험편을 제작하였다. 배관시험편 내부에 결함을 인위적으로 가공하였는데 Fig. 4-4에 서보는 바와 같이 결함의 깊이와 길이는 동일하지만 결함 폭은 서로 다른 4가지의 크기를 가지고 있다. 마이켈슨 간섭계의 방식을 참고하여 구성된 배관 측정용 전단 간섭계를 이용하여 배관 내부결함을 측정된 결과 서로 다른 압력조건하에서 결함부의 변형정도는 Phase map을 통하여 볼 때 압력의 크기에 따라 변위값이 비례하다는 것을 육안으로 식별할 수 있었다. 보다, 결함부의 변위값은 정량적으로 확인하기 위하여 Image Filtering작업 후 Line profile을 이용하여 그래프의 형태로 볼 때 압력에 따른 변위 값이 미세한 차이가 있다는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4-4 Measurement conditions of pressure pipe specimen

Internal pressure (Mpa)	Shear displacement (mm)	Shear angle (°)	Thickness tp	Length(mm)	width(mm)
0.5	1	180	3/4tp	10	5.0
					5.1
					5.2
					5.3
0.7	1	180	3/4tp	10	5.0
					5.1
					5.2
					5.3
0.9	1	180	3/4tp	10	5.0
					5.1
					5.2
					5.3

Table 4-5 Deformation data for defective width

Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Internal defect width (mm)	Internal pressure (Mpa)	Phase map	Filtering
180	1	5.0	0.5		
		5.0	0.7		
		5.0	0.9		
180	1	5.1	0.5		
		5.1	0.7		
		5.1	0.9		


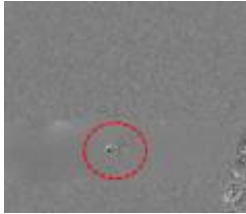










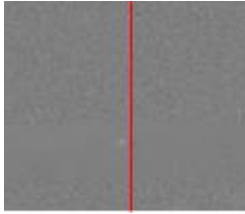
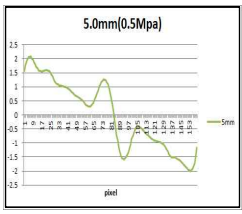
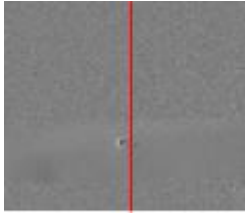
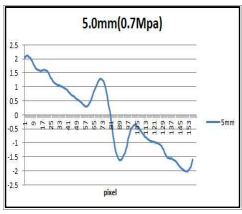
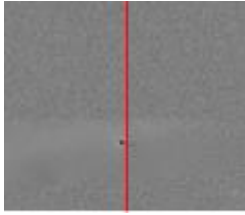
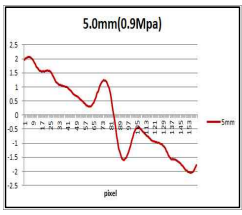

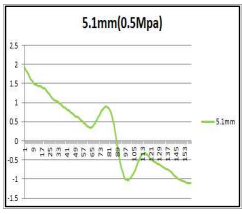
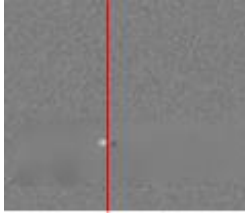
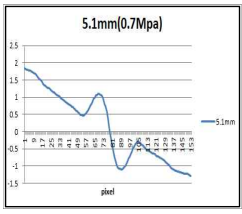

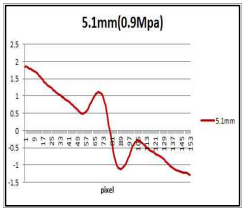
Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Internal defect width (mm)	Internal pressure (Mpa)	Phase map	Filtering
180	1	5.2	0.5		
		5.2	0.7		
		5.2	0.9		
180	1	5.3	0.5		
		5.3	0.7		
		5.3	0.9		

Table 4-6 Profile data for defective width

Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Internal defect width (mm)	Internal pressure (Mpa)	Line profile	Profile graph
180	1	5.0	0.5		
		5.0	0.7		
		5.0	0.9		
180	1	5.1	0.5		
		5.1	0.7		
		5.1	0.9		

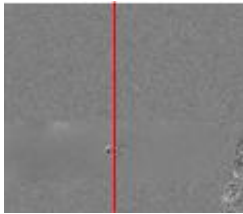
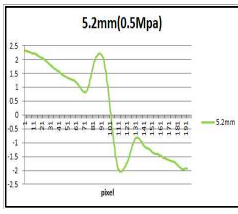
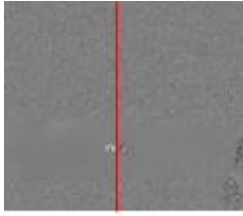
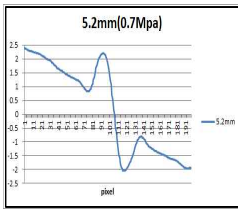

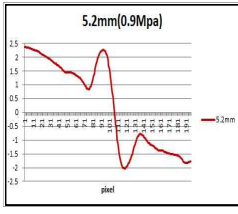
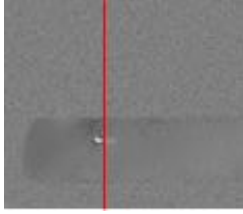
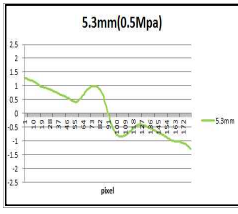
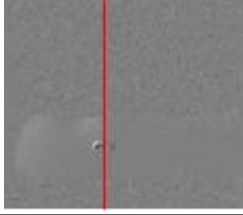
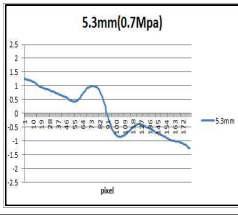
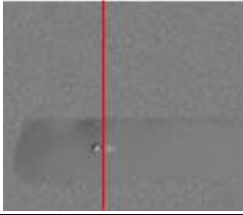
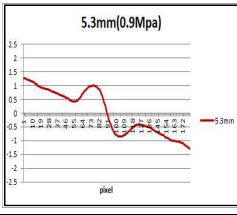
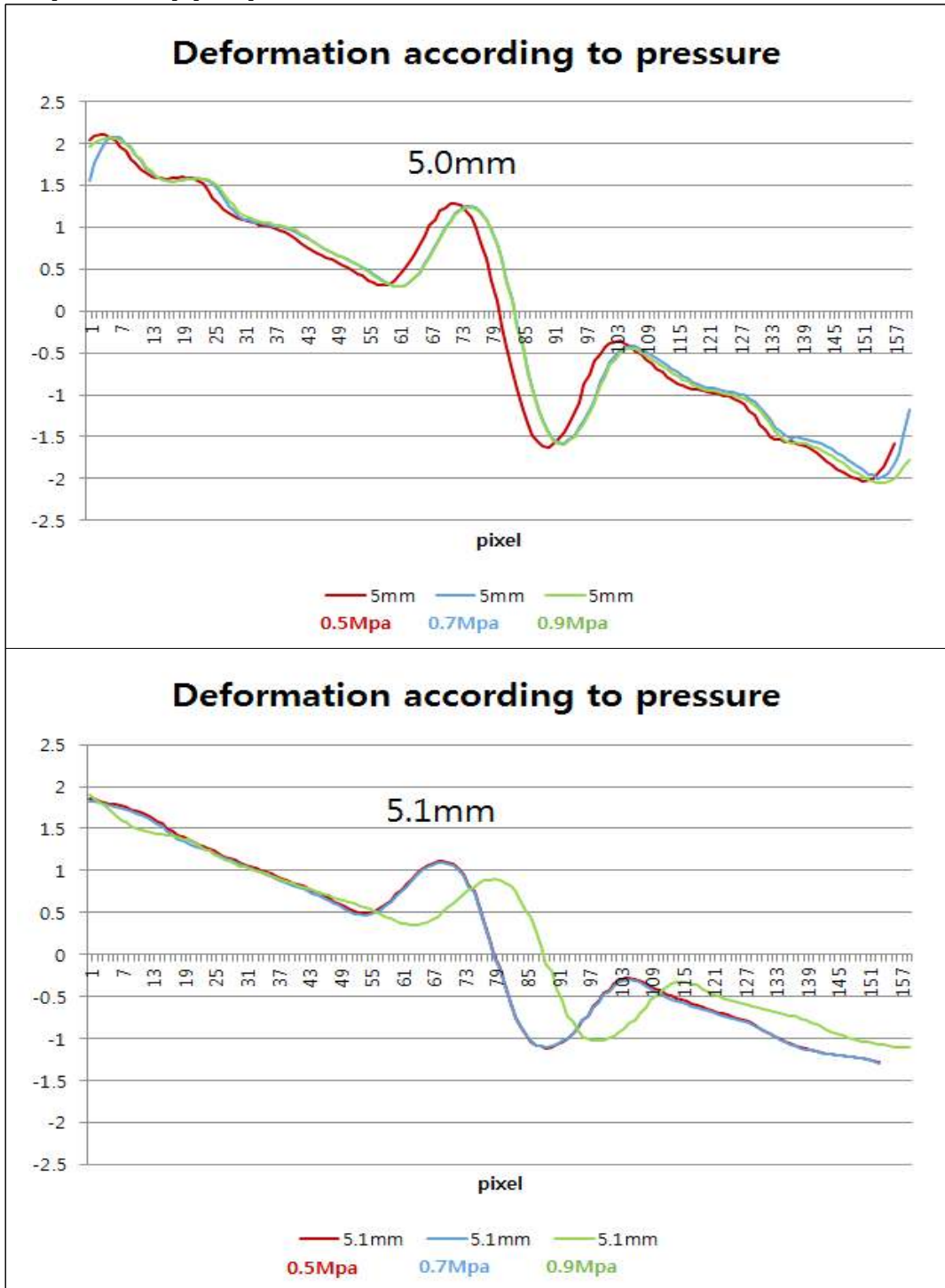
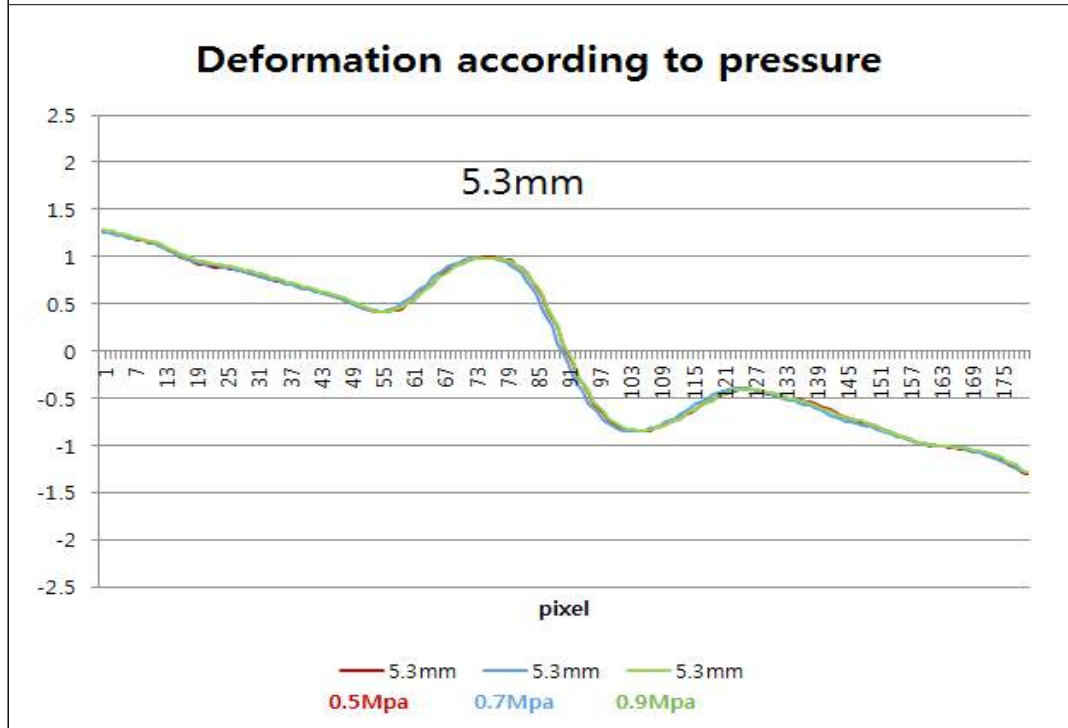
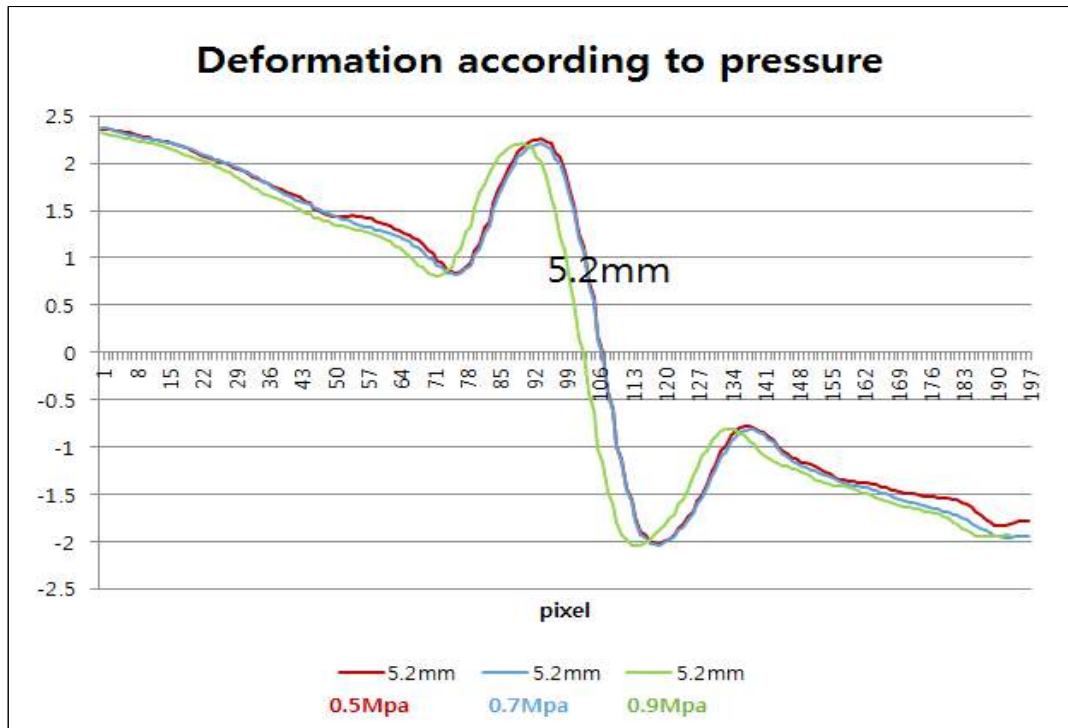
Shear angle (°)	Shear displacement (mm)	Internal defect width (mm)	Internal pressure (Mpa)	Phase map	Filtering
180	1	5.2	0.5		
		5.2	0.7		
		5.2	0.9		
180	1	5.3	0.5		
		5.3	0.7		
		5.3	0.9		

Table 4-7 Comparison of deformation according to defective width in pressure pipe specimen





제 5 장 결론 및 고찰

원자력발전소에서 위약부분은 고온, 고압 환경의 배관부에서의 부식 및 균열발생이며 이 결함들이 성장하는 경우 배관부의 누설이 발생할 수 있다. 특히 2차 계통의 배관부 누설결함이 발생하는 경우 방사능 유출사고로 이어질 수 있기 때문에 배관부의 부식 및 균열에 대한 정확한 검사기술이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 전단간섭계(Shearography)를 이용하여 고무평판의 미세변형에 따른 변형 측정을 하였다. 이를 기반으로 원자력 발전소의 2차 계통에서 사용되는 배관을 모사하여 내부에 결함을 부여한 시험편을 제작하였고 압력변화에 따른 결함부의 미세변위 값을 비교하였다.

1) 고무평판을 이용한 기초실험 결과 이미지들에서 볼 수 있듯이 전단량의 변형량이 클수록 Phase map을 선명하게 얻을 수 있었다. Phase map을 보다 선명하게 처리하기 위해 Filtering작업을 하였으며 그 과정에서 보다 선명한 이미지로 보정이 되었음을 확인할 수 있었다. Filtering값에 따라 결과 값에 차이가 있으므로 차후 이미지 처리 프로그램에서의 개선을 필요로 한다. 또한, 각각의 전단량과 변형량에 대한 Unwrapping결과의 차이가 없는 것으로 보이나 Line profile로 Line을 표기하여 그래프로 나타낸 결과로는 변형량이 클수록 그래프의 선이 부드럽게 나타나는 것을 알 수 있다.

2) 미세변형에 따른 변형기초실험을 토대로 압력에 따른 배관 시험편 내부에 부여된 결함의 크기를 정량적으로 측정하기로 하였다. 하지만, 초기에 배관 내부에 부여된 결함의 전체적인 크기에 부합하기 위하여 배관 내부에 압력을 크기별로 가하여 결함의 전체사이즈에 근접하기에는 많은 에로사항이 있었다.

3) 배관 시험용 Shearography 시스템을 통하여 배관 시험편을 특정한 결과 사진에 부여된 결함부의 전체적인 사이즈에 근접하기에는 한계가 있었지만, 배관 내부에 가해진 압력의 크기가 상승함에 따라 변형률도 미세하게 상승함을 Line profile을 통하여 알 수 있었다.

본 실험에서 전단간섭계를 이용한 결함의 크기 값을 정량적으로 도출하는데 아직까지는 한계가 있다고 생각되지만, 이러한 계측방법을 통해 원전배관 사고에 대응할 수 있는 사전 대비책을 마련할 수 있는 좋은 계기가 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김경석, 『CW 레이저 스펙클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내 변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
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. Hung, Y. Y., "Shearography: a New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing," Optical Engineering, Vol. 21, pp. 391, 1982.
4. Hung, Y. Y., "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge," Applied Optics, Vol. 14, pp. 618-622, 1975.
5. 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.
6. 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.
7. 문상준, 강영준, 백성훈, 김철중, "실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정법," 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 4, pp. 1233-1240, 1996.
8. 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.
9. Vikhagen, E., "Vibration measurement using phase shifting TV-Holography and digital image processing," Optics Communications, Vol. 69, No. 3,4, pp. 214-218, 1989.
10. 강기수, 『레이저 스펙클 간섭법을 이용한 내부결함의 정량평가』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2005.

11. 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.
12. Cloud, Gary L., Optical Methods of Engineering Analysis, New York: Cambridge University Press, 1995, pp. 393-491.
13. 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.
14. Creath, K., "Phase-shifting speckle interferometry," Applied Optics Vol. 24, No. 18, pp. 3053-3058, 1985.
15. Malacara, D., Servin, M., and Malacara, Z., Interferogram Analysis for Optical Testing, New York: Marcel Dekker, 1998, pp. 381-408
16. 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.
17. 윤경원. 『적외선 열화상 기법을 이용한 감육 결함 배관의 결함 검출 최적 계측 조건 평가』, 광주: 조선대학교 석사학위논문, 2013.
18. 장수옥. 『이중 빛 전단간섭계와 적외선열화상을 이용한 결함검출』, 광주: 조선대학교 석사학위논문, 2009.
19. 정덕운. 『전단간섭계를 이용한 압력용기의 결함 및 비결함부의 변형 동시계측』, 광주: 조선대학교 석사학위논문, 2011.
20. 강찬근. 『전단간섭법과 적외선 열화상 기법을 이용한 배관순환시스템에서의 원자력 압력용기 결함 진단 및 정량 평가』, 광주: 조선대학교 석사학위논문, 2014.
21. 최태호. 『광 핀셋을 이용한 미세세포 분석 및 장치 개발』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2016.
22. 장호섭. 『전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2006.
23. 최만용, 김원태, “ 적외선열화상검사,” 노드미디어, 2012
24. 권호영, 임종국, 박종건 “ 비파괴검사 기초론” , 선학출판사, 2000
25. 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.

저작물 이용 허락서					
학 과	기계시스템공학과	학 번	20127113	과 정	석사
성 명	한글: 장 선 도 한문: 張 善 道 영문: Jang, Sun-Do				
주 소	-				
연락처	-				
논문제목	<p>한글: 스페클 전단간섭법을 이용한 마이크로급 변형 분석을 기초로한 원전배관 강육 결함부 크기별 정량평가</p> <p>영문: Quantitative Evaluation by Size of Wall-thinning Defect in pipeline of Nuclear Power Plant based on Micro-scale Deformation Analysis Using Speckle Shearing Interferometry</p>				
<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"> 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. <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: 장 선 도 (인)</p> <p style="text-align: center;">조선대학교 총장 귀하</p>					