creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000241228

2011년 2월
박사학위 논문

스페클 간섭법을 이용한 압력배관의 내부 결함검사 기술개발

조 선 대 학 교 대 학 원

기계설계공학과

박 찬 주

스페클 간섭법을 이용한 압력배관의 내부 결함검사 기술개발

Development of inside crack measuring technique for pressure pipeline using speckle interferometry

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계설계공학과

박 찬 주

스페클 간섭법을 이용한 압력배관의 내부 결함검사 기술개발

지 도 교 수 김 경 석

이 논문을 공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

기계설계공학과

박 찬 주

박찬주의 박사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	김 재 열	㊞
위 원	조선대학교 교수	장 완 식	㊞
위 원	전북대학교 교수	홍 동 표	㊞
위 원	한국표준과학연구원 책임연구원	최 만 용	㊞
위 원	조선대학교 교수	김 경 석	㊞

2010년 12월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

LIST OF TABLES ····· Ⅳ
LIST OF PHOTOGRAPHS ····· Ⅴ
LIST OF FIGURES ····· Ⅵ
NOMENCLATURE ····· Ⅺ
ABSTRACT ····· Ⅻ

제1장 서 론 ····· 1
제1절 연구배경 ····· 1
제2절 연구동향 ····· 3
제3절 연구목적 ····· 6

제2장 연구이론 ····· 7
제1절 스페클 전단 간섭법(SSI)의 원리 ····· 7
1. Interferogram 형성 ····· 7
가) 스페클 형성과 특징 ····· 7
나) 스페클 상관 간섭무늬 ····· 11
다) 스페클 전단 간섭계 ····· 15
2. Interferogram 해석 ····· 20

가) 위상이동 기법의 적용 ····· 20
나) 필터링 ····· 24
다) 결펼침 ····· 30
제2절 디지털 이미지 상관법(DIC)의 원리 ····· 32
1. 화상 상관법 ····· 32
2. 컴퓨터 비전의 단일 카메라 모델 ····· 33
가) 실제 좌표계와 카메라계 사이의 변환 ····· 33
나) 카메라계와 화상 평면 사이의 변환 ····· 34
다) 화상 평면과 센서계 사이의 변환 ····· 35
라) 실제 좌표계에서 센서계로의 전체적인 변환 ····· 37
3. 2차원과 3차원의 컴퓨터 비전 ····· 38
가) 2차원 컴퓨터 비전 ····· 39
나) 3차원 컴퓨터 비전 ····· 40
4. 화상 일치 기법 ····· 45
가) 미분법 ····· 46
나) 템플릿 일치법 ····· 50

제3장 실험 장치 및 방법 ····· 52
제1절 시험편 ····· 52
제2절 실험장치 및 실험방법 ····· 56
1. SSI 시스템 ····· 56
2. DIC 시스템 ····· 58

제3절 실험방법 ····· 60
1. SSI 시스템을 이용한 실험 ····· 60
2. DIC 시스템을 이용한 실험 ····· 62

제4장 실험 결과 및 고찰 ····· 64
제1절 SSI를 이용한 감육결함 측정 ····· 64
1. 결함 최소 두께별 감육결함부 변형 측정 ····· 56
2. 결함 폭별 감육결함부 변형 측정 ····· 71
3. 결함 길이별 감육결함부 변형 측정 ····· 74
제2절 DIC를 이용한 감육결함 측정 ····· 77
1. 결함 최소 두께별 감육결함부 변형 측정 ····· 77
2. 결함 폭별 감육결함부 변형 측정 ····· 83
제3절 고찰 ····· 87

제5장 결 론 ····· 89

참 고 문 헌 ····· 90

LIST OF TABLES

Table 3-1 Defect conditions of specimen ····· 14
Table 3-2 Specification of shearography system ····· 16
Table 4-1 Error between real size of wall thinned defect and measured size by SSI experiment according to the minimum thickness of a defect ····· 70

LIST OF PHOTOGRAPHS

Photo 3-1 Shearography system ····· 57
Photo 3-2 Experiment Setup by SSI System ····· 59
Photo 3-3 Pressure pump & gage ····· 59
Photo 3-4 A Picture of Aramais system ····· 60
Photo 3-5 Aramais CCD camera ····· 61
Photo 3-6 Aramais control box ····· 61
Photo 3-7 Pressure pump & gage ····· 62
Photo 3-8 Experiment setup by DCI system on straight pipe specimen ··· 62

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Formation of speckle pattern ····· 8
Fig. 2-2 Subjective speckle size on the CCD imagepPlane ····· 10
Fig. 2-3 Superposition of two collinear waves ····· 11
Fig. 2-4 Interference of in-plane measurement method ····· 12
Fig. 2-5 Schematic of speckle shearing interferometry ····· 15
Fig. 2-6 Measurement result of surface deformation by shearography 19
Fig. 2-7 Means of shifting the plane in an interferometer ····· 20
Fig. 2-8 Schematic using PZT mounted mirror as phase shifter. ····· 21
Fig. 2-9 3x3 mash with the some doeffcient ····· 24
Fig. 2-10 Concept of median filtering ····· 25
Fig. 2-11 Example of median Filtering ····· 25
Fig. 2-12 Concept of π shifting filtering ····· 26
Fig. 2-13 Sequence of π shifting filtering ····· 27
Fig. 2-14 Concept of phase filtering ····· 41
Fig. 2-15 Sequence of a method mean value filtering ····· 29
Fig. 2-16 Sequence of phase unwrapping ····· 30
Fig. 2-17 Schematic of the gemotry a single camera system using a front image plane construction ····· 33
Fig. 2-18 Relationship between skewed sensor system and orthogonal image system ····· 35
Fig. 2-19 Diagram of projection model ····· 37
Fig. 2-20 2D imaging of planar object using front image plane model · 39
Fig. 2-21 Recovering the third dimension by using two cameras ····· 40
Fig. 2-22 The reference frames associated with the 3D sene and to each camera are linked by three rigid body transformations ····· 41
Fig. 2-23 Epipolar geometry ····· 43

Fig. 2-24 The epipolar constraint reduces the mathing problem to a single scan along the epipolar line ····· 44
Fig. 2-25 Schematic of two camera stereo-vision system during imaging of a target grid ····· 45
Fig. 2-26 Illustration of differential motion estimation for 1-D problem ····· 46
Fig. 3-1 Shape of artificial wall thinned defect(A) ····· 54
Fig. 3-2 Shape of artificial wall thinned defect(B) ····· 55
Fig. 3-3 Configuration of shearography system ····· 56
Fig. 4-1 Result of deformation measurement experiment for specimen with no defect, SSP-0A (Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 64
Fig. 4-2 Result of deformation measurement experiment for specimen with no defect, SSP-0A (Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 65
Fig. 4-3 Result of deformation measurement experiment for SSP-2E with t_p=6.3mm (Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 66
Fig. 4-4 Result of deformation measurement experiment for SSP-2E with t_p=6.3mm (Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 66
Fig. 4-5 Result of deformation measurement experiment for SSP-2F with t_p=5.4mm (Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 67
Fig. 4-6 Result of deformation measurement experiment for SSP-2F with t_p=5.4mm (Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 67
Fig. 4-7 Result of deformation measurement experiment for SSP-2G with t_p=3.6mm (Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 67

Fig. 4-8 Result of deformation measurement experiment for SSP-2G with t_p=3.6mm
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 67
Fig. 4-9 Result of deformation measurement experiment for SSP-2H with t_p=1.8mm
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 69
Fig. 4-10 Result of deformation measurement experiment for SSP-2H with t_p=1.8mm
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 69
Fig. 4-11 Result of deformation measurement experiment for SSP-2D with 2Θ=45°
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 71
Fig. 4-12 Result of deformation measurement experiment for SSP-2D with 2Θ=45°
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 71
Fig. 4-13 Result of deformation measurement experiment for SSP-2L with 2Θ=135°
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 71
Fig. 4-14 Result of deformation measurement experiment for SSP-2L with 2Θ=135°
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 71
Fig. 4-15 Result of deformation measurement experiment for SSP-2P with 2Θ=180°
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 73
Fig. 4-16 Result of deformation measurement experiment for SSP-2P with 2Θ=180°
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 73
Fig. 4-17 Result of deformation measurement experiment for SSP-1H with L/D_0=0.5
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 74

Fig. 4-18 Result of deformation measurement experiment for SSP-1H with L/D_0=0.5
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 74
Fig. 4-19 Result of deformation measurement experiment for SSP-3H with L/D_0=1.5
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 75
Fig. 4-20 Result of deformation measurement experiment for SSP-3H with L/D_0=1.5
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 75
Fig. 4-21 Result of deformation measurement experiment for SSP-4H with L/D_0=2.0
(Shear amount in the axial direction : 10mm) ····· 76
Fig. 4-22 Result of deformation measurement experiment for SSP-4H with L/D_0=2.0
(Shear amount in the radial direction : 10mm) ····· 76
Fig. 4-23 Images obtained from (a) left CCD Camera and (b) right CCD Camera ····· 77
Fig. 4-24 Wall thinned pipe model reconstructed by 3-dimensional image matching method ····· 78
Fig. 4-25 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2E with t_p=6.3 mm
at each pressure difference ····· 78
Fig. 4-26 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2E with t_p=6.3 mm at dP=3 MPa ····· 79
Fig. 4-27 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2F with t_p=5.4 mm
at each pressure difference ····· 80
Fig. 4-28 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2F with t_p=5.4 mm at dP=1.2 MPa ····· 80
Fig. 4-29 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2G with t_p=3.6 mm

at each pressure difference ····· 81
Fig. 4-30 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2G with t_p=3.6 mm at dP=1.2 MPa ····· 81
Fig. 4-31 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2H with t_p=1.8 mm at each pressure difference ····· 82
Fig. 4-32 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2H with t_p=1.8 mm at dP=0.45 MPa ····· 82
Fig. 4-33 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2D with 2θ=45°at each pressure difference ····· 83
Fig. 4-34 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2D with 2θ=45°at dP=0.45 MPa ····· 84
Fig. 4-35 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2L with 2θ=135°at each pressure difference ····· 84
Fig. 4-36 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2L with 2θ=135°at dP=0.6 MPa ····· 85
Fig. 4-37 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2P with 2θ=180°at each pressure difference ····· 85
Fig. 4-38 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2P with 2θ=180°at dP=0.6 MPa ····· 86

NOMENCLATURE

a	:	Aperture
B	:	Bright of monitor pixel
c	:	Velocity of phase
d	:	Deformation
E_O	:	Objective wave
E_R	:	Reference wave
f	:	Frequency
I	:	Intensity of speckle pattern
K	:	Monitor constant
L		Distance between object and lens
n	:	Unit vector
R	:	Response
S	:	Surface
t	:	Time
u	:	Amplitude of the laser beam
V	:	Intensity of output signal
w	:	Weight
z	:	Brightness
α		Relative phase shift between test and reference beam
γ	:	Intensity Modulation
δ	:	Shearing amount
$\Delta\phi$	:	Phase difference
Δl	:	Path change
θ		Illumination angle
λ	:	Wavelength of laser
ϕ	:	Phase
ϕ_K	:	Phase of k-th pixel

ABSTRACT

Development of inside crack measuring technique for pressure pipeline using speckle interferometry

By Chan-Ju Park
Advisor : Professor Kyoung-Suk Kim, Ph.D.
Dept. of Mechanical Design Engineering
Graduate School of Chosun University

As nuclear power plants (NPPs) are aged, the degradation of component integrity induced by increasing susceptibility of defect has become to be an important issue on the aspect of ensuring safety and operability and life extension of NPPs. In particular, it is known that the current non-destructive techniques have limitations on the inspection of cracks in wall-thinning defects in pipe bends and elbows. For these types of defects, the integrity assessment methodologies and acceptance criteria are incomplete up to now. Therefore, it is needed to develop new techniques for inspection and to improve the basis technologies related to this area. The reliable methods and acceptance criteria to assess the integrity of components containing these types of defects should be also established. Since the integrity assessment procedure and methodology for wall-thinning defect in pipe bends have not been developed, especially, it is necessary to develop the integrity evaluation methodology for wall-thinned pipe bends, and the related numerical and experimental studies are required to support the development of the methodology.

Therefore, the objectives of this project are to develop non-contact laser application inspection technique for applying to the inspection of wall

thinning defects in pipe bends, and to establish the defect estimation and integrity evaluation methodologies for these defects.

Most of the wall-thinning defects in pipe bends and elbows are caused by flow-accelerated corrosion (FAC), so that it is mainly observed in carbon steel piping systems. The thinning defect has occurred at various locations, for example, extrados, intrados, and crown, which depend on flow patterns in the pipe system. Also, the wall-thinned pipe bends have various bend angles and are subjected to in-plane and out-of-plane bending loads as well as internal pressure under various restraint conditions. Finite element analysis for not-thinned sound pipe bend showed that the deformation behavior of pipe bends is affected by the bend angle, type of bending load, and constraint conditions.

This study developed integrity evaluation methods based on artificial intelligence techniques. In this method, PCA was used for a preprocessor (denoising and data selection) of input signals, and fuzzy neural-networks (FNNs), support vector regression (SVR), and fuzzy support vector regression (FSVR) methods were employed for integrity evaluation of components containing defects. The developed methods were applied to estimate the collapse moment of wall-thinned pipe bends using finite element analysis data. The results showed that the proposed methods give an accurate estimation of collapse moment of wall-thinned pipe bends whose RMS error is less than 1.0%. Also, the uncertainty analysis of the artificial intelligence techniques was performed, which provided the reliability of the estimation methods.

This study designed and established specimens and testing system for a failure test of wall-thinned elbow, and performed the burst tests using the elbow specimens under various thinning geometries, thinning locations, and loading conditions. Failure pressures for 25 test cases were obtained and failure behavior were investigated from the results of experiments.

Local failure criteria for wall-thinning defect, which are considered the stress states at defected area, were derived based on tensile tests using notched bar specimens and associated finite element simulations. By applying the criteria to the assessment of failure pressure of local wall-thinned straight pipes and elbows, the reliability and applicability of the failure criteria were verified. Also, their reliability at operating temperature of nuclear power plants (NPPs) were confirmed using the tensile data obtained from the notched bar and grooved plate specimens tests at the operating temperature of NPPs.

Parametric finite element analyses on the wall-thinned elbows were conducted under various thinning geometries, thinning locations, and elbow geometries. Combining the results of the analyses and local failure criteria suggested by this study, failure pressure was calculated for each condition and failure behavior was investigated. A failure pressure evaluation model was suggested based on the calculated failure pressure for wall-thinned elbows.

Finally, this study suggested a criteria for failure mode transition from axial cracking to circumferential cracking at wall-thinned area, and provided a map that presents the defect geometries to occur circumferential cracking at wall-thinned area using the failure mode transition criteria and parametric finite element analyses results.

제 1 장 서 론

제1절 연구배경

현대산업에서의 각종 구조물은 급속히 대형화, 고압화, 고속화되고 있으며, 특히 안전성에 대한 신뢰도가 중요한 문제로 대두되고 있다. 모든 구조물들이 항상 안전할 수 없으며, 이들을 구성하는 재료는 가공 및 사용 중에 결함이 발생하고 성장함으로써 재료의 수명에 영향을 준다. 특히, 발전소 등의 생산설비에 사용되는 배관은 생산설비의 성능이나 안전성 유지에 있어서 매우 중요한 설비의 일부이다.

원자력 배관은 사용기간의 증가에 따라 피로, 부식 등 다양한 열화손상에 노출되며, 탄소강 배관에서는 주로 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의해 배관 내부 표면에 감육이 발생하게 된다. 이러한 감육결함으로 인해 배관에 국부적인 응력 집중이 일어나며, 이것은 배관 파손의 원인이 된다. 따라서, 탄소강 배관에서의 감육결함은 원전 배관의 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 배관계통에서 감육 결함을 예측하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구되고 있다.

비파괴 검사기술은 산업의 발달과 사용되는 기기, 다양한 재료들의 검사 대상들의 물리적 특성에 따라 다양한 검사법이 개발되었다. 대표적으로 방사선 투과법, 초음파탐상법, 와전류탐상법, 자분탐상법, 광학적 검사법, 육안검사법의 6가지로 크게 분류할 수 있다. 이들 검사기법을 간략하게 정리하여보면 다음과 같다.

방사선 투과법(Radiography Testing : RT)은 X-선이나 감마선을 대상체에 투과하여 감광지에 나타난 이미지를 통해 대상을 검사하는 기술이다. 초음파 탐상법(Ultrasonic Testing : UT)은 초음파를 이용하여 재료내부의 결함이나 물성치를 검사, 평가하는 기술이다. 와전류탐상법(Eddy Current Testing : ECT, ET)은 검사체가 도체인 경우 전자기력을 가진 도체를 이용하여 검사체 내부에 자장을 형성시켰을 때의 자장 변화를 통해 결함이나 불연속면을 찾는 기술이다.

자분 탐상법(Magnetic Particles Testing : MT)은 강자성체를 자화시켰을 때 결함이 있으면 자극이 형성되며. 이때 자분을 뿌려 나타나는 형상으로부터 결함을 판별하는 기술이다. 광학적 검사법(Optical Testing : OT)은 빛의 파동성과 간섭성을 이용하여 미세한 변위와 형상을 측정하는 기술이다. 육안검사법은 표면 또는 표층

부의 결함 정보를 얻기 위한 기술이며, 최근 IT 기술의 발달로 인해 스테레오 비전을 통한 3차원 변형해석이 가능한 기술이다.

이들 비파괴 검사법은 결국 검사체의 물리적 특성을 알아내는 목적을 갖고 있으며, 검사체에 적용한 물리현상과 이론을 적용하여야 하고, 이를 위해서는 전기 및 기계 장치를 이용한 측정방법과 계측기술이 요구된다. 또한 방사선이나 음파, 자기력, 광원을 발생시키는 센서기술이 선행되어야 하며, 신호분석을 위한 정보통신기술과 재료 등을 평가하기 위한 재료과학 지식도 필요로 한다.

이러한 비파괴 검사기법 중, 광학적 검사법은 최근의 레이저 관련 산업의 발달과 센서기술의 향상 그리고 각종 화상처리 및 관련 프로세서들의 급격한 성장으로 활발하게 연구되고 있는 분야이다.

광학적 검사법은 간섭계 기반의 변위측정기술에서 레이저 유도초음파, 홀로그래피(Holography), 레이저 스페클 간섭법(Laser Speckle Interferometry) 등의 다양한 분야로 발전하고 있으며, 홀로그래피와 레이저 스페클 간섭법은 넓은 면적의 표면 변위를 동시에 고분해능으로 측정한다는 장점이 있어, 진동해석과 변형해석 분야에 많은 활용을 하고 있다.(1,2) 특히, 비파괴 검사를 위한 레이저 스페클 간섭법은 컴퓨터 영상기술의 발전으로 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)와 스페클 전단간섭법 혹은Shearography로 불리는 기술로 발전을 하고 있으며, 변형해석, 진동해석 등의 비파괴 검사영역에서 적용되고 있다.(3,4,5)

이중 스페클 전단간섭법은 간섭계의 구성이 간단하고, 레이저의 가간섭 거리가 상대적으로 짧아도 측정이 가능하여, 적용영역이 보다 넓어지고 있으며, 결함의 정량화, 복합재 구조물의 해석 등 매우 유용한 비파괴 검사법의 하나로 사용되고 있다.(6)

또한, 육안검사법 중 2개의 CCD 카메라를 이용한 스테레오 비전 시스템은 측정대상체의 형상을 3차원적으로 보여주고, 대상체의 변형도 3차원적으로 해석할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 특히, 디지털 이미지 상관법은 2개의 CCD 카메라에서 들어오는 영상의 특정한 점을 기준으로 두 이미지를 일치시키는 매핑 기술을 이용하여 대상체의 변형을 3차원적으로 해석할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 스페클 전단간섭법과 디지털 이미지 상관법을 이용하여 안정성 측면에서 매우 중요한 원자력발전소에 사용 중인 압력배관 내부의 결함발생 여부, 결함평가 분야에서 신뢰성 있는 결함진단 방법이 필요함을 알리고, 이들 기기에 대한 보다 효율적이고 신뢰성 있는 평가 방법을 제시하고자 한다.

제2절 연구동향

국내외 원자력 압력용기의 계측기술은 각각 독자적인 방법과 특징을 가지고 있는데 독일의 경우 기업의 주도적인 연구개발의 결과물인 특수목적용 장비개발의 형태이며, 미국은 대학, 국가연구소 중심의 연구개발로 미국 기계학회(ASME)와 전력연구소(EPRI)에서 원전기기 결함의 예측 및 평가에 대한 기술개발을 진행 중이고, 일본에서는 일본원자력연구소(JAERI)가 주도적으로 개발을 진행하고 있다.

독일과 미국, 일본 등의 기술선진국의 유사기술 적용사례를 보다 상세히 살펴보면 독일 Dantec Dynamics사는 전단간섭계를 이용한 파이프 외부로부터 스캐닝을 통한 측정 결과를 이용하여 파이프 내부의 결함을 빠르게 탐지할 수 있는 방법을 제시 하였고, Steinbichler사는 포터블 형태의 배관 전용 측정 시스템을 개발하여 배관에 발생된 각종 결함을 측정한 사례가 있다. 또한 이들은 ASTM E2581-07에서 작용 외력으로 열을 이용한 Thermal Shearography를 항공우주분야에서 폴리머 매트릭스 복합재, 샌드위치형 복합재, 필라멘트를 감아서 제작한 압력용기 등에 대한 측정 표준으로 제시한 사례가 있다.

미국의 경우 미국 기계학회(ASME)와 전력연구소(EPRI) 원전 감육 배관에 대한 건전성 평가 절차와 허용두께 기준을 ASME Code Case N-480과 N-597 로 제시, 최근 원전 배관에 대한 Code Case N-597-rev.2의 조건부 적용이 허용된 상태이며 현재 추가개정 및 보완이 진행 중에 있고, ASME Sec.XI Code Committee에서는 기존의 Code case N-597의 문제점들을 보완하고, 그 동안의 연구결과를 추가한 새로운 평가 절차를 ASME Sec.XI의 부록(App.X Analytical Evaluation of Internal and External Wall Thinning in Piping Systems, Draft)에 추가하기 위한 노력이 진행 중에 있다.

일본의 경우 일본 JAERI에서는 1990년대 초반에 감육결함에 대한 내압과 굽힘하중 조건에서 실배관 손상실험을 수행하였으며, 이들 결과를 바탕으로 간단한 형태의 건전성 평가식을 제시하는 단계이다. 특히 일본 Hitachi는 일본 내의 여러 대학과 공동으로 직경이 4인치 내외의 배관을 이용하여 단일하중과 반복하중 조건에서의 감육결함에 대한 손상실험을 수행하였으며, 최근에는 연결 배관에 대한 실배관 실험을 수행, 감육결함 평가식을 제시한 사례가 있다.

국내의 광응용 기술은 실험실 차원에서 시험편 대상으로 특성 평가를 하는 단계

이고, 원전 발전설비에 대한 광계측을 이용한 비접촉 검사기술의 적용 사례는 전무한 실정이다. 보다 자세히는 전북대 강영준 교수, 조선대 김경석 교수, 대우전자가 다음과 같은 분야의 레이저응용 검사 기술을 개발 중이고 그 내용은 ESPI를 이용한 Steel Plate에 대한 인장, 압축 및 열하중에 의한 응력 해석, 자동차 Disk Brake의 응력 집중 부위 해석, Honeycomb 복합 구조물의 박리 상태 검사, 초고온(1000℃이상)의 물체 열변형 검사, 발전소용 압력용기의 홀로그래픽 비파괴 검사 등이 있다. 국내에 연구되어 발표된 관련 내용을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

한국표준과학연구원(7)에서는 원자력발전소 배관 손상의 비파괴진단 신기술 개발을 위하여 배관의 결함 탐상이 가능한 이종금속 용접부 미세 결함검출 기술개발, 증기발생기 전열관의 원주 방향 결함 신속 탐지 기술개발, CRDM & BMI 관 균열/누출 상시감시 기술개발, 2차계통 곡관부 배관 두께감육 감시 기술개발, 차세대 원전설비 증기발생기 튜브 결함 상시감시 기술, Test Bed 설계 제작 및 검증시스템 구축기술 등에 대한 연구를 수행하였다. Kim(8) 등은 원자력발전소의 탄소강 배관계통에서 감육결함을 예측하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구됨에 따라 이중 및 전단간섭계(Dual-Beam Shearography)와 적외선열화상기법을 이용한 결함검출 방법을 제시하였다. Choi(9) 등은 원전배관의 특징과 배관 용접부의 특징에 대해 평가하였으며, 우리나라와 전 세계 원전배관에서의 손상 사례 및 원인에 대해 조사하였다. 이를 근거로 배관의 설계 및 관리, 경년열화관리, 물성치 측정 등의 분야에서 원전배관의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방안에 대해 평가하였다. Kim(10) 등은 원전배관에서 발생되는 감육 결함의 형상과 배관의 하중조건이 적절히 반영된 감육결함 평가모델을 제시하고자, 감육결함의 건정성 평가모델에 감육길이에 대한 영향과 내압과 굽힘의 복합하중에 대한 영향을 고려함으로서 기존 평가모델의 한계를 개선하기 위한 연구를 수행하였다. Park(11) 등은 현행 국내 원전에 적용하고 있는 감육배관 관리기술의 현주소를 정리하였으며, 일본 미하마 원전 유사 사고 발생을 방지하기 위하여 진행하고 있는 국내 원전 감육배관 관리기술 최적화를 위한 연구를 수행하였다. Kim(12) 등은 원전 운전조건에서 감육 엘보우의 가장 기본적인 손상 형태인 내압에 의한 손상에 미치는 감육결함의 영향을 파악하고, 결함에 따른 손상압력 평가식을 제시하기 위해, 곡관 내부에 다양한 형태의 감육결함을 가정한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 결함형상, 결함의 위치 및 곡관의 형태에 따른 손상압력을 평가하여 이들 결과로부터 감육 엘보우에 대한 손상압력 평가식을 제시하였다. Shim(13) 등은 비교적 가동 년수가

오래된 CANDU형 원전 국내 대상 발전소 1기의 2차계통 배관에 대한 감육해석 수행 결과를 보고하였으며, 원전 2차 배관의 첨부식 감육관리 방법에 대해 연구하였다.

제3절 연구목적

최근 모든 산업체의 핵심 이슈는 저탄소 녹색성장을 강조하는 국가 신성장동력 추진정책에 맞추어 진행되고 있다. 예로써 자동차분야에서는 전기, 수소 자동차 등이 해당되며, 에너지 낭비를 막는 각종 친환경 건축물 등도 좋은 예가 될 것이다.

우리나라 전력생산의 절반을 차지하는 원자력발전소는 화석연료의 비중을 크게 낮추어 주는 중요한 역할을 한다. 원전설비의 특성상 고온과, 방사선의 위험, 복잡한 설비시스템 등이 신뢰성과 수명 평가시 난해한 요소가 되는데 특히 원자력 배관에서의 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 배관의 두께 감소(감육) 현상은 탄소강 배관의 건전성을 저하시키는 주요 손상 메커니즘중 하나로 알려져 있다.(14) 따라서 탄소강 배관에서 감육결함은 원전 배관의 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 배관계통에서 감육 결함을 예측하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구되고 있다.

그간 사용되었던 초음파탐상법, 와전류탐상법 등은 실제적인 해결방법을 제시하지 못하고 있으며, 이는 감육결함부의 검사를 위하여 대상체에 접촉하는 검사방법의 단점과, 검사시 주변의 고온, 진동 등의 영향을 많이 받기 때문이다. 광학적 검사방법은 현재 원자력 분야에서 널리 사용되어 지고 있지는 않지만, 스페클 전단간섭법을 이용한 검사방법은 기존 검사법과 더불어 원전기기의 신뢰성 향상과 사용중인 설비의 교체 시점 등을 적절하게 판단할 수 있는 좋은 방법이 될 것이다.

본 연구에서는 비파괴 검사시 외부 영향을 최소화 할 수 있는 스페클 전단간섭법을 적용하여 고압상태의 감육결함부를 검사할 수 있는 기술개발에 목적을 두었으며, 디지털 이미지 상관법을 이용하여 동일 검사대상체에 대한 비교를 실시하였다. 본 연구로 내부에 발생한 결함의 유무와 결함의 크기 등을 평가하여 비파괴 검사기술의 한분야인 스페클 전단간섭법을 이용한 현장 적용성을 높이고, 다른 산업분야에서도 응용하여 적용할 수 있기를 기대한다.

제 2 장 연구이론

제1절 스페클 전단 간섭법(SSI)의 원리

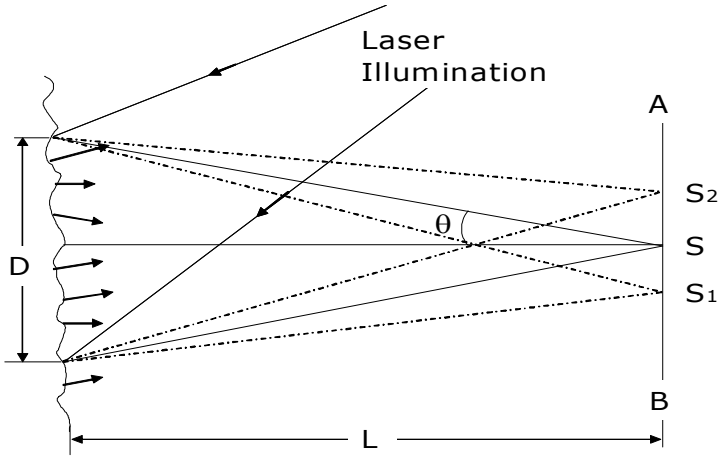
1. Interferogram 형성

가. 스페클 형성과 특징

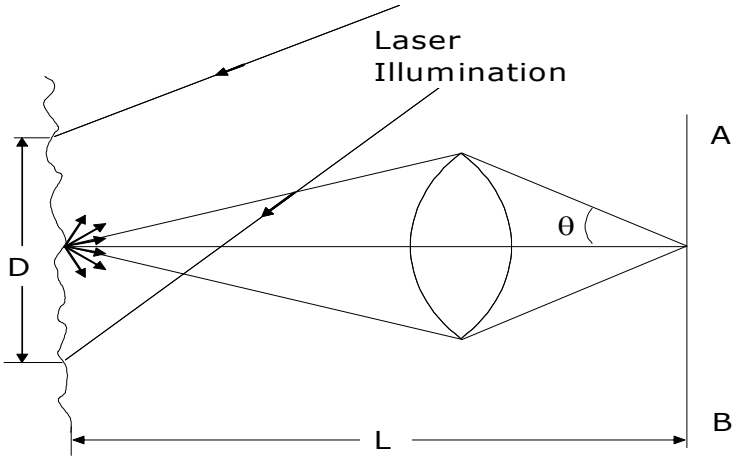
레이저 스페클(laser speckle)은 레이저의 우수한 간섭성질로 인하여 나타나는 현상으로 표면이 레이저의 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 레이저를 조사할 경우 물체표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이를 스페클패턴(speckle pattern)이라 하며, 물체표면에서 반사된 후에도 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다. 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광 검출기에 광강도(intensity) 분포로 기록되어진다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 대상체의 스페클(objective speckle)과 참조된 스페클(subjective speckle)로 나누어진다. Fig. 2-1은 대상체의 스페클과 참조된 스페클의 형성을 보여 주고 있다. 즉, 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 사용 여부에 따라서 구별되며, 그 크기 또한 다르게 된다. 스페클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점(간섭의 보강과 소멸) 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있다. 즉, 서로 상관하지 않는 광강도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다. 대상체의 스페클 크기의 정의는 물체표면의 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D 위의 모든 점은 AB 면(viewing plane)에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식 (2-1)로 대상체의 스페클의 크기를 정의하고 있다(15)

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

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



a) Objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2.1 Formation of speckle pattern

스페클 상관 간섭법 (speckle correlation interferometry)에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하고 있으며, 공간분해능은 참조된 스페클의 크기에 의존하게 된다. 참조된 스페클은 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의를 하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 대상체의 스페클과는 다르게 정의하고 있다. 즉, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로 물체의 한

점과 결상면의 한 점은 1:1 대응이라 할 수 있다. 따라서 수차가 없는 렌즈라면 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나 실제 결상렌즈의 회절한계는 한 점으로 결상을 하지 못함으로, 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기 만큼이 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 참조된 스페클의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 초기 최대점과 첫 번째 최소점사이의 거리(Bessel 함수의 1차 최소점 사이의 거리)라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 참조된 스페클의 크기는 식(2-2)와 같이 정의된다.

$$S_{sub} = 1.22(1+M)\lambda F \tag{2-2}$$

여기에서 M: 렌즈 확대배율, λ: 조사된 레이저의 파장, F: 렌즈의 f-number 이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 줌렌즈 광학배율 1배, 파장 532 nm 레이저, 비디오 배율 47.6 배(1/2 inch 비율 CCD 카메라와 15 inch 모니터(화소거리: 0.297 mm))를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 때, 실제 모니터 상에 관찰되는 subjective speckle의 크기는 37.07 mm가 된다. 또한 참조된 스페클의 물체표면에서 크기는

$$S_{sub\ on\ object} = 1.22(1+M)\lambda\frac{F}{M} \tag{2-3}$$

으로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며, 동일한 면과 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다(16) 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD 화소 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

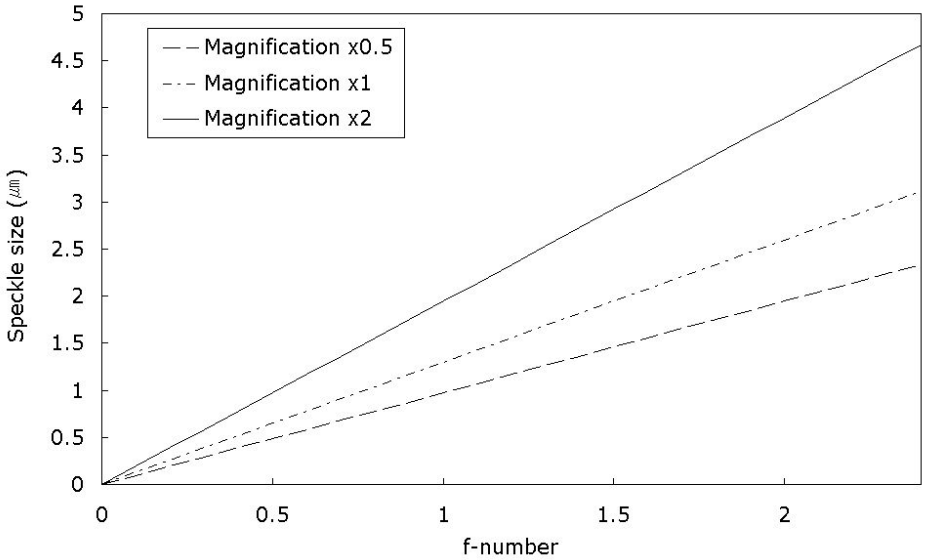


Fig. 2-2 Subjective speckle size on the CCD image plane

Fig. 2-2는 광학배율과 f-number에 따른 CCD 촬상소자에 형성되는 스페클의 크기를 나타내었다. 스페클의 크기가 CCD cell 크기보다 작을 경우에 광강도는 형성적인 스페클패턴의 합성 또는 매끄러운 상태로 관찰되게 된다

나. 스페클 상관 간섭무늬

스페클 전단 간섭법은 집속성과 간섭성이 우수한 레이저 광원을 바탕으로 광학계를 구성하여 가간섭적으로 물체광과 참조광을 합성시킴으로서 물체의 변위량에 따라 발생하는 간섭패턴의 줄무늬를 해석하는 방법이다. 여기에서 스페클은 광학적으로 거칠기를 갖는 물체 표면에 간섭성이 우수한 레이저 광원이 조사되면 산란과 간섭으로 발생하는데 이러한 스페클은 빛의 휘도 분포로 물체 변위에 대한 중요한 위상정보를 갖게 되며, 그 위상값은 CCD(Charge Coupled Device) 카메라와 화상처리 장치를 통해 변위의 정보로 바뀌게 된다.

Fig. 2-3 과 같이 물체광과 참조광의 간섭에 있어서 진폭과 시간 t 에 대한 관계를 나타낼 수가 있는데, Fig. 2-4 에서 나타냈듯이 물체광을 E_O라 하고 참조광을 E_R이라고 하면 각각의 광에 있어서 레이저 파장 λ와 위상값 δ, 그리고 위상속도 c와 시간 t 사이의 파동방정식은 식 (2-4)와 같다.

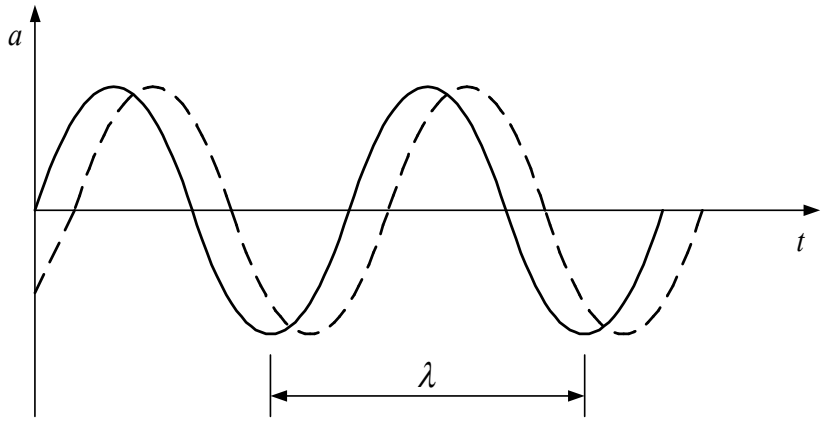


Fig. 2.3 Superposition of two collinear waves

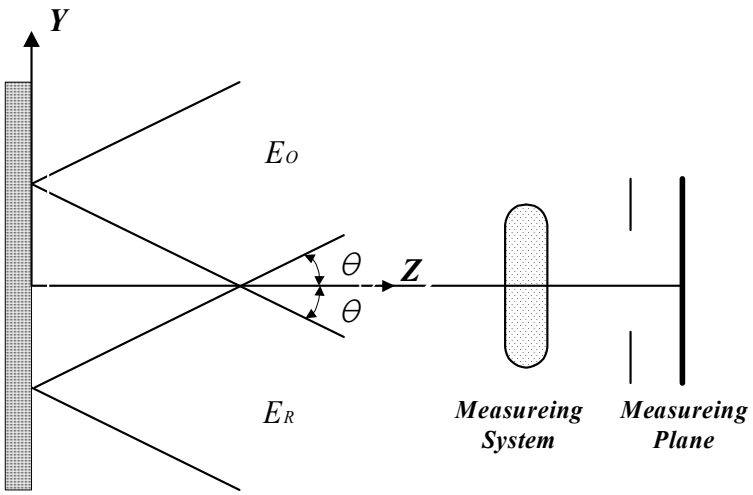


Fig. 2.4 Interference of in-plane measurement method

$$E_O = a_O \cos\frac{2\pi}{\lambda}(\delta_O - ct) \tag{2-4}$$

$$E_R = a_R \cos\frac{2\pi}{\lambda}(\delta_R - ct)$$

식 (2-4)에서 E_R와 E_O는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_O = a_O \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\delta_O - \frac{2\pi}{\lambda}ct\right) \tag{2-5}$$

$$= a_O \cos(\phi_O - \omega t)$$

$$E_R = a_R \cos(\phi_R - \omega t) \tag{2-6}$$

여기서 두 파를 선형적으로 중첩하여 발생된 두 광의 합은 $E\ (= E_O + E_R)$이며 이는 다음 식 (2-7)과 같다.

$$E = (a_O \cos\phi_O + a_R \cos\phi_R)\cos\omega t \tag{2-7}$$

$$+ (a_O \sin\phi_O + a_R \sin\phi_R)\sin\omega t$$

식 (2-7)에서 괄호 안은 시간에 대하여 일정하므로

$$a_O\cos\phi_O + a_R\cos\phi_R = a\cos\phi \tag{2-8}$$

$$a_O\sin\phi_O + a_R\sin\phi_R = a\sin\phi \tag{2-9}$$

가 된다. 합성 광은 식 (2-10)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} E &= a\cos\phi\cos\omega t + a\sin\phi\sin\omega t \\ &= a\cos(\phi - \omega t) \end{aligned} \tag{2-10}$$

따라서 물체광과 참조광의 합성 진폭은 빛의 세기I(Intensity)는 합성광의 진폭의 제곱에 비례하여 I는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I = {} & a_O^2\cos\phi_O^2 + a_R^2\cos\phi_R^2 + 2a_Oa_R\cos\phi_O\cos\phi_R \\ & + a_O^2\sin\phi_O^2 + a_R^2\sin\phi_R^2 + 2a_Oa_R\sin\phi_O\sin\phi_R \end{aligned} \tag{2-11}$$

식 (2-11)은 식 (2-12)와 같이 정리할 수 있다.

$$I = |a_O^2| + |a_R^2| + 2|a_O||a_R|\cos\delta \qquad (\because \delta = \phi_O - \phi_R) \tag{2-12}$$

결국 면내변위 계측을 위해 물체에 조사된 두 레이저 광의 합성 세기는 식(2-13)이 된다.

$$I = I_O + I_R + 2\sqrt{I_OI_R}\,cos\delta \tag{2-13}$$

줄무늬의 생성은 변형전과 변형후의 광의 세기I_{before}와I_{after}의 위상차 $\Delta\phi$가 발생하는데 식 (2-14)와 같이I_{before}와I_{after}는 나타낼 수 있다.

$$I_{before} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\, cos\phi \tag{2-14}$$

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

여기에서 ϕ는 변형 전 참조광과 물체광의 위상차이며, $\Delta\phi$는 변위에 의한 위상의 변화량이다.

CCD카메라의 출력신호 V_{before}와 V_{after} 는 입력 화상의 세기 I_{before}와 I_{after}에 비례하며, 감산된 신호는 식 (2-15)과 같다.

$$\begin{aligned} V_s &= (V_{before} - V_{after}) \propto (I_{before} - I_{after}) \\ &= 2\sqrt{I_1 I_2}\,[\cos\phi - \cos(\phi + \Delta\phi)] \\ &= 4\sqrt{I_1 I_2}\, sin(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi)\sin(\frac{1}{2}\Delta\phi) \end{aligned} \tag{2-15}$$

식 (2-15)에서 계산된 V_s는 양의 값과 음의 값 모두를 포함하고 있다. 그러나, 모니터 상에서 음의 출력신호는 검은색으로 출력되기 때문에 이를 양의 값으로 변화시켜 준다. 따라서 모니터에 출력되는 한 점의 밝기 B는 식(2-16)과 같다.

$$B = K\left|\sqrt{I_1 I_2}\, sin(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi)\sin(\frac{1}{2}\Delta\phi)\right| \tag{2-16}$$

식 (2-16)에서 K는 모니터 상수이다. $\Delta\phi$의 위상차가 변위에 의해 나타나고 이를 모니터에서 밝기 분포로 변환되어 가시화 된다. 결국 변위 측정을 위한 스페클 시스템에서 발생되는 줄무늬는 사인함수의 특성을 갖는다.

다. 스페클 전단 간섭계

(1) 전단간섭계 원리

Fig. 2-5는 전단간섭계의 원리를 나타내고 있으며, 마이켈슨(Michelson)간섭계의 변형된 형태가 많이 사용된다. 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이 때 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. 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 δx로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다.

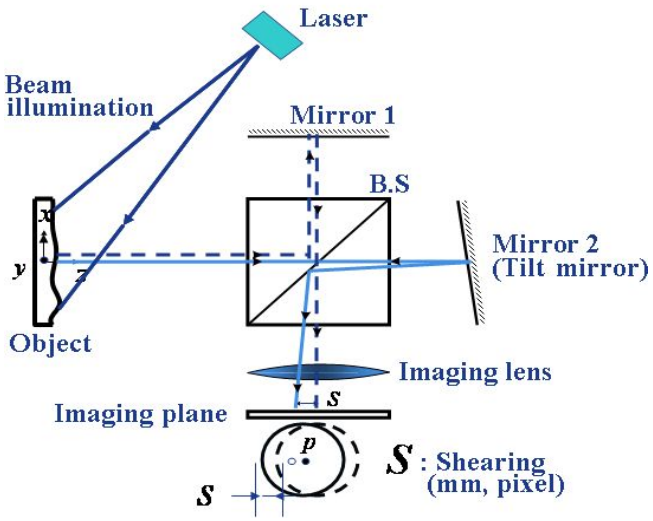


Fig. 2-5 Schematic of speckle shearing interferometry

이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 P_1과 P_2에 $\phi_1 = \phi(x,y)$와 $\phi_1 = \phi(x+\delta x,y)$와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 다음과 같다.

$$\phi = \phi(x+\delta x,y) - \phi(x,y) \tag{2-17}$$

변형에 의하여 발생한 위상차의 변화 $\Delta\phi$는 식 (2-.19)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하다. 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 식 (2-18)을 이용하게 된다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며, 모든 광계측의 기본식이 된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\overrightarrow{n_i} - \overrightarrow{n_v}) \bullet \vec{d} \tag{2-18}$$

식 (2-18)과 차이점은 식 (2-20)의 표현한 바와 같이 $\vec{d}$와$\vec{d'}$은 임의의 P에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.(17)

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \phi' - \phi = (\phi_2{}' - \phi_1{}') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2{}' - \phi_2) - (\phi_1{}' - \phi_1)\end{aligned} \tag{2-19}$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\overrightarrow{n_i} - \overrightarrow{n_v}) \bullet (\vec{d} - \vec{d'}) \tag{2-20}$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식 (2-20)을 식 (2-21)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta d \tag{2-21}$$

Δd는 테일러급수에 의해 식 (2-22)와 같이 표현할 수 있으며, Δx는 상면에서 전단량 δx와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식. (2-22)에서 2차 이상의 고차항을 무시하면, 식 (2-23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = d(x) - d(x_0) \tag{2-22}$$
$$= \frac{\Delta x}{1}\frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2}\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \cdots$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{\partial d}{\partial x}\right)\delta x \tag{2-23}$$

(2) 전단간섭계를 이용한 변형 측정

전단간섭법은 변형기울기를 측정하며, 거의 모든 연구자들이 사용하고 있는 전단간섭법의 이론식을 표현할 때는 전단량이 '충분히 작다'는 조건을 적용하여 미분으로 표현하고 있다.

$$f'(x_i) = \lim_{h\to 0}\frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \tag{2-24}$$

전단간섭법을 적용하는 식 (2-24)과 도함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내외 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물의 결함검출의 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 (2-25)와 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형Δd 는 식 (2-26)와 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta d \tag{2-25}$$

$$\Delta d = d(x) - d(x_0)$$
$$= \frac{\Delta x}{1!}\frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!}\frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \cdots \tag{2-26}$$

전단간섭법과은 화상처리이므로 식 (2-25)와 식 (2-26)의 각각의 기호를 변형f,

대응화소 x_i, 전단량화소 h로 바꾸어 쓰면, 식 (2-27)과 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f'으로 정리하면 식 (2-28)와 같다.

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

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \tag{2-28}$$

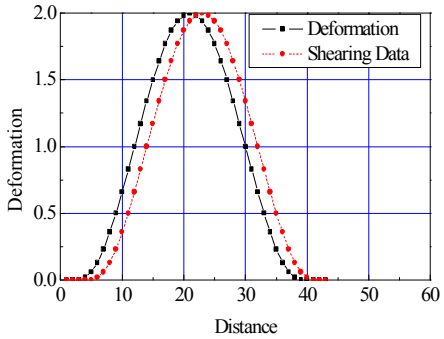
식 (2-28)은 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다.

식 (2-27)을 식 (2-25)에 대입하면 식 (2-29)와 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

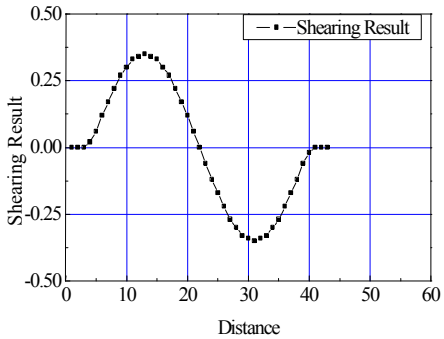
$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f'h \tag{2-29}$$

전단간섭계의 전단거울이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2-6(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동되어 나타난다. Fig. 2-6(b)는 Fig. 2-6(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.

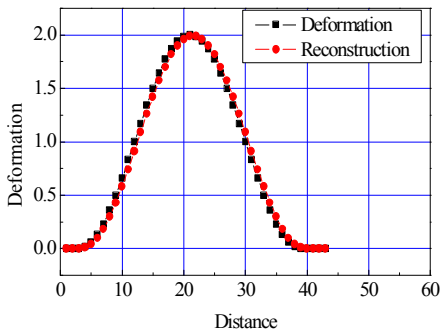
본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2-6(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2-6(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2-6 Measurement result of surface deformation by Shearography

2. Interferogram 해석

가. 위상이동기법의 적용

(1)위상이동장치

전자제어 시스템을 이용한 위상이동장치를 사용하여 스페클 패턴의 강도를 측정하여 파면의 위상을 얻어낼 수 있으며, Fig. 2-7은 위상을 이동시킬 수 있는 여러 가지 방법을 나타내고 있다.

가장 많이 보편적으로 사용되는 위상이동 기술은 참조광의 경로상에 있는 거울에 압전소자(PZT)를 붙이고, 이 압전소자를 정밀 제어한 후, CCD 카메라에 입사되는 영상을 이용하여 결과를 얻어낸다. Fig. 2-8은 PZT를 이용한 참조광 위상이동 장치를 이용한 간섭계의 개략도를 나타내고 있다[18].

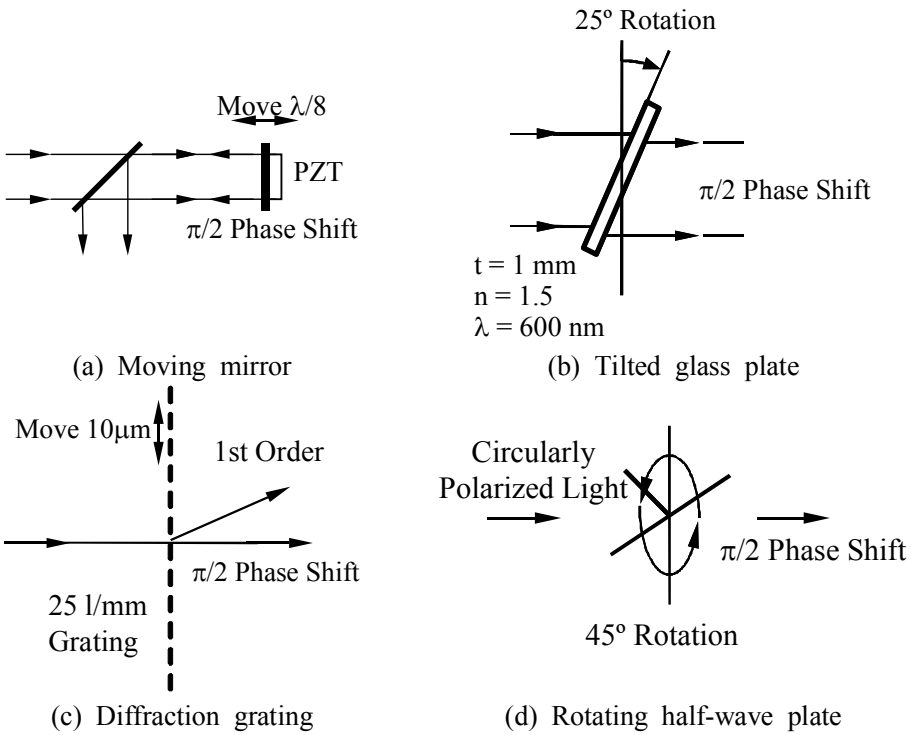


Fig. 2-7 Means of shifting the phase in an interferometer

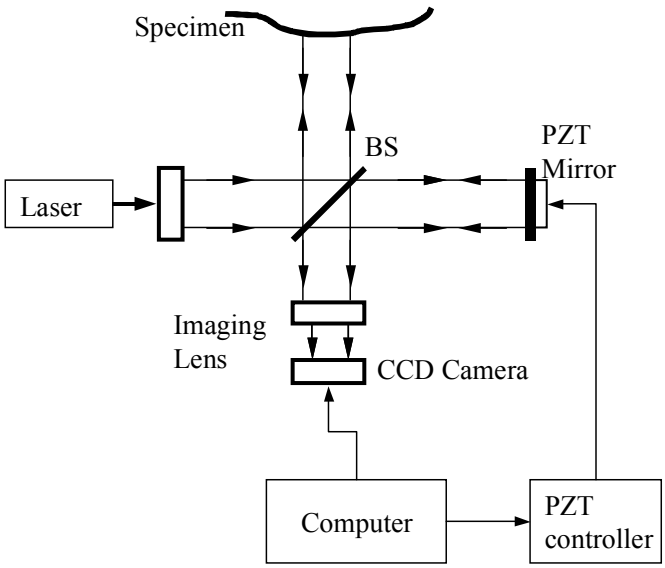


Fig. 2-8 Schematic using pzt mounted mirror as phase shifter

(2) 위상측정 알고리즘

위상이동방법을 적용하는 일반적인 간섭무늬의 수식적 표현은 식 (2-30)과 같으며, 미지수가 3개이므로 위상을 결정하기 위해서는 최소 3개이상의 이미지가 필요하다. 여기서 미지수는 빛의 세기I_0, 간섭줄무늬의 가시도γ_0, 파면의 위상ϕ이며,α는 간섭계의 참조광과 물체광 사이의 상대적인 위상이동량으로 알고 있는 값이다. 또한, 기록된 빛의 강도분포를 식 (2-31)와 같이 쓸 수 있다[19][20][21].

$$I = I_0[1+\gamma_0\cos(\phi+\alpha)] \tag{2-30}$$

$$I_i(x,y) = \frac{1}{\Delta}\int_{\alpha_i+\Delta/2}^{\alpha_i-\Delta/2} I_0(x,y)\{1+\gamma_0(x,y)\cos[\phi(x,y)+\alpha(t)]\}d\alpha(t) \tag{2-31}$$

여기서, α_i는 i번째 노출에 대한 상대적인 위상의 평균값이고, $\alpha(t)$는 시간의 함수로 참조광과 물체광 사이의 상대적인 위상이동이다.

식 (2-31)을 위상이동기법을 적용할 수 있는 표현으로 변환하면 식(2-32)와 같다.

$$\mathrm{I_i(x,y)} = \mathrm{I_0(x,y)}\left\{1+\lambda_0(\mathrm{x,y})\mathrm{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right)\cos[\phi(x,y)+\alpha_i]\right\} \tag{2-32}$$

$$= \mathrm{I_0(x,y)}\{1+\gamma_0(\mathrm{x,y})\cos[\phi(x,y)+\alpha_i]\}$$

$$\sin\frac{\frac{\Delta}{2}}{\frac{\Delta}{2}} = \mathrm{sinc}\frac{\Delta}{2} = 1 \tag{2-33}$$

$\Delta = 2\pi$라면, 빛의 강도의 변화는 없으며, 식 (2-33)을 다시 쓰면 식 (2-34)와 같다.

$$\mathrm{I_i(x,y)} = \mathrm{a_0(x,y)} + \mathrm{a_1(x,y)}\cos\alpha_i + a_2(x,y)\sin\alpha_i \tag{2-34}$$

$$\mathrm{a_0(x,y)} = \mathrm{I_0(x,y)} \tag{2-35}$$

$$\mathrm{a_1(x,y)} = \mathrm{I_0(x,y)}\gamma_0(\mathrm{x,y})\mathrm{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right)\cos\phi(x,y) \tag{2-36}$$

$$\mathrm{a_2(x,y)} = -\mathrm{I_0(x,y)}\gamma_0(\mathrm{x,y})\mathrm{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right)\sin\phi(x,y) \tag{2-37}$$

이들 식에 최소자승법의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix}\mathrm{a_0(x,y)}\\ \mathrm{a_1(x,y)}\\ \mathrm{a_2(x,y)}\end{bmatrix} = \mathrm{A}^{-1}(\alpha_\mathrm{i})\mathrm{B}(\mathrm{x,y},\alpha_\mathrm{i}) \tag{2-38}$$

$$\mathrm{A}(\alpha_\mathrm{i}) = \begin{bmatrix}\mathrm{N} & \sum\cos\alpha_i & \sum\sin\alpha_i\\ \sum\cos\alpha_i & \sum\cos^2\alpha_i & \sum\cos\alpha_i\sin\alpha_i\\ \sum\sin\alpha_i & \sum\cos\alpha_i\sin\alpha_i & \sum\sin^2\alpha_i\end{bmatrix} \tag{2-39}$$

$$B(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \sum I_i(x,y) \\ \sum I_i(x,y)\cos\alpha_i \\ \sum I_i(x,y)\sin\alpha_i \end{bmatrix} \tag{2-40}$$

행렬A를 계산하여야 하고, 간섭줄무늬의 각 점의 위상은 계수 a_1과 a_2를 계산하고, 각 점에서 B값을 얻을 수 있다. 최종적으로 계산되는 위상결과는 다음과 같다.

$$\phi(x,y) = \tan^{-1}\left[\frac{-a_2(x,y)}{a_1(x,y)}\right] \tag{2-41}$$

$$= \tan^{-1}\left\{\frac{I_0(x,y)\gamma_0(x,y)\mathrm{sinc}\frac{\Delta}{2}sin[\phi(x,y)]}{I_0(x,y)\gamma_0(x,y)\mathrm{sinc}\frac{\Delta}{2}cos[\phi(x,y)]}\right\}$$

식 (2-41)을 이용하여 3-프레임 기법, 4-프레임 기법, 5-프레임 기법, Carre 방법 그리고 푸리에 변환 방법 등 여러 가지 위상계산 알고리즘이 있는데[22], 본 논문에서는 일반적으로 가장 많이 사용하는 4-프레임 기법을 적용하였다. 이 경우 기록되는 4개의 이미지의 각 화소별 세기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 = I_0[1+\gamma\cos\phi] \tag{2-42}$$

$$I_2 = I_0[1+\gamma\cos(\phi+\frac{\pi}{2})] = I_0[1-\gamma\sin\phi] \tag{2-43}$$

$$I_3 = I_0[1+\gamma\cos(\phi+\pi)] = I_0[1-\gamma\cos\phi] \tag{2-44}$$

$$I_4 = I_0[1+\gamma\cos(\phi+\frac{3\pi}{2})] = I_0[1+\gamma\cos\phi] \tag{2-45}$$

각 점에서의 위상과 줄무늬 가시도는 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \tag{2-46}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2I_0} \tag{2-47}$$

나. 필터링

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

필터링의 기본 개념은 영상내의 특정한 위치에서 마스크 아래에 있는 화소의 밝기와 마스크 계수들간의 곱을 합한 것이다. Fig. 2-9는 일반적인 3×3 마스크를 보여준다. 임의의 위치에서 마스크 아래에 있는 화소들의 명암도를 $z_1, z_2, \cdots, z_9$으로 표시하면 선형 마스크의 응답은 다음과 같다.

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \cdots + w_9 z_9 \tag{2-48}$$

노이즈들을 감소시키기 위하여 메디안 필터링, Smoothing, π위상이동, 위상필터링 등 여러 가지의 효율적인 필터링 단계를 거치면 위상 정보의 손상을 최소화하고 잡음를 제거할 수 있다.

w_9	w_2	w_3
w_8	w_1	w_4
w_7	w_6	w_5

Fig. 2-9 3×3 mask with the some coefficient

(1) 메디안필터링

메디안 필터링이란 주변 픽셀 값들 중에서 그 중간 값으로 대치하는 필터링 방법으로 그 원리는 Fig. 2-10과 같다.

Fig. 2-11은 노이즈를 포함하고 있는 일차원 톱니파 데이터에 대한, 메디안 필터를 적용한 결과를 보여주고 있다. 여기서 알 수 있는 것과 같이 원래의 데이터는 노이즈가 심하고(위), 3개의 선형마스크를 사용한 메디안 필터링(가운데), 5개의 선형마스크를 사용한 메디안 필터링(아래)의 차이를 잘 보여주고 있다.

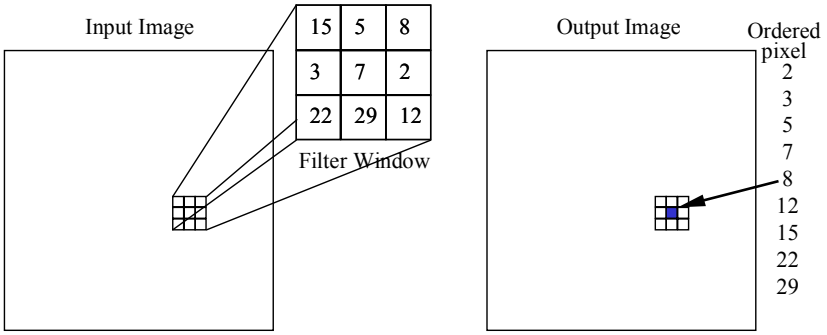


Fig. 2-10 Concept of median filtering

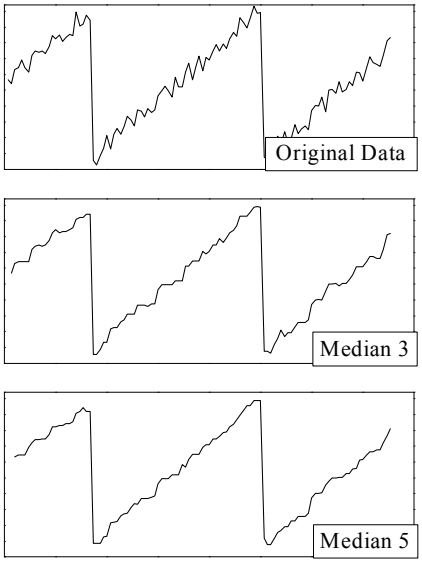


Fig. 2-11 Example of median filtering

(2) π 이동방법

위상지도의 단면도는 위상값이 2π에 해당하는 256그레이 레벨로 표현되어 있는데, 이는 톱니파의 형태이며 이 톱니파로 인하여 정량해석을 가능하도록 하는 결펼침의 기회를 제공한다. 그러나 일반적인 스무딩 처리를 하면 톱니파의 에지부분의 위상정보 손실이 매우 커서 결펼침을 할 수 없게 된다. 이러한 손실은 차단하고 데이터를 필터링하는 방법이다. Fig. 2-12에 그 방법을 개략적을 나타내었다.

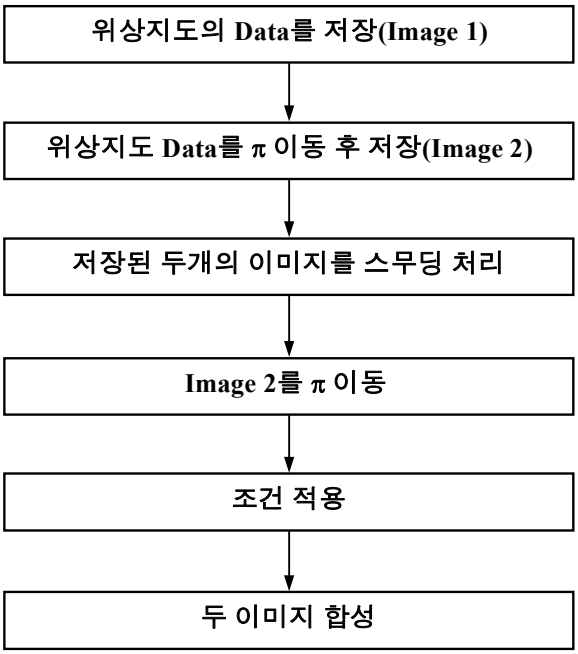
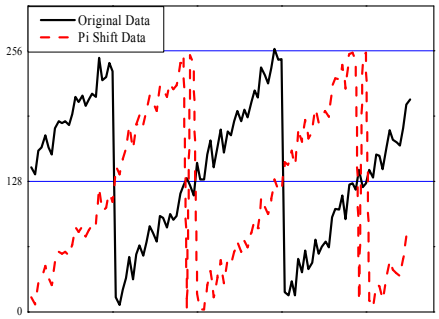
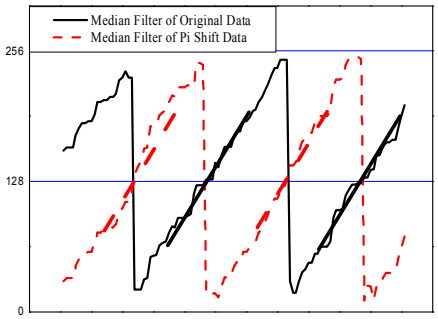


Fig. 2-12 Concept of π shifting filtering

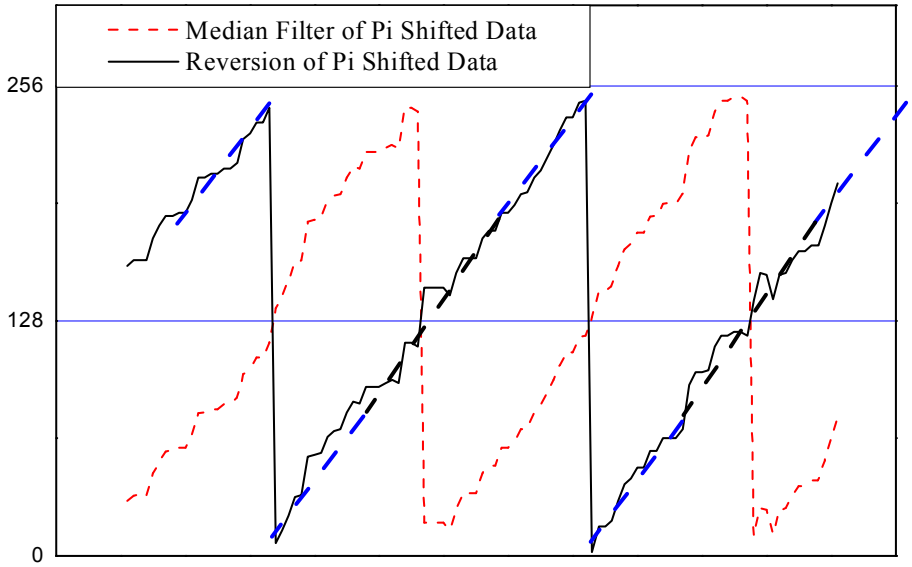
이것을 다시 설명하면 위상을 나타내는 이미지 데이터는 256분포를 가지는데 이는 2π에 해당하므로, 위상단면의 위상값 분포가 그레이 레벨 128 [π] 보다 크면 감산하고, 작으면 가산을 한다. 이렇게 계산을 수행한 결과가 Fig. 2-13(a)에서 설명되는데 흑색 실선은 π이동을 수행하기 전의 위상값의 분포를 나타내며, 점선은 π이동을 수행한 결과이다. Fig. 2-13(b)은 π이동 전 후의 이미지 데이터를 각각 메디안 필터링한 결과이다.



(a) Distribution of the original and the executed π shifting data



(b) Median filtering result of data(a)



(c) Reversion of π shifted data

Fig. 2-13 Sequence of π shifting filtering

(b)와 같이 필터링한 결과를 가지고, 본래의 데이터에서는 64 - 192[π/2 - 3π/2]까지의 데이터를 이용하고, π이동하였던 데이터는 다시 π이동하고, 복원된 이동 데이터 중에서 0 - 64[0 - π/2], 192 - 256[3π/2 - 2π]까지의 데이터만을 이용하여 두 이미지를 합성하는 것으로서, (c)의 흑색 청색 점선이 복원되는 데이터이다.

(3) 위상 필터링

위상지도에서 2π의 불연속 정보와 노이즈의 정보는 공간주파수가 매우 높은 특성을 갖는다. 이렇게 높은 공간주파수의 노이즈를 제거하기 위하여 평균필터를 사용하면 노이즈를 줄이기는 하지만 이와 함께 2π불연속 정보도 함께 잃게 된다. 앞에서 설명한 π위상이동방법도 내부에서 메디안 필터링을 수행하므로 약간의 정보를 잃게 된다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 위상필터링을 적용하며, Fig. 2-14에 순서도를 나타내었다.

Fig. 2-15의 (a)와 같은 톱니파의 데이터는 바로 필터링을 하지 않고 위상값을 (b)와 같이 Sine과 Cosine의 위상으로 분리하면 연속적인 사인파를 얻을 수 있다. 이렇게 변환된 데이터를 일정 평균값을 취하고((c)), 이를 다시 Arctangent 함수에 대입하면 변환된 톱니파를 얻을 수 있다((d)). 여기서 프린지의 간격을 고려해야 하는데 프린지의 간격이 좁으면 필터의 커널을 작게하여 평균값을 구하여야 한다.

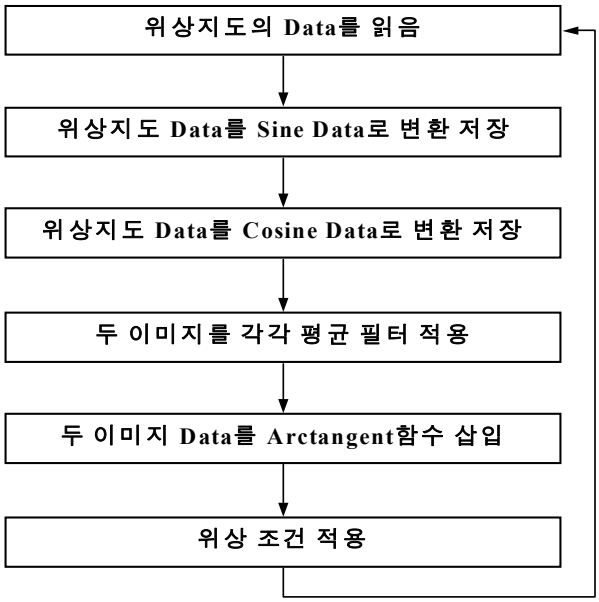
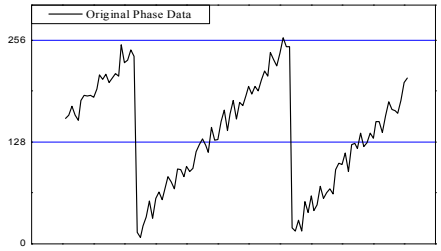
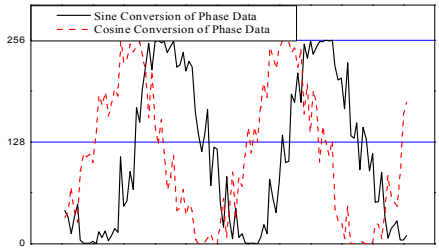


Fig. 2-14 Concept of phase filtering

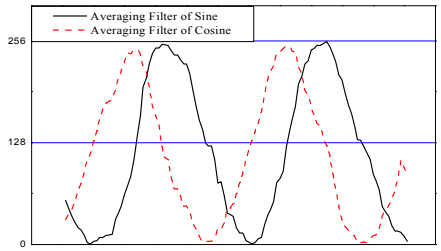
이러한 과정을 여러번 반복하면 노이즈는 거의 완전하게 제거되고 2π의 불연속 정보는 그대로 유지하는 위상지도를 얻을 수 있다. (e)는 필터링 전 후 결과의 비교를 보여주고 있으며, 이를 반복수행하면 더욱 개선된 결과를 얻을 수 있다.



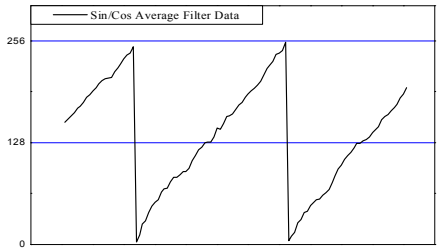
(a) Original phase value



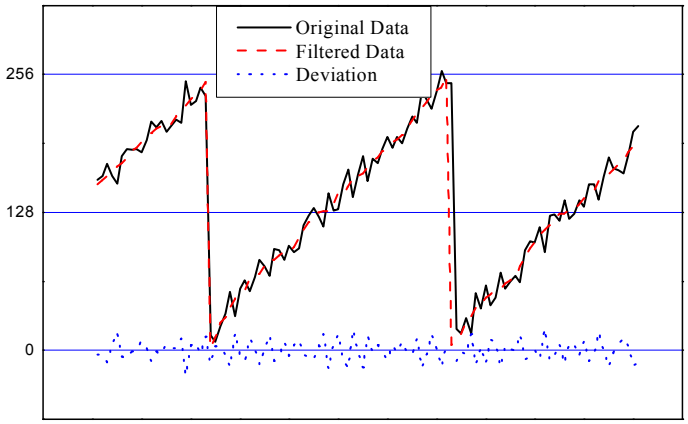
(b) Transformation of Sine and Cosine



(c) Mean value filtering of (b)



(d) Conversion of the sawtooth function



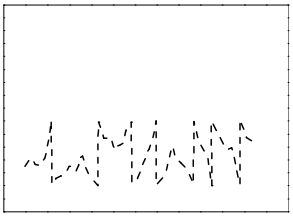
(e) Comparison of result

Fig. 2-15 Sequence of a modified mean value filtering

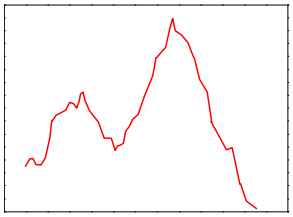
다. 결펼침

위상결펼침의 기본 원리는 데이터 경로를 따라 2π단위 내에서 톱니파를 가지는 위상값 Φ를 통합시키는 것이다. 각 픽셀에서 위상의 기울기를 계산하는데, 이때 위상차의 절대값이 $3\pi/2$와 같은 일정한 한계치를 초과한다면 위상 줄무늬 경계라고 가정한다. 이 위상 도약은 위상차의 부호에 따라서 2π를 가산 또는 감산하여 정확하게 한다. 임의의 점에서 위상을 $\phi+2\pi N$으로 계산하기 위하여 현재 프린지 차수 N은 저장하여야 한다.

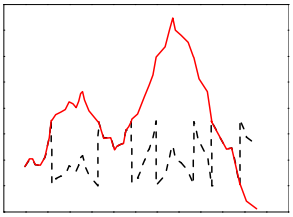
위상이동법을 적용해서 구해진 위상은 Arctangent의 함수로부터 계산되었으므로 0과 2π 사이의 값만 가지게 되며 $\phi(x,y)=2N\pi$ 인 점에서 불연속점이 발생한다. 불연속구간을 연속구간으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보를 획득하기 위하여 위상값의 차가 임계값 이상일 경우 불연속으로 가정하여 modulo 2π 계수, 차수를 구하고 연속된 위상으로 변환하는 결펼침(Phase Unwrapping) 단계를 거친다. Fig. 2-16은 이러한 결펼침과정을 나타낸다.



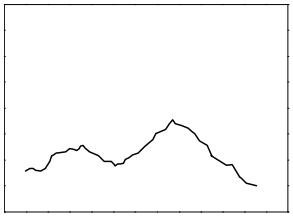
(a) Data of phase value



(b) Result of phase unwrapping



(c) Comparison



(d) Presentation of gray level

Fig. 2-16 Sequence of phase unwrapping

이를 자세히 설명하면 Fig. 2-16(a)에서 얻어진 위상값을 식 (2-49)을 이용하여 이미지 상의 모든 점에서 각각 인접한 화소들의 위상차를 구한다.

$$\Delta\phi_k(x,y) = \phi_k(x,y) - \phi_{k-1}(x,y) \tag{2-49}$$

여기서, ϕ_k은 k번째 화소의 위상을 나타내며, 위상이 급변하는 점에서 위상의 값이 0에서 2π, 또는 일정한 임계값 이상이면 그 화소의 위상 값에 2π을 더하여 주고 반대인 2π에서 0으로 변하는 부분에서는 2π의 값을 감소시키면서 Fig. 2-16(a)의 불연속적인 위상의 값을 (b)처럼 통합시킨다. (c)는 불연속적인 위상값과 연속으로 변환시킨 값을 비교하고 있다. (d)는 $2n\pi$의 분포를 갖기 때문에 이 값이 대상물체의 변형 정도가 되는 것이다. 그러나 화면에서는 백색으로 나타나기 때문에 최대 변형점을 백색으로 나타나게 하여 시각상의 효과를 나타내기 위하여 2π의 위상분포로 다시 나타낸다.

각 화소의 위상변화와 일치하는 변위는 위상정보로부터 결정되므로 한 점(x, y) 위치에서의 그 물체표면의 변형 d는 식 (2-50)과 같다.

$$d(x,y) = \frac{\Delta\phi_k(x,y)\lambda}{2\pi(\cos\theta_i + \cos\theta_v)} \tag{2-50}$$

여기서, λ는 레이저의 파장이며,θ_i는 레이저가 물체에 조사되는 각도, θ_v는 물체와 CCD가 이루는 각도이다.

제2절 디지털 이미지 상관법(DIC)의 원리

1. 화상 상관법

화상 상관법은 1950년대 Gilbert Hobrough의 '다양한 관측으로부터 특징을 일치시키기 위해 아날로그 방식의 사진을 비교하는 연구'를 통해 처음 시작된 것으로 알려져 있다. 1961년, Hobrough는 '변화 가능한 지면 조건을 더욱 정확하게 측정하도록 하기 위한 고정도 측량 사진을 통한 고해상도 정찰 사진의 상관에 대한 연구'를 통해 화상 상관법을 이용한 장치를 설계 및 제작하였다.

1960년대 이후 디지털 방식의 화상의 이용이 가능해져서, 인공지능과 로봇공학 분야의 연구자들은 항공사진을 위한 사진측량법과 동시에 비전을 기반으로 한 알고리즘과 스테레오 비전 계측법을 개발하기 시작하였다. 1955년부터 1979년까지, Rosenfeld는 특징 인식, 현미경, 의학과 방사선학, 사진측량법과 항공사진과 드물게 공학에서의 형상과 변형 계측에 대한 연구를 수행하였다.

그 후, 디지털 화상 해석법은 폭발적으로 성장하였으며, 실험적 고체역학 분야에서는 레이저 기술의 활용에 관심이 집중되었다. 레이저를 이용한 계측기술은 holographic interferometry, laser speckle photography, laser speckle interferometry, speckle shearing interferometry, moire interferometry 등이 대표적이며, 이들 기술을 통해 얻어지는 측정 데이터는 줄무늬 패턴으로 형성된 사진 매체에 내재되어 표현된다. 이들 데이터의 기록과정은 일반적으로 비선형으로서 고정도로 줄무늬의 위치를 추출하기가 어렵기 때문에, 대부분 몇 개의 점을 기준으로 줄무늬의 중심 위치를 예측하게 되었다.

사진으로 기록된 측정 데이터의 후처리 과정에서 실험역학 연구자들이 직면한 이와 같은 문제 때문에, 연구자들에게는 최근 발전한 디지털 화상을 이용한 기술을 채택하여 (a) 측정 데이터를 포함하는 화상을 디지털적으로 저장하는 방법, (b) 디지털 화상을 해석하고 측정 데이터를 추출하는 알고리즘, (c) 전체 처리과정을 자동화하는 방법 등을 개발하는 것이 당연한 일이 되었다.

2. 컴퓨터 비전의 단일 카메라 모델

카메라를 이용한 컴퓨터 비전은 다음 세 가지를 고려해야 한다. 우선, 카메라는 물체로부터 빛을 모아서 센서 평면에 화상의 초점이 맺히도록 하기 위해 일련의 렌즈군과 필터, 셔터 등으로 구성되어 있기 때문에, 광학적인 접근이 필요하다. 두 번째로, 디지털 화상을 얻기 위해 CCD(charge-coupled device) 카메라가 사용되기 때문에, 카메라로 입사되는 빛은 전기적인 신호로 변환된다는 것이다. 마지막으로, CCD 카메라를 통해 얻어진 CCD 신호는 A/D 변환기에 의해 분산 디지털 세기 데이터의 집합으로 변환되어 저장된다는 것이다. 이들의 변환 관계는 핀홀 투영 모델(pinchole projection model)을 고려하여 해석할 수 있다.

가. 실제 좌표계와 카메라계 사이의 변환

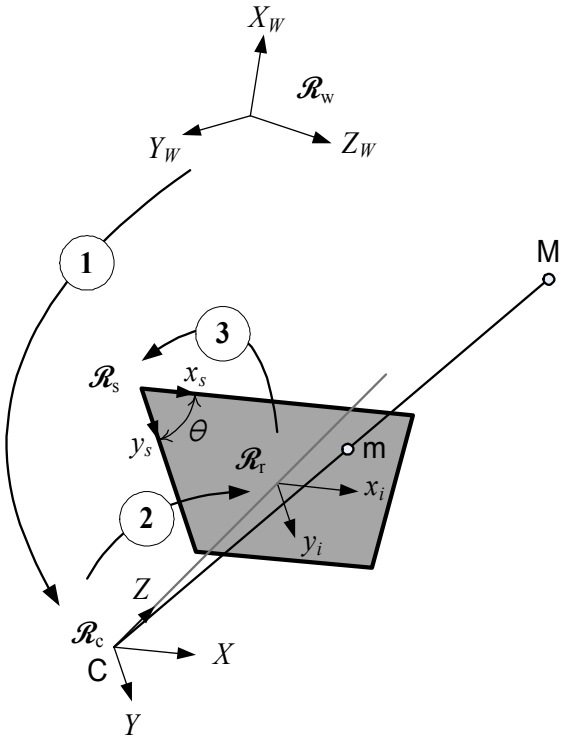


Fig. 2-17 Schematic of the geometry for a single camera system using a front image plane construction.

Fig. 2-17은 전방 화상 평면 구성을 이용한 단일 카메라 시스템에 대한 기하학적 구성을 표현한 것이다. 3차원 공간상의 점 M은 실제 좌표계 $\mathcal{R}_W(X_W, Y_W, Z_W)$를 갖는다. 카메라 또는 렌즈계 $\mathcal{R}_C$는 점 C를 원점으로 하는 좌표계 (X, Y, Z)를 갖는다. 화상계 $\mathcal{R}_r$은 좌표계 (x_i, y_i)를 갖게 되며, 점 M에 대응하는 화상 점은 $\underline{\mathrm{m}}$으로 지정된다. 센서계 $\mathcal{R}_s$는 픽셀 단위로 표현되는 좌표계 (x_s, y_s)를 갖게 되고, 화상 점 $\underline{\mathrm{m}}$은 m으로 지정된다.

Fig. 2-17에서 ①은 좌표계 $\mathcal{R}_W$와 $\mathcal{R}_c$ 사이의 변환을 나타낸다. 이 과정은 회전과 평행이동이 일어난다. 이 때, 회전 텐서를 [R], 평행이동 벡터를 t라고 하면, 변환은 식 (2-51)와 같이 쓸 수 있다.

$$\mathrm{M}=\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}=[\mathrm{R}]\cdot\begin{Bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{Bmatrix}+\mathrm{t} \tag{2.51}$$

$$\widetilde{\mathrm{M}}\doteq\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{Bmatrix}=[\mathrm{T}]\cdot\begin{Bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$[\mathrm{T}]\doteq\begin{bmatrix} \mathrm{R} & \mathrm{t} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}_{4\times 4};\quad \mathrm{t}=\begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{Bmatrix};\quad [\mathrm{R}]=\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

여기서, $\doteq$는 특별한 변수에 대한 투영 형태를 나타내기 위해 사용된다.

나. 카메라계와 화상 평면 사이의 변환

Fig. 2-17에서 ②는 좌표계 $\mathcal{R}_c$와 $\mathcal{R}_r$ 사이의 변환을 나타낸다. 이것은 3차원 공간상의 점 M을 화상 평면상의 점 (x_i, y_i)로 투영하는 화상처리 과정이다. 이 변환은 순수 투시투영이며, 식 (2-52)과 같이 정방행렬 [R]을 사용하는 기본 행렬 형태로, 또는 균일 행렬 형태로 쓸 수 있다.

$$\widetilde{\underline{\mathrm{m}}}\doteq\alpha\begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{Bmatrix}=[\boldsymbol{P}]_{3\times 4}\cdot\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{2.52}$$

$$[\boldsymbol{P}]\doteq\begin{bmatrix} \boldsymbol{f} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

다. 화상 평면과 센서계 사이의 변환

Fig. 2-17에서 ③은 센서 수광소자로 입사되는 빛의 세기장에 대한 샘플링 과정을 나타낸다. 이 변환 과정에서 미터 단위로 표현되는 위치 좌표는 화상 내에서 픽셀 좌표로 변환된다. 센서의 수광소자는 기울어져 있을 경우도 있으므로 변환은 좀 더 복잡하다고 할 수 있다.

Fig. 2-18에서 보는 바와 같이, 센서계는 비직교좌표계로 가정된다. 화상과 센서 좌표계 사이의 경사 변환은 식 (2-53)와 같이 쓸 수 있다.

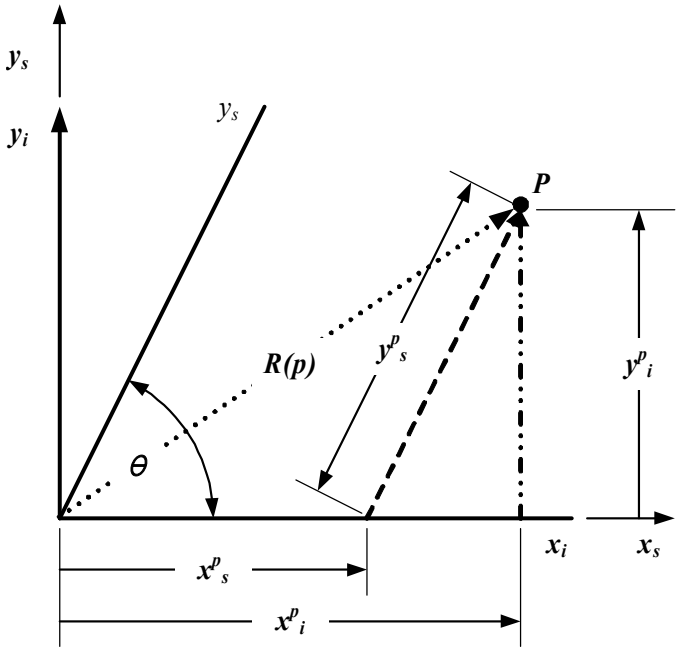


Fig. 2-18 Relationship between skewed sensor system and orthogonal image system

$$\begin{Bmatrix} \bar{\bar{x}} \\ \bar{\bar{y}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\cot\theta \\ 0 & \sin^{-1}\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \tag{2-53}$$

센서 좌표계 방향으로 다른 크기 인자(scale factor)를 가정하고 단위 길이당 픽셀 단위를 갖는 좌표 (S_x, S_y)로써 지정하면, 미터 단위에서 픽셀 단위로의 변환은 식 (2-54)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{\overline{x}} \\ \overline{\overline{y}} \end{Bmatrix} \tag{2-54}$$

평행이동 $(\hat{c_x}, \hat{c_y})$이 화상 좌표계에서 측정된다고 가정할 때, 경사지고 스케일이 변화된 좌표계에서 센서 좌표계의 원점으로 평행이동하면, 변환은 식 (2-55)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & -S_x \cot\theta \\ 0 & \dfrac{S_y}{\sin\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} S_x \hat{c_x} - S_x \hat{c_y} cot\theta \\ \dfrac{S_y \hat{c_y}}{\sin\theta} \end{Bmatrix} \tag{2-55}$$

최종적으로, 센서 좌표계에 대한 균일 행렬 형태는 식 (2-56)과 같이 쓸 수 있다.

$$\tilde{\mathrm{m}} \doteq \alpha \begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{2-56}$$

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & -S_x \cot\theta & -S_x\left(\hat{c_x} - \hat{c_y} cot\theta\right) \\ 0 & \dfrac{S_y}{\sin\theta} & -\dfrac{S_y \hat{c_y}}{\sin\theta} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{Bmatrix} = [\boldsymbol{A}] \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{Bmatrix}$$

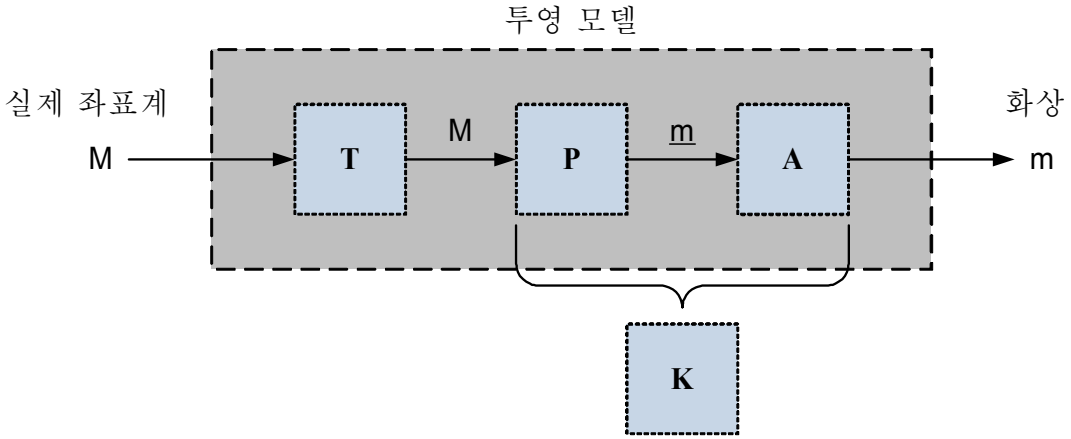


Fig. 2-19 Diagram of projection model

(x_s, y_s)와 $(\widehat{c_x}, \widehat{c_y})$는 픽셀로 측정되며, θ는 경사각(라디안)이다.

라. 실제 좌표계에서 센서계로의 전체적인 변환

식 (2-51) ~ 식 (2-56)은 점 M에서 점 m으로 변환하는데 사용된다. Fig. 2-19는 이 일련의 과정을 개략적으로 나타낸 것이다. 식 (2-51) ~ 식 (2-56)을 한 개의 식으로 묶어서 행렬로 표현하면, 변환에 대한 최종 식은 식 (2-57)로 나타낼 수 있다.

$$\widetilde{\mathrm{m}} = \alpha \begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{Bmatrix} = [\Lambda] \cdot \begin{Bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{2-57}$$

$$[\Lambda]_{3\times4} = [K]_{3\times4} \cdot [T]_{4\times4}$$

$$[K] = [A]_{3\times3} \cdot [P]_{3\times4} = \begin{bmatrix} fS_x & -fS_x\cot\theta & -S_x\left(\widehat{c_x} - \widehat{c_y}cot\theta\right) & 0 \\ 0 & fS_y/\sin\theta & -S_y\widehat{c_y}/\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & f_s & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서, $f_x = fS_x$

$$f_y = \frac{fS_y}{\sin\theta}$$

$$f_s = -fS_x \cot\theta$$

$$c_x = -S_x\left(\hat{c_x} - \hat{c_y} cot\theta\right)$$

$$c_y = -\frac{S_y \hat{c_y}}{\sin\theta}$$

이다.

(S_x, S_y)는 (x_s, y_s) 방향을 따라서 거리를 픽셀로 변환한 수직과 수평 크기 인자이다. Fig. 2-18에서 보는 바와 같이, 경사각 θ는 화상에서 행과 열 사이의 경사를 나타낸다. 만일, $\theta = \pi/2$라면, 식 (2-57)은 $f_x = fS_x$, $f_y = fS_y$, 그리고 $f_x = 0$을 포함하는 단순화된 형태로 나타낼 수 있다. 또한, 식 (2-57)에서 크기 인자를 제거한 변환의 수정된 형태는 벡터 $[\Lambda]$를 풀어서 정리한 식 (2-58)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_x + f_x \dfrac{R_{11}X_W + R_{12}Y_W + R_{13}Z_W + t_x}{R_{31}X_W + R_{32}Y_W + R_{33}Z_W + t_z} + f_s \dfrac{R_{21}X_W + R_{22}Y_W + R_{23}Z_W + t_y}{R_{31}X_W + R_{32}Y_W + R_{33}Z_W + t_z} \\ C_y + f_y \dfrac{R_{21}X_W + R_{22}Y_W + R_{23}Z_W + t_y}{R_{31}X_W + R_{32}Y_W + R_{33}Z_W + t_z} \end{Bmatrix} \quad (2\text{-}58)$$

3. 2차원과 3차원 컴퓨터 비전

2차원과 3차원 컴퓨터 비전은 핀홀 카메라 모델과 왜곡 모델, 일반적인 최적화 과정이 사용된다. 2차원 컴퓨터 비전을 위해, 물체 평면 내에서 평면적인 물체의 운동이 일어난다고 가정한다. 대부분의 2차원 컴퓨터 비전에서, 물체 평면은 카메라 센서 평편과 평행하다. 3차원 컴퓨터 비전에서, 곡선 운동 상에서의 제약은 (a) 물체는 운동하는 동안 계속 초점이 맞춰지고 (b) 물체상의 관심 있는 점은 2개 또는 그 이상의 카메라 센서 평면에 상이 맺힌다는 것이다.

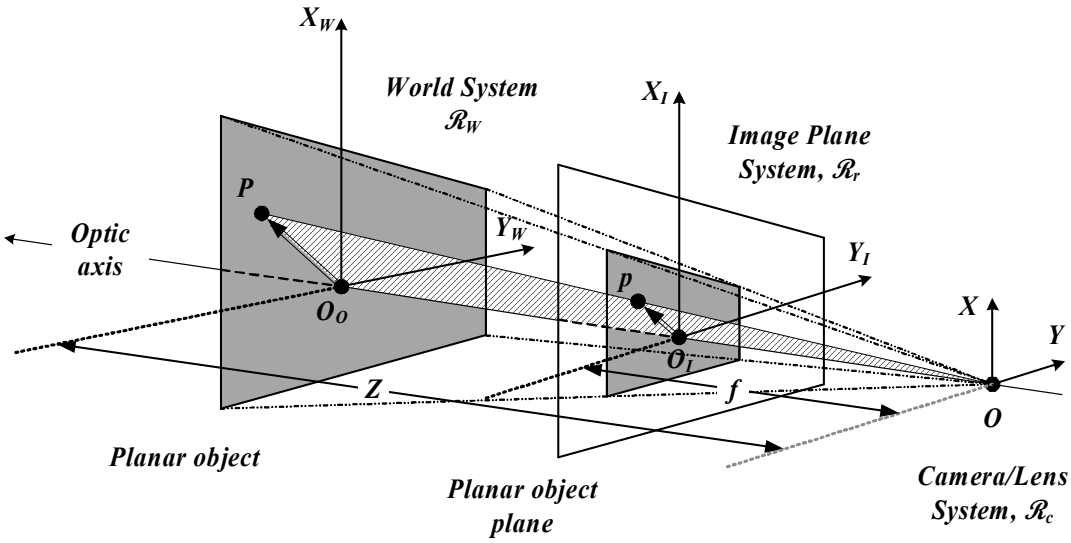


Fig. 2-20 2D imaging of planar object using front image plane model

가. 2차원 컴퓨터 비전

Fig. 2-20은 평면 물체상의 점을 평행한 센서 평면 내의 위치로 투영하는 것을 나타내고 있다. 물체상의 점 P와 이에 대응하는 화상에서의 점 p는 선형 변환과 평행이동 변환의 합성으로 표현되는 아핀(affine) 변환에 의해 관계가 이루어진다. 점 P와 p에 대한 위치벡터는 광축을 포함하는 평면상에 놓인다. 점 P의 전체 좌표계상의 좌표는 $X_W - Y_W - Z_W$ 계에서 $(X_W, Y_W, 0)$이다. 화상 점 p에 대응하는 센서 위치는 센서계에서 (x_s, y_s)이다.

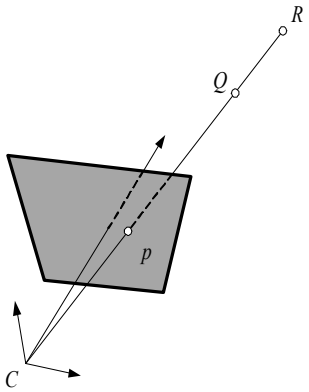
이 경우, 물체상의 모든 점은 센서 평면으로부터 같은 거리 Z에 위치한다. 즉, 각각의 물체 벡터 $O_O P$는 각각의 화상 평면 벡터 $O_I P$의 크기가 바뀐 것이다. 이 경우, 화상 점에 대한 물체 점의 투영은 아핀 투영으로 감소된다.

2차원 컴퓨터 비전에 활용하기 위해 식 (2-58)을 단순화하기 위해서는 다음과 같은 가정이 이용된다. 첫째, 전체 좌표계는 물체와 광축의 교점에 원점이 존재하는 평면 물체 좌표계로 조정된다. 즉, $[\mathrm{R}] = [\mathrm{I}]$, 세기 행렬이다. 둘째, 센서 평면은 $\theta = 0$과 함께 $\theta = \pi/2$로 가정한다. 이들을 결합하면 식 (2-59)으로 평면 물체 좌표와 센서 위치 사이의 관계를 쓸 수 있다.

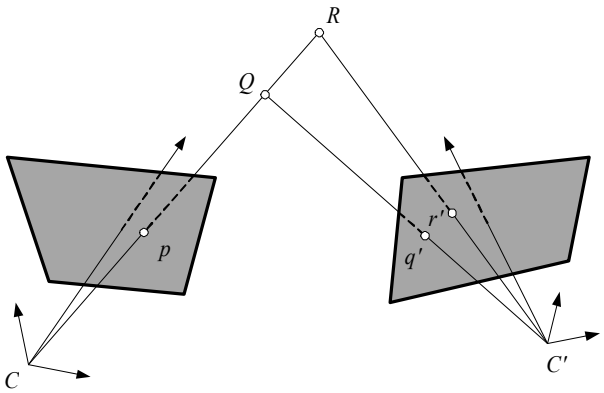
$$\begin{Bmatrix} x_s \\ y_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left(\dfrac{fS_x}{Z}\right) X_W \\ \left(\dfrac{fS_y}{Z}\right) Y_W \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_x \\ c_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} s_x X_W \\ s_y Y_W \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_x \\ c_y \end{Bmatrix} \tag{2-59}$$

나. 3차원 컴퓨터 비전

핀홀 카메라는 투시 투영을 수행한다. 식 (2-58)에서 보는 바와 같이, 투시 투영은 3차원 물체 점을 2차원 화상 점으로 변환한다. 그럼으로써 비가역적 방법으로 세 번째 차원을 제거하게 된다.



(a) a single camera



(b) two cameras

Fig. 2-21 Recovering the third dimension by using two cameras

Fig. 2-21 (a)에서 보는 바와 같이, 두 개의 3차원 점 Q와 R은 동일한 투영 광

선 (C,p) 상에 놓여있기 때문에, 이들 두 점은 동일한 화상 점 p로 상을 맺게 되며, 이것은 화상 점 p에 대응하는 수많은 3차원 점이 존재한다는 것을 보여준다. Fig. 2-21 (b)에서 보는 바와 같이, 동일한 물체의 화상 점을 동시에 저장하기 위해 두 개의 카메라를 사용함으로써 실제 물체 점의 3차원 위치를 복원할 수 있다. 만일 두 점이 (p',q')이라면, 유일한 3차원 점은 Q가 된다. 만일 대응하는 화상 점이 (p,r')이라면, 유일한 3차원 점은 R이 된다.

Fig. 2-22는 두 개의 카메라를 이용한 일반적인 스테레오비전 시스템에 대한 개략도를 나타낸다. 고유 변환은 식 (2-60)로 쓸 수 있으며, 이 때, 강체회전 텐서와 평행이동 벡터는 3×4 행렬로 결합된다.

$$
\begin{aligned}
[\mathrm{T}]\mathrm{R_W} - \mathrm{R_c} &= [\mathrm{T}] \doteq \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
[\mathrm{T}]\mathrm{R_c} - \mathrm{R_{c'}} &= [\mathrm{T_s}] \doteq \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_S \\
[\mathrm{T}]\mathrm{R_W} - \mathrm{R_{c'}} &= [\mathrm{T'}] \doteq \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{C'}
\end{aligned}
\tag{2-60}
$$

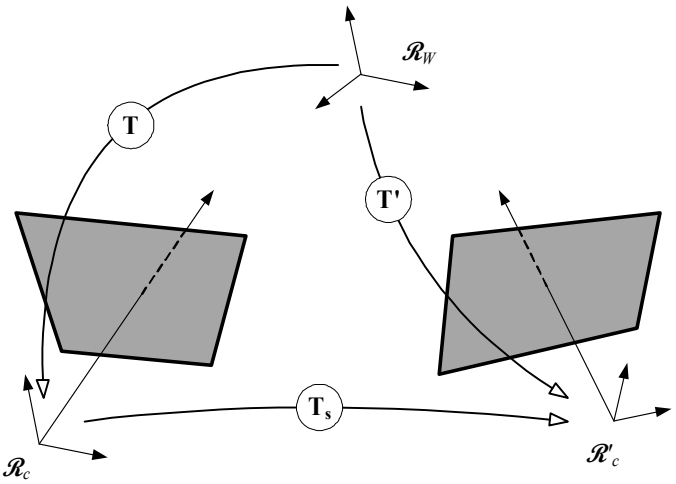


Fig. 2-22 The reference frames associated with the 3D sene and to each camera are linked by three rigid body transformations

[T]는 실제 좌표계 $\mathcal{R}_W$에 있는 벡터를 좌측 카메라에 위치한 핀홀 시스템 $\mathcal{R}_c$로 변환한다. 유사하게, [T]′는 실제 좌표계 $\mathcal{R}_W$에 있는 벡터를 우측 카메라에 위치한

핀홀 시스템 $\mathcal{R}_{c'}$로 변환한다. 최종적으로, $[T_s]$는 $\mathcal{R}_c$에 있는 벡터를 $\mathcal{R}_{c'}$에 있는 벡터로 변환한다. 이들 변환은 식 (2-61)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[T_s][T]=[T]' \tag{2-61}$$

단일 카메라 모델의 경우와 동일하게 표현하기 위해 일반적인 3차원 점 M을 고려한다. 3차원 위치 M에 대한 대응하는 균일 행렬 형태와 좌측 카메라 $\widetilde{m}$에 있는 크기가 조절된 센서 위치, 우측 카메라 $\widetilde{m}'$에 있는 대응하는 크기 조절된 센서 위치를 사용하면, 식 (2-57)은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}\widetilde{m}&=[K]\cdot[T]\cdot\{\widetilde{M}\}\\ \widetilde{m}'&=[K']\cdot[T']\cdot\{\widetilde{M}\}\end{aligned} \tag{2-62}$$

식 (2-61)와 식 (2-62)을 적용하면, 두 화상 점 사이의 관계를 식 (2-64)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\widetilde{m}'&=[K']\cdot[T']\cdot\{\widetilde{M}\}\\ &=[K']\cdot[T_s]\cdot\{T\}\cdot\{\widetilde{M}\}\end{aligned} \tag{2-63}$$

식 (2-62)에서 보는 바와 같이, 공통의 3차원 점에 대한 센서 위치는 변환 행렬을 통해 직접 관련된다.

물체 점 M과 스테레오비전 시스템에서 두 개의 화상 평면상의 2차원 투영 $\widetilde{m}$과 $\widetilde{m}'$에 대한 균일 행렬 형태가 주어질 때, 식 (2-51) ~ 식 (2-58)에 의해 모델링 될 수 있는 카메라로 구성된 임의의 스테레오 화상 시스템은 $\widetilde{m}$과 $\widetilde{m}'$ 사이에 기하학적 제약을 갖는다는 것을 여러 문헌에서 찾아볼 수 있다. 에피폴라 제약으로 알려진 이 관계는 식 (2-63)와 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$\{\widetilde{m}'\}^T\cdot[F]_{3\times3}\cdot\{\widetilde{m}\}=0 \tag{2-63}$$

정방 기본 행렬 [F]는 크기가 3×3이고 2의 랭크를 갖는다. 개념적으로 식

(2-64)는 (a) 그와 연관된 에피폴라 선으로 불리는 우측 화상에 있는 선을 $\widetilde{\mathrm{m}}$에 연관 짓고 (b) 좌측 화상에 있는 에피폴라 선을 $\widetilde{\mathrm{m}}'$에 연관 짓는다. 특히, 만일 $\{\widetilde{\mathrm{m}}\}$이 좌측 화상에 있는 화상 점에 대한 동일 표현이라면 $[\mathrm{F}]\cdot\{\widetilde{\mathrm{m}}\}$은 우측 화상에 있는 그와 연관된 에피폴라 선이다.

식 (2-63)에서 보는 바와 같이, $\{\widetilde{\mathrm{m}}\}$과 연관된 대응하는 화상 점 $\{\widetilde{\mathrm{m}}'\}$에 대한 동일 표현은 반드시 에피폴라 선을 따라 놓이게 된다. Fig. 2-23은 스테레오 대응과 에피폴라 선의 개략도를 나타낸다. Fig. 2-23에서 볼 수 있듯이, 카메라의 중심 C와 C', 3차원 점 M, 그리고 그 화상 m과 m'은 공통 평면에 놓여 있으며, 이 평면은 에피폴라 선으로 각 화상 평면과 교차하고 있다.

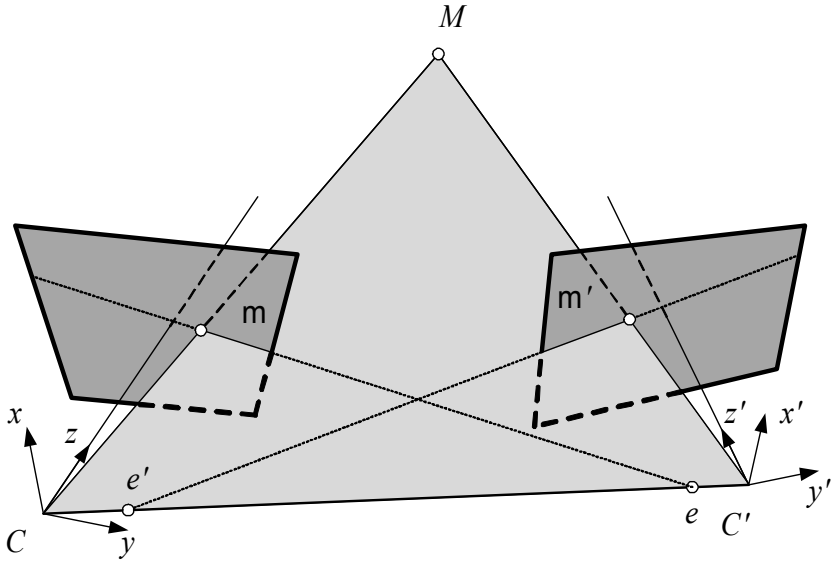


Fig. 2-23 Epipolar geometry

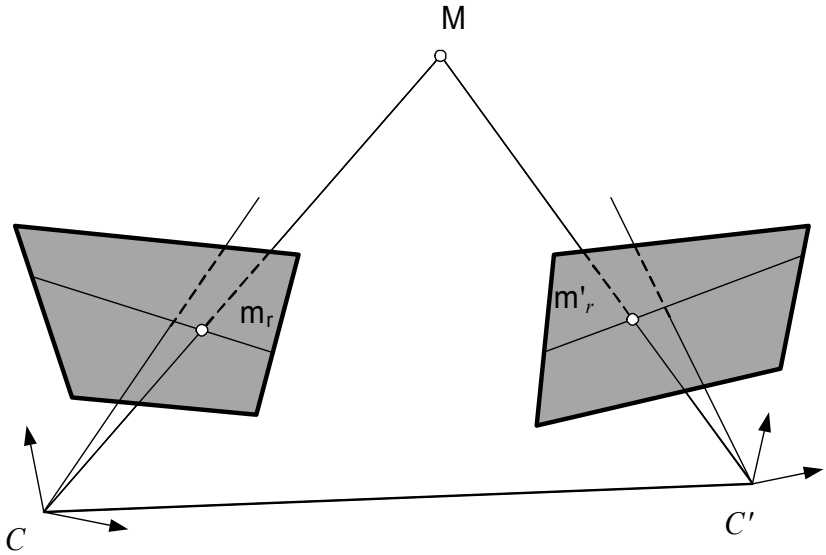


Fig. 2-24 The epipolar constraint reduces the mathing problem to a single scan along the epipolar line

보정 과정은 기본 행렬을 정의하기 위한 충분한 정보를 제공하기 때문에, 식 (2-64)는 일치점 $\widetilde{\mathrm{m}}'$이 위치하는 두 번째 카메라의 화상 평면에 있는 대응 선을 정의하기 위해 기준 화상($\widetilde{\mathrm{m}}$)에 있는 이미 알고 있는 점의 위치와 결합될 수 있다. 따라서, Fig. 2-24에서 보는 바와 같이, 일치점 $\widetilde{\mathrm{m}}'$을 위치시키기 위한 찾기 과정은 두 번째 카메라의 화상 평면에서 식 (2-63)에 의해 정의된 에피폴라 선을 따라서 제한된 영역에 한정된다.

스테레오비전 시스템의 보정을 위해 보통 두 가지 방법이 사용된다. 첫 번째 보정방법은 동일한 대상 패턴의 운동을 사용하는 스테레오비전 정렬에서 각각의 카메라를 독립적으로 보정하는 것이다. 그림 2-25에서 보는 바와 같이, 공통 격자 패턴의 스테레오 관측은 모든 카메라에 대해 공통 전체 좌표계를 정의하는데 사용될 수도 있다. 그럼으로써, 공통의 3차원 위치에 모든 카메라에 있는 화상 위치를 연결하기 위한 기초를 제공한다.

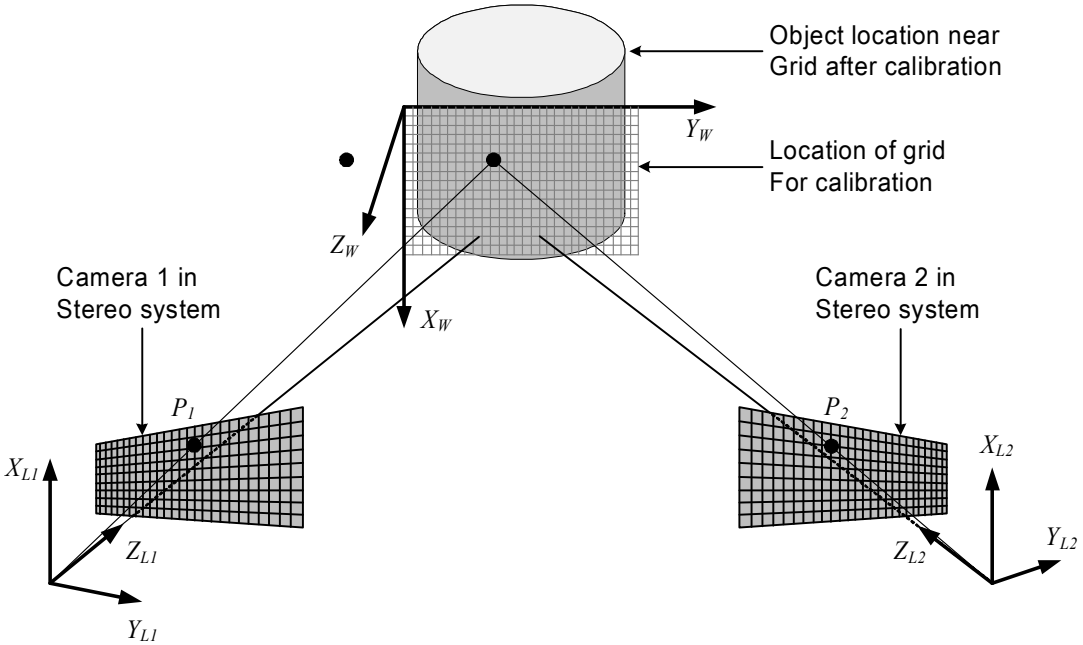


Fig. 2-25 Schematic of two camera stereo-vision system during imaging of a target grid

두 번째 보정방법은 두 개의 카메라를 단일 측정 시스템으로 간주하는 것이다. 보통 스테레오 시스템으로 알려진 이 시스템의 최적화 과정은 남은 카메라에 대한 임의로 선택된 카메라의 상대적인 방향과 위치를 결정하기 위해 수행된다.

4. 화상 일치 기법

화상 일치(image matching)는 많은 실제 활용에서 중요한 컴퓨터 비전 분야이다. 화상 일치는 산업적 가공 제어, 주차장에서의 자동 번호판 인식, 생물학적 성장 현상, 지질학적 매핑, 스테레오비전, 비디오 압축과 우주 탐사를 위한 자율 로봇 등의 분야에서 발생하는 문제를 해결하기 위해 사용된다. 활용분야가 매우 다양하기 때문에 사용에 있어서 많은 접근법과 알고리즘이 있다. 디지털 화상 상관법은 예외없이 알고리즘이 변형 과정에 기반으로 한 물리학을 채택하고 있다. 그러나 디지털 화상 상관법은 조금 독특하다. 공학분야 활용에서 종종 관심을 갖는 미소 운동으로

인해, 요구 해상도는 다른 대부분의 활용에 비해 보다 더 높다. 많은 공학 재료에 대한 응력-변형률 선도를 정확히 측정하기 위해, 10-5 m/m의 정도로 길이 변화를 측정해야 한다. 이러한 요구는 최소 시스템 오차를 갖는 높은 해상도를 제공하는 쪽을 대상으로 해서 많은 알고리즘의 개발이 이루어지고 있다.

가. 미분법

운동 예측 문제를 나타내기 위해, 그림 2-26에 나타낸 바와 같이 1차원 문제를 고려한다. $G(x,t)$를 시간의 함수로서 물체상의 세기 분포라고 할 때, 움직임이 매우 작다면 식 (2-64)와 같이 1차 테일러 급수 전개에 의해 관심있는 점 주변의 그레이(gray) 값을 근사할 수 있다.

$$G(x+\Delta x,t) = G(x,t) + \frac{\partial G}{\partial x}\Delta x \tag{2-64}$$

물체가 일정한 속도 $\dot{u}$로 움직인다면, 그레이 값은 시간 간격 Δt에서 $\Delta x = \dot{u}\Delta t$ 양만큼 표시되고, 시간 간격 Δt 이후의 그레이 값 분포는 원래 그레이 값 분포에서 미세하게 이동된다.

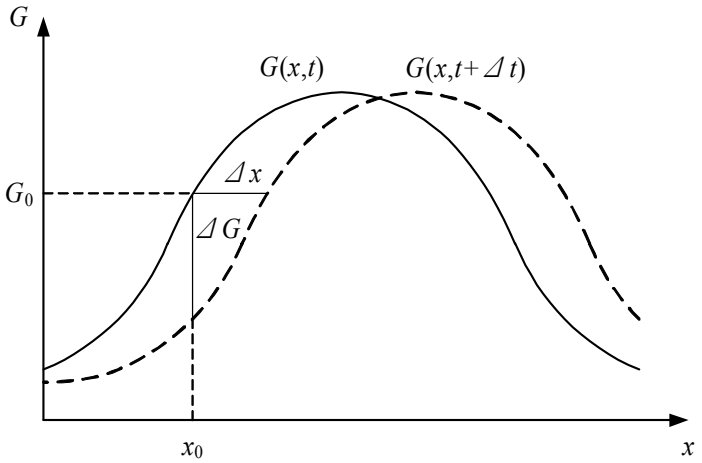


Fig. 2-26 Illustration of differential motion estimation for 1-D problem

$$\begin{aligned}\Delta G &= G(x,t+\Delta t) - G(x,t) \\ &= G(x-\dot{u}\Delta t,t) - G(x,t) \\ &= G(x-\Delta x,t) - G(x,t)\end{aligned} \tag{2-65}$$

식 (2-64)를 식(2-65)에 대입하면, 식 (2-66)과 같이 세기의 기울기 함수로써 그레이 값 ΔG로 변화를 나타낼 수 있다.

$$G(x,t+\Delta t)-G(x,t)=-\frac{\partial G}{\partial x}\Delta x \qquad (2\text{-}66)$$
$$\Delta G=-\frac{\partial G}{\partial x}\Delta x$$

또한, 움직임에 대한 추정값을 식 (2-67)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta x=-\frac{\Delta G}{\frac{\partial G}{\partial x}} \qquad (2\text{-}67)$$

미소 운동에 대해, 변위는 세기 패턴의 경사로 나눈 세기의 변화로 주어진다. $\Delta x=\dot{u}\Delta t$를 식 (2-67)에 대입하면, 식 (2-68)와 같이 속도에 대한 추정값을 구할 수 있다.

$$\dot{u}\Delta t=-\frac{\Delta G}{\frac{\partial G}{\partial x}} \qquad (2\text{-}68)$$

그리고, 극한 $\Delta t\rightarrow 0$을 취하여, 식 (2-69)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial G}{\partial t}+\dot{u}\frac{\partial G}{\partial x}=0 \qquad (2\text{-}69)$$

2차원 속도 $\mathbf{v}$에 대해, 테일러 급수 전개 $G(\mathbf{x}+\Delta\mathbf{x})=G(\mathbf{x})+\Delta\mathbf{x}\cdot\nabla\mathbf{G}$를 사용하는 동일한 유도가 사용되며, 식 (2-70)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\partial G}{\partial t}+\mathbf{v}\cdot\nabla G=0 \qquad (2\text{-}70)$$

이 식은 일반적으로 광학적 흐름에 대한 밝기 변화 구속방정식으로 알려져 있으

며, 지난 수 십년에 걸쳐 큰 물체에 대한 연구에 대한 중심축을 이루었다. 분산의 경우에 대해 식 (2-70)을 다시 써서 화상 간의 시간 간격을을 곱하여 식 (2-71)를 얻을 수 있다.

$$\boldsymbol{\Delta}\mathbf{x} \cdot \nabla G = -\Delta G \tag{2-71}$$

식 (2-71)로부터, 추가적인 정보가 없으면 2차원 운동을 알아내기가 불가능함을 알 수 있다. 만일 세기 구배가 0이면, 움직임은 전혀 결정될 수 없다. 그러나 세기 구배가 0이라 하더라도, 식 (2-71)는 두 개의 미지수를 갖는 한 개의 방정식을 제시한다. 내적 $\boldsymbol{\Delta}\mathbf{x} \cdot \nabla G$는 국부 그레이 값의 구배 방향으로 향하는 $\boldsymbol{\Delta}\mathbf{x}$의 요소, 즉, 국부 가장자리에 수직하는 요소 $\Delta_{\perp}$을 곱한 구배의 크기로써 쓸 수 있기 때문에, 식 (2-72)과 같이 국부 그레이 값의 가장자리에 대해 수직한 움직임을 해결할 수 있다.

$$\Delta_{\perp} = -\Delta G / |\Delta G| \tag{2-72}$$

조리개 문제를 수학적으로 표현하는 것이 한계이지만, 이것은 한 점을 이용하는 대신 이웃하는 점들 즉 화상의 정사각형 세트를 이용함으로써 해결될 수 있다. 움직임이 이웃하는 점들에서 대략적으로 일정하다고 가정하면, 관심 있는 점 근처에 있는 N개의 점의 집합에 대해 식 (2-71)를 식 (2-73)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \dfrac{\partial G^1}{\partial x} & \dfrac{\partial G^1}{\partial y} \\ \dfrac{\partial G^2}{\partial x} & \dfrac{\partial G^2}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \dfrac{\partial G^N}{\partial x} & \dfrac{\partial G^N}{\partial y} \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \overline{x} \\ \Delta \overline{y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta G^1 \\ \Delta G^2 \\ \vdots \\ \Delta G^N \end{bmatrix} \tag{2-73}$$

두 개 이상의 점에 대해, 이것은 식 (2-74)로 주어진 형식의 과도하게 정해진 방정식 시스템이다.

$$\mathrm{G}\Delta\bar{\mathrm{x}}=-\mathrm{g} \tag{2-74}$$

식 (2-75)에 의해 최소자승법으로 평균 움직임에 대해 식 (2-75)를 풀 수 있다.

$$\Delta\bar{\mathrm{x}}=-(\mathrm{G}^{T}\mathrm{G})^{-1}\mathrm{G}^{T}\mathrm{g} \tag{2-75}$$

식 (2-75)은 식 (2-76)과 같은 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\Delta\bar{x}\\ \Delta\bar{y}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 & \sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\frac{\partial G}{\partial y}\right)\\ \sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\frac{\partial G}{\partial y}\right) & \sum\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}\sum\frac{\partial G}{\partial x}\Delta g\\ \sum\frac{\partial G}{\partial y}\Delta g\end{bmatrix} \tag{2-76}$$

식 (2-75)과 식 (2-76)은 행렬 $\mathrm{G}^{T}\mathrm{G}$가 특이행렬이 아닌 한, 움직임은 추정될 수 있다는 것을 보여준다. 즉, 식 (2-77)로 나타낼 수 있다.

$$\det(\mathrm{G}^{T}\mathrm{G})=\sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2\sum\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2-\sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2\neq 0 \tag{2-77}$$

식 (2-77)은 모든 그레이 값의 미분이 반드시 0이 되는 것은 아니라는 것을 의미한다. 달리 말하면, 일정한 그레이 값을 갖는 영역에서는 움직임을 추정하는 것이 불가능하다. 더욱이, 만일 모든 그레이 값의 구배가 동일한 방향으로 정렬된다면 행렬식 역시 사라진다. 이 경우, 두 좌표 방향에서의 편미분은 상수 인자에 연관되며, 식 (2-76)에서 행렬식이 사라진다는 것을 보여주고 있음을 알 수 있다.

나. 템플릿 일치법

한 개의 화상(템플릿)으로부터 작은 점의 집합과 다른 화상에서 변위가 발생한 것 사이의 그레이 값의 차이를 최소화 하는 것에 기초한 움직임 추정법을 유도할 수 있다. 두 개의 화상 사이에 아무런 빛의 변화도 일어나지 않는다고 가정한다. 즉, 템플릿과 변위가 일어난 것은 가우시안 분포의 무작위 잡음에 의한 차이만 있다고 가정한다. F로 주어지는 템플릿으로부터 기준 화상을 나타내고 G에 의해 변

위 발생 후의 화상을 나타낸다. 이웃하는 점의 집합에 대해 편차제곱합(sum of squares deviation, SSD)으로 알려진 그레이 값에서 제곱한 차이를 최소화를 수행하면 식 (2-78)를 구할 수 있다.

$$\bar{\mathbf{d}}_{\mathrm{opt}} = \arg\min \sum |G(\mathbf{x}+\bar{\mathbf{d}}) - F(\mathbf{x})|^2 \tag{2-78}$$

최적 변위 벡터 $\bar{\mathbf{d}}_{\mathrm{opt}}$에 대해 풀기 위해, 식 (2-79)과 같이 함수에 1차 테일러 급수 전개에 의한 단순 반복 알고리즘을 사용할 수 있다.

$$\chi^2(\bar{d}_x + \Delta_x, \bar{d}_y + \Delta_y) = \sum \left| G(\mathbf{x}+\bar{\mathbf{d}}) - \frac{\partial G}{\partial x}\Delta_x - \frac{\partial G}{\partial y}\Delta_y - F(\mathbf{x}) \right|^2 \tag{2-79}$$

여기서, $\bar{d}_x$와 $\bar{d}_y$는 작은 점의 집합(subset)의 평균 움직임에 대한 현재의 추정값이며, Δ_x와 Δ_y는 현재의 반복에서 본 업데이트하는 움직임의 증분이다. Δ_x와 Δ_y에 대해 식 (2-79)의 편미분을 취하고 그들을 0으로 설정하면 각 반복에서 업데이트하는 증분에 대해 식 (2-80)의 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 & \sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\frac{\partial G}{\partial y}\right) \\ \sum\left(\frac{\partial G}{\partial x}\frac{\partial G}{\partial y}\right) & \sum\left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial G}{\partial x}(F-G) \\ \sum \frac{\partial G}{\partial y}(F-G) \end{bmatrix} \tag{2-80}$$

식 (2-01)은 최적 변위 벡터 $\bar{\mathbf{d}}_{\mathrm{opt}}$에 대해 수렴될 때까지 $\bar{\mathbf{d}}^{p+1} = \bar{\mathbf{d}}^{p} + \boldsymbol{\Delta}$를 사용한 p번째 반복에서 평균 움직임에 대한 추정을 반복적으로 향상시키는데 사용될 수 있다. 이 반복적 화상 정합 기술(image registration technique)은 Lucas-Kanade 추적 알고리즘으로 잘 알려져 있다. Lucas-Kanade 추적은 미분법에서 유도한 미분 움직임 추정 방법의 연장이라 할 수 있다. 식 (2-76)과 식 (2-80)의 비교를 통해 알 수 있듯이, 미분법적 접근은 초기 움직임 추정이 0에 대해 도출된 Lucas-Kanade 방법의 단일 반복과 동일하다. 그러나 Lucas-Kanade 알고리즘은 작은 운동 벡터에 국한되지 않고 초기 추정이 방법의 수렴 반경 내에 있는 동안 임의로 큰 운동을 발견할 수 있다.

제 3 장 실험 장치 및 방법

제1절 시험편

직관 모사시험편에 인공 감육결함을 가공하여 결함의 종류에 따라 결함의 축방향 길이와 원주방향 길이를 예측하기 위해 ASTM A106 Gr.B 재질의 직관 모사시험편 을 만들어 결함을 측정 하였다. 결함의 종류는 총 3세트 12가지이며 결함을 가공하지 않은 정상적인 직관에 대해 압력차의 변화에 따른 결과를 기준 자료로 하여 실험을 행하였다. A106 Gr.B 관은 이음매가 없는 탄소강 파이프 재질이며, 항복강도는 240 MPa, 인장강도는 415 MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. 직관 내부에 감육결함을 가공할 때 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하고자 하였으나 가공시 정확한 가공이 어려워 축방향으로는 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하였고 원주방향으로는 공구의 직경에 해당하는 곡률반경 250 mm를 갖는 형상으로 가공하였다.

결함의 종류는 크게 결함의 최소두께(tp)별, 결함의 폭별, 결함의 길이별로 각각 4개의 시험편을 가공하여 실험하였다. 직관은 내부 표면과 외부 표면을 정밀가공하여 두께를 7.2 mm가 되도록 하였음. 결함의 최소두께는 ASME에서 규정하고있는 관 두께의 87.5%(7t/8)를 유효 두께로 하여 7t/8인 6,3 mm, 6t/8인 5.4 mm, 4t/8인 3.6 mm, 2t/8인 1.8 mm로 선정하여 가공하였다. 결함의 폭은 최소두께를 1.8 mm로 가공하고, 여기에 폭이 45°, 90°, 135°, 180°가 되도록 가공하였다. 또한 결함의 길이는 최소두께를 1.8 mm로, 결함 폭을 90°로 가공하고, 여기에 길이가 직관의 직경을 기준으로 L/D0가 0.5(56.7 mm), 1(113.4 mm), 1.5(170.1 mm), 2(226.8 mm)가 되도록 가공하였다. Table 3-1 에 사용된 시험편의 종류 및 스펙을 나타내었다. Fig. 3-1 은 제작된 시험편의 도면으로 Tabel 3-1 과 참조하면 된다.

Table 3-1. Specimen type of wall thinned pipe

1. No defect

ID No.	Defect length (L/Do)	Defect width (2θ)	Minimum thickness tp (mm)
SSP-0A	0.00	0°	7.2

2. Specimen type by minimum thickness of defect

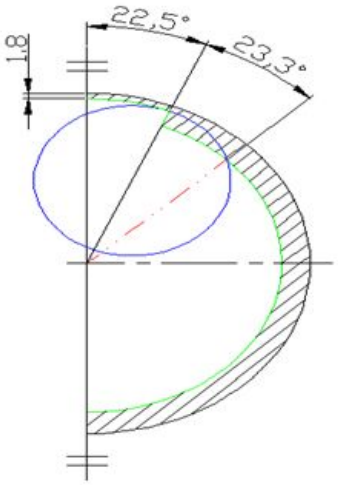
ID No.	Defect length (L/Do)	Defect width (2θ)	Minimum thickness tp (mm)
SSP-2E	1.00	90°	6.3
SSP-2F	1.00	90°	5.4
SSP-2G	1.00	90°	3.6
SSP-2H	1.00	90°	1.8

3. Specimen type by width of defect

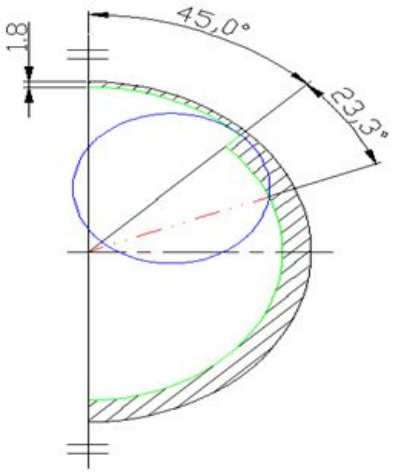
ID No.	Defect length (L/Do)	Defect width (2θ)	Minimum thickness tp (mm)
SSP-2D	1.00	45°	1.8
SSP-2H	1.00	90°	1.8
SSP-2L	1.00	135°	1.8
SSP-2P	1.00	180°	1.8

4. Specimen type by length of defect

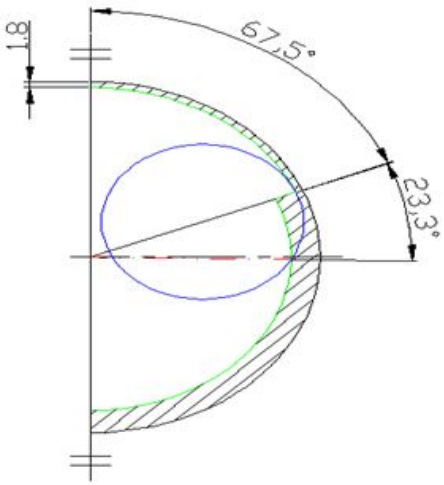
ID No.	Defect length (L/Do)	Defect width (2θ)	Minimum thickness tp (mm)
SSP-1H	0.50	90°	1.8
SSP-2H	1.00	90°	1.8
SSP-3H	1.50	90°	1.8
SSP-4H	2.00	90°	1.8



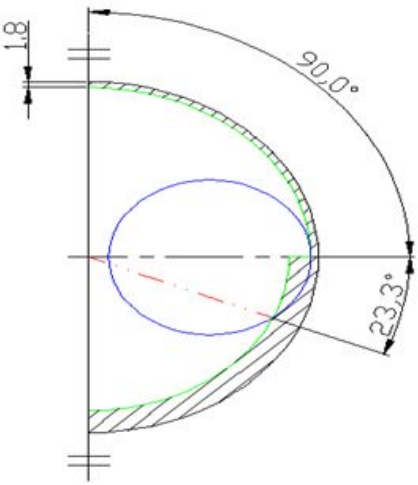
SSP-2D



SSP-2H

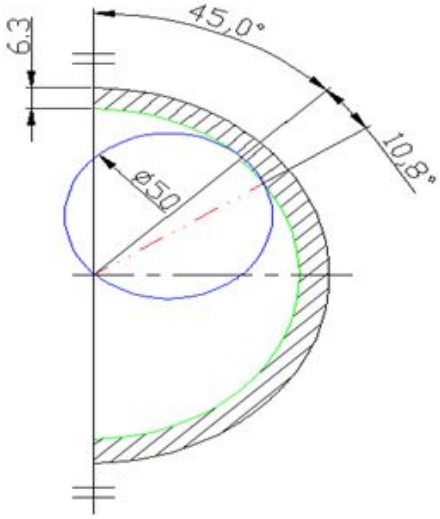


SSP-2L

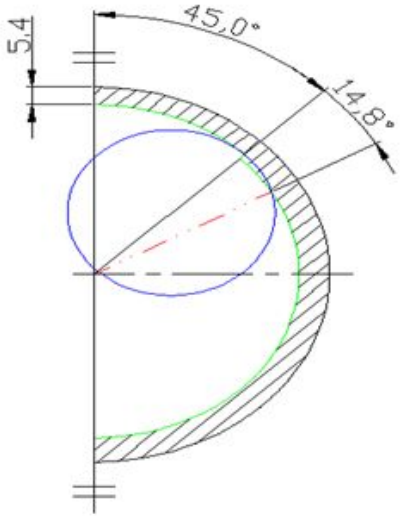


SSP-2P

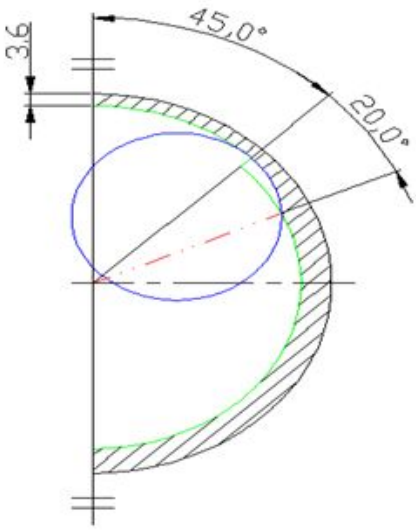
Fig. 3-1 Shape of artificial wall thinned defect (A)



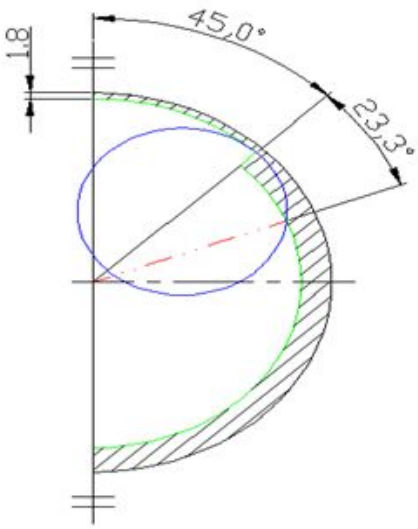
SSP-2E



SSP-2F



SSP-2G



SSP-1H, 2H, 3H, 4H

Fig. 3-2 Shape of artificial wall thinned defect (B)

제2절 실험장치 및 실험방법

1. SSI 시스템

전단간섭시스템은 독일 DANTEC DYNAMICS 사의 상용 Shearography 시스템(Q-800HR model)을 이용하였으며, 구성은 Fig. 3-3 과 같이 Shearography 센서, 센서 내부에 장착된 Diode laser, Controller, PC로 구성이 되어 있다. System 의 모습은 Photo 3-1 에 나타내었으며, System은 상용 프로그램 ISTRA 4D를 이용하여 장치의 제어와 필터링과 결편침을 수행한다.

레이저는 Diode laser (출력: 50 mW, 파장: 780 nm)를 사용하며, 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 Diode을 통해 확산된 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사된다. 전단량과 전단방향은 센서 내부의 모터를 ISTRA 4D 프로그램을 이용하여 전단 각도와 픽셀을 설정하여 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 해석함으로서 상대변위량를 얻게 된다. Table 3-2에는 Shearogrphy 시스템의 사양을 나타내었다.

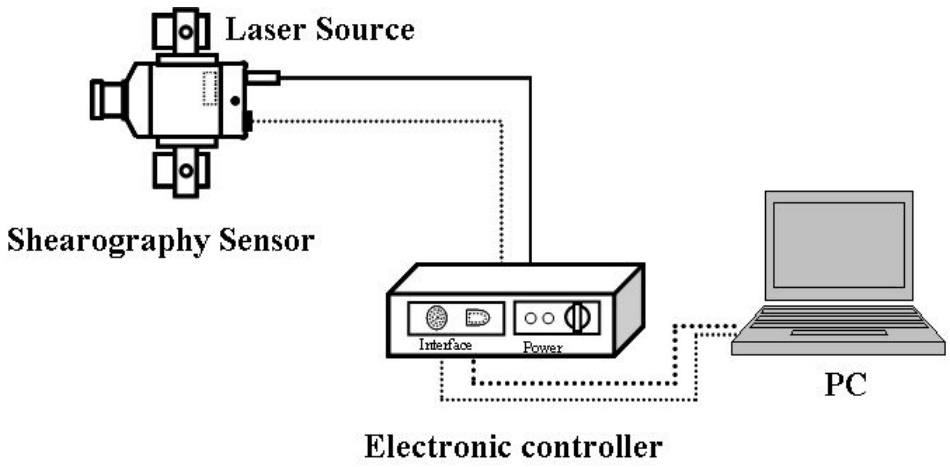


Fig. 3-3 Configuration of shearography system

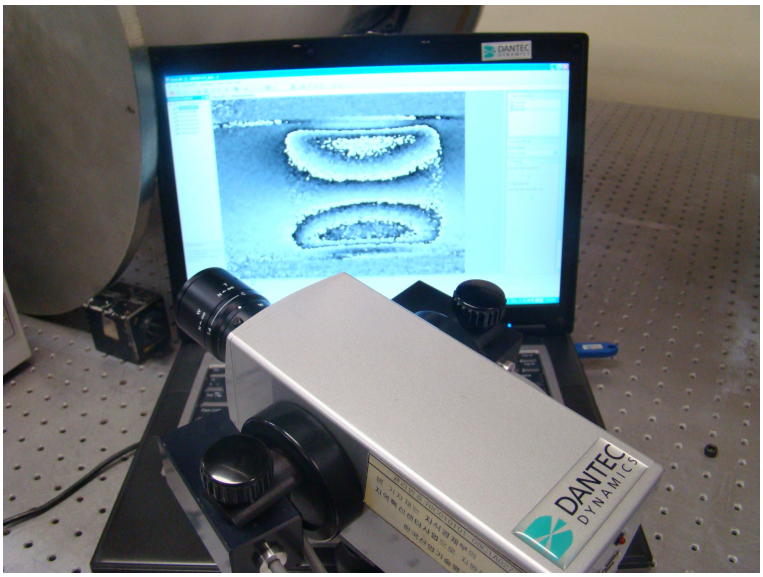


Photo 3-1 Shearography system

Table 3-2 Specification of Shearography system

Description	Technical 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 x 0.8 m^2 (with external laser)
Meauring resolution	according to illumination arm, distance and wave length: 0.03 μm/shear distance
Sensor head dimension	W×H×D = 70×70×160 mm^3
Laser (Built-in)	Diode 50 mW, 780 nm

2. DIC 시스템

DIC시스템은 독일 Gom사의 상용 ARAMIS 시스템(ARAMIS v6.1 and higher)을 이용하였으며 Photo 3-2 , 구성은 Photo 3-3 과 같이 ARAMIS 17mm CCD 카메라가 레이저 포인트를 중심으로 좌·우에 위치하고 있으며 센서 외부에 장착된 laser, ARAMIS Control PC로 구성이 되어 있다. System은 상용 프로그램 inux를 이용하여 이미지를 촬영하고 장치의 제어와 필터링을 수행한다. 레이저는 물체의 초점을 맞추기 위해 좌·우 CCD 카메라 중에 위치하였으며, 센서 중앙의 부착된 레이저 포인트를 통해 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사한다. 레이저의 초점을 중앙에 맞춘 상태에서 좌·우 CCD 카메라에서 측정대상물에 이미지를 입력한다. 이 이미지를 제어 PC를 통해서 Control하여 측정한다. System은 변형전 처음 이미지를 시작으로 변형후의 이미지의 변화를 추적하여 해석함으로서 상대변위량을 얻을 수 있다. 본 시스템의 제어를 담당하는 Control box 는 Photo 3-4 과 같다.

Photo 3-2 A Picture of Aramais System

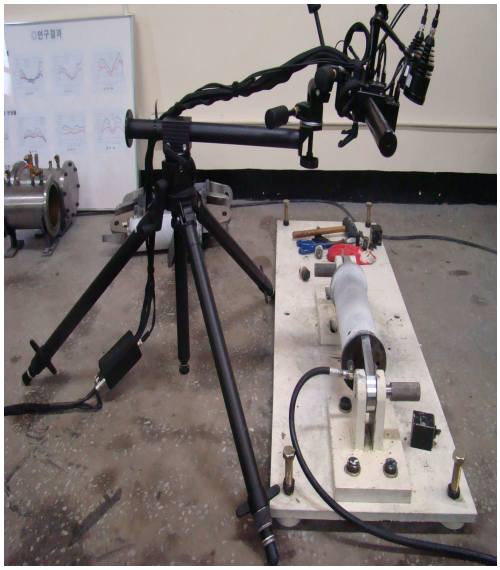


Photo 3-3 Aramais CCD camra

Photo 3-4 Aramais control box

제3절 실험방법

1. SSI 시스템을 이용한 실험

압력파이프는 발전설비의 70~80%를 구성하는 구조물로서 유속에 의한 감육(Thinning)결함이 발생 할 수 있으며, 결함의 크기와 배관 두께의 정밀 정량 측정이 설비의 안전평가에 매우 중요한 요소이다. 현재 전단간섭법은 배관 등 내부에 존재하는 결함의 측정에 가장 많이 적용되나 측정결과의 정량성과 신뢰성의 문제를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 내부에 임의의 감육결함을 가공한 원자력 배관 모사 압력용기를 제작하여 내부 압력 변화에 따른 결함부의 변형을 전단간섭법을 이용하여 측정화하고 이를 ARAMIS를 이용한여 비교하였다. 시험편 재질은 ASTM A106 Gr.B로써 항복강도는 240 MPa, 길이방향 연신률은 30%이며, 내부 감육결함의 원주방향 경계부를 곡선 가공하였다. 또, 시험편을 고정하기 위해 Bed를 제작하였으며, 내압을 가하기 위해 유압잭의 작동 및 밸브 개방 방식으로 가압과 감압을 조절할 수 있는 유압식 수동 가압장치를 제작하였다. 아래 그림은 시험편과 압력조절장치를 나타내며, 실험장치의 전체적인 구성은 Photo 3-2 와 같다.

Photo 3-3 은 직관 모사시험편에 대한 실험을 위한 시스템 설치와 가압장치를 나타냈다. 정밀한 압력 제어를 위해 정밀 압력게이지를 부착하여 제어하였다.

압력 게이지를 이용하여 시험편에 압력을 주어서 압력의 변화에 따른 시험편의 변화를 SSI 시스템을 이용하여 측정하였다.

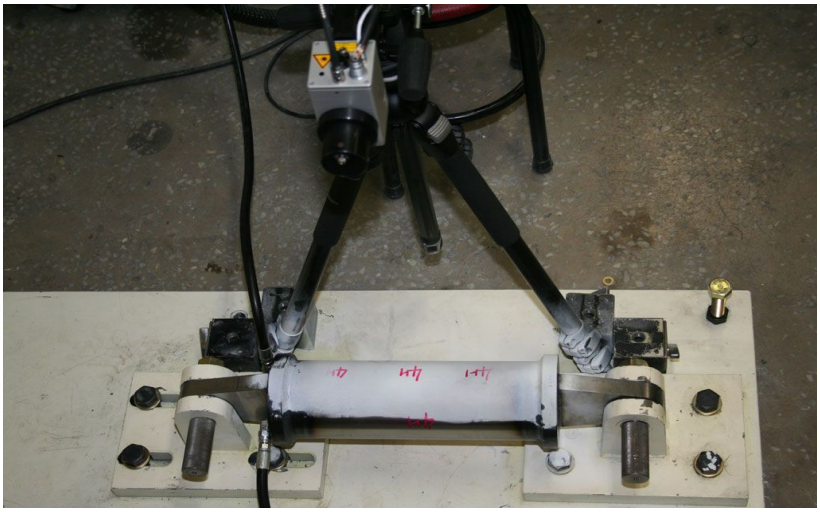


Photo 3-2. Experiment setup by SSI System

Photo 3-3. Pressure Pump & Gage

2. DIC 시스템을 이용한 실험

시험편 재질은 ASTM A106 Gr.B로써 항복강도는 240 MPa, 길이방향 연신률은 30%이며, 내부 감육결함의 원주방향 경계부를 곡선 가공하였다. 또, 시험편을 고정하기 위해 Bed를 제작하였으며, 내압을 가하기 위해 유압잭의 작동 및 밸브 개방 방식으로 가압과 감압을 조절할 수 있는 유압식 수동 가압장치를 제작하였다. Photo 3-7 실험장치의 전체적인 구성을 나타냈고 시험편과 압력조절장치를 Photo 3-8 에 나타냈다. . 직관 모사시험편에 대한 실험을 위한 시스템 설치와 가압장치를 나타냈다. 정밀한 압력 제어를 위해 정밀 압력게이지를 부착하여 제어하였다. 압력 게이지를 이용하여 시험편에 압력을 주어서 압력의 변화에 따른 시험편의 변화를 DCI 시스템을 이용하여 측정하였다.

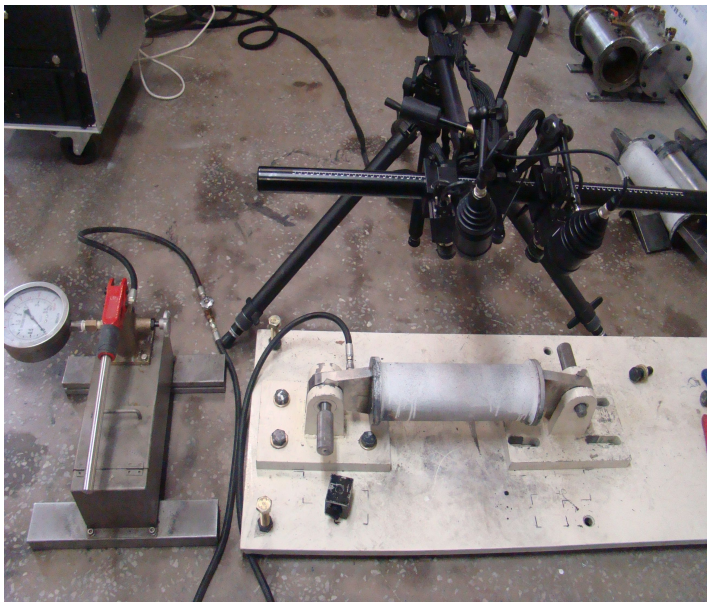


Photo 3-7 Experiment Setup by DCI System on Straight Pipe Specimen

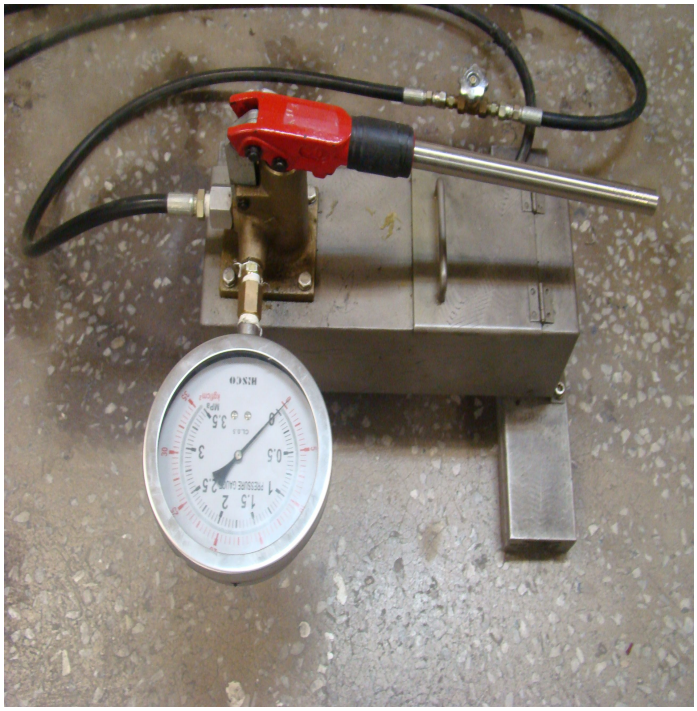


Photo 3-8 Pressure Pump & Gage

제 4 장 실험 결과 및 고찰

제1절 SSI를 이용한 감육결함 측정

1. 결함 최소 두께별 감육결함부 변형 측정

무결함 직관 시험편에 대한 실험을 수행하여 기준 데이터를 획득하였다. 축방향 측정 실험에서는 압력의 요동으로 인한 직관의 내부 표면에 왜란이 발생하여 0.1 ㎛ 정도의 아주 미세한 떨림만 발생하였다. 원주방향으로는 압력차가 증가함에 따라 관의 직경이 늘어남을 알 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 축방향과 원주방향에 대한 결함 크기 측정 실험으로 기준 데이터를 확보하고 이 결과를 이용하여 각 결함 조건별 측정결과와 비교하였다.

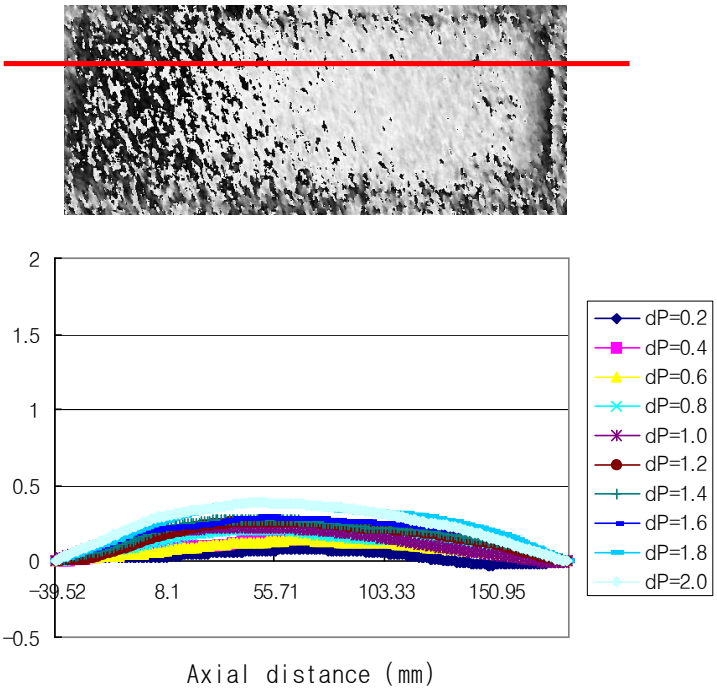


Fig. 4-1 Result of deformation measurement experiment for specimen with no defect, SSP-0A (shear amount in the axial direction: 10 mm)

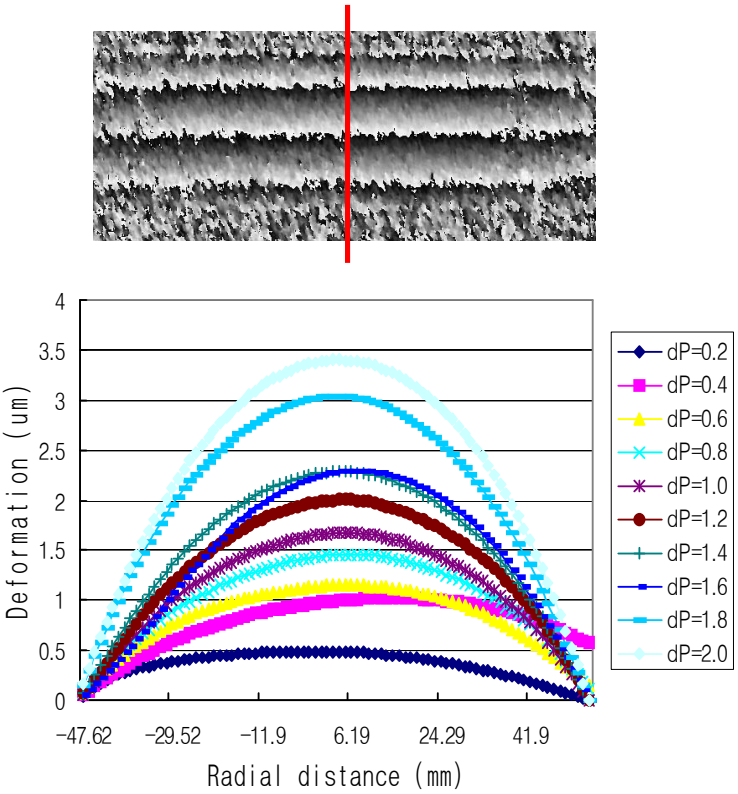


Fig. 4-2 Result of deformation measurement experiment for specimen with no defect, SSP-0A (shear amount in the radial direction: 10 mm)

Fig. 4-1과 Fig. 4-2에 무결함 시험편인 SSP-0A 시험편에 대한 측정결과를 나타냈다. Fig. 4-1은 축방향인 x 방향으로 10 pixel 전단량을 주었을 때의 측정결과이며, Fig. 4-2는 원주방향인 y 방향으로 10 pixel 전단량을 주었을 때의 측정결과를 나타냈다.

결함 최소두께(tp)가 7t/8인 6.3 mm 두께의 SSP-2E 시험편에 대한 측정결과를 그림 Fig. 4-3과 Fig. 4-4에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 감육결함부의 영향이 압력차 0.4 MPa일 때부터 두드러지게 나타나며, 점차 압력차가 증가할수록 감육결함부가 확실히 드러남을 알 수 있었다.

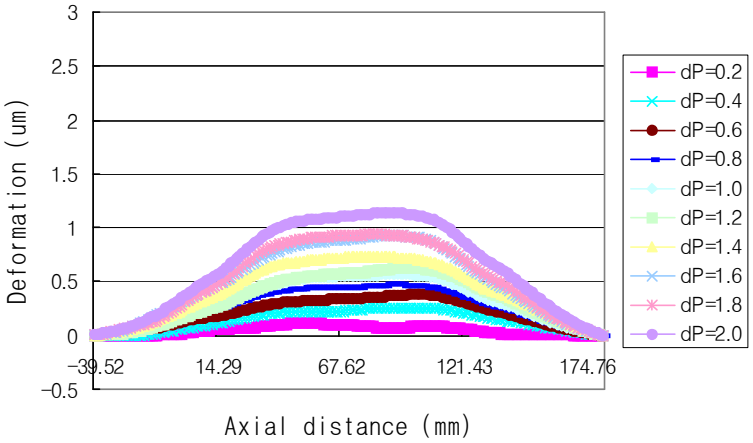


Fig. 4-3 Result of deformation measurement experiment for SSP-2E with t_p=6.3 mm (shear amount in the axial direction: 10 mm)

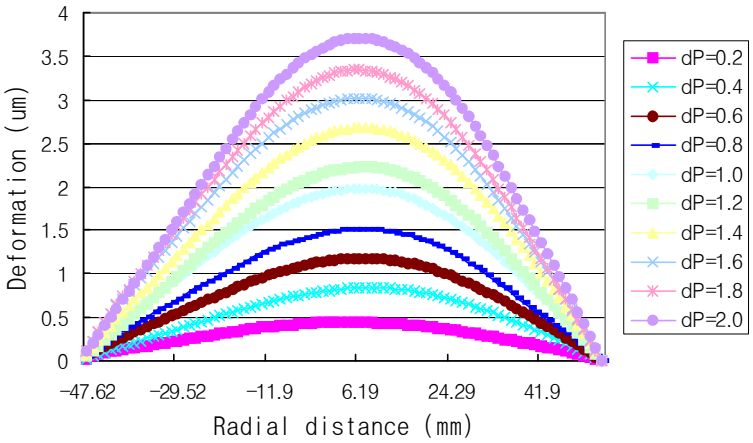


Fig. 4-4 Result of deformation measurement experiment for SSP-2E with t_p=6.3 mm (shear amount in the radial direction: 10 mm)

SSP-2F 시험편(tp=5.4 mm)과 SSP-2G 시험편(tp=3.6 mm), SSP-2H 시험편(tp=1.8 mm)의 결과를 Fig. 4-5 ~ Fig. 4-10에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 결함 최소두께가 줄어들면 압력차에 의한 감육결함부의 형상이 명확해지고 원주방향에서의 감육결함의 영향이 나타나기 시작했다. 이때 축방향 결함의 길이는 72 mm로 측정되었으며 원

주방향의 결함 길이는 측정이 불가능하였다.

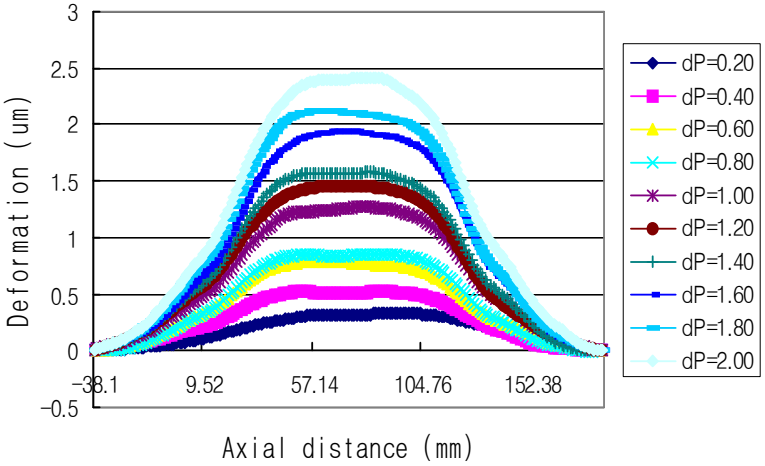


Fig. 4-5 Result of deformation measurement experiment for SSP-2F with t_p=5.4 mm (shear amount in the axial direction: 10 mm)

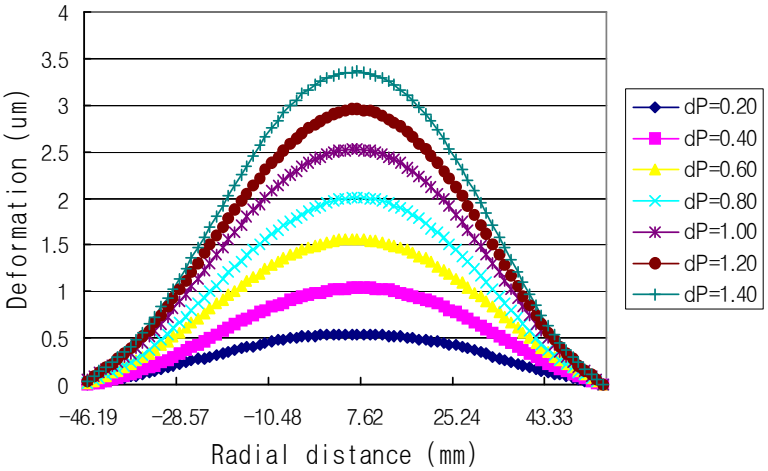


Fig. 4-6 Result of deformation measurement experiment for SSP-2F with t_p=5.4 mm (shear amount in the radial direction: 10 mm)

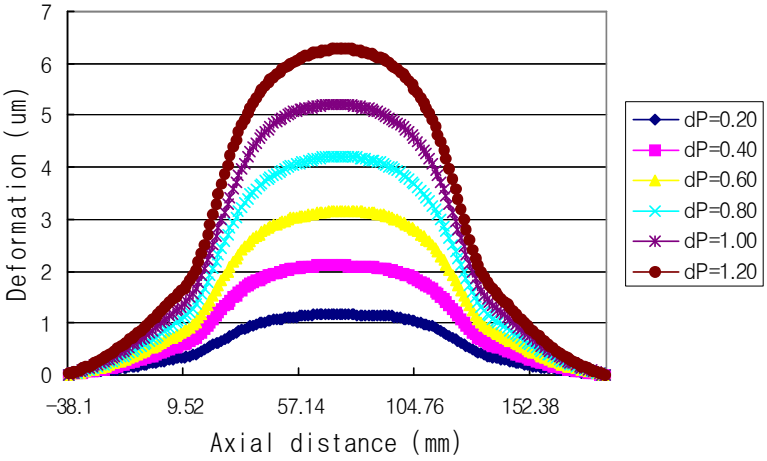


Fig. 4-7 Result of deformation measurement experiment for SSP-2G with t_p=3.6 mm (shear amount in the axial direction: 10 mm)

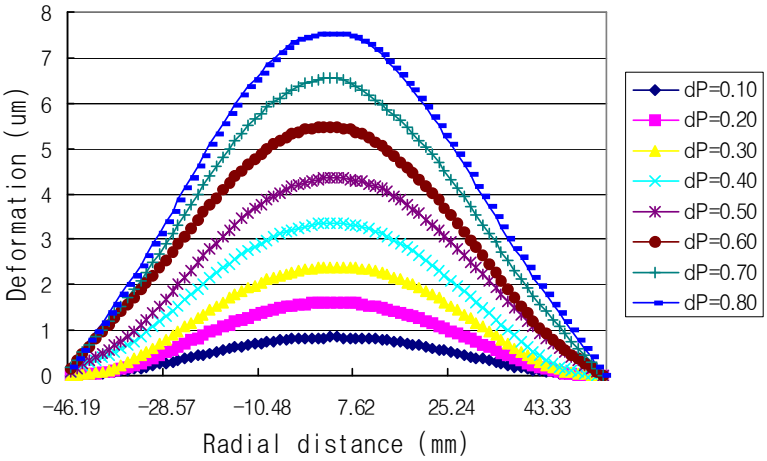


Fig. 4-8 Result of deformation measurement experiment for SSP-2G with t_p=3.6 mm (shear amount in the radial direction: 10 mm)

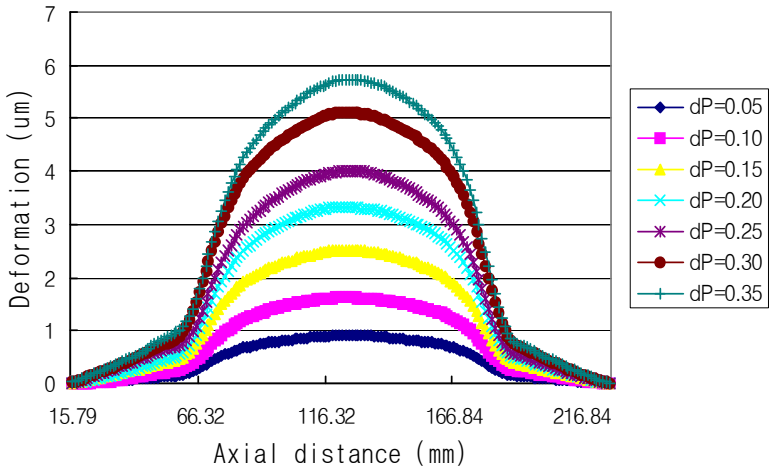


Fig. 4-9 Result of deformation measurement experiment for SSP-2H with t_p=1.8 mm (shear amount in the axial direction: 10 mm)

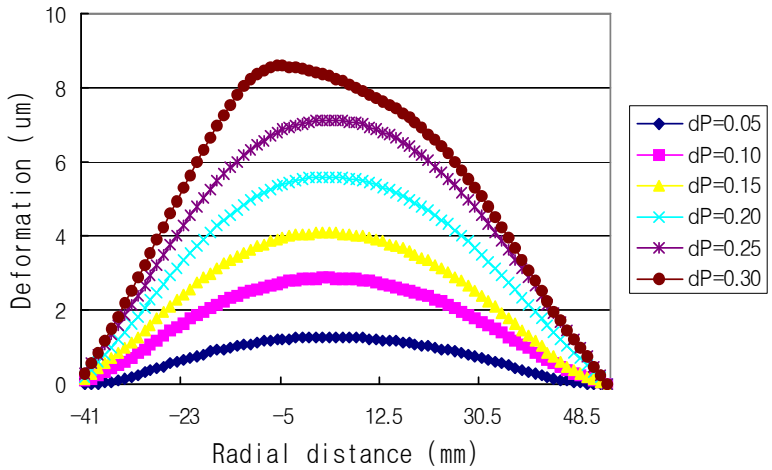


Fig. 4-10 Result of deformation measurement experiment for SSP-2H with t_p=1.8 mm (shear amount in the radial direction: 10 mm)

Table 4-1 Error between real size of wall thinned defect and measured size by SSI experiment according to the minimum thickness of a defect

Item \ Specimen No.	SSP-2E	SSP-2F	SSP-2G	SSP-2H	Real size
SSI (mm)	72	78	120	132	(113.4)
Error (%)	-36.5	-31.2	5.8	16.4	0

SSP-2F 시험편의 축방향 결함 길이는 78 mm, SSP-2G 시험편에서는 120 mm, SSP-2H 시험편에서는 132 mm로 각각 측정되었다. 실제 결함의 길이가 113.4 mm 이므로 측정값과 실제값의 사이에 큰 오차가 발생하였다. 각 시험편에 대해 측정된 결함의 크기와 오차를 Table 4-1에 비교하여 표시하였다.

측정 결과로부터 최소 두께가 비교적 두꺼운 직관의 결함 크기를 명확하게 알기 위해서는 보다 더 큰 압력차를 이용하여 변형을 주어야 하며, 최소 두께가 얇을 경우 적은 압력차에서도 결함의 크기가 실제보다 더 크게 측정되므로 최소 두께와 직관의 형상, 압력차의 상관관계를 명확히 알 필요가 있다.

2. 결함 폭별 감육결함부 변형 측정

결함 폭에 따른 결함 크기 측정 실험은 최소 두께에 따른 결함 크기 측정 실험과 유사하게 진행되었다. 결함 폭에 따른 실험 결과는 최소 두께별 실험 결과와는 많은 차이를 보이고 있다.

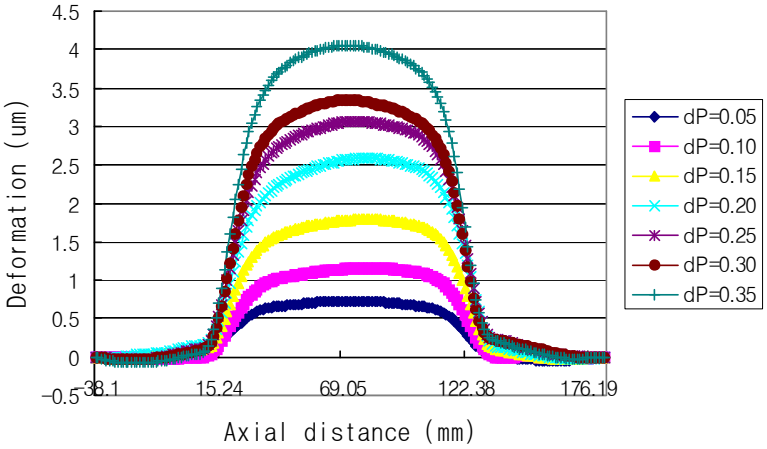


Fig. 4-11 Result of deformation measurement experiment for SSP-2D with 2Θ =45°(shear amount in the axial direction: 10 mm)

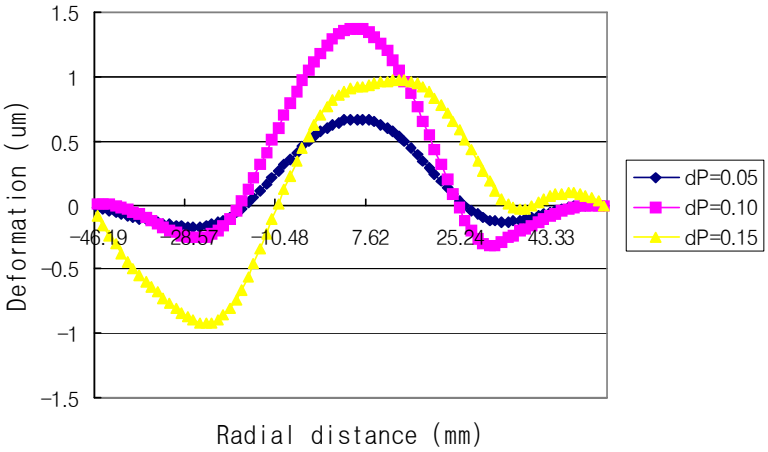


Fig. 4-12 Result of deformation measurement experiment for SSP-2D with 2Θ =45°(shear amount in the radial direction: 10 mm)

최소 두께별 실험에서는 두께가 얇아지더라도 원주방향으로 변형의 정도만 커지는 상태였으나 결함 폭에 따른 실험 결과는 압력이 많이 걸리는 감육결함부에서 특이 패턴이 나타나기도 하였다.

Fig. 4-11 ~ Fig. 4-16에 SSP-2D(2Θ=45°), SSP-2L(2Θ=135°), SSP-2P(2Θ=180°) 시험편에 대한 측정 결과를 나타냈다.

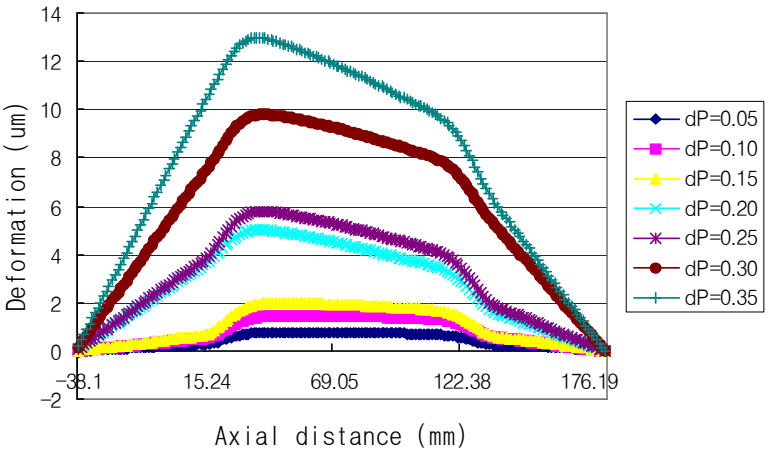


Fig. 4-13 Result of deformation measurement experiment for SSP-2L with 2Θ =135°(shear amount in the axial direction: 10 mm)

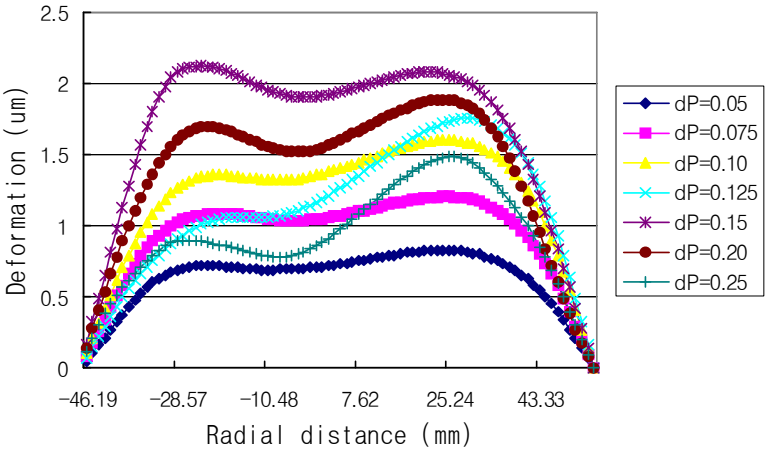


Fig. 4-14 Result of deformation measurement experiment for SSP-2L with 2Θ =135°(shear amount in the axial direction: 10 mm)

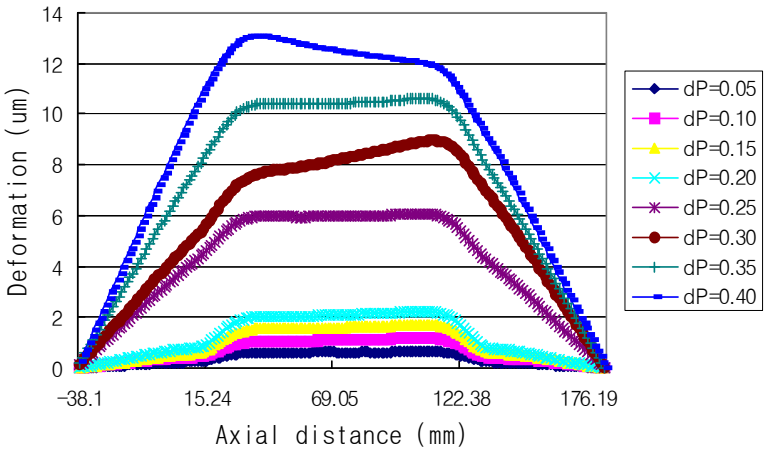


Fig. 4-15 Result of deformation measurement experiment for SSP-2P with 2Θ =180°(shear amount in the axial direction: 10 mm)

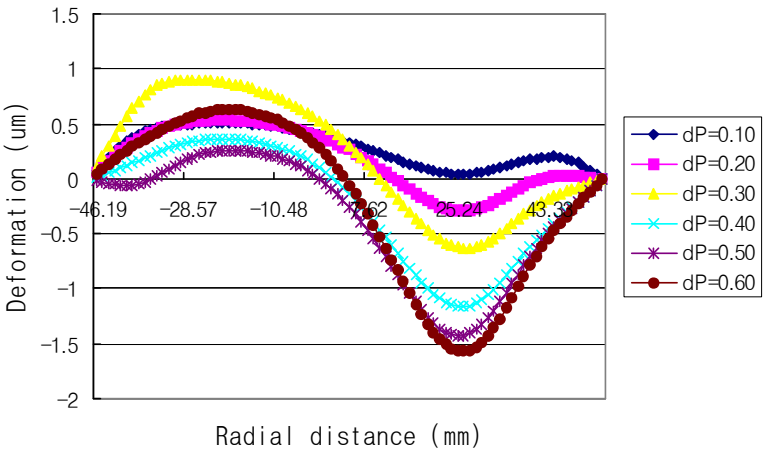


Fig. 4-16 Result of deformation measurement experiment for SSP-2P with 2Θ =180°(shear amount in the axial direction: 10 mm)

SSP-2D 시험편에 대한 결과로부터 결함 폭이 좁을수록 결함부에 집중적으로 변형이 발생되고 있음을 알 수 있었으며, 결함 폭이 넓어짐에 따라 일반 평판의 변형과 같은 형태의 변형이 발생하게 됨을 확인하였다. 축방향 결함 길이는 폭의 변화와는 무관하게 100 mm 정도로 일정하게 측정됨을 확인하였다.

3. 결함 길이별 감육결함부 변형 측정

결함 길이에 따른 감육결함의 크기 측정 실험 결과로부터 결함의 길이를 정확하게 측정할 수 있음이 확인되었으며, 원주방향 결함 크기는 결함의 길이에 따라 조금씩 다른 패턴을 보이고 있음을 확인하였다.

Fig. 4-17 ~ Fig. 4-22에 SSP-1H(L/D_0=0.5), SSP-3H(L/D_0=1.5), SSP-4H(L/D_0=2.0) 시험편에 대한 결과를 나타냈다.

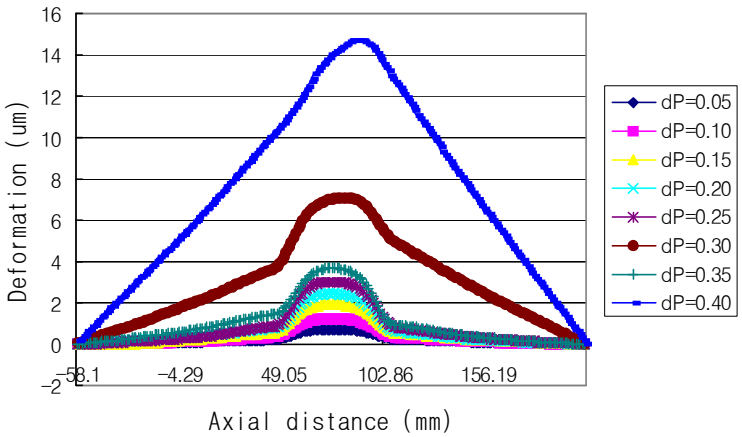


Fig. 4-17 Result of deformation measurement experiment for SSP-1H with L/D_0=0.5 (shear amount in the axial direction: 10 mm)

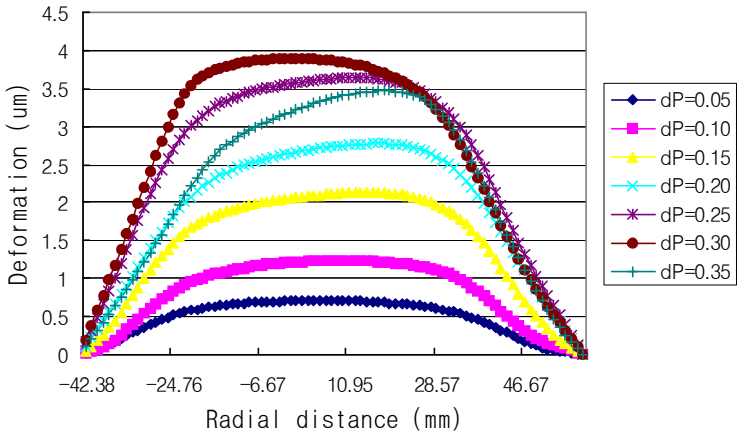


Fig. 4-18 Result of deformation measurement experiment for SSP-1H with L/D_0=0.5 (shear amount in the radial direction: 10 mm)

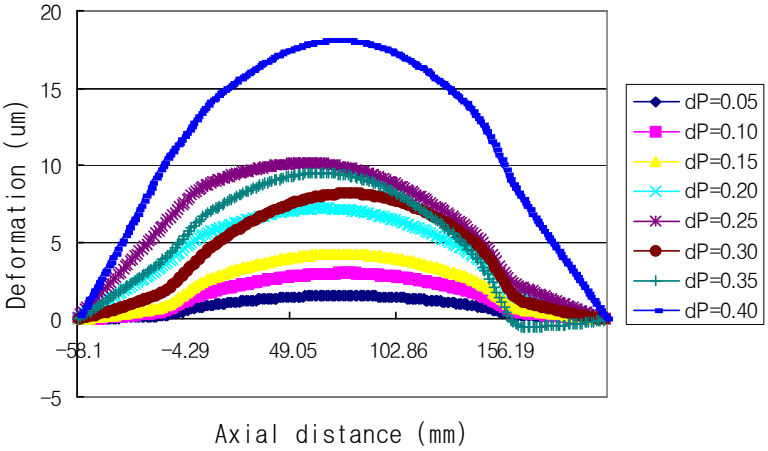


Fig. 4-19 Result of deformation measurement experiment for SSP-3H with L/D_0=1.5 (shear amount in the axial direction: 10 mm)

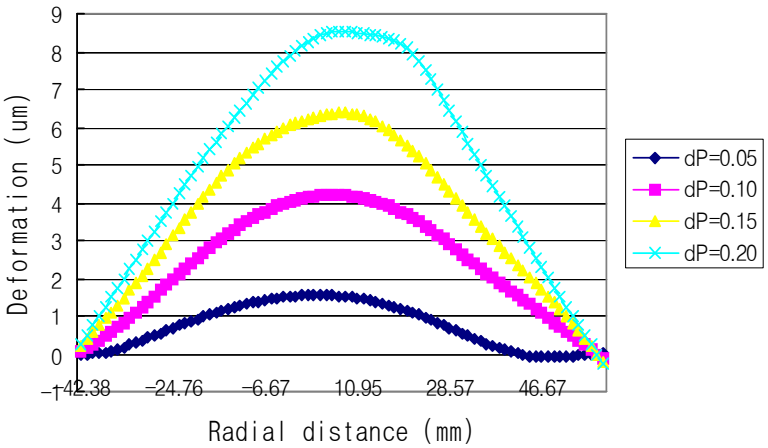


Fig. 4-20 Result of deformation measurement experiment for SSP-3H with L/D_0=1.5 (shear amount in the radial direction: 10 mm)

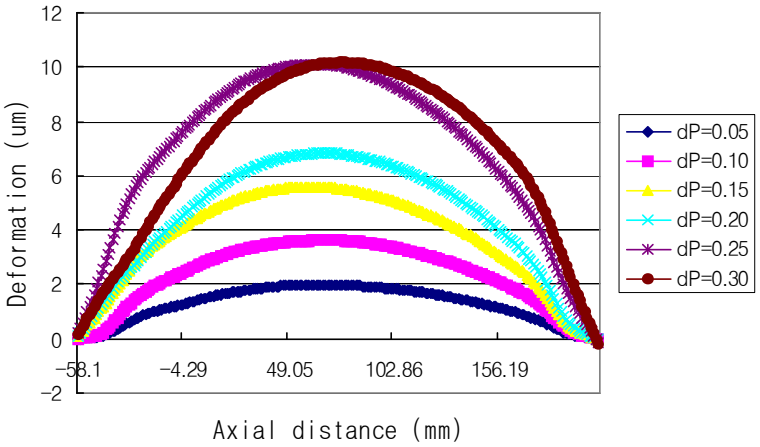


Fig. 4-21 Result of deformation measurement experiment for SSP-4H with L/D_0=2.0 (shear amount in the axial direction: 10 mm)

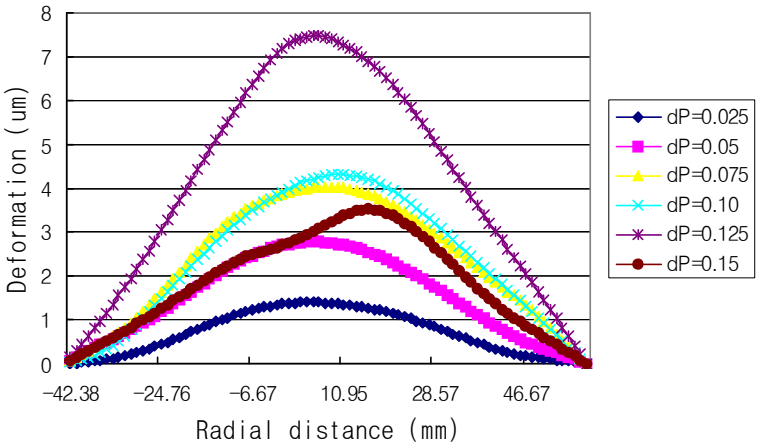


Fig. 4-22 Result of deformation measurement experiment for SSP-4H with L/D_0=2.0 (shear amount in the radial direction: 10 mm)

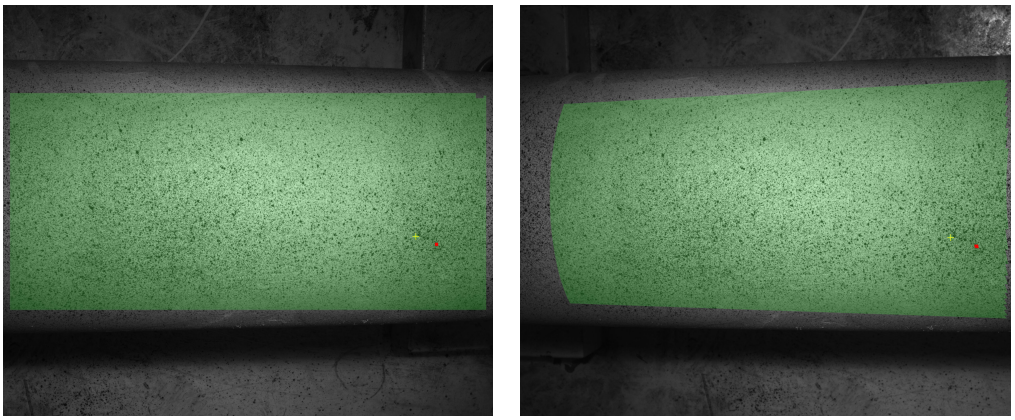
인공 감육결함이 가공된 직관에 대해 결함 조건에 따른 결함 크기 측정 실험을 수행한 결과, 보다 정확한 측정 결과를 얻기 위해서는 보다 정도 높은 위상 결펼침 기법의 적용을 고려해야 할 것으로 생각된다. 또한, 결함의 크기가 큰 경우는 미세한 압력차에 의해서도 손쉽게 관측자의 눈을 통해 결함의 크기와 형상의 예측이 가능함을 확인하였다.

제2절 DIC를 이용한 감육결함 측정

디지털 화상 상관법(DIC)를 이용한 감육결함 측정에서도 전단간섭계를 이용한 감육결함 측정과 동일하게 실험을 수행하였으며, 감육결함의 길이에 따라서 구분한 그룹은 DIC를 이용한 실험에서는 제외시켰다. 그 이유는 사용하는 상용 DIC 장비의 측정 한계로 인해 결함의 길이가 상대적으로 긴 SSP-3H와 SSP-4H 시험편에 대해 실험을 수행할 수 없었기 때문이다. 따라서 DIC를 이용한 감육결함 측정 실험에서는 감육결함의 최소 두께별로 구분한 시험편에 대한 결함부 변형 측정과 감육결함의 폭별로 구분한 시험편에 대한 결함부 변형 측정의 두 가지 실험을 수행하였다.

1. 결함 최소 두께별 감육결함부 변형 측정

앞 장에서 기술한 바와 같이 DIC는 두 개의 CCD 카메라를 이용하여 감육배관의 화상을 받아들이고, 우측과 좌측 카메라로부터 들어온 두 개의 화상을 화상 일치 방법을 이용하여 3차원적으로 프로그램상에서 형상을 복원하여 관측자에게 제공한다. Fig. 4-23에 좌측과 우측 카메라를 통해 얻은 화상을 나타냈다.



(a) (b)

Fig. 4-23 Images obtained from (a) left CCD Camera and (b) right CCD Camera

이들 두 화상으로부터 화상 일치를 통해 복원된 대상체의 3차원적 모델을 Fig. 4-24에 나타냈다. 운용 프로그램상에서 복원된 전체 배관을 화면상에 나타내거나 감출 수 있으며, 시각적인 효과를 위해 전체 배관은 화면에서 삭제한 상태이다.

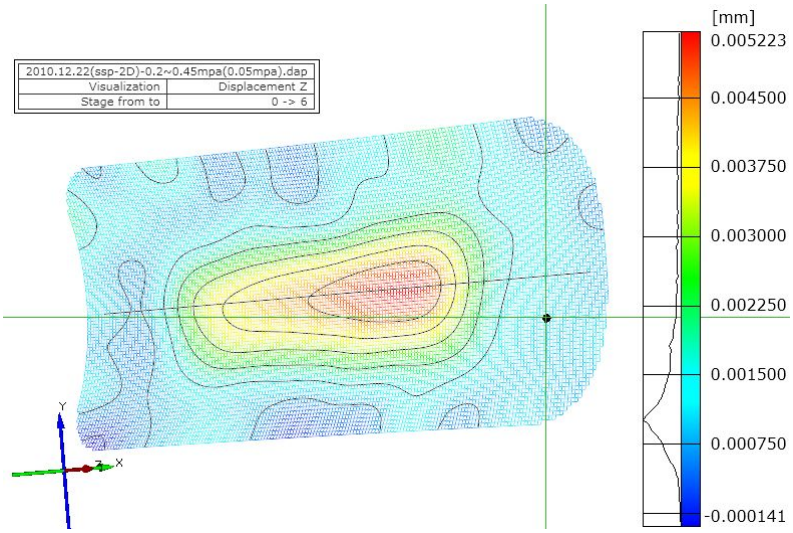


Fig. 4-24 Wall thinned pipe model reconstructed by 3-dimensional image matching method

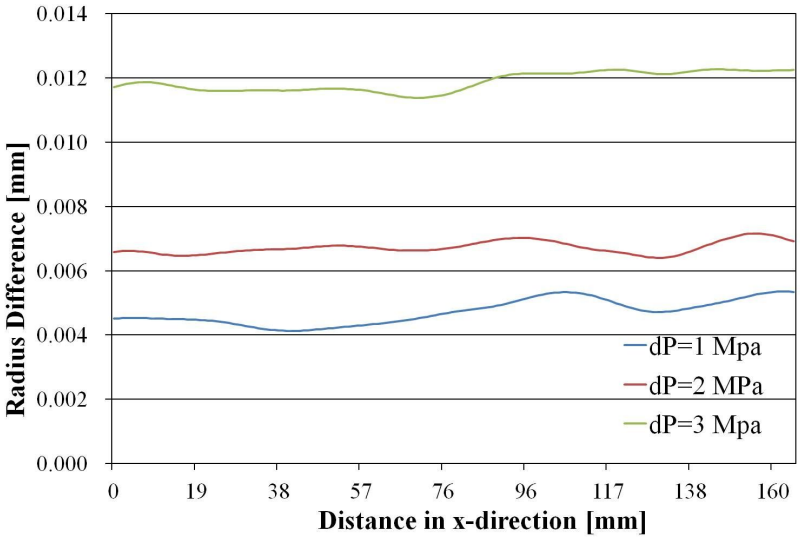


Fig. 4-25 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2E with t_p=6.3 mm at each pressure difference

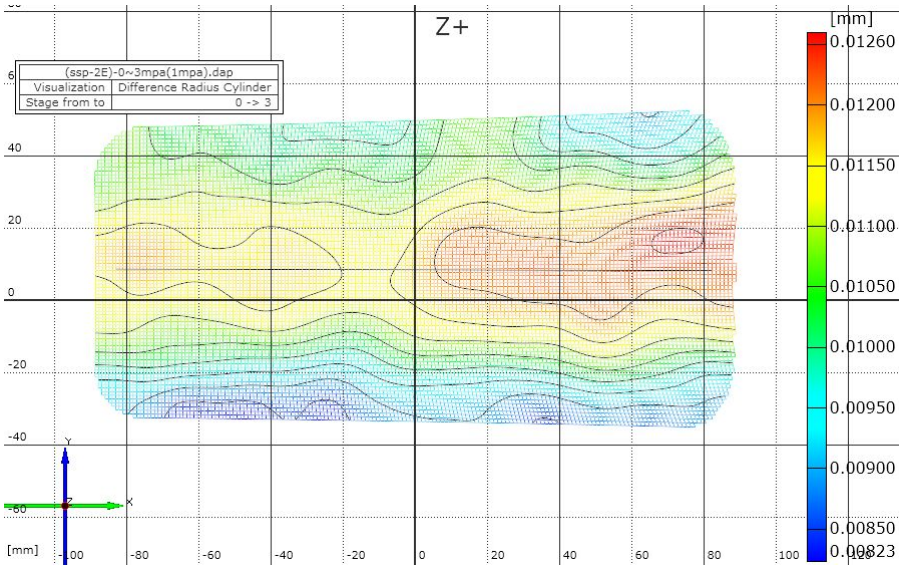


Fig. 4-26 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2E with t_p=6.3 mm at dP=3 MPa

DIC 측정을 통해 x축을 따라서 그은 선에서의 원주방향의 변위, 즉 배관의 반경 변화에 대한 프로파일을 구하였으며, 감육결함의 최소두께 t_p=6.3 mm인 SSP-2E에 대한 측정 결과를 Fig. 4-25에 나타냈다. 또한, Fig. 4-26에 z축 방향의 변위를 등고선 형태로 나타냈다. Fig. 4-25에서 볼 수 있듯이 감육결함의 최소두께가 6.3 mm인 경우, 내부 압력차를 최대 3 MPa까지 적용하였으나 전체적으로 반경 방향으로 균일하게 변화가 일어남으로써 감육결함부의 위치와 크기 등을 파악하기가 힘들었다. Fig. 4-26에서 압력차 dP=3 MPa일 때, 배관의 반경방향의 최대 변화량은 0.0126 mm로 측정되었다.

Fig. 4-27에 감육결함의 최소두께 t_p=5.4인 SSP-2F에 대한 프로파일을 나타냈으며, Fig. 4-28에 압력차 dP=1.2 MPa일 때, 배관의 반경방향 변화에 대한 등고선 지도를 나타냈다. SSP-2F의 경우, SSP-2E와는 달리 감육결함의 위치가 어느 정도 감지가 되고 있음을 알 수 있다. 특히, 등고선 지도로 표시한 Fig. 4-28에서는 측정부 중앙에 특이한 패턴이 발생하여 결함이 존재함을 알 수 있다. 압력차 dP=1.2 MPa일 때, 최대 변형은 0.006926 mm로 측정되었다.

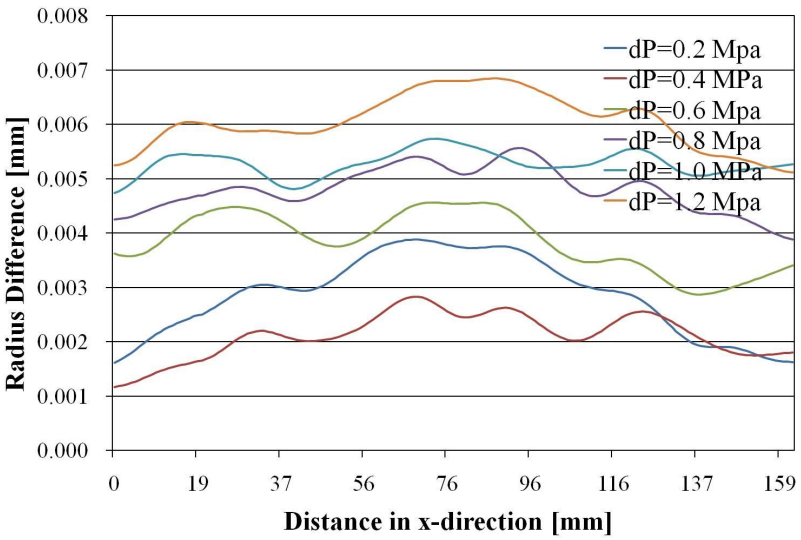


Fig. 4-27 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2F with t_p=5.4 mm at each pressure difference

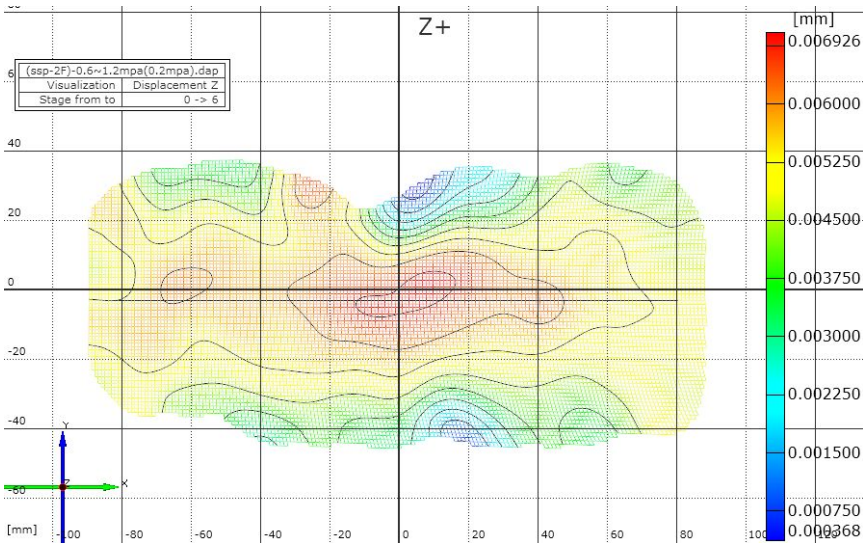


Fig. 4-28 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2F with t_p=5.4 mm at dP=1.2 MPa

Fig. 4-29와 Fig. 4-30에 감육결함의 최소두께 t_p=3.6인 SSP-2G에 대한 프로파일과 등고선 지도를 나타냈다. 프로파일 결과를 통해 결함의 크기를 예측할 수 있으며, 등고선 지도를 통해 감육결함의 형상과 위치 등을 확인할 수 있었다. Fig. 4-30으로부터 압력차가 1.2 MPa일 때, 최대 변형이 0.00856 mm 임을 알 수 있었다.

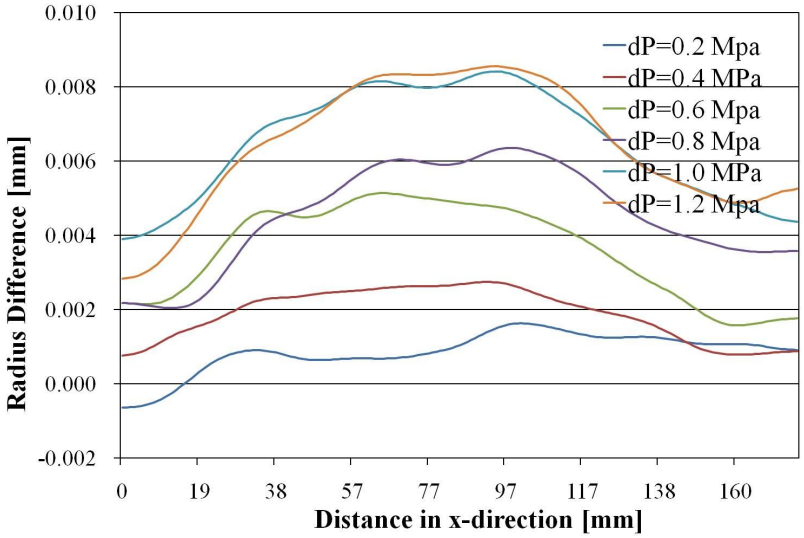


Fig. 4-29 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2G with t_p=3.6 mm at each pressure difference

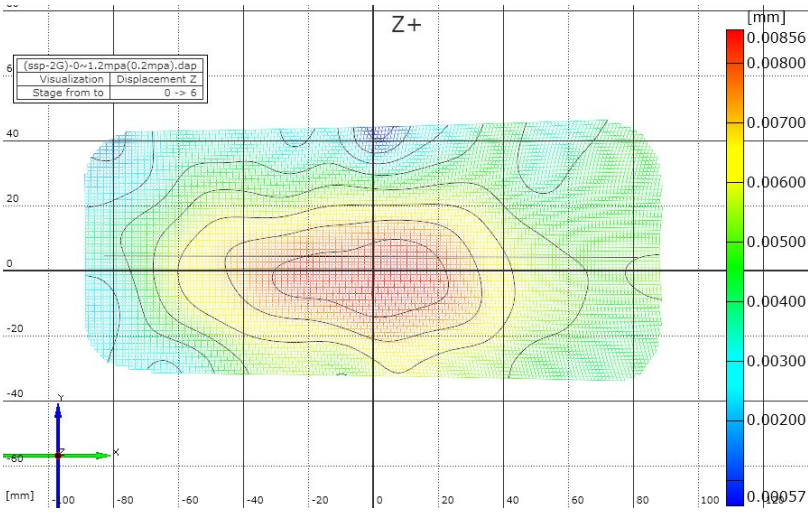


Fig. 4-30 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2G with t_p=3.6 mm at dP=1.2 MPa

Fig. 4-31과 Fig. 4-32에 감육결함의 최소두께 t_p=1.8인 SSP-2H에 대한 프로파일과 등고선 지도를 나타냈다. SSP-2H 시험편은 결함의 최소두께가 가장 얇은 것으로, 다른 시험편에 비해 적은 압력차에서도 결함부의 변형이 크게 발생하였다. Fig. 4-32에서 볼 수 있듯이, 압력차가 0.45 MPa일 때의 최대 변형은 0.009594 mm임을 알 수 있었다.

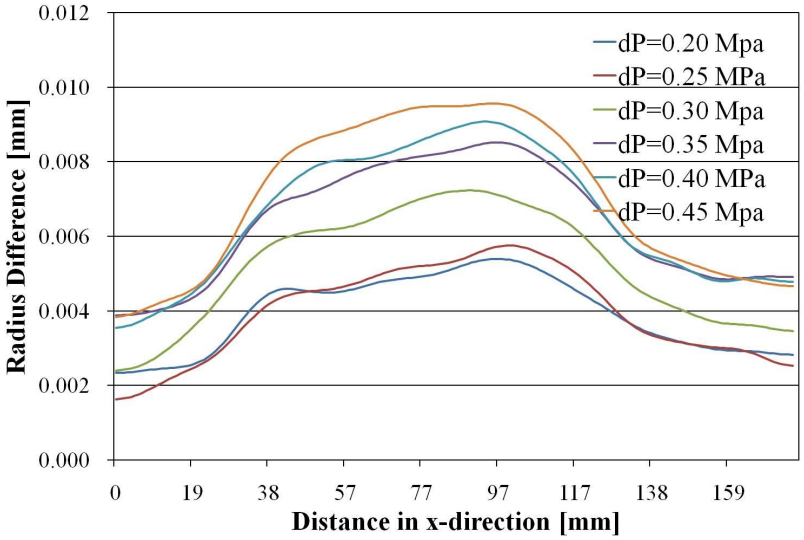


Fig. 4-31 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2H with t_p=1.8 mm at each pressure difference

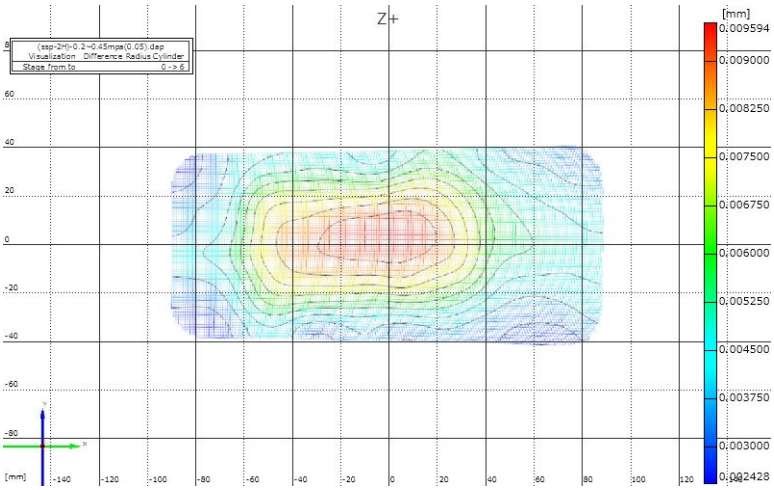


Fig. 4-32 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2H with t_p=1.8 mm at dP=0.45 MPa

2. 결함 폭별 감육결함부 변형 측정

감육결함의 폭을 각각 2θ=45°, 90°, 135°, 180°로 해서 결함의 길이와 최수두께가 일정할 때, 내부 압력의 차이에 따른 감육결함부의 변형을 측정하였다. 결함 폭이 90°인 시험편 SSP-2H는 앞선 결함의 최소두께별 실험에서 수행하였으므로 해당 시험편을 제외한 나머지 3개의 시험편에 대해 측정 실험을 행하였다. 이들 각각에 대한 실험 결과를 Fig. 4-33 ~ Fig. 4-38에 나타냈다.

Fig. 4-33으로부터 감육결함의 축방향 길이를 확인할 수 있었다. 그러나 시험편의 감육결함의 축방향 가장자리가 직각으로 가공되었음을 고려하면, 실제 감육결함의 확인을 위해서는 보다 정확한 해석 결과와 실험상의 오류를 줄이는 것이 좋을 것으로 생각된다.

Fig. 4-34로부터 결함의 축방향과 원주방향으로의 위치 및 크기를 한 눈에 파악할 수 있었다. 측정결과의 정확도는 전단간섭계와 비교되기 아직은 어려울 것으로 생각되지만 정성적인 측정에서는 활용도가 높을 것으로 생각된다. Fig. 4-34에서 알 수 있듯이, 압력차 dP=0.45 MPa에서 최대 변형은 0.00527 mm로 측정되었다.

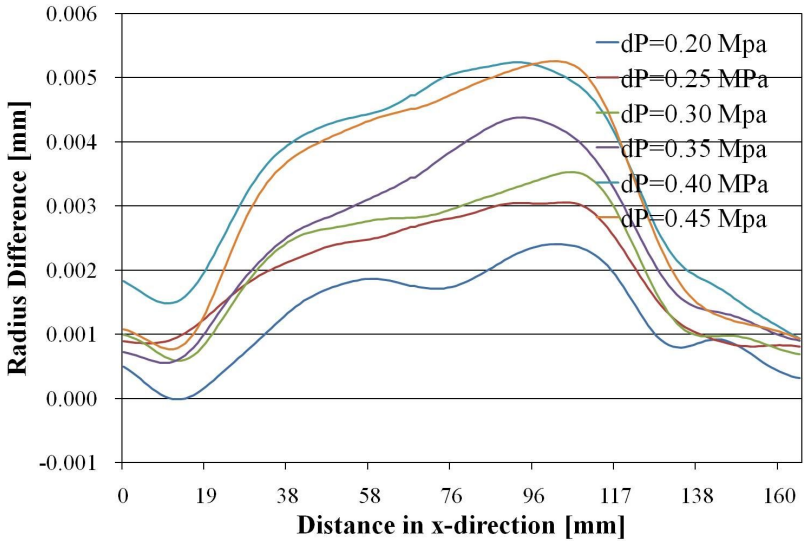


Fig. 4-33 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2D with 2θ=45°at each pressure difference

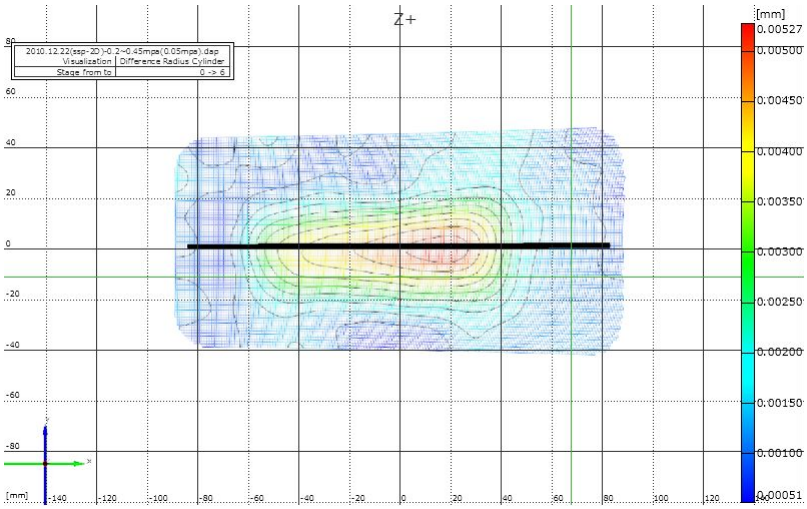


Fig. 4-34 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2D with 2θ=45°at dP=0.45 MPa

Fig. 4-35와 Fig. 4-36은 감육결함의 폭 2θ=135°인 시험편에 대한 프로파일 결과와 등고선 지도를 나타낸 것이다. Fig. 4-36에서 볼 수 있듯이, 압력차 dP=0.6 MPa에서 최대 변형이 0.00996 mm임을 알 수 있었다.

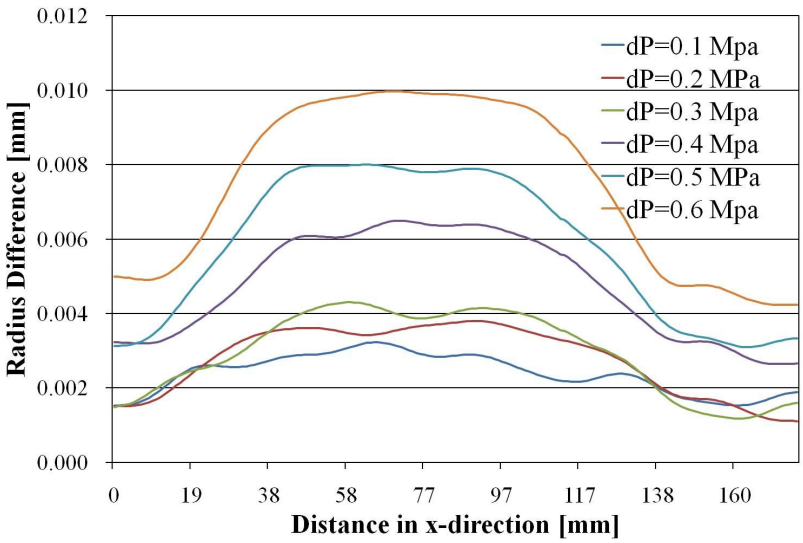


Fig. 4-35 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2L with 2θ=135°at each pressure difference

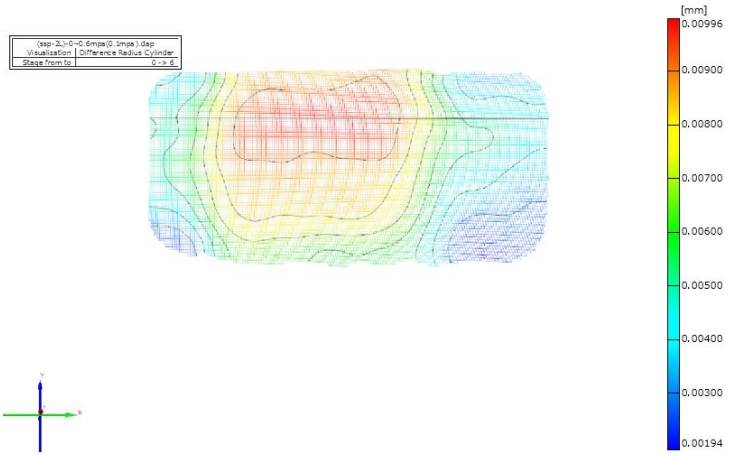


Fig. 4-36 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2L with 2θ=135°at dP=0.6 MPa

Fig. 4-37과 Fig. 4-38은 감육결함의 폭 2θ=180°인 SSP-2P 시험편에 대한 프로파일과 등고선 지도를 나타낸 것이다. 결함의 폭이 배관 원주의 절반에 해당되기 때문에 변형 측정 결과는 매우 폭넓게 측정되었으며, Fig. 4-38에서 보는 바와 같이 결함이 원주상에 넓게 존재하고 있음을 한 눈에 알 수 있다. 압력차 dP=0.6 MPa일 때, 최대 변형은 0.01035 mm로 측정되었다.

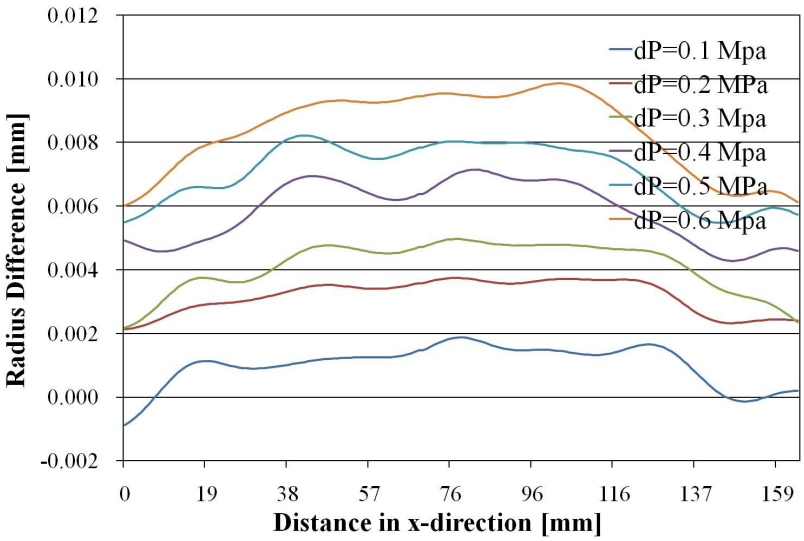


Fig. 4-37 Profile result of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2P with 2θ=180°at each pressure difference

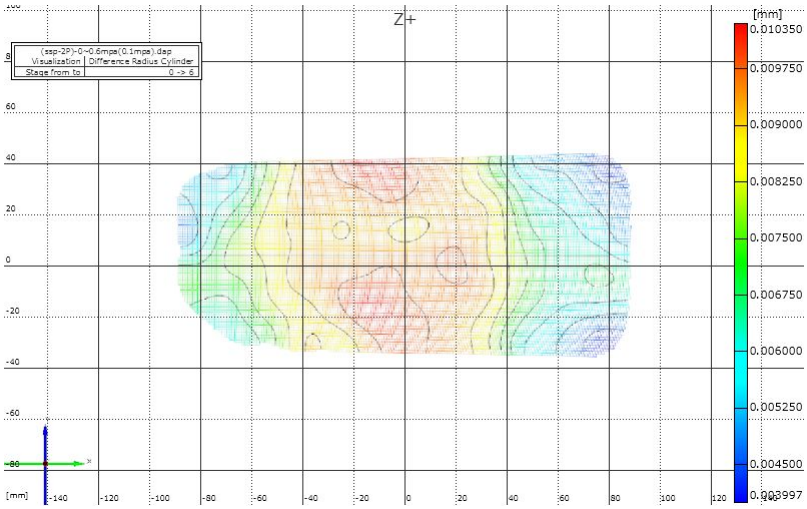


Fig. 4-38 Contour map of deformation measurement experiment with DIC for SSP-2P with 2θ=180°at dP=0.6 MPa

제3절 고찰

본 논문에서는 원자력 발전소의 2차계통에서 주로 사용되는 탄소강 배관을 대상으로, 내부에 인공 감육결함을 가공하고 결함의 최소두께, 폭, 그리고 길이를 서로 다르게 가공한 세 개의 그룹으로 나누었다. 이들 각 그룹에 대해 전단간섭계(SSI)와 디지털 화상 상관법(DIC)을 이용하여 감육결함부의 변형을 측정하였다. 그러나 DIC 실험에 있어서 측정 영역에 대한 기준을 설정하지 못하는 문제가 발생해서 감육결함의 길이를 서로 다르게 가공한 그룹에 대한 실험은 수행하지 못했다.

SSI를 이용한 결함 최소두께별 감육결함부의 변형 측정 실험에서, SSP-2E는 결함의 최소두께가 7t/8인 6.3 mm인 관계로 강체운동이 전체 시스템을 지배하고 있는 상태에서도 미세하게나마 변형을 측정할 수 있었다. 결함의 최소두께가 6t/8인 5.4 mm로 가공된 SSP-2F는 뚜렷하게 축방향에서의 결함의 크기를 예측할 수 있었다. SSP-2G와 SSP-2H는 결함의 최소두께가 각각 4t/8과 2t/8인 3.6 mm와 1.8 mm이므로 미세한 압력 변화에도 감육결함부가 곧바로 반응을 보였다.

결함 폭별 감육결함부의 변형 측정 실험에서는 결함폭 2θ의 크기와 무관하게 감육결함부에서 측정한 변형을 통하여 결함부의 크기를 쉽게 알 수 있었다. 또한, 결함 길이별 감육결함부의 변형 측정 실험 역시 결함 폭에 따른 실험 결과와 유사하게 결함 길이와 무관하게 변형 측정 결과로부터 결함부의 크기를 쉽게 알 수 있었다.

DIC를 이용한 결함 최소두께별 감육결함부의 변형 측정 실험에서, SSI 실험과는 달리 SSP-2E는 물론이고 SSP-2F에서도 결함의 존재 여부를 확인하는 것이 매우 어려웠다. 그러나 SSP-2G와 SSP-2H에 대한 실험 결과로부터 축방향 결함 길이는 물론이고 원주방향 결함 길이도 어느 정도 예측이 가능하였다. DIC가 3차원적인 변형 측정이 가능한 기술인 관계로, 원주방향에서의 변형을 통해 결함의 형상을 쉽게 구분할 수 있었다. 결함 폭별 감육결함부의 변형 측정 실험을 통해서 감육결함의 크기를 축방향에서는 물론, 원주방향에서도 쉽게 확인할 수 있었다.

이상의 실험을 통해, 감육결함을 측정할 수 있는 최소 두께와 결함 폭, 결함의 길이 등을 파악할 수 있었다. 우선, 결함의 최소두께 t_p가 7t/8 보다 얇아지면 결함의 유무와 위치, 크기 등을 보다 쉽게 확인할 수 있었다. 배관의 살두께가 7t/8보다 두꺼울 경우는 내부 압력에 의해 반경방향으로 강체운동이 발생하기 때문에 결함

을 찾기가 매우 어려웠다.

이것은 결함의 폭이나 결함의 길이가 더 넓어지거나 길어진다고 하더라도 달라지지 않을 것으로 판단된다. 단, SSI의 경우는 DIC 기술보다 분해능이 더 뛰어나기 때문에, Fig. 4-3에서 확인할 수 있듯이, 보다 적은 압력차에 의해서도 변형을 측정할 수 있었으며, SSI를 이용하면 결함의 최소두께가 7t/8보다 두꺼운 결함이라 할지라도 불가능하지는 않다는 점을 확인할 수 있었다.

DIC의 분해능은 SSI에 비해 뒤처지는 듯하지만, 현장에서 SSI보다 더 간단하게 활용을 할 수도 있는 부분이 있기 때문에 다양한 활용이 기대되는 기술이라고 생각된다.

실험 결과로부터, 감육배관은 결함의 길이나 폭 보다는 결함의 최소두께로 인한 영향이 더 크다는 점을 알 수 있었으며, 최소두께가 7t/8 보다 더 얇아졌을 때 약간의 압력변화에 의해서도 변형이 크게 발생하여 파손 및 파괴로 이어질 수 있음을 확인하였다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 스페클 간섭법 중 한가지 기술인 스페클 전단 간섭법을 이용하여 내압이 가해지는 압력 배관의 내부에 가공한 감육결함을 측정하는 기술에 대하여 연구하였다. 배관 시스템은 특히 원자력 발전설비의 2차 계통에서 주로 냉각을 담당하는 중요한 요소이므로 높은 안전성이 요구된다. 따라서 전단간섭계를 이용하여 감육결함부에서의 변형을 측정하고, 이 측정 결과를 통해 결함의 크기와 형상을 확인할 수 있는지 여부를 분석하였다. 이 과정에서 디지털 화상 상관법을 도입하여 전단간섭계를 이용한 실험의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

전단간섭계와 디지털 화상 상관 시스템, 이 두 가지 시스템을 이용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전단간섭계를 이용해서 결함의 존재 유무를 구분할 수 있도록 하는 가장 중요한 인자는 결함의 최소두께이다. 결함의 최소두께가 7t/8보다 클 경우, 감육배관의 운동을 지배하는 것은 바로 강체운동이며, 이 때문에 실험 결과로부터 감육결함의 크기를 예측하기 매우 힘들었다.

2) 전단간섭계를 이용한 감육결함부의 변형 측정 결과로부터 축방향 결함의 길이는 결함 최소두께별 실험에서 평균 121.36 mm, 결함 폭별 실험에서는 평균 100 mm로 측정되었다. 또한, 디지털 화상 상관 시스템을 이용한 감육결함부 변형 측정 결과로부터 축방향 결함의 길이는 결함 최소두께별 실험에서 평균 113.94 mm, 결함 폭별 실험에서는 평균 118.36 mm로 측정되었다.

3) 전단간섭법과는 다른 성능을 지닌 디지털 화상 상관법을 이용하여 감육결함의 형상과 크기, 위치 등을 정확하게 측정할 수 있었다. 전단간섭계는 외부 환경에 대한 영향을 적게 받기 때문에 현장에서 적용할 수 있는 비파괴 검사 장비로써 활용되어왔다. 그러나 디지털 화상 상관법 또한 스테레오비전 기술을 이용하고 있기 때문에 산업현장에서의 활용이 늘어날 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. (Hariharan, P,. "Optical Holography 2nd Edition", New York: Cambridge University Press, 1996.
2. Jones, R.. and Wykes C.. "Holographic and Speckle Interferometry 2nd Edition", London: Cambridge University Press, 1989.)
3. 김경석. 『CW 레이저 스페클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
4. Hyunchul Jung. Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor thesis, Chosun University, 2004.
5. 강기수. 『레이저 스페클 간섭법을 이용한 내부결함의 정량평가』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2005.
6. 장호섭. 『전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2006.
7. 한국표준과학연구원, "원전 배관손상 비파괴 진단 신기술 개발", 교육과학기술부, 2009.
8. Kyeong Suk Kim, Hyun Chul Jung, Ho Seob Chang, Ha Sig Kim and Sung Won La, "Defect Detection of Wall Thinned Straight Pipe using Shearography and Lock-in Infrared Thermography", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 11, pp. 55-61, 2009.
9. Young Hwan Choi, Sun Yeong Choi, and Hong Key Kim, "Enhancement of Piping Reliability in Nuclear Power Plants", 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 64-69, 2006.
10. Jin-Weon Kim, Chi-Yong Park, "Integrity Evaluation Model for a Straight Pipe with Local Wall Thinning Defect", Transaction of the KSME A, Vol. 29, No. 5, pp. 734-742, 2005.
11. Sang-Kyu Park, Byoung-Eui Lee, Sun-Dong Shin and Sung-Ho Lee, "Optimization of Thinned Pipe Management Program of Domestic Nuclear Power Plants", 대한기계학회 춘계학술대회, pp. 215-219, 2005.
12. Jin-Weon Kim, Tea-Soon Kim, Chi-Yong Park, "An Evaluation of the Effect of Internal Thinning Defect on the Failure Pressure of Elbow", Journal

of the Korean institute for industrial safety, Vol. 18, No. 4, pp. 28-34, 2003.

13. S. H. Shim, J. S. Song, K. B. Yoon, K. M. Hwang, T. E. Jin, S. H. Lee, “A Study on Managing of Metal Loss by Flow-Accelerated Corrosion in the Secondary Piping of CANDU Nuclear Plants”, Energy Engg. J, Vol. 11, No. 1, pp. 18-25, 2002.
14. Frank, M., Hans, R. and Helmut, S., "Experience with piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects." Nucl. Eng. & Des., Vol. 207, 2001, pp. 307~316.
15. Goodman, J.W., “Some Fundamental Properties of Speckle”, Journal of the Optical Society of America Vol.66, pp.1145-1150, 1976
16. Cloud, G,L. "Optical Methods of Engineering Analysis", London Cambridge University Press, pp.446-469, 1990
17. Jones, R.. and Wykes C.. "Holographic and Speckle Interferometry 2nd Edition", London: Cambridge University Press, 1989.
18. 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
19. Creath, K., "Phase-shifting speckle interferometry," Applied Optics Vol. 24, No. 18, pp. 3053~3058, 1985
20. Malacara, D., Servin, M., and malacara, Z., Interferogram Analysis for Optical Testing, New York: Marcel Dekker, 1998, pp.381~408.
21. Huntley, J. M., Automated analysis of Speckle Interferogram in Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, ed. Rastogi, P. K., Chichester, John Wiley & Sons, 2001, pp.49~139.

감사의 글

1993년 조선대학교에 입학하여 올해가 2010년. 배움은 끝이 없는 것이지만 이제 학생의 신분이 일단락된다는 아쉽고도 한편으론 흐뭇한 18년간의 시간이 잠시 여기 실험실에 멈춘 듯한 기분이 듭니다. 무엇을 위해서 살아가는지는 아직 깨닫지 못했지만, 저에게 아무 대가도 없이 많은 사랑과 정성을 주신 분들을 위해 해야 할 것이 무엇인지를 항상 생각하며 살아가도록 하겠습니다.

지도교수님이신 김경석 교수님께 깊은 존경과 감사의 인사를 드립니다. 부족한 제자 더 노력하는 자세로 살겠습니다. 심사를 기꺼이 허락해 주신 김재열 교수님, 장완식 교수님, 전북대학교 홍동표 교수님, 한국표준과학연구원 최만용 박사님 감사드립니다. 학부부터 대학원 과정까지 많은 가르침을 주셨던 기계설계공학과 양광영 교수님, 나기대 교수님, 양인영 교수님, 정낙규 교수님, 김택현 교수님 감사합니다. 부족한 저에게 많은 것을 깨우쳐주시고 끌어주신 정현철 박사님 감사드립니다. 장호섭 박사님 바쁘신 와중에도 후배 신경써주셔서 감사드립니다. 졸업 후 사회에 계시는 양승필 박사님, 김성식 박사님, 강기수 박사님 감사합니다. 센터에서 도움주신 최태호 선생님, 김우진 선생님과 자동화실험실 후배님들에게 감사드립니다.

항상 막내아들 일 많이 한다고 걱정하시고, 행여 힘들지는 않나 걱정하시는 강진에 계시는 아버님, 어머님 더 많이 찾아뵙고 더 노력하는 아들이 되겠습니다. 제가 회사를 다니면서, 사업을 하면서 두 분이 저에게 주신 많은 능력들을 아낌없이 발휘하여 꼭 성공하고 베푸는 사람이 되겠습니다. 아울러 항상 많은 사랑을 주신 누님, 인생의 큰 틀을 잡아주신 매형 민운택 사장님 감사합니다. 편한 친구처럼 대해주시는 형님과 형수님께도 깊은 감사와 사랑을 전합니다. 석사 때 태어나 벌써 중학생이 되는 재윤과 홍은, 초등학교 입학하는 윤영, 주현, 항상 가족들을 생각하고 건강하길 바란다. 나산계기산업과 탐진기와의 모든 임직원분들의 건강과, 회사의 무궁한 발전과 대박을 기원합니다. 어려울 때 기꺼이 도움을 주셔서 감사드립니다.

멀리 김해에서 광주까지 귀한 딸 보내주신 김해에 계시는 아버님, 어머님께도 감사드립니다. 먼 길 왕래하시면서 저희들 보살펴주시고, 걱정해 주신 은혜 잊지 않겠습니다. 크리스마스 전날이 생일인 기정아 전화도 못해 미안하다. 애들 아프다고 광주까지 달려와준 처남댁, 감사합니다. 그리고 항상 반겨주시고 아껴주시는 김해가족들 모두에게도 감사드립니다.

2005년 학교를 떠나 사회로 나갔을 때, 눈물의 시련과 좌절을 많이 겪었습니다. 하지만 다시 시작한다는 각오로 생산현장 말단사원에서부터 시작하였습니다. 세상이 저를

배신도 하고 이용하기도 했지만, 그때마다 정직하게 더 배우고 강해지기 위해 노력했습니다. 그 결과 시련을 극복하고 앞으로 나갈 수 있었던 것 같습니다. 이런 저에게 따뜻한 정신적 기둥이 되어준 조선대학교 자동화실험실이 있었기에 더 성장할 수 있었습니다. 이제는 조그만 회사를 설립하여 운영하고 있지만, 지금까지 겪었던 일들보다 더 큰 시련들이 남아있을 것이고, 당당하게 이겨내도록 하겠습니다. 그것이 저에게 많은 도움을 주신 분들께 보답하는 첫 번째 길이기도 할 것입니다.

마음껏 제하고 싶은 일을 맡겨주신 배한철 사장님 감사드립니다. 큰형님 같은 김철영 이사님과 믿고 일을 맡겨주신 이창근 사장님 감사합니다. 같이 광주공장 큰 기둥이 되었던 정승택 과장에게도 감사를 전합니다. 함께 일했던 이상민 차장님, 모두 흩어져 버렸지만 한때 같이 일했던 공장 식구들 모두 저를 잘 따라주셔서 감사합니다. 박사 입학 때 헤어졌다 사회에서 다시 만난 이상테크 김동호 사장님, 이상필 사장님, 배성현 팀장님 감사합니다. 사업초반에 많이 도와주신 포미 허상휴 사장님, 허상호 상무님, 정래주 이사님 감사드립니다. 저를 믿고 맡겨주신 럭스콤 전자이 사장님, 이민호 팀장님, 김철진 대리님, 김은미 사원 모두 감사합니다. 화순에 계시는 최재현 차장님 큰 세상을 보여주셔서 감사합니다. 전남 TP 김대성 메니저님과 관계자분들 감사합니다. 동강대학에서 항상 살펴주시는 박경우 실장님, 차천석 교수님 감사합니다. 항상 친구처럼 따뜻이 신경써준 김지훈 교수님, 김창오 박사님 감사합니다. 큰 재능을 저에게 맡겨준 황과장님 고맙습니다. 졸업 후에도 여러모로 도와주신 영학형 둘째 축하드리고, 성욱이 좋은 회사 입사한 것, 아빠된 것 축하한다.

끝으로 나의 아들들 **윤현**과 **성현** 부족한 나를 부모로 찾아와줘서 고맙구나. 너희 둘은 하늘의 천운을 두루 갖고 태어났으니 성장하여 반드시 대성하고 사회에 좋은 일을 많이 하는 큰 인물이 될 것이라 믿는다. 또한 형제간에 서로 의지하며 세상을 즐겁게 사는 모습을 아빠 형제간들이 행동으로 보여 줄 테니 꼭 배워서 실천하기 바란다.

결혼해서 잘 해준다고만 하고 매일 일한다는 핑계로 늦게 오는 신랑 원망도 많이 했을 나의 아내 성아영에게 고마움과 사랑하는 마음을 전하고 싶습니다. 황금마차를 타고 궁궐로 들어가는 당신의 꿈은 곧 현실이 될 것입니다. 항상 즐겁게 살아갈 수 있도록 더 노력 할 테니 앞으로 잘 부탁합니다.

항상 당당하게 살아가겠습니다.

2010. 12. 31

박찬주 올림

저작물 이용 허락서

학 과	기계설계공학과	학 번	10341081	과 정	박사
성 명	한글 박 찬 주 한문 朴 燦 註 영문 Park Chan Ju				
주 소	광주광역시 서구 금호동 도시공사 아파트 1단지 101-308				
연락처	E-mail : mde22@paran.com				
논 문 제 목	**한글** 스페클 간섭법을 이용한 압력배관의 내부 결함검사 기술개발				
	영문 Development of indside crack measuring technique for pressure pipeline using speckle interferometry				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 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 편집과 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 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함.

동의여부 : 동의(○) 반대( )

2011년 2월 25 일

저작자: 박 찬 주 (인)

조선대학교 총장 귀하