2006년 8월

박사학위논문

# 전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법

# 조선대학교 대학원

기계설계공학과

## 장 호 섭

# 전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법

# Quantitative Measurement Method of Out-of-Plane Deformation Using the Shearography

2006년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계설계공학과

# 장 호 섭

# 전단간섭계를 이용한

# 면외변형의 정량계측법

### 지도교수 김 경 석

### 이 논문을 공학박사학위 신청 논문으로 제출함.

### 2006년 4월

### 조선대학교 대학원

### 기계설계공학과

## 장 호 섭

# 장호섭의 박사학위 논문을 인준함

위원장	조선대학교 교수	장	완	식	인
위 원	전북대학교 교수	강	영	조건	인
위 원	서울산업대학교 교수	정	성	균	인
위 원	조선대학교 교수	김	재	열	인
위 원	조선대학교 교수	김	경	석	인

2006년 6월 일

# 조선대학교 대학원

List of Tables	······ III
List of Figures	······ <b>IV</b>
Nomenclature	······ VII
Abstract	······ <b>IX</b>

1	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	론	장 서	제 1
1	••••••	연구배경	1 절	제
2	. 및 내용	연구목표	2 절	제

		기론적 배경	장 이	제 2
	프린지	스페클과	1 절	제
	의 해석	간섭무늬의	2 절	제
석 17	위한 위상정보의 해식	정량화를	3 절	제

	의 개념	형계측의	변	용한	컵을 o	간섭	[단]	- 전	장	3	제
	•••••	한사항	제	용의	섭법 전	간간	전	절	1	제	
개념 … 32	섭법의	전단간식	는	용되	측에 이	흥계.	변	절	2	제	
33	••••••	•••••	<u>.</u>	적용	방법의	난된	제	절	3	제	

	장 실험장치	4 장 실	제
	1 절 ESPI 시스템 ··	제 1 절	
전단간섭시스템 38	2 절 전단량 자동조	제 2 절	
<u>+</u>	3 절 소프트웨어의	제 3 절	

	•••••	1찰	및 그	실험결과	장 실	제 5	저
	•••••	변형	면외	평판의	1 절	제	
	면외변형	압력용기의	있는	결함이	2 절	제	
66		••••••	진동	평판의	3 절	제	

제	6	장	결론	•••••••	7	9
<u>~ II</u>	U	Ő	って		_ /	

참고문헌	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	81
------	---	----

# - List of Tables -

Table 4-1 Specification of ESPI system     37
Table 4-2 Components of the development system    38
Table 5-1 ESPI and shearography phase-map according to deformation
variation 47
Table 5-2 ESPI and shearography phase-map according to shearing
amount variation 51
Table 5-3 ESPI and shearography phase-map according to pressure
variation 56
Table 5-4 ESPI and shearography phase-map according to pressure
variation 61
Table 5-5 Maximum deformation according to shearing amount
variation ······ 63
variation

# - List of Figures -

Fig. 2-1 The scattering of light by a rough surface
Fig. 2-2 Speckle pattern formation in the image plane of a lens
Fig. 2-3 The fringe pattern formation depend on deformation9
Fig. 2-4 The optical path of a ray : image-plane viewing 10
Fig. 2-5 The optical path of a ray : defocussed viewing 11
Fig. 2-6 The optical path of a ray : focal plane viewing 11
Fig. 2-7 The illuminating wavefronts introduced by a surface
displacement ······ 12
Fig. 2-8 The scattered wavefronts introduced by a surface displacement
Fig. 2-9 A diagrammatic arrangement of an out-of-plane displacement
Fig. 2-10 Speckle pattern shearing interferometry 15
Fig. 2-11 Means of shifting the phase in an interferometer 17
Fig. 2-12 Schematic of ESPI using PZT mounted mirror as phase
shifter
Fig. 2-13 $3 \times 3$ mask with the some coefficient 22
Fig. 2-14 Concept of median filtering 23
Fig. 2-15 Example of median filtering 23
Fig. 2-16 Concept of $\pi$ shifting filtering24
Fig. 2-17 Sequence of $\pi$ shifting filtering
Fig. 2-18 Concept of phase filtering
Fig. 2-19 Sequence of a modified mean value filtering 27
Fig. 2-20 Sequence of phase unwrapping

Fig.	3-1	Deformation function depend on the boundary condition 32
Fig.	3-2	Comparison between differentiation and numerical
		differentiation 33
Fig.	3-3	Algorithm of deformation reconstruction 34
Fig.	3-4	Formation of shearogram using ESPI interferogram
Fig.	4-1	Configuration of ESPI system
Fig.	4-2	The developed system with the auto-shearing
Fig.	4-3	Develop process of entire program
Fig.	4-4	Operating process of entire program 40
Fig.	4-5	Result of PZT control using the developed program 41
Fig.	4-6	Each image of 4 frame phase shifting method 42
Fig.	4-7	Result of phase value - phase map 42
Fig.	4-8	Comparison of different filters 43
Fig.	4-9	Flowchart of unwrapping 44
Fig.	4-1(	) Result of unwrapping
Fig.	5-1	Schematic of specimen and system 45
Fig.	5-2	Slop profile according to deformation variation
Fig.	5-3	Deformation profile according to deformation variation
Fig.	5-4	Comparison of deformation result according to deformation
		variation ······ 49
Fig.	5-5	Slope profile according to shearing amount variation 52
Fig.	5-6	Deformation profile according to shearing amount variation $\cdot$ 52
Fig.	5-7	Comparison of result according to shearing amount variation
Fig.	5-8	Schematic diagram of pressure vessel with line defect 54
Fig.	5-9	Photograph of pressure vessel

Fig.	5-10	Deformation profile according to pressure variation of ESPI
Fig.	5-11	Result of shearography according to variation of pressure
		difference
Fig.	5-12	Comparison of result according to variation of pressure
		difference 59
Fig.	5-13	Result of shearography according to shearing amount
		variation 62
Fig.	5-14	Maximum deformation according to shearing amount variation
Fig.	5-15	Measurement of deformation area by using shearography 64
Fig.	5-16	Specimen used for vibration testing
Fig.	5-17	JIG for fixing the specimen
Fig.	5-18	Schematic of shearography for vibration analysis
Fig.	5-19	The magnitude of auto-spectrum by using LDV71
Fig.	5-20	The frequencies comparison obtained by using each method
Fig.	5-21	Comparison fo frequency average deviation by each method $\cdot$
Fig.	5-22	Amplitude line profile at each mode by using SPS-ESPI ··· 75
Fig.	5-23	Slope profile at each mode by using SPS-shearography 76
Fig.	5-24	Amplitude profile data at each mode by using
		SPS-shearography77
Fig.	5-25	Comparison of max. amplitude by using ESPI and
		shearography 78

### - NOMENCLATURE -

- a : Aperture
- d : Deformation
- f : Frequency
- 1 : Optical path
- *n* : Unit vector
- s : Path length difference
- t : Time
- u : Amplitude of the laser beam
- v : Focal length
- W : Weight
- $_{\rm X}$   $\phantom{x}$  : x-axis and/or x-direction
- y : y-axis and/or y-direction
- z : Brightness
- D : Area of dimension by the illuminated light
- F : Focal length/aperture, f-number of the lens
- I : Intensity
- L : Distance between the viewing and object planes
- M : Magnification of the lens
- N : Fringe order
- S : Speckle size
- U : Complex amplitude of the laser beam

- a : Relative phase shift between test and reference beam
- x : Interference fringe visibility
- $\delta_{\mathbf{X}}$   $\ :$  Shearing amount in the x-direction
- $\Delta_d$  : Slope of deformation
- $\Delta_{S}$  : Relative path length difference
- $\Delta \varphi_k$  : Phase difference of k-th pixel
- $\Delta \varphi~$  : Phase change
- $\Delta_1$  : Path change
- $\lambda$  : Wavelength
- $\Theta$  : Angle to surface normal
- $\phi$  : Phase
- $\boldsymbol{\varphi}_k~$  : Phase of k-th pixel

#### Subscript

- 1 : First
- $_2$  : Second
- i : Illumination
- $_{v}$  : Viewing
- 0 : Mean value
- $_{k}$  : k-th
- <sub>o</sub> : Objective
- r : Reference
- s : Subjective

### ABSTRACT

### Quantitative Measurement of Out-of-Plane Deformation Using the Shearography

By Hoseob Chang

Advisor : Professor Koung-Suk Kim Ph.D Dept. of Mechanical Design Engineering Graduate School, Chosun University

In general, deformation measurement methods are largely divided into a contact type and a non-contact type. The representative contact deformation measurement methods include a strain gauge and a accelerometer, while the representative non-contact methods are Laser Doppler Vibrometry(LDV), Electronic Speckle Pattern Interferometer(ESPI), and shearography.

Especially, ESPI can measure and analyze precisely in a real-time the deformation occurring to the whole fields of the objects. On the other hand, as this method is so sensitive to external disturbances, the applicability is so low in the industries without a optical table.

Another method using speckles is shearography, which is developed on the basis of detecting the derivative components of deformation when the interferometry composes appropriately. Like a strain gauge, shearography can directly acquire the strain information.

Stress concentration will occur when external forces are applied to an object

with a defect, and the deformation of rigid bodies will not change the strain. Thus, shearography is very efficient to measure the defects of an object. Also as shearography is very endurable against external disturbances, is frequently employed as a nondestructive inspection technique on industrial areas.

Because shearography easily composes interferometer and can measure even though coherence length of laser is relatively short, it has been more widely employed and is used to vibrations analysis of objects. Also, this method is applied efficiently in the nondestructive inspection sector such as the quantification of defects and the analysis of composite material structures.

Until now, researchers used shearography so as to measure just the slope of deformation, to quantify defect lengths by measuring the distance between the inflection points of deformation slope taking place on defected regions of pressure vessels. Also, they used in order to compare shearography with ESPI to vibration modes occurring in a certain object.

Currently, ESPI is mainly used to measure the deformation of objects, while shearography is used to measure only the defects of objects. Stroboscopic phase shift ESPI(SPS-ESPI), which is applicable to vibration analysis only, can quantitatively measure the amplitude in a certain condition, but cannot quantitatively measure the amplitude of each vibration mode occurring in objects under the same condition. LDV can analyze the vibration of objects under the same external oscillation condition, but it takes very much time to measure it.

This thesis uses shearography and numerical integration not only to quantitatively measure various types of out-of-plane deformation occurring in objects but also to solve the problems of the other methods mentioned above and shearography.

In the past, the researchers arbitrarily applied the shearing amount, which is the most important variable of shearography, according to the sensitivity of detecting the defects. In contrast, this thesis proposes an basic idea considering that shearography is basically an image processing method. The procedures of this method are as follows; a) shearing amount can be converted into the number of pixels in the surface, b) applied to the results of measurement by shearography, c) and then numerically integrated in order to quantitatively measure the deformation of objects.

To verify the effectiveness of the proposed method, experiment is performed on a circular plate with out-of-plane deformation, pressure vessel with internal defects, and a flat plate with vibration. Then, the correlation between ESPI and shearography is investigated. Also, the experimental results demonstrate that shearing amount on the image plane can be substituted by the number of pixels, and shearography can measure out-of-plane deformation.

Furthermore, an experimental result for the deformation measurement in a circular plate shows an error rate of about 1.74%. It is very precise comparing to ESPI. In an experiment for the defects measurement in defective pressure vessel, the rate is about 8.3%. Also, this study shows that the proposed method in this thesis can consistently measure the deformation in any shear, while ESPI cannot measure deformed regions.

In analyzing the vibration of a plate, the proposed method can quantitatively measure the amplitude of not only first mode but high modes. Thus, it is more useful than SPS-ESPI.

Comparing results of techniques such as the finite element method, LDV, and SPS-ESPI, the reliability of the proposed method is much more higher as its mean deviation is 2.84%.

Based on the above-mentioned results, the proposed method can overcome the limits of ESPI that is so sensitive to external disturbances, and quantitatively measure the out-of-plane deformation and the strain, and its application in industrials areas is very effective.

### 제1장서론

#### 제 1 절 연구배경

산업기계, 원자력 발전소, 항공기 등 산업현장에서 많이 사용되는 산업 설 비 및 부재들은 결함이 발생할 가능성이 높고, 결함 발생 시 설비 및 부재의 파괴를 초래하여 막대한 손실이 발생한다. 따라서 결함의 검출을 위해 초음 파, X선, 와전류 등의 여러가지 비파괴 검사 기법이 현장에서 적용되고 있다. 이러한 방법들은 접촉식이거나 대상물에 전처리를 필요한 문제점이 있으 나, 레이저를 이용한 계측 방법은 비접촉식이며, 특별한 전처리 없이 비파괴 검사를 수행할 수 있다.

일반적으로 변형을 측정하는 방법은 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분된다. 대표적인 접촉식 변형측정 방법은 스트레인게이지와 가속도계이며, 비접촉식 변형측정 방법은 도플러의 원리를 이용하는 레이저 도플러 진동계(LDV)가 있으며, 대표적인 방법은 전자처리 스페클 패턴 간섭법(ESPI)으로 70년대에 개발되었으며[1][2], 레이저의 시간적 공간적인 가간섭성을 이용하여, 정밀한 수준으로 대상물 전체 영역에 걸쳐 실시간측정 및 해석할 수 있다[3]. 그러나 ESPI는 대상물에 발생하는 변형을 정밀하게 측정할 수 있으나[4] 외부에서 발생하는 외란에 매우 민감하여 외부진동을 감쇠하는 방진 테이블이 없는 산 업현장에서는 그 적용성이 매우 낮다.

스페클을 이용하는 또 다른 방법인 전단간섭법(Shearography)은 광학간섭계 를 적절하게 구성하여 변형의 도함수 성분을 구할 수 있다는 개념으로 Leendertz[5]에 의해 개발되었고, 후에 Hung[6]이 이를 더욱 발전시켰으며, 이 를 이용하여 변형률 정보를 직접 획득할 수 있다. 개발 당시 전단간섭법은 기울기를 측정하기 위하여 개발되었으며, 이는 넓은 영역 전체에 발생하는 변형의 기울기를 동시에 측정하는 스트레인게이지와 동일하다고 할 수 있다 [7-11].

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

또한 ESPI보다 간섭계의 구성이 간단하고, 레이저의 가간섭거리가 상대적 으로 짧아도 측정이 가능하여, 전단간섭법의 응용 영역은 더욱 증가하여 대 상물의 진동해석에도 사용되고 있으며, 결함의 정량화[12], 복합재 구조물의 해석[13] 등 비파괴 검사분야에서 유용한 방법으로 활용이 되고 있다[14].

그러나 현재까지의 전단간섭계는 변형의 기울기만을 측정하는데 이용되고 있으며, 특히, 결함계측에 있어서 전단간섭법을 이용하여 압력용기 결함부위 에 발생한 변형의 변곡점 사이의 거리를 결함길이로 하는 결함 길이의 정량 화에 관한 기법을 제시하였고[15][16], 전단간섭법을 이용하여 임의의 대상물 에 발생하는 진동모드를 ESPI와 비교하는 등에 관하여 연구를 진행하였다 [17-24]. 또 다른 연구자는 압력용기의 결함 정량화에 있어서 결함계측에 최 적의 전단량이 있음을 제시하였다[25][26].

이렇게 전단간섭법의 장점이 지속적으로 연구되고 있으나, 대상물에 발생 하는 결함의 측정에만 연구 분야가 머무르고 있으며, 대상물에 발생하는 변 형을 측정하는 방법은 ESPI가 주도적 역할을 하고 있다.

그런데 ESPI는 산업현장에서의 적용성이 떨어지며, 진동의 해석에 있어서 도 동일한 조건에서 대상물에 발생하는 진동모드별 진폭을 정량 측정할 수 없으며, 진동해석이 가능한 장비로 성능이 우수한 레이저 도플러 진동계 (LDV)는 대상물의 진동해석에 소요시간이 매우 길다는 제한이 있다[24].

#### 제 2 절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 앞에서 언급된 다른 방법 및 전단간섭법의 제한을 극복하고 산업적 활용을 높이고자, 전단간섭법과 수치적분을 이용하여 대상물에 발생 하는 결함의 가시화와 면외변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

본 논문에서 제안하는 기본 개념은 전단간섭법이 기본적으로 화상처리방법 임을 감안하여, 전단량을 상면에서의 화소수로 변환하는 것이다. 현재까지는 전단간섭법에서 가장 중요한 변수인 전단량을 결함검출 민감도에 따라 연구 자 임의로 적용되고 있는데, 이 전단량을 화소수로 변환하여 전단간섭법의 측정결과에 적용하고, 수치적분하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 측정할 수 있다는 것이다.

이를 검증하기 위하여 원형평판에 발생하는 면외변형의 정량계측, 내압의 변화에 따른 내부결함이 있는 압력용기의 결함계측 및 면외변형의 정량계측, 동일한 외부 가진력을 받는 진동하는 평판의 공진주파수, 진동모드형상 및 진동모드 진폭의 정량계측에 대하여 실험과 해석을 수행하였다. 실험과 해석 방법으로는 유한요소해석, LDV, ESPI 그리고 전단간섭법에 의한 실험을 동시 에 수행하여 제안된 기법의 신뢰성과 장점을 검증하였다.

본 논문에서 제안된 기법은 전단간섭법을 이용하여 대상물에 발생하는 면 외변형을 정량적으로 측정할 수 있었으며, 전단간섭법의 장점인 간단한 간섭 계의 구성과 저렴한 레이저의 사용, 그리고 외란에 강인한 장점을 바탕으로 전단간섭법의 산업적 현장적용성을 높이고, 비파괴 검사기법으로서 스페클 패턴 간섭법이 안정적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

### 제 2 장 이론적 배경

#### 제 1 절 스페클과 프린지

#### 1. 스페클 형성

레이저 빛을 임의의 대상물에 비추면, 대상물의 표면에서 어른거리는 입자 를 볼 수 있다. 이러한 어른거림은 대상물의 표면에서 난반사된 빛이 공간상 에서 서로 간섭을 일으키게 되고, 이러한 간섭 효과가 밝고 어두운 부분이 무질서하게 분포하는 어른거림의 형태로 나타나는데, 이를 스페클 효과라고 한다. 이러한 스페클 효과는 레이더 및 초음파 이미지에서도 나타난다[27].

이러한 스페클은 레이저의 가간섭성과 대상물 표면의 광학적 거칠기 때문 에 발생하는데, 즉, 대상물의 표면 거칠기가 조사되는 레이저 빛의 파장 정도 나 그보다 클 때 나타난다. 일반적인 광학거울의 거칠기는 \/10정도이기 때문 에 전반사가 발생하고, 거울에서는 스페클이 발생하지 않게 된다.

스페클은 관측 방법에 따라 Objective Speckle과 Subjective Speckle로 나눌 수 있으며, 이 둘의 가장 큰 차이점은 결상렌즈의 사용여부에 따라 구분된다.

Objective Speckle은 관측면의 위치에 따라 변화하게 되며, 대상물의 표면에 빛이 비출 때, 대상물 표면의 모든 점에서는 흡수와 반사가 일어나는데, 반사 가 일어나는 점은 Huygens-Fresnel의 2차 파면과 유사한 구면파를 생성한다. 표면의 모든 점으로부터 산란된 빛의 진폭의 합은 공간상의 임의의 한 점에 서 빛의 복소진폭의 합으로 나타난다. 이를 Fig. 2-1에 나타내었으며, 이의 물 리적 의미를 살펴보면 다음과 같다.

대상물 표면의 모든 점은 Q에 영향을 주게 되며, Q와 인접한 Q'사이의 거 리가 Δ<sub>X</sub>라고 하고, P<sub>1</sub>과Q, P<sub>2</sub>와 Q까지의 경로차는 s이며, P<sub>1</sub>과Q, P<sub>2</sub>와 Q' 까지의 경로차는 s'이라고 할때, s와 s'과의 상대적인 경로 변화는 Eq.(2-1)과 같이 유도할 수 있다.



Fig. 2-1 The scattering of light by a rough surface

$$s = (P_1Q - P_2Q) \simeq \frac{-xD}{L} + \frac{-D^{-2}}{2L}$$

$$s' = (P_1Q' - P_2Q) \simeq \frac{-xD}{L} + \frac{-D^{-2}}{2L} + \frac{-\Delta xD}{L}$$

$$\Delta s = s' - s = \frac{-\Delta xD}{L}$$
(2-1)

Δ<sub>s</sub>가 파장보다 상당히 작다면, 상대적 위상은 근사적으로 동일하지만,
Δ<sub>x</sub>D/L ≃λ라면 인접한 점과의 위상은 전혀 다르기 때문에, Q와 Q'에서 빛
의 강도는 상호 연관성이 없게 된다. 이렇게 상호 연관성이 없게 되는 거리
Δ<sub>x</sub>의 2배를 스페클의 크기라고 할 수 있으며, 그 거리는 Eq.(2-2)과 같이 표 현할 수 있다[28].

$$S_{o} = 1.22 \frac{\lambda L}{D}$$
 (2-2)

이와 같이 Objective Speckle은 공간상의 평면에만 의존성이 있으며, 결상렌 즈를 사용하지 않는다. 하지만, Subjecive Speckle은 ESPI와 같이 결상렌즈를 사용할 때 발생하며, 스페클의 공간분포는 결상시스템의 회절한계에 의해 결 정된다.

- 5 -



Fig. 2-2 Speckle pattern formation in the image plane of a lens

즉, Fig. 2-2의 대상물 위의 P<sub>1</sub>에서 반사된 빛은 렌wm L을 통과하면서 결 상면의 Q에 회절 무늬를 형성한다. Q에 형성되는 회절무늬의 진폭 분포는 제 1종베셀함수로 설명할 수 있고, Q는 P<sub>1</sub>에 인접한 점들에서 발생하는 회절무 늬에 의해 영향을 받는다. 그러나 인접한 점들의 2차, 3차 회절무늬가 Q에 영향을 미칠 수 있으나, 1차 회절무늬보다 매우 작기 때문에 2차 이상의 회 절무늬의 영향은 무시할 수 있고, Q에서 빛의 강도는 P<sub>1</sub>을 중심으로 하고, 그 한계는 P<sub>2</sub>로 하는 그 주위 일부 영역에서 산란된 빛의 영향을 받는다. 이 때 주변영역의 지름 d<sub>o</sub>는 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub>사이의 거리의 두배이다. 이러한 관계를 이 용하여 결상시스템에서 얻어지는 스페클의 크기는 거리QQ'의 2배이고, 베셀 함수를 이용하여 Eq.(2-3)와 같다.

$$S_s = \frac{2.44\lambda_V}{a}$$
(2-3)

여기서, a는 렌즈 조리개의 지름이며, v는 렌즈부터 결상면까지 거리를 나타낸다.

Fig. 2-2에 표현된 것처럼 렌즈 조리개를 통과한 스페클은 Airy Disc모양의 회절패턴을 보이므로, 각각의 스페클의 크기는 Eq.(2-4)와 같이도 표현할 수 있다.

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

여기서, M 은 렌즈 확대배율, F는 렌즈의 f-number이며, 간략한 렌즈이론 으로부터 산란된 표면에서 스페클의 크기는 다음과 같다.

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

#### 2. 두 빛의 간섭 : 파의 중첩

두 개 혹은 그 이상의 파면들이 주어진 점을 지나갈 때, 그 점에서의 변위 의 총 진폭은 각각의 변위의 합에 의해서 주어진다. 중첩의 원리가 적용되는 시스템은 선형 시스템이며, 빛의 강도가 매우 높은 광원을 사용할 때는 중첩 의 원리가 적용될 수 없고, 비선형 광학이 적용된다[27].

$$U(\mathbf{r}, \mathbf{t}) = u_0 \exp i(2\pi f \mathbf{t} + \Phi)$$
(2-6)

U(r,t)는 빛의 복소 진폭이고, u₀는 진폭, f는 주파수, φ는 위상이며,
 빛의 강도 I는 u₀²에 비례하므로 Eq.(2-7)과 같이 표현할 수 있다.

복소 진폭 U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>에 의해 표현되는 빛을 고려하면 Eq.(2-8)와 Eq.(2-9)와 같으며, 전체 복소진폭은 Eq.(2-10)와 같다.

$$I = UU^* \tag{2-7}$$

- 7 -

$$U_1 = u_1 \exp i(2\pi ft + \Phi_1)$$
 (2-8)

$$U_2 = u_2 \exp i(2\pi f t + \Phi_2) \tag{2-9}$$

$$U = u_1 \exp i(2\pi ft + \Phi_1) + u_2 \exp i(2\pi ft + \Phi_2)$$
 (2-10)

Eq.(2-10)를 정리하고, 빛의 세기로 바꾸면, Eq.(2-11), Eq.(2-12)와 같다.

$$U = (u_1 \exp i \Phi_1 + u_2 \exp i \Phi_2) \exp i 2\pi ft$$
(2-11)  

$$I = UU^*$$

$$= u_1^2 + u_2^2$$
(2-12)  

$$+ u_1 u_2 [\exp i (\Phi_1 - \Phi_2) + \exp - i (\Phi_1 - \Phi_2)]$$

다음 관계를 사용하여 Eq.(2-12)를 표현하면 Eq.(2-13)과 같이 표현할 수 있 다.

$$(e^{i\Phi} + e^{-i\Phi}) = 2\cos\Phi$$
$$UU^* = u_1^2 + u_2^2 + 2u_1u_2\cos(\Phi_1 - \Phi_2)$$
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\Phi_1 - \Phi_2)$$
(2-

여기서 
$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$$
는 두 파의 위상차이며, 이를 다시 정리하면, Eq.(2-14)와

(2-13)

같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2 \cos \Phi}$$
 (2-14)

### 3. 프린지의 형성 : 이중노광법과 이미지 감산

카메라 신호는 입력된 빛의 세기에 비례하기 때문에 변형에 대한 간섭무늬 의 형성은 변형 전과 변형 후의 각각의 이미지를 저장하고, 저장된 이미지를 합산처리하거나 감산처리하여 변형에 의한 간섭 줄무늬를 나타낼 수 있다. 홀로그램 필름의 경우는 합산이며 Eq.(2-15)와 같고, ESPI의 경우는 감산처리 에 해당하며 Eq.(2-16)과 같다[8].

$$\begin{split} \mathbf{I}_{b} &= \mathbf{I}_{1} + \mathbf{I}_{2} + 2\sqrt{\mathbf{I}_{1}\mathbf{I}_{2}}\cos \Phi \\ \mathbf{I}_{a} &= \mathbf{I}_{1} + \mathbf{I}_{2} + 2\sqrt{\mathbf{I}_{1}\mathbf{I}_{2}}\cos (\Phi + \Delta \Phi) \\ \mathbf{I}_{add} &= \mathbf{I}_{b} + \mathbf{I}_{a} \\ &= 2\mathbf{I}_{0}(1 + \Im\cos \Phi) + 2\mathbf{I}_{0}[(1 + \Im\cos (\Phi + \Delta \Phi))] \\ &= 4\mathbf{I}_{0} + 2\mathbf{I}_{0}\Im[\cos \Phi - \cos (\Phi + \Delta \Phi)] \\ &= 4\mathbf{I}_{0} + 4\mathbf{I}_{0}\Im[\cos (\Phi + \frac{\Delta \Phi}{2})\cos \frac{\Delta \Phi}{2}] \end{split}$$
(2-15)

$$|I_{sub}| = |I_b - I_a|$$

$$= |4I_0 \Im \left[ \sin\left(\Phi + \frac{\Delta \Phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta \Phi}{2}\right) \right]$$
(2-16)



Fig. 2-3 The fringe pattern formation depend on deformation

### 제 2 절 간섭무늬의 해석

#### 1. 면외변형 측정 간섭계 및 해석

먼저 대상물이 관측면에서 초점을 맺는 것을 생각하면, Fig. 2-4에서 보는 것처럼 S에서 확산하는 빛이 대상물에 조사되고, 이때의 광경로는 1로 표현할 수 있으며, Eq.(2-17)과 같다[27].



Fig. 2-4 The optical path of a ray : image-plane viewing

$$1 = SP + 1_p + PO + OR \tag{2-17}$$

여기서, SP와 PO는 대상물 표면의 임의의 P의 주변영역에서 S와 O까지의 평균거리이고, 1<sub>p</sub>는 대상물 표면의 무작위적 높이 변화에 따른 광경로이다.

Fig. 2-5에서 관측면의 Q는 T에서 확산 조사되는 것으로 생각할 수 있으며, 대상물의 임의의 영역이 렌즈 조리개를 통하여 초점을 맺는다. 이를 전체 광 경로로 표현하면 Eq.(2-18)로 나타낼 수 있다.

$$l = SP + l_p + TQ - PT$$
(2-18)



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



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

관측면이 렌즈의 초점면일 때, T의 위치가 무한대일 때 더 정확하며, Fig. 2-6에서 관측면의 Q에 조사되는 모든 광선은 MQ에 평행하게 된다. 관측면의 한점에 조사되는 면적은 대상물에서 관측 렌즈 조리개에 투사되는 영역이며, 관측면이 심하게 기울어 있지 않으면, 그 면적은 관측 렌즈 조리개의 면적과 거의 같다. S부터 P를 거쳐 Q까지의 광경로는 Eq.(2-19)와 같이 표현할 수 있 으며, S부터 Q까지 광경로는 i) 경로 S부터 P까지, ii) 표면의 높이변화와 관 련한 경로<sup>1</sup><sub>P</sub>, iii) 경로 S부터 P까지로 구성된다.

$$l = SP + l_p + MQ + PN \tag{2-19}$$

- 11 -



Fig. 2-7 The illuminating wavefronts introduced by a surface displacement

Fig. 2-6에서 SP와 SP', PQ와 P'Q는 서로 평행한 것으로 가정한다. Fig. 2-7 에서 대상물에 변형이 발생하였을 때, i)에 의한 경로 변화는 Δl<sub>i</sub>이며, 실제적 인 간섭계의 배열을 고려할 때 SP>>d이기 때문에 Eq.(2-20)과 같이 쓸 수 있 다.



Fig. 2-8 The scattered wavefronts introduced by a surface displacement

대상물의 표면이 변형하여도 Δ1<sub>p</sub>는 변하지 않는다고 가정할 수 있으며, iii) 와 과련된 경로 Δ1<sub>2</sub>의 변화는 Fig. 2-8에 표현된 Eq.(2-21)과 같다.

$$\Delta l_{v} = d \cos \aleph_{v}$$
  
$$\Delta l_{v} = -\boldsymbol{n}_{v} \cdot \boldsymbol{d}$$
(2-21)

변형에 의한 전체의 위상변화는 Eq.(2-22)로 표현되며, 모든 광계측의 기본 식이 된다.

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\boldsymbol{n}_i - \boldsymbol{n}_v) \cdot \boldsymbol{d}$$
(2-22)

여기서, n<sub>i</sub>는 조사방향이고, n<sub>v</sub>는 관측방향이며, Eq.(2-22)는 면외변형 뿐만 아니라 면내변형의 줄무늬 패턴에도 적용되며, 대상물에 조사되는 입사각과 관측각이 다르면 위상변화는 Eq.(2-22)와 같으며, 이를 조사각과 관측각에 의 해 표현하면 Eq.(2-23)과 같다.

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \Theta_{i} + \cos \Theta_{v}) d \qquad (2-23)$$

여기서, θ<sub>i</sub>은 대상물 표면의 수직면과 조사면과의 각도이며, θ<sub>v</sub>는 관측면과 이루는 각이다.



Fig. 2-9 A diagrammatic arrangement of an out-of-plane displacement

- 13 -

Eq.(2-23)를 이용하여 Fig. 2-9와 같이 면외변형 측정에 민감한 간섭계를 구 성할 수 있으며, 물체광 U<sub>o</sub>이 물체에 조사되고 난반사된 빛이 광분할기(Beam Splitter : B.S)에 입사되고, 참조광 U<sub>r</sub>이 물체를 거치지 않고 직접 광분할기에 입사된다. 이렇게 입사된 두 빛에 의한 간섭이 일어나고, 대상물에 변형이 발 생할 때, 참조광에 비하여 물체광의 위상이 변화한다. 또한 관측각 θ<sub>v</sub>=0이 므로 Eq.(2-23)은 Eq.(2-24)와 같이 표현되고, 대상물에 발생하는 변형을 계산 할 수 있는데 이는 Eq.(2-25)와 같다.

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \Theta_{i}) d \qquad (2-24)$$

$$d = \frac{\lambda}{2\pi (1 + \cos \Theta_{i})} \Delta \phi \qquad (2-25)$$

#### 2. 전단간섭계 및 전단간섭무늬의 해석

Fig. 2-10은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스페클의 발생은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히 고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD 의 상면(Image plane)에 맺히게 된다.



Fig. 2-10 Speckle pattern shearing interferometry

이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 면외변형측정 간섭계와 동일하며, 변 형 전 후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 면외변형측정 간섭계와 달리 대 상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다.

Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 δ<sub>x</sub>로 표현한다. 전단방향과 전단량 등 에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다.

이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub>에 Φ<sub>1</sub>=Φ(x,y)와 Φ<sub>2</sub>=Φ(x+δ<sub>x</sub>,y)와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 다음과 같 다.

$$\Phi = \Phi(\mathbf{x} + \delta_{\mathbf{X}, \mathbf{y}}) - \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

변형에 의한 위상차의 변화 Δφ는 Eq.(2-26)과 같으며, 이는 면외변형의 계 측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하며, 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 ESPI와 유사하기 때문에 Eq.(2-22)를 이용하게 된다. 이때 Eq.(2-22)와 차이점은 Eq.(2-27)에 표현한 바 와 같이 *d*와 *d*'은 임의의 P에 조사된 두 점의 각각의 변형이다[27][29].

$$\Delta \Phi = \Phi' - \Phi = (\Phi_2' - \Phi_1) - (\Phi_2 - \Phi_1) = (\Phi_2' - \Phi_2) - (\Phi_1' - \Phi_1)$$
(2-26)

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\boldsymbol{n}_{i} - \boldsymbol{n}_{v}) \cdot (\boldsymbol{d} - \boldsymbol{d}')$$
(2-27)

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 Eq.(2-27)을 Eq.(2-28)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta_{\mathbf{d}} \tag{2-28}$$

Δd는 테일러급수에 의해 Eq.(2-29)와 같이 표현할 수 있으며, Δ<sub>x</sub>는 상면에 서 전단량 δ<sub>x</sub>와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 Eq.(2-29)에서 2차 이상의 고 차항은 무시하면, Eq.(2-29)은 Eq.(2-30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = d(x) - d(x_0)$$

$$= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \cdots$$
(2-29)

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{x}} \right) \delta_{\mathbf{X}}$$
(2-30)

제 3 절 정량화를 위한 위상정보의 해석

1. 위상이동기법의 적용

#### 가. 위상이동장치

전자제어 시스템을 이용한 위상이동장치를 사용하여 스페클 패턴의 강도를 측정하여 파면의 위상을 얻어낼 수 있으며, Fig. 2-11은 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 카메라 에 입사되는 영상을 이용하여 결과를 얻어낸다. Fig. 2-12는 PZT를 이용한 참 조광 위상이동장치를 이용한 간섭계의 개략도를 나타내고 있다[29].



Fig. 2-11 Means of shifting the phase in an interferometer



Fig. 2-12 Schematic of ESPI using PZT mounted mirror as phase shifter

#### 나. 위상측정 알고리즘

위상이동방법을 적용하는 일반적인 간섭무늬의 수식적 표현은 Eq.(2-31)과 같으며, 미지수가 3개이므로 위상을 결정하기 위해서는 최소 3개이상의 이미 지가 필요하다. 여기서 미지수는 빛의 세기 I<sub>0</sub>, 간섭줄무늬의 가시도 χ<sub>0</sub>, 파면 의 위상 φ이며, α는 간섭계의 참조광과 물체광 사이의 상대적인 위상이동량 으로 알고 있는 값이다. 또한, 기록된 빛의 강도분포를 Eq.(2-32)와 같이 쓸 수 있다[30][31][32].

$$I = I_0 [1 + Y_0 \cos(\Phi + a)]$$
 (2-31)

$$I_{i}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{1}{\Delta} \int_{\alpha_{i}+\Delta/2}^{\alpha_{i}-\Delta/2} I_{0}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \{1 + \aleph_{0}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \cos[\Phi(x,\mathbf{y}) + \alpha(t)]\} d\alpha(t)$$
(2-32)

여기서, a<sub>i</sub>는 i번째 노출에 대한 상대적인 위상의 평균값이고, a(t)는 시간 의 함수로 참조광과 물체광 사이의 상대적인 위상이동이다.

Eq.(2-32)를 위상이동기법을 적용할 수 있는 표현으로 변환하면 Eq.(2-33)과 같다.

$$I_{i}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = I_{0}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \left\{ 1 + \lambda_{0}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \cos\left[\Phi(x, \mathbf{y}) + a_{i}\right] \right\}$$
$$= I_{0}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \left\{ 1 + \mathbb{V}_{0}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \cos\left[\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + a_{i}\right] \right\}$$
(2-33)

$$\sin \frac{\frac{\Delta}{2}}{\frac{\Delta}{2}} = \operatorname{sinc} \frac{\Delta}{2} = 1$$
 (2-34)

Δ=2π라면, 빛의 강도의 변화는 없으며, Eq.(2-33)을 다시 쓰면 Eq.(2-35) 와 같다.

$$I_{i}(x, y) = a_{0}(x, y) + a_{1}(x, y) \cos a_{i} + a_{2}(x, y) \sin a_{i} \quad (2-35)$$

$$a_0(x, y) = I_0(x, y)$$
 (2-36)

$$a_1(x, y) = I_0(x, y) v_0(x, y) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \cos \Phi(x, y) \qquad (2-37)$$

$$a_{2}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = -I_{0}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \forall_{0}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \operatorname{sinc}\left(\frac{\Delta}{2}\right) \sin \Phi(\mathbf{x},\mathbf{y})$$
(2-38)

이들 식에 최소자승법의 해는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_{0}(x, y) \\ a_{1}(x, y) \\ a_{2}(x, y) \end{bmatrix} = A^{-1}(a_{i})B(x, y, a_{i})$$
(2-39)

$$A(\alpha_{i}) = \begin{bmatrix} N & \sum \cos \alpha_{i} & \sum \sin \alpha_{i} \\ \sum \cos \alpha_{i} & \sum \cos^{2} \alpha_{i} & \sum \cos \alpha_{i} \sin \alpha_{i} \\ \sum \sin \alpha_{i} & \sum \cos \alpha_{i} \sin \alpha_{i} & \sum \sin^{2} \alpha_{i} \end{bmatrix}$$
(2-40)
$$B(\alpha_{i}) = \begin{bmatrix} \sum I_{i}(x, y) \\ \sum I_{i}(x, y) \cos \alpha_{i} \\ \sum I_{i}(x, y) \sin \alpha_{i} \end{bmatrix}$$
(2-41)

행렬A를 계산하여야 하고, 간섭줄무늬의 각 점의 위상은 계수  $a_1$ 과  $a_2$ 를 계산하고, 각 점에서 B값을 얻을 수 있다. 최종적으로 계산되는 위상결과 는 다음과 같다.

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \tan^{-1} \left[ \frac{-\mathbf{a}_2(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\mathbf{a}_1(\mathbf{x}, \mathbf{y})} \right]$$
(2-42)
$$= \tan^{-1} \left\{ \frac{\mathbf{I}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{y}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \operatorname{sinc} \frac{\Delta}{2} \sin[\Phi(x, \mathbf{y})]}{\mathbf{I}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \mathbf{y}_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \operatorname{sinc} \frac{\Delta}{2} \cos[\Phi(x, \mathbf{y})]} \right\}$$

Eq. (2-42)를 이용하여 3-프레임 기법, 4-프레임 기법, 5-프레임 기법, Carre 방법 그리고 푸리에 변환 방법 등 여러 가지 위상계산 알고리즘이 있는데 [33], 본 논문에서는 일반적으로 가장 많이 사용하는 4-프레임 기법을 적용하 였다. 이 경우 기록되는 4개의 이미지의 각 화소별 세기는 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$I_1 = I_0 [1 + V \cos \Phi]$$
 (2-43)

- 20 -

$$I_2 = I_0 [1 + \Im \cos(\Phi + \frac{\pi}{2})] = I_0 [1 - \Im \sin \Phi]$$
 (2-44)

$$I_{3} = I_{0}[1 + \Im \cos(\Phi + \pi)] = I_{0}[1 - \Im \cos \Phi]$$
 (2-45)

$$I_4 = I_0 [1 + \Im \cos (\Phi + \frac{3\pi}{2})] = I_0 [1 + \Im \cos \Phi]$$
 (2-46)

각 점에서의 위상과 줄무늬 가시도는 다음과 같다.

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right)$$
(2-47)

$$X = \frac{\sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2}}{2I_0}$$
(2-48)
#### 2. 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 위 상값이 급격하게 변하는 부분을 인식하는 단계에서 오류를 발생하게 하는 요 인이다. 즉, 차수를 인식하는데 있어서 에러가 발생되는 것은 대상물의 정량 해석 결과에 에러를 포함시키게 된다.

필터링의 기본 개념은 영상내의 특정한 위치에서 마스크 아래에 있는 화소 의 밝기와 마스크 계수들간의 곱을 합한 것이다. Fig. 2-13은 일반적인 3×3 마스크를 보여준다. 임의의 위치에서 마스크 아래에 있는 화소들의 명암도를 Z<sub>1</sub>,Z<sub>2</sub>,...,Z<sub>9</sub>으로 표시하면 선형 마스크의 응답은 다음과 같다.

$$R = w_{1}z_{1} + w_{2}z_{2} + \dots + w_{9}z_{9}$$
(2-49)

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

<b>W</b> 9	<b>W</b> 2	<b>W</b> 3
w 8	w 1	W 4
w 7	W 6	w <sub>5</sub>

Fig. 2-13 3×3 mask with the some coefficient

#### 가.메디안 필터링

메디안 필터링이란 주변 픽셀 값들 중에서 그 중간 값으로 대치하는 필터 링 방법으로 그 원리는 Fig. 2-14와 같다.

Fig. 2-15는 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(가 운데), 5개의 선형마스크를 사용한 메디안 필터링(아래)의 차이를 잘 보여주 고 있다.



Fig. 2-14 Concept of median filtering



Fig. 2-15 Example of median filtering

### 나. 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 톱니 파의 에지부분의 위상정보 손실이 매우 커서 결펼침을 할 수 없게 된다. 이 러한 손실은 차단하고 데이터를 필터링하는 방법이다. Fig. 2-16에 그 방법을 개략적을 나타내었다.



Fig. 2-16 Concept of  $\pi$  shifting filtering

이것을 다시 설명하면 위상을 나타내는 이미지 데이터는 256분포를 가지는 데 이는 2π에 해당하므로, 위상단면의 위상값 분포가 그레이 레벨 128 [π] 보 다 크면 감산하고, 작으면 가산을 한다. 이렇게 계산을 수행한 결과가 Fig. 2-17(a)에서 설명되는데 흑색 실선은 π이동을 수행하기 전의 위상값의 분포를 나타내며, 점선은 π 이동을 수행한 결과이다. Fig. 2-17(b)은 π이동 전 후의 이 미지 데이터를 각각 메디안 필터링한 결과이다.





(a) Distribution of the original and the executed  $\pi$  shifting data

(b) Median filtering result of data(a)



(c) Reversion of  $\pi$  shifted data

Fig. 2-17 Sequence of  $\pi$  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 굵은 점선이 복원되는 데이 터이다.

#### 다. 위상 필터링

위상지도에서 2π의 불연속 정보와 노이즈의 정보는 공간주파수가 매우 높 은 특성을 갖는다. 이렇게 높은 공간주파수의 노이즈를 제거하기 위하여 평 균필터를 사용하면 노이즈를 줄이기는 하지만 이와 함께 2π불연속 정보도 함 께 잃게 된다. 앞에서 설명한 π위상이동방법도 내부에서 메디안 필터링을 수 행하므로 약간의 정보를 잃게 된다. 이러한 제한을 극복하기 위하여 위상필 터링을 적용하며, Fig. 2-18에 순서도를 나타내었다.

Fig. 2-19의 (a)와 같은 톱니파의 데이터는 바로 필터링을 하지 않고 위상값 을 (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 프린지 의 간격을 고려해야 하는데 프린지의 간격이 좁으면 필터의 커널을 작게하여 평균값을 구하여야 한다.



Fig. 2-18 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. 2-19 Sequence of a modified mean value filtering

## 3. 결펼침

위상결펼침의 기본 원리는 데이터 경로를 따라 2π단위내에서 톱니파를 가 지는 위상값 φ를 통합시키는 것이다. 각 픽셀에서 위상의 기울기를 계산하는 데, 이때 위상차의 절대값이 3π/2와 같은 일정한 한계치를 초과한다면 위상 줄무늬 경계라고 가정한다. 이 위상 도약은 위상차의 부호에 따라서 2π를 가 산 또는 감산하여 정확하게 한다. 임의의 점에서 위상을 φ+2πN으로 계산 하기 위하여 현재 프린지 차수N은 저장하여야 한다.

위상이동법을 적용해서 구해진 위상은 Arctangent의 함수로부터 계산되었으 므로 0과 2π 사이의 값만 가지게 되며 Φ(x,y)=2Nπ 인 점에서 불연속점이 발생한다. 불연속구간을 연속구간으로 변환하여 위상 변화에 따른 변형 정보 를 획득하기 위하여 위상값의 차가 임계값 이상일 경우 불연속으로 가정하여 modulo 2π 계수, 차수를 구하고 연속된 위상으로 변환하는 결펼침(Phase Unwrapping) 단계를 거친다. Fig. 2-20는 이러한 결펼침과정을 나타낸다.



(a) Data of phase value



(c) Comparison



(b) Result of phase unwrapping



(d) Presentation of gray level

Fig. 2-20 Sequence of phase unwrapping

이를 자세히 설명하면 Fig. 2-20(a)에서 얻어진 위상값을 Eq.(2-50)을 이용하 여 이미지 상의 모든 점에서 각각 인접한 화소들의 위상차를 구한다.

$$\Delta \Phi_{k}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \Phi_{k}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \Phi_{k-1}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$
(2-50)

여기서, Φ<sub>k</sub>은 k번째 화소의 위상을 나타내며, 위상이 급변하는 점에서 위 상의 값이 0에서 2π, 또는 일정한 임계값 이상이면 그 화소의 위상 값에 2π을 더하여 주고 반대인 2π에서 0으로 변하는 부분에서는 2π의 값을 감 소시키면서 Fig. 2-20(a)의 불연속적인 위상의 값을 (b)처럼 통합시킨다. (c)는 불연속적인 위상값과 연속으로 변환시킨 값을 비교하고 있다. (d)는 2nπ의 분포를 갖기 때문에 이 값이 대상 물체의 변형 정도가 되는 것이다. 그러나 화면에서는 백색으로 나타나기 때문에 최대 변형점을 백색으로 나타나게 하 여 시각상의 효과를 나타내기 위하여 2π의 위상분포로 다시 나타낸다.

각 화소의 위상변화와 일치하는 변위는 위상정보로부터 결정되므로 한 점 (*x*, *y*) 위치에서의 그 물체표면의 변형 d는 Eq.(2-51)과 같다.

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\Delta \Phi_{\mathbf{k}}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\lambda}{2\pi(\cos\Theta_{i} + \cos\Theta_{v})}$$
(2-51)

여기서,  $\lambda$ 는 레이저의 파장이며,  $\theta_i$ 는 레이저가 물체에 조사되는 각도,  $\theta_v$ 는 물체와 CCD가 이루는 각도이다.

# 제 3 장 전단간섭법을 이용한 변형계측의 개념

### 제 1 절 전단간섭법 적용의 제한사항

서론에서 언급한 바와 같이 전단간섭법은 여러 가지 장점이 있으며, 또한 이를 이용하여 대상물에 발생하는 변형의 변화를 측정하고 그 응용으로 대상 물에 내재된 결함을 측정하는데 유용하게 사용되고 있다.

전단간섭법은 그 측정결과를 변형의 도함수(Derivative), 구배(Gradient), 기울 기(Slope) 등으로 표현하고 있으며, 거의 모든 연구자들이 사용하고 있는 전단 간섭법의 이론식을 표현할 때는 전단량이 '충분히 작다'는 조건을 적용하여 미분(Differentiation)으로 표현하고 있다[15, 27, 29].

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

그러나 전단간섭법은 윗식과 같은 도함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내외 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물 의 결함 검출의 민감도를 높이기 위해 전단량을 측정조건에 맞게 임의로 부 여하며, 통상 대상물에 존재하는 결함의 1/2정도를 전단량으로 한다. 이 또한 결함의 크기를 알고 있는 경우에 해당되며, 전단량이 50%라고 하는 것은 전 단량이 '매우 작다'는 조건을 적용할 수 없게 된다. 즉, 대상물에 내재되어 있 는 결함부위에 발생하는 변형의 크기를 모르는 상태이며, 이러한 상황에서 적용되는 전단량이 매우 작다는 것은 단언하기 어려운 것이다.

더욱이 전단간섭법은 전단량에 따라 변형의 해석 영역이 전단량의 증가만 큼 증가하기 때문에 대상물에 발생한 원래의 변형영역이 얼마인지를 알 수가 없다.

앞서 언급한 바와 같이 실제는 도함수나 미분이 될 수 없으며, 전단량에 의한 변형의 평균기울기의 연속적인 표현이라고 하는 것이 옳다고 판단된다.

# 제 2 절 변형계측에 이용되는 전단간섭법의 개념

본 논문에서 제안하는 사항은 앞에서 언급한 전단간섭법의 이론적 제한사 항을 수치미분을 이용하여 표현하고, 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적 분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

실제 전단간섭법을 이용한 측정결과는 Eq.(2-28)과 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형 Δd는 Eq.(2-29)와 같다.

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \qquad (2-28)$$

$$\Delta d = d(x) - d(x_0) \qquad (2-29)$$

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

Eq.(2-29)에서 고차항을 무시하면, Eq.(3-1)과 같으며, 이를 Eq.(2-28)에 대입 하면 Eq.(3-2)와 같다.

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}(\mathbf{x}) - \mathbf{d}(\mathbf{x}_0) \approx \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\Delta \mathbf{x}}{1!}$$
(3-1)

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{ d(\mathbf{x}) - d(\mathbf{x}_0) \} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{-\partial d}{\partial \mathbf{x}} \right) \Delta_{\mathbf{X}}$$
(3-2)

이는 대상물에 발생하는 변형의 한 점과 전단량만큼 떨어진 두 점의 연속 적인 차이와 같으며, 이 결과는 직접적으로 적분을 적용할 수가 없으나, ESPI 나 전단간섭법 모두 화상처리이므로 변형 f, 대응화소 X<sub>i</sub>, 전단량화소 h로 바 꾸어 쓰면, Eq.(3-3)와 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f'으로 정리 하면 Eq.(3-4)와 같다.

$$f'(x_i) h \approx f(x_i + h) - f(x_i)$$
 (3-3)

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h}$$
 (3-4)

Eq.(3-4)는 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과 이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차 분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다.

Eq. (3-3)을 Eq.(3-2)에 대입하면 Eq.(3-5)와 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 Eq.(3-6)과 같이 수치적분이 가능하다.

$$\Delta \Phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f h$$
 (3-5)

$$f(x_i) \approx \sum f'(x_i) \tag{3-6}$$

또한, 대상물에 발생하는 변형은 경계조건이 양단고정 또는 양단단순을 가 정할 경우에 Fig. 3-1과 같이 삼각함수로 표현이 가능하며, 삼각함수에 유한차 분법을 적용하는 것은 그 신뢰성을 높일 수 있다.



Fig. 3-1 Deformation function depend on the boundary condition



Fig. 3-2 Comparison between differentiation and numerical differentiation

Fig. 3-2는 양단고정 경계조건에서 대상물에 발생하는 변형함수와 그 함수 의 미분, 그리고 각각의 유한차분법에 의한 수치미분 결과를 비교하였으며, 이 결과로 전단간섭법을 이용한 변형측정 결과는 대상물에 발생한 변형에 대 한 수치미분적 표현임을 알 수 있으며, 원래의 변형을 계산할 수 있음을 보 여주는 것이다.

# 제 3 절 제안된 방법의 적용

제안된 방법을 실제 실험에 적용하기 전에 검증단계로 양단고정인 경우를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 고정단을 가지는 평판의 면외변형은 Cosine 함수로서, Fig. 3-3(a)의 실선과 같은 형태이며, 이것은 ESPI를 평판에 발생하는 면외변형을 이용하여 측정한 결과로 볼 수 있다. Fig. 2-10에서 표현 된 전단간섭계의 전단거울(Mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라 에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 3-3(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉,



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result





Fig. 3-3 Algorithm of deformation reconstruction

화소수만큼 평행이동 되어 나타난다.

Fig. 3-3(b)는 Fig. 3-3(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. 3-3(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 3-3(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측 정할 수 있음을 나타낸다. 또한, 전단간섭법은 간섭계의 구성상 하나의 이미 지로부터 전단이미지를 구하여 간섭정보를 기록하게 되므로 전단량으로 인하 여 측정 결과는 전단량의 1/2만큼 전단되어 나타나게 된다.

또한, 제안된 방법을 적용하고 차분법에서의 적용과 동일하게, 전단량 변화 에 따른 해석영역의 변화를 분석하면, 대상물에 발생한 원래의 변형 및 변형 영역을 알 수 있으며, 이를 활용하여 대상물에 내재된 결함의 길이를 측정할 수도 있을 것이다.

또한, 이와 동일한 개념을 적용하여 ESPI를 이용하여 측정된 변형을 이용 하여 전단간섭줄무늬를 생성할 수도 있는데, Fig. 3-3(a)와 같은 변형이 발생 한다고 하였을 때, ESPI는 변형 측정결과는 참조광과 물체광의 차이가 본래 발생한 변형과 동일한 형태로 나타나고 그 결과가 CCD로 직접 입사된다.

그러나, 전단간섭법은 광분할기와 두 개의 거울을 거치면서 광경로가 2배가 되기 때문에 본래 발생한 변형의 2배가 광분할기에 재입사되고, 이들 두 빛 의 차가 CCD로 입사되는데, 이러한 과정을 Fig. 3-4에 표현하였다.

Fig. 3-4(a)는 ESPI의 변형 프로파일과 동일한 결과를 전단간섭법에서와 같 이 전단량 5mm에 대응하는 24화소수만큼 평행이동한 프로파일이다. (b)는 (a) 의 두 값을 감산한 결과와 전단간섭법 실험결과이며, 두 값이 비교적 잘 일 치함을 알 수 있으며, 이는 ESPI와 전단간섭법이 앞에서 언급한 것과 같이 정확한 상관관계가 있음을 증명하는 것이다.



(a) Deformation Profile from ESPI and Shifted Data



(b) Shearogram by ESPI and Experiment DataFig. 3-4 Formation of shearogram using ESPI interferogram

- 36 -

# 제 4 장 실험장치

# 제 1 절 ESPI 시스템

ESPI 시스템은 독일 Ettemeyer사의 상용제품을 사용하였으며, 장치구성은 Fig. 4-1과 같이 ESPI sensor, Nd:YAG Laser(파장: 532 nm), Optic fiber, Controller, PC로 구성이 되어 있다. 센서 내부에는 x, y, z축의 변위를 측정할 수 있는 3개의 간섭계가 구성이 되어 있으며, 셔터를 이용한 광로의 변경으 로 간섭계를 선택할 수 있다. Talbe 4-1은 ESPI 시스템의 사양을 나타내었다.



Fig. 4-1 Configuration of ESPI system

Table 4-1 Specification of ESPI system

Description	Technical data	
Measuring Sensitivity	0.03 ~ 1 µm adjustable	
Measuring range	1-20 µm per meauring step, any with serial measurement	
Measuring area	static up to $1 \text{ m}^2$ dynamic up to $400 \times 600 \text{ mm}^2$	
Working distance	variable, 0.1 > 2.5 m	
Operation modes	automatic, manual, static, dynamic 1D-, 2D-, 3D-operation	
Data interface	TIFF, ASCII, Windows metafile	

# 제 2 절 전단량 자동조절 전단간섭시스템

Fig. 4-2는 본 논문의 연구에 적용된 전단간섭 시스템의 개략도와 입체도이 며, 주요 구성품은 레이저 소스, 광 분배기, PZT, 모터, 셔터, CCD 카메라 및 기타 광학부품으로 구성되어 있으며, 이를 Table 4-2에 정리하였다.

정밀한 위상이동을 위하여 PI사의 PZT set를 사용하였으며, 전단량 조절을 위하여 x, y축에 모터를 설치하여, 전단량을 정확하게 부여할 수 있도록 제작 하였으며, 광경로 제어를 위하여 셔터를 설치하였다.



Fig. 4-2 The developed system with the auto-shearing

부품명	
Laser & Collimation Package	1
CCD Camera	1
Qube Beam Splitter	2
Motor	2
셔터	2
PZT Tranlator	2
PZT Mirror	
Expanded Lens	2
각종 광학부품 및 고정 Holder	

Table 4-2 Components of the development system

# 제 3 절 소프트웨어의 개발

# 1. 프로그램 개발과정 및 전체 프로그램의 구성

개발된 시스템을 이용하여 측정결과의 획득과정과 해석에 사용되는 프로그 램은 National Instrument사의 LabVIEW7.1을 이용하여 개발하였으며, 이미지 획득 저장 장치는 IMAQ 1409, 모터 및 셔터의 제어장치는 NI-7402를 이용하 였다.

개발된 프로그램의 전체적인 과정은 Fig. 4-3과 같이 프로그램의 개발계획 을 수립하고, 하드웨어 제어프로그램에서 제어가 필요한 카메라, PZT, 셔터, 모터 등의 프로그램을 개별적으로 완성하고, 알고리즘을 구현하는 순수 해석 부분, 즉 이미지의 획득, 실시간 감산처리, 위상지도의 계산, 필터링, 결펼침 등을 개별적으로 완성한 후 이를 전체 알고리즘 순서에 의거하여 통합하였 다.



Fig. 4-3 Develop process of entire program

개발된 프로그램의 작동 순서는 Fig. 4-4와 같고, 프로그램은 순차적인 작동 으로 측정결과를 얻을 수 있도록 하였다. 전체 메뉴는 이미지 저장, 멈춤, 이 미지 획득, 파라메터 설정, 위상지도 계산, 각종 필터링 방법, 해석영역의 선 택, 결펼침, 선형 프로파일의 획득, 최대값 측정, 3차원 표현, 이미지 획득, 데 이터 연산 등으로 구성하였다.



Fig. 4-4 Operating process of entire program

# 2. 개발된 프로그램의 세부 알고리즘

#### 가. PZT 제어

위상이동 기법을 적용하기 위하여 반드시 필요한 PZT 제어를 위하여 RS-232통신을 이용하였으며, 레이저 파장의 1/8씩 정밀하게 PZT Actuator를 작동하도록 하였다. Fig. 4-5는 개발된 PZT 제어 프로그램을 이용하여 시스템 내의 PZT가 작동하는 결과를 나타내고 있으며, 통상적인 사인곡선을 표현하 는 것으로, PZT는 정상적으로 작동하고 있음을 알 수 있다.



Fig. 4-5 Result of PZT control using the developed program

# 나. 위상지도의 계산

프로그램의 전처리 과정에서 이미지의 획득과 PZT의 작동을 순차적으로 연결하여 얻어진 이미지를 Eq.(2-48)과 같은 위상지도 계산식에 대입하면, 얻 어지는 위상지도는 Fig. 4-7과 같이 노이즈가 매우 많이 포함된 형태로 계산 된다. 이러한 노이즈가 포함된 결과는 결펼침을 수행할 수 없는 데이터로서 앞에서 언급한 필터링 과정을 수행하여야 한다.



Fig. 4-6 Each image of 4 frame phase shifting method

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right)$$
(2-48)



Fig. 4-7 Result of phase value - phase map

#### 다.필터링

위상지도를 해석하여 변형을 정량화하기 위하여 결펼침을 수행하게 되는 데, 노이즈가 포함된 위상지도는 정량화 결과에 치명적인 오류를 포함하게 된다. 이러한 이유로 결펼침 전에 반드시 위상지도에 포함된 노이즈를 완벽 하게 제거해야 한다.

개발된 시스템의 프로그램에 사용한 필터링 기법은 저주파 통과 필터링, 메디안, π위상이동, 위상필터링 등을 적용하였는데, Fig. 4-8은 각각의 필터링 을 적용한 위상지도를 보여주고 있다.



(a) Median(b)Low Pass(c)Phase filteringFig. 4-8 Comparison of different filters

#### 라. 결펼침

결펼침은 필터링된 위상지도의 위상값을 읽어들이고, 전 후 화소에 대한 위상차를 계산하여, 위상차의 절대값이 임계값(3π/2)보다 크다면 전 후 화소 사이에서 2π의 차이가 있는 것으로 판단하고, 별도의 배열에 차수의 변화를 저장한다. 이때 계산된 위상차가 0(zero)보다 크다면 차수가 감소한 것으로 하 고, 0보다 작다면 차수가 증가한 것으로 하여 차수를 저장한다. 이렇게 저장 된 차수에 2π를 곱하고 해당되는 위상지도의 위상값을 더해주면 대상물에 발 생한 변형의 결과를 정량적으로 획득할 수 있게 되는데 이를 Fig. 4-9에 흐름 도로 표현하였으며, Fig. 4-10(a)는 임의의 위상지도를 결펼침이 적용되기 전 후의 관계를 표현하였다. 이때 점선은 위상지도값이며, 실선은 결펼침된 실제 변형의 결과를 나타내는 것이다. Fig. 4-10(b)는 Fig. 4-8(c)를 결펼침한 결과의 2차원표현이다.



Fig. 4-9 Flowchart of unwrapping

Fig. 4-10은 컴퓨터의 이미지 표현 한계 때문에 0~255사이의 회색조로 표 현되었지만, 실제 계측결과는 별도의 배열에 저장되며, 수치상 표현이 가능하 다.



(a) Line profile



(b) 2D Image



# 제 5 장 실험결과 및 고찰

## 제 1 절 평판의 면외변형

## 1. 실험장치 및 방법

전단간섭법에 의한 면외변형을 측정하는 방법을 검증하기 위한 가장 적합 한 방법은 평판에 발생하는 면외변형의 측정이며, 이를 위하여 ESPI와 전단 간섭계를 이용하여 동시에 실험하였으며, 532 nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하 였다.

대상 평판은 철판과 구리판을 이용하여, Fig. 5-1(a)와 같이 두께 3 mm인 철 판(110 mm × 110 mm)에 지름이 50 mm인 원공을 만들고, 1 mm 두께의 구리판 (110 mm × 110 mm)을 접착한 후 지그에 4변을 고정하였다. 대상 평판의 측정 면 반대편에서 PZT를 이용하여 반복변형을 부과할 수 있도록 하였으며, 실험 장치의 전체적인 구성은 Fig. 5-1(b)와 같다



Fig. 5-1 Schematic of specimen and system

ESPI를 이용한 실험결과와 제안된 방법에 의한 전단간섭법의 실험결과를 비교하기 위하여, 전단량을 일정하게 하고, PZT를 이용하여 변형을 일정하게 증가시키면서 실험하였고, 다른 방법으로 변형을 일정하게 하고 전단량을 증 가시키면서 실험하였다.

#### 2. 실험결과

#### 가. 전단량 일정 변형량 변화

전단간섭계의 전단량을 5 mm(23 pixel)로 고정하고, 변형은 PZT를 이용하여 0.5µm부터 2.5µm까지 0.5µm씩 일정하게 증가시키면서 실험하였고, 그 결과를 Table 5-1에 정리하였다. 변형의 증가에 따라 ESPI와 전단간섭계에 의한 측정 결과 모두 위상지도에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5-2는 전단량이 일정하고, 변형이 점차 증가함에 따라 통상적인 전단간 섭법의 측정결과 프로파일을 보여주고 있다. 여기서, 가로축은 실제 측정된 거리를 나타내며, 세로축은 전단량에 의한 변형의 차, 즉 기울기를 보여주고 있다. Fig. 5-3은 지름이 50mm인 평판의 ESPI와 제안된 전단간섭법을 이용한 변형량 변화에 따른 측정결과의 프로파일을 나타내고 있으며, 전단량만큼 변 형해석영역이 증가하여 약 55mm를 나타내고 있으며, 최대변형점의 위치가 오른쪽으로 이동하였음을 보여주고 있다. Fig. 5-4는 ESPI 측정결과와 전단간 섭계를 이용한 제안된 방법에 의한 변형 측정결과를 비교하고 있으며, 그래 프의 선형성은 실험 수행의 신뢰성을 나타내고 있다. 또한, 그 오차는 1.74% 로 낮게 측정되었고 제안된 방법이 매우 신뢰도가 높음을 나타내는 결과이 다.

Shearography		ESPI	
Deformation (µm)	Phase-map	Deformation (µm)	Phase-map
0.501		0.518	•
0.953		0.966	Ô.
1.445	00	1.493	
1.916	0	1.929	
2.453	OD	2.458	

Table 5-1 Shearography and ESPI phase-map according to deformation variation



Fig. 5-2 Slop profile according to deformation variation



Fig. 5-3 Deformation profile according to deformation variation



Fig. 5-4 Comparison of deformation result according to deformation variation

#### 나. 변형량 일정 전단량 변화

전단량 변화에 대한 실험은 대상물의 변형량은 1 µm로 일정하게 하고, 전 단간섭계의 전단량을 일정하게 변화시키면서 그 결과를 측정하였다. Table 5-2에서 보는 바와 같이 거의 동일한 변형에 대해 ESPI는 위상지도에 나타난 줄무늬의 수가 동일함을 알 수 있으며, 전단간섭법은 전단량의 증가에 따라 줄무늬의 숫자가 일정한 비율로 증가함을 보여주고 있다. 또한, 전단간섭계의 위상지도는 평판의 가장자리의 기울기 변화가 작음을 보여주고 있으며, 중심 으로 향할수록 기울기 변화가 크고 중심에서는 기울기가 역전되며 이는 Fig. 5-5에서 보다 명확하게 알 수 있다.

Fig. 5-6은 전단량 변화에 따른 전단간섭계를 이용한 측정결과의 프로파일 로 전단량의 증가만큼 해석영역이 증가했음을 알 수 있으며, 변형을 거의 동 일하게 측정하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5-5와 Fig. 5-6에서 보는바와 같이 전단간섭법에 의한 변형 측정결과의 최고값의 위치는 전단방향으로 전단량의 1/2만큼 이동되어 나타나고, 해석영역은 전단량만큼 증가되었음을 알 수 있 다.

Fig. 5-7은 ESPI를 이용한 측정결과와 제안된 방법에 의한 변형 측정결과를 비교하고 있으며, 그 오차는 2.62%이다.

Shearing		Phase-map	
Distance (mm)	Pixel	Shearography	ESPI
1	5		
2	9		
3	14		
5	24		0.
10	48	00	
15	72		

Table 5-2 Shearography and ESPI phase-map according to shearing amount variation



Fig. 5-5 Slope profile according to shearing amount variation



Fig. 5-6 Deformation profile according to shearing amount variation



Fig. 5-7 Comparison of result according to shearing amount variation

# 3. 고찰

ESPI와 제안된 방법에 의한 전단간섭계를 이용한 평판의 변형에 대한 실험 의 결과는 전단간섭법을 이용하여 결함의 계측과 동시에 면외변형의 정량계 측이 가능함을 알 수 있었다.

(1) ESPI와 제안된 방법의 전단간섭법에 의한 면외변형의 측정결과를 비교 하면, 전단량을 일정하게 하고 변형의 증가실험에서는 약 1.74%의 오차가 있 었으며, 변형을 일정하게 하고 전단량을 증가시키는 실험은 약 2.62%의 오차 를 보였다. 이는 제안된 방법의 전단간섭법을 이용하여 면외변형을 측정할 수 있음을 알 수 있으며, 신뢰도 또한 매우 높음을 알 수 있다.

(2) 제안된 방법에 의한 전단간섭법은 전단방향으로 전단량만큼 증가된 면
 외변형의 해석 영역을 제시하며, 최대변형점의 위치는 전단방향으로 전단량
 의 1/2만큼 이동되어 나타남을 알 수 있다.

# 제 2 절 결함이 있는 압력용기의 면외변형

# 1. 실험장치 및 방법

현재까지 전단간섭법은 배관 등 내부에 존재하는 결함에 대한 측정에 가장 많이 적용되고 있기 때문에, 내부 결함이 발생 가능한 배관을 가정하여 압력 용기를 제작하였다. 제작된 압력용기에 압력차이를 발생시키기 위하여 유압 유와 유압잭을 사용하였으며, Fig. 5-8, Fig. 5-9와 같이 안전변과 압력게이지 를 부착하였다.

결함길이에 대한 정량해석을 위하여 Fig. 5-8과 같이 두께 5 mm, 지름 160mm인 압력용기의 중심부위에 가로방향으로 길이 10mm, 깊이 3mm의 내 부결함을 방전 가공하였다. 실험시 유압잭의 작동 및 밸브의 개방의 방법으 로 가압 또는 감압하였으며, 이때 외란이 발생하지 않도록 파이프는 방진테 이블의 바닥에 고정하였다.



(b) Position of defect and size

Fig. 5-8 Schematic diagram of pressure vessel with line defect



Fig. 5-9 Photograph of pressure vessel

#### 2. 실험결과

#### 가. 전단량 일정 압력차 변화

압력차 변화에 따른 압력용기 결함부위의 변형측정 실험은 전단간섭계의 전단량을 5mm로 고정하고, 압력차를 0.25MPa부터 1.0MPa까지 0.25MPa씩 일 정하게 변화시키면서 실험하였고, 그 결과를 Table 5-3에 정리하였다. 압력의 변화에 따라 ESPI와 전단간섭계 모두 위상지도에 나타난 줄무늬의 수가 증가 함을 알 수 있으나, ESPI는 압력용기 전체에 발생하는 변형을 측정하므로 위 상지도의 줄무늬 수가 매우 많으며, 결함부위를 쉽게 인지하기가 어렵다. 반 면, 전단간섭계 측정결과는 낮은 압력차에서도 결함의 위치를 쉽게 인지할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5-10(a)는 ESPI를 이용하여 압력차 변화에 따른 변형 프로파일로서 위 상지도에서 보는바와 같이 변형이 경사져서 발생함을 알 수 있으며 결함부위 의 실제 변형이 얼마인지 알 수가 없고, 변형 전 후의 상대적인 변형만을 나 타내고 있다. Fig. 5-10(b)는 Fig. 5-10(a)의 결과를 보정한 후의 프로파일로서 압력차 증가에 따라 변형량이 증가함을 알 수 있으며, 변형영역이 약 29.5~ 37.6mm로 계측되었다.

Pressure Difference (MPa)	Shearography (Shearing 5mm)	ESPI
0.25		
0.5		
0.75		
1.0	• •	

Table 5-3 Shearography and ESPI phase-map according to pressure variation



(a) Deformation profile of original data



(b) Compensation result of (a)

Fig. 5-10 Deformation profile according to pressure variation of ESPI


(a) Slope profile



(b) Deformation profile

Fig. 5-11 Result of shearography according to variation of pressure difference

Fig. 5-11은 전단간섭계를 이용한 변형 측정 결과이며, 두 그래프에서 압력 차 변화에 따라 변형이 일정한 비율로 증가하고 있음을 알 수 있으며, ESPI 측정결과는 노이즈가 심하게 나타나 변형의 최고점이 불규칙하게 나타나고 있으나, 제안된 방법에 의한 측정결과는 노이즈가 제거된 결과를 보여주고 있다.

또한, 동일한 결함 분위에 대해 압력차 변화와 무관하게 변형영역은 일정 함을 알 수 있으며, 이는 결함길이의 정량측정이 가능함을 제시하고 있다.

Fig. 5-12는 두 실험방법에 의한 최대변형값의 비교로서 ESPI는 노이즈에 의해 변형측정결과가 불규칙하게 나타나고 있으며, 전단간섭법에 의한 측정 결과가 압력차에 대한 선형성을 보여주고 있다.

두 방법에 의한 차이는 8.3%이며, 전단간섭법에 의한 측정결과가 선형성을 나타내고 있으며, 제안된 방법에 의한 변형측정 결과가 신뢰성이 높음을 보 여주고 있다.



Fig. 5-12 Comparison of result according to variation of pressure difference

## 나. 압력차 일정 전단량 변화

압력용기의 압력차를 0.5MPa로 고정하고, 전단간섭계의 전단량을 1mm, 3mm, 5mm, 10mm, 15mm로 일정하게 변화시키면서 그 결과를 측정하였으며, 그 결과를 Table 5-4에 정리하였다.

원형 평판의 변형 측정결과와 마찬가지로 동일한 압력차에 대한 전단량의 증가가 위상지도의 줄무늬를 더욱 선명하게 하고 있으며, Fig. 5-13(a)에서 보 는바와 같이 기울기가 점차 증가하고 있으며, 기울기가 0(zero)인 위치가 점차 오른쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5-13(b)에 나타난 것처럼 전단량이 증가함에 따라 해석영역 범위가 넓 어지며, 최대변형점 또한 점차적으로 낮아지는 결과를 볼 수 있었다.

Fig. 5-14와 Table 5-5는 압력차가 0.5MPa로 일정하고, 전단량이 점차 증가 할 경우의 최대변형 측정결과를 ESPI 측정결과와 비교하였다. 전단량의 증가 에 따라 오차가 점차 증가함을 알 수 있으며, 선형보간을 통하여 전단량이 0(zero)일 경우의 최대변형을 측정한 결과 1.983µm로 측정하였으며, 이는 ESPI 측정결과가 보정된 것을 고려하면 전단간섭계 측정결과를 신뢰할 수준이라고 판 단된다.

Shearing		DI		
Distance[ mm]	Pixel	Phase map		
1	4.25			
3	12.55			
5	21.00			
10	42.40			
15	65.75			

Table 5-4 Shearography phase-map according to pressure variation



(a) Slope profile



(b) Deformation profile

Fig. 5-13 Result of shearography according to shearing amount variation

Shearing[mm]	Deformation[µm]	Error[%]
1	0.194	0.09
3	0.185	4.73
5	0.175	9.88
10	0.149	23.27
15	0.130	33.05

Table 5-5 Maximum deformation according to shearing amount variation



Fig. 5-14 Maximum deformation according to shearing amount variation

shearing		Maximum	Analysis	Deformed
Distance	Divol	Position	Area	Area
[mm]	FIXEI	[mm]	[mm]	[mm]
1	4.25	17.463	34.926	33.926
3	12.55	18.643	37.286	34.286
5	21.00	19.115	38.230	33.230
10	42.40	21.947	43.894	33.894
15	64.75	24.543	49.086	34.086

Table 5-6 Measurement of deformation area by using shearography



Fig. 5-15 Measurement of deformation area by using shearography

각각의 전단량에 의한 변형프로파일에서 결함영역에 대한 최대변형점의 위 치가 변형의 중심점이라고 할 때, Fig. 5-13(b)의 프로파일에서 추출한 해석영 역과 변형영역을 Table 5-6과 Fig. 5-15에 정리하였다.

ESPI가 압력변화에 따라 약 29.5~37.6mm까지 넓은 영역에 걸쳐 결함부위 에 발생하는 변형영역을 측정한 반면 제안된 방법에 의한 전단간섭법의 해석 영역은 거의 일정한 수준으로 변형영역이 계산되며 평균 33.9mm로 측정하였 다.

# 3. 고찰

압력용기에 발생하는 면외변형 측정에 있어서 제안된 방법에 의한 전단간 섭법이 압력용기의 결함에 의한 변형영역을 더 정확하게 측정함을 알 수 있 었으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) ESPI는 결함부위에 발생하는 실제 변형을 측정하기 위하여 보정이 필요
 하고 노이즈가 심하게 나타나는 반면, 제안된 방법은 노이즈가 제거되었음을
 알 수 있다.

(2) 압력용기에 발생하는 면외변형의 측정결과, 전단량 5mm에서는 ESPI 측 정결과와 제안된 방법의 전단간섭법에 의한 측정결과의 오차는 약 8.3%이며, 전단량 변화에 따른 실험에서는 오차가 선형적으로 증가하므로 선형보간을 통하여 1.983μm로 측정하였고, ESPI 측정결과 0.194μm와 약 2.12%의 오차를 보였 다.

(3) 본 실험에서 압력용기의 압력차에 의한 결함부위의 변형영역은 압력차
의 변화와 무관하게 일정한 변형역영을 발생함을 알 수 있으며, ESPI는 약
29.5~37.6mm로 넓은 영역을 제시한 반면, 제안된 방법에 의한 전단간섭법은
평균 33.9mm로 일정하게 측정하였다.

# 제 3 절 평판의 진동

본 논문에서 제안된 방법은 정적상태에서 발생하는 변형뿐만 아니라 동적 상태의 거동인 진동해석에도 적용할 수 있다.

실제 대상물에 진동을 발생시키는 외부가진력 또는 소음원은 일정한 가진 력으로 대상물을 가진시키게 된다. 이와 같이, 일정한 가진력은 진동모드 해 석에 있어서도 반드시 충족되어야하는 조건인데, 모든 대상물의 1차모드는 진폭이 매우 크기 때문에 다른 고차모드를 발생시키는 가진력과 동일하게 가 진력을 부여할 수가 없다. 반대로, 1차모드의 진폭을 정량 측정할 수 있는 외 부 가진력으로는 다른 고차 모드의 진폭을 측정할 수 없게 된다.

각 진동 모드별로 서로 다른 가진력은 동일한 조건으로 볼 수 없으며, 동 일한 조건에 대한 진동모드별 진폭을 정량적으로 측정할 필요가 있게 된다.

동일한 조건에서 각각의 진폭을 비례적으로 측정할 수 있는 장치는 가속도 계와 레이저 도플러 진동계(LDV, Laser Doppler Vibrometer)가 대표적이며, 가 속도계는 실험장치가 간단하고 실험에 소요되는 시간이 짧으나, 접촉식이며 대상물의 진동모드를 나타낼 수가 없다. LDV는 White Noise를 이용하여 대상 물의 공진주파수를 측정할 수 있으며, 비접촉 방법으로 모드별 진폭을 측정 할 수 있으나, 제한점은 대상물의 공진주파수와 진동모드의 측정에 소요되는 시간이 매우 길다는 것이다[24].

본 논문에서 제안된 방법은 가속도계나 LDV가 가지는 제한을 극복하고 비 교적 짧은 시간에 대상물에 발생하는 공진주파수와 진동모드 형상을 찾아낼 수 있다.

### 1. 실험장치 및 방법

진동실험을 위하여 기계적 물성이 Table 5-7과 같은 두께 1mm, 가로 세로 150 mm × 150 mm의 스테인레스 스틸평판을 제작하여 Fig. 5-16, Fig. 5-17와 같이 지그에 고정하였다[24].

Table 5-7 Mechanical properties of STS304 stainless steel

Young's Modulus	Poisson's Ratio	Density
193 GPa	0.3	$8000 \text{ kg/m}^3$



Fig. 5-16 Specimen used for vibration testing



Fig. 5-17 JIG for fixing the specimen

제안된 방법에 의한 진동실험결과를 유한요소해석(ANSYS), LDV 그리고 스트로보스코프 위상이동 ESPI(SPS-ESPI, Storoscopic Phase Shifting ESPI)의 실험결과[24]와 비교하였다.

유한요소해석에서는 공진주파수와 진동모드형상을 획득하였고, LDV로는 공진주파수, 진동모드형상 및 주파수 스펙트럼을 획득하였으며, SPS-ESPI에서 는 공진주파수에 대한 진동모드형상 및 각 모드별 진폭을 측정하였다.

제안된 방법에 의한 진동실험은 SPS-ESPI와 동일한 실험방법을 적용하였으 며, 함수발생기(Model: HP 33120A), AOM(Model: AOM-403A1), 스피커, 스피 커 증폭기 그리고 간섭시스템을 Fig. 5-18과 같이 구성하여 실험하였다. Fig. 5-18에서 일점쇄선은 AOM을 통과한 레이저 빛으로서 진동해석을 위해서 1차 모드의 레이저 빛을 사용하였으며, 가는 실선은 광파이버로 유도된 1차모드 레이저 빛의 확산조사를 나타낸다.



Fig. 5-18 Schematic of shearography for vibration analysis

유한요소해석 프로그램은 ANSYS이며, 적용한 요소는 SHELL63을 사용하 고, Block-Lanczos법을 사용하여 모드형상을 획득하였다. 유한요소해석에 의 한 모드형상을 기준으로 하여, SPS-ESPI와 제안된 방법에 의한 실험을 동시 에 수행하였으며, 1차실험에서 스피커에 의한 외부 가진력을 변화시키면서 대략적인 공진주파수와 진폭을 측정한 후, 2차 실험에서 외부 스피커 가진력 을 일정하게 하고 전단량을 임의로 변화시키면서 실험하였다. 이때 실제 전 단량 화소수를 알기 위하여 스케일 이미지를 저장하여 정량해석에 필요한 화 소수를 획득하였다.

### 2. 실험결과

#### 가. 실험방법별 모드형상 및 공진주파수

각각의 실험에서 얻어진 공진주파수 및 진동모드형상을 Table 5-8에 정리하 였으며, 유한요소해석 결과의 2차, 3차모드 그리고 7차, 8차모드는 공진주파 수 및 진동모드형상이 동일하며 모드형상의 방향만 변화되었음을 알 수 있 다.

LDV로 획득한 6차모드와 7차모드의 형상이 다른 해석 및 실험결과와 다른 데, 이는 외부가진력의 차이로 판단되며, SPS-ESPI와 SPS-shearography는 동시 에 실험하였다.

SPS-ESPI의 실험으로 얻어진 모드형상은 유한요소해석과 일치하며, SPS-shearography의 실험결과는 SPS-ESPI의 x방향의 기울기와 동일한 형태임 을 알 수 있다.

여기서, SPS-shearography 실험결과의 위상지도의 줄무늬 수가 서로 다른것 은 개별 진동모드에서 진폭의 차이가 매우 다르기 때문에, 전단량을 임의로 조절하여 모든 진동모드의 진폭을 측정하였다. 또한, 이미지의 크기가 1차모 드가 가장 작으며 5차모드가 가장 넓은 것을 볼 수 있는데, 이는 1차모드의 진폭이 가장 크기 때문에 전단량을 매우 작게 하였고, 이와 반대로 5차모드 에서의 진폭이 매우 작아서 전단량을 매우 크게 하였기 때문이다.

Mode	유하요ረ	해석	LD	v	SPS-F	SPI	SPS-	
Mode	11 12			•			Shearogra	phy
1st		592		540	$\bigcirc$	599	•0	588
2nd		1,206		1,124	00	1,190		1,156
3rd	8	1,206		1,135	00	1,201	01/0	1,181
4th		1,777		1,676		1,748	$\mathbf{h}$	1,696
5th		2,161		2,061		2,141	ð	2,087
6th		2,171		2,081		2,208		2,115
7th		2,708		2,574	000	2,654		2,575
8th		2,708		2,598	00) 000	2,674	000.	2,615

Table 5-8 The result of the first 8 mode shapes obtained by using each method



(a) Sound level base



(b) Vibration velocity base

Fig. 5-19 The magnitude of auto-spectrum by using LDV

Mode	Ansys	LDV	SPS-ESPI	SPS- shearography
1st	592	540	599	588
2nd	1,206	1,124	1,190	1,156
3rd	1,206	1,135	1,201	1,181
4th	1,777	1,676	1,748	1,696
5th	2,161	2,061	2,141	2,087
6th	2,171	2,081	2,208	2,115
7th	2,708	2,574	2,654	2,575
8th	2,708	2,598	2,674	2,615

Table 5-9 The natural frequency of each mode by using each method



Fig. 5-20 The frequencies comparison obtained by using each method.

모든 실험에서 2차, 3차모드 그리고 7차, 8차모드의 공진주파수가 유한요소 해석과는 달리 모든 실험에서 서로 다르게 측정되었으며, 이는 대상 평판의 제작 및 지그의 고정 등 경계조건이 유한요소해석에 적용되는 이론과 같이 적용될 수 없기 때문이다. LDV는 White Noise를 이용하여 대상물에 발생하는 공진주파수를 검출할 수 있으며, 진폭을 사운드레벨과 속도로서 표현할 수 있으며, Fig. 5-19에 나타내었다. 그런데, 통상적인 진폭은 고차모드일수록 낮 아지는 경향이 있는데, LDV의 측정결과는 2차, 3차 모드의 진폭보다 5차, 6 차 모드의 진폭이 높게 나타남을 알 수 있다. 그리고 1차모드 이전에 마루가 있는데 이는 통상 노이즈로 해석하며 본 실험결과 분석에서는 무시하였다.

각각 실험방법으로 얻어진 공진 주파수를 Table 5-9와 Fig. 5-20에 나타내었 다. 모든 실험 결과가 거의 유사함을 알 수 있으며, 실험결과를 각각의 실험 을 기준으로 편차를 분석하여 Fig. 5-21과 같이 정리하였고, 평균편차는 Table 5-10과 같다.

편차 분석 그래프에서 볼 때, LDV 실험결과 중 1차모드의 공진 주파수가 상대적으로 낮음을 알 수 있으며, 본 논문에서 제안한 방법에 의한 공진 주 파수 획득 결과와 다른 실험방법에 의한 공진 주파수 획득 결과를 비교할 때 대체적으로 낮은 수준의 편차를 보이고 있으며, Fig. 5-21에서 보는 바와 같이 평균 편차 또한 비교적 낮은 수준으로 제안한 방법이 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

Method	Average Deviation[%]	
Ansys	3.14	
LDV	4.64	
SPS-ESPI	2.77	
SPS-shearography	2.84	

Table 5-10 Frequency average deviation of each method









(c) SPS-ESPI base

(d) SPS-shearography base



(e) Frequency average deviation

Fig. 5-21 Comparison fo frequency average deviation by each method

## 나. SPS-ESPI와 SPS-shearography의 모드형상별 진폭

공진주파수에서 해당하는 진동모드형상 및 진폭을 정량적으로 측정하는 여 러가지 방법 중 SPS-ESPI는 동일한 외부 가진조건으로 1차진동모드를 포함한 고차모드진폭을 정량적으로 측정할 수 없으며, 공진 주파수별 외부 가진조건 을 다르게 해야한다. Fig. 5-22는 SPS-ESPI로 측정한 동일한 가진조건에서의 진동모드별 진폭의 선형 프로파일이며, 1~3차 모드의 진폭은 상대적으로 매 우 커서 측정이 불가능하였고, 4~8차모드는 유한요소해석에서 보여주는 모 드형상과 동일하다.

일반적인 전단간섭법은 대상물에 발생하는 진폭 기울기를 측정하기 위하여 임의의 전단량을 부여하게 되는데, Fig. 5-23은 임의의 전단량에 대한 진폭의 기울기 변화이며, Table 5-11은 각 모드별 전단량이다. Fig. 5-23의 원형 점선 부분을 분석하면 전단량에 따른 진동모드별 해석영역이 각각 다른 것을 알 수 있고, 전단량 차이에 의한 각 진동모드별 진폭의 기울기가 무작위적으로 나타나있다.



Fig. 5-22 Amplitude line profile at each mode by using SPS-ESPI



Fig. 5-23 Slope profile at each mode by using SPS-shearography

Mode	Distance[mm]	Pixel
1st	2	8
2nd	8	32
3rd	8	32
4th	23	92
5th	32	127
6th	9	35
7th	22	88
8th	22	88

Table 5-11 Applied shearing amount at each mode

Fig. 5-23과 같이 무작위적인 진폭의 기울기 측정결과에 전단량에 대응하는 화소수를 적용하고 수치적분하면 Fig. 5-24와 같이 1차모드를 포함한 전체모 드 진폭을 정량적으로 구할 수 있다.

여기서 가장 높은 진폭을 나타낸 1차 진동모드는 6.068µm이며 가장 낮은 진폭을 나타낸 진동모드는 5차진동모드로서 0.087µm로 측정되었으며, 이 둘 의 비율은 약 70배의 차이가 있다. 이렇게 동일한 외부 가진 조건을 받는 진 폭의 정량 측정에 있어서 SPS-ESPI는 Fig. 5-22에 표현된 바와 같이 저차모드 의 측정결과가 없는 반면, Fig. 5-24에서 보여주고 있는 SPS-shearography의 진 폭정량측정 결과로 1~3차모드의 진폭이 다른 고차 진동모드의 진폭보다 매 우 높음을 알 수 있는데, 이러한 결과는 예상을 정확하게 반영하고 있다. 또 한, Fig. 5-19의 LDV에 의한 진폭 측정결과는 2~3차 진동모드의 진폭이 6차 진동모드의 진폭보다 낮게 측정되었는데, 제안된 방법에 의한 진폭측정결과 는 2~3차모드가 6차모드보다 진폭을 크게 측정하였다.



Fig. 5-24 Amplitude profile data at each mode by using SPS-shearography



Fig. 5-25 Comparison of max. amplitude by using ESPI and shearography

Fig. 5-25는 동일한 외부 가진조건에서 SPS-ESPI와 SPS-shearography로 측정 한 각 모드별 최대 진폭값이며, 두 실험결과가 잘 일치하며, 제안된 방법에 의한 결과는 저차모드의 진폭도 측정가능함을 알 수 있다.

#### 3. 고찰

본 논문에서 제안된 방법에 의한 전단간섭법은 정적상태의 변형뿐만아니라 동적상태인 진동해석에서도 유용함이 입증되었다.

(1) 각 해석 및 실험방법을 기준으로 계산된 평균 편차는 유한요소해석
3.14%, LDV 4.64%, SPS-ESPI 2.77% 그리고 제안된 방법에 의한 전단간섭법
은 2.84%로서 제안된 방법의 신뢰수준이 높음을 알 수 있었다.

(2) 제안된 방법은 LDV에 비하여 측정에 소요되는 시간이 적고, SPS-ESPI와 동일한 시간에 공진주파수 및 진동모드형상을 측정하였다.

(3) 제안된 방법은 SPS-ESPI에서 불가능한 동일한 외부 가진 조건에서 1차 모드를 포함한 고차모드까지의 진폭을 정량 측정하였다.

# 제 6 장 결론

본 논문에서는 ESPI는 측정을 위하여 방진테이블이 필요한 데, 이러한 제 한사항을 극복하고, 고정밀 변형측정이라는 장점과 전단간섭법의 외란에 강 인하고 구성이 간단한 장점을 통합하여, 전단간섭법의 산업적 활용을 높이고 자 하였다.

기존에 적용되는 전단간섭법에 수치미분 및 수치적분을 적용하여 대상물에 발생하는 면외변형 및 진동의 진폭을 정량적으로 계측하는 방법을 제안하였 으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

 제안된 방법의 전단간섭법은 고정밀 변형측정하는 ESPI 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점이 통합된 산업현장적용성이 매우 높은 면외변형의 정량측정이 가능한 전단간섭법이다.

 2. 대상물에 발생하는 면외변형의 측정에서 ESPI 측정결과로 전단간섭줄무 늬를 만들 수 있으며, 전단간섭계를 이용한 측정결과에서 ESPI 측정결과와 동일한 변형을 재현할 수 있는 ESPI와 전단간섭법의 상관관계를 규명하였다.

3. 기존의 전단간섭법은 전단량을 상면에서의 전단량이라 하고 거리단위의 임의의 값을 적용하고 있는데, 본 논문에서는 전단량을 테일러 급수 표현의 구간으로 대응시킬 수 있고, 화상처리기법을 적용하여 전단량을 화소수로 적 용시킬 수 있음을 확인하였다.

4. 제안된 방법은 전단량을 화소수로 대응하여 해석하므로, 화상처리 해석
 영역이 전단방향으로 전단량만큼 증가되며, 최대변형점의 위치는 전단량의
 1/2만큼 이동되어 나타난다. 또한 전단방향에 따라 유한차분법의 전방차분이
 나 후방차분과 동일한 결과를 표현한다.

5. 원형 평판의 면외변형 측정에 대하여 ESPI와 제안된 방법에 의한 실험 결과는, 변형 증가실험은 약 1.74%의 오차를, 전단량을 증가시키는 실험은 약 2.62%의 오차를 보였다.

6. 결함이 있는 압력용기의 변형측정

가. ESPI는 결함부위에 발생하는 실제 변형을 측정하기 위하여 보정이 필 요하고, 노이즈가 심하며, 제안된 방법은 노이즈가 제거된 결과를 제시한다.

나. 전단량이 일정한 경우에는 ESPI와 제안된 방법의 오차는 약 8.3%이며, 전단량 변화 실험에서는 오차가 선형적으로 증가하므로 선형보간을 통하여 대상물에 발생한 변형 측정이 가능함을 알 수 있었다.

다. 압력용기의 압력차에 의한 결함부위의 변형영역은 압력차의 변화와 무 관하게 일정한 변형역영을 발생함을 알 수 있으며, 본 실험에 사용된 압력용 기의 결함에 의한 변형영역을 ESPI보다 정확하게 평균 33.9mm로 측정하였 다.

7. 평판의 진동해석

가. 제안된 방법에 의한 공진주파수 측정결과, 다른 기법과의 평균 편차가2.84%로서 제안된 방법이 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있었다.

나. SPS-ESPI에서 동일한 외부 가진 조건으로 1~3차모드를 제외한 고차 모드의 진폭을 정량측정할 수 있었으나, 제안된 방법은 동일한 외부 가진조 건 상태에서도 전단량을 다양하게 적용하여 1~3차모드를 포함한 고차모드까 지의 진폭을 정량 측정할 수 있었으며, LDV에 비하여 측정에 소요되는 시간 이 적고, SPS-ESPI와 동일한 시간에 공진주파수, 진동모드형상 및 진폭을 정량 측정하였다.

위와 같은 결과로 제안된 방법의 전단간섭법은 외란에 민감한 ESPI의 제 한사항을 극복하고, 고정밀 계측이라는 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점을 통합하여 면외변형의 고정밀 정량측정, 변형률의 측정 및 결함의 검 사 등 산업현장에서 적용성이 높은 계측기법을 제시하였다.

# 참고문헌

1. Butters, J. N. and Leendertz, J. A., "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology," Optics & Laser Technology, Vol. 3, pp. 26-30, 1971.

 Høgmoen, K., Løkberg, O. J., "Detection and Measurement of Small Vibrations using Electronic Sepcekle Pattern Interferometry," Applied Optics, Vol. 16, pp. 1869-1875, 1977.

3. Hung, Y. Y., Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation, J. Opt. Lasers Eng., Vol. 26, pp. 421-436, 1997

4. 김경석, 『CW 레이저 스페클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내 변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.

5. Leendertz, J. A. and Butters, J. N., "An Image Shearing Speckle Pattern Interferometer for Measuring Bending Momonts," J. Phy. E.Sciencetific Instrument, Vol. 6, pp. 1107, 1973.

6. Hung, Y. Y., "A Speckle-Shearing Interferometry: A tool for Measuring Derivatives of Surface Displacement," Optics Communication, Vol. 11, pp. 132-135, 1974.

7. Hung, Y. Y., "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge," Applied Optics, Vol. 14, pp. 618-622, 1975.

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

9. Hung, Y. Y., "Shearography: a New Optical Method for Strain Measurement and Nondestructive Testing," Optical Engineering, Vol. 21, pp. 391, 1982.

10. C. J. Tay, H. M. Shang, A. L. Neo, "Measurement of slopes and profile of an optical lens by shearography," Measurement, Vol. 18, pp. 185-191, 1996.

11. W. Steinchen, G. Kufer, P. Mackel, F. Vossing., "Determination of strain distibution by means of digital shearography," Measurement, Vol. 26, pp. 79-90, 1999.

12. Fulton, J. P., Deaton, J. B., Rogowski, R. S., Namkung, M., "Capabilities and Limitations of Electronic Shearography for Detection of Cracks in Thin Plates," Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, pp. 365-372, 1994.

13. Y. Y. Hung, "Appplications of digital shearography for testing of composite structures," Composites Part B, Vol. 30, pp. 765-773, 1999.

14. W. Steinchen, L. X. Yang, G. Kufer, P. Mackel, F. Vossing., "Strain analysis by means of digital shearography : potential, limitations, and demonstration," Journal of strain analysis, Vol. 33, No. 2, pp. 171-182, 1998.

15. 강영준, 박낙규, 유원재, 김동우, "전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기
의 내부결함 측정에 관한 연구(Ⅱ)," 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 4, pp.
402-410, 2002

16. 문상준, 강영준, 백성훈, 김철중, "실시간 홀로그래픽 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정법," 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 4, pp.
1233-1240, 1996.

17. Steinchen, W., Yang, L., Kupfer, G., Mäckel, P., and Thiemich, A., "Vibration analysis by digital speckle pattern shearing interferometry," Proc. SPIE, Vol. 3098, pp. 158~165, 1997.

Høgmoen, K. and Løberg, Ole J., "Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry," Applied Optics, Vol. 16. No. 7, pp. 1869~1875, 1977.

19. Valera, J. D. R., Jones, J. D. C., and Løkberg, O. J., "Exact vibration amplitude derivative measurement with TV shearography," Meas. Sci. Technol., Vol. 7, pp. 918~922, 1996.

20. Vikhagen, E., "Vibration measurement using phase shifting TV-Holography and digital image processing," Optics Communications, Vol. 69, No. 3,4, pp. 214~218, 1989.

21. 강영준, 권용기, "진동해석을 위한 전자전단간섭계의 개발," 대한기계학 회논문집(A), Vol. 21, No. 12, pp. 2047-2054, 1997.

22. L. X. Yang, W. Steinchen, G. Kufer, P. Mackel, F. Vossing., "Vibration

analysis by means of digital shearography," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 30, pp. 199-212, 1998

23. 양승필, 『ESPI에 의한 引張荷重 下에서의 複合 積層板의 振動 擧動에 關한 研究』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2000.

24. Hyunchul Jung, Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor thesis, Chosun University, 2004.

25. Kim, Koungsuk, Kang, Kisoo, Kang, Youngjune, Jung, Seongkyun, "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography," Optics & Laser Technology, Vo. 35, pp. 639-643, 2004.

26. 강기수, 『레이저 스페클 간섭법을 이용한 내부결함의 정량평가』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2005.

27. Jones, R., and Wykes C., Holographic and Speckle Interferometry: A discussion of the theory, practice and application of the techniques, 2nd Edition, New York: Cambridge University Press, 1989.

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

29. Creath, K., Temporal Phase Measurement Methods, in Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques, ed. Robinson, David W. and Reid, Graeme T., London: IOP Publishing, 1993, pp.94~140.

30. Creath, K., "Phase-shifting speckle interferometry," Applied Optics Vol. 24, No. 18, pp. 3053~3058, 1985.

31. Malacara, D., Servin, M., and Malacara, Z., Interferogram Analysis for Optical Testing, New York: Marcel Dekker, 1998, pp.381~408.

32. Huntley, J. M., Automated analysis of Speckle Interferograms in Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques, ed. Rastogi, P. K., Chichester, John Wiley & Sons, 2001, pp.49-139.

33. Chungi Ki Hong, Hyun Surk Ryu, Hyun Choon Lim, "Least-squares fitting of the phase map obtained in phase-shifting electronic speckle pattern interferometry," Optics Letters, Vol. 20, No. 8, pp. 931-933, 2004.