



저작자표시-비영리-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.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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](#)

2011년 2월
석사학위논문

전단간섭계를 이용한 압력용기의
결함 및 비결함부의 변형 동시계측

조 선 대 학 교 대 학

첨단부품소재공학과

정 덕 운

전단간섭계를 이용한 압력용기의 결함 및 비결함부의 변형 동시 계측

Simultaneous measurement of deformation on
defect and non-defect parts pressure vessel using
shearography

2011 년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

정 덕 운

전단간섭계를 이용한 압력용기의 결함 및 비결함부의 변형 동시 계측

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2011 년 10 월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

정 덕 운

정덕운의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 양인영 ㉠

위원 조선대학교 교수 장완식 ㉠

위원 조선대학교 교수 김경석 ㉠

2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	IV
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목표 및 내용	3
제 2 장 이론적 배경	4
제 1 절 스펙클과 프린지	4
제 2 절 간섭무늬의 해석	9
제 3 절 정량화를 위한 위상정보의 해석	15
제 4 절 전단간섭법을 이용한 변형계측의 개념	18
제 3 장 실험장치	23
제 1 절 ESPI 시스템	23
제 2 절 전단간섭시스템	25
제 4 장 실험결과 및 실험결과	27
제 1 절 전단간섭계와 ESPI를 이용한 평판의 면외변형	27
제 2 절 압력용기의 면외변형	35

제 3 절 압력용기의 비결함부 면외변형 변형계측	43
제 5 장 결론	46
참 고 문 헌	48

LIST OF TABLES

Table 3-1 Specification of ESPI system	24
Table 3-2 Specification of Shearography system	26
Table 4-1 Phase-map and max-deformation by voltage	30
Table 4-2 Phase-map and max-deformation by voltage	33
Table 4-3 Shape and dimension of pipe specimen	36
Table 4-4 Phase-map by Pressure Difference	38
Table 4-5 Phase-map by Shearing	41
Table 4-6 Maximum deformation according to shearing amount variation	43

LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 The scattering of light by a rough surface	5
Fig. 2-2 Speckle pattern formation in the image plane of a lens	6
Fig. 2-3 The fringe pattern formation depend on deformation	9
Fig. 2-4 The optical path of a ray : image-plane viewing	9
Fig. 2-5 The optical path of a ray : defocussed viewing	10
Fig. 2-6 The optical path of a ray : focal plane viewing	10
Fig. 2-7 The illuminating wavefronts introduced by a surface displacement	11
Fig. 2-8 The scattered wavefronts introduced by a surface displacement	11
Fig. 2-9 A diagrammatic arrangement of an out-of-plane displacement	12
Fig. 2-10 Speckle pattern shearing interferometry	13
Fig. 2-11 Schematic of ESPI using pzt mounted mirror as phase shifter	15
Fig. 2-12 Sequence of phase unwrapping	17
Fig. 2-13 Deformation function depend on the boundary condition	20
Fig. 2-14 Comparison between differentiation and numerical differentiation	20
Fig. 2-15 Algorithm of deformation reconstruction	21
Fig. 3-1 Configuration of ESPI system	23
Fig. 3-2 ESPI system	24
Fig. 3-3 Configuration of Shearography system	25
Fig. 3-4 Shearography system	26
Fig. 4-1 Schematic of Polymer Plate	27
Fig. 4-2 Schematic of Shearography and ESPY System	28
Fig. 4-3 Shearography and ESPI System	29
Fig. 4-4 Slop profile of deformation by voltage	31
Fig. 4-5 Shearography vs ESPI deformation by voltage	31
Fig. 4-6 Shearography vs ESPI max-deformation by voltage	32
Fig. 4-7 Shearography vs ESPI deformation by voltage	34
Fig. 4-8 Shearography vs ESPI deformation by voltage	34

Fig. 4-9 Shearography vs ESPI max-deformation by voltage	35
Fig. 4-10 ESPI phase-map according to force difference variation	36
Fig. 4-11 ESPI phase-map according to force difference variation	37
Fig. 4-12 Shearography vs ESPI Xaxis deformation by Pressure Difference	39
Fig. 4-13 Shearography vs ESPI Yaxis deformation by Pressure Difference	39
Fig. 4-14 Shearography vs ESPI max-deformation by Pressure Difference	40
Fig. 4-15 Shearography vs ESPI deformation by voltage	42
Fig. 4-16 Shearography vs ESPI deformation by voltage	42
Fig. 4-17 Maximum deformation according to shearing amount variation	43

ABSTRACT

Simultaneous measurement of deformation on defect and non-defect pressure vessel using shearography

By Jung, Duk Woon

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

Dept. Advanced Parts & Materials

Engineering.

Graduate School of Chosun University.

In general, methods to measure deformation are largely divided into a contact style and a non-contact style. Representative contact style deformation measure methods include a strain gauge and an accelerometer, a non-contact method is Laser Doppler Vibrometry(LDV) using the doppler principle, and a representative non-contact method electronic speckle pattern interferometer is ESPI, which can measure and analysis precisely and in a real-time the deformation applied to the whole fields of the objects but is so sensitive to external disturbances that the applicability is so low in the industries without an optical table.

Another method using speckles is Shearography, which composes the interferometer appropriately enough to detect derivative components of deformation. Like a strain gauge, Shearography can directly acquire information on the strain.

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. In this regard, Shearography is very efficient to measure the defects of an object and very endurable against external disturbances,

and so it is frequently employed as a nondestructive inspection technique on industrial sites.

Shearography, which easily composes interferometer and can measure laser what coherence length of laser is relatively short, has been more widely employed and it is used to vibrations analysis of objects and hired as an efficient method in the nondestructive inspection sector including the quantification of defects and the analysis of composite material structures.

Until recently, 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 to know defect lengths, and use Shearography in order to compare ESPI to vibration modes applied to a certain object.

Currently, ESPI is mainly used to measure the deformation of objects and Shearography is used to measure only the defects of objects only. This thesis uses Shearography and numerical integration to quantitatively measure various types of out-plane deformation applied to objects, with a view to overcome the limits of the other methods and Shearography.

In the past, a researcher arbitrarily applied shearing amount where the most important variable of Shearography according to the sensitivity of detecting the defects. In contrast, this thesis proposes an idea that considering Shearography is basically an image processing method, shearing amount can be converted into the number of pixels in the surface, and applied to the results of measurement by Shearography, and then numerically integrated in order to quantitatively measure the deformation of objects.

To verify that, it experimented on a circular plate to which out-of-plane deformation is applied, pressure vessel with internal defects, and determined the correlation between ESPI and

Shearography. It also has been confirmed that shearing amount on the surface can be substituted by the number of pixels and that Shearography can measure out-plane deformation.

Furthermore, an experiment to measure the deformation of a circular plate has an error rate of about 1.43%~1.87%; it is very precise in comparison to ESPI. In an experiment to measure the defects of defective pressure vessel, the rate is about 5.4%~14.4%.

Therefore, a new measurement technique that measures quantitatively deformation on the non-defect part by the pressure changes through the experiments for measuring deformation of the cylindrical pipes using the variation of shearing amount of shearography was proposed. The maximum deformation decreases linearly when the shearing amount increases through the comparison with the maximum deformations by changing the shearing. Based on the results of experiments, the quantitative value of maximum deformation could be inferred when the shearing amount is "0". In other words, the deformation when the hearing amount is "0" can be equal to adding a deformation on defect part and a deformation on non-defect part. The possibility for improving the degree of precision for the out-of-plane deformation measurement of shearography through this study.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

산업기계, 원자력 발전소, 항공기 등 산업현장에서 많이 사용되는 산업 설비 및 부재들은 결함이 발생할 가능성이 높고, 결함 발생 시 설비 및 부재의 파괴를 초래하여 막대한 손실이 발생한다. 따라서 결함을 신속하고 정확하게 검출하기 위한 비파괴 검사기술은 산업전반에서 중요한 역할을 담당하고 있으며, 그 중요성은 안전 진단을 통한 대형사고의 예방에서부터 제품의 신뢰성평가를 통한 기업경쟁력 강화까지 이르고 있으며, 초음파, X선, 반사선, 와전류, 적외선 등의 여러가지 비파괴 검사 기법이 현장에서 적용되고 있다.

이러한 방법들은 접촉식이거나 대상물에 전처리를 필요한 문제점이 있으나, 레이저를 이용한 계측 방법은 비접촉식이며, 특별한 전처리 없이 비파괴 검사를 수행할 수 있다. 이러한 비파괴 검사기술은 1960년대 부재의 파괴를 결정하는 응력확대계수 개념의 도입과 함께 결함의 종류, 위치, 크기, 형상등의 결함의 특성을 정량적으로 정하는 것이 필요하게 되었고, 여기에 정량적비파괴평가(Quantitative Nondestructive Evaluation; QNDE)라는 새로운 개념이 필요하게 되었다. 결함의 정량정보는 파괴역학을 기초로 결함을 유해도(Severity)를 평가하여, 구조물의 합부(합부)의 평가 및 수명평가의 기초로 활용되어 그 중요성이 더욱 증가하고 있다.

일반적으로 변형을 측정하는 방법은 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분된다. 대표적인 접촉식 변형측정 방법은 스트레인게이지와 가속도계이며, 비접촉식 변형측정의 대표적인 방법으로 레이저를 이용한 방법이 있다. 레이저응용 검사기술은 간섭계기반의 변위측정기술에서 레이저유도초음파, 홀로그래피(Holography), 스펙클상관간섭법(Speckle correlation interferometry) 등의 다양한 분야로 발전하고 있으며, 홀로그래피와 스펙클상관법은 넓은 면적의 표면변위의 고분해능 측정의 장점으로 진동 또는 변형해석 분야에서 많이 활용하고 있다. 특히, 비파괴 검사를 위한 스펙클 상관법은 컴퓨터 영상기술의 발전으로 ESPI와 Shearography로 발전하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴 검사등의 분야로 적용되고 있다.

전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)은 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 산업현장에서는 그 적용성이 매우 낮다.

스펙클을 이용하는 또 다른 방법인 전단간섭법(Shearography)은 광학간섭계를 적절하게 구성하여 변형의 도함수 성분을 구할 수 있다는 개념으로 Leendertz[5]에 의해 개발되었고, 후에 Hung[6]이 이를 더욱 발전시켰으며, 이를 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, 강체변형은 변형률 변화를 발생시키지 않기 때문에 전단간섭법은 대상물의 결함을 계측하는데 매우 우수하며, 외란에 매우 강한 장점을 바탕으로 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 많이 사용되고 있다. 또한 ESPI보다 간섭계의 구성이 간단하고, 레이저의 가간섭거리가 상대적으로 짧아도 측정이 가능하여, 전단간섭법의 응용 영역은 더욱 증가하여 대상물의 진동해석에도 사용되고 있으며, 결함의 정량화[12], 복합재 구조물의 해석[13] 등 비파괴 검사분야에서 유용한 방법으로 활용이 되고 있다[14].

특히, 전단간섭법은 광학계의 조작만으로 변위의 1차 미분성분을 구할 수 있으며, 1차 미분값을 이용하여 정량화된 변위값을 측정할 수 있다. 현재 광학간섭계의 구성을 고려한 결함의 정량화에 관한 연구는 강영준에 의해 시도가 되었으며, 조선대학교 자동차연구실은 전단량을 고려한 결함의 정량화에 대한 연구를 수행중이다. 그러나 결함의 정량화에 있어서 최적의 전단량과 전단량 변화에 따른 측정 정밀도의 관계에 관한 연구의 보완이 필요하다. 또 전단간섭법을 이용하여 얻은 결함부의 변위는 건전부와 비건전부 사이의 변위값의 차이를 나타내는데 이는 압력배관의 경우처럼 건전부의 비건전부의 동시 변형이 이루어지는 대상에 대해서 변위의 정량측정의 정밀도가 떨어지는 문제점이 있어 산업적 활용을 저해하고 있다.

현재까지의 연구들을 종합해보면 제품의 신뢰성과 구조물의 안전성을 평가하기 위하여 비파괴 검사기술의 결함 정량측정 기술의 보완이 필요하다. 특히, 산업현장에서 전단간섭법의 적용은 유용하나 결함의 정량적 평가와 언제, 누가, 어디서 시험을 하여도 동일한 시험결과를 얻을 수 있는 기술의 신뢰성과 결함의 정량평가를 위한 이론적, 실험적 기반이 미흡한 상태이다.

제 2 절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 앞에서 언급된 다른 방법 및 전단간섭법의 제한을 극복하고 산업적 활용을 높이고자, 전단간섭법과 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 결함의 가시화와 면외변형을 정량적으로 계측하고자 한다. 또 전단량에 따른 결함의 정량 검출 메카니즘을 분석하고 실험적 검증을 통하여 결함의 효과적 정량검출방법을 제시하고자 한다.

본 논문에서 제안하는 기본 개념은 전단간섭법이 기본적으로 화상처리방법임을 감안하여, 전단량을 상면에서의 화소수로 변환하는 것이다. 현재까지는 전단간섭법에서 가장 중요한 변수인 전단량을 결함검출 민감도에 따라 연구자 임의로 적용되고 있는데, 이 전단량을 화소수로 변환하여 전단간섭법의 측정결과에 적용하고, 수치적분하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 측정할 수 있다는 것이며, 이 전단량과 측정값은 선형적인 관계가 있다는 것이다.

즉 이 전단량과 측정값 사이를 관계를 이용하여 압력배관 결함측정의 정밀도를 향상시키고자 한다. 이를 검증하기 위하여 원형평판에 발생하는 면외변형의 정량계측, 내압의 변화에 따른 내부결함이 있는 압력용기의 결함계측에 대하여 실험과 해석을 수행하였다.

본 논문에서 제안된 기법은 전단간섭법을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 정량적으로 측정할 수 있었으며, 전단간섭법의 장점인 간단한 간섭계의 구성과 저렴한 레이저의 사용, 그리고 외란이 강인한 장점을 바탕으로 전단간섭법의 산업적 현장적용성을 높이고, 비파괴 검사기법으로서 스펙클 패턴 간섭법이 안정적으로 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

제2장 이론적 배경

제1절 스페클과 프린지

1. 스페클 형성

레이저 빛을 임의의 대상물에 비추면, 대상물의 표면에서 어른거리는 입자를 볼 수 있다. 이러한 어른거림은 대상물의 표면에서 난반사된 빛이 공간상에서 서로 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타나게 된다. 이러한 간섭 효과가 밝고 어두운 부분이 무질서하게 분포하는 어른거림의 형태로 나타나는데, 이를 스페클(speckle) 효과라고 한다[27].

이러한 스페클은 레이저의 가간섭성과 대상물 표면의 광학적 거칠기 때문에 발생하는데, 즉, 대상물의 표면 거칠기가 조사되는 레이저 빛의 파장 정도나 그보다 클 때 물체의 표면에서 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인한 보강간섭과 소멸간섭은 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타난다. 이를 스페클패턴(speckle pattern)이라 하며, 이 스페클 패턴은 또 다른 스페클패턴과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위산변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광검출기에 광도(intensity) 분포로 기록되어진다. 일반적인 광학거울의 거칠기는 $\lambda/10$ 정도이기 때문에 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 구분되며, 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. Objective Speckle은 관측면의 위치에 따라 변화하게 되며, 대상물의 표면에 빛이 비출 때, 대상물 표면의 모든 점에서는 흡수와 반사가 일어나는데, 반사가 일어나는 점은 Huygens-Fresnel의 2차 파면과 유사한 구면파를 생성한다.

표면의 모든 점으로부터 산란된 빛의 진폭의 합은 공간상의 임의의 한 점에서 빛의 복소진폭의 합으로 나타난다. 이를 Fig. 2-1에 나타내었으며, 이의 물리적 의미를 살펴보면 다음과 같다.

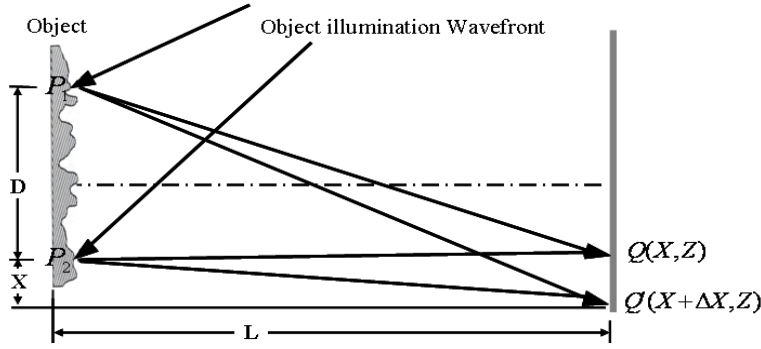


Fig. 2-1 The scattering of light by a rough surface

대상물 표면의 모든 점은 Q에 영향을 주게 되며, Q와 인접한 Q'사이의 거리가 Δx 라고 하고, P_1 과Q, P_2 와 Q까지의 경로차는 s이며, P_1 과Q, P_2 와 Q'까지의 경로차는 s'이라고 할때, s와 s'과의 상대적인 경로 변화는 식.(2-1)과 같이 유도할 수 있다.

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

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

$$\Delta s = s' - s = \frac{\Delta x D}{L} \tag{2-1}$$

Δs 가 파장보다 상당히 작다면, 상대적 위상은 근사적으로 동일하지만, $\Delta x D / L \approx \lambda$ 라면 인접한 점과의 위상은 전혀 다르기 때문에, Q와 Q'에서 빛의 강도는 상호 연관성이 없게 된다. 이렇게 상호 연관성이 없게 되는 거리 Δx 의 2배를 스페클의 크기라고 할 수 있으며, 거리는 식(2-2)과 같이 표현할 수 있다[28].

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

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

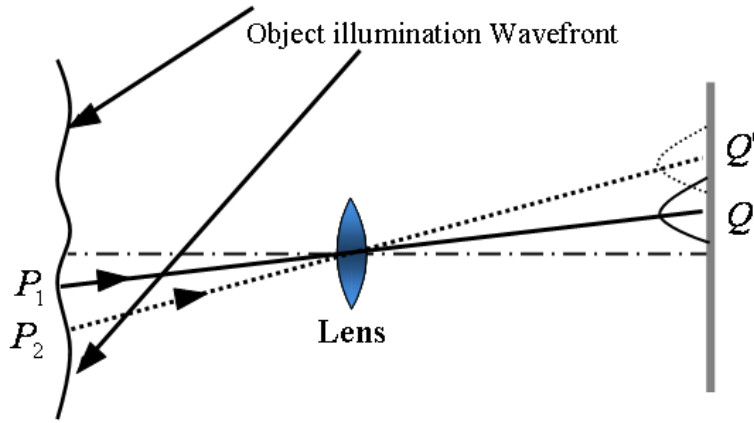


Fig. 2-2 Speckle pattern formation in the image plane of a lens

즉, Fig. 2-2의 대상물 위의 P_1 에서 반사된 빛은 렌즈 L을 통과하면서 결상면의 Q에 회절 무늬를 형성한다. Q에 형성되는 회절무늬의 진폭 분포는 제1종베셀함수로 설명할 수 있고, Q는 P_1 에 인접한 점들에서 발생하는 회절무늬에 의해 영향을 받는다.

그러나, 인접한 점들의 2차, 3차 회절무늬가 Q에 영향을 미칠 수 있으나, 1차 회절무늬보다 매우 작기 때문에 2차 이상의 회절무늬의 영향은 무시할 수 있고, Q에서 빛의 강도는 P_1 을 중심으로 하고, 그 한계는 P_2 로하는 그 주위 일부 영역에서 산란된 빛에 영향을 받는다. 이때 주변영역의 지름 d_o 는 P_1 과 P_2 사이의 거리의 두 배이다. 이러한 관계를 이용하여 결상시스템에서 얻어지는 스페클의 크기는 거리 QQ'의 2배이고, 베셀함수를 이용하여 식.(2-3)와 같다.

$$S_s = \frac{2.44\lambda v}{a} \quad (2-3)$$

여기서, a는 렌즈 조리개의 지름이며, v는 렌즈부터 결상면까지 거리를 나타낸다. Fig. 2-2에 표현된 것처럼 렌즈 조리개를 통과한 스페클은 Airy Disc모양의 회절 패턴을 보이므로, 각각의 스페클의 크기는 식.(2-4)와 같이도 표현할 수 있다.

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

여기서, M 은 렌즈 확대배율, F 는 렌즈의 f-number이며, 간략한 렌즈이론으로 부터 산란된 표면에서 스펙클의 크기는 다음과 같다.

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

2. 두 빛의 간섭 : 파의 중첩

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

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

$U(\mathbf{r}, t)$ 는 빛의 복소 진폭이고, u_0 는 진폭, \mathbf{f} 는 주파수, ϕ 는 위상이며, 빛의 강도 I 는 u_0^2 에 비례하므로 식.(2-7)과 같이 표현할 수 있다.

복소 진폭 U_1, U_2 에 의해 표현되는 빛을 고려하면 Eq.(2-8)와 Eq.(2-9)와 같으며, 전체 복소진폭은 식.(2-10)와 같다.

$$I = UU^* \quad (2-7)$$

$$U_1 = u_1 \exp(i(2\pi \mathbf{f}t + \phi_1)) \quad (2-8)$$

$$U_2 = u_2 \exp(i(2\pi \mathbf{f}t + \phi_2)) \quad (2-9)$$

$$U = u_1 \exp(i(2\pi \mathbf{f}t + \phi_1)) + u_2 \exp(i(2\pi \mathbf{f}t + \phi_2)) \quad (2-10)$$

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

$$U = (u_1 \exp(i\phi_1) + u_2 \exp(i\phi_2)) \exp(i2\pi \mathbf{f}t) \quad (2-11)$$

$$I = UU^* = u_1^2 + u_2^2 + u_1 u_2 [\exp(i(\phi_1 - \phi_2)) + \exp(-i(\phi_1 - \phi_2))] \quad (2-12)$$

다음 관계를 사용하여 식.(2-12)를 표현하면 식.(2-13)과 같이 표현할 수 있다.

$$(e^{i\phi} + e^{-i\phi}) = 2\cos\phi$$

$$\begin{aligned}
UU^* &= u_1^2 + u_2^2 + 2u_1u_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \\
I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\phi_1 - \phi_2)
\end{aligned}
\tag{2-13}$$

여기서 $\phi = \phi_1 - \phi_2$ 는 두 파의 위상차이며, 이를 다시 정리하면, 식.(2-14)와 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\phi \tag{2-14}$$

3. 프린지의 형성 : 이중노광법과 이미지 감산

스펙클 상관 간섭무늬는 물체의 변형에 따라 스펙클이 가지고 있는 같은 파장의 차수 내에서 위상점의 연결로 이루어진 것으로 볼 수 있으며, 상관간섭무늬는 화상처리장치를 이용하여 변형 전의 스펙클 패턴을 기준으로 물체변형에 따른 스펙클 패턴의 변화를 연속으로 감산처리에 의해 실시간으로 관찰할 수 있다. 화상처리장치인 카메라 신호는 입력된 빛의 세기에 비례하기 때문에 변형에 대한 간섭무늬의 형성은 변형 전과 변형 후의 각각의 이미지를 저장하고, 저장된 이미지를 합산처리하거나 감산처리하여 변형에 의한 간섭 줄무늬를 나타낼 수 있다. 홀로그램 필름의 경우는 합산이며 식.(2-15)와 같고, ESPI의 경우는 감산처리에 해당하며 Eq.(2-16)과 같다[8].

$$\begin{aligned}
I_b &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\phi \\
I_a &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\phi + \Delta\phi) \\
I_{add} &= I_b + I_a \\
&= 2I_0(1 + \gamma\cos\phi) + 2I_0[(1 + \gamma\cos(\phi + \Delta\phi))] \\
&= 4I_0 + 2I_0\gamma[\cos\phi - \cos(\phi + \Delta\phi)] \\
&= 4I_0 + 4I_0\gamma\left[\cos\left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}\right)\cos\frac{\Delta\phi}{2}\right]
\end{aligned}
\tag{2-15}$$

$$\begin{aligned}
 |I_{\text{sub}}| &= |I_b - I_a| \\
 &= \left| 4I_0 \sin \left(\phi + \frac{\Delta\phi}{2} \right) \sin \frac{\Delta\phi}{2} \right|
 \end{aligned}
 \tag{2-16}$$

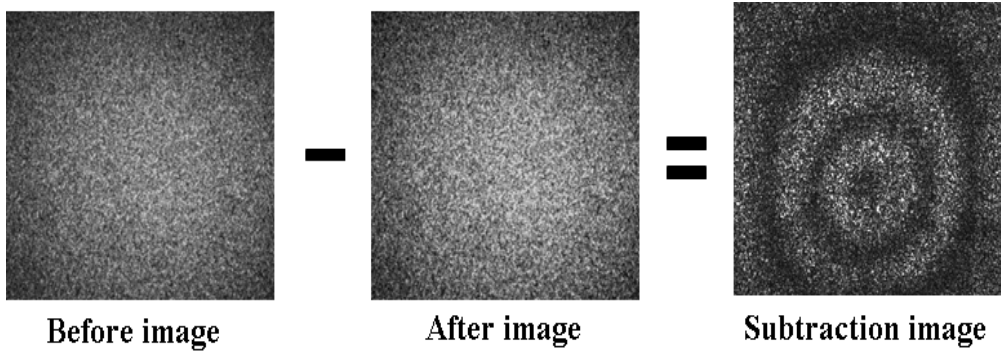


Fig. 2-3 The fringe pattern formation depend on deformation

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 l로 표현할 수 있으며, 식.(2-17)과 같다[27].

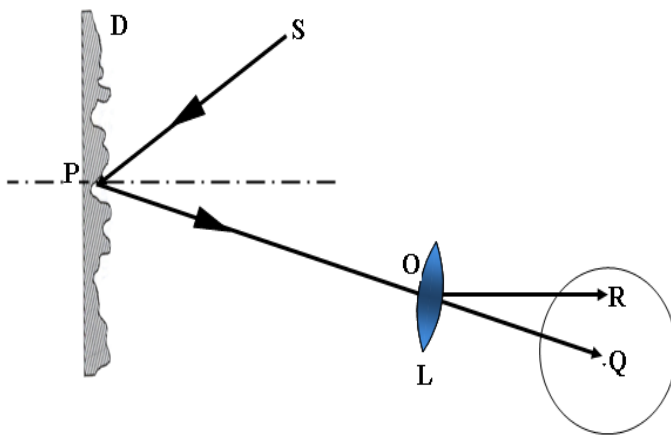


Fig. 2-4 The optical path of a ray : image-plane viewing

$$l = SP + l_p + PO + OR \quad (2-17)$$

여기서, SP와 PO는 대상물 표면의 임의의 P의 주변영역에서 S와 O까지의 평균거리이고, l_p 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 광경로로 표현하면 식.(2-18)로 나타낼 수 있다.

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

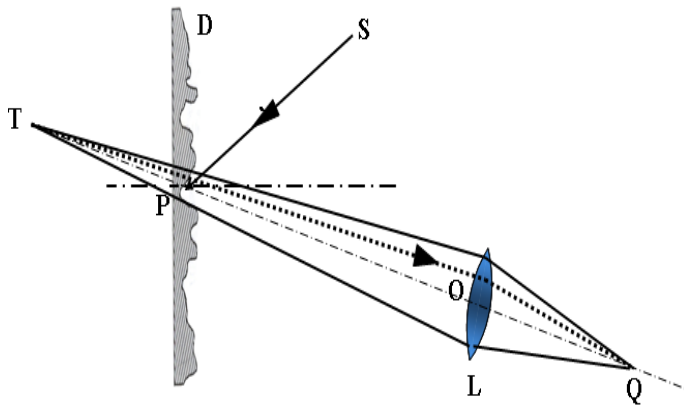


Fig. 2-5 The optical path of a ray : defocussed viewing

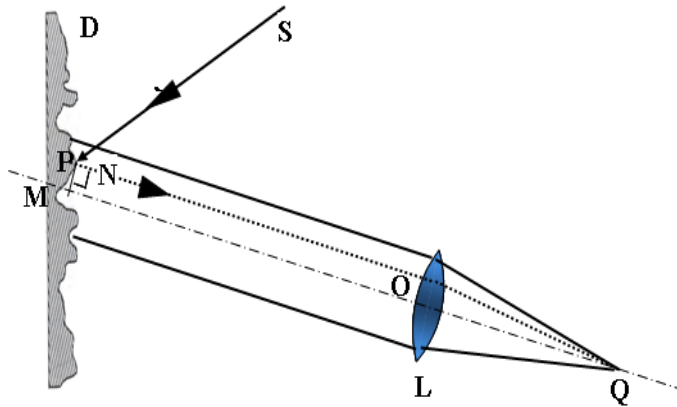


Fig. 2-6 The optical path of a ray : focal plane viewing

관측면이 렌즈의 초점면일 때, T의 위치가 무한대일 때 더 정확하며, 관측면의 Q

에 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 식.(2-19)와 같이 표현할 수 있으며, S부터 Q까지 광경로는 i) 경로 S부터 P까지, ii) 표면의 높이변화와 관련한 경로 l_p , iii) 경로 S부터 P까지로 구성된다.

$$l = SP + l_p + MQ + PN \quad (2-19)$$

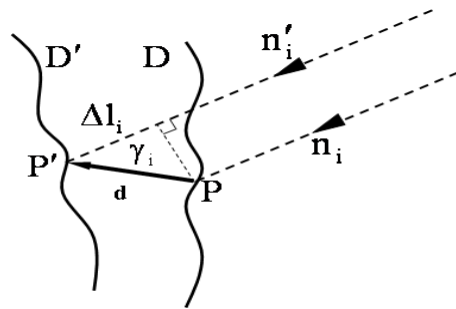


Fig. 2-7 The illuminating wavefronts introduced by a surface displacement

대상물에 변형이 발생하였을 때, i)에 의한 경로 변화는 Δl_i 이며, 실제적인 간섭계의 배열을 고려할 때 $SP \gg d$ 이기 때문에 식.(2-20)와 같이 쓸 수 있다.

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

$$\Delta l_i = \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{d} \quad (2-20)$$

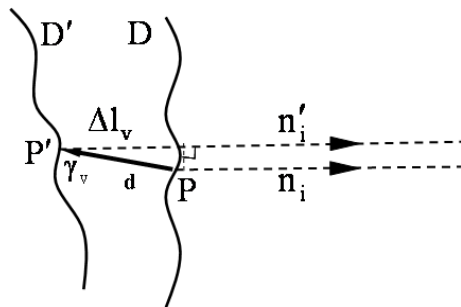


Fig. 2-8 The scattered wavefronts introduced by a surface displacement

대상물의 표면이 변형하여도 Δl_p 는 변하지 않는다고 가정할 수 있으며, iii)와 관련된 경로 Δl_2 의 변화는 Fig. 2-8에 표현된 식.(2-21)과 같다. Fig. 2-6에서 SP와 SP', PQ와 P'Q는 서로 평행한 것으로 가정한다.

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

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

변형에 의한 전체의 위상변화는 식.(2-22)로 표현되며, 모든 광계축의 기본식이 된다.

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_v) \cdot \mathbf{d} \quad (2-22)$$

여기서, \mathbf{n}_i 는 조사방향이고, \mathbf{n}_v 는 관측방향이며, 식.(2-22)는 면외변형 뿐만 아니라 면내변형의 줄무늬 패턴에도 적용되며, 대상물에 조사되는 입사각과 관측각이 다르면 위상변화는 식.(2-22)를 조사각과 관측각으로 표현하면 식.(2-23)과 같다.

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_i + \cos \theta_v) d \quad (2-23)$$

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

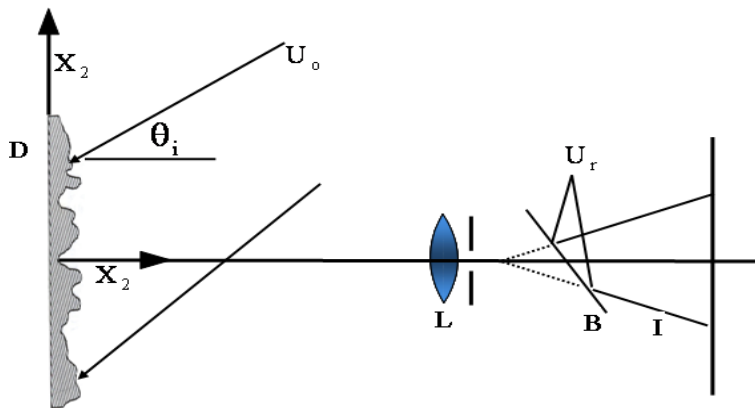


Fig. 2-9 A diagrammatic arrangement of an out-of-plane displacement

식.(2-23)를 이용하여 Fig. 2-9와 같이 면외변형 측정에 민감한 간섭계를 구성할 수 있으며, 물체광 U_o 이 물체에 조사되고 난반사된 빛이 광분할기(Beam Splitter : B.S)에 입사되고, 참조광 U_r 이 물체를 거치지 않고 직접 광분할기에 입사된다. 이렇게 입사된 두 빛에 의한 간섭이 일어나고, 대상물에 변형이 발생할 때, 참조광에 비하여 물체광의 위상이 변화한다. 또한 관측각 $\theta_v = 0$ 이므로 식.(2-23)은 식.(2-24)와 같이 표현되고, 대상물에 발생하는 변형을 계산할 수 있는데 이는 식.(2-25)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta_i) d \quad (2-24)$$

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

2. 전단간섭계 및 전단간섭무늬의 해석

Fig. 2-10은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다.

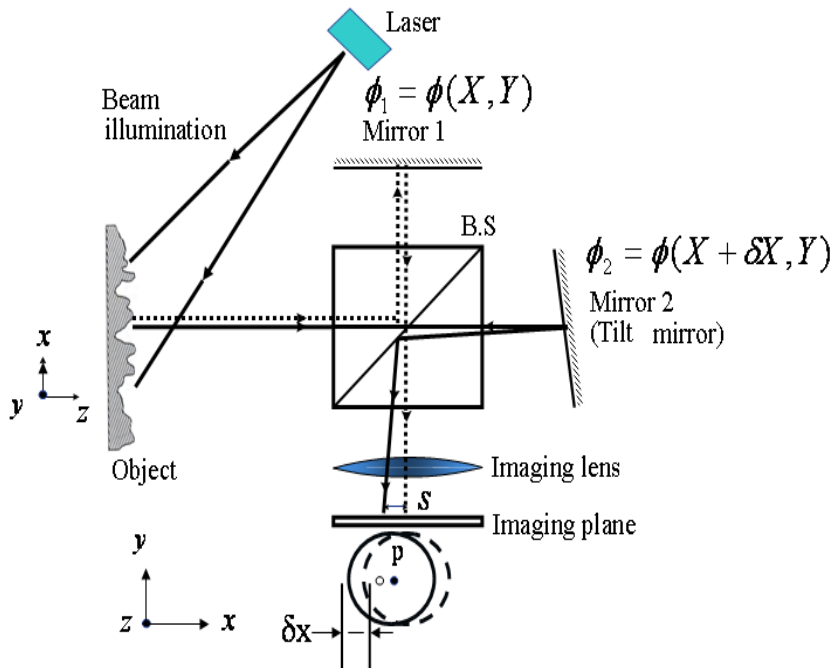


Fig. 2-10 Speckle pattern shearing interferometry

이때 스펙클의 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 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 변형 전 후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 면외변형 측정 간섭계와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다.

Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 $\delta\mathbf{x}$ 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다. 이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 \mathbf{P}_1 과 \mathbf{P}_2 에 $\phi_1 = \phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 와 $\phi_2 = \phi(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 다음과 같다.

$$\phi = \phi(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \phi(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

변형에 의한 위상차의 변화 $\Delta\phi$ 는 Eq.(2-26)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 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 바와 같이 \mathbf{d} 와 \mathbf{d}' 은 임의의 \mathbf{P} 에 조사된 두 점의 각각의 변형이다[27] [29].

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi = (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_2) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (2-26)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\mathbf{n}_i - \mathbf{n}_v) \cdot (\mathbf{d} - \mathbf{d}') \quad (2-27)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 Eq.(2-27)

을 Eq.(2-28)과 같이 표현할 수 있다.

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

Δd 는 테일러급수에 의해 Eq.(2-29)와 같이 표현할 수 있으며, $\Delta \mathbf{x}$ 는 상면에서 전단량 $\delta \mathbf{x}$ 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 Eq.(2-29)에서 2차 이상의 고차항은 무시하면, Eq.(2-29)은 Eq.(2-30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(\mathbf{x}) - d(\mathbf{x}_0) \\ &= \frac{\Delta \mathbf{x}}{1!} \frac{\partial d}{\partial \mathbf{x}} + \frac{(\Delta \mathbf{x})^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial \mathbf{x}^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-29)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial \mathbf{x}} \right) \delta \mathbf{x} \quad (2-30)$$

제 3 절 정량화를 위한 위상정보의 해석

1. 위상이동기법의 적용

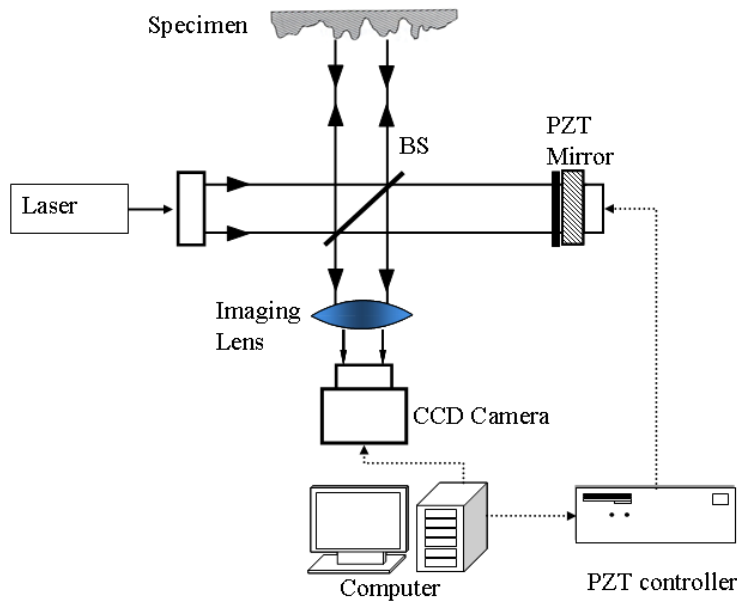


Fig. 2-11 Schematic of ESPI using pzt mounted mirror as phase shifter

전자제어 시스템을 이용한 위상이동장치를 사용하여 스펙클 패턴의 강도를 측정하여 파면의 위상을 얻어낼 수 있으며, 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. 2-11는 PZT를 이용한 참조광 위상이동장치를 이용한 간섭계의 개략도를 나타내고 있다[29]. PZT를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 위상추출 알고리즘은 4단계 위상이동기법(4-step phase shifting method)으로 3개의 미지수를 구하기 위해 $\pi/2$ 씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식(2-30)와 같이 얻게된다.

$$I_1 = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos \phi \quad (2-30)$$

$$I_2 = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos (\phi + \pi/2)$$

$$I_3 = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos (\phi + \pi)$$

$$I_4 = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0 I_R} \cos (\phi + 3/2)$$

4개의 방정식을 식(2-31)과 같이 조합하여 CCD pixel의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(phase map)를 형성한다. 점에서의 위상과 줄무늬 가시도는 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (2-31)$$

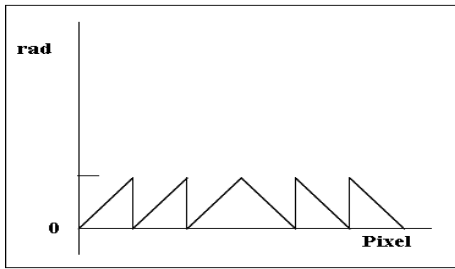
ESPI에서 변형해석을 위한 실험에서는 식(2-15)의 변형 전과 후에 가가 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상(ϕ_b)과 변형후의 위상(ϕ_a)을 각각 구하고 그 차를 구함으로써 실제 물체변형을 식(2-32)와 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_b - \phi_a \quad (2-32)$$

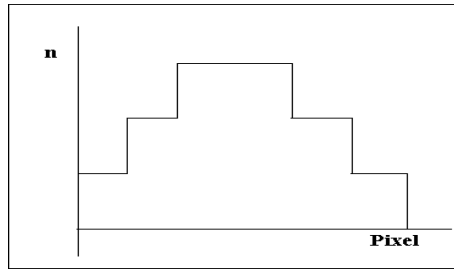
그러나, 이 방법은 4개의 방정식을 얻기 위한 위상변조가 이루어지는 시간동안 안정된 상태를 유지하여야 하며, 위상이동 중에 발생하는 물체의 변형 또는 외부잡음은 오차의 요인이 된다.

2. 결핍

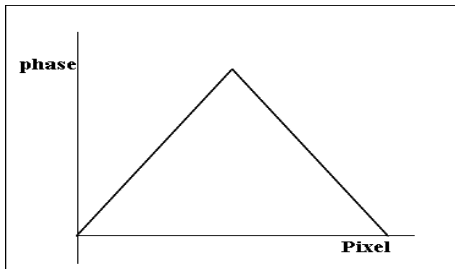
위상결핍의 기본 원리는 데이터 경로를 따라 2π 단위내에서 톱니파를 가지는 위상값 ϕ 를 통합시키는 것이다. 각 픽셀에서 위상의 기울기를 계산하는데, 이때 위상차의 절대값이 $3\pi/2$ 와 같은 일정한 한계치를 초과한다면 위상 줄무늬 경계라고 가정한다. 이 위상 도약은 위상차의 부호에 따라서 2π 를 가산 또는 감산하여 정확하게 한다. 임의의 점에서 위상을 $\phi + 2\pi N$ 으로 계산하기 위하여 현재 프린지 차수 N 은 저장하여야 한다. 위상이동법을 적용해서 구해진 위상은 Arctangent의 함수로부터 계산되었으므로 0과 2π 사이의 값만 가지게 되며 $\phi(x, y) = 2N\pi$ 인 점에서 불연속점이 발생한다.



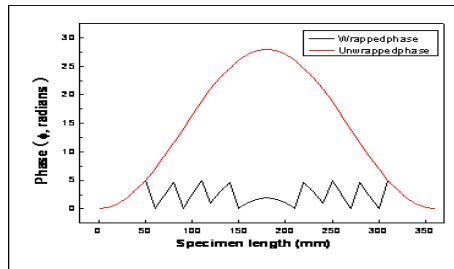
(a) Data of phase value



(b) Calculation of Fringe order



(c) Unwrapped phase distribution



(d) example of phase unwrapping

Fig. 2-12 Sequence of phase unwrapping

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 결궤침(Phase Unwrapping) 단계를 거친다. Fig. 2-12는 이러한 결궤침 과정을 나타낸다.

제4절 전단간섭법을 이용한 변형계측의 개념

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

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

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

더욱이 전단간섭법은 전단량에 따라 변형의 해석 영역이 전단량의 증가만큼 증가하기 때문에 대상물에 발생한 원래의 변형영역이 얼마인지를 알 수가 없다. 앞서 언급한 바와 같이 실제로는 도함수나 미분이 될 수 없으며, 전단량에 의한 변형의 평균기울기의 연속적인 표현이라고 하는 것이 옳다고 판단된다.

본 논문에서 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다.

실제 전단간섭법을 이용한 측정결과를 식.(2-33)과 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형 Δd 는 식.(2-34)와 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-33)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(\mathbf{x}) - d(\mathbf{x}_0) \\ &= \frac{\Delta \mathbf{x}}{1!} \frac{\partial d}{\partial \mathbf{x}} + \frac{(\Delta \mathbf{x})^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial \mathbf{x}^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-34)$$

식.(2-34)에서 고차항을 무시하면, 식.(2-35)와 같으며, 이를 식.(2-33)에 대입하면 식.(2-36)과 같다.

$$\Delta d = d(\mathbf{x}) - d(\mathbf{x}_0) \approx \frac{\partial d}{\partial \mathbf{x}} \frac{\Delta \mathbf{x}}{1!} \quad (2-35)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{d(\mathbf{x}) - d(\mathbf{x}_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial \mathbf{x}} \right) \Delta \mathbf{x} \quad (2-36)$$

이는 대상물에 발생하는 변형의 한 점과 전단량만큼 떨어진 두 점의 연속적인 차이와 같으며, 이 결과는 직접적으로 적분을 적용할 수가 없으나, ESPI나 전단간섭법 모두 화상처리이므로 변형 f , 대응화소 \mathbf{x}_i , 전단량화소 h 로 바꾸어 쓰면, 식.(2-37)과 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f' 으로 정리하면 Eq.(2-38)과 같다.

$$f'(\mathbf{x}_i) h \approx f(\mathbf{x}_i + h) - f(\mathbf{x}_i) \quad (2-37)$$

$$f'(\mathbf{x}_i) \approx \frac{f(\mathbf{x}_i + h) - f(\mathbf{x}_i)}{h} \quad (2-38)$$

식.(2-38)은 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다.

식. (2-37)을 식.(2-36)에 대입하면 식.(2-39)과 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 식.(2-40)과 같이 수치적분이 가능하다.

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f' h \quad (3-39)$$

$$f(x_i) \approx \sum f'(x_i)$$

(3-40)

또한, 대상물에 발생하는 변형은 경계조건이 양단고정 또는 양단단순을 가정할 경우에 Fig. 2-13과 같이 삼각함수로 표현이 가능하며, 삼각함수에 유한차분법을 적용하는 것은 그 신뢰성을 높일 수 있다.

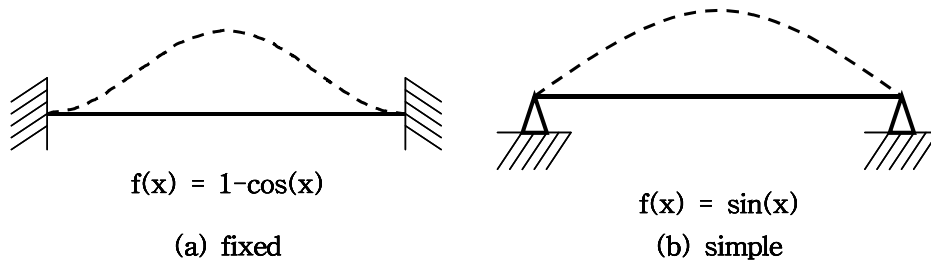


Fig. 2-13 Deformation function depend on the boundary condition

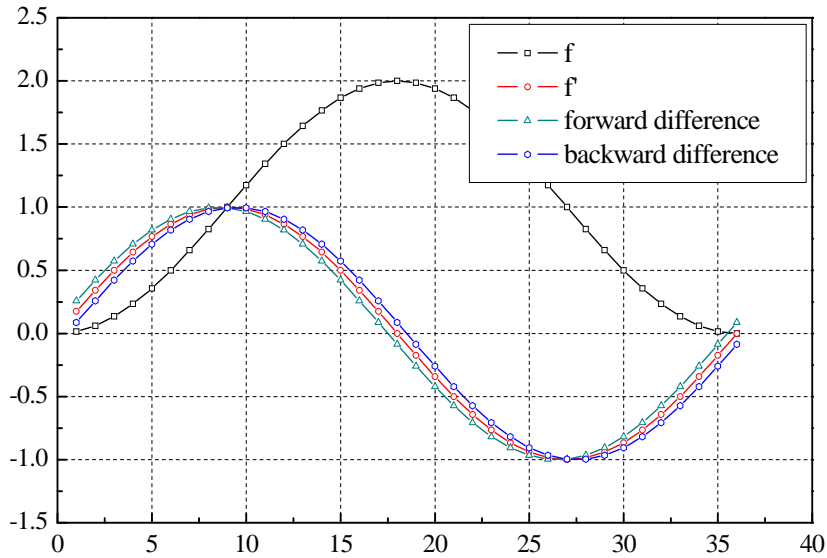
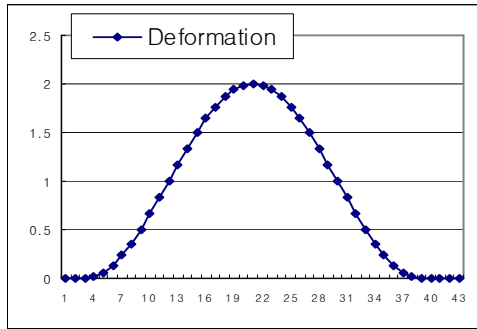


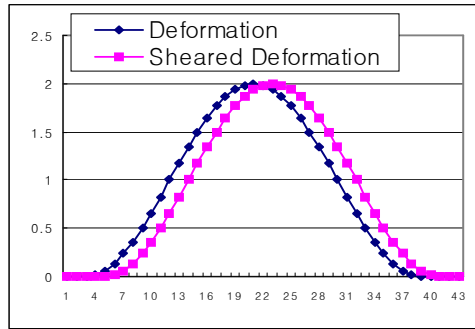
Fig. 2-14 Comparison between differentiation and numerical differentiation

Fig. 2-14는 양단고정 경계조건에서 대상물에 발생하는 변형함수와 그 함수의 미분, 그리고 각각의 유한차분법에 의한 수치미분 결과를 비교하였으며, 이 결과로

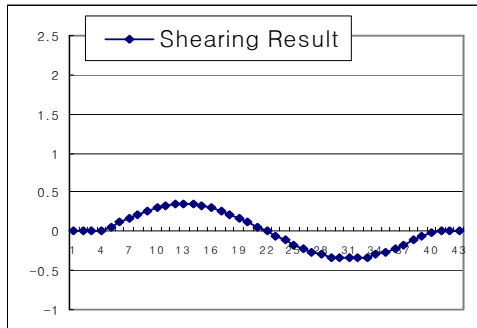
전단간섭법을 이용한 변형측정 결과는 대상물에 발생한 변형에 대한 수치미분적 표현임을 알 수 있으며, 원래의 변형을 계산할 수 있음을 보여주는 것이다.



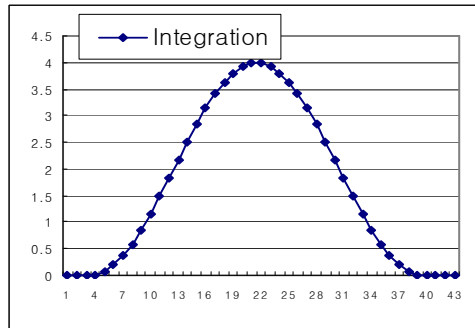
(a) Out-of-plane Deformation



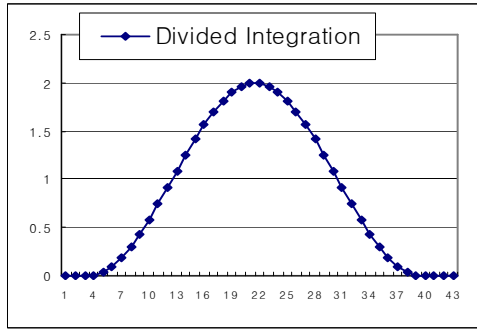
(b) Sheared Deformation



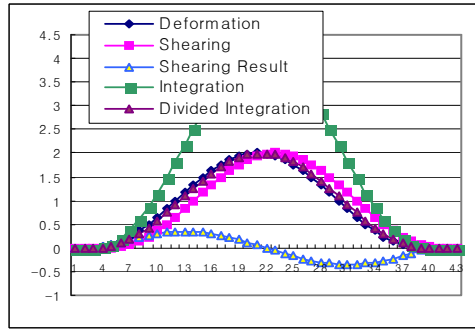
(c) Deformation Slope



(d) Integration of Deformation Slope



(e) Divided Integration Result by shear



(f) Comparison of Result

Fig. 2-15 Algorithm of deformation reconstruction

본 연구에는 고정단을 가지는 평판의 면외변형은 Cosine 함수로서, Fig. 2-15(a)의 실선과 같은 형태이며, 이것은 ESPI를 평판에 발생하는 면외변형을 이용하여 측정한 결과로 볼 수 있다. Fig. 2-10에서 표현된 전단간섭계의 전단거울(Mirror 2)이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2-15(b)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 2-15(c)는 Fig. 2-15(b)에 표현된 두 값을 감산한 결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형전과 변형후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2-15(d)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2-15(e)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다. 또한, 전단간섭법은 간섭계의 구성상 하나의 이미지로부터 전단이미지를 구하여 간섭정보를 기록하게 되므로 전단량으로 인하여 측정 결과는 전단량의 1/2만큼 전단되어 나타나게 된다.

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

제3장 실험장치

제1절 ESPI 시스템

ESPI 시스템은 독일 Ettemeyer사의 상용제품(Model: Q-300)을 사용하였으며, 장치구성은 Fig. 3-1과 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 변경으로 간섭계를 선택할 수 있다. 위상의 추출을 위해 4단계 위상이동기법을 적용하였으며, 위상이동은 Piezo-electronic transducer(PZT)로 수행하며 외부 Controller에 의해 제어가 되고, 최적 위상이동량을 자동 검출하여 위상이동기법을 적용한다, 또한 위상이동기법에 의해 구한 위상지도(Phase map)는 상용프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH)을 이용하여 결렬침 및 수치해석함으로서 변위 및 변형율을 구할 수 있다. Talbe 3-1은 ESPI 시스템의 사양을 나타내었다.

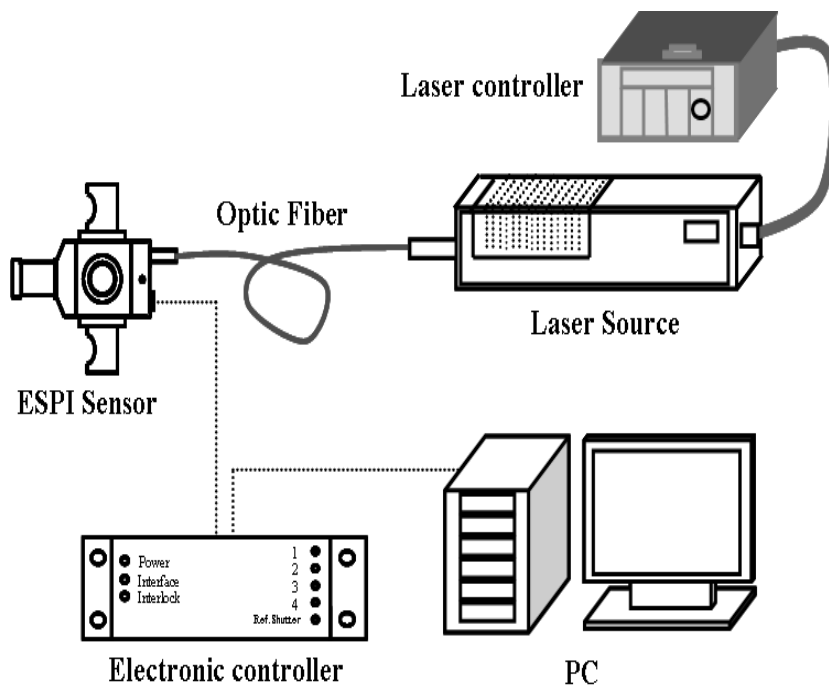


Fig. 3-1 Configuration of ESPI system



Fig. 3-2 ESPI system

Table 3-1 Specification of ESPI system

Description	Technical data
Measuring Sensitivity	0.03 ~ 1 μ m adjustable
Measuring range	1-20 μ m per measuring step, any with serial measurement
Measuring area	static up to 1 m ² dynamic up to 400×600 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
Dimensions of sensor head (without arms)	80×80×120 mm ²
Data acquisition speed	2.5 sec for 3D-analysis

제2절 전단간섭시스템

전단간섭시스템은 독일 DANTEC DYNAMICS 사의 상용 Shearography 시스템(Q-800HR model)을 이용하였으며, 구성은 Fig. 3-3과 같이 Shearography 센서, 센서 내부에 장착된 Diode laser, Controller, PC로 구성이 되어 있다. System은 상용 프로그램 ISTRA 4D를 이용하여 장치의 제어와 필터링과 결결침을 수행한다. 레이저는 Diode laser (출력: 50 mW, 파장: 780 nm)를 사용하며, 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 Diode를 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 해석함으로써 상대변위량을 얻게 된다. Table 3-2에는 Shearography 시스템의 사양을 나타내었다.

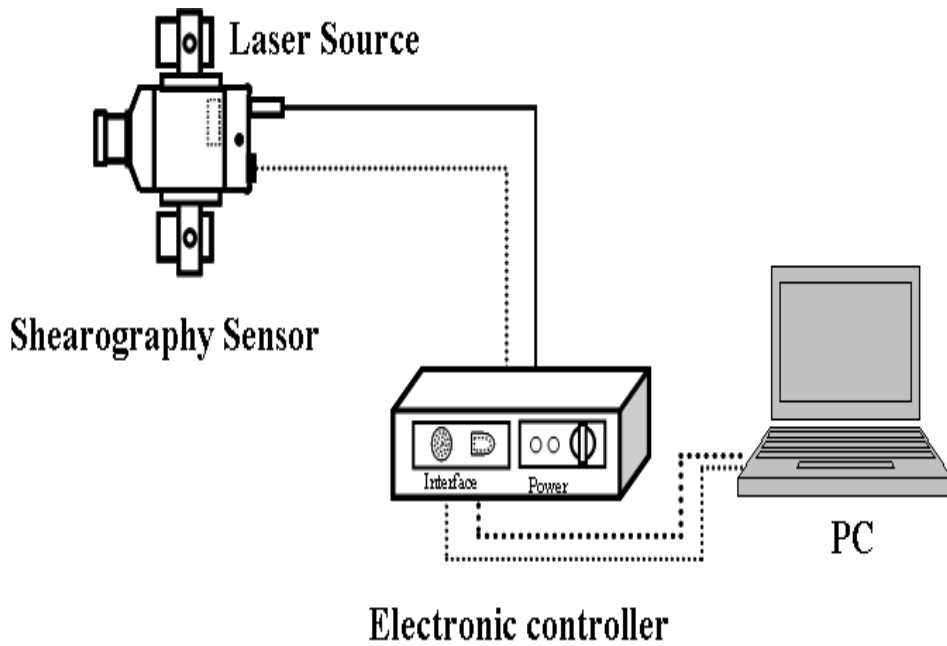


Fig. 3-3 Configuration of Shearography system

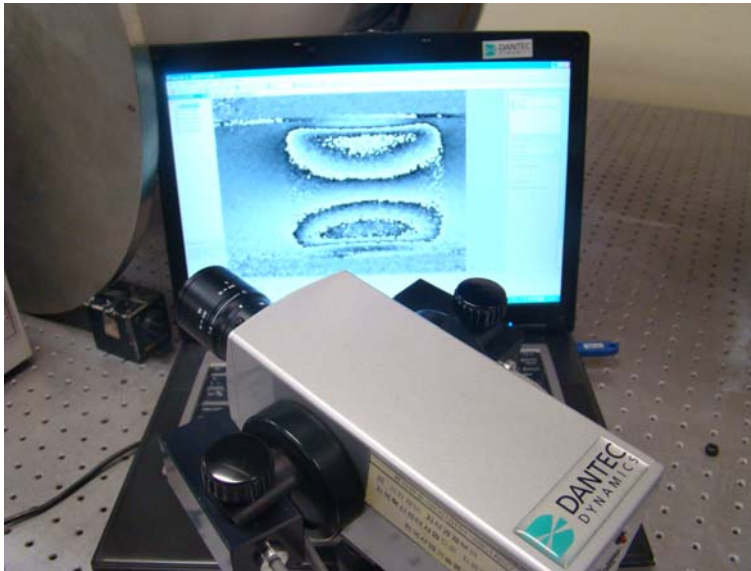


Fig. 3-4 Shearography system

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)
Measuring resolution	according to illumination arm, distance and wave length: 0.03 μ m/shear distance
Sensor head dimension	W×H×D = 70×70×160 mm ³
Laser (Built-in)	Diode 50 mW, 780 nm

제4장 실험방법 및 실험결과

실험과정은 폴리머 평판을 이용한 면외변형 측정결과를 ESPI와 전단간섭법을 이용하여 측정하여, 측정 센서와 제안된 전단간섭 정량해석기법의 신뢰성을 확인하였다. 그리고 본실험으로 내부 감속결함을 가공한 압력용기의 내압변화에 따른 면외변형을 ESPI와 전단간섭법을 내압변화와 전단량 변화에 대하여 비교하였다.

제1절 전단간섭계와 ESPI를 이용한 평판의 면외변형

1. 실험장치 및 방법

전단간섭법에 의한 면외변형의 정량측정 방법을 검증하기 위하여 고무평판에 발생하는 면외변형을 측정하였으며, 이를 ESPI를 이용하여 동일조건으로 측정하여 변형량을 비교하였다. 이를 위하여 전단간섭시스템과 ESPI 시스템은 독일 DANTEC DYNAMICS사의 상용 시스템을 사용하였다.

대상 평판은 철판과 폴리머판을 이용하여, Fig. 4-1과 같이 두께 3mm인 철판(110mm×110mm)에 지름이 50mm인 원공을 만들고, 3mm 두께의 폴리머판(110mm×110mm)을 본드를 이용하여 접착한 후 스틸소재의 고정용 지그에 4번을 고정하였다. 대상 평판의 측정방향의 반대편에서 PZT와 Controller를 이용하여 반복변형을 부과할 수 있도록 하였으며, 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-2와 같다.

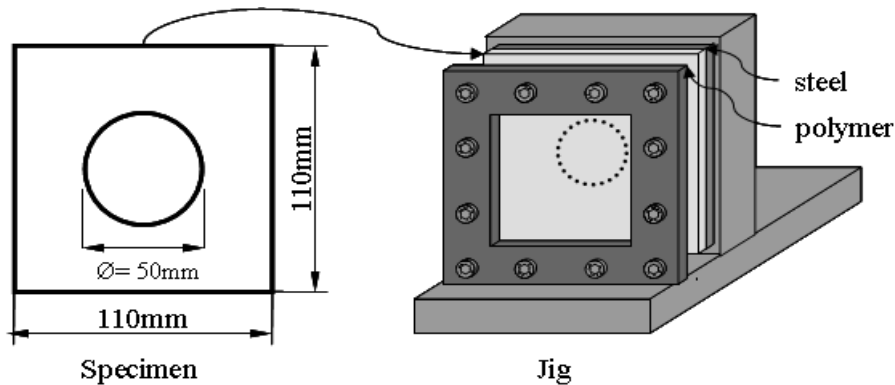


Fig. 4-1 Schematic of Polymer Plate

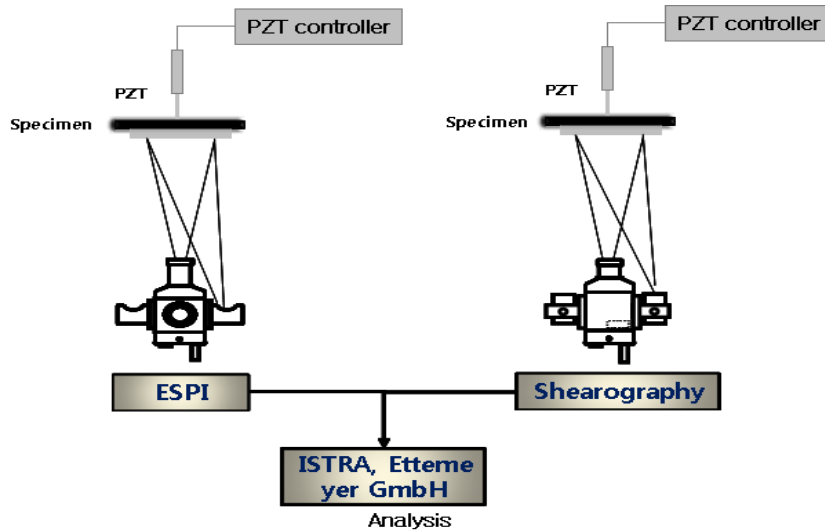
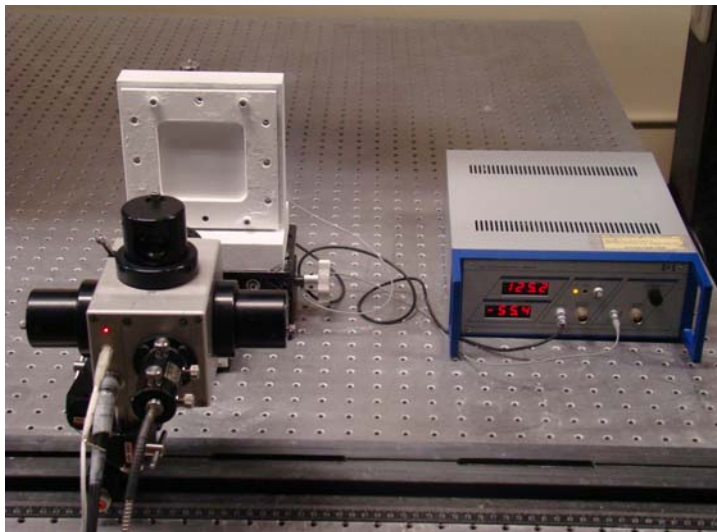


Fig. 4-2 Schematic of Shearography and ESPY System

전단간섭법과 ESPI의 실험결과를 비교하기 위하여, PZT Controller를 이용하여 전압변화에 따른 PZT의 이송변형을 제어하였으며, 이송된 PZT가 고무판에 외압을 가하도록 하여 변형량을 조절할 수 있도록 하였다. 실험은 전단량을 일정하게 하고, PZT를 이용하여 변형을 일정하게 증가시키면서 측정하는 방법과 변형을 일정하게 하고 전단량을 증가시키면서 측정하는 방식으로 수행하였다.



(a) ESPI



(b) Shearography

Fig. 4-3 Shearography and ESPI System

2. 실험결과

가. 전단량 일정 변형량 변화

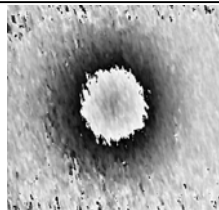
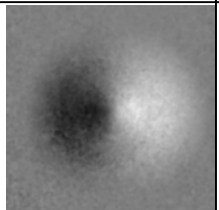
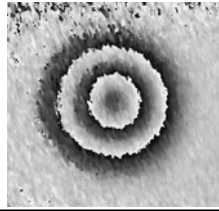
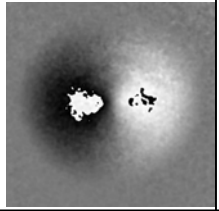
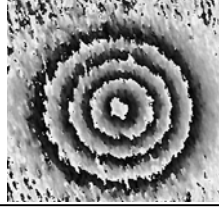
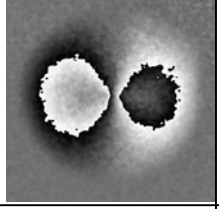

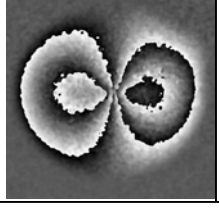
전단간섭계의 전단량을 5pixel로 고정하고, 변형은 PZT Controller를 이용하여 전압을 5V부터 20V까지 5V씩 일정하게 증가시키면서 실험하였고, 그 결과를 Table 4-1에 정리하였다. 변형의 증가에 따라 ESPI와 전단간섭계에 의한 측정결과 모두 위상지도에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

위상지도의 줄무늬는 ESPI의 경우 변형을 등고선 형태의 단일 폐곡선으로 변형의 크기를 표현한다. 하지만 전단간섭법은 1개의 변형을 2개의 줄무늬 패턴으로 표현한다. Table 4-1에 나타낸 ESPI와 전단간섭법의 위상지도 이미지를 통하여 차이를 확인할 수 있으며, 전단간섭의 위상지도는 제안된 적분을 이용한 정량 해석 방법을 통하여 ESPI와 같은 형태의 결함으로 표현 할 수 있다.

Fig. 4-4는 전단간섭법의 측정결과 프로파일로 측정 구간에 따른 변형의 기울기를 나타낸다. Fig. 4-5, Fig. 4-6은 ESPI와 제안된 방법을 이용하여 변형기울기를

를 적분한 전단간섭법의 정량적 측정값과 최대변형의 비교를 나타내었다. Fig. 4-5 그래프의 유사성과, Fig. 4-6 그래프의 선형성은 전단간섭 시스템의 정량 계측의 신뢰성을 나타내고 있다. 정량적 평균 오차는 1.43% 제안된 전단간섭법의 정량계측 방법의 신뢰성이 매우 높음을 확인할 수 있다.

Table 4-1 Phase-map and max-deformation by voltage

Volt	ESPI		Shearography		Error (%)
	Deformation (μm)	Phase-map	Deformation (μm)	Phase-map	
5V	0.373		0.383		2.7%
10V	0.846		0.795		6.1%
15V	1.344		1.324		1.5%
20V	1.779		1.764		1%

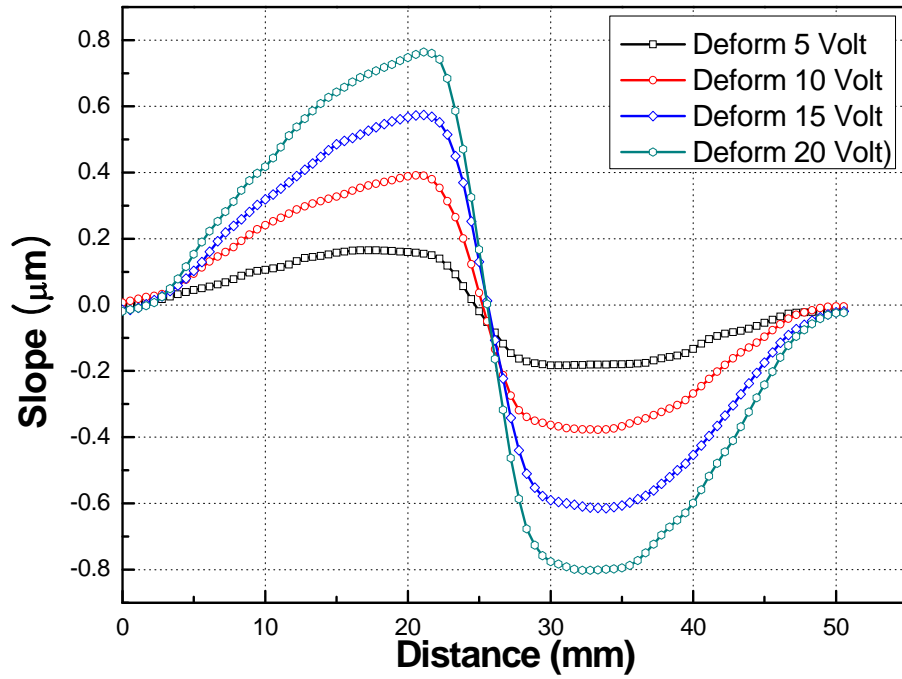


Fig. 4-4 Slop profile of deformation by voltage

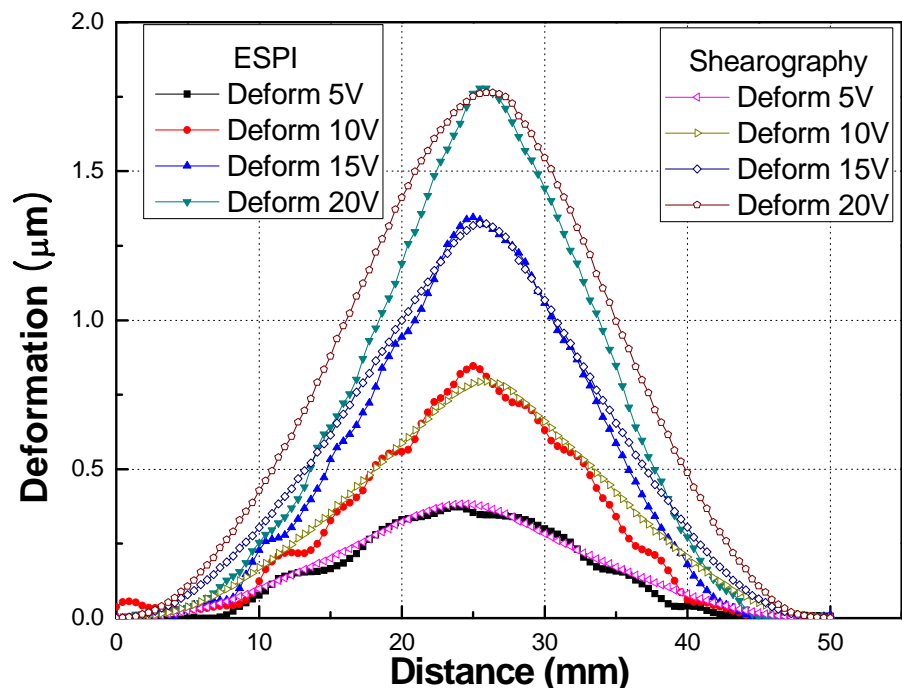


Fig. 4-5 Shearography vs ESPI deformation by voltage

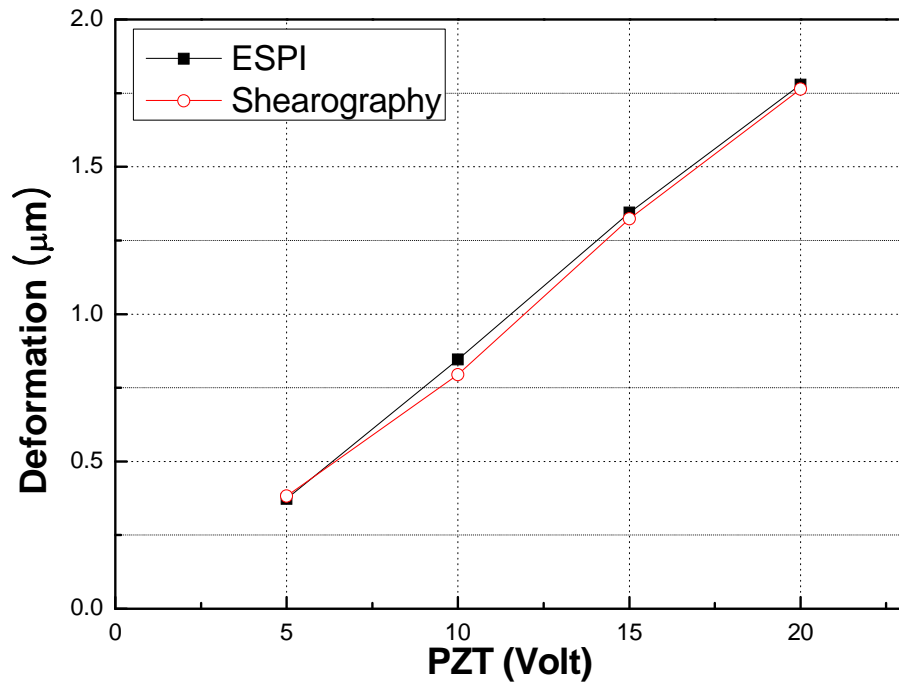
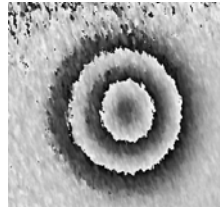
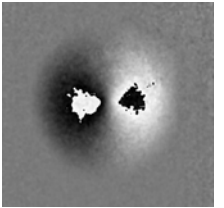
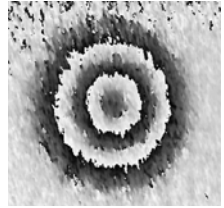
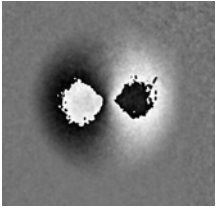
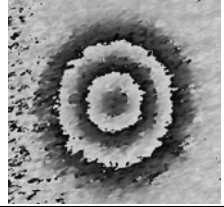
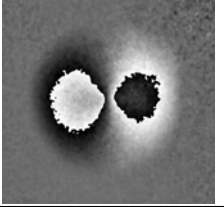
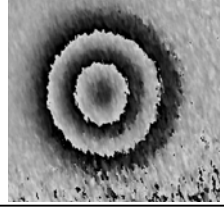
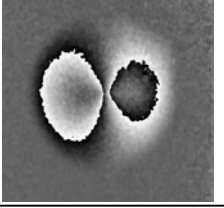
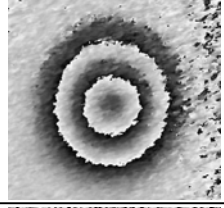
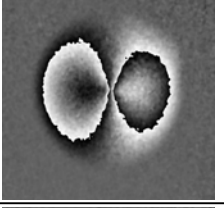
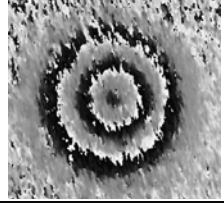
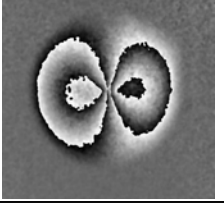


Fig. 4-6 Shearography vs ESPI max-deformation by voltage

나. 변형량 일정 전단량 변화

전단간섭법의 전단량 변화에 대한 변형 측정값의 변화를 확인하기 위하여 PZT에 전압을 10V로 일정하게 부과하여 대상물에 동일한 변형을 부과하였으며, 전단량을 X축 방향으로 5pixel씩 일정하게 증가시키면서 그 결과를 측정하였다. 또 동일한 조건의 변형을 ESPI를 이용하여 측정하여 측정값을 비교하였다. Table 4-2는 측정된 전단간섭법과 ESPI의 위상지도를 나타낸다. Table 4-2의 결과를 확인하면 ESPI는 위상지도의 줄무늬 수에 변화가 없으나, 전단간섭법은 전단량의 증가에 따라 줄무늬의 숫자가 증가함을 볼 수 있다. 또, Fig. 4-7의 전단간섭계의 변형기울기 선도와 Fig. 4-8의 변형량 해석선도를 확인하면, 전단량의 증가에 따라 해석 영역은 증가하고, 최대 변형 측정결과는 일정함을 알 수 있다. 평판의 면외변형 측정에 있어서 전단량의 변화는 변형량의 크기에는 영향을 주지 않지만 변형영역의 크기 측정에 오차를 발생시킬 수 있음을 보여준다. Fig. 4-9는 ESPI를 이용한 측정결과와 제안된 방법에 의한 변형 측정결과를 비교하고 있으며, 그 평균 오차는 1.87%이다.

Table 4-2 Phase-map and max-deformation by voltage

Volt	ESPI		Shearography		Error (%)
	Deformation (μm)	Phase-map	Deformation (μm)	Phase-map	
5	0.846		0.826		2.4%
10	0.812		0.794		2.2%
15	0.820		0.813		0.9%
20	0.832		0.813		2.3%
25	0.820		0.795		3.1%
30	0.824		0.821		0.4%

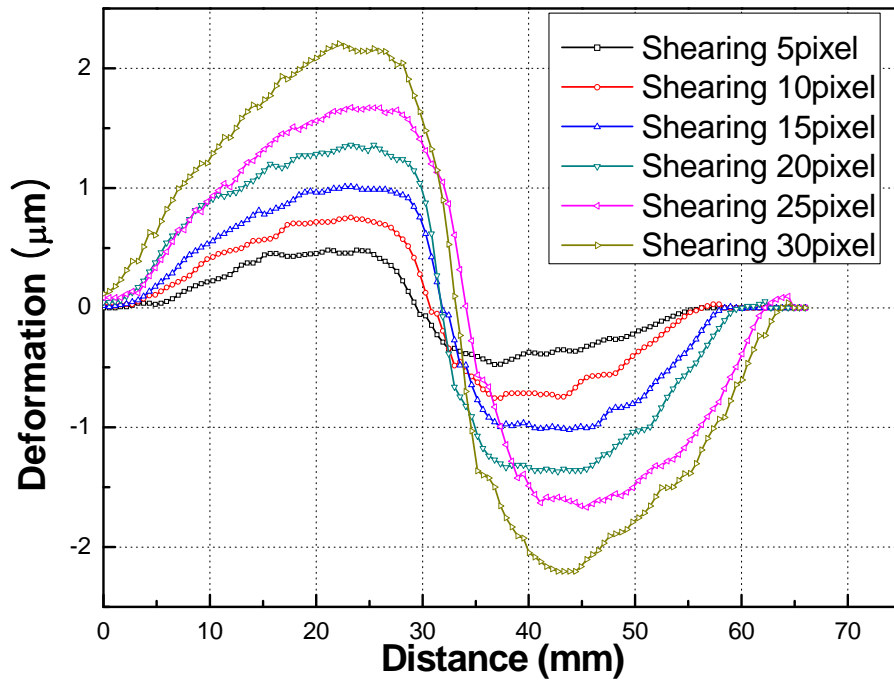


Fig. 4-7 Shearography vs ESPI deformation by voltage

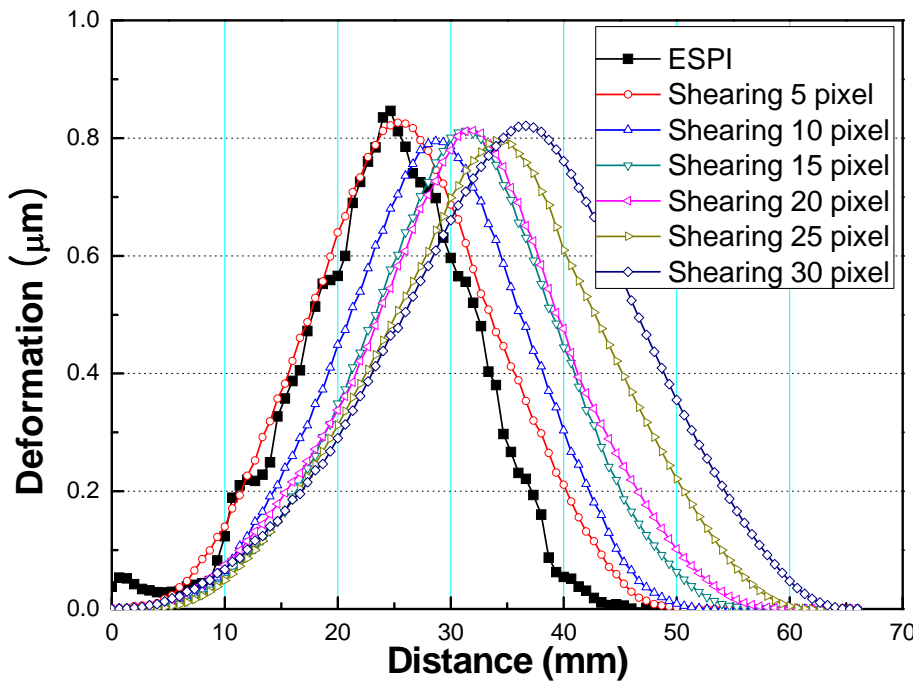


Fig. 4-8 Shearography vs ESPI deformation by voltage

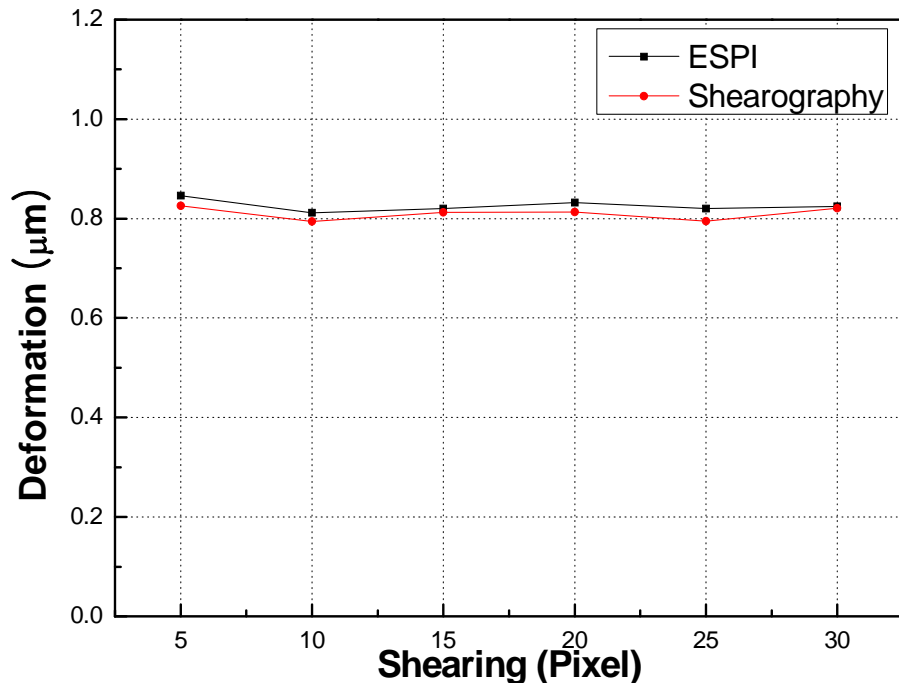


Fig. 4-9 Shearography vs ESPI max-deformation by voltage

제2절 압력용기의 면외변형

1. 실험장치 및 방법

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 측정하고 이를 ESPI를 이용하여 비교하였다. 제작된 압력용기 시험편의 형상과 감육결함의 크기는 Table 4-3에 나타냈다. 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 감

압을 조절할 수 있는 유압식 수동 가압장치를 제작하였다. Fig. 4-11은 시험편과 압력조절장치를 나타내며, 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-10과 같다.

Table 4-3 Shape and dimension of pipe specimen

description	specimen data
Length of pipe (L):	342.0 mm
Outside diameter (Do)	113.4 mm
Inside diameter (Di)	99.0 mm
Defect Thickness (tp)	1.8 mm
Defect Length (L/Do)	113.4 mm
Defect angle (2θ)	90°

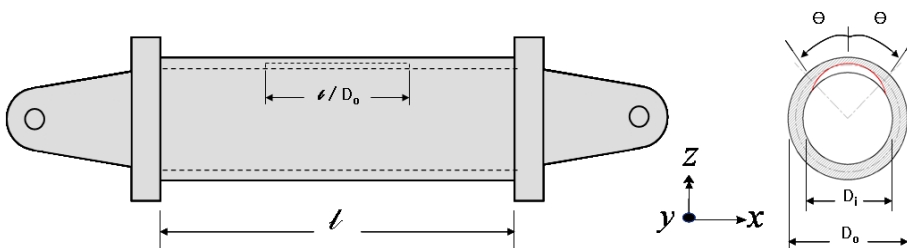
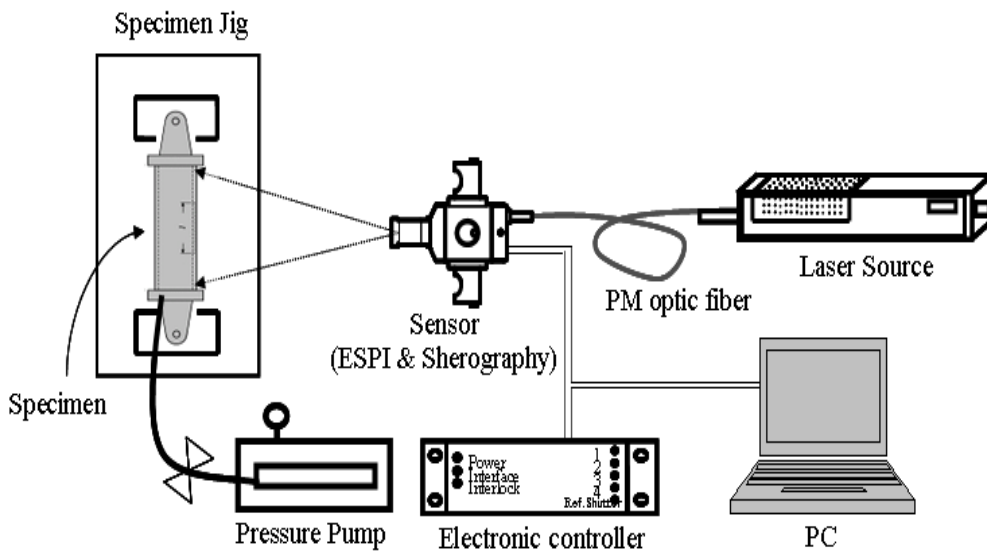



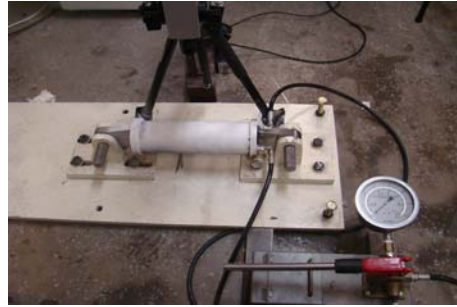
Fig. 4-10 ESPI phase-map according to force difference variation



(a) Specimen



(b)Hydraulic Pump & Gauge



(C)system setup

Fig. 4-11 ESPI phase-map according to force difference variation

2. 실험결과

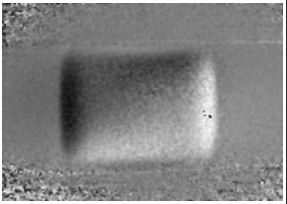
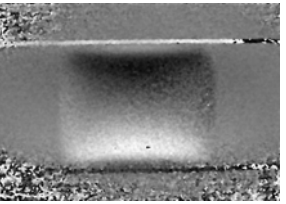
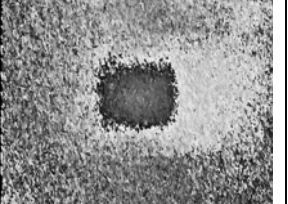
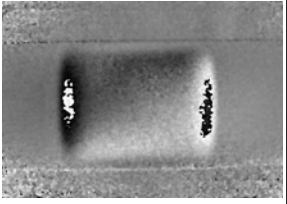
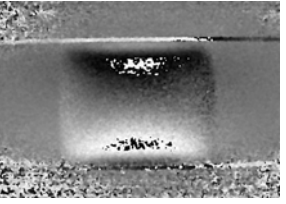
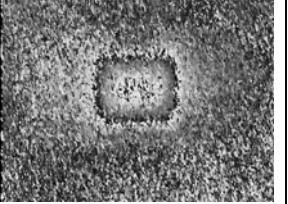
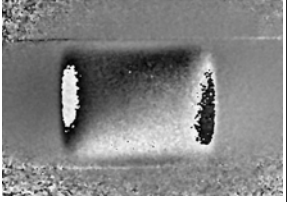
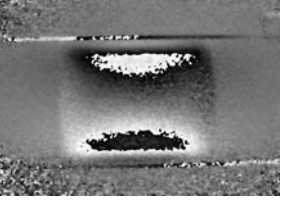
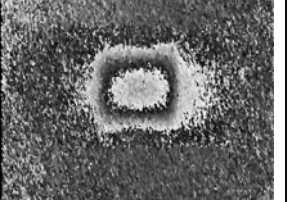
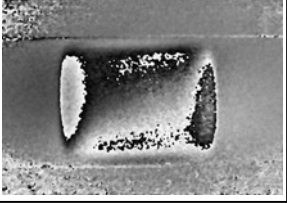
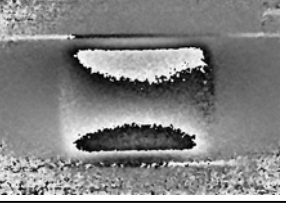

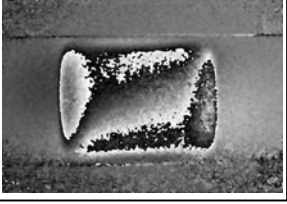
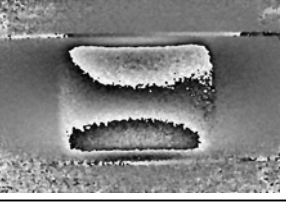

가. 전단량 일정 압력차 변화

압력차 변화에 따른 압력용기 결함부위의 변형측정은 전단간섭계의 전단량을 5 pixel로 고정하고, 압력차를 0.05MPa부터 0.1MPa까지 0.01MPa씩 일정하게 증가시키면서 실험하였고, 그 결과를 ESPI와 비교하였다. 전단간섭법의 전단방향은 시험편의 축방향인 X축 방향과 원주방향인 Y축방향으로 각각 실험하였으며, 변형 결과는 ESPI의 X축, Y축 변형 프로파일과 비교하였다.

Table 4-4는 그 결과를 나타낸다. 변형의 증가에 따라 ESPI와 전단간섭계에 의한 측정결과 모두 위상지도에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. ESPI는 압력용기 전체에 발생하는 면외변형을 측정하므로 비 결함부의 줄무늬수 증가를 확인할 수 있으나 전단간섭법은 비결함부의 줄무늬수 변화를 확인하기 어려웠다. Fig. 4-12는 ESPI와 전단간섭법의 X축 방향의 측정 결과

의 변형 프로파일로이며, Fig. 4-13은 Y축방향의 변형을 나타낸다. Fig. 4-14는 최대변형의 비교를 나타내었다.

Table 4-4 Phase-map by Pressure Difference

ΔP	Shearography (X)	Shearography (Y)	ESPI
	Phase-map	Phase-map	Phase-map
0.01			
0.02			
0.03			
0.04			
0.05			

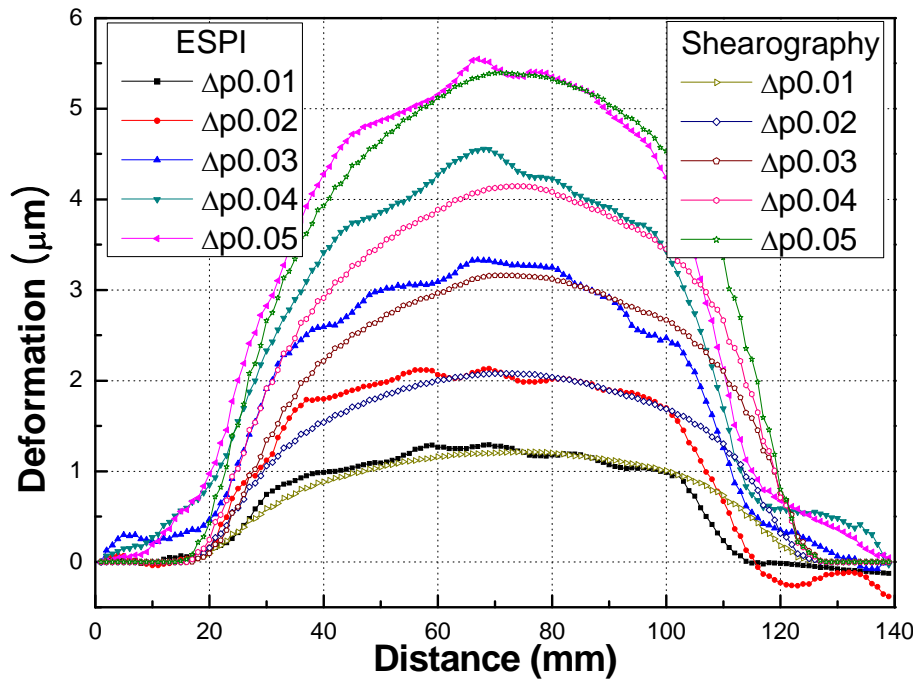


Fig. 4-12 Shearography vs ESPI Xaxis deformation by Pressure Difference

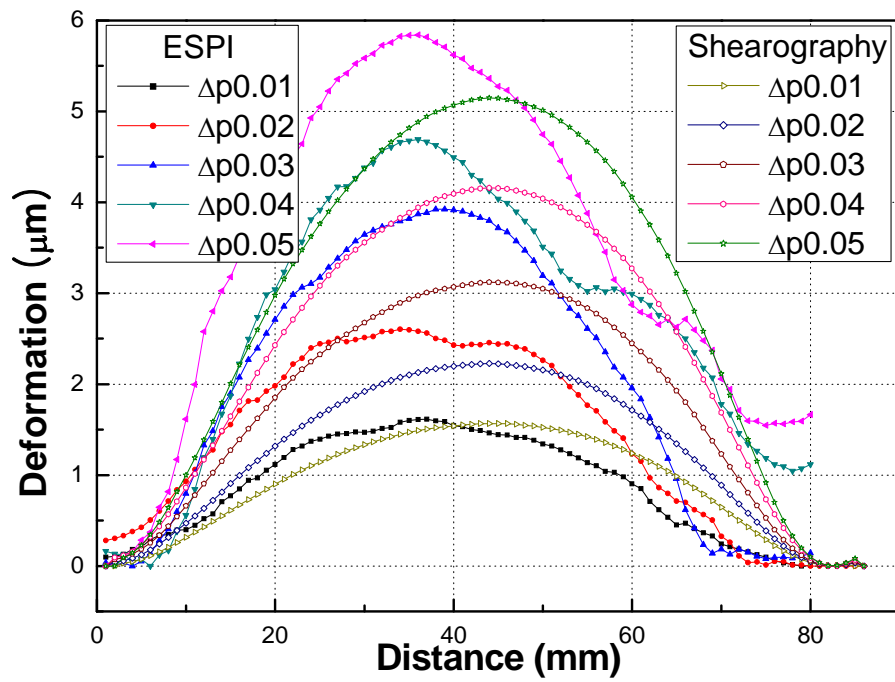


Fig. 4-13 Shearography vs ESPI Yaxis deformation by Pressure Difference

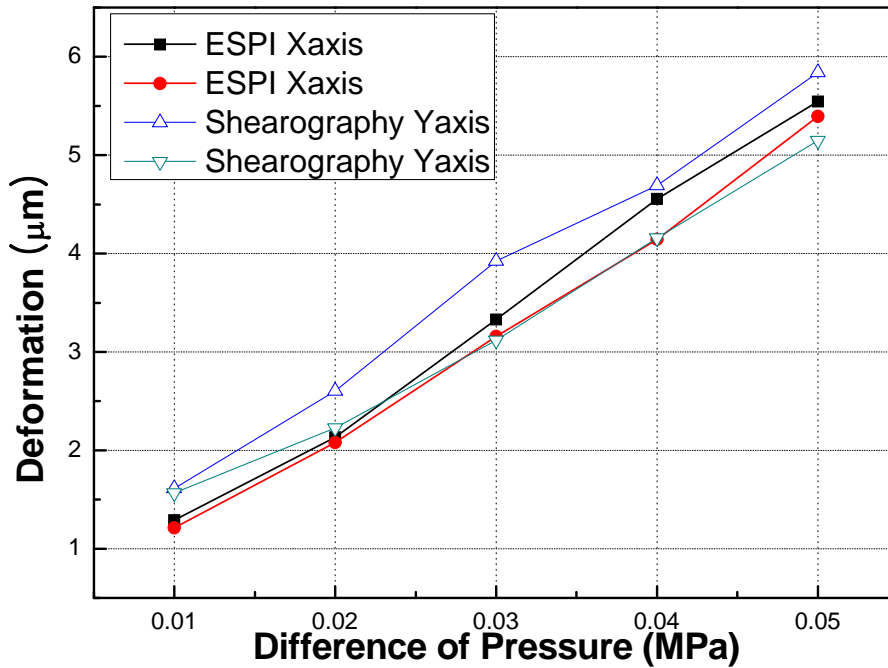


Fig. 4-14 Shearography vs ESPI max-deformation by Pressure Difference

변형량 그래프를 확인하면 X축이 Y축의 변형량 선도보다 측정 정밀도와 외부 영향이 적음을 확인할 수 있다. 그러나 두 측정법 모두 압력차 변화에 따라 변형이 일정한 비율로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 압력차 변화와 무관하게 변형영역은 일정함을 확인할 수 있다. 하지만 또한 두 방법에 의한 최대변형량의 차이는 평균 X축5.4%, Y축14.4%로 압력용기의 결함측에 있어서는 약간의 오차가 발생함을 알 수 있으며, 이 오차는 전단간섭법을 이용한 변형측정은 압력용기 전체에 발생하는 면외변형을 측정할 수 없어 발생한다고 판단된다.

나. 압력차 일정 전단량 변화

압력용기의 압력차를 0.03MPa로 고정하고, 전단간섭계의 전단량을 5Pixel 씩 일정하게 증가시키면서 그 결과를 측정하였으며, 실험은 압력변화와 동일하게 전단간섭법의 전단방향을 시험편의 축방향인 X축 방향과 원주방향인 Y축방향으로 각각 실험하였으며, 변형 결과는 ESPI의 X축, Y축 변형 프로파일과 비교하였다. 그 결과를 Table 4-5에 나타내었다. 원형평판의 측정결과와 마찬가지로 동일한 압력차에서 전단량이 증가할수록 위상지도의 줄무늬 수가 증가하고 있다. 또, Fig.

4-15, Fig. 4-16의 제안된 방법으로 해석된 전단간섭법의 정량적 변형량 선도를 확인하면 최대변형량은 X축과 Y축 모두 점차적으로 감소함을 확인할 수 있다. 그리고 결함영역 또한 전단량이 증가함에 따라 점차 넓어짐을 알 수 있다.

Table 4-5 Phase-map by Shearing

Pixel	Shearography (X)	Shearography (Y)	ESPI
	Phase-map	Phase-map	Phase-map
5			
10			
15			
20			
25			

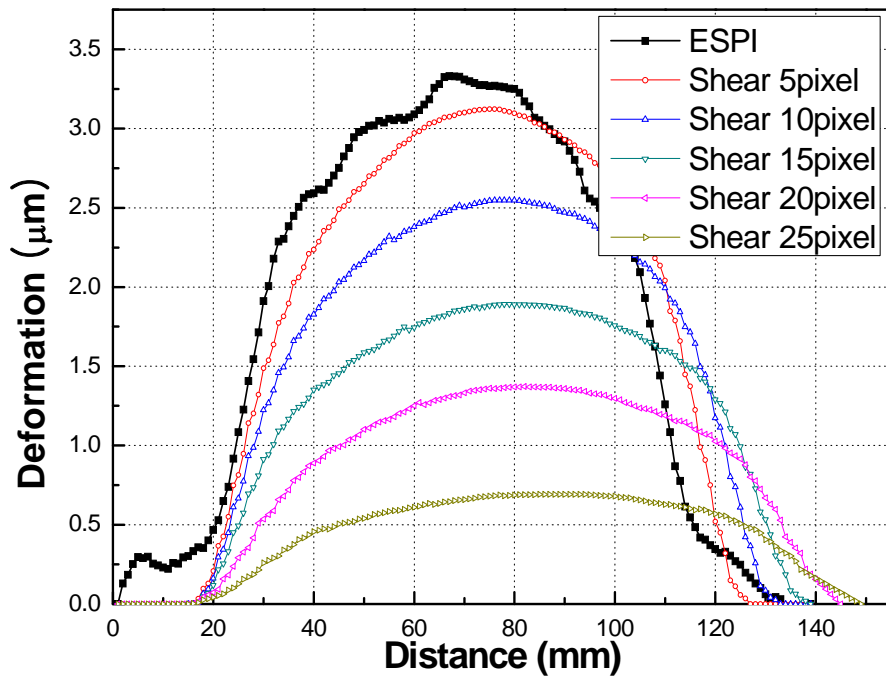


Fig. 4-15 Shearography vs ESPI deformation by voltage

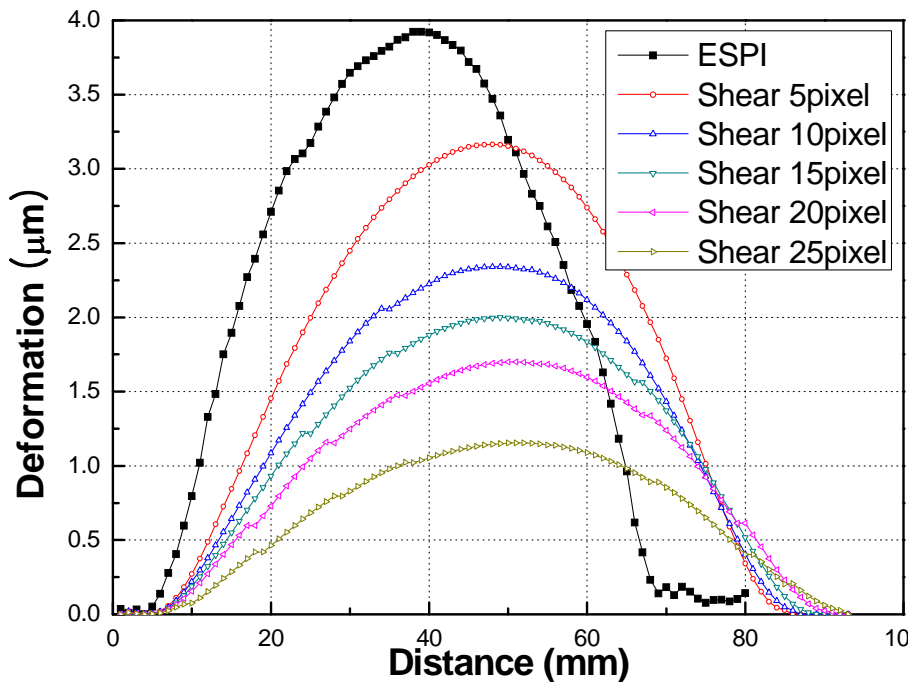


Fig. 4-16 Shearography vs ESPI deformation by voltage

제3절 압력용기의 비결함부 면외변형 변형계측

1. 전단간섭법의 전단량에 따른 측정오차 보정

전단간섭법을 이용한 전단량 변화에 따른 압력용기의 변형측정 실험 결과

Fig. 4-15와 Fig. 4-16을 이용하여 전단량 증가에 따른 X축과 Y축 방향의 최대 변형량과 ESPI의 X축방향의 최대변형량을 Table 4-6에 정리하였다. Fig. 4-15와 Fig. 4-16을 확인하면 전단량 증가에 따라 측정된 결함영역은 증가하며, 제안된 방법으로 해석된 전단간섭법의 최대변형량은 감소함을 확인할 수 있다. 그리고 이 전단간섭법으로 측정된 최대변형량의 감소율은 선형적인 변화임을 확인할 수 있다. 이를 Fig. 4-17에 나타내었다. 이를 통하여 전단량이 증가함에 따라 측정값의 감소로 인하여 증가하는 측정 오차를 선형보간을 통하여 보정할 수 있음을 확인하였으며, 전단량이 0(zero)일 경우의 최대변형과 측정 영역이 가정 정확한 압력용기의 결함측정결과임을 알 수 있다. Fig. 4-17의 선도를 토대로 압력차 0.03MPa에서의 정략적 최대변형량을 계산한 획득할 수 있으며, 이를 ESPI 측정결과와 비교하면 오차율이 매우 낮은 매우 신뢰도 높은 측정값을 얻을 있다. 이는 측정자의 경험과 노하우에 의존했던 "작은 전단량"이라는 정성적 전단량의 수치를 전단량에 상관없이 측정 후 보정을 통해 측정값의 신뢰도를 향상시킬 수 있다는 새로운 전단간섭법의 측정기법의 가능성을 의미한다. 그리고 이러한 새로운 측정기법을 응용한 계측정비의 개발가능성을 제시하였다.

Table 4-6 Maximum deformation according to shearing amount variation

Shearing (pixel)	ESPI	Shearography	Shearography
	X axis Deformation (μm)	X axis Deformation (μm)	Y axis Deformation (μm)
5	3.328	3.122	3.165
10	3.295	2.549	2.340
15	3.319	1.891	1.998
20	3.339	1.370	1.700
25	3.327	0.692	1.155

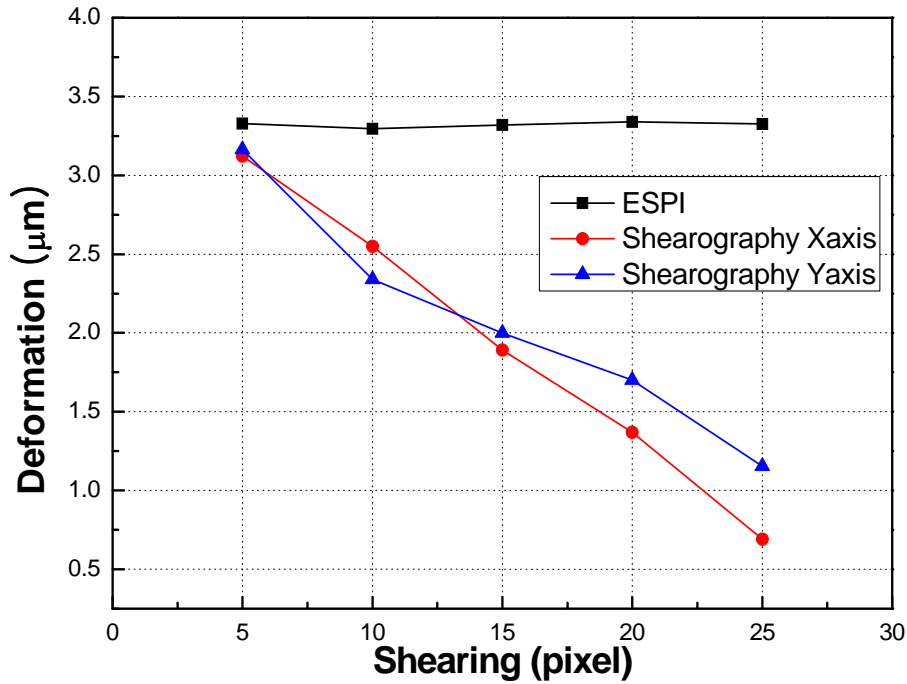


Fig. 4-17 Maximum deformation according to shearing amount variation

2. 압력용기의 비결함부 면외변형 변형계측

전단간섭법을 이용한 압력 용기의 결함측정 시 전단량을 최소로 할수록 측정정밀도가 증가함을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 하지만 실제 측정시 전단량을 0으로 측정할 수 없으며, 전단량의 부여는 측정자의 경험과 판단에 의하여 결정되며 이로 인한 측정 오차 또한 측정자에 따라 다르게 나타난다. 하지만 본 연구에서 제한하는 전단간섭법을 이용한 측정 방식은 전단량의 증가에 따라 최대변형량이 선형적으로 증가한다는 사실을 바탕으로, 임의로 전단량을 다르게 하여 동일 대상을 다수회 측정하고 이 결과를 이용하여 전단량이 0일 때의 정량적인 최대 변형의 값을 유추 하는 방식이다.

현재 전단간섭법을 이용한 압력용기의 결함을 측정할 때 ESPI와 비교하여 변형량의 오차가 발생함을 연구자들은 확인하였고, 이를 비결함부 면외변형 변형량의 차이로 판단하였다. 즉 ESPI는 압력용기 전체의 면외변형을 측정하지만, 전단간섭법은 결함부와 비결함 부의 변형 구배만의 차이를 확인하여 결함의 크기와 변형량을 정량적으로 계측하기 때문에 압력용기의 내압변화에 따른 면외변형을 정량적으로

계측할 때 압력용기 비결함 부의 원주방향 면외변형량을 측정할 수 없어 정확성이 떨어진다고 판단하였다. 하지만 본 연구에서는 압력용기의 전단량이 0일때의 변형값을 결함부와 비결함부의 변형량의 합이라 할 수 있다. 즉, 압력용기 비결함부의 정량적인 변형은 임의의 다른 전단량을 이용하여 결함부를 측정하고, 전단량 변화와 변형량 사이의 선형 구배를 계산, 이를 이용한 전단량 0인 점의 변형량 추정의 단계를 통하여 획득할 수 있다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 전단간섭법의 고정밀 정량측정의 한계를 극복하여 전단간섭법의 산업적 활용을 높이고자 하였다. 이를 위하여 기존에 적용되는 전단간섭버버에 수치미분 및 수치적분을 적용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 정량적으로 측정하였으며, 이를 ESPI와 비교하여 신뢰성을 확인하였다. 또, 전단간섭계의 전단량 변화를 이용한 원통형 압력용기의 변형계측 실험을 통해 얻은 결과를 비교하여 압력 변화에 따른 비결함 부의 변형을 정량적으로 계측하는 새로운 계측기법을 제시하였고, 다음의 결과를 획득할 수 있었다.

1) 제안된 방법의 전단간섭법은 ESPI의 고정밀 정량변형측정이라는 장점과 외란에 강한 간편한 계측이라는 전단간섭법의 장점이 통합된 산업현장적용성이 매우 높은 비파괴계측 기법이다.

2) 대상물에 발생하는 면외변형의 측정에서 ESPI 측정결과로 간섭줄무늬와 전단간섭계를 이용한 측정결과와 간섭줄무늬의 형태가 다르나, 제안된 방법을 이용하여 동일한 변형량과 형태로 재현할 수 있는 ESPI와 전단간섭법의 상관관계를 검증하였다.

3) 원평 평판의 면외변형 측정에 대하여 ESPI와 제안된 방법에 의해 해석된 전단간섭법의 실험결과는 변형증가실험은 약 1.43%의 오차를 전단량 증가 실험은 약 1.87%의 오차를 보였다.

4) 결함이 있는 압력 용기의 변형측정은 ESPI는 결함부위와 용기 전체에 발생하는 실제변형을 측정하나 노이즈가 심하며, 전단간섭법은 측정이 용이하나 압력용기 자체의 팽창으로 인한 변형을 확인할 수 없어 결과의 신뢰성이 떨어짐을 확인하였다.

5) 결함이 있는 압력 용기의 전단량 변화에 따른 최대 변형값의 비교를 통하여 전단량이 증가할 때 최대 변형은 선형적으로 감소함을 알 수 있으며, 이를 토대로 전단량이 0일 때의 정량적인 최대 변형의 값을 유추 할 수 있다. 전단량이 0일때의

변형량을 결함부와 비결함부의 변형량의 합이라 할 수 있다.

6) 정량계측의 정확성이 떨어지는 전단간섭법의 면외변형정량 계측의 정밀도를 향상시킬 수 있는 가능성을 제시하였으며, 압력용기 자체의 팽창으로 인한 변형을 확인할 수 방법을 제시하였다.

위와의 결과로 제안된 방법의 전단간섭법을 이용한 계측 기법은 외란에 민감한 ESPI의 제안사항을 극복하고, 고정밀 정량계측이라는 장점과 외란에 강인한 전단간섭법의 장점을 통합하여 압력용기 면외변형의 고정밀 정량측정, 변형률의 측정 및 결함의 검사 등의 비파괴검사기법을 필요로 하는 다양한 산업형장에서 활용도가 크게 향상 될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

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.
2. Hogmoen, K., Lokberg, O. J., "Detection and Measurement of Small Vibrations using Electronic Speckle 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 스펙클 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 Moments," J. Phy. E.Scientific 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 distribution 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, "Applications 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 압력용기의 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., Mackel, P., and Thiemich, A., "Vibration analysis by digital speckle pattern shearing interferometry," *Proc. SPIE*, Vol. 3098, pp. 158–165, 1997.
18. Hogmoen, K. and Lokberg, Ole J., "Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry," *Applied Optics*, Vol. 16, No. 7, pp. 1869–1875, 1977.
19. Valera, J. D. R., Jones, J. D. C., and Lokberg, O. J., "Exact vibration amplitude derivative measurement with TV shearography," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 7, pp. 1869–1875, 1977.
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,” 대한기계학회논문집(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 舉動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, Vol. 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 University 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.