



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2012년 2월
석사학위논문

레이저 계측법을 이용한 압력용기 결함두께 측정 신뢰성 평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

박 찬 식

레이저 계측법을 이용한 압력용기 결함두께 측정 신뢰성 평가

Reliability Assessment on Thickness measurement
of Pressure Vessel Using Laser Diagnostics

2012 년 2 월 24 일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

박 찬 식

레이저 계측법을 이용한 압력용기 결함두께 측정 신뢰성 평가

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2011년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

박 찬 식

박찬식의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 양 인 영^인

위 원 조선대학교 교수 김 재 열^인

위 원 조선대학교 교수 김 경 석^인

2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 배경	3
제 1 절 레이저와 스펙클의 특징	3
1-1. 레이저 스펙클	3
1-2. 레이저 스펙클 상관 간섭무늬의 형성	7
제 2 절 물체의 변형정보 추출	10
2-1. 위상이동기법	10
2-2. 위상이동기법을 위한 결필침	11
제 3 절 광학 간섭계 구성	13
3-1. 면외 간섭계	13
3-2. 스펙클 전단간섭계	14
제 4 절 압력용기의 결함두께 측정	18
4-1. 압력용기의 결함두께 측정방법	18

제 3 장 실험장치 및 구성	22
제 1 절 측정 시스템	22
1-1. ESPI 시스템	22
1-2. 전단간섭 시스템	24
1-3. 시험편	26
제 2 절 실험방법	27
제 4 장 실험결과 및 고찰	28
제 1 절 ESPI 실험결과 & Shearography	28
제 2 절 압력용기 결함 길이를 이용한 결함의 두께측정	33
제 5 장 결론	39
참 고 문 헌	41

LIST OF TABLES

Table 1 Specification of the ESPI system	23
Table 2 Specification of the Shearography system	25
Table 3 SSP-2H Phase-map by Pressure Difference	28
Table 4 SSP-2G Phase-map by Pressure Difference	30
Table 5 SSP-2F Phase-map by Pressure Difference	31
Table 6 Results of SSP-2H specimen	33
Table 7 Results of SSP-2G specimen	35
Table 6 Results of SSP-2F specimen	36

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Light scattering on object surface	4
Fig. 2.2 Speckle prattern	4
Fig. 2.3 Formation of speckle pattern	5
Fig. 2.4 Superposition of two continuos wave	8
Fig. 2.5 Unwrapping Processing	12
Fig. 2.6 Out-of-plane displacement sensitive interferometer	13
Fig. 2.7 Single-Beam Shearography interferometer	15
Fig. 2.8 Deformation according to Pressure	18
Fig. 2.9 Measurement result of surface deformation by ESPI and Shearography	19
Fig. 2.10 Thickness defects due to changes in pressure	19
Fig. 2.11 Surface deformation internal defect by external load	20
Fig. 3.1 Schematic of 3D-ESPI System	22
Fig. 3.2 Configuration of Shearography system	24
Fig. 3.3 Shape and dimension of pipe specimen	26
Fig. 3.4 Configuration of ESPI & Shearography system	27
Fig. 4.1 Shearography vs ESPI Xaxis deformation by pressure Difference	29
Fig. 4.2 Shearography vs ESPI Xaxis deformation by pressure Difference	31
Fig. 4.3 Shearography vs ESPI Xaxis deformation by pressure Difference	32
Fig. 4.4 SSP-2H Maximum Displacement according to pressure	34
Fig. 4.5 SSP-2H Constant K according to Maximum Displacementt	34
Fig. 4.6 SSP-2G Maximum Displacement according to pressure	35
Fig. 4.7 SSP-2G Constant K according to Maximum Displacement	36
Fig. 4.8 SSP-2F Maximum Displacement according to pressuret	37
Fig. 4.9 SSP-2F Constant K according to Maximum Displacement	37

ABSTRACT

Reliability Assessment on Thickness measurement of Pressure Vessel Using Laser Diagnostics

By Park, Chan Sic

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

Dept. Advanced Parts & Materials

Engineering.

Graduate School of Chosun University.

In the industrial site, much used industrial facility and subsidiary materials has high possibility of the deformity. Due to destruction of them, there can be the enormous loss. Therefore, the non-destructive test technique detecting the deformity quickly and accurately manages the role of being important in the whole industry. In addition, the industry technology development requires smaller, more various and reliable goods. In order to be satisfied this, non-destructive inspection changes from the contact type testing technology into the noncontact inspection technology. Particularly, much used supersonic flaw detecting test and radiant-ray test develops are being developed for the inside defect test. However, the supersonic flaw detecting test has time consumption for test and the application limit about complicated structure and anisotropy material objects according to the Point by

point scanning inspection plan.

When measuring the deformity, the supersonic flaw detecting test has the limit due to the restrictive cause of the risk about the radiation exposure and radiological scan direction as shown in Nuclear Electrical Power Plant of Fukushima, Japan. In this aspect, the non-destructive test technique including the Electronic Speckle Pattern Interferometry, Shearography, Thermography, and etc. is the tendency that the application is gradually enhanced in local and foreign industrial site.

The laser application technology based on interferometer, laser based ultrasonic testing, Holography, speckle correlation interferometry etc. It is applied in the field including the vibration or deformation analysis, vibration analysis, non-destructive inspection, and etc. in the advantage that at the same time it measures the surface displacement of the wide area with the high resolution. In addition, the speckle correlative method for the non-destructive inspection is being developed into ESPI and Shearography and it is applied in the field including the deformation analysis of all sorts of structures, noise and vibration analysis, non-destructive inspection, and etc. With computer science and image processing technology, film-based speckle correlation interferometry evolves into ESPI, which substitute the film-based by the digitalized with CCD camera. This technology was developed in the U.S. and United Kingdom at the early 1970's at the same time and presently this application range widens to the Field of engineering. electronic speckle pattern interference technique was developed into the Phase shifting method developed by K. Creath, which can automatically extract a phase from interference pattern and demodulate the surface displacement of a target.

Therefore, in this research, the thickness of the pressure vessel defect which comes into question in many industrial fields including the Nuclear Power Plant and field of the plant facility, and etc. by using the electronics speckle pattern interferometry, that is one among the laser measuring technology, is detected and the reliability is evaluated so that the theoretical access method tries to be shown and this tries to be verified through the experiment.

In this research, the basic idea for measuring the defective thickness of the pressure vessel is to analyze the quantity detection mechanism of the pressure vessel deformity and to estimates the thickness of the pressure vessel internal defect through the test verification quantitatively.

In this research, by using the inspection technique to be proposed, the size of the internal defect of the pressure vessel, shape, and location can be inspected with the high resolution and the concept of the quantitative nondestructive evaluation can be satisfied based on product reliability evaluation. It is expected to contribute to the base establishment promoting the Nuclear Power Plant, safety of all sorts of structures, soundness, and water retention as the fundamental research that theory including the pressure vessel deformity thickness prediction and dry well assessment technology development, and etc. and experiment are combined based on this.

제 1 장 서 론

산업현장에서 많이 사용되는 산업 설비 및 부재들은 결함의 발생 가능성이 높고, 설비 및 부재의 파괴를 통하여 막대한 손실을 발생 할 수 있다. 따라서 결함을 신속하고 정확하게 검출하기 위한 비파괴 검사기술은 산업전반에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한 산업기술 발전은 보다 작고, 다양하고 신뢰성 높은 제품을 요구하고 있으며, 이를 만족하기 위해 비파괴 검사도 접촉식 검사기술에서 비접촉식 검사기술로 변하고 있다. 특히 내부결함 검사에 많이 사용되는 초음파탐상시험과 방사선투과시험은 많은 발전을 하고 있는 실정이다. 그러나 초음파 탐상시험은 Point by point canning 검사방식에 따른 검사시간의 소요 및 복잡한 구조물의 형상 및 이방성재료의 대상물에 대한 적용 한계성을 가지고 있으며 방사선 투과시험은 최근 일본 후쿠시마 원전에서와 같이 방사선 피폭에 대한 위험성과 방사선 조사방향의 제한적인 부분으로 결함을 측정하는데 한계가 있는 실정이다. 이러한 측면에서 Electronic Speckle Pattern Interferometry, Shearography, Thermography 등의 비파괴검사기술이 국내외 산업현장에서 활용이 점차로 높아지고 있는 추세이다.¹⁾⁻⁵⁾ 레이저응용 계측기술은 간섭계 기반의 변위측정기술, 홀로그래피(Holography), 스펙클 상관간섭법(Speckle Pattern Interferometry) 등의 분야로 다양하게 발전하고 있으며 넓은 면적의 표면변위를 동시에 고분해능으로 측정한다는 장점으로 진동 또는 변형해석, 진동해석, 비파괴 검사 등의 분야로 적용되고 있다.^{6),7)} 또한 비파괴 검사를 위한 스펙클 상관법은 ESPI와 Shearography로 발전하고 있으며, 각종 구조물의 변형해석, 소음 및 진동해석, 비파괴검사 등의 분야로 적용되고 있다.^{8),9)} ESPI는 초기 필름을 사용한 형태에서 IT분야의 발전과 컴퓨터기술의 발전으로 기존의 입력방법이었던 필름에서 CCD Camera로 대체하고 이를 발전시켜 영상처리기술과 융합을 통하여 디지털 기술로 발전하였다. 이 기술은 1970년대 초에 미국과 영국에서

거의 동시에 개발되었고 현재에는 공학 분야로 그 활용범위가 넓어진 상태이다. 전자처리 스펙클 패턴 간섭기술은 K. Creath¹⁰⁾에 의해 제안된 위상위동기법을 적용한 Phase shifting ESPI로 발전하면서 간섭정보의 획득에서 최종 표면변위 측정까지 자동화가 가능하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 레이저 계측기술 중 하나인 전자 스펙클 패턴 간섭법을 이용하여 현재 원자력발전소 및 플랜트설비 분야 등 여러 산업 분야에서 문제시 되고 있는 압력용기 결함부의 두께를 검출 하여 신뢰성을 평가하여 이론적 접근 방법을 제시하고 실험을 통하여 이를 검증하고자 한다. 본 연구에서 압력용기의 결함두께를 측정하기 위한 기본개념은 압력용기시험편을 제작하여 압력용기 결함의 정량 검출 메카니즘을 분석하고 실험적 검증을 통하여 정량적으로 압력용기 내부 결함의 두께를 추정하는 것이다.¹¹⁾ 본 연구에서 제안하는 검사기법을 이용하여 압력용기의 내부 결함의 크기, 형상, 위치를 고분해능으로 검사하고 제품의 신뢰성 평가를 기준으로 정량적비파괴평가의 개념을 충족시킬 수 있으며 이를 기반으로 압력용기 결함두께 예측 및 건정성 평가기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 원자력발전소, 각종 구조물의 안전성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대된다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 레이저와 스펙클의 특징

1-1 레이저 스펙클

레이저(laser)는 복사의 유도방출에 의한 빛 증폭의 약자에서 성립된 용어이다. 모든 원자나 분자는 특수한 에너지 준위를 가지고 있어서 이들 사이의 에너지 차이에 의하여 흡수 또는 방출하는 광자의 에너지가 결정되고 이때 유도빛내쏘기가 계속 일어나면 광 증폭이 되어 레이저발진을 일으킬 조건을 만들게 되는데 레이저 매질의 외부에서 펌핑에너지를 주입하고 유도내쏘기하는 광자와 같은 파장대의 거울을 광축과 수직으로 장치하여 레이저 발진조건을 충족시키면 레이저 빛살이 광축 방향으로 방출하게 된다.¹²⁾ 이러한 레이저는 단색성, 지향성, 고휘도성, 간섭성 집속성 등으로 말할 수 있다. 첫번째 레이저 광은 음파와 같이 시간적, 공간적으로 위상을 유지한다. 전등 또는 형광등의 보통 광원은 공간적, 시간적으로 일정하지 못함은 물론 광파의 진폭, 주파수가 서로 다른 불규칙한 파의 집합으로 간섭현상이 일어나지 않는다. 파동의 간섭성은 임의의 파가 정확한 사인 곡선과 같은 형태로 전파됨을 말하고 부분적 파의 간섭현상은 제한된 시간과 공간 내에서 관측되어진 파형이 사인파인 경우를 말한다. 또한 이런 2개 이상의 레이저 광파가 서로 겹칠 때 간섭이란 이라는 것이 발생하는데 강도변화가 보강되거나(보강간섭) 소멸되거나(소멸간섭)하여 Fig. 2-1과 같이 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고 Fig. 2-2와 같이 반점과 같은 형태로 물체의 표면에 나타나게 된다. 이와 같이 육안으로 보았을 경우 밝고 어두운 반점형태의 무늬가 무작위로 변화하는 현상을 스펙클 (Speckle) 이라고 하며 물체의 표면각 점에서 산란된 파면과 다른 곳의 모든 점에서 발생하는 파면들이 중첩하여 Speckle은 산란파들이 겹치는 공간이 형성되게 된다.^{13), 14)}

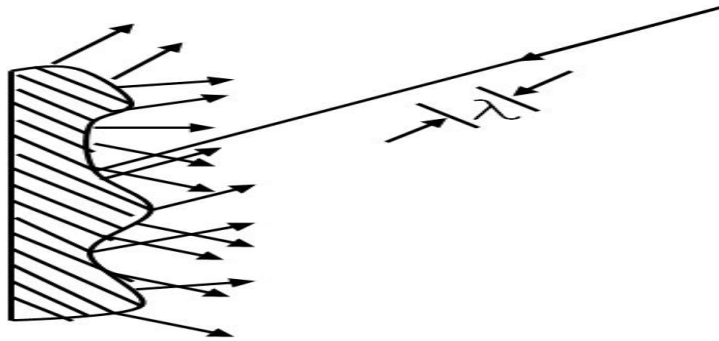


Fig. 2-1 Light scattering on object surface

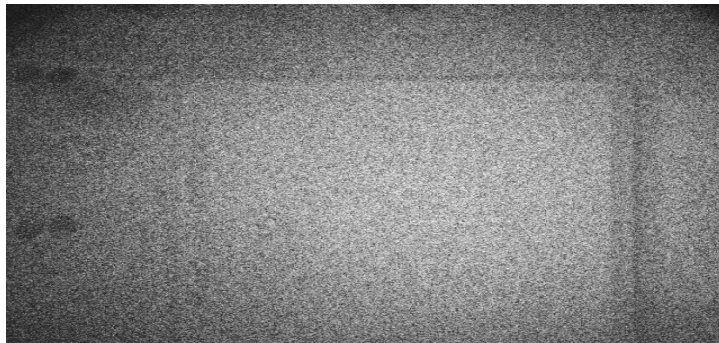
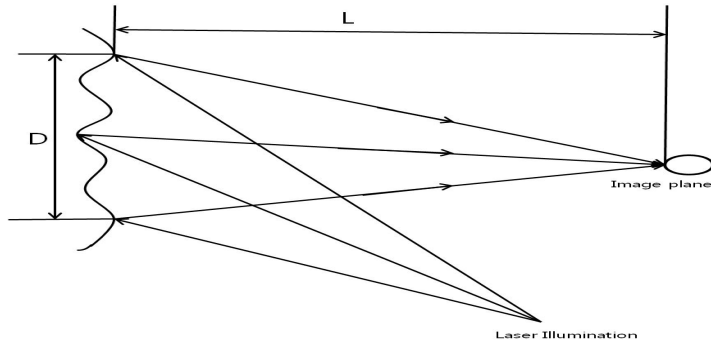
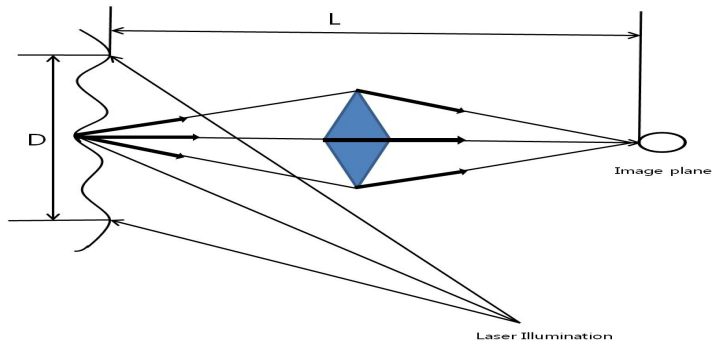


Fig. 2-2 Speckle pattern

전자처리 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)은 집속성과 간섭성이 우수한 레이저 광원을 바탕으로 광학계를 구성하여 물체광과 참조광을 합성시킴으로서 물체의 변위량에 따라 발생하는 간섭패턴의 줄무늬를 해석하는 방법이다. 여기서 스페클은 광학적으로 거칠기를 갖는 물체 표면에 간섭성이 우수한 레이저 광원이 조사되면 물체에서 난반사가 일어난다. 이 난반사 된 빔들이 서로 겹치면서 간섭 현상이 일어나는데 이러한 스페클은 빛의 휘도 분포로 물체 변위에 대한 중요한 위상정보를 가지게 되며 이 위상의 정보는 CCD Camera 와 이미지 화성처리 장치를 통하여 변위의 정보로 바뀌게 된다. 이러한 레이저 스페클은 관찰하는 방법에 따라서 크게 Objective speckle와 Subjective speckle로 나눌 수 있으며 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 사용 여부에 따라서 구별된다. Fig. 2-3 에서는 Objective speckle와 Subjective speckle의 모습을 보여주고 있다.



(a) objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2-3 Formation of speckle pattern

스페클 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점 사이의 거리를 스페클 크기라 한다. 또한 서로 상관하지 않는 광강도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다.¹⁵⁾ Objective speckle 크기는 대상체의 표면 D의 면적에 레이저광이 조사되고 면적 D위의 모든 점은 viewing plane에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에서 제안한 식(2-1)로 Objective speckle의 크기를 정의하고 있다.¹⁶⁾

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

λ = 물체 표면에 조사되는 레이저의 파장.

L = 물체표면과 결상면 사이의 거리.

D = 물체에 조사된 면적.

Subjective speckle은 결상렌즈를 사용할 때 발생하며 Objective speckle은 결상렌즈를 사용하지 않고 공간상의 평면에만 의존성이 있다.

Fig.2-4의 임의 대상물 위에 A_1 에서 반사된 빛은 렌즈 L 을 통과하면서 결상면의 W 에 회절 무늬를 형성한다. W 에 형성되는 회절무늬의 진폭분포는 제1종베셀함수로 표현되며 W 는 P_1 에 인접한 점들에서 발생하는 회절무늬에 의해 영향을 받는다. 또한 인접한 점들의 2,3차 회절무늬가 W 에 영향을 미칠 수 있으나 1차 회절무늬보다 매우 작기 때문에 2차 이상의 회절무늬의 영향은 무시할 수 있고 W 에서 빛의 강도는 A_1 을 중심으로 하며, 그 한계는 A_2 로 하는 그 주변의 일부 영역에서 산란된 빛에 영향을 받는다. 이때 주변 영역의 지름 d_o 는 P_1 과 P_2 사이 거리의 2배이다. 이러한 것을 이용하여 결상시스템에서 얻어지는 스페클의 크기는 거리 WW' 의 2배이고, 베셀함수를 이용하여 식(2-2)로 표현 할 수 있다.

$$S_s = 1.22 \frac{\lambda \nu}{a} \quad (2-2)$$

a = 렌즈 조리개의 지름.

ν = 렌즈부터 결상면까지 거리.

렌즈 조리개를 통과한 스페클은 Airy Disc모양의 회절 패턴을 보이므로 각각의 스페클 크기는 식(2-3)의로 표현 할 수 있다.

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

M = 렌즈 확대배율.

F = 렌즈의 구경비 (f-number).

스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 실험에서 줌렌즈 광학배율은 1배, 파장은 532nm 레이저, 비디오 배율은 47.6배를 사용하여 렌즈의 f-number 1.2로 하였을 경우 실제 모니터에서는 Subjective speckle의 크기는 37.07nm가 된다.¹⁷⁾ 또한 Subjective speckle의 물체표면에서 크기는 식(2-4)와 같이 쓸 수 있다.

$$S_s = 1.22(1 + M)\lambda \frac{F}{M} \quad (2-4)$$

1-2 레이저 스페클 상관 간섭무늬의 형성

물체의 변형에 따라 스페클 상관 간섭무늬는 같은 파장의 차수내에서 위상점의 연결로 이루어진 것으로 볼 수 있다. 또한 화상처리를 통하여 상관무늬는 변형전의 스페클 패턴을 기준으로 물체변형에 따라 스페클 패턴의 변화를 연속으로 감산처리하여 실시간적으로 관찰 가능해진다. 간섭계는 민감도를 높이기 위해 참조광을 사용한다. 이 참조광의 종류에 따라 스페클 패턴과 uniform field의 합성, 두 스페클패턴의 합성으로 나눌 수 있다. 면외변위 측정을 위해서는 ESPI에서는 첫 번째 방법을 많이 사용하고, 면내변위측정 간섭계를 사용할 때는 나중의 방법을 많이 사용하고 있다.

물체의 변위정보를 포함하고 있는 광원을 물체광, 물체광의 위상변화의 기준이 되는 광원을 참조광이라고 한다. Fig. 2-4는 두 개의 광파의 합성을 나타내는 그림으로서 여기서 참조광= E_r 은 물체광= E_o 에 의해 형성된 스페클을 Z축에 민감하도록 기준면을 제공하는 역할을 하게 된다. 여기서 물체광과 참조광의 파동방정식은 식(2-5)로 나타낼 수 있다.

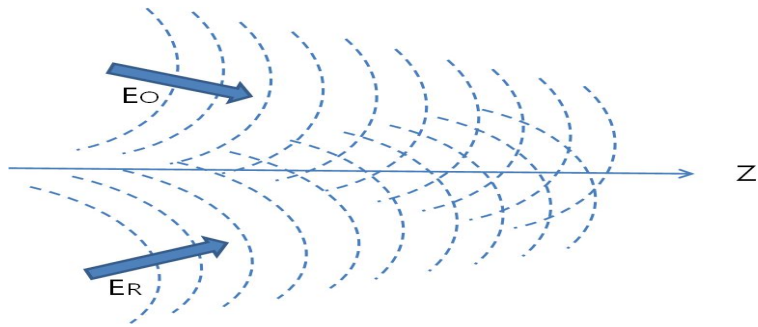


Fig. 2-4 Superposition of two continuous wave

$$E_o = A_o \cos(\delta_o - wt) \quad (2-5)$$

$$E_R = A_R \cos(\delta_R - wt)$$

E_o = 물체광. A_o = 물체광의 진폭. δ_o = 물체광의 초기위상.
 E_R = 참조광. A_R = 참조광의 초기위상. W = 전파속도.
 t = 시간.

여기서 참조광과 물체광은 간섭계에 의해 같은 공간상에서 선형적으로 중첩할 수 있으며 이때 발생한 합성광 E 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E = E_R + E_o \quad (2-6)$$

CCD camera 하나의 화소에 광강도는 식(2-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= |A_o|^2 + |A_R|^2 + 2|A_o| \cos \phi \\ &= I_o + I_R + 2\sqrt{I_o I_R} \cos \phi \end{aligned} \quad (2-7)$$

I = 합성광의 광강도. I_R = 참조광의 광강도.
 I_o = 물체광의 광강도. ϕ = 물체광과 참조광의 위상차.

물체의 표면 변위를 측정하기 위한 변형전후의 스펙클 상태의 감산처리를 통

하여 상관간섭무늬를 형성하게 되는데 변형 전후의 CCD camera에 기록되어
진 스펙클패턴을 식(2-8), 식(2-9)로 나타낼 수 있다.^{18),19)}

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

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

I_b = 물체 변형전의 광강도.

I_a = 물체 변형후의 광강도.

$\Delta \varnothing$ = 물체변형에 따른 위상변화.

변형전후 두 개의 스펙클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며
식(2-10)와 같이 나타나게 된다.

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

I_s = 물체변형전후의 광강도 분포의 감산 처리된 광강도

실질적으로 모니터에서 관찰되는 광강도 분포는 음의 신호가 정류된 아래의
식(2-11)로 나타낼 수 있다.

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

K = 모니터 밝기분포 상수

변형 전후의 스펙클을 감산 처리함으로써 나타나는 줄무늬를 스펙클 상관 간
섭무늬라고 한다. 식(2-11)에서 물체의 변형에 따른 위상변화($\Delta \varnothing$)를 추출
함으로써 물체의 변형을 측정할 수 있다.

제 2 절 물체의 변형정보 추출

물체의 변형을 측정하기 위해서는 변형에 따른 위상변화를 추출해야하는데 이를 추출하기 위한 방법으로는 등간격의 프린지패턴에 대해 화상처리를 이용하여 프린지 패턴으로부터 line를 추출하고 이 사이를 보간 함으로서 물체의 변형을 추출하는 방법이 있다.²⁰⁾⁻²²⁾ 특히 K.Creath에 의해 제안된 시간의 존성 위상이동기법의 적용이 용이하고 효과적 이어서 가장 많이 활용되고 있다. 이 위상이동기법은 3개의 미지수(I_1, I_2, \varnothing)를 구하기 위해 PZT를 참조광의 광경로에 삽입하여 위상변조를 하여 최소3개 이상의 방정식을 얻어 위상을 구할 수 있는 방법이다. 이를 이용하여 위상이동기법을 적용하여 변형전과 변형후의 위상을 구함으로써 대상체의 변형위상을 추출 할 수가 있다.

2-1 위상이동기법

위상이동기법은 주로 물체의 변형 전·후의 위상변화를 계산하여 물체의 변형정도 및 결함의 크기를 정량화 하는데 이용된다. 또한 PZT를 이용하여 위상을 이동하는 기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있다. 이러한 위상이동기법은 3-프레임, 4-프레임, 5-프레임 등이 있다.^{23),24)}

3-프레임 방법은 1980년 후반에 Creath가 발명한 기법으로 일정한 위상차를 갖는 3장의 스펙클 패턴 이미지를 얻고 이 이미지를 감산 처리하여 위상 \varnothing 를 구하는 방법으로서 참조광의 위상을 α 만큼 이동시켰을 때 3장의 스펙클 패턴을 구하는 방법으로 식(2-12)의 식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_0(1 + \gamma \cos(\varnothing - \alpha)) \\ I_2 &= I_0(1 + \gamma \cos \varnothing) \\ I_3 &= I_0(1 + \gamma \cos(\varnothing + \alpha)) \end{aligned} \quad (2-12)$$

본 연구에서는 위상추출 알고리즘의 4단계 위상이동기법으로 3개의 미지수

를 구하기 위해 $\pi/2$ 씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식 (2-13)과 같이 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \varnothing \\
 I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varnothing + \pi/2) \\
 I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varnothing + \pi) \\
 I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\varnothing + 3\pi/2)
 \end{aligned} \tag{2-13}$$

4개의 방정식을 식(2-14)와 같이 조합하여 CCD Pixel의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도를 형성하게 된다.

$$\varnothing(x,y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \right) \tag{2-14}$$

ESPI에서 변형해석을 위한 실험에서는 식(2-8)의 변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상과 변형 후의 위상을 각각 구하고 그 차이를 구함으로써 실제 물체변형을 식(2-15)와 같이 구할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_b - \phi_a \tag{2-15}$$

2-2 위상이동기법을 위한 결필침

위상결필침의 기본 원리는 데이터 경로를 따라 2π 단위로 톱니파를 가지는 위상값 ϕ 를 통합시키는 것이다. 위상이동을 수치적으로 획득한 이미지는 광경로변화를 통해 위상변화가 톱니파 형태의 2π 단위의 연속적인 등고선 형태의 위상지도를 형성하여 물체의 변형정보를 겹쳐진 형태로 나타낸다. Fig. 2-5는 이러한 결필침 과정을 나타낸 것이다.

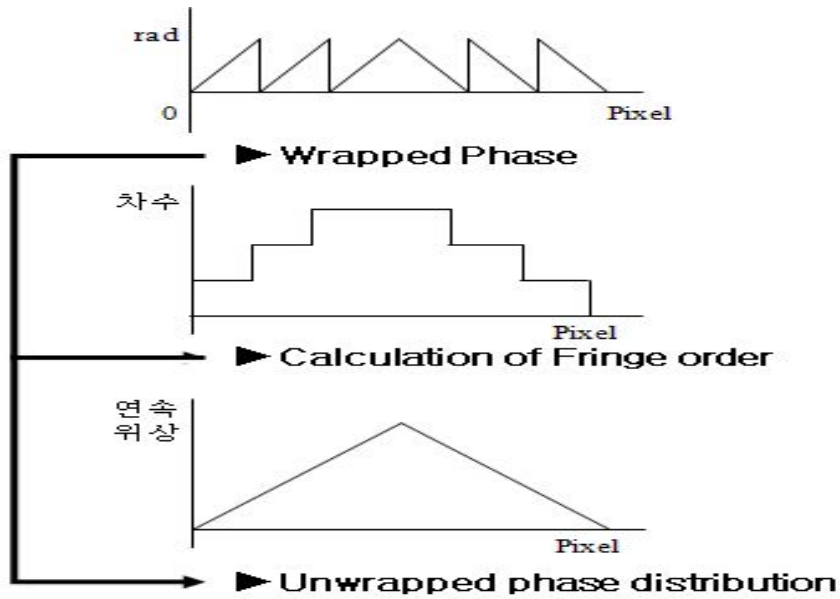


Fig. 2-5 Unwrapping Processing

연속 위상으로 변환하는 결편침의 식은 2-16을 이용하여 구하게 된다.

$$\phi_{unw} = \phi_{wra} + (2\pi N) \quad (2-16)$$

ϕ_{unw} = Unwrapped Phase

ϕ = Wrapped phase

N = Fringe order

결편침을 위한 차수(N)의 결정을 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법으로 구한다. 여기서 Pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 무턱 값과 비교하여 조건을 만족하면 N을 감소 또는 증가시키는 방법으로 프링지 차수를 구하게 된다. 간섭계의 기하학적 구성에 따라 최종의 변위 값은 감도 백터를 고려하여 구하게 된다. 본 연구에서는 위상이동 및 결편침의 알고리즘을 이용하였다.^{25,26} 상용 프로그램은 (ISTRA, Ettemeyer GmbH, Germany)를 사용하였다.

제 3 절 광학 간섭계 구성

스펙클 패턴을 이용하여 물체 표면의 변위 발생 시에 발생하는 변형 전후의 스펙클 패턴을 빼서 줄무늬를 만들고 이를 분석하여 위상차 및 변위량을 구하는 것이 스펙클 패턴 간섭계이다. 이 간섭계에 CCD Camera 이용하여 정보를 수록하고 컴퓨터를 이용하여 데이터를 획득 하여 변형 정보를 얻는 방법을 ESPI라 한다. 이 스펙클 상관 간섭법에는 변형 측정 방법에 따라 면외 변위 측정 간섭계와 면내변위 측정 간섭계로 구분 지을 수 있다. 이 두 간섭을 일으키는 두 beam을 물체광과 참조광이라 정의하며 이 두 beam 중 참조광이 시편 조사면에서 난반사된 스펙클 프랜지인지 조사되지 않은 uniform field 인지에 따라서 면외 변위 와 면내 변위 간섭계로 결정된다. 본 연구에서는 시험편에 압력을 실시하여 그 압력에 따른 변형량을 측정 이를 이용하여 압력용기의 결함의 두께를 측정하기 위해 면외 변형 간섭계를 구성하여 실험을 실시하였다.

3-1 면외 간섭계

면외변위 측정을 위한 대표적인 간섭계는 Fig. 2-6과 같다. 물체로 직접 조사되어 Subjective speckle을 형성하는 물체광과 CCD camera 촬상소자에 Uniform field 형태로 직접 조사되는 참조광으로 나눌 수 있다.

변형전의 물체의 Objective speckle pattern은 참조광과 간섭하여 제2의 스펙클 패턴으로 변형 전 스펙클 패턴을 형성하게 된다. 스펙클상관 간섭무늬는 변형 전과 후의 스펙클 패턴의 감산처리로부터 형성이 되고, 위상이동 기법을 적용하여 변형전후의 위상을 추출하여 물체의 변형을 측정할 수 있다. 면외변위 정량해석을 위한 물체광의 광로추적으로부터 식 2-17과 같이 쓸 수 있다.

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

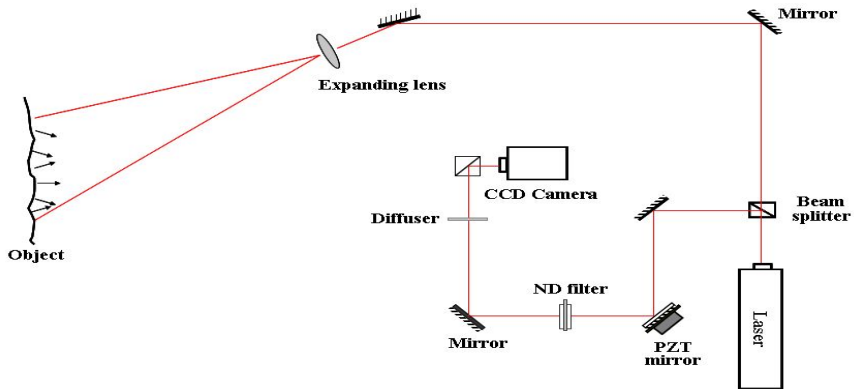


Fig. 2-6 Out-of-plane displacement sensitive interferometer

3-2 스펙클 전단간섭계

전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도는 Fig. 2-7 에 나타나 있다. ESPI 와 달리 전단간섭계는 레이저의 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스펙클의 발생은 ESPI와 동일하지만 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나뉘는 후, 하나의 빔은 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히게 되고 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때 Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 거울에서 반사된 파면이 Mirror1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 Shearing 되어 CCD camera 상면에 이미지로 맺히게 된다. 이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 ESPI와 동일하지만, 변형 전·후의 이미지를 감산처리하는 과정에서 간섭줄무늬는 ESPI와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 도함수의 결과를 표현하게 된다, 또한 Mirror2를 전단거울이라 하며 Mirror2가 기울어진 방향을 전단방향 즉 기울어진 각도를 전단량이고 한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정되게 된다. 이런 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의 P_1 과 P_2 사이에 $\phi = \phi(x, y)$ 와 $\phi_1 = \phi(x + \delta x, y)$ 관계되는 위상차를 가지게 되는데 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 식 2-18과 같이 된다.

Fig. 2-7 Single-Beam Shearography interferometer

$$\phi = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (2-18)$$

변형에 의한 위상차의 변화는 $\Delta\phi$ 식 2-20과 같으며 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현할 수 있으며 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬는 식 2-19와 같이 사용하게 된다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며 모든 광계측의 기본식으로 사용되고 있다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot \vec{d} \quad (2-19)$$

이때 식 2-19와 차이점은 식 2-21에 표현한 바와 같이 \vec{d} 와 \vec{d}' 은 임의의 P에 조사된 2 점의 각각의 변형이다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi = \phi' - \phi &= (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_1) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (2-20)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot (\vec{d} - \vec{d}') \quad (2-21)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식 (2-21)을 식 (2-22)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-22)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 식 2-23와 같이 표현할 수 있으며 Δx 는 상면에서 전단량 δx 와 같고 이 값은 매우 작기 때문에 식 2-23에서 2차 이상의 고차항을 무시하면 식 2-4와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-23)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) \delta x \quad (2-24)$$

전단간섭법은 변형기울기를 측정하며 거의 모든 연구자들이 사용하고 있는 전단간섭법의 이론식을 표현할 때는 전단량이 충분히 작다는 조건을 적용하여 미분으로 표현한다.

$$f'(x_1) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-25)$$

전단간섭법의 이론적 제한 사항을 수치미분을 이용하여 표현하고 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하면 실제 전단간섭법을 이용한 측정결과는 식 2-26와 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타내며 변형 Δd 는 식 2-27와 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-26)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) & (2-27) \\ &= \frac{\Delta x}{1i} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned}$$

식 2-26과 식 2-27의 각각의 기호를 변형 f , 대응화소 x_i , 전단량화소 h 로 바꾸어 사용하면 식 2-28와 같이 표현할 수 있으며 이를 다시 f' 으로 정리하면 식 2-29와 같다.

$$f'(x_i)h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (2-28)$$

$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-29)$$

식 2-29을 식 2-28에 대입하면 식 2-30과 같이 표현할 수 있으며 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f' h \quad (2-30)$$

이를 이용하여 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있다.

제 4 절 압력용기의 결함두께 측정

4-1 압력용기의 결함두께 측정 방법

본 연구에서는 압력용기의 결함두께를 측정하기 위해 현장 적용성 및 정확도면에서 뛰어난 레이저 응용 계측 기술인 ESPI, Shearography를 이용하여 압력용기의 결함두께를 측정하기 위해 이론적 방법을 제시하고 실험을 통하여 이를 검증하고자 한다. 본 연구에서 압력용기의 결함두께를 측정하기 위하여 기본 개념은 압력용기에 압력을 가하였을 경우 Fig. 2-8에서 볼 수 있듯이 시험편이 변형전에서 변형후로 δ 만큼 늘어남을 확인 할 수 있다.

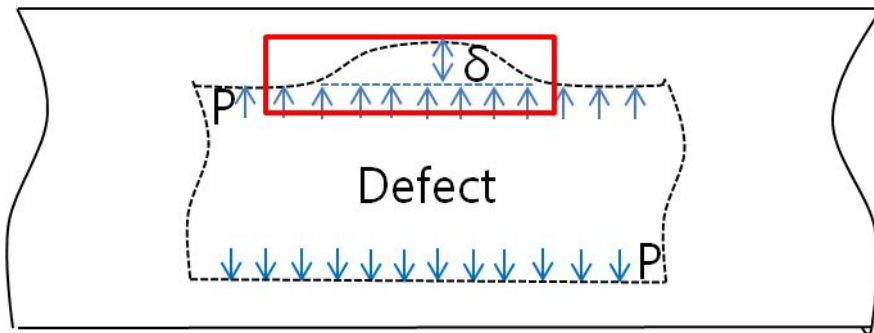


Fig. 2-8 Deformation according to Pressure

이를 착안하여 ESPI & Shearography 계측 시스템을 이용하여 압력용기의 내압변화에 따른 면외변형을 측정하여 최대변형량, 압력, 결함길이를 이용하여 압력용기의 결함두께를 정량 평가 할 수 있다. 내부결함이 있는 물체에 외력이 가하여 지면 결함부에서는 응력집중이 발생하며 외력에 대해 응력집중은 표면변위의 왜곡으로 나타나게 된다. 즉 Fig.2-9과 같이 내부결함이 있는 대상체가 외력을 받아 결함에 의한 변형이 물체의 표면까지 전달될 경우, Shearography를 이용하여 전단량에서 면외 변위의 1차 미분값으로 직접 측정할 수 있으며 ESPI는 면외 변위량을 측정할 수 있다.

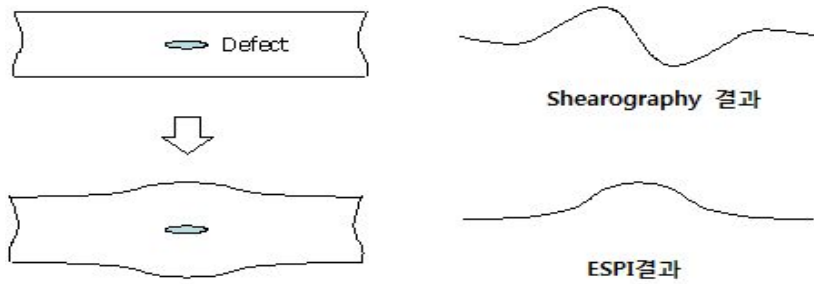


Fig 2-9 Measurement result of surface deformation by ESPI and Shearography

또한 Fig.2-10에서 나타낸 것과 같이 내압변화에 따른 결함두께(t_p)는 외부 표면과 내부표면 간의 두께(t_1)와 결함표면과 외부표면 간의 두께(t_2)차이를 통해 식 2-31로 구할 수 있다.

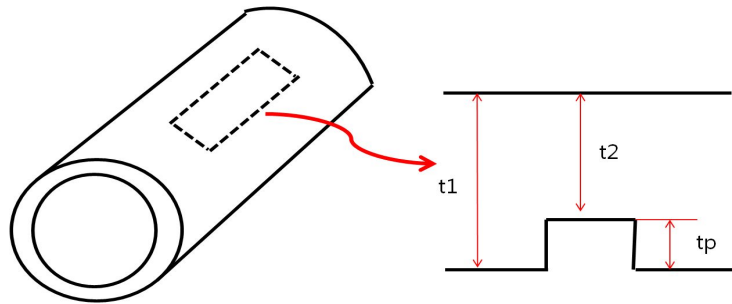


Fig. 2-10 Thickness defects due to changes in pressure

$$t_p = t_1 - t_2 \quad (2-31)$$

t_p = 파이프 내부 결함의 두께

t_1 = 외부표면과 내부표면 간의 두께

t_2 = 결함표면과 외부표면 간의 두께

압력용기에 압력을 가했을 경우 결함이 있는 부분에 작용하는 변형은 Fig. 2-11 와 같이 나타낼 수 있다. δ 에 대한 함수는 식 2-32로 표현 할 수 있으며 1 차 미분을 통하여 식 2-33 와 같이 나타낼 수 있다.

$$y = k(1 - \cos \frac{2\pi}{L_0}x) \quad (2-32)$$

k = 변형에 따른 대비상수

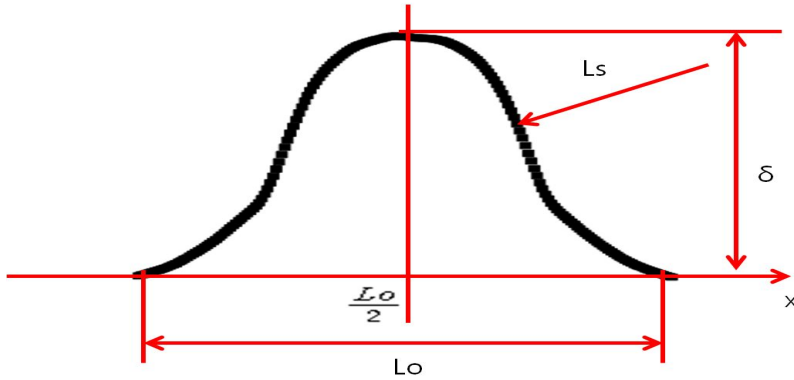


Fig.2-11 Surface deformation internal defect by external load

$$L_s = L_0 \frac{k \cdot 2\pi \cdot \sin \frac{2\pi}{L_0}}{2} \sqrt{(k \cdot \frac{2\pi}{L_0} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_0})^2 + 1} \quad (2-33)$$

$$+ \frac{1}{2} \ln \left| k \cdot \frac{2\pi}{L_0} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_0} + \sqrt{(k \cdot \frac{2\pi}{L_0} \cdot \sin \frac{2\pi}{L_0})^2 + 1} \right|$$

또한 변형량 δ 는 식 2-34과 같이 표현 할 수 있다.

$$L_s = L_0 + \delta \quad (2-34)$$

L_s = 변형의 변위길이 L_0 = 결함의 길이 δ = 변형량

식 2-34를 정리하면 식 2-35와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s - L_0 = \delta = \frac{PL_0}{bt_2E} \quad (2-35)$$

P = 압력

b = 시험편 결함의 폭

t_2 = 결함표면과 외부표면 간의 두께

E = 탄성계수

식 2-35의 미지변수 t_2 를 구하기 위해 식 2-36와 같이 쓸 수 있다.

$$t_2 = \frac{bE(Ls - Lo)}{PLo} \quad (2-36)$$

t_2 = 결함표면과 외부표면 간의 두께

식 2-36를 이용하여 tp 에 대한 압력용기의 결함두께를 구하는 식 2-37과 같이 최종적으로 쓸 수 있다.

$$tp = t_1 - t_2 \quad (2-37)$$

tp = 결함의 두께

이 식들을 이용하여 ESPI 와 Shearography를 이용하여 압력용기 시험편의 변형량 및 결함의 길이를 획득 할 수 있으며 획득한 결함의 길이와 변형량을 이용하여 압력용기 결함부의 두께를 얻을 수 있다.

제 3 장 실험장치 및 구성

제 1 절 측정 시스템

1-1 ESPI 시스템

압력용기의 결함두께를 측정하기 위해서 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템인 ESPI를 이용하였으며 장치의 구성은 Fig.3-1과 같다. 레이저는 532nm 파장으로 Nd:YAG laser source, laser controller, polarization maintaining optical fiber, ESPI sensor, controller, PC로 구성되어 있으며 센서 내부에는 x, y, z축의 변위를 측정할 수 있는 3개의 간섭계로 구성되어 있다. 셔터를 이용한 광로의 차단으로 간섭계를 선택할 수 있다. 위상의 추출을 위해 4 단계 위상이동기법을 적용하였으며 위상이동은 Piezo electronic transducer (PZT)로 수행하며 외부 Controller에 의해 제어가 되고, 최적 위상이동량을 자동 검출하여 위상이동기법을 적용한다. 이를 이용하여 위상이동기법으로 Phase map인 위상지도를 획득 상용프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH)을 이용하여 결렬침 및 수치 해석함 으로서 변위 및 변형률을 구할 수 있다. 또한 이를 이용하여 압력용기의 결함두께를 측정 할 수 있다. Table 3-1은 ESPI 시스템의 사양을 나타내고 있다.

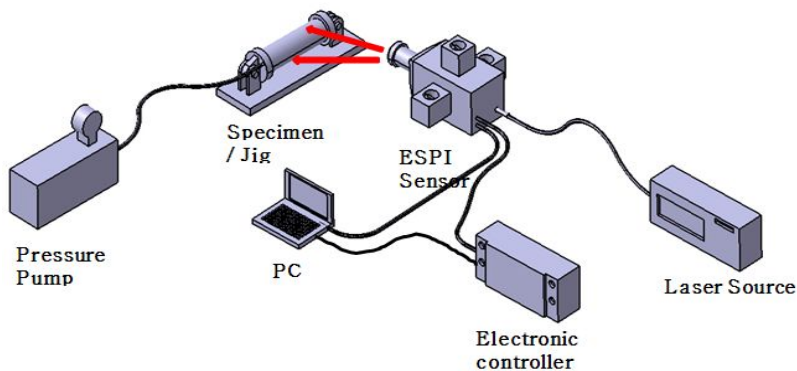


Fig. 3.1 Schematic of 3D-ESPI System

Table 3-1 Specification of the ESPI system

3D – ESPI System	
Description	Technical data
Measuring Sensitivity	0.03– 1 μm adjustable
Measuring range	static 1 – 20 μm per measuring step, any with serial measurement dynamic 0.3 – 3 μm amplitude
Measuring area	static up to 1 m ² dynamic up to 400×600 mm ³ (16"×24")
Working distance	variable, 0.1 ... > 2.5m(4 ... >60")
Operation modes	automatic, manual, static, dynamic 1D– ,2D–, 3D–operation
Data interface	TIFF, ASCII, Windows metafile
Data acquisition speed	2.5 sec for 3D–analysis
Data analysis	automatic or semi automatic

1-2 전단간섭시스템

전단간섭시스템은 독일 DANTEC DYNAMICS 사의 상용 Shearography 시스템(Q-800HR model)을 이용하였으며 구성은 Fig. 3-2와 같이 Shearography 센서, 센서 내부의 Diode laser, Controller, PC로 구성되어 있다. 상용 프로그램인 ISTR A 시스템을 이용하여 장치의 제어, 필터링, 결핍침을 수행한다. 레이저는 Diode laser(출력 : 50 mw, 파장 : 780nm)를 이용하였으며 센서양측면의 arm에 장착된 2개의 Diode를 통해 확산된 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사된다. 전단량과 전단반향은 센서 내부의 모터를 ISTR A 4D 프로그램을 이용하여 전단 각도와 픽셀을 설정하여 조절할 수 있다. system은 PZT에 의해 위상이동이 되며 4단계 위상이동기법을 적용하여 위상지도를 얻게 된다. 최종 위상지도는 상용 프로그램(ISTR A, Ettemeyer GmbH)을 이용하여 해석함으로써 상대변위량을 얻을 수 있게 된다. Table 3-2 에 Shearography 시스템을 나타내고 있다.

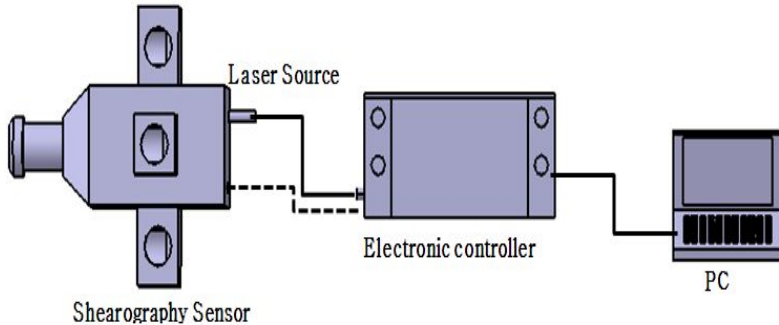


Fig. 3-2 Configuration of Shearography system

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

1-3 시험편

본 실험에 사용한 시험편은 직관 모사시험편에 인공 감육결함을 가공하여 결함의 종류에 따라 결함의 축방향 길이와 원주방향 길이를 예측하기 위해 ASTM A 106 GrB 재질의 직관 모사시험편을 만들어 결함을 측정하였다. A106 Gr.B 관은 이음매가 없는 탄소강 파이프 재질이며, 항복강도는 240MPa, 인장강도는 415MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. 직관 내부에 감육결함을 가공할 때 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하고자 하였으나 가공시 정확한 가공이 어려워 축방향으로는 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하였고 원주방향으로는 공구의 직경에 해당하는 곡률반경 250mm를 갖는 형상으로 가공하였다. Fig. 3-3은 각 시험편의 재질과 규격에 대해 나타내었다.

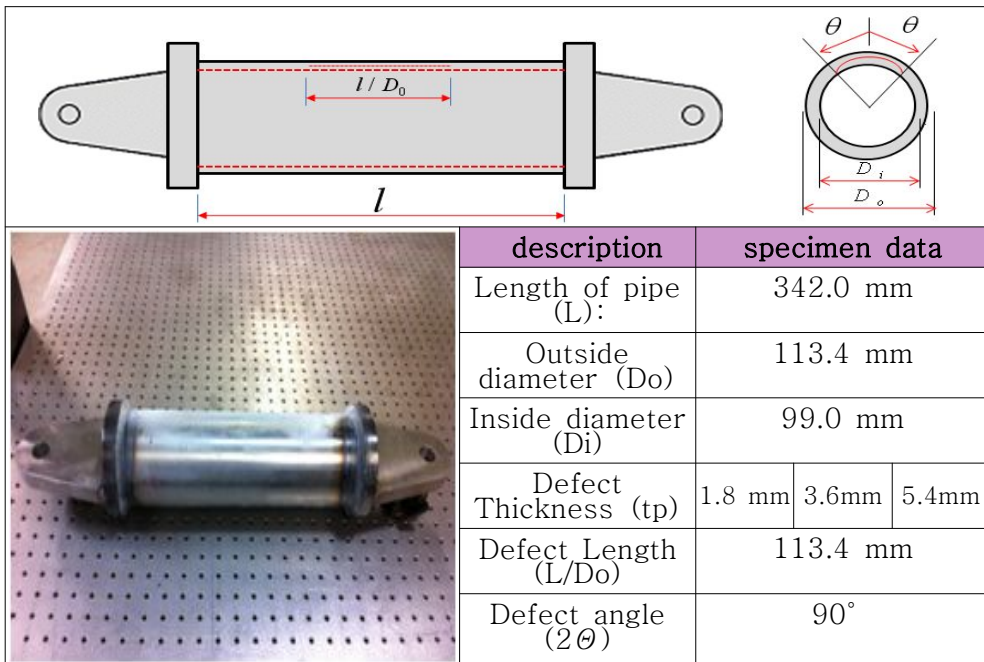


Fig. 3-3 Shape and dimension of pipe specimen

제 2 절 실험방법

압력파이프는 발전설비의 70~80%를 구성하는 구조물로서 유속에 의한 감속 결함이 발생 할 수 있으며 결함의 크기와 배관 두께의 정밀 정량 측정이 설비의 안전평가에 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 내부에 임의의 감속결함을 가공한 원자력 배관 모사 압력용기를 제작하여 내부 압력 변화에 따른 결함부의 변형을 측정 이를 이용하여 압력용기 시험편 결함의 두께를 측정하였다. 시험편의 내부 감속결함의 원주방향 경계부를 곡선 가공하였으며 시험편을 고정하기 위해 Bed를 제작하였으며 내압을 가하기 위해 유압잭의 작동 및 밸브 개방 방식으로 가압과 감압을 조절할 수 있는 유압식 수동 가압 장치를 제작 하였다. 실험장치 구성은 Fig 3-4 와 같이 구성하였다.

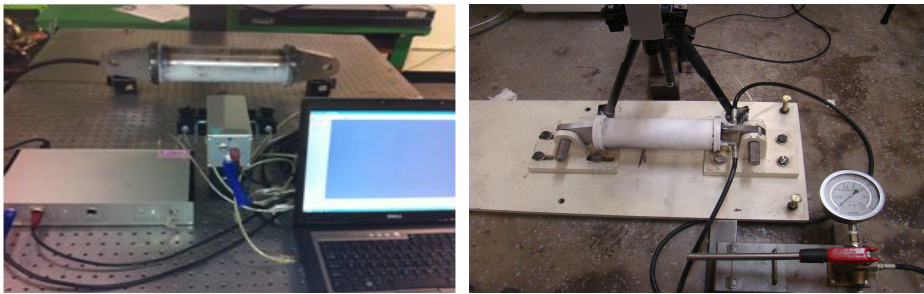


Fig. 3-4 Configuration of ESPI & Shearography system

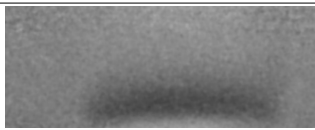
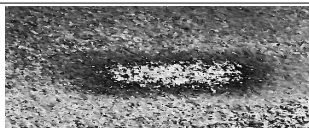
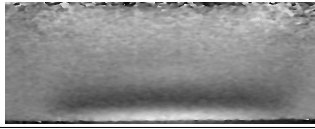
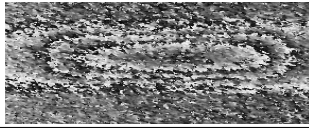
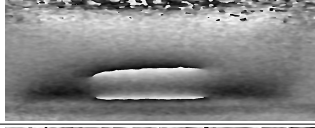
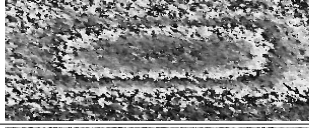
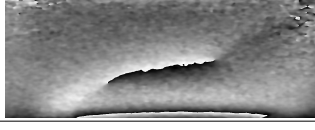
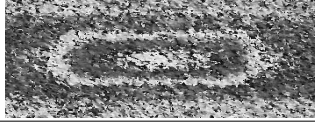
실험을 통해 시험편에 압력을 주었을 때의 감속결함부의 결함 및 변형을 측정함으로써 그때의 변형량을 이용하여 압력용기 두께 이론식에 대입하여 압력용기의 두께를 계산 하였으며 압력에 변화를 단계적으로 증가시켜 그 변화를 관찰 하였다.

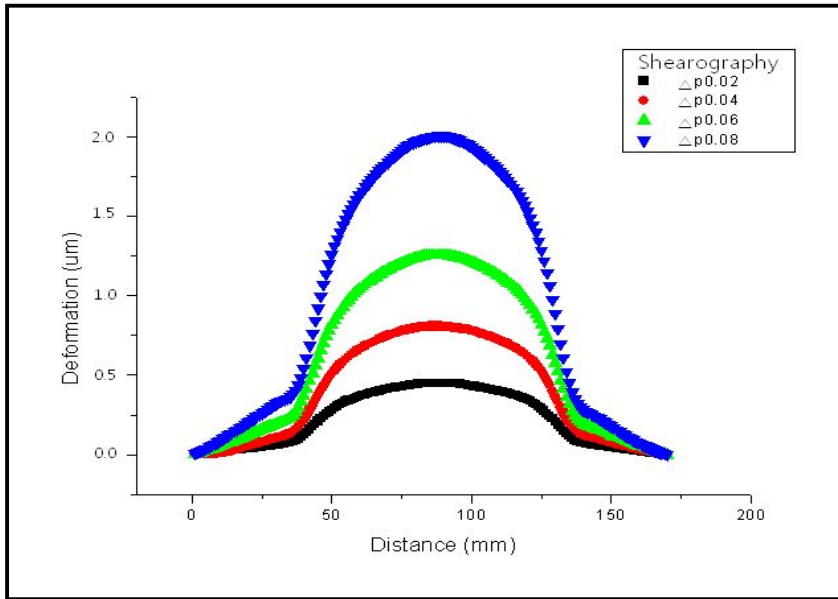
제 4 장 실험결과 및 고찰

제 1 절 ESPI 실험결과 & Shearography 실험결과

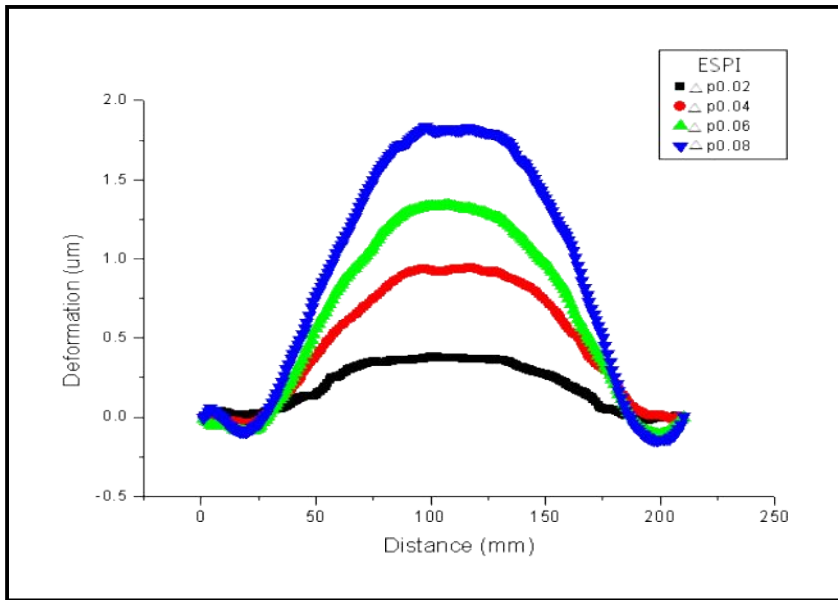
본 논문에서 제시한 압력용기의 결함두께를 측정하기 위해 Shearography를 이용하여 압력용기의 결함부위의 변형 측정을 위해 일정한 압력차를 주어 변형을 측정 하였다. 전단량을 5pixel로 고정하고 압력차를 0.02MPa ~ 0.08MPa 까지 0.02Mpa씩 일정하게 증가 시키면서 실험하였다. 또한 그 결과를 ESPI와 비교하였다. 전단간섭법의 전단방향은 시험편의 축방향인 X축 방향으로 실험하였으며 변형 결과는 ESPI의 X축 변형 프로파일과 비교하였다. Table 4-1, Table 4-2, Table 4-3은 각 시험편에 따른 결과를 나타내었다. ESPI와 전단간섭계에 의한 측정결과 모두 위상이동에 나타난 줄무늬의 숫자가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig 4-1, 4-2, 4-3은 ESPI와 전단간섭법의 X축 방향의 측정결과의 변형 프로파일이다.

Table 4-1 SSP-2H Phase-map by Pressure Difference

ΔP (Mpa)	Shearography	ESPI
	phase-map	phase-map
0.02		
0.04		
0.06		
0.08		



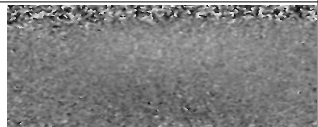
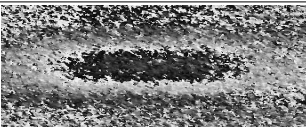
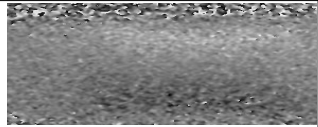
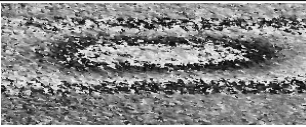
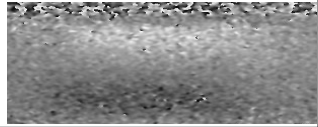
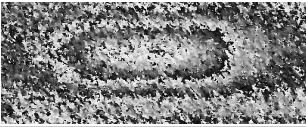
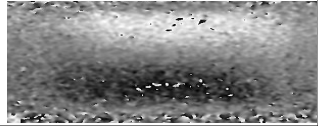
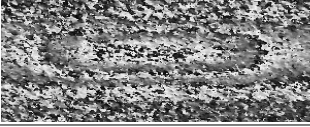
(A) Shearography Result

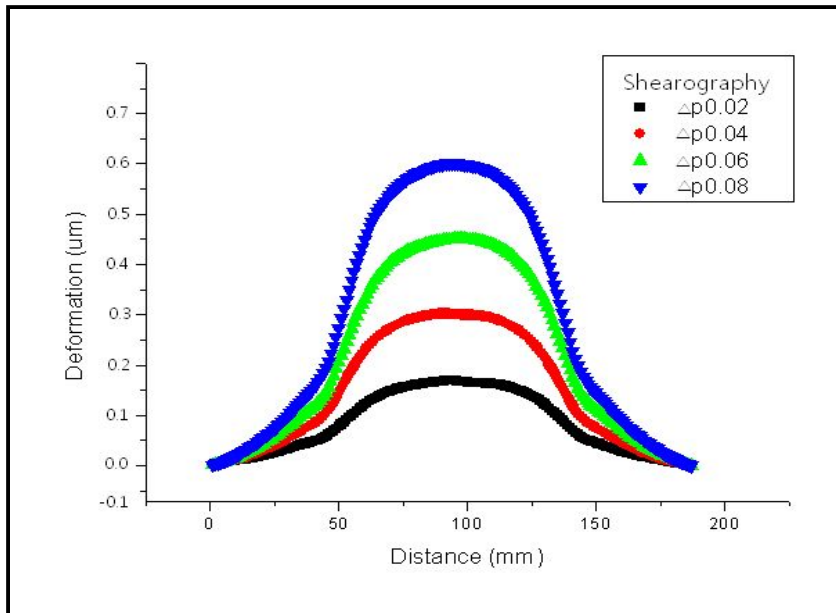


(B) ESPI Result

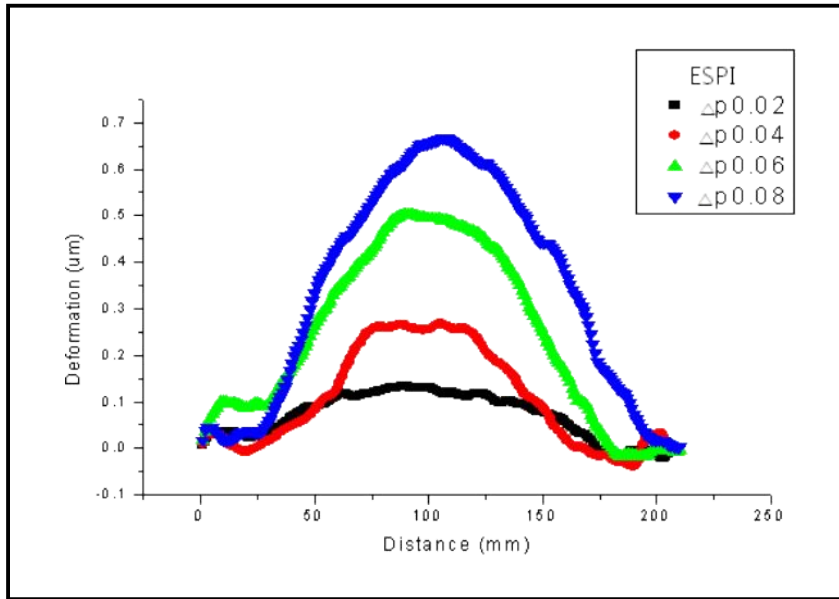
Fig. 4-1 Shearography vs ESPI Axis deformation by pressure Difference

Table 4-2 SSP-2G Phase-map by Pressure Difference

ΔP (Mpa)	Shearography	ESPI
	phase-map	phase-map
0.02		
0.04		
0.06		
0.08		



(A) Shearography Result

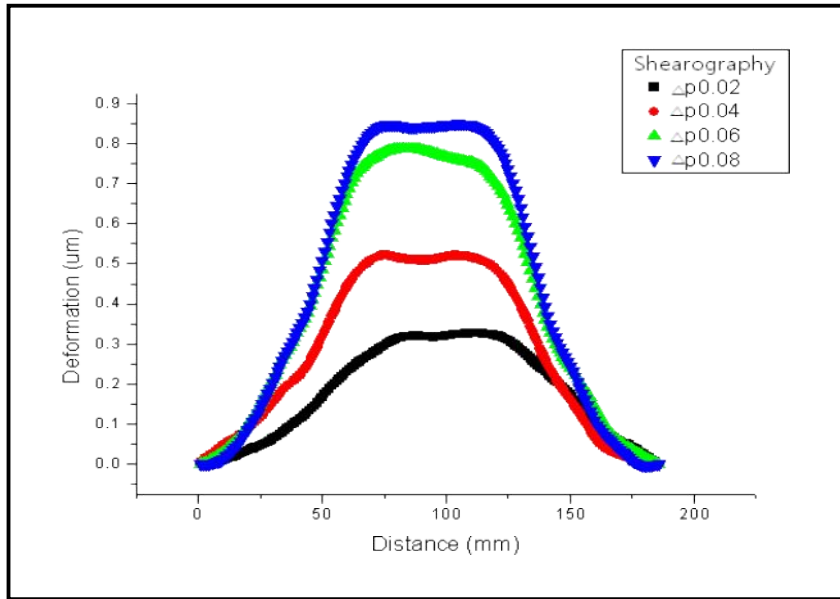


(B) ESPI Result

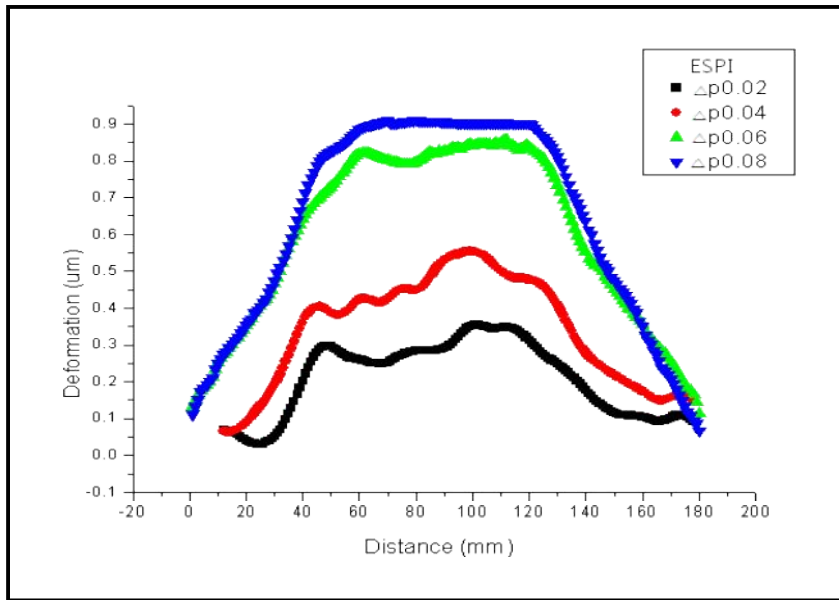
Fig. 4-2 Shearography vs ESPI Xaxis deformation by pressure Difference

Table 4-3 SSP-2F Phase-map by Pressure Difference

ΔP (Mpa)	Shearpgraphy	ESPI
	phase-map	phase-map
0.02		
0.04		
0.06		
0.08		



(A) Shearography Result



(B) ESPI Result

Fig. 4-3 Shearography vs ESPI Axis deformation by pressure Difference

실험을 통하여 시험편 SSP-2H, SSP-2G, SSP-2F의 축방향 결함의 길

이는 120mm, 130mm, 126mm, 로 각각 측정 되었다. 실제 결함의 크기인 113.4mm 와는 약간의 오차가 발생하였다. 각 시험편에 대한 측정결과로부터 압력용기의 결함두께를 구하기 위한 결함의 길이인 L_0 를 구할 수 있다. 또한 각 압력의 변화에 따른 최대 변형량 δ 를 구할 수 있다.

제 2 절 압력용기 결함 길이를 이용한 결함의 두께 측정

각 시험편의 압력에 따른 결과를 나타내기 위해서 Table 4-4, Table 4-5, Table 4-6에 나타내었다. Fig. 4-4~9은 압력(P)에 대한 최대변형량(δ), 최대변형량에 대한 L_s 대한 상수 값, 상수 K 에 대한 결과를 나타내었다. 시험을 통하여 구한 결과 값을 이용하여 압력용기의 결함두께 구하는 공식을 이용하여 압력용기의 결함의 두께(t_p)를 정리하여 표에 나타내었다.

Table 4-4 Results of SSP-2H specimen

ΔP (Mpa)	δ	k	L_s (mm)	t_2 (mm)
0.02	0.315	0.073	799	5.34
0.04	0.921	0.103	1473	5.31
0.06	1.312	0.127	2166	5.36
0.08	1.707	0.147	2850	5.36

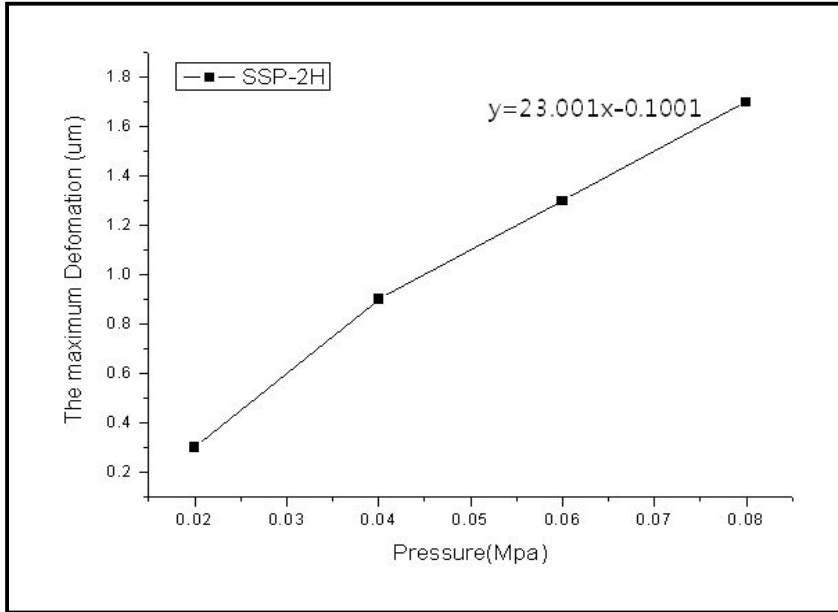


Fig. 4-4 SSP-2H Maximum Displacement according to pressure

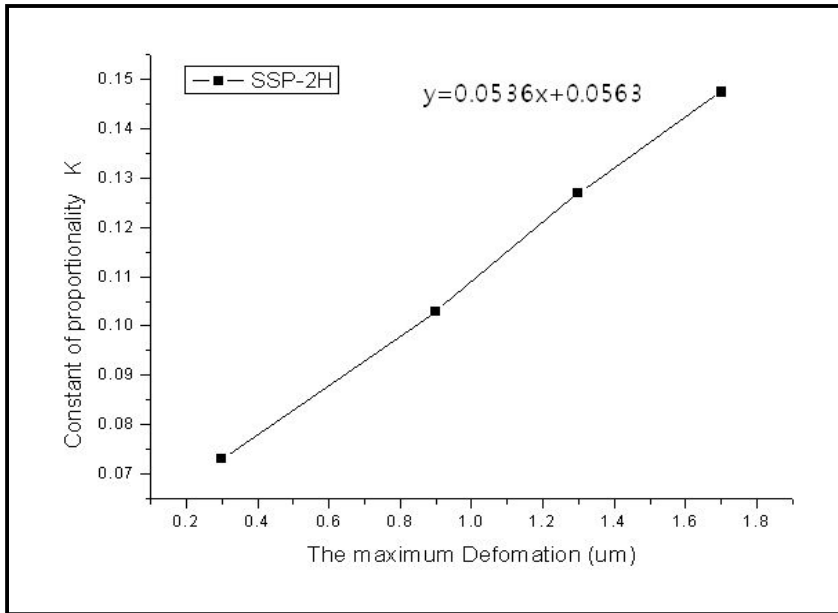


Fig. 4-5 SSP-2H Constant K according to Maximum Displacement

Table 4-5 Results of SSP-2G specimen

ΔP (Mpa)	δ	k	L_s (mm)	t_2 (mm)
0.02	0.134	0.077	673	3.59
0.04	0.267	0.109	1207	3.59
0.06	0.503	0.128	1601	3.28
0.08	0.667	0.149	2133	3.358

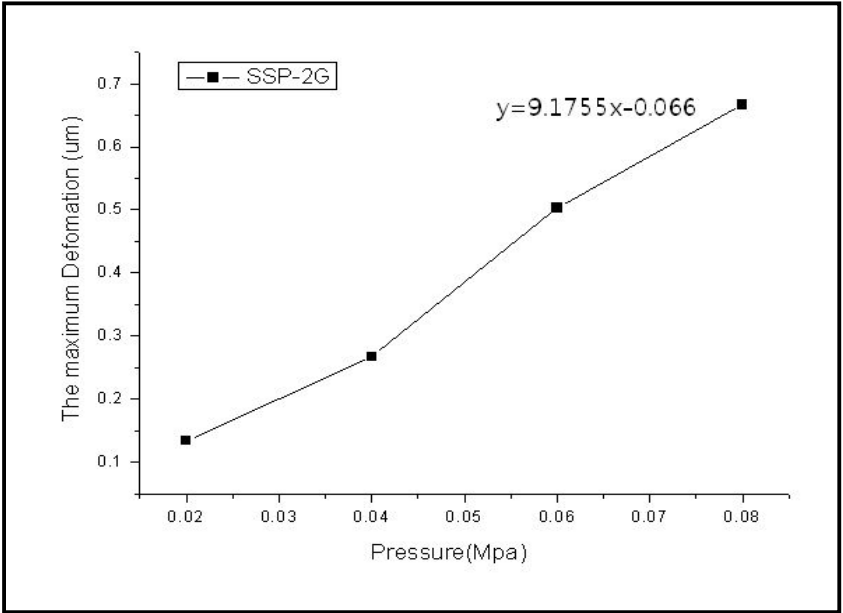


Fig. 4-6 SSP-2G Maximum Displacement according to pressure

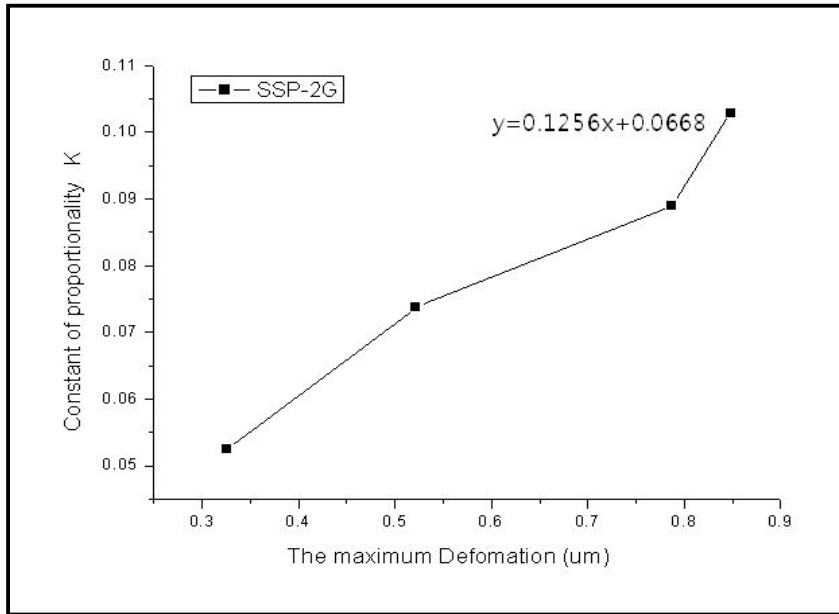


Fig. 4-7 SSP-2G Constant K according to Maximum Displacement

Table 4-6 Results of SSP-2F specimen

ΔP (Mpa)	δ	k	Ls (mm)	$t2$ (mm)
0.02	0.326	0.052	365	0.0017
0.04	0.521	0.073	619	0.0018
0.06	0.787	0.089	846	0.0017
0.08	0.848	0.102	1086	0.0017

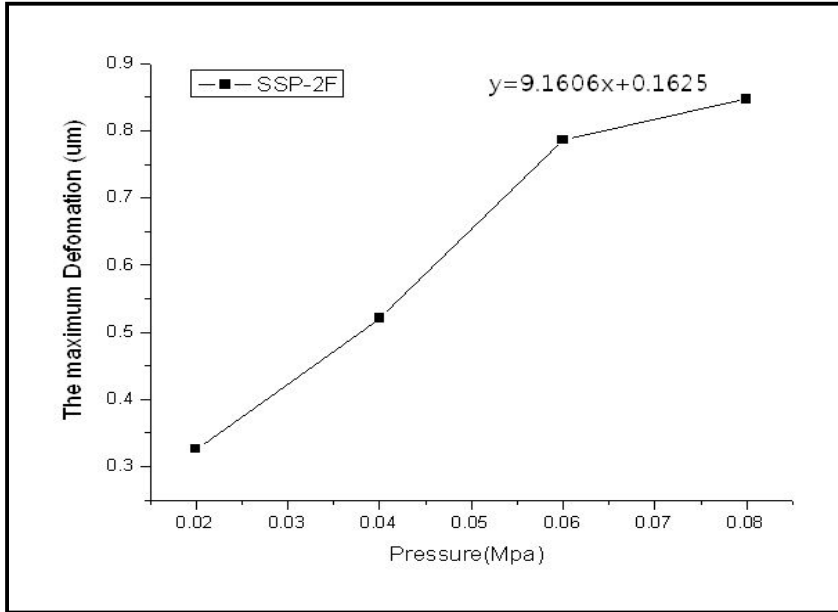


Fig. 4-6 SSP-2F Maximum Displacement according to pressure

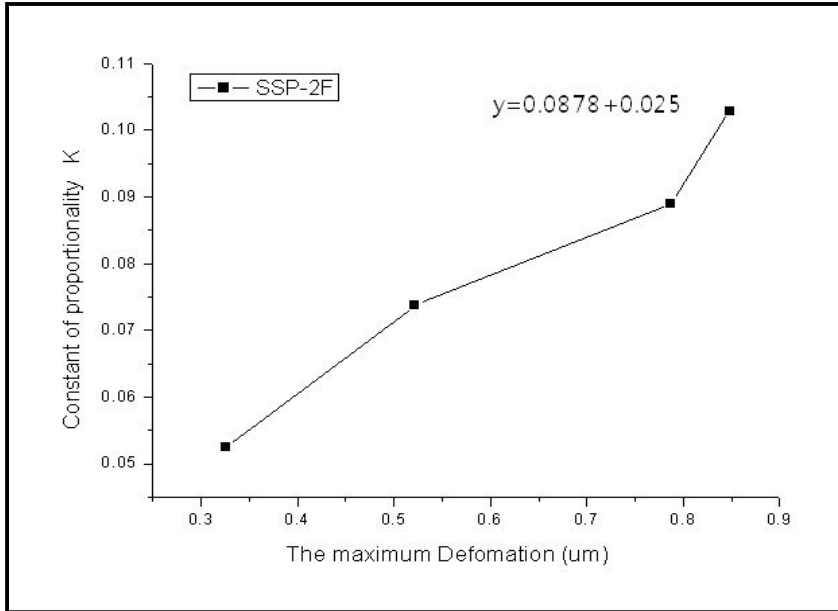


Fig. 4-7 SSP-2F Constant K according to Maximum Displacement

Fig. 4-4, 4-6, 4-8에 확인할 수 있듯이 압력의 증가에 따라서 측정된 결함의 최대 변형량이 증가함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 4-5, 4-7, 4-9

를 통하여 최대변형량 증가에 따라 상수 k 값이 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이를 통하여 실험을 통하여 확인한 결과뿐만 아니라 1MPa에서의 압력에 따른 최대변형량과 상수 k 의 값을 예측 할 수 있다. 또한 이를 통하여 압력용기의 결함두께를 측정 할 수 있으며 각 시험편에 따른 압력의 변화에 따른 최대변형량과 상수 k 의 예측으로 압력용기 결함두께를 예측 할 수 있는 계측 이론을 제시하였다.

현재의 압력용기의 결함을 측정할 때는 ESPI와 Shearography를 이용하여 변형량과 변형률을 결과를 측정 결함의 유무를 판단하였지만 압력용기의 결함두께 측정을 통하여 결함의 크기와 변형량의 측정뿐만 아니라 결함부의 두께도 예측 할 수 있다. 즉 외부표면과 내부표면간의 두께에서 결함표면과 외부표면 간의 차를 결함두께라 할 수 있다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소의 2차계통에서 주로 사용되는 탄소강 배관을 대상으로 내부에 인공 감육결함을 가공하고 두께를 서로 다르게 하여 제작하여 실험하였다. 또한 계측을 통하여 압력용기의 결함두께를 정량적으로 평가하여 계측 기술의 발전과 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이를 위해 Shearography와 ESPI를 이용하여 감육결함부의 변형을 측정하였다. 측정결과를 바탕으로 압력용기를 구하는 이론식에 대입하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두께별로 감육결함부의 변형 측정 실험을 통하여 미세한 압력변화에도 Shearography로 측정하였을 때는 결함의 최소두께가 1.8mm로 가공된 SSP-2H, 3.6mm로 가공된 SSH-2G, 5.4mm로 가공된 SSH-2F의 변형을 쉽게 측정하였다.

2) 두께별로 감육결함부의 변형 측정 실험을 하였을 때 Shearography로 측정하였던 결과와는 다르게 ESPI로 측정하였을 때에는 실험결과에서 확인하였던 것과 같이 SSP-2F에서는 결함의 길이를 확인하는데 어려움이 발생하였다.

3) Shearography와 ESPI로부터 얻어진 결과를 이용하여 본 논문에서 제시한 압력용기의 결함두께를 측정할 수 있는 계산식에 대입한 결과 결함의 두께(t_p)는 SSP-2H는 실제 결함의 두께인 1.8mm의 같은 결과를 나타내었고 SSP-2G, SSP-2F에서는 압력에 변화에 따라 결함의 두께가 실제 결과와 다르게 약 7% 정도의 오차로 실제 두께와 차이를 보였다.

본 연구에서 제안하는 압력용기 결함두께 측정법은 원자력배관의 감육결함 예측 및 건정성 평가 기술 개발 등 이론과 실험이 결합된 기초연구로서 압력용기의 안정성, 건전성, 보수성을 증진시킬 수 있는 기반 확립에 기여할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. Maldague, X.. Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography, London: Springer-Verlag, 1993
2. Hung, Y.Y.. "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge." Applied Optics 14:618-622, 1975
3. Hung, Y.Y.. Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation. JOpt Lasers Eng 1997;26:421-36.
4. Ettemeyer, A.. Technical engineering note laser shearography for inspection of pipelines. J. Nucl. Eng. Design 1996;160:237-40.
5. edited Ratogi, P.K and Inaudi, D.. Trends in Optical Non-destructive Testing and Inspection, London: Elsevier, 2000
6. Hariharan, P.. Optical Holography 2nd Edition, New York: Cambridge University Press, 1996.
7. Jones, R.. and Wykes C.. Holographic and Speckle Interferometry 2nd Edition, London: Cambridge university Press, 1989.
8. 김경석. 『CW 레이저 스펙클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위 논문, 1988.
9. Hyunchul Jung. Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor Thesis, Shosun University, 2004.
10. Creath, K.. "phase-shifting Speckle Interferometry." , Applied Optics 24:3053, 1985
11. Kim, Koungsuk, Kang, Kisoo, Kang, Youngjune, Jung, Seongkyun. "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography." Optics & Laser Technology 33:5639-643, 2004.
12. 조재홍, 장수, 황보창권, 조두진. "광학" . 4소 Edition. 두양사. 2002.
13. Uif Schnars, Werner Jueptner, " Digital holography" , Springer, pp.18-20, 2003.
14. H. S. Jang, "Quantitative measurement method of out-of-plane deformation using the shearography" , Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2006

15. J. C. Dainty, "Laser speckle and related phenomena 2nd edition", New York: Springer-Verlag, 1984.
16. J.W. Goodman, "some fundamental properties of speckle", Journal of the Optical Society of America Vol. 66, pp. 1145-1150, 1976.
17. K. S. Kang, "Quantitative Evaluation of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry", Chosun Univ., ph.D Dissertation, 2005
18. P. K. Rastogi, "Digital speckle pattern interferometry and related techniques", John Wiley & Sons Ltd., pp. 59-139, 2001.
19. David W. Robinson, Graeme T. Reid, "Interferogram Analysis: Digital fringe pattern measurement techniques", IOP publishing Ltd., 1993.
20. Madjarova, V., Toyooka, S., Widiastuti, R., Kadono, H.. "Dynamic ESPI with subtraction-addition method for obtaining the phase." Optics Communications 212:35-43, 2002.
21. K. S. Kim, H. C. Jung, K. S. Kang, J. K. Lee, S. S. Jang, J. K. Hong, "In-plane strains measurement by using the electronic speckle pattern interferometry", KSME International Journal, Vol. 12, pp. 215-222, 1998.
22. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry", Journal of the Optical Society of America A, pp. 72-156, 1982.
23. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis", Cambridge University, 1998, pp. 395-408, 440-491.
24. Pramod K. Rastogi, "Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques", John Wiley & Sons Ltd., 2001, pp.59-139
25. Creath, "Phase-shifting Speckle Interferometry", Applied Optics, Vol. 24, pp. 3053, 1985.
26. G. Charette and I. W. Hunter, "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content", Appl. Opt, Vol. 35, pp. 3506-3513, 1996.