



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](#)

2014년 2월  
석사학위논문

전단간섭법과 적외선 열화상 기법을  
이용한 배관순환시스템에서의 원자력  
압력용기 결함 진단 및 정량 평가

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

강 찬 근

# 전단간섭법과 적외선 열화상 기법을 이용한 배관순환시스템에서의 원자력 압력용기 결함 진단 및 정량 평가

Fault Diagnosis and Quantitative Evaluation of Nuclear  
Pressure Vessels in a Piping Circulation System by  
Using Shearing Interferometry and Infrared  
Thermography

2014년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

강 찬 근

전단간섭법과 적외선 열화상 기법을  
이용한 배관순환시스템에서의 원자력  
압력용기 결함 진단 및 정량 평가

지도교수 김 경 석

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함.

2013년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

강 찬 근

강찬근의 석사학위 논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 양 인 영 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 재 열 ㉠

위 원 조선대학교 교수 김 경 석 ㉠

2013년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

LIST OF TABLES .....	iii
LIST OF FIGURES .....	iv
ABSTRACT .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구 배경 .....	1
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	3
제 2 장 이론적 배경 .....	5
제 1 절 전단간섭계 .....	5
1. 스펙클과 간섭계의 이론 .....	5
가. 레이저 스펙클과 간섭무늬 형성 .....	5
나. 스펙클 간섭 무늬 해석 .....	9
2. 물체의 변형정보 추출 .....	10
가. 위상이동기법(Phase shifting method) .....	10
나. 결렬침(Unwrapping) .....	11
3. 전단 간섭계(Sherarography) .....	12
가. 전단간섭계의 원리 .....	12
나. 전단간섭계를 적용한 변형측정 .....	14
제 2 절 적외선 열화상 기술 .....	17
1. 적외선 열화상의 원리 .....	17

2. 적외선 열화상 카메라 .....	18
3. 적외선 열화상 영상 획득법 .....	19
가. 직렬주사식 영상획득법 .....	19
나. 센서감응식 영상획득법 .....	20
4. 위상 잠금 기법(Lock-in IRT) .....	22
제 3 장 실험장치 및 구성 .....	25
제 1 절 전단간섭계 시스템 .....	25
제 2 절 적외선 열화상 시스템 .....	27
제 3 절 배관 순환 시스템 (Pipeline Circulation System) .....	29
제 4 절 압력용기 시험편 .....	30
제 4 장 실험방법 .....	33
제 1 절 전단간섭계 시스템 .....	33
제 2 절 적외선 열화상 시스템 .....	34
제 3 절 해석 프로그램 (LabVIEW) .....	35
제 5 장 실험결과 및 고찰 .....	38
제 6 장 결론 .....	50
참 고 문 헌 .....	51

## LIST OF TABLES

Table 3-1 Specification of Shearography system .....	30
Table 3-2 Specification of infrared camera .....	31
Table 3-3 Specification of Cooling System .....	32
Table 3-4 Type of Pressure Vessel Specimen .....	33
Table 3-5 Mechanical properties of base metal of specimen .....	33
Table 5-1 Experiment according to Temperature change and Defect size .....	36
Table 5-2 Experiment according to Temperature change and Defect size .....	37



# LIST OF FIGURES

Fig. 2-1 Light scattering on object surface .....	5
Fig. 2-2 Speckle pattern .....	5
Fig. 2-3 Formation of speckle pattern .....	7
Fig. 2-4 The fringe pattern formation depend on deformation .....	9
Fig. 2-5 Examples of the wrapped and unwrapped phase data .....	11
Fig. 2-6 Speckle pattern shearing interferometry .....	15
Fig. 2-7 Deformation function depend on the boundary condition .....	17
Fig. 2-8 Deformation function depend on the boundary condition .....	19
Fig. 2-9 Measurement result of surface deformation by Shearography	21
Fig. 2-10 IR camera with addition of scanning element for imaging ...	24
Fig. 2-11 Scanning type-Serial scanning .....	27
Fig. 2-12 Staring type .....	28
Fig. 2-13 Signal processor .....	28
Fig. 2-14 Signal processing of lock-in infrared thermography .....	28
Fig. 3-1 Configuration of Shearography system .....	29
Fig. 3-2 Shearography system .....	33
Fig. 3-3 Infrared camera .....	34
Fig. 3-4 Cooling system .....	34
Fig. 3-5 Pipeline circulation system .....	34
Fig. 3-6 Shape and dimension of pipe specimen .....	34
Fig. 4-1 Shearography experiment .....	39
Fig. 4-2 Infrared thermographic experiment .....	40
Fig. 4-3 Phase map of Specimen .....	41
Fig. 4-4 Front panel image of control .....	42
Fig. 4-5 Profile graph Image of front panel and black diagram .....	43
Fig. 4-6 Unwrap profile Image of front panel and black diagram .....	43

# ABSTRACT

## Fault diagnosis and Quantitative evaluation of Nuclear Pressure vessels in a Piping recyclien system by Using Shearing Interferometry and Infrared Thermography

Chan-Geun Kang

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

Dept. Advanced Parts & Materials Engineering.

Graduate School of Chosun University

Nondestructive inspection technology used in industrial field has been widely used the field of safety diagnostic tests such as industrial machinery, nuclear power plants, heavy and power plants, ports, car etc. The absence defect of industrial facilities through the test results quickly and accurately detect the defects, are responsible an important role in the industry by gaining the reputation of the product, such as the health, economy and reliability. There are many efficient NDT methods such as visual testing(VT), radiographic testing(RT), ultrasonic testing(UT), magnetic testing(MT), liquid penetrant testing(LT), eddy current testing(ET), acoustic emission(AE), thermography. Generally, VT, PT, MT, and ET are applied for the detection of surface defects and UT and RT are done for internal defects.

Shearography was developed by Leendertz based on the concept to derive derivative for deformation after configuring proper optical interferometry. Since the initial discovery, Hung improved the methodology to acquire strain rate information. Original shearography was developed to measure slope, and it can be considered as strain gauge, which measures deformation slope in large area simultaneously. Where defect exists at rigid object, external force will create stress concentration. Rigid body deformation does not involve

change in strain rate, and shearography method will be highly suitable to measure the defect in object, and it has less influence from disturbance. Due to these advantages, it has been widely used as non-destructive analysis technique.

IR thermography utilizes optical energy as detection method. Unique IR energy signature is applied to target, and difference in IR energy from target is analyzed. This method is applied not only stress analysis, corrosion defect in metal, fatigue limit analysis, degradation of power facility, medical application, delamination of composite material, but also semiconductor, nuclear, defense, aerospace industries, that require higher reliability and safety standard. Therefore, its adoption into different field is expanding over the time.

In this paper, shearography and IR thermography is used to measure wall-thinning defect according to internal temperature change in pipeline for circulation system of nuclear power plant. Shearography system is a commercial one from Dantec Dynamics, German (Q-800 model), and it is composed of shearography sensor, diode laser inside of sensor, controller, and PC. Amount of shear is given in Y direction as 5 mm (0.333mm/pixel), and system utilizes commercial program, ISTRA 4D, for equipment control and filtering/grain treatment. IR thermography equipment is a commercial product from French company, Cedis 480M for acquisition of thermography image. Frequency of IR thermography is synchronized with function generator, and control PC for camera sensor control

Emissivity of pipeline specimen is maintained as 0.95 by applying emission paint (KRYLON 4290 Ultra Flat Black). Internal temperature of test specimen in pipeline circulation system is set to 16°C as ambient temperature, and is changed to 100°C. Using blower, temperature is quickly cooled to measure the surface of test specimen. Distance between pipeline and measurement equipment is 0.85m and 1 m, and blower is connected to function generator as sine wave with 0.1 Hz of frequency.

Using pipeline circulation system, internal temperature of pipeline specimen

is changed to 100°C and blower is used to quench the specimen for measuring defect shape. As results, higher internal temperature of pipeline and deeper wall-thinning from the image will produce the bigger deformation of defect area. defect symptom of pipeline inside can be quantitatively estimated.

Therefore, based on this result, estimation of defect, maintenance and replacement cycle for pipeline of nuclear power plant can be determined using the proposed method in this study.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

최근 다양한 구조물을 안전하게 관리하기 위한 비파괴 검사기술은 원자력 발전설비, 석유화학 플랜트 등 거대설비 기기들에서부터 반도체 등의 소형 제품에 이르기까지 다양한 분야로 많이 사용되어지고 있다. 본 검사기술을 통한 산업설비의 부재결함을 신속하고 정확하게 검출하여 산업시설물에 대한 제품 수명성, 경제성, 건전성 등을 확보하여 산업전반에 중요한 역할을 담당할 것이다. 그에 따른 비파괴 안전진단을 통해 대형 사고의 사전예방에서부터 검사대상의 신뢰성 평가까지 얻어 기업 경쟁력 강화에 큰 기반을 둘 것이다. 비파괴 검사에 있어서 내부(Volume) 검사법에는 초음파 탐상검사, 방사선 투과검사를 들수 있으며 외부(Surface)검사로는 육안검사, 자분탐상검사, 침투탐상검사, 와류탐상검사 등을 들수 있겠다. (비파괴검사기초론)<sup>1</sup> 이러한 비파괴 검사방법들은 접촉식이거나 측정 대상물에 전처리 과정을 거치는 문제점이 있으나 레이저를 이용한 검사방법은 비접촉식이며 특정한 전처리 과정없이 검사를 수행할수 있는 장점을 가지고 있다. 대상물의 변형을 측정하는데 있어서 접촉식과 비접촉식으로 분류되며 접촉식 변형측정 방법은 스트레인게이지와 가속도계등이 있으며 비접촉식 변형측정 방법은 레이저를 이용하여 계측하는 방법이 있다. 특히 레이저 스펙클 간섭법(Laser speckle interferometry)은 레이저를 이용한 컴퓨터 영상처리기반으로 광학간섭계의 변화를 줌으로써 비접촉 고분해능의 측정정밀도를 갖는 전자처리 스펙클 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry)과 스펙클 전단간섭법(Speckle Shearography)등으로 발전을 하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴검사 등의 다양한 분야로 적용되고 있다.<sup>2,3,4</sup> 1970년대에 전자처리 스펙클 간섭법(ESPI)이 개발되었으며, 시간적·공간적인 가간섭성을 갖는 레이저를 이용하여 정밀한 수준으로 대상물의 전 영역(Whole Field)에 걸쳐 실시간측정 및 해석 등을 할 수 있다.<sup>5,6</sup> 그러나 ESPI는 대상물에 발생하는 변형을 정밀하게 측정할 수 있으나, 외부환경에 의한 진동외란은 매우 민감하여 진동을 감쇠하는 방진테이블이 없는 산업현장에서는 그 적용성이 매우 낮다. 또 다른 스펙클을 이용하는 방법인 전단간섭법(Shearography)는 광학간섭계를 적절하게 구성하여 변형의 도함수 성분을 구할 수 있다는 개념으로 Leendertz

에 의해 개발된 후에<sup>7</sup> Y.Y. Hung이 이를 더욱 발전시켰으며 화상처리기술과 디지털기반의 발전으로 변형률 정보를 직접 획득할 수 있었다.<sup>8</sup> 전단간섭계는 전자처리스펙클 간섭법과 유사한 간섭신호처리 알고리즘이 있으면서도, 간섭계 구성의 차이로 면외 변위의 1차 미분값을 직접 측정할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점은 외부환경의 진동외란에 둔감하면서 면외 변위의 변화를 측정함으로써 변형률 해석과 진동해석을 할 수 있으며, 결함의 정량화, 기계구조물 해석 등의 비파괴 검사분야에서 매우 유용한 방법으로 활용되고 있다.<sup>9,10</sup> 또 다른 적외선 열화상 기법은 응력해석, 금속재료 부식결함 검사, 피로한계치 분석, 전력설비 열화진단, 의료진단, 복합재 박리 검사뿐 만 아니라 고도의 신뢰성과 안전성이 요구되는 반도체, 원자력산업, 방위산업, 항공우주 산업 등의 발달과 더불어 그 활용성과 중요성이 증대되어 응용범위가 점차 확대되고 있는 추세다. 금속결함 검출에 적용되는 경우, 열확산계수가 큰 금속 재료일수록 검출소자의 샘플링 한계로 인하여 결함을 찾는 데 어려움이 있다. 따라서 이러한 문제 해결방안으로 위상 잠금 적외선 열화상 기법(Lock-in Infrared thermography)을 이용하여 열확산계수가 큰 금속의 내부결함을 검출할 수 있다.<sup>11,12,13</sup> 이러한 위상 잠금 열화상 기법은 낮은 샘플링에서도 표면의 미세한 변화를 감지할 수 있다. 적외선 열화상 기법은 국외에서는 1960년도부터 상용화가 되어 각 산업분야에서 널리 사용되어 왔으며, 특히 콘크리트 결함 계측, 미국 전력연구센터(EPRI)의 변압기의 전기 누출의 상태감시분야 등 여러 분야에서 활용되어지고 있다.

## 제 2 절 연구목표 및 내용

원자력 설비의 결함 검사는 매우 중요한 기술이나 검사기법에 관한 연구가 많이 부족하다. 고온과, 방사선의 위험, 매우 복잡한 형상등 원인으로 그간 사용되어온 검사기법들은 실제적인 해결방법을 제시하지 못하여 왔다. 또 국내 광계측 분야는 단순 구조물의 계측이라는 실험실 차원의 연구에 국한되어 해외연구에 비하여 그 활용성이 떨어졌다. 이를 탈피하기 위하여 새로운 비접촉 레이저 결함 검사를 통한 결함형상 측정에 관한 연구가 진행 되었지만, 정량적 크기 측정과 두께 측정 부분을 만족하지 못하였다. 또 열화상 분야에서 표면 냉각을 이용한 결함 검사기법에 관한 연구가 부족하다. 본 논문에서 연구하고자 하는 광계측 기술은 레이저 계측 기법과 적외선 열화상 기술을 융합하였으며, 기존연구에 적용분야의 확대와 정량성 확보라는 한 단계 나아간 연구를 수행하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 광계측을 이용한 원자력 배관 결함의 비접촉 비파괴 정량 평가를 통한 원자력 기기의 안정성 확보와 신뢰성 향상에 있다. 또한 광계측 비파괴 검사기술의 원자력 배관계열 현장 적용을 위한 기초기술 확보 및 광계측 검사기술의 선진화 및 표준화에 연구목표를 두고 있다.

이를 검증하기 위하여 원전력 압력용기에 임의의 결함을 가공하여 압력용기 내부의 온도변화와 내압의 변화에 따른 내부결함 계측 및 면외변형의 정량계측에 대하여 실험과 해석을 수행하였다. 본 논문에서 제안된 광계측기법을 이용한 원자력 압력용기의 정밀한 정량계측 기술은 원자력 발전 설비 검사기술의 국내외 경쟁력 확보에 공헌할 것이다. 또한 배관에 대한 열변형, 열응답, 결함 형태 측정 및 내압을 받는 구조물의 기계적 거동해석, 보일러 튜브 부식검사 및 감육검사등 응용분야로 점차 확대 되고 있어 다양한 산업 발전에 기여 할 것이다

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 전단간섭계(Shearography)

#### 1. 스페클과 간섭계의 이론

##### 가. 레이저 스페클과 간섭무늬 형성

레이저 빛과 같은 가간섭성이 좋은 두 개의 광원이 Fig. 2-1과 같이 표면이 레이저 파장보다 큰 거칠기를 갖는 물체에 조사될 경우 난반사된 광들이 겹쳐서 간섭을 일으키게 되고, 이로 인해 보강간섭과 소멸간섭을 일으켜 스페클이 형성되고 Fig. 2-2와 같이 희고 검은 알갱이들이 모여 있는 마치 반점과 같은 형태로 표면에 나타난다.<sup>14,15</sup> 이와 같이 밝고 어두운 반점형태의 무늬가 무작위로 변화되는 밝기분포로 나타나는 현상을 스페클효과(speckle effect)라 하며, 물체 표면에서 반사된 후에도 레일리 산란을 만족하며 간섭성질을 유지할 수가 있다.<sup>16</sup> 이 스페클패턴은 또 다른 스페클 패턴과 간섭을 일으켜 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 측정 대상체에 변화가 생기면 레이저의 광경로에 변화가 생기므로써 각 상태에 따른 스페클이 달라지는데 이는 광검출기에 광강도 분포로 기록되어져 각각의 상태를 비교함으로써 물체표면의 거칠기, 변형 등의 정보를 얻을 수 있다.

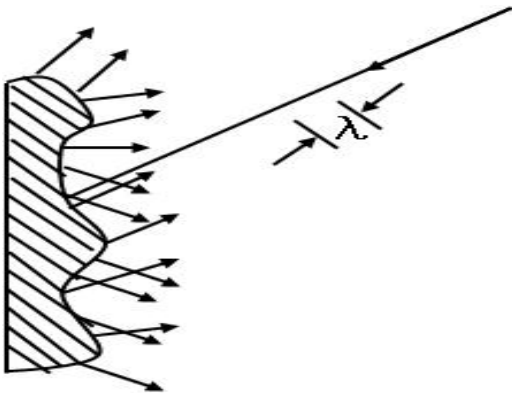


Fig. 2-1 Light scattering on object surface

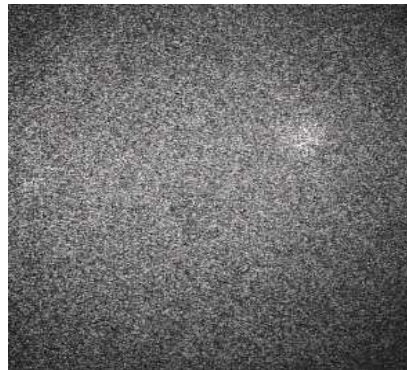


Fig. 2-2 Speckle pattern



스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나누어진다. Fig. 2-3은 objective speckle과 subjective speckle의 형성을 보여 주고 있다. 즉, 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 사용 여부에 따라서 구별되며, 그 크기 또한 다르게 된다. 스페클의 크기는 결상면(image plane) 위에서 형성되는 스페클의 최대 밝기 점과 최소 밝기 점(간섭의 보강과 소멸) 사이의 거리를 스페클 크기라 정의하고 있다. 즉, 서로 상관하지 않는 광각도 사이의 거리를 스페클 크기라고 추정할 수 있다. objective speckle 크기의 정의는 물체 표면의  $D$ 의 면적에 레이저광이 조사되고 면적  $D$  위의 모든 점은 AB plane(viewing plane)에 형성되는 스페클에 영향을 주게 된다는 이론을 바탕으로 하고 있으며, 확률분포이론에 기초하여 제안한 식(2-1)로 objective speckle의 크기를 정의하고 있다.<sup>17</sup>

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

여기서  $\lambda$ : 조사되는 레이저의 파장,  $L$ : 물체와 결상면 사이의 거리,  $D$ : 물체에 조사된 면적 이다.

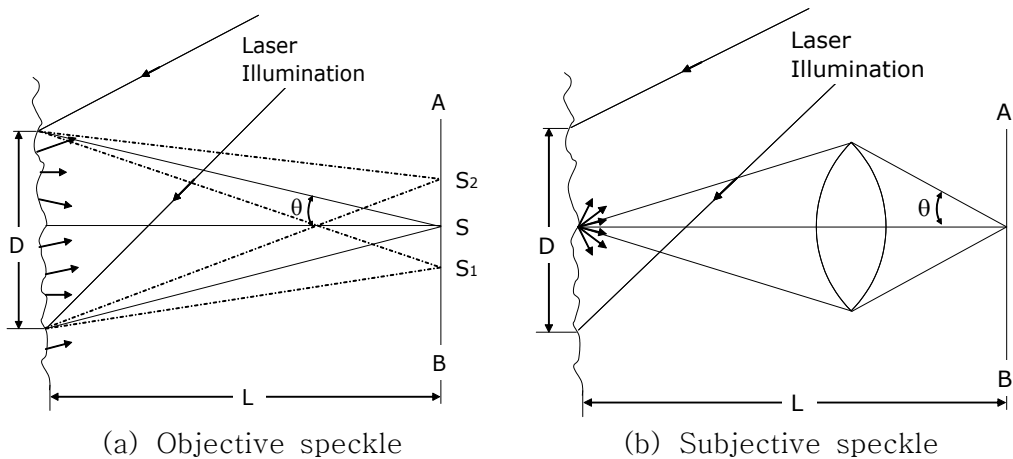


Fig. 2-3 Formation of speckle pattern

스페클 상관 간섭법 (speckle correlation interferometry)에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하고 있으며, 공간분해능은 subjective speckle의 크기에 의존하게 된다. subjective speckle은 결상렌즈가 사용되어 형성되는 스페클로 정의를 하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게 정의하고 있다. 즉, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로써 물체의 한점과 결상면의 한 점은 1:1 대응이라 할 수 있다. 따라서 수차가 없는 렌즈라면 결상면에 형성되는 스페클의 강도는 물체 표면 위의 한 점만이 영향을 주게 된다. 그러나 실제 결상렌즈의 회절한계는 한 점으로 결상을 하지 못함으로써, 결상면에 대응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기 만큼이 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다. 따라서 subjective speckle의 크기는 결상렌즈에 의해 생기는 회절의 primary maximum와 first minimum사이의 거리(Bessel function의 1차 최소점 사이의 거리)라고 할 수 있으며, 결상면에서 형성되는 subjective speckle의 크기는 식(2-2)와 같이 정의된다.

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

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

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

으로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며 29, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다. 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.<sup>18</sup>

화상처리장치인 카메라 신호는 입력된 빛의 세기에 비례하기 때문에 변형에 대한 간섭무늬의 형성은 Fig. 2-4에서 보는바와 같이 변형 전과 변형 후의 각각의 이미지를 저장하고, 저장된 이미지를 합산처리하거나 감산처리하여 변형에 의한 간섭 줄무늬를 나타낼 수 있다.<sup>19</sup>

$$\begin{aligned}
 I_{\text{before}} &= I_{\text{obj}} + I_{\text{ref}} + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \\
 I_{\text{after}} &= I_{\text{obj}} + I_{\text{ref}} + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos (\phi + \Delta \phi) \\
 I_{\text{add}} &= I_{\text{before}} + I_{\text{after}} \\
 &= 2I_0 (1 + \gamma \cos \phi) + 2I_0 [(1 + \gamma \cos (\phi + \Delta \phi))] \\
 &= 4I_0 + 2I_0 \gamma [\cos \phi - \cos (\phi + \Delta \phi)] \\
 &= 4I_0 + 4I_0 \gamma \left[ \cos \left( \phi + \frac{\Delta \phi}{2} \right) \cos \frac{\Delta \phi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{add}} &= |I_{\text{before}} - I_{\text{after}}| \\
 &= 4I_0 \gamma \left[ \sin \left( \phi + \frac{\Delta \phi}{2} \right) \sin \frac{\Delta \phi}{2} \right]
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

여기서  $I_{\text{before}}$  : 변형전의 광강도,  $I_{\text{after}}$  : 변형후의 광강도,  $\Delta \phi$  : 변형에 따른 위상변화이다. 홀로그램 필름의 경우는 합산이며 식(2-4)과 같고, ESPI의 경우는 감산처리에 해당하며 식(2-5)와 같이 나타나게 된다.

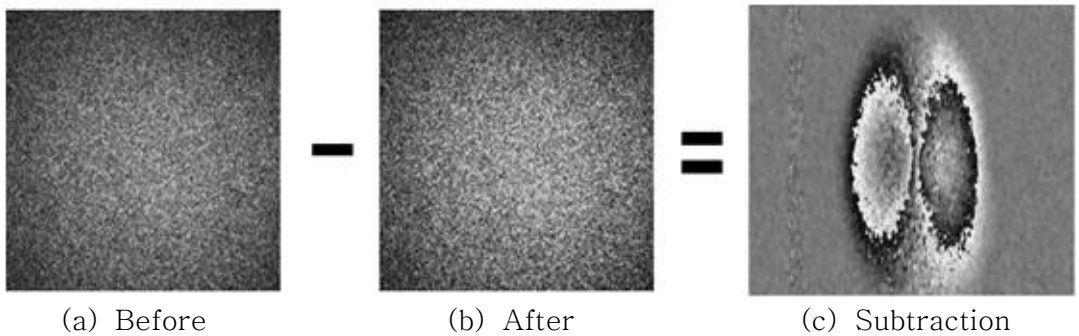


Fig. 2-4 The fringe pattern formation depend on deformation

## 나. 스페클 간섭 무늬 해석

스페클 간섭은 두 개 혹은 그 이상의 레이저 빛들이 가간섭성을 띠는 어느 점을 마주칠 때 빛의 강도가 주기별로 증가 또는 감소하는 현상을 말한다. 이러한 점들의 총 진폭은 각각 변위의 합에 의해서 주어지며 중첩의 원리가 적용되는 시스템은 선형 시스템이며, 빛의 강도가 매우 높은 광원을 사용할 때 중첩의 원리가 이용될 수 없고, 비선형 광학이 적용된다.<sup>20</sup>

$$U(r,t) = u_0 \exp i(2\pi ft + \phi) \quad (2-6)$$

$U(r,t)$ 는 빛의 복소 진폭이고,  $u_0$ 는 진폭,  $f$ 는 주파수,  $\phi$ 는 위상이며, 빛의 강도  $I$ 는  $u_0^2$ 에 비례하므로 식(2-7)과 같이 표현할 수 있다. 복소진폭  $U_1, U_2$ 에 의해 표현되는 빛을 고려하면 식(2-8)와 식(2-9)는 같으며, 전체 복소진폭은 식(2-12)과 같다.

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

$$U_1 = u_1 \exp i(2\pi ft + \phi_1) \quad (2-8)$$

$$U_2 = u_2 \exp i(2\pi ft + \phi_2) \quad (2-9)$$

$$U = u_1 \exp i(2\pi ft + \phi_1) + u_2 \exp i(2\pi ft + \phi_2) \quad (2-10)$$

식(2-10)을 정리하고 빛의 세기로 대입하면 식(2-11)와 식(2-12)은 같다.

$$U = (u_1 \exp i \phi_1 + u_2 \exp i \phi_2) \exp i 2\pi ft \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned} I &= UU^* \\ &= u_1^2 + u_2^2 \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$+ u_1 u_2 [\exp i (\phi_1 - \phi_2) + \exp -i (\phi_1 - \phi_2)]$$

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

$$\begin{aligned} (e^{i\phi} + e^{-i\phi}) &= 2\cos\phi \\ UU^* &= u_1^2 + u_2^2 + 2u_1 u_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned} \quad (2-13)$$

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

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

## 2. 물체의 변형정보 추출

### 가. 위상이동기법(Phase shifting method)

PZT를 이용한 위상이동기법은 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(2-15)과 같이 얻게 된다.<sup>21,22</sup>

$$\begin{aligned} I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi \\ I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi/2) \\ I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi) \\ I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + 3\pi/2) \end{aligned} \quad (2-15)$$

4개의 방정식을 식(2-16)와 같이 조합하여 CCD pixel의 각 점에서 위상을 구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(phase map)를 형성하게 된다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (2-16)$$

변형해석을 위한 실험에서는 변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상( $\phi_{before}$ )과 변형후의 위상( $\phi_{after}$ )을 각각 구하고 그 차를 구함으로써 실제 물체변형을 식(2-17)과 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_{before} - \phi_{after} \quad (2-17)$$

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

## 나. 결펼침(Unwrapping)

위상 이동 기법에 의해 얻어진 변형량을 정량적으로 표현하는 위상지도(phasemap)는 위상을 추정하기 위한  $\arctangent$ 함수의  $\text{modulo}-2\pi$  특성으로 인해  $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 구성된 톱니 바퀴형상으로 모호성을 가지게 된다. 이렇게  $\arctangent$  함수가 갖는 불연속성을 해결하기 위해 불연속의 변위값을 연속값으로 변환하여 주는 과정을 위상 결펼침(phase unwrapping)이라 하고 이에 대한 예를 Fig. 2-5에 나타내었다. 위상 결펼침에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있으며 적용하고자 하는 대상 및 조건에 따라 적절한 위상 결펼침 알고리즘을 적용하여야 한다.<sup>23,24</sup>

위상 결펼침을 하기 위해서는 먼저  $\arctangent$  함수가  $-\pi \sim \pi$ 의 주기로 불연속이 되므로 그 주기를  $0 \sim 2\pi$ 로 연장하고, 이를 연속 위상으로 변환하여야 한다. 식(2-18)을 이용하여 결펼침 된 위상을 구하게 된다.

$$\phi_{unwrapping} = \phi_{wrapping} + 2\pi N \quad (2-18)$$

여기서,  $\phi_{unwrapping}$  : unwrapped phase,  $\phi_{wrapping}$  : wrapped phase,  $N$  : fringe order 이다.

결펼침을 위한 차수( $N$ )의 결정은 위상전후의 값을 비교하여 큰 단차를 찾는 방법을 취한다. 각 pixel 전후의 위상값을 비교하여 임의로 정한 문턱값과 비교하여 조건을 만족하면  $N$ 을 증가 또는 감소시키는 방식으로 프린지 차수(fringe order)를 구하게 된다. 최종의 변위 값은 간섭계의 기하학적 구성에 따라 감도 벡터(sensitive vector)를 고려하여 구하게 된다. 본 연구에서는 위상이동 및 결펼침 알고리즘을 상용 프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH., Germany)을 이용하였다.

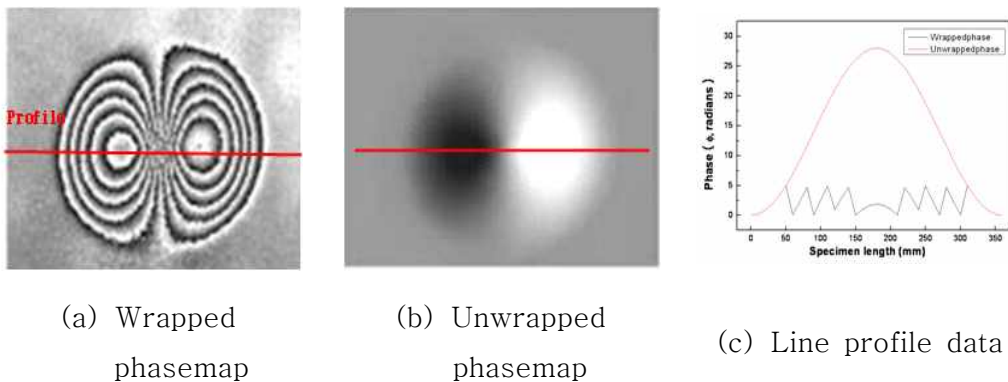


Fig. 2-5 Examples of the wrapped and unwrapped phase data

### 3. 전단간섭계 (Shearography)

#### 가. 전단간섭계의 원리

Shearography에서 사용되는 간섭계는 마이켈슨(Michelson)간섭계의 변형된 형태가 많이 사용된다. Fig. 2-6은 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이때 스펙클의 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두개의 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. Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 로 표현한다. 전단방향과 전단량등에 영향을 받아 간섭 줄무늬 형태가 결정된다.

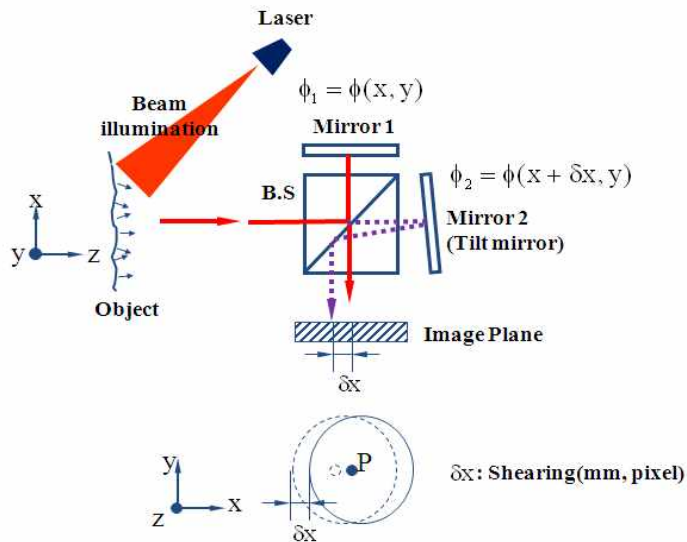


Fig. 2-6 Speckle pattern shearing interferometry

이와 같이 전단간섭계는 대상물에 레이저 빛이 조사될 때 임의의  $P_1$ 과  $P_2$ 에  $\phi_1 = \phi(x, y)$ 와  $\phi_2 = \phi(x + \delta x, y)$ 와 관계되는 위상차를 가지게 되기 때문에, 중첩의 원리에 의해 서로 간섭하게 된다. 이때 위상차는 식(2-19)과 같다.

$$\phi = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (2-19)$$

변형에 의하여 발생한 위상차의 변화  $\Delta\phi$ 는 식(2-21)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하다. 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 식(2-20)을 이용하게 된다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며, 모든 광계측의 기본식이 된다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot \vec{d} \quad (2-20)$$

식(2-20)와 차이점은 식(2-22)에 표현한 바와 같이  $\vec{d}$ 와  $\vec{d}'$ 은 임의의 P에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi = (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_2) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (2-21)$$

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

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 식(2-22)을 식(2-23)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-23)$$

$\Delta d$ 는 테일러급수에 의해 식(2-24)와 같이 표현할 수 있으며,  $\Delta x$ 는 상면에서 전단량  $\delta x$ 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 식(2-24)에서 2차 이상의 고차항을 무시하면, 식(2-25)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta d = d(x) - d(x_0) \quad (2-24)$$

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

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial d}{\partial x} \right) \delta x \quad (2-25)$$



## 나. 전단간섭계를 적용한 변형측정

전단간섭법은 변형기울기를 측정하며, 거의 모든 연구자들이 사용하고 있는 전단간섭법의 이론식을 표현할 때는 전단량이 ‘충분히 작다’는 조건을 적용하여 미분으로 표현하고 있다.<sup>25,26</sup>

$$f'(x_i) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-26)$$

전단간섭법을 적용하는 식(2-26)과 도함수의 정의로 설명할 때 구간이 매우 작아야 하나, 현재까지 개발된 국내외 상용장비 및 개발된 시스템은 대상물의 결함 검출의 민감도를 높이기 위해 전단량을 측정조건에 맞게 임의로 부여하며, 통상 전단량이 ‘충분히 작다’는 조건을 만족하지 못한다. 이러한 조건을 보완하기 위해서 앞에서 언급한 전단간섭법의 이론적 제한사항을 수치미분을 이용하여 표현하고, 전단간섭법에 의한 측정결과를 수치적분을 이용하여 대상물에 발생하는 변형을 정량적으로 계측하고자 한다. 실제 전단간섭법을 이용한 측정결과는 식(2-27)과 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형  $\Delta d$ 는 식(2-28)과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta d \quad (2-27)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-28)$$

식(2-28)에서 고차 항을 무시하면, 식(2-29)와 같으며, 이를 식(2-27)에 대입하면 식(2-30)과 같다.

$$\Delta d = d(x) - d(x_0) \approx \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\Delta x}{1!} \quad (2-29)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \{d(x) - d(x_0)\} \approx \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{\partial d}{\partial x} \right) \Delta x \quad (2-30)$$

이는 대상물에 발생하는 변형의 한 점과 전단량 만큼 떨어진 두 점의 연속적인 차이와 같으며, 이 결과는 직접적으로 적분을 적용할 수가 없으나, 전단간섭법은 화상처리이므로 변형  $f$ , 대응좌소  $x_i$ , 전단량 좌소  $h$ 로 바꾸어 쓰면, 식(2-31)과 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시  $f'$ 으로 정리하면 식(2-32)과 같다.

$$f'(x_i)h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (2-31)$$

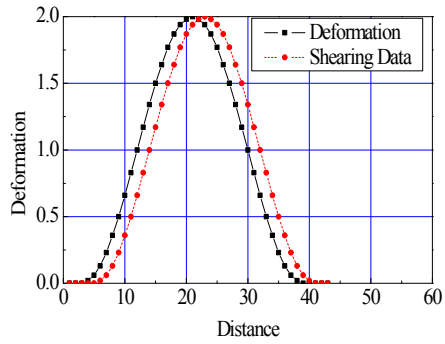
$$f'(x_i) \approx \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-32)$$

테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다. 측정된 결과는 식(2-33)과 같이 수치적분이 가능하다.

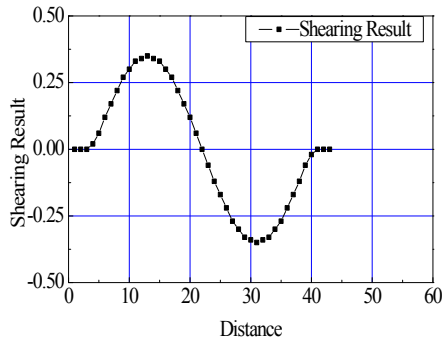
$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f'h \quad (2-33)$$

전단간섭계의 전단거울이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2-7(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행 이동 되어 나타난다. Fig. 2-7(b)는 Fig. 2-7(a)에 표현된 두 값을 감산한 결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다.

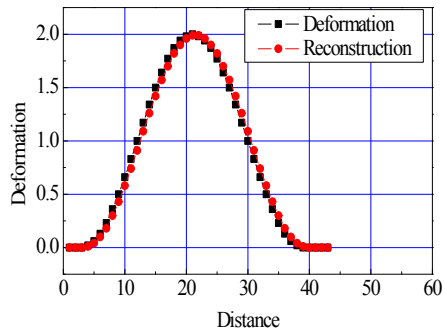
본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2-7(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2-7(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.<sup>27</sup>



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2-7 Measurement result of surface deformation by Shearography

## 제 2 절 적외선 열화상 기술

적외선 열화상 기술은 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 특히 건축물 누수검사, 복합재료 내부 결함 검사, 자동차 크랙 검사, 반도체 열적특성 분석 등에 활용되고 있으며, 내부의 존재하는 결함이나 박리현상이 발생하는 부위의 검출 연구를 수행 중이다. 특히 최근에는 항공기 등에 복합 재료들이 많이 사용되면서 적외선 열화상을 이용한 초고속 카메라를 개발하여 항공기 이륙 및 착륙 시의 영상을 촬영하여 복합재료의 비파괴 결함 검사에도 적외선 열화상 기술을 적용하고 있다. 또한, 콘크리트 구조물 내의 결함 검출 및 안전성 평가에 활용되고 있으며, 적외선 열화상 기법 및 열적 가열을 이용하여 공업 및 산업단지 건축물의 결함 검출에 활용하고 있다. 화력 발전소나 공업 단지 굴뚝의 온도 범위를 측정함으로써 굴뚝의 결함을 검출하기 위한 수단으로 적외선 열화상 기법이 적용되고 있다. 또한, 적외선 열화상 기법의 시스템을 송배전 시설에 적용한 바 있으며, 군사용 감시 카메라 및 야시경의 개발과 원전 터빈의 진공상태의 이상 유무를 검사하기 위해 적외선 열화상 기법을 활용한 바 있다. 다양한 비파괴검사를 자체적으로 적외선 열화상 기법 시스템을 구축하여 연구를 수행하였다.

### 1. 적외선 열화상의 원리

모든 물체는 절대온도 제로 켈빈(0 Kelvin) 이상에서 적외선 복사 에너지를 방출한다. 복사란 전도와 대류가 고체 액체 기체 등의 매질을 이용하여 열이동을 하는 것과는 달리 매질을 통과하지 않고 복사선에 의하여 열을 이동하는 것을 말한다. 적외선 열화상 측정 원리는 Fig. 2-10에서 보이는 것처럼 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장의 적색으로, 낮은 곳은 단파장의 청색으로 나타낸 열화상이다. 따라서 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정할수 있다.<sup>28</sup>

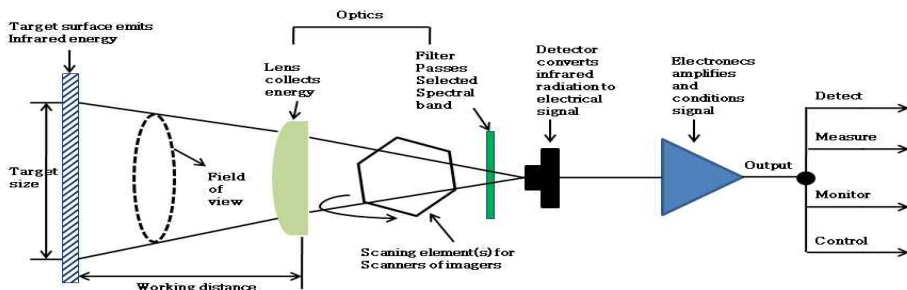


Fig. 2-8 IR camera with addition of scanning element for imaging

## 2. 적외선 열화상 카메라

적외선은 사람의 눈에는 보이지 않지만 적외선 카메라를 사용하여 눈으로 볼 수 있는 실화상으로 변환할 수 있으므로 대상물체 또는 임의의 범위에 존재하는 열의 차이 (온도)를 조사할 수 있다. 전자기파의 스펙트럼에서 적외선이 차지하는 영역은 대략 900 ~ 14,000 나노미터(0.9 - 14  $\mu\text{m}$ )부분이다. 온도가 절대온도 이상인 모든물체는 적외선을 방사하며 그 방사하는 양은 온도에 따라서 증가한다. 열화상은 대상 물체나 장면 내에 있는 온도값의 차이를 보여주는 적외선 카메라를 사용하여 이미지로 작성하는 방법이라 할수 있다. 그러므로 열화상은 대상 물체의 온도를 비접촉 방식으로 측정할 수 있는 것이다. 적외선 카메라의 기계적인 구조는 디지털 비디오 카메라와 비슷하다. 주요 구성부분은 입사되는 적외선이 디텍터 즉, 센서 위에 초점이 맺히도록 하는 렌즈 및 신호와 이미지를 처리하고 디스플레이 해주는 전자장치와 소프트웨어 등이다. 일반 비디오 및 디지털 스틸 카메라에서 사용되고 있는 CCD (charge coupled device) 디텍터와 달리 적외선 카메라의 디텍터는 적외선 파장대에 민감한 다양한 물질로 만들어

지는 마이크로미터 크기의 픽셀로 구성되는 초점면 배열(focal plane array; FPA)이다. FPA의 분해능은 대략 160 × 120 픽셀부터 1024 × 1024 픽셀까지의 범위이다. 카메라 기종에 따라서 FPA 상의 원하는 부분에 초점을 두고 그 부분을 집중적으로 온도를 계산할 수 있도록 해주는 소프트웨어를 내장하고 있는 모델도 있다. 또한 온도 분석을 지원하는 특수한 소프트웨어가 설치된 컴퓨터나 다른 데이터 시스템을 사용하기도 한다. 이런 방법들은 모두  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내의 정밀도로 온도를 분석할 수 있다. FPA 디텍터 기술은 열 디텍터 (thermal detector)와 양자 디텍터 (quantum detector)의 두 종류로 분류할 수 있다. 대표적인 열 디텍터로는 금속 또는 반도체를 소재로 제조되는 비냉각식 마이크로볼로미터 (uncooled microbolometer)가 있다. 이 방식의 디텍터는 대개 양자 디텍터에 비해 가격이 저렴하며 더 넓은 범위의 적외선 스펙트럼을 검출할 수 있다. 마이크로볼로미터는 입사되는 적외선에 반응하며 양자 디텍터에 비해 그 반응속도와 민감도가 훨씬 더 낮다. 양자 디텍터는 InSb, InGaAs, PtSi, HgCdTe (MCT) 등의 재료로 제조되며, GaAs/AlGaAs 층을 형성하여 QWIP (Quantum Well Infrared Photon) 디텍터가 만들어 진다. 양자 디텍터의 동작 원리는 결정 내에 있는 전자의 상태가 입사 광자에 의하여 달라지는 현상에 기반을 두고 있다.<sup>29</sup>

### 3. 적외선 열화상 영상 획득법

어떤 물체의 형태를 인식하고자 하려면 사람의 눈을 생각하면 쉽게 이해가 된다. 눈으로 넓은 영역을 보려면 얼굴을 돌리거나 눈알을 굴리면서 전체를 인식한다. 여기에서 눈은 적외선 센서에 해당하며, 눈알을 굴리는 것은 적외선 광학계에 해당한다. 그리고 얼굴은 적외선 영상 시스템 전체를 의미한다. 이와 같은 원리를 응용하여 두 가지 방법의 광학계를 이용하여 영상을 획득한다. Fig. 2-11 같은 수평, 수직 거울을 돌리면서 전체를 인식하는 주사 방법(scanning type-Serial scanning)과 Fig. 2-12과 같이 수평, 수직 거울 없이 인식하는 주시 방법(staring type)이 있다.

#### 가. 직렬주사식 영상획득법

주사 방법(scanning type-Serial scanning)은 모니터에 나오는 물체를 실시간으로 보고자 하면 수평, 수직 거울을 고속으로 움직이도록 해야 한다. 왜냐하면 모니터의 주사선을 250선으로 보고, 영상을 무리 없이 보고자 하면 초당 24 frame은 되어야 하므로, 기본적으로 세로축으로는  $24 \times 250$ 에 의해 초당 6000번을 움직여야 한다. 그리고 가로축도 같은 비율로 움직여야 하므로 세로축은  $6000 \times 250$ 에 의해 약 1 MHz 이상의 주기로 움직여야 한다는 결론에 도달한다. 거울이 이렇게 빨리 움직이려면 구동 부분이 특수 설계로 이루어져야 한다. 보통의 평면거울로는 이 속도를 도저히 낼 수 없기 때문에 8각형 또는 그 이상의 각을 이룬 거울을 사용한다. 이 방법의 장점은 주사하면서 신호를 증폭하여 신호 대 잡음비를 높일 수 있는 것과 센서의 소자 개수가 작아도 된다는 것이다. 그러나 광학계의 복잡성 때문에 시스템 자체의 크기와 무게 때문에 이 방법보다는 주시 방법으로 기술이 옮겨가고 있다.<sup>28</sup>

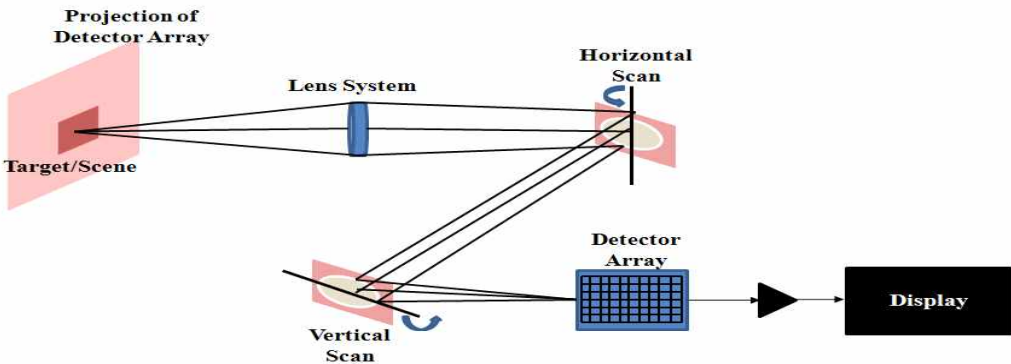


Fig. 2-9 Scanning type-Serial scanning

## 나. 센서감응식 영상획득법

Fig. 2-12와 같은 주시(staring)방법은 주사 방법과는 달리 거울이 없는데 센서의 소자 하나하나가 모니터의 한 Pixel에 해당하도록 설계되어 있다. 그러므로 센서의 소자 개수가 많으면 많을수록 화면에 나타나는 화질은 그만큼 향상되며, 복잡한 광학계가 없기 때문에 크기 및 무게에서 많은 이점을 갖고 있다. 주시 방법에 사용되는 적외선 센서는  $256 \times 256$  이상의 이차원 배열을 갖는 소자가 필요하며, 현재 센서의 재료에 따라 다르지만, PtSi를 사용한 경우  $1024 \times 1024$  배열을 갖는 센서가 개발되어 실용화되었으며, 가장 성능이 우수한 HgCdTe 반도체형 센서인 경우  $512 \times 512$  배열까지 개발되어 있다. 주사 및 주시 방법으로 광학계에서 센서에 적외선을 집속시켜 주면 센서는 적외선과 반응하여 전압 또는 전류를 발생시킨다. 그런데 센서의 소자 개수가 많아지게 되면 소자 각각의 특성들이 일정하지 않기 때문에 신호처리에 서는 각 소자의 신호 크기를 보상해 주거나 반응을 하지 않는 소자의 신호도 보상해 주어 모니터에 깨끗한 영상이 구현되도록 해야 한다.<sup>28</sup>

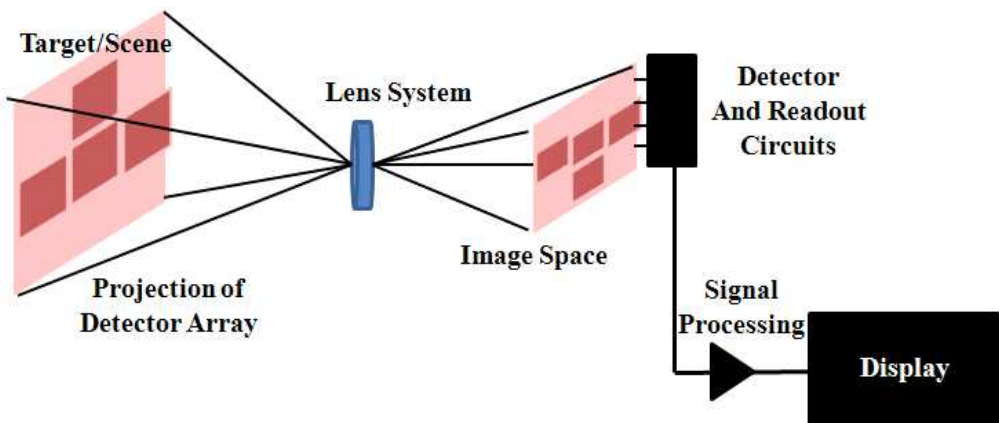


Fig. 2-10 Staring type

이러한 역할의 내용을 Fig. 2-13에 나타내었다. 첫 번째 그림은 각 소자의 특성들이 서로 다른 특성을 갖고 있음을 나타내고 있다, 주위 온도에 변화에 대해 반응하는 정도와 기준점인 offset이 모두 다르다. 이것을 두 번째 그림에서 기준점인 offset을 모두 맞추고, 세 번째 그림에서처럼 소자의 특성을 모두 균일하게 맞추어 주면, 온도변화에 대한 반응 정도가 모두 동일하게 나타나게 되어 깨끗한 상을 얻을 수 있는 것이다. 적외선 열화상 기법에서의 결함은 적외선 이미지에서 결함이 차지하고 있는 화소수(Pixel)로 크기를 대략적으로 추정할 수 있다. 일반적으로 결함의 크기측정을 위해서는 먼저 지시자를 이용하여 적외선 열화상 카메라의 화각에 따라 단위 화소에 대응하는 실제 길이를 산정하는 방법을 사용한다. 즉, 결함의 크기(mm) D는 식(2-34)과 같이 표현된다.

$$D = M \times \left(\frac{L}{P}\right) \quad (2-34)$$

여기에서, L은 지시자(Calibrator)의 길이(mm), P는 지시자의 길이에 대응하는 화소수(Pixel), M은 결함이 차지하는 화소수(Pixel)이다.

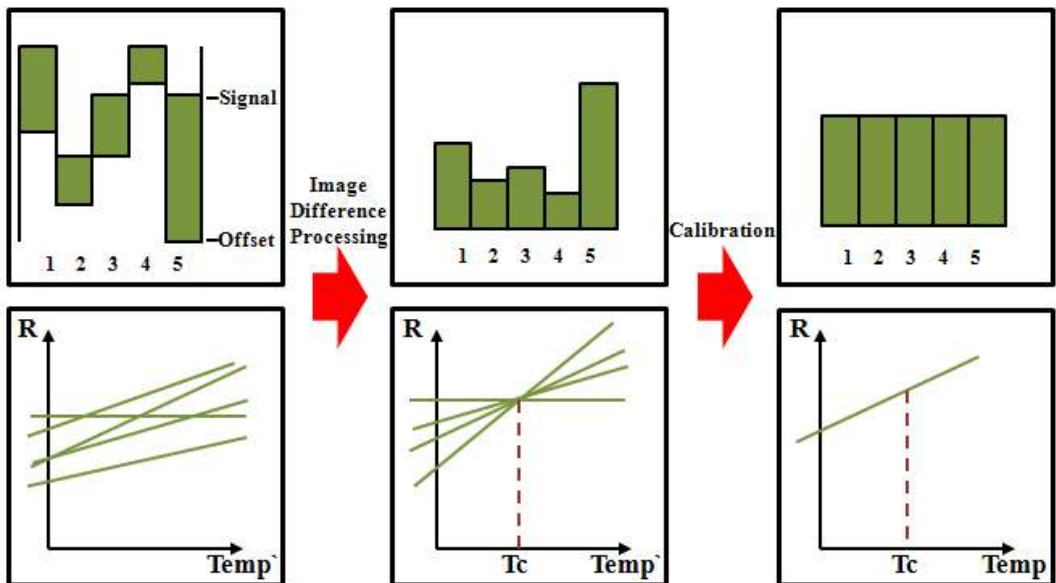


Fig. 2-11 Signal processor



#### 4. 위상 잠금 기법(Lock-in IRT)

위상 잠금(Lock-in) 기법은 기계구조물에 있어서 열에 대한 변화로 인한 온도 변화가 미세하여 미세한 온도변화를 측정하기 위한 분해능을 높이기 위한 방법이다. 위상잠금 적외선 열화상 기법은 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가능한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 외선 열영상에 있어서 가장 보편적인 열자극 방법 중 하나로 짧은 열자극 펄스에 의한 시험의 신속성 때문이며 신속한 열자극은 재료의 손상을 방지한다. 또한, 안정된 상태의 에너지를 입사할 때 각각의 프레임을 축적시켜 S/N 비가 향상되는 방법으로 하나의 주파수 신호에 에너지가 집중되며, 실시간으로 적외선 영상 측정이 가능하다. 균일한 가열과 온도로부터 독립된 상태로 위상 측정이 가능하며 초음파, 마이크로웨이브, 광학적 가열에 모두 사용할 수 있는 기술로 증폭을 통하여 깊이 침투깊이를 얻을 수 있어 모든 검사에 사용가능한 제어기법이다.<sup>28</sup>

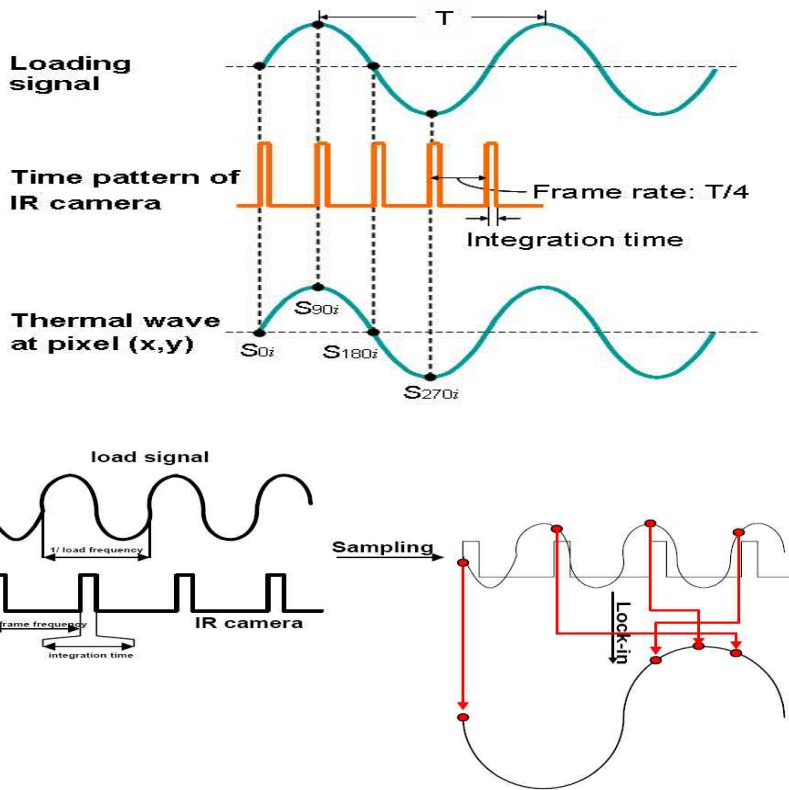


Fig. 2-12 Signal processing of lock-in infrared thermography

이 기술들은 식(2-35)와 같은 고체 내의 1차원 열전도 방정식에서 자극원을 Halogen Lamp로 대상체에 조화함수( $T = T_0 \cos wt$ )로 가진 및 가열을 하고 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함 검출을 하게 된다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa_m}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-35)$$

여기에서  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $\kappa_m$ 는 열전도 계수,  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 비열이다. 조화함수는 가열된 식(2-37)의 해는 식(2-39)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T(x,t) &= T_0 e^{-x/\mu} e^{i(wt-x/\mu)} \\ &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(wt-x/\mu) + i \sin(wt-x/\mu) \end{aligned} \quad (2-36)$$

여기에서 침투깊이  $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$ , 열확산계수  $\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p}$ 이다. 식(2-36)의 실수부만을 고려하면 식(2-37)과 같이 쓸 수 있다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(wt-x/\mu) \quad (2-37)$$

식(2-37)은  $T_0 \cos wt$ 로 고체를 가열할 때, 깊이  $x$ 에 따라 위상지연이  $x/\mu$ 로 일어난다는 것을 알 수 있다. 입사되는 자극원의 주파수가 증가함에 따라 침투깊이가 작아지며, 표면에서 근접한 정보만을 얻게 된다. 또한 낮은 주파수에서는 침투깊이가 증가하여 깊은 곳의 정보를 검출할 수 있게 된다.

위상 잠금 기법에서는 식(2-38)에서는 검사 결과로서 위상을 추출함으로써 결함 검출능을 향상시킬 수 있다. 시간평균으로 구성된 열적 분해능을 개선하고 Least mean square 방법과 단일 조건 푸리에 급수와 유사한 방법으로 Load frequency와 동기화 되어지지 않게 Frame rate를 선택하여 신호 대 잡음비를 개선한다.

$$signals(x,y) = c \sum_{i=0}^N F_i \cdot T(x,y) \quad (2-38)$$

식 (2-39)에서  $C =$  계수,  $F_i =$  가중치(위상, 진폭, RMS 값, Peak to Peak 값)을 나타낸다. 이 기법은 Fig. 2-12 과 같다.

$$\begin{aligned}
S_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\
S_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\
S_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\
S_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2)
\end{aligned} \tag{2-39}$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left( \frac{S_4 - S_2}{S_1 - S_3} \right) \tag{2-40}$$

$$A(x, y) = T_0 e^{-x/\mu} = \sqrt{(S_4 - S_2)^2} + \sqrt{(S_1 - S_3)^2} \tag{2-41}$$

Fig. 2-13에서 위상을 추출하기 위해 자극원과 적외선 검출소자를 동기화 하여 제어함으로서 자극원의  $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 를 측정할 수 있다. 연속하는 신호  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 는 식(2-39)과 같이 나타낼 수 있으며, 4개의 방정식으로부터 식 (2-40)와 식(2-41)를 사용하여 특정화소( $x, y$ )에서 온도변조에 대한 위상( $\phi$ )과 진폭( $A$ )을 구할 수 있게 된다.

## 제 3 장 실험장치 및 구성

### 제 1 절 전단간접계 시스템(Shearography System)

비파괴 검사(NDT) 방법중의 하나로 재료의 표면 정보를 제공해주는 측정시스템으로 DANTEC DYNAMICS (덴마크) 사의 상용 Shearography(Q-800) 제품을 사용하였다. 이 시스템의 기술은 비접촉식이며 재료의 내부 품질에 대한 신속하고 정확한 정보를 제공하는 비파괴 테스트를 위한 휴대용 소형 측정 시스템으로서 Fig. 3-1와 같이 Shearography 센서, 고해상도 CCD 카메라, 센서 내부에 장착된 Diode laser, Controller로 구성이 되어 있다. 레이저는 Diode laser (파장: 780 nm, 출력: 50 mW)를 사용하며, 센서 양측면의 arm에 장착된 2개의 Diode를 통해 확산된 레이저 광을 직접적으로 물체에 조사된다. 센서 내부 모터 제어를 통한 전단량과 전단방향, 전단각도를 조절할수 있으며 PZT 제어를 통한 4단계 위상이동 기법을 적용하여 위상지도(Phase Map)를 얻게된다. 전체 시스템은 ISTR A 4D 소프트웨어 플랫폼을 이용하여 노트북 PC에서 제어된다.

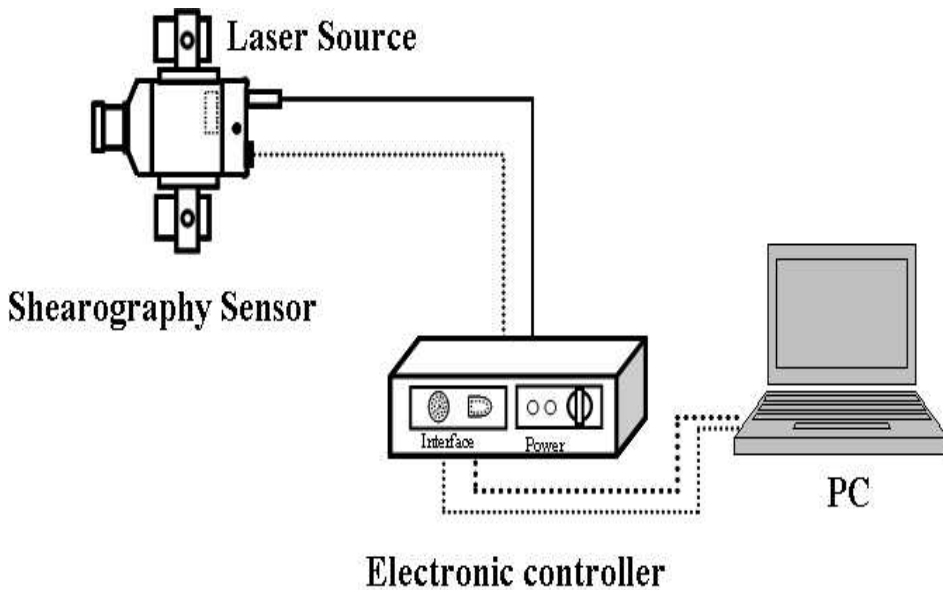


Fig. 3-1 Configuration of Shearography system

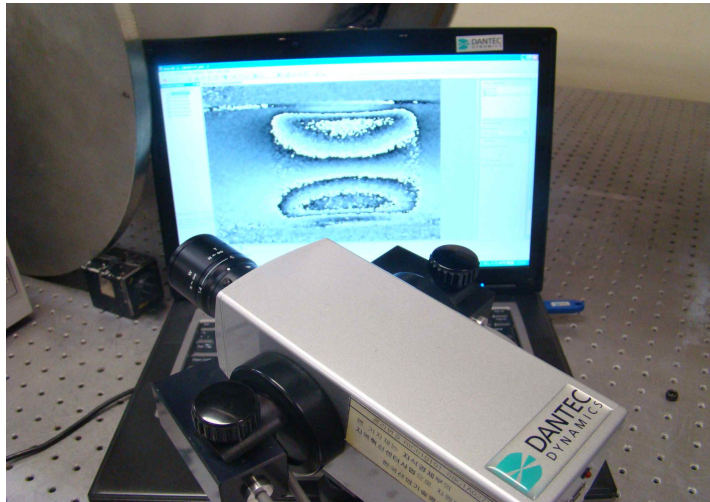


Fig. 3-2 Shearography system

Table 3-1 Specification of Shearography system

Technical Data	Q-800
CCD-resolution	1392 × 1040 pixel
Standard C-mount lens	Zoom f=1.4/6... 12mm
Inspection Speed	Typically 300mm×300mm /20s
Shear direction	up to 1/20 the field-of-view, fully adjustable (software controlled)
Shear Angle	0-180° , fully adjustable (software controlled)
Measuring Area	300mm×300mm with 2 laser diode
Measuring Sensitivity	0.03 $\mu$ m/shear distance
Sensor Head Dimension	W×H×D = 70×70×160mm <sup>3</sup>
Laser	Diode 50mW, 780nm
Laser Diodes	up to 870mW

## 제 2 절 적외선 열화상 카메라 시스템

적외선 열화상 비파괴 검사 장비는 시험 대상을 파괴하지 않고 내부에 결함을 측정하는 장비로서 물체 표면의 온도를 열화상 카메라로 검출하는 일반 Passive 방식과 달리 에너지를 입사하는 Active 방식으로 내부의 결함까지 측정할수 있습니다. 다른 검사방법과 달리 비접촉식으로 빠른시간에 넓은 면적 측정이 가능하며 측정된 결과는 실시간으로 이미지화 하여 제공되어 현장에서 데이터를 바로 분석할수 있는 장점을 가지고 있습니다.

적외선 열화상 카메라 센서는 Fig. 3-3과 같으며 FLIR사의 상용화제품인 Silver 480M 장비를 사용하였다. Table 3-2는 적외선열화상 카메라 센서에 대한 재원을 나타내었다.



Fig. 3-3 Infrared camera

Table 3-2 Specification of infrared camera

Infrared camera(FLIR., Sliver 480M)	
Detector Materials	InSb(안티몬화 인듐)
Cooling method	내장 스테링 쿨러 (Stirling)
Spectral Response	3.7~5.0um
Number of Pixels	320*256
Pitch	30um*30um
NETD	25mK@25℃ (20mK typical)
Temperature measure range	-15~2000℃
Frame rate	5Hz~380(400)Hz
Frame rate resolution	1Hz Step
Integration time	10 μs to 5000 μs
	programmable, 1 μs step

또한, 배관 표면 냉각을 위해 함수발생기를 이용하여 냉각장치의 출력을 주기적으로 조절하였다. Fig. 3-4는 냉각시스템을 보여주고 있으며 Table 3-3은 그에 대한 재원정보이다.



Fig. 3-4 Cooling system

Table 3-3 Specification of cooling system

Cooling system	
Fan Size	Ø270(mm)
Air Volume	3,780mm <sup>3</sup> /h
Rated Output	440W

### 제 3 절 배관 순환 시스템 (Pipeline circulation system)

원자력 발전소나 플랜트 산업현장에서 결함이 존재하는 원전의 배관을 모사하기 위한 Mock-up 시스템을 제작하였다. Fig. 3-5는 배관순환시스템을 보여주고 있으며 밀폐된 압력용기 내 전열코일로 가열하여 내부의 증기를 발생시키며 발생한 증기는 내부 관을 따라 원전 배관을 거쳐 다시 압력용기내로 순환하는 시스템이다. 압력용기 내 발생하는 최대압력은 0.2MPa이며 압력배관 내부 최대온도는 125~130° 이다. 또한 고온고압으로 인한 용기내부의 압력을 유지하기 위한 안전장치를 설치하였으며 시스템 온도 제어는 온도 컨트롤 박스에서 제어를 한다.

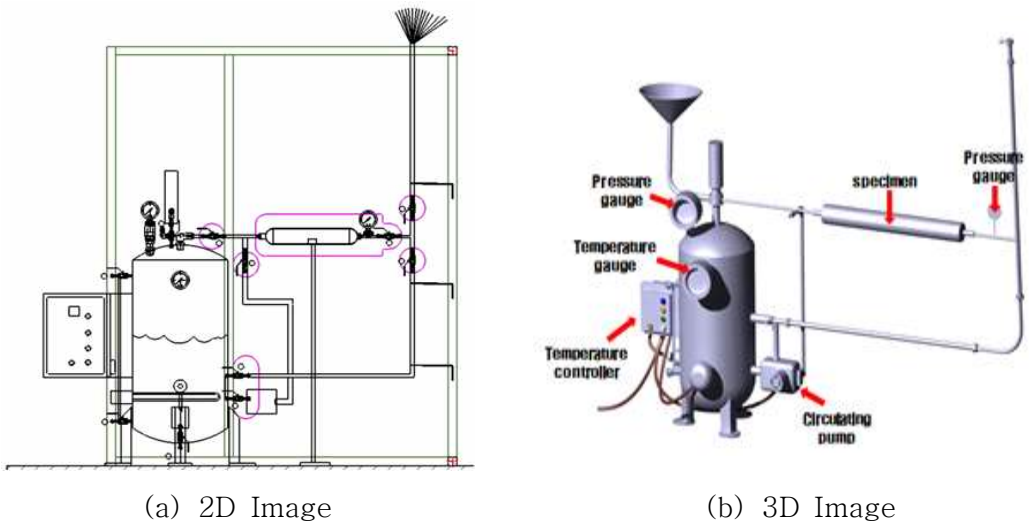
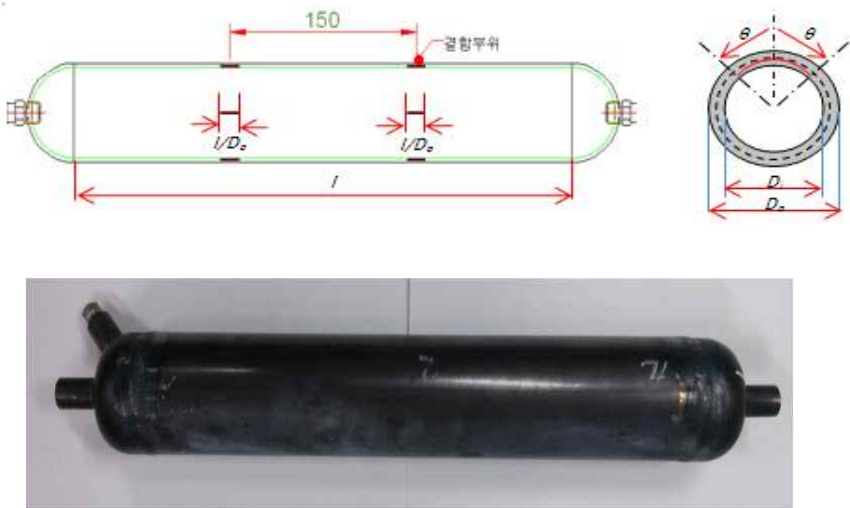


Fig. 3-5 Pipeline circulation system



## 제 4 절 압력배관 시험편

압력배관 시험편을 인공적으로 90° 결함각도로 임의의 결함을 축방향인 길이방향의 2중씩 가공하여 총 8개의 결함을 가공하였으며 감속결함을 가공할 때 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하고자 하였으나 가공 시 정확한 가공이 힘들어 원주방향으로 공구의 직경에 해당하는 곡률반경 250mm를 갖는 형상으로 원자력 배관 모사 압력배관 시험편을 제작하였다. Fig. 3-6은 시험편의 형상과 치수를 보여주고 있으며 시험편의 재질은 ASTM A53 Gr.B Type F로써 항복강도는 240MPa, 인장강도는 415MPa, 길이방향의 연신율은 30%이다. Table 3-4는 각 시험편의 결함 깊이, 결함 폭, 결함 길이 조건별 종류를 보여주고 있다.



Description	Specimen Data
Length of pipe(L)	400mm
Outside diameter(D <sub>o</sub> )	76.4mm
Inside diameter(D <sub>i</sub> )	69mm
No Defect thickness(tp)	3.7mm

Fig. 3-6 Shape and dimension of pipe specimen

Table 3-4 Type of Pressure Vessel Specimen

(a) PVS-1 specimen

ID No.		Thickness $t_p$ (mm)	Width (mm)	Length (mm)
PVS-1	01	$3/8t_p$	2.5	5
	02			10
	03			20
	04			40
	05		5	5
	06			10
	07			20
	04			40

(b) PVS-2 specimen

ID No.		Thickness $t_p$ (mm)	Width (mm)	Length (mm)
PVS-2	01	$3/8t_p$	10	5
	02			10
	03			20
	04			40
	05		20	5
	06			10
	07			20
	04			40

(c) PVS-3 specimen

ID No.		Thickness $t_p$ (mm)	Width (mm)	Length (mm)
PVS-3	01	4/8 $t_p$	2.5	5
	02			10
	03			20
	04			40
	05		5	5
	06			10
	07			20
	04			40

(d) PVS-4 specimen

ID No.		Thickness $t_p$ (mm)	Width (mm)	Length (mm)
PVS-4	01	4/8 $t_p$	10	5
	02			10
	03			20
	04			40
	05		20	5
	06			10
	07			20
	04			40

## 제 4 장 실험방법

### 제 1 절 전단간섭계(Shearography) 시스템

배관순환 시스템을 이용한 배관의 내부 결함을 측정하기 위하여 Fig. 3-7과 같이 실험 구성을하였다. 시험편 표면에 현상액(Developer)를 도포하여 난반사를 제거하였다. 백색 현상액은 결함부에 침투한 적색침투액을 빨아 올려 미세한 Crack을 명확히 나타나게 하는 백색 현상액이다. 압력배관 내부 온도는 실온 상태 16℃ 시작으로 하여 밸브 개방 시 배관의 내부온도를 100℃까지 온도 변화를 주었으며 이때 압력배관의 최대온도는 125~130℃까지 보였으며 내부 압력은 최대 0.18MPa이다. 압력배관의 온도가 더 이상 변화를 보이지 않은 시점에서 송풍기를 이용하여 순간적으로 냉각을 시켜 시험편 내부 압력 및 온도 변화에 따른 결함 부위를 측정하였다. 배관과 계측기와의 거리는 0.85m이며 함수발생기에 송풍기를 연결하여 sin파형으로 Frequency는 0.1Hz이다.



Fig. 4-1 Shearography experiment

## 제 2 절 적외선 열화상 시스템

전단간섭계 시스템을 이용한 실험방법과 동일한 조건으로 적외선 열화상 시스템을 이용한 압력배관의 내부 결함을 측정하기 위하여 Fig. 3-8과 같이 실험을 구성하였다. 시험편에 방사페인트(KRYLON 4290 Ultra Black)를 도포하여 방사율을 0.95로 유지시켰다. 압력배관 내부 온도는 실온 상태 16℃ 시작으로 하여 밸브 개방 시 배관의 내부온도를 100℃까지 온도 변화를 주었으며 이때 압력배관의 최대 온도는 125~130℃까지 보였으며 내부 압력은 최대 0.18MPa 이다. 압력배관의 온도가 더 이상 변화를 보이지 않은 시점에서 송풍기를 이용하여 순간적으로 냉각을 시켜 시험편 내부 압력 및 온도 변화에 따른 결함 부위를 측정하였다. 배관과 계측기와의 거리는 1m이며 함수발생기에 송풍기를 연결하여 sin파형으로 Frequency는 0.1Hz이다.

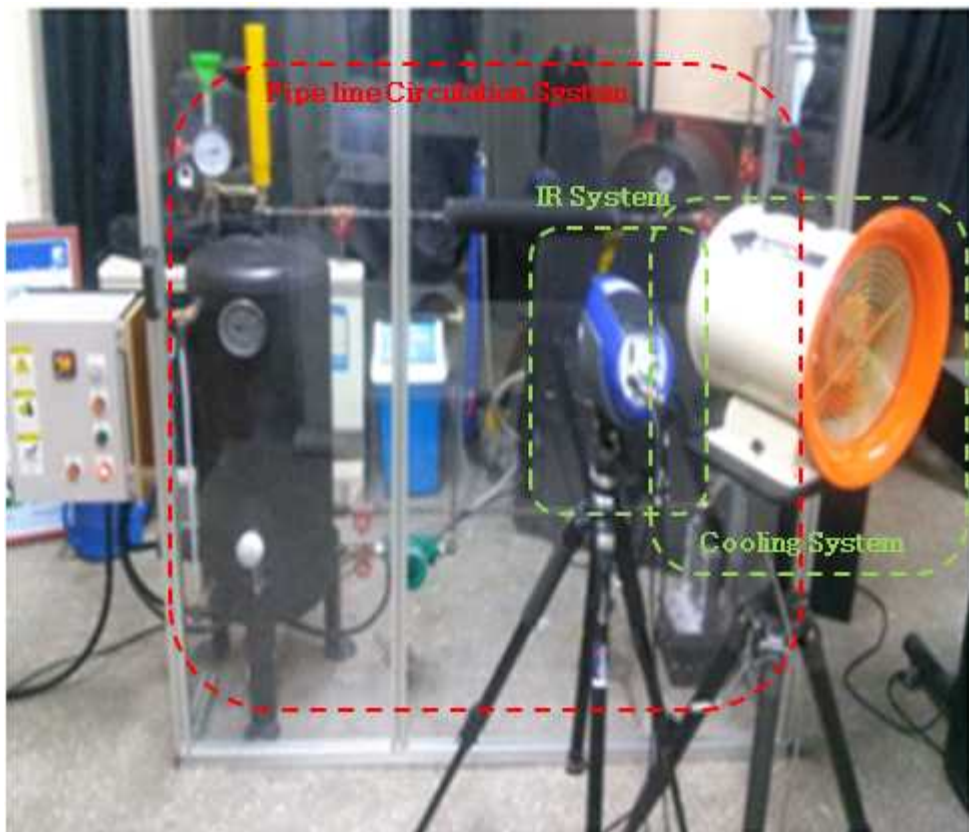


Fig. 4-2 Infrared thermographic experiment

### 제 3 절 해석 프로그램 (LabVIEW)

Fig. 3-9는 전단간섭계를 이용한 압력배관 시험편에 대한 측정 결과 위상지도를 보여주고 있다. 획득한 위상지도 이미지는 LabVIEW 프로그램을 이용하여 최종 결함부 변형량을 정량적으로 측정할수 있었다. Phase Filtering으로 보정된 위상지도 이미지 획득단계를 거쳐 결함부의 Line Profile를 그어 Line Profile에 해당하는 데이터를 엑셀파일로 저장하는 단계를 거친다. 모든 시험편의 측정결과는 X축 방향으로 프로파일을 그어 측정결과를 획득하였다. Fig. 은 Image Profile & Unwrap 프로파일에 대한 블록다이아그램을 보여주고 있으며 Fig.은 각 해당하는 프런트패널을 보여준다.

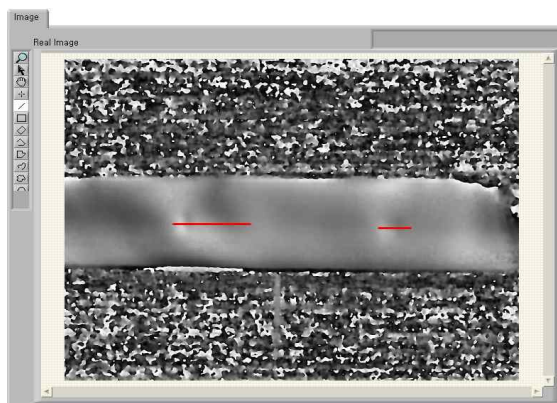


Fig. 4-3 Phase map of specimen

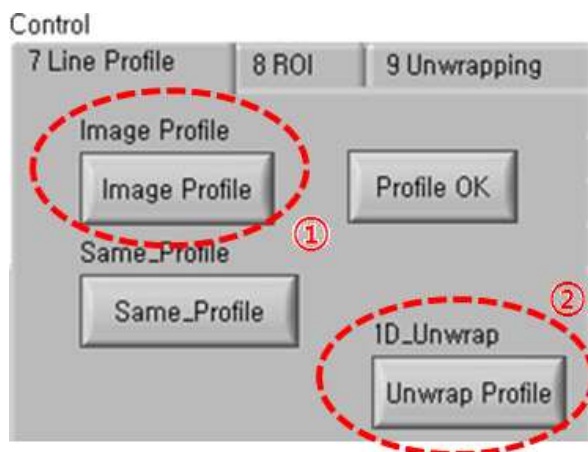


Fig. 4-4 Front panel image of control

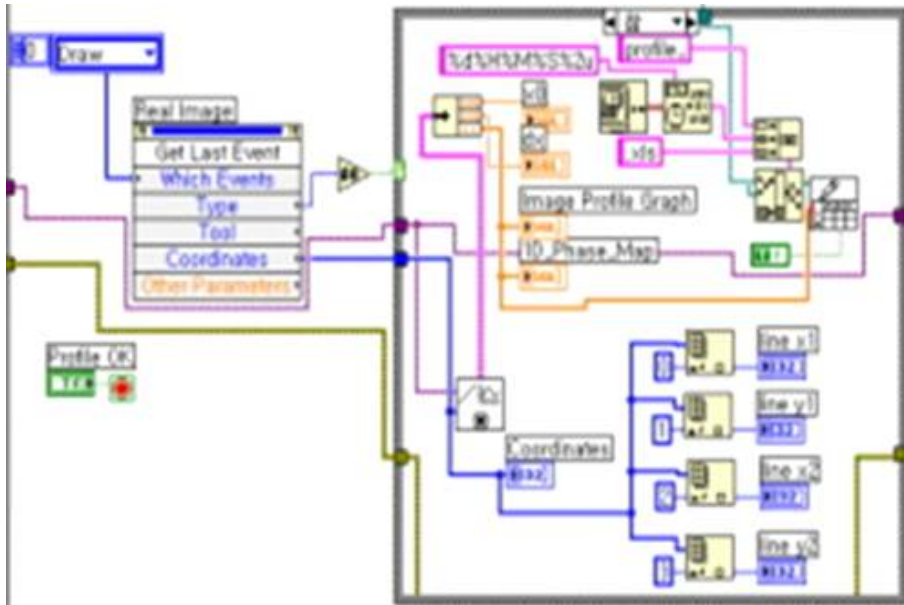
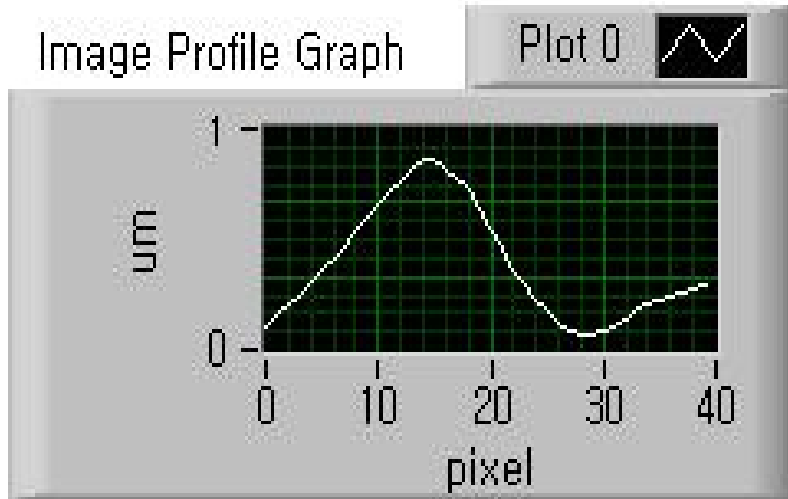


Fig. 4-5 Profile graph Image of front panel and black diagram

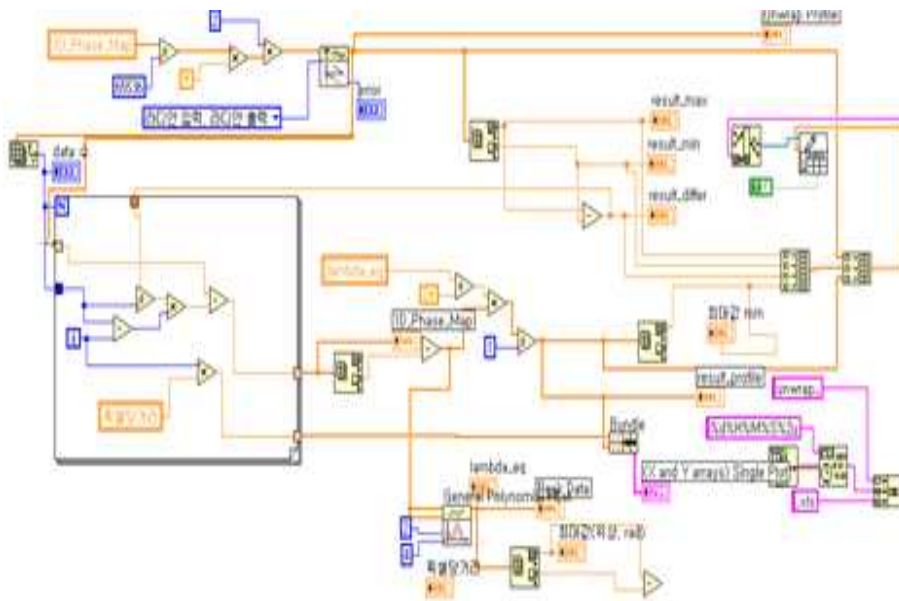
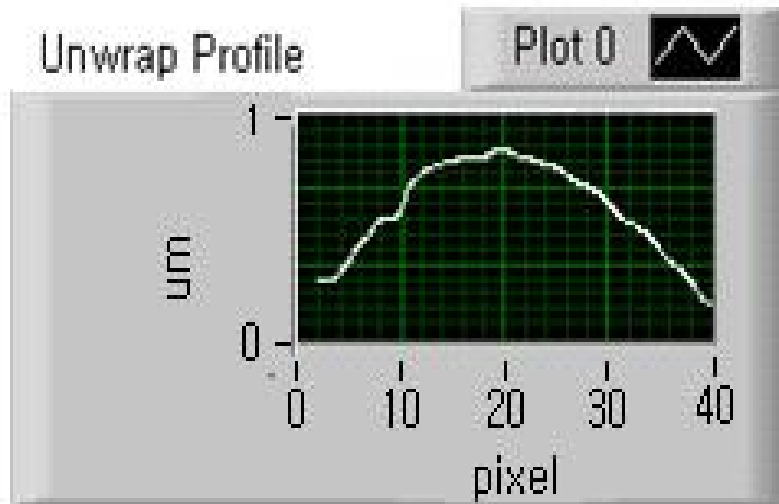



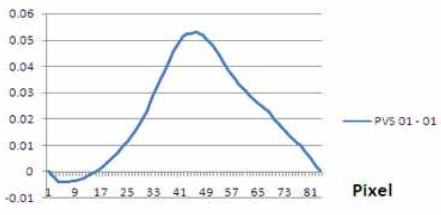
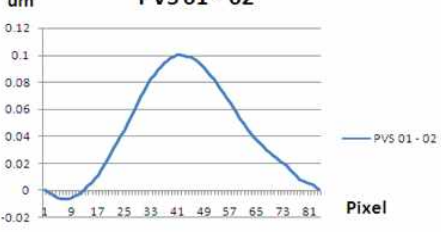
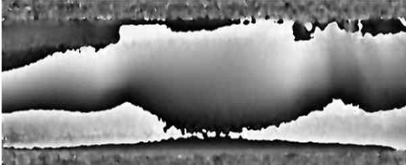
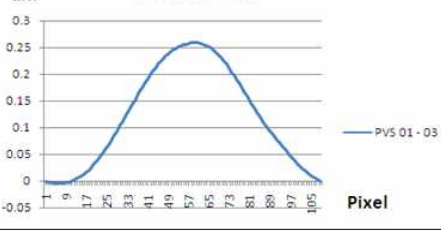
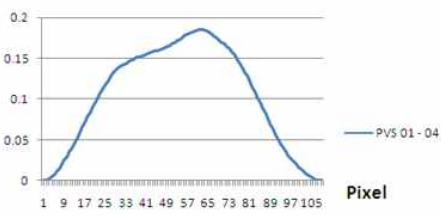
Fig. 4-6 Unwrap profile Image of front panel and block diagram

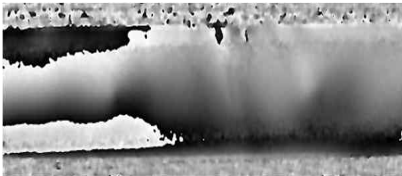
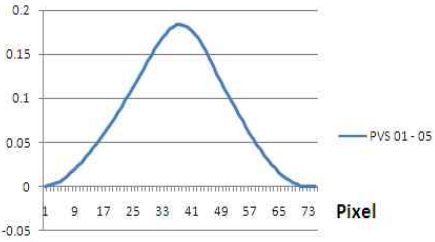
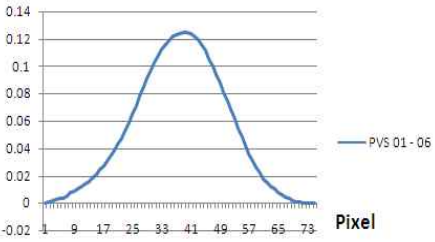
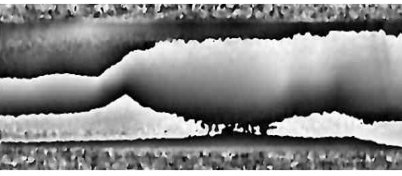
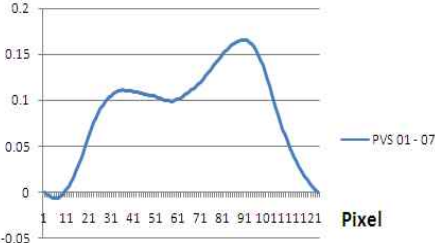
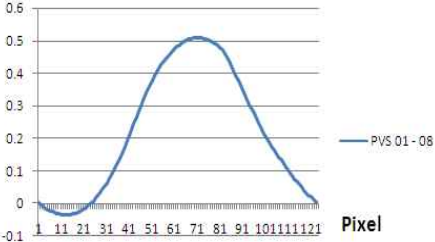


## 제 5 장 실험결과

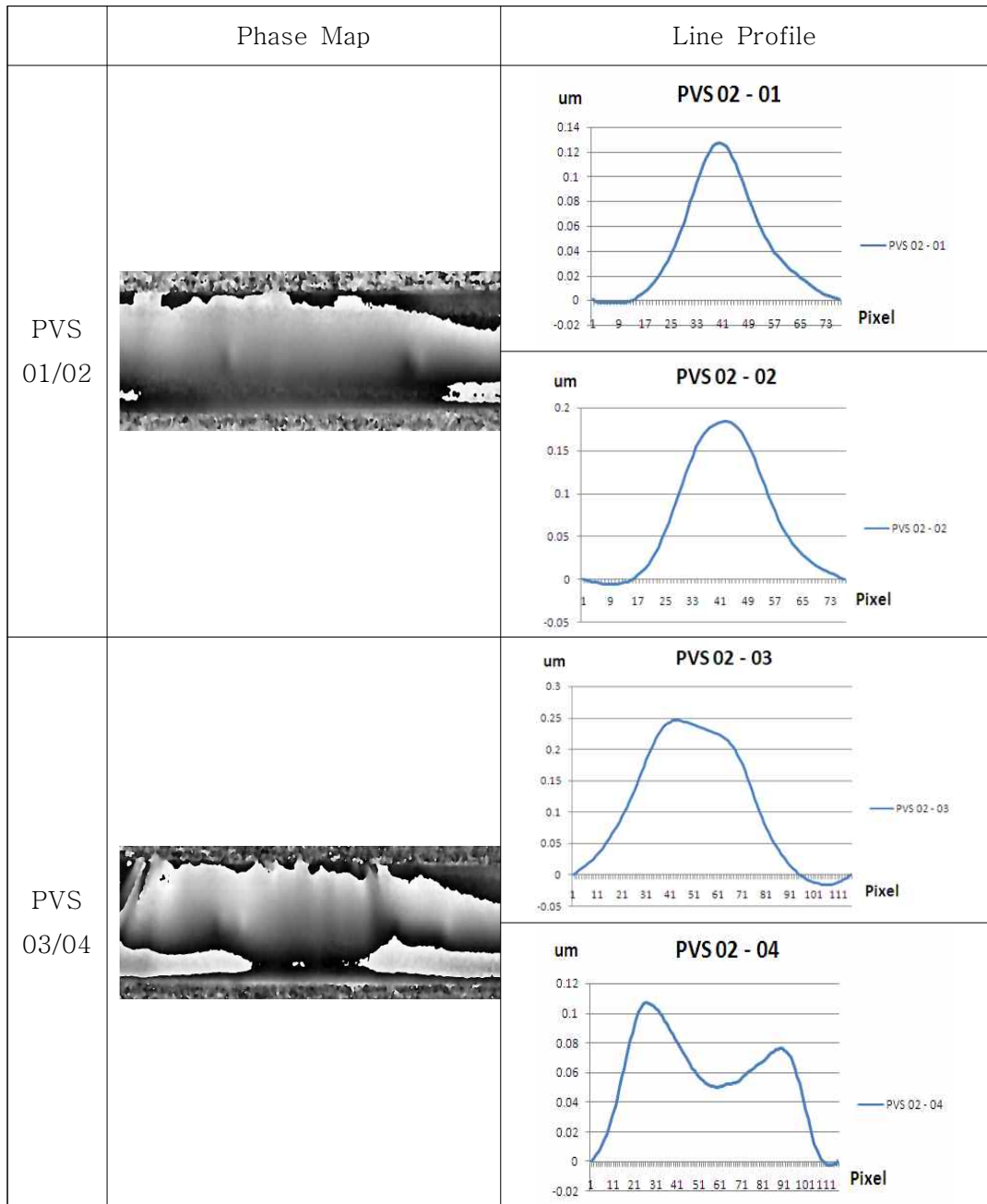
Table 3-5는 Shearography system을 이용하여 배관 시험편의 내부 온도 변화와 결함 폭, 결함길이에 따른 위상지도(Phase Map)와 결함부의 변형량의 측정 결과를 보여주고 있다. 압력 배관의 온도차에 따른 내부 결함을 위상지도를 통해 눈으로 확인할수 있었으며 특히 결함 폭과 결함 길이가 큰 시험편의 변형량이 크게 발생한 것을 볼수 있다.

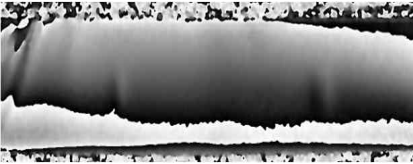
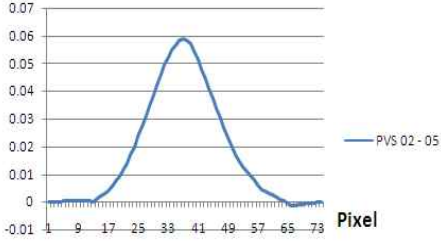
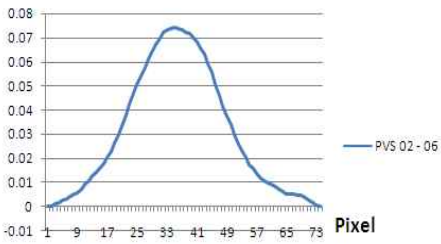
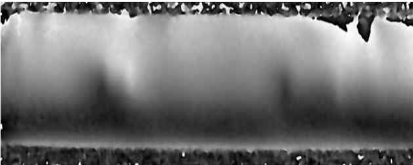
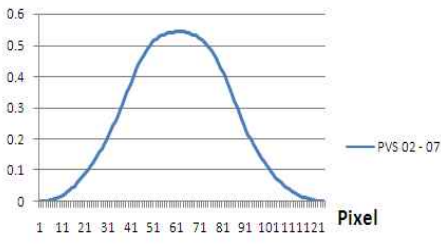
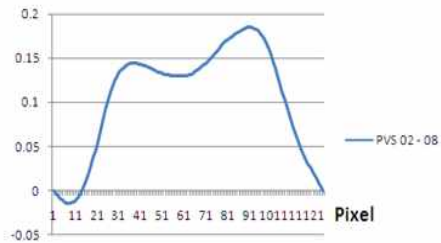
Table 5-1 Experiment according to Temperature change and Defect size  
(a) PVS 1

	Phase Map	Line Profile
PVS 01/02		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 01</b></p> 
		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 02</b></p> 
PVS 03/04		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 03</b></p> 
		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 04</b></p> 

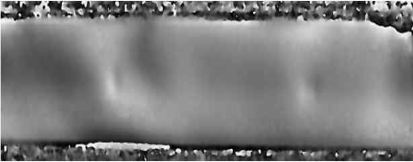
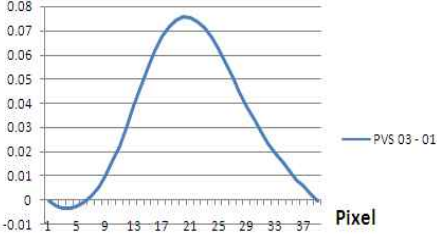
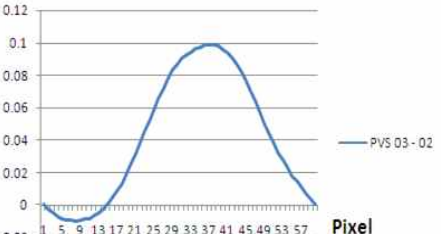
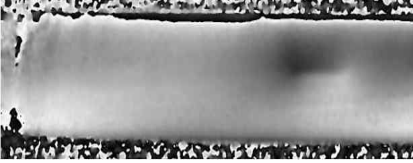

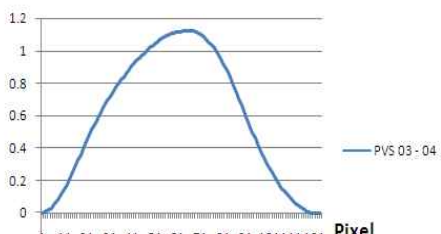
	Phase Map	Line Profile
PVS 05/06		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 05</b></p>  <p>Pixel</p>
		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 06</b></p>  <p>Pixel</p>
PVS 07/08		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 07</b></p>  <p>Pixel</p>
		<p><b>um</b> <b>PVS 01 - 08</b></p>  <p>Pixel</p>

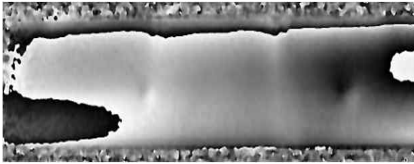
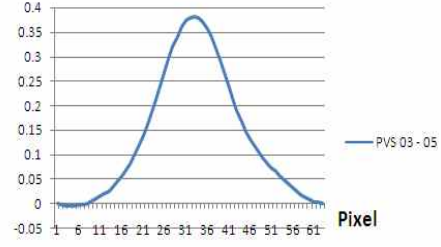
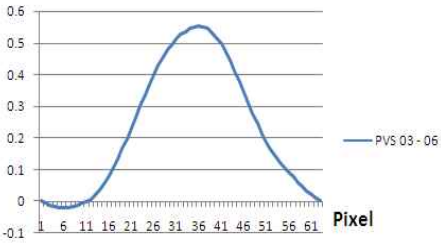

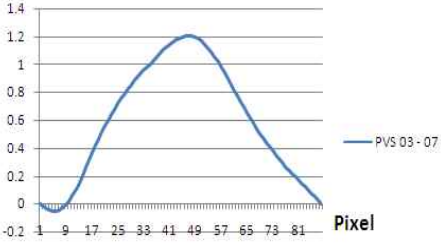
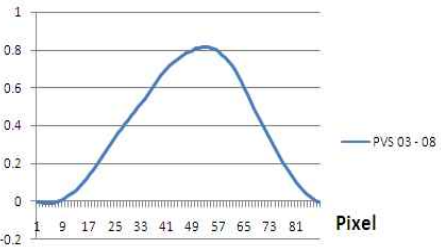
(b) PVS 2



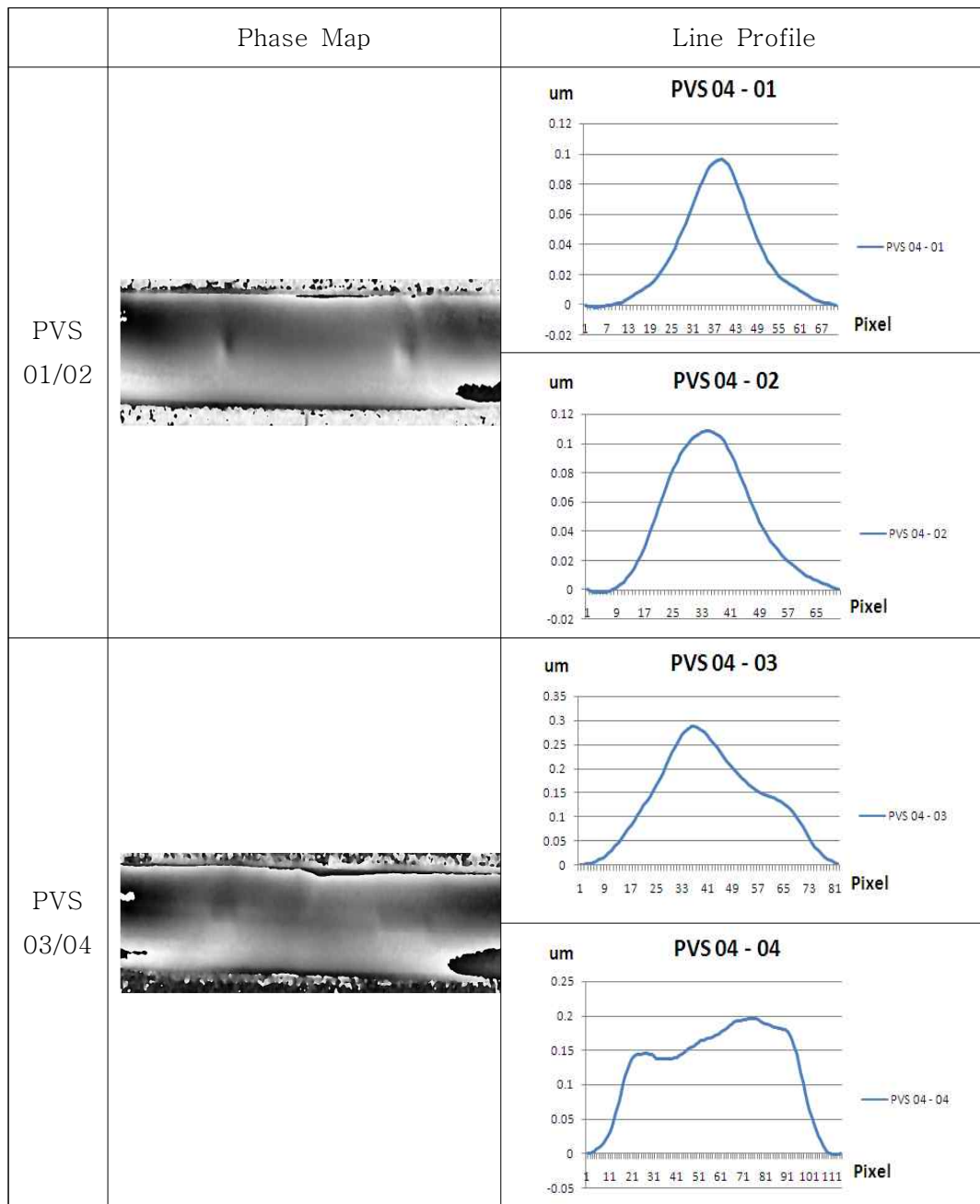
	Phase Map	Line Profile
PVS 05/06		<p><b>um PVS 02 - 05</b></p>  <p><b>um PVS 02 - 06</b></p> 
PVS 07/08		<p><b>um PVS 02 - 07</b></p>  <p><b>um PVS 02 - 08</b></p> 

(c) PVS 3

	Phase Map	Line Profile
<p>PVS 01/02</p>		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 01</b></p> 
		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 02</b></p> 
<p>PVS 03/04</p>		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 03</b></p> 
		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 04</b></p> 

	Phase Map	Line Profile
PVS 05/06		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 05</b></p> 
		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 06</b></p> 
PVS 07/08		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 07</b></p> 
		<p><b>um</b> <b>PVS 03 - 08</b></p> 

(d) PVS 4



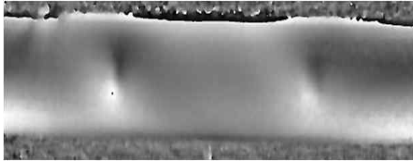
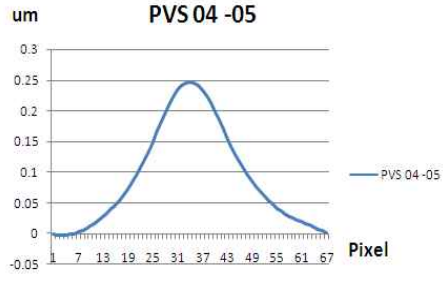
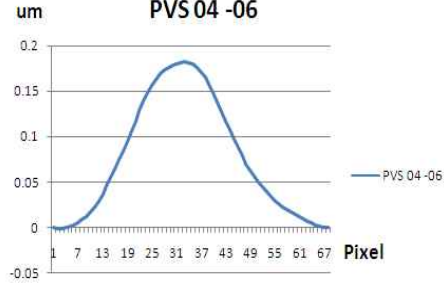

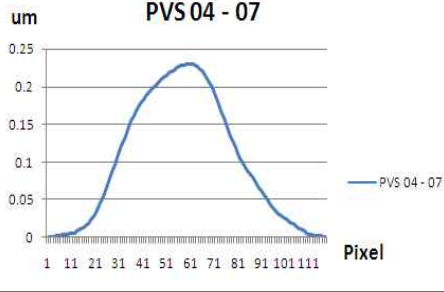
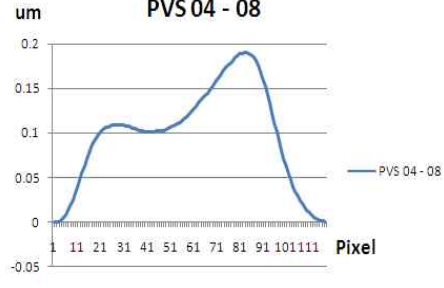
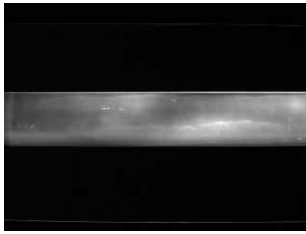
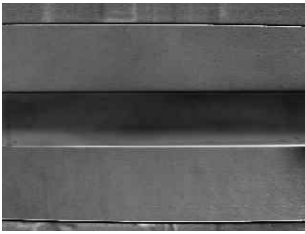
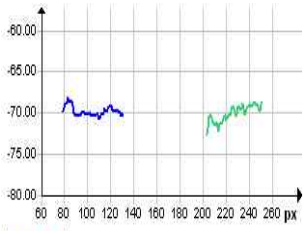
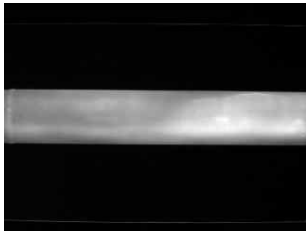
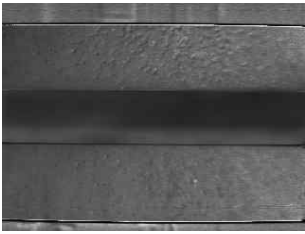
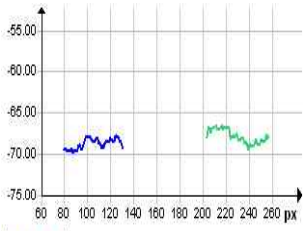

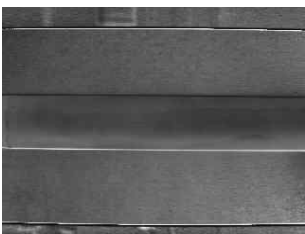
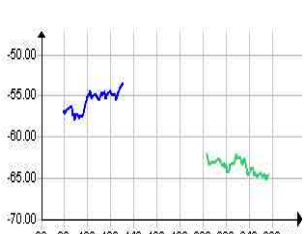

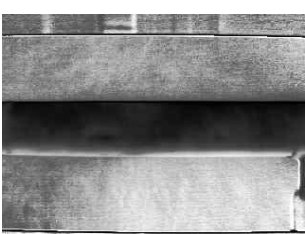
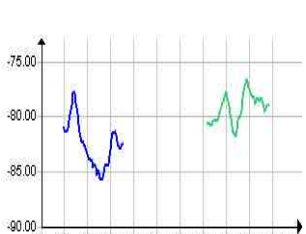
	Phase Map	Line Profile
PVS 05/06		<p><b>um PVS 04 -05</b></p> 
		<p><b>um PVS 04 -06</b></p> 
PVS 07/08		<p><b>um PVS 04 -07</b></p> 
		<p><b>um PVS 04 -08</b></p> 

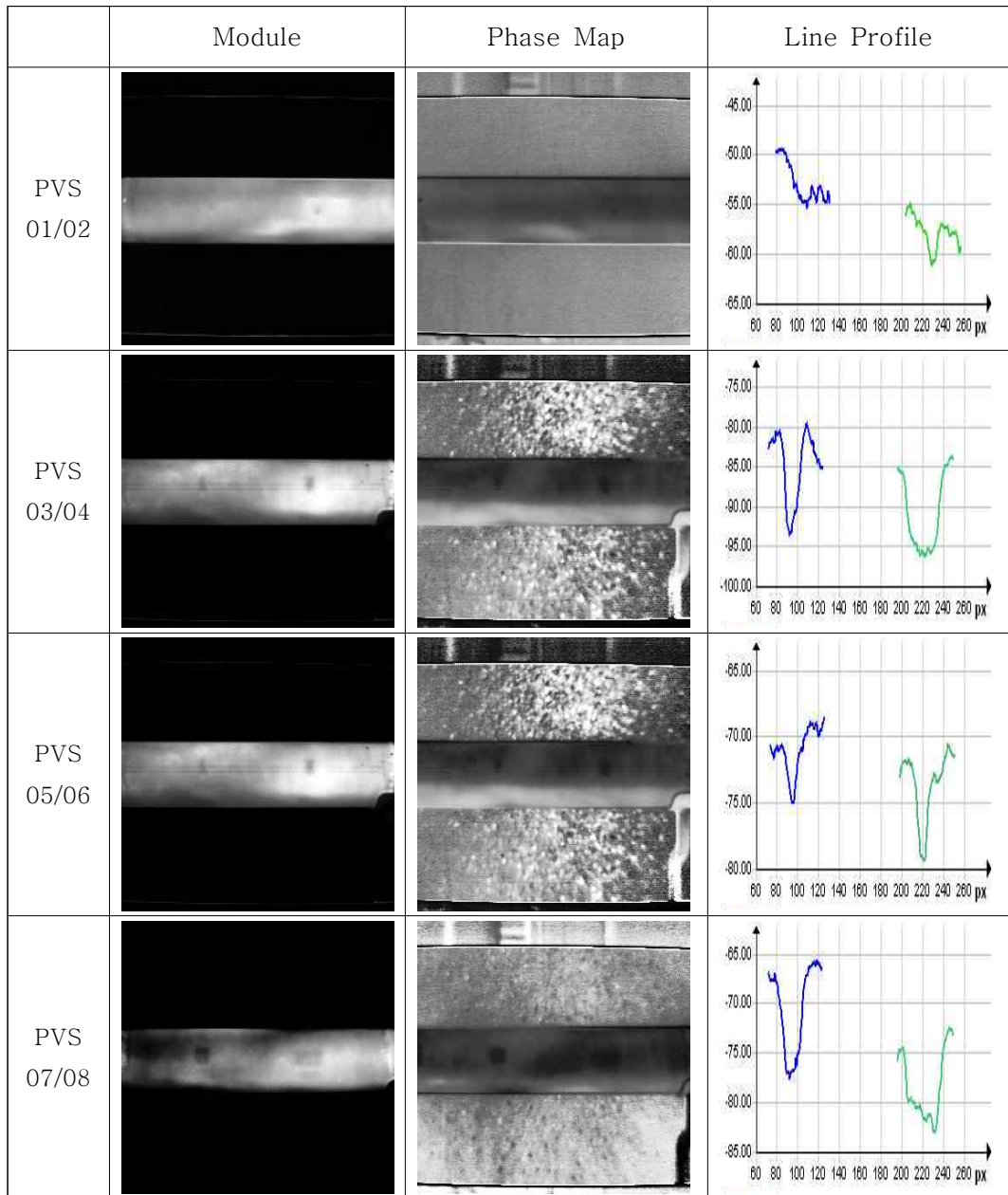


Table 3-6은 Infrared thermography system를 이용하여 얻어진 Phase Map과 온도변화에 따른 Module Image를 보여주고 있다. 마찬가지로 결함부의 온도변위차 결과를 그래프로 보여주고 있다. 압력 배관의 온도차에 따른 내부 결함을 위상지도와 Module를 통해 눈으로 확인할수 있었으며 특히 결함 폭과 결함 길이가 큰 시험편은 쉽게 눈으로 확인할수 있으며 결함부의 온도변위차도 크게 나타나는 것으로 보였다.

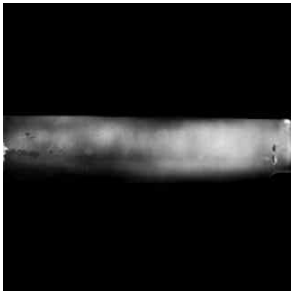
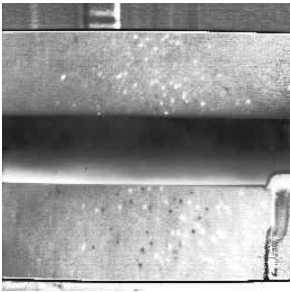
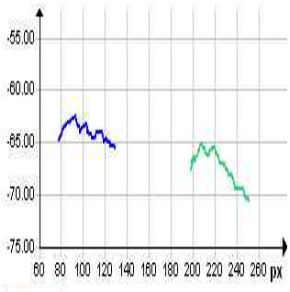
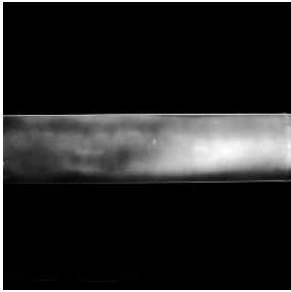
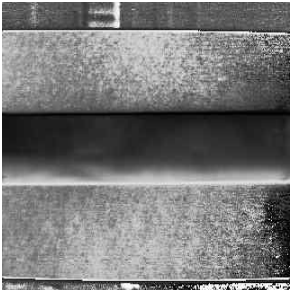
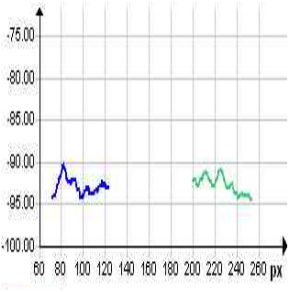
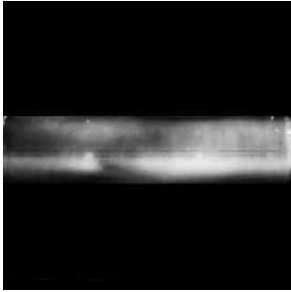
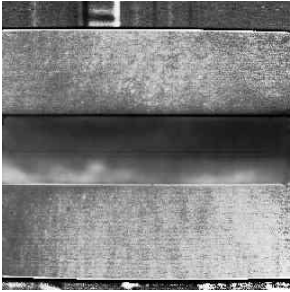
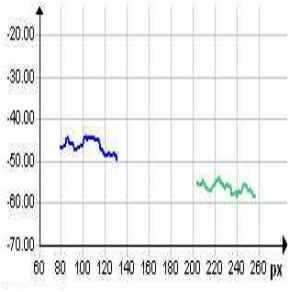
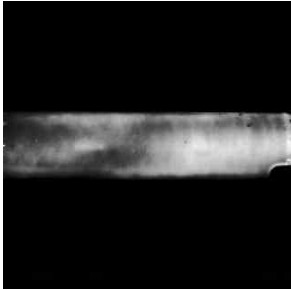
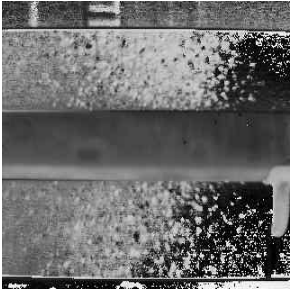
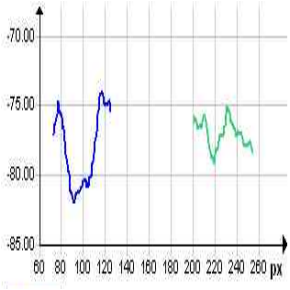
Table 5-2 Experiment according to Temperature change and Defect size  
(a) PVS 1

	Module	Phase Map	Line Profile
PVS 01/02			
PVS 03/04			
PVS 05/06			
PVS 07/08			

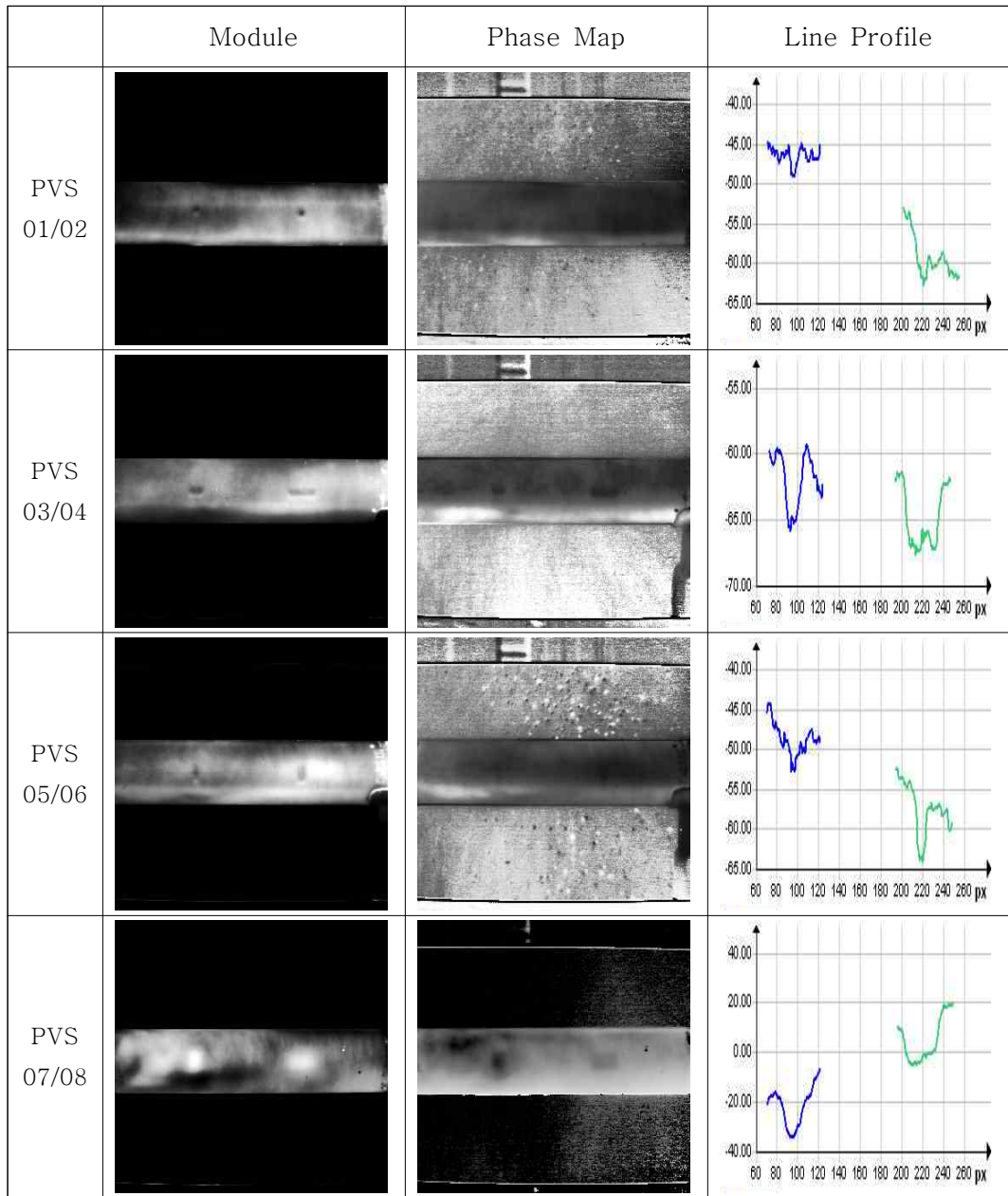
(b) PVS 2



(c) PVS 3

	Module	Phase Map	Line Profile
PVS 01/02			
PVS 03/04			
PVS 05/06			
PVS 07/08			

(d) PVS 4



## 제 6 장 결론

배관 시스템은 원자력 발전설비의 2차계통에 해당하며 주로 냉각 방식의 중요한 역할을 담당하므로 보다 높은 안전성을 필요로 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 전단간섭계와 적외선 열화상 카메라를 이용한 원전배관의 감육결함을 측정하였다. 결함정량화 기법의 실험적 검증을 위하여 내부 인공결함을 갖은 압력배관을 이용하였으며 배관순환시스템을 적용한 압력배관 내부 온도에 따른 결함의 유무를 확인하고 정량적으로 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

1) 본 연구를 통하여 결함의 존재 유무를 구분할 수 있도록 하는 가장 중요한 요소는 결함의 최소 깊이이며 결함의 최소 깊이가  $3/8tp(1.85mm)$ 보다 작을 경우 감육결함의 크기를 예측하기가 힘들것으로 보여진다. 또한 배관의 냉각온도 차가 클수록 감육결함의 변형이 커지는걸 알 수 있다. 본 실험에서는 냉각장치를 송풍기를 이용하여 배관의 온도를 떨어뜨렸지만 보다 효율적인 냉각장치를 사용할수록 더 정확하고 선명한 이미지를 얻을수 있을것으로 보여진다.

2) 결함의 깊이가  $3/8tp(1.85mm)$ 인 경우에는 적외선 열화상 측정에서 결함의 유무를 확인하기가 어려웠지만 위상 잠금 기법을 적용하였을 경우 결함 유무를 확인할수 있었다. 이렇듯 대상체의 온도 변화만을 관찰하고 그것을 후처리하는 방법이 갖고 있는 한계를 극복하기 위한 방법으로 Lock-in 기법을 활용한 방법을 사용하게 되면 좀 더 정밀한 결과를 얻을수 있었다.

3) 본 실험 및 결과를 통하여 결함 깊이, 결함 폭, 결함 길이가 작은 시험편의 경우 Shearography 기법이 적외선 열화상 기법보다 보다 정밀하게 내부결함의 유무를 확인할수 있었으며 이를 개선하기 위해 배관 결함 검출에 적합한 새로운 형태의 온도 보정 알고리즘이 필요하다는 것을 확인하였다.

원자력 발전소에서 사용하는 압력배관은 발전설비의 70~80%를 구성하는 설비 구조물로서 유속에 의한 감육결함 현상이 발생할수 있으며 결함의 크기와 배관 두께의 정밀 정량 측정이 설비의 안전진단 평가에 아주 중요한 요소가 된다. 현재 비접촉·비파괴검사 중 레이저 광원을 이용한 광계측 기법인 전단간섭법 및 적외선 열화상기법을 통하여 압력배관의 내부 결함을 사전에 측정하여 배관의 신뢰성과 건전성을 확보하는데 주요할 것이며 측정결과는 정량적인 데이터로서 2차 배관계통인 압력배관의 기초 진단자료로서 이용될 것이다.

### ○ 배관 감육 결함 측정 및 크기 정량화 기술 개발

전단간섭계를 이용하여 배관 감육결함의 정량화를 위해 전단량의 크기, 전단방향, 작용 외력 등 실험결과에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 선정하고 이들 파라미터의 변화에 따른 실험결과에 변화를 분석하여 최적의 값을 선정하였다. 또한 ESPI를 이용한 실험결과와 비교하여 이들 두 레이저 응용 계측기법 사이의 특성 차이를 평가하였다. 이 분석 결과를 이용하여 감육 곡관 결함부의 결함 형상과 크기를 측정하였으며 감육 직관 결함부의 결함 크기를 측정하였다.

감육 직관 결함부의 해석을 위해 IR 열화상 기법을 이용하여 결함부의 최소두께와 길이에 따른 변형과 온도 분포를 측정하였으며, 이 결과를 전단간섭계를 이용한 결과와 비교하여 측정 결과의 신뢰성을 확보하였다.

### ○ 감육곡관에 대한 자료 조사 및 결함 특성 분석

1차 계통 용접부 및 감육곡관에 대한 자료 조사 및 결함 특성을 분석한 결과, 1차 계통 용접부 결함은 주로 Primary Water Stress Corrosion Cracking (PWSCC)에 의해 발생되며, 용접부의 재료는 대부분 Alloy 600/82/182로 용접부 주위의 모재에서 균열이 발생하는 것으로 파악되었다. 곡관부 감육 결함은 대부분 유동가속부식에 의해 발생되며, 따라서 탄소강 배관 계통에서 주로 발생하는 것으로 파악되었다. 곡관부에서 감육결함은 내부 유체의 유동 특성에 따라 다양한 위치에서 발생하였다. 감육곡관은 다양한 굽힘각과 구속조건을 가지며, 내압 뿐 아니라 곡관의 형상에 따라 In-plane 상에서 단힘모드와 열림모드, 그리고 Out-of-plane 상의 굽힘 등 다양한 굽힘 하중이 작용되는 것으로 파악되었다. 건전 곡관에 대한 유한요소해석 결과, 곡관의 거동은 곡관의 굽힘각, 굽힘 하중의 형태, 그리고 구속 조건 등에 영향을 받는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

2. Kearns, W. H. "Welding handbook", American Welding Society, 7th edition, Vol. 5, pp. 276-311, 1984.
3. 김경석. 『CW 레이저 스페클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
3. Jung Hyunchul. Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor thesis, Chosun University, 2004.
5. 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.
6. Hogmoen, K., Lokberg, O. J., "Detection and Measurement of Small Vibrations using Electronic Speckle Pattern Interferometry," Applied Optics, Vol. 16, pp. 1869-1875, 1977.
7. 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.
8. Hung, Y. Y., "A Speckle-Shearing Interferometry: A tool for Measuring Derivatives of Surface Displacement," Optics Communication, Vol. 11, pp.132-135, 1974
9. Hung, Y. Y., "Speckle-shearing interferometric technique: A full-field strain gauge." Applied Optics 14:618-622, 1975
10. Hung, Y. Y., Digital shearography versus TV holography for non destructive evaluation. J Opt Lasers Eng 1997;26:421.36.
11. Vageswar, A., Balasubramanian, K., Krishnamurthy, C.V., Jayakumar, Ra., T. B. "Periscope infrared thermography for local wall thinning in tubes," NDT&E International, Vol.42, pp.275-282, 2009.
12. Shen G. and Li. T, "Infrared thermography for high-temperature pressure pipe," Insight, Vol.49, pp.151-153, 2007.
13. 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, "위상잠금 광-적외선 열화상을 이용한 내부결함의 위치 및 크기 평가," 비파괴검사학회지, Vol.27, No. 4, pp. 321-327, 2007.

14. Ulf Schnars, Werner Jueptner, "Digital holography", Springer, pp. 18–20, 2003.
15. Jang H. S., "Quantitative measurement method of out-of-plane deformation using the shearography", Chosun Univ., Ph.D Dissertation, 2006.
16. 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.
17. Cloud, Gary L., Optical Methods of Engineering Analysis, New York: Cambridge Universe Press, 1995, pp.393~491
18. Kang K. S. "Quantitative Evaluatin of an Inside Defect by Laser Speckle Interferometry" , Chosun Univ., ph.D Dissertation, 2005
19. Steinchen, W., Yang, L.. Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry, Washington, SPIE Press, 2003.
20. 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.
21. Gary L. Cloud, "Optical Methods of Engineering Analysis" , Cambridge University, 1998, pp. 395~408, 440~491.
22. Pramod K. Rastogi, "Digital Speckle Pattern Interferometry and Related Techniques" , John Wiley & Sons Ltd., 2001, pp.59~139
23. Charette P. G. and Hunter I. W., "Robust phase-unwrapping method for phase images with high noise content", Appl. Opt, Vol. 35, pp. 3506–3513, 1996.
24. Bone D. J., "Fourier fringe analysis: two-dimensional phase unwrapping problem", Appl. Opt., Vol. 30, pp. 3627–3632, 1991.
25. 강영준, 박낙규, 유원재, 김동우, "전자 전단 간섭법을 이용한 압력용기의 내부결함 측정에 관한 연구(II)." 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 4, pp. 402–410, 2002.
26. 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.

27. 장호섭. 『전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2006.
28. 최만용, 김원태, “ 적외선열화상검사,” 노드미디어, 2012
29. 정용택, “ 적외선센서의 원리와 응용,” 인포더박스, 2012

## 감사의 글

2012년도 기계설계공학과 자동화 실험실에 들어와 짧지 않았던 2년이라는 시간 동안 공부한 것들을 바탕으로 석사 졸업논문을 쓰게 되었습니다. 대학원 생활을 하면서 많은 어려움과 힘든점이 있었지만 한편으로는 2년이라는 시간이 제게 얼마나 소중한 시간이었는지를 알게 해주었습니다. 이런시간동안 여러많은 분들의 격려와 지도덕분에 무사히 석사생활을 마무리를 짓게 되어 감사의 말씀을 전합니다.

가장 먼저 좋은 실험실 환경과 지원으로 대학원 생활을 할수있도록 세심한 지도와 격려를 해주신 김경석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 바쁘신 와중에도 논문 심사를 맡아주신 양인영교수님, 김재열교수님께도 감사드리며 매 학기 대학원 수업을 통해 가르침을 주신 김택현 교수님, 정낙규 교수님, 김지훈 교수님, 박정우 교수님께도 감사드립니다. 항상 대학원생과 같이 생활하면서 격려를 아끼지 않으시고 부족한 부분을 항상 채워주신 정현철 박사님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 졸업 논문 지도와 박사과정을 갈수 있게 격려의 말씀으로 저를 이끌어주시고 현재는 무진기공 연구소장님으로 계신 장호섭 박사님께도 감사드립니다.

먼저 졸업하여 각자의 인생길을 가고 있는 대학원 1년 선배인 찬식이, 동률이, 경원이, 용찬이 형과 박사과정이었던 동수에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 실험실에서 두 아이의 아빠로 인생의 선배이시고 논문의 내용에 대해 조언을 해주신 태호형, 가장 눈치가 빠른 현호, 어병병하지만 묵묵히 맡은 일을 끝까지 책임지고 수행해내는 경욱이, 실험실 분위기를 화기애애하게 만들어주는 현일이 부족한 부분이 많았던 선배 밑에서 1년동안 고생해줘서 고맙다는 말을 전합니다. 15층 레이저 센터일을 맡고 계신 김우진 선생님과 김세경 선생님께도 감사의말 전하고 싶습니다. 그리고 2년동안 동거동락하면 내게 가장 큰힘이 되어주고 버팀목이 되어주었던 내 동기인 상우, 형으로써 더 잘 챙겨주지 못해서 미안하단 말과 함께 고마움을 전하고 싶고 꼭 좋은곳에 취직하기를 바랍니다.

마지막으로 부족한 자식을 항상 믿어주신 부모님께 감사의 말씀을 드립니다. 언제나 묵묵히 내 편이 되어 힘을 주었던 동생 정근이에게도 고맙다는 말을 전합니다. 이 모든 분들이 있었기에 지금의 제가 있다고 생각하며 앞으로 박사과정에 있어서는 좀더 노력하는 모습을 보여주도록 하겠습니다. 감사합니다.

# 저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재공학과	학 번	20127113	과 정	석사
성 명	한글: 강 찬 근    한문: 姜 贊 根    영문:Kang, Chan-Geun				
주 소	광주광역시 광산구 우산동 1580-17				
연락처	e-mail : hadis1318 @ hanmail.net				
논문제목	<p>한글: 전단간섭법과 적외선 열화상 기법을 이용한 배관순환시스템에서의 원자력 압력용기 결함 진단 및 정량 평가</p> <p>영문: Fault diagnosis and quantitative evaluation of nuclear pressurevessels in a piping circulation system by using shearing interferometry and infrared thermography</p>				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다            음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의( ○ )    반대(    ) .

2013 년 12 월

저작자:    강 찬 근    (인)

**조선대학교 총장 귀하**