



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](#)

2009 년 2월
석사학위논문

이중 빛 전단간섭계와
적외선열화상을 이용한 결함검출

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

장 수 옥

이중 빛 전단간섭계와
적외선열화상을 이용한 결함검출

Defect Detection using Dual-Beam Shearography and
Infrared Thermography

2009년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

장 수 옥

이중 빛 전단간섭계와
적외선열화상을 이용한 결함검출

지도교수 김 경 석

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2008년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

장 수 목

張秀玉의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 梁仁榮 印

委員 朝鮮大學校 教授 文哲鴻 印

委員 朝鮮大學校 教授 金庚錫 印

2008年 11月

朝鮮大學校 大學院

- 목 차 -

LIST OF TABLE	III
LIST OF FIGURE	IV
ABSTRACT	VII
제 1 장 서 론	1
제 2 장 이론적 배경	4
제 1 절 스펙클 패턴 간섭법	4
1. 스펙클 이론	4
2. 간섭	8
3. 프린지의 형성	10
4. 위상이동기법	11
제 2 절 광학간섭계	12
1. 전단간섭계 원리	12
2. 전단간섭계를 이용한 변형 측정	15
3. Dual-Beam 전단간섭계 원리	18
제 3 절 적외선열화상기술	20

제 3 장 실험장치	23
제 1 절 Dual-Beam 전단간섭계 시스템	23
제 2 절 적외선열화상시스템	25
제 4 장 실험결과	27
제 1 절 원자력배관 내부결함측정	27
1. Dual-Beam 전단간섭계를 이용한 측정	29
2. 적외선열화상을 이용한 측정	38
3. 원자력 배관의 결함크기 비교	43
제 2 절 복합재료의 내부 결함측정	43
1. 복합재료 검사시스템 구성	43
2. 복합재료 내부 결함 측정	44
제 3 절 충격을 받은 복합재 관의 결함측정	46
1. 검사시스템 구성	46
2. 충격을 받은 복합재 관의 결함 측정	47
제 5 장 결론	53
참고문헌	56

- LIST OF TABLE -

Table 3-1 Specification of IR camera	26
Table 4-1 Type of specimen	28
Table 4-2 Error of actual value and measurement value	38
Table 4-3 Type of specimen	39
Table 4-4 Comparison of measured defect length	43

- LIST OF FIGURE -

Fig. 2-1 Formation of speckle pattern	6
Fig. 2-2 Subjective speckle size on the CCD image plane	8
Fig. 2-3 The fringe pattern formation depend on deformation	11
Fig. 2-4 Out-of-plane displacement sensitive interferometer	13
Fig. 2-5 Measurement result of surface deformation by ESPI and Shearography	17
Fig. 2-6 Dual-beam interferometer geometry	18
Fig. 2-7 Signal processing of lock-in infrared thermography	22
Fig. 3-1 Schematic of Dual-Beam Shearography system	23
Fig. 3-2 Dual-Beam Shearography system	24
Fig. 3-3 Composition of Dual-Beam Shearography system	24
Fig. 3-4 Schematic of lock-in photo-infrared thermography	25
Fig. 3-5 Infrared Thermography Camera	26
Fig. 4-1 Shape and dimension of pipe specimen	27
Fig. 4-2 Deformation result of SSP-2H	29
Fig. 4-3 Phase map of SSP-0A	30
Fig. 4-4 Phase map of SSP-2G as the change of pressure amount	31
Fig. 4-5 Shearing result and Deformation of SSP-2G as the change of pressure amount	31
Fig. 4-6 Phase map of SSP-2H as the change of pressure amount	32
Fig. 4-7 Shearing result and Deformation of SSP-2H as the change of pressure amount	32

Fig. 4-8 Phase map of SSP-2D as the change of pressure amount	33
Fig. 4-9 Shearing result and Deformation of SSP-2D as the change of pressure amount	34
Fig. 4-10 Phase map of SSP-2P as the change of pressure amount	34
Fig. 4-11 Shearing result and Deformation of SSP-2P as the change of pressure amount	35
Fig. 4-12 Phase map of SSP-1H as the change of pressure amount	36
Fig. 4-13 Shearing result and Deformation of SSP-1H as the change of pressure amount	36
Fig. 4-14 Phase map of SSP-4H as the change of pressure amount	37
Fig. 4-15 Shearing result and Deformation of SSP-4H as the change of pressure amount	37
Fig. 4-16 Axial phase data according to defect length	38
Fig. 4-17 Infrared thermography images according to the defect thickness	40
Fig. 4-18 Infrared thermography images according to the defect length	41
Fig. 4-19 Data comparison by defect thickness	42
Fig. 4-20 Data comparison by defect length	42
Fig. 4-21 Composite materials plate inspection system	44
Fig. 4-22 Design of inside artificial defects	45
Fig. 4-23 Detection of inside artificial defects by IRT	46
Fig. 4-24 Impact damaged composite inspection system	47
Fig. 4-25 Specimen of impact damaged composite	48
Fig. 4-26 Phase map of specimen	48

Fig. 4-27 Deformation of 15J49
Fig. 4-28 Deformation of 30J50
Fig. 4-29 Deformation of 45J50
Fig. 4-30 Deformation of Top line51
Fig. 4-31 Deformation of Middle line52
Fig. 4-32 Deformation of Bottom line52

ABSTRACT

Defect Detection using Dual-Beam Shearography and Infrared Thermography

Jang, Suok

Advisor Prof. Kim, Koungsuk Ph.D.

Department of Advanced Parts and

Materials Engineering,

Graduate School of Chosun University

As the industrial site of the contemporary society becomes more high precision and high-tech, there is an increased need on the non-contact and non-destructive method, and the finite defect and corrosion of facilities and materials of the industrial site bring vast industrial and economic losses. Nondestructive testing methods with the merits of rapid response, high resolution, and manifold applications have been taken an important role to the safety diagnosis in industrial fields. Nondestructive testing(NDT) methods based on optical metrology are such as Infrared Thermography, Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), Shearography. And those can be sufficient in demand of NDT technical advance direction of present time.

Laser application techniques have been applied for displacement measurement technique based on interferometer, laser based ultrasonic testing, Holography, speckle correlation interferometry etc. Particularly, speckle correlation interferometry can get the surface displacement on large area with real time, high resolution and non-contact basis, which gives the advantages in vibration analysis, deformation analysis and non-destructive testing. With computer science

and image processing technology, film-based speckle correlation interferometry evolves into ESPI and Shearography, which substitute the film-based by the digitalized with CCD camera, frame grabber etc.

Shearography is can measure the first derivative of surface displacement and inspect object with whole-field and non-contact. This technique has introduced to the aerospace and nuclear industry for the non-destructive testing. Recently, the advantage of Shearography that is remarkably insensitive to environmental vibration is applied to measure the strain and deformation of an object. This study proposes new modified Shearography called dual-beam Shearography, which can measure the out-of-plane deformation and the in-plane deformation by using another illuminated laser beam and simple image processing technique.

Infrared thermography is a two-dimensional non-contact nondestructive evaluation that can detect internal defects from the thermal distribution by the inspection of infrared light radiated from the object surface.

Infrared thermal imaging of object is different from that of a defect, in a heated metal with an internal defect, and then location and size of a defect can be measured by the analysis of thermal imaging pattern. Infrared thermography is possible to measure long distance, and there is an advantage of high resolution by development of measurement equipment. Thus this technique can be a kind of non-contact nondestructive evaluation to apply to industrial structures, automobile and airplane etc.

In this paper, defect of nuclear energy pipe and composite material were, measured using dual-beam shearography and infrared thermography, quantitatively evaluated by the analysis of phase map and thermal image pattern.

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경

현대산업에서의 각종 구조물은 급속히 대형화, 고압화, 고속화되어 있어 그것의 품질과 규모에 큰 변화를 가져오고 있으며, 아울러 안정성에 대한 신뢰도가 중요한 문제로 대두되고 있다. 모든 재료는 완전무결할 수 없기 때문에 수명이 영구적일 수가 없으므로 재료부터 결함이 있을 뿐만 아니라 가공 중 및 사용 중에도 결함이 발생하고 성장함으로 재료의 수명에 영향을 준다. 그러므로 시험체에 어느 정도의 결함이 존재하는지도 알아야 되고 그 결함이 이들의 사용조건에서 얼마나 유해한지도 알아야 한다. 이 판단의 자료를 제공하는 것이 비파괴 검사이다. 즉 비파괴 검사로 시험체의 상태를 확인하여 위해하다고 판단되는 결함 등을 미리 기록하여 수명을 연장시킬 수 있고 안심하고 사용할 수 있게 된다. 또한 제조공정에서 비파괴 검사를 통해 불량품을 조기에 발견하고 조치함으로써 노동력과 재료, 그리고 시간을 절약하게 되어 원가의 절감효과를 가져온다. 그리고 구조물의 수명 예측으로 파손을 방지할 수 있다면 안전하고 경제적인 관리가 되어 원가절감의 효과가 있을 것이다. 공업기술의 발달과 함께 보다 높은 품질의 제품을 생산하면서 불량률을 최소화하고 제조공정의 낭비를 줄여 보다 빠르고 안전한 제품을 만드는 연구가 필요하게 되었다. 그래서 불량재료의 조기 발견, 용접 등의 가공 불량이나 사용 중의 손상을 검출하기 위한 비파괴 검사의 요구가 점점 높아지고 있다. 비파괴검사의 응용분야는 재료, 기기 및 구조물의 제조시의 검사 및 보수검사 등 폭넓은 분야에 적용되고 있다. 이러한 비파괴검사 기법 중에 다양한 방법이 있지만 특히 Infrared Thermography, Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI), Shearography 등의 광학기반의 비파괴검사기술이 짧은 시간에 많은 대상체를 비접촉, 실시간, 고분해능으로 검사가 가능하기 때문에 현재의 비파괴검사기술의 발전 방향의 요구에 충족할 수 있을 것이다.¹⁻⁵

레이저응용 검사기술은 간섭계 기반의 변위측정기술에서 레이저유도초음

파, 홀로그래피(Holography), 스페클 상관간섭법 (Speckle correlation interferometry) 등의 다양한 분야로 발전을 하고 있으며, 홀로그래피와 스페클 상관간섭법은 넓은 면적의 표면변위를 동시에 고분해능으로 측정한다는 장점으로 진동 또는 변형해석 분야에 많은 활용을 하고 있다.^{6,7} 특히, 비파괴 검사를 위한 스페클 상관간섭법은 컴퓨터 영상기술의 발전으로 ESPI와 Shearography로 발전을 하고 있으며, 변형해석, 진동해석, 비파괴 검사 등의 분야로 적용되고 있다.⁸⁻¹⁰

스페클 기법 중 Shearography는 변형의 도함수 성분을 구할 수 있는 개념으로 대상물에 결함이 있을 경우, 외력이 가해지면 응력집중이 발생하며, 강제변형은 변형을 변화를 발생시키지 않기 때문에 전단간섭법은 대상물의 결함을 계측하는데 매우 우수하며, 외란에 매우 강한 장점을 바탕으로 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 많이 사용되고 있다. 이러한 Shearography 기법의 장점을 그대로 포함하면서 면내변위를 측정할 수 있는 새로운 변형된 Shearography 기법을 소개하고자 한다. 이 새로운 시스템은 두 개의 빔을 물체에 각각 조사하여, 그 각각의 정보를 받아들임으로써, 기존의 하나의 빔만을 사용했던 Shearography 기법(Single-Beam Shearography)이 물체의 면외변위(Out-of-Plane Displacement)만을 측정¹¹했던 것과는 달리, 물체의 면내변위(In-Plane Displacement)를 측정할 수 있게 된다.^{12,13}

적외선 열화상을 이용한 비파괴시험법은 예측적 공장보수, 제품의 생산과정 및 모니터링과 연구, 개발 등 산업전반에 걸쳐 광범위하게 쓰이는 가장 유용한 도구중의 하나이며, 적외선 감지기에 의해 획득할 수 있는 열화상은 대상 물체의 열 분포에 의한 특징을 검출할 수 있기 때문에, 초기단계에서 시스템과 구조체내에 우선의 문제 해결책일 수 있으며, 각종 재해방지를 위한 목적에도 사용된다. 또한 사태가 심각해지기 전에 문제를 수정할 수 있는 필수 정보들을 제공해주기 때문에 고장이나 작동장치를 피할 수 있다. 그러므로 대체나 수리적인 측면에서 절감을 이룰 수 있다.¹⁴ 적외선 열화상을 이용한 방법은 원거리에서도 측정이 가능하며 측정 장비의 발전으로 분해능 또한 매우 뛰어난 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 비파괴검사 방법 중 Dual-Beam 전단간섭법과 적외선열화상

법을 이용하여 금속부재가 가지고 있는 내부결함에 대하여 결함의 크기, 형상, 위치를 분석하고자 한다.

제 2 절 연구목표 및 내용

다양한 구조물의 안전한 유지와 관리를 위해서는 재료 내부에 보이지 않는 많은 결함을 검출하는 것이 상당히 중요하다. 원자력 배관에서 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion, FAC)에 의한 배관의 두께 감소(감육) 현상은 탄소강 배관의 건전성을 저하시키는 주요 손상 메커니즘중 하나로 알려져 있다.¹⁵ 따라서 탄소강 배관에서 감육결함은 원전 배관의 건전성 확보 측면에서 중요한 관리 항목으로 대두되고 있으며, 배관계통에서 감육 결함을 예측하고 검출된 결함을 평가할 수 있는 적절한 절차와 방법이 요구되고 있다.

복합재료는 다른 금속재료 보다 강도, 강성, 비강도, 비강성등 많은 특성이 우수하기 때문에 우주항공재료나 자동차재료에 많이 사용되고 있지만 복합재료는 탄성 변형 에너지를 초과하는 하중을 받으면 소성 변형이 거의 없기 때문에 곧바로 손상이나 파괴를 발생시키며 기계적 성질이 급격히 저하된다. 이러한 복합재 구조는 압축강도에 약한 특성이 있어서 손상이 발생하였을 때 재료 고유의 강도를 저하시키며 이로 인하여 복합재료로 구성되는 구조물의 수명 감소나 미소결함의 진전으로 인해 예기치 못한 사고나 문제를 야기 시키게 된다. 또한 복합재료로 구성된 구조체의 외부요인에 의한 충돌시 표면에서는 거의 관찰할 수 없는 층간분리, 모재균열에 의해 내부손상이 발생하게 되고, 충격에너지에 의해 손상이 증가하게 되면 구조체로서의 역할을 수행할 수 없게 된다. 따라서 복합재 구조체가 충격하중에 대한 보다 신뢰성 있고 안전한 설계방안을 확립하기 위하여 충격손상거동에 대한 체계적인 연구가 필요로 한다.

본 연구에서는 위에서 제시한 원자력 배관과 복합재료에서의 요구들을 해결하기 위해 Dual-Beam 전단간섭법과 적외선열화상기법을 이용하여 결함의 효과적 검출을 제시하는 것이고, 비파괴검사분야의 현장기술로 정착하는데 일조하고자 한다.

제 2 장 이론적 배경

제 1 절 스페클 패턴 간섭법

1. 스페클 이론

레이저 스페클(laser speckle)은 단색성(monochromaticity)이며 간섭성(coherency)이 좋은 레이저 광이 거친 표면에 반사되거나 굴절률이 균일하지 않는 매질을 통과할 때 고운 입자 형태의 밝고 어두운 점이 무질서한 분포를 이루게 되는 것을 말한다. 레이저 빛을 임의의 대상물에 비추면, 대상물의 표면에서 어른거리는 입자를 볼 수 있다. 이러한 어른거림은 대상물의 표면에서 난반사된 빛이 공간상에서 서로 간섭을 일으키게 되고, 이러한 간섭 효과가 밝고 어두운 부분이 무질서하게 분포하는 어른거림의 형태로 나타나는데, 이를 스페클 효과라고 한다.⁷ 이러한 스페클은 레이저의 가간섭성과 대상물 표면의 광학 거칠기 때문에 발생하는데, 즉, 대상물의 표면 거칠기가 조사되는 레이저 빛의 파장정도나 그보다 클 때 나타난다. 이 스페클은 또 다른 스페클과 간섭하여 새로운 스페클을 형성할 수도 있으며, 물체표면 변위에 대해 함께 움직이거나, 위상변화를 일으켜 물체 변위의 정보 전달자로서 광 검출기에 광강도(intensity) 분포로 기록되어진다. 스페클은 관찰하는 방법에 따라 objective speckle과 subjective speckle로 나누어진다. Fig. 2-1은 objective speckle과 subjective speckle의 형성을 보여 주고 있다. 즉, 이 두 스페클의 차이는 결상렌즈의 사용 여부에 따라서 구별된다. objective speckle은 관측면의 위치에 따라 변화하게 되며, 대상물의 표면에 빛이 비출 때, 대상물 표면의 모든 점에서는 흡수와 반사가 일어나는데, 반사가 일어나는 점은 Huygens-Fresnel의 2차 파면과 유사한 구면파를 생성한다. 표면의 모든 점으로부터 산란된 빛의 진폭의 합은 공간상의 임의의 한 점에서 빛의 복소 진폭의 합으로 나타난다. 이를 Fig. 2-1에 나타내었으며, 이의 물리적 의미를 살펴보면 다음과 같다. 대상물 표면의 모든 점은 Q에 영향을 주게 되며, Q와 인접한 Q'사이의 거리가 Δx 라고 하고, P_1 과 Q, P_2 와 Q

까지의 경로차는 s 이며, P_1 과 Q , P_2 와 Q' 까지의 경로차는 s' 이라고 할때, s 와 s' 과의 상대적인 경로 변화는 Eq. (2-1)과 같이 유도할 수 있다.

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

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

$$\Delta s = s' - s = \frac{\Delta x D}{L} \quad (2-1)$$

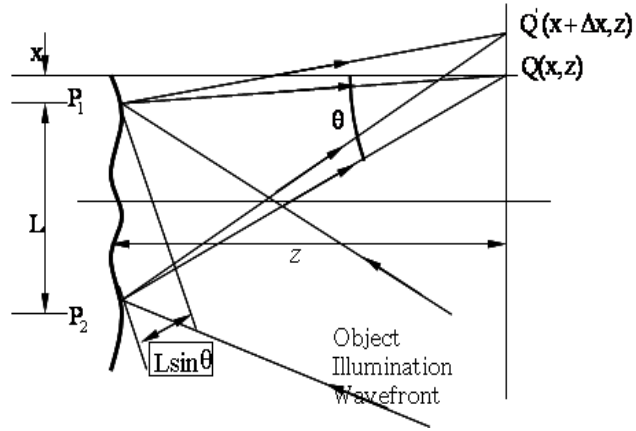
Δs 가 파장보다 상당히 작다면, 상대적 위상은 근사적으로 동일하지만, $\Delta x D/L \simeq \lambda$ 라면 인접한 점과의 위상은 전혀 다르기 때문에, Q 와 Q' 에서 빛의 강도는 상호 연관성이 없게 된다. 이렇게 상호 연관성이 없게 되는 거리 Δx 의 2배를 스페클의 크기라고 할 수 있으며, 그 거리는 Eq. (2-2)과 같이 표현할 수 있다.¹⁶

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

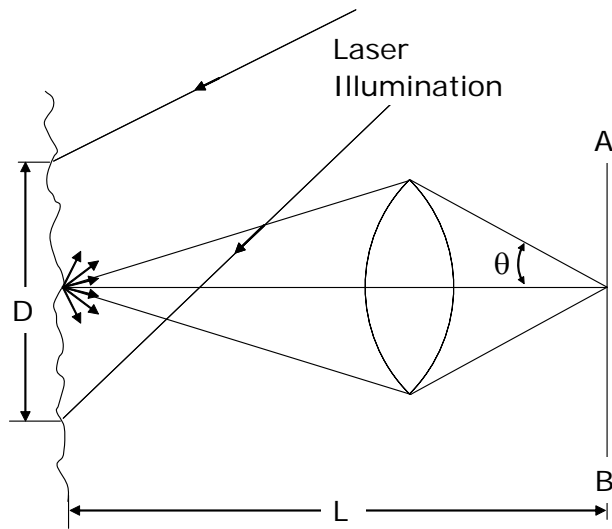
여기서 λ : 조사되는 레이저의 파장, L : 물체와 결상면 사이의 거리, D : 물체에 조사된 면적 이다.

스페클 상관 간섭법 (speckle correlation interferometry)에서는 subjective speckle pattern을 대부분 사용하고 있으며, 공간분해능은 subjective speckle의 크기에 의존하게 된다. subjective speckle은 결상렌즈가 사용되어 형성이 되는 스페클로 정의를 하며, 렌즈의 회절한계로 인하여 objective speckle과는 다르게 정의하고 있다. 즉, 결상렌즈는 물체표면 위의 한 점을 결상면의 한 점으로 결상함으로 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 못함으로, 결상면에 대

응하는 물체 위의 한 점을 중심으로 렌즈의 회절크기 만큼이 결상면 위의 스페클 형성에 영향을 주게 된다.



(a) Objective speckle



(b) Subjective speckle

Fig. 2-1 Formation of speckle pattern

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(2-3)과 같이 정의된다.

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

여기에서 M : 렌즈 확대배율, λ : 조사된 레이저의 파장, F : 렌즈의 f-number 이다. 스페클은 하나의 위상정보를 전달하며, 그 크기는 측정 대상의 공간분해능을 결정하게 된다. 실제 적용실험에서 zoom 렌즈 광학배율 1 배, 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

$$S_{sub\ on\ object} = 1.22(1 + M)\lambda \frac{F}{M} \quad (2-4)$$

으로 정의되며, 위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며¹⁷, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다.¹⁶ 측정시스템에서 스페클의 이상적인 크기는 CCD pixel 하나에 한 개의 스페클이 존재할 때이다.

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

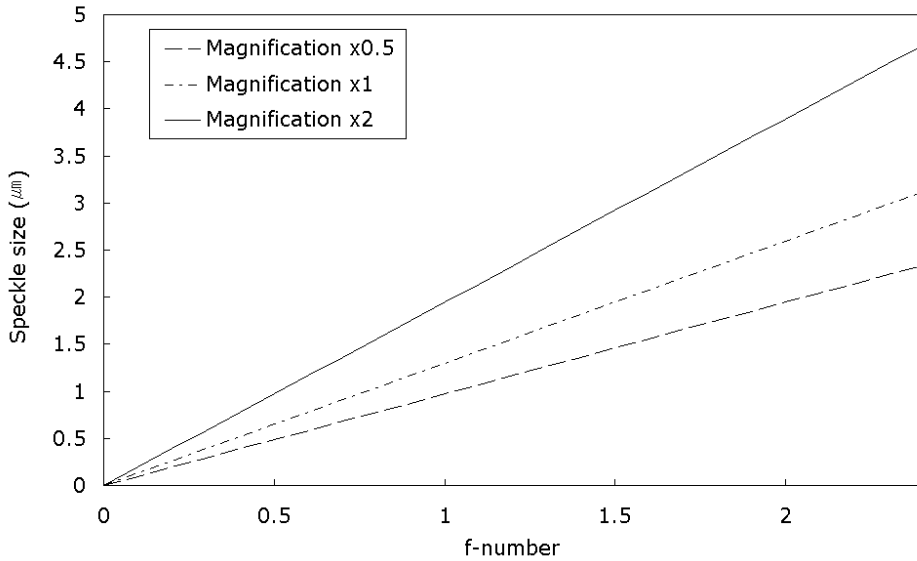


Fig. 2-2 Subjective speckle size on the CCD image plane

2. 간섭

간섭은 두 개의 가 간섭성의 빔이 서로 만났을 때 빔의 강도가 주기별로 증가 또는 감소하는 현상을 말한다. 두 빔이 서로 중첩할 때 형성되는 광 강도의 분포 I 는,

$$I = A(x, y) + B(x, y) \cos [(k_1 - k_2)r - (\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2] \quad (2-5)$$

$A(x, y)$ 는 바이어스(Bias) 강도, $B(x, y)$ 는 변조파의 강도, $k_i, \omega_i, \phi_i (i = 1, 2)$ 는 각각 1번째 빔의 파수, 각 주파수, 초기 위상값을 나타내고 $B(x, y)/A(x, y)$ 간섭무늬의 명암(contrast), 즉 가간섭도(visibility)를 나타낸다.

$$\begin{aligned} A(x, y) &= (I_1 + I_2)/2 \\ B(x, y) &= (I_1 - I_2)/2 \end{aligned} \quad (2-6)$$

간섭현상은 동일 광원으로부터 나온 파가 서로 다른 경로로 전파되어 임의의 한 점에 동시에 도달할 때 관측자가 볼 수 있는 것을 말하며, 이 현상을 기술하기 위하여 파의 전기장을 이용한다. 각 경로의 전기장을

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01}\cos(kx_1 - wt_1 + \phi_1) \\ E_2 &= E_{02}\cos(kx_2 - wt + \phi_2) \end{aligned} \quad (2-7)$$

라고 하면, 합성은

$$E_t = E_1 + E_2 \quad (2-8)$$

여기서 고려해야 할 사항은 E_1 과 E_2 는 모두 가시범위 내에서는 상당히 빠른 주파수로 변화하기 때문에 이들의 변화를 일정 시간동안 평균하게 되면 0이 된다. 왜냐하면 E_1 은 E_{01} 과 $-E_{01}$ 사이에서 진동하기 때문이다. 즉, E_1 과 E_2 의 변화는 의미가 없고 이들의 제곱값은 각각 그들의 평균값이 $(E_{01})^2$ 에서 0 사이에 또는 $(E_{02})^2$ 에서 0사이에 존재하기 때문에 물리적 의미를 갖는다. 간섭무늬의 세기는 진폭의 제곱에 비례. 우리가 관측하는 것이 에너지인데 이것은 파의 진폭의 제곱을 관측하는 것이다. 이를 I 로 표시한다면, 이 때 I 는 어떤 면을 비추는 빛의 총량을 언급할 때 I 라고 표기하는 복사조도(irradiance), 즉 단위 시간당 단위 면적당 평균에너지라 한다.

$$I \equiv \langle S \rangle_T = \frac{c\epsilon_0}{2} E_o^2 \quad (2-9)$$

$I = \epsilon_0 c \langle E^2 \rangle_T$ 로 표현한다. 여기서, $\langle E^2 \rangle_T$ 의 의미는 전기장 크기의 제곱의 시간평균 즉, $\langle E \cdot E \rangle_T$ 이다.

$$E^2 = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2) = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \quad (2-10)$$

양변에 시간 평균을 취하면,

$$\begin{aligned}
 I &= I_1 + I_2 + I_{12} & I_1 &= \langle E_1^2 \rangle_T \\
 & & I_2 &= \langle E_2^2 \rangle_T \\
 & & I_{12} &= 2 \langle E_1 \cdot E_2 \rangle_T
 \end{aligned} \tag{2-11}$$

I_{12} 항을 간섭항(interference term)이라고 하는데 이 식의 값을 구해보면

$$E_1 \cdot E_2 = E_{01} \cdot E_{02} \cos(k_1 \cdot r - wt + \epsilon_1) \times \cos(k_2 \cdot r - wt + \epsilon_2)$$

$$\begin{aligned}
 E_1 \cdot E_2 &= E_{01} \cdot E_{02} [\cos(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \cos wt + \sin(k_1 \cdot r + \epsilon_1) \sin wt] \\
 &\quad \times [\cos(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \cos wt + \sin(k_2 \cdot r + \epsilon_2) \sin wt]
 \end{aligned} \tag{2-12}$$

이 식에 시간 간격 T에 대해서 함수를 시간 평균을 한 후 얼마간에 수학적 과정을 거치면, 총 복사 조도를 구할 수 있다.¹⁸

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \tag{2-13}$$

3. 프린지의 형성

카메라 신호는 입력된 빛의 세기에 비례하기 때문에 변형에 대한 간섭무늬 형상은 변형 전과 변형 후의 각각의 이미지를 저장하고, 저장된 이미지를 합산처리하거나 감산처리하여 변형에 의한 간섭 줄무늬를 나타낼 수 있다.¹⁹

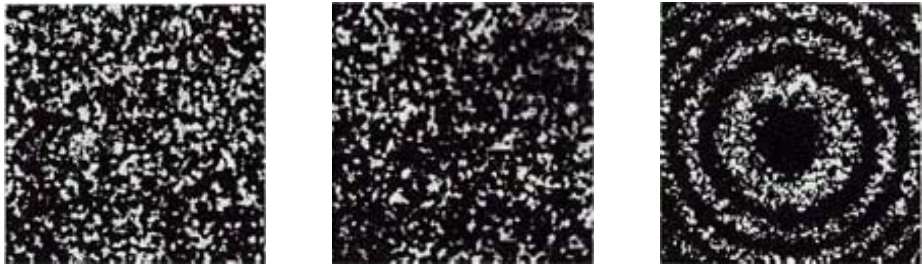
$$I_{before} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos \phi \tag{2-14}$$

$$I_{after} = I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \Delta\phi) \tag{2-15}$$

여기서 I_{before} : 물체변형전의 광강도, I_{after} : 물체변형후의 광강도, $\Delta\phi$: 물체변형에 따른 위상변화이다. 변형전후의 두 개의 스페클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 식 (2-16)와 같이 나타나게 된다.

$$\begin{aligned}
I_{sub} &= I_{before} - I_{after} \\
&= 4\sqrt{I_O I_R} \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)
\end{aligned}
\tag{2-16}$$

여기서 I_{sub} : 물체변형전후의 광강도 분포의 감산 처리된 광강도이다.



(a) Before image (b) After image (c) Subtraction image

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

4. 위상이동기법(phase shifting method)

PZT를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 Shearography에 의해 형성되는 간섭정보로부터 물체의 변형에 따른 위상을 추출하기 위한 기법으로 가장 널리 사용되고 있으며, 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 위상추출 알고리즘은 4단계 위상이동기법(4-step phase shifting method)으로 3개의 미지수를 구하기 위해 $\pi/2$ 씩 3번의 위상변조를 하여 4개의 방정식을 식 (2-17)과 같이 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos\phi \\
I_2 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi/2) \\
I_3 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + \pi) \\
I_4 &= I_O + I_R + 2\sqrt{I_O I_R} \cos(\phi + 3\pi/2)
\end{aligned}
\tag{2-17}$$

4개의 방정식을 식 (2-18)와 같이 조합하여 CCD pixel의 각 점에서 위상을

구할 수 있으며, 각 위상점들의 연결이 위상지도(phase map)를 형성하게 된다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right) \quad (2-18)$$

ESPI에서 변형해석을 위한 실험에서는 변형 전과 후에 각각 위상이동기법을 적용하여 변형 전의 위상(ϕ_{before})과 변형후의 위상(ϕ_{after})을 각각 구하고 그 차를 구함으로써 실제 물체변형을 식 (2-19)과 같이 측정할 수 있게 된다.

$$\Delta\phi = \phi_{before} - \phi_{after} \quad (2-19)$$

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

제 2 절 광학 간섭계

1. 전단간섭계 원리

Fig. 2-4는 전단간섭계의 원리를 나타내는 개략도로서 ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이 때 스펙클의 발생은 면외변형 축전 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(shearing)되어 CCD의 상면(image plane)에 맞히게 된다. 이렇게 두 빛이 간섭하게 되는

것은 면외변형측정 간섭계와 동일하며, 변형 전 후 감산처리로 발생하는 간섭줄무늬는 면외변형측정 간섭계와 달리 대상물에 발생한 면외변형의 기울기를 표현하게 된다. Mirror 2를 전단거울이라고 부르며, Mirror 2가 기울어진 방향을 전단방향, 기울어진 각도를 전단량이라고 하고 δx 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다.

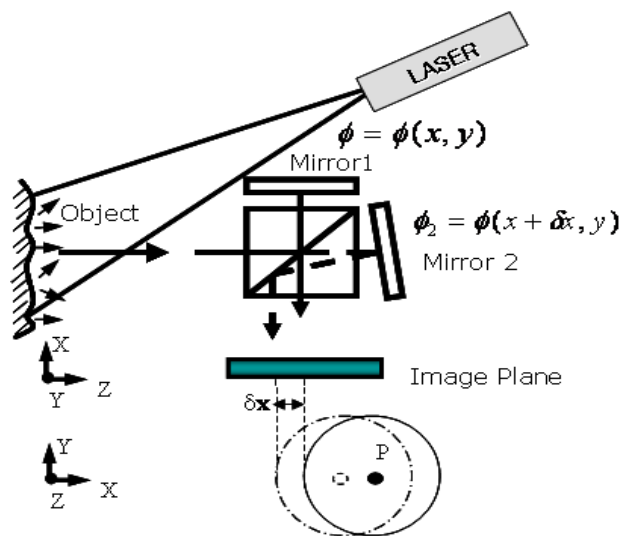


Fig. 2-4 Out-of-plane displacement sensitive interferometer

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 다음과 같다.

$$\phi = \phi(x + \delta x, y) - \phi(x, y) \quad (2-20)$$

변형에 의한 위상차의 변화 $\Delta\phi$ 는 Eq. (2-22)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하며, 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 다음 식 Eq.(2-21)을 이용하

게 된다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며, 모든 광계축의 기본식이 된다.

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

이때 Eq.(2-21)와 차이점은 Eq. (2-23)에 표현한 바와 같이 \vec{d} 와 \vec{d}' 은 임의의 P에 조사된 두 점의 각각의 변형이다.⁷

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi' - \phi = (\phi_2' - \phi_1') - (\phi_2 - \phi_1) \\ &= (\phi_2' - \phi_2) - (\phi_1' - \phi_1) \end{aligned} \quad (2-22)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\vec{n}_i - \vec{n}_v) \cdot (\vec{d} - \vec{d}') \quad (2-23)$$

레이저 빛이 대상물에 조사되는 각도와 상면의 관측각도가 수직하면 Eq.(2-23)을 Eq.(2-24)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta d \quad (2-24)$$

Δd 는 테일러급수에 의해 Eq. (2-25)와 같이 표현할 수 있으며, Δx 는 상면에서 전단량 δx 와 같고, 이 값은 매우 작기 때문에 Eq. (2-25)에서 2차 이상의 고차항을 무시하면, Eq. (2-26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-25)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \right) \delta x \quad (2-26)$$

2. 전단간섭계를 이용한 변형 측정

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

$$f'(x_i) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_i + h) - f(x_i)}{h} \quad (2-27)$$

전단간섭법을 적용하는 식(2-27)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(2-28)와 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형 Δd 는 식(2-29)와 같다

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

$$\begin{aligned} \Delta d &= d(x) - d(x_0) \\ &= \frac{\Delta x}{1!} \frac{\partial d}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 d}{\partial x^2} + \dots \end{aligned} \quad (2-29)$$

ESPI나 전단간섭법 모두 화상처리이므로 식(2-28)과 식(2-29)의 각각의 기호를 변형 f , 대응화소 x_i , 전단량화소 h 로 바꾸어 쓰면, 식(2-30)와 같이 바꾸어 표현할 수 있으며, 이를 다시 f' 으로 정리하면 식(2-31)와 같다.

$$f'(x_i)h \approx f(x_i + h) - f(x_i) \quad (2-30)$$

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

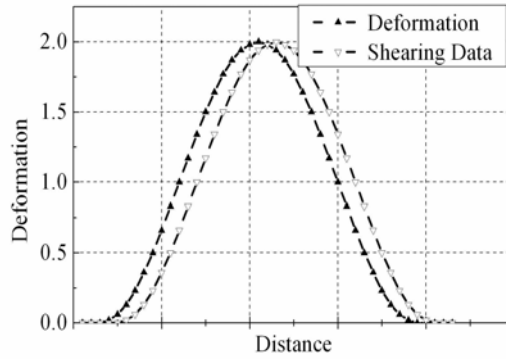
식 (2-31)은 테일러 정리를 이용한 유한차분법의 전진차분법과 동일한 결과이며, 전단간섭법은 전단방향에 따라 유한차분법에서 전방차분 또는 후방차분에 해당되고, 이를 이용하여 수치적분을 수행할 수 있다.

식 (2-30)을 식 (2-28)에 대입하면 식 (2-32)과 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

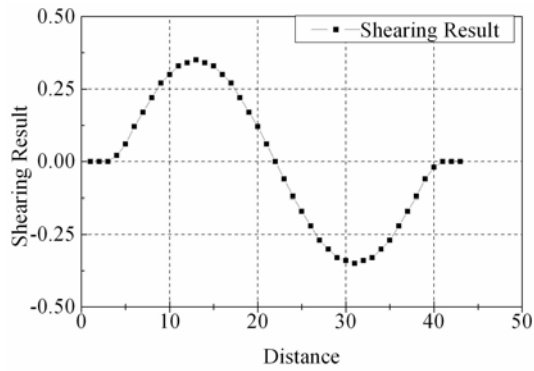
$$\Delta\phi \approx \frac{4\pi}{\lambda} f h \quad (2-32)$$

전단간섭계의 전단거울이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 5(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(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.²⁰

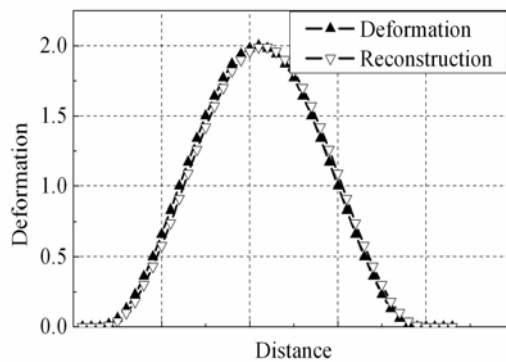
본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 5(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 5(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

Fig. 2-5 Measurement result of surface deformation by ESPI and Shearography

3. Dual-Beam 전단간섭계 원리

변형은 면내 변위의 도함수인 다음의 요소(분력)과 관계가 있다.

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{and} \quad e_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2-33)$$

여기서, e_x, e_y 는 각각 x 와 y 의 변형성분이다.

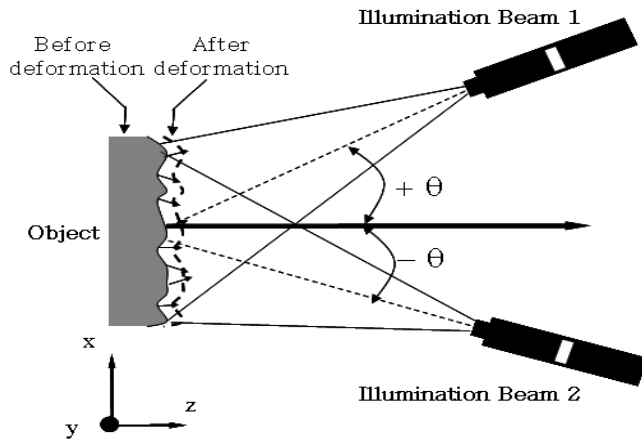


Fig. 2-6 Dual-beam interferometer geometry

Fig. 2-6은 x 축 변형을 측정하기 위한 Dual-beam 전단간섭계의 좌표구성이 다. 대상체에 대한 측정은 B.S에 의해 나누어진 두 개의 레이저빔을 z 축에 대해서 동일한 각도로 번갈아 조사한다. 빔의 방향은 측정의 변형성분에 달려있다. 변형성분의 측정은 그림에서 보듯이 x 방향과 평행하고, 두 빔의 입사는 각각 y, z 평면에 대칭이다. 위상변화는 $+\theta$ beam 과 $-\theta$ beam 이 각각 조사하는 동안의 물체의 변형에 기인한다. $+\theta$ 에 기인하는 위상변화 $\Delta_{+\theta}$ 은 다음과 같다.¹⁹

$$\Delta_{+\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left\{ [1 + \cos(+\theta)] \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \sin(+\theta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \quad (2-34)$$

여기서 λ 는 레이저의 파장이고, δx 는 게이지 길이에 상당하는 전단량이다. $-\theta$ 에 의한 위상변화 $\Delta_{-\theta}$ 은 다음으로 주어진다.

$$\Delta_{-\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left\{ [1 + \cos(-\theta)] \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \sin(-\theta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \quad (2-35)$$

측정은 대상체에 한번에 하나의 빔만이 조사된다. $+\theta$ beam의 조사와 함께 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 만큼의 위상이동에 대응하는 네 개의 스페클 이미지는 연속적으로 저장된다. 마찬가지로 $-\theta$ beam이 조사되는 동안 네 개의 스페클 위상이동 이미지들도 저장된다. 대상체의 변형 이후의 스페클 이미지는 오직 영(zero) 위상을 나타내어 각각의 조사에 대해 개별적으로 저장된다. 식 (2-34)과 식 (2-35)의 감산은 식 (2-36)과 같다.

$$\Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = \frac{4\pi\delta x \sin\theta}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2-36)$$

그러므로, x 방향의 면내변형은 결정된다. 만일, z 축에 대해서 90도 회전해서 조사가 이루어지면, 전단 방향은 y 축과 평행해지고 식 (2-36)은 다음이 된다.

$$\Delta_{+\theta} - \Delta_{-\theta} = \frac{4\pi\delta y \sin\theta}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2-37)$$

실제로, 어떤 변형 분력은 조사되는 시스템의 방향을 조절하면 측정되어질 수 있다. 면외변위의 도함수도 또한 $(\Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta})$ 의 합을 컴퓨터계산에 의해서 또한 결정할 수 있다.

$$\Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta} = \frac{4\pi\delta x (1 + \cos\theta)}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2-38)$$

이것은 x 방향으로 평행한 전단 방향이다. y 방향으로 평행한 전단량이면 다

음으로 주어진다.

$$\Delta_{+\theta} + \Delta_{-\theta} = \frac{4\pi\delta y(1 + \cos\theta)}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2-39)$$

제 3 절 적외선열화상기술

적외선 열화상은 주어진 표면을 따라 온도에 관련된 징후, 증거가 되는 열 패턴 그리고 검출을 하기 위해 사용되는 비 접촉, 비파괴 시험의 한 형태이다. 정기적으로 수행되면 적외선 정밀검사는 초기에 장비 고장을 확인하는데 도움을 준다. 적외선 에너지는 온도의 직접적이고 비례적인 함수이기 때문에 동영상은 모니터에 온도 레벨을 나타내게 디자인 되어있다. 최신의 열화상 장치는 0.08℃의 감도로 -20℃에서 1500℃의 물체온도를 감지할 수 있는 능력이 있다. 특별한 온도차를 가진 부품이나 지역들이 있으면 열화상 장치는 그 문제의 온도를 측정 할 수 있게 된다. 열화상들은 PC카드나 플로피디스크로 기록되어질 수 있다. 적외선 열화상은 열전도에 의해 방사되는 보이지 않는 적외선 광선을 보이고 화상으로 만들어 주는 기술이다. 가장 전형적인 열화상 카메라는 캠코더와 유사하고 열복사 동영상을 만든다. 좀 더 정교한 카메라는 실제로 어떤 물체의 온도 혹은 화상 안에 있는 표면의 온도를 측정할 수 있다. 그리고 쉽게 열 패턴을 해석할 수 있는 칼라영상을 만들어 낼 수 있다. 열화상은 온도차로 인하여 보여 질 수 있는 문제 또는 조건에 어떤 상황이라도 적용될 수 있고 많은 상황에 대해서 적용하기가 쉽다. 적외선 열화상 기법은 적외선을 이용한 비파괴 검사의 하나로서 적외선 영상장치의 발전과 함께 검사의 방법이 다른 시험법에 비해 비접촉성으로서 안전하며, 고속으로 측정 가능하고, 기록의 보존 등이 용이한 잇점을 가지고 있다.²¹ 적외선의 에너지 복사(radiation) 파장대는 가시광선과 마이크로파 사이의 0.75 μm에서 1000 μm 파장대에 있는 전자기파이다. 적외선 복사를 전기적 신호로 바꾸는 장치를 적외선 감지기(sensor)라 한다. 넓은 파장대에 있는 복사에너지의 감지를 위해 광 다이오드(photodiodes), 광전도 검출기(photoconductive detector), 광기전 검출기(photovoltaic detector), 초전기 검출기

(pyroelectric detector) 그리고 복합형(hybrid)검출기 등이 사용된다.²² 특히, 주파수 대역에 따른 적외선 감지기는 근적외선 감지기와 원적외선 감지기가 있다. 원적외선 감지기는 상온에서 방출되는 적외선의 검출에 용이하고, 근적외선 감지기는 상온보다 훨씬 높은 온도에서 방출되는 적외선을 검출하는데 용이하다. 따라서 두 감지기의 감지할 수 있는 온도의 범위가 다르기 때문에 두 적외선 감지기를 융합하여 물체의 내부 상태를 파악하는데 이용할 수 있다.²³ 적외선 열화상(Infrared Thermography)은 물체의 표면에서 자연히 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포를 온도가 높은 곳은 적색으로, 낮은 곳은 청색으로 표시하여 나타낸 화상(image)이다.²⁴

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 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 본 논문에서는 결함검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 2-7과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수로 입사되는 열원(heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 식 (2-40)로 표현되는 고체 내의 1차원 열전도방정식에서 외부 자극원으로서 광(할로겐 램프)을 사용하여 대상체에 조화함수($T = T_0 \cos \omega t$)로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다.^{25,26}

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2-40)$$

여기에서 T는 온도, t는 시간, k는 열전도계수, ρ는 밀도, c_p는 비열, x는 열유동 방향으로의 거리이다. 조화함수로 가열된 식 (2-40)의 해는 식 (2-41)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (2-41)$$

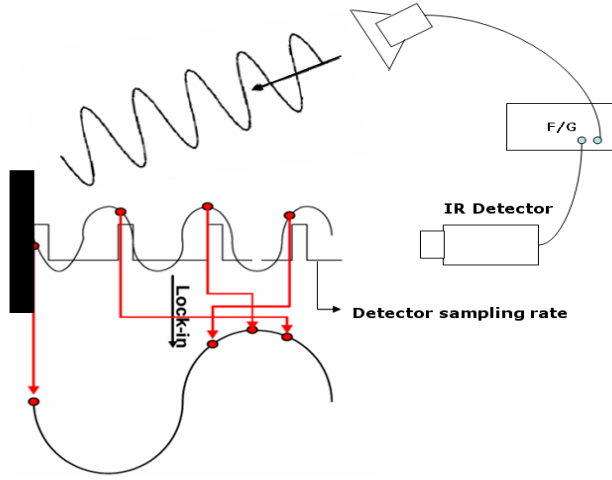


Fig. 2-7 Signal processing of lock-in infrared thermography

여기서 침투깊이(thermal diffusion length), $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$, 열확산계수 (thermal diffusivity), $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 이다. 위상잠금 기법에서는 식 (2-41)에서 측정결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화할 수 있다. 식 (2-41)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기시켜 자극원의 $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호 I_1, I_2, I_3, I_4 를 식 (2-42)과 같이 획득하고, 식 (2-43)를 사용하여 추출할 수 있다.²⁷

$$\begin{aligned}
 I_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\
 I_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\
 I_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\
 I_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2)
 \end{aligned} \tag{2-42}$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \tag{2-43}$$

제 3 장 실험장치

제 1 절 Dual-Beam 전단간섭계 시스템

Fig. 3-1은 Dual-Beam Shearography system을 나타내고 있다. Nd:YAG 레이저로부터 나온 광원은 B.S를 통해 두 개의 빔으로 나누어진다. 두 개로 나누어진 빔 중 하나는 셔터(Shutter)에 의해 차단되어지고, 나머지 하나의 빔은 확산렌즈를 통해 시험편의 전 영역에 걸쳐 조사된다. 시험편을 통해서 반사된 빔은 B.S에 의해 다시 두 빔으로 나뉘어 PZT를 거쳐 위상 이동된 빔과 전단거울에 의해 경사진 빔이 CCD 카메라의 수광소자에 맞춰 간섭 무늬가 결상된다.

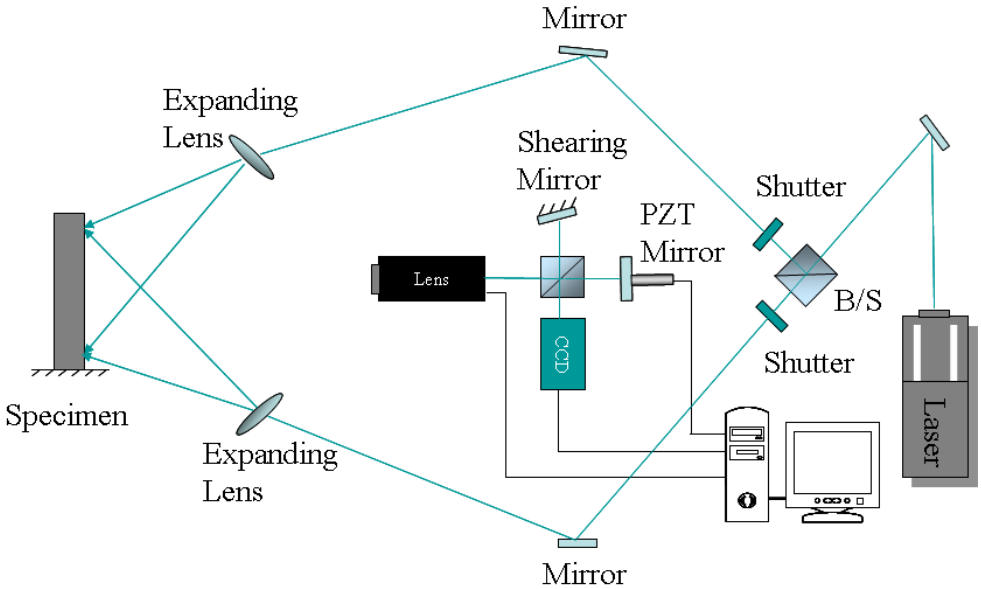


Fig. 3-1 Schematic of Dual-Beam Shearography system

다시, 셔터에 의해 차단된 빔을 통과시키고 기존의 통과했던 빔은 셔터에 의해 차단되어져서 위와 동일한 방법으로 확산렌즈를 통해 시험편의 전 영역에

걸쳐 조사되어지고 반사된 빔은 전단 간섭계로 유입되어지는 과정을 거치게 된다. 이 때, CCD 카메라로부터 받아들인 시험편의 변형 전과 변형 후의 이미지는 프레임 그래버(Frame Grabber)가 내장된 컴퓨터의 화상처리 프로그램에 의해 감산처리 되어지며 모니터 상에 전단 간섭무늬를 출력하게 된다.

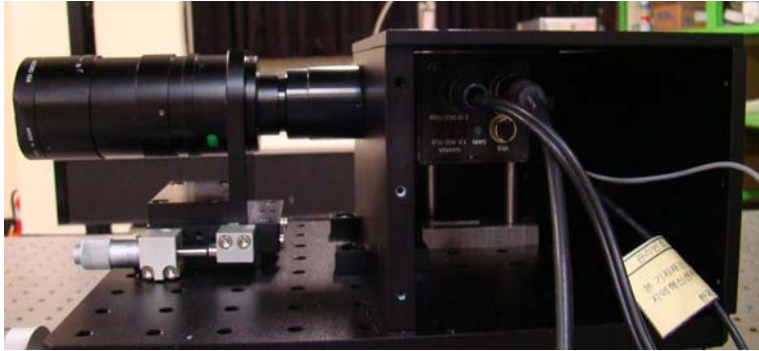


Fig. 3-2 Dual-Beam Shearography system

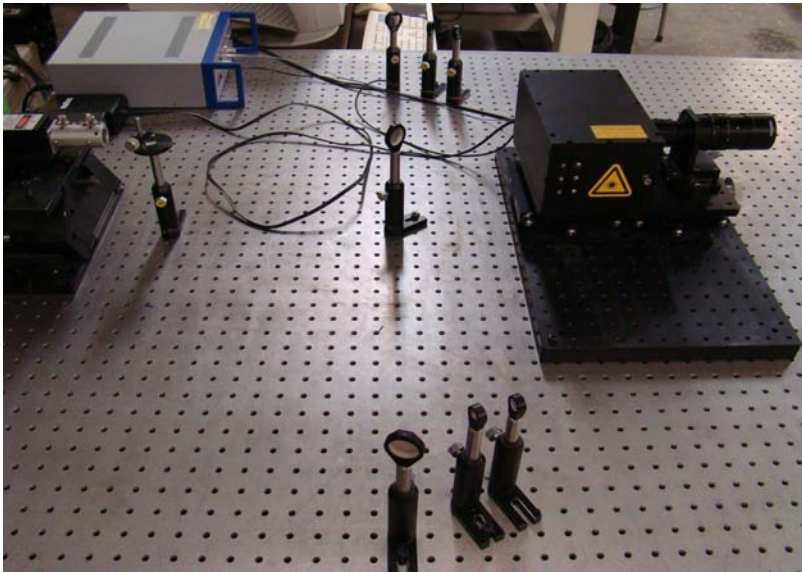


Fig. 3-3 Composition of Dual-Beam Shearography system

제 2 절 적외선화상시스템

위상잠금 적외선 열화상 시스템의 구성을 Fig. 3-4에 나타내었으며, 프랑스 Cedip사의 Silver 480 사용제품을 사용하였다. 이 시스템에서는 함수발생기에 의해 할로겐 램프의 주파수를 조절하고 이와 동기화하여 적외선 검출소자로부터 위상이미지(Phase map)를 사용자에게 제공한다. 본 연구에서는 위상 이미지를 획득하여 결함의 크기 및 위치를 평가한다. 다음 Table 3-1에 적외선 열화상카메라(IR camera)의 사양을 나타내었다.

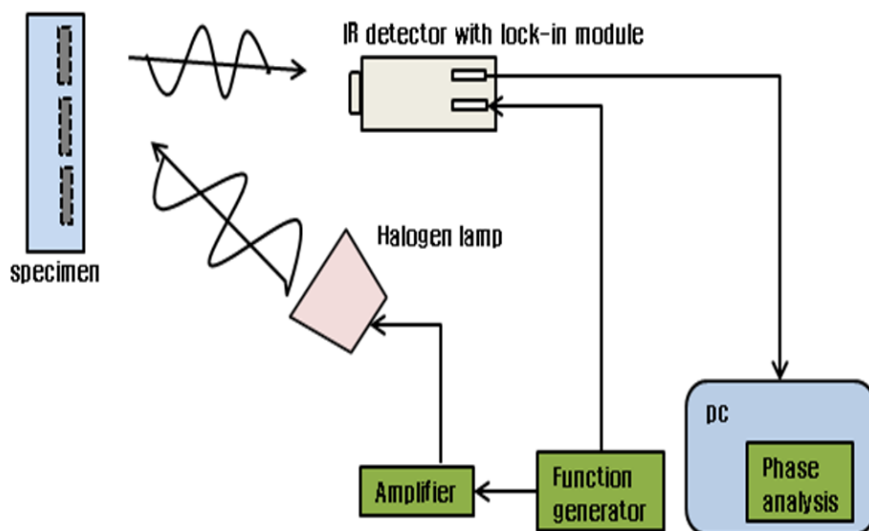


Fig. 3-4 Schematic of lock-in photo-infrared thermography

Table 3-1 Specification of IR camera

Description	Technical data
Detector Materials	InSb
Number of Pixels / Pitch	320×256 pixels / 30 μm
Spectral Response	3.7~5.0 μm
Frame rate	5Hz~380(400)Hz
Integration time	10 μs to 5000 μs programmable, 1 μs step
NETD	< 25mK (20mK typical)
Temperature measure range	-15~2000°C
Digital output	CAMLINK / Optional GigE
Remote control	RS232

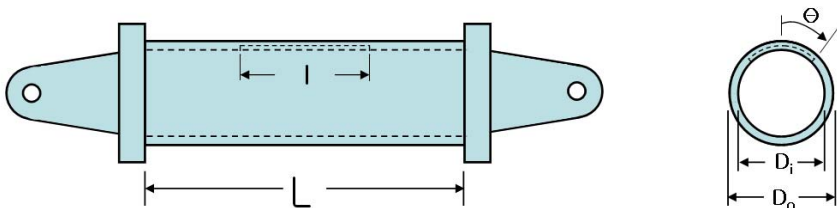


Fig. 3-5 Infrared Thermography Camera

제 4 장 실험결과

제 1 절 원자력배관 내부결함측정

현재 발전소등의 생산설비에 사용되는 배관은 생산설비의 성능이나 안전성 유지에 있어서 매우 중요한 설비의 일부이다. 배관은 사용기간의 증가에 따라 피로, 부식 등 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있는데, 그 중 하나가 배관 내부를 흐르는 유체에 의한 침식과 부식에 의해 발생하는 감육 결함(wall thinning defect)이다. 이러한 감육결함으로 인한 국부적인 응력 집중으로 배관이 파손되는 사례가 빈번히 발생하곤 한다. 이러한 파손을 사전에 검출하기 위해 본 연구에서는 인공으로 결함을 제작한 직관시험편으로 적외선열화상기술과 Dual-Beam 전단간섭계를 이용하여 내부결함을 측정하였다. 본 연구에서 사용한 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 4-1에 나타내었다. 시험편의 재질은 ASTM A106 GrB로써 항복강도는 240MPa, 인장강도는 415MPa, 길이방향 연신률은 30%이다. Table 4-1은 각 조건별 시험편의 종류를 나타낸 것이다. 인공결함을 가진 직관시험편에 대한 실험을 위해 가압장치를 설치하였고, 정밀한 압력 제어를 위해 정밀 압력계이치를 부착하여 압력을 제어하였다. 각 실험에 앞서 무결함 직관시험편에 대한 실험을 수행하여 기준 데이터를 획득하였다.



*직관의 길이(L)=342.00mm

*외경(D_o)=113.40mm *내경(D_i)=99.00mm

Fig. 4-1 Shape and dimension of pipe specimen

Table 4-1 Type of specimen

1. Specimen with no defect

ID No.	Length (mm)	Width (2 θ)	Thickness tp (mm)
SSP-0A	0.00	0°	7.2

2. Defect thickness related type

ID No.	Length (mm)	Width (2 θ)	Thickness tp (mm)
SSP-2G	113.40	90°	3.6
SSP-2H	113.40	90°	1.8

3. Defect width related type

ID No.	Length (mm)	Width (2 θ)	Thickness tp (mm)
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-2D	113.40	45°	1.8
SSP-2P	113.40	180°	1.8

4. Defect length related type

ID No.	Length (mm)	Width (2 θ)	Thickness tp (mm)
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-1H	56.70	90°	1.8
SSP-4H	226.80	90°	1.8

Table 4-1에서 나타난 시험편 중 SSP-2H 시험편을 모델링하여 유한요소해석을 실시하였다. 시험편에 압력을 0.2MPa를 가하여 시험편 전체의 변형량을 확인하였다. Fig. 4-2에 유한요소해석 결과를 나타내었다.

유한요소해석 결과 변형량이 3.56 μ m임을 알 수 있었고 원자력 배관에 내부압력을 가했을 경우에 나타나는 변형형태를 알 수 있었다. 유한요소의 결과를 참고하여 원자력 배관의 내부 결함을 Dual-Beam 전단간섭계와 적외선열화상을 이용하여 측정하였다.

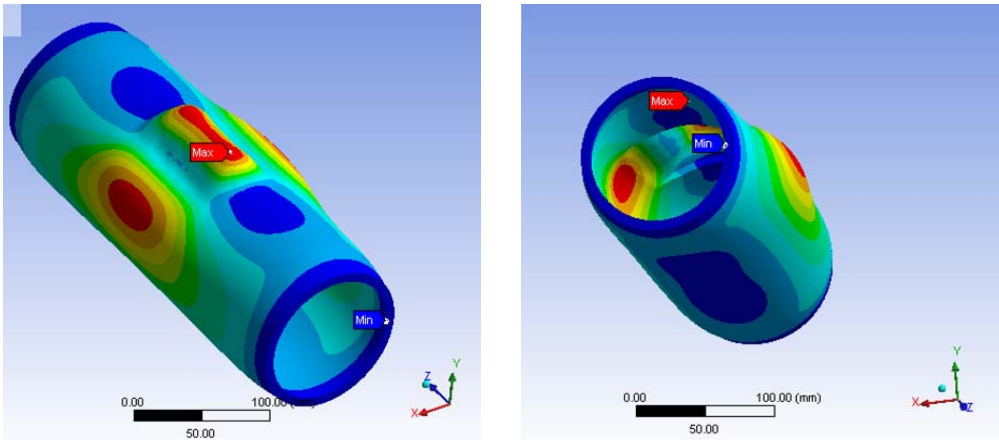


Fig. 4-2 Deformation result of SSP-2H

1. Dual-Beam 전단간섭계를 이용한 측정

ASTM A106 GrB 재질의 직관 모사시험편에 인공 감육결함을 가공하여 결함의 종류에 따라 결함의 원주방향 길이를 예측하였다. 결함의 종류는 총 3세트 8가지이며 결함을 가공하지 않은 정상적인 직관에 대해 압력차의 변화에 따른 결과를 기준 자료로 하여 실험을 행하였다. 직관 내부에 감육결함을 가공할 때 결함의 끝단이 각이 지도록 가공하고자 하였으나 가공시 정확한 가공이 힘들어 원주방향으로는 공구의 직경에 해당하는 곡률반경 250 mm를 갖는 형상으로 가공하였다. 결함의 종류는 크게 결함의 최소두께(tp)별, 결함의 폭별, 결함의 길이별로 시험편을 가공하여 실험하였다. 직관은 내부 표면과 외부 표면을 정밀가공하여 두께를 7.2 mm가 되도록 하였고, 결함의 최소두께는 ASME에서 규정하고있는 관 두께의 87.5%(7t/8)를 유효 두께로 하여 4t/8인 3.6 mm, 2t/8인 1.8 mm로 선정하여 가공하였다. 결함의 폭은 최소두께를 1.8 mm로 가공하고, 여기에 폭이 45°, 90°, 180° 가 되도록 가공하였고, 또한 결함의 길이는 최소두께를 1.8 mm로, 결함 폭을 90° 로 가공하고, 여기에 길이가 직관의 직경을 기준으로 L/D0가 0.5(56.7 mm), 1(113.4 mm), 2(226.8 mm)가 되도록 가공하였다. 감육결함이 있는 직관시험편의 결함을 측정하기 위하여 직관에 압력의 변화를 0.02MPa씩 증가하여 0.1MPa까지 변화하

였고, 각각 동일한 y방향으로 5mm을 전단량을 주었고, 압력에 의한 원자력 배관의 내부 결함을 Dual-Beam 전단간섭계를 이용하여 측정하였다. Fig. 4-3에 무결함 시험편인 SSP-0A 시험편에 대한 측정결과인 위상지도를 나타내었고 모든 시험편의 측정결과를 y축방향의 프로파일을 이용하여 결과를 획득하였다. Fig. 4-4과 Fig. 4-5는 결함 최소두께별 시험편 중 SSP-2G의 위상지도(Phase map)와 측정결과를 나타내었다.

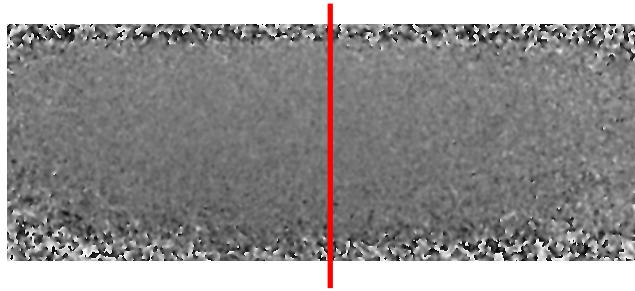


Fig. 4-3 Phase map of SSP-0A

Fig. 4-6와 Fig. 4-7은 결함 최소두께별 시험편 중 SSP-2H의 위상지도(Phase map)와 측정결과를 나타내었다. 두 시험편의 위상지도에서 볼 수 있듯이 감육결함부의 영향이 압력차가 0.4MPa일 때부터 두드러지게 나타나며, 점차 압력차가 증가할수록 감육결함부가 확실히 드러남을 알 수 있다. 또한, 최소두께가 줄어들수록 적은 압력차에서도 감육결함의 형상이 명확해지는 것을 알 수 있다. 두 시험편의 Line profile로부터 얻은 변형값을 살펴보면 최소두께가 줄어들수록 동일한 압력차에서 변형값이 크게 나타난 것을 알 수 있으며 동일한 압력차에서 변형값이 약 2배정도 차이가 나는 것을 알 수 있다.

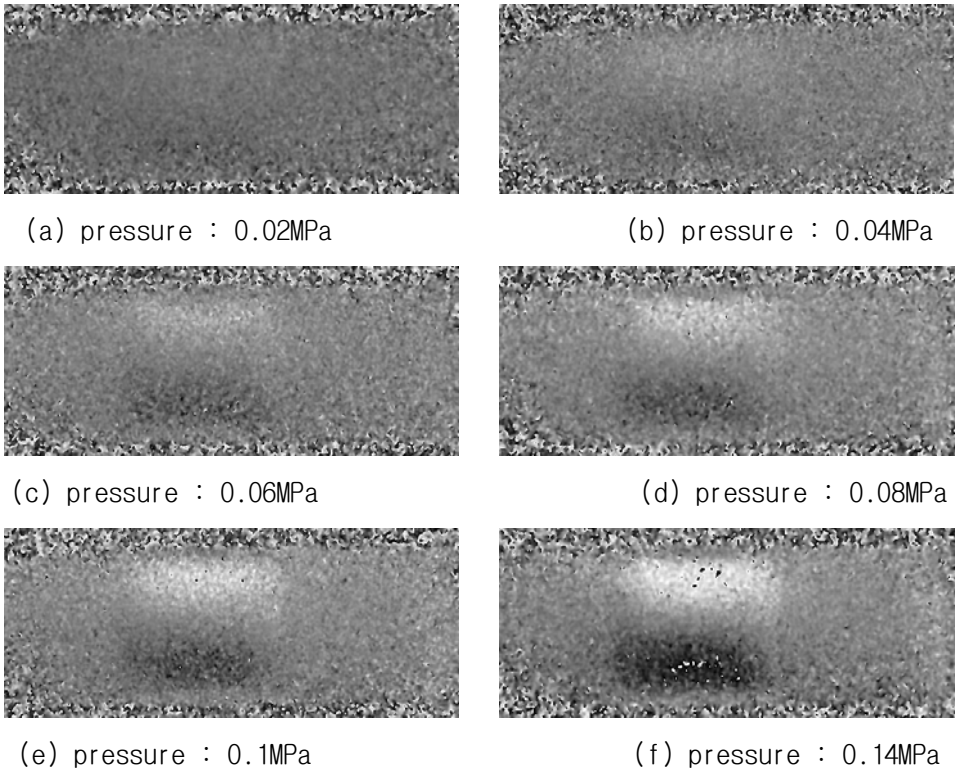


Fig. 4-4 Phase map of SSP-2G as the change of pressure amount

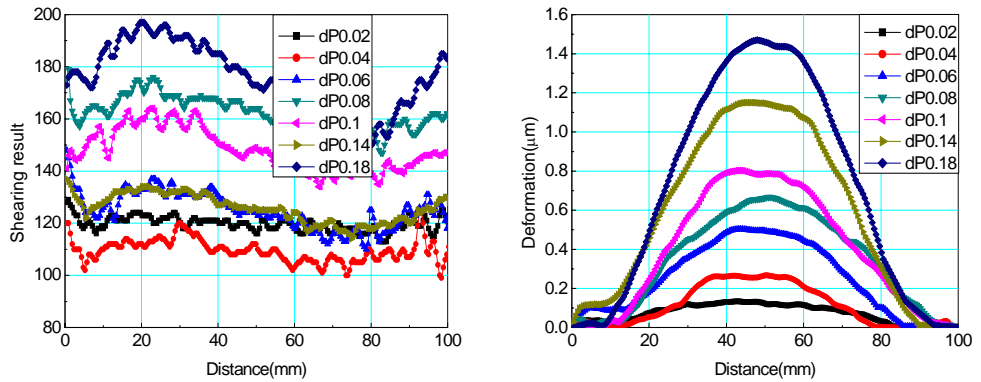


Fig. 4-5 Shearing result and Deformation of SSP-2G as the change of pressure amount

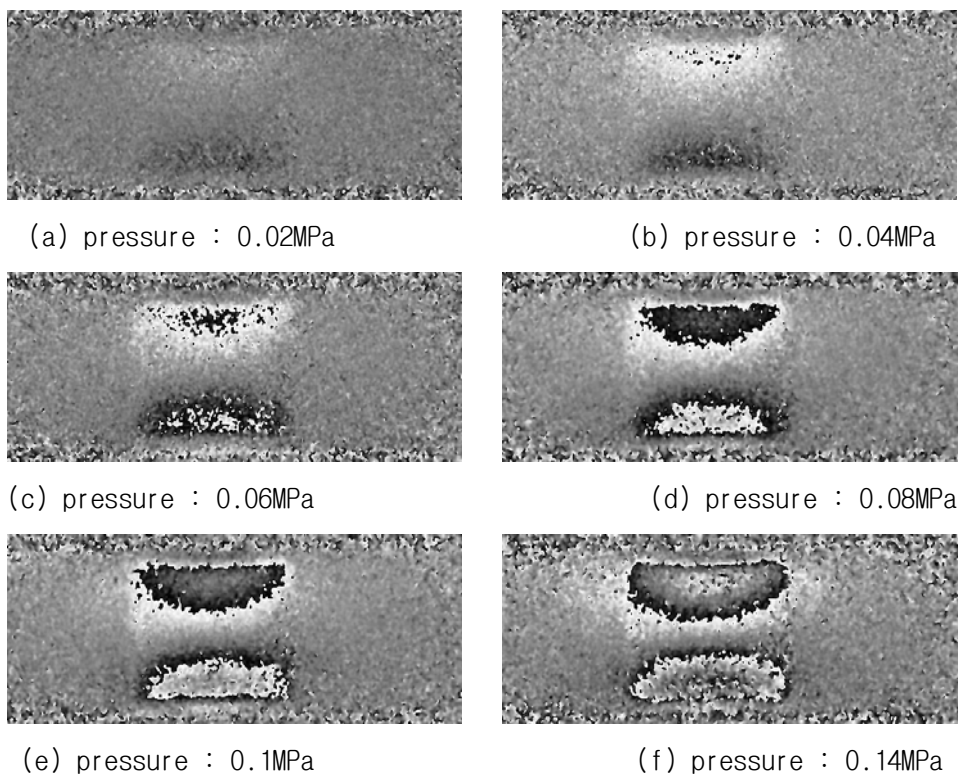


Fig. 4-6 Phase map of SSP-2H as the change of pressure amount

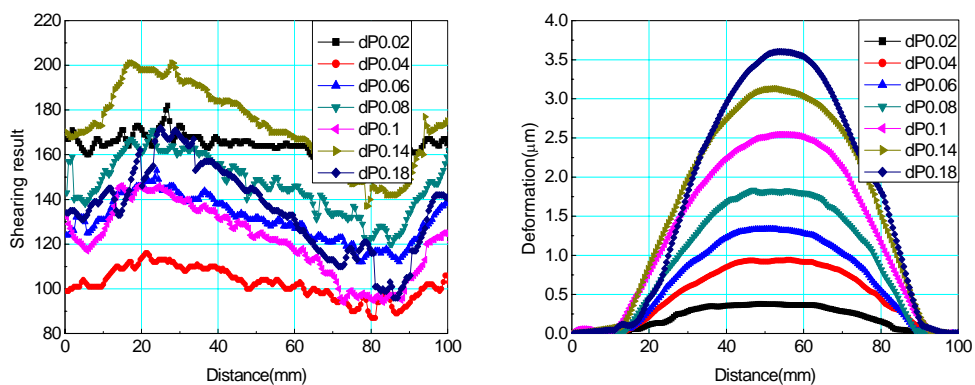
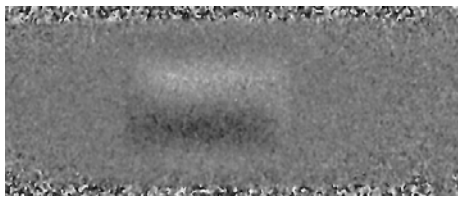
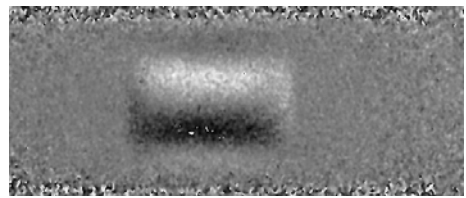


Fig. 4-7 Shearing result and Deformation of SSP-2H as the change of pressure amount

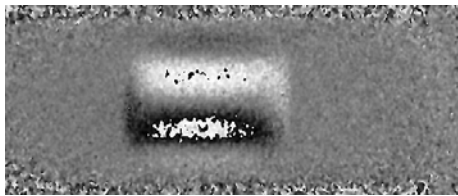
결함 폭에 따른 결함의 측정 실험은 위와 동일한 방법으로 실험을 진행하였다. Fig. 4-8~4-11에 결함폭별 시험편 중 SSP-2D와 SSP-2P의 위상지도와 측정결과를 나타내었다. 결함폭별 시험편의 위상지도에서 볼 수 있듯이 결함 폭에 따라 위상지도의 형태, 즉 변형의 형상이 다르게 나타난 것을 알 수 있다. 또한, line profile로부터 얻은 변형량 역시 다른 형태를 나타내어 유사한 점은 찾지 못하였다. 그러나 결함폭별에 따른 시험편의 측정 결과 최대변형량 값이 $90^\circ > 45^\circ > 180^\circ$ 와 같이 나타난 것을 확인할 수 있었다.



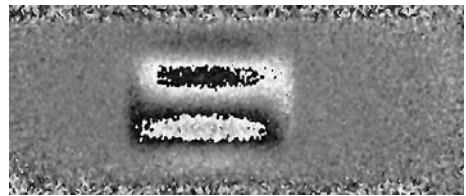
(a) pressure : 0.02MPa



(b) pressure : 0.04MPa



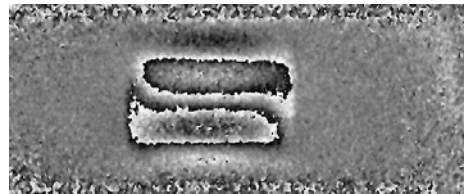
(c) pressure : 0.06MPa



(d) pressure : 0.08MPa



(e) pressure : 0.1MPa



(f) pressure : 0.14MPa

Fig. 4-8 Phase map of SSP-2D as the change of pressure amount

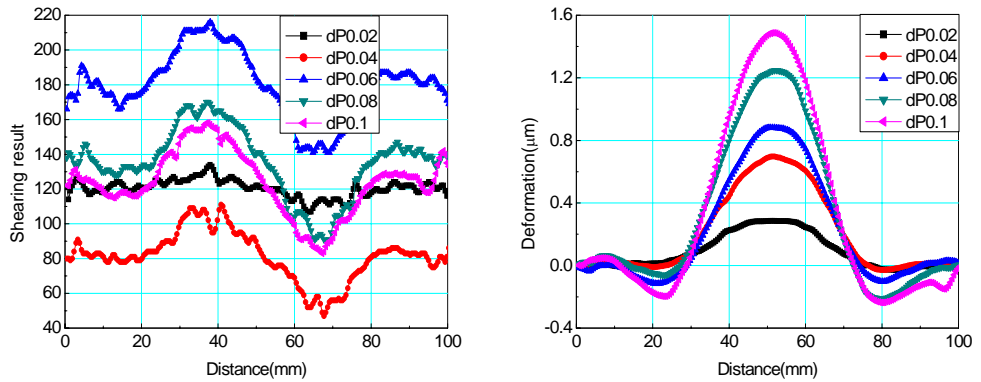


Fig. 4-9 Shearing result and Deformation of SSP-2D as the change of pressure amount

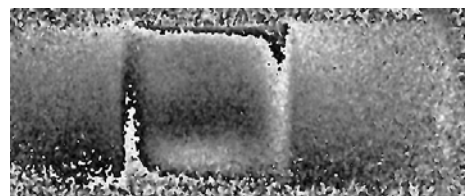
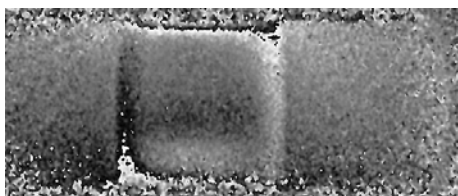
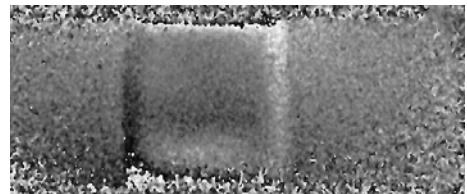
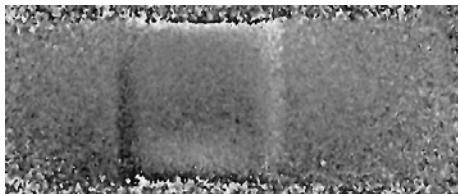
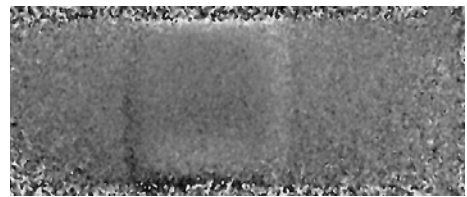
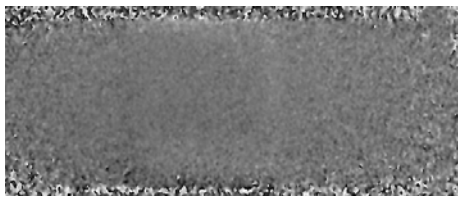


Fig. 4-10 Phase map of SSP-2P as the change of pressure amount

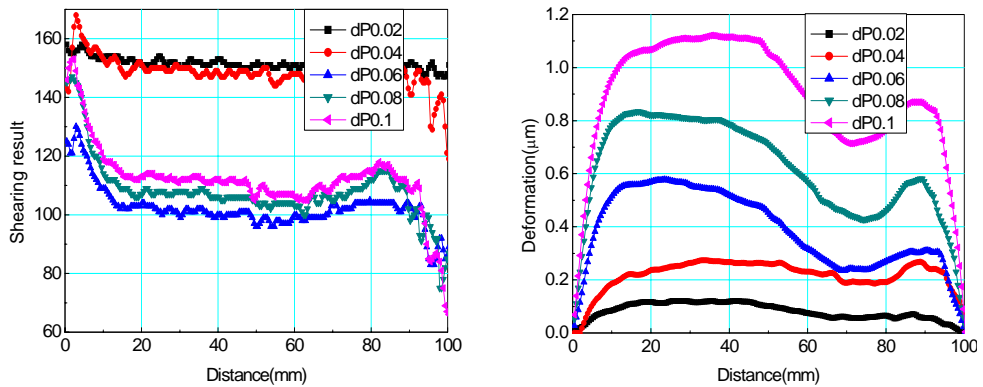
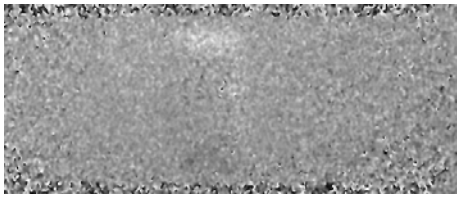


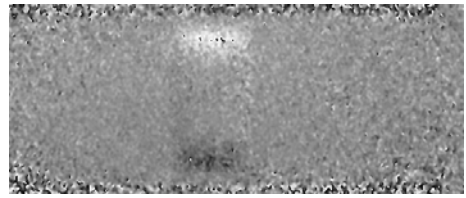
Fig. 4-11 Shearing result and Deformation of SSP-2P as the change of pressure amount

결함 길이에 따른 결함의 측정 실험은 위와 동일한 방법으로 실험을 진행하였다. Fig. 4-12~4-15에 결함길이별 시험편 중 SSP-1H와 SSP-4H의 위상지도와 측정결과를 나타내었다. 결함길이별 시험편의 위상지도에서 볼 수 있듯이 결함 길이가 길어짐에 따라 위상지도의 형태, 즉 변형의 형상이 커지는 것을 알 수 있으며, 결함의 길이가 클수록 낮은 압력차에서 변형이 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 원주방향의 line profile로부터 얻은 각각의 변형량을 비교하였을 때 결함의 길이가 2배씩 증가할 경우 변형량이 약 2배씩 증가하는 것을 알 수 있다.

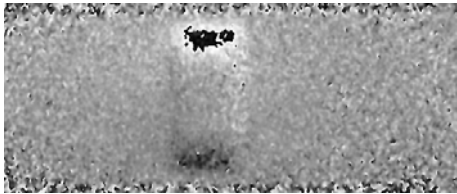
실제 결함의 길이와 측정된 결함의 길이를 비교하기 위해 축 방향의 line profile로부터 얻은 각각의 위상 데이터를 Fig. 4-16에 나타내었다. Fig. 4-16에서 위상 값이 변하는 변곡점 사이의 거리가 각각의 시험편의 결함 길이라는 것을 알 수 있다. Table 4-2에 각 시험편에 대해 실제 결함의 길이와 측정된 결함의 길이를 나타내었고 두 결과를 비교하여 오차를 나타내었다. 그 결과 실제 결함의 길이와의 오차가 5%이내임을 알 수 있었다.



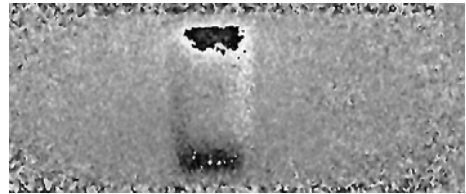
(a) pressure : 0.02MPa



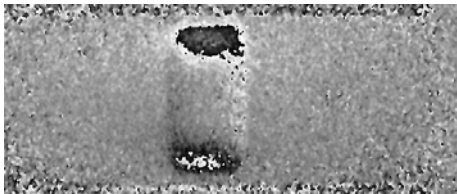
(b) pressure : 0.04MPa



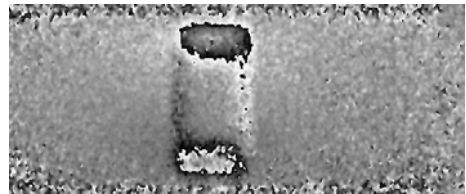
(c) pressure : 0.06MPa



(d) pressure : 0.08MPa



(e) pressure : 0.1MPa



(f) pressure : 0.14MPa

Fig. 4-12 Phase map of SSP-1H as the change of pressure amount

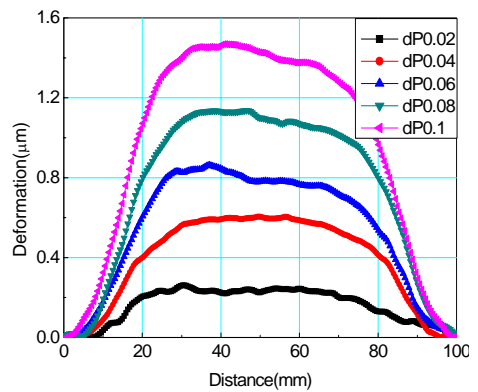
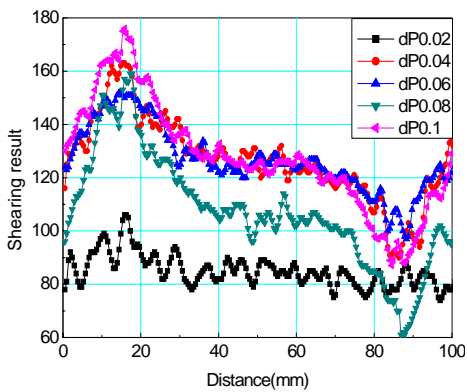


Fig. 4-13 Shearing result and Deformation of SSP-1H as the change of pressure amount

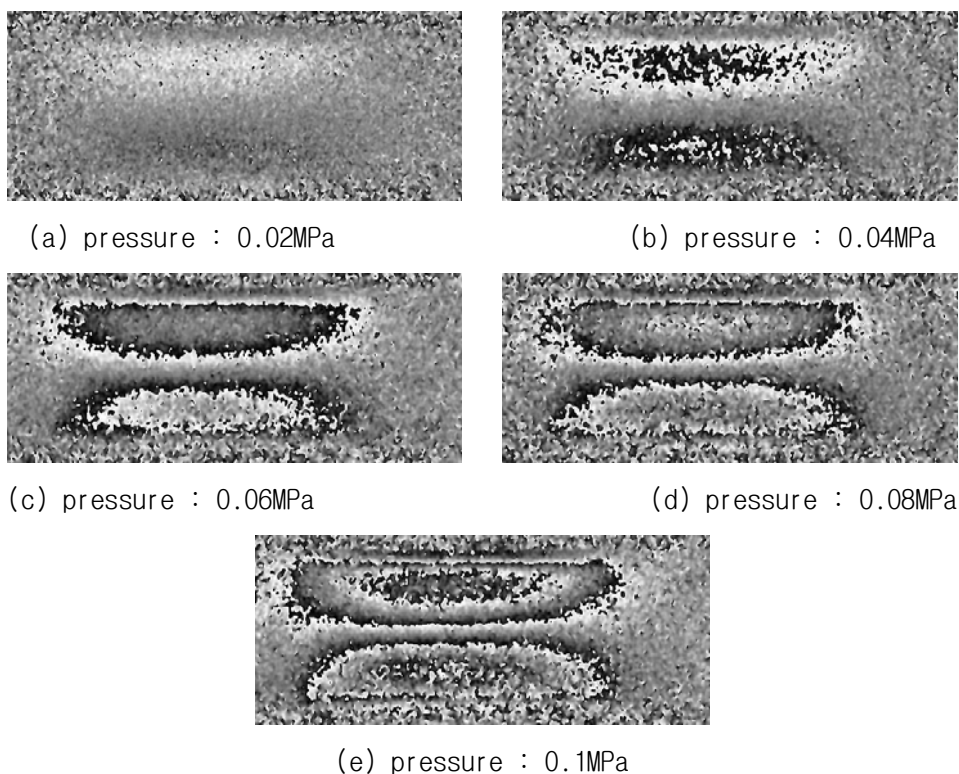


Fig. 4-14 Phase map of SSP-4H as the change of pressure amount

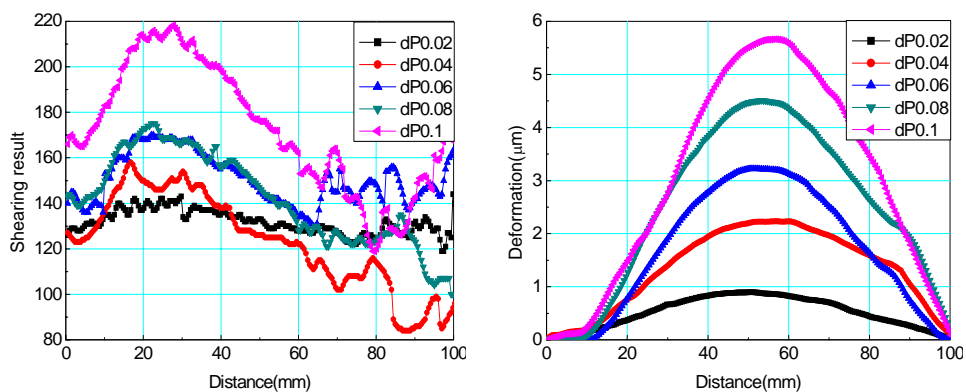


Fig. 4-15 Shearing result and Deformation of SSP-4H as the change of pressure amount

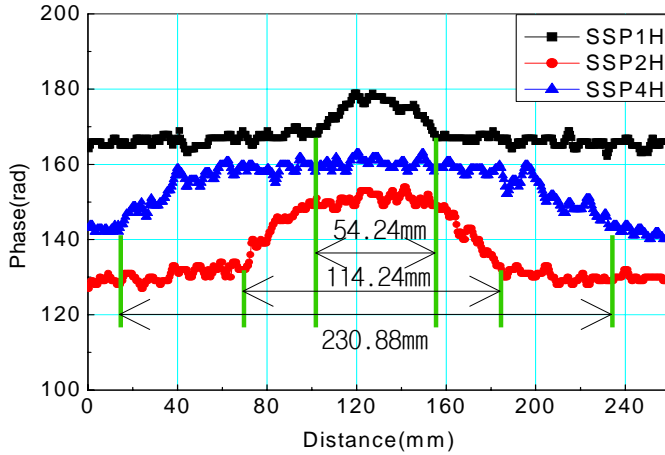


Fig. 4-16 Axial phase data according to defect length

Table 4-2 Error of actual value and measurement value

시험편 번호 / 구분	SSP-1H	SSP-2H	SSP-4H
실제값 (mm)	56.70	113.40	226.80
측정값 (mm)	54.24	114.24	230.88
오차 (%)	4.3	0.7	1.8

2. 적외선열화상을 이용한 측정

모든 제조에 관련된 설비나 발전소, 변전소 내의 전기설비 등이 공통적으로 사전에 아무런 징후 없이 고장 오작동 파손 등이 발생하는 경우는 거의 없을 것이다. 공장 내의 여러 설비들의 이상 징후를 사전에 감지하여, 보다 심각한 문제가 발생하기 전에 적절한 조치를 취하는 일련의 유지, 보수 활동을 Predictive Maintenance라고 한다. 이러한 PdM에서 설비의 온도변화에 의해 조기 발견될 수 있는 이상 징후는 열화상카메라의 열화상 이미지로 시각화하여, 궁극적으로는 PdM의 효과를 극대화 할 수 있을 것이다. 본 논문에서

는 적외선 열화상을 이용하여 인공결함을 가진 원자력 배관의 결함을 측정하고자 한다. 시험편의 표면에 방사페인트를 도포하여 방사율을 0.95로 유지하였고, 위상잠금기법을 이용하여 열원과 검출소자를 동기화 시켜 주파수(50 mHz)를 주어 위상이미지(Phase map)를 신호처리를 통하여 결함검출을 행하였다. 본 연구에서는 결함의 유무에 따른 측정결과를 비교하기 위하여 먼저 결함을 가공하지 않는 직관의 실험을 수행하였고, 이 결과를 기준으로 하여 두께와 길이별 실험을 실시하였다. 적외선열화상 측정에 사용된 시험편은 제4장 1절에 제시된 시험편 중 선택하여 실험을 실시하였다. Table 4-3에 본 실험에 사용된 시험편의 종류를 나타내었다.

감육결함이 있는 직관시험편의 결함을 측정하기 위하여 주변의 온도($20 \pm 0.5^\circ\text{C}$)를 일정하게 유지하고, 방사된 에너지를 적외선열화상(IRT)을 이용하여 온도를 검출하였다. 결함의 최소두께별 열에너지의 발생빈도가 다르고 결함의 길이에 따라 측정되는 길이가 다를 것이라는 가정 하에 실험을 진행하였다. 각 조건에 따른 적외선열화상 이미지를 Fig. 4-17, Fig. 4-18에 나타내었으며, 실험결과는 Fig. 4-19와 Fig. 4-20에 나타내었다.

Table 4-3 Type of specimen

1. Specimen with no defect

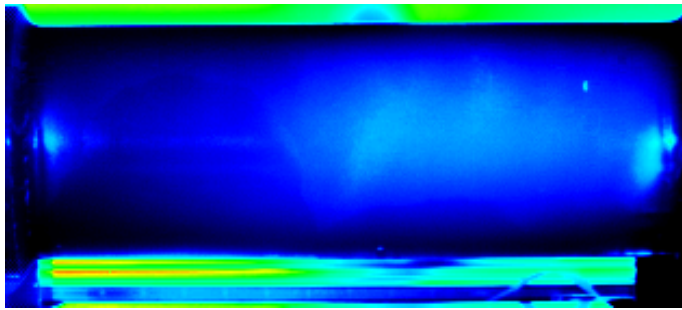
ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-0A	0.00	0°	7.2

2. Defect thickness related type

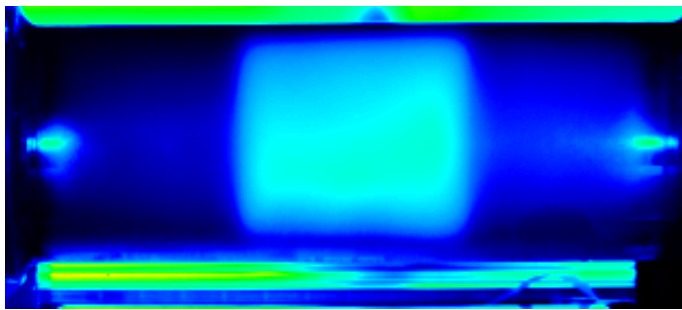
ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-2G	113.40	90°	3.6
SSP-2H	113.40	90°	1.8

3. Defect length related type

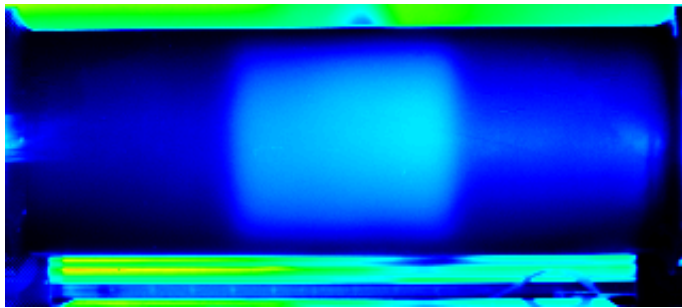
ID No.	결함 길이 l (mm)	결함 폭 (2θ)	최소 두께 tp (mm)
SSP-2H	113.40	90°	1.8
SSP-4H	226.80	90°	1.8



(a) non-defect

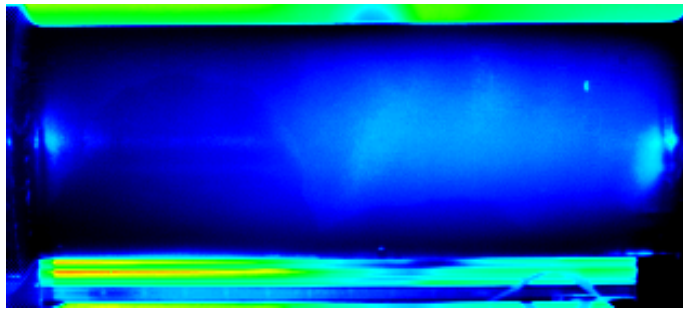


(b) SSP-2H

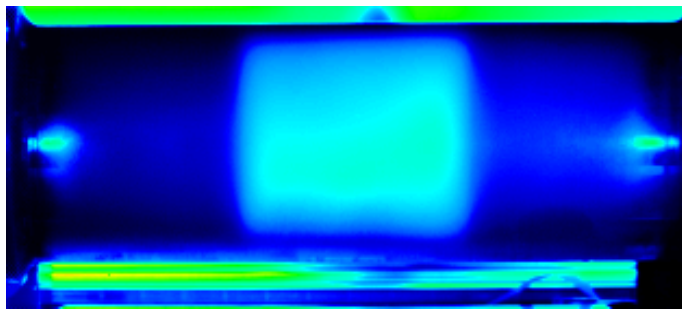


(c) SSP-2G

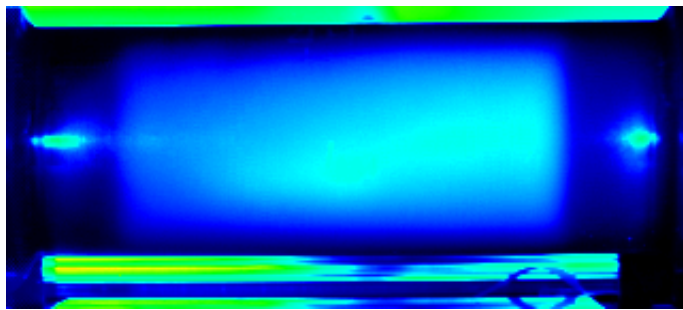
Fig. 4-17 Infrared thermography images according to the defect thickness



(a) non-defect



(b) SSP-2H



(c) SSP-4H

Fig. 4-18 Infrared thermography images according to the defect length

Fig. 4-19는 적외선 열화상을 통해 얻은 결함의 최소두께에 따른 온도변화를 나타내었다. 결함의 최소두께에 따라 온도가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 4-20은 결함의 길이에 따른 온도분포를 나타낸 것이며 측정된 결함의 길이와 인공결함의 길이와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

위상잠금 광-적외선 열화상기법을 이용하여 여러 가지 조건으로 가공된 내부 감육결함을 갖는 시험편의 결함 크기, 위치를 측정하였으며, 시험편의 최소두께에 따른 온도변화를 측정하였다. 실험결과 무결함 시험편을 기준으로 최소두께별로 비교하였을 때 온도변화가 약 2배씩 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 결함길이별 시험편의 측정결과 SSP-2H는 약 118mm, SSP-4H는 약 230mm로 인공 결함길이와 약 5%이내의 오차를 얻을 수 있었다.

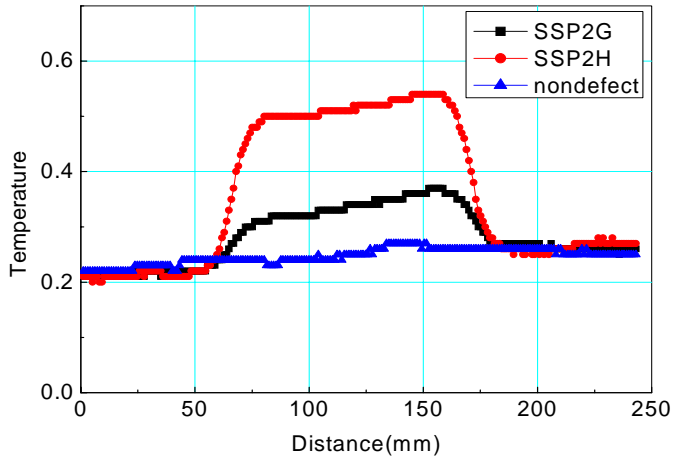


Fig. 4-19 Data comparison by defect thickness

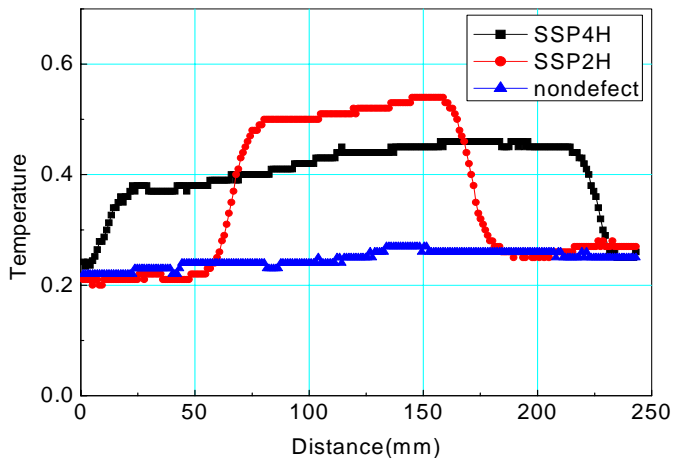


Fig. 4-20 Data comparison by defect length

두 조건 모두 시험편의 방사폐인트 도포의 불균일성에 따른 시험상의 오차 등과 같은 오차가 발생했지만 대체적으로 정확한 결함길이(측방향 결함크기), 위치를 측정할 수 있었다. 본 연구를 통해 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 이용하여 인공으로 가공된 결함에 대한 적용가능성을 검증하였다. 향후 높은 정확도를 가질 수 있도록 오차를 보정하기 위한 방법에 대하여 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

3. 원자력 배관의 결함크기 비교

Dual-Beam Shearography와 적외선 열화상 기법을 이용하여 원자력 배관의 결함크기를 측정한 결과를 다음 Table 4-4에 나타내었다.

Table 4-4 Comparison of measured defect length

시험편 번호 구분	SSP-1H	SSP-2H	SSP-4H
실제값 (mm)	56.70mm	113.40mm	226.80mm
Dual-Beam Shearography	54.24mm	114.24mm	230.88mm
Error(%)	4.3	0.7	1.8
적외선열화상	55.10mm	118.17mm	230.33mm
Error(%)	2.9	4.0	1.4

각각의 두 장비로 측정한 원자력 배관의 결함길이 값이 실제의 값과 거의 일치하며 오차는 5%내외로 얻을 수 있었다.

제 2 절 복합재료의 내부 결함측정

1. 복합재료 검사시스템 구성

섬유강화 복합재료는 대형 수송기 및 기계구조물에서 고강도 경량화를 위한

재료로 많이 사용되고 있으며, 진동감쇠특성 및 내화성 등이 뛰어나지만 아니라 하중조건에 적합한 구조로 섬유방향과 적층을 달리함으로써 강성 및 강도조절이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 복합재료는 충격과 열에 약하여 운행 중 이물질의 충돌에 의해 내부 박리결함이 발생하며, 이 결함은 복잡한 역학거동의 특징으로 기존 검사기술로 내부손상을 검출하는 것이 어렵다. 이와 같은 내부 결함을 측정하기 위해 본 논문에서는 적외선열화상 기술을 사용하였다. 검사장치는 Fig. 4-21과 같이 할로겐 램프를 사용하여 대상체에 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 IR camera로 관찰하여 결함을 검출하였다. 시험에 사용되는 복합재 시험편은 탄소섬유 강화플라스틱 (CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic)을 $[\theta/\theta]$ Symmetric로 적층하고, 내부에 테프론 필름을 인공결함으로 가공하여 검사결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

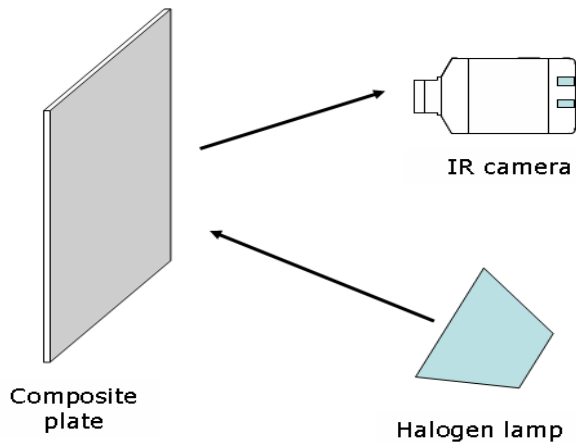


Fig. 4-21 Composite materials inspection system

2. 복합재료 내부 결함 측정

인공결함은 층간분리를 모델링하기 위해 원형 모양의 직경 35 mm, 두께 0.15 mm의 테프론 필름, 사각형 모양의 40mm × 25mm의 테프론 필름, 한변의 길이가 40mm인 정삼각형 모양의 테프론 필름의 인공결함을 복합재 성형 시 내부

에 삽입하였다. 또한 인공결함의 내부 삽입위치를 다르게 하여 시험편을 제작하였다. 인공결함의 형상은 Fig. 4-22에 나타내었다. 시험편의 표면에 방사페인트를 도포하여 방사율을 0.95로 유지하였고, 위상잠금기법을 이용하여 열원과 검출소자를 동기화시켜 복합재의 최적 검출 주파수(0.2 Hz)를 주어 위상이미지(Phase map)를 신호처리를 통하여 결함검출을 행하였다.

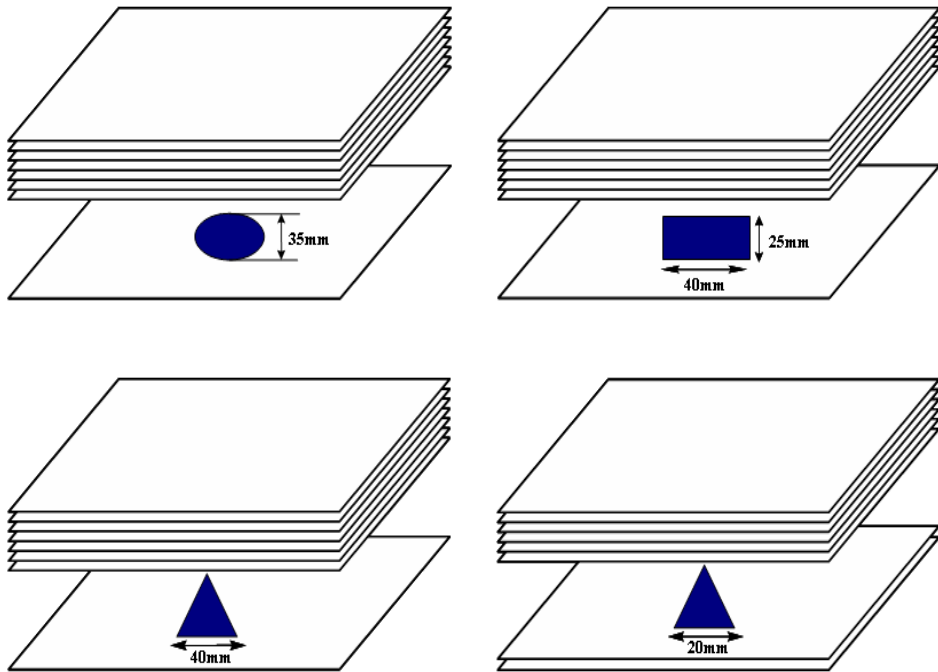


Fig. 4-22 Design of inside artificial defects

적외선 열화상을 이용한 내부에 인공결함이 있는 복합재료의 측정결과를 Fig. 4-23에 나타내었다. 내부결함은 실제 결함에 비해 다소 크게 검출이 되었다.

결함은 위상이미지 결과로부터 line profile를 구하여 직경 35 mm의 원형 결함을 35.79 mm로 측정하였으며, 40 mm × 25 mm의 사각형 결함에 대해서 40.8 mm × 25.1 mm로 측정하였고, 세변의 길이가 40 mm인 삼각형의 결함에 대해서는 40.2 mm로 측정하였다. 또한 인공결함의 내부 위치를 달리한 길이 20 mm인 삼각형의 결함을 20.6 mm로 측정하였다.

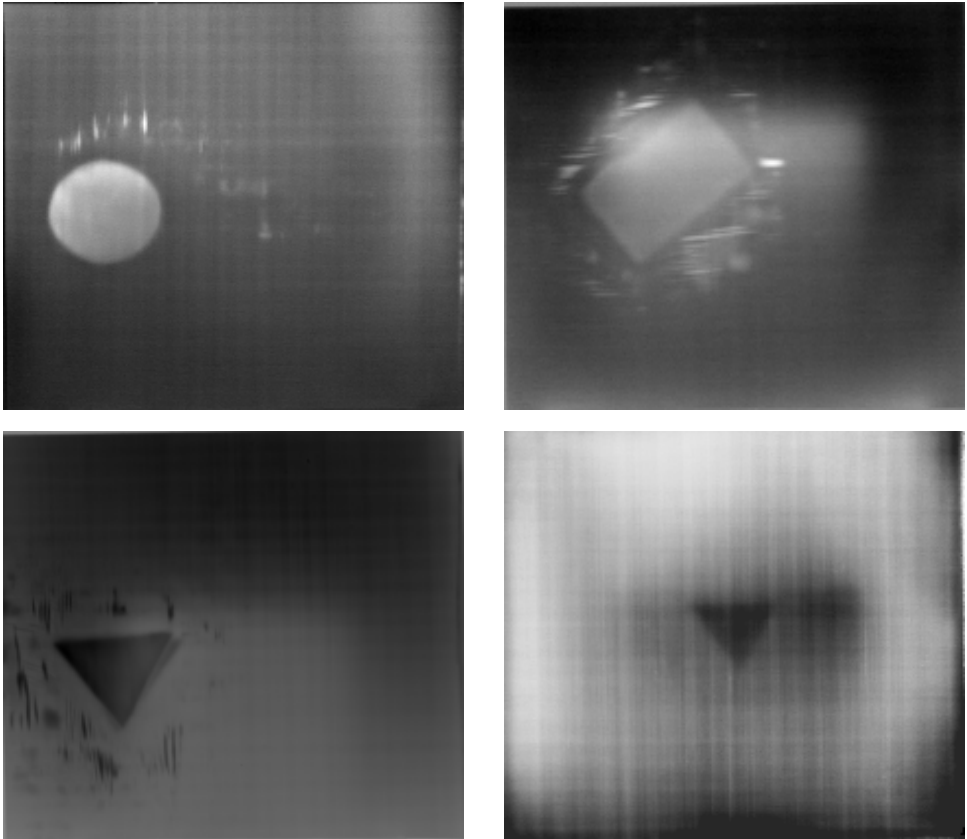


Fig. 4-23 Detection of inside artificial defects by IRT

제 2 절 충격을 받은 복합재 관의 결함 측정

1. 검사시스템 구성

섬유강화 복합재료는 대형 수송기 및 기계구조물에서 고강도 경량화를 위한 재료로 많이 사용되고 있으며, 진동감쇠특성 및 내화성 등이 뛰어날 뿐만 아니라 하중조건에 적합한 구조로 섬유방향과 적층을 달리함으로써 강성 및 강도조절이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 복합재료는 외부요인에 의한 충돌시 표면에서는 거의 관찰할 수 없는 층간분리, 모재균열에 의해 내부손상이 발생하게 되고, 충격에너지에 의해 손상이 증가하게 되면 구조체로서의

역할을 수행할 수 없게 된다. 이러한 충격에 의한 내부 손상을 사전에 검출하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 복합재구조물의 가장 취약한 분야인 충격에 의한 손상으로 발생한 결함을 Dual-Beam 전단간섭계를 활용하여 시험편에 열을 가한 후 냉각시키면서 시험편의 변형을 측정하였다. 검사 장치는 Fig. 4-24 와 같이 복합재료가 열에 약한 특성을 이용하여 온도변화에 따른 변형 분포를 측정하여 결함을 검사하였다. 실험에 사용된 시험편은 복합재료 구성된 파이프 형상의 구조체를 사용하였다. 충격에 의한 열변형 측정을 위해 복합재에 임의적으로 충격을 주어 시험편을 제작하였다

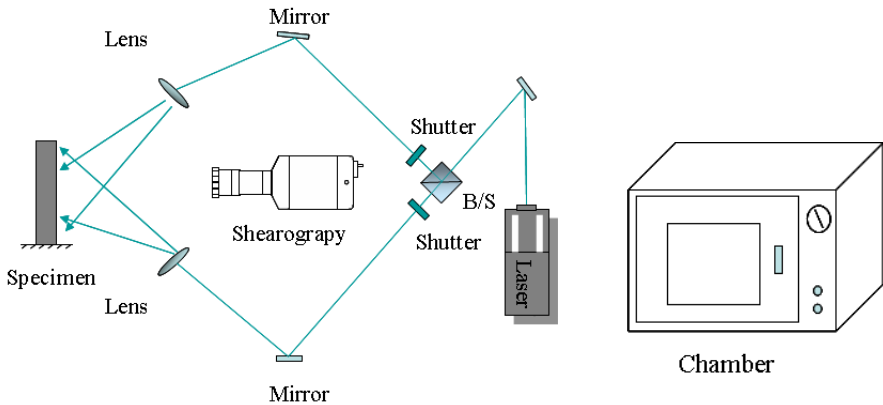


Fig. 4-24 Impact damaged composite inspection system

2. 충격을 받은 복합재 관의 결함 측정

파이프 형상의 복합재 시험편에 각각 15J, 30J, 45J의 에너지로 충격을 가하였다. 복합재 시험편을 다음 Fig. 4-25에 나타내었다. 실험 방법은 시험편을 진공챔버에서 가열한 뒤 냉각하면서 그 변화를 측정 하였다. 위의 방법으로 각각 대상별(15J, 30J, 45J) 온도변화에 따른 변형을 측정하였다. 온도 변화는 비접촉 온도 측정이 가능한 온도계와 열화상 카메라를 사용하여 온도를 측정하였다. 온도변화는 $29^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T=1^{\circ}\text{C}$), 전단량은 10mm로 하여 전단간섭계를 이용 복합재의 열변형을 측정하였다. 또한, 대상별 비교를 위하여 위상지도와 동일한 위치에서 프로파일을 획득하고 동일한 위치에서 변형 결과를 측정하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 충격을 가한 복합재료에 40°C까지 열을 가하고 29°C ~ 28°C에서 전단간섭계를 이용하여 복합재의 변형을 측정하였다. 각각의 실험에서 얻어진 충격에너지별 위상지도를 Fig. 4-26에 나타내었다.

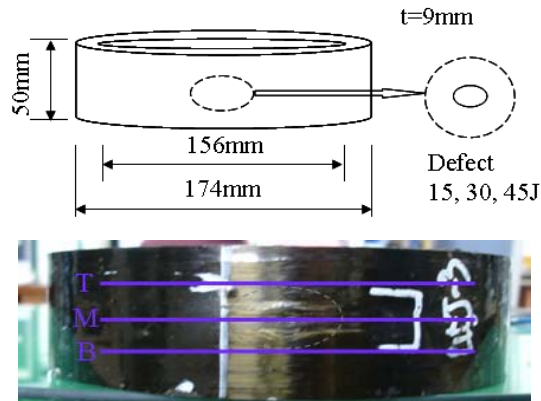


Fig. 4-25 Specimen of impact damaged composite

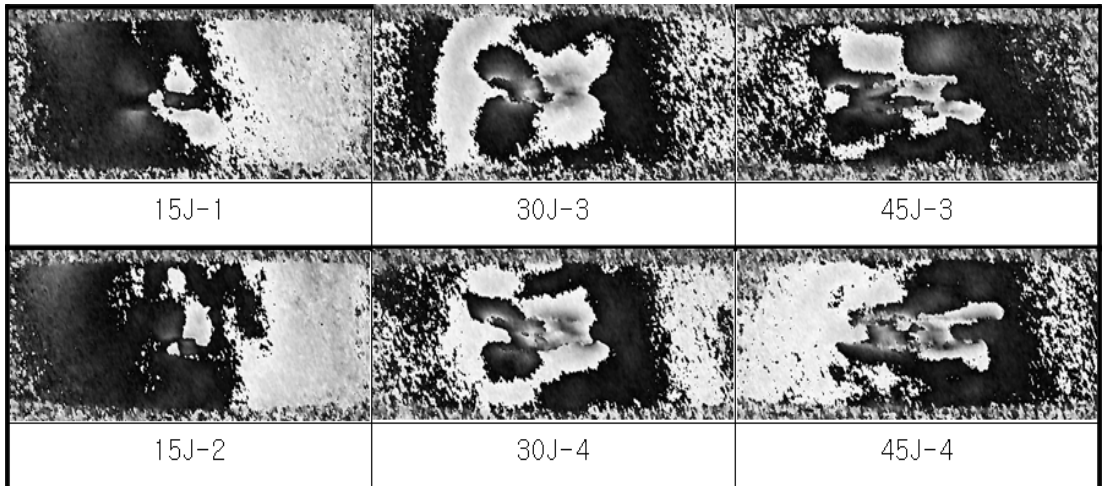


Fig. 4-26 Phase map of specimen

Fig. 4-26에서 보는 바와 같이 충격 에너지에 따라 결함 부위의 변형이 커지는 것을 알 수 있다. 45J의 결함 중앙 부분은 완전 파단이 일어나 변형이 과

도하여 데이터 획득에 어려움이 있다. 각각의 시험편의 Top, Middle, Bottom에서 얻어진 변형 데이터를 Fig. 4-27, 4-28 and 4-29에 나타내었다.

15J-1의 경우 충격받은 부분을 기준으로 하여 상하 좌우 동일한 파손 형태를 보이고 충격부위는 충격전보다 밀도가 높아진 것으로 판단된다. 15J-2의 경우 전체적으로 15J-1과 유사한 양상을 보인다. 15J는 충격부위에 박리가 발생하지 않고 밀도가 높아진 것을 알 수 있다. 30J-3은 전체적으로 15J-1과 유사한 양상을 보이지만 중앙부분은 15J-1과 반대의 변형이 나타났다. 그 이유는 30J에서는 충격으로 인하여 박리가 발생한 것으로 판단된다. 그리고 변형영역이 위와 아래는 동일하지만 중앙부분은 상대적으로 좁은 것을 알 수 있다. 30J-4는 전체적으로 30J-3과 유사한 양상을 보이며, 30J-3보다 충격량이 큰 것을 알 수 있다.

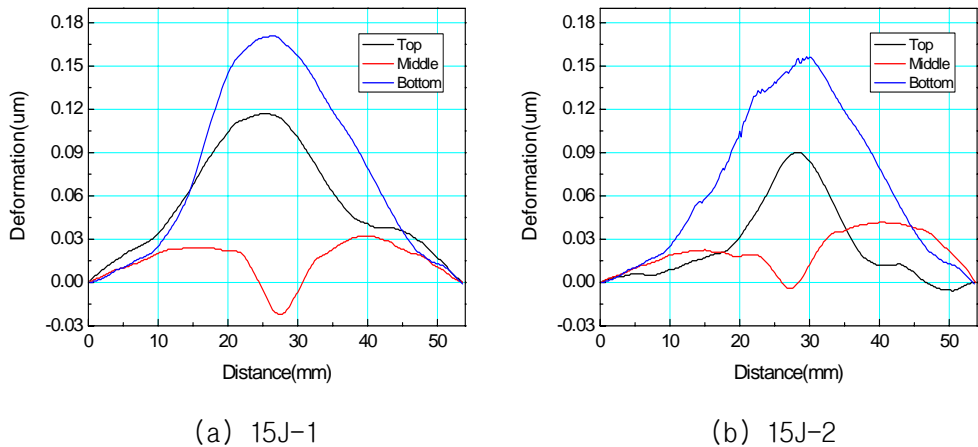
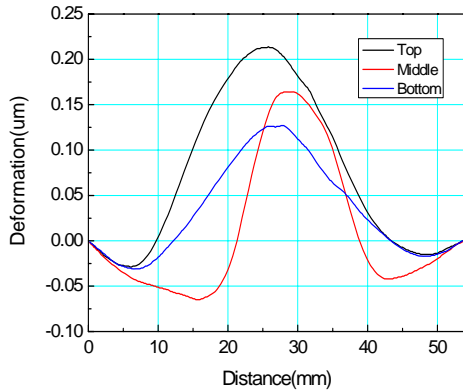
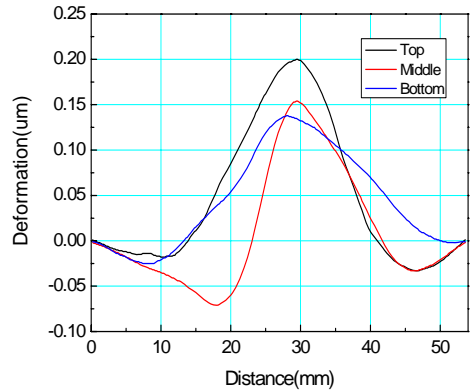


Fig. 4-27 Deformation of 15J

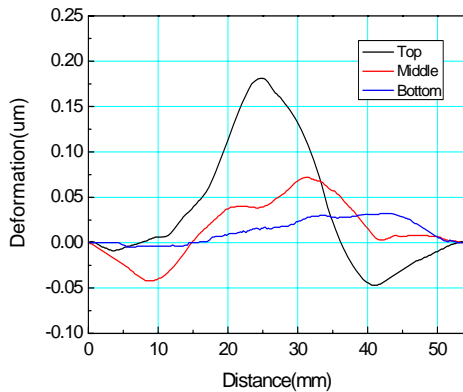


(a) 30J-3

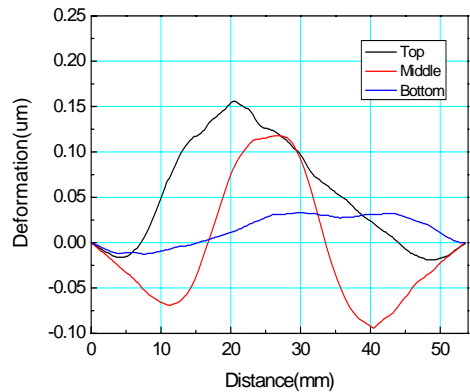


(b) 30J-4

Fig. 4-28 Deformation of 30J



(a) 45J-3



(b) 45J-4

Fig. 4-29 Deformation of 45J

45J-3과 45J-4는 복합재 튜브 가장 바깥면이 완전 파괴된 것을 알 수 있고, 둘 모두 변형의 형태는 유사한 것을 알 수 있다. 복합재의 파괴로 인해 중앙 부분의 변형이 과도하게 발생하여 해석에 어려움이 있다.

전체 시험편의 비교를 위해 Top, Middle, Bottom line의 변형 데이터를 Fig. 4-30, 4-31 and 4-32에 나타내었다. Top line에서는 15J보다 30J이 약 2배의 변형을 나타내고, 45J은 일정하게 증가되지 않고 완전파단으로 인해 변형이

작게 나타난 것을 알 수 있다. Middle line에서는 15J은 충격부위가 약 11mm 정도이며 약 11mm이하의 강체로 충격된 것을 알 수 있다. 그리고 박리가 발생하지 않고 충격전보다 밀도가 높아진 것을 알 수 있다. 30J은 박리가 발생하였고 변형이 과도한 것을 알 수 있다.

45J은 완전파단이 발생한 것을 알 수 있다. 변형영역(가로축)이 15J<30J<45J 임을 보여주고 있다. Bottom line은 위상지도에서 나타난 것과 같이 Top line과 유사한 형태의 변형이 나타나지만 변형의 양이 Top line에 비해 작게 나타난 것을 알 수 있다.

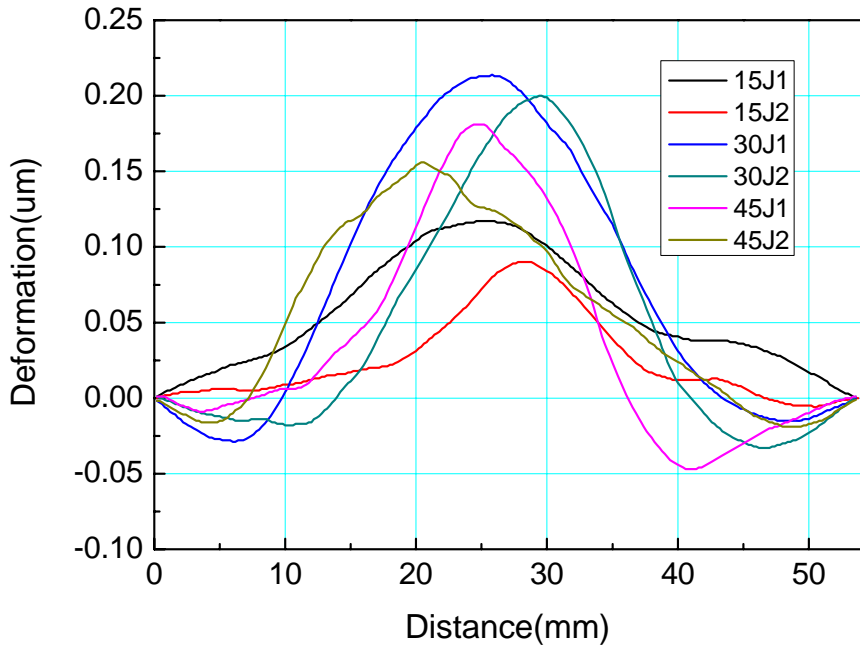


Fig. 4-30 Deformation of Top line

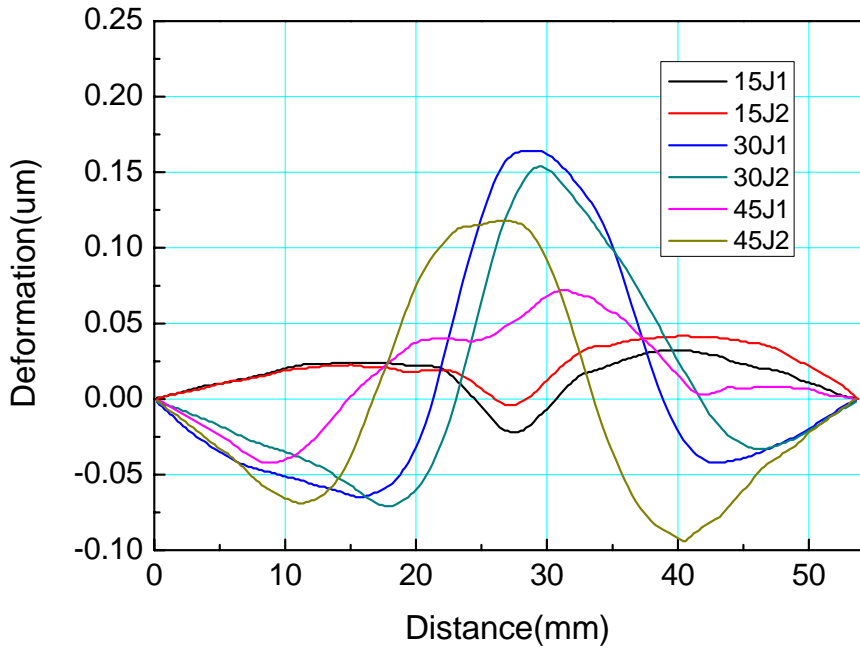


Fig. 4-31 Deformation of Middle line

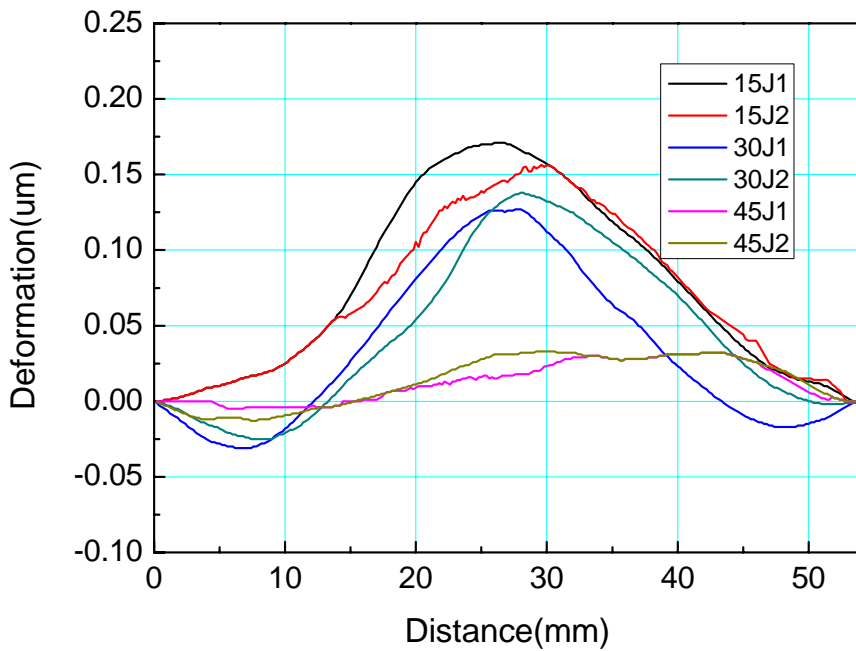


Fig. 4-32 Deformation of Bottom line

제 5 장 결론 및 고찰

본 논문에서는 기존 비파괴검사기술의 기술적, 경제적 손실을 보완하기 위해 전단간섭계(Shearography)와 적외선 열화상(Infrared thermography)기술을 이용한 검사기술을 제안하였으며, 기존의 Shearography 기법의 장점을 그대로 포함하면서 면내변위를 측정할 수 있는 응용된 Shearography 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 Dual-Beam Shearography와 IRT를 이용한 결함 검출 방법을 원자력배관과 복합재료에 대해 실험적 검증을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. 원자력배관 내부 결함 측정

원자력 배관은 사용기간의 증가에 따라 피로, 부식 등 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있는데, 그 중 하나가 배관 내부를 흐르는 유체에 의한 침식과 부식에 의해 발생하는 감육결함(wall thinning defect)이다. 이러한 감육결함에 의한 파손을 막기 위해 본 논문에서는 Dual-Beam Shearography와 IRT를 이용하여 원자력 배관의 내부결함을 측정하였고, 그 측정결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Dual-Beam Shearography의 측정결과 중 결함 최소두께별 시험편에서 최소 두께가 줄어들수록 적은 압력차에서도 감육결함의 형상이 명확해지는 것을 알 수 있었다. 또한, 최소두께가 줄어들수록 동일한 압력차에서 변형값이 크게 나타난 것을 알 수 있었으며 동일한 압력차에서 변형값이 약 2배정도 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

(2) Dual-Beam Shearography의 측정결과 중 결함 폭별 시험편에서 결함 폭에 따라 위상지도의 형태, 즉 변형의 형상이 다르게 나타난 것을 알 수 있었고 결함 폭별 시험편의 실험결과를 통해 결함 폭의 크기에 따라 변형분포형태가 변화하는 것을 가시적으로 확인할 수 있었다. 또한, 결함폭별에 따른 시험편의 측정 결과 최대변형량 값이 $90^\circ > 45^\circ > 180^\circ$ 와 같이 나타난 것을 확인할

수 있었다.

(3) Dual-Beam Shearography의 측정결과 중 결함 길이별 시험편에서 결함 길이가 길어짐에 따라 위상지도의 형태, 즉 변형의 형상이 커지는 것을 알 수 있었으며, 결함의 길이가 클수록 낮은 압력차에서 변형이 크게 나타난 것을 알 수 있었다. 또한, 결함의 길이를 측정해본 결과 실제 결함의 길이와의 오차가 5%이내임을 알 수 있었다.

(4) IRT의 측정 결과 중 결함 두께별 시험편에서 결함의 최소두께에 따라 온도가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 실험결과 무결함 시험편을 기준으로 최소두께별로 비교하였을 때 온도변화가 약 2배씩 증가하는 것을 알 수 있었다.

(5) IRT의 측정 결과 중 결함 길이별 시험편에서 결함길이별 시험편의 측정결과 Dual-Beam Shearography와 동일하게 결함 길이가 클수록 변형의 형상이 커진 것을 알 수 있었으며, 결함의 길이를 IRT로 측정한 결과 실제결함의 길이와의 오차가 약 6%이내의 오차를 얻을 수 있었다.

나. 복합재료의 내부 결함 측정

복합재료는 충격과 열에 약하여 운행 중 이물질의 충돌에 의해 내부 박리결함이 발생하며, 이 결함은 복잡한 역학거동의 특징으로 기존 검사기술로 내부손상을 검출하는 것이 어렵다. 이러한 내부 손상에 의한 결함을 사전에 검출하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 IRT를 이용하여 복합재료의 내부결함을 측정하였고, 그 측정결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복합재 구조물의 충격에 의한 내부 박리결함 검사를 위해 IRT를 이용하였으며, Lock-in 기술을 이용하여 결함을 검출하였다. 인공결함을 이용한 검증 시험으로 오차율이 3% 이내로 검사의 신뢰성을 확보하였다.

다. 충격을 받은 복합재 관의 결함 측정

복합재 구조물의 충격에 의한 내부 박리 결함 검사를 위해 Dual-Beam 전단간섭계를 이용하였으며, 온도에 따른 열변형에 의해 결함을 검출하였고 그 측정결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Dual-Beam Shearography의 측정결과에서 열변형 측정 결과는 충격에너지에 따라 변형의 형상이 다르게 나타나는 것을 알 수 있고, 변형영역이 충격에너지에 따라 증가하는 것을 정성적으로 알 수 있었다.

(2) Dual-Beam Shearography의 측정결과에서 복합재료의 충격부위의 크기를 통해 충격을 가한 물체의 크기를 유추할 수 있었다. 또한 복합재료 내부의 박리 여부와 파단 여부를 알 수 있었다.

위와 같은 연구 결과로부터 Dual-Beam Shearography와 IRT를 이용하여 내, 외부 결함의 크기, 형상, 위치를 고분해능으로 검사함으로써 제품 신뢰성평가의 기준이 되는 비파괴평가의 개념을 충족시킬 수 있으며, 이를 기반으로 Dual-Beam Shearography과 IRT 기법이 비파괴 검사기법으로서의 산업적 활용도가 높아질 것으로 기대한다.

참고문헌

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. J Opt Lasers Eng 1997;26:421.36.
4. Etemeyer, 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 스페클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구』, 서울: 한양대학교 박사학위논문, 1988.
9. 강기수. 『레이저 스페클 간섭법을 이용한 내부결함의 정량평가』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2005.
10. Hyunchul Jung. Vibration analysis of structures using stroboscopic phase shifting ESPI, Gwangju: Doctor thesis, Chosun University, 2004.
11. Rastogi, P. K., "Measurement of in-plane strains using electronic speckle and electronic speckle-shearing pattern interferometry", J. Mod. Opt., Vol 43, pp403-407, 1996.
12. Steinchen, W., Yang, L. X., Kupfer, G., Mäckel, P., and Vössing, F., "Strain analysis by means of digital shearography: potential, limitations and demenstration", JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS Vol.33, No.2, pp171-182, 1998

13. Hung, Y. Y. and Wang, J. Q., "Dual-beam phase shift shearography for measurement of in-plane strains", Opt. Lasers Eng., Vol.24, pp403-413, 1996.
14. Horng, H. E., Jeng, J. T., Yang, H. C., Chen, J. C., "Evaluation of the flaw depth using high-T SQUID" Physica. C, Superconductivity, Vol. 367, No. 1/4, 2002, pp.303-307
15. Frank, M., Hans, R. and Helmut, S., "Experience with piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspects." Nucl. Eng. & Des., Vol. 207, 2001, pp. 307~316.
16. Cloud, Gary L., "Optical Methods of Engineering Analysis." New York: Cambridge Universe Press, 1995, pp. 393-491
17. Kim, Koungsuk, Kang, Kisoo, Kang, Youngjune, Jung, Seongkyun. "Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography." Optics & Laser Technology, pp. 639-643, 2004.
18. Hecht, E., "OPTICS 4th edition." Addison Wesley Longman, 2002, pp. 470~524.
19. Steinchen, W., Yang, L., "Digital Shearography: Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry." Washington, SPIE Press, 2003.
20. 장호섭. 『전단간섭계를 이용한 면외변형의 정량계측법』, 광주: 조선대학교 박사학위논문, 2006.
21. S.V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Pub. Co. 1980
22. Arch C. Luther, "Video Camera Technology", Artech House Inc, Section 3.1, 1998
23. Nancy, K. Del Grande and P. F. Durbin, "Using Emissivity-Corrected Thermal Maps to Locate Deep Structural Defects in Concrete Bridge Decks", SPIE Symposium on Non-Destructive Evaluation of Aging Infrastructure Oakland, CA, June 06-08, 1995

24. J. M. Lloyd, "Thermal Infrared System", Plenum press, 1979
25. Wu, D., Busse, G., "Lock-in thermography for evaluation of materials", Rev. Gen. Therm., Vo1. 37, 693-703, 1998
26. 김민근, 김경석, 양승필, 김성식, 김현민, 송재근. "위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 Aluminum 6061-T6 시험편의 결함검출." 한국정밀공학회, 춘계학술대회 논문집, pp. 523~524, 2008
27. Busse, G., "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography", Nondestructive Testing Handbook Series 3(3rd Ed), X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, 318-328, 2001

감사의 글

사람은 살아가면서 인생에서 몇 번의 중요한 기회가 찾아온다고 합니다. 제 인생에서 대학원은 제 인생에서 그 몇 번의 기회 중 하나였다고 생각합니다. 우선 저에게 대학원에 입학할 수 있도록 많은 조언을 해주신 부모님과 가족 그리고 선배이자 오랜 벗인 건정이에게 감사하단 말을 전하고 싶습니다. 그리고 부족한 저에게 대학원의 생활에 대해 많은 조언과 가르침을 주신 교수님과 정현철 박사님, 그리고 강기수박사님께도 감사하단 말을 전하고 싶습니다. 그리고 실험실에서의 공부이외에 인생에 대한 조언도 많이 해주신 장호섭박사님께도 감사하단 말을 전하고 싶습니다. 대학원 생활을 2년 넘게 하면서 가족만큼 정이 들어버린 실험실 식구들의 도움이 없었으면 대학원에서의 생활이 어려웠을 것입니다. 잠깐 동안 생활을 하여 친해지지 못한 진혁이형, 상규형, 1년 동안 생활을 하면서 많은 것을 가르쳐준 재호형, 그리고 선배이자 친구인 건정이, 항상 옆자리에서 많은 걸 가르쳐주고 많은 도움을 준 자랑스러운 나의 동기 민근이, 항상 긍정적이고 활달하며 빠른 일처리가 독보인 자랑스러운 나의 동기 현민이, 매사에 꼼꼼하여 어떤 일이든 정확하고 실험실의 분위기 메이커인 자랑스런 나의 동기 종현이, 4명의 선배가 있어서 힘들었을 성원이, 그리고 강원도에서 연고도 없는 광주로 와서 고생한 동수, 마지막으로 이제 갓 신입생인 덕운이, 경수, 이 모든 분들께 감사하단 말을 전하고 싶습니다. 이 모든 분들이 저의 곁에 계셨기에 제가 아무 문제없이 지금껏 생활을 할 수 있었습니다.

앞으로 많은 분들의 성원에 보답하도록 자만하지 않고 항상 노력하고 끈기 있는 사람이 되도록 하겠습니다.

저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20077277	과 정	석사
성 명	한글: 장 수 옥 한문: 張 秀 玉 영문: Jang, Suok				
주 소	광주광역시 동구 학1동 913-12번지				
연락처	E-MAIL: yakidavs@daum.net H.P: 010-4614-0129				
논문제목	한글: Dual-Beam 전단간섭계와 적외선열화상을 이용한 결함검출 영문: Defect Detection using Dual-Beam Shearography and Infrared Thermography				

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 허락을 하였을 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()

2009 년 2월

저작자: 장 수 옥 (인)

조선대학교 총장 귀하