



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](#)

2010 년 2월  
석사학위논문

전단간섭계와 적외선 열화상을  
이용한 복합재 튜브의 결함검출

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

나 성 원

# 전단간섭계와 적외선 열화상을 이용한 복합재 튜브의 결함검출

Defect Detection of Composite Tubes Using  
Shearography and Infrared Thermography

2010년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

나 성 원

전단간섭계와 적외선 열화상을  
이용한 복합재 튜브의 결함검출

지도교수 김 경 석

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2009년 10월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

나 성 원

# 羅成元の 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 張完植 印

委員 朝鮮大學校 教授 梁仁榮 印

委員 朝鮮大學校 教授 金庚錫 印

2009年 11月

朝鮮大學校 大學院

# - 목 차 -

LIST OF TABLE .....	IV
LIST OF FIGURE .....	V
ABSTRACT .....	VIII
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구목표 및 내용 .....	3
제 2 장 이론적 배경 .....	4
제 1 절 스펙클 패턴 간섭법 .....	4
1. 스펙클 이론 .....	4
2. 간섭 .....	8
3. 프린지의 형성 .....	10
4. 위상이동기법 .....	11
제 2 절 광학간섭계 .....	13
1. 전단간섭계 원리 .....	13
2. 전단간섭계를 이용한 변형 측정 .....	15
제 3 절 적외선 열화상 기술 .....	19

제 3 장 실험장치 및 시험편 .....	22
제 1 절 전단간섭계 시스템 .....	22
제 2 절 ESPI 시스템 .....	23
제 3 절 압력조절기 시스템 .....	25
제 4 절 적외선 열화상 시스템 .....	27
제 5 절 시험편 .....	29
제 4 장 실험방법 및 실험결과 .....	30
제 1 절 전단간섭계와 ESPI를 이용한 면외변형 비교 .....	30
1. 평판 면외변형 비교 .....	30
2. 복합재 튜브 면외변형 비교 .....	34
제 2 절 전단간섭계의 전단방향 변경 실험 .....	37
제 3 절 전단간섭계를 이용한 변형측정방법 및 가압방법 변경 실험 .....	41
제 4 절 전단간섭계를 이용한 충격에너지에 따른 변형 측정 .....	44
1. 시험편 충격부의 변형 측정 .....	44
2. 시험편 충격부의 대변형 측정 .....	52
3. 시험편 충격 사이영역의 변형 측정 .....	53
4. 균열 및 비균열 충격부의 변형 비교 .....	57

제 5 절 적외선 열화상을 이용한 복합재 튜브의 결함 측정 .....	59
제 5 장 결론 .....	62
참고문헌 .....	64



## - LIST OF TABLE -

Table 3-1 Comparison with input pressure and real pressure .....	25
Table 3-2 Specification of IR Camera .....	28
Table 4-1 Phase map and Max-deformation by voltage .....	32
Table 4-2 Phase map and Max-deformation of $\varnothing 250$ -10JL by pressure change .....	36
Table 4-3 Phase map and deformation of $\varnothing 150$ -Specimen at $\Delta P=0.0021\text{MPa}$ .....	46
Table 4-4 Phase map and deformation of $\varnothing 250$ -Specimen at $\Delta P=0.0021\text{MPa}$ .....	48
Table 4-5 Phase map and deformation of $\varnothing 500$ -Specimen at $\Delta P=0.0021\text{MPa}$ .....	50
Table 4-6 Deformation of each position of $\varnothing 150$ -Specimen .....	54
Table 4-7 Deformation of each position of $\varnothing 250$ -Specimen .....	54
Table 4-8 Phase map and deformation of $\varnothing 150$ -Specimen between impact parts ( $\Delta P=0.0021\text{MPa}$ ) .....	55
Table 4-9 Phase map and deformation of $\varnothing 250$ -Specimen between impact parts ( $\Delta P=0.0021\text{MPa}$ ) .....	56

## - 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 .....	18
Fig. 2-6 Signal processing of lock-in infrared thermography .....	21
Fig. 3-1 Schematic of Shearography system .....	22
Fig. 3-2 Sensor of shearography (Ettemeyer GmbH, Germany) .....	23
Fig. 3-3 Schematic of ESPI system .....	24
Fig. 3-4 ESPI system (Ettemeyer GmbH, Germany) .....	24
Fig. 3-5 Pressure controller system .....	26
Fig. 3-6 Schematic of lock-in infrared thermography .....	27
Fig. 3-7 Infrared thermography camera .....	28
Fig. 3-8 Composite tubes .....	29
Fig. 4-1 Schematic of shearography and ESPI system .....	30
Fig. 4-2 Shearography and ESPI system .....	31
Fig. 4-3 Shearography vs ESPI deformation by voltage .....	33
Fig. 4-4 Shearography vs ESPI Max-deformation by voltage .....	33
Fig. 4-5 Schematic of shearography and ESPI system .....	34
Fig. 4-6 Shearography and ESPI system .....	35

Fig. 4-7 Shearography vs ESPI deformation of $\varnothing 250$ -10JL by pressure change .....	36
Fig. 4-8 Deformation of x, y-axis .....	37
Fig. 4-9 Schematic of shearography system .....	38
Fig. 4-10 Deformation by shearing direction .....	38
Fig. 4-11 Shearing direction .....	39
Fig. 4-12 Comparison with Max-deformation .....	40
Fig. 4-13 Two kinds of measurement methods .....	42
Fig. 4-14 Comparison with Max-deformaton .....	42
Fig. 4-15 Comparison with deformation .....	43
Fig. 4-16 New measurement method .....	44
Fig. 4-17 Schematic of shearography .....	45
Fig. 4-18 Shearography system .....	45
Fig. 4-19 Max-deformation by pressure change( $\varnothing 150$ ) .....	47
Fig. 4-20 Max-deformation by impact energy( $\varnothing 150$ ) .....	47
Fig. 4-21 Max-deformation by pressure change( $\varnothing 250$ ) .....	49
Fig. 4-22 Max-deformation by impact energy( $\varnothing 250$ ) .....	49
Fig. 4-23 Max-deformation by pressure change( $\varnothing 500$ ) .....	51
Fig. 4-24 Max-deformation by impact energy( $\varnothing 500$ ) .....	51
Fig. 4-25 Deformation of maximum preassure( $\varnothing 150$ -15JR, 20J, 30J) .....	52
Fig. 4-26 Measurement position of phase map( $\varnothing 150$ , $\varnothing 250$ ) .....	53
Fig. 4-27 Measurement position .....	57
Fig. 4-28 Deformation of each position .....	58
Fig. 4-29 Two kinds of deformation .....	58
Fig. 5-1 Infrared thermography system .....	59

Fig. 5-2 Infrared thermography image of $\varnothing 150$ -Specimen .....	60
Fig. 5-3 Infrared thermography image of $\varnothing 250$ -Specimen .....	60
Fig. 5-4 Infrared thermography image of $\varnothing 500$ -Specimen .....	60
Fig. 5-5 Temperature of $\varnothing 150$ -Specimen .....	61
Fig. 5-6 Temperature of $\varnothing 250$ -Specimen .....	61
Fig. 5-7 Temperature of $\varnothing 500$ -Specimen .....	61

# ABSTRACT

## Defect Detection of Composite Tubes Using Shearography and Infrared Thermography

Na Sung Won

Advisor : Prof. Kim Koung-suk Ph.D.

Department of Advanced Parts and-  
Materials Engineering,

Graduate School of Chosun University

The problem of delamination of composite tubes by impact has been acknowledged in aerospace and automobile industry. Non-destructive testing(NDT) methods in composite material structure are important to evaluate reliability of composite structure. There are many kind of NDT methods which can detect the inside defect of the composite material such as Infrared Thermography(IRT), Holography, Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) and Shearography, Ultrasonic testing. Nondestructive testing methods with the merits of rapid response, high resolution, and manifold applications have been taken to the safety diagnosis in industrial fields.

Shearography can measure the first derivative of surface displacement and inspect object with whole-field and non-contact. This technique has especially introduced to the aerospace and nuclear industry for the non-destructive testing. Recently, Shearography is applied to measure the strain and deformation of an object. In this paper, deformation of impact position of composite tubes under internal pressure change was measure by Shearography.

Infrared thermography is a non-contact and non-destructive technique

which can measure temperature variations of surface. Defect detection of infrared thermography by Lock-in method is possible for measuring a temperature evolution of object by thermoelastic effect except for the external factors. Thus, those technique can be a kind of non-contact nondestructive evaluation to apply to industrial structures. In this study, Infrared thermography detect internal defects of composite tubes from the thermal distribution by the inspection of infrared light radiated from the surface of composite tubes. Infrared thermal imaging of object is different from that of a defect, in heated composite tubes 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.

In this paper, defect of composite material tubes by impact were measured by using Shearography and infrared thermography.

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구배경

최근 산업분야에서 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 복합재료의 응용분야가 급속히 확산되고 있다. 그 중 복합재료의 대표적인 재료인 탄소섬유강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP)은 비강성(탄성을/밀도 : specific stiffness), 비강도(인장강도/밀도 : specific strength)가 기존의 금속재료보다 훨씬 높고 내화학성, 진동감쇄특성, 전기절연성, 치수안정성 등이 우수하기 때문에 선박, 항공기, 우주비행체, 자동차 및 기차에 이용되고 있으며 그 활용 범위도 점차 확대되어가고 있다.<sup>1-4</sup> 특히 우주항공분야의 응용사례를 살펴보면 보잉사는 수직, 수평 꼬리날개에 알루미늄보다 비강도가 3배가 높은 복합재료를 사용하여 약 15%의 경량화에 성공하였고, 미국 전투기의 기체중량을 40%까지 복합재료로 대체한다는 계획을 추진하고 있다.<sup>5</sup>

그러나 필라멘트 와인딩 기법을 적용하여 제작된 복합재 튜브는 섬유 및 수지의 특성으로 인하여 충격에 의한 결함의 발생 가능성이 높다는 단점이 있으며<sup>6-8</sup>, CFRP 적층판의 경우 일 방향성 프리프레그 시트(Prepreg sheet)를 이용하여 원하는 적층순서와 배향각에 따라 제작하기 때문에 적층과정에서 발생하는 미끄럼이나 적층불량에 의한 기공, 기포, 미세균열 등의 결함이 혼재될 수 있다. 또한 CFRP 적층판은 저에너지 충격시 표면에서는 관찰 불가능한 층간박리(Delamination), 모재크랙(Transverse crack)에 의해 내부 손상이 발생한다. 충격에 의한 결함은 육안으로 판별하기 곤란하여 CFRP 복합재를 항공기나 자동차의 강도부재료 사용할 경우 저속충격에 의한 내부 결함평가는 매우 중요한 문제이다.

CFRP 복합재를 항공기 구조재료로써 이용할 경우 항공기 제조, 수리, 정비 중 공구낙하, 항공기의 이착륙시 우박이나 새와의 충돌에 의한 이물충격손상을 받는 경우가 많으며 이러한 손상해석은 복합재료 안전설계에 있어 매우 중요한 문제로 제기되고 있으며, 실제 항공기 날개나 동체, 압력용기, 배관, 로켓모터 케이스와 같은 적층복합재료 구조물들은 거의 셸이나 튜브의 형태

를 가지고 있기 때문에 복합재 튜브의 충격에너지에 따른 결함 측정의 연구가 필수적으로 요구된다.<sup>9-11</sup>

현재 복합재 구조물의 내부 결함검출 및 평가로 초음파(Ultrasonic), 방사선(Radiography)등을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 전단간섭법과 적외선 열화상 기법을 이용하여 복합재 튜브의 결함을 검출하였다.

전단간섭법(Shearography)은 비접촉, 전면검사, 실시간 검사기술로써 대상물의 결함을 계측하는데 매우 우수하며, 외란에 매우 강한 장점을 바탕으로 산업현장에서 비파괴검사 기법으로 사용되고 있다. 레이저 스펙클 간섭법을 이용하여 변형 전후의 스펙클이미지를 저장한 다음 변형 전·후의 각각의 위상을 위상이동 기법에 의해 위상을 구하고, 감산처리를 통하여 Phase map을 획득한다. 이렇게 획득한 Phase map을 화상처리 및 적분과정을 거쳐 결함검출 및 변형을 측정한다.<sup>12-14</sup>

적외선 열화상(Infrared Thermography : IRT) 기술은 대상체 표면의 복사 에너지를 검출하여 이를 온도로 환산하여 실시간으로 영상을 제공하는 기술이다. 적외선 열화상기술에 의한 비파괴 검사는 결함부와 미 결함부의 온도차를 관찰함으로써 결함의 유무를 판단한다. 대상물의 열확산계수가 클 경우 샘플링 한계로 인하여 결함을 찾는데 어려움이 발생한다. 이러한 문제점을 위장잠금(Lock-in)기법을 적용함으로써 측정이 가능하다. 이러한 적외선열화상 검사기법은 예측적 공장보수, 제품의 생산과정 및 모니터링과 연구, 개발 등 산업전반에 걸쳐 광범위하게 쓰이는 가장 유용한 도구중 하나이다. 따라서 본 연구에서 전단간섭법 및 적외선 열화상 기법을 통한 복합재 튜브의 충격량에 따른 결함측정은 항공분야 등의 안전성 확보에 큰 도움이 될 것이다.<sup>15</sup>



## 제 2 절 연구목표 및 내용

여러 분야에서 실제 사용되는 복합재 구조물은 대부분 셸이나 튜브의 형태를 하고 있기 때문에 복합재 튜브의 충격에너지에 따른 결함 검출은 매우 중요하다. 복합재료는 다른 금속재료 보다 강도, 강성, 비강도, 비강성 등이 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 미소결합의 진전으로 인해 예기치 못한 사고나 문제를 야기시키게 된다. 또한 복합재료로 구성된 구조체의 외부요인에 의한 충돌시 표면에서는 거의 관찰할 수 없는 층간분리, 모재균열에 의해 내부손상이 발생하게 되고, 반복하중에 의하여 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 필요 하다.

본 연구에서는 위에서 제시한 복합재 튜브의 충격에너지에 따른 결함검출을 위해 전단간섭법과 적외선 열화상기법을 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 간섭성(Coherency)이 좋으며, 단색성(Monochromaticity)인 레이저 광이 거친 표면에 반사되거나 굴절률이 균일하지 않는 매질을 통과할 때 고운 입자 형태의 밝고 어두운 점이 무질서한 분포를 이루게 되는 것을 말한다. 임의의 대상물에 조사된 레이저 빛은, 대상물의 표면에서 어른거리는 입자 발생한다. 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.<sup>16</sup> 스페클 효과는 레이저의 가간섭성과 대상물 표면의 광학 거칠기 때문에 발생하고, 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. 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  $\Delta x$ 라고 하고,  $P_1$ 과 Q,  $P_2$ 와 Q까지의 경로차는 s이며,  $P_1$ 과 Q,  $P_2$ 와 Q'까지의 경로차는 s'이라고 할때, s와 s'과의 상대적인 경

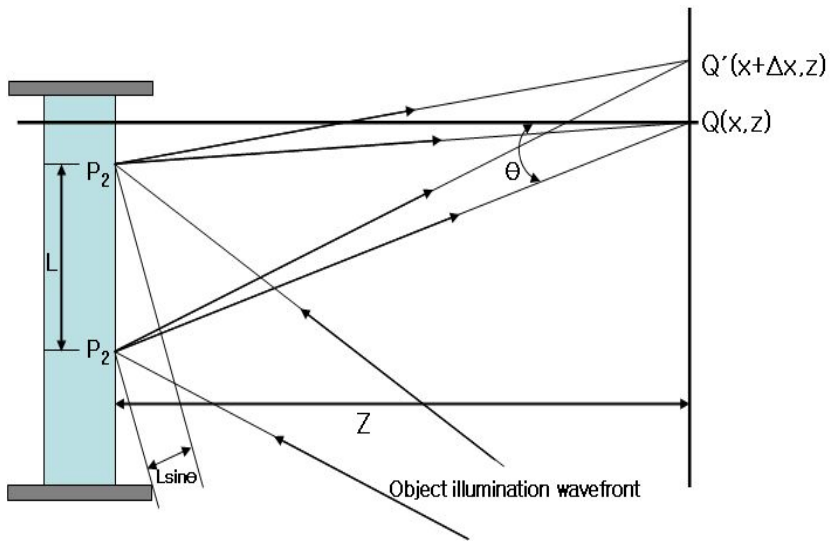
로 변화는 Eq. (2-1)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 s &= (P_1Q - P_2Q) \simeq \frac{xD}{L} + \frac{D^2}{2L} \\
 s' &= (P_1Q' - P_2Q') \simeq \frac{xD}{L} + \frac{D^2}{2L} + \frac{\Delta x D}{L} \\
 \Delta s &= s' - s = \frac{\Delta x D}{L}
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

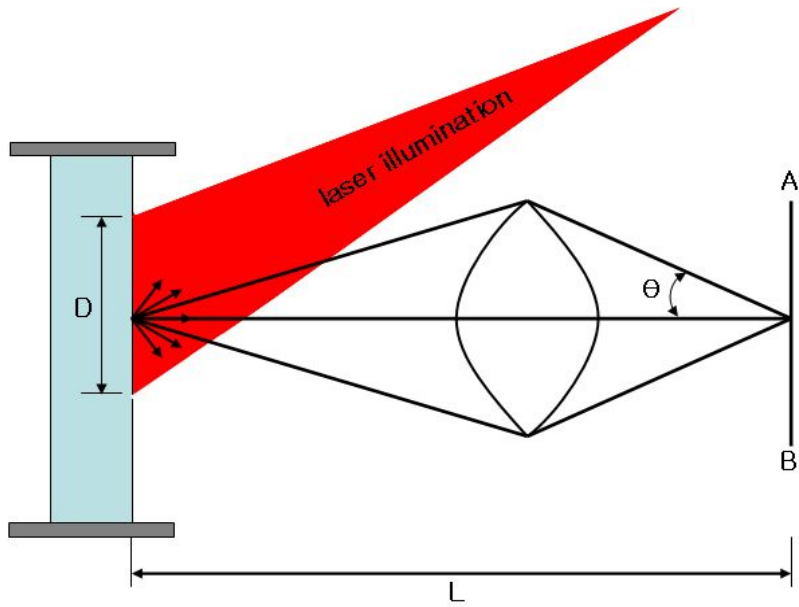
$\Delta s$ 가 파장보다 매우 작다면, 상대적 위상은 근사적으로 동일하다.  $\Delta x D/L \simeq \lambda$ 라면 인접한 점과의 위상은 전혀 다르기 때문에, Q와 Q'에서 빛의 강도는 상호 연관성 없다. 이렇게 상호 연관성이 없게 되는 거리  $\Delta x$ 의 2배를 스페클의 크기라고 할 수 있으며, 그 거리는 Eq. (2-2)과 같이 표현할 수 있다.<sup>17</sup>

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

여기서  $\lambda$ : 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 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.



(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 Eq. (2-3)과 같이 정의된다.

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

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 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 Eq. (2-4)로 정의된다.

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

위 조건에서 물체 표면에서 형성된 스페클의 크기는 778.78 nm가 된다. 스페클의 크기는 CCD 카메라의 화소크기와 같을 때 가장 이상적이며<sup>18</sup>, uniform field와의 조합하여 간섭하는 면외변위측정 간섭계에서는 스페클의 크기가 2배로 커지게 된다.<sup>17</sup> 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.

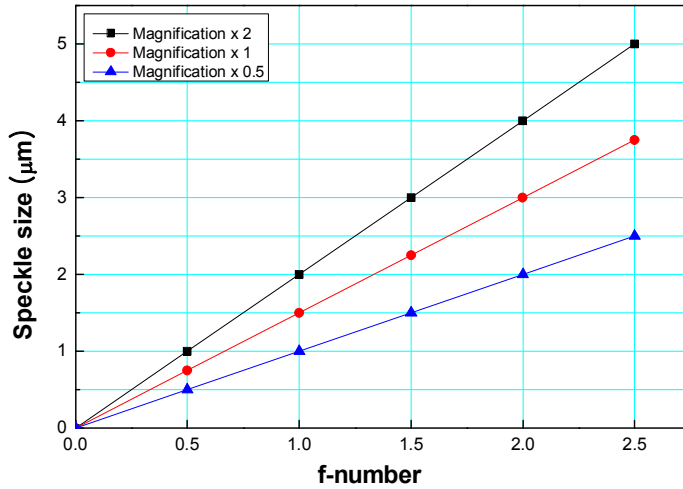


Fig. 2-2 Subjective speckle size on the CCD image plane

## 2. 간섭

간섭이란 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 Eq. (2-5)로 나타낼 수 있다.

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

$A(x,y)$ 는 바이어스(Bias) 강도,  $B(x,y)$ 는 변조파의 강도,  $k_i, \omega_i, \phi_i (i = 1, 2)$ 는 각각  $I$ 번째 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 Eq. (2-7)이라고 하면, 합성은 Eq. (2-8)로 정의된다.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{01} \cos(kx_1 - \omega t_1 + \phi_1) \\ E_2 &= E_{02} \cos(kx_2 - \omega t + \phi_2) \end{aligned} \quad (2-7)$$

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

$E_1$ 과  $E_2$ 는 모두 가시범위 내에서는 상당히 빠른 주파수로 변화하기 때문에 이들의 변화를 일정 시간동안 평균하게 되면 0이 된다. 이는  $E_1$ 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 0사이 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 Eq. (2-11)로 나타낼 수 있다.

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

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

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

이 식에 시간 간격 T에 대해서 함수를 시간 평균을 한 후 얼마간에 수학적 과정을 거치면, 총 복사 조도를 구할 수 있다.<sup>19</sup>

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

### 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.<sup>20</sup>

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

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

여기서  $I_{before}$  : 물체변형전의 광강도,  $I_{after}$  : 물체변형후의 광강도,  $\Delta\phi$  : 물체변형에 따른 위상변화이다. 변형전후의 두 개의 스펙클패턴의 감산처리는 화상처리 장치에 의해 수행되며 Eq. (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  $I_{sub}$  : 물체변형 전후의 광강도 분포의 감산 처리된 광강도이다.

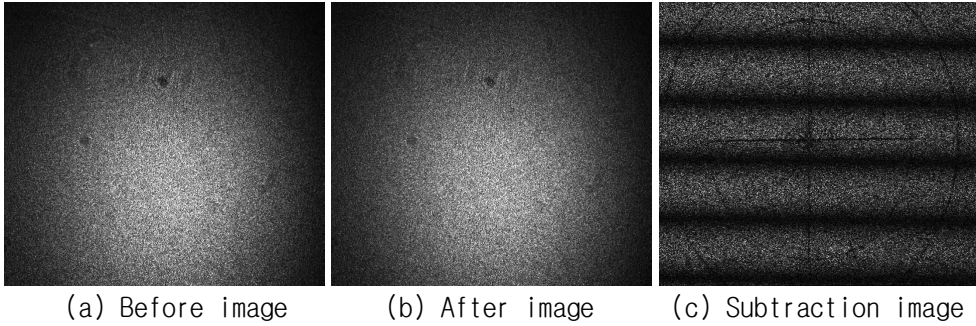


Fig. 2-3 The fringe pattern formation depend on deformation

#### 4. 위상이동기법(Phase shifting method)

PZT를 이용한 위상이동기법은 ESPI와 전단간섭계에 의해 형성되는 간섭 정보로부터 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 Eq. (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 Eq. (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( $\phi_{before}$ )과 변형후의 위상( $\phi_{after}$ )을 각각 구하고 그 차를 구함으로써 실제 물체변형을 Eq. (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 시간 동안 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 나타내고 있으며, ESPI와 달리 레이저 빛이 둘로 나뉘지 않고 하나의 확산광이 대상물에 조사된다. 이 때 스페클의 발생은 면외변형 측정 간섭계와 동일하며, 난반사된 빛이 광분할기에 의해 두 개의 빛으로 나누어진 후, 하나는 Mirror 1에 입사/반사되어 상면에 맺히고, 다른 하나는 Mirror 2에서 반사되어 다시 광분할기를 통해 상면에 맺히게 된다. 이때, Mirror 2에 임의의 기울기를 주면 기울어진 Mirror 2에서 반사된 파면은 Mirror 1에서 반사된 파면에 대해서 수평으로 전단(Shearing)되어 CCD의 상면(Image plane)에 맺히게 된다. 이렇게 두 빛이 간섭하게 되는 것은 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  $\delta x$ 로 표현한다. 전단방향과 전단량 등에 영향을 받아 간섭줄무늬의 형태가 결정된다.

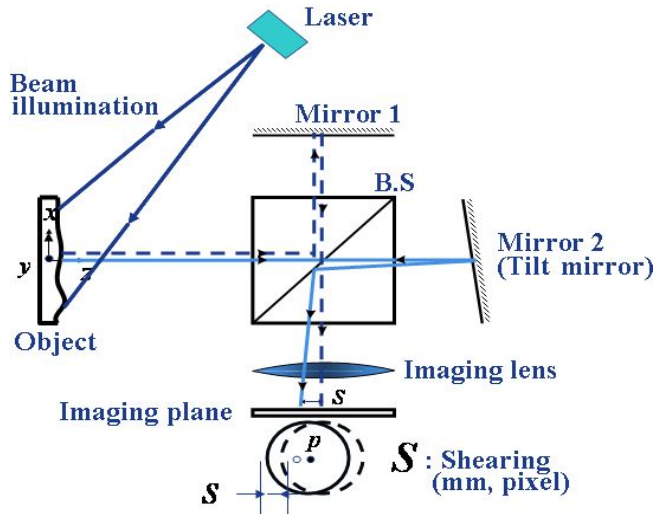


Fig. 2-4 Out-of-plane displacement sensitive interferometer

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 의하여 발생한 위상차의 변화  $\Delta\phi$ 는 Eq. (2-22)과 같으며, 이는 면외변형의 계측에서 전체 위상변화의 표현과 같이 벡터로 표현이 가능하다. 전단간섭계를 이용하여 얻어진 간섭줄무늬를 해석하는 방법은 Eq. (2-21)을 이용하게 된다. 이 식은 변형에 의한 전체의 위상변화를 나타내며, 모든 광계측의 기본식이 된다.

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

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.<sup>16</sup>

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

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

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

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

$\Delta d$ 는 테일러급수에 의해 Eq. (2-25)와 같이 표현할 수 있으며,  $\Delta x$ 는 상면에서 전단량  $\delta x$ 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 Eq. (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 Eq. (2-28)와 같이 대상물에 발생하는 변형을 전단시켜 나타나며, 변형  $\Delta d$ 는 Eq. (2-29)와 같다.

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

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

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

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

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

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

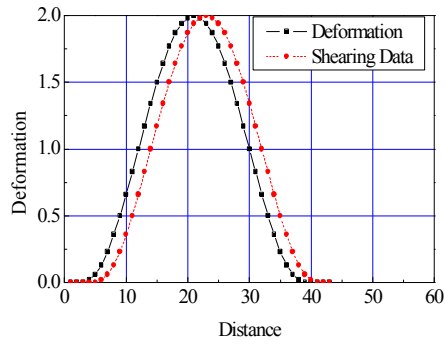
Eq. (2-30)을 Eq. (2-28)에 대입하면 Eq. (2-32)과 같이 표현할 수 있으며, 측정된 결과는 수치적분이 가능하다.

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

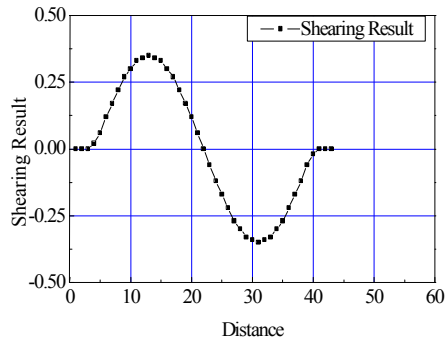
전단간섭계의 전단거울이 임의의 각도로 전단될 때 CCD 카메라에 전단 이미지가 형성되는데 이는 Fig. 2-5(a)의 점선과 같이 일정 거리 즉, 화소수만큼 평행이동 되어 나타난다. Fig. 2-5(b)는 Fig. 2-5(a)에 표현된 두 값을 감산한

결과로써, 전단간섭법으로 표현되는 변형 전과 변형 후 상태의 비교결과와 동일하며, 이는 임의의 두 점 사이의 평균 기울기의 연속적인 표현이라고 할 수 있다.<sup>20</sup>

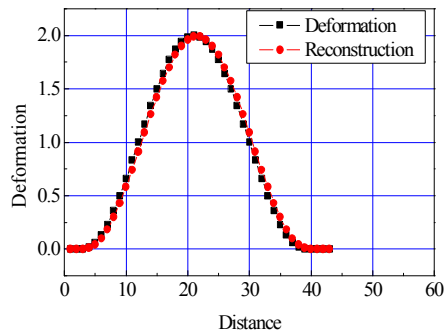
본 논문에서 제안하는 내용은 Fig. 2-5(b)의 결과를 평행 이동시킨 화소수로 나누고, 적분하면 원래의 변형과 거의 같은 결과를 얻을 수 있는데, 이는 Fig. 2-5(c)와 같으며, 전단간섭법만을 이용하여 대상물에 발생하는 면외변형을 측정할 수 있음을 나타낸다.



(a) Deformation and shearing data



(b) Shearing result



(c) Deformation and reconstruction

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



### 제 3 절 적외선 열화상 기술

적외선 열화상 기술은 대상물의 표면을 따라 온도에 관련된 징후, 증거가 되는 열 패턴을 검출을 하기 위해 사용되는 비 접촉, 비파괴 시험의 한 형태이다. 정기적으로 수행되면 적외선 정밀검사는 초기에 장비 이상을 확인하는데 도움을 준다. 적외선 에너지는 온도의 직접적이고 비례적인 함수이기 때문에 열화상 동영상은 모니터에 온도 레벨을 나타내도록 되어있다. 최신 적외선 열화상장치는 0.08°C의 감도로 -20°C에서 1500°C의 물체의 온도를 감지할 수 있다. 적외선 열화상은 열전도에 의해 방사되는 보이지 않는 적외선 광선을 검출하여 화상으로 만들어 주는 기술이며, 가장 전형적인 열화상 카메라는 캠코더와 유사하고 열복사 동영상을 측정 및 저장한다. 좀 더 정교한 카메라는 실제로 어떤 물체의 온도 혹은 화상 안에 있는 표면의 온도를 측정할 수 있으며, 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 검사 방법이 다른 시험법에 비해 비접촉측정으로 안전하며, 고속으로 측정 가능하고, 기록의 보존 등이 용이한 장점을 가지고 있다.<sup>21</sup> 적외선의 에너지 복사(Radiation) 파장대는 가시광선과 마이크로파 사이의 0.75 $\mu\text{m}$ 에서 1000 $\mu\text{m}$  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 검출기(Hybrid detector)등이 사용된다.<sup>22</sup> 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.<sup>23</sup>

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.<sup>24</sup>

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 제어 가능한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 본 논문에서는 결함검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광-적외선 열화상 기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 2-6과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수로 입사되는 열원(Heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. Eq. (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.<sup>25,26</sup>

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

여기에서 T는 온도, t는 시간, k는 열전도계수, ρ는 밀도, c<sub>p</sub>는 비열, x는 열 유동 방향으로의 거리이다. 조화함수로 가열된 Eq. (2-40)의 해는 Eq. (2-41)과 같이 나타낼 수 있다.

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

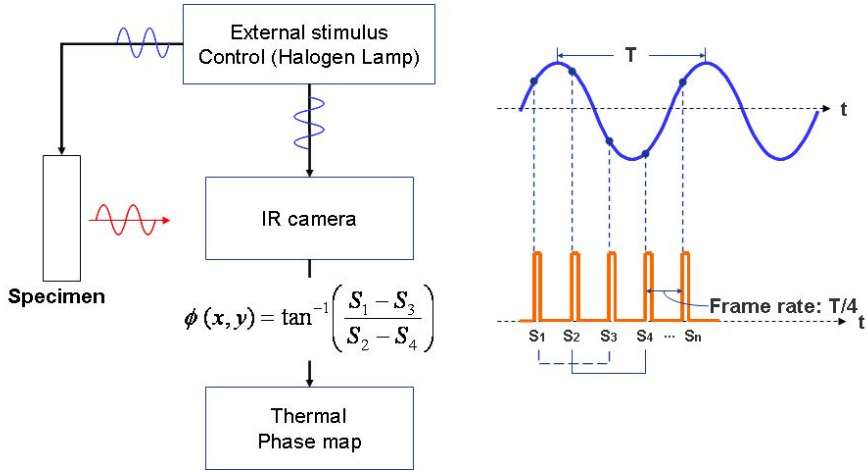


Fig. 2-6 Signal processing of lock-in infrared thermography

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

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

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

## 제 3 장 실험장치 및 시험편

### 제 1 절 전단간섭계 시스템

전단간섭계 시스템은 독일 Ettemeyer 사의 상용 시스템을 이용하였으며, 시스템의 구성은 Fig. 3-1과 같이 전단간섭계센서, Laser, Controller, PC로 구성이 되어 있다. 레이저는 Nd:YAG Laser(파장: 532nm)를 사용하며, polarization maintaining optic fiber를 이용하여 레이저 빛을 센서로 전달하고, 센서 위쪽의 암(Arm)에 장착된 거울을 통해 물체에 조사된다. 전단량과 전단방향은 센서 뒷면의 수동식 조절장치를 이용하여 조절할 수 있다. 상용 프로그램(ISTRA)을 이용하여 최종 위상지도를 획득하고, 후 처리를 통하여 결함부의 변형을 측정한다. Fig. 3-2는 전단간섭계 센서를 나타내었다.

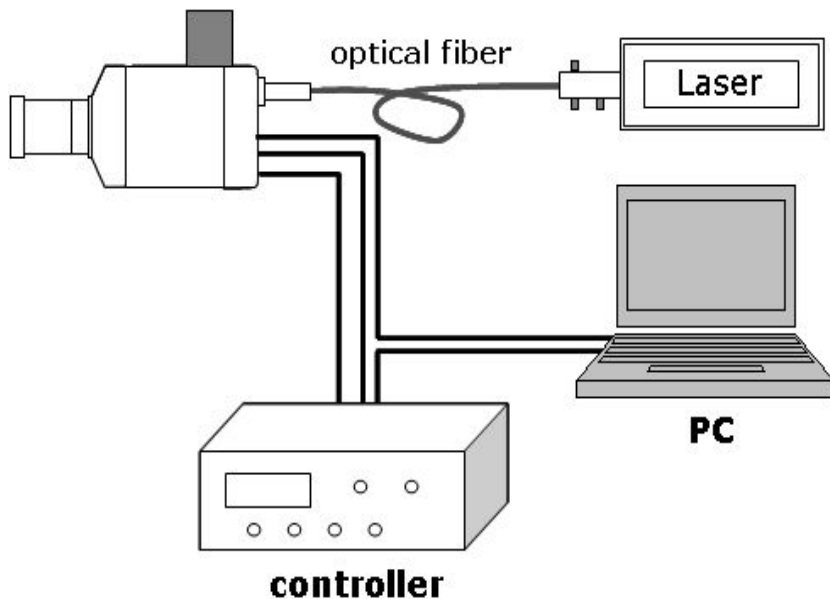


Fig. 3-1 Schematic of shearography system



Fig. 3-2 Sensor of shearography (Ettemeyer GmbH, Germany)

## 제 2 절 ESPI 시스템

전단간섭법을 이용한 변형측정의 신뢰성 확보를 위해 ESPI 시스템을 사용하였으며, ESPI 실험장치는 독일 Ettemeyer 사의 상용제품(Model : Q-300)을 사용하였다. 장치구성은 Fig. 3-3과 같이 Nd:YAG Laser (파장 : 532nm), polarization maintaining optic fiber, ESPI sensor, controller, PC로 구성된다. 센서 내부에는 x, y, z축의 변위를 측정할 수 있는 3개의 간섭계가 구성이 되어 있으며, 셔터(Shutter)를 이용한 광로의 차단으로 간섭계를 선택할 수 있다. 위상지도(Phase map)는 상용프로그램(ISTRA, Ettemeyer GmbH)을 이용하여 결편침 및 수치해석함으로서 변형을 측정할 수 있다.

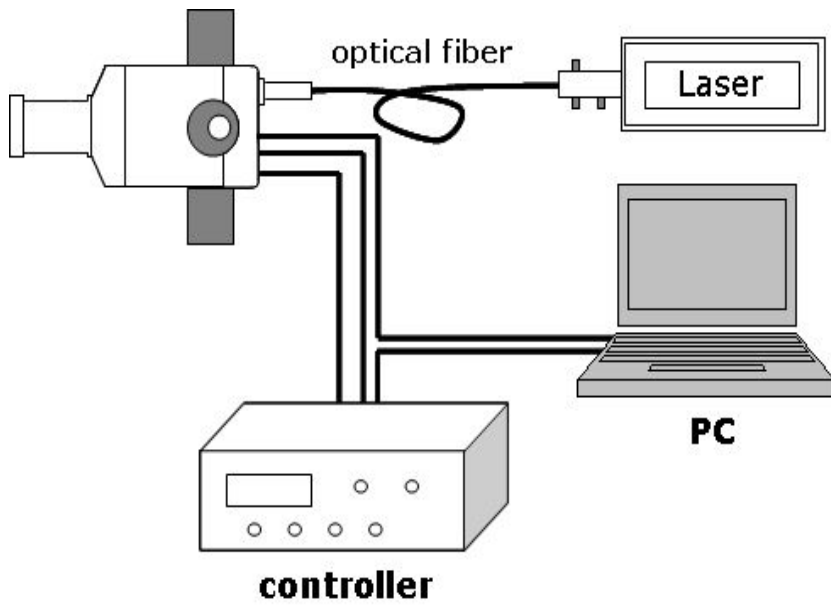


Fig. 3-3 Schematic of ESPI system



Fig. 3-4 ESPI system (Ettemeyer GmbH, Germany)

### 제 3 절 압력조절기

압력조절기는 Fig. 3-5(a)과 같이 제작하였으며, 압축기에서 나오는 공기압력을 압력조절기를 거쳐서 원하는 압력으로 복합재 튜브에 공급하는 역할을 한다. 터치스크린 방식으로 컨트롤이 가능하며, 최대 0.8MPa의 압력을 0.001MPa의 분해능으로 컨트롤 할 수 있다. 그러나 공압 조절시 공압의 정밀한 제어가 힘들기 때문에 입력한 압력과 실제 시험편 내부 압력의 차이가 발생하였다. 이에 Table 3-1과 같이 컨트롤러의 입력 압력과 시험편 내부의 실제 압력을 표시하였다. 본 연구에서는 초기압력을 0.0297MPa(Real pressure)으로 설정 하였으며, 이 초기압력을 기준으로 10단계를 가압하여 변형을 측정하였다.

Table 3-1 Comparison with Input Pressure and Real Pressure.

Input Pressure (MPa)	Real Pressure (MPa)	$\Delta P$ (MPa)
0.033 (기본압)	0.0297	-
0.036	0.0318	0.0021
0.039	0.0369	0.0072
0.042	0.0393	0.0096
0.045	0.0420	0.0123
0.048	0.0441	0.0144
0.051	0.0465	0.0168
0.054	0.0516	0.0219
0.057	0.0540	0.0243
0.060	0.0567	0.0270
0.063	0.0588	0.0291



(a) Controller



(b) Compressor

Fig. 3-5 Pressure controller system



#### 제 4 절 적외선 열화상 시스템

위상잠금(Lock-in) 적외선 열화상 시스템의 구성을 Fig. 3-6에 나타내었으며, 프랑스 Cedip사의 Silver 480 사용제품을 사용하였다. 이 시스템에서는 함수발생기에 의해 할로젠램프의 주파수를 조절하고 이와 동기화하여 적외선 검출소자로부터 위상이미지(Phase map)를 사용자에게 제공한다. 본 연구에서는 위상이미지를 획득하여 결함의 크기 및 위치를 평가한다. Fig. 3-6은 Lock-in 기법을 이용한 적외선 열화상 측정 시스템을 나타내었고, Fig 3-7은 적외선 열화상 카메라를 나타내었다. 적외선 열화상카메라(IR camera)의 사양은 Table 3-2에 나타내었다.

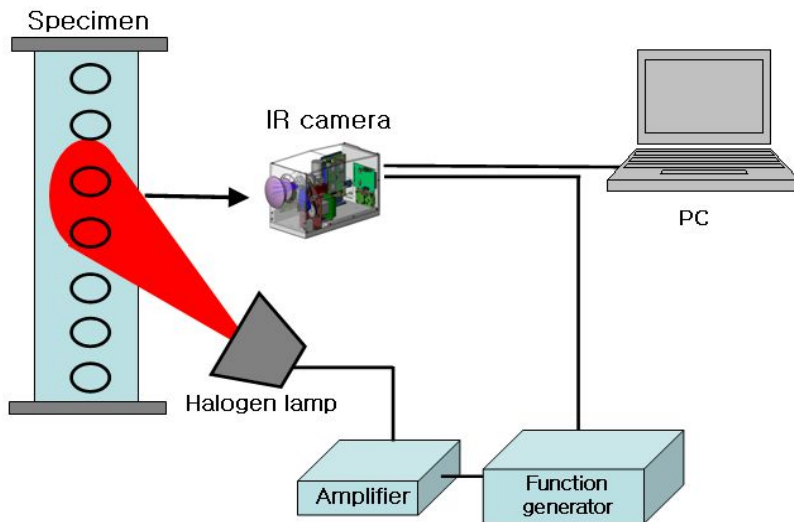


Fig. 3-6 Schematic of lock-in infrared thermography



Fig. 3-7 Infrared thermography camera

Table 3-2 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

## 제 5 절 시험편

본 연구에서는 지름이  $\varnothing 150$ ,  $\varnothing 250$ ,  $\varnothing 500$ 인 복합재 튜브를 탄소섬유와 에폭시 수지를 재료로 하여 필라멘트 와인딩 기법으로 제작하였다.

제작된 각각의 시험편에 두께 방향으로 강구를 발사하여 다양한 충격하중을 주었다.  $\varnothing 150$ 시험편의 충격에너지는 시험편의 왼쪽에서부터 각각 3JL, 3JR, 5J, 10J, 15JL, 15JR, 20J, 30J, 40JL, 40JR이고,  $\varnothing 250$  시험편의 경우 충격에너지는 왼쪽에서부터 각각 10JL, 5JL, 3JL, 3JR, 80J, 60J, 40J, 20J, 10JR, 5JR이다.  $\varnothing 500$  시험편의 경우 왼쪽에서부터 각각 120JL, 60JL, 10JL, 10JR, 120JR, 100J, 80J, 60JR, 40J, 20J의 충격을 가하였다. 이때 동일한 충격에너지의 경우 왼쪽 충격부위를 L, 오른쪽 충격부위를 R로 표기하였다. Fig. 3-8는 제작된 시험편을 나타내었다.



Fig. 3-8 Composite tubes

## 제 4 장 실험방법 및 실험결과

### 제 1 절 전단간섭계와 ESPI를 이용한 면외변형 비교

#### 1. 평판 면외변형 비교

ESPI와 전단간섭계를 이용한 복합재 튜브의 면외변형 비교에 앞서 고무 평판의 면외변형을 측정 및 비교가 필요하다. 따라서 전단간섭계 와 ESPI의 면외변형 측정을 위한 간섭계를 구성하고, 고무 평판에 PZT 와 PZT Controller를 이용하여 5V, 10V, 15V, 20V의 전압에 따른 면외변형을 가한다. 각각의 PZT의 이송량에 대한 변형을 전단간섭계 와 ESPI를 이용하여 측정 및 데이터를 비교한다. 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-1과 Fig. 4-2와 같다. Table 4-1은 ESPI와 전단간섭계의 volt변화에 따른 위상지도와 최대 변형 및 오차율을 나타내었다. Fig. 4-3, 4-4는 ESPI 와 전단간섭계의 각 Volt에 따른 변형 및 최대 변형의 비교를 나타내었다.

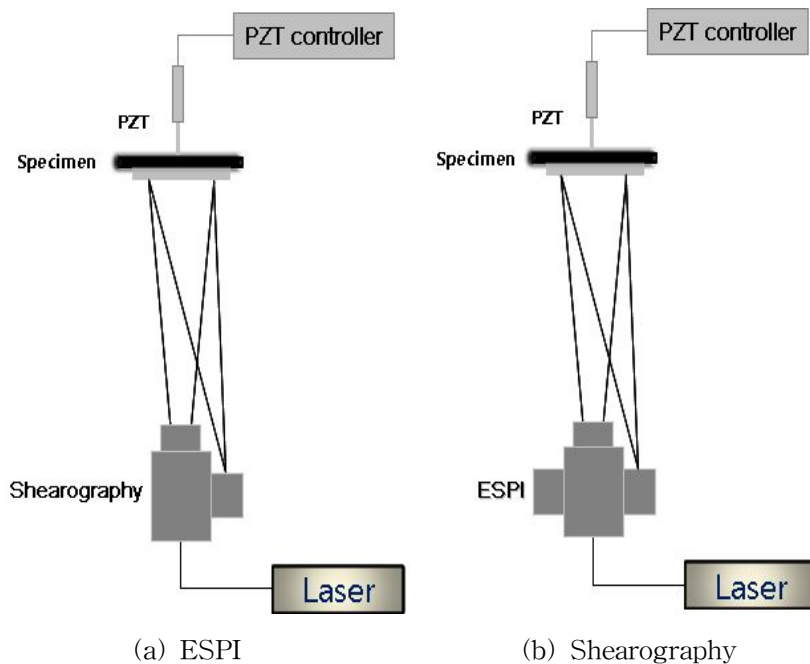
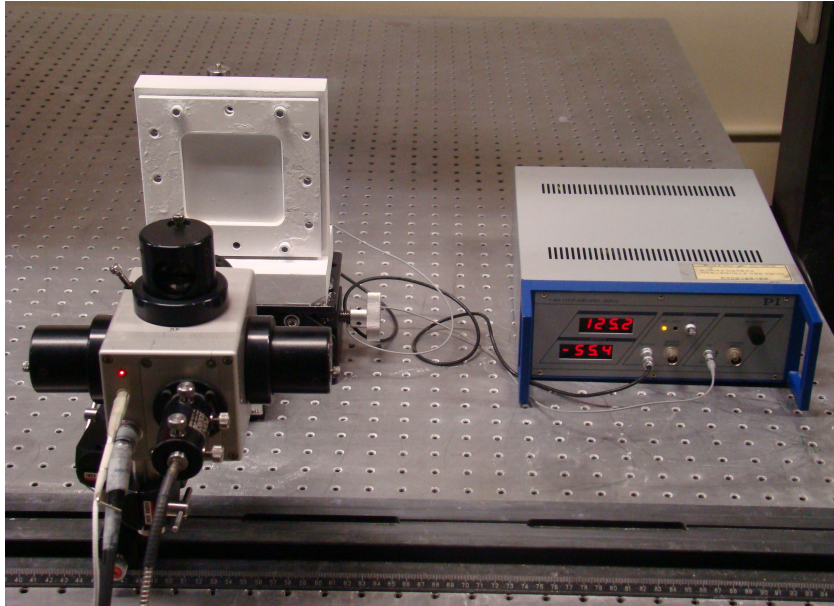
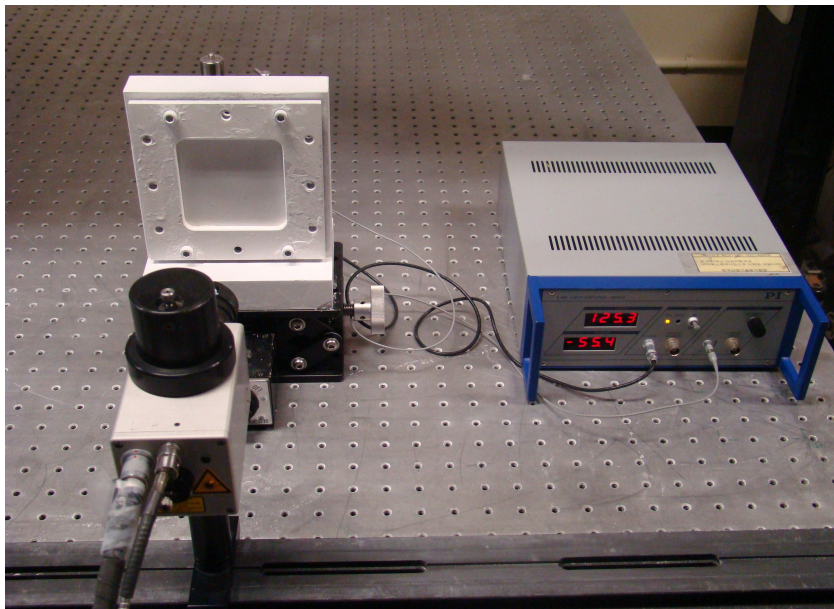


Fig. 4-1 Schematic of shearography and ESPI system



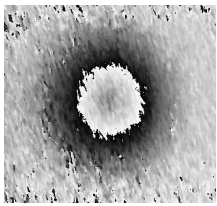
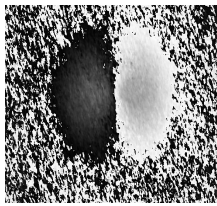
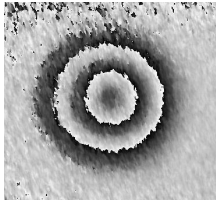
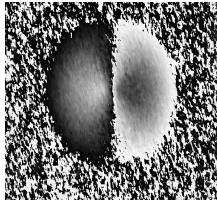
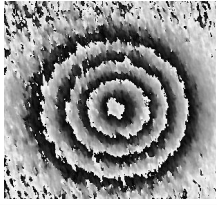
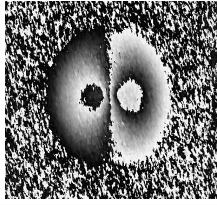
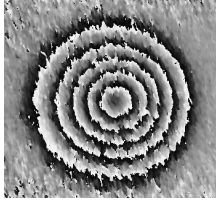
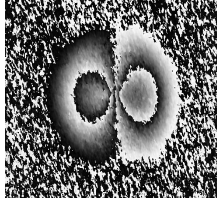
(a) ESPI



(b) Shearography

Fig. 4-2 Shearography and ESPI system

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

Volt	ESPI		Shearography		Error (%)
	Deformation ( $\mu\text{m}$ )	Phase-map	Deformation ( $\mu\text{m}$ )	Phase-map	
5V	0.314		0.323		3%
10V	0.654		0.661		1%
15V	1.041		1.023		2%
20V	1.344		1.353		1%

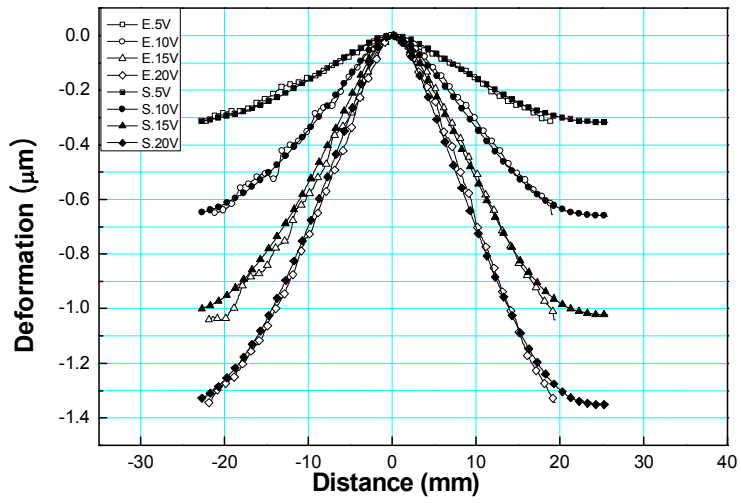


Fig. 4-3 Shearography vs ESPI deformation by voltage

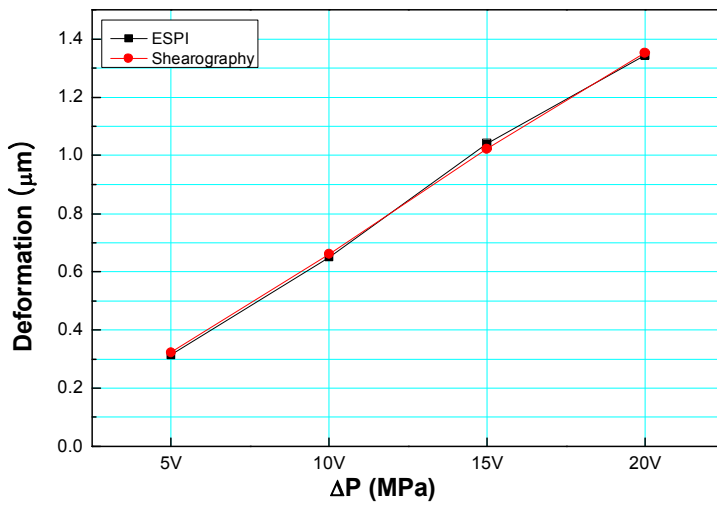


Fig. 4-4 Shearography vs ESPI max-deformation by voltage

본 실험은 고무평판의 변형을 전단간섭계와 ESPI를 이용하여 비교 실험하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

전단간섭계와 ESPI의 Volt 변화에 따른 고무평판의 변형은 1~3% 이내의 오차 범위로 측정됨을 알 수 있다. 따라서 ESPI와 전단간섭계를 이용한 변형 측정은 거의 일치함을 알 수 있으며, 전단간섭계 기법의 신뢰성을 확인하였다.

## 2. 복합재 튜브 면외변형 비교

ESPI와 전단간섭계를 이용한 복합재 튜브의 충격에너지별 변형을 비교분석 및 압력변화에 따른 변형을 비교 분석하여 전단간섭계의 신뢰성을 검증하기 위하여 전단간섭계와 ESPI를 이용하여 동일한 결함을 동시에 측정 하였다. 532nm인 Nd:YAG 레이저를 사용하였고,  $\varnothing 250-10JL$ , 20J 충격부의 압력 변화에( $\Delta P=0.003, 0.006, 0.009$  MPa)의한 변형을 측정하였다. 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-5과 같다.

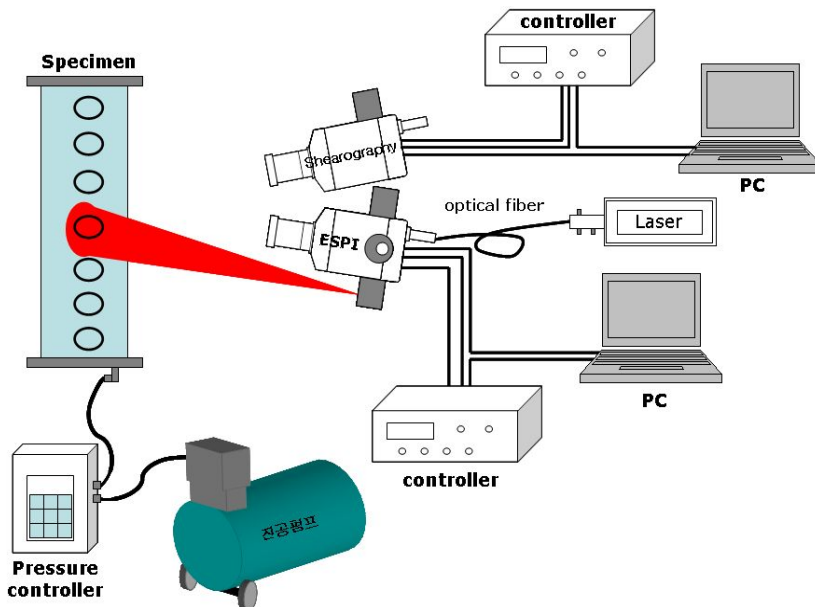


Fig. 4-5 Schematic of shearography and ESPI system



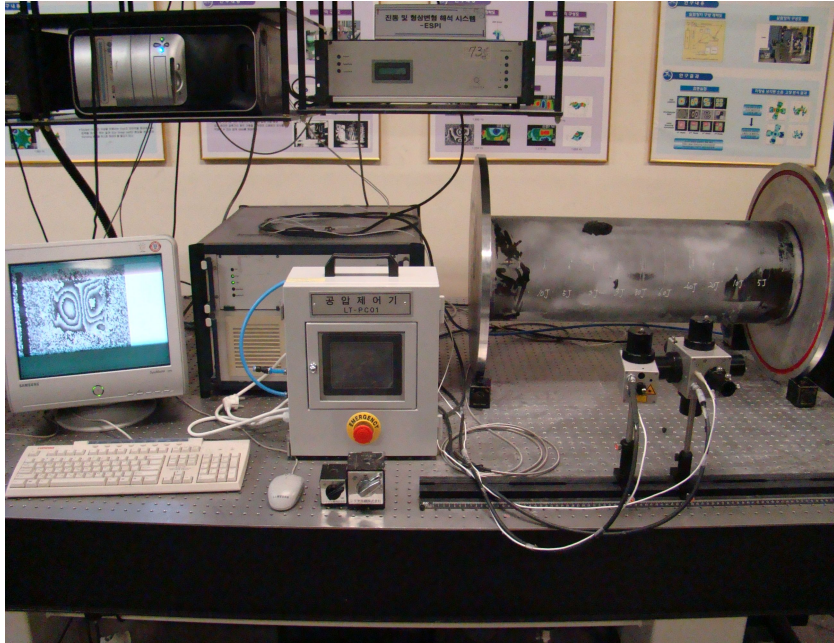
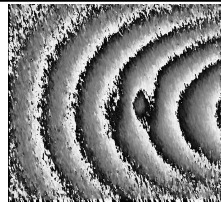
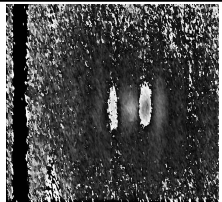
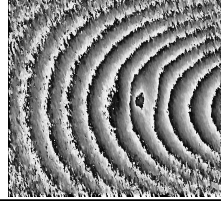
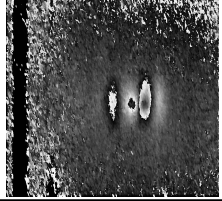
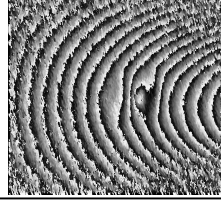
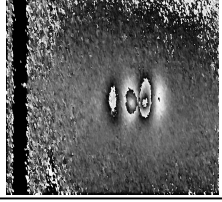


Fig. 4-6 Shearography and ESPI system

압력 변화에( $\Delta P=0.003, 0.006, 0.009$  MPa)따른 전단간섭계와 ESPI의 실험 결과를 Table 4-2에 정리하였고, Fig. 4-7는 전단간섭계와 ESPI의 압력차에 따른  $\varnothing 250-10JL$ 의 변형을 비교하여 그래프로 나타낸 것이다.

본 실험의 결과 전단간섭계와 ESPI의 압력 변화에 따른 복합재 튜브의 변형은 1~6% 이내의 오차 범위로 측정됨을 알 수 있으며, ESPI와 전단간섭계를 이용한 변형 측정은 거의 일치함을 알 수 있다.

Table 4-2 Phase-map and max-deformation of  $\varnothing 250-10\text{JL}$  by pressure change

Pressure Change	ESPI		Shearography		Error (%)
	Deformation ( $\mu\text{m}$ )	Phase-map	Deformation ( $\mu\text{m}$ )	Phase-map	
0.003	0.119		0.125		4.8
0.006	0.235		0.222		5.6
0.009	0.40		0.393		1.8

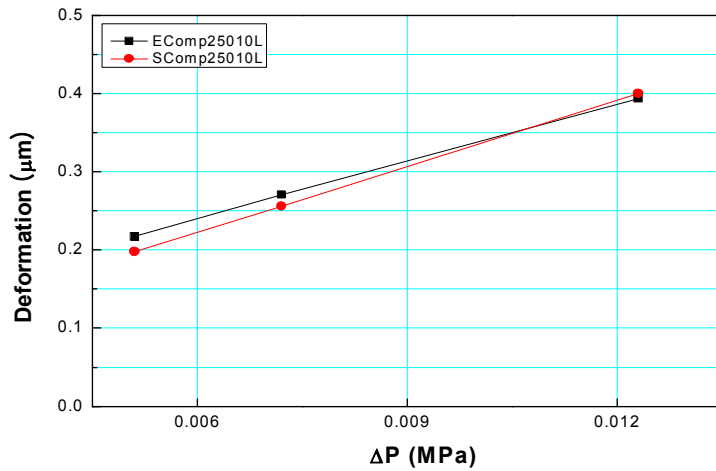


Fig. 4-7 Shearography vs ESPI deformation of  $\varnothing 250-10\text{JL}$  by pressure change

## 제 2 절 전단간섭계의 전단방향 변경 실험(x전단, y전단)

본 논문의 1절의 전단간섭계 실험에서 x축 전단방향을 이용하여 변형을 측정하였을 때 어려움이 발생하였다. 특히 충격량이 큰 영역의 측정시 시험편의 원주방향 균열이 다수 발생하여 해석이 불가능한 경우가 많았다. Fig. 4-8과 같이 압력변화에 따른 변형은 x축, y축이 동일하게 발생하기 때문에 균열이 발생한 충격부의 해석의 어려움을 해결하고자 y축 전단방향을 선택하여 압력차에 따른 충격부의 변형을 측정하였다. 본 실험은 1절의 실험과 동일한 조건에서 x축 전단방향과 y축 전단방향에 따른 충격부의 변형을 비교하여 y전단의 신뢰성을 평가하고자 한다.

∅250 복합재 튜브의 5JR 충격부위를 실험대상으로 선택하였고, Fig. 4-10과 같이 압력차를 증가시켜 이에 따른 변형을 x축 전단방향과, y축 전단방향 두 방법으로 변형을 측정하였다. 전단방향 이외의 모든 조건은 동일하게 적용하였다. 시험편에 초기압력을 0.1005MPa로 설정하였고, 압력을 0.1104( $\Delta P=0.0099$ MPa), 0.1200( $\Delta P=0.0195$ MPa), 0.1299( $\Delta P=0.0294$ MPa), 0.1398( $\Delta P=0.0393$ MPa), 0.1494MPa( $\Delta P=0.0489$ MPa)으로 5단계의 압력을 증가시키면서 변형을 측정하였다. 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-9와 같다.

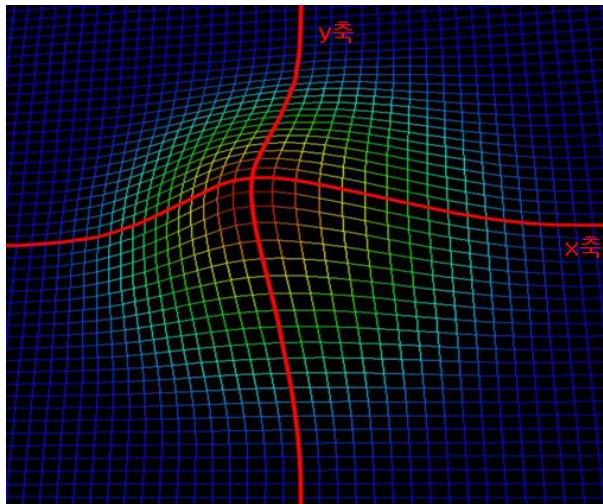


Fig. 4-8 Deformation of x, y-axis

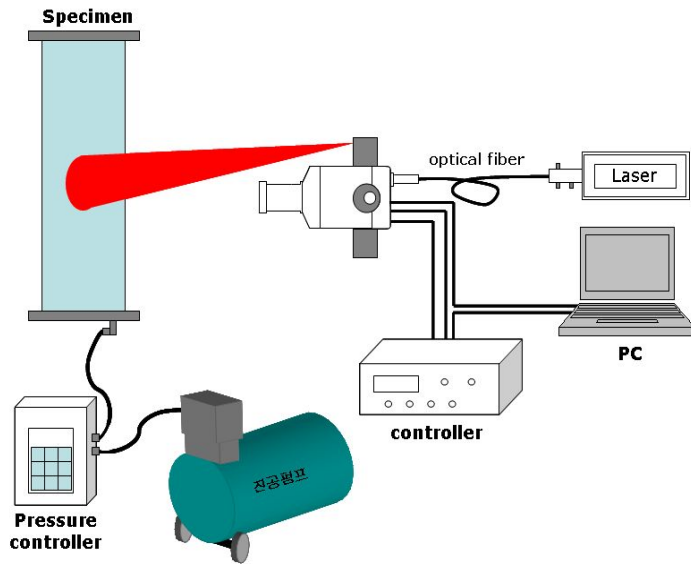
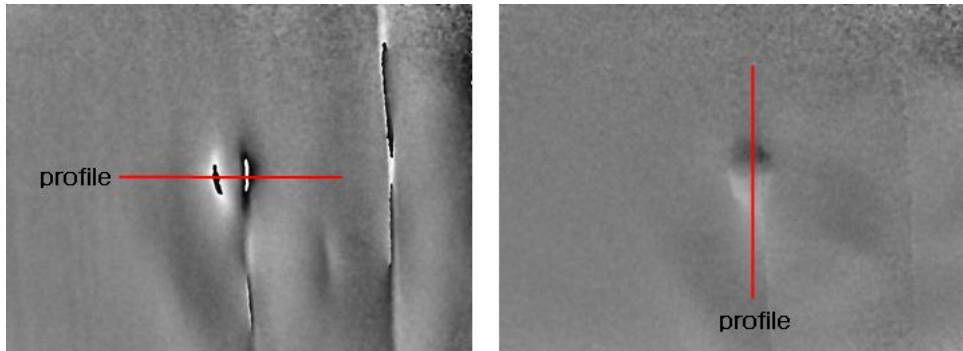


Fig. 4-9 Schematic of shearography system

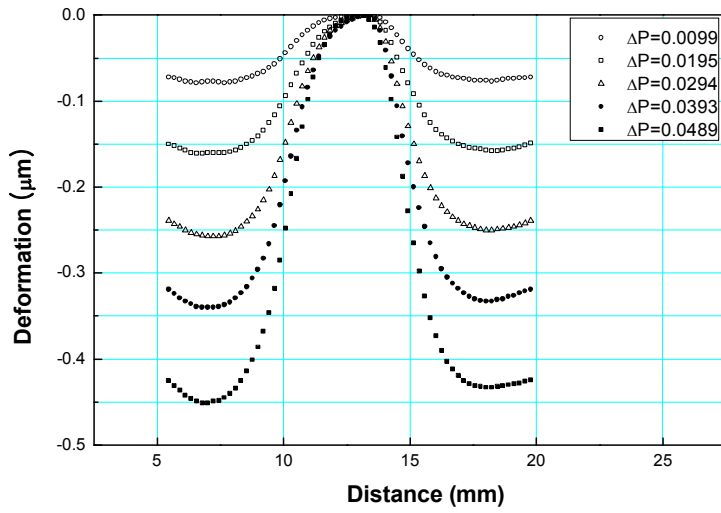


(a)x-axis shearing

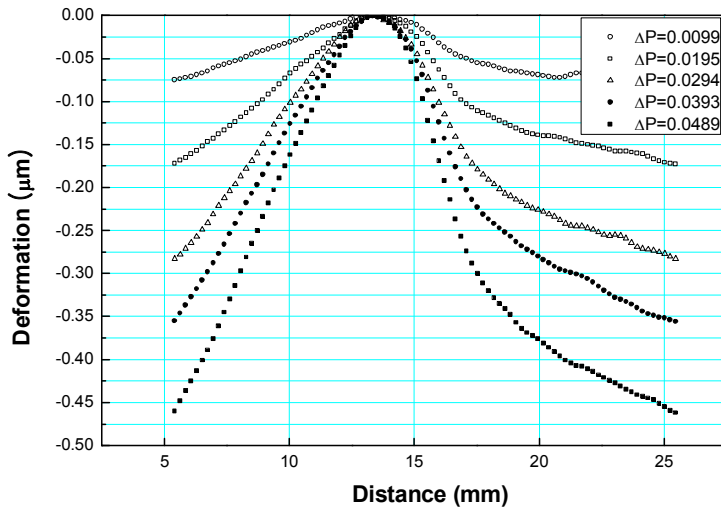
(b) y-axis shearing

Fig. 4-10 Deformation by shearing direction

x축 전단방향과 y축 전단방향의 압력차 증가에 따른 변형을 Fig. 4-11에 각각 비교하여 나타내었고, Fig. 4-12는 전단방향에 따른 최대 변형을 비교하여 나타내었다.



(a) x-axis shearing



(b) y-axis shearing

Fig. 4-11 Shearing direction

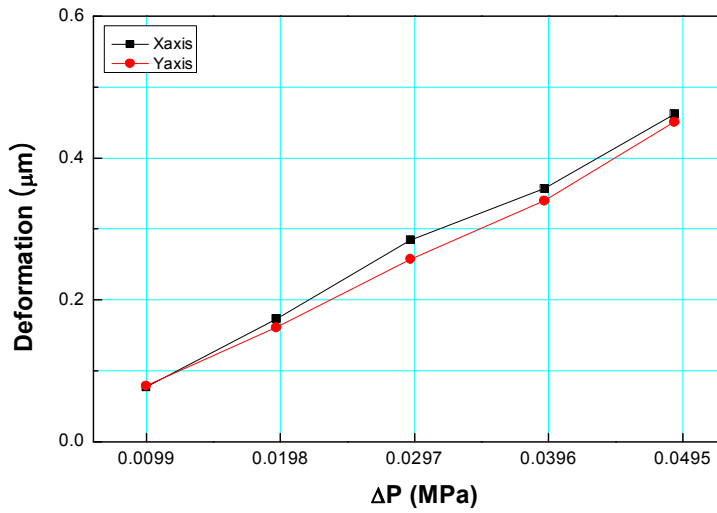


Fig. 4-12 Comparison with Max-deformation

본 실험의 결과 전단방향에 따른 변형을 살펴보면 1~6% 이내의 오차범위로 측정 되었으며, 이는 충격부의 변형이 압력 증가에 따라 x축 변형뿐만 아니라 y축 변형도 동일한 크기로 변화함을 나타낸다. 따라서 전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 원주방향 균열이 발생한 충격부의 결함 측정시 y축 전단방향을 적용하여 해석의 어려움을 해결하였다.

### 제 3 절 전단간섭계를 이용한 변형 측정방법 및 가압방법 변경 실험

본 논문 1절의 실험에서 전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 압력차 증가에 따른 변형을 측정시 전단간섭계의 측정 가능 변형을 초과하여 3단계 압력구간( $\Delta P=0.003, 0.006, 0.009\text{MPa}$ ) 까지만 측정이 가능하였다. 이에 더 높은 압력구간의 변형을 측정하기 위하여 새로운 측정방법을 제시하였다. 따라서 기존의 측정 방법과 비교를 통하여 새롭게 제시한 측정방법의 신뢰성을 확보함에 본 실험에 목적이 있다.

$\varnothing 250$  복합재 튜브 5JR 충격부를 실험의 대상으로 선택하였다. 1절의 실험의 경우 초기압력( $0.030\text{MPa}$ )에서 시작하여 압력차  $\Delta P=0.003\text{MPa}$ 을 증가시킨 후 변형을 측정하고, 다시 초기압력으로 압력을 복귀하여 압력차  $\Delta P=0.006\text{MPa}$ 을 증가시키는 방법으로 변형을 측정하였다. 이 때문에 압력차이가 커질수록 변형이 전단간섭계가 측정 가능한 범위를 초과하기 때문에 측정가능 압력범위가 작았다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 초기압력에서 일정 압력차를 증가시킨 후 위상지도를 측정하고, 압력을 초기압력으로 변경하지 않고 현 압력에서 압력차를 증가시켜 압력을 누적 시킨다. 각 압력의 누적구간에서 획득한 위상지도는 다음 압력구간의 기준이미지(Reference image)로 적용되고, 각각의 구간에서 획득한 위상지도는 각 구간의 변형을 나타낸다. 이를 원하는 압력구간의 변형까지 누적시키는 방법을 이용하여 기존방법으로 측정 불가능 하였던 큰 압력변형 구간을 측정 가능하다. 두 측정방법의 차이를 Fig. 4-13에 나타내었다.

두 방법의 변형비교를 위하여 초기압력을  $0.1005\text{MPa}$ 로 설정하고, 압력차를 ( $\Delta P$ ) 항상 초기압력에서 시작하여  $\Delta P=0.0099, 0.0195, 0.0294, 0.0393, 0.0485\text{MPa}$ 의 5단계로 가압하면서 측정하는 기존의 방법과, 초기압력에서 ( $0.1005\text{MPa}$ ) 압력을  $0.0099\text{MPa}$ 을 증가시킨 후 측정하고, 다시 증가된 압력에서  $0.0096, 0.0099, 0.0096, 0.0096\text{MPa}$ 의 압력을 차례로 누적하여 증가시킨다. 그리고 각 구간별 위상지도는 다음단계의 기준이미지로 사용되며, 각 구간의 변형을 누적시켜서 최종 변형을 획득하였다.

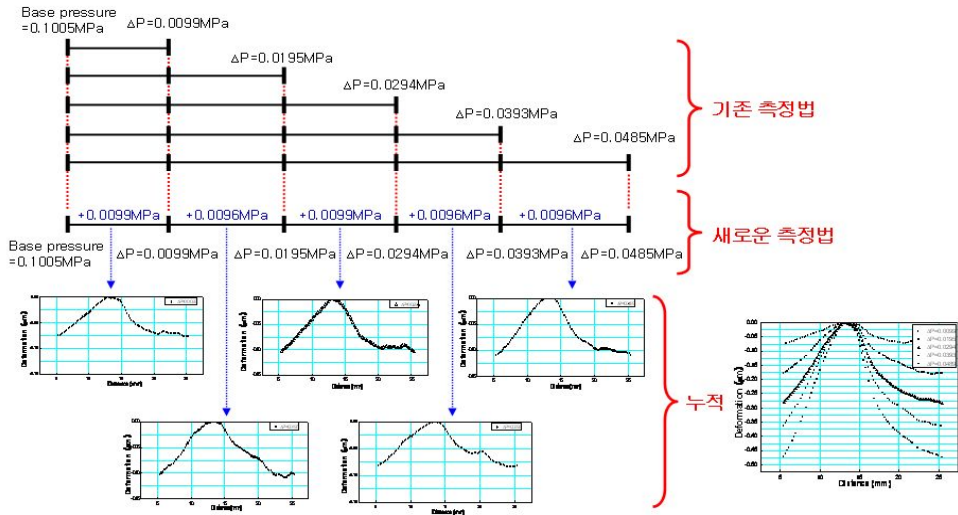


Fig. 4-13 Two kinds of measurement methods

1절의 실험 방법과 새로운 실험방법을 비교한 결과를 Fig. 4-15 나타내었고, Fig. 4-14은 두 측정 방법의 최대변형을 비교하여 나타내었다. 실험결과 두 측정 방법에 따른 최대변형을 살펴보면 두 방법 모두 거의 동일한 변형을 보였고, 그 오차는 1~2% 내외로 측정되었다. 따라서 새로운 측정 방법을 본 실험에 적용하여 보다 높은 압력구간의 변형측정이 가능함을 확인하였다.

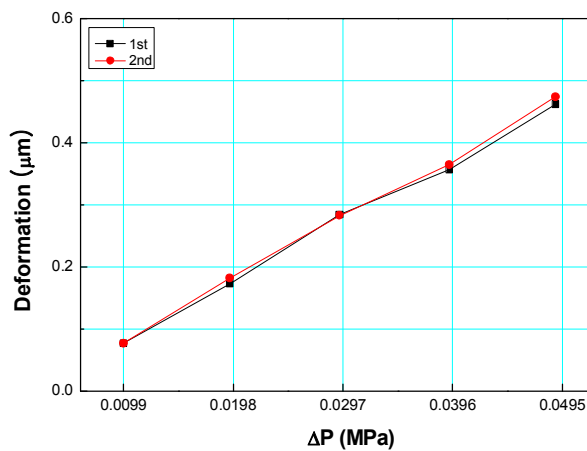
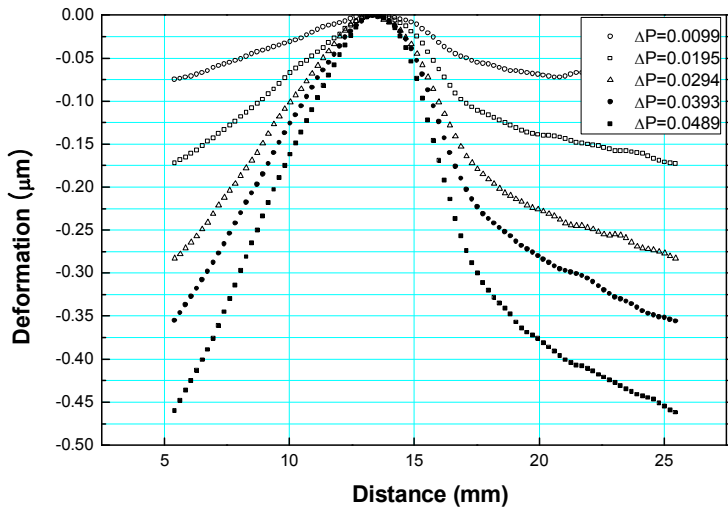
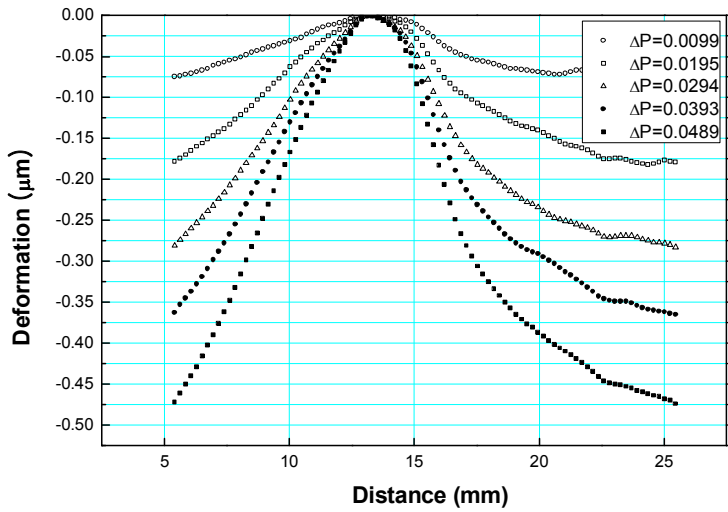


Fig. 4-14 Comparison with Max-deformation





(a) 1st experiment method



(b) 2nd experiment method

Fig. 4-15 Comparison with deformation

## 제 4 절 전단간섭계를 이용한 충격에너지에 따른 변형 측정

### 1. 시험편 충격부의 변형 측정

전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 압력차 증가에 따른 변형과 일정 압력에서 충격량에 따른 변형을 측정 및 분석하여 각 시편별 충격에너지에 의한 충격부의 상태를 확인하기 위하여, 본 실험에서는  $\varnothing 150$ ,  $\varnothing 250$ ,  $\varnothing 500$  복합재 튜브의 여러 충격에너지에 의한 결함부에 압력차를 증가시켜 이에 따른 변형을 전단간섭계를 이용하여 측정 및 분석하였다. 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-17, 4-18과 같다. Fig. 4-16과 같이 2절에서 새롭게 제시한 방법으로 초기압력(0.0297MPa)에서 0.0021MPa을 증가시킨 후 위상지도를 획득하고, 현재 압력에 0.0051, 0.0024, 0.0027, 0.0021, 0.0024, 0.0051, 0.0024, 0.0027, 0.0021MPa의 압력을 차례로 누적하여 증가시킨다. 각 구간의 위상지도로부터 각 구간의 변형을 측정 후 이를 누적하여 10단계 압력구간의 변형을 계산한다. 이때 충격이 가하여진 중앙 부분을 기준으로 y축 방향으로 변형선도를 나타낸다.

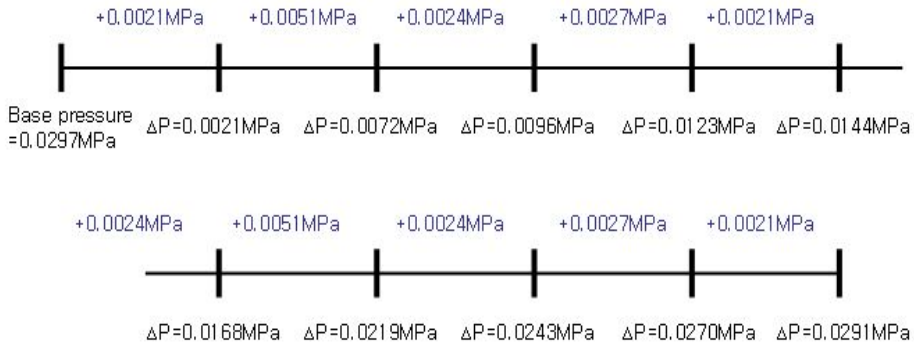


Fig. 4-16 New measurement method

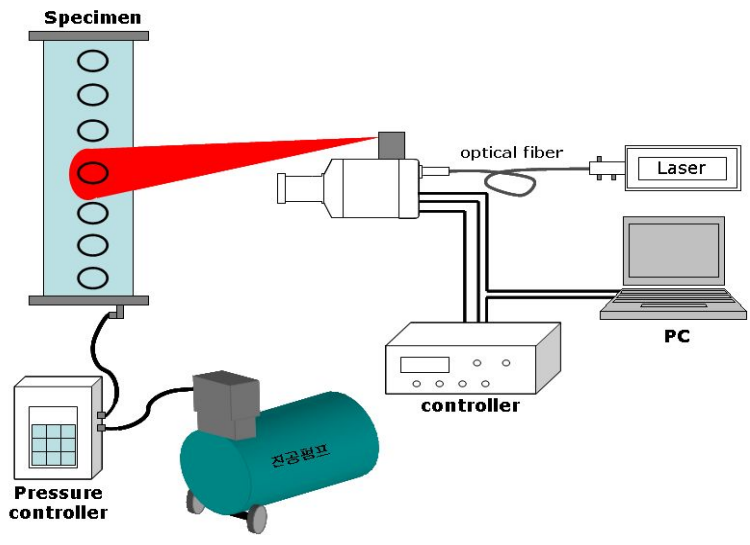


Fig. 4-17 Schematic of shearography

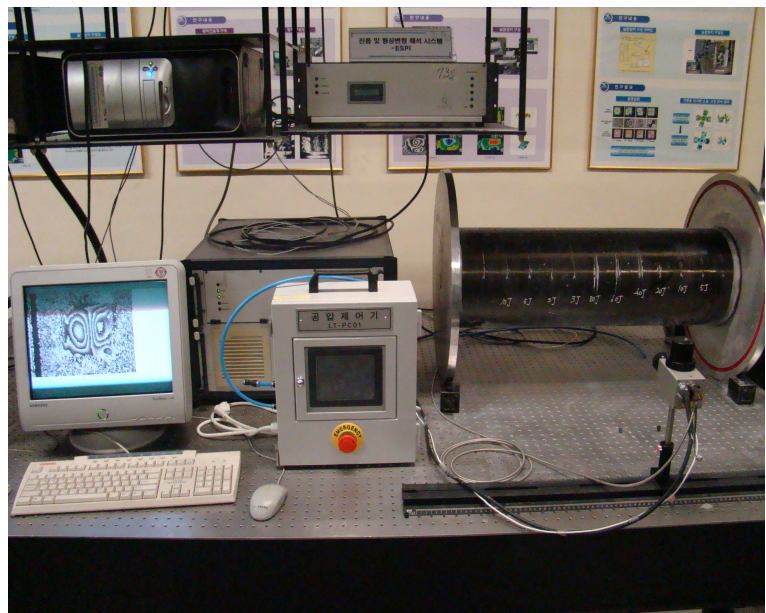


Fig. 4-18 Shearography system

Table 4-3, 4-4, 4-5는 각 시험편의  $\Delta P=0.0021\text{MPa}$  에서 복합재 튜브의 실제 결함 모양, 위상지도 및 변형을 나타내었다. 압력차 증가에 따른 결함부의 최대변형을 Fig. 4-19, Fig. 4-21, Fig. 4-23에 나타내었고, Fig. 4-20, Fig. 4-22, Fig. 4-24는 충격에너지에 따른 최대 변형을 시험편 별로 나타내었다.

Table 4-3 Phase-map and deformation of  $\varnothing 150$ -specimen at  $\Delta P:0.0021\text{MPa}$

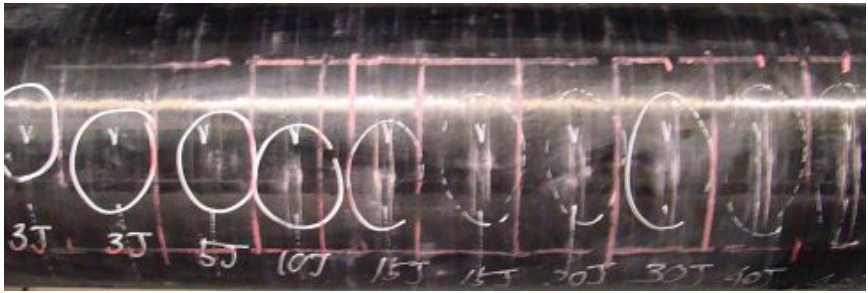
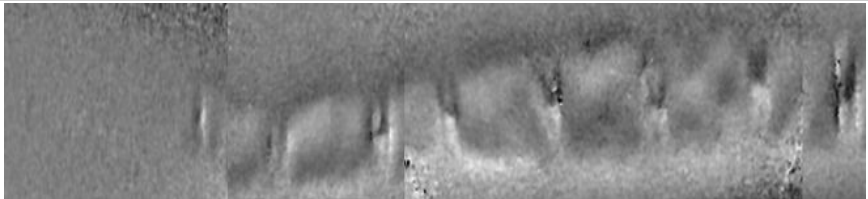
시험편										
위상지도										
충격 에너지	3JL	3JR	5J	10J	15JL	15JR	20J	30J	40JL	40JR
변형 ( $\mu\text{m}$ )	0.243	0.28	0.403	0.606	0.783	1.043	0.674	0.537	1.223	0.797

Table 4-3의 위상지도로 부터 복합재 튜브의 각각의 충격은 서로 연결되어서 전체적인 변형으로 나타남을 알 수 있다. 이는 충격영역의 중첩에 의한 현상으로 예상된다. 그리고 충격에너지가 증가할수록 변형영역은 증가하는 경향을 보이나, 주변의 충격에너지의 충격량에 따라 충격영역이 달라짐을 확인하였다. 또한 Fig. 4-19, 4-20에서 보는 바와 같이 압력차가 증가함에 따라 변형은 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 충격량 증가에 따른 변형은 선형성이 나타내지 않았다. 이는 동일한 충격량에서도 충격부위의 갈라짐이나 충격영역의 중첩에 의한 결과로 예상된다.

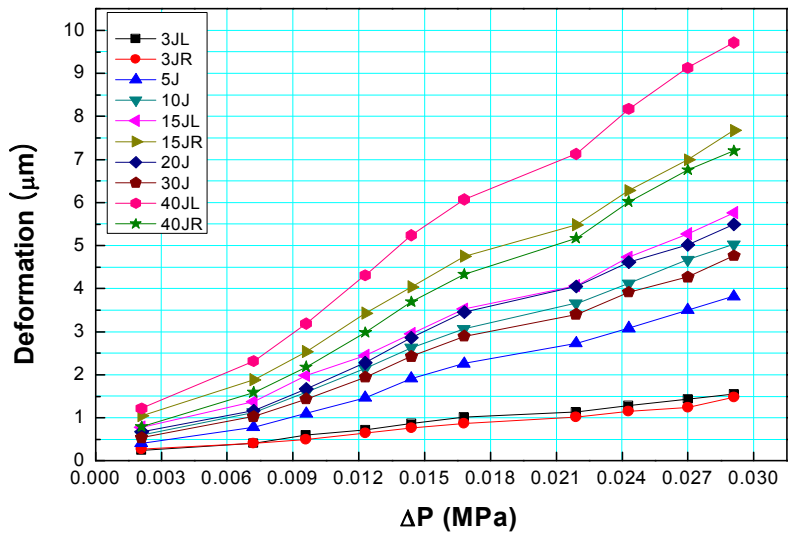


Fig. 4-19 Max-deformation by pressure change ( $\varnothing 150$ )

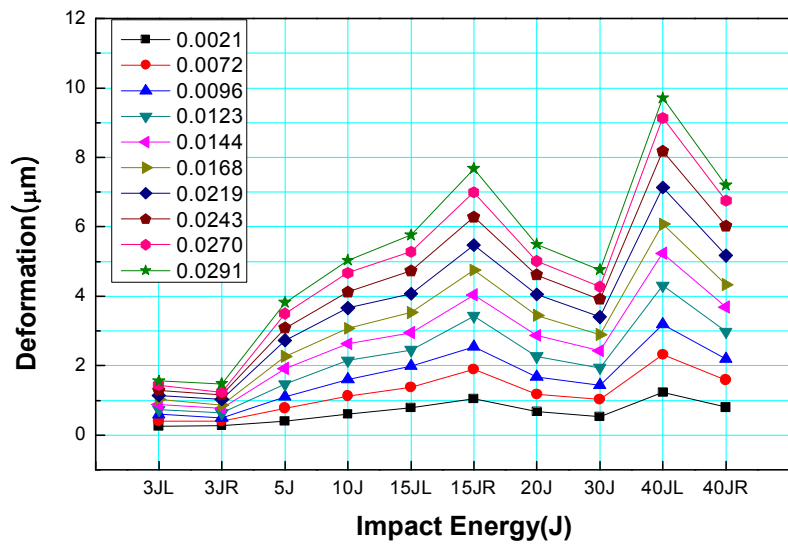


Fig. 4-20 Max-deformation by impact energy ( $\varnothing 150$ )

Table 4-4 Phase-map and deformation of  $\varnothing 250$ -specimen at  $\Delta P:0.0021\text{MPa}$

시험편										
위상지도										
충격 에너지	10JL	5JL	3JL	3JR	80J	60J	40J	20J	10JR	5JR
변형 ( $\mu\text{m}$ )	0.09	0.078	0.159	0.333	0.616	1.048	0.734	0.437	0.148	0.069

Table 4-4의  $\varnothing 250$  시험편의 위상지도의 결과  $\varnothing 150$  위상지도와 같이 충격 영역의 중첩이 확인되었으며,  $\varnothing 250$  시험편의 3JL과 3JR의 변형이 큰 차이를 보였다. 이는 Table 4-4의 위상지도 에서도 육안으로 확인 가능하다. 3JR 충격부위가 충격에 의한 갈라짐이 없음에도 불구하고 변형이 상대적으로 크게 나온 이유는 80J의 충격영역이 3JR의 충격부에 영향을 미친 것으로 예상된다. 또한 Fig. 4-21, 4-22에서 보는 바와 같이 압력차가 증가함에 따라 변형은 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 충격량 증가에 따른 변형은 선형성이 나타내지 않았다.

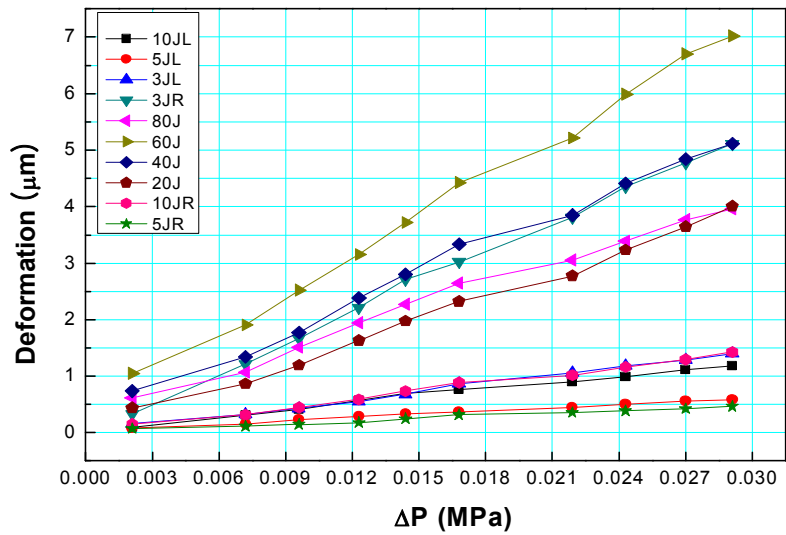


Fig. 4-21 Max-deformation by pressure change (∅250)

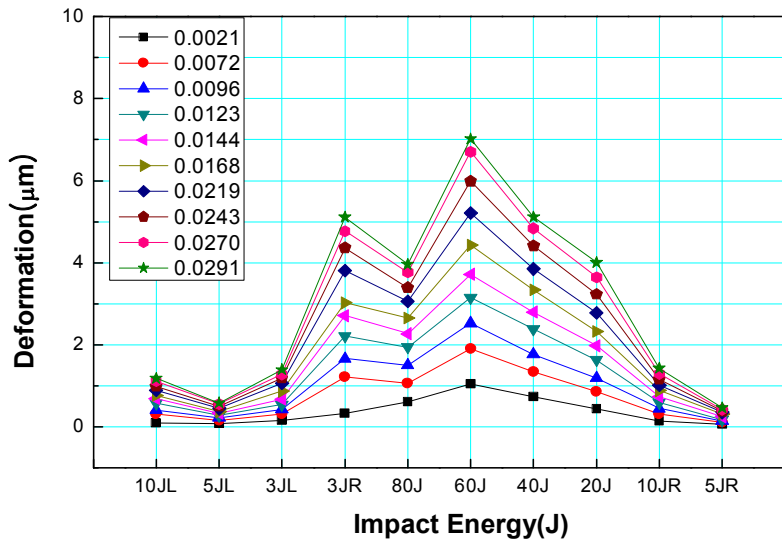


Fig. 4-22 Max-deformation by impact energy (∅250)

Table 4-5 Phase-map and deformation of  $\varnothing 500$ -specimen at  $\Delta P: 0.0021\text{MPa}$

시험편										
위상지도										
충격 에너지	120JL	60JL	10JL	10JR	120JR	100J	80J	60JR	40JR	20JR
변형 ( $\mu\text{m}$ )	1.126	0.287	0.630	0.331	1.192	1.491	1.082	0.599	0.676	0.082

Table 4-5의 위상지도에서 10JL과 10JR의 변형을 살펴보면 10JL은 원주방향으로 길게 변형이 발생한 반면에 10JR은 충격부위만 작은 변형이 발생함을 확인할 수 있으며, 변형 또한 10JL부분이 10JR부분보다 2배가량 크게 측정되었다.  $\varnothing 500$  시험편 또한 충격에 의한 충격영역의 중첩이 확인되었으며, 모든 시험편의 각 충격에너지에 따른 결함부에서 압력의 증가에 따른 변형은 선형적으로 증가함을 확인하였다. 그러나 동일한 압력에서 충격에너지에 따른 변형은 선형성이 나타나지 않았다. 그리고 충격에너지가 증가할수록 변형 영역은 증가하는 경향을 보이나, 주변의 충격에너지의 충격량에 따라 충격영역이 달라짐을 보였으며, 충격영역의 중첩이 모든 시험편에서 확인되었다.



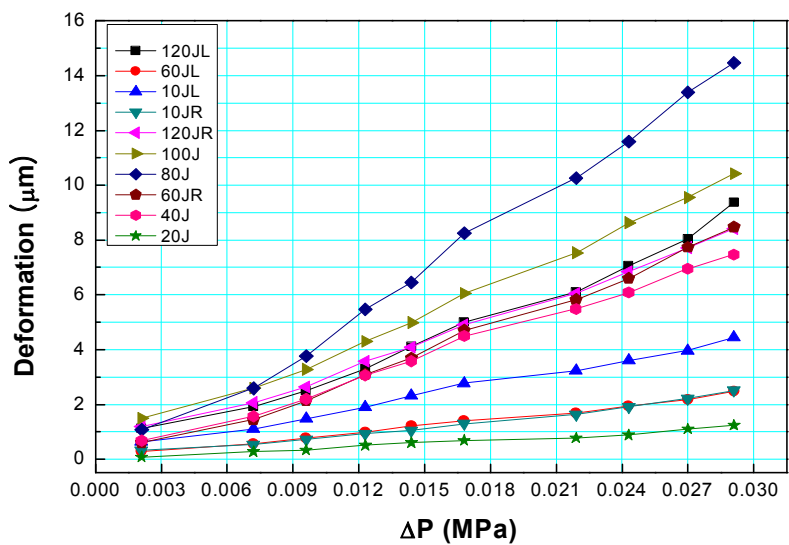


Fig. 4-23 Max-deformation by pressure change (∅500)

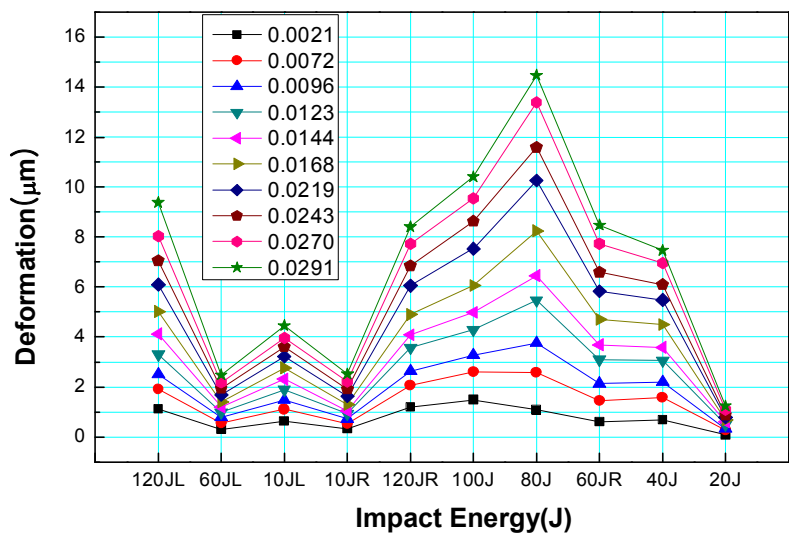


Fig. 4-24 Max-deformation by impact energy (∅500)

## 2. 시험편 충격부의 대변형 측정

전단간섭계를 이용하여 압력 시스템의 최대 허용 압력인 0.5001MPa 까지 가압하여 압력 증가에 따른 복합재 튜브 충격부의 대변형을 측정하여 압력 증가에 따른 충격부의 변형을 확인하기 위하여 본 실험에서는  $\varnothing 150$ -15JR, 20J, 30J 충격부를 실험대상으로 선정하고, 압력차를 초기압(0.0297MPa)에서  $\Delta P=0.4713$ MPa까지 증가시켜 이에 따른 변형을 전단간섭계를 이용하여 측정하였다. 실험장치의 전체적인 구성은 Fig. 4-17, Fig. 4-18과 동일하다. 2절에서 새롭게 제시한 방법으로 초기압력(0.0297MPa)에서 0.0021MPa를 증가시킨 후 위상지도를 획득하고, 현재 압력에 0.0051, 0.0024, 0.0027, 0.0021, 0.0024, 0.0051, 0.0024, 0.0027, 0.0021MPa...의 압력을 차례로 누적하여 압력을 0.5001MPa 까지 증가시킨다. 각 구간의 위상지도로부터 각 구간의 변형을 측정 후 이를 누적하여 156단계 압력구간의 변형을 계산한다. 이때 충격이 가하여진 중앙 부분을 기준으로 y축 방향으로 변형선도를 타나낸다. Fig. 4-25는 최대 압력차( $\Delta P=0.4713$ MPa)에 따른  $\varnothing 150$ -15JR, 20J, 30J 충격부의 변형을 나타내었다. 그 결과 압력이 점차 증가함에 따라 변형의 증가 기울기는 점차 감소함을 나타내었다.

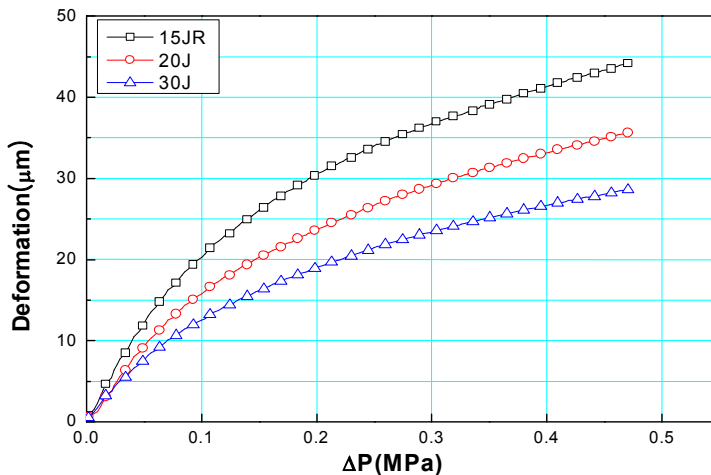


Fig. 4-25 Deformation of maximum pressure( $\varnothing 150$ -15JR, 20J, 30J)

### 3. 시험편 충격 사이영역의 변형 측정

Ø150시험편의 위상지도를 살펴보면 충격부 주변의 변형이 서로 연결 되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 충격 에너지가 그와 인접한 충격부의 변형에 영향을 미치는 것으로 추측된다. 따라서 충격에너지가 큰 위치의 주변부와, 충격에너지가 작은 위치의 주변부의 변형을 비교하여 충격에너지가 그 주변의 충격부에 미치는 영향을 확인함이 본 실험에 목적이 있다.

본 실험의 분석은 Ø150 시험편의 위상지도에서 충격부 주변의 변형이 시각적으로 뚜렷하게 나타났기 때문에 Ø150 시험편을 분석 대상으로 선정하였다. 그리고 충격에너지 차이가 큰 구간인 Ø250 시험편의 3JL, 3JR, 80J 충격부 구간을 추가적으로 변형을 비교하였다. 이에 4절의 실험에서 획득한 Table. 4-3, 4-4의 Ø150, Ø250 복합재 튜브의  $\Delta P=0.0021\text{MPa}$ 에 따른 위상 지도를 사용하여, 각각의 충격부를 기준으로 다음 충격부 사이의 공간을 3등분하여 그 변형을 측정하였다. 이 값을 주변의 충격에너지 크기와 비교하여 그 결과가 주변 에너지크기와 연관성이 있는지 확인한다. Fig. 4-26은 위상지도에서 변형을 측정된 구간을 나타낸 것이며, 각각의 충격부를 숫자 “0”으로 지정하고, 충격부를 기준으로 우측에 있는 영역을 “1”, “2”, “3”으로 나누어 지정한다.

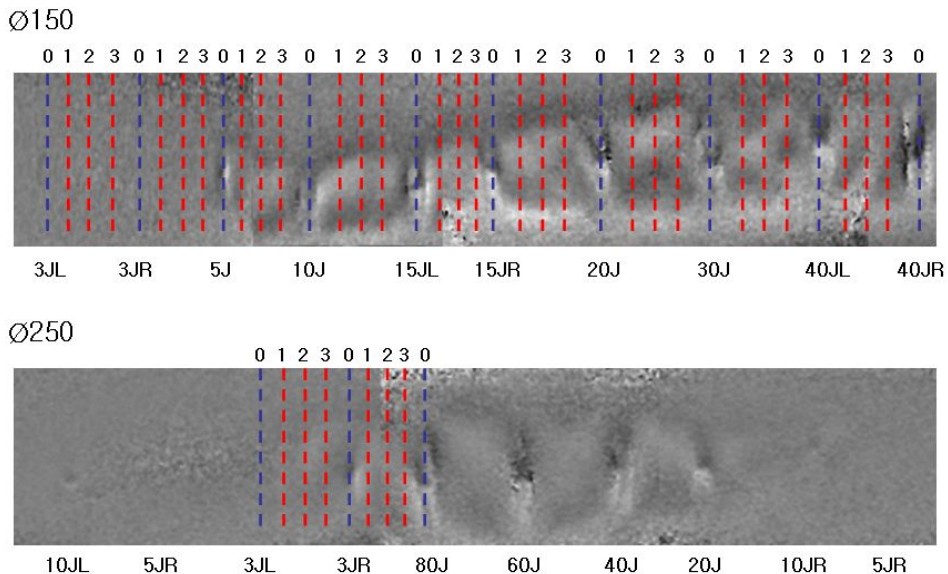


Fig. 4-26 Measurement position of phase map(Ø150, Ø250)

Table 4-6, 4-7은  $\varnothing 150$ ,  $\varnothing 250$  시험편의 충격부와 충격부 사이의 변형 값을 나타내었고, 이에 따른 위상지도와 변형 그래프를 Table 4-8, 4-9에 나타내었다.

Table 4-6 Deformation of each position of  $\varnothing 150$ -specimen

충격 에너지		3JL	3JR	5J	10J	15JL	15JR	20J	30J	40JL	40JR
변형 ( $\mu\text{m}$ )	0	0.243	0.28	0.403	0.606	0.783	1.043	0.674	0.537	1.223	0.797
	1	0.140	0.268	0.298	0.435	0.502	0.474	0.411	0.393	0.444	-
	2	0.193	0.254	0.369	0.465	0.507	0.400	0.403	0.431	0.635	-
	3	0.236	0.326	0.467	0.478	0.598	0.424	0.340	0.393	0.620	-

Table 4-7 Deformation of each position of  $\varnothing 250$ -Specimen

충격 에너지		10JL	5JJ	3JL	3JR	80J	60J	40J	20J	10JR	5JR
변형 ( $\mu\text{m}$ )	0	-	-	0.159	0.333	0.616	-	-	-	-	-
	1	-	-	0.164	0.161	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	0.139	0.192	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	0.189	0.295	-	-	-	-	-	-

Table 4-8 Phase-map and Deformation of  $\varnothing 150$ -Specimen between impact parts ( $\Delta P:0.0021\text{MPa}$ )

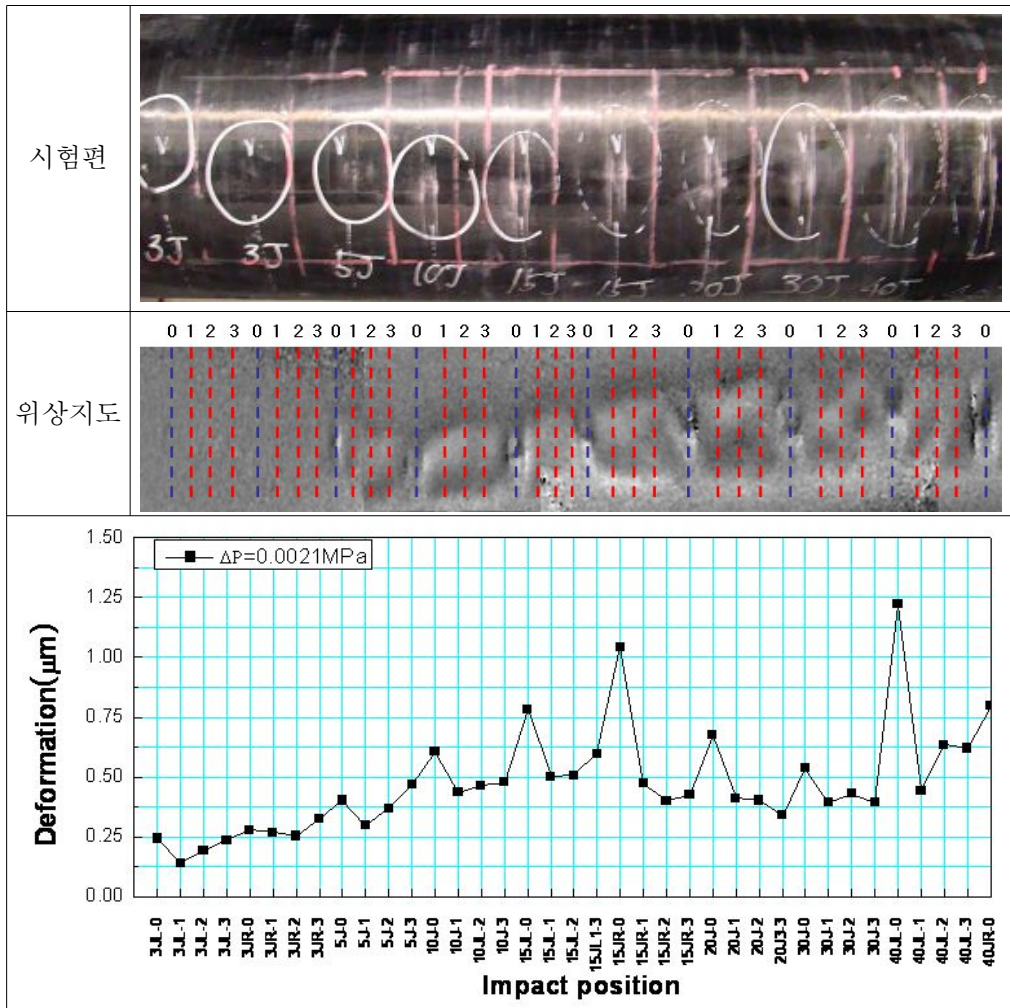


Table 4-8의 변형 그래프에서  $\varnothing 150$  시험편의 3JR-1, 2, 3의 변형은 오른쪽에 위치한 5J-1, 2, 3의 변형에 비하여 낮게 측정되었으며, 충격에너지가 큰 쪽으로(오른쪽) 충격부 주변의 변형이 증가함을 보였다. 3JR~15JR의 충격부 주변 변형에서 충격에너지가 증가함에 따라 충격영역이 서로 중첩되어 그 주변의 변형이 15JR 쪽으로 갈수록 일정하게 증가함을 확인하였다. 그러나 15JR-1, 2, 3과 20J-1, 2, 3의 변형은 충격에너지가 증가하였으나 충격부 주변의 변형은 감소하였다.

Table 4-9 Phase-map and Deformation of  $\varnothing 250$ -Specimen between impact parts ( $\Delta P:0.0021\text{MPa}$ )

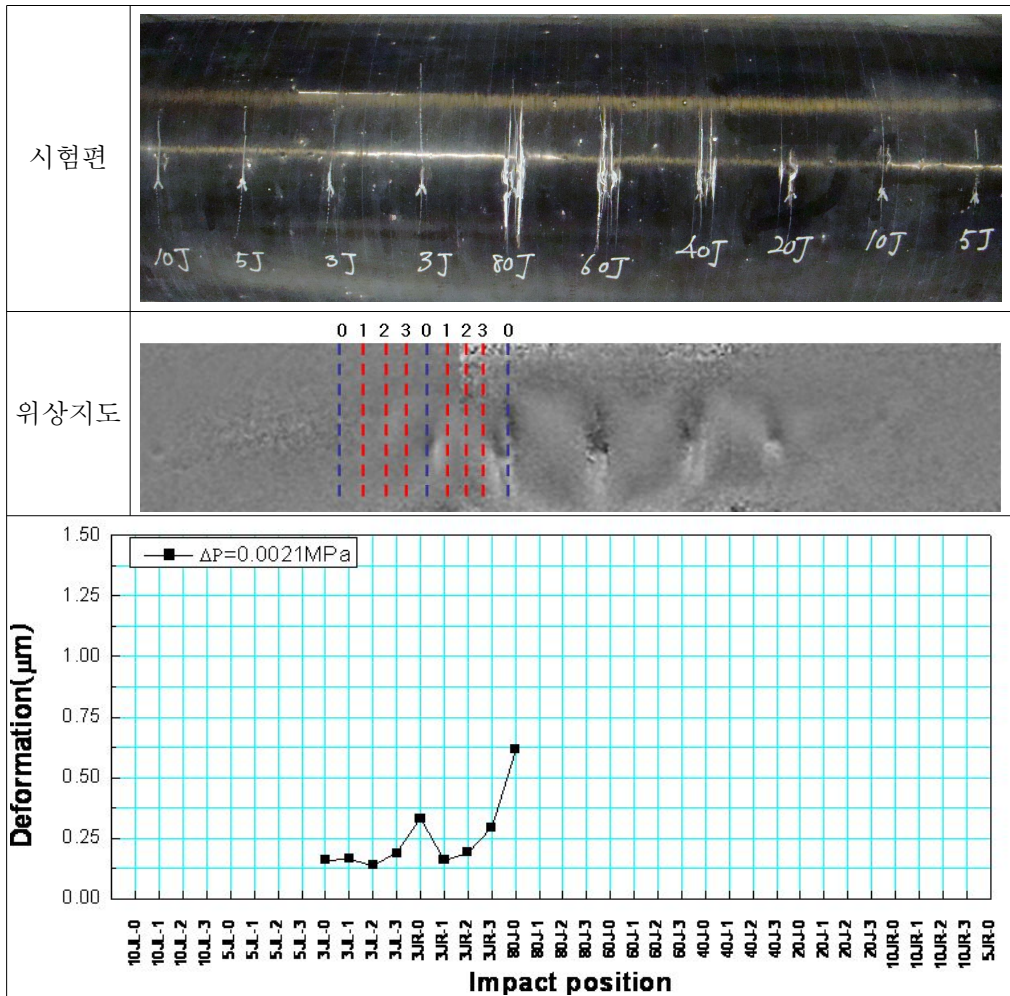


Table 4-9와 같이  $\varnothing 250$ 의 3JL과 3JR 사이의 변형은 우측으로 갈수록 더 큰 변형을 보였고, 3JR과 80J 사이의 변형 또한 우측으로 갈수록 더 큰 변형을 나타내었다. 그러나 3JL과 3JR 사이의 증가에 비하여 3JR과 80J사이의 변형은 매우 크게 증가하였다. 이는 80J 충격에너지가 3J의 충격 에너지에 비하여 주변에 더 많은 변형을 유발하며, 충격영역 또한 그와 인접한 충격에너지와 중첩이 될 수 있음을 나타낸다.

#### 4. 균열 및 비 균열 충격부의 변형 비교

복합재 튜브의 충격에너지에 따른 변형에는 원주방향 갈라짐이 발생한 부분과, 균열이 발생하지 않고 충격부만 함몰된 2가지 경우가 발생하였다. 균열이 발생하지 않은 충격부의 변형은 어떠한 형태로 나타나는지 충격부의 변형 상태를 알아보기 위하여 각각의 변형 형태를 비교 하였다. 본 실험에서는 충격에너지에 의하여 외부균열이 발생하지 않은  $\varnothing 150-5J$ ,  $\varnothing 250-3JR$ 과 외부균열이 발생한  $\varnothing 150-15JR$ ,  $\varnothing 250-60J$ 을 실험의 대상으로 선정하였고, Fig. 4-27과 같이 충격부의 5곳의 변형을 측정하였다. 압력차는  $\Delta P=0.0021MPa$ 이며 y축 전단을 이용하였다.

각 부분의 변형을 Fig. 4-28에 나타내었고, 실험의 결과는 외부 균열이 발생하지 않은 충격부위의 경우 충격의 중심위치보다 충격의 좌·우 끝 부분이 더 높은 변형을 나타냄을 확인하였다. 또한 외부균열이 발생한 충격부위의 경우 충격의 중심부가 최고 변형을 나타내었다. 따라서 충격에너지에 의하여 발생한 외부균열의 유무에 따라 Fig. 4-29과 같은 형상으로 변형이 일어남을 예측할 수 있다.

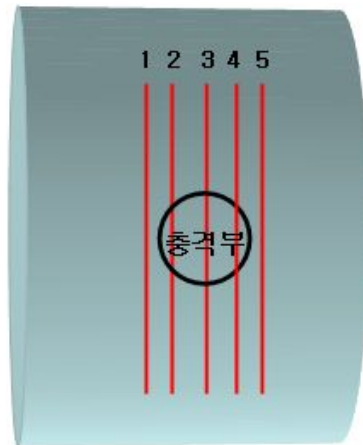


Fig. 4-27 Measurement position

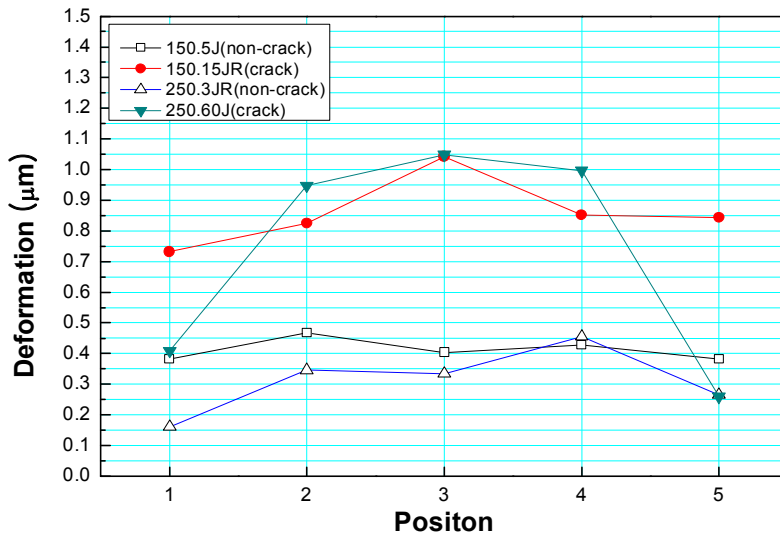


Fig. 4-28 Deformation of each position

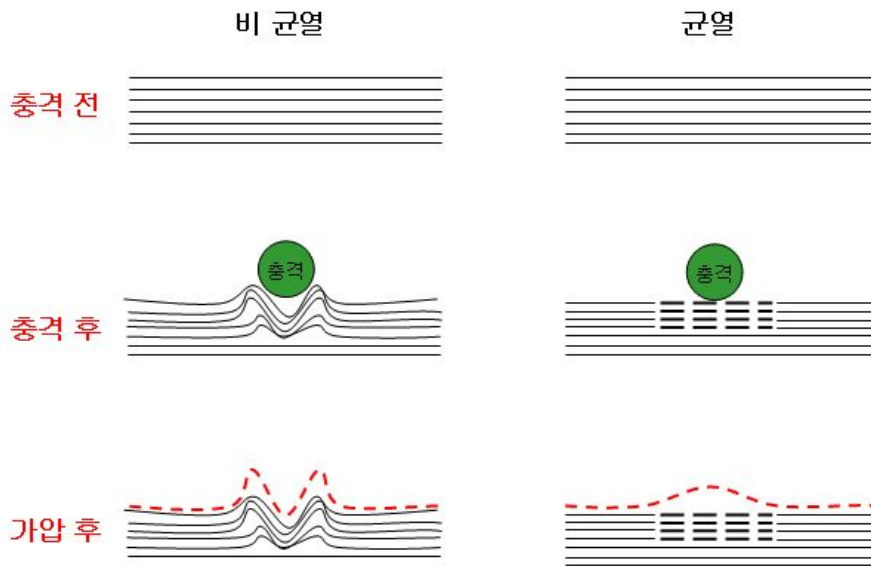


Fig. 4-29 Two kinds of deformation

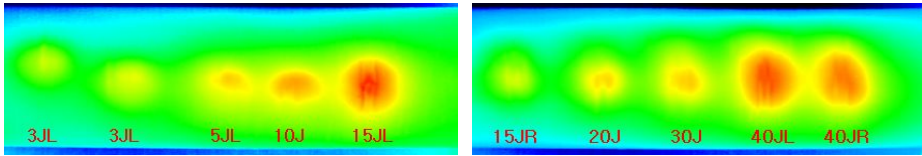


## 제 5 절 적외선열화상을 이용한 복합재 튜브의 결함 측정

본 실험에서는 적외선 열화상을 이용하여 복합재 튜브의 여러 충격에너지에 의한 손상을 측정하기 위해서 Fig. 5-1과 같이 적외선 열화상 시스템을 구성하였다. 시험편의 표면에 방사페인트를 도포하여 방사율을 0.95로 유지하였고, 위상잠금기법을 이용하여 열원과 검출소자를 동기화 시켜 50 mHz 주파수를 주어 위상이미지(Phase map)를 신호처리를 통하여 획득 하였다. 복합재 튜브의 결함을 측정하기 위하여 주변의 온도( $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ )를 일정하게 유지하였으며, 할로겐램프를 사용하여 시험편을 가열하였고 방사된 에너지를 적외선열화상(IRT)을 이용하여 온도를 검출하였다. 이때 적외선 열화상 카메라의 해상도가 낮아 하나의 시험편을 좌·우로 나누어 측정하였다. 시험편의 온도 검출은 각 시험편의 좌·우 두 부분으로 나누어서 측정하였다. 각 시험편에 따른 적외선열화상 이미지를 Fig. 5-2, Fig. 5-3, Fig. 5-4에 나타내었다.

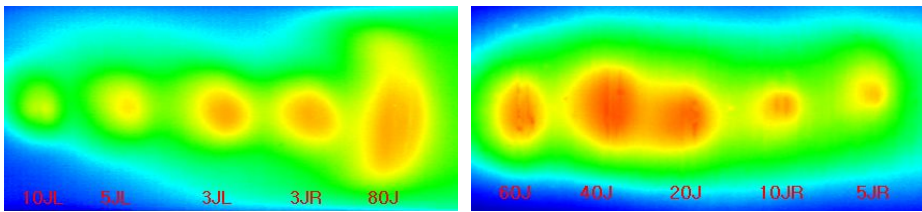


Fig. 5-1 Infrared Thermography system



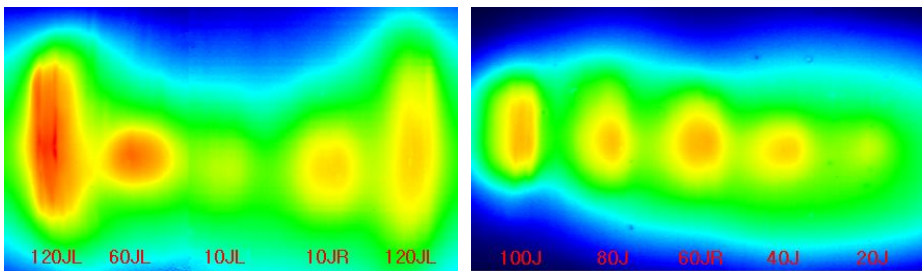
(a) Left side of the specimen      (b) Right side of the specimen

Fig. 5-2 Infrared Thermography image of  $\varnothing 150$ -Specimen



(a) Left side of the specimen      (b) Right side of the specimen

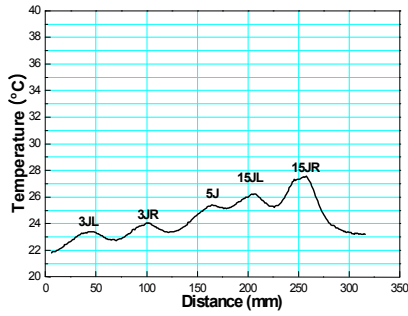
Fig. 5-3 Infrared Thermography image of  $\varnothing 250$ -Specimen



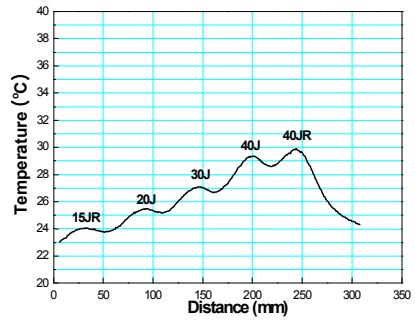
(a) Left side of the specimen      (b) Right side of the specimen

Fig. 5-4 Infrared Thermography image of  $\varnothing 500$ -Specimen

Fig. 5-5, Fig. 5-6, Fig. 5-7은 적외선 열화상 이미지를 통해 얻은 온도변화 그래프를 나타내었다. 그 결과 충격이 가해진 위치가 그렇지 않은 부분에 비하여 온도가 높게 측정 되었다. 충격에너지가 클수록 온도가 대체로 높게 측정되었으나 그렇지 않는 부분도 발생하였다. 또한 충격에너지가 높을수록 측정 온도가 높고, 온도변형에 따른 결함의 폭이 대체로 넓게 측정됨을 확인하였다. 충격 에너지 크기와 온도가 일치하지 않는 부분의 경우 시험편의 넓은 면적을 할로겐램프를 이용하여 가열시 시험편의 전 측정영역에 균일하게 열을 전달하지 못한 현상으로 예상된다.

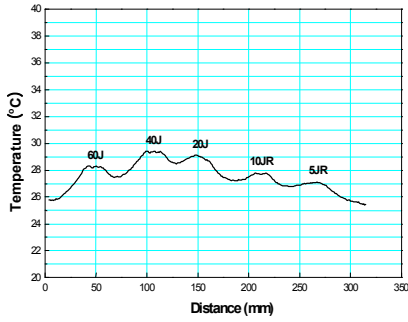


(a) Left side of the specimen

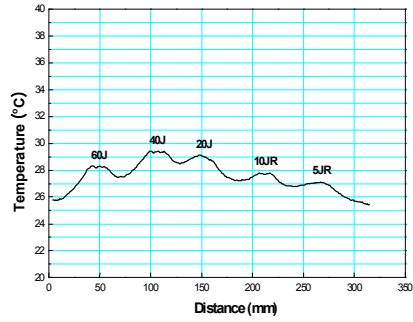


(b) Right side of the specimen

Fig. 5-5 Temperature of  $\varnothing 150$ -specimen

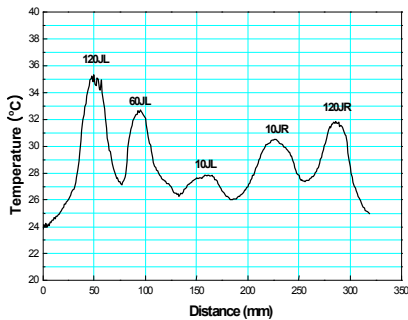


(a) Left side of the specimen

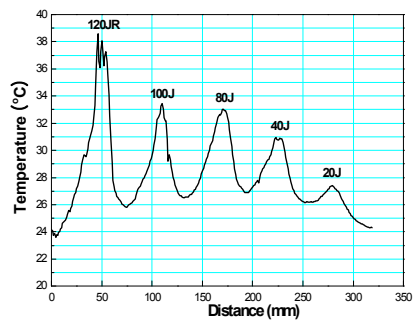


(b) Right side of the specimen

Fig. 5-6 Temperature of  $\varnothing 250$ -specimen



(a) Left side of the specimen



(b) Right side of the specimen

Fig. 5-7 Temperature of  $\varnothing 500$ -specimen

## 제 5 장 결론

본 논문에서는 기존 비파괴검사기술의 기술적, 경제적 손실을 보완하기 위해 전단간섭계(Shearography)와 적외선 열화상(Infrared thermography : IRT)기술을 이용한 복합재 튜브의 결함 검사기술을 제안하였으며, 전단간섭계와 IRT를 이용한 결함 검출 방법을 복합재 튜브의 결함 검출에 실험적 검증을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

### 가. 전단간섭계를 이용한 복합재 튜브의 변형측정

복합재 튜브는 저속충격에 의하여 내부균열이 발생할 우려가 있다. 이러한 내부균열에 의한 제품의 파손을 방지하기 위해 본 논문에서는 전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 내부결함을 측정하였고, 측정결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전단간섭계의 신뢰성 확보를 위하여 ESPI와 전단간섭계를 이용한 고무평판 및 복합재 튜브의 면외변형을 비교하였다. 그 결과 고무평판 면외변형의 경우 오차율은 1~3% 이내의 오차범위로 나타났으며, 복합재 튜브의 면외변형의 경우 두 방법은 1~6% 이내의 오차 범위로 측정되었다. 따라서 ESPI와 전단간섭계를 이용한 면외변형 측정은 거의 일치함을 알 수 있다.

(2) x축 전단방향을 이용하여 변형 측정시 원주방향 균열로 인한 해석의 어려움이 발생하였다. 이에 y축 전단방향을 이용하여 비교실험을 하였고, 그 결과 두 방법의 오차율은 1~2% 이내의 값으로 나타났다.

(3) 더 높은 압력구간의 변형을 측정하기 위한 새로운 방법을 도입하였다. 4장 1절의 실험의 방법은 항상 초기압을 일정하게하고 가압하는 방법이며, 새로운 방법은 압력을 단계적으로 누적시키고, 작은 변형을 누적시켜 큰 변형을 측정하는 방법이다. 기존 방법과 새로운 방법의 변형 오차는 1~2% 내외로 측정되었다.

(4) 전단간섭계를 이용하여 복합재 튜브의 충격에너지에 따른 결함부를 압력차를 변경하여 측정하였으며, 그 결과 첫째, 각 충격에너지에 따른 결함부에서 일정한 압력의 증가에 따른 충격부의 변형은 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그러나 동일한 압력에서 충격에너지의 증가가 변형의 증가로 나타나지만 선형적이지 않았다. 둘째, 충격에너지가 증가할수록 변형영역은 증가하는 경향을 보이나, 주변의 충격에너지의 충격량에 따라 충격영역이 달라진다.

(5) 충격 에너지가 그 주변 충격부위의 변형에 영향을 미치는 것을 확인하기 위하여  $\varnothing 150$ ,  $\varnothing 250$  시험편의 각 충격부 사이의 변형을 측정하였다. 그 결과  $\varnothing 250$ 의 3JL과 3JR 사이의 변형은 고 충격량 쪽(우측)으로 갈수록 더 큰 변형을 보였고, 3JR과 80J 사이의 변형 또한 고 충격량 쪽(우측)으로 갈수록 더 큰 변형을 나타내었다. 그러나 3JL과 3JR 사이의 증가에 비하여 3JR과 80J 사이의 변형은 매우 크게 증가하였다. 이는 80J 충격에너지가 3J의 충격 에너지에 비하여 주변에 더 많은 변형을 유발하며, 충격영역 또한 그와 인접한 충격에너지와 중첩이 될 수 있음을 나타낸다.

(6) 외부균열의 발생 유·무에 따른 변형이 어떠한 형태로 나타나는지 알아보기 위하여 균열이 발생하지 않은  $\varnothing 150-5J$ ,  $\varnothing 250-3JR$  부분과, 외부 균열이 발생한  $\varnothing 150-15JR$ ,  $\varnothing 250-60J$ 의 변형 형태를 비교 하였으며, 그 결과 외부 균열이 발생하지 않은 충격부위의 경우 충격의 중심위치보다 충격의 좌·우 끝 부분이 더 높은 변형을 나타내었고, 외부균열이 발생한 충격부위의 경우 충격의 중심부가 최고 변형을 나타내었다.

## 나. 적외선열화상을 이용한 복합재 튜브의 결함 측정

복합재료는 충격과 열에 약하여 운행 중 이물질의 충돌에 의해 내부 박리 결함이 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. 그 결과 충격이 가해진 위치가 그렇지 않은 부분에 비하여 온도가 높게 측정되었다.

(2) 충격에너지가 높을수록 측정 온도가 높고, 온도변형에 따른 결함의 폭이 넓게 측정되었다.

위와 같은 연구 결과로부터 전단간섭계와 IRT를 이용하여 복합재 튜브의 내, 외부 결함의 크기, 형상, 위치를 고분해능으로 검사함으로써 제품 신뢰성 평가의 기준이 되는 비파괴평가의 개념을 충족시킬 수 있으며, 이를 기반으로 전단간섭계와 IRT 기법이 비파괴 검사기법으로서의 산업적 활용도가 높아질 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. A. G. Mamalis, D. E. Manolaks., "Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fiberglass composite Materials Subjected to Axial Loading." J. Composite Materials, Vol. 24, pp. 72-91, 1990.
2. C. H. Chiu, C. K. Lu., "Crushing Characteristics of 3-D Braided Composite Square Tubes." J. Composite Materials, Vol. 31, pp. 2309-2327, 1997.
3. C. H. Chiu, K. H. Tsai, W. J. Huang., "Effects of Braiding Parameters on Energy Absorption Capability of Triaxially Braided Composite Tubes." J. Composite Materials Vol. 32, pp. 1964-1983, 1998.
4. Vistasp M. Karbhari, "Energy Absorption Characteristics of Hybrid Braided Composite Tubes." J. Composite Materials, Vol. 31, pp. 1164-1186, 1997.
5. Stephen R. Swanson, "Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials", Prentice Hall, pp. 22-24, 1997.
6. Highsmith, A. L, Ledbetter, F. E., Nettles, A. and Russel, S. S., "Low Velocity Impact Damage in Filament-Wound Composite Pressure Bottles," Journal of Composites Technology & Research, Vol. 18, No. 2, pp. 109-117, 1991.
7. Poc Jr., C. C., "Impact Damage and Residual Tension Strength of a Thick Graphite/Epoxy Rocket Motor Case", Journal of Spacecraft & Rockets, Vol. 29, No. 3, pp. 394-404, 1991.
8. Paris, H. G., "Assessment of Impact Damage of Composite Rocket Motor Cases", NASA Technical Report NAG-1016, 1994.
9. G. L. Farley, R. M. Jones. "Energy-Absorption Capability of Composite Tubes and Beams." NASA TM 101634, 1989.
10. G. L. Farley. "The Effects of Crushing Speed on the Energy-Absorption Capability of Composite Tubes." Journal of Composite

Materials Vol. 25, pp. 1314-1329, 1991.

11. G. L. Farley, R. M. Jones. "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes." *Journal of Composite Materials* Vol. 26, pp. 37-50, 1992.

12. Rastogi, P. K., "Measurement of in-plane strains using electronic speckle and electronic speckle-shearing pattern interferometry", *J. Mod. Opt.*, Vol 43, pp. 403-407, 1996.

13. Steinchen, W., Yang, L. X., Kupfer, G., Mäckel, P., and Vössing, F., "Strain analysis by means of digital shearography: potential, limitations and demonstration", *JOURNAL OF STRAIN ANALYSIS* Vol.33, No.2, pp. 171-182, 1998.

14. Hung, Y. Y. and Wang, J. Q., "Dual-beam phase shift shearography for measurement of in-plane strains", *Opt. Lasers Eng.*, Vol.24, pp. 403-413, 1996.

15. 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, pp.303-307, 2002.

16. Jones, R.. and Wykes C.. "Holographic and Speckle Interferometry 2nd Edition", London: Cambridge University Press, 1989.

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

18. 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.

19. Hecht, E., "OPTICS 4th edition." Addison Wesley Longman, pp. 470-524, 2002.

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., Vol. 37, pp. 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, pp. 318-328, 2001.

## 감사의 글

대학원을 입학한지 벌써 2년이 지나가고 이 논문을 끝으로 졸업을 앞두고 되었습니다. 대학원을 들어오기 전 많은 생각과 고민을 했고, 지금의 제 모습은 더 성숙하고 발전된 모습으로 이 자리에 있는 것 같습니다. 지금 졸업을 앞두고 대학원 생활을 마치게 되지만 아직 걸어야 하는 많은 인생의 여정 가운데 한 걸음 내딛는 것이며, 이것은 마침이 아니라 새로운 시작을 알리는 출발선에 서있음을 느끼게 합니다. 제가 여기까지 올 수 있도록 해주시고, 대학원 생활동안 조언과 격려를 아끼지 않고 지도해주신 김경석 교수님, 정현철 박사님, 장호섭 박사님께 진심으로 감사드립니다. 대학교 학부생활 부터 열심히 지도해주신 양광영 교수님, 나기대 교수님, 양인영 교수님, 김택현 교수님, 정낙규 교수님, 김지훈 교수님께도 감사드립니다.

그리고 늘 든든하게 내 곁에 있어준 소심쟁이 내 동기 김동수, 내 후배이자 친구인 투덜쟁이 덕운이, 모든 일에 긍정적인 쿨가이 경수 이 모든 분에게 감사드립니다. 대학원 생활을 2년 넘게 지내면서 하루 중 가장 많은 시간을 보내면서 가족만큼 정이 들어버린 실험실 식구들의 도움이 없었으면 대학원에서의 생활이 어려웠을 것입니다. 이 모든 분들이 저의 곁에 계셨기에 제가 대학원 생활을 잘 마칠 수 있었습니다.

마지막으로 지금의 제가 있기까지 29년의 세월을 아낌없이 보살펴 주시고 기도해주신 사랑하는 우리 아버지 어머니께 감사드립니다.

앞으로 많은 분들의 성원에 보답하도록 항상 노력하고 성실한 사람이 되도록 하겠습니다.

# 저작물 이용 허락서

학 과	첨단부품소재 공학과	학 번	20087147	과 정	석사
성 명	한글: 나 성 원    한문: 羅 成 元    영문: Na Sung-Won				
주 소	전남여수시 학동 22-2번지				
연락처	E-MAIL: won4u@hanmail.net    H.P: 010-2993-5031				
논문제목	한글: 전단간섭계와 적외선 열화상을 이용한 복합재 튜브의 결함검출 영문: Defect Detection of Composite Tubes Using 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 의사 표시가 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(    )

2010 년 2월

저작자:    나 성 원    (인)

조선대학교 총장 귀하