

## 적외선 열화상 기술을 이용한 복합재료의 결함 검출 정량화 연구

### Study on the Qualitative Defects Detection in Composites by Optical Infrared Thermography

박희상\*, 최만용\*<sup>†</sup>, 박정학\*, 김원태\*\*, 최원중\*\*\*

Heesang Park\*, Manyong Choi\*<sup>†</sup>, Jeonghak Park\*, Wontae Kim\*\* and Wonjong Choi\*\*\*

초 록 본 논문에서는 현재 산업 전반에 널리 사용되고 있는 복합재료(탄소섬유강화플라스틱, 유리섬유강화플라스틱)의 비파괴검사를 위한 광적외선 열화상기법을 이용한 복합재료 측정 표준기술개발을 위한 결함(인클루전, 층간결함) 검출 기술을 실험하였다. 결함의 검출률을 높이기 위하여 위상잠금 방법을 활용하였다. 결과는 시험편의 두께에 따라 광원의 조사시간을 늘릴 경우 결함 검출의 확률이 높아진다는 것을 알 수 있다. 하지만 50 mHz 이하의 광원을 가하였을 때에도 결과값이 좋아지지 않는 점은 열확산이 재료 전체에 영향을 미치게 되면 결함 부위가 전체적으로 열평형 상태가 되어 결함 검출이 어려움을 파악할 수 있었다.

주요용어: 적외선 열화상, 탄소섬유강화플라스틱, 유리섬유강화플라스틱, 층간결함, 인클루전

**Abstract** In this paper, infrared thermography measurement technique has been used to develop standard measurement technique for nondestructive testing of composite materials which is widely used in aerospace industries. To increase the defect detection rate, the related experiment used the lock-in IR-thermography method. Therefore it is of considerable interest in the field of non-destructive testing for fast discontinuity detection by using ultrasonic lock-in infrared thermography. The result also shows that as the investigation period of light source is lengthened according to the thickness of specimen, the possibility of detecting defects gets higher as well. However, the reason why the result values were not favorable when less than 50 mHz of light source was provided is because it was difficult to detect defects as the defect parts became a state of thermal equilibrium in general when thermal diffusivity affects the entire materials.

**Keywords:** Infrared Thermography, CFRP, GFRP, Delamination, Inclusion

#### 1. 서 론

기존의 구조물 재료로 많이 사용되어 온 금속합금과는 달리 두 종류 이상의 구성 소재가 각각의 거시적인 특성을 유지하며 우수한 물성을 상호 보완하도록 인위적으로 만들어진 복합재료 중에서 대표적인 것으로는 CFRP(carbon fiber reinforced plastic), GFRP(grass fiber reinforced plastic) 등이 널리

사용되고 있다. 이러한 재료는 우주항공, 자동차, 철도, 건축구조물 및 풍력발전 블레이드 등 여러 응용분야에서 사용이 점차 확대되고 있다.

지금까지 항공기용 복합재료 구조물에 존재하는 결함들인 층간결함(delamination), 균열(crack), 기공(void), 인클루전(inclusion) 중, 기공을 제외한 결함에 대해서는 초음파탐상(ultrasonic C-scan)으로 결함 검사를 할 수 있으나, 이와 같은 검사방법은

시간과 비용이 크게 소모된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 비파괴검사 평가기술로 해외에서는 적외선 열화상 비파괴검사(infrared thermography nondestructive testing: IRT NDT)이 활용되고 있으나 국내에서는 아직 그 활용도가 떨어지는 실정이다[1,2]. 따라서 본 논문에서는 위상잠금 광 적외선 열화상 검사 기법을 활용한 CFRP 및 GFRP 복합재료의 결함 종류에 따른 검출 방법 및 결함 정량화에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 재료 및 장치

적외선 열화상을 이용하여 복합재료 적층판 내부의 결함 검출을 위해 본 논문에서는 결함의 종류(층간결합, 인클루전)와 크기 그리고 깊이에 따른 복합재료 적층판 결함 시험편을 제작하여 비교하였으며, 사용한 복합재료의 종류는 다음과 같다. 첫째로는, 항공우주용으로 광범위하게 사용되고 있는 소재로서 Cycom 5276-1 에폭시 수지에 고강도 T800급 일 방향 탄소섬유를 함침시킨 Cycom 5276-1 G40-800 -24K UD Tape를 사용하였다.

Table 1 The basic descriptions of CFRP & GFRP

NO	Properties	Unit	Nominal mean value	
			Cycom5276-1	UGN 150
Resin	Designation	-	Cycom5276-1	
	Chemical type	-	Toughened epoxy resin	epoxy resin
	Cure temperature	°C	175	127
	Density	g/cm <sup>3</sup>	1.31±0.01	1.20
Fiber	Fiber type	-	G40-800-24K	
	Density	g/cm <sup>3</sup>	1.79	2.54
Cure Cycle	Curing pressure	kPa	586	310
	Heat-up/Cooling rate	°C/min	0.5~3/3	1~2
	Curing temperature	°C	175	127
	Cure time	min	120	90
	Vacuum	mbar	Full	Full
Propertie	0 tension strength	MPa	3013	147
	0 tension modulus	GPa	155	7.25

둘째로는, 전자 PCB 기판, 풍력발전용 블레이드 등에 적용되는 소재로서 에폭시 수지에 일 방향 E-glass 유리섬유를 함침시킨 SKY FLEX UGN 150을 함께 사용하여 비교·평가하였다. Table 1은 두 재료의 물성을 보여주고 있다.

## 3. 실험 방법

### 3.1. 실험 방법

적외선 열화상을 이용한 복합재료 결함 검출 방법은 크게 수동적(passive) 방법과 능동적(active) 방법으로 나뉘지며, 능동적 측정 방법은 수동적 방법과 달리 특정 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 전달하여 대상체의 응답신호를 처리하여 결함의 크기를 산출하는 방법이다. 본 논문에서는 평판형 복합재료의 결함을 효과적으로 검출하기 위해 기존 광-적외선 열화상 시스템에 열화상을 신호 처리할 수 있는 위상잠금 기술을 적용하여 실험하였다.

적외선 열화상 검사 장치는 광원 가열장치와 적외선 열화상 카메라로 구성되며, 시험중 시험편과 외부 열원과의 열교환을 최소화하기 위하여 Fig. 1과 같이 단열챔버 내부에 실험장치를 구성하였다. 광원 램프는 좌우 하나씩 출력 1 kW, 거리 2 m로 설치, 적외선 카메라는 프랑스 Cedip사의 Silver 480m 모델(NEDT: 25 mK)을 사용하였다. 적외선 열화상의 검출 감도를 위하여 시험편 표면은 완전한 방사율값이 1인 흑체에 가까운 조건을 만족시키기 위하여 검정색 무광 페인트로 도포하였다.

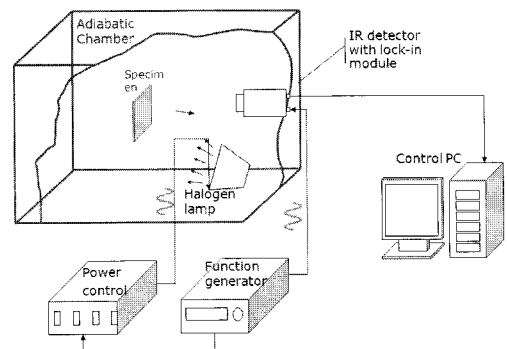


Fig. 1 Infrared thermography experiment system

### 3.2. 위상잠금 광-적외선 열화상 적용 이론

위상잠금 적외선 열화상 기법은 크게 두가지 알고리즘으로 나눌 수 있는데 하나는 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)을 이용한 방법과 조화 근사 기반 알고리즘(harmonic approximation based algorithm)을 활용하는 방법이 있다. 먼저 이산 푸리에 변환(DFT)은  $N$ 개의 이산적인 복소수  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$  값들을 복소수 값  $F_0, F_1, F_2, \dots, F_{n-1}$ 으로 변환하는 이산 푸리에 변환식 (1)로 정의된다.

$$F_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{-\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{N} jk} \quad (1)$$

$$= Re_j + i \cdot Im_j \quad j = 0, \dots, n-1$$

이때 DFT의  $j$ 값은 주파수가 증가와 실수부(Re)와 허수부(Im)로 나타낼 수 있으며, 실수부와 허수부를 이용하여 식(2)와 식(3)과 같은 진폭값  $A_j$  (amplitude)와 위상값  $\phi_j$  (Phase)을 얻을 수 있다.

$$A_j = \sqrt{Re_j^2 + Im_j^2} \quad (2)$$

$$\phi_j = \text{atan}\left(\frac{Im_j}{Re_j}\right) \quad (3)$$

이를 이용하여 주파수 선정에 따른 진폭 이미지와 위상 이미지를 얻을 수 있다[3].

HA(harmonic approximation)은 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 결함 검출을 위해 자극원을 할로젠 광원으로 하는 광-적외선 열화상 기법을 적용하였으며, 이 기법은 Fig. 2과 같이 시스템을 구성하고, 조화함수 알고리즘이 포함된 정현파 신호를 광원에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 식(4)로 표현되는 고체내의 1차원 열전도 방정식에서 외부 자극원으로서 광원을 사용하여 대상체에 조화함수( $T = T_0 \cos \omega t$ )로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를

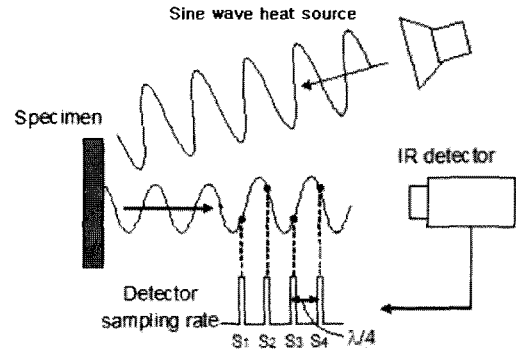


Fig. 2 Signal processing of lock-in infrared thermography

관찰하여 결함을 검출하는 방법이다[4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

여기에서  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $k$ 는 열전도계수,  $\rho$ 는 밀도,  $c_p$ 는 비열,  $x$ 는 열유동 방향으로의 거리이다. 조화함수가 포함된 정현파로 가열된 식(4)의 해는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (5)$$

여기에서, 침투깊이(thermal diffusion length),  $\mu = \sqrt{\alpha/\pi f}$ , 열확산계수(thermal diffusivity)는,  $\alpha = k/\rho c_p$ 이다. 위상잠금 기법에서는 식(5)에서 측정 결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화할 수 있다. 식(5)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기시켜 자극원의  $\lambda/4$ 주기 간격으로 연속하는 적외선 검출 신호  $I_1, I_2, I_3, I_4$ 를 식(6)과 같이 획득하고, 식(7)를 사용하여 추출할 수 있다 [5,6].

$$\begin{aligned} I_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\ I_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\ I_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\ I_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1}\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (7)$$

4. 실험 고찰

4.1. 층간박리 결함 시험편의 결함 검출

Fig. 3은 층간결함(delamination) 인공결함 시험편으로 CFRP의 경우 8겹으로, GFRP의 경우 16겹으로 적층하였으며, 두께 1.4 mm의 동일한 두께의 인공결함 시험편으로 복합재료 사이에 구리시트를 삽입하여 인공결함을 제작하였다. 상단과 하단의 결함은 구리시트를 넣었다 빼낸 부분으로 실제 층간결함이 공기 중에 노출되어 있는 결함 형태로 설계되었다.

각각의 CFRP의 결함 깊이는 12.5%(P1/P2), 25%(P2/P3), 50%(P4/P5), 75%(P7/P8)이며, GFRP delamination 시험편은 CFRP보다 얇은 재질의 특성상 16겹으로 적층을 하여 제작하였다. 결함 타입은 CFRP 시험편의 형상과 크기가 모두 같고 복합재료의 재질만 틀린 상태의 시험편을 제작하여 CFRP와 GFRP의 특성을 비교하고자 설계하였다.

결함 깊이는 12.5%, 25%, 50%, 87.5%의 깊이로 제작하였으며, 양쪽 위아래의 결함은 구리시트가 삽입되어 있지 않은 상태에서 층간결함 부분이 노출되게 제작하였으며, 다양한 크기의 결함을 포함하고 있다.

Fig. 4는 CFRP를 위상잠금 방법을 통하여 얻은 결함 검출 열화상으로 광원의 가열 주파수를 달리하여 실험한 결과 (b) 400 mHz에서도 대부분의 결함이 검출되었지만 50%, 87.5% 결함 깊이에 비하여 12.5%와 25% 결함 깊이에서는 영상이

뚜렷하게 나타나지 않았으나 (a) 200 mHz에서는 대부분의 결함을 검출할 수 있었다.

또한, 이렇게 검출한 열화상을 Fig. 5에서와 같이 수평과 수직방향으로 결함의 크기를 측정하기 위하여 각각의 선과 기호를 이용하여 표시하였다. Fig. 6과 같은 방법으로 수평방향과 수직방향 열화상 이미지의 픽셀(pixel)과 실제 크기를 활용한 공간 분해능을 이용하여 결함의 크기를 측정하였다. 획득한 열화상 데이터는 전단위상 방법을 이용하여 최적의 결과값을 도출하였다.

각각의 픽셀이 차지하는 공간분해능은 1.21로 (하나의 픽셀 당 1.21 mm의 크기를 나타내고 있다.) 결함 측정의 평균 결함 검출의 오차율은 2% 이하이고 최대 오차는 L6-d로 10%의 오차를 나타냈다. 전단위상을 이용한 결함 측정의 정확도

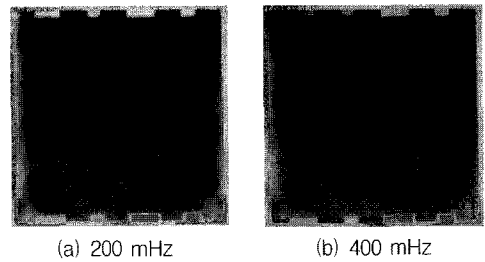


Fig. 4 Qualitative images of CFRP delamination

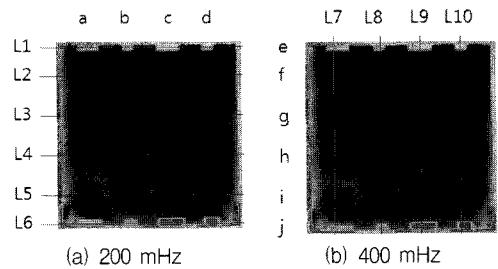


Fig. 5 Geometric scale for measuring positioning

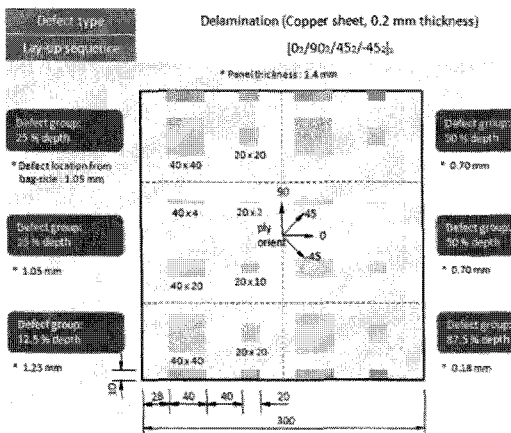


Fig. 3 Delamination defect specimen of CFRP and GFRP

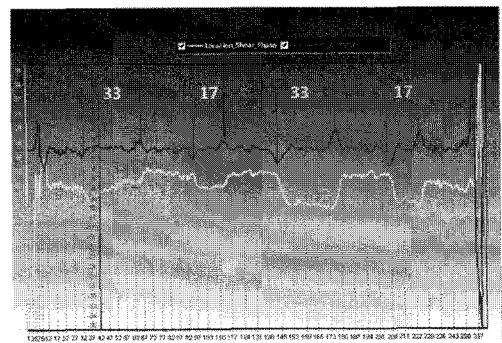


Fig. 6 Defect size measurement using shear phase

가 우수한 결과를 얻을 수 있었다[7]. 그러나, 수직 방향의 결함 검출 결과값은 깊이에 따라 다른 결과를 보였는데 L8g 와 L10g의 경우 결함 검출은 가능하지만 오차가 81.5% 까지 발생하였다.

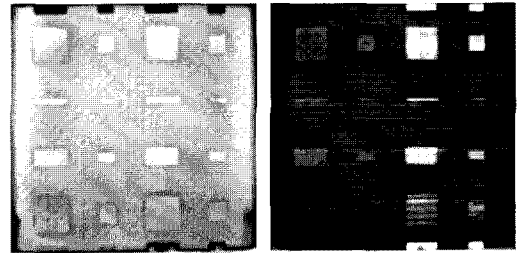
이렇듯 한 픽셀 분해능에 따라 결함 치수가 작을수록 분해능이 떨어짐을 알 수 있다. 12.5%, 25%의 결함 깊이에 있는 결함의 경우 평균 19.4%의 오차를 보였고, 25%, 50% 깊이에 존재하는 결함의 크기를 측정된 평균 결함은 13.5%의 오차를 보였다. 이와 같은 결과의 이유는 수직방향에서 측정된 결함의 영상 이미지 중에 결함이 차지하는 부분의 이미지의 크기가 작은 관계로 하나의 픽셀이 실제 시험편에서 차지하는 크기가 1.21 mm에 달하는 관계로 결함의 치수가 2 mm인 경우 픽셀의 수가 3개인 경우 3.63 mm로 측정되어 오차가 81%까지 크게 발생

Table 2 Horizontal size of defects

Real Location		a	b	c	d
Real defect size(mm)	L1~L6	40	20	40	20
Detection location		a	b	c	d
Defect detection size(mm)	L1	41.14	20.57	38.72	19.36
	L2	41.14	20.57	39.93	20.57
	L3	41.14	19.36	39.93	19.36
	L4	41.14	20.57	38.72	19.36
	L5	38.72	19.36	42.35	21.78
	L6	39.93	20.57	38.72	18.15
average(mm)		40.53	20.17	39.73	19.76

Table 3 Vertical size of defects

Detection location		L7	L8	L9	L10
[real defect size](mm)	e	[10]	[10]	[10]	[10]
		8.47	8.47	10.89	8.47
[real defect size](mm)	f	[40]	[20]	[40]	[20]
		37.5	22.99	39.93	19.36
Defect detection size(mm)	g	[4]	[2]	[4]	[2]
		3.63	3.63	4.84	3.63
Defect detection size(mm)	h	[20]	[10]	[20]	[10]
		20.57	13.31	20.57	10.89
Defect detection size(mm)	i	[40]	[20]	[40]	[20]
		41.14	24.2	39.93	20.57
Defect detection size(mm)	j	[10]	[10]	[10]	[10]
		8.47	8.47	10.89	10.89



(a) 50 mHz (b)300 mHz

Fig. 7 Thermography detection of GFRP delamination specimen

되는 영향과 작은 결함의 이미지가 또렷하지 못하여 데이터를 구하는데 어려움이 발생한 문제라 하겠다. 또한 층간결함이 일어난 부분에서의 온도는 공기층의 온도와 같은 온도 변화를 나타내어 공기중에 노출된 층간결합임을 판단할 수 있는 장점이 있었으나, 데이터의 정량화에 오차를 나타내는 문제가 발생 가능하므로 측정 공기 온도의 조절을 통한 측정 오차 방지도 추후 가능하리라 판단된다.

앞선 실험을 통하여 CFRP 시험편의 결함 검출이 가능한 광원의 조사 주파수와 검출된 열화상을 이용하여 결함을 정량화할 수 있음을 확인하였다. Fig. 7은 GFRP 층간결합 시험편의 열화상 시험 결과로 결함 깊이가 12.5%, 25%, 50%, 87.5%에 광원조사 주파수를 (a) 50 mHz 이하로 실험하였을 때 결함 전체의 형상을 파악할 수 있었으며, (b) 300 mHz 이상의 주파수에서는 깊이 12.5%, 25% 깊이의 결함은 정확한 형태의 파악이 어려웠다.

이와 같은 결과는 CFRP와 GFRP의 열전도계수가 차이에 따라 열전도계수가 더 높은 CFRP에서는 GFRP보다 빠른 시간안에 열확산이 일어나게 되고 이때 발생하는 온도 차이를 적외선 카메라가 검출한 영향이라 하겠다. 이러한 점을 보완하기 위하여 같은 두께의 복합재료에서라도 광원의 조사 주파수를 알맞게 낮추어 광원의 열 침투 깊이가 깊어질 때 GFRP의 결함을 검출할 수 있었다.

#### 4.2. CFRP 인클루전 결함 시험편

Fig. 8은 CFRP 시험편 내측에 테프론(teflon) 필름을 삽입하여 인클루전 인공결합 시험편을 제작하였다. 결함의 형태는 원형, 타원형, 별모양의

결합을 삽입하였다. CFRP 층간결합 결함 시험편과 같은 8겹(ply)으로 적층된 두께 1.4 mm의 결함 시험편을 제작하였으며, 결함 깊이는 중심선을 기준으로 왼편이 결함이 가장 깊은 25%, 오른편의 깊이는 시험편의 정중앙에 위치하는 깊이인 50%에 위치하는 결함을 삽입하여 제작되었다. 앞선 층간결합 결함 검출 실험에서는 광원의 최적주파수에 따라 결함의 형태가 모든 깊이에서 또렷한 결함 영상을 보여주었으나 Fig. 9의 실험을 통하여 얻은 결과는 인클루전 결함 시험편에서 광원을 400 mHz로 조사한 Fig. 9의 (b) 시험편은 표면에서 가까운 곳에 위치한 50%의 결함 깊이에서는 전체적인 결함 형태는 나타났으나, 25%의 경우에서는 결함이 나타나지 않는 결과를 보인 반면 (a) 100 mHz의 검사에서는 25% 깊이에서도 큰 형태의 결함은 일부 검출이 가능하였다. 이러한 결과는 인클루전에 사용된 비다공질형 테프론 필름의 두께가 0.0025 mm로 1.4 mm의 복합재료 두께 대비 1:550정도의 두께로 인한 열전도 계수의 영향이 적어 온도차를 이용하여

영상을 검출하는데 제약이 따른 것으로 판단된다. 또한 층간박리 삽입체로 사용된 구리시트의 경우 금속재료의 열전도 및 열확산이 빨리 일어나는 재료로 똑 같은 열이 가해졌을 때 빨리 가열되고 빨리 온도가 내려가게 되어 열적거동차이를 일으켜 결함의 형태를 확실하게 나타내는 차이라 판단된다.

### 4.3. GFRP 인클루전 결함 시험편

Fig. 10은 GFRP의 인클루전 인공결함 시험편으로 16겹으로 적층하였으며, CFRP와 동일한 1.4 mm의 두께로 시험편을 제작하였다. 시험편은 앞선 CFRP 인클루전 결함 시험편과 동일한 25%와 50%의 깊이에 원형, 타원형, 별모양의 결함을 테프론 필름으로 삽입하여 제작하였다.

Fig. 10에 보이는 시험편을 정면에서 바라봤을 때 세로방향의 중심선을 기준으로 인공결함의 깊이는 왼편의 결함들이 25%로 가장 깊은 곳에 위치해 있고, 오른편의 결함들이 50%로 시험편의 중

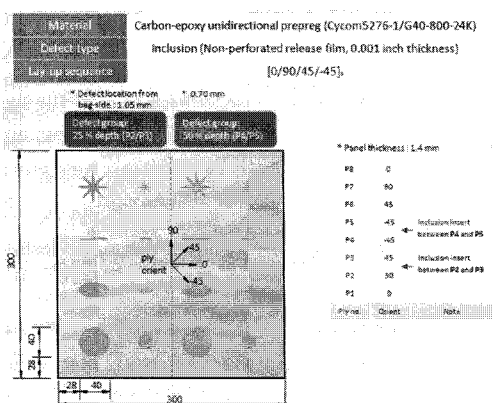


Fig. 8 Inclusion defect specimen of CFRP

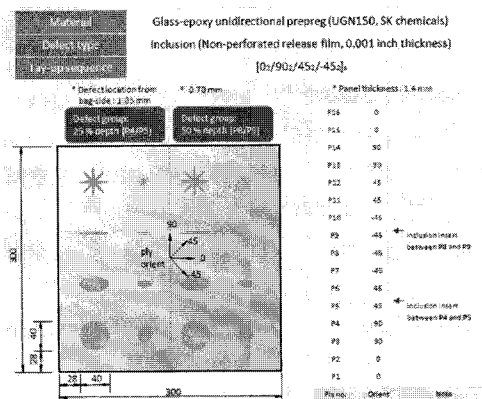
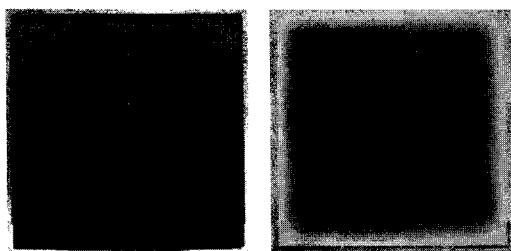
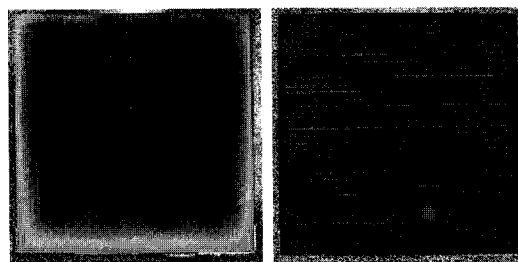


Fig. 10 Inclusion defect specimen of GFRP



(a) 100 mHz (b) 400 mHz

Fig. 9 Thermography detection results of CFRP Inclusion Specimen



(a) 50 mHz (b) 300 mHz

Fig. 11 Thermography images of GFRP at Inclusion

간에 위치해 있다. 열화상 시험 결과 Fig. 11의 광원 주파수 (b) 300 mHz에서는 우측에 위치한 50% 깊이의 결합만이 검출 가능하였으나, 광원 주파수 (a) 50 mHz에서는 25% 깊이에 존재하는 결합의 위치를 파악 할 수 있는 정도로 검출 가능하였다.

앞선 CFRP 인클루전 결합에 비하여 GFRP 시험편의 결합 검출을 위하여 광원 조사시간을 길게 해야만 검출이 되는 이유는 CFRP와 GFRP의 열전도 특성의 영향을 받은 결과라 하겠다(CFRP의 경우 탄소섬유로 이루어져 있으므로 상대적으로 열전도계수가 유리섬유인 GFRP보다 높다). 하지만 GFRP의 결합 검출을 위해 너무 오랜 시간 광원을 조사할 경우 재질에 열평형이 일어나 결합의 검출이 어려웠다.

## 5. 결론

본 논문으로부터 광 적외선 열화상 실험의 경우 광원의 조사시간과 신호처리, 복합재료의 재질에 따라 복합재료의 결합을 검출율이 달라짐을 파악할 수 있었다.

- 1) 1.4 mm 두께의 8겹 적층 CFRP의 복합재료의 경우 층간결합 결합에서는 200 mHz에서 가장 검출율이 높았고 인클루전 결합 시험편에서는 100 mHz에서 결합 영상의 검출이 가능했다.
- 2) 1.4 mm 두께의 16겹 적층 GFRP의 복합재료의 경우 층간결합과 인클루전 결합 모두 50 mHz로 광원을 조사하였을 때 결합 영상의 획득이 용이하였다.
- 3) 25%와 50% 깊이에 결합이 존재하는 1.4 mm 두께의 CFRP와 GFRP의 인클루전 결합은 GFRP 시험편에 광원의 조사시간을 50 mHz로 길게 하여야만 전체적인 결합 검출이 가능하였다.
- 4) 삽입재의 경우 얇은 박막의 테프론 계열의 필름보다는 구리 박판을 삽입하였을 때 명확한 결합 영상을 검출할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 시행한 지식경제 기술혁신사업(표준기술력향상사업)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

- [1] X. P. V. Maldague, "Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing," John Wiley&Sons, New York (2001)
- [2] A. Th. Zweschper, A. Dillenz, G. Riegert and G. Busse, "Lock-in thermography methods for the NDT of CFRP aircraft components," NDT.net - February, Vol. 8 No. 2 (2003)
- [3] G. Busse, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J Appl Phys*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)
- [4] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed), X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 54-86 (2001)
- [5] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703 (1998)
- [6] G. Busse, "Infrared and thermal testing: technique of infrared thermography," Nondestructive Testing Handbook Series III (3rd Ed), X. P. V. Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 318-328 (2001)
- [7] M. Y. Choi, K. S. Kang, J. H. Park, W. T. Kim and K. S. Kim, "Defect sizing and location by lock-in photo-infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 4, pp. 321-327 (2007)