

# 광 적외선열화상을 이용한 풍력 블레이드의 결함 크기 정량화 연구

## Quantitative Defects Detection in Wind Turbine Blade Using Optical Infrared Thermography

권구안\*, 최만용\*\*†, 박희상\*\*, 박정학\*\*, 허용학\*\*, 최원재\*\*

Koo-Ahn Kwon\*, Man-Yong Choi\*\*†, Hee-Sang Park\*\*, Jeong-Hak Park\*\*,  
Yong-Hak Huh\*\* and Won Jae Choi\*\*

**초 록** 풍력발전기의 핵심 부품인 풍력 블레이드는 예상치 못한 풍 하중과 공력 특성으로 인해 불안정한 상태에 놓여 있다. 그에 따라 필연적으로 발생하는 내부 결함을 검출하기 위해 초음파탐상을 이용한 비파괴 검사가 주로 진행되어 왔다. 하지만 블레이드의 소재 특성으로 인해 음향 신호 분석에 따른 문제점이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 풍력 블레이드 인공결함시험편을 제작후, 능동적 광 적외선열화상 비파괴검사 방법을 이용하여 결함의 크기를 정량화하기 위한 실험을 진행하였다. 100 kW 급 블레이드 내부의 결함 크기 정량화를 위해 알루미늄 켈리브레이션 테이프를 사용하였으며, 계재물(inclusion), 디본딩(debonding), 주름(wrinkle) 결함을 삽입하였다. 실험 결과 모두에서 뚜렷한 결함 검출이 가능하였으며, 결함 크기 정량화 결과 debonding 인공 결함 (φ50.0 mm)에서 최대 98.0%의 정확성을 보였다.

**주요용어:** 풍력발전 블레이드, 광 적외선열화상, 위상잠금 방법, 결함 크기 정량화

**Abstract** A wind turbine blade is an important component in wind-power generation, and is generally exposed to harsh environmental conditions. Ultrasonic inspection is mainly used to inspect such blades, but it has been difficult to quantify defect sizes in complicated composite structures. Recently, active infrared thermography has been widely studied for inspecting composite structures, in which thermal energy is applied to an object, and an infrared camera detects the energy emitted from it. In this paper, a calibration method for active optical lock-in thermography is proposed to quantify the size. Inclusion, debonding and wrinkle defects, created in a wind blade for 100 kW wind power generation, were all successfully detected using this method. In particular, a φ 50.0 mm debonding defect was sized with 98.0% accuracy.

**Keywords:** Wind Turbine Blade, Optical Infrared Thermography, Lock-in Method, Quantitative Defects Detection

### 1. 서 론

국내 풍력산업의 규모는 산업 전반에 걸친 공급체계가 완성되면서 성장 추세를 보이고 있으며, 국내에서도 서남해안 2.5 GW 해상풍력발전단의 건설을 통해 내수시장이 크게 확대되고 있다. 그에 따른 풍력발전 시스템의 경제성 및 신

뢰성 확보를 위해서는 표준화된 유지관리기술 체계 확립이 필수적이다. 하지만 현재까지 풍력발전기의 유지관리기술에 대한 해외 의존도가 높고, 국내에 표준화된 유지관리지침이 정립되어 있지 않은 상황이다. 또한 풍력 블레이드 복합재료의 결함 평가를 위한 기존의 비파괴검사는 대부분 초음파탐상을 위주로 진행되어 왔으나 블레

이드의 복잡한 구조적 특성으로 인한 음향 신호 노이즈 발생과 분석의 어려움으로 인해 많은 문제점이 발생한다[1]. 따라서 본 연구에서는 광적외선열화상 비파괴검사(optical infrared thermography nondestructive testing) 기술을 사용하여 풍력 블레이드의 표층부에 존재하는 결함이나 접합이 불완전한 부분을 탐지하기 위한 연구를 진행하였다[2]. 적외선열화상기술(IRT)의 장점은 대상체의 적외선 방출 에너지를 활용하여 비접촉인 상태로 결함 검출이 가능하며, 특히 풍력 블레이드의 주재료로 사용되고 있는 CFRP(탄소섬유강화플라스틱), GFRP(유리섬유강화플라스틱) 복합재료의 inclusion, wrinkle, debonding 결함 검출에 있어 매우 효과적이라는 점이다[3]. 또한 현장에서 비교적 간편하게 이동 가능한 상태로 검출이 가능한 장점을 지닌 검사 방법으로 대형 구조물인 풍력 블레이드의 결함 검출에 매우 적합한 방법이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 풍력 블레이드 접합부 결함 크기 정량화를 위한 열화상 기술 개발을 목표로 블레이드 접합부에 발생하는 inclusion, wrinkle, debonding 결함을 검출하여 정량적으로 평가할 수 있는 기술을 개발하였다.

## 2. 블레이드 접합부 결함 모사시험편 제작

본 연구에 사용된 풍력 블레이드는 100 kW급의 블레이드로 로터 직경이 15.0 ~ 40.0 m에 적용 가능한 NREL (National Renewable Energy Laboratory) S82X-series airfoil의 형상으로 제작되었다. 다양한 크기의 블레이드중 본 실험의 목적에 부합할 수 있는 크기의 블레이드의 전체 재질은 GFRP로 제작되었으며, 접합재료는 epoxy가 사용되었다. 또한 블레이드 내부에 삽입되는 core(코어)로는 PVC 폼과 발사우드가 사용되었고 제작중에는 진공을 유지하여 제작하였다.

실제 풍력 블레이드의 제작시에 사용되는 코어를 블레이드의 위와 아래에 삽입하여 결함에 반응하는 정도를 파악하기 위한 설계를 진행하였다.

Fig. 1은 제작한 블레이드의 단면을 나타내며 코어의 위치와 스파(spar)의 위치를 확인할 수 있다.

Table 1은 블레이드의 재질과 적층 그리고 치수를 나타내고 있다. 블레이드 제작에 기본이 되는 GFRP는 UGN 200 재질의 프리프레그(prepreg)

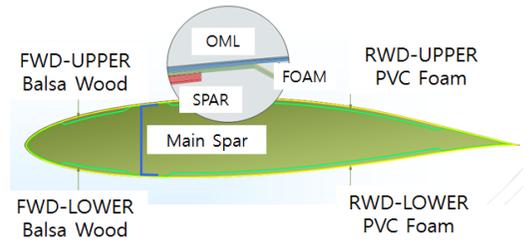


Fig. 1 The cross section of wind blade

Table 1 Material and size of wind turbine blade

Rotor Diameter	Reinforcement	Resin	Core	Process
15-40 +m	Glass fiber	Epoxy	PVC foam/ Balsa wood	Vacuum Bag

Table 2 Mechanical material property

Tensile Strength	Tensile Modulus	Fiber Density	Resin Density
150 kgf/mm <sup>2</sup>	7.4×10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	1.2 g/cm <sup>3</sup>

를 사용하였다. 프리프레그(Prepreg)는 결합재(matrix)를 강화섬유(reinforced fiber)에 미리 함침시킨 sheet 형태의 복합재료 제품의 중간 재료로 강화섬유로는 주로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유가 이용되며, 결합재료는 에폭시수지, 폴리에스테르수지, 열가소성수지 등이 사용된다.

실제 풍력 블레이드의 제작에는 프리프레그와 레진인퓨전(resin infusion) 방법이 사용되고 있으나 결함 크기 정량화를 위하여 본 실험에서는 프리프레그를 적층하여 사용하였고, 기계적 물성치는 Table 2와 같다.

FWD와 RWD 부분에 각각 0.3 mm의 프리프레그 8장을 ±45°/0°의 각도로 적층하여 총 2.4 mm의 두께로 제작하였다. Fig. 2는 각각의 공정을 나타낸 프로세스 플로우 차트이다. Fig. 2의 공정으로 제작되는 블레이드의 내부에 결함을 삽입하여 정량화된 결함시험편을 제작하였다. 내부에 삽입된 인공결합의 재질은 Table 3과 같다. 결함의 크기는 가로, 세로 30.0 mm × 50.0 mm과 25.0 mm × 25.0 mm를 대표로 하여 삽입하였고, 12.5 mm<sup>2</sup> 등을 추가로 삽입하였다. 구리 시트를 사용하여 표면으로부터 1.2 mm 깊이에 inclusion 결함을 제작하였다.

Table 3 Artificial defect materials

Thickness (mm)	Copper sheet (0.03 mm)
Density (g/cc)	7.65
Specific Heat Capacity (J/g-°C)	0.38
Thermal Conductivity (W/m-K)	58.0

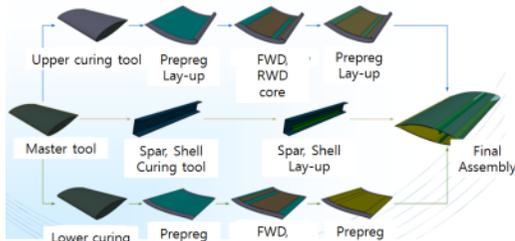


Fig. 2 Process flow chart of wind blade

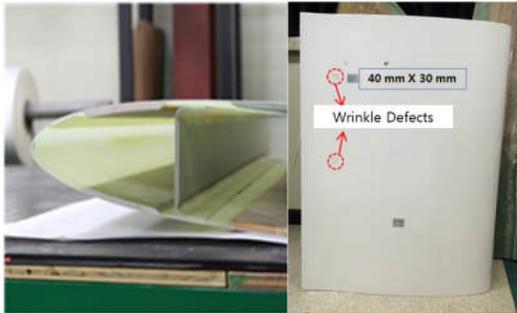


Fig. 3 Wrinkle defects specimen

또한 wrinkle(주름) 형태의 구리 시트를 이용하여 프리프레그 사이에 삽입, 열처리한 후 표면으로부터 2.1 mm 깊이에 Fig. 3과 같은 wrinkle 결함을 제작하였다.

### 3. 적외선열화상 실험장치 구성

본 연구에서는 능동적 광 적외선열화상검사 방법을 이용하여 실험을 진행하였다. 광원으로 사용한 할로겐램프는 좌우 하나씩 출력 1 kW, 거리 1.5 m로 설치, 적외선 카메라는 프랑스 Cedip사의 Silver 480 m 모델(NEDT:25 mK)을 사용하였다.

적외선열화상의 검출 감도를 위하여 시험편 표면은 완전한 방사율 값이 1.0인 흑체에 가까운 조건을 만족시키기 위하여 검정색 무광 페인트를

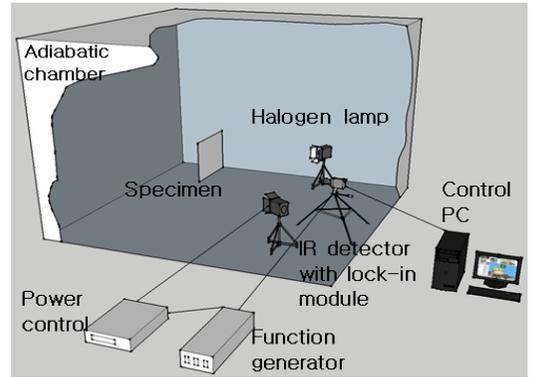


Fig. 4 Infrared thermography experiment system

일부 도포하였다[4,5]. 예비실험 결과 결함 검출에 있어 최적화된 200.0 mHz의 sine파로 가열하고 디지털 위상잠금(digital phase lock-in) 신호 처리 기술을 이용하여 블레이드 각각의 부분에 만들어둔 인공결함 검출을 진행하였다. Lock-in 주파수는 199.0 mHz로 가열주파수와 동기화 되지 않도록 설정하였다. 실험장치 구성은 Fig. 4와 같다[6].

### 4. 결함 크기 정량화

Fig. 5는 구리 박판을 삽입한 부분의 열화상을 나타내고 있다. Inclusion 결함시험편의 크기는 735.0 mm × 1000.0 mm이다. 열화상의 검은색 표면은 무광 페인트가 도포되어 있는 부분이다.

실험 결과 구리 박판이 삽입된 inclusion 결함 50.0 mm × 30.0 mm의 결함을 검출하였다. 또한 코어와 GFRP의 경계가 명확하여 결함의 위치를 정확히 판단할 수 있었다. Fig. 6은 블레이드 앞면 부분의 적외선열화상으로 내측에 존재하는 inclusion 결함을 나타낸다.

GFRP의 경우 육안으로 결함이 보일 수도 있지만 실제 블레이드의 경우 제작의 마지막 단계인 코팅 작업으로 내부의 결함을 육안으로 검출하기는 불가능하다. 이러한 점을 고려하여 현장과 동일한 조건을 유지하기 위하여 본 실험에서는 백색 깁코팅이 된 블레이드 표면에 무광의 검정색 페인트를 도포하지 않은 상태에서 결함을 검출하였다. 실험 결과 발사우드의 나이테가 나타날 정도로 선명하게 블레이드 내부를 파악할 수 있었으며, 특히 스파 부분의 접착을 열화상으로 확인할 수 있었다. Fig. 6과 같이 본 실험에서는

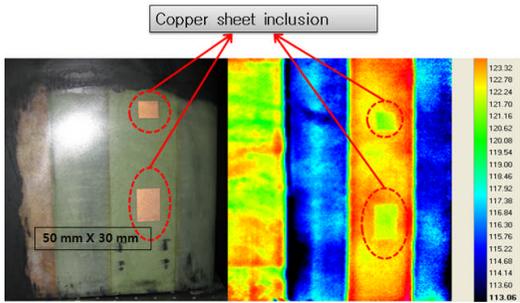


Fig. 5 Copper sheet inclusion defects

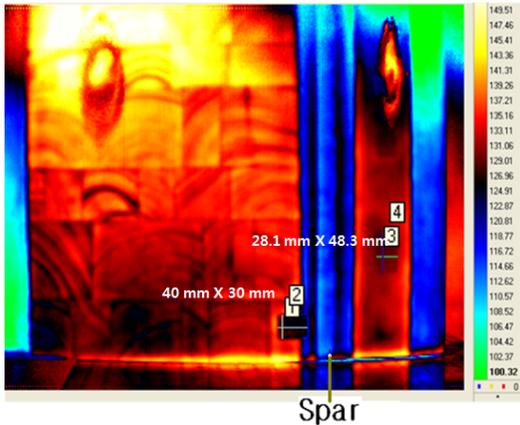


Fig. 6 Optical infrared thermography of inclusion defects

결함 크기 정량화를 위한 공간분해능 설정을 위해 적외선 반사가 뛰어난 알루미늄 켈리브레이션 테이프를 일정크기로 제작하여 부착하였다. 켈리브레이터 역할을 하는 알루미늄 켈리브레이션 테이프의 경우 가로, 세로 40.0 mm × 30.0 mm의 크기로 제작하였으며 실험하고자 하는 위치에 부착하여 사용하였다.

Fig. 6의 경우 1,2번으로 지시된 부분이 알루미늄 켈리브레이션 테이프이다. 공간분해능의 측정 결과 1 pixel이 2.0 mm의 치수를 나타냈고, 이를 활용하여 실제 결함으로 삽입한 3번과 4번의 크기를 측정하였다. 가로는 14 pixel, 세로는 24 pixel로 계측되어 공간분해능을 활용하여 계산한 결과 28.1 mm와 48.3 mm로 측정되었다.

실험 결과 1 pixel의 차이를 보였으며, 실제 결함 크기인 가로 30.0 mm와 세로 50.0 mm의 크기와 최대 1.9 mm의 차이를 보였다.

Fig. 7은 wrinkle 결함의 열화상을 나타내고 있다. Wrinkle 결함시험편의 크기는 735.0 mm ×

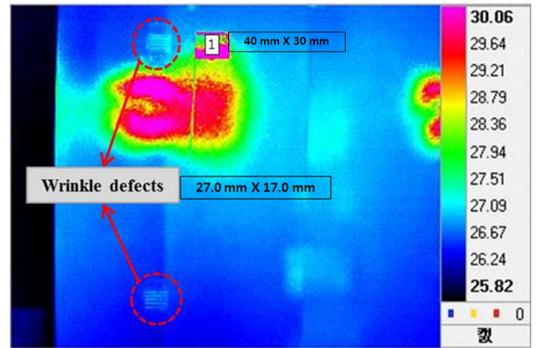


Fig. 7 Optical infrared thermography of wrinkle defects

Table 4 Quantitative detection of wrinkle defects

Size (mm)	Delamination defects	Wrinkle defects
	30.0×50.0	27.0×17.0
Quantitative defects	28.1×48.3	28.8×16.5

1000.0 mm이다. 1번으로 지시된 부분이 알루미늄 켈리브레이션 테이프이다. 공간분해능 측정 결과 1 pixel이 0.8 mm의 치수를 나타냈고, 결함의 픽셀수로 계산한 결과 가로 28.8 mm와 세로 16.5 mm로 측정되었다. 실제 결함 크기인 가로 27.0 mm와 세로 17.0 mm의 크기와 2.0 mm 이내의 차이를 보이는 것을 확인하였다. 붉은색으로 보이는 부분은 검정색 무광 페인트를 도포하지 않음으로 인한 할로젠 광원의 반사현상으로 해석된다. Table 4는 결함 크기 정량화의 결과를 나타내고 있다. 시험편의 결함 크기와 광 적외선열화상 방법을 통한 정량화 결과값은 최대 1.9 mm의 차이를 보였다.

Fig. 8과 같이 debonding 결함을 측정하기 위하여 2.0 MW급 풍력 블레이드를 이용하여 인공결함시험편을 제작한 후 결함 크기 정량화를 진행하였다. Debonding 결함시험편의 크기는 530.0 mm × 730.0 mm이다. 제작한 인공결함시험편을 이용하여 블레이드 표면을 원형 드릴 톱날로 정량적으로 절취한 후 내부를 1.0 mm 깊이 기공을 둔 상태로 가공하여 다시 GFRP 스킨을 덮어 에폭시로 부착하여 내부에 발생한 debonding 결함을 인공적으로 제작하였다. 결함의 크기는 5가지  $\phi 50.0$  mm,  $\phi 40.0$  mm,  $\phi 25.0$  mm,  $\phi 10.0$  mm,  $\phi 5.0$  mm 크기로 제작하였으며, 표면에 검정색 무광 페인트를 도포한 후 실험을 진행하였다.

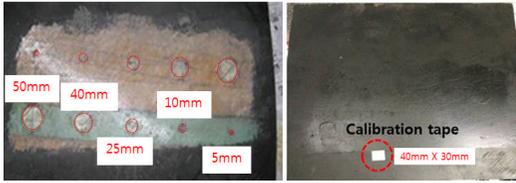


Fig. 8 The artificial defects specimen

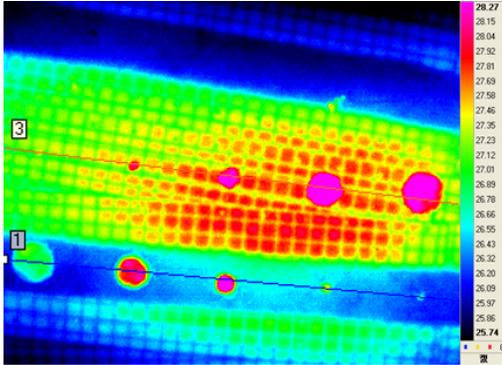


Fig. 9 Optical infrared thermography of debonding defects

결함 크기 정량화를 위해 알루미늄 캘리브레이션 테이프를 부착하였으며, 적외선열화상을 이용한 결함 검출 결과 Fig. 9와 같은 결함 열화상을 획득할 수 있었다. Fig. 10은 debonding 결함의 온도 프로파일이다. 그래프에서의 최대 피크점은 각 결함이 갖는 최대 온도값이다.

특별한 신호처리를 하지 않은 상태에서 온도 열화상만으로도 뛰어난 결함 열화상을 획득할 수 있었다. 결함 측정 결과 블레이드 내부의 PVC 코어에 위치한 결함의 경우 열확산으로 인해 결함 열화상의 구분에 제약이 발생하였다. 인공결함의 크기와 측정 결함의 크기는 Table 5와 같다. PVC 코어 위에 위치한 결함 열화상은 더욱 검출이 어려웠다. 열화상을 통한 각각의 크기 차이는 다르게 나타났으며, PVC 코어 위에 위치한 크기는 직경 5.0 mm로 결함 크기 정량화 결과는 결함 크기의 72.0%로 나타났다.

이는 1 Pixel 분해능에 따라 결함 치수가 작을수록 분해능이 떨어지는 것을 의미한다. Fig. 10은 debonding 결함의 크기에 따른 정량화 결과의 차이를 나타내고 있다.  $\phi 10.0$  mm 이상의 결함에서는 90.0% 이상의 높은 정확도를 보이지만  $\phi 5.0$  mm 결함에서는 72.0%의 상대적으로 낮은

Table 5 Quantitative detection of debonding defects

Size (mm)	50.0	40.0	25.0	10.0	5.0
PVC core	50.9	41.8	25.5	10.9	3.6
Spar	49.1	38.2	23.6	9.09	5.5

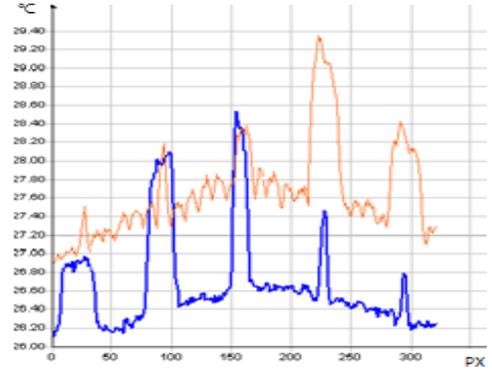


Fig. 10 Temperature profile of debonding defects

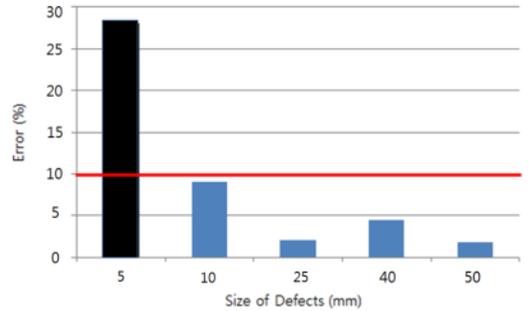


Fig. 11 Accuracy of quantitative detection of debonding defects

정확도를 보였다. 이는 1 pixel의 분해능은 일정하지만 작은 치수의 결함일수록 그에 따른 적은 수의 픽셀을 갖기 때문에 상대적으로 전체적인 결함의 차이가 커져 결함의 크기가 작을수록 인공결함시험편 결함과 실제 결함의 차이가 커진 것으로 판단된다[7].

### 5. 고찰

본 연구를 통하여 inclusion 결함과 debonding, wrinkle 결함 크기 정량화 결과 인공결함시험편의 실제 결함 크기와 2.0 mm 이내의 차이를 보여 광 적외선열화상기술이 결함 크기 정량화를

위한 우수한 비파괴검사 방법임을 확인하였다.

결합 크기 정량화에 오차를 발생시키는 인자로서 실험자에 의한 측정 오차, 재질의 특성에 따른 열확산 오차, 표면방사율에 따른 오차 등 여러가지 인자들의 복합적인 영향으로 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 특히 debonding 결합 크기 정량화 결과  $\phi$  10.0 mm 이하의 결합에서 급격하게 에러율이 높아지는 경향을 보였다. 이는 현재 광원을 이용한 적외선열화상 방법을 사용하였을 경우 광원의 세기와 주파수, 블레이드 재질의 영향 등에 따라 크기가 작은 결합일수록 에러가 높아지는 것으로 사료되며 향후 결합 정확도를 높이기 위해  $\phi$  10.0 mm 이하의 debonding 결합 크기 정량화를 위한 추가적인 연구와 광 적외선열화상기술 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서 실시한 광 적외선열화상기법에 의한 풍력 블레이드의 결합 크기 정량화 연구에 있어서 복합재료 소재의 특성에 따른 inclusion, wrinkle, debonding 결합 크기 정량화 결과는 다음과 같다.

- 1) 반사율을 극대화한 알루미늄 켈리브레이션 테이프를 제작하여 30.0 mm × 50.0 mm 크기의 inclusion 결합 크기 정량화를 통하여 1 pixel이 2.0 mm의 치수를 나타냈으며, 결합 크기와 비교하여 1 pixel의 차이를 보였다.
- 2) Wrinkle 결합의 공간분해능 측정 결과 1 pixel이 0.8 mm의 치수를 나타냈으며, 결합 크기 정량화 결과 28.8 mm × 16.5 mm의 크기로 실제 결합 크기인 27.0 mm × 17.0 mm과 2 pixel의 차이를 보였다.
- 3) 2.0 MW급 블레이드의 PVC 코어와 스파에 위치하는 5가지 크기의 debonding 인공결합을 ( $\phi$ 50.0 mm,  $\phi$ 40.0 mm,  $\phi$ 25.0 mm,  $\phi$ 10.0 mm,  $\phi$ 5.0 mm) 제작하여 실험한 결과 모든 결합을 검출할 수 있었으며, 결합 크기 정량화 결과  $\phi$ 50.0 mm의 결합에서 최대 98.0%의 정확성을 보였다.
- 4) Debonding 결합 크기 정량화 결과  $\phi$ 10.0 mm 크기 이상의 결합에서는 90.0% 이상의 높은 정확도를 보였지만,  $\phi$ 5.0 mm 결합에서는 1 pixel의

작은 공간분해능으로 인해 상대적으로 낮은 정확도를 보였다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20121620100020)이며, 미래창조과학부와 한국연구재단의 방사선기술개발사업으로 연구 지원한 (No.2013M2A2A9043706)의 결과물입니다.

## 참고문헌

- [1] A. Salerno, A. Dillenz, D. Wu, J. Rantala and G. Busse, "Progress in ultrasound lock-in thermography," in *Quantitative Infrared Thermography*, pp. 154-160, QIRT 98 (1999)
- [2] G. Gaussorgurs, "Infrared Thermography", Translated by S. Chomet, pp. 415-452, Chapman & Hall, London (1994)
- [3] X. P. V. Maldague, "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing," John Wiley&Sons, New York (2001)
- [4] 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)
- [5] V. P. Vavilov, "Infrared and thermal testing: heat transfer," *Nondestructive Testing Handbook Series III* (3rd Ed.), X. P. V. Maldague Maldague, P. O. Moore Ed., ASNT, Columbus, USA, pp. 54-86 (2001)
- [6] M. Y. Choi, H. S. Park, J. H. Park, W. T. Kim and W. J. Choi. "Study on the qualitative defects detection in composites by optical infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 31, No. 2, pp. 150-156(2011)
- [7] D. Wu and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703 (1998)