

적외선 열화상 비파괴기술 연구 동향 - 초음파 적외선 열화상 기술

Research Trends in Infrared Thermography NDT - Ultrasound Infrared Thermography Technology

박희상, 최만용(한국표준과학연구원 안전측정센터)

E-mail: moonring@kriss.re.kr

1. 소 개

초음파 적외선 열화상 (ultrasound infrared thermography; UIRT) 기술은 적외선 열화상 기술의 한 분야로 아직까지는 널리 알려지지 않은 기술이다. 초음파 적외선 열화상은 세계 각국의 연구진에 따라 기술의 명칭이 조금씩 차이가 존재하는데 그러한 명칭들에서 기술의 구현에 관한 힌트가 포함되어 있다. 대표적으로 나타내는 명칭은 ultrasound (ultrasonic) infrared thermography, thermosonics, vibrothermography, sonic infrared image 등으로 사용되고 있다. 이러한 명칭을 통하여 기술이 구현되는 원리가 대략 파악이 가능하다. 그러나 본 기술이 초음파 적외선이라고 불리는 이유는 대부분 사용되는 진동주파수가 20 kHz 대역의 가청주파수를 살짝 넘나드는 범위의 주파수를 이용하는 경우가 주로 사용되어 초음파 적외선 열화상으로 불리곤 한다. 그렇지만 앞선 명칭들에서 보듯 꼭 초음파를 활용하는 기술이 아닌 음파영역으로 그리고 진동을 활용하는 기술적 힌트를 내포하고 있다. 그러나 초음파, 음파, 진동은 결함을 나타내기 위한 에너지일 뿐 최종의 결함 데이터는 적외선 열화상 기술을 이용하여 결함을 검출하게 된다.

적외선 열화상 (infrared thermography) 기술을 이용한 비파괴검사는 의료, 발전, 전력, 항공, 복합재료 분야 등 그 활용범위가 점차 늘어가는 추세이다. 적외선 열화상은 기존의 비파괴검사보다 넓은 검사부위를 빠르게 시각적 이미지를 통하여

결과물을 얻을 수 있다는 점에서 새로운 적용분야로의 확대가 진행 중이다.

지금까지의 적외선 열화상 검사는 광범위한 구역의 이상 유무를 판정하는 시스템으로 산업 전반에 활용하여 왔지만, 최근 적외선 열화상을 이용한 비파괴검사 방법이 넓은 면적의 이상 유무의 판정만이 아닌 좀 더 좁은 구역에서 정밀한 비파괴검사 기술로 확대 응용되고 있다. 적외선 열화상 검사방법은 크게 두 가지 종류로 구분할 수 있는데 하나는 수동적(passive) 검사 방법으로 모든 물체가 방사하고 있는 고유의 적외선에너지를 검출하는 방법이고, 또 다른 하나는 능동적(active) 검사 방법으로 검사대상체에 외부의 에너지를 입사하여 검사대상체의 내부 조건에 따라 달라지는 방사에너지의 검출을 이용하는 방법으로 나뉘게 된다 [1,2]. 이러한 분류에서 초음파 적외선 열화상 기술은 검사 물체에 15~100 kHz 대역의 초음파를 입사시키면 결합부에서 발열이 일어나게 되고, 그 열원을 적외선 열화상 카메라를 이용하여 측정함으로써 결함을 검출하는 능동형 열화상 기술이다 [4]. 초음파 적외선 열화상 검사 기법은 음파의 영향이 미치는 면적을 동시에 검사할 수 있고, 크랙, 박리와 같은 결함부 만을 실시간으로 검출할 수 있어 자동차, 우주항공 분야의 산업에서 결함 검출 기술로 활용되고 있으며 최근에는 배관의 결함 검출에도 활용되고 있다 [5,6].

2. 초음파 적외선 열화상 기법

초음파 가진을 이용한 열화상검사 기법은 Fig. 1과 같이 짧은 초음파 펄스를 검사 시편에 인가하여 결함 부위에서 국부적인 열이 발생되도록 하여 결함을 검출한다. 적외선 열화상 카메라는 초음파 가진 인가 전, 후의 시간 경과에 따른 결함 부위의 발열현상의 진행 상황을 기록 저장하고 이를 영상 처리하여 검사 시편의 결함부를 찾아낸다 [5]. 초음파 에너지 입사에 의한 탄성파가 결함부위에 도달함과 동시에 발열 현상이 나타나게 되며, 발열의 에너지원은 주로 마찰열에 기인한다. 결함부위에 미세한 폭의 균열이 존재할 때 탄성파에 의하여 맞닿아 있는 균열부에서 마찰하며 운동을 하게 되며, 이때 발생하는 마찰열에 의하여 결함부에서 열점 (hot spot)이 나타나게 된다. 크랙 결함의 경우 크랙의 폭이 마찰열을 발생시키는데 중요한 변수로 작용한다[7]. 실험에 주로 사용되는 초음파의 대역은 20 kHz 대역 주파수로 초음파는 수십 cm의 파장 성분을 갖는다. 또한 파장 길이보다 훨씬 먼 거리를 진행할 경우에도 초음파는 충분한 진폭 에너지를 가지면서 전파된다. 이는 재료에 손실이 없을 경우 초음파는 감쇠 없이 수 파장 길이의 거리를 전파할 수 있다는 것을 의미하며, 고체의 음속의 속도는 수 km/s이다. 이와 같은 초음파의 특성은 본 실험에 사용되는 재료의 검사 영역을 음장 (sound field)이 완전히 포함됨을 의미한다. 고체에서 음향 진폭 감쇠는 음파 주파수의 제곱에 비례한다.

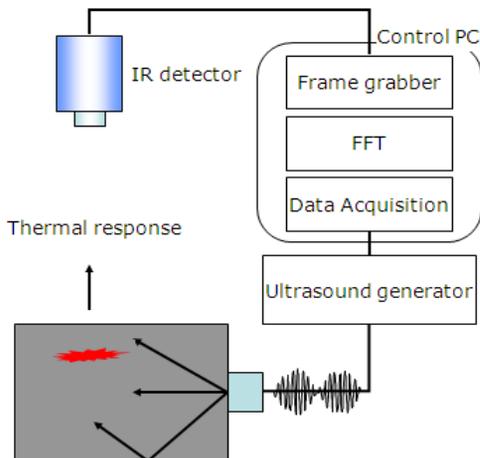


Fig. 1 초음파 적외선 열화상 시스템 구성

3. 비선형 마찰 메커니즘(Nonlinear Friction Mechanism)

적외선 열화상 검사는 넓은 폭의 균열이 아닌 초기균열에서 나타나는 결함 폭이 좁은 균열을 검사하는데 효과적인 기술이다. 초기균열은 대개 닫힘 균열로 생각되며 닫힘 균열은 소위 접촉 음향 비선형성 (contact acoustic nonlinearity; CAN)으로 불리는 비선형적인 거동을 나타낸다. 이러한 결함은 접촉하고 있는 두 계면의 변형특성이 극도로 비선형적이기 때문에 나타나는데 비선형 결함부의 단면을 확대해 보면 Fig. 2와 같이 표면 굴곡이 매우 불규칙하게 분포되어 있으며 이러한 면들의 미소 돌출부들이 횡파가 입사될 경우의 상대적인 운동을 방해하게 된다.

변형이 작을 경우에 이러한 상대운동은 근접한 돌출부에 의해서 마찰 저항을 받게 되고, 미끄러짐이 저지되게 되는데 이러한 운동은 마이크로 슬립 모드라고 정의 된다 (micro slip mode). 이 경우의 응력-변형률 곡선을 그려보면 Fig. 3에서와 같이 초기에는 미끄러짐이 발생하다 일정 변형 후에는 돌출부에 의해 접선방향으로 운동이 어렵게 되는 특징을 가지게 된다. 이러한 모드의 운

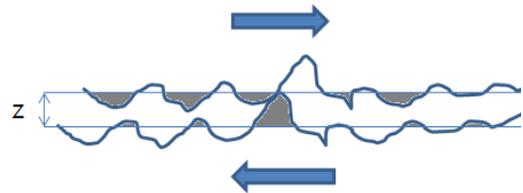


Fig. 2 접촉계면에서의 마찰 운동

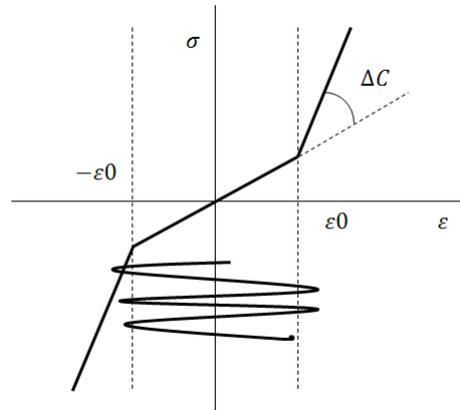


Fig. 3 마찰에 의한 비선형계면에서의 응력-변형률 특성

동은 전단력 방향에는 무관하며 한 주기의 변형 주기에 대해 두 번의 강성변화를 가지는 것이 특징이다. 비선형성에서는 횡방향 성분의 표면력이 정지 마찰력보다 크게 되면 마이크로 슬립 운동이 미끄럼 운동으로 변하게 되며 이러한 결합에 횡파 초음파가 입사될 경우 마이크로 슬립과 미끄럼 운동이 반복적으로 일어난다. 이 과정은 비가역적인 과정이어서 한 주기 동안의 응력-변형을 곡선을 그려보면 강한 히스테리시스 특성이 나타난다. 마이크로 슬립과정 동안의 계면 강성계수는 정지 마찰계수에 의해 결정되고 미끄럼 운동(sliding)에서는 동마찰계수(dynamic friction coefficient)에 의해 결정된다고 알려져 있다 [8]. 이러한 마찰 메커니즘은 초음파 적외선 열화상의 발열 특성을 연구하는데 기초가 된다.

4. 발열 메커니즘

단일 주파수만을 고려하여 발열 메커니즘을 분석하였을 때 물체에 입사된 고출력의 초음파는 균열부에서 Fig. 4와 같이 3개의 모드 형태로 나타나는 것으로 예측할 수 있다. 이를 발열 메커니즘 측면에서 살펴보면, 모드 I는 개구형 모드로서 균열 첨단부에서 응력집중이 발생하고 발열은 열-기계 연성효과가 주요한 원인이라 예측할 수 있다. 또한, 모드 II(면내 전단형)와 모드 III(면외 전단형)은 균열 첨단부에서 응력집중보다는 계면 사이의 마찰이 주요한 원인이라 가정할 수 있다. 두 가지의 발열 메커니즘을 바탕으로 초음파 가진에 의한 균열부에서 온도 변화를 식(1)과 같이 세울 수 있다. 여기에서 외부 열교환과 전도와 대류에 의한 손실을 무시하였다[9].

$$\Delta T = T_M + T_F \tag{1}$$

여기에서, ΔT 는 균열부의 온도변화, T_M 는 열-기계 연성효과에 의한 온도변화, T_F 는 마찰에 의한 온도변화이다.

결합에서 발열이 열-기계 연성효과가 기여하지 못하고 계면 사이의 마찰이 주요한 원인으로 보았을 때, 상대운동을 하는 계면 사이의 마찰에 의한 순간 최대 온도변화는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[10].

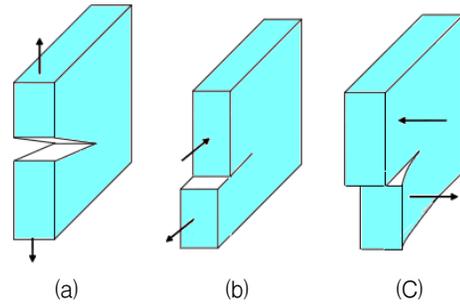


Fig. 4 진동시 크랙의 거동 (a)모드I (b)모드II (c)모드III

$$T_F = \frac{C\mu\sqrt{v_r}}{\sqrt{b}\sqrt{k\rho c_p}} \tag{2}$$

여기에서 C는 마찰면의 형상계수, μ 는 마찰계수, p는 단위길이 당 접촉력(N/m), v_r 는 상대속도, b는 접촉 길이, k는 열전도계수, ρ 는 밀도, c_p 는 정압 비열이다. 식(2)는 1회 마찰에 따른 온도변화를 나타낸 방정식으로 초음파 가진의 경우에는 f는 초음파 주파수를 τ 는 초음파 가진시간을 나타내며, 반복회수, $n = (f \cdot \tau)$ 을 고려하여야 한다.

두 계면 사이의 상대속도, v_r 은 초음파 발진자의 최대진폭을 α 라 할 때, 상대속도는 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$v_r = \alpha \cdot 2\pi \cdot f \tag{3}$$

또한, 단위길이 당 접촉력(선접촉력), p는 Fig. 5와 같이 결합면의 수직으로 작용하는 초기 선접촉력, p_0 와 초음파 가진에 의해 조화함수 형태로 변하는 선접촉력, Δp 가 작용하는 것으로 볼 수 있으며, 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$p = p_0 + \Delta p \cos \omega t \tag{4}$$

여기에서 Δp 의 방향은 균열 계면과 수직방향이므로 실질적으로 선접촉력으로서 100% 기여를 하지 못하고 입사된 초음파의 일부만이 선접촉력으로서 기여하게 된다.

Δp 의 성분 중 온도변화에 기여할 수 있는 접촉력 성분(p_0 와 같은 방향)만을 Δp_c 라고 하면, 가진시간과 반복회수를 고려하여 식(5)를 얻을 수 있다.

$$T_F = n \cdot \frac{C\mu b|\sqrt{v_r}|}{\sqrt{b}\sqrt{k\rho c_p}} \cdot \int_0^\tau p_0 + \Delta p_e \cos \omega t dt \quad (5)$$

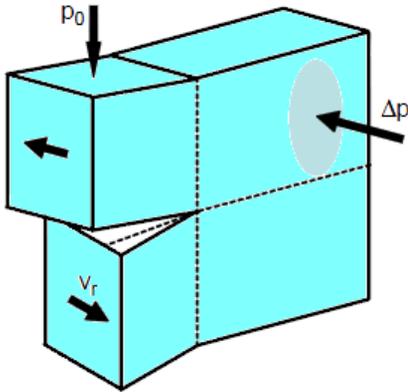


Fig. 5 접촉력이 가해질 때의 마찰계면

5. 초음파 적외선 NDT

5.1. 가진력이 피로균열 시험편의 결함 검출 영향

초음파 적외선 열화상 기술은 비교적 간단하게 시험장치 구성으로 빠른 시간 내에 결함을 검출할 수 있으나, 아직까지는 검출능과 관련된 인자들이 최적화되지 않아 검사자의 경험에 의존하여 검사를 수행하는 경우가 많다.

지금까지 밝혀진 영향인자들로는 가진되는 초음파의 주파수와 출력, 주기, 시간, 가진위치, 결합형태, 시험편과 가진장치의 접촉방법, 접촉력 등이 있다. 앞선 연구결과 등을 통하여 초음파 가진에 따른 결함 열반응이 마찰임을 고려할 때, 여러 가지 변수 중 같은 결함 조건에서 시험편과 가진장치 사이의 접촉력이 중요한 역할을 한다는 것을 식(5)를 통하여 알 수 있으며, 접촉력에 따른 검출능을 실험을 통하여 평가하였다. 실제 초음파 가진시 가진 주파수와 초음파 파형의 측정하기 위한 장치로 레이저 변위 센서나, 마이크로폰, 광섬유 센서 등을 사용할 경우 최적의 가진 주파수를 검출하여 활용할 수 있다. 시험장치의 전체 구성은 접촉력을 특정하기 위해 초음파 가진장치에 로드셀을 설치하여 접촉력을 변화하면서 검사를 수행하였다.

접촉력을 0, 10, 20, 30, 40 kgf으로 변화하면서 결함을 검출하였으며, 가진위치 및 가진각도는

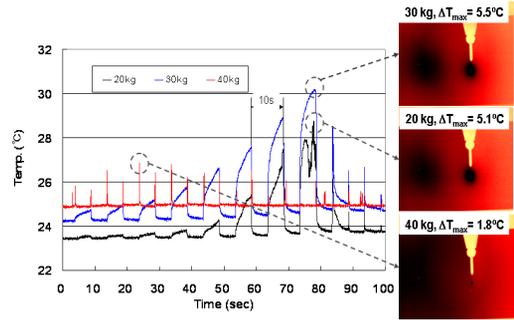


Fig. 6 가진력과 가진주기에 따른 피로균열 시험편의 온도 변화

항상 일정하도록 고정하였다. 0 kg은 시험편에 가진장치가 단순히 접촉하는 상태로 가진력이 전달되지 않는 경우이며, 10 kg의 경우 접촉력이 약해 에너지가 결합까지 전달되지 못한 것으로 생각된다. Fig. 6은 가진주기에 따라 온도변화가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 가진 전후의 상대온도차는 30 kgf에서 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

접촉력이 40 kgf의 경우 온도변화는 발생하였으나, 발열현상이 매우 짧게 나타나게 되며, 이는 낮은 frame rate를 갖는 적외선 카메라로 검사 시에 검출되지 않을 가능성이 있게 된다. 이러한 현상은 초음파 발진자에 압축력이 발생하면서 발진자의 공진조건이 바뀌게 되고 이는 초음파를 발진할 수 없는 상태가 되는 것으로 추측된다. 접촉력이 20 kgf의 경우, 30 kgf에 비해 상대 온도차가 작지만 검출 가능한 충분한 온도변화가 있는 것을 알 수 있다. 초음파 가진이 8회 이후에는 발열현상이 불규칙적으로 변화하는데 이는 초음파 발진자가 발열이 되면서 공진특성이 변화하는 것으로 예상된다.

또한, 접촉력 20 kgf과 30 kgf에서 최대 발열지점의 열화상 이미지를 보여주고 있으며, 이때 건전부와 상대온도차는 각각 5.1 °C와 5.5 °C이다. 시험결과로부터 20~30 kgf이 검사를 위한 최적 접촉력임을 알 수 있다.

5.2. 용접부의 결함 검출

대부분의 용접구조물에는 다양한 용접 결함이 용접부를 중심으로 존재하거나 생성되곤 한다.

Table 1 Carbon steel specimen data

시편 번호	직경	두께	용접부 표면	결 함		
				길이	깊이	위치
A	2"	0.218"	Crown	0.449"	0.157"	-
B	4"	0.345"	Flushed	0.639"	0.259"	-
				0.189"	0.066"	-
C	6"	0.369"	Crown	0.430"	0.156"	-
				1.025"	0.303"	-

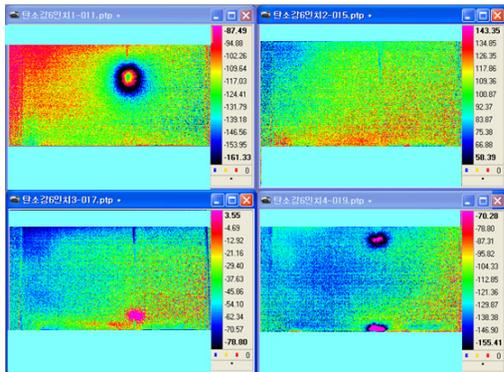


Fig. 7 탄소강 6인치 배관 용접부의 위상잠금 결함 검출 열화상 이미지

특히 용접부에서 발생하는 다양한 결함 중 저온취성, 고온취성, 수소취성 등 취성과괴에 의한 미세균열과 열피로와 열충격에 의한 열영향부 또는 용융부에서 발생하는 다양한 결함들이 존재하게 된다. 이러한 용접부의 미세결함을 초음파 적외선 열화상 방법을 이용하여 결함을 검출하였다. 시험편으로 사용된 재질은 탄소강 재질의 용접배관 시험편으로 Table 1과 같은 결함이 존재하는 시험편이다.

탄소강 시편 3개에 대한 실험 결과 Table 1에 나타나 있는 5개의 결함을 모두 검출하였다. 결함 길이 범위 4.8~26.0 mm, 결함 깊이 범위 1.68~7.7 mm, 표면에서 깊이 범위 1.55~7.08 mm 까지의 균열결함에 대하여 용접부 표면가공 상태에 상관없이 검출 가능함을 확인하였으며, 결함 신호와 주변 건전부위의 온도차는 0.25~0.5 °C 이었다[11].

배관을 90 ° 각도로 회전시키며 배관의 후면에 초음파 가진을 하였을 때 Fig. 7과 같은 위상 잠금 열화상 이미지를 통하여 결함을 검출 할 수 있었다. 초음파 적외선 열화상의 경우 발열이 미

세하게 발생하는 경우가 많이 나타나므로 이와 같은 결함을 검출하는 방법으로 위상 잠금(lock-in) 적외선 열화상 방법이 사용된다. 위상잠금 적외선 열화상 기술에서 결함 정보를 추출하는 데는 반사된 적외선 변조파의 크기와 위상을 모두 사용할 수 있지만 위상정보는 특히 국부적인 표면 방사율(surface emissivity)의 변화에 둔감한 특성을 가지고 있어 초음파 적외선 열화상과 같이 재질과 발열부의 온도차가 크지 않아 노이즈가 많이 발생하는 부분에 효과적으로 사용 가능하다.

위상 잠금 열화상 방법으로 주로 사용되는 방법은 fourier transform method (FTM), four point correlation method (FPCM), digital lock in correlation method (DLICM) 등이 사용되며 각각의 알고리즘마다 노이즈 처리와 시간과의 상관관계에 따라 유용성이 다르게 나타난다[12].

5.3. 복합재료의 결함 검출

적외선 열화상 비파괴검사에 주로 사용되는 에너지원은 할로겐(halogen) 램프와 같은 광원이 주로 사용되고 있으나, 외부에게 광원을 조사할 경우 광원에 의한 열에너지가 검사 대상체에 열전달로 진행된 후 결함부에서 방출되는 열에너지가 다시 표면으로 방출될 때 검출하는 방법을 사용하게 된다. 하지만 초음파 적외선 열화상의 경우 결함부에서 발생한 열원이 검사 대상체 표면까지 열이 전달되는 방법으로, 열원이 침투에 한계가 있는 재질의 검사에 활용이 가능한 장점 있다. Fig. 8은 1.4 mm 두께의 GFRP 복합재료 내부(62.5%, 12.5%)에 위치한 테프론(teflon) 계재물(inclusion) 인공결함 시험편의 상세도이다.

Fig. 9(a)는 광적외선 방법으로 검출한 이미지이고, Fig. 9(b)는 초음파 적외선 열화상을 이용한 방법으로 나타난 이미지를 보여주고 있다. 적외선 열화상 결함 검출 방법을 활용되었을 때 가장 깊은 부분의 결함은 나타나지 않았지만, 초음파 적외선으로 가진 하였을 때에는 바닥면에 가까운 12.5% 의 깊은 부분의 결함을 검출하는 결과를 나타냈었다.

그러나 상대적으로 표면에 가까운 부분인 62.5%의 결함형태는 일부는 나타났지만 전체적으로 결함을 검출해내지는 못하였다. 이러한 결

과는 내부에 삽입된 테프론 필름과 이형된 GFRP와의 접착 정도에 의한 영향으로 상대적으로 테프론 필름과 이형이 많이 일어나 12.5% 깊이의 결함은 검출이 용이하였으나, 테프론 필름과 이형이 덜 일어난 62.5% 깊이의 결함은 표면에 상대적으로 가까이 위치하였지만 결함의 검출이 용이하지 않음을 나타냈다.

또한, 초음파 공구흔이 접촉하는 부분에서는 접촉한 상태에서 가진이 일어나므로 높은 열이 발생하여 시험편의 정중앙에서 발열이 일어나는 이미지를 보였으며 음파에 따라 발생한 진동의 파형이 시험편에 노이즈로 나타나는 이미지를 보였다.

실제 초음파 적외선 열화상을 이용한 복합재료의 시험은 임팩트 데미지를 입은 복합재료 내부의 미세균열을 찾는데 효과적으로 사용되고 있으며[13], 복합재료의 가장 치명적인 결함이라 할 수 있는 박리(delamination) 결함을 검출하는데 효과적인 기술로 활용범위가 점차 확대되고 있다.

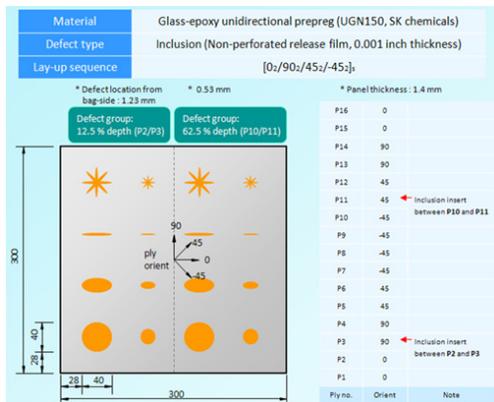
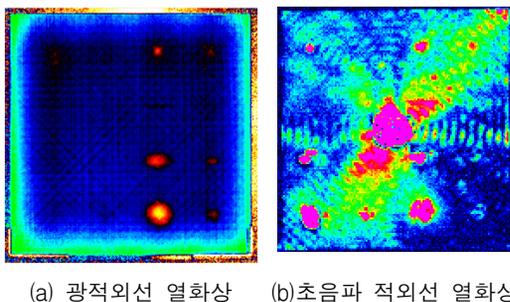


Fig. 8 GFRP 테프론 Inclusion 인공결함 시험편



(a) 광적외선 열화상 (b) 초음파 적외선 열화상

Fig. 9 GFRP의 광적외선 열화상과 초음파 적외선 열화상의 결함 검출 비교

6. 맺음말

초음파 적외선 열화상 검사 방법은 적외선 열화상 비파괴검사 방법 중 비교적 널리 알려지지 않은 검사 방법이다. 대부분의 비파괴검사 방법이 거시적인 결함을 쉽게 검출하는 것과 달리 본 기술은 미시적인 결함을 검출하는데 활용도가 높은 기술이다. 이러한 기술적 특성을 이용하여 큰 결함으로 진전되기 이전 단계인 미세한 결함을 검출하는 방법으로 본 기술은 현재까지도 연구되고 있으며, 특히 해외에서는 도시 구조물의 안전성 유지[14], 자동차의 용접부, 터빈블레이드의 결함 검출에 일부 이용되고 있다. 현재 국내에서는 한국표준과학연구원, 한국원자력연구소, 조선대학교 등의 기관에서 연구 중에 있으나 아직 산업적으로 활용하는 데는 어려움이 따르고 있다. 그중 가장 제약이 되는 부분은 가진을 발생시키는 가진장치로 사용되는 압전소자의 출력 제한과 더불어 초음파가 실제 구조물에 가진될 때 나타나는 특성이 항상 일정하지 못함에 따른 결함 검출 성능의 편차가 큰 문제가 되고 있다. 그러나 새로운 가진 방법 및 가진 에너지의 연구 및 기술 개발이 이루어진다면 새로운 비파괴검사 기술로 세계적 기술을 오히려 선도해 나갈 수 있는 활용가치가 높은 기술로 거듭나리라 판단된다.

참고문헌

- [1] R. B. Mognogna, R. E. Green Jr., J. C. Duke Jr., E. G. Henneke II and K. L. Reifsnider, "Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials," *Ultrasonics*, Vol. 19, pp. 159-163 (1981)
- [2] Mingcheng Zong, Jianxin Zhang and Yan Zhao, "Pulse-heating infrared thermography non-destructive testing technique," *SPIE*, Vol. 2899, pp. 654-659 (1996)
- [4] A. Dillenz, A. Salerno, D. Wu, J. Rantala and G. Busse, "Progress in ultrasonic lock-in thermography," *QIRT 98*, pp. 154-160 (1988)
- [5] G. Buss, D. Wu and W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *J. Appl. Phys.*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965 (1992)

- [6] H. S. Park, M. Y. Choi, J. H. Park and S. S. Lee, "Using ultrasound infrared thermography to detect defects in pipes," *QIRT* 10, pp. 761-762 (2010)
- [7] Jeremy Renshaw, Stephen D. Holland and R. Bruce Thompson, "Measurement of crack opening stresses and crack closure stress profiles from heat generation in vibrating cracks," *Applied Physics Letters* 93, 081914 (2008)
- [8] N. Y. Kim, "Frequency modulation of ultrasound by nonlinear defects," *Journal of KSNT*, Vol. 31, No. 6, pp. 679 (2011)
- [9] ManYong. Choi, SeungSeok. Lee, JeongHak. Park, WonTae. Kim and KiSoo. Kang, "Analysis of heat generation mechanism in ultrasound infrared thermo- aphy," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 29, No. 1, pp. 10-14 (2009)
- [10] M. Taburdagitan and M. Akkok, "Determination of surface temperature rise with thermoelastic analysis of spur gears," *Wear*, Vol. 261, pp. 656-665 (2006)
- [11] WangBae Kim, ByungSik Yoon and ManYong Choi, HeeSang Park, "A feasibility study for application of ultrasound-infrared thermography NDE technique in NPPs," *KPVP, Conf. Proc.* (2011)
- [12] Nohyu Kim, "Phase-extraction algorithm over a lock-in infrared thermography," *Journal of KSNT*, Vol. 31, No. 2, pp. 189-192 (2010)
- [13] Selina X. Zhao, Xiaoyan Han, Lawrence D. Favro, Golam. Newaz and Robert L. Thomas, "Composite delamination depth profiling in sonic-ir imaging," *AIP Conf. Proc.* 1430, 533 (2012)
- [14] Qi He and Xiaoyan Han, "Application of sonic IR imaging in civil structure health assurance," *AIP Conf. Proc.* 1430, 540 (2012)