

초음파가진 열화상시험 시 가진된 진동 신호 특성 연구

A Study on the Characteristics of the Excited Vibration Signals in a Thermosonic Test

강부영

Bubyoung Kang

초 록 초음파가진 열화상시험 중 가진 방법이 시편에 가진된 진동의 시스템 응답 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 복잡한 형상을 가진 터빈 블레이드 시편에 가진된 진동의 특성을 분석하기 위하여 고출력의 가진이 가능한 초음파 혼이 사용되었다. 초음파 혼에 입력되는 신호의 특성이 가진된 진동의 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였고 블레이드를 클램프에 고정된 후 가진기와 클램프를 연결하는 방법이 진동 신호에 미치는 영향에 대해서도 연구하였다. 연구 결과를 통하여 칩(chirp) 입력신호와 볼트를 사용하여 클램프와 혼을 연결하는 방법을 가진 방법으로 제안하였다. 이러한 가진 방법은 다양한 종류의 터빈 블레이드 뿐만 아니라 다른 기계부품들의 시험에 적용될 수 있다.

주요용어: 음파가진 열화상법, 초음파 혼, 터빈 블레이드 검사, 가진 신호, 칩 테스트

Abstract The characteristics of the responses obtained in thermosonic tests are investigated in this study to improve the performance of a thermosonic test system. Thermosonic tests are conducted with an acoustic horn with high power capability to investigate the characteristics of the vibration produced in turbine blades with complex geometry. The influences of the excitation signal that is input to the horn and the coupling methods between a clamp and the acoustic horn on the characteristics of the vibration excited in a component are presented. As a result, an excitation method with a fast narrow band chirp test (sweep test) and a stud coupling is proposed as an excitation method for thermosonic testing. This method can be applied to different types of turbine blades and also to other components.

Keywords: Thermosonics, Acoustic Horn, Turbine Blade Inspection, Excitation Signal, Chirp Test

1. 서 론

서모소닉(thermosonics)은 적외선 열화상을 이용하는 비파괴검사 방법 중의 하나이다[1]. 균열 또는 면 접촉을 가진 결함이 물체 내에 존재 할 경우 이런 물체에 고주파 진동이나 저주파 대역의 초음파(20-100 kHz)를 입사시키면 균열이나 결함 부위의 표면에 국부적인 열이 발생한다. 발생된

열은 물체 내외 표면에 온도장을 형성시키고 이 온도장을 적외선 열화상 카메라로 관측하여 물체 내의 결함을 진단하는 방법이 서모소닉이다. 서모소닉은 초음파 서모그라피, 소닉 적외선 열화상법(sonic infrared imaging)이라고도 불리고 있다. 서모소닉을 포함한 적외선 열화상 기술은 주로 항공기 등의 복합재 재료 검사에 효과적으로 사용될 수 있음이 보고되어 있다[2,3]. 국내에도 다

양한 분야에서 적외선 열화상법을 이용한 결함 검출 방법에 대한 연구가 활발해지고 있다[4,5]. 최근에는 항공기 가스 터빈 엔진에 사용되는 복잡한 형상의 터빈 블레이드나 팬 블레이드 검사에 서모소닉법을 적용하기 위한 연구가 항공기 엔진회사를 중심으로 활발히 이루어지고 있다[6]. 특히 신속하게 열의 확산이 발생하는 금속계 부품의 크랙 검출의 경우 짧은 시간에 초음파 펄스를 활용하여 실험체를 가진하는 서모소닉법이 효과적인 것으로 알려져 있다. 전 세계적으로 터빈 블레이드 검사를 위한 많은 방법들이 연구되고 있다. 현재 블레이드 표면결합의 진단을 위해서 현장에서 가장 많이 쓰이고 있는 방법은 자분탐상(magnetic particle inspection)이나 FPI (fluorescent penetrant inspection)법이다[7]. 그러나 이 방법들은 시험 전 표면의 청소 및 검사 후 처리를 위해 많은 시간과 비용이 요구되고 검사 절차 또한 간편하지 않다. 모든 검사 절차의 자동화에 대한 요구가 커지고 있는 시대에 이 방법은 자동화에도 문제점이 있고 인적 요인(human factors)에 의존하기 때문에 신뢰성 확보의 문제도 있다. 서모소닉은 검사 시간이 매우 짧고 터빈 블레이드와 같이 복잡한 형상을 가진 구조물의 검사에 효과적으로 적용 될 수 있다는 장점이 있다. 또한 이 방법은 열화상 이미지를 이용하기 때문에 최근 발전한 이미지 처리 기술을 접목하면 자동화도 가능하다.

서모소닉이 다양한 부품들의 결함 검사에 효과적으로 사용될 수 있지만 아직도 신뢰성에 대한 의문이 남아 있다. 신뢰성에 대한 의문은 시험중 시험체내에 구현되는 진동의 비재현성에 기인한다. 이런 비재현성은 가진시스템(초음파 혼)과 시편 사이의 연결에서 발생하는 비선형성 때문이다. 이 문제는 결함의 검출에 필요한 크기의 진동 에너지가 결함이 위치한 장소에 가진 되지 않으면 결함이 검출되지 않을 수 있다는 것이다. 결과적으로 서모소닉법의 신뢰성 문제는 가진시 시험 대상체에 구현되는 진동장의 특성과 관계가 있고 주어진 결함에 대해서 정량적으로 어느 정도의 진동의 크기가 필요한가라는 질문과도 관계가 있다. 만일 가진 방법의 신뢰성에 대한 문제가 해결된다면 서모소닉은 다양한 산업분야에서 더 활발히 적용되게 될 것이다. 이러한 관점에서 서모소닉의 신뢰성을 향상시키기 위한 방법에 대

한 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 Rothenfusser 등과[8] Morbidini 등이[9] 이런 신뢰성 문제를 해결하기 위한 보정 시험절차에 대하여 연구하였다. Rothenfusser는 시험중 시험체에 부착한 특정 재료의 온도 응답을 측정하여 충분한 가진이 이루어 졌는지를 판단하였고 Morbidini 등은 시험중 측정한 진동신호로부터 단일 파라미터를 계산하여 충분한 가진이 이루어 졌는지를 판단하는 방법을 제안하였다. 두 방법 모두 결함검출에 필요한 임계치를 설정하여서 매 시험마다 임계치와 비교를 통하여 충분한 가진이 되었는지를 판단하는 과정을 갖는다는 점에서 유사하다.

본 논문은 특히 시험중 시편에 가진된 진동특성을 중요한 파라미터로 제안한 Morbidini의 제안에 관심을 두고 연구를 진행하였다. Morbidini 등[9]은 발열지수(HI, heating index)라 불리는 파라미터를 계산하여 가진 성능의 평가에 활용하였다. 발열지수의 장점은 진동신호와 크랙에서 발생한 열간에 상관 관계가 있어 진동신호 분석을 통하여 충분한 가진이 이루어졌는지를 평가할 수 있다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 서모소닉 시험중 시험편에 발생하는 진동의 특성과 결함검출 성능과의 관계에 대하여 분석하였다. 특히 초음파 혼의 입력 신호 및 혼과 시편의 연결 방법 등이 진동 신호 특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 아직 보고된 것이 없다. 따라서 신뢰성을 향상시키기 위한 가진 방법을 찾기 위하여 서로 다른 가진 방법이 진동특성에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 개발된 방법의 현장 적용성을 높이기 위하여 시험은 복잡한 형상을 가진 항공기용 터빈 블레이드를 활용하여 수행하였다.

2. 관련 이론 및 실험 방법

2.1. 진동 신호와 온도와의 상관관계

초음파 가진중에 측정되는 온도를 예측하고자 하는 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다[10,11]. 특히 진동신호와 온도 사이의 상관관계를 찾고자 하는 연구 결과는 초음파 가진 열화상법의 기초 물성을 이해하는데 기여하였다. 초음파 가진 열화상법에 대한 이해도의 증가는 결국 이 검사 방법의 신뢰성 향상에 기여하였다.

물체에 진동이 가해지면 구조 댐핑에 의하여 진동에너지가 열로 발산하여 열이 발생한다[12]. 만약 물체내에 크랙과 같은 결함이 존재하면 국부적인 댐핑이 증가하여 온도 최대점은 크랙이 위치한 곳이 된다[13]. 크랙으로 인한 온도 상승은 결국 크랙에 의하여 발산된 에너지에 비례한다. Morbidini 등은 크랙으로부터 발산되는 파워와 비례하여 온도 상승값을 대표할 수 있는 발열지수를 제안하였다[10]. Morbidini 등이 제안한 발열지수는 결국 온도상승 값에 영향을 미치는 발산 에너지는 진동 스트레인의 제곱에 비례하고 진동 주파수에 비례하며, 전체 에너지는 각 주파수성분의 기여도의 총합과 같다는 것을 보여준다. Morbidini 등은 제안한 발열지수가 크랙에서 측정된 온도변화와 유사한 패턴으로 변한다는 것을 여러 시험을 통하여 확인하였다[10]. 이 결과는 결국 초음파 가진시에 측정된 진동신호로부터 결함부위 온도변화를 계산해 낼 수 있다는 것을 보여준다. 또한 마찰에 의해 열이 발생한다는 가정 아래 구한 온도 예측 결과가 실제 온도변화와 유사하다는 것은 초음파가진 열화상 시험시 발생하는 온도상승이 결함부위의 마찰에 의해 발생하는 열에 의한 것임을 보여주는 결과이기도 하다. Morbidini 등은 앞에 설명한 발열지수를 활용하

여 매 시험마다 충분한 가진이 발생하였는지를 판단하는 시험절차를 제시하였다[14]. 이런 절차를 사용함으로써 초음파가진 열화상법의 신뢰성을 향상 시킬 수 있다. 하지만 때로는 단일 주파수가 지배적인 가진이 발생하여 진동 모드의 노드점에 위치한 크랙을 발견하지 못할 수도 있다. 따라서 두 개 이상의 다수의 공진주파수에서 비슷한 크기의 가진이 수행되도록 하여 미지의 장소에 존재하는 모든 크랙이나 결함들이 검출될 수 있도록 하는 것이 신뢰성 확보 측면에서 중요하다. 따라서 본 연구에서는 가진된 진동신호의 주파수 특성을 분석하여 초음파가진 열화상법의 신뢰성을 평가하고 신뢰성을 높일 수 있는 가진 방법을 찾고자 하였다

2.2. 실험 방법 및 실험 장치

Fig. 1은 터빈블레이드 검사용으로 제안된 시험장치를 보여준다. 본 연구에 사용된 터빈 블레이드는 대형 여객기 엔진 부품 중 최고로 높은 온도와 압력에 노출되어 사용되는 터빈블레이드(Stage-1 high pressure turbine blade)이다. 블레이드는 니켈계 단결정 초내열합금(CMSX4)이고 클램프는 일반 탄소강으로 제작되었다. 초기 진동 특성의 시험에는 새 시편을 사용하여 시험하였고 크랙의 검출 성능을 평가하기 위해서는 실제 사용 중 크랙이 발생한 시편을 사용하였다. 초음파 혼은 일반적으로 힘에 의해 시편에 접촉시키고 시편의 표면 손상을 막고 혼의 끝단이 시험중 움직이는 것을 방지하기 위하여 절연 테이프나 얇은 알루미늄 테이프 등과 같은 매개 물질이 사용된다. 그러나 터빈블레이드와 같이 표면이 곡면으로 이루어져 있고 형상이 복잡한 경우 직접 혼의 끝단을 시편에 고정시키고 충분한 크기의 진동 에너지를 시편에 전달하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 클램프를 제작하여 사용하였고 초음파 혼은 클램프의 평탄한 면에 접촉시켰다. 클램프는 Fig. 1에서와 같이 터빈 블레이드의 뿌리(root)부 형상과 유사한 패턴을 가진 홈을 가지고 있어 블레이드가 고정될 수 있도록 하였다. 터빈블레이드는 클램프에 구속되어 있고 초음파 가진기의 혼(horn)을 클램프에 연결하여 진동 에너지를 전달하는 구조이다. Fig. 2는 혼(acoustic horn)의 연결방법에 따른

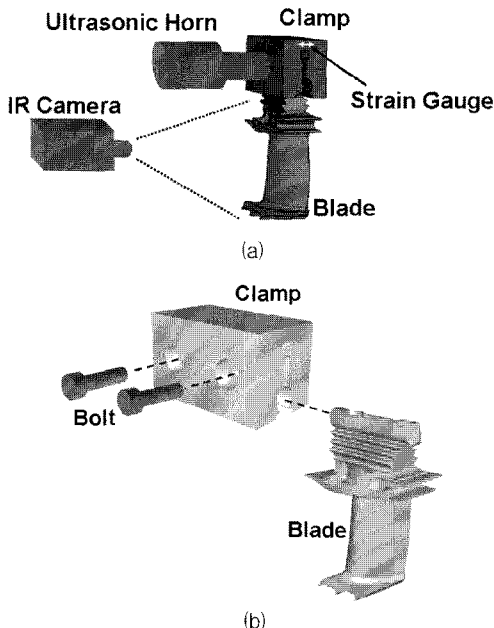


Fig. 1 Proposed thermosonic test setup for turbine blades, (a) Thermosonic test setup, (b) Clamp for fixing blade

시험장치의 구성을 보여준다. 블레이드는 Fig. 1에서와 같이 클램프에 구속되어 있다. Fig. 2(a)에서는 혼이 스프링력에 의해 클램프에 접촉되어 있고 Fig. 2(b)에서는 볼트에 의해 클램프에 구속되어 있다. 볼트를 사용한 경우 볼트 구멍은 16 mm의 직경을 갖는 혼의 끝단과 클램프에 직경 5 mm의 볼트를 사용할 수 있도록 가공하였다. 스프링으로 연결한 경우보다 볼트를 사용한 경우 복잡한 주변 장치가 필요없어 실험장치가 단순해지는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 특히 초음파 혼의 입력 신호로써 첩신호를 사용할 경우의 진동신호의 특성 및 가진 성능에 대하여 연구하였다. Fig. 3은 첩시험에 사용된 시험장치와 신호처리과정의 개략도를 보여준다. 첩가진은 파형 발생기(Agilent 33220A)로부터 첩신호를 발생시켜 파워 앰프(AG 1012)에 입력하여 얻어졌다. 파워 앰프로부터 초음파 혼에 특정 주파수 특성을 갖는 전압을 전달시켜 첩가진을 수행하였다. 가진시스템은 일반적으로 초음파 용접에 사용되는 초음파 혼이 사용된다. 본 연구에는 공진주파수가 40 kHz인 초음파 용

접용으로 판매되는 Sonotronics사의 제품이 사용되었다. 파워 공급에 사용되는 제너레이터는 최대 400 W의 파워공급이 가능하다. 진동의 측정을 위해서 본 연구에서는 Polytech OFV 552 레이저 진동계가 사용되었다. 적외선 카메라는 CEDIP사의 제품(Jade)으로 온도분해능은 30 mK 이고 화소의 크기는 320 × 240 이다. 100 Hz까지 고속 이미지 샘플링이 가능한 카메라이다. 진동 데이터와 열화상 이미지는 필요에 따라서 파형 발생기의 트리거 신호를 이용하여 동기화되어 측정되었다. 기존의 방법은 Fig. 3에 제시한 방법에서 파형발생기와 파워 앰프 대신에 초음파 혼과 함께 제공되는 제너레이터를 사용하는 경우이다. 이때 진동측정과 열화상 카메라를 위한 트리거 신호는 제너레이터의 단자에서 제공하는 펄스 신호를 사용한다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 진동 신호의 주파수 특성

초음파 혼이 공진주파수에서 단일 주파수 사인파 입력으로 가진되면 시편에 가해지는 진동은 입력 신호의 주파수와 고조파 그리고 저조파가 포함되어 있는 진동 특성을 보인다. 이런 고조파는 클램프와 혼사이의 접촉영역에서의 채터링(chattering) 진동이나 충격하중에 의해 발생한다. 이런 비선형 진동특성은 또한 시편의 고정 방법, 실험장치의 비선형성 등에 의해서도 영향을 받을 수 있지만 제일 큰 영향은 혼의 끝단과 시편사이의 접촉 상태가 상실되면서 발생하는 충격력인 것으로 알려져 있다[15]. 채터링으로 인해 발생하는 비선형 진동은 저조파(sub-harmonics)와 고조파(harmonics)가 복합적으로 발생하는 특성을 보이는 카오스(Chaotic)진동상태가 될 수도 있는데 이런 진동은 다중 모드를 가진하는 효과로 인해 시험물체의 관심영역 전반에 걸쳐 고른 진동의 크기를 확보하여 결함의 발견 확률을 높일 수 있다[16]. 서모소닉 시험은 주로 초음파 용접에 사용되는 초음파 혼과 같이 납품되는 제너레이터(generator)를 이용하여 가진된다. Fig. 4는 제너레이터를 사용하여 가진되었을 때에 블레이드 시편에서 측정된 진동 신호의 주파수 스펙트럼을 보여준다. Fig. 4는 초음파 혼의 가진주파수인

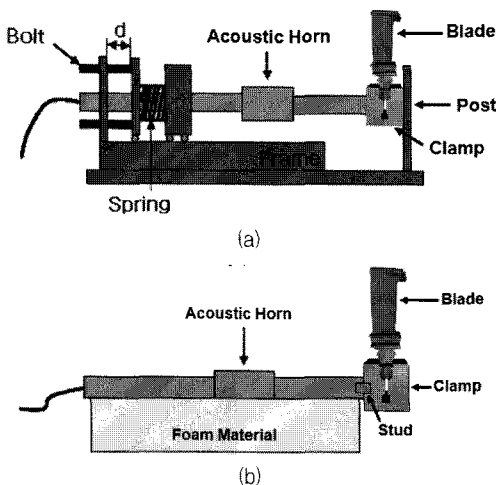


Fig. 2 Thermosonic test setup for turbine blades, (a) Spring force coupling, (b) Stud coupling

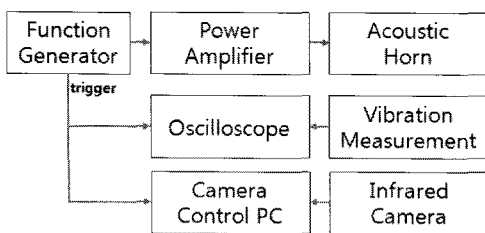


Fig. 3 Schematic of test setup and signal flow

40 kHz 근처의 4 kHz 밴드내의 주파수 스펙트럼이다. Fig. 4는 10회에 걸친 시험 결과를 보여주고 있는데 이렇게 다수로 시험을 수행하는 이유는 서모소닉 시험은 측정된 진동의 크기와 주파수 특성이 매회마다 변하여서 재현성을 기대하기 어렵기 때문에 다수의 결과 통하여 특성을 파악하고자 하였다. 결과를 보면 최대 피크값이 10배까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이런 변동성은 결국 신뢰성있는 시험을 위해 Morbidini 등이 제안한 보정시험절차와 발열지수를 활용한 시험절차의 도입이 필요함을 보여준다[14]. 실험결과를 보면 진동의 특성은 변화하지만 다수의 모드가 관찰되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 일반적으로 초음파 혼을 가진하는 입력신호는 혼의 공진주파수이지만 제너레이터는 가진중에 시스템의 공진점을 추적하는 기능이 있어 좁은 대역내를 빠르게 스위칭하는 효과를 보여주기 때문이다. 그러므로 이런 시스템이 장착된 초음파 가진 시스템은 사실 단일 주파수 가진 시스템이 아니고 제너레이터로부터 초음파 혼에 입력되는 전압신호의 특성에 따라 시편에 가진되는 진동의 특성을 변화시켜 대역폭을 갖게 하는 진동 시스템이다. 이런 가진 특성은 시편과 가진 시스템을 포함하는 시스템 공진점 주위에서 첩시험을 수행하면 높은 가진 에너지를 갖는 다수의 모드를 가진할 수 있다는 가능성을 보여준다. 이런 가진은 첩신호 입력을 큰 진동이 발생하는 시스템 공진 주파수를 중심으로 가진하면 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 첩시험 중에 발생하는 진동신호의 특성을 분석하기 위하여 선형 첩시험이 수행되었다.

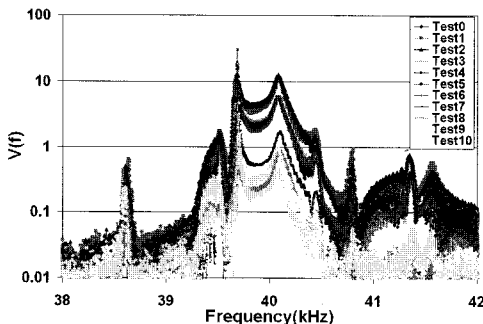


Fig. 4 Spectrum of the 10 different vibration signals around 40 kHz (horn resonance frequency) measured on the blade center at the static force level of 330 N

3.2. Chirp Test 결과

가진시 단일모드 진동이 가진되면 가진된 모드의 노드점에서는 이론적으로 진동의 크기가 0이다. 이 경우는 결국 노드점에 결함이 위치하면 충분한 진동이 발생하지 않아 검사시 발견이 안될 수도 있다는 의미가 된다[15]. 따라서 가진시 여러 개의 모드가 가진 되도록 함으로써 검사 표면의 전 영역에 걸쳐 결함이 발견될 수 있도록 하는 것이 검사의 신뢰성을 높이기 위해서 매우 중요하다. 검사의 신뢰성을 높이기 위해 초음파 가진기의 공진주파수 영역 근처에서 첩 테스트(chirp test)를 수행함으로써 가진 주파수 영역 내에 존재하는 다양한 모드를 가진시킬 수 있다. Fig. 5는 35 kHz-45 kHz 대역의 주파수 범위에서 1초 동안 첩 테스트를 수행한 결과를 보여준다. 주파수 영역은 사용한 초음파 가진기의 공진주파수가 40 kHz이기 때문에 시작점은 35 kHz이고 끝점은 45 kHz인 10 kHz 범위에서 시험을 수행하였다. 주파수 범위를 공진주파수 근처로 좁은 이유는 단위 입력 전력에 대해서 가진기의 공진주파수 근처에서 더 큰 가진력을 얻을 수 있기 때문이다. Fig. 5의 결과는 혼과 클램프를 연결하는 방법의 차이에 따른 가진된 진동의 크기를 비교해 보여준다. Fig. 5(a)는 혼과 클램프를 볼트로 연결한 경우이고 Fig. 5(b)는 스프링 힘으로 연결한 경우이다. Fig. 5(a1)과 (b1)을 보면 시스템 공진주파수 근처에서 피크값들을 볼 수 있다. 특히 볼트로 연결된 경우 진동의 크기가 크고 Fig. 5(a2)의 STFT(short time fourier transform)에서 볼 수 있는 것 같이 44 kHz 근처의 시스템 공진주파수에서 많은 고조파들이 생성되는 것을 볼 수 있다. 이런 고조파 성분들은 열화상 이미지의 결함 검출 성능을 높일 수 있다[16]. 첩 테스트 결과는 가진 시스템과 시험체를 포함한 시스템 공진주파수 근처에서 첩 테스트를 수행할 때 많은 시스템 모드들을 가진할 수 있다는 것을 보여준다. Fig. 5(a2)가 보여주는 또 다른 중요한 점은 혼의 공진주파수인 40 kHz가 아닌 44 kHz에서 최대 피크가 발생한다는 것이다. 이 결과는 가진 시스템이 시험 대상체에 연결될 경우 실제 시스템 공진특성은 40 kHz가 아닌 다른 주파수에서 최대 가진력을 얻을 수 있는 공진주파수가 발생할 수 있다는 것이다. 따라서 최적의 첩주파수를

설정하기 위해서는 예비시험중에 최대 피크를 얻을 수 있는 주파수를 찾아 이 주파수 근처를 좁은 대역으로 하는 첩시험을 수행하면 더 효과적인 가진을 수행할 수 있다. Fig. 4에서 보인 결과와 같이 기존의 가진방법을 활용할 경우도 좁은 대역의 다수의 모드를 가진하는 가능성을 보여주고 있지만 기존 제너레이터를 이용한 가진의 경우 공진주파수인 40 kHz 근처의 좁은 주파수 대역에서 공진 추적을 하도록 설정되어 있어 공진 피크점이 이 주파수 범위를 벗어날 경우 작동 오류로 기능을 하지 못하는 문제가 발생하였다. 실제 시험에서는 측정 대상물체에 따라서 진동의 최대 피크값을 보이는 주파수가 변하기 때문에 사용자가 최적의 주파수 범위를 선택할 수 있는 시스템이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 파형 발생기와 일반적인 고주파 파워 앰프를 사용하는 방법으로 첩(chirp) 시험을 수행하였다.

Fig. 6은 서로 다른 가진 입력과 서로 다른 혼과 클램프의 연결방법에 따라 측정된 신호이다. Fig. 6의 (a1), (a2), (a3)는 Fig. 3에서 최대 피크값을 보이는 경우의 결과로써 스프링 연결을 사용하고 혼의 제너레이터를 파워 공급원으로 사용한 경우이다. 앞에서 살펴본바와 같이 그 크기는 시험에 따라 차이가 날 수 있기 때문에 본 연구에서는 주파수 특성을 중심으로 비교 분석 하였다.

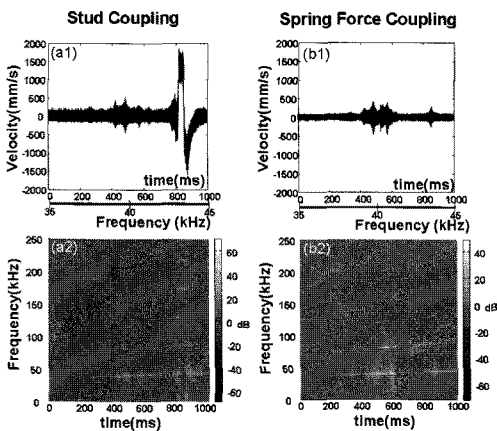


Fig. 5 Test results from chirp tests with stud coupling and spring force coupling: (a1) Vibration obtained with a stud coupling (a2) STFT of the signal in (a1) (b1) Vibration obtained with a force coupling (b2) STFT of the signal in (b1)

Fig. 6(a1)는 레이저 진동계로 터빈블레이드 중심에서 측정된 진동 신호이다. Fig. 6의 (b), (c)는 선형 첩시험에서 측정된 결과이다. 첩시험은 35 kHz에서 45 kHz 사이에서 1초간 선형 사인 첩시험을 수행하였다. Fig. 6의 (b1), (b2), (b3)는 스프링 연결을 사용한 경우이고 (c1), (c2), (c3)는 볼트로 연결한 경우이다. Fig. 6(b1), (c1)은 블레이드 중심에서 측정된 진동 신호로써 첩시험중에 다수의 시스템 공진주파수에서 진동의 크기가 크게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6의 (a2), (b2), (c2)는 Fig. 6의 (a1), (b1), (c1)의 진동 신호에 대하여 FFT를 수행한 결과이다. Fig. 6의 (a2)는 1차 고조파의 크기가 기본 주파수의 크기와 비슷하다. 이 결과는 블레이드의 한 점에서 큰 진폭을 갖는 두개의 모드를 가진함으로써 단일 모드 가진시에 발생하는 노드 발생 가능성을 줄여 크랙 검출 가능성이 향상 될 수 있다는 것을 의미한다. Fig. 6의 (b2)와 (c2)에서의 첩시험 결과는 많은 고조파 성분이 가진되는 것을 보여준다. 특히 볼트 연결을 사용한 경우 200 kHz 대역의 높은 주파수까지 주파수 성분이 발견되는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 6의 (a3), (b3), (c3)는 Fig. 6의 (a2), (b2), (c2)의 결과중 기본 주파수 근처의 스펙트럼을 확대해서 보여준다. Fig. 6의 (a3)는 크기가 매우 다른 두 개의 모드가 가진 된 것을 보여준다. 다시 말하면 일반적인 가진 방법으로 가진할 때는 기본 주파수 근처에서 하나의 지배적인 모드가 가진되고 있는 것을 볼 수 있다. 특히 특정 공진 주파수를 찾아 가진하는 시스템 특성으로 인해 특정 모드 주변의 아주 작은 주파수 밴드를 가진하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 6의 (b3)와 (c3)는 첩시험시 얻어진 기본 주파수 성분들을 보여준다. Fig. 6의 (b1), (c1)과 Fig. 4의 (b3), (c3)에는 각각 대응되는 모드에 같은 번호가 부여되어 있다. Fig. 6의 (b3), (c3)는 Fig. 6(a3)에 나타난 일반적인 방법으로 구하여진 결과와 비교했을 때 첩 시험시 유사한 크기를 갖는 더 많은 모드들이 가진 되고 있는 것을 알 수 있다. 이런 특성은 결국 서모소닉 시험법의 신뢰성을 더 높여 줄 수 있을 것이다. 서로 다른 초음파 혼과 클램프의 연결 방법은 시스템 공진 특성의 차이와 진동에너지 전달량의 차이로 인한 서로 다른 주파수 특성을 보여주고 있다. 볼트로 연결한 경우가 더

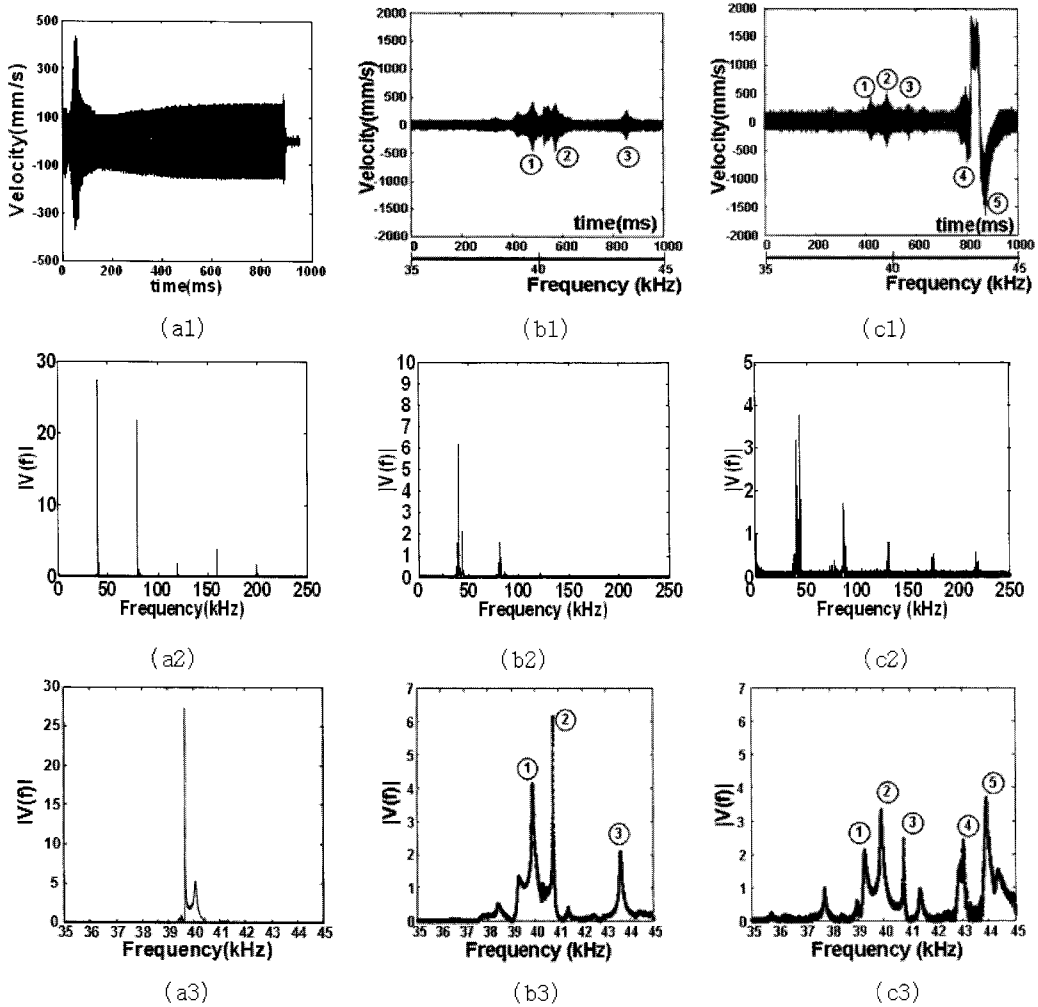


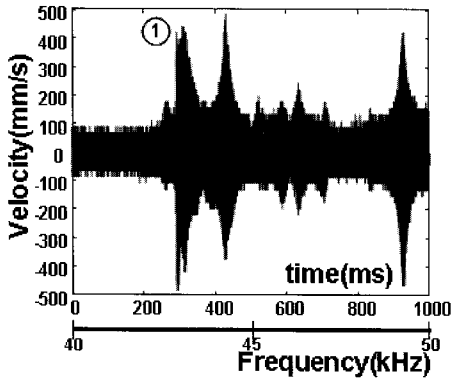
Fig. 6 Vibration(a1, b1, c1), corresponding FFT of the total vibration signal(a2, b2, c2) and frequency components around the fundamental frequencies(a3, b3, c3) : (a1), (a2), (a3) spring force coupling and signal input from the horn generator with resonance searching function; (b1), (b2), (b3) spring force coupling and chirp input from the power amplifier; (c1), (c2), (c3) stud coupling and chirp input from the power amplifier

큰 진동과 더 많은 진동 모드 그리고 더 높은 주파수 대역까지 주파수 성분이 발생함을 보여준다. 이러한 첩시험 결과는 시편과 가진 시스템을 포함한 시스템의 공진주파수 근처에서 잘 조정된 첩시험을 수행하면 크랙의 검출 성능을 높여 줄 수 있다는 것을 보여준다. 그 이유는 첩시험 시 첩주파수 범위 안에 존재하는 다수의 모드를 공진을 이용하여 효과적으로 가진할 수 있고 카오스 진동과 같은 비선형 진동의 발생 가능성도 높여주기 때문이다. Fig. 7은 볼트 연결을 사용하고 첩시험을 수행한 경우 블레이드 표면에서 레이저 진동계로 측정된 진동신호의 예이다. Fig. 7(a)는 몇 개의 큰 진동 피크가 첩주파수 범위 내의 시

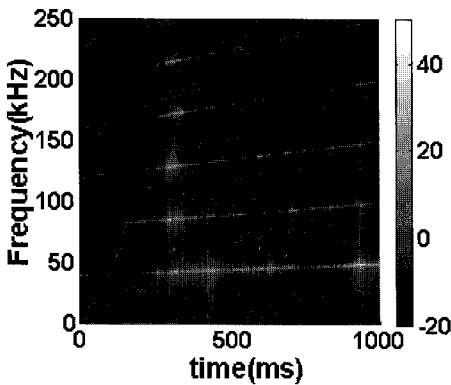
스템 공진주파수에서 발생하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 측정된 진동 신호의 STFT를 보여준다. Fig. 7(b)는 큰 진폭의 주파수 성분들이 기본 주파수와 그 고조파 성분에서 발견되고 있는 것을 보여준다. 특히 Fig. 7(a)에서 보면 유사한 크기를 갖는 세개의 피크가 보이지만 주파수 특성은 달라서 Fig. 7(b)의 STFT를 보면 1번으로 표시된 피크에서 더 많은 그리고 더 높은 주파수까지 고조파 성분들이 발견되고 있는 것을 볼 수 있다. 이런 다수의 모드 가진 성능은 노드점의 문제를 극복하고 시편내에 미지의 장소에 위치한 크랙의 검출 성능을 더 높여 줄 것이다. 또 다른 장점은 첩시험은 큰 진폭의 진동을 얻기 위하여

특정 공진주파수에 시스템을 튜닝하는 어려움을 피할 수 있다는 것이다. Fig. 8은 시험중에 크랙이 발견된 블레이드를 활용하여 첩시험의 주파수 스윕중에 서로 다른 시간(서로 다른 가진 주파수)에 적외선 카메라(cedip jade)로 측정된 열화상 이미지이다. 시험에는 볼트 연결방법이 사용되었다. 화살표는 시험중 검출된 크랙의 위치를 보여준다. Fig. 8(a)에서는 블레이드 끝단의 크랙은

검출되지만 측면의 돌출된 부위 하단의 크랙은 보이지 않으나 약간 시간이 지나서 측정된 Fig. 8(b)에서는 블레이드 끝단의 크랙과 돌출부 하단의 크랙이 모두 검출되는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 어떤 크랙이 특정 가진주파수에서는 측정되지 않지만 가진된 진동의 크기와 주파수 특성이 서로 다른 상이한 가진주파수에서는 측정될 수 있다는 것을 보여준다. 이 결과는 첩시험이 서로 다른 가진 성능을 갖는 다수의 시스템 공진을 이용하여 크랙 검출 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

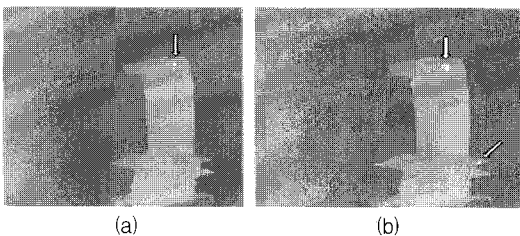


(a)



(b)

Fig. 7 Vibration measured during chirp test with stud coupling: (a) Vibration measured on blade; (b) STFT of vibration



(a)

(b)

Fig. 8 Thermal images taken at two different frequencies during a chirp test by using an acoustic horn and a clamp with a blade is connected to the acoustic horn by stud coupling. Arrows indicate detected cracks

4. 결론

본 논문에서는 서모소닉 시험중 측정된 진동 신호의 특성을 분석하고 신뢰성을 높이는 방법에 대하여 연구하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 클램프를 통하여 충분한 크기의 가진력이 블레이드에 전달되는 것을 확인하였고 블레이드 시편을 편리하게 가진 할 수 있었다.
- 2) 초음파 용접기의 공진주파수 추종 기능은 좁은 주파수 대역내의 첩시험과 같이 다수의 모드의 가진이 가능함을 보여주었으나 첩주파수 범위가 혼의 공진주파수 근처로 고정되어 있어 시스템 공진을 효과적으로 활용하기 위해서는 주파수 범위를 선택적으로 조정할 수 있는 방법의 도입이 필요하다.
- 3) 첩시험은 첩주파수 범위 안에 존재하는 다수의 시스템 공진을 이용하여 시편내에 고르게 분포하는 진동을 얻게 함으로써 미지의 장소에 있는 결함들을 발견하는 확률을 높여 줄 수 있다.
- 4) 볼트로 혼과 클램프를 연결한 간편한 가진 시스템을 이용하였을 경우 더 큰 진동을 얻을 수 있고 열 발생 효율이 좋은 높은 주파수 대역까지 고조파의 가진이 가능하였다.

향후에는 제안된 방법을 복잡한 형상을 가진 다양한 기계구조물이나 부품에 적용하여 신뢰성을 평가하는 연구가 필요하며 맞춤형 검사 시스템 제작을 위한 연구들도 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] R. L. Thomas, L. D. Favro, X. Han and Z. Ouyang, H. Sui and G. Sun, "Infrared imaging of ultrasonically excited subsurface defects in materials," US Patent 6236049 (1999)
- [2] T. J. Barden, D. P. Almond, M. Morbidini and P. Cawley, "Advances in thermosonic for detecting impact damage in CFRP composites," *Insight*, Vol. 48, No. 2, pp. 90-93 (2006)
- [3] J. Rantala, D. Wu and G. Busse, "Amplitude-modulated lock-in vibro thermography for NDE of polymers and composites," *Research in Nondestructive Evaluation*, 7(4), pp. 215-228 (1996)
- [4] 윤주영, 정 란, 노영숙, "열화상 정보를 이용한 부식률 예측기법", *비파괴검사학회지*, 제 27권 제2호, pp. 142-147 (2007)
- [5] 김원태, 강기수, 최만용, 박정학, 허용학, "Lock-in Thermography를 이용한 노치 시험편의 응력해석 및 피로한계치 평가", *비파괴검사학회지*, 제26권 제5호, pp. 315-320 (2006)
- [6] B. Kang and P. Cawley, "Multi-mode excitation system for thermosonic testing of turbine blade," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, AIP Conference Proceedings, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, American Institute of Physics, Melville, NY, pp. 520-527 (2007)
- [7] G. Bolu, A. Gachagan, G. Pierce and G. Harvey, "Reliable crack detection in turbine blades using thermosonics: An empirical study," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pp. 474-481 (2010)
- [8] M. Rothenfusser, C. Homma, P. J. Zombo, P. D. Vona and R. E. Shannon, "Method for calibrating and enhancing flaw detection of an acoustic thermography system," U.S. Patent US 7064331 B2 (2006)
- [9] M. Morbidini and P. Cawley, "A calibration procedure for sonic infrared nondestructive evaluation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 106 (2009)
- [10] M. Morbidini, P. Cawley, T. J. Barden and D. P. Almond, "Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements," *Journal of Applied Physics*, Vol. 100, No. 10, pp. 1-13 (2006)
- [11] M. Morbidini, "A comparison of the vibration-modulation and thermosonic NDT techniques," PhD thesis, Imperial College, University of London, Mechanical Engineering (2007)
- [12] D. J. Ewins, "Modal Testing: theory, practice and application," 2nd Edition, Research Studies Press Ltd. (2000)
- [13] C. J. Pye and R. D. Adams, "Heat emission from damaged composite materials and its use in nondestructive testing," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 14, pp. 927-941 (1981)
- [14] M. Morbidini, B. Kang and P. Cawley, "Improved reliability of sonic infrared testing," *Materials Evaluation*, Vol. 67, No. 10 (2009)
- [15] B. Kang and P. Cawley, "Low power PZT exciter for thermosonics," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 26A*, Vol. 820 of AIP Conference Proceedings, Edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, American Institute of Physics, Melville, NY, pp. 484-491 (2006)
- [16] X. Y. Han, Z. Zeng, W. Li and M. S. Islam J. P. Lu, V. Loggins, E. Yitamben, L. D. Favro, G. Newaz, and R. L. Thomas, "Acoustic Chaos for enhanced detectability of cracks by sonic infrared imaging," *Journal of Applied Physics*, 95(7), pp. 3792-3797 (2004)