



고온 환경용 복합소재의 비파괴평가

원순호 | 재료연구소

[요약문]

새로운 소재의 개발과 더불어 이의 특성을 평가하기 위한 여러 방법들도 새롭게 개발, 적용되어 왔다. 그러나 동일한 소재라도 사용 환경에 따라서 그 특성은 다르게 나타나기 때문에 사용 적정성의 평가는 반드시 수행되어야 한다. 특히 소재의 내구성이 한계에 달하는 극한환경에서 사용을 목적으로 하는 경우 더욱 그러하다. 이 분야의 연구는 전통적으로 미국, 일본, 독일 등을 중심으로 개발되어 왔으나 근래 국내의 연구개발도 산, 학, 연 분야에서 활발하게 진행되고 있다. 우리 연구소에서는 당해연도를 시작으로 극한환경 소재 기술개발을 수행하고 있다. 본고에서는 초고온 환경에서 사용되는 탄소-탄소 복합소재의 특성평가를 목적으로 이 분야의 비파괴평가 기술개발 동향을 소개한다.

1. 서론

재료를 평가하는 방법으로 종래의 비파괴적 재료특성 평가는 비파괴적 계측량과 재료의 기계적 특성을 결부시키는 물리적 근거가 명확하지 않아 평가결과에 대한 판단이 불확실한 경우가 많았다. 재료가 가지고 있는 내재적인 특성 또는 합금에 의해 발현하는 이차적인 특성에 대해 정확한 정보를 얻고자 하는 노력은 아주 오래전부터 수행되어 왔지만, 재료가 일반적 환경이 아닌 극한환경에 적용 되었을 때 지속적인 소재 고유의 특성을 유지할 수 있는지에 대한 개별 특성평가 등도 동 분야의 연구에서는 기반기술로서 매우 중요하다.

고온 환경에서의 사용을 목적으로 개발되는 복합소재의 경우 주로 항공우주, 방위산업 및 발전설비와 관련되어 있다. 선진국의 경우 이 분야의 사용을 목적으로 개발되는 소재는 비파괴시험을 적극적으로 수행하고 있다. 우리나라도 근래 소재산업의 중요성이 부각되는 시점에서 소재의 효용성을 증명 할 수 있는 특성평가 기술의 개발은 개발 소재의 상용화를 위해서는 필수적으로 해결해야 하는 문제이고, 특히 비파괴시험의 대표적 장점인 소재의 경제성 측면에서도 매우 추천될 일이다.

본고에서는 이 분야에서의 국, 내외 기술현황 분석을 다루고, 선진국으로의 도약 및 국제화 리더로서의 역할을 수행하고자 하는 재료연구소의 연구방향을 간단히 소개할 것이다.

2. 기술현황 분석

전통적으로 복합재료 등에서의 비파괴시험 등은 항공기 동체 등의 면허생산과 관련하여 사전에 주어진 장비 및 시편과 절차서에 따라서 검사를 수행하는 정도로, 이 분야의 시험기술의 확대와 실제적 응용이 절실히 요구되어 왔다. 향후 연구되는 고온, 고압 또는 극저온 등 극한환경에서 사용되는 소재의 실제 응용 및 사용조건에서의 개별 특성평가 등이 관심의 초점이 되어 왔고, 특히 이 분야의 후보 소재인 탄소-탄소 복합재료는 고온에서 내열성이 요구되는 구조물 응용에 적합한 재료로, 그 특성은 재료 내부의 밀도 또는 탄성계수와 같은 성질의 균질성에 의해 좌우되

므로 이들 성질의 검사, 특히 비파괴적 검사, 평가(NDE)가 필수적이라 할 수 있다. 그러나 초음파는 재료내부의 결함이나 성질의 불균질성에 민감한 만큼 복합소재의 특성상 그 결과의 해석도 용이하지는 않다. 극한환경에서 사용되는 소재의 경우, 특성평가를 위한 환경조건의 구현 및 관련 장비의 구축에 있어 현재는 미흡한 부분이 있고, 이러한 문제는 국·내외 대부분의 연구그룹에서 공통적으로 안고 있는 문제이다. 연구 성과가 미흡한 만큼 이 분야에 대한 부가가치 및 개발의지가 높고, 따라서 연구 네트워크의 구성이 쉽고, 빠르게 진전될 수 있을 것으로 전망되는 바 지금까지의 개발동향은 다음과 같다.

2.1 국외의 현황

미국 NASA의 경우 복합재료의 비파괴특성평가와 관련하여서는 주로 초음파를 사용하여 평가하는데, 1982년 처음으로 발견된 leaky lamb wave(LLW)를 이용한 평가가 폭넓게 연구되어 왔다. 적용방법으로는 pitch-catch 법을 적용하여 다중 방향성을 갖는 laminate 등을 잘 정의할 수 있었다. 재료의 탄성계수와 관련된 음파의 감도와 경계조건 등은 탄성계수와 접합재의 특성이 연구되는 분야의 연구를 통해 폭 넓게 발표되었고, LLW를 이용한 초음파평가 등은 C-scan과 조합된 LLW scanner 등이 적용되어 지고 있다.^[1]

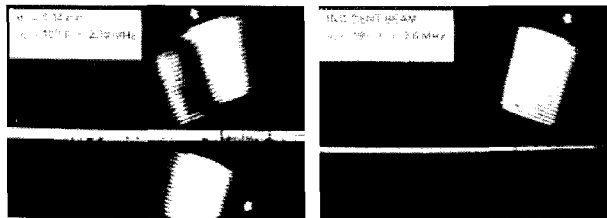


그림 1. Graphite-epoxy의 박리상태를 보여주는 초음파 영상

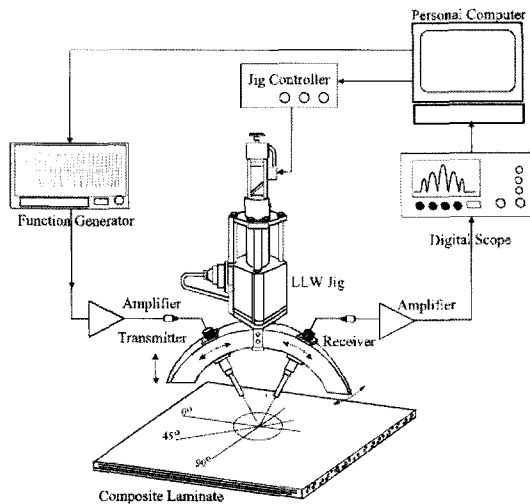


그림 2. 고속 LLW 시험장비의 개요

Boeing사의 경우, 품질보증으로서 비파괴시험은 미세결합의 정밀 분석과 같은 고도의 비파괴시험 기술과 응용을 요구하고 있다. 여기서의 비파괴시험은 항공기의 각 부품, 공정제어, 손상 분석과 결부된 하드웨어의 건전성을 보증

하기 위해 수행된다. 비파괴시험의 기술적 원리하에서 Pratt & Whitney Rocketdyne은 Mil-I-6870, “NDI Program Requirements for Aircraft and Missile Materials and Parts.”에 규정된 비파괴시험 요구사항을 적용하게 되는데 이 방법들은 90-95%의 신뢰성을 바탕으로 하고 있어, Computed Tomography (CT), Precision Fluorescent Penetrant (PT), Real-Time Radioscopy (RTR), Immersion Ultrasonic (UT) 분야에서 뛰어난 비파괴평가 기술을 보유하고 있다.

일본의 대표적 재료연구소인 NIMS는 “A vision of materials science in the year 2020”에 재료 특성평가와 관련한 명확한 범위를 제시하고 있다.^[2] 현대의 일본 사회에서조차 재료의 예기치 못한 손상과 파괴는 많은 인명 또는 사회적 손실을 초래하였고, 과거 수 십년간 수행되어온 연구에도 불구하고 아직까지도 규명되지 못한 재료 파괴의 수많은 메커니즘이 과제로 남아있다. 재료 특성평가와 관련한 NIMS의 연구가 30년 이상 수행되어 왔고, 재료연구 인용지수에서 세계적으로 5위 안에 드는 저력에도 상술한 문제는 재료 특성평가와 관련한 연구의 지속적인 필요성을 제시하고 있는 것이다. 특히 NIMS의 재료연구가 발전설비, 화학플랜트와 같은 고온, 고압 환경에서 사용되는 재료에 대해 재료별 데이터베이스, 재료시험 및 평가 방법, 손상기구, 파괴특성에 실제적인 결과를 제시하여 재료연구 분야에 기여하고 있다는 점은 모두가 인지하고 있는 사실이다. 이 연구결과들은 시험방법에 있어서 국가표준에 반영되었고 재료의 신뢰성을 개선하는 지속적인 행위와 안전사회를 실현하는데 기여하고 있다. 이러한 면에서 NIMS는 기초적인 데이터의 구축과 신뢰성 평가 시스템을 개발하는 것 뿐만 아니라 신 재료의 개발시 이를 평가하기 위한 새로운 재료평가 기술과 기존 평가법의 획기적인 진보를 보여주는 새로운 비파괴 평가방법의 개발을 진전시키는 것을 필수적인 것으로 명시하고 있다.

특히, 극한환경 소재의 궁극적 사용처인 고효율 가스터빈, 화력발전소, 고온·고압 용기, 핵융합 용기의 신뢰성을 평가하기 위한 기술개발에 있어 향후에도 지속적으로 중요하게 추진할 것을 표명하고 있다. 복합재료 등과 같은 신 재료의 평가 연구는 또 다른 중요한 연구분야로 규정되어 있다.

프랑스 ONERA^[3]의 경우, 설립의 주요 목적에 명시된 바와 같이 연구 특성상 재료 특성평가를 위한 기술적 분석과 지원이 중요한 임무이다. 항공 및 방위산업과 관련된 창조적이고 경쟁력있는 기술로 열화기구 평가를 위해 특정 원소의 luminescence의 분석과 분광학을 응용한 비파괴평가 기법의 개발이 지속적으로 추진되고 있다. 이를 위해서 “structural health monitoring”과 같은 프로그램을 통해 비파괴평가법의 기술지도도 수행하고 있다.

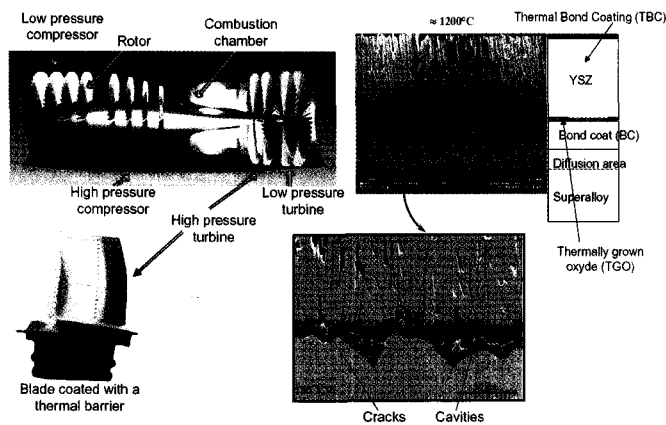


그림 3. ONERA에서 수행된 터빈소재의 연구사례

중국의 항공기 제조기술 연구소의 복합소재 비파괴평가 센터에는 비접촉식에 의한 미세조직의 3D 영상구현에 관한 기술을 보고하고 있다.^[4] 이 방법으로 공간분해능 60 μ m, 수직분해능 80 μ m의 해상도를 얻을 수 있었다. 즉 시험체

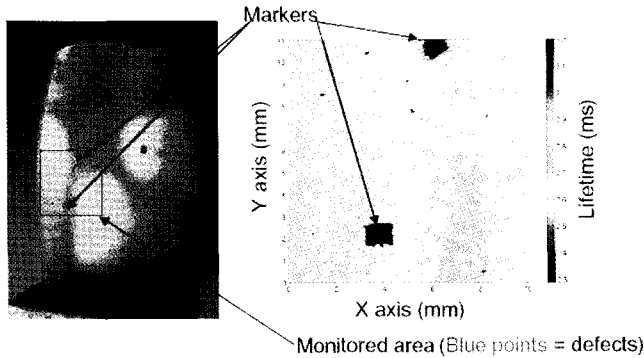


그림 4. 터빈 블레이드 손상에 대한 비파괴평가, ONERA

내의 깊이방향에 있어서 마이크론 결함을 비파괴적으로 얻을 수 있었고, 내면의 기계적 특성의 손상원인들을 구분할 수 있었다. 깊이방향에 대한 C-Scan 방식의 연속적인 토폴로지 데이터 취득과 이로부터의 영상 조합으로부터 내부의 국부변화나 구조적 문제점을 밝혀낼 수 있다. 물론 x-ray 방법 등의 토폴로지 영상이나 전자 현미경, 원자 힘 현미경, 광학 현미경 등의 방법으로 결과를 얻을 수 있으나 사용 제한성내지 파괴적인 방법이 적용되어야 한다.

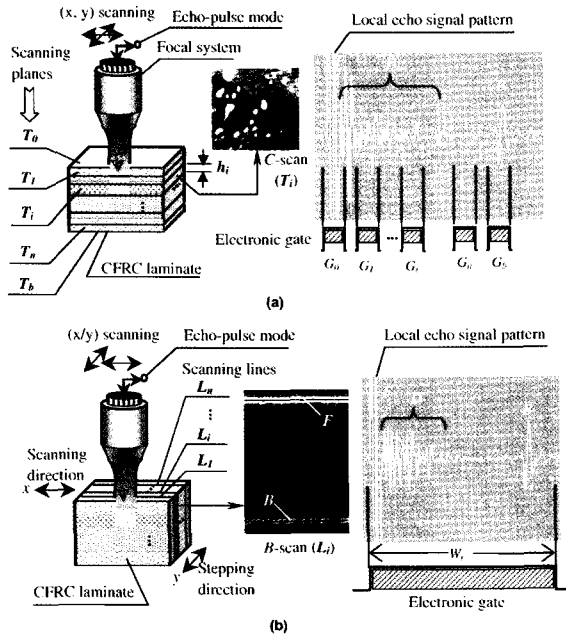


그림 5. 펄스 초음파법에 의한 3D 영상법의 개요 (a) C-Scan, (b) B-Scan

소재의 궁극적인 물리적 특성을 평가하는 방법으로도 초음파는 매우 효과적이다.^[5-7] 소재 물성변화에 기인한 탄성계수의 변화 등은 소재를 전파하는 초음파의 속도를 측정하는 방법으로 $1/10^6$ 의 감도로 측정하는 것이 가능하다. 이 방법에서는 저온환경과 고온환경에서의 특성변화를 실시간적으로 측정할 수도 있는 장점이 있다.^[8-10]

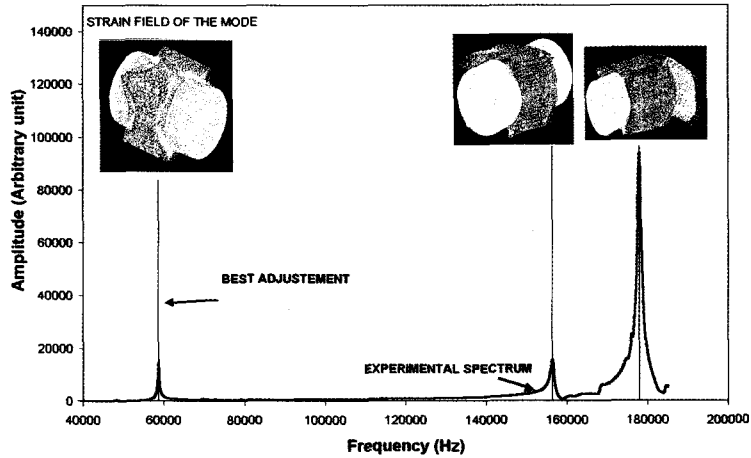


그림 6. Duralumin/air 복합소재에서 초음파 공명법의 적용

이 외에 영국이나 독일 등의 국가에서도 주로 고온환경의 복합재에 적용되는 비파괴시험방법은 초음파를 이용한 평가가 가장 보편적으로 적용되고 있고, 이와 관련된 새로운 시스템의 개발도 공통의 목표로 연구가 진행되는 추세이다. 또한 평가기법의 개발과 적용에 있어서도 전문 연구그룹이 컨소시엄 형태로 연구를 진행하는 추세이다.

2.2 국내의 현황

국내의 경우도 재료기반 분야에서의 소재물성 및 특성평가 기술은 국가 경제적 측면에서 지속적으로 연구, 개발되어 온 분야이다. 특히 비파괴평가 기술은 항공우주, 방위산업과 밀접하게 연관되어 발전되어 왔으며, 적용분야의 특성상 극한환경에서의 기계적 특성이 중요시되어 품질검사와 평가 측면에서 집중된 연구, 개발이 지속되어 왔다.

국내의 연구개발 환경을 살펴보면 비파괴검사를 주 업무로 직접적 서비스를 제공하는 비파괴시험 업체와 비파괴 시험이 요구되는 기업의 품질보증부 그리고 재료연구소와 같이 정부 출연연구소나 학교 등이 이와 관련된 새로운 시험평가 기술의 연구와 개발에 앞장서 왔다.

한국표준과학연구원 경우 고온 환경 소재나 부품의 평가와 관련하여 한국전력연구원의 수탁과제를 오래전부터 수행하여 왔고, 근래에서 스마트센서와 같은 측정 부분의 시스템과 관련한 연구를 발표하고 있다.

포항산업과학연구원의 경우 고온소재의 평가를 위해 누설자속의 측정을 통해 표면 및 표면하 평가를 수행한 연구 사례가 있다. 이 방법은 감도면에서는 초음파법에 비해 단점이 있지만 적용의 용이성과 경제성 면에서 상대적 장점이 있는 방법이다.

대학 연구실에서의 연구 등은 부산대학교와 성균관대학교 등에서 복합재의 비파괴 평가 등과 관련한 연구를 오래 전부터 수행해 왔다. 지난 10여년간의 연구결과를 살펴보면, 연구 인력과 관련 연구과제의 확대를 통해 많은 연구성과를 발표하고 있고, 산업체와의 연계 연구와 국제공동 연구도 활발하게 수행하고 있는 상황이다. 이 외 서울대학교, 서울 산업대학교 등에도 관련 연구그룹이 형성되어 있다.

산업체의 연구와 관련하여서는 근래 비약적인 연구개발이 수행되고 있는데, 전통적으로 연구 분야가 취약했던 비파괴 관련 중소기업이 경쟁력 강화를 목적으로 연구비의 집중적인 투자, 국가 연구개발 사업에의 적극적인 수주, 해외로의 기술 수출 등에 활발하게 참여하고 있다. 특히 대한검사기술(주)와 같이 자체 연구소를 보유한 기업의 경우 고온 환경의 터빈로터, 블레이드재 검사에 있어서 많은 실적을 보유하고 있다. 일반적으로 고온, 고압, 고속으로 회전하는 터빈의 회전체는 형상이 대단히 복잡하고 절손시 대형사고를 유발하기 때문에 프로브의 선정과 검사수행시 고도의 초음파 탐상기술이 필요하며 높은 신뢰성이 요구되고 있다.

재료연구소에서는 복합재료의 평가와 관련하여 이미 '89년부터 국가 연구사업을 수행하여 왔고, 응력해석 등과

관련하여 KAIST 등과 공동 연구를 통해 연구 인프라를 구축하고 있다. 주로 초음파를 이용한 내면의 3차원 영상화 기술과 감마선 등을 이용한 유리섬유 및 탄소섬유의 체적을 측정기술로 특허를 보유하고 있다. 당해 연도에는 고감도 복합소재를 효과적으로 초음파탐상 할 수 있는 새로운 장치를 고안하여 제작 중에 있다.

3. 결 론

소재 특성평가분야는 일반 제품의 제조기술과는 달리 적용시험을 통한 경험축적과 전문 인력의 양성 없이는 기술의 적용과 결과의 분석, 평가가 어려운 성격의 기술이다. 동일한 공정에 동일한 방법을 적용하였다고 하여도, 그것을 평가하는 전문가의 경험축적이 최고의 고려 요소가 되기 때문에 선진국으로부터의 기술도입이나 기타 다른 방법을 고려하는 것은 의미가 없다. 또한 선진국에서 이미 개발, 확보된 데이터베이스나 평가 알고리즘, 소프트웨어 등을 우리가 이전 받는다든지 또한 불가능한 현실이다. 결국 적지 않은 시간과 노력이 소요되겠지만 정부 주도의 국내개발은 불가피하다. 수행주체 측면에서 상술한 사실을 고려해보면 소재특성 평가와 관련한 지난 20여년의 연구, 개발 결과와 축적된 기술력, 연구 인력면에서 재료연구소에서의 관련연구는 지속 추진되어야 하고, 그 결과물을 산업현장에 활용할 수 있는 기술개발이 최종의 목표가 될 것이다.

❁ 참고 문헌

- [1] Y. B. Cohen and Z. Chang, 7th European Conference on Non-Destructive Testing and Exhibition, (1998).
- [2] website: <http://www.nims.go.jp/eng/>, A Vision of Materials Science in the Year 2020.
- [3] website: <http://www.onera.fr/>
- [4] S. Liu, E. Guo, V. M. Levin, F. Liu, Y. S. Petronyuk, and Q. Zhang, Ultrasonics 44, e1037-1044 (2006).
- [5] E. P. Papadakis, Rev. Sci. Instrum. 47, 806 (1976).
- [6] K. Ota, Cryogenics 35, 735 (1995).
- [7] J. Bayard, T. Philippe, and J. Grenet, Rev. Sci. Instrum. 69, 2725 (1998).
- [8] K. Tozaki, T. Okazaki, A. Kojima, and Y. Yoshimura, Rev. Sci. Instrum. 76, 066104 (2005).
- [9] C. Pantea, D. G. Rickel, A. Migliori, R. G. Leisure, J. Zhang, Y. Zhao, S. El-Khatib, and B. Li, Rev. Sci. Instrum. 76, 114902 (2005).
- [10] D. Laux, J. Y. Ferrandis, G. Leveque, and J. M. Gatt, Ultrasonics 45, 104 (2006).



원 순 호

· 재료연구소 산업기술지원본부 안전성평가그룹
 선임연구원
 · 관심분야 : 소재특성평가 기술 및 시스템
 · E-mail : wsh@kims.re.kr