

特輯

MIT의 복합재료 연구현황

김병선\*, 어재혁\*\*

ABSTRACT

This paper presents the brief description of Composite Materials Research carried out at Massachusetts Institute of Technology (MIT). The researches regarding Composites are performed at four Departments, they are Laboratory for Manufacturing & Productivity (LMP) within Mechanical Engineering Department, Technology Laboratory for Advanced Composites (TELAC) within Aerospace Engineering Department, Structures & Materials Program within Civil & Environmental Engineering Department and Building Technology Program within Department of Architecture.

초 록

이 논문에는 미국 MIT에서 복합재료 관련연구를 간략하게 소개하였다. 복합재료 관련 연구는 4개의 학과에서 수행하고 있다. 즉, 기계공학과내의 Laboratory for Manufacturing & Productivity (LMP), 항공우주공학과내의 Technology Laboratory for Advanced Composites(TELAC), 토목환경공학과에 있는 구조 및 재료 프로그램 (Structures & Materials Program) 그리고 건축학과 내의 Building Technology Program등에서 수행되고 있다.

1. 서 론

MIT에서 이루어지고 있는 복합재료에 관한 연구는 크게 4개의 학과에서 수행하고 있다. 첫째로 기계공학과내의 Laboratory for Manufacturing & Productivity (LMP) 에서 진행되고 있는 복합재료의 생산비용 추정 모델에 관한 연구, 둘째로 항공우주공학과내의 Technology Laboratory for Advanced Composites (TELAC)에서 하고 있는 MEMS (Microelectromechanical systems)에 사용되는 복합재료에 관한 연구와 복합재료의 파괴모델에 관한 연구, 셋째, 토목환경공학과에 있는 구조 및 재료 프로그램 (Structures & Materials Program)에서 집중하고 있는 새로운 복합 신소재 건설재료에 관한 연구와 microwave를 이용한 비파괴 검사에 관한 연구, 넷째, 건축학과 내에 있는 Building Technology Program에서는 새로운 빌딩 외장재를 위한 복합재료에 관한 연구등이 있다.

현재 진행되고 있는 이러한 연구의 구체적인 내용은 다음과 같다.

2. Laboratory for Manufacturing & Productivity (LMP)의 “복합재료의 생산비용 추정 모델”에 관한 연구

MIT의 Laboratory for Manufacturing & Productivity (LMP)는 기계공학과를 중심으로 생산공학에 관한 다양한 연구를 진행하고 있는 실험실로서 복합재료에 관한 연구도 활발하게 진행하고 있다. 현재 중점을 두고 연구하고 있는 주제는 “복합재료의 생산비용 추정 모델”에 관한 연구이다.

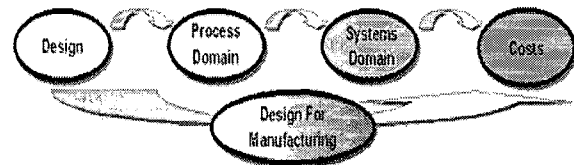


Fig. 1 복합재료의 생산비용 추정 모델의 개념도.

\* 한국기계연구원 재료공정부 책임연구원

\*\* MIT Ocean Systems Engineering, Ph.D. Candidate

복합재료는 기본적으로 서로 다른 공학적 특성을 가지고 있는 두가지 이상의 재료를 접합시켜 생산되게 된다. 따라서, 접합되는 재료들의 특성에 따라 다양한 자동 가공 기술 (automatic fabrication technique)를 사용하게 되며, 접합과정에 들어가는 비용을 적절히 조절하는 것이 성공적인 복합재료를 생산하는 데 매우 중요한 요소가 된다. 예를 들어 접합과정에 소요되는 비용을 복합재료의 설계단계에서부터 정확히 추정할 수 있다면 보다 경제적으로 복합재료를 생산할 수 있는 밑거름이 될 수 있다. 이런 목적으로 개발된 것이 바로 "복합재료의 생산비용 추정 모델"이다.

본 연구에서는 복합재료의 형상과 관련된 두가지의 변수 - 생산하고자 하는 복합재료의 크기 (size scaling effect) 와 형상의 복잡도 (shape complexity) - 와 접합 process를 연결하여 간단히 복합재료의 생산비용을 추정할 수 있는 모델을 제시하고 있다. 이 모델은 복합재료를 생산하고자 하는 엔지니어가 설계단계에서부터 손쉽게 최종 복합재료의 생산비용을 추정할 수 있게 해 줌으로써, 보다 최적화된 복합재료 생산계획을 세울 수 있도록 도움을 준다. 현재 14가지의 복합재료 형상과 8가지의 접합 process에 대한 생산비용 추정 모델에 개발되었으며, 모델의 결과를 실제의 복합재료 생산비용과 비교, 분석하여 모델의 정확도를 높이기 위한 연구를 진행하고 있다.

Table 1 생산비용 모델에 이용되는 복합재료의 형상과 접합 프로세스의 유형

복합재료의 형상 유형	복합재료의 접합 process 유형
1) Flat Panels	1) Hand Lay-up
2) Simply Curved Parts	2) Automated Tow Placement (ATP)
3) Flange Type Parts	3) 2D Braiding
4) Straight L	4) Diaphragm Forming
5) Straight C	5) Pultrusion
6) Straight I	6) Resin Transfer Modeling (RTM)
7) Straight T	7) Mechanical Assembly
8) Curved L	8) Adhesive Bonding
9) Curved C	
10) Curved I	
11) Curved T	
12) Straight Tube Profiles	
13) Straight Square Tubes	
14) Rib Like Structures	

본 모델은 인터넷상에서 손쉽게 복합재료 생산비용을 계산할 수 있도록 개발되어 있으며, 누구나 다음의 웹사이트에 접속하여 이 모델을 사용할 수 있다. 웹사이트 주소는 다음과 같다.

<http://web.mit.edu/lmp/www/composite/costmodel/>

또한, 본 프로젝트의 주요 연구진, 연구 지원기관, 그리고 관련 연구 논문들은 다음과 같다.

< 연구진 >

- Professor Timothy G. Gutowski, Department of Mechanical Engineering
- Sascha M. Haffner, Ph.D. Candidate, Department of Mechanical Engineering,  
(개인 홈페이지 - <http://web.mit.edu/haffner/www/>)

< 연구 지원기관 >

- NSF
- Northrop Grumman
- Composite Design Technologies
- Ibis Associates
- Deneb Robotics

< 관련 연구 논문 >

- T. G. Gutowski et al., "Development of a Theoretical Cost Model for Advanced Composite Fabrication," Composite Manufacturing, Vol. 5 No. 4, 1994.
- T. G. Gutowski et al., "Cost Optimization Software for Transport Aircraft Design Evaluation," NASA Report 4737, 1996.
- S. M. Haffner, T. G. Gutowski, "Automated Cost Estimation for Advanced Composite Materials," NSF Conference Paper, 1998.
- S. M. Haffner, T. G. Gutowski, "Manufacturing Time Estimation Laws for Composite Materials," NSF Conference Paper, 1999.
- S. M. Haffner, T. Marin, T. G. Gutowski, "Cost Elements of Autoclave Tooling," NSF Conference Paper, 2000.
- A. Goel, "Economics of Composite Material Manufacturing Equipment," BS Thesis, MIT, 2000.
- R. W. Lin, "Early Cost Estimation for Metal Fabricated Tooling in Resin Transfer Molding," BS Thesis, MIT, 2000.
- T. Marin, "Economic Analysis of Metal Fabricated Tooling for Composite Parts," MS Thesis, MIT/TU Munich, 2000.
- A. Gorgia, "Economics of Assembly vs. Parts Integration in Composite Manufacturing," MS Thesis, MIT/TU Munich, 2000.

그 밖에 LMP에서 이루어진 복합재료와 관련된 연구와 관련 웹사이트 주소는 다음과 같다.

- Virtual Manufacturing  
: <http://web.mit.edu/haffner/www/Progress2.html>
- Modified Double Diaphragm Forming Process  
<http://web.mit.edu/lmp/www/composites/Forming/>

### 3. Technology Laboratory for Advanced Composites (TELAC)에서의 복합재료 연구

MIT의 Technology Laboratory for Advanced Composites (TELAC)는 항공우주공학과내에 설치되어 있는 복합재료 연구센터로서, 항공기와 관련된 복합재료에 관하여 많은 연구를 하고 있으며, 그 중에서도 섬유질 복합재료 (Filamentary composite materials)에 관하여 주로 연구를 수행해 오고 있다. 항공우주공학과와 Paul Lagace교수와 S. Mark Spearing 교수가 공동 Director로서 TELAC을 이끌고 있으며, 10명의 대학원생이 연구에 참여하고 있다.

현재는 Spearing 교수의 연구활동이 매우 활발한 편이다. Spearing 교수는 크게 두가지 분야에 관심을 두고 연구를 진행하고 있는데, 첫째는 MEMS (Microelectromechanical systems)에 사용되는 복합재료에 관한 연구이고, 둘째는 복합재료의 파괴모델 (mechanism-based modeling of failure of engineered materials)에 대한 연구이다. 아래 Table 2에서는 Spearing 교수가 TELAC을 통해 수행하고 있는 복합재료에 관한 연구를 정리하였다.

Table 2 TELAC에서 수행하고 있는 복합재료에 관한 연구 프로젝트

1. Accelerated Insertion of Materials - Composites
2. Fatigue of Ti/Gr Hybrid Laminates
3. Materials Structures and Package Design for the MIT Microengine
4. Materials and Structures for the Micro-Hydraulic Transducer
5. Mechanical Characterization of Wafer Bonds
6. Metal-Composites Adhesive Joints
7. Piezo-induced Fracture of Adhesive Joints
8. Structural Health Monitoring for Composites

#### 3.1 Accelerated Insertion of Materials - Composites

전통적으로 새로운 복합재료를 항공우주 시스템에 적용하기 위해서는 항상 많은 시간이 걸려왔다. 이는 새로운 복합재료의 특성을 테스트하는 실험에 많은 시간과 비용이 소요되기 때문이다. 이에 따라 본 연구는 이렇게 오래 걸

리는 복합재료 개발 기간을 단축하기 위해서 실험 대신에 모델과 컴퓨터 시뮬레이션을 적극적으로 활용하는 기법을 개발하는 것을 목적으로 한다. 미국의 국방관련 연구기관인 DARPA와 Boeing사가 본 연구의 스폰서를 맡고 있으며, 자세한 내용은 다음의 웹사이트에서 알아볼 수 있다.

<http://web.mit.edu/aeroastro/www/people/spearing/composites.html>

#### 3.2 Fatigue of Ti/Gr Hybrid Laminates

Titanium-graphite (Ti/Gr) 복합재료는 고속 민간 항공기에서 요구되는 낮은 structural weight fraction과 긴 사용수명 (operational lifetime)을 만족시킬 수 있는 재료로서 주목을 받고 있다. 다시 말하면, 높은 표면온도를 견디면서 6만 시간의 사용수명을 가져야 하는 고속 민간 항공기의 구조 재료로서는 Ti/Gr의 내구성이 무엇보다도 중요한 요소이다. 그 내구성의 척도로서 특별히 중요한 것이 고온 피로강도 (fatigue response at elevated temperatures)이다. 본 연구에서는 Ti/Gr 복합재료가 가지고 있는 고온 피로강도의 조절 메커니즘을 실험적으로 규명하고, 이를 바탕으로 메커니즘 파괴 역학 모델 (mechanism-based fracture mechanics model)을 개발하고자 한다.



Fig. 2 Ti/Gr Damage Mode.

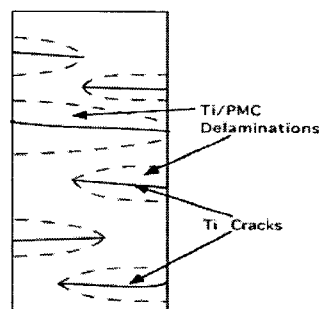


Fig. 3 Ti/Gr 복합재료의 피로파괴의 형상도.

현재 Ti/Gr 복합재료의 고온 피로강도에 관한 기계적 특성에 관한 실험을 통하여 Ti/Gr 복합재료의 고온 손상모드 (damage mode)을 규명하였으며, 다음의 Fig. 2, 3은 고온 손

상모드의 일부분을 보여주고 있다. 또한, 이러한 고온 피로강도를 위한 메커니즘 파괴 역학 모델이 개발된 상태이며, 본 실험결과와 비교, 분석 중에 있다.

본 연구는 Boeing사와 NASA가 스폰서하고 있으며, 자세한 연구 결과는 다음의 웹사이트에서 알아 볼 수 있다.

<http://web.mit.edu/aeroastro/www/people/spearing/laminates.html>

### 3.3 Materials Structures and Package Design for the MIT Microengine

본 연구는 마이크로 엔진을 개발하려는 커다란 프로젝트의 한 분야이다. 먼저 마이크로 엔진 개발 연구에 대하여 설명하면, 이 연구는  $1\text{cm}^3$  보다 작은 package이 안에서 50W의 전기에너지를 생산할 수 있는 마이크로 가스터빈 발전기를 개발하는 것으로서, 그 첫 번째 목표로서 single crystal silicon을 미세가공(micromachining)하여 마이크로 터빈 발전기를 생산하는 것이다.

이 마이크로 엔진 개발 연구와 관련하여 그런 미세 터빈 발전기를 생산하는 데 필요한 설계기술과 접합기술(fabrication)을 연구, 개발하는 것이 본 연구의 목적이 된다. 그 중에서도 터보기계의 성능을 발휘하기 위해 필요한 매우 높은 응력 (거의 1 GPa정도의 응력)을 견딜 수 있는 설계 및 접합기술의 개발이 가장 중요한 연구개발의 대상이 된다.

<http://web.mit.edu/aeroastro/www/people/spearing/microengine.html>



Fig. 4 Freestanding Silicon Carbide Rotor.

현재까지의 연구결과 silicon을 미세 가공하는 기술을 이용하여 마이크로 엔진에 필요한 응력을 견디는 재료구조를 만들어 낸 상태이며, 그 미세 재료시편을 이용한 재료시험이 현재 진행되고 있다. 이와 아울러 미세 접합된 내열성 재료 (예를 들어, silicon carbide)를 위한 프로세스 기술이 개발중에 있다. 가장 주목할 만한 지금까지의 연구결과로는 Si/SiC 하이브리드 구조를 위한 평탄화(planarization) 기술과 평탄화된 웨이퍼(planarized wafer)의 접합(bonding)기술 등이 있다. 아래의 Fig. 4, 5는 본 연구를 통하여 만들어

진 여러 가지 기계부품들을 보여주고 있다.

본 연구는 미 육군의 연구개발처(Army Research Office)와 DARPA에서 지원하고 있으며, 자세한 내용은 다음의 웹사이트에서 찾아볼 수 있다.

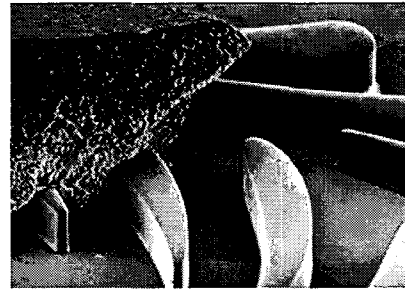


Fig. 5 Negative Turbine Mold Processing.

### 3.4 Materials and Structures for the Micro-hydraulic Transducer

Micro-hydraulic transducer는 미세가공(microfabrication) 기술, 활성재료(active materials) 기술, 그리고 servohydraulic system 기술등이 집약되어야 하는 high-power density 마이크로 시스템으로서, 이의 생산을 위해서는 고도의 복합재료 특성 및 구조에 관한 연구가 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 미세가공된 멤브레인 구조에 대한 강성 시험, 피조 세라믹(piezo-ceramic)과 미세가공된 silicon 구조의 접합기술, 그리고 멤브레인 구조의 비선형 편형 특성(nonlinear deflection behavior) 연구등을 수행하고 있다.

본 연구는 미 육군의 연구개발처(Army Research Office)와 DARPA에서 지원하고 있으며, 자세한 내용은 다음의 웹사이트에서 찾아볼 수 있다.

<http://web.mit.edu/aeroastro/www/people/spearing/transducer.html>

### 3.5 Mechanical Characterization of Wafer Bonds

많은 미세가공된 기기들은 대부분 유사 3차원(quasi-three-dimensional) 구조의 형성과 1차 packaging을 위하여 웨이퍼 접합(wafer bonding)가공을 거쳐야 한다. 따라서, 이러한 웨이퍼 접합가공의 발전은 미세가공된 복합재료들의 발전을 위해 꼭 필요한 기술이다.

이에 따라 본 연구에서는 웨이퍼 접합가공의 프로세스 컨트롤과 그 기계적 특성을 규명하고자 한다. 특별히 silicon과 silicon의 융합접합(fusion bonds), gold thermo-compression bonds, 그리고 anodic bonding등이 중점적으로 연구되고 있다. 본 연구는 미 육군의 연구개발처(Army

Research Office), DARPA, 그리고 Draper Lab에서 연구비 지원을 받고 있다.

### 3.6 Metal-Composite Adhesive Joints

접착성 joint는 일반적으로 특정한 구조적 특성을 보여주고 있으나, 금속과 복합재료를 연결해 주는 신뢰성 높은 joint를 만드는 것은 열잔류 응력(thermal residual stress)과 접착구간(adherend) 표면의 상이한 화학적 특성 때문에 쉽지 않은 일이다. 본 연구에서는 이러한 어려운 점을 해결하고자 우선 금속과 복합재료의 접합을 위한 적절한 사전 준비과정을 찾아낸 후, 열잔류 응력으로 인한 열팽창을 고려하여 접착성 joint를 설계할 수 있는 모델을 개발하고자 한다.

현재까지의 연구결과, 금속의 표면을 etching과 priming을 하고 복합재료의 표면을 마모(abrasion)시키는 방법이 접합성 joint를 위한 사전 준비과정으로서 가장 적절한 것으로 판명되었다. 앞으로 열잔류 응력의 영향을 더 자세히 고려하여 보다 발전된 금속-복합재료 접합성 joint를 만들어 낼 수 있는 연구를 진행할 계획이다.

본 연구는 Draper Lab에서 연구비를 지원하고 있다.

### 3.7 Piezo-induced Fracture of Adhesive Joints

열기계적 하중(thermomechanical loading)을 받는 joint의 신뢰성을 높이는 일은 electronic packaging에 매우 중요한 이슈 중의 하나이다. 그러나, 접착성 및 납땜 joint의 열순환(thermal cycling)은 시간이 오래 걸리는 일이고, 아울러 불확실한 data를 보여주는 경향이 있다. 또한, 접합성으로 연결된 (adhesively joined) piezoceramics의 전압 순환(voltage cycling)도 위와 비슷한 변형구조(strain distribution)를 보여준다.

본 연구에서 개발된 기법은 보다 빨리 접착성 복합재료를 시험하기 위한 방법으로 응용될 수 있으며, 또한 열기계적 하중(thermomechanical loading)하에서의 기본적인 분쇄 유형(fundamental fracture)을 조사하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 이 연구를 통하여 polymer 접합성 joint와 납땜 joint의 피로강도 data를 S-N과 da/dN 곡선들을 그릴 수 있었고, 이들은 또한 fracture-mechanics model로 설명할 수 있었다.

아래의 사진(Fig. 6)들은 위의 실험결과를 보여 주고 있다.

본 연구는 미 국방성 장학금과 Rockwell International Science Center의 지원으로 이루어졌으며, 아래의 웹사이트에서 더 자세한 내용을 알아 볼 수 있다.

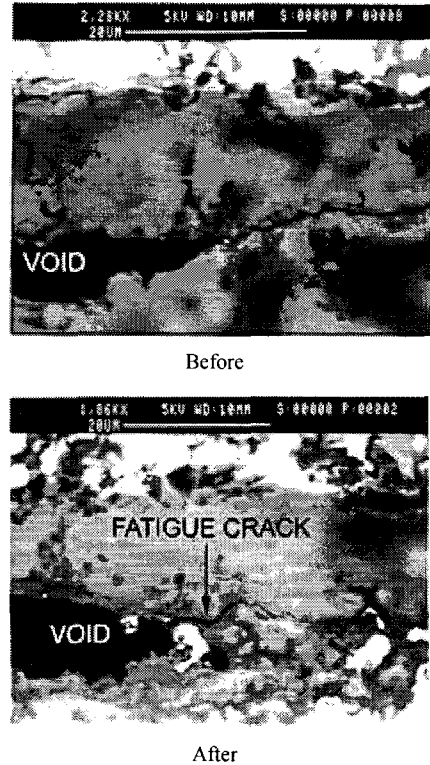


Fig. 6 Piezo-induced Fatigue of a Solder Joint.

<http://web.mit.edu/aeroastro/www/people/spearing/joints.html>

### 3.8 Structural Health Monitoring for Composites

센서기술의 비약적인 발전으로 최근에는 여러 개의 센서를 구조물의 여러 곳에 설치하여 구조물의 안전도(reliability)를 현장에서 즉시 판정할 수 있는 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 본 연구는 이러한 현장 모니터링 시스템을 복합재료로 만들어진 구조물에 적용해 보고자 한다. 현재 몇 가지의 구조물 손상 탐지 기법들 - 예를 들어 frequency response method와 Lamb Waves를 이용하는 방법 등을 조사해 그들의 적용성 여부를 판단하고 있다.

본 연구는 NSF (National Science Foundation)에서 연구비를 지원하고 있다.

## 4. Structures & Materials Program의 복합재료에 관한 연구

MIT의 토목환경공학과(Civil and Environmental Engineer-

ing)내에 있는 Structures & Materials Program은 건설재료로 사용되고 있는 콘크리트 복합재료에 관한 연구와 교육을 행하고 있다. 현재 주로 연구하고 있는 과제와 교수진은 다음과 같다.

< 연구 과제 >

- 고성능 섬유강화 복합 콘크리트의 개발
- 새로운 플라스틱 복합재료의 개발
- Microwave를 이용한 급속 콘크리트 양생(accelerated concrete curing)기술의 개발
- 콘크리트 및 스틸 구조물의 보수, 보강을 위한 플라스틱 복합재료의 사용기술 개발
- Wideband microwave를 이용한 구조물의 비파괴 검사기술에 관한 연구

< 연구진 >

- Professor Oral Buyukozturk
- Professor Jerome J. Connor
- Professor Eduardo Kausel
- Professor Frederick J. McGarry
- Associate Professor Franz-Josef Ulm
- Associate Professor Shi-Chang Wooh

## 5. Building Technology Program의 새로운 빌딩 외장용 복합재료에 관한 연구

MIT의 건축학과 내에 있는 Building Technology Program에서는 빌딩에 사용되는 새로운 복합재료에 대하여 연구를 하고 있다. 중점적으로 연구하고 있는 대상은 빌딩 외장재(envelope)로 사용할 수 있는 새로운 복합재료이다.

최근에 새롭게 개발된 빌딩 외장용 복합재료는 세 가지의 기능 - 구조부재, weather shield, 단열재 -을 동시에 발휘하면서도 자동적인 접합(fabrication)과 조립(assembly)이 가능하다. 본 연구는 여러 건축자재 생산회사 (예를 들어 Alcan International, Dow Chemical, GE Plastics 등) 들이 공동으로 연구비를 지원하였으며, 자세한 내용은 다음의 웹사이트에서 알아 볼 수 있다.

[http://architecture.mit.edu/research/bt/bm\\_cmbe.html](http://architecture.mit.edu/research/bt/bm_cmbe.html)