

# 복합재료 지능성형 기술 (I)

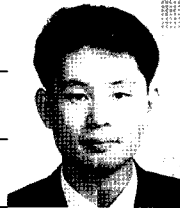
## Intelligent Processing Technology of Composites (I)



**황 병 선**

(KIMM 재료공정연구부)

- '74 - '78 부산대학교 재료공학과(학사)
- '78 - '86 국방과학연구소 연구원
- '86 - '88 Univ. of Dayton 재료공학과(석사)
- '88 - '94 Univ. of Dayton 기계공학과(박사)
- '94 - 현재 한국기계연구원 책임연구원(부장)



**엄 문 관**

(KIMM 재료공정연구부)

- '84 - '88 서울대학교 기계공학과(학사)
- '88 - '90 서울대학교 기계공학과(석사)
- '90 - '95 서울대학교 기계공학과(박사)
- '98 - '99 미국 Northwestern Univ. (Post Doc.)
- '95 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



**이 상 관**

(KIMM 재료공정연구부)

- '81 - '86 경북대학교 금속공학과(학사)
- '86 - '88 경북대학교 금속공학과(석사)
- '88 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

### 1. 서 론

에폭시, 불포화폴리에스터, 비닐 에스터, 페놀 등의 열경화성 수지를 기지로 하는 섬유 강화 고분자 복합재료는 그 성형 과정에서 열과 압력을 필요로 한다. Autoclave 성형의 경우에는 열은 수지의 점도를 낮추어 수지 유동(Resin Flow)를 용이하게 하며, 수지의 화학 반응을 촉진시켜 수지를 경화(Cure)시키는 역할을 하고, 압력은 과잉의 수지를 블리더(Bleeder)에 흡수시켜 제품의 두께를 조절함과 동시에 기공을 최소화시키는 역할을 한다. 또한 금형의 형상 대로 제품을 성형하는 역할도 한다. 따라서 복합재료의 최적 성형을 위해서는 열과 압력의 가해지는 정도와 지속 시간이 적절히 고려되어야 한다. 즉, 복합재료의 성형에 필요한 온도와 압력을 시간의 함수로 나타낸 것을 경화 사이클(Cure cycle)이라고 하며, 이는 복합재료 최종 제품의 품질에 결정적인 역할을 하므로 수지의 종류와 제품의 용도에 따른 경화사이클의 결정은 매우 중요하다. 일반적으로 경화사이클은 기본 열분석, 경험, 시행오차 등에 의존하여 결정되고 있다. 기존의 경험적인 방법으로 결정된 경화사이클을 적용한 제품 제조 공정은 제작 과정의 효율이 낮고, 공정 최적화가 어려워 결과적으로 생산성이 낮아 제조 가격이 높아진다. 경험적인 방법은 종래의 낮은 생산량에서는 가능하였으나 구성재료의 성능향상, 생산성 향상, 품질의 재현성 및 제품의 성능향상 등의 요구사항을 만족하

기에는 한계가 있다. 예를 들면 형상이 복잡한 복합재 제품의 제조 시에 발생하는 스크랩의 발생율은 공정 관리가 비교적 잘되고 있는 선진국의 경우에도 약 40%에 달하고 있다. 즉, 100개의 제품을 제조하기 위해서는 165개의 제품 분량의 원재료가 필요하다는 의미이다. 이와 같이 높은 스크랩 발생율과 제조 공정상의 비예측성(Unpredictability)으로 인하여 선진국에서는 모든 제품을 검사하고 있는 실정이다. 이는 약 25%의 제조 공정 단가에 해당하므로 경험과 시행 착오에 의하여 결정된 경화사이클이 주는 역효과는 매우 지대하다는 것을 알 수 있다. 즉 기존의 경화사이클을 보다 분석적인 방법을 이용하여 개선만 하여도 스크랩의 발생율을 감소시킬 수 있다. 스크랩을 10%로 줄이면 33%의 단가를 줄일 수 있으며, 공정후 검사 경비의 감소까지 함께 고려하면 약 40%의 단가를 낮출 수 있다. 이러한 개념을 항공기 및 미사일 등과 같은 복합재료 실제 제품에 적용하면 제조 단가를 수억 달러 이상 절감할 수 있다.<sup>[1]</sup>

최근 들어 복합재료 연구자들은 복합재료 성형 공정 개발을 경험적 판단에 의존하지 않고 데이터에 바탕을 둔 공정신호분석 시스템의 판단을 활용하는 지능 성형 기술(Intelligent Processing Technology)을 개발하기 시작하였다. 복합재료 지능성형의 의미는 공정 변수 측정 센서, 데이터 획득 및 성형 상태 분석, 공정 학습 및 제어 판단, 제품 품질 등을 상호 연계하여 실시간 성형 제어에 응용하는 총체적 표현을 일컫는다.<sup>[2]</sup> 복합 재료의 각종 성형 공정들(Autoclave 공정, Resin Transfer Molding, Filament Winding, Compression Molding)에는 수치 경화가 공통적으로 수반되므로, 수치 경화 예측에 수학적 모델을 활용하여 경화 과정을 제어함으로써, 시행 오차를 줄이고, 제품 성능과 공정 재현성을 향상시키는 것이 지능 성형의 핵심 연구 분야 중 하나이다. 정밀한 센서, 마이크로 프로세서, 전문가 시스템 소프트웨어, 성능이 우수한 PC 제어

Actuators 등의 발전과 더불어 지능성형에 의한 제품 개발이 점차 현실화되고 있다.

## 2. 국내의 기술적 현황

선진국에서는 80년대 초부터 고품질을 요하는 항공 산업을 중심으로 점차적으로 종래의 성형 방법에 대한 경제성 및 제품 성능 개선의 필요성이 제기됨에 따라 지능 성형에 대한 연구가 시작되었다.<sup>[2]</sup> 초창기의 주요 연구 분야는 항공용 복합재료의 대표적 성형법인 Autoclave 공정 분야이며, 지능 성형 연구는 두꺼운 복합재료의 성형 공정 개발에 집중되었다. 이러한 이유는 두꺼운 제품의 경화 중에 발생하는 발열에 의한 복합재 내부의 불균일 온도 분포는 제품의 불균일한 경화, 기포 생성, 열화 등의 원인이 되어 복합재 부품의 품질을 저하시키므로 이를 방지하고 또한 생산성의 향상이 필요하기 때문이다.

지능 성형 연구의 초기에는 온도와 압력 신호를 전문가 시스템(Expert system)과 결합하는 형태로 개발되었는데, 이는 실시간으로 측정하는 공정 변수를 분석하여 온도와 압력을 적절히 변화시키며 성형하는 방법이다. 하지만 이러한 접근 방식은 수치 자체의 화학 반응 특성인 경화도를 측정하는 것이 아니라 그 결과로 나타나는 온도 변화를 측정하기 때문에 복합재 물성을 최적화하기 위한 분석 방법에 한계가 많다.<sup>[3]</sup> 한편 사회 경제적 및 군사적 측면의 세계 시장 변화로 인하여 성형법의 경제성 요구가 강하게 부각됨에 따라, 고성능 복합재 제조 공정도 전통적 Autoclave 성형법에서 RTM(Resin Transfer Molding) 공법으로 전환하고자 하는 노력이 꾸준히 진행되고 있다. 따라서 Autoclave 성형법 뿐만 아니라 LCM(Liquid Composite Molding)이란 보다 포괄적인 범주에서 지능 성형에 대한 연구가 공정 모델링 및 수치 해석, 공정 변수 모니터링, 공정 능동 제어, 성능 최적화 기법 등을 통합하는 형태로 진행되고 있으며, 이를 통하여 복

합재 부품 제조의 신뢰성 및 생산성을 확보하고자 노력하고 있다. 다시 말해서, 공정의 복잡성이나 성형 교란 요인이 공정 중에 항시 상존하므로 신호 측정, 공정 분석, 성형 제어를 통합적으로 관리하는 것이 제품 성능 및 공정 재현성 확보에 가장 효과적인 대응이라고 할 수 있다.

미 해군에서는 대형 선박 제조에 있어 VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)법을 적용하였는데, 우선 수치 해석 프로그램을 이용하여 공정 분석을 선행하였고, 공정 중에 실시간 유동 감지(On-line sensing) 결과를 수치 해석과 비교하여 제어 방향을 설정하는 방식으로 접근하였고,<sup>[4]</sup> Boeing사에서는 수지의 화학 반응 상태를 실시간으로 측정할 수 있는 유전센서(Dielectric sensor)를 항공 우주용 복합재 제품 제조에 활용하고 있으며,<sup>[5]</sup> 컴퓨터를 활용한 경화 분석 모델(CACC : Computer Aided Curing of Composites)을 개발하였다. 수치 해석을 통해서 각종 공정 상황에 대한 가상 시나리오 세트를 생성하고, 그 결과에 학습 개념을 도입한 신경망 분석(Neural Network Analysis) 기법을 적용하고 CACC와 접목시키는 방식으로 지능 성형에 대한 연구를 진행하고 있다.<sup>[3]</sup> 또한 미 육군 연구소에서는 VARTM 공정에서 수치 함침 상태를 측정하기 위한 센서로 SMARTweave를 개발하였다.

아래에 미국 내에서 지능성형과 관련하여 활발한 연구가 진행되고 있는 기관을 나열하였다.

- 1) National Institute of Standard and Technology, Polymer Composite Laboratory
- 2) Composites Processing Laboratory, Air Force Research Laboratory : Hot melt prepreg machine, Autoclave, Intelligent processing software and hardware
- 3) University of Delaware Composite Center : Advanced Materials Intelligent Processing Center
- 4) Affordable Composite Processing Group,

Florida State Univ. : In-situ process sensing and intelligent control

- 5) Intelligent Materials and Manufacturing Group Laboratory, Lehigh Univ. : Intelligent manufacturing of molding process through real-time sensing and neural network based control, electronically embedded wire
- 6) Center for Intelligent Processing of Composites, Northwestern University, RTM system with Supervisory Control And Data Acquisition(SCADA) System.
- 7) Intelligent Systems Laboratory, Michigan State University

대개의 연구자들은 성형 공정 중에 발생하는 수치 유동 및 경화의 감지와 모니터링을 위하여 Fiber optics, Dielectrometry, Electromagnetic sensors 등의 방법을 다양하게 도입하고 있다. 일본의 Osaka City Univ. 에서는 RTM의 2-D 유동 측정을 위한 다기능 센서<sup>[6]</sup>를 개발하였고 Mitubishi Heavy Ind.에서는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)의 경화에 Dielectric sensor를 이용하여 경화 과정을 모니터링하고 Springer의 cure kinetic 모델을 적용하여 수치 시스템의 경화 등에 활용하고 있다.

국내에서의 연구 동향을 보면 다음과 같다. 복합재료의 지능성형에서 중요한 분야인 적층 복합재 내부의 경화 거동을 측정하기 위한 방안으로, 유전센서, 광섬유 센서(FBG, Fiber Bragg Grating) 등을 이용하여 복합재의 가열 및 냉각 속도를 달리하며 일방향(UD : unidirectional) 복합재의 열적 거동을 모니터링 하는 연구<sup>[7]</sup>가 연세대에서 수행되었다. 또한 Autoclave 성형에 의한 두꺼운 복합재 경화시 복합재 내부온도 및 경화도 분포, 압밀 효과에 대한 실험 및 해석적 연구<sup>[8]</sup>도 KAIST에서 수행되었다. 본 글에서는 주로 복합재 성형시의 지능 성형 개념에 대해 기술하고 있지만, 이미 오래 전부터 제작된 구조물이 실제로 운

용될 때 복합재료의 거동 신호를 모니터링하여 Life cycle을 예측한다든지, Actuator를 삽입하여 위험한 거동을 사전에 제어한다든지, 전체 구조물의 성능을 향상시키기 위한 연구가 스마트 복합재

료(Smart Composites)란 개념으로 수행되고 있다. 다시 말해서, 열팽창율이 매우 낮은 Carbon/Epoxy 적층판, 열팽창계수가 큰 Glass 복합재료 적층판 및 세라믹 PZT Actuator 등을 적절히 배

표 1. 복합재료 지능 성형 관련 국내외 기술 동향 요약

기술분야	국 외	국 내
성형 모델링	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Carbon/Epoxy 시스템의 autoclave, compression 성형 modeling, 등이 수행됨.</li> <li>○RTM 성형, 수지 유동, 가열 및 가압, vent gate 위치 선정 등 유동 모델링, software도 일부 개발.</li> <li>○기본 이론의 개발중심, 실제 적용시 변수가 매우 많기 때문에 customized modeling 위주로 발전</li> <li>○Univ. of Delaware, AFML, Northwestern Uni, 선진국 항공기 제조사 및 협력회사, 독일 FIMRT 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Autoclave Carbon/Epoxy 시스템의 compaction 거동 연구 수행 경험(KIMM)</li> <li>○RTM 수지 유동 modeling 연구로 software 개발 경험(서울대, 기계공학과)</li> <li>○Autoclave를 이용한 Carbon/ Epoxy 성형시 Compaction 거동에 대한 이론적·실험적 연구 수행으로 기초적인 개념, software화 인력 및 실험기법 보유('89 미국특허 보유, KIMM)</li> <li>○RTM 수지 유동 modeling 연구의 software 개발에 참여 경험 인력의 보유(서울대, 기계공학과 졸업자)</li> </ul>
Sensor 및 Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Dielectric, Optical, IR, DSC, Ultrasonic technique의 사용자 자체 개발이용 혹은 상업적 개발 수준</li> <li>○Intelligent processing 관련 산·학·연 기관에서 활발하게 사용 및 정밀도 향상을 위한 연구중임</li> <li>○Micromet measurement, TDR사의 특수 sensor 공급</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○Dielectricometry 기법을 이용하여 경화 모니터링에 대한 기초 실험 경험 보유(KAIST)</li> <li>○선진국에서 적용중인 다양한 기법은 시도된적이 없고 생산 현장에서 적용 경험은 미숙한 단계임 (대한 항공, 한국화이버 등에서 항공기 부품 제작시 T/C를 이용한 온도 monitoring 정도)</li> <li>○고속전철복합재료 변압기 과제와 관련하여 BMI 수지의 유전 특성(Dielectric property)변화 연구 수행 하여 기본 적인 개념의 정립 상태</li> <li>○Autoclave Compaction 거동 연구시 pressure transducer, T/C, DSC를 이용한 monitoring 기법 연구 경험</li> </ul>
인자 및 장치 Control	<ul style="list-style-type: none"> <li>○압력, 온도의 신속한 제어를 위한 각 성형장치에 맞는 독자적인 제어시스템의 구축이 필요한 분야로써 선진국의 컴퓨터 및 interface 기술, 제어, micro motor, 정밀 유압시스템 등의 종합 기술이 활용되고 있음.</li> <li>○AFML의 QPA(Qualitative Proc. Automation), Aerospace Serv. &amp; Control사의 CPC (Composite Processing Control) system</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○국내의 computer 및 interface, 제어, 등의 기술 분야에서는 상당한 발전이 있기 때문에 개발하고자 하는 system에 실제 적용 연구를 통하여 가능 할 것으로 판단됨.</li> <li>○재래식 성형 방법 및 장치에 의하여 수동 제어 기법의 적용 경험, RTM 법에서 Multi-gate, Line-injection, 순차 주입법 개발 경험.</li> <li>○Computer 제어 Metal Matrix Composite 성형 장비의 개발 경험이 있으므로 이를 활용 예정</li> </ul>
AI (Artificial Intelligence), Expert system	<ul style="list-style-type: none"> <li>○국내에서 당 기술 분야에서 integrated system 연구를 수행한 경험은 없음.</li> <li>○Computer 알고리즘 관련 기술로써 많은 인식된 데이터 필드에서 판단하여 즉각적인 대처 혹은 지시를 내릴 수 있도록 도와주는 기술로써 다양한 산업 분야에서 선진국에서 적용하고 있다.<sup>[8]</sup></li> <li>○각 복합재료 성형 시스템에 필요한 알고리즘은 접근하기 어렵고 복합재료 관련 Public field에 있는 보기로 Michigan State Univ.의 COMADE (COMposite Material Designer), COFATE (COMposite FABrication Tech. Evaluator), SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) System 등이 알려져 있음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○국내에서 복합재료 관련하여 당 기술을 적용한 사례는 찾기 어려운 형편임.</li> <li>○타 산업 분야에서의 활용 연구가 도움이 될 수 있기 때문에 국내전문가의 발굴이 필요함.</li> <li>○본 연구 그룹에서는 당 기술에 대한 연구 및 적용 경험이 없으나 Artificial Intelligence 개념은 종합적이며 interdisciplinary 학문 분야이므로 당 연구그룹에서 지니고 있는 computer software, computer 운용 기술, program language(BASIC, FORTRAN, C++)에 대한 기본 능력이 있으면 접근 가능할 것으로 판단됨.</li> </ul>

합하여 복합재의 열팽창계수를 제어하거나 외력에 의해 제품이 비정상적 거동을 할 때 이를 수정할 수 있는 능동·수동 지능 복합재 구조물을 설계 제작하는 연구가 현재 진행되고 있다.

한편 지능 성형에 필요한 공정 모니터링, 공정 분석 기술, 성형 제어 알고리즘 등이 상호 연계된 통합 복합재료 성형 시스템에 대한 연구는 아직 미미한 실정으로 한국기계연구원 복합재료 그룹에서 국가지정연구실 사업의 일환으로 이에 대한 연구를 수행하고 있다. 표 1에 복합재료 지능 성형 관련 국내의 기술 동향 분석을 기술 분야별로 요약하였다.

### 3. 복합재료 지능성형의 설계

성형 설계(Process design)는 최종 요구 물성을 확인하기 위한 공정인자의 결정 및 tooling의 선정 등을 필요로 한다. 유동, 점도 변화, 경화도 등을 예측하기 위한 수치 해석 모델에 대한 연구도 병행되고 있지만, 실제 공정에서는 성형 예측을 어렵게 하는 교란들이 개입될 소지가 높아서 해석 모델의 신뢰도가 떨어진다. 또한 실제적으로 현장에서 활용하기에는 각종 변수 통합 측정 S/W의 부재, 복잡한 부대장치 등의 장애 요소가 있다. 한편 Microprocessor의 발전과 더불어 컴퓨터 제어 계장화(Computer Controlled Instrumentation)와 자료 획득 시스템(Data Acquisition System)이 80년 이후 급속히 발전하였으며, Smart Instrumentation Micro-controller를 활용하여 측정 범위 조정, Calibration 등을 원격으로 조정하거나 주위의 조건에 맞추어 부분 수정(Local Correction)이 가능하게 되었다.

지능 측정(Intelligent Measurement)은 스마트 Instrument 와 데이터 획득시스템의 발전된 단계로 국부 분석(Local Analysis)과 결정 능력(Decision Making Capability)을 갖는 것이다. 자료(Data)를 연속해서 생산하는 대신에 자료를 조사하거나 측정 변수가 변할 때, 지능 측정에서

는 생산되는 정보를 가공, 처리, 혹은 교신을 하는 기능이 추가됨을 의미한다. 기존 시스템이 수많은 데이터를 생산함에 비하여 지능 측정 시스템은 오직 필요한 정보만 주고받아 시스템에 걸리는 하중을 크게 줄여준다.

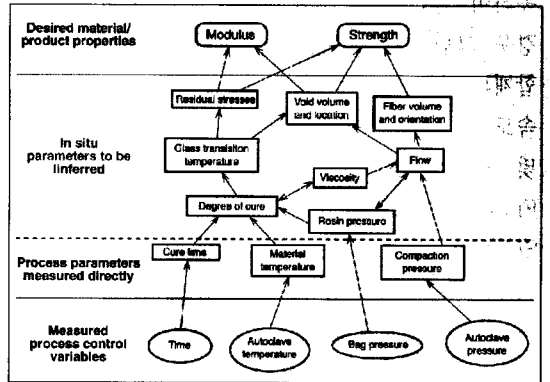


그림 1. 지능 성형 도입시의 Autoclave 공정 변수간 상호 연계성

그림 1에 지능 성형 개념을 도입할 경우의 Autoclave 공정 변수간 상호 연계성에 대하여 설명되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 공정 모델에서 도출되는 성형 변수와 공정에서 센서를 이용하여 직접 측정되는 성형 변수들 간에는 차이가 있으며, 몇 개의 변수의 상호 작용이 새로운 공정 변수를 도출하거나, 직접적으로 변수 값을 측정하는 것이 아니라 모델에 의존하여 간접적으로 공정 변수를 추정하기도 한다. 따라서 지능 성형의 설계는 적용하고자하는 공정에서 중요 인자의 도출, 도출 인자 측정 센서 선정, 측정값 분석 기법, 공정 변수 미래 거동 예측 모델, 실시간 제어 기법의 선정 등을 종합적으로 고려하는 것을 의미한다.

### 4. 센서(Sensors)

지능성형이 가능하려면, 제어 조건의 실시간 결정이 필수적이므로 성형상태 및 재료의 상태를 알아야 한다. 센서의 역할은 성형중의 상태를 정량적으로 측정하여 공정제어 시스템에 정보를 제공

함으로써 공정제어가 가능하도록 돕는 것이다. 센서는 온도, 압력, 유동 및 경화를 감지하기 위하여 사용된다. 온도, 변형율, 저항 등의 변화를 전기적인 신호로 변화시켜 비록 센서가 어떤 주어진 시간에 한가지 데이터만 제공하지만 적절한 분석을 통하여 많은 정보를 유추해 낼 수 있다. 온도의 경우 그림 2에서 설명되는 바와 같이, 감지된 복합재의 온도를 통하여 점도, 경화도, 수지의 반응 속도 등을 예측할 수 있다. 이러한 수지의 유동 및 경화의 감지와 모니터링을 위한 도구로써 Fiber Optics(그림 3), Ultrasonic Sensors, Dielectric Sensors(그림 4), Piezoelectric Elements, Electromagnetic Sensors, DC-Resistance Sensors 등이 활용되고 있다. 유전 센서(Dielectrometric Sensor)의 원리는 유전율, 유전 손실율, 전도율 등이 재료의 상태에 민감한 재료 상수임을 이용한 것으로 특히 유전상수는 경화 상태에 민감하여 경

화 정도를 평가하는 유용한 방법중의 하나이다. 한편 전자기 센서의 경우, 고분자의 특정 부위를 전자기적으로 활성화시키면 분극 메카니즘(Polarization Mechanism)이 발생하여 전기적 특성이 달라지는 원리를 이용한 것이다. 분극 메카니즘은 고분자의 화학구조에 따라 달라지는데 전기적 분극(Electric Polarization), 이온 분극(Ionic Polarization), 쌍극자 배열(Orientation Polarization), 운동 전하(Space Charge Polarization) 등이 있다. 하지만 이러한 재료의 유전 특성들은 온도, 습도, 경화 상태, 주파수 등에 영향을 받아 안정적이지 못한 점이 있다. 유전센서에서 교류를 사용하는데 비하여 DC-resistance 센서는 직류를 사용하며 재료와 표준 저항을 직렬로 연결하여 전압을 측정하는 원리를 이용한 것으로 Dielectrometry를 활용하는 것 보다 저렴한 방법이다.<sup>[9]</sup> 표 2에 사용되는 센서 및 용도를 요약하였다.

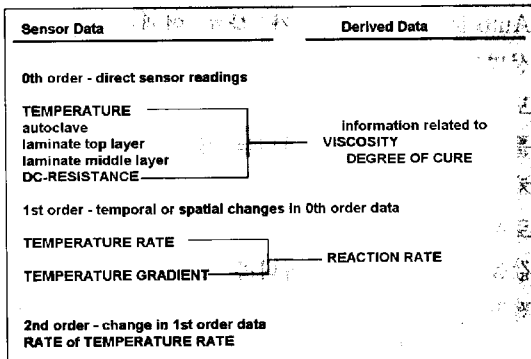


그림 2. 수지 경화 상태 예측을 위한 공정 온도의 활용



그림 4. 유전센서(dielectric sensor)시스템

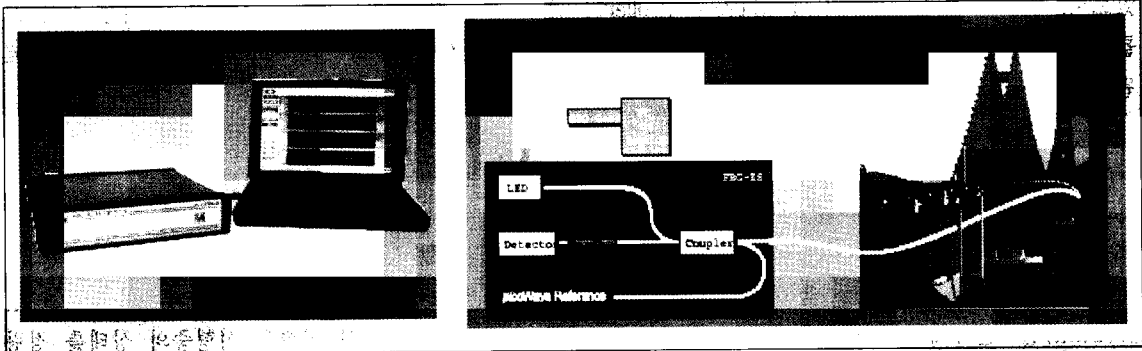


그림 3. 온도 및 변형율 측정을 위한 광섬유(fiber optic) 센서 시스템

### 5. 능동 제어(Active control)

복합 재료 성형 공정에 있어서 주의해야 할 특성 중에 하나가 외부 교란에 상당히 민감하다는 것이다. 다시 말해서 각각의 부품 제조시 마다 공정 상황이 품질에 영향을 미칠 만큼 외란에 의해서 달라질 확률이 높다는 것이다. 따라서 성형 공정이 숙련된 작업자의 집중을 요하며, 품질 관리에 어려움이 많다. 이러한 공정상의 문제를 극복하기 위해서는 공정 상황을 실시간으로 파악하고 상황에 따라 복합재의 품질을 확보할 수 있는 방향으로 성형 조건을 수정하는 실시간 제어가 필요하다. 공정 상황의 실시간 파악은 적절한 센서를 이용하여 공정 변수를 모니터링하면 가능하며, 공정 상황 예측 및 제어는 Decision Tree 기법이나 신경망 분석(Neural Network Analysis) 기법을 활용하면 가능하다. Decision Tree나 신경망 훈련(Neural Network Training)에 필요한 자료는 공정 모사 모델(Process

Simulation Model)을 활용하여 생성할 수 있다.

그림 5에 능동 제어를 이용하여 수지 경화 사이클을 제어한 예가 주어져 있다. 일반적으로 일정한 승온율과 일정 온도 구간의 조합으로 이루어진 경화 사이클은 복합재 내부와 표면간에 높은 온도차를 유발할 가능성이 높으며, 이로 인해서 내외부가 판이하게 다른 온도 및 경화 History를 거치므로, 결과적으로 잔류 응력의 과

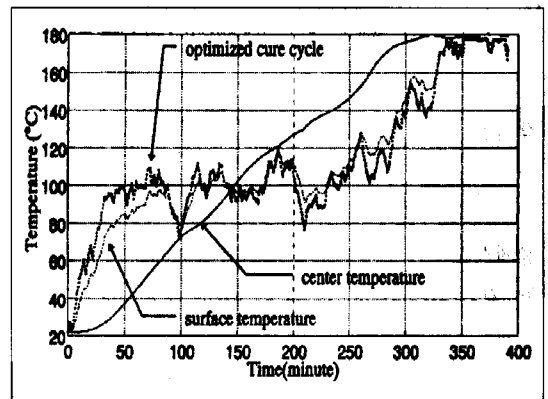


그림 5. 지능 제어에 의한 경화 사이클 적용 예

표 2. Sensors and Sensing Techniques

Sensor Type	Measures Changes In	Used to Monitor	Examples
Spectroscopic	chemical state	flow cure	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vibrational spectroscopy</li> <li>Raman spectroscopy</li> <li>UV-vis spectroscopy</li> <li>Fluorescence</li> <li>Chemiluminescence</li> </ul>
Electromagnetic	electrical properties(e.g. capacitance & conductance)	temperature flow cure	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dielectric(AC)</li> <li>SMARTweave(DC)</li> <li>Arrival-Gel-Cure(DC)</li> </ul>
Visual	externally visible process changes	flow	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optical camera with software</li> <li>Technician</li> </ul>
Thermal	temperature	temperature (exotherm initiation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Infrared thermography</li> <li>Thermocouples</li> </ul>
Wave Propagation	mechanical response	flow cure	<ul style="list-style-type: none"> <li>Direct Measurement</li> <li>Surface wave</li> <li>Reflectance</li> <li>Wave guide</li> <li>Acoustic Emission</li> </ul>
Mechanical	pressure & viscosity(stiffness)	pressure(demolding cure)	

다한 발생이나 복합재 내부의 열화(Degradation)를 유발시키는 요인이 된다. 따라서 제품 표면 온도와 밀접하게 연관되는 분위기 온도를 통상적인 경화 사이클에서 탈피하여 지능 제어를 하면 제품 표면과 내부의 온도차를 최소화 할 수 있으므로 건전한 방향으로의 온도 및 경화도 조절을 통하여 제품의 건전성 확보가 가능하다.

6. 요약

복합재 제품의 응용 확대에 있어서 실제적인 장벽은 높은 가격 때문이다. 특히 고성능을 요하는 항공우주, 군사적 응용 부분에서는 고품위의 복합재료 부품을 제작하기 위하여 모든 제조 과정에서 기술자의 판단 및 경험이 필요하므로 제조 가격이 높아지는 현상이 뚜렷하다. 그 중요한 원인 중의 한가지가 부적절한 성형 기술에서 온다. 따라서 기술자의 숙련도와 경험에서 탈피하여, 기존의 성형 기술을 이론적 모델과 온도, 압력, 경화도 등의 측정 정보와, 학습된 컴퓨터의 판단을 활용하여 통합 제어시스템을 구축함으로써, 다시 말해서 지능 성형을 구현함으로써 생산성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 글에서는 국내의 기술 개발 현황과 지능 성형을 위한 개념설계, 센서의 종류와 역할, 능동 제어의 필요성 등을 서술하였다. 후속 편에서는 RTM 성형법에 대한 지능 성형 기술에 대하여 집중적으로 기술하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] P. D. Hilton and P. W. Kopf, "Aerospace Market for Composites Poised to Take Off," Research & Development, February, 1989, pp.94-101.  
 [2] R. A. Servais and C. W. Lee, "Intelligent

Processing of Composite Materials," SAMPE Journal, Sep/Oct. 1986, pp 14-18.  
 [3] Personal communication, I. M. Daniel, Northwestern University, Dec. 1999.  
 [4] S. G. Advani, "The Role of Virtual Manufacturing in Liquid Molding of Composites," On-Line Sensing and Control for Liquid Molding of Composite Structures, Annapolis, MD, Apr. 14-15, 1999.  
 [5] J. Griffith and T. Hackett, "Implementation of Dielectric Sensors into Composites Production," On-Line Sensing and Control for Liquid Molding of Composite Structures, Annapolis, MD, Apr. 14-15, 1999.  
 [6] S. Motogi, T. Itoh, T. Fukuda, "Multi-Functional Sensor Properties and 2-D Flow Detection for RTM," Proceedings of 6th Japan International SAMPE Symposium, Edited by T. Tanimoto and T. Morii, Oct. 26-29, 1999, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan, pp.1033-1036.  
 [7] 김승택, 전홍재, 최홍섭, "삽입되어진 광섬유 센서를 이용한 일방향 적층 복합재료의 열적 거동 연구," 한국복합재료학회 추계 학술 발표대회, 충남대학교, 대전, 1999. 11. 12.  
 [8] 오제훈, 이대길, "유리섬유 강화 후판 복합재료의 경화공정 해석," 한국복합재료학회 춘계 학술발표대회, 부산대학교, 부산, 2000. 4. 14.  
 [9] C. W. Lee, B. Rice, and M. Buczek, "Direct Current Resistance Based Resin State Sensors," 41st International SAMPE Symposium and Exhibition, March 24-28, 1996, pp.1511-1517.