

Resin Transfer Molding법을 이용한 복합재료 지능성형 기술 (II)

Intelligent Processing Technology of Composites by
Resin Transfer Molding Method(II)



황 병 선

(KIMM 재료공정연구부)

'86 - '94 미 Dayton대 기계공학과(석·박사)
'94 - 현재 한국기계연구원 책임연구원(부장)



엄 문 광

(KIMM 재료공정연구부)

'88 - '95 서울대학교 기계공학과(석·박사)
'95 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이 상 관

(KIMM 재료공정연구부)

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



변 준 형

(KIMM 재료공정연구부)

'86 - '91 미 Delaware대 기계공학과(박사)
'93 - 현재 한국기계연구원 책임연구원(그룹장)

1. 서론

고성능 복합재료 주요 성형법에는 autoclave성형법, Filament Winding(F/W)법, Resin Transfer Molding(RTM)법이 대표적인 예이다. Compression molding(압축성형)법, 진공성형법 등은 전통적인 방법이며 앞의 방법에 기초가 되는 성형방법이다. Autoclave 방법과 F/W법은 비교적 오랫동안 고성능 복합재료 부품제작에 적용되어 제작공정이 체계화되어 있는 편이다. 그러나, 경험적인 요소의 최소화와 제품의 재현성 등을 위하여 지능성형의 개념 도입이 필요한 사항이 있다. 이에 반하여 RTM방법은 앞의 두 가지 공정의 단점을 보완하는 공정으로 최근에 많이 연구되고 있다. 따라서 현재 적용과 개발이 진행중인 공정으로 새로운 개념을 도입하기에 쉽고, 공정의 특성상 온도, 압력, 진공도, 수지의 점도, 수지충전 등을 조절할 수 있는 조건이 마련되어 있기 때문에 지능성형 개념을 적용하기에 편리하다. RTM의 기본 사항은 잘 알려져 있지만 실제 생산과 관련하여 구현하기 위해서는 성형 장치의 개발이 고성능화 및 지능성형화된 RTM의 요체이다. 따라서 본 논문에서는 RTM방법을 이용한 복합재료의 지능성형 기술에 대하여 논하며, 기본적인 사항과 현재 알려진 시스템의 구성 및 개발에 대하여 논하고자 하였다.

2. RTM 지능성형을 위한 기초

RTM 공정은 단힌 금형내부에 있는 건조한 프리폼내부로 수지를 철저하게 충전시켜서 기포 혹은 함침이 안된 부분이 없도록하여 가열을 통하여 수지를 경화시켜 고성능 제품을 얻는 과정을 말한다. RTM 공정의 핵심 기술은 프리폼 제조, 금형 충전 및 경화공정 등이다. 이의 해석을 위해서는 보강재(투과성 계수) 및 수지의 물성(점도, 경화도)을 알아야 한다. 일단 물성이 확보되면 금형 설계(주입구/배출구 선정) 및 성형 조건의 결정을 위하여 금형 충전 및 경화 해석을 수행하여야 한다. 이 사항을 도식적으로 표현한 것이 Fig. 1에 나타나 있다.

2.1 수지 및 보강재

RTM용 수지의 선택 시 고려하여야할 변수들로는 점도, 가사 시간(pot life), 유리 천이 온도(glass transition temperature, Tg), 수분흡수 정도 등이 있다. 낮은 점도는 보강재와의 젖음성을 좋

게 하고, 금형 내의 보강재가 수지 충전중의 압력에 의하여 변형되는 것을 막아주며, 몰드 충전율(mold filling rate)이 증가하므로 바람직하다. 가사 시간은 수지 주입을 완료할 수 있을 만큼 충분히 길어야 한다. 유리 천이 온도는 복합재가 높은 온도에서도 구조재로서의 역할을 충분히 담당하기 위하여 사용온도보다 50~100°F정도 높아야 한다. 그리고 RTM용 수지는 화학적으로 안정하여야 하고, 겔 후에 경화가 빨리 일어나야 하고, 잔금이 생기지 않아야 하고, 인성이 높아야 한다.

통상적인 RTM성형품에 사용되는 수지는 polyesters, vinylesters, metacrylates, acrylamates 등이 사용되고 있는 데, 이는 주로 상온에서 경화되는 수지들이다. 이들 수지는 사용온도가 낮기 때문에 우주 항공 부품 등 고성능이 요구되는 분야에는 적절하지 못하다. 고성능 복합재료 성형용으로 사용되는 RTM 수지는 주로 고온 경화용으로 내식성, 고온 특성 및 보강섬유와 compatibility가 우수한 수지들이 많이 사용되고 있다. 대표적인 수지로는 bisphenol-A type인 epoxy수지가 가장 많이 사용되고 있으며, 이 의

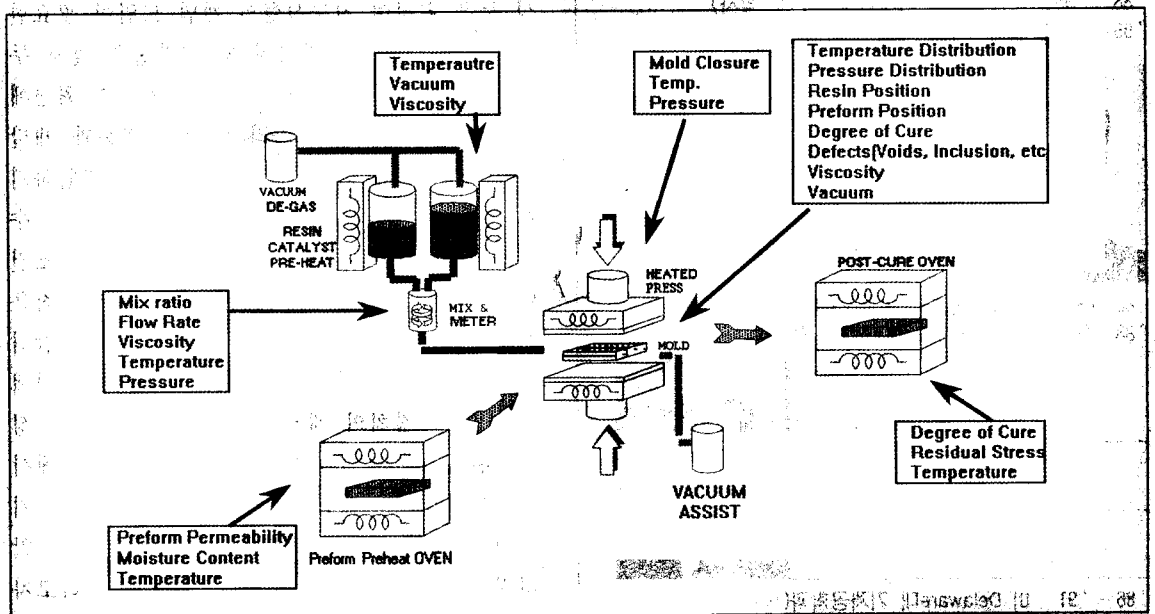


Fig. 1 RTM Processing Parameters

에 bismaleimides, polystyrylpyridines 등이 사용되고 있다. 이 수지의 대표적인 장점은 성형성이 우수하며, 저온/저압 경화가 가능하며, 200°C 이상에서도 고온 특성이 유지되며, 내화성이 우수한 장점을 가지고 있다.

최근에 일종의 reactive oligomer인 "cyanated ester"가 고온용 열경화성 수지중의 하나로 일반화되고 있으며 특히 RTM용으로도 사용이 가능하다. 이 수지의 독특한 특성은 epoxy 수지와 같이 취급성이 양호하고 열적 안정성이 우수하며, 점도가 낮다는 것이다. Backbone structures에 따라 이 수지의 Tg는 260°C부터 290°C사이(Dow and Rhene Poulenc Material)와 400°C(Allied-Signal's PT resin)로 다양하다. 이 수지는 높은 Tg와 취급성이 용이하므로 고성능과 대형 부품 제조에 많이 사용될 전망이다.

열경화성 수지는 경화될 때 발열 반응을 하므로, 이로 인하여 복합재 내부 온도의 불균일 분포가 존재하고, 금형 충전 중에도 경화도에 따라 수지의 점도를 변화시키므로 공정 최적화를 위해서는 점도 및 경화도 모델이 필요하다.

RTM용 보강재의 선택시, 부품의 형상, 크기, 두께, 요구 성능을 충족하기 위해서는, Fabric 등의 보강재는 부품의 외형 윤곽에 따라 변형되는 형상 적응성이 높아야 하고, 보강재와 수지 사이에 젖음성이 우수하여야 한다. RTM에 사용되는 보강재의 형태는 continuous strand mat, woven fabric, knitted fabric, braided fabric 등이 사용되

고 있다. RTM용 보강재는 주로 carbon, Kevlar, glass 섬유 등이 단독이나 혼합형태로 사용되고 있으며, 항공기용 고성능 복합재료의 RTM 성형에 필요한 원재료는 연속 섬유 형태의 carbon 섬유, Kevlar 섬유가 2-D fabric 형태로 널리 사용되고 있다. 최근에는 복합재료의 생산성 향상 기술에 대한 요구가 증대되어 자동화된 textile 프리폼 제조 기술을 RTM과 같은 고생산성 성형 기술과 접목하여 항공기 구조물에 응용하려는 노력이 진행되고 있다.

2.2 투과성 계수

투과성 계수는 보강재의 유동 전도 특성이다. 보강재는 형태상 일방향 섬유와 섬유 직물, random mat 형태로 구분할 수 있는데, 일방향 섬유, 섬유 직물은 주로 autoclave성형에, 섬유 직물, random mat는 RTM 공정에 많이 쓰인다.

Table 1에 요약한 바와 같이 일방향 섬유 다발내에서의 수지유동에 대한 많은 연구가 진행되었는데, 삼각 및 사각배열의 경우, 섬유 축방향 유동(axial flow)과 섬유축 수직방향 유동(transverse flow)에 대한 수치 및 해석적 연구와 실험적 연구들이 시도되었다. 해석해와 수치해를 시도한 연구자들은 Stokes 방정식이나 Darcy 방정식의 보완적인 Brinkman 방정식을 이용하였다. 축방향 유동에서, 해석해는 높은 기공도에서 사각배열이나 삼각배열이 서로 잘 일치함을 볼

Table 1. 일방향 섬유의 축방향 유동 투과성 연구

Researcher	Fiber/ v_f Range	Fluid	Comments
Sullivan ^[1]	Goat and glass wool, hair, copper wire steel rod	Air Air	Ideal bed
Williams et al. ^[2]	Nylon, carbon starch and silane glass oil, epoxy, glycerol	Nitrogen	
Gutowksi et al. ^[3]	Carbon	Oils	
Drummond & Tahir ^[4]	Entire v_f		S, T A
Larson & Higdon ^[5]	Entire v_f		S, T N

S = Square array

A = Analytical solution

T = Triangular array

N = Numerical solution

수 있다. 기공도가 작아지면서 배열의 영향이 강해지고, 또 축방향 유동에서는 같은 기공도라고 하더라도 사각배열이 삼각배열에 비해 유동저항이 작으므로(삼각배열은 점성의 효과가 유로에 골고루 전달되므로 결과적으로 유동저항이 큼) 큰 투과성 계수값을 나타낸다. 실험 결과들은 해석해보다 높은 투과성 계수값을 보인다.

섬유 축방향에 수직한 유동에서도 역시 높은 기공도에서 해석해가 배열에 상관없이 잘 일치하며, 또한 실험과도 잘 일치한다. 기공도가 낮아질수록 배열의 영향이 뚜렷해지며 축방향 유동에서보다 훨씬 강하게 나타난다. 축방향 유동에서와는 달리 사각배열이 보다 높은 투과성 계수 값을 보이는데, 이는 유동저항의 대부분이 노즐목 부분에서 형성되는 축에 수직한 방향 유동의 특성에 기인한다. 같은 체적율이라고 하더라도 사각배열이 삼각배열보다 노즐목의 유로가 작아서 유량이 작으므로 작은 투과성 계수값을 보이게 된다. 실험 결과들이 넓게 분포하고 해석해도 만족스럽지 못한 결과를 보이는데 이는 유동 단면 내부의 섬유 체적율의 분포가 유동에 지배적인 요인으로 작용하기 때문이라 생각된다.

2.3 수치 충전 및 경화 해석

수치해석은 해석기법(유한요소법, 유한차분법, 경계요소법)이 어떤 것인지에 관계없이 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 첫째는 계산에 사용된 격자를 매 계산시마다 이동시키며 격자를 재생성하여 수지의 전진면을 정확하게 예측하고자 하는 것으로 이 방법은 계산 시간이 상대적으로 길다는 단점이 있다. 둘째는 고정 격자계를 사용하는 것으로, 수치 전진면을 따라가며 격자를 재생성하지는 않지만(검사체적법, Control Volume Method) 계산 시간을 효과적으로 단축할 수 있는 방법이다. 현재 사용되는 방법은 고정 격자계를 사용한 FAN(Flow Analysis Network) 방법이 주류를 이루고 있으며 성공적으로 적용되고 있다.

2.4 경화 모니터링

복합재료의 경화를 모니터링하기 위한 센싱 기술은 크게 유전기법(dielectric method), 초음파 기법(ultrasonic method) 및 광학기법(optical method)의 세 가지로 나누어 볼 수 있다[Table 2]. 주파수에 따른 임피던스를 측정하는 방법인

Table 2. 경화 모니터링 센싱 기술 비교

비교 항목	유전기법	초음파 기법	광학 및 분광기법
처리속도	매우 우수	매우 우수	매우 우수
Sampling 부피	국부	전체, 국부	매우 국부
수지형태			
- 열경화성	매우 우수	매우 우수	매우 우수
- 열가소성	매우 우수	우수	양호
섬유형태	우수	매우우수	매우 우수
측정 고려사항			
- 제품내부 특성	센서 내장 필요	매우 우수	센서 내장 필요
- 센서의 다목적성	양호	나쁨	우수
온도 범위	상용 센서 최대 370℃	최대 205℃	모든 온도 범위 가능하나 상용화 미진
제조환경 사용가능성	우수	우수	양호
데이터 해석	우수	우수	우수 - 매우 우수

유전기법은 가장 큰 발전을 보이고 있고 최근 응용이 많은 반면, 초음파 기법을 이용한 경화 모니터링 기술은 앞으로의 가능성은 크지만 측정된 결과와 재료특성을 연관시켜 주는 모델이나 전반적인 이론이 취약하여 제한적으로 사용되고 있다. Fourier Transform Infrared(FTIR) Spectroscopy를 이용한 광학기법은 아직 실험적으로 사용되고 있고 초기 연구 단계에 머물러 있다. 이러한 방법들은 경화상태에 대하여 서로 다른 정보를 제공하고 있기 때문에 유일한 방법이 될 수 없으며 서로 병용함으로써 복합재료의 경화에 영향을 미치는 복잡하고 다양한 변수를 정확하게 모니터링 할 수 있다.

2.5 수지유동 선단 감지

RTM 성형법에서 가장 중요한 문제는 수지충진 시 금형 내에 수지가 채워지지 않는 부분(dry spot)이나 섬유배열이 흐트러지는(fiber washout) 현상인데, 이를 해결하기 위해서는 수지 유동선단을 모니터링함으로써 수지충진 과정을 최적화하는 것이다. 현재, 수지유동 선단을 센싱하는 방법은 직류저항을 이용하는 것으로서, 이 방법은 수지점도와 경화도 측정도 가능한데, grid sensor 형태와 point sensor 형태가 있다.

SMART(Sensors Mounted As Roving Threads) Weave

이것은 상용화된 제품이며, 전도성 선(strand)이 직각으로 배열된 grid 형태로서 유리 섬유 프리폼과 같은 비전도성 재료에 의해 분리되어 있다. 보통 사용되는 센싱 섬유로는 금속 피막 처리된 아라미드 섬유나 카본섬유인데 그 이유는 이러한 섬유가 복합재료에 많이 사용되기 때문이다. 전도성 매질인 액상 수지가 node를 형성하고 있는 두 개의 sensing strand를 지나게 되면 전압이 떨어지게 됨으로써 수지의 존재 여부가 확인된다. 이 방법의 장점은 $N \times M$ 지점을

모니터하기 위해 $N+M$ 개의 channel이 필요하다는 점이며, 현재 상용화된 측정장치 및 s/w 프로그램이 개발되어 있다. 단점으로서, 센서의 접촉 면적이 작기 때문에 전도성이 매우 낮은 수지의 경우 detect하기가 힘들며, 제품을 제조할 때마다 센서 그리드를 배열해야하는 번거로움이 있고 전기적 단절로 인한 잘못된 정보를 줄 수 있다는 점이다.

Point Sensor

이 방법은 열전대를 그대로 이용할 수 있기 때문에 매우 저렴한 방법이며 기존의 열전대 측정 port에 연결하여 사용할 수 있으므로 특별한 장치 구성이 필요하지 않는다. 또한, 센서를 금형에 영구히 고정하여 사용할 수 있으므로 생산 현장에서 매우 유리하다. 현재로서는 s/w 프로그램의 상용화가 되어 있지 않지만 센서의 wet-out 시간을 2차원 내삽을 통하여 유동선단 진행 과정을 재구성하는 프로그램을 개발함으로써 사용자에게 적합한 전체 시스템을 독자적으로 구성할 수 있다.

2.6 잔류응력 감지 및 측정

복합재료의 경화가 끝나고 냉각되는 중에는 수지와 섬유 사이의 열팽창계수의 차이로 인한 응력 발생으로 크랙이 생성된다. 이러한 응력은 섬유 자체의 열팽창 계수가 길이방향과 반경방향이 다르기 때문에 매우 크고 복잡하게 나타난다. 복합재료의 냉각 중에 발생하는 잔류응력을 측정하는 방법으로는 음향 방출법(AE, Acoustic Emission)이 가장 효과적이다. 이 방법에서는 센서를 사용하여 재료 내부를 전파하는 미세한 disturbance를 감지하고 이 신호를 분석하여 disturbance의 근원인 미세 크랙을 확인하는 것이다. 실험에 의하면, 급격한 냉각은 크고 빈번한 AE burst를 보여주며 서서히 일어나는 냉각은 작고 덜 빈번한 AE 활동을 보여준다. 이러한 현

상은 급격한 냉각의 경우에는 더 많은 미세 크랙이 형성되고 이 크랙은 잔류응력을 감소시키기 때문이다. 또한, AE 신호와 복합재의 기공 형성 과도 분명한 연관 관계가 있다고 알려져 있다.

3. RTM 지능성형 기술

종래의 RTM 시스템 설계는 재료의 측정, 혼합, 가압펌프에 의한 수지 주입을 바탕으로 한다. 다시 말해서, 수지 및 경화제 펌프는 정밀하고, 고압 기어펌프는 모터, 감속기, 펌프헤드 등으로 이루어져 있다. 전통적인 방법의 단점은 수지의 계량과 주입을 통합하여 조절하는데 한계가 있고 독자적으로 조절해야한다. 매우 정밀한 수지 및 경화제의 계량이 수지 주입시 발생하는 반발 압력에 의하여 무용하게 되기 쉽고 주입과 관련된 최적화되지 못한 수지 토출속도가 발생할 수 있다. 따라서 지능 RTM의 개념을 도입하는 초기 단계로써 수지의 계량과 주입을 분리하

는 시스템[Fig. 2]의 설계가 이루어졌다.^[6] 이 경우 중간 저장 탱크를 도입함으로써 주입 펌프가 방해 받는 순간에도 적절한 양을 모아 둘 수 있기 때문에 매우 실용적이다. 또한 저장 탱크로 인하여 기포 및 가스 방출에 매우 효과적이며, 새로운 모드로 작동하여 매우 정확한 비율로 주입하게 해준다. 이 사항은 종래의 단순RTM 성형법에서 벗어나 RTM 성형의 지능화에 수지의 정확한 유동 조절을 위한 가장 기본적인 개념의 변화를 보여준다.

이러한 시도는 노스웨스턴대 복합재료 지능성형 센터에서 이루어졌고, 수지 주입을 지능적으로 제어하기 위하여 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템을 개발하여 성공적으로 적용하고 있다.^[7]

앞에서 언급된 바와 같이 다음으로 중요한 사실은 경화(cure) 제어 부분이다. 복합재료를 이루는 기지재의 최적의 조건에서 완벽한 경화를 유도하는 방안을 고안해야 한다. 수지의 경화에

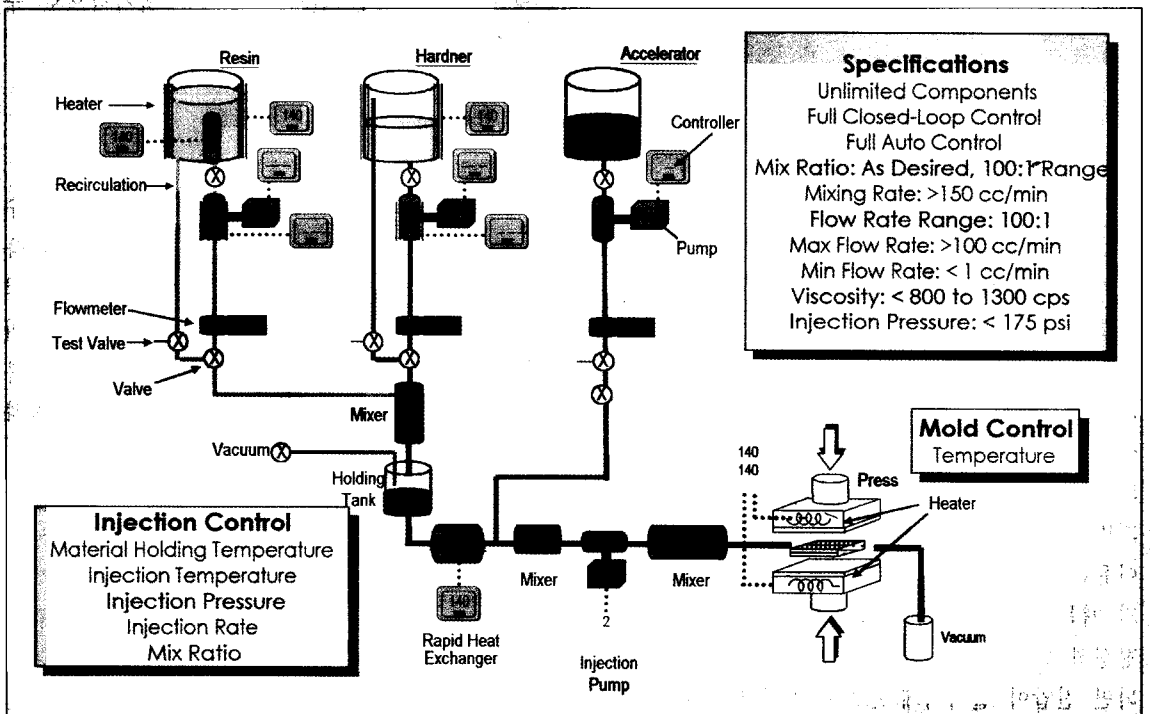


Fig. 2 노스웨스턴대의 Innovative Advanced RTM System

이르는 화학적 메카니즘의 이해가 필수적은 아니지만, 열적인 특성화 작업을 통한 Tg, viscosity, degree of cure 등의 자료를 확보해야 한다. 금형내부의 보강재사이에 주입된 수지의 경화를 제어할 수 있도록 센서, 신호 감지, 가열 장치의 제어 등이 필요하다. 경화촉진제의 조절, 주입 수지의 온도 조절 등도 이에 연계되어 있다. 또한 경화시 발생하는 수축에 의한 잔류응력 등의 감지를 위한 감지 시스템의 구축도 필요하다. 수축문제는 Tg와 냉각 절차에 상당히 관련^[8]이 있기 때문에 이를 반영해야 한다. Fig. 3은 수지 유동과 경화제어를 전제로 파라미터의 데이터 획득과 능동제어(adaptive control)의 관계를 도식적으로 표현하였고 이 기본적인 개념을 도입하여 총체화된 통합제어 RTM 시스템의 구축이 RTM 지능 성형 복합재료의 제작에 가장 필수적인 부분이다.

3.1 통합 제어 시스템의 개발

지능 성형의 개념을 RTM 공정에 구현하기 위해서 제작해야할 하드웨어는 크게 수지 사출 장치, 공정 변수 측정 장치, 공정 변수 분석 장비 제어 장치로 분류할 수 있다. 여기에 이들 하드

웨어를 운용하는 소프트웨어를 추가하여 통합 시스템을 구성한다.

RTM 공정의 기본 요소들로는 수지 충전 과정, 경화(금형 온도 및 체결) 과정, 수지 충전 및 경화 중의 공정 신호(온도, 압력, 유전율, 수지 함침도) 측정 과정 및 지능 제어 과정으로 분류 할 수 있다. 아래에 언급되는 사항은 상기 개념에 따라서 RTM 지능 성형 시스템의 한 일례로써 한국기계연구원에서 개발 중인 시스템 위주로 설명하고자 한다.

3.2 수지 사출

수지 사출은 보강재가 기 충전되어 있는 금형 내에 수지를 충전시키는 공정으로 제어 프로그램에서 유량을 설정하여 피스톤을 구동시키는 공정이다. 이때 수지 저장조의 수지 온도도 제어 프로그램에서 제어한다. 기존의 장비들은 피스톤 운동 방식을 채택하여 수지 주입 유량을 기계적으로 제어하지만 피스톤의 전진이나 후진시 수지 사출이 이루어지지 않아 결과적으로 단속적으로 수지를 금형 내로 주입하게 된다. 일반적으로 수지는 2액형이 많이 쓰이며 특수 용도로 3액형을 쓰는 경우도 있다. 그러나 본 소고에서는 수지 사출 시스템

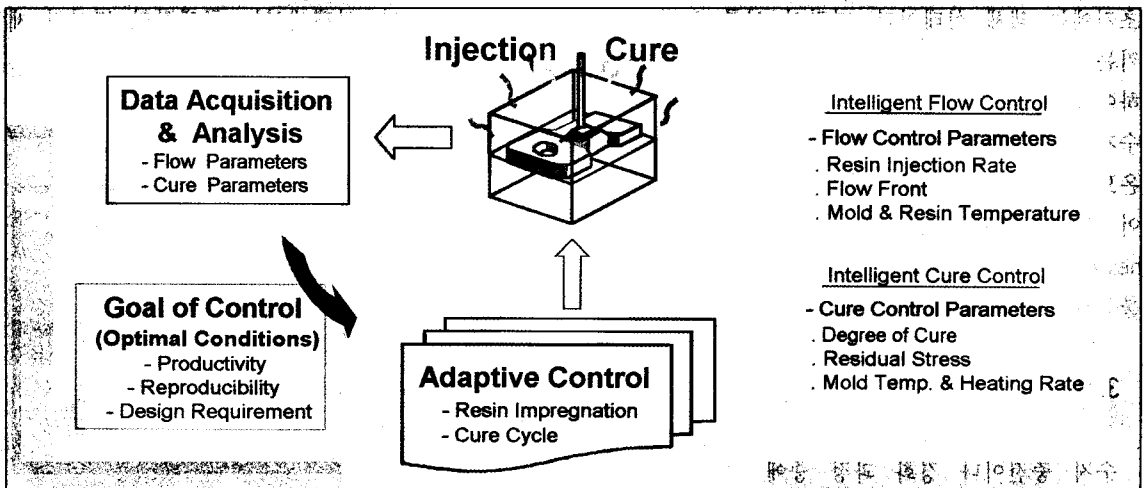


Fig. 3 RTM 지능성형의 개념

은 2개의 실린더가 랙-피니언(rack and pinion) 형태의 왕복 운동부에 동시에 연결되어 연속적으로 수지를 금형 내로 주입할 수 있도록 하여 지속적인 수지 충전이 가능한 시스템을 설명하였다.

주입 장치 기구부에는 수지 저장조(60℃, Silicone rubber heater, 진공 장치), 수지 주입 Gun(self mixer형, solvent 세척형), 정량 토출 실린더(AC servo motor를 이용한 single motion 제어방식으로 수지 비율을 1/100까지 미세 조절 가능), 변속기 및 모터로 구성되어있다. 이 장치는 일반적으로 소개되고있는 air assistance bar제어나 air regulator조절 주체 경화제 비율 제어장치와는 달리 AC servo motor를 이용한 전자 유량 제어식 RTM 수지공급 장치이다. 이 장치의 경우는 수지 최대 사출 유량이 분당 21이며, 주체 A와 경화제 B의 비율은 1:1에서 1:100까지 제어할 수 있으므로 RTM에서 일반적으로 상용화되고있는 수지 및 실험용으로 활용하고있는 특수용도 수지의 주입기로도 사용할 수 있어 향후 구동 방식의 변화에도 기여할 수 있는 모델장치로 활용도가 높은 장치라 할 수 있다.

3.3 금형 온도 제어

RTM 공정에 쓰이는 수지는 열 경화성 수지로 초기에는 액체 상태이다. 따라서 이를 고체화시키는 과정을 경화라고 하며 통상적으로 열을 가하여 고체화시킨다. 열은 금형 온도를 제어하여 수지에 가하게 되며, 수지의 반응 속도를 금형 온도를 통하여 제어할 수 있다. PC에 탑재된 제어 프로그램에서 온도를 설정하고 통신으로 heater controller에 제어 명령을 내려 금형 온도를 제어한다.

3.4 공정 신호 측정

수지 충전이나 경화 과정 중에 변하는 공정 변수는 온도, 압력, 유량, 유전율, 수지 함침도 등

을 들 수 있는데 공정 중에 이들의 변화 과정을 모니터링 함으로써 공정의 진행 과정을 파악할 수 있으며 이들을 분석함으로써 공정을 개선하고 지능 제어를 구현할 수 있다. 공정 변수들은 각각의 특성에 따라 적합한 센서를 사용하게 되며 적절하게 증폭 변환된 센서 신호는 통신 보드나 A/D 보드를 통하여 PC로 입력 및 전송되며 제어 프로그램에 의하여 화면에 표시되거나 데이터 파일로 저장되어 분석 자료로 활용된다. 슬래노이드 밸브는 센서 신호를 분석하여 수지 주입구나 배출구 개폐에 이용된다.

3.5 장비 통합 제어 프로그램

통합 제어 프로그램은 시스템 검사, 공정 상황, 수지 사출, 금형 제어, 신호 처리, 지능 성형, 도우미 등의 구성 요소들로 이루어져 있으며 이들이 유기적으로 상관 관계를 맺고 있으며 서로의 설정 및 측정 데이터를 공유하도록 프로그램되었다. Fig. 4는 RTM 시스템을 통합하여 제어하는 메인프로그램의 첫 화면이다. 본 프로그램은 공정변수나 공정설정을 선택적으로 원하는 것에 대하여 저장할 수 있도록 설계되어, 다음 공정에서 이전 공정을 그대로 재연하거나 공정을 분석하는 것이 가능하여 공정 최적화나 표준화가 용이하다. 아래에서는 구체적인 몇가지 제어 과정의 예를 들어 설명하였다.

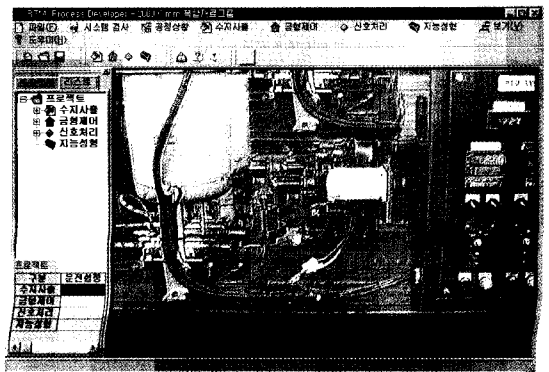


Fig. 4 RTM 시스템 통합 제어 메인프로그램

Fig. 5는 메인 프로그램에서 접근하여 공정 중의 상황을 파악할 수 있도록 고안된 것이다. 공정 상황에서는 제품이나 금형의 형태가 들어 있는 data file을 3차원으로 그려서 회전, 확대, 축소 등의 동작을 수행할 수 있다. 그리고 주입구나 벤트의 위치를 지정하거나, 온도, 압력, 유전율 등을 측정한다면 제품이나 금형내 센서 위치를 화면으로 표시할 수 있어서 공정 상황을 쉽게 파악할 수 있다.

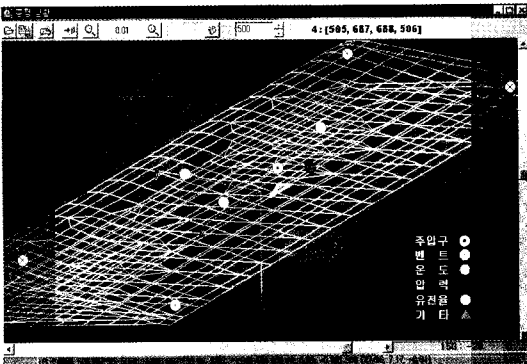


Fig. 5 3차원 제품 형상에서의 각종 센서 및 제어 파라미터 측정 위치의 표시

좌표를 갖는 격자들의 임의의 평면(요소) 들을 조합하면 임의의 3차원 제품 형상을 구현할 수 있다. 본 메뉴에서는 요소 번호를 기입하면 구성 격자 번호 및 좌표 값이 화면에 표시되고, 격자 번호를 지정하면 제품내 위치가 화면에 표시된다. 메뉴에서 격자들이 주입구인지, 벤트나 기타 신호 측정 위치인지를 지정하면 화면에 종류별 위치들이 표시 가능하다.

3.6 신호 처리

신호처리는 세 가지의 기능으로 구성되어 있으며 그 기능들은 다음과 같다. 금형 내부의 센서값을 읽어 게이트를 제어하는 게이트 제어와 금형 내부에 연결된 센서값을 감지하고 기록하는 센서 표시와 수지의 경화도를 측정하는 경화도 표시가 있다. 게이트 제어 부에서는 임의의

공정 신호를 센서를 이용하여 측정하고 이를 이용하여 주입구나 벤트의 개폐를 결정하게 된다. 이와 같이 센서와 게이트의 연결 설정이 구축되어 지능제어 시스템과 연결된다. 공정 중의 각종 공정 변수(온도, 압력, 수지 함침도)는 센서 표시부에서 화면 표시 및 데이터 저장을 관장하도록 설계되었다. 그리고 공정 변수 중 경화도와 관련된 유전율 신호는 경화도 표시부에서 화면 표시 및 데이터 저장을 설정하도록 설계되었다. Fig. 6은 신호처리 과정에서 나타나는 dialog 화면의 보기를 나타내었다. 게이트, 센서, 경화도 등의 주요 인자를 시간에 따른 변화를 실시간으로 작업자가 확인이 가능하도록 설계되어 있다.

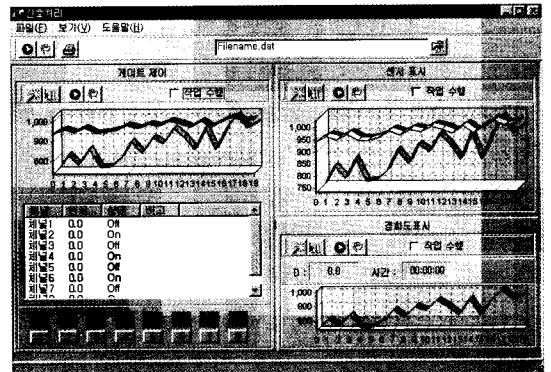


Fig. 6 신호처리 및 제어를 위한 dialog 화면의 보기

게이트 제어 메뉴에는 설정 버튼, 그래프 설정 버튼, 동작 시작 버튼, 정지 버튼, 그리고 main process에서의 동작명령 수행여부를 설정하는 작업수행으로 구성된다.

3.7 경화 모델링 및 능동제어

보강재에 주입된 수지의 경화를 위한 온도 및 압력의 적용은 최종 부품의 성능에 매우 큰 영향을 미친다. 수지 유동, 점도변화, 경화도 등을 예측하는 이론적인 연구가 계속되고 있지만 현장에 적용하기에는 어려움이 있다. 일례로 노스웨스턴대의 지능성형 센터에서는 이론적 모델로

제시되는 데이터를 학습을 통하여 기존에 존재하는 이론을 신경망(neural network)으로 표현하는 방안을 개발하고 있다. 이에 따라 실험데이터를 이론데이터에 접목시켜 실제에 사용이 가능하게 할 수 있다. 실제 실험데이터를 이론적 학습 데이터로 대입하려면 공정상의 파라미터는 단일값이 아닌 실험치이므로 확률 개념인 Monte Carlo simulation을 도입하는 방안이 있다. 특히 온도의 경우 열전대(thermocouple)를 이용하여, 점도와 경화도는 유전센서를 심어 실험치를 얻는데 이 방법은 이 파라미터들을 취급하는데 매우 유용하다. 개발자 소유의 성형 코드으로써 일반화되어 있지는 않지만 지능성형의 초기모델로 여겨지는 Boeing사의 Computer Aided Curing of Composites(CACC)을 활용하여 노스웨스턴대에서는 지능성형 방안을 추진하고 있다.

본 논문에서 언급 중인 RTM 시스템은 현재 개발 중인 시스템으로써 참고문헌^[9]에서 언급한 바와 같이 공정 상황의 예측 및 제어를 위하여 decision tree 기법이나 신경망 분석(neural network analysis) 기법을 활용할 예정이다. 이에 따라 Fig. 7은 위에서 언급된 소프트웨어 및 하드웨어를 통합한 시스템의 외양을 나타내고 있다. 크게 제어 소프트웨어를 담고 있는 PC제어부, 각종 unit에 전력을 공급하는 배선 및 부품의 조립체인 전기부, 기어 및 모터, 감속기 등으로 구성된 기구부, 수지의 저장, 혼합, 예열 등이 가

능한 저장조, 금형에 연결되는 호스에 수지를 주입하는 주입 실린더 등이 그림에 나타나 있다.

4. 요약

Resin Transfer Molding(RTM) 공정의 지능성형 개념을 도입한 RTM 지능 성형에 관하여 논하였다. RTM 공정은 현재 적용과 개발이 진행 중인 공정으로 새로운 개념을 도입하기에 쉽고, 공정의 특성상 온도, 압력, 진공도, 수지의 점도, 수지충전 등을 조절할 수 있는 조건이 마련되어 있기 때문에 지능성형 개념을 적용하기에 편리하다. RTM법의 기본적인 개념의 설명 및 중요한 사항을 언급하였고, 최근 외국에서의 개선된 RTM 시스템의 개발 현황에 대하여 설명하였다.

이를 바탕으로 현재 한국기계연구원 복합재료 그룹에서 개발 중인 지능성형 RTM 시스템 위주로 RTM 지능 성형의 개념, 수지 사출, 금형온도 제어, 공정 신호 측정, 장비 통합 제어 프로그램, 신호 처리, 경화 모델링 및 능동제어 등으로 항목별로 설명하였다. 서술한 바와 같이 RTM 지능 성형 분야는 화학, 기계, 전기 및 전자 등 전문 분야간의 상호 협조가 필요한 사항으로 옮겨가고 있음을 알 수 있다. 본 연구내용은 복합재료 성형 분야에서 세계적으로 추진 중인 연구분야의 초기 부분에 해당되기 때문에 표준화되거나 확립된 모델이 없는 상태이다. 따라서 추후 연구 결과에 따라 생산성이 높으며 고성능 복합재료 부품의 제조를 위해서는 현장에의 적용을 위한 단순화 과정을 거치는 후속 개발이 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] R. R. Sullivan , J. Appl. Phys., Vol. 13, 1942, pp. 725-730.
- [2] J.G. Williams, C.E.M. Morris and B.C. Ennis, Polym. Eng. Sci., Vol. 14, 1974, pp. 413-419.

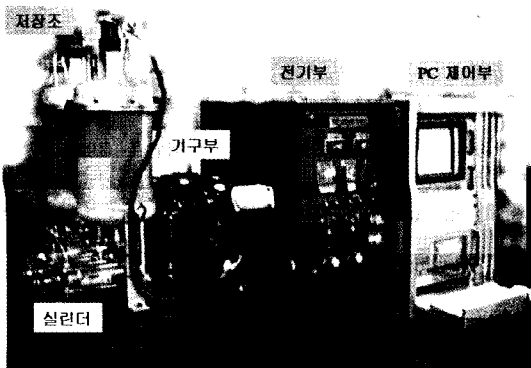


Fig. 7 지능 성형 RTM용 통합 시스템의 Hardware의 보기

-
-
- [3] T. G. Gutowski, Z. Cai, S. Bauer, D. Boucher, J. Kingery and S. Wineman, J. Compos. Mater., Vol. 21, 1987, pp. 650-669.
- [4] J. E. Drummond, and M. I. Tahir, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, 1984, pp. 515-540.
- [5] R. E. Larson and J. J. L. Higdon, J. Fluid Mech., Vol. 178, 1987, pp. 119-136.
- [6] J. M. Fildes and I. M. Daniel, 44th International SAMPE Symposium, May 23-27, 1999, pp. 1111 -1117.
- [7] J. M. Fildes and I. M. Daniel, On-Line Sensing and Control for Liquid Molding of Composite Structures, Annapolis, MD, Apr. 14-15, 1999.
- [8] Y. Weitsman, J. of Applied Mechanics, Vol. 46, 1979, pp. 563-567.
- [9] 황병선, 업문광, 이상관, 기계와재료, 13권, 1호, 2001. 4., 한국기계연구원.