

수지이동 성형공정을 이용한 고성능 복합재료의 생산

남재도 · 이승중* · 이기준*

성균관대학교 고분자공학과, *서울대학교 화학공학과
(1995년 4월 3일 접수)

Resin Transfer Molding for High Performance Composite Materials

Jae-Do Nam, Seung Jong Lee* and Ki-Jun Lee*

Department of Polymer Science and Engineering, Sung Kyun Kwan University
300 Chunchun-dong, Jangan-ku, Suwon 440-746, Korea

*Department of Chemical Engineering, Seoul National University
Seoul 151-742, Korea

(Received April 3, 1995)

1. 서 론

수지이동 성형공정(Resin Transfer Molding Process, 이하 RTM 공정이라 표기)은 약 반세기에 걸쳐 섬유강화 고분자 복합재료를 생산하는데 사용되어온 공정으로써 hand layup, sprayup, compression molding, SMC, reinforced reaction injection molding (RRIM) 등과 경쟁하면서 제품의 특성에 따라 선택적으로 사용되어 왔다. 특히 대량이나 소량이 아닌 중간량의 생산을 요구하는 제품을 큰 설비투자비용 없이 단기간에 안정되게 생산할 수 있게 해 주기 때문에 현재 자동차 몸체 및 부품, wind blade, 욕조나 의자 등을 포함한 일상 생활용품, 수상보트, 저장탱크 등 다양한 범용 복합재료 제품을 생산하는데 사용되고 있다. 특히 RTM 공정으로 만들 수 없는 제품은 없다고 알려져 만큼 이 공정은 대단히 유연성이 커서 어떠한 특이한 형태의 제품이라도 생산이 가능하다고 말할 수 있다[1-3]. 따라서 특정한 제품을 생산하기 위하여 복합재료 공정을 선택해야 하는 엔지니어에게 있어서 이 RTM 공정은 반드시 한번은 고려의 대상이 되는 것이 보통인데 다음과 같은 특성 때문에 다른 공정에 대하여 비교 우위를 지키고 있다.

RTM 공정은 압력이 보통 20 psi 이하의 저압에서 수행되는 공정이기 때문에 (수지함유량이 충전범위가 큰 경우엔 최고 100~200 psi) 크기가 큰 제품을 만드는데 유리하다. 일반적으로 약 2000 psi가 요구되는 compression molding의 경우 제품의 크기가 커지면 프레스 용량의 한계에 도달하는 경우가 많으며 따라서 과도한 설비투자가 요구되기도 한다. 또한 금형에 고압이 걸리지 않기 때문에 금형을 제작하는데 매우 유리한데, 강도가 크지 않으나 가공이 용이하고 저렴한 알루미늄, 니켈, 주석, 고분자 복합재료 등이 금형으로 사용될 수 있으며, 금형의 밀폐에 있어서도 강화섬유 자체의 pinch-off 등을 이용할 수 있기 때문에 제작이 비교적 단순하고 저렴하다. 또한 이 공정은 3차원의 복잡한 형태의 제품을 생산하는데 큰 장점을 가지고 있다. compression molding이나 SMC처럼 기계적 압축에 의하여 형태가 만들어지는 것이 아니라 수지의 유입에 의하여 압축되기 때문에 deep draw가 포함된 구조물이나 draft angle이 작은 경우라도 생산이 용이하다. 이와 더불어 수지침전공정은 foam core, rib, insert 등을 첨가하여 3차원 형태의 제품을 용이하게 제작할 수 있기 때문에 접합공정에서 발생할 수 있는 손상을 방지할 수 있다. 예를 들어 Ford사의 Escort

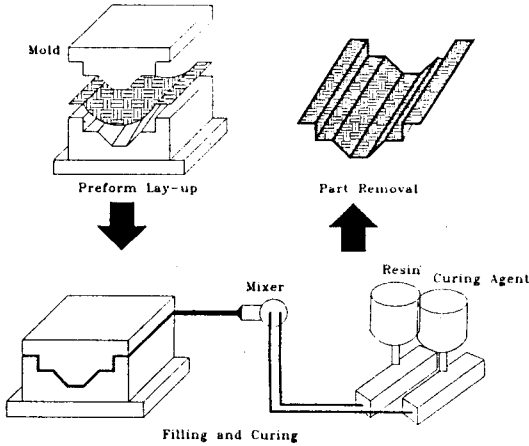


Fig. 1. Schematic diagram of resin transfer molding process.

자동차에 사용되는 front structure의 경우 45개의 금속부품을 RTM 공정을 이용하여 한 개의 부품으로 결합시킨 결과 약 30%의 무게를 감소시킬 수 있었으며 성능의 향상도 동시에 얻을 수 있었다고 알려져 있다.

이러한 RTM 공정이 최근에 고성능 복합재료(high performance composites)의 생산공정으로 주목받기 시작하였다. 이는 기존의 고성능 복합재료의 주요 생산수단이었던 hand layup/autoclave 공정이나 filament winding공정에 비하여 가격을 낮출 수 있고, 다양한 형상을 생산하는데 용이하며, 대량생산이 가능하다는 잠재력을 많은 사람들이 인정하기 때문이다. 특히 우주 항공용 복합재료의 생산에 있어서 RTM 공정은 복잡한 형상을 지닌 부품을 정확한 치수로 생산할 수 있으며 hand layup/autoclave 공정에서 요구되는 프리프레그를 보관하고 관리하는 데에 소요되는 비용과 어려움을 피할 수 있다는 점에서 커다란 매력을 지니고 있다.

그러나 범용복합재료의 생산에 사용되어 오던 RTM 공정 기술을 고성능 복합재료의 생산에 응용하려면 몇 가지 극복해야 할 점들이 있다고 지적되어 왔다. 이러한 문제점은 기본적으로 고성능 복합재료에서 요구하는 높은 기계적 물성과 이들이 사용되는 열악한 사용환경 등의 차이에서 기인하는데, 고성능 복합재료로 분류되려면 일반적으로 강화섬유 부피가 50~70% 가량 되어야 하며, 이에 사용되는 강화섬유도 단섬유가 아닌 장섬유가 주로 사용되어야 하기 때문에, 섬유의 이방성(anisotropy)이 설계단계부터 최종물성

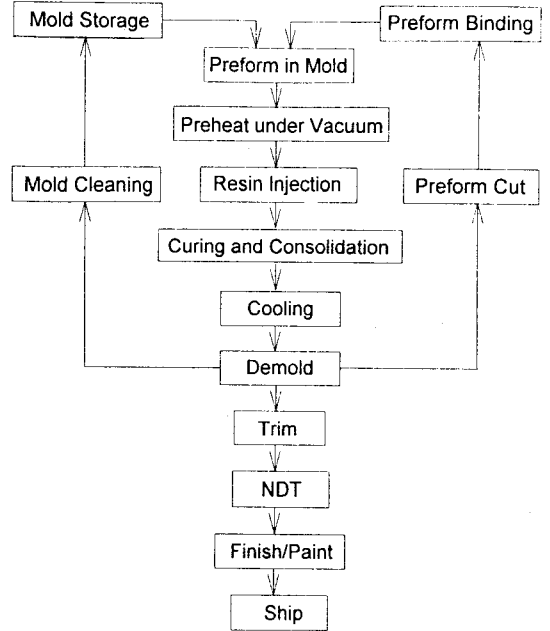


Fig. 2. Process flow diagram of resin transfer molding process.

의 테스트까지 정확히 고려되어야 한다. 또한 제품이 사용되는 환경의 온도, 습도, 기간, 응력 등의 조건을 만족하는 고성능 매트릭스를 사용하게 되는데 이러한 용도로 사용되는 수지들은 보통 점도가 높고 따라서 고온에서 수지함침이 되어야 하는 경우가 많다. 이밖에 복합재료 내부에 형성되는 기공을 제거하는 기술, 금형의 최적설계기술, 장섬유의 preforming기술, 효율적인 충전기술, part consolidation 등이 범용 복합재료 RTM 공정을 고성능 복합재료의 생산기술로 응용할 때 요구되는 기술이라 할 수 있다. 본고에서는 RTM 공정의 전반적인 개요와, RTM 공정에 사용되고 있는 수지 및 강화섬유의 preforming, 공정의 응용 및 연구동향 등을 정리하여 보고자 한다. 저자는 기존의 범용복합재료를 생산하는 데에 사용되고 있는 RTM 공정을 바탕으로 공정의 원리 및 소재를 설명하였으며, 공정의 응용 및 연구동향을 기술할 때에는 고성능 복합재료를 주요 대상으로 기술하였다. 다양한 독자를 대상으로 RTM 공정을 정리하고자 하였으므로 이를 양지하여 주기 바란다.

2. 본 론

2.1. 공정의 개요

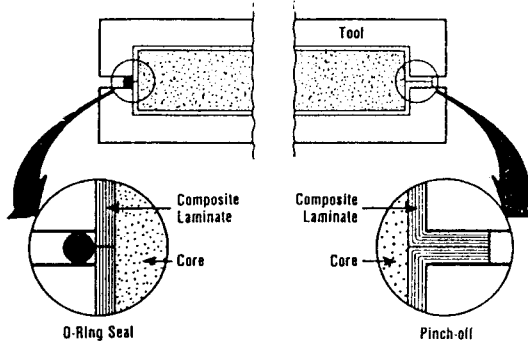


Fig. 3. Two methods of tool sealing: pinch-off and O-ring sealing.

RTM 공정의 개략적인 모습이 Fig. 1에 보여지고 있는데, RTM 공정은 강화섬유가 들어 있는 금형에 수지를 충전시키고 이를 경화시키는 과정이 단일 공정으로 결합되어 있는 것이 특징이다. 따라서 prepreg나 resin-impregnated mixture 등의 중간단계를 거치지 않고 섬유와 수지로부터 직접 완제품을 생산하는 점이 다른 복합재료 공정과 비교할 때 큰 장점으로 지적된다. RTM 공정을 Fig. 2에서 각 단계별로 살펴보면 금형의 cleaning 및 storage 그리고 preform의 cutting 및 binding 과정이 각각 독립적으로 존재하게 되며, 이렇게 준비된 preform을 금형에 넣은 후 injection, solidifying, 그리고 trimming and testing 등의 단계가 진행된다. 전체 공정시간은 제품의 형태, 크기, 수지의 종류 등에 따라 다르나 cycle 당 보통 10~30분, 길게는 10시간 이상 걸리는 경우도 있다. 제품의 대량생산을 가능하게 하기 위하여 공정의 자동화와 빠른 경화속도를 가진 수지의 개발에 많은 연구가 진행되어 왔으며 특히 강화섬유를 금형의 형태로 미리 만들어 주는 preforming 기술의 개선을 위하여 노력하고 있다.

RTM 공정의 주요 단계를 간략히 살펴보면, 일정한 압력으로 수지를 injection시킬 때 초기에는 수지의 함침이 수월하나 함침이 진행되어 수지의 경계면이 주입구로부터 멀어질수록 driving force인 pressure gradient가 감소하여 수지의 흐름이 어려워진다. 이를 방지하기 위하여 수지의 함침은 일반적으로 피스톤 형태의 펌프를 이용하여 일정한 유속을 유지하도록 하고 있다. 이는 금형으로부터 전달되어 오는 back pressure를 방지하고, 수지와 촉매 등 첨가제의 함량을 일정하게 유지하는 데에 유리하기 때문이다. 수지와

촉매는 reaction kinetics와 충전량을 고려하여 적절한 비율로 혼합되는데 금형에 주입되기 전 static mixer를 통과하면서 mixing된다. 금형에 수지를 충전시킬 때 경우에 따라서, 특히 부품의 크기가 큰 경우, 여러 곳에서 동시에 수지를 injection시키기도 한다. 이러한 경우 금형의 설계에 이어서 수지의 흐름거리를 최소화하면서 수지의 front가 air pocket을 만들지 않도록 주입구와 venting port를 적절히 배치하여 수지의 흐름을 유도하는 것이 매우 중요하다. 따라서 효율적인 금형의 설계를 위하여 수치모사방법 등을 이용하여 수지의 흐름과 압력의 분포를 예측하는 연구는 대단히 유용하다 하겠다. 금형에 preform을 넣고 금형을 닫을 때 공기는 통과하고 수지의 흐름은 막아주는 적절한 sealing을 하게 되는데 일반적으로 Fig. 3에 보여지고 있는 pinch-off방법과 O-ring방법이 사용되며, 제품의 구조와 흐름을 고려하여 특정 부분에 vent가 필요한 경우에는 금형에 구멍을 뚫기도 한다. 이 부위는 새로운 제품을 성형하고자 할 때마다 청소하여야 하는 부위이므로 금형을 설계할 때 반드시 고려하여야 한다.

2.2. 수지 및 강화섬유

RTM 공정에서는 polyester, vinyl ester, phenolic, polyurethane, epoxy, bismaleimide, methacrylate, nylon 등의 다양한 열경화성 및 열가소성 수지가 사용될 수 있는데, RTM 공정에 적합한 수지로서의 개량 그리고 새로운 수지의 개발이 끊임 없이 진행되고 있다. 범용복합재료의 제조에는 현재 polyester가 가장 많이 사용되고 있다. 이는 가격이 저렴하며 상온 또는 상온에 가까운 온도에서 낮은 점도를 유지하면서 빠르게 경화반응을 조절할 수 있기 때문이다. RTM 공정에서는 점도가 낮은 것이 유리하기 때문에 보통 100~1000 cps 정도의 점도를 수지의 충전과정 동안 유지할 수 있도록 수지의 반응성과 촉매의 특성을 조절하고 있다. 현재 에폭시 수지가 주로 사용되는 고성능 복합재료의 생산을 위하여 기술선진국을 중심으로 RTM 공정용 에폭시 수지의 개발이 경쟁적으로 진행되고 있는데 예를 들어 3M의 PR500, Ciba-Geigy의 Araldite LY564, Shell Chemical의 Epon DPL-862, Epon 9400/9450 등이 이미 개발되어 소개된 바 있다. 이들은 250°F 또는 350°F 경화용으로 개발된 수지로서 약 100°C 근방의 수지충전 온도에서는 상당 기간 동안 경화반응이 억제되어 500~1000 cps 정도의 낮은

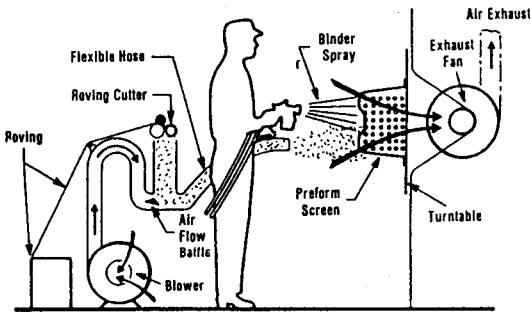


Fig. 4. Spray-up preform fabrication method.

점도를 유지하고 있다가 경화온도로 가열되었을 때 반응이 신속히 진행되는 특성을 지니고 있다.

강화섬유로는 기존의 어떤 종류의 섬유나 강화형태라도 가능하다고 알려져 있다. carbon, glass, aramid 섬유와 경우에 따라서는 polyester섬유나 wood fiber

그리고 금속제들도 제품의 사용 용도에 따라서 강화제로 사용된다. 강화섬유를 사용할 때 수지의 함침속도에 영향을 미치는 compression정도, 섬유의 방향성, 이방성 섬유층의 적층, sizing 등 여러 가지 사항을 복합적으로 고려하여야 한다. RTM 공정의 cycle time을 결정하는 단계 중의 하나는 이러한 섬유강화제를 금형의 형태에 맞게 성형하여 이를 금형에 위치시키는 과정인 preforming이라 할 것이다. 이를 위하여 stitching, knitting, braiding 등의 섬유직조 기술을 사용하면서 공정의 자동화를 통하여 preform을 효율적으로 제조하고자 시도하고 있다. preforming기술 중 가장 간단한 방법으로는 강화섬유를 단순히 stamping시킴으로써 신속히 preform을 제조하는 것이다. 이때 적절한 binder를 사용하여 stamping 후 형태를 유지하도록 조치하는데 유리섬유의 경우엔 sizing에 사용된 물질이 binder의 역할을 수행하기도 한다. 그

Table 1. Property comparison and design guidelines of Resin Transfer Molding versus spray-up, hand lay-up, mat/preform, and SMC molding

Design Parameter	Resin-Transfer Molding	Spray-up	Hand Lay-up	Mat/Preform	Sheet Molding Compound
Minimum inside radius, in. (mm)	1/4 (6.35)	1/4 (6.35)	1/4 (6.35)	1/4 (6.35)	1/16 (1.59)
Molded-in holes	No	Large	Large	Yes	Yes
In-mold trimming	No	No	No	Yes	Yes
Core pull and slides	Difficult	Difficult	Difficult	No	Yes
Undercuts	Difficult	Difficult	Difficult	No	Yes
Minimum recommended draft (deg.)	2 to 3	0	0	1/4 to 6-in. depth 1 to 3; above 6-in. depth 3, or as required	
Minimum practical thickness, in. (mm)	0.080 (2.0)	0.060 (1.5)	0.060 (1.5)	0.030 (0.76)	0.050 (1.3)
Maximum practical thickness, in. (mm)	0.500 (12.7)	No limit	No limit	0.500 (12.7)	1 (25.4)
Normal thickness variation, in. (mm)	± 0.010 (± 0.25)	± 0.020 (± 0.50)	± 0.020 (± 0.50)	± 0.008 (± 0.2)	± 0.005 (± 0.1)
Maximum thickness buildup, heavy buildup (ratio)	2 : 1	Any	Any	2 : 1	Any
Corrugated sections	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Metal inserts	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Bosses	Difficult	Yes	Yes	Difficult	Yes
Ribs	Difficult	No	No	Yes	Yes
Hat section	Yes	Yes	Yes	Difficult	No
Raised numbers	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Finished surfaces	2	1	1	2	2

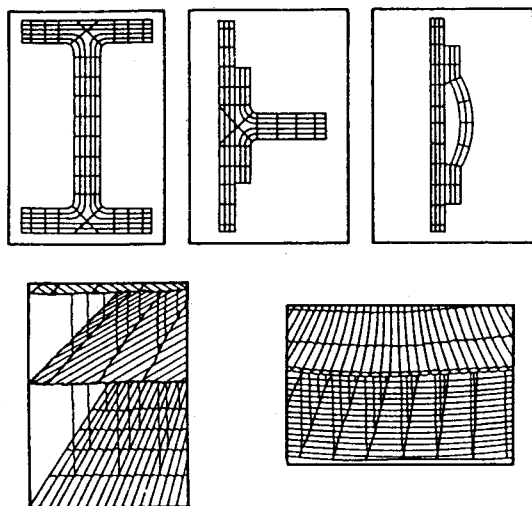


Fig. 5. Examples of aerospace cut-and-sew preforming technique.

러나 이 binder가 우주항공용 등으로 사용되는 경우 비록 예폭시 계통의 binder를 사용하더라도 복합재료 내부에 microcracking을 유발할 수 있다고 알려져 있으므로 (binder poisoning) 이에 대한 영향을 명확히 규명한 후 사용하여야 할 것이다. 크기가 크고 대량의 preform을 준비해야 하는 경우엔 Fig. 4과 같은 spray-up 기술을 이용하기도 한다. 이는 chopped fiber와 binder를 미리 준비된 preform형틀에 공기와 함께 붙여 밀착시키어 preform을 제조하는 기술로써 형틀의 뒷면에서는 진공을 걸어 일단 밀착된 섬유가 분산되지 않게 조치하는 기술이다. 장섬유를 사용하여 복잡한 형태의 제품을 생산하는 경우엔 woven cloth를 stitching시키거나 fiber tow를 braiding 또는 knitting시키며 Fig. 5에서 볼 수 있는 cut-and-sew 기술을 사용하여 다양한 형태의 preform을 제조하기도 한다.

Table 2. Cost comparison of resin transfer molding versus SMC compression and injection molding

	Process		
	RTM	SMC Compression	Injection
Process operation :			
Production requirement, annual units per press	5,000~10,000	50,000	50,000
Capital investment	Moderate	High	High
Labor cost	High	Moderate	Moderate
Skill requirements	Considerable	Very low	Lowest
Finishing	Trim flash, etc.	Very little	Very little
Product :			
Complexity	Very complex	Moderate	Greatest
Size	Very large parts	Big flat parts	Moderate
Tolerance	Good	Very good	Very good
Surface appearance	Gel coated	Very good	Very good
Voids/wrinkles	Occasional	Rarely	Least
Reproducibility	Skill-dependent	Very good	Excellent
Cores/inserts	Possible	Very difficult	Possible
Material usage :			
Raw material, cost	Lowest	Highest	High
Handling/applying	Skill dependent	Easy	Automatic
Waste	Up to 3 percent	Very low	Sprues, runners
Scrap	Skill dependent	Cuts reusable	Low
Reinforcement flexibility	Yes	No	No
Mold :			
Initial cost	Moderate	Very high	Very high
Cycle life	3,000~4,000 parts	Years	Years
Preparation	In factory	Special mold-making shops	
Maintenance	In factory	Special machine shops	

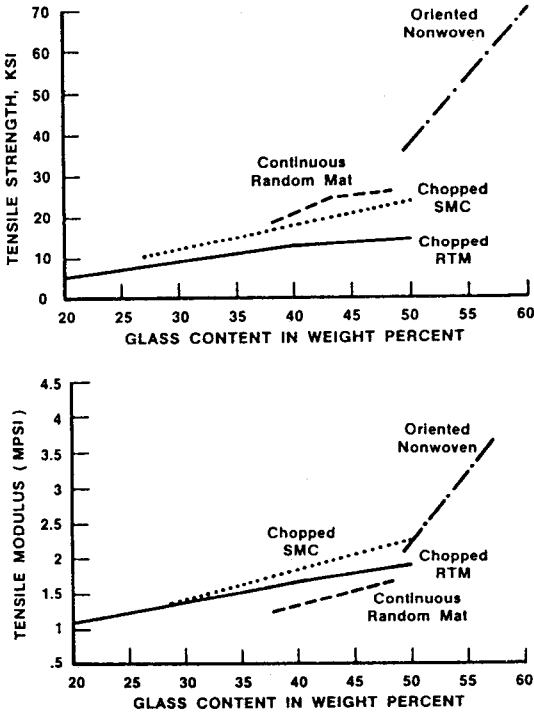


Fig. 6. Comparison of SMC and RTM process in (a) tensile strength and (b) tensile modulus.

2.3. 공정의 특성 비교

복합재료 제품을 생산하기 위하여 공정을 선택할 때에는 경제성, 수량, 공정의 한계 등을 복합적으로 고려하여 결정하여야 한다. Table 1과 2에서는 RTM 공정을 이와 경쟁할 수 있는 몇몇 복합재료 성형공정과 비교하였다. 볼 수 있는 바와 같이 RTM 공정은 형태가 복잡하고 크기가 큰 제품을 저렴하게 생산하는 데에 장점이 있다는 것을 알 수 있고, Table에서 비교된 공정 중 장섬유의 이방성을 적절히 조합하여 제품의 물성을 조절하면서 섬유의 함유율을 50% 이상 포함시킨 고성능 복합재료를 생산하려 하는 경우에는 RTM 공정 이외에 대안이 없다고 말할 수 있다. 많은 경우에 RTM 공정과 비교가 되는 SMC 공정을 서로 비교한 것이 Fig. 6인데, 여기서 유의할 점은 SMC를 사용하여서는 이 그림에 나타난 oriented nonwoven 고성능 복합재료를 생산하기가 현실적으로 매우 어렵다는 것이다. 즉 SMC에서는 섬유 mat가 belt를 따라 진행되는 동안 mat의 수직 방향으로 수지가 충전되는데 섬유의 수직방향 투과도(permeability)는 수평방향에 비하여 약 10~100배 작기 때문에 특히 장섬유의 경우 균일한

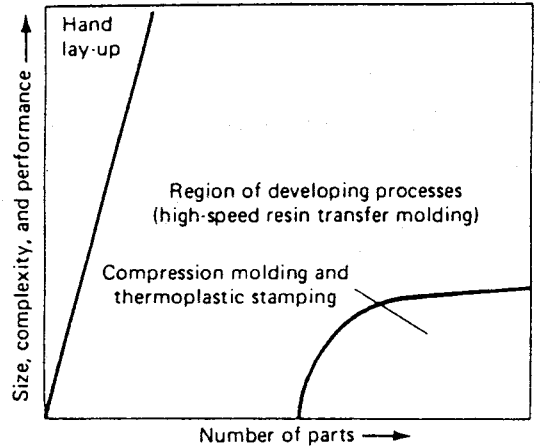


Fig. 7. Process development for automotive composite parts.

함침이 대단히 어렵고, cross angle (0°와 90°) 이외에는 sheet의 제조시 섬유의 각도를 조절하기가 불가능하다. 그리고 SMC sheet를 성형할 때 제품의 모서리 부분 등에서 흔히 나타나는 불균일한 섬유의 분산현상 등을 고려할 때 그림에 나타난 바와 같이 단순히 SMC제품의 탄성과 강도가 RTM 공정의 제품보다 우수하다고 결론 짓는다는 것은 무리가 있다고 사료된다. 구체적으로 자동차 산업에 복합재료를 사용하려 하는 경우 제품의 크기 및 복잡성 그리고 수량에 따라 공정의 선택이 달라질 수 있는데, Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 RTM 공정은 기존의 SMC나 thermoplastic stamping 기술 등의 한계를 극복할 수 있는 바람직한 공정이라는 것을 알 수 있다. 그러나 여기에서 지적된 바와 같이 RTM 공정은 생산속도가 늦기 때문에 대량생산에 적절하지 못하다고 일반적으로 알려져 있으나, RTM 공정의 전반적인 기술의 진보와 공정자동화의 결과로 인하여 최근 생산속도가 3분 이내로 단축될 수 있다고 보고된 바 있다. 따라서 꾸준한 연구와 투자를 통하여 경험과 데이터베이스가 구축되면 RTM 공정은 금속소재를 대체할 수 있는 복합재료의 주요 생산공정으로 자리잡을 가능성이 많다.

2.4. 응용 및 연구

현재 다양한 고성능 복합재료 부품이 RTM 공정으로 생산되고 있으며 그 응용 범위를 점차 넓혀가고 있다. 몇몇 대표적인 예를 들자면, BP사는 Boeing 767, 757 비행기의 thrust reverser blocker door를 RTM

공정으로 생산하여 납품하고 있는데 이는 honey-comb부위와 수많은 fitting이 함께 결합되어야 하는 부품으로써 RTM 공정의 진수를 보여주고 있다 하겠으며, 최근에 민항기인 Boeing 777의 APU Fuel Systems Drain Mast가 역시 RTM 공정으로 제작되었다. 이밖에 Hexel사와 McDonnell Douglas사는 공동으로 미사일 container system의 bulk-head와 strongback를 3~4개의 부위로 나누어 RTM 공정으로 생산한다고 보고된 바 있으며, Hercules사 역시 미사일에 사용되는 wing과 fin을 탄소섬유, 유리섬유, 이들의 hybrid를 stitching시켜 성공적으로 제작하였는데 이는 filament winding로 생산되는 가격의 약 25~30%에 해당하였다고 한다. Douglas Aircraft사는 비행기의 wing과 fuselage구조를 RTM 공정을 사용하여 생산하는 연구를 수행하여 6-by-4-ft 크기의 wing-cover panel을 제작한 바 있다. 고온용 복합재료의 경우 Fokker Aircraft사는 draft angle이 매우 작은 부분을 포함하고 있으면서 고온에서 사용되는 engine cowling beam을 8-Harness Graphite/BMI 복합재료로 대체하는 연구를 수행한 결과 RTM 공정이 hand layup/autoclave 공정이나 금속재료의 경우에 비하여 물성과 공정성이 우수하다고 보고하였다.

이러한 다양한 응용에도 불구하고 RTM 공정은 기존의 복합재료공정에 비하여 공정 자체가 복잡하며 데이터베이스나 경험이 오랜 기간 축적되어 있지 않기 때문에 다양한 기초연구가 요구되고 있다. 먼저 섬유층을 통한 수지의 투과도는 수치충전과정을 묘사하는 기초 데이터가 되기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 섬유의 형태와 배열 상황으로부터 투과도를 예측하는 microscopic 접근 방법과 섬유층을 단일 매체로 간주하여 투과도를 결정하는 macroscopic 접근 방법이 있는데, 현재 Darcy's law를 이용하여 투과도 (permeability)를 정의하는 후자의 접근 방법이 일반적으로 사용되고 있다[4-6]. 투과도는 섬유와 배향형태의 고유한 물성이며 당연히 기공함량의 함수인데 이에 대한 관계는 다양한 이론식과 실험식에 의하여 성공적으로 묘사될 수 있다[7, 8]. 그러나 기존의 투과도를 측정하는 실험기법과 모델식을 사용할 때에 주의할 점이 있는데, 이는 RTM 공정에서의 투과현상은 수지가 섬유층에 unsaturated된 상태에서 이동하기 때문에 saturated 상황에서 측정한 투과도와 차이가 있으며 흔히 이방성(anisotropy)을 보이는

in-plane 방향의 투과도가 중요하다는 데에 있다. 현재까지 소개된 투과도의 측정방법 중에서 RTM 공정의 해석에 바람직해 보이는 것은 수지의 radial flow로부터 flow front의 진행과정을 측정하여 in-plane principal direction의 투과도를 동시에 결정하는 flow visualization 실험기법이다[9, 10]. 이와 병행하여 수지의 경화반응속도 (cure reaction kinetics)를 온도와 시간 그리고 촉매의 함량에 따라 묘사하는 연구가 많이 진행되고 있다. 경화반응속도는 공정온도와 공정시간 그리고 수지의 반응도를 조절하는 데에 필수적인 정보로써 기존의 reaction kinetics에서 연구되어온 모델식과 이론을 바탕으로 하고 있다[11, 12]. 경화반응은 일반적으로 n-th order 형태와 autocatalytic 형태의 반응을 보이는데 특히 에폭시의 경우엔 autocatalytic 형태가 관찰되고 있다. RTM 공정의 경화온도가 isothermal과 dynamic-heating조건을 모두 포함하고 있는 경우에는 kinetic 모델 역시 두가지 조건을 모두 만족시키고 있는 지를 확인하여야 한다. 이와 더불어 경화반응에 따라 변화하는 수지의 점탄성 점도의 변화현상을 규명하는 chemorheology 분야는 RTM 공정의 해석에 매우 중요한 위치를 차지하고 있다[13, 14]. 경화반응속도의 모델링은 아래에서 기술될 수치충전 수치모사와 결합되어 수지의 점도변화에 따른 충전과정의 변화, residence time에 따르는 경화반응의 진행정도, 잔류응력의 분포에 따른 제품의 변형 등을 예측하는 주요한 역할을 하게 된다. 수지가 섬유층을 통하여 특정한 형태의 금형을 투과해 가는 과정을 예측하고자 수치충전과정의 수치모사 연구가 많이 진행되고 있는데 finite element method가 주로 사용되고 있다. 예를 들어 boundary-fitted coordinate system을 이용한 접근방법[15-19], finite element/control volume method[20-25], boundary element method [26], Galerkin method [27, 28] 등이 소개된 바 있는데 모두 2-D와 3-D의 수치충전과정을 비교적 정확히 묘사하고 있다. 이때 flow front에 따른 효율적인 mesh generation을 위한 mapping technique 등이 응용되어 RTM 공정의 수치모사 기법이 개선되고 있으며[28], 이러한 수치해석을 이용하여 RTM 공정의 최적 공정조건을 판단할 수 있도록 moldability diagram이 제안되기도 하였다[29]. RTM 공정 동안 진행되는 경화반응을 효율적으로 예측하고 이를 동시에 컨트롤하기 위한 in-situ monitoring 연구가 진

행되고 있는데, 여기에는 optical fiber를 사용하여 광 신호를 측정하거나[30-33], complex permittivity를 측정하여 이를 경화반응과 연계시키고자 하는 시도들이 있다[34-37]. 특히 관심의 대상이 되고 있는 후자의 경우, 온도와 경화반응 정도에 따라 변화하는 수지의 ionic diffusion과 dipolar mobility를 측정하고 이를 이론과 모델링을 통하여 수지의 chemorheological property와 대응시켜 dielectric property를 in-situ monitoring하려는 것이다. 최근 개발된 dielectric 측정기기는 remote sensor를 용이하게 활용할 수 있기 때문에 수지충진 금형의 내부에 이를 장착하여 수지의 경화반응을 측정함과 동시에 이에 따라 경화온도와 시간 등을 최적조건으로 조절할 수 있게 되었다.

3. 결 론

수지이동 성형공정(RTM 공정)은 저렴한 비용으로 다양한 형태의 고성능 복합재료를 생산할 수 있는 매력있는 공정임에 틀림없다. 그러나 이 공정은 기타 복합재료공정에 비하여, 축적된 자체기술과 경험이 없이 단기적인 설비투자나 기술도입만으로는 성공을 기대하기 어렵다는 특성이 있다. 그 이유는 비록 기술선진국에서도 RTM 공정의 specification이나 standard가 아직 정립되어 있지 못한 상황이며, 현재 다양한 연구와 응용이 진행되고 있는 단계이기 때문이다. 이러한 상황에서 국내의 몇몇 기업과 대학 및 연구소에서 RTM 공정에 대한 꾸준한 연구가 진행되고 있다는 것은 매우 바람직한 현실로 보여진다. 그러나 세계적인 추세에 비하여 국내의 연구인력이나 연구투자는 아직 미흡하다는 사실을 지적하지 않을 수 없으며, 응용 잠재력이 대단히 큰 RTM 공정에 많은 관심을 당부하고 싶다.

참고문헌

1. Donald V. Rosato, D.P. DiMattia, and Dominick V. Rosato, "Designing with Plastics and Composites: A Handbook," Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
2. P.K. Mallick, and S. Newman, "Composite Materials Technology," Eds, Hanser Publishers, New York, 1990.
3. T.J. Reinhart, "Engineered Materials Handbook, vol. 1, Composites," Eds., ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.
4. F.A.L. Dullien, *Chem. Eng. J.*, **10**, 1 (1975).
5. J. Bear, "Dynamics of Fluids in Porous Media," Dover Pub., Inc., New York, 1972.
6. A.E. Scheidegger, "The Physics of Flow Through Porous Media," Univ. Toronto Press, Toronto, 1960.
7. H. Rumpf and A.R. Gupte, *Chem. Eng. Tech.*, **43**, 367 (1971).
8. R.B. Brid, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena," Wiley, New York, 1960.
9. K.L. Adams and L. Rebenfeld, *Textile Res. J.*, **57**, 647 (1987).
10. K.L. Adams and L. Rebenfeld, *Polym. Comp.*, **12**, 179 (1991).
11. J.D. Nam and J.C. Seferis, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.*, **30**, 455 (1992).
12. J.D. Nam and J.C. Seferis, *J. Appl. Polym. Sci.*, **50**, 1555 (1993).
13. J.G. Hwang, C.G. Row, I. Hwang, and S.J. Lee, *I&EC Research*, **33**, 2377 (1994).
14. 황진구, 노충근, 황인석, 이승중, *화학공학*, **30**(6), 664 (1992).
15. J.P. Coulter and S.I. Guceri, *J. Reinforced Plastics and Composites*, **7**, 200 (1988).
16. J.P. Coulter and S.I. Guceri, *Comp. Sci. and Tech.*, **35**, 317 (1989).
17. R. Gauvin and M. Chibani, *Int. Polym. Processing*, **1**(1), 42 (1986).
18. S. Li and R. Gauvin, *J. Reinforced Plastics and Composites*, **10**, 314 (1991).
19. F. trochu and R. Gauvin, *J. Reinforced Plastics and Composites*, **11**, 772 (1992).
20. M.V. Brusckke and S.G. Advani, *Polym. Comp.*, **11**(6), 398 (1990).
21. L. Trevino, L. Rupel, W.B. Young, M.J. Liou, and L.J. Lee, *Polym. Comp.*, **12**(1), 30 (1991).
22. W.B. Young, K. Han, L.H. Fong, L.J. Lee and M.J. Liou, *Polym. Comp.*, **12**(6), 391 (1991).
23. W.B. Young, *Polym. Comp.*, **15**(2), 118 (1994).
24. S.W. Kim, A Study on the Resin Transfer Molding Process and the Gas Permeation Phenomena during Autoclave Processing, Ph.D. Thesis, Seoul National University, 1993.

25. J.D. Nam, S.W. Kim, K.J. Lee, and J.C. Seferis, Proc. 11th Annual Meeting of Polymer Processing Society, Seoul, Korea, March 27-30, 287 (1995).
26. M.K. Um and W.I. Lee, *Polym. Eng. Sci.*, **31**(11), 765 (1991).
27. A.W. Chan and S.T. Hwang, *Polym. Eng. Sci.*, **31**(15), 1149 (1991).
28. Miae Choi, Numerical Simulation and Experimental Studies on the Resin Transfer Molding Process, Ph.D. Thesis, Seoul National University, 1994.
29. V.M. Gonzalez-Romero and C.W. Macosko, *Polym. Eng. Sci.*, **30**(3), 142 (1990).
30. N.H. Sung, W. Dang, H.J. Paik, and C.S.P. Sung, 36th int. SAMPE Symp., 1461 (1991).
31. 최홍섭, 하종민, 안규중, J.R. Dunphy, R.M. Rukus and W.A. Veronesi, 한국복합 재료학회 추계학술발표회 논문집, 83 (1994).
32. B.P. Rice, 38th Int. SAMPE Symp., 334 (1993).
33. K.S. Kim, L. Kollar and G.S. Springer, *J. Comp. Mat.*, **27**, 75 (1993).
34. H. Kim, K. Char, Y.S. Eom, K.M. Chung, and K.J. Ahn, Proc. 11th Annual Meeting of Polymer Processing Society, Seoul, Korea, March 27-30, 391 (1995).
35. A.M. Maffezzoli, L. Peterson, and J.C. Seferis, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 75 (1993).
36. Y. Deng and G.C. Martin, *Macromolecules*, **27**, 5141 (1994).
37. D. Kranbuehl, M. Hoff, and A. Loos, 34th Int. SAMPE Symp., 416 (1989).

저자약력

남 재 도

- 1984 서울대학교 화학공학과 (학사)
 1986 서울대학교 화학공학과 (석사)
 1991 University of Washington 화학공학과 (박사)
 1991~1993 Polymeric Composites Laboratory, University of Weshington. (Research Associate)
 1993~1993 삼성 제일합섬 기술연구소 선임연구원
 1994~현재 성균관대학교 고분자공학과 조교수

이 승 종

- 1974 서울대학교 화학공학과 (학사)
 1982 University of Delaware 화학공학과 (박사)
 1982~1983 University College of Wales 응용수학과(Post Doc.)
 1984~현재 서울대학교 화학공학과 교수

이 기 준

- 1961 서울대학교 화학공학과 (학사)
 1964 서울대학교 화학공학과 (석사)
 1971 University of Washington 화학공학과 (박사)
 1971~현재 서울대학교 화학공학과 교수
 1990~1993 서울대학교 공과대학 학장