

特輯

복합재료의 액상성형공정(Liquid Composite Molding)의 현황과 전망

변준형*, 엄문광**, 이우일***, 강문구***

1. 서론

액상성형 공정(Liquid Composite Molding)은, 오토클레이브 성형에서와 같이 미리 함침된 프리프레그 형태의 반제품을 사용하는 것이 아니라, 현장에서 액상의 수지를 보강 섬유에 함침시켜 복합재료를 성형하는 방법이다. 액상성형 공정으로는 Structural Reaction Injection Molding (SRIM), Resin Transfer Molding (RTM) 등이 대표적인데, 특히 RTM과 그의 변형인 Vacuum Assisted RTM (VARTM, SCRIMP 혹은 VBRTM이라고도 함)은 기존의 오토클레이브 성형법을 생산성과 비용에서 훨씬 앞질러, 대체성형공정으로 각광을 받고 있다.

고성능 복합재의 대표적 성형법인 Autoclave 공법은 높은 시설 투자비, 낮은 생산성, 제품 크기의 한계 등이 있어 선진국에서는 80년대 초부터 고품질을 요하는 항공 산업을 중심으로 점차적으로 종래의 성형 방법에 대한 대체 공법으로 RTM 공법에 대한 연구가 지난 10여년 동안 꾸준히 진행되었으며, 현재 많은 제품들에 대한 대체 공법이 이미 개발되었거나 진행되고 있다. Autoclave 공법과 RTM 공법의 생산 단가를 비교해 보면, 고성능 단순 후판재의 경우는 약 50% 정도, 형상이 복잡해지더라도 30% 이상의 절감이 가능하다. 향후 항공·방산 분야의 고성능 제품뿐만 아니라, 토목·건축 및 선박·해양 구조물과 같은 대형 복합재 구조물에도 액상 성형 공법을 적용하면 생산 단가를 크게 낮출 수 있으리라 예상된다.

또한, 현재 복합재 구조물을 제조하는 데 널리 적용되고 있는 Hand layup이나 Spray up 성형법은 노동집약적이고, 제품 제조시간이 길며, 원재료의 낭비가 심하다. 또한, open mold 성형법이기에 때문에 VOCs (Volatile Organic Compounds) 방출 등으로 작업환경이 나쁘며 작업자의 숙련도에 따라 제품의 품질이 좌우된다. 그러나 액상성형 기술은 압수 금형이나 진공 bag을 사용하는 closed mold 성형이므로 대기 중 VOC 방출이 매우 낮고 scrap rate를 최소

화 할 수 있기 때문에 환경에 대한 충격을 최소로 할 수 있으며 공정의 최적화, 표준화, 양산화가 용이하다.

이 중 대표적인 공정인 RTM은 금형에 미리 보강 프리폼을 장착하고 수지를 보강재 속으로 열과 압력을 가하며 충전시킨 후 열을 가하여 제품을 성형하는 공정으로, 핵심 공정 단계로는 프리폼(Preform) 제조, 금형 충전 및 경화공정 등이 있다(Fig. 1). 좀 더 상세히 살펴보면, RTM 공정의 공정변수(Fig. 2)로는 수지에 관련된 점도(Viscosity), 경화도(Degree of cure), 주제·경화제 배합비 등과 보강 매트와 관련된 투과성 계수(Permeability) 그리고 공정 조건에 관련된 금형 및 수지 온도, 수지 주입 압력이나 유량, Gate 및 Vent 개폐시기, 금형 개폐 시기 등이 있다. 그리고 공정 제어를 위해서는 보강 매트내 수지의 전진면(Flow front), 온도, 압력 및 경화도 분포와 복합재 잔류 응력에 대한 정보가 필요하며, 제품 탈형 후 복합재의 후경화를 위한 온도도 공정 변수의 하나이다. 전술한 바와 같이 RTM 공정을 통한 제품 개발에는 많은 공정 변수들이 단계별로 관여하므로, 이들을 체계적으로 통합하여 적절히 적용하여야만 성공적으로 부품 성형 공정을 개발할 수 있다.

이러한 RTM 공정은 전술한 여러 가지의 잇점 때문에 최근 많이 사용되고 있으나, 대형 부품의 성형, 섬유분율의 증가 등 몇가지 점에서 그 한계를 드러냈다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 여러 가지 대안이 마련되었는데, 그 중 대표적인 것이 VARTM이다. VARTM에서는 수지의 유동을 돕기 위하여 프리폼 위에 다공질의 층 (Resin Distribution Medium, RDM)을 하나 더 둔다(Fig. 3). 그러면 주입된 수지는 프리폼 위의 RDM으로 먼저 흘러들여간 후 프리폼으로 스며들게 되는데, 이렇게 하면 수지의 유동 거리가 훨씬 짧아져 수지 주입 시간을 획기적으로 개선할 수 있어 대형 부품의 성형에 적합하다. 그러나 VARTM에서는 수지의 유동이 3차원이 되므로 기공의 형성에 각별한 주의가 요구된다.

* 한국기계연구원 복합재료그룹

** 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

*** 서울대학교 공과대학 전기공학부

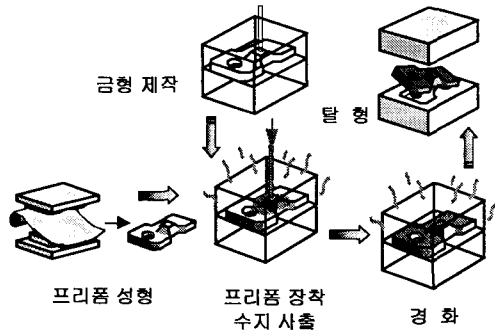


Fig. 1 RTM 공정 개요도.

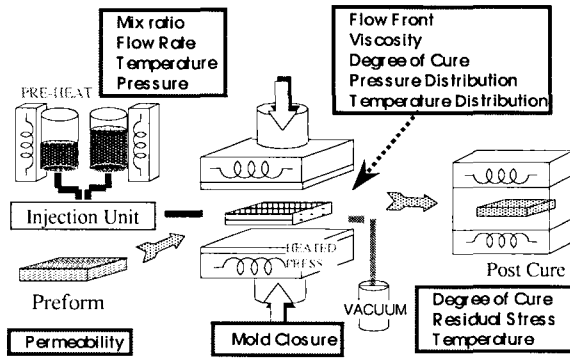


Fig. 2 RTM 공정 변수들.

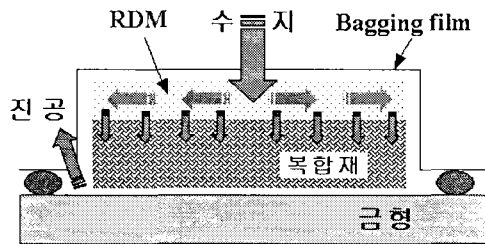


Fig. 3 RDM을 적용한 VARTM 공정 개략도.

이 글에서는 여러 가지 액상 성형공정 중, 가장 대표적이라 할 수 있는 RTM 공정에 대하여 현황과 전망을 알아보고자 한다.

2. 국내외 기술 개발 현황

프리폼 기술의 경우, 미국은 A&P Technology Inc.,

Albany International Techniweave, Fiber Innovations Inc., Hexcel Composites, Atlantic Research Corporation, 3TEX 의 20개 업체에서 주로 3차원 woven 프리폼이나 braided 프리폼을 제조하고 있으며, 일본의 경우 다른 나라에 비하여 비교적 늦게 시작하였지만 집중적인 연구를 지속하고 있다. 국가적인 연구 지원 사업으로 3-D Composite Research Corporation 이라는 컨소시움이 1988년에 구성되어, 3차원 보강 구조의 프리폼을 저가이면서 효율적으로 제조하기 위하여 200억원의 연구비로 6년 동안 연구를 수행하여, 3차원 프리폼 제조방법 및 장비개발 (3축 및 4축 제어 3차원 weaving 기계, 3차원 braiding 기계, 3차원 filament winding 기계), 3차원 복합재 제조 기술 및 기계적/물리적 특성평가 기술과 같은 연구 결과를 확보하고 있다.

미국의 액상 성형에 대한 연구 동향을 보면, NASA 주도의 Advanced Composites Technology (ACT) 프로그램으로 액상 성형 공정(Resin film infusion, Pressure injection 등)을 이용하여 항공기 1차 구조물을 개발중이며, 또 다른 Advanced Subsonic Program (ASP) 하에서 GE-90 engine용 center vent tube 부품 개발을 목표로 경제적인 액상 성형 공정을 개발하고 있다. 또한, 보잉사는 수송기 날개 구조물을 제작하고 있는데, Knitting 과 Stitching에 의해 Stiffened panel (1.8×1.2m 및 3×1.2m) 시제품을 제조하였으며 향후 3.6×2.5m semi-span wing을 제조할 예정으로 있다. ARL(Army Research Laboratories)에서는 RTM 성형기술을 이용하여 육상 장갑차용 두꺼운 복합재 구조부품과 항공기 기체용 Thin-skin 복합재료 제조기술을 개발하는 데에 주력하고 있는데, 이들의 연구는 컴퓨터 코드를 이용한 시뮬레이션과 시제품 제조 기술을 도입하여 선행연구를 수행한 다음 실 제품을 제조하는 방법을 취하고 있으며 Comanche keel beam (3m)을 대상으로 하고 있다.

한편, 한국기계연구원에서는 섬유 체적율 50% 이상 고성능 부품 (길이 1.0m 이하)의 액상성형 기술에 대한 기초 기술을 특정 연구 개발 사업을 통하여 확보하였으며, 또한 G7 과제로서 고속전철의 변압기 권선 지지판을 액상성형 공정을 이용하여 성공적으로 개발한 바 있다. 그리고 프리폼도 Stitching, Knitting, Weaving, 3D Braiding 공정 등을 통하여 성공적으로 개발한 바 있다. 국내 학계의 경우, 서울대학교에서는 수지유동 해석에 관련한 연구를 다년간 수행하고 있으며, 한국과학기술원(KAIST) 등에서도 액상성형을 모사하기 위한 기초 연구와 구조물 건전성 평가에 대한 연구를 수행하고 있다.

3. 액상 성형에 의한 공정 개발

본 절에서는 RTM 공정으로 제품을 개발하는 과정에 대하여 간략히 기술하였다.

3.1 프리폼 개발

복합재료 성형 방법과 밀접한 관계를 가지는 프리폼 제조기술은 대부분 직조기술을 바탕으로 하고 있다. 일방향 프리프레그 테이프에 비하여 직물(Textile) 프리폼이 가지는 장점은 복잡한 형상의 부품 성형이 가능하고, 생산성이 향상되며 손상허용치가 증가한다는 것이다. 직물 프리폼은 Fig. 4에서 보는 것처럼 섬유가 일체화되는 정도와 두께방향 강화 정도에 따라 2차원 및 3차원 구조로 구분된다. 예를 들어, 기존의 weaving, knitting, braiding을 보면 두께 방향의 섬유가 단지 섬유 직경의 2~3배 정도 깊이로 연결되기 때문에 섬유 관통으로 인한 강화효과는 비록, 일방향 적층 복합재료에 비하여 높지만 비교적 적은 편이다. 즉, 이런 직조 형태를 2차원 프리폼이라고 한다. 한편, 최근에 관심을 끌고 있는 3차원 프리폼의 경우에는 여러 방향의 섬유가 일체화된 구조이며 두께방향으로 현저한 보강효과를 줄 수 있다. 이런 2차원 혹은 3차원 직물 프리폼에 대한 다소 느슨한 정의는 프리폼의 실제 치수와는 무관한 것이다.

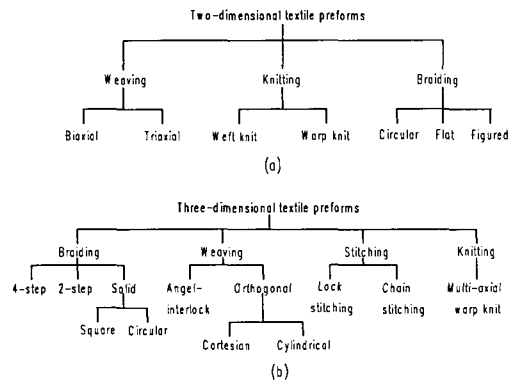


Fig. 4 Manufacturing techniques and textile preforms for (a) two-dimensional preforms and (b) three-dimensional preforms, respectively.

3.1.1 2차원 Textile 프리폼

■ Weave

Weave 프리폼은 두 세트 이상의 섬유가 서로 다른 방향으로 교차하여 직조되는 구조인데 길이 방향의 섬유를 경사(warp), 폭 방향의 섬유를 위사(filling 혹은 weft)라고 한다. Fig. 5는 대표적인 직교(orthogonal) weave 패턴을 보인 것이다. Weave 프리폼은 하나의 층으로 두 방향의 보강효과를 줄 수 있으며 충격저항 특성도 향상된다. 또한, 적층 작업을 할 때 다루기 쉽고 생산성이 높기 때문에 구조용 복합재료 성형에 가장 많이 사용된다. 반면에, 면내 전단 특성이 낮고 섬유굴곡으로 인하여 길이방향의 기계적 특성

이 저하되는 단점이 있다. 한편, 3축 (triaxial) woven 프리폼 같은 경우에는 세 세트가 섬유가 서로 60°의 각도로 교차하기 때문에 직교 weave에 비하여 재료 등방성이 향상되고 면내 전단 특성이 훨씬 높다.

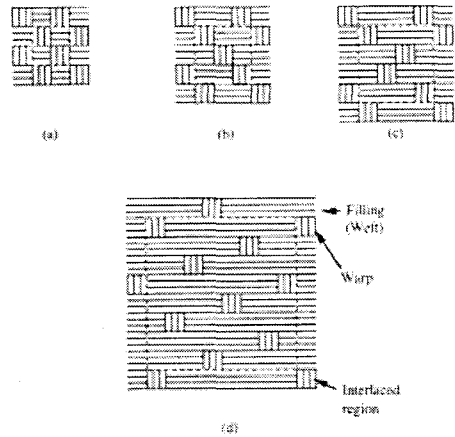


Fig. 5 Examples of woven fabric patterns: (a) plain weave; (b) twill weave; (c) four-harness satin; (d) eight-harness satin.

■ 브레이드 (Braid)

브레이드는 셋 이상의 섬유가 아래위로 교차하면서 직조되는 구조인데 폭이 좁은 편평한 테이프 형태의 flat 브레이드와 속이 빈 튜브형 브레이드가 있다. 브레이드의 기하학적 패턴이 Fig. 6에 나타나 있다. 첫 번째 것은 두 섬유가 서로 2개씩 상하로 교차하는 2/2 형태이며 Fig. 6(b)는 1/1 반복구조를 가진다. Fig. 6(c)는 regular 브레이드에 길이 방향 섬유가 보강된 세 방향 섬유로 구성된 구조로서 triaxial 브레이드라고 한다.

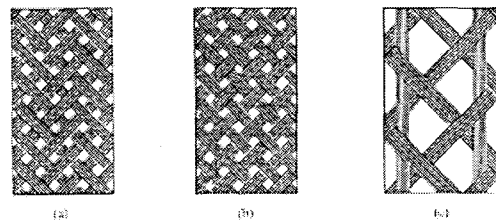


Fig. 6 Geometric configuration of (a) regular or plain braid; (b) diamond or basket braid; (c) triaxial braid.

■ 니트(knit)

니트 구조는 루프(loop)가 특징인데 루프를 형성하는 섬유가 진행되는 방향에 따라 weft 니트와 warp 니트로 구별된다. Weft 니트에서는 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 루프 섬유가 폭 방향으로 진행되며 (Fig. 7(b)) 루프는 단 하나의

weft 섬유에 의하여 형성된다.

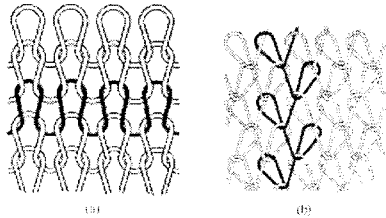


Fig. 7 Knitted fabrics: (a) weft knit structure; (b) warp knit structure.

Warp 니트에서는 루프가 형성되는 섬유가 길이 방향이며 하나의 수평 열을 이루는 모든 루프가 동시에 형성되는 구조이다. 이러한 니트 구조는 모든 방향으로 팽창이 가능하기 때문에 깊이가 깊은 부품 제조에 매우 유리하다. 폭 및 길이 방향으로 보강을 주기 위해 보강섬유를 추가하는 경우도 있다.

3.1.2 3차원 Textile 프리폼

■ Weave

3차원 weave 구조는 2차원 weave와 직조 방법은 유사하나 경사(warp)가 여러 층의 위사(weft)를 두께 방향으로 배열된다는 점이 다르다. 3D weave 프리폼은 연결(interlace)되는 층수, 반복되는 패턴, 길이 방향으로 삽입되어 직선 배열되는(in-laid) 섬유 유무에 따라 매우 다양한 기하학적인 형상을 가진다. Fig. 8는 대표적인 3D weave를 보여주고 있다.

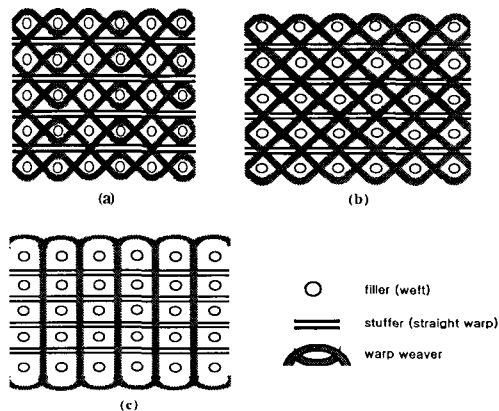


Fig. 8 Schematics of (a) layer-to-layer angle-interlock; (b) through-the-thickness angle-interlock; (c) orthogonal interlock.

■ 브레이드

3차원 브레이드 프리폼은 둘 이상의 섬유가 공간적으로 서로 꼬여져서 일체화된 구조를 가진다. 일반적으로 알려진 형태로는 track과 column이 가로, 세로로 움직여서 4단계에 걸쳐 섬유가 서로 꼬여지는 4단 (4-step) 브레이딩과 고정된 중축 섬유 사이로 브레이딩 섬유가 서로 대각선 방향으로 움직여 2단계에 걸쳐서 섬유가 꼬여지는 2단 (2-step) 브레이딩이 있다. 4단 브레이딩에는 machine bed가 원형이 형태와 직각형인 경우가 있는데 원형 브레이드는 튜브형 구조물을 만들 수 있고 직각형 브레이드는 solid 형태의 구조물 제작에 이용된다. 이와 같이 비교적 최근에 개발된 2단 및 4단 브레이딩 외에 maypole 형태의 브레이딩 기술을 이용하여 3차원 solid 브레이드를 제조할 수 있다.

■ 니트

여러 형태의 니트 프리폼 중 두께방향으로 가장 높은 구조 일체를 주는 것은 다축경편(multiaxial warp knit)이다. 이 프리폼은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 0°, 90° 및 ±θ의 각도를 가지는 섬유들이 두께 방향의 섬유로 일체화된 구조이다. 섬유의 배열각 순서, 추가되는 non-woven과 같은 재료 종류, 섬유 종류 등에 따라 매우 다양한 구조를 얻을 수 있다. 이 프리폼의 큰 장점은 weave 구조와는 달리 섬유의 굴곡이 없기 때문에 일방향 적층 복합재료의 장점을 그대로 살릴 수 있으나 일반적으로 섬유 층수가 4.5개 정도로 제한되는 단점이 있다.

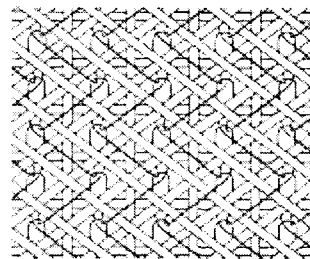


Fig. 9 Multiaxial warp knit fabric.

■ Needled 프리폼

이 프리폼은 순수한 3차원 프리폼은 아니나 최종적인 형태는 두께방향의 섬유가 배열된 구조이기 때문에 2.5D Textile 프리폼이라고도 한다. 가장 일반적인 직조기술은 스티칭(stitching) 및 니들펀칭(needle-punching)이다. 스티칭 기술은 보통 2차원 직물 프리폼 여러 장 적층된 것을 두께 방향의 바늘 관통에 의하여 전체를 결속시키는 기술로서 매우 경제적으로 3차원 구조를 만들 수 있으나 바늘 관통에 따른 적층 직물의 섬유 손상이 생기는 단점이 있다. 스티칭 섬유로서 인성이 좋은 아라미드 섬유나 유리섬유를 사용한다. 니들 펀칭 기술은 바늘의 펀칭에 의하여 평면으

로 배열된 섬유들을 강제적으로 두께 방향으로 배열시켜 층간 결속을 주는 방법이다. 사용되는 바늘은 주로 barb 형태를 가지며 펀칭하는 방향으로 barb가 나와 있어서 아래로 펀칭하게 되면 섬유를 끌어내리고 바늘이 위로 움직일 때는 섬유를 빠지지 않도록 되어있다. 이 방법의 장점은 최종 프리폼의 두께 제한 없이 경제적으로 제조할 수 있으나 사용할 수 있는 직물 형태도 펠트처럼 불연속 섬유를 사용하기 때문에 기계적 특성이 연속 섬유보다 떨어지는 단점이 있다.

3.2 성형 물성 정량화

입의의 부품에 대한 RTM 성형 공정을 개발하기 위해서는 주입구나 벤트의 위치, 주입 압력 및 유량, 주입 온도 및 경화 사이클 등을 결정하여야 하는데, 이를 위해서는 수치 해석을 통한 결정이 바람직하다. 수치 해석을 수행하기 위해서는 수지와 보강재의 기초 물성을 정량화하여야 한다.

수지 점도 및 경화도 열경화성 수지는 경화될 때 발열 반응을 하므로, 이로 인하여 복합재 내부 온도의 불균일 분포가 존재하고, 금형 충전 중에도 경화도에 따라 수지의 점도를 변화시키므로 공정 개발을 위해서는 점도 및 경화도 모델이 필요하다. 점도는 Rheometer나 Viscometer를 이용하여 온도, 배합율 및 시간에 따른 점도 변화를 측정하여야 한다(Fig. 10). 경화도는 통상적으로 DSC (Differential Scanning Calorimetry)를 이용하여 시간에 따른 Heat release rate를 측정하여 정량화(Fig. 11)하며, 수치 점도 변화를 예측하거나 경화 사이클을 결정하는데 이용된다.

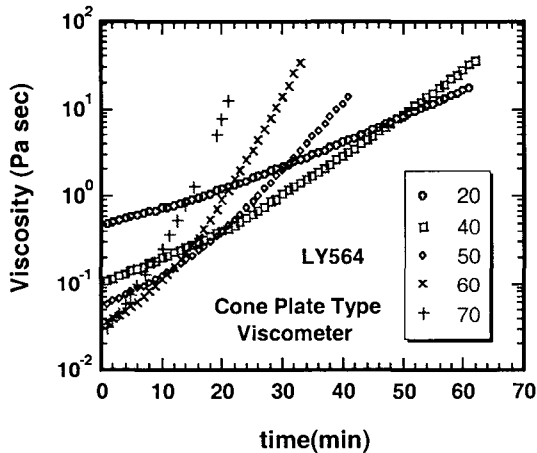


Fig. 10 수지의 온도별 점도 변화 측정 예.

수지의 선택 시에는 점도, 가사 시간(pot life), 유리 천이 온도(glass transition temperature, Tg), 수분흡수 정도 등을

고려하여야 하며, 통상적으로 사용되는 수지로는 UP(Unsaturated Polyester, VE(vinylester), methacrylate, acrylamate 등의 범용 상온 경화용과, 고성능 복합재 제품용으로 사용되는 Epoxy, BMI(Bismaleimide), PSP (Polystyryl-pyridines) 등이 있다. RTM용 Epoxy수지의 주요 제조회사는 Ciba-Geigy, Dow Chemical, Shell 등이 있으며, 최근에는 국내의 국도화학에서 외국 제품의 성능과 유사한 epoxy 수지를 시판하고 있다. 한편 고온용 Bismaleimide 수지는 Ciba-Geigy사 등에서 생산하고 있으며, PSP수지는 프랑스 SNPE사에서 개발하였다.

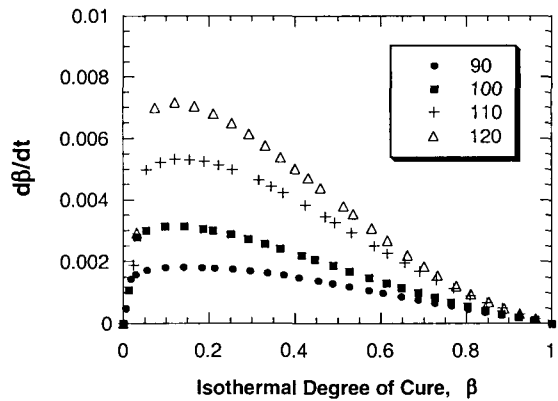


Fig. 11 수지의 온도별 경화도 측정 예.

보강재 투과성 계수 액상의 수지가 대체로 직경 10 μm 내외의 섬유들 사이로 침투하여 들어갈 때 섬유 공극에서 생기는 유동 저항을 유동 전도성으로 환산하여 정량화한 물성치로 금형 충전 해석에 필수적인 물성이다. 따라서 일방향 섬유 다발내에서의 섬유 축방향 유동과 수직방향 유동에 대한 수치 및 해석적 연구와 실험적 연구들이 많은 연구자들 (Sullivan, Williams, Gutowski, Drummond & Tahir, Larson & Higdon, Bergelin, Kirsch & Fuchs, Lam, Drummond & Tahir, Keller, Sangani & Acrivos...)에 의해 수행되었다. 섬유 직물이나 random mat의 투과성 계수는 일방향 섬유에서와 달리 실험 결과로부터 투과성 계수를 결정하는 방법들에 대한 연구가 Adams, Um & Lee, Chan, Young 등에 의해 진행되었는데 실험 장치의 개략도가 Fig. 12에 주어져 있다.

3.3 금형 충전/경화 수치 해석

본 절에서는 금형 충전 및 경화과정에 대하여 지배방정식과 경계조건 그리고 수치해석 기법에 대하여 간략히 설명한다.

지배방정식 Resin Transfer Molding (RTM) 공정에서 Preform을 통과하는 수지의 유동은 Darcy's Law에 따른다.

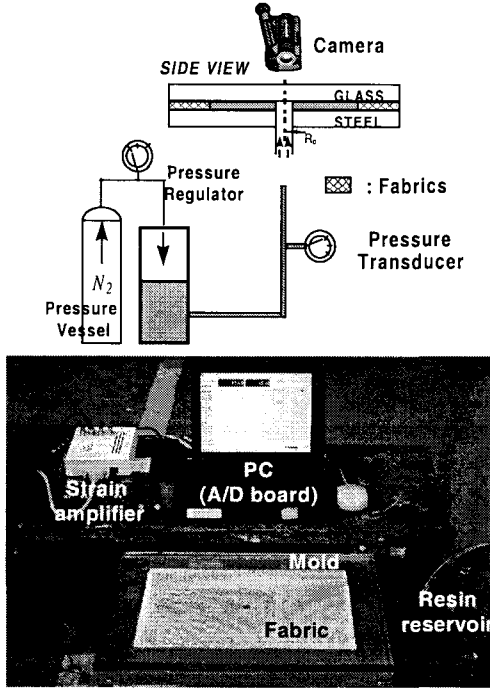


Fig. 12 투과성 계수 측정 개략도 및 실험 장치.

$$\bar{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

여기서 K 는 섬유의 배열, 섬유 부피분율 등의 함수로 표현되는 Permeability tensor, μ 는 수지의 점도이다. 수지 유동은 다음과 같은 질량 보존식을 만족하여야 한다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 수지의 압력 분포에 관한 방정식을 얻을 수 있다

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} \nabla P \right) = 0 \quad (3)$$

수지는 상온에서 주입되어 가열된 금형으로부터 열전달을 받아 가열되며, 이에 따라 수지내부에 온도 분포가 생긴다. 또한 가열된 수지 내부에서는 시간이 경과함에 따라 경화 반응이 진행된다. 경화 반응은 발열 반응으로서, 경화의 진행은 온도의 상승을 초래하며, 온도의 상승은 경화 반응을 촉진시킨다. 수지의 점도 μ 는 수지의 경화의 진행과 온도에 따라 달라지므로 이에 대한 고려가 필요하다. 수지와 섬유 사이에는 열전달이 존재하므로 에너지 방정식은 수지와 섬유에 대해 각각 서술되어야 하나, 섬유의 직경이 매우 작으므로 수지와 섬유 사이의 단위체적당 열전달 면적은 매우 크며, 따라서 수지와 섬유의 온도는 유동 선단을 제외하고는 서로 거의 같음을 가정할 수 있다. 유동 선단

에서의 수지-섬유간의 열전달을 적절한 경계조건을 정의하여 처리할 경우 다음과 같은 단일한 에너지 방정식을 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r c_{pr} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi \dot{G} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, ρ 와 c_p 는 각각 수지-보강섬유 복합재료의 평균 밀도와 비열이며, ρ_r , c_{pr} 은 각각 수지의 밀도와 비열을 뜻한다. \dot{G} 는 경화 반응에 따른 발열항으로서, 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{G} = \Delta H \cdot \dot{m} \quad (5)$$

여기서 ΔH 는 경화반응열이며, \dot{m} 은 경화에 따른 질량 생성 항이다.

주입구에서 들어오는 수지는 경화가 진행되지 않은 상태이고 온도 상승에 따라 금형 내부에서 경화가 진행되므로, 금형 내부의 수지 전체에 걸쳐 경화도의 분포가 생기게 되며, 식 (6)에 의해 표현된다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{u}{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{v}{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial y} = \dot{m} \quad (6)$$

윗 식에서, \dot{m} 은 경화 반응에 따른 질량생성항으로서, 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{m} = (k_1 + k_2 \alpha^{m_1}) (1 - \alpha)^{m_2} \quad (7)$$

m_1 , m_2 는 모델상수이며, k_1 , k_2 는 온도에 따른 함수이다. 수지의 점도는 다음과 같이 온도와 경화도의 함수로 주어진다.

$$\mu = \mu_\infty \exp \left(\frac{\Delta E_\mu}{RT} + \kappa \alpha \right) \quad (8)$$

여기서 μ_∞ , ΔE_μ , κ 는 실험으로 결정되어야 할 값들이다. Preform의 투과도는 다음과 같은 Carman-Kozeny equation을 이용하여 표현할 수 있다.

$$K_{ii} = \frac{r_f^2 (1 - V_f)^3}{4k_{ii} V_p^2} \quad (9)$$

여기서, K_{ii} 는 i 방향으로의 투과도, r_f 는 섬유가닥의 평균 반경, V_p 는 섬유의 부피분율, k_{ii} 는 i 방향으로의 Cozeny constant이다.

경계 조건 수지 주입구에서의 시간에 따른 압력 혹은 유량의 변화를 경계조건으로 주어야 한다.

$$P|_{gate} = P_0(t), \text{ or } u|_{gate} = u_0(t) \quad (10)$$

금형 벽면과 수직인 방향으로의 속도 성분이 존재하지 않으므로,

$$\left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{wall} = 0 \tag{11}$$

공기 배출구에는 대기압 조건을 적용할 수 있다.

$$P|_{vent} = P_{atm} \tag{12}$$

에너지 방정식에 대한 경계조건으로서 수지 주입구 온도를 정의하여야 한다.

$$T|_{gear} = T_{mold} \tag{13}$$

금형은 등온으로 가정할 수 있으므로

$$T_{mold} = \text{constant} \tag{14}$$

수지 유동 선단에서의 열적 경계조건을 다음과 같이 서술할 수 있다.

$$k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{front} = (1 - \phi) \rho_f c_{pf} u_n (T_{fo} - T) \tag{15}$$

화학반응식 (9)에 있어서 수지 주입구에서는 초기 경화도가 0이므로,

$$\alpha|_{gear} = 0 \tag{16}$$

수지 유동 선단에서는 선단과 수직인 방향으로의 경화도의 구배가 존재하지 않는다고 가정하면,

$$\left. \frac{\partial \alpha}{\partial n} \right|_{front} = 0 \tag{17}$$

위에서 서술한 지배방정식들을 이상의 경계조건에 대하여 풀면 수지의 유동 선단의 위치와 온도, 압력 및 경화도 분포를 시간에 따라 구할 수 있다.

수치해석 전술한 지배방정식과 경계조건은 제품의 형상이 복잡하므로 수치해석으로 푸는 것이 보통이다. 수치해석 기법으로는 유한요소법을 많이 사용하는데, 지배방정식의 형태가 비교적 단순하여 특별한 기법이 필요하지는 않다. 그러나 금형 충전 문제는 계산영역이 시간에 따라 변하는 문제이므로, 이에 대한 특별한 처리가 필요하다. 기간에 따라 변화하는 계산영역에 맞게 계산격자를 생성하는 이동격자법은 자유표면의 형상을 정확히 예측할 수 있다는 장점은 있으나, 형상이 복잡할 경우자동으로 격자를 생성하기가 힘들다는 단점이 있다. 따라서 요즈음은 계산 시작 전에 모든 관심영역을 미리 격자로 나누어 놓는 고정격자법이 많이 사용된다. 고정격자법은 각 격자가 대표하는 검사체적 (Control Volume) 으로 드나드는 유체의 양을 계산하여 그 검사체적 안에 있는 유체의 양에 따라 완전히 찬 영역, 부분적으로 찬 영역, 아직 비어 있는 영역으로 나누어, 찬 영역 만 계산에 참여시키는 방법이다. 고정격자법을 사용하면 자유표면의 형상은 약간 부정확해 지나, 격자 생

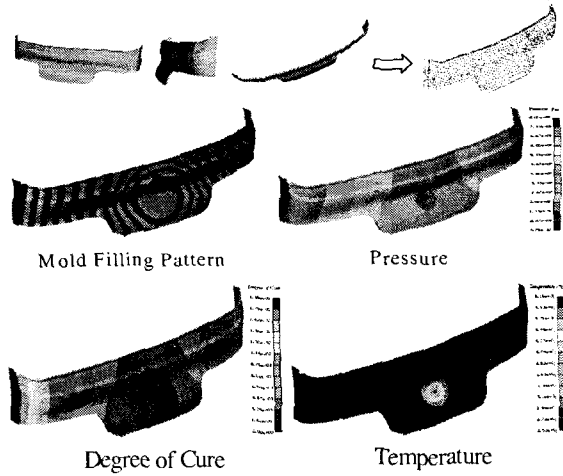


Fig. 13 자동차 부품에 대한 RTM 수치충전·경화 과정 수치해석 결과.

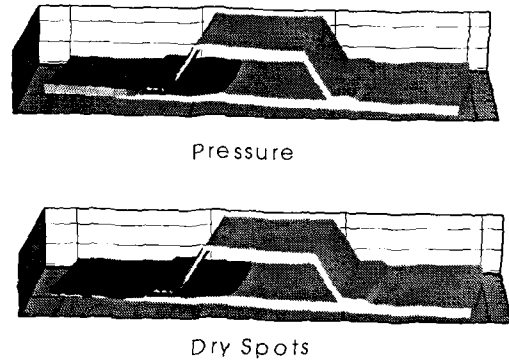


Fig. 14 VARTM을 이용한 Hat Section의 성형 해석 결과.

성의 어려움이 없으므로 복잡한 형상을 많이 다루어야 하는 액상성형 공정의 해석에 많이 사용된다. 이러한 수치해석 방법을 사용하면 Fig. 13에서 보는 바와 같이 복잡한 형상이라도 수치충전 및 경화과정 중의 압력, 온도, 경화도 분포는 물론 금형 충전 패턴을 예측할 수 있어 수지주입구의 위치 선정과 금형 설계에 이용할 수 있다. 최근에는 두꺼운 복합재료의 성형에 RTM이 이용되고, 또 프리폼 위에 다공질의 희생층을 두는 VARTM 방법등이 많이 보급됨에 따라 수치유동의 3차원 해석 필요성이 높아지고 있다. 3차원의 경우에도 수치해석은 기본적으로 전술한 방법으로 이루어진다. 단, 계산격자의 수가 크게 증가하기 때문에, 전 계산영역을 3차원으로 할 수도 있으나, 전체영역은 2차원으로 계산하고 관심 영역만을 3차원으로 해석하는 방법등을 생각할 수 있다. Fig. 14에 VARTM 공정의 3차원 수치해석 예가 나와 있다.

4. 공정의 발전 추이

최근에는 액상 성형 공정을 개발함에 있어 기존의 경험적 판단에 의존하지 않고, 공정 중에 변하는 각종 공정 변수를 측정하고 기존의 모델들과 비교 분석하여 공정 변수를 원하는 방향으로 제어하는 지능 성형 기술(Intelligent Processing Technology)에 대한 관심이 생산성 및 품질 향상에 대한 시대적 요구와 맞물려 매우 높아지고 있다. Fig. 15에 RTM 지능성형 개념도가 주어져 있다. 지능성형을 구현하려면 공정 변수 측정 센서, 데이터 획득 및 성형 상태 분석, 제어 판단, 실시간 성형 제어 등을 상호 연계하여 통합적으로 조절 및 관리할 수 있는 시스템 구축이 필수적이다. 액상 성형은 공정 중에 인가되는 외부 교란에 어느 정도 민감하므로 최종 제품의 품질에 영향을 미칠 소지가 다분하다. 따라서 성형 공정이 숙련된 작업자의 집중을 요하며, 품질 관리에 주의가 요구된다. 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 수치 해석 기술을 이용하여 생성할 수 있다.

성형 상황 및 재료 상태를 실시간으로 감지·모니터링하기 위한 센서로는 Fiber Optics, Ultrasonic Sensors, Dielectric Sensors, Piezoelectric Elements, Electro-magnetic Sensors, DC-Resistance Sensors 등이 활용되고 있다. 유전 센서(Dielectrometric Sensor)는 유전율, 유전 손실율, 전도율 등이 재료의 상태에 따라 변하는 것을 이용한 것으로 특히 유전상수는 경화 상태에 민감하여 경화 정도를 평가하는 유용한 수단중의 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, 러한 재료의 유전 특성들은 온도, 습도, 경화 상태, 주파수 등에 영향을 받아 안정적이지 못한 단점이 있다.

유전센서는 교류를 사용하는데 비하여 DC-resistance 센서는 직류를 사용하며 재료와 표준 저항을 직렬로 연결하여 전압을 측정하는 원리를 이용한 것으로 Dielectrometry를 활용하는 것 보다 저렴한 방법이다. 표1에 사용되는 센서 및 용도를 요약하였다.

지능 성형의 적용 사례를 보면, 미 해군에서는 대형 선박 제조에 있어 VARTM(Vacuum Assisted RTM)법을 적용하였는데, 우선 수치 해석 프로그램을 이용하여 공정 분석

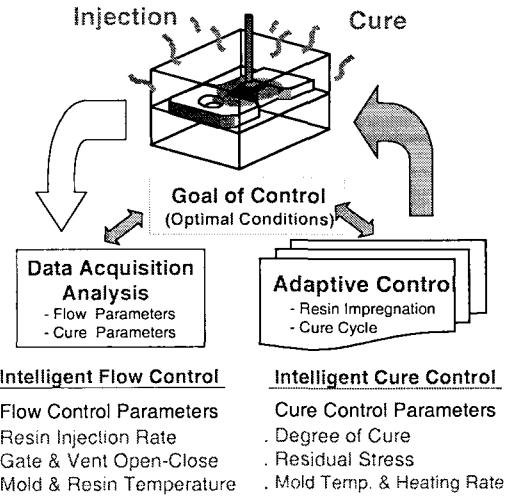


Fig. 15 RTM 지능성형 개념도.

표 1 Sensors and Sensing Techniques

Sensor Type	Measures Changes In	Used to Monitor	Examples
Spectroscopic	chemical state	flow, cure	Vibrational spectroscopy, Raman Spectroscopy, UV-vis spectroscopy, Fluorescence, Chemiluminescence
Electro-magnetic	electrical property (capacitance, conductance)	temperature flow, cure	Dielectric(AC, SMARTweave(DC) Arrival-Gel-Cure(DC))
Visual	externally visible process changes	flow	Optical camera with software
Thermal	temperature	temperature	Infrared thermography, Thermocouples
Wave Propagation	mechanical response	flow, cure	Direct Measurement, Surface wave, Reflectance, Wave guide, Acoustic Emission
Mechanical	pressure, viscosity	pressure cure	

을 선행하였고, 공정 중에 실시간 유동 감지(on-line sensing) 결과를 수치 해석과 비교하여 제어 방향을 설정하는 방식으로 접근하였고, Boeing사에서는 수지의 화학 반응 상태를 실시간으로 측정할 수 있는 유전센서(dielectric sensor)를 항공 우주용 복합재 제품 제조에 활용하고 있으며, 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. 또한 미 육군 연구소에서는 VARTM 공정에서 수치 함침 상태를 측정하기 위한 센서로 SMARTweave 개발하였다.

일본의 Osaka City Univ. 에서는 RTM의 2-D 유동 측정을 위한 다기능 센서를 개발하였고, Mitsubishi Heavy Ind. 에서는 CFRP의 경화에 Dielectric sensor를 이용하여 경화 과정을 모니터링하고 Springer의 cure kinetic 모델을 적용하여 수치 경화 제어에 활용하고 있다.

한편 국내에서는 복합 재료의 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(Unidirectional) 복합재의 열적 거동을 모니터링 하는 연구가 연세대에서 수행되었고, Autoclave 성형에 의한 두꺼운 복합재 경화시 복합재 내부온도 및 경화도 분포, 압밀 효과에 대한 실험 및 해석적 연구는 KAIST에서 수행되었다. 또한 한국기계연구원 복합재료그룹에서는 공정 모니터링, 공정 분석 기술, 성형 제어 알고리즘 등을 상호 연계하여 궁극적으로 지능 성형을 구현하는 통합제어 액상성형 시스템에 대한 연구를 현재 수행하고 있다(Fig. 16).

5. 적용 사례

경량화나, 내화학성이 요구되는 많은 구조물을 액상 성형 기술을 적용하여 제조 가능하다. 항공 분야의 경우 빔 구조물, Wing, Skin 구조물 등이 있는데, F-22의 경우 약 350개의 크고 작은 복합재료 부품이 RTM으로 제작되고 있다(Fig. 17). 토목 건축 분야 중에서 최근 많은 각광을 받고 있는 교량에 적용 가능한 제품의 형태는 비대칭 beam 구조물, girder, grid, 샌드위치 패널 형태의 deck 등의 대형 구조물이 있다. 자동차의 경우 Hood나 Side Panel 등의 적용 사례가 있고, 철도 차량도 전두부(Fig. 18)나 내장 판넬류가 액상성형 공정으로 개발되어 적용되고 있다. 그 외에도 TPI Composites에서는 디즈니 월드의 Monorail car를 개발하여 Al 합금 대비 40%의 경량화를 달성하였고, 일본의 Tokyo Car Corp에서는 Roof를 개발하여 Try-Z test car에 설치하여 차량당 300~500kg의 경량화를 달성하였다. 이탈리아의 Italian ETR500 (300km/h)에도 전두부와 내장재 패널이 설치된 사례가 있다. 앞서 언급한 바와 같이 전 산업 분야에 걸쳐 액상 성형 기술이 현재 활발히 적용되는 추세이다.

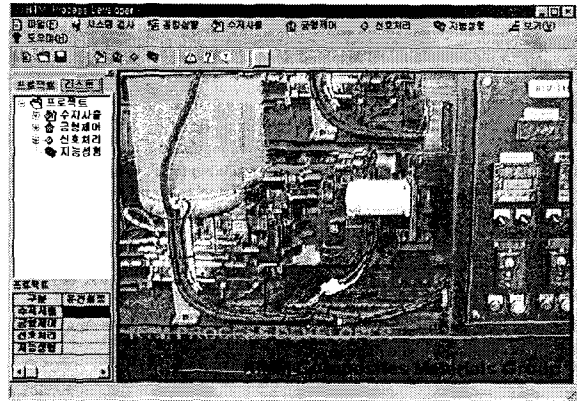


Fig. 16 RTM 통합제어 시스템 S/W 메인 화면.

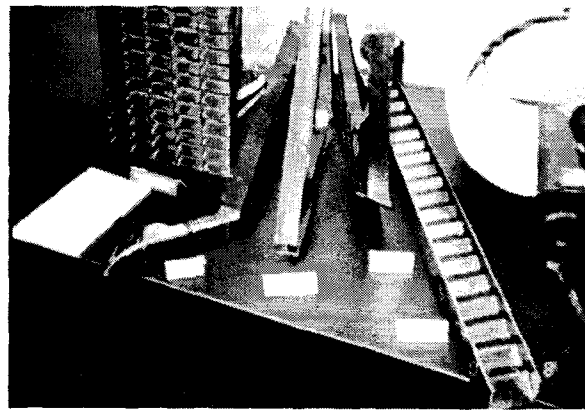


Fig. 17 Sine wave spar, Sub frame, Internal frame, Kick rib, 및 민항용 Cascade thrust reverser(왼쪽부터)

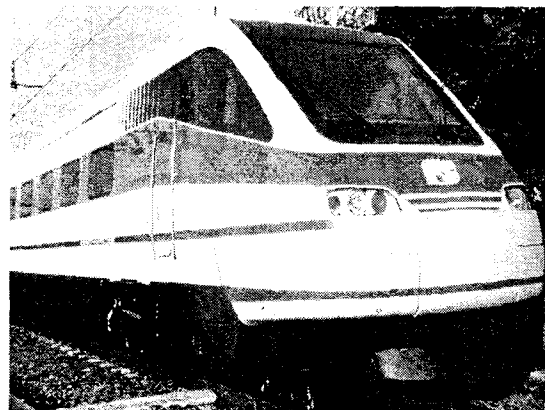


Fig. 18 철도 차량 전두부.

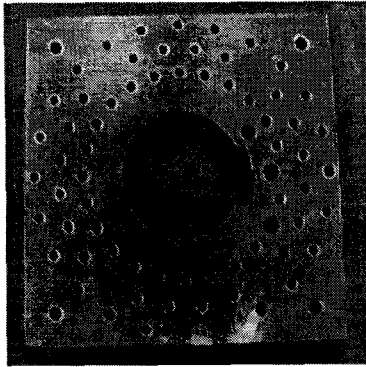


Fig. 19 권선 지지판.

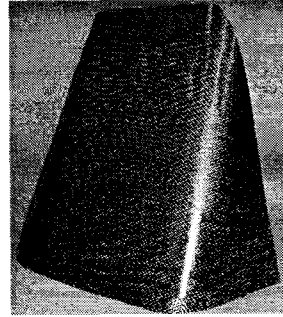


Fig. 23 민항기용 Tail cone.

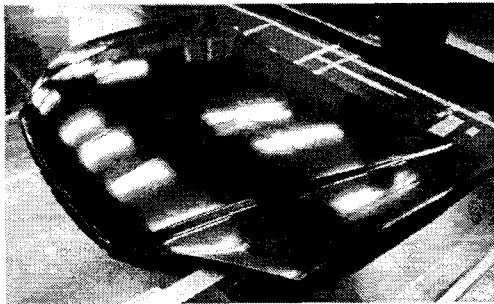


Fig. 20 복합재 자동차 후드.

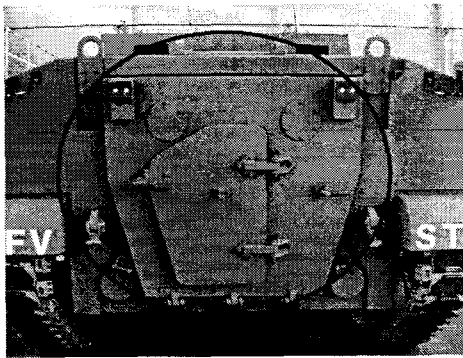


Fig. 21 장갑차 후방문.



Fig. 22 복합재 J빔, U빔.

국내 산업계의 경우, 대부분의 업체가 섬유 체적율 20% 이하의 범용 부품에 액상 성형을 적용하고 있으며, 기아 자동차의 경우 엘란 스포츠카 외장 판넬을 액상성형기술을 적용한 사례가 있고, 최근에는 (주)테크, 대한항공, 한국항공우주산업, 한국화이바 등 복합재 제조업체에서 고성능이 요구되는 대형 구조물에 개발에 액상성형 기술 적용의 필요성을 인식하여 개발 계획을 세우고 있으므로 조만간 산업화가 예상된다. 한편, 한국기계연구원에서는 섬유 체적율 50% 이상 고성능 부품 액상성형 기술에 대한 기초기술을 확보하여 한국형 고속전철 변압기 권선 지지용 복합재(650x650mm, 두께 47mm, Fig. 19)를 액상성형 공정을 이용하여 성공적으로 개발하였다. 그 외에도 자동차용 엔진 후드(1350X1200mm, Fig. 20), 차세대 장갑차의 후방문(1500x1300x55mm, Fig. 21), 복합재 J 및 U 빔 구조물(길이 200mm 단품, Fig. 22), 민간 항공기용 Tail cone (430X400X160mm, Fig. 23) 등의 부품들을 RTM 공법으로 성공적으로 개발하여 실용화를 추진하고 있다.

후 기

본 연구는 과기부 21C 프론티어 사업인 “차세대 소재성형 기술 개발” 사업에 의해 지원 받았으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.