

첨단 복합재료의 성형 공법



김 병 선

(복합재료실 선임연구원)

- '77. 5 미국 Grinnell College 물리학(학사)
- '78. 5 미국 Washington 대학교 기계공학(학사)
- '80. 5 미국 Washington 대학교 기계공학(석사)
- '90.12 미국 Missouri-Rolla 대학교 기계공학(박사)
- '91. 2-현재 한국기계연구소 복합재료실 선임연구원



이 상 관

(복합재료실 연구원)

- '86. 2 경북대학교 공과대학 금속공학과(학사)
- '88. 2 경북대학교 대학원 금속공학과(석사)
- '88. 3-현재 한국기계연구소 복합재료실 연구원

1. 고분자기지 복합재료

오늘날 가장 급성장 하는 산업중 하나인 고분자기지 복합재료 산업개발을 위한 선진국의 최근 연구 개발 현황과 동향을 소개한다. 고분자기지 복합재료 구조물의 사용도가 높아지는 이유는 성능 향상, 부품수의 경감 및 원가 절감 등에 있다. 그러나 관련업계에서는 몇 부분에서 더 많은 발전을 요하고 있다. 예를 들자면 가격과 성능의 관계가 보다 더욱 잘 이해 되고, 재료및 성형공법 비용의 절감과 대량생산성이 향상 되어야 된다.

1.1. Cost-effective한 성형공법의 개발

1.1.1. Net Shape Preform 제작

섬유강화된 복합재료가 현재 우주, 항공, 지상 수송기관, 생체재료, 스포츠 레저산업등에 응용되고 있으나 더 광범위한 응용에 어려운 장애를 주는 요소가 있다.

즉 damage tolerance, delamination resistance, 비싼 공법등이다. 이 애로점을 극복할수 있는 방법은 3차원으로 섬유강화된 복합재료 구조물을 사용하는 것이다. 이 구조물에는 평면 사이로 횡단하는 많은양의 섬유가 포함되어 있고 이 섬유는 굽힘, 압축, 충격하중 등으로 생긴 out-of-plane stress의 load path를 제공한다. 3차원적으로 보강된 섬유로 near-net-shape preform을 제작할수 있는 자동화 직조(weaving)장비가 곧 개발될것이다.

Albany국제 연구사(Mansfield, Mass)가 개발한 다층 interlocked braiding 공법은 독자적인 braiding성형공법이며, 다른 3-D 구조물 성형법에는 Atlantic 연구소의 3-D track & column 성형법 혹은 4 단계 성형법과 Du Pont사의 2단계 성형법등이 있다. Albany사의 성형법은 3-D interlocked pre-

form을 비교적 신속하고 효율적으로 제작할 수 있다.

올해 안으로 향상될 전망이다 성형 공법은 I-beam, C-Section, J-Section 등을 다층으로 interlocked braided된 구조물 생산 능력을 갖게 될것으로 보고 있다. 또한 앞으로 개발될 기술은 합침기술 및 3-D 보강 부품의 경화 기술이다.

복합재료구조물이 자동차, 트럭, 농업기기용에 계속 성장되고 있는 반면 오하이오 주 Ashtabula의 Molded Fiber Glass사는 deep draw 혹은 혼합 곡면이 있는 비교적 커다란 부품 생산에 directed fiber preform 혹은 형상 보강으로 structural reaction injection molded(SRIM) 부품 생산이 함께 성장할 것을 예상하고 있다. 이 크고 복잡한 형상의 부품생산에 compression molding이 이미 사용되므로 preform이 SRIM부품 성형에 더 많이 활용되고 있고 그 이유는 주로 directed fiber preform이 제공하는 다양성, 편리함, 고성능 등에 있다. 복잡한 성형의 구석에서 늘어날 수 있는 유리 섬유 mat와 비교하면 directed fiber preform은 성형되는 부품과 거의 흡사하게 성형되며, 보강섬유의 균일한 분배 및 random orientation을 할수있다.

Preform성형 공법은 구조물의 구석 구석 혹은 다른 주요 위치에 추가적 보강을 용이하게 할수 있다. 다량생산을 위한 robot사용 자동차 장비가 개발되고 있으며, 이장비는 formed-mat preform 기계로 plenum-chamber preform 구형 장비 보다 더 많은 유연성을 주며 작업시간을 줄여 준다. 새 섬유 유도 preform 장비는 큰 preform도 제작(지름 4.5mm까지)가능 하다고 보고 있다.

SMC나 RTM같은 복합재료 성형공법들과 비교했을때, SRIM은 유연성및 충격 저항의 손실이 없이 더 적은 무게로 더 많은 강성을 요하는 부품 성형을 할수 있다. 추가로, 다른 성형법으로 제작 가능한 부품보다 더 큰부품 성형 능력은 one shot mold로 여러 부품을 한꺼번에 성형하게 해 준다. 자동차 산업은 bumper beam, 계기판, seating, load floor 등에 합동 성형 이용으로 상당한 이점을 얻을수 있다.

Urethane과 isocyanate resin은 SRIM에 가장 많이 쓰이며 재료특성이 좋다. Epoxy, acrylic, dicychope-

ntadive, vinyl-ester, hybrid resin 등의 사용으로 부품 성능 및 부품 가격은 더욱 다양해 진다.

RTM공법은 소량 생산에 있어서 SMC 공법과 비슷한 수준의 표면처리를 낮은 가격으로 생산 할수 있다.

Injection mold 가능한 긴 섬유 보강 복합재료는 자동차 엔진 및 transmission 부속품을 제작하기 위해 개발되었다. 긴 섬유 보강 복합재료는 충격 흡수력을 향상 시킨다.

긴 섬유사용이 짧은 섬유 사용시의 failure mode와 다른 이유는 긴 섬유 사용시 충격 에너지가 부품 전체로 퍼지기 때문이다. 이 충격에너지는 짧은 유리섬유로 보강 된 패늘에서 생기는 failure mode보다 더 안전한 failure mode로 전환해주는 crack 시작 및 파장에 필요한 에너지의 양을 증가시킨다.

1.1.2. Filament Winding

Multiple wind angle을 요하는 부품을 filament wind하기 위해서 전 패턴 변경 및 작업 패턴을 정밀조절 할수있는 digital-controlled filament winder가 개발되었다. 이 기계의 통제장치는 컴퓨터 사용자가 모든 winding parameter를 계산하고 통제장치로 보낼수 있는 퍼스날 컴퓨터에 연결될수 있다. 이 컴퓨터는 또한 일반기계 작동에도 쓰일수 있다.

EB(electronic beam)은 tape winding의 熱源으로 효과적으로 사용할수 있다. 최근에 개발된 EB성



사진 1) 300 만불을 투자한 RTM 성형공법으로 제작된 트럭의 외형

형공법은 항공 분야의 filament wound, 탄소섬유 보강 rocket motor case의 성형을 가능 하게 했다.

EB 성형공법은 프랑스 항공 회사에서 최대 지름 4m, 길이 10m인 filament wound motor case를 제작 하는데 사용하고 있다. 전면 hydraulic 실험에 의 하면 EB cured sample이 thermally cured sample 보다 hoop stress가 11% 높고 performance factor는 12% 높다고 나타나 있다. 이 시설은 또한 지름이 다른 제품도 쉽게 제작할수 있는 3-D제품 조정 기계 장치를 포함하고 있다. 구조물 전체를 방사 에너지 cure할때 걸리는 총 시간은 8시간이고 thermal curing의 경우 100시간이며 EB사용 경우 온도 상승은 겨우 25~40°C이다. On line density 측정 및 feedback은 전자 beam을 더 큰 에너지 투과를 위해 X-ray beam으로 전환 시킬때를 결정한다.

1.1.3. Cost-effective한 성형공법

시장을 점유하고 있는 기존의 자재를 플라스틱 복합재료로 교체 시키기 위해서는 cost-effective한 성형공법의 개발이 필요하다. 미국 Delaware대학의 복합재료연구센터는 이 성형공법 개발에 노력 해왔으며, 1974년에서 80년도 중반까지 on-line consolidation, sheet forming, liquid molding, textile-preform, injection molding등의 개발에 주력 하였다. 지난 5년간 이곳에서 플라스틱 복합재료공법에 계속적인 분리 성형 공법보다 통합 성형 공법에 중점을 두고 연구 개발된 분야는 다음과 같다.

- CO₂레이저를 이용한 열가소성 복합재료의 consolidation.
- 판재형의 열가소성 복합재료로 복잡한 형상의 3-D 제품 제작.
- 열가소성수지 복합재료의 접착.

Delaware대학의 연구 센터에서 앞으로 곧 시작할 연구는 위에 개재된 거의 모든 분야에서 연구를 계속할 것이며 새로운 분야도 개척할 예정이다. 계속 연구될 분야는 다음과 같다.

- Microstructure까지 통제 가능한 성형공법을 고려하여 이에 적합한 모델을 정하여 실험을 하는 기본연구.
- 성형공법 개조에 중점을 둔 성형공법 모델 및 특성 분석.

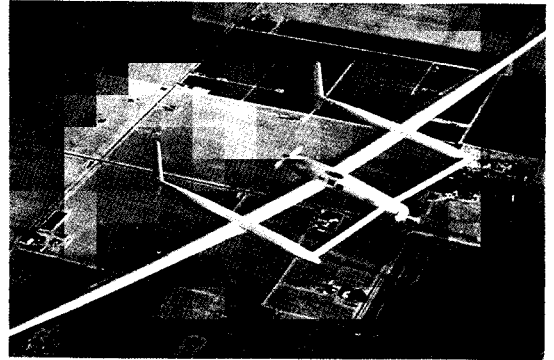


사진 2) 복합재료로 제작된 극경량 Voyager호

- Coupling reaction or crystallization kinetics 및 기계적 특성에 대한 기본 연구.
- 세라믹 복합재료의 성형 공법.
- 성형 공법의 유동학 특성에 대한 기본 연구.
- 플라스틱 및 세라믹 복합재료의 강도 및 파괴 인성치에 대한 모델연구.

1.1.4 새로 개척될 연구 분야

- 기계적, 열적, 전기적 및 자기적 특성의 조합으로 새로운 유능한 물질에 관한 연구.
- 열적, 내환경특성에 관한 연구.
- 첨단 센서 기술 및 인공지능 시스템사용으로 복합재료 성형공법의 on-line control에 관한 연구.
- 복합재료 재활용에 관한 연구.

1.2. 열가소성 수지 사용의 증대

Pultrusion은 복합재료 성형 공법중 가장 저렴한 것 중에 하나이며 미국 Alcoa연구소의 이분야에 대한 R&D 연구는 항공, 방위산업, 산업용응등에 요구되는 Pultrusion 성형공법 개발에 필요한 성형 공법연구에 더욱 힘을 예정이다.

McDonnell Douglas Space System사와 합작 연구하고 있는 Alcoa사는 열가소성 pultrusion분야에 저렴한 복합재료 성형공법을 개발시켰다고 주장 하고 있다. 이회사는 pultrusion 성형공법으로 multicell, hollow structure section, 열가소성 유리 PEEK 미사일 몸통등을 제작 성공하였다. 개발 가능케

한것은 열가소성 복합재료 pultrusion 성형공법에 어려운 과정을 조절 하는 Alcoa사의 컴퓨터 성형 공법 통제장치 및 data-acquisition 시스템이었다.

Thermoplastic Pultrusion사는 근래 tubular product(최대 지름 32mm) 같은 hollow profile을 제작할수 있는 pultrusion성형공법을 개발하였다. 계속 연구 되는것은 더 큰 지름의 구조물을 성형 하는데 있다. 이 공법은 prepreg으로 부터 구조물에 필요한 섬유각을 조절 할수 있는 preliminary assembly에 의존한다.

Pultrusion 성형 공법으로 제작된 튜브는 glass/poly propylene, graphite and glass/nylon 12, glass/polyphenylene sulfide(pps), graphite/PEEK 재료 시스템으로 성형된다. 이 공법은 rounds, oval, square로 되어 있는 모든 hollow profile에 응용된다.

2. 금속복합재료

1990년대에 접어 들면서 첨단재료와 공정을 위한 광범위한 영역이 확장되어 가고 있는 상황에서 금속복합재료(Metal Matrix Composites, MMCs)에 대한 응용과 이해가 보다 더 절실하게 요구되고 있다. 금속복합재료에 대한 관심은 1979년에 시작된 미국의 DoD(Department of Defence)금속복합재료에 관한 연구의 시작으로 인해 더욱더 커지게 되었으며, 새로운 기술의 상업화를 위해 필요한 응용력을 제공하여 주고 있다. 그러나 현재 금속복합재료의 가장 큰 응용은 미국방성의 금속복합재료의 응용보다는 자동차 부품에 선택적으로 보강하여 제조한 금속복합재료를 상업화한 것을 들 수 있다. 이러한 응용의 성공은 적절한 경비로 금속복합재료의 특성을 보유할 수 있는 제조공정의 핵심적인 역할을 의미한다. 이러한 상황은 1990년 이후에도 변하지 않고 계속될 것이다.

세라믹 섬유보강 금속복합재료는 강화재의 길이대 직경비(1/d)를 기준으로하여 연속섬유강화 복합재료(Continuous Fiber-reinforced Composites)와 불연속 섬유강화 복합재료(Discontinuous Fiber-reinforced Composites)로 인위적으로 나눌 수 있다. 연속섬유강화 복합재료는 불연속 섬유강화 복합

재료에 비해 우월한 특성을 가진다. 특히 일방향 하중을 고려하였을 때는 이러한 경향이 더욱더 두드러지게 된다. 그러나 연속섬유는 가격이 비싸며, 제조단가도 높기 때문에 연속섬유 강화 복합재료의 응용에 많은 제한을 받고 있다. 이와 대조적으로 단섬유, 휘스커, 강화입자를 이용한 불연속섬유강화 복합재료는 상용의 Squeeze Casting, 분말 야금법등과 같은 상용의 금속 제조법을 응용하여 훨씬 더 높은 특성을 가진 재료를 제조할 수 있으며, 그 제조단가도 많이 절감시킬 수 있다.

그리고 금속 복합재료의 형태에 관계없이 금속복합재료의 궁극적인 성공은 특성을 향상시키기 위한 공정의 개발과 새롭고 독특한 복합재료 체계를 개발하기 위한 연구소, 산업체등의 끊임없는 노력에 의해 좌우될 것이다.

1990년대초의 연구 초점은 설계된 합금조성들과 금속복합재료에 적합한 공정들, 강화재와 기지재료의 계면에서의 화학 및 기계적 성질, 부품의 재현성을 증가시키는 반면 복합재료의 제조단가를 감소시키기 위한 고유의 제조공법을 개발하고 정착시키는데 주력할 것이며, 한편으로는 Ti_6Si_6 같이 새로이 개발된 보강섬유들과 γ TiAl, 금속간 화합물같은 기지재료등과 같이 새로이 설계된 금속기지 재료의 개발을 통하여 $900^{\circ}C$ 이상의 온도에서도 사용 가능한 고온용 금속복합재료를 도입시키는 데 맞추어 질 것이다.

통상 금속복합재료에 사용되는 기지재료의 선택은 복합재료에 궁극적인 기계적 성능 향상에



사진 3) Squeeze Casting으로 제조된 금속 복합재료 부품

얼마만큼의 영향을 미칠지를 거의 고려하지 않고 상용합금을 임의로 선택하여 사용하여 왔다. 일 방향으로 연속섬유가 보강된 금속복합재료에서는 기지재료의 선택이 덜 중요하지만, Cross Ply가 요구되거나 불연속되거나 섬유가 보강된 복합재료를 고려할 때에는 기지재료의 선택이 중요한 의미를 가지게 될 것이다. 그러므로 앞으로는 모든 조성내에서 더 의존적이고 Quench Rate Sensitivity를 최소화시키도록 설계된 알루미늄 금속복합재료가 개발될 것이다. 그리고 분산강화 알루미늄합금은 고온용 금속복합재료의 기지재료로서의 이용에 많은 관심을 받을 것이다.

또한 Al-Li 합금도 낮은 체적율에서 보다 높은 비강성도를 얻을 수 있기 때문에 기지재료로서 좋은 평가를 받게 될 것이다. 궁극적으로는 기지재료의 합금설계 또한 다른 기지재료 체계로 확장되어 갈 것이다. 즉, 섬유와 기지재료의 반응도를 최소화시키는 Mg과 Ti기지재료 합금등이 도입될 것이다. 예를들면 Ti합금의 경우, 적절한 섬유와 기지재료의 결합을 유지시키기 위해 Beta상을 도입시킴으로써 보강섬유와 기지재료의 반응성을 최소화시킬 수 있으므로 계면에 관한 이해를 보다 명백하게 얻게 될 것이다. 실지상용의 금속복합재료의 계면은 화학반응도와 젖음성이 기지재료에서 보강섬유로 하중을 전달하기 위해서 필요한 것에 대해 균형을 이룰 수 있는 상태로 될 것이다.

부가적으로, 계면을 화학적인 측면에서 개선하기 위하여 효율적인 방법들이 도입될 것이다. 연속섬유나 불연속 강화재의 두 경우다 하나의 바람직한 계면을 위한 접근 방법은 얇고 연속적인 Nanocrystalline 코팅을 형성시킬 수 있는 Sol-gel공정을 들 수 있다. 그리고 금속복합재료의 공정에서 많은 진보는 금속복합재료 조성, 변형공정거동등에 관한 모델의 개발에 의해 가능해질 수 있다.

1990년대동안의 연구개발진행은 수용가능한 가

격에서 재현가능한 특성을 얻는 데 맞추어 질 것이다. 이러한 접근은 자동차 시장내에 금속복합재료의 연속적인 침투를 위해 특히 중요하다. 당분간 자동차로의 응용은 Squeeze Casting에 의해 제조된 금속복합재료에 제한될 것이다. 이것의 생산성은 Injection-mold와 예열된 Preform들이 속도와 압력조절하에서 함침될 수 있도록 자동조정되는 자동시스템의 개발에 의해 증대될 수 있다. 몇몇 연구소에서 연구하고 있는 이러한 자동시스템들은 독특한 빠른 사이클로 가열과 냉각을 하는 개념을 이용하고 있다. 열제어 및 시스템의 자동화는 Preform 가격, 코팅, 보강섬유와 기지재료의 상호반응을 감소시킨다. 이기술이 처음에는 알루미늄기지 금속복합재료에 응용될 수 있지만, 장차 Mg의 물성에 관한 더많은 이해를 하게될때 Mg기지 금속복합재료의 응용에도 사용될 것이다.

한편 강화재의 편석과 침전에 관한 연구들은 금속 기지재료의 주조가능성에 관한 개발로 유도될 것이다. 불연속적으로 보강된 알루미늄 합금의 Strip Casting을 직접적으로 조사하는 연구들이 또한 시작될 것이다. 이 제조방법은 사실상 큰 부피에서 감소된 가격들을 보장하며, 이에 관련된 예비연구들은 SiC로 강화된 합금들에 대하여 이러한 접근법들의 가능성에 관한 것들이다.

열제어 실시간 조절을 이용한 불연속적으로 보강된 Sheet와 Shape들의 직접적인 Dual-spraying은 알루미늄기지 금속복합재료로 입증될 수 있다. Al-Ti합금에서 예시된 것처럼 급냉응고 기술의 장점과 세라믹 강화재가 특히 고온에서 향상된 구조적인 성능을 얻기 위해 조합될 수 있다. Alcan에 의한 SiC보강 8090 Al-Li합금기지 금속복합재료의 생산은 높은 내구성과 고온용의 응용을 위한 이 공정의 가능성을 입증하였다. 연속섬유와 불연속 강화재의 장점들로 조합된 Hybrid Composite구조물에 대한 개발도 유망시 된다.