

자동섬유적층법을 이용한 고성능 복합재료 구조물 제작의 자동화



김진봉

(KIMM 공정연구부)

'90 - '94 인하대학교 항공우주공학과(학사)
'94 - '96 한국과학기술원 항공우주공학과(석사)
'96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



김태욱

(KIMM 공정연구부)

'79 - '83 서울대학교 항공공학과(학사)
'83 - '85 서울대학교 항공공학과(석사)
'85 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

복합재료는 뛰어난 비강성, 비강도 뿐만 아니라 우수한 내환경성, 피로내구성으로 인하여 수송, 건축, 항공/방산 산업으로부터 해양, 전기/전자, 소비재 산업에 이르기까지 그 사용량이 해마다 증가하고 있다. 이러한 복합재료 산업은 생산비 중에 인건비 부분이 다른 산업에 비하여 비교적 큰 특징을 가지고 있다. 따라서, 생산공정의 자동화를 통하여 인건비를 줄이고 공정을 개선하려는 연구가 국내외적으로 많이 진행되고 있다.



그림 1. 한국기계연구원에서 보유중인 7축 제어 자동섬유적층장비(FPS : Fiber Placement System)

자동화된 로봇을 이용하여 수지가 함침되어 있는 Tow, Ribbon, Tape 등을 자동으로 적층하는 방법은 고성능 섬유강화 복합재료 구조물을 제작

표 1. 대표적인 자동섬유적층장비

Machine Fabricator	Alliant Tech.	ADC	ADC	ADC	Cincinnati Milacron	Cincinnati Milacron	Cincinnati Milacron	Ingersol Mining
Owner Location	ATK SLC, UT	Boeing Seattle	Bell Ft Worth	NASA Langley	Boeing Phily	Northrop El. Seguno	Raytheon Wichita	Boeing St. Lou.
Install Date	1997	1992	1994	1995	1994	1995	1998	1995
Length (ft)	47	8	12	4	28.5	40	65	37
Diameter (ft)	16	2	3	3	12.5	12.5	13	14
Tool Weight	120,000	2,000	10,000	2,000	40,000	40,000	40,000	80,000
Motion Axis	7	6	7	7	7	7	7	7
No. of Tow	32	1	8	5	24	20	24	22
Project	F-22	V-22	V-22	in House	V-22	F/A-18E/F	Premier	F/A-18

하는데 있어 가장 효과적이고 경제적인 성형방법 중 하나이다. 미국에서부터 시작된 이러한 자동섬유적층법에 대한 개념은 필라멘트와인딩(Filament Winding) 공법으로부터 유래되었다. 1979년에는 이것을 고등 필라멘트와인딩이라고 불렀는데, 이것은 필라멘트와인딩공법의 한계를 넘는 다양한 기능을 가지고 있으며 다양한 형태의 재료를 이용할 수 있는 공법이라는 뜻이었다. 6축의 자동섬유적층장비는 1980년에 시작되었으며, 1983년에 실제로 운용될 수 있었다. 대형의 복합재료 구조물의 제작이 가능한 장비는 1989년부터 운용되었는데, 지금까지도 장비의 규모 및 그 수가 계속해서 증가하고 있는 추세이다.

매우 복잡하고 정교한 컴퓨터 소프트웨어에 의하여 운영되는 자동섬유적층법은 전통적인 Hand Layup 공법에 비하여 약 25%의 인력감소 및 30%까지의 재료절감을 가져올 수 있을 뿐만 아니라, 설계해석과의 차이도 획기적으로 줄일 수 있기 때문에 비용절감뿐만 아니라, 구매자에게도 확실한 신뢰를 줄 수 있는 장점이 있다. 이러한 저비용 제작공법을 보다 저변화 하고 그 성능을 개선하기 위해서는, 보다 경제적이며, 작은 규모의 실험적인 장비를 이용한 연구가 필수적이다. 이러한 장비를 이용하여 새로운 수지, 강화섬유, 중간재형태, 새로

운 경화 미케니즘, 실험상 적층법, 고온에서의 응용, 금속-고분자기지 복합재료 하이리드 등에 대한 연구를 수행할 수 있다.

2. 열경화성 복합재료에 대한 자동섬유적층법

열경화성 복합재료에 대한 자동섬유적층법에 대한 본격적인 연구는 1990년대 초부터 중반까지 미국의 ONR의 MENTECH의 프로젝트에 의하여 수행되었다.

미국의 해군 CECMT, Boeing, Alliant Tech-systems, Cincinnati Milacron, Northrop Grum-



그림 2. 자동섬유적층장비를 이용하여 항공기 구조물을 제작하는 장면

man, Rockwell International의 참여 하에 진행된 이 프로그램에서 개발된 기술은 F/A-18E/F의 부품을 대상으로 하였다.

개발된 기술은 실제의 항공기 부품을 제작하는데 응용되었다. Boeing은 F/A-18E/F의 수평꼬리 날개를 제작 및 생산하였으며, Northrop Grumman은 F/A-18E/F의 엔진 inlet duct, fuselage panel을 제작하는데 약 9천만 달러의 비용을 절감하였다. 이것은 부품별로 25%~30%의 비용절감효과

를 의미하였다. 미국 해군은 이 프로그램에 대하여 비용절감과 성능향상의 목표를 동시에 만족하였다고 평가하고 있다.

개발된 고동섬유적층법은 지난 수년에 걸쳐서 V-22 Osprey, F-22 Raptor, C-17 Globemaster, T-45 Goshawk, AH-1 Cobra helicopter, Joint Strike Fighter와 같은 군용항공기 제작에 새롭게 기여했을 뿐만 아니라, Boeing 609 helicopter, Boeing 777 Transport, Raytheon Premier 등의 민수용 항공기에도 적용되기 시작하였다.

표 2. Cost Savings(F/A-18E/F only)

Component	Dollars Saved (per 1000 aircraft)
Horizontal Stabilator Skins	\$69M
Inlet Duct Skins	\$90M
Side Skin2	\$90M
Side Skins, Over	-

3. 열가소성 복합재료에 대한 자동섬유적층법

열가소성 복합재료에 대한 자동섬유적층공법은 1990년대부터 미국의 ARPA의 MACSS (Manufacture of Advanced Composite Submarine Structures) 프로그램의 일환으로 연구가 활발하게 진행되었다. 이 프로그램은 저가의 복합재료 잠수함 구조를 제작하는데 필요한 자동화된 일련의 제작공정을 개발하기 위한 것인데, 이들은 실제의 잠수함 구조물을 제작하는데 앞서 실제 크기의 CDDS (Composite Dry Deck Shelter)를 먼저 제작함으로써 공정의 신뢰성을 확보하는 연구를 수행하였다.

이 프로그램의 궁극적인 목적은, 복합재료 잠수



그림 3. Raytheon 항공사에서 Cincinnati Milacron의 자동섬유적층장비를 이용하여 제작한 항공기의 복합재료 fuselage



그림 4. NASA Langley 복합재료 센터의 열가소성 복합재료용 자동섬유적층장비



그림 5. CDDS를 위하여 자동섬유적층장비를 이용하여 제작된 열가소성 복합재료(APC-2) 실린더

함 구조물의 제조비용 및 시간을 줄이기 위하여, 적층된 복합재료를 높은 적층속도(최고 200lb/hr) 및 낮은 비용(\$100/lb)으로 실시간으로 자동경화하는 공법을 개발하는 것인데, 자동경화는 오토클레이브(autoclave)에서의 후경화(post curing)가 필요하지 않도록 재료가 적층되는 동안에 충분한 실시간 경화가 일어나도록 하는 것이다.

4. 자동섬유적층법의 체계

자동화된 로봇 기술과 복합재료 구조물 제작기술이 함께 적용된 이 공법은 자동 적층을 위한 소프트웨어 부분과 하드웨어 부분적인 체계로 분류

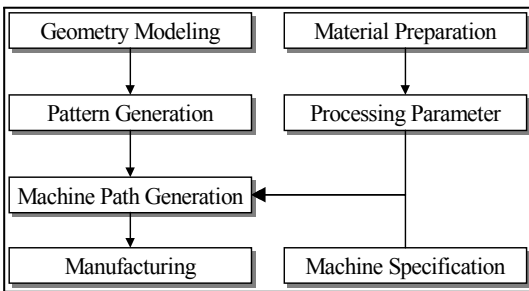


그림 6. 자동섬유적층장비를 이용하여 복합재료 구조물을 제작하기 위한 소프트웨어 부분의 준비의 흐름도

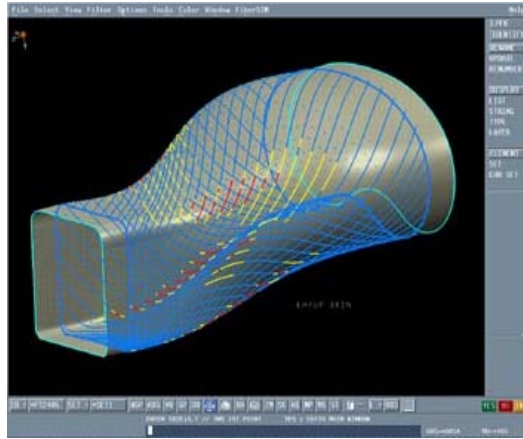


그림 7. 캐드상에 그려진 금형위에 섬유적층 패턴을 정의한 장면.

될 수 있다.

소프트웨어 부분은 컴퓨터 상에 모델링된 금형의 형상 데이터를 이용할 수 있도록 하는 인터페이스와, 금형 형상 위에 원하는 복합재료 적층순서에 따른 섬유적층경로를 정의하는 패턴 데이터(fiber placement pattern)를 생성하는 부분과, 패턴 데이터와 장비의 축의 수, 각 축의 상하 운동반경의 한계, 속도, 각속도 등의 종합적인 사양을 고려하고 성형하고자 하는 재료의 성형온도, 재료의 치수 및 점도 등의 데이터를 이용하여 장비의 운동에 대한 데이터(machine path)를 생성하는 부분과 장비 운동 데이터를 이용하여 장비를 구동시킬 수 있는 제어 소프트웨어로 구성된다.

하드웨어 부분은 필라멘트와인딩과 유사한 구조를 가지고 있다. 필라멘트와인딩의 하드웨어는 주로 3~4축 제어 로봇 시스템과 복합재료 구조물 제작을 위한 부분 즉, 섬유를 운반하는 크릴과 수지함침조, 재료가 나오는 부분인 아이(eye)로 구성되어 있다. 자동섬유적층장비의 경우 주로 6~7축의 로봇 시스템과 섬유를 운반하는 크릴과 자동섬유적층 기능을 가진 자동섬유적층헤드(FPH : Fiber Placement Head)로 구성된다.

자동섬유적층헤드는 필라멘트와인딩장비의 복

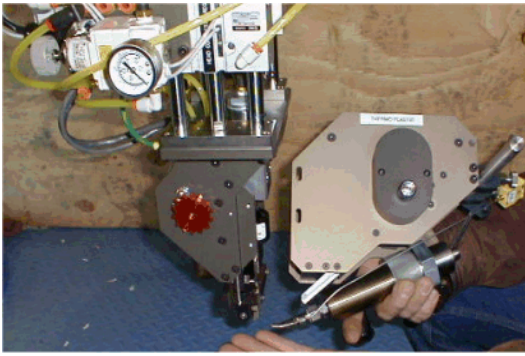


그림 8. 한국기계연구원 에서 보유중인 자동섬유적층헤드

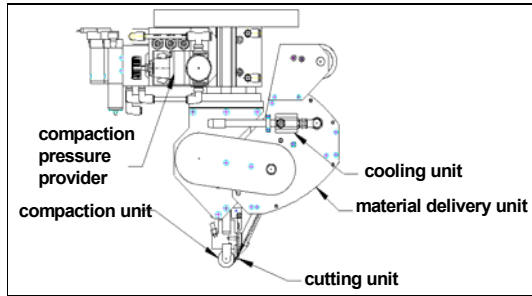


그림 10. 자동섬유적층헤드의 구조

5. 자동섬유적층헤드의 구조

금형 표면 위에 직접 복합재료를 적층할 수 있도록 다양한 기능을 가진 자동섬유적층헤드는 그림 10과 같은 다양한 유닛들로 구성되어 있고 이러한 유닛들은 성형 중에 서로 유기적으로 연동되어 원활한 적층이 가능하도록 한다.

Compaction Pressure Provider 재료를 적층할 때에는 금형 상에 적당한 압력으로 가압하여야 하는데 이러한 역할은 자동섬유적층장비를 이루는 로봇 시스템에서 금형의 수직방향으로 움직이는 축의 운동으로 가능할 수 있다. 그러나, 이러한 방법은 고속으로 움직이는 축의 과도운동과, 금형의 치수 오차 및 이미 적층된 재료에 의한 금형 표면형상의 변화에 의하여 적당한 적층압을 유지하기가 매우 어렵게 된다. 따라서, 로봇 시스템에서 금형의 수직방향의 병진 축의 방향과 동일한 방향으로 일정한 힘을 유지하며 움직일 수 있는 장치를 도입함으로써 금형 표면에 일정한 적층압을 유지하도록 할 수 있다.

Compaction Unit 금형의 표면에 실질적인 적층작업을 하는 유닛으로서 금형의 표면에 밀착하여 움직일 수 있어야 한다. 또한, 열경화성, 열가소성 수지 복합재료의 적층 분위기 온도에 따른 물성저하가 발생하지 않아야 하며, 수지와 반응하지 않고, 수지와의 접촉특성이 낮은 재료로 구성되어야 한다. 적층하는 재료의 너비가 작을 경우에는 흔히 금속성 롤러 형태의 장치가 사용되기도 하지만 넓은 재료를 적층하거나 작은 너비의 다수의

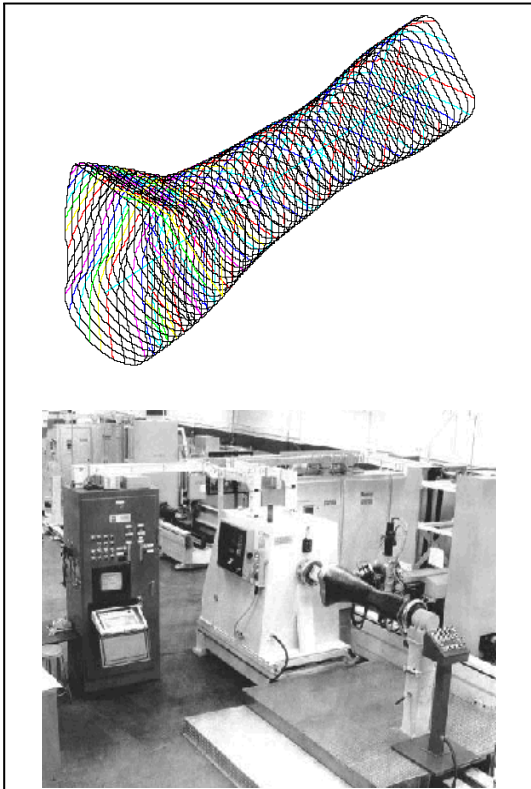


그림 9. V22의 main rotor grip을 제작하기 위한 섬유적층경로와 제작장면.

합재료관련 장치 이상의 복잡한 구조를 가진 장치로서 실제의 자동섬유적층장비의 기술력의 대부분이 집중된 부분이다. 따라서 일반적으로 자동섬유적층장비의 경우 로봇 시스템을 제어하는 제어 체계이외에 자동섬유적층헤드를 제어하기 위한 별도의 제어 체계가 동반되는 경우가 많다.

재료를 한꺼번에 적층할 때에는 특수한 방식의 장치의 개발이 필요하다.

Cutting Unit 일반적으로 강화섬유로 사용되는 탄소섬유 및 유리섬유의 경우 경도가 매우 큰 재료로서 기계가공이 매우 어렵다. 따라서, Cutting Blade와 같은 부품들은 반드시 초경합금과 같은 재료로 제작되어야 한다. 또한, 잘라낸 면이 가지런해야 하고 무리한 절단으로 인하여 재료의 단면 형상이 변하지 않도록 설계되어야 한다.

Material Delivery Unit 재료를 자동섬유적층헤드의 끝에 있는 Compaction Unit으로 이송하는 장치로서 적층할 때 움직이는 로봇 시스템의 축의 속도와 정확히 동기되어 적층하고자 하는 속도로 섬유를 이송시킬 수 있어야 한다.

Cooling Unit 열가소성 수지 복합재료가 상온에서는 접착성이 없는 것과는 달리 열경화성 수지 복합재료는 경화하기 전에는 상온에서의 접착성이 매우 크다. Material Delivery Unit의 경우 내부의 기계적 장치에 복합재료의 수지가 계속해서 쌓이게 되어 장비의 고장의 요인이 될 수 있으며 재료의 이송경로에 재료가 붙어서 이송이 불가능하게 될 수도 있다. 따라서, 이송경로 중의 분위기를 온도를 낮추어야 하는데, 냉각에 필요한 전기적, 기계적 장치의 무게가 증가하면 로봇 구조의 추가적인 강성과 아울러 축을 움직이는 동력계통 및 Compaction Pressure Provider와 같은 장치의 용량이 커지게 된다. 그러므로, 가볍고 간단한 냉각 장치의 개발이 필수적이다.

Heat Source 열가소성 수지 복합재료의 경우 적층을 위하여서는 수지가 적층 중에 녹는점 이상으로 충분히 가열될 수 있는 열량을 공급하여야 하며 열경화성 수지의 경우도 적층에 알맞은 점성을 가질 수 있는 열원이 필요하다. 이러한 열 에너지를 주는 가장 대표적인 방법은 Hot Gas Torch를 이용하는 방법으로 현재까지 가장 널리 쓰이고 있다. 그러나, Hot Gas Torch는 그림 11과 같이 금형 위에 적층된 재료와 적층할 재료가 만나는 지점에 미치지 못하는 위치에 가

스의 정체점(stagnation point)을 형성하여 열전달 효율이 떨어지고, 적층할 재료뿐만 아니라 특히 Compaction Unit을 동시에 가열하게 되어 적층된 재료와 적층할 재료 사이의 접착성보다 Compaction Unit이 닿는 면에서의 접착성이 커져서 적층된 재료의 표면상태를 저하시키는 단점이 있다.

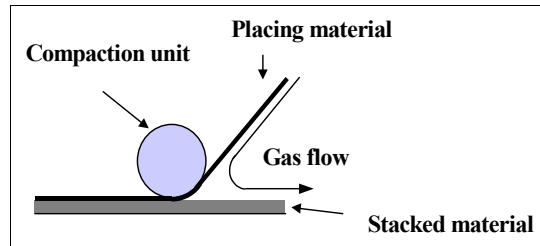


그림 11. Hot Gas Torch를 사용할 경우에 발생하는 Stagnation 현상

효율적이고 집중적인 열원을 개발하기 위하여 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다. 대표적으로는 Focused IR Lamp나 Laser 등을 사용하여 원하는 위치를 국부적이고 효율적으로 가열하는 방식이 실용화를 앞두고 있다.

In-situ NDT 열가소성 수지 복합재료용 자동섬유적층법의 경우 오토클레이브를 이용한 후처리공정을 생략하고 보다 신뢰성 있는 구조물을 제작하기 위하여 자동섬유적층헤드부분에 초음파장비와 같은 적층판 내부 손상진단 장치를 부착하는 경우도 있다.

6. 섬유자동적층법을 위한 원소재

경제적인 자동경화 속도를 얻기 위해서는 새로운 복합재료 중간재의 개발과 적절한 선택이 필수적이다. 적합한 복합재료는 넓은 공정영역 (processing windows)을 가져야 하며 실제의 작업 환경 조건에서 좋은 기계적 특성을 유지할 수 있어야 한다. 넓은 공정영역을 얻기 위해서는 약간의 원자재의 변화 및 공정변수의 변화에 대해서도 유사한 구조적인 성능을 지니고 있어야 한다.



그림 12. 연속함침섬유와 프리프레그테이프

열가소성 재료

열가소성 수지 복합재료 중간재에 대한 국내에서의 연구는 거의 전무한 실정이며, 국외연구결과는 미국의 MDA(McDonnell Douglas Aerospace)에서 수행한 연구가 대표적인 것인데 이것은 주로 열가소성 수지 중간재를 이용한 자동경화에 대한 연구이다.

높은 자동경화 속도를 얻기 위해서는 우수한 특성의 열가소성재료가 필수적이다. 우수한 특성을 결정하는 조건으로는 섬유와의 함침성, 최소 공극율, 높은 치수안정성, 충분한 길이를 들 수 있다. MDA는 여러 가지 형태의 중간재 즉, 연속함침섬유(continuous prepreg tow), 수지혼합섬유(commingled tow), 수지분말함침섬유(powdered prepreg tow), 프리프레그테이프(slit tape)에 대하여 적합성을 평가하였다.

시험결과 이들 중간재 중에, 오직 연속함침섬유 및 프리프레그테이프만이 충분한 섬유와의 함침성을 나타내었다. 수지혼합섬유는 강화섬유와 섬유형태의 수지가 서로 혼합된 형태이며, 수지분말함침섬유는 수지 분말을 섬유에 코팅한 형태인데, 이 두 재료는 모두 충분한 함침성 및 실시간 경화도를 얻지 못하여 연속함침섬유, 프리프레그테이프에 비하여 적층판의 기계적 특성 및 적층속도가 떨어지는 것으로 나타났다.

수지혼합섬유와 수지분말함침섬유의 경우 중간재 형태로 있을 때에는 일정한 형태를 유지하지 않고 적층 시에 매우 유연한 방향으로 적층될 수 있는데, 이러한 특성은 섬유자동적층법에서는 도리어 성형 중 작업성을 나쁘게 하는 것으로 밝혀졌다. 따라서, MDA에서는 오직 연속함침섬유와 프

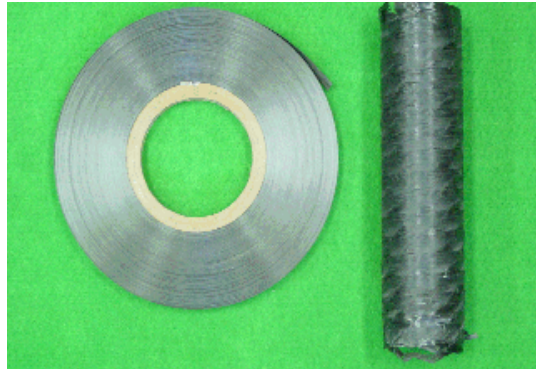


그림 13. Carbon/PEEK(APC-2) 프리프레그테이프 롤과 자동섬유적층장비로 제작한 복합재료 튜브



그림 14. 자동섬유적층장비를 이용하여 열가소성 프리프레그테이프를 제조한 복합재료 제품

리프레그테이프만이 본 공법에 적절한 것으로 평가하였다.

연속함침섬유는 길이가 수백 미터에 이르는 연속된 재료를 얻을 수 있지만 재료의 두께와 너비는 한정되어 있는 반면, 프리프레그테이프는 수 mm까지의 다양한 두께에 원하는 대로 다양한 너비의 재료를 가질 수 있지만 가능한 길이는 테이프 가공하기 전의 프리프레그의 제작 가능한 길이에 한정된다.

열경화성재료

열경화성 중간재는 주로 프리프레그테이프가 많

이 사용되는데 프리프레그 기술은 국내외적으로 이미 안정된 기술수준을 유지하고 있다.

열경화성 수지 프리프레그 중 가장 많이 쓰이는 재료는 carbon/epoxy 프리프레그와 E-glass/epoxy 프리프레그인데, 일반적으로 E-glass/epoxy 프리프레그가 carbon/epoxy 프리프레그보다 섬유직진도가 좋지 않다. 따라서, E-glass/epoxy 프리프레그의 경우 테이프로 제작할 때 잘려진 면에서 연속섬유의 끊김이 많이 발생하고, 잘려진 면에서 섬유가 갈라져 나와 심할 경우에는 테이프 롤 자체가 불가능할 경우도 있다. 또한, 갈라져 나온 섬유는 수지와 함께 Material Delivery Unit에 쌓여서 장비의 오작동의 원인이 되기도 한다.

열경화성 수지 복합재료는 자동섬유적층장비를

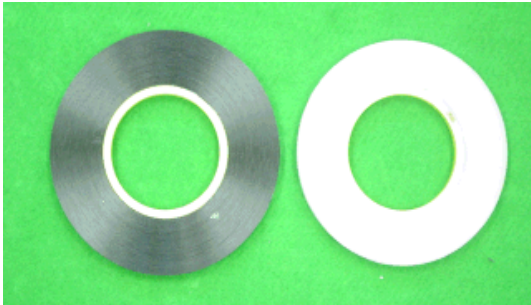


그림 15. SK Chemicals에서 제작한 carbon/ epoxy, E-glass/epoxy 프리프레그테이프 롤



그림 16. Carbon/epoxy 프리프레그테이프를 이용하여 자동섬유적층장비로 제작한 Rolls-Royce 엔진용 복합재료 Bypass Duct

이용하여 적층 이후에는 반드시 오븐이나 오토클레이브를 이용한 경화과정을 거쳐야 한다.

열가소성 수지 복합재료는 비교적 크기가 작은 복합재료 부품산업에 많이 사용되는 반면 열경화성 수지 복합재료는 주로 항공기 구조 등의 대형 구조물 제작에 사용되는 것이 일반적이다.

참 고 문 헌

1. N. J. Johnston, H.L. Belvin, R. J. Cano, J. M Marchello, and A. B. Hulcher, "A Prototype Research Laboratory for Automated Fabrication of High Performance Composites", *ICCM12-Europe*, Paris, pp.748-755, 1999
2. Richard Sharp, Scott Holmes and Cindy Woodall, "Material Selection/Fabrication Issues for Thermoplastic Fiber Placement", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 8, pp. 2-14, Jan., 1995
3. C.A. Mahieux, "Cost effective manufacturing process of thermoplastic matrix composites for the traditional industry : the example of carbon-fiber reinforced thermoplastic flywheel", *Composite Structures*, Vol. 52, pp. 517-521, 2001
4. Leon G.F., Hall J.C., Kelly J.J., Coffenberry B.S., Cirino M., "Affordable thermoplastic processing of marine structures", *Composites Manufacturing*, Vol. 6, Issue 3-4, pp. 193-199, Sep. 1995
5. Ahrens Markus, Mallick Vishal, Parfrey Karl, "Robot-based thermoplastic fibre placement process", *Industrial Robot*, Vol. 25, Issue 5, 1998, pp. 326-330