

고분자 복합재료 성형 기술의 현황과 미래



박 주 혁*

1. 서 론

60대 초반에 붕소(Boron) 섬유의 도입으로 시작된 복합재료의 역사는 현재 나노 복합재까지 상당히 발전되어 왔다. 이와 더불어 무게에 비하여 높은 탄성계수, 고강도를 갖고 있는 특성으로 인하여 초기 항공분야에 사용되기 시작하였다. 기계부품 및 선박용품 등으로 널리 사용되어 왔으며, 현재는 숙련공의 부족, 양질의 재료와 미적인 우수성, 내부식성, 환경친화적 공법 등으로 인하여 도목/건축 분야에까지 과거 10년간 매우 빨리 광범위하게 확대되어 가고 있다. 이와 같이 사용 분야의 확대에 인하여 초기의 수작업에 의한 적층구조물의 형태로만 사용되던 복합재료는 다양한 형태와 생산 방법으로 응용되고 있다.

60년대 초기에 사용된 붕소/에폭시 복합재료는 고비용, 고가의 가공비 등과 같은 제한을 갖고 있어서 그 응용분야를 확대할 수가 없었다. 60년대 말에 현재 널리 사용되고 있는 탄소/아라미드(carbon/aramid)계열의 섬유와 수지침투가공재(prepreg)가 개발되었다. 탄소 섬유의 도입으로 인하여 초기 붕소 복합재료와 비교하여 생산단가의 절감, 일반 가

공 방법의 적용 가능, 다양한 기계적 물성치 등으로 인하여 복합재료의 활용이 활성화되기 시작하였다. 탄소 섬유와 수지침투가공재 제조 기술의 계속적인 개선으로 인하여 복합재료기술은 급진적인 발전을 하였다. 이와 병행하여 복합재료 구조물의 성형기술도 같이 발전을 하였으며, 현재도 기 성형 기술은 계속 개선되고 그 활용범위도 넓혀지고 있다. 그러나 기술의 진화 및 발전 방향은 과거와는 다른 형태로 나가리라고 예상된다.

60년대 초에 복합재료 기술이 소개되었을 때에는 구조물의 경량화라는 관점에서 복합재료를 활용하기 시작하였고, 생산 비용의 절감 문제에는 관심이 적었다. 특히 70년대 초반의 오일 쇼크의 결과로 경량화가 가능한 복합재료에 대한 관심은 더욱 높아졌으나, 80년대 초에 예측한 바와는 달리 연료비의 상승이 높지 않았으므로 경량화에 대한 관심은 점차 사라지면서 복합재료에 대한 연구 및 활용도 점차 감소하였다.

80년대에는 생산 기술 수준으로도 시간과 경비에 대한 제약이 없는 경우 모든 구조물을 복합재료화한 F-117, B-2 등과 같은 비행기를 생산할 수 있을 정도로 복합재료 가공 기술은 상당한 수준에

* 세종대학교 기계항공우주공학부 연구조교수

도달하였다. 그러나 경제적인 측면에서 보아 아직도 복합재료 구조물의 생산에는 막대한 경비가 소비되었다. 따라서 대부분의 복합재료 생산업체에서는 보다 경제적이면서도 재료의 특성을 감소시키지 않는 생산 공정 기술의 개발에 참여하게 되었다. 물론 새로운 생산 공정 기술의 개발 하나만으로는 경제적인 문제의 해결책이 될 수 없었으므로, 관련된 설계, 재료, 공정, 금형, 품질보증 등 전 분야에 걸친 발전으로 인하여 90년대에 들어 복합재료는 금속재료에 대하여 경쟁력을 갖게 되었다. 그러나 아직도 많은 분야에서 복합재료는 금속재료에 대하여 경쟁력을 없다. 그럼에도 불구하고 스포츠 용품, 경선박, 항공 산업 등 특정분야에서는 금속재료보다 그 활용도면에서 우위를 차지하고 있다.

2. 기존 복합재료 생산 및 수리 공정

현재 일반적으로 사용되고 있는 폴리머 복합재료 구조물이나 제품을 생산하기 위한 공정과 손상된 복합재료 구조물의 수리 공정을 우선 살펴보기로 하자. 복합재료 구조물에 사용되는 재료 즉 수지, 섬유 및 코어(core)에 따라 기계적 강성, 인성, 내열성, 가격 및 가공성 등에 의하여 다양한 생산 공정을 갖는다. 일반적으로 최종 제품의 특성은 이러한 각각의 재료가 하나의 비로 나타나는 것보다는 생산 공정에 따라서 달리 구성되므로 그 생산 공정이 매우 중요하다. 이러한 복합재료의 구조물이나 부품의 생산 공정 기술에 대하여 알아보기로 하자.

2.1 스프레이 레이업(Spray Lay-up)

큰 강도를 요구하지 않는 구조물의 제작이나 인조 바위와 같은 보조 구조물 등의 제작에 주로 사용되는 방법으로서 spray gun을 사용하여 금형 표면에 일정한 두께로 잘게 자른 유리섬유(chopped fiber glass)와 주로 폴리에스테르계열의 수지와 혼합하여 압축공기를 이용하여 금형의 표면에 뿌린 후 대기 중에서 수지를 경화시켜 가공물을 성형하는 공정이다. 이 공법은 저가로 손쉽게 구조물을 성형할 수 있으나 유리섬유가 한 곳으로 물리는 경향

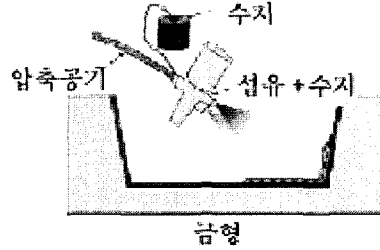


Fig. 1 Schematic of the Spray Lay-up Process

이 있고 또한 그 높은 섬유체적비(fiber volume fraction)를 갖는 제품의 생산이 불가능하므로 기계적 강도가 요구되는 구조물의 제조에는 사용할 수 없다. 또한 사용하는 수지의 점도가 높은 경우 이용할 수 없으면 상온에서 경화되는 수지만을 사용하여야 하므로 기계적/열적으로 안정한 구조물의 제조에는 사용할 수 없는 단점이 있다. 낮은 점도를 갖는 수지와 동시에 스티렌을 사용하므로 작업복을 쉽게 침투되므로 작업 시 안전에 주의하여야 한다.

2.2 습식/수 레이업(Wet/Hand Lay-up)

가장 보편적으로 사용되는 복합재 구조물 성형 방법이다. 금형 위에 보강재인 섬유를 적조, 편물 또는 기운 형태로 놓은 후 수지를 롤러나 솔을 사용하여 스며들게 한 후에 수지는 대기 중에서 경화시켜 구조물을 제조하는 공정이다. 이 공정의 장단점은 spray lay-up 방법과 동일하나 수작업으로 함침(impregnate) 작업을 수행하므로 환경 친화적이지 못하다.

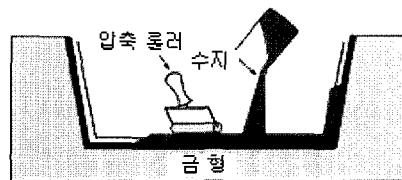


Fig. 2 Schematic of the Wet/Hand Lay-up Process

2.3 진공 포장 방법(Vacuum Bagging)

위에서 소개한 습식 레이업 방법을 개선한 방법이다. 이 방법을 사용하면 수지가 경화될 때 적층

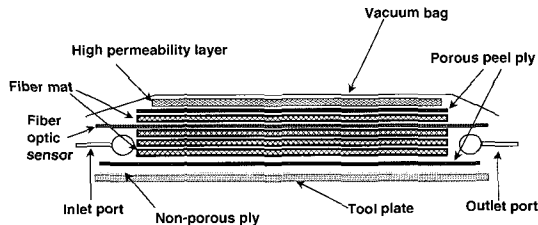


Fig. 3 Schematic of the Vacuum Bagging Process

판에 압력을 가해주므로 보다 완성도 높은 제품을 생산할 수 있다. 습식 또는 수작업을 통하여 보강재 섬유에 수지를 함침 시킨 후 플라스틱 필름 형태의 박막을 제품 위를 감싸고 진공 펌프를 사용하여 필름으로 싸여진 적층 구조물을 진공으로 만들어 대기압으로 제품을 가압하는 방법을 사용한다. 다른 레이업 방법에 비하여 공비가 증가하고 수지의 올바른 유동을 위하여 숙련공이 필요하나 섬유의 함유량을 증가시킬 수 있고 제품의 마무리가 위의 방법에 비하여 우수한 장점을 갖는다.

2.4 테이프 레이업(Tape Lay-up)

복합재료 구조물의 성형 공정 중에 가장 많은 부분이 자동화된 공정이다. 완곡한 곡면을 갖는 비교적 대형 구조물의 제작에 사용되는 공정으로서 프리프레그 테이프나 토(tow) 형태의 섬유를 다축 CNC 공작기계를 사용하여 일정한 형상을 갖는 금형 위에 레이업한 후에 물 분사 절단기 등을 사용하여 절단을 한다. 다음 열을 가하여 프리프레그 내의 수지가 경화되도록 한다. 이 방법을 사용하면 같은 형상을 갖는 구조물을 반복생산이 가능하고 프리프레그 테이프를 여러 방향으로 배치할 수 있으므로 원하는 기계적 강도를 갖는 구조물을 손쉽게 생산할 수 있다. 일반적으로 테이프 재료로는 모든 섬유가 사용되며 경가소성수지를 주로 사용한다.

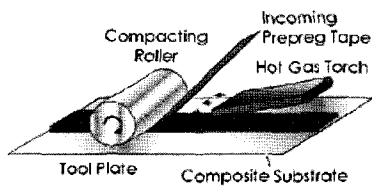


Fig. 4 Schematic of the Tape Lay-up Process

다른 레이업 방법에 비하여 섬유의 방향을 적절하게 조절할 수 있는 장점이 있으나 장비가 고가이므로 생산 설비가 고가이다.

2.5 필라멘트 와인딩(Filament winding)

원통형, 구형의 압력 용기, 탱크 파이프 등의 제조에 쓰이는 열경화성 강화 플라스틱의 성형 공정이다. 사용하고자 하는 섬유(유리섬유 또는 탄소섬유)를 토(tow) 형태로 수지에 담근 다음 심형(mandrel)에 장력을 가하여 감아서 성형을 시켜 제품을 제작하는 방법이다. 섬유의 토를 공급하는 장력과 속도를 조절함으로써 다양한 기계적 특성을 갖는 제품을 빠르고 경제적으로 생산할 수 있다. 그러나 생산하고자 하는 제품의 형상에 제약을 받고 섬유를 원하는 위치에 정확하게 위치하기 힘들며 심형 가공비가 일반적으로 높다. 또한 제품의 외면은 그대로 경화시켜 사용하므로 매끄럽지 못한 단점을 가지고 있다.

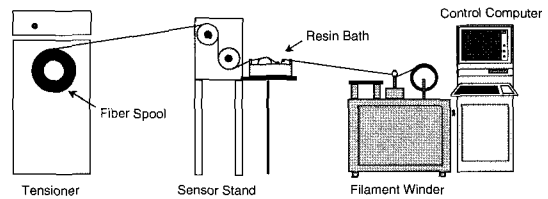


Fig. 5 Schematic of the Filament Winding Process

2.6 풀트루전(Pultrusion)

섬유를 토(tow) 형태로 보빈(bobbin)에 감아 놓은 후에 섬유를 담은 통을 거쳐서 잡아당기면서 가열된 금형을 통과하도록 한다. 이때 수지가 함침된 섬유 토는 금형을 통과하면서 잡아당기는 장력과 다이에서 가해지는 압력, 열 등에 의하여 경화되면서 원하고자 하는 구조물의 형상으로 성형되게 된다. 이런 식으로 경화된 제품은 자동으로 절단되어 제품으로 완성된다. 비록 이러한 풀트루전 연속 공법으로 일정한 형태의 단면적을 갖는 제품의 제조에 이용되지만, 잡아당기는 작업의 변화를 통하여 단면의 변화를 줄 수도 있다. 즉 금형을 통과하면서 수지의 섬유로의 함침 공정과 금형 내에서 열

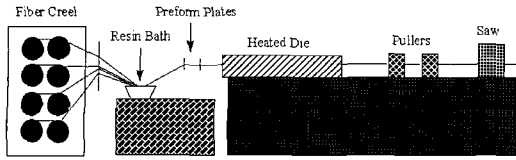


Fig. 6 Schematic of the Pultrusion Process

과 압력에 의한 경화 두 공정으로 나누어진다. 이때 약간의 금형의 형태를 변화시켜 단면의 변화를 줄 수 있다. 이 방법에 사용되는 섬유는 제약이 없이 모든 섬유의 사용이 가능하고 수지는 일반적으로 에폭시, 폴리에스테르, 비닐에스테르, 페놀 수지와 같은 열경화성수지가 사용된다. 이 방법은 일정한 단면을 갖는 구조물을 경제적으로 신속하게 제조할 수 있고 섬유체적비를 쉽게 조절할 수 있는 장점을 가지나 금형비가 비싸고 제품의 단면이 변화하는 구조물의 성형에는 응용할 수 없는 단점이 있다.

2.7 수지충진법(Resin Transfer Molding)

수지가 함침 되지 않은 예비성형재(preform)을 금형 내부에 적층을 한다. 일반적으로 예비성형재는 압력을 가하거나 재봉질을 하여 제품의 형상대로 제조를 한다. 또 하나의 금형으로 금형에 적층된 예비성형재를 완전히 밀폐시킨 후 금형 내의 공동(cavity)에 수지를 충전 시키면서 압력과 열을 가하여 경화 반응을 발생시켜 제품을 성형하는 공정이다. 이 방법의 변형으로 두 번째 금형대신 플라스틱 필름을 사용하고 진공 펌프로 금형과 플라스틱 필름으로 만들어진 공동에 진공을 형성하여 대기압으로 압력을 가하여 제품을 성형하는 진공수지충진법(VARTM, Vacuum assisted resin transfer molding)이 있다. 일반적으로 열경화성수지와 모든 형태의 섬유가 사용될 수 있다. 다른 방법에 비하여 섬유체적비를 증가시킬 수 있으며 그 조절도 아주 용이하며 제품 내의 공극(void)량이 적고 환경친화적이다. 또한 전통적인 수작업에 의한 적층 작업을 배제하여 인건비가 절감되는 장점이 있으나, 금형 제작 등 가공비가 비싸고 대형 구조물의 제작이 어려운 단점이 있다.

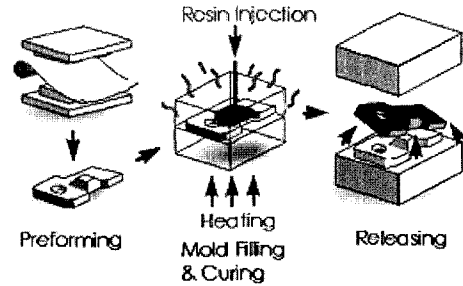


Fig. 7 Schematic of the RTM Process

2.8 프리프레그 성형(Prepreg Molding)

수지를 미리 함침 시킨 섬유나 직물을 사용하여 형상을 제조한 후 열과 압력, 용해제 또는 촉매 등을 가하여 성형하는 공정이다. 촉매는 일반적으로 상온에서 경화작용을 즉시 촉진시키는 용도로 사용된다. 따라서 프리프레그는 섬유에 수지가 함침된 재료이므로 일반적으로 저온 냉동고에 저장 보관한다. 따라서 프리프레그는 끈적끈적한 감이 느껴지며 일반적으로 접착제가 붙은 테이프와 같은 형태로 제작된다. 이러한 프리프레그는 수작업 또는 기계를 사용하여 금형 표면에 적층하고 얇은 플라스틱 필름으로 쌓은 후 120-180℃로 가열함으로써 프리프레그 내의 수지가 유동을 하면서 섬유에 골고루 스며들면서 경화된다. 또한 압력을 가함으로써 그 제품의 치수를 조절할 수 있다. 이러한 작업은 오토클레이브(Autoclave)에서 이루어지며, 가해지는 압력은 보통 5기압 정도이다. 이 공정에 사용되는 수지는 열경화성수지와 폴리아미드, 시안산 에스테르 등 고온용 수지가 사용되며 모든 형태의 섬유가 보강제로 사용된다. 어떠한 복합재료 생산 공정에 비하여 섬유체적비의 조절과 증가가 용의하고 작업 조건이 환경친화적이다. 섬유의 배열이 한 방향(Unidirectional)인 프리프레그를 사용함으로써 재료의 손실을 막을 수 있으며 열과 압력을 손쉽게 조절할 수 있으므로 수지의 경화의 조절이 가능하다. 또한 복잡한 형상의 부품의 제조에도 손쉽게 응용할 수 있으며 자동화를 실현할 수 있다. 그러나 생산비와 사용하는 재료(Pre-impregnated fabric)의 단가가 높고, 오토클레이브를 사용하여야 함으로 생산 설비가 고가이다. 상당히 큰 압력이 가해

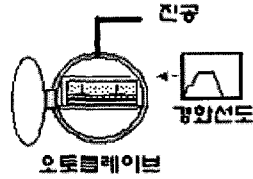


Fig. 8 Schematic of the Autoclave Molding Process

지는 공정이므로 코어(core)의 재료 선정에 주의하여야 한다.

2.9 저온 프리프렉 성형(Low Temperature Prepreg Molding)

저온에서 경화되는 수지를 미리 함침 시킨 섬유나 직물을 사용하여 형상을 제조하여 60-100℃로 가열함으로써 성형하는 공정이다. 일반적으로 오토클레이브보다는 진공 백(vacuum bag)을 사용하여 금형을 가열하는 형태를 취하여 비싼 생산 설비의 투자를 배제한 공정이다. 사용되는 수지는 에폭시 계열로 제한되며 모든 형태의 섬유가 사용된다. 또한 대기압으로 가압을 함으로 코어를 선정할 때 일반적으로 PVC계열의 재질을 많이 사용한다. 통상적인 프리프렉 성형 방법과 같은 장점을 가지고 있으며 저렴한 비용으로 제조가 가능하다. 또한 목재와 같은 저렴한 금형 재료를 사용할 수 있고, 오토클레이브 성형과는 달리 대형 구조물을 제작할 수 있다. 그러나 프리프렉의 단가가 높고 수지의 경화를 위하여 가열장치와 진공 백의 사용을 하여야 하므로 생산 단가가 높다.

2.10 수지 필름 침투법(Resin Film Infusion, RFI)

Resin transfer molding 방법은 두 개의 금형을 사용하여 동공을 만드는 데 반하여 이 방법은 한 개의 금형만을 사용한다. 진공수지충진법과 같이 수지로 제작된 필름을 금형 표면에 놓고 그 위에 섬유로 제작된 예비성형물을 놓는다. 이러한 예비성형물과 수지 필름을 진공 포장(vacuum bagging)을 한 후에 진공 펌프를 사용하여 예비성형물 내부를 진공 상태로 만들고 금형을 가열하여 수지 필름이 녹아 수지가 예비성형물 내부로 스며들도록

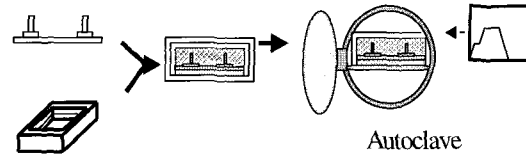


Fig. 9 Schematic of the RFI Process

하도록 하여 경화되도록 하는 공정이다. 일반적으로 사용되는 수지는 에폭시 계열의 수지로 제한되며 모든 형태의 섬유가 사용된다. 일반적으로 PVC 코어가 사용되며 오토클레이브를 사용하면 고온용 수지의 사용도 가능하므로 고온에서 사용하는 제품을 제작하는데 응용될 수 있다. 제품의 공극이 적고 수작업에 의한 레이업 작업이 배제됨으로 인건비와 환경문제를 줄일 수 있고 수지의 경화 조절이 용이함으로 기계적 특성이 우수한 제품을 생산할 수 있다. 또한 일반적인 프리프렉 성형 방법에 비하여 금형의 사용을 최소화할 수 있으므로 생산 비용을 절감할 수도 있다. 새로운 방법이라서 제품 질에 대한 검증이 완벽하게 이루어지지 않았으며 가열과 진공을 위한 작업으로 다른 일반적인 방법에 비하여 생산 비용이 높은 편이다.

2.11 볼트/접착 수리(Bolted/Bonded Repair)

일반적으로 손상을 입은 복합재료의 수리 방법에는 볼트로 체결하는 방법과 새로운 복합재료를 부착시키는 방법으로 크게 나뉜다.

일반적으로 박판 형태의 구조물의 수리에는 접착 수리방법이 많이 사용된다. 이 방법은 구멍을 만들어 볼트로 체결하는 방법에 비하여 간단하며 새로운 손상을 만들 필요가 없는 장점을 갖는다. 또한 표면이 매끄럽고 접착제에 의하여 충분한 강도를 가질 수 있다. 그러나 두꺼운 구조물의 수리 시에는 그 접착력으로는 구조물이 받는 하중을 견딜 수 없으므로 볼트에 의한 수리 방법을 사용하게 된다. 일반적으로 1/2 in. 이상의 두께를 갖는 구조물의 수리에는 볼트를 이용한다.

2.12 스카핑(Scarfiging)

손상 받은 부위가 크지 않은 경우에는 이 부위

를 제거한 후에 응력 집중 현상을 피하기 위하여 그 부위에 구멍을 낸 후, 그 면에 테이퍼(taper)를 가공하여 새로운 재료를 패치(patch)하는 경우에 하중이 잘 분산되도록 한다. 스카핑 또는 테이퍼 연마는 공압 연마기를 사용하며 숙련공에 의하여 작업을 수행한다. 원자재의 강도를 패치를 통하여 회복하여야 함으로 손상 구조물의 플라이의 숫자, 섬유 방향과 두께를 확실하게 알아야 한다. 제거되어 만들어지는 테이퍼가 있는 구멍의 반경은 복합 재료 플라이 한 장당 일반적으로 그림과 같이 1/2 in.의 경사면을 갖는다.

제거된 부위에는 새로운 복합재료를 수작업을 통하여 레이업하거나 VARTM 공정을 사용하여 패치를 하도록 한다. 이때 수지의 경화를 위하여 일반적으로 Heat blanket을 사용한다. 이때 습기에 의한 공극이 발생하지 않도록 주의하여야 한다.

하중이 많이 가해지는 일차 구조물도 이러한 방법을 통하여 성공적으로 수리를 했다. 이 경우에는 하중, 섬유 보강재의 방향 등을 잘 고려하여 수리 방안을 도출하도록 하여야 한다. 위에서 언급한 바와 같이 수지의 경화와 패치 내의 공극을 배제하

기 위하여 올바른 압축(compaction)과 수지의 경화(consolidation)가 요구되므로 많은 경우에 진공백을 사용하고 있다. 또한 접착제의 선정과 패치가 접촉되는 표면의 처리 공정이 매우 중요하다. 이러한 것들은 현장 기술자의 숙련도, 기술 및 수리 방안 등에 의하여 결정된다.

3. 새로운 복합재료 생산 공정

혁신적인 복합재료 생산 공정이 가까운 장래에 개발되어 사용되리라고 생각되지는 않는다. 아마도 기존의 생산 공정에 대한 개선은 계속 이루어질 것으로 전망된다. 금속이나 다른 재료에 비하여 경쟁력있는 재료로 산업체에 사용되기 위하여 우선 순환경비(recurring cost), 비순환경비(non-recurring cost) 및 직접 운영경비(durability, maintainability, reliability, repairability) 등을 개선시키는 관점에서 생산 공정도 같이 개선되고 있다. 그러나 생산 공정을 통하여 생산 경비의 감소를 이룰 수 있다면 비순환경비 및 직접 운영경비를 상쇄할 수 있을 것이다.

이러한 목적을 위하여 새로운 복합재료의 생산 공정에 대한 연구가 다음과 같이 이루어지고 있다.

3.1 스티칭 기술과 RTM공정(Stitched/RTM)

현재 중소형 구조물에 제조에 CNC화된 재봉기를 이용하여 섬유 직물을 재봉질 하여 구조물을 성형하여 금형에 넣은 다음 수지를 충전하여 성공적으로 구조물을 성형하고 있다. 또한 항공분야에서는 날개 표면 등 비교적 대형 구조물에 까지 그 활용 범위를 넓혀가고 있다. 박판 형태의 구조물의 생산에 이 방법을 활용하는 것은 비용의 절감 면에서는 그다지 장점이 없으나 두꺼운 제품의 생산에는 전통적인 수작업을 통한 레이업 방법에 비하여 비교우위를 가질 것이다. 현재 미국 항공 우주국(NASA)는 보잉사와 공동으로 이 방법의 실용화를 위하여 많은 연구를 기울이고 있다. 이 기술은 적층판이 갖고 있는 충격에 약한 단점을 재봉질로 극복하고자 하는 목적을 가지고 있으며 대형 구조물의 성형에 자동화된 기계를 사용할 수 있기에 생산성

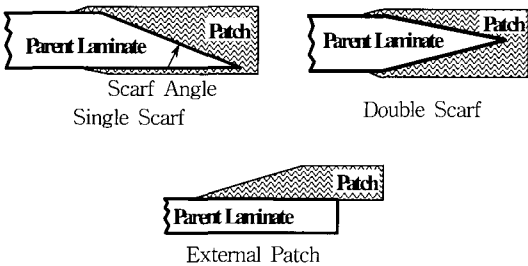


Fig. 10 Repair Patch Design Options

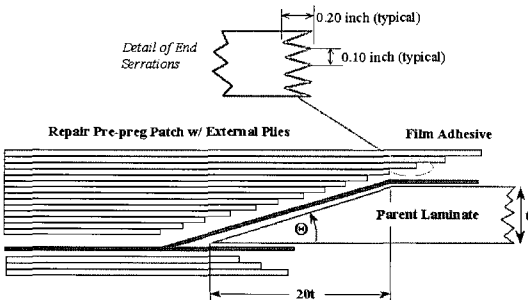


Fig. 11 Scarf Joint Design Including Serrations

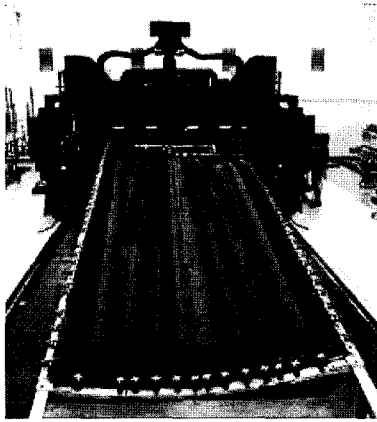


Fig. 12 Stitching Machine for the Semi-span Wing

향상을 가지고 올 것으로 기대하고 있다. 또한 이러한 공정의 실용화에 선행하여 구조물에 대한 품질 검증에 대한 연구가 Federal Aviation Administration을 중심으로 수행되고 있다. 이 공정을 실용화하기 위하여서는 금형 내의 수지의 올바른 충전과 경화에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다. 또한 이 기술은 손상된 복합재료 구조물이나 산업기반구조물의 수리에도 응용할 수 있을 것이다.

3.2 필라멘트 와인딩 공정(Filament Winding)

이 방법은 이미 성숙한 제조 공정이다. 따라서 이미 많은 분야에서 자동화를 통하여 공정의 개선, 공정의 단축을 실현하였으며, 심재의 형상 변화를 통하여 다양한 두께를 갖는 구조물의 제조, 품질의 균일화, 섬유 방향성의 유연화를 통한 맞춤 구조물(tailer made structure)의 제작, 환경친화적인 수지의 사용 등에 대한 연구가 수행되고 있다. 현재는 로봇 기술을 적용하여 7-10축 제어를 통한 기계가 도입되고 있다. 이러한 기술의 실용화가 실현을 통해 시스템이 완성되면, 복잡한 형상을 갖는 T형 또는 L형 관형 이음쇠의 제작도 가능하게 될 것이다. 이러한 기술의 실현을 위하여 감기 작업(winding)에서 1개 섬유 토(tow)의 장력을 조절하여 제대로 원하는 위치에 놓이게 하는 연구가 수행되고 있다. 또한 연속 필라멘트 와인딩 공법이 개발되어 모래와 유리 섬유를 이용하여 상/하수도용 유리 섬유 복합관이 실용화되어 현재 생산, 사용되고 있다.

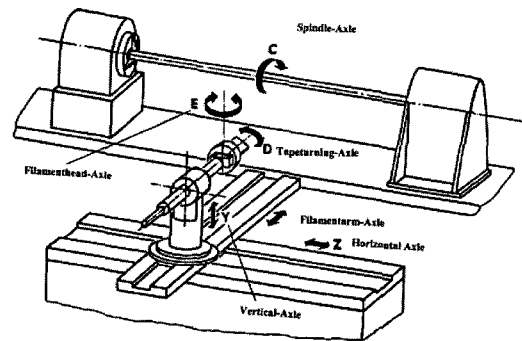


Fig. 13 Multi-axis Filament Winding Machine

3.3 플투르전(Pultrusion)

비용 감소에의 잠재성을 가지고 있으나, 현재의 기술은 일정한 단면을 갖는 구조물의 제조에 한하여 사용되고 있으며 사용되는 섬유의 방향성이 한정되는 단점을 가지고 있다. 따라서 플투르전으로 생산되는 제품이 금속 제품에 대하여 경쟁력을 갖고 있지 않다. 그러나 압출 공법에 의하여 제작되는 금속 제품은 체결하는 방법에 많은 이음쇠 또는 보트가 필요하다. 이러한 체결 부위를 제거하는 공법이 폴리머 복합재료라는 특성을 갖는 플투르전 제품에서 적용이 가능하다. 즉 접착제를 사용하는 방법 또는 체결부위의 새로운 기구의 설계 등을 통하여 해결이 된다면 금속 제품에 대한 경쟁력을 가질 수 있을 것이다. 또한 최근에는 가변 금형의 개발로 단면적의 변화를 줄 수 있는 새로운 공법에 대한 연구가 수행되고 있다. 또한 복잡한 형상의 단면을 갖는 구조물의 생산 공법과 섬유의 방향에 변화를 줄 수 있는 장비가 개발되고 있다. 이러한 연구 개발은 플투르전 제품의 활용분야의 확대를 가져올 것이다.

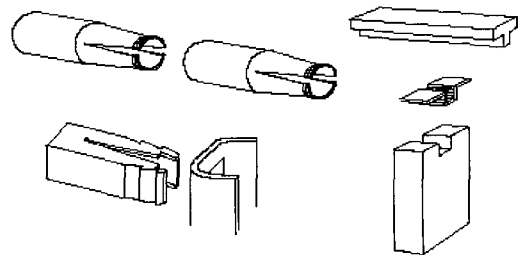


Fig. 14 Composite Interlocking Joint Architectures

3.4 3-D Woven Textile

복합재료 성형 공정과 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것이 예비성형물(preform)의 제조 기술 이 성형 기술의 향상과 매우 밀접한 관계를 갖는다. 직물 복합재료는 크게 2차원과 3차원 구조물로 나눌 수 있으나 3차원 직물 구조는 두께 방향으로 섬유 보강이 되어 있으므로, 2차원 구조물에 비하여 손상에 대한 특성이 우수하다고 알려져 있다. 이러한 3차원 직물 복합재료는 과거 제조비용의 문제로 인하여 관심을 끌지 못하였으나 자동화 설비의 개발을 통하여 최근 많은 관심을 끌고 있다. 또한 대형 구조물에 대한 복합재료의 활용이나 고가의 티타늄 부품인 항공기 엔진의 블레이드, 부착물(fitting), 힌지 등을 대체하고 있다.

이러한 3차원 woven textile은 주로 그림과 같은 multiple warp weaving 기법으로 제조된다. 한 warp 과 yarn이 하나의 평면을 이루고 다른 일련의 yarn 이 이 평면들을 서로 연결하여 3차원 구조물을 만든다.

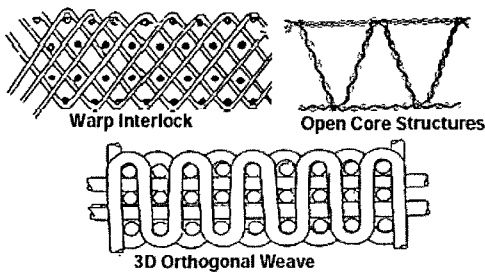


Fig. 15 3-D Woven Fabric Structures

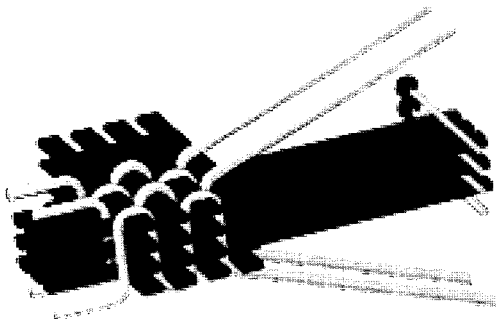


Fig. 16 Schematic of the Multiwarp Weaving Concept

3.5 자동 테이프 레이업(Automatic Tape Lay-up)

전자 기술의 발전으로 인하여 과거의 생산 공정에 비하여 상당히 많은 발전이 본 생산 공정에 이루어 졌다. 즉 테이프의 올바른 위치 선정과 정확도는 상당히 증가되었으며 컴퓨터의 하드웨어 및 소프트웨어 기술의 발전과 함께 속도와 정확도는 비례하여 향상되었다. 비록 새로운 기술은 도입되지 않았지만 테이프에 함유된 수지의 경화를 위한 가열 방법에 대한 연구 및 장치의 자동화에 대한 연구는 아직도 꾸준히 이루어지고 있다.

3.6 Liquid Molding

Resin transfer molding(RTM), Vacuum assisted resin injection 및 Resin film infusion 방법 등은 전통적인 수작업에 의한 적층과 오토클레이브 성형 방법에 비하여 제조 단가가 낮고 그 생산성이 높아 많이 사용된다. 현재 이러한 방법에 대한 개선 및 연구는 고성능 보강재 및 페놀 계열의 수지 등 다양한 수지의 활용, 예비성형물(preform) 제조 기술, 수지의 유동 및 제품의 품질에 미치는 생산 공정 변수의 최적화에 대한 연구가 수행되고 있다. 이러한 연구는 현재 항공기의 2차구조물에 사용되고 있는 이러한 생산 공정 기술을 1차구조물의 제조에 까지 활용할 수 있을 것으로 예측된다.

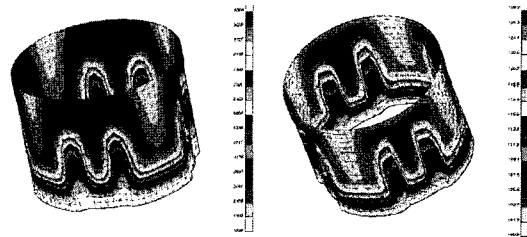


Fig. 17 RTM Process Simulations

3.6 Tow Placement

테이프 레이업 또는 플라멘트 와인딩 방법으로 복합재료 구조물을 제조하는 경우 섬유의 방향성을 조절하는 함으로써 생산하고자 하는 구조물의

기계적 특성을 조절할 수 있으나 생산 공정의 제한으로 인하여 섬유를 임의로 조절할 수 없었다. 그러나 최근 제어 기술의 발전으로 인하여 섬유의 방향을 제한 없이 복잡한 형태의 구조물을 제조할 수 있는 기술과 하드웨어의 제조가 가능하게 되었다. 따라서 tow placement 기술은 다시 새로운 연구로 주목을 받고 있다. 또한 고가의 재료를 적절하게 절단함으로써 재료의 낭비를 방지할 수 있어 생산비용을 절감할 수도 있으므로 이미 미 공군과 미국 항공 우주국에서는 연구 개발 프로그램화 하여 최적화 제어 시스템 즉 섬유의 운송하는 헤드의 빠른 이송과 공정 작업 중에 제품의 품질 검사 등의 분야에 대한 연구를 수행하고 있다.

3.7 Co-Curing Technology

일반적인 생산 공정으로 제조가 불가능한 대형 구조물을 부분별로 나누어 제조를 한 다음 각각의 부분 구조물 조립하여 전체 대형 구조물을 제조하는 공정이다. 이 방법은 각각의 독립적으로 생산된 부분을 한 개의 금형이나 연결 부위에 위치한 후 경화를 시켜 한 개의 구조물을 제조하는 방법이다. 이러한 경우 재료는 주로 pre-impregnated tow, 테이프 등이 사용되며 기계적 강도를 만족시키기 위하여 두께 방향으로 박음질, 체결, z-pinning, knitting 등 방법을 사용한다. 따라서 이 방법은 복잡한 tooling이 요구되므로 생산 단가가 높고 또한 수지의 경화 문제 등 공정상 난제를 가지고 있다.

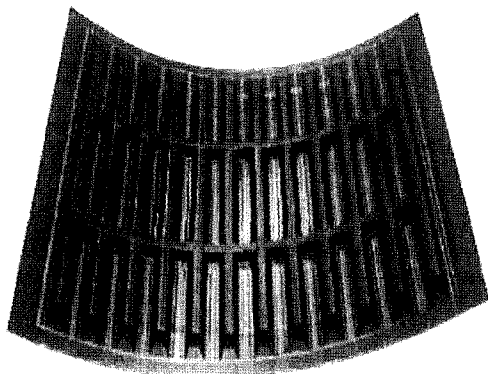


Fig. 18 Demonstration Panel of Co-curing Technology

따라서 새로운 pre-impregnated 재료의 개 새로운 tooling 방법, 수지의 경화 감시 방법으로 광섬유의 제품 내의 삽입, 손쉬운 수지의 경화를 위하여 E-beam 경화수지의 사용, resin film infusion 공정의 부분적인 도입 등으로 새로운 공정의 개발에 대한 연구가 수행되고 있다.

3.8 수리 기술(Repair Technology)

복합재료의 상용화가 늘어나면서 복합재료 구조물에 대한 수리 기술 및 금속 구조물의 수리 및 보강에 대한 연구가 진행되고 있다. 복합재료의 수리에 대하여 이미 2-11,12 절에서 언급하였으므로 복합재료를 이용한 금속재료의 구조물의 보강 및 수리에 대하여 알아보기로 하자.

금속 재료 구조물은 부식 및 반복하중에 의한 재료의 성능저하가 발생하게 된다. 경제적인 관점에서 이런 구조물을 전면 교체하는 것보다는 간단한 복합재료의 덧붙임이나 주입 등을 통하여 손상된 부위의 수리나 교체에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 흑연/에폭시(graphite/epoxy) 계열의 복합재료가 다른 재료에 비하여 많이 활용되고 있다. 이를 위하여 수리 부분에 대한 한계 하중, 열기계적 변위, 저가이면서 신속한 수리 방법에 대한 연구가 이루어지고 있으며 압전재료와 Polyvinylidenedifluoride(PVDF) 등과 같은 지능형 재료(smart material)를 구조물에 패치 함으로써 구조물의 피로 및 손상을 실시간으로 감시 및 구조물의 행동을 제어하는 기술도 개발되고 있다.

현재의 수리 방법은 비용과 복잡성, 전문가의 필요와 heat blanket 등 특수 장비의 필요성으로 인하여 만족할 만한 수준은 아니다. 그러나 복합재료의 사용의 증가 및 산업구조물의 노후 등으로 인하여 수리 기술의 발전은 사회적으로 요구되고 있는 실정이다.

3.9 재활용(Recycling)

최근까지 기계적 특성이 우수한 수지의 사용 및 개발이 주 연구 주제였다. 그러나 환경 문제의 대두로 인하여 현재는 환경친화적인 재료의 사용 및

재활용, 환경친화적인 공정 개발이 새로운 연구 과제이다. 즉 사용된 복합재료 제품의 재활용에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이를 위하여 현장 절단 공정 개발 및 열분해폐기 공정의 개발이 이루어지고 있다. 일반적으로 열가소성 수지는 가열에 의하여 용융시켜 재사용이 가능하나 열경화성 수지는 물성의 열화 및 강화 섬유의 변화로 인하여 물성 저하가 발생함으로 열에 의한 재활용이 곤란하다. 따라서 열경화성 수지 제품은 기계적인 분쇄, 가열 및 가압 가공을 통하여 저급 재료로 재활용되고 있는 실정이다. 또한 가압/가열을 통하여 수지와 섬유의 분리를 위한 연구가 시도되고 있다.

4. 결 론

일반 산업계 및 군수 산업계에서 복합재료를 사

용하는 구조물이나 부품이 크게 증가되고 있으며 향후 고성능 제품의 개발에 따라 그 사용은 더욱 늘어날 것으로 전망된다. 이와 더불어 현재 사용하고 있는 복합재료 생산 방법은 다른 재료의 가공, 생산 방법에 비하여 고가이며 노동 집약적이다. 따라서 공정이 저가의 간단하면서 빠른 생산 공정의 개발이 다른 재료에 대한 복합재료의 경쟁력을 높일 수 있는 방법으로 생각된다. 본 논문에서는 현재의 복합재료 생산 공정에 대한 고찰과 현재 진행 중인 생산 공정의 개선 및 개발 내용을 살펴봄으로써 복합재료 생산 공정에 대한 이해를 돕고, 생산 공정의 발전에 대하여 알아보았다.

타 재료에 비하여 물성치가 우수한 복합재료의 활용을 확대하기 위하여 생산성이 높으면서도 신뢰성 높은 생산 공정의 개발이 필요하며 지구의 환경 보존 및 개선을 위하여 재활용 및 폐기물 처리 기술 개발도 매우 중요하다. 