

# 복합재료를 이용한 풍력발전기용 터빈 블레이드의 개발

조 정 미 · 이 경 봉

## Development of Turbine Blade with Composite in Wind Turbine

Jeong-Mi Cho and Kyung-Bong Lee



- 조정미 ((주)한국화이버 복합재료연구소)
- 1960년생
- 고분자공학 및 재료공학을 전공하였으며, 복합재료의 기지재료 개발 및 응용분석 분야에 관심을 가지고 있다.



- 이경봉 ((주)한국화이버 복합재료연구소)
- 1959년생
- 재료의 충격 및 피로강도를 전공하였으며, 복합재료의 가공 공정설계 분야에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

에너지원은 화석연료의 고갈 및 편중, 지구대기의 온실화, 핵연료의 환경문제 등으로 대체에너지원을 요구하고 있으며, 우리나라는 여기에 에너지자원의 해외의존 문제까지 안고 있어 대체에너지 이용기술의 자립은 시급한 과제라 하겠다.

대체에너지 기술개발사업 중에서 풍력에너지 이용 기술개발 분야는 기술의 단순성, 효율의 신뢰성, 발전단가의 경제성, 보수유지 및 관리의 용이성 등의 특성으로 인하여 연구개발의 초점이 되어 왔으며, 지금은 상용화의 단계를 지나 대량생산에 의한 경제성 향상에 주력하고 있는 것이 세계적 추세이다.

풍력발전기의 개발분야 가운데에서도 터빈 블레이드(turbine blade)의 개발은 이의 형상설계 및 구조적 강도설계 등으로 매우 중요한 분야이다. 현재 외국에 설치되어 운용

되고 있는 풍력발전기의 경우 유지보수비의 90 퍼센트에 이르는 비용이 터빈 블레이드의 파손에 따른 교체 및 수리비용이 차지하는 등 터빈 블레이드 사용소재의 선택과 적정한 강도설계 등이 중요한 분야로 인식되어 연구 중에 있다.

현재까지 풍력발전용 터빈 블레이드로 사용된 소재는 나무(wood), 알루미늄(aluminum), 복합재료(composite) 등이 있으나 지금은 주로 알루미늄 압출 블레이드를 사용하거나 유리섬유에 폼(form), 하니콤(honeycomb) 등을 이용하는 하이브리드(hybrid)형 제작기술이 널리 이용되고 있다. 또한 풍력발전기의 대용량화 추세에 따라 터빈 블레이드의 크기가 증가하고 이의 경량화와 내구성의 향상을 위하여 첨단 복합소재(advanced composite materials)의 이용이 점차 증가하고 있는 실정이다.<sup>(1,5)</sup>

이에 이 글에서는 현재 개발연구가 진행중인 풍력발전시스템의 복합재료를 이용한 터빈 블레이드의 제작과정을 소개하고, 풍력발

전시스템에 적용가능성, 제작공정의 타당성에 관한 연구를 수행하여 이를 바탕으로 풍력발전기용 터빈 블레이드에 복합재료의 사용가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 터빈 블레이드

블레이드는 바람의 에너지를 기계에너지로 변환시키는 중요한 부분이다. 따라서 블레이드는 공력하중에 직접으로 노출되며, 회전운용하게 되므로 강도 이외에 형상관리에 주의하여야 한다. 블레이드에 대한 설계의 기초자료는 공력해석의 결과로부터 얻을 수 있고, 여기에는 최고 풍속의 한도에서 견디어야 하는 정적인 문제와 운용중 발생하는 여러 형태의 동적인 문제가 고려되어야 한다. 본 연구에서의 블레이드는 실증시험을 위한 pilot 개념으로 공정설계되므로 정적인 고려사항인 강도, 블레이드 내부형상, 허브와의 체결, 블레이드간 체결, 성형가공 문제 등을 외국에서 운용중인 기존의 수직축 블레이드와 비교하여 주로 검토되었으며, 동적인 고려사항들은 실증시험을 통한 기초자료 확보 후 검토된다. 따라서 블레이드의 설계과정은 다음과 같이 간략화하여 진행할 수 있다.

- 복합재료 기초 물성 평가
- 블레이드 단면 설계
- 몰드 설계
- 공정 설계
- 기타

여기에서 블레이드를 구성하는 복합재료의 소재는 섬유강화 복합재료인 글라스 프리프레그(glass prepreg), 카본 프리프레그(carbon prepreg), 알루미늄 하니콤(Al honeycomb) 등이 고려되었으며, 허브 및 스트러트(strut)의 체결방법 및 블레이드-블레이드 체결방법의 결정에 따라 블레이드의 내부형상이 설계되었다. 고려된 조건을 보면 블레이드의 표면부에는 알루미늄 재료와 유사한 탄성계수를 가진 일방향성 탄소섬유를 배열

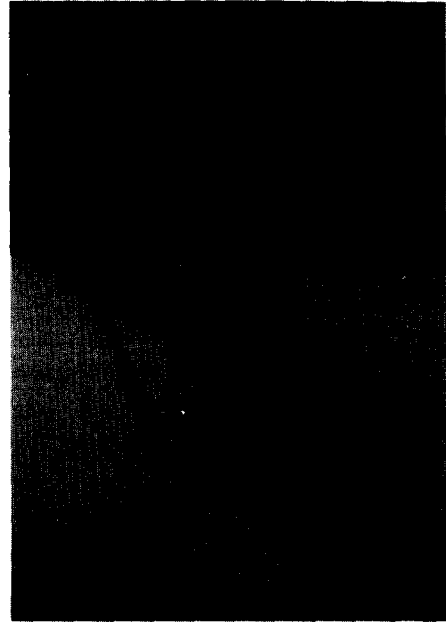


그림 1 소항병산 지구에 설치되어 시험운용중인 수직축 풍력발전시스템

하고, 그 하부에 알루미늄 압출재 블레이드의 관성모멘트와 유사하도록 두께를 고려한 직조형태의 유리섬유를 배열한 후 최종적으로 알루미늄 하니콤을 배열하여 굴곡강성을 유지하도록 하였다. 복합재료의 기초물성치 조사는 주로 이것을 검토하기 위한 실험으로 진행되었다. 그림 1은 당 연구소에서 운용중인 수직축풍력발전시스템을 나타내었다.

## 3. 복합재료의 기초물성 연구

### 3.1 복합재료의 개요

복합재료는 금속재료에 비교하여 그 물성이 매우 우수하여 그 이용도가 날로 급격히 증가하고 있는 신소재이다. 특히 풍력발전시스템의 블레이드를 섬유강화 복합재료를 이용하여 제작하였을 경우, 우수한 강인성 및 치수 안정성, 곡면가공성을 활용할 수 있으며 높은 탄성률을 확보하기 위하여 하이브리드 구조물로 구성시킬 수 있다.

이는 서로 다른 물성을 갖는 두 가지 이상의 재료를 피구조물에서 요구하는 기계적 성질을 최적화하도록 설계하여 제작하는 방법으로서 피로하중, 염수 및 화학분위기에 대한 저항성이 강하며, 특히 충격에 대한 저항은 금속보다 강한 특성을 갖고 있다. 그러나 복합재료는 고가이고 공정개발이 어려우며, 대규모 파괴시 수리가 어려운 점 등 금속재료와는 달리 특정한 설계 및 공정도가 요구되어진다.

또한, 복합재료는 금속재료와 비교하여 방향성의 고유한 특성을 갖고 있으며, 이와 같은 특성은 구조물 제작시 각 소재의 적층 순서 및 강화재의 재질에 따라 서로 상이한 특성을 나타낸다. 따라서 효율적인 물성치를 얻기 위하여는 용도에 따른 적절한 소재의 선택이 중요하다 하겠다.

복합소재가 갖는 이러한 특성 때문에, 사용조건에 적합한 재료의 배열구성 및 제작공정개발을 보다 명확히 규명할 필요가 있으며, 특히 회전체인 블레이드의 경우는 신뢰성있는 강도, 강성 및 피로특성을 요구하고 있다.

이에 복합재료의 기초 물성평가는 터빈 블레이드에 적합한 하이브리드형 복합재료를 구성할 수 있는 근거자료 산출을 목적으로 수행하였다.

### 3.2 복합재료의 선정 및 시험조건

본 풍력발전 시스템에 적용될 블레이드의 소재는 당사에서 생산되는 250°F 경화용 복합재료인 CU125/Epoxy, GU450/Epoxy, HG570/Epoxy로 하였다.

섬유강화 복합재료는 사용온도와 습도 등의 분위기에 따라 강도 및 수명이 저하되는 경향이 있으므로, 설계에서 요구되는 소재의 기초물성치는 이와 같은 온도 및 습도의 영향을 고려한 가상적인 극한환경 조건에서 재료시험을 수행하여 이의 자료를 이용하여 피구조물의 강도치가 설계치 이하로 떨어지지

않도록 고려하여야 한다.

채택된 복합재료도 온도 및 습도에 민감하므로 시험조건을 결정하기 위하여 당사 내부에서 보유하고 있는 섬유방향의 인장특성 연구보고의 결과에 따라 다음의 결과를 추측하였다.

○ 섬유방향의 인장특성 :  $-50^{\circ}\text{C}$ 에서  $125^{\circ}\text{C}$ 까지의 온도에서는 물성에 큰 영향이 없으나, dry cold( $-53^{\circ}\text{C}$ )상태 및 수분함량(moisture content)이 1% 이상이고 온도  $110^{\circ}\text{C}$  이상인 경우에는 물성치의 심한 저하 현상을 갖는다.

○ 압축 및 층간에 대한 기지(matrix) 특성 : 고온다습에 민감하여 물성치의 저하를 가져 온다.

이 결과에 따라 다음의 3가지 시험조건을 선정하여 실험을 수행하였으며 여기서, Wet는 1% 흡습조건을 의미한다. 따라서 상온분위기, 저온분위기 및 흡습 고온분위기가 시험조건이 된다.

○ RTD(Room Temperature, Dry) ( $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ )

○ LTD(Low Temperature, Dry) ( $-55^{\circ}\text{C}$ )

○ ETW(Elevated Temperature, Wet) ( $71^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ )

이러한 환경 조건 이외에 돌풍 또는 보수 유지 중에 발생할 수 있는 충격손상 및 운용 중에 발생할 수 있는 미소균열(micro crack) 생성, 층간분리현상(delamination)과 같은 다양한 형태에서 야기되는 파괴의 평가와 그 기인 요소에 대한 고려를 하여야 한다. 따라서 블레이드는 이러한 모든 조건들을 고려한 시편 시험(test) 및 구조 시험을 통해서 최적설계를 하고 안전계수를 결정하여야 한다.

### 3.3 복합재료의 제원

본 시험에 사용된 소재에 대한 섬유(fiber)의 특성, cloth의 물리적, 화학적 성

표 1 판넬 형상(Lay-up Sequence)

각요소부	적층패턴	플라이	비고
표면부	(G45/C0 <sub>2</sub> /G-45/C0 <sub>4</sub> /G90) <sub>s</sub>	18	G45 : GU 450-45° G90 : GU 450-90°
스트링거	(GF)	14	C0 : CU 125-0°
표면부/스트링거/표면부	(G45/C0 <sub>2</sub> /G-45/C0 <sub>4</sub> /G90/GF4) <sub>s</sub>	32	GF : HG 570-0/90°

질 및 적층판(laminate)의 물리적 특성 결과를 검토한 결과 특이사항은 섬유에서의 CU125의 인장 모듈러스(modulus) 결과치가 GU450 혹은 HG570보다 약 3배 높은 값을 가지고 있으며, 일체 성형공정을 위하여 동일한 수지체계를 기지재료(matrix material)로 하고 있기 때문에 프리프레그의 물리적 특성이 유사하다는 점이다.

HG570/Epoxy 프리프레그는 본 연구와 관련하여 당사에서 개발한 복합재료의 형태이다. 이것은 로빙(roving)사를 오토클래브 공정에 적합화시킨 것으로서 섬유단량(fiber areal weight)이 570 g/m<sup>2</sup>이기 때문에 블레이드의 중량관리 및 관성모멘트 조절에 유익하도록 한 것이다. 따라서 HG570은 블레이드의 스트링거 구성재료로 활용하였다.

3.4 복합재료의 적층 및 성형

프리프레그의 적층 과정은 라미네이트(laminate)의 물성에 영향을 미치는 중요한

요소 중의 하나이다. 이것은 복합재료가 급속과는 달리 방향성을 갖는 재료이므로 이의 적층과정 즉, 섬유의 방향이 기계적 물성을 좌우시키며, 층간의 이물질 혼입이 흔히 일어나기 때문이다. 표 1은 판넬의 형상(lay-up sequence)을 나타낸다.

배킹(bagging) 공정에 사용된 부자재는 라미네이트와 몰드의 분리를 쉽게 해주는 이형필름(separator film), 공기와 휘발성 물질이 통과할 수 있는 브리더(breather), 수지 함침량(resin contents)의 조절이 가능한 다공질 필름(porous film), 그리고 나일론 진공백 필름(nylon vacuum bag film) 등을 사용하였으며 백킹방법은 그림 2와 같다.

배킹이 완료된 프리프레그 판넬을 그림 3과 같은 경화 사이클(cycle)에 따라 오토클래브(autoclave) 내에서 경화시켜 제작하였다.

3.5 시험결과

3.5.1 열역학적 성질

실험에 나타난 결과들에 의하면, 표면부

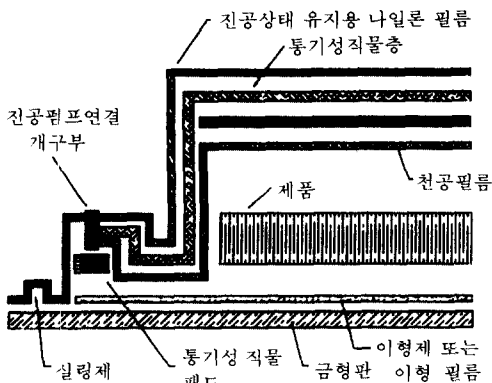


그림 2 배킹(bagging) 방법

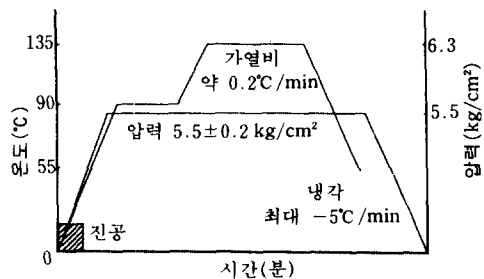


그림 3 경화사이클(curing cycle)

시험편의 경우 계수값이 다른 결과치들에 비해 상대적으로 높은 온도까지 일정하였으며, 또한 유리전이온도(glass transition temperature( $T_g$ ))값은 192.6°C로 매우 높게 나타남을 알 수 있었다.

그리고 스트링거 시험편의 경우, 굴곡저장 모듈러스(flexural storage modulus)  $E'$  값의 경우 표면부 시험편에 비해 곡선의 기울기가 낮은 온도에서 발생됨을 볼 수 있었고, 또한  $T_g$ 값들이 열적특성이 상대적으로 떨어짐을 알 수 있었다. 이러한 경우 더 높은 열적특성을 부여하기 위해서 2차성형(post

cure)으로서 충분한 경화를 시켜주면 안정된 공정을 확보할 수 있게 된다.

그리고 표면부-스트링거-표면부 재료의 경우  $T_g$ 값이 표면부와 스트링거 사이인 160.4°C 사이에서 나타나며,  $E'$  곡선의 양상도 스트링거 재료와 비슷함을 볼 수 있었으며 이 경우에도 포스트큐어로서 물성치를 더 개선시킬 필요가 있었다.

### 3.5.2 기계적 성질

각 소재별 및 시험항목별의 시험결과를 표 2에 정리하였다. 환경분위기의 시험편에

표 2 시험결과(Test Summary)

물성치	시험조건	표면부		스트링거		표면부/스트링거 /표면부		시험방법
		경사	위사	경사	위사	경사	위사	
인장강도 (MPa)	LTD	865.32		420.85		480.11		ASTM D 635 & ASTM D 3039
	RTD	876.75		431.21		482.11		
	ETW	715.23		305.20		320.20		
인장 탄성률 (GPa)	LTD	54.10		30.25		39.85		
	RTD	54.36		29.05		40.67		
	ETW	53.07		27.80		39.25		
포와송비	RTD	0.32		0.03		0.49		ASTM D 695
압축강도 (MPa)	RTD	517.71		473.87		407.10		
	ETW	307.20		361.45		290.07		
굴곡강도 (GPa)	RTD	53.64		20.62		31.75		ASTM D 790
	ETW	53.32		19.50		30.42		
굴곡강도 (MPa)	RTD	경사 842.91	위사 318.92	경사 577.63	위사 553.61	경사 663.25	위사 689.43	ASTM D 790
굴곡탄성률 (GPa)	RTD	51.49	18.33	29.49	30.09	47.68	46.64	ASTM D 2344
층간분리강도 (I. L. SS) (MPa)	RTD	50.02	33.25	52.17	53.35	51.98	53.06	
샤피 충격강도 ( $kg\cdot cm/cm^3$ )	RTD	N/C		N/C		185.54	202.23	ASTM D 256
아이조도 충격강도 ( $kg\cdot cm/cm^3$ )	RTD	N/C		N/C		173.69	180.10	

대한 시험항목별 결과는 상온분위기와 비교하여 저온분위기에 의한 물성치 감소는 나타나지 않으며, 다만 고온분위기의 결과는 저하되는 양상을 보인다. 이것은 고온분위기의 시험편은 흡습조건까지 포함하고 있기 때문이라고 판단되며, 모듈러스들의 결과치보다는 강도시험 결과치에서 두드러지고 있다. 따라서 설계기초자료로서의 사용은 ETW 시험편 결과를 사용하여도 무방하리라 여겨진다. 표면부 재료는 주로 카본의 물성치에 접근되고 있으며 표면부재료와 스트링거 재료를 조합한 표면부+스트링거+표면부 재료는 모듈러스 시험 결과치와 같이 스트링거 재료보다는 우수한 결과를 보이고 있으나 압축강도시험 결과치는 감소한 결과를 보였다.

충격시험이 경사(warp) 및 위사(fill) 방향에 대하여 실시되었으나, 물성치의 차이는 크게 나타나지 않고 있다. 경사방향의 경우 위사방향에 비하여 최대하중점에서 발생한 oscillation의 유지시간이 길게 나타나고 있어 대규모 파괴상태로 되는 시간이 지연되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 최대하중점(peak load point)를 보면 위사방향이 경사방향보다 높게 나타남으로써 동적파괴 인성치가 우수하고 충격흡수에너지도 높게 평가되었다.

#### 4. 단면 설계

복합재료 블레이드의 단면설계는 복합재료의 제작공정을 고려할 때 알루미늄 압출재의

블레이드 단면과 동일한 형상으로 완성되기 어렵다. 따라서 기초물성이 평가된 복합재료로서 조합한 단면형상은 인장 및 굴곡강성을 고려한 탄소섬유의 표면부, 이를 보강하기 위한 유리섬유의 스트링거, 그리고 국부 굴곡강성을 보완한 알루미늄 하니콧을 선정하였다. 1차 구조물인 기존의 금속재료를 복합재료로 대체할 때, 강성의 문제 중에서 굴곡강도를 만족시키기 어렵다. 그러나 굴곡강도를 만족시키기 위하여 고탄성복합재료를 채택하려면 경제성에 문제가 있게 된다. 이를 보완하기 위한 것이 하니콧, 폼(form), 충전재 등이 있고, 여기에서 안정된 공정을 보장하는 것이 하니콧이다.<sup>(5)</sup> 그림 4는 최종적으로 결정된 블레이드의 단면을 보여준다.

뒷전의 리벳조인트를 고려한 0°/90°배열의 탄소직조섬유 8층을 최초 45 mm의 폭으로부터 25 m씩 넓게 배열하였다. 물론 블레이드의 표면가공을 위한 0°/90°배열의 유리직조섬유 2층을 몰드 전면에 배열하였다. 길이 방향의 굴곡강성을 위하여 0°배열의 탄소일방향섬유 9층을 앞전 80 mm부터 200 mm의 폭으로 20 mm씩 엇나게 배열하였다.

코드길이(chord length)에 대한 두께편차를 보상하기 위하여 다양한 폭의 HG570(0°/90°배열) 유리직조섬유가 배열되고 최종적으로 전면에 스트링거로서 HG570(0°/90°배열) 4층, HG570(±45 배열) 1층을 배열시킨 후 1차 성형 후 알루미늄 하니콧을 위치시킨 후 2차 성형하여 완성되게 하였다. 따라서 위의 재료배열은 알루미늄 압출재 블레이드가 가

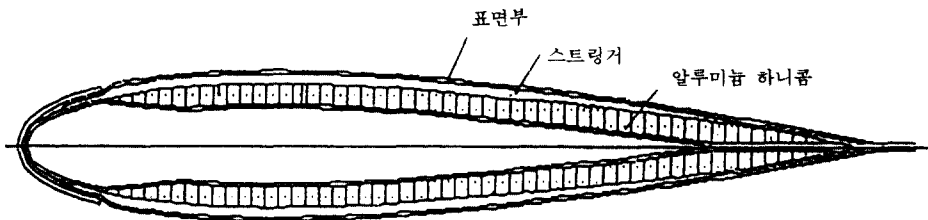


그림 4 블레이드 단면형상

지는 기계강도를 만족시키는 최종 결론이었으며, 이것은 다른 배열조건들을 실제 성형 후 굴곡시험시킨 결과에 의하여 결정된 것이었다.

NACA 0015으로의 형상완성을 위한 접착 공정은 상온경화하여 2차 성형되도록 하여 성형 중 형상변경을 확인할 수 있게 하였다. 또한, 접착공정을 거친 후 앞전부위는 HG 1581(0°/90° 배열) 유리직조섬유 2층으로 폭 80 mm되게 상온경화시켜 최종 완성하였고, 뒷전은 100 mm 간격으로 리벳팅처리하여 마무리하였다.

### 5. 블레이드 제작

블레이드의 제작방법이 여러 가공방법 중에서 오토클레브 성형공정이 검토되었다. 따라서 이 공정을 수행하기 위한 몰드 제작이 수행되어 4개의 몰드가 알루미늄 압출재 블레이드로부터 제작되었다. 몰드는 알루미늄

압출재 블레이드 위에 상온경화 수지를 유리 섬유에 함침시켜 가면서 적층하여 2차고온경화 시킨 후 철구조물 위에 고정시키는 다음의 공정을 거쳤다.<sup>(1-4)</sup>

- 알루미늄 압출재 블레이드의 연마 및 몰드 날개 부착
- 알루미늄 압출재 블레이드의 이형처리
- 적층 및 상온경화
- 보강판 부착 및 1차 상온경화, 2차 고온경화
- 철구조물에 거치
- 후처리

그림 5는 곡선부 부위에 대하여 보강판 고정까지 진행시킨 상태를 보여주고 있으며 곡선부 부위는 길이방향으로 2등분되어 직선부위와 연결되어 1개의 몰드로서 완성된다. 철구조물과 복합재료 몰드의 연결은 300 mm 간격의 볼트 및 너트로서 체결되며, 이 볼트 및 너트를 조정함으로써 광학 계측시스템(optical tooling)의 측정에 의한 이론적 형

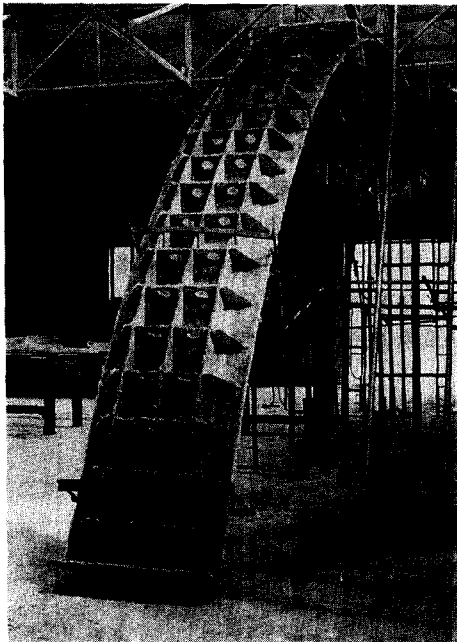


그림 5 복합재료 블레이드의 곡선부 몰드

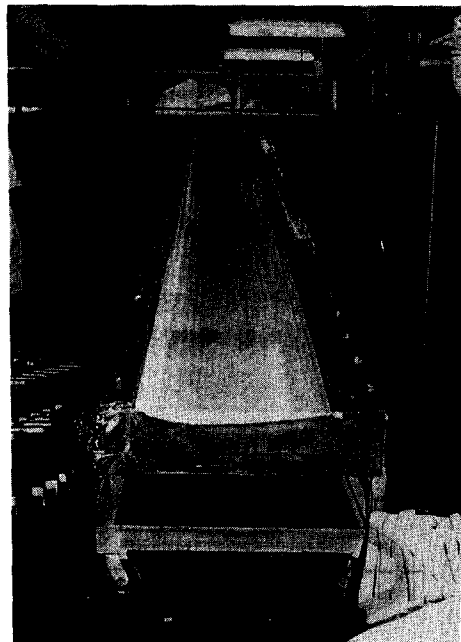


그림 6 몰드상에 적층된 프리프레그

상에 접근되도록 하였다.

그림 6은 청정실(clean room) 내에서 프리프레그(prepreg)가 재단되어 적층된 상태를 보여주고 있다. 프리프레그의 적층시 4~5층의 복합재료가 적층될 때마다 진공을 120분 유지시켜 프리프레그가 몰드면에 양호하게 부착되게 하였다.

그림 7은 성형가공 완료후 기계가공되는 상태를 보여준다. 블레이드는 토크튜브에 거치되는 이론적 크기에 따라 가공되며, 허브부 및 블레이드-블레이드 체결부의 드릴가공 공정을 거치게 된다.

그림 8은 토크튜브상에 블레이드-블레이드 부가 체결되어 완전조립된 상태를 보여주고 있으며 기계 가공되어 에어포일(airfoil)이 훼손된 부위는 최종 트림(trim)공정을 거쳐 매끈하게 된다.

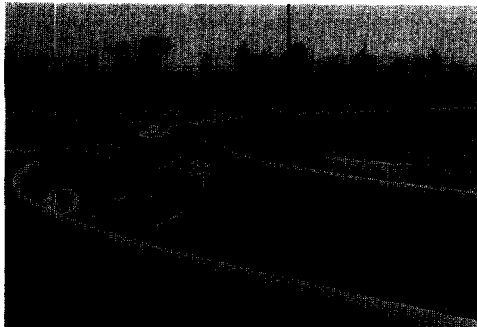


그림 7 성형완료된 블레이드의 접합부 기계가공

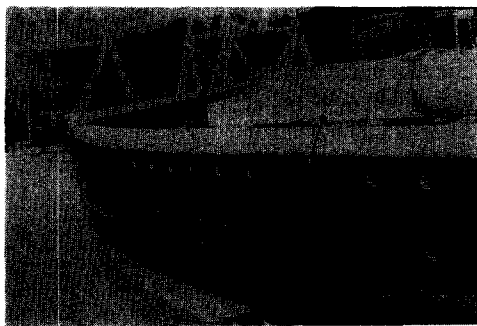


그림 8 조립완료된 블레이드의 접합부

## 6. 맺음말

본 연구를 통하여 기존에 사용되고 있던 알루미늄 압출재 블레이드를 복합재료로 대체하여 개발함으로써 이의 타당성을 검토하여 보았다. 풍력발전기의 개발 추세는 점차 메가와트(megawatt)급 시스템으로 진행되어 터빈 블레이드가 대형화됨에 따른 터빈 블레이드의 경량화 및 내구력의 향상이 절실히 요구된다. 이는 복합소재의 사용으로 경량화를 통한 시스템 각요소의 제작비용절감 및 내구력 향상을 통한 시스템의 수명증대의 효과를 확보할 수 있을 것이다. 그러나 복합재료를 사용한 터빈 블레이드는 기존의 알루미늄을 이용한 재료보다는 가격경쟁에서 다소 떨어지며 제작과정상의 어려움과 정밀한 설계기술의 미개발 등 아직도 많은 난점을 안고 있는 실정이다. 그러나 현재 풍력에너지 이용 선진국의 개발추이로 보아 대용량시스템의 터빈 블레이드는 복합소재의 사용이 필수적이며 보다 효율적인 양산시스템의 구축과 최적설계에 대한 연구가 지속적으로 실시되면 기존의 블레이드와는 충분한 경쟁성을 확보할 것으로 전망된다.

## 후 기

이 연구는 1993년도 상공자원부에서 시행한 대체에너지기술개발사업의 연구비 (과제번호 : 931G301-820DP1) 지원에 의한 연구 결과의 일부이며 연구비를 지원해준 상공자원부에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Covington, C. E. and Baumgardner, P. S., 1987, "Design and Production of Fiberglass Helicopter Rotor Blade," Bell Helicopter Tetron, pp. 497~511.



- (2) 가와사키중공업주식회사 회전날개 설계부, 1982, "복합재료를 적용한 Helicopter Blade의 동특성에 관한 연구."
- (3) Sullivan, W. N., 1976, "Structural Loads for the 17m Darrieus Turbine," in *Proceedings of VAWT Technology Workshop*, Sandia Labs., New Mexico, 17~20 pp. II130~II136.
- (4) Weingarten, L. I. and Lobitz, D. W., 1976, "Blade Structural Analysis," in *Proceedings of VAWT Technology Workshop*, Sandia Labs., Mexico, 17~20 pp. II137~II150.
- (5) Barzda, J. J., 1976, "Blade Design and Fabrication 17m VAWT," in *Proceedings of VAWT Technology Workshop*, Sandia Labs., Mexico., pp. 17~20. ■