

技術論文

국산 중·대형 수평축 풍력 발전기 블레이드를 위한 복합재료 및 제조 방법의 고찰

황병선* · 김진우* · 김종식** · 류지윤**

Materials and Fabrication of Composite Mid or Large Wind Turbine Blades for Korean Version

B.S. Hwang*, J.W. Kim*, J.S. Kim**, and J.Y. Ryu**

ABSTRACT

Horizontal axis wind turbine blade is one of the largest composite structures ever developed in Korea. The blades suffer dynamic loadings such as aerodynamic load, gravitational load. Thus, the developers need to consider serious approaches in materials selection, design, manufacturing, and test/evaluation. This paper is analyzing composite materials and fabrication methods used by advanced countries throughout the review of literatures. In addition, some data of mid-size vertical axis wind turbine developed in Korea is compared to the data of real composite turbine in Denmark. Composite materials for wind turbine has excellent material properties and processing capability compared to laminated woods and metals. They have also good fatigue and environmental characteristics. Selection of composite materials and fabrication methods must be performed simultaneously and in conjunction with economic aspects, industrial structure, and materials and manufacturing experience.

초 록

수평축 wind turbine용 블레이드는 국내에서 개발되는 대형 복합재료 구조물의 하나이다. 블레이드는 동적인 하중을 받는 대형 구조물이므로 재료의 선택, 설계, 제작, 시험 및 평가 과정에 상당한 노력이 필요하다. 본 논문에서는 특히 재료 및 제품 제작에 필요한 고려사항을 문헌을 통하여 분석하였고 이미 개발 경험이 있는 수직축 블레이드의 예를 들어 비교하였다. 복합재료는 목재 혹은 금속재료에 비교하여 물성 및 제작성이 우수하며 피로특성 및 내후성 등에서도 유리한 특성을 지니고 있다. 재료 및 공정 선정에는 재료의 특성과 제작 공법을 연계해서 고려해야하고 경제성 및 각국의 산업구조 및 경험을 토대로 결정되어야 한다.

1. 서 론

고성능 복합재료는 탄소 및 케블라 섬유 등과 같이

고강도 및 강성을 지닌 보강섬유를 사용한 복합재료를 일컫는다. 고성능 복합재료는 원재료 및 제작 가격의 고가 때문에 항공, 우주, 군사용 구조물 등에서 필수 불

* 한국기계연구원

** (주)한국화이바

가결한 부품 제작에 응용되어 왔고 엄격한 규정 및 기존 금속재료와의 경쟁성 때문에 지난 20여년간 급속한 발전이 있었다. 구조물의 경량화의 관점에서 볼 때 이 재료들은 적절한 재료중의 한가지임에 틀림없다. 따라서 경제성보다는 성능위주의 응용물에 적용되어 왔으며 이 때문에 재료의 성능 및 제조 공법 등의 향상에 주도적인 역할을 해왔다.

이러한 항공, 우주, 군사 관련 기술이 사회 하부 구조물, 건축 및 토목 구조물 등에 이용되므로써 해당 분야에 큰 진보를 가져오고 있다. 이 중 한가지 혜택을 받고 있는 것이 대체에너지로 각광을 받고 있는 풍력발전 시스템의 터빈 블레이드에의 적용이다. 풍력 터빈 블레이드는 대형 구조물이므로 재료의 소모량이 엄청나다.

예를 들면 전장이 20m이고 chord길이가 2m인 블레이드 한 개의 중량은 1.5-2.5ton에 이른다. 복합재료로써 단일 구조물에서 이러한 크기는 많지 않기 때문에 탄소섬유나 케블라섬유 같은 고가 보강재의 사용에는 제약이 따른다. 따라서 특수한 경우에 고강도 섬유와 유리섬유의 혼성(hybrid) 복합재료도 사용되고 있으나 대개 유리섬유, 샌드위치 재료를 이용한 복합재료 블레이드의 개발이 주류를 이루고 있다.

복합재료 블레이드가 대량으로 생산되기 이전에는 블레이드 제작에 강철, 알루미늄, 목재 등의 재료들이 이용되었고 아직도 제작 수량이 적은 모델 개발 등에는 금속 재료들이 많이 사용된다. 복합재료 블레이드는 기본적으로 금형(mold)제작이 필수적이기 때문에 초기 투자 비용이 크다. 다른 측면에서 보면 소형의 풍력 시스템에서는 주로 알루미늄, 강철과 같은 금속 블레이드로도 충분하였으나 점차 대형화되면서 제작, 설치, 성능 등의 면에서 중량 때문에 한계에 이르기 때문에 대체 재료를 고려하게 되었다. 역사적, 지리적인 고려와 경량 때문에 적층목재(laminated woods)는 금속과 같이 병행하여 발전하였고 대형 블레이드에 금속과 함께 사용되어 왔으나 고분자 복합재료의 발전으로 급속히 이 재료로 대체되고 있다. 적층목재 재료는 가격, 경량, 제작의 용이 등의 장점이 있으나 대량생산시 경제적인 측면에서의 고려가 각국의 산업구조와 함께 고려되어야 한다.

목재의 사용에서 가장 문제점으로 지적되는 것은 목재의 나뭇결(grain)을 이용하여 적층판 형태의 재료로 만들어서 구조물로 사용해야하는데 적층기술, 재현성, 형상제조, 흡습에 의한 형상변형(shrinkage 및

warpage), 데이터확보 등의 어려움이 있다. 복합재료의 발전으로 목재구조에 복합재료를 블레이드 앞전(leading edge)에 사용하여 마모(erosion)를 감소시키는데 사용하기도 한다. 또한 순수한 목재의 사용은 어렵고 금속 및 복합재료와 혼성된 형태로 이용된다. Table 1에서 나타난 바와 같이 근본적으로 기본 특성의 차이를 극복하고 독자적인 설계 기법을 도입하여 기존 목재 블레이드를 개발하여 사용중인 국가 혹은 기업에서는 역사적으로 쌓인 노하우를 이용하고 있다. 따라서 후발 개발자는 이 기술적인 장벽을 짧은 기간에 넘기면 어려울 것으로 보인다. 국내의 여건을 보면 우수한 품질을 가진 국내 목재 자원의 부족, 비행기용 프로펠러, 헬리콥터용 로터 블레이드 등의 제작 경험 부족으로 목재 사용에 대한 기술 개발이 필요하다.

금속 블레이드는 대형화할 때 중량 증가에서 오는 설치 운용상의 문제점이 중대한 걸림돌이 된다. 강철(steel)의 경우 블레이드 중량의 증가는 연결부위(hub), 동력전달장치(drive-train), tower등의 중량을 순차적으로 늘어나게 한다. 알루미늄의 경우 일정한 chord 폭을 가진 Darrieus형 로터에 실제로 많이 사용되었다. 이는 블레이드가 인장력을 주로 받고 인발(extrusion)성형으로 생산성이 우수하지만 금속 피로 현상에 의한 균열현상이 심각한 문제가 되었다.

풍력 발전시스템의 국내 개발의 역사가 짧아 시스템 전반적인 분야의 충분한 경험 및 자료가 확보되지 않은 상태이다. 그중 풍력시스템의 터빈 블레이드 또한 마찬가지이다. 따라서 본 고찰에서는 국내의 복합재료 풍력시스템용 블레이드의 재료 및 제조 방법에 대하여 분석 및 정리하고 이를 바탕으로 국내의 중대형 터빈 블레이드의 제작 방향을 제시하고자 하였고 복합재료

Table 1. Mechanical properties of blade materials[1]

Materials Properties	Douglas Fir	Wood/ Epoxy ^b	Steel	Al	Fiberglass Composite	UD Fiberglass Composite ¹
Density[g/cm ³]	0.52	0.637	7.8	2.7	1.9	1.9
Compressive strength [MPa]	51.71	—	775.66	260.50	188.94	—
Tensile strength [MPa]	103.42	68.95	1551.32	537.00	377.88	1124
Modulus [GPa]	13.79	15.17	206.84	71.57	50.33	44.8

1) type 110 laminate, Gougeon Brothers Co. Douglas fir(침엽수)[2]

2) V_r=50-60% Unidirectional laminates[2]

와 타 재료와의 비교보다는 세계적인 경향인 복합재료 터빈 블레이드의 제작과 관련된 사항을 논하였다.

2. 풍력 터빈 블레이드의 환경 및 하중조건

2.1 환경적인 조건

풍력 터빈은 설치위치에 따라 환경조건이 다르겠지만 복미 대륙을 제외하고 세계적으로 대개의 풍력발전 단지는 해안에 위치하고 있기 때문에 습윤한 환경에 처한다고 볼 수 있다. 터빈의 면적 또한 크기 때문에 비와 우박 등에 의한 마모, 조류에 의한 충돌, 일교차에 의한 thermal cycle 등 외부 환경에 그대로 노출된다.

시스템의 수명은 20-30년 정도로 예상하고 설계와 제작을 하기 때문에 부품의 장기적인 내후성 및 내구성을 고려해야 한다. 위에서 언급한 어떤 재료라도 운용환경에 대비한 적절한 외부 코팅 등을 적용하여야 한다. 하지만 복합재료 자체가 다른 재료들보다는 내환경성이 뛰어나기 때문에 유리한 조건을 갖추고 있다.

2.2 하중조건

2.2.1 Aerodynamic load

풍력 발전시스템에서 블레이드가 처하게되는 가장 기본적인 외부 하중이다. 운용 즉 작동 중에 발생하는 rotating rotor와 관련된 하중으로 코드 길이의 함수로써 bending moment 와 하중을 나타낼 수 있다. 블레이드의 연결 부위(hub, root)에서의 bending moment 및 하중은 블레이드의 길이가 길어짐에 따라서 지수함수의 관계로 증가한다. 동적인 항목을 배제하여 예측과정을 단순화하기 위하여 max. quasi-static loading으로 가정하여 취급하기도 한다. 또한 정지할 때 발생하는 최대 풍속에 의한 정하중(static loading)도 aerodynamic load에 대표적으로 속한다. 이 하중들은 블레이드에 bending, twisting coupling을 겪게 한다. 이는 재료 자체의 기본적인 강도 및 강성을 요구하며 우수한 피로 특성을 요구하게 된다. 복합재료의 하중 방향에 따른 재료의 배열을 최대로 이용할 수 있으며 이 공력학적인 하중을 고려한 twist 혹은 distortion angle에 따른 형상의 제작에서 mold를 이용할 수 있는 복합재료는 제작상의 경제성에서 아주 우수한 재료이다.

2.2.2 Dynamic load

가장 중요한 동적인 하중은 시스템 운용시 발생하는 반복중력 하중(cyclic gravity loading)이다. 블레이드의 자체 중량 및 중량의 분포가 중력에 의하여 코드 방향으로 작용한다. 따라서 이에 의한 모멘트 및 하중에 의하여 재료의 stretching 및 twisting coupling이 발생한다. 이와 함께 구조물의 고유 진동수와 회전 진동수와 관련된 구조물의 excitation, gyroscopic loading 등도 복합적으로 관련된다. 이러한 하중은 무엇보다 재료의 우수한 피로 특성을 요구한다.

대표적인 예를 들면 블레이드의 root bending moment를 rotor크기에 따라 나타낸 그림은 Fig. 1과 같다[3]. 이는 블레이드 설계와 관련하여 최소한 고려되어야 할 하중을 기준으로 하였다. 조사된 블레이드 크기에 따라서 bending moment는 지수함수로 증가함을 볼 수 있다.

3. 블레이드용 복합재료의 고찰

시스템의 대형화로 인하여 경량의 재료를 필요로 하는 것 외에 풍력 터빈 블레이드 재료가 지녀야 할 요구 사항으로는 2절에서 제시된 하중조건을 달리 표현하면 다음과 같은 사항이 지적되고 있다[4].

- Low amplitude, high cycle fatigue properties (10^7 - 10^8 cycles)

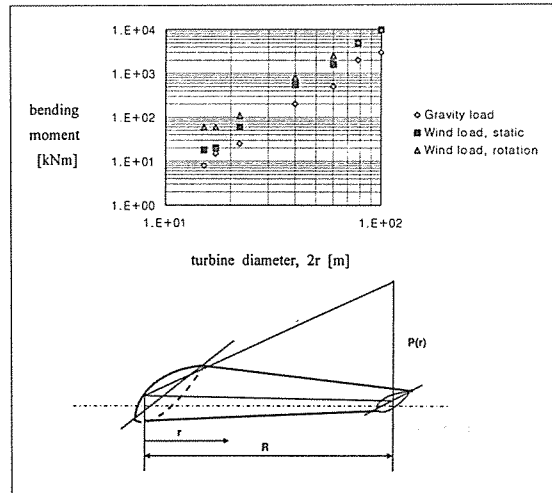


Fig. 1. Root bending moment for the three different load types and linear load distribution shape

- Stiffness and strength to accommodate 20 - 30 years extreme wind conditions
- Adequate stiffness and structural damping to avoid resonance and to ensure aeroelastic stability

상기 조건을 갖출 수 있는 재료는 초기의 소형시스템에 사용되던 알루미늄에서 나무 복합재 및 유리섬유 복합재료로 자연스럽게 발전되어 왔다. 중량 문제 때문에 상기 언급한 바와 같이 나무나 복합재료의 사용은 불가피하다 또한 나무의 사용도 국내의 실정으로 적절하지는 않다는 것은 이미 서론에서 언급하였다.

나무를 이용한 정교하면서 대형인 laminate형의 구조물을 제조하는 기술이 부족하며 재료의 확보 또한 쉽지 않다고 판단된다. 따라서 로터 블레이드의 제조는 복합재료를 사용할 수 밖에 없다.

복합재료에 사용되는 보강재인 섬유는 유리섬유 및 탄소섬유가 가장 가능성 있는 재료로써 취급된다. 두 섬유의 물성 비교에서 보면 탄소섬유가 유리섬유보다 여러 특성이 우수하다. 단섬유 적층시편에서 얻은 물성을 볼 때 인장강도 면에서는 약 40%, 탄성률 면에서는 400% 정도 우수하다. 하지만 이는 단순비교로서 실제 블레이드 설계 및 제조에서는 직접 적용하기에는 무리가 있다. 복합재료의 물성은 섬유의 배열형태 및 섬유 함유량에 따라서 물성의 변화가 크기 때문이다. 또한 배열 형태 및 함유량은 선택되는 제조법에 따라서 다르기 때문에 모든 조건을 정확히 언급하기 전에는 직접비교는 어렵다. 문헌상에 나타난 대개의 비교자료는 가장 단순하며 일반적인 물성 즉 단방향 복합재료의 물성 정도만 많이 찾을 수 있다. 추후 제조 공정에서도 언급할 예정이나 수적층(hand lay-up)의 경우 현재 블레이드 제조에 가장 많이 사용되는 방법이다. 이 경우 그 물성은 제조업체에서 제시하지 않는 한 정확한 수치는 알 수 없다.

3.1 비강도 및 비강성

고분자 복합재료의 일반적인 특성인 타 재료에 비하여 경량인 점이 재료의 선택에 상당히 중요한 요인으로 작용한다. Table 1에서 본 바와 같이 재료 자체의 비중은 금속과 목재의 중간 정도에 있다. 하지만 블레이드 제조에 사용되는 목재라도 주 구조물인 스파 혹은 동력축과의 연결 부위(hub)는 금속재료의 사용이 불가피하다. 따라서 로터 블레이드의 중량의 비는 밀도

의 비와 같이 비례하지는 않는다. 복합재료는 금속이나 복합재료 hub를 사용할 수 있기 때문에 설계에 따라서 중량의 변화가 있을 수 있다. 조사된 블레이드 데이터 [5]에서 보면 목재 블레이드 13.21m형(Gougeon, U.S.A)이 625kg이지만 비슷한 크기의 유리섬유 복합재 블레이드 14.2m형(LM사, Denmark)은 1150kg이다. 중형의 경우 목재 블레이드 18.8m형(Wind-Master사, U. K.)은 2000kg, 복합재 블레이드 18m형(Aerpac사)은 1600kg이다. 비록 금속 블레이드이지만 18.29m 형(MOD-OA Model, U.S.A[1])은 1065kg 정도에 불과한 경우도 있다. 따라서 터빈의 경량성 여부는 turbine의 환경조건을 고려한 설계에 따라서 결정되는데 재료 자체의 경량은 설계에 상당한 자유성을 부여할 수 있다. 밀도 대비 강도 및 강성은 복합재료가 상당히 우수한 것으로 잘 알려져 있기 때문에 다른 재료에 비하여 설계에 우월성을 가진다.

3.2 피로특성 및 내후성

앞 절에서 언급된 터빈 블레이드의 하중 조건에 의하면 재료의 우수한 피로특성이 재료 선정에 아주 중요한 요인 중의 하나이다. 복합재료의 일반적인 피로시험 데이터는 107 cycle까지 존재하는 것으로 나타나 있다[6]. 또한 유리섬유 복합재료의 경우라도 106 cycle에서 50% 정도의 초기 강도를 유지하고 있다[7]. 참고 문헌[6]에서 조사한 관련 피로시험 데이터는 피로에 의한 파괴 스트레인은 0.2-0.3% 정도라고 알려져 있다. 상온에서 정적 파괴시험에 의한 인장 파괴 스트레인이 1-2.5%임을 고려할 때 상당한 물성 감소가 있음을 나타낸다. 특히 습한 자연 환경의 수분과 상승작용에 의한 피로 특성의 감소는 매우 커서 폴리에스터 복합재료의 경우 단기간의 흡습시험을 수행할 때 약 30-35%의 파괴 스트레인의 저하가 있다고 한다[6]. 따라서 내후성은 블레이드가 처하는 외부환경면에서 볼 때 고려해야할 중요한 요인이다. 하지만 복합재료 자체가 고분자 유기물로써 내식성이 아주 우수하며 내흡습성도 우수한편이다. 단지 UV에 의한 유기물의 분해현상을 방지하기 위하여 UV 방지 코팅이 요구되는데 이는 매끄러운 표면조도의 유지를 위한 코팅과 동시에 이루어질 수 있다. 이와 같이 블레이드를 설계할 때 이 피로 특성 및 내후성을 고려하게 된다.

블레이드용 복합재료는 섬유 보강 재료, 수지재료, 샌드위치재료 등 몇 가지 정도로 압축된다. 복합재료의 선정은 재료 및 공정을 같이 고려해서 이루어져야한다

다. 앞에서 언급한 바와 같이 대형 구조물이므로 사용되는 재료량이 매우 많기 때문에 경제적인 면이 가장 중요한 선정요인이다.

3.3 보강섬유(fiber)

복합재료의 구조물에서 하중을 담당하는 구성 재료이다. 본 절의 목적에 맞는 섬유는 유리섬유와 탄소 섬유이다. 블레이드는 하중조건에 비추어 인장 및 압축하중을 받는데 케블라 섬유는 기계적 특성상 압축강도가 상대적으로 낮아서 섬유 선정에서 불리하다. 섬유의 형태는 많은 종류가 언급될 수 있으나 경제성 및 실제 적용성 등을 고려할 때 단방향 연속섬유, 직조물이 가장 유력하다. 대개 섬유의 물성 비교는 일방향섬유의 강도 비교로써 시작되지만 본 절에서는 이 값의 비교는 별 의미가 없다. 일방향섬유의 특성에서 유리섬유와 탄소섬유의 강도 차이는 이미 알려진 대로 탄소 섬유가 매우 우수하다.

참고 문헌[2]의 분석을 인용하면 E-glass 섬유의 인장 파괴 스트레인(failure strain)은 2.5%이고 탄소섬유는 약 1%내외이다. 하지만 E-glass는 탄소섬유보다 아주 낮은 fatigue ratio(0.3 vs 0.75 at 106 cycle)를 갖는다. 106 cycle 이상에서는 탄소섬유가 유리섬유의 피로 특성을 완전히 넘는다. 단가 분석을 보아도 피로 강도의 비교치와 비슷한 수준이다. 또한 탄소섬유를 사용할 경우 중량 감소 때문에 피로에 의한 수명이 더욱 늘어나는 이점이 있다. 하지만 유리섬유는 탄소섬유나 케블라섬유같은 고성능 섬유보다 기계적 특성은 낮으나 앞에서 언급한 경제성 때문에 선택의 여지가 없다.

사용되는 섬유의 형태는 unidirectional tow, woven cloth, knitted fabric, continuous strand mat, braided fabric, chopped fiber 등이 있는데 블레이드를 제조하기 위해서는 몇 가지 섬유 형태가 혼합되어 사용되며 하중 구조물에 사용되는 것은 unidirectional tow, woven cloth, knitted fabric, braided fabric 정도이다. 제조 공정과 관련하여 보면 filament winding에서는 unidirectional tow, hand lay-up에서는 unidirectional tow 및 woven cloth, multiaxial knitted fabric, RTM(Resin Transfer Molding)공법에서는 woven cloth 및 braided cloth 등이 사용된다.

블레이드 구조는 주하중을 담당하는 스파(spar)와 airfoil의 형상을 유지하는 표피(skin)로 구성되는데 구성 부품의 제작에 사용되는 섬유의 형태는 하중조건

에 따라 달라야 한다. 하중이 큰 스파는 섬유의 강도를 최대한 활용할 수 있는 일방향 섬유의 배열이 이용되어야 하므로 UD tow, multiaxial knitted fabric, braided fabric 등이 필요하다. 스킨은 형상유지 및 낮은 하중을 담당하기 때문에 woven fabric 혹은 continuous mat 등이 사용된다. 최근의 경향으로 스파와 스킨의 구별을 없애고 일체형 블레이드가 생산되고 있다. 섬유 보강재는 small tow 보다는 heavy tow(12k 이상)를 사용한다. 또한 제조 과정에서 생산성 향상을 위하여 설계에 의하여 결정된 적층을 미리 직조기에서 직조하는 multiaxial knitted fabric을 사용한다.

3.4 수지(resin)

터빈 블레이드에 사용중인 수지는 에폭시(epoxy), 불포화 폴리에스터(unsaturated polyester), 비닐에스터(vinylester) 등이다. 불포화 폴리에스터는 경화시간이 짧고 가격이 저렴하지만 고 수축성 및 흡습성이 단점이다. 에폭시 수지는 폴리에스터에 비하여 경화시간이 길고 가격이 다소 높지만 내약품성, 고접착성, 저수축율, 우수한 전기특성 및 기계적 특성 등의 장점을 지니고 있다. 비닐에스터 수지는 폴리에스터와 에폭시 수지의 중간 정도의 특성을 지니고 있다. 폴리에스터 같이 짧은 시간에 경화가 가능하지만 강도 및 강성도는 에폭시 수지의 그것과 비슷하다.

또한 폴리에스터에 비교하여 내흡습성 등이 우수하여 습도가 높은 응용 부문에 사용 가능하다.

터빈 블레이드는 대형 구조물인 관계로 수지 선택에 있어서 다음 몇 가지 사항을 고려해야만 한다. 첫째, 가사시간이 적절하게 길어야 한다. 적층 및 수지 함침시간이 상당히 길어야 하기 때문에 작업중 점도의 상승은 작업을 어렵게 할 수 있다. 둘째, 가격이 저렴해야 한다. 블레이드 한 개에 소요되는 수지량은 상당한 양이다. 약 1.5톤의 복합재료 블레이드의 경우 수지함량이 약 50%라도 750kg 정도의 수지 및 첨가물이 소요된다. 셋째, 경화시간이 가사 시간과 비교하여 짧으면 좋다. 대개 상온 경화용 수지를 사용하지만 약간의 상승된 온도에서 경화되면 생산성 향상에 큰 영향을 준다.

수지의 선택에는 경제성, 환경규제, 경험 등이 크게 좌우한다. 전통적으로 wind turbine 기술이 우수한 북유럽(덴마크, 네덜란드)에서는 폴리에스터, 독일 및 영국에서는 폴리에스터 및 에폭시 수지, 미국에서는 폴리에스터 및 비닐에스터를 많이 사용하고 있다.

3.5 샌드위치 재료

스킨 구조물로서 fabric 복합재료를 사용하는데 블레이드의 중량을 줄이고 좌굴 방지를 위하여 샌드위치 형태의 재료를 사용한다. 외부 스킨은 얇게 줄이고 심재(core materials)는 하니컴 혹은 플라스틱 폼(foam)을 이용한다. 하니컴은 알루미늄 혹은 paper phenolics 재료 등으로 제작한다. 플라스틱 폼은 PVC (polyvinyl chloride), 에폭시, 폴리우레탄 폼 등이다. 플라스틱 폼은 블록형태에서 설계된 형태로 가공하여 복합재료 스킨을 접착시킨다. 하니컴 또한 가능한 심재이다.

북미의 사막지역에 설치되는 블레이드의 경우에는 큰 문제가 없으나 습윤한 지역에서는 내부 cell에 축적되는 수분은 블레이드의 불균형을 초래할 수도 있기 때문에 설치 장소에 따른 재료의 선택이 이루어져야 한다.

3.6 외국의 Windmill turbine blade의 사용 재료

중대형 풍력시스템의 로터 블레이드의 제작에는 복합재료나 나무(wood)재료를 제외하고는 현재로서는 대안이 없는 상태이다. 따라서 밀도, 기계적 특성, 내식성, 재료특성의 설계, 제조법의 다양성 등을 고려할 때, 20~50 m에 이르는 대형 구조물의 중량 때문에 재료의 선택에는 제한이 따른다. 본 절에서는 문헌상에 나타난 블레이드 재료를 조사하여 수록하였다. 문헌조사를 통하여 조사하는 과정에서 볼 때 문헌상에 나타난 블레이드 재료는 그 자료가 구체성이 없다. 대개 보고서 혹은 논문 등이 블레이드 제작자의 입장에서 쓰여진 것이라기 보다 총괄 책임자 혹은 설계자의 입장에서 기록된 것이 많기 때문인 것으로 추측된다. 따라서 일반적인 서술, 즉 'fiberglass로 blade가 제작되었다'라는 방법으로 표현되어 있다. 이 때문에 구체적인 자료를 입수에는 어려운 점이 있다.

재료적인 측면에서 보면 본 연구에서 관심사인 중형의 블레이드인 경우 복합재/나무의 비율이 89/11%로

복합재료의 사용이 주류이라고 분석하고 있다[8]. 본 절에서는 문헌[8]에 나타난 51건의 경우를 조사 정리하였다. 소형, 중형, 대형 시스템으로 나누어서 수록하였다. 크기별 분류는 최대 용량을 기준으로 할 수 있으나 본 보고서의 초점은 블레이드에 있기 때문에 블레이드의 크기에 따른 분류를 하였다. Fig. 1 과 2에는 이를 재료별로 나누어서 분석한 결과이다. laminated wood의 경우 모두 에폭시 수지를 사용하였다. 이는 접착력 및 저수축의 장점 때문인 것으로 판단된다.

복합재료의 경우(총30건) glass fiber/polyester와 glass/epoxy 재료가 사용되고 있는데 glass fiber/polyester계가 7건으로 확실하게 명시되어있고 나머지는 수지 명이 명시되어 있지 않고 에폭시계는 사실상 명기된 것은 거의 없다. 분류되지 않는 fiberglass재료는 폴리에스터계로 보아도 무방할 것 같다. 하지만 대형의 구조물의 작업시간 및 경화시간 등의 경제성을 고려할 때 glass fiber/ polyester계의 재료 선택이 불가피 했던 것으로 판단된다. 하지만 에폭시계 수지의 사용도 적지 않은 숫자이다. 에폭시 수지는 가격 면에서는 폴리에스터 보다 비싸지만 치수 안정성, VOC(volatil organic chemical)의 방출 등의 문제에서는 상당히 유리하다.

따라서 개발단계의 수지 선택은 제작자의 작업성 및 경험, 자료 축적 등을 고려해야한다. 대량 생산에 직면하거나 설치 및 운용의 경험이 축적되면 자연적으로 저렴한 제조 가격을 추구하는 재료 및 제조법으로 전환하게 될 것이다.

Fig. 2는 다른 참고 문헌[5, 9]을 이용한 복합재료별 사용 정도를 비교한 것이다. 조사된 69시스템의 재료는 모두 5종류로써 역시 GFRP(glass fiber reinforced polyester)가 매우 많은 량을 차지하고 있으며 다음으로 laminated wood, GI/Epoxy, CFRP(carbon fiber reinforced plastics)순이다. 이는 위에서 분석한 경향과 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

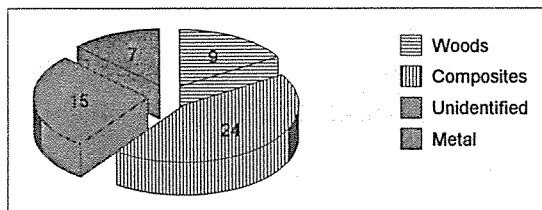


Fig. 1. Different materials used for wind turbine shown in ref.[8]

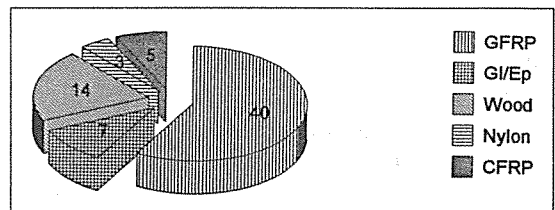


Fig. 2. Materials type for 69 nonmetallic wind turbine blades[5,9]

4. 제조 공법

일반 상업용 구조물로서의 복합재료 블레이드는 대형 구조물이면서 정교한 기술을 요구한다. 따라서 항공 우주용 혹은 군사용 복합재료 구조물의 개발에 적용되던 기술이 점차 이용되고 있는 실정이다. 초창기에서부터 현재까지 가장 일반적으로 사용되는 방법이 수적층 방법(hand lay-up method)이다. 구조물의 크기 때문에 개발 초기에 투자의 결정에 어려움이 있어 대부분의 관련 업체에서는 이 방법부터 시작한다. 점차 수량의 증가, 최적화된 공정, 설계의 자신감 등이 축적되면서 생산성을 높이는 제조 공법으로 변경되어진다. 본 절에서는 중요한 몇 가지 공정에 대하여 언급하기로 한다.

4.1 Hand lay-up 공법

Hand lay-up 공법은 복합재료 혹은 FRP 부품 제조에 사용된 가장 단순하고 오래된 제조법이다. 따라서 이 방법은 선박의 hull이나 비슷한 대형 부품을 생산성이 낮게 제조되는 노동 집약적인 방법이다. 착색된 겔코트(gel coat)를 몰드의 표면에 발라서 제품의 표면을 우수하게 만든다. 아직 겔코트가 끈적한 상태로 있을 때 유리섬유 매트나 직조 로빙천을 적층(섬유 함량 30-40%)하고 수지를 부어넣고 붓이나 로울러로 합침이 고루 되도록 압착한다. 수작업으로 로울러를 이용하여 갇힌 기포를 제거하고 적층물의 물성이 균일하도록 잘 누른다.

이런 방식으로 원하는 두께만큼 유리섬유와 수지를 더한다.

경화 작업은 수지의 선택에 따라서 상온 경화 및 열경화로 수행할 수 있다. 풍력 발전 블레이드와 같이 대형 구조물은 상온 경화를 사용하거나 온실과 같은 경화용 공간을 만들어서 저온(약 60-70℃) 경화하는 방법을 선택한다.

이 방법에서 약간 변형된 방법으로 적층후 기포의 제거를 원활히 하고 보다 치밀한 재료의 적층을 위하여 진공을 걸어 주는 방법도 있다. 즉 대기압 정도의 압력을 가함으로써 잔류 기포나 과다 수지를 제거하고 압착을 통한 재료의 밀도를 증가시킨다. 이때 비 접착성 필름, 즉 PVA(polyvinyl alcohol)나 혹은 nylon 계를 적층물 위에 두고 모서리부분을 실란트(sealant)로 막는다. 진공을 적용한 상태에서 상온 혹은 열경화를 시킨다. 단순 hand lay-up에 비하여 보강섬유량이

증가하고 (50-60%) 층간의 접착이 보다 나은 제품을 얻을 수 있다. 압력을 가하는 방법으로는 autoclave를 사용할 수 있으나 대형 구조물을 수용하기는 경비가 많이 소요된다.

일부 블레이드 회사에서는 내부 심재와 외부 몰드사에 적층물을 두고 유압으로 압착하는 방법을 사용하여 60%정도의 섬유함량을 얻기도 한다. 고체형의 내부 심재 이외에도 고무로된 에어백을 사용하기도 한다.

또한 본 절에서 지적해야 될 것은 위에서 언급한 보강재와 수지를 동시에 취급하는 방법 이외에 미리 수지와 보강재가 준비된 상태의 중간재, 즉 prepreg를 사용하는 방법이 있다. 대개 prepreg는 작업성이 우수하고 균일한 품질의 제품을 만들 수 있으나 블레이드용으로는 초기 개발에는 사용하기 어려운 점이 있다.

반드시 열경화가 뒤따라야 되므로 wet lay-up 경우 보다 추가 설비가 소요된다.

실제 제품을 제조하기 위한 형 혹은 mold의 제조 또한 마스터 모델의 제조를 거쳐 FRP로 제조된다. Hand lay-up은 이러한 제조 특성 때문에 저가의 tooling비용, 설계 변경의 용이 및 크기의 제한이 없는 대신에 제품의 물성 및 품질이 낮다. Fig. 3에 기본 개념이 설명되어 있고 Fig. 4에는 실제 블레이드 제품의 제작 과정을 볼 수 있다.

4.2 Filament 및 tape winding

연속이면서 수지가 함침된 섬유 다발이 회전 멘드렐에 정한 패턴에 따라서 감기는 공정을 말한다. 충분한 적층이 이루어지면 오븐 혹은 상온 경화를 거쳐 멘드렐을 제거하여 제품을 만든다. 전통적으로 실린더 혹은 구형의 구조물, 즉 연료탱크, 파이프, 압력용기, 모터케이스 등의 대칭형 제품을 제조에 사용되는 방법이다. 하지만 제어기술의 발전으로 비대칭형 제품제조도 가

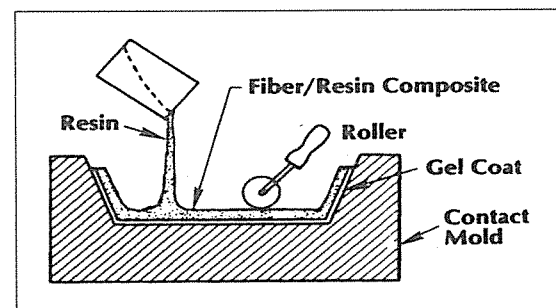


Fig. 3. Hand lay-up process

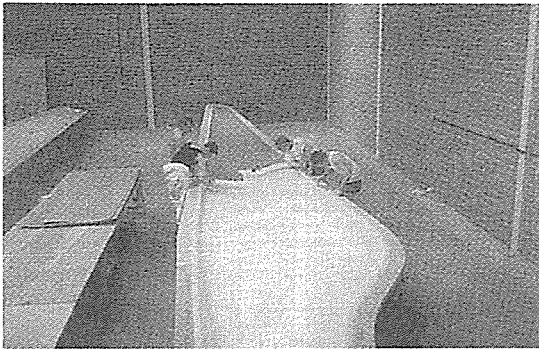


Fig. 4. Fabric lay-up on blade mold[10]

능하며 헬리콥터 꼬리 붐 및 블레이드, wind turbine blade 등의 제조도 가능하게 되었다. 풍력 발전기 블레이드 제조는 대개 튜브형의 spar를 감아서 만든 후 leading edge 및 tailing edge 펜드렐을 추가하여 그 위에 winding 작업을 수행하여 작업을 마감한다.

풍력 발전용 블레이드 제조법으로써의 본 방법의 장점은 비대칭형의 제품을 통합된 한 부품으로 제조가 가능하고, 자동화가 가능하여 노동력을 절약할 수 있고 hand lay-up 법에 비하여 균일한 품질의 제품 생산이 가능하다는 것들이다. 그 외에 보강 섬유량을 약 60-70%으로 유지함으로써 설계할 때 무게 감량에 유리하다.

반면에 단점은 초기 장비 및 설비 투자가 크다는 점이다. 또한 제품의 표면이 부드럽지 않기 때문에 2차 가공이 필요하다. 현실적으로 제품의 winding 각도에 제한(약 30°)이 있기 때문에 길이 방향으로 보강(polar ply)이 어떤 형태라도 이루어져야 한다. 이는 장비의 전용화를 요구하여 또 다른 투자를 필요로 한다.

길이 방향의 보강 문제를 해결하기 위하여 고안된 방법이 TFT(Transverse filament tapes)를 이용하여 감는 방법이다. 종래의 연속된 로빙사 대신에 일정한 폭(약 200mm)을 가진 tape를 감는 방법이다. 이 테이프는 섬유의 방향이 감기는 방향에 90도 방향으로 배열된 것이다. 이 TFT와 함께 hoop winding이 동시에 이루어져야 완전한 제품을 만들 수 있다. Fig 5는 이 방법을 도식적으로 나타낸 것이다.

4.3 RTM(Resin Transfer Molding)

RTM법은 spray-up 혹은 hand lay-up과 압축성형법의 중간 형태이다. RTM은 압축 성형법과 같이 제품의 양면이 몰드 면을 가지므로써 깨끗한 제품 표면을

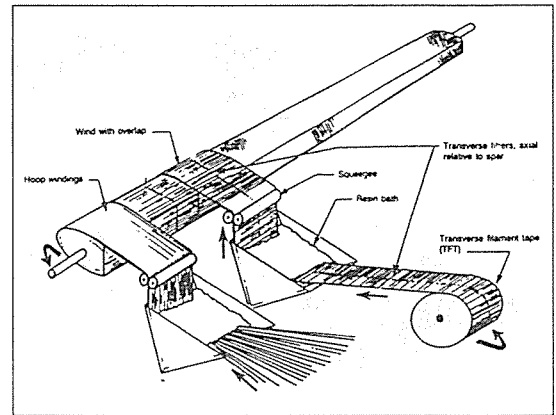


Fig 5. Transverse tape filament winding process from reference[11]

만들 수 있다. 이 방법의 원리는 보강섬유를 몰드에 적층하고 몰드를 체결한 후 액상 수지를 입히는 방법이다. Fig. 6은 간단히 나타낸 제조 방법이다. 몰드를 제작하는 방법에 따라서 소형에서 대형까지 제품을 제작할 수 있다. 또한 섬유의 배열도 설계자나 작업자의 임의로 할 수 있기 때문에 성능이 비교적 우수한 제품을 만들 수 있다.

또한 종래의 hand lay-up법에 비하여 VOC를 크게 줄임으로써 노동 생산성을 향상시킨다. 단지 hand lay-up 법에 비하여 preform을 제작하여야 생산성을 높일 수 있다. 일반적으로 고품질 RTM 제품의 섬유함유량은 40% 정도에 이르나 방법에 따라서는 60%까지 달성할 수도 있다. 이 방법은 주로 소형 블레이드 제작에 적용된 예가 있으나 대형 제품을 위해서는 다소 변형된 방법을 사용해야 한다.

그 대표적인 방법이 SCRIMP(Seamann Composites Resin Injection Molding Process)이다. 이는 일종의 진공 RTM법으로 대개 양면 몰드를 사용하는데 비해 한 면은 몰드면 한 면은 필름을 이용하여 밀봉 시스템을 형성시킨 후에 수지를 주입하는 방법이다. 미 TPI 사에서는 이 방법을 이용하여 17m에 이르는 블레이드를 제조하여 사용하였다.

4.4 기타 방법

기타 적용하였던 방법이나 가능성 있는 방법은 pultrusion 법, braiding 법, fiber placement 법 등이 거론될 수 있다. pultrusion 법은 일정한 형상의 금형을 통하여 fiber bundle을 통과시키면서 모양을 형성시키

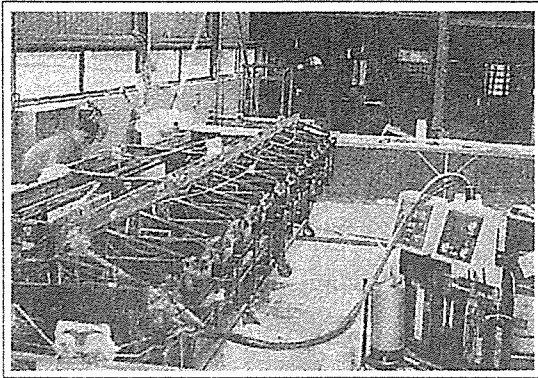


Fig 6. RTM process of turbine blades[12]

는 것으로 생산성이 높고 치수안정성이 있으나 대형형이 아닌 블레이드에 적용하기에는 문제점이 있어 활발히 사용되지 않고 있다. braiding법은 자체로써 한 방법을 나타내는 것은 아니지만 보강섬유를 배열하는 방법으로 preform을 제조하는 것이다. 블레이드 형상의 braiding이 가능하여 추후 몰드에서 수지를 주입하여 제조 가능하다. 제품의 균일성, 치밀성, 생산성 등에서는 상당히 우수한 방법이다. 하지만 타 제조법에 비하여 경제성이 떨어지므로 이방법의 사용은 드문 편이다. fiber placement법은 filament winding법과 유사한 방법으로 복잡한 형상을 따라서 섬유를 배열하는 방법으로 고성능, 정밀성 있는 제품의 제조에는 유리하나 경제성 면에서 불리하므로 적용 정도가 낮다.

이상과 같이 몇 가지 주요 제조 공법에 대하여 고찰을 하였다. 대개의 제조 업체에서 사용하는 방법은 hand lay-up, filament winding, RTM법이다. 이 중에서 hand lay-up법이 대중을 이루고 있으며 filament winding 및 RTM 법은 일부 회사에서 사용하고 있다. filament winding 및 RTM법이 hand lay-up법에 비교하여 우수한 방법이지만 성능 대 가격 등의 경제적인 면을 고려해서 주요 선진국에서는 생산비의 면에서 저렴한 미개발국의 노동력을 이용하므로써 hand lay-up법을 그대로 사용하고 있다. 따라서 대형 블레이드 개발 및 생산에 진입하는 우리 나라로써는 초기 대형 투자보다는 hand lay-up을 통하여 설계 및 제조 경험을 쌓고 생산성을 도모하는 방법을 추구하는 방향으로 사업을 진행시켜야 할 것으로 판단된다.

5. 국내의 현황 및 전망

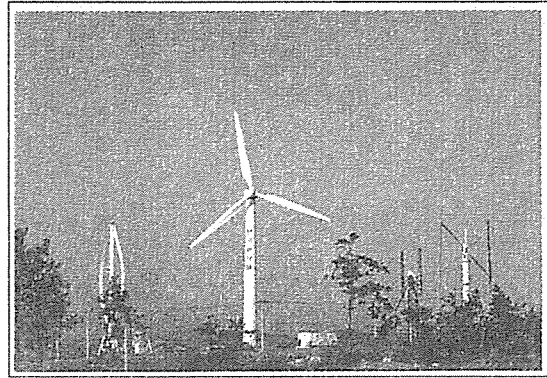


Fig. 7. Wind turbines in Muan wind farm: from the left 150kW Darrieus type, 550kW horizontal axis, 300kW and 50kW vertical axis wind turbine

5.1 국산 수직축 블레이드 재료

1975년 이후 풍력 발전에 대한 조사 연구 사업이 진행되었으나 본격적으로 국내 기술에 의한 복합재료를 이용한 실제 시스템의 국내 개발은 90년 초반 제1단계 수직축 풍력 발전 시스템 개발과 함께 시작되었다. Fig. 7은 개발된 국산 수직축 풍력 발전기 및 국산화 개발 예정인 것과 유사한 수평축 풍력시스템을 나타내고 있다.

국내 개발과 관련하여 대형 풍차 구조물에 기존 사용된 재료의 조사 및 분석은 필수적이라 하겠다. 이는 국내에서 생산될 복합재료 블레이드의 물성의 수준을 외국의 경우와 비교 평가할 수 있게 한다. 따라서 제1단계 수직축 풍력발전 시스템의 개발[13, 14]에 적용된 재료 및 공정들의 조사 및 분석을 Table 2 및 3과 같이 정리하였다. 수직축 풍력시스템용 블레이드 제작에는 유리섬유, 탄소섬유 및 에폭시 수지 시스템의 복합재료를 사용하였다. 두 시스템에서 블레이드 스파는 탄소섬유로 제작되었고 스킨은 carbon fabric 및 woven roving과 aluminum honeycomb core가 사용되었다. 이 재료는 250°F형 autoclave용 프리프레그이고 항공 우주용으로 사용되는 것이다. 50kW급의 경우 탄소섬유/에폭시 시스템만을 사용하여 제작하였고, 300kW의 경우 탄소섬유와 유리섬유를 혼용하였다. 두 시스템 모두 에폭시 수지를 사용하였다. 300kW의 트래버스(traverse)는 woven roving 및 surface fabric, 폴리우레탄 foam을 이용하여 제작하였다.

국내에서 사용된 블레이드 재료의 물성은 Table 4의 대표적인 덴마크의 wind turbine 재료의 물성보다

Table 2. 50kW wind turbine system data

50kW Vertical Axis Wind Turbine		
System Specification	Rotor Diameter	12m
	Cord Length	0.74m
	Blade Length	8.6
	정격 회전수	n/a rpm
	Airfoil	GA(W)-1
	No. of Blade	4EA
	CF3327/Epoxy Skin	12 ply
CF3327/Epoxy Materials	CF3327/Epoxy Spar	21ply
		[MPa]
	Tensile Strength	687
	Tensile Modulus	80.5×10^1
	Compr. Strength	421
	Flexural Strength	696
	Flexural Modulus	64.8×10^1

우수하다. 에폭시 수지 및 탄소섬유를 주스파에 사용하였고 유리섬유의 경우에도 autoclave법을 사용하여 보강섬유의 함량을 최대로 높여 항공기 구조물에 해당하는 품질의 재료를 사용하였다. 개발 초기의 위험 부담을 최소화 하기 위한 것이다. 추후 경험이 축적되고 대량 생산이 이루어지면 설계의 최적화를 통하여 저렴한 재료로 전환될 수 있을 것으로 판단된다.

외국에서 사용된 재료는 유리섬유 및 폴리에스터, 비닐에스터, 에폭시 수지이다.

이 재료들은 국내에서 생산되고 있으며 취급 경험이 충분히 있다. 단지 폴리에스터나 비닐에스터의 경우에는 저급제품의 제조에 집중적으로 사용되어 왔기 때문에 그 필요성이 대두되지 않았기 때문에 신뢰성 있는 데이터가 확보되어 있지 않다. 이는 제품의 재현성 및 품질 보증에 어려움이 있을수 있다. 하지만 이들 원재료의 가격이 낮기 때문에 개발자에게는 매력적인 재료이다. 에폭시 수지는 상대적으로 품질이 우수한 제품 개발에 사용되어 왔고 국내 우주 항공 분야의 복합재료 제품 개발에 사용되어 왔기 때문에 고성능 복합재료 부품을 생산하는 산업체에서는 경험이 비교적 많다. 따라서 수지 및 강화섬유의 선정은 개발자의 경험 및 개발 제품의 경제성을 고려하여 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5.2 제조 공법

국내에서 시도되었던 수직축 풍력 발전시스템용 블

Table 3. 300kW wind turbine system data

300kW Vertical Axis Wind Turbine				
System specification	Rotor Diameter	22m		
	Cord Length	2m		
	Blade Length	30m		
	정격 회전수	31rpm		
	Airfoil	NACA0018		
	No. of Blade	2EA		
Traverse	Sub blade	3×10m		
Urethane foam	Main spar	Carbon		
WR580/Surface	Skin	WR580		
fabric	Skin surface	Glass fabric		
Hand Lay-up(20ply)				
Postcure(autoclave)				
2t/core/2t				
Skin & Facing (Autoclave)	HG120(1)/WR580(2)/Al Honeycomb/HG120(1)			
	Adhesive film			
	Honeycomb	Aeroweb 5052.3.0-3/16-10		
Properties	HG120/RS1242	WR580/Epoxy	Carbon	
	Fabric/RS1222			
	Tensile strength [MPa]	299.03	414.17	1004.84
	modulus [GPa]	17.93	35.50	71.57
	Compression strength [MPa]	419.89	298.34	581.23
	modulus [GPa]	N/A	27.50	55.43
	Flexural strength [MPa]	565.03	408.03	683.68
	modulus [GPa]	N/A	22.27	51.64
	ILSS strength [MPa]	54.9	N/A	61.57

Table 4. Static test results of E-glass/Polyester materials of RIS
ø National Lab, Denmark[16]

Materials	Tensile Modulus [GPa]	Tensile Strength [MPa]	Ult. Strain [%]	Remarks
Glass/polyester	47.2	862	2.3	RIS ø Lab
Glass+Carbon /polyester	59.7	894	1.32	RIS ø Lab
Glass/polyester	23.8	445	2.13	Jotun Co.

레이드 제조는 autoclave에 의한 방법으로 블레이드는 작은 크기로 만든 후에 조립되었다. 수평축 블레이드는 같은 방법으로 제조할 수는 없으며 autoclave에 의한 방법은 제조 단가가 매우 높다.

4절에서 설명된 제조 공법은 국내 기술 수준으로 볼 때 모두 적용 가능한 방법이다. 수직축 및 진공법은 일

반적으로 복합재료 관련 업체에서 사용하는 방법이며 국내에서 생산되는 제품들에 이용되고 있다. Filament 혹은 tape winding(F/W or TFT)법은 전용 기계를 제작해야 가능한 방법이다. 국내에서 보다 정교한 F/W 제품을 개발한 경험이 있기 때문에 기술적인 문제는 없는 것으로 판단된다. 단지 블레이드 자체가 대형이기 때문에 자체적인 기계의 설계 및 제작, 경화 오븐 등의 제작이 필요한 실정이다. RTM법 역시 국내에서 정교한 항공기 부품의 제작 경험이 있기 때문에 사용 가능한 방법이다. 수지 주입 및 제어를 위한 RTM기계를 확보해야 한다.

제조 공법의 선택은 기술적인 노하우의 축적 정도와 개발 시기의 제품의 경제성을 고려하여 이루어질 수 있다. 소량의 제품을 개발하기 위하여 전용기계의 제작은 다소 회의적이다. 따라서 초기 개발 단계에서는 TFT나 RTM법보다는 수직층 및 진공법에 의한 제작법이 보다 성공 가능성이 높다고 판단된다.

수직층법에 의한 스파를 제작할 때 섬유 보강재의 함량을 높이며 경화 공정을 효과적으로 할 수 있도록 연구해야 한다. 앞전표피(leading edge skin)와 뒷전(trailing edge)을 제작할 때 샌드위치 적층판의 제작은 기존 항공기 부품의 제조 공법과 동일하므로 국내에서 보유한 기술로써 어려움을 없을 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

수직층 풍력 발전 시스템용 블레이드의 재료 및 제조 공법에 대한 문헌 조사 결과의 분석을 수행하였다. 조사된 국외의 주요 시스템의 블레이드 재료는 90% 정도가 경량재료이며 이중 대부분이 유리섬유 복합재료이다. 따라서 새로 국내에서 개발되는 블레이드 시스템은 유리섬유 복합재료를 이용해야 할 것으로 판단된다.

외국시스템의 경우 대개 유리섬유/폴리에스터 재료 시스템을 채택하고 있다. 하지만 유리섬유/에폭시 시스템을 적용하고 있는 제조 회사도 적지 않다. 복합재료의 구성 성분인 보강섬유와 기지재료의 선택은 경제성 및 개발자의 경험과 축적된 자료를 토대로 이루어져야 한다. 제조 공법도 세 가지 정도가 제시되었는데 초기 개발 단계에서는 수직층(hand lay-up)공법이 적용하기에 가장 용이한 방법으로 판단된다.

후후 투자를 통하여 생산성 향상을 이룰 수 있는 방법으로 점차적인 전환이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. M. Gougeon and M. Zuteck, "The Use of Wood for Wind Turbine Blade Construction," NASA Conference Publication 2106, DOE Publication CONF-7904111, A workshop Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, April 24-26, 1979.
2. George E. Dieter, Assessment of Research Readers for Wind Turbine Rotor Materials Technology, University of Maryland National Academy Press, 1991.
3. D. H. Bowen, C. W. A. Maskell, D. C. Phillipe, T. W. Thorpe, C. M. Wells and N. J. M. Wilkins, "Materials Aspects of Large Aerogenerator Blades", European Wind Energy Conference, 22-26, Oct., 1984, Hamburg FRG, pp. 281-287.
4. Geoff Eckold, Design and Manufacture of Composite Structures, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England, 1994.
5. D. Corbet, Investigation of Materials and Manufacturing Methods for Wind Turbine Blades, Garrad Hassan & Partners, 1993.
6. S. Frandsen, P. Hauge Madsen and J. C. Hansen, "What is the Difference Between a Large and a Small Wind Turbine?", European Wind Energy Conference, 22-26, Oct., 1984, Hamburg FRG, pp. 287-294.
7. F. L. Matthews and R. D. Rawlings, Composite Materials: Engineering and Science, Chapman & Hall, London, 1994.
8. D. A. Spera, Wind Turbine Technology, ASME press, 1994.
9. P. Gipe, Wind Power for Home and Business, Renewable Energy for the 1990s and Beyond, Chelsea Green Publishing Co., White River, Vermont, U.S.A., 1993.
10. Study of the Use of Wood-Composite Construction for Large Wind Turbine Rotors, Project Summary 090, Wind Energy/Composite Technology, Department of Energy, UK, first issued March 1992.
11. S. T. Peters, et al, Filament Winding Com-

posite Structure Fabrication, SAMPE International Business Office, P. O. Box 2459, Covina, CA 91722, 1991.

12. "RTM Hollow Mouldings: From Fiction to Fact", Reinforced Plastics, Elsevier Science Ltd, UK, Vol. 38, No. 4, Apr. 1994, pp. 34 - 37.

13. 조정미 외, 수직축 풍력 발전 시스템 개발과 설치 운용에 관한 실증 연구(II), 1993, 보고서 번호, 931G301-820DP1, (주)한국화이바, 통상산업부.

14. 조정미 외, 수직축 풍력 발전 시스템 개발과 설

치 운용에 관한 실증 연구(III), 1994, 보고서 번호, 941G301-820DP1, (주)한국화이바, 통상산업부.

15. 김종식 외, 수직축 풍력 발전 시스템 개발과 설치 운용에 관한 실증 연구(IV), 1995, 최종보고서 번호, 951G301-820DP1, (주)한국화이바, 통상산업부.

16. S. I. Andersen, H. Lilholt, Aa. Lystrup, "Fatigue Properties and Design of Wingblades for Windturbines," Final Report, Contract No: JOUR-0071-DK, Jan. 1994.