

## 경량화 복합재를 이용한 풍력 블레이드 개발과 해석에 관한 연구

강병윤\* · 한정영\*\* · 홍철현\*\* · 문병영\*\*\*\*

### A Study on Development and Analysis for Wind Turbine Blades Using Composites Materials

Byong-Yun Kang\*, Jeong-Young Han\*\*, Cheol-Hyun Hong\*\*, Byung-Young Moon\*\*\*\*

Key Words : BMS(Boeing Material Specification: 보잉 재료 규격), Prepreg(프리프레그), Blade(블레이드), Epoxy(에폭시), Fabric(패브릭), FEM(유한요소해석), Vibration Analysis(진동해석)

#### ABSTRACT

Wind turbine blades will be required to be longer, lighter, more reliable and more consistent. Therefore it is necessary to lose weight of the wind turbine blades. This points squarely toward prepreg blade production growing. It is important to note however that prepreg blade production as it is today is flawed and that there are ways to improve greatly on the performance of these blades in manufacturing process and in their in-service performance. Through this, we have some detail on the current process and its advantage of cost and weight of blades.

#### 1. 서론

새로운 복합재료는 재료의 효율적인 조합에 의하여 구조물의 중량감소와 피로하중에 대한 높은 내구성, 안정성, 내열성 등의 이유로 해양구조물<sup>(1)</sup>, 항공우주<sup>(2)</sup> 부품 등에 사용되어 왔다.

최근에는 신재생에너지 분야의 풍력발전시스템과 같은 첨단 신소재산업에 적용되어 미래 유망 거대산업으로 각광받고 있는 실정이다. 이러한 복합재료는 응용범위가 넓고, 선도적 기술혁신을 통한 타 산업으로 연계 파급효과가 매우 클 뿐만 아니라 기술적 우위를 확보하기가 어려운 대형 산업이다<sup>(3)</sup>.

풍력발전시스템에서 블레이드는 바람이 가진 에너지를 회전력으로 변환시켜 주는 회전익으로 가장 중요한 요소이며, 풍력발전기의 대형화 추세 속에 경제성과 신뢰성을 높이는 것이 가장 큰 관건이라 할 수 있다. 이에 풍력발전시스템의 블레이드에 사용되는 복합재료는 몇몇 선진국에 한해 개발된 상태이고, 이의 제조 및 응용기술은 각 나라마다 국가적인 차원에서 보호하는 실정이어서 일부 업체들에 의하여 독

점 생산 및 고가로 판매되고 있다.

따라서 본 논문에서는 국외 선진 풍력발전시스템 블레이드 개발업체에서 적용되고 있는 프리프레그(Prepreg) 공법을 소개하고 내구성, 안정성 및 비용적인 측면에서 제품 경쟁력 등을 보고하고자 한다. 그리고 유한요소해석을 이용하여 복합재 블레이드의 고유진동수를 수행하였다.

#### 2. 프리프레그 종류

일반적인 프리프레그 재료의 원료로 사용되는 수지인 에폭시는 여러 종류가 있으나 일반적으로 2-3종류의 에폭시를 혼합하여 물성을 향상시켜 적용되고 있다. 특히, 최근 적용되고 있는 재료의 350°F용 수지의 물성이 대단히 중요하며 수지의 경화 물성이 우수해야 하고, 내열성과 고온에서 소재의 Toughness 향상을 위한 강인화제의 에폭시 수지를 사용한다<sup>(4,5)</sup>. 그리고 적용되는 탄소섬유는 일본의 TORAY와 TOHO-TENAX 그리고 국내에서는 한국 화이버의 12K Carbon 과 3K Carbon을 주로 사용한다. 주로 사용되는 350°F 경화형 에폭시 수지 및 탄소섬유는 다음과 같이 정리할 수 있다.

##### 2.1 고온경화용 에폭시수지

· EPIKOTETM Resin 497(4-관능성 에폭시 수지)

\* (주)도하인더스트리 기술연구소

\*\* 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터

\*\*\* 군산대학교 조선공학과

† 교신저자, E-mail : moonby20@gmail.com

- EPIKURETM Curing Agent 962(방향족 아민계 경화제, DDS)
- Boron Trifluoride Monoethylamine(BF<sub>3</sub>-MEA, 경화촉진제)

### 2.2 탄소섬유

- 12K Carbon Fiber : Toray T700-12K 1000kg
- 3K Carbon Fiber : Toray 3K 평직 150 m<sup>2</sup>E
- Toho - Tenax : 3K 평직 300 m<sup>2</sup>

## 3. 프리프레그 제작

Tape 형태의 프리프레그는 Hot Melt System에 의한 UD Machine에 의해 제조할 수 있는데 UD Machine의 구성은 탄소섬유를 감고 냉각시키는 부분과 수지를 Coating하는 부분 그리고 모든 공정을 조정할 수 있는 Control 부분으로 구분할 수 있다. 프리프레그는 코팅 방식에 따라 분류되며 그 특성은 다음과 같이 구분될 수 있다.

### 3.1 Solvent 프리프레그

복합재료 강화재에 액상의 수지를 함침하여 건조로를 이용하여 경화 일반적으로 직조한 직물에 적용한다. 예) 절연판, 내장재, 연마용, 항공용 등

### 3.2 Hot Melt 프리프레그

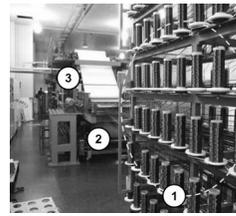
복합재료 강화재에 R/P(Resin Paper)와 톨라를 이용하여 열간압착 하는 방식으로 경화하며 일반적으로 일방향성(UD) 직물에 적용한다. 예) 낚시대, 골프 샤프트, 우주항공 기타 특수산업 분야

### 3.3 제조과정

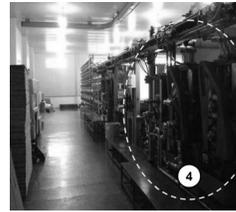
Fabric 프리프레그 제조과정은 수지제조 → 온도설정 → 원단장착 → 원단본딩 → 원단완충 → 실란처리 → 실란건조 → 수지함침 → 수지건조 → 권취피딩 → 권취완충 → 권취조정 → 권취시작 → 제품검사 → 제품측정 → 물성검사로 이루어지며, 제작의 최적조건은 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Carbon/Epoxy Fabric Prepreg producing optimized conditions

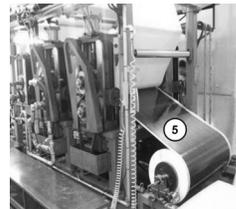
Fiber / matrix	Spec.				R/C (%)
	velocity (M/min.)	viscosity	temperature(°C)		
			treatment	coating	
Carbon Fabric Epoxy 350°F	2.5	6.5초	120	75, 55, 100, 115	36.0



① Carbon Fiber Creel Stand  
② Film  
③ Resin Paper



④ Impregnation



⑤ Tape prepreg product

Fig. 1 Equipment and prepreg product

Table 2 Carbon/Epoxy Tape Prepreg product properties

R/C (%)	Thickness (mm)	CF wt(g/m <sup>2</sup> )	Resin wt(g/m <sup>2</sup> )	Total wt(g/m <sup>2</sup> )
34±2	0.148	150	77	227

탄소섬유와 350°F 경화형 에폭시 수지를 이용하여 350°F 경화형 Carbon/Epoxy Tape 프리프레그 제작에 사용된 설비 및 그 제품의 예를 Fig. 1에 나타냈으며 물성을 Table 2에 나타내었다.

## 4. 풍력 블레이드 복합재 적용

블레이드는 풍력터빈의 출력 발생원인 동시에 시스템에 부담이 되는 하중 발생원이기 때문에 우수한 블레이드는 동일 출력 하에서 가능한 낮은 하중을 유발하도록 설계되어야 한다.

동등 출력의 블레이드에서 유발되는 하중은 블레이드의 중량 및 공탄성적 특성에 가장 크게 영향을 받기 때문에 블레이드 경량화와 함께 하중저감형 특성을 갖도록 블레이드를 설계하는 기술이 매우 중요하다. 따라서 경량화와 하중저감으로 블레이드에서 유발되는 하중이 경감되면 블레이드 자체의 소재 비용 절감, 시스템에 미치는 하중 부담의 감소에 따른 메인샤프트, 베어링, 증속기, 낫셀 구조, 타워 같은 시스템 주요 구성품의 크기를 최소화할 수 있기 때문에, 풍력발전시스템 전체의 가격 및 내구성에 미치는 파급효과가 매우 크다고 할 수 있다<sup>(3)</sup>.

블레이드의 중량 및 하중에 가장 큰 영향을 미치는 인자

중 하나가 바로 블레이드의 구성 소재이며, 현행 기술에서는 비용 문제로 인해 저가의 유리섬유/에폭시가 주로 쓰이며, +3MW급의 초대형 블레이드에서는 국부적으로 고가의 탄소 섬유/에폭시를 적용하고 있다.

하이브리드소재적용기술에서는 최근 개발되고 있는 다양한 복합 소재들에 대해 블레이드 적용 타당성을 검증하고, 비용대비 성능을 극대화시킬 수 있는 소재의 혼합 적용 방법에 대한 연구를 통해 비용 증가를 최소화하면서 블레이드 중량을 획기적으로 낮출 수 있는 기술을 개발하고 있다.

#### 4.1 경량화 블레이드 성형 및 제작 기술

블레이드 제작 기술은, 블레이드의 고효율, 저소음, 경량화 등을 위해 도출된 최적화 된 블레이드의 형상 및 구조 설계를 실물로 구현하는 기술로서, 제작 상에서 유발되는 설계와 실물(제품)과의 공차를 최소화하기 위한, 즉 제조 기술의 고 신뢰성 및 고 생산성을 확보하기 위한 제조 기술의 개발이 필요하다.

또한 노동 집약적인 산업 분야를 탈피하기 위한 생산성 향상을 위한 관련 설비의 개발 및 효과적인 생산성을 고려한 블레이드 구조 설계와 연계된 공정 설계가 고려되어야 한다<sup>(7)</sup>.

Carbon fiber의 가격이 Glass fiber의 가격에 10배 이상이며, 전 세계적으로 수급이 원활하지 못한 상황이기 때문에 기존 Glass/epoxy 복합재료를 Glass fiber보다 가볍고 강도 및 강성이 우수한 복합재료로 대체하는 것이 대안이라고 할 수 있다.

따라서 Glass/epoxy 복합재료에 Carbon fiber 혼용 사용하는 Glass/carbon fiber hybrid 성형 기술 개발이 필요하다.

경량 블레이드 개발의 또 다른 관점은 블레이드 구조 설계의 과도한 안전계수를 낮추는 것으로, 최적화 구조 설계 및 블레이드 성형 공정에 따라 달라지는 복합재료의 정확한 물리적 특성을 반영 하는 것이 필요하며, 이러한 복합재료의 물리적 특성은 성형 공법의 특징과 공정 control 기술에 의해 달라진다. 특히 공정 control기술에 의해 블레이드 구조물의 기계적 특성(무게 및 강도 등)의 편차가 크게 발생한다.

국내에서는 과거 효성의 750kW급 시스템 개발과제에서 KM, 서울대, 한국기계연구원, 에너지기술연구원이 해외기술의 지원 없이 국내 독자기술로 블레이드 설계 및 경량화를 위해 노력하였으나, 성공적인 개발이 이루어지지 못했다. 그리고 유니슨의 750kW급 시스템 개발과제에서 한국화이바와 포항공대가 유럽의 Design consulting 회사로부터 설계를 지원받아 국내 제작하는 형태로 개발을 진행하였으나 경량화에 초점을 둔 기술개발은 미흡한 실정이다. 현재 개발 완료된 유니슨의 2MW급 블레이드 역시 유럽의 설계를 지원받아 국내 KM이 제작하는 방식으로 개발되어 국내에서 설계/해석 기술에 대한 기술 개발은 미흡한 단계이다. 한국화이바는 1996년에 300kW, 2001년 750kW급 블레이드를 프리프레그 적층방식으로 제조한 경험이 있으며, 도하인더스트리

는 B777 FSF 등 프리프레그를 이용한 항공기 부품 생산업체로 프리프레그 성형 기술을 확보하고 있으며, 영국의 Blade dynamics와 MOU를 체결하여 블레이드 사업을 시작하여 현대로템과 2MW급 블레이드 개발을 진행하고 있다.

세계 풍력 블레이드 시장을 선점하고 있는 선진 국의 업체의 경량화 블레이드 기술은 업체와 적용방법에 따라 다음과 같이 크게 3가지로 분류할 수 있다.

- Polyester(LM Glasfiber)
- Epoxy infusion(All other manufactures)
- Prepreg(Vestas and Gamesa)

#### 4.2 경제성 분석

블레이드 성형을 위한 세부기술로는 원자재 선정과 적층 기술, 경화기술 및 이를 총괄하는 제작 공정기술이 세부적인 기술이며, 블레이드의 크기와 용도 생산수량 등으로 기술적, 경제적 측면을 고려하여 공법을 선택하므로 성형 및 제작에 필요한 경제성 분석기술 또한 고려하여야 한다.

아래의 Fig. 2는 에폭시로 제작된 블레이드의 로터직경 대비 중량에 대한 자료를 보여주고 있다. 에폭시 Infusion은 다소 오차가 있는데, 이는 다양한 종류의 많은 블레이드가 제작되고 있고, 공정방법에 따라 중량이 달라질 수 있기 때문이다. 기본적으로 에폭시 Infusion은 프리프레그에 비해 블레이드의 중량이 많이 나가는 것을 알 수 있다.

Table 3에서는 현재까지 개발된 에폭시 Infusion 방식으로 제작된 블레이드 가격을 보여주고 있으며, 프리프레그 대비 에폭시 Infusion은 Resin 주입에 있어 조절이 힘들고, 40~50% 이상의 많은 부산물이 동반하는 단점이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 프리프레그는 비용과 직결되는 중량을 최소한 50%는 줄일 수 있는 장점이 있다<sup>(7)</sup>.

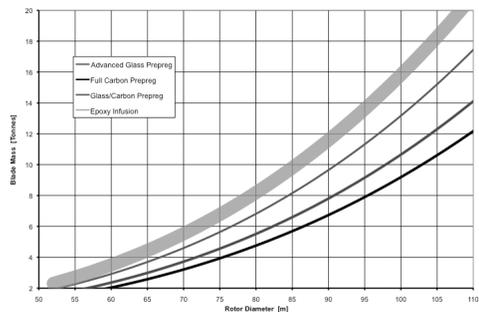


Fig. 2 Blade mass extrapolation

Table 3 Epoxy infusion cost

Machine (MW)	Blade Length(m)	Blade Mass(kg)	Blade Value(\$)	(\$/kg)
0.75	25	2360	55000	23
1.5	36	5216	110000	21
3	47	12474	275000	22

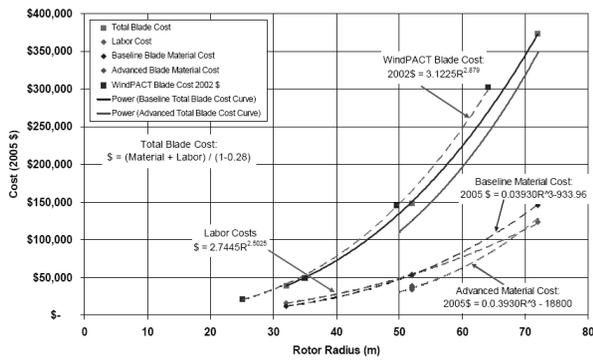


Fig. 3 Cost for large wind turbine blades, TPI

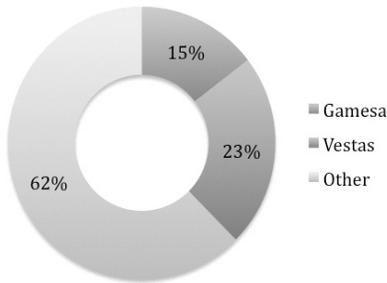


Fig. 4 Vestas and Gamesa made 38% of the worlds turbines in 2007

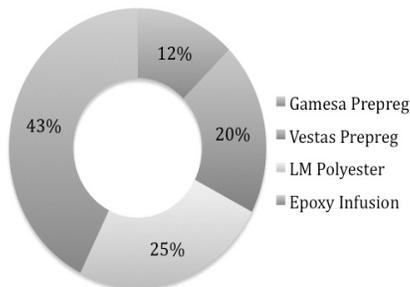


Fig. 5 32% of the MW installed in 2007 had prepreg blades

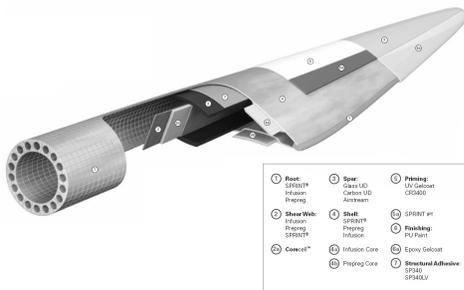


Fig. 6 Structure of Wind-turbine Blade

현재까지 구체적인 프리프레그를 적용한 블레이드의 가격은 시장에서 공개된 것은 없지만, 전체적인 블레이드의 중량 감소와 불필요하게 버려지는 부산물을 줄일 수 있는 것을 고

려할 때, 전체적인 가격은 낮을 것으로 추정하고 있다.

전체적인 중량 감소에 따른 피로하중 경감으로 인한 부수적인 유지비 감소에 대한 장점과 우수한 성능의 표면코팅처리가 가능하여 처음뿐만 아니라 수명이 다하는 동안 그 유지비용이 적어 환경적 열화에 대한 뛰어난 내성과 낮은 오염물 부착, 안정적인 저비용의 장점 또한 가진다. Fig. 3은 이러한 장점을 고려하여 적용된 소재에 따른 블레이드 제작비용을 도시화 하였다<sup>(7)</sup>.

### 4.3 풍력 블레이드 경량화 소재 적용 추이

프리프레그 블레이드는 품질 및 신뢰성에서 에폭시 Infusion 블레이드보다 월등하게 우수하여, 블레이드의 파손에 대한 위험을 감소할 수 있다. 향후 블레이드 크기의 대형화 추세에 따른 재료의 신뢰성이 더욱 부각되고 있다.

이러한 요구조건에 따라 Fig. 4와 Fig. 5에 보이는 것처럼 2007년 세계 풍력 블레이드 시장 중 38%를 점유하고 있는 선진 국의 업체 Vestas사와 Gamesa사에서는 2007년 설치된 풍력발전 용량(MW)의 32%에 해당하는 블레이드를 프리프레그로 제작하였다<sup>(7)</sup>.

향후 2020년까지 세계적으로 1000GW의 풍력발전시스템의 설치가 이루어질 것으로 전망되며, 프리프레그 블레이드가 30% 이상의 시장을 점유할 것으로 예측된다. 그리고 2012년까지 블레이드 시장은 금액으로 \$12bn, 이중 프리프레그 블레이드가 \$3.6bn을 차지할 것으로 예측된다.

## 5. Preperg 풍력 블레이드 CAE 해석

### 5.1 Preperg 풍력 블레이드 구조

프리프레그 복합재의 우수한 물성치로 인해 풍력 블레이드 적용에 관해 이전부터 많은 연구가 진행되어 왔다.

블레이드의 기본 구성은 외부의 스킨(Skin), 내부의 웨어 웹(Shear web), 스파 캡(Spar Cap) 등으로 구성되며 Fig. 6에 블레이드의 기본 구조를 나타내었다. 웨어 웹과 스파 캡은 대부분 Glass-Epoxy로 사용되고 있지만 외국의 경우 점차 대형화에 따른 경량화의 목적으로 인해 고가의 Carbon-Epoxy로 바뀌고 있다.

### 5.2 유한요소해석

유한요소해석을 수행하기 위해 블레이드의 스킨은 UD (Glass), 웨어 웹과 스파 캡은 Glass-Epoxy, Carbon-Epoxy 재료가 사용되었으며 재료 물성치는 Table 4에 나타내었다.

일반적으로 블레이드의 두께는 바람에 의한 모멘트의 영향을 감소시키기 위해 블레이드의 뿌리 부분은 두껍고 끝단으로 갈수록 얇아지는 구조이다. 따라서 블레이드 스킨의 위치별 적층 순서 및 적층 두께를 Fig. 7과 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Material Properties of Blade

	UD(Glass)	Glass-Epoxy	Carbon-Epoxy
E <sub>11</sub> (MPa)	43,100	39,000	142,000
E <sub>22</sub> (MPa)	13,200	8,600	10,300
E <sub>33</sub> (MPa)	13,200	8,600	10,300
ν <sub>12</sub>	0.24	0.28	0.27
ν <sub>23</sub>	0.45	0.47	0.46
ν <sub>13</sub>	0.24	0.28	0.27
G <sub>12</sub> (MPa)	3,620	3,800	7,200
G <sub>23</sub> (MPa)	4,550	2,930	3,520
G <sub>13</sub> (MPa)	3,620	3,800	7,200
ρ (kg/m <sup>3</sup> )	1,939	2,100	1,580



Fig. 7 Blade Regions according to Variable Lay-up Pattern & Thickness

Table 5 Lay-up Pattern & Thickness of Blade Skin

	Thickness[mm]			Region
	±45°	0°	0°/90°	
[±45°/0°/0°/90°] <sub>s</sub>	4×0.9(1)	52×0.9	4×0.9	⑤
	4×0.9	40×0.9	4×0.9	④
	4×0.9	28×0.9	4×0.9	③
	4×0.9	12×0.9	4×0.9	②
	4×0.9	8×0.9	4×0.9	①

쉐어 웹과 스파 캡의 재료 물성치는 Glass-Epoxy와 Carbon-Epoxy 두 가지의 경우로 각각 적용하여 비교하고자 하였다. 쉐어 웹과 스파 캡의 적층 순서 및 적층 두께를 Table 6에 나타내었다.

블레이드의 고유 진동수와 모드 형상을 파악하여 공진 여부나 진동에 의한 변형 형상을 예측하기 위해 모달(Modal) 해석을 수행하였다. 복합재 재질에 따른 모달 해석 결과를 Table 7에 나타내었다.

Glass-Epoxy와 Carbon-Epoxy의 경우, 모달해석 결과 6.4~13.5%의 오차가 발생하였다. 실제 적용된 블레이드는 정격 작동주파수가 0.278로서 유한요소해석으로 얻어진 세

Table 6 Lay-up Pattern & Thickness of Shear Web & Spar Cap

	Thickness[mm]			Remarks
	±45°	0°	90°	
[±45°/0°/0°/90°] <sub>s</sub>	6×0.9	3×0.9	3×0.9	Shear Web
	6×0.9	3×0.9	3×0.9	Spar Cap

Table 7 Results of Modal Analysis

Mode	Type 1	Type 2	Error
	Glass/epoxy	Carbon/epoxy	%
1	0.023	0.026	13.0
2	0.060	0.064	6.7
3	0.071	0.079	11.3
4	0.144	0.163	13.2
5	0.172	0.183	6.4
6	0.251	0.285	13.5

개의 저차 모드(1~3)값은 3.9~12배이다. 따라서 공진에 대해 안전하게 설계된 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

(1) 신재생 에너지 분야에서의 프리프레그 적용 풍력 블레이드의 경량화 기술은 향후 세계 풍력 블레이드 시장을 주도할 것으로 예상되므로 반드시 국내에서 다양한 연구개발 및 산업기반이 마련되어야 할 것으로 보며, 이러한 첨단소재의 신뢰성 증대를 위한 원천기술의 개발은 국내 에너지 분야의 유지보수 비용의 감소를 통해 풍력 발전단지를 운영하는 운영사의 단지 유지보수 비용의 감소와 이익 증대를 발생시켜 풍력발전의 보급 확대를 위한 기반이 될 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 쉐어 웹과 스파 캡이 Glass-Epoxy와 Carbon-Epoxy의 경우, 모달 해석 결과 6.4~13.5%의 오차가 발생하였다. 실제 적용된 블레이드는 정격 작동주파수가 0.278이므로 유한요소해석으로 얻어진 세 개의 저차 모드(1~3)값은 약 3.9~12배 이다. 따라서 공에 대해 안전하게 설계되었다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 2008NWD12P0200002009)

## 참고문헌

- (1) 김윤해, 배창원, 1999, "복합재료를 이용한 조선기자재의

- 개발,” 기계저널, 제39권, 제2호, pp. 54-59.
- (2) 김태욱, 홍성혁, 1999, “항공기용 복합재료,” 기계저널, 제39권, 제2호, pp. 37-42.
- (3) 지식경제부, 2008, “차세대 블레이드 개발,” 기획보고서.
- (4) Boeing Material Specification, 2002, “Advanced Composites-350F Cure Toughened-Epoxy Preimpregnated Carbon Fiber Tapes and Fabrics,” BMS 8-276G.
- (5) Boeing Material Specification, 2009, “Carbon Fiber Reinforcements, Yarn and Fabrics,” BMS 9-8J, 2004.
- (6) 강병윤, 손창석 외, 2009, “BMS 인증기준에 따른 구조용 CFRP 개발,” 한국해양공학회지, 제23권, 제2호, pp. 92-97.
- (7) Blade Dynamics, 2008, “Prepreg Blade Market Report”.