

## 論文

## 500W급 풍력발전기 복합재 블레이드의 설계 및 충격손상 안전성 연구

공창덕<sup>\*,†</sup>, 최수현<sup>\*</sup>, 박현범<sup>\*</sup>, 김상훈<sup>\*</sup>

## Investigation on Design and Impact Damage for a 500W Wind Turbine Composite Blade

Chang-Duk Kong<sup>\*,†</sup>, Su-Hyun Choi<sup>\*</sup>, Hyun-Bum Park<sup>\*</sup>, and Sang-Hoon Kim<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

Recently the wind energy has been alternatively used as a renewable energy resource instead of the mostly used fossil fuel due to its lack and environmental issues. This work is to propose a structural design and analysis procedure for development of the 500W class small wind turbine system which will be applicable to relatively low speed region like Korea and for the domestic use. The wind turbine blade was performed structural analysis including stress, deformation, buckling, vibration and fatigue. In addition, the blade should be safe from the impact damage due to FOD(Foreign Object Damage) including the bird strike. MSC.Dytran was used in order to analyze the bird strike phenomena on the blade, and the applied method Arbitrary Lagrangian-Eulerian was evaluated by comparison with the previous study results. Finally, the structural test was carried out and its test results were compared with the estimated results for evaluation of the designed structure.

## 초 록

최근 화석 연료가 고갈됨에 따라 대체 에너지 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 대체 에너지들 중 풍력 발전기는 바람의 에너지를 전기적 에너지로 바꾸어 주는 시스템으로 매우 친환경적이기 때문에 다양하게 연구되고 있다. 따라서 본 연구의 목표는 500W급 소형 풍력 발전용 블레이드의 개발로서 외국에 비하여 상대적으로 풍속이 낮은 국내와 같은 지역에 적용할 수 있도록 설계 되어야 한다. 본 논문에서는 피로수명을 고려한 고효율 경량화 블레이드의 공력설계 및 구조설계 방법이 제안되었으며, 구조해석으로 선형 정적해석, 좌굴해석, 진동모드해석이 수행되었다. 또한 풍력 발전 시스템에 발생할 수 있는 유체충돌해석을 모사하였다. 해석결과들은 유압시험장비를 이용한 구조시험 및 성능시험의 결과와 비교되었고, 비교적 잘 일치하여 설계결과와 안전성을 확인하였다.

**Key Words** : 풍력발전 블레이드(Wind Turbine Blade), 샌드위치 복합재(Sandwich Composite), 구조설계 및 공력설계(Structural and Aerodynamic Design), 조류 충돌(Bird Strike), 충돌 해석(Impact analysis)

## 1. 서 론

최근 화석 연료가 고갈됨에 따라 대체 에너지 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 풍력 발전시스템은 바람의 에너

지를 유용하게 사용할 수 있도록 전기적 에너지로 바꾸어 주는 시스템으로 매우 친환경적이기 때문에 다양하게 연구되고 있다. 현재 세계의 풍력 발전 시스템은 출력대형화 추세이나 대형 풍력 발전 시스템은 대규모 단지 조성 등 국가적 차원의

\* 조선대학교 항공우주공학과, 교신저자(E-mail:cdgong@chosun.ac.kr)

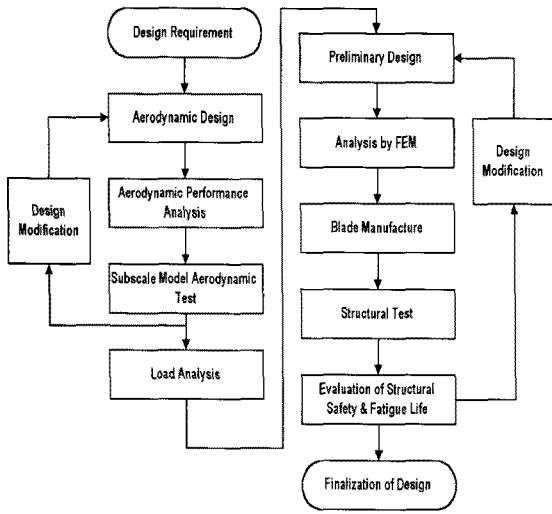


Fig. 1 Flow of aerodynamic and structural design.

지원이 이루어져야 하는 단점을 가지고 있다. 반면 소형 풍력은 소규모로 독립적 운용이 가능하므로 최근 관심 있게 연구되어 가고 있다[1, 2]. 또한 복합재료를 사용하게 되면서 구조적 강도 및 피로 수명이 크게 향상 되었다. 그런데 기존의 풍력 발전시스템들이 대부분 선진국에서 개발되어온 형태로서 소형 풍력 발전시스템의 정격 풍속은 대부분 국내의 기상에 적합하지 않아 국내 기상에 알맞은 풍력 발전시스템 개발이 요구된다[1, 2].

본 연구에서는 국내 기상과 같이 저 풍속인 지역에서 우수한 성능을 발휘할 수 있고 가정에서 운용이 가능하도록 500W급 수평축 블레이드의 공력 및 구조 설계를 수행한 후 구조 시험 및 성능 시험을 수행하여 해석 결과와 비교하였다. 적용된 재료는 경제적이면서 성능이 우수한 Glass/Epoxy가 적용되었다[3].

## 2. 블레이드 설계

설계는 공력 설계를 수행한 후 구조 설계를 수행하였다. 먼저 설계 요구 조건으로부터 블레이드의 크기 및 비틀림 각, 깃 끝 속도비 등의 공력 설계를 수행하고, 공력 해석 및 공력 실험을 통하여 요구 성능 만족 여부를 검토한 후 설계를 개선하거나 확정하게 된다.

공력 설계 완료 후 구조 설계 요구 조건을 분석하여 구조 설계 하중을 산출하고 이를 바탕으로 구조 설계를 수행한다. 구조 설계 결과는 변형을 및 응력분포를 확인하기 위한 정하

중 해석, 고유 진동수 해석, 좌굴 해석, 피로수명 해석을 수행하여 블레이드에 대한 안전성을 판단한다. 다음으로 시제품을 제작한 뒤 구조 시험을 수행하여 구조 해석 결과와 비교를 통해 해석 결과의 타당성을 검증하고 설계를 확정하게 된다. Fig. 1은 이러한 설계 절차를 보여준다.

### 2.1 블레이드 공력 설계

본 연구 대상 풍력 발전 시스템은 수평축 풍력 발전 시스템으로서 정격 출력이 500W이며, 정격 풍속은 8m/s이고, 블레이드의 직경은 2.5m이다[4]. 기타 세부적인 공력 설계 결과는 Table 1에 명시하였으며 공력 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 적용된 에어포일은 양향비고 높고 구조적으로 충분히 두꺼운 DU 93-W-210이다.

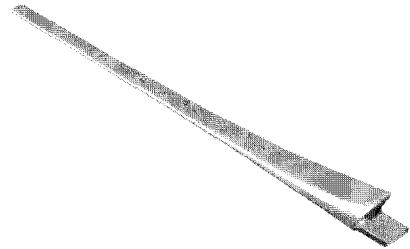


Fig. 2 Blade aerodynamic configuration.

Table 1 Aerodynamic design results of small wind turbine blade

Rated power	500W
Rotor radius	1230m
Blade root chord	149.208mm
Blade tip chord	42.727mm
Blade total twist	24.353deg
Airfoil	DU 93-W-210

#### 2.1.2 공력 성능 해석

공력해석은 설계된 블레이드의 설계 요구 성능 만족 여부를 검토하기 위해 수행되었고 이를 위해 Betz의 이론과 깃 요소 이론을 바탕으로 다음과 같은 절차 및 방법을 적용하였다[4]. 출력계수( $C_p$ )는 다음과 같이 정의하여 계산한다.

$$C_p = \frac{2M \times \lambda_0}{\rho S V_1^2 R} \quad (1)$$

그리고 기계적 출력(P)과 전기적 출력( $P_e$ )은 다음 식을 이용하여 계산한다.

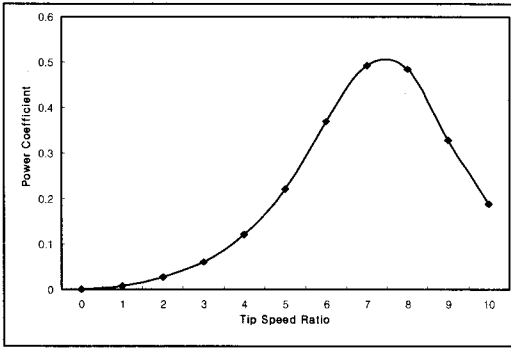


Fig. 3 Power Coefficient vs. Tip Speed Ratio.

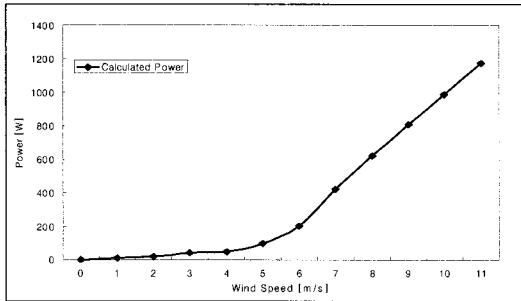


Fig. 4 Power of aerodynamic analysis.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p S V^3 \tag{2}$$

$$P_c = \eta_g P \tag{3}$$

여기서 M은 모멘트, R은 회전 반경,  $\rho$ 는 공기밀도,  $V_1$ 는 풍차를 지나가기 전 바람의 속도,  $\lambda_0$ 는 깃 끝 속도비,  $\eta_g$ 는 발전기 효율이다.

성능 해석 결과 깃 끝 속도비 7에 대해서 동력계수는 최대 값을 가지며 그 외의 다른 깃 끝 속도비에서는 현저하게 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 3은 깃 끝 속도비에 대한 동력계수의 변화를 분석한 것이고 Fig. 4는 동력계수를 이용하여 계산된 블레이드 출력곡선으로서 정격풍속인 8m/s에서 요구 출력인 500W에 비하여 669W로 블레이드의 공력설계 요구 조건을 충분히 만족함을 확인하였다.

## 2.2 블레이드 구조 설계

### 2.2.1 구조 설계

구조 설계를 위한 블레이드에 작용하는 하중은 공력하중과

Table 2 Load cases for structural design

Load case	Case 1	Case 2	Case 3
Reference wind speed	8m/s	20m/s	55.0m/s
Gust condition ( $\pm 20$ m/s, $\pm 40^\circ$ )	without gust	with gust	storm
Rotational speed	433rpm	1069rpm	stop

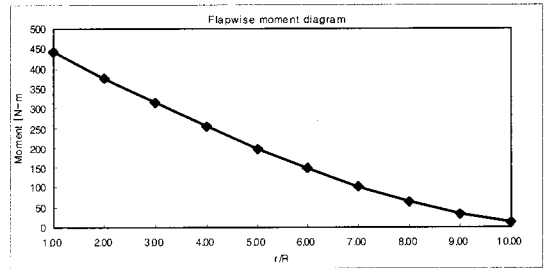


Fig. 5 Moment diagram for Load Case 2.

Table 3 Mechanical properties of materials used in the present blade design

	Glass/Epoxy Fabric	Polyurethane Foam
$E_{11}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10500	60.86
$E_{22}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	10500	59.86
$G_{12}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1450	19.18
$\nu$	0.27	0.2
$X_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	283.9	2.63
$X_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	184.6	1.41
$Y_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	283.9	2.49
$Y_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	184.6	1.41
$S$ [N/mm <sup>2</sup> ]	15.0	0.71
$S$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1.705	0.1197
Ply thickness[mm]	0.25	12.5

원심하중이 주하중으로 작용한다. 원심하중은 유한 요소 해석 단계에서 구조 해석 모델에 회전수를 고려하여 적용할 수 있고, 계산되어야할 공력하중은 IEC 1400-1에 따라 Table 2와 같은 하중 조건을 정의하였다. 하중 해석 결과 하중 Case 2에서 블레이드에 가장 큰 모멘트를 발생시킴을 확인하여 구조 설계 기준으로 정의하였다. Fig. 5는 구조 설계 기준이 되는 하중 Case 2의 하중 해석 결과를 보여주고 있다.

하중 Case 2를 바탕으로 구조적 강도와 경량화를 위해 블레이드의 구조 형상은 Skin-Spar-Foam 샌드위치 구조 형태를 채택하여 설계하였다[4].

Table 4 Structure design results

	Thickness(mm)			
	Upper surface		Lower surface	
1	Skin1.00t	Spar6.75t	Skin1.00t	Spar6.75t
2	Skin1.00t	Spar2.25t	Skin1.00t	Spar2.25t
3	Skin1.00t	Spar2.7t	Skin1.00t	Spar2.7t
4	Skin1.00t	Spar3.15t	Skin1.00t	Spar3.15t
5	Skin1.00t	Spar3.15t	Skin1.00t	Spar3.15t
6	Skin1.00t	Spar3.15t	Skin1.00t	Spar3.15t
7	Skin1.00t	Spar3.15t	Skin1.00t	Spar3.15t
8	Skin1.00t	Spar1.35t	Skin1.00t	Spar1.35t
9	Skin1.00t	Spar0.45t	Skin1.00t	Spar0.45t
10	Skin1.00t	Spar0.23t	Skin1.00t	Spar0.23t

먼저 Spar는 주로 압축하중을 담당하게 되는데 구조물이 압축하중을 받을 때 인장의 경우보다 좌굴에 취약하게 되므로 Crippling 좌굴에 의해 설계를 하였다. Skin은 주로 전단응력을 담당하므로 전단응력에 의한 설계를 하였다[5].

사용된 재료는 구조적 강도 및 피로 수명이 뛰어나고 비교적 저렴한 Glass/Epoxy를 적용하였고 물성값은 Table 3에 나와있다. 블레이드의 스킨은 주로 전단하중을 담당하므로 ±45°로 적층하고, 스파는 주로 압축 하중을 담당하므로 0°, 90°로 적층하였다. 내부에 폼은 좌굴에 보다 더 강건한 구조를 만들기 위해 사용되었으며, 각 구획별 하중을 계산하여 길이방향 적층수를 결정하였다. 복합재로 설계 방법을 적용하여 초기 구조 설계 결과를 확정한 이후 구조 해석을 통해 설계 개선하는 방법을 적용하였다. 최종적인 구조설계 결과는 Table 4에 나타내었다.

2.2.2 구조 해석

구조 설계 결과에 대한 구조 안전성 평가를 위해 본 연구에서는 구조 해석을 위해 유한 요소 상용 코드인 MSC. NASTRAN을 사용하였다. 원심 하중은 회전수를 적용하여 모사하였으며, 경계 조건은 블레이드 뿌리 부위 고정 경계 조건을 적용하였고, 길이방향으로 분포 하중을 적용하였다.

각 하중 조건에 따른 선형 정적 해석결과 충분한 안전율 4.13을 확보한 안전한 구조로 설계되었음을 확인 하였다. 좌굴 안정성 평가 결과 또한 하중 배수 1.20으로 운용 중 좌굴 안정성을 충분히 확보한 구조임을 확인하였다. Fig. 6과 7에 선형 정적 해석 결과인 응력 분포와 변위를 나타내었다. 검토결과 운용 중 공진에 대한 충분한 안전율을 확보한 것으로 확인 되었다. 또한 S-N 손상기법과 Spera의 경험식을 이용하여 피로 수명평가 결과 블레이드의 주기적 응력이 피로한계이하에서 피로수명요구조건인 20년(3.7×10<sup>8</sup> Cycles)을 충분히 만족함을



Fig. 6 Stress analysis result of load case 2.



Fig. 7 Displacement analysis result of load case 2.

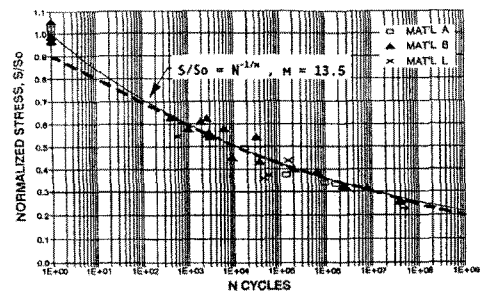


Fig. 8 S-N diagram for E glass material.

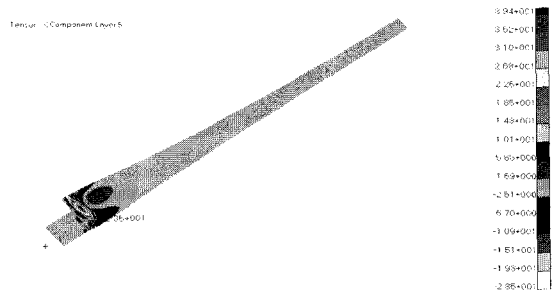


Fig. 9 Stress analysis result for cyclic load.

확인하였고 해석에 사용된 S-N선도와 FEM해석 결과는 Fig. 8 과 9에 나타내었다[6]. 그리고 블레이드의 공진 여부를 검토하기 위한 고유 진동수 해석결과 운용 회전수 근처에서 공진이 발생하지 않음을 확인하였고 Fig. 10에 고유진동수에 대한 캠벨(Campbell) 선도이다. 여기서 해석에 회전효과가 반영되지 않아 다소 보수적일 수 있다.

2.2.3 조류 충돌 해석

유체-구조물 연계(Fluid-Structure Interaction)는 대표적인 연성

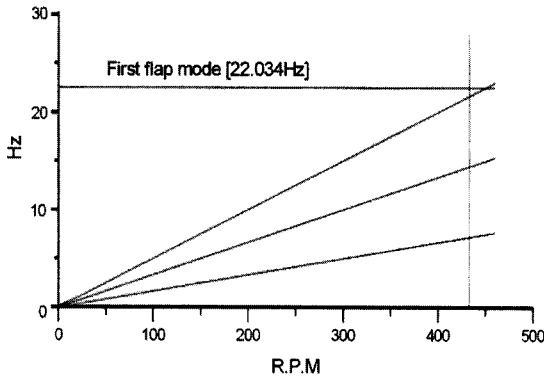


Fig. 10 Campbell diagram for load case 2.

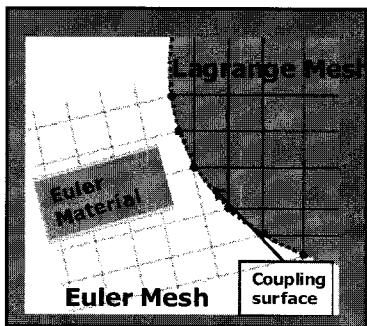


Fig. 11 ALE coupling.

Table 5 Structure analysis results

		Case 2
Max. stress [MPa]	Ten.	68.7
	Com.	25.5
Max. Disp. [mm]		166
1st flap mode [Hz]		22.034
1st lead-lag mode [Hz]		44.818
1st Buckling load factor		1.2073

해석(Coupled Analysis)의 한 분야로서 최근 많은 연구자들에 의해 해석 방법 및 관련된 응용 연구가 수행되어져 왔다. 연성해석이란, 서로 다른 물리적 특성을 가지는 두 가지 이상의 장(Field)이 결합할 경우에 전체를 하나의 시스템으로 정의하여 상호작용에 의한 영향을 고려한 해석을 의미한다.

MSC/DYTRAN에서는 유체-구조물 연계를 ALE 연계(ALE Coupling)를 제공하는데, 일반 연계에 비해 계산시간에 있어 상당한 이점이 있으며, 적은 수의 오일러 격자라도 충분한 해석이 가능하다. 그러나, Fig. 11과 같이 구조물의 변형이 완만하여 오일러 격자가 구조물의 운동을 충분히 따라갈 수 있어야

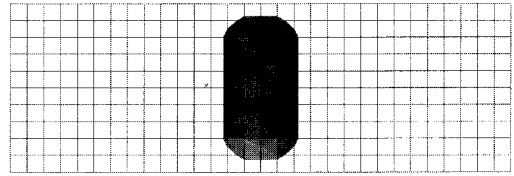


Fig. 12 Configuration of the bird.

Table 6 Properties of the bird

Material properties (Bird)	
Density(Kg/m <sup>3</sup> )	950
Bulk modulus (Pa)	2.2E9
Diameter (m)	0.106
Length (m)	0.213
Initial velocity (m/s)	197

하며, 오일러 격자/ALE 연계면/라그랑지 격자의 절점들을 서로 공유해야 하는 제약이 있기 때문에 해석모델의 형상이 단순해야 한다[8].

가. 해석 방안의 타당성 검증

항공기 조류 충돌에 관한 접근은 해석적 접근을 바탕으로 충돌 시험을 통해 해석 결과와 시험 결과를 통상 비교 검토한다. 본 연구에서는 수치 해석적 접근을 수행하였으므로 적합한 유한요소 코드인 MSC/DYTRAN을 이용한 조류 충돌 해석의 타당성 검증을 위하여 선행 연구 결과와 비교 검토하였다[7].

일반적으로 자연에 존재하는 조류는 종류가 매우 다양하여 밀도와 크기가 다르다. 선행 연구결과에 따르면 조류 충돌 시험을 위해 실제 조류 대신 쉽게 구할 수 있는 닭을 많이 사용하였다.

본 연구에서는 연구 대상 블레이드의 형상이 작고 국내에 가장 많이 서식하는 조류가 참새이므로 충격 모델로 참새를 가정하였다. 조류 형상은 앞뒤 반구에 원통형 형상으로 가정하여 구현하였으며 Fig. 12에 조류의 형상을 나타내었다. 결정된 조류 형상을 바탕으로 알루미늄 평판에 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 선행 연구 결과와 비교하여 신뢰성 검증을 시도하였다. 여기서 조류에 적용된 물성값은 Table 6에 나타냈다[8].

해석의 검증을 위해 조류의 모델링은 참고문헌과 동일하게 상용프로그램에서 제공하는 수력학적 유체 재질(Hydro Dynamic Material)을 사용하였다. 조류를 포함하는 오일러 영역은 8절점 솔리드 요소를 사용하였다. 강체평판에 1.814kg의 조류가 197m/s의 속도로 수직충돌 한다고, 이때 유체로 가정한 조류의 밀도는 950kg/m<sup>3</sup>이다. Fig. 13는 유한요소 해석 결과에 따른 압력 변화 그래프를 나타낸 것이다.

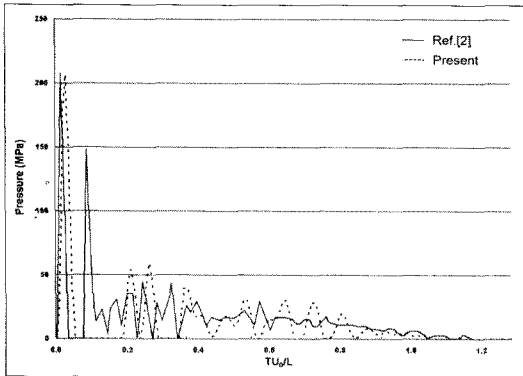


Fig. 13 Comparison between the reference result and the analysis result.

Table 7 Properties of the blade and the bird

	Skin	Bird
Density(Kg/m <sup>3</sup> )	1780	950
Bulk modulus (pa)	6.55e9 ~ 11.14e9	2.2e9
Poisson's ratio	0.31 ~ 0.46	
Yield stress (Pa)	3.08e8	
Thickness (m)	0.00235 ~ 0.0085	
Diameter (m)		0.03
Length (m)		0.06
Mass (Kg)		0.079
Initial velocity (m/s)		55m/s

충돌초기에 높은 충돌압력이 발생하고 일정시간 이후에는 정상상태 압력이 존재함을 알 수 있다. 동일조건하에서 시험을 통해 측정된 참고문헌의 결과와 유사하게 충격압력과 정상상태 압력 값이 비교적 잘 일치함을 확인 하였다.

나. 조류 충돌 해석

풍력 발전 시스템은 시간에 제한을 받지 않고 작동을 한다. 따라서 맑은 낮에 비하여 밤에는 야행성 조류가 미처 확인하지 못하고 충돌할 가능성이 있다. 또한, 풍력 발전 시스템은 일반적으로 50m/s의 풍속을 동반하는 폭풍이 부는 경우 작동을 제한하지만, 이 경우 역시 거센 바람에 휩쓸려 블레이드에 어떤 물체가 충돌할 가능성이 있다. 본 연구에서는 이 물체를 조류로 가정하여 폭풍이 부는 상황의 조류 충돌에 대한 해석을 수행하여 블레이드의 조류 충돌에 대한 안전성을 확인하고자 한다. 여기서 충돌위치는 회전중심으로부터 0.4m로 임의로 설정되었다. 본 연구 대상인 블레이드는 Glass/Epoxy 재질을 가지고 있으므로 준등방성으로 가정하여 해석을 수행하였다. Table 7은 블레이드와 조류에 적용된 물성값을 나타내고, Table 8은 해석 결과값이고, Fig. 14는 블레이드의 조류 충돌 해석을 위한 유한

Table 8 The result of bird strike

정면 충돌 (55m/s)	
최대 응력	113 MPa
최대 변위	184 mm

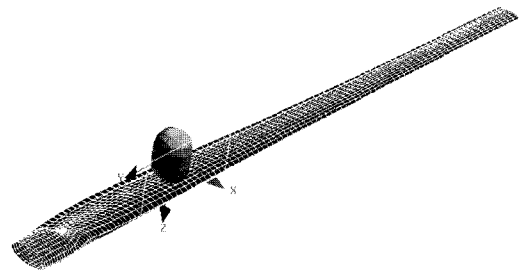


Fig. 14 Modeling for bird strike.

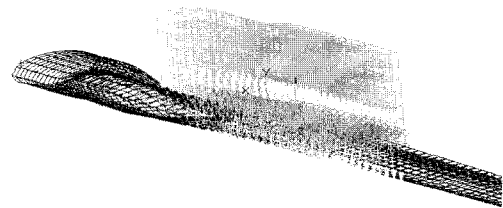


Fig. 15 ALE coupling between Euler mesh and Lagrange mesh.

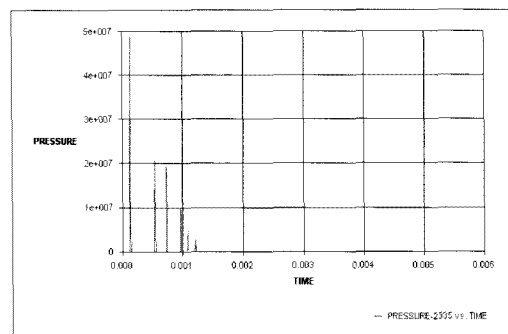


Fig. 16 Pressure curve for bird strike.

요소 모델링을 나타낸다. 또한 Fig. 15는 블레이드와 유체 영역 사이를 ALE Coupling으로 연계시켜준 형상이다. Fig. 16은 조류 충돌시 블레이드에 대한 충격압력을 나타내며, Fig. 17은 시간에 대한 조류의 변형형상을 나타낸다. 최대 응력과 최대 변위의 결과는 각각 Fig. 18과 19에 나타내었다.

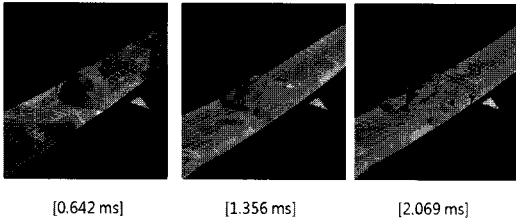


Fig. 17 Bird deformation according to time.

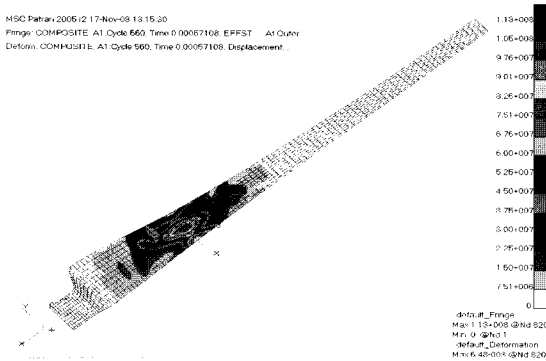


Fig. 18 Stress result of the bird strike analysis.

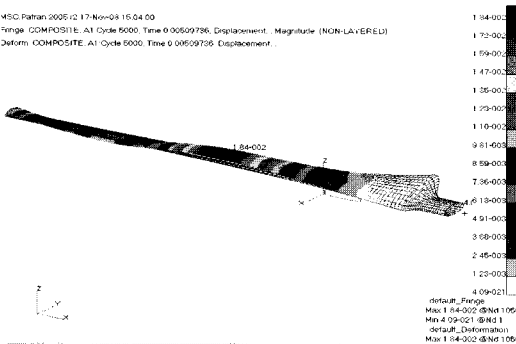


Fig. 19 Displacement result of the bird strike analysis.

### 3. 시제품 제작 및 구조시험

시제품 제작을 위해 블레이드 단면형판을 주문하여 스티로폼과 열선을 이용하여 1차 몰드를 제작하였다. 1차 몰드는 스티로폼 재질이므로 에폭시 경화중 발생하는 열에 의한 변형을 막기 위해 고온태임으로 코팅을 하였다. 코팅 된 몰드 위에 이형제와 켈코트를 바른 뒤 유리섬유를 수적층하여 2차 몰드를 만든다. 2차 몰드 위에는 1차와 동일하게 이형제와 켈코트를 도포하여 최종 몰드를 제작한다. 최종 몰드의 재질은 Glass/Epoxy이며, 경화중에 압력을 받더라도 변형되지 않도록

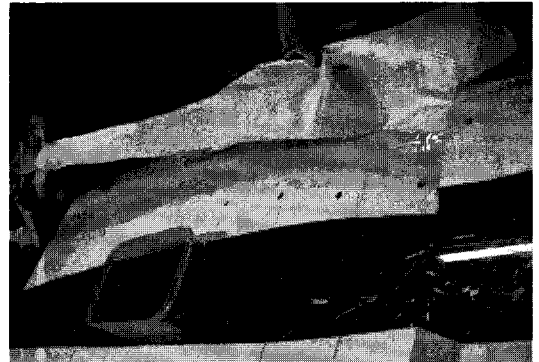


Fig. 20 Lay-up process on the mold.



Fig. 21 First prototype blade.

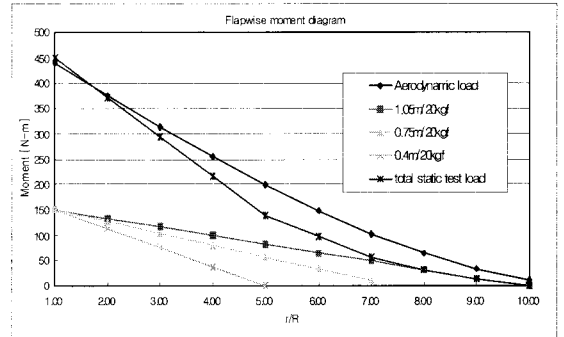


Fig. 22 Static strength test loads simulated by three-point loading method.

충분한 두께를 갖도록 하였다. 이렇게 제작된 최종 몰드에 이형제를 바르고 켈코트를 도포한 후 블레이드 크기에 맞게 재단된 유리 섬유 및 에폭시를 적층하였다. 상하면 몰드의 적층이 끝나게 되면 이들을 서로 볼트를 이용하여 결합한 후 내부에 우레탄 폼을 발포하는데, 이때 원래 부피의 약 3배정도로 팽창하는 폼의 발포 압력을 이용하여 적층된 섬유를 몰드에 밀착하도록 하였고, 에폭시가 몰드의 접착면을 따라 흘러나오도록 유도하여 섬유 체적비가 향상되도록 하였다. Fig. 20은 몰드에 섬유를 적층하는 과정이며, 제작된 블레이드의 형상은 Fig. 21에 명시하였다.

설계된 블레이드의 실제 거동이 이론적인 해석 결과와 잘 일치하는지 확인하여 이론 해석에서 제시한 안전계수 등의 제반 사항을 입증하기 위해 구조 시험이 수행되어야 한다. 모델의 구조

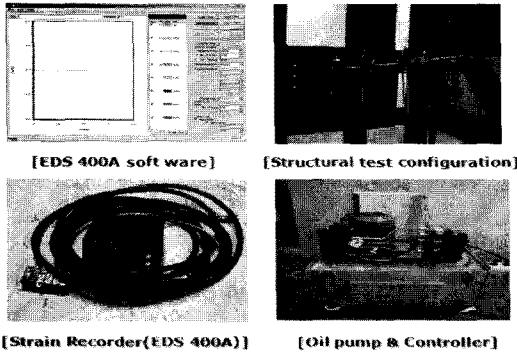


Fig. 23 Equipments for structure test.

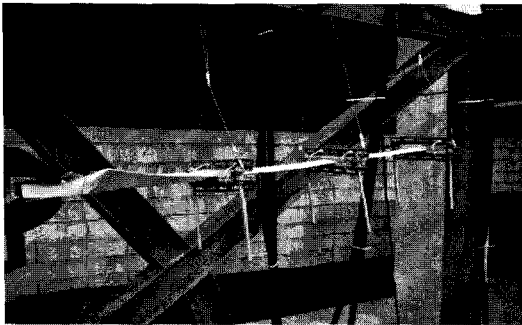


Fig. 24 Static test of the prototype blade.

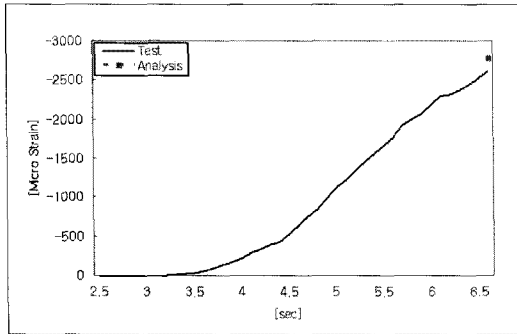


Fig. 25 Strain curve for load case 2.

시험은 본 연구팀이 보유하고 있는 항공기 구조물 시험 장치인 유압식 구조 하중 시험 장치를 이용하여 수행하였다.

정하중 시험을 위해 설계 하중은 Fig. 22의 그래프를 바탕으로 유압식 구조시험장비를 통해 3점 집중 하중으로 모사되었으며, 각각의 하중위치는 블레이드 회전중심으로부터 0.4m, 0.75m, 1.05m이고 적용된 하중은 20kgf로 동일하다. 데이터 측정을 위해 Strain Recorder가 사용되었으며, 구조시험을 위한 장비는 Fig. 23에 나타내었다.

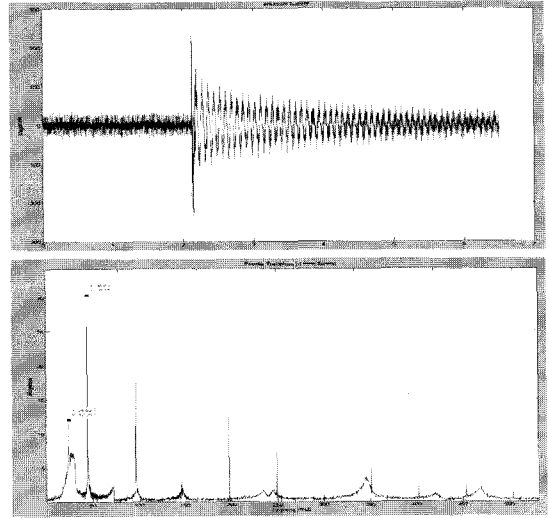


Fig. 26 Eigenvalue test result.

Table 9 Comparison between the static analysis results and the test results

Item	Analysis result	Test result
Stress(0.3R from root)	29.1MPa	27.4MPa
Tip displacement	166mm	152mm
1st flap mode	22.034Hz	25.02Hz
1st lead-lag mode	44.818Hz	46.08Hz

Fig. 25는 Case 2의 해석과 시험의 Strain값을 비교한 것이고 Fig. 26은 고유진동측정결과를 보여준다. Table 9는 모델의 유한 요소 해석 결과와 구조 시험 결과를 비교한 것으로 서로 유사한 결과임을 보여 주고 있다.

#### 4. 블레이드 성능 시험

성능시험은 설계된 블레이드의 공력성능을 입증하기 위해 수행되었으며 이를 위해 특별한 시험장치 및 타워가 제작되었다. 실험실 주변에는 바람이 일정치 못하고, 충분한 풍속이 나오지 않는 지역이므로 적재함이 있는 차량에 타워를 고정하여 실험하였다. 차량에 고정된 풍력터빈 시스템은 3 ~ 11m/s 사이의 다양한 풍속에서 출력이 측정되었으며 좀 더 정확한 실험을 한가지 풍속에 대해서 3km의 거리를 주행하며 출력이 측정되었다.

##### 4.1 성능시험장치 개요

공력시험을 위해 사용된 발전기는 서영테크의 SYG-A208-600-570



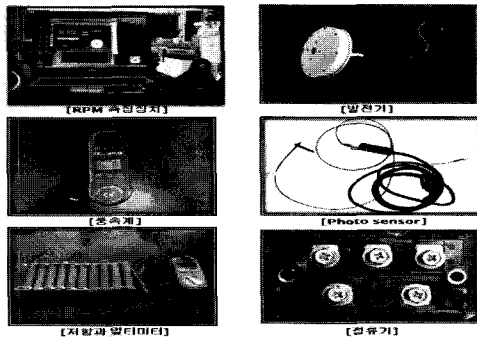


Fig. 27 Equipment for the blade performance test

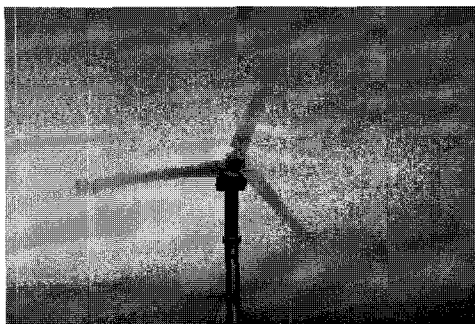


Fig. 28 Operating wind turbine system.

발전기로서 효율이 높고 기어박스가 없어 소음이 적은 특징이 있다. 발전기에서 출력을 측정하기 위해 3상에서 단상으로 변환해주는 정류기를 사용하였으며, 저항을 가변하며 멀티미터를 이용하여 최대 출력을 측정하였다. RPM 측정을 위해서 NI사의 포토센서와 Labview를 적용한 프로그램을 사용하였다.

Fig. 27은 공력시험 장치의 전체적인 구상도로서 발전기에서 전달되어오는 전기적 신호를 수집하여 출력계산을 위한 전압 및 전류 측정 장치 및 풍속 및 회전수 등을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 장치들로 구성되어있다. 성능 시험 중인 풍력 터빈 시스템은 Fig. 28에 나타내었다.

#### 4.2 성능시험 결과

Fig. 29는 공력해석결과와 실험결과를 비교한 것으로서 풍속에 대한 출력을 나타내고 있다. 측정된 출력은 기계적 효율이 포함된 공기역학적 출력이며 계산된 출력은 순수한 공기역학적인 출력과 여기에 효율 90%를 적용하여 계산된 전기적인 출력이다. 분석 결과 출력생산은 4m/s에서 시작되며 6m/s에서 출력이 급상승함을 확인하였다. 그리고 실험 결과와 이론적인 계산 결과가 정격풍속 8m/s뿐만 아니라 다른 풍속에서도 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

Table 10 The result of aerodynamic test

	해석 결과	시험 결과
출력[at 8m/s]	669 W	663 W

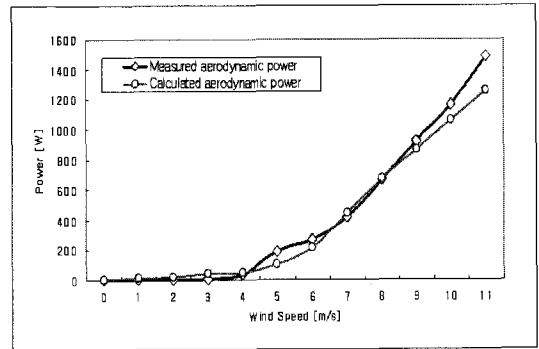


Fig. 29 Comparison between aerodynamic test result and analysis result.

### 5. 결론

본 연구에서 국내 지역에 적합하고 가정에서 운용이 가능하도록 소음이 적은 500W급 저소음 수평축 블레이드의 공력 및 구조 설계를 수행하였다. 성능해석 결과 설계요구조건에 비해 높은 출력을 낼 수 있도록 잘 설계되었음을 확인하였다.

또한, 구조 설계 결과에 대한 FEM 해석을 통해 블레이드의 좌굴과 공진에 대한 안전성을 확인하였고, 피로수명해석 결과 20년의 피로수명을 확보하였다. 그리고 폭풍이 부는 악천후 속에서 있을 수 있는 블레이드의 조류충돌 모사 결과 안전 배수 1.6이 확보되는 안전한 구조물임을 확인하였고, 풍력 발전용 블레이드 및 다른 구조물 설계 시 적용하여 충돌에 대한 안전한 구조물을 설계할 수 있을 것으로 사료된다.

시제품은 구조적 강도 및 피로 수명이 뛰어난 Glass/Epoxy를 적용하여 수직층으로 제작하였고, 유압식 구조 시험 장비를 통해 load case 2의 하중을 모사하여 구조 해석 결과와 시험 결과를 비교해본 결과 서로 잘 일치함을 확인하였다. 또한, 차량을 이용한 블레이드 성능 시험결과 성능해석결과와 잘 일치하여 국내 기상에 적합한 블레이드가 설계되었음을 확인하였다.

### 후기

본 연구는 지방대학혁신역량강화(NURI) 사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) 공창덕, 방조혁, “1 kW급 소형 풍력 발전용 블레이드의 풍력 설계 변수에 관한 연구”, 한국항공우주학회 춘계 학술대회 논문집, 2003.
- 2) 공창덕, 방조혁, 오경원, “1 kW급 소형 풍력 발전용 블레이드의 구조 설계”, 한국항공우주학회 추계 학술대회 논문집, 2003.
- 3) Dieter, G. E et al., “Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor Materials Technology,” National Academy Press, pp. 5-65, 1991.
- 4) Gourieres, D. L., “Wind Power Plants,” Pergamon Press, 1982.
- 5) 공창덕, “항공기 구조역학,” 조선대학교 출판부, 2004.
- 6) Spera D. A., “Dynamic Loads in Horizontal Axis Wind Turbines Part II : Empirical Equations,” Windpower '93, 1993.
- 7) 손 정삼, “수막해석을 위한MSC/Dytran 입력 파일 생성 전문가 프로그램 개발”, 부산대학교 석사학위논문, 2005.
- 8) 문창오 외 “항공기용 Windshield의 조류충돌 저항성 평가”, 한국항공우주학회지, 제24권, 제2호, 1996, pp. 95-105.