

## 중형항공기 고효율 복합재 블레이드의 설계 연구

공창덕\* · 박현범\*<sup>†</sup> · 이경선\* · 최원\*\*

# A Study on Structural Design of High Efficiency and Lightweight Composite Propeller Blades of Regional Aircraft

Changduk Kong\* · Hyunbum Park\*<sup>†</sup> · Kyungsun Lee\* · Won Choi\*\*

### ABSTRACT

In this study, structural design of the propeller blade for turboprop aircraft was performed. The propeller shall have high strength to get the thrust to fly at high speed. The high stiffness and strength carbon/epoxy composite material was used for the major structure and skin-spar-foam sandwich structural type was adopted for improvement of lightness. As a design procedure for the present study, firstly the structural design load was estimated through investigation on aerodynamic load and then flanges of spars from major bending loads and the skin from shear loads were preliminarily sized using the netting rule. In order to investigate the structural safety and stability, stress analysis was performed by finite element analysis code MSC. NASTRAN. Finally, it is investigated that designed blade have high efficiency and structural safety to analyze of aerodynamic and structural design results.

### 초 록

본 연구에서 터보프롭 항공기의 프로펠러 블레이드에 대한 구조 설계 연구를 수행하였다. 프로펠러는 고속으로 비행할 수 있는 추력을 얻기 위해 구조적으로 높은 강도가 요구된다. 본 연구에서는 프로펠러 구조 설계 시 고강도 및 고강성의 특성을 지닌 카본/에폭시 복합재료가 적용되었으며, 경량화를 위하여 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하였다. 구조 설계 하중은 블레이드에 작용하는 공력하중과 원심 하중을 분석하여 결정하였으며, 스파 플렌지는 굽힘 하중을 담당하고 스킨은 전단 하중을 담당하도록 복합재료 설계 개념을 반영하였다. 구조 안전성을 평가하기 위하여 상용 유한요소 해석 코드인 나스트란을 활용하여 구조 해석을 수행하였다. 최종 공력 및 구조 설계 결과 분석을 통하여 설계된 프로펠러 블레이드의 효율이 우수하며 안전한 구조인 것으로 검토되었다.

**Key Words:** Composite Propeller(복합재료 프로펠러), Structural Design(구조 설계)

\* 조선대학교 항공우주공학과

\*\* 한국항공우주산업(주) 고정익비행성능팀

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: swordship@daum.net

본 연구에서는 차세대 고속 운송 시스템으로 연구 중인 터보프롭 항공기 프로펠러 블레이드의 구조 설계를 수행하고 구조 해석을 통해 구조 안전성을 검토하였다. 블레이드 구조 설계 시 고강도 및 고강성의 특성을 지닌 카본/에폭시 복합재료가 적용되었으며, 경량화를 위하여 스킨-스파 구조 형태를 채택하였다. 최종 설계된 8개 블레이드의 공력 효율이 우수하며 구조적 안전성이 향상된 것으로 검토되었다. 연결 부위는 고강도 금속재 구조를 적용하여 허브에 연결되도록 설계 하였으며 구조 해석을 통해 안전성을 검토하였다.

## 2. 프로펠러 공력 설계

본 연구 대상 항공기는 중형 항공기로서 순항 영역은 17,000ft 로 설정되었으며, 설계 요구 조건은 Table 1에 명시하였다. 초기 공력 설계 단계의 블레이드 형상은 6개 블레이드 형태였으나 기존 프로펠러 보다 공력 소음을 낮추는 저소음형 블레이드를 제시하고 보다 추진 효율을 향상시키기 위하여 여러 단계의 설계 변경을 통해 최종 8개 블레이드 형태로 결정되었다. 공력설계는 와류이론과 블레이드 깃 요소 이론으로 설계 하였으며, 블레이드 75% 지점의 시위길이와 블레이드 각 및 피치를 계산하였다. 본 연구에 적용한 이론적 수식은 아래에 명시한 바와 같다. 앞서 계산한 반경 75%에서의 시위길이를 기준으로 하여 시위 / 직경비를 이용하여 각 Radius station의 시위를 결정하였다.

시위 길이의 계산

$$C_r = \frac{4T(r/R)}{BRb\rho V_r^2 C_l} \quad (1)$$

블레이드각의 결정

$$\beta = \tan^{-1} \frac{V'}{2\pi r N} \quad (2)$$

피치의 계산

$$P = 1.50 \pi R \tan \psi \quad (3)$$

단면 추력계수 계산

$$\frac{dC_T}{dx} = \frac{\pi^3}{4} (1-a')^2 x^3 \sigma C_y \sec^2 \psi \quad (4)$$

단면 동력계수 계산

$$\frac{dC_P}{dx} = \frac{\pi^4}{4} (1-a')^2 x^4 \sigma C_x \sec^2 \psi \quad (5)$$

설계 요구 조건을 만족하는 최종 블레이드 형상은 Fig. 1과 같다. 최종 공력 해석을 통해 설계된 블레이드의 설계 요구 성능 만족 여부를 검토하였으며 설계 결과는 Table 2에 명시하였다[1].

Table 1. System specification

Rotation speed(RPM)	980
Velocity(m/s)	142
Thrust(kN)	10.36
Power(HP)	2229
Efficiency	0.89

Table 2. Aerodynamic design results

Diameter(m)	4.07
Number of Blades	8
Blade root chord(m)	0.347

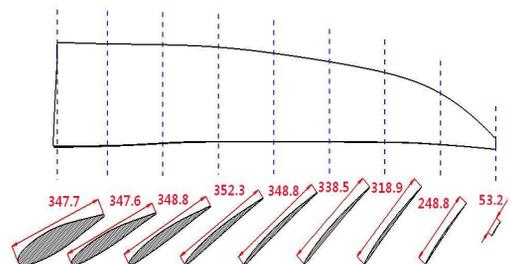


Fig. 1 Aerodynamic design result of propeller blade

### 3. 블레이드 구조 설계

블레이드 공력 형상을 분석하여 블레이드 구조 형상은 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하였다. 블레이드의 구조 설계를 위하여 블레이드에 작용하는 하중을 분석하면 공력 하중에 의한 전단력과 굽힘 모멘트 및 원심하중으로 분류할 수 있다. 구조 설계 하중을 위해 공력 설계에서 계산된 추력과 토크에 의한 하중을 분석하여 설계 하중을 계산하였다. 프로펠러 블레이드 재질은 항공기에 다양하게 적용되고 있는 Carbon/epoxy UD Prepreg 재질을 선정하였다. 선행 연구[2]에서 수행된 구조 설계 결과를 보완하여 최종 구조 설계 결과를 제시하였다.

블레이드는 총 10개의 구획으로 분할하여 블레이드 뿌리 부위는 적층수를 증가시키고, 블레이드 끝 부위는 적층수를 감소시켜 각 구획에 적용된 하중을 담당하는 범위 내에서 경량화 하였다. Fig. 2는 블레이드 단면 구조 형상이며, Table 3은 분할된 블레이드의 구조 설계 결과를 보여주고 있다.

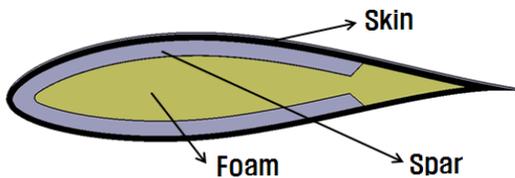


Fig. 2 Configuration of blade section structure

Table 3. Structural design results

Station	Spar flange
Station 1 (Root)	[ ( ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ) <sub>10</sub> ]s
Station 2-1	[ ( ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ) <sub>6</sub> ,±45,0 <sub>3</sub> ]s
Station 2-2	[ ( ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ) <sub>4</sub> ,±45 ]s
Station 3-1	[ ( ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ) <sub>3</sub> ,±45,0 ]s
Station 3-2	[ ( ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ) <sub>2</sub> ,±45,0 <sub>2</sub> ]s
Station 4-1	[ ( ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ) <sub>2</sub> ]s
Station 4-2	[ ±45,0 <sub>4</sub> ,90 ]s
Station	Skin
Station 1~5-1	[ ±45 <sub>2</sub> ,0,90,±45 <sub>2</sub> ]s
Station 5-2	[ ±45 <sub>2</sub> ,0 ]s

### 4. 블레이드 구조 해석

블레이드 구조 설계 결과는 상용 유한 요소 해석 코드를 활용하여 구조 안전성을 검토하였다. Fig. 3은 유한 요소 해석을 위한 격자 생성 결과이다. 블레이드의 선형 정적 해석 결과 스킨의 최대 압축 응력은 84MPa 이며, 인장 응력은 90MPa 로 확인되었다. 스파 플랜지의 압축 응력은 74MPa, 인장 응력은 69MPa 로 검토되었다. 변형 해석 결과는 42mm 로 블레이드 끝단 부위에서 확인 되었으며 전체 응력을 검토한 결과 충분히 안전율을 확보한 구조로 설계되었음을 확인하였다. 좌굴 해석 결과 1차 모드의 좌굴 하중 배수는 4.8로서 좌굴에도 충분히 안정한 것으로 검토되었다. 고유 진동수 해석을 통해 Campbell 선도를 검토한 결과 블레이드의 다양한 회전 환경에서 공진에 대한 안전성도 확보된 것으로 확인되었다. 또한 블레이드 중량을 검토한 결과 유사 블레이드보다 18% 경량화 된 것을 확인하였다. Fig. 4는 스파의 응력 분포, Fig. 5는 좌굴 해석 결과, Fig. 5는 Campbell 선도 검토 결과이다.

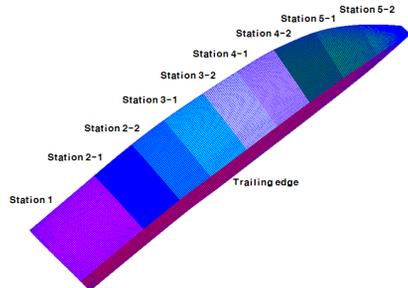


Fig. 3 Mesh generation for FEM analysis

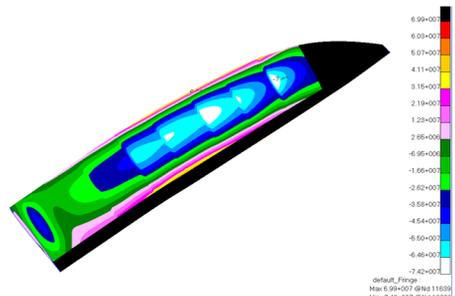


Fig. 4 Stress contour of spar

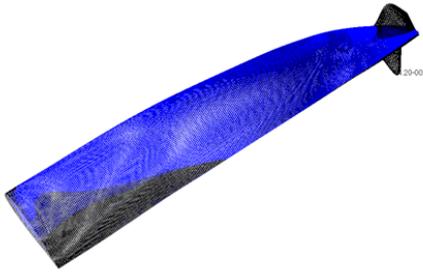


Fig. 5 buckling analysis result

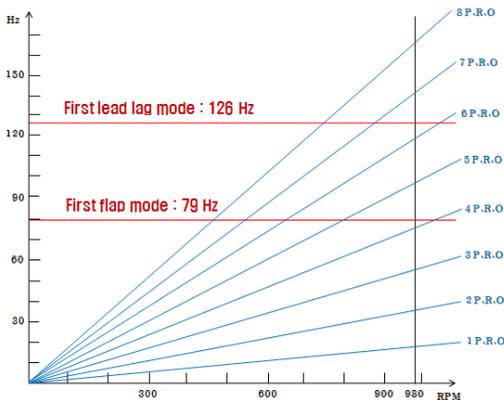


Fig. 6 Campbell diagram

### 5. 연결 부위 구조 설계 및 해석

블레이드 연결 부위는 블레이드 회전에 의한 원심력과 공력 하중에 의한 모멘트 및 비틀림을 고려하여 설계하였다. 적용 재질은 고강도 스틸을 적용하였다. 허브와 연결되는 금속재 구조의 응력은 128MPa 이며, 블레이드 복합재 부분의 응력은 85MPa로서 검토되어 두 가지 구조 형태 모두 안전한 것으로 확인되었다.

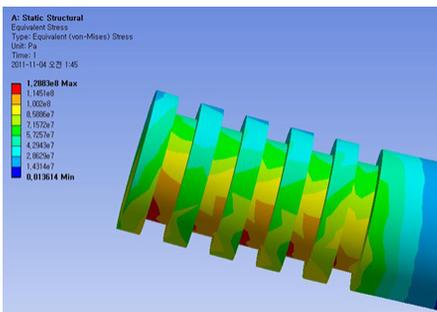


Fig. 7 Stress contour of Joint

### 6. 결 론

본 연구에서 터보프롭 항공기의 프로펠러 블레이드에 대한 구조 설계 및 해석을 수행하였다. 공력 설계 결과를 분석하여 구조 설계 하중을 계산하였으며, 스킨-스파-폼 샌드위치 구조 형태를 채택하였다. 구조 설계는 블레이드 길이방향으로 적층수를 감소하여 경량화 설계를 수행하였다. 단계적 설계 보안을 통해 최종 구조 설계 결과의 구조 해석 수행 결과 설계 요구 조건을 만족하는 구조 설계 결과임을 확인하였다. 연결 부위는 고강도 스틸을 적용하여 설계 하였으며 접착 방식으로 고정되며 허브와 연결되도록 설계 하였으며 구조 안전성을 확보한 것으로 검토되었다. 본 연구를 통해 설계된 블레이드는 추후 시제품 제작을 통해 구조 시험을 수행하고 구조 설계 단계에서 제시한 이론적 해석 결과와 비교하여 설계 기법의 타당성을 검증할 계획이다.

### 후 기

본 논문은 한국항공우주산업에서 위탁 시행한 2011년도 R&D 선행연구과제의 일환으로 수행된 연구임.

### 참 고 문 헌

1. 최원, 정인면, 김지홍, 이일우, 2010, "FAR25 급 터보프롭 항공기 프로펠러 설계 및 공력 특성 연구", 한국추진공학회 추계학술대회.
2. 공창덕, 박현범, 이경선, 최원, 2011, "터보프롭 항공기용 복합재 프로펠러 블레이드 구조 개념 설계 연구", 한국항공우주학회 춘계학술대회.
3. Changduk Kong, 2005, "Structural investigation of composite wind turbine blade considering various cases and fatigue life", ENERGY, Vol. 30, pp. 2101-2114.
4. 권진희, 구교남, 문창오, 박정선, 우경식, 정성남, 2004, "NASTRAN으로 배우는 전산 구조 해석" 경문사.