

# 무인헬기용 힌지없는 로터시스템의 복합재료 블레이드 설계 및 제작

심정욱\*, 기영중\*, 김덕관\*, 김승범\*, 변성우\*\*

## A Design and Manufacture of the Composite Blade for the Hingeless Rotor System of Unmanned Helicopter

Joung-Wook Sim, Young-Jung Kee, Deog-Kwan Kim, Seung-Bum Kim, Seong-Woo Byun

### Abstract

This paper describes the design, analysis and manufacture procedure of the composite blade for hingeless rotor system of unmanned helicopters. Helicopter rotor system is the key structural unit that produces thrust and control forces for intended flight conditions. In this work, a hingeless rotor system is adopted, and base on the design requirements for rotor system, composite blade section design and calculation of material properties were performed. In order to avoid the unstable state such as resonance, vibration characteristics of rotor system were analyzed. Finally, this paper describes simply the forming and manufacture of composite blade.

**Key Words:** Unmanned Helicopter, Rotor Blade, Composite Material, Vibration Characteristics, Natural Frequency

### 1. 서 론

현대 산업사회의 발전에 따라 인력의 효율적인 운용과 위험요소로부터의 보호 및 경제적인 운용 등의 요구에 부응하기 위해 무인항공기에 대한 관심이 점차 증가되고 있다. 이에 따라 항공선진국에서는 무인기 개발에 첨단기술이 집중되고 있으며, 특히 수직 이착륙 및 제자리 비행이 가능하여 다목적으로 활용할 수 있는 무인헬기 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 현재, 무인헬기는 일본, 미국 등에서 이미 상용화되어 운용하고 있으나 운용범위, 경제성 등에서 개선할 점이 많으며, 각 국에서 관련기술을 보호육성하고 있으므로 무인헬기 관련 핵심기술을 자체적으로 확보하는 것이 추후 관련 산업에 경쟁력을 갖기 위해 필수적이다. 또한 블레이드와 허브 및 조종장치로 구성되는 로터 시스템은 헬기의 성능, 소음, 진동 및 안정성을 결정짓는 핵심요소이므로 무인헬기 개발시 최우선적으로 개발되는 구성품 중 하나이다.

로터 시스템은 허브 형태에 따라 관절형 로터(articulated rotor), 힌지없는 로터(hingeless rotor), 베어링없는 로터(bearingless rotor) 시스템으로 구별된다. 이중 힌지없는 로터 시스템은 블레이드가 허브에 고정되어 자유단보(cantilever beam)처럼 연결되며, 회전속도가 빨라질수록 허브에 가해지는 하중이 증가하는 단점이 있으나 구조가 단순하기 때문에 공기력에 의한 항력이 줄어들며 동시에 조종력이 커서 고기동이 가능하며 정비성 및 안정성이 좋다. 따라서 본 논문에서는 무인헬기 전체의 진동특성에 중요한 영향을 미치는 힌지없는 로터 시스템의 복합재료 블레이드에 대한 개발과정을 기술하였다. 먼저 복합재료 블레이드의 단면구조 설계 및 해석 과정을 소개하고, 다음으로 복합재료 블레이드의 성형 및 제작에 대하여 간략히 기술하였다.

본 연구를 통해 연구개발된 로터 시스템이 장착될 대상 헬리콥터는 Yamaha R-MAX 무인헬기로 Fig. 1에 제시되어 있으며, 주요 제원은 표 1에 기술되었다.



Fig. 1 Yamaha R-MAX 무인헬기

표 1 R-MAX의 주요 제원

	R-MAX	Unit
Empty Weight	58	kg
Payload	30	kg
Endurance (Full payload)	60	min
Control Range	150	m
Main Rotor Diameter	3115	mm
Main Rotor RPM	830	rpm
Tail Rotor Diameter	545	mm
Overall Length	3630	mm
Body Length	720	mm
Overall Height	1080	mm
Installed Power	21	PS

## 2. 로터 블레이드 설계

### 2.1 로터 블레이드 단면구조 상세설계

현재 운용중인 헬리콥터의 로터 블레이드는 스펀 방향으로 2 ~ 3개의 서로 다른 익형을 사용하고 있으며, 이는 회전하는 로터 블레이드의 스펀 방향의 유동장 특성이 다르기 때문에 공력성을 최적화하기 위한 것이다. 그렇지만 실제 로터 블레이드의 경우, 40 ~ 85%R 구간에서 발생하는 양력이 대부분을 차지하므로, 이 구간의 익형은 실속특성이 우수하고 양력계수가 큰 익형으로 선정되어 적용되고 있다. 그러나 양력계수가 상대적으로 큰 값을 갖는 익형은 과도한 피칭모멘트를 유발하기 때문에 본 연구에서는 로터 허브에 발생하는 비틀림 모멘트를 최소화하기 위해 반대의 피칭모멘트 특성을 갖는 익형을 블레이드의 끝부분(>85%R)에 적용하였다. 흔히없는 로터 시스템에 적용될 블레이드의 질량 및 강성분포는 본 연구원이 수행한 바 있는 “차세대 로우터 시스템 개발” 연구 과제를 통해 개발된 NRSB-II 블

레이드를 기본으로 하였으며 복합재료 블레이드 단면 설계 및 해석은 본 연구원이 개발한 CORDAS(COMposite Rotor Design and Analysis Software) 프로그램을 이용하여 수행하였다[1,2]. 블레이드 설계에 사용된 복합재료는 제작사로부터 제공되는 원자재의 물성치를 이용하여 수행하며, 물성치가 없을 경우 시편을 이용한 시험을 통해 설계 자료를 확보하였다. 복합재료 블레이드 설계시 원자재의 제작성 및 가공성 등을 고려하여야 하며 블레이드 설계에 사용된 복합재료의 종류와 특성을 표 2에 정리하였다. CORDAS를 이용하여 설계된 대표적인 블레이드 단면(67.5%R)의 구조와 구성요소를 Fig. 2에 나타내었다.

표 2 복합재료 블레이드 원자재 및 적용구조

원자재명	구분	적용구조	비고
GU150NS	UD Glass	Spar	굽힘강성
HPW193	Carbon Fabric	Spar	굽힘강성
HG1581	Glass Fabric	Skin&Spar	비틀림강성
Rohacell Foam	110WF/71WF	Spar Core & Nose Weight	스파형상유지
Blue Foam	-	T.E. Core	익형유지

표 3 복합재료 원자재 물성치

Materials	E1 (MPa)	E2 (MPa)	Poisson's Ratio	G (MPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
GU150NS	39,650	10,910	0.31	4,670	1.86
HPW193	54,100	53,960	0.05	3,770	1.55
HG1581	24,280	23,150	0.14	3,730	1.87
Rohacell Foam	105	105	-	42	0.08

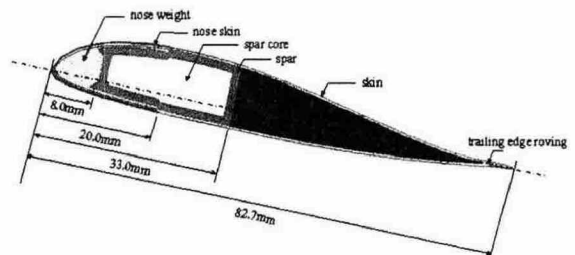


Fig. 2 복합재료 블레이드 단면구조 및 구성요소

- 블레이드 반경 : 877.5mm
- 블레이드 시위(chord) : 82.7mm
- 에어포일 형상 : NRSB-2R(12%C)
- Nose Skin: 앞진 부분의 익형 형상유지
  - 구성: Glass Fabric 2plies( $\pm 45^\circ$ ), 0.46mm
- Skin : 익형 형상유지 및 전단력 담당
  - 구성 : Glass Fabric 2plies( $\pm 45^\circ$ ), 0.46mm
- Spar : 블레이드에 가해지는 대부분의 하중을 담당하는 주요 구조부재
  - 구성 : Glass Fabric 4plies( $\pm 45^\circ$ )/Carbon Fabric 2plies( $\pm 45^\circ$ )/UD Glass 4plies( $0^\circ$ ), 1.9mm
- Nose Weight, Spar Core, Trailing Edge Core : 스파 및 익형 형상유지
  - 구성 : Rohacell Foam, Blue Foam
- 무게중심 위치 : 25.7%C
- 탄성중심 위치 : 24.6%C
- 질량 : 481.0g/m

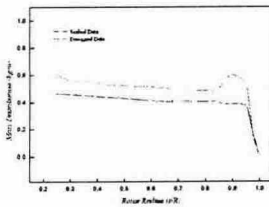


Fig. 3 질량 분포

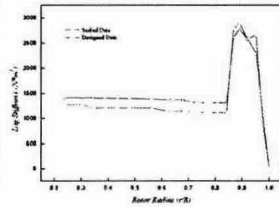


Fig. 4 래그 강성 분포

위의 Fig. 3은 단면의 질량 분포를, Fig. 4는 래그 강성 분포를 나타내며 Fig. 5는 CATIA로 설계된 복합재료 블레이드의 각 구성요소를 나타내고 있다.

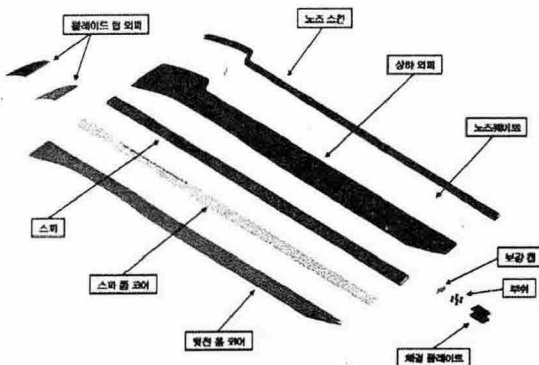


Fig. 5 복합재료 블레이드 분해도

## 2.2 로터 블레이드 동역학해석

힌지없는 로터 시스템의 회전수 변화에 따른 고유진동수를 계산하였으며, 고유진동수와 모드형상을 도출하기 위하여 헬리콥터 통합해석 소프트웨어인 CAMRAD(Comprehensive Analysis Model of Rotorcraft Aerodynamics and Dynamics)-II를 이용하였다. 복합재료 블레이드의 탄성 변형을 고려하기 위해 블레이드를 탄성 보로 모델링하였으며, 고유치 해석을 통해 로터 회전수 변화에 따른 고유진동수와 모드형상을 도출하였다.

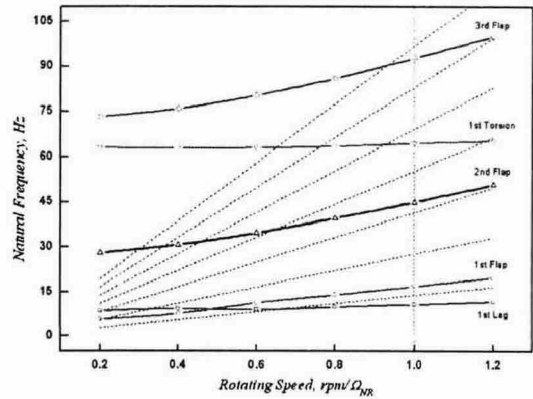


Fig. 6 회전속도에 따른 고유진동수 변화 (Blade Pitch : 12°)

표 4 회전수 변화에 따른 고유진동수 (Blade Pitch : 12°)

Rotating Speed (rpm/Ω)	Natural Frequency (Hz)				
	1st Lag	1st Flap	2nd Flap	1st Torsion	3rd Flap
0.2	8.371	5.685	27.934	62.998	72.984
0.4	9.103	7.572	30.583	62.723	75.739
0.6	8.795	11.151	34.560	62.947	80.095
0.8	9.667	13.885	39.469	63.452	85.774
1.0	10.532	16.727	44.853	64.433	92.593
1.2	11.479	19.633	50.683	65.222	99.795

해석 결과, 1차 래그 모드와 플랩 모드의 고유진동수 값은 아래와 같으며, 로터 회전수 변화에 따른 고유진동수의 분포도를 표 4와 Fig. 6에 제시하였다.

- 1차 래그 고유 진동수 : 0.76Ω

- 1차 플랩 고유 진동수 : 1.21Ω

Fig. 6에 제시된 결과를 통해 운용회전속도에서

공진이 발생하지 않음을 확인하였으며, 저진동 블레이드에 대한 설계 요구조건을 충족한 것으로 판단된다.

### 3. 로터 블레이드 제작

#### 3.1 로터 블레이드 제작

복합재료 단품은 NC가공된 알루미늄 금형에서 프리프레그 적층방식과 Match-Die 방식을 적용하여 오토클레이브를 통해 성형되며, 성형 조건은 아래와 같다. Fig. 7, 8은 블레이드 스킨 단품의 몰드와 성형과정을 보여주고 있다.

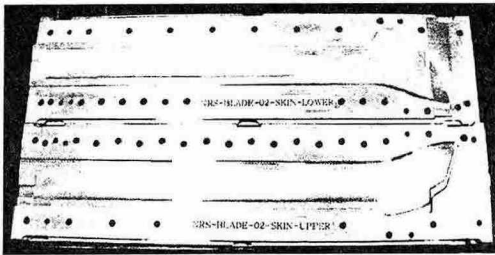


Fig. 7 스킨 몰드

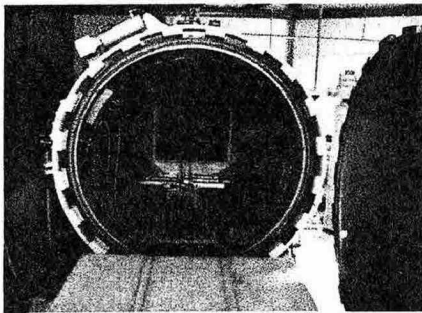


Fig. 8 스킨 단품 오토클레이브 성형

- Vacuum : Min 22 inHG
  - 압 력 :  $40 \pm 10$  psi
  - 가열속도 :  $0.5 \sim 7$  °F/Min
  - 성형온도 :  $260 \pm 10$  °F
  - 유지시간 : Min 120분 above 250 °F
  - 냉 각 :  $0.5 \sim 4$  °F/Min 속도로 140°F까지
- 최종 조립은 2단계로 구분되어 진행되며 최대한 제작 공정을 간소화하여 치공구 수의 감소 및 조립기준의 증가로 조립공정의 안정화를 도모하였다. 완성된 블레이드는 치공구를 이용하여 형상, 중량 및 단면을 확인하였다. Fig. 9는 최종 복합

재료 블레이드 조립품이며 Fig. 10은 단면의 형상을 검사하는 모습이다.



Fig. 9 최종 제작된 복합재료 블레이드

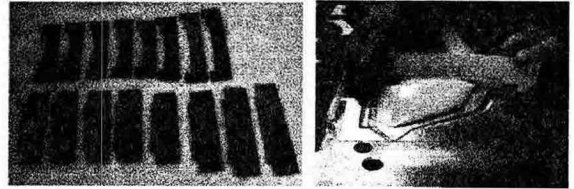


Fig. 10 단면 형상 검사용 치구 및 단면 검사

### 4. 결 론

본 논문에서는 무인헬기 전체의 성능과 진동특성에 중요한 영향을 미치는 무인헬기용 힌지없는 로터 시스템의 복합재료 블레이드에 대한 개발과정을 기술하였다. 먼저 복합재료 블레이드의 단면구조 설계 및 해석 과정을 소개하고, 다음으로 복합재료 블레이드의 성형 및 제작에 대하여 간략히 기술하였다. 추후 R-MAX 무인헬기에 본 연구를 통해 개발된 로터 블레이드를 적용하여 성능의 향상을 확인할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 현재 수행중인 공공기술연구회 지원의 “무인기 성능향상 핵심기술 연구” 결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

- (1) 김덕관, 주진, “복합재료 로우터 블레이드 설계/해석 프로그램(CORDAS) 개발”, 한국항공우주학회 춘계학술대회발표논문집, 1999.
- (2) 주진 외 12명, “차세대 헬리콥터 로우터 시스템 개발”, 산업자원부, 2003.
- (3) 주진 외 10명, “헬리콥터용 힌지없는 허브시스템 핵심기술 선행연구”, 산업자원부, 2003.