

헬리콥터 힌지없는 로터 시스템용 축소 복합재료 블레이드 개발

김덕관*·주 진**

A Development of Small-scaled Composite Blade for the Hingeless Rotor System of Helicopter

Deog-Kwan Kim, Gene Joo

Key Words: 복합재료 블레이드, 단면물리량, 동역학 해석, 힌지없는 로터, 헬리콥터

초 록

본 논문에서는 헬리콥터용 힌지없는 로터 시스템의 축소 복합재료 블레이드의 개발 과정을 소개한다. 블레이드 설계에는 자체 보유의 CORDAS 프로그램을 이용하였으며 블레이드 동역학 해석에는 헬리콥터용 해석 프로그램인 Flightlab 상용 프로그램을 이용하였다. 힌지없는 허브에 설계된 복합재료 로터 블레이드를 연결하여 동적 특성을 분석하였으며 그 결과를 이용하여 설계 변경하는 과정을 수행함으로써 최적의 설계값을 구하는 과정을 기술하였다. 효과적인 성형 공법을 정립하여 설계된 축소 복합재료 블레이드를 제작하였다. 본 연구를 통해 복합재료 블레이드 개발 과정에 대한 경험을 축적하였으며 축적된 기술을 관련 분야에 적용할 예정이다.

Abstract

This paper contains the development procedure of small-scaled composite rotor blade for helicopter hingeless rotor system. Composite blade design is conducted by using CORDAS program developed by KARI and dynamic analysis is conducted by using Flightlab which is commercial software for helicopter analysis. Also the optimizing procedure of iterative design was described. The designed composite blades were manufactured after establishing the effective curing method. Through this research, the experiences of composite rotor blade development were accumulated and will be applied to the related research field.

1. 서 론

헬리콥터 로터 시스템은 헬리콥터의 성능 및 안정성을 좌우하는 핵심요소이며 헬리콥터 개발 시 최우선적으로 개발되는 구성품이다. 로터 시스템을 구성하는 블레이드는 로터의 성능, 소음, 진동 및 안정성 특성을 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서 설계된 실물크기 블레이드의 공력 성능 및 공력탄성학적 안정성을 확보하기 위해 다

양한 축소 복합재료 블레이드를 제작하여 축소 로터 시험을 수행하게 된다. 이러한 축소 로터 시험을 수행함으로써 로터 시스템 개발에 소요되는 비용과 시간을 줄일 뿐만 아니라 설계입증자료로 활용할 수 있기 때문에 로터 시스템 개발시 필수적인 항목이다. 복합재료를 이용한 헬리콥터용 로터 블레이드 적용은 70년 초반부터 이미 시작되었으며 70년대 후반부터는 상용화해서 적용되기 시작하였다. 본 논문은 헬리콥터 힌지없는 로터 시스템용 축소 복합재료 블레이드의 개발과정을 기술하고자 한다. 먼저 축소 복합재료 블레이드의 내부 구조 설계 및 해석 과정을 소개하고 다음으로 축소 복합재료 블레이드의 성형 및 제

* 한국항공우주연구원, 항공사업부

** 한국항공우주연구원, 항공사업부

작 과정에 대하여 기술하고자 한다. 축소 복합재료 블레이드 구조 설계는 본 연구원이 개발한 CORDAS(COMposite Rotor Design and Analysis Software)[1]를 이용하여 수행되었으며 설계된 복합재료 블레이드에 대한 동역학 해석은 Flightlab을 이용하여 해석을 수행하였다. 그림 1은 본 연구원이 설계한 힌지없는 축소 로터 시스템을 나타낸 것이다.[3]

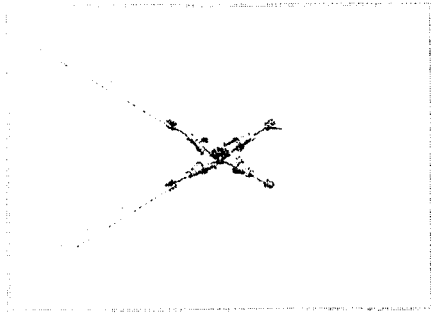


그림 1. 축소 로터 시스템(허브+블레이드) 조립도

2. 복합재료 블레이드 구조 설계

2.1 복합재료 블레이드 형상 정의

블레이드의 단면형상은 3가지 익형(NPL9618, NPL9615, NPL9617)을 사용했으며 플랜폼 형상은 직사각형이고 비틀림각은 8.35도이다. 자세한 내용은 아래 그림 2에 제시되어 있다.

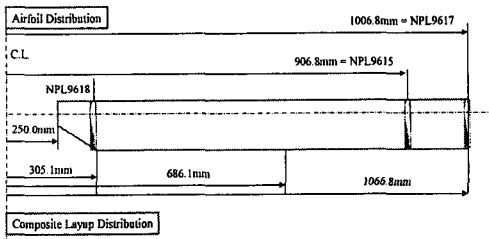


그림 2. 기준형 블레이드 형상 정의

복합재료 블레이드 구조 설계를 수행할 때 우선적으로 고려하는 부분은 블레이드의 구조/동역학 특성에 맞는 재료를 선택하는 것인데 강성 및 질량 효과를 잘 고려하여 선택하게 된다. 먼저 복합재료 블레이드 구조 설계 과정을 간략하게 기술하면 기존의 실물크기 Lynx 헬리콥터의 금속 재료 블레이드의 구조적 특성을 모사할 수 있도

록 설계하였으며 기준값으로 1/6 프루드 축소 값을 표준으로 삼았다. CORDAS에 사용된 복합재료에 대한 물성치 값은 일반적인 물성치를 사용하였으며 이는 설계 초기에는 블레이드에 대한 성형공법 및 제작 방법이 정해지지 않아 정확한 물성치를 사용할 수 없기 때문이다. 성형 공법 및 제작 완료 후 실제 블레이드 단면 물리량을 측정하여 그 값을 이용하여 다시 한번 해석을 수행하게 된다. 먼저 1차 구조 설계를 실시한 후 그 결과와 설계 요구 조건을 비교/분석하여 2차 구조 설계를 실시하였다.

2.2 1차 구조 설계

1차 구조 설계된 블레이드의 주요 내부 구성요소 및 그 기능을 기술하면 아래와 같다.

- Skin 구성 : 공력성능을 좌우하는 외형 유지 및 전단력 감당하는 요소
- Spar 구성 : 블레이드 하중을 대부분 받는 곳으로 가장 중요한 요소
- Nose Molding : 익형의 앞진 부분의 정확한 형상과 강도 보강 요소
- Spar Core : 가공성, 제작성 및 스파의 구조적 안정성을 위한 요소
- Trailing Edge Core : 제작성 및 구조적 안정 요소
- Nose Weight : 블레이드의 무게중심을 조절해주는 요소

표 1. 복합재료 블레이드 주요 사양

구성요소	재료사양	비고
Skin	± 45 UD E-Glass	0.5mm
Spar	± 45 UD E-Glass & 0 UD Carbon	1.0mm - 0.5mm
Nose Mold	± 45 UD E-Glass	0.5mm
Spar Core	Polyurethane Foam	
T/E Core	Nomex Honeycomb	
Nose Weight	Lead	1.2mm

설계된 블레이드에 대한 대표적인 주요 단면형상을 그림3과 그림4에 제시하였다.

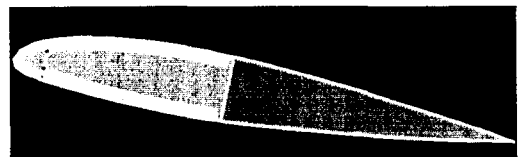


그림 3. 로터 반경 28.78MR에서 설계된 블레이드 단면



그림 4. 설계된 블레이드의 비틀림각 분포

1차 구조 설계된 값 중에서 로터 블레이드 동특성 해석에 중요하게 쓰이는 요소를 요약하면 다음과 같다.

CORDAS를 통해 1차 구조 설계된 블레이드에 대한 단면물리량 계산 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 질량 : 0.2876 kg
- 무게중심 : 23.4% ~ 26.6% Chord 분포
- 탄성중심 : 20.5% ~ 26.2% Chord 분포

위에서 구한 블레이드 스펠 방향에 따른 단면 물리량 계산 결과를 진동수 해석 프로그램에 대입하여 축소 한지없는 로터 시스템에 대한 동역학적 특성을 분석해 본 결과 원하는 1차 래그 고유 진동수 범위인 0.60 ~ 0.80 범위를 만족시키지 못하고 훨씬 크게 나왔다. 또한 질량도 설계요구조건인 200g ~ 250g 사이를 넘게 되므로 적당치 않아 2차 구조 설계를 시작하였다.

2.3 2차 구조 설계

2.3.1 설계 변경 내용

2차 구조 설계시 변경된 내용은 블레이드의 무게를 감소시키는 것과 강성을 낮추는 것이다. 이를 위해 먼저 블레이드 뒤전 코어에 사용된 노멕스 허니콤(Nomex Honeycomb) 재료 대신에 가벼운 PEI Foam으로 대체하였으며 스파 코어도 PEI Foam으로 대체하였다.

또한 강성 및 무게를 감소시키기 위해 스파에 들어간 탄소섬유를 유리섬유로 대체하였으며 Spar 두께도 1차 구조설계 값보다 약 50% 정도 감소시켰으며 블레이드 단면의 시위방향 무게중심을 맞추기 위해 익형 앞전 부분에 들어가는 웨이트(Weight)의 지름을 1.2mm에서 1.5mm로 늘렸다.

2.3.2 2차 구조 설계 내용

설계된 블레이드의 주요 내부 구성 요소를 표3에 정리하였다.

표 2. 복합재료 블레이드 주요 사양

구성요소	재료사양	비고
Skin	± 45 UD E-Glass	0.5mm
Spar	± 45 UD E-Glass	0.5mm - 0.25mm
Nose Mold	± 45 UD E-Glass	0.5mm
Spar Core	PEI Foam	
T/E Core	PEI Foam	
Nose Weight	Lead	1.5mm

설계된 블레이드 각 단면에 대한 형상 및 내부 구조를 그림 5에서부터 그림6까지 제시하였다.

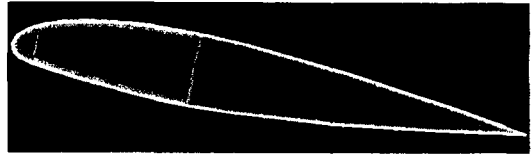


그림 5. 로터 반경28.78mm에서 설계된 블레이드 단면

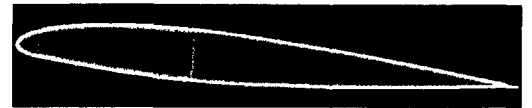


그림 6. 로터 반경 99.82mm에서 설계된 블레이드 단면

CORDAS를 통해 2차 구조 설계된 블레이드에 대한 단면물리량 계산 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 질량 : 0.225 kg
- 무게중심 : 27.5% ~ 31.3% Chord 분포
- 탄성중심 : 25.6% ~ 29.8% Chord 분포

아래 표3 에 설계 완료된 복합재료 블레이드 스펠방향에 따른 단면물리량 계산 결과를 정리하였다.

표 3. 2차 설계된 블레이드에 대한 단면물리량 결과

RADIUS	E-WX	E-WY	E-WZ	E-MEA	GJ	XCD	YCD
m	N/mm	N/mm	N/mm	N	N/mm	m	m
0.3071	5.40E+02	9.07E+03	1.76E+01	1.57E+06	4.20E+01	0.000346	0.000025
0.3236	5.42E+02	9.01E+03	1.75E+01	1.58E+06	4.09E+01	0.000576	0.000026
0.3560	5.46E+02	8.89E+03	1.72E+01	1.59E+06	3.93E+01	0.000443	0.000025
0.4029	5.50E+02	8.69E+03	1.67E+01	1.61E+06	3.81E+01	0.000285	0.000024
0.4621	5.53E+02	8.45E+03	1.59E+01	1.63E+06	3.64E+01	0.000187	0.000023
0.5310	5.52E+02	8.15E+03	1.50E+01	1.64E+06	3.41E+01	0.000228	0.000023
0.6068	5.43E+02	7.79E+03	1.37E+01	1.61E+06	3.13E+01	0.000518	0.000024
0.6860	5.23E+02	7.39E+03	1.22E+01	1.53E+06	2.78E+01	0.001187	0.000028
0.7652	4.77E+02	6.88E+03	1.02E+01	1.37E+06	2.34E+01	0.002593	0.000034
0.8410	4.46E+02	6.44E+03	8.86E+00	1.28E+06	2.09E+01	0.003221	0.000036
0.9099	4.37E+02	6.15E+03	8.07E+00	1.25E+06	1.94E+01	0.003285	0.000036
0.9691	4.39E+02	5.94E+03	7.61E+00	1.26E+06	1.84E+01	0.00312	0.000034
1.0160	4.45E+02	5.80E+03	7.31E+00	1.28E+06	1.77E+01	0.002832	0.000033
1.0484	4.50E+02	5.71E+03	7.11E+00	1.30E+06	1.72E+01	0.002804	0.000032
1.0649	4.52E+02	5.66E+03	7.01E+00	1.31E+06	1.69E+01	0.002754	0.000031

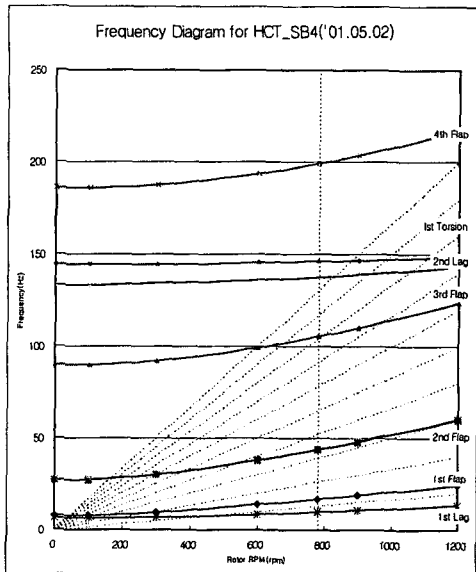


그림 7. 로터 회전수에 따른 고유진동수 분포도

3. 복합재료 블레이드 성형/제작

3.1 복합재료 블레이드 성형 공법 연구

축소 기준형 복합재료 블레이드 설계시 가장 적합한 재료로 강성 및 질량 분포를 비교적 쉽게 맞출 수 있는 +/-45 Woven Glass SK 210과 SK 224 제품을 원자재로 선택하였다. 블레이드 내부 코어 폼(Core Foam)으로 PEI 폼을 이용하였는데 이는 강도가 높아서 블레이드의 스파 성형을 할 때 제작성 및 가공성에 아주 좋은 재료이다. 블레이드 스파에 대한 성형은 이미 가공된 PEI 스파 코어 폼에 prepreg를 감은 뒤 진공백으로 감싸 진공처리를 수행한 후 125°C±5°C 온도에서 2시간동안 성형하였다. 상하 외피 성형은 가공된 몰드를 이용하여 비슷한 방법으로 성형하였으며 블레이드는 각 요소를 몰드에 조립한 후 볼트로 체결하여 125°C±5°C 온도에서 2시간동안 성형하였다.

3.2 복합재료 블레이드 제작 공법 연구

블레이드를 제작하는 공법에 대하여 다음과 같은 공정을 개발하였다.

- 블레이드 외피 제작용 몰드 가공(CNC)
- 블레이드 노즈 외피 제작용 몰드 가공
- 블레이드 스파 내부 코어 폼 가공

- 블레이드 뒤전 내부 코어 폼 가공
- 블레이드 외피 성형(진공 백/오븐 성형)
- 블레이드 스파 성형(진공 백/오븐 성형)
- 블레이드 어셈블/성형(진공 백/오븐 성형)

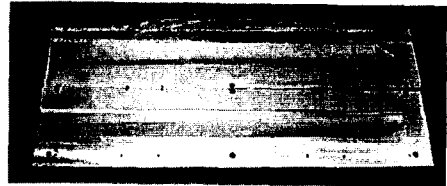


그림 8. 블레이드 스킨 제작 및 조립용 몰드



그림 9. 제작 완료된 축소 복합재료 블레이드

4. 결론

본 연구를 통하여 복합재료 블레이드에 대한 구조 설계 및 해석, 성형 및 제작 공법에 대한 기술을 확보하였다. 향후 좀 더 정확한 축소 블레이드 설계 및 제작 공법에 대한 연구를 계속 수행하여 국내 독자적인 복합재료 블레이드 개발 시 필요한 설계 및 시험 자료를 확보할 예정이다.

후기

본 논문은 산자부에서 지원한 항공우주기술개발사업 '헬리콥터용 힌지없는 허브시스템 핵심기술선행연구'과제 결과의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 주진, 김덕관, "복합재료 로우터 블레이드 설계/해석 프로그램(CORDAS) 개발", 한국항공우주학회 '99 춘계학술대회논문집
- [2] 주진, 김덕관, 박훈철, 구지은, "복합재료 헬리콥터 로우터 블레이드의 단면 물리량 예측 및 동적 해석에 관한 연구", 99 춘계 복합재료 학술대회논문집, 1999. 5
- [3] 주진, 김덕관 외 8명, "헬리콥터용 힌지없는 허브시스템 핵심기술 선행연구", 한국항공우주연구원, 1차년도 보고서, 2001