

# 복합재료 헬리콥터 로우터 블레이드의 단면 물리량 예측 및 동적해석에 관한 연구

## Estimation of Section Properties and Vibration Analysis of Composite Helicopter Rotor Blade

박훈철<sup>(1)</sup>, 구지은<sup>(1)</sup>, 김덕관<sup>(2)</sup>, 주진<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> 건국대학교 항공우주공학과

<sup>(2)</sup> 한국항공우주연구소, 품질인증기술지원부

### 서론

복합재료는 높은 비강도 및 피로특성, 이방성 그리고 손상 허용 특성 등과 같은 많은 장점을 갖고 있다. 이러한 특성 때문에 복합재료는 일찍부터 헬리콥터 로우터 블레이드에 많이 사용되었다. 이러한 주된 배경은 복합재료 설계/해석/성형기술 발달로 헬리콥터 블레이드에 적용이 가능해졌고 여러 예측 가능한 해석적인 방법이 동시에 개발되었기 때문이다. 최신의 헬리콥터에 요구되는 고성능, 고안정성 로우터 블레이드는 복합재료의 사용을 더욱 확대시켰는데 이방성 특성을 이용한 동역학적 특성 최적화, 복잡한 형상의 제작 용이성과 같은 특성은 앞으로 더욱 복합재료의 사용을 확대시킬 것이다. 복합재료 헬리콥터 로우터 블레이드의 공력탄성학적 안정성 해석을 위해서는 설계된 블레이드의 단면 물리량을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 NASTRAN을 이용한 유한요소 해석 방법과 한국항공우주연구소에서 러시아 중앙항공연구소와 공동으로 개발한 CORDAS (COMposite Rotor Design and Analysis Software)를 이용하여 복합재료 로우터 블레이드의 단면 물리량을 예측하고 정적/동적 해석을 수행하였다.[1-2] 정적 유한요소해석으로 복합재료 블레이드의 전단 중심, 플랩, 래그 및 비틀림 방향의 등가 강성도(equivalent stiffness)를 산출하여 CORDAS의 해석 결과와 비교하였다. 또한 고유진동해석

을 수행하여 결과를 비교하였다.

### NASTRAN을 이용한 유한요소해석

#### 1. 기하학적 모델링

실험용 블레이드의 제원은 다음과 같고 상세한 그림은 아래와 같다.

- chord length = 70mm
- thickness of skin = 0.5mm
- thickness of spar = 0.5mm
- blade span length = 860mm

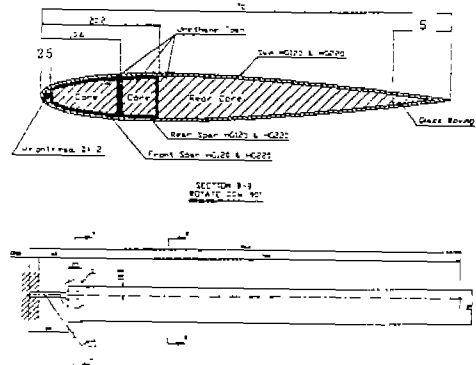


그림 1. TG 복합재료 블레이드의 기하학적 형상

블레이드의 익형을 모델링하기 위하여 사용한 NACA0012의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{y}{c} = \frac{12}{0.2} \times (0.2969 \times \sqrt{\frac{x}{c}}) - 0.126 \times (\frac{x}{c}) - 0.3516 \times (\frac{x}{c})^2$$

$$+0.2348 \times \left(\frac{r}{c}\right)^3 - 0.1015 \times \left(\frac{r}{c}\right)^4, \quad c = \text{chord}$$

위의 식을 이용하여 익형의 좌표를 계산한 뒤, 그 값에서 외피의 두께를 뺀 값을 이용하여 익형의 단면을 모델링하였다.

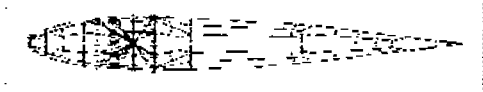


그림 2 블레이드의 단면 형상

위의 그림과 같은 단면 형상의 블레이드를 1개의 바(BAR) 요소와 2211개의 셸(shell) 요소, 5053개의 솔리드(solid) 요소로 모델하였다.

블레이드의 외피는 4절점 사각형 요소인 QUAD4와 3절점 삼각형 요소인 TRIA3로 모델하였고, 블레이드의 내부의 폼(foam), 웨이트(weight), 스파(spar) 등은 8절점 육면체 요소인 HEXA8, 6절점 삼각기둥 요소인 WEDGE6를 사용하여 모델하였다. 블레이드의 끝단 부분에 정적 하중을 가하는 경우 단면이 변형되는 것을 방지하기 위하여, 블레이드의 끝단에 박판이 덧대어져 있는 것으로 가정한 뒤, 이 박판을 셸 요소로 모델하였다.

그립(grip)의 축부분은 BAR요소로 모델하고 그립 부분은 솔리드로 모델하였다. 이때, 그립축의 단면에 해당하는 면적 부위에 놓인 절점 자유도와 BAR 요소의 절점 자유도를 RBE2로 묶어 주었다.

다음은 이와 같이 모델한 블레이드의 유한 요소 모델을 보여주는 그림이다.

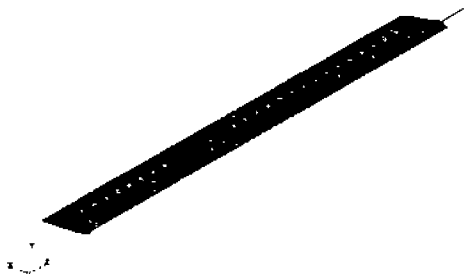


그림 3. 블레이드의 유한요소 모델

## 2. 물성치

블레이드를 구성하고 있는 각 재료의 물성치를 표 1에 정리하였다. 해석에 필요하나 자료가 없는 물성치는 가정하여 사용하였다.

표 1. 블레이드에 사용된 재료의 물성치

|                  | 탄성계수<br>(GPa) | 전단계수<br>(GPa) | 밀도<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Poisson's<br>ratio |
|------------------|---------------|---------------|----------------------------|--------------------|
| 외피,스파<br>(HG120) | 16.547        | 0.041         | 1.890                      | 0.15               |
| 헤이트(lead)        | 0.014         | 0.005         | 12.2                       | 0.4                |
| 폼(foam)          | 4.173E-06     | 1.897E-6      | 0.03431                    | 0.1                |
| glassroving      | 16.547        | 0.041         | 1.890                      | 0.15               |
| grip(S45C)       | 207           | 80.545        | 7.860                      | 0.285              |
| epoxy            | 3.44          | 1.277         | 1.217                      | 0.35               |
| carbon epoxy     | 71.7          | 5.69          | 1.6                        | 0.049              |

모델링을 단순화하기 위하여, epoxy로 블레이드와 결합되어 있는 그립 부분을 따로 모델하지 않고, 같은 구조물로 가정한 뒤, 이 부분의 물성치는 두 부위의 체적을 고려한 혼합법칙(rule of mixture)을 이용, 계산하여 사용하였다. 중량의 경우에는 모델링이 완료된 후에 설계가 변경되었으므로, 다시 모델하는 번거로움을 피하기 위해 이전의 모델과 같은 부피에 밀도만을 증가시켜 동적 해석에 무리가 없도록 하였다.

## 3. 경계 조건

정적 해석 시에는 그립이 고정되는 부분의 모든 자유도를 고정시켰다. 일반적으로 3차원 요소는 절점당 3개의 자유도 즉, 회전에 관여하는 자유도를 고정시킨다. 그러나, 본 해석에서는 회전 자유도를 고정시키면 비틀림이 발생하지 않게 되므로, 3차원 요소의 회전 자유도를 구속하지 않았다.

## 4. 정적해석에 의한 단면 물리량 계산

무게 중심은 Patran 프로그램의 mass property를 계산하는 프로그램을 이용하여 계산하였고, 전단 중심은 블레이드의 끝 부분에 하중점의 위치를 변화시키면서 블레이드의 비틀림이 0에 근사하는 점을 전단 중심

으로 보았다.

블레이드의 정적 해석을 통해 플랩과 비틀림 강성을 구하는 경우에는, 전단 중심(shear center)에 1N을 가하였고, 래그(lag) 강성을 구하는 경우에는 블레이드의 앞전(leading edge)에 1N을 가하였다.

이때, 블레이드를 고정된 보(beam)로 가정하고, 가한 하중에 대한 변위 또는 각변위로부터 등가 강성도를 구하였다. 이와같은 방법으로 계산한 단면 물리량은 표 6에 CORDAS의 결과와 비교하여 정리하였다.

### 5. 고유진동수 계산

자유 진동 해석에서는 정적 해석시 블레이드의 끝단에 덧대어져 있다고 가정했던 박판의 밀도를 0에 근사한 값으로 대치하여 동적 해석에 무리가 없도록 하였다. 고유치 문제를 풀기 위해 이용된 방법은 Lanczos method이다. 이와 같은 방법으로 계산된 고유진동수는 표 7에 CORDAS의 결과와 비교하여 정리하였다.

### CORDAS를 이용한 해석 예제

CORDAS 프로그램의 이론적 배경은 참고 문헌 [2]에 상세히 설명되어 있으므로 생략하기로 한다. CORDAS 프로그램의 검증을 위해 다음의 예제에 대해 해석을 수행/비교하였으며 CORDAS를 이용하여 1차로 자체 설계된 KS 모델 실험용 복합재료 블레이드를 설계하여 해석을 수행하였다.

- 1) NACA0012 단면의 외팔보-NASTRAN 해석 결과와 비교
- 2) 자체 설계된 블레이드(KS모델) 해석

### 1. NACA0012 단면의 외팔보

단면 구성은 그림 4에 도시한 바와 같고 재료는 다음과 같다.

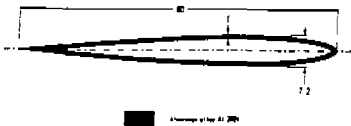


그림 4 NACA0012 블레이드 단면 구성도

- 재질 : 알루미늄2024
- 외팔보 단면 형상:  
길이 1000mm, 단면 두께 0.6mm

표 2. NACA0012 단면의 외팔보 해석 결과

| Property                                | NASTRAN | CORDAS |
|---|---------|--------|
| 무게 중심(%)                                | 48.7    | 47.31  |
| 비틀림 중심(%)                               | 27.5    | 22.4   |
| 틀림 강성 $EI_{xx}$ (Nm <sup>2</sup> )      | 30.39   | 43.27  |
| 1st Flap Freq $\omega_{\beta}$ (Hz)     | 6.30    | 6.56   |
| 1st Lag Freq $\omega_L$ (Hz)            | 49.55   | 46.98  |
| 1st Torsion Freq $\omega_{\theta}$ (Hz) | 197.57  | 195.6  |

NASTRAN 해석 결과와 CORDAS 해석 결과를 비교하여 표 2에 정리하였다. 이 예제에서도 NASTRAN과 CORDAS는 거의 동일한 단면 물리량을 산출하고 있음을 알 수 있다.

### 2. 설계된 로우터 블레이드(KS 모델)

CORDAS를 이용하여 자체 설계된 복합재료 로우터 블레이드(KS모델)의 기하학적 형상은 아래와 같다.

- 로우터 블레이드 스펠 길이 : 1000mm
- 대칭형 익형 : NACA0010
- 블레이드 시위길이 : 60mm
- 블레이드 끝단/뿌리 두께비 : 0.5
- 뿌리 단면 구성도

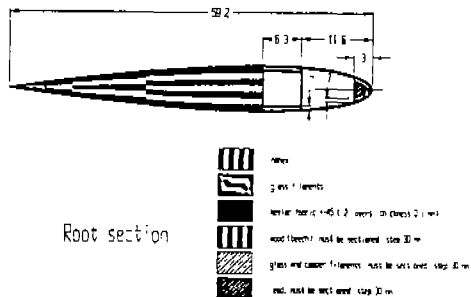


그림 5 CORDAS로 설계된 로우터 블레이드 뿌리 형상

KS 모델에 쓰인 재료의 물성치들은 아래의 표 3에 정리하였으며, KS모델의 정적/동적 해석 결과는 표 4와 5에 정리하였다.

표 3 KS 모델 설계에 쓰인 재료의 물성치

| 종류                    | E1(GPa) | E2(GPa) | $\nu$ | G(GPa) | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|---------|---------|-------|--------|-----------------------------|
| Nomex                 | 0       | 0       | 0.3   | 0      | 0.025                       |
| Glass filament        | 60      | 2.73    | 0.15  | 2.1    | 1.90                        |
| Kevlar                | 54      | 2.0     | 0.15  | 2.1    | 1.3                         |
| Glass/Copper filament | 60      | 3.0     | 0.15  | 2.1    | 3.4                         |
| lead                  | 0.      | 0.      | 0.3   | 0      | 11.0                        |

표 4 KS 모델 단면 유리량 해석 결과

| Property                 | Root   | Middle span | Tip    |
|--------------------------|--------|-------------|--------|
| 단위길이당 질량(g/m)            | 175.6  | 85.6        | 45.76  |
| 무게 중심(% chord)           | 16.3%  | 22.76%      | 23.78% |
| 비틀림 중심(% chord)          | 20.13% | 22.5%       | 24.5%  |
| 플랜 강성(Nm <sup>2</sup> )  | 7.895  | 1.39        | 0.125  |
| 레그 강성(Nm <sup>2</sup> )  | 155.17 | 70.653      | 21.73  |
| 비틀림 강성(Nm <sup>2</sup> ) | 19.15  | 5.626       | 1.164  |

표 5 KS모델의 동적 해석 결과

| Mode Type        | 해석결과 (Hz) |
|------------------|-----------|
| 1st Flap Mode    | 4.342     |
| 2nd Flap Mode    | 16.62     |
| 1st Lag Mode     | 24.46     |
| 1st Torsion Mode | 219.9     |

### 헬리콥터 로우터 블레이드에 대한 해석결과 비교

이와 같이 KS모델에 대한 설계/해석을 수행한 후 최종적으로 그림 1과 같은 TG 모델 복합재료 블레이드를 설계하여 CORDAS 및 NASTRAN 해석 결과를 표 6과 표 7에 정리하였다.

표 6. 정적 해석에 의한 블레이드의 단면 특성 물성치

| Property                 | CORDAS* | NASTRAN | relative error (%) |
|--------------------------|---------|---------|--------------------|
| 단위길이 당 질량(g/m)           | 350.2   | 325.4   | 7.1                |
| 무게 중심(% chord)           | 27.5%   | 33%     | 20.0               |
| 전단 중심(% chord)           | 22.5%   | 23.6%   | 4.9                |
| 플랜 강성(Nm <sup>2</sup> )  | 7.787   | 9.822   | 26.1               |
| 레그 강성(Nm <sup>2</sup> )  | 411.4   | 242.8   | 41.0               |
| 비틀림 강성(Nm <sup>2</sup> ) | 14.36   | 6.63    | 53.8               |

\* CORDAS의 결과는 그림 부분이 제외된 경우임

표 7. 고유 진동수 비교

| Mode Type        | CORDAS* (Hz) | NASTRAN (Hz) | relative error (%) |
|------------------|--------------|--------------|--------------------|
| 1st Flap Mode    | 4.337        | 5.306        | 22.3               |
| 2nd Flap Mode    | 27.18        | 23.63        | 13.1               |
| 1st Lag Mode     | 31.53        | 32.79        | 3.9                |
| 1st Torsion Mode | 102.5        | 110.2        | 7.5                |

\* CORDAS의 결과는 그림 부분이 제외된 경우임

### 결론

MSC/NASTRAN을 이용한 유한요소 해석과 CORDAS를 이용한 해석 결과를 통해 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

1) 비교적 단순한 단면 형상을 가지는 구조물에 대해서 CORDAS는 비교적 정확한 단면 물리량과 고유 진동수를 제공하였다. 이로써 비교적 형상이 단순한 복합재료 로우터 블레이드에 대해서는 설계/해석이 용이한 CORDAS를 적용하면 효율적으로 정적/동적 해석이 가능하다.

2) 복잡한 형상의 단면 구성을 가지는 복합재료 로우터 블레이드의 경우, 그림 유무에 따라서 정적해석 방법에 의한 동가 강성은 큰 차이를 보이나, 고유진동수는 크게 차이 나지 않는다.

3) 향후 실험을 통하여, 두 결과를 검증할 필요가 있으며, 두 가지 소프트웨어를 이용한 모델링 방법의 개선에 관한 추후 연구가 필요하다.

### 후기

본 연구는 과학기술부 지원 한국항공우주 연구소 기관고유사업인 "다목적 회전익기 핵심기술 연구"로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. CORDAS User's Manual, 1998
2. CORDAS Theoretical Manual, 1998
3. 주진, 힌지없는 헬리콥터 로우터의 정지 비행 시 동적 특성에 관한 연구, 박사학위논문, 1993