

# 공진현상을 이용한 실물 복합재 헬리콥터 블레이드의 피로수명 평가

## Resonant Fatigue Testing of Full-Scale Helicopter Blades from Composite Laminated Materials

기영중† · 김태주\* · 문성욱\*\* · 한정호\*\*\*

Youngjung KEE, Taejoo KIM, Seongwook MOON, Jeongho HAN

### 1. 서 론

헬리콥터 블레이드는 비행에 필요한 양력, 추력 및 조종력을 발생시키는 대표적인 비행안전품목(flight safety part)으로서 1980년대부터 블레이드 제작에 복합재료가 본격적으로 사용되기 시작하였다. 특히 금속재료에 비해 중량절감에 유리하며, 복잡한 형상으로의 가공성, 적층 방법을 통한 기계적 물리량 변화 및 내피로(fatigue tolerance) 특성이 우수하여 블레이드 이외의 주요 비행안전품목에 섬유강화 복합재료(fiber reinforced composites)를 적용하는 비율이 증가하는 추세이다.

비행시 블레이드 주위에 발생하는 주기적인 형태의 공력 변화는 고주기 특성의 반복하중으로 작용하여 블레이드의 피로수명에 중요한 영향을 미치게 되며, 수명요구조건 만족여부를 입증하기 위해 해석적인 방법뿐만 아니라 실물 블레이드 시편을 이용한 피로시험을 수행하는 것이 필요하다. 복합재 블레이드의 피로평가는 회전익 항공기의 감항인증규정인 FAR-27[1]과 FAR-29.571[2]에 제시된 바와 같이 안전수명(safe life), 내결함 안전수명(flaw tolerant safe life) 또는 파손안전(fail safe) 개념에 따라 독립적 또는 혼합 적용하여 수행할 수 있다. 또한 피로시험에 사용되는 블레이드 시편은 구조적인 취약부위를 포함하여 여러 개의 단면으로 나누어 사용하거나 전체 블레이드를 동시에 사용하는 것이 일반적이다.

### 2. 본 론

#### 2.1 블레이드 구조

로터 블레이드는 비행시 발생하는 원심력과 모멘트를 지지하기 위한 스파, 토션박스 등의 내부 구조물과 공기 역학적인 형상을 유지하기 위한 스킨 등으로 구성된다. 이 외에도

블레이드 표면에 생성된 얼음을 제거하기 위한 제빙장치, 모래 및 먼지 입자에 의한 침식, 낙뢰로 인한 파손을 방지하기 위한 보호물 등이 있다. 스파와 토션박스 및 스킨의 제작에 유리섬유와 탄소섬유가 사용되며, 복합재료의 적층과 성형의 용이함을 위한 코어(core) 자재로써 하드 폼 및 허니컴 코어 등이 사용된다. 그림 1에 블레이드 내부구조물의 명칭과 실제 운용중인 헬리콥터에 장착된 블레이드의 단면 형상을 나타 내었다.

#### 2.2 피로시험용 블레이드 시편

피로시험용 블레이드 시편은 블레이드의 기하학적인 특성과 내부 구조, 제작에 사용되는 소재의 특성, 하중 분포 등을 고려하여 형상을 결정하게 되며, 블레이드 전체를 사용하거나 특정 부위만을 절단(sectioned blade specimen)하여 시편으로 제작하게 된다. 로터 블레이드에 가해지는 하중은 회전으로 인한 원심력과 블레이드 주위의 공기력 분포에 의한 플랩모멘트, 래그모멘트 및 비틀림모멘트로 구분할 수 있다. 특히 블레이드 루트 부위(attachment test part)의 경우 원심력이 피로수명에 중요한 영향을 미치며, 블레이드 중앙부위(airfoil test part)는 플랩모멘트와 래그모멘트가 피로수명을 결정짓는 요소라 할 수 있다.

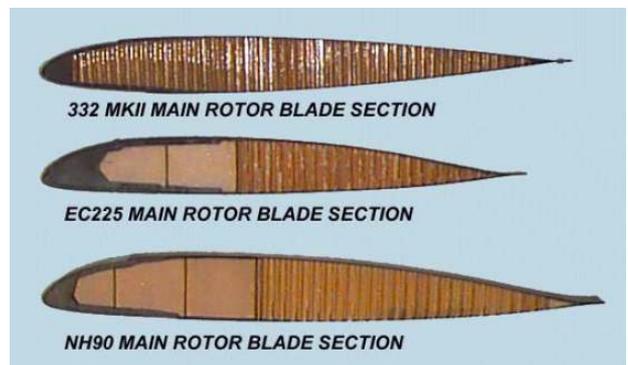
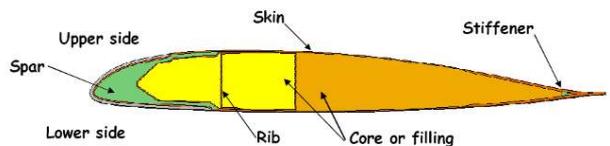


그림 1. 블레이드 구조 명칭 및 단면 형상

† 교신저자 : 한국항공우주연구원  
E-mail : naltguy@kari.re.kr  
Tel : (042)860-2294

\* 한국항공우주연구원    \*\* 국방과학연구소

\*\* (주)한국항공우주산업

### 2.3 피로시험 수행방법

로터 블레이드의 피로시험을 수행하기 위한 방법으로 블레이드가 운용되는 조건을 고려하여 예측된 운용하중이나 실제 비행시험을 토대로 측정된 운용하중을 이용하여 요구되는 수명의 2~4배에 해당하는 시간동안 블레이드 시편에 시험하중을 부가하여 피로파괴가 발생하지 않음을 입증하는 수명시험법(life test method)이 있다. 또한 일정진폭의 시험하중을 부가하여 블레이드 시편의 파괴를 유발함으로써 피로수명곡선(S-N curve)을 획득하여 수명을 평가하는 S-N형식 시험법(S-N type test)이 있다. 회전익 항공기는 고정익 항공기에 비해 해석적인 방법을 통해 예측된 하중의 불확실성이 상대적으로 높기 때문에 S-N 형식의 피로시험법을 주로 적용하고 있으며, 본 연구에서도 S-N 형식의 피로 평가법을 적용하였다. S-N 형식 피로시험법은 로터 블레이드와 같이 고주기 피로(high cycle fatigue) 특성을 갖는 구조물의 피로평가에 일반적으로 쓰이는 방법이기도 하다.

로터 블레이드는 회전으로 인한 원심력과 블레이드 주위의 공기력 변화에 의한 플랩모멘트와 래그모멘트가 동시에 작용하므로 피로시험을 수행할 경우에도 이와 같은 상황을 적합하게 모사할 수 있어야 한다. 특히 플랩모멘트와 래그모멘트의 비율을 조절할 수 있도록 수직하중만을 부가되도록 블레이드의 장착각(setting angle)을 조절함으로써 플랩모멘트와 래그모멘트가 목표로 하는 비율로 연성되어 부가되도록 하였다.

### 2.4 공진현상을 이용한 시험하중 부가

S-N 형식의 피로평가를 위해 블레이드 시편의 파괴가 발생하도록 일정진폭의 반복하중을 부가하는 경우 고주기 영역의 피로평가(high cycle frequency)를 위해  $10^5 \sim 10^6$  사이클 수준에서 피로파괴가 발생해야 하므로 시험을 완료하기까지 상당한 시험 기간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 블레이드 시편의 양쪽 끝단을 회전이 자유롭도록 단순지지(simple support)하며, 이중 한곳을 가진함으로써 블레이드 시편의 공진이 발생하는 동시에 시험하중을 부가[3]할 수 있도록 하였다.

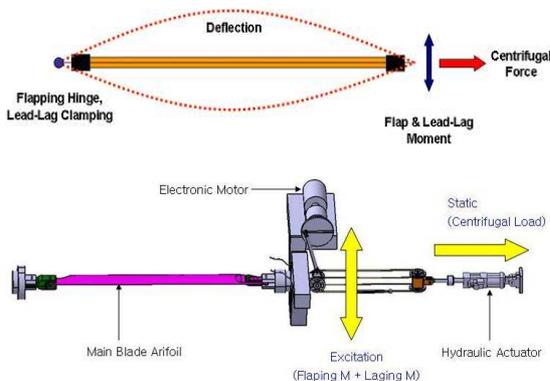


그림 2. 블레이드 피로시험 하중 적용개념



그림 3. 공진현상에 의한 블레이드 변형 형상

플랩방향으로 회전이 자유롭도록 하여 공진에 의해 블레이드 중앙부위에서의 변형이 최대가 되도록 하였으며, 블레이드 변형이 일정한 형상을 유지하도록 래그방향은 고정하였다. 블레이드 시편에 적용되는 시험하중과 공진 유발을 위한 가진 방법 및 실제 공진현상에 의해 블레이드가 변형된 형상을 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

블레이드 가진을 통해 공진현상이 발생하게 되면 일정하게 유지되어야 하는 원심력이 동적으로 변화할 수 있다. 실제 비행조건에서도 블레이드에 작용하는 플랩모멘트와 래그모멘트의 변화에 비해 원심력의 변화는 미미하기 때문에 원심력의 동적인 변화를 최소화할 수 있도록 하였다.

## 3. 결 론

S-N 형식의 피로평가 방법을 적용하여 실물 복합재 헬리콥터 블레이드의 피로시험을 수행하였다. 일반적으로 구성품 수준의 경우 시험하중 부가속도가 0.5~1Hz 수준이나, 공진현상을 이용함으로써 4.5~5Hz까지 증가시킬 수 있었다. 또한 원심력을 부가하기 위한 유압작동기와 서보밸브 블록 사이에 축압기를 연결하여 유압댐퍼(hydraulic damper) 기능을 수행하도록 하였으며, 이를 통해 블레이드 공진에 의한 원심력의 동적 변화를 저감시킬 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업(KARI 주관) 연구결과 중 일부입니다.

## 참고문헌

- [1] FAR Part-27/29, Airworthiness Standards, Normal Category Rotorcraft, Section 571 - Fatigue evaluation of structure
- [2] Advisory Circular 29, MG8, Substantiation of composite rotorcraft structure
- [3] 기영중, 송근웅, 허해규, 정재권, 제16회 지상무기학술대회, “헬리콥터 로터 블레이드 피로시험설비 설계”