

# 연성된 블레이드 디스크 시스템의 진동 특성에 관한 연구

## Vibration Characteristics in the Blade-disk System

이선숙† · 나성수 \*\* · 차석주\*\*\*

Sunsook Lee†, Sungsoo Na\*\* and Seog-Ju Cha\*\*\*

**Key Words :** Finite Element Method (유한 요소법), Modal Analysis(모드 분석), Damping Wire (댐핑 와이어)  
Centrifugal Force (원심력)

### ABSTRACT

The blade is an important part of rotating turbomachinery. The blade dynamic strength is of considerable importance as far as the reliability of operation and the life of the engine are concerned. In this paper, blades are attached to a disk and coupled by means of damping wire. We assumes that the interfaces between the blade and disk dovetails are joined together, which means surface-to-surface contacts without friction. The damping wire is implemented using a beam element and temperature effect in the blade is neglected. Centrifugal forces are applied by using an angular velocity to all elements in the system. The FEM results showed vibration characteristics in the blade disk system for the cases of a free-standing blade and blades with damping wire, respectively.

### 1. 서 론

진동에 의한 블레이드 파로 파괴는 1990년 미국의 페르미 원자력 발전소에서 저압 터빈 최종 단 날개 비산 사고와 그 전에 발생한 1985년 중국 만산 원자력 발전소에서 저압 터빈 최종 단 날개의 파손이 있었으며 국내에서는 울산 2에서 각각 고주파 파로 파괴된 경우를 들 수 있다.<sup>(7)</sup> 또한 최근 국내에서 발생한 분당 24단 고압 터빈 블레이드의 파손을 예로 들 수 있다.<sup>(6)</sup> 따라서 연성된 블레이드 디스크간의 정확한 진동 특성 파악이 필요하며 또한 효율적인 댐퍼에 관한 연구가 필요하다.

블레이드 디스크 시스템에서 진동 특성을 파악하는 것은 진동에 의한 파로 파괴와 엔진의 수명에 관련하여 매우 중요한 일이다. 지금까지는 주로 블레이드의 진동 해석이 수행되었으며 블레이드와 디스크간의 연성된 상호 영향에 대해서는 부족하였다.<sup>(8)</sup> 그러나 실제로 블레이드는 디스크에 부착되어 있으며 디스크 역시 블레이드의 운동에 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서는 블레이드의 진동을 최대한 억제하기 위해서 댐핑 와이어를 고려하였으며 그에 따른 블레이드의 진동특성을 연구하였다. B.L.JAISWAL 과 S.K. BHAVE는 효율적인 댐퍼를 설계하기 위해 여러 댐퍼들에

관해 실험을 하였으며 각 경우의 감쇠비를 제시하였다. 여기서 댐핑 와이어와 여러 종류의 댐퍼들을 부착할 경우가 미 부착 시 보다 감쇠비가 효과적임을 제시하였다.<sup>(2)</sup> 또한 Chapman과 Wang는 댐핑 와이어와 같은 댐퍼를 부착할 경우 블레이드의 강성이 향상되어 결과적으로 고유 진동수가 증가함을 보였다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 블레이드 디스크 모델과 댐핑 와이어에 대해 소개하며 3차원 유한 요소 해석을 통하여 운전 중 블레이드 디스크의 진동 모드와 댐핑 와이어에 의한 블레이드 디스크의 강성 및 댐핑 특성 해석을 수행하고자 한다.

### 2. 이 론

#### 2.1 기본 가정

본 모델에 적용한 기본 가정은 다음과 같다.

- 1) 디스크는 강체이고 블레이드는 유연체이다.
  - 2) 블레이드와 디스크는 연성되어 있다.
  - 3) 블레이드와 디스크의 접촉부에 마찰을 무시 한다.
  - 4) 회전에 의해 발생하는 열 효과를 무시하며 원심력은 시스템의 모든 요소에 각속도로 적용한다.
  - 5) 블레이드의 운동은 유한 요소법을 사용하여 해석한다.
- 그림 1-(a),(b)는 유한 요소 법으로 해석하기 위해 모델링 한 것으로 3D CAD 프로그램인 CATIA V5을 사용하여 모델링을 한 후 FEM 전후 처리 프로그램인 I-DEAS 10 를 사용하여 유한 요소 모델을 구성하였고 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.4를 사용하였다. 10절점 4면

† 고려대학교 기계공학과 대학원  
E-mail : damyata@paran.com

Tel : (02) 3290-3854, Fax : (02) 926-9290

\*\* 고려대학교 기계공학과

\*\*\* 고려대학교 기계공학과 대학원

체 요소(Triangular shell element)를 사용하여 3차원 모델을 구성하였다. 사용된 요소의 한 변의 크기는 최소 약 1.5mm 정도이며 약 30000~100000개의 3차원 요소를 사용하였다. 블레이드와 디스크의 어셈블리 부분은 블레이드를 디스크 안으로 넣어 결합하는 방식을 취하였다.<sup>(5)</sup>

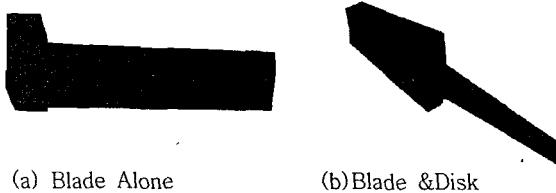


Fig 1. FE Blade & Disk Assembly model

블레이드 디스크 결합에서 유연성(flexibility)을 설명하기 위해 블레이드 디스크 사이의 절점(node)는 각각 같은 자유도를 갖는다. 또한 블레이드와 디스크의 결합면의 모든 절점과 반경 방향의 변위를 구속한다. 디스크의 내경을 고정한다.<sup>(1)</sup>

## 2-2. 경계조건 및 하중 조건의 설정

블레이드에 적용된 하중 조건은 면압에 의한 굽힘 하중과 원심력을 고려하였다. 적용된 면압은 1.89 기압이며, 터빈의 회전 속도는 0 rpm과 3600rpm으로 나누어 적용하였다. 적용된 하중 조건은 다음과 같다.

$$p = 1.89 \text{ atm} = 0.189 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$CF = \int \rho r w^2 dv \quad (2)$$

블레이드 간의 댐핑 와이어는 주로 블레이드의 회전 방향 굽힘을 억제하는 역할을 한다. 그림2는 댐핑 와이어의 축 방향과 수직 방향의 근사적인 강성을 구하는 과정을 설명한 것으로 축방향의 강성을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_1 = \frac{Fl}{AE} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{F}{\delta_1} = \frac{AE}{l} \quad (4)$$

또한 댐핑 와이어의 수직 방향 강성을 다음과 같다.

$$\delta_2 = \frac{Ml^2}{2EI}, M = Fl \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{F}{\delta_2} \quad (6)$$

식(4)와 식 (6), 표1 를 통하여 댐핑 와이어를 장착했을 경우 블레이드의 회전 방향의 강성이 주로 증가함을 알 수 있다.

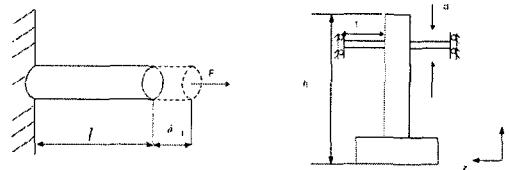


Fig 2. Axial & Bending Load Stiffness of Damping Wire

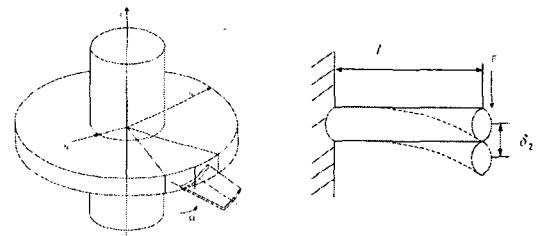


Fig 3. Turbine Blade & Damping wire

그림 3는 블레이드 간의 댐핑 와이어를 범 요소(beam element)로 사용하였으며 경계 조건은 그림에서 표현 한 것과 같이 대칭 경계조건을 사용하였다.

## 3. 수치 해석 및 결과

본 논문에서 모델링한 블레이드-디스크 시스템의 기하학적 치수와 물성치는 표1을 적용하였다.

Table1. Blade-Disk Model Data

List	Value
블레이드 높이 (h)	355mm
댐핑 와이어 지름(d)	10mm
블레이드 간의 거리(l)	38.51m
블레이드 비틀림 각도	35°
디스크 내경( $r_0$ )	180.25mm
디스크 외경( $r_1$ )	380.25mm
블레이드 루트	40mm
재질	St 12 t

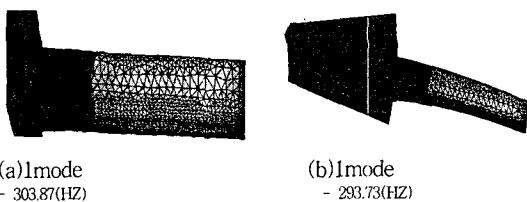


Fig. 4 Model of Blade alone and Blade-Disk  
(-External force=0)

그림 4와 5는 블레이드와 블레이드 디스크가 어셈블리 되었을 때의 고유 진동수를 나타낸다. 블레이드만 있을 때와 블레이드 디스크가 어셈블리 되었을 때 고유 진동수가 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 디스크와 블레이드는 연성되어 있으므로 각각의 고유 진동수에도 영향을 주고 있음을 볼 수 있다.

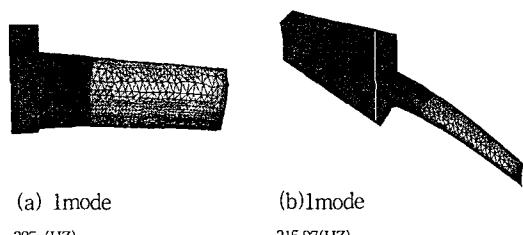


Fig. 5 Rotating Blade and Blade-disk Model  
(-With Centrifugal force & Bending Load)

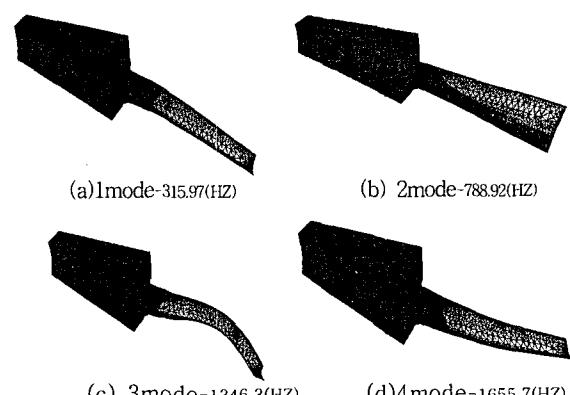


Fig. 8 Rotating Blade-disk Model applied  
by Both Centrifugal force and Bending Load

그림 4와 5는 블레이드와 블레이드 디스크가 어셈블리 되었을 때의 고유 진동수를 나타낸다. 블레이드만 있을 때와 블레이드 디스크가 어셈블리 되었을 때 고유 진동수의 차이가 많음을 알 수 있다. 그림 8은 원심력과 굽힘 하중이 작용 할 때 free condition일 경우로 1차 모드에서 4차 모드 까지 나타내었다. 그림 9는 뎁핑 와이어가 부착 되었을 때로 1모드에서 4모드까지 나타내었다. 따라서 그림 8과 9에서 알 수 있듯이 뎁핑 와이어가 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우 보다 모든 모드에서 높은 고유 진동수를 갖는다.

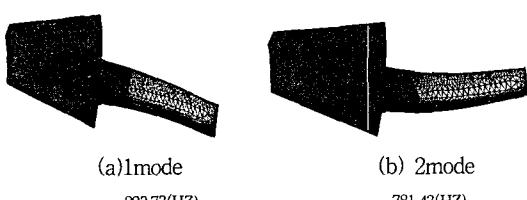


Fig. 6 . Modes of Blade-disk Model  
(No Damping Wire and External force=0)

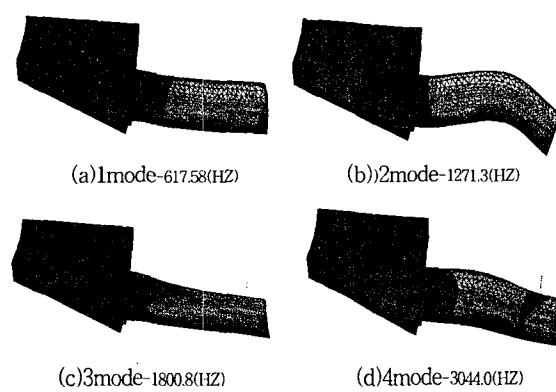


Fig. 9. Rotating Blade-disk Model  
With Damping wire applied by  
Centrifugal force and Bending Load

Fig. 10 Without External Force

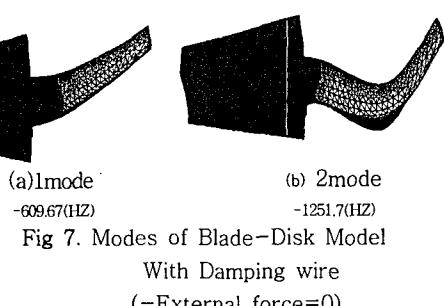


Fig. 7. Modes of Blade-Disk Model  
With Damping wire  
(-External force=0)

그림 6과 7은 외부로부터 외력이 작용하지 않을 때 free condition일 때와 뎁핑 와이어가 부착 되었을 때의 진동 모

드 1차모드와 2모드를 나타내었다. 그림을 통하여 알 수 있듯이 뎁핑 와이어가 존재 할 경우에는 존재 하지 않을 때보다 고유 진동수의 차이가 많음을 알 수 있다. 그림 8은 원심력과 굽힘 하중이 작용 할 때 free condition일 경우로 1차 모드에서 4차 모드 까지 나타내었다. 그림 9는 뎁핑 와이어가 부착 되었을 때로 1모드에서 4모드까지 나타내었다. 따라서 그림 8과 9에서 알 수 있듯이 뎁핑 와이어가 존재하는 경우가 존재하지 않는 경우 보다 모든 모드에서 높은 고유 진동수를 갖는다.

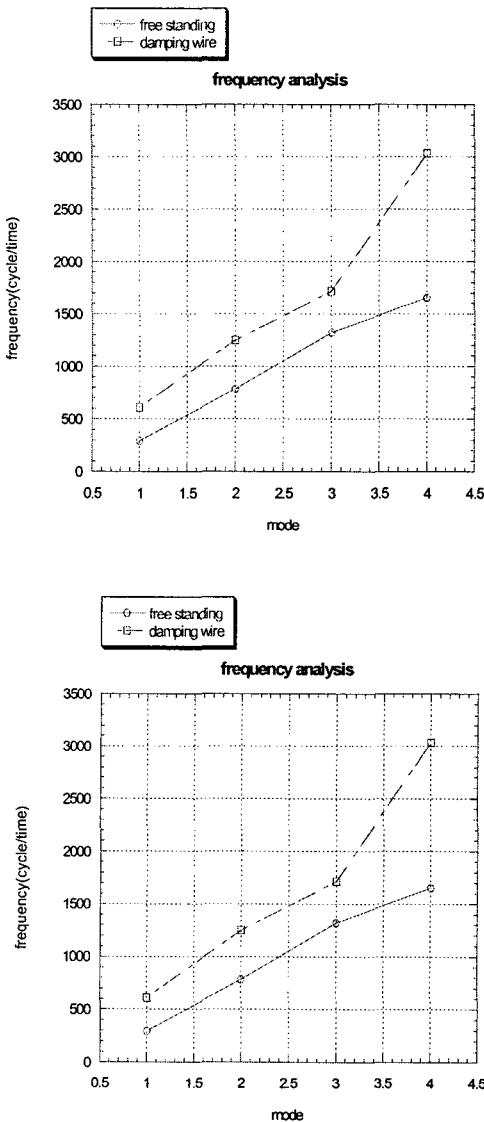


Fig. 11 With External Force

#### 4. 결 론

본 논문에서는 블레이드-디스크 모델에 관한 연구와 이 모델에 댐핑 와이어 부착 되었을 때 강성과 진동에 어떠한 영향을 주는지 규명하고자 하였다. 블레이드가 디스크와 어셈블리 되었을 때와 블레이드만을 해석 하였을 때를 비교하였으며 댐핑와이어를 부착함으로써 블레이드 시스템의 강성을 부과하여 전체시스템의 안정성이 향상됨을 고찰하였다.

#### 후 기

Sungsoo Na acknowledges the support of the work by the Basic Research Program of the Korea Science.

#### 참 고 문 헌

- (1) M .M. Bhat., V. Ramamurti and C. Sujatha., 1996, "Stduies on the determination of natural frequencies of industrial turbine blades." Journal of sound and vibration
- (2) B. LJAISWAL and S. K.BHAVE 1994 "Experimental evaluation of damping in bladed disk model." Journal of sound and vibration
- (3) V.OMPRAKSH and V. RAMAMURTI 1988 "Natural frequencies of bladed disks by a combined cyclic symmetry and Rayleigh-Ritz Method." Journal of sound and vibration
- (4) V.OMPRAKSH and V. RAMAMURTI 1990 "Coupled free vibration characteristics of rotating tuned bladed disk system." Journal of sound and vibration
- (5) Jian F Hou 2002 "Blade Vibrations Coupled with Disc."AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materias Conference
- (6) 문당#1 ST 고압 터빈 22단 블레이드 손상 관련 검토자문 보고서
- (7) 김계연, 2002,"비틀림 진동에 의한 증기터빈 최종단 날개와 로터의 연성 진동 연구",충남 대학교 석사 학위 논문
- (8) ARTHUR LEISSA , 1981 "Vibration Aspects of Rotating Turbomachinery Blades." Applied Mechanics Reviews