

고속 구동축의 지지부강성이 안정성에 미치는 영향

Effects of Foundation Stiffness on the Stability of Supercritical Driveshafts

신 응 수† · 김 태 광*

Eung-Soo Shin and Tai-Gwang Kim

Key Words : Stability(안정성), Supercritical Driveshafts(초임계 구동축), Internal Damping(내부감쇠), Foundation Stiffness(지지부강성)

ABSTRACT

This paper is to investigate the effects of support conditions on the whirling stability of a supercritical composite driveshaft. Two system parameters are rigorously considered: one is the bending stiffness of the support beam/bearings and the other is the rotating internal damping of the shaft. An analytic model is developed based on finite element methods and an eigenvalue analysis is employed to estimate the shaft stability under supercritical operating conditions. Results show that the internal damping causes the whirling instability at a supercritical speed, as demonstrated in other previous studies. However, the bending stiffness of the support beam is found to affect greatly the stability behaviors of a supercritical shaft and several combinations of the shaft/beam stiffness can be identified to guarantee the stable operation even in a supercritical region.

1. 서 론

최근 들어 동력을 전달하는 구동축이 갈수록 고속화하고 경량화함에 따라 기존의 금속 구동축을 대체한 다양한 재료의 구동축이 등장하고 있다. 복합재료 구동축도 이중의 하나라고 할 수 있는데 축이 가벼울 뿐 아니라 선택적으로 축의 특성을 설계할 수 있다는 장점을 가지고 있어 헬리콥터 꼬리날개 구동시스템 등 여러 분야에서 활발하게 연구되고 있다.

그런데 복합재료로 만들어진 구동축은 고속회전 시 축의 굽힘 모드에 대한 고유진동수보다도 축 회전주파수가 높은 초임계 상태로 운전되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 초임계 상태에서 구동축의 안정성을 유지하는 것은 매우 중요하며 특히 휘둘림에 의한 불안정을 야기할 수 있는 원인들에 대한 면밀한 분석이 필요하다.

일반적인 금속 구동축의 경우는 지지 베어링의 특성이 구동축의 안정성에 미치는 영향에 대해 많은 연구들이 발표된 바 있다. El-Marhomy (1997), Kalita 등 (2004)은 베어링이 구동축 안정성에 미치는 연구 결과를 발표했으며, Brusa 등 (2005)과 Wettergren 등 (1996)은 내부 감쇠의 영향을 분석하였다. 하지만 초고속 복합재료 구동축은 낮은 굽힘 강성과 높은 내부감쇠를 갖고 있어 금속 구동축과는 그 특성이 매우 다르다. 이에 대해서도 많은 연구가 진행되어 왔는데 Chen 등 (1998)은 축하중이 안정성에 미치는 영향을 분석하였으며, Na 등 (2006)은 구동축의 단면 형태가 구동축의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

하지만 위에 언급한 연구 중에서 내부 강성이 상대적으로 큰 복합재의 특성이 초임계 복합재 구동축의 안정성에 미치는 영향을 분석한 경우는 없으며 특히 구동축의 지지 조건까지 포함한 안정성 분석은 일반 금속 구동축의 경우에도 고려되지 않았다. 본 연구에서는 구동축의 내부 감쇠와 축 지지 강성이 초임계 상태에서의 안정성에 미치는 영향을 분석하고자한다.

† 교신저자 ; 충북대학교 기계공학부
E-mail : esshin@cbnu.ac.kr
Tel : (043) 261-3150, Fax : (043) 263-2448

* 충북대학교 기계공학부

2. 초임계 구동축 모델

본 연구의 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 고속으로 회전하는 복합재 구동축과 이를 양 끝단에서 지지하는 베어링 및 한쪽 끝단이 고정되어 베어링을 지지하고 있는 외팔보로 구성되어 있다. 이는 Boeing AH-64 헬리콥터의 기본 형태 및 구조로부터 기존의 알루미늄 구동축을 복합재로 대체한 시스템으로 복합소재는 탄소 섬유 T700과 폴리에탄 Adiprene-L100의 모재로 되어 있다. 특히 모재가 매우 유연하여 헬리콥터 꼬리날개와 같이 축을 지지하는 보가 양력을 받아 끝단에 큰 굽힘 변형이 발생하는 시스템에서는 효과적으로 변형을 흡수할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

Table 1 Shaft descriptions

Fundamental dimensions (m)	Outer diameter	0.1143
	Length	7.26
Material properties	Modulus (MPa)	Longitudinal: 115 Transverse: 0.359 Shear: 0.250
	Loss factor	Longitudinal: 0.011 Transverse: 0.114 Shear: 0.112
Natural frequencies (Hz)	1st	16.75
	2nd	46.08

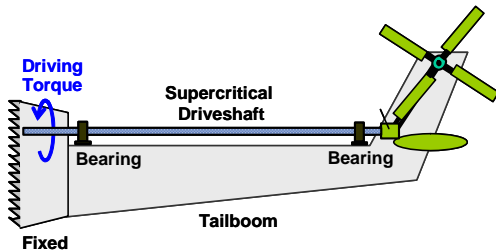


Fig. 1 Schematic of the supercritical shaft system

반면 구동축의 유연성 증가는 굽힘 모드에 대한 고유진동수를 저하시키며 구동축의 정상 회전속도인 4800 rpm 이하로 떨어지게 되어 초임계 상태가 된다.

3. 안정성 해석

시스템의 해석 모델은 유한요소법에 근거하여 식(1)과 같이 유도하였다.

$$[M]\ddot{q} + ([C] + [G])\dot{q} + ([K_S] + [K_R])q = \{Q\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$, $[C]$ 는 각각 질량 및 감쇠 행렬이고 $[G]$ 는 자이로스코픽 행렬로서 구동축의 회전속도의 함수이다. 또한 $[K_S]$, $[K_R]$ 은 각각 강성 행렬과 회전내부감쇠(rotating internal damping) 행렬이고 $\{q\}$ 는 구동축 및 지지보의 축방향 및 횡방향의 변위벡터이며 $\{Q\}$ 는 외부하중벡터이다. 특히 초임계 구동축에서 발생하는 선회(whirling) 불안정은 $[K_R]$ 과 직접 관련이 있는데 본 연구에서는 복합소재의 재료 특성을 식(2)와 같이 복소 강성의 형태로 나타내고 그 허수부를 내부 감쇠항으로 취하여 이를 유한요소 모델에 포함하였다.

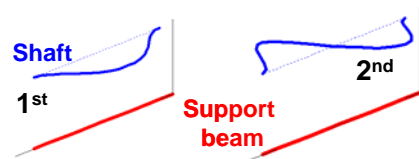
$$\begin{aligned} E_{\text{Fiber}} &= E_L(1 + i \cdot \eta_L) \\ E_{\text{Matrix}} &= E_T(1 + i \cdot \eta_T) \\ G_S &= G_{12}(1 + i \cdot \eta_{12}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 E , G 는 각각 탄성 계수 및 전단 계수이고 η 는 손실계수이다.

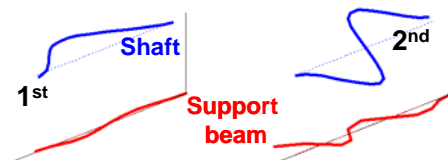
시스템의 안정성은 고유치 해석으로부터 판별할 수 있다. 먼저 식(1)을 상태방정식의 표준 형태로 변형하면 다음과 같다.

$$[A] \equiv \begin{bmatrix} 0 & [I] \\ -[M]^{-1}([K] + [K_R]) & -[M]^{-1}([C] + [G]) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $[A]$ 에 대한 고유치 해석을 수행하여 모든 고유치의 실수부가 음의 값이면 계는 안정하지만 어느 하나라도 양의 값을 가지면 계는 불안정하다. Fig. 2는 고유치 해석에 따른 시스템의 고유진동모드를 도시한 것이다.



(a) Relative beam stiffness=10000



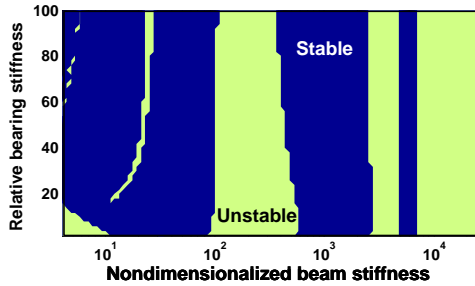
(b) Relative beam stiffness=100

Fig. 2 Natural mode shapes

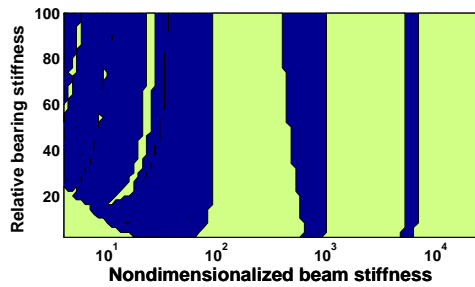
4. 결과 분석

4.1 지지보 강성이 안정성에 미치는 영향

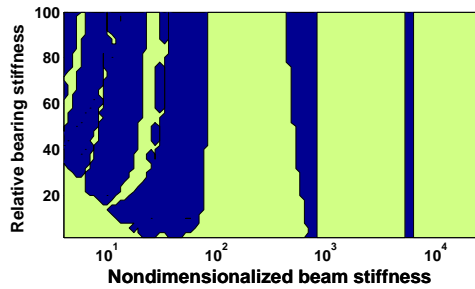
Fig. 3은 구동축을 지지하는 외팔보 및 베어링의 강성 변화에 따른 초임계 구동축의 선회 안정영역선도로서 질게 나타난 부분이 안정영역을, 옅은 부분이 불안정영역을 의미한다.



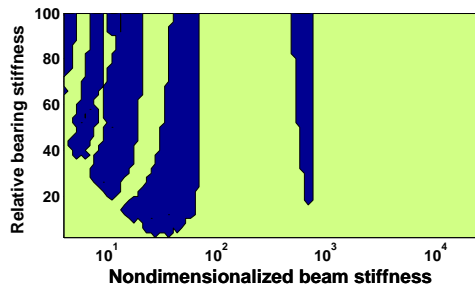
(a) 2400 rpm



(b) 3600 rpm



(c) 4800 rpm



(d) 6000 rpm

Fig. 3 Stability diagram vs. stiffness

안정선도의 가로축은 지지보의 굽힘강성으로서 구동축의 굽힘강성에 대해 무차원화시켰으며 세로축은 베어링 강성을 지지보 끝단의 등가굽힘강성에 대해 무차원화시켜 나타낸 것이다. 또한 구동축의 임계 조건은 Table 1에서 1차고유진동수가 16.75 Hz 이므로 이는 회전속도 1005 rpm에 해당되며 따라서 Fig. 3의 (a)-(d)의 회전속도는 모두 초임계 조건에 해당된다.

Fig. 3의 결과를 보면 베어링 강성의 경우 강성이 커짐에 따라 안정 영역이 약간 확장되기는 하지만 그 영향이 그렇게 크지는 않다는 것을 알 수 있다. 반면 지지보의 강성의 경우 구동축의 선회 안정성에 매우 큰 영향을 미치는 것을 안정영역선도의 가로축으로의 변화를 통해서 확인할 수 있다. 즉, 베어링의 강성에 관계없이 지지보의 강성이 변화함에 따라 안정 영역과 불안정 영역이 주기적으로 반복되는 것을 관찰할 수 있다. 그 이유는 지지보의 강성 변화가 구동축의 동특성, 즉 고유진동수 및 고유진동모드에 직접적인 영향을 주기 때문인 것으로 보인다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 지지보의 굽힘강성이 구동축에 비해 크면 지지보는 거의 거동하지 않는 반면 지지보의 강성이 감소하면 구동축과 지지보의 횡방향 거동 사이에 상호 연성이 발생하여 회전하지 않는 지지보가 초임계 회전하는 구동축을 안정화하는 것으로 판단된다.

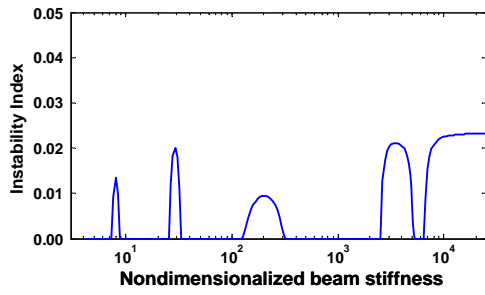
반면에 Fig. 3의 안정영역선도에서 회전속도와 지지보 강성의 복합적인 영향은 별로 크지 않은 것으로 보인다. 즉 회전속도가 2400 rpm에서 증가함에 따라 불안정영역이 약간 넓어지는 하지만 전체 형상 및 크기의 변화는 아주 미미하다.

Fig. 4는 구동축이 불안정해지는 정도를 지수로 나타낸 것으로 식(3)에서 불안정모드에 해당하는 고유치의 실수부를 허수부로 나눈값으로 정의된다. 불안정지수는 지지보의 강성이 클수록 커지는데 이는 지지보와 구동축 거동 사이의 연성이 적어져서 지지보가 stabilizer의 역할을 하지 못하기 때문으로 보인다.

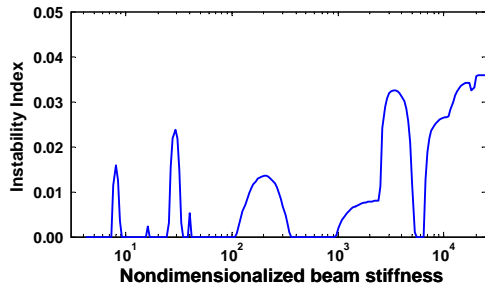
4.2 회전내부감쇠가 안정성에 미치는 영향

Fig. 5는 구동축의 내부감쇠 특성의 변화에 따른 안정영역을 도시한 것으로 내부감쇠를 정량화한 파라미터인 손실계수와 무차원화시킨 지지보 강성에 대해 나타냈다. 그 결과를 보면 회전내부감쇠가 증가할수록 구동축의 불안정 영역이 약간 확장되기는 하지만 그 영향이 크지는 않은 것을 알 수 있다. 즉 손실계수의 크기보다는 지지보 강성에 따라 안정 영역 또는 불안정 영역이 정해진다는 것을 관찰할 수 있다.

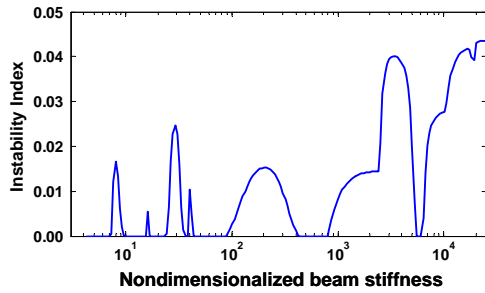
반면에 Fig. 5로부터 손실계수와 회전속도가 복합적으로 선회 안정성에 미치는 영향은 매우 크다는 것을 확인할 수 있다. 즉 회전속도가 2400 rpm인 Fig. 5(a)에서는 지지보의 강성이 매우 큰 경우를 제외한 거의 전 영역에서 구동축이 안정하지만 회전속도가 2배가 되는 Fig. 5(c)에서는 안정 영역이 급격하게 축소된 것을 알 수 있다. 이러한 복합적인 영향으로 계의 불안정지수를 도시한 Fig. 6에서도 회전속도의 변화에 따라 불안정지수가 크게 변하게 된다.



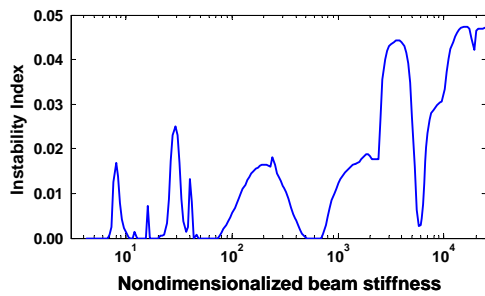
(a) 2400 rpm



(b) 3600 rpm

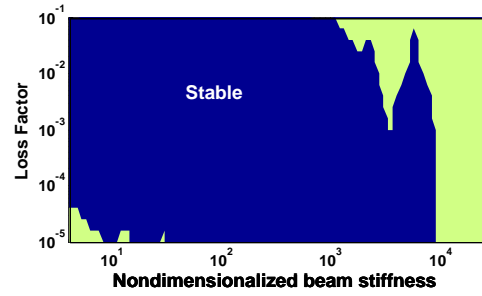


(c) 4800 rpm

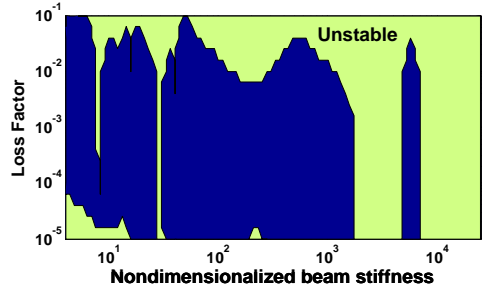


(d) 6000 rpm

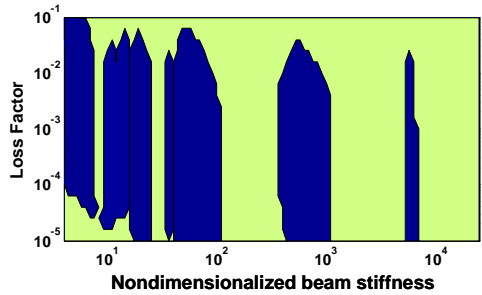
Fig. 4 Instability index vs. stiffness



(a) 2400 rpm



(b) 3600 rpm



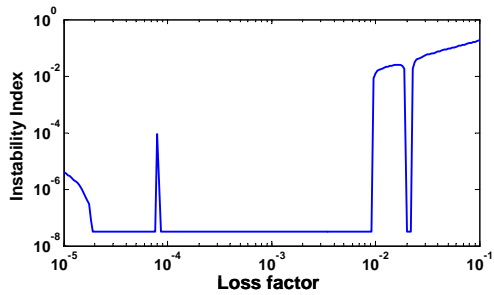
(c) 4800 rpm

Fig. 5 Stability diagram vs. internal damping

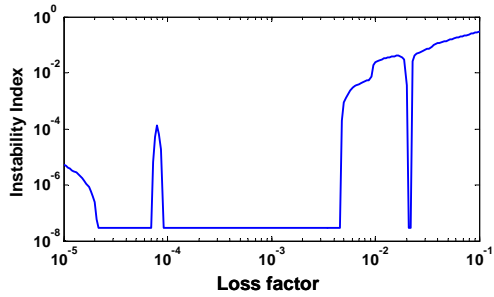
5. 결론

본 연구에서는 복합소재 구동축이 초임계 상태로 회전할 때 축의 내부감쇠 및 축을 지지하는 외팔보의 강성이 계의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 그에 따른 결과는 다음과 같다.

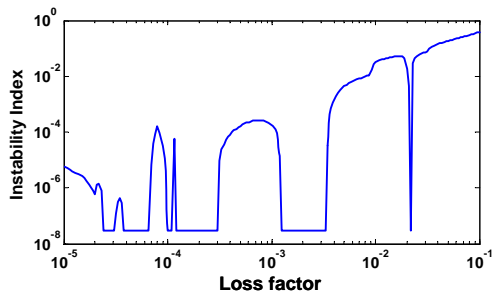
(1) 초임계 상태로 운전되는 구동축에서 발생하는 선회 불안정성에 영향을 주는 요인은 여러 가지가 있는데 본 연구에서는 구동축을 지지하는 보의 강성이 축의 안정성에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.



(a) 2400 rpm



(b) 3600 rpm



(c) 4800 rpm

Fig. 6 Instability index vs. internal damping

(2) 복합소재 구동축의 설계에서 축을 지지하는 강성은 축 자체의 강성에 비해 매우 크므로 고정된 경계조건으로 단순화시키는 경우가 일반적이다. 하지만 초임계 조건에서의 안정성 해석에서는 이러한 단순화가 불안정영역을 과도하게 예측하는 결과를 초래할 수 있다. 구동축의 강성에 따라 횡방향 거동에 대해 연성이 발생할 수 있으며 그 결과로 초임계 구동축을 안정화시킬 수 있다.

(3) 축을 직접적으로 지지하는 베어링 강성이 축의 선회 안정성에 미치는 영향은 미미하다. 반면 구동축의 내부 감쇠는 안정성에 매우 밀접한 관련이 있으며 초임계 상태에서 계의 불안정을 야기하는 가장 큰 원인이다. 하지만 정량적인 관점에서 볼 때 내부감쇠의 크기 변화에 따라 구동축의 안정영역이 바뀌는 정도는 크지 않다.

(4) 지지보의 강성 변화에 따라 구동축의 안정 영역과 불안정 영역이 주기적으로 나타나는 것을 결과에서 확인할 수 있으며 이에 관해서는 향후 보다 면밀한 분석이 필요하다.

후기

이 논문은 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

(1) A. El-Marhomy, 1999, "Parametric Stability Analysis of Rotor-Bearing Systems," *Proc. Natl. Sci. Coun. ROC(A)*, Vol. 23, No. 1, pp. 42-49.

(2) M. Kalita and S. Kakoty, 2004, "Analysis of Whirl Speeds for Rotor-Bearing Systems Supported on Fluid Film Bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, pp. 1369-1380.

(3) L. Chen and W. Peng, 1998, "The Stability Behavior of Rotating Composite Shafts under Axial Compressive Loads," *Composite Structures*, Vol. 41, pp. 253-263.

(4) E. Brusa, and G. Zolfini, 2005, "Non-Synchronous Rotating Effects in Gyroscopic Rotating Systems," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 281, pp. 815-834.

(5) H. Wettergren and K. Olsson, 1996, "Dynamic Instability of a Rotating Asymmetric Shaft with Internal Viscous Damping Supported in Anisotropic Bearings," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 195, No. 1, pp. 75-84.

(6) S. Na, H. Yoon, and L. Librescu, 2006, "Effects of taper ratio on vibration and stability of a composite thin-walled spinning shaft," *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, pp. 362-371.

(7) H. DeSmidt, K. W. Wang and E. Smith, 2002, "Coupled Torsional-Lateral Stability of a Shaft-Disk System Driven through a Universal Joint," *ASME J. of Applied Mechanics*, Vol. 69, No. 3, pp. 261-273.