

무베어링 헬리콥터 로터 시스템의 동특성 해석

Dynamic Characteristic Analyses of a Bearingless Helicopter Rotor Systems

기영중[†] · 윤철용^{*} · 김승호^{*}

Youngjung Kee, Chul-Yong Yun, Seung-Ho Kim

Key Words : bearingless rotor(무베어링 로터), 유연보(flexbeam), 토크튜브(torque tube), 동특성(dynamic characteristic), 스너버-댐퍼(snubber-damper), 헬리콥터(helicopter)

ABSTRACT

Recently, KARI(Korea Aerospace Research Institute) has been developing a modern 11.5m diameter four bladed bearingless main rotor system, and this rotor system can be used for 7,000lb class helicopter. Flexbeam and torque tube can be considered as the key structural components, and large elastic twist of flexbeam induced by pitch control motion of torque tube can influence the nonlinear aeroelastic behavior.

In this paper, the dynamic characteristic analysis results of bearingless rotor system were presented. In order to construct a input model and validate the analysis procedures, calculated results using the comprehensive helicopter analysis program CAMRAD II were compared with the measured natural frequencies and lag damping data from small-scale wind tunnel test. Next, the analysis model was extended to a full-scale model, and the dynamic analysis results were presented.

1. 서 론

최근 우리나라에서는 한국형기동헬기(KUH, Korean Utility Helicopter)를 비롯하여 공격형헬기, 민수형 헬기 및 스마트 무인기 등 회전익 항공기에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있으며, 특히 비행에 필요한 추력과 양력 및 조종력을 발생시키는 헬리콥터의 핵심구성품인 로터 시스템의 연구개발에 많은 관심과 노력이 집중되고 있다.

헬리콥터 로터 시스템은 페더링(feathering)운동, 플랩(flap)운동 및 리드-래그(lead-lag)운동을 구현하기 위한 힌지(hinge)의 구조적인 형태와 적용 여부에 따라 시이소형(seesaw), 관절형(articulated), 무힌지형(hingeless) 및 무베어링형(bearingless) 로터 시스템

으로 구분할 수 있다. 이중 무베어링 로터 시스템은 기존 로터 시스템에 비해 기계적인 단순함, 로터의 경량화, 제작비용의 절감, 조종력의 증가 및 허브 항력의 감소 등 많은 장점이 있으며, 이로 인해 차세대 로터 시스템으로써 무베어링 로터 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

무베어링 로터 시스템은 Fig.1에서 볼 수 있듯이 블레이드와 허브 사이에 위치한 플렉스빔(flexbeam)과 토크튜브(torque tube)로 구성되며, 플랩운동, 리드-래그운동 및 페더링운동을 플렉스빔의 굽힘 변형과 비틀림 변형을 통해 담당하게 된다. 블레이드 피치각(pitch angle)은 토크튜브의 회전에 따른 플렉스빔의 비틀림 변형을 통해 조절이 가능하며, 이를 위해 토크튜브의 비틀림강성(torsion stiffness)은 플렉스빔에 비해 상대적으로 큰 값을 갖는다. 또한 피치링크(pitch link)와 토크튜브의 거동에 따라 발생하는 굽힘-비틀림 연성과 플렉스빔의 대변형은 무베어링 로터 시스템이 기하학적으로 비선형 거동을 하게하며, 관절형 또는 무힌지형 로터 시스템이 단일 하중 경로인 것과는 달리 무베어링 로터 시스템은 플렉스빔과 토크튜브에 원심력, 비틀림

† 교신저자; 정회원, 한국항공우주연구원
E-mail : naltlguy@kari.re.kr
Tel : 042-860-2294, Fax : 042-870-3590
* 한국항공우주연구원

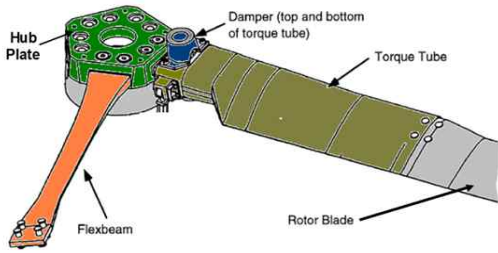


Fig.1 Configuration of bearingless main rotor (RAH-66)

하중 및 굽힘하중이 분산되어 전달되는 다중 하중 경로의 특성을 지니고 있다. 더불어 허브에 가해지는 하중의 크기를 제한하는 동시에 조종력을 증가시키기 위해서 면내로 유연한(soft-inplane, $\omega_r < \Omega$) 특성을 갖도록 로터 시스템이 설계됨에 따라 공력탄성학적 불안정 상태에 노출되어 있으므로 이에 대한 해석이 적합하게 수행되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 무베어링 로터 시스템만이 지닌 고유한 특성을 모두 고려할 수 있도록 해석모델을 구성하였으며, 참고 문헌[1]에 제시된 축소형 무베어링 로터 시스템의 실험값과 비교함으로써 해석 방법의 적절성을 확인하였다. 또한 해석모델을 본 연구원에서 개발 중인 실물 크기의 무베어링 로터 시스템으로 확장하여 동특성 해석을 수행하여 그 결과를 제시하였다.

2 무베어링 로터 모델링

2.1 Small-scale rotor system

무베어링 로터 시스템의 동특성 해석을 위한 모델 생성을 위해 참고문헌[1,2]에 제시된 설계 데이터를 이용하였다. 축소형 무베어링 로터 시스템은 회전직경이 1.8m, 플렉스빔은 로터 회전중심으로부터 반경방향으로 19.7%R 까지 적용되었다. 또한 토크튜브는 9%R~26.5%R까지 적용되었으며, 그밖에 해석모델 생성을 위해 사용된 주요

Table 1 Small-scale bearingless rotor system

Property	Value
Rotor radius (m)	0.902
Number of blades	2
Blade chord (m)	0.0419
Solidity (σ)	0.029
Airfoil section profile	NACA 23012
Blade twist (deg)	0.0
Flexbeam length (m)	0.1016
" width (m)	0.0813
" thickness (M)	0.0361

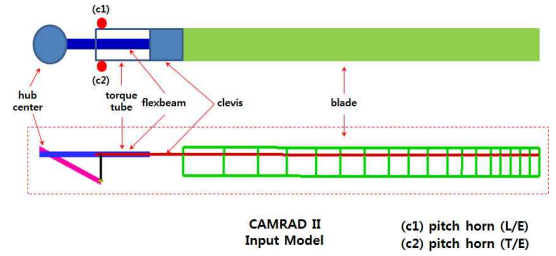
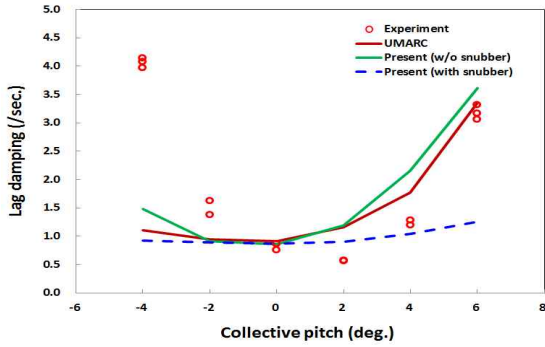


Fig.2 CAMRAD II analysis model (Ref.[1])

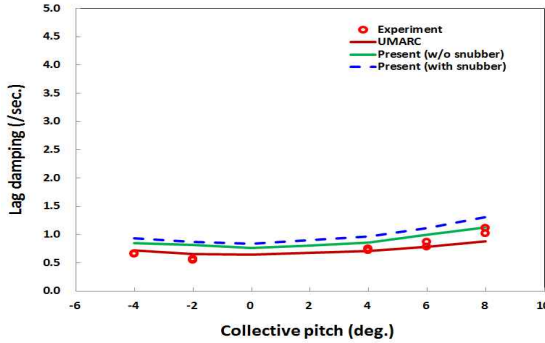
요설계변수를 Table 1에 제시하였다.

Fig.2는 축소형 무베어링 로터 시스템의 구성과 CAMRAD II를 통해 생성된 해석모델을 보여주고 있다. 플렉스빔과 토크튜브 및 블레이드의 탄성거동을 적절하게 예측하기 위해서 플렉스빔 구간의 경우에 3개의 빔요소(beam element)를 적용하였으며, 토크튜브와 블레이드는 각각 2개와 6개의 빔요소를 적용하였다. 피치혼(pitch-horn)이 토크튜브의 앞전(L/E)에 부착된 조건과 뒷전(T/E)에 부착된 조건으로 구분하여 블레이드 피치각 변화에 따른 1차 리드-레그모드의 댐핑 값을 계산하였으며, 실험 측정값[1]과 비교한 결과 댐핑 값의 수준과 변화경향이 모두 비슷한 결과를 나타내었으며, 이를 통해 무베어링 로터 시스템의 특성을 평가하기 위한 해석모델이 적합하게 생성되었음을 확인할 수 있었다.

Fig.3은 축소형 무베어링 로터 시스템의 공력탄성학적 안정성 확보여부를 검토하기 위한 결과로써 피치혼의 장착위치와 블레이드 피치각 변화에 따른 1차 리드-레그모드의 댐핑 값 변화를 보여주고 있다. 피치혼이 토크튜브의 앞전(leading edge)과 뒷전(trailing edge)에 장착된 경우 모두 댐핑 특성이 공력탄성학적으로 안정한 영역에 포함됨을 볼 수 있었으며, 피치혼이 토크튜브의 앞전에 장착된 경우 댐핑의 효과가 크게 나타났으나, 피치혼이 토크튜브의 뒷전에 장착된 경우에는 블레이드 피치각이 변하여도 댐핑 값이 일정한 수준을 나타냄을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 참고문헌[2]에 제시된 바와 같이 피치-플랩 연성에 의해 블레이드 피치각이 증가함에 따라 플랩 방향의 굽힘도 함께 증가하며, 결국 블레이드 단면의 유효받음각이 증가 또는 감소함으로써 공기력에 의한 리드-레그방향의 댐핑 효과가 변하는 것으로 이해할 수 있다. 또한 대부분의 무베어링 로터 시스템에는 플렉스빔과 토크튜브를 구조적으로 결합해주며,



(a) Pith link at leading edge, Case-1



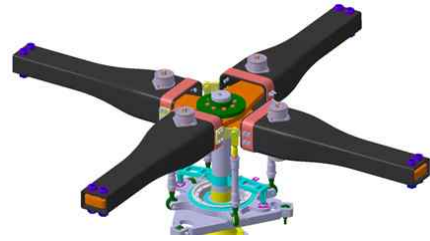
(b) Pitch link at trailing edge, Case-2

Fig.3 1st lead-lag damping versus blade pitch angle

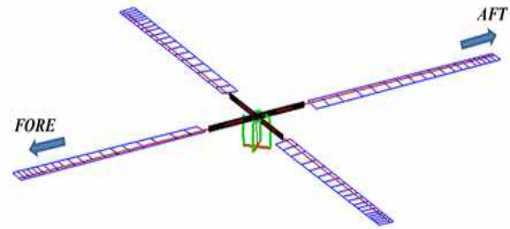
블레이드 변형에 따라 토크튜브가 플랩방향과 피치 방향으로 자연스럽게 회전할 수 있도록 스너버(snubber)가 장착되므로 해석모델에 스너버를 추가하여 댐핑 특성을 분석하였다. Fig.3에 제시된 바와 같이 스너버와 함께 토크튜브 앞전에 피치링크가 장착된 경우 전반적으로 댐핑의 크기가 감소함을 볼 수 있으며, 토크튜브 뒷전에 피치링크가 장착된 경우에는 댐핑의 크기가 증가함을 볼 수 있었다. 따라서 무베어링 로터 시스템은 스너버 적용을 통해 피치-플랩 연성의 효과를 제한할 수 있으며, 이를 통해 1차 리드-래그 모드의 댐핑 특성을 조절할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2 Full-scale bearingless rotor system

Property	Value
Rotor radius (m)	5.74
Number of blades	4
Blade chord (m)	0.36
Solidity (σ)	0.08
Airfoil section profile	NACA 23012
Blade twist (deg)	-12.0
Rotor speed (rpm)	349



(a) Full-scale bearingless rotor system



(b) CAMRAD II analysis model

Fig.4 Configuration of bearingless rotor system

2.2 Full-scale rotor system

본 연구원에서 개발이 진행 중인 무베어링 로터 시스템은 7,000lb급 헬리콥터에 적용하기 위한 로터 시스템으로써 직경이 11.5m이며, 4개의 블레이드가 장착된다. 허브는 토크튜브, 플렉스빔, 스너버 및 피치 혼으로 구성되며, 이중 토크튜브와 플렉스빔은 피로 수명 향상과 정비요소 감소를 위해 복합재료를 적용하였다. 또한 대표적인 공력탄성학적 불안정 상태인 지상공진(ground resonance)과 공중공진(air resonance) 현상을 방지하기 위해 추가적인 댐핑을 제공해주는 탄성체댐퍼를 적용하였다. 따라서 실물 크기의 무베어링 로터 시스템의 해석모델 생성 시 모든 구성품의 물리적 특성이 적합하게 반영될 수 있도록 하였으며, 플렉스빔과 토크튜브에 의해 원심력, 비틀림하중 및 굽힘하중이 분산되어 전달되는 다중 하중 경로의 특성을 나타낼 수 있도록 하였다. Table 2에 해석모델 생성에 사용된 주요 설계변수들을 제시하였으며, Fig.4에 현재 개발이 진행 중인 무베어링 로터 시스템의 형상과 CAMRAD II를 통해 생성된 해석모델을 나타내었다. 플렉스빔과 토크튜브 및 블레이드의 탄성거동을 적절하게 예측하기 위해서 플렉스빔 구간의 경우에 5개의 빔요소를 적용하였으며, 토크튜브와 블레이드는 각각 4개와 5개의 빔요소를 적용하였다. 또한 스너버와 탄성체댐퍼의 영향을 고려할 수 있도록 해당 물리량을 해석모델에 포함하였다.

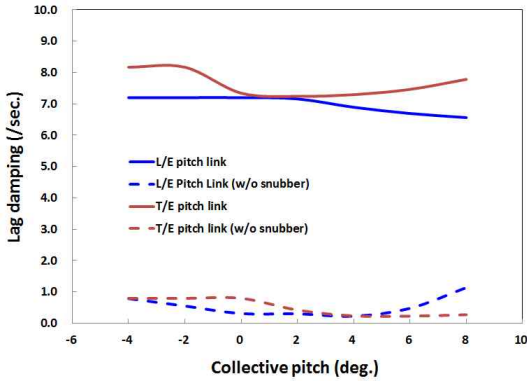


Fig.5 1st lead-lag damping versus blade pitch angle

3. 해석결과 및 분석

3.1 스너버-댐퍼 조립체의 특성

스너버 장착여부에 따라 고유진동수의 변화경향을 분석하기 위하여 모달해석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 3에 제시하였다. 스너버가 장착된 경우 1차 토션 모드의 고유진동수가 증가하였으며, 플랩 및 리그-래드 모드의 고유진동수에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 피치링크와 유사하게 스너버가 장착됨으로써 블레이드 루트(blade root) 부위의 수직방향 구속조건을 강화시켜 전체적으로 로터 시스템의 비틀림 강성을 증가시켜 토션 모드의 고유진동수가 증가하는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 스너버의 강성 조절을 통해 적절한 1차 토션 모드의 고유진동수를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

스너버와 함께 지상공진 및 공중공진을 방지하기 위해 로터 시스템의 면내 감쇠를 증가시킬 수 있도록 탄성체댐퍼가 사용되며, 이를 해석모델에 포함하여 블레이드 피치각 변화에 따른 댐핑 값의 변화를 분석하였다. Fig.5에 제시된 바와 같이 피치링크가 토크튜브의 앞전 또는 뒷전에 장착된 경우 블레이드 피치각이

Table 3 Rotating modal frequencies (per rev)

Mode	with snubber	w/o snubber
1st flap	1.04	1.04
2nd flap	2.61	2.63
3rd flap	4.58	4.65
1st lag	0.71	0.69
2nd lag	4.92	4.95
1st torsion	3.10	4.65

변하여도 1차 리드-래그모드의 댐핑 특성에 크게 영향을 미치지 않음을 볼 수 있으며, 이를 통해 두 경우 모두 스너버에 의해 피치-플랩 연성이 비슷한 수준으로 제한된다는 것을 알 수 있었다. 또한 탄성체댐퍼를 함께 고려하여 댐핑 특성을 분석한 결과 탄성체댐퍼가 장착되지 않은 경우에 비해 1차 리드-래그 모드의 댐핑 효과가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

3.2 회전고유진동수

Fig.6은 로터 시스템의 회전속도 변화에 따른 플랩, 리드-래그 및 토션모드의 고유진동수 변화를 보여 주고 있다. 무베어링 로터의 운용회전수는 349rpm 이며, 회전속도 증가에 따라 원심력에 의한 강성 증대로 인해 플랩, 리드-래그 및 토션 모드의 고유진동수가 모두 증가함을 확인할 수 있었다. 1차 리드-래그모드의 고유진동수는 0.7/rev으로써 soft-inplane ($\omega_s < \Omega$) 특성을 만족하도록 설계되었음을 확인할 수 있었으며, 1차 플랩모드의 고유진동수는 1.04/rev, 1차 토션모드의 고유진동수는 4.65/rev으로 확인되었다. 특히 스너버의 영향을 고려하지 않은 결과에 비해 스너버가 장착된 경우 1차 토션모드의 고유진동수가 증가함을 볼 수 있었다. 또한 각 모드의 고유진동수가 로터 회전수의 정수배에 해당하는 n/rev으로부터 이격 되어 있어 공진에 의해 발생하는 불안정 상태로부터 안전함을 확인할 수 있었다.

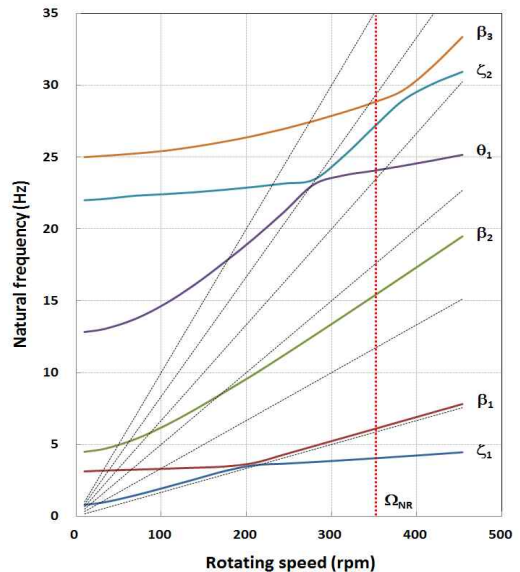
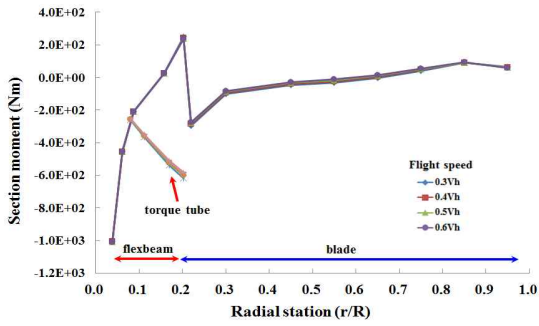
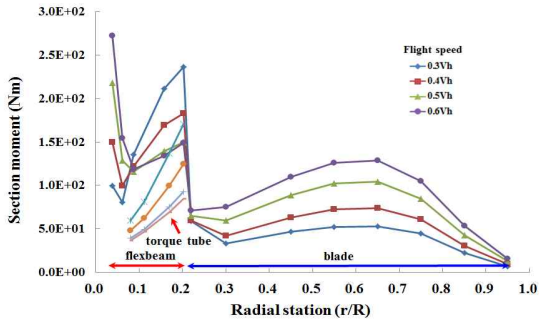


Fig.6 Bearingless main rotor fan plot

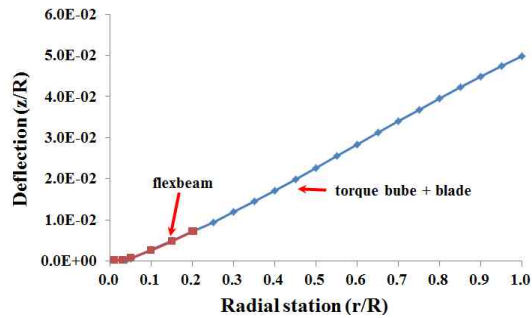


(a) Steady moment

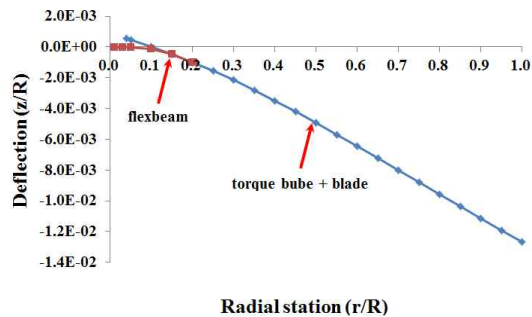


(b) Dynamic moment

Fig.7 Flap bending moment distribution



(a) Flap deflection



(b) Lag deflection

Fig.8 Deflections of blade and flexbeam

3.3 로터 하중 및 변형

동일한 로터 추력($C_T/\sigma=0.07$)조건으로 자유후류(free wake) 공기력모델을 이용하여 전진비행속도 변화에 따른 로터 하중의 변화를 분석하였으며, 이중 플랩모멘트의 변화를 Fig.7에 제시하였다. 비행속도가 증가함에 따라 플랩모멘트의 동적성분이 점차 증가함을 볼 수 있으며, 토크튜브의 경우 스너버와 연결되는 지점에서 플랩모멘트 값이 최소가 됨을 볼 수 있었다. 또한 플렉스빔과 블레이드의 플랩강성의 차이로 인해 플렉스빔 경계 지점에서 플랩모멘트가 급격히 변함을 확인할 수 있었다.

Fig.8은 무베어링 로터 시스템에 작용하는 하중에 의한 플렉스빔, 토크튜브 및 블레이드의 변형을 보여 주고 있다. 플렉스빔의 변형에 의해 플랩방향과 래그 방향의 변형이 발생하였으며, 토크튜브의 변형은 상대적으로 매우 작은 수준임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 축소형 무베어링 로터 시스템의 동특성 해석결과와 시험 측정값의 비교를 통해 해석모델의 적절성을 확인하였으며, 이를 바탕으로 해석모델을 실물 크기의 무베어링 로터 시스템으로 확장하였다. 토크튜브와 피치혼의 기하학적인 연결특성에 따라 비틀림-굽힘 현상의 효과가 다르게 나타남을 확인하였으며, 스너버를 장착할 경우 피치-플랩 연성을 제한할 수 있으며, 1차 토션모드의 고유진동수가 증가함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 항공우주부품기술개발사업 연구결과 중 일부이며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Seth Dawson, et all, "An experimental investigation of the stability of a bearingless model rotor in hover", American Helicopter Society 38th Annual Forum, May 1982
- [2] Farhan Gandhi, et all, "An aeroelastic analysis methodology for bearingless main rotor helicopters, Journal of the American Helicopter Society, pp.66-75, Vol.43, 1998