

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(5), 439-446(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.5.439

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

헬리콥터 무베어링 주로터의 동특성 시험

윤철용*, 송근웅, 김덕관

Dynamic Characteristics of Helicopter Bearingless Main Rotor

Chul Yong Yun*, Keun Woong Song and Deog-Kwan Kim

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

The characteristics of bearingless main rotor of helicopter are investigated through non-rotating tests and rotating tests. The stiffness and natural frequencies of rotor blades, flexbeam, and torque tube which are core components of bearingless rotor are measured to obtain input material properties for rotor analysis. The functional test on ground for assembly of one hub with damper, snubber, and no blade is carried out to check interfaces between components, kinematics of components, and pitch motion ranges under applied loads including centrifugal load. The 4-bladed bearingless rotor with 5.82m of rotor radius is tested on the whirl tower with rotation plane of 9.65m height. The thrust and power are measured to obtain hover performance and the frequencies and dampings of the rotor are obtained by excitation of cyclic pitch by hydraulic actuators.

초 록

이 논문에서는 무베어링 로터의 동특성을 비회전 강성 및 진동수 측정 시험과 회전 휘타워 시험을 통해 살펴보았다. 무베어링 로터의 주요 구성품인 블레이드, 유연보, 토크튜브에 대해 강성 및 고유진동수를 측정하여 해석을 위한 물성치를 확보하였고, 휘타워 시험 전에 댐퍼와 스너버를 장착한 무베어링 로터를 조립하여 지상에서 하중이 부가되는 조건하에 기능시험을 수행하여 로터 구성품간의 간섭 여부, 기구학적 거동 등을 확인하였다. 4개의 블레이드를 가지고 회전반경이 5.82m인 무베어링 로터의 회전 동특성시험을 회전면 높이가 9.65m인 휘타워에서 수행하였다. 정지비행성능을 확인하기 위해 추력과 사용동력을 측정하였으며, 회전시 블레이드의 고유진동수 및 감쇠를 측정하기 위해 유압 가진기를 통하여 사이클릭 가진을 하였다.

Key Words : Helicopter(헬리콥터), Bearingless rotor(무베어링 로터), Dynamic characteristics (동특성), Damping(감쇠), Whirl test(휨시험)

1. 서 론

헬리콥터는 로터 회전을 통해 추력을 발생시

켜 수직 이착륙할 수 있는 비행체로서 근본적으로 진동 및 불안정성에 쉽게 노출되어 있다. 헬리콥터에서 주로터는 추력 및 제어력을 발생하는

† Received : December 24, 2015 Revised : April 10, 2016 Accepted : April 21, 2016

* Corresponding author, E-mail : cyyun@kari.re.kr

헬리콥터의 핵심 시스템으로 최신 개발 경향은 기존의 복잡한 형상대신 단순한 로터 허브 형태를 추구하고 있다. 회전하는 헬리콥터 주로터 허브는 전진방향시 블레이드에서 발생하는 모멘트를 최소화하기 위해 회전면의 방향으로 플랩핑 운동을 하며, 이의 운동이 가능하도록 플랩 힌지 또는 유연보가 존재한다. 회전하는 로터의 플랩핑 운동은 코리올리(Coriolis) 힘에 의해 회전면 내 운동인 항력(또는 래그) 방향 운동을 유발하게 되며, 이의 운동을 허용하기 위해 래그 힌지 또는 유연보가 있다. 또한 블레이드의 받음각 조절을 위해 허브의 피치 조종을 하며 이는 페더링(피치) 방향 운동을 허용하여야 한다. 기존의 관절형 로터는 플랩 힌지, 래그 힌지, 피치베어링이 기계적인 형태로 존재하여 허브가 복잡해지고 정비소요가 많았다. 이를 극복하기 위해 관절형 로터와 무힌지 로터에서 존재하는 힌지와 베어링을 복합재 유연보(Flexbeam)와 토크튜브(Torque Tube)로 대체하여 그 기능을 수행할 수 있는 단순한 허브 형태인 무베어링 로터가 개발되었으며, 이는 로터 무게절감, 정비의 최소화, 신뢰성 향상으로 인해 운용유지비 절감효과를 가져왔다. 이는 고탄성 비틀림 특성이 있는 최신 복합재료를 허브 개발에 적용함으로써 단순한 허브 형상을 개발할 수 있게 되었다. 무베어링 로터에서 플랩방향 및 코드방향에서의 블레이드 운동은 유연보의 탄성변형으로 구현되며, 블레이드 피치 조종은 역시 복합재 유연보의 탄성 비틀림과 토크튜브로 구현된다[1-5]. 스와시플레이트와 토크튜브에 연결된 피치링크는 작동기에 의해 상하방향 운동을 하여 블레이드의 피치 운동을 가능케 한다. 유연보와 토크튜브 사이에는 댐퍼와 스너버가 있어 유연보와 토크튜브의 상대운동에 의한 래그 운동에 대해 댐퍼가 반응하여 래그 모드에 추가적인 댐핑을 제공한다. Fig. 1은 4개의 블레이드가 장착된 무베어링 로터의 형상을 보여주고 있다.

이 논문에서는 로터의 해석 물성치를 확보하

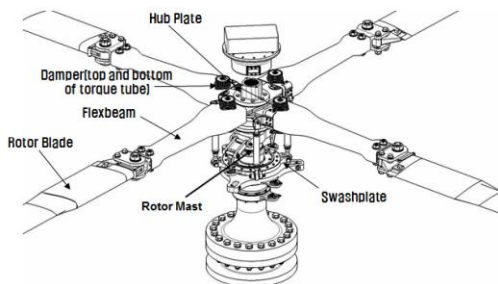


Fig. 1. Bearingless Main Rotor

기 위해 강성 및 고유진동수 측정 시험을 바탕으로 물성치를 보정한 결과를 기술하였고, 로터 허브의 지상기능시험 및 헬다워 회전 시험을 통해 무베어링 로터의 동특성을 확인하였다.

II. 무베어링 로터 비회전 시험

무베어링 로터의 동특성, 안정성, 구조하중, 성능 해석 등 로터의 해석을 위해 블레이드, 유연보, 토크튜브 등 로터를 구성하는 구성품의 물성치 입력값이 중요하다[6]. 이에 로터 구성품의 물성치를 확보하기 위해 질량측정, 강성측정, 비회전시 고유진동수 측정을 수행하여 물성치를 보정하였다. 또한 지상에서 블레이드 없이, 댐퍼, 스너버, 유연보 및 토크튜브가 조립된 상태에서 원심력, 플랩, 래그, 비틀림 하중을 부가하여, 구성품간의 간섭 여부 및 기구학적인 운동을 확인하여 허브 조립체의 안전성을 확인하였다.

2.1 강성 측정

로터 동특성 및 하중 해석 모델에 사용된 물성치를 실험적으로 확인하기 위해 블레이드, 유연보, 토크튜브에 대해 플랩방향 강성, 래그방향 강성, 비틀림 방향 강성 측정 시험을 수행하였다[7-9]. 대상 시험의 플랩방향 강성, 래그방향 강성을 측정하기 위해 특정 단면에 변형율을 측정하는 굽힘 시험을 수행하였고, 비틀림 강성 측정을 위해서는 단면의 비틀림 각 또는 변형율을 측정하는 비틀림 시험을 수행하였다. 측정 결과는 단면 해석 결과와 비교를 수행하였다. 유연보, 토크튜브와 블레이드의 보강된 부분의 단면 물성치는 VABS와 KSec2D를 사용하여 해석하였고[10], 블레이드의 단면 물성치는 Dixon 보고서[3]를 참조하였다. 강성 측정치는 일반적으로 강성 해석치와 차이가 있어, 본 시험 결과는 블레이드, 유연보, 토크튜브의 강성 분포의 경향을 확인하고 강성 분포를 정하기 위한 참고치로 사용하였고, 최종 보정은 고유진동수 측정을 통해 수행하였다. 측정된 결과는 Fig. 2, Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다.

2.2 비회전 고유진동수 측정

무베어링 로터의 블레이드, 유연보, 토크튜브에 대해 해석 모델에 사용될 물성치를 보정하기 위해 비회전시 고유진동수를 측정하였다. 시험대상의 경계조건은 시험환경 구축이 용이하고, 시험값과 해석값의 비교시 경계조건 구현에 영향을 덜 받는 Free-Free조건을 사용하였다. 대상 시제

Table 1. Frequencies of blade, torque tube and flexbeam

Comp.	Mea.	Frequency(Difference), Hz(%)		Mode
	Hz	Not tuned	Tuned	
Blade	5.07	5.10(0.6)	5.06(-0.2)	F1
	15.0	14.81(-1.3)	14.74(-1.7)	F2
	24.3	24.82(2.1)	24.67(1.5)	L1
	29.4	32.78(11.5)	32.33(10.0)	F3
	43.5	34.93(-19.7)	43.49(0.0)	T1
	49.6	61.25(23.5)	60.66(22.3)	F4
	72.5	72.44(-0.1)	72.27(-0.3)	L2
Torque Tube	431	518(20.2)	431.58(0.1)	F1
Flex-beam	15.25	17.18(12.7)	15.21(-0.3)	F1
	47.25	50.18(6.2)	46.06(-2.5)	F2
	79.0	85.24(7.9)	79.00(0.0)	T1
	92.0	99.01(7.6)	91.76(-0.3)	T2
	103.8	114.89(10.7)	104.41(0.6)	F3
	104.5	111.60(6.8)	104.01(-0.5)	L1

를 번지코드를 이용하여 수직으로 매달아 Free-Free 조건 상태에서 모드를 측정할 수 있도록 3개의 가속도계를 사용하였으며, 플랩 및 비틀림 모드를 측정하기 위해 대상 시제 단면의 앞 부분과 뒤 부분에 수직방향으로 각각 가속도계를 장착하였고, 래그 모드 측정을 위해서는 코드 방향으로 가속도계를 장착하였다. 모드 측정을 위해 충격 해머를 사용한 임팩트 해머 로빙방식의 모달 시험을 수행하였다[9]. 대상 시제의 강제모드를 확인하기 위해 수직방향, 수평방향, 비틀림 방향에 대해 강제모드의 고유진동수를 측정하였다. 블레이드와 유연보의 경우 모든 방향에 대해 강제 고유진동수는 1Hz 미만이며, 토크튜브의 경우는 2Hz미만의 강제 고유진동수를 보여 탄성 모드와 확실히 구분할 수 있다.

블레이드, 유연보, 토크튜브의 비회전시 고유진동수를 해석하기 위해 CAMRAD II를 사용하여 번지코드와 수직으로 장착된 대상 시제를 모델링하여 해석하였다.

모달 시험을 통해 측정한 블레이드, 유연보, 토크튜브의 고유진동수와 모드를 Table 1에 정리하였다. 번지코드를 이용한 free-free 경계조건하에서 블레이드의 1차 플랩 고유진동수는 5.07Hz로 측정되었고, 1차 래그 모드 및 1차 비틀림 모드는 각각 24.3Hz와 43.5Hz로 측정되었다. 또한 2차 플랩 모드는 15.0Hz이다. 유연보의 경우 1차 플랩, 래그, 비틀림 모드는 각각 15.25Hz, 104.5Hz, 79.0Hz로 측정되었다. 토크튜브의 경우는 1차 플랩 모드가 431Hz로 측정되었다. 보정

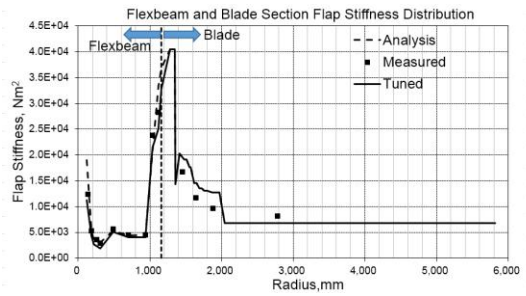


Fig. 2. Flap stiffness distribution

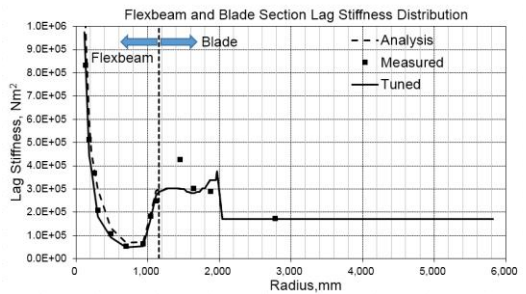


Fig. 3. Lag stiffness distribution

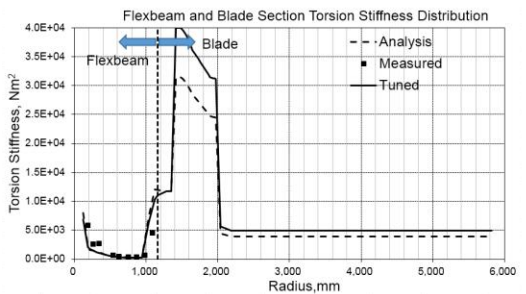


Fig. 4. Torsion stiffness distribution

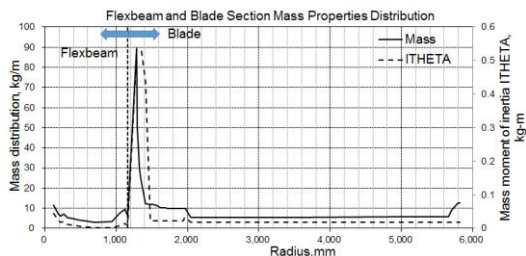


Fig. 5. Mass properties distribution

되기 전의 강성 측정결과만을 반영한 물성치를 사용하여 CAMRAD II로 계산한 고유진동수 역시 Table 1에 함께 정리하였다. 블레이드의 경우 1차 플랩 모드 및 2차 플랩 모드의 해석 결과는

각각 5.1Hz와 14.81Hz로서 측정값과 거의 일치하며, 3차 및 4차 플랩 모드에서는 측정값과 일부 차이가 있다. 래그 모드의 경우는 1차와 2차 모드 모두 약 2%이내의 오차를 보이고 있어 측정값과 해석값이 아주 잘 일치하고 있다. 비틀림 모드의 경우는 해석값이 34.9Hz로서 시험값과 약 20% 정도의 차이를 나타내고 있다. 유연보의 경우는 1차 플랩 모드 및 1차 래그 모드에서 약 10% 정도 해석값과 시험값이 차이를 보이고 있다. 토크튜브의 경우는 시험값과 해석값이 약 20% 정도 차이를 보이고 있다.

블레이드, 유연보 및 토크튜브에 대한 고유진동수 해석이 시험값과 차이가 발생하는 모드에 대해 해석에 사용되는 질량 및 강성 특성을 보정하였다. 블레이드의 경우는 플랩모드와 래그 모드는 고유진동수에 대한 해석값과 시험값이 차이가 적어 강성을 그대로 유지하였다. 20% 정도 차이가 있는 비틀림 모드에 대해서는 고유진동수에 대한 해석값을 시험값과 맞추기 위해 비틀림 고유진동수에 영향을 미치는 단면 관성모멘트와 비틀림 강성 값을 보정하였다. 단면 관성모멘트 (ITHETA)는 기존 해석치에 비해 전체적으로 20% 감소시키고, 비틀림 강성(GJ)은 반경방향으로 균일하게 27%를 증가시켜 해석 입력값을 보정하였다. 유연보의 경우는 플랩 모드, 래그 모드 및 비틀림 모드 모두에서 측정치와 해석치가 차이가 있어 플랩, 래그, 비틀림 방향 강성을 감소시켰다. 유연보 질량 분포의 경우 절단을 통해 단면별로 획득한 자료를 사용하였다. 토크튜브의 경우는 플랩 강성을 저하시켜 해석값과 시험값을 일치시켰다. 물성치를 보정하여 해석한 결과를 Table 1에 정리하였다. 블레이드의 3차 및 4차 플랩 모드를 제외한 다른 모드들은 시험치와 해석치가 잘 일치하고 있다. Fig 2, Fig. 3, 과 Fig. 4는 블레이드와 유연보에 대해 각각 플랩, 래그, 비틀림 방향에 대한 강성분포를 단면 해석, 측정 결과 및 고유진동수 결과를 이용하여 보정한 경우에 대해 함께 도시한 것이다. Fig. 5에서는 해석에 사용한 로터 질량분포와 관성모멘트 분포를 나타내었다.

2.3 댐퍼 및 스너버

무베어링 로터 시스템에 사용된 댐퍼는 실리콘 타입의 Elastomer 댐퍼로서 토크튜브에 장착되며, 댐퍼가 수직방향으로 압축되었을 때 전단 방향의 면내 운동에 대해 강성과 감쇠를 만든다. 사용한 댐퍼의 강성 및 손실계수(Loss factor)는 운용환경에 따라 차이가 있지만 대표적

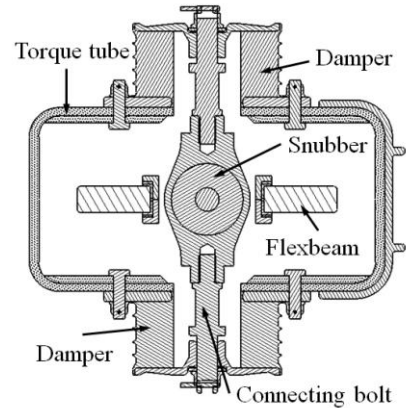


Fig. 6. Damper-Snubber Assembly

인 강성은 400N/mm이고, 손실계수는 0.66값을 가진다. 스너버 역시 실린더 형태의 Elastomer로 제작되었으며 반경방향으로는 강성이 높으며, 축방향, 토션방향 및 코킹 방향 강성은 낮아 피치각이 있을 경우 등 유연보와 토크튜브의 상대운동에 대해 자유롭게 운동할 수 있다. Fig. 6는 댐퍼-스너버가 유연보와 토크튜브에 장착된 단면으로, 댐퍼는 토크튜브의 상부와 하부에 각각 장착되며 댐퍼의 중앙부가 스너버와 연결되어 있다. 토크튜브의 수평방향 운동에 따라 댐퍼는 전단변형이 생겨 댐핑이 생성된다. 스너버는 유연보에 장착되며 수직방향 양쪽 끝단은 볼트 형태로 댐퍼와 연결된다. 스너버의 가운데 부분은 탄성체 고무로서 피치운동에 따라 함께 운동한다.

댐퍼의 강성은 동적변위가 증가할수록 낮아지며, 손실계수는 증가하다 일정해지는 경향이 있으며, 아주 낮은 동적변위일 때는 강성은 매우 높아지고, 손실계수는 매우 낮아져 댐퍼의 성능은 저하된다.

2.4 지상기능시험

무베어링 로터의 지상기능시험은 유연보, 토크튜브, 댐퍼, 스너버, 피치링크, 로터 마스트가 결합된 로터 허브에 대해 지상에서 조립체의 간섭 여부, 기구학적 거동 확인, 피치 범위 능력 확인 등을 확인하기 위하여 수행하였고, 정지비행 및 전진비행조건의 하중 및 변위를 시체에 가하여 로터 허브의 기능을 확인하였다. Fig. 7은 지상기능시험을 위한 시체와 시험 치구를 보여주고 있다. 유연보와 토크튜브의 조립체 끝단을 더미 블락으로 연결하여, 그 블락에 원심력, 플랩하중, 래그하중을 가할 수 있도록 유압작동기와 연결하였다. 하중과 함께 플랩방향 변위, 래그방향 변

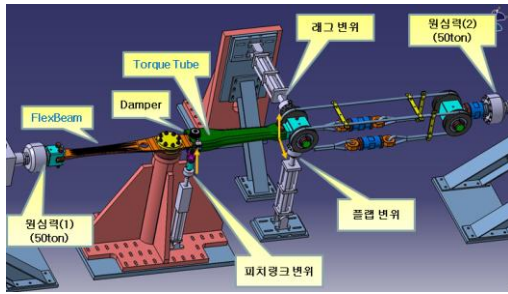


Fig. 7. Test apparatus of functional test

위, 피치각을 측정하기 위해 블레이드와 유연보의 연결부에 변위계, 각도기를 장착하였다. 로터의 정상회전수에 해당하는 원심력 157.4kN을 부가함과 동시에 플랩하중과 래그 하중을 각각 8kN과 6kN에 도달할 때까지 점차적으로 증가시켰다. 지상기능 시험 결과 최대하중 부가시 피치각이 12도 되었으며 이때 조립체의 간섭은 발생하지 않고 유연보, 토크튜브, 댐퍼, 스너버 등이 정상적으로 기능을 수행함을 확인하였다.

III. 무베어링 로터 회전 시험

3.1 무베어링 로터 허브

무베어링 로터의 회전시험을 위한 블레이드는 BO-105의 무힌지 로터용 블레이드를 기본으로 하여 무베어링 로터에 적합하도록 블레이드 루트부에 있는 유효 힌지를 제어할 목적으로 루트부

Table 2. Rotor characteristics

Parameter	Value
Hub type	Bearingless
Number of blades	4
Rotor speed, RPM	345
Radius, m	5.82
Blade chord,	0.27
Airfoil	NACA 23012
Linear blade twist, deg	-8.0
Solidity	0.08
Blade length, m	4.54
Flexbeam length, m	1.16
Torque tube length, m	1.46
Snubber radial pos., m	0.26

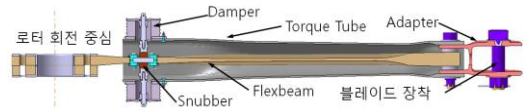


Fig. 8. Sectional drawing of bearingless main rotor

의 강성을 복합재로 보강하여 사용하였다[10]. 헬타워 시험에 사용한 무베어링 로터 허브는 블레이드가 4개가 있으며, Fig. 8과 같이 블레이드당 유연보, 토크튜브, 스너버가 각 1개가 있고 댐퍼는 토크튜브의 위아래 2개로 구성되어 있다.

2개의 댐퍼는 허브 중심에서 반경의 4.47% 지점에서 토크튜브와 체결되며, 수직으로는 유연보에 체결된 스너버와 연결된다. 반경의 20% 지점인 유연보 끝단에서는 토크튜브와 연결이 되며, 유연보와 블레이드를 연결하는 어댑터는 반경의 22.3% 지점에서 블레이드와 체결이 되어 있다.

블레이드 4개를 가진 무베어링 로터의 회전수는 345RPM이며, 회전반경은 5.82m이며, 블레이드 코드길이는 27cm이고, 고형비는 0.08이다. 회전 시험에 사용된 무베어링 로터의 주요 제원은 Table 2에 정리하였다.

3.2 헬타워 시험 준비

실물 크기 로터에 대해 회전시험을 수행하는 헬타워의 회전면 높이는 9.65m이며, 최대 동력은 2.75MW이며, 콜렉티브 및 사이클릭 피치 조절이 가능하고, 동특성 시험을 위한 가진은 유압 가진기를 이용하여 최대 60Hz까지 가진이 가능하다. 데이터 획득을 위해 60개의 회전부 채널과 50개의 비회전부 채널이 있으며, 허브 마스터와 회전 모터 사이에 있는 3축 회전 하중 밸런스로 로터의 추력, 토크, 굽힘 모멘트를 측정한다. Fig. 9는 헬타워에 장착된 로터 허브의 모습이다.



Fig. 9. BMR on the whirl tower

로터의 동특성 및 구조하중을 측정하기 위해 유연보, 토크튜브, 피치링크 및 블레이드에 스트레인게이지를 부착하였으며 댐퍼의 변위 측정을 위해서는 포텐쇼미터를 장착하였다. 무베어링 로터 동특성 시험은 회전수 345RPM에서 콜렉티브 피치각이 0도 ~ 3도인 조건에서 사이클릭 피치각을 유압작동기를 통해 가진하였으며, 성능시험을 위해서는 풍속 2.5m/s이하의 조건에서 콜렉티브 피치각 7도까지 1도 간격으로 측정하였다[11].

3.3 헬타워 시험 결과

무베어링 로터의 동적 특성을 확인하기 위해 회전시험에서는 가진기를 이용한 가진시험 및 정지비행 성능시험을 수행하였다. Fig. 10은 헬타워에 장착된 블레이드와 무베어링 로터 모습이다.

정지 비행 성능시험을 위해서는 블레이드 상태에 대한 안전을 고려하여 콜렉티브 피치각 7도까지 회전시험을 수행하였다. Fig. 11은 추력과 파워를 측정하여 정지비행 효율(Figure of Merit)을 추력계수에 대해 표현한 것으로, 측정결과와 해석결과는 잘 일치하고 있다. 해석은 보정된 물성치를 입력으로 CAMRAD II를 이용하여 수행하였다. 로터는 힌지가 없이 다중 하중 경로를 가지며, 토크튜브를 포함하는 블레이드와 스너버를 가지는 유연보는 탄성체빔으로 모델링하였고, 블레이드의 공력 패널은 19개를 사용하였다. 로터 단독 모델에 대해 제자리비행조건으로 해석을 수행하였으며, 사용된 공기력 모델은 자유후류모델을 적용하였다. 시험에서 추력계수(C_t/σ)가 0.044일 때, 정지비행 효율은 0.41이고, 해석에서는 최대 정지비행효율은 추력계수가 0.1일 때 0.55로서 일반적인 로터 블레이드에 비해 상당히 낮다. 시험에서는 BO-105에 사용되는 블레이드를



Fig. 10. Whirl tower test of BMR

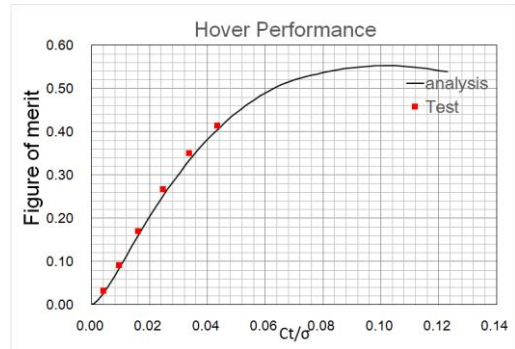


Fig. 11. Hover Performance

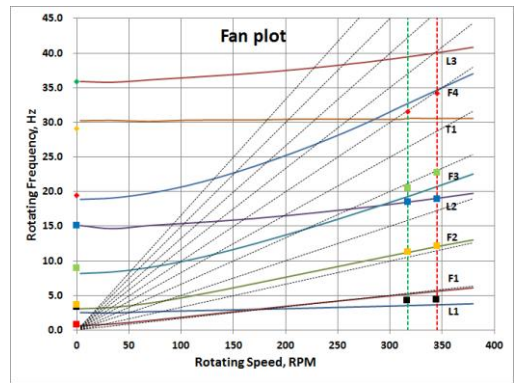


Fig. 12. Fan plot

사용하여 비틀림 각 등이 본 무베어링 로터에 최적화 되지 않아 정지비행 효율은 다른 로터에 비해 낮은 결과를 나타내고 있다.

Figure 12는 로터 회전수 변화에 따른 회전 블레이드의 고유진동수를 나타낸 Fan plot이다. 비회전시, 317RPM, 345RPM 회전속도 조건에서 플랩 모드, 래그 모드, 비틀림 모드의 고유진동수를 측정하였다. 정상 회전수인 345RPM에서 측정된 1차 래그 모드는 0.75/rev이고, 2차 래그 모드는 3.3/rev이다. 1차 플랩 모드는 회전수와 가까워 측정이 어려웠으며 2차 플랩 모드는 2.11/rev, 3차 플랩 모드는 3.96/rev, 4차 플랩 모드는 5.95/rev으로 측정되었다.

Figure 13은 헬시험에서 측정된 콜렉티브 피치각에 따른 1차 래그 모드 감쇠비이다. 317RPM과 345RPM에서 감쇠비의 차이는 약 0.2% 정도로 차이는 미비하다. 두 개의 회전수 조건에서 모두 감쇠비가 요구조건인 2%보다 매우 낮은 0.4% 값을 나타내고 있다. 헬타워 시험시 래그 모드의 감쇠비를 구하기 위해서는 댐퍼가 기능을 수행할 수 있도록 충분한 크기로 가진을 하여야 하나, BO-105 블레이드의 수명 및 안전을 고려하여 충

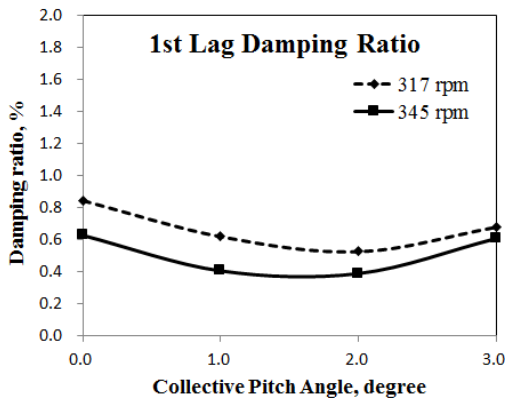


Fig. 13. Lag damping

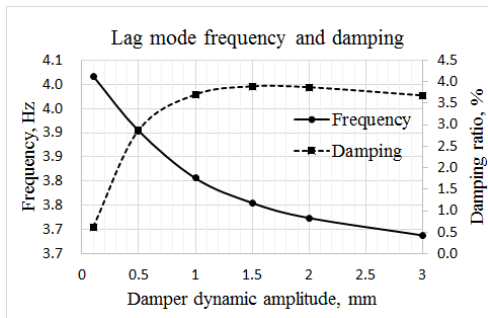


Fig. 14. Effects of damper amplitude on frequency and damping of 1st lag mode

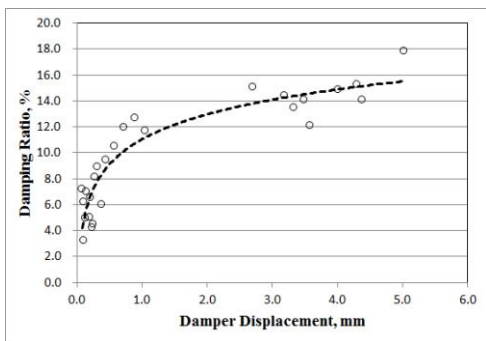


Fig. 15. Lag mode damping on non-rotating condition

분히 가진을 하지 못하였다. 탄성체 댐퍼는 일반적으로 충분한 가진이 있을 경우는 가진 크기에 따라 손실계수(Loss factor)가 비선형적으로 증가하다가 어느 정도 크기에서 일정한 값을 가진다. 하지만 가진의 크기가 작을 경우는 손실계수가 낮아 댐퍼로서의 기능을 충분히 수행하지 못하는 특성이 있다. Fig. 14는 무베어링 로터에 사용된 댐퍼의 비선형특성을 고려하여 사이클릭 가진 크

기에 따른 1차 래그 모드의 고유진동수와 감쇠비를 CAMRAD II를 이용하여 해석한 결과이다. 회전수는 운용 회전수이며, 컬렉티브 피치각은 1.5도이고, 구조 감쇠비는 0.5%를 가정하여 해석하였다. 동적 변위에 따른 댐퍼의 비선형 특성으로 인해 래그 모드의 감쇠는 가진 크기에 따라 증가하여 댐퍼 변위가 1.5mm 경우 최대 약 4% 감쇠비를 가지며 이후 감소하는 경향을 보인다. 헬타워 시험시 가진이 충분히 이루어져 댐퍼의 변위가 1mm이상이면 감쇠비는 3.5%이상의 충분한 값을 가지게 된다. 하지만 가진 크기가 작아 댐퍼 변위가 0.1mm정도로 매우 적을 경우에는 감쇠비가 급격히 낮아져 감쇠비가 0.5%까지 낮아진다. 래그 모드 고유진동수는 댐퍼의 변위에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 댐퍼의 강성이 변위에 대해 반비례하는 특성으로 인해 발생하는 현상이다.

탄성체 댐퍼의 기능을 확인하기 위해서 비회전시 무베어링 로터에 장착된 댐퍼에 충분한 초기 변위를 가하고 자유 진동을 유발하였다. Fig. 15는 댐퍼의 변위에 따른 비회전시 무베어링 로터의 래그 감쇠비를 측정할 것이다. 낮은 변위에서는 감쇠비가 매우 낮으며, 높은 변위에서는 감쇠비가 증가한다. 댐퍼 변위가 약 1mm이상일 때 10%이상의 감쇠비를 보이고 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 비회전 시험 및 헬타워 시험을 통해 무베어링 로터의 동적 특성에 대해 살펴보았다. 무베어링 로터를 구성하는 블레이드, 유연보, 토크튜브에 대해 로터 동특성 및 하중 해석을 위한 입력 물성치를 비회전 강성 시험과 고유진동수 측정 시험을 통해 질량 분포 및 강성 분포 등을 결정하였다. 고유진동수 측정을 통한 물성치 보정은 측정값과 해석값이 잘 일치하였다. 또한 무베어링 로터의 댐퍼 및 스너버의 특성 및 지상에서 로터 허브 조립체에 대해 기능시험을 수행하여 구성품간의 간섭, 기능 등이 정상적으로 작동함을 확인하였다.

루트부가 보강된 BO-105 블레이드를 사용한 무베어링 로터 헬타워 회전시험을 통해 정지비행 성능, 로터 고유진동수 및 래그 모드 감쇠를 측정하였다. 정지비행 성능을 측정한 결과와 해석값은 잘 일치하였지만, 무베어링 로터에 최적화되지 않은 블레이드를 사용하여 성능은 일반적인 로터에 미치지 못하였다. 회전하는 블레이드의 고유진동수 측정 및 해석에서 플랩 모드는 로터

회전수의 조화 진동수근처에 있고, 래그 모드와 비틀림 모드는 로터 회전수의 조화 진동수와 충분히 이격이 되어 있다. 회전시험에서 가진 크기가 작은 이유로 인해 댐퍼가 충분히 변형되지 않아 래그 모드 감쇠는 미비하였으나, 지상에서 자유 진동 시험을 통해 댐퍼의 성능을 확인하였다. 댐퍼의 운동 변위에 따른 강성과 손실계수의 비선형을 고려한 해석에서 감쇠비가 4% 정도로서 충분한 감쇠를 가지고 있었다.

후 기

이 논문은 “무베어링 로터 허브시스템 개발사업” 및 “소형민수헬기 주로터 블레이드, 자동비행조종장치 S/W, 능동진동제어시스템 설계해석 연구” 과제의 연구결과 중 일부이며, 지원에 감사드립니다.

Reference

- 1) Huber, Helmut, “Will Rotor Hubs Lose Their Bearingless? A survey of Bearingless Main Rotor Development,” The 18th European Rotorcraft Forum, 1992.
- 2) Johnson, Wayne, “Recent Developments in the Dynamics of Advanced Rotor System,” NASA TM-86669, 1985
- 3) Dixon, Peter G.C., “Design, Development, and Flight Demonstration of the Loads and Stability Characteristics of a Bearingless Main Rotor,” USAAVRDCOM-TR-80-D-3, 1980.
- 4) Kampa, K., Enenkl, B., Polz, G., and Roth, G., “Aeromechanic Aspects in the Design of the EC135,” *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 44, No. 2, 1999, pp. 83-93.
- 5) Kim, T. J., Kee, Y. J., Kim, D. K., and Kim, S. H., “Fatigue Safe Life Analysis of Helicopter Bearingless Rotor Hub Composite Flexbeam,” *Journal of the Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 7, 2013, pp. 561-568.
- 6) Yun, C. Y., Kee, Y.J., Kim, T. J., Kim, D.K., and Kim, S.H., “Hub Parametric Investigation of Main Rotor Stability of Bearingless Helicopter,” *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. Vol. 22, No.8, 2012, pp. 784-790.
- 7) Yun, C. Y., Kim, T. J., Kee, Y. J., Sim, H. S and Kim, S. H., “Basic Properties Test and Non-rotating Dynamic Test of Helicopter rotor,” Proceedings of the KSNVE Annual Fall Conference, 2013.
- 8) Kee, Y.J., Kim, T.J., Yun, C.Y., and Kim, D.K., “Manufacturing Process and Basic Property Tests of Composite Helicopter Rotor Hub System,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 38, No. 6, 2014, pp. 691~698.
- 9) Yun, C. Y. and Kim, D. K., “The Measurement Test of Stiffness and Natural Frequencies for Bearingless Rotor System of Helicopter,” *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*. Vol. 25, No.12, 2015, pp. 881~887.
- 10) Kim, T.J., and Kee, Y. J., “Hingeless Blade Flexure Bending Stiffness Reinforcement for Whirl Tower Test,” *Journal of the Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 5, 2014, pp. 390-397
- 11) Yun, C. Y., Kee, Y. J., Song, G. W., Kim, S. B., Kim, D. K., and Paek S. G., “The Whirl Tower Test of a Bearingless Main Rotor with BO-105 blades,” KSAS 2014 Spring Conference, 2014.