한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 325~329.

# 차세대 헬리콥터 로터용 탄성체베어링 소재 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study for Material Properties of Elastomer Bearing Using Next Genration Helicopter rotor system

정정교*·김영석*·박건록*·김두훈*·이명규**·김덕관**

**Jeong, Jeong-kyo · Kim, Young-Suk · Park, Gun-Rock · Kim, Doo-Hoon · Lee, Myung-Gue · Kim, Duk-Guan**

**Key Words :** Elastomer Bearing(탄성체 베어링), Helicopter(헬리콥터)

**ABSTRACT**

Nowadays many peoples are using helicopter in various fields, not only military use but also common people applications such as air-measurement, photography, transportation of goods and persons, saving life and fire fighting etc. And it will be expected more popular than now. Most important part of helicopter to increasing performance and to reducing noise is rotor hub-system. Hub system consists of rotor-blade and rotor-hub. We participate to develop next-generation rotor hub system with elastomeric bearing, part of rotor hub.

In this paper we introduce about the role and shape of elastomeric bearing in next-generation helicopter hub system. Then we study about bearing-material requirements and measuring methods. Finally we represent some experimental results.

## 1. 서 론

헬리콥터의 발상은 이미 1490 년경 레오나르도 다빈치의 스케치에서 엿볼 수 있다. 헬리콥터가 본격적으로 실용화된 것은 제 2 차 세계대전 말기에서 시작되었다. 헬리콥터는 공중측량, 사진촬영, 물자나 인원의 수송, 소화 구난작업 등 외에 농약살포등 다양한 민간분야에서 사용되고 있으며 군용기로서도 종래의 인원, 물자수송이나 연락·정찰 외에 지상공격용 등으로 활용되고 있다. 그러나 기체구조나 기구가 복잡하여 대량생산하기 힘들고 가격이 비싼데다가, 부품이 섬세하여 분해검사(overhaul) 간격이 짧으므로 고정날개기 만큼 운항비를 내릴 수 없다는 점과 성능(속도)가 낮다는 점 그리고 안정성 문제가 남아 있다. 이러한 문제점이 있음에도 불구하고 선진국에서는 이미 헬리콥터를 이용한 근거리 이동 및 관광, 산불방재, 구급에 널리 사용되고 있으며 향후 우리나라에서도 국리민복 증진 및 군 전력 증강에 따른 민·군 헬리콥터 수요가 증대될 것으로 예상되고 있다. 위에서 서술한 바와 같이 향후 급격한 수요증대가 예상되면서 차세대 헬리콥터 기술개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데 특히 중요한 기술은 헬리콥터 특성을 좌우하는 핵심기술인 로우터 시스템 기술의 개발을 이라고 할 수 있다.

탄성체 베어링은 차세대 로우터 시스템에 적용되는 부품으로 블레이드와 로우터를 연결하는 관절 역할을 수행하게 된다. 군용 헬리콥터의 경우 가혹한 기상 조건상에서도 작전을 수행할 수 있는 능력이 있어야 하므로 적용될 탄성체 베어링 역시 넓은 범위의 환경조건에서 그 기능을 원활히 수행할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 차세대 헬리콥터 로우터 시스템에서 탄성체 베어링의 역할 및 형상에 대해서 기술하고 요구 특성 및 소재 특성 시험 방법과 실험 결과에 대하여 고찰 하였다.

## 2. 탄성체 베어링 개요

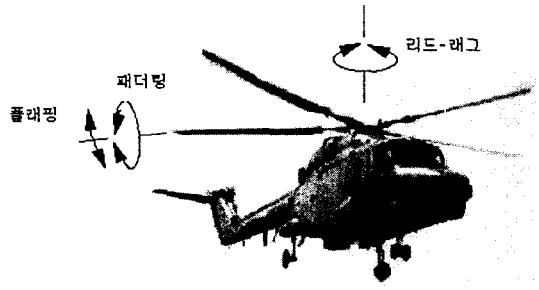
### 2.1 탄성체베어링의 역할 및 거동

(1) 로터 시스템의 거동

탄성체 베어링은 헬리콥터의 허브에 있어 관절과 같은 부분이므로 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 탄성체 베어링의 역할을 알기 위해서는 헬리콥터 깃(Blade)와 허브의 역학적 관계에 대한 파악하는 것이 가장 우선되는 일이라 할 수 있겠다. 먼저 로우터 날개가 구동축과 연결되는 로우터의 중앙부분을 로우터 허브라 한다. 여기에는 구동토크 이외의 모멘트가 날개 (Blade)와 기체 상호간에 전달되지 않도록 하기 위해 힌지와 날개각

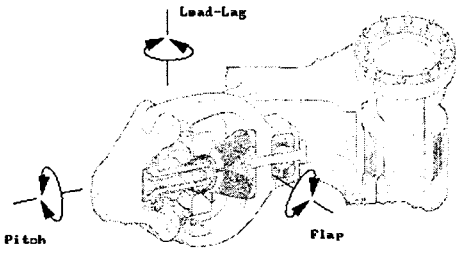
* 유니슨㈜
E-mail : jjk@unison.co.kr
Tel : (041) 620-33417, Fax : (041) 552-7488
** 한국항공우주연구원

조정장치로 구성되어 있다. 여기서 구동 토크 이외의 모멘트라 함은 헬리콥터가 전진비행을 하는 경우 로우터 날개의 회전위치에 따라 날개각이 변하지 않는다면 앞으로 돌아나가는 위치에 있는 깃은 전진속도와 회전에 의한 선속도가 합해지고 위로 돌아오는 위치에 있는 깃의 속도는 전진 속도와 빼져서 좌우속도 비대칭에 의한 롤링 모멘트를 말한다. 이 롤링 모멘트가 동체에 전해지는 것을 막기 위해 로터 깃이 상하로 움직일 수 있도록 힌지를 설치하여 양력, 원심력 및 로우터 깃의 관성력등에 의한 모멘트 합이 인지에서 영이 되도록 하는 것을 플래핑힌지라 한다. 회전하는 깃이 플래핑 운동을 하면 코리올리 가속도가 발생하여 회전 방향과 같은 방향으로 깃이 앞서거나 뒷서려는 모멘트가 생겨나는데 이의 전달을 방지하기 위해 리드래그 힌지를 설치하고 있다[1]. <그림 1> 은 한국 해군의 링스 Mk 99 형의 사진이고 위에서 기술한 헬리콥터 날개의 운동 현상을 나타내고 있다. 최근에는 헬리콥터 로우터 시스템의 힌지로 사용되는 기계적 베어링 (Mechanical-Bearing)을 대체하는 탄성체 베어링을 사용하는 헬리콥터가 늘어나고 있는 추세이다.




<그림 1> 한국 해군의 Lynx Mk 99[2]

<그림 2> 는 구면형 탄성체 베어링과 래디얼 베어링의 설치위치를 나타낸 그림이다. 탄성체 베어링의 위치는 허브와 날개를 연결하는 부분에 위치하며 고무에 인장력이 발생하지 않도록 연결부가 날개와 허브의 반대방향에 위치한다. 따라서 날개의 원심력은 베어링 축방향 압축력으로 작용하게 된다. 방향별 거동을 분류하면 날개의 패더링 현상에 의해 발생하는 축 주면방향 회전을 Pitch(Torsional Shear), 수평방향 축회전을 나타내는 Lead-Lag(Radial Compression /shear), 수직방향 축회전을 나타내는 Flap (Misalignment shear)을 허용한다. <그림 3>은 헬리콥터에 사용되는 대표적인 탄성체 베어링인 구면형 탄성체 베어링의 실물 형상이다.




<그림 2> 탄성체 베어링의 설치위치

<그림 3> 탄성체 베어링(실물)

(2) 탄성체 베어링의 특성

헬리콥터는 우리시대에 있어서 경이로운 기술중의 하나이다. 그 안정성과 기능성에 비판을 가하는 사람들이 있음에도 불구하고 전세계적으로 헬리콥터를 구매하는 사람, 운전하는 사람, 그리고 어떤 목적에 의해 탑승하는 사람들의 수는 계속 증가하고 있는 추세이다. 이에 비례하여 헬리콥터의 신뢰성과 유지보수를 손쉽게 할 수 있는 방법에 관한 기술 발달이 계속되어 졌다. 특히, 최근 탄성체 베어링, 진동 절연체 그리고 댐퍼 등의 개발은 직접적인 구동 경비를 절감하였으며, 헬리콥터 내부의 소음/진동을 감소시켜을 뿐 아니라 수송능력을 증대시킴으로 조용하고 안락하며 신뢰성이 높은 헬리콥터의 제작을 가능하게 했다.

일반적인 베어링은 연속적인 회전이 가능하며서 축을 지지한다. 탄성체 베어링 역시 회전운동이 발생할 수 있으나 연속적이지 못하고 약 10°~90° 정도 범위에서 운동이 제한된다는 점이 특징이다. 또한 하드 베어링(Hard Bearing)에 대해서 다음의 몇 가지 이점을 가지고 있다.

① 적층형식 탄성체 베어링은 강성 효과를 증대시켜 변형이 가해 졌을 때, 변형전의 상태로 돌아가려는 특성을 나타낸다.

② 탄성체 베어링은 이격(Clearance)이 없기 때문에 마모에 따른 이격의 증가가 없으며 채터

(Chatter)나 이격에 의한 흔들림이 발생하지 않는다. 따라서 베어링의 수명이 다할 때까지 부드러운 동작이 발생한다.
③ 유지보수 비용을 절감할 수 있으며 간략한 검사를 통해 사용 가능 여부를 파악할 수 있다.

## 2.2 탄성체베어리의 요구성능

탄성체 베어링의 요구성능은 물리적 특성과 환경적 특성으로 나누어지게 된다. 물리적 특성은 운전조건, 회전강성, 압축강성, 피로 해석 등의 항목으로 헬리콥터의 운행에 따라 발생하는 물리력과 연관이 있으며 환경적 특성에서는 작동온도, 노화 특성, 오존저항 등 소재의 특성과 연관이 있다.

(1) 환경적 특성

탄성체 베어링의 환경적 특성은 헬리콥터의 운용 환경과 밀접한 관계를 가지고 있다. 운전조건으로는 운전주파수, 운전온도, 그리고 운동 스펙트럼이 있다.
① 운전 주파수 : 300 ~ 500 rpm
② 운전 온도 : −54 ~ 70 ℃
③ 설계하중 및 최대운동각 : <표 1>
④ 운동 스펙트럼 : <표 2>
⑤ 기타 요구조건 : 임계포인트 (−54℃ 이하), 노화 후 특성변화, 오존저항정도

<표 1> 탄성체 베어링의 설계하중

| 설계조건 | 구면형 베어링 | 레디얼 베어링 |
|---|---|---|
| 하 중 | 240,000 N | 30,200 N |
| | 30,200 N | |
| 최대 피치 회전각 | ± 30° | ± 30° |

<표 2> 탄성체 베어링의 운동 스펙트럼

| 비행 조건 | 피치 회전각 | 플랩 회전각 | 래그 회전각 | 빈도 % | 주파수 (rpm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 14.1±4.5 | ±1.0 | ±1.0 | 15.6 | 326 |
| 2 | 13.6±4.2 | ±1.0 | ±1.0 | 8.4 | 326 |
| 3 | 14.3±4.7 | ±1.0 | ±1.0 | 9.8 | 326 |
| 4 | 16.3±6.6 | ±1.0 | ±1.0 | 18.3 | 326 |
| 5 | 17.9±8.0 | ±1.0 | ±1.0 | 27.9 | 326 |

(2) 물리적 특성

탄성체 베어링은 기본형상에 대해서 일반적인 추력베어링(Conventional Thrust Bearing), 래디얼 베어링(Radial-Journal Bearing), 원추형 베어링(Conical Bearing), 구면형 베어링(Spherical Bearing), 기타 특수 베어링 등 크게 5 가지로 분류되며 적용하중에 대한 적절한 베어링 선정이 필수적인 요건이다. 헬리콥터용 탄성체 베어링의 요구사항은 MIL-B-8598[2]을 참조하였고 요구강성은 <표 3>과 같이 정리된다. 탄성체 소재의 물리적 성질은 아래와 같다.
① 경도 : 54~58
② 인장강도 : 25 Mpa
③ 신장률 : 최소 525 %

<표 3> 탄성체 베어링의 물리적 요구사항

| Bearing Configuration | Type I Class C | Type I Class C | Type II Class E | Type II Class E |
|---|---|---|---|---|
| **Spring rate (min)** | | | | |
| Axial load(lb/in) | 1,000,000 | 200,000 | | |
| Radial load(lb/in) | 580,000 | 50,000 | 380,000 | 140,000 |
| **Spring rate (max)** | | | | |
| Torsional(in-lb/deg) | 800 | 12 | 45 | 6 |
| Cocking (in-lb/deg) | 1,170 | 30 | 30 | 4 |
| **Static Strength (min)** | | | | |
| Axial load(lbs) | | N/A | N/A | N/A |
| Radial load(lbs) | N/A | | 4,000 | 800 |
| Droop stop test | | N/A | N/A | N/A |
| **Endurance test loads** | | | | |
| Axial load (lbs) | 73,000 | 5,000 | | |
| Radial load (lbs) | ±1,600 | 300±200 | ±1,350 | ±250 |
| Test speed (CPM) | 300 | 1500 | 300 | 1500 |
| **Test motions** | | | | |
| Torsional (deg) | −5 ± 8 | 4 ± 2 | ±4 | ±4 |
| Cocking (deg) | −4 ± 4 | 4 ± 2 | ±2.8 | ±2 |
| Start-stop cycles | | | | |
| Axial load(lbs) | 80,000 | 5,800 | N/A | N/A |
| **Control check cycles** | | | | |
| Torsional (deg) | N/A | N/A | ±26.0 | ±26.0 |
| Cocking (deg) | N/A | N/A | ±16.0 | ±16.0 |

## 3. 시험 규격 및 장비

### 3.1 소재 시험 규격

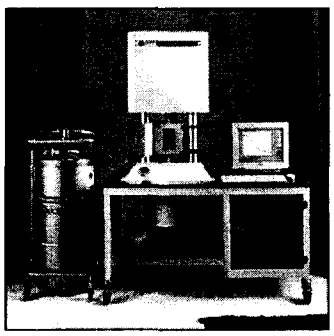
점탄성 재료의 특성은 시험 목적 및 사용환경에 따라 여러가지 방법으로 얻어질 수 있으며 다양한 국내 및 국제 시험규격에서 시험방법과 조건들을 규정하고 있다. 고분자 재료의 특성을 파악하는 방법을 정적/동적 시험 그리고 인장/압축 시험별로 분류하면 다음과 같다.[3]

① 정적 변형 압축 시험 규격 : ASTM D6049-96, ASTM D575-91, ASTM D395-01, KS M6518, KS M 6785
② 정적 변형 인장 시험 규격 : KS M6518, KS M 6785, ASTM D1456-86
③ 동적 변형 압축 시험 규격 : ISO 4664, KS M6665, M6604 ASTM D2231 (ASTM D5992-96), DIN 53513

### 3.2 시험장비 및 시험 내용

(1) 시험장비 사양

점탄성 소재의 시험에 사용된 장비는 독일 "GABO"사의 EPLEX 150N 을 사용였으며 장비는 <그림 3>과 같다. 상부에 부착된 공압 실린더에 의하여 초기 정적인하중을 (1500N)까지 가할 수 있으며 하부에 설치된 전자석 구동기를 이용하여 ±150N 의 동하중을 0.1 ~ 100 Hz 범위내에서 작용할 수 있다. 시험기의 구체적인 제원은 <표 4>에 기술하였다. 시편은 온도 챔버에 위치하게 되어 -150 ~ 500 ℃까지 온도 변화가 가능하다. 시험편을 고정시키는 지그를 변화하여 인장, 압축, 전단 시험을 수행할 수 있으며 시험시 사용한 규격은 ISO 4664 를 참조하였다.[4]



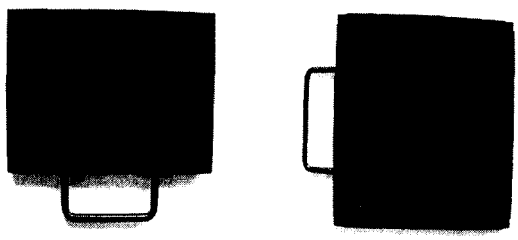
< 그림 3> EPLEX 150 N

<표 4> 장비 사양

| Model | EPLEXOR 150 |
|---|---|
| Force Range Dynamic/Static | ±150 N/1500N |
| Dynamic Strain | ± 1 μm |
| Static Strain | Up to 35 mm |
| Frequency Range | 0.01 - 100 Hz |
| Tan δ | 0.001 - 100 |
| Dimensions (Width×Depth) | 1470 × 750 mm |
| Height | 2000 mmm |
| Weight Approx. | 350 kg |
| Electric connection | 3 Phase, 400 V Neutral, PE, 16A |
| Compressed Air | 6 - 8 bar |
| Temperature | -150° to 500° |
| Environment | Inert gas Or Air Ozone or Humidity |

(2) 시험편 크기

ISO 4664 와 시험기 하중을 참조하여 인장 시험편과 압축시험편 제작 금형을 만들었다. <그림 4> 제작된 금형의 형상이며 <표 5>는 시편의 크기이다.



a. 압축시편 금형 b. 인장/전단 시편 금형

<그림 4> 시험편 제작용 금형 사진

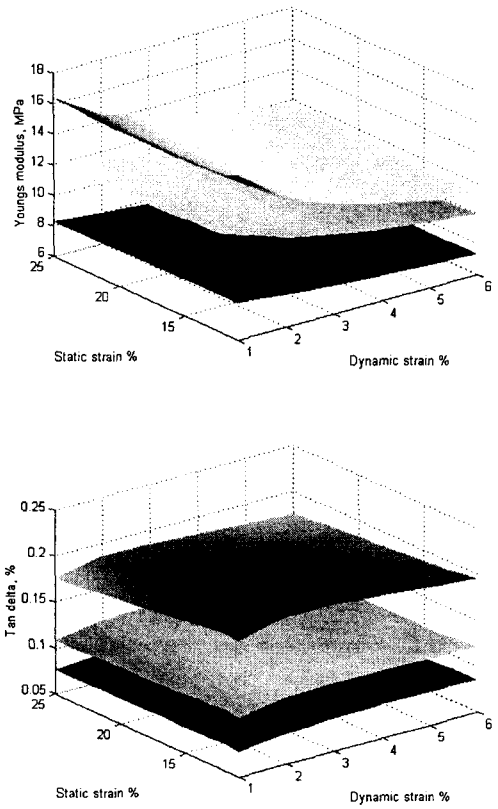
<표 5> 시험편 크기

| | 제작시편 | ISO 4664 Guide |
|---|---|---|
| 인장시편 | 길이 : 50 mm<br>폭 : 10 mm<br>두께 : 2 mm | L / t ≅ 5,<br>1 < t < 3 |
| 압축시편 | 직경 : 10 mm<br>높이 : 20 mm | H/D ≅ 1.5 |
| 전단시편 | 직경 : 10 mm<br>두께(높이): 2mm | D/t ≥ 4,<br>t < 12 |

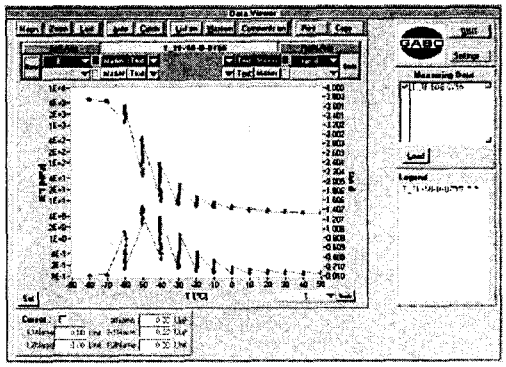
## 4. 특성시험

### 4.1 소재시험결과

고분자 재료의 기계적 물성은 주파수, 온도, 동적/정적 변형율의 함수이므로 한 조건을 고정하고 나머지 두 조건을 변경하면서 특성 시험을 수행하였다. 먼저 주파수 와 온도를 고정한 후, 동적 변형율과, 정적 초기 변형율을 변경하는 실험을 수행하였고 다음으로 온도 변화에 대한 소재의 특성 시험을 수행하였다. 변형율 특성 실험에 사용된 조건은 고정주파수(5Hz), 고정온도(상온), 초기변형율(11~25%), 동적변형율(1~6%) 이고 온도 특성실험에 사용된 조건은 고정주파수(5Hz), 고정 초기변형율 (5%), 동적변형율(2%) 온도범위(-60~70℃) 이다. 점탄성 소재는 경도를 기준으로 배합되었으며 경도는 50, 55, 60 세 종류를 사용하였다. <그림 5> 변형율 의존 실험에 의해 측정된 소재의 강성과 감쇠(tan $\delta$) 값이며 <그림 6>은 소재의 온도 의존 특성을 나타내고 있다.




<그림 5> NR (경도 50, 55, 60)의 물성



<그림 6> 점탄성 소제의 온도 특서

① 경도가 증가할 수록 소재의 영계수 값이 증가한다.

② 온도 특성 소재의 천이 영역에서 급격한 강성 증대 효과를 나타내고 있다.

③ 동적 변형율이 증가할 수록 영계수값은 감소한다. 단 정적변형율이 증가하면 영계수 역시 증가한다. 반면 손실계수값은 영계수에 비해 변동량이 크지 않다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 차세대 헬리콥터 로우터 시스템용 탄성체 베어링에 대한 간략한 소개와 요구성능을 살펴 보았고 설계시 물성값으로 사용할 데이터를 추출하기 위해 점탄성 소재의 시험 방법을 고찰하였다.

독일 GABO 사의 점탄성 물질 시험기인 Eplexor 150N 을 이용하여 점탄성 소재의 온도, 주파수, 변형율에 대한 실험을 수행하였고 향후 실험에서 구한 물성을 이용하여 유한요소해석을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 민군겸용사업 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

(1) 한국항공우주학회, "항공우주학 개론", 사단법인 한국항공우주학회, pp. 257~300

(2) MIL-B-85598, 1998, Bearings, Elastomeric General specificaton for

(3) 김광준 등 , 2003, "정적 대변형을 받고 있는 점탄성 재료의 동적 물성치 규명 시험", 논문집 제 13 권 제 2 호, 한국소음진동공학회, pp. 132~143.

(4) ISO 4664, 1998, "Rubber - Guide to the determination of dynamic properties"