

# 소형 정밀 왕복동기기용 선형 탄성 베어링 모델(KIMM-LFB)의 설계 및 해석

## Design and analysis of a newly devised linear flexure bearing(KIMM-LFB) for small precision reciprocating machines

。 최 상규\*, 박 성제\*\*, 홍 용주\*\*, 김 효봉\*\*

S.-K. Choi, S. J. Park, Y. J. Hong, H. B. Kim

### ABSTRACT

A newly devised linear flexure bearing (KIMM-LFB) for reciprocating machines is disclosed having improved tight gas clearance maintaining capability for better system performance. KIMM-LFB is an integrated device comprising an axially moving diaphragm with circumferentially arranged arc-shaped flexure blades secured between rim and hub spacers, which turn out to have higher radial stiffness than the one with circumferential tangent cantilever flexure blades. It is expected for KIMM-LFB to play a key role in designing long life, special purpose reciprocating machines such as spacecraft borne cryogenic refrigerators (cryocoolers) by providing frictionless, non-wearing, linear movement and radial support for the machines as well as a gas clearance seal by maintaining extremely tight clearances between piston and cylinder.

### 1. 서론

최근 에너지 효율의 극대화로 시스템의 성능을 향상시키고 구조를 단순화하기 위해 극저온 냉동기용 헬륨압축기, 가전기용 냉매압축기, 섬유기기의 제어장치와 같이 정밀 위치제어가 필요한 산업용, 가전용, 군수용 기기의 구동시스템으로 선형 구동 모터를 이용한 소형 정밀 왕복동기기의 응용이 기하급수적으로 증가하고 있다. 특히 극저온 냉동기는 미사일유도 및 야간 투시용 적외선센서의

냉각과 같은 군수용뿐만 아니라, 반도체공정의 저온 진공펌프, 이동통신기지국의 초전도 RF filter 냉각기, MRI 초전도 냉각기와 같은 상업용으로 광범위하게 그 응용이 확대되고 있다.

극저온 냉동기에는 스티어링, JT, GM, Pulse-tube 등으로 다양하나 최근 개발, 사용되고 있는 것은 스티어링과 Pulse-tube type으로 모두 선형 구동모터를 장착한 소형 정밀 압축기를 채택하고 있다. 군사용, 상업용으로 사용되는 이와 같은 극저온 냉동기는 신뢰도가 높고 장수명(3-10년 연속운전)인 압축기를 필요로 하고 있으며 여기서 피스톤과 실린더 내벽의 마모방지 및 밀봉역할을 하는 베어링

\* 한국기계연구원 회전체그룹

\*\* 한국기계연구원 열공조기체그룹

이 그 핵심적인 역할을 하고 있다. 따라서 선진국에서는 개스베어링, 자기베어링 및 Flexure 베어링과 같은 비접촉식 베어링을 개발, 사용하고 있으며 이 중 Flexure 베어링이 가격, 성능등의 장점으로 상용제품에 가장 많이 사용되고 있다. Flexure 베어링에는 크게 Spiral형과 Tangential canti-lever형의 두가지로 구분되며 (Fig 1), Flexure 베어링의 설계조건은 1) 반경방향 강성의 최대화, 2) 축방향 강성의 최소화, 2) 최대 스트로크 점에서의 작동 응력 및 축 회전의 최소화 등이 있다.

Tangential canti-lever형의 베어링은 Spiral형에 비해 반경방향 강성이 70% 높고 Von-mises 최대 응력은 30%정도 낮은 것으로 보고된 바 있다 [1].

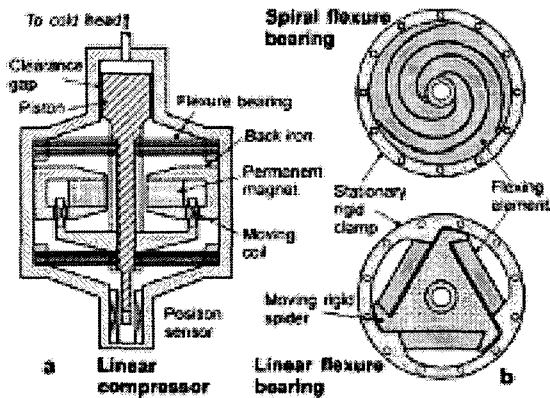


Fig 1. Schematic of (a) a linear compressor with (b) tw types of flexure bearings

본 논문에서는 1999년부터 KIMM에서 개발하고 있는 적외선 센서 냉각용 스텔링 극저온 냉동기용 헬륨압축기의 베어링으로서 새로 고안된 선형 탄성베어링(KIMM-LFB)의 성능을 기존에 사용되고 있는 Tangential canti-lever형 탄성 베어링과 수치해석기법으로 비교하여 그 적용성을 검토하고자 한다.

## 2. 수치해석

두 베어링(Tangential canti-lever bearing: Old, KIMM-LFB: New)의 특성(축 및 반경 방향 강성, Von-mises peak-stress)을 비교하기 위하여 두 모델을 각각 ANSYS 유한요소 해석 S/W를 이용하여 모델링 하였고, element는 shell 63번을 사용

하였다. 두 베어링의 재료는 SUS이며, 동일한 경계 조건과 동일한 하중을 가하여 똑같은 조건을 부여하였다. 두 베어링은 최대 stroke가 ±10mm로서 비선형 거동을 한다고 가정하였으며 수치 해석을 통하여 베어링의 설계시 필요한 각 특성의 경향을 알아보았다.

### 2.1 Tangential canti-lever (Old) 베어링의 해석

Old 베어링은 Table 1과 같은 물성치를 가지며, 둥근 원형의 모습이다. 외측 반경은 70mm이고 내측 반경은 24mm이다. 두께는 0.12mm로써 상당히 얇은 plate이며, 3개의 서로 다른 plate가 적층되어있다. 베어링의 해석은 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 총 element 10,970개 node 11,955개로 나누었으며, 외측 원둘레는 고정 경계 조건(all clamped)으로 하였다. 축방향 강성을 구하기 위하여 내측 원의 둘레에 위치한 총 180개의 node에 축 방향으로 동일한 하중을 주었다.

Table 1. Material properties of linear flexure bearings

Material properties	
Young's modulus (E, Pa)	193e9
Density (ρ, kg/m <sup>3</sup> )	8000
Poisson's ratio (ν)	0.27

Fig 2와 3은 old 베어링의 유한 요소 모델링과 최대 stroke 지점에서의 변형된 모습을 나타낸다. 축방향 강성을 계산하기 위하여 다음과 같은 수식을 사용하였다.

$$k = \frac{F}{d} \quad (1)$$

여기서, F는 하중을 나타내며, d는 변위를 나타낸다. 반경방향 강성을 구하기 위하여 축방향 강성을 구할 때와 마찬가지로의 경계 조건을 부여한 후 내측원 둘레의 θ=0°인 node에 단일힘 10N (F<sub>x</sub>=10N, F<sub>y</sub>=0N)을 radial 방향으로 주고 그에 따른 베어링 중심부의 변위값을 구하여 강성을 구하였다. 그 다음으로 θ값을 변화해가면서, 각도에 따른 반경방향 강성을 구하였다. 하중은 30°간격으로 부가하였다.

Figure 4는  $\theta=0^\circ$ 일 때 이러한 하중을 가한 후 발생되는 변위의 모습이다.

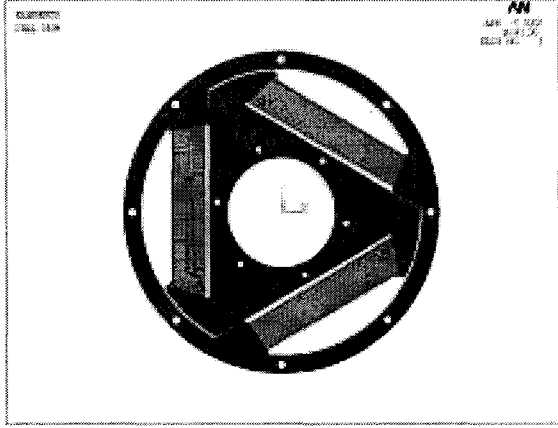


Fig. 2 Finite element model of the Old bearing

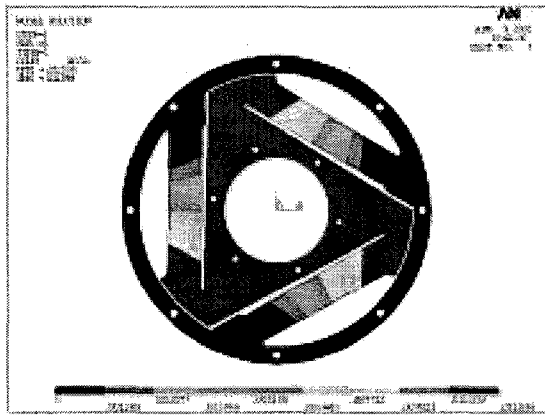


Fig. 3 Contour plot of axial displacement



Fig. 4 Contour plot of radial displacements

또한 최대 변형점에서의 Von-mises stress 분포

및 축의 회전량을 위의 모델을 사용하여 구하였다. Fig. 5는 최대 변형점(10mm)에서 10N의 반경방향 힘을 가했을 때의 변형된 모습이다.

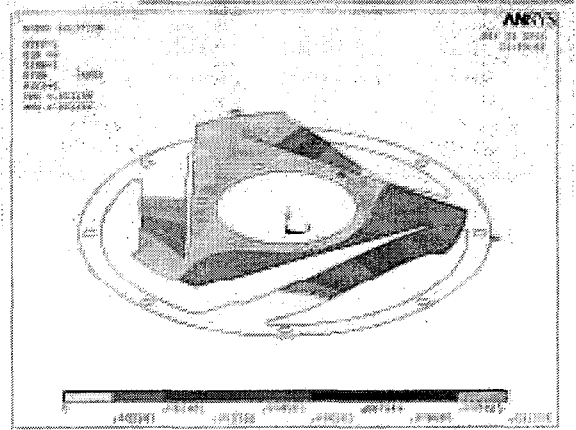


Fig. 5 Deformed shape of the Old bearing

### 2.2 KIMM-LFB (New)의 해석

Fig. 6와 7에 있는 두 가지 형태의 KIMM-LFB의 해석을 수행하였다. KIMM-LFB는 canti-lever형의 플렉서 암이 허브 원의 접선방향으로 배열되어 있는 기존 모델(Fig. 1, 2)과 달리 허브 외곽에 3개의 원호형상 플렉서 암을  $120^\circ$ 로 배치하고 각 암의 한 끝은 허브에, 다른 끝은 외곽 림에 고정하는 형태를 취하였다. 허브와 림은 모두 강체로 간주하였다. 모델 1과 2는 암과 허브, 암과 림사이의 고정방법을 달리 한 것으로서 고정방법에 따른 베어링의 특성 변화를 보고자 하였다.

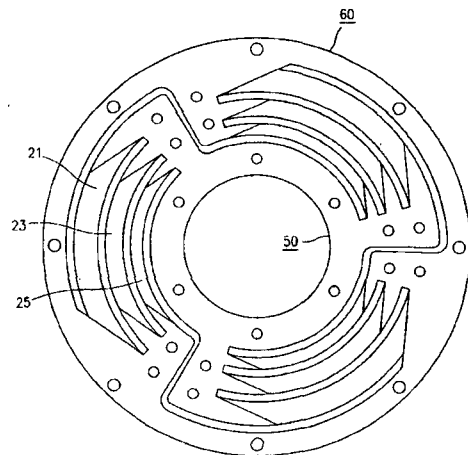


Fig. 6 KIMM-LFB model 1

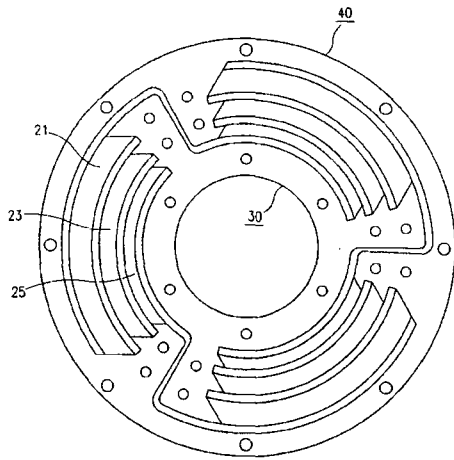


Fig. 7 KIMM-LFB model 2

방사상으로 배열된 플렉서 암은 안쪽 암의 폭이 제일 작고 바깥쪽으로 갈수록 그 폭을 크게 하여 최대 변형시 응력을 최소화하도록 하였으며, 기존 모델과의 특성비교를 위하여 Fig. 2의 모델과 크기 및 재료의 물성치는 동일하게 하였다.

2.2.1 KIMM-LFB 모델 1의 해석

수치해석을 위한 하중 및 경계조건은 기존 모델의 해석과 동일하게 주었으며, 총 element 11,443 개, node 12,900개로 나누었다. Fig. 8은 KIMM-LFB 모델 1의 유한요소 해석 모델이며 Fig. 9은 최대 변형점에서 10N의 반경방향 하중이 주어진 상태의 변형된 모습을, Fig. 10과 11은 각각 3차원 변형 모습 및 Von-mises 응력분포를 보여주고 있

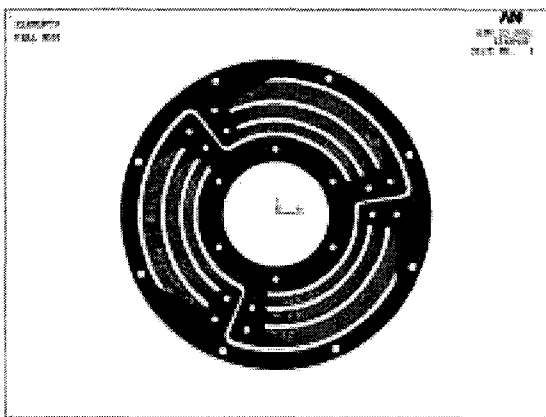


Fig. 8 Finite element model of KIMM-LFB model 1 (m1-new)

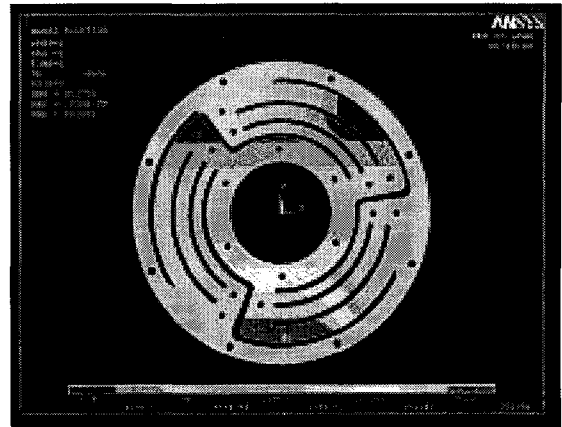


Fig. 9 Contour plot of radial displacement

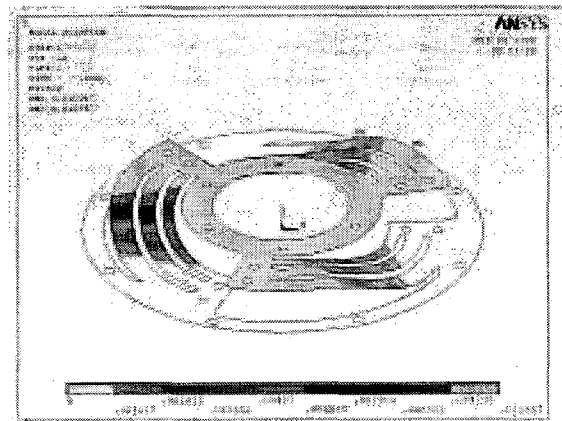


Fig. 10 Deformed shape of KIMM-LFB model 1 at max. stroke with the radial force of 10N

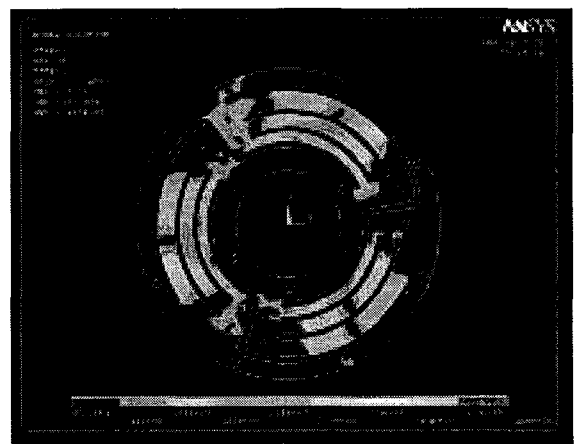


Fig. 11 Von-mises stress distribution at max stroke with the radial force of 10N

다.

### 2.2.2 KIMM-LFB 모델 2의 해석

KIMM-LFB 모델 2는 2.2.1절에서 해석한 모델 1과의 성능비교를 목적으로 약간의 수정을 하여 설계하였다. 수정된 부분은 위아래로 적층되는 림과 허브의 끝 부분에 위치한 삼각형 모양의 플렉서암 고정부분으로 약간 작게하여 플렉서암의 길이를 크게하는 효과를 갖도록 하였다. 전체적인 크기 및 물성치는 동일하며, 하중과 경계 조건도 앞서준 조건과 동일하다. 총 element 11,666개, node 13,189개로 나누었다. Figure 12는 유한요소 해석모델을, Fig. 13, 14, 15는 각각 변형된 베어링의 2D, 3D모습과 Von-mises 응력분포를 보여주고 있다.

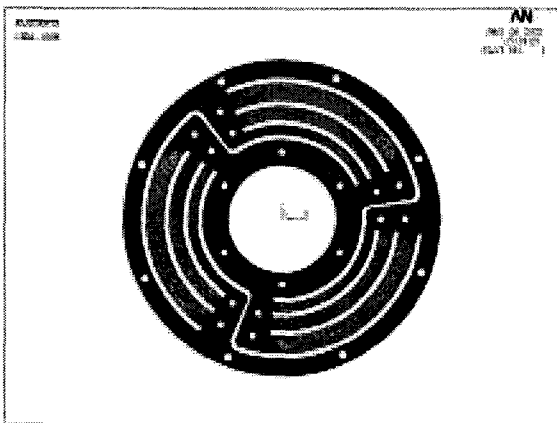


Fig. 12 Finite element model of KIMM-LFB model 2 (m2-new)

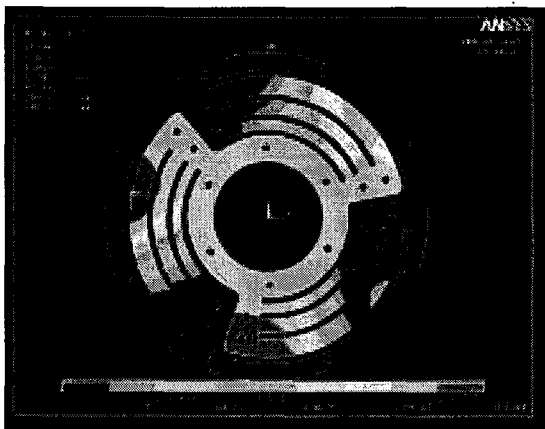


Fig. 13 Contour plot of radial displacement

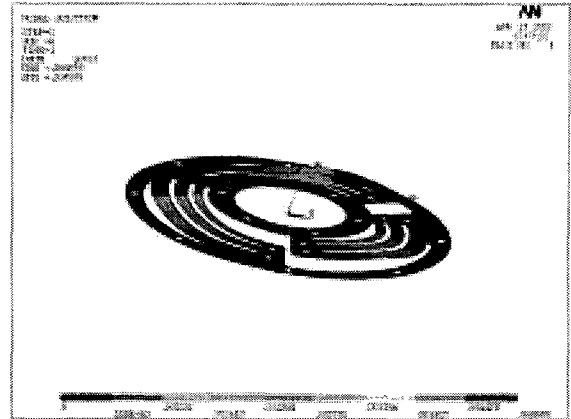


Fig. 14 Deformed shape of KIMM-LFB model 2 at max. stroke with radial force of 10N

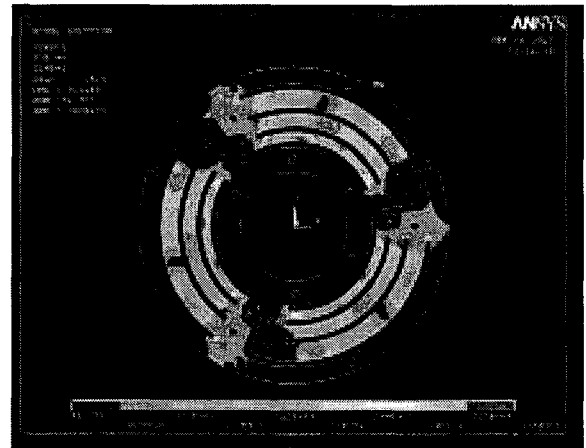


Fig. 15 Von-mises stress distribution at max. stroke with the radial force of 10N

### 3. 해석결과

먼저 베어링의 축방향 변위에 따른 축방향 강성의 변화를 관찰하였다. Fig. 16에 있는 것과 같이 기존모델과 신규모델 모두 베어링의 축방향 변위가 증가함에 따라 강성이 같이 증가함을 알 수 있으며 기존모델, KIMM-LFB model 2 및 모델 1의 순으로 강성이 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있다. 특히 모델 1의 경우에는 최대변위점에서 축방향 강성이 기존모델의 약 1.6배에 이르고 있다. 그러나 그 절대값이 매우 작아 그 영향은 거의 무시할 수 있는 정도인 것으로 판단된다.

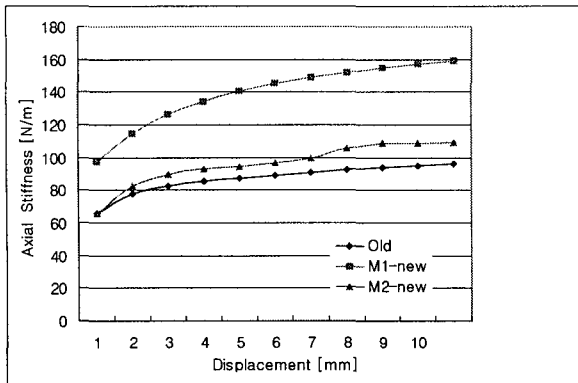


Fig. 16 Axial stiffness vs. axial displacement

Fig. 17과 18은 반경방향 하중(10N) 부여각도를 원주방향으로 변화시키면서 구한 베어링의 최대 변위점(10mm)에서의 반경방향 강성 및 Von-mises 최대 응력값의 변화를 보여주고 있다.

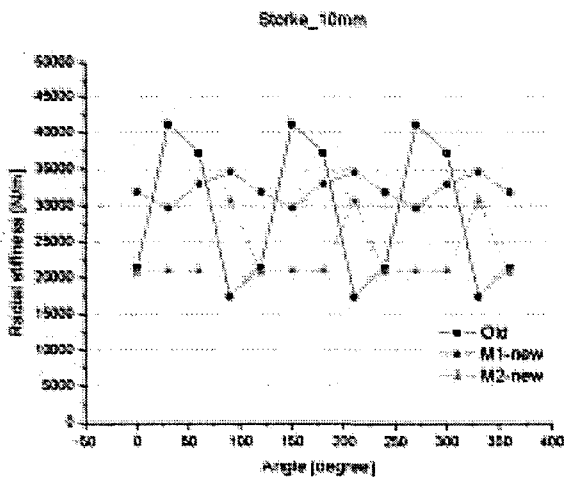


Fig. 17 Radial stiffness vs. radial force angle

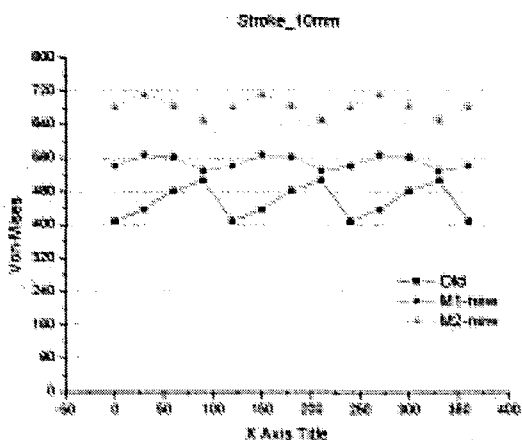


Fig. 18 Von-mises stress vs. radial force angle

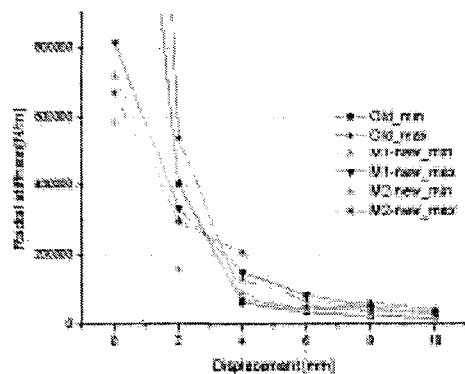


Fig. 19 Radial stiffness vs. axial displacement

Fig. 17과 19에서 보면 작은 변위에서는 기존모델이 신 모델에 비해 강성이 크나 변위가 커질수록 그 차이는 작아지고, 최대 변위점에서는 기존모델의 강성 및 응력은 원주방향으로 많은 차이를 보이고 있는 반면 KIMM-LFB 모델 1은 그 차이가 상대적으로 매우 낮게 나타나고 있다. 또한 설계시에 반영되어야 할 반경방향 강성의 최소값은 오히려 모델1이 기존모델보다 약 1.8배 큰 것으로 나타나 새로 고안된 베어링 모델 1의 성능이 우수한 것으로 판단되고 있다. Von-mises 최대 응력도 모델 1이 기존모델에 비해 약 1.2배에 불과, 반복하중에 대한 피로수명도 기존모델에 근접할 것으로 기대된다.

#### 4. 결론

새로운 형상의 선형 탄성 베어링을 개발하여 수치해석 기법을 사용, 기존모델과의 특성비교를 시도하였다. 수치해석 결과, 신 모델이 기존 모델에 비해 하중의 방향에 따른 강성변화가 상대적으로 작고 또한 최대 변위점에서의 강성값은 오히려 1.8 배 정도 우수한 것으로 나타났다. 따라서 향후 소형 정밀 왕복동 압축기에 대한 신모델의 적용이 기대되고 있다.

본 연구는 민군겸용기술개발사업(99-DU-04-A-02)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

[1] Pan, R. B. et. al., "Tangential linear flexure bearing", US Patent 5492313