

## 극저온 냉동기 헬륨 압축기용 선형 탄성 베어링의 해석 및 설계

Design and analysis of a newly devised linear flexure bearing(KIMM-M1) for cryogenic compressors

조 영선\*, 최 상규\*\*, 박 성제\*\*\*, 김 효봉\*\*\*, 우 호길\*\*\*\*

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

### ABSTRACT

Flexure bearings have been used in linear-resonant compressors to maintain a non-contacting clearance seal between the piston and cylinder. There are two types of tangential cantilever bearing and spiral arm bearing with flexure bearings. A newly devised linear flexure bearing (KIMM-M1) for compression refrigeration machines is disclosed having improved tight gas clearance maintaining capability for better system performance. KIMM-M1 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 tangential cantilever flexure blades. It is expected for KIMM-M1 to play a key role in designing long life, special purpose compression refrigeration machines 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. 서 론

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 적외선

서의 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 type 으로 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 피스

\*\* 한국기계연구원 기전응용그룹

\*\*\* 한국기계연구원 열공조기계그룹

\*\*\*\* 충남대학교 기계공학과

톤과 실린더 내벽의 마모방지 및 밀봉역할을 하는 베어링이 그 핵심적인 역할을 하고 있다. 따라서 선진국에서는 개스베어링, 자기 베어링 및 Flexure 베어링과 같은 비접촉식 베어링을 개발, 사용하고 있으며 이 중 Flexure 베어링이 가격, 성능 등의 장점으로 상용제품에 가장 많이 사용되고 있다. 플렉서 베어링에는 크게 Spiral형과 Tangential cantilever형의 두가지로 구분되며 (Fig. 1), Flexure 베어링의 설계조건은 1) 반경방향 강성의 최대화, 2) 축방향 강성의 최소화, 2) 최대 스트로크 점에서의 작동 응력 및 축회전의 최소화 등이 있다.

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

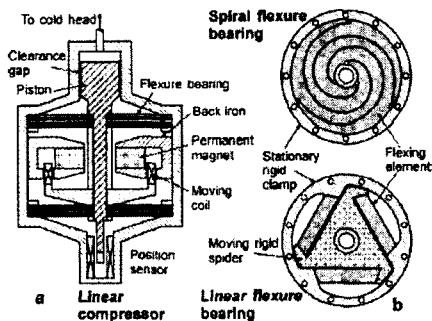


Fig. 1 Schematic of (a) a linear compressor with (b) two types of flexure bearings

본 논문에서는 1999년부터 KIMM에서 개발하고 있는 적외선 센서 냉각용 스텔링 극저온 냉동기용 헬륨압축기의 베어링으로서 새로 고안된 선형 탄성베어링(KIMM-M1)의 성능을 기존에 사용되고 있는 Tangential cantilever형 탄성 베어링과 수치해석기법으로 비교하여 그 적용성을 검토하고자 한다.

## 2. 유한요소 해석 및 설계

본 연구에서는 두 모델의 베어링(Tangential cantilever bearing: Paper, KIMM: M1)을 고려한다. 플렉서 베어링에 요구되는 특성(축 방향 강성, 반경방향 강성, 최대 변형점에서의 최대 응력)을 파악하기 위하여 프로그램 ANSYS를 사용하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 성능비교를 위해 두 모델에 적용한 하중과 경계조건 및 물성치는 동일한 조건으로 부여하였다. 각 모델의 재료는 Stainless steel이며, 해석에 사용된 요소(element)는 하나의 요소(element)에 4개의 절점(node)을 갖고, 6자유도를 갖는 shell 63을 사용하였다. 베어링의 축방향의 최대 stroke가  $\pm 10\text{mm}$ 로써 비 선형 거동을 알아보았으며, 이를 통하여 설계 시 요구되는 특성을 알아보았다.

### 2.1 Tangential Cantilever 베어링의 해석

참고문헌[2]의 Tang-C.B. 모델은 Fig. 1에서 보듯이 둥근 원형의 모습이며, 세 개의 플렉서 암으로 구성되어 있다. 각 암의 형상은 사각형의 형태를 띄고 있으며, 원의 중심에 대하여 각각  $120^\circ$ 간격으로 대칭이다. Table 1과 같은 물성치를 가지며, Fig. 2(a)에서 보듯이 Effective radius = 54mm이다. 내측 반경은 22mm이며, 검게 표시된 플렉서 암의 두께는 0.3mm의 plate를 사용하였고, 나머지 부분은 플렉서 암 두께의 다섯 배로 부여하여 강체로 가정하였다. 강체 내에 있는 볼트 구멍은 축방향으로의 stroke시 축방향 강성과 반경 방향 강성에 거의 영향을 주지 않으므로, 그 형상은 무시를 하였다. 해석에 사용된 요소(elements)의 수는 총 4720개, 절점(node)의 수는 총 5323개 이다(Fig. 2(b)). 외측원의 둘레에 존재하는 절점 들은 자유도를 모두 구속(all clamped)하였으며, 반경 방향으로의 하중을 가하기 위해, 현재 비어있는 중심부에 강체를 형성하여 중심점의 절점에 단일하중  $0.65\text{ kgf}(6.35\text{N})$ 을 부여하였다(Fig. 3). 탄성 방향으로 하중이 가해질 때, 축방향으로 강체

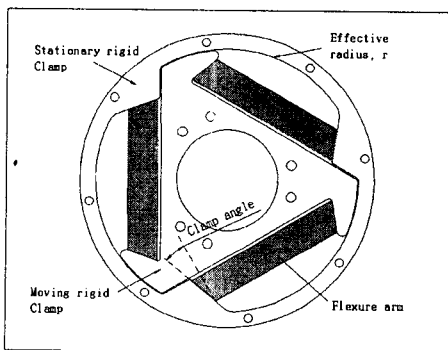
변위(stroke, 6.5mm)를 주고, 이에 따른 각 방향의 반력 값을 구하여 축방향과 반경방향에 따른 축방향 강성(axial stiffness)과 반경방향 강성(radial stiffness)를 구하였다. 축방향 강성( $k_a$ )과 반경방향 강성( $k_r$ )을 계산하기 위하여 사용된 수식은 다음과 같다.

$$k = \frac{F}{d}$$

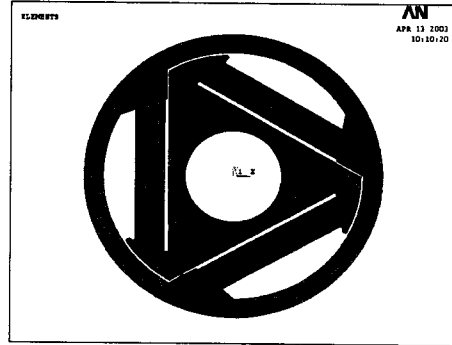
Table 1. Material properties of linear flexure bearings

Material properties	
Young's modulus (E, Pa)	210e9
Density ( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )	7860
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.3

Fig. 4는 축방향 stroke시의 변형된 모습을 축방향에서 바라본 결과이며, Fig. 5는 경사진 방향에서 바라본 모습이다. Fig. 6은 최대 변형점에서의 응력(Von-Mises) 분포를 나타내었다.



(a) model



(b) Finite element

Fig. 2 modeling Finite element of Tang-C.B.[2]

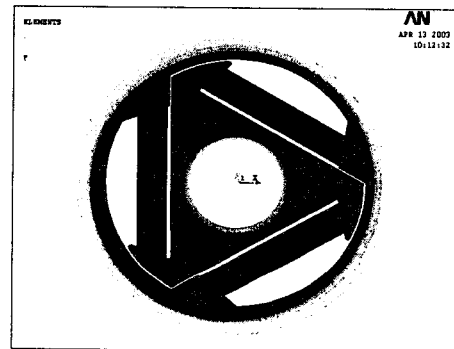


Fig. 3 Boundary condition of analysis

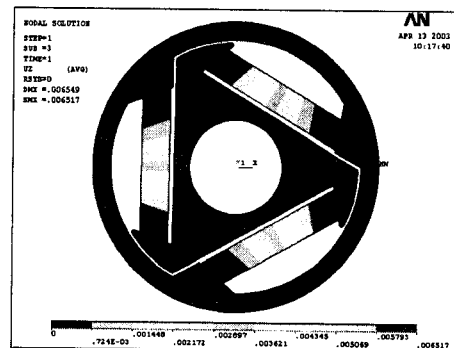


Fig. 4 Contour plot of axial displacements

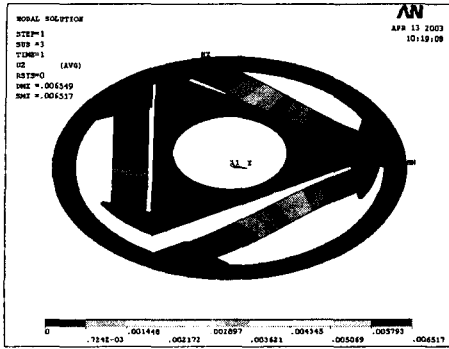


Fig. 5 Contour plot of axial displacements

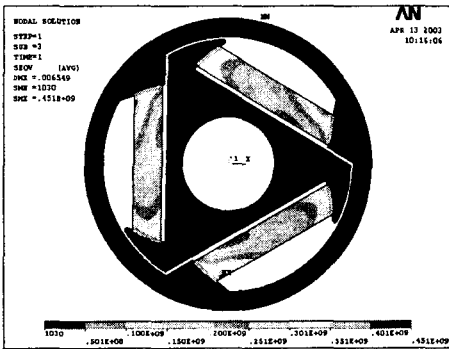


Fig. 6 Contour plot of Von-Mises stress

Table. 2에서는 본 해석에서 얻은 해석 값과 참고문헌[2]에 제시된 수치를 비교하였다. 오차는 최대 4.4%로써, 신뢰성 있는 결과로 판단된다.

Table. 2 Comparison of Analysis  
(axial stroke=6.5mm)

	Paper	Analysis model	Error (%)
Von-Mises stress [MPa]	430	449	4.41
Radial stiffness [N/mm]	2282	2182	4.38
Axial stiffness [N/mm]	1.66	1.61	3.01

## 2.2 KIMM-M1 (New)의 해석

앞에서 고찰한 Tang-C.B.[2]는 축 방향

stroke가 6.5mm일 때를 기반으로 하고 있다. 현재 KIMM에서 연구하고 있는 냉동 압축기의 플렉서 베어링은 축 방향으로 최대 10mm로 stroke하기 때문에, Tang-C.B.[2] 모델의 10mm stroke 거동을 해석하여, KIMM-M1 모델과 비교해 보고자 한다.

해석 절차는 앞에서 고려한 바와 같고, 재료의 물성치와 모델의 경계조건, 요소의 크기(element size) 등을 Tang-C.B.과 동일하게 부여하였다. Fig. 7은 KIMM-M1의 형상이며, 고려하고자 하는 설계변수를 나타내었다. KIMM-M1은 Tang-C.B. 플렉서 안이 내측원의 접선방향으로 배열되어 있는 기존의 모델(Fig.1 a)과는 달리 허브 외곽에 원호형상 플렉서 암을 120°로 배치하였다. x1은 플렉서 암의 원호상의 길이를 변수로 하며, x2는 Clamp angle(0~50), x3은 암의 폭을 나타내는 변수이다. 기존의 모델과 성능을 비교하여 설계변수의 변화에 따른 특성변화를 알아보았다.

모델의 중심점에서 플렉서 원호 암의 양쪽 외경 끝점을 변화하여 각도(x1) 변화를 주었다(Fig. 8). x1에 따라 반경방향 강성과 응력의 분포가 변화하므로 기존의 모델에서의 수치에 기준을 두고 적정 포인트를 찾았다. Clamp angle과 암의 폭이 정해지지 않은 상태이기 때문에 반경 방향 강성은 고려하지 않은 상태에서 기존 모델의 응력분포(Von-mises: 700MPa)와 만족하는 암의 각도로써 64°를 선택하였다. Fig. 9는 x1에서 결정된 포인트에서 원의 중심에 있는 선과 이루는 clamp angle에 따른 반경방향 강성과 응력 분포를 보여주고 있다. angle step=(clamp angle=35.8)에서 응력 값이 최소이면서 반경방향 강성이 최대임을 알 수 있다. Fig. 10에서는 반경방향 강성을 높이기 위해 암의 폭에 따른 변화를 알아보았다.

암의 폭에 따라서 응력이 최소로 발생하는 clamp angle이 달라지게 되므로, Fig. 11,12에서는 KIMM-M1 모델 형상의 제약과 기존 모델의 응력값을 고려하여 normalized width

( $w^* = w/r$ ) = 0.2963, 0.3056, 0.3148에서의 clamp angle 변화에 따른 응력 값과 반경방향 강성을 알아보았다. 기존의 모델과 비교하여 응력과 반경방향 강성을 고려한 최적의 값으로  $w^* = 0.2963(16\text{mm})$ 이고, clamp angle =  $35.7^\circ$ 을 취하였다.

각 변수에 대한 최적 값을 적용하여 전체 모델을 유한 요소로 나타낸 그림은 Fig. 13과 같으며, 해석에 사용된 요소의 수는 총 8,824 개, 절점은 총 9,416 개를 사용하였다. 경계조건은 외측반경의 절점을 모두 구속(all clamped)하고, 원의 중심점에서 반경방향으로 하중을 가하여 기존의 모델 해석과 동일하게 부여하였다(Fig. 14). Fig. 15는 최대 변형이 일어났을 때, 축 방향에서 바라본 모습이며, Fig. 16은 경사진 방향에서 바라본 모습이다. Fig. 17은 최대 변형점에서의 응력 분포를 나타내었다.

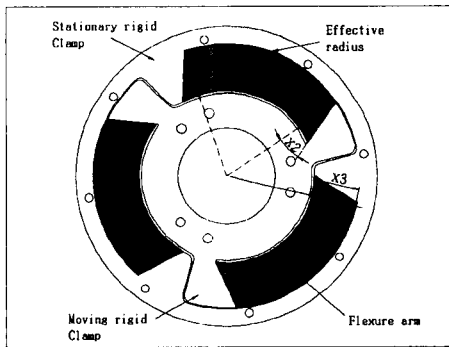


Fig. 7 Model of KIMM-M1

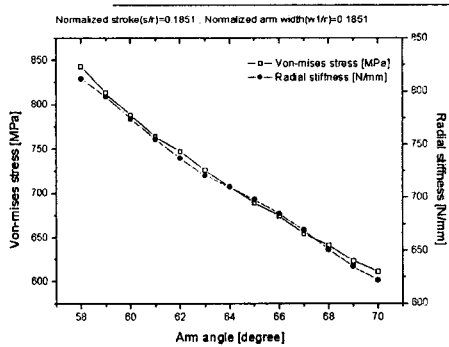


Fig. 8 Variation of stress and radial stiffness by  $x_1$ (flexure arm length)

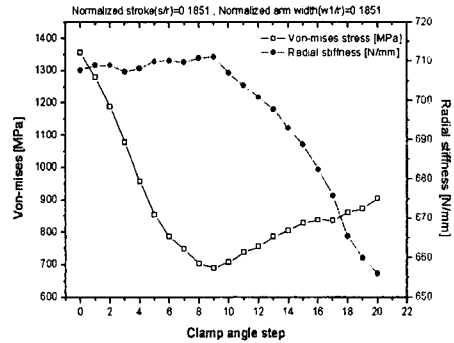


Fig. 9 Variation of stress and radial stiffness by  $x_2$ (clamp angle)

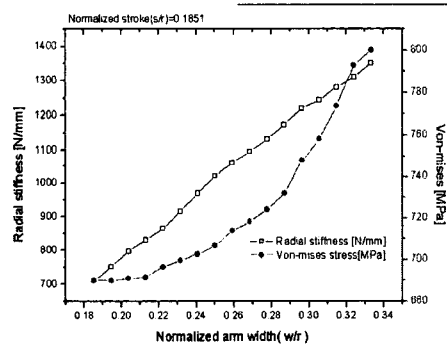


Fig. 10 Variation of stress and radial stiffness by  $x_3$ (arm width)

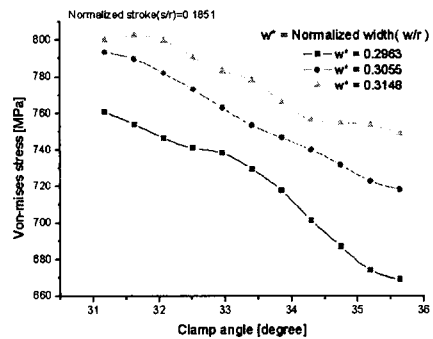


Fig. 11 Variation of stress by  $x_2$ (clamp angle)

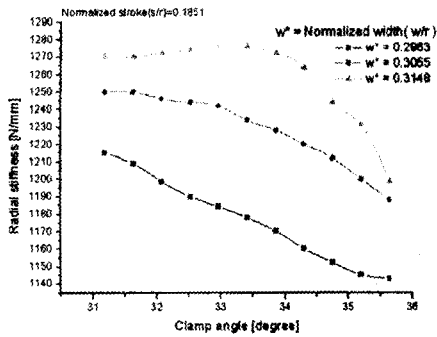


Fig. 12 Variation of radial stiffness x2 (clamp angle)

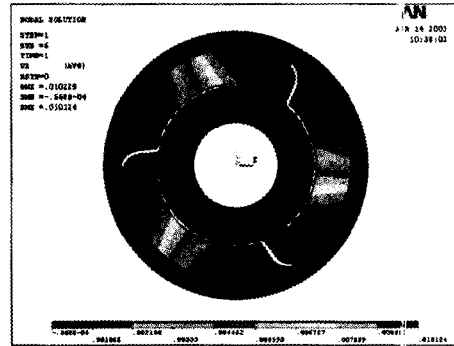


Fig. 15 Contour plot of axial displacements

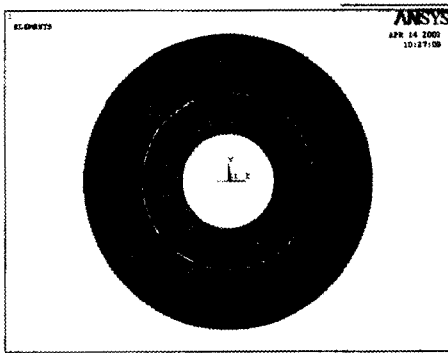


Fig. 13 Finite element of KIMM-M1

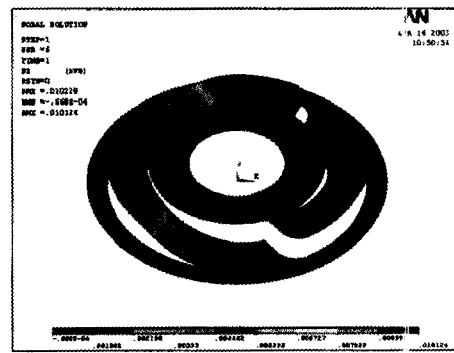


Fig. 16 Contour plot of axial displacements

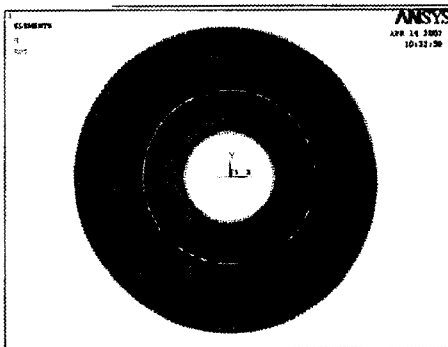


Fig. 14 Boundary condition of analysis



Fig. 17 Contour plot of Von-Mises stress

### 3. 결 과

반경 방향으로의 하중( 6.376N )을 가한 상태에서 축 방향 변위에 따른 반경 방향의 강성 값을 알아보았다(Fig. 18). 그림에서 보듯이 normalized stroke=0.11(6.5mm)인 지점에서 기존 모델과 근 사하게 나타났으며, stroke가 증가할 수록 기존 의 모델에 비해 KIMM-MI의 강성 값이 더 커짐을 알 수 있다. Fig. 19는 모델의 중심 점에서 수평축 (x축) 방향과 반경 방향으로의 하중의 각도(0~360)에 따른 Von-mises 최대 응력 분포를 보여주고 있다. 두 모델 모두 각 도에 따른 최대 응력 오차는 1%이내 임을 보여주고 있다. Fig. 20은 하중의 각도에 따른 두 모델의 반경 방향 강성 값을 나타낸 그림이다. 각도에 따른 각 모델의 최소점을 선택해서 비교했을 때, 기존의 모델에 비해 KIMM-MI의 강성 값이 10.4% 높음을 알 수 있었으며, 최대 값과 최소 값의 오차는 기존 모델에 비해 50% 적었다. Fig. 21에서는 stroke에 따른 축 방향 강성을 비교하였다. stroke의 증가에 따라 두 모델 모두 강성 값이 증가하였으며, 최대 변형점에서는 기존의 모델에 비해 KIMM-MI의 강성 값이 약 2 배(195%)에 도달함을 알 수 있었다. 플렉서 베어링은 많은 경우 적층을 하여 사용을 하게 된다. 이 경우 축 방향으로부터 요구되는 강성 값이 존재하므로, 반경 방향의 변위가 clearance seal을 만족하는 조건 내에서 축 방향 강성 값이 높아짐으로 해서 적층 수를 줄이는 효과를 기대할 수 있다.

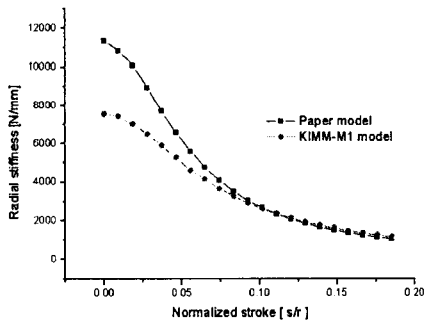


Fig. 18 Radial stiffness vs. Normalized stroke

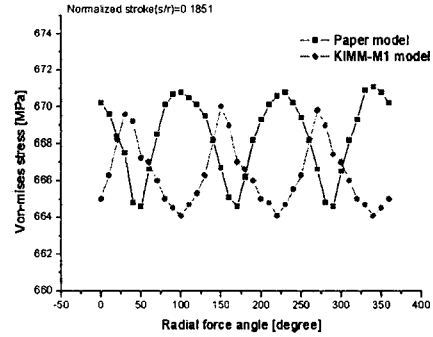


Fig. 19 Von-mises stress vs. radial force angle

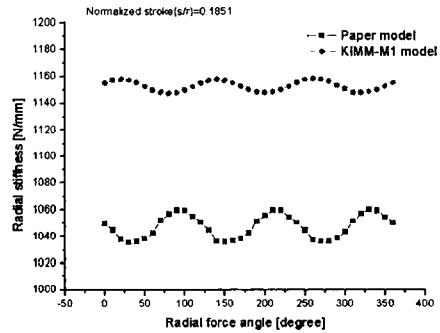


Fig. 20 Radial stiffness vs. radial force angle

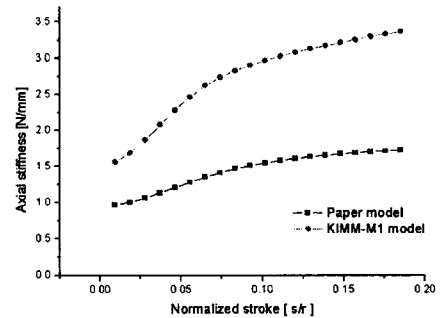


Fig. 21 Axial stiffness vs. Normalized stroke

#### 4. 결 론 및 향 후 계 획

#### 후 기

새로운 형상의 플렉서 베어링을 설계 및 해석을 수행하여 기존모델과의 특성비교를 해보았다. 기존의 모델에 비해 반경 방향 강성은 10.4% 높으며, 반경 방향의 하중 방향에 따른 강성 변화가 상대적으로 작고, 최대 변형점에서의 응력은 거의 동일하게 분포함을 알 수 있었다. 또한 최대 변형점에서의 축 방향 강성은 기존의 모델보다 두 배정도 높아 적은 수의 적층으로도 적용이 가능할 것으로 기대가 된다. 따라서 앞으로 극 저온 냉동기 왕복동 압축기에 대한 신 모델의 적용이 기대된다.

향후, 해석된 결과를 토대로 축방향으로의 왕복 stroke에 대한 피로수명을 측정할 계획이며, 축 방향 강성, 반경 방향 강성을 측정하여 해석 값과의 결과를 고찰 할 계획이다. 또한 설계변수 및 형상을 변화하여 성능 개선을 위한 설계를 시행하고자 한다.

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

#### 참 고 문 헌

- [1] Pan, R. B. et. al., "Tangential linear flexure bearing", US Patent 5492313
- [2] Eric Marquardt and Ray Radebaugh, "Design Optimization of Linear-Arm Flexure Bearings, National Institute of Standards and Technology
- [3] T. E. Wong, R. B. Pan, H. D. Marten C.Sve, L. Galvan, T. S. Wall "Spiral Flexure Bearing", The Aerospace Corporation 4 Segundo, California, USA
- [4] 최 상규, 박 성제, 홍 용주, 김 효봉, "소형 정밀 왕복동기용 선형 탄성 베어링 모델(KIMM-LFB)의 설계 및 해석", 2002 한국소음진동학회