

초소형 고속 회전기기의 베어링 설계/제작 및 운용 기술

이 용 복* · 김 태 호 · 곽 현 덕 · 김 창 호
(한국과학기술연구원)

1. 머리 말

NASA의 터보 기기 관련 전문 워크-샵인 "Rotordynamic Instability Problems in High Performance Turbomachinery"에 따르면 고속 회전하는 터보 기기의 불안정성(instability)의 원인은, 공력 시스템의 임펠러 및 터빈으로부터 야기되는 불안정성으로 인한 스톱/서지(stall/surge), 회전기 요소인 베어링이나 실(seal)등의 시동 및 정지 시(start/stop), 즉 천이영역에서의 러빙(rubbing)에서 기인한 불안정성, 고속에서의 유체 전단 마찰력에 기인한 불안정성인 휠(instability whirl), 베어링 표면이나 블레이드의 마모에 의한 영향 등으로서, 이는 시스템의 신뢰성 및 성능 저하에 따른 불안정성을 유발한다.

특히 고속으로 운전되는 시스템에서 불안정성을 유발하는 메커니즘을 이해하고 불안정성을 예측하여 이를 치유하기 위한 회전기 요소 및 시스템 연구는 기계시스템의 내구성 및 안전성과 직결되어 고속화를 통한 기계시스템의 경쟁력 향상에 중요한 사항이 된다.

이 글에서는 초소형 스마트 동력 발생(power-MEMS) 시스템에 적용되는 베어링의 설계 및 제작 그리고 고속 회전에 따른 운전 안정성(instability)

* E-mail : lyb@kist.re.kr

에 관련한 기술들을 소개하고자 한다.

2. 고속 회전체의 스마트 베어링의 설계

"MEMS/MST 기반의 고속 회전기용 마이크로 베어링 기술"은 반도체 공정 기술의 일종인 Deep RIE(reactive ion etching)/LIGA(lithography) 등의 MEMS(microelectromechanical systems) 기술이나 초소형 3차원 머시닝센터를 이용한 정밀 MST(micro system technology) 기술을 제작의 기반으로 하여, 정보 저장기기 및 에너지 발생 관련 기기(power-MEMS)의 고효율화 실현을 위한 가스 혹은 공기 베어링(bearing)의 설계 및 가공 기술과 고속에서의 안정성을 확보하는 기술을 의미한다. 이는 IT/NT의 연구 확대 및 급속한 성장을 배경으로 하여, 소형 스마트 회전기기의 고효율·고효율화 실현을 가능하게 하는 핵심 요소인 베어링의 극한 설계 기술이며, 아래와 같은 세부 기술로 구성된다.

2.1 MEMS/MST 저널/스러스트 베어링의 미끄럼 유동 및 연성 경계 해석

마이크로 베어링의 틈새 유동 해석기술은 학문적으로 극소 틈새(clearance)내의 미세 유동과 최소 유막 두께(minimum fluid film thickness)와의 관계를 고려하여야 하는데, 이는 최소 유막 두

특집 베어링

계와 윤활제인 가스 혹은 공기 분자의 평균자유 분자행로(mean free molecular path)의 크기 비율 정도에 따라 극소 틈새 내에 국부적인 미끄럼 유동(slip flow)이 발생하기 때문이다.⁽¹⁾ 더욱이 MEMS의 가공 특성상 웨이퍼(wafer)의 최대 가공 깊이가 500 μm 정도에 불과하기 때문에 가공 가능한 베어링의 형상비(aspect ratio : L/D)가 제한되어 하중 지지력이 기존의 베어링에 비하여 현저히 떨어지게 될 뿐 아니라 저널과 스톱스트 베어링의 연성 영역(coupling region)이 발생하게 된다.⁽²⁾ 따라서 고속회전시의 미끄럼 유동 및 연성 경계 조건의 해석은 마이크로 베어링의 설계 및 유동해석에 필수적이다.

2.2 Knudsen Number for Thin film

초소형 베어링은 일반적인 베어링에 비하여 첫째, 축 직경에 비하여 틈새가 매우 작아 제작이 어려우며, 둘째, 회전축의 직경이 작아 축의 표면에서의 유속도 매우 작고, 셋째, 특히 공기 베어링의 경우에는 비연속체(non-continuum)의 효과를 고려해야 한다. 따라서 micro-scale의 초소형 베어링 윤활은 기존의 일반적인 윤활과 다른 특성을 가지며 해석 기법의 적용 또한 달라져야 한다. 일반적인 유체 베어링에서의 유막 특성은 아래의 식과 같이 무차원수인 레이놀즈수(Reynolds number)에 의해서 그 특성을 나타낸다.

$$Re = \frac{\text{inertia}}{\text{viscous}} = \frac{\rho_0 u_0 c_0}{\mu_0}$$

여기서 ρ_0 , u_0 , c_0 와 μ_0 는 각각 밀도, 유속, 공칭 틈새 그리고 점도를 나타낸다. 그러나 초소형 베어링의 유동 해석은 지배방정식인 레이놀즈 수식을 적용하기에 앞서 유막의 최소 두께(minimum fluid film thickness)와 윤활제인 가스 분자의 평균자유 분자행로에 대하여 고려해야만 한다. 베어링 틈새의 유막 최소 두께가 윤활제 분자의 평균자유 분자행로와 비교하였을 때 매우 작게 되면 베어링의 표면과의 경계에서 윤활제의 미끄럼이 발생한다. 이는 고체 벽면의 속도와 고체 벽면의 공기 분자 속도의 차이가 발생한다는 것을 의미하며 이를 미끄럼 유동(slip flow)라 한다.⁽³⁾ 이때 유막에서의 유동의 속도는 고체 벽면에서의 점착 조건을 고려되어야 하므로 일반적인 층류와 다른 양상을 보인다. 이러한 미끄럼 유동은 표면에서 평균 유동 속도와 표면의 속도와의 차이가 존재하기 때문에 유동에 미끄럼의 발생으로 인해 레이놀즈 식(Reynolds equation)은 더 이상 유용하지 않다. 미끄럼 유동에 대한 Knudsen number, K_n 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Kn = \frac{\lambda_m}{h}$$

여기서 λ_m 는 가스 입자의 평균 자유 행로이고 h 는 유막 두께이다.

Knudsen number, K_n 가 0.01보다 작을 경우 유동의 형태는 층류의 유동형태를 갖지만 그보다 클 경우에는 유동의 미끄럼에 의한 현상이 지배적이게 된다. 일반적으로 상온 대기압 하에서 공기의 값이 0.064 μm이고, 유막의 두께 h 가 10 μm 내외의 MST에서는 Knudsen number, K_n 가 충분히 커 층류의 영역에서 작동하지만 MEMS 가공 후

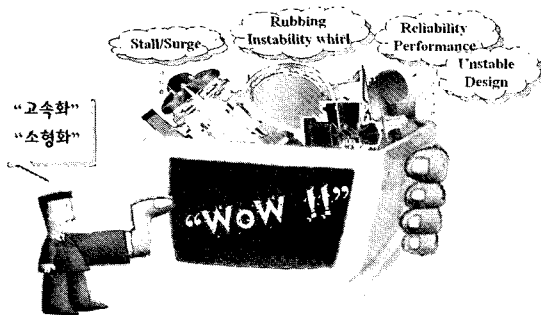


그림 1 터보 기기의 불안정성 유발 요인

의 베어링의 경우 극소유막두께의 발생으로 인해 미끄럼 유동이 발생 할 수 있다. 따라서 이러한 현상을 고려한 별도의 유동 방정식의 적용이 필요하다. 그림 2는 베어링 틈새 내의 유선(streamline)의 형태를 편심률과 미끄럼 계수(slip factor) S 에 따라 나타낸 것으로 상부에서 하부로 이동할 경우 편심률이 0.2에서 0.5, 0.8로 커지며, 또한 좌에서 우로 이동함에 따라 미끄럼 계수, S 가 증가한다. 편심률이 0.5 이상에서는 회류(recirculation)가 발생하며, 반면에 미끄럼이 반대편에서 발생함을 보여 주고 있다.

2.3 고속에서의 안정성을 갖는 운용 기술

현재의 초고속 마이크로 베어링이 적용되는 대표적인 터보기기 가운데 Power-MEMS 관련한 연구로는 고효율의 에너지 발생장치인 마이크로 터빈 제네레이터 시스템을 들 수 있다. 초소형

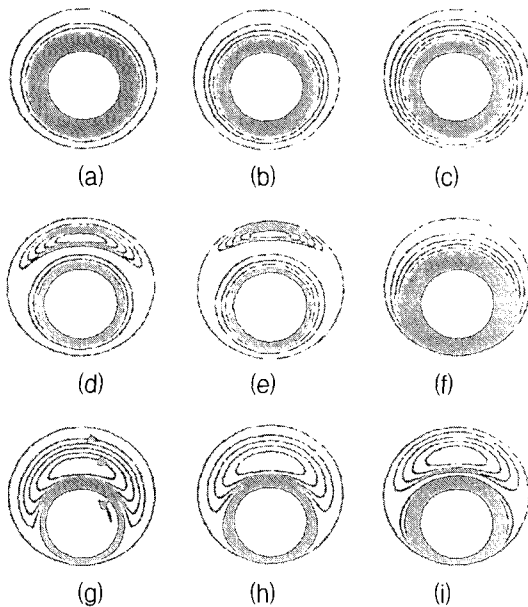


그림 2 슬립조건과 편심에 따른 유선(streamline)의 효과; from top to bottom: $\epsilon = 0.2, 0.5, 0.8$, from left to right: $S = 0, 0.1, 0.5$

MEMS 기반의 로터/베어링 시스템의 경우 수십 watt의 파워를 발생시키기 위해서 로터는 1,000,000 rpm 이상의 고속으로 운전되어야 한다. 실제 로터의 직경이 4 mm일 경우, 30 watt 정도의 동력을 발생하기 위해서는 2,400,000 rpm 정도의 고속 운전이 불가피하다. 더욱이, Deep RIE 기술을 이용하여 로터를 가공하는 경우에는 최소 에칭 틈새(minimum etchable clearance)가 $12 \mu\text{m}$ 로 윤활틈새 대반경비(c/R)가 일반적인 공기 베어링에 비하여 상대적으로 큰 값을 갖게 된다. 이는 낮은 하중지지력과 불안정성(instability)을 야기하기 때문에 마이크로 베어링의 경우 유막 두께를 $10 \mu\text{m}$ 내·외로 하여 설계 및 운전이 매우 난해하며 또한 고속에서 불안정성이 발생하게 된다. 이러한 제한은 초고속 마이크로 베어링 설계기술의 가장 큰 난관이라 할 수 있으며 따라서 고속회전으로 인한 로터의 불안정성을 피할 수 있도록 베어링의 제진력을 증가시키는 것이 마이크로 베어링의 핵심기술이다. 한편, 2001년 미국 국방일보에 따르면 마이크로 터빈 제너레이터의 성공을 위해서는 1,000,000 rpm 이상의 초고속 회전기용 베어링 운용 기술의 확보가 가장 중요하게 고려해야 할 관건으로 인식되고 있다.

기존의 강성 가스 베어링(rigid gas bearing)은 하중 지지력이나 고속에서의 감쇠력에 대한 한계

Power-MEMS-Micro Gas Turbine supported by Micro foil bearing

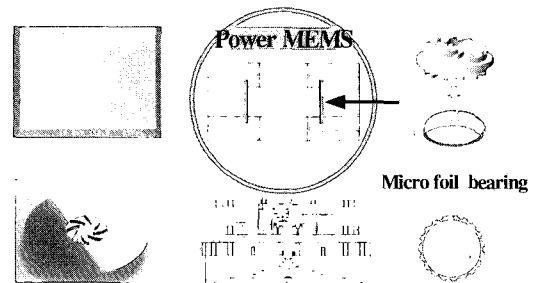


그림 3 초소형 포일베어링을 적용한 마이크로 가스 터빈

특집 베어링

를 갖고 있다. 따라서 고속회전 운전 시에 불가피한 유동의 불안정성 발생으로 인해 운전속도의 제약이 따르는 것이 사실이다. 이러한 불안정성을 극복하고자 많은 베어링의 연구가 이루어져 왔는데 특히 가스(공기)를 윤활제로 사용하는 경우 부가적인 강성과 감쇠의 효과는 일반적인 오일 등의 윤활제를 활용하는 베어링에 비하여 작아 설계 및 운용이 어려웠다. 1970년대부터 연구되기 시작한 포일 가스 베어링(foil gas bearing)은 포일의 부가적인 감성과 감쇠의 효과를 통하여 안정성 및 하중 지지력 증대를 꾀할 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 고속 터보기기인 터보 압축기, 터보 제너레이터, ACM(air cycle machine) 등의 지지 베어링으로 다양하게 활용되고 있다. 그러나 포일 베어링 역시 구조적인 감쇠(structure damping force) 및 쿨롱 마찰(coulomb friction)에 기인한 감쇠력을 이용하여 고속회전에서의 제진효과를 얻기 때문에 고속에서의 유동 불안정성에서 기인한 공력학적 서지(surge) 등의 불안정성에는 한계를 갖게 된다. 그림 3은 마이크로 포일베어링을 적용한 마이크로 가스 터빈의 개념도를 나타내는데 가스 포일 베어링은 미세 입자 및 먼지 등의 불순물에 대하여 self-position(clearance)의 장점을 갖기

때문에 일정한 유막력을 발휘하여 회전체를 안정적으로 지지할 수 있다.

일반적으로 고속의 터보 기기는 저주파 비동기 신호(sub-synchronous) 등의 불안정한 진동으로 인해 전체 시스템의 진동이 발생하기도 한다. 그림 4는 39,000 rpm의 고속으로 운전되는 초고속 터보압축기에서의 실험결과로서 공력요소에서 발생하는 불안정성인 서지로 인해 유발된 회전축의 비정상상태의 진동을 보여준다. 회전축은 범프 포일 가스 베어링으로 지지하였다. 회전주파수에 대해 저주파 영역에서 비동기성 진동이 발생하였으며 그 크기가 동기성 진동을 크게 능가한다. 일반적인 포일 베어링 배면에 감쇠물질을 부가함으로써 감쇠력을 향상시킨 점탄성 범프 포일 가스 베어링으로 지지되었을 때의 압축기의 축 진동을 범프 포일 베어링의 경우와 비교하기 위해 그림 5에 나타내었다. 점탄성 범프 포일 베어링의 경우에는 증대된 감쇠 성능으로 인해 저주파에서의 진동이 제진되었음을 알 수 있다. 즉 점탄성 포일 베어링의 증대된 감쇠 성능은 비선형성에서 기인한 로터의 비정상 진동을 줄이는 데에 도움이 됨을 알 수 있다. 이와 같이 강성 가스 베어링과 달리 포일 가스 베어링은 포일구조로 이루어진 탄성의 베어

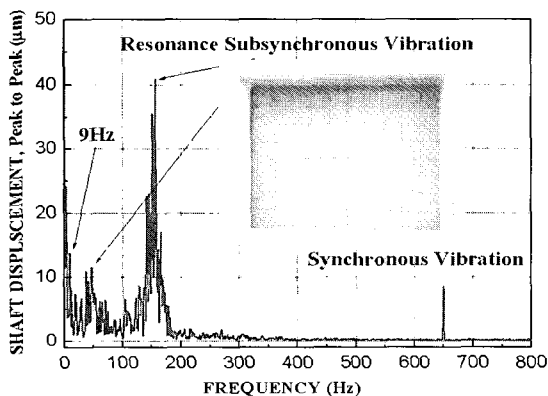


그림 4 서지로 인한 회전축의 진동 스펙트럼 - foil bearing

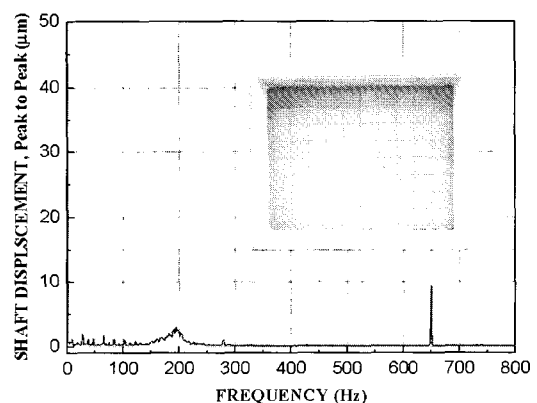


그림 5 감쇠력 향상을 통한 회전축의 제진 - viscoelastic foil bearing

링 내면을 구성하기 때문에 강성과 감쇠력의 증대가 가능한 장점을 갖고 있어 고속회전에서의 안정성 향상을 도모할 수 있다.⁽⁴⁾

2.4 마이크로 베어링의 재료/가공 및 고온 코팅 기술

마이크로 베어링의 재료인 실리콘은 밀도가 $2,330 \text{ kg/mm}^3$ 로 알루미늄의 $2,700 \text{ kg/mm}^3$ 보다 상대적으로 작고, 강도가 우수한 장점이 있는 반면 고온에서 재료의 변형이나 마멸 및 취성이 큰 단점을 가지고 있다. 따라서 재료 측면에서 내 충격이 강한 재료의 개발과 아울러 미소 틱새 내의 스틱현상(stiction)에 관한 연구, 표면에 고온/내마모의 코팅을 통한 윤활 특성의 개선이 이루어져야 한다.⁽⁵⁾ 특히, 에너지 관련 기기에 사용되는 마이크로 베어링의 경우 작동 온도가 700°C 이상이므로 고온 코팅과 모재(substrate)의 연구가 중요하다.

3. 국내 · 외 기술동향 및 수준

3.1 국외의 기술 동향 및 수준

현재 미국은 NASA의 주관 아래 1995년부터 New Millennium Program(일명 moon light project)을 통하여 1~10 kg급의 초소형 인공위성을 탑재 할 수 있는 마이크로 로켓과 그의 초소형 무인 비행기(MAVs)의 전원 시스템으로 초소형 가스 터빈 엔진에 대한 연구를 진행 중에 있다. 특히, 동 분야에 선두 그룹인 미국 MIT의 연구 현황을 보면 출력 30 W의 터빈을 실제 수소 혹은 메탄 연료를 이용하여 1,000,000 rpm 이상의 고속에서 운전한 경험이 있으며, 최종 목표를 2,400,000 rpm으로 설정하여 연구에 박차를 가하고 있다.^(6, 7) 또한, 일본 Tohoku 대학의 Esashi 교수와 Tanaka 박사는 micro-reaction-sintering process를 이용한 마이크로 터빈 로터(micro-turbine rotor)를 약 9,800 rpm의 속도로 구동한

바 있으며, 마이크로 5축 밀링 가공을 통한 MST 기반의 연구를 수행 중에 있다.⁽⁸⁾ 그러나 현재 이들 연구 그룹은 마이크로 베어링의 안정화 설계 및 운용에 있어 기술적 문제에 봉착하고 있어 이에 연구 역량을 집중하고 있다. 또한 이러한 극한 기술의 문제점에 대해 콜롬비아 대학의 록프래체 교수는 “부품(저널/베어링)들 사이에 발생하는 인력 때문에 각각의 부품이 기능을 발휘 못 할 수도 있다.”고 언급하여 현재의 베어링의 설계 및 운용 기술이 극한 기술임을 지적한 바 있다.

3.2 국내의 기술 동향 및 수준

국내에서는 서울대학교에서 마이크로 파워 시스템 개발의 일환으로 MEMS 기반의 고속 회전 마이크로 터빈과 마이크로 연소기의 설계, 제작 및 평가와 관련된 연구를 수행하고 있다. 현재까지 터빈/압축기 로터의 설계와 패키징을 통한 제작 단계를 거쳐 운용을 위한 준비단계에 머무르고 있다. 또한 한국과학기술연구원은 1997년부터 동 분야 연구를 수행하여 왔으며, 현재까지 MEMS 기반의 직경 5 mm의 로터 베어링을 설계 제작한 경험과 MST 기반의 scaled-up(diameter 10 mm) 모델의 제작 및 운용 경험을 가지고 있다. 또한 다년간의 마이크로 베어링 해석 및 설계 그리고 고속회전 베어링의 적용 경험을 바탕으로 초고속 마이크로 터빈 제너레이터 연구에 박차를 가하고 있다.

그러나 이러한 국내의 기술은 선진국과의 동 분야 기술 수준의 차이에 있어서 유사 시스템의 설계 및 운용에 따른 풍부한 경험을 갖추고 있지만 실제 MEMS/MST 기반의 베어링의 가공과 운용에 경험이 부족한 것이 현실이다. 따라서 향후 10년 후 IT/NT/ST의 핵심 기반 기술 중의 하나로써 국내 연구에 미칠 지대한 파급 효과를 고려할 때 장기적인 국가적 차원의 지원이 이루어져야 할 것이다.



4. 초소형 베어링의 기술경쟁력 및 향후 수요전망

현재 국내의 “마이크로 베어링의 설계·가공 및 운용기술”은 표 1과 표 2에서 알 수 있는 바와 같

이 선진국 대비 50% 정도 수준에 머물고 있다. 이제까지의 연구 개발은 주로 저속 영역의 정보 저장기기용 소형 모터나 소형 정밀 가전에 사용되는 볼 베어링이나 유체 베어링에 운용에 그 기술이 국한되었다. 여러 선진기술국에서는 MEMS/MST기반의 회전기 베어링의 기술을 마이크로 터

표 1 선진 연구 기관의 Power-MEMS/MST 베어링의 핵심 기술 개발 사례

관련 기술	선진국 수준(개발사례)	선진 연구 기관	국내 수준
Micro tribology	- Boundary layer analysis	MIT, DARPA, Brown University	- 기초 연구 단계 - Slip flow analysis
고속 회전체 운영 기술 (rotordynamics)	- 최대 1,200,000 rpm 운전 - Electro-damper	MIT	- 중속 운전 경험 - 연구 대등 단계
마이크로 베어링.실 및 로터 가공	- Deep RIE/LIGA, 3D MST	MIT, Tohoku Univ. IHI Co. Ltd.	- 기초 연구 단계 - 5mm MEMS - 10mm MST 가공운전 중

표 2 MEMS/MST 기반 베어링의 핵심 기술 개발 사례 및 선진국과의 기술 수준 비교

분야/기술	세부 기술	선진국 대비 국내 기술 수준
해석·설계	- Boundary layer analysis - Slip flow analysis	60%
고속 안정화 기술	- Damping force 증대 - OSI 및 dynamic characteristics 해석 - Blancing 기술	50%
초정밀 가공 및 운영 (고온 코팅 및 소재기술 포함)	- MEMS/MST based high precision fabrication - Micro tribology for silicon material	40%

표 3 MEMS/MST기반 회전기 베어링 기술의 적용 사례 및 파급 효과

핵심 세부기술	적용 사례	파급 효과
마이크로 베어링 유동 해석 및 설계 기술(micro tribology)	- MEMS/MST Based bearing/seal - Micro tribology	미세 유동 해석 및 프린터(잉크젯)
고속 회전체 안정화 기술 (rotordynamics)	- Micro foil bearing - Micro electro-damper	저진동, 저마찰, 안정된 출력, 미세 감쇠기 개발
고온 베어링 설계·제작/코팅 기술 (열·재료 공학)	- 700°C 이상의 고온 내마모 코팅 - Micro tribology	고신뢰성, 고속 경량화, 고효율화
가공 및 평가 기술	- 3D micro milling - Deep RIE/ LIGA process - 측정 및 Data/signal processing	MEMS에 의한 대량 생산(경제성) MST에 의한 소형 공작 기계 기술 향상(micro factory)

빈 구동, MAV 파워 제네레이션 시스템의 핵심 기술로서 연구개발하고 있으며, 또한 그 파급 기술은 매우 광범위하다. 향후 10년 뒤에는 모바일 위험 로봇, 수질/환경/산림화재 감시용 무인 순항 시스템 등의 민수용 초소형 모바일 전원의 핵심 기술로 활용이 가능할 것으로 예상된다. 더욱이 최근에는 포일 가스 베어링의 환경친화적 특성을 이용해 가전 정보 기기 구동 핵심 부품인 oil-free 모터의 베어링으로 활용 및 대체를 모색하고 있다. 1999년 발표된 전자부품연구원의 소형 모터 산업 실태조사 보고서에 의하면 이러한 소형 모터의 국내 연간 수요가 일본의 1/3 수준인 년 매출 규모 100억일 정도로 국내 산업에 미치는 효과가 큰 것으로 나타났다. 또한 비교적 정보 저장기기 중 시장 규모가 큰 하드 디스크 드라이브의 경우에는 1998년에 전 세계적으로 약 1억4천만 개가 생산되어 세계시장 규모가 1998년 현재 \$300억에 이르렀으며, 최근에는 초소형 무급유 베어링에 대한 적용 연구사례가 적극적으로 발표되고 있다.('99 Disk/Trend Report)

5. 맺음말

매년 \$ 1.6 억 이상의 베어링이 단일 품목으로 수입('99-KOAMI 자료)되고 있고, 그외 회전기에 포함되어 있는 그 수요까지 고려하면 그 액수는 매우 크다. 그에 반하여 아직까지 MEMS/MST 기반의 초소형 스마트 베어링은 전반적으로 그 시장성이나 적용성은 그리 넓지 않았던 것이 사실이다. 그러나 초고속 베어링 기술은 국내의 IT 및 ET 기반기술과 고효율 및 환경친화적 무공해 터보기기의 사회적 요구 증대를 감안할 때 그 잠재력이 매우 크다. 따라서 향후 초소형 스마트 터보기기 시장 확대를 위한 회전기 요소인 초소형 베어링의 설계 및 평가 기술의 확보는 매우 중요하리라 사료된다.

참고 문헌

- (1) Nagaraj, K. A. and Nelson, H. D., 1992, "An Analysis of Gas-lubricated Foil-journal Bearings," STLE Tribology Transactions, Vol. 35, No. 1, pp. 1~10.
- (2) Lee, Y. B., Kwak, H. D., Kim C. H. and Jang, G. H., 2001, "Analysis of Gas-lubricated Bearings for Micro Gas Turbine with Coupled Boundary Effects," STLE Tribology Transactions, Vol. 44, No. 4, pp. 685~691.
- (3) Gad-el-Hak, 1997 "Flow and Load Characteristics of Microbearings with Slip," Journal of Micromech. Microeng. 7(1997), pp. 55~64.
- (4) Lee, Y. B., Kim, T. H., Lee, N. S. and Kim, C. H., 2003, "Suppression of Subsynchronous Vibrations Due to Aerodynamic Response to Surge in a Two-stage Centrifugal Compressor with Air Foil Bearing," STLE Annual Meeting, AM03-8.
- (5) DellaCorte C., 1997, "A New Foil Air Bearing Test Rig for Use to 700°C and 70,000rpm," NASA TM-107405.
- (6) Orr, D. J., 2000, "Macro-scale Investigation of High Speed Gas Bearings for MEMS Devices," Ph. D. Thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology.
- (7) Piekos, E. S. and Breuer, K. S., 1999, "Pseudospectral Orbit Simulation of Nonideal Gas-lubricated Journal Bearing for Micro-fabricated Turbomachines," Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 604~609.
- (8) Tanaka, et. al., 2000, "Air-turbine-driven Micro-polarization Modulator for Fourier Transform Infrared Spectroscopy," 17th Sensor Symposium, pp. 29~32.