

마이크로 회전액추에이터의 연구 동향 분석 및 새로운 개념 설계

한봉수
경일대학교 기계자동차공학부

A Review and Novel Concept Design of Micro-rotary Actuators

Bongsu Hahn
School of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungil University

요약 본 논문은 마이크로 회전액추에이터의 여러 문헌을 검토하여 현재 기술 현황과 제약 사항 등을 분석하고, 이를 바탕으로 관련 분야의 기술적 진척을 이루기 위한 새로운 형태의 마이크로 회전액추에이터의 개념 설계를 제시하였다. 연구 동향 분석과 논의는 첫째, 구동 형식, 둘째, 안정적인 회전 전달 방법, 셋째, 회전 정밀도 향상을 위한 제어 방법의 세 분야에 대해 수행되었다. 그 결과 회전액추에이터를 위해 가장 효율적이고 진보된 구동방식은 Top-drive 정전 구동 방식이고 회전전달 방식은 전도체 액체 베어링 형식인 것으로 나타났다. 이 형식에서, 회전 안정성 및 전달력은 마찰력, 회전자의 수평 유지, 고정자로부터 회전자로의 효과적인 전류연결 등에 영향을 받는다. 이와 같은 문제는 제어적 방법으로 기계적 설계의 부족한 부분을 보상하여 더욱 정밀하고 안정적인 시스템을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 이와 같은 분석을 기반으로 소형, 정밀, 저전력, 안정성, 증대된 운동자유도 등의 성능을 개선할 수 있는, 새로운 형식의 액추에이터를 기계적 관점에서 설계하고 센싱과 제어적 접근을 통해 그 정밀도와 안정성을 확보하는 방법을 개념적으로 제시하였다.

Abstract In this article, we review the recent developments and limitations of micro-rotary actuators from studies on existing articles to state-of-the-art technologies, and suggest a novel conceptual design of micro-rotary actuators. In order to achieve this, we consider three representative areas of rotary actuators: (1) drive type (2) stable torque transmission method (3) accurate control method for rotation. Based on the studies in these areas, we conclude that the most efficient and advanced method of actuation for the rotary actuators is the electrostatic force actuation, with top-drive and the conductive liquid bearing. However, in this type of actuation, rotational stability and torque transmission are affected by friction forces, rotor wobble, and current connectivity from a stator to a rotor. All these problems can be resolved with the application of an advanced control for the actuator. Therefore, based on this review, we conceptually suggest a novel structure for micro-rotary actuators, that can be controlled in a more accurate and stable manner, fabricated in smaller sizes, and can have an increased number of kinetic degrees of freedom.

Keywords : Electrostatic Actuation, Liquid Bearing, MEMS, Microsystem Control, Micro-Rotary Actuator

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1D1A1B04934686)

*Corresponding Author : Bongsu Hahn(Kyungil Univ.)

email: hahn@kiu.kr

Received July 8, 2021

Accepted August 5, 2021

Revised July 23, 2021

Published August 31, 2021

1. 서론

MEMS 기술이 소개된 이 후, 회전액추에이터에 대한 연구가 매우 큰 관심을 받고 있다. 그 이유는 마이크로 자동화 기기, 의생명 기기, 초정밀 계측 기기, 및 광학 기기 등의 다양한 첨단 분야에 사용되는 장비의 부품으로 회전 운동을 야기하는 소형 액추에이터가 필수적이기 때문이다. 예를 들어, 소형 자이로센서의 보정, 광학 거울을 이용한 방위각 제어, 디스플레이 기기에서의 스캐닝 각도 조정, 및 내시경 말단의 카메라 포커싱 등에 아주 유용하게 사용되고 있다.

그러므로 소형, 정밀, 저전력, 안정성 등을 보장할 수 있는 마이크로 회전스테이지가 관련 연구의 궁극적 목표라고 정의할 수 있다. 그러나, 현재까지 연구된 연구 결과들은 구동 효율, 안정성, 제어 전략에서 여전히 상당한 진전을 필요로 한다.

따라서 이 논문에서는 여러 문헌조사를 통하여 마이크로 회전액추에이터의 기술 현황과 제약 사항 등을 파악한 후, 이를 극복하고 기술적 진척을 이루기 위한 방법을 제시하여 새로운 형태의 마이크로 회전액추에이터의 개념 설계를 제안하고자 한다.

문헌 조사는 크게 세 가지 분야로 분류하여 수행되었다: (1) 구동 형식, (2) 안정적으로 회전력을 전달하는 방법, (3) 회전 정밀도 성능 개선을 위한 제어 방법. 이 분류 기준 하에서의 관련 연구 동향을 논의 하고 그에 대한 장단점 및 해결책을 제시하고자 한다.

2. 국내·외 연구 동향 분석

2.1 구동 형식에 따른 연구

마이크로 회전액추에이터의 회전운동은 크게 세 가지의 구동원리를 기반으로 발생 된다. 그 세 가지는 (1) 정전 구동, (2) 전자기 구동, (3) 압전 구동으로서 각 구동 형식마다 존재하는 단점을 보완하고 장점을 극대화하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

정전 구동 기반의 회전액추에이터 연구는 [1-4] 다시 구동력의 위치에 따라 Fig. 1과 같은 Top-drive와 Side-drive, 및 Fig. 2와 같은 Wobble-drive의 세 가지 형식으로 분류된다. 이 중에서 Top-drive 방식의 경우, 빠른 속도와 큰 토크 생성은 유리하지만, 회전자와 고정자 사이의 본질적인 수직력에 의해 회전자 요동 혹은 진동이 발생할 수 있는 단점이 있고, Side-drive 방식은 회

전자의 안정도가 큰 대신에 구조적으로 정전력에 기여하는 면적을 측면에서는 증가시키기 어려우므로 토크를 크게 할 수 없는 단점이 있다. Wobble-drive의 경우, 회전자의 안쪽 벽면에 대한 구름 운동으로 회전하게 되어 접점의 마모가 크고 스파크가 발생하는 단점이 있다.

Fig. 3의 좌측과 같은 전자기 구동 기반의 회전액추에이터는 [5-8] 정전 구동 방식과 같이 빠른 속도와 큰 토크를 발생하면서도 회전자의 안정성을 확보할 수 있지만, MEMS 제작공정으로 미세 코일을 제작하기가 매우 복잡하여 제작이 힘든 단점이 있으며 또한 외부 장비에 전자기적 간섭을 발생시킬 수 있으므로 사용에 주의가 필요하다.

Fig. 3의 우측과 같은 압전구동에 기반한 회전액추에이터는 [9-15, 41] 대역폭이 크고 전력 소모가 적은 장점이 있으나, 회전 발생을 위해 회전자와 고정자가 직접 접촉하게 되어 반복된 마찰에 의해 수명이 짧으며 양방향 회전 및 속도제어가 용이하지 않다.

따라서, 최대 토크와 속도, 제작 용이성, 유지 보수성, 및 전력 소모에 대한 종합적 고려로, 정전 구동 방식이 선호되어 왔다. 특히, Top-drive 정전 구동 방식은 회전자의 진동, 기울어짐과 같은 안정성이 보장되는 경우, 다른 형식과 비교할 때 보다 경쟁력이 있는 구동 방식이 될 수 있을 것으로 판단된다. 각 형식에 따른 회전액추에이터의 기존 연구 내용과 해결해야 할 문제점은 Table 1과 같이 요약된다.

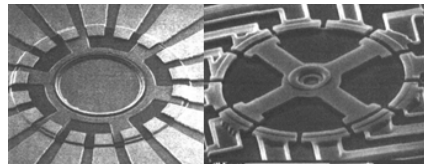


Fig. 1. Electrostatic rotary actuators: (left) top-drive, (right) side-drive [1]

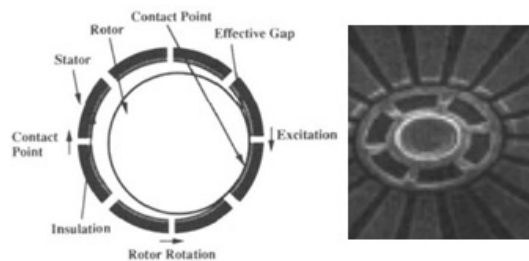


Fig. 2. An Electrostatic rotary actuator: wobble drive, (left) principle, (right) actual one [1]

Table 2. Issues on types of microscale bearing

Bearing Types		Torque transmission	Friction	Electric connection	Problems to be solved	Mechanical stabilization	Active stabilization
Liquid Bearings	Conductive type	• Electromagnetic force	• Liquid shear friction • Contact angle hysteresis	• Impossible	• Rotor tilting • Large drag force	• Partly possible	• Necessary
	Non-conductive type	• Electrostatic force • Electromagnetic force	• Liquid shear friction	• Possible	• Rotor tilting • Increased device size	• Partly possible	• Necessary
Gas bearing		• Electrostatic force • Pneumatic force	• Gas shear friction	• Impossible	• Large instability	• Impossible	• Necessary
Solid Bearings		• Electrostatic force	• Static/Dynamic friction	• Impossible	• Large friction	• Possible	• Necessary

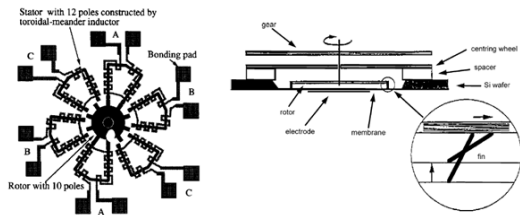


Fig. 3. An Electromagnetic (left) [21] and a piezoelectric rotary actuator (right) [10]

2.2 안정적으로 회전력을 전달하는 방법에 관한 연구 (물리적 접근법)

2.1 단락에서 논의된 바와 같이, 마이크로 회전액추에이터에서 정전 구동 방식은 안정적인 회전력의 전달이 보장될 경우 다른 형식보다 여러 측면에서 큰 장점이 있다. 따라서, 고정자와 회전자 사이에 다양한 형태의 베어링을 접목하여 그 안정성을 확보하려는 연구가 진행되었

다 [16-34]. 이는 베어링의 재질 특성에 따라 크게 Fig. 4 ~ 6과 같은 형태의 고체 베어링, 기체 베어링, 및 액체 베어링으로 분류될 수 있으며 그 특징은 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

고체 베어링의 경우 [16-23], 회전력 전달성이 좋은 반면 마찰력이 매우 큰 단점이 있고, 기체 베어링은 [24-29], 이와 달리 마찰력이 상대적으로 작지만 회전자의 불안정성이 큰 단점이 있다. 고체 베어링의 큰 마찰력과 기체 베어링의 회전 불안정성을 해결하기 위해 액체 베어링이 연구되었다 [30-34]. 그러나, 이는 비전도체이며 표면장력이 큰 구조로 인해 정전 구동에 적합하지 않다. 최근 미국의 연구진 [34]에서 전도체 액체를 이용한 링형태의 액체 베어링을 사용한 정전구동 방식의 마이크로 회전액추에이터를 발표하였다. 이는 고정자-회전자 간 전기적 연결이 가능하게 하여 기존 연구의 단점들을 해결할 수 있는 기초 사례가 된다.

Table 1. Micro-rotary actuators based on actuating methods

Actuating Methods		Principle and advantages	Problems to be solved
Electrostatic forces	Top-drive	• Use of electrostatic tangential force acting in the vertical direction • Capable of generating high speed and large torque	• Rotor wobble and vibration due to the intrinsic vertical forces between a rotor and stator
	Side-drive	• Use of electrostatic tangential force acting in the lateral direction • Great stability behavior of a rotor	• Difficult to generate large torque since it is not easy to increase the lateral area that contributes to the electrostatic force
	Wobble	• Use of rotor rolling on the inner wall of the stator • Suitable for high speed and small torque applications	• Large contact wear • Spark generation
Electromagnetic forces		• Use of same principle as an electromagnetic motor • Capable of generating high speed and large torque	• Difficult to fabricate a micro-scale coil • Electromagnetic interference to external devices
Piezoelectric forces		• Use of the friction force generated by the contact surface deformation of a PZT stator • Direct contact between a rotor and stator • PZT strain by resonance frequency • Large bandwidth and low power consumption	• Short lifespan due to repeated contact friction • Difficult to bidirectional rotation and speed control

그러나 Side-drive 방식이므로 정전력 향상을 위해 단면적을 증가시켜야 하므로 소형화에 불리하다. 또한 회전자의 안정성 증대를 위한 링베어링의 개수를 증가시켜야 하므로 제작의 복잡도가 함께 커지는 단점이 있다. 더불어 링타입의 구조상 정전력 증대에 필요한 유전력이 매우 작다. 안정도 측면에서 이러한 방식은 단순 물리적 안정도만 고려되어 예측이 불가능한 돌발 상황에 대한 안정화가 불가능하다. 그러함에도 불확실한 상황에 대한 능동적인 안정화 제어가 가능하고 유전율을 높일 수 있는 방법이 보장될 경우, 전도체 액체베어링은 기존 연구의 단점들을 보완할 수 있는 경쟁력 있는 대체 방법이 될 것이다.

2.3 마이크로시스템의 정밀도 및 안정도 향상을 위한 제어 방법에 관한 연구

일반적으로 마이크로 스케일에서 센서가 함께 장착된 액추에이터의 제작이 용이하지 않다. 이와 같은 이유로, 마이크로시스템을 제어할 때에는 시스템 모델에 기반한 오픈 루프 제어기법을 많이 사용한다.

이와 같은 오픈 루프 제어기법을 마이크로 회전액추에이터에 적용하기 위한 연구가 발표되었다 [35]. 이는 정교한 모델 기반으로 예측된 결과를 이용하여 회전시스템을 제어하도록 한 것으로써 해당 연구는 외란과 모델 불확실성에 대한 강인성이 어느 정도 수용 가능함을 증명하였다.

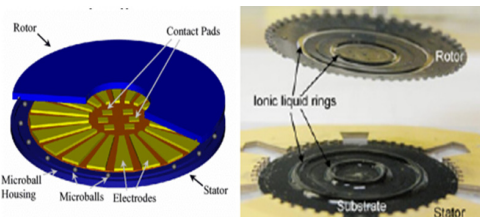


Fig. 4. (left) A rotary actuator with solid bearings [18], (right) with liquid bearing [34]

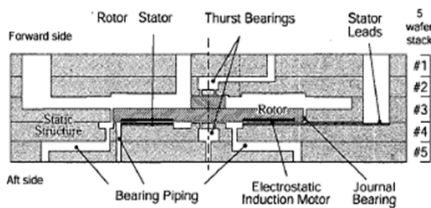


Fig. 5. A rotary actuator with gas bearing [24]

그러나, 마이크로시스템에는 MEMS 제작 공정의 비향시성, 외부 환경 조건의 잦은 변화, 시스템 크기에 비하여 상대적으로 큰 외란, 및 구동 메커니즘의 비선형성 등이 태생적으로 존재하는데, 이를 본질적으로 극복하기 위해서는 피드백제어가 필수적이다. 그러함에도, 위 연구는 구조적 특성상 피드백제어를 구현하지 못하였다. 다행히도, 정전력 기반 액추에이터에서, 구동에 사용되는 전극은 면적 변화에 따라 커패시턴스가 변화된다. 즉 구동을 위한 전극이 회전각을 계측 혹은 예측할 수 있는 특성을 제공할 수 있다. 이 특성을 이용하여 별도의 센서 없이 고정자-회전자간 커패시턴스를 계측하는 방법과 이를 이용한 구동회로를 제안한 연구 사례가 있다 [36-39]. 이는 회전자의 회전각 위치에 따른 상변환 방법과 회로 설계 방법을 제공하였으나 계측과 관련된 내용을 제어공학적 이론을 접목한 고정밀 제어 방법에 적용하지 못하였다. 또한, 회전자의 안정성과 관련된 능동 제어가 적용되지 않아 회전자의 안정성은 여전히 보장하지 못한다.

국내의 한 연구팀에서, 커패시턴스 센서를 이용한 회전액추에이터의 모델 식별 방법에 대한 연구를 발표하였다 [40]. 이는 마이크로 스케일에서의 저전력 구동에 효율적인 센싱 및 시스템 모델링 방법에 기여하였으나 제어성능을 개선할 필요성이 여전히 존재하며, 기존 연구와 마찬가지로 회전자 진동 등에 대한 불안정성의 극복에는 기여하지 못하였다.

3. 새로운 연구 접근법 제안

기존 연구의 분석 결과를 바탕으로하여 액추에이터의 정밀도 및 안정성과 관련된 문제를 개선하고, 더불어 액추에이터의 운동 자유도를 확장할 수 있는 새로운 연구 접근법을 제안한다. 그 방법으로 (1) 기계적 설계 관점에서 Fig. 6의 녹색 타원형에 해당되는 부분의 성능을 개선하고, (2) 시스템 소형화를 저해하지 않으면서 2축 각운동과 수직 운동이 가능한 구조를 제안하며, (3) 센서가 내장된 구조와 이의 효율적인 사용법을 제안하여, (4) 제어적 관점에서 Fig. 6의 적색 부분에 대한 도전적인 해결법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이를 위해 본 논문에서는 Fig. 6의 자색으로 표현된 부분의 분야가 새로운 설계 접근법의 대안이 될 것으로 제시하며 이에 따라 Fig. 7과 같은 구조의 개념 설계를 마이크로회전액추에이터의 새로운 연구 대안으로 제안한다.

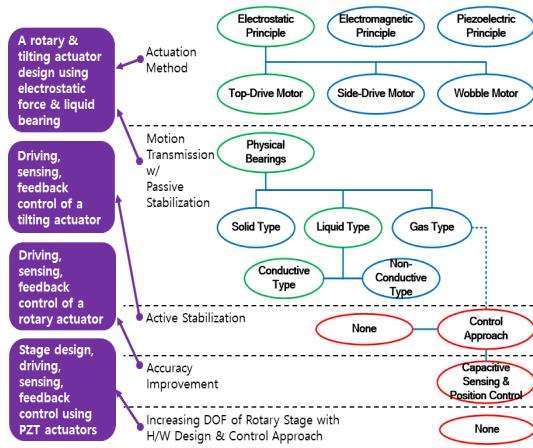


Fig. 6. Proposed research approaches for micro-rotary actuators: (green) the existing research to be improved, (red) the proposed approaches to be challenged, (purple) novel proposed approaches in this paper

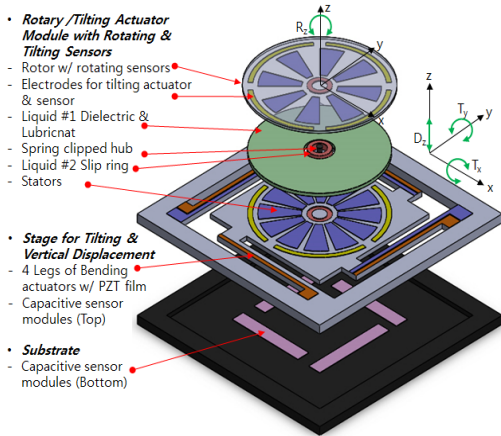


Fig. 7. Concept of the proposed micro-actuator

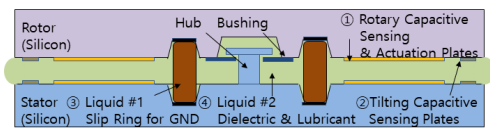


Fig. 8. Detail cross-section view of the rotary actuator

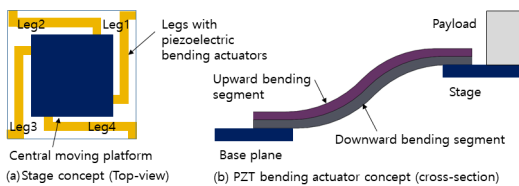


Fig. 9. Detail view of the stage and bending actuators

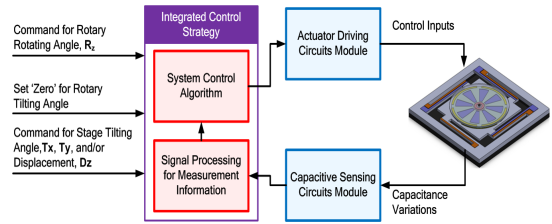


Fig. 10. Concept of integrated control and sensing strategy for the micro-actuator

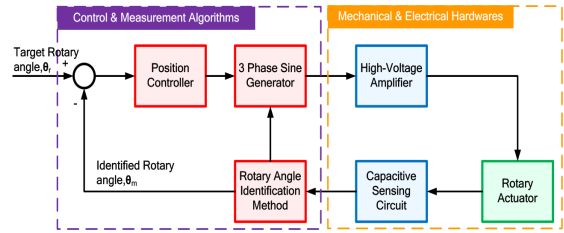


Fig. 11. Concept of closed loop control for the rotary actuator

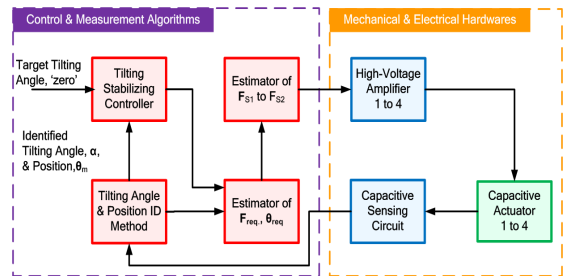


Fig. 12. Concept of rotor stabilization method

Fig. 7과 같이 제안하는 모듈은 z 축 회전운동, R_z ,에 더하여 x 축 각운동, T_x , y 축 각운동, T_y , z 축 수직이동, D_z 가 동시에 가능하다. 이는 회전자의 진동, 기울어짐 등을 보상하여 회전자의 안정성과 정밀도를 높이는 동시에 액추에이터의 2축 각운동과 수직 직선운동에도 기여할 수 있게 하기 위함이다. 여기서, T_x , T_y , 및 D_z 는 Fig. 9과 같이 4면에 배치된 네 개의 굽힘액추에이터로 구현되고 R_z 는 Fig. 8의 회전액추에이터로 구현되며, 회전자 안정화는 Fig. 8과 같이 회전자-고정자 측면에 배치된 센서 겸용 커패시터 액추에이터(틸팅액추에이터)로 구현된다. 각 세부 기술에 대한 개념적 제어 방법은 Fig. 10 ~ 12와 같다. 제안한 시스템은 Table 3의 세부 연구 내용에 의해 구체화 될 수 있을 것이다.

Table 3. Proposed research approaches

Research Topics	Specific research contents	Figures
Design of a rotary & tilting actuator integrated with sensors, liquid bearing and slip ring	• A rotary actuator: a top-drive electrostatic(capacitive) actuator (could be used to measure rotary angle) • A tilting actuator: an electrostatic(capacitive) actuator placed outside a rotor and stator (could be used to measure titling angle) • A structure of an electric connection between a rotor and stator using conductive liquid(liquid slip ring) • Improvement of measurement accuracy and mechanical stability using dielectric liquid between a rotor and stator	Fig. 8
Design of a bending actuator & vertical displacement stage integrated with angular sensors	• A bending actuator using piezoelectric principle • Design of a structure producing independent movements, T_x, T_y, and D_z, of the stage • Design of four capacitive sensors between the stage and substrate	Fig. 9
Design of a high performance control system with simultaneously driving & sensing	• Generating rotational motion by 3 phase electrostatic force conversion • Measurement and prediction method for rotational and tilting angle using capacitance variance between a rotor and stator • Force vector distribution method using 4 axis bending actuators for control of stage tilting motion • High precision position control and stabilizing method • Elimination of model uncertainty and disturbance	Fig. 10 ~ 12

4. 결론

본 논문에서는 마이크로 회전액추에이터와 관련된 기존 연구 동향을 여러 문헌을 통하여 분석하고 그 결과를 바탕으로 향후 관련 분야에 필요한 연구 방향을 제시하였다.

연구 동향 분석에서 (1) 구동 형식, (2) 안정적으로 회전을 전달하는 방법, (3) 회전 정밀도 성능 개선을 위한 제어 방법에 대한 연구 사례를 분석해 본 결과, 가장 효율적인 구동 방식은 Top-drive 정전 구동 방식이고 회전 전달 방식으로는 전도체 액체 베어링 형식이었다. 이 형식에서, 회전 안정성 및 전달력은 마찰력, 회전자의 수평 유지, 고정자로부터 회전자로의 효과적인 전류연결 등에 영향을 받으므로 기존의 연구는 이 문제를 해결하기 위해 다양한 형태의 기계적 수동 안정화 및 회전 전달 방법을 추구하고 있다.

그러나, 제어적 방법을 통해 기계적으로 부족한 부분을 보상하여 더욱 정밀하고 안정적인 시스템을 확보할 수 있음에도 기계/제어/센싱이 융합된 시스템적 접근에 의한 연구가 필요함에도 관련 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한, 마이크로 회전액추에이터가 사용되는 최종 응용시스템의 특성상, 회전운동 이외의 액추에이터의 각 운동과 이송운동 등이 동시에 필요한 경우가 많이 발견된다. 그러함에도 현재까지 발표된 연구는 회전운동 이외의 운동에 대한 자유도를 확장시키기 위한 연구 사례를 발견할 수 없다.

결과적으로, 마이크로 회전액추에이터의 기계적 설계

와 더불어 시스템의 안정성 및 정밀성 등의 운용과 관련된 연구를 병행하는 것은 아직 시작 단계에도 들어서지 못하고 있으며, 이와 같은 연구가 시도된다면 향후 마이크로 회전액추에이터의 응용 분야가 더욱 확대 발전될 수 있을 것으로 판단된다. 그러므로, 본 논문에서 향후 완성 주제로 제시한 연구 방향은 소형, 정밀, 저전력, 안정성, 증대된 운동자유도 등의 성능 개선을 위해, 새로운 형식의 액추에이터를 기계적으로 설계하고 센싱과 제어적 접근을 통해 그 정밀도와 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] M. Mehragany, Y.-C. Tai, "Surface micromachined mechanisms and micromotors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.1, No.2, pp.73-85, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1088/issn.0960-1317>
- [2] C. Livermore, A. Forte, T. Lyszczarz, S. Umans, A. Ayon, J. Lang, "A high-power MEMS electric induction motor," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.13, No.3, pp.465-471, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2004.828736>
- [3] L. Frechette, S. Nagle, R. Ghodssi, S. Umans, M. Schmidt, J. Lang, "An electrostatic induction micromotor supported on gas-lubricated bearings," *14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, IEEE, Interlaken, Switzerland, pp.290-293, Jan. 2001.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.2001.906535>

- [4] S. Nagle, C. Livermore, L. Frechette, R. Ghodssi, J. Lang, "An electric induction micromotor," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.14, No.5, pp.1127-1143, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2005.851816>
- [5] H. Guckel, T. Christenson, K. Skrobis, T. Jung, J. Klein, K. Hartojo, I. Widjaja, "A first functional current excited planar rotational magnetic micromotor," *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, IEEE, FL, USA, pp.7-11, Feb. 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1993.296942>
- [6] C. Ahn, Y. Kim, M. Allen, "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and wrapped coils," *Proc. of IEEE Micro electro mechanical systems*, IEEE, FL, USA, Feb. 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1993.296940>
- [7] H. Koser, J. Lang, "Magnetic induction micromachine part i: Design and analysis," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.15, No.2, pp.415-426, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2006.872238>
- [8] T. Galante, J. Frank, J. Bernard, W. Chen, G. A. Lesieutre, G. H. Koopmann, "Design, modeling, and performance of a high force piezoelectric inchworm motor," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.10, No.12, pp.962-972, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1106/21LN-RUY-35CH-C1FD>
- [9] T. Sashida, T. Kenjo, An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford University Press, 1993.
- [10] T. Morita, "Miniature piezoelectric motors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.103, No.3, pp.291-300, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(02\)00405-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(02)00405-3)
- [11] A. M. Flynn, "Performance of ultrasonic mini-motors using design of experiments," *Smart Materials and Structures*, Vol.7, No.3, pp.286-294, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/7/3/003>
- [12] T. Morita, M. K. Kurosawa, T. Higuchi, "A cylindrical micro-ultrasonic motor (stator transducer size: 1.4mm in diameter and 5.0mm long)," *Ultrasonics*, Vol.38, No.1-8, pp.33-36, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00141-9](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00141-9)
- [13] S. Cagatay, C. Koc, P. Moses, K. Uchino, "A piezoelectric micromotor with a stator of (1/4 1:6mm and 1 1/4 4mm using bulk PZT," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.43, No.4A, pp.1429-1433, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.43.1429>
- [14] B. Watson, J. Friend, L. Yeo, "Piezoelectric ultrasonic resonant motor with stator diameter less than 250 mm: The proteus motor," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.19, No. 2, pp. 22001 (5pp), 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/issn.0960-1317>
- [15] B. Koc, S. Cagatay, K. Uchino, "A piezoelectric motor using two orthogonal bending modes of a hollow cylinder," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.49, No.4, pp.495-500, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/58.996568>
- [16] L.-S. Fan, Y.-C. Tai, R. S. Muller, "IC-processed electrostatic micromotors," *Sensors and Actuators*, Vol.20, No.1-2, pp.41-47, Nov. 1989.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874\(89\)87100-8](http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874(89)87100-8)
- [17] M. Mehregany, S. F. Bart, L. S. Tavrow, J. H. Lang, "Principles in design and microfabrication of variable-capacitance side-drive motors," *Journal of Vacuum Science and Technology A*, Vol.8, No.4, pp.3614-3624, 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1116/1.576515>
- [18] N. Ghalichechian, A. Modafe, M. L. Beyaz, R. Ghodssi, "Design, fabrication, and characterization of a rotary micromotor supported on microball bearings," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.17, No.3, pp.632- 642, Jun. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2008.916346>
- [19] M. McCarthy, C. M. Waits, M. I. Beyaz, R. Ghodssi, "A rotary microactuator supported on encapsulated microball bearings using an electro-pneumatic thrust balance," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.19, No.9, pp.094007, Aug. 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/19/9/094007>
- [20] P. Murali, "Ultrasonic micromotors based on PZT thin films," *Journal of Electroceramics*, Vol. 3, No. 2, pp.143-150, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009943110147>
- [21] C. H. Ahn, Y. J. Kim, M. G. Allen, "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and coils," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.2, No.4, pp.165-173, 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/84.273093>
- [22] B. Wagner, M. Kreutzer, W. Benecke, "Permanent magnet micromotors on silicon substrates," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.2, No.1, pp.23-29, Feb. 1993.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/84.232591>
- [23] L.-H. Lu, R. Kee Suk, L. Chang, "A magnetic microstirrer and array for microfluidic mixing," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.11, No.5, pp.462-469, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2002.802899>
- [24] L. G. Frechette, S. F. Nagle, R. Ghodssi, S. D. Umans, M. A. Schmidt, J. H. Lang, "An electrostatic induction micromotor supported on gas-lubricated bearings," in *Proc. IEEE Int. Conf. MEMS*, Interlaken, Switzerland, Jan. 2001, pp.290-293.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.2001.906535>
- [25] C. W. Wong, X. Zhang, S. A. Jacobson, A. H. Epstein, "A self-acting gas thrust bearing for high-speed microrotors," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.13, No.2, pp.158-164, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2004.824900>

- [26] L. G. Frechette, S. A. Jacobson, K. S. Breuer, F. F. Ehrich, R. Ghodssi, R. Khanna, C. W. Wong, X. Zhang, M. A. Schmidt, A. H. Epstein, "High-speed microfabricated silicon turbomachinery and fluid film bearings," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.14, No.1, pp.141-152, Feb. 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2004.839008>
- [27] J. U. Jeon, S. J. Woo, T. Higuchi, "Variable-capacitance motors with electrostatic suspension," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.75, No.8, pp.289-297, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(99\)00061-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(99)00061-8)
- [28] C. Shearwood, K. Y. Ho, C. B. Williams, H. Gong, "Development of a levitated micromotor for application as a gyroscope," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.83, No.1-3, pp.85-92, May 2000.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(00\)00292-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(00)00292-2)
- [29] Xi chen, Fengtian Han, Yunfeng Liu, "Modeling of an electrostatic micromotor based on a levitated rotor," *International Conference on Integration and Commercialization of Micro and Nanosystems*, Sanya, Haina, China, pp.10 - 13, Jan. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1115/MNC2007-21078>
- [30] A. Takei, K. Matsumoto, I. Shomoyama, "Capillary motor driven by electrowetting," *Lab on a Chip*, Vol.10, No.14, pp.1781-1786, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/c001211d>
- [31] M. L. Chan, B. Yoxall, H. Park, Z. Kang, I. Izyumin, J. Chou, M. M. Megens, M. C. Wu, B. E. Boser, D. A. Horsley, "Design and characterization of MEMS micromotor supported on low friction liquid bearing," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.177, pp.1-9, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.08.003>
- [32] B. E. Yoxall, M. Chan, R. S. Harake, T. Pan, D. A. Horsley, "Rotary liquid droplet microbearing," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.21, No.3, pp.721-729, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2185218>
- [33] M. C. Wu, B. Boser, D. Horsley, "Autonomous sensor Motes employing liquid-bearing rotary stages," Final Technical Report ONR W31P4Q-10-1-002, Jun. 2014.
- [34] G. Sun, T. Liu, P. Sen, W. Shen, C. Gudeman, C.-J. Kim, "Electrostatic side-drive rotary stage on liquid-ring bearing," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol.23, No.1, pp.147-156, Feb. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2013.2262592>
- [35] B. Edamana, B.Hahn, J. Pulskamp, R. Polcawich, K. Oldham, "Modeling and optimal low- power on-off control of thin-film piezoelectric rotational actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.16, No.5, pp.884-896, Oct. 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMECH.2010.2053041>
- [36] N.K. Rao, D.K. Hartsfield, A. Purushotham, S.L. Garverick, "An IC for closed-loop micromotor control", *Proc. of ISSE'95- International Symposium on Signals, Systems and Electronics*, CA, USA, pp.63-56, Oct. 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISSSE.1995.498057>
- [37] M. I. Beyaz, M. McCarthy, N. Ghalichechian, R. Ghodssi, "Closed-loop control of a long-range micropositioner using integrated photodiode sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 151, No.2, pp.187-194, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2009.02.020>
- [38] A. Purushotham, S. L. Garverick, C. Edwards, M. L. Nagy, "A closed-loop micromotr control system," *1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, IEEE, GA, USA pp.209-212, May 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISCAS.1996.541937>
- [39] S. L. Garverick, M. L. Nagy, D. K. Hartsfield, A. Purushotham, "A Capacitive Sensing Integrated Circuit for Detection of Micromotor Critical Angles," *IEEE Journal of Solid-state circuits*, Vol.32, No.1, pp.23-30, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/4.553172>
- [40] B. Hahn, "Sensing Parameter Selection Strategy for Ultra-low-power Micro-servosystem Identification," *Journal of Institute of Control, Robotics and systems*, Vol.20, No.8, pp.849-853, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2014.14.0046>
- [41] M.-Y. Lee, E.-J. Park, J.-K. Yeom, D.-P. Hong, D.-Y. Lee, "Pure Nano-Rotation Scanner," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 4, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/962439>

한 봉 수(Bongsu Hahn)

[정회원]



- 2002년 2월 : GIST 기전공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : Univ. of Michigan, Ann Arbor 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 1월 ~ 2014년 2월 : 국방 과학연구소 선임연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 경일대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

제어이론 및 응용, 기전융합시스템, 로보틱스