

단일 구동 3축 MEMS자이로스코프의 구적 오차 저감을 위한 설계 기법에 관한 연구

박지원* · 딘 후사무드* · 이병렬**†

*† 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학과, ** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

A study on Quadrature error Reduction of Design Methodology in a Single Drive 3-Axis MEMS Gyroscope

Ji Won Park*, Hussamud Din* and Byeung Leul Lee**†

*† Department of Mechatronics Engineering,

Graduate School of Korea University of Technology and Education,

**† School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

In this paper, we have studied the quadrature error reduction for the single drive 3-axis MEMS Gyroscope. There was a limitation of the previous study which is the z-axis quadrature error was large. To reduce this value, design methodologies were presented. And the methodologies included a different mesh application, z-rate spring structure change, and mass compensation for balancing of the structure. We conducted the modal analysis, drive mode analysis and sense mode analysis using COMSOL Multiphysics. As a result, a drive resonant frequency was 26003 Hz, with the x-sense, y-sense, z-sense being 26749 Hz, 26858 Hz, 26920 Hz, respectively. And the Mechanical sensitivity was computed at 2000 degrees per second(dps) input angular rate while the sensitivity for roll, pitch, and yaw was computed 0.011, 0.012, and 0.011 nm/dps respectively. And z-axis quadrature error was successfully improved, 2.78 nm to 0.95 nm, which the improvement rate was about 66 %.

Key Words : 3-Axis MEMS Gyroscope , Quadrature error, Sensitivity, COMSOL Multiphysics, Rayleigh damping

1. 서 론

자이로스코프(Gyroscope)는 전통적으로 항공기의 항법 시스템, 우주 탐사, 군사 기술 등에 활용되었으며, 최근에는 로봇, 모바일 게임 등의 분야에서 사용되고 있다[1,2]. IMU(Inertial Measurement Unit)는 1930년대에 처음 항공기 항법 시스템에 사용되었으며, 비교적 큰 크기로 활용되었다. 또한 큰 크기와 전력 소비로 인해 가격은 높아졌고, 이로 인해 시장이 침체됐다[3].

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems) 자이로스코프의

등장으로 인해 저비용으로 자이로스코프의 생산이 가능하게 되었고, 이로 인해 다양한 분야에서 활용이 시작되었다[4,5]. 수요의 증가로 인해 다양한 MEMS 자이로스코프 관련 연구가 진행되었다. 자이로스코프는 각속도를 측정하며, 각속도 측정 시 발생하는 오차를 개선하는 것이 자이로스코프 성능의 핵심이다[6]. 자이로스코프 오차 개선 연구들 중 구적 오차 (Quadrature error) 개선과 관련된 다양한 연구가 진행되었다.

Erdinc Tatar는 2012년 진행된 연구에서 질량이 서로 독립된(Decoupled) 자이로스코프 구조에서 구적 오차의 주요 원인을 스프링의 불균형임을 제시했다[7]. Huiliang Cao는 2016년 진행된 연구에서 이중 질량(Dual-mass) 자이로스코

†E-mail: bllee@koreatech.ac.kr

프 구조에서 구적 오차를 줄일 수 있는 3가지 방법론을 제시하였다[8]. 또한 Hussamud Din은 2020년 진행된 연구에서는 단일 구동 3축 MEMS 자이로스코프를 COMSOL Multiphysics를 사용하여 구적 오차 개선 연구를 진행했다[9].

본 논문에서는 2020년 진행된 구적 오차 개선 연구의 한계점인 z축 구적 오차 개선을 위한 방법론을 제시하고 이를 유한요소 해석을 통해 증명할 것이다.

2. 제안된 구조

2.1 구성 및 동작 원리

Fig 1은 본 연구에서 제시한 단일 구동 3축 MEMS 자이로스코프의 2-D 구조 및 세부 명칭을 나타낸 그림이다. 해당 자이로스코프는 각 축의 외부 각속도를 측정하는 검출 질량(Sense mass)이 존재하며, 축 별로 x축 검출 질량(X-sense mass), y축 검출 질량(Y-sense mass), z축 검출 질량(Z-sense mass)이 있다. 또한 각 검출 질량의 거동에 영향을 주는 4종류의 스프링으로 내부 스프링(Inner spring), 외부 스프링(Outer spring), 커플링 스프링(Coupling spring), z축 각속도 스프링(Z-rate spring) 5개의 Anchor로 구성되어 있다.

해당 자이로스코프는 구동 모드(Drive mode)에서 전극을 통해 구동력(Drive force)이 정현파(Sinusoidal wave) 형태로 가해진다. x축 검출 질량에 바깥쪽 구동 방향(Drive axis)으로 구동력이 가해지면 x축 검출 질량은 바깥 방향으로 이동하며, y축 검출 질량은 커플링 스프링에 의해 안쪽 방향으로 구동 변위(Drive displacement)가 발생한다. 또한 구동력이 역 방향으로 걸리게 되면 x축 검출 질량은 안쪽 방향으로 이동하며, y축 검출 질량은 커플링 스프링에 의해 바깥 방향으로 이동하게 된다.

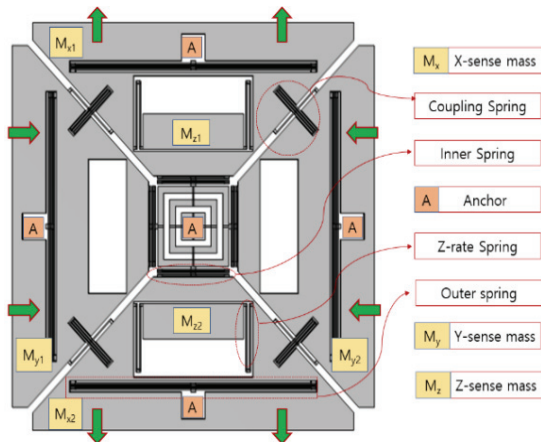


Fig. 1. Proposed 2-D layout of 3-axis MEMS Gyroscope.

해당 자이로스코프의 검출 모드(Sense mode)에서 자이로스코프에 구동력이 가해진 상태에서 외부 각속도가 가해질 때, 코리올리 효과(Coriolis effect)에 의해 코리올리 변위(Coriolis displacement)가 발생한다. 이 때, 코리올리 변위인 검출 변위(Sense displacement)를 측정하여 검출 변위 값을 이용해 외부 각속도를 추정할 수 있다.

3. 제안된 방법론

본 논문에서는 COMSOL Multiphysics를 사용하여 정확한 해석 결과를 얻기 위해 적절한 메시(Mesh)를 설정하고, z축 구적 오차 개선을 위해 z축 각속도 스프링의 구조 변경 및 질량 보상 방법을 활용했다.

3.1 새로운 메시 적용

이전 선행 연구에서는 메시 형상(Mesh shape)으로 삼각형 메시(Triangular mesh)를 질량과 스프링 구분 없이 적용했다. 또한 메시 크기(Mesh size)는 COMSOL Multiphysics에서 적용 가능한 Extremely fine 크기를 적용했다. 본 연구에서는 스프링과 질량의 형상을 고려하여 서로 다른 메시지를 적용하여 스프링에 사각형 메시(Mapped mesh), 질량 부분에는 삼각형 메시지를 적용했다. 메시 크기는 스프링에 기존보다 작은 크기, 질량 부분을 해석 시간을 고려해 큰 크기를 적용했다.

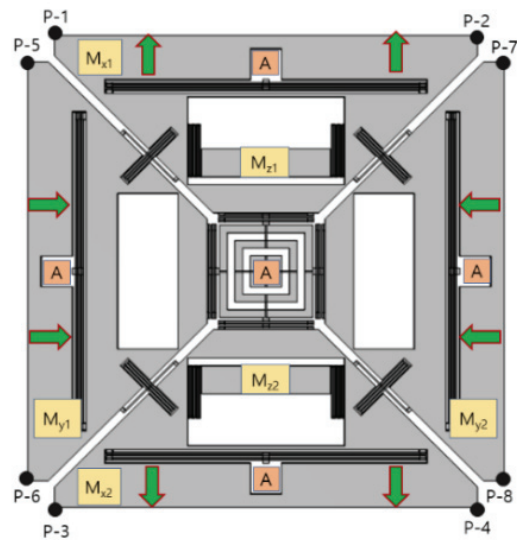


Fig. 2. Utilized model for mesh shape evaluation.

Fig 2는 메시 형상에 따른 해석 정확성 비교를 위해 활용된 모델이며, 선행 연구에서 활용한 모델에서 질량 보

상이 적용되었다. 또한 Table 1은 활용된 구조의 크기 및 구동력을 나타낸 표이고, Table 2와 Table 3은 시간 영역에서 구동력이 가해질 때, 메시 형상에 따른 각 절점에서 구동 방향과 수직인 변위를 나타낸 표이다.

Fig 2와 같이 구동력이 가해지고, 외부 각속도가 없을 때, 제시된 모델은 질량 보상이 이루어졌기 때문에 시간 영역에서 대칭적인 거동이 나타난다. 따라서 스프링에 적합한 메시 형상은 이 대칭성을 만족하는 메시 형상이라고 가정했다. 메시는 COMSOL Multiphysics에서 제공하는 메시 형상을 활용했다. Table 2, Table 3을 통해 삼각형 메시와 사각형 메시의 변위를 비교하면 사각형 메시지를 스프링에 적용했을 때, 수직 변위는 대칭적으로 나타났다. 따라서 정확한 시뮬레이션을 위한 메시 형상으로 사각형 메시지를 스프링에 적용하고자 한다.

위에서 제시한 메시 형상을 바탕으로 메시 크기를 조정했으며, 스프링과 질량의 메시 크기를 다르게 지정했다. 스프링의 메시 크기는 COMSOL Multiphysics에서 제공하는 최대 요소 크기(Maximum element size)를 기존 사이즈인 18.5 μm 에서 3 μm 로 세밀하게 설정하였다. 또한 스프링 메시 크기 변화로 인한 해석 시간을 고려하여 질량의 최대 요소 크기는 92.4 μm 로 증가시켰다.

Table 1. Structure parameters of the utilized model

Parameters	Value
Structure size	900 μm \times 900 μm
Structure thickness	30 μm
Drive force	2.2mN

Table 2. Triangular mesh shape results of drive mode

Mass	Node	Displacement (nm)	Node	Displacement (nm)
M_x	P-1	-0.33	P-3	1.80
	P-2	-0.05	P-4	-1.57
M_y	P-5	0.19	P-7	-0.18
	P-6	0.16	P-8	-0.21

Table 3. Mapped mesh shape results of drive mode

Mass	Node	Displacement (nm)	Node	Displacement (nm)
M_x	P-1	-0.46	P-3	0.10
	P-2	-0.10	P-4	0.46
M_y	P-5	0.45	P-7	-0.42
	P-6	0.42	P-8	-0.45

3.2 구조 설계

3.1절에서 제시한 메시지를 바탕으로 기존 연구의 z축 구적 오차를 개선하기 위해 기존 자이로스코프 구조의 z축 각속도 스프링 변경 및 질량 보상을 적용했다.

Fig 3을 살펴보면 z축 검출 질량과 z축 각속도 스프링으로 인한 질량 불균형이 나타난다. 이를 보상하기 위해 y축 검출 질량에 질량을 추가하여 질량 불균형을 보충했다.

Fig 4에서 x축 검출 질량에 의해 z축 각속도 스프링이 힘을 받는 위치와 z축 각속도 스프링에 의해 z축 검출 질량이 힘을 받는 위치의 높이가 다르게 나타남을 확인할 수 있다. Fig 5와 같이 스프링 구조를 변화시켜 x축 방향의 힘을 받는 위치의 높이를 일치시켰다.

해당 모델의 z축 구적 오차는 x축 방향으로 발생한다. 따라서 구동 모드에서 발생하는 x축 검출 질량의 x축 방향 변위 오차가 발생하면 이는 z축 구적 오차 증가에 영향을 준다. 해당 내용을 바탕으로 구동모드에서 z축 각속도 스프링에 따른 x축 검출 질량의 x축 변위 오차를 비교했다.

Table 4를 통해 x축 방향의 최대 변위 오차를 비교하면 0.46 nm에서 0.23 nm로 감소함을 확인할 수 있다. 이를 통해 z축 각속도 스프링의 구조 변화로 x축 방향 변위 오차가 감소함을 확인했으며, 실제 구적 오차 개선이 이뤄졌는지 확인하기 위해 해당 결과를 바탕으로 주파수 영역에서 모드 해석(Modal analysis), 구동 모드 해석 및 검출 모드 해석을 진행하고자 한다.

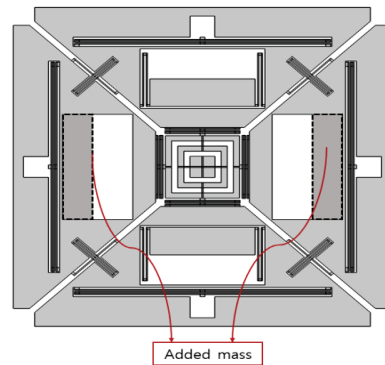


Fig. 3. Mass compensation structure.

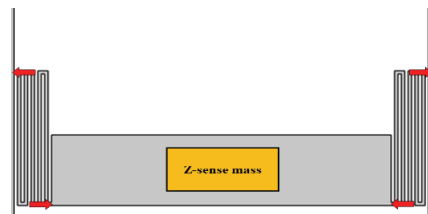


Fig. 4. Previous z-rate spring structure.

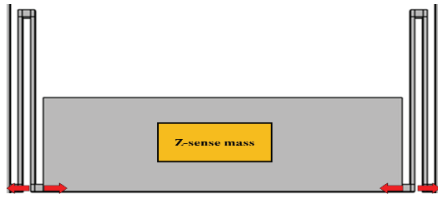


Fig. 5. Proposed z-rate spring structure.

Table 4. Drive mode analysis of the previous and proposed z-rate spring structure

Z-rate spring	Node	X-axis displacement (nm)	Node	X-axis displacement (nm)
Previous	P-1	-0.46	P-3	0.10
	P-2	-0.10	P-4	0.46
Proposed	P-1	-0.21	P-3	0.12
	P-2	-0.12	P-4	0.23

Table 5. Mode analysis of the proposed design

Mode		Frequency (Hz)	Frequency difference with drive (Hz)
f_{dr}	Drive	26003	0
f_{cx}	X-sense	26749	746
f_{cy}	Y-sense	26858	855
f_{cz}	Z-sense	26920	917

4. 해석 결과

4.1 모드 해석 결과

Table 5는 모드 해석 결과를 나타낸 표이다. 구동 모드와 검출 모드의 공진주파수는 1 kHz 이내로 설계했으며, 또한 이상 검출 모드와의 최소 주파수 차이를 3 kHz 이상으로 설계했다. 이를 통해 자이로스코프의 안정적인 구동과 검출이 가능하다.

Fig 6은 본 논문에서 제시한 자이로스코프의 각 모드 별

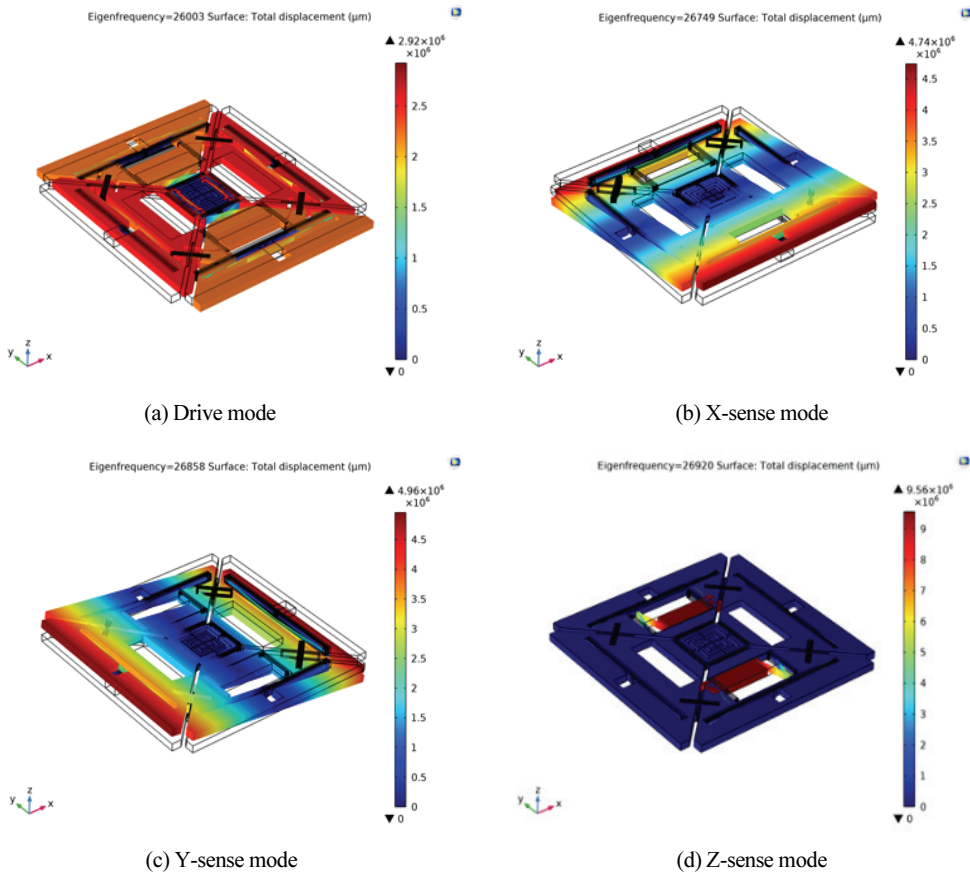


Fig. 6. Mode shape of proposed MEMS Gyroscope.

형상을 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)에서 자이로스코프는 외부 각속도가 인가되지 않은 구동 모드에서 x-y평면상에서 직선 운동하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 6(b), Fig. 6(c), Fig. 6(d)를 통해 외부 각속도가 인가되었을 때, x축, y축 검출 모드에서 코리올리 변위 방향인 z축 방향으로 검출 질량의 거동이 나타남을 확인할 수 있으며, z축 검출 모드에서 x축 방향의 코리올리 변위가 발생하므로, 해당 방향으로 z축 검출 질량의 거동이 나타남을 확인할 수 있다.

4.2 구동 모드 해석 결과

Table 6은 구동 모드 해석을 위한 파라미터를 나타낸 표이다. 구동 양호도(Drive quality factor)는 10,000으로 가정하여 해석을 진행했으며, 모드 해석을 통해 계산된 구동 공진 주파수 26003 Hz를 사용했으며, 구동 질량은 각 축의 검출 질량과 스프링의 질량의 합으로 나타난다. 구동력은 최대 구동 변위 4 μm 를 기준으로 계산되었다.

Table 6. The parameters of drive mode analysis

Parameters		Value
Q_d	Drive quality factor	10,000
M_d	Drive mass	$4.25 \times 10^{-8} \text{ kg}$
f_{dr}	Drive frequency	26003 Hz
F_d	Drive force	0.214 μN
α_{dM}	$\frac{4\pi f_{dr}}{3Q_d}$	10.892 Hz
β_{dK}	$\frac{1}{6\pi f_{dr} Q_d}$	$2.04 \times 10^{-10} \text{ s}$

또한 감쇠 계산을 위해 레일리 감쇠 계수(Rayleigh damping coefficient)를 Table 6과 같이 계산하여 진동 해석을 진행했다.

구동 모드에서 최대 구동 변위는 x축 최대 구동 변위, y축 최대 구동 변위가 각각 4.0 μm , 3.5 μm 로 나타났다.

4.3 검출 모드 해석 결과

Table 7은 검출 모드 해석을 위한 파라미터를 나타낸 표이다. 검출 양호도(Sense quality factor)는 1,000으로 가정하여 해석을 진행했으며, 감쇠 계수 및 구동력은 구동 모드 해석과 동일한 값으로 해석을 진행했다. 외부 각속도는 2000 dps를 적용하여 해석을 진행했다.

Table 8은 검출 모드에서 측정된 검출 변위와 감도는 나타낸 표이다. 각 축의 감도는 x축 감도 0.011 nm/dps, y축 감도 0.012 nm/dps, z축 감도 0.011 nm/dps로 나타났다.

Table 7. The parameters of sense mode analysis

Parameters		Value
Q_s	Sense quality factor	1,000
x_{dmax}	Drive displacement for x-axis	4.0 μm
	Drive displacement for y-axis	3.5 μm
Ω	Angular rate	2000 dps

Table 8. FEA results of sense displacement and sensitivity

Mass	FEA value (nm)	FEA value (Q-Error removed) (nm)	Sensitivity (nm/dps)
X	22.98	22.97	0.011
Y	23.38	23.38	0.012
Z	22.64	21.69	0.011

Table 9. Quadrature error evaluation

Mass	Quadrature error(nm)		Improvement
	Previous	Final	
X	0.002	0.004	Negligible
Y	0.001	0.0002	Negligible
Z	2.78	0.95	66%

Table 9는 검출 모드에서 측정된 구적 오차 값을 정리한 표이다. 이전 연구의 한계점인 z축 구적 오차 개선에 성공했으며, 선행 연구의 수치인 x축, y축 구적 오차 결과는 이전과 비슷한 0에 수렴하는 값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 최종 z축 구적 오차는 0.95 nm로 이전 2.78 nm에 대해 구적 오차 개선율은 약 66%이다.

5. 결론

본 연구에서는 COMSOL Multiphysics를 활용하여 단일 구동 3축 자이로스코프의 선행 연구의 한계점을 보완하기 위해 모드 해석, 구동 모드 해석, 검출 모드 해석을 진행했다.

제안된 방법론은 적절한 메시 선정 및 z축 각속도 스프링의 구조 변경, 질량 보상이 있으며, 해당 방법론을 적용하여 z축 구적 오차 개선에 성공하였으며, 약 66%의 개선 성과를 얻었다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로

한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0008458, 2022년 산업혁신인재성장지원사업).

이 논문은 2022년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Bahari, J., Feng, R., & Leung, A. M. "Robust MEMS gyroscope based on thermal principles.", *micro-electromechanical systems*, 23(1), pp.100-116, 2013.
2. Benser, E. T. "Trends in inertial sensors and applications.", *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS) Proceedings*, pp. 1-4, 2015.
3. Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., & Kasi, V. "Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications.", *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), pp.256-262, 2013.
4. Wang, S., Al Farisi, M. S., Tsukamoto, T., & Tanaka, S. "Roll/pitch rate integrating mems gyroscope using dynamically balanced dual-mass resonator.", *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, pp. 1-4, 2020.
5. Perlmutter, M., & Robin, L. "High-performance, low cost inertial MEMS: A market in motion!", In *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pp. 225-229, 2012.
6. Passaro, V. M., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., & Campanella, C. E. "Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective.", *Sensors*, 17(10), 2284, 2017.
7. Tatar, E., Alper, S. E., & Akin, T. "Quadrature-error compensation and corresponding effects on the performance of fully decoupled MEMS gyroscopes.", *Micro-electromechanical Systems*, 21(3), pp. 656-667, 2012.
8. Cao, H., Li, H., Kou, Z., Shi, Y., Tang, J., Ma, Z., Shen, C., Liu, J. "Optimization and experimentation of dual-mass MEMS gyroscope quadrature error correction methods.", *Sensors*, 16(1), 71, 2016.
9. Din, H., Iqbal, F., & Lee, B. "Sensitivity Analysis of Single-Drive, 3-axis MEMS Gyroscope Using COMSOL Multiphysics.", *Micromachines*, 11(12), 1030, 2020.
10. Din, H., Iqbal, F., & Lee, B., "Design Approach for Reducing Cross-Axis Sensitivity in a Single-Drive Multi-Axis MEMS Gyroscope.", *Micromachines*, 12(8), 902, 2021.
11. Din, H., Iqbal, F., & Lee, B. "Mode ordering of single-drive multi-axis MEMS gyroscope for reduced cross-axis sensitivity.", *Sensors and Actuators A: Physical*, 332, 113145, 2021.
12. Din, H., Iqbal, F., & Lee, B., "Modelling and optimization of single drive 3-axis MEMS gyroscope", *Microsystem Technologies*, 26(9), pp. 2869-2877, 2020.

접수일: 2022년 12월 9일, 1차심사일: 2022년 12월 14일,
2차심사일: 2022년 12월 21일, 게재확정일: 2022년 12월 21일