

기어박스에서 점도의 변화에 의한 철분마모센서의 감도 평가

홍성호[†]

동국대학교 창의융합공학부 기계시스템공학전공 부교수

Evaluation of Sensitivity of a Ferrous Particle Sensor with Variation of Viscosity in Gearbox Systems

Sung-Ho Hong[†]

Associate Professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Dongguk University-WISE

(Received July 23, 2024 ; Revised August 7, 2024 ; Accepted August 8, 2024)

Abstract: This study evaluates the sensitivity of a ferrous particle sensor in response to changes in viscosity in a gearbox. Composed of various gears, the gearbox typically occurs significant ferrous wear due to gear contact. Condition monitoring is primarily implemented by measuring the number of ferrous wear particles in the lubricant. Gearboxes are critical in many systems, including wind turbines, for facilitating changes in speed and torque. Therefore, technology to monitor ferrous particles in gearboxes is essential. In this study, a simplified gearbox is numerically modeled to assess sensor sensitivity based on viscosity and sensor position. Three sensor positions are considered: one directly beneath the gear and two at locations farther from the gear. Analyses are conducted using lubricants with low viscosity and gear oil. Sensor sensitivity is defined by the number of ferrous particles adhering to the sensor, where more particles indicated higher sensitivity. The evaluation reveals that the position directly beneath the gear exhibits the highest sensitivity due to direct influence from the main flow. To achieve optimal sensitivity, sensors should be installed in the main flow path as determined by flow analysis. Evaluation of sensor sensitivity with changes in viscosity shows that a higher viscosity results in a lower sensor sensitivity. Therefore, for ease of analysis, performing an analysis under low-viscosity conditions is useful for understanding the main flow and for identifying the optimal location for proper sensor position.



© Korean Tribology Society 2024. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords: Ferrous particle sensor(철분마모센서), Gearbox(기어박스), Machine condition monitoring(기계상태진단), Viscosity(점도), Position(위치)

1. 서 론

다양한 기계시스템의 신뢰성 향상 측면에서 보전 전략

을 적용하고 있다. 보전 전략의 궁극적인 목적은 고장 시간(downtime)을 줄이고 적은 비용으로 가용시간을 늘려 생산성을 증대하고자 하는 것이다 [1-2]. 다양한 기계시스템의 상태진단에 활용되는 여러가지 방법중에서 소음, 진동 기반의 상태진단이 여전히 많이 적용되고 있고 기어박스에서도 마찬가지이다 [3-4]. 하지만 기어박스 내 금속간 접촉(metal-to-metal contact)에 의해 철분마모가 자

[†]Corresponding author: Sung-Ho Hong
Tel: +82-54-770-2211, Fax.: +82-54-770-2870
E-mail: hongsh@dongguk.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-3445-0646>

주 발생하므로 윤활유 센서 기반의 상태진단 연구가 필요하다[5-6]. 윤활유 센서는 점도, 밀도, 유전상수, 수분 함량 등 윤활유의 다양한 물성을 측정하는데 사용된다. 다양한 윤활유 센서들에서 마모를 측정하는 센서들의 사용빈도가 높다. 그 이유는 마모 현상이 기계의 이상진단에 대한 중요한 정보를 제공하기 때문이다. 마모를 측정하는 센서에는 인덕턴스 (Inductance)의 변화를 이용한 방법, 전기용량 (Capacitance)의 변화를 이용한 방법, 음향(Acoustics)의 변화를 이용한 방법, 광학(Optics)을 이용한 방법들이 주로 적용되고 있다 [7-8]. 그 중에서도 철분마모를 측정하는데 영구자석이 결합된 철분마모센서는 활용도가 높다. 그 이유는 대부분의 기계요소가 철로 구성되어 있고 그 결과로 철분마모입자가 발생함으로 이상마모를 감지하는데 용이하다. 이 센서는 자기력을 이용하여 철분마모입자를 센서에 부착하여 코일의 인덕턴스의 변화로 철분마모량을 측정한다. 또한 센서에 철분마모입자를 부착함으로써 세물체 연삭마모(three-body abrasive wear)를 방지할 수도 있다. 그 외에도 다량의 철분마모입자들을 측정 가능하여 엔진과 기어박스 같은 고임 섀프트(sump) 타입의 윤활 시스템에 적합하다 [9-11]. 이전 연구에서 건설장비의 액슬(axle)에서 철분마모센서를 이용하여 상태진단을 하는 과정에 기어의 심각한 손상이 있음에도 불구하고 센서가 이상 상태를 진단하지 못하는 경우가 발생하였다. 그 문제를 해결하고자 센서의 내부 설계인자의 변경을 통한 센서의 감도 개선과 센서의 적합한 위치를 선정하는 방법에 대한 연구를 진행하였다. 기존의 철분마모센서에서 여러가지 설계인자 중에서 코어(core)의 형상이 센서의 감도에 큰 영향을 주었다. 그래서 코어의 형상을 변경함으로써 기존 센서보다 2배 이상의 감도를 개선하였다. 그리고 간략화된 기어박스 시스템에서 3개의 센서 위치에 따른 센서의 감도를 평가하였다. 그리고 유동해석을 통해 적합한 센서의 위치를 선정했음에도 불구하고 센서를 공간적인 제약이나 센서의 손상을 우려해 다른 위치에 센서를 설치하는 경우에 센서의 감도를 개선하기 위해서 유동 가이드 벽 (flow guide wall)을 제안하였다. 유동 가이드 벽은 2가지 형태로 제안을 했는데 하나는 주된 유동의 일부를 센서쪽으로 유도하는 것이고 다른 하나는 벽으로부터 부딪혀 돌아오는 주된 유동을 센서쪽으로 유도하는 역할을 수행한다. 해석의 용이성을 위해 기어박스입에도 불구하고 기어유를 사용하기 보다는 점도가 낮은 일반 윤활유를 사용하였다 [5-6]. 기존의 연구 결과를 바탕으로 기어유 (gear oil)에 대한 추가적인 해석을 수행하였다. 이 연구의 실제 적용측면에서 반드시 기어박스

내 기어유가 있는 경우에 대한 수치해석이 수행되어야 하기 때문이다.

본 연구에서는 기어박스 내의 점도가 낮은 경우와 점도가 높은 기어유인 경우에 대해 센서 위치에 따른 센서의 감도를 비교 평가하였다.

2. 본 론

2.1. 해석 모델 및 해석 조건

본 연구는 Fig. 1과 같이 간략화된 기어박스 시스템에서 센서의 위치에 따른 센서의 감도를 평가하였다. 실제 기어 시스템은 여러 개의 기어로 구성되어 있지만 해석의 용이성을 위해 주된 유동을 발생시키는 2개의 큰 기어로 모델링하였다. 그리고 실제 마모 입자는 기어의 접촉에 의해 발생하지만 해석상 마모 입자들은 기어 사이의 입자 주입 영역(injection area of particles)에서 인위적으로 주입되는 것으로 묘사하였다. 이 해석은 다중 물리 해석(multi-physics analysis)이 가능한 COMSOL을 이용하였다. 해석에서는 Fig. 2와 같이 3가지 모듈을 사용하였다. 유동 해석 (flow analysis)을 위한 CFD 모듈과

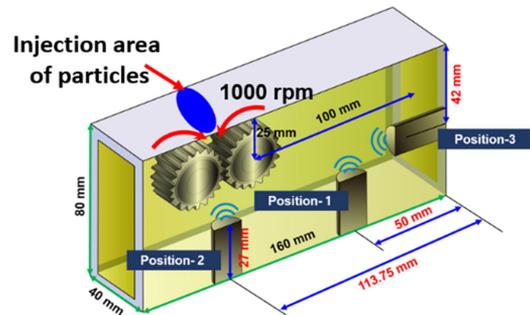


Fig. 1. Planar symmetric model of gearbox [6].

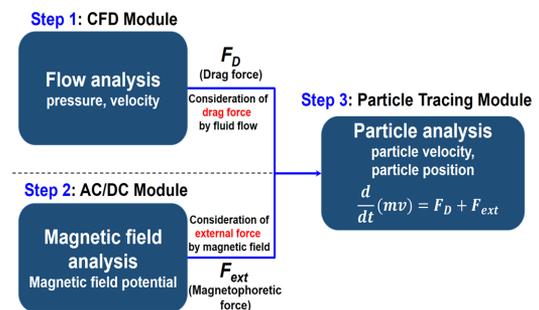


Fig. 2. Simulation modules in the numerical analysis [5, 6].

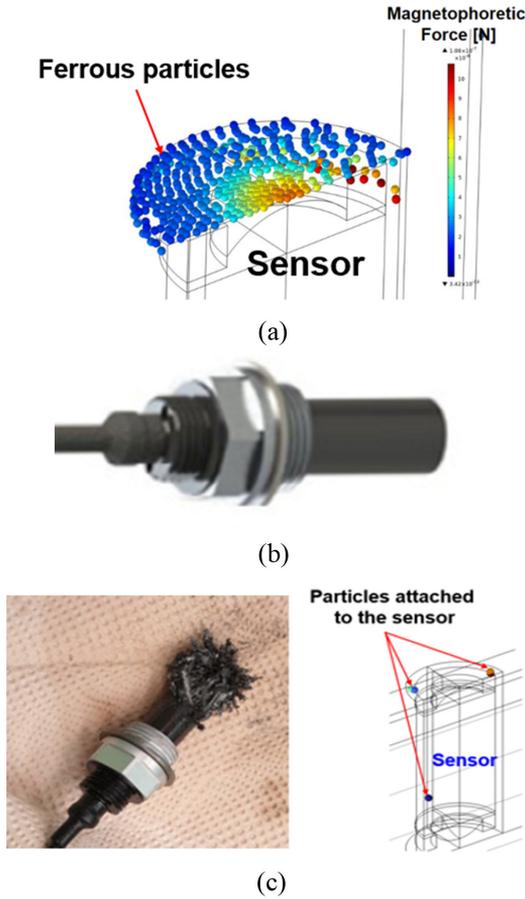


Fig. 3. Sensitivity of ferrous particle sensor with permanent magnet.
(a) Magnetophoretic force (b) Sensor without particles
(c) Particles attached to the sensor.

센서와 센서 주위의 자기장 해석(magnetic force analysis)을 위한 AC/DC 모듈을 사용하였다. 그 외에도 입자들의 속도, 위치 및 궤적을 계산하는 particle tracing 모듈을 적용하였다. Fig. 2와 같이 particle tracing 모듈은 CFD 모듈로부터 구해진 항력 (Drag force, F_D)과 AC/DC 모듈로부터 구해진 자기영동력 (Magnetophoretic force, F_{ext})을 이용하여 식 (1)에서 입자의 위치, 속도 및 궤적을 계산한다. 식 (1)에서 m 과 v 는 질량 (kg)과 속도 (m/s)를 나타낸다.

Table 1. Properties and working condition of particles

	Density	Relative permeability	Diameter	Material	Number
Particles	7,800 kg/m ³	1,000	10 μm	steel	450

Table 2. Properties of lubricants.

	Density	Dynamic viscosity
Oil-1	870 kg/m ³ @ 15°C	0.04 Pa·s @ 15°C
Oil-2	870 kg/m ³ @ 15°C	0.87 Pa·s @ 15°C

$$\frac{d}{dt}(mv) = F_D + F_{ext} \tag{1}$$

이 센서는 Fig. 3과 같이 자기력에 의해 철분입자들을 센서에 부착시키면 입자들에게 자기영동력 (magnetophoretic force)이 작용하고 센서 주위의 인덕턴스 (inductance)의 변화를 통해 철분마모입자의 양을 측정한다. 이때 센서의 감도는 센서에 부착되는 입자들의 개수로 정의하였다. 즉 센서에 부착되는 입자의 개수가 많을수록 센서의 감도가 우수하다는 것을 의미한다.

해석은 20개의 이(teeth)를 가진 2개의 기어들이 1000 rpm으로 회전하고 있고 기어 사이에 Table 1과 같이 10 μm인 구형의 철분입자 450개가 인위적으로 주입된다. 본 해석에서는 일반적으로 이상마모의 크기라고 간주되는 입자사이즈 중에서 가장 작은 사이즈를 선정하여 해석을 수행하였다 [12]. 기어박스 내에는 센서는 3가지 위치에 설치되어 있다. Position-1은 기어에서 다소 떨어진 위치에 있고 Position-2는 기어의 바로 아래쪽에 위치하고 Position-3은 기어박스의 오른쪽 벽면에 위치하고 있다. 해석에 사용된 윤활유는 Table 2와 같이 2가지 종류이다. Oil-1은 기어유에 비해 점도가 낮은 일반 윤활유의 물성을 가지고 있고 Oil-2는 기어유의 물성값을 갖는다.

2.2 해석 결과

센서의 위치와 점도에 따른 감도의 결과는 Fig. 4와 같다. 점도가 낮은 경우의 결과를 보면 센서가 기어와 멀리 떨어진 경우인 Position-1과 Position-3의 경우는 5개의 철분입자가 측정되었지만 기어의 바로 아래에 위치한 Position-2의 경우에는 56개의 철분입자가 측정되었다. 즉 Position-2의 경우가 Position-1과 Position-3의 경우보다 센서의 감도가 약 10배 이상 우수하다. 그리고 점도가 높은 경우에는 Position-1과 Position-3의 경우에는 전혀 철분입자가 측정되지 않았으며 Position-2의 경우만 1개의 입자가 측정되었다. 이 결과를 바탕으로 윤활

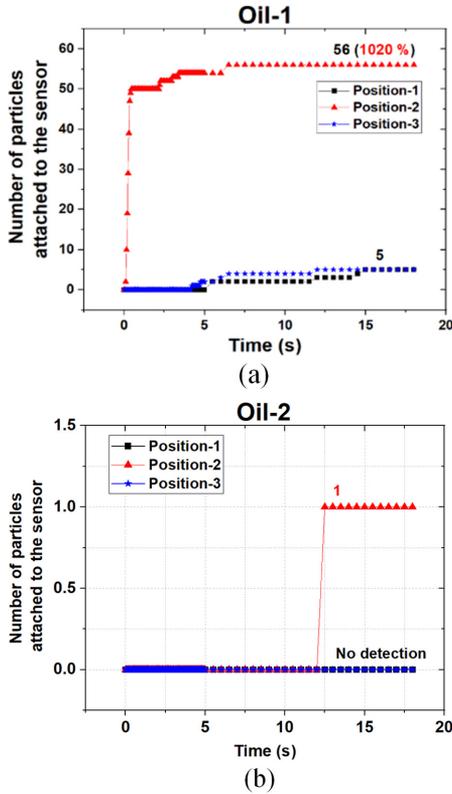


Fig. 4. Sensitivity with variation of sensor position and lubricant viscosity. (a) Oil-1 case [6] (b) Oil-2 case.

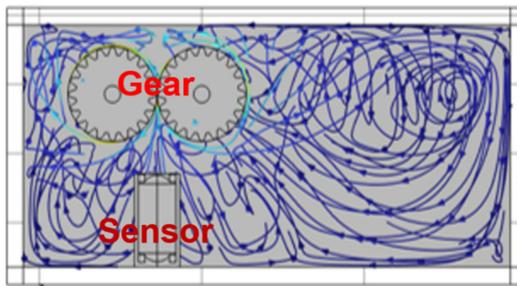


Fig. 5. Streamlines in gearbox (@ Position-2).

유의 점도가 높은 경우, 점도가 낮은 경우에 비해 철분 입자를 측정하는 감도가 현저히 떨어진다. 그리고 점도가 낮은 경우나 높은 경우에도 3가지 센서의 위치 중에서 Position-2의 경우가 나머지 2가지 경우 (Position-1, Position-3)에 비해 상대적으로 센서의 감도가 높다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 5와 같이 Position-2의 경우에 센서는 기어의 움직임에 의해 발생하는 주된 유동

에 직접적으로 영향을 받기 때문이다. 즉 센서의 감도를 개선하기 위해서는 유동 해석을 통해 주된 유동이 발생하는 곳에 센서를 위치시켜야 한다. 점도가 높은 경우는 점도가 낮은 경우에 비해 수치해석에서 수렴성이 낮고 계산 시간도 아주 오래 걸린다. 점도가 낮은 경우와 높은 경우에 주된 흐름의 패턴은 유사하고 나머지 작은 와류 등의 변화가 조금 상이하다. 따라서 센서의 위치 선정을 위한 해석에서는 해석의 용이성 측면에서 점도가 낮은 경우에 대한 해석을 수행하는 것도 효과적인 방법이라고 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 기어박스 윤활시스템에서 철분마모센서의 위치를 선정하는 방법에 대해 수치적으로 접근하였다. 센서의 위치와 점도의 변화에 따른 해석을 수행하여 센서의 감도를 평가하였다. 센서의 감도는 센서에 부착되는 철분입자의 개수로 정의를 하였다. 철분마모센서는 윤활시스템에 대한 유동해석을 통해 주된 유동을 확인하고 주된 유동 내에 센서를 위치시켜야 감도가 우수하다는 것을 확인하였다. 점도가 낮은 경우보다는 점도가 높은 경우에 센서의 감도는 낮았다. 점도가 높은 경우는 해석의 수렴성이 낮고 계산시간도 오래 걸리는 단점이 있다. 점도의 변화에 의해 주된 유동의 변화와 센서의 감도 경향이 변하지 않으므로 대안적으로 점도가 낮은 경우에 대한 해석을 통해 센서의 위치를 선정하는 방안이 효과적이라고 판단된다. 하지만 점도의 변화에 의한 주된 유동의 크기 변화와 와류 등의 영향도 있으므로 일부 해석을 통해 유사성에 대한 확인과정이 필요하다.

Acknowledgements

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(경북지역 풍력에너지 클러스터 인재 양성사업, No. 20214000000010)입니다.

References

- [1] Velmurugan, R. S., Dhingra, T., "Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function: A conceptual framework", *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, Vol.35, pp.1622-1661, 2015., <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2014-0028>
- [2] Simeu-Abazi, Z., Sassine, C., "Maintenance integra-

- tion in manufacturing systems: from the modeling tool to evaluation”, *Int. J Flex. Manuf. Syst.*, Vol.13, pp.267-9, 2001, <https://doi.org/10.1023/A:1011147602744>
- [3] Kumur, P., Hirani, H., “Misalignment effect on gearbox failure: An experimental study”, *Measurement*, Vol.169, pp.108492-11, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108492>
- [4] Luo, J., Yu, D., Liang, M., “Enhancement of oil particle sensor capability via resonance-based signal decomposition and fractional calculus”, *Measurement*, Vol.76, pp.240-15, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.08.009>
- [5] Hong, S. H., “Numerical Approach and Verification Method for Improving Sensitivity of Ferrous Particle Sensors with Permanent Magnet”, *Sensors*, Vol.23, pp.5381, 2023, <https://doi.org/10.3390/s23125381>
- [6] Hong, S. H., “Numerical Analysis for Appropriate Positioning of Ferrous Wear Debris Sensors with Permanent Magnet in Gearbox Systems”, *Sensors*, Vol.23, pp.810, 2024, <https://doi.org/10.3390/s24030810>
- [7] Zhu, X., Zhong, C., Zhe, J., “Lubricating oil condition sensors for online machine health monitoring – A review”, *Tribol. Int.*, Vol.109, pp.473-484, 2017.
- [8] Hong, S. H., “Literature Review of Machine Condition Monitoring with Oil Sensors-Types of Sensors and Their Functions”, *Tribol. Lubr.*, Vol.36, No.6, pp.297-306, 2020, <https://doi.org/10.9725/kts.2020.36.6.297>
- [9] Li, W., Bai, C., Wang, C., Zhang, H., Ilerioluwa, L., Wang, X., Yu, S., Li, G., “Design and research of inductive oil pollutant detection sensor based on high gradient magnetic field structure”, *Micromachines*, Vol.12, pp.638, 2021, <https://doi.org/10.3390/mi12060638>
- [10] Zeng, L., Zhang, H., Wang, Q., Zhang, X., “Monitoring of non-ferrous debris in hydraulic oil by detecting the equivalent resistance of inductive sensors”, *Micromachines* Vol.9, pp.117-8, 2018, <https://doi.org/10.3390/mi9030117>
- [11] Hong, S. H., Jeon, H. G., “Assessment of condition diagnosis system for axles with ferrous particle sensor”, *Materials*, Vol.16, pp.1426-16, 2023, <https://doi.org/10.3390/ma16041426>
- [12] Flanagan, I. M., Jordan, J. R., Whittington, H. W., “Wear-debris detection and analysis techniques for lubricant-based condition monitoring”, *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, Vol.21, pp.1011-1016, 1988.