https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.5.400

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Technical Papers

절삭유 유입 방지를 위한 내부 급유형 고속 스핀들 메커니즘 연구

방현철[a], 장민규[a], 김현진[a], 김진현[a*]

Internal-Oil-Feed-type High-Speed Spindle Mechanism to Prevent Cutting Oil Flow

Hyeoncheol Bang[a], Mingyu Jang[a], Hyeonjin Kim[a], Jinhyun Kim[a*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Seoultech*

ARTICLE INFO

Article history:

Received 11 August 2020
Revised 5 October 2020
Accepted 12 October 2020

Keywords:
Cutting oil
Internal oil feed type high speed spindle
Magnetic coupling
Contact rubbers seal type bearing
Multiple bearing module

ABSTRACT

The use of cutting oil is essential during the machining of precision parts by grinding for improving the quality of the machined surface and for cooling tools used. To this end, an internal-oil-feed-type high-speed spindle, which obtains rotational power using cutting oil, is widely employed. However, repeatedly used cutting oil contains small metal fragments, which reduces the bearing durability inside the spindle. This study investigated a new mechanism to improve the bearing life of internal-oil-feed-type high-speed spindles. Two designs were considered: The first uses a magnetic coupling principle to deliver power in a contactless manner, the second is a multiple bearing module structure that mitigates the limitation of contact-rubber-seal-type bearings. Furthermore, we analyzed the features and limitations of the proposed mechanism by fabricating actual models with the two designs.

1. 서 론

최근 제조 가공 분야에서는 고도로 정밀한 부품과 다양한 난삭재에 대한 가공 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 제품 가공 시간 단축 및 가공 표면 개선에 대한 요구가 높아지고 있으며, 이를 위해 공작 기계용 스핀들의 회전 속도는 점점 더 빨라지고 있는 추세이다. 스핀들의 가공 성능 경쟁이 심화됨에 따라 스핀들과 공구의 파손 및 런아웃 에러로 인한 가공 정밀도 저하 등의 문제들이 발생하게 된다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 센서의 신호를 분석하여 장비의 절삭 성능을 진단하고[2] 고장 여부를 예측하는 스마트 시스템이 사용되기도 한다[3]. 또한 베어링 부품 수명 및 회전 효율 향상을 위한 기술로 공압 베어링(air bearing)[4,5], 유압 베어링(oil pressure bearing), 자기 베어링(magnetic bearing)[6] 등이 연구 개발되고 있다. 고속 정밀 가공에는 가공면 개선 및 가공 공구 냉각을 위한 절삭유가 필수적으로 사용되며, 이 절삭유로 가공축 회전 동력까지 해결할 수 있는 내부 급유형 고속 스핀들 제품이 널리 이용되고 있다[7]. 내부 급유형 고속 스핀들은 절삭유가 스핀들 내부의 주축과 연결되어 있는 터빈을 회전시킴으로써 자체적으로 회전 동력을 만들어낼 수 있다는 장점이 있지만, 수차례 재사용되는 절삭유의 특성상 절삭유 내에 이물질이 섞이게 되고, 이는 곧 스핀들 내부의 베어링을 손상시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 스핀들의 수명을 증가시키고 가공 품질을 향상시키기 위해서는 외부 오염 물질로부터 베어링을 보호하기 위한 메커니즘이 필요하다. 본 논문에서는 기존 내부 급유형 고속 스핀들의 베어링 수명을 향상시킬 수 있는 새로운 메커니즘에 대한 초기 연구를 진행하였다.

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6318
E-mail address: jinhyun@seoultech.ac.kr (Jinhyun Kim).

2. 절삭유 유입 방지 구조 설계

2.1 내부 급유형 고속 스핀들 구동 방식 및 특징

내부 급유형 고속 스핀들의 대표적인 단점으로 절삭유에 유입으로 인한 베어링 내구성 저하 문제가 있다. 회전축을 지지함과 동시에 회전 마찰을 최소화하기 위해서는 베어링의 사용이 필수적이다. 그러나 축과 결합되어 회전력을 발생시키는 터빈과 절삭유의 접촉이 발생하는 구조 특성상, 베어링을 절삭유로부터 완벽히 보호하기는 거의 불가능하다. 절삭유의 유입으로 인한 베어링 내구성 저하 문제를 해결하기 위해 여러 가지의 절삭유 유입 방지 구조 설계를 수행하였다.

2.2 와전류 커플링 스핀들 설계[8]

자석 근처에서 전기 도체 원판을 회전시키면 플레밍의 오른손 법칙을 따르는 방향으로 원판에 와전류가 흐르게 되며, 이 전류와 자석의 자계로 플레밍의 왼손 법칙을 따르는 방향으로 토크가 발생하여 원판을 정지시키는 것이 와전류 브레이크의 원리이다. 이 원리를 역으로 이용하여 정지 상태의 자석을 도체의 회전을 통해 회전시키는 장치를 구상하고 스핀들 구조를 Fig. 1과 같이 설계하였으며, Fig. 2와 같이 간단한 실험 장치를 제작하였다. 자기장이 비접촉으로 전달된다는 점을 이용하여 절삭유 밀봉을 위한 별도의 공간을 만들고 샤프트 공구 말단부와 자석 회전체를 배치하였다. 입구 포트를 통해 유입된 절삭유가 노즐로부터 유출되면 터빈과 전도체 디스크가 연결되어 있는 중공 샤프트를 회전시키고, 터빈을 회전시킨 절삭유는 샤프트 공구 말단부 쪽에 있는 중앙 유체 출구로 배출되도록 하였다. 전도체 디스크의 회전은 유체 통로와 격리된 공간에 있는 샤프트의 회전을 유도하게 된다.

2.3 마그네틱 커플링 스핀들 설계[8,9]

두 번째로 적용한 원리는 영구 자석끼리 서로 밀고 끌어당기는 특성을 이용한 마그네틱 커플링이다. 와전류 커플링과 마찬가지로 비접촉으로 동력 전달이 가능하기 때문에 기본적인 설계는 와전류 커플링 스핀들과 비슷하며, 부품 분할 및 수리 용이성 등을 감안하

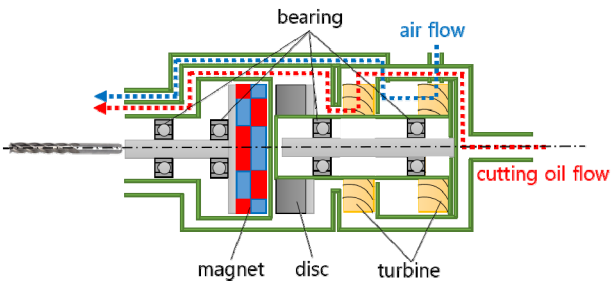


Fig. 1 Eddy current coupling spindle design

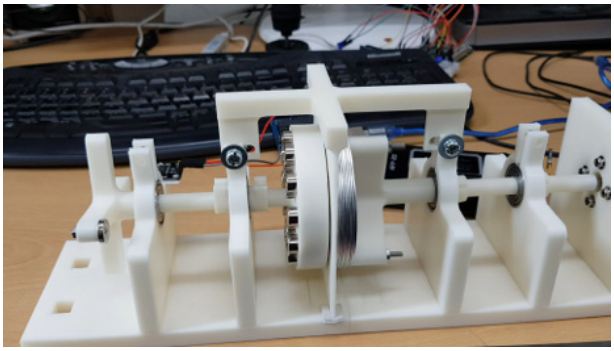


Fig. 2 Experimental device for eddy current coupling test

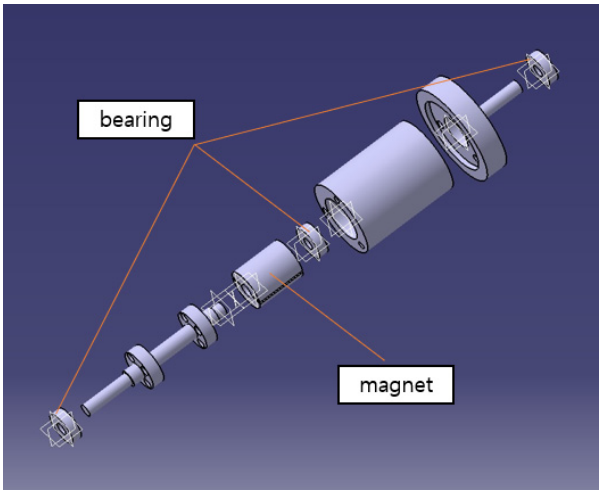


Fig. 3 Magnetic coupling spindle design ①

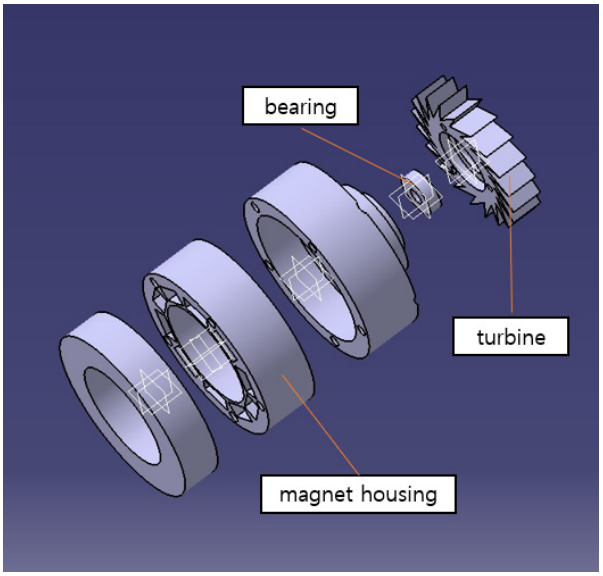


Fig. 4 Magnetic coupling spindle design ②

여 Fig. 3~5와 같이 최종적으로 보완 설계하였다. 절삭유와 터빈이 만나는 외부 회전체, 가공축과 베어링으로 구성되어 있는 내부 가공축 모듈, 그리고 그 사이를 물리적으로 차단하는 벽으로 구성하였

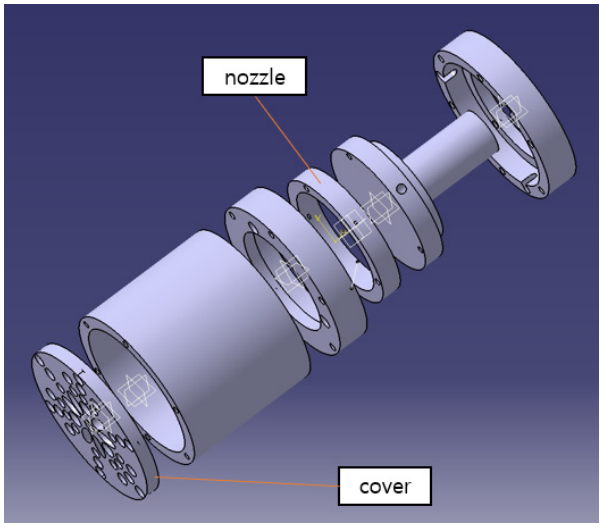


Fig. 5 Magnetic coupling spindle design ③

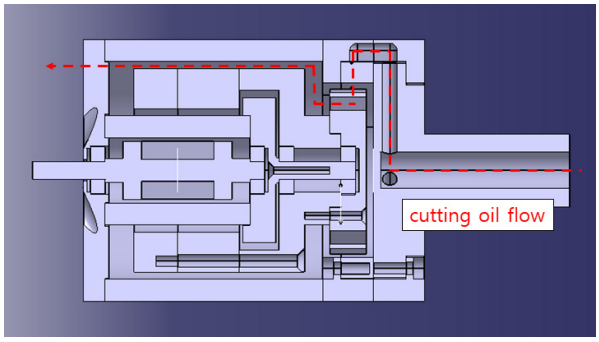


Fig. 6 Cutting oil flow path

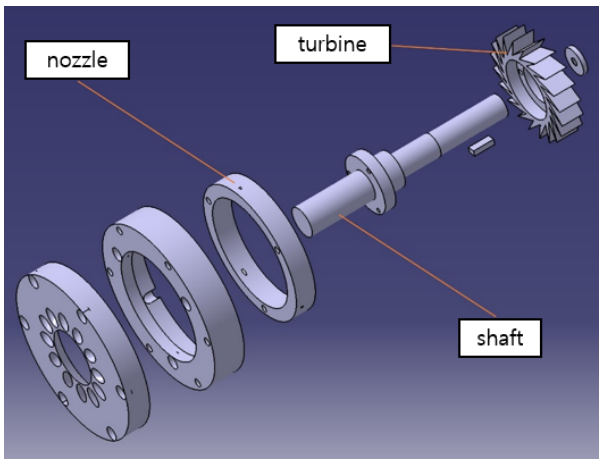


Fig. 7 Multiple bearing module spindle design ①

다. 그리고 외부 회전체와 내부 가공축에는 자석이 배치되어 있어 마그네틱 커플링 원리에 의해 함께 회전하게 된다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 이 구조를 통해 절삭유의 유입을 막아 베어링의 수명을 증가시킬 수 있으며, 내부 가공축 모듈은 하부 커버만 분리하면 교체가 가능하게 함으로써 용이한 유지 보수가 가능하게 되어 있다.

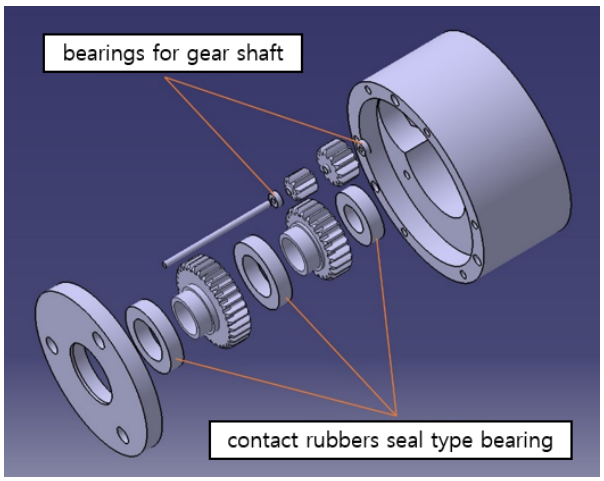


Fig. 8 Multiple bearing module spindle design ②

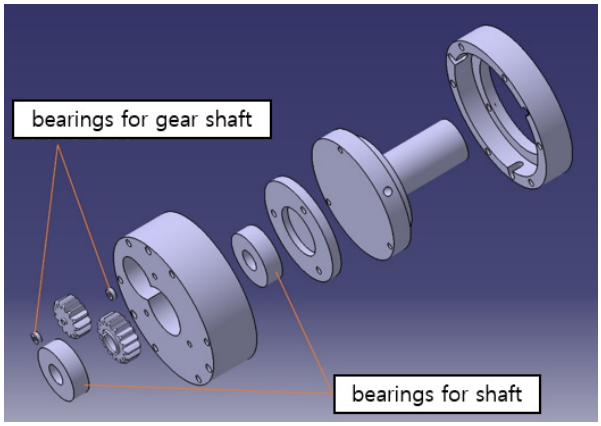


Fig. 9 Multiple bearing module spindle design ③

2.4 다중 베어링 모듈 스핀들 설계

세 번째로 설계한 스핀들은 접촉 고무씰형 베어링을 사용한 절삭유 차단 구조이다. 접촉 고무씰형 베어링은 방진, 방수를 위해 베어링 틈 사이를 고무 패킹으로 차단한 베어링으로, 외부 오염물질 유입 방지용으로 제작된 베어링 규격품이다. 접촉 고무씰형 베어링은 고무씰 마찰이 발생하는 구조적인 특성상 한계 회전 속도가 일반 베어링에 비해 많이 낮다는 단점이 있다. 따라서 이 문제를 해결하고자 3개의 베어링을 기어를 통해 회전축과 연결하고, 회전축이 고속으로 회전하게 되면 베어링들이 각각의 한계 회전수만큼 회전하는 형태로 Fig. 7~9와 같이 설계하였다.

3. 스핀들 설계 메커니즘들의 특징

3.1 와전류 커플링 스핀들 특징

설계한 와전류 커플링 스핀들을 제작하기에 앞서 와전류 원리에 의한 동력 전달 성능을 테스트하기 위해 간단한 실험 장치를 제작하였다. Fig. 10과 같이 모터와 도전체로 구성되어 있는 입력부의

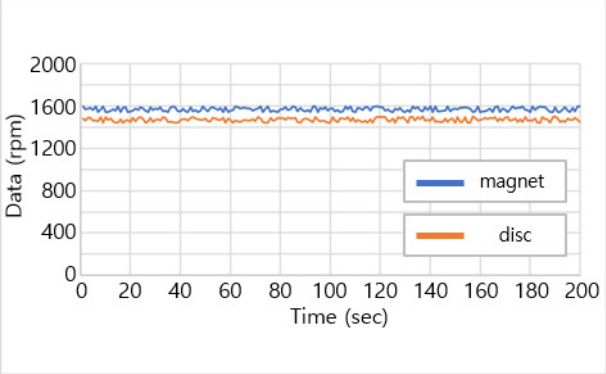


Fig. 10 RPM loss of eddy current coupling

회전 속도를 약 1600 rpm으로 구동했을 때, 자성체와 연결되어 있는 출력부는 약 1500 rpm의 회전 속도를 유지하였다. 무 부하시에는 약 90~95%의 회전 성능을 얻을 수 있음을 확인하였으나, 와전류 원리 특성상 부하가 가해지게 되면 회전 효율이 큰 폭으로 떨어져 고속 스핀들로 사용하기에는 적합하지 않다는 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 마그네틱 커플링 스핀들 특징

마그네틱 커플링 스핀들의 핵심적인 특징은 영구 자석이 사용된다는 점이다. 자석 사용으로 인해 스핀들 하우징 재질 선정에 주의해야 하며, 작업 온도 환경에 따라 회전 동력 성능이 저하될 우려가 있다. 동력 전달 성능을 확인하기 위해 Fig. 11~12와 같이 간단한 실험 장치를 제작하였다. 그리고 절삭유에 포함된 불순물 가운데 자석에 붙는 파편이 포함되어 있는 경우, 제품 내구성에 악영향을 미칠 수 있다. 본 설계품과 가공축 직경이 같은 San Francisco Industrial의 Toodle[10] 제품의 경우 Fig. 13에서 볼 수 있듯이 60 bar, 10000 rpm에서 약 0.3 Nm의 최대 토크 성능을 내는 것으로 명시되어 있다. 본 연구에서 설계한 마그네틱 커플링이 버틸 수 있는 최대 토크는 0.5 Nm로 측정되어 고속 스핀들로서 사용이 가능함을 확인하였다. 와전류 커플링 스핀들에 비해서는 회전 효율이 좋은 편이지만 너무 강한 부하가 작용하게 되면 마그네틱 커플링이 어긋나면서 생기는 진동으로 인해 가공 성능이 떨어진다는 단점이 있다.

3.3. 다중 베어링 모듈 스핀들 특징

다중 베어링 모듈 스핀들의 핵심은 한 개의 베어링으로는 감당할 수 없는 고속 회전을 3개의 베어링들이 나눠서 담당하는 구조라고 볼 수 있다. 이렇게 설계한 다중 베어링 모듈 형태를 이용하게 되면 절삭유를 차단할 수 있음은 물론이고, 회전축 말단부에 여러 가지 가공툴을 고정할 수 있는 클램프 구조를 적용할 수 있을 정도로 큰 지름을 가진 회전축의 적용이 가능해진다는 장점이 있다.

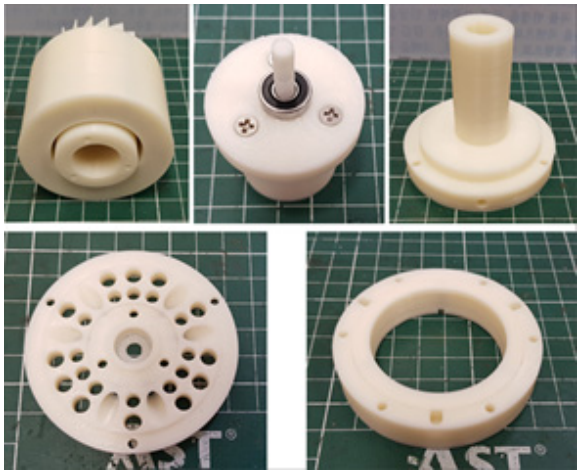


Fig. 11 Magnetic coupling spindle parts

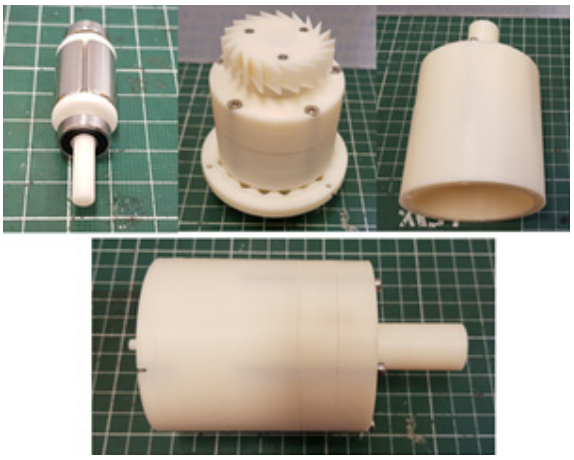


Fig. 12 Magnetic coupling spindle assembly

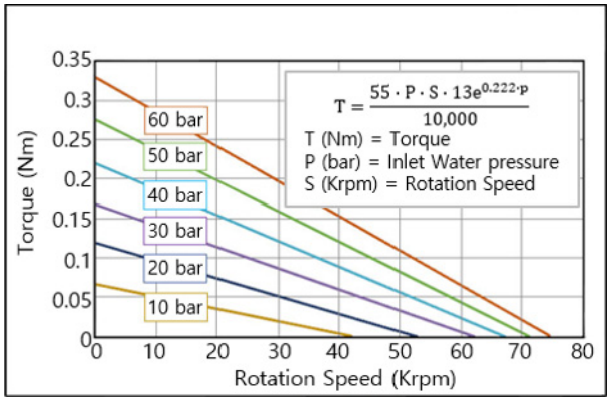


Fig. 13 SFI TOODLE torque specification[10]

또한 마그네틱 커플링 구조와 달리 자석이 전혀 사용되지 않아, 자석 사용으로 인한 문제점들로부터도 자유로워지게 된다. 설계한 다중 베어링 모듈 스핀들의 동력 전달 성능을 확인하기 위해 Fig. 14~15와 같이 간단한 실험 장치를 제작하였다. 절삭유의 비중은 0.8로 가정했을 때, 절삭유의 유량은 60 bar 압력에서 2.87×10^{-4}

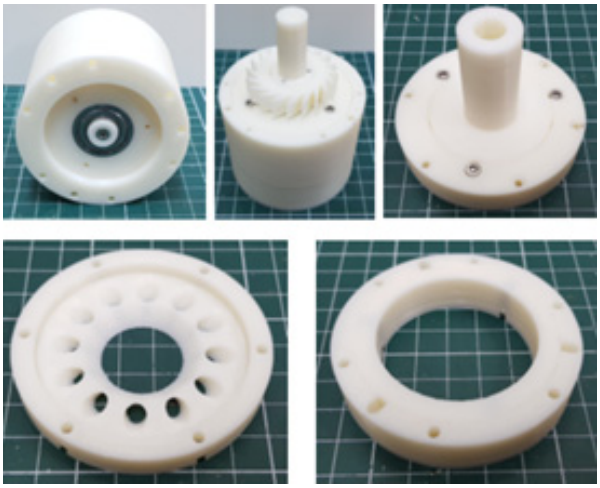


Fig. 14 Multiple bearing module parts

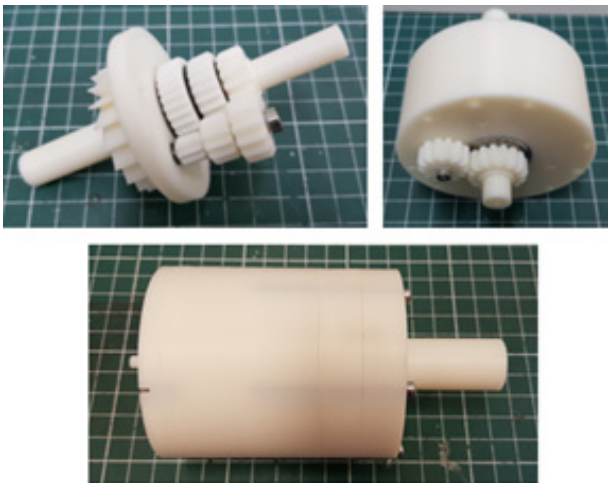


Fig. 15 Multiple bearing module assembly

Table 1 Rotation speed and power

Pressure (bar)	Rotation speed (RPM)	Power (W)
60	40000	633.696
60	30000	839.647
60	20000	802.681
50	40000	388.608
50	30000	626.630
50	20000	641.203

m^3/s, 50 bar 압력에서 2.64×10^{-4} m^3/s이며, 터빈 회전수에 따른 이론적인 출력은 Table 1과 같다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 다중 베어링 모듈 스핀들은 60 bar, 30000 rpm에서 최대 출력을, Toodle 스핀들의 경우 60 bar, 40000 rpm에서 최대 출력 성능을 발휘하며, 같은 40000 rpm에서 비교해보면 비슷한 출력값을 가짐을 알 수 있다.

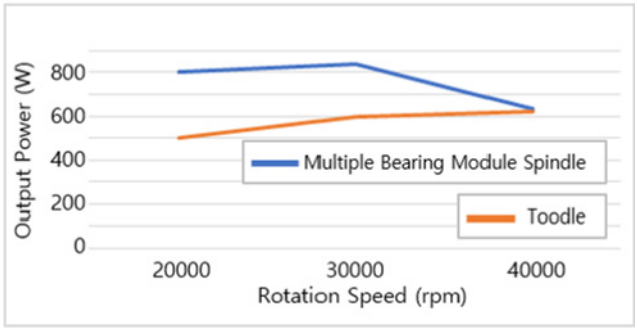


Fig. 16 Output power comparison between multiple bearing module spindle and toodle

4. 결 론

본 논문에서는 내부 급유형 고속 스핀들의 단점으로 지적되는 절삭유 유입에 의한 베어링 내구성 저하 문제를 해결하기 위한 연구를 수행하였다. 개발 중인 스핀들의 이론적인 성능은 40000 rpm에서 634 W로 약 620 W인 Toodle 제품과 비슷하지만, 실제 품의 동력 성능은 부품들간의 마찰 및 고무 접촉씰형 베어링의 회전 손실 등에 의해 달라질 수 있다. 그러나 터빈의 지름은 Toodle 제품의 20 mm보다 큰 44 mm이므로 동일한 회전수 조건에서 좀 더 높은 토크 성능을 기대해볼 수 있다. 절삭유 방지를 위한 여러 가지 구조들을 설계하고 분석해 본 결과, 비접촉 회전체에 의한 절삭 효율과 기어 구조로 인한 소음 및 진동 등의 새롭게 해결해야 할 문제점들도 발견할 수 있었다. 추후에 본 논문에서 설계한 구조를 토대로 테스트용 실물 제품을 제작하여 실제 작동을 통해 절삭유 유입 방지 성능 및 스핀들 가공 효율 등을 확인함으로써, 실제 제품 개발을 위한 최적 설계 및 부가적인 문제 해결 등을 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0002092, 2020년 산업혁신인재성장지원사업).

References

[1] Oh, H. I., Kwon, S. W., Park, W. S., Hong, S.W., 2018, Study on the Dynamic Characteristics and Fatigue Life of a Spindle-Bearing System for Large Machine Tools, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 27:6, 591-599, 10.7735/ksmte.2018.27.6.591.

[2] Kim, J. H., Yoon, J. S., Lee, D. Y., 2019, Estimation of Tangential Cutting Force using Spindle Load of CNC Machining Center, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 28:6, 343-349, 10.7735/ksmte.2019.28.6.343.

[3] Kim, H. J., Yun, H. T., Jun, B. G., 2018, Simulation of Accelerometer Sensors for Bearing Failures in Machine Tool Spindle Units, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Conference, 92-92, I410-ECN-0101-2018-003-002073389.

[4] Lee, D. Y., Yun, S. J., 2017, Development of Deburring Spindle up to 80,000 rpm for Precision Finishing, Korean Society for Precision Engineering Conference, 441-442.

[5] Yook, I. S., Lee, D. H., Han, G. S., Kim, W. K., Hwang, J. H., 2015, Development of the Air Bearing Spindle for Precision Machining for Metal case of the Smart-phone, Korean Society for Precision Engineering Conference, 280-281, I410-ECN-0101-2016-555-002274769.

[6] Park, C. H., Yoon, T. G., 2017, Development of Drilling Spindle for Micro-hole Machining with Magnetic Bearings, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 27:4, 510-517, 10.5050/KSNVE.2017.27.4.510

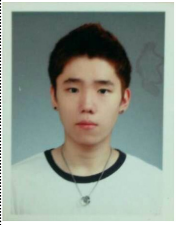
[7] Bang, H. C., Jang. M.. G., Kim, H. J., Lee, H. B., Kim, J. H., 2019, A Basic Study for Designing an Internal Feed Type High Speed Spindle for Machining Center, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Conference, 13-13, I410-ECN-0101-2019-003-000711477.

[8] Liu, Y., Liu, W., Cheng, N., 2015, Magnetic Field and Eddy Current Analysis of Permanent Magnet Eddy Current Coupling, 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, 2817-2822, 10.1109/ICInfA.2015.7279766.

[9] Ahn, J. H., Park, C. H., Han, C., Yoon, T. G., Kim, J. K., Chio, J. Y., 2016, Rotor Design of 80,000rpm 3.4kW Class High-speed Spindle According to Mechanical Characteristics, The Korean Institute of Electrical Engineers Conference, 135-137, I410-ECN-0101-2018-560-001203610.

[10] San Francisco Industrial n.d., <https://sfi-toodle.com/product-item/toodle-blue-131/>.

Hyeoncheol Bang
Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Machine Learning and Robotics.
E-mail: banghc@seoultech.ac.kr



Mingyu Jang
Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology.
His research interest is Machine Learning and Robotics.
E-mail: 12jmg1234@gmail.com

Hyeonjin Kim
Master's course in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology.
Her research interest is Machine Learning and Robotics.
E-mail: hyeonjin@seoultech.ac.kr

Jinhyun Kim
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is Control and Robotics.
E-mail: jinhyun@seoultech.ac.kr