

고속 회전하는 볼베어링 내 공기 유동구조 수치해석 연구

A Computational Investigation on Airflow Structures Inside a Ball Bearing at High-Speed Rotation

김동주¹, 오일석², 홍성욱³, 김경진⁴✉
Dongjoo Kim¹, Il-Suk Oh², Seong-Wook Hong³ and Kyoungjin Kim⁴✉

- 1 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
- 2 금오공과대학교 대학원 기계공학과 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
- 3 금오공과대학교 기전공학과 (Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology)
- 4 금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: kimkj@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7327

Manuscript received: 2011.1.6 / Accepted: 2011.3.9

In a hope to better understand the flow and convective heat transfer characteristics inside a ball bearing, air flow between the rolling elements and raceways at high speed bearing rotation is numerically investigated using a simplified inner geometry of bearing and a CFD technique. Flow simulation results reveal the pressure distribution of airflow and the shear stress distribution on the ball surface, of which nonuniformity becomes significant with the increasing rotational speed. Also, the local point of maximum shear stress coincides with the stagnation flow area on the surface of rolling elements. A complex pattern of three-dimensional vortex structures is found in the air flow due to the relative motion of bearing elements and three different types of vortex pairs exist around the rotating and orbiting rolling elements.

Key Words: Ball Bearing (볼베어링), CFD Analysis (전산유동해석), Airflow (공기유동), Flowfield Characteristics (유동특성)

1. 서론

볼베어링은 반경방향이나 축방향 하중을 지지하는 동시에 회전마찰을 줄여 원활한 회전이 가능하도록 하는 회전체의 핵심요소이다. 따라서 볼베어링은 동력발생장치나 전달장치로 사용되는 대부분의 회전체에 널리 채용되고 있다. 볼베어링의 핵심적인 역할이 회전요소와 정지요소의 분리 상태를 유지시킴으로써 마찰을 최소화하도록 고안되었지만, 실제 큰 하중을 받거나 고속회전 상태에서는 구름요소와 내외륜 사이에 많은 마찰열이 발생하게 된다. 베어링에 발생한 과도한 열을 적절

히 제거하지 못한다면 베어링의 온도 상승을 야기할 수 있으며 이는 결국 베어링 수명이나 신뢰성 등에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 베어링 온도 상승은 구름요소나 내외륜의 팽창을 일으키게 되며, 이는 베어링의 정밀도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.^{1,2} 따라서 베어링의 온도가 적절한 범위 내에 유지되는 지를 예측하는 것은 중요한 의미가 있다고 할 수 있다.

구름요소와 내외륜 사이에서 주로 발생하는 마찰열은 여러 형태의 열방출 경로를 통해 외부에 방출된다. 그 중에서도, 레이스를 통한 축과 하우징으로의 열전도와 공기 및 윤활유 유동에 기인한

대류열전달이 대표적이다. 지금까지 베어링에서의 열전달과정을 해석하기 위한 여러 시도가 있었으나 대부분은 실험식에 의존하여 왔다. 특히, 공기 유동에 의한 대류열전달 계산을 위해서도 실험적인 방법에 기반을 둔 계략적인 해석에 의존해오고 있다.^{3,4} 그 예로 현재 구름요소의 대류열전달량 계산에 널리 쓰이는 1960년대의 Kreith⁵의 실험식은 베어링 내부형상을 고려하지 않은 단순히 독립적으로 회전하는 구에 대한 열전달 연구결과이다. 따라서 베어링 내의 구름요소의 운동이 고려된 대류열전달 예측을 위한 정확도 있는 해석방법이 필요하다, 국내외적으로 베어링 내부의 공기유동 및 이에 따른 대류열전달에 대한 심층적인 연구가 진행된 바가 아직 없다.

본 논문에서는 공기유동에 의한 구름요소와 내외륜 사이의 대류열전달 과정을 이해하기 위한 노력의 시작으로, 자전하면서 공전운동을 하는 볼 베어링 구름요소 주위의 공기유동에 대해 연구하였다. 볼 베어링 내부공간에서의 공기 유동은 여러 구름요소 간의 상대 운동에 의해 발생되므로 매우 복잡한 양상을 띠게 된다. 최근 본 연구저자들에 의해 베어링 내부의 공기유동에 관한 단순화된 유동계산 모델을 이용한 수치해석 기본 연구결과가 발표된 바 있다.⁶

본 논문에서는 기존 연구를 확장하기 위해 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)기법을 적극적으로 활용하였으며 베어링 내부의 공기 유동 특성에 대한 세부적인 분석을 제시한다. 특히 베어링 구름요소와 내외륜간의 접촉점 근처에서 발생하는 유동압력 변동이나 유동전단력 변화 및 구름요소 뒤에서 발생하는 와류현상 등에 대해 관찰하였다.

2. 계산 모델 및 해석

2.1 볼 베어링 내부에서의 공기유동 모델

볼 베어링 내부의 형상은 베어링 형식에 따라 크게 달라질 수 있지만, 공통적으로 내외륜과 구름요소, 그리고 구름요소의 간격을 유지시키기 위한 케이지 등으로 이루어진다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 구름요소를 중심으로 한 단순화된 모델을 고려하였다. 구름요소의 공전운동을 유도하기 위해 존재하는 내외륜의 축방향 곡률과 케이지는 고려하지 않았다. 본 연구는 구름요소 주위 공기 유동의 기본 특성에 대한 기초 연구로서 본 연구

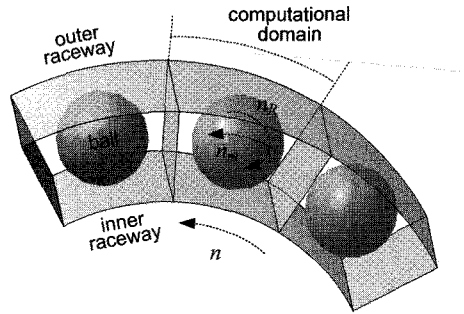


Fig. 1 Simplified geometry and computational domain for the flow simulations inside the ball bearing

의 모델링 및 계산의 타당성을 바탕으로 향후 본 연구에서 고려하지 않았던 내부 형상을 점진적으로 반영하여 그 효과를 고찰할 예정이다.

본 논문에서는 각접촉 볼베어링(angular contact ball bearing)인 호칭번호 7218 베어링을 대상으로 하였다. 내부레이스 직경(d_i)과 외부레이스 직경(d_o)은 각각 102.79, 147.73 mm이며 폭은 모두 33.71mm이다. 구름요소의 직경(D)은 22.23 mm이며, 구름요소의 개수(Z)는 16개이다.

2.2 공기유동의 CFD 해석

구름요소가 베어링 내부공간에 대해 주기적으로 배치된다는 점을 고려하여, Fig. 1에서와 같이 계산영역을 구름요소 1개 및 $360^\circ/Z$ 각도에 해당하는 공간으로 제한하였다. 한편, 내부레이스는 축회전속도 n (rpm)으로 회전하며, 외부레이스는 정지되어 있다. 또한 구름요소는 자전운동과 공전운동을 동시에 하게 된다. 구름요소의 공전속도(n_m) 및 자전속도(n_r)는 각각 다음과 같이 근사화할 수 있다.³

$$n_m = n(1 - \gamma)/2, \quad n_r = n(1 + \gamma^2)/2\gamma \quad (1)$$

여기서 γ 는 D/d_m 이며 d_m 은 피치직경으로 $(d_i + d_o)/2$ 로 정의된다. 본 연구에서는 베어링 회전속도를 5,000에서 20,000 rpm까지 고려하였다.

구름요소와 같이 물체가 움직이는 경우에 절대좌표계에서 유동해석을 하려면 매 순간 계산 격자를 새로 형성해주어야 하며, 해를 얻기 위해 많은 계산시간이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 계산의 효율성을 위해 베어링의 중심을 기준으로 구름요소의 공전속도로 회전하는 이동좌표계(moving

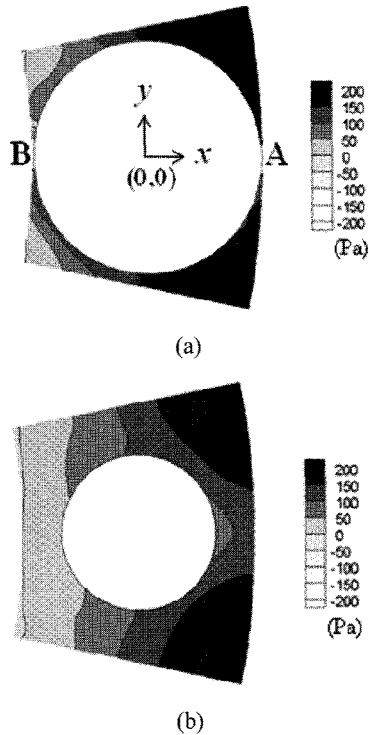


Fig. 2 Contours of pressure on two different planes for $n = 10,000$ rpm: (a) $z = 0$; (b) $z = 8.34$ mm

reference frame)를 사용하였다. 상용 CFD 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하였으며, 3차원 비압축성 정상상태 유동을 고려하였다. 고속회전임을 고려하여 난류유동을 가정하였고, $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 공전방향에 수직으로 놓인 두 평면에는 주기조건(periodic condition)을, 내외륜 및 구름요소에는 각각의 회전속도를 경계조건으로 주었다. 축방향 측면은 케이지에 해당하는 벽이라 가정하여 점착조건을 사용하였다. 계산에 사용된 격자의 수는 약 63만개로 하였다. 해석 및 결과 분석에 직교좌표계(x, y, z)를 사용하였으며, 좌표계의 원점은 구름요소의 중심에 위치시켰다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 x -축은 구름요소의 중심에서 외륜과의 접촉점을 향하고 있고, y -축은 구름요소의 공전방향을 향한다.

3. 결과 및 토의

Fig. 2는 $n = 10,000$ rpm일 때 $z = 0$ 단면과 $z = 8.34$ mm 단면에서의 압력분포를 나타낸다. 여기서,

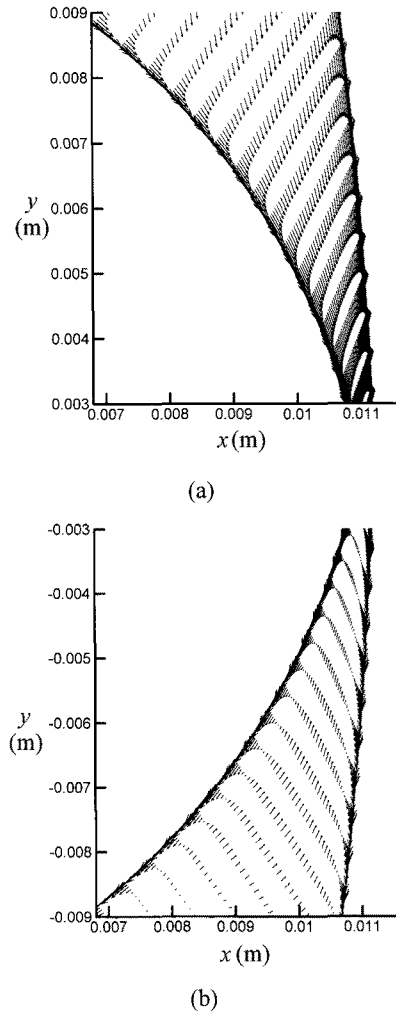


Fig. 3 Flow velocity vectors viewed from the moving reference frame for $n = 10,000$ rpm: (a) above point A; (b) below point A

압력은 대기압에 대한 상대압력을 의미하며 Pa 단위로 나타내었다. 우선 $z = 0$ 단면을 살펴보면, 전체적으로 외륜 쪽의 압력이 내륜 쪽보다 상대적으로 높고, 내외륜과 구름요소의 접촉점인 A와 B 근처에서 압력이 급격히 감소하여 최소값을 갖는다. 이러한 압력분포 특성은 회전속도에 상관없이 공통적으로 발견되지만, 회전속도가 증가함에 따라 압력의 최대값과 최소값의 차이는 점점 커진다. 예를 들어, 5,000 rpm에서 압력차이는 373 Pa인 반면, 10,000 rpm에서는 1431 Pa이 된다. 한편, $z = 8.34$ mm 단면에서는 구름요소와 내륜 및 외륜 사

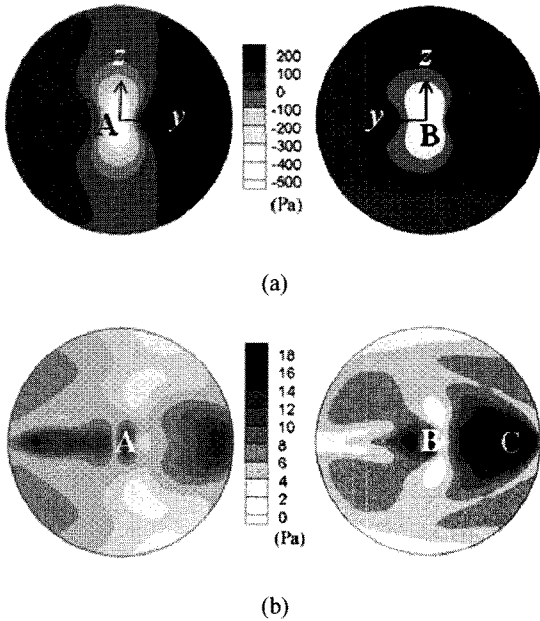


Fig. 4 Distributions of pressure and wall shear stress on the ball surface for $n = 10,000$ rpm: (a) pressure; (b) wall shear stress

이의 공간이 넓어져 $z = 0$ 단면과 같이 압력이 급격히 감소하는 영역은 나타나지 않는다. 하지만, 이 위치에서도 $z = 0$ 단면과 마찬가지로 외륜 쪽의 압력이 내륜 쪽보다 상대적으로 높다.

Fig. 3은 구름요소와 외륜의 접촉점 A 근처에서 공기 유동의 속도벡터를 나타낸 것으로, 속도는 절대속도가 아닌 이동좌표계에서 바라본 상대속도이다. 이동좌표계에서 볼 때 구름요소와 외륜은 모두 시계방향으로 회전하기 때문에 구름요소와 외륜 벽면 근처에서 공기의 하향운동이 발생된다. 즉, 두 벽면 근처에 공기의 점성으로 인한 경계층(boundary layer)이 성장한 것을 Fig. 3에서 뚜렷이 알 수 있다. 한편, Fig. 3(a)와 3(b)를 비교해 보면 하나의 특징적인 차이를 발견할 수 있다. 접촉점 A 위에서는 유동이 전체적으로 아래를 향하고 있지만, A 아래에서는 구름요소와 외륜 벽면의 경계층을 제외한 대부분의 영역에서 유동이 위쪽을 향하고 있다.

Fig. 4는 구름요소 표면에서의 압력과 전단응력 분포를 보여준다. 왼쪽 그림은 외륜 접촉점 A가 보이도록 $+x$ 축에서 바라본 것이며, 오른쪽 그림은 내륜 접촉점 B가 보이도록 $-x$ 축에서 본 것이

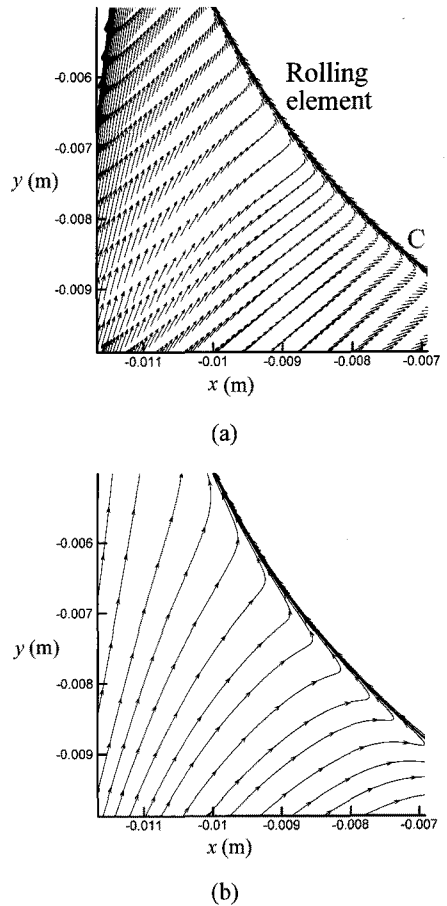


Fig. 5 Flow velocity vectors and streamlines near the area C for $n = 10,000$ rpm: (a) velocity vectors; (b) streamlines

다. 앞서 Fig. 2에서 설명한 것처럼 접촉점 A와 B 근처에서 압력이 낮은 영역을 다시 확인할 수 있다. 한편, 전단응력 분포는 압력 분포보다 다소 복잡한 분포를 보이는데, 접촉점 A와 B 이외에 C 위치에서 급격한 변화를 보이며 전단응력이 매우 큰 값을 갖는다. C 위치는 구름요소 중심에 대해 접촉점 B로부터 약 $50^\circ \sim 53^\circ$ 회전한 곳에서 발견되며, 베어링의 회전속도가 증가함에 따라 B에서 점점 멀어지는 경향이 있다.

C 위치에서 전단응력이 매우 큰 이유를 분석하기 위해 Fig. 5와 같이 C 근처에서 $z = 0$ 단면의 속도 벡터 및 유선을 그려보았다. 아래에서 위로 올라온 공기 유동이 구름요소의 왼쪽 아랫면에서 경계층 유동과 만나며 정체영역을 형성한다. 이

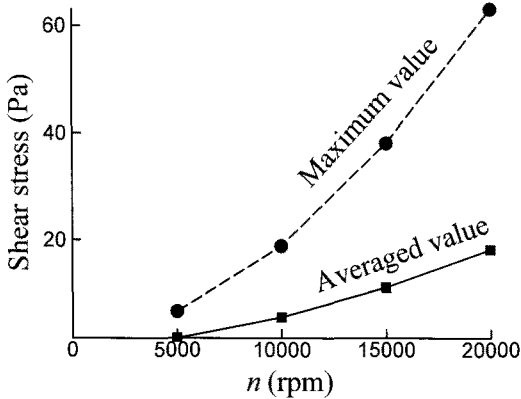
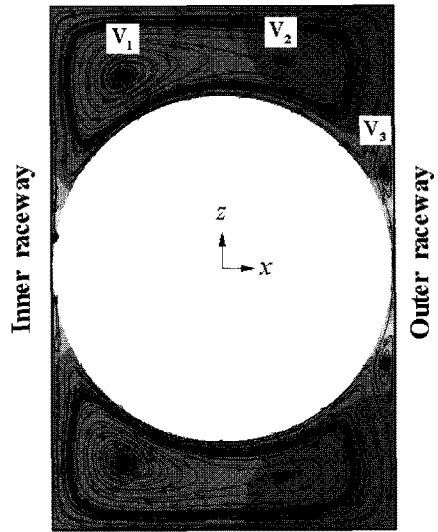


Fig. 6 Maximum and area-averaged shear stresses on the rolling element with respect to the rotational speed of bearing

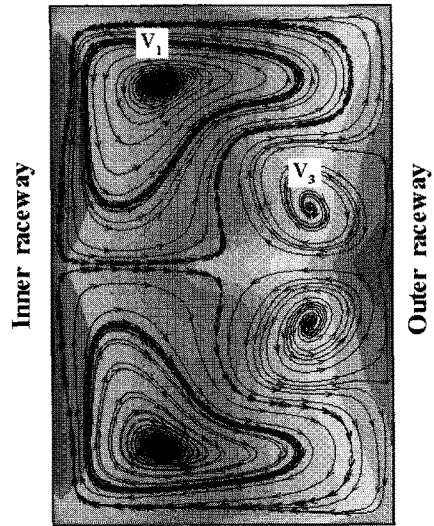
때, 정체점을 기준으로 공기 중 일부는 구름요소의 회전(시계방향)을 따라 접촉점 B를 향해 위로 올라가고, 나머지는 우측의 공간으로 이동한다. 정체점 근처에서는 일반적으로 경계층이 얇고 전단응력이 상대적으로 높기 때문에 C 위치에서 전단응력이 큰 이유는 정체점 근처이기 때문으로 판단된다.

회전속도에 따른 전단응력의 변화를 정량적으로 나타내기 위하여 Fig. 6에 구름요소에 작용하는 전단응력의 최대값 및 평균값을 회전속도의 함수로 나타내었다. 회전속도가 증가함에 따라 전단응력의 최대값 및 평균값이 모두 증가하며, 특히 구름요소 표면 상 전단응력의 불균형적 분포가 고속회전에서 매우 심해짐을 볼 수 있다.

구름요소 주위 공기유동의 3차원 와류 구조를 이해하기 위해 볼의 공전방향에 수직인 두 단면($\theta = 0$ 와 -11.25° 평면)에서의 유선을 Fig. 7과 같이 살펴보았다. 여기서, θ 는 x 축에 대한 회전요소의 공전각도를 의미하며, $\theta = 0$ 평면은 구름요소의 중심을 지나는 xz -평면과 일치하고, $\theta = -11.25^\circ$ 평면은 계산영역의 경계면, 즉 두 구름요소의 중간에 위치한 평면이다. $\theta = 0$ 평면에서는 구름요소와 주변 경계면 사이에서 세 개의 와류(V_1, V_2, V_3)가 위아래 대칭적으로 형성된다. 위아래 벽면 근처에 나타난 와류 V_1 과 V_2 는 반시계 방향의 와도(vorticity)를 가지고 있으며, 하나의 큰 회전유동을 형성한다. 반면 와류 V_3 는 외륜과 회전요소 사이에 작은 크기로 형성되며, V_1 및 V_2 와 반대인 시계방향으로 회전한다. 한편, 구름요소가 없는 $\theta = -11.25^\circ$ 단면에



(a)



(b)

Fig. 7 Streamlines and pressure contours at two different planes for $n = 10,000$ rpm: (a) $\theta = 0$; (b) $\theta = -11.25^\circ$. Note that contour levels are different between the figures: (a) -1000 ~ 100 Pa; (b) -40 ~ 260 Pa

서는 와류 V_3 가 상대적으로 매우 커지면서 와류 V_2 가 사라진다. 이렇게 대칭면 근처에서 하나의 쌍을 이루는 와류 V_3 는 구(sphere) 주위 유동에서 발견되는 한 쌍의 와류 구조와 유사하다.⁶ 하지만 와류쌍(vortex pair)의 위치가 불규칙하게 발생하는

구 주위 유동과 달리 베어링 내부에서는 와류 V_3 가 항상 구름요소 중심에서 외륜 쪽으로 치우쳐 존재한다. 이러한 차이는 Fig. 7(b)에서 알 수 있듯이 베어링 내륜과 외륜 사이에 존재하는 압력구배에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 베어링에서의 유동 및 열전달 특성을 분석하기 위한 연구의 첫 단계로서, 고속으로 회전하는 베어링 내부의 공기 유동에 대해 수치해석을 수행하였다. 해석결과 외륜 쪽의 압력이 내륜에 비해 높았고, 최저 압력이 구름요소와 내외륜의 접촉점 근처에서 발견되었다. 베어링의 회전으로 발생하는 공기유동, 특히 구름요소 및 내외륜 벽면에서 발생하는 경계층을 잘 예측하였고, 구름요소 표면에서 전단응력이 최대가 되는 위치가 정체점과 관련이 있음을 밝혔다. 또한, 베어링 내부 유동의 3차원 와류 구조를 규명하였는데, 세 개의 와류가 대칭적으로 존재함을 보였다. 이러한 유동 특성은 본 연구에서 고려한 회전속도 범위에서는 공통적으로 발견되었고, 최대압과 최소압의 차이 및 전단응력의 크기는 회전속도가 증가함에 따라 증가하였다. 이상의 연구결과는 향후 베어링 내부에서 일어나는 대류 열전달 과정을 이해하는데 기초자료로서 활용이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 “기계정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술개발”사업의 과제로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Stolarski, T. A., “Tribology in Machine Design,” Butterworth-Heinemann, 1990.
2. Choi, J. K. and Lee, D. G., “Thermal Characteristics of the Spindle Bearing System with a Gear Located on the Bearing Span,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 9, pp. 1017-1030, 1998.
3. Harris, T. A., “Rolling Bearing Analysis, 4th Edition,” John Wiley & Sons, 2001.
4. Bossmanns, B. and Tu, J. F., “A Thermal Model for High Speed Motorized Spindles,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, No. 9, pp. 1345-1366, 1999.
5. Kreith, F., “Convection Heat Transfer in Rotating Systems,” *Advances in Heat Transfer*, Vol. 5, pp. 129-251, 1968.
6. Kim, D., Oh, I.-S., Hong, S.-W. and Kim, K., “CFD Analysis of Air Flowfield Characteristics Inside a Ball Bearing at a High Speed Rotation,” *Proceedings of the KSPE Spring Conference*, pp. 477-478, 2010.
7. Kim, D. and Choi, H., “Laminar Flow Past a Sphere Rotating in the Streamwise Direction,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 461, pp. 365-386, 2002.