한국기계가공학회지, 제13권, 제3호, pp.83～88 (2014.6) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.13 No.3, pp.83~88 (2014.6) ISSN2288-0771 (Online)

http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.3.083

FSI 해석법을 이용한 고속 주축계의 열특성 해석

김수태#, 이석준*, 최영휴**

(# 창원대학교 기계공학과, * 창원대학교 대학원 기계공학과, ** 창원대학교 기계설계공학과)

Thermal Characteristics Analysis of a High Speed Spindle System by Using FSI Method

Soo-Tae Kim#, Seog-Jun Lee*, Young-Hyu Choi**

(Received 1 May 2014; received in revised form 9 May 2014; accepted 26 June 2014)

ABSTRACT

FSI (Fluid Structure Interaction) method, in this study, has been applied to analyzing thermal characteristics of a high speed machine tool spindle system. The spindle is composed of angular contact ceramic ball bearings, a high speed built-in motor, a cooling jacket, and so on. The cooling jacket has three inlets and outlets. Using the FSI method, temperature distributions and thermal displacements of the spindle system were computed considering the heating of the front and rear bearings and the built-in motor. The results computed using the FSI method were compared with those determined by experiment and using the conventional numerical approach. The results determined using the FSI method were similar to those from the conventional numerical approach but showed better agreement with the experimental results. Therefore, it is concluded that the FSI method is useful for analyzing the thermal characteristics of high speed spindles and can be applied to the design of high speed spindles.

Key Words : FSI Method(유체-구조 연성해석기법), High Speed Spindle(고속 스핀들), Heating(발열), Cooling Jacket(냉각 재킷)

1. 서 론

공작기계의 가공 정도에 미치는 열변형을 감소시키기 위해서 초기 설계 단계에서 구조적인 온도 및 열변형 제어와 가공오차 보상이 필요하며, 이를 위해 공작기계의 열적 특성을 정확히 예측하는 것이 중요하다.

주축계의 유동특성과 온도분포, 열변형을 해석하기 위해서는 다물리계의 연성해석인 FSI(Fluid Structure Interaction)해석[1]이 필수적이다. FSI해석은 유동해석을 통하여 얻은 대류열전달계수 및 온도분포를 주축계의 구조에 접목하여 해석함으로서

Corresponding author:
Dept. of Mechanical Engineering, Changwon UNIV.
E-mail : stkim@changwon.ac.kr
* Graduate School of Changwon UNIV.
** Dept. of Mech. Design & Manufacturing Engineering, Changwon UNIV.

냉각재킷의 형상에 따른 냉각성능을 예측하는데 적합하며, 주축계의 발열원인 베어링, 회전자와 고정자 등과의 온도 상호작용으로 인한 온도 분포를 예측하는데 용이할 뿐만 아니라, 구조해석과 결합하여 열변형 해석을 수행할 수 있다는 장점이 있다[2-6].

본 연구에서는 냉각 재킷에 의한 고속 주축의 냉각특성을 FSI 해석과 일반적인 해석을 적용하여 이론적으로 구하고, 이 결과를 실험결과와 비교·분석함으로써 모터를 내장한 고속 주축계의 냉각 및 발열에 따른 열특성을 연구하고자 한다.

본 연구를 통하여 고속 주축의 설계 및 운용시에 효율적인 냉각 재킷을 설계할 수 있고, 이를 통하여 안정적인 주축의 온도분포와 냉각효율 향상으로 경비절감의 효과를 기대할 수 있을 것이다.

2. 주축계의 구조 및 모델링

2.1 주축계의 구조

본 연구에서 사용된 고속 태핑 주축은 주축을 지지하는 전반부와 후반부의 베어링은 접촉각이 15° 인 단열 세라믹 앵귤러 콘택트 볼 베어링을 사용하였으며, 전반부에는 Φ35베어링 2개, 후반부에는 Φ25베어링 2개를 각각 설치하였다. 베어링의 윤활방식은 오일에어 윤활방식을 사용하였으며, 내장형 모터와 스핀들 전반부를 냉각시켜 주기 위해 전·후반부 베어링 상부, 내장형 모터 상부에 각각 냉각 재킷을 설치하여 냉각수를 강제로 순환시킬 수 있는 구조를 하고 있다. Fig. 1은 본 연구의 대상인 주축계의 구조이고, Table 1은 고속주축의 규격을 나타내고 있다.

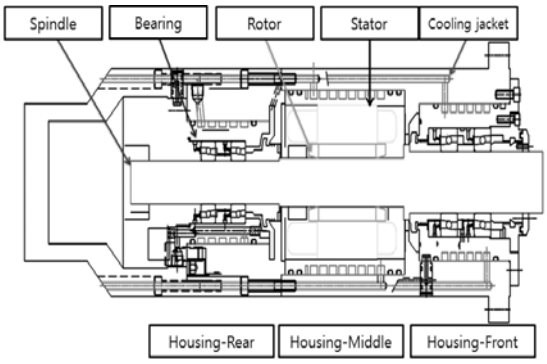

Fig. 1 Schematic diagram of high speed spindle

Table 1 Specification of the high speed spindle

Item		Specification
Motor type		Built in motor
Spindle size		Diameter: 160 mm, Length: 314mm
Spindle speed		Max 35,000 rpm
Bearing	Front	Ceramic angular contact ball bearing(Φ35)
	Rear	Ceramic angular contact ball bearing(Φ25)
Lubrication		Oil air
Cooling method		Cooling jacket

2.2 해석 모델링

주축계의 온도분포와 그에 따른 열변위 해석을 위해 축을 중심으로 회전자, 고정자, 전·후반부 베어링 및 냉각재킷으로 구성하여 주축계를 모델링을 하였다. 베어링의 발열은 이론식에 대입하여 열 유속을 구한 후 전·후반부 베어링의 외륜과 내륜부에 적용하기 위하여, 베어링의 면만을 모델링하였다. 베어링 발열은 주축의 회전에 의한 마찰손실에 의해 일어나므로 마찰 모멘트를 구함으로서 베어링의 발열량을 계산할 수 있다. 앵귤러 콘택트 볼베어링에 대한 자이로스코픽모멘트와 하중과 점성에 의한 동마찰 모멘트를 통하여 주축의 회전수에 따른 베어링 발열량(Q_{total})을 구하였다[7].

$$Q_{total} = Q_{gyroscopic} + Q_{load} + Q_{viscosity}$$

일반 열해석의 경우, 냉각재킷을 따라 흐르는 냉각수의 유량 및 점도에 따른 Nuselt 수를 구하고, 이를 관 내부 유동에 대한 열전달식을 적용하여 계산된 냉각재킷의 대류열전달계수[8]를 적용하여 해석을 수행하였다. FSI 해석에서는 유체와 고체의 연성해석을 위하여 냉각 부위별 개별 입·출구를 가지는 냉각재킷을 Fig. 2와 같이 모델링 하였다.

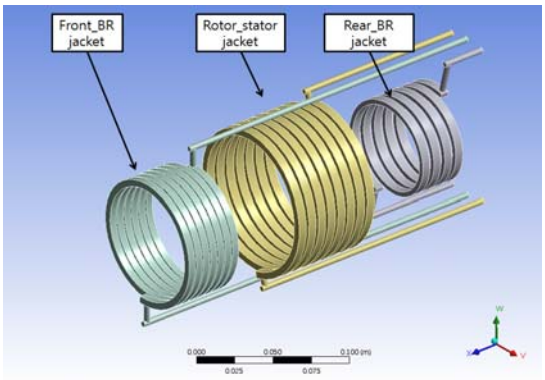

Fig. 2 Cooling jacket model of high speed spindle(Individual inlet & outlet)

3. 실험장치 및 실험방법

열특성 실험에 사용한 주축계를 Fig. 3에 제시하였다. 발열 및 냉각특성 실험의 경우 주축에 부착된 T형 열전대(AEC-5505 Φ5)와 변위센서의 신호는 앰프를 거쳐 데이터 획득장치를 통하여 컴퓨터에 저장된다. 하우징 표면 및 냉각재킷의 입·출구부에 총 열두개의 열전대를 주축표면에 설치하고 주축하우징의 온도를 측정하였다. 주축의 열변위는 변위센서를 이용하여 주축 선단부에서 X, Y, Z축 방향의 변위를 측정하였다. 실험조건으로 냉각수 입구의 온도 19.5 °C, 유량 18 l/min, 그리고, 주축 회전수를 각각 10,000 rpm, 20,000 rpm 30,000 rpm, 35,000 rpm으로 증가시키면서 온도를 측정하고, 35,000 rpm에서 열변위를 측정하였으며, 이때 대기온도는 약 19.5 °C이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 주축계의 온도분포 및 열변위 실험

해석결과와 실험결과를 비교하기 위해 회전수를 변화시키면서 주축계의 온도분포와 열변위를 측정하는 실험을 수행하였다. 주축계의 실험을 통하여 하우징 전반부, 중·후반부의 온도변화를 10초 단위로 측정한 결과를 Fig. 4에 제시하였다.

주축의 회전속도를 10,000 rpm에서 35,000 rpm까지 회전수를 증가시켰으며, 회전수 증가에 따른 온도 상승이 정체되었을 때 다음 회전수로 증가하는 방식을 취하였다. 하우징 외부의 온도는 하우징을 감싸고 있는 냉각재킷의 영향으로 전체적으로 유사하게 상승하고, 3,5000 rpm에서 최고 온도인 21.8 °C로 2 °C정도 상승하는 것을 보여 냉각재킷의 냉각성능이 양호하다는 것을 보여주고 있다. Fig. 5는 회전수에 따른 주축선단부의 온도를 측정한 결과이다. 주축선단의 온도는 실온(19.5 °C)에 대해 각각 약 3 °C, 3.5 °C, 5.5 °C, 6.5 °C 정도 상승하였다.

Fig. 6은 주축 선단부에서 회전수 35,000 rpm인 경우에 X, Y, Z축 방향으로의 열변위에 대한 결과이다. X축은 반경방향, Y축은 베드 쪽의 반경방향 그리고 Z축은 축방향의 열변위를 나타내고 있다. 실험결과 X축 방향으로 4 μm, Y축 방향으로

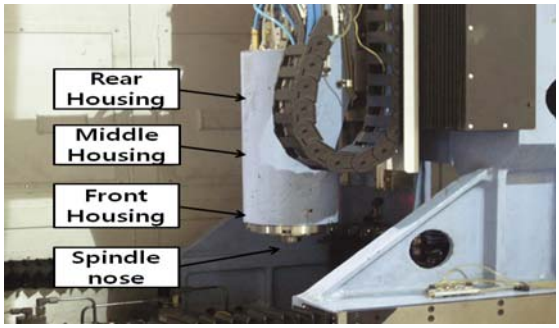

Fig.3 Photograph for spindle system

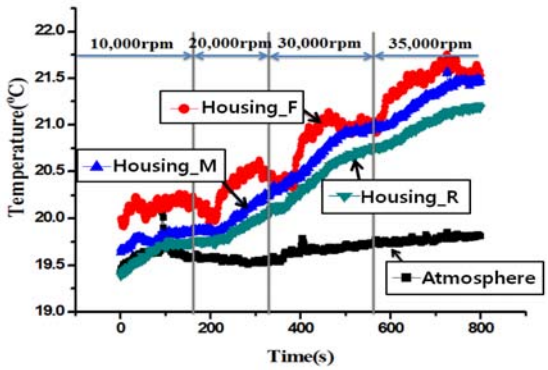

Fig. 4 Temperature increments by experiment at housing

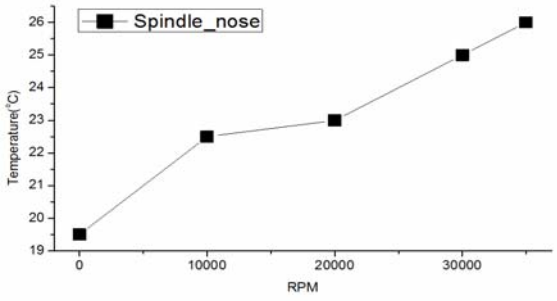

Fig. 5 Measured temperatures at spindle nose

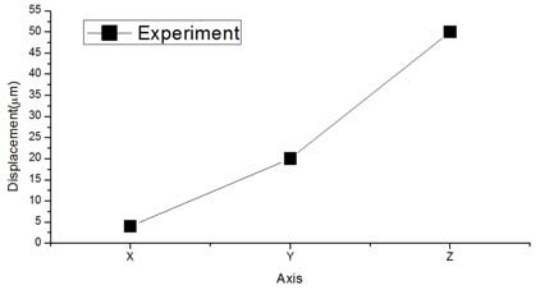

Fig. 6 Thermal displacement by experiment

20 μm, 그리고 Z축 방향으로 약 50 μm의 열변위를 보이고 있다.

4.2 주축계의 온도분포 및 열변위 해석

4.2.1 주축계의 온도분포 해석

냉각재킷의 대류열전달계수를 이론식을 이용하여 구한 뒤 해석에 대입하는 일반 열특성 해석결과를 Fig. 7에 도시하였다.

최고 회전수인 35,000 rpm에 대한 온도분포로 최고 온도는 전반부 베어링 부에서 46.8 ℃로 나타났으며, 이는 대기온도(19.5 ℃)에 비하여 약 27 ℃정도 온도가 상승하고, 하우징의 표면은 냉각재킷의 의해 충분히 냉각되는 것을 확인할 수 있다.

4.2.2 주축계의 FSI 적용 온도분포 해석

다물리계 연성해석인 FSI해석을 적용하여 얻은 해석결과를 Fig. 8에 도시하였다. 베어링, 회전자와 고정자의 발열은 동일한 조건하에 수행하였으

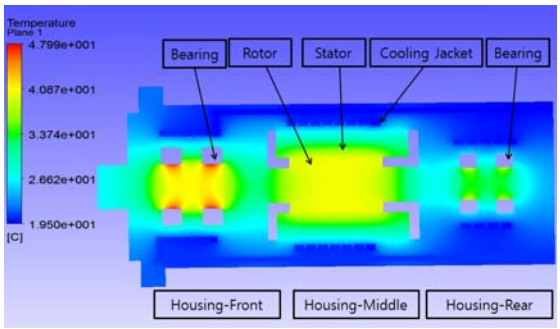

Fig. 7 Computed temperature distribution by using FSI analysis

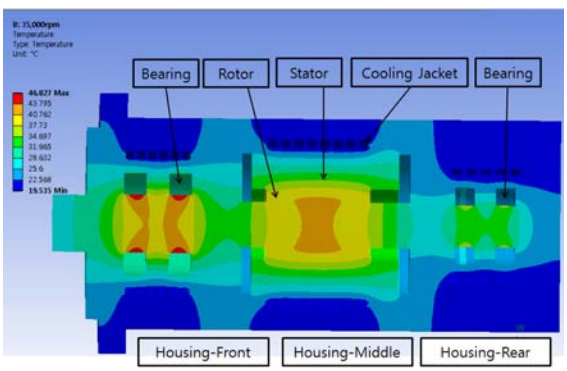

Fig. 8 Computed temperature distribution by using conventional numerical analysis

며, 해석에 사용한 냉각유량은 실험과 동일한 18 l/min을 사용하여 해석을 수행하였다. 최고 회전수인 35,000 rpm에서 최고 온도는 전반부 베어링 부에서 48 ℃로 나타났으며, 이는 대기온도에 비하여 약 28.5 ℃정도 온도 상승이 있고, 일반 열특성 해석과 유사한 결과를 보이는 것을 알 수 있다.

4.2.3 주축냉각에 따른 온도 및 열변위 해석 및 실험결과의 비교

주축계의 온도분포 해석결과와 실험결과를 비교하기 위하여 Fig. 9에 냉각조건에 따른 전반부 하우징과 주축 선단부의 온도 분포를 비교하였다. 하우징과 달리 주축선단부의 경우 10,000 rpm에서 실험과 해석결과 사이에 약 1.5 ℃의 차가 나타나

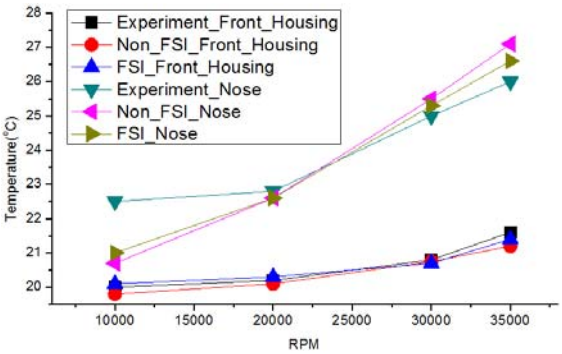

Fig. 9 Comparison of temperature distributions by experiment and numerical analysis

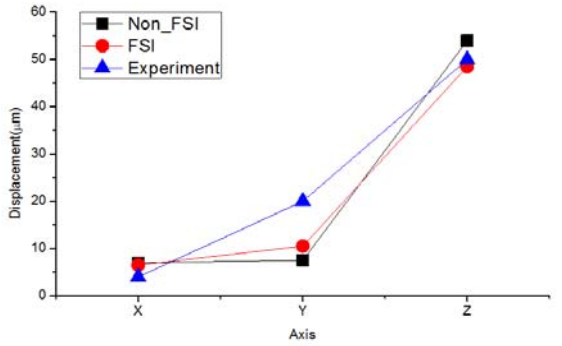

Fig. 10 Comparison of thermal displacement by experiment and numerical analysis

는 것을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 5의 결과에서 보듯이 실험과정에서 0 rpm에서 10,000 rpm으로 가속되면서 베어링 등이 자리를 잡으며 안정화되는 과정에서 주축온도의 급격한 상승으로 해석과는 다른 조건에 의하여 발생된 오차라 할 수 있다. 대체적으로 일반 열해석, FSI 해석 모두 실험과 유사한 온도 분포를 보였으나, FSI 해석이 실험과 좀 더 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

회전수 35,000 rpm에서 주축 선단부의 열변위에 대한 실험, 일반 열해석 및 FSI 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. Y축의 열변위 실험과 해석결과가 약 10 μm의 차이를 보이는데, 이 결과는 해석을 수행할 때 주축이 Y축 방향으로 베드에 구속되어있는 부분을 생략하고 모델링하여 나타난 결과이다. 전체적으로 해석결과와 실험결과가 비슷한 결과를 보이고 있으며, FSI해석 결과가 일반 열해석 결과보다 실험결과를 잘 예측하는 것으로 나타나고 있다.

5. 결론

본 연구는 FSI 연성 해석기법을 활용하여 고속주축계의 열특성 해석을 수행하였고, 이를 일반 열특성해석 및 실험결과와 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) FSI 연성 해석과 일반 열해석 결과를 실험과 비교한 결과 하우징외부의 온도분포, 주축 선단부의 온도 및 열변위 모두 유사한 결과를 보였으며, 두 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

(2) FSI 연성해석 결과가 실험결과를 좀더 정확하게 예측하는 것으로 나타나고 있는데, 이로부터 발열에 따른 냉각효과를 유동과 구조의 직접적인 연동해석을 통하여 해석함으로써 보다 정확한 열특성 해석이 가능한 것으로 판단된다.

(3) 본 연구를 바탕으로 주축의 발열 및 냉각에 따른 열특성 해석을 수행하는 경우, FSI 연성해석을 적용하여 보다 정확한 해석을 수행할 것으로 예상되며, 효율적인 고속주축 설계에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

“이 논문의 일부는 2013~2014년도 창원대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Lee Sang-Gab, Nan Jae-Hyung, Kim Jin-Kyung, ZHAO Tuo "LNGC_Iceberg Collision Respinse Analysis using FSI Analysis Technique" 2012.
2. D. B. Choi, S. H. Jung, Y. K. Kim, S. T. Kim, "Thermal Characteristics according to the Internal Cooling of the High Speed Spindle", Proceedings of KSMPE Autumn Conference pp.

281-285, 2004

3. Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons, Inc., 2001.
4. A. Muramatsu, S. Nakamura, H. Yoneyma and O.Iwasaki, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle.", NSK Technical Journal, No. 658, pp. 32～39, 1994.
5. YUNUS .A CENGEL, "Heat Transfer International Edition", McGrawHill
6. Bernd Bossmanns, Jay F. Tu, “A Power Flow Model for High Speed Motorized Spindles - Heat Generation Characterization”, ASME J. of manufacturing science and engineering, Vol. 123, No. 3, pp. 494～505, 2001.
7. DaeBong CHOI, SooTae KIM, SungHun JUNG, YongKee KIM, "Thermal Characteristics of the High Speed Motor Spindle by the Variation of Bearing Preload and Cooling Conditions", Machine engineering, Vol. 4, No. 1-2, 2004.
8. Frank Kreith, Mark S. Bohn, "Principles of Heat Transfer", West Info Access Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress", Proc. of the 2th International Conference on Shot peening, Vol. 1, Chicago, pp. 316-331, 1984.