고속주축의 열변위 측정 및 예측 시스템

Thermal Displacement Monitoring and Prediction System of High-Speed Spindle

*임정숙[1], 정원지[2], 이정환[1], #이춘만[2]
*J.S. Lim[1], W. J. Chung[2] , #C.M. Lee[3] (cmlee@changwon.ac.kr)
[1] 한국기계연구원 부설 재료연구소, [2]창원대학교 기계설계공학과

Key words : High-speed spindle, Thermal displacement, Thermal error model

1. 서론

제품 생산에서 고정밀·고생산성을 추구하기 위해서, 주축의 고속화는 필연적이다. 이러한 초고속 주축의 움직임이 용이하기 위해서 주축의 구조는 필연적으로 내장형 모터로 구동되는 형태가 된다. 모터 내장형 주축은 구조가 간단하고 벨트, 기어 등의 고속에서의 문제점을 해결할 수 있는 반면, 구동 시 내부 발열로 인한 열변형 문제의 개선이 중요한 과제로 부각되고 있다[1-7].

고속 주축에서 제품의 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 발열과 열변형 문제를 해결하기 위해 주축의 열특성을 정확히 예측하는 것이 중요하기 때문에, 주축의 냉각과 베어링의 예압의 방법과 조건을 설정하는 연구가 선행되어져 오고 있다[1-3].

이러한 연구 뿐만 아니라, 고속주축의 열변형에 관한 문제를 소프트웨어적으로 해결하려는 노력 또한 진행되고 있다. 선행된 연구들을 살펴보면, 신경망(artificial neural network)[4], 열모델(thermal error mode)[5], 그리고 퍼지로직(fuzzy logic)[6] 등을 이용하여 범용 주축의 열변형을 예측하려는 연구가 수행되었지만 이는 기어나 벨트로 구동되는 스핀들에서만 만족스러운 결과를 도출하였다. 하지만 Jeng-Shyong Chen[7]은 그의 논문에서 hybrid-variables dynamic thermal error model을 설계하고 실험에 적용하여 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 National Instrument사의 LabVIEW라는 언어를 사용하여 고속주축의 열변위 모니터링 시스템을 구축하고, hybrid-variables dynamic thermal error model을 적용한 고속주축의 열변위 모니터링 시스템을 재구성하였다. 이렇게 구축된 시스템으로 고속주축의 열변위를 측정 또는 예측함과 동시에, 제품 가공 시 주축의 축방향 길이변화의 정도를 feed-back하여 제품의 가공정밀도를 향상시키고자 한다.

Fig. 1은 본 연구를 통해 열변위 특성을 측정하고자 하는 초고속 주축의 개략도 이다. 이 고속주축은 기존의 벨트나 기어로 구동되는 스핀들과는 달리 주축을 구동하는 모터가 회전축에 직접 부착되어 있는 형태이기 때문에 주축의 온도상승에 직접적인 영향을 미친다. 주축이 고속으로 회전하게 되면 이를 지지해 주는 베어링 또한 고속으로 회전하게 되는데 여기에서 발생하는 열 또한 베어링의 조합을 변하게 만들고, 또 다른 발열의 원인이 되게 된다. 또한 원심력과 열팽창 때문에 모터부의 로터와 스테이터의 간격도 변하게 된다. 그러므로, 열 발생량과 열전도 특성은 시간에 따라 틀리며, 비선형적으로 변하게 된다.

고속주축의 이러한 비선형적인 열특성과 복잡한 형상 때문에 주축의 거동을 측정하기 위해서는 여러 가지의 센서들이 필요하게 되며, 이러한 센서들은 설치가 까다롭기 때문에 주축 가공 시 가공유연성에 영향을 미칠 수 있다. 하지만 Jeng-Shyong Chen[7]의 hybrid-variables dynamic error model을 적용하게 되면 예비실험을 통하여 주축에 대한 모델을 설계하고 주축에 부착되어져 있는 온도만을 측정함으로써 고속 주축의 열변위를 산출할 수 있다.

2. 열변위 측정 및 예측 시스템의 구성

2. 1 실험장치의 구성

Fig. 1에 설계된 고속 주축의 열변형, 회전속도 및 온도를 측정하기 위해서 아래의 Fig. 2와 같이 고속주축을 실험용 선반에 설치하고 관심이 되는 위치에 센서들을 장착하였다. 각 센서에서 출력되는 데이터들을 실시간으로 수집하기 위하여 National Instrument사의 LabVIEW라는 언어를 사용하여 Data Acquisition Program을 작성하였다.

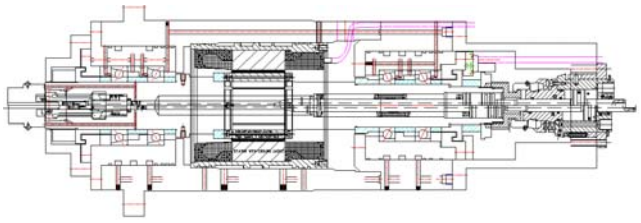

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed spindle

Fig. 2 Installation for experiment

2. 2 Thermal error model

Jeng-Shyong Chen[7]이 설계한 hybrid-variables dynamic thermal error model은 온도측정, 회전속도, 열변위가 복합적으로 작용하는 모델이며, 이들이 입력 변수가 되게 된다. 이 모델은 다음의 식(1)과 같다.

$$y(t)=\frac{q^{nk_1}B_1(q)}{F_1(q)}Z_1(t)+\frac{q^{nk_2}B_2(q)}{F_2(q)}T_1(t)+\frac{q^{nk_3}B_3(q)}{F_3(q)}S(t)+e(t) \quad (1)$$

여기에서, $y(t)$: 열변위 측정값
t : 전체 데이터 취득 시간 중 한 시점의 시간
$T_n(t)$: t 시간에서의 n번째 센서의 온도
$e(t)$: 모델의 무작위 에러
q : 딜레이 오퍼레이터
S(t) : t 시간에서의 스핀들의 회전속도
Z(t) : t 시간에서의 열변위
nk_i: 온도센서로 측정된 i번째 온도의 딜레이 수
$B_i(q)/F_i(q)$: 열변위 측정값 $y(t)$와 온도센서로 측정된 i번째 온도($T_i(t-nk_i)$) 사이의 전달함수이다.

3. 실험결과

Fig. 2와 같이 고속주축에 데이터들을 취합할 수 있는 센서들을 설치하였고, LabVIEW로 작성된 데이터 취득 프로그램으로 각종 센서에서 발생하는 신호를 수집하고 이 데이터들을 Fig. 3와 Fig. 4에 각각 나타내었다. Fig. 3는 실내온도, 전·후면 베어링 온도, 쿨링 in, out 및 주축의 회전속도데이터들을 나타내고 있다.

Fig. 4는 주축의 회전속도에 따른 주축 선단부의 X, Y, Z 축의 열변위를 나타내고 있다. 주축의 회전속도에 따른 주축 열변위의 상관관계를 파악하기 위하여 회전속도와 그 속도에서의 유지시간은 랜덤으로 실시하였다.

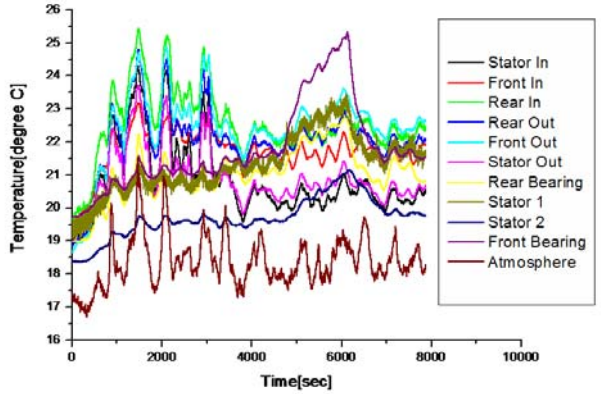

Fig.3 Temperature variation of each part

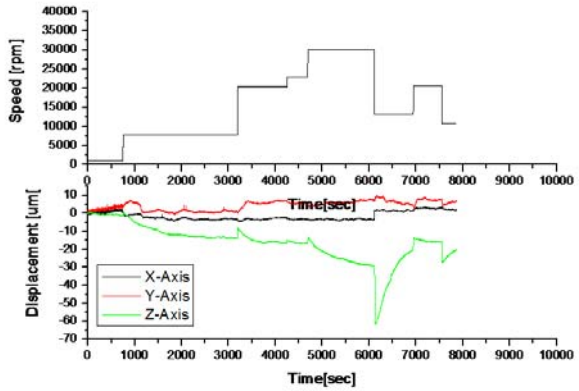

Fig. 4 Thermal displacement of X, Y and Z axis

위의 실험을 통해 취득한 각 센서들의 데이터들 중 Jeng-Shyong Chen[7]의 hybrid-variables dynamic thermal error model에 적용하기 위하여 공작물의 가공정밀도에 가장 큰 영향을 미치며, 주된 관심의 대상이 되는 Z축의 열변위[Z]와 주축선단부의 열변위에 직접적인 영향을 미치는 베어링의 온도[T], 주축의 회전속도[S]를 각각 error model의 변수로 선정하고 이들을 설계된 hybrid-variables dynamic thermal error model에 적용하였다.

Fig. 5는 hybrid-variables dynamic thermal error model을 통해 산출된 Z축의 열변위와 실제 실험을 통하여 측정된 Z축의 열변위를 나타내고, 이들의 각 데이터에 대한 편차를 나타낸 것이다. Fig. 5의 그래프를 통해서 이 hybrid-variables dynamic thermal error model이 정확한 데이터를 도출한다고 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 제품의 가공정밀도에 지대한 영향을 미치는 40,000rpm 고속 주축의 회전수에 따른 주축의 축방향 길이 변화를 예측하기 위하여 각종 센서들의 데이터를 취합할 수 있는 데이터 취득 시스템을 구성하였으며, 취합된 데이터들로 고속주축의 열변위를 예측하기 위하여 Jeng-Shyong Chen[7]이 설계한 hybrid-variables dynamic thermal error model을 적용하였다.

Hybrid-variables dynamic thermal error model을 이용한 주축의 열변위 예측으로 에러 오차평균이 2.7756×E-17 ㎛인 열변위 데이터를 계산할 수 있었다.

이렇게 구축된 시스템으로 고속주축의 열변위를 측정 또는 예측함과 동시에, 제품 가공 시 주축의 축방향 길이변화의 정도를 feed-back하여 제품의 가공정밀도를 향상시킬 수 있다.

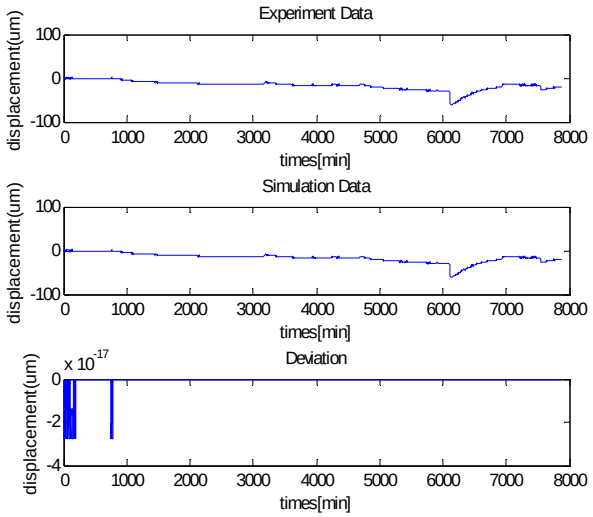

Fig. 5 Comparison of measurement and estimated data

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김수태, 김재실,최대봉,김진한,정동수,"예압과 냉각방식에 따른 고속주축의 온도분포 및 열변형 해석," 공업기술연구논문집, 5, 13-18, 2005.
2. 김수태,최대봉,"고주파 모터 내장형 주축의 냉각특성 해석," 한국공작기계학회,춘계학술대회논문집, 278-283, 2002.
3. 최대봉,최대봉,정성훈,김진한,김용기,"예압과 냉각조건에 따른 고주파 모터 내장형 주축계의 열특성," 한국공작기계학회,14, 31-36, 2005.
4. J.S. Chen, J. Yuan, J. Ni, "Thermal error modeling for real-time error compensation," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 12, 266-275, 1996.
5. J.S. Chen, J. Yuan, J. Ni, " Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center," International Journal of Machine Tool and Manufacture, 39, 1367-1381, 1999.
6. J.-H. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Yang, "Thermal error modeling of a horizontal machining center using fuzzy logic strategy," Journal of Manufacturing Processes, 3,120-127, 2001.
7. J.S.Chen, W.Y.Hsu, “Characterizations and models for the thermal growth of a motorized high speed spindle. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43(2003) 1163-1170.