

## 전자기 가진기를 이용한 스피indle 불평형 진동 보상

안재삼\*(광주과학기술원 기전공학과), 김선민(광주과학기술원 기전공학과),  
이선규(광주과학기술원 기전공학과)

### Vibration Compensation due to Spindle Unbalance using An Electro Magnetic Exciter

J. S. An(Mechatronics Eng. Dept. K-JIST), S. M. Kim(Mechatronics Eng. Dept. K-JIST),  
S. K. Lee(Mechatronics Eng. Dept. K-JIST)

#### ABSTRACT

When the spindle is rotated for machining the workpiece, the vibration is generated due to the spindle unbalance. This vibration affects surface finish, dimensional accuracy, tool life, and spindle bearings. To compensate this effect of the spindle unbalance, the spindle system using an EME(electromagnetic exciter) is proposed in this paper. In the proposed spindle system, the vibration due to the spindle unbalance is monitored using vibration sensors and is compensated by electromagnetic attractive forces generated in the EME which are excited by anti-direction forces corresponded with the measured unbalance. Firstly, the spindle system using an EME and control system are constructed to compensate the effect of spindle unbalance in this paper. And then the system is modeled by bond graph to analyze the system. Finally, a controller for vibration compensation due to spindle unbalance is designed and is implemented in real experimental system. As a result, experimental results show this proposed spindle system is very effective to compensate the spindle unbalance.

**Key Words** : vibration compensation(진동보상), EME(electro magnetic exciter) (전자기 가진기), spindle unbalance(주축 불평형), bond graph(본드그래프)

#### 1. 서론

공작기계를 이용한 절삭가공 작업에서 스피indle 자체의 불평형에 의한 진동이나 공구와 공작물 사이의 상대진동(혹은 체터 진동) 등의 현상이 발생한다<sup>1</sup>. 이러한 진동은 공작물의 가공정도에 치명적인 영향을 미친다. 본 논문에서는 이러한 요인들의 의한 진동 중 특히 스피indle 자체의 불평형에 의한 진동에 중점을 둔다.

일반적으로 스피indle 자체의 불평형에 의한 효과를 보상하기 위해서 불평형을 진동센서로 모니터링하여 불평형과 반대되는 방향에 편심 질량을 부가하여 진동을 제거하는 방식이 사용되었다<sup>2</sup>. 그러나, 이러한 방식은 공작기계 제작 초기에 주로 행해지며 이로 인해 장시간 운전등에 의한 스피indle 시스템의 변형등에 의하여 생기는 추가적인 편심은

제거하기가 어렵고 제거할 수 있다 하더라도 수작업에 의해 수행해야 하기 때문에 매우 번거롭게 된다.

이러한 결점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 전자기 가진기를 이용한 스피indle 시스템을 제안한다. 본 연구에서 스피indle 자체의 불평형에 의한 진동을 보상하기 위해 사용되는 전자기 가진기는 비접촉으로 가진력을 가할 수 있으며 또한 마모가 없고 가진 주파수와 진폭을 유연하게 변화시킬 수 있어 액츄에이터용으로 쉽게 사용할 수 있는 특징이 있다<sup>3</sup>. 그러므로 이러한 가진기를 액츄에이터로 사용하여 스피indle 불평형에 의한 진동 보상 시스템을 구축한다. 이 진동 보상 시스템은 전자기 가진기를 이용한 스피indle 시스템과 제어기로 구성 되며 여기에 보상 제어기를 구현하여 실제 시스템에 적용한다. 또한 전자기계와 기계계로 이루어진 복합

적인 연계장 해석에 유용한 본드 그래프 기법을 이용하여 시스템을 모델링하고 수치해석적인 방법에 의하여 시스템을 시뮬레이션한다<sup>4</sup>.

본 논문에서는 스피들이 3000[rpm]정도로 회전시 불평형에 의한 진동을 보상하는 것을 목표로 한다.

## 2. 시스템 구성

전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템은 스피들 불평형에 의한 진동을 보상하는데 적용된다. 이를 구현하기 위해 전자기 가진기를 이용한 스피들 불평형에 의한 진동을 보상하기 위한 시스템은 전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템과 제어계로 구성된다.

전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템은 전형적인 스피들 베어링 시스템에 전자기 가진기를 부가하여 Fig. 1 과 같이 구성된다. 여기서 전자기 가진기는 4 개의 각각의 독립된 전자석으로 구성되며 스피들 방사방향에 상하좌우로 90도 간격으로 배열되며 각각의 전자석은 두개의 자극을 한쌍으로 하여 구성된다. 또한 8 개의 자극은 NNSSNNSS 의 자극 배열로 배치된다.

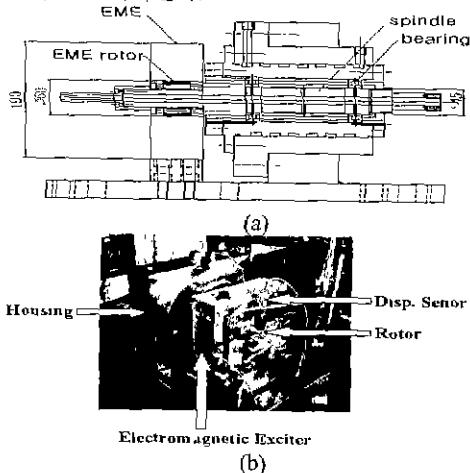


Fig.1 Spindle system using an EME  
(a) Schematic diagram (b) photo

다음 Table 1 은 본 논문에서 제작된 전자기 가진기의 사양이다.

Table 1 Specification of EME magnet

Parameter	Value
Inner diameter	φ61 mm
Outer diameter	φ160 mm
Core thickness	30 mm
Core material	SE14C
Lamination thickness	0.5 mm
Air gap	0.5mm
No of turns	320 turns
Pole face area	350 mm <sup>2</sup>

Magnetic coil thickness	φ0.9 mm
Coil resistance	3.5Ω

스피들 불평형 보상 시스템의 제어계는 전자기 가진기 각 전자석의 권선에 흐르는 전류측정을 위한 4 개의 CT(current transformer, LA25-J.P. LEM CO.)와 스피들의 x 축과 y 축 방향에서의 변위 측정용 2 개의 정전형 변위센서, 전력증폭용 IGBT 컨버터, 실시간 제어를 구현하기 위한 DSP based controller board(DS1102,dSPACE co.), 그리고 Pentium 100 IBM PC 로 Fig. 2 와 같이 구성된다.

여기서, 변위센서(정전형 변위센서)는 스피들의 방사방향의 변위를 비접촉으로 측정하는 것에 의해 전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템에서 스피들의 방사방향 제어를 위해 필수적이다. 그리고, 전류센서(CT)는 전자력을 제어하기 위해 전자석 각각의 권선 전류를 측정하기 위해 사용된다.

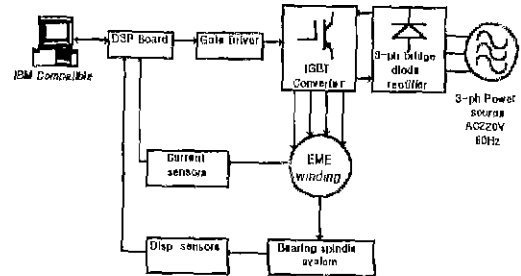


Fig. 2 Block diagram of control system configuration

또한, IGBT 컨버터는 지능형 스피들 시스템의 제어기에서 발생하는 제어신호에 따라 전자기 가진기의 전자석에 전력을 증폭하여 공급해 주는 역할을 한다. 이 컨버터는 전력용 스위치를 이용한 증폭기로서 PWM(pulse width modulation) 스위칭 기법에 의해 구동되며 본 논문에서 사용된 컨버터는 Asymmetric 타입의 컨버터이며 스위칭 주파수는 22[kHz]이다. Fig. 3 은 Asymmetric 타입의 컨버터의 회로도이다.

Asymmetric 타입 컨버터의 특징은 제어의 다양성이 뛰어나고 각상의 전류제어가 독립적이어서 두상의 전류중첩이 가능하다. 고전압, 대용량에 적합하며 스위치의 정격전압이 상대적으로 낮다. 그러나 상당 스위치 수가 두개가 필요하고 그에 따르는 제어 및 드라이브 회로의 증가, 상당 스위치에 대한 드라이브의 전원이 각각 절연되어야 하는 번거로움이 있다<sup>5</sup>.

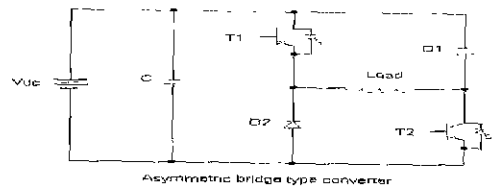


Fig. 3 Circuit diagram of asymmetric bridge type converter(1ph.)

### 3. 모델링 및 시뮬레이션

이 절에서는 스핀들 불평형으로 인한 진동을 보상하기 위해 제작된 전자기 가진기를 이용한 스핀들 시스템을 모델링하고자 한다. 본 연구에서 제안된 스핀들 시스템은 기존의 스핀들 시스템으로 이루어진 기계체와 여기에 부가된 전자기 가진기에 의한 전자기계의 조합으로 구성된 복합 시스템이므로 이러한 복합시스템 해석에 유용한 본드 그래프 기법을 이용하여 모델링을 수행한다<sup>4</sup>.

시스템을 모델링하기 위해 다음과 같은 가정들을 한다<sup>3</sup>.

- i) 전자석의 누설자속은 무시한다. ii) 전자석의 자속은 포화되지 않는다. iii) 와전류의 영향은 무시된다. iv) 모든 전자석의 구조가 대칭이다. v) 회전체는 강체라고 가정한다. vi) 불베어링은 선형 스프링-감쇠기 배열로 근사 시킨다.

Fig. 4는 두개의 볼 베어링과 강체의 회전축으로 구성된 스핀들 시스템의 개략도이다.

여기서,  $V_1, V_g, V_2, V_3, V_4$ 는 각 지점에서의 속도[m/s]이고,  $W$ 는 회전체의 각속도[rad/s]이며,  $r_1, r_2, r_3, r_4$ 는 회전체 무게 중심으로부터의 각 위치에서의 거리[m],  $M, J$ 는 회전체의 질량[kg]과 회전체의 관성 모멘트[kg·m<sup>2</sup>],  $K_{yf}, K_{yr}$ 는 전·후부 베어링의 강성계수[N/m],  $C_{yf}, C_{yr}$ 는 전·후부 베어링의 감쇠계수[Ns/m],  $F(t), F_{me}(t)$ 는 각각 스핀들 불평형에 의한 편심과 전자기 가진력[N]이다.

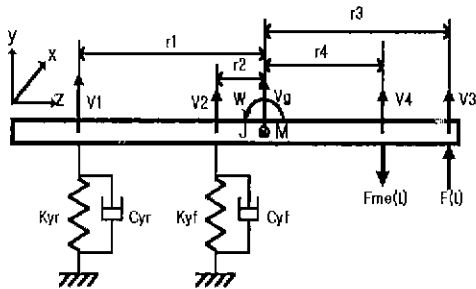


Fig. 4 Schematic diagram of the spindle bearing system

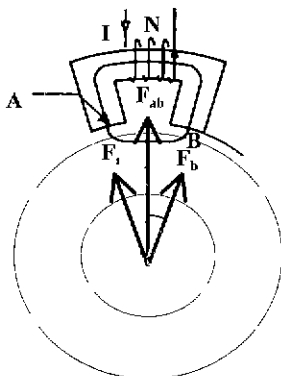


Fig. 5 Schematic diagram of an EME

Fig. 5는 전자기 가진기의 전자석 1개와 회전자로 간략화된 전자기 가진기의 개략도이다.

가정 (i)와 (ii)를 고려하면, 공극에서의 전자력(F)과 자속밀도(B) 사이의 관계식은 식 (1)-(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_a = F_b = \frac{B^2 A}{\mu_0} \quad (1)$$

$$F_{ab} = 2F_a \cdot \cos(\theta) \quad (2)$$

자속밀도(B)는 식 (3)과 같이 권선에 흐르는 전류 (i)와 공극(g)의 관계로 표현된다.

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2g} \quad (3)$$

전자기 가진기에 의해 발생하는 실제 전자기력은 가정에서 무시한 누설요소들을 고려하여 교정 계수( $\alpha$ )를 곱하여 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$F_{real} = \alpha \cdot F_{ab} = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{\mu_0 N^2 A}{4g^2} \cdot i^2 = ki^2 \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ (=0.7 by FEM analysis<sup>6</sup>)는 교정 계수, 편 의상 상수  $k$  ( $k = 2 \cdot \alpha \cdot \frac{\mu_0 N^2 A}{4g^2}$ )를 정의하고,  $F_a,$

$F_b$ 는 전자석의 각 극에서의 전자력[N/pole],  $F_{ab}$ 는 전자석의 합력[N/magnet],  $F_{real}$ 는 한 개의 전자석에서 실제 발생하는 힘[N],  $B$ 는 공극에서의 자속밀도 [wb/m<sup>2</sup>],  $\mu_0$ 는 공기 중에서의 투자율(=4 $\pi$ ×10<sup>-7</sup> [H/m]),  $A$ 는 자극 면적[m<sup>2</sup>/pole],  $N$ 은 권선수,  $g$ 는 공극[m],  $i$ 는 권선전류[A]이다.

전자기 가진기의 권선에 흐르는 전류는 식 (5)에 의하여 결정된다.

$$e = Ri + \frac{d}{dt} Li \quad (5)$$

여기서,  $R, L$  ( $L = \frac{\mu_0 N^2 A}{2g}$ )은 각각 권선의 저항과 인덕턴스이고,  $e, i$ 는 권선에 인가되는 전압과 권선에 흐르는 전류이다.

Fig. 6은 전자기 가진기를 이용한 스핀들 시스템의 본드 그래프 모델링을 보여준다.

Fig. 6은 전자기 가진기를 이용한 스핀들 시스템의 본드 그래프 모델링을 보여준다.

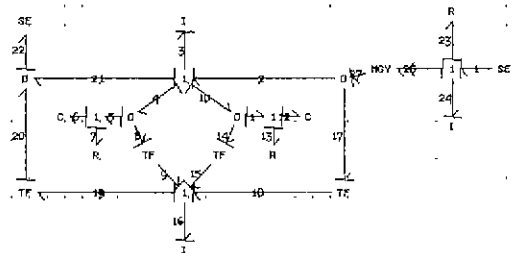


Fig.6 The bond graph modeling of the spindle system using an EME(by CAMP-G)

Fig. 7은 수치적인 해석에 의해 시뮬레이션한 그림을 보여준다.

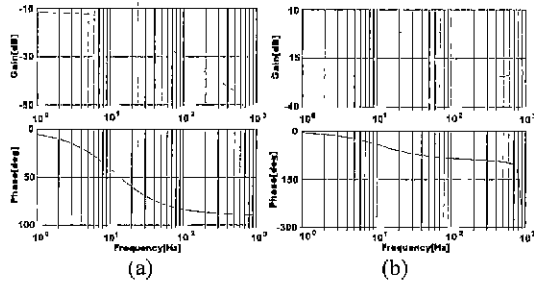


Fig. 7 Bode plot (a) V-I plot of EME winding (b) V-Y bode plot of intelligent spindle system(by ACSL)

Fig. 7은 전자기 가진기를 이용한 스펀들 시스템의 주파수 응답을 보여준다. 여기서 Fig. 7(a)는 전자기 가진기 권선의 전기적인 특성을 나타내 주는 보드 선도이고 Fig. 7(b)는 전자기 가진기를 이용한 스펀들 시스템의 전압과 변위에 관련된 게우프에 의한 응답특성을 보여주는 보드 선도이다. 전체 시스템은 Fig. 7(b)에서 보이는 것처럼 5개의 극점(-72[rad/s], -272.2±j5205.6[rad/s], -1970.3±j13426[rad/s])과 2개의 영점(-1341.6 ± j11155.6 [rad/s])을 가짐을 알 수 있다. 여기서, 두개의 극점(-72[rad/s], -272.2±j5205.6 [rad/s])이 시스템의 특성을 좌우하는 지배적인 근들이다. 특히, 극점(-72[rad/s])는 전자기 가진기 권선의 전기적인 특성을 나타내며 나머지 극점(-272.2±j5205.6[rad/s])는 스펀들 베어링 시스템의 기계적인 특성을 나타낸다. 시스템의 대역폭은 약 10[Hz] 정도이며 주파수가 증가함에 따라 위상 지연이 증가하게 된다. 결과적으로, 전체 시스템의 응답은 느리고 불안정해지기 쉬운 시스템이다. 그러므로 제어기는 대역폭과 위상 지연을 고려하여 설계되어야 함을 알 수 있다.

#### 4. 제어기 설계 및 실험 결과 고찰

##### 4.1 제어기 설계

Fig. 8는 스펀들 불평형에 의한 진동을 보상하기 위한 y축에 대한 제어기의 블록 다이어그램이다. 제안된 제어기는 궤환 전류제어기와 궤환 변위제어기로 구성되어 있다. 여기서,  $K_{ifb}$ ,  $K_{yfb}$ 는 전류 및 변위 궤환 이득이고,  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$ 는 전류제어기와 변위 제어기의 이득이며,  $K_{cb}$ 는 컨버터 이득이고,  $v_i, i, f, y, y_{ref}$ 는 각각 권선 입력 전압, 권선에 흐르는 전류, 전자기 가진기에 의해 발생하는 전자력, y축의 변위와 y축의 기준 명령이고,  $G_{EW}(s)$ ,  $G_{EM}(s)$ ,  $G_{SB}(s)$ 는 전자기 가진기 권선의 전기회로의 전달함수, 가진기의 자기계와 회전체와의 전달함수, 그리고 스펀들 베어링 시스템의 기계계의 전달함수이다.

본 논문에서 제작된 실제 시스템에서 제어기의 이득은 시행착오법에 의하여 실험에 의해 최적의

값이 구해 졌다.

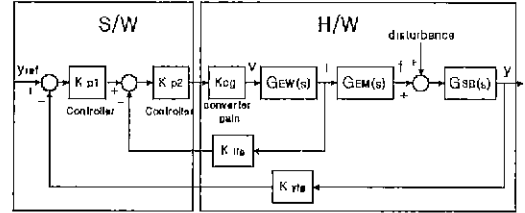


Fig. 8 Block diagram of vibration compensation controller due to spindle unbalance about y-axis

##### 4.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 9~10은 입력으로 Swept sine 신호를 주고 출력으로 전류와 변위신호를 받아 동적신호분석기(HP35670A)를 이용한 신호처리에 의하여 얻어진 주파수 응답 특성이다.

Fig. 9(a)는 게우프 시 전자기 가진기 권선의 전기회로적 특성인 V-I 보드 선도이며 Fig. 9(b)는 궤환 전류제어기로 제어시의 V-I 보드 선도이다.

전자기 가진기의 권선은 -12[Hz]에서 하나의 극을 가지고 이득 값은 20.7이라는 것을 Fig. 9(a)에 의해 알 수 있다. 이 데이터는 권선이 저항(R)이 3.5[Ω]이고 인덕턴스(L)은 48[mH]임을 의미한다.

이것은 시스템의 반응 속도가 매우 느리고 또한 나쁜 위상 지연으로 인해 안정도가 나빠지기 쉽다는 것을 보여준다.

이러한 결점을 보상하기 위하여 궤환 전류제어기가 설계되었고 이득은 실험을 통하여 얻어 졌다. 그 결과로서, 대역폭은 약 1[kHz] 정도로 증가하였고 위상 지연이 보상되었다. 그럼에도 불구하고, 약 100[Hz]이상의 주파수 대역에서는 주파수 증가에 따라 위상 지연이 증가하게 되어 시스템의 안정도를 해치는 결과를 초래하는 문제를 일으킨다.

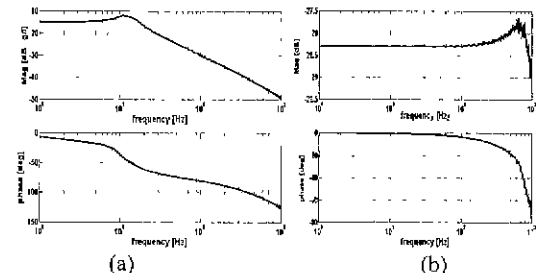


Fig. 9 V-I bode plot of EME winding (a) open loop (b) current feedback control

Fig. 10(a)는 전자기 가진기를 이용한 스펀들 시스템의 V-Y 보드 선도이다. 이 그림으로부터 대역폭은 4[Hz]이고 이득은 14.195이며 또한 3개의 극점(-6.33[rad/s], -286.47±j5382.8[rad/s])과 2개의 영점(6374.2 ± j7919.1[rad/s])이 존재함을 알 수 있다. Fig. 10(b)는 궤환 전류제어기와 궤환 변위제어기를 포함한 전체 시스템의  $Y_{ref}$ -Y 보드 선도를 나타낸다.

이로부터 전체 시스템은 2개의 극점(-921.5±j1852[rad/s])과 2개의 영점(1092±j4453[rad/s])이 존재하며 대역폭은 약 385[Hz]임을 알 수 있다.

이 결과는 시스템의 응답성능은 매우 빨라졌다는 것을 알 수 있으나 주파수 증가에 따른 위상 지연의 증가에 의해 약 100[Hz]이상에서 주파수 대역에서는 시스템의 안정성에 문제가 있다는 것을 보여 준다.

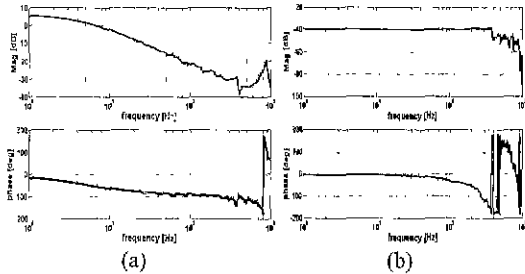


Fig. 10 Frequency response of spindle system using an EME (a) V-Y bode plot at open loop (b)  $Y_{ref}$ -Y bode plot with vibration compensation controller due to spindle unbalance

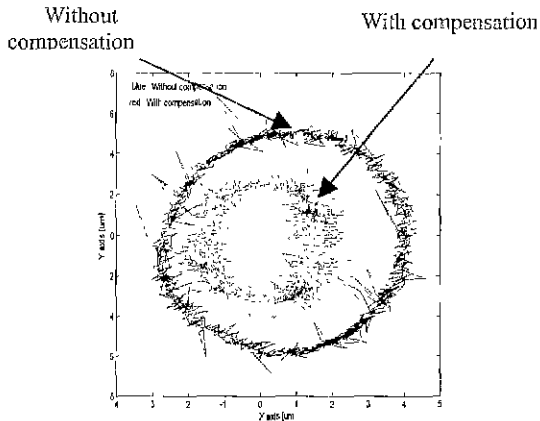


Fig. 11 Vibration compensation result due to spindle unbalance (vibration 50[Hz] in 3000 rpm)

Fig. 11은 스피들 불평형에 의해 발생된 진동을 전자기 가진기를 이용하여 보상한 결과이다. 여기서 실험 결과는 본 연구에서 사용된 스피들이 3000[rpm]으로 회전 시 스피들의 불평형에 의해 축의 roundness가 장반경 5.5[ $\mu\text{m}$ ], 단반경 3.5[ $\mu\text{m}$ ]를 갖는 타원형상으로 50[Hz]로 진동 할 때 이때 전자기 가진기를 이용하여 보상한 결과 장반경은 2.5[ $\mu\text{m}$ ]로 그리고 단반경은 2[ $\mu\text{m}$ ]정도로 진동이 보상됨을 나타내 준다.

### 5. 결론

본 논문에서는 스피들 자체의 불평형에 의한 진동을 보상하고자 전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템이 제안 되었다. 전자기 가진기를 이용한 스

핀들 시스템은 스피들 불평형에 의한 진동을 모니터링하여 그에 반대되는 방향에 전자기 가진기에 의한 보상력을 만들어 가해줌으로써 불평형에 의한 진동을 보상해 준다.

이를 위해, 먼저 전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템이 제작되고 또한 제어계가 구성된다. 구성된 실험 장치에 진동 보상위한 제어기를 설계하여 실제 실험에서 적용되었다. 적용한 결과 제어기의 대역폭은 약 385[Hz]였다. 그리고 스피들이 3000[rpm]으로 회전 시 스피들의 불평형에 의해 축의 roundness가 장반경 5.5[ $\mu\text{m}$ ], 단반경 3.5[ $\mu\text{m}$ ]를 갖는 타원형상으로 50[Hz]로 진동 할 때 이때 전자기 가진기를 이용하여 보상한 결과 장반경은 2.5[ $\mu\text{m}$ ]로 그리고 단반경은 2[ $\mu\text{m}$ ]정도로 진동이 보상됨을 알 수 있었다. 이 결과는 전자기 가진기를 이용하여 스피들 불평형에 의한 효과를 보상할 수 있음이 타당함을 보여 주었다.

그럼에도 불구하고 100[Hz]이상의 고주파수 대역에서는 주파수에 따른 위상지연의 증가로 한계가 있음을 알 수 있었다.

그러므로 향후에 제어기의 성능을 개선하기 위한 노력이 필요하다고 생각된다.

또한 본 연구에서는 전자기 가진기를 이용한 스피들 시스템의 비선형적인 특성을 고려치 않았는데 이러한 비선형 요소를 고려한 비선형 제어기법을 사용하는 고급의 제어기를 개발해야 될 필요가 있다.

### 후 기

본 연구는 BK21 기금에 의해 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

1. S.A. Tobias, "Machine Tool Vibration", Black & Son, London,1965
2. Fredric F. Enrich, "Handbook of Rotor Dynamics", McGrawhill,1992
3. C.K. Kim et al., "Development of a Horizontal High Speed Active Magnetic Bearing System", KERJ, pp.91-106,1994.
4. Dean C. Karnopp, "System Dynamics-A Unified Approach," 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons Inc.,1990.
5. 임근희,신판석,김원호,손화영,김원만. "스위치드 리덕턴스 모우터 및 구동 장치에 관한 연구," 재단법인 한국전기연구소
6. 송동준,김선민,이선규, "전자기 가진기를 이용한 베어링 주축계의 강성모니터링," KSPE 추계학술대회,1999.