

능동 복합 베어링 개발

박정훈*(위아), 심풍수*(위아), 박철학*(위아), 이태영*(위아)

A Study on the Development of Active Hybrid Bearing

J. H. Park(WIA), P. S. Sim(WIA), C. H. Park(WIA), T. Y. Lee(WIA)

ABSTRACT

This article describes the development on a new style active hybrid bearing system including both merits of an aerostatic bearing system and a magnetic bearing system. The developed active hybrid bearing system has several advantages: exact rotation, robust controller against the variation of a disturbance, improvement of stiffness and a damper of the system at a high-speed operation, and constraints of the heat generated by a bias current. In order to measure a rotating error due to the change of a cutting force and the variation of a system parameter, a CCS (Cylindrical Capacity displacement Sensor) was used.

Key Words : 능동 복합 베어링(AHB : Active Hybrid Bearing), 공기 베어링(Aerostatic Bearing), 자기 베어링(Magnetic Bearing), 강성(Stiffness), 감쇠(Damper), 변위센서(Displacement Sensor), 편의전류(bias current)

1. 서론

최근 국가 산업의 견인차 역할을 담당하는 산업은 정보화 기술(IT)로서 국제 경쟁력이 다른 분야에 비해 상대적으로 높으며, 이에 중요 핵심 부품의 가공에 있어서 종전의 마이크로미터 개념에서 나노급 초정밀 가공에 대한 수요가 급증하고 있다. 이를 부흥하기 위해서 가공기에서도 초정밀화, 초고속화 및 고품위 가공은 시대를 초월하여 언제나 대두되는 핵심기술로서, 급속히 진전되고 있는 것이 세계적인 기술 추세이다.

최근 국가 경쟁력 강화를 위해 관심이 집중되고 있는 IT, BT, NT 등 시장 선도 분야의 경쟁력 확보를 위해 생산 기반 기술 확보가 절실한 실정이다. 특히 광부품 시장의 확대와 더불어 초정밀 부품의 수요가 급증하고 있으나, 관련 가공기의 제품 기술 및 가공 기술은 선진국에 비해 열악한 실정이다. 나노급 가공기의 핵심 부품의 하나로써 나노급 주축 기술을 들 수 있다. 국내에서도 90년대부터 공기 정압, 동압 베어링 및 능동형 자기베어링 주축에 관한 활발한 연구를 통해 많은 연구 성과가 얻어졌으나, 제작 기술 및 협소한 시장 등의 이유로 기술 개발이 답보 상태에 빠져 있었다고 할 수 있다. 한편, 21 세기에 들어 매우 빠른 속도로 성장한

정보 통신 분야가 앞으로 국가 경쟁력을 결정하는 핵심 산업으로 여겨지고 있다. 완제품 시장에서의 현재의 경쟁력을 강화하기 위해서는 현재 해외 업체가 독점하다시피 하는 가공 기술의 국산화가 필요하다. 특히, 나노급 가공 기술은 정밀 가공, 설계, 제어 및 나노급 계측 기술 등이 복합된 분야로써 관련 기술의 확보가 다른 분야에 미치는 영향이 큰 기반 기술이라고 할 수 있다.

변화하는 시장 상황과 국제적 경쟁력에 따른 제품 수명의 단축으로 인하여 신소재 개발 및 신기술에 의한 산업계 생산 공정에서 지속적인 생산성 향상은 필연적이다. 이에 따라 나노급 가공 및 요소 설계 기술은 보편화 할 것이다. 생산의 고능률화를 위한 실 가공 시간의 단축 방안을 여러 방면으로 강구하고 있다. 이와 관련된 여러 기술의 발달로 인한 초정밀, 초고속 나노급 가공이 가능하게 됨으로써 산업전반의 균형적 발전을 이루어질 것이다. 따라서 나노급 고속 주축을 개발하여 국내에 정착이 된다면 향후 전개될 첨단산업의 활성화와 함께 수입의존도가 특히 개선될 것이므로 국가산업 경제 전반에 미치는 영향을 지대하다 할 수 있다.

본 연구는 앞으로 시장성이 큰 정보 통신 관련 부품의 나노급 가공을 위한 주축 개발에 역점을 두고 있으며, 능동형, 복합형 베어링 형태의 나노급

주축 개발을 목표로 하고 있다. 초정밀 가공 기술, 능동형 공기 베어링 기술, 능동형 자기 베어링을 이용한 주축 제어 기술, 나노급 계측 기술 및 모니터링 기술 등이 결합된 복합 기술 분야로써 관련 기술의 융합을 통해 관련 핵심 기술의 수요 확대도 꾀하고 있다.

2. 능동 복합 베어링 개발

2.1 개요

능동 복합 베어링(Hybrid Active Bearing)이란, 공기베어링과 자기베어링의 혼합형으로서 공기 베어링의 우수한 회전정밀도 및 능동자기베어링의 외란에 대한 제어 기능을 갖는 새로운 개념의 베어링이다. 이는 공기 정압 베어링의 단점인 고속 운전 시 낮은 강성과 감쇠계수를 자기베어링이 보완하며, 자기베어링의 최대 단점인 초기 부상 시 편외전류에 의한 과도한 발생열은 냉각 압축된 공기를 자기베어링의 극수를 통해 공급하면 초기 부상 시 열 발생을 억제한다. 또한 이 효과는 회전에 직접적인 냉각작용을 한다. 절삭력 및 불평형 질량과 같은 외란에 의한 회전 오차를 제어하기 위해서 원통형 정전 용량형 센서(CCS: Cylindrical Capacity Displacement Sensor)를 베어링에 일체형으로 가공하여 회전체의 변위를 측정하여 회전정밀도를 보정한다.

능동 복합 베어링은 Fig. 1 에서와 같이 정지된 상태에서 압축된 공기를 오리피스관으로 주입하여 부상하게 된다. 또한 구동원에 의한 회전체의 변화를 한 쌍의 x-y 방향 전자석과 회전체에 압입된 강자성체 사이의 흡입력에 의하여 상대적인 주축의 위치를 제어하게 된다. 회전체의 회전정밀도를 제어하기 위해서는 기준위치(정적평형상태)로부터 축의 오차를 변위센서(CCS)를 통하여 직접 측정하고 이것을 폐환 제어하여 다시 회전축의 좌우 및 상하에 배치된 한 전자석 여자 코일에 흐르는 전류로서

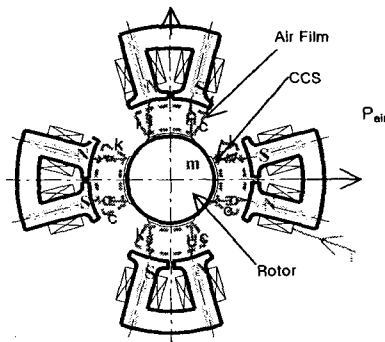


Fig. 1 Schematic of Active Hybrid Bearing

제어하여 자기력을 변화시켜 회전체를 제어한다. 즉, 회전축이 이동하면 변위 센서가 변위를 검출하고 제어기에서 신호처리를 하여 나온 전압형태의 제어신호를 전력 증폭기에서 전류로 증폭하는데, 다른 쪽의 전자석의 여자전류는 증가시켜 자기력을 크게 하고 위쪽 전자석의 여자 전류는 감소시켜 자기력을 작게 하여 회전축을 반복적으로 기준위치로 복원시킨다.

2.2 수학적 모델링

회전체는 구동원(모터)으로부터 동력을 받아 회전할 경우 Fig. 2 에서와 같은 자유물체도로부터 조화력(원심력)을 받는 스프링-감쇠계의 응답으로 볼 수 있으므로 회전체운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{r} + c\dot{r} + kr &= F_u + F_{mag} \\ &= me\omega^2 e^{j\omega t} + F_{mag} \end{aligned} \quad (1)$$

2.3 능동 복합 베어링 설계 변수

능동 복합 베어링은 공기 및 자기베어링의 혼합된 형태이므로 설계변수 또한 두 베어링이 갖고 있는 설계변수를 동시에 고려하여야 한다. 이를 정리하면 Table 1 과 같다.

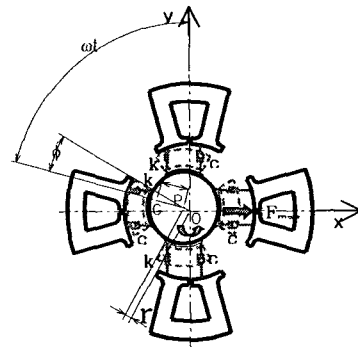


Fig. 2 DOF of Active Hybrid Bearing

Table 1 Design parameter of AHB

Parameter	Aerostatic	Magnetic
베어링 직경(mm)	40	40.2
베어링 폭(mm)	40	30
기준틈새(공극, mm)	0.008	0.2
급기열 수(열)	2	-
급기공 수(Pole 수, EA)	8	
급기공 직경(극의 폭, mm)	0.2	8

급기 압력 (인가 전류, bar)	6	-
Coil의 직경(mm)	-	0.5
코일의 감긴 수(turns)	-	90
코일의 저항(Ω)	-	-
Inductance of a coil(H)	-	-
Current gain(N/A)	-	-
Position gain(N/m)	-	-
Power amp.	Natural freq. (Hz)	-
	Damping ratio	-
초기 편심률	0.1	-
초기 자세각(deg)	30	-
회전수(rpm)	10,000	

2.4 능동 복합베어링의 정압 특성

2.4.1 정압 베어링의 해석

공기베어링을 해석하기 위한 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식으로부터, 공기베어링에 관련된 가정을 통하여 간략화 되어진 방정식을 윤활면의 연속방정식에 대입하여 적분하여 얻어진 식(2)과 같은 Reynold 방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ph^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{ph^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} r\omega \frac{\partial(ph)}{\partial x} + \frac{\partial(ph)}{\partial t} \quad (2)$$

이와 같이 얻어진 레이놀즈 방정식은 압력 항과 압력의 미분항이 곱해진 비선형 미분방정식이 되어 해석 하는 얻을 수 없고, 수치적인 해만을 얻을 수 있다. 식 (2)를 유한차분법에 의해서 압력 분포를 얻고, 이 압력분포를 베어링 면에 적분하게 되면 베어링 공기 압력에 의한 하중지지용량을 얻게 된다. 한편, 베어링의 하중 지지용량 이외에 베어링의 강성 및 감쇠의 개념이 베어링 설계 시에 매우 중요한 설계 인자로 사용된다. 베어링의 강성과 감쇠란 베어링 내의 축의 중심이 이동하게 되면 하중 지지 용량이 변하게 된다. 그러면, 이러한 하중의 변화와 축 중심의 위치 및 속도의 비율이 강성 및 감쇠계수가 되는 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$k_{xx} = \frac{\Delta F_x}{\Delta x}, k_{xy} = \frac{\Delta F_x}{\Delta y}, k_{yx} = \frac{\Delta F_y}{\Delta x}, k_{yy} = \frac{\Delta F_y}{\Delta y} \quad (3)$$

$$c_{xx} = \frac{\Delta F_x}{\Delta \dot{x}}, c_{xy} = \frac{\Delta F_x}{\Delta \dot{y}}, c_{yx} = \frac{\Delta F_y}{\Delta \dot{x}}, c_{yy} = \frac{\Delta F_y}{\Delta \dot{y}}$$

베어링의 강성 및 감쇠계수를 효율적으로 계산하기 위해서 축 중심이 미소하게 변화했다고 가정하고 섭동법(small perturbation method)을 이용한다. 섭동법은 축 중심이 미소하게 변화하였다고 가정하면, 베어링 틈새함수가 정상상태의 틈새함수 h_0 와 미소 변화 틈새 \hat{h} 및 원래 위치에서의 정상상태 압력 p_0 와 \hat{p} 을 다음 식 (4)와 같이 가정하는 것이다.

$$\begin{aligned} h &= h_0 + \epsilon \hat{h} e^{j\omega t} \\ p &= p_0 + \epsilon \hat{p} e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 레이놀즈 방정식에 대입하면 정상상태 압력 및 섭동압력에 해당하는 식 (5)와 (6)과 같은 방정식을 얻게 된다. 여기서, 베어링 형식에 따른 섭동 틈새함수 \hat{h} 은 Fig. 3에 나타내었다.

(i) p_0 에 대해서

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_0 h_0^3}{12\mu} \frac{\partial p_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{p_0 h_0^3}{12\mu} \frac{\partial p_0}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} r\omega \frac{\partial(p_0 h_0)}{\partial x} \quad (5)$$

(ii) \hat{p} 에 대해서

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \left(3p_0 h_0^2 \hat{h} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \hat{p} h_0^3 \frac{\partial p_0}{\partial x} + p_0 h_0^3 \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(3p_0 h_0^2 \hat{h} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \hat{p} h_0^3 \frac{\partial p_0}{\partial y} + p_0 h_0^3 \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} \right) \\ &= 6\mu r\omega \frac{\partial}{\partial x} (\hat{p} h_0 + p_0 \hat{h}) + i12\mu r\omega (\hat{p} h_0 + p_0 \hat{h}) \end{aligned} \quad (6)$$

	z	r	z	z
h_x		$-c \cos \theta$	$-c \cos \theta \cos \theta$	$-c \sin \theta \cos \theta$
h_y		$-c \sin \theta$	$-c \cos \theta \sin \theta$	$-c \sin \theta \sin \theta$
h_z	$-c$		$c \sin \theta$	$c \cos \theta$
h_x	$\frac{c}{L} r \sin \theta$	$\frac{c}{L} z \sin \theta$	$\frac{c}{L} r \sin \theta$	
h_y	$\frac{c}{L} r \cos \theta$	$\frac{c}{L} z \cos \theta$	$\frac{c}{L} r \cos \theta$	

Fig.3 Perturbed height functions

유한차분법을 적용함에 있어서, 급기공이 위치한 곳에서는 급기공을 통하여 들어오는 유량을 포함하여 연속방정식을 만족하여야 한다. 따라서 급기공을 통하여 베어링내부로 들어오는 유량을 구해야 하는데, 베어링 내부로 들어오는 유량은 압축성 유체의 등엔트로피 가정을 통하여 구한다. 따라서, 급기공이 없는 점과 급기공이 있는 점 모두에서 유량의 평형을 만족하는 압력 및 섭동압력을 수치계산으로 얻게 되고, 얻어진 결과를 방향에 따라 적분함으로써 하중지지용량 및 강성, 감쇠계수 등 설계 변수들을 얻게 되는 것이다.

2.4.2 공기베어링의 해석 프로그램의 개발

본 연구에서는 2.4.1 절에서 설명한 이론에 근거하여, 한 프로그램 내에서 저어널 베어링 및 스톱퍼 베어링 모두 해석 가능하며, 급기공의 개수, 열수와 같은 베어링 설계 변수를 입력하여 압력 분포를 계산 후, 하중지지 용량, 강성 계수 등을 계산한다.

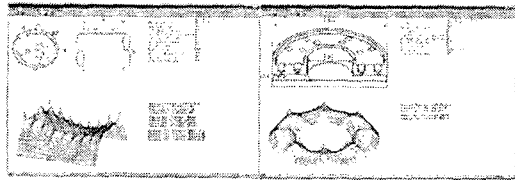


Fig.4 Example of analysis for a journal bearing & thrust bearing

Table 2 Results values of Aerostatic Bearing

Item	Symbol	Unit	Value
Max. Pressure	P_{max}	Bar	4.768468
Static Force	F_x	N	19.184329
	F_y		37.539181
Friction Loss	P_{loss}	W	135.132938
Stiffness	k_{xx}	N/ μ m	54.078191
	k_{xy}		9.374717
	k_{yx}		-9.216574
	k_{yy}		54.533172
Damping	c_{xx}	N/ μ m-sec	0.011018
	c_{xy}		0.0165538
	c_{yx}		-0.016262
	c_{yy}		0.010944

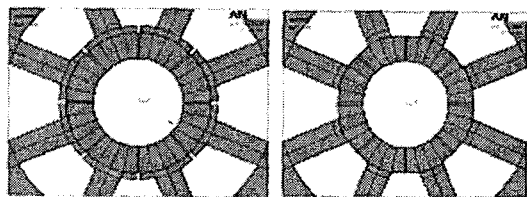
2.5 능동 복합 베어링의 자기력 특성

2.5.1 형상에 따른 자기력 변화

능동 복합 베어링은 공기베어링과 자기베어링의 기능을 모두 수행하도록 설계되었기 때문에 베어링의 형상이 일반적인 자기베어링과 다르다. 가장 큰 특징으로는 Fig. 5 에서와 같이 공극 사이에 공압이 적용되도록 하기 위한 베어링 하부의 에어 갭 부분과 공압 주입을 위한 에어 홀 부분이다. 이와 같이 자기베어링의 형상이 일반적인 경우와 다를 경우 자기베어링의 자기력 특성 또한 바뀔 수 있다. 먼저 베어링 내부에 공압을 유지하기 위한 부분 (이하 Wing 이라 함)의 효과를 보기 위해 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용해 Fig. 5 와 같이 Wing 부분을 제거한 모델과 Wing 부분이 있는 모델을 작성한다.

Table 3 은 Wing 의 일정한 바이어스 전류와 제어 전류를 가한 상태에서 발생하는 자기력을 두께 t 에 따라 정리한 것으로 Wing 의 두께에 따른 자기력의 변화를 볼 수 있다.

Air 홀에 의한 영향 역시 홀이 있는 모델과 없는 모델로 나누어 해석하였다. Fig. 6 은 홀이 있는 모델의 형상이다. 해석은 공급전류에 따라 홀이 있는 모델과 없는 모델의 자기력 차이의 비율을 조사하는 방법으로 진행하였고 Fig. 7 은 가로축은 공급된 전류[A]와 턴 수[N]의 곱으로 세로축은 홀이 있을 때의 자기력을 없을 때의 자기력으로 나눈 값으로 차트에서 보이듯 $N \cdot A$ 값이 작을 때에는 0.94 정도의 일정한 비율을 보이지만 [A]가 증가함에 따라 비율이 비선형적으로 낮아짐을 보인다.



a) Wing Model b) No-wing Model

Fig. 5 Difference between wing and No-wing Model

Table 3 Effect of wing

Thick	wing	w/o wing t
t = 2	0.21663E+02	0.15078E+02
t = 1	0.21506E+02	0.15144E+02
t = 0.5	0.16075E+02	0.15180E+02

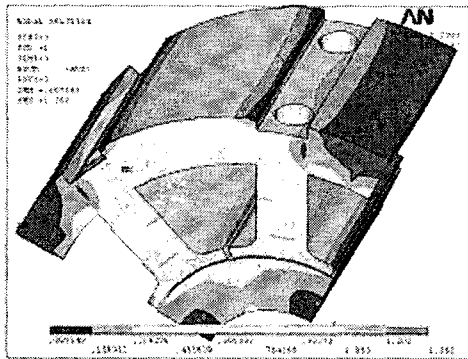


Fig. 6 Electro-magnetic model of Hybrid Bearing

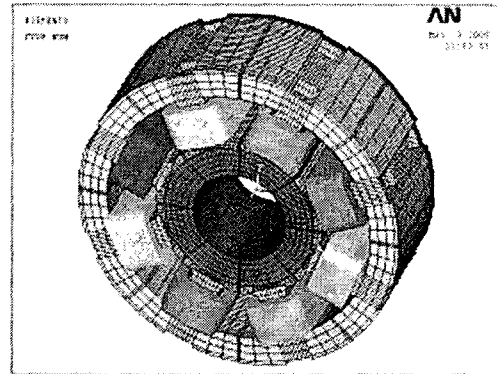


Fig. 8 Finite element model of hybrid Bearing

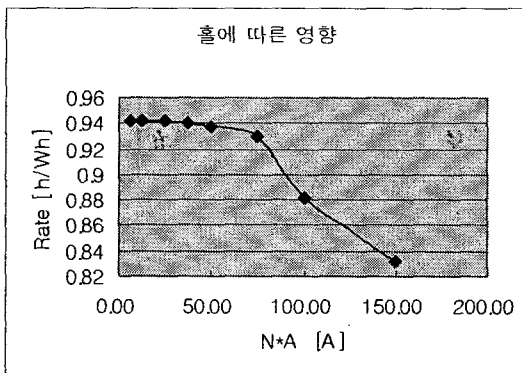


Fig. 7 Chart of Effect by hole (Aerostatic Brg.)

Table 1 과 Fig. 7 에서 보듯이 능동 복합 베어링의 형상이 일반적인 자기베어링의 형상과 다르므로써 나타나는 wing 과 Air 홀에 의한 자기력 영향이 존재하므로 베어링 설계 시 두 요소에 대한 설계검토가 필요하다.

2.5.2 제어모델을 위한 자기베어링 특성 값

능동 복합 베어링을 Plant 로 모델링하기 위해서는 자기 베어링의 특성을 파악해야 하며 그 중 전류에 의한 전류강성은 식 (7)과 같이 전류의 변화량에 따른 자기력의 변화량으로 쓸 수 있다.

입력전류에 따른 자기력을 구하기 위해 Fig. 8 과 같은 유한요소 모델을 작성하였다.

$$F_{mag} = \left(\frac{\Delta F}{\Delta i} \right)_{\Delta x=0} = \left(\frac{F|_{i_c=0.2}^{h=2} - F|_{i_c=0.1}^{h=2}}{1.7 - 1.6} \right)_{\Delta x=0} \quad (7)$$

Table 3 Force by changing current

Air Gap [mm]	wing	w/o wing t
0.2	1.6E+02	1.00450
	1.7E+02	1.72960

3. 능동 복합 베어링 설계 및 제작

3.1 AHB 설계

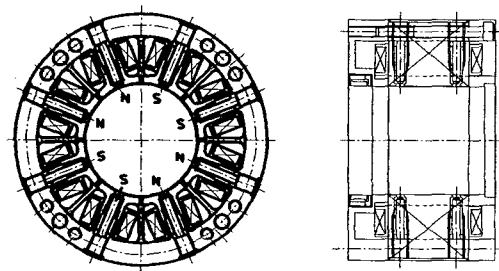


Fig. 9 Drawing of Active Hybrid Bearing

3.2 제작공정

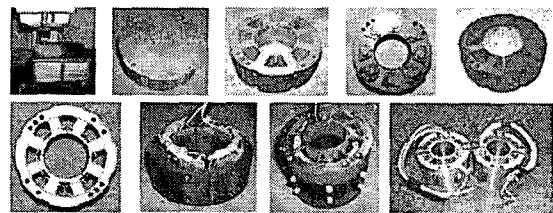


Fig. 10 The manufacturing process of AHB

등방성 규소강판을 적층하여 1 차 Wire Cutting 을 한 후 측면 Air Hole 구멍을 치구를 사용하여 NC Rotary table 이 장착된 M/C 에서 가공을 한다. 탭 가공된 상태에서 열처리를 하여 다시 2 차 Wire Cutting 에서 형상가공을 한 후 보빈을 장착하여 권선을 실행한다. 앞쪽 CCS 센서를 가 조립하여 후면 측에 Collar 를 조립하여 Epoxy Adhesive Bond 를 응착시켜 최종 연삭 가공을 하여 제작한다.

3.2 센서(CCS)의 구성

3.2.1 CCS 제작 및 Amp 개발

센서의 민감도는 센서 면과 측정 면 사이의 틈새가 가까울수록 높아지나 조립을 고려하여 측과의 틈새가 0.15mm 가 되도록 설계하였다. Fig. 11 은 원통형 정전 용량형 센서와 센서 앰프를 나타낸 것이다.

정전용량을 검출하는 전하전달법(Charge transfer principle)을 사용한다. 전하전달법은 CMOS 스위치를 이용하여 미지의 정전 용량 C_x 를 전압으로 충전시킨 후 이를 Op amp로 만들어진 적분기를 이용하여 정전 용량에 비례하여 직류전압을 얻는 방법이다.

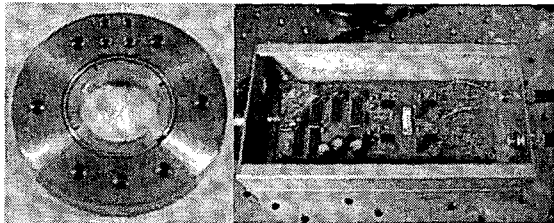


Fig. 11 Cylinder Cylindrical Capacity Displacement Sensor & Amp.

3.2.2 CCS 검보정

센서의 보정은 Fig. 8 의 기구를 사용하여 보정하였다. 보정 과정을 간략히 보면 Fig. 8(a)의 삼각형 형태의 받침대 위에 원통형 정전 용량형 센서를 설치하고 실제 측정 대상이 되는 축과 같은 재질, 같은 지름을 가진 대상물을 받침대 구멍을 통해 아래의 3 축 스테이지에 고정시킨다. 그런 다음 A/D Converter 를 통해 스테이지를 제어하여 이 때 대상물의 움직임을 CCS 와 기 기준이 되는 센서의 신호를 다시 받아서 Linearity, Offset, Resolution 을 보정하게 된다. 본 연구에서는 PC 를 통해 제어가 가능한 정전 용량 C_x 를 전압으로 충전시킨 후 이를 Op amp로 만들어진 적분기를 이용하여 정전 용량에 비례하여 직류전압을 얻는 방법이다. 분해능 0.1 탸, 반복정밀도 0.2 탸 의 Newport 사의 2 축 Precision compact linear stage, VP-25XA 를 이용하였다. 센서의 calibration 결과는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.07 & 2.27 \times 10^{-2} \\ 8.52 \times 10^{-2} & 3.01 \end{bmatrix} [\mu m / V]$$

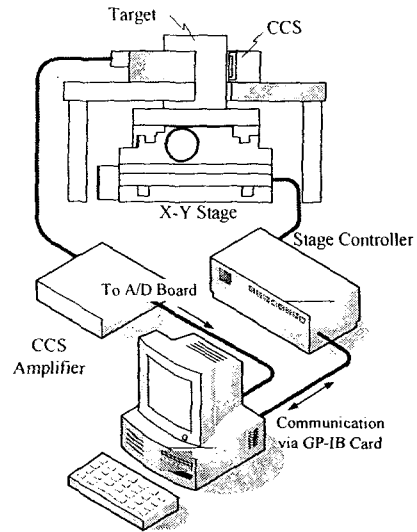


Fig. 12 Schematics of CCS Calibration experiment setup

3.3 위상조절법을 이용한 유연 회전체의 능동 제어

3.3.1 위상조절법

전문가 시스템을 제어 알고리즘으로 적용하기 위한 선행 연구로서 전문가 시스템의 추론엔진 부분의 자율 학습 자료를 위한 근거와 자료의 데이터 베이스를 위한 좋은 경향에 대한 이론적 자료로 시도되었다.

위상조절법은 고속으로 회전하는 유연회전체에서 유연 회전체를 진동하게 하는 가진력은 회전속도에 종속이며 진동면을 따라 서로 수직인 두 방향의 주기 성분이라 가정하고 이로부터 도출되는 응답 변위의 주파수, 위상 및 변위 분석을 통하여 주기성분을 갖는 가진력의 효과를 감소시킬 수 있는 반 위상차 제어력을 예측 적용 시킴으로써 고속 회전체의 변위를 최소화하는 방법이다. 고속 회전체를 가진 시키는 성분은 주기적인 성분으로 가정하고 가진력에 대한 응답 성분을 궤환하여 주파수와 위상을 분석한다. 가진력과 90~180° 사이의 위상차를 갖고 가진력과 스케일이 같은 제어력을 발생시켜 진동 발생 원인에 지대한 영향을 미치는 주기성분을 제거하는 것이다. 지속적으로 유효한 제어력 발생을 위해 제어기의 이득값과 위상 조절 계수들은 회전시스템 동작 중 동적으로 변화되도록 구성한다.

3.3.2 위상조절제어기를 포함한 유연회전체의 상태공간 모델

해석을 위하여 21 개의 절점과 20 개의 요소를 갖는 유한요소모델로 구성하였다. 회전체를 지지하

는 베어링은 2 개로 전방 2 번 절점과 후방 18 번 절점에 위치한다. 베어링의 강성 값은 10^7 N/m로 모두 동일하게 한다. 축을 가진 시키는 불평형력은 11 번 절점에 축 방향과 서로 수직인 두 개의 분력으로 적용한다. 자기 베어링은 액추에이트(actuator)와 같은 역할을 수행하면서 제어 효과가 극대화 될 수 있도록 가진력이 작용하는 11 번 절점에 장착한다.

고속 회전체를 구성하여 해석과 제어 응답 분석을 수행하였다. Fig. 5는 제어가 이루어지기 전의 11 번 관심 절점에서의 응답을 나타내고 있다.

x 방향으로 $-5 \sim +5 \times 10^{-7}$ m, y 방향으로 $-7 \sim +7 \times 10^{-7}$ m의 진동변위가 발생된다. Fig. 13의 상태공간모델에 위상조절 제어기와 자기베어링 관련 매개변수를 고려하여 MATLAB의 SIMULINK를 이용하여 상태공간모델을 구성하면 Fig. 14과 같다.

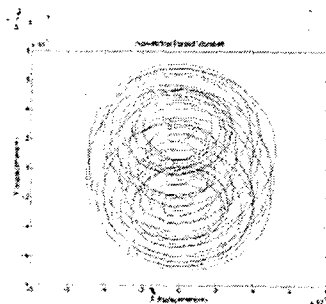


Fig. 13 none controlled forced vibration response

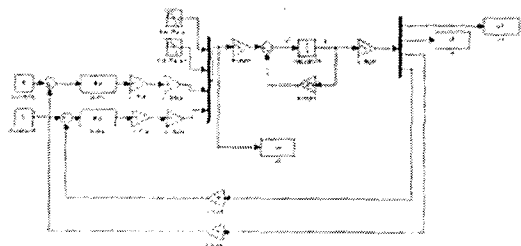


Fig. 14 The state space model of the flexible rotor with a controller

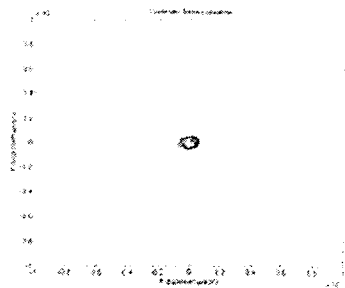


Fig. 15 under the controlled forced vibration response

Fig. 15은 위상조절 제어기를 적용하여 동일한 고속 회전체의 해석과 제어 응답 분석을 수행하였을 때의 결과이다.

x 방향으로 $-8 \sim +8 \times 10^{-9}$ m, y 방향으로 $-7 \sim +7 \times 10^{-9}$ m의 진동변위가 발생된다.

제어 전후 약 90%의 진동에 의한 변위 감소 효과가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

능동제어의 가능성을 확인함으로써, 3 차년도 종료 시에는 목표치인 100nm 회전 오차를 갖는 능동 복합 베어링을 장착한 주축시스템의 구현을 통하여 초정밀 가공용 주축의 고강성 능동 복합 베어링의 적용이 가능해지리라 생각된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 중기거점기술개발사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. I.H. Kim, "A study on in-process measurement of spindle vibration and cutting state using a cylindrical capacitive displacement sensor", Thesis of Ph. D in Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, 2001
2. Chong-won Lee 발ibration Analysis of Rotor?
3. Gerhard Schweizer, Hanes Bleuler, Alfons Traxler 畵ctive Magnetic Bearing?
4. 박상신 초정밀 공작 기계용 공기 베어링의 해석 및 진동 특성 측정에 관한 연구? 서울대학교 박사 학위 논문. 1995