한국소음진동공학회 1995년도 추계학술대회논문집 pp.148-153

에너지 절약형 자기부상계

김종선*, 0노승국*, 최상규**

(Magnetic Suspension System with Low Power Consumption)

(Jong-Sun Kim, Seung-Kook Ro, Sang-Kyu Choi)

1. 서론

자기부상계는 기계적 마찰에 의한 마모 및 손실이 없고 전자식 제어에 의해 혁신적인 성능 향상을 이룰 수 있기 때문에 자기베어링 및 정밀이송기구에 많이 사용되고 있다.[1-2] 특히 자기베어링은 유막베어링이나 구름베어링보다 손실이 적을 뿐 만 아니라 고속회전과 극한 환경 하에서의 적용 가능성 때문에 최근 연구가 활발히 진행되고 있다.[3-4] 일반적으로 전자석만으로 지지되는 자기부상계에서는 정적인 하중지지와 선형제어를 위해 바이어스 자속이 필요하고, 이를 만들어 주기 위한 바이어스 전류에 의해 전력손실이 발생한다. 영구자석으로 바이어스 자속을 만들고 전자석으로 제어자속을 발생함에 의하여 전력손실을 최소화할 수 있는데, 이러한 조합형 자기부상계는 정상상태에서는 전력의 소모가 거의 없어(Virtually zero power), 전자석만을 사용한 경우에 비해 에너지 절약효과가 탁월하다.[5] 특히 최근 들어 희토류 자석(Sm-Co 또는 Nd-Fe-B 계열)이 상용화되면서 이를 이용하여 소형이면서도 우수한 성능을 보이는 자기부상계가 제작 가능해 졌다.

영구자석과 전자석을 조합한 자기부상계는 전력손실을 최소화해야 하는 플라이휠 배터리에 특히 유용하게 이용될 수 있다. 자기베어링을 이용한 고속 플라이휠은 화학전지에 비해 높은 에너지 집적도와 큰 순간 출력으로 인해 무정전 전원장치, 인공위성의 에너지 저장장치, 전기자동차의 보조 동력원 등 여러 산업 분야에서 응용이 시도되고 있다.[6-7] 단위질량당 에너지집적도를 높이기 위한 고속화와 이 때 발생하는 마찰 손실을 최소화하기 위하여 플라이휠에 자기베어링을 사용하는 것이 효과적이며 현재 외국에서는 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고 조합형 자기베어링을 이용한 연구도 몇몇 시도되고 있으나 국내에서는 현재 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

* 한국항공대학교 기계설계학과

** 한국기계연구원

본 연구에서는 조합형 자기부상계에 대하여 영구자석을 포함한 자기회로해석과 설계변수의 변화에 따른 지지특성의 변화를 해석하였다. 응용 예로써 1자유도 실험모델을 설계제작하여 수치결과와 비교하였으며 제시된 자기부상계가 정상상태에서 전력소모가 거의 없음을 보였다. 또한 실제적인 응용 예로써 그림1과 같이 조합형 자기베어링으로 지지된 플라이휠 배터리를 설계하고 수치 예를 통해 설계된 자기베어링 시스템의 성능을 분석하고 제시된 방법의 유용성을 보였다.

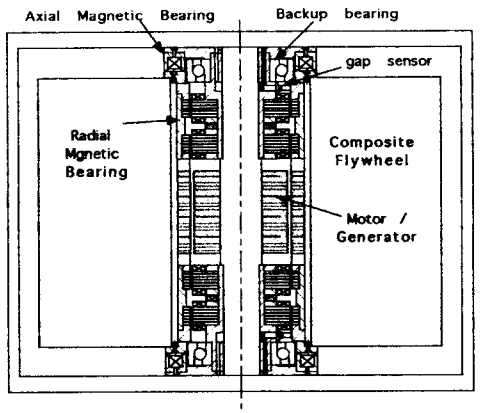


그림1 자기베어링을 사용한 플라이휠

2. 자기회로 해석 및 운동방정식

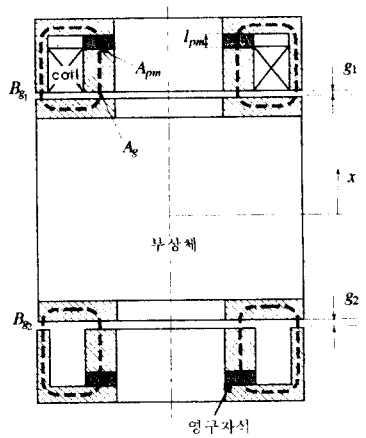
영구자석/전자석 조합형 자기부상계는 제어자속이 영구자석을 통과하는 구조와 통과하지 않는 구조로 나눌 수 있는데 자기베어링의 경우 축방향은 그림2a)와 같이 바이어스 자속과 제어자속이 동일한 경로를 갖는 구조로 되어 있으며 반경방향의 경우 그림2b)와 같이 바이어스자속은 영구자석을 통과하여 축방향으로 폐루프를 형성하지만 제어자속은

규소적층판을 따라 원주방향으로 페루프를 구성하는 구조로 되어 있다. 이렇게 다른 구조로 설계한 이유는 반경방향의 경우 회전체의 회전에 따른 자극의 변화로 발생하는 이력손실과 와전류손실을 최소화하기 위함이다.

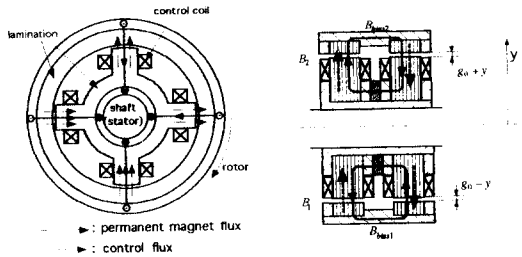
회로해석을 위해서는 다음의 방정식을 풀어야 한다.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = \int\int \vec{J} \cdot d\vec{S} \qquad (1)$$

여기서 $\vec{H}$는 자계의 세기, $\vec{J}$는 전류밀도(current density), $\vec{S}$는 자속이 통과하는 면적, $\vec{L}$는 자속의 경로벡터를 나타낸다. 여기서는 전기회로와의 상사성을 이용한 회로 해석법으로 수치해를 구했다.



a) 축방향



b) 반경방향

그림2 영구자석/전자석 조합형 자기부상계

2.1 축방향

축방향은 그림2a)와 같이 동심원으로 파여진 홈에 권선을 감은 구조로 되어 있으며 영구자석과 전자석에 의한 기자력이 직렬 연결되어 있다. 영구자석은 길이 방향으로 탁자된 링(ring) 형태로 되어 있으며 전자석의 안쪽 링에 끼워져 있다. 축방향의 경우 회전체의 회전에 따른 극의 변화가 없으므로 제어자속의 변화가 반경방향에 비해 작다. 그러므로 자속의 경로를 적층판으로 하지 않았으며 제어자속이 영구자석을 곧바로 통과하도록 설계하였다. 이 때 공극과 영구자석 그리고 자성체의 단면적이 같다면 공극과 영구자석에서의 자속밀도는 다음과 같다.

$$B_{pm_1} = B_{g_1} = \frac{\mu_0 l_{pm} H_{pm}}{2g_1} + \frac{\mu_0 N i_x}{2g_1} \qquad (2a)$$

$$B_{pm_2} = B_{g_2} = \frac{\mu_0 l_{pm} H_{pm}}{2g_2} \qquad (2b)$$

여기서 B_{pm_1}, B_{pm_2}는 각각 상하 영구자석에서의 자속밀도, B_{g_1} B_{g_2}는 공극에서의 자속밀도, g_1, g_2는 공극이다. N, i_x는 코일의 감은 수와 전류이고, μ_0는 공극에서의 투자율, H_{pm}, l_{pm}은 각각 영구자석의 자화력과 길이인데 여기에 영구자석의 자화특성을 고려해야 한다. 희토류 자석의 경우는 그림3에 나타낸 바와 같이 대체로 B-H관계가 다음 식과 같이 선형적이다.

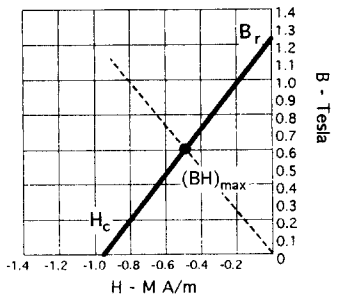


그림3 영구자석의 BH 곡선

$$B_{pm} = -\mu_{pm} H_{pm} + B_r \qquad (3)$$

여기서 $B_r = -\mu_{pm} H_c$ 로 잔류 자속밀도이고, μ_{pm}은 영구자석의 비투자율, H_c는 보자력이다. 식(3)을 (2)에 대입하면 공극에서의 자속은 다음과 같이 주어진다.

$$B_{g_1} = \frac{\mu_0 (l_{pm} B_r + \mu_{pm} N i_x)}{2\mu_{pm} g_1 + \mu_0 l_{pm}} \qquad (4a)$$

$$B_{g_2} = \frac{\mu_0 l_{pm} B_r}{2\mu_{pm} g_2 + \mu_0 l_{pm}} \qquad (4b)$$

전자기력은 다음과 같다.

$$F_x = \frac{A_g}{\mu_0} \left(B_{g_1}^{\ 2} - B_{g_2}^{\ 2} \right) \qquad (5)$$

여기서 A_g는 한쪽 극의 단면적으로 자속의 경로를 따라 단면적이 일정하도록 설계하였다. 선형제어를 위하여 다음과 같이 작동점에서 선형화 시킨 전자기력 모델을 구할 수 있다.

$$F_x = K_{ix} i_x + K_x x \qquad (6)$$

여기서 전류강성(K_{ix})과 변위강성(K_x)은 다음과 같다.

$$K_x = \frac{\partial F}{\partial x}\Big)_{x,\ i_x=0} = \frac{4\mu_0\mu_{pm}l_{pm}^2B_r^2A_g}{(2\mu_{pm}g_{01}+\mu_0l_{pm})^3} - \frac{4\mu_0\mu_{pm}l_{pm}^2B_r^2A_g}{(2\mu_{pm}g_{02}+\mu_0l_{pm})^3} \quad (7a)$$

$$K_{ix} = \frac{\partial F_x}{\partial i_x}\Big)_{x,\ i_x=0} = \frac{2\mu_0\mu_{pm}l_{pm}B_rNA_g}{(2\mu_{pm}g_{01}+\mu_0l_{pm})^2} \quad (7b)$$

여기서 g_{01}과 g_{02}는 정상상태에서 상하 양방향의 공극의 크기이다.

2.2 반경방향

반경방향은 그림2b)와 같은 구조로, 축방향으로 탁자 되어 있는 영구자석의 자속이 바이어스 자속을 만들며, 제어자속은 4개의 극을 가지고 있는 적층판을 따라 반경방향과 원주방향으로 흐르게 된다. 제어 시는 반대쪽에 있는 극을 같이 제어하도록 한다. 설계 변수로는 자극면적 A_g, 코일의 감은 수 N, 영구자석의 제원(단면적 A_{pm}, 길이 l_{pm})과 특성 (B_r, H_c), 공극(g_0)등이며 제한 조건으로는 온도 상승, 자속밀도의 포화, 베어링의 외경(d_0)등이다. 이러한 제원은 자기회로해석을 통하여 원하는 성능을 갖도록 설계한다.

우선 1축 모델에 대하여 상하 양방향의 자석을 고려하면 공극의 자속은 다음과 같다.

$$B_1 = B_c + B_{bias1}, \quad B_2 = -B_c + B_{bias2} \quad (8)$$

여기서 제어자속 B_c와 바이어스 자속 B_{bias}은 다음과 같이 주어진다.[5]

$$B_{bias1} = \frac{\mu_0H_{pm}l_{pm}}{2(g_0-y)}, \quad B_{bias2} = \frac{\mu_0H_{pm}l_{pm}}{2(g_0+y)}, \quad (9a)$$

$$B_c = \frac{\mu_0NI}{2g_0} \quad (9b)$$

식(3)을 (9)에 대입하면 바이어스자속은 다음과 같이 주어진다.

$$B_{bias1} = \frac{a}{b+2(g_0-y)}, \quad B_{bias2} = \frac{a}{b+2(g_0+y)} \quad (10)$$

여기서 $a = \frac{\mu_0l_{pm}B_r}{\mu_{pm}}$, $b = \frac{\mu_0l_{pm}A_g}{\gamma\mu_{pm}A_{pm}}$ 이고 A_g, A_{pm}은 각각 공극과 영구자석의 단면적이다. y방향으로 작용하는 힘과 선형화된 관계는 다음과 같이 쓸 수 잇다.

$$F_y = \frac{B_1^2A_g}{\mu_0} - \frac{B_2^2A_g}{\mu_0} \approx K_{iy}i_y + K_yy \quad (11)$$

여기서 전류강성(K_{iy})과 변위강성(K_y)은 다음과 같다.

$$K_{iy} = \frac{\partial F_y}{\partial i_y}\Big|_{i_y=0,\ y=0} = \frac{2NA_g}{g_0}\left(\frac{a}{b+2g_0}\right) \quad (12a)$$

$$K_y = \frac{\partial F_y}{\partial y}\Big|_{i_y=0,\ y=0} = \frac{8A_ga^2}{\mu_0(b+2g_0)^3} \quad (12b)$$

같은 방법으로 z방향의 전자기력은 다음 식과 같이 주어진다.

$$F_z = K_{iz}i_z + K_zz \quad (13)$$

보통 대칭성에 의해 $K_{iy}=K_{iz}$, $K_y=K_z$가 된다.

2.3 운동방정식

식(6), (11), (13)의 선형화된 전자기력을 그림4와 같은 강체 모델에 적용할 때 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = K_xx + K_{ix1}i_x \quad (14a)$$

$$m\ddot{y} = K_{y1}y_1 + K_{y2}y_2 + K_{iy1}i_{y1} + K_{iy2}i_y \quad (14b)$$

$$m\ddot{z} = K_{z1}z_1 + K_{z2}z_2 + K_{iz1}i_{z1} + K_{iz2}i_z \quad (14c)$$

$$J_t\ddot{\theta}_y + J_p\Omega\dot{\theta}_z = (K_{z1}z_1 + K_{iz1}i_{z1})l_{c1} - (K_{z2}z_2 + K_{iz2}i_{z2})l_{c2} \quad (14d)$$

$$J_t\ddot{\theta}_z - J_p\Omega\dot{\theta}_z = (K_{y2}y_2 + K_{iy2}i_{y2})l_{c2} - (K_{y1}y_1 + K_{iy1}i_{y1})l_{c1} \quad (14e)$$

여기서 m은 회전체의 질량이고 J_t, J_p는 각각 회전체의 관성 모멘트이고 Ω는 회전속도이다.

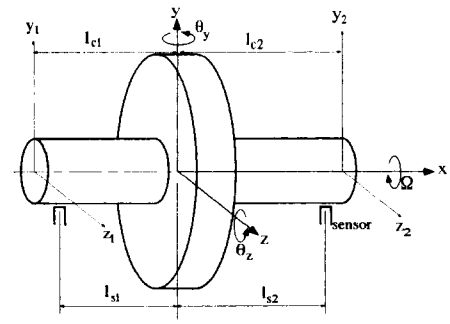


그림4 자기베어링 시스템의 강체모델

3. 응용예

3.1 1자유도 자기부상계

그림2a)와 같은 1자유도 자기부상계를 고려한다. 제어 방법으로는 PD제어기를 사용하였다. 제어기의 전달함수는 다

음과 같다.

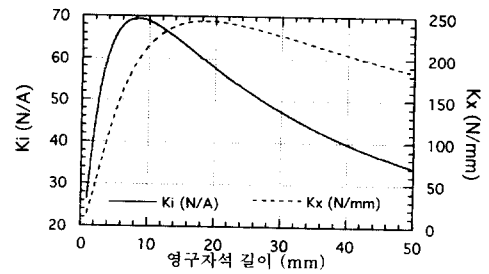
$$K(s) = K_p[\ 1 + \frac{T_d s}{1 + \eta T_d s} \qquad (15)$$

여기서 K_p는 비례이득이고 T_d는 미분시간이며 고주파 센서잡음의 영향을 줄이기 위해 1차의 저역통과필터를 미분기에 직렬로 연결하였다. 부상체의 위치는 근접센서를 이용하여 측정하였으며 코일의 인덕턴스에 의한 위상지연을 개선하기 위해 전류궤환을 추가하였다. 영구자석과 전자석, 부상체 및 제어기의 제원은 표1과 같다.

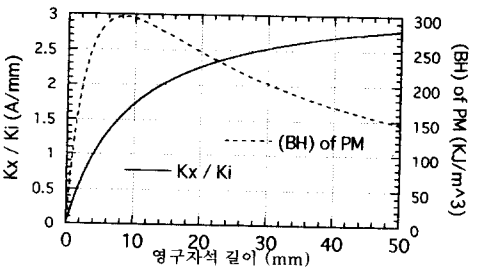
표1 1자유도 자기부상계의 제원

m	1.0 Kg	l_{pm}	7 mm
g_{01}	4.0 mm	B_r	1.25 T
g_{02}	5.0 mm	H_c	950 KA/m
N	600 회	K_p	2.0
A_g	1480 mm^2	T_d	0.01 sec
A_{pm}	1480 mm^2	V_{sup}	40 V

영구자석의 길이를 정하는데 있어서 영구자석에서 나오는 단위체적당 에너지 방출량이 최대인 점, 즉, $(BH)_{max}$인 점을 설계점으로 잡으면 영구자석의 체적을 줄일 수 있어 소형화가 가능하다. 그림5에 표1과 같은 축방향 자기부상계의 변위 및 전류강성이 영구자석의 길이(l_{pm})의 함수로 나타나 있다.



a) 지지강성의 변화



b) 강성비와 BH의 변화

그림5 영구자석 길이와 지지강성(축방향)

영구자석의 길이가 커지면 K_{ix}와 K_x가 증가하다가 최대점에 도달한 후 다시 감소하는데 이는 영구자석의 길이 증가가 공극을 크게 하는 것과 같은 효과가 있기 때문이다. K_{ix}가 크면 제어가 용이하며 영구자석의 길이가 약 8mm일 때 최대가 되는 것을 알 수 있는데 이 점은 BH곱이 최대인 점과 일치한다. 표1과 같은 사양을 갖는 1축 자기부상 실험장치의 연결도가 그림6에 나타나 있다. 반경방향 동역학의 영향을 줄이기 위하여 축방향으로 길게 제작하였으며 영구자석을 상하 양방향에 배치하였다. 제어전류는 위쪽에 위치한 작동기에만 인가하였으며 전자석에 제어전류를 인가하기 위해 직류증폭기를 이용했다. 그림7에 부양실험을 한 결과가 수치결과와 비교하여 도시되어 있다. 감쇠비가 1이 넘어 오우버슈트가 없이 안정된 부양특성을 얻는 것을 확인할 수 있었으며 전자석에 흐르는 전류가 부양초기에 3A까지 이르지만 정상상태에서는 거의 0에 도달하여 전력손실이 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

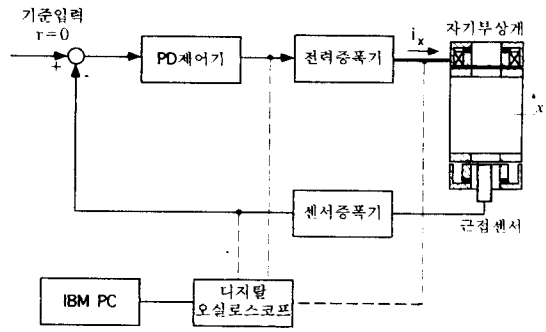


그림6 1자유도 자기부상계 실험장치

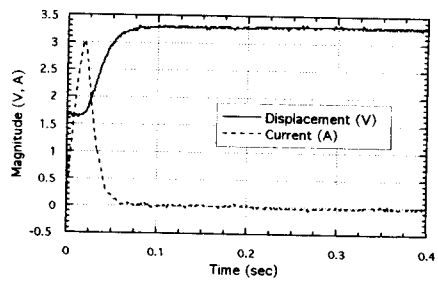


그림7 1자유도 자기부상계의 부상실험

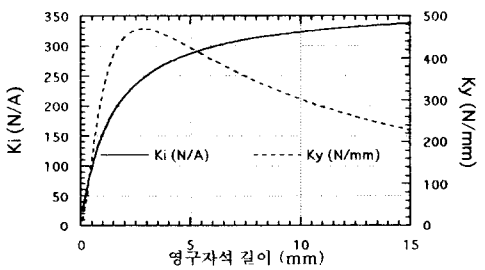
3.2 플라이휠

그림1과 같은 플라이휠용으로 설계된 자기베어링 시스템의 제원은 표2와 같다.

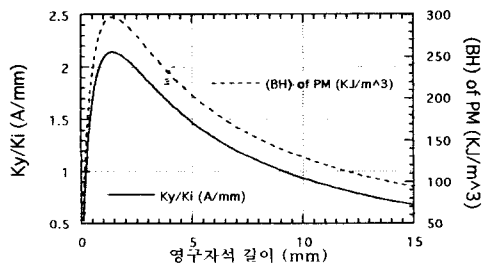
표2 플라이휠 시스템의 제원

m	20 Kg	l_{pm}	5 mm
J_t	0.25 Kgm^2	B_r	1.25 T
J_r	0.19 Kgm^2	H_c	950 KA/m
l_{c1}, l_{c2}	0.06 m	B_{bias}	0.8 T
l_{s1}, l_{s2}	0.09 m	K_i	310.5 N/A
N	250 회	K_y, K_z	237.4 KN/m
A_g	450 mm^2	i_{max}	5 A
A_{pm}	338.5 mm^2	V_{sup}	110 V

그림8에 반경방향 자기부상계의 변위 및 전류강성이 영구자석의 길이(l_{pm})의 함수로 나타나 있다. 영구자석의 길이를 늘리면 자기력의 선형성이 증가하고, 전류강성에 대한 변위강성의 비(K_y/K_{iy})가 작아지는 경향이 있다. 또한 이 비가 최대인 점이 $(BH)_{max}$인 점과 같은 것도 볼 수 있다. 제어기 설계의 관점에서 보면 (K_y/K_{iy})가 작은 것이 유리하므로 제작의 용이성 등을 검토하여 영구자석의 길이를 더 길게 결정할 수 있다. 그러나 전자석 철심에서의 자속밀도가 포화점에 접근하지 않도록 하여야 하는데 왜냐하면 이 경우, 철심의 투자율이 낮아지며 자속의 누설이 커지기 때문이다. 따라서 극면적과 영구자석 면적, 영구자석의 길이를 같이 고려하여 설계하여야 한다.



a) 지지강성의 변화

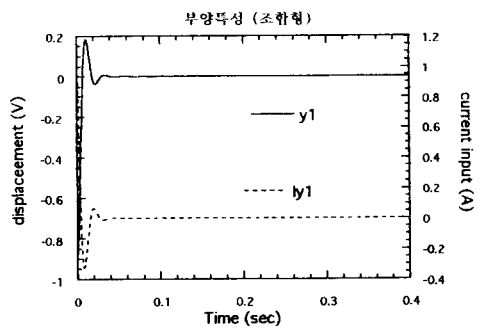


b) 강성비와 BH의 변화

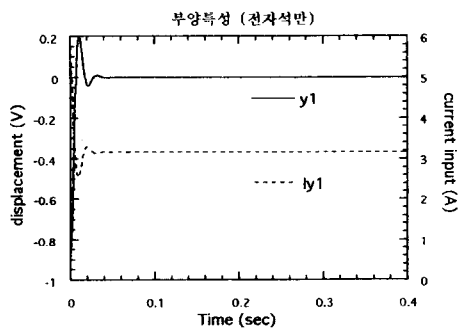
그림8 영구자석 길이와 지지강성(반경방향)

$(BH)_{max}$인 점은 영구자석의 길이가 1.9mm 일 때이지만 가공의 용이성을 고려하여 5mm로 하였다. 철심 재료인 AISI4340은 0.8 T 에서 투자율이 최대이고 2.0 T 에서 포화되므로 바이어스 자속을 0.8 T 로 만들기 위해 공극면적이 450 ㎟이 되도록 설계하였다.

설계된 시스템의 특성을 보이기 위해 자기베어링 시스템을 전력증폭기와 코일, 전류궤환 회로를 포함한 전체이득을 1로 놓고 비례이득을 1.2, 미분시간을 0.003초로 한 PD제어기(Decentralized PD controller)의 응답특성을 시뮬레이션하였다. 그림10은 배어링의 부양특성을 보인 것으로 조합형과 같은 전류강성을 갖는 전자석만으로 된 자기베어링의 전류입력도 비교하였는데, 전자석형은 정상상태에서 약 3.2A의 전류가 흘러 25W의 전력손실이 발생하는데 반해 조합형의 경우에는 정상상태에서 전류가 거의 흐르지 않음을 알 수 있다. 플라이휠의 경우 극관성모멘트가 경방향에 비해 크므로 고속회전시 자이로모멘트가 커서 그림 11에서 보는 바와 같이 감쇠비의 감소와 함께 회전방향과 반대방향의 저주파의 선회운동(Backward precession)이 크게 나타난다. 그러므로 이를 고려한 제어기의 설계가 필요하다. 또한 불균형응답에 의한 제어전류를 최소화하기 위해서 자동밸런싱을 도입하여 전력손실을 거의 0으로 만들 수 있으므로 고속회전체에서도 조합형 자지부상계의 장점을 유지할 수 있다.



a) PM/EM조합형



b) 순수 전자석

그림9 부양특성

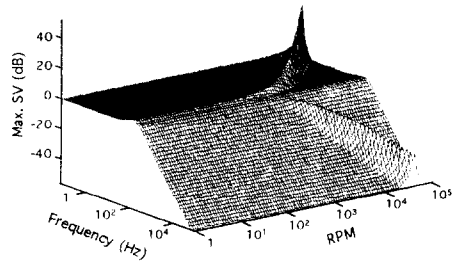


그림10 회전속도에 따른 최대특이값 선도

4. 결론

저전력소비형 자기부상계로써 영구자석/전자석 조합형 자기부상계에 관한 연구를 수행하였다. 설계에 필요한 여러 고려사항중에서 자기회로 해석, 영구자석의 특성 등을 고려한 형상 제원의 설계, 특히 영구자석의 특성과 제원이 동특성에 미치는 영향을 해석하였으며 영구자석/전자석 조합형 자기부상계의 설계에 관한 기초연구를 수행하였다. 1자유도 모형을 이용한 수치예와 실험을 통하여 제시된 방법의 장점인 저전력소비형 자기부상이 가능함을 보였으며 실제 응용예로써 플라이휠용 자기베어링에의 적용 가능성을 수치예를 통해 보였다.

후기

본 연구는 통상산업부가 지원한 에너지절약기술개발 사업의 일환으로 연구되었으며 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. P.K. Sinha, Electromagnetic Suspension: Dynamics & Control, Peter Peregrinus Ltd., 1987.
2. 경진호, 김종선, 이해, "PID제어기를 이용한 능동형 자기베어링의 설계 및 실험적 동특성 연구," 한국소음진동공학회 춘계학술대회, 1991, pp.83-89.
3. M. Dussaux, "The industrial applications of the active magnetic bearings technology.", 2nd Int. Symp. on Magnetic Bearings, 1990, pp33-38.
4. C. Meeks, D. Hibner, "Light weight magnetic bearing system for aircraft gas turbine engines", 4th Int. Symp. on Magnetic Bearings, 1994, pp.429-434.
5. E. H. Maslen, et al, "Permanemt magnet biased magnetic bearings", Proceedings on MAG '93 Magnetics Bearings, Magnetic Devices and Dry Gas Seals Conference & Exhibition, 1993, pp559-567.
6. M. Ahens, et al., "Design of magnetically suspended flywheel energy storage device", 4th Int. Symp. on Magnetic Bearings, 1994, pp.553-558.
7. T. Lange, "Optimal magnetic bearing control for high speed momentum wheels," J. Guidance, Vol.8, No.6, 1985, pp737-742.
8. C. W. Lee and J. S. Kim, "Modal testing and suboptimal vibration control of flexible rotor bearing system by using a magnetic bearing," ASME J. of Dynamic Systems, Measurements, and Control, Vol.114, 1992, pp.244-252.
9. 노승국, 김종선, 최상규, "플라이휠용 PM/EM 조합형 자기베어링 시스템의 설계," 한국항공우주학회 추계학술대회, 1995.