

고온 초전도체를 사용한 반발식 마그네틱 베어링의 특성에 관한 실험적 연구

유계환 · 임운철*

연세대학교 대학원, *연세대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Characteristics of the Repulsive Type Magnetic Bearing System using High Temperature Superconductor

Je-Hwan You, Yoon-Chul Rhim*

Graduate School, Yonsei Univ., *Dep. of Mech. Eng., Yonsei Univ.

Abstract— An experimental study of the characteristics of the repulsive type magnetic bearing using high T_c superconductor is presented. In field cooling superconductor has the position-stability due to a flux pinning effect and the strong damping due to hysteresis, while in zero field cooling it has the only strong repulsive force due to Meissner effect. Lift force in superconducting levitation has a hysteresis characteristics, and it is the dissipation of energy, the mechanism of damping. As the relative linear velocity between a magnet and a superconductor increases, the area of the hysteresis loop becomes smaller. It means the decrease of damping. In field cooling, the static stiffness is very nonlinear in smaller than initial gap, but almost linear in larger than initial gap.

1. 서론

임계온도가 액체질소의 비등점(77K)보다 높은 산화물 고온 초전도체가 1987년에 발견된 이후에 최근에는 $10^4 A/cm^2$ 이상의 임계전류밀도를 갖는 덩어리형 고온 초전도체가 MPMG법과 QMG법과 같은 용융공정을 통해 개발되었으며, 특히 이트륨, 바륨, 구리가 1:2:3의 비율로 들어있는 산화물 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 은 산소 조성이 7에 가까우면 임계온도가 95K로서 현재 가장 많이 사용되고 있다. 응용 분야로서는 자기부상열차, 초전도 전기추진전동의 수송분야, MRI, PET 등의 의료분야, 전력저장, 송전, 발전에 관련한 전력분야, 그리고 초대형 양자 싱크로트론같은 기초과학분야등이 있고, 향후 상온 초전도체의 출현으로 인한 응용 범위의 확대는 획기적인 것으로 예측되어진다. 이중 10^{-6} 이하의 마찰계수를 갖는 초전도 마그네틱 베어링을 플라이트럴 같은 에너지 저장장치나 고속 원심분리기에 적용시키는 연구가 국내외적으로 진행되고 있다. 기존의 흡인식 마그네틱베어링은 감쇠와 강성을 전기적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나 능동제어를 필요로 하며 대중량의 부하를 지지하기에 전자석 만으로 한계가 있다. 이에 비해 고온 초전도체를 사용한 반발식 수동형 마그네틱 베어링은 Meissner effect뿐 아니라 Flux pinning effect에 의해 자체적으로 외란에 대한 위치안정성을 가지며, 히스테리시스 손실에 의한 에너지 소산을 통해 외란에 대해 강

한 감쇠능력을 가진다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 고속 회전시 공기저항이 있는 경우와 진공인 경우 자기적 전단력에 의한 마찰저항에 대한 실험 [1], 부하지지 능력과 회전체의 감속에 관한 실험, 히스테리시스 특성 실험 및 응용[2][3][4][5][6], 고온 초전도 자기부상에 관한 동·정적 특성의 수치해석과 실험[7][8][9] 등의 연구가 수행되어져 왔다. 본 연구에서는 초전도체와 자석간의 간극변화와 상대 선속도 변화에 따른 부상력과 강성의 변화를 냉각조건과 자석의 종류에 따라 실험하였다.

2. 본론

1) 초전도 이론

초전도란 임계온도 이하에서 전기저항이 사라지며 나타나는 전자기적 성질을 지칭하는 현상이다. 그러나 단순히 영저항인 완전도체의 자기적 성질과는 구별되는 초전도체 특유의 자기적 거동이 있다. 완전도체인 경우에는 저항이 영이므로 시간에 따른 자속밀도의 변화가 없다($\dot{B}=0$). 전혀 자계가 존재하지 않는 상태에서 전이온도이하로 냉각된 뒤(Zero Field Cooling) 자계가 인가되면 자속밀도는 변화할 수 없기 때문에 자속밀도는 영에 머문다. 이때 자계의 인가는 저항이 없는 표면전류를 유도하고, 이 전류는 도체내부의 모든 곳에서 인가자계의 자속밀도를 상쇄하는 자속밀도를 발생한다. 결국 자속의 중첩은 도체 내부에 자속밀도가 없는 완전반자성의 형태로 나타난

다. 그리고나서 인가자계가 영으로 감소하면 도체는 처음의 자화되어있지 않은 상태로 된다. 반면 자계가 존재하는 상태에서 전이온도이하로 냉각되면(Field Cooling) 도체는 대개 비투자율이 1정도 이므로 도체 내부의 자속밀도는 인가자계의 그것과 같고 자속밀도의 변화없이 유지된다. 그때 인가자계를 영으로 하면 도체내의 자속밀도는 변화할 수없기 때문에 계속 전이온도이하로 유지되면 영구히 자속을 유지한채 영구 전류가 유지된다. 그러나 실제로 자계가 존재하는 상태에서 전이온도로 냉각시키면 도체는 자발적으로 완전반자성이 되어 내부의 자속을 모두 상쇄한다. 이는 초전도 상태에서는 도체내부에 자속밀도가 존재하는 것을 허용하지 않는다는 것을 의미하며($B=0$), Meissner효과라고 한다. 다시말해 초전도체의 자화의 상태는 인가자계와 온도의 값에만 의존하고, 이들의 조건에 이르기까지의 과정에는 의존하지 않는다. 이것은 인가자계가 있는가 없는가에 의하지 않고 열역학적인 의미에서 초전도에서 상전도 상태로의 전이는 가역이라는 것을 의미하고 있다. 따라서 온도와 자계의 강도를 열역학적 변수로 잡아 열역학적 논의를 초전도체에 적용할 수 있다. 초전도와 상전도의 2개의 상(相)이 같은 인가자계내에 있을 때, 이 두 상에 대한 자기적 기여의차를 Gibbs의 자유에너지를 도입해 생각해 보면 전이온도 이하에서는 초전도 상태의 자유에너지가 상전도 상태보다 적다. 한편 초전도체는 저항이 없는 상태에서 흘릴 수 있는 전류의 상한치가 있는데 이를 임계전류밀도 J_c 라고 부르며, 만약 전류가 이 값을 넘으면 저항이 나타난다. 그리고 인가자계의 자속밀도(즉 표면에서의 자속밀도)가 어떤 값으로 증가하면, 표면에서 임계치에 도달할 것이다. 이 자속밀도를 임계자속밀도 B_c 라 부른다. 그러나 도체 바깥쪽에서의 자속밀도는 H 를 자계의 강도라 하면, 항상 $\mu_0 H$ 와 같기 때문에 임계자계의 강도 $H_c = B_c / \mu_0$ 를 똑같이 생각해도 된다. 다시말해 표면의 임의의 점에서 수송전류와 인가자계에 의한 전체의 자계의 강도가 임계자계의 강도 H_c 를 넘을 때에 초전도체는 그 영저항을 잃는다. 앞에서 언급한 표면전류라는 것은 전류가 초전도체의 내부를 통과할 수는 없지만, 표면에만 흐를 수 있다는 전자기학적인 해석으로 부터 얻은 결론이며, 차폐전류(Shielding current 또는 Screening current)라고도 부른다. 초전도체가 인가자계 속에 있을 때, 속의 자계를 상쇄하도록 흐르는 차폐전류는 표면전류이고 자속밀도는

도체의 표면에서 급격히 영이 되지 않지만, 차폐전류가 흐르고 있는 영역내에서 소실한다. 이때문에, 전류가 흐르고 있는 깊이를 침입깊이라고 한다. 왜냐하면 침입깊이는 인가자계의 자속이 거기까지 침입해 있는 것같이 보이는 깊이기 때문이다. 그래서 초전도체가 완전 반자성이라 해도, 실제로는 매우 근소한 자속의 침입이 있고, 자속밀도는 표면에서 소실하고 있다. 이것은 상전도체에 고주파의 교류자계가 침입하는 표피깊이(Skin depth)와 약간 비슷하다. 대개의 초전도체는 불순물이나 결정의 결함이 있는 제II종 초전도체인데, 인가자계가 영이 되었을 때 잔류자속밀도를 일으키는 포획자속(Trapped flux)이 남게 된다. 다시말해, 결함이 많으면 임계온도 이하에서 초전도상태로 되지 않는 부분이 체적비율로 보면 근소하나 잘게 많이 남는다. 이 상전도 상태로 남아있는 부분은 자기장이 통과하기 쉽기 때문에 와상상태로 전류를 흘리며 자속선은 소위 이 함정과 같은 부분에 걸려 움직이지 못하게 된다. 이것을 자속의 피닝(Pinning)이라고 한다. 제I종 초전도체의 중간상태에 비해서 제II종 초전도체는 인가자계의 어떤 최소, 최대강도에 의해서 혼합상태가 되는데, 이때 최소강도를 하부임계자계 H_{c1} 라 하고 최대강도를 상부임계자계 H_{c2} 라 한다. 이것은 제I종 초전도체가 초전도체나 상전도 두 상태 중 어느 하나로 존재할 수 있는데 대하여 제II종 초전도체는 초전도, 혼합, 상전도의 3가지 상태중 하나로 존재할 수 있다는 것을 의미한다.

2) 실험장치 및 방법

본 실험장치는 초전도체를 이용한 스러스트 마그네틱 베어링에서 초전도체와 자석간의 상대선속도와 간극을 변화시켜가며 Lift force와 Drag force를 동시에 측정하고자한다. 두가지 힘을 측정하기 위해서 2종류의 Cantilever가 각각 발생하는 힘을 전달받도록했다. 그 힘의 변화는 각각의 Strain gauge에 의해 미소 전압변화로 바뀌고 2B31Jf를 통한 증폭과 Filtering을 거친 뒤 A/D변환된다. Lift와 Drag을 각각 Calibration하여 환산계수를 고려해 실험시 힘의 단위로 나타나도록 하였다. 실험장치는 그림 1과 같다. DC servo motor는 회전속도에 비례하는 전압을 발생하는 Tacho-generator을 내장하고 있는데, 회전속도와 발생전압의 관계를 Calibration하여 원하는 정속도 유지에 사용한다. 원하는 속도를 Digital값으로 주면 D/A변환을 거쳐 전류증폭기의 출력으로 DC motor에 전달되어 motor가 구동되고, 그때의 속도에

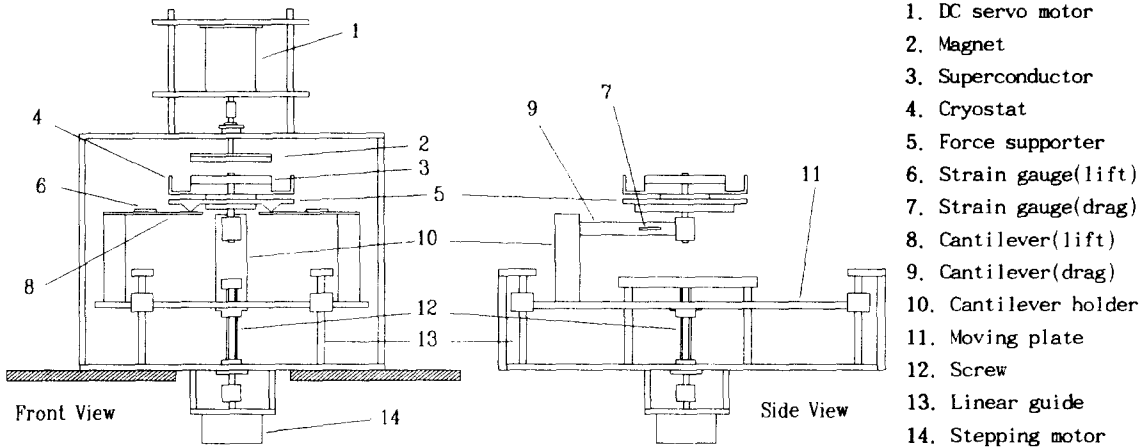


그림 1 실험장치 상세도

비례하는 전압이 Tacho에서 발생되어 A/D변환을 통해 속도를 알 수 있다. 자석은 최대 2.98KG의 자속밀도를 갖는 네오디움 영구자석(11×11×7) 8개를 같은극이 한 방향을 향하도록 배치한 8극 자석과 최대 2.75KG의 자속밀도를 갖는 도우넛형(내경:6, 외경:22, 두께:7) Onebody자석을 사용했다. Cryostat는 재료선정에 있어 여러 시행착오를 거쳐 결국 스티로폼으로 제작하여 사용했다. 초전도체는 덩어리형 산화물 초전도체의 일종인 YBCO를 사용하여 도우넛형(내경:12, 외경:26, 두께:9) 초전도체를 제작해 사용했다. Stepping motor를 구동하여 moving plate가 Ball-screw를 통해 움직임으로써 초전도체와 자석간의 간극을 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 모든 데이터는 100개의 sampling된 데이터를 평균한 값을 취한다. 실험과정은 다음과 같다. 일정간극에 초전도체를 위치시키고 액체질소를 부어 냉각시킨다. 잠시 뒤 안정화되고 나서 간극을 일정 간격씩 좁혀나감다 다시 일정 간격씩 원위치로 하고 간격을 넓혔다가 다시 원래의 위치로 되돌린다. 이 과정에서 각 간극에서 초전도체와 자석의 상대선속도, Lift, Drag를 측정하게된다. 이 실험장치에서 초전도체와 자석간의 최대간극이 55mm까지 가능한데, 먼저 최대간극에서의 자석의 자장이 초전도체에 영향을 주는가 확인을 해보았다. 결국 간극이 40mm 이내에서의 냉각을 Field cooling이라고 볼 수 있었고, 그 이상의 간극에서의 냉각은 Zero field colling이라고 볼 수 있었다. 또한 실험시 초전도체 냉각에 사용되는 액체질소는 0.075g/sec 기화하는데, 그양은 한 실험당 걸리는 시간이 수십초이므로 무시했다.

3) 실험결과

초기 간극을 10mm로 하여 field cooling을 한 뒤 실험을 했다. 그림2와 그림3은 각각 8극자석과 onebody 자석을 가지고 초전도체와 자석간의 상대선속도를 0.58m/s로 하고 초기 간극 10mm부터 시작해서 1mm씩 접근시켜가며 1mm까지 접근시켰다가, 다시 1mm씩 후퇴시켜 간극 19mm까지 갔다가 다시 1mm씩 접근시켜 원위치 시키는 동안 각 간극에서의 Lift force와 Drag force를 측정해본 것이다. 먼저 Lift force를 보면 자기력이 거리의 제곱에 반비례하므로 반발력이 상당량 증가를 했다가 멀어질때는 접근시보다 같은 간극에서 작은 반발력을 보인다. 그래서 초기 간극보다 가까운 위치에서 이미 힘평형이 이루어지며 초기 간극과 같은 거리에서는 흡인력이 작용한다. 이후 최대간극까지 흡인력이 유지되다가 초기간극으로 원위치되면 최초의 힘평형상태로 복귀된다. Drag force의 경우에는 Lift force에 비해 아주 작은량이 나타나며 실험시 거의 변화를 보이지 않는다. 액체질소에 의한 냉각에 기인한 외팔보의 열변형이 Drag force에 영향을 준것같다. 그러므로 Drag force의 실질적인 크기는 실험결과보다 훨씬 작다고 볼 수 있다. 예비실험에서 초전도체를 Field cooling하고 냉각시의 일정 간극에서 도우넛형 Onebody자석을 회전시켜보면 그 위치에서 상당시간 회전이 안정적으로 유지되는데 전자기적 전단력이 공기저항보다도 작다고 판단되어질 정도였다. 이러한 위치안정성은 제 I 종 초전도체의 자기부상이 단지 Meissner effect에 의한 반발형이므로 수평방향의 안정성이 결여되어 있는데 비해, 제 II 종 초전도체의 경우는 특이한 비선형전자현상인 Flux pinning effect에 의해 역학적 평형상태의 보존이 이루어지기 때문이다. 이와같이 어떤 조건하에서는

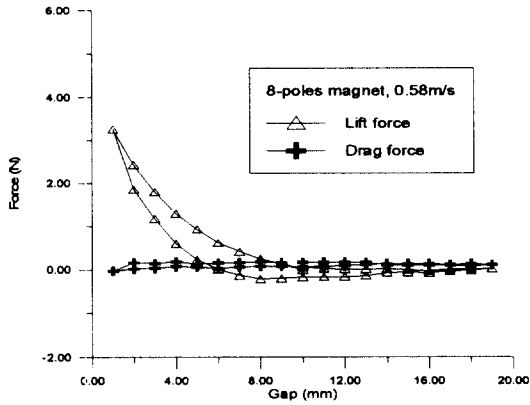


그림 2 간극변화에 따른 힘의 변화
(8극 자석, 상대선속도: 0.58m/s)

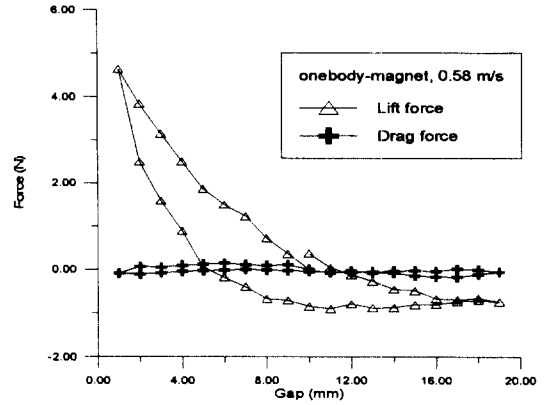


그림 3 간극변화에 따른 힘의 변화
(onebody magnet, 상대선속도: 0.58m/s)

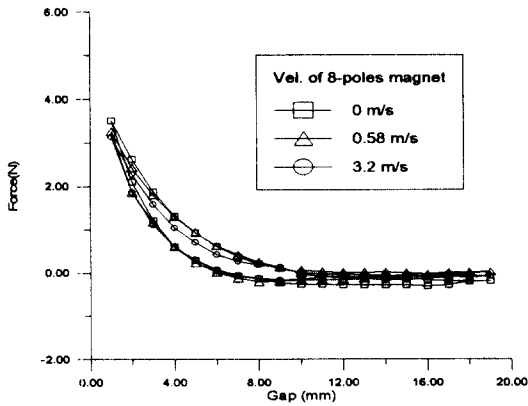


그림 4 속도변화에 따른 힘의 변화
(8극자석, Field cooling)

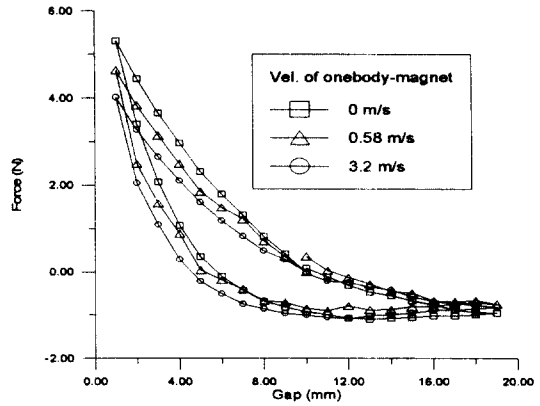


그림 5 속도변화에 따른 힘의 변화
(Onebody magnet, Field cooling)

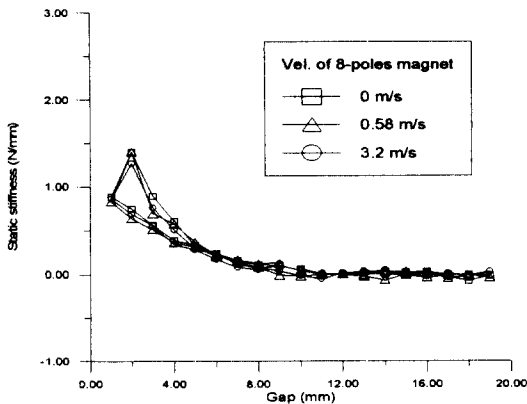


그림 6 간극변화에 따른 정적강성변화
(8극자석, Field cooling)

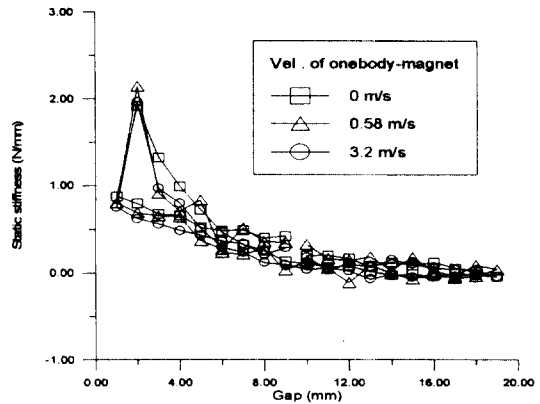


그림 7 간극변화에 따른 정적강성변화
(Onebody magnet, Field cooling)

Lift force가 흡인력으로 작용하면서 Pinning effect가 유지될 수 있으므로 Suspension effect가 있다고 볼 수 있다. 반면 Zero field cooling으로 실험해보면 수평방향으로 안정성이 없었다. 결과적으로 Lift force는 히스테리시스 특성을 보이는데 이는 초전도체의 표면전류의 분포변화에 기인한 것이다. 다시말해, 간극이 가까워지면 표면전류가 초전도체 상부의 표면부터 초전도체속으로 침투하면서 흐르며, 간극이 멀어지면 원래 침투되어진 표면전류의 분포는 변화없이 그대로 유지되면서 반대방향으로의 표면전류가 초전도체 상부부터 초전도체 내부로 침투하며 흐른다. 이것이 Lift force의 히스테리시스 특성의 원인이며, 열역학적으로 보면 비가역 과정이라고 할 수 있다. 그리고 Lift force의 미소한 불규칙성은 초전도체의 Grain 경계나 Crack에 의한 영향이라 볼 수 있다. 왜냐하면 표면전류가 Grain경계에 의해 여러 영역으로 국소화되고, Crack에 의해 왜곡되면, 결과적으로 표면전류가 동심원적으로 흐를 수 없기 때문이다. 한편 히스테리시스 손실특성은 초전도 자기부상에서의 외란에 대한 강한 댐핑의 원인이라고도 할 수 있다. 이 특성은 일종의 에너지소산 과정으로 제II종 초전도체의 특징이라 할 수 있다. 실제로 예비 실험에서 부상되어있는 초전도체에 힘을 가하면 강한 댐핑을 느낄 수 있었다.

그림4와 그림5는 상대선속도를 더 증가시키거나 정지시킨 경우에 대한 실험이다. 실험으로부터 알 수 있는 사실은 상대선속도가 증가할수록 Lift force가 약간 감소하고 히스테리시스 루프영역이 줄어들어가는 것이다. 다시 말해 위 실험결과로부터 알 수 있듯이 속도에 따라 댐핑이 변화한다고 볼 수 있다. 그림6과 그림7은 그림2와 그림3의 결과로부터 얻은 정적강성의 변화이다. 이것은 정적강성이 초기간극보다 먼 곳에서는 거의 선형적이고, 가까운 곳에서는 매우 비선형적인 거동을 한다는 것을 나타낸다.

3. 결론

예비 실험을 통해 Field cooling인 경우 초전도체의 위치안정성과 강한 댐핑이 있음을 확인했고, Zero field cooling인 경우는 위치안정성이 없음을 확인했다.

본 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) Lift force는 히스테리시스 특성이 있고, 이는 에너지 소산과정으로 강한 댐핑의 원인이다
- 2) 초전도체와 자석간의 상대선속도가 증가할수록 히스테리시스 루프의 면적이 줄어들며, 이는 댐핑의 감

소를 의미한다.

- 3) 정적 강성은 초기간극보다 먼 곳에서는 비교적 선형적이며, 가까운 곳에서는 상당히 비선형적이다.

4. 참고문헌

- [1] F.C.Moon and P.Z.Chang, "High-speed rotation of magnets on high T_c superconducting bearings", Appl. Phys. Left. 56(4), Jan.1990, 397-399
- [2] B.R.Weinberger et al., "Characterization of composite high temperature superconductors for magnetic bearing applications", IEEE Transaction of Magnetics, VOL.27, NO.2, March 1991, 2415-2422
- [3] David E. Weeks, "Rotational dynamics of passive high T_c superconducting bearings", J.Appl.Phys. 70(3), 1 Aug.1991, 1820-1825
- [4] C.K.McMichael et al., "Practical adaptation in bulk superconducting magnetic bearing applications", Appl. Phys. Left. 60(15), 13 April 1992, 1893-1895
- [5] Francis C.Moon et al., "Superconducting Bearings for high load applications", Applied Superconductivity, Vol.1, Nos 7-9, 1993, 1175-1184
- [6] W.K.Chu et al., "Applications of high temperature superconductors on levitation bearings and other levitation devices", Applied Superconductivity, Vol.1, Nos3-6, 1993, 1259-1264
- [7] N.Takeda et al., "Computation and experiments on the static and dynamic characteristics of high T_c superconducting levitation", Cryogenics, Vol. 34, No.9, 1994, 745-752
- [8] 上坂 充, 吉田 義勝, 官 健三, "高温超電導磁氣浮上における動的電磁力解析", 日本機械學會論文集(C編), 60巻 570号, 1994, 126-133
- [9] Masanori Tsuchimoto et al., "Numerical Evaluation of Levitation Force of HTSC Flywheel", IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 4, No. 4, Dec.1994, 211-215