

반발식 자기 베어링의 응용으로서 고온 초전도체의 특성에 관한 실험적 연구

유제환 · 임윤철*

연세대학교 대학원
*연세대학교 기계공학과

An Experimental Study on the Characteristics of the High Temperature Superconductor as an Application of the Repulsive Type Magnetic Bearing

Je-Hwan You and Yoon-Chul Rhim*

Graduate School, Yonsei University
*Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract—An experimental study is presented for the characteristics of the high temperature superconductor as an application of the repulsive type magnetic bearing. A ring shaped YBCO type superconductor and Neodium permanent magnets are employed for the experiment. For the case of field cooling, superconductor shows strong repulsive force, which is due to the Meissner effect, as the gap between the superconductor and the magnet gets closer. The repulsive force variation with respect to the gap change shows hysteresis characteristics. The area of the loop of the hysteresis curve represents the dissipation of energy, which reveals that the magnetic bearing with superconductor has large damping. The effect of the initial gap and the magnetic flux density on the repulsive force is analyzed experimentally and the static stiffness variation is calculated from the measured repulsive force variation. The relative sliding velocity between the superconductor and the magnet has little effect on the repulsive force which is quite different from the usual sliding element bearing. As the initial gap for the field cooling becomes larger, the maximum repulsive force at the minimum gap increases and approaches to the value for the case of zero field cooling.

Key words—high temperature superconductor, repulsive type magnetic bearing, hysteresis characteristics, experiment, static stiffness.

1. 서 론

임계온도가 액체 질소의 비등점(77 K)보다 높은 산화물 고온 초전도체가 1987년에 발견된 이후 최근에는 10^4A/cm^2 이상의 임계전류밀도를 갖는 덩어리형 고온 초전도체가 MPMG (Melt-Powder-Melt-Growth) 법과 QMG(Quench-Melt-Growth)법과 같은 용융공정을 통해 개발되었다[1]. 특히 이트륨, 바륨, 구리가 1:2:3의 비율로 들어 있는 산화물인 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 는 산

소 조성이 7에 가까워지면 임계온도가 95 K까지 상승하며 현재 가장 많이 사용되고 있는 고온 초전도체이다[2]. 초전도체의 응용분야로서는 자기부상열차, 초전도 전기 추진선 등의 수송 분야, MRI, PET 등의 의료 분야, 전력 저장, 송전, 발전에 관련한 전력 분야, 그리고 초대형 양자 싱크로트론과 같은 기초과학 분야 등이 있으며[3], 향후 상온 초전도체의 출현으로 인한 응용 범위의 확대는 상상을 초월할 것으로 예측되어진다. 현재 10^8 이하의 마찰계수를 갖는 초전도

자기 베어링을 플라이휠과 같은 에너지 저장 장치에 적용시키는 연구가 국내외적으로 진행되고 있다[1]. 기존의 흡인식 자기 베어링은 감쇠와 강성을 전기적으로 제어할 수 있는 장점이 있으나 능동 제어를 필요로 하며 대부하를 지지하는데 전자석만으로는 한계가 있다. 이에 비해 고온 초전도체를 사용하는 반발식 수동형 자기 베어링은 Meissner 효과뿐만 아니라 자속의 고착현상에 의해 자체적으로 외란에 대하여 위치 안정성을 가지며, 히스테리시스 손실에 의한 에너지 소산을 통하여 외란에 대해 강한 감쇠 능력을 가진다는 장점이 있다. Moon 등은 초전도체를 사용하여 반발식 자기 베어링의 개념을 이용한 고속 회전축에 대하여 공기저항이 있는 경우와 진공 중인 경우 자유 회전의 감소율을 측정하여 마찰계수를 산정하였으며, 진공상태에서의 마찰력은 시간 경과에 관계없이 일정하고, 회전속도에 대해서도 영향을 받지 않는다는 결과를 제시하였다[4].

Weinberger 등은 초전도체 구성 입자의 크기에 따른 자기 베어링에서의 자기적, 기계적인 힘을 측정하였으며[5], Week는 초전도체 베어링의 회전체역학적인 접근을 시도하였고[6], McMichael 등은 실용화가 가능한 정도의 부하용량을 갖는 초전도체 베어링과 hybrid형 베어링을 사용하여 비교 실험을 하였으며[7], Komori 등은 3종류의 초전도체 베어링을 제작하여 각 베어링의 정적 특성과 회전체의 동적 특성에 대한 간단한 실험을 하였고 $30\mu\text{m}$ 보다 작은 runout이 가능함을 확인하였다[8]. Chu 등은 초전도 특유의 성질을 이용하여 여러 가지 형태의 초전도체 베어링을 제시하였으며, 토오크 커플러나 진동 댐퍼와 같은 장치로 응용이 가능함을 보여주었다[9]. Takeda 등은 반발력의 히스테리시스 특성을 임계상태 모델을 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 정적 강성과 진동 특성에 관한 기초적인 실험을 하였다[10]. 上坂 充 등은 동적 전자력의 외부 자장변화와 속도 의존성에 대한 실험, 준정적 전자력의 히스테리시스 특성에 대한 실험, 초전도 연성 진동과 자기 댐핑에 대한 실험을 수행하였으며, 수치해석 결과와 비교하였다[11]. Masanori 등은 초전도체 베어링을 플라이휠에 적용하는데 있어서, 자석의 크기와 조합의 영향을 수치해석하였다[12]. 외부에서의 활발한 연구 활동과는 대조적으로 아직 국내에서는 초전도체의 베어링으로서의 응용을 위한 기초적인 실험의 수행조차 미진한 상태이다. 본 연구에

서는 환상형의 YBCO계열의 고온 초전도체와 네오디움계열의 영구자석을 사용하여 초전도체와 자석간의 간극 변화와 상대 속도 변화 및 자속밀도 변화에 따른 반발력 변화와 간극 변화에 따른 강성의 변화를 냉각 조건을 달리하면서 실험하였고 반발식 자기 베어링으로의 응용 가능성을 살펴보았다.

2. 본 론

2-1. 초전도 이론

초전도란 임계온도 이하에서 전기저항이 사라지며 나타나는 전자기적 성질을 지칭하는 현상이다. 그러나 단순히 영저항인 완전 도체의 자기적 성질과는 구별되는 초전도체 특유의 자기적 거동이 있다. 완전 도체인 경우에는 저항이 없으므로 시간에 따른 자속밀도의 변화가 없다($\dot{B}=0$). 자계가 전혀 존재하지 않는 상태에서 임계온도 이하로 냉각된 뒤(zero field cooling) 자계가 인가되면 도체 내부의 자속밀도는 변화할 수 없기 때문에 자속밀도는 영에 머문다. 이때 자계의 인가는 저항이 없는 도체의 표면에 전류를 유도하고, 이 전류는 도체 내부의 모든 곳에서 인가자계의 자속밀도를 상쇄할 수 있는 자속밀도를 발생시킨다. 결국 자속의 중첩은 도체 내부에 자속밀도가 없는 완전 반자성의 형태로 나타난다. 그후 인가자계가 영으로 감소하면 도체는 처음의 자화되기 전의 상태로 된다.

반면 자계가 존재하는 상태에서 임계온도 이하로 냉각되면(field cooling) 도체는 일반적으로 비투자율이 1정도이므로 도체 내부의 자속밀도는 인가자계의 그것과 같고 자속밀도는 변화 없이 유지된다. 그때 인가자계를 영으로 하면 도체 내의 자속밀도는 변화할 수 없기 때문에 도체의 온도가 임계온도 이하로 계속 유지되는 한 영구히 자속을 유지한 채 유도전류가 유지될 것으로 예상되나 실제로는 자계가 존재하는 상태에서 임계온도 이하로 냉각되면 도체는 자발적으로 완전 반자성이 되어 내부의 자속을 모두 상실한다. 이는 도체가 초전도 상태에서 내부에 자속밀도가 존재하는 것을 허용하지 않는다는 것을 의미하며($B=0$), Meissner효과라고 한다. 즉, 초전도체의 자화 상태는 인가자계와 온도에만 의존하고, 이들의 조건에 이르기까지의 과정에는 의존하지 않는다.

한편 초전도체는 저항이 없는 상태에서 흘릴 수 있는 전류의 상한치가 있는데 이를 임계전류밀도(J_c)라

고 부르며, 만약 전류가 이 값을 넘으면 저항이 나타난다. 그리고 인가자계의 자속밀도(즉 표면에서의 자속밀도)가 증가하면 초전도체 표면에서부터 임계치에 도달하게 되며 이때의 자속밀도를 임계자속밀도(B_c)라 부른다. 그러나 도체 외부에서의 자속밀도는 H 를 자계의 강도, μ_0 를 진공 중에서의 비투자율이라 할 때, 항상 $\mu_0 H$ 와 같기 때문에 임계자계의 강도 H_c 는 B_c/μ_0 와 같다. 다시 말해 표면의 임의의 점에서 표면전류와 인가자계에 의한 전체 자계의 강도가 임계자계의 강도 H_c 를 넘을 때에 초전도체는 그 영저항을 잃는다. 앞에서 언급한 표면전류는 전류가 초전도체의 내부를 통과할 수는 없지만, 표면에는 흐를 수 있다는 전자기학적인 해석으로부터 얻은 결론이며, 차폐 전류(shielding or screening current)라고도 부른다. 초전도체가 인가자계 속에 있을 때 자속밀도는 초전도체의 표면에서 급격히 영으로 되지는 않으며, 차폐 전류가 흐르고 있는 영역 내에서 소실된다. 이 때문에, 전류가 흐르고 있는 깊이를 침입깊이라고 하며 이는 인가자계의 자속이 그곳까지 침입해 있는 것 같이 보이는 깊이이기 때문이다. 따라서 초전도체가 완전 반자성이라 해도, 실제로는 매우 근소한 자속의 침입영역이 있고, 자속밀도는 이 영역에서 소실된다.

대개의 초전도체는 제작하는 과정에서 불순물이 포함되거나 결정에 결함이 존재하게 되는데 이를 제 II 종 초전도체라 한다. 제 II 종 초전도체를 field cooling 한 후 인가자계를 제거하더라도 초전도체 내부에는 잔류 자속밀도를 일으키는 포획 자속(trapped flux)이 남게 된다. 다시 말해, 결함이 많을수록 임계온도 이하에서도 초전도 상태로 되지 않는 부분이 체적 비율로 보면 근소하나 잘게 많이 남는다. 이 상전도 상태로 남아 있는 부분은 자기장이 통과하기 쉽기 때문에 와사상태로 전류가 흐르게 되며 자속선은 소위 이 함정과 같은 부분에 걸려 변화하지 못하게 된다. 이를 자속의 고착(pinning)현상이라고 하며 제 II 종 초전도체가 위치안정성을 갖게 되는 원인이다.

제 I 종 초전도체와는 달리 제 II 종 초전도체는 어떤 최소, 최대강도의 인가자계에 의해서 혼합상태가 되는데, 이때 최소강도를 하부 임계자계 H_{c1} 라고 하고 최대강도를 상부 임계자계 H_{c2} 라 한다. 이것은 제 I 종 초전도체가 초전도 또는 상전도의 두 상태 중 어느 한 상태로만 존재할 수 있는데 대하여 제 II 종 초전도체는 초전도, 혼합, 상전도의 3가지 상태 중 하나로 존재할

수 있다는 것을 의미한다. 혼합상태에서는 초전도 영역과 상전도 영역의 경계가 인가자계와 나란하게 놓이며, 각 상전도 영역은 원통형으로서 반지름이 ξ (coherence length) 정도이다. 이것을 상전도핵(normal core)이라 부르며, 인가자계의 자속과 같은 방향으로 자속이 각 상전도 핵을 침투하는데 이 자속은 핵주위를 도는 영구 와전류에 의해 발생된다. 이 자속의 꾸러미를 fluxoid라 하며 침입깊이 정도의 반지름을 가지고 삼각형 격자(triangular close-packed lattice)로 배열된다. 혼합상태의 제 II 종 초전도체의 내부에 전류가 흐르면, 전류와 fluxoid는 상호작용으로 Lorentz 힘을 발생한다. 이 힘으로 인하여 fluxoid가 움직이는데, 이를 flux flow라 부르며 이 flux flow 때문에 상전도 영역에서 에너지 손실이 생긴다.

2-2. 실험장치 및 방법

본 실험장치는 제 II 종 초전도체를 이용하여 자기 추력 베어링을 모사하였고 초전도체와 자석간의 상대속도와 간극을 변화시켜 가며 반발력(부상력)과 마찰력을 동시에 측정할 수 있도록 제작되었다. 두 힘을 측정하기 위해서 2종류의 외팔보가 각각 발생하는 힘을 전달받도록 하였다. 그 힘의 변화는 각각의 스트레인게이지에 의해 측정되며 앰프(2B31JF)를 통한 증폭과 filtering을 거친 뒤 A/D 변환된다. 반발력과 마찰력을 각각 calibration하여 환산 계수를 고려해 실험시 힘의 단위로 출력되도록 하였다. 실험장치는 Fig. 1과 같다. Tacho-generator를 내장한 DC 서어보 모터를 사용하여 회전속도를 제어하였으며 네오디움 계열의 영구자석은 환상형(내경: 6 mm, 외경: 22 mm, 두께: 7 mm)으로서 일체형(Onebody)자석을 사용하였다. 초전도체를 냉각시키는데 사용할 저온유지장치(Cryostat)는 재료 선정에 있어 여러 시행착오를 거쳐 결국 스티로폼으로 제작하였다. 저온유지장치의 단열효과가 상당히 우수하여 스트레인게이지가 부착된 반발력 측정장치 부위는 거의 상온을 유지할 수 있었다. 초전도체는 덩어리형 산화물 초전도체의 일종인 YBCO를 사용하여 환상형(내경: 12 mm, 외경: 26 mm, 두께: 9 mm)으로 제작, 사용하였다. 스테핑 모터를 구동하여 초전도체를 올려놓은 판을 볼 스크류를 회전시켜 상하로 움직임으로써 초전도체와 자석간의 간극을 조절할 수 있도록 하였다. 본 실험은 정적인 특성을 파악하는데 관심이 있으므로 실험 결과는 정적 평형이 이

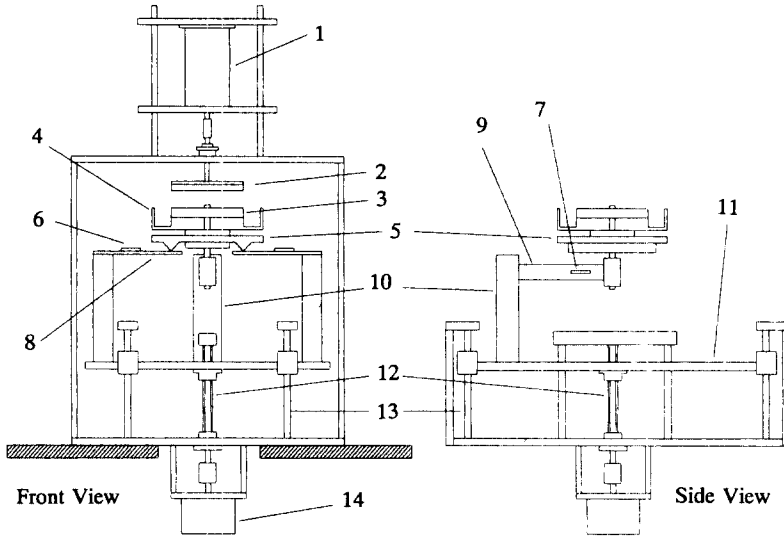


Fig. 1. Overview of experimental system. 1. DC servo motor, 2. Permanent Magnet, 3. Superconductor, 4. Cryostat, 5. Force supporter, 6. Strain gauge(lift), 7. Strain gauge(drag), 8. Cantilever(lift), 9. Cantilever(drag), 10. Cantilever holder, 11. Moving plate, 12. Screw, 13. Linear guide, 14. Stepping motor.

루어진 상태에서 측정되었다.

실험 방법은 다음과 같다. 회전축의 끝단에 환상형 영구자석을 고정시키고 스테핑 모터를 구동시켜 초전도체가 들어 있는 저온유지장치를 영구자석으로부터 일정간극(초기간극)만큼 떨어진 위치로 이동시켜서 초기 인가자계가 형성되도록 한 후 저온유지장치에 액체 질소를 부어 초전도체를 냉각(field cooling)시킨다. 잠시 뒤 저온유지장치가 안정화되면 초전도체를 영구자석에 최소간극(1 mm)까지 접근시킨 후 초기간극보다 더 멀리까지 후퇴시켰다가 다시 초기간극까지 접근시키면서 반발력과 마찰력을 측정한다.

DC 서어보 모터를 구동하면 영구자석과 초전도체 간의 상대 속도를 조절할 수 있으며 영구자석을 여러 개 겹침으로서 자속밀도를 변화시킬 수 있다. 본 실험 장치에서는 초전도체와 영구자석 간의 최대 간극이 55 mm까지 가능한데, 이는 한 개의 영구자석을 사용할 경우 자석의 자장이 초전도체에 영향을 미치는 거리가 40 mm 정도이었기 때문이다. 40 mm 이상의 초기간극에서는 field cooling의 영향이 거의 나타나지 않으므로 그 이상의 간극에서의 냉각은 zero field cooling이라고 볼 수 있었다. 또한 실험시 초전도체가 충분히 냉각된 후 실험에 들어가기 직전상태에서 액체 질소는 0.075 g/sec의 비율로 기화하였는데, 그 양은 한 실험당 걸리는 시간이 수십초 정도이므로 반발력

의 측정에서 기화된 액체 질소의 무게는 무시하였다.

2-3. 실험 결과

모든 실험 결과는 5회 실험한 결과의 평균값을 취하였다. Fig. 2는 영구자석을 회전시키지 않는 상태에서 초기간극을 4, 6, 8, 12 mm로 하여 field cooling을 한 뒤 실험한 결과이다. 초기간극으로부터 시작해서 1 mm씩 초전도체를 영구자석쪽으로 접근시켜 가며

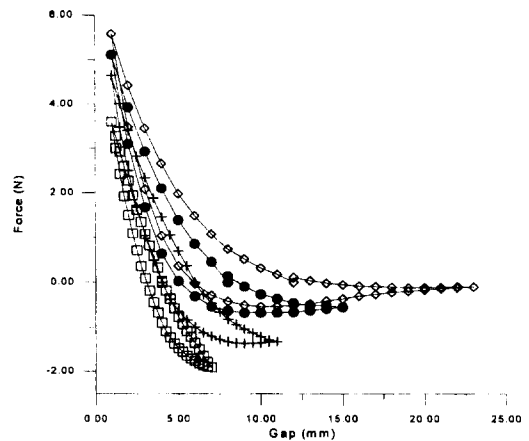


Fig. 2. The variation of forces w.r.t. various initial gap (Onebody magnet, Field cooling) onebody-magnet, om/s, □—□: initial gap=4 mm, +—+: initial gap=6 mm, ●—●: initial gap=8 mm, ◇—◇: initial gap=12 mm.

최소 간극 1 mm까지 접근시켰다가, 다시 1 mm씩 후퇴시키면서 초기간극의 2배만큼 후퇴시켰다가 다시 1 mm씩 접근시켜 원위치로 오는 동안 각 간극에서의 반발력을 측정하였다. 반발력은 자기력이 거리의 제곱에 반비례하므로 접근할 경우와 멀어질 경우 모두 쌍곡선 적으로 증가하였다가 감소하는데 멀어질 경우에는 접근 시보다 같은 간극에서 작은 반발력이 측정되었다. 따라서 초기간극보다 가까운 위치에서 이미 반발력은 영이 되며 초기간극과 같은 거리에서는 흡인력으로 작용함을 알 수 있다. 이후 최대 간극까지 흡인력이 유지되다가 다시 초기간극으로 원위치 되면 최초의 평형 상태로 복귀된다. 이러한 히스테리시스 특성은 fluxoid가 자유로이 움직이는 것을 방해해서 비가역 자화(irreversible magnetization)를 일어난게 하는 고착현상때문에 발생한다.

마찰력은 반발력에 비해 매우 작은 값으로 나타나며 실험 과정 동안 거의 변화를 보이지 않는데 그 작은 변화도 데이터 수집 시스템에서의 잡음이나 액체 질소에 의한 냉각에 따른 외팔보의 열변형 등이 영향을 준 것으로 판단된다[13]. 그러므로 마찰력은 매우 정밀한 측정 장치를 별도로 구성하지 않는 한 본 실험 장치로는 그의 변화를 측정하기 곤란하여 결과정리에서는 생략하였다.

예비실험에서 초전도체를 field cooling하고 환상형 영구자석을 초전도체 상부 공간에 띄운 후 영구자석을 회전시켜 보면 그 위치에서 상당 시간 회전이 안정적으로 유지되었다. 이러한 위치안정성은 제 I종 초전도체의 자기 부상이 단지 Meissner 효과에 의한 반발형이므로 수평 방향의 안정성이 결여되어 있는데 비하여, 제 II종 초전도체의 경우는 특이한 비선형 전자현상인 자속의 고착현상에 의하여 역학적 평형 상태의 보존이 이루어지기 때문이다. Fig. 2에 의하면 field cooling 상태에서 영구자석을 초전도체에 접근시킨 후 원위치 시키면 반발력이 흡인력으로 작용하면서 고착 현상이 유지될 수 있으므로 부상효과(fishing effect)가 있다고 볼 수 있다. 반면 zero field cooling의 경우 같은 방법으로 실험해 보면 수평방향으로의 안정성이 없었다.

반발력의 변화가 보여주는 히스테리시스 특성은 초전도체의 표면전류 분포변화에 기인한 것이다. 즉, 간극이 가까워지면 표면전류가 초전도체 상부의 표면으로부터 초전도체 속으로 침투하면서 흐르며, 간극이

멀어지면 원래 침투되어진 표면전류의 분포는 변화 없이 그대로 유지되면서 반대 방향으로의 표면전류가 초전도체의 상부로부터 초전도체 내부로 침투하며 흐르게 되어 반발력이 히스테리시스 특성을 띄게 되는 원인이 된다. 그리고 반발력의 미소한 불규칙성은 초전도체의 grain 경계나 미소 크랙에 의한 영향이라 볼 수 있다. 왜냐하면 표면전류가 grain 경계에 의해 여러 영역으로 국소화되고, 미소 크랙에 의해 왜곡되면서, 결과적으로 표면전류가 동심원적으로 흐를 수 없기 때문이다.

이러한 히스테리시스 손실특성은 초전도 자기부상이 외란에 대하여 강한 뎀핑특성을 보이는 원인이라고도 할 수 있다. 이 특성은 일종의 에너지소산 과정으로 제 II종 초전도체의 특징이라 할 수 있으며 실제로 예비 실험에서 부상되어 있는 초전도체에 변위를 일으킨 후 진동시키면 상당히 짧은 시간 내에 진폭이 감소하는 현상을 관찰할 수 있어서 정성적으로 강한 뎀핑이 있음을 확인할 수 있었다.

한편 이 실험으로부터 field cooling시의 초기간극이 감소할수록 최소간극에서의 최대 반발력은 감소하며 히스테리시스 루프의 영역이 줄어들어 뎀핑의 영향이 감소함을 알 수 있다. 그러나 간극이 초기간극보다 커진 영역에서의 최대 흡인력은 계속 증가하였고 이는 초기간극이 작을수록 부상효과가 커져서 강성이 증가됨을 뜻한다.

Fig. 3은 초기간극을 8 mm로 하고 field cooling한

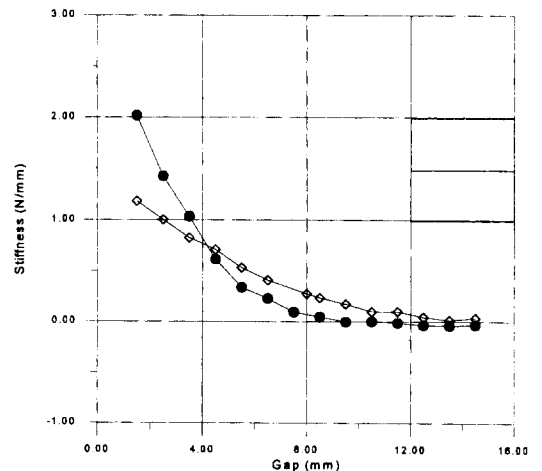


Fig. 3. The variation of static stiffness (initial gap : 8 mm) ◇—◇: Approach, ●—●: Retreat.

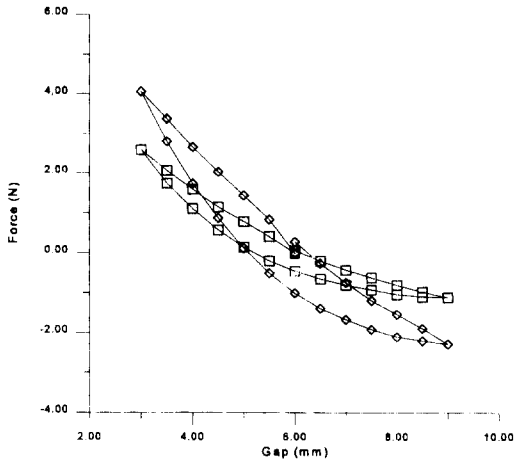


Fig. 4. The variation of forces w.r.t. flux density (initial gap: 6 mm) Magnetic flux density \square — \square : 1.93 K gauss, \diamond — \diamond : 2.85 K gauss.

후 간극변화(8→1→8→15→8 mm)에 따른 정적 강성의 변화를 보여준다. 정적 강성은 초기간극보다 먼 영역에서는 영으로 수렴하나 가까운 영역에서는 급격히 증가하는 비선형적인 거동을 하며, 히스테리시스 특성에 따라 접근시보다 후퇴시가 더 비선형적인 경향을 보여주고 있다.

Fig. 4는 영구자석의 자속밀도 변화에 따른 반발력의 변화로서 초기간극을 6 mm로 하고 간극변화(6→3→6→9→6 mm)를 주었을 경우의 결과인데, 자속밀도가 커지면 히스테리시스 루프의 면적이 증가하며 반발력과 흡인력도 더 커진다. 이것은 같은 간극변화에 대해서 자속밀도의 변화가 더 커져서 차폐전류가 더 많이 유기되었기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 강한 자속밀도 하에서 field cooling된 초전도체는 보다 큰 강성과 뎀핑특성을 갖게 된다.

Fig. 5는 영구자석과 초전도체간의 상대속도 변화에 따른 반발력의 변화로서 초기간극을 10 mm로 하고 간극변화(10→1→10→19→10 mm)를 주었을 때의 결과인데, 상대속도의 변화가 있어도 최대 반발력의 변화는 거의 없으며, 최대 흡인력은 속도가 증가함에 따라 약간 감소하고 히스테리시스 루프의 면적은 조금 줄어든다. 즉, 상대속도의 증가는 강성에는 거의 영향을 미치지 않으나 감쇠능을 약화시키는 경향을 보이며 이는 일반적인 추력베어링의 경우와는 상당히 다른 양상을 보이고 있다.

Fig. 6은 초기간극 4 mm에서 field cooling한 후 1

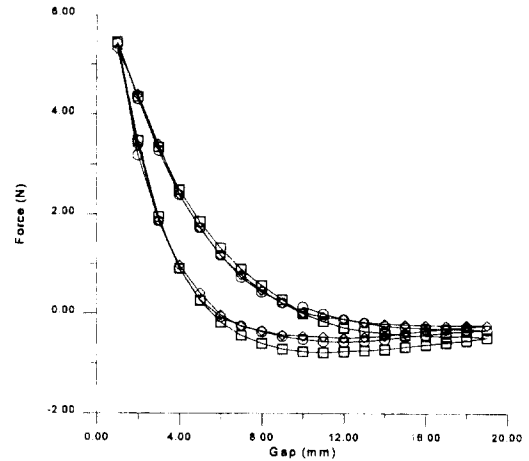


Fig. 5. The variation of forces w.r.t. relative velocity between magnet and superconductor (initial gap: 10 mm) Relative velocities of magnet \square — \square : 0 m/s, \circ — \circ : 0.023 m/s, \diamond — \diamond : 0.786 m/s.

mm까지 접근시켰다가 7 mm와 9 mm까지 후퇴시킨 뒤 원위치 시키면서 반발력의 변화를 측정 한 실험 결과이다. 후퇴거리가 증가할수록 히스테리시스 루프의 면적은 넓어지나 강성은 거의 영으로서 변화가 없으며 최대반발력 및 최대흡인력의 크기에도 변화가 없다.

Fig. 7은 간극의 반복변화(8→1→8→1→8→1→8→1→8 mm)에 따른 힘의 변화로서 최소간극에서 후퇴하여 초기간극으로 돌아온 후 다시 최소간극으로 접근시키면 반발력이 처음의 초기간극에서 접근하여 최

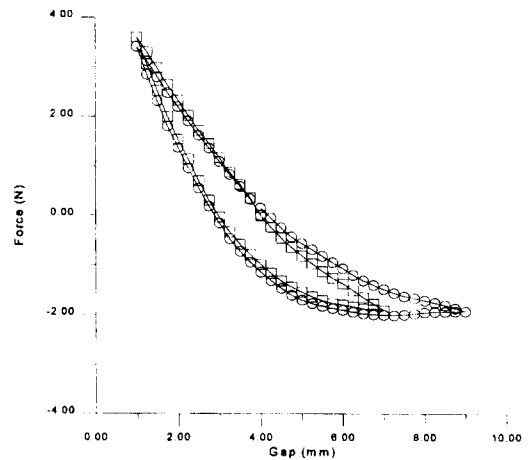


Fig. 6. The variation of forces w.r.t. retreat distance (initial gap: 4 mm) Retreat \square — \square : 3 mm backward, \circ — \circ : 5 mm backward.

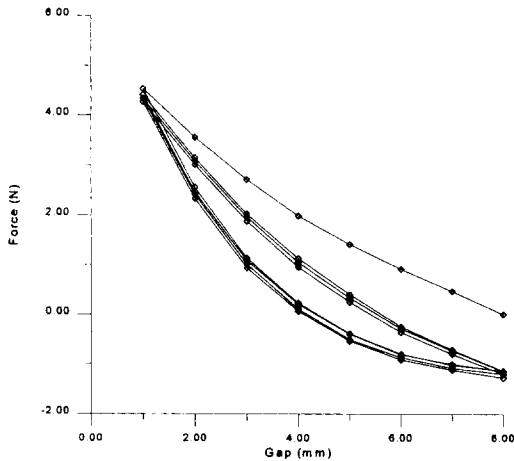


Fig. 7. The variation of forces w.r.t. repetitive variation of gap (initial gap: 8 mm).

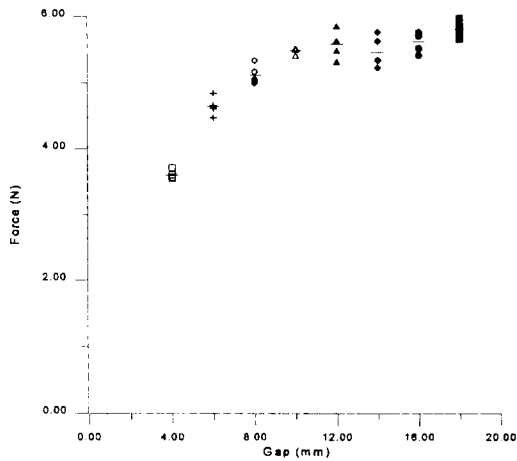


Fig. 8. The variation of forces at minimum gap w.r.t. various initial gap. Maximum lift force at 1 mm gap □—□: Initial gap=4 mm, +—+: Initial gap=6 mm, ◇—◇: Initial gap=8 mm, △—△: Initial gap=10 mm, ▲—▲: Initial gap=12 mm, ◆—◆: Initial gap=14 mm, ●—●: Initial gap=16 mm, ■—■: Initial gap=18 mm.

소간극이 되었을 경우에 발생되었던 최대반발력과 같은 값으로 수렴됨을 알 수 있다. 이와 같이 최대반발력은 간극변화를 반복하여도 일정하며, field cooling 시의 초기간극 및 자속밀도에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 또한 간극이 반복되게 변화할 경우 즉, 초전도체 또는 영구자석이 진동할 경우 그 진폭의 크기에 상관없이 히스테리시스 루프는 폐곡선을 이루나 진폭이

줄어들면 히스테리시스 루프의 면적은 줄어들고 감쇠능도 떨어지게 된다.

Fig. 8에는 field cooling하에서 초기간극변화에 따른 최소간극(1 mm)에서의 최대반발력의 변화를 도시하였다. 초기간극이 증가할수록 최소간극에서의 최대반발력도 증가하면서 일정 값으로 수렴되어 가는데 이는 초기간극이 멀어질수록 zero field cooling에 근사해지므로 최대반발력도 그때의 값에 수렴한다고 볼 수 있다. 따라서 최대반발력을 얻기 위해서는 zero field cooling이 바람직하나 이 경우 위치안정성이 확보되지 못하는 결점이 있다.

3. 결 론

YBCO계열의 초전도체와 네오디움 계열의 영구자석을 이용하여 초전도 반발식 자기 베어링 시스템을 구성하였고 자장이 형성된 상태에서 초전도체를 냉각한 후 초전도체와 영구자석간의 간극변화, 상대속도변화, 자속밀도 변화를 통한 반발력의 변화를 측정하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 간극변화에 따른 반발력의 변화는 히스테리시스 특성을 보이며 이는 고착현상에 의한 비가역 자화 때문으로서 감쇠의 원인이 된다.
2. 초전도체와 영구자석간의 상대속도가 증가할수록, 진동변위가 줄어들수록, 자속밀도가 감소할수록 히스테리시스 루프의 면적이 줄어들며, 이는 감쇠능의 감소를 의미한다.
3. 정적강성은 초기간극보다 멀리 떨어진 영역에서는 거의 영으로 일정하나 가까운 영역에서는 쌍곡선적으로 증가하며 접근시보다 후퇴시가 더욱 급격히 변화한다.
4. 반발력은 field cooling시 초기간극을 크게 할수록 최소간극에서 증가하며, zero field cooling일 때의 값으로 수렴해 간다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술 연구조성비 기계공학분야 지원과제(ME95-E-12)에 의하여 이루어졌으며, 초전도체 제작에 도움을 주신 한국원자력연구소 초전도체연구실 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 박해웅, 김찬중, 홍계원, "고온 초전도체를 이용한 에너지 저장장치(플라이휠)," 電氣學會誌 第44卷 3號 1995年 3月.
2. 大塚泰一郎, "超傳導の世界 なぜ起こる? どう使う?," 1987, 講談社.
3. 岩田 章, "應用超 導 電磁推進船から 超 導自動車まで," 1990, 講談社.
4. Moon, F.C. and Chang, P.Z. "High-Speed Rotation of Magnets on High T_c Superconducting Bearings," Appl. Phys. Lett. 56(4), Jan. 1990, pp. 397-399.
5. Weinberger, B.R. *et al.*, "Characterization of Composite High Temperature Superconductors for Magnetic Bearing Applications," IEEE Transaction of Magnetics, Vol. 27, No. 2, March 1991, pp. 2415-2422.
6. Weeks, D.E., "Rotational Dynamics of Passive High T_c Superconducting Bearings," Appl. Phys. Lett. 70(3), 1 Aug. 1991, pp. 1820-1825.
7. McMichael, C.K. *et al.*, "Practical Adaptation in Bulk Superconducting Magnetic Bearing Applications," Appl. Phys. Lett. 60(15), 13 April 1992, pp. 1893-1895.
8. Moon, F.C. *et al.*, "Superconducting Bearings for High Load Applications," Applied Superconductivity, Vol. 1, Nos. 7-9, 1993, pp. 1175-1184.
9. Chu, W.K. *et al.*, "Applications of High Temperature Superconductors on Levitation Bearings and other Levitation Devices," Applied Superconductivity, Vol. 1, Nos. 3-6, 1993, pp. 1259-1264.
10. Takeda, N. *et al.*, "Computation and Experiments on the Static and Dynamic Characteristics of High T_c Superconducting Levitation," Cryogenics, Vol. 34, No.9, 1994, pp. 745-752.
11. 上坂 充, 吉田義勝, 官 健三, "高온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卷 570, 1994, pp. 126-133.
12. Tsuchimoto, M. *et al.*, "Numerical Evaluation of Levitation Force of HTSC Flywheel," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 4, No. 4, Dec. 1994, pp. 211-215.
13. 유제환, 임운철, "고온 초전도체를 사용한 반발식 마그네틱 베어링의 특성에 관한 실험적 연구," 한국윤활학회 추계학술대회 1996, pp. 202-206.