

YBCO 고온초전도체를 이용한 자기부상 주행모델 제작

오 상수^o, 하 동우, 이 언용, 권 영길, 조 전욱, 나 완수, 진 흥범,
한 태희, 류 강식
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Fabrication of magnetic levitation - traveling model using YBCO high Tc superconductor

S.S. Oh, D.W. Ha, E.Y. Lee, Y.K. Kwon, J.W. Cho, W.S. Nah,
H.B. Jin, T.H. Han, K.S. Ryu
ASL, Korea Electrotechnology Research Institute

YBCO bulks for levitation have fabricated using MPMG method. The superconducting properties and repulsive/attractive force against permanent magnet were investigated for the specimens annealed at various periods after MPMG.

A linear induction motor type levitation - traveling vehicle using the pinning force of MPMG processed YBCO bulk has fabricated.

The floating or hanging small vehicle mounted with two YBCO pellets was confirmed to travel stably on the Nd-Fe-B permanent magnet track. The traveling speed of the vehicle was confirmed to depend on AC frequency linearly. At 200 Hz, the traveling speed was found to be 110 cm/sec.

1. 서론

최근 산화물계 고온초전도체의 새로운 응용분야로서 영구자석과 제2종 초전도체의 핀닝현상을 이용한 자기부상 응용 연구 [1, 2]가 새롭게 부각되고 있다. YBCO 고온초전도체를 MPMG법으로 제조하면 외부로 부터 침입하는 자속선을 고정(pinning)하는 결합인 211상이 포정반응에 의하여 시료내에 미세하게 생성되고 이러한 결합들에 의하여 자장하의 임계전류밀도가 향상된다. 프로세스중의 서냉(slow cooling)과정에서 123상의 결정입자가 조대하게 되어 결과적으로 임계전류밀도와 결정입자크기의 증가에 의하여 YBCO초전도체의 부상력이 증가하게 된다.

본 연구에서는 MPMG법으로 YBCO초전도시료를 제조하고 후 열처리 조건에 따른 영구자석과의 반발/흡인특성을 조사하였다. 또한 MPMG법으로 만든 YBCO펠렛시료 2개를 탑재한 액체 질소 주입 구조의 우레탄 비히클과 Nd-Fe-B계의 영구자석 트랙을 제작하고 리니어 유도방식의 추진코일을 설치하여 자기부상주행모델을 완성시킨 후 비히클의 주행특성을 조사하였다.

2. YBCO 시료제조

초전도체 시료의 조성이 Y:Ba:Cu = 1.8:2.2:3.4가 되도록 출발원료 분말의 무게를 재어 불필요로 혼합한 후 분말을 알루미늄이나 도가니에 충전하여 910 °C, 공기 중에서 하소처리를 하였으며 이를 분쇄하여 백금도가니에 넣고 1410°C에서 40분동안 가열한 후 용융된 시료를 급냉용 구리판에 부은뒤 다른 구리판으로 눌러 급냉시켰다. 급냉시킨 시료를 다시 자동유발기를 이용하여 4시간 동안 분쇄시킨 후 분말로 만들었다. 이처럼 용융시켜 만든 분말에 10wt%의 AgO분말을 첨가하여 다시 혼합하였다. 그 후 분말을 펠렛형으로 만든 후 900 °C일 때 전기로에 넣어 1120 °C에서 20분간 유지한 다음 1000°C에서 950°C까지 냉각이 된 시료는 상온까지 3 시간에 걸쳐 냉각을 시켰다. 이렇게 MPMG공정을 거친 시료를 산소분위기 600°C에서 각각 12, 24, 48시간 동안 열처리 하였다.

3. 시료의 반발/흡인 특성

하부입계자장 Hc1이하에서 제2종 초전도체는 외부로 부터의 자장 침입을 완전히 배척하는 Meissner효과를 나타낸다. 이러한 효과를 이용하면 영구자석은 초전도체를 부상시킬 수가 있고 초전도체에 영구자석을 부상시키는 것도 가능하다. 그러나 Meissner효과에 의한 자기반발력은 작기 때문에 응용에는 제한을 받는다. Hc1이상에서도 초전도체의 자속선 핀닝효과를 이용하면 자기반발력을 얻을 수 있다.

외부자장이 초전도체내로 침입할 때 내부자장은 1차원적으로 다음과 같은 자장기울기를 갖는다.

$$dB / dx = \mu_0 J_c \quad (1)$$

자속밀도 기울기는 시료의 결합에 의한 자속선의 핀닝과 관계가 있다. Jc가 크면 초전도체의 많은 부분이 자속선 핀닝에 의하여 차폐될 수 있으므로 Jc가 큰 벌크시료에서 큰 반발력이 일어난다.

초전도체와 영구자석사이에 작용하는 힘은 1차원적으

로는

$$F = A J_c r v \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. A, r, v는 각각 기하학적 정수, 차폐전류 루프의 반경, 시료의 체적이다. 영구자석이 동일한 경우에는 dH/dx 가 상수가 되고 큰 반발력을 얻기 위하여는 J_c 혹은 r을 크게하는 것이 필요하다.

MPMG법으로 제조한 YBCO시료의 영구자석과의 반발 및 흡인력을 전자저울로서 측정하였다. 초전도체를 영구자석 쪽으로 가까이 갖고 갈 때 초전도체가 경험하는 자장은 증가한다. 이것은 결과적으로 반자성 자화(-M)를 증가시키고 따라서 반발력도 비례하여 커지게 된다. 한편 초전도체를 영구자석에서 멀리 할 때 초전도체의 외부자장은 감소한다. 이 때 초전도체내의 결함들에 의해 일부 자장이 트랩되고 흡인 성분인 +M이 발생한다. 어느 임계 자장이나 거리에서 +M이 -M과 같아지면 반발력은 제로가 된다. 최종적으로는 트랩된 자장에 의하여 힘은 흡인 쪽으로 바뀐다. 본 연구에서는 MPMG법으로 제조한 다음 시간을 12시간, 24시간, 48시간 서로 달리하여 열처리한 시료의 반발/흡인력을 측정하였는데 48시간 열처리한 시료에서 그림1에 나타난 것과 같이 큰 반발력이 얻어졌으며 5 mm 갭에서 18 mm 직경의 펠레트 시료를 이용하여 0.2 kgf의 반발력이 확인되었다. 이것은 MPMG후의 열처리 시간을 길게하여 MPMG의 서빙과정에서 성장한 수 mm크기의 조대한 정방정123상이 대부분 사방정123상(초전도상)으로 변태된 것과 관계가 있다고 생각된다.

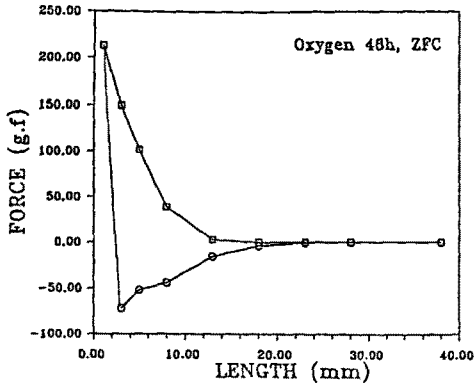


그림1 48시간 후열처리한 시료의 흡인/반발특성
Fig.1 Repulsive/attractive force vs length for the sample annealed for 48 h.

4. 비히클 및 주행시스템 제작

부상용 비히클은 우레탄을 가공하여 만들었다. 펠레트 시료 두개를 차체바닥 중앙의 두 곳에 삽입하고 단 열효과를 높이기 위하여 gauze를 시료위에 놓았다. 액체질소는 차체밀의 흡을 통하여 내부로 주입되며 액체질소 증발을 억제하기 위하여 뚜껑을 씌우고 저온접착제로 밀봉하였다. 또한 비히클을 추진시킬 목적으로 와전류를 유도시키기 위하여 전도성이 좋은 은판 두개

를 비히클의 양쪽에 수직으로 삽입하였다.

부상용 주행트랙은 크기가 50 mm L x 10 mm W x 11 mm H이고 표면 자속밀도가 3000 ~ 4000 Gauss 정도 되는 Nd-Fe-B계 영구자석을 자계분포가 그림2와 같이 되도록 서로 접합하여 타원형의 트랙을 제작하였으며 이때 접합 및 자계강도를 향상시키기 위하여 자석밀에는 철판을 깔았다. 트랙의 중앙부의 두 곳에는 추진코일을 설치하였다. 추진코일은 선형유도모터(Linear Induction Motor)의 형태로 제작되었다. 변압기용 철심재료인 Fe-Si계 E형 판을 적응한 후 주위를 플라스틱 틀로 고정시키고 그 위를 동선으로 권선하여 12개의 전자석 코일을 만들었다. 트랙의 형상과 추진코일의 구조를 그림3에 나타냈다. 추진코일과 전원의 배선은 Y결선으로 하였으며 주파수제어를 위하여 사이에 인버터를 설치하였다. 결선구조를 그림4에 나타냈다.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| N | N | N | N | N | N |
| S | S | S | S | S | S |
| N | N | N | N | N | N |

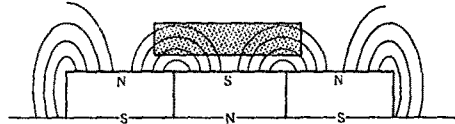


그림2 영구자석트랙의 자계분포도
Fig.2 Schematic illustration of magnetic field distribution of permanent magnet track.

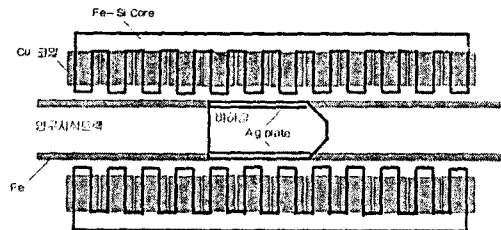
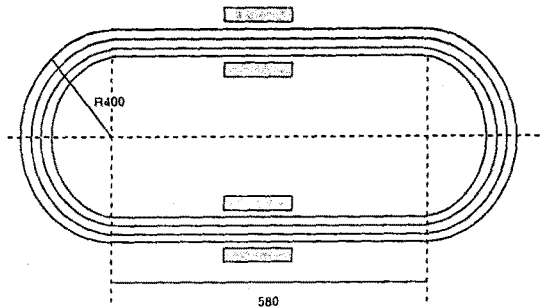


그림3 영구자석트랙의 외관과 추진코일의 구조
Fig.3 Schematic illustration of track and propulsion coil.

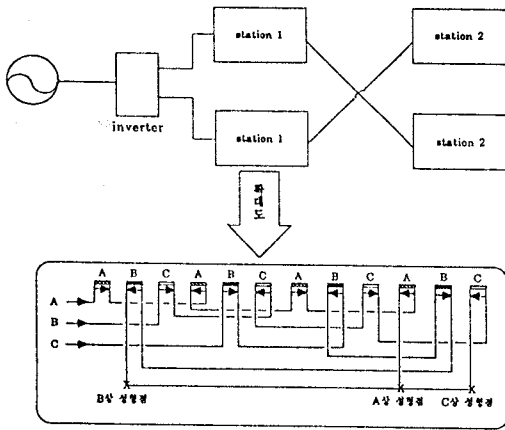


그림4 전원과 추진코일과의 결선도
Fig.4 Block diagram between power source and propulsion coil.

5. 비히클의 주행특성

비히클을 액체질소중에서 충분히 냉각시킨 후 트랙 위에 부상시키고 추진코일(linear induction motor)을 3상 교류전류로서 여자하여 주행특성을 조사하였다. 여자주행의 경우 관성 주행에 비해서 비히클이 주행도중 조금 기울어진 채로 주행하는 것과 부상시간이 관성주행에 비하여 짧은 것을 확인하였다. Ogihara의 보고 [2]에 의하면 부상시간이 여자주행시 짧아지는 것은 교류손실의 영향으로 해석하고 있다. 관성주행시는 열침입에 의한 방열로 부상체의 온도가 상승하고 여자주행에서는 초전도체 전체에 영구자석으로 부터의 자장에 의하여 입계에서 저항성분이 생기고 추진코일에 의하여 초전도체에 변동자장이 인가되면 그 저항성분을 매개로 하여 와전류가 유도되므로서 손실이 생긴다는 것이다.

추진코일에 교류전류가 인가되면 은판에는 렌츠의 법칙에 의하여 같은 극의 자장을 발생시키는 와전류가 유도된다. 은판(2차측)에 유기되는 기전력에 의하여 흐르는 전류밀도 J 는 추진코일(1차측)과의 사이의 공극 자계의 시간적인 변동에 의하여 발생하는 유도기전력과 2차측이 운동하여 공극자계를 V 의 속도로 끊음으로서 유기되는 운동기전력에 의하여

$$J = k(E + V \times B) \quad (3)$$

으로 나타낸다. 여기서 k 는 도전율이다. 공극에서의 비히클 진행방향으로의 traveling field는

$$B_y = B_m \exp[j(\omega t - (\pi/\tau)x)] \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. B_m 은 최대 자속밀도이다. 추진코일에서의 발생자장과 와전류의 수직성분(비히클의 위에서 밀로 향하는)의 전류에 플레밍의 왼손법칙에 의하여 로렌츠력이 작용하고 이힘에 의하여 비히클은 추진하게된다. 이러한 로렌츠력은 은판의 두께 및 전도도, traveling field의 특성 및 동기속도등에 비례한다 [3].

추진코일 여자시 인버터로서 교류주파수를 증가시키 나갈 때의 비히클의 주행속도 변화를 측정하여 그 결과를 그림5에 나타냈다. 비히클의 주행속도는 주파수가 증가할수록 비례하여 직선적으로 증가되었는데 traveling field의 동기속도에 비례하는 것으로 확인되었다. 주파수를 200 Hz로 고정하고 트랙위를 주행 회전시켰을 때의 회전 횟수와 주행 속도와의 관계를 그림6에 나타냈다. 비히클의 주행 속도는 회전 횟수와 함께 증가하다가 4회에서 최대속도에 달한 후 완만하

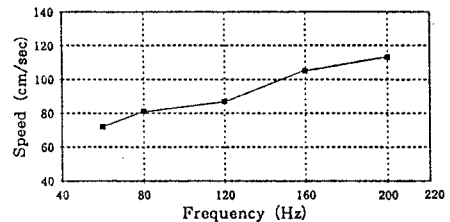


그림5 비히클의 주행속도의 교류주파수 의존성
Fig.5 Frequency dependence of traveling speed of vehicle.

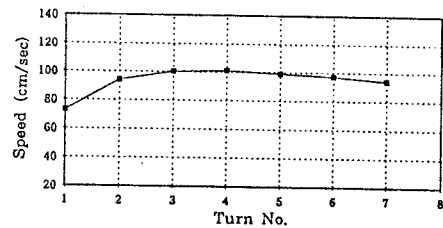


그림6 주행속도와 회전 횟수와의 관계
Fig.6 Traveling speed vs turn No.

게 감소하는 것을 알 수 있었다. 비히클은 출발시킬 때 일정 주행거리에서 가속도가 붙어 최대속도에 달한 후 비히클의 냉각성능 저하에 의하여 초전도시편의 부상력이 감소하고 결과적으로 주행속도가 감소하는 것으로 생각되었다.

6. 결 론

본 연구에서 MPMG법으로 제조한 시편은 48시간 후열처리에 의하여 18 mm 직경의 펠렛트에서 0.2 kgf의 자기 반발력을 나타냈다. 이러한 시료를 두개 탑재하여 제작한 비히클을 영구자석트랙위에 부상시켜 linear induction motor를 3상교류전류로 여자시킨 결과 비히클은 타원형 트랙위를 안정하게 주행하였다. traveling field의 동기속도에 비례하여 비히클의 주행속도가 빨라지는 것을 확인하였고 200 Hz주파수에서 110 cm/sec의 주행속도가 확인되었다.

참고문헌

- [1] Murakami et al. : Processing and properties of HIGH Tc Superconductors, World Scientific, Vol.1, edited by S. Jin.
- [2] M. Ogihara and K. Aihira : Japan Cryogenic Engineering, 27 (1992) 49.
- [3] T. K. Ko : Private communication.