고온 초전도 응용

이상헌 교수 (선문대학교 전자공학과)

1. 서 론

저온 초전도체로 시작된 초전도체에 대한 열기는 1986년 스위스 IBM연구소의 Bednorz와 Müller에 의한 LaBaCuO계 산화물 초전도체가 발견된 이래 본격적인 연구가 활성화되어 고온 초전도체의 시대가 열리게 되었다. 특히, 1987년 미국 휴스턴대학의 Chu와 알라바마대학의 Wu에 의한 임계온도 90 K 이상인 YBCO계 고온 초전도체가 발견되면서 TV와 신문을 포함한 각종 매체를 통해 '제3의 산업혁명'으로 부르며 그 열기가 가속화되었다. 이러한 YBCO산화물 초전도체의 발견은 고자기장 영역에서 높은 전류밀도 값의 실현이 가능해져 전력시스템 및 전기기기 분야에 상용화를 위한 실용화 연구가 미국, 일본 및 유럽을 중심으로 집중적으로 진행되고 있다. 고온 초전도 응용기술은 전력, 수송, 에너지, 의료, 전자 등 많은 분야에 다양하게 응용이 되고 있다. 특히, 초전도 전력응용 분야는 전력 손실이 없으며 친환경적이고 대용량화가 가능하면서 무게와 부피를 경감시킬 수 있다는 이점으로 인해 많은 연구가 진행되고 있다.

고온 초전도체는 임계온도 이외에도 여러 가지 성질이 종래의 금속 초전도체와는 판이하게 다른 것으로 알려져 있다. 세라믹의 특성인 층상구조로 인하여 여러 가지 물리적 성질, 전기저항, 임계자장, 간섭 길이, 에너지 간격 등이 심한 이방성을 나타내며 부서지기 쉽고 원하는 모양으로 만드는데 어려움이 있다. 그러나 유리한 점은 고온 초전도로서 전체 혹은 일부 시스템을 운영할 경우 액체헬륨 대신 액체질소를 냉매로 쓸 수 있기 때문에 저온 초전도시스템과 비교해 볼 때 열적 단열을 위한 비용의 감소뿐 아니라 전체적인 비용도 상당히 감소되는 것이다. 이러한 점 때문에 고온 초전도체의 응용은 많은 분야에서 시도되고 있으며 그중 가장 실용화에 근접되어 있는 것으로 초전도 벌크 분야가 주목을 받고 있다. 이는, 초전도 상태에서 강한 Pinning Force를 이용하여 자기베어링의 동작으로 응용할 수 있기 때문이다. 따라서 고온 초전도체를 플라이휠, 초전도 베어링 모터로 활용하는 시도는 초전도 산업화를 위해서도 대단히 중요한 의미를 갖는다.

2. 초전도 베어링

초전도 베어링은 일반적으로 영구자석을 포함하는 회전자와 고온 초전도 벌크로 구성된 고정자로 이루어진다. 회전자를 평행한 위치에 두고 고온 초전도체를 냉각시킴으로써 회전자에서 발생한 자속이 고온 초전도체 내부에 일부 고정되어, 회전자가 평형 위치에서 이동할 경우 발생하는 복원력으로 베어링으로서의 역할을 하게 된다.

고온 초전도 벌크의 베어링 고정자로서의 성능은 자속을 내부로 포획시켜 사용하든 반자성에 의한 자속 배척을 이용하든 어느 경우에 대해서나 초전도체의 자기장 포획능력으로써 평가할 수 있다. 고온 초전도 벌크의 최대 포획자장을 증가시키는 방법은 단결정을 대면적화 하는 방법과 내부 미세구조 등을 인위적으로 조절하여 자속 고정력을 향상시키는 방법이 있다. 이 중 대면적화에 의한 효과는 외부에서 제공되는 자기장이 충분히 강할 경우 최대 포획자장이 단결정의 최소 반경에 비례하며, 이러한 경우 발생될 수 있는 자기력도 초전도체의 총 면적이 같을 때 단결정의 반경에 비례하게 되는 것으로 설명할 수 있다. 단, 유의해야 할 점은 초전도체를 2차원적으로 볼 때 초전도체 내부 한 지점의 자속 포획량은 자기장에 수직 방향인 초전도체 외부의 비초전도 영역과의 거리에 따라 결정된다는 것이다. 또한, 비초전도 영역이 초전도 영역의 내부에 존재할 경우에는 형상 기하적인 (Topological) 이유로 이를 내부의 자속밀도가 균일한 하나의 큰 자속 고정점으로 보아야 할 것이다. 최근 국내에서도 진행되고 있는 다중 종자에 의한 대면적 결정성장 연구도 위와 같은 특성을 잘 이용하여 좋은 결과가 나올 수 있을 것이라고 기대된다.

한편, 고온 초전도체의 자속 고정력 향상에 의한 효과는 작은 반경의 단결정에서도 더 높은 포획자장을 얻을 수 있다는 것으로, 특히 베어링 회전자 자기장의 비대칭성과 회전자의 진동 등에 의해 발생하는 자기장 변화에 의한 초전도체 내부의 자속 이동을 줄여 베어링의 특성을 더 좋게 할 수 있다는 점이다. 초전도체 내부의 자속 이동은 초전도체 내에서 발생하는 비가역손실 (Hysteresis Loss), 회전자의 평형위치 이동 (Levitation Drift) 등을 유발시킨다. Hikihara와 Moon은 고온 초전도체의 비가역 자화 특성에 의해 발생한 초전도 베어링의 혼돈적 (Chaotic) 동 특성을 측정 분석한 바 있다. Hikihara 등은 중량 456 g의 시험용 회전체를 MPMG-YBCO 위에서 회전시켜 평형위치이동 측정을 한 바 있다. 이 실험의 결과를 참고하여 현실적인 플라이휠 베어링에 대해 유추하기엔 미흡한 점이 많으나, 최근에 제조되고 있는 고품질의 단결정들은 상당히 강한 자속 고정력을 가지고 있어 플라이휠 베어링에 적절하게 사용 가능하리라 본다.

고온 초전도 베어링에서 회전자 영구자석으로는 주로 Nd-B-Fe 자석을 사용한다. 이 종류의 자석은 잔류자속 밀도 (Br)가 1.1~1.3 T 정도이고, 보자력 (Hc)은 상온에서 14 kOe 정도이며 온도 변화에 따른 보자력의 변화도 커서 -40℃ 정도에서 24 kOe에 달하게 된다. 그러나 이 자석으로 이루어진 일반적인 베어링 회전자에서 고정자 고온 초전도체에 가하는 자기장은 자기 저항 (Magnetic Resistance)에 의한 감자 효과로 인해 수천 가우스 정도로 한정되게 된다. 이 정도의 자기장은 단결정 YBCO의 성능 한계에 못 미치므로 고온 초전도 베어링의 하중 지지력과 강성을 제한하는 큰 요인이 되고 있다. 따라서 영구자석의 자속 경로를 효율적으로 구성하여 초전도체에 가해지는 자기장을 강화하는 방안이 여러모로 고안되었다. 이 방안들은 대체적으로 자석의 극 배열을 조정하여 자기장과 고온 초전도체와의 상호 작용을 극대화하는 방법과 자속 경로를 강자성체로 구성하여 자기저항을 줄이는 방법을 혼합한 것으로 적용 대상인 플라이휠 장치의 구성에 따라 다양함을 보인다. 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 핵심은 초전도체 베어링이다. 그 중에서도 중량체를 떠받치면서 마찰을 최소화하는 벌크 초전도체의 개발이 절대적으로 필요하다. 기존의 자기베어링은 전자석을 이용한 타입으로 자서가동을 위한 전력소모 및 위치제어 기술의 어려움으로 인해 경제성 없다. 성능 및 베어링의 단순화, 경제성 등을 고려할 시 초전도 베어링용 YBCO 벌크 초전도체의 개발이 필수적이다. 현재 세계적으로 초전도 플라이

휠용 고온 초전도체 제조기술은 일본, 미국, 유럽의 몇 나라가 보유하고 있으나 한국에서는 원자력연구소와 전력연구원이 벌크 초전도체 제조에 대한 세계적인 기술을 보유하고 있다. 국내 기술을 활용한 벌크체 제조와 독자적 초전도 베어링기술을 활용하면 고효율 초전도 에너지 저장장치를 개발이 가능하다.

초전도 베어링의 핵심소재인 YBCO 초전도체는 주로 종자결정성장법으로 제조된다. 종자결정성장법으로 제조된 초전도체의 가격은 한 변이 3 cm인 타일의 경우 100만 원 ~200만 원 정도로 판매되고 있다. 국내에도 지난 십수 년간의 이 분야 연구에 대한 투자로 독자적인 초전도 벌크체를 제조할 수 있는 기술을 확보하고 있다.

고자력 부상력 초전도체 제조기술은 곧 바로 초전도 플라이휠 에너지 저장장치에 활용이 가능하다. 초전도 베어링에 사용되는 YBCO 초전도체의 특성은 현재까지 개발된 어떠한 초전도체보다도 강력하다. 따라서 이 기술은 고 자기부상뿐만 아니라 고전류 초전도체도 활용될 수 있으므로 다른 전력 분야인 초전도선재, 전류인입선 등의 연구 등에도 활기차게 진행할 수 있다. 국내 기술이 선진국과 비교해 떨어지지 않기 때문에 국산화 기술은 곧 세계화 기술이 된다. 플라이휠 에너지 저장장치가 산업적으로 활용될 수 있는 만큼의 경제적 부가가치도 100% 성취할 수 있다. 초전도 베어링용 초전도체는 고부가가치 재료이므로 부품 소재의 국산화를 통해 국내 기술력 확보 및 산업에 기여도는 크다 아니할 수 있다.

3. 초전도 벌크 모터

일반 산업에서 모터는 전기에너지를 기계에너지로 바꾸어 기계의 동력을 제공하는데 사용되고 전기에너지를 기계에너지로 바꾸어 기계의 동력을 제공하는데 사용되고 있다. 미국 에너지성 (Department of Energy)에 따르면 미국 산업시설에서 전기에너지의 사용 70%를 모터가 담당하고 있고 총 전기에너지의 55%를 모터가 사용하고 있다고 한다. 중소형 모터가 산업설비의 동력으로서의 비중은 대단히 높다. 1,000 KW급의 대용량모터는 총 전기 에너지의 25%를 소모하고 있다. 초전도선을 감아서 솔레노이드 형태로 제작되고 있으며 선박 추진 등의 큰 동력을 얻는데 활용되고 있다. 산업용 초전도 모터의 실용화를 위해서는 초전도 기술, 냉동기술, 고 진공기술, 전기 기술 등의 첨단 기술을 융합하여야 한다. 예를 들어, 발전소 가스터빈의 냉각수로 사용되는 해수 공급용 모터는 수 천 H.P급의 펌프용 모터가 사용 중이다. 초전도 벌크 모터는 일반 모터에 비해 토오크 (Torque)가 2~4배 크고 단위 무게당 출력이 3배가 되므로 모터의 무게와 부피를 획기적으로 줄일 수 있다. 선박 추진용 초전도 모터연구는 초전도 선을 이용하여 수만 kW급의 모터개발을 연구 중이다. 초전도선재 대신 벌크를 사용할 경우 형상 설계가 단순해져서 수십 kW~수백 kW급의 중, 소형 모터개발에 적합하다. 벌크형 초전도 모터는 100 kW급의 중형 모터에 적합하며 벌크를 이용한 모터를 제작하면 효율이 높고 냉각 등의 설계부분이 단순해지는 장점이 있다.

고온 초전도 벌크 회전자용 전동기의 경우는 독일의 Institute of Physics High Technology (IPHT) Jena와 러시아의 Moscow State Aviation Institute (MAI)가 공동으로 YBCO형 벌크 히스테리 전동기와 릴럭탄스 전동기를 개발하고 있다. 독일 Oswald사에서는 현재 100 kW급의 벌크형 모터를 개발 중이다. 일본 교토대학에서는 Bi-계 초전도체를 이용한 전동자를 개발 중이다.

현재까지 개발된 초전도 벌크를 이용하는 모터는 히스터리시스 모터 (Hysteresis Motor), 릴럭탄스 모터 (Reluctnace Mortor)와 자기포획 싱크로노우스 모터 (Trapped

Magnetic Field Synchronous Motor)의 세 가지가 있다. 히스터리시스 모터는 구조가 매우 간단하다. 낮은 회전 속도에서도 발생하는 토오크가 안정적이고 부하가 걸렸을 때 초기 작동이 용이하다.

그림 1은 구리선으로 감아서 만든 고정자(Stator)와 초전도 벌크를 사용한 프로토타입 히스터리시스 모터의 사진이다. 실린더 형의 회전자를 고장자내에 위치시키고 고정자의 자장이 초전도체에 전류를 유발하게 되면 그것이 회전자를 자화시킨다.

고온 초전도체는 그 자체가 히스터리시스 거동을 보이기 때문에 이런 형태의 모터에 유용하다. 특히 임계자장이 높은 초전도체의 경우 플럭스 피닝에 의해 자기 플럭스가 초전도내에서 이동하지 못하므로 회전자는 자화 (Magnetization)가 되고 고정자의 자력은 Misalign되게 되어 결국 커다란 방향성 토크를 만들게 된다. 히스터리시스 모터의 컴퓨터 모델결과는 반복배열 회전자 설계가 추가적으로 효율을 향상시킬 수 있음을 제시해 준다. 예를 들어, 생산되는 파워를 적정화하려면 얇은 초전도 튜브가 필요하고 튜브를 길이 방향으로 여러 개를 배치하면 된다. 이런 설계는 요구되는 초전도체의 양을 대폭 일 수 있다. 여러 조각들을 일정형사에 끼워 맞추면 직경이 큰 회전자를 만들 수 있다. 모터에서 발생하는 토오크는 회전자의 직경의 세제곱에 비하므로, 무게가 가볍고 힘이 큰 모터를 쉽게 만들 수 있다.

릴럭탄스 모터의 경우는 초전도체의 자력에 반발하는 반자장을 사용하여 모터를 구동시켜 주기 때문에 반발력이 우수한 초전도체를 사용한다. 반발력이 우수한 초전도체로는 단결정 성장공장으로 만들어지는 YBCO 초전도체가 좋다. 또한 회전자에 내에 초전도 블록을 어떤 형식으로 배열하느냐에 따라 자력 반발력이 달라지기 때문에 여러 형상디자인에 대한 시뮬레이션과 경험적인 결과를 바탕으로 회전자를 설계하여야 한다.

그림 1. The series of hysteresis HTS motors with different level of output power.

그림 2. 히스터리시스 모터.

효율이 좋은 초전도 벌크 모터의 개발은 회전자 설계에 달려 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 독일의 Oswald Elektromotoren, GmbH, Germany에서는 YBCO 브록을 회전자의 자기차폐블록으로 사용하여 20 kW급 초전도 모터를 개발한바 잇고 현재는 100 kW급 모터를 개발 완료하였다. 전동기의 고정자와 회전자 모두에 자기력이 원천이 있다면 모터의 힘과 효율을 향상시킬 수 있다. 이것은 전자석이나 영구자석으로 회전자에 자력을 심어 주면 가능하다. 최적의 작동을 위해서는 회전자 쪽의 자력을 최대화하여야 한다. 영구자석의 경우는 1.5 테스라가 최대 자력이지만 초전도의 경우는 이보다 큰 자력을 포획되기 때문에 회전자의 자력을 최대화할

그림 3. 릴럭탄스 초전도 벌크 모터.

수 있다. 자화된 초전도체를 사용하면 전기 단자가 필요하지 않기 때문에 구조를 간단히 할 수 있는 추가적인 이점이 있다. 초전도체에 외부에서 자기장을 인가하면서 냉각을 시키면 초전도체에 많은 자력을 넣을 수 있다. 인가된 자력을 제거하면 초전도체에 여전히 전류가 흐르기 때문에 전에 존재했던 자력이 그대로 재생된다. 자력이 포획된 재료는 영구자석과 같다. 자력을 포획시키는 또 다른 방법은 초전도 상태에 있는 재료에 큰 자장을 펄스 형태로 인가하는 방법이다. 펄스 자력이 통과하고 난 후에 자력은 초전도체에 포획된 채로 남아있게 된다. 아직 실제로 구형되지는 않았지만 컴퓨터 모사에 따르면 초전도체에 아주 큰 자력을 집어 넣어 자석으로 만든다면 전력 밀도가 매우 큰 모터를 만들 수 있다고 한다. 실제로 시뮬레이션 결과 작은 회전자의 경우 릴럭탄스 모터를 수정해서 초전도체를 자화시킨 결과 이론적으로 파워가 10배로 커졌다. 이 모델을 실현할 수 있는 모터가 개발되고 있다.

그림은 릴럭탄스 모터의 회전자와 고정자의 사진으로 초기 실험 결과에 의하면 모터 효율이 50%의 상승하였다고 한다.

4. 결 론

에너지는 우리 사회에서 없어서는 안될 중요 요소 중 하나로 전 세계의 수요는 계속 증가되고 있는 추세이다. 우리나라의 경우 에너지의 대부분을 석유 수입에 의존하고 있음을 인식하고 있으나 대체할 대안이 없는 것 또한 사실이다. 석유 수입의 증가와 동시에 석탄 량의 소비도 증가하고 있어 에너지 가격을 상승시키고 있으며 이러한 것들은 많은 사회, 경제적인 문제로 새로 대두되고 있다. 특히 계속적인 불안정한 국제 원유 가격은 전 세계 경제의 심각한 요인으로 작용하고 있는 게 현실이다. 이제는 우리나라도 초전도 재료 개발과 같은 일부 분야에서는 세계적인 수준이라 할 수 있고, 또 다른 중요 산업 여러 분야도 세계와 경쟁을 하고 있다. 이제는 우리나라도 부품과 그것을 이용한 응용기기 산업에 대한 박차를 기하여야할 때이다. 특히 초전도 산업과 같이 초기 연구에서부터 국가적인 차원에서 지원한 분야에서는 소재에 대한 연구가 지속적으로 이루어졌기 때문에 부품에 대한 국가 경쟁력도 어느 수준이상이라 할 수 있다. 따라서 초전도 선재 개발에 대한 국가 정책적 투자로 인한 국가 경쟁력의 상승과 산업이 부가가치 향상을 기대할 수 있다. 초전도를 활용한 초전도 모터 기술은 재료공학, 기계공학, 전기공학 등의 다양한 학문들의 융합기술로 개발이 가능하다. 초전도 모터 기술은 고 부가가치, 친환경기술로 초전도 모터 개발에서 파생되는 재료 설계 및 합성기술, 전자기 성질 평가기술, 전동기 설계 및 제작기술은 첨단 기반기술 확보에 지대한 영향을 미칠 수 있는 국가적으로 보하고 육성하여야 할 첨단 소재산업으로 사려 된다.

참고 문헌

[1] A.W.Sleight, J.L.Gillson and P.E.Bierstedt, Solid State Comm., Vol.17, p.27, 1975.

[2] J.G.Bednorz and K.A.Muller, Z.Phys. B64, p.189, 1986.
[3] M.K.Wu, J.Ashburm, C.J.Trong, P.H.Meng, L.Gao,Z.J.Huang, U.Q.Wang and C.W.Chu, Phys. Rev. Lett., Vol.58, p.908, 1988.
[4] Z.Z.Sheng and A.M.Hermann, Nature, Vol.332, No.55, p.138, 1988.
[5] R.J.Cave, B.Batlog, J.J.Krajewski, R.Farrow, L.W.Rupp, Jr., A.E.White, K.Sort, W.F.Pect, and T.Kometani, Nature, Vol.332, p.814, 1988.
[6] T.D.Thanh, A.Koma, and S.Tnaka, Appl. Phys., Vol.22, p.205, 1980.
[7] M.Suzuki, Y.Enomoto and T.Murakami, J. Appl. Phys., Vol.56, p.2083, 1986.
[8] T.Itoh, K.Kitazawa, and S.Tnaka, J.Phys. Soc. Jpm₩n., Vol.53, p.2668, 1984.
[9] V.Ambegaokar and A.Baratoff, Phys. Rev. Lett., Vol.10, p.486, 1963.
[10] D.E.McCumber, J. Appl. Phys., Vol.39, p.3113, 1968.
[11] A.Rothwarf and B.N.Taylor, Phys. Rev. Lett., Vol.19, p.27, 1967.
[12] S.G.Han, Z.V.Vardeny, K.S.Wong, and O.G.Symko, Phys. Rev. Lett., Vol.65, p.2708, 1990.

저|자|약|력|

성 명 : 이상헌
◈ 학 력
· 1989년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학사
· 1991년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학석사
· 1994년
일본 TOKAI Univ. 전자공학과 공학박사

◈ 경 력
· 1994년 – 1997년 일본 초전도공학연구소 책임연구원
· 1994년 – 1997년 일본 東京電氣대학교 연구교수
· 1997년 – 현재 선문대학교 전자공학과 교수