

커패시터 뱅크를 이용한 펄스고자기장 발생장치의 소개

김 용 민
단국대학교

1. 서 론

펄스고자기장 발생장치는 순간적으로 대전류를 솔레노이드 전자석에 흘려 자기장을 펄스 형태로 발생시키는 장치이다. 고 전류를 순간적으로 발생시키는 방법에는 발전기를 이용하는 방식과 커패시터를 병렬 연결하여 구축한 대용량의 커패시터 뱅크에 전하를 충전한 후 전류를 발생시키는 방식이 있으며, 비교적 적은 비용으로 고자기장을 얻을 수 있는 커패시터 뱅크를 이용하는 경우가 대부분이다.[1-7] 그러나 커패시터 뱅크를 이용한 장치의 경우 자기장 유지시간을 길게 만들기가 어려워 최근에는 발전기 방식을 채택하는 경우가 늘어나고 있다.[2] 발전기 방식의 경우 펄스폭을 1초 이상 길게 발생시킬 수 있는 이점이 있으나 제작비용이 많이 든다는 단점을 가지고 있다. 또한 커패시터를 대신하여 축전지 뱅크(battery bank)를 사용하는 방식이 시도되고 있는데 축전지는 방전시간이 길어 한 번 충전으로 여러 번 실험을 할 수 있으며 장비를 사용하지 않는 새벽 시간을 이용하여 축전을 할 수 있다는 장점이 있지만 스위치 제작에 기술적인 어려움이 있다. 본 글에서는 비교적 적은 건설 및 유지비용이 소요되는 커패시터 뱅크를 이용한 펄스 고자기장 발생장치에 대하여 소개하고자 한다.

펄스고자기장 장치는 전자석에 의해 발생되는 자기장의 유지시간에 따라 짧은 펄스(short-pulse)와 긴 펄스(long-pulse) 고자기장 발생장치로 나눌 수 있으며, 전자석의 형태에 따라서 매번 자기장을 발생함과 동시에 전자석이 파괴되는 파괴형(destructive type) 전자석을 이용하는 방식과 파괴되지 않고 계속해서 사용할 수 있는 비파괴형(non-destructive type) 전자석을 이용하는 방식이 있다. 비파괴형 방식의 경우 전자석을 계속해서 사용할 수 있으며 펄스 유지시간이 수십 마이크로초에서 0.5초에 이르는

상대적으로 긴 장점이 있는 반면 자기장의 세기가 최고 80 테슬라(T) 정도로 제한된다. 파괴형 방식의 경우는 100~수백 T에 이르는 초 고자기장을 얻을 수 있는 반면 펄스 유지시간이 수십 마이크로초 정도로 짧고 매번 폭발을 통한 전자석의 파괴가 일어나게 되어 실험장치의 일부분과 시료가 같이 파괴되는 단점을 가지고 있다.[8-9]

2. 커패시터 뱅크를 이용한 비파괴형 펄스 고자기장 발생

그림 1에서는 일반적인 펄스고자기장 발생용 커패시터 뱅크 회로의 개략도를 나타내고 있다. 커패시터 뱅크를 이용한 고자기장 발생장치의 회로는 일반적으로 충전부와 단순한 임계감쇄(critical damping) C-R-L 방전회로로 구성된다. 충전부는 정전류 전원장치를 사용하며, 충전 중 실험을 중지하여야 할 필요가 발생하였을 때 이미 충전된 전하를 방전시키거나 펄스 자기장 발생 실험 후 남아 있을 수 있는 잔여전하를 접지를 통하여 방전시키는 용도로 덤프(dump) 저항(R_D)이 필요하다. S1과 S2는 각각 충전과 덤프 스위치를 나타낸다.

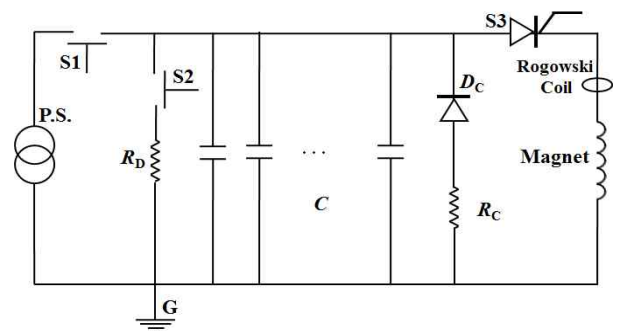


그림 1. 커패시터 뱅크를 이용한 비파괴형 펄스 고자기장 발생장치의 일반적인 회로도.

R_D	C	R_C	L
250 Ω	40 mF	0.25 Ω	1.8 mH

표 1. 단국대학교 커패시터 뱅크를 이용한 비파괴형 펄스 고자기장발생장치의 부품 용량.

C 는 여러 개의 커패시터를 병렬 연결한 커패시터 뱅크를 나타낸다. S3은 방전스위치로 thyristor 또는 ignitron 방식을 이용한다. 그러나 파괴형 펄스자기장 발생장치에서는 비파괴형 장치보다 높은 전류가 방전되기 때문에 스파크 갭(spark gap) 스위치가 사용된다. 자기장 펄스의 모양과 방전시간을 결정하는 크로바 저항(R_D)과 임계감쇄를 위한 단방향 전류 흐름을 만드는 목적으로 크로바(crowbar) 다이오드(D_C)를 사용하며, 전자석에 흐르는 전류를 모니터링하기 위해 일반적으로 Rogowski 코일을 장착한다.

단국대학교 펄스고자기장 실험 장치에서 사용하는 저항, 정전용량 및 전자석의 자세한 용량 값은 표 1과 같다. 커패시터 뱅크는 각각의 정전용량이 840 μF, 최대 충전전압이 9 kV 인 커패시터 48개를 병렬연결로 구성하여 최대 충전 시 1.6 MJ의 에너지를 저장할 수 있다. 하지만 현재 사용하고 있는 전자석의 물리적 한계를 고려하여 그중 절반인 24개의 커패시터 뱅크만을 사용하고 있다. 이 경우 6 kV 충전 시 펄스 유지 시간은 22 ms이며 최대 자기장 값이 47.0 T를 기록하였다.(그림 2

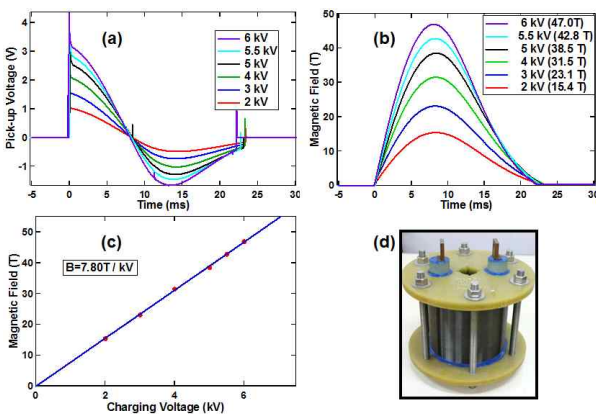


그림 2. (a) 여러 충전전압 하에서 pick-up coil에 유도된 전압. (b) pick-up 전압을 적분하여 얻은 자기장의 세기. (c) 최대 자기장의 세기는 7.8 T/kV로 충전전압에 비례함. (d) 본 실험에서 사용한 펄스전자석의 사진.

참조). R_C 를 조정하면 더 긴 펄스 시간을 얻을 수 있으나 전자석 자체의 강력한 로렌츠 힘 발생으로 인하여 전자석 수명이 단축되어 사용 횟수가 늘어남에 따라 지속적인 로렌츠 힘의 영향에 의하여 수명을 다하면 방전 시 폭발하게 된다. 24개의 커패시터 뱅크를 사용하는 경우 시상수($R_D C$)를 5초로 계산하여 250 Ω의 덤프 저항을 설치하였고 방전 스위치는 thyristor 방식의 스위치를 사용하였다. Ignitron 스위치의 경우 가격 면에서 이점이 있으나 방전 시 노이즈 발생이 있으며 최소 충전 요구 전압이 있어 낮은 전압 충전 시 스위치 역할을 하지 못하는 단점이 있다.

3. 커패시터 뱅크를 이용한 파괴형 펄스 고자기장 발생

3.1 단권 파괴형 펄스 고자기장 시스템

단권 파괴형 펄스 고자기장 장치의 경우 비교적 단순하게 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있으며 100~300 T에 이르는 비파괴형 전자석 시스템보다 강력한 자기장을 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 더구나 방전 시 로렌츠 힘의 방향이 밖을 향하여 전자석의 폭발이 밖으로 일어나게 되어 저온용기와 시료가 안전하게 보존되어 재사용할 수 있다는 장점이 있다(그림 3 참조). 고자기장에서 실험은 대부분 액체 헬륨 온도의 극저온에서 수행하기 때문에 헬륨용기의 보존과 희귀 시료의 경우 지속적 실험을 수행하는 것은 매우 중요한



그림 3. 커패시터 뱅크를 이용한 단권(single-turn coil) 파괴형 펄스 전자석의 사용전과 사용 후 모습. (그림제공 : International MegaGauss Research Institute, University of Tokyo).

사항 중 하나이다. 단점으로는 비파괴형 펄스 고자기장 장치가 20 kA 내외의 전류가 흐르는 반면 단권 파괴형 장치의 경우 1 MA 이상의 대전류가 수 마이크로초 동안 빠르게 흐르게 되어 방전 시 막대한 shock wave가 발생한다는 것이다. 따라서 주변에 많은 영향을 미치게 되어 실험실 안전에 매우 세심한 주의가 필요하다.

3. 2 자속 응축형(magnetic flux compression) 펄스 고자기장 장치

자속 응축형 펄스 고자기장 장치는 파괴형 펄스 장치 중 300~700 T 정도의 매우 강력한 자기장을 발생시킬 수 있는 극한 장치이다. 구성은 그림 4에 보이는 바와 같이 seed field coil, primary coil 그리고 liner로 이루어져 있다.[9] 자기장을 얻는 방법과 같다. 우선 커패시터 뱅크를 이용하여 수 테슬라 정도의 seed 자기장을 발생시키면 자기장은 liner 내부를 지나게 된다. 이때 자기장의 최고점에서 primary coil에 2~4 MA에 이르는 막대한 전류를 방전시키면 liner는 수십 MA의 유도전류가 생성되며 전자기력에 의해 안쪽으로 수축하게 된다. 이때 수축에 의한 liner 단면적 감소에 따라 seed 자기장의 자속(Φ_B) 밀도가 증가한다. 자기장의 세기는 $B = \Phi_B / A$ 이므로 자속이 지나가는 면적(A)이 감소하면 자기장의 세기가 증가하는 원리이다.

자속 응축형 펄스고자기장 장치의 장점은 수백 테슬라의 초 고자기장을 발생시킬 수

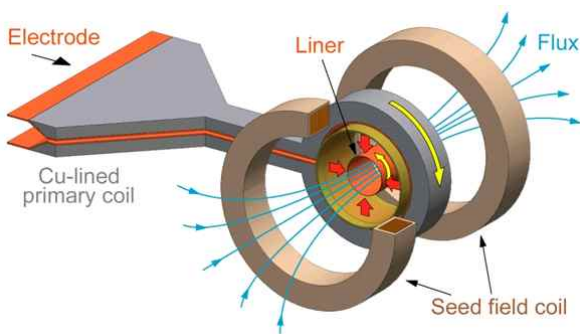


그림 4. 커패시터 뱅크를 이용한 magnetic flux compression 방식 파괴형 펄스 전자석의 모식도.

(그림제공 : International MegaGauss Research Institute, University of Tokyo).

있어 초고자기장이 인가된 극한 상태에서 물질의 새로운 특성을 연구하는데 적합한 장치이다. 그러나 장치의 구성이 seed 자기장을 만드는 커패시터 뱅크와 primary coil을 작동시키는 커패시터 뱅크가 따로 있어야 하며 primary coil을 작동시키는 커패시터뱅크도 여러 개를 병렬로 연결하여 구동시키기 때문에 각 커패시터 뱅크 작동을 시간적으로 일치시켜야 한다는 문제 등 기술적으로 매우 복잡하고 어려운 문제를 극복해야 한다. 또한 수백만 암페어의 전류가 수 마이크로초라는 짧은 시간에 흐르기 때문에 펄스 발생 시 수반되는 대규모의 shock wave 문제, 한 번 실험으로 모든 장치가 폭발하는데 따른 실험상의 어려움과 비용 등의 단점을 가지고 있다.

다른 형태의 자속 응축형 펄스자기장 장치로 seed 자기장을 만드는 전자석 주위를 화약으로 감싸고 자기장의 최고점에서 폭약을 폭발시켜 전자석이 수축함에 따라 자속을 응축시켜 고자기장을 얻는 방법이 있다. 이때 폭약 폭발 시 전자석이 일정하게 수축하여 자속을 응축시켜야 하므로 기술적으로 어려우나 1000 T이상의 초 고자기장을 얻을 수 있다.

4. 하이브리드 방식 펄스 전자석

하이브리드 방식의 펄스 전자석은 펄스 시간이 긴 전자석 내에 펄스 시간이 짧은 전자석을 넣은 이중구조로 이루어져 있다. 펄스 시간이 긴 자기장의 최고점에서 펄스 시간이 짧은 자기장이 인가되어 최고점에서 100 T 정도의 고자기장을 얻는 방식으로 비파괴형 실험 장치로 고자기장을 얻을 수 있어 최근 많은 연구가 이루어지고 있다.[2] 긴 펄스시간을 갖는 펄스 장치로는 발전기 방식을 사용하는데, 이 방식의 경우 최고점에서 40~50 T의 자기장을 발생시킬 수 있으며 전체 펄스의 폭이 1~2초 정도의 긴 자기장 펄스를 발생시킬 수 있다. 여기에 수십 마이크로초 정도의 펄스 폭을 가지며 최고 50 T 정도의 펄스 자기장을 생성할 수 있는 전자석을 중심에 넣은 구조로 구성된다. 발전기 방식은 대용량의 전기를 사용하여 모터를 돌리고 모터를 빠르게 정지시키는 과정에서 역학적 에너지를 전기에너지로 전환하는 방식으로 AC 발전 방식의 경우 추가로 대용량의 정류기가 필요하여 최근에는

브러시를 장착한 DC 발전 방식이 개발되고 있다. 발전기 방식은 건설 및 유지비용 모두가 매우 많이 들기 때문에 이를 대체하여 커패시터 뱅크를 사용하면서 긴 펄스시간을 갖는 전자석을 이용하는 하이브리드 방식이 개발되고 있다. 이 경우 최고 자기장 세기가 발전기 방식에 미치지 못하는 단점이 있지만 비용과 유지비용 측면에서 장점이 있다.

5. 맺음말

물질의 특성은 극한 상태에서 새로운 물리적 특성을 보이는 경우가 많다. 일반적 상황에서 보이지 않던 물질 내 새로운 상태가 극저온, 초고압 또는 고자기장 하에서 새로운 질서를 가지며 예상하지 못한 물리적 특성을 나타내는 경우가 많다. 반도체 양자 홀 효과, 위그너 크리스탈, 위상부도체 등과 같은 현상들은 대표적으로 물질의 극저온, 고자기장 하에서 나타나는 대표적인 현상들이다. 이러한 극한 물성 연구는 기초과학 발전에 지대한 공헌을 해 왔다.

펄스 고자기장 하에서 실험은 물질의 전기수송, 광전이 특성, 자화특성, 비열 등과 같은 대부분의 물리적 특성 연구가 가능하다. 하지만 펄스 유지시간이 매우 짧아 이러한 물리량을 측정하는 데에는 많은 기술과 경험이 필요하다. 펄스 발생 시 수반하는 shock wave의 극복, 전기수송 측정시 원치 않는 field pick-up 문제, 다양한 환경 전파 잡음의 제거 등과 같이 극복해야 할 문제들이 많아 단순히 장치 건설만으로 해결할 수 없는 기술적 문제점들이 나타나게 된다.

우리나라의 경우 아직 펄스 자기장 장치 개발은 물론, 이러한 장치를 이용한 경험 있는 연구자가 많지 않아 이 분야의 인력양성이 시급한 상황이다. 지금까지 우리나라는 이러한 중요한 극한 물성 실험 중목을 방치하여 왔으나 최근 과학계에서는 국가 고자기장 센터 건립에 많은 노력을 기울이고 있어 머지않은 미래에 고자기장 관련 연구 분야에 많은 새로운 연구결과가 도출 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] H. Krug et. al., "The Dresden high-magnetic field laboratory - overview and first results", Physica B 294-295, pp 605-611 (2001).
- [2] J. Singleton et. al., "The National High Magnetic Field Laboratory Pulsed-Field Facility at Los Alamos National Laboratory", Physica B 294-295, pp 614-617 (2001).
- [3] O. Portugall et. al., "Pulsed magnetic fields in Toulouse - past, present and future", Physica B 294-295, pp 579-584 (2001).
- [4] J. Klamut et. al., "International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures in Wrocław (Poland)", Physica B 294-295, pp 547-550 (2001).
- [5] M. von Ortenberg et. al., "The Humboldt high magnetic field center at Berlin", Physica B 294-295, pp 568-573 (2001).
- [6] K. Kindo, "100T magnet developed in Osaka", Physica B 294-295, pp 585-590 (2001).
- [7] L. Li et. al., "The Pulsed High Magnetic Field Facility at HUST, Wuhan, China and Associated Magnets", IEEE Trans. Appl. Supercond. 18, pp 596-599 (2008).
- [8] N. Miura, T. Osada and S. Takeyama, "Research in Super-High Pulsed Magnetic Fields at the Megagauss Laboratory of the University of Tokyo", J. Low Temp. Phys. 133, pp 139-158 (2003).
- [9] S. Takeyama and E. Kojima, "A copper-lined magnet coil with maximum field of 700T for electromagnetic flux compression", J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 425003 (2011).

저자이력



김용민(金容民)

1980-1987년 성균관대학교 물리학과(학사), 1991-1996년 미국 Northeastern 대학교 물리학과 (박사), 1996-2000년, 미국 National High Magnetic Field Laboratory - Los Alamos Pulsed Field Facility (Post Doc.), 현재 단국대학교 응용물리학과 교수.