

SSC 쌍극자 마그네트의 퀘치 특성에 대한 연구

나 완수* 류 강식 권 영길 조 전욱 진 흥범

한국 전기 연구소, 경남 창원시 성주동 28-1

Quench Characteristics of SSC Dipole Magnet Prototypes

Wansoo Nah, Kangsig Ryu, Youngkil Kwon, Jeonwook Cho, Hongbeom Jin

Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Kyongnam 641-120, Korea

Abstract - The quench performance and ramp rate sensitivity of eighteen 5-cm-aperture, 15-m-long SSC dipole magnet prototypes are discussed. All the magnets appear to reach a quench plateau near their extrapolated short sample current limit and well in excess of the operating current with very little training. Most of the magnets, however, exhibit a dramatic degradation of their quench current as a function of ramp rate, which for the most part, can be attributed to large cable eddy currents.

1. 서론

지난 2 년 동안 직경이 5 cm 이고 길이가 15 m 인 SSC 쌍극자 프로토타입 마그네트 (5-cm-aperture, 15-m-long SSC dipole magnet prototypes) 20 대가 미국 BNL 연구소 (Brookhaven National Laboratory)와 FNAL 연구소 (Fermi National Accelerator Laboratory) 에서 제작, 시험되었다. 이 마그네트들은 미국 SSC 연구소 (Superconducting Super Collider Laboratory) 의 입자 가속기용 초전도 마그네트의 실현성을 입증하기 (Demonstration) 위한 R & D 프로그램의 일부로 제작 되었으며, 또 이들은 마그네트 제작 기술을 국립 연구소들에서 GD (General Dynamics)와 WEC (Westinghouse Electric Company) 로 이전하기 위한 목적도 아울러 가지고 있다. GD와 WEC 는 각각 SSC 쌍극자 마그네트의 대량 생산(약 8000 대)을 위한 제 1 및 제 2 의 계약 회사이다. 본 논문에서는 20 대의 프로토타입 마그네트 중에서 1992 년 8월 현재 제작, 시험 완료된 18 대 마그네트 (FNAL 에서 설계 제작된 마그네트 11 대: DCA311-DCA321, BNL 에서 설계 제작된 마그네트 7 대: DCA207-DCA213)의 퀘치 특성 시험 결과를 보고하고, 전류 충전율 (Current ramp rate) 이 퀘치 특성에 어떻게 영향을 미치는지를 살펴본다.

BNL 에서 설계, 제작된 마그네트 (이하 BNL 마그네트)와 FNAL 에서 설계, 제작된 마그네트 (이하 FNAL 마그네트) 양자 모두 로렌츠 힘(Lorentz force)을 지지하기 위하여 코일을 칼라(Collar)로 지지하고 (Collared-coil assembly) 또

그것을 요크(Yoke)로 클램핑(Clamping) 한 기본 구조로 되어 있으나 클램핑의 방법에서 양자는 차이가 있다 [2]. 즉 BNL 마그네트는 요크를 수평 방향으로 클램핑하여 수직 방향으로 正의 (Positive) Collar-yoke interference 를 갖고, 반면에 FNAL 마그네트는 요크를 수직 방향으로 클램핑하여 수평 방향으로 正의 (Positive) Collar-yoke interference 를 갖는다 [2]. 그러나 이러한 기계적 설계 차이는 퀘치 특성에 영향을 거의 미치지 않았다.

II. 퀘치 특성

1. BNL 마그네트

그림 1 (a) 는 BNL 마그네트들의 4.35 K 에서의 퀘치 특성을 보인다. 모든 마그네트가 퀘치를 경험하지 않고 6600 A (정격 전류) 에 도달 하였다. DCA213 은 트레이닝 퀘치 (Training Quench) 없이 곧바로 플래토 전류 (Plateau current) 에 도달하였으며, 나머지 마그네트들은 1 개 또는 2 개의 트레이닝 퀘치를 거친 후에 플래토에 도달하였다. 이러한 트레이닝 퀘치는 DCA210 의 2 번째 퀘치를 제외하면 모두 내부 코일 (Inner coil)의 폴턴 (Pole Turn: 자장의 세기가 가장 큰 곳) 이외의 곳에서 발생하였다. 한편 플래토 퀘치는 모두 자장의 세기가 가장 큰 폴턴에서 발생하였으며, 그 때의 전류는 선제 전류 한계 (Short sample current limit) 의 1 % 이내의 값을 가졌다. 이것은 마그네트의 열화 (Degradation) 됨이 없었음을 뜻한다. 그런데 DCA209 의 경우 처음 6 개의 퀘치가 4 A/s (SSC main ring 의 정격 전류 충전율) 로 충전 (Energization) 되었으며, 2 번째에서 4 번째의 4 개의 퀘치가 폴턴 이외의 곳에서 발생하였다. 그 후에 전류 충전율(Ramp rate)을 1 A/s 로 낮추었더니, 그 후의 퀘치 전류가 약 80 A 증가하였고 퀘치 발생 지점도 폴턴으로 이동 하였다. 이와같이 퀘치 발생 지점이 전류 충전율에 대하여 극도로 민감하게 변화하는 것에 대한 고찰은 다음 장에서 언급하기로 한다.

2. FNAL 마그네트

그림 1 (b) 는 FNAL 마그네트들의 4.35 K 에서의 퀘치 특

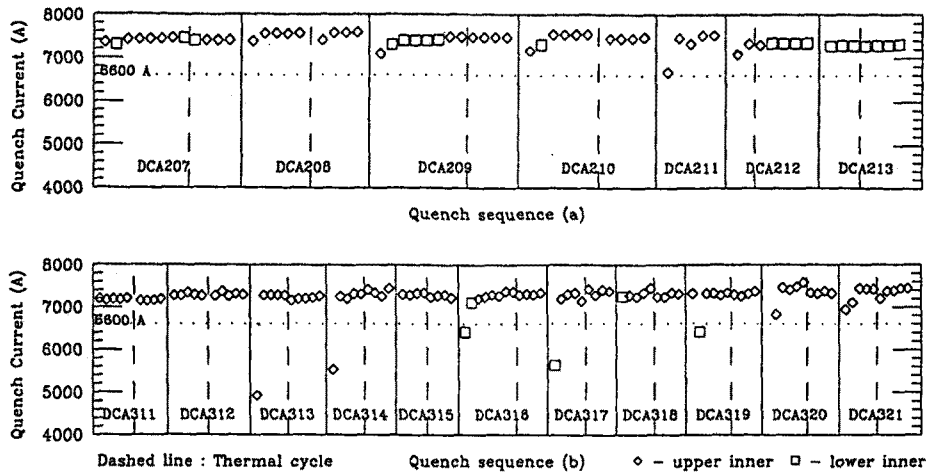


그림 1. SSC 쌍극자 프로토타입 마그네트의 팬치 특성: (a) BNL 마그네트 (b) FNAL 마그네트

Fig. 1 Quench performance at 4.35 K of SSC dipole magnet prototypes: (a) BNL-design, and (b) FNAL-design magnets.

성을 보인다. 그림에서 볼 수 있듯이 4 대의 마그네트 (DCA313, DCA314, DCA316 그리고 DCA317) 가 6600 A 이하에서 트레이닝 팬치를 경험하였고 DCA320 과 DCA321 또한 트레이닝 팬치를 경험하였으나, 팬치 전류를 6600 A 이상이었다. 나머지 5 대의 마그네트는 트레이닝 팬치를 보이지 않고 플래토에 곧바로 도달하였다. DCA313, DCA314 그리고 DCA317의 초기 저전류 트레이닝 팬치 (Low current training quench)는 팬치 발생 지점이 서로 같았으며, 그것들의 축 방향 위치는 마그네트 끝 부분의 마지막 칼라 팩 (Collar pack)과 마그네트를 지지 하는 풀키 어셈블리 (Coilet assembly) 사이 부분이다. 그것은 코일 곡면 부(Coil turnaround)를 지지하는 풀키 (Pole key) 라고 부르는 G-10 Box 의 끝 부분이다. 이 풀키는 원래 1 피이스 (Piece)로 설계 되었으나, 이들 마그네트에서는 조립을 간편하게 하기 위해서 2 피이스로 만들었다. 이들 초기 저전류 트레이닝 팬치는 이 2 피이스의 풀키들이 보다 안정한 위치로 이동하는 과정에서 발생한 것으로 믿어진다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 첫번째 팬치 이후에는 이와같은 문제는 다시 일어나지 않았다.

DCA316 의 첫번째 팬치는 전류 충전율이 16 A/s 에서 일어났으며 발생 지점은 풀턴 이외의 곳이었다. 그 후의 팬치 특성은 BNL 마그네트 DCA209 와 유사한 패턴을 보인다. 즉 2 번째 부터 6 번째 팬치는 전류 충전율이 4 A/s 이고 이때의 팬치 발생 또한 풀턴 이외의 곳이었다. 7 번째 팬치 부터 전류 충전율이 1 A/s 로 낮추어졌고 그 결과 팬치 전류가 100 A 상승하였으며 팬치 발생 지점도 풀턴으로 이동 하였다. DCA318 또한 전류 충전율의 4 A/s (1 번째에서 3 번째 팬치 까지) 에서 1 A/s (4 번째 팬치 이후)로의 변화가 팬치 전류의 증가와 팬치 발생 지점의 풀턴으로의 이동을 가져왔다. 그리고 DCA319 의 1 번째 팬치 전류는 선재 전류 한계치와 같았고 발생 지점도 풀턴이었으나 2 번째 팬치는 6415 A, 풀턴 이외의 지점에서 발생하였다. 이와같은 모순 (Discrepancy) 역시 전류 충전율과 관계가 있다. 즉 1 번째

와 2 번째 팬치의 전류 충전율이 각각 1 A/s 와 16 A/s 인 것으로 설명이 된다. 다음 장에서 언급되었지만 BNL 마그네트 DCA209 과 FNAL 마그네트 DCA316, DCA318, DCA319 는 모두 같은 선재(Strand) 제조업체에서 제작된 선재로 제작된 케이블을 이용하여 제작된 마그네트들이다.

FNAL 마그네트들의 플래토 전류치들은 BNL 마그네트의 경우보다 변화가 심해보이나 이것은 온도 변화에 기인한 결과이다.

III. 전류 충전율과의 관계

초전도 마그네트의 전류가 변하면 초전도체와 요크에서의 히스테리시스, 케이블 내부의 선재(Strand) 안에서의 와전류 손 그리고 케이블 내부의 선재와 선재 사이의 와전류 손 등에 의해 열이 발생하고 그 열에 의해 온도가 상승되어 마그네트의 팬치 전류가 감소하게된다.

그림 2는 선택된 몇 개의 마그네트에 대해서 전류 충전율에 의한 팬치 전류의 감소를 보여준다. 그림 2의 (a)와 (b)는 각각 마그네트에 쓰인 선재 제조 업체에 따라서 2 개의 그룹으로 나누어서 보인 것이고, 여기에 나타나지 않은 마그네트들은 다른 선재 제조 업체의 선재를 사용한 경우이다. 그림 2의 (a)의 경우, 팬치 전류는 25 A/s 까지 일정한 값을 유지하다가 그후에는 전류 충전율에 따라서 거의 선형적 (Quasi-linearly)으로 감소한다. 가장 심한 감소는 DCA312의 경우로써, 200 A/s 에서 2180 A 까지 감소하였으며, 이것은 초기 팬치 전류의 30% 에 해당한다. 반면에 그림 2의 (b)의 경우에는 팬치 전류가 저전류 충전율 (Low ramp rate)에서 급속히 감소한 후 전류 충전율이 커질수록 팬치 전류의 감소 폭이 완화된거는 패턴을 보여준다. 이 때 가장 심한 전류 감소는 DCA319 의 경우로 250 A/s 에서 5000 A 의 경우였다.

그림 2의 (a), (b)의 양쪽 모두의 경우에 1 A/s 에서의 플래토 팬치는 풀턴에서 발생하였다. 그런데 그림 2의

(a) 마그네트의 경우에는 25 A/s 까지 팬치가 풀런에서 발생하였고 50 A/s 에서부터 마그네트 중심 평면 (Midplane)으로 팬치 발생지가 옮겨갔다. 반면에 그림 2의 (b) 마그네트의 경우에는, 전장에서 언급한 바와 같이, 1 A/s - 4 A/s 의 전류 충전율에서부터 팬치 발생이 중심 평면으로 옮겨가기 시작하였으며 이것은 (b)의 급격한 팬치전류 감소와 궤를 같이한다. 이러한 전류 충전율에 따른 팬치 발생점의 이동은 와전류 관점에서 볼 때에 타당하다고 말할 수 있다. (케이블은 마그네트 중심 평면에서 자속선과 수직이다.) 한편 몇 대의 FNAL 마그네트와 1 대의 BNL 마그네트 (DCA213) 에 대하여 교류손실 (AC loss) 측정도 행하여졌다 [3]. 이 결과에 의하면 상대적으로 큰 전류 충전율 영역에서, 단위 주기당 에너지 손실 기공기와 팬치 전류 기공기 사이의 상관 관계가 일치 하였다. 이것은 다시 말해서 교류 손실이 큰 마그네트가 팬치 전류의 감소도 크다는 것을 의미하고, 따라서 그림 2의 팬치 전류劣化 (Degradation)가 와전류손에 의한 것이라는것을 시사한다.

위에서 언급한 와전류손이 케이블 내부의 선재와 선재 사이의 와전류에 주로 기인한다고 가정하고, 그 와전류가 선재와 선재 사이의 접촉저항 (Contact resistance, Crossover resistance)을 통과하여 흐른다고 가정하면 간단한 모델 회의를 위해 [4] 케이블 내부의 와전류를 수식화 할 수 있고, 이것을 2 차원 자장 분포와 결합시키면 케이블 내부의 와전류를 구할 수 있다. 이 때 교류손실은 접촉저항에서 와전류가 방출하는 주율 열을 적분함으로써 얻을 수 있다 [5]. 접촉저항 r_c (단위: $\mu\Omega$)가 코일 전체에서 일정하다고 가정하면, 5-cm 직경 SSC 쌍극자 마그네트에서 단위 길이 (m) 당 발생하는 전력 (Power) $\#$ (단위: Watt/m) 는,

$$W = 1.43 \times \frac{10^{-9}}{r_c} \left(-\frac{\partial I}{\partial t} \right)^2 \quad (1)$$

가 되며, 길이 15 m 의 마그네트가 500 A 에서 5000 A 로 다시 500 A 로 감소되는 전류 주기에 대하여 전체 에너지 손실 E (단위: J/cycle) 는,

$$E = \frac{200}{r_c} \times \left(-\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2)$$

가 된다. 이 식과 실험적으로 얻어진 주기당 교류손실의 기공기에서부터, 접촉저항을 계산해 볼 수 있다. 그림 2 (a)의 마그네트 (DCA312, DCA314, DCA315)들의 경우 이 값은 10 $\mu\Omega$ 이하이고 (b) 의 마그네트 (DCA318, DCA319)들의 경우 이 값은 20 $\mu\Omega$ 과 30 $\mu\Omega$ 이었다. 이러한 수치는 고전류 충전율 (High ramp rate)에서 그림 2의 (a) 와 (b)의 기공기가 와전류에 기인한다는 것을 다시 한번 확인해 준다. 그러나 지금까지 저전류 충전율(Low ramp rate)에서 마그네트들이 왜 그림 2의 (a)와 (b)와 같이 다른 형태를 보여 주는 지는 아직 설명이 되지 않고 있다.

IV. 결론

지금까지 제작 시험된 18 대의 BNL 과 FNAL 마그네트들 팬치 특성은 4 개의 트레이닝 팬치 만이 정격전류 이하의 값을 보여주었으며, 이중 3 개 팬치는 코일의 끝 부분을 지지하는

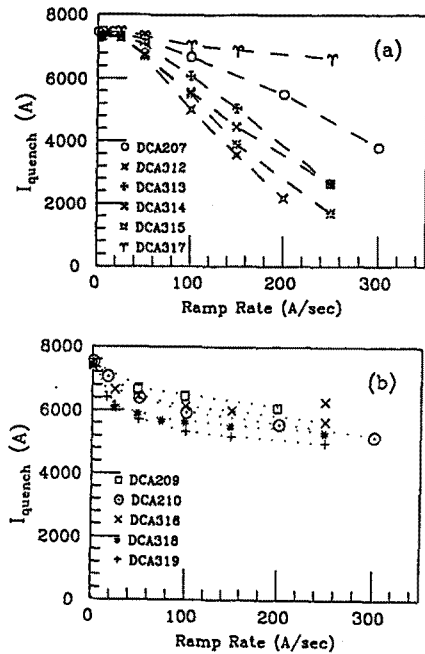


그림 2. SSC 쌍극자 프로토타입 마그네트들의 전류 충전율에 대한 팬치 전류 특성

Fig. 2 Ramp rate sensitivity of SSC dipole magnet prototypes. The magnets are grouped according to the manufacturer and the production batch of their inner cable strands.

폴키의 설계 결함임에 판명되었고 그것들은 이미 수정되었다. 그러나 마그네트들은 전류 충전율에 따라 팬치 전류가 급격하게 변화하는 특성을 보였으며, 이것은 케이블의 와전류 때문으로 생각되고있다. 그러나 전류 충전율에 따른 팬치 전류의 감소 패턴이 저충전율 영역에서 다른 패턴을 보이는 이유에 대하여는 아직까지 밝혀지지 않고 있다.

참고 문헌

- [1] W. Nah, et al., "Quench Characteristic of 5-cm-aperture, 15-m-long SSC Dipole Magnet Prototypes", Applied Superconductivity Conference, Chicago, 1992
- [2] T. Ogitsu, W. Nah, et al., "Mechanical Performance of 5-cm-aperture, 15-m-long SSC Dipole Magnet Prototypes", Applied Superconductivity Conference, Chicago, 1992
- [3] J. Ozolis, S.W. Delchamps, et al., "AC Loss measurements of Model and Full Size 50 mm SSC Collider Dipole Magnets at Fermilab", Applied Superconductivity Conference, Chicago, 1992
- [4] G. H. Morgan, "Eddy Currents in Flat Metal Filled Superconducting Braids", J. Applied Physics, 44, 1973
- [5] T. Ogitsu, et al., ICFA Workshop on AC Superconductivity, National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba, Japan, June 23-25, 1992