

SMES용 전도냉각형 고온초전도 자석의 설계, 제작 및 평가

배준한[†] · 김해종 · 성기철

한국전기연구원

(2011년 2월 23일 접수, 2011년 8월 23일 수정, 2011년 8월 23일 채택)

Design, Fabrication and Evaluation of a Conduction Cooled HTS Magnet for SMES

Joon-Han Bae[†], Hae-Jong Kim, Ki-Chul Seong

Korea Electrotechnology Research Institute

(Received 23 February 2011, Revised 23 August 2011, Accepted 23 August 2011)

요 약

본 논문은 초전도 에너지 저장장치(SMES)용 전도냉각형 고온초전도 자석의 설계, 제작 및 평가에 대해 기술한다. 고온초전도 자석은 황동 안정화재를 갖는 2개의 Bi-2223 다심 선재가 적층된 4-ply 도체로 제작된 22개의 double pancake coil(DPC)로 구성된다. 그리고, 각 DPC는 내경과 외경이 각각 500 mm, 691 mm이고 높이가 10 mm인 2개의 single solenoid coil로 구성된다. 코일 내부의 전기적 손실에 의해 발생된 열의 냉각을 위하여 DPC 사이에 두께 3 mm의 알루미늄 판이 내재된다. 고온초전도 자석은 2단 Gifford McMahon 냉동기에 의해 5.6 K까지 냉각된다. 충전전류가 증가할수록 방전시 고온초전도에서의 최대 온도가 증가 하였다. 충전전류가 360 A일 때 켄치 없이 고온초전도 자석에 1 MJ의 자기에너지가 성공적으로 저장되었다. 본 연구에서는 SMES용 전도냉각형 고온초전도자석에 대한 열적, 전자기적 특성을 보이고, 본 연구를 통해 얻어진 결과는 전도냉각형 고온초전도자석의 최적설계 및 안정도 평가에 활용될 것이다.

주요어 : 전도냉각형 고온초전도 자석, SMES, DPC, 냉동기, 최대 온도

Abstract— This paper describes design, fabrication, and evaluation of the conduction cooled high temperature superconducting (HTS) magnet for superconducting magnetic energy storage (SMES). The HTS magnet is composed of twenty-two of double pancake coils made of 4-ply conductors that stacked two Bi-2223 multi-filamentary tapes with the reinforced brass tape. Each double pancake coil consists of two solenoid coils with an inner diameter of 500 mm, an outer diameter of 691 mm, and a height of 10 mm. The aluminum plates of 3 mm thickness were arranged between double pancake coils for the cooling of the heat due to the power dissipation in the coil. The magnet was cooled down to 5.6 K with two stage Gifford McMahon (GM) cryocoolers. The maximum temperature at the HTS magnet in discharging mode rose as the charging current increased. 1 MJ of magnetic energy was successfully stored in the HTS magnet when the charging current reached 360A without quench. In this paper, thermal and electromagnetic behaviors on the conduction cooled HTS magnet for SMES are presented and these results will be utilized in the optimal design and the stability evaluation for conduction cooled HTS magnets.

Key words : Conduction cooled HTS magnet, SMES, double pancake coils, cryocooler, maximum temperature

[†]To whom corresponding should be addressed.
KERI 12, Bulmosan-ro 10beon-gil, Seongsan-gu, Changwon-si,
Gyeongsangnam-do, 641-120, Korea
Tel : 055-280-1698; E-mail : baejh@keri.re.kr

1. 서 론

초전도체는 저항이 없기 때문에 전기 손실 없이 큰 전류를 전송할 수 있기 때문에 이러한 장점을 이용한

초전도 자석은 MRI, NMR, SMES, 초전도 자기분리기, 초전도 발전기 및 모터 등의 초전도 전기기기에 활용되고 있다. 기존의 초전도자석은 초전도 상태를 유지하기 위하여 액체헬륨이나 액체질소 등의 냉매로 냉각되기 때문에 이러한 형태의 자석들은 많은 단점이 있다. 냉매를 저장하고, 자석의 동작온도를 유지하기 위해 사용되는 저온용기는 훨씬 복잡하다. 고온초전도 자석에서 켄치가 발생하면 많은 양의 냉매의 갑자기 증발하기 때문에 위험할 수 있다. 또한, 고온초전도 자석을 운전하기 위한 저온 냉매는 매우 비싸고, 주기적으로 냉매를 충전해야 하는 번거로움이 있다. 최근에, 초전도 선재와 냉동기의 급속한 발달로 냉매의 사용없이 초전도자석을 운전할 수 있게 되었다. 1983년에 Hoenig는 GM 냉동기로 전도 냉각되는 초전도자석의 열설계를 제시한 이후, 전도냉각형 초전도자석에 대한 많은 연구가 전 세계적으로 활발히 수행되고 있다 [1]. 전도냉각형 초전도자석의 최대 장점은 조작성이 쉽고, 안전하며, 운전비용이 적고, 크기가 작다는 것이다. 또한, 냉동기의 전력소비 및 유지비용이 기존의 냉매를 이용한 경우의 1/10이하인 장점을 갖고 있다 [2]. 본 논문은 SMES용 전도냉각형 고온초전도 자석의 설계, 제작 및 실험 결과를 기술한다. 우선, 고온초전도 자석의 최적설계는 총 소요되는 고온초전도 선재의 양을 최소화하는 목적함수를 이용하여 실행하고, 초전도 자석의 전자기적, 기계적 특성이 해석되었다. 22개의 DPC로 구성된 고온초전도 자석이 설계 및 해석된 결과를 바탕으로 제작되었고, 마지막으로 총방전 운전 시 고온초전도 자석의 성능이 평가되었다.

2. 고온초전도 자석의 최적 설계

일반적으로, 솔레노이드, 다중 솔레노이드, 토로이드 등의 다양한 형태의 고온초전도 자석이 있다. 솔레노이드형 코일은 설계가 간단하고, 제작이 용이하지만, 누설자장을 제한할 수 없다. 다중 솔레노이드 코일은 누설자장의 제한이 용이하지만, 에너지밀도가 매우 낮다. 토로이드 코일은 이들의 단점을 보완한 형태이다. 완전한 토로이드 코일은 누설자장이 없이 모든 자장이 코일 내부에 존재한다. 그러나, 이러한 형태의 코일을 제작하는 것은 쉽지가 않다. 대신 pancake 형태로 권선 코일이거나 적층된 pancake 코일이 유사한 효과를 구현할 수 있다. 반면에, 토로이드 코일은 솔레노이드 코일보다 더 많은 초전도 선재를 필요로 하지만,

다중 솔레노이드 코일 보다는 적게 소요된다. 본 논문에서는 적용환경을 고려하여 modular single pole DPC를 선택하였다.

4-ply 고온초전도 선재가 고온초전도 자석을 설계하기 위해 사용되었다. 이 도체는 AMSC Bi-2223 테이프 구성되며, 기계적 보강을 위해 Bi-2223 테이프 양면에 2개의 황동 테이프가 납땜되어 있다. 최소 굽힘 반경을 줄이기 위해서 땀납과 황동 테이프의 두께가 최소가 되도록 정밀하게 제어되었고, 끝으로 전기 절연을 위하여 polyimide 테이프가 황동 테이프 외주에 권선되어 있다. Table 1은 4-ply 도체의 사양이다. 일반적으로 전도냉각형 고온초전도 자석이 임계전류에 근처에서 운전될 때 열폭주가 발생할 수 있고, 이것은 고온초전도 코일의 성능을 저하시킨다 [4]. 따라서, 이러한 열폭주 현상을 피하기 위해서는 고온초전도 자석의 load factor가 낮고, 높은 안전성을 갖도록 설계 되어야 한다. 따라서, 자석의 보호 관점에서, 설계 시 고온초전도 자석의 운전전류를 4-ply 고온초전도 선재의 임계전류의 70% 이내로 제한하였다.

설계의 주요한 목적은 고온초전도 선재의 소요 길이가 최소를 갖는 고온초전도 자석의 최적 형상을 찾는 것이다. 따라서, 임계 자장, 고온초전도 선재의 총 소요길이, 구조물의 크기 등의 설계 과정에서 고려되어야 할 몇가지 제한 조건이 있다. 이중에서 고온초전도 선재의 총 소요길이가 작고, 저렴한 고온초전도 자석을 만들기 위해 가장 중요한 요소이다. 따라서, 도체 소요길이가 설계시 목적함수로 선정되었다. 고온초전도 자석의 단면도는 Fig. 1과 같다. DPC를 지지하는 알루미늄 보빈은 전기절연을 위해서 세라믹 분말로 얇게 도포되었고, 고온초전도 자석을 냉각시키는 냉각판 역할을 한다. 2 mm 두께의 유리강화섬유 판이 정확한 적층권선을 위하여 DPC 중간에 삽입되었다. 고온초전도 자석의 운전온도는 2대의 GM 냉동기로 전도방식

Table 1. 고온초전도 선재의 사양

| | |
|------------------------------------|---|
| Composition | 2 BSCCO-2223 tapes and 2 brass tapes wrapped with 2 polyimide tapes |
| Average width of the conductor | 4.5 mm |
| Average thickness of the conductor | 0.77 mm |
| Critical tensile stress | 150 MPa at room temperature |
| Critical bend diameter | 150 mm at > 95% Ic retention |
| Critical current | 480 A at 20 K, 3 T |

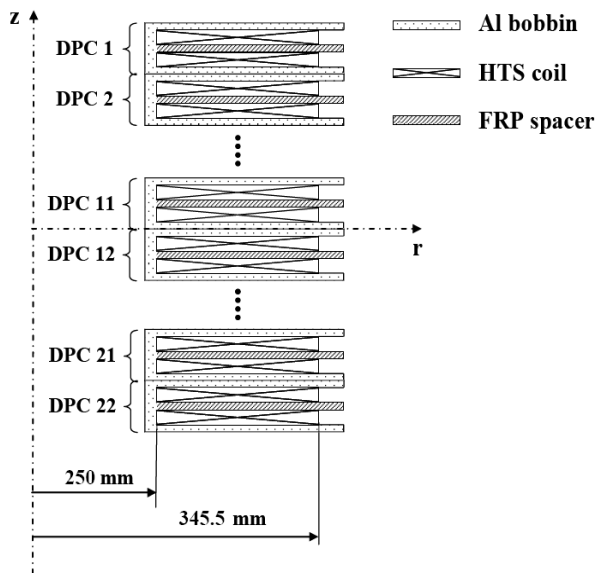


Fig. 1. 고온초전도 자석의 단면도

Table 2. 고온초전도 자석의 설계 결과

| | |
|------------------------------------|------|
| Operating temperature [K] | 20 |
| Inner diameter [mm] | 500 |
| Outer diameter [mm] | 691 |
| Number of turns per DPC | 262 |
| Number of DPCs | 22 |
| Gap between DPCs [mm] | 4 |
| Operating current [A] | 275 |
| Height [mm] | 330 |
| Maximum parallel field [T] | 3.92 |
| Maximum perpendicular field [T] | 2.49 |
| Central field [T] | 2.98 |
| Stored energy [kJ] | 605 |
| Inductance [H] | 16 |
| Total length of HTS conductor [km] | 10.8 |

으로 냉각되어 20 K에 도달한다. Table 2는 Auto-Tuning Niching Genetic Algorithm에 의해 얻어진 고온초전도 자석의 설계 결과이다.

3. 전자기적 및 기계적 해석

고온초전도 자석은 운전시 전자기력을 경험하며, 이 힘은 초전도자석의 형상을 뒤틀리게 하여 안정도를 저하시킨다. 이러한 문제는 대용량 고온초전도 자석에서 더 심각하다. 따라서, 설계시 전자기력에 의해 발생된 초전도 자석의 도체에 미치는 기계적 힘을 고려해야 한

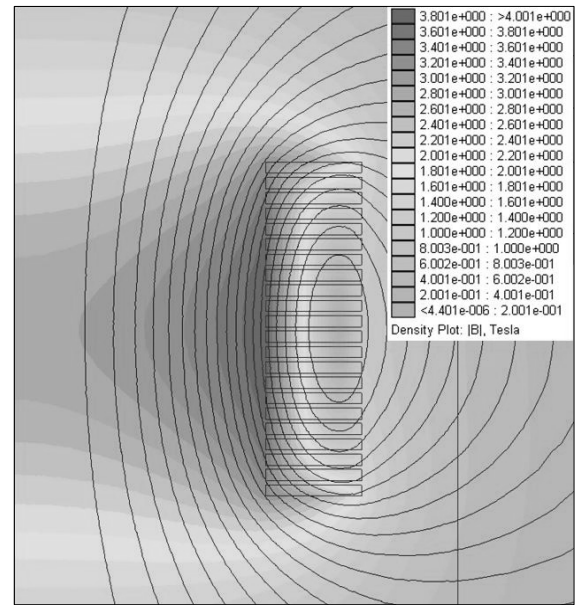


Fig. 2. 고온초전도 자석내의 자장분포

다. 비자성 재료내에서 전자기력과 응력이 평형을 이룰 때 아래와 같은 식이 유효하다.

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$J \times B + \nabla \cdot S = 0 \quad (3)$$

여기서, J 는 전류밀도, B 는 자속밀도, S 는 응력텐서이다. 솔레노이드 HTS 자석에 전류가 흐를 때, 자석내의 자장분포는 식 (1)과 식 (2)로부터 얻어진다. 또한, 운전전류와 자장의 상호작용에 의한 로렌트 힘은 자석내의 응력을 발생시켜서 고온초전도 자석을 축방향으로는 수축시키고, 반경방향으로는 팽창하려는 힘이 발생된다. 이러한 힘은 식 (3)을 이용하여 얻을 수 있다.

Fig. 2는 고온초전도 자석내의 자장분포이다. 자석의 중앙에서 가장 강렬한 축방향 자장이 발생하고, 이것은 자석의 최내벽에 있는 고온초전도 선재에서 최대 hoop stress를 발생시킨다. 충전시 자석내의 최대응력 평가는 고온초전도 선재의 움직임에 의한 쉘로부터 자석을 보호하기 위해 중요하다. 각 고온초전도 선재내에 차폐전류에 의한 미세 응력 분포가 무시된다 가정하면 솔레노이드 고온초전도 자석의 반경방향 및 hoop stress가 유한요소법을 이용한 축대칭 2차원 수

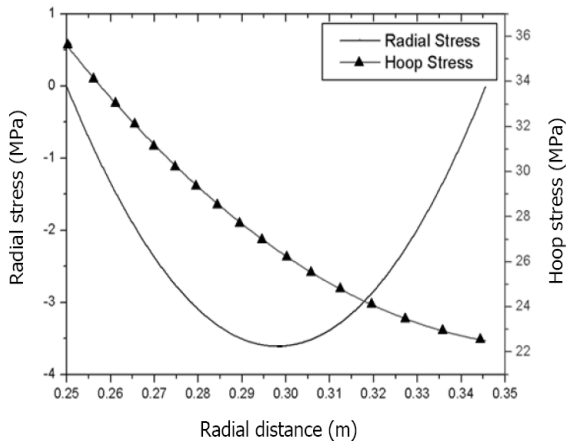


Fig. 3. 운전전류가 275 A일 때 DPC 11번의 반경방향 및 hoop stress 분포

칙해석을 통해 얻어진다. 4-ply 고온초전도 선재가 복합 재료이기 때문에, 0.35의 포아송비와 등가 영 모듈러스가 자석내의 응력을 계산하기 위해 적용되었다. Fig. 3은 운전전류가 275A일 때 DPC 11번의 반경방향 및 hoop stress 분포이다. DPC 11번이 고온초전도 자석의 가장 중간에 위치하기 때문에 이곳에서 최대 반경방향 및 최대 hoop stress가 발생하였다. DPC11의 중심에서 3.61 MPa의 최대 반경방향 응력이 계산되었고, DPC 11번의 내측에서 35.6 MPa의 최대 hoop stress가 계산되었다.

4. 고온초전도 자석의 제작 및 조립

4-1. 냉각 장치

전도냉각형 고온초전도 자석용 저온용기의 외경은 1330 mm, 높이는 924 mm이고, 무게는 1100 kg이다. 2단 GM 냉동기(Sumitomo, model 415D)들은 서로 인접해서 저온용기의 한쪽 면에 설치되었다. 전류리드와 열차폐판은 냉동기의 1단에 의해 냉각되고 고온초전도 자석은 냉동기의 2단에 의해 냉각된다.

냉각용량을 높이기 위해, 고온초전도 자석은 저온에서 유연한 열연결과 열응력 완화를 위해서 냉동기의 2단과 고온초전도 자석 사이에 연결된고순도 구리편 조선에 의해 냉각된다. 상온에서의 복사열을 최소화하기 위해서 고온초전도 자석에 15장의 MLI(multi-layer insulator)가 감겨진다. 한쌍의 황동 전류리드는 냉동기의 1단과 상온 사이에 연결된다. 또한, AMSC Cryoblock 선재로 구성된 한쌍의 고온초전도 전류리드는 황동 전

Table 3. 77 K의 실험결과를 바탕으로 20 K에서의 DPC의 예상 임계전류

| DPC number | Critical current [A] | | DPC number | Critical current [A] | |
|------------|----------------------|------|------------|----------------------|------|
| | 77 K | 20 K | | 77 K | 20 K |
| 1 | 125 | 1398 | 12 | 121 | 1378 |
| 2 | 124 | 1393 | 13 | 125 | 1398 |
| 3 | 123 | 1388 | 14 | 119 | 1367 |
| 4 | 122 | 1383 | 15 | 124 | 1393 |
| 5 | 124 | 1394 | 16 | 123 | 1388 |
| 6 | 127 | 1408 | 17 | 121 | 1378 |
| 7 | 125 | 1398 | 18 | 120 | 1375 |
| 8 | 125 | 1398 | 19 | 123 | 1388 |
| 9 | 125 | 1398 | 20 | 121 | 1378 |
| 10 | 119 | 1367 | 21 | 129 | 1419 |
| 11 | 124 | 1393 | 22 | 123 | 1388 |

류리드를 통해 들어오는 전도열을 차단하기 위해서 고온초전도 자석의 단자와 황동 전류리드 사이에 삽입된다. 열 경로의 많은 기계적 접합에서의 열접촉저항을 줄이기 위해서 각각의 경계면은 정밀 가공되고, 인듐 포일이나 Apiezon N 그리스를 경계면에 삽입하여 열전도성을 높였다.

4-2. 고온초전도 자석

4-ply 도체는 자석에서 발생한 열을 신속히 축출하는 알루미늄 합금 보빈위에 정렬하고, 전체 도체 길이의 중간점부터 권선이 시작된다. 490 m 길이의 4-ply 도체로 262 turn의 DPC 1개를 만든다. 고온초전도 자석은 22개의 DPC로 구성되고 GM 냉동기에 의해 전도로 냉각된다. 알루미늄 보빈은 전기 절연을 위해서 세라믹으로 도포되고, 절연내력은 표면에서 2 kV, 끝단에서는 500 V로 측정되었다. DPC의 임계전류는 매 DPC 1개를 만들 때 마다 4단자법으로 액체질소 속에서 측정되었다. 77 K의 실험결과를 바탕으로 20 K에서의 DPC의 예상 임계전류를 Table 3에 기재하였다. 전자기력에 의한 고온초전도 선재의 이동이나 코일과 보빈사이의 격리를 막기 위해서, 권선후에 저온에폭시로 함침한 후 24시간 동안 상온에서 경화된다. Fig 4는 전도냉각 저온용기의 상부면에 조립된 고온초전도 자석의 모습이다.

4-3. 온도 및 자석의 켄치 검출

전도냉각형 고온초전도 자석의 온도 및 전압 검출

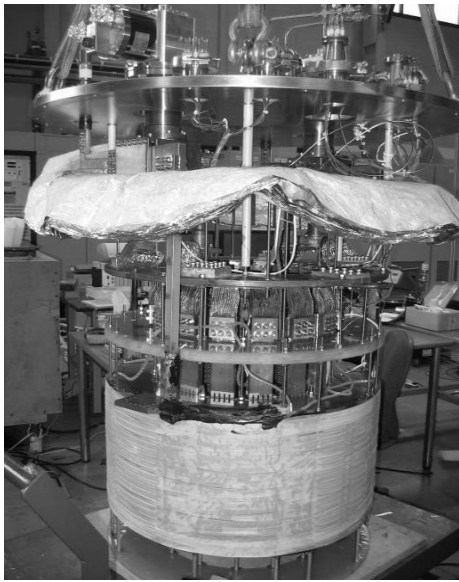


Fig. 4. 저온용기에 조립된 고온초전도 자석

은 충방전시 안전한 운전을 위하여 중요한 요소이다. 열접촉이 나쁜 곳을 찾기 위해서 열경로를 따라 24개의 Cernox 온도센서와 21개의 E형 열전대가 설치되었다. 또한, 충방전시 자석에의 켄치 신호를 검출하기 위해서 22개의 DPC 전압과 1개의 전류리드 전압이 절연증폭기를 통해서 측정되었다.

5. 실험 결과 및 토의

초기 냉각시간을 줄이기 위해서 냉동기의 2단부에 연결되어서 thermal sink로 동작하는 열교환기 내부로 액체질소를 순환시켰다. 열교환기의 온도가 170 K에 도달한 후, 액체질소의 공급이 중단되고, 고온초전도 자석은 2대의 냉동기만으로 냉각되었다. Fig. 5는 주요 측정점에서의 냉각이력이다. 고온초전도 자석의 온도가 포화되기 까지 75시간이 소요되었다. 지지대, 전류리드, 복사로 부터의 열침입을 최소화함으로써 고온초전도 자석의 최종 도달온도는 5.6 K이었고, 이 값은 설계 운전온도 보다 낮았다. 냉동기를 설치하기 전에 냉동기의 냉각 용량이 측정되어 열침입량을 계산할 수 있었다. 측정된 냉동기 온도를 이용하여 전도와 복사 에 의해 고온초전도 자석으로 들어오는 열침입은 약 6 W로 계산되었다. Fig. 6은 고온초전도 자석에 605 kJ 에너지를 저장하기 위해서 2 A/s의 전류증가율을 가지고 275 A까지 전류를 충전하고, 1 Ω의 저항을 가지고 방전시의 온도변화이다. 충방전시 고온초전도 자

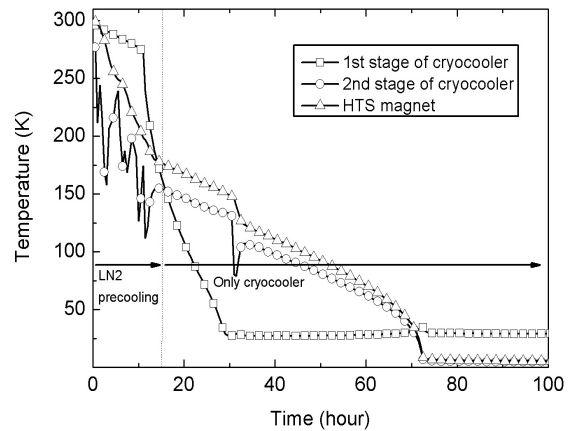


Fig. 5. 주요 측정점에서 냉각이력

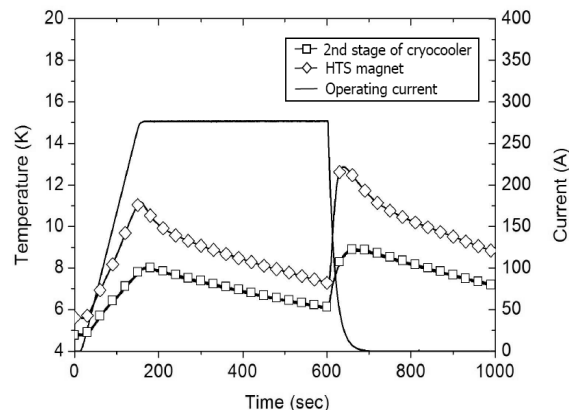


Fig. 6. 605kJ 충방전시의 온도 및 전류 변화

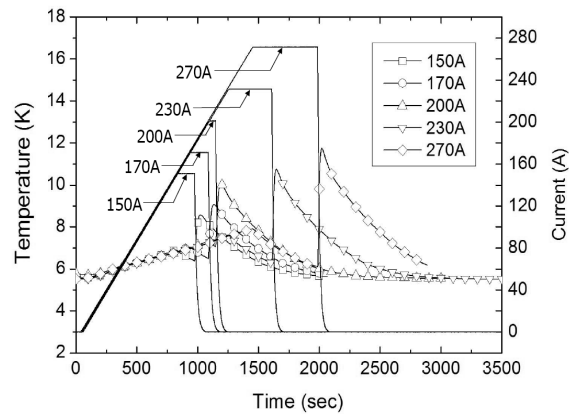


Fig. 7. 충전전류에 따른 고온초전도 자석의 온도

석의 최대온도는 각각 11 K과 12.9 K이었다. Fig. 7에서 충전전류가 증가할 때 고온초전도 자석의 최대 온도가 상승하였고, 이 값은 설계 운전온도 20 K 보다 낮았다.

6. 결 론

몇가지 제한 조건을 가지고 SMES용 고온초전도 자석의 최적설계가 수행되었고, 설계결과를 바탕으로 시험용 고온초전도 자석이 제작되었다. 충방전시 고온초전도 자석의 열적, 전자기적 특성이 분석되었고, 결과는 다음과 같다.

- (1) 605 kJ SMES용 고온초전도 자석의 최대 수직 수평자장은 각각 2.49 T와 3.92 T이었다.
- (2) 자장해석결과로부터 3.61 MPa의 최대 반경방향 응력이 자석의 중심에서 계산되었고, 최대 hoop stress는 자석의 내벽에서 35.6 MPa로 계산되었다.
- (3) 2대의 GM냉동기를 이용하여 75시간이후에 고온초전도 자석의 온도는 5.6 K까지 떨어졌고, 냉각 load map과 냉동기의 측정온도를 이용하여 전도 및 복사에 의해 자석으로 들어오는 열침입량을 약 6 W로 계산되었다.
- (4) 2 A/s의 전류증가율로 275 K까지 충전후 1 Ω의 저항으로 방전시의 고온초전도 자석에서의

최대온도는 12.9 K이었다.

- (5) 고온초전도 자석의 최대온도는 운전전류가 증가함에 따라 상승하였으나, 설계 온도 20 K 보다는 훨씬 낮았다.
- (6) 퀀치 없이 충전전류를 360 A까지 증가시켜서 자기에너지를 고온초전도 자석에 성공적으로 저장하였다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. M. O. Heonig, "Design concepts for a mechanically refrigerated 13 K superconducting magnet system" *IEEE Trans. Magn. MAG-19* (1983) 880.
2. S. Katano, N. Minakawwa, T. Hasebe, J. Sakuraba, "New cryocooler-cooled superconducting magnet: A 13.5 T high-field split-pair coil magnet for neutron scattering" *Physica B* 385 (2006) 1300.