

μ SMES코일용 초전도도체의 전류용량에 관한 연구

Study on Current Capacity of the SC Conductor for a μ SMES Coil

김해중*, 성기철*, 조전욱*, 진홍범*, 류강식*, 류경우**

H. J. Kim*, K. C. Seong*, J. W. Cho*, H. B. Jin*, K. S. Ryu* and K. Ryu**

Abstract: Recently, small-sized superconducting magnetic energy storage(μ SMES) coils become commercially available as an energy storage device for a power conditioner. In design and fabrication of the μ SMES coils, to determine optimum current capacity of the superconducting(SC) conductors is one of the important things. We thus investigated the effect of conductor's current capacity, current density, and stability on the coil's maximum stored energy density in consideration of AC losses and switching device's capacities in a power converter. The results show that the smaller current capacity of the SC conductors is preferred for the μ SMES coils but can increase their induced voltage excessively.

Key Words: current capacity, current density, μ SMES, maximum stored energy density

1. 서 론

전력기술의 발전에 힘입어 수 분 이상의 일반정전의 가능성은 대단히 감소하였지만 낙뢰와 같은 예측불허의 짧은 시간 즉 수 초 이내의 순간정전과 같은 전력장해(Disturbance)는 전력시스템의 복잡화로 인하여 더욱 빈번해지고 있는 실정이다. 그리고 첨단산업의 팽창으로 인하여 날로 증가 추세에 있는 정보·제어 기기 및 정밀 전기·전자 기기의 경우, 특히 전력의 질에 매우 민감하여 수 주기동안의 전력장해에 대해서도 오 동작을 하게 되어 산업현장에 막대한 경제적 손실을 유발시킨다. 이와 같은 전력장해에 대처할 수 있는 에너지저장 장치로써 가장 보편적인 것으로는 에너지저장 밀도가 대단히 큰 장점을 지닌 배터리가 있지만 에너지의 충·방전 특성이 매우 느리며, 수명 또한 짧은 단점을 가지고 있다. 반면 배터리와 비교해 환경 친화성을 갖는 에너지저장 장치일 뿐만 아니라 수명 또한 반영구적이고 특히 뛰어난 충·방전 특성 즉 전력장해 발생 직후 약 2 ms 이내에 수 MW의 대전력을 위에서 언급한 민감한 전력부하에 가장 효과적으로 공급할 수 있는 초전도자계에너지저장코일(이하 μ SMES코일)을 최근 미국의 AS사(American Superconductor)를 중심으로 상용화에 성공한 바 있다.

최근에 상용화된 에너지저장 용량이 수 MJ이고, 그

출력이 수 MW인 μ SMES코일을 제작하기 앞서 먼저 코일용 초전도도체의 적절한 전류용량에 대한 검토가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 전 단계 연구에서 이미 실험적으로 그 타당성이 입증된 바 있는 μ SMES 코일 설계프로그램을 이용하여(1), μ SMES코일의 직경, 초전도도체의 전류용량, 전류밀도 및 안정성이 단위 체적당 초전도도체에 저장 할 수 있는 에너지(이하 에너지저장 밀도)에 미치는 영향을 조사하였으며, 또한 이들 결과를 토대로 하여 μ SMES코일의 제작에 앞서 결정되어야 하는 적절한 초전도도체의 전류용량에 대하여 코일의 교류손실 및 전력변환기용 스위칭소자의 정격용량을 고려하여 검토를 하였다.

2. 설계프로그램

2.1. 초전도도체의 임계전류밀도

우수한 충·방전특성을 최대 장점으로 하는 μ SMES 코일의 경우 가장 보편적인 운전모드는 급속한 충·방전 운전으로써 이와 같은 운전 시 μ SMES코일에는 교류손실이라 불리는 손실이 발생하게 되며, μ SMES코일을 켜치시키지 않고 안정하게 운전시키기 위해서는 교류손실을 냉매인 액체헬륨으로 신속히 빼내어야 한다. 이를 효과적으로 달성하기 위한 일반적인 방법은 μ SMES코일 내부에 냉각채널을 설치하고 에폭시로 함침시키지 않은 비함침 코일(Dry coil) 구조를 채택하는 것이다. 그러나 이와 같은 구조의 비함침 코일에 있어서 코일을 불안정하게 하는 켜치는 초전도도체의 국부적 운동으로 인하여 발생하는 마찰 발열이 그 중요한 원인으로 알려져 있다. 따라서 μ SMES코일과 같은 비함침 코일 구조에서 피할 수 없는 초전도도체의 국부적 운동에 대하여 안정한 코일을 제작하기 위해서는 코일 제작 시 도체 운동을 초전도도체의 고유특성인 안정성 한계 이하로 억제시킬 수 있도록 코일을 권선하거나 또는 μ SMES코일의 제작에 사용 될 도체의 선정 단계에서 안정성이 뛰어난 초전도도체를 선정하는 방법이 있을 수 있다.

μ SMES코일 제작에 적합한 초전도도체의 전류용량을 검토하기 위해서는 초전도도체의 고유 특성인 임계전류 특성에 대한 파악이 선행되어야 하며, 이를 위해서 본 연구에서는 안정한 μ SMES코일 제작을 위한 방법 중 후자 즉 안정성이 뛰어난 초전도도체를 선정하는 방법에 근거하여 초전도도체의 기본 요소인 초전도선을 선정하였다. 선정된 초전도선의 중요한 특징을 요약하면 교류손실을 저감하기 위해 그 단면 중심부에 있는 다량의 안정화재 즉 동(Cu)을 고저항의 CuNi장벽으로 에워싸고, 그 외부에 NbTi초전도체를 배열시킨 구조이다. 이와 같은 동시스(Copper sheath) 구조의 초전도선의 경우 μ SMES코일의 급속 충·방전 운전 시 발생하는 교류손실은 비교적 큰 반면 안정성은 대단히 우수한 것으로 알려져 있으며(2), 그 상세 단면 및 사양을 그림 1 및 표 1

* 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

** 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과

원고접수 : 1999년 3월 01일

심사완료 : 1999년 4월 20일

에 각각 나타내었다. 또한 0.7 MJ μ SMES코일 개발을 위한 전 단계 연구에서 그림 1의 초전도선에 대한 임계전류 및 퀘치특성 등의 기초 특성에 대한 조사가 이루어졌으며(3), 초전도선에 대한 임계전류 - 자장관계의 실험데이터로부터 μ SMES코일용 초전도도체의 전류용량에 대한 검토에 사용 될 전형적인 초전도체 즉 NbTi에 대한 임계전류밀도 - 자장관계를 도출하여 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

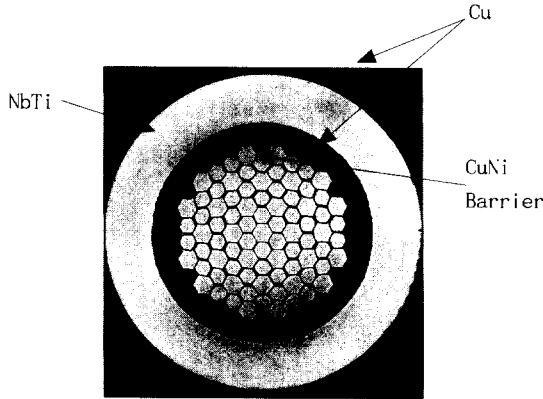


그림 1. 초전도선의 단면.
Fig. 1. Cross-section of the superconducting wire.

표 1. 초전도선의 사양.
Table 1. Specifications of the superconducting wire.

| 항 목 | 특 성 | |
|----------------|-------------------------------------|-----------|
| Cu/CuNi/NbTi 비 | 5/1/1 | |
| RRR | 120 | |
| 직경 | 1.0 mm | |
| 항복강도 | 40×10^6 kgf/m ² | |
| 필라멘트 | 직경 | 5 μ m |
| | 수 | 5,712 |
| | 트위스트피치 | 19.5 mm |
| | 트위스트방향 | Z-twist |

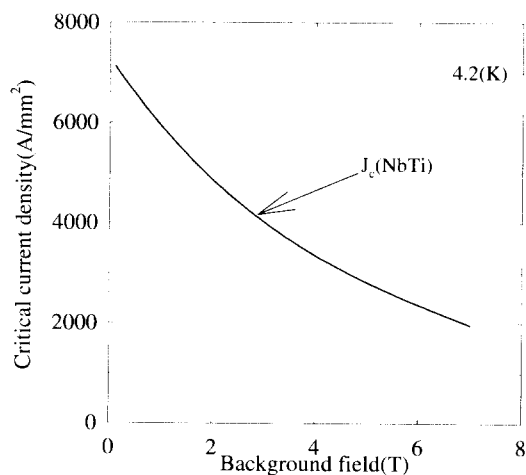


그림 2. NbTi 초전도체의 임계전류 밀도 - 자장.
Fig. 2. Critical current density vs. background field for the NbTi superconductor.

2.2. 설계프로그램

μ SMES코일 제작에 적합한 초전도도체의 전류용량을 검토하기 위해 사용된 설계프로그램은 참고문헌(1)의 소형 모델코일에 대해 측정된 인덕턴스 및 자장이 설계프로그램에 의해 계산된 값과 비교해 오차가 5 %이하로 그 타당성이 입증된 것을 사용하였고, 그 개괄적인 흐름도를 그림 3에 나타내었다.

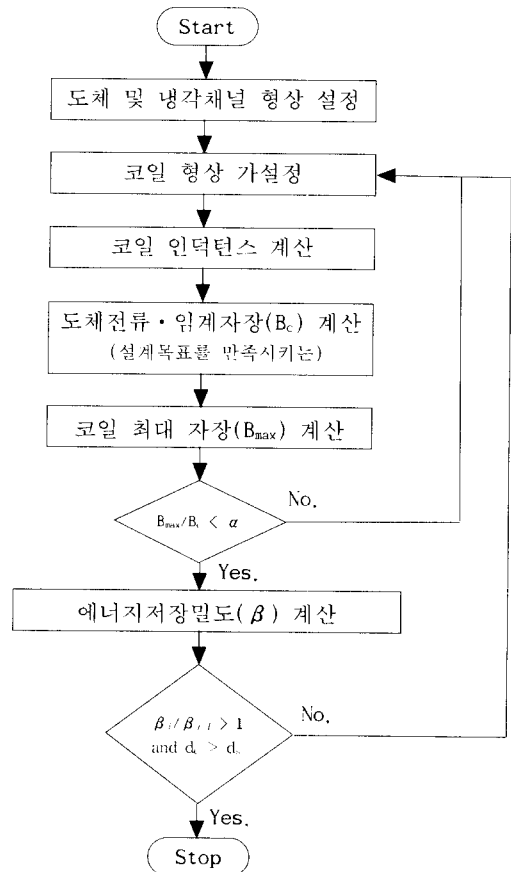


그림 3. μ SMES코일 설계프로그램의 흐름도.
Fig. 3. Flow chart of the μ SMES coil's design code.

상용화된 μ SMES코일의 에너지저장 용량이 수 MJ임과 참고문헌(4)의 연구·개발 목표를 고려하여 설계 대상 μ SMES코일에 저장되는 에너지를 0.7 MJ로 하였으며, 코일의 저장에너지는 (W_H) 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_H = \frac{\mu_0}{2} \int_v H^2 dv = \frac{1}{2} LI_{op}^2 \quad [J] \quad (1)$$

여기서 μ_0 는 자유공간의 투자율, H 는 자장의 세기, L 및 I_{op} 는 각각 μ SMES코일의 자기인덕턴스 및 운전전류이며, 식 (1)로부터 코일의 저장에너지는 인덕턴스 및 운전전류의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

또한 액체헬륨에서 운전되는 초전도 응용 기기의 전기 절연내력은 3 kV정도가 그 한계로써 낮기 때문에 급속 충전·방전이 요구되는 μ SMES코일의 인덕턴스는 제약을 받게되고, 따라서 μ SMES코일의 저장에너지를 크게 하기 위해서는 식 (1)로부터 초전도도체의 전류용량을 크게 해야 함을 알 수 있다. 이와 같이 초전도도체의 전류용량을 크게 하는 방법에는 먼저 도체 크기를 크게 함으로써 가능하지만 이로 인하여 μ SMES코일의 급속 충전·

방전 시 초전도필라멘트 사이에 있는 상전도 모재(Cu 또는 CuNi 등)에서 발생하는 결합손실이 커져 운전효율을 저하시키기 때문에 그림 1과 같이 초전도선의 직경을 1 mm이하로 작게 해야한다. 따라서 초전도도체의 전류용량을 크게 하기 위해서는 이와 같은 다수의 가는 초전도선을 트위스트 하여 큰 전류용량의 도체를 만들어야 한다. 그리고 또 다른 하나의 방법으로써는 동일한 크기의 초전도도체에서 초전도체 즉 NbTi의 단면적을 크게 함으로써 도체의 전류용량을 크게 할 수 있지만 안정한 μ SMES코일을 제작하기 위해서는 NbTi의 양도 제한을 받게된다. 따라서 본 검토에서의 초전도도체로써는 그림 1의 초전도선을 기본으로 하여 이들 초전도선 4본, 9본을 트위스트해 만든 4본 도체 및 9본 도체를 대상으로, Cu/NbTi비 즉 동비는 2.5 - 5사이로 선정하였으며, 이들 도체의 크기는 각각 1.8 mm×2 mm 및 1.8 mm×4.8 mm이다. 또한 μ SMES코일의 충·방전 시 발생하는 교류손실을 액체헬륨으로 효과적으로 빼내기 위하여 설치하는 코일 축 방향 냉각채널의 두께는 1 mm로 모두 일정하게 선정하였다.

코일의 인덕턴스는 일반적으로 코일의 각 턴에 쇠교하는 자속과 그 전류로부터 계산될 수 있다. 이를 위해서는 코일 전 영역에서 자장계산이 선행되어야 하고 따라서 많은 계산 시간이 소요되는 문제점이 발생된다. 그러나 μ SMES코일과 같이 단순한 원통형 구조의 공심 코일에 있어서 인덕턴스는 Hak 등의 연구에 의해 코일의 형상만 결정되면 자장계산을 하지 않고도 인덕턴스를 간단히 근사적으로 계산할 수 있는 방법이 이미 개발되어 있으며, 최근 μ SMES코일과 같은 공심 코일에 대한 관심의 증대에 부응하여 Hak 등에 의한 근사 계산식을 한층 발전시켜 그 오차를 개선시킨 근사식을 코일의 인덕턴스 계산에 사용하였다[5].

상전도 코일의 동선에 흘릴 수 있는 허용전류가 존재하는 것과 마찬가지로 초전도 코일의 경우도 코일 최대 자장이 결정되면 초전도도체에 흘릴 수 있는 최대 전류 즉 초전도체 고유 특성인 임계전류가 존재하게 되며, 동일한 NbTi초전도체라 할 지라도 제작사의 기술에 따라 다소간의 차이는 있지만 본 검토에서는 전 단계 연구에서 얻어진 그림 2의 실험 결과를 사용하였다.

또한 코일의 중앙면(Midplane) 내벽에서 발생하는 최대 자장은 도체전류에 대응되는 임계자장보다는 최소한 작아야한다. 이를 만족시키는 μ SMES코일을 제작하기 위해서는 코일의 최대 자장이 먼저 계산되어야 하며 이를 위해서는 일반적으로 유한요소법과 같은 수치 해석적인 방법이 많이 사용되고 있지만, 본 계산에서는 원형 선전류에 의한 해석적 벡터자위를 이용하여 코일의 자장분포를 계산할 수 있는 간단하면서도 정밀한 방법을 채택하여 μ SMES코일 내 최대 자장을 계산하는데 사용하였다[4].

그림 3의 설계프로그램에서 코일 형상이 가설정되면 인덕턴스가 계산될 수 있고, 식 (1)로부터 μ SMES코일의 저장에너지를 만족시키는 코일 운전전류가 결정되며, 이 전류가 코일에 흐를 때 발생하는 최대 자장은 그림 2의 NbTi초전도체의 고유특성으로부터 결정되는 임계자장보다는 최소한 작으면 된다. 그러나 2.1절에서 지적한 바와 같이 초전도도체의 국부적 운동 등과 같은 외란에 의해 μ SMES코일은 불안정하게 되는 것을 피할 수 없다. 따라서 μ SMES코일의 설계 및 제작에 있어서는 이와 같은 불안정성이 반드시 고려되어야 하며, 코일 및 도체의 안정성 척도로써 식 (2)와 같은 안정성인자(α : Stability factor) 사용하였다.

$$\alpha = B_{max} / B_c \quad (2)$$

여기서 B_{max} , B_c 는 각각 μ SMES코일의 최대 자장 및

임계자장이고, 앞서 언급한 바와 같이 안정성인자는 최소한 1보다 작아야 하고 α 가 작을수록 μ SMES코일 및 도체는 더욱 안정함을 의미하며 이를 결정짓는 주요 사항들로는 초전도도체의 안정성, 코일의 구조 및 제작기술에 관련된 코일의 안정성을 들 수 있다. 마지막으로 그림 3에서 d_c 및 d_s 는 μ SMES코일 설계 시 임시적으로 가설정되는 코일의 외 직경 및 조사 직경을 각각 나타낸다.

3. 해석결과 및 검토

μ SMES코일의 제작에 적합한 초전도도체의 전류용량에 대한 검토에서 μ SMES코일의 중요한 특징이 수 MJ의 작은 저장에너지로 순간전전과 같은 전력장해의 발생시 민감한 부하에 수 MW의 대전력을 공급하는 장치임을 고려할 때 부하에 인접한 좁은 장소에 설치가 가능해야 한다. 따라서 이를 고려하여 코일의 높이 및 직경에 제한을 두었으며 최대 높이를 1 m으로, 최대 직경을 3 m으로 각각 하였다.

그림 4에는 저장에너지가 0.7 MJ인 μ SMES코일에 있어서 안정성인자를 0.6으로 했을 경우 도체의 전류용량이 코일의 최대 에너지저장 밀도 및 중횡비에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다.

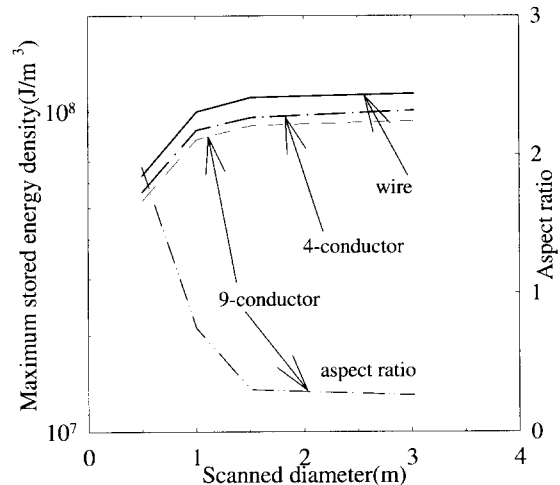


그림 4. 최대 에너지저장 밀도, 중횡비 - 조사직경.

Fig. 4. Maximum stored energy density and aspect ratio vs. scanned diameter.

그림 4에서 도체의 전류용량을 달리하기 위하여 그림 1의 초전도선을 기준으로 하여 이보다 4배 및 9배나 큰 4본 도체 및 9본 도체에 대하여 코일 직경을 0.5, 1, 1.5 및 3 m으로 제한하였을 때 (이하 조사직경이라 함) 각각의 조사직경에 대한 코일의 에너지저장 밀도 중 가장 큰 값을 최대 에너지저장 밀도로, 그리고 코일의 높이/직경의 비를 중횡비(Aspect ratio)로 각각 하였으며, 조사직경을 0.5 m보다 작게 했을 경우는 저장에너지를 만족시키는 μ SMES코일의 형상이 존재하지 않았다. 그림 4로부터 초전도도체의 전류용량에 관계없이 조사직경이 커짐에 따라서 코일의 최대 에너지저장 밀도는 증가하지만 조사직경이 약 1 m부터는 그 증가가 둔화되어 포화되는 경향을, 그리고 동일한 조사직경에 대해서는 전류용량이 가장 작은 초전도선의 최대 에너지저장 밀도가 9본 도체와 비교해 크다는 사실과 또한 조사직경이 커질수록 최대 에너지저장 밀도는 증가하는 반면 코일의 중횡비는 작아짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 저장에너지가 수 MJ인 μ SMES코일의 제작에 있어서는 먼저 코일

직경이 1 m보다 커지게 되면 저온용기 및 액체헬륨의 체적만 증가시킬 뿐 μ SMES코일의 제작에 소요되는 초전도도체 량의 감소는 그다지 크지 않음을 의미하고, 또한 μ SMES코일 및 전력변환기 소자의 전기절연내력의 한계 내에서 초전도도체의 전류용량이 작을수록 더 작은 량의 도체로써 동일한 저장에너지를 갖는 μ SMES코일의 제작이 가능함을 의미하며, 코일의 최대 높이 및 최대 직경에 제한을 두지 않을 경우 코일의 최대 에너지저장 밀도는 종횡비가 낮을수록 커지는 경향은 일반적으로 잘 알려진 SMES코일의 설계결과와 잘 일치함을 보여준다.

μ SMES코일에 에너지를 저장하거나 또는 필요 시 부하에 전력을 공급하기 위해서는 변환장치가 필요하며, μ SMES코일의 정격전류는 전력변환기용 스위칭소자의 전류용량을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 따라서 그림 5에는 그림 4의 초전도선, 4분 도체 및 9분 도체의 경우에 있어서 각각의 조사직경에 대해 최대 에너지저장 밀도를 갖는 μ SMES코일의 정격전류에 대해 조사한 결과를 나타내었다.

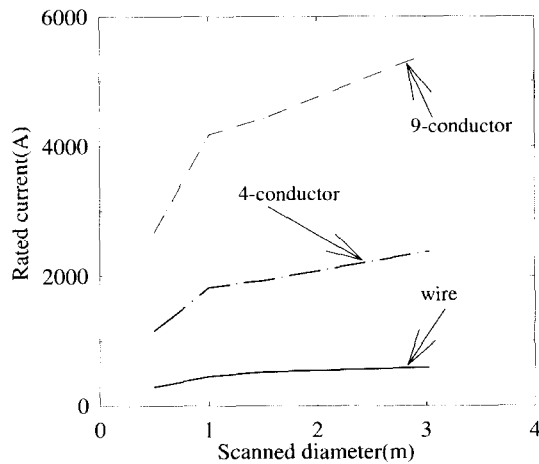


그림 5. 정격전류 - 조사직경.
Fig. 5. Rated current vs. scanned diameter.

그림 5로부터 동일한 조사직경에 대해서 초전도도체의 전류용량이 커짐에 따라서 코일의 정격전류는 대단히 증가하는 반면 동일한 도체에 대해서는 조사직경이 커질수록 비교적 작은 증가가 일어남을 알 수 있다. 앞서 지적한 바와 같이 이러한 결과는 초전도도체의 전류용량을 크게 할수록 최대 에너지저장 밀도는 낮아지고 저온용기의 크기 및 액체헬륨의 체적만 증가할 뿐만 아니라 스위칭소자의 전류용량도 크게 해야 함을 의미한다.

μ SMES코일에 저장된 에너지를 신속히 충·방전시킬 때 코일 양단에는 큰 유도전압이 발생하는데 유도된 전압이 μ SMES코일 및 전력변환기 소자의 전기절연내력보다 크게 되면 코일 및 전력변환기 소자에는 절연파괴가 일어나 이들을 불안정하게 만든다. 따라서 그림 6에는 초전도도체의 전류용량이 코일 양단에 유도되는 전압에 관련된 유도전압 인자에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다. 그림 6에서 유도전압 인자는 μ SMES코일의 인덕턴스와 정격전류의 곱으로 정의하였으며 따라서 코일 양단전압은 유도전압 인자를 시간에 대하여 미분함으로써 구해질 수 있다. 그림 6으로부터 초전도도체의 전류용량에 무관하게 코일의 조사직경이 커짐에 따라서 유도전압 인자는 감소하며, 또한 도체의 전류용량이 클수록 즉 9분 도체의 유도전압 인자가 초전도선보다 대단히 작음을 알 수 있고, 이는 초전도도체의 전류용량을 작게함으로써 앞서 지적한 최대 에너지저장 밀도가 증가

하고 스위칭 소자의 전류용량 또한 작아지는 장점이 있는 반면 지나치게 전류용량을 작게하면 μ SMES코일의 양단전압이 과도하게 커져 코일 및 전력변환기 소자의 절연파괴가 발생할 수 있음을 의미한다.

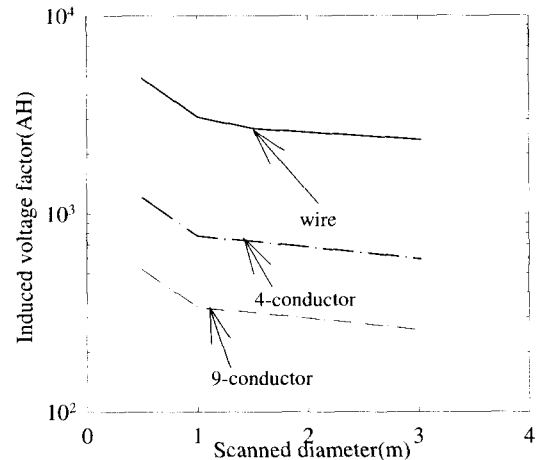


그림 6. 유도전압 인자 - 조사직경.
Fig. 6. Induced voltage factor vs. scanned diameter.

μ SMES코일에 저장된 에너지를 신속히 충·방전시킬 때 코일에는 큰 유도전압 외에 또한 교류손실이 발생되며 이는 μ SMES코일의 운전효율을 저하시킬 뿐만 아니라 효과적으로 이를 제거하지 못하면 초전도도체의 온도상승을 초래해 코일을 불안정하게 만든다. 따라서 그림 7에는 초전도도체의 전류용량이 코일에서 발생하는 교류손실과 밀접하게 관련된 코일의 최대 자장에 [6] 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다.

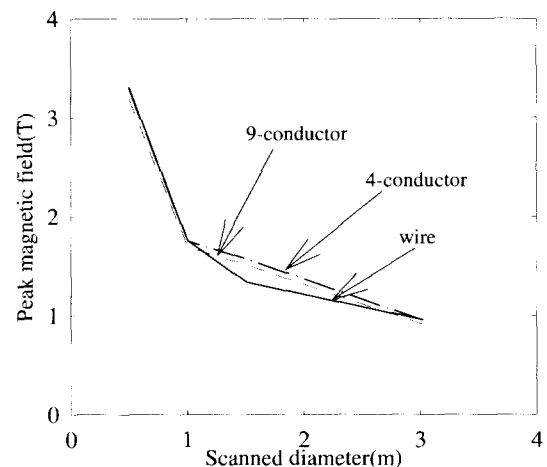


그림 7. 최대 자장 - 조사직경.
Fig. 7. Peak magnetic field vs. scanned diameter.

그림 7로부터 초전도도체의 전류용량에 관계없이 조사직경이 커짐에 따라서 코일의 최대 자장이 작아지는 반면 동일한 조사직경에 대해서 최대 자장은 도체 전류용량에 거의 무관함을 알 수 있다. 이러한 결과는 μ SMES코일의 급속 충·방전 시 초전도선의 필라멘트 및 상전도 모재에서 발생하는 교류손실은 초전도도체의 전류용량에 무관하게 동일하지만 도체 전류용량이 커짐에 따라 초전도선의 수가 많아지게 되고 따라서 초전도선 사이에서 발생하는 결합손실이 추가되어 초전도도체의 총 교류손실은 증가됨을 의미한다.

그림 8에는 저장에너지가 그림 4와 동일한 μ SMES코일에 있어서 9분 도체에 대해 안정성인자를 0.6으로 했을 경우 초전도도체의 전류밀도가 코일의 최대 에너지저장 밀도에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다.

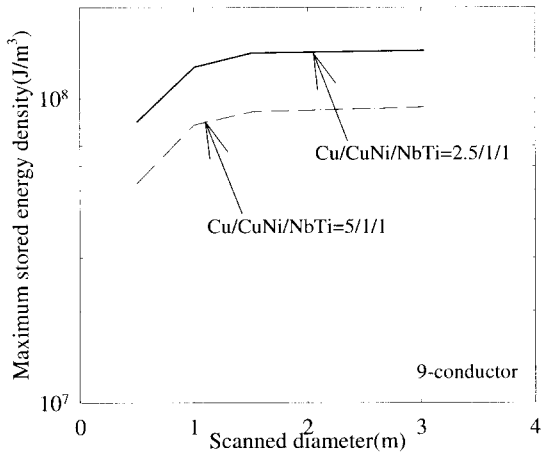


그림 8. 최대 에너지저장 밀도 - 조사직경.
Fig. 8. Maximum stored energy density vs. scanned diameter.

그림8에서 9분 도체의 전류밀도를 달리하기 위하여 그림 1의 초전도선에서 필라멘트사이의 결합손실을 줄이기 위해 사용되는 고저항의 CuNi의 량은 일정하게 두고 안정화재/초전도체 즉 Cu/NbTi의 조성비를 가변시켜 전류밀도를 약 1.5배까지 증가시켰다. 그림 8로부터 초전도도체의 전류밀도가 약 1.5배 증가함에 따라서 최대 저장에너지 밀도도 각각의 조사직경에 대해 약 1.5배로 증가한다는 사실과 도체 전류밀도가 증가함에도 불구하고 최대 저장에너지 밀도는 코일 직경 1 m부근에서 포화되는 것은 이전 결과와 동일함을 알 수 있다. 이는 초전도도체의 전류밀도를 크게 함으로써 μ SMES코일의 제작에 소요되는 도체량을 대단히 줄일 수 있음을 의미하지만 이는 초전도도체의 안정성을 저하시키는 문제를 초래함으로 주의할 해야한다.

그림 9에는 저장에너지가 그림 4와 동일한 μ SMES코일에 있어서 9분 도체에 대해 초전도도체 및 코일의

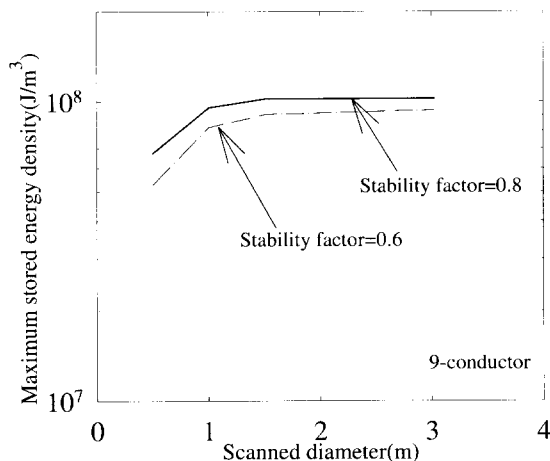


그림 9. 최대 에너지저장 밀도 - 조사직경.
Fig. 9. Maximum stored energy density vs. scanned diameter.

안정성이 최대 에너지저장 밀도에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를 나타내었다. 그림 9에서 도체 및 코일의 안정성을 달리하기 위하여 안정성인자를 약 1.3배 증가시켰다. 그림 9로부터 초전도도체 및 코일의 안정성이 1.3배 커짐에 따라서 최대 에너지저장 밀도도 약 1.3배 정도 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

이상에서 저장에너지가 수 MJ이고 출력이 수 MW인 μ SMES코일을 제작하는데 적합한 초전도도체의 전류용량에 대한 검토를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 초전도도체의 전류용량을 작게 할수록 최대 에너지저장 밀도가 증가하여 코일 제작에 소요되는 도체량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 코일의 정격전류가 작아져 스위칭 소자의 전류용량도 작아지고, 또한 μ SMES코일의 급속 충·방전 시 발생하는 교류손실이 감소하는 등의 많은 장점이 있는 반면 코일 양단에 발생하는 유도전압 및 대단히 긴 도체가 요구되기 때문에 초전도도체 사이의 접속 등의 문제에 주의해야한다.
- 2) 초전도도체의 전류밀도 및 도체 또는 코일의 안정성을 높일수록 최대 에너지저장 밀도가 증가하지만 이는 μ SMES코일의 안정성에 대단히 영향을 미치기 때문에 주의해야한다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 에너지절약기술개발사업으로 수행한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 류경우, 김해중, 성기철, 류강식, "0.7 MJ μ SMES코일 제작을 위한 소형 초전도코일의 특성," 대한전기학회논문지, 제48B권1호, pp.13-18, 1999.
- [2] P. Maccionis and B. Turk, "Influence of copper location on the stability of composites made of superconducting filaments in a highly resistive matrix," Cryogenics, vol.31, pp.738-748, 1991.
- [3] 류경우, 김해중, "0.7 MJ UPS용 초전도 케이블의 퀵치 특성," 전기전자재료학회논문지, 제11권 7호, pp.565-570, 1998.
- [4] 류강식, 한병성, 정승기외, UPS용 SMES의 소형 초전도코일 및 전력변환기 요소기술 개발에 관한 중간보고서(1차년도), 통산산업부 연구보고서, 1996, pp.61-71.
- [5] K. Kajikawa, et al., "矩形斷面圓筒形コイル用自己インダクタンス計算式の適用範圍について," 日本低温工学, vol. 30, pp.324-332, 1995.
- [6] Y. Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, Plenum press, 1994, pp.261-265.

저 자 소 개



김해중(金海鍾)
 1965년 11월 25일생
 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업
 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업
 (석사), 1995년~1996년 (주)현대정
 공 근무, 1996년~현재 한국 전기연구
 소 초전도응용연구사업팀 연구원



성기철(成者哲)
 1956년 2월 20일생
 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업
 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업
 (석사), 1986년~현재 한국전기연구소
 선임연구원, 1997년~현재 초전도전력
 응용연구 part장



조전욱(趙守旭)
 1960년 3월 2일생
 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업
 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업
 (석사), 1990년~현재 한국전기연구
 소 초전도응용연구사업팀 선임연구원



진홍범(陳弘範)
 1962년 11월 20일생
 1987년 성균관대학교 전기공학과 졸
 업 1989년 동 대학원 전기공학과 졸
 업(석사), 1997년 동 대학원 전기공학과
 졸업(공학), 1991년~현재 한국전기연
 구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원



류강식(柳康植)
 1958년 8월 5일생
 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업
 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업
 (공학), 1986년~1988년 동 대학원
 전기공학과 강사, 1988년~1993년
 한국 전기연구소 초전도연구실 실장,
 1993년~현재 한국전기연구소 초전도
 응용연구사업팀장



류경우(柳炅佑)
 1962년 2월 10일생
 1983년 인하대 전기공학과 졸업
 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸
 업(석사), 1995년 일본 Yokohama
 National Uni. 전자정보공학과 졸업
 (공학), 1986년~1995년 한국전기연
 구소 초전도응용연구사업팀 선임연구
 원, 1996년~현재 전남대학교 전기공
 학과 조교수