

# 마그넷 형상에 따른 고온초전도 마그넷의 에너지와 인덕턴스

논 문
60-6-9

## Energy and Inductance of a HTS Magnet with Various Aspect Ratios

강 명 훈\* · 김 영 민\*\* · 구 대 관\*\* · 백 경 호\*\*\* · 차 귀 수†  
(Myunghun Kang · Youngmin Kim · Daekwan Ku · Kyounggho Paik · Gueesoo Cha)

**Abstract** - When the aspect ratio of a magnet varies, the magnetic field in the magnet also varies. The critical current of a tape-shaped HTS wire varies with the direction and magnitude of applied magnetic field. Consequently when the aspect ratio of a HTS magnet varies, the critical current of a HTS magnet varies. This paper shows the relation between the aspect ratio of a magnet and the energy and inductance of a HTS magnet. The critical current is also shown at various aspect ratio of the magnet. The length of the HTS wire, inner diameter of the magnet, and number of pancake are chosen to be variables which varies the shape of the magnet. For a HTS magnet consisting of pancake windings, calculation results show the number of pancake windings are the prime factor which varied the energy and inductance of the magnet. The inner diameter of the magnet varies the energy and inductance of the magnet a little.

**Key Words** : Aspect ratio, HTS magnet, Inductance, Stored energy

### 1. 서 론

전류 용량이 높은 초전도선의 개발로 인해 새로운 물질개발에 사용되는 NMR, MRI와 같은 고자장용 마그넷, 전력계통에서 에너지를 저장할 수 있는 SMES(초전도에너지저장장치) 등 일반 구리선을 대체하는 초전도 기기들이 개발되고 있다[1-3]. 그러나 초전도선은 임계온도, 임계자장, 임계전류의 3가지 임계값 중 하나라도 넘으면 초전도 현상이 깨지는 퀘치가 발생하여 초전도 기기에 치명적인 손상을 준다. 이러한 이유로 대표적인 초전도 기기 중 하나인 마그넷을 설계함에 있어서도 퀘치시의 마그넷에 저장된 에너지를 소모하기 위해 초전도 마그넷에 저장된 에너지를 미리 예측하는 기술이 필요하다. 또한 SMES에 저장될 에너지를 예측하기 위해서도 초전도 마그넷의 에너지에 관한 연구가 필요하다.

마그넷에 저장되는 에너지는 인덕턴스에 비례하며, 마그넷에 흐르는 전류의 제곱에 비례한다. 즉, 마그넷에 흐르는 전류 및 인덕턴스가 클수록 저장되는 에너지는 증가한다. 인덕턴스는 전류가 흐를 때 코일에 쇄교되는 자속의 양으로써, 마그넷의 형상에 따라 발생하는 자장의 분포가 달라짐

로 마그넷의 인덕턴스 또한 형상에 따라 달라진다. 한편 마그넷의 운전전류는 상전도 마그넷의 경우 구리선의 직경과 동작온도에 따라 제한되지만, 고온초전도 마그넷의 경우에는 고온초전도선의 이방성으로 인해 마그넷의 형상에 따라 임계전류가 달라진다[4].

본 논문에서는 고온초전도 마그넷의 저장되는 에너지 특성을 연구하기 위해 마그넷의 형상 변화에 따라 달라지는 마그넷의 임계전류, 인덕턴스, 에너지를 계산하였다. 계산에 사용된 선재는 AMSC사의 Bi-2223선으로 계산에 필요한 선재의 특성은 액체질소(77K)에서의 데이터를 이용하여 계산했다. 마그넷의 형상을 변화시키기 위해서 고온초전도선의 길이, 팬케이크 권선의 개수, 마그넷의 내반경을 변수로 선정했다.

### 2. 형상비에 따른 마그넷의 특성

마그넷이 발생하는 자장의 분포는 마그넷의 형상에 따라 달라진다. 그림 1은 일반적인 마그넷의 형상을 나타낸 그림으로  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$ 는 각각 마그넷의 내반경, 외반경, 높이의 절반을 나타낸다. 마그넷의 형상비는 식 (1)과 같이  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 나타낼 수 있으며 형상비  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 마그넷의 내반경, 외반경, 높이의 절반으로 표현된다. 따라서  $\alpha$ 가 크면 마그넷은 납작한 형태가 되며 반대로  $\beta$ 가 크면 길쭉한 형태의 마그넷이 된다.

$$\alpha = \frac{a_2}{a_1}, \quad \beta = \frac{b}{a_1} \quad (1)$$

\* 정 회 원 : 순천향대 공대 전기통신공학과 박사과정

\*\* 준 회 원 : 순천향대 공대 전기통신공학과 석사과정

\*\*\* 정 회 원 : 순천향대 공대 전기통신공학과 계약교수

† 교신저자, 펠로우회원 : 순천향대 전기통신공학과 교수

E-mail : gsoocha@sch.ac.kr

접수일자 : 2010년 10월 22일

최종완료 : 2011년 5월 12일

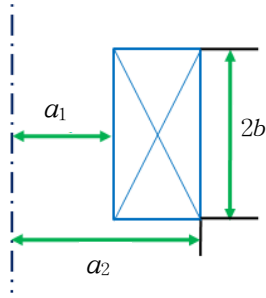
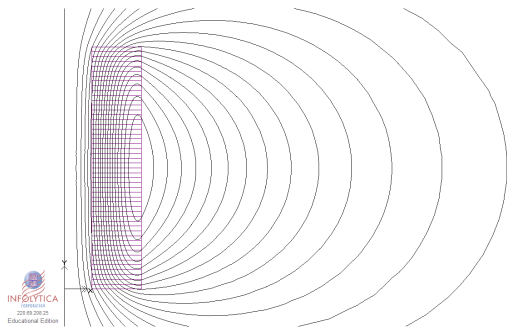


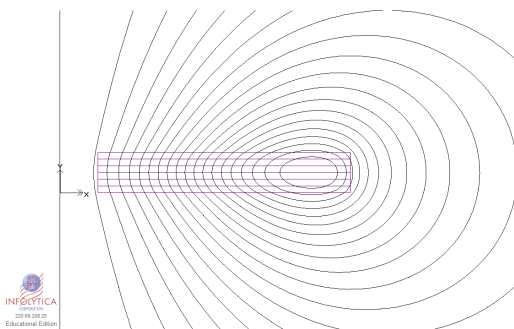
그림 1 일반적인 마그넷의 형상  
Fig. 1 General shape of a magnet

그림 2는 형상에 따라 발생하는 자장의 분포를 나타낸 그림으로써 2.(a)는 코일의 형상이 길쭉한 경우의 자장 분포이며, 2.(b)는 넓적한 형상의 자장 분포이다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 마그넷이 발생하는 자장의 분포는 마그넷의 형상에 따라 다르다.

인덕턴스는  $N$ 턴의 코일에 전류  $i$ 가 흐를 때 코일에 쇄교되는 자속을 의미한다( $L=N\phi/i$ ). 마그넷의 형상에 따라 자장 분포가 다르므로 코일에 쇄교되는 자속 또한 달라지며, 이로 인해 인덕턴스 역시 달라진다.



(a) Magnet consisting of 70 pancake windings



(b) Magnet consisting of 6 pancake windings

그림 2 마그넷 형상에 따른 자장의 분포  
Fig. 2 Magnetic field distribution of the magnet

인덕턴스가 있는 회로에 흐르는 전류를 변화시키면 전자 유도에 의해 역기전력이 발생하여 전류의 변화를 방해한다. 이것을 이겨낼 수 있는 에너지는 전원에서 공급되며, 이 에너지는 마그넷에 자기 에너지로 축적된다. 마그넷에 저장되

는 에너지는 인덕턴스에 비례하며, 흐르는 전류의 제곱에 비례한다( $W=0.5 \times L \times I^2$ ).

마그넷에 저장되는 에너지에 큰 영향을 미치는 전류는 상전도 마그넷의 경우 구리선의 직경과 동작온도에 따라 임계 전류가 제한된다. 반면 고온초전도 마그넷의 경우에는 고온 초전도선의 이방성으로 인해 마그넷의 형상에 따라 발생하는 자장의 크기와 방향이 다르기 때문에 임계전류 또한 마그넷의 형상에 따라 다르다. 따라서 고온초전도 마그넷에서 저장되는 에너지는 마그넷의 형상에 따라 달라진다. 그림 3은 2km의 고온초전도선으로 제작한 마그넷의 형상에 따른 임계전류의 분포를 나타낸 그래프로 마그넷의 형상에 따라 임계전류가 달라지는 것을 볼 수 있다 [4].

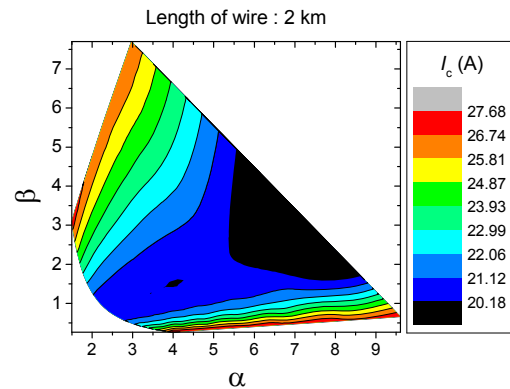


그림 3 마그넷 형상에 따른 임계전류의 분포  
Fig. 3 Critical current distribution as function of various shape of the magnet

### 3. 해석 모델 및 계산 방법

본 논문에서는 팬케이크 권선을 적용한 구조인 마그넷을 대상으로 마그넷의 형상이 에너지와 인덕턴스에 미치는 영향을 검토했다. 마그넷의 형상을 변화시키기 위해 팬케이크 권선의 수, 마그넷의 내반경, 고온초전도선의 길이를 변수로 선정했다. 고온초전도선의 길이가 2, 4, 6, 8, 10km 일 때, 각 경우에 대해 팬케이크 수를 6개에서 70개까지 2개씩 변화 시키고, 내반경을 20mm에서 50mm까지 5mm씩 증가시켜 마그넷의 형상을 변화시켰다. 고온초전도선의 길이에 따라 마그넷의 부피가 달라지며, 팬케이크 권선의 수와 내반경에 따라 마그넷의 형상비가 달라진다.

그림 4는 10km의 고온초전도선으로 권선되는 내반경이 20mm인 마그넷의 형상변화를 나타낸 것이다. 고온초전도선의 길이를 10km로 고정했기 때문에 팬케이크 권선의 개수가 증가함에 따라 팬케이크 권선 당 턴 수는 감소하며, 마그넷의 형상은 납작한 형태에서 길쭉한 형태로 변한다. 한편 팬케이크 권선의 개수와 내반경이 둘 다 변하면 마그넷의 형상비를 나타내는  $\alpha$ 와  $\beta$ 가 달라진다. 그림 5는 10km 고온초전도선으로 권선되는 마그넷의 팬케이크 권선과 내반경 변화에 따른  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림 5에서 원형의 심볼은  $\alpha$ 의 변화를 나타내며 X심볼은  $\beta$ 의 변화를 나타내며, 맨 위에 그려진 그래프가 내반경 20mm인 경우이고 그 아래로 내반경이 5mm씩 늘어난 경우이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 마그넷의 내반경이 늘어날수록  $\alpha$ 와

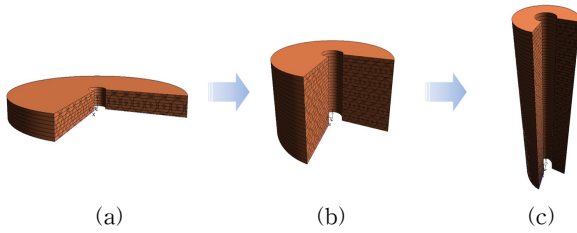


그림 4 마그넷의 구조 (a) 팬케이크 권선 : 6개, (b) 팬케이크 권선 : 20개, (c) 팬케이크 권선 : 70개

Fig. 4 Structure of magnet (a) 6 pancake windings, (b) 20 pancake windings, (c) 70 pancake windings

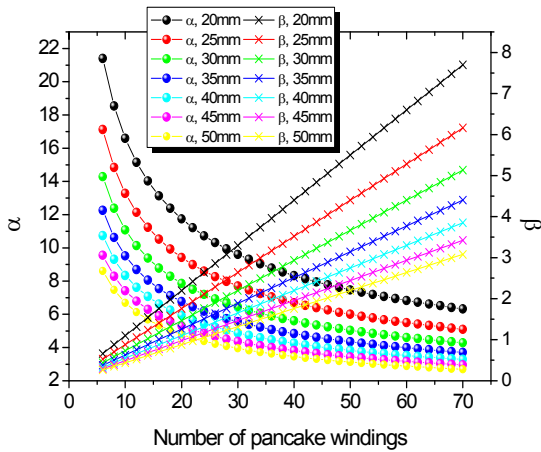


그림 5 10km의 고온초전도선으로 권선되는 마그넷의 팬케이크 권선의 개수, 내반경 변화에 따른  $\alpha$ 와  $\beta$

Fig. 5  $\alpha$  and  $\beta$  of 10km magnet at various no. of pancake windings and inner radius

$\beta$ 는 줄어들고, 팬케이크 권선의 개수가 증가하면  $\alpha$ 는 지수함수 형태로 감소하고  $\beta$ 는 선형적으로 증가한다.

계산에 사용된 고온초전도선은 AMSC사의 reinforced Bi-2223선으로 폭은 4.4mm, 두께는 0.285mm이며 그 밖에 자세한 사양은 표 1에 나타났다. 계산시 턴과 턴 사이의 절연물의 두께 0.06mm를 고려했으며, 계산에 필요한 선의  $I_c - B(\theta)$ ,  $n$ -value 특성은 참고문헌 [5]의 값을 이용했다.

마그넷의 형상변화에 따른 특성을 계산한 과정은 다음과 같다. 우선 한 가지 형상에 대하여 자장을 계산하고 한 턴에 인가되는 자장의 크기와 방향을 결정한다. 한 턴에 인가

된 자장을 바탕으로  $I_c - B(\theta)$  특성을 이용하여 한 턴의 임계전류를 계산한다. 식 (2)의 Power-law를 이용하여 한 턴에서 발생된 전계를 계산한 후  $E - J$  관계를 이용하여 마그넷의 임계전류를 결정한다.

$$E_n = E_c \times \left( \frac{I}{I_{c,n}} \right)^{n(B,\theta)} \quad (2)$$

여기서  $E_c$ 는 초전도 선의 임계전류를 결정하는 기준전계 값으로  $1\mu V/cm$ 이고  $I_{c,n}$ 은  $n$ 번째 턴의 임계전류이다.  $n(B,\theta)$ 은 외부자장의 크기와 각도에 따라 달라지는 고온초전도선의  $n$ -value이다.

#### 4. 계산 결과

마그넷의 형상변화에 따라 저장되는 에너지의 특성을 연구하기 위해 마그넷의 특성 중 저장되는 에너지에 영향을 미치는 임계전류, 인덕턴스를 계산했다. 그림 6은 형상변화에 따라 달라지는 임계전류를 나타낸 그림이다. 그림 6에서 (a), (b), (c), (d)는 각각 고온초전도선의 길이가 2km, 4km, 6km, 10km인 경우이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 마그넷의 임계전류는 팬케이크 권선의 개수가 달라짐에 따라 달라졌다. 즉, 마그넷의 형상이 납작한 형상에서 길쭉한 형상으로 변함에 따라 임계전류 역시 변한다는 것으로, 이는 고온초전도선의 이방성으로 인하여 마그넷의 임계전류를 결정짓는 최외각 팬케이크 권선이 받는 자장의 크기와 방향이 달라졌기 때문이다. 임계전류가 변화하는 패턴은 형상비(=마그넷의 높이/폭)가 1 이하일 때(10km, 6개 팬케이크 : 25.88A) 높았다가 형상비가 약 1 정도 일 때(10km, 32개 팬케이크 : 14.22A) 최소가 되고, 형상비가 1 이상이 되면(10km, 70개 팬케이크 : 16.37A) 다시 증가하는 패턴이다. 즉, 마그넷의 임계전류는 마그넷의 형상이 정사각형 형태일 때 최소가 되며, 이는 임계전류에 영향을 미치는 수직자장의 영향이 가장 크다는 것이다.

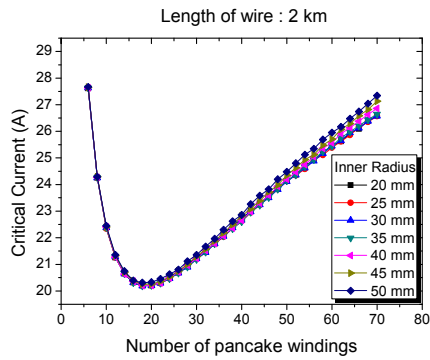
한편 내반경 변화에 따른 마그넷의 임계전류는 큰 변화가 없다. 그림 6.(a)에서 보노바와 같이 고온초전도선의 길이가 2km로 마그넷의 부피가 작을 때는 내반경에 의한 임계전류의 변화가 약간 있지만 10km로 증가하여 마그넷의 부피가 커질 때는 내반경에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

그림 7은 형상변화에 따른 마그넷의 인덕턴스를 나타낸 그림이다. 그림 6의 형상변화에 따른 임계전류와 마찬가지로 인덕턴스의 변화는 내반경에 따른 영향은 작으나 팬케이크 권선의 개수에 따른 영향은 컸다. 반면에 팬케이크 권선 개수에 따른 인덕턴스의 변화 패턴은 임계전류와 반대로 형상비가 약 0.65정도 일 때 가장 크며 위로 볼록한 패턴을 보인다. 초전도선의 길이 10km, 내반경 20mm인 마그넷에서 인덕턴스는 6개 팬케이크일 때 15.58H, 26개 팬케이크 일 때 22.63H, 70개 팬케이크인 경우에 16.75H 이다. 또한 그림 7에서 고온초전도선의 길이가 증가함에 따라 인덕턴스가 커짐을 알 수 있다. 이는 선의 길이가 증가함에 따라 턴 수가 증가하였기 때문이다.

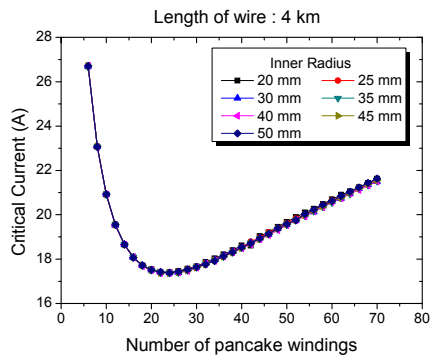
표 1 BSCCO 고온초전도선의 사양

Table 1 Specifications of BSCCO HTS wire

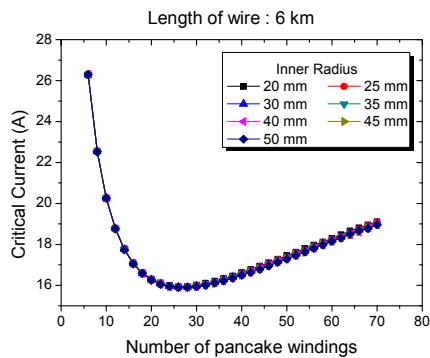
Type of wire	Bi-2223 reinforced wire
Critical current	125 A @ 77K, Self-field
Width	4.4 mm
Thickness	0.285 mm
Min. bending dia.	38 mm
Insulation thickness	0.06 mm



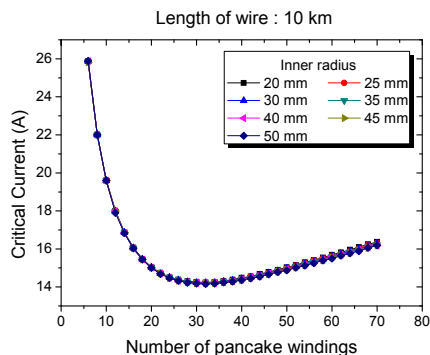
(a) 2 km



(b) 4 km



(c) 6 km



(d) 10 km

그림 6 형상 변화에 따른 마그넷의 임계전류  
 Fig. 6 Critical current of the magnet as function of various shape

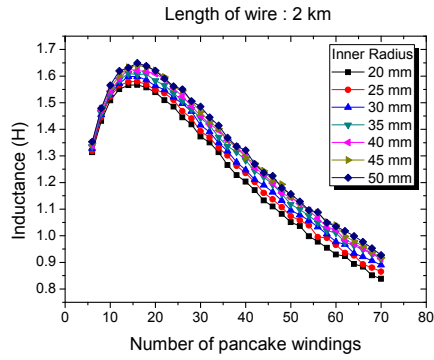
그림 7은 형상변화에 따른 마그넷의 인덕턴스를 나타낸 그림이다. 그림 6의 형상변화에 따른 임계전류와 마찬가지로 인덕턴스의 변화는 내반경에 따른 영향은 작으나 팬케이크 권선의 개수에 따른 영향은 컸다. 반면에 팬케이크 권선 개수에 따른 인덕턴스의 변화 패턴은 임계전류와 반대로 형상비가 약 0.65정도 일 때 가장 크며 위로 볼록한 패턴을 보인다. 초전도선의 길이 10km, 내반경 20mm인 마그넷에서 인덕턴스는 6개 팬케이크 일 때 15.58H, 26개 팬케이크 일 때 22.63H, 70개 팬케이크인 경우에 16.75H 이다. 또한 그림 7에서 고온초전도선의 길이가 증가함에 따라 인덕턴스가 커짐을 알 수 있다. 이는 선의 길이가 증가함에 따라 턴 수가 증가하였기 때문이다.

형상변화에 따라 마그넷에 저장되는 에너지를 나타낸 것이 그림 8이다. 마그넷에 저장된 에너지 역시 마그넷의 임계전류와 마찬가지로 내반경에 따른 영향은 고온초전도선의 길이가 증가할수록 없어지며, 팬케이크 권선의 개수에 따라 크게 변하는 것을 알 수 있다. 마그넷에 저장된 에너지와 임계전류의 그래프가 다른 점은 마그넷에 저장된 에너지는 팬케이크 권선의 개수가 증가함에 따라 크게 달라지는 임계전류와 달리 팬케이크 권선의 개수가 어느 정도가 되면 수렴한다는 것이다. 고온초전도선의 길이가 2km, 4km, 6km, 10km인 모든 경우에 대해 팬케이크 권선의 개수가 20개 이상이 되면 마그넷에 저장되는 에너지가 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다. 이는 그림 9의 형상변화에 따른 마그넷의 특성 그래프와 같이 형상변화에 따른 인덕턴스와 임계전류의 상반된 패턴 때문이다. 그림 9에서 속이 찬 심볼의 값은 왼쪽 축에 따라 나타냈으며, 속이 빈 심볼의 값은 오른쪽 축에 나타냈다. 그림 9.(b)의 고온초전도선의 길이가 10km, 내반경이 50mm인 마그넷의 경우, 팬케이크 권선의 개수가 6개에서 26개로 증가할 때 임계전류가 44.6% 감소하는 반면 인덕턴스는 49.1% 증가한다. 에너지는 인덕턴스에 비례하고, 전류의 제곱에 비례하므로 이 경우 인덕턴스와 임계전류가 비슷한 비율로 증가하고 감소하였다 하더라도 임계전류의 영향이 더 크기 때문에 에너지는 팬케이크 권선이 증가함에 따라 감소하는 패턴을 보인다.

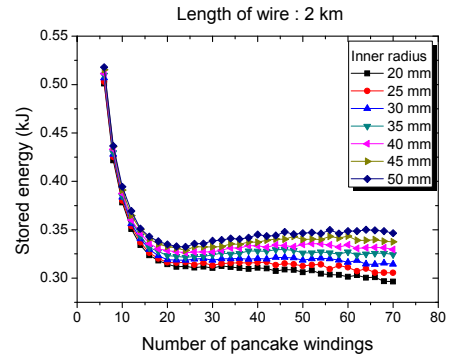
반면에 팬케이크 권선의 개수가 26개부터 70개까지 증가하는 영역에서는 임계전류가 12.9% 증가할 때 인덕턴스는 23.1% 감소한다. 임계전류의 감소폭이 인덕턴스의 증가폭보다 작기 때문에 마그넷에 저장된 에너지는 일정하게 수렴한다.

### 5. 결 론

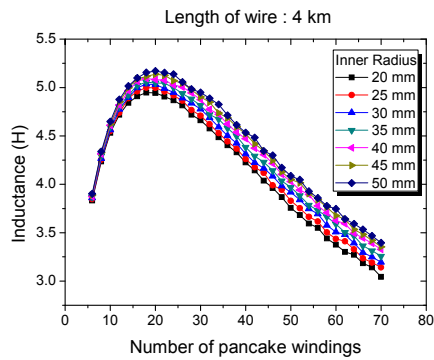
본 연구에서는 고온초전도선의 길이, 마그넷의 내반경, 팬케이크 권선의 개수를 달리하여, 마그넷의 형상에 따른 마그넷의 임계전류, 인덕턴스, 에너지를 계산했다. 마그넷의 임계전류, 인덕턴스, 에너지의 변화는 내반경에 의한 영향이 적고 팬케이크 권선의 개수 변화에 의한 영향은 컸다. 마그넷의 임계전류는 팬케이크 권선의 개수가 6개에서 70개로 증가함에 따라 약 45% 정도 감소했다가 다시 증가하는 패턴을 보였고, 인덕턴스는 약 49% 정도 증가했다가 감소했다. 그에 따라 마그넷에 저장된 에너지는 인덕턴스와 임계전류의 변화량이 비슷한 영역(26개 팬케이크 권선 적층시)



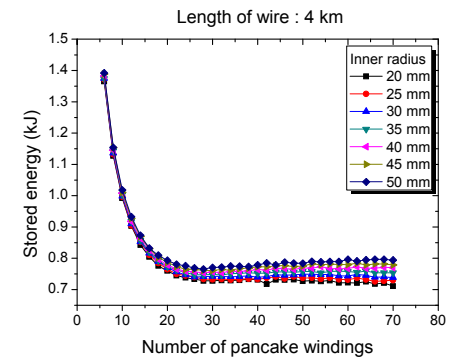
(a) 2 km



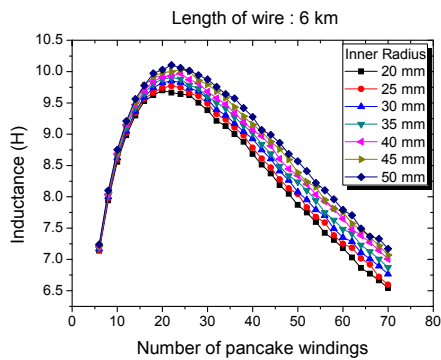
(a) 2 km



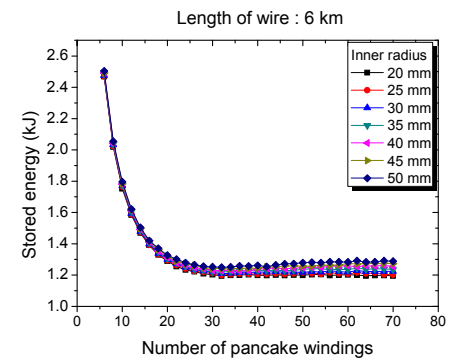
(b) 4 km



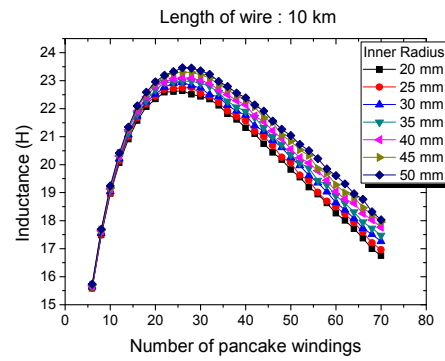
(b) 4 km



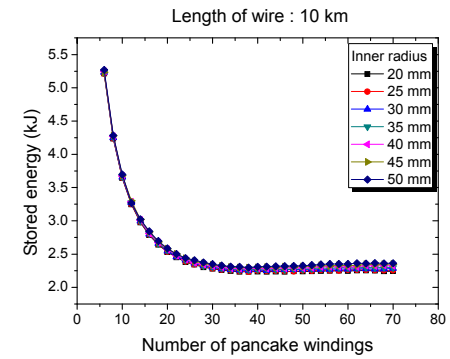
(c) 6 km



(c) 6 km



(d) 10 km

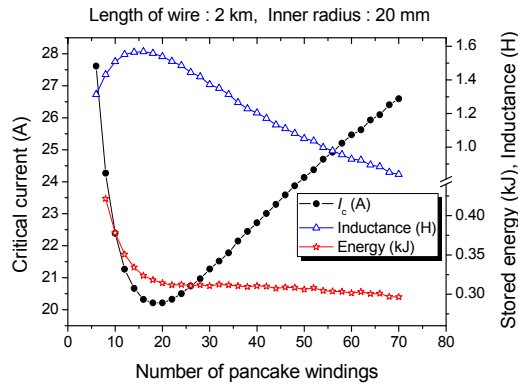


(d) 10 km

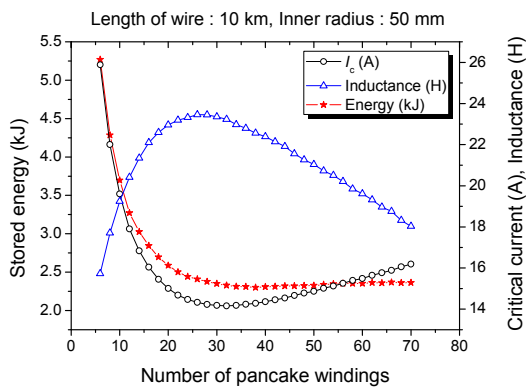
그림 7 형상 변화에 따른 마그넷의 인덕턴스  
Fig. 7 Inductance of magnet as function of various shape

그림 8 형상 변화에 따른 마그넷의 인덕턴스  
Fig. 8 Stored energy of magnet as function of various shape





(a) Length of wire : 2km, Inner radius : 20mm



(b) Length of wire : 10km, Inner radius : 50mm

그림 9 형상 변화에 따른 마그넷의 특성

Fig. 9 Properties of magnet as function of various shape

에서는 임계전류와 같이 감소하는 패턴을 보였으며, 인덕턴스의 변화량이 임계전류의 변화량이 큰 영역(26개 켄케이크 권선 이상)에서는 인덕턴스와 임계전류의 상반된 패턴의 영향으로 일정해졌다. 본 논문에서 제시된 결과는 고온초전도 마그넷의 설계 시 사용 목적에 알맞은 형상을 결정하는 데에 도움을 줄 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Yukikazu Iwasa et al., "High - Temperature Superconducting Magnets for NMR and MRI: R&D Activities at the MIT Francis Biter Magnet Laboratory," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, pp. 718-721, 2010.  
 [2] Janusz Kozak et al., "Design and Performance Results of First Polish SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1981-1984, 2009.  
 [3] Wenbin Ma et al., "Tests of 3 T Superconducting Electromagnetic Iron Separator," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 20, no. 3, pp. 957-960, 2010.  
 [4] Myunghun Kang et al., "Magnetic Field and Critical

Current of a BSCCO HTS Magnet at Various Aspect Ratios," in Conf. The 2010 Appl. Supercond. Conf., Washington.

[5] 구명환, 강명훈, 이회준, 차귀수, "HTS 선재의 Ic-B 특성 및 n 값 측정," 한국초전도저온공학회논문지, 12권 1호, 2010년 3월.

저 자 소 개



강 명 훈 (姜 明 勳)

2008년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업. 2010년 동대학원 전기통신공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정.  
 Tel : 041-530-1334  
 E-mail : ksward@sch.ac.kr



김 영 민 (金 榮 敏)

2010년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업. 현재 동대학원 전기통신공학과 석사과정.



구 대 관 (具 大 官)

2010년 순천향대 공대 정보기술공학부 졸업. 현재 동대학원 전기통신공학과 석사과정.



백 경 호 (白 京 虎)

1999년 순천향대 공대 전자공학과 졸업. 2007년 동대학원 전자공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 전기통신공학과 계약교수.



차 귀 수 (車 貴 守)

1978년 서울대 공대 공업교육과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 순천향대 전기통신공학과 교수.  
 Tel : 041-530-1334  
 Fax : 041-530-1548  
 E-mail : gsoocha@sch.ac.kr