

고온초전도 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 교류손실 측정 및 수치해석

論 文

53B-12-6

Measurement and Numerical Analysis of AC Loss in the HTS Pancake Coil and the HTS Solenoid Coil.

朴明陣[†] · 李相秀^{*} · 李昇昱^{**} · 車貴守^{***} · 李志光[§]

(Myung-Jin Park · Sang-Soo Lee · Seung-Wook Lee · Guee-Soo Cha · Ji-Kwang Lee)

Abstract - In this paper, we constructed 13 turns pancake coil and solenoid coil with HTS tape and measured AC losses of the pancake coil. The critical current of the pancake coil and the solenoid coil were 80A and 109A, respectively. To compare measured AC losses of the two coils, we carried out numerical analysis using 2-D FEM program for manufactured coils. This paper presents current density distribution, flux density distribution and AC losses of the pancake coil and the solenoid. As a result, we obtained that current density distribution was closely related to the orientation of magnetic field and distribution of AC losses were also closely related to the perpendicular component of flux density distribution in coil. The calculated AC losses of the two coils showed good agreement with measured AC losses and AC losses of the pancake coil was about 9 times bigger than that of the solenoid coil under the same turns and length.

Key Words : AC Loss, Pancake Coil, Solenoid Coil, HTS

1. 서 론

고온초전도선재의 특성 개발과 더불어 고온초전도선재를 이용한 전력기기의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 고온초전도선재를 교류조건 하에서 사용하게 되면, 직류조건 하에서와는 달리 초전도체의 자기적 특성으로 인해 손실이 발생하게 된다. 이러한 손실은 외부로부터 초전도선재에 자장이 가해질 때 발생하는 자화손실, 초전도선재에 교류전류를 흘려주었을 때, 통전전류에 의해 발생하는 교류자장에 의한 전송전류손실로 나누어 볼 수 있다. 또한 초전도체의 반자기적 자기특성을 고려하여, 초전도선재의 교류손실을 계산하기 위한 해석적 방법과 수치해석 기법에 대해 많은 연구가 발표되었다[1]-[5].

고온초전도 변압기와 같은 전력기기의 응용을 위해서는 초전도선재를 팬케이크나 솔레노이드의 형태로 권선하여 코일을 제작한다. 이러한 권선의 형태에서는 초전도선재시편의 상황과는 달리 선재에 전송전류가 흐르고 있음과 동시에 인접한 선재들에 의해 발생한 자장으로 인한 영향까지 포함이 되어 좀 더 복잡한 교류손실의 특성이 나타나게 된다. 코일에서의 교류손실의 측정과 계산은 전력기기의 경제성

여부와 성능향상을 위해 앞으로 반드시 수행되어야 할 중요한 연구 분야 중 하나이다.

본 논문에서는 고온초전도 선재로 권선한 코일의 교류손실 측정과 수치해석을 위해 동일 턴 수와 길이를 가지는 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일을 설계, 제작하여 교류손실을 측정하였으며 또한 유한요소법(FEM)을 이용한 수치해석을 통해 두 코일의 교류손실을 계산하고 측정값과 비교, 검토하였다.

2. 코일의 교류손실 측정과 수치해석

2.1 코일의 교류손실 측정

고온초전도선재를 권선한 형태로서 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일이 많이 이용되고 있다. 솔레노이드 코일은 그 구조상 권선시 선재가 축 방향으로 위치하기 때문에 팬케이크 코일을 권선 할 때 보다 보빈의 부피가 커지지만, 턴과 턴 사이에 대한 절연이 용이하고, 초전도선재가 냉매인 액체 질소에 노출되기 때문에 냉각 효율도 팬케이크 코일에 비해 우수하다. 또한 초전도선재를 코일의 형태로 제작하게 되면 초전도 코일의 임계전류는 코일을 이루고 있는 선재들이 발생시키는 자장에 영향을 받게 된다.

두 가지 방식의 코일에 대한 교류손실 특성을 측정, 비교하기 위해 직경이 동일한 팬케이크와 솔레노이드 코일의 보빈을 설계 제작하였다. 보빈이 액체질소에 들어가면, 냉각에 따른 보빈의 수축현상이 발생하는데, 이는 상온에서 권선한 선재가 액체질소 내에서 느슨해지는 현상을 초래하게 된다. 이런 현상을 방지하기 위해 냉각시 내수축성이 우수한

[†] 교신저자, 正會員 : 順天鄉大 電氣工學科 博士課程
E-mail : pj1973@hanmail.net

^{*} 正會員 : 順天鄉大 電氣工學科 碩士課程

^{**} 正會員 : 順天鄉大 電氣工學科 博士課程

^{***} 正會員 : 順天鄉大 情報技術工學部 教授, 博士

[§] 正會員 : 又石大 電氣工學科 副教授, 博士

接受日字 : 2004年 10月 27日

最終完了 : 2004年 11月 8日

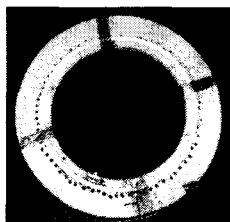
G-10 FRP를 사용하여 보빈을 제작하였으며, 두 코일의 보빈 내경은 202mm로서 동일하다. 전류도입단자의 부착을 위해 팬케이크 보빈에 폭 20mm 길이 5mm의 홈을 내고 단자를 삽입하여 권선 시 초전도선재의 소손이 발생하는 것을 방지하였다. 솔레노이드 코일의 권선 시 선재의 위치를 고정시키고 옆에 위치해 있는 턴과의 단락을 방지하기 위해 5mm 폭의 홈을 내었으며, 팬케이크 코일에서는 층과 층 사이에 0.2mm의 비닐절연테이프를 이용하여 층 간 단락이 되는 것을 방지하였다. 또한 코일의 권선 시 냉각 효율을 증대시키기 위해 초전도선재가 권선 되는 영역에 구멍을 뚫어 냉매인 액체질소의 소통을 원활하게 하였다.

표 1은 고온초전도 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 사양과 고온초전도선재의 사양을 나타내고 있고, 그림 2는 실제 제작된 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 모습을 나타낸다.

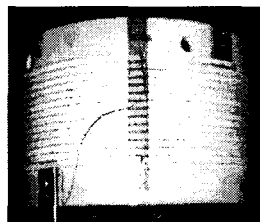
초전도 선재를 이용한 코일의 전기적 특성을 측정하기 위해서는 전원을 인가하였을 때의 전류, 전압, 임피던스의 특성을 파악해야 한다. 코일의 임피던스는 크게 저항 성분과 리액턴스 성분으로 볼 수 있는데 코일의 경우 리액턴스 성분의 크기가 저항 성분보다 매우 크기 때문에 측정을 통하여 얻어지는 전압 파형은 전류와 90°의 위상을 가지게 된다.

표 1. 초전도 선재, 솔레노이드, 팬케이크 보빈의 사양
Table 1. The specification of HTS tape, pancake and solenoid coil.

초전도 선재	종류	Bi-2223/Ag
	입계전류(I_c)	120A
	폭	4.1mm
	두께	0.21mm
솔레노이드 코일	재질	G-10 FRP
	외반경	101mm
	높이	145mm
	층수	단층
	턴수	13
	입계전류	80A
	총 길이	8.5m
팬케이크 코일	재질	G-10 FRP
	외반경	101mm
	높이	15mm
	턴수	13
	턴 사이의 간격	0.2mm
	입계전류	109A
	총 길이	8.5m



(a)



(b)

그림 1. (a) 팬케이크 코일, (b) 솔레노이드 코일
Fig. 1. (a) The pancake coil, (b) The solenoid coil.

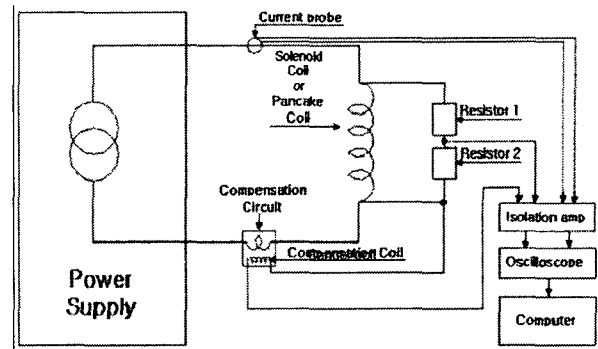


그림 2. 코일의 전기적 특성 측정을 위한 회로도
Fig. 2. The Experimental set-up configuration.

측정된 전압 중에서 리액턴스 성분은 초전도 코일의 교류손실과 무관하므로 코일의 교류손실을 측정하기 위해서는 측정된 전압을 저항 성분과 리액턴스 성분으로 분리하여야 한다. 전압 성분을 분리하기 위해 일반적으로 사용되는 측정방법으로는 Lock-in-amp를 이용하는 것과 상쇄코일을 사용하는 방법이 있다. Lock-in-amp를 사용할 경우, 별도의 유도성 성분의 보상 없이 측정하여도 저항 성분만을 측정할 수 있으나, 측정된 전압과 리액턴스 성분이 매우 크고 외부로부터의 노이즈를 해결하지 못하면 이 또한 측정에 어려움을 갖게 된다. 상쇄코일을 이용하는 방법은 그림 2에서와 같이 측정회로에 유도성 성분을 감소시키는 보상회로를 둔다.

그림 2는 초전도선재를 이용한 코일의 교류손실 측정을 위한 회로도를 나타내고 있다. 회로에 인가하는 전류는 전류 탐침기를 이용하여 측정하였다. 전류 탐침기로부터 얻어진 신호는 절연증폭기를 통하여 오실로스코프를 통해 확인하였다. 전류 도입선과 보상코일은 자기적으로 연결되어 있어, 상쇄코일을 적절히 조절하여 전압신호의 인덕턴스 성분을 상쇄시키고 저항성분의 전압신호를 측정하였다.

그림 3은 팬케이크 코일에 41A의 교류전류를 흘려주었을 때의 전압, 전류 파형을 3주기 동안 나타낸 그림이다. 측정된 전압 중에서 그림 3에 나타낸 구간 a를 한주기로 하여 전압파형을 Fast-Fourier-Transform(FFT) 변환을 통해 인가전류와 동상인 저항성 성분과 90도의 위상차를 지닌 유도성 전압 성분으로 분리하였다, 그림 4의 (a)는 그림 3의 측정전압의 저항성 성분 전압의 파형이며 실효값은 21.5mV이다. 그림 4의 (a)-(c)는 각각 41, 57, 102A의 교류전류를 팬케이크 코일에 인가하였을 때, 측정전압 중에서 저항성 성분 전압만을 나타낸 것이고 (d)-(f)는 60, 80, 119A인 경우에 솔레노이드의 저항성 성분 전압만을 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)와 (d)는 인가전류의 피크치가 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 임계전류 아래이고, (b)와 (e)는 임계전류와 같을 때, (c)와 (f)는 임계전류를 넘어선 과전류인 경우를 나타낸다. 측정된 저항 성분의 전압이 정현적이지 않은 것을 볼 수 있는데, 이는 초전도체의 자기적 특성에 기인한 것으로 보인다. 두 코일의 교류손실은 인가전류와 저항 성분전압의 곱으로 나타낼 수 있다.

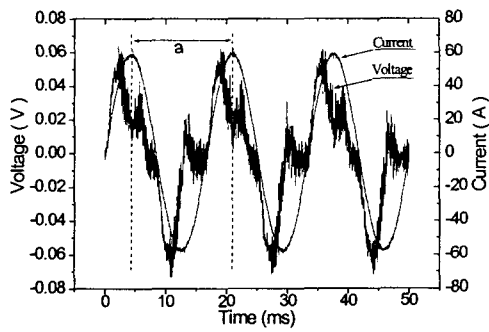


그림 3. 팬케이크 코일의 전압, 전류 파형 ($I=41A$).
 Fig. 3. The measured voltage and current wave of the pancake coil ($I=41A$).

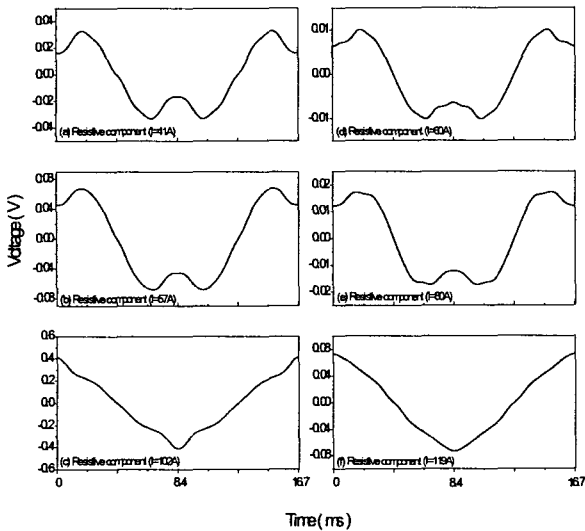


그림 4. 코일의 저항성성분 전압.
 (a)~(c): 팬케이크 코일의 저항성성분 전압
 (d)~(f): 솔레노이드 코일의 저항성성분 전압;
 Fig. 4. The resistive component voltage of the Coils.
 (a)~(c): The pancake coil
 (d)~(f): The solenoid coil

2.2. 코일의 교류손실 수치해석

초전도체의 전류밀도 분포 및 교류손실을 계산하기 위한 해석기법으로는 Bean의 임계상태모델(Critical state model)과 실제 초전도체의 특성으로부터 나타나는 Power law 관계를 이용하는 방법이 있다. Bean의 임계상태모델은 고온초전도체의 느슨한 천이현상을 반영할 수 없는 단점이 있지만, Power law의 관계로부터 나타나는 index, 혹은 n value라 정의되는 값의 크기가 충분히 큰 경우에 있어서는 두 해석결과가 잘 일치한다[2]-[4]. 본 논문에서는 고온초전도체를 이용한 팬케이크 코일의 교류손실을 측정값과 비교하기 위해 임계상태모델을 이용한 팬케이크 코일의 축 대칭 2차원 모델의 수치해석을 하였다.

맥스웰 방정식으로부터 전자기장의 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \tag{1}$$

초전도체 내부에서의 전류밀도 \vec{J}_{sc} 는 식(2)와 (3)의 Bean의 임계상태 모델에 의해 결정된다.

$$\vec{J}_{sc} = J_c \frac{\vec{E}}{|E|}, \text{ if } |E| \neq 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \vec{J}_{sc}}{\partial t} = 0, \text{ if } |E| = 0 \tag{3}$$

식(1)과 식(2), (3)으로부터 계산된 전기 \vec{E} 와 초전도체의 전류밀도 \vec{J}_{sc} 로부터 교류손실은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \int_0^T \int_v \vec{J}_{sc} \cdot \vec{E} \, dv \, dt \tag{4}$$

그림 5는 팬케이크 코일의 전류밀도분포를 나타내었다. 인가한 교류전류는 피크치가 80A인 60Hz의 정현파이다. 그림 5(a)는 인가전류의 두 번째 주기의 시작점을 기준시점으로 하고 이때의 시간을 $t=0$ 으로 하여 나타낸 것이며, 이때 코일의 내부에 전류밀도의 분포가 존재하여 마치 전류가 흐르고 있는 것처럼 보이나 전체 전류밀도의 합이 0이 되어 전류는 흐르지 않는다. 그림 5(b), (c)는 각각 $\omega t = \pi/6, \pi/3$, 일 때의 전류밀도 분포를 나타내고 있다. 시간이 증가함에 따라 전류의 크기가 증가하면서 차폐전류의 영향으로 인한 음의 전류밀도분포의 영역이 점점 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 영향은 그림 5(d)와 같이 $\omega t = \pi/2$ 가 되어 전류의 크기가 피크점에 도달하면 차폐전류의 영향은 완전히 사라지고 실제 코일에 흐르는 전류들에 의한 분포만이 남게 된다. 팬케이크 코일의 1-2-3-4-5번째 턴과 9-10-11-12-13번째 턴의 전류밀도의 분포가 서로 대칭적으로 분포하고 있는데, 이것은 인접한 선재로부터 발생한 자장의 인가방향에 대한 영향에 기인한 것이다

그림 6은 그림 5(c)에 대해 코일 내부의 자장분포와 벡터도를 나타내고 있다. (a)는 코일전체의 자장분포를 나타내고, (b)는 코일의 1, 2번째 턴, (c)는 6-8번째 턴, (d)는 12, 13번째 턴에서 자장의 벡터도를 나타내고 있다. 그림 6의 (c)에서 확인할 수 있듯이 팬케이크 코일의 중앙부에 위치한 선재에 입사되는 자장의 방향은 선재의 넓은 면에 수직인 R축 방향 성분이 대부분임을 확인할 수 있다.

고온초전도체시편의 자화 손실에 관한 많은 연구결과들에서 보고되었듯이, 고온초전도체의 교류손실은 자장의 방향과 크기에 지배적인 특성을 보이고 있다[6]. 특히 선재의 넓은 면에 수직으로 자장이 인가 될 때의 손실이 매우 크므로 초전도체의 손실특성을 예측하기 위해서는 초전도체에 어느 정도의 수직방향성분의 자장이 분포하고 있는가를 확인하는 것이 중요하다. 그림 7의 (a)와 (b)는 인가 교류전류가 $1I_c$ 일 때, 팬케이크 코일에서 발생하는 자장의 성분 중에서 R축과 평행인 성분의 자장분포(B_r)와 선재에서 발생하는 교류손실의 분포를 나타내고 있다. 코일의 B_r 성

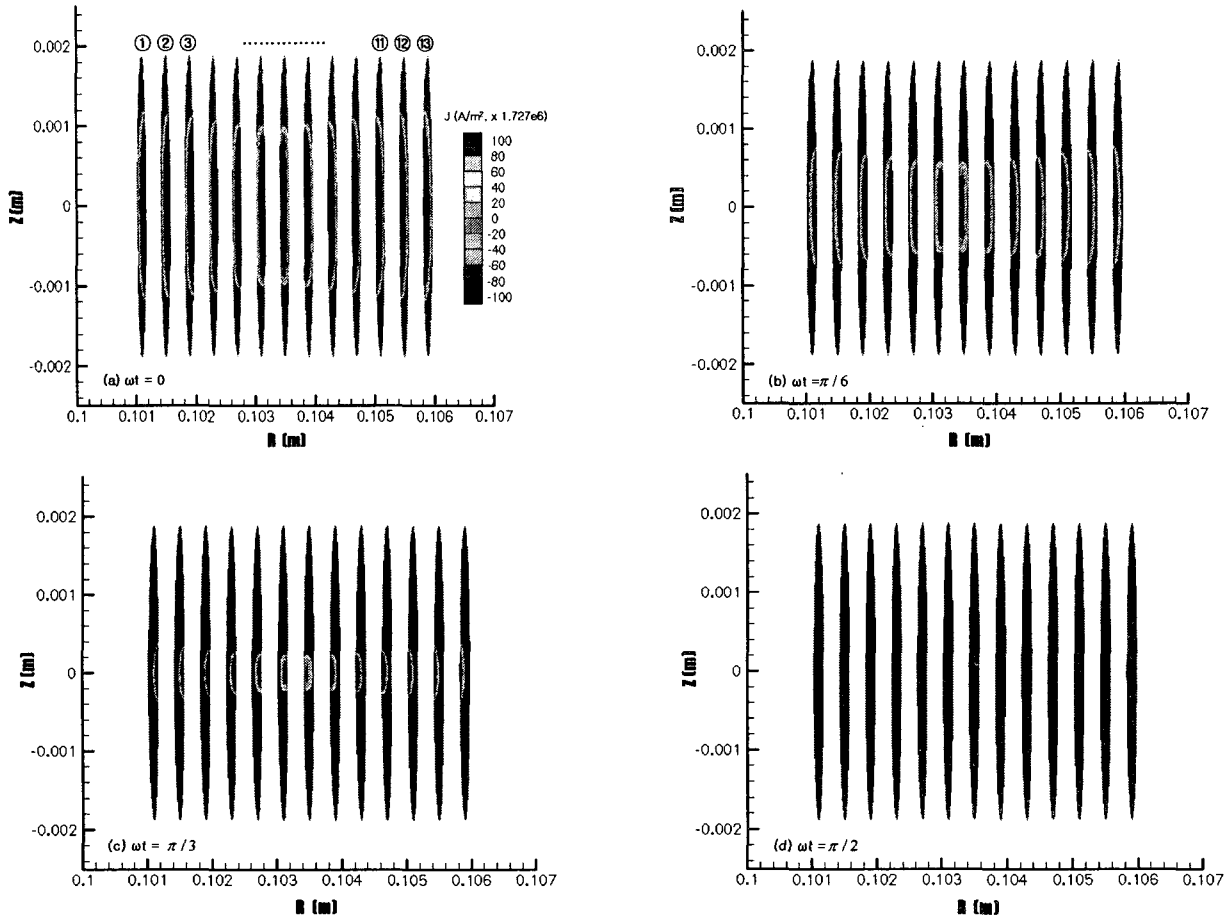


그림 5. 팬케이크 코일의 전류밀도 분포 ($I=80\sin\omega t$, $f=60\text{Hz}$) ; (a) $\omega t=0$, (b) $\omega t=\pi/6$, (c) $\omega t=\pi/3$, (d) $\omega t=\pi/2$
 Fig. 5. Current density distribution of the pancake coil ($I=80\sin\omega t$, $f=60\text{Hz}$) ; (a) $\omega t=0$, (b) $\omega t=\pi/6$, (c) $\omega t=\pi/3$, (d) $\omega t=\pi/2$

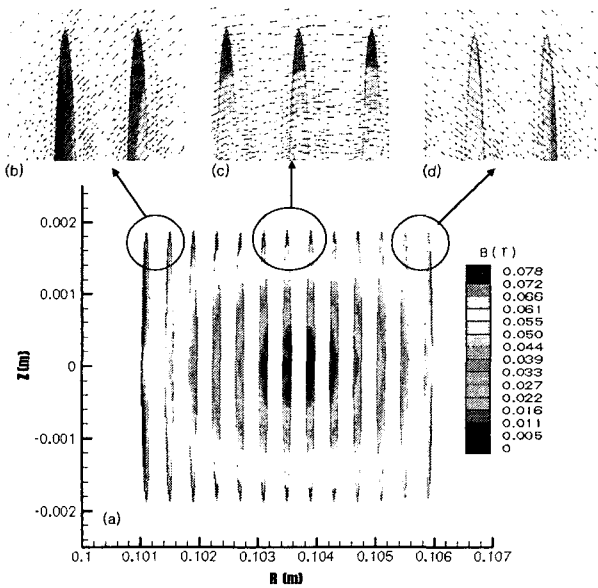


그림 6. 팬케이크 코일의 자장분포와 벡터도.
 Fig. 6. Flux density distribution and vector view of pancake coil ($I=80\sin\omega t$, $\omega t=\pi/3$, $f=60\text{Hz}$) ; (a) whole (b) 1-2th turn (c) 6-7th turn (d) 12-13th turn

본 자장은 그림에서 보이는 바와 같이 선재의 양 끝단에 강하게 분포하고 있으며, 이와 유사하게 코일의 교류손실도 선재의 양 끝단 부분에서 집중적으로 발생하고 선재의 중앙부에서는 미미하게 나타남을 보여주고 있다. 또한 그림 7(a)의 자장분포로 볼 때, 팬케이크 코일의 교류손실은 코일을 이루고 있는 바깥쪽에 위치한 1-2, 12-13번째 턴 보다 안쪽에 위치한 3-11번째 턴에서의 교류손실의 크기가 클 것이라는 것을 예측 할 수 있고, 이는 그림 7(b)의 교류손실분포로부터 엄밀하게 확인 할 수 있다.

그림 8은 피크값이 $0.6I_c$ 와 $1I_c$ 인 교류전류를 인가하였을 때, 팬케이크 코일의 각 턴 당 교류손실의 크기를 나타낸다. 코일의 교류손실은 $0.6I_c$ 인 경우 코일의 중심에 위치한 7번째 턴의 교류손실이 약 49.5mW로 가장 작았으며, 가장 큰 교류손실을 나타내는 최외각의 13번째 턴의 교류손실은 약 57.5mW이다. 반면 $1I_c$ 교류전류를 인가하였을 때의 교류손실은 1번째 턴에서 약 260mW로 가장 작았으며, 10번째 턴에서 약 310mW로 가장 크게 계산되었다. 이는 턴 별 교류손실의 최소, 최대값이 약 17%의 차이를 보이나, 대체적으로 팬케이크 코일에서의 교류손실은 각 턴마다 고르게 분포하고 있음을 나타내고 있다.

그림 9는 솔레노이드 코일의 해석 모델에 대한 요소 분포와 턴 별 위치를 나타내고 있다. 솔레노이드 코일의 축대칭

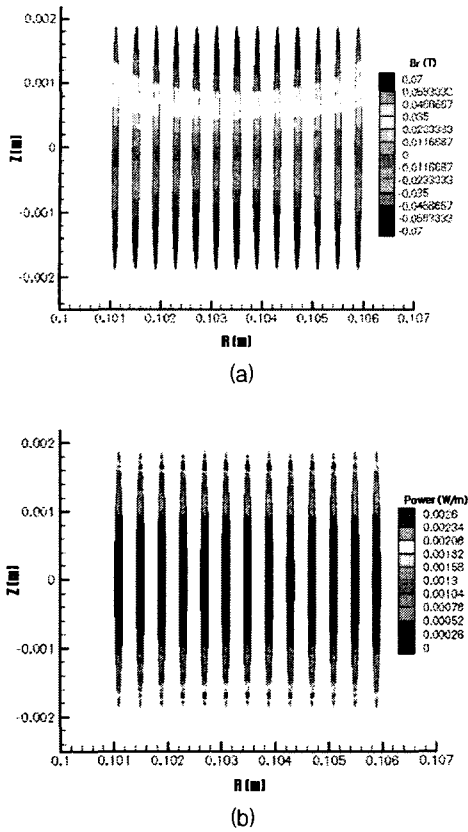


그림 7. 팬케이크 코일에서의 교류손실 분포.
 Fig. 7. AC loss distribution of the Pancake coil.
 (a) Distribution of B_r ($i=80\sin\omega t$, $\omega t=\pi/2$)
 (b) AC loss distribution ($i=80\sin\omega t$)

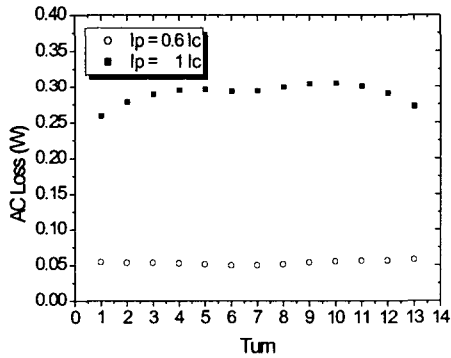


그림 8. 팬케이크 코일의 각 턴 당 교류손실
 Fig. 8. AC loss of each turn in the pancake coil.

칭 모델은 좌우대칭일 뿐만 아니라, 그림 9에서와 같이 7번째 턴을 중심으로 해서 상하 대칭적인 구조를 하고 있다. 따라서 본 논문에서는 솔레노이드 코일 모델의 중심에 위치하는 7번째 턴과 상부에 위치한 8~13번째 턴을 중심으로 하여 수치해석 결과를 나타내었다.

그림 10은 솔레노이드 코일의 전류밀도 분포를 나타내고 있다. 솔레노이드 코일의 최외부에 위치한 13번째 턴의 전류밀도 분포를 살펴보면 대부분의 전류밀도분포가 선재의 상부 쪽으로 밀려서 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 코일의 전류밀도 분포 중에서 미미하게 음의 부호를 가지는

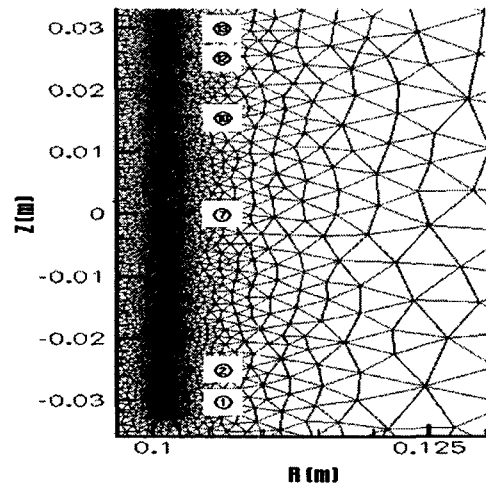


그림 9. 솔레노이드 코일 해석모델의 요소 분포 및 턴 위치.
 Fig. 9. The mesh generation and location of each turn in the solenoid coil.

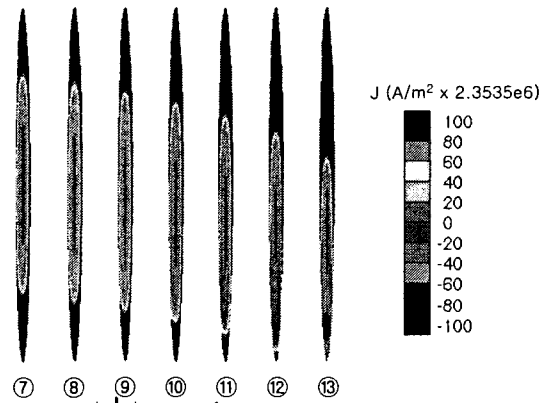


그림 10. 솔레노이드 코일의 전류 밀도 분포.
 (7~13번째 턴, $I_p=0.6I_c$)
 Fig. 10. Current density distribution of the solenoid coil.
 (7~13th turn, $I_p=0.6I_c$)

영역이 존재하고 있음을 알 수 있는데, 이 역시 팬케이크 코일에서와 같이 솔레노이드 코일에 인가되는 자장의 영향에 기인한 것으로 보인다. 솔레노이드 코일의 전류밀도 분포는 중심에 위치한 7번째 턴에 가까워질수록 상하 대칭적인 모양을 나타내고 있는데, 이는 마치 단일 초전도선재시편에 전송전류를 인가하였을 때의 전류밀도 분포와 비슷한 모양을 하고 있어 솔레노이드 코일의 구조상 중심에 위치한 턴은 인접 선재들에 의해 발생한 자장의 영향이 서로 상쇄되어 그 영향을 거의 받지 않고 자기 자신에 의해서 발생한 자장의 영향이 지배적으로 나타나기 때문으로 볼 수 있다. 그림 11은 그림 10의 전류밀도 분포로 인한 7, 10, 13번째 턴에서의 자장의 벡터도를 나타내고 있다.

그림 12(a), (b)는 인가교류전류가 $1I_c$ 일 때 솔레노이드 코일의 B_r 성분의 자장분포와 교류손실분포를 나타내었다. 팬케이크 코일에서와 동일하게 교류손실의 분포는 B_r 성분의 자장분포와 상당히 유사하게 분포하고 있음을 보였다.

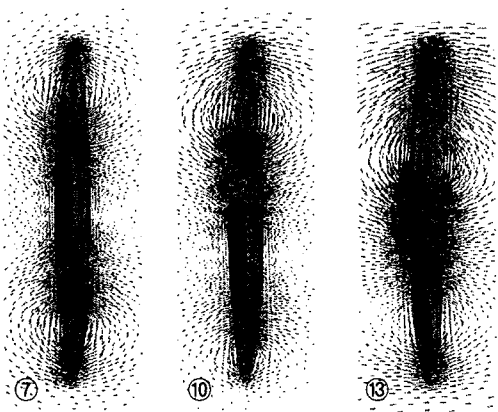


그림 11. 솔레노이드 코일의 7, 10, 13번째 턴에서의 자장 분포와 벡터도.

Fig. 11. Flux density distribution and vector view of 7, 10, 13th turn in the solenoid coil.

솔레노이드 코일의 교류손실 분포는 그림 8에서와 같이 팬케이크 코일이 턴의 위치에 큰 영향 없이 선재의 양 끝단에 고루 분포했던 것과는 다르게 턴의 위치에 따라 교류손실의 분포가 확연히 달라지고 있음을 확인 할 수 있다.

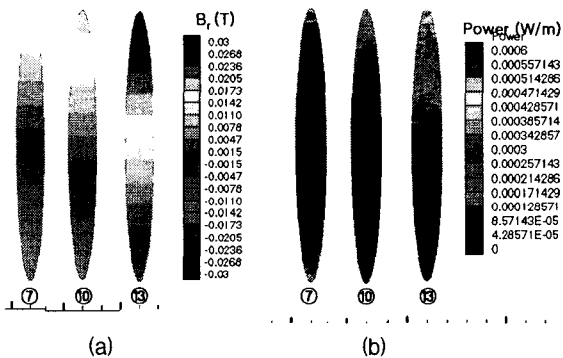


그림 12. 솔레노이드 코일에서의 B_r 성분 자장분포와 교류 손실분포.

Fig. 12. AC loss distribution of the solenoid coil.

(a) Distribution of B_r ($i=109\sin\omega t$, $\omega t=\pi/2$)

(b) AC loss distribution ($i=109\sin\omega t$)

그림 13는 $0.6I_c$ 와 $1I_c$ 의 전류를 인가하였을 때, 솔레노이드 코일의 각 턴 당 교류손실의 크기를 나타낸다. 팬케이크 코일의 턴 별 교류손실과는 다르게 솔레노이드 코일에서의 턴 별 교류손실의 크기는 큰 편차를 나타내고 있다. 이는 그림 12(a), (b)의 B_r 성분의 자장분포와 교류손실 분포로 이미 예견되었던 결과이기도 하다. $0.6I_c$ 와 $1I_c$ 일 경우 가장 적은 교류손실이 발생하는 7번째 턴에서의 교류손실은 각각 5mW와 63.53mW이고, 가장 큰 교류손실의 크기를 보이는 13번째 턴의 교류손실은 각각 35.72mW, 213.93mW가 발생하였다. 턴 별 교류손실의 최소, 최대값의 차이는 최소값을 기준으로 하여 $0.6I_c$ 에서 약 13배, $1I_c$ 에서 약 6배의 편차를 나타내었다. 전체적으로 솔레노이드 코일의 교류손실은 코일의 최외부에 위치하는 1-2와 12-13번째 턴에서 발생한 손실이 전체 교류손실의 50%이상을 차지하고 있어 솔레노이

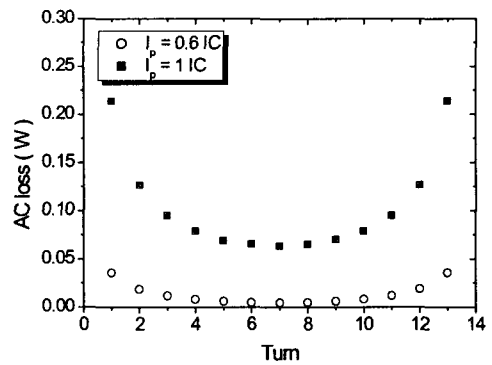


그림 13. 솔레노이드 코일의 각 턴 당 교류손실

Fig. 13. AC loss of each turn in the solenoid coil.

드 코일의 교류손실 분포에 비해 높은 편차를 나타내고 있음을 보였다.

2.3. 코일의 교류손실 측정과 해석 결과 비교

그림 14는 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일의 교류손실 측정결과와 수치해석결과를 도시한 것이다. 두 코일의 교류손실 측정은 인가전류의 피크치(I_p)가 임계전류(I_c)를 넘어서는 영역까지 수행되었지만, 수치해석상으로는 임계전류까지만 계산하였다. $I_p > I_c$ 범위에서 임계전류의 크기만으로 살펴 볼 때 이미 두 코일은 초전도 상태를 벗어났다고 볼 수 있으나, 측정된 교류손실의 기울기가 $I_p < I_c$ 인 영역의 기울기를 유지하고 있고, 그림 4의 저항성 전압성분의 모양으로 확인해 볼 때 여전히 초전도 상태를 어느 정도 유지하고 있음을 알 수 있다. 측정결과로부터 두 코일의 교류손실의 차이는 팬케이크 코일의 임계전류 이하인 구간에서는 약 9배, 팬케이크 코일의 임계전류 이상이고 솔레노이드 코일의 임계전류 이하인 범위의 구간에서는 약 8.3배의 차이를 보여 교류손실의 관점에서 볼 때 동일 턴 수와 길이를 이용한다면, 솔레노이드형의 권선방식이 커다란 장점을 보이고 있음을 확인하였다.

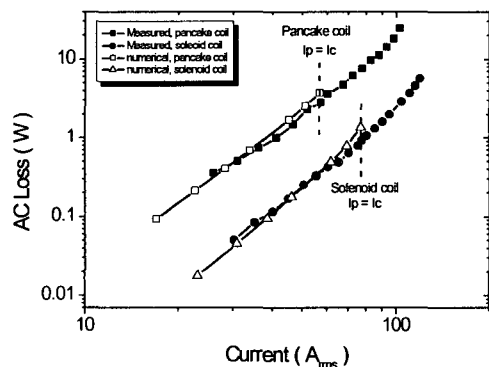


그림 14. 팬케이크와 솔레노이드 코일의 교류손실의 측정값과 계산값.

Fig. 14. The comparison of the measured AC losses and numerical analysis results in the pancake and the solenoid coil.

3. 결 론

본 논문에서는 고온초전도선재를 이용하여 동일 턴 수와 길이의 팬케이크 코일과 솔레노이드 코일을 제작하고 교류손실을 측정하였다. 또한 두 코일과 동일한 해석모델의 수치해석을 통해 초전도 두 코일 내에서의 전류밀도분포, 자장분포, 교류손실 분포를 확인하였으며, 교류손실의 크기를 계산하였다. 수치해석을 통해 계산된 코일의 교류손실 분포는 코일의 Br 성분 자속밀도분포와 매우 밀접한 관계를 보였다. 팬케이크 코일의 교류손실은 코일을 이루고 있는 전체 턴에서 균일한 분포 나타내었고 솔레노이드 코일은 전체 턴에서 큰 편차를 나타내었다. 수치해석을 통해 계산된 코일의 교류손실은 측정값 비교해본 결과 본 논문에서 사용한 수치해석 기법을 이용하여 초전도선재로 권선한 초전도코일의 교류손실을 어느 정도 예측 할 수 있음을 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-11692-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Ernst Helmut Brandt, and Mikhail Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Physical review B, Vol. 48, No. 17, pp. 893-906, 1993.
- [2] Kazuhiro Kajikawa, Toshihiro Hayashi, Ryoji Yoshida, Masataka Iwakuma, and Kazuo Funaki, "Numerical Evaluation of AC losses in HTS wires with 2D FEM Formulated by self magnetic field," IEEE Transaction on Applied superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 3630-3633, 2003.
- [3] Svetlomidr Stavrev, Bertrand Dotoit, and Nadia Nibbio, "Geometry considerations for use of Bi-2223/ag tapes and wires with different models of Jc(B)," IEEE Transaction on Applied superconductivity, Vol. 12, No. 3, pp. 1857-1865, 2002.
- [4] Emmanuel Vinot, Gerard Meunier, and Pascal Tixador, "Different formulations to model superconductors," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp. 1226-1229, 2000.
- [5] Kengo Miyamoto, Naoyuki Amemiya, Nobuya Banno, Masayasu Torii, Eiki Hatasa, Eiji Mizushima, and Tomoyuki Nakagawa, "Measurement and FEM analysis of magnetization loss in HTS tapes," IEEE Transaction on Applied superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 770-773, 1999.
- [6] Jikwang Lee, Seungwook Lee, Myungjin Park, and Guesoo Cha, "Magnetization loss in HTS stacked tapes by various directional external magnetic fields," IEEE Transaction on Applied superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 630-633, 2004.

저 자 소 개



박 명 진(朴明陣)

1973년 12월 7일생. 1999년 순천향대 전기공학과 졸업, 2001년 동국대학교 전기공학과 졸업(석사), 현재 순천향대 전기공학과 박사 과정.

Tel : 041-530-1334

E-mail : pj1973@hanmail.net



이 상 수(李相秀)

1977년 9월 16일생. 2003년 순천향대 전기공학과 졸업, 현재 순천향대 전기공학과 석사 과정.

Tel : 041-530-1334

E-mail : isanggiwoo@hanmail.net



이 승 욱(李昇昱)

1973년 12월 23일생. 1999년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 041-531-0334

E-mail : leeso23@sch.ac.kr



차 귀 수(車貴守)

1956년 7월 18일생, 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업, 1987년 동대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1987년 순천향대 조교수, 현재 순천향대 정보기술공학부 교수 및 MIT 방문교수.

USA 전화 : 1-617-864-4535



이 지 광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 현재 우석대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 063-290-1476