

공심형 초전도 전동기 설계에 관한 연구

¹이지영, ¹권순오, ¹홍정표, ²백승규, ²손명환, ²권영길
¹창원대학교, ²한국 전기연구원

Study on the design of air cored superconducting motors

¹Ji-Young Lee, ¹Soon-O Kwon, ¹Jung-Pyo Hong, ²Seung-Kyu Baik,
²Myung-Hwan Sohn, and ²Young-Kil Kwon
¹Changwon National University, ²Korea Electrotechnology Research Institute

jyecad@korea.com

Abstract - This paper presents a design method for superconducting motors. In order to consider large air-gap effects, three dimensional equivalent magnetic circuit network method (3D EMCN) is used in design process. The proposed design process consists of five steps. Firstly the ranges of electrical parameters, such as electromotive force and synchronous reactance, are investigated to get object output characteristics under specifications. And then, the detail motor dimensions are decided within the range of the parameters. In third and forth steps, the parameters are obtained by analysis using 3D EMCN. At last, the characteristics of designed model are confirmed.

1. 서 론

고온 초전도 코일은 기존의 구리 코일보다 훨씬 높은 전류를 흘릴 수 있으므로 제한된 형상 치수에서 보다 높은 자계를 형성시킬 수 있다. 그러나 회전자와 고정자의 요크에 자성체를 사용하는 경우에는 자기적인 포화현상으로 인하여 초전도체를 사용하여 높은 자장을 형성하는 데 대한 효과를 반감시킬 뿐만 아니라, 철손 증가로 인한 효율저하의 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 공심형 코일 형태의 초전도 전동기 설계에 대한 접근이 많이 이루어지고 있다[1].

공심 코일을 사용하는 경우, 자기적 공극 길이가 증가하므로 축방향으로의 프린징 현상으로 인해 2차원적인 해석으로 전동기의 특성을 분석하는 데는 많은 오차를 수반하게 된다. 그러나 일반적인 모델링을 거쳐 3차원 해석을 수행하는 경우에는 많은 노력과 시간이 소요되므로 설계 단계에서 여러 가지 형상변화에 대해 특성을 분석하는 데 어려움을 겪게 된다.

따라서 본 논문에서는 간략화된 모델링과 3차원 등가자기회로방법(3D Equivalent Magnetic Circuit Network, 이하 3D EMCN)[2]을 이용하여

3차원적인 자계 분포를 고려한 특성해석을 빠르게 수행함으로써 신뢰성이 향상된 설계 프로세스를 제안하고자 한다.

본 논문에서 제안된 설계 과정은 크게 다섯 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서는 역기전력과 인덕턴스 변화에 따른 특성 변화의 추이를 분석하여, 목표로 하는 출력 특성을 얻기 위한 역기전력과 인덕턴스의 범위를 결정한다. 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계에서 결정된 전기적인 파라미터를 얻기 위해서 필요한 전동기 형상 설계를 시작한다. 최종 형상을 얻기 위한 초기 값을 이 단계에서 결정하게 된다. 세 번째와 네 번째 단계에서는 3D EMCN을 이용하여 역기전력과 인덕턴스를 각각 산정하게 된다. 이 때 초전도 전동기의 주요 파라미터인 동기 리액턴스와 B_L (고온 초전도 테이프에서 넓은 면과 수직한 자계 성분)[3,4]을 같이 산정한다. 역기전력과 인덕턴스는 두 번째 단계에서 결정된 전동기 형상 치수 및 계자와 전기자 조건에 의해 각각 산정된다. 산정된 값이 첫 번째 단계에서 결정된 범위를 만족시키는지 판단하여 두 번째 단계로 퍼드백, 또는 다음 단계로 넘어가게 된다. 다섯 번째 단계에서는 이전 단계를 거치면서, 출력 특성을 만족시키는 역기전력과 인덕턴스의 값을 가질 수 있는 초전도 모터의 설계 사양이 결정되고, 최종 특성해석을 하게 된다.

2. 본 론

2.1 설계 모델

Fig. 1은 공심형으로 설계된 고온 초전도 동기 전동기 단면의 예를 보여주고 있다. 전동기는 운전온도가 약 35K인 고온 초전도 코일 Bi-2223로 만들어진 계자 권선, 저온 댐퍼 쉴드, 공극, 구리 도선으로 만들어진 전기자 권선, 적층된 자기 쉴드 등으로 구성되어있다. 계자 권선은 race track 타입 이중 팬케익 구조로 만들어 지는 것으로 고려하였다. Fig. 1에서 보듯이 기계적인 공극은 댐퍼 쉴드에서부터 전기자 치까지 이나, 자기적인 공극은 그보다 큰 것을 볼 수 있다[5].

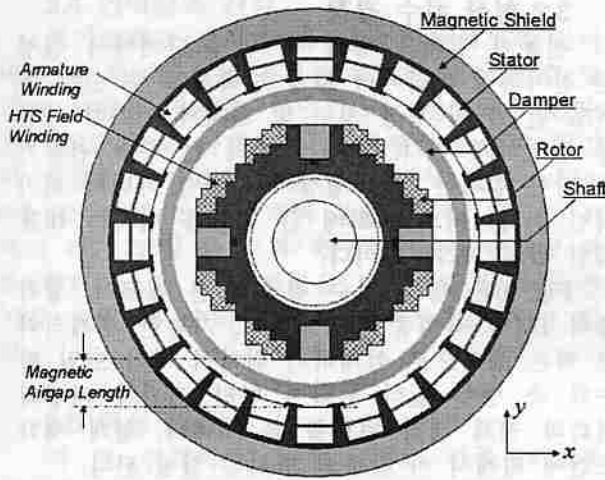


Fig. 1. The cross-section view of superconducting motor.

2.2 해석 이론

3D EMCN은 자기 스칼라 포텐셜을 계변수로 하는 수치 해석 법이다. 3D EMCN에서 해석 모델은 영역에 따라 6면체의 요소로 나누어지고, 퍼미언스에 따라 인접하는 절점을 연결함으로써 형성된다. 하나의 절점에 대한 3차원 해석 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 절점 (i,j,k) 에서 자속의 연속성, 즉 유입되는 자속은 유출되는 자속과 같다는 조건을 통해 (1)과 같은 경계 조건을 얻고 전기가 도체 영역의 등가 기자력을 이용하여 (2)와 같은 계수 행렬을 구성 할 수 있다.

$$\sum_{n=1}^6 F_n = F_{1,j,k} + F_{2,j,k} + F_{3,j,k} + F_{4,j,k} + F_{5,j,k} + F_{6,j,k} = 0 \quad (1)$$

$$[P]\{U\} = \{F\} \quad (2)$$

F_n 는 n 번째 요소의 자속을, $[P]$ 는 퍼미언스 계수 행렬, $\{U\}$ 는 절점의 자기 스칼라 포텐셜, $\{F\}$ 는 구동함수를 나타낸다.

설계 단계에서 3D EMCN을 이용하여 3차원 해석을 수행하기 위하여 Fig. 3의 좌변에서 보듯이 간략화된 해석 모델을 이용하였다.

3. 설계 과정

Fig. 4는 본 논문에 적용된 설계 과정을 나타내고 있다. 설계과정은 기본적으로, 다섯 단계로 나누어진다.

3.1 파라미터 범위 결정

전동기의 사양이 결정되고 나면 설계의 첫 번째 단계로서, 원하는 전동기 특성을 만족시킬 수 있는 주요 파라미터 범위 결정을 하게 된다. Fig. 5는 동기 전동기의 기본 출력식을 이용하여 평가할 수 있는 것으로서, 주요 파라미터인 역기전력과 인덕턴스 변화에 따른 전동기 특성변화를 보여주고 있다.

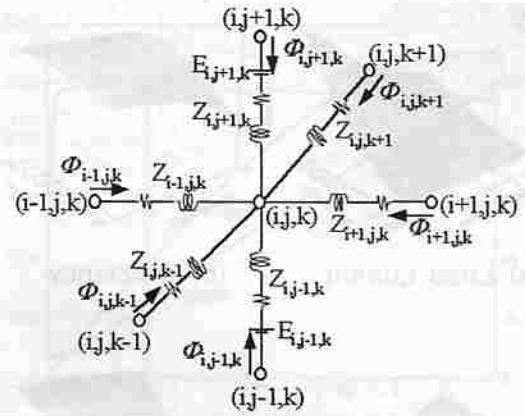


Fig. 2. Configuration of magnetic circuit network

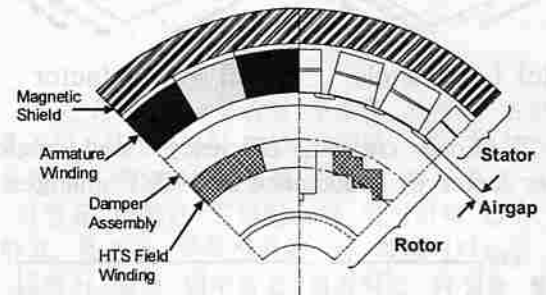


Fig. 3. Analysis model by 3D EMCN (left-side) vs. real model (right-side).

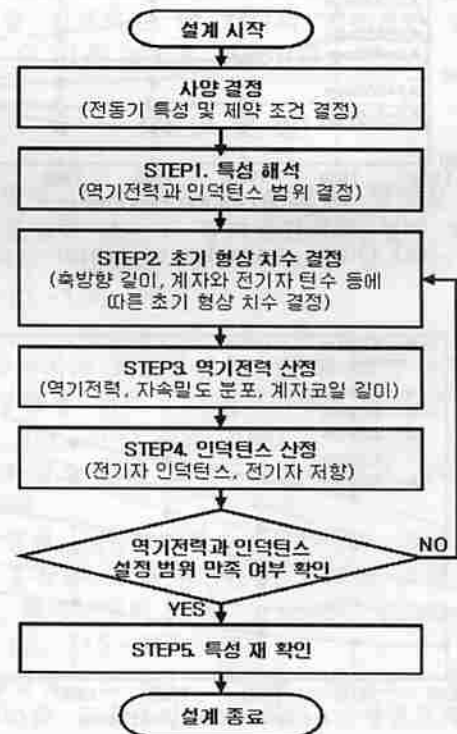


Fig. 4. Design process

원하는 효율이나 역률, 또는 출력을 발생시킬 수 있는 역기전력과 인덕턴스 범위를 이 단계에서 결정하게 된다.

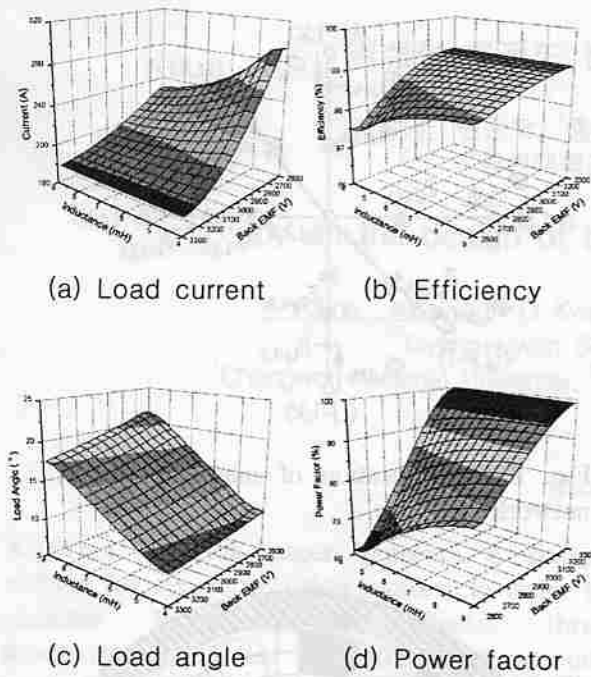


Fig. 5. Load current, efficiency, load angle, power factor by inductance and EMF changes.

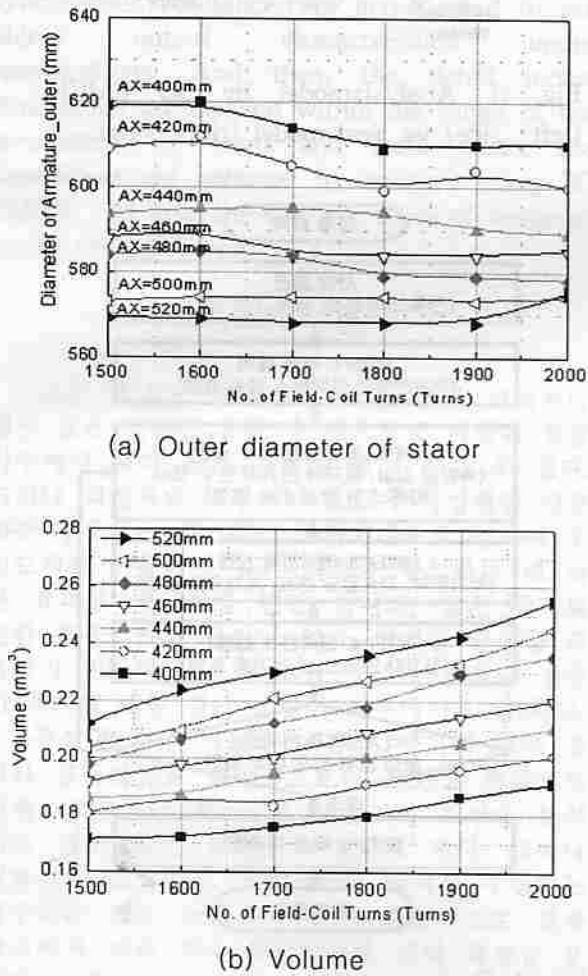


Fig. 6. Variation of dimensions according to the rotor coil turns and axial length.

3.2 형상 치수 결정

전동기 설계 사양과 첫 번째 단계에서 결정된 전기적인 파라미터 값을 만족시킬 수 있는 초전도 전동기의 형상 치수 및 계자와 전기자 사양을 결정하게 된다. 계자 코일의 턴 수와 전동기 축 방향 길이는 다른 형상 치수뿐만 아니라 전기적인 파라미터의 변화에 큰 영향을 미치는 대표적인 설계 파라미터이다.

Fig. 6은 형상 치수 결정의 한 예로서, 정격 출력 1MW 특성을 만족하면서, 가능한 경제적이고 적은 체적으로 설계하기 위하여 계자 코일 턴 수와 축 방향 길이 변화에 따라 전기자 외경의 변화와 전체 체적 변화를 본 것이다. 설계 제약 조건에 의해서 이 값들의 범위는 결정 된다.

3.3 역기전력 산정

Fig. 7은 두 번째 단계에서 결정된 형상 치수 및 권선 사양으로, 입력 파라미터와 이에 따른 특성 해석 결과를 보여주고 있다.

계자권선의 기자력만 인가한 특성 해석 결과 값은 역기전력뿐만 아니라, 전체 계자 코일 길이, 토크, 자기 철드에서의 최대 자속 밀도, 계자 코일의 수직 자장 밀도 등이 있다. 첫 번째 단계에서 결정된 역기전력 범위 내에서 계자 코일 턴 수와 축 방향 길이 변화에 따른 B_{\perp} 와 계자 코일 길이 변화를 보여주고 있다.

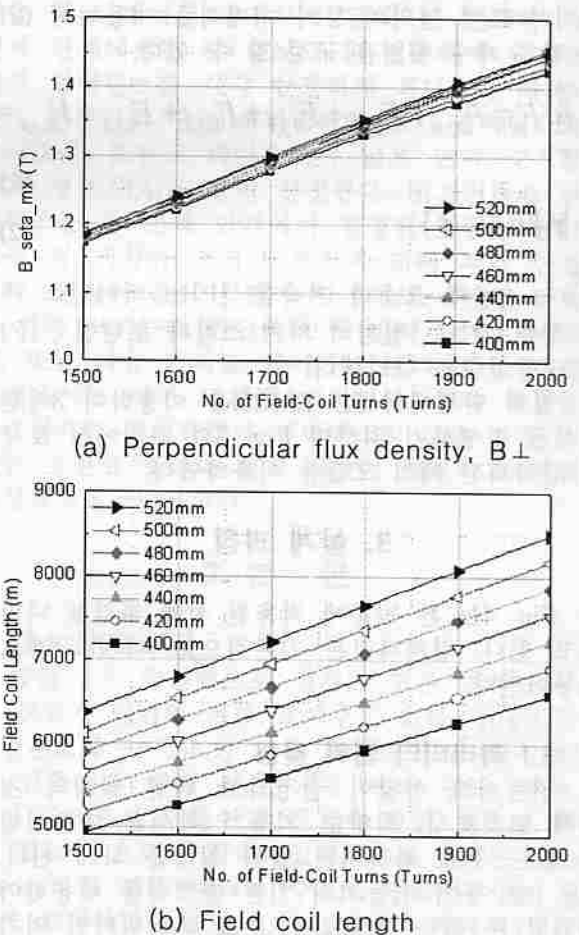


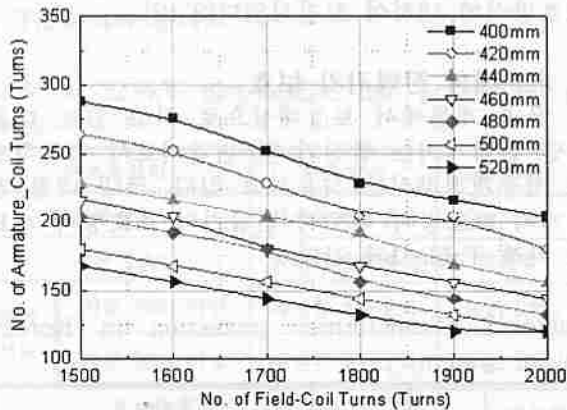
Fig. 7. Input parameter, flux density according to the length of rotor coil.

3.4 인덕턴스 산정

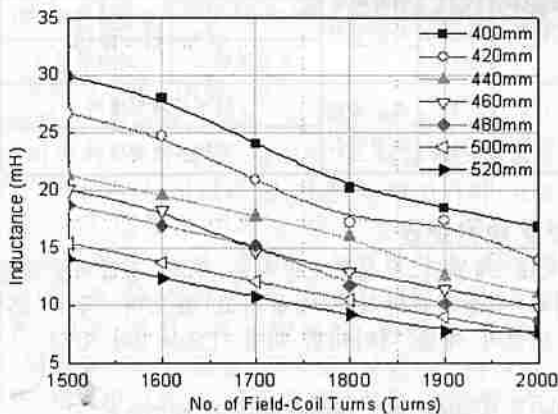
역기전력을 산정한 세 번째 단계에서와 같이 네 번째 단계에서는 결정된 동일한 형상 치수 및 권선 사양을 가지고, 인덕턴스를 결정하게 된다. 3D EMCN으로 자계 해석을 수행하여 얻은 전기자 권선의 기자력에 의한 특성 해석 결과는 Fig. 8과 같다. 세 번째 단계와 동일한 역기전력 조건에서 계자 코일 턴 수와 축 방향 길이 변화에 따른 인덕턴스와 동일 출력을 발생시키기 위한 전기자 코일 턴 수의 변화에 대해서 보여주고 있다.

3.5 특성 검증

이 전 단계에서 출력 특성을 만족시키도록 결정된 역기전력과 인덕턴스 범위 내에서 형상 제약 및 경제적인 제약 조건을 만족시키는 치수 및 권선 사양을 결정함으로써 전동기 형상을 결정할 수 있다. 결정된 전동기 형상에 대해 특성 해석을 수행하여 목표에 대한 만족여부를 검증함으로써 설계를 완료할 수 있고 그 결과는 Fig. 9에 나타내었다.



(a) Number of armature coil turn



(b) Inductance

Fig. 8 Variation of armature coil according to the field coil and axial length

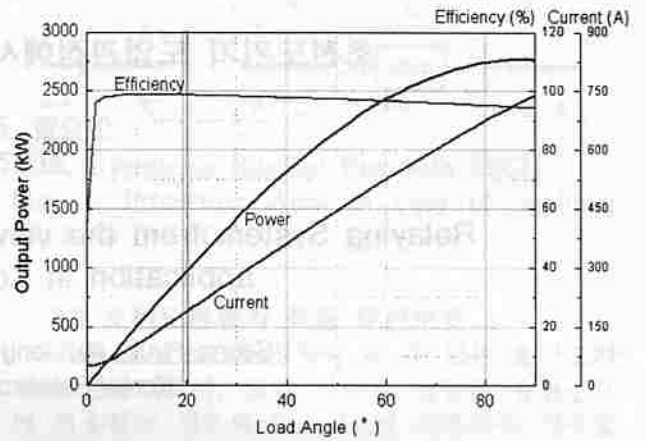


Fig. 9 Characteristics of a superconducting motor

3. 결 론

본 논문에서는 공심형 구조를 가지는 초전도 전동기의 설계과정이 검토되었다. 3D EMCN을 이용한 3차원 해석을 통해 전동기 특성에 주요하게 영향을 미치는 인덕턴스와 역기전력 값을 산정하고, 특성을 만족시키는 이 파라미터들의 범위 내에서 설계 변수들을 결정하는 과정을 보였다. 해석 과정에서 수직 자속 밀도 B_z 를 고려함으로써, 초전도 계자코일을 이용하는 초전도 전동기의 특수성 역시 고려할 수 있었다.

본 논문에서 제시된 과정은 공심형 초전도 전동기를 설계하는 데 하나의 기본적인 안으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조영식, 홍정표, 이주, 손명환, 권영길, 류강식, "공심형 초전도 동기발전기의 설계 변수에 대한 연구", 대한전기학회 논문지, vol. 50, No. 3, pp101-106, 2001
- [2] 염상부, 하경호, 홍정표, 허 진, "전압구동 3차원 등가자기 회로방법을 이용한 선형 직류전동기의 동특성 해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 271-273, 2000
- [3] 고화질소 냉각 초전도발전기 개발, 과학기술부, 1999
- [4] 조영식, 서무교, 백승연, 김석환, 손명길, 권영길, 홍정표, "운전전류를 고려한 고온초전도 모터용 계자코일의 설계", KIASC Conference 2002, pp. 315-317, 2002
- [5] 이정중, 조영식, 주진홍, 홍정표, 권영길, "100hp급 고온초전도 모터의 자장분포특성", KIASC Conference 2002, pp. 312-314, 2002

KIASC Conference 2004

2004년도 학술대회 논문집

일 시 : 2004년 10월 20일(수) ~ 22일(금)

장 소 : 무주리조트 호텔티롤

홈페이지 : www.kiasc.or.kr



사단
법인

한국초전도·저온공학회

The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics

◆ 15:00-16:00

소 회 의 실

Session I PS : 기기 및 시스템 분과

좌장 : 최경달(산업기술대), 조전욱(전기연)

[15:00 - 16:00]	PS-01	초전도 디지털 SFQ 회로의 바이어스 전류와 Josephson Junction 크기가 신호 동기화에 미치는 영향 분석 박정근, 임지훈, 이상민, 조원, 문규	151
	PS-02	Mo 저항값의 조정을 통한 초전도 디지털 SFQ 회로의 자가동기회로 지연 시간 분석 이상민, 조원, 박정근, 임지훈, 문규	154
	PS-03	수직 교류자장에 대한 HTS테이프의 동저항손실 특성 허대행, 류경우, 이기만, 오일성	158
	PS-04	인접 HTS테이프가 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성에 미치는 영향 조영호, 마용호, 류경우, 최병주, 황시돌	162
	PS-05	EMTDC를 이용한 저항형 고온초전도 한류기의 계통적용 시뮬레이션 허태전, 배형택, 박민원, 유인근	165
	PS-06	공심형 초전도 전동기 설계에 관한 연구 이지영, 권순오, 홍정표, 백승규, 손명환, 권영길	170
	PS-07	초전도기기 도입관점에서의 국내계통 보호방식 고찰 이승렬, 김종율, 윤재영	174
	PS-08	고온초전도 케이블의 굽힘 직경에 따른 임계전류의 저하특성과 절연특성 김혜준, 김재호, 곽동순, 조전욱, 심기덕, 배준한, 김해중, 성기철	178
	PS-09	수치해석 기법을 이용한 고온초전도 전력케이블의 인덕턴스 계산 이상진, 심기덕, 조전욱	182
	PS-10	고온초전도 케이블 단말의 전류도입선 설계 김도형, 김지환, 이창호, 김준동, 김균석, 김익생	185
	PS-11	수치해석을 통한 HTS 선재의 자화손실에 대한 자계방향 의존성 이광연, 박명진, 차귀수, 이지광	189
	PS-12	고온초전도 선재를 이용한 팬케이크 코일의 교류손실 측정과 수치해석 박명진, 이상수, 이승욱, 차귀수, 이지광	193
	PS-13	고온초전도선의 단선전류 특성 김재호, 김혜준, 조전욱, 심기덕, 배준한, 성기철, 김해중, 박승엽	197