

계자 철심형 초전도 전동기 개념 설계 및 특성 해석

Conceptual Design and Characteristic Analysis of a Superconducting Motor using Iron Cores in the Field

이상호¹, 권순오¹, 홍정표^{2,*}, 권영길³

S. H. Lee¹, S. O. Kwon¹, J. P. Hong^{2,*}, and Y. K. Kwon³

Abstract: This paper deals with the conceptual design and characteristic analysis of core type superconducting motor using iron cores in the field. As the objective function of conceptual design, the flux quantity per pole is selected. In order to reduce the quantity of superconductors, the variations of flux quantity per pole by changing the design variables and area are investigated. Finally, the quantity of superconductors between air-cored and core type superconducting motor is compared under the same motor capacity. In addition, the dimensions and volumes of motors are compared.

Key Words: air-cored, flux quantity per pole, iron cores, superconducting motor.

1. 서 론

고출력, 고효율의 산업용 전동기를 개발하기 위하여 기존에 적용되었던 유도 전동기나 영구자석형 동기전동기가 아닌 계자코일(field coil)에 초전도 선재를 이용한 초전도 동기전동기가 개발되고 있다[1-4]. 그 이유는 계자코일에 기존의 동선을 이용할 때에는 동선에 통전 가능한 전류가 제한적이고 동손이 발생하므로 전동기 효율을 감소시키는 단점을 지니고 있기 때문이다. 그러나 아주 낮은 온도로 생각하면 전기저항이 존재하지 않는 초전도체를 계자코일로 이용하게 되면 동손이 없어지고 통전 가능전류가 동선에 비하여 매우 커지게 된다.

선박 추진용으로 적용되는 초전도 전동기는 저속/고토크의 운전 특성이 요구되며 전동기 효율을 향상시키기 위해서는 계자 기자력을 증가시켜 자속을 확보해야 한다. 그러나 초전도 선재에 통전 가능한 전류가 일정한 조건에서는 계자코일의 턴 수가 증가해야 하므로 초전도 선재량 또한 증가하게 된다[5]. 이는 곧 초전도 전동기의 제작비가 상승하는 주 원인이 되므로 초전도 전동기 연구/개발에 부정적인 영향을 미치게 된다. 따라서 동일한 전동기 부피내에 자기적 공극을 줄이면서 계자 자속에 의해 발생하는 유효자속량을 극대화

시킬 수 있는 계자 철심형 초전도 전동기에 대한 연구가 이뤄져야 할 것이다. 이 때 계자 철심형 초전도 전동기는 공심형(또는 계자 공심형) 초전도 전동기와 구조는 동일하면서 계자(또는 회전자)에 자성체 재질이 이용된다.

본 논문에서는 계자에 자성체 재질을 이용한 계자 철심형 초전도 전동기의 개념 설계에 대해 다루며 그리고 공심형과 계자 철심형 초전도 전동기의 출력이 동일할 때 초전도 선재량 및 전동기 형상치수 등을 비교/분석하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 설계 사양 및 공심형 초전도 전동기 개요

Table 1은 초전도 전동기의 설계 사양을 나타낸 것이다. 합정 추진용으로 적용하기 위하여 저속/고토크의 운전특성이 요구되어지며 냉각 조건을 고려한 계자코일의 동작전류는 180 A이다. 그리고 기존 합정 추진용으로 적용되었던 유도기나 영구자석형 동기전동기보다 높은 효율 특성이 요구되어 진다.

Fig. 1은 앞서 언급한 설계 사양을 토대로 공심형 공심형 초전도 전동기 개념설계 결과의 측면도를 나타낸 것이다[5]. 공심형 초전도 전동기의 상당직렬턴수는 192턴, 동기리액턴스는 0.2 p.u 그리고 무부하시 선간역기전력의 왜형률(total harmonic distortion, THD)은 약 1.4% 이다. 이 때 전동기 체적은 약 2.6 m³ 정도이며 계자 코일에 사용되는 초전도 선재량은 약 40 km 이다. 이는 기존 전동기보다 효율이 높으며 전동기 부피를 감소시킬 수 있는 장점이 있지만 초전도 선재량 증가로 인한 전동기 제작비가 크게 상승하는 단점이 발생한다. 따라서 회전자에 자성체 재질을 이용하여 초전도 선재량을 줄일 수 있는 계자 철심형 초전도 전동기에 대한 연구가 필요하다.

Table 1. Design specifications.

정격용량	5 MW
정격속도	230 rpm
정격토크	208 kNm
단자전압	6600 V _{rms}
전기자 정격전류	460 A _{rms}
효 율	97% 이상

¹학생회원 : 한양대학교 자동차공학과

²정 회 원 : 한양대학교 기계공학부

³정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

*교신저자 : hongjp@hanyang.ac.kr

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 09월 18일

게재확정 : 2008년 09월 18일

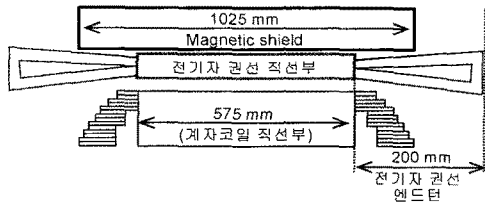


Fig. 1. Vertical section of air-cored type superconducting motor.

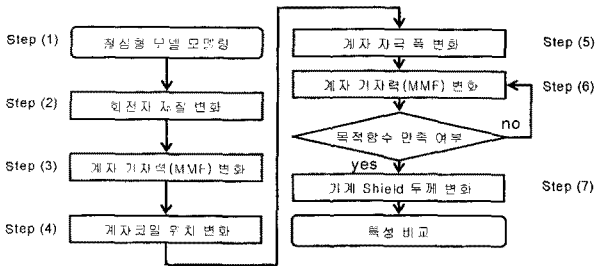
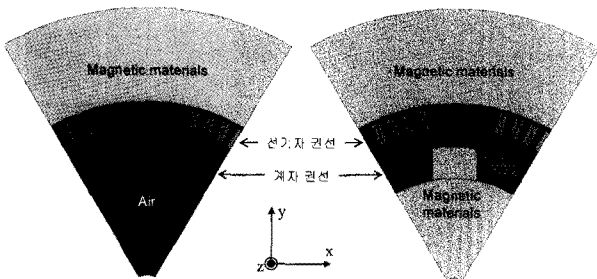


Fig. 2. Design procedure.



(a) Air-cored type (b) Core type

Fig. 3. The comparison between air-cored and core type models.

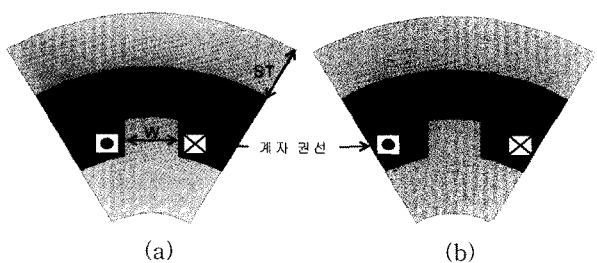


Fig. 4. Design variables.

2. 2. 계자 철심형 전동기 검토 방법

Fig. 2는 계자 철심형 초전도 전동기의 개념 설계 과정을 나타낸 것이다. 공심형 초전도 전동기와 설계 사양이 동일한 조건에서 회전자에 자성체 재질 사용에 따른 전동기의 부피 및 초전도 선재 사용량을 비교하게 된다.

Fig. 3 (a)는 Fig. 1에서 언급한 공심형 초전도 전동기의 단면도 형상을 나타낸 것이다. 그리고 회전자에 자성체 재질이 사용된 Fig. 3(b)는 계자 철심형 초전도 전동기의 기본형상으로서 자성체 재질 사용에 따른 전동기 파라미터를 산정/비교하게 된다. 계자 철심형 초

전도 전동기에 대한 개요는 다음과 같다.

- 공심형 초전도 전동기 형상에서 계자측에 자성체 재질 사용
- 기계적 공극과 전기자의 상당직렬턴수는 공심형 초전도 전동기와 동일
- 계자 전류 180 A

Fig. 4는 설계 과정에서 검토되는 설계변수를 나타낸 것으로서 Fig. 4 (a)와 (b)는 계자 기자력이 동일한 상태에서 계자코일 위치에 따른 특성을 비교할 때 검토되어진다. 그리고 Fig. 4 (a)에 표시되어 있는 ST와 W는 기계 Shield의 두께 및 계자 자극폭 변화에 따른 특성을 비교할 때 검토되어지는 설계인자를 정의한 것이다.

2. 3. 목적함수

개념 설계의 목적함수는 극 당 자속량이며 산정과정은 다음과 같다. 먼저 전기자 권선이 존재하는 영역의 중심 반경에 대하여 공극자속밀도 분포를 산정하고 이를 주파수 분석하여 공극자속밀도의 왜형률 및 기본파 성분을 계산한다. 그리고 개념 설계의 목적함수인 극 당 자속량을 산정한다.

공심형 초전도 전동기와 동일하게 계자 철심형 초전도 전동기의 전기자 권선방식은 전철권이며 상당직렬턴수는 192턴, 운전주파수는 11.5 Hz, 단자전압이 6600 V_{rms}, 그리고 식 (1) 을 이용하여 산정된 극당 자속량의 목표값은 0.387 Wb이다. 그리고 공극자속밀도 분포가 정현적이라고 가정할 때 목표값을 만족시키기 위한 공극자속밀도의 최대값은 1.36 T이다. 따라서 공극자속의 왜형률은 5% 이하가 되도록 제약조건을 설정한다.

$$\text{목적함수} : \Phi = \frac{e}{4.44 \times k_p \times k_d \times N_{ph} \times f} \quad (1)$$

$$\text{목표값} : \Phi = 0.387 \text{ Wb}, B_{peak} = 1.36 \text{ T}$$

$$\text{제약조건} : THD \leq 5\%$$

여기서 e 는 상 역기전력의 실효값, k_p, k_d 는 각각 권선의 단절계수 및 분포계수, N_{ph} 는 상당직렬턴수 그리고 f 는 전동기 운전 주파수이다.

2. 4. 설계인자 변화에 따른 자속밀도 특성

Fig. 5는 계자 철심형 초전도 전동기의 초기 설계 형상으로부터 설계 인자 및 영역 변화에 따라 공극자속밀도 특성 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타나 있는 Step (1) 부터 Step (6) 까지는 기계 Shield의 두께가 목적함수에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 150 mm로 일정하며 Step (7)에서 기계 Shield에서의 평균 자속밀도가 1.5 T 이하가 되도록 기계 Shield의 두께를 결정한다.

Fig. 5 (a)와 (b)는 계자측에 자성체 재질 사용 여부 및 계자 기자력 변화에 따른 공극자속밀도 변화 양상을 나타낸 것이다. 공심형 초전도 전동기와 계자 철심형 초전도 전동기의 계자 기자력이 동일할 때 공극자속밀도의 기본파 성분은 약 2배 증가하였지만 계자 자극에 대한 상세설계가 이루어지지 않았기 때문에 공극

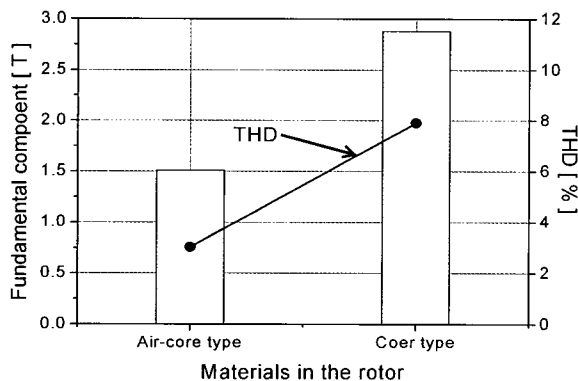
자속밀도의 THD는 오히려 증가하게 된다. 그러나 계자측에 자성체 재질을 사용함에 따라 자기저항이 감소하게 된다. 그리고 동일한 계자 기자력에 대해 공심형 초전도 전동기보다 전동기 출력과 관련된 유효 자속량은 크게 증가하게 됨을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5 (b)와 같이 계자 철심형 초전도 전동기의 계자 기자력이 40%(공심형 초전도 전동기에 인가된 계자 기자력을 100% 이라고 가정) 일 때 개념 설계의 목표값과 동등 수준의 극 당 자속량을 확보할 수 있다.

Fig. 5 (c)는 계자 기자력이 동일할 때 계자코일 위치에 따른 공극자속밀도 특성을 나타낸 것이며 계자코일 위치는 Fig. 4와 같다. 계자 철심형 전동기는 자기적 공극이 크므로 계자 코일이 계자 자극에 인접할수록 누설 성분이 증가하게 되지만 계자 코일이 계자 자극으로부터 멀어질수록 공극자속밀도의 THD는 저감되며 극당 자속량 확보에 유리해진다. 따라서 개념 설계의 목적함수의 목표값을 만족시키면서 제약조건을 만족시키기 위한 계자 코일의 위치는 Fig. 4 (b)로 고정시킨다. 그러나 이러한 구조는 계자 코일 간격이 커지게 되므로 초전도 선재량은 오히려 증가하는 단점이 있다.

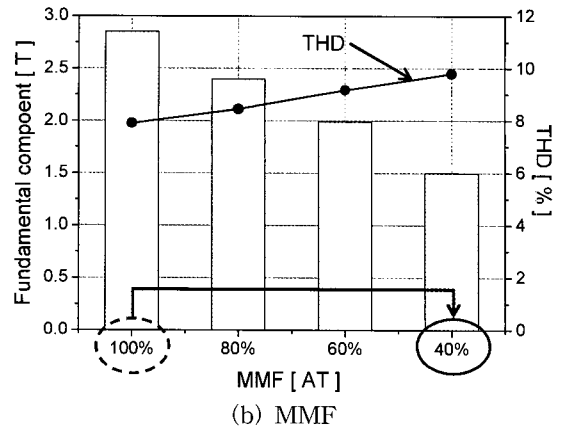
Fig. 5 (d)는 계자 자극폭(W) 변화에 따른 공극자속밀도 변화 양상을 나타낸 것이다. 계자 철심형 초전도 전동기의 초기 계자 자극폭은 140 mm이고 계자 코일의 위치가 Fig. 4 (b)와 같을 때 공극자속밀도의 기본 성분과 THD는 각각 1.7 T, 4% 이다. 계자 자극폭을 40 mm 간격으로 증가시켰을 때 자극폭 증가에 따른 극 단면적은 증가하게 되므로 공극자속밀도의 기본 성분은 증가하게 된다. 그러나 공극자속밀도의 THD는 180 mm일 때 최소가 되므로 계자 자극폭은 초기 형상보다 40 mm증가하게 된다.

Fig. 5 (e)는 Fig. 5 (a) ~ Fig. 5 (d)의 결과로부터 얻은 전동기 형상을 이용한 계자 기자력 변화에 따른 목적함수의 변화양상을 나타낸 것이다. 계자 철심형 초전도 전동기는 계자 공심형 초전도 전동기의 계자 기자력의 30% 수준일 때 계자 공심형 초전도 전동기와 동등수준의 역기전력 확보가 가능하며 이 때 공극자속밀도의 THD는 약 2%이다.

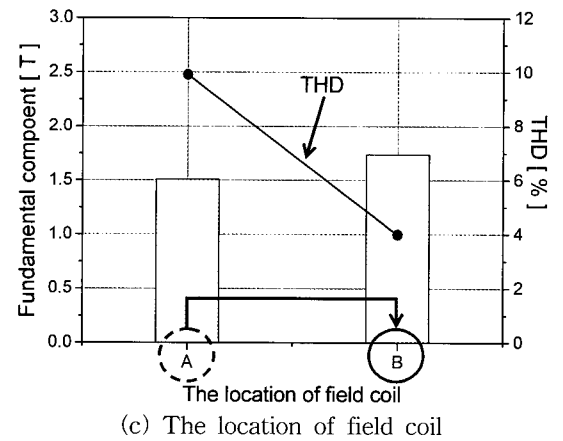
Fig. 6은 Fig. 4 (a)에 나타나 있는 설계인자 ST가 50 mm 씩 변화할 때 기계 Shield 내 주 자로(main flux path)에 대한 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 해석 조건은 앞서 검토되었던 전동기 형상에 대하여 계자 기자력이 공심형 초전도 전동기의 30% 이다. ST가 200 mm 이상일 때 평균자속밀도는 동등수준이고 이는 초기 설계시 가정하였던 1.5 T 이하를 만족시키므로 기계 Shield의 두께는 200 mm로 정하게 된다.



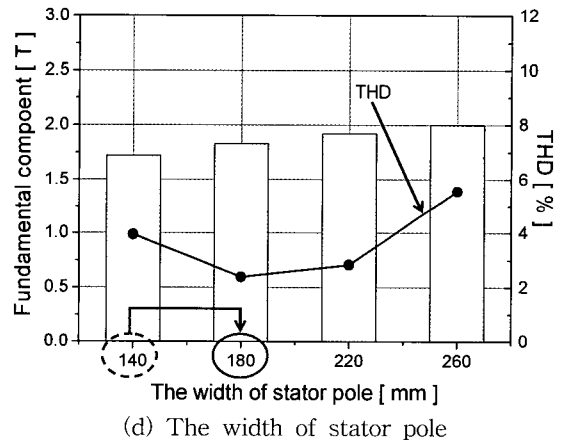
(a) Materials in the rotor



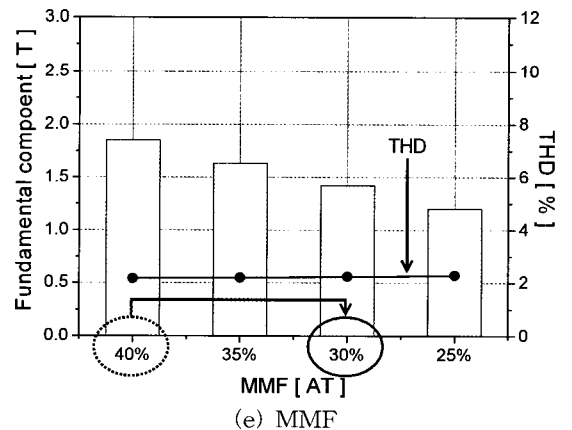
(b) MMF



(c) The location of field coil



(d) The width of stator pole



(e) MMF

Fig. 5. The effects of design factor.

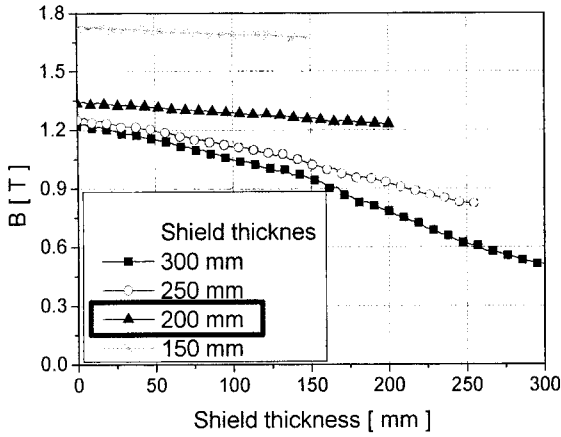


Fig. 6. Flux density at the shield according to the change of shield thickness.

Fig. 7은 개념 설계 과정을 통하여 결정된 최종형상의 2차원 해석 모델 단면 및 해석 초기조건을 나타낸 것이다. 공심형 초전도 전동기와 동일한 전원사양 조건에서 제어가능여부를 알기위하여 회전자 위치 및 전류 변화에 따라 상해교자속 최대값, 인덕턴스 그리고 토크 프로파일 등을 산정한다.

계자 철심형 전동기는 d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스보다 큰 돌극형 기기로서 벡터도상에서 전류 운전구간은 1사분면에 존재하게 된다[6-7]. 정격전류에 대하여 유한요소법을 통해서 산정된 전류 위상각별 전동기 파라미터와 동기전동기 벡터도를 이용하여 계산된 발생토크는 Fig. 8과 같다. 계자 철심형 전동기가 돌극형 구조이지만 Id=0 운전 조건에서 발생토크는 최대이고 전류 위상각별 발생토크 크기 변화가 미소하다. 그 이유는 고정자의 전기자 권선영역이 공심형이고 자기적 공극이 일반 기기보다 매우 크므로 회전자 위치에 따른 자기저항차가 미소하여 릴럭턴스 토크 성분이 거의 존재하지 않기 때문이다. 그리고 실제 유한요소법을 이용하여 전류 위상각별 발생토크 프로파일을 산정한 결과 토크리플은 5%이하로 매우 작다. 그래서 동일한 전압사양 조건에서 마그네틱 토크를 최대로 이용할 수 있는 Id=0 운전일 때 발생토크는 최대가 된다.

Table 2는 공심형 초전도 전동기와 계자 철심형 초전도 전동기의 개념 설계 결과를 바탕으로 두 전동기의 형상치수 및 초전도 선재량 등을 비교한 것이다. 전동기 출력과 부피가 동등수준일 때 계자 철심형 초전도 전동기의 초전도 선재량은 공심형 초전도 전동기에서 필요로 하는 초전도 선재량의 절반 이하로 저감되었다.

3. 고찰 및 향후방안

본 논문에서는 공심형 초전도 전동기보다 초전도 선재량을 저감시킬 수 있는 계자 철심형 초전도 전동기의 개념설계에 대하여 다루었다. 이를 위하여 공심형 초전도 전동기와 동등수준의 역기전력을 확보하기 위하여 극당 자속량을 목적함수로 선정하였으며 공심형 초전도 전동기보다 초전도 선재량을 절반 이하로 저감시킬 수 있는 계자 철심형 초전도 전동기 설계안을 도출하였다.

계자 철심형 초전도 전동기는 돌극형 기기와 회전자 구조가 유사하므로 회전자 위치에 따라 발생하는 자기

저항차를 이용하여 릴럭턴스 토크를 이용할 수 있다. 그러나 계자 철심형 초전도 전동기는 전기자 권선이 존재하는 고정자에서 자기적 공극이 일반 기기보다 매우 크므로 자기저항차가 크게 발생하지 않는다. 따라서 자기저항차를 최소화하기 위하여 계자 자극의 돌극 구조에 대한 상세 설계가 필요하므로 앞으로 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

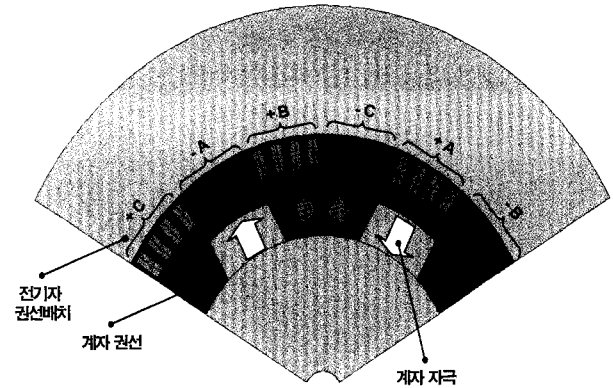


Fig. 7. The configuration of analysis model.

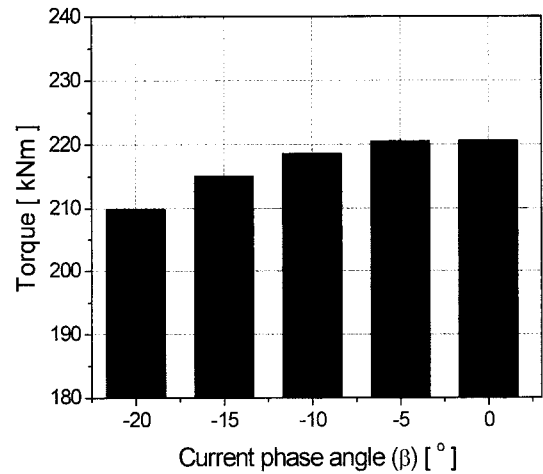


Fig. 8. Torque profile according to the change of current phase angle.

Table 2. The comparison between air-cored and core type superconducting motor.

	공심형	철심형
극수/슬롯수	6/72	
상당직렬턴수	192 turns	
전동기 최외경	1800 mm	1700 mm
Shield, 계자 직선부길이	575 mm	770 mm
극당 계자턴수	3229 turns	969 turns
역기전력 THD	2.5%	3.2%
전동기 부피	2.6 m ³	2.8 m ³
초전도 선재량	38 km	15 km

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] D.Aized., et al., "Status of the 1,000hp HTS Motor Development", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, No.2, June 1999.
- [2] David Madura, et al, "Test results of a 5000HP HTS Motor", in *Appl. Supercond. Conf.*, Houston, Texas August 6, 2002.
- [3] Alex P. Malozemoff, "The New Generation of Superconductor Equipment for the Electric Power Grid," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 1, Mar. 2006.
- [4] Paul N. Barnes, Gregory L. Rhoads, Justin C. Toliver, Michael D. Sumption, and Kevin W. Schmaeman, "Compact, Lightweight Superconducting Power Generators," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 1, Jan. 2005.
- [5] Sang-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Young-Kil Kwon, Young-Sik Jo, and Seung-Kyu Baik, "Study on Homopolar Superconductivity Synchronous Motors for Ship Propulsion Applications," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, June 2008.
- [6] A.E. Fitzgerald et al., "ELECTRIC MACHINERY," McGRAW-HILL, 5th edition, pp.216-259, 1991.
- [7] I. Boldea., "Reluctance Synchronous Machines and Drives," CLARENDON PRESS, pp.133-137, 1996.

저자 소개



이상호(李相浩)
 1980년 2월 20일생, 2004년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2007년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학(박사과정).



권순오(權淳吾)
 1975년 11월 25일생, 2003년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2007년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학(박사과정).



홍정표(洪正杓)
 1959년 4월 17일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임 연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임 연구원, 1995년 동 대학원 기공학과 졸업(공학박사), 1996년~2006년 창원대학교 전기공학과 부교수, 2006년~2008년 한양대학교 기계공학부 부교수, 2008년~현재 한양대학교 기계공학부 교수, 2002년~현재 IEEE Senior member.



권영길(權永吉)
 1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도기기연구그룹 그룹장.