

## Characteristic of a Superconducting Magnet for 3MJ SMES

金海鍾\* · 成者哲\*\* · 趙全旭\* · 裴俊漢\* · 金錫煥\* · 沈基德\*\*\* · 李彦容§ · 金海窩§§ · 權永吉§§§ · 柳昶佑# · 金相賢##  
 (Hae-Jong Kim · Ki-Chul Seong · Jeon-Wook Cho · Joon-Han Bae · Seog-Whan Kim · Ki-Deok Sim,  
 Eon-Yong Lee · Hae-Joon Kim · Young-Kil Kwon · Kyung-Woo Ryu · Sang-Hyun Kim)

**Abstract** - For quite a long time various researches and developments of superconducting magnetic energy storage(SMES) device have been done for enhancement of power quality control of sensitive electric load. This paper describes the design, fabrication and experimental results for the 3MJ SMES magnet made by using the design code of a SMES device that we developed. A computer code was developed to find the parameters of the SMES magnet which has minimum amount of superconductor for the same stored energy, and the 3MJ SMES magnet was designed based upon that. And the 3MJ SMES magnet designed based upon those. In addition, 3MJ SMES magnet was made based on several research results which were ramp up to 1kA without quench.

**Key Words** : superconducting magnetic energy storage(SMES), magnet, power quality, superconductor, quench

### 1. 서 론

고도화되고 정보화된 사회로 발전함에 따라 정보통신기기, 전산 기기, 온라인 서비스 기기, 자동생산라인 및 정밀 제어 기기가 확충되면서, 이러한 민감하고 중요한 부하에 고품질의 전력을 공급할 목적으로 초전도자계에너지저장(이하 SMES) 장치에 대해 연구 및 개발이 오래 전부터 진행되어 왔다. 이러한 장치는 전력품질을 제어하기 위한 작은 규모의 SMES 와 부하 평균화를 목적으로 하는 대용량 SMES 장치에 이르기까지 다양하다[1]. 최근에는 민감한 부하의 전력 품질을 제어할 목적으로 수 MJ급 소규모 SMES( $\mu$ SMES) 장치가 상용화되어 산업체 및 군용으로 필드에 적용되어 그 효과를 입증하고 있다. SMES 장치의 주요 부분은 초전도

마그네트와 초전도 마그네트를 수용하는 Cryostat 그리고 초전도 마그네트의 두 단자를 Cryostat 외부로 인출하는 Current lead 및 전력계통으로부터 전력을 변환시켜 공급하는 전력변환기로 크게 나눌 수 있다.

본 논문에서는 3MJ SMES용 초전도 마그네트를 설계·제작하여 그 특성을 평가·분석 하였다.

### 2. 설계 및 제작

#### 2.1 초전도 도체

SMES용 초전도 마그네트는 수백 A/mm<sup>2</sup>인 고 전류밀도의 급격한 펄스모드 및 고 자장 하에서 운전되기 때문에 보통의 초전도 마그네트에 비해 매우 가혹한 조건에서 운전된다고 할 수 있다.



그림 1 도체의 단면

Fig. 1 Cross-section of the conductor

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員  
 \*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員  
 \*\*\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員  
 § 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任技士  
 §§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 委囑研究員  
 §§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 超傳導應用研究그룹長  
 # 正 會 員 : 全南大學校 電氣工學科 副教授  
 ## 正 會 員 : 慶尙大學校 電氣工學科 教授  
 接受日字 : 2003년 8월 20일  
 最終完了 : 2003년 10월 6일

표 1 도체의 주요사양

Table 1 Specifications of the conductor

Wire	NbTi/CuNi/Cu ratio	1/0/1.85
	RRR	50
	Diameter	0.648 mm
	Filament diameter	6 μm
	Number of filaments	4182
	Filament twist pitch	13 mm
	Filament twist direction	Right
	Insulation	Bare
Conductor	Dimension	11.8mm×1.3mm
	Number of wire	36
	Transposition pitch	94 mm
	Transposition direction	Left
	Critical current	9780 A at 5.6T

따라서 SMES용 초전도도체는 대전류 통전특성은 물론 Pulse 운전조건에 부합하는 도체 특성이 요구된다. 3MJ SMES 마그네트용으로 선정된 도체는 기술한 대로 이미 소선에 대한 특성시험을 마쳤으며 일본 Hitachi 전선의 직경 0.648mm인 36본의 초전도소선을 케이블 화시킨 폭 11.88mm, 두께 1.3mm의 초전도케이블을 선정했으며 중요한 사양은 표 1에, 36본 케이블의 단면사진은 그림 1에 나타내었다.

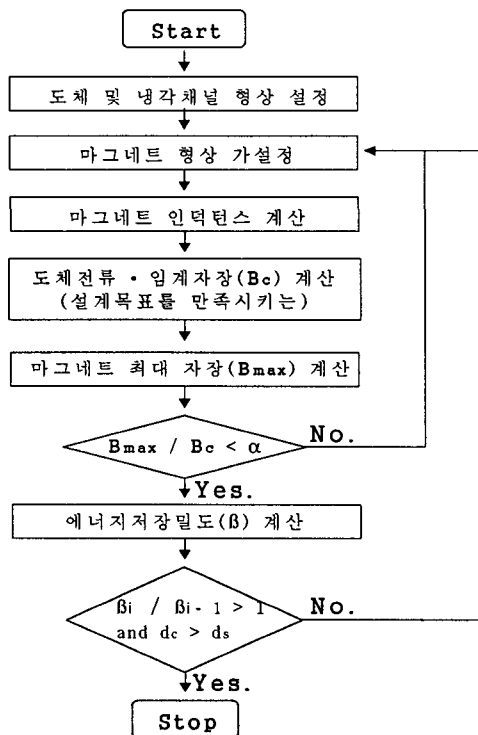


그림 2 SMES 마그네트 설계프로그램의 흐름도  
Fig. 2 Flow chart of SMES magnet design program

2.2 설계 및 제작

3MJ SMES 마그네트 제작에 적합한 초전도도체의 전류용량을 검토하기 위해 사용된 설계프로그램은 SMES 마그네트 모델에 대해 측정된 인덕턴스 및 자장이 설계프로그램에 의해 계산된 값과 비교해 오차가 5%이하로 그 타당성이 입증된 것을 사용하였고(2)(3), 그 개괄적인 흐름도를 그림2에 나타내었다. 상용화된 SMES 마그네트의 에너지저장 용량이 수 MJ임과 연구·개발 목표를 고려하여 설계 대상 SMES 마그네트에 저장되는 에너지를 3 MJ로 하였으며, 마그네트의 저장에너지는 ( $W_H$ ) 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율,  $H$ 는 자장의 세기,  $L$  및  $I_{op}$ 는 각각 SMES 마그네트의 자기인덕턴스 및 운전전류이며, 식으로부터 마그네트의 저장에너지는 인덕턴스 및 운전전류의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

또한 액체헬륨에서 운전되는 초전도 응용 기기의 전기 절연내력은 3 kV정도가 그 한계로써 낮기 때문에 급속 충·방전이 요구되는 SMES 마그네트의 인덕턴스는 제약을 받게되고, 따라서 SMES 마그네트의 저장에너지를 크게 하기 위해서는 식 (1)로부터 초전도도체의 전류용량을 크게 해야 함을 알 수 있다. 그림 2의 설계프로그램에서 마그네트 형상이 가설정되면 인덕턴스가 계산될 수 있고, 식 (1)로부터 SMES 마그네트의 저장에너지를 만족시키는 마그네트 운전전류가 결정되며, 이 전류가 마그네트에 흐를 때 발생하는 최대 자장은 NbTi 초전도체의 고유 특성으로부터 결정되는 임계자장보다는 최소한 작으면 된다. 그러나 초전도도체의 국부적 운동 등과 같은 외란에 의해 SMES 마그네트는 불안정하게 되는 것을 피할 수 없다. 따라서 SMES 마그네트의 설계 및 제작에 있어서는 이와 같은 불안정성이 반드시 고려되어야 하며, 마그네트 및 도체의 안정성 척도로써 식 (2)와 같은 안정성인자를 ( $\alpha$ : Stability factor) 사용하였다.

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

여기서  $B_{max}$ ,  $B_c$ 는 각각 SMES 마그네트의 최대 자장 및 임계자장이고, 앞서 언급한 바와 같이 안정성인자는 최소한 1보다 작아야 하고  $\alpha$ 가 작을수록 SMES 마그네트 및 도체는 더욱 안정함을 의미하며 이를 결정짓는 중요 사항들로서는 초전도도체의 안정성, 마그네트의 구조 및 제작기술에 관련된 마그네트의 안정성을 들 수 있다. 마지막으로 그림 2에서  $d_c$  및  $d_s$ 는 SMES 마그네트 설계 시 임시적으로 가설정되는 마그네트의 외직경 및 조사 직경을 각각 나타낸다.

따라서 3MJ의 에너지저장용량을 갖는 초전도 마그네트의 설계 기준은 원하는 저장에너지를 만족하면서도 도체의 사용량을 최소화하는 개념을 기준으로 설계형상을 결정했다. 또한 초전도 마그네트의 냉각채널을 위해선 두께 1mm, 폭 10mm의 FRP 재질의 Spacer를 사용했다. 이러한 냉각채널을 설치한 이유는 초전도 소선의 마이크로 한 운동에 의해 도체가 국부적으로 상전도가 되었다 할지라도 초전도 마그네트 전체가 초전도 상태로 다시 회복되기 위해서이며, 또한 Spacer 폭을 10mm로 한 이유는 Quench 발생시 최소전과길이(Minimum

Propagation Zone: MPZ)보다는 작은 폭의 Spacer를 사용하여야만 상전도 상태의 양단부가 냉각채널의 액체헬륨으로 충분히 냉각되어 마그네트는 다시 초전도상태로 회복되어진다.

그리고 마그네트의 안정성을 위해 이미 실험한 초전도도체의 회복전류 실험결과를 바탕으로 운전 전류를 설정했으며, 회복전류실험에서도 알 수 있듯이 초전도도체는 동비에 무관하게 냉각에 대단히 의존함을 알 수 있다[4]. 따라서 초전도도체의 냉각을 위해 3MJ SMES 도체의 절연물인 Kapton tape의 Lapping방법도 기존의 50%보다 냉각효과가 뛰어난 30%로 Overlapping 하였다. 이러한 모든 조건을 만족하면서 SMES 마그네트의 가격 요소 중 중요한 도체량을 최소화하는 3MJ SMES 마그네트를 설계하였다. 표2에 설계한 3MJ SMES 마그네트의 주요사양을, 그림 3에 제작된 3MJ SMES 마그네트 사진을 나타내었다.

표 2 3MJ SMES 마그네트 주요사양  
Table 2 Specifications of a 3MJ SMES magnet

Inner diameter	865.6 mm
Outer diameter	1,160 mm
Height	475.2 mm
Conductor fraction	56.9 %
No. of layers	64
No. of turns for layer	40
Total number of turns	2,560
Total conductor length	8,137 km
Inductance	6 H
Nominal current at $B_{max}$	1 kA at 4.2 T
Stored energy	3 MJ

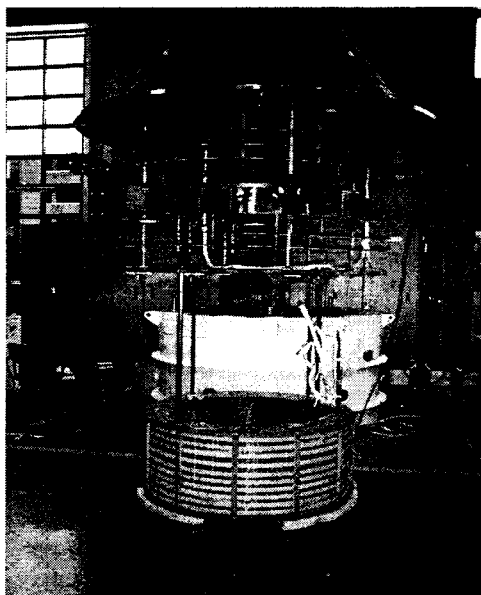


그림 3 3 MJ SMES 마그네트  
Fig. 3 Assembled 3MJ SMES magnet

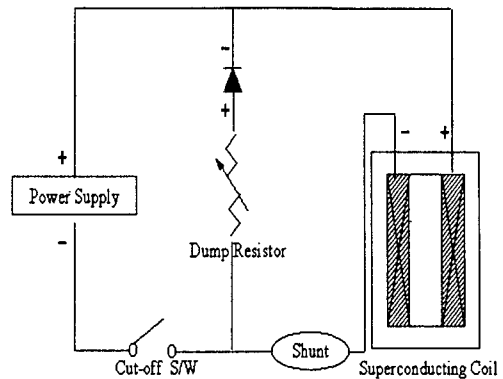


그림 4 실험장치의 개략도  
Fig. 4 Schematic of the test apparatus

### 2.3 시험

그림 4은 제작된 3MJ SMES 마그네트의 특성시험을 위한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 본 그림에서 보는바와 같이 특성시험에 사용된 전원은 5000A, 50V DC Power Supply(독일 FUG사)를 사용하였으며, 마그네트의 보호를 위해 내부에 Dump Resistor 및 다이오드가 장착된 차단기를 사용하여 Quench시 초전도 마그네트에 축적된 에너지를 Dump 저항을 통해 소비하도록 하였다. 이때 감쇠 시정수는 마그네트의 인덕턴스 L 과 보호저항 R에 의해 결정되며 시정수를 줄이기 위해 보호저항을 크게 하면 액체헬륨 증발을 감소시키는 데는 매우 유익한 반면, 초전도 마그네트의 급격한 전류 감소로 인해 유도되는 전압에 의해 절연파괴의 위험이 있기에 마그네트 양단에 인가할 수 있는 최대전압을 고려해 적절하게 선택해야 한다. 따라서 3MJ SMES 마그네트의 인덕턴스가 6 H이므로 전류감쇄 시정수를 1초로 하면 6Ω의 Dump 저항이 필요하나, 이럴 경우 마그네트 양단에 걸리는 전압이 최대 6kV로 절연에 문제가 있으므로 Dump 저항을 2Ω으로 제작 하여 전류감쇄 시정수를 약 3초로 하였다.

그리고 3MJ SMES 마그네트 Quench시 초전도마그네트의 보호 및 액체헬륨의 증발을 막기위해 Quench 검출기에 의해 Quench를 검출하며, 차단기 및 Dump 저항으로서 마그네트 전류를 차단 및 소모시켜 초전도 마그네트를 보호한다. 이때 사용되어지는 Quench 검출방식으로는 일반적으로 많이 사용하는 브리지 회로 방식을 사용하였으며, 특히 동일한 Quench검출 감도를 유지하기 위하여 마그네트를 두 개로 분리하는 전압탭의 위치를, 개발된 설계코드를 사용하여 가능한 한 동일한 인덕턴스가 되도록 정하였다[5][6]. 또한 3 MJ SMES 마그네트의 직류 충전시험에서는 마그네트의 전류상승률을 4 A/s(20 mT/s)로 대단히 천천히 충전하였다.

### 3. 시험결과 및 검토

제작된 SMES 마그네트에 대해 설계 코드를 사용하여 계산한 인덕턴스값 과 실제 LCR Meter(HP 4284A)로 측정된 값을 비교하기 위하여 이들을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서와 같이 실선은 설계코드로 계산한 인덕턴스 값이고, 검은 Dot로 표시된 것이 LCR Meter로 측정된 측정치로서 초전도마

그네트의 운전모드가 거의 직류인 점을 고려해 LCR Meter의 최저 주파수인 20Hz부터 측정했다. 그림 5의 결과로부터 일반적인 인덕턴스의 주파수 의존성과 같이 발진기 주파수가 감소함에 따라 인덕턴스는 증가하여 최소 발진기 주파수에서는 계산된 인덕턴스와 측정치가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 3MJ SMES 마그네트의 직류전류 인가 시험을 한 결과이다. 그림에서 보듯와 같이 초전도 마그네트에 운전전류를 300A, 600A, 900A 및 1000A의 순으로 순차적으로 인가 시켰으며, 목표 운전전류인 1,000A 까지 Quench없이 운전하였다. 그림에서 점선은 마그네트 운전전류 및 SMES용 마그네트 설계 코드로부터 계산된 마그네트의 최대 자계 관계를 나타낸 부하선(load line)을 나타내었으며, ●는 제작된 초전도 마그네트에 인가한 충전 전류를 각각 나타내었다.

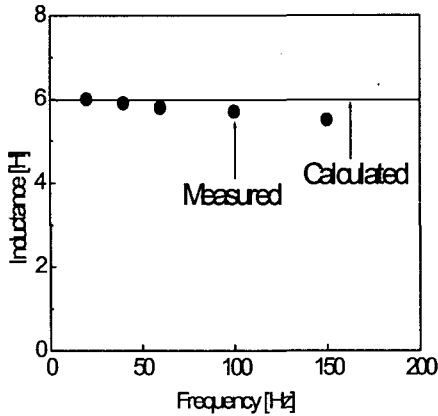


그림 5 SMES 마그네트의 주파수별 인덕턴스  
Fig. 5 Inductance vs. frequency in the SMES magnet

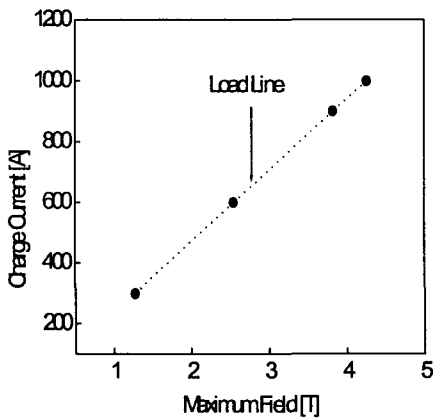


그림 6 SMES 마그네트의 자장에 따른 충전전류  
Fig. 6 Charge current vs. maximum magnetic field

#### 4. 결 론

3MJ SMES 마그네트의 설계, 제작 및 특성평가 연구결과를 요약하면 개발된 SMES 마그네트 설계프로그램은 실제 제작된 마그네트의 특성결과와 잘 일치 했으며, 대형 초전도마그네트 제작을위한 요소기술로서 Model Coil의 특성시험결과, 직경 및 권선장력에 따른 마그네트의 특성도 중요하지만 냉각효과에 따른 마그네트 특성이 가장 중요한 요소임을 알 수 있었다[7]. 그리고 SMES 도체의 고 운전전류 밀도 연구로서 Rutherford 도체에 Soldering 함으로써 고 운전전류 밀도가 가능함을 알 수 있었다. 이러한 요소기술은 향후 SMES 마그네트 연구방향을 결정하는 중요한 결과라 할 수 있다. 따라서 이러한 각종 연구결과를 바탕으로 제작된 3MJ SMES 마그네트는 운전전류인 1kA까지 Quench 없이 운전 할 수 있었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Michael PARIZH, A. Kamel KALAFALA and Robert WILCOX, "Superconducting Magnetic Energy Storage for Substation Appliation", IEEE Trans. on Appli. Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997.
- [2] K. Ryu, H.J. Kim, K.C. Seong, E.Y. Lee, H.B. Jin, K.S. Ryu, "Test results of the small model coil for a small-sized superconducting magnetic energy storage device", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, September 1999.
- [3] 김해중, 성기철, 조전욱, 진홍범, 류강식, 류경우, "μ SMES용 초전도도체의 전류용량에 관한 연구", 한국 초전도·저온공학회, Vol. 1, No. 1, pp.22 - 27, 1999.
- [4] 김해중, 성기철, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, "μSMES용 초전도도체의 회복전류 특성", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.807 - 809, 2000.
- [5] 성기철, 김해중, 조전욱, 이언용, 권영길, 류강식, 류경우, "1MJ SMES 마그네트 제작 및 특성시험", 2001년도 학술대회논문집, 한국초전도·저온공학회, pp. 125-127, 2001.
- [6] Y. Iwasa and M. W. Sinclair, "Protection of large superconducting magnets: maximum permissible undetected quench voltage," Cryogenics, vol. 20, pp. 711, 1980.
- [7] H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, S.W. Kim, Y. K. Kwon, K.S. Ryu, K. Ryu, "Fabrication and Test of the Model Coil for a SMES", IEEE Trans. on Appli. Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp.770-773, 2002.

저 자 소 개



**김해종(金海鍾)**

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~ 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원

Tel : (055) 280 -1658

Fax : (055) 280 -1399

E-mail : [hjkim@keri.re.kr](mailto:hjkim@keri.re.kr)



**성기철(成耆哲)**

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원

**조전욱(趙全旭)**

1960년 3월 2일 생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



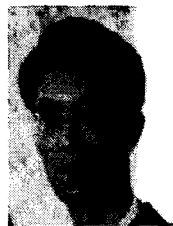
**배준한(裴俊漢)**

1966년 4월 30일 생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원



**김석환(金錫煥)**

1964년 1월 12일 생, 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1988년 서울대학교 전기공학과 석사, 1993년 서울대학교 전기공학과 박사, 1993년 기초전력공학 공동연구소 연구원 1994 ~1996 일본 고에너지물리학회 연구소 연구원, 1997~1999 유럽 CERN 연구소 연구원, 2000~2001 미국 Fermi 연구소 연구원, 현재 한국전기연구원 선임연구원



**심기덕(沈基德)**

1973년 2월 1일 생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원



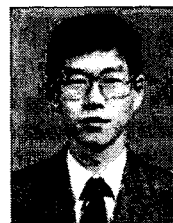
**이언용(李彦容)**

1960년 3월 8일생, 1984년 창원기능대전기과 졸업, 1988년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임기사



**김해준(金海濤)**

1977년 2월 19일생, 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업, 2000년~2002년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년~현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 위촉연구원



**권영길(權永吉)**

1959년 7월 28일 생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1990년 동 대학원 기계공학과 졸업 (공학박사), 1992년~1999년 한국전기연구원 선임연구원, 1999년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구 그룹 그룹장



**류경우(柳炅佑)**

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대전기공학과 졸업. 1985년 서울대대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박사). 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 부교수



**김상현(金相賢)**

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986~1989년 한국전기연구원 초전도 연구실장, 1999~2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000~2002년 한국 초전도·저온공학회 회장, 2003년 현재 경상대학교 교수, 대한전기학회 경남지부장