

## Fabrication and Test of a Superconducting Coil for SMES

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

**Abstract** - To develop a stable and compact small-sized superconducting magnetic energy storage (SMES) system, which provides electric power with high quality to sensitive electric loads, we fabricated a SMES coil and tested it. Because such a large-sized superconducting coil quenches far away from its critical current, the recovery current is frequently used as a stability criterion in the coil fabrication. Therefore, we first investigated the recovery current characteristics of the large current conductor, which was used in our SMES coil fabrication. The test results indicate that the recovery currents measured in the conductor are nearly identical to those based on the single wire. This implies that the recovery current is affected by the conductor's cooling condition rather than its size and current capacity. In the SMES coil test the first quench occurred at 1250 A, which is equivalent to the stored energy of about 2 MJ. It corresponds to the quench current density of about 130 A/mm<sup>2</sup>. This value is much higher in comparison with that reported in the other work. In addition, the first quench current of the coil agrees well with the measured recovery current of the conductor having similar cooling condition with it. This means that to determine the recovery current of a conductor is, first of all, important in the design and fabrication of a large-sized superconducting coil.

**Key Words** : coil's quench current, recovery current, superconducting magnetic energy storage, training effect.

### 1. 서 론

많은 산업체의 생산공정에서는 전력품질에 대한 의존도가 더욱더 높아지고 있다. 송전과 배전시스템에서 많은 개선이 있었으며, 이러한 덕분에 현재는 장기간의 정전은 거의 없어졌다. 그러나 순간정전 및 전압 불균형은 여전히 빈번한 현상이다. 이러한 현상은 소규모 초전도에너지저장(이하 SMES)장치에 의해 보상받을 수 있으며, 이러한 SMES 장치는 상업적으로 이용이 가능하다. 민감하고 중요한 부하에 고 품질의 전력을 공급할 목적으로 이미 수 년 전부터 SMES 장치에 대해 연구·개발이 되어왔다. 이러한 연구 중

대형 초전도 코일의 경우는 임계전류보다 퀘칭전류는 대단히 낮은데 이러한 현상을 size effect 라 하며, 그 원인은 아직 확실치 않다. 이러한 대형 초전도코일은 많은 경험으로 제작되어진다. 따라서 SMES용 초전도코일을 제작하기 위해 코일에 사용된 초전도도체의 회복전류 특성에 대해 먼저 연구하였다. 이러한 SMES용 초전도코일은 초전도도체의 실험 결과를 바탕으로 제작되었다. 본 논문에서는 SMES용 초전도코일에 사용된 초전도도체의 각종 특성 및 제작된 SMES 코일의 실험결과에 대해 설명되었다.

### 2. 시 험

#### 2.1 Short Sample

SMES 코일 개발에 사용된 초전도도체는 저 동비의 초전도 선으로서 중요사항은 표 1에 나타내었다. 제작된 SMES 코일은 어떠한 외란에서도 퀘칭없이 안정되고 신뢰할 수 있는 초전도도체를 사용하였다. 초전도도체는 내부변수인 동비와 외부변수인 냉각조건에 의해 대부분 영향을 받는다. 따라서 냉각조건이 다른 3가지 초전도 선으로 실험했다. 냉각조건에 대한 실험을 위해 사

\* 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 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 5월 28일  
 最終完了 : 2003년 9월 13일

표 1 도체의 사양

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	10.5mm×1.5mm
	Number of wire	30
	Transposition pitch	55 mm
	Transposition direction	Left
	Critical current	8900 A at 4T

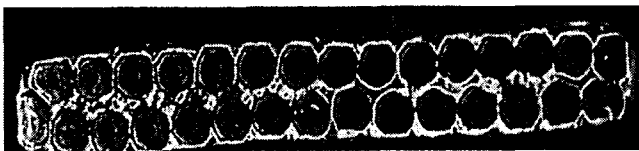


그림 1 도체의 단면

Fig. 1 Cross-section of the conductor

용된 초전도 선은 절연이 되지 않은 초전도 선과 Kapton tape으로 부분 절연한 초전도선, 그리고 완전히 절연된 초전도선으로 구분되었다. 이러한 초전도 선은 직경 50mm, 높이 130mm인 보빈에 피치 10mm로 권선하여 시험용 Short Sample을 제작하였다. 초전도 선에 액체 헬륨에 의한 냉각 효과를 위해 두께 1mm, 폭 10mm의 FRP 스페이스를 보빈에 두고 권선하였다. 30본 선으로 구성된 도체의 사양은 표 1에 나타내었으며, Short Sample로 권선된 코일의 구조는 층 사이에 냉각용 스페이스가 없는 구조와, 다른 하나는 냉각용 스페이스를 가진 구조로서 이는 앞의

초전도선에 Kapton tape으로 절연한 경우와 함께 냉각특성을 잘 보여준다. Short Sample에 사용된 스페이스는 각 보빈위의 같은 위치에서 권선시 냉각채널 구조로 사용되었다. 그림 1은 도체의 단면을 보여주고 있다. Short Sample의 회복전류 특성을 조사하기 위해 니켈-20%크롬 히터선을 10mm 길이로 초전도 선 및 도체의 축에 단단히 감았다. 그리고 액체 헬륨에 의한 열 교환을 막기 위해 히터선은 에폭시 레진으로 덮었다. 초전도선과 도체는 외부자장이 인가되는 초전도마그네트 보빈 내부에 삽입하여 3T부터 6T까지 자장을 인가시키면서 특성실험을 했다. 이때 마그네트 여자용 전원은 3000A, 10V DC 전원이며, 외부자장용 및 히터용 전원은 500A, 10V DC 전원 과 30A, 150V Pulse 전원을 사용 하였다[2][3].

2.2 SMES 코일

표 1에 나타낸 도체의 특성은 예비실험 된 결과를 근거로 하였으며, 소형의 SMES 코일은 이전에 개발된 코드를 사

용하여 설계 하였다[4]. 설계된 SMES 코일의 주요사양은 표 2에 나타내었다. SMES 코일의 제작에 사용된 보빈의 재질은 펄스 운전시 발생하는 eddy current 손실을 줄이기 위해 비금속성 원료인 fiberglass reinforced plastic(이하 FRP)를 사용하였다. 그리고 코일의 냉각특성을 좋게하기 위해 보빈의 상,하 flange 및 cylinder 에 많은 수의 홀을 뚫었다. 더우기, 냉각채널은 소선의 움직임과 같은 불안정성에 의해 발생하는 열을 제거하는데 매우 효과적임을 잘 알고 있다. 그리고 두께 1mm, 폭 10 mm의 FRP 스페이스를 같은 간격으로 층 사이에 끼워 넣었다. 권선시 장력은 예비시험에서 강한 권선장력이 권선작업만 어려울 뿐 별 효과가 없음을 확인하여 본 코일에서는 9 N/mm<sup>2</sup>의 저 권선장력으로 제작 되었다.그리고 SMES 코일의 빠른 켄치 검출을 위해 코일의 중심 전압 탭은 인덕턴스가 같은 지점으로 두 영역으로 나눈 후 전압 탭을 설치하였다. 이러한 이유는 켄치 전압을 검출할 때, 각 영역에서 같은 정밀도로 켄치 전압을 검출하기 위함이다. 그림 2에 조립된 SMES 코일을 나타내고 있으며, 완성된 코일은 시험을 위해 Stainless Steel Cryostat에 넣게 된다.

표 2 1MJ SMES 코일의 사양

Table 2 Specifications of a 1MJ SMES Coil

Inner diameter	535.5 mm
Outer diameter	749.5 mm
Height	512.5 mm
Conductor fraction	56.07 %
No. of layers	48
No. of turns for layer	50
Total number of turns	2,400
Total conductor length	4,844 km
Inductance	2.48 H
Nominal current at B <sub>max</sub>	900A at 3.93 T
Stored energy	1 MJ

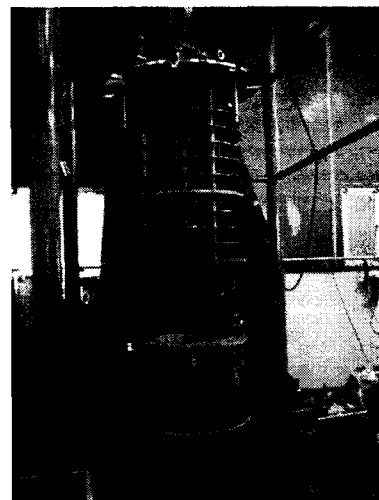


그림 2 조립된 SMES 코일

Fig 2 Assembled SMES coil

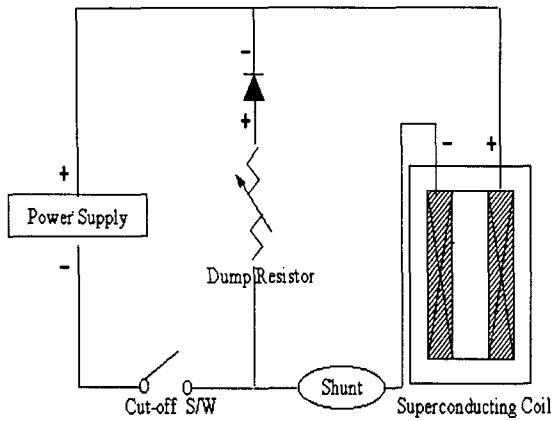


그림 3 시험장치 개략도  
 Fig. 3 Schematic of the test apparatus

SMES 코일의 실험에서 중요한 문제 중의 하나가 민감하고 확실한 켄치 검출 방법이다. 따라서 본 실험에서는 켄치 시 빠른 검출을 위해 bridge circuit을 이용하였다[5]. bridge circuit의 저항은 각각 9.1kΩ과 10kΩ으로 bridge circuit의 평형을 맞추었다. 코일의 보호저항은 코일의 양 단자에 병렬로 연결되었으며, 이는 켄치시 코일에 저장된 에너지의 효과적인 소비를 위해 사용되어졌다. 보호저항의 정격으로는 1600A 전류가 녹는점없이 수 초동안 흘릴수 있게 했으며, 사용된 저항은 500mΩ까지 가변 할 수 있게 했다. 코일 실험에 사용된 전원으로는 3000A/10V 이며, 전류 측정은 shunt로 하였다. 그림 3은 실험장치의 개략도를 나타내었다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 Short sample

SMES 코일과 같은 큰 규모의 초전도코일의 켄치는 임계 전류와 상당히 차이가 나며, 따라서 큰 규모의 코일의 제작에는 안정성 기준으로 회복전류를 사용한다.

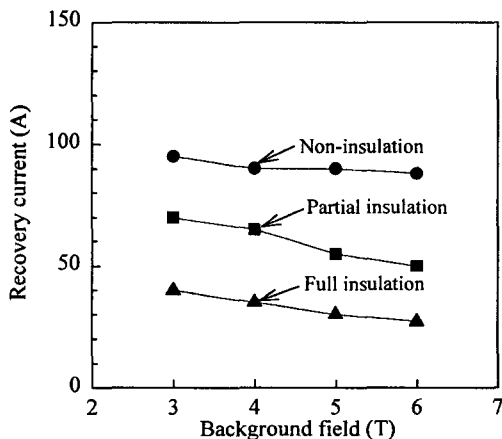


그림 4 절연조건에 따른 회복전류 와 외부자장  
 Fig. 4 Recovery current vs. background field for different insulation in the wire.

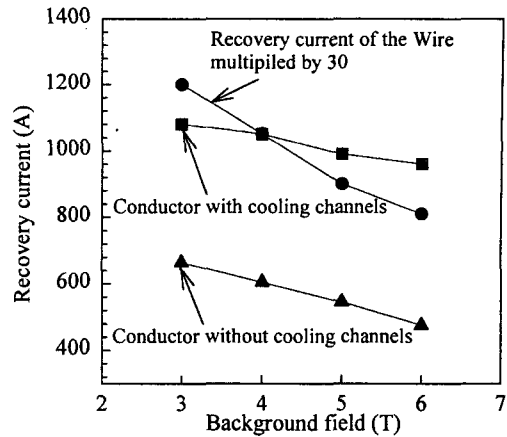


그림 5 냉각채널에 따른 회복전류 와 외부자장  
 Fig. 5 Recovery current vs. background field in the conductor.

회복전류는 잘 알려진 바와 같이 두개의 도체 특성에 의존한다. 그중 하나는 냉각조건이며 나머지는 동비이다[6]. 따라서 도체의 냉각특성에 큰 영향을 미치는 여러 가지 형태의 절연 테이프에 의한 회복전류 특성을 실험 하였다. 도체에 사용되어진 여러 가지 초전도선의 회복전류는 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 초전도선의 냉각특성이 나빠짐에 따라 회복전류도 나빠짐을 알 수 있다. SMES 코일은 일반적으로 그림 4에서 보여지는 초전도선 보다 훨씬 큰 수 kA의 큰 전류용량의 도체를 요구한다. 따라서 SMES 도체는 여러 가닥의 초전도선으로 구성되어져있다. 그리고 코일의 턴 사이의 전기 접촉을 방지하기위해 절연되어있다. 따라서 두개의 절연된 kA급 도체의 냉각채널의 유,무에 따른 회복전류 특성을 관찰하였다. 그림 5에 측정된 회복전류를 나타내었다. 또한 그림 5에는 전체를 절연시킨 30본 도체의 회복전류도 나타내었다. 특히 5mT에 5에는 비슷한 냉각조건을 가지며, 냉각채널을 가지는 초전도 도체와 선을 나타내었다. 그림 5에서 보면 냉각 채널을 가진 도체는 냉각 채널이 없는 도체보다 약 2배의 회복전류가 높은 것을 알 수 있다. 이 결과는 SMES 코일의 제작시 도체의 냉각 구조가 중요함을 암시한다. 만약 도체가 30배로 크기와 전류용량이 커질지라도 하나의 도체에 기반하는 냉각채널을 가진 도체의 회복전류는 거의 같다. 이것은 비슷한 냉각조건으로 설명 되어진다. 따라서 회복전류는 도체의 크기 나 전류용량 보다 도체의 냉각 특성에 의해 결정되어짐을 알 수 있다.

#### 3.2 SMES Coil

도체의 실험결과를 바탕으로 SMES 코일을 제작하고 실험하였다. 그림 6에 보는바와 같이 load line 과 코일의 켄치 전류의 측정결과를 나타내고 있으며, 5.5 T 자장에서의 측정된 냉각채널을 가진 도체의 회복전류는 점선으로 표시된 SMES 코일의 첫 번째 켄치와 일치한다. 코일의 켄치 실험에서는 10A/s의 속도로 충전 하였으며, 켄치 전에는 여러개의 전압 스파이크가 켄치 검출 회로에 관찰되었다. 이러한 의미는 SMES 코일에서 켄치 이전에 발생하는 초전도 선의

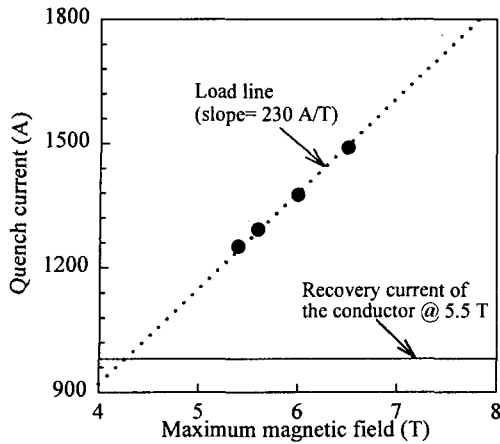


그림 6 SMES 코일의 퀘치 전류 와 load line  
 Fig. 6 Quench current and load line vs. maximum magnetic field in the SMES coil.

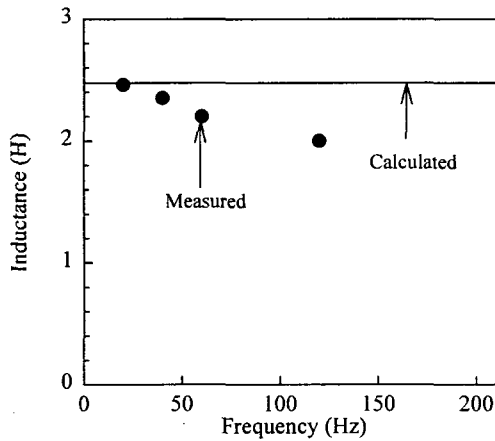


그림 7 SMES 코일의 인덕턴스 와 주파수  
 Fig. 7 Inductance vs. frequency in the SMES coil.

움직임 때문에 나타나는 것이다. 첫 번째 퀘치 전류는 1250A에서 발생하였으며, 이는 약 2MJ의 저장 에너지와 같다. 이때의 퀘치 전류 밀도는 약 130 A/mm<sup>2</sup>이다. 이러한 값은 이전에 실험한 결과인 80 A/mm<sup>2</sup>보다 매우 높은 값이다 [7]. 그리고 퀘치 전류는 점차 상승하여 1500 A까지 도달하였으며 이때 에너지 저장에너지 용량은 약 3 MJ 이었다. 그림 6에서 보는바와 같이, 첫 번째 퀘치 전류는 냉각채널을 가지는 SMES 코일의 도체 회복전류보다 약 1.2배 정도 크다. 그러나 그것은 도체에서 측정된 회복전류와 비교적 잘 일치한다. 도체의 회복전류 결정은 SMES 코일의 설계와 제작에서 중요한 요소 중의 하나이다. training 효과와 퀘치 전류감쇄는 일반적으로 큰 규모의 초전도 코일에서 관찰되고 있다. 예를 들면, 도체의 임계전류가 5 T에서 8900 A인데, 첫 번째 퀘치 전류는 5.5 T에서 1250 A였다. 이러한 퀘치 특성은 강한 장력으로 권선된 소형의 초전도 코일과는 다르며, 이는 이미 이전의 실험을 통하여 설명되었다[4].

제작된 SMES 코일 대해 설계 코드를 사용하여 계산한 인덕턴스값과 실제 LCR Meter(HP 4284A)로 측정된 값을 비

교하기 위하여 이들을 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서와 같이 실선은 설계코드로 계산한 인덕턴스 값이고, 검은 점으로 표시된 것이 LCR Meter로 측정된 측정치로서 초전도코일의 운전모드가 거의 직류인 점을 고려해 LCR Meter의 최저 주파수인 20Hz부터 측정했다. 그림 7의 결과로부터 일반적인 인덕턴스의 주파수 의존성과 같이 발전기 주파수가 감소함에 따라 인덕턴스는 증가하여 최소 발전기 주파수에서는 계산된 인덕턴스와 측정치가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

안정하고 최적의 SMES 코일의 제작을 위해, SMES 코일에 사용되어진 큰 전류 도체의 회복전류 특성을 실험을 통해 조사하였다. 냉각채널을 가진 도체의 회복전류는 도체가 30배로 크기와 전류용량이 커질지라도 하나의 도체에 기반하는 도체의 회복전류는 거의 같다. 회복전류는 도체의 크기보다도 도체의 냉각조건, 전기절연, 냉각채널에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있다. 우리는 이전의 도체의 실험결과를 바탕으로 SMES 코일을 제작하고 실험하였다. SMES 코일은 이전의 결과에서 실험된 코일과 비교하여 매우 높은 퀘치 전류밀도를 보여주고 있다. SMES 코일의 첫 번째 퀘치 전류는 비슷한 냉각조건을 가진 도체의 회복전류와 잘 일치한다. 도체의 회복전류 결정은 SMES 코일과 같은 큰 규모의 초전도 코일의 설계와 제작에서 중요한 요소 중의 하나이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행한 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Oxford University, New York, 1983, pp.89-90.
- [2] K. Ryu, H. J. Kim, K. C. Seong, J. W. Cho, Y. K. Kwon, K. S. Ryu, and B. J. Choi, "Stability and quench test results of the kA class conductor for a SMES coil," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 10, no. 1, pp. 828-831, 2000.
- [3] K. Ryu, H. J. Kim, K. C. Seong, J. W. Cho, S. W. Kim, Y. K. Kwon, K. S. Ryu, "Recovery current characteristics of a kA class conductor for a superconducting magnetic energy storage device," presented at the 2001 Int. Conf. Magnet Technology, Geneva, Switzerland.
- [4] 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.
- [5] Y. Iwasa and M. W. Sinclair, "Protection of large

superconducting magnets: maximum permissible undetected quench voltage," *Cryogenics*, vol. 20, pp. 711, 1980.

- [6] Lawrence Dresner, *Stability of Superconductor*, New York and London: Plenum Press, 1995, pp. 56-62.
- [7] V. E. Keilin, V. P. Agalakov, O. P. Anashkin, N. N. Britousov, A. V. Durarev, A. V. Krivykh, A. S. Kulikov, V. V. Lysenko, S. M. Miklyaev, S. A. Shevchenko, and M. I. Surin, "Development and test results of a double 0.5 MJ coil SMES system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 4, pp. 2312-2315, 1996.

저 자 소 개



**김 해 증(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



**성 기 철(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

**조 전 옥(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



**배 준 한(裵 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



**김 석 환(金錫煥)**

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



**심 기 덕(沈 基 德)**

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



**이 언 용(李 彦 容)**

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



**권 영 길(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



**류 경 우(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



**김 상 현(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