

## $\mu$ SMES마그네트용 초전도도체의 안정성 및 켄치 특성

### Stability and Quench Characteristics of the SC Conductor for a $\mu$ SMES Magnet

김해중\*, 성기철\*, 조전욱\*, 권영길\*, 류강식\*\*, 최병주#, 류경우##

H. J. Kim\*, K. C. Seong\*, J. W. Cho\*, Y. K. Kwon\*, K. S. Ryu\*\*, B. J. Choi#, and K. Ryu##

**Abstract** : We are developing a small-sized superconducting magnetic energy storage ( $\mu$  SMES) magnet with the storage capacity of a few megajoules, which provides electric power with high quality to sensitive electric loads. A kA class superconductor with a high copper/superconductor ratio was selected as a candidate conductor. The superconductor was tested in two points of view, which are basic and important in development of the  $\mu$ SMES magnet. First, stabilities of the superconductor against localized disturbances such as wire motions were estimated by using a wire heater. Second, the quench current characteristics for different charge rates were also tested. The stability data showed that the short heat pulses made the conductor more unstable. The superconductor had relatively high recovery currents ranging between 40 % and 50 % of its critical currents. The quench tests indicated that the quench currents of the conductor were independent of current ramp rates up to 3000 A/s and nearly equal to its critical current data.

**Key Words**: small-sized superconducting magnetic energy storage, wire motion, kA class superconductor, minimum quench energy, recovery current, current ramp rate

## 1. 서 론

효율적인 전력관리를 위하여 수 십년 동안 초전도저장 에너지저장(이하 SMES) 장치에 대한 연구 및 개발이 진행되어 왔다. 이러한 장치는 전력의 품질을 제어하기 위한 저장용량이 작은 SMES(이하  $\mu$ SMES) 장치에서부터 주간 부하평준화를 위한 수천 MWh급의 대용량 SMES 장치에 이르기까지 다양하며, 최근에 이르러 특히  $\mu$ SMES 장치의 경우는 상용화 단계에까지 이르렀다.

\* 정 회 원 : 한국전기연구소 초전도응용연구그룹  
 \*\* 정 회 원 : 한국전기연구소 전력기술연구단  
 # 정 회 원 : 서라벌대학 전기과  
 ## 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과  
 원고접수 : 2000년 01월 20일  
 심사완료 : 2000년 04월 10일

$\mu$ SMES용 마그네트는 일반적으로 비합침 마그네트로 제작되며 그 이유는 빠른 충·방전 운전에서 발생하는 교류손실을 냉매인 액체헬륨으로 신속히 제거 할 수 있기 때문이다. 비합침 마그네트는 이와 같은 장점이 있는 반면 초전도선의 움직임과 같은 매우 국부적인 외란에 의해 낮은 운전전류에서조차도 결국에는 마그네트 전체로 상전도부가 전파되는 불안정한 현상 즉 켄치가 빈번히 일어나는 문제점이 있다.

현재 민감한 부하에 고품질의 전력을 공급하기 위한 목적으로 저장용량이 수 MJ인  $\mu$ SMES용 마그네트를 개발하고 있다. 따라서 안정성 및 신뢰성이 우수한 마그네트 제작을 위한 전 단계로서 선정된 kA급 초전도도체에 대하여 마그네트의 설계 및 제작에 있어서 중요한 두 가지 관점에서 시험을 했다. 첫째, 초전도선의 운동을 고려하여 국부적인 발열에 대한 도체의 안정성을 선 히터를 이용해 측정하였으며 둘째,  $\mu$ SMES 장치의 빠른 펄스 운전모드를 고려하여 여러 가지 전류상승율(current ramp rate)에 대한 도체의 켄치 특성을 시험했다. 본 논문에서는  $\mu$ SMES용 마그네트의 후보 도체로 선정된 kA급 초전도도체에 대한 안정성 및 켄치 시험결과에 대해 검토를 하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 도체 및 시험샘플

$\mu$ SMES용 마그네트의 개발을 위해 교류손실보다는 오히려 안정성에 비중을 두어 동비가 비교적 큰 kA급 초전도도체를 후보도체로서 선정했다. 시험에 이용된 도체의 단면을 그림 1에 나타내었으며 표1에는 도체의 중요한 사양을 나타내었다.

안정성과 켄치 시험을 위한 시험샘플은 길이가 약 1.6 m인 도체를 직경 50 mm, 높이 130 mm인 보빈에 피치를 10 mm로 하여 권선 하였다. 또한 도체를 액체헬



그림 1. 도체의 단면.

Fig. 1. Cross-section of the conductor.

롭과의 접촉이 잘 되도록 하기 위하여 보빈 원주상 에는 깊이 1 mm, 폭이 10 mm인 냉각 채널을 동일한 간격으로 배치시켰다. 시험샘플의 권선 장력은 이전의 실험의 결과를 고려하여 비교적 강한 장력인 약 70 N/mm로 하였다[2].

일반적으로 사용되는 선 히터는 열 용량이 클 뿐만 아니라 열 시정수도 또한 큰 반면 두께가 수십  $\mu\text{m}$ 인 카본면 히터는 이와 비교하여 양자 모두 우수하여 초전도도체의 최소퀸치에너지(MQE; minimum quench energy)를 측정하는데 자주 사용된다. 그러나 금회의 국부적인 발열에 대한 후보도체의 안정성 실험에서는 직경 0.2 mm, 니켈-20%크롬의 선 히터를 초전도도체로 열확산이 잘 되도록 도체 축 방향을 따라 길이 약 7 mm정도로 단단하게 감았다. 도체에 감겨진 선 히터의 체적과 히터로 가열되는 도체 체적과의 비는 약 1/6이다.

표 1. 도체의 사양

Table 1. Specifications of the conductor

Wire	NbTi/CuNi/Cu	1/1/5
	RRR	120
	Diameter	1 mm
	Filament diameter	5 $\mu\text{m}$
	Number of filaments	5712
	Filament twist pitch	19.5 mm
	Filament twist direction	Right
	Yield strength	400 $\times 10^6$ kgf/m <sup>2</sup>
	Insulation	Bare
	Conductor	Dimension
Number of wire		9
Transposition pitch		45 mm
Transposition direction		Left
Critical current		3375 A at 4T
		2385 A at 6T

2.2 시험장치

그림 2에는 시험장치의 개략도를 나타내었다. 시험샘플은 안정성 및 퀸치 실험동안 솔레노이드형 초전도마그네트의 중앙에 배치시켜 외부자장을 인가하였으며 3 ~ 6 T의 외부자장에 대하여 도체 특성을 조사하였다. 시험샘플용 전원은 10 V, 3000 A 전원으로, 외부자장 인가용 마그네트와 히터용 전원은 각각 10 V, 500 A 전원 및 150 V, 30 A 펄스전원으로 하였다. 시험샘플, 외부자장 인가용 마그네트와 히터의 전류는 시험샘플 및 히터의 전압탭 신호와 함께 디지털 스코프로 측정하였다.

$\mu\text{SMES}$ 용 마그네트와 같은 비함침 마그네트의 경우에 빈번히 일어나는 국부적인 발열에 대한 도체의 안정성을 실험적으로 평가하기 위해 두 가지의 기준에 대하여 안정성 시험을 하였다. 첫 번째는 최소퀸치에너지로서 초전도도체를 퀸치 시키는데 요구되는 가장 작은 외란 에너지를 의미한다. 최소퀸치에너지를 측정하기 위하여 선 히터에 구형파의 펄스전류를 인가하였으며 도체의 퀸치 및 회복의 판정은 시험샘플 양단에 설치한 전압탭 신호로 하였다. 안정성 시험에서 히터에 입력된 에너지는 히터의 전류, 전압 및 인가시간으로부터 계산되었고, 최소퀸치에너지는 퀸치와 회복의 경계영역 근처에서 측정된 2회의 히터 입력에너지를 평균하여 정하였다. 이때 안정성 경계에서 측정된 히터 입력에너지사이의 최대 편차는 약 30 %로써 비교적 컸으며 그 주된 원인은 히터

용 펄스전원의 출력제어 분해능이 나쁘기 때문이다. 두 번째 기준으로써는 회복전류에 대응되는 최소전과전류(minimum propagating current)로써 이보다 큰 전류가 도체에 흐르는 경우에 있어서 초전도선의 운동과 같은 외란에 의해 도체에 국부적으로 상전도부가 발생하게 되면 발열이 냉각보다 커지기 때문에 초전도도체 전체로 상전도부는 전파되는 반면 최소전과전류보다 작은 전류가 도체에 흐를 경우는 어떠한 외란에 의해 도체에 상전도부가 발생된다 할지라도 외란이 종료되면 도체 전체가 다시 초전도 상태로 회복됨을 의미한다. 모든 회복전류 실험에서 히터에는 선 히터를 단선시키지 않는 최대허용 에너지 즉 약 20 J의 에너지를 인가하였고, 이 에너지는 안정성 시험으로부터의 최소퀸치에너지 중에서 가장 큰 에너지보다도 수십배 정도 큰 에너지이다. 그림 3에는 초전도도체의 회복전류 측정시 시험샘플 양단에 부착된 전압 탭의 신호와 전형적인 선 히터 전류를 나타내었다.

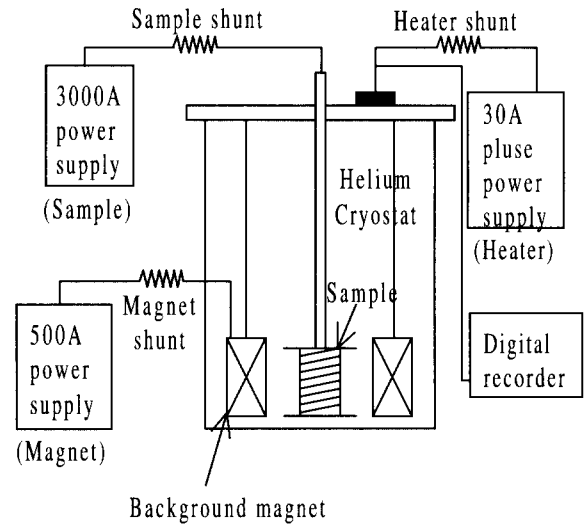


그림 2. 실험장치의 개략도.

Fig. 2. Schematic arrangement of the test apparatus.

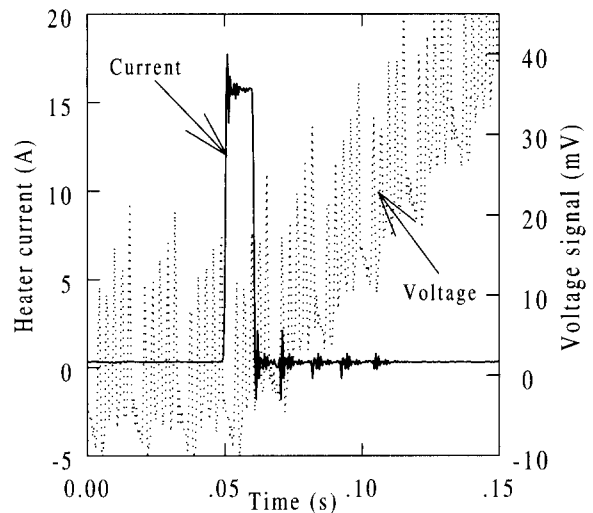


그림 3. 시간에 따른 히터전류 및 탭전압.

Fig. 3. Heater current and tap voltage vs. time during recovery current tests.

3. 실험결과 및 검토

그림 4에는 각각의 상이한 외부자장에 대하여 도체의 운전전류에 따른 시험샘플의 최소퀸치에너지를 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 동일한 운전전류에 대해서 외부자장이 4 T일 때 최소퀸치에너지가 6 T일 경우와 비교하여 약 10배정도 크다. 즉 동일한 운전전류에 대해서는 외부자장이 낮을수록 초전도도체는 더욱 안정함을 알 수 있다. 그림 5에는 히터의 펄스 폭에 따른 시험샘플의 최소퀸치에너지를 나타내었고, 그림 5로부터 최소퀸치에너지는 10 ms 이하 범위에서는 실질적으로 히터의 펄스 폭에 의존하지 않지만 이보다 커지면 펄스 폭이 증가함에 따라 최소퀸치에너지는 매우 급격히 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 이전의 실험결과들과도 잘 일치할 뿐만 아니라[3-4], 또한  $\mu$ SMES용 마그

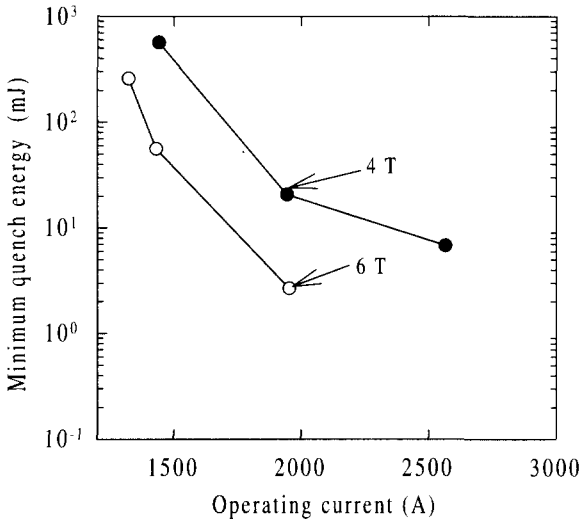


그림 4. 외부자장에 대한 운전전류에 따른 최소퀸치 에너지: 1 ms의 히터 펄스 폭.

Fig. 4. Minimum quench energy vs. operating current for different background fields in case of a heat pulse with the pulse width of 1 ms.

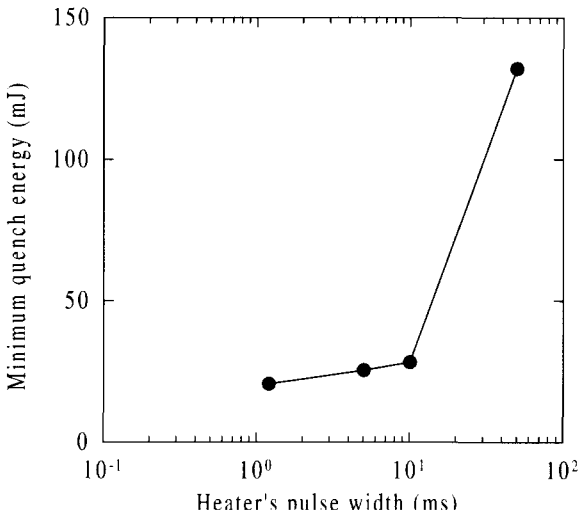


그림 5. 히터 펄스 폭에 따른 최소퀸치에너지: 4 T, 1890 A  
Fig. 5. Minimum quench energy vs. heater's pulse width at the operating current of 1890 A and 4 T

네트로서 일반적으로 채택되고 있는 비합침 마그네트는 국부적인 초전도선의 운동으로 인하여 발생하는 펄스 폭이 매우 짧은 발열에 대하여 더욱더 불안정함을 의미한다.

그림 6에는 외부자장에 따른 시험샘플의 회복전류에 대한 실험 결과를 나타내었으며 회복전류와의 비교를 위하여 측정된 임계전류를 함께 나타내었다. 또한 식(1)로부터 계산된 회복전류도 그림 6에 나타내었다[5].

$$I_r = \frac{-1 + \sqrt{1 + 8\alpha}}{2\alpha} I_c \tag{1}$$

$$\alpha = \frac{\rho I_c^2}{APh(T_c - T_b)} \tag{2}$$

여기서  $I_r$ 는 시험샘플의 회복전류,  $\alpha$ 는 안정성파라미터,  $I_c$ 는 임계전류,  $\rho$ 는 안정화재의 고유저항,  $A$ 는 안정화재의 단면적,  $P$ 는 단위길이당 냉각면적,  $h$ 는 액체헬륨으로의 열 전달 계수,  $T_c$ 는 임계온도이며,  $T_b$ 는 시험샘플로부터 멀리 떨어져 있는 액체헬륨의 온도를 각각 의미한다. 그리고 회복전류의 계산에 있어서 임계전류는 시험샘플로부터 측정된 데이터를 사용했고, 이전의 실험 데이터에 근거하여  $h$ 는  $0.1 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup>를,  $\rho$ 는  $1.5 \times 10^{-10}$   $\Omega \cdot m$ 를 사용했으며[6],  $P$ 는 사용된 시험샘플에 대한 전체 측면적의 반으로 가정하였으며,  $T_c$ 는 식(3)을 이용하였다.

$$T_c = 9.2(1 - B/14.5)^{0.558} \tag{3}$$

여기서  $B$ 는 외부자장이다.

그림 6에서 보는 바와 같이 식(1)에 근거하여 계산된 회복전류는 실험으로부터 측정된 회복전류와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 조사된 외부자장 범위 내에서는 시험샘플의 회복전류가 임계전류의 약 40% ~ 50% 사이로 비교적 높은 반면 낮은 동비의 초전도선에 대한 이전의 실험결과와 비교해 보면 초전도선의 회복전류는 임계전류의 약 25% ~ 33% 정도로써 비교적 낮다[6]. 그림 6의 결과에서와 같이

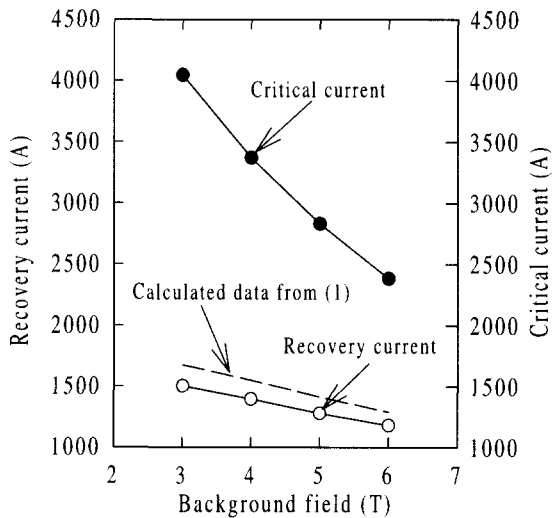


그림 6. 외부자장에 따른 회복전류.  
Fig. 6. Recovery currents vs. background fields.

시험샘플의 회복전류가 큰 이유는 선정된 후보도체의 동비가 높기 때문인 것으로 잘 설명 할 수 있다.

그림 7에는 상이한 전류상승율에 대하여 외부자장에 따른 켄치전류를 나타내었다. 켄치전류와의 비교를 위하여 시험샘플에 대하여 측정된 임계전류를 그림 7에 함께 나타내었다. 전류상승율에 따른 켄치전류 열화 시험에서는 시험샘플의 전류상승율을 5 A/s ~ 3000 A/s로 대단히 광범위한 영역에 대하여 조사하였으며 그림 7의 결과에서 보는 바와 같이 시험샘플의 켄치전류는 전류상승율에는 무관한 결과 임계전류와 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나 급회의 시험샘플에 대한 결과와는 달리 동일한 도체 105 m를 사용해 제작된 소형 마그네트의 경우는 3000 A/s보다 대단히 작은 150 A/s의 전류상승율에서도 마그네트 임계전류의 약 87 %정도에서 켄치가 일어났다. 즉 도체의 임계전류에 대하여 약 13 %의 켄치전류 열화가 발생되었다(2). 이와 같은 소형마그네트에 있어서 켄치전류의 감소는 급속한 충·방전동안 발생하는 과도한 교류손실에 의하여 도체의 온도가 상승하기 때문으로 생각되어 진다.

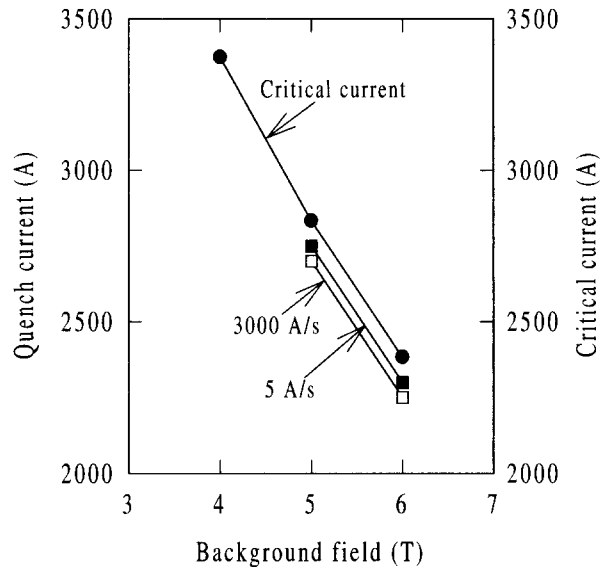


그림 7. 전류상승율에 대한 외부자장에 따른 켄치전류.  
**Fig. 7.** Quench currents vs. background fields for different current ramp rates.

#### 4. 결 론

수 MJ의 에너지저장 용량을 갖는  $\mu$ SMES용 마그네트 개발의 전 단계 연구로서 동비가 높은 kA급 초전도도체에 대하여 안정성 및 전류상승율 특성을 조사하였다. 안정성 시험 결과로부터는 초전도선의 움직임과 같은 원인에 의하여 발생하는 짧은 열 펄스가 초전도도체를 더욱더 불안정하게 만든다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 낮은 동비의 초전도 선에 대한 실험 결과와 비교하여 볼 때 시험에 사용된 외부자장의 범위에서 kA급 초전도도체의 회복전류는 임계전류의 40 % ~ 50 %사이로 비교적 높은 회복전류 특성을 보였다. 마지막으로 전류상승율에 따른 켄치전류 열화 실험결과로부터 시험에 사용된 직류 외부자장의 범위에서 kA급 초전도도체의 켄치전류는 전류상승율에 무관하게 도체의 임계전류 데이터와 거의 비슷하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 민군겸용기술개발 사업으로 수행한 연구결과입니다

#### 참 고 문 헌

- [1] O. Tsukamoto, K. Ryu, P. Michael and N. Amemiya, Transient heat transfer characteristics of supercritical helium and stability analysis of CCICS, Cryogenics, vol. 36, no. 3, pp.183-188, 1996.
- [2] K.Ryu, H.J. Kim, K.C. Seong, S.S. Oh, J.W. Cho, E.Y. Lee, H.B. Jin and K.S. Ryu, Characteristics of the kA class superconducting magnet with high winding tension, ICEC17, p. 559-562, 1998.
- [3] Kazutaka Seo, Masao Morita, Shiro Nakamura, Tadatoshi Yamada, Yoshihiro Jizo, Minimum quench energy measurement for superconducting wire, IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp. 3089-3093, 1996.
- [4] S.W. Kim, T. Shintomi, N.Kimura, Y. Makida and H. Hirabayashi, Experimental studies on stabilities of Rutherford cables for superconducting accelerator magnets, IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp. 2784-2787, 1996.
- [5] Yoich Hayashi, Noriaki Sato, An experimental study of quench protection for superconducting magnetic energy storage, the transactions of the institute of electrical engineers of Japan, vol.105-B, no.12, pp. 81-88, 1986.
- [6] Yukikazu Iwasa, *Case Studies in Superconducting Magnets*, New York and London: Plenum Press, 1994, pp.391, pp. 114.

#### 저 자 소개



김해중(金海鍾)

1965년 11월 25일생  
 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임 연구원



**성기철(成耆哲)**

1956년 2월 20일생.  
1980년 한양대학교 전기공학과 졸업 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1986년 ~ 현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 책임연구원



**조전욱(趙全旭)**

1960년 3월 2일생. 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년~현재 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원



**권영길(權永吉)**

1959년 7월 28일생. 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1990년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구소 초전도 응용연구그룹 그룹장



**유강식(柳康植)**

1958년 8월 5일생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1988년~1993년 한국전기연구소 초전도 연구실 실장, 1993년~99년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀장, 현재 한국전기연구소 전략기술연구단장



**최병주(崔炳柱)**

1958년 12월 12일생. 1981년 영남대학교 전기공학과 졸업, 1983년 영남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 일본 Kyushu Univ. 전기공학과 졸업(공학박), 1983년~1986년 현대 중전기연구소 연구원, 1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구원, 1997년~현재 서라벌대학 전기과 전임강사



**류경우(柳景佑)**

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1985년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박), 1986년~1995 한국전기연구소 선임연구원, 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 조교수