

# 직렬연결된 초전도 한류기의 분로저항에 의한 동작특성

論文

49B - 11 - 4

## Operating Characteristics of Superconducting Fault Current Limiters Connected in Series by Shunt Resistors

玄 鈺 培\* · 崔 孝 祥\*\* · 金 蕙 林\*\*\* · 林 海 龍<sup>§</sup> · 金 仁 善<sup>§§</sup>  
(Ok-Bae Hyun · Hyo-Sang Choi · Hye-Rim Kim · Hae-Ryong Lim · In-seon Kim)

**Abstract** - We fabricated resistive superconducting fault current limiters (SFCL) based on YBCO thin films grown on 2-inch diameter  $Al_2O_3$  substrates. Two SFCLs with nearly identical properties were connected in series to investigate simultaneous quench. There was a slight difference in the rate of voltage increase between two SFCL units when they were operated independently. This difference resulted in significantly imbalanced power dissipation between the units. This imbalance was removed by connecting a shunt resistor to an SFCL in parallel. The appropriate values of shunt resistance were  $80 \Omega$  at  $75 V_{rms}$ ,  $100 \Omega$  at  $100 V_{rms}$  and  $110 \Omega$  at  $120 V_{rms}$ , respectively. Increased power input at high voltages also reduced the initial imbalance in power dissipation, but with increase in film temperature to higher than 200 K.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter, YBCO thin film, Simultaneous quench, Shunt resistance

### 1. 서 론

고온 초전도 한류기에 대한 연구는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있는데, 박막형으로 대표되는 저항형은 배전급의 응용에 쓰여질 전망이고 자기차폐형등의 유도형은 송전급의 실계통에 적용될 것으로 예상되고 있다.<sup>1-8)</sup>

박막을 이용한 저항형 한류기는 유도형 한류기에 비하여 구조가 간단하기 때문에 크기가 작고 운용이 쉽다. 현재 전력계통 내에서 초전도 한류기의 설치공간이 제한되어 있는 점을 고려하면 적용가능성이 높다. 또한 한류작용이 순수하게 저항만으로 이루어지기 때문에 파형이 깨끗할 뿐만 아니라 사고직후 발생할 수 있는 직류성분이 거의 없는 특징을 갖고 있다. 그러나 저항형 한류기는 한류소자 자체가 quench시 소비전력을 모두 감당해야 하고, 재료가 위치에 따라 약간 불균일하기 때문에 hot spot에 의한 국부적인 열 발생이 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 이의 해결책으로 본 연구에서는 초전도체 위에 금층을 코팅하여 열분산을 꾀하였다.

고온 초전도 한류기를 실계통에 응용하기 위해서는 초전도 한류소자의 quench 시작시점은 일정하게 유지하면서 전압계급을 높일 수 있는 기술이 개발되어야 한다. 고온 초전

도 한류소자를 직렬로 연결함으로써 적용전압을 높일 수 있으나 동시에 quench가 어려운 점등의 새로운 문제가 제기되고 있다. 본 논문에서는 박막형 초전도 한류소자 2개를 직렬로 연결하였을 때 발생하는 전류 및 전압특성을 살펴본 다음, 개별 한류소자간에 존재하는 약간의 특성차이 때문에 발생하는 동시 quench의 문제를 살펴보고 이러한 문제점을 극복하는 방법에 대한 실험 data를 제시하고자 한다.

### 2. 실험 구성

초전도 한류소자는 직경 2 inch의  $Al_2O_3$  기판위에 성장된 두께  $0.3 \mu m$ 의  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO) 박막을 바탕으로 제작되었으며 박막은 독일의 Theva사에서 제작되었다. 임계온도와 임계전류밀도는 각각 87 K와  $3 MA/cm^2$  이었다. YBCO 박막은 제조공정 특성상 위치에 따라 두께가 불균일한데, 이에 따라 hot spot에서 발생하는 국부적인 열을 분산하기 위하여 YBCO 박막위에  $0.2 \mu m$  두께의 금을 *in-situ*로 증착하였다. 금 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에 (약 100분의 1) quench된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 줄여준다. 이외에 금 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다. YBCO는 공기중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하기 때문에 YBCO의 표면을 공기로부터 차단시켜 보호하여야 한다. 시편은 직렬연결을 통한 용량증대 및 quench특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 전압단자의 영향을 줄이는 형태로 설계하여 제작하였으며 독립된 한류소자를 구성하여 실험하였다. 이때 각 한류소자의 길이는 26 cm, 폭 2 mm이고 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있으며 상온에서 저항값은  $33 \Omega$ 이었다.

\* 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 責 任 · 理 博  
\*\* 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 先 任 補 · 工 博  
\*\*\* 正 會 員 : 韓 電 力 研 究 院 電 力 系 統 研 究 室 先 任 · 理 博  
§ 正 會 員 : 韓 國 標 準 科 學 研 究 院 量 子 研 究 部 委 囑 · 理 博  
§§ 正 會 員 : 韓 國 標 準 科 學 研 究 院 量 子 研 究 部 責 任 · 理 博  
接受日字 : 2000年 6月 28日  
最終完了 : 2000年 9月 4日

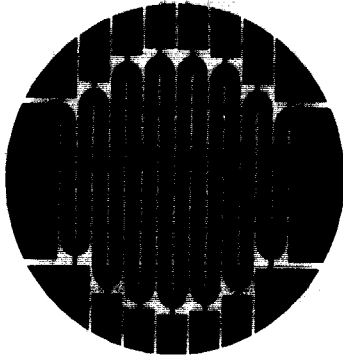


그림 1. Meander 형태로 패턴한 초전도 한류소자  
Fig. 1. Superconducting current limiting elements patterned in the meander form

그림 2는 실험에 사용한 측정회로도를 보여주고 있으며 여기서  $V_0$ 는 전원전압,  $R_0$ 는 전체전류 측정을 위한 표준저항,  $R_F$ 는 사고전류를 제어하기 위한 조정저항, 그리고  $R_L$ 은 부하저항을 각각 나타낸다. SFCL1과 SFCL2는 초전도 한류기를 나타내며, 정상상태 운전시 초전도 상태를 유지하기 위하여 액체질소 용기에 담겨진 채로 실험하였다. 실험조건에 따른 회로소자값 산정을 위한 방정식은 아래와 같다.

$$V_0 = (R_0 + R_L) i \quad (1)$$

$$V_0 = (R_0 + R_F + R_{SFCL1} + R_{SFCL2}) i \quad (2)$$

$$V_0 = V_m \sin \omega t \quad (3)$$

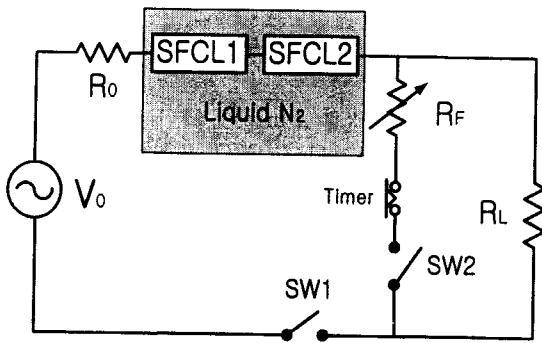


그림 2. 동시켄치 측정을 위한 실험 회로도  
Fig. 2. Experiment circuit for measurements of simultaneous quench

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 병렬 연결한 경우

초전도 한류기를 실계통에 적용하기 위해서는 전체적인 용량을 높여야 한다. 초전도 한류소자를 적절히 조합하는 것이 한 방법이며 이를 위해 병렬연결과 직렬연결을 생각할

수 있다. 이중에서 병렬연결은 적용전류를 증대하는 방법으로 사용된다. 시편의 특성이 거의 같은 SFCL1과 SFCL2를 병렬연결 하였을 때, 그림 3과 같이 동시에 quench가 발생하여 소자의 열분담이 균일하였다. 이는 회로 특성상 전류의 상호 분류가 잘 일어나기 때문으로 생각된다.

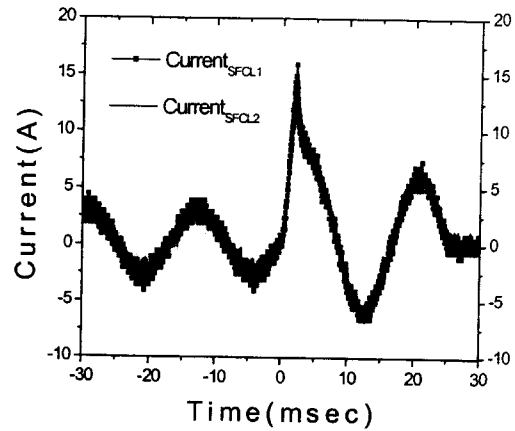


그림 3. 병렬연결시 개별 초전도 한류기의 quench 특성  
Fig. 3. Quench characteristics of each SFCL in parallel connection

#### 3.2 직렬 연결한 경우

앞에서도 언급한 바와 같이 직렬연결은 한류소자간의 특성이 약간의 차이만 있더라도 quench 시작시점이 현저하게 차이가 나게된다. 초전도 한류소자의 특성이 정확히 같도록 제작하면 문제는 해결되겠으나 이는 제작공정상 현실적인 어려움이 많으며 대안을 찾아야 한다.

우선 사고가 발생한 경우 인가전압 100  $V_{rms}$ , 부하저항  $R_L = 27 \Omega$ , 조정저항  $R_F = 0 \Omega$  일 때 한류소자 각각에 대한 개별 전압발생 파형을 그림 4에 보여준다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 전체적으로 거의 동일한 특성을 보여주며, 그래프내의 확대한 그림을 보면 SFCL1이 quench후 전압상승률에서 SFCL2보다 약간 높음을 알 수 있다.

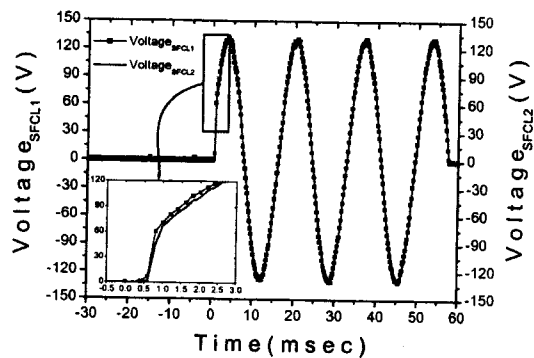


그림 4. 개별 초전도 한류기의 전압특성  
Fig. 4. Voltage properties of individual SFCLs

이번에는 한류소자 2개를 직렬 연결한 시편에 대하여 사고가 발생한 후 각각의 전압발생 파형을 살펴보았다. 그림

5에서 두 시편간에 존재한 약간의 전압발생물의 차이가 초기 quench 시작 시점에서 큰 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 직렬연결의 경우 한쪽 한류소자에서 quench가 먼저 발생하면 그 시간동안 인가되는 모든 전력을 한 한류소자가 감당해야 하기 때문에 적용전압을 올릴 수가 없게 된다. 즉 직렬연결에서는 사고직후 한류소자간 동시 quench가 대단히 중요함을 알 수 있다.

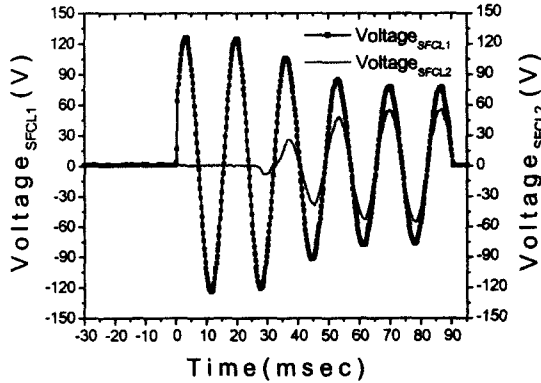


그림 5. 직렬연결시 초전도 한류기의 전압 특성  
Fig. 5. Voltage properties of SFCLs in series connection

전체적인 전류 및 초전도 한류기 양단의 전압발생 파형을 그림 6에 보여준다. 전체전류는 초전도 한류소자의 온도상승에 의한 저항발생으로 사고 초기에 14.2 A<sub>peak</sub> 까지 상승하였으나 점차 감소하는 모습을 볼 수 있다. 즉 발생저항이 완만하게 증가하고 있다. 인가전압을 120 V<sub>rms</sub>로 높인 그림 7을 보면 전체적인 추세는 그림 5와 동일하나 SFCL1의 전압이 발생한 후 약 1주기만에 SFCL2의 전압이 발생하여 한류소자간 편차가 상대적으로 줄어들었음을 알 수 있다. 다시 말해 인가전압이 상승할수록 편차는 줄어들고 있으나, 사고발생 초기에 한류소자가 받는 충격이 가장 크고 3주기 이후의 초전도 한류소자의 온도상승이 그만큼 높아지는 점을 감안하면 사고발생 초기의 동시 quench 방안을 강구하여야 한다. 이처럼 인가전압이 높아질수록 한류소자간 편차가 줄어드는 이유는 사고초기에 SFCL1에 발생하는 인가전압에 대한 저항 변화율이  $\frac{dR}{dV} < 1$  이기 때문으로 사료된다. 따라서 직렬연결된 소자간에 동시퀘치를 효과적으로 이루기 위해서는 인가전압을 높임으로써 어느 한 개의 한류소자에 전압이 발생하기 시작하는 순간의 전체 전류가 높아지도록 설계하거나 단위 한류소자의 발생저항을 낮추는 것이 유리할 것이다. 그러나 전체전류의 상승은 초전도 한류소자에 충격을 줄 수 있고 발생저항을 낮추는 것도 사고전류의 최종 제한값에 영향을 주기 때문에 적절한 설계가 이루어져야 한다.

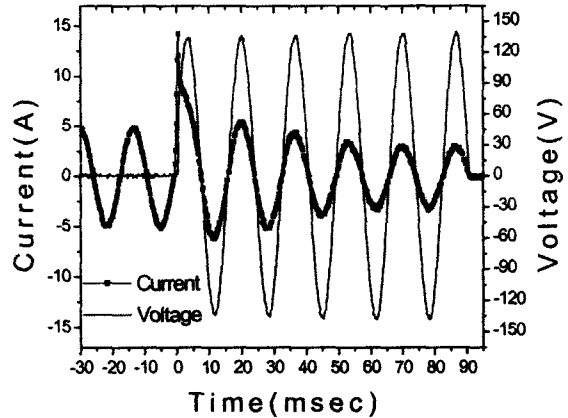


그림 6. 인가전압 100 V<sub>rms</sub>에서 전체적인 전압 및 전류 특성  
Fig. 6. Properties of the total current and voltage at 100 V<sub>rms</sub>

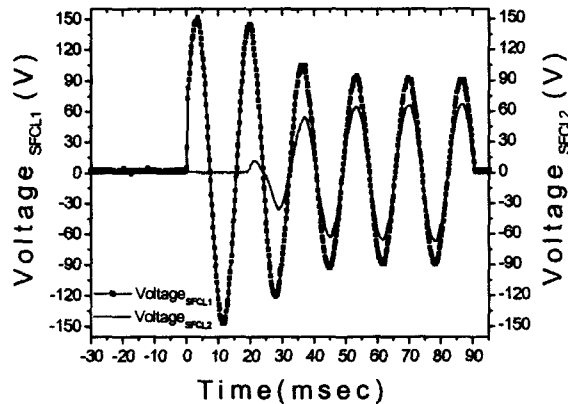


그림 7. 인가전압 120 V<sub>rms</sub>에서 초전도 한류기의 전압 특성  
Fig. 7. The voltage properties of the SFCLs at 120 V<sub>rms</sub>

### 3.3 직렬 연결시 suunt 저항을 삽입한 경우

한류소자간의 초기 소비에너지의 불평형을 해소하기 위하여, SFCL과 병렬로 shunt 저항 R<sub>c</sub>를 삽입함으로써 SFCL2와의 소비에너지 균등화를 꾀하였다. 이때 인가전압 V<sub>0</sub> = 75, 100, 120 V<sub>rms</sub>의 각각에 대하여 shunt 저항 R<sub>c</sub> = 120 ~ 40 Ω까지 10 Ω씩 단계적으로 감소해 가면서 실험을 수행하였다. 적정저항은 SFCL1과 SFCL2에서 quench 시작시점은 동일하면서, 사고후 3 cycle되는 지점에서 발생된 열에 의한 각각의 온도가 동일하게 되는 저항값을 기준으로 선정하였다. 사고후 3 cycle되는 지점은 154 kV의 경우 차단기의 정격차단시간(IEEE 규격)이다. 표 1에 실험에 의하여 선정된 인가전압과 shunt 저항별 적정저항값을 나타내었다. 인가전압이 증가할수록 적정 shunt 저항값이 비례적으로 증가하였다. 즉, 인가전압의 상승과 함께 shunt 저항의 영향이 점차 줄어들음을 알 수 있다.

표 1. 인가전압별 적정 shunt 저항값

Table 1. Optimal shunt resistance at various applied voltages

75 V <sub>rms</sub>			100 V <sub>rms</sub>			120 V <sub>rms</sub>		
R <sub>s</sub> (Ω)	SFCL1 (Ω)	SFCL2 (Ω)	R <sub>s</sub> (Ω)	SFCL1 (Ω)	SFCL2 (Ω)	R <sub>s</sub> (Ω)	SFCL1 (Ω)	SFCL2 (Ω)
80	14.19	14.41	100	17.64	17.63	110	18.11	18.24

그림 8에 인가전압 120 V<sub>rms</sub>에서 shunt 저항 R<sub>s</sub> = 110 Ω인 경우의 초전도 한류소자별 quench 특성을 나타내었다. 사고후 quench 시작시점은 각 한류소자별로 동일하였으며, 발생 전압은 약간 달랐지만 계산된 저항값은 표 1과 같이 거의 같았다.

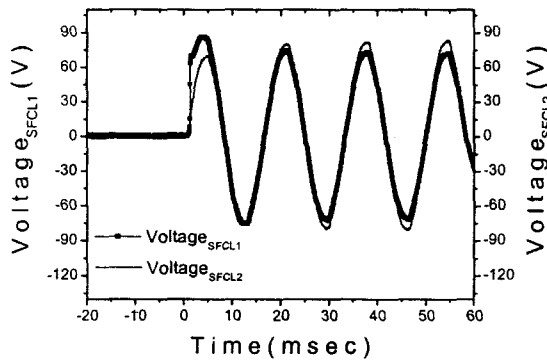


그림 8. 각 초전도 한류소자의 전압 곡선 (V<sub>0</sub> = 120 V<sub>rms</sub>, R<sub>c</sub> = 110 Ω)

Fig. 8. Voltage curves of each SFCL (V<sub>0</sub> = 120 V<sub>rms</sub>, R<sub>c</sub> = 110 Ω)

4. 결 론

YBCO film을 이용한 초전도 한류소자 2개를 제작하고 용량증대를 위하여 직·병렬 연결한 시편에 대한 전류제한 특성 및 동시 quench 여부를 고찰하였다.

인가전압 100 V<sub>rms</sub>, 부하저항 R<sub>L</sub> = 27 Ω, 조정저항 R<sub>F</sub> = 0 Ω 일 때 한류소자 각각에 대한 개별 전압발생 파형은 사고후 전압상승률에서 약간의 차이를 보였을 뿐 거의 동일한 특성을 보여주었다. 먼저 인가전류를 높이기 위한 초전도 한류소자간 병렬 연결은 개별소자의 약간의 특성차이에도 불구하고 소자간 전류분류가 효과적으로 일어나 열분담이 동일하였다. 그러나 소자간 직렬연결의 경우 이러한 약간의 전압상승률의 차이가 먼저 quench된 시편의 열발생을 촉진함으로써 power가 모두 그 시편에 부담되는 문제를 야기하였다. 초전도 한류소자간의 초기 소비에너지의 불평형을 해소하기 위하여 SFCL2와 병렬로 shunt 저항 R<sub>c</sub>를 연결한 결과 적정저항은 75 V<sub>rms</sub>에서 R<sub>c</sub> = 80 Ω, 100 V<sub>rms</sub>에서 R<sub>c</sub> = 100 Ω, 125 V<sub>rms</sub>에서 R<sub>c</sub> = 110 Ω를 각각 나타내었다.

shunt저항은 초전도 한류소자에 병렬로 삽입되기 때문에

근본적으로 정상상태에서 영향은 거의 없으나 전압상승률의 상승, 전류제한값의 조절등과 같은 방법으로 shunt 저항의 영향을 더욱 줄이는 방법을 현재 강구중에 있다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. Chen, T. Baumann, P. Unternahrer and W. Paul, "Fabrication and characterisation of superconducting rings for fault current limiter application", *Physica C*, vol. 4, pp. 282-287, 1997.
- [2] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, P. Kummeth and H. W. Neumuller, "Resistive current limiters with YBCO films", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, vol. 7, no. 2, pp. 828-831, 1997.
- [3] E. N. Reimann, R. Cherkaoui, B. Dutoit, D. Djukic and G. Grasso, "Simulation of the transient response of a High-T<sub>c</sub> superconducting current limiter inserted in an electrical distribution system", *IEEE Trans. on App. Supercon.*, vol. 7, no. 2, pp. 836-840, 1997.
- [4] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H. W. Neumueller, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films - 100 kVA Functional Model", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, vol. 9, no. 2, pp. 656-659, 1999.
- [5] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO-films on sapphire substrates", *IEEE Trans. App. Supercon.*, vol. 9, no. 2, pp. 1369-1372, 1999.
- [6] 최효상, 현옥배, 김혜립, 황시들, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", *전기학회논문지*, 48B권, 10호, pp. 537-543, 1999.
- [7] H. Kato, O. Miura and D. Ito, "Quench behaviors of QMG current limiting elements under the influence of magnetic field", *IEEE Trans. on App. Supercon.*, vol. 10 no. 1, pp. 869-872, 2000.
- [8] 김혜립, 현옥배, 최효상, 황시들, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 켄치 전파", *한국전기전자재료학회논문지*, 제 13권, 4호, pp. 337-342, 2000.

저 자 소 개



현 옥 배 (玄 鈺 培)

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이박), 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

Tel : 042-865-5971, Fax : 042-865-5804

E-mail : hyun@kepri.re.kr



임 해 용 (林 海 龍)

1969년 2월 25일생. 1994년 영남대학교 물리학과 졸업, 1996년 영남대학교 물리학과(석사), 2000년 영남대학교 물리학과(이박), 현재 표준과학연구원 전자기표준부 초전도그룹 post-doc, 주요관심분야는 고

온초전도 박막 및 전자소자제작.

Tel : 042-868-5238, Fax : 042-868-5475

E-mail : hrlim@kriss.re.kr



최 효 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1995년~현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

Tel : 042-865-5977, Fax : 042-865-5804

E-mail : hschoi@kepri.re.kr



김 인 선 (金 仁 善)

1955년 4월 20일생. 1981년 경북대학교 전자공학과 졸업, 1983년 경북대학교 전자공학과(석사), 1993년 Tokyo Institute of Technology 재료과학(이박), 현재

표준과학연구원 전자기표준부 초전도그룹 책임연구원, 주요관심분야는 고온초전도 및 산화물 박막의

PLD 증착 및 전자소자제작.

Tel : 042-868-5238, Fax : 042-868-5475

E-mail : hrlim@kriss.re.kr



김 혜 림 (金 蕙 林)

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대학교 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대학교 대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미 코넬대학교 대학원 물리학과 졸업(이박), 현재 한전 전력연구원 전력계통연구

실 근무

Tel : 042-865-5973, Fax : 042-865-5804

E-mail : hrkim@kepri.re.kr