

## 전도냉각되는 1.2kV급 고온초전도 직류리액터 전류도입부의 전기적 절연에 대한 연구

### Study on the Electrical Insulation of Current Lead in the conduction-cooled 1.2kV Class High-Tc Superconducting DC Reactor

배덕권\*, 정종만\*\*, 안민철\*, 이찬주\*, 고태국\*\*\*, 김상현#

Duck Kweon Bae\*, J.M. Jeong\*\*, Min Cheol Ahn\*, Chan Joo Lee\*, Tae Kuk Ko\*\*\* and S.H. Kim#

**Abstract:** In this paper, Insulation of current lead in the conduction-cooled DC reactor for the 1.2kV class 3 $\phi$  high-Tc superconducting fault current limiter(SFCL) is studied. Thermal link which conducts heat energy but insulates electrical energy is selected as a insulating device for the current lead in the conduction-cooled Superconducting DC reactor. It consists of oxide free copper(OFC) sheets, polyimide films, glass fiberglass reinforced plastics(GFRP) plates and interfacing material such an indium or thermal compound. Through the test of dielectric strength in LN<sub>2</sub>, polyimide film thickness of 125  $\mu$ m is selected as a insulating material. Electrical insulation and heat conduction are contrary to each other. Because of low heat conductivity of insulator and contact area between electrical insulator and heat conductor, thermal resistance of conduction-cooled system is increased. For the reducing of thermal resistance and the reliable contact between polyimide and OFC, thermal compound or indium can be used. As thermal compound layer is weak layer in electrical field, indium is finally selected for the reducing of thermal resistance. Thermal link is successfully passed the test. The testing voltage was AC 2.5kVrms and the testing time was 1 hour.

**Key Words:** Cryocooler, thermal link, superconducting fault current limiter, electrical insulation, cryogenic temperature

## 1. 서 론

극저온 냉동기의 발달로 냉동기로 냉각되는 초전도 시스템에 대한 연구 및 개발이 진행되고 있다. 이러한 개발은 superconducting magnetic energy storage(SMES), magnetic resonance imaging (MRI), 실리콘 단결정 성장용 초전도자석 등의 저전압 분야

뿐만 아니라 고온초전도한류기와 같은 고전압 응용분야에까지 광범위하게 이루어지고 있다 [1]-(3).

전도냉각방식을 사용하면 냉각 시스템의 소형경량화 및 냉각시스템의 유지보수가 간편해지는 장점 이외에 고 초전도 시스템의 동작온도를 변화시킬 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 초전도 전력기에 전도냉각방식을 사용할 경우 필연적으로 발생하는 전류도입부의 전기적 절연에 대한 연구를 수행하였다. 전도냉각은 도체를 통해 전도되는 열을 냉동기로 냉각시키는 방식이므로 열은 전달시키면서 전기적으로는 절연시켜야 하는 문제점이 있다. 전도냉각되는 고온초전도 직류리액터의 전류도입부에 대한 전기적 절연을 위하여 폴리머와 금속을 결합시킨 써멀 링크(thermal link)를 설계, 제작하여 시험하였다.

## 2. 극저온에서 재료의 절연내력

### 2.1. 단시간 파괴전압

직류리액터의 절연을 위한 재료로 폴리이미드 필름을 사용하였다. 상용화되어있는 폴리이미드 필름 중 듀폰사의 캡톤(kapton) 필름을 선택하여 해당 재료의 절연내력을 측정하였다.

전도냉각으로 냉각된 직류리액터에서 절연물이 위치할 부분의 설계 온도는 80K이다. 액체질소는 재료를 77K으로 냉각시키고 재료의 연면절연파괴 또한 방지할 수 있으므로 액체질소 속에서 시험의 절연파괴실험을

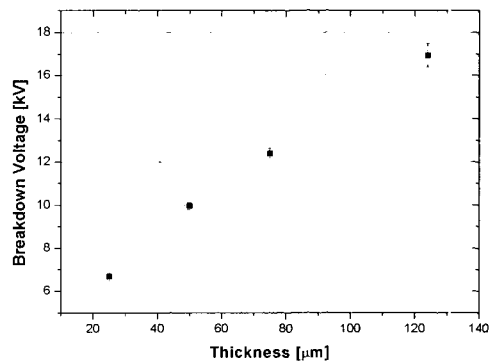


그림 1. 두께에 따른 캡톤 필름의 단시간 파괴전압  
Fig. 1. Short time breakdown voltage of kapton film via thickness

\* 학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

\*\* 학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과 박사과정

\*\*\* 정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 교수

# 정 회 원 : 경상대 공대 전기공학과 교수

원고접수 : 2002년 04월 08일

심사완료 : 2002년 05월 22일

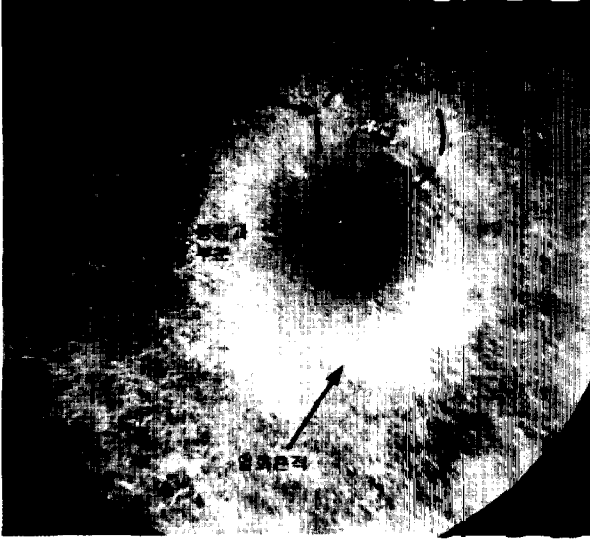


그림 2. 파괴된 시료  
Fig. 2. Specimen after breakdown

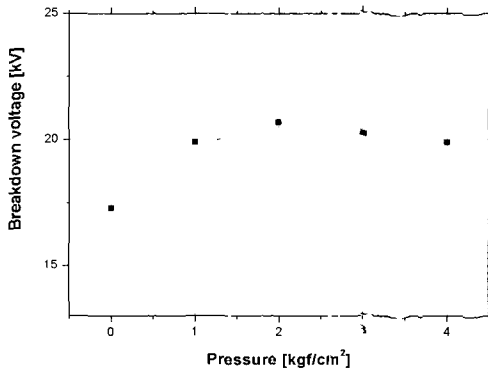


그림 3. 압력에 따른 두께 125 μm 캡톤 필름의 단시간 파괴전압  
Fig. 3. Breakdown voltage of kapton film of 125 μm via pressure

행하였다. 승압속도는 500V/s로 하였으며 전극은 sus를 사용하였다. 표시된 절연파괴전압은 10회의 측정을 평균한 값이다.

그림 1은 평등전계 하에서 두께에 따른 캡톤 필름의 단시간 파괴전압을 나타낸다. 구 내 평판 전극으로 전극계를 구성하였으며 구 전극으로는 지름 8mm의 sus를 사용하였다. 시편 두께는 25, 50, 75, 125 μm였으며 단시간 절연파괴전압은 각각 6.67, 9.95, 12.51, 17.07kV였다. 가장 얇은 두께에 비해 2배, 3배, 5배로 시편의 두께가 변하였으나 절연파괴 전압은 각각 1.49배, 1.9배, 2.5배 변하였다. 이로써 절연파괴전압의 변화율이 재료의 두께변화율에 비례하지 않고 변화율의 제곱근에 반비례한다는 실험적 결과 [4]를 극저온에서도 확인할 수 있었다.

그림 2는 파괴된 시료의 현미경 사진이다. 구전극의 중심부분이 아닌 구전극과 평판전극 사이의 미소 갭과 접해있는 캡톤 필름이 열화된 흔적을 볼 수 있으며 절연파괴 또한 이 부분에서 일어난 것을 알 수 있다. 미소 갭의 전계가 절소의 절연내력 보다 커서 절소의 부분파괴 현상이 발생하였다. 따라서 이 부분에서 기포가 지속적으로 발생되므로 기포와 절소의 복합적이고

지속적인 절연파괴가 캡톤 필름을 열화시킨다. 이 열화로 인해 캡톤 필름의 절연내력보다 낮은 전압에서 절연파괴가 일어난 것으로 생각되므로 이러한 문제를 최소화하기 위하여 절소를 가압한 상태에서 두께 125 μm인 캡톤 필름의 단시간 파괴전압을 측정하였다. 그림 3은 압력에 따른 캡톤 필름의 단시간 절연파괴전압을 나타낸다. 절연파괴전압은 1kgf/cm<sup>2</sup>이후에서 포화되는 경향을 나타내며 그 값은 20kV 정도 있다. 따라서 절소를 가압하지 않은 상태에는 절소의 부분파괴가 캡톤 필름을 열화시켜 절연파괴전압을 3kV 정도 감소시킨 것으로 생각된다. 두께 125 μm인 캡톤 필름의 절연파괴전압을 선계로 환산하면 160kV/mm가 된다.

### 3. Thermal link의 설계

#### 3.1. 직류리액터 양단전압의 해석

본 논문의 절연대상인 고온초전도 직류리액터는 그림 4에 나타나 있는 것과 같이 3Φ 고온초전도 환류기를 위한 것이므로 환류기의 양단전압에 대한 해석이 필요하다. 정상상태에서는 계통 선간 전압의 2% 이하가 자기철심리액터(Magnetic Core Reactor) 양단에 걸리고 고온초전도 직류리액터(High-Tc Superconducting DC Reactor)는 자기철심리액터에 병렬로 연결되어 있으므로 절연에 대한 문제는 심각하지 않다. 그러나 계통에 고장이 발생할 경우, 부하가 지락 또는 단락되어 계통에 임피던스가 사라지므로 이 시간 동안 계통의 전압이 직류리액터 양단에 걸리게 된다. 다시 말해, 계통이 고장발생 시점에서 차단기가 동작하기까지의 약 100ms 정도의 시간동안 직류리액터 양단에 고전압이 인가된다. 직류리액터에 전압이 고전압이 인가될 경우 전류도입부 양단에 직류리액터 양단의 전압 전체가 인가되므로 이 부분은 직류리액터 양단에 걸리는 전압에 대한 절연이 보장되어야 한다. 계통에서 부하가 사라질 경우 직류리액터 양단에 걸리는 전압은 식 (1)과 같다 [5].

$$v = \frac{\pi}{3} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1)$$

여기서,  $V_{m,L-L}$ 은 선간전압의 최대치를 나타낸다.

본 논문의 직류리액터가 식 (1)에 적용될 경우 자기철심리액터의 전압변환비기 1:0.89이므로 직류리액터 양단 전압의 최대치는 약 1.5kV가 될 것이다.

#### 3.2. Thermal link의 설계 및 전계분포 해석

Thermal link는 냉동기와 직류리액터의 전류도입부 사이에 설치된다. 이 것의 역할은 열을 냉동기로 전달시키면서 전기적으로 절연시켜주는 것인데, 열전달을 위하여 열저항이 작은 무산소동(OFC)을 사용하며 이 둘 사이에 캡톤 필름을 끼워 전기적 절연을 한다. 열전달을 좋게 하기 위해서는 접촉면적이 넓어야 하므로 여러 장의 무산소동 사이에 캡톤 필름을 끼운다. 무산소동과 캡톤 필름이 접하는 부분에는 보이드나 공동 등이 있어 열전달에 좋지 않은 영향을 미치므로 thermal compound나 인듐 층을 절연물과 무산소동이 접하는 부분에 두고 압력을 가한다.

1mm 두께의 thermal compound의 절연파괴 전압을 측정할 결과 그 값은 4.5kV에서 7.1kV 사이였고

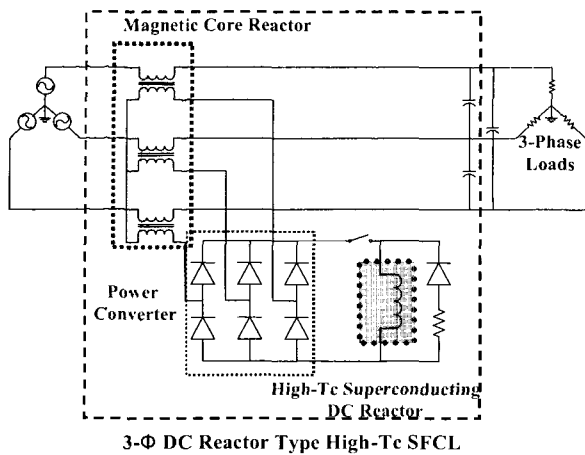


그림 4. 3상 고온초전도환류기의 직류리액터  
Fig. 4. DC reactor in 3 $\phi$  high-Tc SFCL

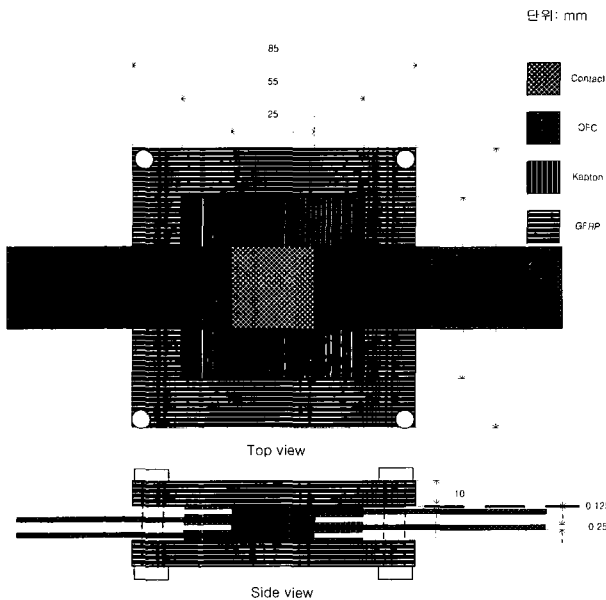


그림 5. Thermal link의 구조  
Fig. 5. Structure of thermal link

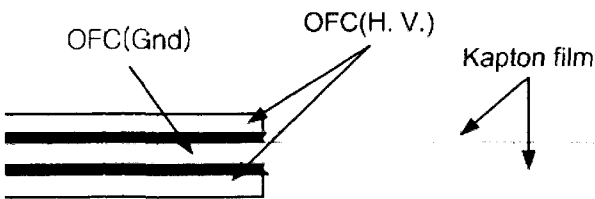


그림 6. thermal link의 전계분포  
Fig. 6. Electric field distribution of thermal link

10회 측정의 평균값은 6kV였다. 이를 전계로 환산하면 6kV/mm로 매우 낮은 절연내력을 가지므로 thermal compound에서 절연파괴가 일어날 수 있으며 이 부분의 파괴가 주 절연물인 캡톤 필름을 열화시킬 수 있으므로 본 논문에서는 인듐을 사용하여 절연물과 무산소동을 결합하였다.

그림 5는 thermal link의 구조를 나타낸다. 두께 250  $\mu\text{m}$ 의 무산소동 사이에 전기적 절연을 위해 두께 125  $\mu\text{m}$ 인 캡톤 필름을 끼웠다. 무산소동과 캡톤 필름이 접하는 면적은  $25 \times 25\text{mm}^2$ 이다. 접하는 면적에서 각 15mm 씩 캡톤 필름의 여유를 두어 연민절연파괴를 방지하였다.

그림에서는 4장의 무산소동 만을 표시하였으나 무산소동의 양은 열적인 계산에 의해 가감될 수 있다. 1.2kV 직류리액터의 경우 열적 설계에 의해 24장의 무산소동을 사용한다.

그림 6은 thermal link의 전계분포를 나타낸다. 무산소동 사이에 한 장의 캡톤 필름을 끼운 것을 모델링하였다. 그림에서 어두운 부분은 전계가 센 부분을 나타내는데 고전압이 인가되는 무산소동의 모서리부분에 접해있는 부분이 가장 큰 값을 나타내었다. 이 부분은 전계가 집중되는 곳으로 1kV당 전계가 12.3kV/mm인 것으로 계산되었다. 평등전계인 경우 1kV당 전계는 8kV/mm이므로 thermal link의 전계 집중도는 평등전계의 1.54배이다.

#### 4. Thermal link의 제작 및 평가

##### 4.1. Thermal link의 제작

무산소동, 캡톤 필름, 인듐, 등의 재료를 사용하여 thermal link를 제작하는 순서도를 그림 7에 나타내었다.

열전달을 위하여 무산소동과 캡톤 필름을 압착시키므로 무산소동의 가장자리와 모서리 부분의 요철 등을 조심스럽게 제거한다. 특히 모서리부분을 둥글게 처리하여 전계집중도 또한 완화시킨다. 캡톤 필름의 두께는 125  $\mu\text{m}$ 이므로 미세한 불순물도 압착에 의해 캡톤 필름을 손상시킬 수 있으므로 캡톤 필름과 무산소동을

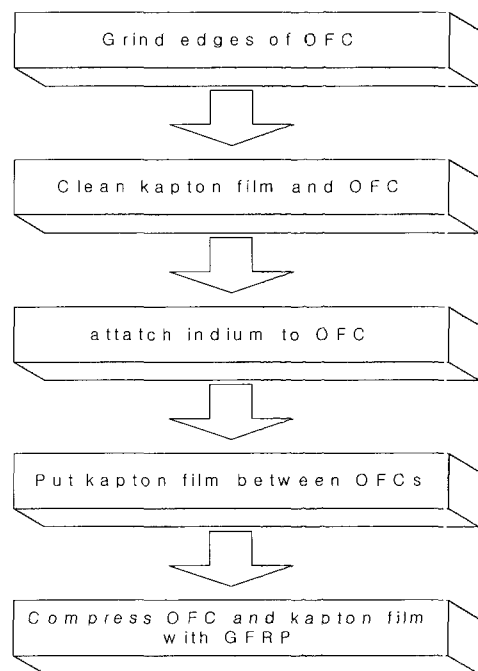


그림 7. Thermal link 제작 공정  
Fig. 7. Process of thermal link manufacture

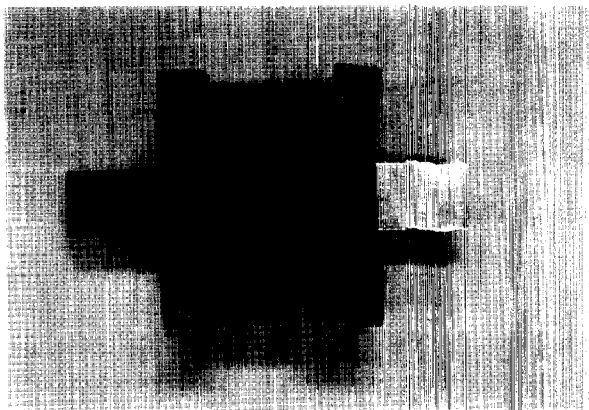


그림 8. 평가용 thermal link  
Fig. 8. Thermal link for test

깨끗하게 세척한다. 세척한 무산소동의 양면에 인듐을 붙이고 그 사이에 역시 세척한 캡톤 필름을 끼운다. 인듐을 사용하는 이유는 캡톤 필름을 보호하는 것과 무산소동과 캡톤 필름이 접하는 부분에 생길 수 있는 공동을 제거하여 열저항을 최소화시키기 위함이다. 마지막으로 GFRP판, 볼트, 너트로 무산소동과 캡톤 필름을 압착한다. 이 때 충분한 압력을 인가하여야 캡톤에 의해 생기는 열저항을 최소로 줄일 수 있다.

#### 4.2. Thermal link의 평가

그림 8은 평가를 위해 제작한 thermal link를 나타낸다. 이것으로 먼저 단시간 절연파괴 전압을 측정하였다. 계산에 의한 thermal link의 전계는 1kV 당 12.3kV/mm이고 2.1에서 측정한 두께 125 μm인 캡톤 필름의 절연내력은 160kV/mm이다. 그러므로 계산에 의한 예상 파괴전압은 13kV였으나 실제 실험에서는 16.4kV에서 파괴되었다. 무산소동의 모서리부분을 둥글게 처리하여 전계집중을 완화시켰으므로 절연 파괴전압이 예상보다 증가하였다고 생각된다.

단시간 절연파괴 시험 후 제작한 thermal link로 인가전압에 따른 파괴시간을 측정하였다. 계통 고장시 1.2kV 3Φ 직류리액터형 고온초전도 한류기의 직류리액터 양단 전압의 최대 값은 약 1.5kV일 것으로 3.1에서 계산되었는데 이 값은 교류 1.2kV 최대값의 약 88%이다. 본 논문에서는 실효값 1.2kV인 교류전압의 1.5배인 실효값 1.8kV, 최대값 2.5kV를 thermal link에 인가하여 1시간동안 전다는지를 시험하였다. 이 조건은 IEEE std 1277-2000을 참조하였다. 본 논문에서 제작한 thermal link는 위 조건을 절연파괴 없이 견뎌내었으므로 1.2kV 직류리액터의 절연을 성공적으로 수행할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 논문은 1.2kV 3Φ 직류리액터형 고온초전도 한류기를 구성하는 직류리액터의 전류도입부의 절연에 대하여 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전도냉각되는 1.2kV급 직류리액터의 전류도입부 절연을 위한 thermal link를 설계, 제작하였으며 그 평가를 성공적으로 수행하였다.
2. 액체질소 속에서 절연파괴 실험을 할 경우 기포의 부분 절연파괴에 의해 대상 시료가 열화될 수 있으

므로 가압 등의 방법으로 시료가 열화되는 것을 최소한으로 줄여야 한다.

3. 본 논문에서 제작한 thermal link의 전계 집중부분은 평등전계 구조보다 1.54배 큰 전계가 인가될 수 있다.
4. Thermal link의 열전달 효율을 높이기 위하여 절연물과 무산소동이 접촉되는 부위에 thermal compound나 인듐 등을 사용할 수 있으나, 절연내력의 문제를 고려하면 인듐을 사용하여야 한다.
5. 열전달을 위하여 얇은 절연물을 사용하므로 절연물에 손상이 가지 않도록 특별한 주의를 기울여야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] K.D. Sim, et al., "Fabrication and Test Results of Superconducting Magnet for Crystal Growing System", Proceedings of KIASC Conference 2002, pp 374-375, 2002
- [2] M. A. Green, "The Effect of Low Temperature Cryocoolers on the Development of Low Temperature Superconducting Magnets", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001
- [3] E. Leung, et al., "Testing of the World's Largest Bi-2223 High Temperature Superconducting Magnet", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, March 2000
- [4] ASTM D 149-97a.
- [5] Daniel W. Hart, *Introduction to Power Electronics*, pp. 139, 1997

#### 저 자 소 개



##### 배덕권(裵德權)

1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정



##### 정종만(鄭鍾萬)

1971년 9월 16일생, 1997년 경상대학교 전기공학과 공학사, 1999년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



##### 안민철(安敏哲)

1976년 9월 20일생, 1999년 연세대학교 전기공학과 공학사, 2001년 동 대학원 전기전자공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



**이찬주(李燦周)**

1972년 2월 20일생, 1995년 연세대 공대 전기공학과 공학사, 1997년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정



**고태국(高太國)**

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 공학사, 1983년 Case Western Reserve University 공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사, 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도 저온공학회 총무이사, 현재 대한전기학회 평의원, 현재 초전도 국제표준화 (IEC/TC90) 전문위원



**김상현(金相賢)**

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 1982년~1986년 일본 오사카대학 대학원 공학박사, 현재 경상대 전기전자공학부 교수 및 당 학회 회장