

# Polyethylene 계열 절연재료의 환경적·기계적 특성

## Wet Environmental and Mechanical Characteristics for Polyethylene-based Insulating Materials

송 우 창\* · 최 원 석\*\* · 박 하 용†

(Woo-Chang Song · Won-Seok Choi · Ha-Yong Park)

**Abstract** - In this study, four kinds of specimens of PE(polyethylene)-based insulating materials were prepared for selecting the optimum insulation materials in a wet environment. The specimens were tested by various methods, the anti tracking test, the transmittance test in the water vapor transmittance(WVT) and the abrasion resistive test, etc. The HDPE(high-density polyethylene) specimen was showed excellent property in the tracking resistance test and the lowest transmittance in water vapor transmittance test. In the abrasion resistive test, the LLDPE(linear low-density polyethylene) and MDPE(medium-density Polyethylene) were showed excellent mechanical properties. The value of cut-through resistance for MDPE and HDPE were superior to that for LLDPE and LDPE(low-density polyethylene).

**Key Words** : Abrasion resistance, Anti tracking, Cut-through resistance, Polyethylene, Water vapor transmittance(WVT)

### 1. 서 론

고분자 절연재의 유전율, 전기저항, 절연파괴 강도 등의 전기적 특성과 인장강도 등의 기계적 특성에 관한 연구는 상당히 진척되어 왔다. 하지만 마모성 시험, 관통 저항성 시험 등의 기계적 특성뿐 아니라 주위 환경이 습한 곳에서의 수증기 투과 시험, 투습시험 등의 연구는 미진한 상태이다.

고전압 공학이나 그 응용분야에 있어서 절연재료는 누전을 막는 부분이며, 또한 절연 재료의 전기적 특성 중 유전강도, 전계 등은 절연의 성패를 결정짓는 중요한 요소다[1,2,3].

최근 전 세계적인 이슈로 대두되어 온 각종 이상기후 현상은 우리나라의 경우, 하계의 갑작스런 계릴라성 집중호우로 발생하고 있으며, 이와 같은 예측 불허한 폭우로 인해 수많은 시설이 침수되어 국민의 생명과 재산을 순식간에 앗아가는 피해가 매년 반복되고 있는 실정이다. 침수되는 다양한 시설 중에는 전기설비가 포함되어 있으며, 불가항력적으로 발생하는 1차재해와 이를 복구하기 위해 투입되는 인력에게 파급되는 2차 재해는 주로 복구과정 중에 전기사용이나 기타 요인으로 인해 발생하는 경우가 대부분이다. 더욱이 각종 시설 침수 시 차단기가 정상적으로 동작하지 않을 경우에는 피해가 더욱 가중될 수밖에 없으며, 재산상의 피해

보다는 소중한 인명 상의 피해로 직결되는 만큼 전기설비의 안전에 관심을 가져야 한다[4,5,6].

특히, 지하공간에 대한 개발과 촉진은 평면적이고 외형적인 도시성장패턴에 의한 지표중심주의적인 토지이용의 결과에 대한 수요증가에 대한 지상의 토지공급의 한계로 인한 기존의 도시문제를 해결하는 것과 미래의 도시변화에 대응하는 것으로부터 논리적 정당성을 찾을 수 있다. 특히, 국내의 지하 개발은 대중교통수단인 지하철의 도입과 함께 크게 활성화되어 왔다. 지하철역을 중심으로 개발되어 온 대부분의 지하상가 및 지하보행자 도로들은 지하철과 지상 교통수단을 연결하는 통행로의 기능을 수행할 뿐만 아니라 지하상가, 지하광장, 지하주차장 등의 지하시설들을 중심으로 한 역세권을 형성하여 지상부의 상업·유통기능의 상당부분을 수행하고 있다[7,8,9].

습기가 존재하는 전원설비의 충전된 단자 간에는 트래킹을 비롯한 각종 연면방전이 발생할 우려가 있으며, 절연재 및 환경조건에 따라 그 특성이 달라지므로, 본 연구에서는 이에 대한 기초적인 특성을 실험하였다.

시험 재료는 현재 절연재로 범용중인 PE 계열의 시료를 선정하였으며, 이 재료를 이용하여 시편을 제작한 후 내트래킹성, 수증기 투과율, 시료의 마모 및 관통 저항성 등을 분석하였다. 수증기 투과 시험법에는 건식방법(dessicant method)과 습식방법(water method)이 있는데, 전력케이블 절연층으로의 수분은 외피를 통해 침투하므로, 본 실험에서는 건식방법을 선정하여 실험하였다. 건식방법은 시료로 dessicant를 함유한 시험접시의 입구를 밀봉하고 일정한 환경 내에 설치한 후, 주기적으로 시험접시의 중량을 측정·비교함으로써 시료를 통해 dessicant로 이동하는 수증기 투과의 속도를 결정한다. 또한, 모든 고분자 재료는 취급 중 기계적으로 손상될 수 있다. 손상정도는 외피재의 강도에 따라 달라지므로 마모 및 관통저항성에 대한 평가도 요구되므로 이에 대한 실험을 하여 연구, 분석하였다.

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Kangwon National University, Korea

E-mail : hivol5652@kangwon.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Kangwon National University, Korea

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, Korea

접수일자 : 2014년 5월 2일

수정일자 : 2014년 5월 19일

최종완료 : 2014년 5월 22일

## 2. 실험 방법

설비안전에 기여할 수 있는 최적의 절연재를 선정하기 위해 현재 범용 중인 4종의 PE(polyethylene) 계열 절연재인 LLDPE, LDPE, MDPE, HDPE에 대한 시편을 제작하였다.

### 2.1 내트래킹성 평가

PE 계열의 고분자 4종에 대한 내트래킹성을 시험하기 위해 경사법을 사용하였으며, 이에 대한 개요도를 그림 1에 나타내었다.

그림 1에 보인 바와 같이, 고분자 절연재에 대한 내트래킹성을 평가하기 위해 5[mm] 두께로 성형한 각 시료를 50×120[mm]의 규격으로 재단한 후, 재료 표면에 상부전극과 하부전극을 50[mm] 이격하여 설치하고 상부전극과 고분자 절연재 간에는 도전성 수용액을 3[cc/min]의 비율로 떨어뜨렸다. 이때 수용액의 낙하에 따른 재료 표면상에서의 흘러내림을 일정하게 유지하기 위해 8매의 거름종이를 재단하여 삽입한 후, 상부전극에는 2.5[kV]의 교류전원을 접속하고 하부전극은 접지하였다. 도전성 수용액은 IEC 60112에서 제시한 바에 따라 플라스크 내의 순수 2[ℓ]에 0.1[%]의 NH<sub>4</sub>Cl, 음이온계 계면활성제인 0.02[%]의 Triton X-100을 넣고 교반기로 고루 섞어 전체 수용액의 도전율이 2,400[μS]가 되도록 하였다. 이와 같이 설치한 후, 도전성 수용액이 재료 표면을 타고 흘러내리는 정도가 균일해졌을 때, 두 전극 간에 2.5[kVac]를 인가하고 재료 표면에 흐르는 누설전류의 크기가 40[mA]일 때 전원이 차단되도록 한 후, 전압 인가 시부터 차단 시까지의 시간을 측정하고 이 때 재료 표면의 상태를 관찰하였다. 이와 같은 실험을 시료마다 3번씩 반복하여 측정한 후 그 평균값을 구하였다.

### 2.2 수증기 투과시험

고분자 절연재에 대한 수분침투 특성을 평가하기 위하여 ASTM E96에 따라 수증기 투과(water vapor transmission : WVT) 시험을 실시하였다[10]. 수증기 투과율(water vapor transmission rate)은 일반적으로 32[mm] 이하의 두께를 가진 시료가 정해진 온습도 조건에서 단위면적을 통해 단위시간동안의 지속적인 수증기 흐름으로 정의된다.

본 실험에 사용된 시험접시는 알루미늄으로 제작하여 부식 및 수증기의 투과가 발생하지 않도록 하였다. 시험용 접시를 그림 2에 나타내었다.

그림 2에 보인 바와 같이, 시험접시는 입구의 한 쪽 길이가 76[mm]인 정방형으로써 약 5,700[mm<sup>2</sup>]의 시험면적을 지닌다. 용이한 시료부착 및 시험 중 시료변형을 고려하여 시험접시 입구는 2.8[mm] 정도의 턱(flange 또는 ledge)을 확보하고 이 턱 주위로 4[mm]의 테(rim)를 두루으로써 측면을 통한 수분침투를 방지하였다. 또한 dessicant를 설치하기 위한 시험접시 내부높이는 19[mm]로 제작하였다.

시험접시 내 dessicant로서 크기가 2~3[mm] 정도인 무수염화칼슘을 넣은 후, 실란트를 사용하여 시험접시에 시료를 접착하였다. 이와 같은 절차를 거쳐 준비된 시료의 중량을 측정하고 온습도 조절이 가능한 시험챔버에 설치하였다.

시험조건은 규격에 따라 온도 32±0.6[°C], 상대습도 50±2[%]를 선택하였다. 시험챔버에서 온습도 변화는 자동적으로 기록되며, 공기는 지속적으로 순환된다. 한편 시험시간에 따른 중량변화는 0.1[mg]까지 측정 가능한 전자저울을 사용하여 주기적으로 측정되었으며, 수증기 투과율을 계산하기 위해 8~10개의 데이터를 확보하였다.

시험시료는 절연재로 많이 사용하고 있는 PE계열 시편 4종을 각 재질별로 3~4개씩 시험접시에 설치하여 동시에 시험하였으며, 오차가 큰 시료는 접착불량에 의한 것으로 판단하여 분석에서 제외하였다. 시험시료는 hot press로 180[°C]의 온도에서 10분간 압축성형하여 0.8[mm] 정도의 두께로 제작하였다. 시험시간에 따른 중량변화를 plot한 후 직선을 그어 기울기를 구하였다.

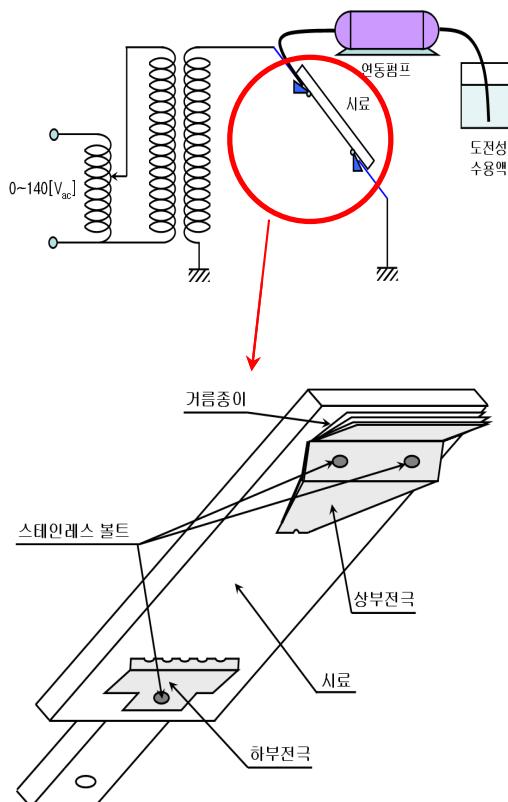


그림 1 내트래킹성 평가를 위한 실험장치

Fig. 1 Experimental diagram for anti tracking assesment

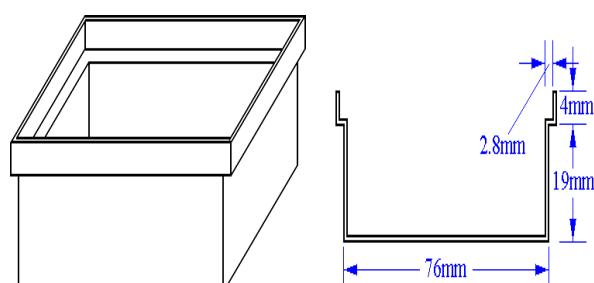


그림 2 수증기 투과시험에 사용된 시험접시

Fig. 2 Vessel for water vapor transmittance test

### 2.3 마모 및 관통저항성 시험

모든 고분자 재료는 취급 중 기계적으로 손상될 수 있다. 손상정도는 외피재의 강도에 따라 달라지므로, 마모 및 관통저항성에 대한 평가가 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 ASTM D3389-94에 따라 고분자 절연재의 마모특성을 평가하였다[11]. 우선 보이드나 불순물을 포함하지 않는 3[mm] 두께의 시료를 약 110[mm] 직경의 원형으로 절단한 후, 시료 중앙에 구멍을 뚫고 초기중량을 측정하였다. 이 시료를 RPDH(Rotary Platform, Double Head) Abrader의 홀더의 클램프로 고정시키고 일정 압력 하에서 분당 70[rev/min]의 속도로 2개의 마모성 wheel을 회전시킨 후의 중량을 측정하였다. 시험은 시료 당 2회씩 실시하였다.

한편 관통저항성(cut-through resistance) 시험의 경우 universal tester를 사용하여 압축모드로 실시된다. 관통저항성은 wedge 형태의 칼날이 1.9[mm] 두께의 시료를 관통할 때 걸리는 최대 force로 평가한다. 칼날은 25.4[mm]×0.76[mm](넓이 × 두께)의 wedge이며, 45각도를 갖도록 제작하였다. 시험에서는 wedge형 날의 이동속도를 분당 10[mm]로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3에 보인 바와 같이, PE 계열의 시료 4종에 대한 내트래킹성을 평가하기 위해 도전성 수용액이 흐르는 표면에 전압을 인가하고 누설전류에 의한 트래킹 지속시간을 측정한 결과, HDPE가 약 94분 정도로 가장 우수한 특성을 나타내었다. 이는 HDPE의 밀도가 약 0.95 내외로서 LDPE(밀도 0.92내외)보다 큰 것에 기인한 것으로 사료된다. 밀도는 폴리에틸렌의 경화도 뿐 아니라 수지의 분자량도 알려준다. 일반적으로 밀도가 크다는 것은 전기적 특성으로 낮은 유전율과 높은 절연내력을 가진 것으로 이해된다.

4종의 PE 계열 절연재에 대해 15일간 수증기 투과시험을 실시하고 시간에 따른 중량을 측정한 결과, 시간에 따른 중량변화 및 이 변화를 토대로 한 수증기 투과율을 계산하여 그림 4와 그림 5에 각각 나타내었다.

수증기 투과율은 식(1)에 의해 계산되었으며, 시험시간에 따른 중량변화를 plot한 후 직선을 그어 기울기를 구하였다.

$$WVT = G/tA = (G/t)/A \quad (1)$$

여기서, G는 직선에서의 중량변화[g], t는 시간[h], 직선기울기[g/h], A는 시험접시 입구면적[m<sup>2</sup>], WVT는 수증기 투과율[g/h · m<sup>2</sup>]이다.

그림 4에 보인 바와 같이 시간의 경과에 따라 모든 시료에서 수증기 투과가 약간 증가하는 경향이 나타났다. 그림 4의 직선 기울기로부터 수증기 투과율을 계산하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 보인 바와 같이 수증기 투과율은 HDPE가 가장 낮아 수분침투 억제능력이 가장 우수한 것으로 판명되었다. 이 결과로부터 수증기 투과율은 재료의 밀도와 밀접히 관련되어 있음을 알 수 있었으며, 이에는 고분자 사슬 분자의 영향도 관여하고 있다고 추론되었다.

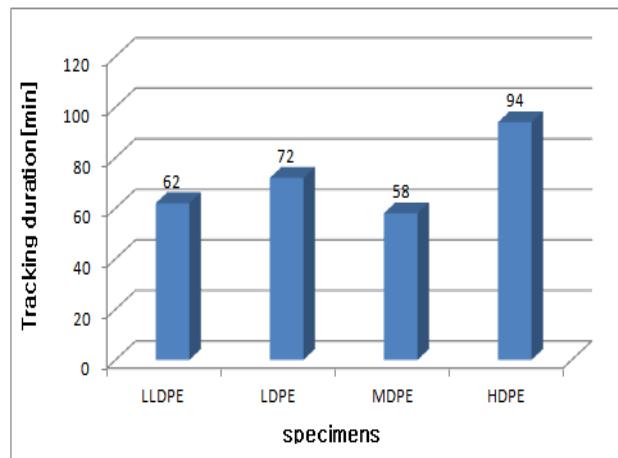


그림 3 트랙킹 지속시간

Fig. 3 Tracking resistance duration for specimens

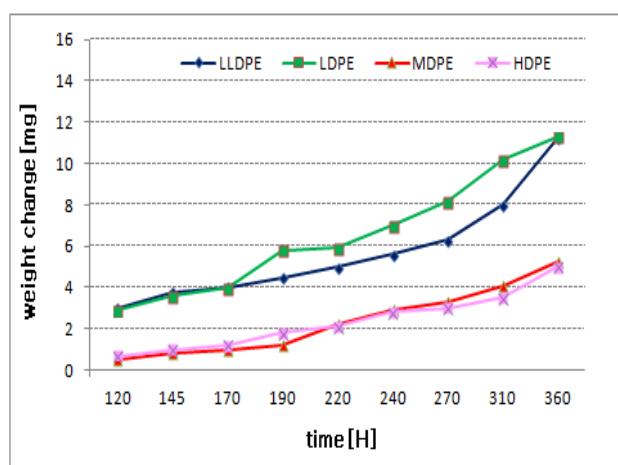


그림 4 15일 동안 시료의 중량변화

Fig. 4 Weight change for specimens(for 15 days)

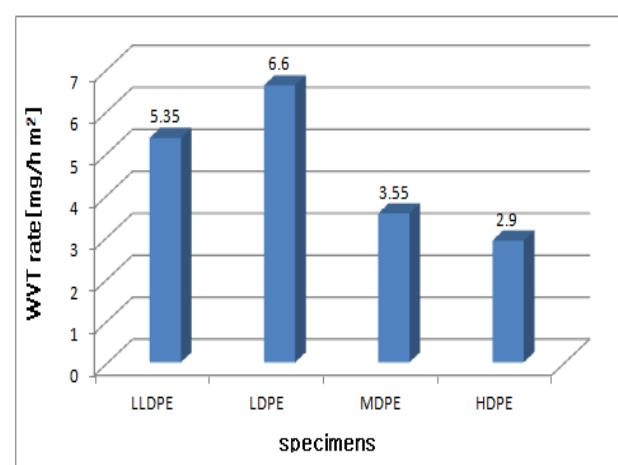


그림 5 수증기 투과율

Fig. 5 Water vapor transmittance rate for specimens

고분자 절연재의 마모에 의한 중량손실 및 동일시료에 대해 관통저항성을 측정한 결과를 그림 6과 그림 7에 각각 나타내었다.

마모저항성은 식(2)에 의해 계산되었다.

중량감소/회전수[mg/rev]

$$= (\text{시험전 중량} - \text{시험 후 중량}) / \text{회전수} \quad (2)$$

그림 6에 보인 바와 같이, LLDPE와 MDPE가 내마모 특성면에서 우수한 것으로 나타났으며, LDPE는 중량손실이 큰 것으로 나타났다. 이는 선형 고분자인 LLDPE와 MDPE가 인성이나 다른 기계적 특성에서 우수하기 때문인 것으로 생각된다.

또한 그림 7에 보인 바와 같이 관통 저항성은 MDPE와 HDPE가 비슷한 값을 보였으며, 이들은 LLDPE, LDPE보다 우수한 특성을 나타내었다. 이 또한 재료의 밀도와 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. LLDPE와 LDPE는 큰 차이를 나타내지 않았다.

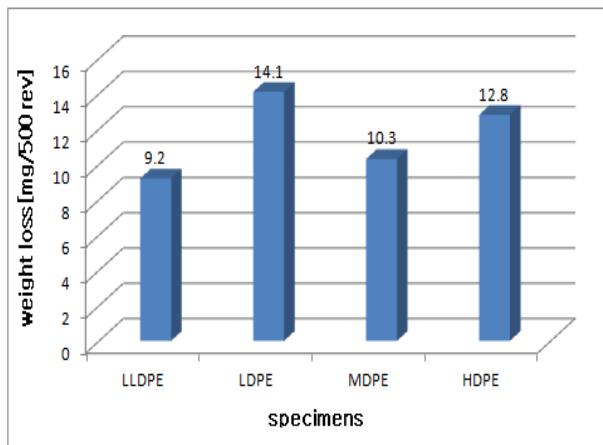


그림 6 마모에 의한 중량감소

Fig. 6 Weight loss for specimens by abrasion resistive test

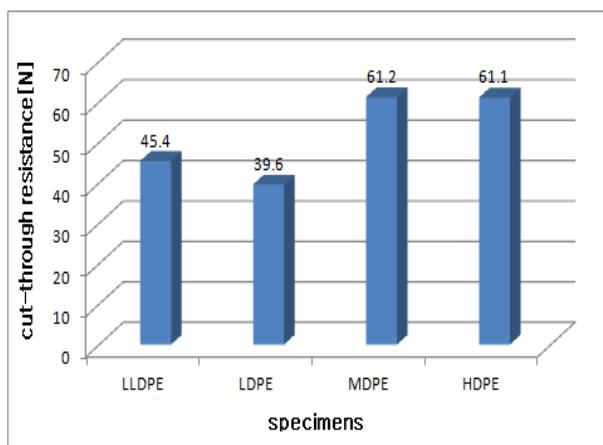


그림 7 관통 저항성

Fig. 7 The value of cut-through resistance for specimens

#### 4. 결 론

PE 계열의 시료 4종을 대상으로 시편을 제작하여 내트래킹성, 수증기 투과시험, 마모 및 관통 시험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내트래킹성 평가결과, PE 계열의 고분자 4종은 대략 70분 내외의 트래킹 지속시간을 나타내었으며, HDPE가 약 94분 정도로 가장 우수한 특성을 보였다.

2. 모든 시료는 시간이 경과함에 따라 수증기 투과가 약간 증가하는 경향이 나타났으며, 그 중 HDPE가 가장 낮은 수증기 투과율을 나타내었다. 이는 재료의 밀도와 깊은 연관성이 있는 것으로 사료된다.

3. 고분자 절연재의 마모에 의한 중량손실 및 동일시료에 대해 관통저항성을 측정한 결과, LLDPE와 MDPE가 내마모 특성면에서 우수한 것으로 나타났으며, LDPE는 중량손실이 큰 것으로 나타났다. 이는 선형 고분자인 LLDPE와 MDPE가 인성이나 다른 기계적 특성에서 우수하기 때문인 것으로 생각된다. 또한, MDPE가 가장 우수한 관통저항성을 나타내었으며, LLDPE와 LDPE는 큰 차이를 나타내지 않았다.

#### References

- [1] Polymeric composite based on waste material for high voltage outdoor application, Aminudin Amana, Mohd Muhrizda Yaacob, Malik Abdulrazzaq Alsaedib, Khairul Anwar Ibrahim, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 45, Issue 1, Pages 346 - 352, February 2013.
- [2] M. S. Naidu, V. Kamaraju, High voltage engineering, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2009.
- [3] M. Z. A. Ab Kadir, I. Cotton, Application of the insulator coordination gap models and effect of line design to backflashover studies, Int J Electr Power Energy Syst., 32, pp. 443 - 449, 2010.
- [4] Park Jong-keun, Roh Sam-kew, Seo Young-min, 'A Study on the Risk Assessment System of the Underground Space', T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol. 16, No. 2, pp.70-74, 2002.
- [5] Water and Disaster management Bureau, 'Guidelines underground inundation measures', Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan, 2000.
- [6] J. S. Lee, 'Natural Disaster Comprehension', Goomibook, Seoul, Korea, 2004.
- [7] Doo-hyun Kim, Dong-kyu Kang, Jong-ho Lee, 'Hazard Assessment by Electric Shock both on the Ground and in the Water', Korean Society of Safety, Vol.19 No.2, 2004.
- [8] J.E. Bridges et. al, Electrical Shock Safety Criteria, Pergamon Press Inc., pp.45-57, 1985.
- [9] Standard Test Methods for Water Vapor

Transmission of Materials, ASTM E96-00, vol. 04.  
06, Nov. 2000.

- [10] Standard Test Method for Coated Fabrics Abrasion Resistance (Rotary Platform, Double-Head Abrader),  
ASTM D3389-94(1999), Vol. 09.02, Aug. 2000.

## 저 자 소 개



**송 우 창 (宋禹昌)**

1990년 성균관대 전기공학과 졸업, 1992년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(박사), 2010년~현재 강원대학교 공학대학 전기공학과 조교수

Tel : 033-570-6348

Fax : 033-574-7270

E-mail : wcsong@kangwon.ac.kr



**최원석 (崔源錫)**

1998년 성균관대 전기공학과 졸업, 2001년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(석사), 2006년 성균관대 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학과 졸업(박사), 2006년~2007년 플라즈마 응용 표면기술 연구센터 박사후연구원, 2007년~현재 한밭대학교 정보기술대학 전기공학과 부교수

Tel : 042-821-1754

Fax : 042-821-1088

E-mail : wschoi@hanbat.ac.kr



**박하용 (朴河鎔)**

1979년 숭실대 전기공학과 졸업, 1982년 동국대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2001년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1985년~1991년 삼척공업전문대학 전기과 교수, 1991년~2006년 삼척대학교 공과대학 전기공학과 교수, 2007년~현재 강원대학교 공학대학 전기공학과 교수

Tel : 033-570-6342

Fax : 033-574-7270

E-mail : hivol5652@kangwon.ac.kr