

교류 코로나 방전시 주파수 변화에 따른 전기유체역학적 특성

(Electrohydrodynamic Characteristics of AC Corona Discharge for the Frequency)

정재승* · 김진규**

(Jae-Seung Jung · Jin-Gyu Kim)

Abstract

In this paper, EHD(electrohydrodynamics) characteristics of AC corona discharge for the various frequency was investigated. Ionic wind velocity is controlled by the frequency of applied ac high voltage, and maximum velocity of the ionic wind is obtained at 1.2kHz. Maximum velocity are 1.90 m/s by metal corona electrode and 2.72m/s by wet porous corona electrode, These attain 91~99% of the maximum velocity in the DC corona discharge by adjusting the frequency through the experiments. In this paper, wet porous corona electrode has high possibility of cooling method because a AC corona discharge using wet porous corona electrode is able to eject more water droplets than DC corona discharge.

Key Words : Ionic wind, Corona Discharge, Electrohydrodynamics, Adjusting Frequency

1. 서 론

코로나 방전은 그 과정에서 다양한 물리화학적 반응을 일으킬 수 있어 이를 다방면 산업분야에 응용할 수 있다. 그러나 실 적용 되고 있는 것은 전기집진기, 오존 발생장치 등의 오염방지장치나 반도체 공정 등의 일

부 국한되어 적용되고 있으며 산업분야 전반으로의 기여도가 미미한 상황이다. 근래에 들어 불평등 전계에 의한 코로나 방전의 전기유체역학적(electrohydrodynamic, EHD) 특성을 냉각, 송풍, 운송 장치 등에 응용하기 위한 연구가 다양하게 수행되고 있다 [1-4].

코로나 방전을 이용한 전기에너지를 물리에너지로의 변환하는 경우 전동기와 달리 기계적 회전부분이 없어 이에 의한 기계적 마모와 소음이 없는 장점을 가지고 있으나[2-4], 아직까지는 코로나 방전에 의한 EHD 발생특성에 대한 연구가 미비하여 전동기와 같이 정밀 제어가 불가능한 실정이다.

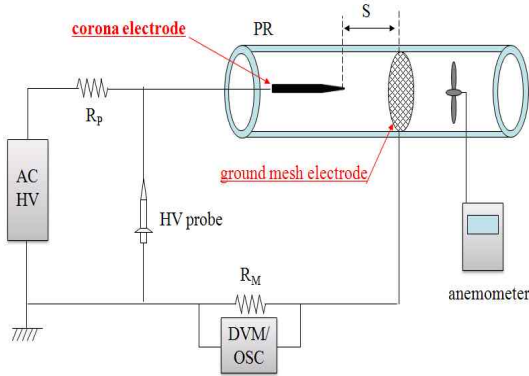
불평등전계 형성이 가능한 전극구조인 침전극대 평판전극 구조를 이용한 EHD 발생장치의 경우, 금속침 또는 다공성 수침을 코로나발생 전극으로 이용

* 주저자 : 경북대학교 전기공학과 박사
** 교신저자 : 경북대학교 전기공학과 교수
* Main author : Ph D., Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University
** Corresponding author : Professor, Department of Electrical Engineering, Kyungpook National University
Tel : 054-530-1326, Fax : 054-530-1239
E-mail : kjg@knu.ac.kr
접수일자 : 2012년 11월 8일
1차심사 : 2012년 11월 10일
심사완료 : 2012년 11월 29일

한 EHD 발생장치의 특성 연구가 수행되고 있지만 [4-5], 직류 코로나 방전에 의한 연구만 주로 수행되었을 뿐 교류 코로나 방전에 의한 EHD 특성에 관한 연구는 미비한 상황이다. 따라서 본 연구는 교류 코로나 방전에 의한 EHD 특성 제어를 위한 기초 연구로써 방전전극으로 사용된 금속침과 다공성 수침전극을 제작 설치하고, 전극의 종류와 주파수 변화가 EHD 발생 특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 본 실험에 사용한 실험장치의 개략도이다. 직경이 25mm인 아크릴관의 내부에 코로나 전극과 그물형 접지 전극으로 구성된 코로나 방전장치, 이온풍을 측정하기 위한 프로브를 장치하여 실험 챔버 내에 설치하였다. 코로나 전극으로는 구리 재질의 금속전극과 도전성 액체(도전유, $200\mu\text{S}/\text{cm}$)를 주입한 다공성(다공율, 35%) 재질의 전극을 사용하였다. 그물형 접지전극은 지름이 0.18mm SUS 메쉬형으로 구성되어 있으며, 전극 지름은 25mm, 그물눈의 크기는 $1.4 \times 1.4\text{mm}^2$ 이다. 코로나 전극과 접지전극 간의 방전간격(airgap spacing, S)은 15.0mm로 고정하였다.



ACHV: AC HV supply DVM/OSC: digital voltmeter/oscilloscope
 PR: plasma reactor RM: measurement resistors
 RP: protection resistor S: airgap spacing

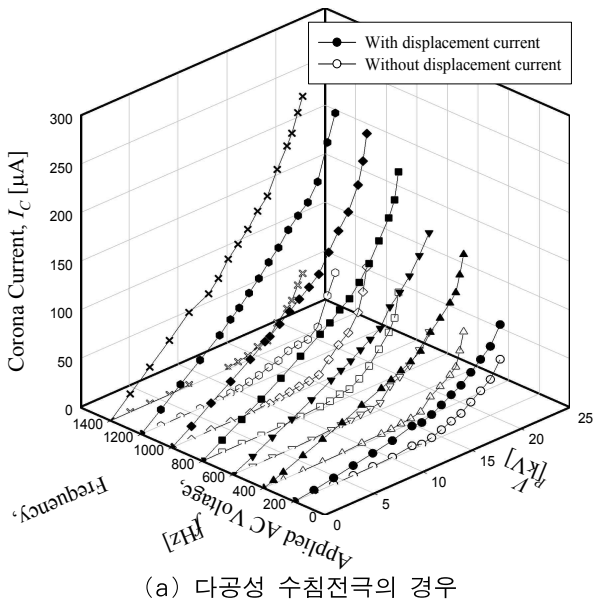
그림 1. 실험장치 개략도
 Fig. 1. Schematics of the experimental setup

인가 전압원으로 주파수 변조가 가능한 교류 고전압 전원을 사용하였고, 고전압 프로브(Tektronix P6015A, 1000 : 1), 측정저항, 디지털 멀티미터(Fluke 75, DVM), 오실로스코프(Tektronix, TDS 3034B)를 이용하여 코로나 전극에 인가된 고전압과 접지전극에서의 방전전류를 측정하였다. 발생한 이온풍속은 접지전극 후방 35mm인 지점에 설치된 팬 형식의 기계식 센서를 통하여 풍속계(Mini Vane YK-80AS)를 이용하여 측정하였다.

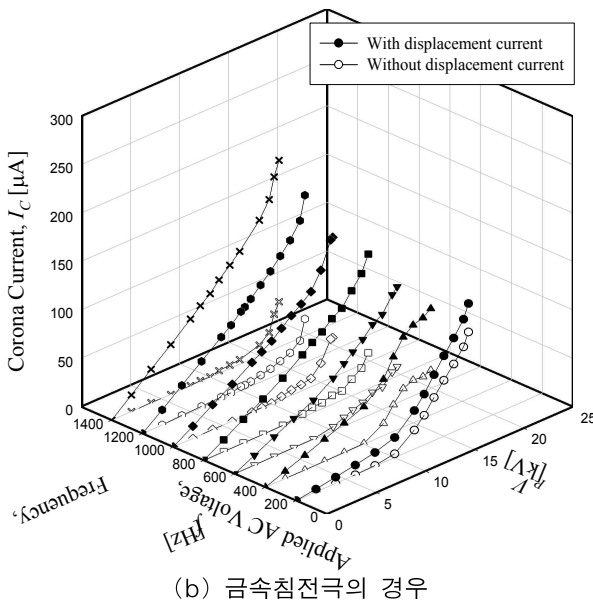
3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 인가되는 교류 고전압의 주파수(f)의 변화에 따른 코로나 방전 전류-전압 특성을 나타낸다. 코로나 전극에 인가되는 교류 전압의 주파수가 증가하면 방전 공간의 정전용량에 의해 흐르는 변위전류의 증가로 인하여 직류 코로나 방전에 비하여 방전 전류가 크게 증가하는 특성을 보인다. 코로나 전류는 인가되는 교류 전압의 주파수가 증가함에 따라 동일한 인가전압에서 보다 큰 코로나 전류를 보이며, 이는 방전장치에 전달되는 에너지가 크게 증가함을 나타낸다[6]. 주파수가 증가할수록 이온이 움직일 수 있는 거리는 감소하고, 결국 방전 공간 내에 포착된다. 주파수가 증가할수록 포착되는 이온들은 더욱 증가하고 자유행정거리가 길어짐에 따라 충돌전리확률을 증가시켜서 아크방전으로 쉽게 이행된다. 그러므로 인가되는 교류전압의 주파수가 증가할수록 절연 파괴전압이 감소한다[6]. 다공성 수침전극을 이용한 경우에는 주파수가 200Hz에서 1,200Hz로 증가할 때, 21.5kV에서 19.8kV로 절연파괴전압이 감소되었고, 금속침전극의 경우에는 17.6kV에서 16.5kV로 감소하였다.

전체 교류 코로나 전류에서 변위전류를 제거하면 일반적인 직류 코로나 방전 전류-전압 특성과 유사한 특성이 나타난다. 다공성 수침전극과 금속침전극을 이용한 코로나 방전의 방전전류는 인가되는 교류 고전압의 주파수 증가에 따라 서로 상반되는 특성을 나타낸다. 다공성 수침전극을 이용한 경우, 주파수가 증가함에 따라 코로나 전류도 증가하지만, 금속침전극의



(a) 다공성 수침전극의 경우



(b) 금속침전극의 경우

그림 2. 교류 코로나 방전시 전류-전압 특성
Fig. 2. I-V characteristics for the AC corona discharge

경우에는 주파수가 증가함에 따라 코로나 전류가 감소한다. 이는 그림 2에서 다공성 수침전극을 이용한 경우가 금속침전극의 경우에 비하여 더 큰 코로나 전류가 나타난 것과 같이 동일한 이유인 것으로 사료된

다. 즉 다공성 수침전극에서 방출되는 하전된 수적의 이동에 의한 전류가 원래 코로나 전류와 같이 측정되기 때문이며, 주파수가 증가할수록 더 많은 수적이 방출되었음을 나타낸다.

그림 3은 수침에서 방출된 수적이 집지전극 상에 남긴 흔적이다. 교류 코로나의 경우에는 정 및 부극성 코로나 방전이 교번하는 특성에 의하여 아주 미세한 수적과 상대적으로 큰 수적이 번갈아가며 방출되지만, 교류전압의 주파수가 증가할수록 동일한 시간에 더 많은 양의 수적이 방출되어 그 방출특성을 확인하기 어려워진다. 직류 코로나 방전시의 수적 방출은 주로 전계에 의해 가속된 전자나 이온이 수침전극 표면의 수막에 충돌함으로 나타난다. 하지만 교류 코로나 방전시의 수적 방출은 주파수에 따라 그 특성이 달라진다. 낮은 주파수에서는 주로 직류 코로나 방전 시처럼 전자, 이온의 충돌에 의해 수적이 방출되지만, 주파수가 증가함에 따라 변위전류에 의한 방전공간으로의 에너지 공급이 증가하므로 이에 의하여 발생하는 열에 의하여 수침 전극 표면에서의 수분 증발량이 커진다. 이에 의한 수적의 공급이 증가하기 때문에 높은 주파수에서는 직류 코로나 방전이나 낮은 주파수의 교류 코로나 방전 시에 나타나는 수적이 특성이 잘 나타나지 않게 되는 것으로 사료된다.

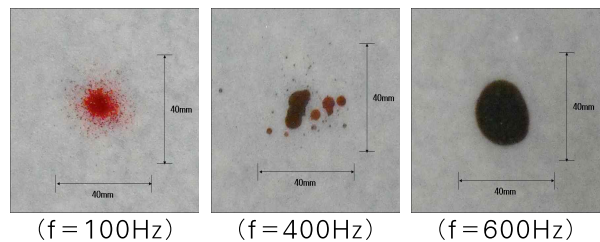


그림 3. 수침전극에서 방출된 수적의 흔적
Fig. 3. Trace of the water droplets ejected from wet porous point electrode

그림 4는 인가되는 교류 고전압의 주파수 변화에 따른 이온풍속의 변화 특성을 나타낸다. 주파수가 증가함에 따라 코로나 방전의 세기도 변화하므로 주파수의 변화가 이온풍속에 영향을 주게 된다. 이는 인가되

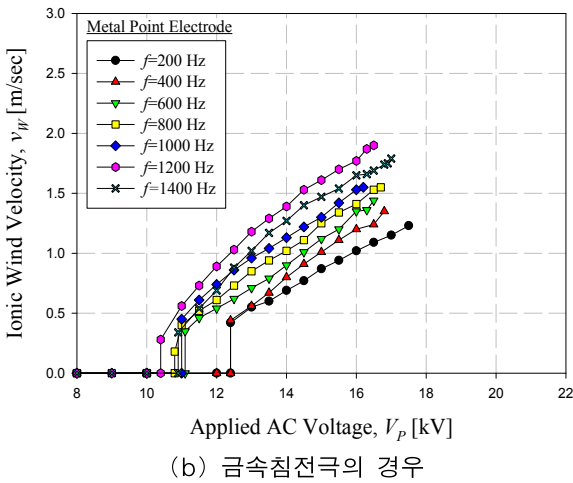
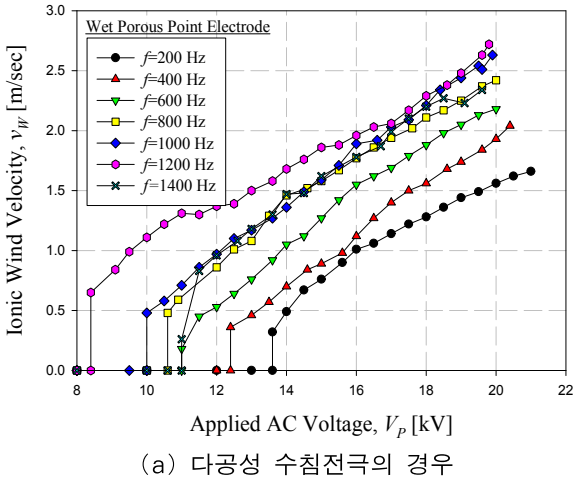


그림 4. 교류 코로나 방전시 이온풍속 특성
Fig. 4. Ionic wind velocity characteristics for the AC corona discharge

는 교류전압의 주파수가 증가함에 따라 이온의 가속 및 이동 거리가 전계의 방향 변화에 따라 바뀌기 때문이다. 이온이 인가전압의 주파수의 변화에 따라 이동할 수 있는 거리, x_i 는 다음의 식 (1)에 의해 구할 수 있다[5].

$$x_i = \frac{\mu_i E}{\omega} \sin \omega t \quad (1)$$

여기서 μ_i 는 이온의 이동도, ω 는 인가전압의 주파

수에 의한 각속도이다. 정극성 이온의 이동도는 $1.32 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$, 부극성 이온의 이동도는 $2.11 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{sec}$ 이므로, 위의 식에 의하면 이온들의 이동거리는 $f=200 \sim 1,400 \text{ Hz}$ 의 경우에는 $14.0 \sim 4.6 \text{ cm}$ 정도로

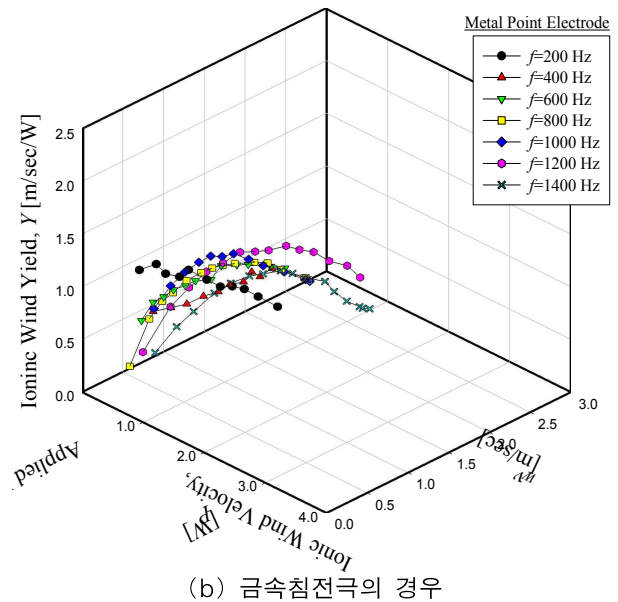
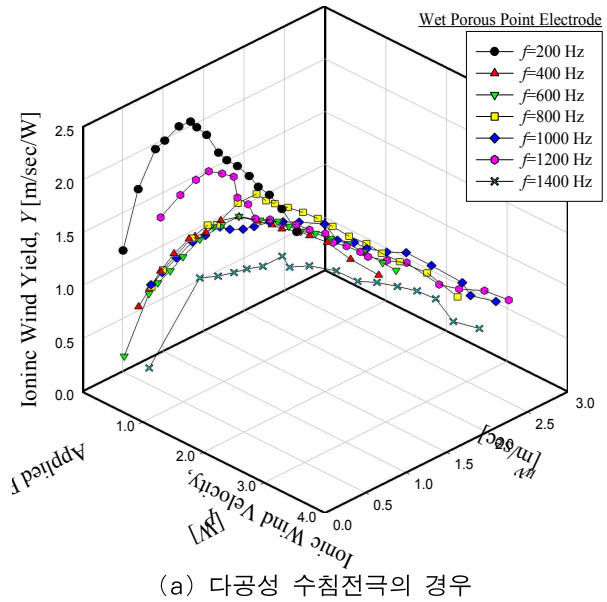


그림 5. 인가전력에 따른 이온풍속 및 발생이득 특성
Fig. 5. Ionic wind velocity and yield characteristics as function of frequency of the applied power

실험에 사용한 방전전극간 거리인 15mm보다 크므로 단방향의 이온풍이 발생한다. 인가되는 교류 전압의 주파수가 증가할수록, 그림 2에 나타난 것처럼 절연파괴전압이 감소하므로 인가할 수 있는 최대 전압은 감소한다. 하지만 변위전류가 증가하여, 방전장치에 전달되는 에너지가 증가하므로 코로나 전극에서 생성되는 이온의 양도 증가하게 된다. 따라서 인가전압의 주파수가 증가할수록 이온풍속은 증가한다. 코로나 전극의 종류에 관계없이 주파수가 1,200Hz일 때, 최대 이온풍속을 얻을 수 있으며, 다공성 수침전극의 경우에는 $v_w=2.72\text{m/s}$, 금속침전극의 경우에는 $v_w=1.90\text{m/s}$ 의 최대 이온풍속을 얻을 수 있다. 이는 다공성 수침전극을 이용하였을 경우에 얻을 수 있는 최대 이온풍속인 $v_w=2.74\text{m/s}$, 금속침전극을 이용하였을 경우에 얻을 수 있는 최대 이온풍속인 $v_w=2.09\text{m/s}$ 에 근접한 이온풍속을 얻을 수 있었다. 특히 다공성 수침의 경우 그 증가폭이 상대적으로 더 크게 나타났으며 이는 수적 발생량의 증가에 의한 것으로 사료된다.

그림 5는 인가전력-이온풍속-이온풍 발생이득 특성 곡선이다. 이온풍 발생이득은 인가전력과 이온풍속이 증가함에 따라 증가하여 최대값에 도달한 이후 다시 감소하는 특성을 보여준다. 다공성 수침전극을 이용한 경우에는 전반적으로 최대 이온풍속의 약 60%정도의 이온풍속에서 최대 발생이득을 나타냈다. 하지만 금속침전극을 이용한 경우, $f=200\text{Hz}$ 에서는 최대 이온풍속의 약 45%정도의 이온풍속에서 최대 발생이득을 나타내었지만 주파수가 증가함에 따라 최대 발생이득이 나타나는 이온풍속이 증가하여 $f=1,200\sim 1,400\text{Hz}$ 에서는 최대 이온풍속의 약 80%정도에서 최대 발생이득이 나타났다. 이는 그림 2에 나타난 것처럼 금속침전극의 경우에는 주파수가 증가할수록 방전에 의한 코로나 전류는 감소하기 때문에 이온풍속의 증가량에 비해 인가전력의 증가량이 상대적으로 작기 때문으로 사료된다. 다공성 수침전극을 사용한 경우, 다량의 하전된 수적이 발생하기 때문에 금

속침전극에 비하여 동일한 조건에서 이온풍속과 이온풍 발생이득이 더 크게 나타난다. 금속침전극을 사용한 경우의 최대 이온풍속이 나타나는 $f=1,200\text{Hz}$, $VP=16.5\text{kV}$ 에서 다공성 수침전극을 사용하면 최대 이온풍속은 약 7%, 이온풍 발생이득은 약 15% 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 교류 코로나 방전시 주파수 변화에 따른 전기유체역학적 특성을 실험적으로 연구하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

코로나 전극에 인가하는 교류 전압의 주파수를 조절함으로써 이온풍속을 제어할 수 있으며, 주파수의 제어를 통하여 증가시킬 수 있는 이온풍속은 직류 코로나 방전에 의한 최대 이온풍속의 99%(다공성 수침전극 사용시), 91%(금속침전극 사용시)에 이르는 이온풍속을 얻을 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

다공성 수침을 사용한 경우, 코로나 전극에서 전자, 이온 충돌에 의한 수적이 수침 표면에서 방출된다. 교류 코로나 방전시 방출된 수적은 정 및 부극성 직류 코로나 방전이 교번하는 특성에 의하여 아주 미세한 수적과 상대적으로 큰 수적이 교번하여 방출되지만, 주파수가 증가할수록 전자, 이온 충돌에 의한 수적 방출뿐만 아니라 공급전력에 의한 열 증발에 의한 방출이 증가하므로 극성에 의한 방출특성이 잘 나타나지 않는다.

다공성 수침전극 이용시 직류 코로나 방전에 비해 동일 이온풍속에서 다량의 수적을 발생시켜 내포할 수 있으므로 보다 효율적인 냉장장치로서의 가능성을 가진다. 따라서 본 연구결과를 바탕으로 향후 연구에서 교류 코로나 방전시의 EHD 특성 연구를 통하여 교류 고주파 방전에 대한 이온풍 냉각장치에 대한 연구를 추가적으로 수행함으로써 고효율의 EHD 발생장치로서의 성능향상이 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] Rafika Mestiri, Ramzi Hadaji, Sassi Ben Nasrallah, The electrical discharge as a source of a mechanical energy, Desalination 220, pp. 468-475, 2008.
- [2] Matthew Rickard, Derek Dunn-Rankin, Felix Weinberg, Fred Carleton, Maximizing ion-driven gas flows, Journal of Electrostatics, 64, 368-376, 2006.
- [3] E. Moreau, G. Touchard, Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharge, Journal of Electrostatics, 66, pp. 39-44, 2008.
- [4] Jae-Duk Moon, Jae-Seung Jung, Jin-Gyu Kim, Sang-Taek Geum, An EHD Gas Pump Utilizing a Wet Porous Point Electrode, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 16, 3, pp. 622-628, 2009.
- [5] Choon-Saing Jhoun, Electrical discharge and high voltage engineering, Dongmyungsa, 2003, pp. 22-149.
- [6] M. Tanski, M. Kocik, J. Mizeraczyk, Electrohydrodynamic gas pump with both insulated electrodes driven by DBD discharge, Proceedings of 7th Conference of the French Society of Electrostatics, pp. 351-354, August-September 2010.

◆ 저자소개 ◆



정재승 (鄭在勝)

1979년 4월 14일생, 2004년 경북대학교 공대 전자전기공학부 졸업. 2007년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 경북대학교 대학원 전자전기 컴퓨터학부 졸업(박사).



김진규 (金振圭)

1967년 2월 24일생. 1990년 경일대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1994년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 경북대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 경북대학교 전자전기 공학부 BK21조교수. 2001~2008년 상주대학교 전자전기공학부 부교수. 2008년~2012년 경북대학교 산업전자전기공학부 부교수. 2012년~현재 경북대학교 IT대학 전기공학과 교수.