
오존발생기 구동장치의 주파수제어에 관한 연구

최 규 남*

Frequency control method of ozonator power supply

Kyoo-Nam Choi*

요 약

선박내 공기정화나 음료수 살균용으로 제작된 세라믹 방전판 상하면에 패턴된 전극간에 일어나는 연면 코로나 방전을 이용한 오존발생기 구동장치의 주파수제어 특성에 대하여 분석하였다. 고압변압기의 2차측 권선 자체의 인덕턴스와 세라믹 방전판 전극 자체의 용량간의 공진도를 주파수제어를 통하여 제어하여 최고 5 배의 전류제어범위를 실현하였다. 기존의 전압제어 및 단속제어방식에 비하여 주파수제어 방식은 28 mg/W 의 오존발생 효율과 40% 의 입력전압 변동에 대하여 3.4 % 이내의 방전전류 안정도를 갖는것으로 측정되었다.

Abstract

The characteristics of ozone generator targeted for air or water sterilizing in the vessel utilizing the surface corona discharge between the electrodes on the ceramic substrate was investigated by using the frequency control method. The frequency control was achieved by controlling the degree of resonance between the secondary winding inductance of transformer and the electrode capacitance of ceramic discharge plate, and the range of control was found to be 5 times of discharge current. This frequency control method showed the efficiency of 28 mg/W ozone generation and the stability within 3.4 % when the input voltage was varied within 40% range. The frequency control method is regarded to be more efficient way of corona discharge control compared to the conventional on/off control or voltage control methods.

* 終身會員, 仁川專門大學 工學部 通信科(인천전문대학 공학부 통신과)
접수일자 : 1999년 9월 30일

I. 서 론

선박내 밀폐된 선실의 공기 및 음료수는 악취와 세균의 번식 가능성이 높아 오존에 의한 악취 제거 및 살균법이 선호되고 있다. 이러한 소용량 오존발생기용 연면코로나 방전을 위하여는 세라믹(Ceramic) 판이나 유리와 같은 유전체의 양면에 박막증착 또는 후막인쇄법을 이용하여 전극을 형성한 후 여기에 고전압을 인가하여 연면코로나방전을 시키는 방법이 사용된다. 이러한 연면코로나방전을 위하여 필요한 전압은 유전체의 재질과 두께에 따라 다르지만 일반적으로 일반볼트 이상의 고전압이 필요하게 된다. 이러한 교류 고전압을 발생시키기 위하여 종래에는 고압변압기[1] 사용되어 왔으나 2차측 권선의 절연을 유지하기 위하여는 부피가 크고 무거워 소형기기에 내장하여 상용화하기에 어려웠다. 또한 구동주파수가 고압트랜스의 1차측 권선에 인가되는 주파수와 같으므로 제약요인이 되었다. 이러한 구동주파수를 높여서 방전효율을 높이는 방법으로 상용 교류전원을 정류하여 직류로 변환시킨 후 SCR[2]을 높은 주파수로 단속시키는 주파수변환기를 거친후 고압트랜스의 1차측 권선에 인가하는 방법이 사용되었다. 그러나 SCR은 직류에서는 한번 도통된후는 회로를 끊기 위해서는 인가전압의 극성을 반전시켜야 하므로 제어회로가 복잡해지는 단점이 있고 주파수가 높아져 변압기의 부피가 줄어들 수 있지만 여전히 큰 권선비가 요구되었다. 고압트랜스의 권선비를 줄이기 위하여 Switching Inverter가 구동하는 고압트랜스의 일차측 권선과 직렬로 인덕터 및 콘덴서를 연결[3]하여 직렬공진을 유도하거나 고압트랜스의 2차측 권선에 병렬로 콘덴서를 연결[4]하여 병렬공진을 유도하는 방법이 사용되었다. 그러나 이러한 방법에서는 직렬 또는 병렬로 연결된 인덕터 및 콘덴서가 전력을 소모하여 변환효율이 낮은 단점이 있었다.

한편, 안정된 연면코로나 방전을 지속적으로 발생시키기 위하여는 방전전류를 안정적으로 일정하게 유지시켜 주는 것이 필요하다. 종래에는 방전전류가 설정된 값을 초과하면 Switching Inverter의 발진이 중단되고 방전전류가 감소되면 다시 발진이 계속되는 단속제어 방법[4]이 사용되었다. 그러

나 이러한 방법은 평균적으로는 적정 방전전류로 보이지만 순간적으로는 과방전 전류가 흐르므로 연면코로나방전을 발생시키는 방전판의 수명을 단축시킬 수 있었다. 또한 Switching Inverter[5-7]와 직류전원 사이의 저항값을 제어하여 적정 방전전류를 유지하는 방법[8]이 사용되었다. 그러나 이러한 방법은 전원장치의 공급전압과 출력전압 사이에 직류전압 조정에 필요한 전압차 이상의 차이가 있어야 하므로 전압제어회로에서 필연적으로 과도한 열을 발생시키는 단점이 있고 넓은 범위에 걸쳐서 방전전류를 제어하기 위해서는 넓은 범위에 걸쳐서 직류전압을 조정하는 것이 필요하나 내압이 40볼트 정도인 Bipolar Transistor를 사용한 일반적인 정전압회로로는 구현이 어려우며 따라서 회로가 복잡해지는 단점이 있었다.

결국, 종래 기술에 의한 오존발생기용 전원장치는 변환효율이 낮으며 따라서 고압트랜스의 권선비를 획기적으로 낮추기 어려운 문제점이 있고 방전전류를 정밀하게 조정하며 안정적으로 유지시키기 어려운 문제점이 있었다. 본 논문에서는 상기와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 세라믹 방전판 자체의 용량과 고압트랜스의 2차측 권선 자체의 인덕턴스간의 직렬공진을 이용하여 고효율로 오존을 발생시키며 주파수제어를 통해 방전전류를 안정적으로 유지시켰다.

본 논문의 구성은 2장에서는 연면코로나 방전에 대하여 논하고 3장에서는 실험장치 및 실험방법에 대하여 논하였고 4장에서는 실험결과 및 고찰, 마지막으로 5장에서 결론으로 끝맺었다.

II. 연면코로나 방전

공기중의 방전은 비자속방전인 암류와 코로나방전, 불꽃방전, 아크방전으로 세분되는 자속방전으로 세분된다. 오존발생에 관계되는 코로나방전은 전극사이에 전계가 강한 국부만이 절연파괴되어 발광하는 방전을 말하며 다시 glow 코로나방전, 부라쉬코로나방전, 스트리이마코로나방전으로 나뉘어진다. 방전이 코로나의 상태를 안정하게 지속하는지 여부는 회로의 상황 특히 전계에 전적으로 의존하며, 전극의 형상, 크기 및 전극사이의 거리

등에 영향을 받는다. 전극에 전압을 인가하여 그 값을 점점 올려갔을때 아크방전이 일어나기전에 코로나가 발생하는 조건으로서는 첫째 전계의 분포가 심하게 불균일하여야 하며, 둘째 코로나의 발생에 의하여 최대전위경도의 값이 감소하여야한다. 첫째 조건은 국부적인 전리현상이 생기기 위하여 필요한 조건이며 두번째 조건은 코로나가 안정되게 존재하기 위하여 필요한 조건이다.

일반적으로 고체유전체의 표면에 접하고 있는 공기는 공기만이 단독으로 전극사이에 있는 경우에 비하여 낮은 전위경도에서 방전이 일어나게된다. 평행판 전극 간격을 d cm, 판상고체유전체의 두께를 t cm, 비유전율을 ϵ_r 이라고 하면 공기부분이 받는 전기적 스트레스 X_a 와 고체유전체가 받는 전기적 스트레스 X_r 는 다음과 같다.

$$X_a = \frac{V}{d - t \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r}\right)} = \frac{V}{\frac{t}{\epsilon_r} + (d - t)} = \frac{\epsilon_r V}{(d - t)\epsilon_r + t} \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (1)$$

$$X_r = \frac{v}{(d - t)\epsilon_r + t} \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (2)$$

이식에서 X_a 와 X_r 를 비교하여 보면 고체유전체의 비유전율은 $\epsilon_r > 1$ 이므로 $X_a > X_r$ 이며, 일반적으로 고체유전체의 절연내력이 공기의 절연내력보다 크므로 공기부분의 절연이 먼저 파괴되어 코로나방전이 발생되게된다. 연면코로나 방전에서는 그림 1(a)와 같은 대향 전극 구조에서 공기중에서 방전이 일어날때는 그림 1(b)와 같은 수직방향으로만 방전이 일어나는 등가 전극으로 생각할 수 있

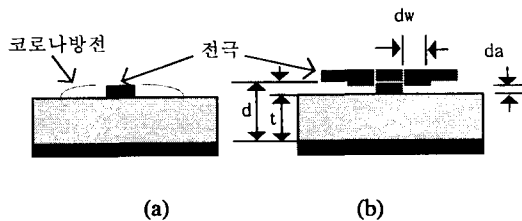


그림 1. (a) 대향전극 구조, (b) 등가 세라믹방전판 구조
Fig. 1. (a) Electrode structure, (b) Equivalent ceramic discharge plate structure

다. 여기서 공기의 최대간극 $d - t$ 는 방전불꽃의 길이와 같게되며 방전불꽃의 길이가 얼마나 진행되는가는 전극간에 인가되는 전압과 비례하게된다.

III. 실험장치 및 실험방법

방전판은 표 1과 같은 사양으로 세라믹(Ceramic) 판 위에 방전전극을 후막인쇄법을 이용하여 인쇄 후 소성하고 납땀용 터미널을 인쇄 후 소성하였다. 방전시 표면전극의 소모를 줄이기 위하여 Glass Paste 를 20 mm 두께로 Terpeneol 를 용제로 사용하여 인쇄 후 580oC로 60분간 소성하였다. 그림 2에 방전판의 외부규격을 나타내었다. 연면코로나방전 발생은 세라믹 방전판에 고압 교류전압을 인가하는 방법을 사용하였다.

표 1. 방전판의 재질

Table 1. Material characteristics of discharge plate

구분	상수
방전판 기판재료	Alumina 99.5%
Volume Resistivity	1014 ohm-cm
Dielectric Strength	7.9 kV/mm
상대유전계수	9.8
상부전극 폭	1 mm
상부전극 길이	27 mm
하부전극	평면
전극두께	50 mm

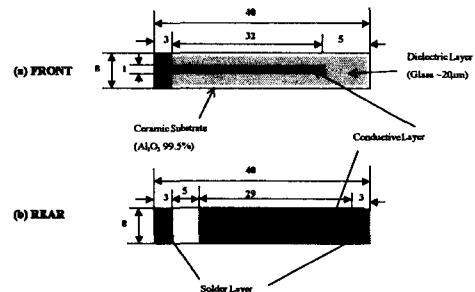


그림 2. 방전판의 외부규격
Fig. 2. Dimensions of discharge plate

방전에 필요한 교류 고전압을 발생시키기 위하여, 상용교류전압을 Triac을 이용한 정전압장치를 통한후 정류하여 직류전압을 공급하고 그림 3과 같이 MOSFET 전력용 스위칭소자를 이용한 Half Bridge 인버터회로를 사용하여 고주파로 순차적으로 단속시켜 고압변압기의 1차측 권선에 인가하였다. 이때 Inverter의 Switching 주파수는 임으로 조정할 수 있게 하였다.

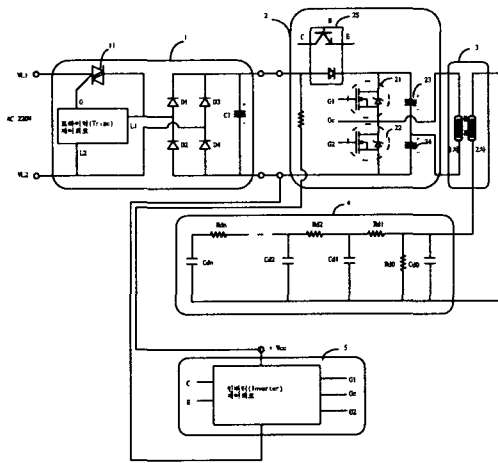


그림 3. 고압발생용 인버터 블록도
Fig. 3. Block diagram of high voltage inverter

측정방법은 고압변압기의 2차측 권선의 Inductance와 연면코로나 방전용 방전판의 전극간 용량으로 결정되는 공진주파수의 분수배에 해당하는 주파수를 switching 주파수로 하여 변화시키면서 공진점을 찾았다. 코로나 방전은 극히 불안정한 상태의 방전이므로 방전의 안정화를 위하여 Inverter의 Switching 소자에 흐르는 전류를 검출한 후 평활하여 직류로 만들고 이를 전압제어발진기(VCO)에 인가하여 Switching 주파수를 제어하는 방법을 사용하여 방전전류를 제어하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

VCO를 disable 로 설정하고 Switching 주파수를 변화시키면서 방전전류의 변화를 측정하여 방전특성을 살펴보았다. 그림 4에 측정된 발진주파수와

방전전류와의 관계를 보이고 있다. 공진특성은 26 kHz와 46 kHz 부근에서 최고치를 보이고 주파수가 증가하면 최고치가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 고압변압기의 주파수특성이 높은 주파수대에서는 저하하는 요인에도 기인하는것으로 생각된다. 두개의 공진주파수가 정확히 배수가 되지 않는 이유는 코로나방전이 개시되면 불꽃면적과 실제 전극의 면적이 합하여져서 공진주파수를 변화시키기 때문으로 생각할 수 있다. 이는 그림 3에 4로 나타내어진 방전판의 코로나방전시 등가회로를 생각하면 해석될 수 있다. 그림 3에서 C_{d0} 는 방전판 자체의 정전용량이고 R_{d0} 는 유전체의 도전율이다. 코로나 방전이 진전되면 방전범위에 따라서 추가로 전극의 좌측으로는 불꽃저항 R_{dn} 과 불꽃으로인한 추가정전용량 C_{dn} 이 불꽃의 범위에 걸쳐서 무한히 잘게 나뉘어져 분포되어있고 전극의 우측으로도 같이 분포되어 있는것으로 해석될 수 있다.

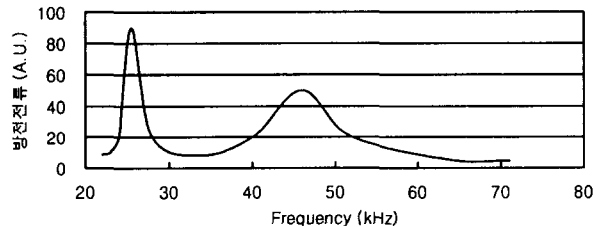


그림 4. 발진주파수와 방전전류와의 관계
Fig. 4. Relationship between switching frequency and discharge current

분수배로 발진되는 switching 주파수의 배수와 방전판의 공진주파수가 정합시 방전에 미치는 영향을 알아보기 위하여 공진회로에 비정합시와 정합시로 나누어 방전전류 파형을 측정하여 보았다. 그림 5는 비정합시의 전류파형을 그림 6은 정합시의 전류파형을 보이고있다. 그림 5,6에서 각각 상단에 나타난 파형은 방전판에 흐르는 전류 파형을, 하단에 나타난 파형은 switching 주파수 전압파형을 나타내고있다. 비정합시는 switching 주파수에 해당하는 기본파와 공진주파수에 해당하는 파형이 복합적으로 존재하지만, 정합시는 switching 주파수보다 수배 높은 공진주파수에 해당하는 파형이 주

류를 이루고 고압트랜스 2차권선에 유기되는 평균 전압도 권선비보다 공진 정도에 따라 수배 높은것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. 방전판에서 방전이 시작되면 방전 넓이에 비례하여 전극의 면적이 넓어지는 효과가 있고 이로인하여 공진주파수가 낮아지게 된다. 그러나 방전은 고저항의 도전체와 같으므로 고압변압기의 2차측 권선의 Inductance 와 방전판의 전극간 용량으로 결정되는 기본공진주파수와 방전면적이 넓어져서 형성되는 보다 낮은 공진주파수들이 복합적으로 공존하게 된다. 이들 방전전류파형은 Inverter의 Switching 주파수의 배수가 될 때 강력한 공진이 일어나게 되며 이들 구동펄스들은 공진회로의 Quality Factor 의 정도에 따라서 증폭되어 나타나게 된다. 따라서 Inverter의 Switching 주파수를 기본공진주파수의 분수배에서 약간 벗어나게 하면 증폭율이 조정되어 방전용 방전판에 인가되는 고전압 펄스 패턴을 변화시켜 방전전류를 효율적으로 제어할 수 있게되어 방전전류의 주파수 제어가 가능하게된다. 공진시 평균 방전전류 변화율은 약5배까지로 측정되었다.

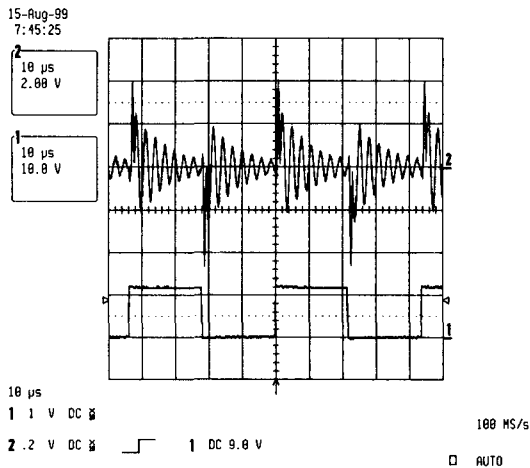


그림 5. 방전판의 고유진동수와 스위칭주파수가 비정합시의 방전전류 파형

Fig. 5. Discharge current waveform when the switching frequency is non-resonant to resonant frequency of discharge plate

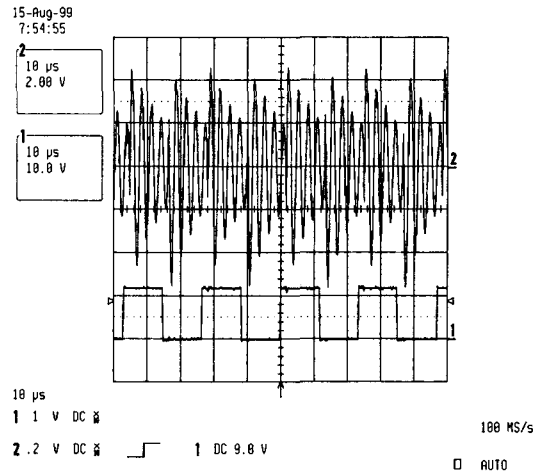


그림 6. 방전판의 고유진동수와 스위칭주파수가 정합시의 방전전류 파형

Fig. 6. Discharge current waveform when the switching frequency is resonant to resonant frequency of discharge plate

세라믹 유전체위에 형성된 전극에서 방전이 보다 활성화되어 코로나방전이 전체 전극에 걸쳐서 활발히 일어나게되면 전계의 분포가 심히 불균일

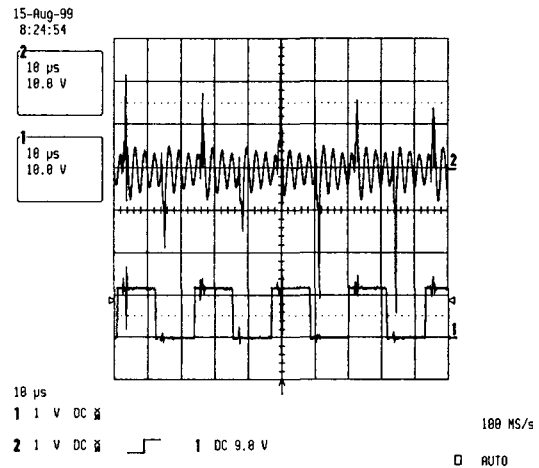


그림 7. 코로나방전이 활성화 되었을때의 방전전류 파형

Fig. 7. Discharge current waveform when the visible corona discharge covers the entire electrode on discharge plate

할때 발생하는 정상전류의 3~4배에 해당하는 침두치를 갖는 펄스가 스위칭주기에 해당하는 수만큼 생기는것이 그림 7과 같이 측정되었다.

주파수제어 방식을 사용했을때 입력전원 전압의 변동이 방전전류의 안정도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 8의 실선으로 나타난 곡선과 같이 입력전압을 변경시키면서 방전전류의 안정도를 측정하였다. 측정결과 정류전 교류입력전압이 -20%에서 +20% 까지 변동되어도 방전전류의 변동율은 3.4% 이내인 것으로 측정되어 Triac에 의한 전압안정화와 주파수제어방식에 의한 방전전류의 안정화를 병행한 코로나방전 제어가 효율적임을 보여주고 있다. 비교를 위하여 제어를 걸지 않은 경우의 방전전류의 변화를 그림 8에 점선으로 나타내었다. 주파수제어를 하지 않은 경우에는 정류전 교류입력전압이 32% 변화되면 방전전류는 67 % 변화됨을 알 수 있다.

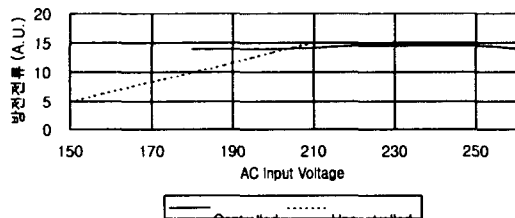


그림 8. 교류입력전압과 방전전류와의 관계
Fig. 8. Relationship between AC input voltage and discharge current

또한 오존발생량측정기로 오존발생효율을 측정시 3.6 W의 전력이 공급되면 100 mg의 오존이 발생되어 오존발생효율은 28 mg/W 인것으로 계산되었다.

V. 결론

별도로 공진용 수동소자인 Inductor와 Condenser를 회로에 추가하지 않고도 세라믹 유전체위에 후막인쇄된 전극을 이용한 방전판 자체의 정전용량과 고압트랜스 2차측권선 자체의 Inductance를 이용하여 공진을 일으켜 주파수제어 방식을 사용하

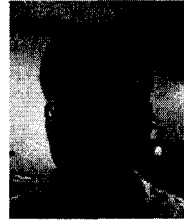
여 안정된 그로우 코로나와 부라쉬 코로나 방전 영역에서 5배까지 제어가능함을 구현하였으며 스트리이마 코로나 방전까지 확장된 영역에서는 최대 9배까지 방전전류를 제어할 수 있었다. 이러한 방식은 추가된 소자에의한 외부손실이 발생하지 않는 고효율 코로나방전 방식으로 오존발생 효율을 28 mg/W 까지 높일 수 있었다. 또한 Triac에 의한 전압제어와 주파수제어방식에 의한 방전전류 제어 방식을 병행하여 외부 교류입력전압이 40% 변동되어도 불안정한 코로나 방전전류 변동율을 3.4% 이내로 유지시켰다. 이는 제어되지 않았을 경우의 67 % 이상인 변동율과 비교하면 안정적인 방식으로 판단된다.

참고문헌

1. Maurice Adaatto and Christian Coste, "Power supply for ozone generator," US Patent 4587591, May. 6, 1986.
2. Frank E. Lowther, "Solid state frequency converter for corona generator," US Patent 3784838, Jan. 8, 1974.
3. Anh N. Huynh, "Power supply for an ozone generator with a bridge inverter," US Patent 5285372, Feb. 8, 1994.
4. William Racca and Edward F. Racca, "Resonant power supply circuit for ozone generators," US Patent 5474750, Dec. 12, 1995.
5. D. Grant et al, "Technique for pulse elimination in pulsewidth-modulation inverter with no waveform discontinuity," IEEE Proc., Vol. 129, Pt. B, No. 4, Jul. 1982.
6. Schwarz et al, "A 95 percent efficient 1KW DC converter with an internal frequency of 50 KHz," IEEE Trans. on Ind. Electron. & Control Instrumentation, vol.IECI-25, No.4, pp.326-333, Nov. 1978.
7. S. Magai, A. Chibani, M. Nakooka, and H. Ogiwara, "A new phase-shifting PWM regulated-mode resonant inverter using static induction power devices for induction-heating-

and-melting applications," EPE'89 3rd European Conference on Power Electronics and Applications, vol.1, dated Oct.9 through 12, 1989, pp.347-352.

8. Anh N. Huynh, "Ozonator power supply employing a current source inverter," US Patent 4682266, Jul. 21, 1987.



崔圭南(Kyoo-Nam Choi)

1953년 8월 2일생.

1976년 2월 서울대학교 졸업
(공학사).

1989년 12월 Texas A&M University
졸업 (공학석사).

1992년 8월 Texas A&M University 졸업 (공학박사).

1992년 ~ 1994년 금성중앙연구소 연구실장.

1994년 ~ 현재 인천전문대학 부교수.

*주관심분야는 광전자 및 박막반도체임.