

SF₆/CO₂혼합기체 중에서 뇌임펄스코로나방전의 특성

(Characterisitcs of Lightning Impulse Corona Discharges in SF₆/CO₂ Mixtures)

이복희* · 백영환 · 오성균 · 안창환

(Bok-Hee Lee · Young-Hwan Baek · Sung-Kyun Oh · Chang-Hwan Ahn)

요 약

본 논문은 불평등 전계의 SF₆/CO₂혼합기체 중에서 전구방전특성에 대한 실험결과를 제시한다. 임펄스 전구방전 진전을 코로나 전류와 방전광 이미지의 측정으로 조사하였다. 정·부극성의 전구방전 진전메커니즘은 기본적으로 같았으며, 초기스트리머코로나는 침전극의 끝단에서 발단되어 계단상으로 진전하는 리더에 의해 시험갭을 교락시킨다. 정극성에서 리더펄스의 휴지시간은 부극성에서보다 매우 짧았다. 또한 부극성에서 초기스트리머코로나와 절연파괴사이의 시간간격은 정극성에서보다 매우 길게 나타났다. 정극성에서 방전채널경로는 임의적으로 나타났으며, 부극성에서 리더 채널은 정극성에서 보다 굵고 밝게 나타났다.

Abstract

This paper presents experimental results relating to the preliminary breakdown characteristics in SF₆/CO₂ gas mixtures under a highly non-uniform electric field. The impulse pre-breakdown developments are investigated by the measurements of corona current and light emission images. As a result, the preliminary breakdown development mechanisms for both the positive and negative polarities were fundamentally same. The first streamer corona was initiated at the tip of needle electrode, and the leaders developed with a stepwise propagation and bridged the test gap. The pause time of leader pulses in the positive polarity was significantly shorter than that in the negative polarity. Also, the time interval between the first streamer corona onset and breakdown in the negative polarity was much longer than that in the positive polarity. The discharge channel path in the positive polarity was zigzag, and the leader channel in the negative polarity was thicker and brighter than that in the positive polarity.

Key Words : Prebreakdown phenomenon, Nonuniform electric field, Corona current, Light emission images, Discharge channel path

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2005년 9월 28일
1차심사 : 2005년 9월 30일
심사완료 : 2005년 10월 17일

1. 서 론

6불화유황(SF₆)은 절연내력이 매우 높기 때문에 송변전용 전력기기의 절연매체로서 폭넓게 사용되고 있다. 또한 가스절연개폐장치(Gas-Insulated

SF₆/CO₂혼합기체 중에서 뇌임펄스코로나방전의 특성

Switchgear: GIS)의 소형화와 설비·운영비용의 저감에 기여하였으며, 현재 765[kV]의 변전설비로도 이용되고 있다.

대기압에서 SF₆기체는 공기에 비해 약 3배의 절연내력을 가지고, 압력이 증가하면 그 비율에 따라 증가한다. 무독성, 불연성, 그리고 우수한 소호특성을 가지고 있다. 하지만 SF₆기체는 지구온난화지수가 높은 것으로 지목되고 있다. SF₆기체와 특성이 비슷한 불활성 기체이면서 물리적, 화학적 특성이 우수한 조건을 갖춘 순수기체를 발견하지 못하였다.

따라서 SF₆를 대체할 수 있는 SF₆/분자가스의 혼합기체의 특성에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 특히 SF₆/N₂혼합기체의 절연특성에 대한 연구가 집중적으로 이루어져 왔으며, SF₆/N₂혼합기체는 가스절연송전선로(gas insulated transmission line)의 절연매질로 사용되고 있다[1-2]. SF₆/CO₂혼합기체는 SF₆/N₂혼합기체보다도 동일한 혼합비와 가스압에서 절연내력이 높으며, SF₆/CO₂혼합기체 중에서의 가스분해에 의한 단점을 미약한 것으로 보고된 바 있다 [3-4]. 따라서 SF₆/CO₂혼합기체는 순수 SF₆기체를 대체할 친환경적인 절연매체로의 사용이 가능할 것으로 예상되는 바, 이에 대한 실증적 연구가 필요하다.

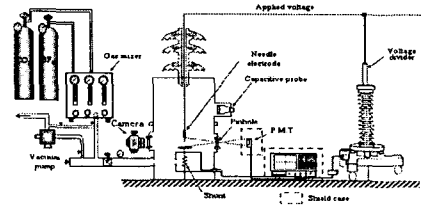
본 연구에서는 지구온난화지수와 절연비의 저감을 통하여 경제성을 추구할 수 있으며, SF₆기체의 대체절연체로 사용될 가능성이 높은 SF₆/CO₂ 혼합기체의 전구방전현상의 규명을 위한 목적으로 실제 규모 GIS 내에 금속성 이물질이 존재하는 경우를 모의한 매우 취약한 조건에 대한 연구를 수행하였다. 가스절연개폐장치에 존재할 수 있는 바늘모양의 금속성 이물질을 모의하여 침대 평판 갭으로 불평등 전계를 형성하는 전극계를 구성하였다. SF₆/CO₂혼합기체 중에서 정·부극성 임펄스 전압에 대한 전구방전과정과 방전광을 측정하고, 이를 바탕으로 임펄스코로나방전특성에 관해 기술하였다.

2. 본 론

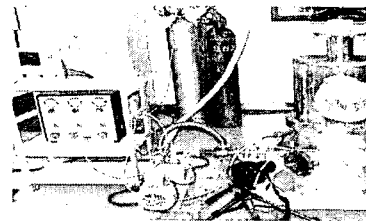
2.1 실험계의 구성

실규모 GIS를 모의할 수 있는 실험 장치와 전계의

구성을 그림 1에 나타내었다. 실험에 사용된 용기는 상부에 뇌임펄스전압을 인가하기에 충분한 절연내력을 가진 콘덴서형 부싱(BIL 350[kV], In 400[A])을 설치하였고, 스테인레스 재질의 실험 용기는 원통형으로 내경이 396[mm]이며, 상부와 하부로 나뉘어 플랜지로 접합되어 있다.



(a) 실험회로의 개략도



(b) 실험장치의 사진

그림 1. 실험장치의 개략도와 사진

Fig. 1. Schematic diagram and photograph of the experimental setup

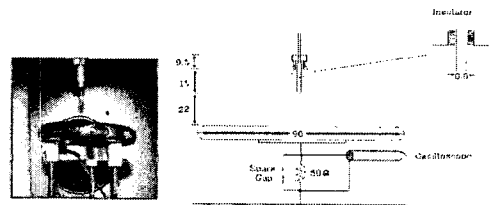


그림 2. 침-평판 전극계 사진 및 개략도

Fig. 2. A photograph and schematic diagram of the needle-to-plane electrode system

실험용기의 상부에는 돌출형으로 전압을 측정할 수 있도록 용량성 전계센서가 설치되어 있으며, 하부에는 부분방전과 절연파괴가 발생할 때 흐르는 전류를 측정하기 위해 미소전류검출회로를 설치하였다.

GIS내에 존재할 수 있는 금속성 이물질을 모의하여 구성한 침-평판 전극계의 사진 및 전극과 전류 측정용 검출기기의 개략도를 그림 2에 나타내었다.

침 전극 끝단의 곡률반경은 0.3[mm]이고, 길이는 15[mm]이며, 평판 전극은 직경 90[mm]의 크기로 침 전극 하부에 갭의 간격이 22[mm]가 되도록 설치하였다.

2.2 실험방법

유회전 펌프를 이용하여 실험 용기를 수 [mTorr] 까지 배기시킨 후 가스혼합기를 통하여 상용의 CO₂ 와 SF₆기체를 80[%] : 20[%]의 비율로 주입하였다. SF₆/CO₂ 혼합기체의 혼합비율은 혼합기체의 환경지수개선과 경제성을 고려할 때 SF₆기체의 비율은 10 ~ 20[%]가 적합한 것으로 검토되고 있어 본 연구에서는 SF₆기체의 비율을 20[%]로 하였다[4]. 혼합기체의 압력은 0.1~0.5[MPa]을 단계적으로 증가시켜 가면서 실험하였다.

Marx형 임펄스전압 발생장치를 이용하여 정·부극성의 뇌임펄스전압을 실험 용기의 부상을 통해 침 전극에 인가하였고, 전압의 측정은 10,000 : 1의 분압비를 갖는 용량성 분압기(Capacitive voltage divider)로 측정하였다.

전구방전전류의 측정은 평판전극의 하단에 설치한 50[Ω]의 미소전류검출기로 측정하였으며, 전류검출기의 출력단에 설치한 10 : 1 감쇠기(attenuator)를 통하여 오실로스코프에 입력된다. 또한, 방전광은 광전자증배관(Photo-Multiplier Tube, H9305-04)을 이용하여 관측하였다. 오실로스코프(TDS 644B, band width: 500[MHz], sampling rate: 2.5[GS/s])를 통해 인가전압, 전구방전전류, 광 신호를 측정하였다.

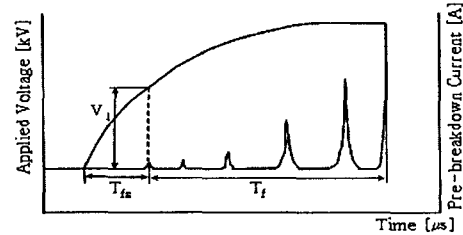
계측장치에 입사할 수 있는 방사 노이즈를 차단하기 위해서 오실로스코프와 광전자증배관은 차폐함 내부에 설치하였다. 또한 계측용 전원선을 따라 인입될 수 있는 잡음에 대해서는 절연변압기와 이중 라인필터를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전구방전 파라미터

전구방전현상을 해석하기 위해 정의한 파라미터를 그림 3에 나타내었다. 뇌임펄스전압을 인가하였

을 때의 전구방전진전특성은 인가전압의 파형, 극성, 그리고 기체의 압력의 변화에 따라서 전혀 다르게 나타난다. 갭에 인가되는 전압과 전계의 분포는 방전진전의 특성을 지배하는 시간에 비하여 매우 짧은 시간 내에 변화하며, 절연내력의 실질적인 변동을 가져오게 된다.



V₁ : 초기코로나 발생전압 T_{fs} : 통계적 지연시간
T_f : 형성지연시간

그림 3. 전구방전전류의 파라미터의 정의
Fig. 3. Definition of the parameters of the preliminary discharge current

뇌임펄스전압과 관련되는 전구방전의 진전과정에 미치는 영향을 정확하게 이해하기 위해서는 통계적 지연시간, 형성지연시간, 초기코로나 임계전압, 절연 파괴전압 등 여러 가지 요인들을 개별적으로 검토하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 SF₆/CO₂ 혼합기체의 전구방전개시전압, 초기코로나에서 섬락까지의 형성지연시간 등을 평가하고 검토하였다.

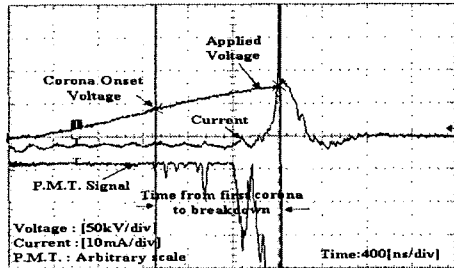
3.2 전구방전전류 및 방전광

혼합기체의 압력이 0.3[MPa]일 때 정·부극성의 뇌임펄스전압을 인가하여 측정한 인가전압, 전구방전전류, 리더의 방전광 신호의 대표적인 파형을 그림 4에 나타내었다.

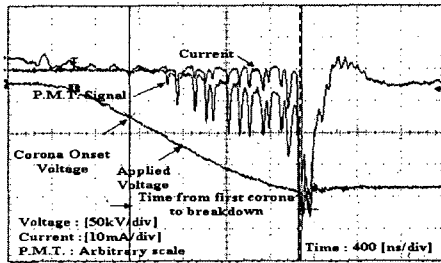
전극에 전압이 인가되면 침 전극의 끝단에서 전계의 세기가 높아져 초기전자가 발생하며, 이에 의한 전자사태로 초기 코로나가 발생한다[5]. 초기전자가 발생하는 시점 또는 전압을 측정하기는 매우 어려우며, 보다 미시적 관점의 해석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 초기 코로나의 발단을 기점으로 전구방전이 시작되는 것으로 분석하였다. 또한 코로나전류에 의한

SF₆/CO₂혼합기체 중에서 뇌임펄스코로나방전의 특성

리더 또는 스트리머 방전의 진전을 관측할 수 있으나 미소한 전구방전전류의 검출에는 노이즈의 영향으로 정확도가 낮아 방전광의 측정을 병행하였다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 4. 0.3(MPa)의 SF₆/CO₂혼합기체에서 인가된 임펄스전압, 전구방전전류와 방전광 신호
Fig. 4. Waveforms of the applied impulse voltage, prebreakdown current and luminous signals in SF₆/CO₂ mixtures of 0.3(MPa)

그림 4에서 보면 전구방전전류의 신호와 광 신호의 대응관계를 알 수 있다. 또한 코로나 초기전류에서 절연파괴까지의 시간을 분석하기 위해 초기 광 신호의 최고점을 기준으로 측정하였다. 광학적 신호는 스트리머 코로나 또는 리더스텝과 일치한다[6]. 따라서 전자사태에 의한 스트리머-리더 변환을 통해 진전하는 메커니즘이라고 볼 수 있다. 즉 초기코로나에 의한 리더의 계단상 진전으로 전구방전이 형성되며, 최종적으로 전극 사이를 교락하게 된다.

전구방전전류와 방전광 펄스는 인가전압의 증가와 더불어 점차적으로 증가하였다. 전구방전전류는 리더의 진전에 따른 누적효과가 거의 나타나지 않았으나 방전광신호는 방전광의 잔광현상으로 점진적으로 상승하는 누적효과가 크게 나타났다.

3.2 SF₆/CO₂혼합기체 중에서 초기코로나 발생에서 절연파괴까지의 시간특성

SF₆/CO₂혼합기체의 압력 변동에 따른 형성시간 지연 특성을 그림 5에 나타내었다. 본 논문에서는 전구방전의 형성시간을 초기코로나의 발단에서 절연파괴에 이르기까지의 시간간격으로 정의하였다. 또한, 리더의 전파시간과 일치하고 공간전하효과와 관련이 있다[6].

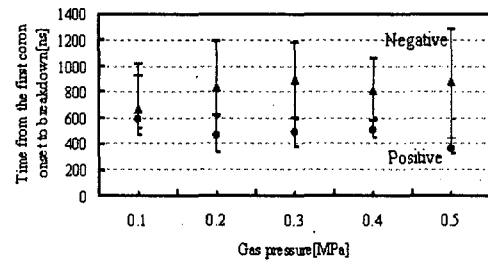


그림 5. SF₆/CO₂혼합기체 중에서의 압력에 대한 초기 코로나 발생에서 절연파괴까지의 시간특성
Fig. 5. Characteristics of the time from the first corona onset to breakdown as a function of the gas pressure in SF₆/CO₂ mixtures

부극성일 때는 기체압력이 증가함에 따라 형성지연시간이 다소 증가함을 볼 수 있지만, 정극성일 경우에는 압력이 증가할수록 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다. 정극성의 형성지연은 부극성보다 훨씬 짧으며, 리더의 진전스텝간격은 부극성에 비해 매우 짧게 나타났다. 이는 극성에 따라 스트리머리더의 진전방향이 반대이기 때문이며, 부극성의 경우 공간전하효과가 보다 크게 나타나기 때문이다. 즉 부극성의 경우 스트리머코로나에 의해 부이온의 공간전하가 형성되며, 부이온의 확산작용에 의해 전계완화작용이 감소해야 후속 스트리머코로나가 발생하는 작용이 반복되게 된다. 이에 반하여 정극성의 경우 스트리머 코로나에 의해 발생한 전자는 정극성인 침전극 또는 리더 채널로 입사하므로 공간전하의 영향이 비교적 작아 리더가 비교적 용이하게 진전하여 섬락에 이르게 된다.

3.3 SF₆기체와 SF₆/CO₂혼합기체의 초기 코로나 개시전압

SF₆와 SF₆/CO₂혼합기체 중에서의 압력을 매개변수로 한 정·부극성에서 초기코로나 개시전압의 비교를 그림 6에 나타내었다.

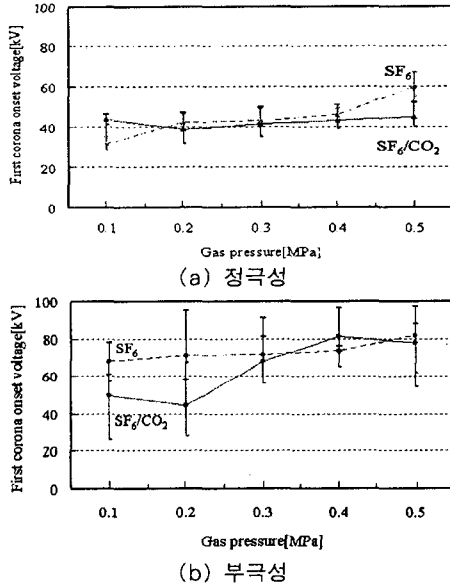


그림 6. SF₆와 SF₆/CO₂혼합기체 중에서의 초기 코로나 개시전압의 비교

Fig. 6. Comparison of the first corona onset voltages in SF₆ and SF₆/CO₂ mixtures

정극성의 경우 SF₆ 기체 중에서 초기코로나개시 전압은 기체압력이 증가함에 따라 증가하지만, 혼합기체에서는 거의 일정하였다. 또한 SF₆/CO₂ 혼합기체내에서 부극성 코로나 개시전압의 기체 압력의존성이 현저하고, 정극성에 비해서 초기 코로나 개시전압의 변동도 두드러지게 크게 나타났다. 특히 부극성의 초기코로나개시전압은 정극성의 경우보다 매우 높게 나타났다. 정극성에서 초기전자는 불순물이나 부이온으로부터의 탈리작용에 의해 생성된다. 초기 전자사태는 초기전자에 의한 이온화 진전에 의해 생성되고, 그 이후의 전자사태는 광전리작용도 영향을 미치는 복합적 과정에 의해 발생하게 된다. 반면에, 부극성에서 초기전자는 음극 표면으로부터

의 전계방출에 의해 생성되고, 초기스트리머코로나는 시작된다[7]. 정극성과 부극성 사이에 초기코로나 개시전압의 차이는 초기전자생성메커니즘에 밀접하게 관련성이 있다고 사료된다. 이는 리더진전의 형성시간과도 관계가 있으며, 기체압력이 증가함에 따라서 전구방전의 형성시간의 감소를 의미한다.

3.4 방전광 현상

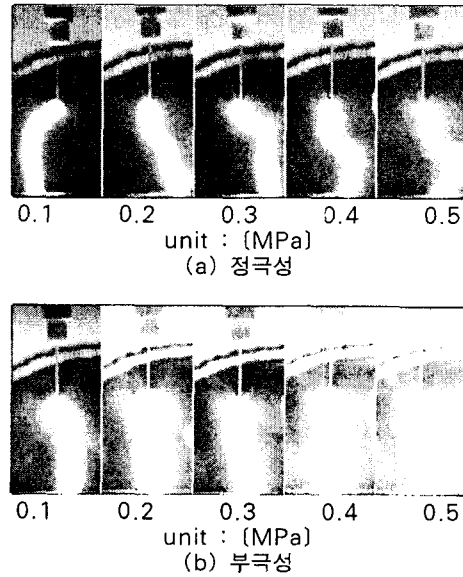


그림 7. SF₆/CO₂혼합기체 중의 방전광 현상

Fig. 7. Light emission images in SF₆/CO₂ mixtures

SF₆/CO₂혼합기체 중에서 정·부극성의 뇌임펄스 전압이 인가되어 섬락이 발생하기까지의 전체 진전 과정동안에 발생하는 방전광에 대한 현상을 알아보기 위해서 고성능 디지털 카메라(Canon, EOS 20D)를 이용하여 최종 교락상태의 방전진전경로의 양상을 촬영하였다.

기체압력 0.1~0.5[MPa]에서 방전경로를 알 수 있는 정·부극성의 섬락시 발생하는 방전광의 사진을 그림 7에 나타내었다. 정극성의 경우 방전경로는 불규칙하며, 이러한 현상은 기체압력의 증가와 더불어 보다 뚜렷하게 나타났다. 이는 스트리머코로나에 의해 형성된 리더 앞단의 공간전하에 의해서 전계분포

SF₆/CO₂혼합기체 중에서 뇌임펄스코로나방전의 특성

가 변형되기 때문인 것으로 볼 수 있다. 또한 정극성에서보다 부극성일 때의 빛의 강도가 높고, 방전 채널도 짧은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

SF₆기체와 SF₆/CO₂혼합기체 중에서 전구방전특성과 방전진전경로의 고찰을 위한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초기코로나개시전압은 가스압력에 비례하는 것으로 나타났으며, 초기코로나의 발생에서부터 섬락에 이르기까지의 시간은 부극성에서 훨씬 길게 나타났다.

(2) 전구방전은 칩 전극 끝단에 발생한 초기코로나에 의해 시작되어 계단상으로 진전되는 간헐적 양상으로 나타났으며, 진전 스텝간격은 부극성에서 훨씬 길게 나타났다.

(3) 정극성의 경우 방전진전경로의 형태는 꼬불꼬불하게 나타났으며, 부극성 방전채널도 정극성의 것보다 짧게 나타났다. 그러나 부극성의 경우 방전경로는 거의 직선상으로 나타났으며, 방전 경로의 형상과 기체압력사이의 상관성은 나타나지 않았다. 방전경로의 광의 세기는 기체압력의 증가에 따라 밝게 나타났다.

(4) 정극성의 경우 순수 SF₆기체와 SF₆/CO₂혼합기체의 초기코로나 개시전압이 거의 비슷하게 나타났다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원 사업에 의해 작성되었습니다.

References

- [1] T. Kawamura, Bok-Hee Lee, T. Nishimura and M. Ishii, "Breakdown Characteristics of SF₆ Cap Disturbed by a Metallic Protrusion under Oscillating Transient Overvoltages", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, pp.2043-2049, 1994.
- [2] S. Hotsuka, K. Eguchi, M. Cho, S. Yuasa, S. Okabe, and M. Hikita, "Light emission properties of SF₆ gas mixture in impulse breakdown process", 13th ISH, 99.367-370, 2003.
- [3] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa, and H. Okubo, "Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Caps in N₂/SF₆ gas Mixtures", IEEE Trans., on Dielectrics and Insulation, Vol.9, No.4, pp. 544-550, 2002.
- [4] Y. Qiu, E. Kuffel, "Comparison of SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ Gas Mixtures as Alternatives to SF₆ Gas", IEEE Trans., on DEI, Vol.6, No.6, pp.892-895,1999.
- [5] T. Kawamura and Bok-Hi Lee, "Transient Impulse Breakdowns of SF₆ gas in Inhomogeneous Electric Fields", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, No.8, pp.4898-4904, 1999.
- [6] Mazen Abdel-Salam, Hussein Anis, Ahdab El-Morshedy, Roshdy Radwan, "High-Voltage Engineering Theory and Practice", Marcel Dekker, Inc., pp.49-50, 2000.
- [7] L. Niemeyer, L. Ullrich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Gases", IEEE Trans., Vol. EI-24, No.2, pp309-324,1989.
- [6] L. Niemeyer, L. Ullrich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Gases", IEEE Trans., Vol. EI-24, No.2, pp309-324,1989.
- [6] L. Niemeyer, L. Ullrich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Gases", IEEE Trans., Vol. EI-24, No.2, pp309-324,1989.

◆ 저자소개 ◆

이복희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~1989년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기 컴퓨터공학부 교수.

Tel: (032)860-7398, Fax: (032)863-5822, http://heirc.inha.ac.kr, E-mail: bhlee@inha.ac.kr

백영환 (白英煥)

1959년 12월 8일생. 2002년 2월 서울산업대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 인하대 대학원 전기공학과 석사졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel: (032)860-7398, Fax: (032)860-5822, E-mail: sky4u6006@hanmail.net

오성균 (吳聖均)

1977년 3월 12일생. 2003년 8월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel: (032)860-7398, Fax: (032)860-5822, E-mail: osk1245@empal.com

안창환 (安昌煥)

1959년 11월 4일생. 1983년 2월 원광대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 인하대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문대학 디지털전자정보과 교수.

E-mail: aza@inhac.ac.kr