

## 평단봉대평판 전극배치에서 평판 전극에 화염이 존재할 때 공기의 섬락전압 특성

(Flashover Characteristics of Air in the Arrangement of Cylinder-Shaped Rod and Plane Electrode in Case of Flame on the Plane Electrode)

김인식\*

(In-Sik Kim)

### Abstract

In this paper, flashover characteristics of air in the vertical arrangement of cylinder-shaped rod and plane gap in the case of combustion flame on the plane electrode were examined under the application of a.c. and d.c. high-voltages. In order to investigate the effect of propane flame on the flashover characteristics of air, flashover voltages in accordance with the variation of the gap length and the horizontal distance between the flame and the high-voltage rod electrode were measured. As the result of the experiment, flashover voltages in the presence of the flame were substantially lowered than those in the absence of flame, and the polarity effects with the d.c. voltages on appeared owing to the flame. Flashover voltages of air were increased in the proportion of the gap length and the horizontal distance in the case of both a.c. and d.c. voltages, but the flame was extinguished by such corona wind that was produced from the rod electrode when the gap length and the horizontal distance reached to a certain degree.

Key Words : Flashover Characteristics, Combustion Flame, Polarity Effect

### 1. 서 론

대기압 공기의 절연파괴현상에 대해서는 J. Meek, H. Raether 등 여러 연구자들에 의해서 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다[1-2]. 기체 절연 방식 중 공기는

별도의 용기가 필요하지 않으며, 가격이 가장 저렴하고, 쉽게 얻을 수 있으므로 송·배전선로의 절연매질로서 많이 이용되고 있다.

산업이 발달함에 따라 각종 전기장치 및 설비들이 고전압·대용량화됨으로서 고전압 도체 부근에 연소 화염이 존재하는 특수한 상황이 발생하는 경우가 있다. 예로서 송전선로 아래에서 산불이 발생한 경우, 도시 배전선로가 통과하는 주변 건물에서 화재가 발생한 경우, 연소가스에 의한 MHD발전의 전극부에서의 방전현상을 억제하는 경우, 차단기의 아크화염에 의한

\* 주저자 : 경일대학교 철도전기공학부  
Tel : 053-850-7143, Fax : 053-850-7602  
E-mail : iskim@kiu.ac.kr  
접수일자 : 2012년 2월 24일  
1차심사 : 2012년 2월 29일  
심사완료 : 2012년 3월 21일

절연회복 특성을 도모해야 하는 경우 등을 들 수 있다. 이러한 경우에는 화염이 매질의 절연특성에 주요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[3-5].

화염 자체의 연소반응이나 도전을 등 물리·화학적 특성에 대해서는 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다[6-8]. 그러나 고전압 및 방전공학적 측면에서 화염이 금속 전극 상에 존재하거나 전극에 접근하여 존재하는 경우 등에 대한 절연과피 특성에 미치는 화염의 영향에 대해서는 비교적 많이 발표되지 않고 있다.

송전선로 아래에서 발생된 화염에 의해 고전압 도체와 대지 사이의 섬락 현상은 가공선 도체와 대지를 불평등 전계 전극시스템인 수직배치 형 침대 평판전극 또는 봉대평판 전극으로 모델화할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 봉대평판전극을 수직으로 배치한 경우 평판전극 중앙에 연소화염이 존재할 때, 공기의 섬락특성에 미치는 화염의 영향을 조사하였다. 일정한 크기의 화염이 평판전극 상에 존재하는 경우 전극 간 갭 길이 변화에 따른 직류 및 교류전압에 대한 섬락전압을 조사하였다. 또한 고전압 도체에 화염이 접근할 경우 절연내력에 미치는 영향을 조사하기 위해 봉전극과 화염사이의 수평거리를 변화시킨 경우에 대해서도 섬락전압을 측정하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

그림 1은 연소화염, 전극배치, 고전압 발생장치 및 측정회로 등을 나타내는 실험장치의 개략도이다. 본 실험에서 사용된 전극배치는 그림 1과 같이 봉대평판전극을 수직으로 구성하였다. 전극재질은 모두 스테인리스강(stainless steel)이며, 봉 전극은 직경 10[mm], 평판전극은 직경 150[mm]로 제작하였다. 고전압 측 봉 전극은 그 선단을 수평으로 평탄하게 자른 것(이하 평단봉(平端棒, cylinder-shaped rod)이라 칭함)을 사용하였다.

교류 고전압은 고전압 발생장치(high voltage generator)를 사용하였으며, 이 장치는 정격용량 3[kVA], 1차 220[V], 주파수 60[Hz], 2차 50[kV]이다. 직류 고전압은 정류회로와 실리콘정류기(일본 Tokyo Transformer co.)를 사용하였다. 고전압 측정은 고압

프로브(high voltage probe)와 디지털 오실로스코프를 사용하였으며, 고압프로브는 그림 1에서 R1, R2이며, 보호용 저항  $R_L=50[k\Omega]$ 은 방전에 의한 전극 손상을 방지하기 위한 것이다. 연소화염은 그림 1과 같이 평판전극 중앙에 직경 2[mm] 노즐을 통해 공급된 프로판가스(propane gas)에 의해 발생하였으며, 화염의 크기는 전압이 인가되지 않는 상태에서 높이 3[cm]로 일정하게 유지하였다. 이는 압력밸브와 유량계를 조정함으로써 요동이 없는 안정 화염을 얻을 수 있었다. 봉전극이 화염으로부터 이격 거리를 나타내기 위해 그림에서 수평거리 S를 표시하였다.

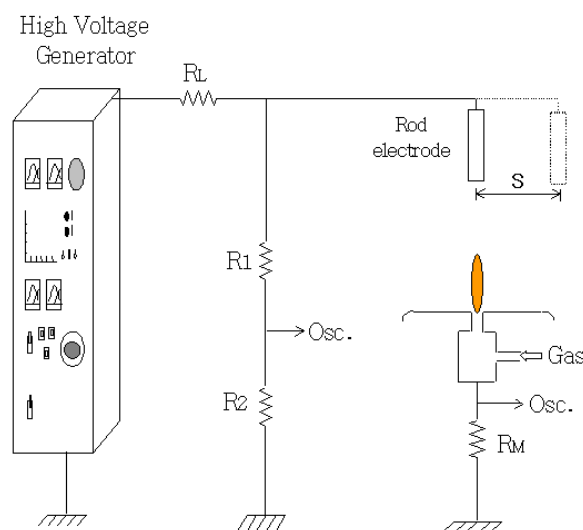


그림 1. 실험장치의 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

연료인 프로판 가스는 무색무취이며, 주성분은 메탄계의 탄화수소(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)이다. 0[°C] 1기압에서 1[l]의 질량은 2.02[g]으로 공기의 약 1.56배이며, 발열량은 약 23,550[kcal/m<sup>3</sup>]이다. 화염내부의 온도와 화염 주위의 대기온도는 서미스터 온도계와 백금-백금로 지움으로 구성된 열전대 온도계(thermometer)를 사용하여 측정하였다. 화염의 연소에 대한 화학방정식 및 연소반응 현상 등에 대해서는 참고문헌에 기술되어 있다[9].

그림 2는 프로판가스 화염에서 수직 거리에 대한 대

기의 온도분포를 나타낸 것이다. 여기서 화염내부의 온도는 약 660~700[°C]이며, 화염으로부터 수직거리가 증가할수록 대기온도는 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다.

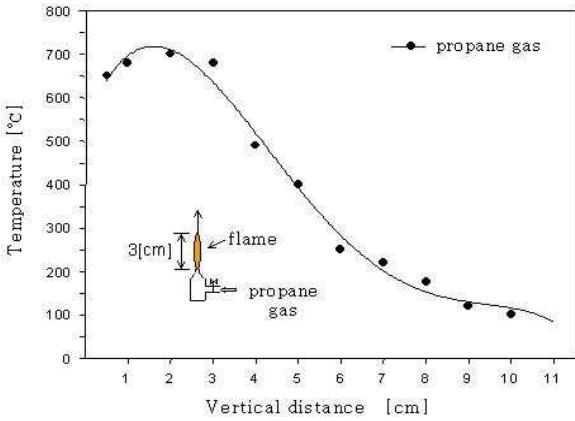


그림 2. 수직거리에 대한 온도분포  
Fig. 2. Temperature distribution along the vertical distance

이는 자연대류에 의한 연소가스의 흐름이 화염의 수직 방향으로 상승하기 때문이라고 생각된다.

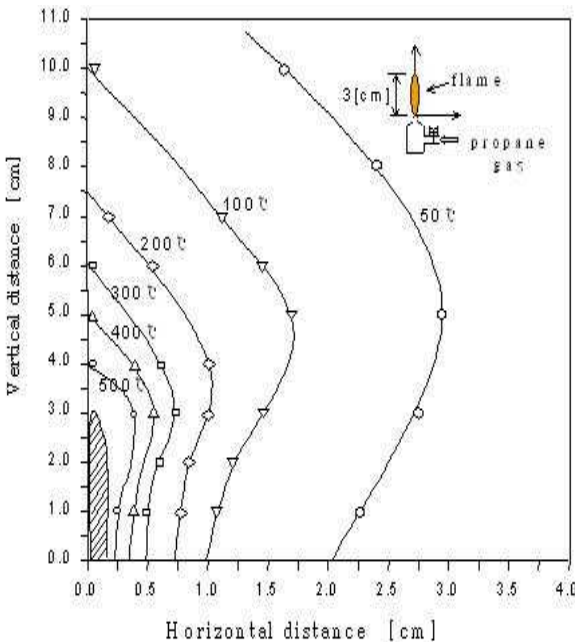


그림 3. 화염 주위의 등온선  
Fig. 3. Isothermal lines around the flame

그림 3은 프로판 화염의 주위 공기에 대한 등온선분포를 나타낸 것이다. 그림 3으로부터 거리에 따른 온도 변화량, 즉 온도 구배는 수평방향이 수직방향보다 큰 것으로 나타나고 있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 갭 길이에 따른 섬락전압 특성

그림 4는 수평거리 S=0[cm]일 때, 갭 길이에 따른 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 측정치는 실효값이며 화염이 없을 때와 화염이 존재할 때의 섬락전압을 함께 나타내었다. 그림과 같이 화염이 존재할 때의 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 매우 저하된 것으로 나타났다. 여기서 화염에 의한 절연내력의 저하를 나타내기 위해 화염이 없을 때의 섬락전압을 기준값(100)으로 하고, 화염이 존재할 때의 섬락전압을 상대값[%]으로 표시할 경우, 갭 길이 d=1[cm], 2[cm], 3[cm] 및 4[cm]일 때 섬락전압의 상대값은 각각 34.1[%], 35.8[%], 21.6[%] 및 22.9[%]인 것으로 나타났다. 따라서 비교적 단 갭에서 연소화염이 존재할 때의 교류 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 평균 32.1[%]인 것으로 나타났다.

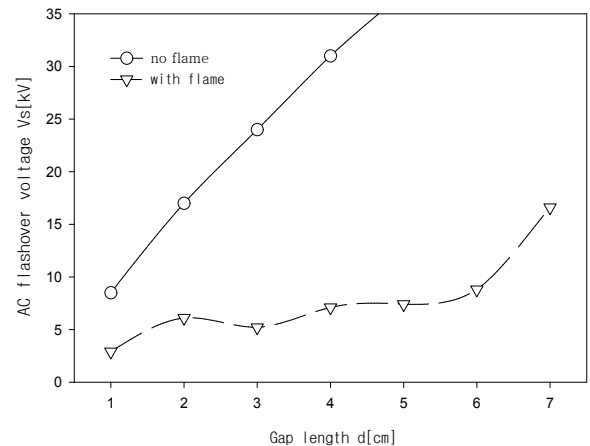


그림 4. 갭 길이와 교류 섬락전압의 관계  
Fig. 4. Relationship between AC flashover voltage vs. gap length

이는 화염으로 인해 전극사이의 공기 밀도가 크게 저하되었기 때문인 것으로 생각된다. 보통 화염이 존재하지 않는 정상 기상조건에서 대기의 섬락전압은 수[%]이내에서 변화되지만[1-2], 화염이 존재하면 그 영향은 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 수평거리  $S=0$ [cm]일 때, 갭 길이에 따른 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 화염의 유무에 따른 섬락전압을 함께 표시하였으며, 화염이 존재할 때의 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 크게 저하된 것으로 나타났으며, 또한 극성에 따른 섬락전압의 차이, 즉 극성효과가 뚜렷이 나타나고 있다. 그림 5에서 화염이 없는 경우 부극성의 섬락전압이 정극성보다 높았으나, 화염이 존재할 때는 부극성 섬락전압이 정극성보다 낮은 것으로 나타났다. 실험결과, 갭 길이  $d=2$ [cm],  $3$ [cm] 및  $4$ [cm]일 때, 정극성 섬락전압의 상대값은 각각  $51.8$ [%],  $46.8$ [%] 및  $31.1$ [%]이었으나, 부극성인 경우는 각각  $24.2$ [%],  $15.0$ [%] 및  $17.0$ [%]인 것으로 나타났다. 따라서 부극성인 섬락전압의 평균값은  $18.7$ [%]이며, 이는 정극성일 때의 평균값  $43.2$ [%]보다 크게 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 인가전압의 극성에 따라 화염 형상이 변화함으로써 섬락전압에 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

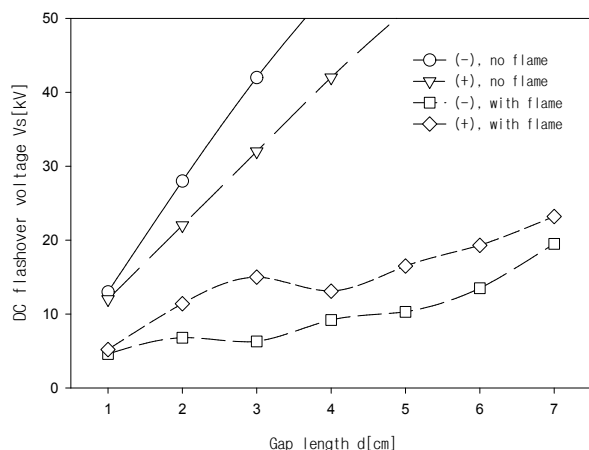


그림 5. 갭 길이와 직류 섬락전압의 관계  
Fig. 5. Relationship between DC flashover voltage vs. gap length

고온 화염은 전리(ionization) 현상에 의해 내부에 양이온(positive ion)이 다수 존재하기 때문에[5,10] 외부 전계에 대해 흡인 또는 반발력이 작용하는 것으로 나타났다.

### 3.2 수평거리에 따른 섬락전압 특성

그림 6은 갭 길이  $d=1$ [cm]에서  $d=3$ [cm]까지 변화시킨 경우, 수평거리  $S$ 에 따른 교류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 여기서 섬락전압은 실효값이며, 수평거리는 화염 중심으로부터  $S=5$ [cm]까지 변화시켰다. 그림 8과 같이 교류 섬락전압은 갭 길이 및 수평거리에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 여기서 수평거리에 따른 섬락전압의 변화를 나타내기 위해 수평거리에 대한 전압상승률로 표시하였을 때, 갭 길이  $d=1$ [cm],  $2$ [cm] 및  $3$ [cm]인 경우 수평거리의 증가에 따른 섬락전압의 평균상승률은 각각  $1.7$ [kV/cm],  $2.0$ [kV/cm] 및  $2.1$ [kV/cm]인 것으로 나타났다. 이는 수평거리가 증가함에 따라 대기 온도는 저하됨으로서, 공기밀도가 증가되기 때문이라고 생각된다.

본 실험에서는 코로나 풍(corona wind)에 의한 화염의 소화현상이 나타났다. 갭 길이  $d=2$ [cm] 및  $3$ [cm]일 때 수평거리가 증가하면 화염이 소화되었으며, 이를 그림 6에서는 ☆표로서 표시하였다.

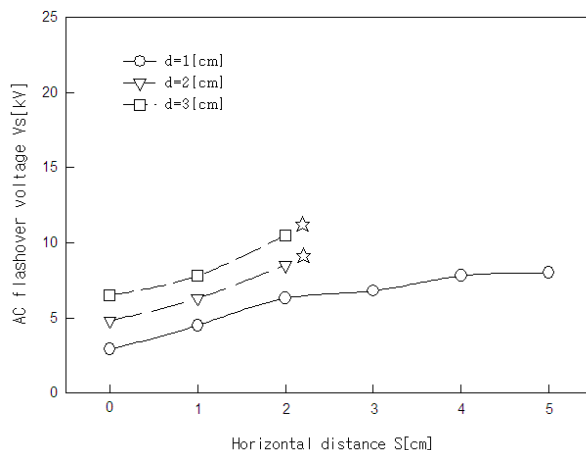


그림 6. 수평거리와 교류 섬락전압의 관계  
Fig. 6. Relationship between AC flashover voltage vs. horizontal distance

그림 7는 갭 길이  $d=1[cm]$  및  $d=2[cm]$ 인 경우 수평거리에 대한 직류 섬락전압 특성을 나타낸 것이다. 그림과 같이 수평거리가 작은 범위에서 극성효과가 나타났으나, 어느 범위 이상 수평거리가 증가하면 극성효과는 나타나지 않았다. 극성효과가 나타나는 범위에서는 부극성 섬락전압이 정극성에 비해 낮은 것으로 나타났다. 그리고 정극성의 섬락전압은 수평거리에 비례하여 완만하게 상승하고 있으나, 부극성의 섬락전압은 수평거리  $S=1[cm]$ 까지는 매우 낮지만,  $S=2[cm]$ 부터는 정극성의 섬락전압과 거의 동일한 값으로 나타나고 있다. 극성효과가 비교적 크게 나타나는 범위에서 갭 길이  $d=1[cm]$  및  $2[cm]$ 인 경우, 수평거리에 따른 정극성 섬락전압의 최대상승률은 각각  $3.3[kV/cm]$  및  $3.9[kV/cm]$ 이었으며, 부극성일 때는 각각  $5.4[kV/cm]$  및  $10.5[kV/cm]$ 로 나타났다. 따라서 부극성인 경우가 정극성에 비해 높은 값을 나타내고 있다. 이는 화염에 의한 섬락전압이 부극성에서 매우 낮은 것을 의미하고 있다. 이는 부극성 전압 인가 시 화염과 봉 전극사이에 작용하는 인력에 의해 섬락이 발생하기 전에 화염은 전극사이 가교역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.

본 실험에서는 갭 길이  $d=2[cm]$ 일 때 수평거리가 증가하면 코로나 풍에 의해 화염의 소화현상이 나타났으며, 이를 그림 7에서는 ☆표로서 표시하였다.

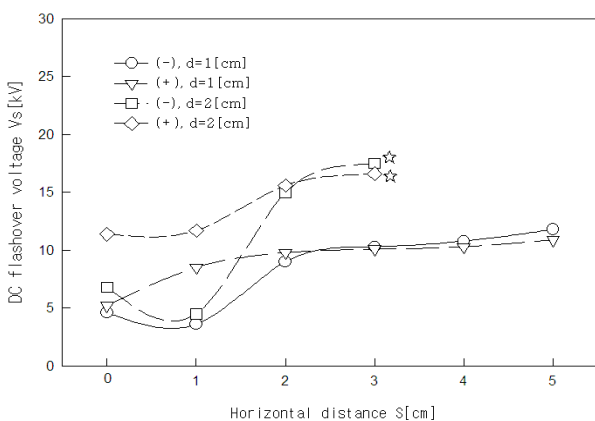


그림 7. 수평거리와 직류 섬락전압의 관계  
Fig. 7. Relationship between DC flashover voltage vs. horizontal distance

#### 4. 결 론

본 논문에서는 평단봉대평판 전극을 수직으로 배치한 상태에서 평판 전극 상에 연소 화염이 존재할 때, 직류 및 교류전압에 대한 공기의 섬락 전압 특성을 조사하였다. 일정 크기의 프로판 화염이 전극사이에 존재하는 경우, 화염이 섬락 전압 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 전극의 갭 길이 변화에 따른 섬락 전압과 봉전극과 화염의 수평거리에 따른 섬락 전압을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 교류전압 인가 시 화염이 존재할 때의 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 크게 저하된 것으로 나타났다. 실험 결과 연소화염이 존재할 때의 교류 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 평균 32.1[%]인 것으로 나타났다.

(2) 직류전압 인가 시 화염이 존재할 때의 섬락전압은 화염이 없는 경우에 비해 크게 저하되었으며, 또한 극성효과가 뚜렷이 나타났다. 실험결과 부극성 및 정극성일 때 상대 섬락전압의 평균값은 각각 18.7[%] 및 43.2[%]인 것으로 나타났으며, 이로부터 화염이 존재하면 정극성보다 부극성이 훨씬 낮은 것을 알 수 있었다.

(3) 교류전압 인가 시 섬락전압은 갭 길이 및 수평거리에 비례하여 증가되는 것으로 나타났다. 그러나 갭 길이와 수평거리가 어느 값 이상 증가하면 코로나 풍에 의해 화염이 소화되는 것으로 관측되었다.

(4) 직류전압 인가 시 수평거리가 비교적 작은 범위에서 극성효과는 나타났으나, 수평거리가 어느 범위 이상 증가하면 극성효과는 나타나지 않았다. 또한 갭 길이와 수평거리가 어느 범위 이상 증가하면 코로나 풍에 의해 화염이 소화되는 현상이 관측되었다.

이상의 결과는 연소화염이 존재할 수 있는 각종 절연 시스템 등에서 합리적인 절연 설계와 절연과피 사고의 대책 수립 시 기본 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

#### References

[1] J. M. Meek, J. D. Craggs "Electrical Breakdown of Gases",

- John Wiley and Sons, pp.209-533, 1987.
- [2] E. Kuffel, W. S. Zaengle, "High Voltage Engineering, Fundamentals", Pergamon Press, pp.297-377, 1984.
- [3] J. D. Boom, A. Konov, "The Effect of DC Electric Field on the Laminar Burning Velocity of Air Flames", Proceeding of the Combustion Institute, vol. 32, No. 1, pp. 1237-1244, 2009.
- [4] J. R. Fonseca, A. L. Tan, "Effects of Agricultural Fires on the Performance of Overhead Transmission Lines", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, No. 4, pp. 687-693, 1990.
- [5] I. Kim, K. Lee, "Flashover Characteristics of the Horizontal Air-Gaps Caused by Combustion Flames", Journal of KIIEE, Vol. 16, No. 1, pp. 27-34, 2002.
- [6] M. J. Tummers, A. W. Hubner, "Hysteresis and Transition in Swirling Flames", Combustion and Flame, Vol. 156, No. 2, pp. 447-459, February 2009.
- [7] K. Koyama, T. Sekiguchi, "The Measurement of the Electrical Conductivity of Seeded Flame Plasmas," Trans. on IEE Japan, Vol.87-6, No. 945, pp.1145-1151, 1987.
- [8] H. Kiwaki, S. Komeji, "Electrical Properties of Combustion Flames," Journal of Applied Physics Japan, Vol.41, No. 10, pp.1077-1084, 1972.
- [9] J. A. Barnard, J. N. Bradley, "Flame and Combustion Phenomena," 2nd ed., Chapman and Hall, pp. 142-185, 1985.
- [10] I. Kim, "Breakdown Characteristics of a Vertical Sphere-Plane Air Gap in the Presence of Combustion Flames", Journal of KIIEE, Vol. 25, No. 5, pp. 79-84, 2011.

### ◇ 저자소개 ◇



#### 김인식(金寅湜)

1953년 10월 3일생. 1974년 영남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1991년 미국 University of Southern California Visiting Scholar. 현재 경일대학교 철도전기공학부 교수.