

Study on Insulation Prediction of Triple Junction in SF₆

조용성[†] · 정진교^{*} · 이우영^{**}

(Yong-Sung Cho · Jin-Kyo Chong · Woo-Young Lee)

Abstract - Triple junction which consists of three media (electrode, insulator, and gas) should be considered in designing of high voltage equipments due to the electric field enhancement. In this paper, positive lightning impulse breakdown voltage is predicted based on the streamer theory for simplified insulator models and 72.5kV spacer with varying the triple junction geometry and gas pressure, and the results are compared to the experimental results. The electric field coefficient concept is also applied in order to evaluate the partial discharge inception voltage and the surface flashover voltage from the streamer inception voltage. The application of this method using the constant electric field coefficient of 1.3 and 0.66 is possible for evaluating the triple-junction insulation of the simplified insulator and the 72.5kV spacer respectively. The error rate is under 10%.

Key Words : Triple junction, Streamer, Surface flashover, Lightning impulse, Insulator

1. 서론

가스 절연 개폐장치(GIS)에는 절연을 유지하면서 고전압 전극을 지지하기 위해 다양한 종류의 고체절연물이 사용된다. 이러한 고체절연물이 가스 중에서 전극을 지지하게 되면 전극, 절연물, 가스의 세 가지 다른 매질이 한 곳에서 만나는 삼중점이 존재하게 된다. 삼중점 부근에서는 전계강도가 국부적으로 집중되므로 전계집중을 완화시키기 위하여 금속을 스페이서 플랜지에 삽입하는 등의 방법을 사용하기도 한다.[1]-[3] 삼중점은 절연설계에 있어서 우선적으로 고려되어야 할 영역이므로 정확한 절연내력예측이 요구된다. 삼중점에서의 절연내력을 예측하기 위해서는 전계해석을 통한 전계분포를 구하여야 하는데, 기존에 널리 사용되고 있는 방법으로 전계해석을 하였을 때는 세 가지 매질이 만나는 삼중점에서의 정확한 전계해석 값을 얻기 어렵고, 해석기법상 삼중점으로부터 일정거리를 벗어난 영역부터 전계해석이 가능하다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 삼중점 영역에서의 정확한 해석을 하기 위한 노력들도 있다[4][5]. 한편 절연파괴는 단순히 전계강도가 높다고만 해서 발생하지는 않는다. 고체절연물의 연면을 통한 방전이 일어나려면 전극과 절연물 사이의 공간에서 전자가 전계에 의해 가속되면서 이온화가 진행되고 그 수가 지수적으로 증가하게 되어 최종적으로 방전이 발생하게 되는데, 이러한 이온화된 전자수가 충

분히 많으려면 갭이 어느 정도의 거리 이상이 되어야 한다. 삼중점으로 가까이 갈수록 전계강도는 높아지지만, 방전이 일어날 수 있는 공간은 협소해지기 때문에 방전에 오히려 불리해지는 효과가 있다. 일반적인 전계해석 방식으로도 방전이 발생하기 쉬운 위치까지는 충분히 전계해석이 가능하므로 삼중점에서의 정확한 전계강도를 알지 못하더라도 삼중점 부근에서 시발되는 연면절연파괴를 추정할 수 있다.

본 논문에서는 스트리머 이론을 적용하여 간이모델절연물 형상과 72.5kV용 스페이서에서 각각 형성되는 삼중점에서의 정극성 뇌충격 파괴전압을 예측하였고, 실험을 통하여 검증하였다[6]. 스트리머 이론을 이용하여 삼중점 절연파괴 추정을 하였을 때 스트리머개시전압을 부분방전개시전압의 최저치로 볼 수 있으나 실제 시험결과에서 나타났듯이 압력이 증가함에 따라 추정된 스트리머 개시전압에 비해 실제 파괴전압이 포화되는 경향을 보여주지는 못한다. 이러한 부분을 보완하기 위하여 구해진 스트리머 개시전압에 추가적으로 전계계수(Cef)라는 개념을 도입하여 부분방전개시전압 및 연면파괴전압을 추정하는 방법을 사용하였다[7].

삼중점 절연예측을 위한 방법은 참고문헌[6][7]에 제시되어 있지만 간이모델과 같은 임의의 형상에 적용이 가능한지 그리고 실제 사용되고 있는 72.5kV 스페이서에 있어서의 적용 가능성을 집중적으로 분석하였다.

2. 삼중점 절연파괴 전압예측

SF₆ 가스 중 연면파괴개시전압은 스트리머이론을 적용하여 구해진다. 그림 1에서 각 Θ 의 축 상의 임의의 점에서의 유효이온화계수 $\alpha_{eff}(\theta, X, P)$ 를 기술하면 다음과 같다.[8]

† 교신저자, 정회원: 한국전기연구원 전력기기연구센터 연구원
E-mail : yscho@keri.re.kr

* 정 회원 : 한국전기연구원 전력기기연구센터 선임연구원

** 정 회원 : 한국전기연구원 전력기기연구센터 책임연구원

접수일자 : 2009년 2월 5일

최종완료 : 2009년 3월 24일

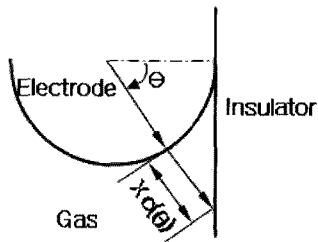


그림 1 전극, 절연물, 가스로 이루어진 삼중점 형상
 Fig. 1 The shapes of triple-junction consisting of electrode, insulator and gas

$$\alpha_{eff}(\theta, X) = K[E_c(\theta, X) \cdot V/100 - (E/P)_{crit} \cdot P] \text{ (mm}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

$K = 27 \text{ (kV}^{-1}\text{)}, (E/P)_{crit} = 88 \text{ (kV/mm} \cdot \text{MPa)}$
 $E_c(\theta, X): (\%/mm), P: (MPa), V: (kV)$

$E_c(\theta, X), V, P$ 는 각각 각 θ 의 축상의 임의의 점에서의 전계강도, 인가전압, SF₆ 가스 압력을 나타낸다. 여기서 %/mm는 100kV가 인가되었을 때 전계강도(kV/mm)를 의미한다. 삼중점 부근 미소공간에서의 전자사태에 의한 평균전자수 $N(\theta, P)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\ln N(\theta, P) = \int_0^{X_c(\theta)} \alpha_{eff}(\theta, X, P) dX \quad (2)$$

$$X_c(\theta) = R_{e1} [(1 - \cos\theta)^2 + (\tan\theta - \sin\theta)^2]^{1/2} \quad (3)$$

여기서 $X_c(\theta)$ 와 R_{e1} 는 전극과 절연물 간의 거리와 굽어진 전극의 반경을 각각 나타낸다.

연면파괴는 다음과 같이 $N(\theta, P)$ 값이 임계값에 도달하였을 때 발생한다고 볼 수 있다.

$$N(\theta, P) = N_{crit} = 10^8 \quad (4)$$

$$\ln N(\theta, P) = \alpha_{eff}(\theta, P) \cdot X_c(\theta) \quad (5)$$

식(1)의 V 는 식(4)와 식(5)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$V(\theta, P) = 100 \left[\frac{\ln N_{crit}}{K \cdot E_c(\theta) \cdot X_c(\theta)} + \frac{(E/P)_{crit}}{E_c(\theta)} \cdot P \right] \quad (6)$$

압력 P 조건에서 연면파괴 시작전압은 전극표면을 따라서 각 위치의 $V(\theta, P)$ 를 구하여 그 중 최소값으로 결정할 수 있고, 절연파괴가 그 위치에서 발생한다고 볼 수 있다.

이렇게 구한 스트리머 개시전압은 부분방전개시전압의 최저치 추정에 도움을 줄 수 있으나 그림 4에서와 같이 압력이 0.6MPa이고, 전극 직경이 20mm 일 때 계산된 스트리머 개시전압과 실제 연면파괴 전압의 차이가 상대적으로 작아지는 것과 같은 특성을 반영하지는 못한다. 따라서 이러한 특성을 포함한 정확한 예측을 하기 위해서 추가적인 고려가 필요하다. 이러한 경향을 가져오는 요인으로서의 전극의 표면거칠기(λ), 최대전계의 90%에 해당하는 실효면적($S_{90\%}$), 실효면적부에서의 평균전계(E_{av}), 그리고 가스충진압력(P)을 들 수 있다. 이러한 요소들의 곱인 $\lambda S_{90\%} E_{av} P$ 에 의해 전계

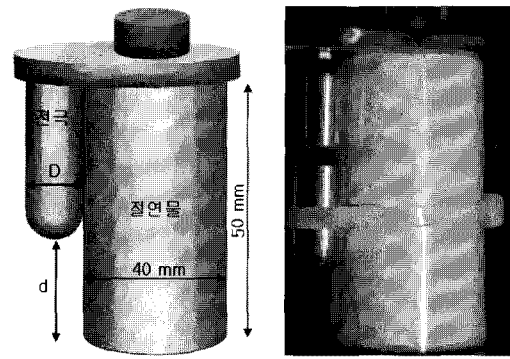


그림 2 삼중점 절연내력 시험용 간이모델
 Fig. 2 The simplified model for the test of triple-junction insulation

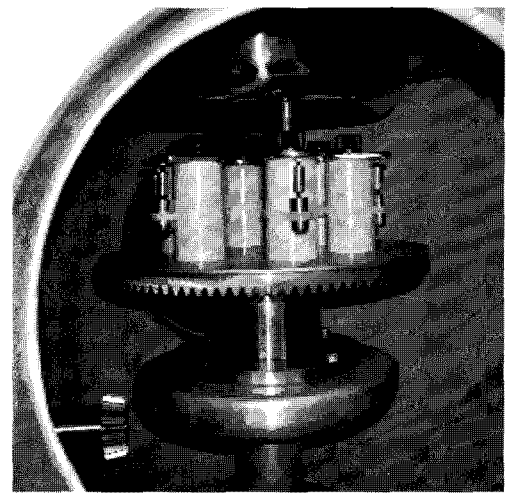


그림 3 간이모델에 대한 삼중점 절연 시험장치
 Fig. 3 The experimental system for the test of triple-junction insulation of the simplified model

계수 C_{ef} 가 결정되고, 이는 스트리머개시전압과 부분방전개시전압의 비를 의미한다. 참고문헌[7]에서는 이러한 요소들에 따른 C_{ef} 를 실험적으로 구하여 절연설계 시에 모델에 따라 적용하고 있다.

3. 삼중점 절연파괴전압 예측 및 실험결과

본 논문에서는 다른 형태의 모델에 대하여 그 적용 가능성을 타진해보기 위하여 그림 2와 같은 형상의 간이모델과 72.5kV 실패모델 스페이스에 대해 삼중점 절연예측을 하였고, 실험결과와 비교를 하였다.

3.1 간이모델

그림 2에 보여지는 것처럼 간이모델 절연물의 형상은 원기둥형이고 절연물의 옆면에 끝단이 반구형인 원기둥형 전극이 부착되게 된다. 절연물의 재질은 알루미늄으로 충전된 에폭시로서 비유전율은 6.0이다. 전극직경(D) 10, 15, 20mm인 전극에 대해서 가스압력 0.45MPa, 0.6MPa 각각에 대해서

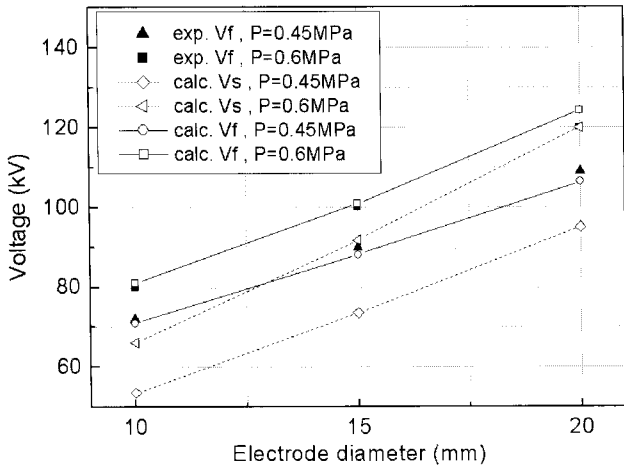


그림 4 간이모델에 대한 삼중점 절연내력 예측값과 실험값과의 비교

Fig. 4 The comparison of the predicted and the experimented of triple-junction insulation for the simplified model

절연시험을 하였고, 전극끝단과 바다의 평면도체와의 거리 (d)는 20mm로 고정하였다. 간이모델에 대한 삼중점 절연시험을 하는데 있어서 시료교체를 위한 챔버의 개폐작업 및 그로인한 가스 교환을 최대한 줄이기 위해서 그림 3과 같이 기어를 사용하여 외부에서 조정하여 시료를 교체할 수 있는 실험장치를 고안하여 실험효율을 높였다.

그림 4에서는 가스압력 0.45MPa 과 0.6MPa 일 때의 3차원 전기해석 및 스트리머 이론을 적용하여 구한 스트리머 개시전압(calc. Vs), 그로부터 구해진 연면파괴전압(calc. Vf) 및 실험으로부터 얻은 연면파괴전압(exp. Vf)의 결과를 보여주고 있다. 압력이 0.6MPa 이고, 전극직경이 20mm일 때 다른 경우보다 스트리머개시전압과 측정된 연면파괴전압의 차이가 상대적으로 작은 경향을 보인다. 이와같은 결과를 초래하는 요인들에 대해서 살펴보면 표면거칠기(λ)가 클 경우 표면에서의 전기장강도가 높아지고, 실효면적($S_{90\%}$)이 커지게 되면 전극표면의 미소돌기의 수가 증가하게 되어 방전에 유리하게 된다. 또한 실효면적부에서의 평균전계(E_{av})가 높으면 방전발생지점이 삼중점으로 근접해 들어가기 때문에 공간전하로 인한 전기완화작용은 감소하게 된다.

이러한 요인들에 의해 전기계수(Cef)가 변화하게 되는데, 본 논문에서 모델로 삼은 간이모델 형상은 참고문헌[7]에서 제시된 전기계수 값들 중 그림 8에서와 같이 1.3의 일정한 전기계수 값을 가지는 $\lambda S_{90\%} E_{av} P$ 의 영역에 해당되며 이 값은 참고문헌의 자료보다 상대적으로 큰 값을 가진다.

3.2 72.5kV 스페이서

간이모델에 대한 해석결과를 바탕으로 72.5kV 스페이서에 있어서 그림 5와 같은 형태의 삼중점 형상에 대하여 전기해석 및 스트리머 이론식을 적용하여 정극성 뇌임펄스 전압에 대한 절연내력을 계산하였고, 측정을 통하여 실험결과와 비교하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 내부도체 끝단의

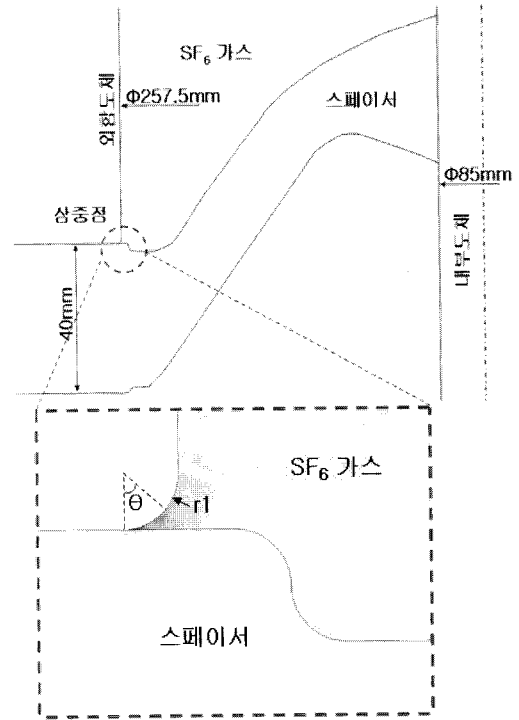


그림 5 삼중점 전기해석

Fig. 5 The electric field analysis of triple-junction

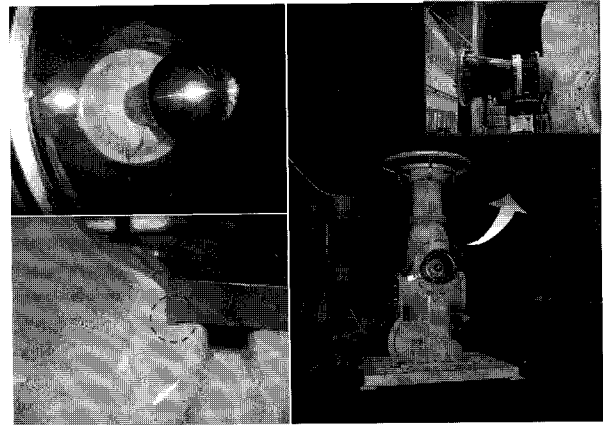


그림 6 72.5kV 삼중점 절연시험 장치

Fig. 6 Triple-junction insulation test system for the 72.5kV spacer

전기장강도를 낮추어 삼중점에서 절연파괴가 먼저 발생하도록 하기 위해서 직경 125mm의 구형셀드를 내부도체의 끝단에 설치하였다. 그리고 그림 6에서와 같이 전극끝단으로 가면서 외부챔버의 직경이 커지도록 설계하여 끝단에서의 절연내력을 높였다. 72.5kV 스페이서 실모델에 대해서 가스압력이 0.2MPa, 0.3MPa의 경우에는 전기완화를 위해 전극의 끝단에 구형태의 셀드를 설치했음에도 불구하고 삼중점에서 절연파괴가 발생하기 전에 가스매질을 통해 챔버로 직접 절연파괴가 발생하여 삼중점으로부터 시작되는 연면파괴전압을 측정할 수 없었다. 반면 가스압력이 0.4MPa, 0.5MPa에 대해서는 삼중점에서 시작되는 연면절연파괴가 발생하였고,

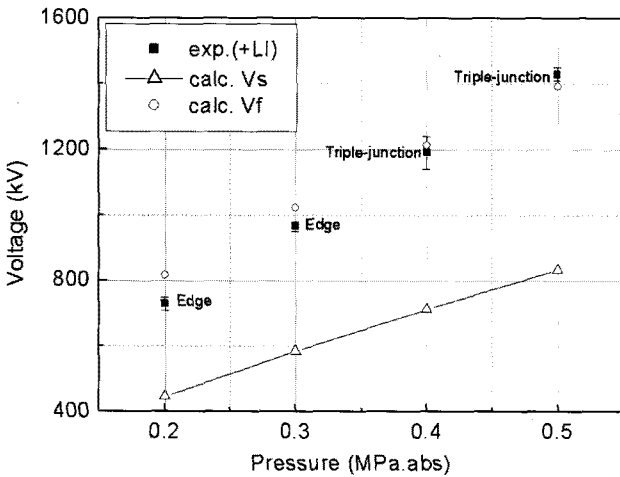


그림 7 72.5kV 스페이서에 대한 삼중점 절연내력 예측값과 실험값과의 비교

Fig. 7 The comparison of the predicted and the experimented of triple-junction insulation for the 72.5kV spacer

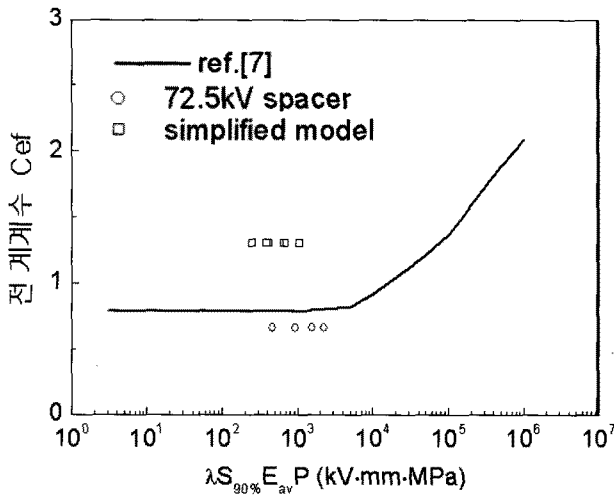


그림 8 전계계수(Cef)의 $\lambda S_{90\%} E_{av} P$ 값에 대한 관계

Fig. 8 The relationship between the electric field coefficient Cef and the value of $\lambda S_{90\%} E_{av} P$

그 결과는 그림 7에 표기되어있다. V_s 는 계산된 스트리머 개시전압을 의미하고, V_f 는 그로부터 계산된 연면파괴전압을 의미한다. 간이모델과 같은 방식으로 삼중점 절연과피값을 추정하였을 때 그림 8과 같이 72.5kV 스페이서의 경우 역시 일정한 전계계수 값 0.66을 가지는 $\lambda S_{90\%} E_{av} P$ 의 영역에 있음을 알 수 있었다. 그리고 압력변화에 대한 절연내력 계산값과 가스압력이 0.4MPa, 0.5MPa일 때의 실험 결과값을 비추어 볼 때 가스압 0.2MPa, 0.3MPa에서도 삼중점 절연과피전압이 계산값과 크게 벗어나지 않는 것으로 미루어 볼 때 예측값이 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

간이모델과 72.5kV 스페이서에 대해서 스트리머 이론을 근거로 한 삼중점 절연과피예측의 가능성을 고찰해 본 결과 간이모델과 72.5kV 스페이서 모두 일정한 전계계수 영역에 있고 전극의 표면거칠기, 실효면적, 실효면적부에서의 평균 전계 및 충전압력에 있어서 큰 변동사항이 없는 한 동일한 전계계수의 사용이 가능하므로 충분히 절연내력예측이 가능하다고 할 수 있다. 본 논문에서 모델로 삼은 간이모델의 경우는 1.3, 72.5kV 스페이서의 경우는 0.66의 값을 사용함으로써 예측치와 실측치의 오차를 10% 이내가 되도록 예측이 가능하다. 각 전계계수 값은 적용모델에 따라 다소 차이가 있어 원하는 모델에 대하여 기본적인 실험검증이 필요하지만 각 모델의 대표적인 전계계수를 찾으면 다양한 변화에 대하여 삼중점 절연내력의 예측이 가능해짐으로 절연물 설계에 직접적인 도움을 줄 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T. Takuma and T. Kawamoto, "Field Intensification near Various Points of Contact with a Zero Contact Angle between a Solid Dielectric and an Electrode," IEEE Vol. PAS-103, No. 9, pp.2486-2494, 1984.
- [2] K. Itawa and T. Hara, "Influence of Local Field Concentration on Surface Flashover Characteristics of Spacers in SF6 Gas," International Symposium on Electrical Insulation, IEEE, pp.55-60, 1980.
- [3] N. G. Trinh, F. A. M. Rizk and C. Vincent, "Electrostatic-Field Optimization of the Profile of Epoxy Spacers for Compressed SF6-Insulated Cables," IEEE Vol. PAS-99, No. 6, pp.2164-22174, 1980.
- [4] 송기동, 오연호, 최희준, "Singularity Function을 이용한 3중점 전계해석 기법의 개발," 2006년도 대한전기학회 부산/울산/경남지회 춘계학술대회 논문집
- [5] T. Takuma, "Field Behavior at a Tripe Junction in Composite Dielectric Arrangements," IEEE Trans. Vol. 26, No. 3, pp.500-509, 1991.
- [6] H. Hama, H. Yamamoto, S. Sakuma, K. Takatsuka, T. Yamauchi, "Surface flashover characteristic of disc-type spacer systeminitiated by wedge shaped gas gap and its improvement," IEEE Trans. Power Delievery, Vol. 8, No. 3, pp.1070-1079, 1993.
- [7] H. Hama, K. Inami, M. Yoshimura, K. Nakanishi, "Estimation of Breakdown Voltages of Surface Flashovers initiated from Triple Junction in SF6 Gas," T. IEE Japan, Vol. 115-A, No. 11, pp. 1078-1087, 1995.
- [8] T. Nitta, Y. Shibuya, "Electrical Breakdown of Long Gaps in Sulfur Hexafluoride," IEEE Trans. PAS-90. 1065-1071. 1971.

저 자 소 개



조 용 성 (趙 龍 成)

1977년 9월 16일생. 2003년 부산대 전자
전기통신공학부 졸업. 2006년 동대학원
전기공학과 석사졸업. 2006년~현재 한국
전기연구원 전력기기연구센터 연구원

Tel : 055-280-1558

Fax : 055-280-1589

E-mail : yscho@keri.re.kr



정 진 교 (鄭 鎭 敎)

1967년생. 1991년 강원대 전기공학과 졸
업(학사). 1994년 동대학원 전기공학과
석사졸업. 현재 한국전기연구원 전력기기
연구센터 선임연구원

Tel : 055-280-1564

Fax : 055-280-1589

E-mail : jkchong@keri.re.kr



이 우 영 (李 佑 映)

1957년 10월 2일생. 1980년 경북대 전자
공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전자공학
과 석사졸업. 1990년~현재 한국전기연구
원 전력기기연구센터 책임연구원

Tel : 055-280-1572

Fax : 055-280-1589

E-mail : wylee@keri.re.kr