

## Insulation Characteristics and Thermography Diagnosis of Porcelain Insulators for the Distribution Systems

정종만<sup>†</sup> · 김동명\* · 최명호\*\*  
(Jong-Man Joung · Dong-Myeong Kim · Myung-Ho Choi)

**Abstract** - The insulating characteristics and temperature rise behaviors of porcelain suspension insulators were investigated. The testing insulators had used in the distribution systems normally and were sampled. Firstly, leakage current was measured and its impedance was calculated. The leakage current of good insulators is 0.2 mA and its impedance is 66 MΩ. The worse insulators have lower impedance and the insulators having below 15 MΩ take place flashover at the high frequency voltage flashover test. Secondly, the temperature rise characteristics were analyzed depending on leakage current and its impedance. Surface temperature of insulators was measured for 30 minutes and until its saturation after voltage was applied. The temperature rise of insulators having 15 MΩ is about 14.5 °C above the ambient temperature. Lastly, the heating behaviors of 3 insulators in a string was analyzed. Any insulator in the string does not generate heat so far as it has at least one sound insulator. On the other hand, all the insulators in the string are bad if the string have any heating insulator.

**Key Words** : Thermography, Diagnosis, Insulating Characteristics, Porcelain, Insulators

### 1. 서 론

전력설비 운영기술은 산업환경, 경제환경과 함께 변화하고 있다. 90년대 말까지는 우리나라 산업의 양적 성장으로 전력설비의 확대에 주력하여 제조품질 관리가 중요하게 여겨졌다. 그 이후에는 전기·전자, 정보통신기술 등 고부가가치 기술이 발전함에 따라 정전예방, 전력공급 신뢰도 확보의 중요성이 커졌다. 최근에는 환경오염과 자원고갈 등의 문제로 인해 자원을 효율적으로 활용하기 위해 전력설비의 최적 투자와 기존 설비를 최대한 사용하려는 노력이 이루어지고 있다. 이를 위해서는 설비의 상태를 판단할 수 있는 진단기술을 확보하고 고장현상을 정확하게 이해할 필요가 있다.

한편, 전력설비는 크게 발전, 송전, 변전, 배전 분야로 구분된다. 이때 발전, 송·변전 분야는 대규모의 설비가 집중 운영되는 반면, 배전분야는 소규모 대량의 설비가 전국에 산재되어 운영되는 특징이 있다. 따라서 배전설비의 경우 고가의 진단장비를 부착, 운영하기가 어렵다. 하지만 최근 정보통신 기술의 발전과 더불어 다양한 진단장비가 개발되고 현장 적용이 이루어지고 있다.

배전설비는 크게 가공설비와 지중설비로 나눌 수 있다. 가공설비는 전력선을 지지하기 위한 전주, 애자, 변압기 및 개폐기 등의 설비가 있다. 그 중 애자는 정전원인에 높은

비중을 차지하는 기자재이다[1]. 애자의 경우 균열, 파손 현상이 대부분을 차지하고 있어 균열이 심한 경우 육안점검이 가능하여 진단적출이 용이하나 미세균열의 경우 적출이 어려워 정전사고가 발생하는 사례가 많다[2][3]. 따라서 애자의 진단기술 개선을 통해 전력공급 신뢰도가 크게 개선될 것으로 생각된다[4].

애자는 전주 위에 설치되어 접근이 어려우므로 비접촉식 진단장비가 효과적이다. 비접촉식 진단장비에는 육안점검을 비롯하여 적외선 검출장비, 자외선 검출장비, 초음파 검출장비가 대표적이다. 이 중에서 적외선 검출장비인 열화상 진단장비는 타 장비에 비해 오랜 기간 사용하여 측정결과에 대한 이해도가 높은 편이다. 그리고 저항손에 의한 발열현상으로 다른 현상에 비해 해석이 용이하다. 따라서 본 논문에서는 애자의 열화상 진단에 활용할 수 있도록 불량애자의 절연 특성과 발열 현상을 분석하였다.

### 2. 본 론

자기애자는 그림 1과 같이 금구, 자기, 시멘트로 구성되어 있다. 그림 1에서 애자의 주절연 부는 캡-핀 사이이며 사용 환경에서 표면섬락이 발생하지 않도록 충분한 누설거리를 확보하고 있다.

애자는 충전부를 절연하고 지지하는 기능을 한다. 애자에 기계적 결함이 있을 경우 절연과파괴가 뿐만 아니라 지지기능도 잃게 되어 기계적 특성이 무엇보다 중요하다. 특히, 주절연부의 미세균열은 외부에서 관찰할 수가 없다.

애자의 균열 원인은 크게 외부충격, 재질불량을 들 수 있다. 외부충격에는 이상전압 유입에 따른 섬락충격, 기계적인

\* 정 회 원 : 한국전력공사 설비진단센터 책임연구원 · 공박  
\*\* 비 회 원 : 한국전력공사 충남본부 부장  
† 교신저자, 정회원 : 한국전력공사 설비진단센터 선임연구원 · 공박  
E-mail: jjmany@kepri.re.kr  
접수일자 : 2011년 8월 19일  
최종완료 : 2011년 10월 14일

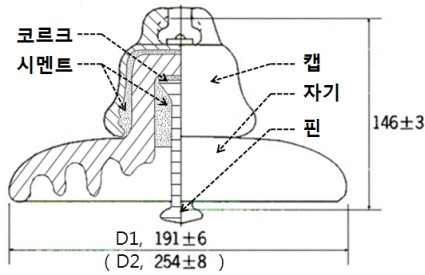


그림 1 자기 현수애자의 단면도  
Fig. 1 Layout of porcelain suspending insulator

충격 및 하중이 있고 재질불량은 재료불량, 열처리 불량 등이다. 이때 외부충격과 같은 외부요인은 애자의 특성변화보다는 환경의 영향이 크고 관찰이 가능하다. 반면, 재질불량의 경우는 내부응력에 의해 애자에 균열로부터 진전되어 육안 관찰이 어렵다[5]-[9].

그림 2는 주절연부의 균열에 의해 관통 섬락이 발생한 사례이다. 이와 같은 경우는 섬락 부가 애자 내부에 있어 사고 개소를 발견하는 것마저 어렵다.

이와 같이 애자 내부에서 균열이 발생할 경우 누설거리가 매우 짧아지게 되어 절연특성의 급격한 변화를 가지게 되는데 그 현상을 분석하였다. 배전계통에서 정상적으로 사용 중이던 자기제 현수애자 96개를 철거하여 특성을 측정하였다.



그림 2 자기 현수애자의 고장사례  
Fig. 2 Failure case of the insulators

2.1 시험시료 및 시험방법

그림 3은 시험용 현수애자의 사진이다. 육안상 관찰되는 균열이 없으며 광택을 유지할 정도로 청결한 상태이다.

애자의 절연특성을 분석하기 위해 누설전류, 절연저항, 정전용량을 측정하였고 고주파전압 섬락시험[7]을 실시하였다. 그리고 발열특성 분석을 위해 전원 인가 후 애자 표면의 온도를 측정하였다. 시험 장치를 표 1에 정리하였다.



그림 3 시험용 시료  
Fig. 3 Test samples

표 1 시험장치  
Table 1 Test sets

구분	사양	제조사
누설전류	0.01 ~ 10mA	Nihon Keisokuki Seizosho
절연저항	5 ~ 10kV, 15TΩ	Megger
정전용량	0.1nF ~ 100pF	AVO Interna'l
고주파전압 섬락시험	2kVA, 200kV, 200kHz	Tokyo Trans
적외선온도계	-30 ~ 900℃	Raytek

누설전류는 LCD-4 Leakage Current Detector로 측정하였다. 애자 핀에 계통전압(13.2 kV, 60 Hz)를 인가하고 캡을 접하여 접지부에서 전류를 측정하였다.

절연저항은 Megger 사의 S1-1052 모델로 측정하였다. 시험전압은 시험장치의 최대 전압인 10 kV로 하였다.

정전용량은 BIDDLE High Voltage Capacitance and Dissipation Factor Bridge를 사용하여 측정하였다. 계통전압을 애자 캡 및 표준 정전용량에 병렬로 인가하고 출력 선은 브릿지 회로에 각각 연결 하여 측정하였다.

고주파 전압 섬락시험은 주로 애자의 냉열 시험 후 애자 내부에 균열 발생 여부를 확인하기 위해 시행하고 있다. 애자 내부에 미세 균열의 존재 여부를 확인하는 시험이다.

애자에 계통 전압을 인가하고 30분 후 그리고 온도가 포화될 때 까지 적외선 센서를 사용하여 애자의 표면온도를 측정하였다.

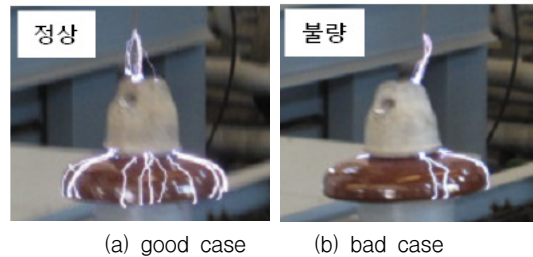


그림 4 고주파 전압 섬락시험  
Fig. 4 Flashover test with high frequency voltage

그림 4는 고주파 전압 섬락시험 시 정상상태와 불량상태를 비교한 것이다. 애자에 고주파 전압이 인가되면 섬락이 지속적으로 발생하고 정상애자일 경우는 그림 4 (a)와 같이 캡에서부터 방사상으로 섬락이 발생하고, 불량일 경우는 애자 내부의 균열을 따라 섬락이 발생하여 그림 4 (b)와 같이 섬락 경로가 고르지 않다.

2.2 시험결과

2.2.1 누설전류 및 임피던스 특성

그림 5는 현수애자의 누설전류 I와 임피던스 Z를 같이 나타내었다. 임피던스는 인가전압과 측정된 누설전류의 비로 계산하였다. 그림 5에서 시료순번은 누설전류 값에 대한 내림차순이다. 임피던스는 크게 세 영역으로 구분할 수 있다. 첫째 고 임피던스의 정상영역, 둘째 중간 임피던스 영역, 셋째 저 임피던스의 고장영역이다.

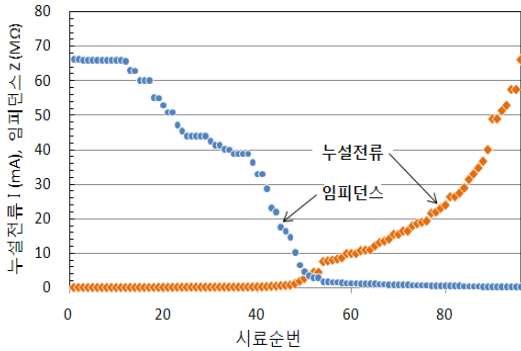


그림 5 애자의 누설전류 및 임피던스  
Fig. 5 Leakage current and impedance of the insulators

그림 5에서 임피던스 최대값은 66 MΩ으로 정상애자의 특성을 정의할 수 있다. 따라서 정상애자의 경우 계통 전압이 인가될 경우 누설전류 약 0.2 mA가 흐르게 된다. 그리고 정상 애자 이외 시료는 계통 운영 중 열화는 되었지만 불량 애자로 판정하기가 어렵다. 아직 사용 중 애자에 대한 상태 판정 기준이 없는 실정이다.

2.2.2 절연저항 및 정전용량 특성

애자의 절연저항 R을 임피던스 및 온도상승 특성과 비교하여 그림 6에 나타냈다. 그림 6에서 절연저항은 최대 20 GΩ, 임피던스는 최대 66 MΩ을 나타내고 있다. 인덕턴스는 무시할 경우 합성 임피던스가 절연저항 보다 작으므로 그림 7과 같이 절연저항과 정전용량 C의 병렬, 등가회로로 나타낼 수 있다.

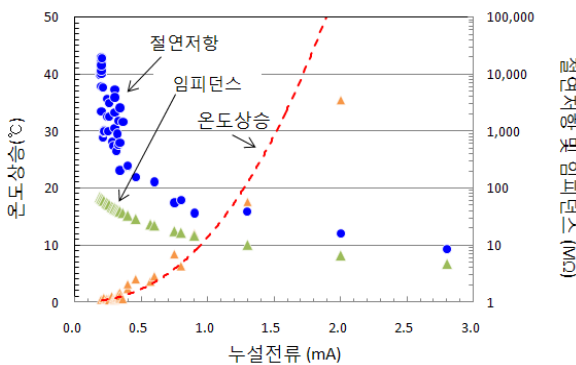


그림 6 절연특성 및 단시간 온도상승 특성  
Fig. 6 Insulating and short time temperature rise characteristics

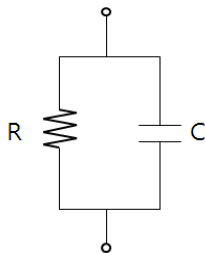


그림 7 현수애자의 등가회로  
Fig. 7 Equivalent circuit of the insulators

그림 6에서 누설전류에 따른 절연저항은 급격히 감소하고 있는데 누설전류 중 저항성 성분이 크게 증가한다고 볼 수 있다.

정상애자의 임피던스를 검토하기 위해 정전용량을 측정하였다. 표 2에 대표적인 정전용량 C값과 절연저항 R 및 임피던스 Z를 나타내었다. 표 1의 1번 애자에 계통전압이 인가되면 저항성 전류는 약 0.8 μA이며, 용량성 전류는 약 0.18 mA로 계산된다. 정상애자의 경우 용량성 전류가 대부분이며 저항성 전류에 비해 200배 이상 크게 나타난다.

표 2 정상애자의 정전용량 및 절연저항 측정값

Table 2 Capacitance and resistance values of the good insulators

구분	정전용량 C (pF)	절연저항 R (GΩ)	임피던스 Z (MΩ)
1	36.7	15.2	66
2	37.0	11.3	66
3	37.7	13.7	66

2.2.3 고주파 전압 섬락특성

그림 6에서와 같이 열화로 인해 임피던스가 점점 줄어들고 누설전류가 증가하게 되는데 불량 애자의 임피던스 기준을 정의할 필요가 있다. 그래서 애자의 균열여부를 확인할 경우 시행하는 고주파 전압 섬락시험을 적용하고 섬락이 발생하지 않는 임피던스의 최소값을 분석 하였다.

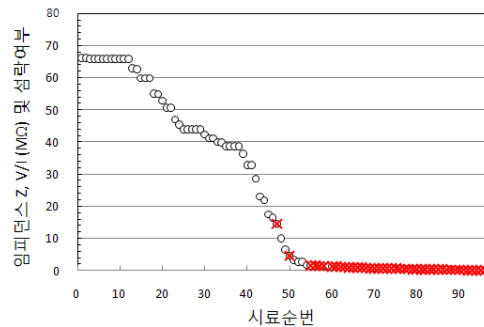


그림 8 고주파 전압 섬락시험 결과  
Fig. 8 Test results of flashover test with HF voltage

그림 8은 고주파 전압 섬락시험 결과를 나타내고 있다. 섬락여부는 임피던스 그래프 위에 X로 표시하였다. 그림 8에서 섬락이 발생한 애자의 최대 임피던스는 약 15 MΩ이었다. 따라서 임피던스가 15 MΩ 보다 작은 경우는 불량애자이며 15 MΩ과 같거나 큰 경우는 정상애자라 할 수 있다. 정상애자 중 66 MΩ 보다 작은 경우는 사용 중에 열화된 것이다. 이 값은 현장에서 설비운영 시 애자의 상태 판정 값으로 활용할 수 있을 것이다.

2.2.4 단시간 온도상승 특성

그림 8에서와 같이 열화된 애자의 경우 임피던스가 감소하는데, 그림 6과 같이 절연저항이 크게 감소하기 때문이다. 따라서 임피던스가 감소한 열화 애자의 경우는 저항성 누설전류가 증가하여 열이 발생하고 열화상으로 검출할 수 있다.

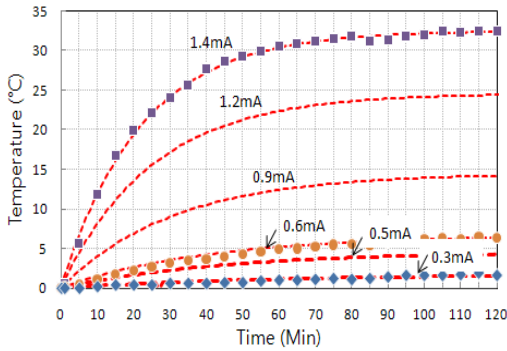
그림 6에 단시간 온도상승 특성이 있다. 통전 후 30분 경과 시의 온도를 누설전류크기에 따라 나타내었다. 그림 6에서 누설전류가 증가함에 따라 애자의 표면온도도 증가하고 있다.

**2.2.5 포화 온도상승 특성**

시간에 따른 온도상승  $T(t)$ 는 식 1과 같이 나타낸다.

$$T(t) = T_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad \text{----- 식 1)}$$

단,  $t$ 는 시간,  $T_m$ 은 최대온도,  $\tau$ 는 시정수 이다.

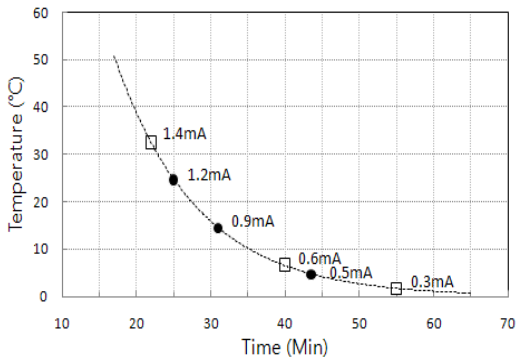


**그림 9** 누설전류에 따른 포화온도 상승특성  
**Fig. 9** Temperature saturation characteristics

그림 9는 누설전류 크기에 따른 온도상승 특성이다. 그림에서 점으로 표시된 그래프는 실측된 값이며 점선은 계산된 값이다. 계산 값의 경우 앞서 측정된 단시간 온도상승 특성  $T(30)$ 을 만족하도록 계산하였다.

그림 10은 시정수와 최대 온도상승 값의 경향을 나타내고 있다. 그림에서 검정색 원은 계산된 값이며 흰색 사각형은 측정된 값이다. 누설전류가 커질 경우 열원이 커지지만 애자의 체적은 일정하여 시정수는 짧아지는 경향을 보이는 것이다.

앞에서 정의한 불량애자의 최대 임피던스는 15 MΩ이므로 이에 계통전압이 인가될 경우 누설전류는 약 0.9 mA가 통전 된다. 이때 최대 온도상승은 그림 10에서 약 15 °C이다. 현장에서 열화상 측정시 주위온도 보다 15 °C 이상 높은 경우 교체를 하는 것이 좋다.



**그림 10** 최대 온도상승값 및 시정수  
**Fig. 10** Maximum temperature rise and time constant

**2.2.6 애자련의 발열 특성**

배전계통에서는 2~3개의 자기재 현수 애자를 1개의 애자련으로 직렬 연결하여 사용하고 있다. 염해, 오손에 대비하고 구성 애자의 일부가 불량하더라도 절연 보완이 되도록 운영하고 있다.

**표 3** 애자련의 온도상승

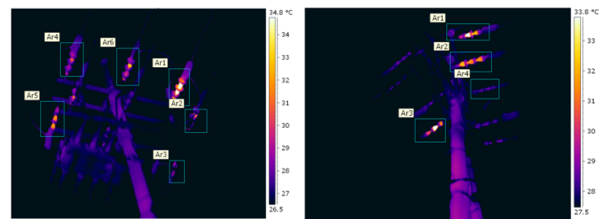
**Table 3** Temperature rise of the insulator series

순번	i (mA)	ΔT (°C)	구성 애자 상태	
			Z (MΩ)	상태
1	0.07	0.1	66	정상
		0.1	66	정상
		0.2	66	정상
2	0.2	0.3	0.9	불량
		0.6	38.8	정상
		0.4	14.7	정상
3	0.4	0.5	0.3	불량
		0.4	0.4	불량
		1.1	33	정상
4	1.1	4.4	0.4	불량
		3.1	0.4	불량
		13.2	11	불량

표 3은 애자련에 대한 단시간(30분) 온도상승 값을 나타내고 있다. 애자의 임피던스 상태에 따른 발열 특성을 비교하기 위해서 나타내었다.

표 3에서 1번 애자련의 경우는 정상 애자로만 구성되어 있다. 저항성 누설전류가 없어 구성 애자 모두 온도상승이 거의 없다. 2, 3번 애자련의 경우는 구성 애자에 불량애자가 있지만 적어도 1개 이상의 정상애자가 포함되어 있어 온도상승이 크지 않다. 4번 애자련의 경우 불량애자만으로 구성되어 있어 구성 애자의 온도상승이 크다.

4번 애자련에서 구성 애자의 온도상승 값은 임피던스가 큰 애자가 크게 나타나고 있다. 이는 앞서의 설명과 같이 저항손에 의한 발열 현상이기 때문이다.



**그림 11** 열화상 진단사례  
**Fig. 11** Thermography diagnosis case

그림 11은 배전계통의 전주에 설치된 자기재 현수애자의 열화상 진단 사례이다. 열화상으로 적출된 애자련의 경우 개별 애자 양단의 전압은 정전유도에 의한 분포보다 저항에 의한 전압강하로 나타난다. 따라서 임피던스가 높은 애자의 분담전압이 높게 나타나고 임피던스가 낮은 애자의 분담전압은 낮게 나타난다. 따라서 정상 애자련의 분담전압 기준으로 불량을 판정할 수 없으므로 주의가 필요하다.

### 3. 결 론

배전계통에서 사용하던 자기제 현수애자를 사용하여 절연 특성 및 온도상승 특성을 분석하였다.

정상애자의 절연저항은 약 15 GΩ, 정전용량은 약 37 pF 을 나타내고 계통전압에서 임피던스는 66 MΩ을 나타내었다. 이때 정상애자는 계통전압에서 0.2 mA의 누설전류가 발생하지만 용량성 전류이므로 저항손이 없어 발열현상이 나타나지 않는다. 한편, 열화애자의 경우 임피던스가 감소하여 누설전류가 증가 하였으며 약 15 MΩ 이하에서는 고주파 섬락시험에서 섬락이 발생하였다.

열화애자의 경우 절연저항이 급격히 감소하여 저항성 누설전류가 증가하였다. 그리고 저항손에 의한 열이 발생하여 애자의 표면 온도가 크게 상승하였다. 특히, 섬락이 발생하지 않은 최소 임피던스인 약 15 MΩ을 나타내는 불량 애자는 주변온도에 비해 약 15℃ 상승하였다.

또한, 애자를 직렬 연결하여 사용하는 애자련의 경우 구성 애자가 하나라도 정상일 경우 온도상승이 없었으며 구성 애자가 모두 불량인 경우 온도가 상승하였다. 이때 구성 애자 중 임피던스가 제일 큰 애자의 온도가 제일 높게 상승하였다. 반면, 열화가 제일 심하여 임피던스가 제일 낮은 애자의 온도가 제일 낮게 나타났다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한전 배전전략실, 배전설비 정전분석 및 예방대책, 한전, pp.8-13, 2010.
- [2] 정종만, 광현관, 김한홍, “자기애자 누설전류 불량판정 기준”, 2010년도 대한전기학회 전기설비전문위원회 추계학술대회, pp.413-418, 2010.
- [3] Rawat.A, Gorur.R., “Microstructure based evaluation of field aged and new porcelain suspension insulators”, IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation, Vol.16, pp.107-115, 2009.
- [4] Vaillancourt.G.H., “New live line tester for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, pp.208-219, 1994.
- [5] 한전표준규격 ES-5970-0006, 배전용 불소켓형 현수애자, 2010.
- [6] 대한전기학회, 최신 배전시스템 공학, (주)북스힐, pp. 58-62, 2006.
- [7] 한전표준규격 ES-5970-0010, 애자시험방법, 2011
- [8] ESMOL Subcommittee 15.07, “Minimum number of good(healthy) porcelain of glass insulator units in a string for live work”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.17, pp.809-814, 2001.
- [9] Forrest. J.S., “The characteristics and performance in service of high-voltage porcelain insulators”, Electrical Engineers-Part II: Power Engineering, Journal of the institution of, pp.60-80. 2010.

## 저 자 소 개



### 정 종 만 (鄭鍾萬)

2004년 경상대 전기공학과 졸업(박사).  
2004년 ~ 현재 한국전력공사 재직  
Tel : 042-869-8072  
E-mail : jjmany@kepri.re.kr



### 김 동 명 (金東明)

2007년 고려대 재료공학과 졸업(박사).  
1986년 ~ 현재 한국전력공사 재직  
Tel : 042-869-8070  
E-mail : kimdmng@kepri.re.kr



### 최 명 호 (崔明鎬)

2004년 한밭대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 ~ 현재 한국전력공사 재직  
Tel : 041-539-3230  
E-mail : jayou@kepeco.co.kr