

https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.2.245

IIBC 2017-2-35

## 화력발전소 고전력 케이블의 누설 전류 측정 데이터의 표준 편차값을 사용한 절연감시 데이터 분석

### Analysis of Monitored Insulation Data Using Standard Deviation of Leakage Current Data in High-Power Cables at a Thermoelectric Power Station

김보경\*, 엄기홍\*\*

Bo-Kyeong Kim\*, Kee-Hong Um\*\*

**요약** 케이블은 설치하여 동작함과 동시에 열화과정이 진행된다. 고압전력케이블 시스템에 있어, 케이블의 절연층 및 방식층의 절연상태뿐만 아니라 케이블을 연결하는 단말부 및 접속부의 절연상태도 함께 감시하여야 케이블 시스템의 절연상태를 종합 관리할 수 있다. 케이블 시스템(케이블 자체 및 접속재)의 상태가 계속 나빠지는 경우, XLPE의 절연 파괴현상으로 인한 화재가 발생한다. 우리는 케이블시스템의 절연 상태를 감시하기 위한 장비를 개발하여 충남 태안의 한국 서부발전주식회사(Korea Western Power Co. Ltd.)에 설치하였다. 이 논문에서, 이 장비를 사용하여 케이블에 흐르는 누설전류를 추출하여 누설전류의 표준편차를 계산하여 분석한 결과를 제시한다. 정해진 누설 전류의 표준 편차값이 기준값 미만이면 안전하지만, 그 이상이면 케이블시스템의 단말부 및 접속부의 절연상태가 나쁜 것으로 판단하고, 새로운 케이블시스템의 단말부 및 접속부로 대체함으로써 전력공급 중단으로 인한 전력설비의 중단사고를 미연에 방지할 수 있다.

**Abstract** From the instant of installation and operation, power cables start deteriorating. Cable systems can be maintained not only by monitoring the insulation status of the insulation layer and oversheath, but also the insulation status of the terminal and junction in high-voltage power cables. When the cable system (the cable itself and cable junctions combined) deteriorates, fire accidents happen due to dielectric breakdowns. We have invented a device to monitor the deteriorating status of cables, and installed it at Korea Western Power Co. Ltd. located in Taean, Chungcheongnam-do Province. In this paper, we present the results obtained using our device, through analysing and calculating the standard deviation of leakage current from cable insulators attached to the cables. When the standard deviation of analysed leakage current falls below a critical value, a cable system is deemed to be operating safely. But when the standard deviation of analysed leakage current is larger than the critical value, the insulation status of the terminal and junction in the cable system is considered to have seriously deteriorated. The terminal and junction in the relevant system should then be replaced preemptively in order to prevent blackout accidents of cables caused by the suspension of power supply.

**Key Words** : Korea Western Power Co. Ltd., Insulation resistance, XLPE, leakage current, Standard deviation

\*정회원, 오성메가파워 대표

\*\*정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자, 주저자)

접수일자 2017년 1월 28일, 수정완료 2017년 3월 2일

게재확정일자 2017년 4월 7일

Received: 28 January, 2017 / Revised: 2 March, 2017 /

Accepted: 7 April, 2017

\*\*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr

Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

## I. 서 론

우리나라의 발전 비중은 2015년을 기준으로 석탄 발전이 39.3%, 원자력발전의 발전 비중은 30.0%로, 가스발전의 경우 4.5% 이며, 수력 등 신재생에너지 발전량은 4.7%에 불과하다. 원자력은 저렴한 발전단가와 안정적인 자원 보유량으로 인해 유용한 에너지원으로 평가받고 있으나 1979년 미국 Pennsylvania 주의 쓰리마일 섬(Three Mile Island)의 원전, 1986년 우크라이나 중북부 체르노빌(Chernobyl) 원전, 일본 후쿠시마 원전에서 발생했던 사고로 인한 안정성에 대한 부정적 인식, 방사선 폐기물 처분에 대한 기술적인 문제, 방사능 등의 위험성이 항상 존재하므로 원자력 발전량을 증가시키기 위해서는 대한 여러 가지 사항을 고려해야 한다<sup>[1]</sup>. 우리 나라는 주요 선진국과 달리, 전력 수요가 계속 증가 추세에 있으면서도 좁은 국토 면적 등 신재생에너지 잠재력이 상대적으로 낮다. 신재생 에너지는 주력 발전원이 되기에는 아직 기술적, 경제적 한계가 있으며, 여러 가지 비현실적인 부분이 존재한다<sup>[2,3]</sup>. 석탄화력 발전소는 환경을 오염시킨다는 단점에도 불구하고 저비용으로 안정적인 전력수급에 기여한다는 장점이 있기 때문에 화력발전에 의존할 수 밖에 없으며, 아직 이를 대체할 대안이 현재로서는 없다<sup>[4,5,6]</sup>. 정부가 해야 할 최선의 조치는 화력발전을 지속적으로 이용하되 그 대신 뒤따르는 부작용을 최소화 하는 방향의 정책을 수립해야 할 것이다<sup>[7,8]</sup>. 우리는 이 논문에서 케이블의 운전 상태를 그대로 유지하는 상태에서 즉, 활선 상태에서 케이블의 동작 상태를 감시하였다. 화력 발전소들 중의 하나로서 한국서부발전 주식회사(Korea Western Power Co. Ltd.)에서 운전 중에 있는 고전력 케이블의 동작 상태를 감시하기 위하여 우리가 개발하여 설치한 장비를 소개한다. 이 장비를 사용하여 누설 측정 한 결과 즉, 케이블의 열화 과정을 나타내는 결과를 제시한다.

## II. 케이블의 절연저항 및 전류의 표준편차

### 1. 케이블의 절연저항

은, 구리, 금, 알루미늄 등의 도체는 전기 전도도가 크지만 종이, 고무, 운모(雲母), 유리, XLPE 등의 절연체

(insulator)의 전기 전도도(conductivity)는 매우 작다. 발전소에서 동작 중인 고전압 6.6 kV 케이블에는 화학적으로 가교 결합(cross-linked) 폴리에틸렌, XLPE가 사용되고 있다<sup>[9,10]</sup>. 절연체의 저항을 "절연저항(insulation resistance, IR)"이라 한다.

폴리에틸렌(polyethylene, PE)은 tan delta 값이 적어서 손실이 적고, 절연 내구력(絶緣耐久力, dielectric strength)이 아주 크다. 절연 내구력이란 절연체에 높은 전압을 인가하였을 때, 높은 전기 저항률을 유지할 수 있는 최대의 전기장 강도(인가 전압/시료 두께). 절연내력 이상의 전압을 인가하면 저항률의 급격한 저하, 즉 절연파괴가 일어난다. XLPE는 폴리에틸렌(polyethylene, PE)에 가교제를 첨가하여 고온고압을 가하여 가교 화학반응을 일으켜 PE 분자간의 입체망상의 3차원 분자구조로 변형시켜서 내열성을 향상시킨 절연체이다. PE가 갖는 장점을 모두 갖는다. 이에 더하여, 105 °C 이상의 온도에서도 녹지 않으며, 수트리(water tree) 저항이 개선된 특징을 갖는다.

전압이 600 V ~ 275 kV 인 범위에서 널리 사용되는 절연체이다. 우수한 전기적 특성을 가지며, 열에 강하기 때문에 허용온도 90 °C 에서 대용량의 초고압 케이블에 사용된다. 절연 저항이 큰 성질을 이용하여 케이블의 두께를 전기적으로 분리하기 위하여 사용된다. 이상적인 경우라면 절연성이 완전하여 절연저항이 무한대 크기의 값을 가진다.

### 2. 전류의 표준편차

표준편차(standard deviation)는 자료가 평균을 중심으로 얼마나 퍼져 있는지를 나타내는 대표적인 수치이다. 표준편차의 단위는 자료의 단위와 일치한다. 표준편차가 0 에 가까우면 자료 값들이 평균 근처에 집중되어 있음을 의미한다. 표준편차가 클수록 자료 값들이 널리 퍼져 있음을 의미한다. 확률변수  $X$ 의 확률분포가 다음 표 1과 같이 주어져 있다.

표 1. 누설전류의 표준편차  
Table 1. Standard deviation of Insulation resistance

$X$	$x_1$	$x_2$	...	$x_n$	합계
도수	$f_1$	$f_2$	...	$\frac{f_n}{N}$	$N$
상대도수	$p_1 = \frac{f_1}{N}$	$p_2 = \frac{f_2}{N}$	...	$p_n = \frac{f_n}{N}$	1

확률변수  $X$ 가  $x_i$ 의 값을 가질 확률은

$$P(X=x_i) = p_i = \frac{f_i}{N} \quad (1)$$

이다. 식 (1)에서  $f_i/N$  는 상대도수를 나타낸다. 확률변수  $X$ 의 기댓값  $E(X)$ 를  $m$ 이라고 할 때, 확률변수  $X$ 의 표준편차  $\sigma(X)$  는

$$\begin{aligned} \sigma(X) &= E((X-m)^2) = \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2 p_i \\ &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

로 정의한다. 식 (2)에 의하여 우리가 측정한 누설전류는 오차를 최소로 줄이기 위하여 수십 차례 측정하여 평균값을 구하고, 평균값과의 차이를 계산하며, 또한 수십 차례 측정한 누설전류를 표준 편차값을 계산하여 감시항목으로 사용한다.

### III. 누설 전류

실제 절연체의 절연성이 완전하지 않으므로 입력단에 인가한 전압에 의하여 미소한 전류가 흐르게 된다. 이 전류를 "누설 전류(leakage current)" 라고 한다. 누설전류(또는 누전)란 것은 전선을 통하지 않고 전선 사이의 유전체를 흐르는 바람직하지 못한 전류이다. 어느 정도의 누설전류가 흐르면 누전 또는 케이블 파괴의 조짐이 보이는가 하는 문제는 발전소에서 동작중인 고전압 케이블의 수명을 예측하는데 매우 중요하다. 절연되어 있는 장소를 통해서 흐르는 전류를 말하며, 정상 상태에서는 매우 적다. 절연물에 붙은 먼지나 습기 등 때문에 표면을 통해서 흐르는 성분과 절연물 중에 존재하는 불순물이나 이온 등 때문에 내부를 통해서 흐르는 성분이 있다. 절연물에 직류전압을 가했을 때, 전류는 서서히 감소하고 일정 값으로 자리 잡는다. 이때의 전류를 말한다<sup>[11]</sup>. 우리는 케이블 시스템에 사용하는 단말부 및 직선접속부는 케이블의 절연층이나 방식층의 절연물질과는 다르고 절연열화특성도 다르기 때문에 누설전류의 값으로는 단말부 및 직선접속부의 절연상태를 파악하기 쉽지 않다는 것을 20여년 이상의 케이블의 절연진단 현장경험으로 알고 있다. 단말부 및 직선 접속부의 절연상태를 파악하기 위해 20

여 년 전인 1994년 부터 절연저항 측정 시에 검출된 누설전류의 data로부터 표준 편차값을 계산하여 편차라는 감시항목을 도입하여 수 년 이상 절연 측정장치가 설치된 실제 현장시험을 거쳐 십 수 년 전부터 케이블 감시항목으로 사용하고 있다. 한편, 한전(KEPCO)에서도 2010년 경부터 IEEE Std. 400.2 /D9, (Sep. 2010)의 VLF(very law frequency)  $\tan \delta$  상태 판정기준에 표준편차에 해당하는 안정도 인자 standard deviation (1.0  $U_0$ ) 를 추가하였다<sup>[12]</sup>.

표 2는 케이블 사고를 미연에 방지하기위한 누설전류의 표준편차에 의한 열화 판정기준을 나타낸다. 이 기준은 수학적인 계산에 의하여 증명 또는 유도된 것이 아니고, 저자들과 케이블 진단업무 엔지니어들의 오랜 실무 경험과 체험에 의한 합의된 기준이다. 이런 기준 따지 없다면, 발전소에서는 객관적으로 정한 기준이 없이 정성적인 판단, 주먹구구로 열화된 케이블을 대체할 것이다.

표 2. 누설전류의 표준편차에 의한 케이블 조치 기준

Table 2. Criteria to take actions on the cables via the standard deviation of leakage current

판 정	표준편차	조 치
양호	5.00미만	
주의	5.00이상	부분방전의 가능성이 있으므로 단말 및 직선 접속부위의 점검 및 상세 data 확인 필요

### IV. 케이블별 전류 데이터 분석

우리는 충남 태안 소재 화력 발전소 서부 발전 주식회사에서 수년 동안 동작하고 있는 여러 개 케이블 중에서 9 개의 케이블을 선택하여 연구를 진행하였다. 케이블별 절연 측정 데이터를 추출하여 우리가 제작한 장치를 저장된 데이터 중 2개의 케이블의 측정사례를 기술한다. 각 케이블별 측정data 분석은 2014년 9월 중순부터 2015년 9월 중순까지 약 12개월(1년)의 data를 사용하여 data분석을 실행하였다. 편의상 하나를 No.02이라고 칭하고 이 케이블시스템의 단말부 및 접속부의 절연상태를 감시한 결과 양호하여 교체할 필요가 없음을 확인하였다. 양호 판정을 내린 근거를 제시한다.

### 1. No.1 Feeder Cable

절연측정 data 를 분석한 사례를 제시한다. 그림1은 절연저항 측정 장치에서 No.01 feeder에 대해 매일 절연상태를 측정시에 직류신호전압을 중첩인가하지 않은 상태에서 검출된 누설전류data로 계산된 표준편차(standard deviation) data의 1년간 trend curve를 나타낸 것으로, 누설전류의 표준 편차값은 편차경계치(5.00, 중앙 파선)보다 매우 낮은 값을 나타내므로, 표준편차 감시항목은 양호한 것이다. 따라서, 케이블의 단말 및 접속부에서 부분방전 (partial discharge, PD)이 발생하지 않은 상태이므로, 단말 및 접속부의 상태는 양호한 상태에 있다고 판단한다.



그림 1. No.01 feeder의 누설전류의 표준편차 trend 1  
Fig. 1. Standard deviation trend 1 from the leakage current of No.01 feeder

그림 2는 절연저항 측정 장치에서 No.01 feeder에 대해 매일 절연상태를 측정시에 직류신호전압을 중첩인가한 상태에서 검출된 누설전류data로 계산된 표준편차 (standard deviation) data의 1년간 trend curve를 나타낸 것으로, 누설전류의 표준 편차값은 편차경계치(5.00, 중앙 파선)보다 매우 낮은 값을 나타내므로, 표준편차 감시항목은 양호한 것이다. 따라서, 케이블의 단말 및 접속부에서 부분방전(partial discharge, PD)이 발생하지 않은 상태이므로, 단말 및 접속부의 상태는 양호한 상태에 있다고 판단한다.

그림 3은 No.01 feeder에 대해 그림1과 그림2에서 사용한 매일 계산된 표준편차값을 10일 평균한 값을 graph 화한 것으로, 누설전류의 표준 편차값은 편차경계치(5.00, 중앙 파선)보다 매우 낮은 값을 나타내므로, 표준편차 감시항목은 양호한 것이다. 따라서, 케이블의 단말 및 접속부에서 부분방전(partial discharge, PD)이 발생하지 않은

상태이므로, 단말 및 접속부의 상태는 양호한 상태에 있다고 판단한다.

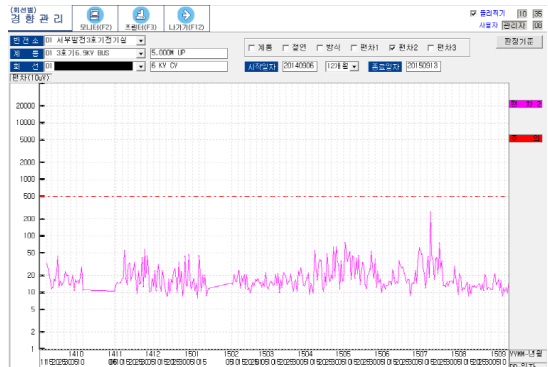


그림 2. No.01 feeder의 누설전류의 표준편차 trend 2  
Fig. 2. Standard deviation trend 2 from the leakage current of No.01 feeder

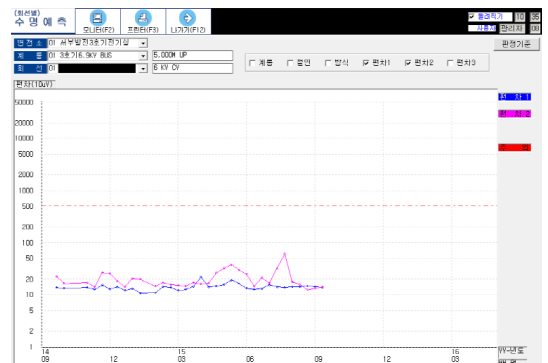


그림 3. No.01 feeder의 누설전류의 표준편차 10 평균 trend  
Fig. 3. Average standard deviation of 10 days from the leakage current of No.01 feeder

### 2. No.2 Feeder Cable

절연측정 data 를 분석한 사례를 제시한다. 그림4는 절연저항 측정 장치에서 No.02 feeder에 대해 매일 절연상태를 측정시에 직류신호전압을 중첩인가하지 않은 상태에서 검출된 누설전류 data로 계산된 표준편차 (standard deviation) data의 1년간 trend curve를 나타낸 것으로, 누설전류의 표준 편차값은 편차경계치(5.00, 중앙 파선)보다 매우 낮은 값을 나타내므로, 표준편차 감시항목은 양호한 것이다. 따라서, 케이블의 단말 및 접속부에서 부분방전(partial discharge, PD)이 발생하지 않은 상태이므로, 단말 및 접속부의 상태는 양호한 상태에 있다고 판단한다.

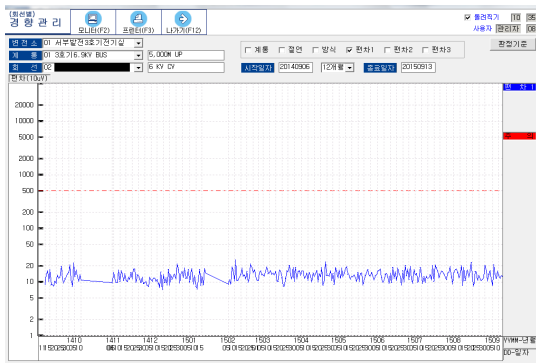


그림 4. No.02 feeder의 누설전류의 표준편차 trend 1  
 Fig. 4. Standard deviation trend 1 from the leakage current of No.02 feeder

그림 5는 절연저항 측정 장치에서 No.02 feeder에 대해 매일 절연상태를 측정시에 직류신호전압을 중첩인가한 상태에서 검출된 누설전류data로 계산된 표준편차(standard deviation) data의 1년간 trend curve(중양 파선)보다 매우 낮은 값을 나타내므로, 표준편차 감시항목은 양호한 것이다. 따라서, 케이블의 단말 및 접속부에서 부분방전(partial discharge, PD)이 발생하지 않은 상태이므로, 단말 및 접속부의 상태는 양호한 상태에 있다고 판단한다.

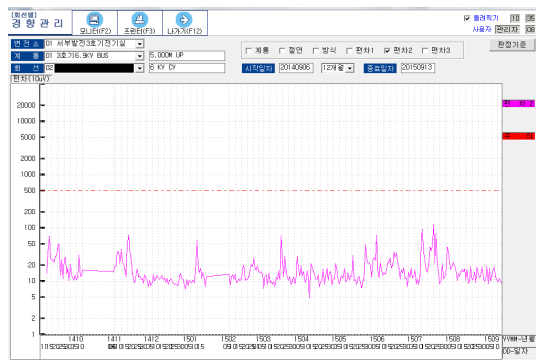


그림 5. No.02 feeder의 누설전류의 표준편차 trend 2  
 Fig. 5. Standard deviation trend 2 from the leakage current of No.02 feeder

그림 6은 No.02 feeder에 대해 그림1과 그림2에서 사용한 매일 계산된 표준편차값을 10일 평균한 값을 graph화한 것으로, 누설전류의 표준 편차값은 편차경계치(5.00, 중앙 파선)보다 매우 낮은 값을 나타내므로, 표준편차 감시항목은 양호한 것이다. 따라서, 케이블의 단말 및 접속부에서 부분방전(partial discharge, PD)이 발생하지 않은 상태이므로, 단말 및 접속부의 상태는 양호한 상태에 있

다고 판단한다.

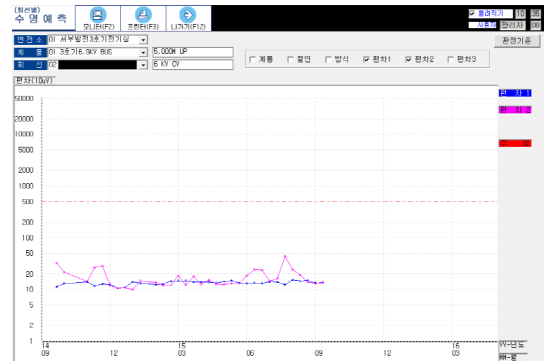


그림 6. No.02 feeder의 누설전류의 표준편차 10 평균 trend  
 Fig. 6. Average standard deviation of 10 days from the leakage current of No.02 feeder

## V. 결론

케이블 시스템의 사고 원인들 중의 하나로서 XLPE의 절연 상태의 악화로 인한 절연 파괴현상이 발생하는 것이다. 고전력 케이블 시스템의 상태가 나빠지는 경우, 절연 파괴현상으로 인한 사고가 발생한다. 우리는 이 논문에서, 충남 태안에 위치한 화력발전소, 한국서부발전 주식회사(Korea Western Power Co. Ltd.)에서 설치되어 동작 중인 6.6 kV 케이블의 열화 상태를 감지하기 위하여 우리가 개발한 장비를 설치하였다. 장비를 사용하여 고전력 케이블의 누설전류의 표준편차를 측정하였다. 이 값들이 기준 한계치 이하의 값을 나타내므로 케이블들의 단말 및 접속부의 절연상태는 매우 양호한 상태에 있다고 판단하였다.

## References

- [1] <http://www.pressian.com/news/article.html?>
- [2] <http://www.knea.or.kr>,
- [3] [http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1339](http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339)
- [4] IEEE-Std-43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power & Energy Society, p. 18,

Mar, 2000.

- [5] <http://ecmweb.com/ops-amp-maintenance/basics-insulation-resistance-testing>
- [6] K. H. Um, K. W. Lee, "A Linear Change of Leakage Current and Insulation Resistance of 22 kV Cables", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 15, no. 3, pp. 169-173, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.3.169>
- [7] <http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php?aid=2016070594441>
- [8] <http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php?aid=2016070467591>
- [9] K. H. Um, K. W. Lee, "Development of Equipment Measuring Insulation Resistance of High-Power Cables in Operation at Power Station", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.1 16, no. 4, pp. 159-164, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.159>
- [10] S. J. Oh, "A Study on the Properties of sPEEK Electrolytic Membranes using Physical Crosslinking", Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society (JKAIS), Vol. 17, No. 1, pp. 433-440, 2016.
- [11] K. H. Um, K. W. Lee, "Linearity Verification of Measured Voltage Deterioration of High Voltage Cable based on Weibull Lifetime Index", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.1 15, no. 3, pp.169-173, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.1.227>
- [12] K. H. Lee, "The Condition Assessment of MW Power Cables Using the VLF  $\tan \delta$  Diagnostic Technology", p.32, MS dissertation, Department of Marine Electronics and Communications, Mok-Po National University, 2013.

## 저자 소개

### 김 보 경(정회원)



- 학사 : 부산대학교 전기공학과
- 대한전선(주) 근무
- ㈜성완전기 근무
- 메가파워테크 대표
- 전력케이블 절연진단 업무 1989년부터 20년 이상 수행 중
- 현재 (주)오성메가파워 대표

<주관심분야 : 절연진단, 전기전자재료, 활성 케이블>

### 엄 기 홍(정회원)



- BS: 한양대학교 전자공학과
- MS: Dept. of Electrical & Computer Engineering, Polytechnic Institute of Engineering, NYU (New York University), New York, USA
- Ph.D: Dept. of Electrical & Computer Engineering, New Jersey

Institute of Technology (NJIT), New Jersey, USA

- TA, RA, and Lecturer at NJIT (New Jersey, USA)
- Researcher at RS Microwave Company Inc. (New Jersey, USA)
- Researcher at Physics Department, Princeton University (New Jersey, USA)
- Adjunct Professor at NJIT (New Jersey, USA)
- 강남대, 상명대, 한양대 강사
- 현재 한세대학교 IT 학부 교수

<주관심분야 : 안테나, 마이크로파, 전기전자재료>

※ The authors wish to express their thanks to Professor Dae-Hee Park(Won Kwang University). Without his help and guidance, this work would have been impossible to complete.

※ This work was supported by Hansei University Research Fund of 2017.