

論文98-35T-6-1

## 부분방전 시스템을 이용한 절연 열화에 관한 연구

### (A Study on the Dielectric Degradation Using Partial Discharge System)

金成烘\*, 李禹相\*\*, 鄭載龍\*\*\*

(Sung-Hong Kim, Woo-Sang Lee, and Jae-Yong Jeong)

#### 요약

본 연구는 부분방전 시스템을 이용하여 열화진단을 실시하였다. 열화 분석 방법으로는 위상각 부분방전 펄스진폭 열화시간과 위상각 부분방전 펄스수 열화시간의 양상을 왜도와 첨쇄도로 3차원 분석하여 열화의 정보로 이용하였다. 두번째로는 C (경도), G (무게중심)의 통계적 파라미터를 이용하여 방전의 군소화가 발생하는 시간을 구하여 그 지점으로부터 수명 예측을 하였다.

#### Abstract

Our studies diagnose insulation degradation using the method of PD system. In analysis method of degradation, we make use of degradation information that analyzed the phase angle - PD pulse amplitude - degradation time( $\phi$ - PDA - t) pattern and phase angle- PD pulse number - degradation time( $\phi$ - PDN - t) pattern using statistical operators such as skewness(S), kurtosis(K).

Secondly using statically operator such as the center of gravity (G), the gradient of the discharge distribution(C), we have analyzed for the prediction of life which we can be obtained the time, occurred of many pulse of small discharge amplitude.

#### I. 서 론

최근 급속히 증가하는 전력 수요에 대응하고자 전력 계통의 승압화가 이루어지고 있으며, 또한 승압된 송·배전 계통에 사용되는 전력기기들의 절연재료로서, 우수한 제반 특성을 보유하고 있는 고분자 절연재료가 사용되고 있다.

이러한 고분자 절연재료를 사용하여 절연 제품을 만

\* 正會員, 湖西大學校 電子工學科  
(Dept. of Electrical Eng., Hoseo University)

\*\* 正會員, 동서울大學 電子通信科  
(Dept. of Telecom., Dong Seoul College)

\*\*\* 正會員, 동서울大學 電子科  
(Dept. of Elec. Eng., Dong Seoul College)  
接受日字: 1998年4月18日, 수정완료일: 1998年6月2日

드는 공정 중에 발생한 결함이나 열악한 사용 환경에 의하여 발생하는 결함들은 절연 성능을 저하시키는 원인으로 작용하는데, 결함(void)이나 공동(cavity)은 그 대표적인 결함으로서 전로파괴를 일으킬 수 있는 부분방전 열화를 일으킨다.<sup>[1][2]</sup> 현재 많이 사용되고 있는 회전기의 경우, 고정자의 권선 절연을 가장 중요한 요소로 평가하는데 이 부분은 각종 전기적, 기계적 및 화학적인 스트레스를 받아 절연층 내에 보이드형 결함이 발생하게 되고 그로 인하여 부분방전 열화 및 트리 열화가 발생하고 점차 전로파괴에 이르게 된다. 또한, 변압기의 경우에도 내장된 철심, 철심의 주위 구조재, 코일, 도입선 및 절연물에서 냉각 불량에 의한 열 열화, 절연불량에 의한 부분방전 열화 등이 발생하게 되어 파괴로 진전될 수 있다. 이와 같은 기기의 열화는 비가역적 반응으로서 절연 성능을 계속 저하시키므로 열화가 발생한 기기는 반드시 보수를 하거나 교

체해 주어야 한다. 현재 이러한 기기의 성능을 감시하기 위하여 열화진단 법들이 사용되고 있다.<sup>[3]</sup>

전기 설비의 절연열화진단은 전기에너지의 안정적 공급 및 유지 보수비의 절감, 설비의 수명 연장 측면에서 매우 중요하다. 현재 열화를 측정하거나 상태를 진단하기 위하여 절연저항 측정, 유전정점 측정 및 부분방전 측정 등이 각 전력기기의 절연진단 기법으로 연구되고 있다. 그러나 대부분의 진단이 운전 정지 중에 이루어지기 때문에 운전중의 절연 성능 파악이 어렵다는 문제점을 안고 있으며 열화의 정도를 판별할 수 있는 명확한 기준의 제시가 아직까지는 미흡한 실정이다.

따라서, 전력설비의 유지·보수, 안전 확보와 사고 방지를 위한 이상 징후를 진단, 감시하기 위한 상시감시 및 예방진단 기술이 요구되고 있는 상황이며, 현재는 전력회사를 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다.<sup>[4]</sup>

본 연구에서는 무보이드인 LDPE 시편에 전계를 인가했을 때 나타나는 에너지의 변환중 전기적 펄스와 계측하여 인가전압 위상각 별로 부분방전의 평균 펄스 진폭과 펄스수를 구하여 인가전압 위상각에 따른 3차원 그래프를 구하여 상호간의 관련성 및 위상각 해석에 의한 열화진단을 행하였다. 통계처리에 의하여 구한 열화진단 파라메터, 즉 분포의 평균값에 대한 비대칭성 정도를 나타내는 왜도(S)와 분포의 집중도를 나타내는 첨쇄도(K)를 이용하여 3차원의 패턴분석을 행하였고 열화 초기에 파괴를 예지할 목적으로 회귀분석법에 의한 무게중심(G), 경도(C)를 이용하여 방전의 군소화와 열화 증가를 규명하여, 부분방전에 의해 발생되는 각종 절연기기의 열화의 수명을 초기에 예측함으로써 파괴를 미연에 방지할 수 있다고 생각된다.

## II. 시편제작 및 실험방법

본 실험에 사용된 시편은 저밀도 폴리에틸렌(이하 LDPE)으로서 밀도  $0.92 [g/cm^3]$  인 펠렛(Pellet)을 사용하였다. 순수한 LDPE 펠렛을 자체 제작한 시료 제작기의 주형 위에 올려놓고  $120 [^\circ\text{C}]$ 에서 5분간 예열한 후 시료 중앙에 바늘을 꽂고 압력이  $100 [kgf/cm^2]$  가 될 때까지 5분간 단계적으로 가압하였다. 다시 5분 동안 주형을 가열한 후 시료의 투명도를 위하여  $10 [^\circ\text{C}]$  의 물에서 급냉 하였다. 시편의 전극 구성은

그림 1에서 나타낸 바와 같다.

시편의 규격은  $30 \times 40 \times 3.5 [mm^3]$ 이며 전극의 형태는 국간 거리가  $2 [mm]$  인 침 대 평판 전극이다. 침 전극은 직경  $0.56 [mm\phi]$  인 스테인레스 스틸 재질의 바늘을 에칭법에 의해 침 선단 곡률 반경  $5 [\mu\text{m}]$  로 조정하여 시편에 주입하였다. 에칭하기 전의 바늘의 형태와 에칭 한 후의 바늘의 형태는 사진 1에 나타내었다.

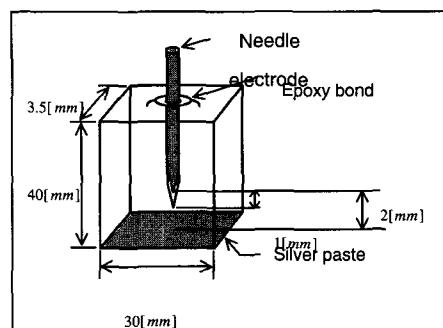
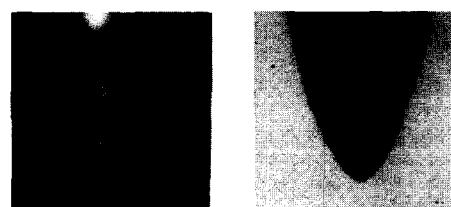


그림 1. 시편의 전극구성

Fig. 1. An electrode composition of specimen.

평판전극은 실버 페이스트(Silver Paste)로 도포하였다. 시편의 종류는 무보이드 시편을 사용하였다. 실험장치도는 그림2에 표시하였다.

자체 제작한 부분방전 측정시스템은 인가전압은 교류  $60 [Hz]$ 이며  $50 [kV_{rms}]$  까지 연속으로 변화시킬 수 있다. 전압 인가방식은 승압속도  $1 [kV/s]$ 로 부분방전 개시의 1.5배 까지 승압한 후 일정하게 유지하였다. 고전압 회로는 부분방전 회로의 잡음을 일으킬 수 있는 코로나 방전을 억제하기 위해 실리콘 오일에 함침하였다.<sup>[5] [6]</sup>



(a) 에칭전

(b) 에칭후

사진 1. 에칭 전후의 전극의 모습

Photo 1. An electrode appearance before and after etching.

위상각 특성을 보기 위해 인가전압을 고전압

Probe(HP 34300A)로 전압을 강하시켜 디지털 오실로스코프(HP54501)의 채널1에 입력시켰다.

대역 필터를 통과한 부분방전펄스는 동기화를 거쳐 인가전압 한 주기 동안의 펄스를 디지털 오실로스코프 채널2에 입력하여 인터페이스(GPIB Card)를 통하여 PC로 전송하고 각 펄스의 위상정보와 펄스 크기 정보를 얻는다.

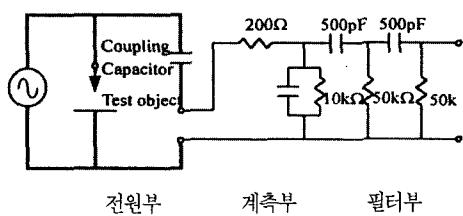


그림 2. 부분방전 측정 장치도

Fig. 2. A set up of partial discharge measurement.

부분방전의 평균 펄스는 인가 전압 1사이클을 정의 제로 크로스 점에서부터 40개의 위상창으로 구분하여 각 위상창 구간마다 1분 동안의 펄스 값을 평균하여 사용하였다.

### III. 실험 결과 및 검토

#### 1. $\phi$ -PDA-t와 $\phi$ -PDN-t 특성 및 왜도와 첨쇄도 분포

$\phi$ -PDA-t (위상각-부분방전-펄스진폭-열화시간)과  $\phi$ -PDN-t (위상각-부분방전-펄스수-열화시간)이라고 약한다. 트리잉 열화 진행과 양호하게 대응하여 변화하는 부분방전 특성량으로  $\phi$ -PDA-t,  $\phi$ -PDN-t의 특성을 들 수 있다. 여기서 X축은 인가전압 위상각, Y축은 부분방전 펄스의 진폭 및 펄스수, Z축은 열화시간을 나타내고 있다.

그림 3~8은 인가전압 9 [kV]에서 가지형 트리로 진전했을 때 인가전압 위상각에 대한  $\phi$ -PDA-t,  $\phi$ -PDN-t의 분포특성과 왜도 및 첨쇄도의 열화 시간 변화에 대한 그래프이다.

그림 3은  $\phi$ -PDA-t, 그림 6은  $\phi$ -PDN-t의 분포특성을 나타내는 것으로 특징적인 것은 일반적 트리의 진전을 벗어나 이상형의 가지형 트리를 나타내며 과전 초기에는 펄스의 발생이 미약하였으나 6분 정도에서

펄스 발생이 커짐을 볼 수 있다. 극히 미약 하지만 트리의 미소 채널의 증가는 극히 빨랐고 파괴 시간(51분)까지 분포의 중심이 약간 흐트러지면서 극히 미약한 펄스진폭/발생수의 위상영역은 정,부극성( $\phi$ 6~ $\phi$ 21내외)의 분포중심 위상영역에 그리고 주 채널이 관통파괴에 이르기까지 펄스의 발생은 증가하다 펄스진폭/펄스수가 점진적인 증가를 보이면서 파괴에 이르고 있으며 펄스발생 위상영역도 파괴에 이를수록 피크를 넘어서는 넓은 영역에서 발생하지만 펄스진폭/펄스수의 분포 중심은 정, 부극성( $\phi$ 6,  $\phi$ 31)에서 펄스를 발생하고 파괴 직전에서는 정극성의 경우 약간 저위상으로 부극성의 경우 고위상 영역으로 이동됨을 알 수 있다. [5] [6] 특히 9분의 시간대에서 잔펄스가 많고 진폭이 큰 펄스가 발생하는 것을 볼 수 있다.

이는 방전의 군소화로서 파괴를 예측하는 시간대로 이용되었다. 부분방전 펄스의 위상각 특성에서 볼 수 있는 뚜렷한 위상각 특성이 나타나며 특정 위상각 영역( $\phi$ 7 ~  $\phi$ 16)에서 피크가 검출됨을 알 수 있다. 그림 4와 5는 PDA 분포패턴에 대한 첨쇄도 및 왜도의 시간변화를 나타낸 것이고 그림 6과 7은 PDN 분포패턴에 대한 첨쇄도 및 왜도의 시간변화를 나타낸 것이다. 이는 3차원 분석의 분포양상을 더욱 정량적으로 간편하게 표현하기 위해 분포의 특성량으로써 왜도 및 첨쇄도를 도입하였다. 이 특성량은 분포의 형상에만 의존하며 분포형상을 간편히 정량화 하는 양으로서 적절하다. 첨쇄도 K는 방전의 집중도에 관계하여, K가 큰 경우, 즉 위상적으로 집중하여 부분 방전이 발생하는 경우에는 공간적으로도 부분방전이 집중하여 발생하는 경우가 많다. 반대로 K가 작은 경우에는 위상적으로 흐트러짐이 크고, 공간적으로도 흐트러짐이 크다고 생각된다.

왜도 S는 분포의 비대칭성을 표현하는 양으로 좌우 대칭이면  $S = 0$ , 오른쪽 아래에 분포하면  $S > 0$ , 그리고 오른쪽 위에 분포하면  $S < 0$ 으로 된다. 초기에는 날카로움이 덜하다가 13분에서 18분까지 날카로운 피크가 계속되다가 다시 줄어들다 파괴 말기 피크의 날카로운 패턴을 보이다가 파괴에 이른다.

값을 나타내며 15분 상승하였다가 그 이후 감소 하였으며, 파괴 직전의 왜도는 2~4.5 정도였다. 점진적으로 증가하였으며, 트리 발생 초기에는 2~3정도, 파괴 직전에는 2.1 ~ 2.45 정도였다.

첨쇄도 K는 트리 발생 초기부터 파괴까지 점진적으

로 증가하였으며, 트리 발생 초기에는 2~3정도, 파괴 직전에는 2.1 ~ 2.45 정도였다.

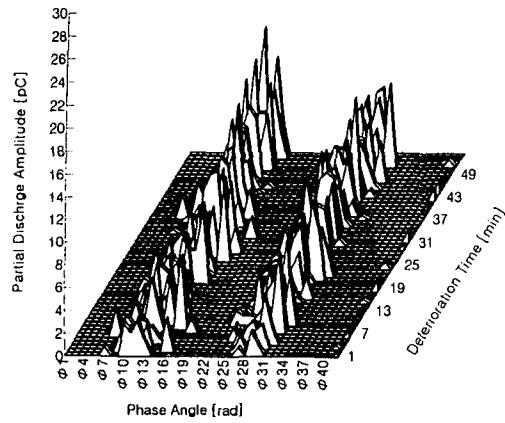


그림 3.  $\phi$ -QA-t의 분포특성

Fig. 3. Characteristics of distribution  $\phi$ -QA-t

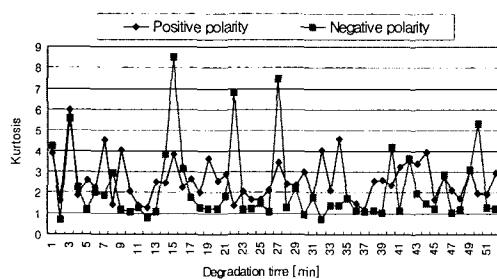


그림 4. PDA 분포 패턴에 대한 첨쇄도의 시간변화  
Fig. 4. The time variation of kurtosis on the PDA distribution.

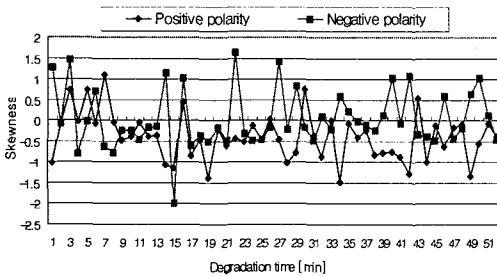


그림 5. PDA 분포 패턴에 대한 첨쇄도의 시간변화  
Fig. 5. The time variation of kurtosis on the PDA distribution patterns.

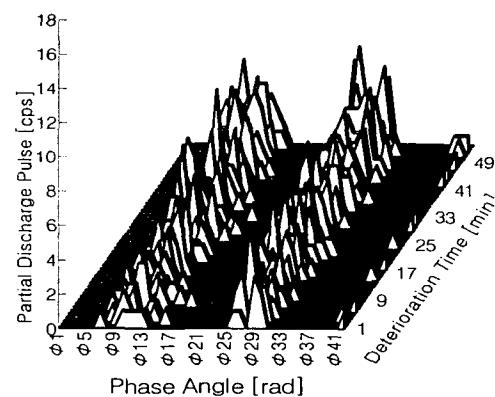


그림 6.  $\phi$ -QN-t의 분포패턴

Fig. 6. Characteristics of distribution  $\phi$ -QN-t

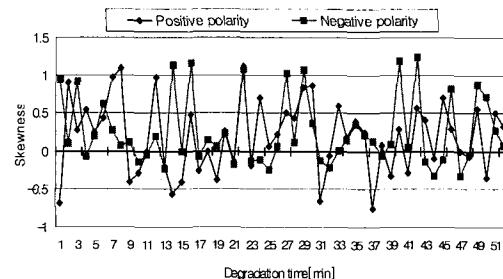


그림 7.  $\phi$ -PDN의 분포 패턴에 대한 첨쇄도의 시간변화

Fig. 7. The time variation of kurtosis on the  $\phi$ -PDN distribution patterns.

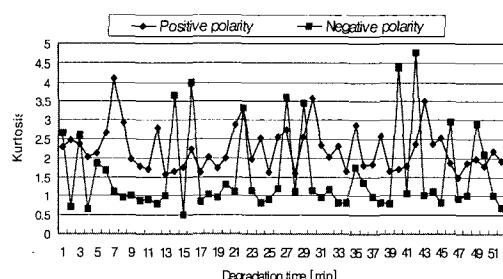


그림 8.  $\phi$ -PDN의 분포 패턴에 대한 왜도의 시간변화

Fig. 8. The time variation of skewness on the  $\phi$ -PDN distribution patterns.

## 2. G, C 파라메타에 의한 파괴예지

본 연구에는 부분방전 분포의 형상을 나타내는 파라메타로서 분포의 중심 G값과 경도 C값을 정의하여

파괴예지로의 유효성을 검토하였다.<sup>[7]</sup> 이들의 파라미터는 파괴의 전조현상이라 생각되어지는 방전의 군소화를 상징하며 또 결보기 부분방전 펄스의 값이 이용해서 다른 실험계로의 적용 가능성이 높다고 생각된다.

파라메타에 의한 파괴예지의 판별기준은 G값이 증가하고 C값이 감소할때 방전의 군소화가 일어나며 이때가 파괴의 전조현상일 것이다. 얇은 시편이기 때문에 방전이 군소화하여 트리가 발생하면 단시간에 파괴에 이르는 것이라 생각하여 실험결과에 의한 데이터도 이 값을 기준으로 파괴를 예지하였다.

그림 9는 PDA와 PDN간의 G값의 시간 변화를 나타낸 그래프로서 7~10분 사이에 최초의 방전 군소화가 일어났고 이때에 각종 파라메타를 이용하여 회귀분석에 의거하여 파괴를 예지해 보았다. 열화가 진행됨에 따라서 군소화가 몇번 더 발생하는 것은 열화 면적 이 넓어져서 각각의 가지마다 독립적으로 방전이 발생하는 것으로 사료되며 G값이 적어지고 C값이 증가하는 것으로 보아 열화중기를 나타내고 있는 것으로 볼 수 있다.

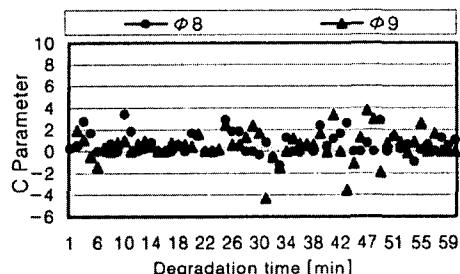


그림 9. PDA 와 PDN간의 경도(C)의 시간 변화  
Fig. 9. The variation of C-parameter between PDA and PDN in each phase.

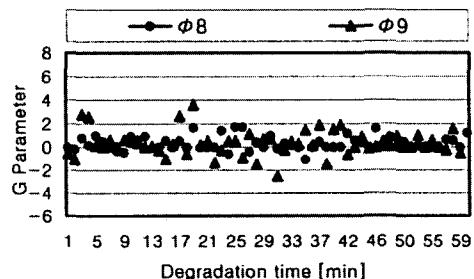


그림 10. PDA 와 PDN간의 경도(G)의 시간변화  
Fig. 10. The variation of G-parameter between PDA and PDN in each phase.

그림 10은 PDA와 PDN간의 C값의 시간변화를 나타내는 것으로서 9와 같이 위상 영역이  $\Phi 8$ 과  $\Phi 9$ 에서 C파라메타를 나타내는 것으로 7분에서 10분 사이에 C값이 감소하고 있음을 보여주고 있다. 이는 G파라메타와 비교하여 좋은 대조를 보여주고 있다. 그러므로 이 그림에서 파괴의 전조에 C값의 감소에 의해 파괴예지가 가능하다. 이와 같은 C값 G값은 같은 방전의 군소화를 포착하기 위한 파라메타이지만 G값보다는 C값이 보다 군소화를 명확히 표시하는 경우가 많다.

#### IV. 결 론

자체 개발한 부분방전 시스템 이용하여 LDPE의 열화현상을 동시에 자동으로 계측하여 열화진단과 수명추정을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부분방전의 위상특성은 규칙적인 위상각 분포를 볼 수 있고 열화초기에 진폭의 크기가 크고 방전의 군소화도 더 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 파괴를 예지하는 군소화 시기를 예측하는데 용이하다고 생각 된다.
2. 왜도와 첨쇄도를 이용하여 3차원 상에서 분석한 결과 무보이드의 경우는 위상이 좁고 진폭이 큰 펄스가 많이 발생했고 이를 이용하여 3차원 그래프의 쉬운 해석으로 절연파괴에 유용한 정보로 사용될 수 있다.
3. 파라미터에 의한 파괴예지의 판별기준은 G값이 증가하고 C값이 감소할때 방전의 군소화가 일어나는데 이는 파괴의 전조현상을 알 수 있다
4. G값이 적어지고 C값이 증가하는 현상 일 때는 열화중기를 나타내고 있는 것으로 볼 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] L. A. Dissado and J. C. Fothergill, Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, Peter Peregrinus, London, 1992.
- [2] 대한 전기 학회, 전기설비의 진단기술, 일본 전기 학회, pp.255~308, 1994
- [3] T. Okamoto, T. Tanaka, "Change in Pulse-Mean  $\phi$ - q Distribution Patterns of Partial Discharge due to Treeing Propagation",

- Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn, Vol. 102. A, No. 12, pp.665~672, 1982.
- [4] Suworno, Y.Suzuoki, T.Mizutani, K.Uchida, "Partial Discharge Patterns Changes due to Electrical Tree Growth in Polyethylene", Trans. IEE Japan, A. 138, No. 11, pp. 1121~1129, 1995.
- [5] 김성홍, 박재준, 김재환. "부분방전 전하와 음향방출 펄스의 동시 측정에 의한 트리잉 파괴진단", KIEE, Vol.10, No.3, pp.247~254. 1997.
- [6] 김성홍, 심종탁, 김재환. 음향방출 계측법을 이용한 프랙탈 특성과 트리잉 파괴진단에 관한 연구, 조명, 전기설비학회, Vol.11, No. 6, pp. 50 ~ 56, 1997
- [7] Tairo et. al., Prediction of Breakdown by Void Discharge Aging, JIEE Vol. 110, No. 11, pp. 1990.

## 저자소개



金成烘(正會員)

1964년 10월 10일생. 1988년 2월 광운대학교 전기공학과 졸업. 1990년 2월 광운대학교 전기공학과졸업(공학석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현 호서대

겸임교수



李禹相(正會員)

1956년 10월 3일생. 1983년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업. 1985년 2월 광운대학교 대학원 졸업(공학석사). 1991년 2월 광운대학교 대학원 졸업(공학박사). 1991년 2월 현재 동서울대학 전자통신과 조교수



鄭載龍(正會員)

1953년 5월 15일생. 1972년 3월 ~ 1976년 2월 한양대학교 공과대학 전자공학과. 1976년 3월 ~ 1978년 2월 한양대학교 대학원 전자공학과 (공학석사). 1987년 9월 ~ 1990년 6월 미국 MIT 대학원 전기공학과 (MSEE). 1978년 9월 현재는 동서울대학 전자과 조교수. 1995년 3월 ~ 현재 홍익대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료