

확률분포를 이용한 전력설비의 기대여명 추정

(Evaluation of Life Expectancy of Power System Equipment Using Probability Distribution)

김광원* · 현승호

(Gwang-Won Kim · Seung-Ho Hyun)

요 약

본 논문은 확률분포를 이용하여 전력설비의 기대여명을 산출하는 방법을 제안한다. 전력설비의 기대여명이란 해당 설비의 잔존수명으로, 기대여명은 전력시스템의 보수계획, 설비교체계획, 신뢰도 평가에 유용하게 이용될 수 있다. 본 논문에서는 각 운전년수별로 향후 운전가능년수에 대한 누적확률을 계산하고, 계산한 누적확률로 누적확률분포함수모델의 모수를 결정한 후, 모델함수의 평균값을 구하여 기대여명을 산정한다. 제안한 방법에서는 정립한 누적확률분포함수모델을 이용하여 기대여명 뿐만 아니라, 향후 특정 운전년수에 이르기 위한 기대확률까지도 쉽게 구할 수 있다. 제안한 방법은 우리나라 복합화력 발전소 발전기의 기대여명 추정에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

Abstract

This paper presents a novel evaluation method of life expectancy of power system equipment. The life expectancy means expected remaining lifetime; it can be usefully utilized to maintenance planning, equipment replacement planning, and reliability assessment. The proposed method is composed of three steps. Firstly, a cumulative probability for future years is evaluated for targeted age year. Secondly, the cumulative probability is modeled by well-known cumulative distribution function(CDF) such as Weibull distribution. Lastly, life expectancy is evaluated as the mean value of the model. Since the model CDF is established in the proposed method, it can also evaluate the probability of equipment retirement within specific years. The developed method is applied to examples of generators of combined cycle power plants to show its effectiveness.

Key Words : Life Expectancy, Power System Equipment, Probability Distribution

1. 서 론

기대여명(life expectancy)은 수명과 관련된 통계 자료에서 사용되는 용어로서, 사람의 예에서는, 각 연령별로 기대되는 잔존 수명이다. 아래의 표 1을 보면[1], 2005년 현재 대한민국 남성의 평균수명은 75.14세인 반면(0세의 기대여명에 해당), 10세의 기대여명은 65.70년이므로 75.70세까지, 80세의 기대여

* 주저자 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
Tel : 052-259-2186, Fax : 052-259-1686

E-mail : kim66@ieee.org
접수일자 : 2008년 7월 14일
1차심사 : 2008년 7월 22일
심사완료 : 2008년 8월 6일

확률분포를 이용한 전력설비의 기대여명 추정

명은 7.00년이므로 87.00세까지 살 것으로 기대된다.

이러한 기대여명은 전력설비의 경우에도 중요한 의미를 가진다. 전력설비의 기대여명은 전력설비의 보수와 경제성을 가능하는데 이용될 수도 있고, 설비 교체에 대한 장기계획을 수립하는데 기초자료로 사용될 수도 있다. 최근에는 전력설비의 노후로 인한 고장(end-of-life failure)을 신뢰도 평가에 반영하는 연구가 진행되고 있다[2-3].

그러나, 현재까지 전력설비의 기대여명에 대한 구체적인 연구는 본격적으로 진행되고 있지 않으며, 이와 비슷한 연구로서 평균수명의 산정 방법에 대한 연구결과는 간헐적으로 발표되고 있다[4-5]. 평균수명의 경우에, 수명이 다하여 철거된 전력설비가 많은 경우에는 철거된 전력설비의 평균수명을 해당 전력설비의 평균수명이라고 간주할 수 있으나, 일반적으로 전력설비는 평균수명이 길기 때문에 현재까지 철거된 설비의 예가 충분하지 않은 경우가 많다. 이런 경우를 대상으로, 참고문헌 [4-5]에서는, 철거된 설비정보와 함께 아직 운전중인 설비의 정보까지 이용하여 기대수명에 대한 확률분포를 생성하고, 생성된 확률분포를 가장 가깝게 근사하는 확률모형을 세운 후, 확률모형의 평균값을 평균수명으로 간주하는 방법을 제안하고 있다. 특히, 참고문헌 [5]에서는 설비정보로부터 기대수명의 누적확률분포(cumulative probability distribution)를 생성함에 있어서, 누적확률분포의 정의를 충실하게 따름으로써 보다 논리적인 해를 제공한다고 할 수 있다.

본 논문에서는 평균수명을 산정하는 참고문헌 [5]의 방법을 응용하여, 전력설비의 기대여명을 산정하는 방법을 제안한다. 전술한 바와 같이, 전력설비의 경제성 및 신뢰성 평가에는 기대여명이 중요한 역할을 하는데, 평균수명으로부터 기대여명을 직접 산출할 수는 없으므로 기대여명의 산정을 위한 별도의 방법이 필요하다. 기대여명은 평균수명과는 달리 각 운전연수별로 산정하여야 하는데, 예를 들면 운전연수가 10년인 발전기의 기대여명, 본 논문에서는 운전연수별로 별도의 누적확률분포를 생성하고 이에 참고문헌 [5]의 방법을 적용하여 각 운전연수별 기대여명을 산정하는 방법을 제안한다.

제안한 방법은 우리나라 복합화력발전소의 발전

기의 예에 적용하여 그 적용 가능성을 보였으며, 사례연구에서 기대여명뿐만 아니라 향후의 연도별 고장확률 또한 산정할 수 있음을 보였다.

표 1. 대한민국 남성의 기대여명(2005)
Table 1. Life expectancy of Korean male(2005)

연 령	기대여명
0	75.14
10	65.70
20	55.87
30	46.21
40	36.72
50	27.79
60	19.56
70	12.39
80	7.00

2. 평균수명 예측방법

본 절에서 소개하는 방법은 참고문헌 [5]에서 인용하였다. 소개하는 방법에서는 평균수명을 산정하는데 있어서, 철거되어 수명을 알고 있는 설비정보와 함께 아직 운전중인 설비의 정보를 동시에 이용하였으며, 와이블(Weibull)분포로써 평균수명을 확률적으로 모형화 하였다.

Step 1) 설비 운전과 관련된 기본 데이터(설치년도와 철거년도)를 수집한다.

Step 2) 각 설비의 운전연수를 계산한다.

- 철거된 설비인 경우: 운전연수 = 철거년도 - 설치년도
- 운전중인 설비인 경우: 운전연수 = 기준(현재)년도 - 설치년도

Step 3) 운전연수별로 다음의 데이터를 계산하여 운전연수에 대한 오름차순 표를 만든다.

- 운전대수: 해당 운전연수 이상까지 운전한 경험

이 있는 설비의 수

- 철거대수: 정확히 해당 운전년수에 철거된 설비의 수

Step 4) 다음의 두 열로 구성된 누적확률분포표를 구한다.

- 1열: 모든 운전년수
- 2열: 해당 운전년수의 누적확률분포. 누적확률분포는 식 (1)을 이용하여 계산한다.

$$\text{누적확률} = \frac{\text{누적 철거대수}}{\text{유효 운전대수}} \quad (1)$$

여기서, 누적 철거대수: 해당 운전년수의 철거대수 + 그 이전에 철거된 설비의 총 수
 유효 운전대수: 해당 운전년수의 운전대수 + 그 이전에 철거된 설비의 총 수

Step 5) Step4의 표에서 동일한 누적확률분포를 보이는 열(row)은 하나를 제외하고 삭제한다.

Step 6) Step5의 표를 대상으로 최소자승근사를 하여 확률분포모델의 모수(parameter)를 결정한다.

Step 7) 확률분포모델로부터 평균수명을 계산한다.

위의, Step 4에서는 누적확률분포의 산정에 있어서 누적확률의 정의를 충실히 반영하고 있으며, Step 5에서는 누적확률분포의 단조증가적 특성을 반영하여 확률분포모델의 모수 결정에 도움이 되지 않은 반복 데이터를 제거한다.

3. 기대여명 예측방법

위의 평균수명 예측방법은 전 설비를 대상으로 설치되기 시작한 시기부터 기준시점까지의 철거 및 운전정보를 이용하였으나, 기대여명을 예측하기 위해서는 기준이 되는 운전연수 이상의 설비만을 대상으

로 잔존기간을 예측하여야 한다. 이는 인간의 기대여명 산출에서도 마찬가지인데, 예를 들어, 80세 남성의 기대여명은 80세 이상에서 사망한 남성의 평균연령만으로 구하여야 한다. 인간의 경우에는 그 수가 많으므로, 사망한 사람의 평균값으로부터 기대여명을 쉽게 구할 수 있지만, 전력설비의 경우에는 철거한 설비가 충분하지 않은 경우가 많고, 특히, 기대여명을 구하려면 정해진 운전년수 이상 운전한 설비만을 대상으로 하므로 그 수가 더욱 불충분하다. 따라서, 확률분포모델을 이용한 기대여명 예측이 더욱 절실하다.

다음은 본 논문에서 제안하는 기대여명 예측방법의 절차이다.

Step 1) 설비 운전과 관련된 기본 데이터(설치년도와 철거년도)를 수집한다.

Step 2) 각 설비의 운전년수를 계산한다.

- 철거된 설비인 경우: 운전년수 = 철거년도 - 설치년도
- 운전중인 설비인 경우: 운전년수 = 기준(현재)년도 - 설치년도

Step 3) 기대여명의 기준 운전년수를 n이라 가정할 때, 운전년수별로 다음의 데이터를 계산하여 추가운전년수에 대한 오름차순 표를 만든다.

- 추가운전년수: 운전년수 - n
- 운전대수: 해당 운전년수이상까지 운전한 경험 이 있는 설비의 수
- 철거대수: 정확히 해당 운전년수에 철거된 설비의 수

Step 4) 음수가 아닌 추가운전년수만을 대상으로 다음의 두 열로 구성된 누적확률분포표를 구한다.

- 1열: 추가운전년수
- 2열: 해당 추가운전년수의 누적확률분포. 누적확률분포는 식 (1)을 이용하여 계산한다.

확률분포를 이용한 전력설비의 기대여명 추정

Step 5) Step 4의 표에서 동일한 누적확률분포를 보이는 열은 하나를 제외하고 삭제한다.

Step 6) Step 5의 표를 대상으로 최소자승근사를 하여 확률분포모델의 모수를 결정한다.

Step 7) 확률분포모델로부터 기대여명을 계산한다.

위의 Step 6에서 수립한 확률분포모형의 누적확률분포함수(cumulative distribution function)를 이용하면, 기대여명 뿐만 아니라 향후 지정한 년수 이내에 철거될 확률을 쉽게 구할 수 있다. 예를 들어, 기대여명의 누적확률분포함수를 $F(x)$ 라고 하면, $F(5)$ 는 해당 설비가 5년 이내에 철거될 확률이다. 식 (2)는 와이블분포의 누적확률분포함수이다. 식에서 α 와 β 는 각각 'scale 모수' 및 'shape 모수'로서 Step 6에서 구해지며, 이와 식 (3), (4)를 이용하면 해당 와이블분포의 평균값과 분산값을 구할 수 있다.

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right) \quad (2)$$

$$\text{평균값} = \alpha \Gamma(1 + 1/\beta) \quad (3)$$

$$\text{분산} = \alpha^2 [\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)] \quad (4)$$

위에서, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수이다. 본 논문의 방법은 Step 6에서 최소자승근사를 이용하여 확률분포모델의 모수를 결정하므로 와이블분포 뿐만 아니라 임의의 확률분포모델에 대해서도 적용할 수 있다.

4. 사례연구

제안한 방법을 참고문헌 [6]에서 발췌한 우리나라 복합화력 발전소의 발전기 데이터에 적용하여 와이블분포모델로 기대여명을 추정하였다. 본 사례연구의 대상은 표 2에서와 같이 36대의 발전기를 표본으로 하였는데, 2003년을 기준으로 철거된 발전기는 모두 16대이다.

표 3은 운전중인 발전기와 철거된 발전기의 수를 운전년수별로 정리한 것으로 Step2의 수행 결과이

다. 예를 들어, 운전년수 12의 데이터를 보면, 12년째에 2대의 발전기가 철거되었으며 14대의 발전기가 11년 이상 운전되었다. 표 3은 2003년을 기준 년도로 하여 표 2로부터 작성하였다.

표 4는 평균수명(신규 설치 설비의 기대여명)의 예측에 사용하기 위하여 2절에서 소개한 방법의 Step 3~Step 5로써 생성한 누적확률분포표이고, 표 5, 6, 7은 각각 10년, 15년, 20년의 운전년수인 발전기의 기대여명을 추정하기 위하여 제안한 방법의 Step 3~Step 5로써 생성한 누적확률분포표이다. 각 누적확률표에서 반복되는 누적확률은 제거하여 공백으로 나타내었다. 각 누적확률값은 단조증가의 추세를 보이며, 1보다 작거나 같은 값이 보장된다.

표 8은 Step 6에서 각 누적확률표를 대상으로 산출한 와이블분포의 모수와 함께, 식 (3), (4)를 이용하여 구한 각 분포의 평균값 및 표준편차를 수록하고 있다. 표 8에 의하면, 신규투입 발전기의 기대수명은 약 16.6년인데 반하여, 10년, 15년, 20년 사용한

표 2. 원시 데이터
Table 2. Raw data

번호	설치	철거	번호	설치	철거
1	1962	1974	19	1996	
2	1962	1975	20	1997	
3	1967	1974	21	1992	
4	1962	1989	22	1993	
5	1962	1993	23	1992	
6	1962	1968	24	1993	
7	1968	1993	25	1994	
8	1977	1989	26	1997	
9	1968	1993	27	1992	
10	1975	1993	28	1994	
11	1977	1993	29	1993	
12	1977	1993	30	1993	
13	1977	1997	31	1993	
14	1979	1997	32	1993	
15	1977	1997	33	1995	
16	1979	1997	34	1996	
17	1992		35	2000	
18	1992		36	2001	

발전기의 기대여명은 각각 8.2년, 5.1년, 5.6년으로 기대수명은 18.2년, 20.1년, 25.6년이다. 본 결과에서는 운전년수 20년인 발전기의 기대여명이 운전년수 15년인 발전기의 기대여명보다 길어서 상식적이지 않은 결과를 보였는데, 이는 실제데이터를 충실히 반영한 것이다. 즉, 주어진 데이터에 따르면, 운전년수가 15년 이상인 발전기는 이 후 3년 이내에 3대의 발전기가 철거된 반면에, 운전년수가 20년 이상인 발전기는 이 후 4년간 한 대의 발전기도 철거되지 않음으로 인해 발생한 결과이다.

표 3. 운전 및 제거 발전기 수
Table 3. Numbers of exposed and retired generators

운전 년수	운전 대수	철거 대수	운전 년수	운전 대수	철거 대수
0	36	0	16	11	2
1	36	0	17	9	0
2	36	0	18	9	3
3	35	0	19	6	0
4	34	0	20	6	2
5	34	0	21	4	0
6	34	1	22	4	0
7	31	1	23	4	0
8	28	0	24	4	0
9	27	0	25	4	2
10	25	0	26	2	0
11	19	0	27	2	1
12	14	2	28	1	0
13	12	1	29	1	0
14	11	0	30	1	0
23	4	0	31	1	1

표 4. 평균수명 산출을 위한 누적확률분포
Table 4. Cumulative probability distribution for expected lifetime evaluation

운전 년수	운전 대수	누적 철거대수	식	누적 확률
5	34	0	0/34	0.00000
6	34	1	1/(34+0)	0.02941
7	31	2	2/(31+1)	0.06250

운전 년수	운전 대수	누적 철거대수	식	누적 확률
8	28	2	2/(28+2)	0.06667
9	27	2	2/(27+2)	0.06897
10	25	2	2/(25+2)	0.07407
11	19	2	2/(19+2)	0.09524
12	14	4	4/(14+2)	0.25000
13	12	5	5/(12+4)	0.31250
14	11	5	5/(11+5)	
15	11	5	5/(11+5)	
16	11	7	7/(11+5)	0.43750
17	9	7	7/(9+7)	
18	9	10	10/(9+7)	0.62500
19	6	10	10/(6+10)	
20	6	12	12/(6+10)	0.75000
21	4	12	12/(4+12)	
22	4	12	12/(4+12)	
23	4	12	12/(4+12)	
24	4	12	12/(4+12)	
25	4	14	14/(4+12)	0.87500
26	2	14	14/(2+14)	
27	2	15	15/(2+14)	0.93750
28	1	15	15/(1+15)	
29	1	15	15/(1+15)	
30	1	15	15/(1+15)	
31	1	16	16/(1+15)	1.00000

표 9는 운전년수가 25년, 30년, 35년에 이르게 될 확률로서, Step 6에서 산출한 누적확률분포함수 $F(x)$ 로부터 쉽게 구할 수 있다. 예를 들어, 10년 운전한 발전기가 운전년수 25년에 도달할 확률은 '1- $F_{10}(15)$ '로 계산되며, 이 때, $F_{10}(x)$ 은 운전년수 10년인 발전기 기대여명 누적확률분포함수이다. 표 9에 따르면, 운전시작시에 운전년수가 25년에 도달할 확률은 7.0%인데 반하여 운전년수가 15년인 발전기는 그 기대확률이 14.1%이다. 한편, 운전년수 20년인 발전기는 향후 5년간만 생존하면 운전년수가 25년에 도달하므로 그 확률이 큰 것은 당연하지만, 표 9에 따르면 무려 64.8%인데, 이는 전술한 바와 같이 표 본데이터에서 운전년수가 21년부터 24년 사이에 한 대의 발전기도 철거되지 않음에 기인한다.

확률분포를 이용한 전력설비의 기대여명 추정

표 5. 기대여명 산출을 위한 누적확률분포 (10년 운전 후)

Table 5. Cumulative probability distribution for life expectancy evaluation(after 10 year operation)

추가 운전년수	운전 대수	10년이후 누적철거 대수	식	누적 확률
1	19	0	0/19	0.00000
2	14	2	2/(14+0)	0.14286
3	12	3	3/(12+2)	0.21429
4	11	3	3/(11+3)	
5	11	3	3/(11+3)	
6	11	5	5/(11+3)	0.35715
7	9	5	5/(9+5)	
8	9	8	8/(9+5)	0.57143
9	6	8	8/(6+8)	
10	6	10	10/(6+8)	0.71429
11	4	10	10/(4+10)	
12	4	10	10/(4+10)	
13	4	10	10/(4+10)	
14	4	10	10/(4+10)	
15	4	12	12/(4+10)	0.85714
16	2	12	12/(2+12)	
17	2	13	13/(2+12)	0.92857
18	1	13	13/(1+13)	
19	1	13	13/(1+13)	
20	1	13	13/(1+13)	
21	1	14	14/(1+13)	1.00000

표 6. 기대여명 산출을 위한 누적확률분포 (15년 운전 후)

Table 6. Cumulative probability distribution for life expectancy evaluation(after 15 year operation)

추가 운전년수	운전 대수	15년이후 누적철거 대수	식	누적 확률
0	11	0	0/11	0.00000
1	11	2	2/(11+0)	0.18182
2	9	2	2/(9+2)	
3	9	5	5/(9+2)	0.45455

추가 운전년수	운전 대수	15년이후 누적철거 대수	식	누적 확률
4	6	5	5/(6+5)	
5	6	7	7/(6+5)	0.63636
6	4	7	7/(4+7)	
7	4	7	7/(4+7)	
8	4	7	7/(4+7)	
9	4	7	7/(4+7)	
10	4	9	9/(4+7)	0.81818
11	2	9	9/(2+9)	
12	2	10	10/(2+9)	0.90909
13	1	10	10/(1+10)	
14	1	10	10/(1+10)	
15	1	10	10/(1+10)	
16	1	11	11/(1+10)	1.00000

표 7. 기대여명 산출을 위한 누적확률분포 (20년 운전 후)

Table 7. Cumulative probability distribution for life expectancy evaluation(after 20 year operation)

추가 운전년수	운전 대수	20년이후 누적철거대수	식	누적 확률
4	4	0	0/4	0.00000
5	4	2	2/(4+0)	0.50000
6	2	2	2/(2+2)	
7	2	3	3/(2+2)	0.75000
8	1	3	3/(1+3)	
9	1	3	3/(1+3)	
10	1	3	3/(1+3)	
11	1	4	4/(1+3)	1.00000

표 8. 기대여명 산출 결과

Table 8. Evaluation results of life expectancy

	운전 시작 시	10년 운전 후	15년 운전 후	20년 운전 후
α	18.552	9.046	5.052	6.190
β	3.275	1.482	0.985	3.913
기대여명	16.635	8.178	5.084	5.604
표준편차	5.588	5.614	5.160	1.604

표 9. 운전년수 기대 확률
Table 9. Probability of age year

운전년수	운전 시작 시	10년 운전 후	15년 운전 후	20년 운전 후
25	7.021	12.048	14.088	64.811
30	0.802	3.911	5.380	0.145
35	0.034	1.097	2.065	0.000

표 10. 15년간 운전한 발전기의 고장확률
Table 10. Failure probability of generator of age year 15

1년 이내	2년 이내	3년 이내	4년 이내	5년 이내
18.347	33.055	45.030	54.819	62.838

끝으로 표 10은 15년간 운전한 발전기의 향후 철거확률로서, 예를 들어, 향후 1년 이내에 철거될 확률은 $F_{15}(1)$ 로 계산되며, 이 때, $F_{15}(x)$ 은 운전년수 15년인 발전기 기대여명 누적확률분포함수이다. 표 8과 표 10의 결과를 종합하면, 운전년수 15년인 발전기의 기대여명은 약 5.1년이고, 5년이내에 철거될 확률은 62.8[%]이다.

5. 결 론

본 논문에서는 확률분포를 이용하여 전력설비의 기대여명을 추정하는 방법을 제안하였다. 전력설비는 대부분 그 수명이 길기 때문에 기대여명을 추정하기 위한 기본데이터가 부족한 경우가 많으므로, 본 논문에서는 철거된 설비의 수명과 함께 운전중인 설비의 운전년수를 동시에 고려하여 부족한 데이터를 보완하였다. 또한 본 논문에서는 설비의 기대여명을 직접 계산하지 않고, 기대여명의 확률분포를 와이بل분포 등의 확률분포로 모형화하고, 모형 확률분포의 평균값으로부터 기대여명을 산정하는 간접적인 방법을 사용하고 있는데, 이 또한 부족한 데이터로부터 합리적인 추정을 하기 위한 좋은 방안이라고 생각된다. 이와 같이 확률분포를 이용하여 모형화하는 경우에는, 그 평균값 뿐만 아니라, 특정 사건에 대한 확률 또한 산정할 수 있으므로 특정 운전년수의 설비가 지정된 년수내에 철거될 확률 등을 쉽

게 구할 수 있다.

본 논문에서 발표한 방법은 필요로 하는 데이터가 단순하고 기대여명의 산정 방법 또한 간단하므로 전력설비 뿐만 아니라, 다른 분야 설비의 기대여명 추정에도 활용될 수 있다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

References

- (1) 통계청 온라인 간행물, 시도별생명표(2006년), www.nso.go.kr.
- (2) W. Li and S. Steven Pai, "Evaluating Unavailability of Equipment Aging Failures," IEEE Eng. Rev., vol. 22, no. 2, pp. 52-54, Feb. 2002.
- (3) W. Li, "Incorporating Aging Failures in Power System Reliability Evaluation," IEEE Trans. on Power System, vol. 17, no. 3, pp. 918-923, Aug. 2004.
- (4) W. Li, "Evaluating Mean Life of Power System Equipment with Limited End-of-Life Failure Data," IEEE Trans. on Power System, vol. 19, no. 1, pp. 236-242, Feb. 2004.
- (5) 김광원, "신뢰도 평가에서 제한된 데이터를 이용한 와이블분포 모형화 기법," 내한전기학회논문지, 55A권, 3호, pp. 109-115, 2006년 3월.
- (6) 이성훈, 이승혁, 김신오, "통계적 분석방법을 이용한 복합하력 발전설비의 평균수명 계산 및 고장확률 예측," 내한전기학회논문지, 54A권, 10호, pp. 480-486, 2005년 10월.

◆ 저자소개 ◆

김광원 (金光源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수.

현승호 (玄升鎬)

1962년 10월 30일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2002년 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 시스템개발팀장. 2002~2004년 명지대학교 전기공학과 차세대 전력기술연구센터 연구교수. 2004년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 부교수.