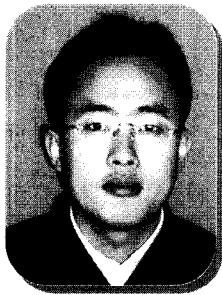


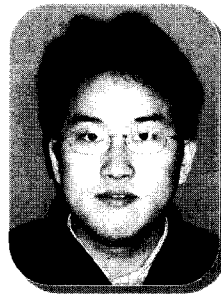
## 초고압 XLPE 전력 케이블 시스템에서 적용되고 있는 Simulation 기술



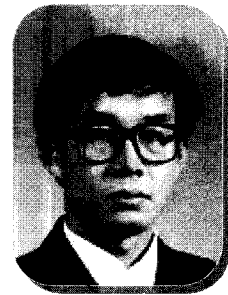
· 신두성 ·  
LG전선(주)  
전력연구소 선임연구원



· 조대희 ·  
LG전선(주)  
전력연구소 주임연구원



· 남석현 ·  
LG전선(주)  
전력연구소 연구원



· 김동욱 ·  
LG전선(주)  
전력연구소 전력연구실장

### 1. 서론

발전소에서 발전된 전력을 각 수요자에게 안정적으로 공급하는 것을 목적으로 하는 전력 케이블은 크게 가공선과 지중선으로 구분된다. 국내에서는 급격한 산업 발전으로 인한 전력 사용량의 증대로 인하여 송전 전압 또한 지속적으로 상승하여 왔으며, 또한 산업화에 수반한 도심화에 따라 전력 케이블의 지중화율도 꾸준히 증가하고 있다.

현재, 국내 지중 송전 전력 케이블 시스템의 전압은 154kV가 주류를 이루고 있으며, 345kV급 XLPE 케이블도 곧 실용화 될 전망이다. 이러한 시스템 전압의 상승에 따라 고품질, 고신뢰성이 요구되기 때문에 전력 케이블 분야에서도 설계, 제조 및 평가의 전 분야에 걸쳐서 컴퓨터 Simulation 기법과 같은 첨단 기술이 적용되고 있다. 본 논문에서는 초고압 XLPE 전력 케이블 시스템 분야에서 적용되고 있는 Simulation 기술과 그 적용 사례에 대하여 설명하고자 한다.

### 2. 초고압 케이블의 품질 관리에 적용되고 있는 Simulation 기술

#### 2.1 초고압 XLPE 케이블 제조 공정에서의 Simulation 적용 기술

초고압 XLPE 케이블의 구조를 아래 그림 1에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 구리선을 연합하여 구성되는 도체, 내부 반도체층, 절연층, 외부 반도체층, 금속 시스 그리고 외부 보호층으로 구성된다.

초고압 XLPE 케이블은 내부 반도체층, 절연층, 외부 반도체층을 케이블 도체 위에 압출시켜 피복하는 삼중 동시 압출 공법에

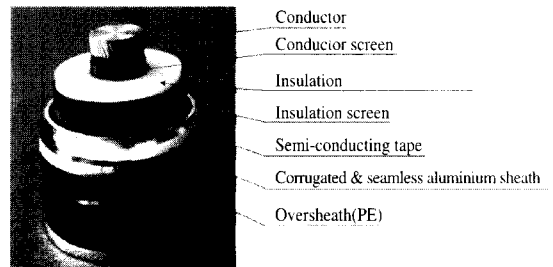


그림 1. 초고압 XLPE 케이블의 구조.

의하여 제조된다.

압출 공정은 그림 2와 같은 Pellet 상태의 XLPE 원재료를 고온으로 용융시켜 압출하는 공정이다. 용융된 XLPE는 스크류의 회전에 의하여 고압의 상태로 압출되고, 반도체 컴파운드와 함께 크로스헤드를 통과하면서 동시에 압출된다. 특히 절연 XLPE 컴파운드는 이물을 차단하기 위한 금속 mesh가 장착된 Breaker Plate를 통과한다. 압출 시스템의 이러한 각 부분에서의 용융된 컴파운드의 온도, 압력, 부품의 형상 등에 따라 용융된 컴파운드의 흐름성에 차이를 나타내며, 가능한 균일한 흐름성을 확보할 필요가 있어, 최적의 유동 해석이 중요하다.

원재료의 균일한 유동 흐름을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 기술을 적용하여 압출 시스템의 주요 부품인 스크류, 크로스 헤드, Breaker Plate 등의 형상을 설계 한다.

### 1) 수지 유동 해석에 의한 스크류 설계

XLPE 압출 시스템에서 스크류는 용융된 XLPE 수지를 mixing 하고 압출 시스템으로 밀어내는 역할을 하는 부품이다. 기존에는 압출량만을 고려하여 스크류를 설계하였으나, 최근에는 XLPE 수지가 얼마나 잘 균일하게 mixing 되는지, 스크류 각 부분에서 수지

의 용융상태가 최적인지, 수지의 압력으로 인한 과부하가 발생하지 않는지 등에 중점을 두고 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 스크류 구조를 설계한다. 스크류의 재질과 외경, 길이와 같은 Dimension, 스크류 날개의 수와 각도 등이 주요한 변수이다. 아래의 그림 3은 스크류 설계에서 수지 유동해석의 예이며, 스크류 부에서 수지의 압력 분포를 simulation 해석에 의하여 나타낸 그림이다.

### 2) 수지 유동 해석을 통한 크로스헤드 유로(流路) 설계

크로스 헤드부는 내부 반도체 컴파운드, 절연 컴파운드, 외부 반도체 컴파운드가 합쳐져서 압출되는 부분이다. 따라서 설계된 XLPE 케이블의 치수대로 제조되기 위해서는 각 컴파운드의 수지 유량과 속도 조절이 중요하다. 크로스 헤드부에서 수지의 체류부가 발생하면 XLPE 케이블의 절연층이 동심원이 안되고 편심이 발생하기 때문에 크로스 헤드부에서 각 수지의 유속이 균일하도록 크로스 헤드의 유로의 외경 및 구조를 설계한다. 그림4는 설계된 크로스 헤드의 유로에서 수지의 유동해석 결과를 나타낸 예이다. 크로스 헤드부에서 수지의 유속을 3차원 색상 map으로 표시한 결과이며 그림에서 보는 바와 같이 수지의 유속이 균일함을 알 수 있다.

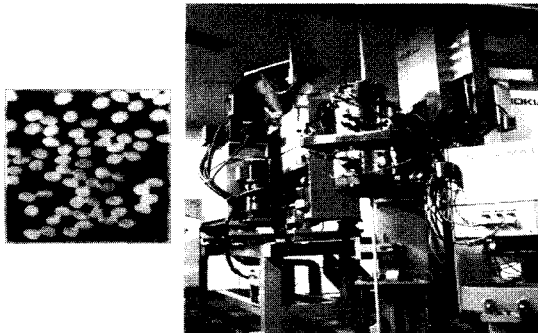


그림 2. Pellet 상태의 XLPE 원재료 및 압출 시스템.

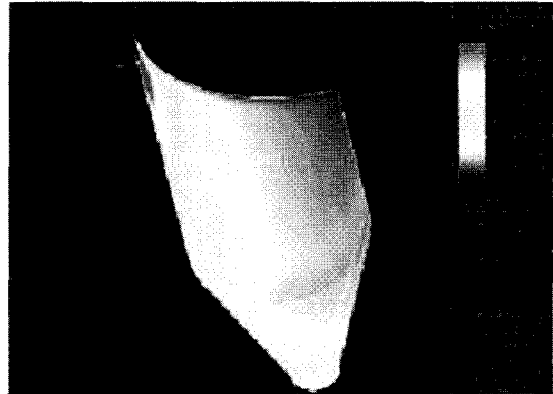


그림 4. 크로스 헤드부의 수지 유속 분포에 [1].

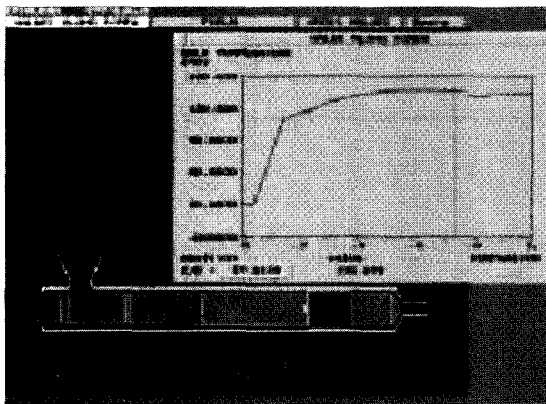


그림 3. 스크류부의 수지 유동 해석 예 [1].

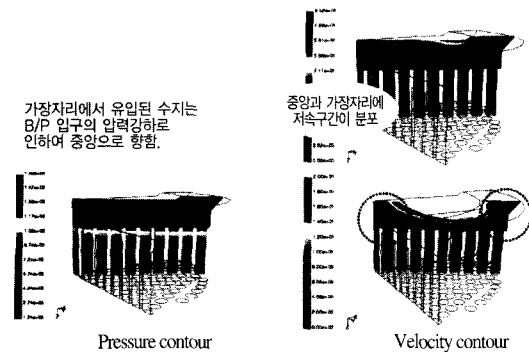


그림 5. Breaker Plate의 Slit부 압력 분포 및 속도 해석 예.

### 3) 수지 유동 해석을 통한 Breaker Plate 설계

Breaker Plate는 절연 XLPE 수지의 이물을 걸러내는 금속 mesh가 장착된 부품이다. Breaker Plate의 Slit의 Dimension과 형상에 따라 수지의 유동에 큰 영향을 미친다. 스크류 끝단의 회전 효과를 고려한 실제 압출 조건을 모사함으로써 컴파운드 흐름저동과 압력분포 및 압력 강하를 바탕으로 유동의 문제점을 파악하고 최적의 모델을 설계한다. 일반적으로 Breaker Plate의 Slit를 통과하는 컴파운드의 평균 유속이 균일하게 분배되도록 유동 해석 simulation을 통하여 Breaker Plate 구조를 최적화 한다. 그림 5와 그림 6은 Breaker Plate Slit부에서의 최적 압력 분포 및 속도 해석 예이다.

### 4) 전력 케이블 가교 냉각조건의 설계

전력 케이블의 압출 공정에서 가교 및 냉각 조건은 전력 케이블의 품질에 직접적으로 영향을 미치는 아주 중요한 변수이다. 따라서, 전력 케이블의 원재료인 XLPE의 물성, dimension 등을 고려하여 최적으로 가교 및 냉각 조건을 설정하여야 한다.

그림 7에 XLPE 케이블 제조 과정 중의 가교 및 냉각 Process를

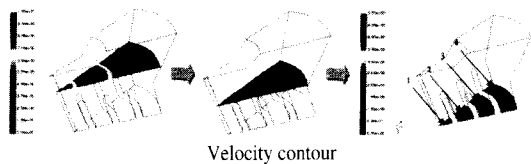


그림 6. 최적 Breaker Plate에서의 속도 분포 해석 예.

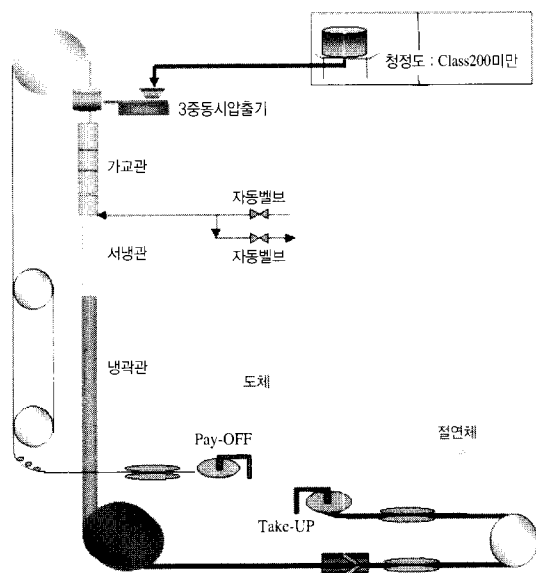


그림 7. XLPE 케이블 제조 과정 중의 가교 및 냉각 Process.

나타내었다. 가교 및 냉각 조건에서 주요한 변수는 도체의 예열 온도, 선속, 가교 온도 및 가교관 길이, 냉각관의 길이 및 냉각관 온도 등이다. 가교 및 냉각에서 가장 중요한 것은 XLPE 절연체 내부에 가능한 균일하게 열이 전달되어야 하며, 국부적으로 미가교 또는 과도한 가교가 발생하지 않아야 하며, 적절한 냉각 Process의 설계에 의하여 냉각과정에 생기는 절연체 내부의 잔류 응력 또한 최소화하여야 한다. 이러한 많은 변수를 최적으로 설정하기 위해서 열전달 및 응력 해석과 같은 simulation 기법이 적용되어 온도와 시간 그리고 냉각 속도를 설정한다.

## 2.2 초고압 XLPE 케이블 절연 공정중 이물 관리에서의 Simulation 적용 기술

초고압 케이블 주 절연재료인 XLPE 속에 존재할 가능성이 있는 이물(Amber, Metal, Black, Fiber)을 실시간으로 검출하는데 있어서도 Simulation 기법을 적용한다. XLPE 재료에 이물이 혼입 될 수 있는 가능성은 크게, 원료를 생산 하는 단계와 케이블을 제조하는 단계에서 일어난다. 이를 위해 이물을 실시간으로 검출하는 In-line 이물 검출 시스템과 이러한 이물의 종류와 형상을 판별하는 Simulation 기법이 전력 케이블 품질의 향상에 어떻게 적용되고 있는가를 설명하기로 한다.

### 1) In-line 이물 검출장치

케이블 제조공정에서 연속적으로 이물을 검출하는 시스템의 개략적인 구성도를 아래의 그림 8에 표시하였다.

이 시스템은 케이블 제조공정 중에 들어가는 전량의 주절연

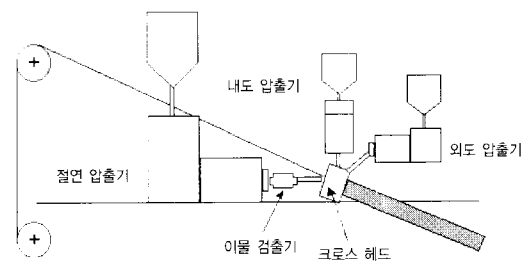


그림 8. 연속 이물 검출기(melt flow 방식).

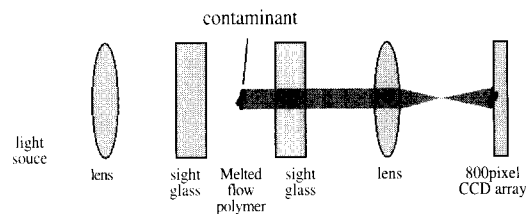
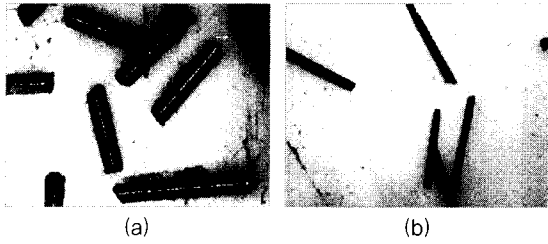
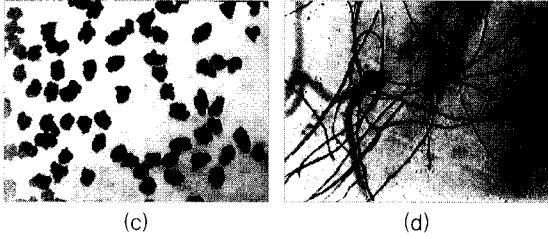


그림 9. 연속 이물검출장치 개념도(Melt Flow식).



(a) (b)



(c) (d)

그림 10. 이물의 종류 : (a) 구리 세션 (b) 머리카락 (c) Fe 분말 (d) 섬유성 이물.

XLPE 재료에 대해 이물을 검사할 수 있는 시스템으로 압출 용융된 상태에서 재료 중의 이물을 검사하는 시스템이다. XLPE Pellet을 용융하여 mixing하는 압출기와 도체에 절연체를 피복하는 Cross-head를 연결하는 선단부의 slit부에 크세논 광을 투과시키고, 용융되어 있는 XLPE 재료 속으로 투과 시킴으로써, 이물이 존재할 경우 투과하는 광량의 차이를 이용하여 검출하는 방법으로, 그 개념도를 그림 9에 표시했다.

## 2) In-line 검출장치의 Simulation 기법을 이용한 자동 이물 판별에

앞서 설명한 바와 같이, In-line 검출 장치는 용융된 XLPE 원재료 수지에 크세논 광원을 투과 시키고, 이물에 따른 투과량의 차이를 CCD 촬영하고 Image Processing 기법에 의하여 이물의 크기 및 종류를 판별한다.

그림 10은 실제로 공정중에 발생할 수 있는 금속 이물, 머리카락, 섬유성 이물 등의 실제 사진이다.

그림 11과 12는 이러한 이물이 XLPE 케이블 제조중에 들어가는 경우, In-line 이물 검출 장치에서 측정된 결과를 나타내고 있다.

왼쪽 화면은 실시간으로 검출된 이물의 CCD 화면과 시간에 따른 이물의 크기의 Profile을 나타내고 있다. 이물의 종류에 따른 광량의 차이가 생기며, CCD 화면에 촬영된 Image를 Image Processing 기법에 의하여 RGB(Red, Green, Blue) Color Map상의 Data로 변환된다. 이물의 크기와 RGB data는 자동으로 저장되어 Data base화된다. 오른쪽 화면에 그러한 Data의 예를 나타내었다.

이러한 data base를 바탕으로 실제 케이블 제조 중에 이물이 발생되면, 원인 파악이 가능하며 즉각적인 조치가 가능하기 때문에 전력 XLPE 케이블의 고품질, 고신뢰도화가 가능하다.

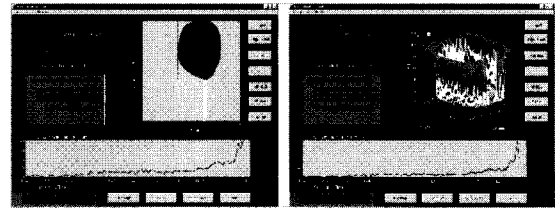
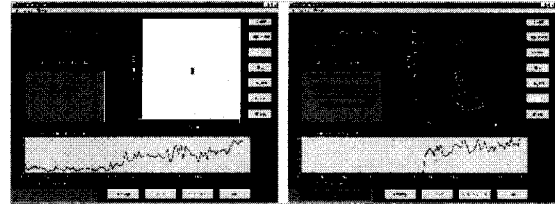
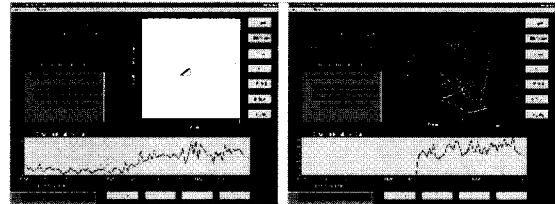


그림 11. HDPE 이물의 경우.



(a) 구리 세션이 flow 방향과 일치 될 때.



(b) 구리 세션이 Flow 방향에 대해 교차 될 때.

그림 12. 구리 세션의 경우.

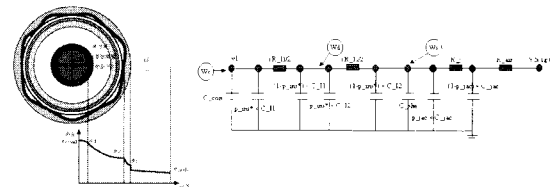


그림 13. 전력 케이블의 구조 및 열모델링 회로도.

## 2.3 초고압 XLPE 전력 케이블 운전 상태에서의 Simulation 적용 기술

초고압 XLPE 케이블이 실제 운전되는 경우, 전류에 의하여 전력 케이블에 열이 발생한다. 따라서 실제로 XLPE 전력 케이블의 효율은 XLPE 재질의 열적 한계로 인하여 제한이 있다. 통상 XLPE 전력 케이블에서 전류의 용량은 케이블의 최고 온도가 90°C를 넘지 않도록 규정되어 있으며, 실제 운전시에는 케이블 내부 온도를 측정할 수 없기 때문에 안전을 고려하여 그보다 훨씬 낮은 전류에서 운전되고 있다.

Dynamic Rating System은 전력 케이블 송전선로의 부하와 주변 매질 (대기, 토양, 덕트, 관로) 등의 열적 상태를 파악하여 전력 캐

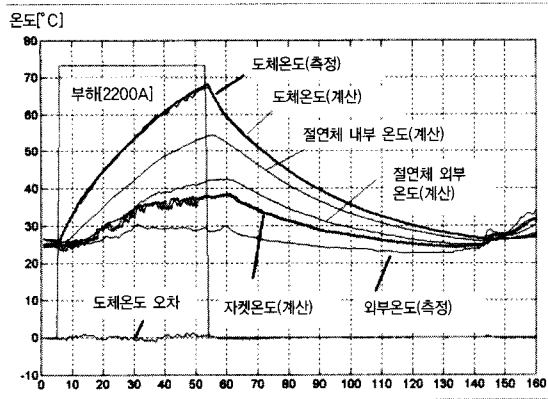


그림 14. 도체 온도 추정 Simulation 예.

이들의 열적 한계를 주변 환경 변화에 따라 동적으로 평가함으로써 실시간으로 송전 용량을 평가하는 기술로, 초고압 XLPE 케이블 선로의 운전 도체 온도를 추정하여 선로 운용의 신뢰성을 증대시키는 기술이다. 아래의 그림 13에 전력 케이블의 구조와 이에 따른 열 모델링 회로의 예를 나타내었다.

여기서,  $W_c$  : 도체 발열량,  $W_d$  : 유전체 손,  $W_s$  : 스위스 손,  $C_{con}$  : 도체 열용량,  $CI1/CI2/...$  : 케이블 각부의 열용량,  $p_{ins} * /p_{jac}$  : 열용량 분배계수,  $R_I$  : 절연체 열저항,  $R_j$  : 자켓 열저항,  $R_{air}$  : 대기층 열저항이다.

전력 케이블의 내부 열정수를 측정하고, 외부 온도를 측정함으로써 케이블 및 주변 매질의 열정수를 보정할 수 있다. 이러한 열정수 data를 바탕으로 그림 13의 XLPE 케이블을 열모델링하여 이러한 열모델을 수치해석하여 전력케이블 도체, 절연체, 표면의 온도를 추정할 수 있다.

그림 14는 케이블 각 부위의 실측 온도와 Simulation한 온도를 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 실측한 온도와 Simulation에 의한 추정온도의 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 DATA와 Simulation 기법을 바탕으로, 전력 케이블의 부하를 실시간으로 조절하여 줌으로써 전력케이블 운용의 효율성이 획기적으로 향상시킬 수 있다.

### 3. 결론

초고압 전력 케이블의 제조 설비의 설계와 공정의 설계에 있어 수지의 유동 해석 등의 Simulation 기법이 적용되고 있으며, 제조 과정인 가교 및 냉각 공정 뿐만 아니라 제품 품질을 위한 검사 과정에서 이물 자동 측정 및 판별에 적용되고 있는 Simulation 기법이 적용되고 있다. 이러한 컴퓨터 simulation 기법의 적용으로 고 품질, 고신뢰도의 전력 케이블 제조 및 평가가 가능하게 되었으며, 또한 최근에는 전력 케이블의 운용을 보다 효율적으로 하기 위하여 실제 운전 상태의 전력케이블의 온도를 추정하여 부하를

조정하는 Dynamic Rating System에도 폭넓게 Simulation 기술이 적용되고 있다.

### 참고 문헌

- [1] Nobuyuki Matsumoto, "Technical Development and View of Underground and Overhead Transmission Line", Showa Cable Review, p. 64, Vol 51, No. 1, 2001.

## 서사약력

성명 : 신 두 성

#### ❖ 학 력

- 1994년 서울대 전기공학과 학사
- 1996년 동 대학원 석사
- 1998년 동 대학원 박사 수료

#### ❖ 경 력

- 1998년 - 현재 LG전선(주) 전력연구소 선임연구원

성명 : 조 대 희

#### ❖ 학 력

- 1996년 한국과학기술원(KAIST) 화학공학과 학사
- 1998년 동 대학원 석사

#### ❖ 경 력

- 1998년 - 현재 LG전선(주) 전력연구소 주임연구원

성명 : 남 석 현

#### ❖ 학 력

- 1998년 서울대 전기공학과 학사
- 2000년 동 대학원 석사

#### ❖ 경 력

- 2000년 - 현재 LG전선(주) 전력연구소 연구원

성명 : 김 동 욱

#### ❖ 학 력

- 1984년 한양대 전기공학과 학사
- 1992년 동 대학원 석사
- 1999년 오오사카대학 전자공학과 공학 박사

#### ❖ 경 력

- 1983년 - 현재 LG전선(주) 전력연구소 전력연구실장