

LED조명의 수명평가 및 국제표준

김태훈 (삼성전기 중앙연구소)

I. 서론

최근 전세계적으로 에너지비용절감에 대한 필요성과 에너지생산에 따른 환경영향 인식의 제고로 인하여 친환경에너지저감 기술이 집중적으로 개발되고 있다. 전세계적으로 사용되는 전기 에너지의 약 20%가 조명에 사용되고 있음을 감안하면 기존의 백열등과 같은 저효율 조명을 고효율 조명으로의 대체하는 것은 에너지절감 측면에서 당연한 과제이다. 이미 미국, 유럽 등 많은 국가들에서 정부, 산업계, 환경단체 주도로 백열등과 같은 저효율 조명에 대한 사용을 단계적으로 금지하는 법안을 제정하여 추진 중이다. 우리나라에서도 이와 같은 세계적인 추세에 발맞추어 2009년에 이미 공공기관에서 거의 모든 백열전구를 퇴출하였으며 올해부터 민간부문에서도 단계적으로 퇴출을 추진하여 2013년까지 완료할 예정이다. 최근 백열등과 같은 저효율 조명을 대체할 수 있는 차세대 조명으로 반도체광원을 탑재한 LED조명이 최근에 각광을 받고 있다. LED조명은 기존 조명들에 비해 많은 장점을 가지고 있으며 이중 광효율과 수명 특성은 기존의 다른 어떤 조명보다 우수하며 LED조명 확산의

원동력이 되고 있다. 현재 LED조명은 실용화 기술개발이 활발하게 진행 중이며 이미 건축조명, 신호조명, 전망조명, 산업조명, 도로조명, 주거조명 등 많은 분야로 확산되고 있다. LED조명이 광효율과 가격 측면에서 아직 고효율 형광등에 뒤지고 있어 본격적인 사용에 다소 시간이 걸릴 것으로 예상되지만 수은과 같은 환경유해물질을 포함하고 있는 형광등은 LED조명이 사회전반에 걸쳐 광범위하게 확산되기 전까지 일정기간 사용되다가 궁극적으로 퇴출될 것으로 예상된다. 신뢰성 측면에서도 LED조명은 구조적인 특성으로 인하여 기존 조명들보다 우수한 성능을 보일 것으로 예상되며 특히 50,000시간 이상의 매우 긴 장수명 특성을 보일 것으로 기대되고 있다. 50,000시간의 수명이 보증되는 LED조명의 경우 하루에 8시간씩 사용한다고 가정할 때 약 6년간 사용이 가능하다. LED조명은 또한 고장특성상 보증수명이 다한 이후에도 감소된 출력이지만 지속적으로 빛을 발생시킬 수 있으므로 파국적인 고장을 맞이하여 수명 이후에 사용이 불가능한 기존 조명들과 비교하면 매우 우수한 수명특성을 보일 것으로 예측하고 있다. 하지만, LED조명의 신뢰성과 수명은 여러 가지 다양

한 요인들이 복잡하게 관련되어 있으며 측정방법에 있어서도 아직 제조자별, 시험기관별, 국가별로 상이하여 정확하고 공정하게 평가하기가 매우 어렵다. 아이러니하게 이러한 평가의 어려움은 LED의 가장 중요한 장수명 특성에 기인하고 있다. LED조명의 경우 고장이 발생할 때까지 시험을 수행하여 수명을 평가하는 것은 현실적으로 가능하지 않으며 제품수명주기를 고려할 때 무의미하고 불합하다. 물론, 필드에서의 고장 데이터를 확보하여 수명을 평가할 수도 있으나 50,000시간 이상의 수명을 자랑하는 고효율 LED패키지가 비교적 최근에 개발된 것을 고려할 때 아직 필드에서 수명을 검증할 만큼 충분한 데이터가 확보되지 못했을 것으로 예상된다. 일부 LED광원 제조업체에서 자사 제품에 대하여 수만 시간의 수명시험데이터를 확보하고 있는 것으로 알려져 있지만 수명시험이 진행되고 있는 대상 제품은 수년 전에 개발된 저출력 제품일 가능성이 높으며 따라서 현재 개발되고 있거나 판매되고 있는 고효율 제품과 수명성능에서 상당한 차이를 보일 가능성이 있다. 따라서 기존 조명과 비교할 때 가장 크게 차별화되고 중요한 LED특성인 장수명을 합리적인 기간 내에 정확하게 평가할 수 있는 방법을 개발하는 것은 정부, 학계, 산업계 모두에게 중요한 과제이다. 본고에서는 LED조명의 수명정의, 평가방법, 국제표준화 현황 등에 대하여 살펴보고자 한다.

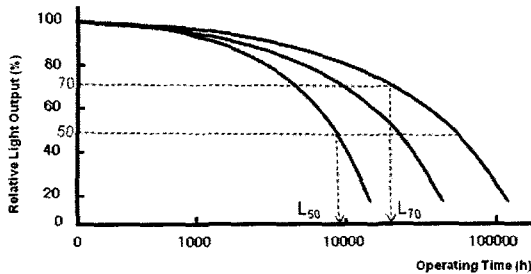
II. LED 수명

백열등, 형광등과 같은 기존 조명들은 사용 중 파국적고장(catastrophic failure) 특성을 보이지만 LED조명은 수명기간 동안 점진적인 광출

력감소(gradual optical power degradation) 특성을 보인다. 기존 조명에 대한 수명은 시험대상의 50%가 파국적 고장에 이르는 시간을 측정하여 평가하며 이렇게 측정된 수명을 정격수명(rated life)이라고 한다. <표 1>에서 보이는 것처럼 기존 광원들은 정격수명에 다다르면 갑작스럽게 빛을 더 이상 발생시키지 않아 파국적 고장에 이르게 되지만 LED광원은 출력이 시간에 따라 점진적으로 감소하므로 광출력이 특정 값으로 감소될 때까지의 시간을 수명으로 정의한다. LED조명의 광출력 감소는 광속저감(Lumen Depreciation)으로 평가한다. 광속저감은 조명의 공간디자인, 교환주기산정, 투자회수기간산정 등에 활용되는 매우 중요한 특성이다. 광속저감은 조명기기의 수명성능을 평가하는 중요한 특성이며 실제 활용에 있어서는 광속유지율(Lumen Maintenance)을 사용한다. 광속유지율은 특정 시점에서 초기광출력 대비 잔여광출력의 비율이며 따라서 광속저감의 상대적 개념이다. LED조명의 수명은 최근 국제적인 표준화에 따라 <그림 1>에서 보이는 것처럼 초기 출력 대비 70% 혹은 50%로 감소될 때까지의 시간으로 정의한다. LED조명은 앞서 언급한 바와 같이 50,000시간 이상의 장수명이 예상되므로 정상 동작환경(normal operating condition)에서 수

<표 1> 광원별 예측수명

광원	정격수명 (시간)	유효수명 (시간)
백열전구	750~2,000	
할로겐램프	3,000~4,000	
절전형형광등(CFL)	8,000~10,000	
메탈할라이드	7,500~20,000	
형광등(linear)	20,000~30,000	
고출력 LED		35,000~50,000



〈그림 1〉 LED 수명 정의

명을 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. LED 수명 평가방법은 그 동안 미국을 중심으로 활발히 연구되어 왔으며 미국 뉴욕의 Rensselaer공대 LRC (lighting research center)의 ASSIST (Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies) 프로그램에서 처음으로 L70 (time to reach 70% lumen maintenance) 개념을 도입하여 LED수명을 평가하였다. ASSIST 프로그램에서 L70(초기 출력 대비 30%의 출력 감소가 일어나는 시점)을 LED광원의 수명 기준으로 정한 이유는 LRC에서 수행한 빛의 인지 실험 결과에 근거하고 있다. LRC에서 수행한 빛의 인지 실험결과에 따르면 대부분의 사람들은 광출력이 초기 대비 30% 감소할 때까지 그 변화를 인지하지 못한다고 한다. 2008년에 북미조명공학회(IESNA) 반도체조명 소위원회는 LED광원(package/module/array)에 대한 수명시험 표준문서 LM-80-08을 발간하였으며 핵심 내용은 ASSIST 프로그램에서 제시한 LED 수명평가 가이드라인과 매우 유사하다. 2008년 미국 에너지성(DOE)과 환경국(EPA)은 LED조명 보급 확산을 촉진하기 위하여 고효율/친환경 제품 인증제도인 Energy Star 프로그램에 LED조명 카테고리 추가하였으며 인증 조건 중 LED광원에 대한 수명평가시험을 북미조명공학회 LM-80-08에서 규정한 절차에 따라 수행할 것

을 요구하고 있다.

III. LED 열화 요인

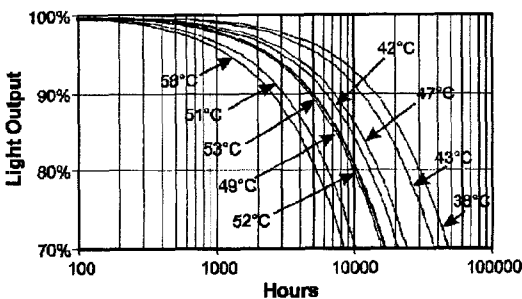
LED는 앞서 기술한 바와 같이 수명기간 동안 점진적인 광출력열화(optical power degradation) 특성을 보이므로 신뢰성측면에서 마모고장 메커니즘(wearout mechanism)에 의한 고장특성을 나타내는 대표적인 제품이다. LED의 광출력 열화는 시간에 따른 광속감소를 측정하여 평가하는데 광속저감시험(lumen depreciation test)은 조명제품에 보편적으로 사용되어온 수명평가 시험방법이다. 대부분의 조명이 유사한 광속저감 특성을 보이지만 열화를 발생시키는 요인 및 메커니즘은 각각 다르다. 형광등은 수은증착과 형광체의 광화학적 열화, 백열등은 텅스텐증착이 주요 광속저감 요인으로 작용한다. LED조명의 경우 방열디자인, 구성소재, 부속전자부품 등 기존 광원보다 다양한 요인들이 복합적으로 광속에 영향을 미칠 수 있으며 LED칩(die), LED패키지, LED조명으로 나누어 열화 요인들을 살펴볼 필요가 있다. LED칩의 주요한 열화 메커니즘은 LED 접합온도(junction temperature, T_j)의 상승에 따른 활성화영역(active region)의 결정결함밀도(crystal defect density) 증가와 이에 따른 전자-정공의 비발광성재결합(non radiative recombination)증가 라고 알려져 있다. 활성화영역의 결정결함은 전자-정공이 재결합할 때 비발광성재결합 센터로 작용하며 이 때 빛이 아닌 열에너지가 방출된다. 따라서 비발광성재결합의 증가는 다시 LED칩의 온도 상승을 초래하며 더 많은 결정결함을 발생시킬 가능성이 높다. 하지만 이러한 LED칩의 비가역적 열화

는 소재의 특성상 단기간에 발생하지 않을 가능성이 높으며 LED칩이 고온에 장기간 노출될 경우 발생할 것으로 예상된다. LED패키지에서의 열화 메커니즘은 LED칩에서보다 복잡하며 다수의 요소들이 복합적으로 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다. LED칩을 감싸고 있는 플라스틱 패키지의 디자인, 소재, 주위온도 등 LED칩의 방열특성에 영향을 미치는 요소들은 LED칩의 접합온도 상승에 영향을 주며 따라서 LED칩의 열화능을 변화시킨다. LED칩으로부터 방출되는 열에너지에는 LED패키지 내부의 열기계적응력(thermo-mechanical stress)을 발생시켜 전기접합부위(electrical contact)에서의 직렬저항(series resistance) 증가로 인한 광출력 감소를 초래하기도 한다. LED패키지는 LED광원으로 제공되는 최소 단위로 제품에 따라 약간의 차이가 있으나 일반적으로 LED칩, 히트싱크, 서브마운트, 충진물질, 형광체, 렌즈, 플라스틱패키지 등으로 구성되어 있다. LED패키지의 주요한 열화 메커니즘은 LED칩의 열화와 더불어 열에너지와 광에너지에 의한 형광체, 충진물질, 렌즈, 플라스틱패키지의 열화이며 LED패키지의 열화에 따라 LED패키지의 광속감소특성 및 색특성이 변하는 것으로 알려져 있다. LED조명은

장착되는 LED광원의 수명특성이 기본적으로 반영되지만 조명기구, 전원공급장치, 드라이버 등 LED조명시스템을 구성하고 있는 개별 부속 장치들의 열화특성이 수명특성에 주도적인 영향을 줄 것으로 예상된다. 이러한 조명시스템 구성 요소들은 자체적인 열화와 더불어 LED광원의 방열특성에도 영향을 주어 장기적으로 LED조명의 광속저감특성을 결정할 것이다. 따라서 조명시스템으로써 LED조명 제품에 대한 수명평가시험이 매우 중요하며 실질적일 것이다. 아직까지 LED조명에 대한 수명평가는 초기단계에 있으나 앞으로 수명특성 및 시험방법에 대한 활발한 연구가 이루어질 것으로 예상된다.

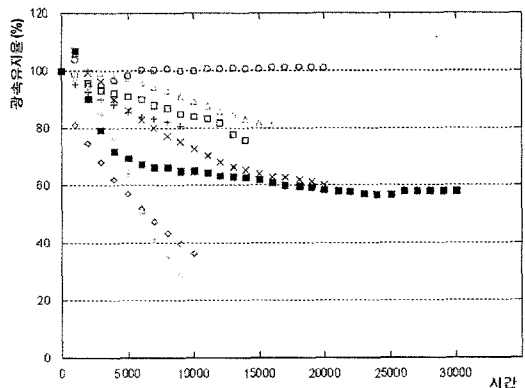
IV. LED 열화 모델

LED의 광속저감특성은 일반적으로 지수함수(exponential function)로 모델 되고 있다. 미국 에너지성은 Energy Star 인증규정 문서에서 지수함수에 의한 광속저감특성을 가정하여 수명성능 평가기준을 제정하였다. 하지만, <그림 3>에서 보이는 것처럼 현실적으로 LED는 매우 다양



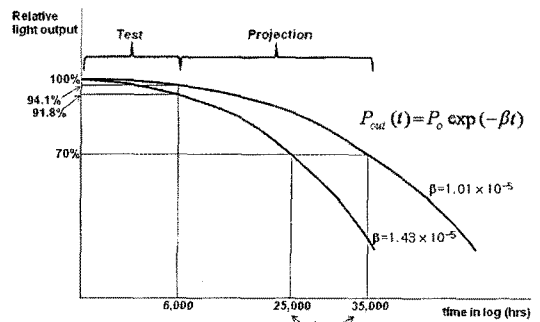
<그림 2> LED 출력의 온도의존성

출처: Life of LED-based white Light Sources, Nadarajah Narendran & Yimin Gu



<그림 3> LED 광속저감 특성

한 패턴의 광속저감특성을 보이고 있다. 따라서 모든 LED 제품의 광속저감 특성을 단순한 지수 함수모델로 가정하여 수명을 평가할 경우 제품의 실제 수명을 과소평가하거나 과대평가하는 오류를 범할 가능성이 있다. 그러므로 LED 제품의 특성에 따라 선형모델, 파워모델, 로그모델, 복합모델 등 다양한 모델의 적용을 검토할 필요가 있다. 수명모델이 필요한 이유는 앞서 언급한 바와 같이 LED의 장수명 특성을 평가하는데 따른 어려움과 불합리함을 해결하기 위한 것이며 대부분의 LED광원 제조업체에서는 1,000시간 내외의 광속저감시험을 통하여 수명을 평가하고 있다. 반면에 미국에너지성, 북미조명공학회 등 LED 수명표준의 제정을 주도하고 있는 단체들은 LED의 보급에 가장 중요한 요소인 수명특성에 대한 소비자들의 요구를 충족시키고 보급을 촉진하기 위해 그들의 표준문서를 통하여 LED 제조업체들에게 6,000시간 이상의 광속저감시험을 요구하고 있다. 이와 같이 1,000시간 혹은 국제적으로 표준화 되고 있는 6,000시간의 시험데이터를 활용하여 수만 시간이 예상되는 LED 수명을 예측하기 위해서는 광속저감모델이 필요하다. 시간에 따른 LED광원의 광속저감특성을 정확하게 예측하기 위해서는 물리화학적 지식에 기반한 고장물리모델(physics of failure model)이 필요하다. 고장물리모델을 수립하게 위해서는 광속저하 메커니즘의 명확한 이해가 필요한데 앞서 언급한 것처럼 이것은 매우 어려운 일이며 아직 충분한 연구가 수행되어있지 않다. 미국에너지성은 <그림 4>에서 보는 바와 같이 LED조명의 Energy Star 인증 요건 중 하나로 LM-80-08에 의거한 LED광원의 광속저감 시험데이터를 요구하고 있으며 인증을 통과하기 위해서는 시험 경과 후 6,000시간 시점에서 특



<그림 4> DOE Energy Star 광속저감 요구사항 및 광속저감모델

정한 광속유지율 값 이상을 유지해야 한다. Energy Star에서 요구하는 최소 광속유지율 값은 광속저감이 지수함수를 따라 감소하는 것을 가정하여 설정 되었다.

V. LED 가속수명시험

가속수명시험(Accelerated Life Test)은 적절하게 설정된 가속 조건에서 단기간에 제품의 고장시간데이터를 확보하여 사용조건에서의 수명을 예측하는 방법이다. 가속수명시험은 LED와 같이 사용조건에서 수명을 평가하는 것이 불가능하거나 비현실적일 경우에 활용할 수 있는 효과적인 수명평가방법이다. 가속수명시험에서는 일반적으로 수명에 영향을 미치는 인자 중 가장 효율적으로 고장을 가속시킬 수 있는 인자를 선정하고 사전 시험을 통해 가속조건을 설정한다. 이렇게 설정된 가속조건 하에서 제품을 시험하여 고장시간데이터를 확보하고 통계적으로 처리하여 사용조건에서의 제품 수명을 예측한다. 가속조건 별로 확보된 고장시간 데이터는 통계 처리 되어 대표 값이 산정되고 적절한 스트레스-수명 관계 모델에 의해 사용조건으로 외삽(extrapolation)된다. LED 가속수명시험에서는

온도 혹은 구동전류 중 하나를 가속인자로 사용하되 충분한 가속성능을 얻을 수 없는 경우 전류를 함께 사용하여 가속하기도 한다. 가속수명에서 유의해야 할 점은 시험시간을 단축하기 위해 과도한 조건으로 가속시험을 수행하게 되면 사용조건에서와는 상이한 고장 메커니즘이 유발되어 수명 데이터의 신뢰성을 확보할 수 없게 된다. LED패키지에 대한 가속수명시험법은 국내외 대학, LED 제조업체에서 개발이 시도되고 있으나 아직 본격적으로 수명평가에 활용되고 있지 않다.

VI. LED 수명시험 국제표준

세계적으로 LED 수명평가에 대한 표준화는 2008년 북미조명공학회에서 LM-80-08을 발간함으로써 본격화 되었다. LM-80-08은 LED 광원의 광속유지율 측정시험에 관한 표준문서이며 주요내용은 <표 2>에서 보는 바와 같이 광속저감시험 전반에 관한 것이다. LM-80-08은 적용 대상을 LED광원 즉, LED Package/LED Module/LED Array로 한정하고 있으며 LED조명의 수명평가에는 적용할 수 없도록 규정하고

<표 2> LM-80-08 주요내용 요약

Terms	Specifications
Test Time	6,000 hrs (or 10,000 hrs)
Data Collection Interval	1,000 hrs
Operating Cycle	Constant Current
Photometry Measurement	Total Spectral Radiant Flux
Measurement Temperature	25 ± 2°C
Failure Recording Interval	Each Measurement Interval
Checking Chromaticity Change	Each Measurement Interval

있다. LM-80-08이 비록 LED광원의 수명평가 방법에 관한 규정서이지만 LED조명의 수명평가 방법이 확립될 때까지 상당 기간 동안 LED조명의 수명을 간접적으로 평가하는데 사용될 것으로 예상된다. LED조명 제조업체에서는 자사제품의 Energy Star 인증을 위해 LED광원 제조업체에게 LM-80-08에 의거한 광속유지율 측정 시험데이터를 요구할 것으로 예상된다. LM-80-08은 LED광원의 수명성능 평가를 위해서 최소한 6,000시간 이상의 시험데이터 확보를 규정하고 있으므로 LED광원 제조업체들은 고객의 요구사항에 대비하여 최소한 1년 전부터 광속저감시험을 계획하고 수행해야 할 것이다. 아직까지는 대부분의 LED조명 제조업체에서 LED조명의 광속유지시험을 수행할 수 있는 자원과 역량이 갖추어져 있지 않을 것으로 예상되며 향후 몇 년간은 LED광원 제조업체에게 LM-80-08 시험데이터를 요구할 확률이 높다. 이러한 업계의 상황을 잘 파악하고 있는 미국에너지성은 LED조명에 대한 Energy Star 인증을 위한 규정문서에 LED조명의 광속저감시험에 의한 인증과 LED광원의 광속저감시험에 의한 인증 2가지를 옵션으로 제시하고 있다. Energy Star 인증은 미국에너지성(DOE)과 환경국(EPA)이 공동으로 운영하는 프로그램으로써 고효율, 친환경, 고경제성에 부합되는 제품에 Energy Star 라벨을 부여하는 자발적 인증제도이다. Energy Star는 약50개 제품카테고리에서 운영되고 있으며 LED조명은 2008년 9월30일 인증이 발효되었으며 2009년 12월 최종 규정서가 발간되었다. 미국에너지성은 Energy Star 인증과 관련하여 2가지 표준문서(Energy Star Criteria for Solid-State Lighting, Energy Star Manufacturers Guide)를 발행하였으며 이들

〈표 3〉 Energy Star 광속저감시험 방법

Summary of Requirements for Lumen Depreciation Test

	Criteria	Documents
Components option	L_{70} (25,000hr) : @6,000hr -- 91.8% ↓	1. LM-80 Test Reports 2. In-Situ TMP Test Reports 3. Drawing indicating location of TMP _{LED}
	L_{70} (35,000hr) : @6,000hr -- 94.1% ↓ Drive Current : $I_{d, measured} \leq I_{d, LM-80 report}$ In situ TMP : $TMP_{LED, measured} \leq TMP_{LED, LM-80}$	
Luminaire option	L_{70} (25,000hr) : @6,000hr -- 91.8% ↓	1. LM-79 Test Report @0hr 2. LM-79 Test Report @6,000hr
	L_{70} (35,000hr) : @6,000hr -- 94.1% ↓ UL 1598/153	
Power supply	$TMP_{PS, measured} \leq TMP_{PS, warranty}$	1. ANS/UL 1598/153 Test Report 2. Drawing (location of TMP _{PS}) 3. Power Supply Warranty

표준문서에는 Energy Star 인증시험방법, 인증 기준, 인증기관 등에 관한 세부적인 내용과 인증 신청절차, 대표인증방법, 사후관리 등에 관한 내용이 기술되어 있다. <표 3>에서 보는 바와 같이 Energy Star에서는 LED광원(components)과 LED조명(luminaire) 2가지 중 원하는 1가지를 선택하여 광속저감시험데이터를 제출할 수 있도록 규정하고 있다. 하지만, 이러한 옵션은 LED 조명업체가 LED조명의 평가 설비와 자원을 확보할 때까지 한시적으로 운영될 예정이며 궁극적으로 Energy Star 인증을 위해서는 LED조명에 대한 시험데이터가 요구할 것이다.

VII. 결론

LED조명은 에너지효율성과 친환경 측면에서 기존 조명과 차별화되어 그 파급효과가 매우 클 것으로 예상 되므로 단계적 적용을 거쳐 궁극적으로 대부분의 기존 조명을 대체할 것으로 기대된다. LED조명의 확산에 가장 큰 원동력으로 작용하고 있는 장수명 특성은 아직 시장에서 검증되지 않았으며 이러한 장수명 특성에 대한 평가 방법 역시 정립되어있지 않다. LED제품의 장수

명 특성을 단기간에 합리적으로 평가하는 방법이 개발되지 않은 상황에서 지난 2~3년 동안 국내외적으로 LED 제품의 표준화가 급속하게 진행되어 왔다. 대부분의 국제표준문서에서는 LED조명의 수명평가지험을 6,000시간 이상 장기간 수행하도록 규정하고 있다. 6,000시간은 LED조명의 수명을 정확하게 예측하기에는 매우 부족한 시간이며 동시에 시험을 수행해야 하는 LED 제조업체 입장에서는 불합리하게 긴 시간이다. 이미 LED조명의 수명평가에 대한 표준화가 최근에 국내외적으로 완료되었지만 보다 합리적이고 정확한 수명평가 방법에 대한 연구가 꾸준히 수행되어야 하며 국제사회에 지속적으로 제안되어야 한다.

저자소개



김 태 훈

1987년 2월 중앙대학교 화학공학과 학사
2000년 12월 Arizon State University 화학공학과 박사
1987년 1월~1992년 6월 (주)제일제당 종합연구소
2001년 1월~2002년 11월 Motorola, USA Senior Engineer
2002년 12월~현재 삼성전기 중앙연구소 수석연구원

주관심 분야 : 가속수명평가, 신뢰성평가, 고장물리, 반도체소자, LED