

시물레이션을 활용한 스마트 LED 가로등 시스템의 인증기준 제안 및 검증

조승완 · 구도연 · 김수민 · 강봉구 · 서경민[†]

Proposing and Verifying Certification Standards of Smart LED Streetlight Systems Using Simulation

Seung-Wan Cho · Do-Yeon Koo · Su-Min Kim · Bong Gu Kang · Kyung-Min Seo[†]

ABSTRACT

This paper proposes certification standards for smart LED streetlight systems using simulation-based testing and verification. The lack of certification standards for smart LED streetlight systems has been identified as a critical issue, particularly concerning dimming control. This paper proposes three dimming control standards: the minimum time to initiate dimming, the duration of the dimming period, and the number of concurrent streetlights that can be controlled. For simulation modeling, Relux and analytical formulas are used to model streetlights and vehicles, respectively. The two models are integrated into the smart LED streetlight system models using Simio. The simulation experiments were conducted with two objectives: to present certification standards and to apply and verify real-world cases. Six hundred thirty scenarios were identified according to the installation environment and vehicle speed certification criteria suggestion. Then, the experimental results were applied to a specific road in the Republic of Korea. The certification criteria proposed in this study offer alternative approaches to operating the streetlight system more efficiently. The proposed simulation method proposed in this study can be applied to smart LED street lighting systems and various new products lacking certification standards.

Key words : Convergence new product, Certification standards, Simulation, Smart LED streetlight system, Dimming control

요약

본 논문은 인증기준이 미비한 융·복합 신제품인 스마트 LED 가로등 시스템에 대해 시물레이션 방법을 활용하여 인증기준을 제안하고 실제 사례를 통해 인증기준을 검증한다. 스마트 LED 가로등 시스템의 인증기준 제시를 위한 가장 중요한 문제 중 하나는 도로조명등급 범위 내에서 조명의 밝기를 조절하는 디밍(Dimming) 제어이다. 본 논문은 관련한 인증기준으로 디밍 제어 지연시간, 디밍 제어 유지시간 및 디밍 제어 시 동시에 제어되는 가로등 수를 제한한다. 제안한 인증기준의 시물레이션 기반 시험 및 검증을 위해 가로등과 차량으로 구분하여 모델링을 수행하고, 이후 도로를 포함한 전체 스마트 LED 가로등 시스템을 모델링한다. 가로등 모델링은 Relux, 차량 모델링은 해석적 수식을 사용했으며 두 모델링 결과를 활용하여 Simio로 전체 스마트 LED 가로등 시스템 모델을 구현한다. 시물레이션 실험은 크게 인증기준 제시를 위한 실험과 실제 국내 도로에 적용 및 검증하는 실험으로 진행하였다. 설치 환경, 차량의 속도에 따라 630개의 시나리오를 식별하여 인증기준 제시를 위한 실험을 진행하였다. 이후 해당 실험 결과를 활용하여 대한민국 실 도로에 대한 검증을 수행하였는데 산출한 인증기준을 통해 가로등 시스템을 보다 효율적으로 운영할 수 있는 대안을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 시물레이션 방법은 스마트 LED 가로등 시스템 뿐만 아니라 인증기준이 미비한 다양한 융·복합 신제품에도 적용 가능할 것으로 기대한다.

주요어 : 융·복합 신제품, 인증기준, 시물레이션, 스마트 LED 가로등 시스템, 디밍 제어

* This paper was supported by Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) grant funded by the Korea Government (MOTIE)(20010644, The Development of the Criteria for the Certification of Compliance and the Support for New Convergence Products Improvement Research)

Received: 20 March 2023, **Revised:** 4 May 2023,
Accepted: 9 May 2023

† Corresponding Author: Kyung-Min Seo
E-mail: kmseo@hanyang.ac.kr
Hanyang University ERICA

1. 서론

국내 전국 도로조명(가로등, 보안등 포함)의 개수는 약 350만 개로 추산된다. 조명 분야는 전체 전력 소비량의 약 20%를 차지, 에너지 절감 영향력이 큰 산업 분야로 LED 조명으로 대체 시 전력 소비 감축 효과가 크게 기대되어 각국에서 LED 조명 활성화 및 보급에 집중하고 있

다(IEA, 2016). 도로조명에서도 고효율 LED 조명의 도입이 활발하게 이루어지고 있는데 서울시에서는 2019년 기준 전체의 약 48%의 가로등 광원을 LED 광원으로 교체하고 있다(J.-M. Kim, 2021). 특히, LED 광원에 물체 인식 감지 센서와 통신을 부가하여 센서 연동, 원격 제어 및 디밍(Dimming) 제어가 가능한 스마트 LED 가로등을 적극적으로 도입하는 추세이다.

도로조명을 운용할 때는 도로의 안정성과 가시성을 확보하여 운전자가 적절한 운전을 할 수 있도록 해야 한다(H.-K Kim 등, 2008). 이를 위해 도로조명 기준에서는 도로 등급별로 만족해야 하는 노면의 평균 휘도 및 균제도 등을 정의한다. 스마트 LED 가로등의 디밍 제어에 따라 도로의 평균 휘도가 변할 때 이 기준을 만족해야 한다. 하지만 디밍 제어 시 도로의 평균 휘도를 유지하기 위한 스마트 LED 가로등의 국제/국내 표준이 미비한 실정이다. 국내에서는 실내용 스마트 LED에 대한 시험 기준과 교통량에 따른 디밍 제어에 관한 연구 J.-M Kim (2021)은 일부 진행되었으나, 차량 접근에 따른 디밍 제어 시나리오에 관한 연구는 부족하다.

가로등의 인증기준 제시는 가로등을 직접 설치하고 시험해야 하는 특성상 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 현실적인 제약으로 어려움이 있어 시뮬레이션을 통해 인증기준이나 분석 결과를 제시하는 연구는 여러 분야에서 진행되고 있다(Kang et al., 2015; Jang et al., 2021; Kang et al., 2021). 시뮬레이션 방법을 통한다면 보다 다양한 설치 상황과 조건을 고려한 시나리오를 통해 구체적인 인증기준을 제시할 수 있다.

본 연구에서는 스마트 LED 가로등 시스템의 인증기준을 제시하고 검증하기 위해 시뮬레이션 모델링 기법을 제안한다. 이를 위해 대상 시스템의 특성에 따라 크게 가로등 모델과 차량 모델로 구분하여 모델링하였다. 가로등 모델링은 조명의 조도 및 휘도를 계산하는 조명 시뮬레이션 도구인 Relux를 사용하여 설계 및 구현을 수행하였다. 차량 모델링은 인증기준 제시에 핵심이 되는 정지 시거 개념을 적용하기 위해 해석적 방법으로 모델링을 수행하였다. 이후, 가로등과 차량, 두 모델을 통합하여 전체 스마트 LED 가로등 시스템을 시뮬레이션하기 위해 이산사건 시뮬레이션 도구인 Simio를 사용하였다.

제한한 방법으로 구현된 모델에 대하여 크게 두 가지 실험을 진행하였다. 첫 번째 실험을 통해 도로 환경, 가로등의 설치 조건을 고려한 630개의 시나리오를 사용하여 세 가지 인증기준을 제시하였다. 차량을 인식 후 디밍 제어를 통해 밝기를 증가시킬 때까지 걸리는 디밍 제어 지

연시간과 차량이 지나간 후 밝기를 유지하는 디밍 제어 유지시간을 제시하였다. 마지막으로 차량의 속도에 따른 정지시거를 확보하기 위한 가로등 동시제어 수를 제시하였다. 인증 기준의 예로, 최대 속도 제한이 60km/h인 도로에 가로등이 38m의 간격으로 설치되어 있을 때, 차량이 접근한다면 최소한 1.845초 이내에 디밍 제어를 통해 가로등의 밝기를 증가시켜야 한다. 또한, 증가시킨 밝기를 2.310초 이상 유지하고 전방의 3개 이상의 가로등을 동시에 디밍 제어해야 함을 제시하였다. 두 번째 실험에서는 제시한 인증기준을 실제 안정시의 두 도로에 대해 실사례 검증을 진행하였다. 본 연구에서는 스마트 LED 가로등 시스템의 다양한 가로등의 설치 조건 및 차량 속도에 대한 도로조명기준을 만족하기 위한 인증기준을 시뮬레이션 방법을 통해 제시해 도로의 안정성을 확보할 것으로 기대한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 스마트 LED 가로등 시스템과 시뮬레이션 도구인 Relux와 Simio에 대해 설명한다. 3장에서는 스마트 LED 가로등 시스템과 시뮬레이션 방법을 통한 인증기준 제시에 관한 관련 연구를 설명하고 본 연구와의 공통점과 차이점을 분석한다. 4장에서는 대상 시스템을 모델링하기 위한 프로세스와 모델을 설명하고 5장에서 해당 모델을 이용하여 인증기준 제시와, 실사례 적용에 대한 실험의 결과를 논의한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론을 제시한다.

2. 배경지식

본 장에서는 대상 시스템인 스마트 LED 가로등 시스템과 논문에서 사용한 시뮬레이션 모델링 도구인 Relux와 Simio를 설명한다.

2.1 대상 시스템 분석: 스마트 LED 가로등 시스템

스마트 LED 가로등 시스템은 차량 운전자가 도로를 안전하게 주행할 수 있도록 LED 가로등의 점멸과 밝기를 지능적으로 제어하는 융·복합 시스템이다. 해당 시스템은 기존 도로조명 시설에 보행자와 차량을 감지할 수 있는 센서를 설치하여 센서에 감지된 정보를 바탕으로 LED 등기구의 점멸 상태와 디밍 제어를 실시한다.

Fig. 1은 스마트 LED 가로등 시스템이 설치된 도로에 차량이 접근하는 예시를 나타낸다. Fig. 1에서 도로의 조명은 차량이 없는 경우 전력 사용의 효율성을 위해 도로조명기준 중에서 낮은 밝기(M5)로 제어된다. 그러나 낮은 밝기에서는 차량 사고의 위험이 커질 수 있으므로 차

량 진입 시에는 밝기 수준을 M5에서 M3로 변경한다(도로조명기준은 4장에서 자세히 서술한다). 이와 같이 스마트 LED 가로등 시스템은 차량이 접근할 때 가로등의 디밍 제어가 지연되거나, 통과하는 동안 밝기가 유지되지 못하거나 혹은 연속적인 가로등 디밍 제어가 되지 않으면 전방의 시야 확보에 어려움이 발생한다(Ergüzel, A. T. 등, 2019).

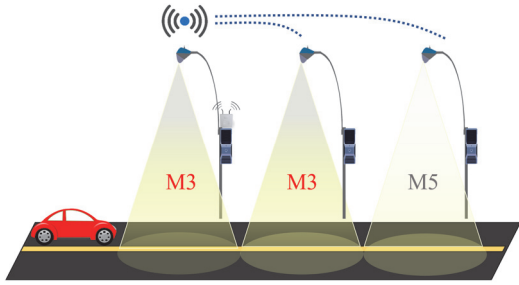


Fig. 1. Smart led streetlight system

2.2 시물레이션 도구

본 연구에서는 시물레이션 모델링을 위해 가로등 모델링에 Relux, 가로등과 차량 통합 모델링에 Simio를 활용하였다.

2.2.1 Relux

Relux는 조명의 주요 밝기 지표인 조도와 휘도를 산출하고 밝기 범위를 시물레이션으로 산출하는 도구이다. 예를 들어 Relux는 조명기구 배치, 등주간격 및 오버행, 도로의 차선수와 폭 등을 설정값으로 하여 도로에 설치할 조명의 휘도 반경과 조명 간 최적 등주간격을 산출한다.

Fig. 2는 Relux 실행 화면의 예시이다. 그림에서 가로등 조명과 도로 설정값을 입력하여 휘도 범위와 최적 등주간격을 확인할 수 있다. 예를 들어 A 영역은 도로와 가

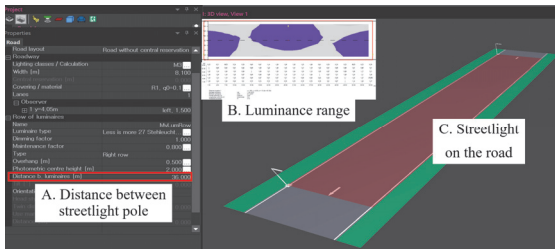


Fig. 2. Distance between streetlight pole and luminance range according to road lighting class

로등 관련 설정값을 설정하면 B 영역에서 조명의 휘도 범위를 확인할 수 있다. 또한 C 영역을 통해 현재 설정된 설정값에서 가로등의 최적 등주간격을 확인할 수 있다.

2.2.2 Simio

Simio는 사용하는 사용자의 행위(프로세스) 같은 이산적인 사건에 대한 구현, 분석 및 가시화를 제공하는 시물레이션 도구이다(M.-G Jeong 등, 2022). Simio 모델링을 통해 단일 조명, 단일 차량 시나리오, 나아가 다중 차량에 대한 다중 조명의 디밍 제어 시나리오에 대한 검증 및 분석을 진행한다.

Fig. 3과 4는 도로 모델링을 위해 Simio를 사용한 예시이다. Fig. 3은 2차선의 도로 모습을 Simio를 통해 구현한 결과이다. 차량(Entity)이 출발지(Source)에서 도로(Path)를 주행하여 목적지(Sink)에 도달하는 시물레이션 예시로 이는 Simio의 Entity, Source, Path, Sink 라이브러리를 활용하여 구현할 수 있다. 이 과정에서 차량의 속도, 라우팅 규칙, 도로의 길이 등을 변수로 설정하여 평균 이동량, 특정 지점에 차량이 지나간 시간 등을 산출할 수 있다. 또한 Fig. 4와 같이 외부 브라우저에서 차량, 가로등 등 다양한 3D 오브젝트를 불러올 수 있으므로, 사실적인 가로등 시스템과 도로 교통환경의 모델링이 가능하다.

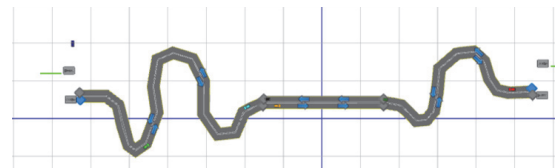


Fig. 3. Traffic simulation in simio

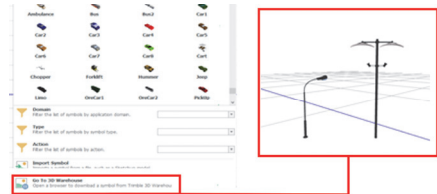


Fig. 4. Streetlight modeling in simio

3. 관련 연구

본 연구의 관련 연구로 시물레이션을 활용한 제품 인증기준 제시한 사례와 스마트 LED 가로등 시스템에 관한 사례를 Table 1과 같이 정리하였다.

시뮬레이션을 활용하여 제품의 인증기준을 제시한 연구로 Shim 등(2019)이 있다. Shim 등(2019)은 방폭 문의 적절한 폭발 하중 기준을 제시하기 위해 수치해석 시뮬레이션을 통해 최대 처짐을 구해 방폭문의 성능을 예측하였다. 실증이 어려운 실험에 대한 시뮬레이션 방법을 채택하여 인증 절차를 대신하였다. 다만, 시뮬레이션의 결과에 따른 실사례 검증에 관한 내용은 부족하였다. Choi 등 (2011)은 도로 상황에 따른 적절한 가로등 배열을 제시하는 데 시뮬레이션 기술을 활용하였다. 도로조명 설비 기준을 검토하고 Relux를 통한 가로등 배열에 대한 시뮬레이션 실험을 담았다. 스마트 LED 가로등 시스템에서는 가로등 배열뿐만 아니라 시야 확보를 위한 디밍 제어가 중요하지만 이에 관한 내용은 제한적이다.

디밍 시나리오에 관한 연구로 Khatavkar 등(2017)은 안정적인 조도를 유지하는 가로등 디밍 제어 시스템을 구현하고 에너지 절감 효과를 증가시키는 연구를 진행했다. 전력 소모량 측정을 통해 디밍 제어의 구체적인 에너지 절감량을 제시하였다. 따라서, 디밍 제어를 통한 에너지 절감에 중점을 둔 연구로 인증기준을 제시한 본 연구와는 다른 점이 존재한다. 또한, Kim 등(2021)은 디밍 제어의 타당성을 검토하여 교통량 데이터를 기반한 기본적인

디밍 제어 시나리오를 개발하였다. 도로 환경과 교통량 여건에 맞춘 도로조명등급에 집중하여 시간대별 디밍 제어를 위한 시나리오를 설정하였다. 다만, 차량 진입에 따른 디밍 제어가 아닌 교통량을 분석해 시간대별 디밍 제어 시나리오를 제시하였다.

이렇듯 기존 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 인증기준을 제시하였으나 실사례 검증에 관한 내용은 부족하였거나, 디밍 제어가 아닌 가로등의 배열에 관한 휘도 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 디밍 제어의 에너지 절감 효과에 대해 분석하였고 교통량에 기반한 디밍 제어 시나리오에 관해 연구를 진행하였다. 따라서 본 연구에서는 가로등 디밍 제어 기술, 차량 진입에 따른 시나리오 분석을 통해 스마트 LED 가로등 시스템의 적합한 인증기준을 제시하고 실사례에 적용한다.

4. 제안 방법

본 장에서는 논문의 제안 방법으로 먼저 시뮬레이션 모델링 프로세스를 제시한다. 이후 제안한 프로세스에 따라 상세 모델링으로 가로등, 도로 및 차량, 스마트 LED 가로등 시스템의 모델링에 관해 설명한다.

Table 1. Related research

Related research	Characteristic	Advantage	Disadvantage
Shim & Lee (2019)	Proposal of a simulation-based certification procedure for explosive doors subjected to explosion loads, replacing the traditional demonstration explosion test	An experimental approach is presented in this study to address the challenges of economic and temporal constraints in product quality certification by utilizing simulations as an alternative method	Based on the simulation results, real-world validation was not adequately addressed, and there was a lack of information on how the simulation results could be applied to real-world scenarios
Choi (2011)	An Analysis of Road Lighting Facility Criteria and Installation Conditions for Streetlight Arrays	A proposal is presented for simulating streetlight installation conditions through a computer program to effectively evaluate and ensure proper installation	The contents of streetlight arrangement are present, but there is no provision for dimming control
Khatavkar (2015)	A study on the implementation of a dimming control system for street lights with the aim of maintaining stable lighting and increasing energy efficiency	A study was conducted to explore energy-saving measures through streetlight dimming control in smart cities. The study presented quantifiable energy savings achieved by measuring power consumption using tables.	The primary focus of the study is energy saving, with dimming control serving as a means to achieve this goal
Kim (2021)	An investigation into the viability of dimming control and the development of a scenario to establish a fundamental dimming guideline utilizing traffic volume data	The implementation of customized scenarios based on road lighting class, traffic volume, and time of day can enable effective dimming control of streetlights under varying road conditions	The proposed dimming control is based on time zones, rather than vehicle entry

4.1 제안 모델링 프로세스

Fig. 5는 융합 신제품의 인증기준 제시를 위한 전체 시스템 모델링 프로세스를 나타낸다.

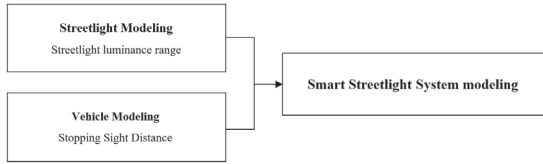


Fig. 5. System modeling process

먼저, 가로등 모델링에서는 조명이 설치되는 다양한 설치 조건을 파악하고, 적용하려는 도로의 도로조명등급을 고려한다. 이후 가로등 모델링의 결과로 특정 조건에 대한 가로등 휘도 범위를 산출한다. 차량 모델링에서는 도로의 노면 상태와 차량의 속도를 고려해 최소 정지시거를 산출한다. 마지막으로 앞서 산출한 두 모델을 포함해 스마트 LED 가로등 시스템의 시뮬레이션 모델을 완성한다.

4.2 시스템 모델링

시스템 모델링은 도로 및 가로등의 조명 기준을 포함한 Relux 가로등 모델링, 정지시거에 대한 해석적 방법을 통한 차량 모델링, 마지막으로 Simio를 통한 스마트 LED 가로등 시스템 모델링 순으로 진행한다.

4.2.1 가로등 모델링

디밍 제어에서는 대한민국 도로안전시설 설치 및 관리 지침에 따라 정해진 조명등급보다 2단계까지 낮추어 감광할 수 있으나 최소한 M5등급 이상을 확보하여야 한다. 따라서 모델링 시 설정값에 따른 가로등의 휘도는 M5 이상의 도로조명등급을 만족해야 한다.

도로조명등급은 Table 2와 같이 도로 및 교통의 종류에 따라 정해진다. 예를 들어 3개 이상의 교차로가 있고 교통량이 많아 복잡한 도로는 항상 M1의 도로조명등급을 만족하는 것을 요구한다. Table 3은 각 도로조명기준별 운전자에 대한 평균 노면 휘도, 종합 균제도, 차선축균제도에 관한 평가 항목을 제시한다. 평균 노면 휘도는 노면이 유지해야 할 휘도 평균값의 최소 허용치, 종합 균제

Table 2. Road lighting grade for drivers

Type of road	Type of transportation and vehicle traffic	Class
sailing high and low lines are separated and all intersections are three-dimensional intersections, with completely restricted access to highways	high traffic and complicated road alignment	M1
	high traffic or complicated road alignment	M2
	low traffic and simple road alignment, or dark surroundings	M3
a highway, an sailing high and low separation road	lack of separation between traffic control and other types of road users	M1
	traffic control and other types of road users are well separated	M2
major urban traffic routes, highways, and national highways	lack of separation between traffic control and other types of road users	M2
	traffic control and other types of road users are well separated	M3
low importance connecting roads, local connecting roads, main access roads to residential areas, to private land	lack of separation between traffic control and other types of road users	M4
	traffic control and other types of road users are well separated	M5

Table 3. Luminance about road lighting grade for drivers

Road lighting class	Average road surface luminance L_{avg} (cd/m^2)	Luminance Uniformity (U_0) L_{min}/L_{avg}	Luminance Uniformity for lanes(U_i) L_{min}/L_{max}	TI(%) (Maximum)
M1	2.0	0.4	0.7	10
M2	1.5	0.4	0.7	10
M3	1.0	0.4	0.5	15
M4	0.75	0.4	-	15
M5	0.5	0.4	-	15

도는 최소휘도와 평균 노면 휘도의 비, 차선축군제도는 도로의 밝기 분포의 균일한 정도를 나타내는 비율로써 최소휘도와 최대휘도의 비이다. 마지막으로 임계치 증분은 눈부심에 관한 수치로 글레어가 있을 경우 임계휘도 증분의 백분율로 최소한으로 만족해야 하는 값이다.

Table 3의 도로조명등급을 만족하는 방법은 다양하다. M1의 기준을 만족하기 위해 등주 높이를 낮춰 도로와 조명의 거리를 가깝게 하거나, 가로등 LED의 용량을 높일 수 있다. Table 4와 같이 도로의 표면 (R1, 콘크리트 표면), 도로조명등급, 가로등의 등주 높이, 가로등의 배열 방법, 차로 수, 가로등 LED 용량, 경사각도, 오버행을 모델 입력 변수로 선정하였다.

Table 4. Variables and inputs for streetlight model

Variable	Input Value
road type	R1
road lighting class	M1, M2, M3, M4, M5
photometric centre height	10m, 11m, 12m
Array type	One-side, staggered layout, both sides
the Number of lanes	one-way 1, 2, 3, 4 lanes
streetlight LED power	100W, 150W
luminaire tilt	10°
overhang	1.5m, 2.3m

Fig. 6은 Table 4의 입력 변수를 활용하여 실제 Relux로 모델링한 일부 결과이다. 2차선의 도로에 가로등을 좌측 하단, 중앙 상단, 우측 하단에 배치 후 M3의 도로조명 기준을 만족하는 최적 등주간격을 산출하였다. 예를 들어, Fig. 6의 x축은 도로의 가로 폭, y축은 도로의 세로 폭으로 각 위치의 평균 노면 휘도 값을 나타낸다. A와 같이 회색의 한 부분은 0.97로 값 M4의 평균 노면 휘도

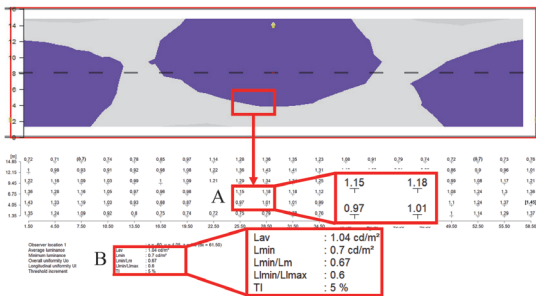


Fig. 6. Optimal luminance range according to input

(0.75)이고 보라색 부분들은 1.15, 1.18, 1.01 등으로 M3의 평균 노면 휘도(1.0)를 나타낸다. Fig. 6의 B에서 도로 전체의 평균은 1.04로 M3의 평균 노면 휘도(1.0) 이상의 기준을 만족하고, 종합 균제도 U_0 는 0.67로 0.4 이상을 만족하고, 차선축군제도 U_i 도 0.6으로 0.5 이상임을 알 수 있다. 마지막으로 최댓값인 임계값 증분 TI도 M3 기준의 15% 이하인 5%인 것을 알 수 있다.

4.2.2 차량 모델링

차량 모델링의 기본적인 시나리오는 차량이 가로등이 설치된 도로에 접근 시 가로등의 밝기를 올리는 디밍 제어를 실시하는 것이다. 이때, 돌발 상황에 대처하기 위해 차량 운전자가 상황 인식 후 정지하기까지의 거리인 정지시거 개념이 필요하다. 만약 조명의 밝기가 낮아 정지시거 이상의 시야를 확보하지 못하면 돌발 상황 발생 시 대처에 어려움이 생길 것이다. 따라서 본 연구에서는 차량 모델링에 Fig. 7과 같이 정지시거 개념을 적용하였다. 정지시거는 운전자가 사건이나 장애물을 인지하고부터 브레이크를 밝기까지의 거리와 브레이크를 밟고 차가 완전히 멈추기까지 이동한 거리의 합이다.

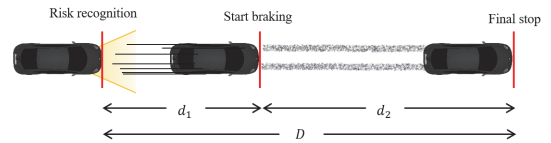


Fig. 7. Stop sight distance

위험인지에서 브레이크를 밟는 때까지 차가 이동한 거리(공주 거리)를 d_1 , 브레이크를 밟고 실제로 차가 멈추는 때까지 이동 거리(제동거리)를 d_2 로 정의하고, 속도를 $v(m/s)$, $V(km/h)$ 로, a 를 도로의 상태에 따른 감속도로 정의하였을 때, 시간 t 에 따른 정지시거 D 의 계산식은 식 (1)과 같다.

$$D = d_1 + d_2 = \frac{V}{3.6}t + \frac{v^2}{2a} = 0.684V + 0.0386 \frac{V^2}{a} \quad (1)$$

Fig. 8은 자동차의 속도가 증가할 때 정지시거의 변화를 도로의 상태에 따라 보여준다. 차량 속도가 같을 때 노면 습윤상태(Wet Road)일 때가 노면 동결·적설(Snowy Road)의 정지시거보다 긴 것을 알 수 있다. 이는 노면 동결·적설 상태의 경우 스노타이어를 장착하였음을 가정하였기 때문이다. 예를 들어 차량의 속도가 60km/h일 때

노면 습윤상태의 도로에서는 위험을 감지하고 차량이 멈출 때까지 76.5m를 이동하지만, 노면 동결·적설 상태의 도로에서는 44.6m를 이동하게 된다. 자동차 안전을 고려하여 일반적이고 더 긴 정지시거를 가지는 도로 상태인 노면 습윤상태의 감속도를 a 값에 이용하여 식 (1) 을 활용하여 차량 속도에 대한 정지시거를 산출한다. 차량 속도와 정지시거를 Simio의 입력 변수로 입력하여 차량을 모델링하였다.

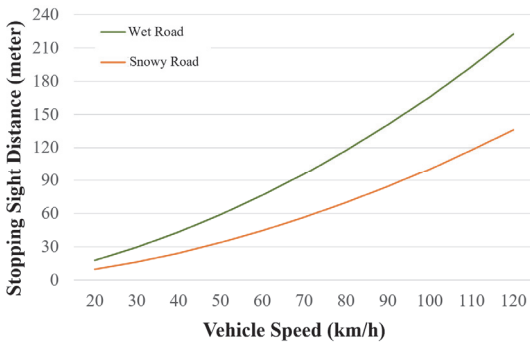


Fig. 8. Stop sight distance graph

4.2.3 스마트 LED 가로등 시스템 모델링

앞서 설명한 가로등과 차량 모델링 결과를 활용하여 Fig. 9와 같이 전체 스마트 LED 가로등 시스템 모델링을 수행한다. 인증기준은 Fig. 9에 빨간색으로 표시하였다. 차가 일정한 속도로 접근해 레이더 센서의 차량 탐지거리 이내에 도달할 경우, 가로등은 차량을 감지해 차량의 속도를 인식한다. 이때 차량의 속도에 따른 최소 정지시거를 계산하고 가로등의 휘도 범위와 정지시거를 통해 가로등 동시제어 수를 산출한다. 또한 차량의 속도와 가로등의 휘도 범위를 통해 디밍 제어 지연시간과 디밍 제어 유지시간을 산출해 차량이 가로등의 휘도 범위로 진입을 하기 전 동시제어 가로등 수의 디밍 제어를 시작한다. 디밍 제어를 통해 차량이 지나가는 동안 증가한 밝기를 유지하고 그 후 차량이 가로등의 휘도 범위를 나간 후 디밍 제어 유지시간이 끝나면 다시 가로등의 밝기를 감소시킨다.

Fig. 10은 Relux를 통해 산출한 가로등의 최적 등주 간격과 해석적 방법을 통해 산출한 정지시거를 활용해 Simio에서 스마트 LED 가로등 시스템의 모델링을 수행한 결과이다. 차량은 Entity로, 도로는 Path로, 가로등은 Server로 Fig. 9의 process에 따라 모델링하였다. 2차선의 도로에 지그재그로 가로등이 배열되어 있다. 앞의 두

가로등과 마지막 가로등은 밝기가 낮고, 차량이 지나가는 곳의 가로등의 밝기는 높아진 것을 확인할 수 있다.

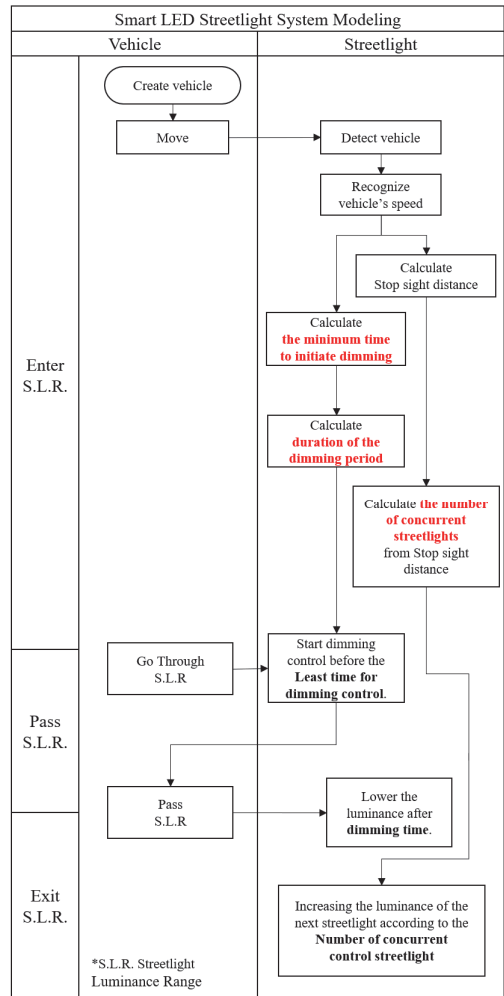


Fig. 9. Smart LED streetlight system modeling

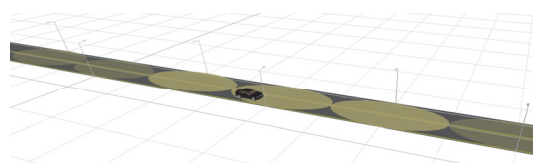


Fig. 10. Vehicle & Streetlight modeling using simio

5. 시뮬레이션 실험

본 논문의 시뮬레이션 실험은 크게 두 단계로 구분된다. 먼저, 실험 1을 통해 다양한 도로 환경에 대하여 논문

에서 제시한 세 가지 인증기준의 정량값을 산출하였다. 실험 2에서는 산출된 인증기준 정량값을 국내의 실제 도로에 적용하여 도로 설계의 적합성에 대한 분석을 수행하였다.

5.1 실험 1: 인증기준 제시

시뮬레이션을 통해 제시한 인증기준의 정의는 Table 5와 같다. 첫 번째 인증기준은 디밍 제어 지연시간이다. 이는 가로등의 센서가 차량을 인식한 후 실제로 디밍 제어까지 걸릴 수 있는 시간의 최댓값이다. 차량이 가로등의 휘도 범위에 들어오기 전에 가로등의 디밍 제어가 완료되어야만 운전자는 도로에서의 시야 안정성을 확보할 수 있다. 두 번째 인증기준은 디밍 제어 유지시간이다. 이는 차량이 가로등의 휘도 범위에 진입 후 나가기까지의 최소 시간이며 이 시간 이상 밝기를 유지해야 후방의 시야를 확보하여 안전 운행할 수 있다. 마지막 인증기준은 가로등 동시제어 수이다. 차량 진입 시 한 개의 가로등만 디밍 제어를 하는 것이 아닌 차량의 속도에 따라 다수의 가로등을 제어해야 정지시거의 시야를 확보할 수 있다.

5.1.1 시뮬레이션 시나리오

실험에서는 Table 6과 같이 도로 유형(R1), 운전자에

대한 도로조명등급(M1~M5), 등기구 높이(10~12m)(KS C 7658), 등기구 배열 형태 (한쪽, 양쪽, 지그재그), 차로 수(1~4차선), 가로등 전력 (100W, 150W), 경사각도(10도), 오버행(1.5m, 2.3m), 차량 속도(30km/h, 45km/h, 60km/h, 75km/h, 90km/h, 105km/h, 120km/h)의 변수를 설정하였다. 총 630개 시나리오에 따른 가로등 디밍 제어 유지 시간, 다수의 가로등 디밍 제어 시 가로등 동시제어 수, 디밍 제어 지연시간을 산출한다.

5.1.2 시뮬레이션 결과 분석: 인증기준 제시

첫 번째 결과로 Fig. 11는 최적 등주간격에 따른 디밍 제어 지연시간을 차량 속도별로 나타낸 그래프이다. 최적 등주간격이 늘어남에 따라 디밍 제어 지연시간 감소, 차량 속도가 증가함에 따라 디밍 제어 지연시간이 감소하였다. 또한, 도로의 최대 제한 속도가 늘어남에 따라 디밍 제어 지연시간이 감소함을 알 수 있다. 예를 들어 가로등의 등주간격이 38m이고 이때 차량이 60km/h의 속도로 접근한다면 가로등은 1.845초 이내에 휘도를 증가시키는 디밍 제어해야 함을 의미한다.

두 번째 인증기준은 디밍 제어 유지시간으로 Fig. 12는 최적 등주간격에 따른 디밍 제어 유지시간을 차량 속도별로 나타낸 그래프이다. 최적 등주간격이 늘어남에 따

Table 5. Simulation output variable (certification standards)

Variable	Explanation
The minimum time to initiate dimming	When controlling the dimming of streetlights, the brightness is adjusted based on vehicle speed, vehicle detection distance, and equidistant interval delay time to achieve the desired level of illumination.
The duration of the dimming period	A minimum duration for maintaining the set brightness after streetlight dimming control has been reached.
The number of concurrent streetlights	In order to ensure that streetlights remain illuminated beyond the stopping sight distance of a vehicle, the minimum number of streetlights to be controlled simultaneously is determined by the vehicle speed and the interval of the luminaires.

Table 6. Simulation input variable (scenarios)

Variable	Range	Case	Note
Distance between streetlight pole	15.5~76.5m	62 (90 including replications)	1, 2, 4 (the number of lanes) M1, M2, M3, M4, M5 (road lighting class) 10m, 12m (photometric centre height) 100LED, 150LED, 200LED (streetlight LED power)
Vehicle Sensing Distance	50m	1	-
Vehicle speed	30~120km/h	7	Increasing 15km/h each

A total of 630 scenarios

라 디밍 제어 유지시간이 증가, 차량 속도가 증가함에 따라 디밍 제어 유지시간이 감소하였다. 또한, 도로의 최대 제한 속도가 늘어남에 따라 디밍 제어를 시행한 후 높은 조명등급으로 유지해야 하는 시간이 짧아짐을 알 수 있다. 예를 들어 가로등의 등주간격이 38m이고 이때 차량이 60km/h의 속도로 접근한다면 가로등은 밝은 휘도를 2.310초 이상 유지해야 후방의 가시성을 확보할 수 있음을 의미한다.

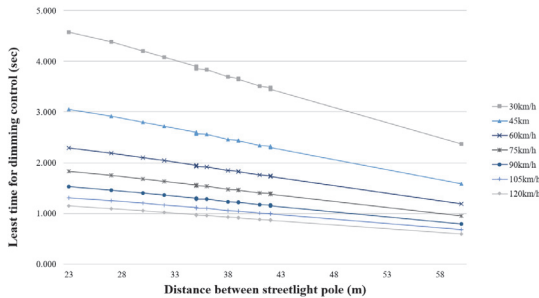


Fig. 11. The minimum time to initiate dimming according to distance between streetlight pole

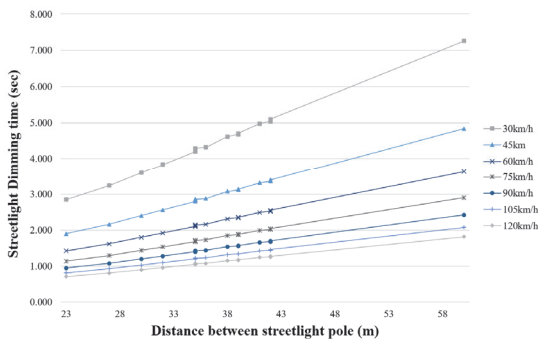


Fig. 12. The duration of the dimming period according to distance between streetlight pole

마지막으로 Fig. 13는 최적 등주간격에 따른 동시제어 가로등 수를 차량 속도별로 나타낸 그래프이다. 최적 등주간격이 늘어남에 따라 동시제어 가로등 개수가 감소, 차량 속도가 증가함에 따라 동시제어 가로등 개수가 증가하였다. 또한, 도로의 최대 제한 속도가 늘어남에 따라 디밍 제어를 시행하는 가로등 동시제어 수가 늘어남을 알 수 있다. 예를 들어 가로등의 등주간격이 38m이고 이때 차량이 60km/h의 속도로 접근한다면 차량의 최소 정지시거 확보를 위해 전방 3개 이상의 가로등의 휘도를 증가시켜야 함을 의미한다.

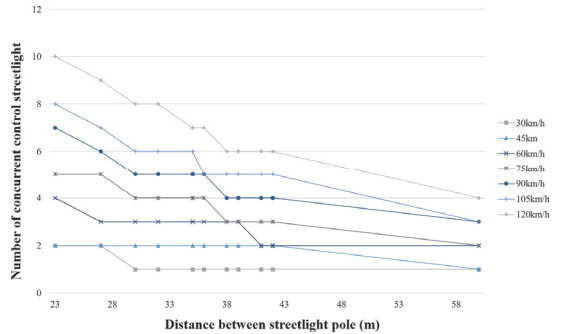


Fig. 13. The number of concurrent streetlights according to distance between streetlight pole

5.2 실험 2: 실사례 적용

실험 1에서 산출한 디밍 제어 지연시간, 디밍 제어 유지시간, 동시제어 가로등 수를 대한민국 안성시의 2개 도로에 적용, 평가하였다.

5.2.1 시뮬레이션 시나리오

안성시 [에너지 절감을 위한 고효율 LED 사업 타당성 조사 영역](채성기 등, 2018)의 대표 8개 실증구역 도로 조명 설치 환경 조건에 따른 내용을 바탕으로 시나리오를 작성하였다. Table 7은 안성시 대표 실증구역의 휘도 실측 결과, Table 8은 도로조명등급을 분석한 결과이다.

Table 7은 안성시의 대표 실증구역의 가로등에 사용된 조명의 종류, 휘도 규제도, 차선축군제도, 현재 도로조명등급, 만족해야하는 도로조명등급을 나타낸다. Table 8은 각 도로의 폭, 길이, 유형, 가로등 간의 간격, 가로등 등주의 높이, 조명의 틸트(Tilt), 암 길이와 오버행(Overhang)을 나타낸다. 시나리오를 선정할 때 조명의 종류가 LED가 아닌 경우 [일죽면, 제3일반산업단지, 안성옥산공공APT, 중앙로, 38번 국도]는 제외하였으며 국토부에서 정한 조명등급보다 2단계 낮추어 감광할 수 있는 최소 M5등급을 확보해야 한다. 따라서 현재 필요 도로조명등급 기준이 M5로 더 이상 조명을 낮추어 디밍 제어가 불가능한 도로 [안성터미널 1]를 제외하였다. 따라서 제2일반산업단지, 안성터미널2를 시나리오 도로로 선정하게 되었다.

Fig. 14은 실제 등주간격 A와 시뮬레이션에서의 적용한 절반의 등주간격 B의 차이를 보여준다. 안성터미널2의 지그재그 배열은 안성시 보고서의 등주간격은 A(30m)이다. A 거리가 떨어진 가로등은 반대편 차선의 가로등이 아닌, 같은 차선의 다음 가로등이다. 따라서 실험의 정확

Table 7. [High efficiency led business feasibility study area for energy saving] environmental conditions for road lighting in the representative demonstration zone of anseong-si

	Ijuk-myeon	Second General Industrial Complex	Third General Industrial Complex	Anseong Oksan Jugong APT	Anseong Terminal 1	Anseong Terminal 2	Central Road	38 national highway
Luminaire used	CDM 150W	LED 150W	HPS 250W	HPS 250W	LED 150W	LED 200W	MH 350W	HPS 250W
Average road surface luminance (cd/m^2)	2.15	1.95	2.96	0.87	7.89	3.96	0.92	2.38
Luminance Uniformity	0.64	0.55	0.57	0.44	0.60	0.63	0.77	0.25
Luminance Uniformity for lanes	0.44	0.48	0.48	0.57	0.27	0.66	0.48	0.38
Road lighting class	M5	M5	M5	M5	X	M3	M5	X
Required road lighting class	M5	M3	M3	M3	M5	M3	M3	M3

Table 8. [High efficiency led business feasibility study area for energy saving] analysis of road lighting luminance measurement results and road lighting levels in the interior

	Ijuk-myeon	Second General Industrial Complex	Third General Industrial Complex	Anseong Oksan Jugong APT	Anseong Terminal 1	Anseong Terminal 2	Central Road	38 national highway
Width of road [m]	5.5	16.0	12.5	15.9	6.0	18.5	8.4	16.0
Width of driveway [m]	3.5	4.0	3.0	3.3	2.7	3.0	2.8	3.5
Array type	both-sides	both-sides	staggered layout	staggered layout	one-side	staggered layout	one-side	staggered layout
Streetlight Spacing [m]	27.4	39.0	34.5	40.3	17.2	30.0	28.0	39.0
Photometric centre height [m]	8.2	10.2	8.5	10.2	9.6	9.0	10.0	10.0
Luminaire tilt [°]	8.0	10.0	5.0	5.0	20.0	20.0	5.0	7.0
Arm length [m]	1.8	3.0	2.4	2.2	2.4	2.6	1.6	2.2
Overhang [m]	-1.0	1.8	1.0	1.2	1.4	1.1	0.2	0.5

Table 9. Input value and number of simultaneous street lamp controls based on proposed model results

Road	Distance between streetlight pole (m)	Actuality Streetlight Spacing (m)	Vehicle speed (km/h)	Stop sight distance (m)
Second General Industrial Complex	-	39	60	80
Second General Industrial Complex (Proposed model)	36	-		
Anseong Terminal2	-	15	50	60
Anseong Terminal2 (Proposed model)	19.25	-		

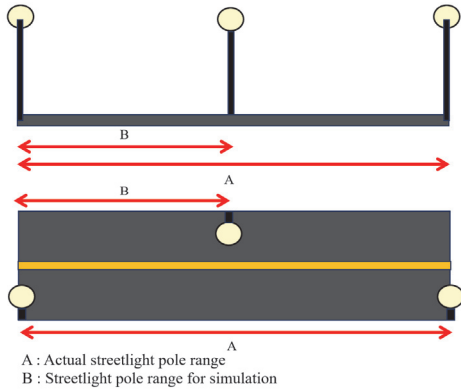


Fig. 14. Streetlight pole range for simulation

성과 일관성을 위해 절반의 값인 B(15m)로 적용하였다. 거리를 B로 적용한다면 정상적으로 다음 가로등과의 거리를 산출할 수 있다.

Table 9는 스마트 LED 가로등 시스템을 모델링 하기 위한 안성시의 실제 가로등 설치 간격과 제한한 가로등 모델을 통해 산출한 설치 간격 및 차량 속도와 그에 따른 정지시거이다. 실제 제2일반산업단지의 등주간격은 39m로, Relux를 통해 구한 M3 등주간격 36m보다 넓게 설치되어 있다. 또한, 안성터미널2는 최적 등주간격은 19.25m 이나 현실은 15m로 훨씬 좁게 설치되어 있다. 실제로 제2일반산업단지과 안성터미널2는 M3의 도로조명기준을 만족하여야 하나, Table 7에서 확인할 수 있듯이 제2일반 산업단지(0.48)는 M3의 기준(0.5)보다 낮은 차선축균제도를 보이고 안성터미널2(3.96)은 M3의 기준(1.0)보다 4 배 가까이 높은 평균노면휘도를 보인다. 차량 속도는 각 도로의 법정 제한 속도인 최대 60km/h와 50km/h를 적용 하였다. 속도에 따른 정지시거를 산출한 값 76.5, 58.9를 소수점 둘째 자리에서 반올림하였다. 모델링 시 제안한 가로등 모델을 통해 구한 최적 등주간격과 실제 등주간격을 적용한 경우를 모두 고려하여 총 4가지 경우 실험을

진행하였다.

Fig. 15는 안성터미널 2의 시뮬레이션 모델이고, Fig. 16은 제2일반산업단지의 시뮬레이션 모델이다. 안성터미널2의 경우 왕복 4차선의 도로에 가로등이 양측배열로 설치되어 있는 것을 확인할 수 있다. 제2일반산업단지의 경우 왕복 6차선의 도로에 가로등이 지그재그 배열로 설치되어 있는 것을 확인할 수 있다.

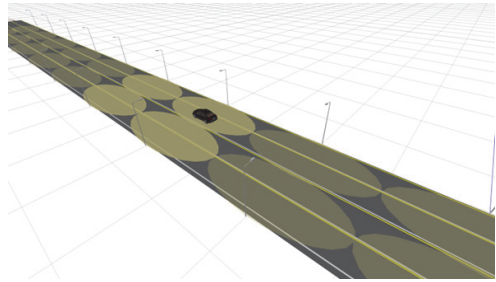


Fig. 15. Simulation modeling for anseong terminal2

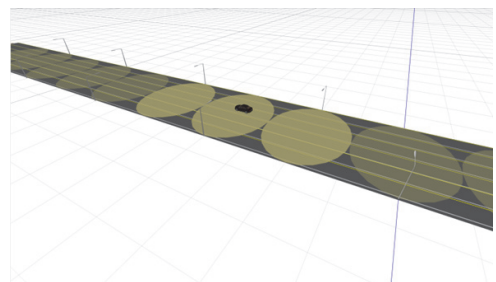


Fig. 16. Simulation modeling for second general industrial complex

5.2.2 시뮬레이션 결과 분석

최종 시뮬레이션에서 산출한 인증기준 3가지는 Table 10과 같다. 차량속도, 정지시거, 최적 등주간격에 따른 가로등 동시제어 수, 디밍 제어 지연시간, 디밍 제어 유지시

Table 10. Experimental results for second general industrial complex

Road	Vehicle speed (km/h)	Stop sight distance (m)	Distance between streetlight pole (m)	The number of concurrent streetlights	The minimum time to initiate dimming (sec)	The duration of the dimming period (sec)
Second General Industrial Complex (Proposed model)	60	80	36	3	1.920	2.160
Anseong Terminal 2 (Proposed model)	50	60	19.25	3	2.907	1.386

간으로 이루어져 있다. 추가적으로, 현재 설치되어 있는 등주간격을 기준으로 가상의 인증기준을 산출하여 최적 등주간격의 인증기준과 비교하였다. 현재 등주간격 기준으로 스마트 LED 가로등 시스템을 구축하였다고 가정하여 산출한 가상의 제2일반산업단지 도로 디밍 제어 지연 시간은 1.83초, 유지시간은 2.34초, 가로등 동시제어 수는 3개, 안성터미널2 도로의 경우 디밍 제어 지연시간은 3.06초, 유지시간은 1.08초, 가로등 동시제어 수는 4개이다. 제2일반산업단지 도로의 경우 추후 도로 설계 시 최적 등주간격을 적용했을 경우 1.92초로 약 5% 증가하였고, 디밍 제어 유지시간은 2.16초로 약 8% 줄일 수 있을 것이다. 안성터미널2 도로의 경우 추후 도로 설계 시 최적 등주간격을 적용했을 경우 디밍 제어 지연시간을 2.907초로 약 5% 줄일 수 있으며, 다만, 디밍 제어 유지시간은 1.386초로 약 28.33% 증가하였는데 이는 현재 안성터미널2 도로의 가로등이 과하게 설치되어 있기 때문이다. 따라서 최적 등주간격을 통해 가로등을 재설치해 도로 전체 설치하는 가로등 수를 줄일 수 있을 것이다. 이는 가로등 동시제어 수가 4개에서 3개로 감소한 부분에서도 확인할 수 있다.

제시한 인증기준에 맞는 디밍 제어 지연시간과 가로등 동시제어 수를 사용한다면 도로조명등급을 만족하는 디밍 제어를 통해 도로의 안정성을 높일 수 있을 것이다. 또한, 디밍 제어 유지시간을 정의해 불필요한 디밍 제어를 줄여 점등 시간을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 연구는 융합 신제품인 스마트 LED 가로등 시스템의 인증기준을 시뮬레이션을 활용해 제시하였다. 제시한 인증기준은 스마트 가로등의 밝게 제어와 관련한 기준으로 디밍 제어 지연시간, 디밍 제어 유지시간, 그리고 동시제어 가로등 수이다. 인증기준 검증을 위해 도구와 해석적 방법을 사용해 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

제안 시뮬레이션 모델과 인증기준을 활용하여 대한민국의 실 도로에 적용하였다. 시뮬레이션 실험 결과, 적용도로는 도로조명기준과 조명의 배열, 그리고 차량 속도를 고려했을 때 평균노면휘도 측면에서 안정성 기준을 만족하지 못하였고, 최적 등주간격보다 짧은 간격으로 설치된 것으로 분석되었다. 논문에서 제시한 인증기준을 만족하도록 도로를 재정비한다면 도로조명등급을 만족하면서 보다 효율적인 운영이 가능할 것으로 보인다.

용·복합 신제품에 대한 명확하고 일관된 인증기준은

제품 개발 및 개선에 중요한 역할을 수행한다. 특히, 스마트 LED 가로등 시스템은 스마트 시티 구축에 필수적인 기술로 검증된 인증기준으로 도로의 안정성을 높임과 동시에 보다 효율적인 운영을 가능하게 한다. 본 논문에서는 단일 차량에 대하여 인증기준 제시와 시뮬레이션 실험을 수행하였는데 추후 연구로 다수 차량으로 대상을 확대하여 스마트 LED 시스템의 전체 전력 소비량 측면에 대한 인증기준을 제시할 예정이다.

마지막으로 본 연구에서 제안한 시뮬레이션 방법은 스마트 LED 가로등 시스템뿐만 아니라 인증기준이 존재하지 않는 여러 신제품에 대해서 적용, 시험 기준을 제시하는데 도움이 될 것으로 기대한다.

References

- Chae, S.-G., Kim, Y.-S, Kim, J.-M., Heo, J. and Kang, S.-W., High efficiency led business feasibility study area for energy saving, Anseong City, pp. 18-24, 2018.
(채성기, 김유신, 김지명, 허준, 강성용, 에너지 절감을 위한 고효율 LED 사업타당성 조사 용역, 안성시청, 18-24페이지, 2018년.)
- Choi, Y.-C., Yun, A.-Y. and Eo, I.-S., “Backlight Simulation Using the Lamp Array According to Relux”, Proc. of the KIEE Conference, pp. 127-128, 2011.
(최용천, 윤아영, 어익수, “Relux를 이용한 가로등 배열에 따른 배광 시뮬레이션”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 127-128페이지, 2011년.)
- Ergüzel, A. T., “A study on the implementation of dimmable street lighting according to vehicle traffic density”, Optik, Vol. 184. pp. 142-152, 2019.
- International Energy Agency(IEA), Energy Efficiency Market Report, pp. 91-108, 2016.
- Jang M. and Seo, K.-M., “Educational Digital Twin Development for Swarm Simulation of Public Mobilities”, Proc. of the the Korea Society for Simulation Conference, pp. 27-28, 2021.
(장미, 서경민, “모빌리티 군집제어 시뮬레이션을 위한 교육용 디지털트윈 개발”, 한국시뮬레이션학회 추계 학술대회, 27-28페이지, 2021년.)
- Jeong, M.-G., Jang, M., Kim, J.P., Park, J.S., Shin, D.M. and Seo, K.-M., “Simulation-based Bottleneck

- Analysis of Forwarding Process in Logistics Automation Warehouse”, Proc. of the Korea Society for Simulation Conference, pp. 29, 2022.
(정문기, 장미, 김종필, 박진성, 신동민, 서경민, “시뮬레이션을 활용한 물류 자동화창고의 출고 프로세스 병목현상 분석”, 한국시뮬레이션학회 추계학술대회 논문집, 29페이지, 2022년.)
- Kang, B.-G, Park, H.-M., Jang, M. and Seo, K.-M., “Hybrid Model-Based Simulation Analysis on the Effects of Social Distancing Policy of the COVID-19 Epidemic”, Int J Environ Res Public Health, Vol. 2021, No. 18, pp. 1-18, 2021.
- Kang, H.-S., Yoo, D.-C., Lee, K.-H., Jang, D.-H. and Choi, C.-H., “Comparative analysis of U-Value in Window System According to Simulation Evaluation Standards and Methods”, Journal of KIAEBS, Vol. 9, No. 5. pp. 285-292, 2015.
(강혜숙, 유동철, 이진호, 장대희, 최창호, “시뮬레이션 평가 기준 및 방법에 따른 창세트 열관류율 비교”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 제9권, 5호, 285-292 페이지, 2015년.)
- Khatavkar, N., Naik, A. A. and Kadam, B., “Energy efficient street light controller for smart cities”, 2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS), Vellore, India, pp. 1-6, 2017.
- Kim, H.-K., Han, J.-S., Hwang, I.-T., Lee, M.-A. and Kim, H., “Investigation of Roadway Lighting by Measurement of Illuminance and Luminance Distribution”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 22, No. 1. pp. 17-23, 2008.
(김형권, 한중성, 황인태, 이미애, 김훈, “조도/휘도 분포측정을 통한 도로조명 실태조사”, 조명·전기설비학회논문지, 제22권, 1호, 17-23페이지, 2008년.)
- Kim, J.-M., A dimming scenario study of smart street lighting considering road characteristics, Ph.D Thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 11, 2021.
(김재민, 도로 특성을 고려한 스마트가로등 디밍 시나리오 연구, 공학박사학위논문, 서울과학기술대학교, 11페이지, 2021년.)
- Kim, J.-M., Lee, J.-K. and Jang, W.-J., “Development of Dimming Scenarios of Smart Street Lights”, Proc. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp. 6, 2021.
(김재민, 이준규, 장우진, “스마트가로등 디밍제어 시나리오 연구”, 한국조명·전기설비학회 학술대회논문집, pp. 6-6, 2021년.)
- Shim, K.-B. and Lee, T.-S., “Standard Procedure for Blast Doors Product Certification Using Numerical Simulation”, Journal of Standards, Certification and Safety, Vol. 9, No. 4. pp. 1-17, 2019.
(심관보, 이택성, “수치해석 시뮬레이션을 통한 폭발 압력을 받는 방폭문 제품인증 표준절차”, 표준인증안전학회지, 제9권, 4호, 1-17페이지, 2019년.)



조 승 완 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0008-3023-4875> / swcho@nsl.hanyang.ac.kr)

2023 한양대학교 ERICA 산업경영공학과 공학사
2023~ 현재 한양대학교 대학원 산업경영공학과 석사과정

관심분야 : 최적화, AI 기반 시뮬레이션, 자율이동로봇(Autonomous Mobile Robot)



구 도 연 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0009-6064-8291> / kimyan1@hanyang.ac.kr)

2018~ 현재 한양대학교 ERICA 산업경영공학과 학사과정

관심분야 : 시뮬레이션, 생산관리, 최적화 모델링, 품질관리



김 수 민 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0001-4240-2492> / tnals0451@hanyang.ac.kr)

2020~ 현재 한양대학교 ERICA 산업경영공학과 학사과정

관심분야 : 시뮬레이션, 최적화 모델링, 신뢰성, 품질경영



강 봉 구 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-7522-4979> / bgkang@kitech.re.kr)

2011 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 공학사
2013 KAIST 전기및전자공학과 공학석사
2018 KAIST 전기및전자공학과 공학박사
2018~ 2019 KT 융합기술원 선임연구원
2019~ 현재 한국생산기술연구원 국가산업융합센터 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 디지털 트윈, 인공지능 융합



서 경 민 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1017-1674> / kmseo@hanyang.ac.kr)

2014 KAIST 전기및전자공학과 공학박사
2014~ 2019 대우조선해양 특수성능연구소 책임연구원
2019 한국생산기술연구원 창의엔지니어링센터 선임연구원
2019~ 2022 한국기술교육대학교 융합학과 조교수
2022~ 현재 한양대학교 ERICA 산업경영공학과 부교수

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 시스템 연동, 디지털 트윈, 사이버 물리 시스템