

소형 유도식 무선전력 LED를 이용한 완전 방수 터널용 LED 조명 개발

김동표, 김경섭, 허성필*

여주대학교, *국립강릉원주대학교

dpkim487@yit.ac.kr, kkseob@yit.ac.kr, *spheo@gwnu.ac.kr

Development on the Waterproof Tunnel LED Light Using Small Wireless Inductive LED

Kim Dong Pyo, Kim Kyung Seob, Heo Sung Phil*

Yeojoo Institute of Tech., * Gangneung-Wonju National Univ.

요약

본 논문은 소형 유도식 무선 전력 LED와 전공 라미네이션 기술을 이용한 완전 방수형 LED 표시 조명을 설계 및 제작하여 유지 보수가 용이한 완전 방수 기능을 가지는 터널용 LED 도로 조명을 제안하고자 한다. 시제품을 제작하여 50 cm 수조에서 1시간 동안 동작하는 것을 확인하였으며, LED 밝기는 송신부에서 멀어짐에 따라 밝기가 줄어들었다. 이 결과는 수신 코일의 직경이 작을수록 결합 계수 감소에 민감하다는 것을 확인하였다.

I. 서론

최근 터널에는 사고 예방을 위하여 차선 통행 상태 표시, 비상구 표시, 주행방향 표시 등 안전 운전을 위한 다양한 LED 조명이 터널 천정, 측벽 및 보행통로에 사용되고 있다.[1~2] 천정에 사용되는 터널용 표시 조명은 난연 PC와 오염방지 코팅을 통하여 화재 및 조명 조도 저하를 방지하는 기술이 적용되어 있으나, 방수에 대한 대비가 부족하다. 특히 터널의 경우 자동차 배기ガ스가 많이 발생하고, 배기ガ스에는 일산화탄소(CO), 탄화수소(HC)와 질소산화물 (NOx)과 황산화물(SOx)이 포함되어 있으며, 이 중 황산화물은 물과 반응을 하게 되면 부식성 산을 생성하게 된다. 그 결과로 금속 및 PCB위의 LED 솔더부를 부식시켜 LED 표시 조명의 고장을 유발 할 수 있다. LED 조명에서 일반적인 방수 기술로는 방수 고무 실을 사용하고 있으나, 이는 물에 대한 방수 기능을 가지나, 배기 가스와 수증기와 같은 기체의 침투를 막을 수 없다.[2~3] 또한, 터널은 주기적으로 터널의 조도 확보를 위하여 살수차를 이용한 주기적인 청소를 하고 있으므로, 터널벽 또는 보행자 통로에 설치된 LED 조명은 침수에 의한 고장이 발생 할 수 있다. 터널 내 조명의 고장 발생 시 수리를 위하여 차량 통행을 차단하여야 하며, 이에 따라 교통 정체가 발생하게 되어 유지 보수를 위한 많은 시간과 비용이 발생하게 된다.



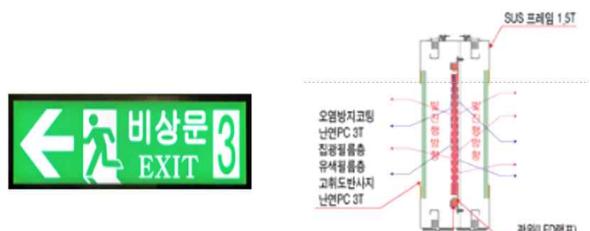
그림 1. 터널 내 LED 조명 및 물세차 청소

본 논문에서는 소형 유도식 무선 전력 LED와 전공 라미네이션 기술을 이용한 완전 방수 LED 표시 조명을 설계 및 제작하여 유지 보수가 용이한 완전 방수 기능을 가지는 터널용 LED 도로 조명을 제안하고자 한다. 전체 시스템은 송신부(무선 전력 송신 회로 및 코일), 수신부(무선 전력 수신 코일, 정류 및 LED 구동 회로)로 구성된다. 12V~24V DC 입력 전원을 150 kHz의 고주파 교류로 변환하여 송신 코일에 공급하고, 수신 코일에서 전자기 유도에 의해 수 mW~W급의 전력을 획득한다. 수신 코일의 직경은 방수 LED 모듈에 삽입 가능하도록 제한적으로 설계되었으며, 광원으로 AC LED를 사용하였다.

II. 본론

1) 터널용 LED 표시 조명의 구조 분석

터널용에 사용되는 천정용 LED 조명에 대해 비상 유도등과 표시 조명의 선행 기술을 분석 한 결과 SUS 프레임에 난연 PC, 실크 인쇄, 필름층과 오염 방지코팅으로 구성되어 있다. IP65 등급으로 방수 기능을 가지고 있으나, 자동차 배기ガ스에 LED 광원이 노출되어 있는 구조이다.



(a) 천정형

(b) 양면 발광식 LED 조명 단면도

그림 2. 터널용 LED 표시 조명 및 구조

2) 유지 보수 편리성을 위한 터널용 완전 방수 LED 조명 설계

터널의 경우 자동차에서 발생하는 배기 가스인 황화물과 수증기와 같은

기체가 포함되어 있어, LED 조명에 침투하게 되면 부식성 산을 생성하여 PCB위의 솔더부 또는 LED 조명의 발광부 변형을 발생시킬 수 있으므로, 실리콘과 진공 라미네이션을 이용하여 LED를 완전 밀봉 함으로써 배기 가스에 대한 노출을 방지하여, 부식에 의한 고장을 방지하고자 한다. 그리고, LED 조명의 수리를 위하여 기구물을 분해하고, 전기 배선 작업을 하여 유지 보수 시간이 많이 드는 것을 개선하기 위하여 소형 유도식 무선전력 LED와 자기유도 무선전력 송신 모듈을 이용하여 교체가 용이한 구조의 완전 방수 터널용 LED 조명을 제안하고자 한다.

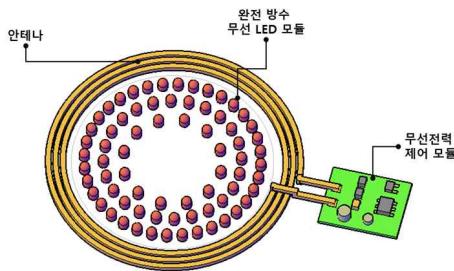


그림 3. 유지 보수가 편리한 완전 방수 터널용 LED 표시 조명 구성

3) 소형 유도식 무선 전력 LED 및 무선 전력 시스템 설계
소형 유도식 무선전력 LED의 핵심은 5 mm 직경의 소형 원형 인덕션 코일로, 에나멜 와이어(0.15 mm, 구리선)를 30회 권선하여 약 $2\sim3 \mu\text{H}$ 의 인덕턴스를 갖도록 제작하였다. 수신 코일과 병렬로 330 pF 세라믹 커패시터를 연결하여 약 150 kHz에서 공진하도록 조정하였다. 이 공진 회로는 송신 측의 공진 주파수와 동기화되어 전력 전송 효율을 극대화한다. LED는 AC LED를 사용하였다. [3~4]

무선 전력 송신부는 12V~24V 입력을 스위칭하는 푸시풀 인버터 회로로 구성하였으며, 전력 MOSFET(N채널, 60V/10A급)을 사용하여 150 kHz 구동 주파수를 제공하였다. 송신 코일은 직경 20 mm의 에어코어 코일(권선 수 20회, 인덕턴스 약 $8 \mu\text{H}$)이며, 여기에 직렬로 100 nF 커패시터를 삽입하여 동일 주파수에서 공진하도록 설정하였다. 시스템은 공진 주파수에서 최대 전력을 전송할 수 있도록 코일 간 거리 5~10 mm 이내 및 정렬을 맞추는 것이 중요하다.

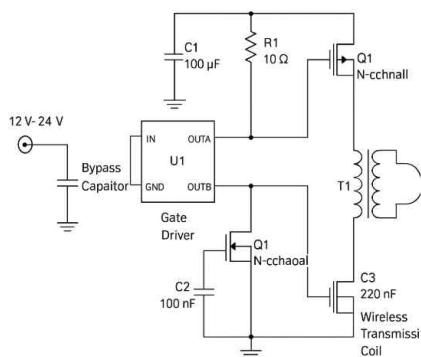


그림 4. 무선 전력 송신 회로도 설계

4) 완전 방수 구조 설계

소형 유도식 무선 전력 LED 10 ea를 상용하여 기구물에 배치 후 LED 모듈을 제작하였고, 이를 실리콘 진공 몰딩 이용하여 완전 밀폐 구조로 봉인하였다. 이 방식은 수분 및 배기ガ스의 침투를 방지하며, 방수 등급은 IP68 이상을 목표로 하였으며, 실험적으로 50 cm 수조에서 1시간 이상 점등 유지가 가능함을 확인하였다.

5) 수신 거리에 따른 전압 변화

시제품 테스트 결과, 송신-수신 간 코일 간격이 5 mm일 때 수신 전압은 11.8V, 출력 전류는 26 mA로 측정되었으며, LED는 정상 밝기로 점등되었다. 송신 측 소비 전력은 약 0.45W로, 전송 효율은 약 68% 수준이었다. 거리 10 mm로 증가 시 수신 전압은 9.3V로 감소하였고, LED 밝기도 줄어들었다. 이 결과는 수신 코일의 직경이 작을수록 결합 계수 감소에 민감하다는 것을 의미한다.

III. 결론

본 논문에서는 5 mm 직경의 소형 유도 코일을 활용하여 방수 LED 조명을 무선으로 구동하는 회로와 구조를 설계 및 검증하였다. 설계된 시스템은 소형화 및 방수성을 동시에 확보하면서, LED 조명에 실질적인 무선 전력 공급이 가능함을 실험적으로 입증하였다. 향후 연구로는 다중 수신 모듈 간 간섭 최소화, 고효율 능동 정류 회로 적용, 다채널 제어 및 광센서 연동을 통한 스마트 조명 시스템 구현이 요구된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(P0011930, 2025년 강원원주산학융합지구조성사업)

참 고 문 현

- [1] Hur J. Y., and Yoon M. H. "Rights of Design Development of External Design of LED LAMP," The Journal of the Korea Contents Association, pp. 114-122, 2012.
- [2] "LED road lighting dimming control system standardization and performance evaluation system development research," 2014, (<https://www.codil.or.kr>>OTKCRK180319).
- [3] Lee H. J. "Development of wireless power LED display board", 2008.
- [4] Nakajima K., Kimura T., Takakura H, Yoshikawa Y. Kameda A., Shindo T. Sato K. Kobahashi H., and Ogawa M., "Implantable wireless powered light emitting diode (LED) for near-infrared phototherapy: device development and experimental assessment in vitro and in vivo," Oncotarget, pp. 20048-20057, 2018.