

■ 論 文 ■

LED 교통신호등 현장적용성 평가 및 경제성 분석

An Experimental Evaluation and Economic Analysis for LED Traffic Signal

장 덕 명

(도로교통안전관리공단 연구위원)

이 병 철

(도로교통안전관리공단 선임연구원)

안 주 혁

(도로교통안전관리공단 연구위원)

목 차

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| I. 서론 | 1. 설치비용 |
| II. 기존신호등과 LED 신호등 특성비교 | 2. 내구연한 |
| 1. 발광원리 | 3. 유지보수비용 |
| 2. 기존 신호등과 LED 신호등 비교분석 | 4. 전력소모 비용 |
| III. LED 신호등 국내·외 기술동향 | 5. LED 신호등 교체시 비용/편익 분석 |
| IV. LED 신호등 현장실험 | 6. 기타 추가적 편익 |
| 1. 에너지 절감효과 측정 실험 | VI. 결론 |
| 2. 보행자용 LED 신호등 현장실험 | 참고문헌 |
| V. LED 신호등 경제성 분석 | |

요 약

LED(Light Emitting Diodes)는 반도체를 이용한 발광소자로서 동화상 광고물이나 가변정보표지판(VMS) 등에 주로 활용되고 있으며 최근 외국의 경우 LED 기술을 교통신호등에 적용하여 시범설치 및 확대 적용 설치하여 운영 중에 있으며 국내에서는 산업체, 학계, 연구소 등에서 연구 개발 중에 있다.

본 연구는 현재 이러한 산·학·연의 노력에 의해 개발된 LED 교통신호등을 현장에 적용하기에 앞서서 실내 실험과 현장실험을 통하여 에너지 절감효과 및 현장적용성을 검증하고 경제성 분석을 통한 타당성을 제시하는데 목적이 있다.

연구 내용으로써 기존 전구식 신호등과 LED 신호등의 발광원리 및 특징 비교·분석, 실내실험을 통한 에너지 절감효과 검증, LED 보행자 신호등 현장적용성 평가, LED 신호등으로 서울시의 기존 신호등을 연차적으로 교체하는 경우에 대한 경제적 분석이 실시되었다.

실내실험을 통해 LED 신호등의 에너지 절감효과가 평균 76% 임을 검증하였고 보행자 신호등에 대한 현장 실험에서 설문응답자의 83.7%가 LED 신호등의 시인성이 우월하다고 나타나 현장적용성은 긍정적인 것으로 나타났다.

LED 신호등에 대한 경제성 분석결과 자본회수기간은 6년으로 나타났으며 향후 기존 신호등의 고장 및 유지 보수 등에 의한 차량정체 비용, 교통사고 비용 및 소자기술 발전을 고려하면 이보다 단축될 것으로 판단된다.

향후 차량등에 대한 운전자들의 반응 및 장기적인 안정성 등에 대한 종합적인 실험이 추가적으로 이뤄져야 할 것이며 이를 바탕으로 하여 LED 신호등에 대한 규격서 제정 등 법·제도 측면이 이루어진 후 LED 국내 기술 수준 등을 총체적으로 고려하여 LED 교통신호등에 대한 보급방안이 강구되어야 할 것이다.

1. 서론

최근 전자, 전기, 통신 등의 다양한 첨단기술이 교통분야에 접목되어 교통의 기술발전과 효율성 제고에 일조를 기하고 있다. 이에 따라 교통분야와 타 분야간의 종합적인 기술응용 추세와 국가 경제의 어려운 상황을 토대로 에너지 절약에 대한 사회 각 분야의 관심이 고조되고 있으며 다양한 에너지 절약 방안이 제시되고 있는 상황이다.

LED(Light Emitting Diodes)는 전자의 에너지 차이에 의해 빛이 발광되는 원리를 이용하여 만들어지는 반도체 제품으로서, 에너지 절감효과 등의 여러 가지 장점으로 인하여 최근 많은 분야에서 각광을 받고 있다. 현재는 도로 상에 설치되어 있는 동화상 광고물이나 가변정보표지판 등에 주로 활용되고 있으며 이러한 기술을 교통신호등에 응용하고자 하는 연구 노력이 국내·외에서 활발히 전개되고 있다.

LED는 적은 전압이나 전력으로 구동하기 때문에 전기에너지 절약효과가 크고 또한 제품이 반도체 소자이기 때문에 기존 신호등의 광원인 전구에 비해 수명이 길어 반영구적으로 사용이 가능하다. 또한 트랜지스터나 집적회로와 같은 방법으로 만들 수 있기 때문에 대량생산이 가능한 장점이 있으며 이로 인한 가격 경쟁 측면에서도 우월성을 확보할 수 있다.

국내의 경우 LED를 이용한 교통신호등 개발을 산업체, 학계, 연구소 등에서 활발히 추진 중이나 제품의 성능검증을 위한 검사기준 및 방법 등을 규정하는 규격이 없어 개발중인 LED 신호등에 대한 안정성, 신뢰성 등을 평가할 방법이나 기준이 없는 실정이다. 그러나, 선진 외국에서는 LED 신호등 규격제정 작업과 병행하여 시제품을 통한 현장실험을 실시하여 기존 신호등에 비하여 에너지 절감량 80%, 유지보수 비용이 95% 이상 절감된다고 보고되고 있다.

본 연구는 LED 신호등에 대하여 현장실험을 통한 적용성과 에너지 절감효과 검증 및 경제적 타당성을 검토, 분석하는데 그 목적이 있다.

II. 기존 신호등과 LED 신호등 특성비교

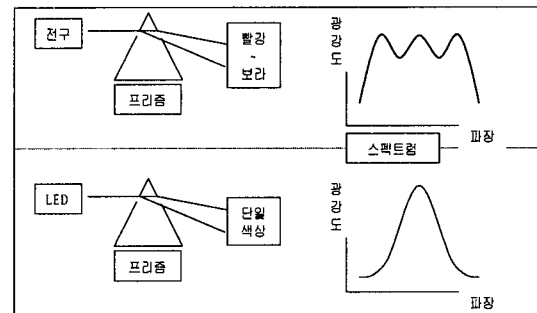
1. 발광원리

일반적으로 물체는 광원의 발광구조에 따라 태양이나 백열전구와 같이 물체가 열을 받아서 발광하는 것

과 LED나 네온전등과 같이 어떠한 자극을 받아서 발광하는 것으로 구분할 수 있다.

기존 신호등에 사용되는 백열전구는 가열되면 그때의 온도에 따라서 빛을 발하면서 색상을 나타내게 된다. 이때 그 색상은 단순한 적색이 아니라 검붉은 색이나 주황색이 혼합되어 있는 색이며 붉은 색이 주를 이루나 확실히 구별되는 분명한 상태는 아니다. 이와 같이 여러 가지 색이 혼합되어 있고 어떠한 색도 경계가 명확하지 않은 빛을 연속 스펙트럼 광(光)이라고 하며 기존 신호등에 주로 사용되고 있는 백열전구나 할로겐전등이 여기에 포함된다. 즉, 전기를 사용하여 전구 안의 저항체를 가열함으로써 발광된 백열전구가 적색, 황색, 녹색의 착색렌즈에 의해 각 색상을 가진 신호등화로 표시되는 것이 기존 전구식 신호등이라고 할 수 있다.

이에 비해 LED의 발광원리는 전자가 에너지 수준이 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동할 때 그 에너지 차이에 해당하는 부분에 대응하는 파장의 빛을 발하게 되는 것이다. 이때 에너지의 차이가 크면 파장이 짧은 청색 빛을 발하게 되고 에너지 차이가 적으면 파장이 긴 적색 빛을 발하게 됨으로써 LED는 색의 경계가 분명한 단일 색상의 빛을 나타내게 된다(〈그림 1〉 참조).



〈그림 1〉 전구와 LED의 발광원리

2. 기존 신호등과 LED 신호등 비교분석

기존 신호등과 LED 신호등에 관한 이론 및 광학적 특성 등을 비교 분석하면 〈표 1〉과 같다.

또한 신호등두(Signal Head)에 있어서 기존 신호등과 LED 신호등의 구조를 비교하면, LED 신호등은 전구와 반사경이 필요 없으므로 기존 전구식에 비해 두께가 얇고 가벼운 합체를 사용할 수 있다(〈그림 2〉 참조).

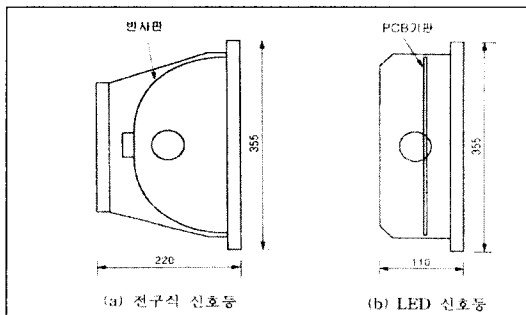
〈표 1〉 전구식과 LED 신호등의 특성 비교

구분	전구식 신호등	LED 신호등
발광 원리 및 수명	<ul style="list-style-type: none"> 저항체가 열을 받아서 발광 불분명한 혼합 색으로 착색렌즈를 통해 신호등화 표시 	<ul style="list-style-type: none"> 전자의 이동에 의한 에너지 차이로 발광 색의 경계가 분명한 단일색상의 빛으로 신호등화 표시
내구수명	연속점등 4,000시간	반영구적 (5~10년)
유지비용	과다	기존에 비해 95% 이상 절감
전력소모	많음 (차량용 110W, 보행자용 60W)	기존에 비해 85% 이상 절감 (차량·보행자용 평균 15W 사용)
설치비용	적음 (3색등두 1기당 약 45만원)	기존에 비해 평균 2~3배 많음
섀넌텀 현상*	동서 가로축에서 자주 발생함	거의 없음
환경 측면	전력소모가 많은 전구에 의한 자체 발열로 분진 등이 열에 타게 되어 공기 오염 유발	자체 발열이 적으므로 환경 친화적임
외부 전압 변화	대처능력 약함 (작은 고장 원인)	대처능력 강함 (230V에서 89V로 강하되어도 정상 작동)
외부열에 대한 저항도	강함	반도체소자로 약함
규정 적합 여부 (교통안전시설실무편람)	현행기준 (광도, 색도)에 합격한 제품 사용	색도는 기준에 적합하지만 광도·휘도는 검사방법 등의 규정이 없어 적합 여부를 판단할 수 없음
기술적 안정성	지속적 개발 및 설치로 기술적 안정성 부여됨	외국 자료를 토대로 검토한 결과, 기술적 안정성이 있다고 판단됨

자료) 경찰청, 교통안전시설실무편람, 1996.

Traffic Technology International, 1996, 1997, 1998.

주) * : 섀넌텀 (Sun Phantom) 현상: 태양이 신호등면을 비출 때 기존 신호등의 함체 안에 있는 반사경 등에 의해 신호등 소등시에도 점등된 것처럼 나타나 등화된 등색의 구분이 모호한 경우를 말함.



〈그림 2〉 기존신호등 규격과 LED 신호등의 외함 규격(안) 비교

III. LED 신호등 국내·외 기술동향

국내의 경우, LED 자체에 대한 기술개발 및 이에 따른 LED 신호등 회로설계 등이 몇몇 대기업과 중소기업 벤처기업을 중심으로 진행중이거나 또는 외국 제품의 수입대리점 형태로 운영되는 수준이다. 특히, 시제품 개발에 따른 현장실험은 최근에 실시된 대전광역시와 본 공단 주관의 LED 보행자 신호등 현장실험 이외에는 전혀 실시된 바가 없으며 또한 제품 및 기술개발의 지침서가 될 규격서가 전무한 실정이다.

외국의 경우, LED 신호등의 개발에 따라 도로현장에 적용한 현장실험과 이를 통한 규격서 제정작업을 수행 중에 있으며 이와 병행하여 도로 현장에 활발히 설치, 적용되고 있다. 미국, 유럽 및 일본 등의 국가에서는 LED 신호등을 도로현장에 직접 설치하여 교통운영 및 운전자 반응을 조사 분석하고 있으며, 미국의 교통공학회(ITE)는 LED 신호등에 관한 잠정 규격(안)을 제정(1998.7)하였다. 유럽이나 미국의 설치운영결과는 주로 에너지 절감과 유지보수 비용부문에 대한 분석으로 행해졌으며 일본의 경우는 교통안전 측면에 초점을 맞춘 연구가 수행되었다.

일본의 LED 신호등 설치운영 결과, 교통안전 측면에서 교통사고 발생건수가 연간 약 25% 정도 감소한 결과를 나타내었으며 주간과 야간 교통사고 발생건수는 각각 17.6%, 38.1% 감소되었는데 특히 야간 교통사고발생 감소율이 주간 2배 이상인 이유는 운전자의 시인성, 판독성 등에 있어서 LED 교통신호등이 기존 전구식 신호등보다 월등한 결과라고 판단된다. 교통사고 사망자수 및 부상자수는 각각 50%, 25.7% 감소비율을 나타내었다. 또한 환경적 측면에서는, LED 교통신호등의 적은 전력소모로 인하여 전력발전시

〈표 2〉 외국의 LED 신호등 현장실험 결과

국가	실험내용	실험결과	비고
유럽	스웨덴 (스톡홀름)	차량등 실험 (녹색, 적색) • 유지보수 및 전력소모 비용 85% 절감효과 • 내구연한 10년 추정	• 기존 녹색등의 경우 70W (우리나라 100W, 미국 150W)를 사용하나 LED의 경우 10W 사용
	영국 (런던)	차량등 실험 (녹색, 적색) • 보행자 및 운전자 설문조사 : 녹색등 8%, 적색등 2%만 시인성 불량으로 응답 • 자본회수기간 2년으로 판단	
	기타 유럽국가	차량등 실험 (녹색, 적색) • 스웨덴(스톡홀름) - 유지보수 및 전력소모 측면에서 85%의 비용 절감효과, 연간 약 85만 달러의 운영비 절감	• 오스트리아(비엔나) • 독일(뮌헨, 스투트가르트) • 스위스(취리히) • 스페인(바르셀로나) • 핀란드(헬싱키)
미국	펠라델피아	6개의 시제품을 제작, 28개 교차로 설치·운영 • 운전자들은 색도, 광도 차이 인식 못함 • 실내실험(온도 74℃, 습도 70%) 결과 색도 등의 변화 없음 • 규격서 제정 작업 진행 중	• LED 교통신호등 잠정규격안 확정 (ITE, 1998. 7.) • 2000년 최종규격제시예정 • 20개 이상의 시와 주에서 운영 중 • 연간 교체비용 4%
	캘리포니아	적색 신호등 실험 • 94%의 전기 절약	
	미네소타주 뉴저지주	적색 점멸등 실험 • 에너지 절감효과 : 교차로당 약 63만원으로 추정 • 내구연한 6~10년 추정	
캐나다	Ecolux社 LED 신호등을 위한 전압변환장치 개발 • 전압변환장치 발생손실 줄임 • 제품 양산체제 가동 중	• 입력전압 - 전구식 (교류전압) - LED (직류전압)	
일본	도쿠시마 (徳島縣)	차량용 3색등 400여개 설치실험(선편 등, 전력소모량) • 썬팬텀 현상 방지 입증 • 시스템의 안정성 입증 • 교통사고 발생률 25% 감소 • 1기당 8,000엔 전력요금 절감	• 무색 투명렌즈 사용 • 매년 100기 설치
	오사카, 교토, 아이치	회전표시등 설치실험 • 오사카 (200개) • 교토 (150개) • 아이찌 (100개)	
	• 기타 철도용으로 5,000여개 설치 • LED 신호등 전국적 설치시 절전비용 80억엔 추정		

주) 유럽, 미국, 캐나다 : Traffic Technology International, 1996, 1997, 1998.
일본 : Nichia社, 1999.

발전소에서 배출되는 CO₂ 배출량의 삭감에 직접적으로 기여할 수 있다고 하였으며 일본의 차량등, 보행자등 및 기타 교통신호등 전체 개수를 150만기로 가정하면 연간 약 68만 톤의 CO₂ 배출량을 감소시킬 수 있다고 추정하였다.

유럽, 미국, 캐나다 등 선진외국에서 LED 신호등에 대해 실험 운영한 평가내용 및 결과는 〈표 2〉와 같다.

N. LED 신호등 현장실험

LED 신호등의 전력절감 효과를 측정하기 위하여 적색 차량등에 한하여 실내실험을 실시하고 도로현장에 LED 보행자등을 설치하여 보행자 출발행태조사와 반응에 관한 설문조사를 실시하였다.

1. 에너지 절감효과 측정 실험

LED 신호등의 장점인 전력절감 효과를 검증하기 위하여 기존 전구식 신호등과 LED 신호등에 대한 전력소모량을 측정, 비교하였다. 실험은 23일간 실시되었으며 직경 300mm의 차량용 적색 신호등을 대상으로 하였다.

적색등을 실험대상으로 선정한 이유는 LED 신호등의 적·황·녹색의 등화 중 가장 안정된 기술수준을 유지할 뿐만 아니라 실제 도로현장에서도 적색신호등의 등화시간이 녹색이나 황색보다 일반적으로 길기 때문에 에너지 절감효과가 크리라 판단되기 때문이다.

〈표 3〉 실험신호등 기술사양

구분	LED 신호등					기존 신호등	
	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5	B 1	B 2
광도	400 cd	885 cd	900cd	775 cd	350 cd		
LED Type	AlInGaP	AlInGaP	AlInGaPⅡ	AlInGaP	AlInGaP	-	-
LED소자수	270 pcs	300 pcs	432 pcs	320 pcs	264 pcs	-	-
작동 전압	220 V	230 V	220V	220 V	110 V	220 V	220 V
설계소비전력	13 W	28 W	5 W	12.1 W	19.8 W	100 W	100 W
수명(시간)	>100,000	>100,000	>100,000	>100,000	>100,000	>8,000	>8,000

〈표 4〉 전력소모량 측정 결과

구분	LED 신호등					기존 신호등	
	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5	B 1	B 2
측정전력량(kWh)	1.40	3.19	0.01	L 4	L 5	B 1	B 2
측정시간(h)	102	102	97	2.62	1.91	9.32	9.60
측정소비전력(W)	13.73	31.27	0.10	102	102	102	102
설계소비전력(W)	13	28	5	25.69	18.73	91.37	94.12

주) 설계소비전력: 제조회사 사양상의 소비전력
 측정소비전력: 실내실험에 의한 실제 측정 소비전력

실험용 기존 신호등은 현행 규격(교통안전시설실무편람)에 적합한 제품을 사용하였으며 LED 신호등은 국내 업체에 의해 제작된 제품 3개, 외국 제품 2개를 사용하였다. 전력량 측정은 각각의 신호등에 전력계를 부착하고 동시점등 및 소등이 이루어지도록 등기선을 연결하여 측정하였다.

〈표 3〉은 실험대상 LED 신호등과 기존 신호등의 기술사양을 나타내며 〈표 4〉는 전력소모량을 측정된 결과를 나타낸다.

측정 결과, L3 신호등의 경우 아주 적은 전력소모가 발생하였는데 회로 점검 결과 고장은 아니며 제작사의 회로설계기술에 기인한 것으로 판단되었다. 그러나 통계적 신뢰도를 기하기 위하여 L3 측정치는 계산에서 제외하였다.

평균소비전력을 비교하면, LED 신호등 22.4W, 기존 전구식 신호등 92.7W로서 LED 신호등이 기존 신호등에 비해 전력량이 75.8% 정도 절감됨을 알 수

있다. 이러한 결과는 전력절감효과가 약 80% 정도라고 보고하는 외국의 실험결과와 비슷하다.

2. 보행자용 LED 신호등 현장실험

도로 상의 횡단보도에 LED 신호등과 기존 신호등을 병행설치하여 보행자의 횡단행태조사와 신호등의 시인성 및 판독성을 비교·분석하였다. 실험을 위하여 대전광역시 동·서 방향(썬펜터 현상 측정이 가능한 위치) 횡단보도 2개소에 보행자용 LED 신호등을 설치, 실험 운영('98.5~'99.4)하였다.

보행자 횡단행태 조사·분석에 대해서는 횡단보행자들의 출발인지반응시간을 측정하고 신호등의 시인성 및 판독성에 대해서는 보행자들을 대상으로 면접 설문조사를 실시하였다. 조사는 3차에 걸쳐서 수행되었으며 수집된 자료 수는 출발인지반응시간 841명, 설문조사 557명이다(〈표 5〉 참조).

〈표 5〉 LED 보행자 신호등 현장조사 개요

조사항목	조사방법	조사장소	수집자료수	비고
보행자 횡단행태 조사	횡단보행자 출발인지반응시간 측정	충남대학교 앞 횡단보도	841명	기존 신호등과 LED 신호등을 각각 대향 방향에 단독으로 설치
신호등 시인성, 판독성 등 조사	횡단보행자 면접 설문조사	대덕대학 앞 횡단보도	557명	기존 신호등과 LED 신호등을 병렬로 설치

〈표 6〉 보행자 출발인지반응시간 측정 결과

구분	1차		2차		3차	
	백열전구	LED	백열전구	LED	백열전구	LED
평균	1.47	1.23	0.94	0.88	1.17	1.02
85th%	1.90	1.66	1.22	1.11	1.75	1.63
평균차이	t=3.5639, 유의수준 0.05에서 평균은 서로 다름		유의수준 0.05에서 평균은 서로 다름.		t=2.0683, 유의수준 0.05에서 평균은 서로 다름	

1) 보행자 횡단행태 조사 결과

횡단보행자의 출발인지반응시간은 횡단보도를 횡단하기 위해 보도에서 대기중인 보행자가 녹색 보행자 신호를 인지하여 횡단 행동이 일어나는 시점, 즉 개별 보행자가 발을 보도에서 차도로 내딛는 순간까지의 소요시간이며 조사된 출발인지반응시간 중에서 85번째 시간을 비교하여 보면, LED 신호등에 대한 보행자의 출발인지반응시간이 0.15초 정도 빠르게 나타났다.

이는 기존 신호등은 필라멘트가 가열되어 빛을 발하는데 반해 LED 신호등은 순간적인 전자기동에 의해 빛을 발하므로 낮은 전압에도 구동이 가능하여 기존 전구식 신호등에 비해 빨리 점등되어 보행자들의 반응이 빠르다고 추정할 수 있다(〈표 6〉 참조).

2) 신호등 시인성 등에 대한 조사결과

설문은 1, 2, 3차에 걸쳐서 실시되었으며 3차 설문에서는 태양에 의한 썬팬텀이 발생하지 않는 시간대에 실시되어 썬팬텀 정도에 대한 설문은 제외되었다. 설문결과로서, 신호등의 시인성(밝기), 판독성(색상),

〈표 7〉 횡단 보행자 설문조사 결과

설문항목		응답자수 (명)	비율 (%)
시인성 (밝기)	LED가 더 밝음	467	83.8
	차이 없음	59	10.6
	전구식이 더 밝음	61	5.6
판독성 (색상)	LED가 더 진함	420	75.5
	차이 없음	62	11.2
	전구식이 더 진함	74	13.3
인식 정도	LED가 더 인식하기 쉬움	370	66.6
	차이 없음	147	26.4
	전구식이 더 인식하기 쉬움	38	6.8
	무응답	1	0.2
썬팬텀 정도	LED가 더 심함	53	13.8
	차이 없음	111	28.8
	전구식이 더 심함	219	56.9
	무응답	2	0.5

인식도에 대해서 기존 신호등에 비해 각각 83.8%, 75.5%, 66.6%가 더 밝고, 더 진하고, 더 인식하기가 쉽다고 하였으며 썬팬텀 정도에 있어서는 50% 이상이 심하지 않다고 응답하여 전체적으로 LED 신호등이 기존 신호등에 비해 훨씬 더 우월하다고 나타났다(〈표 7〉 참조).

V. LED 신호등 경제성 분석

LED 신호등에 대한 경제성 분석을 위해서 계량화가 가능한 신호등 설치비용, 전기료, 유지보수 비용 등의 항목에 대한 기본적인 검토를 하였다. 분석방법은 신호등 설치와 같은 공공투자정책의 효과가 시간대별로 서로 다르게 발생하는 것을 고려해야 하기 때문에 일정한 한 시점을 평가기준 시점으로 정하는 순현재가치법을 적용하여 경제성 분석을 실시하였다.

1. 설치비용

기존 전구식 신호등과 LED 신호등의 경제성 분석을 위해 차량용 3색 신호등에 대한 비용 측면을 우선적으로 살펴보았다. 먼저 제작·설치비용에 있어서 기존 신호등은 적색, 녹색, 황색의 구분 없이 쉐, 반사경, 렌즈, 전구 등에 대한 제작·설치비(지주 제외)가 신호등 1개당 15만원으로 총 45만원 정도의 비용이 소요된다. 반면에 LED 신호등은 신호등화의 색상을 나타내는 발광소자(LED) 자체의 비용에 따라 가격의 차이가 있다.

LED 신호등의 경우는 쉐는 먼지 등에 의한 신호등의 오염방지 등을 위해 활용될 수 있지만 반사경이나 렌즈가 필요치 않기 때문에 LED 자체의 비용이 신호등 설치비용이라고 할 수 있다. 각 색상별로 살펴보면, 녹색등은 약 50만원, 황색과 적색등은 각각 15만원 정도로, 차량용 3색 신호등에 대해 총 80만

원 정도가 소요된다. 따라서 LED 신호등은 기존 신호등에 비해 약 1.7배의 설치비용이 소요된다. 참고로 기존 및 LED 신호등의 설치비용은 모두 신호등을 설치·관리하는 수요자 입장에서의 실제가격, 즉 시장가격이다.

2. 내구연한

일반적으로 전구의 수명이란 초기의 70%까지 저하되는데 소요되는 시간으로써 이를 정격수명이라고 하며 전구의 광속에 관계없이 점등되는 총시간의 수명을 점등수명이라고 한다.

기존 신호등에 사용되는 백열전구의 수명은 교통안전시설실무편람에서 연속 점등시 4,000시간으로 규정하고 있으며 이를 정격수명 4,000시간(약 6개월)으로 간주하고 점등수명은 약 4~5년¹⁾으로 추산된다. 또한, 우리나라의 신호등용 백열전구는 전부 외국제품을 사용하고 있으며 전구 1개당 가격은 약 2,000원으로 환율변동에 따라 가격의 차이가 있다.

LED 교통신호등의 수명은 외국 실험자료에 의하면 반영구적이라고 알려져 있으며 일반적으로 정격수명 6년, 점등수명은 20년 이상으로 추정하고 있다.

3. 유지보수비용

내구연한을 고려한 유지보수 측면을 살펴보면, 기존 전구식 신호등은 내구연한 기준으로 연속점등시 전구수명이 4,000시간(실제 운영에서는 점등 및 소등을 번갈아 하므로 이보다 수명이 단축될 수 있음)으로 1년에 최소한 2회는 교체를 해주어야 정상적인 광도 및 색도를 나타낼 수 있다.

전구식 신호등의 교체에 소요되는 비용은 크게 전구 자체비용과 전구 교체비용으로 구분될 수 있으며 일반적으로 1회 교체에 총 13,464원²⁾이 소요된다. 따라서 전구식 3색 차량 신호등의 경우, 전구의 정격수명을 고려할 때 각 등당 2회, 총 6회의 전구 교체가 필요하다. 기타 유지보수 항목으로 쉐, 반사경 교체 및 보수, 교통통제 등을 위한 장비 사용, 인건비 등을 고려하면, 차량용 3색 신호등두 1개당 1회 유지

보수 비용은 최소 10만원이상이며 연간 20만원 이상이 소요된다.

서울시의 경우, 전구교체에 따른 인건비, 장비 사용료 등을 제외한 유지보수 비용은 대부분 전구교체 및 단선 수리비용이다. 1998년 현재 서울시의 신호등 지주는 약 25,000개로 1년에 유지보수 비용이 약 80억원이 소요되어 신호등 지주 1개당 32,000원이 소요된다고 할 수 있다.

참고적으로 외국의 경우는 기존 전구식 신호등의 1회 유지보수에 차량 정체비용을 포함하여 '97년도에 45만원정도 소요되지만 LED 신호등은 수명이 반영구적이므로 최소 5년 이상 내구성을 갖고 있어 고장에 따른 유지보수 비용은 거의 들지 않는다고 할 수 있다.

4. 전력소모 비용

기존 신호등은 차량등 100W, 보행등 60W의 전구를 사용하고 있으며(교통신호등 규격, 교통안전시설실무편람, 1996.) LED 신호등은 녹색의 경우 20W, 적색과 황색의 경우는 15~20W 정도의 전력이 소모된다. 최근에는 녹색의 경우 8W로서도 등화시킬 수 있는 LED가 개발이 완료되어 생산단계에 있으며 녹색화살표시의 경우는 4W 정도만 소모가 된다. 따라서 LED 신호등은 차량용 또는 보행자용의 구분이 없이 각 신호등화당 평균전력소모량을 17.9W³⁾로 간주할 수가 있으며, 기존 전구식 신호등에 비해 전력소모가 보행자용 30%, 차량용 19% 정도에 불과하다고 할 수 있다.

교통신호등의 전기요금은 공공시설물로 간주하여 야간에만 점등되는 가로등의 요금체계(12시간 점등 기준)와 같은 전력소모량-월 당 21.3원('98년도 기준가격)이다. 그러나 교통신호등의 경우 가로등과는 달리 주·야간 계속 점등함으로써 2배를 곱한 42.6원/W·월을 단위 전기요금으로 하여 계산한다.

신호등에 있어서 차량용 신호등면 1개당 3색등이 부착되어 있다고 가정하고 서울시 전체의 신호등 개수의 30% 정도를 차지하는 경보등, 가변신호등은 제외하였다. 하나의 차량용 신호등면은 적·녹·황색의

1) 1996년, 대전광역시 신호등 교체 실적 기준

2) 한국용용통계원, '97년 교통신호시설기자재 단가 및 원가 조사보고서

3) 도로교통안전관리공단 실내실험검증결과

〈표 8〉 서울시 교통신호등면 설치 현황

연도	차량용 신호등면수	보행자용 신호등면수
1997	24,576개	10,200개

자료) 서울지방경찰청 교통관리과, 1997년말 현재.

등화표시가 교대로 점등되므로 기존 전구식 신호등의 경우, 신호등 전기요금 산출시 차량용 신호등면의 3색등을 1식으로 100W, 보행자 신호등면은 2색등을 1식으로 60W로 계산하고 LED 신호등은 차량용, 보행자용 신호등면 각각 1식을 17.9W로 간주하여 전기요금을 산정한다.

1997년 말 현재 서울시 교통신호등면 설치 현황은 〈표 8〉과 같다.

따라서, 신호등면 수 (N), 소비전력 (W), 단위 전기요금 (P=42.6원/W·월)라고 할 때 연간 전력소모량과 전기요금의 산정은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다. 여기서 12는 12개월/1년을 나타내며 1.1은 부가세 10%를 고려한 것이다.

$$\text{연간전력소모량} = 12 \times N \times W \quad (1)$$

$$\text{연간전기요금} = (\text{연간전력소모량} \times P) \times 1.1 \quad (2)$$

이상과 같은 방식에 의하여, 기존 전구식 신호등으로 운영시 서울시의 연간 전기요금은 차량용 신호등의 경우 13억8천1백만원, 보행자용은 3억4천4백만원으로 총 전기요금이 16억2천5백만원으로 추정된다. 만약 이를 LED 신호등으로 교체할 경우 연간 전기요금이 차량용은 2억4천7백만원, 보행자용은 1억2백여만원으로 총 3억5천만원으로 추정되어 기존 전구식 신호등에 비해 12억7천5백만원 (전구식 신호등의 78.4%)의 절감효과가 있다고 할 수 있다.

이러한 결과는 외국의 실험결과 즉, 외국의 실험지역의 전기요금 등에 따라 다르지만 전반적으로 약 80~85%의 절감효과와 비슷한 것이다.

참고적으로 서울시에서 신호등(차량등, 차량 보조 신호등, 보행자등, 경보등, 가변신호등 포함)의 전기요금은 월 1억2천만원으로 연간 14억4천만원 정도를 지불하고 있는 것으로 조사되었는데, 계산에 의한 결과 값과 이 실제 지불금액과 차이가 있는 것은 교통

〈표 9〉 전국 교통신호등면 설치현황

연도	차량용 신호등면수	보행자용 신호등면수
1997	107,722개	48,766개

자료) 경찰청, 도로교통안전백서, 1998.

신호등의 전력요금이 서울시 각 지역별로 한국전력 각 지점과 계약하고 또한 신호등두수에 대한 계산이 정확히 이뤄지지 못했기 때문이다. 또한, 전국 교통신호등 설치현황은 〈표 9〉와 같으며 서울시 경우와 같은 계산방법으로 전국적으로 LED 신호등 교체시의 에너지 절감비용을 산출하여 보았다.

전구식 신호등의 경우, 차량용은 연간전기요금 60억5천7백만원, 보행자용은 16억4천5백만원이 소요되어 총 전기요금이 77억2백만원인 것으로 산출되었다. 반면, 이를 LED 신호등으로 교체하는 경우 차량용 전기요금은 연간 10억8백만원, 보행자용은 4억9천만원으로 총 전기요금이 연간 14억9천8백만원으로 나타났다. 따라서, 전국적으로 기존 전구식 신호등을 LED 신호등으로 교체할 경우 전기요금 절감액은 약 62억4백만원으로 약 80.5%의 전력절감 효과가 예상된다.

5. LED 신호등 교체시 비용/편익 분석

서울시에 국한해서 기존 전구식 차량등을 LED 신호등으로 교체공사를 실시할 경우 비용/편익 및 자본회수기간을 분석하여 보았다. 서울시의 경우 차량용 3색등이 부착된 신호등면수를 1997년말 현재 24,500개라고 가정하고 1개의 신호등면당 LED 신호등 교체 공사비를 80만원이라고 할 때 총 196억원의 공사비용이 소요되며, 이를 5개년동안 연차적으로 집행⁴⁾한다고 계획하면 매년 39.2억원의 교체비용이 투입되어야 한다.

유지보수 비용에 있어서는 기존 전구식 신호등으로 계속 운영하는 경우 매년 80억원씩 5개년간 총 400억원의 유지보수 비용이 소요되지만 LED 신호등으로 교체하는 경우는 LED의 반영구성과 지주 및 단선 등의 유지보수가 거의 필요치 않는 내구연한으로 유지보수 비용이 분석기간동안 들지 않는다고 가정할 수 있다. 또한, 전기요금에 있어서는 LED 신호등의 교

4) 1차년도: 강북(1/5), 2차년도: 강남(1/5), 3차년도: 강북(1/5), 4차년도: 강남(1/5), 5차년도: 영등포(1/5)

〈표 10〉 연차별 소요예산에 대한 현재가 환산결과 (단위: 억원)

구분	비용/ 편익	항목	연차별						총액	
			1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도		
기존 신호등 계속 운영시	비용	전기 요금	할인을 적용전	16.3	16.3	16.3	16.3	16.3		81.5
			할인을 적용후	16.3	14.6	13.0	11.6	10.4		65.8
		유지 보수비	할인을 적용전	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0		400.0
			할인을 적용후	80.0	71.4	63.8	57.0	50.8		323.0
	편익		-	-	-	-	-		-	
	LED 신호등 연차적 교체시	비용	교체 공사비	할인을 적용전	39.2	39.2	39.2	39.2	39.2	0
할인을 적용후				39.2	35.0	31.3	27.9	24.9	158.3	177.3
편익		전기 요금	할인을 적용전	-	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	30.0
			할인을 적용후	-	1.8	3.2	4.3	5.1	5.6	20.0
		유지 보수비	할인을 적용전	-	16.0	32.0	48.0	64.0	80.0	240.0
			할인을 적용후	-	14.3	25.5	34.2	40.7	45.4	160.1

* "할인을 적용전"은 연차별 투입금액이며, "할인을 적용후"는 연차별 투입예산에 할인율(12%)을 적용한 '98년도 현재가로 환산한 금액임.
편익: LED 신호등으로 교체한 후의 비용절감금액을 말함.

체에 따른 전체적인 전기요금 편익은 차량등의 경우 최소한 연간 약 10억원(실제 계산값 10.3억원)씩 발생한다고 할 수 있으며 이를 5개년간으로 나누어 교체하는 경우 매년 2억원씩의 편익이 누적되어 발생한다고 할 수 있다.

따라서 기존신호등을 LED 신호등으로 교체공사에 대한 비용/편익 계산시 할인율을 12%⁵⁾로 가정하고 기존신호등의 유지보수 및 LED 신호등 교체시의 정체비용을 고려하지 않고 '98년도 현재가로 환산하였으며 편익은 LED 신호등 교체 후 익년도부터 발생하고 유지보수비용은 '98년도 예산 배정액을 기준으로 한 연차적 편익이다 (〈표 10〉 참조).

1) 기존 신호등으로 계속 운영하는 경우

기존 신호등으로 계속 운영하는 경우에 5개년간의 비용과 편익을 추정한 결과, 초기투자비용은 없으나 전기요금과 유지보수 비용 측면에서 할인율 12%를 고려한 1998년도 현재가로 환산한 결과 5년간 총 투입되는 비용은 전기요금과 유지보수비용의 합으로 388.8억원이 소요될 것으로 판단된다. 이는 전기요금과 유지보수 비용을 각각 '98년도 현재 단가 및 책정 예산을 기준으로 하여 연차적으로 단가 및 예산의 변동이 없이 집행된다고 가정한 것이며, 할인율 및 공공요금의 인상요인이 발생하는 경우에는 비용이 더

증가할 것으로 추정된다. 반면, 편익 측면에서는 전기요금이나 유지보수 비용이 계속 일정하게 투입되어야 하므로 편익이 발생하지 않는다고 할 수 있다.

2) LED 신호등을 연차적으로 교체하여 운영하는 경우

서울시의 기존 신호등 전체를 LED 신호등으로 교체하는 경우 차량용 3색 신호등면 1개당 약 80만원으로 총 196억원이 소요되지만 이는 현실적으로 어려우므로 5개년간 연차적으로 나누어 교체하는 경우 할인율을 적용하여 1998년 현재가로 계산하면 교체공사 비용으로 총 158.3억원이 소요된다.

LED 신호등으로의 교체에 따른 편익은 크게 두 개의 항목, 전기요금과 유지보수 비용의 절감으로 구분될 수 있다. 전기요금 절감비용은 총 30.0억원으로 할인율을 고려하여 '98년도 현재 기준으로 산출하면 총 20억원이 된다. 또한 유지보수 비용은 교체 설치 후 약 10년간 거의 필요하지 않으므로 매년 기존 신호등 유지보수 비용의 1/5, 즉 20%씩 절감된다고 할 수 있으며 유지보수 측면의 편익은 총 160.1억원이 된다. 따라서 서울시의 경우 LED 신호등으로의 교체에 따른 총 편익은 전기요금과 유지보수 비용 절감액의 합으로 '98년도 현재가로 할 때 총 180.1억원이 된다.

결론적으로, 서울시의 경우 기존 신호등으로 계속

5) 공공투자사업시의 세계은행 (IBRD) 공식할인율

운영시는 1998년도 현재가 기준으로 5개년간 총 388.8억원의 비용이 소요되고 편익은 전혀 발생하지 않는다. 그러나 5년동안 연차적으로 기존 전구식 신호등을 LED 신호등으로 교체시 비용이 158.3억원이 소요되지만 전기요금 및 유지보수 비용의 절감으로 인한 편익이 180.1억원이 발생한다. 따라서 전구식 신호등으로 계속 운영하는 것보다 5개년 동안 연차적으로 전구식을 LED 신호등으로 교체하는 대안이 보다 더 효과적이라고 할 수 있다.

LED 신호등으로 교체한 후 6차년도의 경우 5차년도까지의 총 교체설치비용 161.5억원에 대한 1년간의 이자율을 고려하면 177.3억원이 되며 편익은 180.1억원이 된다. 즉, 6차년도부터 편익이 비용을 초과하여 발생하므로 자본회수기간을 6년으로 간주할 수 있다.

그러나 이러한 값은 이론적인 계산결과이므로 기존 신호등 전기요금 원가의 낮은 책정, 전기요금의 인상, 신호등 고장수리시의 차량정체비용, 교통사고비용 등의 사회경제적 비용을 무시하고 산출한 값이며 향후 전자기술의 급속한 발달로 인하여 LED 제조 단가의 하락(현재 LED 소자가격은 3년 전에 비해 1/3가격임) 등의 비용총액이 신호등두당 설치비용의 1/2이상 이므로 LED 신호등 설치에 따른 자본회수기간은 훨씬 더 단축된다고 할 수 있다⁶⁾. 따라서 전구식 신호등을 LED 신호등으로 교체 설치하는 것이 비용/편익 분석결과 경제적 타당성이 있는 것으로 판단된다.

3) 민감도 분석 (Sensitivity Analysis)

본 연구의 경제성 분석에서는 전기요금, 유지보수비 (인건비 포함), 공사비 등과 같은 매개변수 값들이 시간에 따라 변화하는 것이 아니라 일정한 것으로 가정되었다. 그러나 현실적으로는 이러한 매개변수들은 기술적, 사회·경제적 여건에 따라 변화하게 되고 경제성 분석에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 매개변수의 변화에 따른 경제성 분석 결과에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

분석결과, 전기요금의 인상폭이 클수록 순편익은 증가하며 이는 LED 신호등의 전력절감효과에 기인한 것으로 판단되며 설치공사비 인상시 순편익이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 LED 신호등의 설치공사

〈표 11〉 LED 교통신호등에 대한 민감도 분석결과

구분	비용	편익	순편익
비용항목 단위가격들이 불변일 때	158.3	180.1	21.8
전기요금 10% 인상시	158.3	182.1	23.8
설치공사비 10% 인상시	174.1	180.1	5.9

비용항목 20% 인상의 경우 (단위:억원)

구분	비용	편익	순편익
비용항목 단위가격들이 불변일 때	158.3	180.1	21.8
전기요금 20% 인상시	158.3	184.1	25.8
설치공사비 20% 인상시	190.0	180.1	9.9

비가 20%이상 증가할 때는 기존 신호등을 LED 신호등으로 교체하는 대안은 바람직하지 못하다고 판단된다. 그러나 향후 LED 신호등의 설치비용은 전자기술 발달에 따라 계속 하락할 것이므로 LED 신호등의 경제성 분석은 타당하다고 할 수 있다.(〈표 11〉 참조)

6. 기타 추가적 편익

기존 전구식 신호등을 LED 신호등으로 교체 설치시 여러 가지 추가적인 편익이 발생한다.

첫째, 외부광선 (햇빛 등)에 의해 등화 구분이 모호한 경우의 발생이 적어진다. 기존 전구식 신호등은 반사경에 반사되는 빛이 착색렌즈를 통하여 발산됨으로써 신호등의 점등여부가 모호한 경우가 발생한다. 따라서 태양과 같은 외부광선이 신호등면에 비추질 때 마치 등화된 것처럼 보여져 적색, 녹색, 또는 황색의 등화 구분이 모호한 상태가 발생하게 된다. 이러한 현상을 허상현상(Sun Phantom Effect)이라고 하며 운전자들로 하여금 잘못된 판단과 행동을 하게 할 수 있으며 그에 따라 교통사고를 유발시킬 수 있다. 그러나 LED 신호등은 반사경이 필요하지 않고 단일색상을 발광하는 특성을 가지고 있기 때문에 이러한 신호등화 표시의 잘못된 인지, 판단 및 행동을 제거하여 그에 따른 교통사고 발생 및 위험성이 줄어들 것으로 판단된다. 따라서 이러한 교통사고 발생건수 및 발생가능성의 감소로 추가적인 편익이 발생할 것⁷⁾이다.

6) 영국의 경우 기존신호등의 유지보수시 차량정체비용 등 사회적 손실비용을 고려하여 자본회수기간을 2년으로 산출한 연구결과를 도출함.

7) 일본 도쿠시마 실험결과 참조

둘째, LED 신호등은 환경 친화적이다. 전구식 신호등은 백열전구에 의해 높은 열을 발생시켜 공기 중의 먼지 등을 태워 분진 등을 발생시킴으로써 그에 따라 대기환경에 영향을 미친다. 그러나 LED 신호등은 LED 자체의 발열이 적음에 따른 분진이 적고 적은 소모전력으로 인한 발전용량의 소형화로 CO₂, SOX, NOX와 같은 대기오염물질의 저감효과를 기대할 수 있다.

셋째, LED 신호등은 외부 입력전압의 변화에 대한 대처능력이 뛰어나다. 예를 들어, 유럽의 실험에서는 기준 전압 230V에서 89V로 강하되어도 정상적인 기능을 수행하는 것으로 나타났다. 또한, LED 신호등은 전력소모가 적어 제어기 내부에 15만원 가격의 축전기를 설치함으로써 24시간 이상의 전원공급이 가능하기 때문에 전원공급이 중단되는 정전상태에 대해서도 신호등을 구동할 수 있는 장점을 갖는다.

그밖에도, LED 신호등은 반사경과 전구가 불필요하기 때문에 합체의 두께를 얇게 할 수 있어 신호등 두 및 지주의 경량화가 가능하여 신호등 설치비용을 줄일 수 있다.

VI. 결론

본 연구는 광원으로 백열전구를 사용하는 기존 전구식 신호등과 LED라는 반도체 소자를 이용한 LED 신호등에 대해서 그 특성을 비교하고 실험을 통하여 현장적용성과 에너지절감효과를 검증하였으며 이에 따른 경제성 분석을 실시하였다.

LED 보행자 신호등에 대하여 현장 적용성을 평가한 실험 결과는 LED의 단일색상 발광특성으로 선명한 신호등화의 색상을 표시함으로써 기존 신호등에 비해 시인성, 판독성, 인식정도, 그리고 외부광선과 주변 밝기에 의한 썬팬텀 현상이 적어 우월하다고 나타났다. 또한 횡단보도 보행자들의 출발인지반응시간은 점등시간이 빠른 LED 신호등이 기존 전구식 신호등에 비해 0.15초 정도 더 빠르게 나타났다. 또한 LED 교통신호등의 에너지 절감효과를 검증한 결과로 기존 전구식 신호등에 비해 75.8%의 전력 절감효과가 있다고 나타났으며 이러한 결과는 외국의 경우와도 비슷하다.

서울시의 기존 전구식 신호등을 LED 신호등으로 5년간 연차적으로 교체시 전기비용 및 유지보수 비용의 절감 등으로 경제적으로 타당성이 있다는 결과를

도출하였다. 그리고 LED 신호등으로 교체시의 초기 자본회수기간은 6년으로 나타났으나 기존 신호등 교장시의 차량정체비용, 교통사고비용, LED 가격하락, 전기요금 상승 등의 요인을 고려하면 자본회수기간은 단축된다고 판단된다. 이와 같이 기존 신호등을 LED 신호등으로 교체하는 것이 경제적으로 타당하지만, 현실적으로 LED 신호등을 도입하여 현장에 설치하기 위해서는 다음과 같은 사항들이 우선적으로 검토되어야 할 것이다.

첫째는 LED 신호등 규격서 제정이다. 기존 신호등 규격은 전구식 신호등에 대한 기준이며 이 규격을 LED 신호등에 직접 적용하기에는 LED 신호등의 전기·광학적 특성으로 인하여 불가능하다. 따라서 LED 신호등의 기술개발 및 향후 현장보급 등을 위해서는 LED 신호등의 광도, 색도 기준 및 품질을 보증하기 위한 검사방법 등에 대한 규격서 제정이 시급한 실정이다. 규격서 제정작업이 선행되지 않을 경우 연구소와 산업체 등에 제품 개발방향을 명확히 제시하기가 어려워 기술확보 측면에서 국가 경쟁력이 저하될 우려가 있다. 또한 규격서 제정작업은 단기간 안에 수행될 문제가 아니므로 향후 LED 신호등 도입을 대비해서라도 국내 교통환경에 적합한 LED 신호등에 관한 규격을 제정하여 이에 적합한 LED 신호등을 보급하는 것이 중요하다. 이와 관련하여 경찰청과 본 공단은 산업자원부 지원 하에 「LED 교통신호등 규격(안) 연구」를 '98년 8월부터 3개년 사업으로 연구수행 중에 있다.

둘째, 현장실험에 의한 LED 교통신호등의 안정성 평가이다. 기존의 실험평가는 보행자 신호등에 국한해서 수행된 실험이었다. 따라서 LED 차량 신호등을 도로 현장에 설치하여 국내 도로환경에 대한 장기적인 적용성 실험 평가가 이뤄져야 하며 그에 따른 안정성 및 기대효과를 면밀히 분석한 다음 단계적으로 보급되는 것이 바람직하다.

결론적으로, 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 할 때 LED 교통신호등의 도입 타당성은 있다고 할 수 있다. 그러나 도로 현장에 대한 실험평가가 보행자 신호등에 대해서만 이뤄진 것으로 추후 차량 신호등에 대해서도 현장 설치를 통해 운전자들의 직접적인 반응을 조사, 장기적인 현장 적용성 실험 평가를 실시하여야 할 것이다. 또한 LED 신호등의 성능 및 외형에 대한 제도적 규격 제정이 이뤄져야 할 것이다.

참고 문헌

1. 경찰청, 도로교통안전백서, 1998.
2. 경찰청, 교통안전시설실무편람, 1996.
3. 도로교통안전관리공단, 신호등, LED 교통신호등 현장실험평가연구 上, 1999, 4.
4. 도로교통안전관리공단, 신호등, LED 신호등 국내외 기술동향 下, 1999, 5.
5. 김홍배, 비용편익분석론, 홍문사, 1997.
6. 원제무, 정책분석기법, 박영사, 1996.
7. 대전광역시, LED 교통신호등 개발 및 보급 타당성 연구보고서, 1998.
8. Institute of Transportation Engineers, Vehicle Traffic Control Signal Heads, 1985.
9. Institute of Transportation Engineers, Light Emitting Diode (LED) Vehicle Traffic Signal Modules, 1998.
10. David Houghton, LED Traffic Lights : New Technology Signals Major Energy Savings, E SOURCE TECH Update, TU-94-1, 1994.
11. Chris Calwell, LED Traffic Lights : Test Results Given Green Light for Additional Installations, E SOURCE TECH Update, TU-95-14, 1995.
12. Traffic Engineering and Control, Prentice-Hall Limited in England, 1996.
13. John O'Connell, The Philadelphia Story : Five Years of LED Traffic signal Development, Traffic Technology International, 1997.
14. Gary Durgin, Precision Lensing : A Critical Factor in LED Implementation, Traffic Technology International, 1996.