

가변 전기요금 기반의 조명 제어기법에 관한 연구

윤정아*, 김광호**
강원대*, 강원대**

A Study of Lighting Control in TOU Electricity Pricing Environment

Jeong-A Yun*, Kwang-Ho Kim**
Kangwon University*, Kangwon University**

Abstract - 본 연구에서는 일반 사무 건물을 대상으로 주광을 이용하여 작업 시 조도에 따른 사용자의 만족도를 높이고 가변 전기요금에 따른 요금을 절감 하는 최적의 조도를 설정하여 조광을 제어하는 방식으로 조명 에너지를 절감하는 기법을 제안한다.

1. 서 론

전기 에너지 사용량 점차적으로 늘어남에 따라 에너지 절감을 위한 효율적인 에너지 사용 대한 많은 방법들이 도출되고 있다. 우리나라의 경우 전체 에너지 사용량의 약 30%를 건물에서 소비하고 있으며, 일반적으로 건물에서 조명에 소비되는 에너지는 총 에너지의 30% 이상을 차지하고 있다. 따라서 조명 에너지 절감은 전체적인 에너지 절감에 기여가 클 것으로 기대된다. 하지만, 적정 조도를 고려하지 않은 절감은 작업 능률을 떨어뜨릴 수 있으므로 적절한 조도를 유지하는 상태에서 효율적인 조명 에너지 관리가 필요하다.

이에 본 연구에서는 TOU(Time Of Use) 요금 체제 기반 하에 일반 사무 건물을 대상으로 조도에 따른 만족도를 설정하고, 이에 따라 실내 등 기구의 밝기를 조절하는 방법으로 조명 에너지를 절감하는 최적의 조명 에너지 관리를 제안한다.

2. 본 론

2.1 조명 에너지 관리 기법

조명 에너지는 적정 실내 조도를 설정하여 조광 제어를 함으로써 에너지 절감을 실행할 수 있으며, 생산 비용이 들지 않는 주광을 이용하면 절감률을 극대화시킬 수 있다. 하지만 실내조도는 작업 능률에 영향을 미치므로 사용자 만족도를 고려하여 실내조도를 적절히 관리하여야 한다. 따라서 주광과 사용자 만족도를 충족하는 범위에서 실내 조도를 유지하는데 필요한 전력량을 산출한다.

2.2 최적 실내조도 결정 함수

TOU 요금 및 주광에 따라 전기 요금을 최소화 하고 사용자 만족도를 최대화 하는 시간당 최적의 기준조도($E_u(t)$)를 산출하기 위한 함수식을 다음과 같이 산출하였다.[1]

Minimize Cost

$$C_t = \sum C(t) \cdot [P_{light}(t) + (U(t) \times A_t/n) \times t_g] \quad (1)$$

s.t

$$0 \leq E_n(t) \leq 600 \quad (2)$$

- 여기서,
- C_t : 일일 조명 전기요금[원]
 - $C(t)$: t 시간 전기요금 단가 [원/kWh]
 - $P_{light}(t)$: t 시간 조명에 사용한 전력량 [kWh], $= E_n(t) \times A_t/n$
 - if $E_u(t) \leq Ed(t)$
 $E_n(t) = 0$
 - else
 $E_n(t) = E_u(t) - E_d(t)$
 - $E_u(t)$: t 시간의 기준 조도[lx], 최적화 변수
 - $E_d(t)$: t 시간에 실내로 유입되는 주광 조도 [lx]
 - $E_n(t)$: t 시간의 조명 조도[lx]
 - $U(t)$: t 시간 조도에 따른 사용자 불만족도
 - A_t : 사무 공간의 면적 [m²]
 - n : 전등 효율
 - t_g : 시간별 가중치

위의 식(1)에서 첫 번째 부분은 각 시간당 주광조도($E_d(t)$)를 차감한 조명조도($E_n(t)$)에 따른 조명의 전력량이며, 두 번째 부분은 조도에 따라 발생하는 사용자의 불만족도에 따른 페널티 요금을 부과하기 위한 부분이다. 또한 사용자의 만족도는 시간별 가중치 t_g 를 도입하여 출근, 점심시간 등 스케줄에 따른 만족도를 조절하였다. 따라서 근무시간에는 높은 조도를 적용하고, 그렇지 않은 시간대에는 조도를 낮춤으로써 효율적인 운영을 가능하도록 하였다.

2.3 주광조도 산출

주광의 영향을 측정하기 위하여 주광의 조도 값을 사용하였으며, 실내로 유입되는 주광 조도를 구하기 위하여 시간별 일사량을 이용하여 다음과 같은 식을 산출하였다.[1][2](3)

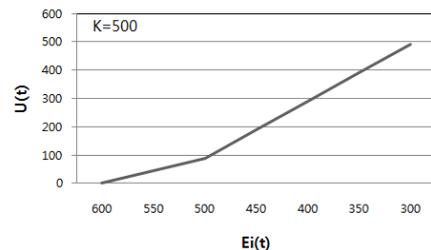
$$E_d(t) = \frac{I_d \times A_w \times \tau \times f \times c \times l}{A_t} \quad (3)$$

여기서,

- I_d : 천공 상태를 고려한 일사량 [MJ/m²]
- A_w : 창문의 면적 [m²]
- τ : 창문의 투과율
- f : 실내의 형태계수
- c : 조도 변환 계수
- l : 거리에 따른 영향 계수

창문과 각 지점 사이의 거리마다 주광이 미치는 영향에 대하여 차이가 있으므로, 창문으로부터 등기구의 거리에 따른 영향 계수를 두었다. 거리에 따른 영향 계수는 천공 상태에 따라 약간의 차이를 보이므로 그에 따라 계수 값이 달라진다.[3]

2.4 조도에 따른 만족도



<그림 1> 실내조도에 따른 만족도

우리나라에서 일반 사무 공간의 조도 기준이 300-400-600[lx]이므로 최대의 만족도를 갖는 조도 값을 600[lx]로 설정하여, 600[lx]와 실내조도사이 차이 즉, 포기하는 조도를 불만족도의 크기로 설정하였다.(4)

$$U(t) = r(t)(600 - E_i(t)) \quad (4)$$

여기서,

- $U(t)$: t 시간 실내조도에 따른 사용자 불만족도
- $r(t)$: t 시간 사용자 만족도 계수
- if $E_u(t) \leq k$
 $r(t) = a$
- else
 $r(t) = b$
- k : 사용자 만족 기준 조도

$$E_i(t) : \text{실내 조도 [lx]}$$

$$\text{if } 600 \leq E_d(t)$$

$$E_i(t) = 600$$

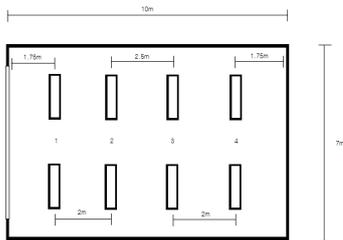
$$\text{else}$$

$$E_i(t) = E_u(t)$$

사용자 만족 기준 조도 k 는 300-600[lx]의 범위 내에서 사용자가 만족하는 조도의 기준을 설정하도록 하고 실내조도가 설정된 만족 기준 조도보다 높은 경우 작은 r 값을($a=0.9$)을 상환하고, 실내조도가 설정 조도보다 낮은 경우 큰 r 값($b=2$)을 상환하도록 하여 그림1과 같이 불만족도의 증가량 가변함으로써 식(1)에서의 만족도 페널티 요금을 조절한다.

2.5 모의실험

이 장에서는 제안된 기법의 효과를 검증하기 위하여 다음의 모의실험 결과를 제시한다. 모의실험에 사용한 공간은 그림 2와 같은 사무 공간을 대상으로 규격은 표 1과 같다. 모의실험 기간은 주광의 영향을 많이 받는 여름철인 2010년 08월 07일로 선정하였으며, 제어 시간은 근무 시간인 오전 8시부터 오후 8시로 설정하였다. 사무 공간이 위치한 장소로는 서울을 가정하였다. 가변 요금제인 TOU는 현재 건물 대상으로 적용 중인 계시별 요금제 일반용(을)을 적용하였다.

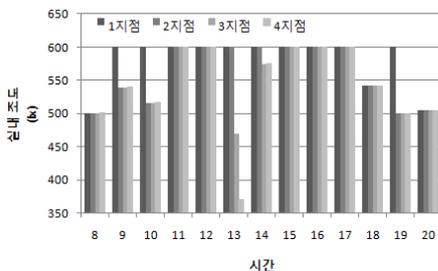


〈그림 2〉 모의실험 사무 공간의 조명배치도

〈표 1〉 모의실험 사무 공간의 규격

사무실 크기	7×10×2.7(m)
작업면 높이	0.75(m)
창문 크기	6×1.8(m)
실내 반사율	천장 80%, 벽 50%, 바닥 20%
창문 반사율 및 투과율	$\rho=0.08, \tau=0.89$
등 종류	FLR32W×2 (자동 디밍회로 내장)
감광 보상률	1.5
광속 유지율	80(%)

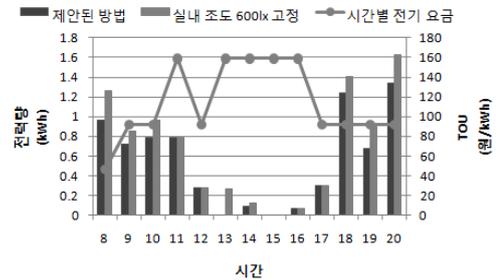
모의실험에서 $k=500$ [lx]로 하였으며, 결과는 다음과 같다. 그림 3은 창문으로부터 등기구가 위치한 각 지점의 시간 별 실내 조도를 보여준다. 창문과 가장 가까이 위치한 1지점은 주광의 영향을 가장 많이 받는 지점으로 대부분의 시간에서 만족도가 최대가 되는 조도인 것을 볼 수 있다. 대부분의 조도가 외부에서 유입되므로 실내 조도를 600lx로 설정한다 하여도 1지점의 전력 사용량이 거의 없는 것을 알 수 있다. 반면에 4지점에서는 실내로 유입되는 주광 조도가 적으므로 실내 조도를 조금 낮게 설정한 것을 확인할 수 있다. 13시에는 점심시간을 고려하여 시간 가중치를 적게 두어 자동 소등을 하였다. 그럼에도 실내 조도 값이 나타난 것은 이 시간대 실내로 유입되는 주광 조도의 영향 때문이다.



〈그림 3〉 각 지점의 시간 별 실내 조도

그림 4는 시간 별 전기 요금과 조광 제어를 했을 때의 사용 전력량을 보여준다. 조광 제어 방법은 앞서 제안된 시간 별 실내 조도 변경 방법과 주광을 이용하면서 만족도가 항상 최대가 되도록 실내 조도를 600lx로 고정된 경우를 비교하였다. 주광 영향을 많이 받는 시간대에는 대부

분의 조도가 주광으로부터 유입되기 때문에 두 방법에 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 또한 두 방법 모두 전기 요금과 대비되는 성향을 보였다. 주광을 이용한 조명 제어는 요금이 비싼 낮 시간대에 전력 소비가 적게 나타나기 때문에 기타 부하의 제어보다 효율적인 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 시간 별 전력 사용량 및 전기 요금

표2는 조광 제어를 하지 않고 근무 시간에 소등을 하지 않는 기존의 경우와 주광을 이용하고 실내조도를 600lx로 고정하는 경우, 주광을 이용하고 사용자 만족도와 전기 요금에 따라 실내 조도를 최적으로 산출하여 조광을 제어하는 경우의 전체적인 전력 사용량 및 전기요금의 산출 결과를 비교한 것이다.

〈표 2〉 기존 방법과 제안된 방법의 비교 결과

	기존 방법	600lx 고정	제안된 방법	절감률(%)
사용자 만족도(%)	67	100	87	
전력 사용량 [kWh]	19.96	8.84	7.25	63.68
전기 요금 [kWh/원]	2283.87	841.57	688.3	69.86

주광을 이용하는 경우 기존의 주광을 이용하지 않는 경우에 비하여 전력 사용량과 전기 요금이 모두 절반 이상 절감할 수 있는 결과를 보였다. 실내 조도를 600lx로 고정된 경우 사용자 만족도는 항상 최대가 되겠지만, 사용자 만족도 범위 내에서 조광제어를 했을 때 비하여 전력량 18% 증가되고, 전기 요금이 18.2% 더 증가하는 것을 확인할 수 있다. 주광을 이용하면서 전기 요금을 최소화하는 조광 제어의 경우 전력 사용량이 63.68%, 전기 요금이 69.86%로 상당히 많은 절감이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 또한 기존의 방법보다 평균 조도가 높으므로 사용자의 작업 능력 향상을 기대할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 TOU 가변요금체계 환경에서 사용자의 만족도를 최대 로 충족시키는 범위에서 주광을 이용한 실내 조도 제어 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실내로 유입되는 주광을 이용하여 사용자가 만족하는 범위 내의 실내조도를 유지하며 최소한의 전기 요금을 산출하는 최적의 조도를 결정한다. 이에 따라 2.2의 모의실험의 결과로 기존의 방법에 비하여 전력 사용량 및 전기 요금이 절반 이상이 절감된 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 말한 것과 같이 요금이 비싼 낮 시간대에 주광을 이용하여 제어하므로 절감 효율이 좋기 때문에 이루어진 결과이다. 따라서 에너지 절감을 위해 조명 에너지를 절감하는 방법은 잠재력이 큰 것을 알 수 있다. 또한 적절한 실내 조도 유지는 사용자의 작업 능력을 더욱 향상시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국에너지 기술평 가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

[참 고 문 헌]

[1] 박유진, “실내로 유입되는 주광조도의 시간별 조도측정에 관한 연구”, 석사학위논문, 2007
 [2] 박유민, “일사량 분석을 통한 PV모듈 발전량과 시뮬레이션을 이용한 실내 조명에너지 절감량 비교”, 조명·전기설비학회논문지, 24권 12호, pp 123-128,, 2010
 [3] 김가영, “사무공간에서 효율적인 조광제어시스템 적용을 위한 주광 분포 연구”, 한국조명·전기설비학회 2005춘계학술대회논문집, pp 123-128, 2005. 5