

3배광법과 구역공간법의 정확도 평가

(Accuracy Evaluation of the Three-Curve Method and the Zonal Cavity Method)

심 상 만 * 춘천직업전문학교 전기과
 김 창 섭 에너지자원기술개발지원센터 팀장
 김 훈 강원대 공대 전기공학과 부교수

Abstract

The accuracy and the application limits of the Three-Curve Method(TCM) and Zonal Cavity Method(ZCM) are evaluated. Average illuminance values are calculated by TCM and ZCM for various lighting conditions using general Diffusing Luminaires and Direct Luminaires. These values are compared with the values from Monte-Carlo Simulation(MCS) for the same lighting conditions. Accuracy of MCS was proved by Moon's Analytical Method.

1. 서 론

최근 경제성장과 더불어 국민의 생활수준이 향상됨에 따라 양질의 조명설계가 요구되고 있다.

조명에 의한 밝기를 나타내는 양은 조도이며, 조도를 향상시키는 것이 작업능률의 향상과 심리적·생리적 상태의 조화를 위하여 필요하다.^{[1][2]} 특히 건축설계의 초기단계에서 인공광이나 자연광에 의한 실내면의 조도를 예측하는 것은 매우 중요하다. 그러나 조명환경의 다양성과 조명에 영

향을 주는 여러 요소들로 인하여 조명설계시 적정하고 정확한 조도계산이 매우 어렵고, 조도계산법 및 적용범위가 각국마다 다양하다.

평균조도를 구하는 계산법은 Harrison과 Anderson이 조명 효율에 관한 실험의 결과에 따라 제안한 3배광법으로부터 시작된다.^{[3][4]}

이 방법은 세계적으로 널리 사용되었으며, 현재 국내에서도 옥내조명의 설계에 있어서 가장 중요한 계산법으로 이용되고 있으나, 상호반사의 효과를 평가하는데 있어서 정확도가 낮아서 적용시에 여러가지 제약이 있으므로, 해외에서는 요즈음 거의 사용되지 않는다.^{[1][3]}

현재 각국의 조명학회와 국제조명위원회(CIE)에서는 3배광법보다 정확도가 높은 새로운 옥내조명계산법을 추천하고 있으며, 이들 중에서 비교적 널리 사용되고 있는 계산법들은 미국의 구역공간법(Zonal Cavity Method ; ZCM), 영국의 영국구역법(British Zonal Method ; BZM), 국제조명위원회에서 권고하는 CIE법 등이 있으며, 독일과 프랑스에서는 3배광법을 토대로하여 보다 개선한 방법들을 사용하고 있다.

위에서 언급한 조도계산법들 중에서 실제 조명설계에 많이 사용되는 3배광법과 IES의 ZCM법은

실용적이나 우리나라에서는 이 두가지 방법을 혼용하고 있는 실정이므로, 국내실정에 맞는 조도계산법의 선택이 요청되며, 그에 따른 조도계산의 정확도 비교 및 적용한계에 대한 검증이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 3배광법과 ZCM의 정확도를 비교하고 적용한계를 파악하여 국내실정에 알맞는 조도계산법이 어느 것인가를 밝히보고, 실용적으로 보다 높은 정확도를 갖는 적정 조도계산법을 선택하고자 한다.

2. 조도계산법의 원리

조도계산법에는 평균조도계산법과 조도분포계산법이 있다.

평균조도계산법은 3배광법으로부터 시작되어, 이것이 발전된 ZCM, 독일의 Litg법, 프랑스의 UTE법 등의 방법이 있고 이를 통틀어 광속법이라 한다.^{[2][3][4][6][11]}

광속법에 의하면 건반조명을 실시한 실내에서 작업면의 평균조도는

$$E_{av} = \frac{F \cdot N \cdot U \cdot M}{A} [lx] \quad (2-1)$$

E_{av} : 작업면의 평균조도[lx]

F : 조명기구 1개에 들어있는 램프들의 총 광속[lm]

N : 조명기구의 갯수

U : 조명율

M : 보수율

A : 작업면의 면적[m²]

으로 계산된다.

보수율 M 은 시설된 조명장치를 사용함에 따라 램프의 광속과 조명기구 및 실내면의 조명효율이 저감되므로 이를 고려하여 산정한 값이다.

위의 (2-1)식에서 볼 때 조명율과 보수율의 정확한 값을 구하는 것이 전체 조명설계에 대단히 큰 영향을 미치며, 조명율에 영향을 미치는 요소에는 조명기구의 배광분포, 방의 크기, 형상, 실내면의 반사율, 기구의 배치간격 등이 있다.

2.1 3배광법

이 계산법은 1916년부터 1920년 사이에 미국의 Harrison과 Anderson이 모형에 의한 실내조도를 실험적으로 구하고 이것을 응용해서 실용화한 실내조도계산법이다.^[6] 광원 또는 등기구에서 나오는 전광속을 간접분(F_I), 수평분(F_H), 직접분(F_D)의 3개의 성분으로 분할하고, 설치수와 천정면 및 벽면의 반사율(바닥면 반사율은 14%로 일정)을 이용해서 구한 직접분 분포계수(U_I), 수평분 분포계수(U_H), 간접분 분포계수(U_D)를 각각 F_I , F_H , F_D 에 곱한 후 3개의 성분을 합하여 작업면으로 입사하는 유효광속을 구한다. 그리고 이것으로부터 조명율을 산출해서 작업면의 평균조도를 계산하는 방법이다.^[4]

2.2 구역공간법(Zonal Cavity Method ; ZCM)

ZCM은 미국 조명학회(IES)에서 1964년 부터 개발하여 추천해온 방법으로 꾸준히 개선되고 있으며, 그 개요는 다음과 같다. 조명설계를 행하려는 방의 천정, 벽, 바닥의 반사율이 각각 ρ_C , ρ_W , ρ_F 일 때, 방을 천정과 조명기구 사이의 천정공

간, 조명기구와 작업면 사이의 방공간, 작업면과 바닥사이의 바닥공간으로 구분한다.^{[7][8]}

그리고 각 공간의 형태와 반사율에 따라 천정공간을 유효반사율 ρ_{ce} 의 면으로 치환하여 방공간의 가상천정으로 하고 바닥공간을 유효반사율 ρ_{fe} 의 면으로 치환한 후 이를 방공간의 가상바닥으로 생각하여 방공간에서 조명율을 구하여 평균조도를 계산하는 방법이다.^{[7][8][11]}

여기서 3배광법과 ZCM의 차이점을 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 3배광법과 ZCM의 차이
Table 1. Differences between Three-curve Method and ZCM.

구분	3배광법	ZCM
비경	실험적	실험, 이론적
반사율 범위	천정: 30 ~ 50 % 벽: 10 ~ 50 % 바닥: 14 % 일정	천정: 10 ~ 80 % 벽: 10 ~ 90 % 바닥: 10 ~ 30 %
광속 분포	수평분, 간접분, 직접분	상향분(간접분), 하향분(직접분, 간접분) 고려
기구 배치	등기구 배치간격과 기구 외부 높이의 비가 일정.(1.5~2.0)	무관함
방공간의 구분	단일 공간	천정, 바닥, 방공간으로 구분 하여 유효반사율 개념 이용.
보수율	등기구 오염만 고려	기구와 방의 오염, 램프의 수명, 한장기의 종류, 전압의 변동 등을 고려함

3. 몬테카를로 시뮬레이션 (MCS법)

3.1 MCS법의 원리

이 방법은 상호반사가 많은 실내면에서의 조도분포를 계산하는 방법이다. 임의의 배광분포를 가진 광원을 실내면에 설치하였을 경우 광원에서 방출된 빛을 어떤 방향을 가지고 진행하는 입자의 호

들로 가정하고, 각 입자들의 진행경로를 그 입자가 흡수될 때까지 추적하면서 실내면의 모든 점들에 대하여 입자들이 진행경로 중에서 무뎠던 횟수를 계산함으로써 조도분포를 알 수 있다. 광원에서 방출된 빛의 방사방향은 광원의 배광분포에 의하여 확률적으로 결정된다. 임의의 방향으로 방출된 빛의 입자는 계속 직진하다가 실내면의 어느 점에 충돌하게 되며, 충돌한 빛은 실내면의 반사특성에 따라 반사, 또는 흡수된다. 반사광의 경로는 실내면의 반사특성에 의하여 확률적으로 결정된다.

조도계산법의 정확도를 비교함에 있어 실험을 수행하지 않고 MCS법을 도입한 이유는

- ① 이미 MCS법을 실용적인 예에 적용하여 정확도가 입증되어 있으며,
- ② 프로그램도 기본적으로 작성되어 있고,
- ③ 본 연구의 목적상 방공간과 조명기구의 특성을 광범위하게 변화시키며 3배광, ZCM의 계산 결과와 비교해야 하는데 실험을 실시할 경우 특성의 광범위한 변화가 어렵고, 실험 자체의 오차가 일반적으로 크게 나타나므로 MCS법을 이용한 모의 실험을 채택하게 되었다.

3.2 MCS법의 정확도 검증

본 연구에서 오차판별의 기준이 되는 MCS법의 정확도를 Moon의 해석적인 방법과 비교하여 다음과 같이 입증하였다. 여기서 비교되는 Moon법은 적분방정식을 이용한 해석적인 방법으로 이상적인 조건하에서 정확한 평균조도를 계산할 수 있으나 일반적인 조명상황에는 비실용적이며 적용하는데 한계가 있다. 일반적인 사무실 규모의 실

내면에서 그림 1과 같은 배광곡선을 갖는 전반확산조명기구를 방의 중앙에 설치하고 각면의 반사율을 동일하게 준 이상적인 경우와 같은 배광곡선을 갖는 조명기구에서 조도에 영향을 주는 요소들 즉, 방의 크기, 광원의 위치, 반사율 등을 변화시켜 각각 조명하였을 때 실내면의 조도값을 MCS법, Moon법으로 구하여 각각 비교하였다. 또 광원의 형태가 다른 그림 2와 같은 배광곡선을 갖는 직접조명기구에서 방의 크기, 광원의 위치, 각면의 반사율을 다르게 하여 실내면의 조도값을 MCS법, Moon법으로 구하고 서로 비교하였다.

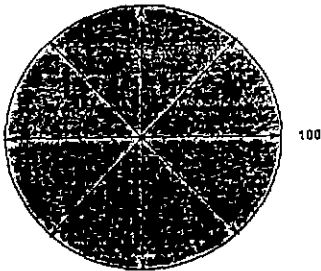


그림 1. 완전확산형 조명기구의 배광곡선
Fig. 1. Distribution Curve of the Diffusing Luminaire

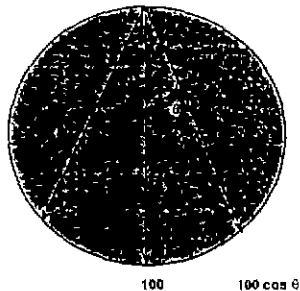


그림 2. 직접형 조명기구의 배광곡선
Fig. 2. Distribution Curve of the Direct-type Luminaire

위와 같은 방법으로 비교해서 표 2과 같은 결과를 얻었다. 표 2에서 두가지 방법에 의해 계산된 평균조도값을 보면, MCS법과 Moon법에 의한 조도의 차이는 0.5 ~ 2[%] 정도로 매우 작아서 MCS법의 정확도가 대단히 높은 것을 알 수 있다.

표 2. MCS법과 Moon의 해석적인 방법의 평균조도 계산치의 비교

Table 2. The Comparison of the Calculated Average Illuminances by MCS and Moon's Analogtic Method

구 분		조 도 (lx)		
		MCS법	Moon법	오 차
전반확산조명기구	방의 크기 : 10×10×10(m)	4.16	4.18	- 0.5 %
	광원의 위치 : 5×5×5(m)			
	반사율(천정, 벽, 바닥): 50%			
전반확산조명기구	방의 크기 : 10×10×3(m)	9.6	9.39	+ 2 %
	광원의 위치 : 5×5×2.8(m)			
	반사율 : (천정:75%, 벽:50% 바닥:30%)			
직접조명기구	방의 크기 : 8×5×3 (m)	5.93	6.04	- 1.8 %
	광원의 위치 : 4×2.5×2.7(m)			
	반사율 : (천정:75%, 벽:50% 바닥:15%)			

4. 조도계산법의 비교

조명설계의 근간이 되는 평균조도 계산은 주어진 방에 조명기구를 설치할 때 평균조도가 얼마나 되는지 계산하는 것이다.

조도에 영향을 미치는 요소는 매우 많으나 크게 분류하면 방에 관련된 요소(방의 크기, 반사율, 조명기구 설치높이, 작업면 높이 등)와 조명기구에

관련된 요소(배광곡선, 안경기술, 램프광속, 수명, 전압 등)로 구분 되는데 이러한 요소들을 충분히 고려하여야 정확한 조도계산이 된다.

3배광법과 ZCM의 두가지 평균조도계산법에 대하여 다음과 같이 비교 하였다.

실내면에서 전반확산조명기구나 직접조명기구를 설치하였을때 조도에 영향을 주는 요소, 즉 실내면의 크기, 광원의 위치, 각 부분의 반사율, 광원의 갯수 등을 변화시키면서 실내면의 조도값을 MCS법, 3배광법, ZCM으로 구하여 정확도가 높은 MCS법에 3배광법과 ZCM을 각각 비교하였다

4.1 방의 크기 변화에 따른 평균조도 비교

실내면에서 전반확산조명기구의 갯수를 9개로 고정시키고 방의 크기를 중심으로 변화를 시키면서, 각 부분의 반사율 등을 다르게 한 상태에서 MCS법, ZCM, 3배광법으로 평균조도값을 구하고 각각 비교하여 그 결과를 그림 3으로 나타내었다.

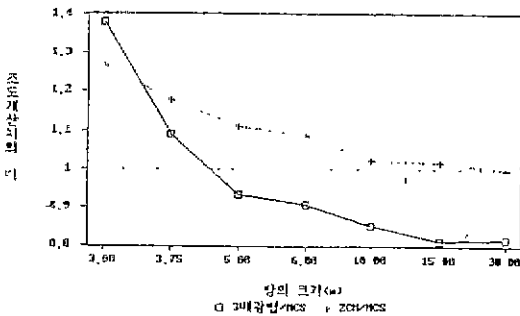


그림 3. 전반확산 조명의 평균조도 계산치의 비교

Fig. 3. Average Illuminances for lighting using the diffusing Luminaires

또 같은 방법으로 동일조건하에 직접조명기구를 사용한 경우에는 그림 4와 같은 결과를 얻었다.

전반확산형, 직접조명기구를 광원의 위치, 천정과 벽면의 반사율을 고정시킨 상태에서 정사각형 방의 한번의 길이틀 3[m]에서 부터 30[m]까지 변화를 주었다. 계산결과에 따르면 전반확산조명기구에서 평균오차는 3배광법에서 16.5[%] ZCM은 9.8[%] 오차의 범위는 3배광법에서 57[%] ZCM은 27[%], 오차변화폭의 평균은 3배광법에서 9.1[%] ZCM은 4.5[%]가 나타났다. 또 직접식 조명기구에서 평균오차는 3배광법에서 16.1[%] ZCM은 5.1[%] 오차의 범위는 3배광법에서 51[%] ZCM은 19[%] 오차변화폭의 평균은 3배광법에서 8.5[%] ZCM은 3.1[%] 오차가 균일하게 되는 범위도 3배광법이 작게 나타났다.

위 결과에서 광원의 형태와는 관계없이 3배광법의 평균조도 오차가 크고 오차의 범위와 오차변화폭의 평균도 크며, 오차가 균일하게 되는 범위도 작아서 ZCM이 정확함을 알 수 있었다. 또 같은 조건에서 두가지 방법 모두 방의 크기가 작은 공간에서 평균조도 오차가 심하고 방공간이 커질수록 오차는 점점 적어짐을 알 수 있었다.

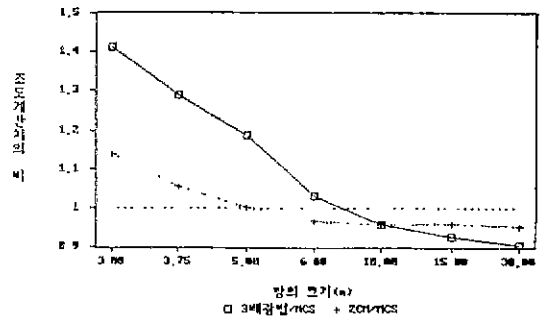


그림 4. 직접조명의 평균조도 계산치의 비교
Fig. 4. Average Illuminances for lighting using direct-type Luminaires

4.2 광원의 수 변화에 따른 평균조도 비교

완전확산과 직접조명기구의 평균조도를 비교한 결과에서 오차가 가장 적게 나타난 직접조명기구를 설치한 10[m] × 10[m]의 방의 크기에서 광원의 갯수를 변화시켜 MCS법, ZCM, 3배광법으로 평균조도값을 구하고 각각 비교하여 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 5에서 보면 동일한 공간에서 3배광법은 광원의 수가 적어지면 평균조도 오차가 커지고 광원의 수가 점점 증가하면 할수록 오차가 감소되는데, 광원의 수가 16개에서 오차의 최소치가 되면서 다시 오차가 증가하였다. 또 ZCM의 경우는 광원의 수가 증가 되면 오차가 점점 감소하여 오차의 최소치에 수렴하는 것으로 보아 ZCM보다 3배광법의 평균조도 오차가 크게 나타날 것으로 예상된다.

그리고 광원의 수가 1개의 경우는 3배광법과 ZCM 모두 오차가 크게 나타남으로 방의 크기에 비해 광원의 수가 매우 적은 공간에서 평균조도를 계산하는 것은 의미가 없음을 알 수 있었다.

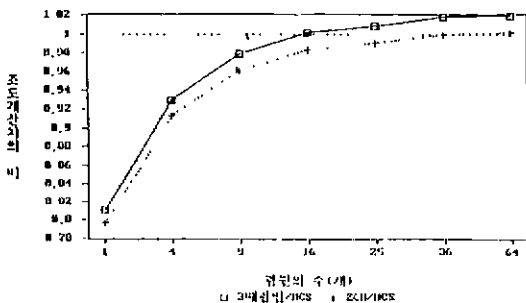


그림 5. 광원의수 변화에 따른 평균조도 계산치의 비교

Fig. 5. Comparison of Average Illuminances as Changing the Number of Luminaires

4.3 방의 형태 변화에 따른 평균조도 비교

방의 길이 및 직접조명기구의 갯수를 고정시키고 방의 폭을 변화 시킨 공간에서 MCS법, ZCM, 3배광법으로 평균조도 값을 구하고, 각각 비교하여 그림 6과 같은 결과를 얻었다.

그림 6에서 보면 평균오차는 3배광법에서 8.8[%] ZCM은 1.7[%] 오차의 범위는 3배광법에서 16[%] ZCM은 7[%] 오차변화폭의 평균은 3배광법에서 2[%] ZCM은 1.1[%] 오차의 균일하게 되는 범위는 3배광법이 작게 나타났다.

그러므로 동일한 조건에서 3배광법 보다 ZCM이 오차가 작음을 알 수 있었다.

또 복도와 같이 폭이 좁고 길이가 긴 공간일수록 평균조도 오차가 점차적으로 크게 나타나고 방공간이 커지면서 정방형에 가까워질수록 오차는 점점 적게 나타났다.

따라서 폭이 좁고 길이가 긴 공간에서 평균조도법의 적용은 곤란하며 보다 정확도가 높은 새로운 조도계산법이 요청된다.

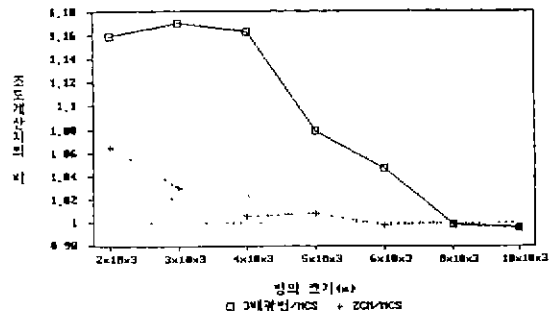


그림 6. 직접조명의 방의 형태 변화에 따른 평균조도의 비교

Fig. 6. Comparison of Average Illuminances as Changing Size of the Room

5. 결 론

1987

본 연구에서는 실제 조명설계에 많이 사용되는 3배광법과 ZCM의 정확도 비교 및 적용한계를 파악하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

조도에 영향을 주는 요소들을 변화시키면서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 평균조도값을 구하고 이를 Moon의 해석적인 방법으로 구한 결과와 비교하여 정확도를 입증하였다.

또 실내면에서 조도에 영향을 주는 여러 요소들을 변화시켜 조명을 하였을 때 실내면의 조도값을 MCS법, 3배광법, ZCM으로 구하여 정확도가 높은 MCS법에 3배광법과 ZCM을 각각 비교해 본 결과 3배광법보다 ZCM이 정확도가 높다는 것을 알 수 있었다. 또 복도와 같이 폭이 좁고 길이가 긴 공간에서는 평균조도계산법으로는 적용이 곤란하므로 조도분포를 계산하는 보다 정확도가 높은 MCS법을 실용화 해야 할 것이다.

그러므로 현시점에서 우리나라에서 혼용되고 있는 3배광법과 ZCM중에서 정확도가 높은 ZCM의 선택이 바람직하다.

다만 이 방법은 3배광법에 비하여 조명을, 보수율 값을 산정하는 과정이 복잡하고 많은 데이터가 필요하므로 국내 실정에 맞도록 적절히 보완하여 간략화된 형태로 만들거나 계산과정을 대행해주는 컴퓨터 소프트웨어 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] "최신 알기쉬운 明視論", 日本 照明學會, 1977
- [2] "현대 조명환경 시스템", 대한전기협회,
- [3] 지철근, "전기설비기술", 문운당, 1992
- [4] 지철근, "조명공학", 문운당, 1994
- [5] "조명설계 표준화에 관한 연구", 상공자원부 에너지절약기술개발사업 중간보고서, 1994. 9
- [6] 石野辛三, "室內照明設計法", 森北出版株式會社, 1971
- [7] Kaufman, J. E., ed., "IES Lighting Handbook", Reference Volume, IES of North America, New York, 1987
- [8] Joseph B. Murdoch, "Illumination Engineer From Edison's Lamp to the Laser", Macmillan, New York, 1985
- [9] 김 훈, "몬테카를로법을 이용한 실내조도계산법", 학술진흥재단 지방대육성과제, 1991
- [10] 지철근, 김 훈, 송민호, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 실내면의 도계산에 관한 연구", 한국조명.전기설비학회지, 1992년 4월호
- [11] 김 훈, "조명율과 보수율", 한국조명. 전기설비학회지, 1990년 6