

技術解説

照明率과 保守率

(Coefficient of Utilization and Maintenance Factor)

金 燠

(江原大學校 電氣工學科 助教授)

1. 서 론

옥내에서의 조도계산은 크게 나누어 작업면에서의 평균조도를 구하는 방법과 각각의 점에서의 조도의 분포를 계산하는 방법이 있다. 좀 더 향상된 조명설계를 위해서는 조도의 분포를 구하여야 하겠으나, 이는 아직도 실용화하기에는 많은 난관이 있고, 옥내 전반조명의 설계에 있어서는 평균조도의 계산이 가장 중요한 설계의 순서로 되어 있다.

이 평균조도를 구하는 계산법의 역사는 1916년 ~1920년 사이에 미국의 Harrison과 Anderson이 조명효율에 관한 실험의 결과에 따라 제안한 "3배 광법"으로부터 시작된다.^{1),2)} 이 방법은 세계적으로 널리 사용되었으며, 우리나라에서도 옥내조명의 설계에 있어서 가장 중요한 계산법으로 이용되고 있다.^{5),6)}

그러나 이 방법은 상호반사의 효과를 평가하는데 있어서 정확도가 낮아서 적용시에 여러가지의 제약이 있으므로 해외에서는 요즘에는 거의 사용되고 있지 않다. 현재 미국, 영국, 독일, 프랑스, 일본 등의 조명학회와 국제조명위원회(CIE)에서는 각각 3배 광법보다 정확도가 높은 새로운 옥내조명계산법을 추천하고 있다.

이 계산방법 중에서 비교적 널리 사용되고 있는 계산법들은 미국의 구역공간법(Zonal Cavity Method, ZCM), 영국의 영국 구역법(British

Zonal Method, BZM), CIE법과 이를 약한 변형한 방법들이다.

본문에서는 미국의 ZCM법을 간략히 소개하고 조명율(Coefficient of Utilization, CU)과 보수율*(Maintenance Factor, MF)을 산정하고 이용하는 방법에 대하여 설명한다.

*註) 3배광법에서는 감광보상율 $D(\geq 1)$ 을 써왔으나 ZCM에서는 보수율 $M(\leq 1)$ 을 사용하며 이는 D 의 역수이다. 이전에는 유지율이라고 불리웠으며 미국조명학회(IES)에서는 광손실율이라 한다.

2. 평균조도 계산의 기초

전반조명을 실시한 실내에서 작업면의 평균조도는 광속법에 의해

$$E = \frac{N \cdot F_L \cdot U \cdot M}{A} \quad (1)$$

- E: 작업면의 조도 [lx]
- N: 조명기구의 갯수
- F_L : 조명기구 1개내의 램프광속 [lm]
- U: 조명율
- M: 보수율
- A: 작업면의 면적 [m^2]

으로 계산된다. 이 식에서 조명율은

$$U = \frac{\text{작업면에 입사한 광속}}{\text{전체조명기구내의 램프광속}}$$

$$= \frac{F_w}{N \cdot F_L} \quad (2)$$

로 정의되며, F_w 는

$$F_w = F_{wd} + F_{wi} \quad (3)$$

F_{wd} : 조명기구에서 직접 작업면에 입사하는 광속

F_{wi} : 천정, 벽 등에서의 상호반사를 거쳐 작업면에 입사하는 광속

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

위의 (1) 식에서 볼 때 조명율과 보수율의 정확한 값을 구하는 것이 전체 조명설계에 대단히 큰 영향을 미치며, 조명율의 경우에는 (3)식의 두 항, F_{wd} 와 F_{wi} 를 정확하게 구하는 것이 중요하다. 단 순히 말해서 여러 나라에서 추천되고 있는 조명계산법의 차이는 (3)식의 두 항을 구하는 방법의 차이이다. 조명율에 영향을 미치는 요소로는 조명기구의 배광, 기구효율, 방의 크기와 형상, 실내면의 반사율, 기구의 배치간격 등이 있다.

3. 구역 공간법(ZCM)

ZCM은 미국조명학회(IES)에서 1964년부터 추천해온 방법으로 그 개요를 설명하면 다음과 같다.

ZCM에서는 조명설계를 행하려는 방의 천정, 벽, 바닥의 반사율이 각각 ρ_c , ρ_w , ρ_f 일 때, 그림 1에서와 같이 방을 천정과 조명기구 사이의 천정공간, 조명기구와 작업면 사이의 방공간, 작업면과 바닥사이의 바닥공간으로 구분한다. 그리고 각 공간의 형태와 반사율에 따라 천정과 바닥의 반사율을 유효반사율 ρ_{ce} 와 ρ_{fe} 로 치환한 뒤, 이를 방공간에만 적용시켜 조명율을 구하는 것이다.

유효반사율 ρ_{ce} , ρ_{fe} 는 ρ_c , ρ_w , ρ_f 와 천정, 바닥 공간 형태의 함수로 되며 여기서 천정, 바닥공간과 방공간의 형태는 공간계수(Cavity Ratio) K 로 나타낸다.

$$K_c, K_r, K_f = \frac{5h_{cc,rc,fc}(W+L)}{W \cdot L} \quad (4)$$

K_c, K_r, K_f : 천정·방·바닥의 공간계수

h_{cc}, h_{rc}, h_{fc} : 천정·방·바닥공간의 높이 [m]

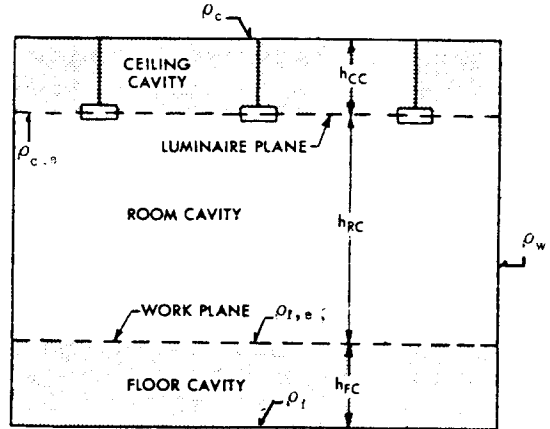


그림 1. ZCM에서 방의 공간구분

W, L : 방의 폭과 길이 [m]

즉, (4) 식에 의해 천정과 바닥의 공간 계수 K_c, K_f 를 계산하면 천정과 바닥의 유효반사율을 계산할 수 있으며 또한 도표에서 찾아볼 수도 있다.^{3),4)}(참고문헌 4의 그림9-39)

(4)식의 방공간계수 K_r 은 종래 3배광법에서 사용되던 방지수 K 와

$$K_r \cdot K = 5$$

의 관계가 있다.

이상에서 구해진 ρ_{ce} , ρ_{fe} 와 K_r , 그리고 ρ_w 를 이용하여 각각의 조명기구에서 주어진 조명율표에 의하여 해당되는 조명율을 찾아낸다. 보통 조명기구의 카탈로그에 주어진 조명율은 $\rho_{fe}=0.2$ 인 경우의 값들이며 ρ_{fe} 가 이 값과 차이가 있을 때에는 적당한 배율을 도표에서 찾아 조명율에 곱해 준 것이 정확한 조명율이 된다.^{3),4)}(참고문헌 4의 그림 9-40)

즉 ZCM은 주어진 실내를 천정·벽·바닥 반사율이 ρ_{ce} , ρ_w , ρ_{fe} 인 방공간 크기의 방으로 치환하여 조명율을 계산하는 것이다.

4. 조명율의 계산

조명기구에서 나온 광속중에서 상향하는 광속을 F_u , 하향하는 광속을 F_d 라 할 때 작업면에 입사하는 광속 F_w 는 F_d 중에서 직접 작업면에 입사하는

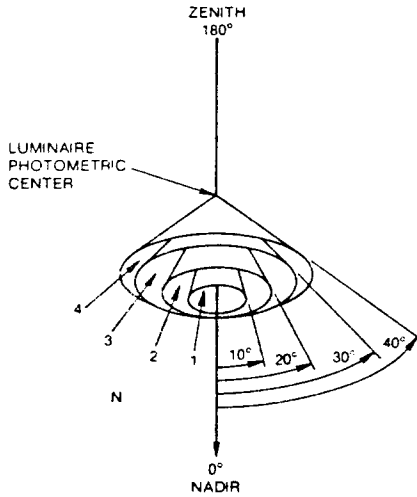


그림 2. 조명기구의 측광중심을 중심으로 한 구(球)에서의 구역배분(10° 간격으로 나눔)

광속 F_{wd} 와 F_d , F_u 중에서 반사를 거쳐 작업면에 입사하는 광속 F_{wi} 로 구성된다. 특히 이 중에서 F_{wd} 와 F_d 의 비율을 직접비(Direct Ratio, DR)라 하며, 이 값은 Jones와 Neidhart의 구역배수(Zonal Multiplier, ZM)의 개념을 써서 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$DR = \frac{\sum_{n=1}^9 F(N) \cdot ZM(N)}{F_d} \quad (5)$$

$F(N)$: 그림 2와 같은 구역 배분에서 N번째 구역으로 나가는 광속 [lm]

$ZM(N)$: N번째 구역에서의 구역배수

$$F_d = \sum_{n=1}^9 F(N)$$

이 식에서 $F(N)$ 은 N번째 구역에서의 평균광도 $I(N)$ 에 입체각을 곱하여 구할 수 있다.

$$F(N) = 2\pi I(N) (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (6)$$

θ_1, θ_2 : N번째 구역의 양쪽 범위를 나타내는 각도

ZM은 다음과 같은 의미가 있다. 조명기구에서 하향하여 나가는 광속 F_d 중의 대부분은 작업면에 직접 입사하지만 그 중 일부는 벽면에 입사하게 된다. ZM(N)은 $F(N)$ 중에서 작업면에 직접 입사하는 광속의 비율을 나타낸 것이다. 실제의 조명시설

에서는 여러개의 조명기구를 사용하고 있고, 각각의 조명기구에서 ZM은 기구가 취부된 위치에 따라 다르므로, 조명기구 전체에 대한 ZM값은 각각의 조명기구의 ZM값을 평균하여 사용한다. ZCM에서는 정방형의 실내에서 조명기구를 등간격으로 배열하였을 때의 ZM값을 K_r 의 함수로 계산하고 있다.

실내에서 상호반사를 거쳐서 작업면에 들어가는 광속은 O'Brien의 광속전달함수(Flux Transfer Function)를 이용하여 계산할 수 있으며, 따라서 조명율은

$$U = (DR + DRC) \frac{F_d}{F_L} + U_{ou} \frac{F_u}{F_L} \quad (7)$$

DRC : 조명기구의 하향광속 중 상호반사에 의해 작업면에 도달하는 비율

U_{ou} : 조명기구의 상향광속중 상호반사에 의해 작업면에 도달하는 비율

로 계산된다.

(7)식에서 F_d , F_u , F_L 은 조명기구의 배광분포에서, DR은 앞에 서술한 방법에 의해 구할 수 있다. DRC와 U_{ou} 는 광속전달이론을 이용해 구한다. IES에서는 U의 계산과정을 컴퓨터로 처리하기 위한 계산식을 발표하였으므로, 배광곡선의 데이터만 있으면 조명율을 계산할 수 있다. 또한 일반 조명설계자가 조명율이 주어지지 않은 조명기구를 이용할 때의 편의를 위해 대표적인 조명기구 55개의 배광분포와 조명율을 도표화하였으므로 이 표에서 조명율을 구할 수 있다(참고문헌 4의 그림 9-62. $\rho_{re}=0.2$ 일 때의 값이다).

5. 보수율의 계산

IES에서는 조명기구에서의 방출광속이 시간에 따라 감소하는 것을 여러가지 요인으로 분석하고 이 경향을 광손실율(Light Loss Factor, LLF)로 표현한다. 조명기구는 그 자체의 요인으로 인해 광출력이 20~30% 정도 줄어들 수 있으며 조명기구나 램프를 적절히 보수해 주지 않으면 50% 이상 광출력이 감소할수도 있다. LLF는 조명기구에서 예상되는 광출력의 저하를 나타내며, 주기적인 보수가 있을 때까지 최소요구조도를 유지하려는 것이다. 따라서 조명설계자는 사용자에게 자신이 산정

한 LLF의 제요소들의 값을 알려주고, 적절한 보수가 중요함을 인지시켜야 한다.³⁾

LLF에 영향을 미치는 요인은 여러가지가 있으며, 크게 나누어 불가피하고 고유적인 광손실요인(Nonrecoverable Factor)과 적절한 보수로 제거할 수 있는 손실요인(Recoverable Factor)이 있다. 이하 각 요소에 대하여 살펴보면 최종 LLF는 각 요소의 값들을 곱한 것이다.⁴⁾

(1) 회복불가능요인

- 1) 온도요인 : 온도에 의한 영향은 백열전구와 고풍도방전등에서는 적으나, 형광등은 큰 영향을 받는다. 형광등은 주위온도 25°C에서 가장 효율이 좋고 형광등의 광출력과 관련된 모든 데이터는 25°C에서 행해진 측정에 의한 것이다. 따라서 형광등기구의 취부방법과 실내온도는 광출력에 큰 영향을 미친다. 즉 매입형이나 부착형의 경우 내부온도가 상승하며 냉장실, 주방의 경우에도 온도변화에 의한 광속감소를 고려해야 한다.
- 2) 전압변동 : 백열전구는 전원전압이 1% 증감하면 광속이 3% 증감한다. 방전등은 안정기의 종류에 따라 다르다. 보통 이 요인은 예상하기 어려우므로 전압변동이 알려진 경우에는 계산에 넣고 그렇지 않으면 1로 본다.
- 3) 조명기구표면의 열화 : 조명기구를 구성하는 금속, 페인트, 플라스틱 등의 변화가 광속의 감소를 초래하는 것이다. 에나멜도장의 반사값은 초기반사율이 높고 청소가 쉬우나 다공성으로 청소를 하여도 계속 반사율이 저하한다. 플라스틱의 경우는 자외선에 의해 변색하는 경우가 있다. 보통 LLF의 관점에서 유리, 자기, 알루미늄으로 구성된 조명기구가 가장 좋다
- 4) 안정기 요인 : 방전등의 광출력은 시험용 안정기(KS규정, 미국은 ANSI의 Reference Ballast)와 결합하여 측정하므로 특히 형광등의 경우 시판되는 안정기와 결합시 광출력의 변화가 있다. HID램프는 영향이 없다.

기타 HID램프의 경우에는 점등자세(수직점등이 아닌 경우)도 광출력에 영향을 미친다.

이상의 요인들은 영구적 요인으로, 조명기구 자체를 교환하기 이전에는 회복이 어렵다. 따라서 최

초 설계시에 좋은 램프-안정기-조명기구의 결합이 중요하다.

(2) 회복가능요인

1) 조명기구의 오염 : 이 요인은 광속감소의 가장 큰 요인이다. 조명기구의 오염도는 실내에서의 작업종류와 부근 환경에 따라 다르다. 이 값은 다음의 3단계를 밟아 계산할 수 있도록 정리되어 있다.

- ① 조명기구 윗부분과 아랫부분 커버의 유무, 투명도 등에 따라 여섯가지 범주 중 하나를 택한다.
- ② 주위 공기의 종류와 청정도에 따라 매우 청정부터 매우 더러움까지 5가지 범주 중 하나를 택한다.
- ③ 위의 두 범주에 따라 구분되는 여러 그래프 중에서 등기구 청소 간격을 변수로 하여 광속감소의 값을 찾아낸다(참고문헌 4에서 그림 9-7부터 9-11까지 이용)

2) 실내면의 오염 : 이 오염에 의해 조도가 감소하는 정도는 청소간격, 대기조건, K_r , 등기구의 배광분포에 의해 영향을 받는다. 예를 들어 매우 넓은 방이라면 실내면의 오염은 큰 영향을 미치지 못하며, 직접등기구의 경우도 마찬가지이다. IES는 위의 네가지 조건을 고려하여 조도감소를 산정할 수 있도록 도표화하였다(참고문헌 4의 그림 9-12).

3) 램프의 광속감소 : 수명중 램프의 광속이 어느정도 감소하는 지는 생산자의 사양에서 제공되어야 한다. 실제의 경우에는 정격수명의 몇 %인 시간에 램프를 집단교체 할 것인지가 사전에 결정되어야 하고, 이에 따라 집단교체시 램프의 광속이 어느 정도까지 감소할 것인지 결정할 수 있다.

4) 램프의 끊어짐 : 끊어지는 램프를 개별적으로 교체하는 유지보수 계획이라면 이 요소는 고려할 필요가 없다. 그러나 실제의 경우에는 개별적으로 끊어진 램프는 방치하다가 수명의 60~70% 정도를 점등한 후 집단교체 하는 것이 경제적인 유지보수 계획이다. 따라서 특히 대형의 조명시스템인 경우 집단교체시까지 몇개의 램프가 끊

어지느냐 하는 데이터를 생산자가 제공해 주어야 한다.

이상과 같은 LLF의 제 요인중에서 회복불가능 요인은 잘 계획되고 조립된 조명시스템에서는 보통 1로 잡을 수 있으나 회복가능 요인들은 조명기구의 사용환경, 취부방법, 유지보수 계획에 따라 정확한 값을 산정하고, 이들을 곱한 LLF값을 평균조도의 계산에 반영하여야 한다. 그리고 설계자는 건물 사용자에게 설계시에 반영된 실내의 청소계획 및 조명기구의 유지보수 계획에 대하여 정확히 알려주어서 계산된 조도보다 낮은 조도에서 생활하지 않도록 해야한다.

6. 옥내조명 설계시의 주의점

이상에서 ZCM과 조명율, 보수율의 계산법을 살펴보았으며, 이를 이용하여 옥내에서의 조명설계를 행할 때 주의해야 할 사항들을 몇 가지 언급하고자 한다.

- ① 조명기구의 생산자가 제공한 조명율 표는 조명기구를 등간격으로 배열하였을 경우의 자료이므로, 조명기구가 불규칙하게 배치되었거나 실내의 한쪽에 치우쳐 배치된 경우에는 오차가 발생할 수 있다. 또 복도와 같이 가늘고 긴 장소에 설치된 조명기구의 경우에는 평균 조도보다는 실내 각 점에서의 조도분포를 구하는 것이 좋다.
- ② 주어진 조명율표는 조명기구의 취부간격과 높이의 비(S/h_r의 비)를 어떤 값에 고정시켜 놓고 구한 것이다. 배광이 넓게 퍼지는 형의 조명기구는 S/H비가 변해도 조명율에의 영향은 적지만 배광분포가 좁은 형태의 것은 S/H비의 영향이 크다. 따라서 이러한 경우에는 영국

구역법(BZM)에 의한 조명기구의 분류에 따라 조명율이 어느 정도 변화할 지 예측해야 한다.²⁾

- ③ 실제 조명계산을 행할 때 어려운 점은 실내면의 반사율을 구하는 것이다. 벽면의 반사율은 벽의 주요부분을 차지하는 재질의 반사율을 취한다. 그러나 큰 창문이 있거나 벽의 반사율과 매우 차이나는 대형의 가구가 있는 경우에는 이들의 면적과 반사율을 고려하여 반사율을 산정해야 한다. 또 바닥의 반사율은 책상의 반사율보다 적은 값(보통 0.1~0.3)을 취하는 것이 보통이다.

이상 소개한 ZCM은 평균조도를 계산하여 주므로 양적인 설계에는 부족함이 없다. 그러나 조명의 질을 향상시키기 위해서는 눈부심을 고려해야 하며, 이 때문에 IES에서는 Visual Comfort Probability(VCP, 직접눈부심고려), Equivalent Sphere Illumination(ESI, 간접눈부심고려) 등의 지수를 고려하도록 하고 있다. 이 두 지수의 소개는 다음 기회로 미룬다.

참 고 문 헌

- 1) 石野幸三, “室内照明設計法”, 森北出版株式會社, 1971.
- 2) 猪野原誠, “屋内照明計算法とその動向”, 電設工業, Jan., pp.61-71, 1983.
- 3) P.C. Sorcar, “Energy Saving Lighting System”, Van Nostrand Reinhold Company, 1982, New York
- 4) IES Lighting Handbook 1984 — Reference Volume, IES, 1984, New York
- 5) 지철근, “최신 조명공학”, 문운당, 1980, 서울
- 6) “현대 조명환경 시스템”, 대한전기협회 출판부, 1985, 서울.