

조명효율 이야기

김홍범 <국립중앙박물관 건립추진 기획단 과장>

1. 서 언

일상의 대화에서 우리는 수없이 효율에 관한 이야기를 한다. '효율이 좋거나 나쁘다'라고 직설적인 어휘를 사용하기도 하지만, '...효과가 있다.'라던가 '효험을 보다.'라는 등의 표현들도 효율과 전혀 무관한 이야기는 아닐 것이라고 생각한다. 어쩌면 말하는 사람 스스로가 효율이라는 의미를 염두에 두고 이야기하는 것일지도 모른다. 효율이란 소모된 에너지에 대해 실제로 기계가 한 일에 대한 비율의 의미도 있지만, 쓰여진 노력에 비해 얻어진 결과의 정도라고도 설명할 수 있는 것이다.

이렇게 굳이 일상적인 생활 속의 이야기를 끄집어 내지 않더라도, 공학적 측면에서 효율이라는 용어가 내포하고 있는 의미의 중요성을 간과할 수는 없는 것이다. 게다가 용어를 정확히 이해하고 있어야 활용이 가능한 것이고, 또한 능률적으로 적용할 수 있는 것이다.

조명설계를 할 때는 효율에 관한 생각을 아니할 수 없다. 그러나 국제조명위원회의 용어해설집이나 최근에 출판된 조명용어사전에 의하면, 조명공학에 있어서도 효율에 관련된 용어는 여러 가지로 다양하다는 것을 알 수 있다. 기구효율과 같이 효율이라

는 의미가 확연한 것 외에도 자연채광계획에 사용하는 주광율이 있고, 광속유지율과 같이 인공광원의 특성을 표현하는 것도 있으며, 사람의 시각기관에 대한 파장별 감도를 의미하는 비시감도와 같은 용어도 있다. 이러한 용어들도 보다 넓은 의미에서 생각해 볼 때, 역시 효율을 나타내는 어휘라고 생각할 수 있다.

여기서는 인공광원에 의한 조명계획에 필수적으로 수반되는 조명계산과 관련된 용어에 대해 살펴보기로 한다. 그 중에서도 발광효율, 기구효율, 고유조명율과 조명율을 대상으로 한다.

먼저 그림 1을 통하여 몇 가지 용어사이의 관계를 정립하자. 크게 광원시스템을 포함하는 조명시스템과 시각시스템을 생각할 수 있다. 그리고 조명시스템과 시각시스템을 연결하는 조명환경(시스템)이 있다. 이들은 조명의 물리적 환경을 통하여 연결되어 있다. 조명의 물리적 환경은 조명시스템의 최종적인 결과로 나타나는 것이지만, 인간의 시각시스템의 근본적인 역할이 되는 것이다. 결과적으로 조명디자인이란 빛의 합리적 배분의 문제가 되는 것이고, 바람직한 것은 이러한 시스템간의 총체적인 효율이야기가 되어야 하지만 여기서는 조명시스템의 효율을 위주로 논의한다.

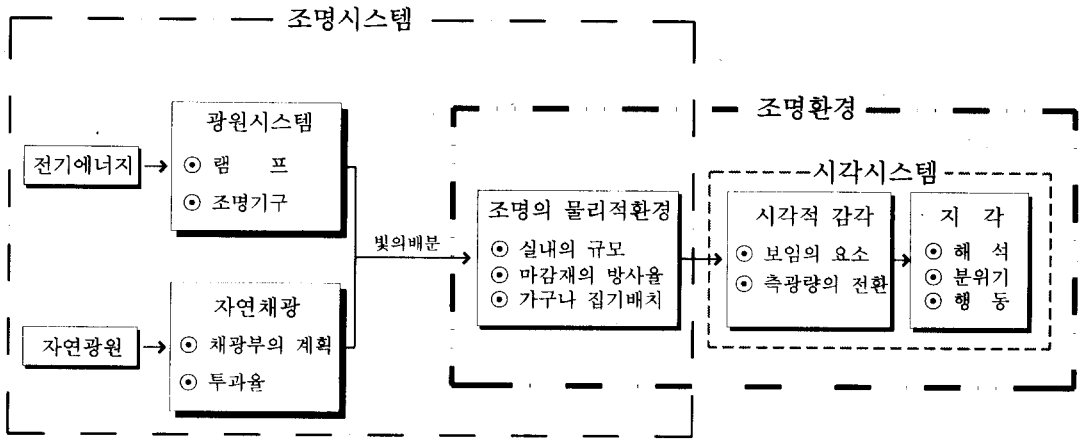


그림 1. 조명시스템과 조명환경사이의 관계

2. 광속법에 의한 조도계산

광속법에 의한 조도계산은 작업면의 평균조도를 계산하거나, 피조면의 적정조도를 확보하기 위한 소요광속의 산출에 사용한다. 조도계산법은 크게 점조도법과 광속법으로 구분할 수 있고, 기타 수학적 도구를 이용한 입자추적법이나 해석적 방법이 있다. 점조도법은 직접조도만을 계산할 수 있고, 광속법은 간접조도까지 포함하여 계산이 가능하다. 그러나 광속법에 의해 산출된 조도는 피조면의 평균조도이다. 반면에 입자추적법이나 해석적 방법으로는 조도분포의 계산까지 가능하다.

2.1. 직접조도와 간접조도

광원에서 나온 광속이 피조면에 도달하는 양의 계산은 광속전달(Flux Transfer)이론에 의한다. 피조면에 도달하는 광속에는 광원이나 조명기구에서 직접적으로 전달되는 직접분과, 인접한 물체 등에서 반사되어 도달하는 간접분이 있다. 직접분에 의한 피조면의 조도를 직접조도 또는 직사조도라 하고, 건축공간과 같이 실내의 벽이나 천정면을 통해서 반사되어 피조면에 얻어지는 조도를 간접조도라 한다. 점광원에 의한 조도계산시 사용하는 거리역제곱의 법칙이

나 자연채광의 설계에 사용하는 입체각투사의 원리, 주광율의 산정시 사용하는 분할광속법의 천공성분을 구하는 원리는 모두가 광속전달이론에 의해 직접조도를 구하는 것이다.

그러나 그림 2에서 보듯이 인공조명에 의한 것은 실내의 천정, 바닥, 벽면에서 서로 반복하여 반사되어 피조면의 조도를 상승시키는 간접조도를 무시할 수 없다. 이를 자세히 살펴보면, 직접조도의 구성성분은 ①과 ⑤와 같은 형태이고, 간접조도는 ②나 ③과 같은 부분이다. 하지만 ④와 같은 성분은 작업면에 도달하지 않는다. 특히 ④와 같은 성분은 인공조명의 측면에서 본다면, 전혀 조명의 역할을 하지 못하는 손실이다. 이렇게 실내 작업면의 조도를 계산한다는 것은 각각의 성분을 검토해서 평가할 수밖에 없는 복잡한 것이다.

복잡한 계산을 하기 위해서는 수학적 도구를 이용하지 않을 수 없다. 더욱이 실내공간의 물리적 규모가 건물의 용도나 형태에 따라 무수히 변화하기 때문에 하나의 통일된 수식에 의해 정형화할 수 없는 것이다. 그러나 우리가 현재 사용하고 있는 소위 광속법이라고 하는 것은 이와 같은 복잡한 수식을 이용하지 않고 직접조도와 간접조도를 한꺼번에 구하기 위하여 고안된 실험법칙에 의한 것이다.

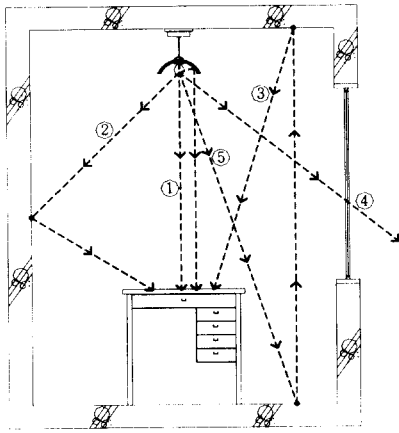


그림 2. 작업면의 조도

2.2. 조명의 간접분과 평균조도의 계산

그림 2에서 보았듯이 조명의 간접분에 대한 영향을 바르게 적용할 수 있어야 피조면의 전체적인 입사광속을 구할 수 있다. 이와 같은 간접분을 어떻게 고려할 것인가에 따라 조도계산에는 여러 종류가 있는 것이다.

간접분을 고려하는 계산법의 시초는 1916년에 미국의 W. Harrison과 E. Anderson이 모형에 대한 실험을 통하여 제안한 삼배광법에 의한 것이다. 즉 모형을 제작하여 실내조도를 측정하고, 이 결과를 응용하여 실내의 작업면에 대한 조도를 예측할 수 있도록 실용화한 것이다. 우리나라도 이 방법을 사용하고 있고, 인접한 일본도 이 방법을 사용하고 있다.

그러나 삼배광법은 간접분의 평가에 있어서 정확도가 다소 떨어진다는 단점을 갖고 있기 때문에, 각국의 조명학회나 국제조명위원회(CIE)에서는 보다 개선된 방법을 사용하고 있다. 대표적인 것들이 북미 조명학회(Illuminating Engineering Society of North America, IESNA)의 구역공간법(Zonal Cavity Method, ZCM), 영국의 영국구역법(British Zonal Method), 국제조명위원회에서 권고하는 CIE법 등이 있다. ZCM법은 3배광법이 발표된 이후 상호반사 이론이 발전하면서, 1964년에 미국의 P. O'Brien이 기구제작자들과 협력하여 진행하였던 연구가 토대가

되었다. 또한 독일이나 프랑스에서는 삼배광법에 의한 조도계산법을 사용하고 있지만, 보다 정밀한 예측이 가능하도록 보완한 것을 사용하고 있다. 그리고 삼배광법은 보수율의 산정에 있어서도 정확도가 떨어진다.

조도계산법에는 평균조도를 구하는 것과 조도분포를 구하는 것이 있다. 앞에서 설명한 계산방법들은 평균조도의 계산방법이다. 평균조도의 계산은 작업면의 평균조도만을 구할 수 있을 뿐이고, 각 지점의 정밀한 조도분포를 구하는 것은 원리적으로 불가능하다. 반면에 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation)을 이용한 입사추적법이나 적분방정식을 이용한 해석적방법 등은 조도분포를 구할 수 있는 방법이다. 이 방법들은 비교적 정확도가 높으나, 실내의 조도계산에 이용하기에는 실용성이 떨어진다. 또한 손으로 계산하기에는 많은 계산량을 갖고 있으므로 컴퓨터에 의한 계산에 의존할 수밖에 없다. 컴퓨터에 의한 조명설계 프로그램은 해석적방법에 의한 것이 많이 있다.

2.3. 평균조도계산의 원리

광속법에 의해 평균조도를 계산하는 식에는 여러 가지의 수치를 나타내는 요소가 포함되어 있다. 이 수치가 지니고 있는 의미를 정확히 이해하는 것이 올바른 조도계산을 할 수 있는 능력이다. 조도의 정의에서 출발하여, 다음과 같은 프로세스로 설명할 수 있다.

평균조도는 어떤 면에 입사하는 광속을 면적으로 나누어 준 값이다. 임의의 공간에 조명기구가 N개 설치되어 있고, 조명기구 내에 수용되어 있는 램프의 전체 발산광속이 F lumen이라고 하면, 조도는 다음과 같다고 생각할 수 있다. 일단 램프에서 나오는 광속의 전부가 작업면에 도달한다고 가정하는 것에서 출발한다.

$$E'' = \frac{N \cdot F}{A} \quad (1)$$

위 식은 가장 단순한 식이다. 이 식으로 조도계산이 끝이라면 얼마나 편할까? 그러나 앞에서 설명하였듯이, 램프에서 발산하는 광속이 전부 작업면에 도달하지는 않는다. 조명기구의 반사판이나 루버의 면 등에서 흡수되는 성분이 있고, 또 일부는 실내 마감면에서 흡수되기도 하고, 창을 통하여 투과하여 없어지기도 한다. 이와 같이 작업면에 이르지 않는 광속을 고려하여, 램프의 총발산광속에 대한 작업면에 도달하는 광속의 비를 조명율이라고 한다. 조명율은 ① 조명기구의 광학적 특성(기구효율, 배광특성), ②공간의 물리적 규모(실의 넓이나 높이), ③조명기구의 설치 위치(높이), 그리고 ④실내 마감재의 반사율 등에 의해 결정된다.

그렇다면 간접분에 대한 것은 실의 형태나 마감재의 반사율에 따라 개별적으로 극히 복잡한 계산을 하여야 구할 수 있을 것이다. 게다가 건축공간의 크기나 형상은 건물에 따라 제각각이다. 앞에서 설명한 조명율에 영향을 주는 요인 4가지 중에서 조명기구의 광학적 특성이 결정되어도, 나머지 3가지의 변수를 고려할 수 있는 방법이 없는 것이다. 그래서 이러한 건축적 변수와 조명기구의 광학적 특성까지 하나로 묶어서 모듈화한 것이 조명율표이다. 먼저 공간의 물리적 규모를 실지수를 통하여 모듈화하고, 반사율을 규정하여 램프의 발산광속에서 작업면에 도달할 수 있는 광속의 양을 계량할 수 있도록 한 것이다.

실지수는 아래의 식에서 보듯이, 실의 치수와 관련된 개념이 아니고 실의 형상과 관련된 개념이다. 이것은 작업면의 조도가 높아지거나 낮아지는 것을 직접적으로 표현할 수 있는 것은 아니다. 램프의 발산광속 중에서 작업면에 도달하는 광속의 비율의 대소를 의미하는 것이다. 즉 실내의 평면이 동일해도 실내의 높이에 따라 실지수는 차이가 있다. 예를 들어 동일한 배광곡선을 갖는 조명기구를 사용해도, 높이가 높은 공간은 벽면에서 흡수되는 빛의 양이 증가하고 상대적으로 작업면에 도달하는 광속의 양은 줄어든다. 그러므로 벽면적이 클수록(실지수가 낮을

수록) 조명율은 저하하는 것이다. 조명기구 제조회사의 카탈로그를 살펴보면 쉽게 알 수 있다. 같은 의미에서 직접조명용 조명기구가 간접조명용 조명기구보다 조명율이 높은 것이고, 또 실내 마감재의 반사율이 높을수록 조명율이 높은 것이다.

$$\begin{aligned} \text{실지수} &= \frac{\text{바닥면적} + \text{천장면적}}{\text{벽면적}} \\ &= \frac{2 \cdot (\text{가로} \times \text{세로})}{2 \cdot (\text{가로} \times \text{세로}) \cdot \text{높이}} \\ &= \frac{x \cdot y}{(x + y) \cdot h} \end{aligned}$$

위의 (1)식에 조명율을 고려한다면 조도는 다음과 같이 바꾸어 생각할 수 있다.

$$E' = \frac{N \cdot F \cdot U}{A} \quad (2)$$

이제 조금 복잡해진다. 그러나 아직 문제가 남아 있다. 지금까지는 램프나 조명기구가 신제품이고, 실내도 공사를 완료한 직후의 청결한 상태로 가정했다. 즉 램프의 발산광속은 초기광속을 기준으로 하였고, 조명기구나 실내면은 먼지가 쌓이지 않은 깨끗한 조건으로 계산한 것이다.

그러나 시공이 완료된 후에 사용시간이 경과함에 따라 ①램프의 동정특성에 따른 광속감퇴, ②조명기구의 광학적 경년 열화, ③램프나 조명기구에 쌓이는 먼지에 의한 광속 저하, ④실내 반사면의 오손에 의한 광속 저하 등으로 작업면에 도달하는 광속은 감소하는 것이다. 하지만 ④번에 의한 광속의 저하는 삼배광법의 조도계산에서는 고려하지 않는다. 이와 같이 신설 당시의 초기조도와 램프를 교체하기 직전 조도의 비를 보수율(유지율)이라고 한다. 이렇게 보수율을 고려해야하는 이유는 사용기간 중에 광속이 저하된 상태에서도 항상 권장조도기준에서 규정하는 조도가 확보되어야 하기 때문이다. 참고로 감광보수율은 보수율의 역수로 규정하고 있다. 따라서 (2)식

에 보수율을 고려하면 조도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E = \frac{N \cdot F \cdot U \cdot M}{A} \quad (3)$$

이외에도 램프의 특성 변동율이 있다. 지금까지는 램프를 정격조건에서 사용한다는 전제에서 고려한 내용이지만, 정격조건 이외의 조건에서는 당연히 광출력이 저하한다. 여기에는 ①정격전압 이외의 전압 변동에 의한 광속저하, ②방전램프의 경우에 안정기의 특성 차이에 따른 광속저하, ③주위온도의 변화에 따른 광속저하 등이 있다. 이것을 보상율이라고 한다. 다시 (3)의 식에다 보상율을 고려한다면 조도는 다음과 같다.

$$E = \frac{N \cdot F \cdot U \cdot M \cdot k_p}{A} \quad (4)$$

그러나 삼배광법에 의한 조도계산식에는 위와 같은 보상율은 빠져 있음을 알고 있다. 즉 삼배광법에 의해서 조명설계를 하는 경우에, 이와 같은 보상율은 적용되지 않는 것이다. 어쨌든 우리가 흔히 조명에 관한 서적 등에서 쉽게 접하는 광속법에 의한 조도계산식은 이러한 과정을 거쳐 성립하였음을 이해한다면, 생각없이 암기하는 것보다는 용이하게 기억할 수 있을 것이고, 또한 보다 효율적으로 응용이 가능할 것이다.

2.4. 조명기구의 배치

조명계산의 결과 소요광속이 산출되면, 설계 초기에 미리 선정하여 두었던 조명기구를 이용해서 그 수량을 결정한다. 그리고 수량이 결정되면 공간의 물리적 규모를 고려하여 조명기구 배치를 하여야 한다.

조명기구의 배치는 조명기구의 종류나 형태에 의해서도 좌우되지만, 천장의 마감 형태에 의해서도 영향을 받는다. 또한 스피커나 공기조화용 디퓨저 등과 같이 천장에 함께 취부하는 각종 설비의 단말기구류

의 배치에 의해서도 영향을 받게 된다. 하지만 천장에 노출시키거나 펜던트식으로 취부하는 경우에는 조명기구의 배치가 다소 자유로운 편이다. 그러나 건물의 구조가 노출되는 경우나, 이중천장이 있어도 천장면이 일정한 패턴을 갖고 마감되거나 경사가 있다면 기구 배치가 자유롭지 못하고, 그 결과 균제도 확보가 어려워진다.

권장조도기준 등에 의거한 적절한 조도의 확보도 중요하지만, 동시에 조명의 질적인 면을 고려하여 피조면의 균제도가 확보되어야 한다. 시야의 범위 내에서 동일한 재질이나 색채, 혹은 반사율을 갖는 면이 불규칙한 밝기의 얼룩으로 인해서 생기는 불쾌감이나 작업을 저하시키는 것을 막기 위한 것이다.

그러나 넓은 실내공간 전체의 작업면에 균일한 조도를 얻는다는 것은 불가능하다. 그리고 그것은 아무런 의미가 없는 것이다. 실내 전체를 한눈에 볼 수 있는 사람은 없기 때문이다. 이런 의미에서 균제도가 검토되어야 할 부분은 다음과 같다.

- 책상이나 작업대와 같이 하나의 작업이 지속적으로 이루어지는 평면.
- 경기장의 관람석에서 내려다보는 그라운드나 상점의 바닥면과 같이 시선을 차단하지 않는 범위에서 한눈에 볼 수 있는 연속된 면. 특히 시각환경이 중요한 공간의 경우에는, 연속된 벽면도 포함한다. 따라서 다운라이트 등에 의해 건축마감재의 특성과 관계없이 벽에 나타나는 스칼롭(scallop) 현상도 부적절한 것이다.
- 교실의 책상처럼 동일한 물체가 연속해서 보이는 경우에, 한눈에 볼 수 있는 개개의 면 전체.

우리나라에서 사용하는 균제도의 판단기준은 보통 북미조명학회의 S/MH(Spacing to Mounting Height)나 s.c(spacing criterion)의 지표이다. 최근에는 양자의 의미를 혼동하여 사용하기도 하고, 어떤 경우에는 동일한 것으로 이해하는 경우도 있으나, 본래 전자는 형광등기구의 축 방향 사이의 간격을 의미하고, 후자

는 축 방향이나 대각선 방향의 점 중에서 짧은 쪽의 간격을 의미한다.

간접조도를 고려하지 않았을 때, 작업면의 조도차이가 가장 심하게 나타날 수 있는 곳은 기구와 기구 사이나 대각선의 중심점이다. 그래서 조명기구의 직하부의 직접조도를 산출하고, 그 조도의 50%가 되는 수평방향의 거리를 구해서, 그 거리의 2배가 되는 거리를 조명기구 설치높이에 대한 비로 표시하는 것이다. 같은 방법으로 대각선상의 점은 4개의 조명기구에 의한 영향을 고려하여 25%의 비가 되는 거리이다. 조명기구 카탈로그의 배광곡선을 이용해서 확인하면 쉽게 이해될 것이다.

이러한 수치는 수평면의 조도가 무리가 없는 범위에서 균일해질 수 있도록, 조명기구 제작자가 조명설계자에게 제시하는 값일 뿐이라는 사실을 기억해야 한다. 그러므로 선조명처럼 조명기구를 일렬로 배치한다든가, 수직면의 조도 확보가 중요하다든가, 작업자의 손에 의한 그림자가 생기는 것을 막기 위해서라면, 기구사이의 간격은 카탈로그에 제시된 수치보다 짧아질 수밖에 없다. 바람직한 기구간격은 설계자가 직접 검토하여야 한다. 보통 기구 설치 높이의 0.9-1.2정도를 설치간격으로 설정하는 것이 바람직하다는 경험적인 수치가 있다. 그리고 이것은 작업면의 조도를 좀 더 균등하게 만들어 줄 수 있는 상호반사에 의한 간접조도는 고려하지 않고 단지 직접조도로 비교하는 것이기 때문에, 간접조명기구나 박쥐날개형(batwing type) 조명기구 등에는 해당되지 않는 내용이라는 사실도 기억하고 있어야 한다.

근본적으로 s.c와 같은 지표는 광속법에 의한 조명계산을 완료하기 전에, 조명설계자가 미리 실내의 기구 배치나 기구의 설치 수량을 가늠할 수 있도록 하는 보조도구일 뿐이다. 조명기구의 취부 높이에 대한 실제적인 등기구의 배치간격으로 확정해서 사용하는 것은 바람직하지 않다. 특히 조명기구의 배광특성이 비대칭이거나 박쥐날개형인 경우에는 설계자가 직접 제작자에게 확인하는 것이 바람직하다. 이와 같

은 점을 감안하여 조명기구의 배치 방법과 순서를 살펴보자. 기구배치를 포함한 광속법에 의한 조명설계의 기본적인 순서는 다음과 같다.

① 조명방식을 결정하고, 이에 따른 광원과 조명기구를 선정한다.

② 조명기구의 s.c를 확인하여 하나의 조명기구가 담당할 구역을 검토한다. 이 때 실내의 반사율과 보수율을 확인하고, 이용율을 추정하여 요구되는 조도가 확보될 수 있는지 여부를 검토한다.

③ 광속법에 의해 권장조도기준에 의한 조도를 확보할 수 있도록 조명계산을 수행한다.

- 실지수를 계산한다.
- 반사율을 고려하여 조명율을 결정한다.
- 보수율을 결정한다.

④ 소요광속을 산출하고, 램프의 정격을 결정한다. 그리고 조명기구의 수량을 산출한다.

⑤ 실제적인 기구간격을 결정하고, 조명기구의 수량을 확정한다.

⑥ 조명기구의 배치계획을 작성한다.

경험이 많은 조명디자이너는 ①번의 과정을 거치면서 시행착오를 최소화한다. 국내의 조명설계의 관행을 보면 ②번의 과정을 생략하고, ③의 과정을 마친 후에 바로 s.c를 기구간격으로 바로 확정해서 나머지 과정을 진행한다. 그래서 가로방향이나 세로방향 중의 하나는 s.c가 바로 기구설치간격이 된다. 설계를 잘못하고 있는 것이다.

올바른 방법을 살펴보자. 먼저 ④의 과정을 마치고 산출한 조명기구의 수량을 N_i , 실내의 면적을 A 라 할 때 개략적인 기구간격 S_i 는 다음과 같다.

$$S_i = \sqrt{\frac{A}{N_i}}$$

다음에 이 수치를 이용해서 실내의 가로방향과 세로방향의 기구간격을 확인한다. 즉 실내의 가로, 세로 길이를 개략적인 기구간격 S_i 의 값으로 나눠주면, 각 방향의 조명기구 설치수량을 구할 수 있다. 이렇

게 하여 얻은 가로, 세로 방향의 기구의 수를 각각 N_r , N_c 라고 하면, N_r , N_c 는 다음과 같다.

$$N_r = \frac{\text{가로방향의 실내의 길이}}{S_t},$$

$$N_c = \frac{\text{세로방향의 실내의 길이}}{S_t}$$

그러나 위에서 계산한, 즉 가로, 세로 길이를 개략적인 기구간격 S_t 의 값으로 나눠서 얻은 수치는 대개 정수가 되지 않는다. 그러므로 천장의 마감 형태나 패턴 등을 고려하여 조정한다. 이렇게 수치를 조정하면 다소간의 기구 수량의 증감이 불가피하게 된다. 이 때에 조명기구 수량을 증가시키는 것은 균제도의 확보나 소요조도의 확보에는 유리하지만, 초기투자비용과 유지관리비용이 증가하므로 적절한 범위 내에서 조정되어야 한다. 이러한 조정이 끝난 후에 최종적으로 결정된 조명기구의 수량은 다음과 같다.

$$N = N_r \cdot N_c$$

이제 실제적인 기구의 간격을 결정한다. 먼저 벽면에 인접한 부분의 조도 확보가 중요한 경우와 그렇지 않은 경우이다. 책상을 벽에 붙여서 작업하는 경우 등이 전자에 해당한다. 벽면에 접한 부분의 조도 확보가 중요한 경우에는 가로방향이나 세로방향에 관계없이 실내의 길이에 따라 다음과 같이 결정한다.

$$S = \frac{\text{실내의 길이}}{(N_r - 1) + 2/3}$$

$$= \frac{\text{실내의 길이}}{N_r - 1/3}$$

또한 벽면에 인접한 부분의 조도가 중요하지 않은 경우에는 다음과 같다.

$$S = \frac{\text{실내의 길이}}{(N_r - 1) + 1}$$

$$= \frac{\text{실내의 길이}}{N_r}$$

이러한 과정을 통하여 얻은 값으로 기구배치도를 작성하는 것이다. 광속법에 의한 조도계산은 조명기구의 분포밀도가 균등한 경우에 실효성이 있는 것이다.

2.5. 조도계산식과 효율사이의 관계

광속법에 의한 조도계산식은 전기에너지를 입력으로 하고, 작업면의 도달 광속(조도×작업면의 면적)을 출력으로 하는 시스템이다. 이와 같은 공간에서 T시간동안 작업이 지속되었다고 하자. 그리고 조명기구 하나당의 소비전력이 w 라고 하면, 광속법에 의한 조도계산식에서 우리는 다음과 같은 식을 유도할 수 있다. 즉 입력에너지를 P 로 하는 계통의 전달함수는 다음과 같다.

$$G = \frac{E \cdot A}{P}$$

$$= \frac{F \cdot N \cdot U \cdot M}{P}$$

$$= \frac{F \cdot N \cdot U \cdot M}{w \cdot N \cdot T}$$

$$= \frac{F \cdot U \cdot M}{w \cdot T}$$

위의 식은 다음과 같이 항목별로 정리할 수 있다.

$$G = \frac{F \cdot U}{w} \cdot \frac{1}{T} \cdot M$$

위 식의 처음 항은 발광효율과 조명용의 곱이고, 두 번째 항은 광원의 점등시간에 관한 것이다. 마지막 항은 보수율에 대한 것이다. 우리가 논의하려고 하는 내용은 첫 번째 항에 관한 것이다.

3. 발광효율

인공광원의 발광원리는 크게 온도방사에 의한 것과 루미네센스에 의한 것이 있다. 백열전구나 할로겐전구, PAR램프, 크립톤전구 등은 온도방사에 의한 것이고, 루미네센스에 의한 대표적인 광원이 형광램프이다. 형광램프는 전기루미네센스와 형광루미네센스를 이용하고 있다.

반복되는 이야기이지만, 이러한 인공광원의 입력 에너지는 전기에너지이다. 전기에너지가 여러 가지의 에너지변환 과정을 거쳐 빛이 발생하는 것이다. 형광램프의 예를 들어보자. 외부회로를 통하여 전원이 연결되면, 전기에너지가 램프에 공급된다. 공급된 전기 에너지는 먼저 형광램프의 양단에 있는 전극에서 전자가 방출하는 데 필요한 운동에너지로 변환된다. 다음에 방출된 전자가 갖고 있는 운동에너지는 형광램프의 내부에 봉입된 수은가스와 충돌하여 방사에너지로 전환된다. 이 때 발생하는 대부분의 방사는 253.7[nm]의 파장을 갖는 자외방사이다. 이것을 가시방사로 바꾸어주기 위해서 형광루미네센스를 이용한다. 즉 램프의 내벽에 도포된 형광체에 의해 자외방사가 파장이 긴 가시방사로 전환되는 것이다. 이러한 에너지의 변환과정을 거치면서, 입력에너지는 시각적으로 빛의 역할을 하지 못하는 저급의 에너지로 소모되는 것이다. 그림 3은 P사의 평균연색평기수가 82인 36[w] 직관형 형광램프의 입력에너지의 배분비율을 표시한 것이다.

램프의 입력에너지 (36.0w)				
방전관 전력 (30.1w)				전극의 열손실 (5.9w)
가시방사 (1.2w)	자외방사 (22.5w)		방전관 내부의 열손실 (6.4w)	
	형광체를 통한 가시방사 (8.8w)	자외방사 (0.2w)		
전체 가시방사 (10.0w)		대류, 전도 및 적외방사 (25.8w)		

그림 3. 형광램프의 에너지 배분

이제 전기에너지가 빛에너지로 전환되는 과정을 살펴보자. 그림 3의 상부의 굵은 선이 입력부분이다. 또 그림의 중간의 굵은 선은 형광체를 의미하고, 하부의 굵은 선은 유리관 외부의 출력이다. 관의 외벽

을 통해 나오는 빛은 대부분이 형광체를 통과해서 나오는 것이라는 것을 쉽게 알 수 있다.

전기적 입력이 손실이 없이 전부 가시방사로 바뀌고, 또한 파장 555[nm]의 단파장 방사를 한다면 발광효율은 683[lm/w]가 될 것이다. 그러나 형광체를 통한 빛은 가시방사의 전체 파장에서 정해진 분광분포를 보이므로, 입력에너지가 완전히 가시방사로 전환된다고 해도 발광효율은 떨어질 수밖에 없다. 그리고 전극손실, 방전관 내부의 손실, 적외방사나 자외방사로 소모되는 것들을 고려하면, 불과 27.8%의 입력에너지만이 가시방사로 전환되는 것이다. 여기에 안정기의 손실을 고려한다면, 이 비율은 더욱 감소할 것이다. 전기적 입력에너지에 대한 각종 광원의 방사에너지와 손실에 대한 비율은 표 1과 같고, 이것을 빛으로 전환한 발광효율은 표 2와 같이 얻어진다.

표 1. 각종 광원의 에너지 배분

구분	광원				안정기
	가시방사	자외방사	적외방사	대류.전도	
백열전구 (100w, coiled-coil)	10.0	-	72.0	18.0	-
형광램프(40w, T12)	19.0	0.4	30.7	36.1	13.8
고압수은램프(400w)	14.6	1.9	46.4	27.0	10.1
메탈헬라이드램프(400w)	20.6	2.7	31.9	31.1	13.7
고압나트륨램프(400w)	25.5	0.2	37.2	22.2	14.9
저압나트륨램프(180w)	29.0	-	3.7	49.1	18.2

표 2. 각종 광원의 발광효율

구분	발광효율(lm/w)
백열(할로겐)전구	5-23
형광램프(CFL포함)	25-98
고압수은램프	25-42
메탈헬라이드램프	45-98
고압나트륨램프	45-110
저압나트륨램프	80-150

표 2에 제시된 수치는 안정기의 손실을 고려한 발광효율이다. 대개 메탈헬라이드램프는 고압수은램프의 거의 2배의 발광효율을 보이고, 저압나트륨램프는 형광램프의 두배의 발광효율을 갖고 있다고 이해하는 것이 편하다. 그래도 흔히 알고 있는 수치와는 상당한 차이가 있다고 생각할 수 있다.

그러나 램프의 발광효율은 기술 발전에 따라 계속 상승하고 있다. 외국의 사례이지만 형광램프가 최근에 거의 100[lm/w]의 효율로 상승하고 있다. 또 백열전구의 한 형태인 할로겐전구는 20[lm/w]가 넘는 것이 대다수이다. 하지만 램프의 종류도 다양화하고 있다. 안정기가 내장되어 있는 CFL(compact fluorescent lamp)은 정격출력이 낮은 경우에는 발광효율이 상당히 떨어지고, 메탈헬라이드램프도 연색성을 개선한 분자발광형은 50[lm/w]정도이다. 기술발전 에 따라 효율은 상승하지만, 동시에 그 종류도 다양화하여 표에서 보듯이 넓은 범위의 발광효율로 나타나는 것이다.

램프의 발광효율을 이야기할 때, 안정기의 손실을 배제한 상태에서 비교하는 것은 무의미한 일이다. 형광램프의 발광효율은 사용하는 형광체의 종류에 따라 많은 차이를 보이며, 주변의 온도조건이나 공급전압의 주파수 특성에 의해서도 변화한다. 특히 형광램프는 안정기의 선택이 중요하다. 그러므로 안정기와 형광램프의 적절한 조합은 조명효율과 관련하여 국내의 여건상 중요한 토론의 대상이 될 것이다. 안정기를 포함한 회로적인 특성의 변화와 함께 검토가 필요하다. 대개 저압나트륨램프는 170-180[lm/w], 메탈헬라이드램프는 125[lm/w]와 같은 값을 대표적인 값으로 이해하고 있다. 이것은 안정기의 손실을 고려하지 않은 최대치일 뿐이다. 실용적으로 적용하는 데에는 거의 소용이 없다. 시험공부 대비용이라고나 할까? 필요하다면 램프의 종류나 규격에 따라 국내에서 유통되고 있는 램프들의 특성과 함께 발광효율을 정리하여 활용하는 것이 설계에 도움이 될 것이다.

발광효율은 램프의 소비전력이 증가할수록 상승한

다. 램프의 종류에 따라 상승하는 정도의 차이는 있지만, 대개는 정격용량의 증가에 따라 직선적인 증가를 한다. 한마디로 이야기하면 50와트 백열전구를 2개 사용하는 것보다는 100와트 1개를 사용하는 것이 에너지 측면에서 효율적이라는 것이다. 물론 초기투자비와 유지관리비도 감소한다. 그러나 램프 1개당의 광속이 과대하면 다음과 같은 문제점이 발생하므로, 무턱대고 용량이 큰 램프를 사용할 수 있는 것은 아니다.

- 조명기구 사이의 간격이 멀어져서 균제도가 떨어진다.

- 수직면조도의 저하

- 광원의 휘도제어가 요구될 수 있다.

- 실내의 zone별 회로제어가 불리하다.

- 1등만 소등이 되어도, 즉시 램프의 교환이 필요하다.

휴게공간이나 고급스러운 식당에 직관형 형광램프를 사용하지 않듯이 램프의 정격용량을 결정할 때는 통상적인 원칙이 있다. 이것은 실내의 높이와 조도기준에 의한 것이다. 즉 동일조도라면 천장의 높이가 높을수록 용량이 큰 것을 사용하고, 천장의 높이가 동일하다면 조도가 높을수록 용량이 큰 것을 사용하는 것이다.

4. 조명효율과 기구효율

조명기구는 공간의 특정한 요구조건에 맞추어 빛이 필요한 위치에 도달할 수 있도록 사용하는 것이다. 램프에서 빛이 나오는 것 이상으로 중요한 것이 원하는 시작업에 필요한 조명을 제공하거나, 효율적으로 보내는 것이다. 이렇게 필요한 부분에 어느 정도의 빛을 보낼 수 있는가하는 효율을 나타내는 것이 조명효율이다.

조명기구의 효율은 미국에서는 Luminaire Efficiency 이라고 표기하고, 유럽에서는 Light Output Ratio (of a Luminaire)라고 표기한다. 누구나 영문 그 자체로 쉽게

의미를 이해할 수 있다. Light Output Ratio는 상향광속비(upward light output ratio)와 하향광속비(downward light output ratio)의 합이다.

도로조명이나 실내조명의 경우 하향광속이 많을수록 조명율이 높아진다. 또 눈부심의 제어가 요구되지 않는다면 하면개방형이 기구효율이 높다. 즉 표 3에서 보듯이 조명기구의 형태가 단순하고, 광학적 제어가 간단할수록 기구효율이 높다. 표 3의 내용은 형광등기구의 개략적인 기구효율을 표시한 것이다.

표 3. 개략적인 기구효율

형광등기구의 형태	기구효율
반사갓이 없는 형태	0.9
반사갓이 있는, 하면개방형	0.8-0.6
반사갓이 있고, 하면에 젓빛커버나 패넌을 설치	0.6-0.5

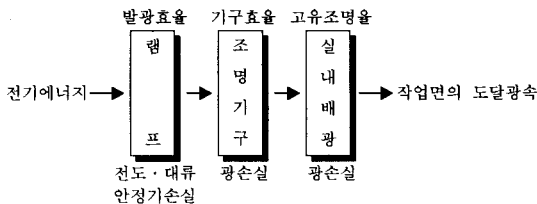


그림 4. 조명시스템의 효율사이의 관계

반면에 투광조명기구의 경우에는 beam factor나 beam efficiency가 중요하다. 나전구의 광속중에서 beam에 포함되는 광속의 비율을 의미한다. 미국에서는 최대광도의 1/10이 되는 광도의 각도를 의미하고, 유럽에서는 최대광도의 1/2이 되는 광도의 각도를 말한다. 이에 따라 beam angle이라고도 한다.

그림 4를 통해 램프에서 나온 빛이 작업면에 도달하는 과정을 살펴보자. 전기적 입력이 램프에 가해지면 빛이 나온다. 빛 외에도 적외방사나 자외방사가 있고, 대류나 전도에 의한 손실도 있다. 방전램프의

경우에는 안정기의 소모전력도 있다. 이러한 손실을 제외한 나머지가 램프에서 방사되는 빛이며, 앞에서 설명한 바와 같이 전기적 입력에 대한 발산광속을 발광효율이라고 한다.

다음에 이 램프가 조명기구에 수용되면 기구의 반사면 등에서 흡수되는 빛의 손실이 있다. 램프 자체의 발산광속에 대한 조명기구에서 나오는 광속의 비율을 기구효율이라고 한다. 다음에 이 조명기구에서 나온 빛은 실내의 공기 중에서 산란되거나 흡수되는 것도 있고, 또 실내의 마감재에 흡수되는 것도 있다. 그러므로 조명기구에서 나온 빛 중에서도 작업면에 도달하는 것은 역시 부분적이다. 이렇게 조명기구의 발산광속에 대한 작업면에 도달하는 광속의 비율을 고유조명율이라고 한다.

조명율은 기구효율과 고유조명율의 곱의 형태임을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 기구의 효율과 고유조명율이 높은 것이 조명율이 높은 것이고, 이것이 조명시스템이 효율적으로 계획될 수 있는 첩경임을 이해할 것이다. 그러나 조명환경과 연결해서 생각한다면 항상 그렇다고 단언할 수는 없다.

실내 마감재의 반사율이 낮으면 조명율이 떨어진다. 결과적으로 보다 많은 램프가 소요된다. 반면에 너무 반사율이 높으면 시작업대상물의 배경이 상대적으로 밝아져서 물체의 반사율이 낮은 경우에 조명효과가 떨어질 수 있으며, 과도한 휘도대비를 낳을 수 있다. 더욱이 경면반사를 일으킬 수 있는 부분은 잠재적인 눈부심의 요인이 된다. 이것은 실내의 마감재뿐만 아니라, 실내에 배치되는 각종 가구나 집기 등에도 해당한다.

외국에서 활동하고 있는 어느 조명디자이너의 이야기를 들어보자. 조명설계를 납품하고, 공사가 진행중인 현장에서 급히 연락이 왔다. 현장을 가서 보니, 당초의 계획과는 달리 실내가 온통 검정색으로 마감되었다. 튀는 디자인이라나, 아니 실내의 분위기상 검정색 계통이 어울린다나... 실내의 색상이 완전히 바뀐 것이다. 당연히 조도는 낮아지고, 조명기구

는 눈이 부셔서 불편하였다. 부랴부랴 조명기구를 바꾸어 추가하고 일단락되었다고 한다. 이렇게 되면 효율만의 문제가 아닐 것이다.

여기서 기구효율의 아이러니컬한 모습을 살펴보자. 일반적으로 간단한 조명기구일수록 기구효율은 높다. 전력이 충분하지 못하고 경제 형편이 어려웠던 1960년대만 해도, 가정집에서 사용하는 램프는 대부분 백열전구였다. 백열전구를 소켓에 끼워서 전선을 길게 연결하여, 벽에 못을 박고 이리저리 필요한 곳을 밝히며 살았던 시기였다. 이렇게 소켓에 끼운 백열전구는 소켓을 하나의 조명기구라고 한다면, 기구효율이 100%이다. 반대로 복잡한 광학계를 가진 조명기구는 기구 자체에서 빛이 흡수되어 기구효율이 저하한다. 예를 들어 집광성이 강한 기구는 빛을 필요한 부분으로 집중해서 조명할 수 있기 때문에 상대적으로 조명효율이 높은 것이다.

동일한 배광곡선을 갖는 기구라면 기구효율이 높은 것이 바람직하지만, 배광곡선이 다를 경우에는 단지 기구효율이 높다고 좋은 것은 아니다. 즉 중요한 것은 조명율이지 기구효율이 아니다. 그리고 조명율도 작업면의 조도와 관련되어 있기 때문에 실내의 전체적인 밝기의 분포를 고려할 때는 단지 조명율 하나의 지표로 조명기구를 선정하는 것도 무리이다. 그러므로 기구효율이나 조명율과 같은 수치는 전기적 입력에 대해 조명의 대상이 되는 시각대상물의 조도를 하나의 물리적인 시스템으로 고려해야 하고, 또 이를 평가하여 이해할 수 있는 안목을 지녀야 한다는 것이 중요하다.

조명율이 낮은 조명기구라면, 당연히 작업면의 조도는 낮아질 것이다. 그러나 조명의 질적인 측면이 잘 배려되어 있다면, 즉 조명시스템과 조명환경이 적절한 연결고리를 갖고 중첩되어 있다면, 보다 쾌적하고 가시도가 높으며, 작업능률을 향상시킬 수 있는 조명환경이 될 것이다. 그로 인해 다소 조명율이 낮더라도 좋은 조명효과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 안타깝게도 현재까지는 조명의 질적인 측면과 양

적인 측면을 생산성이나 사람의 심리적 효과까지 연계해서 수식적인 상관관계를 밝힐 수 있는 충분한 방법이 없다는 것이다.

이쯤해서 다시 한번 전기에너지에 대해 생각해 보자. 전기에너지는 발전 과정을 거쳐 생산된다. 우리나라의 발전 형태를 살펴보면, 지금은 원자력발전의 비중이 커져가고 있지만, 아직도 첨두부하를 담당하는 것은 수력이나 화력이다. 그 중에서 화력발전의 발전효율은 불과 35%를 넘지 못하고, 발전소에서 가동이나 공장과 같은 전기사용장소까지의 송배전 손실을 고려한다면 겨우 30% 정도이다. 첨두부하용 발전소의 경우는 이것도 못된다.

이런 상황에서 조명설비에 사용되는 전력은 어느 정도가 빛으로 전환되고 있을까? 쉽게 말한다면, 30%의 발전효율에 다시 발광효율과 조명율을 곱한 것이 인공조명에 의해 얻는 빛이다. 표 1에서 보듯이 광원의 입력에너지에 대한 가시방사에너지의 비율은 평균해서 20%나 될까? 거기다 조명효율을 고려한다면, 화석연료가 갖고 있는 에너지의 불과 2-3%의 에너지가 빛으로 이용되고 있는 것이다. 여기에다 보수를까지 고려한다면?... 현대 기술과 문명의 한계는 아닌가 모르겠다.

태양의 효율은 어떨까? 자연채광은 본래 천공광을 이용하는 것에서 시작하였지만, 요즘은 직사일광을 활용하려는 노력이 증가하고 있다. 태양광추적시스템 등이 그것이다. 아직은 전기요금이나 인공광원이 이러한 시설에 소요되는 비용보다 저렴하다는 경제적인 논리에 의해 머뭇거리고 있지만, 얼마 안되는 시간에 석유나 석탄이 다이아몬드보다 비싸지는 시기가 오지 않을까? 우리는 우리의 지혜를 사랑하기보다는 창조주가 주신 것을 잘 활용하는 겸손이 더 필요한 시대에 살고 있는 것이다.

5. 맺는 말

지금까지 우리는 광속법에 의한 조명계산과 관련

된 조명효율 이야기를 했다. 이 효율은 전기에너지를 입력으로 하여 작업면에 소요광속을 확보하는 데 요구되는 것이다. 조명의 물리적인 시스템의 역할은 권장조도기준에 부합하는 조도로 시작업대상물을 포함하는 작업면의 밝기를 확보하는 것이라고 설명할 수 있다.

조도계산식과 효율사이의 관계를 다시 한번 살펴보자. EA/P의 값을 효과적으로 하기 위해서는 권장조도기준의 조도나 작업면의 면적에 대한 검토가 필요하다. 하지만 권장조도기준이나 작업면의 면적은 변경이 불가능한 요소이다. 그러나 작업면의 면적은 작업의 내용에 따라 충분히 구분이 가능하다. 작업면의 구획이 가능하다면, 이 식은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{E \cdot A}{P} = \sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot A_i}{P_i}$$

즉 권장조도기준과 작업면의 면적을 조정할 수는 없지만, 위와 같이 구분하면 분명히 P의 값 자체를 줄일 수 있는 것이다. 이런 의미에서 전반조명으로 실내의 조명계획 전체를 마무리하려는 생각을 바꾸어야 할 것이다. 우리는 고조도를 필요로 하는 짧은 시간동안의 작업시간을 위해서 높은 조도의 전반조명으로 조명설계를 하는 우를 벗어나야 할 것이다. 주택이나 아파트의 천정등은 어두워지기 시작하면 켜져서 잠들기 전이나 소등하고, 사무실에서는 정말로 항상 테이블웍이나 컴퓨터에 매달려 있는 것인지, 다시 검토해 볼 필요는 없는지, 확인되어야 한다.

사람의 삶의 패턴을 살펴보면, 일생의 대부분의 시간을 인위적인 공간 내부에서 체류하고 삶을 영위하는 것이다. 아마 생애 전체의 70-80% 시간을 보낼 것이다. 그리고 그 건축물은 혹독한 자연의 환경조건에 대비하여, 보다 쾌적하고 편안한 환경이 조성되도록 에너지를 사용하고 있다. 때문에 많은 물리적 에너지시스템이 건축물에 도입되는 것이다. 조명은 이

중에서 가장 중요한 서브시스템의 하나인 것이다. 하지만 인간의 감각과 지각체계는 위에서 표현한 물리적 에너지시스템의 전달함수로 적용되지 않는다. 물론 권장조도기준 자체에는 사회·경제적인 환경에 의해 성립한 것은 사실이다. 그리고 과학적 사고에 의한 인간의 생리적 조건도 어느 정도는 포함되어 있다. 그렇지만 인간의 감각과 지각의 결과로 나타나는 조명의 심리적 환경에 대한 것은 누락되지 않았나 한다. 이것을 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 있다면, 보다 용이하게 우리는 환경을 고려한 생태학적 조명계획을 수립할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) IE, International Lighting Vocabulary, IE Publication No. 17.4, 1987.
- (2) 일본조명학회, 조명용어사전, 한국조명·전기설비학회 번역, 도서출판 의재, 2000.
- (3) IESNA, Lighting Handbook (8th Ed.), 1993, pp.383-446.
- (4) J. Trivisono (ed.), Lighting, 1997, p.22.
- (5) Lighting Manual(5th ed.), Philips Lighting, 1993, p.22.
- (6) K. Chen, Energy Management in Illuminating Systems, CRC Press, 1999.
- (7) J. Trivisono(ed.), ibid., 1997.
- (8) 일본조명학회, ibid., 2000.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 홍 범(金弘範)

1954년 5월 25일생. 1978년 서울대 공대 공업교육과 전기전공 졸. 1994년 고려대 산업대학원 전기공학과 졸(석사). 1998년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 문화체육부 국립중앙박물관 건립추진기획단 설비과장.