

技術報告

照明分野에서의 컴퓨터 利用과 最近의 建築電氣設備 動向

第3回 照明·電氣設備 심포지움

目 次

- I. 照明分野에서의 컴퓨터 利用
(照明의 諸分野에 있어서 컴퓨터의 利用現況)
(江原大 工大 教授) 金 燾
- II. 最近의 建築電氣設備 動向
(株) 正林建築 機電理事) 柳 光 熙

I. 照明分野에서의 컴퓨터 利用 (照明의 諸分野에 있어서의 컴퓨터의 利用現況)

金 燾
(江原大 工大 教授)

1. 서론

1943년 진공관식 컴퓨터인 ENIAC이 제작된 이래 컴퓨터의 발달은 실로 눈부신 바 있으며 그 활용범위도 학문과 일상생활의 전범 위에 걸쳐지게 되었다. 특히 1970년대 중반부터 광범위하게 사용되기 시작한 마이크로컴퓨터는, 이를 이용하여 간단한 계산 및 계측을 행하고, 그 결과를 대형컴퓨터에 전송하여 복잡한 계산을 행할 수 있을 뿐 아니라, 마이크로컴퓨터 자체의 능력도 대단히 발달하여 범용컴퓨터로서의 기능을 충분히 발휘할 수 있는 단계에 이르렀다.

비교적 오래된 공학분야인 조명분야에서도 컴퓨터의 이용은 대단히 활발하며 이용상황을 분야별로 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 실험데이터의 단순한 통계처리
- (2) 계측의 자동화 및 정밀화
- (3) 이론과 실험을 기초로 한 시뮬레이션
- (4) 주어진 조건을 만족하도록 하는 Computer Aided Design(CAD)
- (5) 컴퓨터를 이용한 조명제어

실험데이터의 통계처리는 가장 기초적이며 소극적인 컴퓨터이용이라고 할 수 있으며, 어떠한 요소를 변경시키면서 반복실험을 수행한 결과를 컴퓨터에

저장하고 회귀분석을 행하는 경우 등을 예로 들 수 있다.¹⁾

이 분야는 조명이 국한되지 않는 일반적 분야이므로 설명을 약하고 이하(2)~(4)항에 대하여 설명한다. 또한 컴퓨터를 이용한 조명제어 분야도 실무적인 내용이므로 설명을 약한다.

2. 계측의 자동화와 정밀화

반도체의 발달과 더불어 최신의 계측기들에는 대부분 마이크로프로세서가 내장되어 종전의 계측기에서는 수행할 수 없던 다양한 기능을 갖게 되었으며, 측정된 결과를 컴퓨터에 전송하여 실험자의 요구에 따라 고도의 분석과 계산도 행할 수 있게 되었다.

조명분야에서 주로 행하여지는 계측은 전압, 전류 등의 전기적 양과 더불어 광원에서 방사된 빛의 스펙트럼, 색도, 연색성 등의 광학적 양, 그리고 아아크 및 방전관의 온도, 입자의 밀도 등 물리적 양들이다.

전압, 전류의 경우는 그 실효치뿐 아니라 순시치를 디지털스코우프로 측정하고 그 데이터를 컴퓨터에 보내어 과형분석을 행하는 실험이 이용되고 있다.^{2) 3)}

광학적 양의 경우는 과거 여러가지 장비를 이용하여 했던 것에서 벗어나 스펙트럼 분석장치와 마이크로컴퓨터를 연결하여 스펙트럼의 분석, 광원색의

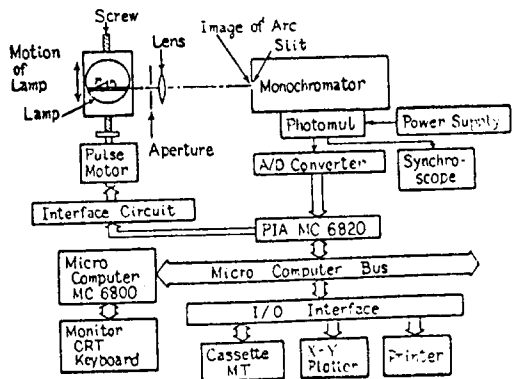


그림 1. 고압아아크 온도를 측정하기 위한 시스템의 개념도

측정, 연색성의 계산, 반사색의 측정, 박막 두께측정 등의 복합적 기능을 수행할 수 있는 장비가 판매되고 있다. 또한 조도분포의 측정, 배광 곡선의 작성 등도 계측기와 컴퓨터를 연결함으로써 자동화, 정밀화할 수 있다.

아아크 온도는 여러가지 방법으로 측정이 가능하나 요즈음 널리 사용되고 있는 방법은 스펙트럼 측정에 의한 방법이다.^{3) 4)} 이는 그림 1과 같은 아아크 단면에서의 비공진선(수은의 경우 435.8 nm 등)의 에너지를 x 방향으로 측정하고 이 데이터를 컴퓨터에 전송하여 아벨변환(Abel's inversion)을 행하여 반경의 함수로 바꾼뒤, 불츠만방정식을 풀어 아아크의 온도를 계산해 내는 방식으로 고광도방전등의 아아크특성을 해석하는데 필수적인 기술이다.

저압방전등에서는 전자 및 여기된 원자들의 밀도와 전자의 온도가 중요한 요소이며 이는 Langmuir의 탐침을 이용한 방법, Brown의 마이크로 웨이브를 이용한 방법, 그리고 Kruithof의 비공진성의 재흡수를 이용한 방법 등으로 측정, 계산될 수 있다.⁵⁾ ⁶⁾ 이중 후자의 방법은 방전에 대한 교란이 적으므로 정밀한 측정을 할 수 있으며, 역시 스펙트럼을 Monochromator 로 측정한 뒤 이 데이터를 이용한 계산은 컴퓨터로 수행하여야 한다.

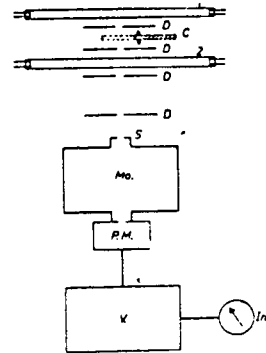


Diagram of the apparatus used for the transmission measurements.

1. discharge employed as a source, Mo. monochromator with slit S,
2. absorbing discharge, P.M. photo multiplier
- C. chopper, V. amplifier,
- D. diaphragms, In. reading instrument.

그림 2. Kruithof의 재흡수를 이용한 측정 시스템

3. 시뮬레이션

시뮬레이션에서의 컴퓨터 이용은 가장 적극적인 컴퓨터이용방법이라고 할 수 있으며, 이는 주어진 상황-광원과 안정기의 제작조건, 조명기구의 형상과 재질, 실내 및 실외에서의 조명조건 등에서 몇가지 조건을 가정하고 만들어진 이론식을 컴퓨터로 풀어서 여러 특성-광원의 전기적, 광학적 특성, 조명기구의 배광곡선, 조도분포 등-을 예측하려는 시도이다. 본장에서는 광원의 특성을 예측하려는 부분에 대해서 설명하고, 조명기구와 조도분포는 다음 장에서 설명한다.

3.1 백열전구

종래의 백열전구의 특성을 실험적으로 얻어진 수명, 전압, 광속, 효율 등의 관계를 실험식으로 정리하고 이를 이용하여 예측하거나 설계를 행하였다. 그러나 이 실험식은 매우 제한된 범위에서만 적용되는 것이 일반적이고 따라서 전혀 새로운 형식의 전구를 만드는 데에는 이용이 불가능하게 된다. 이런 측면을 고려하여 백열전구에서는 주어진 전구의 형태-필라멘트의 직경, 길이, 형태, 유리구의 크기, 봉입가스의 종류와 압력 등에 따라 소비전력, 에너지 손실, 발광광속, 수명 등을 이론적으로 예측하고자 하는 시도가 활발하다.

백열전구의 특성을 이론적으로 구명하려는 시도는 Langmuir의 선구적인 연구에서 비롯된다.⁷⁾ 고온의 필라멘트에서 열손실은 전도, 대류, 방사에 의하나, 온도가 높아질수록 봉입가스의 열전도율과 점성율이 높아져서, 필라멘트 주위에서의 가스에 의한 손실은 주로 전도에만 의존하고 대류를 무시할 수 있다는 가정하에 Langmuir는 sheath 모델을 제안하였다. 이 모델을 이용하면 백열전구에서의 에너지평형식은

$$W_{IN}=W_{RAD}+W_{GAS}+W_C \dots\dots\dots (1)$$

W_{IN} : 전기적 입력에너지

W_{RAD} : 방사에너지

W_{GAS} : 가스에 의한 전도에너지 손실

W_C : 내부도입선을 통한 전도에너지손실

로 되며 각 항들을 필라멘트의 온도와 형상, 봉입가

스의 종류와 압력, 유리구의 크기와 온도의 함수로 표현할 수 있다. 다른 변수들이 모두 주어지면 윗식을 만족하는 필라멘트의 온도를 컴퓨터를 이용하여 계산하고, 이에 따라 백열전구의 손실과 발산광속도 계산할 수 있다. 이하 백열전구의 효율과 수명을 예측하기 위한 시도들을 연대순으로 살펴보면 다음과 같다.

1971년 Coaton은 백열전구의 봉입가스로 주로 사용되는 기체와 이 기체들의 조합에 대하여 온도에 따른 열전도율 및 점성율을 계산하여 Langmuir 모델을 실제로 이용할 수 있는 바탕을 마련하였다.⁸⁾

1975년 Fischer 등은 Langmuir 모델을 사용하지 않고 유체방정식을 풀어 백열전구의 열손실과 가스의 이동을 계산하고 레이저의 간섭을 이용하여 측정 한 결과와 비교하였다.⁹⁾ (그림 3 참조)

1976년 Almer 등은 Langmuir sheath 내에서 텅스텐입자의 이동은 밀도확산(concentration dif-

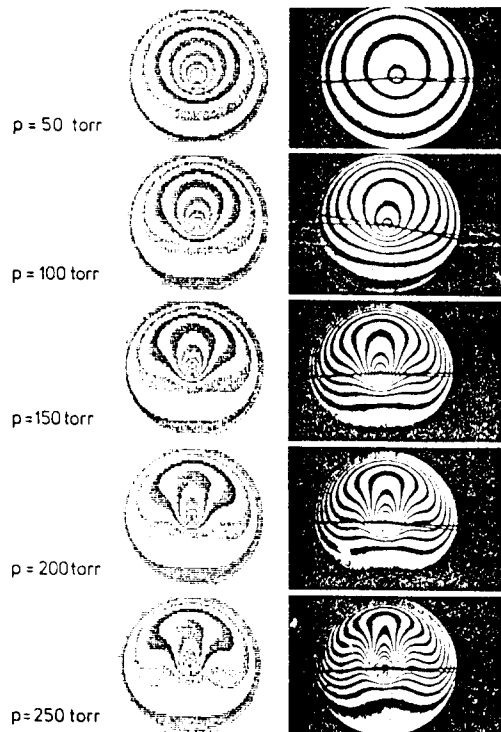


그림 3. Fischer에 의한 원통형 백열전구내의 온도분포
(좌 : 이론에 의한, 우 : 측정에 의한)

fusion) 에 의하고 sheath 외에서는 대류에 의한다는 가정하에 텅스텐의 손실에 대하여 계산하였다. 계산결과 이들은 텅스텐의 손실을 최소로 하는 유리구의 크기가 존재한다는 것을 발견하였다.¹⁰⁾

1977년 Coaton은 봉입가스의 압력과 작동시의 가스압력의 상관관계와 유리구의 온도가 전구의 수명에 미치는 영향을 계산하였다. 계산결과 일반전구에서는 유리구의 온도(즉, 주위온도)가 높아지면 수명이 증가하나, 원통형의 할로겐전구에서는 그 반대로 되는 것을 알아냈다.¹¹⁾

1977년 Passmore 등은 전구에 사용되는 유리구의 크기가 점점 작아지는 추세에 대하여 전구내에 생기는 불순물의 양과 텅스텐의 증발량을 계산하였다.¹²⁾

1981년 Brett 등은 적외선반사막을 설치한 전구가 이론적으로 에너지를 55%까지 절약할 수 있다는 것을 발표하였다.¹³⁾

1985년 Howe는 이전에 발표된 내용들을 집대성하여 일반형의 백열전구의 광속과 필라멘트온도를 오차 3% 이내에서 정확히 예측할 수 있도록 하였다.¹⁴⁾

3.2 저압방전등

저압방전등의 대표적인 형광등을 수은의 여기원자에서 발생한 자외선(파장 253.7 nm)을 이용하여 가시광선을 얻으므로, 이 자외선의 방사효율을 향상시키기 위하여, 물질수지 및 열수지의 관점에서 수은 여기원자의 광경방향의 밀도분포와 에너지 손실, 축방향의 전자에너지 손실을 해석하는 것을 중심으로 시뮬레이션이 진행되고 있다.

저압의 수은-회유가스방전에 대한 모델은 Kenty의 연구에서 시작된다. Kenty는 수은원자에 있어서 제1충돌, 제2충돌, 준안정원자에 충돌 전리를 고려하고, 수은-아르곤계방전의 비공진선 흡수를 이용하여 수은의 각 준위간 여기의 비율과 6³P 준위로 여기된 원자의 밀도를 정밀하게 계산하였다.¹⁵⁾

1956년 Waymouth는 Kenty의 계산결과를 이용하고, 여기준위를 6³P₁, 6³P₂에 한정된 뒤 전자의 에너지가 Maxwell 분포에 따르고 양극성확산(Ambipolar Diffusion)을 한다는 가정하에 형광등의 자외선출력과 효율을 계산하여 실측치와 충분히

일치하는 결과를 얻었다.¹⁶⁾ 이 연구중에서 Waymouth는 복잡한 적분방정식의 풀이와 시뮬레이션에 컴퓨터를 이용하였고, 이후 컴퓨터는 광원개발에 있어서 유력한 수단이 되었다.

1963년 Cayless는 Kenty와 Waymouth의 연구에서 방전관단면의 형상에 의한 영향을 배제하고, 수은 원자의 중요한 여기과정들을 모두 이론적으로 취급하여 컴퓨터를 이용하여 푼 이론식의 결과와 실험결과가 일치되도록 하였다.¹⁶⁾ Cayless는 미소체적에서, 기저상태의 수은원자, 여기된 수은원자, 전자, 수은 이온 등의 입자들에 대한 평형식과 에너지평형식을 만들고 이 식들을 동시에 만족시키는 전자온도, 전자밀도, 아르곤원자의 밀도와 여기원자들의 밀도를 구하였다.

1973년 Vriens은 Cayless 이후의 실험결과들에서 전자의 에너지분포가 Maxwell분포가 아니며, 특히 원자의 여기에너지보다 높은 에너지에서 많은 편차를 갖는다는 것을 알고 이에 대한 해결책을 제시하였다.¹⁷⁾ 즉 Vriens은 전자를 탄성충돌을 일으키는 bulk 부분과 비탄성충돌을 일으키는 tail 부분으로 나누어 이 두부분의 전자들에 대한 Boltzmann 방정식을 풀어 전압아아크의 양광주특성을 해석하였다. 이렇게 하여 정상방전(직류방전)에 대한 아아크모델은 개량을 거듭하였고 실측치를 상당히 잘 설명할 수 있게 되었다.

교류 방전에 대하여는 1972년에 제시된 Polman의 모델이 있다. Polman은 아아크의 시간적변화가 일어나는 추파수대-이는 플라즈마의 확산시간과 전자에너지의 완화시간에 의해 결정되며 작용추파수와 전자안정기 사용시의 고주파가 모두 포함된다. -에서 수은원자의 5개 에너지 준위-기저상태, 6³P 상태, 전리 상태-에 대한 유체역학 모델을 이용하여 아아크의 입자밀도, 온도, 전압과 전류 등을 계산하였다. 계산의 결과를 마이크로웨이브를 이용하여 측정된 전자밀도 및 전자온도와 비교하여 일치하는 결론을 얻었다.¹⁸⁾

이상과 같은 연구 외에도 양광주에 자체를 인가하였을 때의 현상을 구명하려는 노력,¹⁹⁾ 또한 컴퓨터의 계산 및 메모리용량 증대에 따라 실험에서 얻어진 많은 데이터들을 입력시키고 여기에서 특성에 영향을 미치는 파라미터들을 도출하여 시뮬레이션을

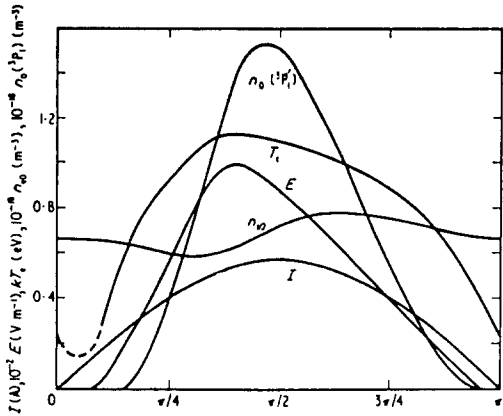


그림 4. Polman에 의해 계산된 500Hz에서의 형광등 양광주 특성

행하려는 시도등의 진행되고 있다.¹⁶⁾ 앞으로는 저압 아아크에 2종류 이상의 희유가스를 봉입하였을 때의 특성과 희유가스의 여기, 전리 등을 고려하는 모델의 개발 등이 연구되어야 할 주요 과제이다.

3.3 고광도 방전등

고광도방전등의 아아크특성을 이론적으로 예측하고자 하는 노력은 두가지 방향으로 진행되고 있다. 한가지는 전자의 생성과 소멸에 대한 Francis의 방정식을 푸는 것이고 다른 하나는 아아크의 미소체적에 대한 에너지 평형식을 푸는 방법이다.

1948년 Francis는 아아크의 양광주에서 전자의 발생은 입력전력에 비례하고, 소멸은 전자밀도에 비례한다고 가정하여 다음과 같은 Francis 방정을 만들었다.²⁰⁾

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha i v - \beta n_e$$

양광주에서의 콘덕턴스는 전자밀도에 비례하고 따라서 이 식의 n_e 는 콘덕턴스 G 로 치환할 수 있으며, 이 식과 회로방식을 풀어 아아크의 전기적 특성을 예측할 수 있다는 것이다. 1968년 Peek 등은 위 식을 컴퓨터로 풀어서 형광등의 전류를 예측하였으나 실용화할 수 있는 수준에는 이르지 못했다.

1973년 일본의 Bo 등은 고압수은등에 Francis 방정식을 적용시켜 비교적 만족스러운 결과를 얻었

으며 이 후 이 모델을 계속 발전시켜 1983년에는 방전관내에서의 온도분포를 고려한 모델에 대하여 발표하였다.^{21) 22)} 이 모델은 또한 1980년 Herrick에 의해서도 적용되었다. 그러나 Francis 방정식을 사용한 모델은 기본식 자체가 이론적 근거를 갖지 못하고 과도히 단순화된 형태이므로 범용적으로 되기는 어렵다는 기본적인 제한이 있다.

에너지평형식을 풀어서 고압아아크의 적기적 특성을 예측하고자 하는 시도는 1969년부터 1975년에 걸쳐 Lowke 등에 의해 발표된 일련의 논문들에서 제시되었다. Lowke는 인덕턴스 L 을 통하여 점등된 고광도 방전등에 대한 회로방정식 아아크전류와 전계의 관계식, 그리고 아아크의 미소체적에서 성립되는 에너지 평형식

$$V_0 \cos \omega t = L \frac{dI}{dt} + IR + E_n$$

$$I = E \int 2\pi r \sigma dr$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma E^2 - U + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}$$

$$\left(r k \frac{dT}{dr} \right) - \rho C_p V \frac{\partial T}{\partial r}$$

등 3식을, 컴퓨터를 이용하여 반경과 시간에 대하여 동시에 적분하여 나감으로써 방전등의 전압, 전류와 형을 예측하였다. 계산에 필요한 ρ , C_p 등의 물질함수의 값은 이론적으로 온도의 함수로 계산하여 컴퓨터에 저장하고, 방사에너지 U 의 값은 실험과 계산을 반복하여 추정하였다.

1977년 Waymouth는 고압나트륨램프에 대하여 2단계 온도분포, 실효반경 등의 개념을 도입하여 아아크모델을 매우 간략화하고, 이를 이용해 D선의 방사등을 계산하여 실험치와 10% 이내의 오차를 갖는 것을 보고하였다.²⁶⁾

1981년 Chalek 등은 Lowke에 의한 모델에 압력 변화에 의한 항을 추가하고 방사에너지도 Jen¹⁶⁾ 등에 의하여 제안된 이론에 의해 계산하여 고압나트륨램프의 아아크 온도, 도전률, 발생분포 등을 계산하였다.²⁶⁾ 이 모델은 1984년 Dakin 등에 의해 좀더 정확히 계산되었고 이들은 고주파의 펄스전압을 인가하여 고압나트륨램프의 광색을 개선할 수 있음을 보였다.²⁷⁾

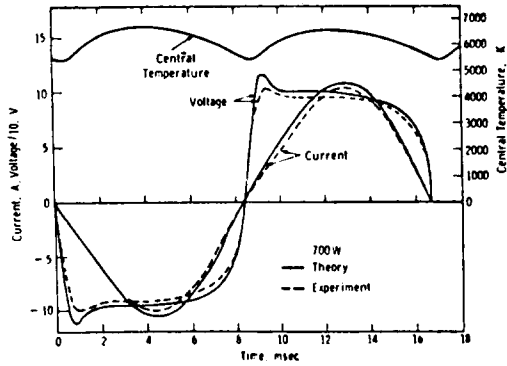


그림 5. Lowke에 의해 예측된 고압수은등의 전압 전류 파형

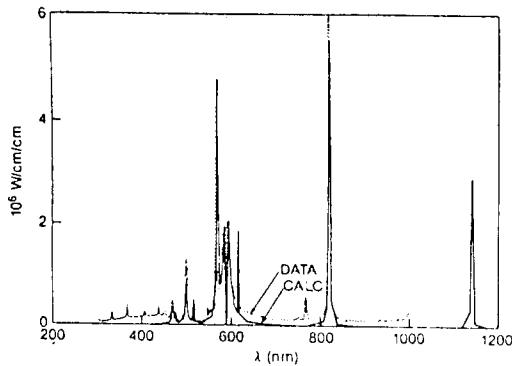


그림 6. Dakin에 의해 예측된 펄스파 인가시의 고압 나트륨램프 스펙트럼

메탈할라이드램프에 있어서는 아아크를 구성하는 성분들이 화학적으로 결합하므로 이에 대한 화학평형식, 확산방정식들을 풀어야 하며, 각 성분의 농도가 방전관의 축방향으로도 변화하므로 많은 과제가 남아있다.

Shaffner는 화학평형식과 에너지평형식을 결합한 모델은³⁹⁾ Zohweg는 에너지평형식에 대류손실을 포함한 모델을 사용하여 메탈할라이드램프의 특성을 계산하였다.³⁰⁾

또한 Fischer는 에너지평형식과 각 입자들에 대한 연속방정식을 이용하여 실험치와 잘 일치하는 결과를 얻었으며³¹⁾ Keefe는 반경험적 아아크모델을 제시하였다.³²⁾ 메탈할라이드 아아크의 시뮬레이션은 플라즈마의 구성성분에 대한 물성적 데이터를 집적하고 컴퓨터의 처리능력이 향상되어야 해결될 수 있을 것이다.

4. Computer Aided Design(CAD)

CAD란 컴퓨터를 이용하여 기기등의 설계를 행하는 것을 말하며, 이는 단순히 컴퓨터를 이용한 작도만을 말하는 것이 아니라 시뮬레이션을 통하여 얻은 이론적 예측의 결과를 설계에 직접 응용하는 것을 말한다.

따라서 앞절에서 설명한 시뮬레이션도 궁극적으로는 CAD를 위한 것이라 할 수 있다. 이 절에서는 광원의 CAD는 생략하고 안정기, 조명기구, 실내 조도분포에 대한 CAD만을 설명하기로 한다.

안정기는 방전등과 결합하여 사용하는 것이므로 방전등의 전기적 특성을 이론적으로 완벽히 구명하기 전에는 CAD를 행하기 어렵다. 따라서 전혀 새로운 형식의 안정기를 개발하는 데에 컴퓨터를 사용한 예를 찾기는 어렵다.

Bo³³⁾, Hall³⁴⁾, Dakin²⁸⁾ 등이 방전등의 특성을 시뮬레이션하는 과정에서 안정기의 영향을 분석한 논문을 발표하였다. 1984년 Nakata 등은 자기누설형 형광등용안정기의 자속분포를 유한요소법(Finite Element Method)을 사용하여 해석한 논문을 발표하였다.

³⁵⁾ 조명기구에 있어서는 원하는 배광분포를 얻기 위한 반사광과 글로우브의 형상설계에 컴퓨터가 이용되고 있다. 실용화된 예로서는 반사광이 램프자체를 통과하면서 손실되는 것을 다면형상을 이용한 설계로 감소시켜 조명효율을 0.8까지 증가시킨 고천정용 반사각의 설계(그림7) 옥외용 투광기에 CAD를 적용시켜 조명률을 개량한 다초점형투광기 등을 들 수 있다.³⁶⁾ 설계의 기법으로는 종래 주어진 반사각의 형태에서 배광곡선을 만들어 내는 방법에서 벗어나 주어진 배광곡선에 따라 반사각의 형태를 만들어나가는 방법이 실용화되고 있다.³⁷⁾

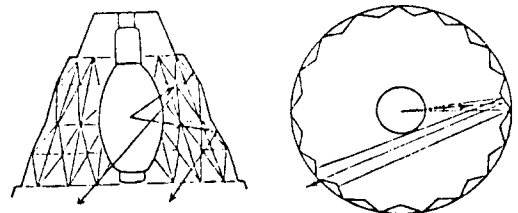
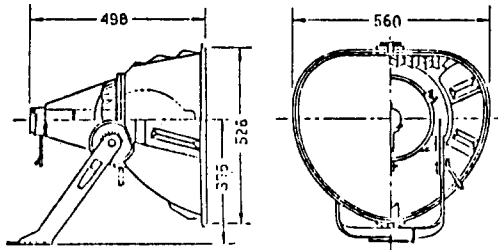
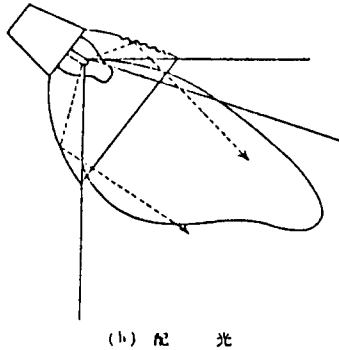


그림 7. CAD를 이용한 고천정용 반사각



旋回角左右 45° 以内, 仰角(下向)60°, 下向用
(A) 構造



(b) 配光

그림 8. CAD를 이용한 다초점형 투광기구

실내조명설계의 경우 CAD 프로그램이 판매되고 있으나, 이는 주어진 조명환경에 대하여 많은 가정하에서 수식을 만든 뒤, 이 식을 컴퓨터로 계산해 내는 방식을 사용하고 있으며, 본격적인 CAD로 보기는 어렵다. 최근 실내조도분포의 계산에 Monte Carlo 법을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이는 광원, 혹은 등기구에서 나온 빛의 이동경로를 추적하여 정확한 결과를 얻을 수 있게한다.³⁸⁾³⁹⁾ 아직까지 이 방법은 실용화 되지 않고 있으며 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 결론

이상으로 조명분야에서의 컴퓨터이용현황에 대하여 간략히 기술하였다. 언급된 부분 이외에도 형광물질의 특성을 해석하는데 컴퓨터를 이용하거나¹⁶⁾ 조명제어 분야에서 컴퓨터를 이용하는 경우가 있으나 생략하였다.

컴퓨터의 기능은 급속히 발달하고 있으며 사용분야도 공학 및 자연과학의 분야 뿐 아니라 인문, 사회과학의 분야까지 넓어지고 있다. 조명분야에 있어서

는 컴퓨터를 이용한 특성의 측정, 이론적인 컴퓨터를 이용한 특성의 측정, 이론적인 해석, 설계, 제품의 생산, 판매, 제품의 효율적인 이용에 이르기까지 전범위에 걸쳐 앞으로 사용이 증대될 것으로 확신한다. 이러한 입장에서 볼 때 국내 조명업계 및 학계에서의 컴퓨터이용은 아직 초보적 단계에 머무르고 있다고 생각되며 앞으로 컴퓨터를 다루고 이용할 수 있는 기술인력의 양성이 시급한 과제라 하겠다.

참고 문헌

- 1) A. Inoue, et al. Toshiba Review 30-10(1975) 716
- 2) 지철근, 김 훈, 전기학회 논문지 35-11(1986) 495
- 3) S. Ozaki, et al., J. Illum, Engng. Inst. Jap. 67-2(1983) 49
- 4) K. Bockasten, J. Opt. Soc. Am. 51-9(1961) 943
- 5) M. Koedam, A.A. Kruithof, physica 28 (1962) 80
- 6) J.J. De Groot, A.G. Jack, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 13(1973)615
- 7) I. Langmuir, Physical Review 34-6(1912) 401
- 8) J.R. Coaton, Lighting Research and Technology 3-2(1971)163
- 9) E. Fischer, et al., Journal of IES, July(1975) 271
- 10) F.H.R. Almer, et al. Lighting Research and Technology 8-1(1976) 31
- 11) J.R. Coaton, Lighting Research and Technology 9-1(1977) 25
- 12) E.M. Passmore, et al., Journal of IES, July (1977)194
- 13) J. Brett, et al., Journal of IES, July(1981) 214
- 14) S.H. Howe, Journal of IES, April(1985) 581
- 15) C. Kenty, Journal of Applied Physics 21-12 (1950)1309
- 16) K. Toshiro, et al., J. Illum Engng. Inst. Jpn. 66-12(1982)544