온실의 효율적인 인공전조법 개발

김태한* · 정원근**

(*경북대학교 농과대학 농업기계공학과 교수 · **성주농공업고등학교 교사)

Development of optimal artificial illuminating method in greenhouse

Tae-Han Kim* · Weon-Geun Jeong**

*Agricultural Machinery Eng., Dept. of Agric., Kyung-Pook Univ., Taegu 702-701, Korea

**Sung-ju Agricultural & Technical High School, Taegu 719-800, Korea

적 요

현재 설치 사용되고 있는 인공전조시설은 재배농가에서 적당히 설치함으로서 농가마다 설치 방법이 다르고 또한 이에 따라 조도분포가 균일하지 못하여 에너지의 효율적인 이용이 되지 않는 등 많은 문제가 대두되고 있어 전조시설의 표준화가 요구되고 있으나 이에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 하우스내의 효율적인 전조시설의 표준화를 확립하여 시설비 및 소요에너지를 절감시키고 또한 재배작물에 적당한 생육환경을 만들어 줌으로써 증수와 동시에 고품질의 상품을 생산할 수 있어 농가수익증대에 크게 이바지하고자 한다. 이에 인공광 설치 형태에 따른 조도분포 모델링(Modeling)을 위해 30, 60, 100W인 백열전구를 지면으로부터 80, 100, 130, 160cm높이에 설치하고 조도치를 분석한 결과 모든 조도분포 그래프로부터 일반식 $y = \frac{a + bx + cx^2}{1 + dx + ex^2 + fx^3}$ [lx] 를 유도해낼 수 있었으며 100W인공광과 60W인공광을 혼합하여 Z형태로 6m간격으로 설치하였을 때 전조재배에 필요한 조도치 30~50lx(本多,1991)를 100% 만족하는 범위를 얻을 수 있었고 에너지 절약측면에서도 60W인공광을 적절히 혼합하여 사용한다면 적정 조도치 만족과 함께 전력소모량도 줄일 수 있다고 본다.

Ⅰ. 서론

1. 연구목적 및 필요성

온실 및 식물 공장의 광 환경 조절에 관한 연구로서 田中(1995)은 인공 전조등 설치시 종래의 고정설치법에 비해 설치비 절감과 엽면의 수광효율 향상 및 광 환경의 균일화를 목적으로 광원을 이동시키는 장치를 개발하여 엽채류를 대상으로 고정설치구와 이동설치구의 생장 특성을 비교 분석한 결과 생장에 차이가 없어 이동식 전조 시설의 실용 가능성을 시사하였으나 이는 전조등 1개를 이동시켜 가면서 시험을 하였으므로 여러개의 전조등을 설치하는 인공전조등의 설치법에 관한 기초 자료를 제공하지 못하였다. 人科 등(1995)은 실내녹화식물의 종류에 따른 광요구도 분류표를 작성하였고 소형 건물을 대상으로 직달일사, 산란일사, 간접일사, 인공광의 총합상태하에서 실내의 평면 광분포를 분석하였다. 北宅 등(1990)은 인공광형 식물공장에서 유지비의 큰 비중을 차지하는 전력비를 저감시키기 위하여 재배공간을 유효하게 이용하고 조명효율을 향상시키기 위한 방

안으로 상하 2단으로 식물을 재배하고 그 중앙에 형광등을 설치하는 전조시설법에 관해 연구하였다. 高木 등(1991)은 완전 인공광형 식물생산 시스템개발에 관한 연구로서 광강도의 변화 및 광원의 높이 변화가 사라다야채의 생육에 미치는 영향을 조사한 결과 생체중량에 영향을 미치는 요인은 광원의 높이가 아니고 광강도의 차이라고 보고하였다. 羽生 등(1995)은 야채공장의 인공광을 효과적으로 이용하는 것을 목적으로 원적색광 조사(照射)시의 강남콩의 생장특성을 조사하였다. 그 외 인공광을 이용한 작물 재배로 생산량이 증대되었다는 결과 발표는 다수 있으나(安西, 1982, 宇野, 1982., 池田, 1991) 전조재배를 위한 전조등 설치방법에 따른 조도특성에 관한 연구는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 농업 시설의 효율적인 인공광 설치의 표준화 확립을 위한 기초 자료를 제공함에 목적을 두고 농가에서 전조용 광원으로 이용하고 있는 백열등을 대상으로 전조등의 설치간격, 설치높이, 전조등의 종류 등에 따른 평면 조도 분포특성을 구명하여 하우스 내에서 조도분포가 균일하고 소요전력을 절감할 수 있는 효율적인 전조방법을 개발하기 위하여 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 방법

가. 실험실 측정

일몰후(9시) 태양광선의 영향을 받지 않는 건물내 지하실에서 실험이 이루어졌으며 전조등의 설치간격, 설치높이, 전조등의 종류 등의 설치 형태와 이에 따른 수평축(x, y축), 수직축(z축)에 관한 조도를 조도계(IM2D, Topcon, Japan)로 측정하였다.

1) 자연상태 인공광

30, 60, 100W 인공광에 대해 전구간격 6m, 3m, 열간 5m일때의 조도분포를 분석하였고 일반식으로 도출하여 2차원 좌표에 대해 각 수치들을 모델링했다.

2) 갓을 씌운 인공광

반사능력이 뛰어난 은박접시와 알루미늄 호일을 이용해 갓의 호선과 지면과 수평이 되는 선과 30°정도의 경사를 주어 60W인공광의 구 중심까지 갓을 씌워 전구간격 6m, 3m, 열간 5m일 때의 조도분포를 분석하였고 일반식으로 도출하여 2차원 좌표에 대해 각 수치들을 모델링하였다.

3) 차광막을 칠한 인공광

100W인공광의 상단에서부터 구 중심까지 반구형태로 차광막을 칠해 전조대상과 무관한 상단방향으로 조사되는 빛을 차단하여 작물이 있는 지면으로 가능한 많은 빛이 조사될 수 있도록 인공광의 효율을 높인 형태로 조도 분포를 분석하였고 차광막의 색상은 노란색, 은색, 무색(차광막을 칠하지 않음), 녹색, 금색, 흑색, 빨간색을 사용하여 가장 효과적인 차광막의 색상을 도출하였다.

나. 현장 측정

경북 고령지역의 전조재배 온실농가를 방문하여 온실 내 인공광의 설치 간격, 지면으로부터 설치높이, 인공광의 배열 형태 등에 관해 조사, 분석하였고 실험실내 측정값과 비교하기 위해 100W 인공광을 Z형태, 6m간격으로 설치한 농가를 방문해 표본측정을 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 인공광의 처리상태에 따른 조도식 유도

가. 자연상태 인공광

1) 100W 인공광

그림 1은 지상에서 인공광(100W)의 설치 높이에 따른 조도 분포를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 측점의 위치가 인공광의 연직선이 지표면과 만나는 점으로부터 0cm거리에 있을 때 각 설치높이 80, 100, 130, 160cm에서의 조도치는 각각 178.6lx, 118lx, 76.3lx, 54.7lx로 인공광의 설치높이가 증가할수록 조도치가 감소함을 알 수 있다. 또한 인공광의 중심으로부터

150cm거리에 있을 때 조도값은 각각 27.4lx, 27.2lx, 29lx, 26lx로 설치높이에 따른 영향을 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 약 600cm거리에 있을 때에는 설치높이에 관계없이 조도값이 0에 수렴해감을 알 수 있다. 이는 인공광의 유효광자속밀도가 150cm를 기점으로 급속히 작아지기 때문이다.

표 1은 그림 1에서 도식화된 곡선의 일반식을 유도한 것으로 3차 유리함수에 변수2개(x=거리, y=조도값)와 계수6개를 주어 각각의 곡선에 대해 가장 근접한 조도 분포식을 구한 것을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 100W전구가 지면으로부터 80cm높이에 설치되어 있을 때 인공광의 중심에서 0cm떨어진 지점에서의 조도값은 변수x에 0을 대입하면 178.6lx가 된다. 이와 같은 방법으로 인공광원으로부터 x만큼 떨어진 거리에 대한 조도값을 도출해 낼 수 있게 된다.

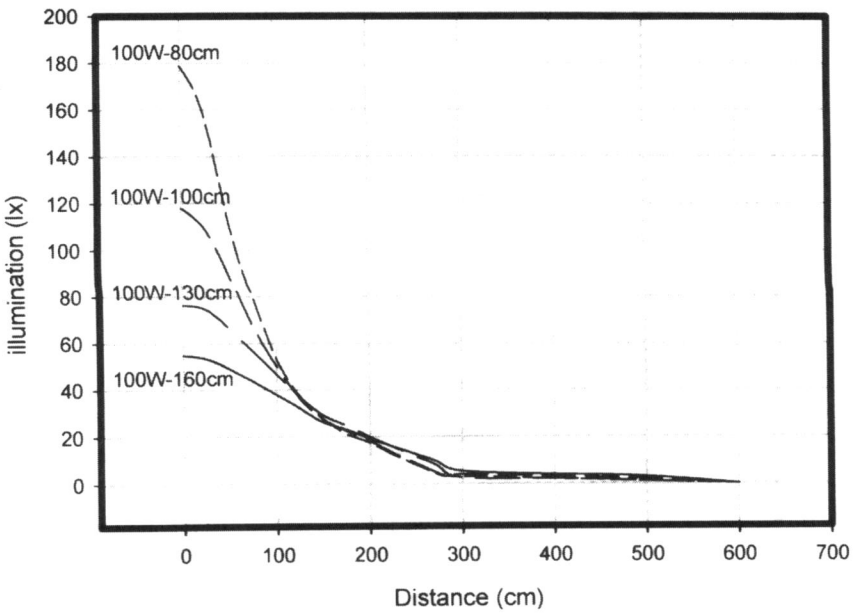

Fig. 1. Comparison between illumination and distance at 80, 100, 130, 160cm height with 100W light

Table 1. Coefficient comparison of calculated equation at each height (100W)

power (W)	height from the bottom (Cm)	Coefficient $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx]					
		a	b	c	d	e	f
100	80	178.66	-1.22	5.61e-4	-0.01	2.30e-4	-1.42e-6
	100	117.84	-0.80	4.20e-4	-0.01	1.39e-4	-8.23e-7
	130	76.41	-0.54	3.22e-4	-0.01	7.08e-5	-4.08e-7
	160	54.75	-0.39	1.99e-4	-0.01	4.24e-5	-2.62e-7

2) 60W 인공광

그림 2는 지상에서 인공광(60W)의 설치 높이에 따른 조도분포를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 측점의 위치가 인공광의 중심으로부터 0cm거리에 있을 때 각 설치높이 80, 100, 130, 160cm에서의 조도치는 각각 100.5lx, 63.2lx, 42.1lx, 32.3lx로 인공광의 설치높이가 증가할수록 조도치가 감소함을 알 수 있다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 125cm거리에 있을 때 조도값은 각각 17.2lx, 17.3lx, 16.7lx, 16.7lx로 설치높이에 따른 영향을 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 약 550cm거리에 있을 때에는 설치높이에 관계없이 조도값이 0에 수렴해감을 알 수 있다. 이는 인공광의 유효광자속밀도가 150cm를 기점으로 급속히 작아지기 때문이다.

표 2는 그림 2에서 도식화된 곡선의 일반식을 유도한 것으로 3차 유리함수에 변수2개(x=거리, y=조

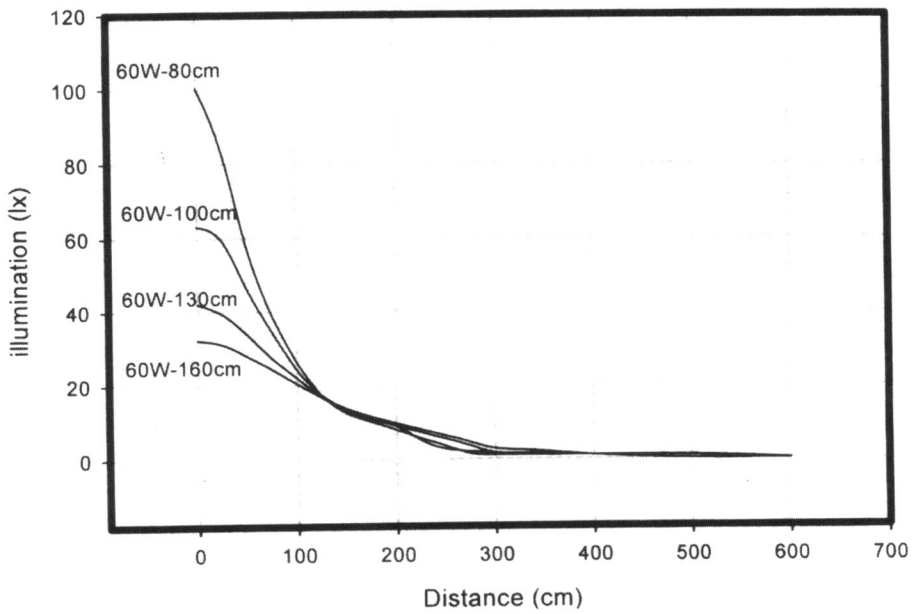

Fig. 2. Comparison between illumination and distance at 80, 100, 130, 160cm height with 60W light

Table 2. Coefficient comparison of calculated equation at each height (60W)

power (W)	height from the bottom (Cm)	Coefficient $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx]					
		a	b	c	d	e	f
60	80	100.45	-0.8	4.16e-4	-0.01	2.52e-4	-1.91e-6
	100	63.33	-0.36	1.61e-4	-0.01	1.76e-4	-8.48e-7
	130	42.08	-0.34	-8.07e-6	-0.01	-8.52e-5	-7.37e-7
	160	32.29	-0.26	-8.88e-5	-0.01	6.04e-5	-5.27e-7

도값)와 계수6개를 주어 각각의 곡선에 대해 가장 근접한 조도 분포식을 구한 것을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 60W전구가 지면으로부터 100cm높이에 설치되어 있을 때 인공광의 중심에서 0cm떨어진 지점에서의 조도값은 변수x에 0을 대입하면 63.3lx가 된다. 이와 같은 방법으로 인공광원으로부터 x만큼 떨어진 거리에 대한 조도값을 도출해낼 수 있게 된다.

3) 30W 인공광

그림 3은 지상에서 인공광(30W)의 설치 높이에 따른 조도분포로 인공광을 설치한 바로 아래 위치에서 25cm간격으로 350cm되는 지점까지의 조도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 측점의 위치가 인공광의 중심으로부터 0cm거리에 있을 때 각 설치높이 80, 100, 130, 160cm에서의 조도치는 각각 40lx, 28.9lx, 17.5lx, 12.6lx로 인공광의 설치높이가 증가할수록 조도

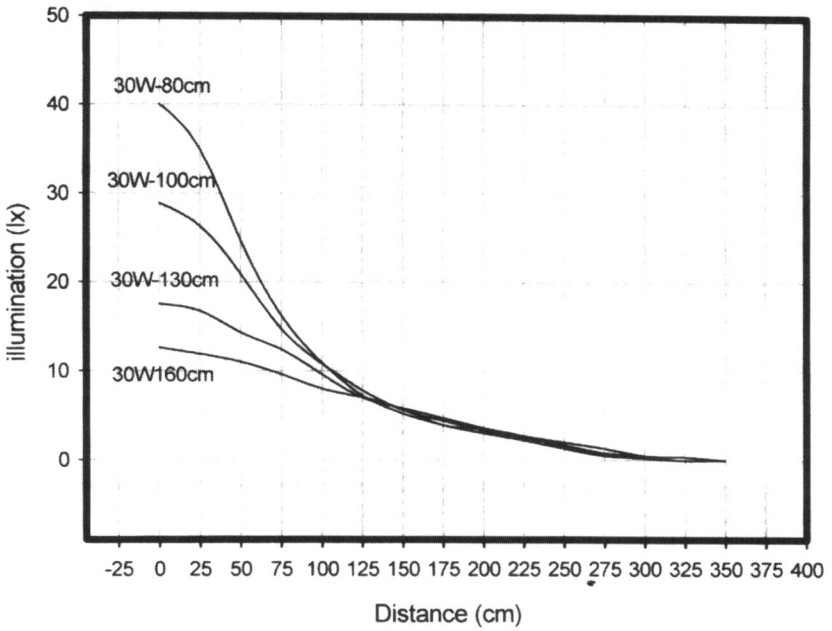

Fig. 3. Comparison between illumination and distance at 80, 100, 130, 160cm height with 30W light

Table 3. Coefficient comparison of calculated equation at each height (30W)

power (W)	height from the bottom (Cm)	Coefficient $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx]					
		a	b	c	d	e	f
30	80	39.97	-0.37	3.02e-4	-0.01	2.66e-4	-2.08e-6
	100	28.88	-0.23	1.7e-4	-0.01	1.68e-4	-1.13e-6
	130	17.52	-0.17	2.61e-4	-0.01	6.46e-5	-4.64e-7
	160	12.59	-0.1	1.57e-4	-0.01	3.62e-5	-1.91e-7

치가 감소함을 알 수 있다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 150cm거리에 있을 때 조도값은 각각 5.2lx, 5.6lx, 5.8lx, 5.7lx로 설치높이에 따른 영향을 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 약 350cm거리에 있을 때에는 설치높이에 관계없이 조도값이 0에 수렴해감을 알 수 있다. 이는 인공광의 유효광자속밀도가 150cm를 기점으로 급속히 작아지기 때문이다.

표 3은 그림 3에서 도식화된 곡선의 일반식을 유도한 것으로 3차 유리함수에 변수2개(x=거리. y=조도값)와 계수6개를 주어 각각의 곡선에 대해 가장 근접한 조도 분포식을 구한 것을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 30W전구가 지면으로부터 130cm높이에 설치되어 있을 때 인공광의 중심에서 0cm떨어진 지점에서의 조도값은 변수x에 0을 대입하면 17.5lx가 된다. 이와 같은 방법으로 인공광원으로부터 x만큼 떨어진 거리에 대한 조도값을 도출해 낼 수 있게 된다.

나. 갓을 씌운 60W 인공광

그림 4는 갓을 씌운 인공광(60W)의 지상에서 설치높이에 따른 조도분포 나타낸 것으로 그림에서와 같이 측점의 위치가 인공광의 중심으로부터 0cm거리에 있을 때 각 설치높이 80, 100, 130, 160cm에서의 조도치는 각각 150.5lx, 104.1lx, 56lx, 38lx로 갓을 사용하지 않은 60W 인공광의 조도치보다 1.2~1.5배 정도 높은 수치를 나타냈으나 인공광의 설치높이가 증가할수록 조도치는 감소하였다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 150cm거리에 있을 때 조도값은 각각 14.7lx, 16.8lx, 15.2lx, 14lx로 설치높이에 따른 영향을 거의 받지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 600cm거리에 있을 때에는 설치높이에 관계없이 조도값이 0에 수렴해감을 알 수 있다.

표 4는 그림 4에서 도식화된 곡선의 일반식을 유도한 것으로 3차 유리함수에 변수2개(x=거리. y=조도값)와 계수 6개를 주어 각각의 곡선에 대해 가장 근접한 조도 분포식을 구한 것을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 갓을 씌운 60W전구가 지면으로부터 160cm높이에 설치되어 있을 때 인공광의 중심에서 0cm떨어진 지점에서의 조도값은 변수x에 0을 대입하면 38.1lx가 된다. 이와 같은 방법으로 인공광원으로

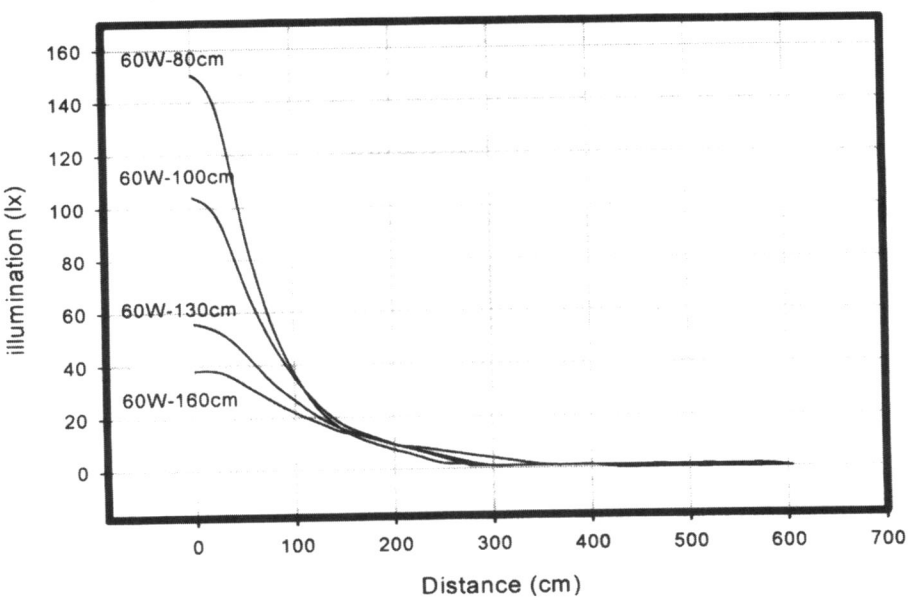

Fig. 4. Comparison between illumination and distance at 80, 100, 130, 160cm height with hat-covered light (60W)

부터 x만큼 떨어진 거리에 대한 조도값을 도출해낼 수 있게 된다.

다. 차광막을 칠한 100W인공광

그림 5는 색상이 있는 차광막을 칠한 인공광(100W)의 지상에서 설치 높이가 160cm일때 조도분포로 인공광을 설치한 바로 아래 위치에서 600cm되는 지점까지의 조도를 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 측점의 위치가 인공광의 중심으로부터 0cm거리에 있을 때 각 차광막의 색상이 노란색, 은색, 무색(차광막을 칠하지 않음), 녹색, 금색, 흑색, 빨간색인 인공광에서의 조도치는 각각 68.9lx, 55lx, 54.7lx, 53.1lx, 51.4lx, 50.1lx, 48lx로 노란색과 은색의 차광막을 칠한 인공광에서는 차광막을 칠하지 않은 인공광의 조도치보다 높게 나타났으며 특히 노란색의 차광막을 칠한 인공광의 경우 1.3배 정도 높은

Table 4. Coefficient comparison of calculated equation at each height with hat-covered light (60W)

power (W)	height from the bottom (Cm)	Coefficient $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx]					
		a	b	c	d	e	f
60	80	150.34	-1.54	2.67e-3	-0.01	3.19e-4	-2.24e-6
	100	104.32	-0.90	9.65e-4	-0.01	2.06e-4	-1.40e-6
	130	56.01	-0.45	3.09e-4	-0.01	1.15e-4	-7.72e-7
	160	38.07	-0.15	-3.29e-4	-0.01	1.05e-4	-5.84e-7

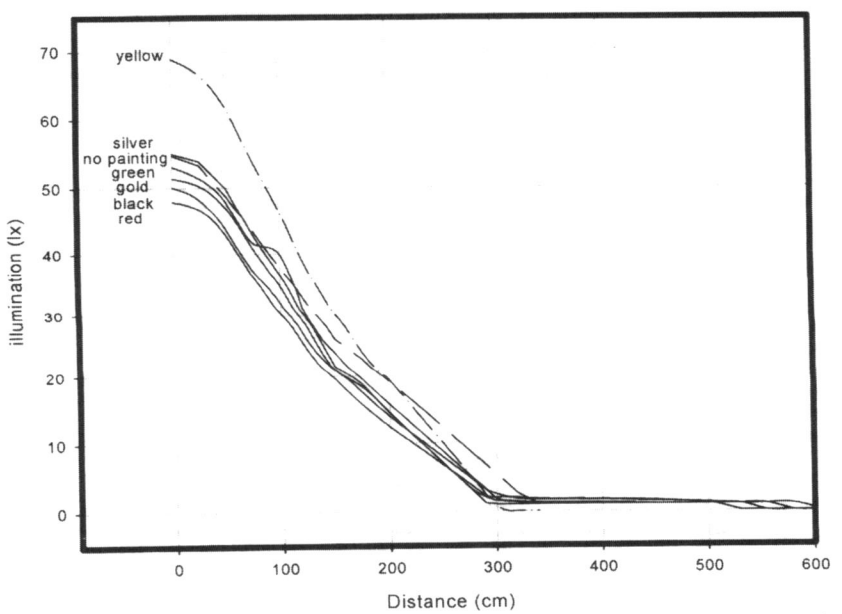

Fig. 5. Comparison between illumination and distance at 160cm height with painted light (100W)

수치를 나타냈다. 또한 인공광의 설치높이가 증가할수록 조도치는 감소하였으며, 측점이 인공광의 중심으로부터 150cm거리에 있을 때 조도값은 각각 30.4lx, 21.8lx, 26lx, 23.9lx, 21.2lx, 21.1lx, 19.4lx로 나타나 노란색의 차광막을 칠한 인공광이 전조효과가 높음을 보였다. 또한 측점이 인공광의 중심으로부터 600cm거리에 있을 때에는 설치높이에 관계없이 조도값이 0에 수렴해감을 알 수 있다.

표 5는 그림 5에서 도식화된 곡선의 일반식을 유도한 것으로 3차 유리함수에 변수 2개(x=거리, y=조도값)와 계수 6개를 주어 각각의 곡선에 대해 가장 근접한 조도 분포식을 구한 것을 나타낸 것이다.

Table 5. Coefficient comparison of calculated equation at 160cm height with painted light (100W)

power (W)	painting color of lights	Coefficient $y=\frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx]					
		a	b	c	d	e	f
100	red	48.05	-0.49	5.15e-4	-0.01	6.99e-5	-4.98e-7
	black	50.15	-0.46	4.97e-4	-0.01	5.35e-5	-3.75e-7
	gold	51.35	-0.42	5.73e-4	-0.01	5.97e-5	-2.90e-7
	green	53.07	-0.61	8.01e-4	-0.01	5.51e-5	-4.08e-7
	no painting	54.75	-.39	1.99e-4	-0.01	4.24e-5	-2.62e-7
	silver	55.04	-0.47	6.98e-4	-0.01	6.09e-5	-3.06e-7
	yellow	68.82	-0.75	1.17e-3	-0.01	5.46e-5	-3.53e-7

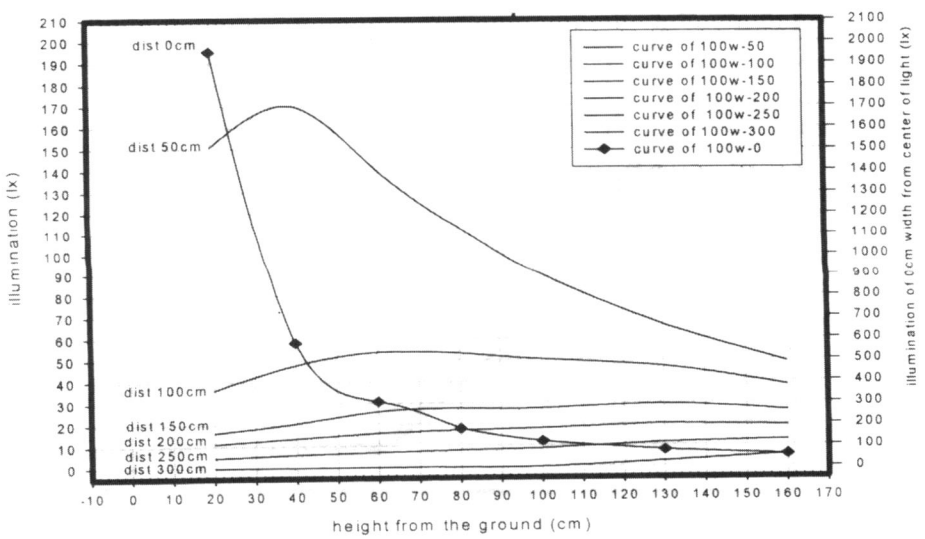

Fig. 6. Illumination comparison of 100W light at each height with different distance from the center light

라. 인공광의 설치형태(높이, 거리)에 따른 조도분포

1) 100W 인공광

그림 6은 인공광원으로서 100W의 백열전구를 사용할 경우 지면으로부터 백열등의 설치 높이 변화에 따른 조도특성을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 100W-0, 100W-50, 100W-100, 100W-150, 100W-200, 100W-250, 100W-300은 각각 전조등을 설치한 바로 아래의 위치를 기준점 0로 하여 50, 100, 150, 200, 250, 300cm떨어진 지점을 의미한다. 따라서 100W의 백열전구를 지면에서 높이 100cm에 설치했을 때 광원으로부터 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300cm 떨어진 위치에서의 조도는 각각 118lx, 90lx, 50lx, 27.2lx, 18lx, 8lx, 1lx가 된다. 또한 그림에서 광원 바로 아래 위치(100W-0)의 조도값은 오른편 세로축의 값으로 나타내었다.

2) 60W 인공광

그림 7은 인공광원으로서 60W의 백열전구를 사용할 경우 지면으로부터 백열등의 설치 높이 변화에 따른 조도 특성을 나나낸 것이다.

그림에서 60W-0, 60W-50, 60W-100, 60W-150, 60W-200, 60W-250, 60W-300은 각각 전조등을 설치한 바로 아래의 위치를 기준점 0로 하여 50, 100, 150, 200, 250, 300cm떨어진 지점을 의미한다. 따라서 60W의 백열전구를 지면에서 높이 100cm에 설치했을 때 광원으로부터 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300cm 떨어진 위치에서의 조도는 각각 63.2lx, 46.2lx, 34.2lx, 13.3lx, 8.9lx, 2.5lx, 1.4lx가 된다. 또한 그림에서 광원 바로 아래 위치(60W-0)의 조도값은 오른편 세로축의 값으로 나타내었다.

3) 30W 인공광

그림 8은 인공광원으로서 30W의 백열전구를 사용할 경우 지면으로부터 백열등의 설치 높이 변화에 따른 조도특성을 나타낸 것이다. 그림에서 30W-0, 30W-50, 30W-100, 30W-150, 30W-200, 30W-250, 30W-300은 각각 전조등을 설치한 바로 아래의 위치를 기준점 0로 하여 50, 100, 150, 200, 250, 300cm떨어진 지점을 의미한다. 따라서 30W의 백열전구를 지면에서 높이 100cm에 설치했을 때 광원으로부터 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300cm 떨어진 위치에서의 조도는

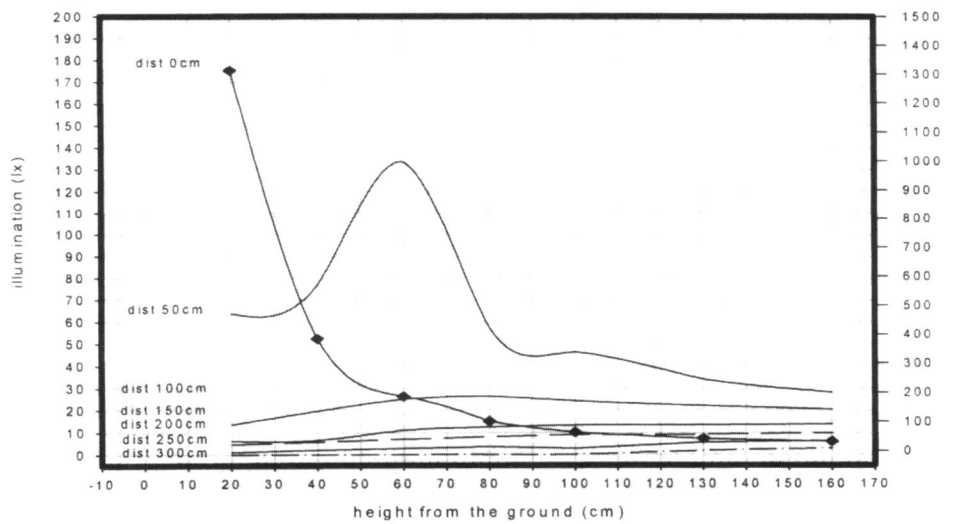

Fig. 7. Illumination comparison of 60W light at each height with different distance from the center of light

각각 28.9lx, 20.9lx, 10.8lx, 5.6lx, 3.3lx, 2.1lx, 1lx가 된다. 또한 그림에서 광원 바로 아래 위치(30W-0)의 조도 값은 오른편 세로축의 값으로 나타내었다.

4) 갓을 씌운 60W 인공광

그림 9는 갓을 씌운 인공광원으로서 60W의 백열전구를 사용할 경우 지면으로부터 백열등의 설치 높

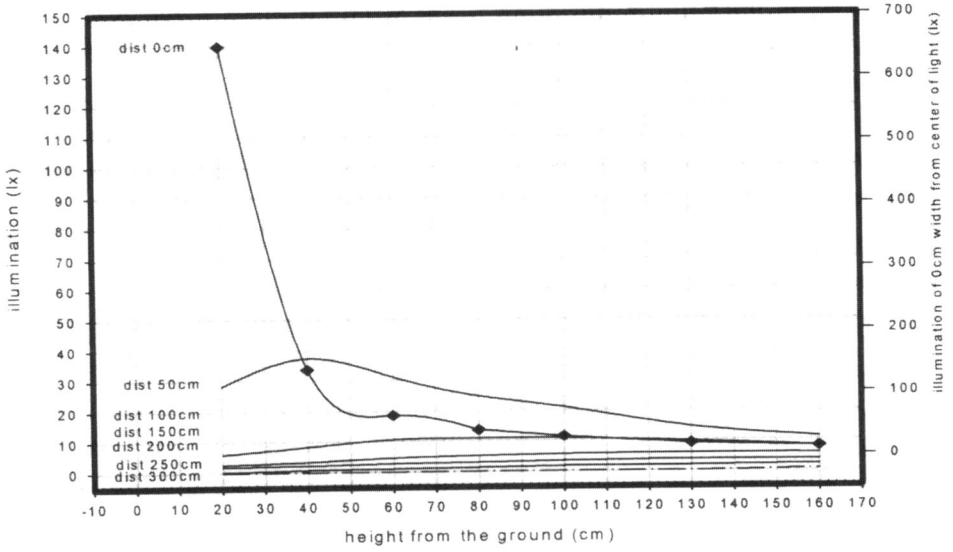

Fig. 8. Illumination comparison of 30W light at each height with different distance from the center of light

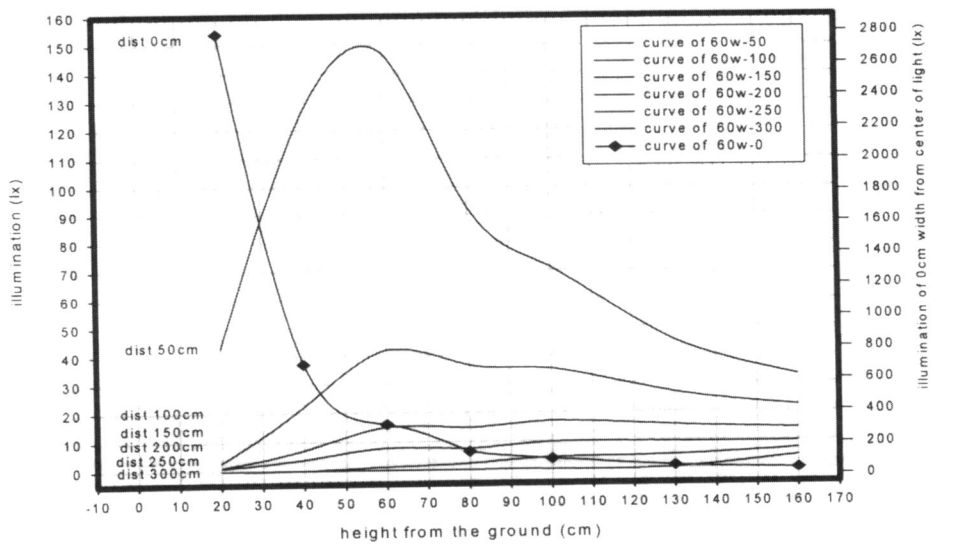

Fig. 9. Illumination comparison of hat-covered 60W light at each height with different distance from the center of light

이 변화에 따른 조도특성을 나타낸 것이다. 그림에서 60W-0, 60W-50, 60W-100, 60W-150, 60W-200, 60W-250, 60W-300은 각각 전조등을 설치한 바로 아래의 위치를 기준점 0로 하여 50, 100, 150, 200, 250, 300cm 떨어진 지점을 의미한다. 따라서 60W의 백열전구를 지면에서 높이 100cm에 설치했을 때 광원으로부터 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300cm 떨어진 위치에서의 조도는 각각 104.1lx, 71.3lx, 35.2lx, 16.8lx, 9.5lx, 4.7lx, 1.6lx가 된다. 또한 그림에서 광원 바로 아래 위치(60W-0)의 조도값은 오른편 세로축의 값으로 나타내었다.

2. 실측치와 계산치 비교

가. 실험실 측정치와 유도식에 의한 계산치의 비교

그림 10은 60W 인공광을 2열 전조방식 중에서 백열등을 온실 중심선을 기준으로 나란히 대칭이 되게 배열한 격자식 배치 형태[이하 Z형태]의 배열로 지면으로부터 1.6m 높이에 길이방향으로 6m, 폭 방향으로 5m되게 배열하였을 때 대칭하여 나타나는 한 구간에서의 조도치 측정점을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 60W 인공광은 위와 같은 조건하에서 조도치가 0lx에 도달하는 지점이 인공광의 중심에서 약 550cm이며 100cm지점에서는 20.4lx, 200cm지점에서는 9.7lx, 300cm지점에서는 3.4lx, 400cm지점에서는 1.6lx로 나타났다. 또한 구간 내에서 대칭이 되는 부분을 고려하여 P_1에서 P_9까지의 임의의 점에서 조도 값은 계산식을 이용해 산출하여 측정치와 비교하였으며 조도치는 각 지점에서 영향을 받는 인공광을 모두 고려하여 계산되어졌다.

식 1은 계산에 이용된 유도식으로 60W 인공광을 지면으로부터 1.6m 높이에 설치하였을 때 x좌표상의 임의의 점에서 조도분포가 어떻게 나타나는지 보여주는 것이다.

$$y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3} = \frac{32.29-0.26x-8.889e^{-5}x^2}{1-0.01x+6.04e^{-5}x^2-5.27e^{-7}x^3} \ [lx]$$

(Equation. 1)

표 6은 유도식에 의해 계산한 조도치와 실제 측정한 조도치를 비교한 것을 나타낸 것으로 표에서와 같이 실험실측정치와 계산치를 비교해보면, $P_1(0,0)$에서 실측치 32.3lx, 계산치 32.29lx이고, $P_4(0,1.5)$에서 실측치 13.7lx, 계산치 13.7lx로 인공광의 조사가 중첩되지 않는 부분에서는 약 100% 동일한 조도 값을 나타

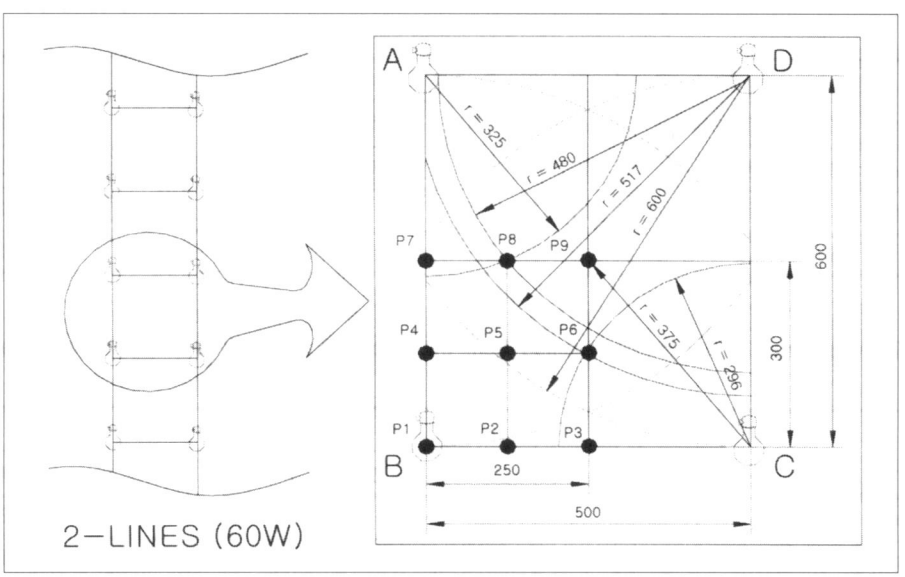

Fig. 10. Schematic drawing of illumination spreading range in a section of lights array (60W)

냄을 알 수 있으나 P_5(1.25,1.5)에서 실측치 12.2lx, 계산치 14.7lx이고, P_8(1.25,3)에서 실측치 5lx, 계산치 8lx로 중첩이 일어나는 부분에서는 다소 차이가 남을 알 수 있다. 이는 인공광 1개의 실제 측정으로 유도되어진 근사식의 특성으로 인해 다수의 인공광 영향을 받는 지점에서는 정확하게 만족치 못하기 때문이나 그 오차 값이 작기 때문에 작물의 생장에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 또한, 각 모서리의 인공 광으로부터 영향을 받는 P_9지점의 경우 인공광 설치간격설정에서 중요한 지점으로서 실제 측정에서는 2lx의 조도치로 나타났으나 계산치에서는 4개의 인공광의 영향을 받아 6.7lx의 조도치로 나타났다.

나. 현장측정치와 유도식에 의한 계산치와의 비교

인공광 100W에 대한 임의의 점에서 측정으로 얻어진 자료에 의해 유도한 유도식과 실제 전조 온실에서의 조도치와 비교하기 위해 100W 인공광을 전구간격 6m, 열간 5m로 지면으로부터 1.5m 높이에 설치하고 Z형태로 배열한 경우를 대상으로 현장측정치와 계산치를 비교하였다.

표 7에서 현장실측치와 계산치를 비교해보면, 현장실측치가 계산치 보다 최소 14lx에서 최대 34lx까지 크게 나타났으며 평균 조도치 오차가 20.6lx로 나타났다. 이는 현장에서 전조방식은 간격, 높이 등 배열이 불균일하고 밭고랑과 두둑의 높이에 의해 인공광의 높이가 실제로는 작물이 자라는 지면으로부터 1.5m이하에서 전조가 이루어지기 때문인 것으로 보인다.

3. 효율적인 전조방식의 모델링

현재 전조재배 온실농가에서 인공광을 이용하고 있는 방식은 비효율적이므로 적정 조도치 이상의 조사가 가능한 표준구간 모델링을 통해 인공광의 적당한 설치간격, 지면으로부터의 적당한 설치높이와 적절한 인공광의 선택에 기초자료를 제공하고자 한다.

표 8은 각 백열등의 지면으로부터 130, 150, 160cm 높이에 설치했을 때 15lx, 20lx까지 조사 가능한 반경과 0lx에 도달하게 되는 반경을 나타낸 것으로 100W 백열등의 경우 지면으로부터 150cm 높이에 설치했을 때 20lx에 도달하게 되는 반경은 약200cm이

Table. 6 Comparison of illumination resulted from the calculation method and measuring in laboratory (60W)

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	AVE	Value	
	0, 0	1.25, 0	2.5, 0	0, 1.5	1.25, 1.5	2.5, 1.5	0, 3	1.25, 3	2.5, 3		Min	Max
Calculation	32.29	16.7	12.6	13.7	14.7	12.8	2.8	8	6.7	13.4	2.8	32.29
Measuring	32.3	16.7	12.6	13.7	12.2	9.9	2.8	5	2	13.7	2	32.3
Error	0.05	0	0	0	3.5	2.9	0	3	4.7	0.3	0.8	0.05

Table. 7 Comparison of illumination resulted from the calculation method and measuring in field (100W)

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	AVE	Value	
	0, 0	1.25, 0	2.5, 0	0, 1.5	1.25, 1.5	2.5, 1.5	0, 3	1.25, 3	2.5, 3		Min	Max
Calculation	62	45	30	38	32	26	24	28	32	35	24	62
Measuring	96	60	50	52	55	44	40	50	55	55.7	40	96
Error	34	15	20	14	23	18	16	22	23	20.6	14	34

고, 0lx에 도달하게 되는 반경은 600cm임을 알 수 있다. 표에서와 같이 온실의 전조재배용으로 적정조사영역을 확보하기 위해서는 100W의 인공광을 사용하며 대형온실내의 소형온실의 설치, 작업공간의 확보, 조사의 효율성을 위해서 인공광의 높이는 지면으로부터 약 1.5m로 한다. 또한 온실 내 작물의 열간은 기존의 농가에서 사용하고 있는 거리인 4.5m~5.5m를 감안하여 평균치인 5m를 기준으로 한다.

가. 1열 전조 방식에서의 최적 전조방식

그림 11은 100W 인공광을 1열 전조방식으로 지면으로부터 1.5m 높이에 길이방향으로 4m, 폭 방향으

Table. 8 Some characteristics of a each incandescent lamp at each height from the ground

	Height (cm)	Range for fixed illuminating value[1)]		Radius reach to 0lx	Max (lx)
		15lx	20lx		
100W lamp	130	260cm	205cm	580cm	76.3
	150	250cm	200cm	600cm	57
	160	245cm	190cm	600cm	54.7
60W lamp	130	140cm	110cm	530cm	42.1
	160	135cm	100cm	550cm	32.3
30W lamp	130	0cm	0cm	340cm	17.5
	160	0cm	0cm	350cm	12.6

1) 작물의 전조재배에 적합한 조도치 30~50lx(本多,1991)의 만족을 위해 중첩부위의 영역을 고려하여 설정

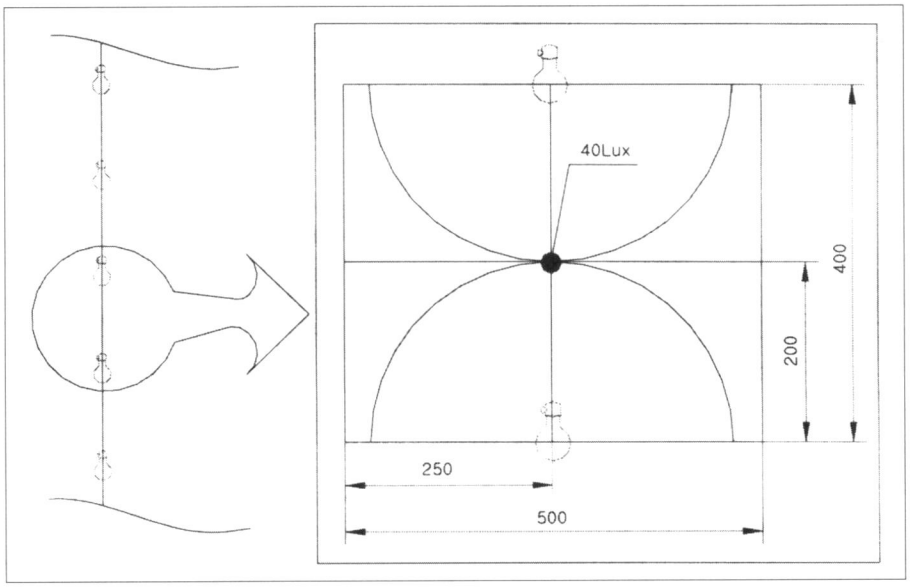

Fig. 11. Schematic drawing to set up optimal illuminating interval of 1 line system (100W incandescent lamp - 1.5m height from the ground)

로 5m되게 배열하였을 때 대칭하여 나타나는 한 구간에서의 조도분포가 어떻게 나타나는지 보여준 것으로 그림에서와 같이 1열 전조 방식으로 설치할 경우 4m간격으로 할 때 온실의 길이 방향에서는 전조재배에 적합한 조도치 30~50lx(本多,1991)의 평균치인 40lx의 조사가 가능하였으나 온실의 폭 방향인 측면에서는 반경 150cm를 넘어서면 30lx이상의 조사가 어려운 단점이 있었다. 또한, 소형터널이 설치되어 있을 경우에는 더욱더 측면에 조사되는 조도가 낮게 나타나 온실의 측면에서 발생되는 냉해의 영향과 함께 작물의 생장을 느리게 하여 작황을 부진하게 하는 원인으로 나타났다. 향후 1열 전조방식으로 인공광을 설치 할 경우에 온실의 가장자리에서 나타나는 이러한 단점들을 보완할 수 있는 연구가 수행되어야 할 듯하다.

나. 2열 전조 방식에서의 최적 전조방식

1열 전조 방식에서와 같이 100W의 인공광을 사용하고 인공광의 높이는 지면으로부터 약1.5m로 하며 온실 내 작물의 열간은 5m를 기준으로 한다. 또한, 2열 전조방식 중에서 백열등을 온실 중심선을 기준으로 나란히 대칭 되게 배열한 격자식 배치 형태[이하 Z형], 3개의 백열등을 3각형 형태로 반복 배열한 지그재그식 형태[이하 N형] 그리고 100W와 60W의 인공광을 혼합한 Z형태에 대해 최적의 표준구간을 설정하고자 한다.

1) 인공광을 Z형태로 배열할 경우

그림 12는 100W 인공광을 Z형태의 배열로 지면으로부터 1.5m 높이에 길이방향으로 6m, 폭 방향으로 5m되게 배열하였을 때 대칭하여 나타나는 한 구간의 임의의 점에서 조도분포가 어떻게 나타나는지 보여준 것으로 그림에서와 같이 100W 인공광은 위와 같은 조건하에서 조도치가 0lx에 도달하는 지점이 인공광의 중심으로부터 약 600cm이며, 200cm지점에서는 20lx, 250cm지점에서는 15lx, 300cm지점에서는 10lx, 400cm지점에서는 5.5lx로 나타났다. 또한 식 2는 계산에 이용된 유도식을 나타낸 것으로 구간 내에서 대칭이 되는 부분을 고려하여 P1에서 P9까지의 임의의 점을 선정하여 조도치 산출은 각 지점에서 영향을

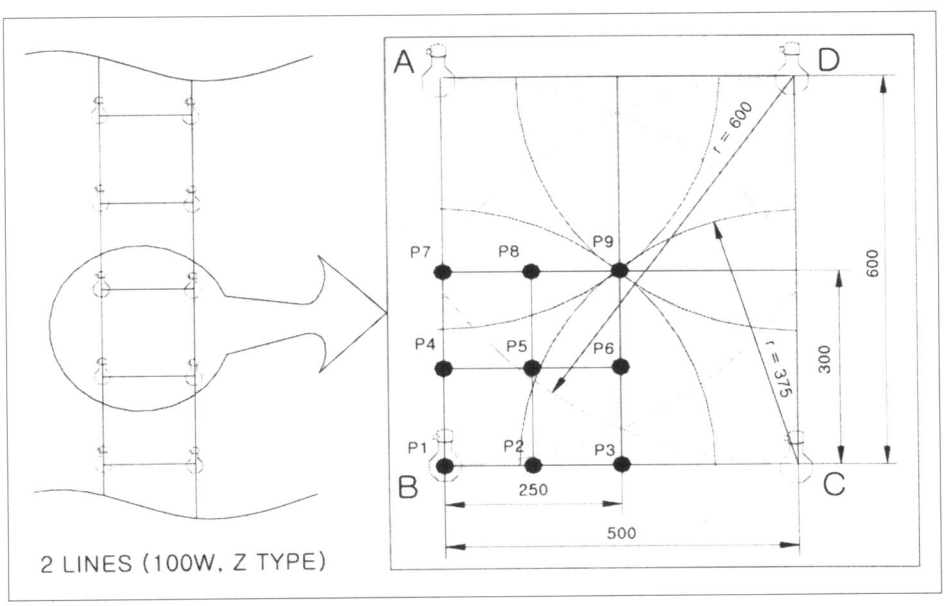

Fig. 12. Schematic drawing to set up optimal illuminating interval of 2 lines system (100W Incandescent lamp, Z-type, 1.5m height from the ground)

받는 인공광을 모두 고려하여 계산되어졌다.

식 2는 계산에 이용된 유도식으로 100W인공광을 지면으로부터 1.5m 높이에 설치하였을 때 임의의 점에서 조도분포가 어떻게 나타나는지 보여주는 것이다.

$$y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3} = \frac{57.13-0.17x+1.20e^{-4}x^2}{1-1.39e^{-3}x+2.98e^{-5}x^2-5.44e^{-8}x^3} \text{ [lx]}$$

(Equation. 2)

표 9는 사각형모양으로 100W인공광을 나란히 반복 배열한 식의 Z형태로 6m 간격으로 설치하였을 때 대칭 되는 단면에서의 임의의 각 지점에서 조도를 나타낸 것으로 표에서와 같이 인공광의 설치를 2열 전조 방식으로 설치할 경우 6m간격으로 할 때 온실의 폭 방향과 길이 방향에서 전조재배에 적합한 조도치 30~50lx(本多,1991)를 95%이상 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하였으며 실제 포장에서는 밭고랑과 두둑의 높이, 작물의 생육 물성치를 고려한다면 100% 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하다 하겠다.

2) 인공광을 N형태로 배열할 경우

그림 13은 100W 인공광을 N형태의 배열로 지면으로부터 1.5m 높이에 길이방향으로 6m, 폭 방향으로 5m되게 배열하였을 때 대칭하여 나타나는 한 구간의 임의의 점에서 조도분포가 어떻게 나타나는지 보여준 것으로 그림에서와 같이 100W 인공광 1개는 위와 같은 조건하에서 조도치가 0lx에 도달하는 지점이 인공광의 중심으로부터 약 600cm이며, 200cm지점에서는 20lx, 250cm지점에서는 15lx, 300cm지점에서는 10lx, 400cm지점에서는 5.5lx로 나타났다. 또한 구간 내에서 대칭이 되는 부분을 고려하여 P_1에서 P_6까지의 임의의 점을 선정하여 조도치 산출은 각 지점에서 영향을 받는 인공광을 모두 고려하여 계산되어졌다.

표 10은 삼각형모양으로 100W인공광을 반복 배열한 지그재그 식의 N형태로 6m 간격으로 설치하였을 때 대칭 되는 단면에서의 임의의 각 지점에서 조도를 나타낸 것으로 표에서와 같이 인공광의 설치를 2열 전조 방식으로 할 경우 6m간격으로 할 때 온실의 폭 방향과 길이 방향에서 전조재배에 적합한 조도치 30~50lx(本多,1991)를 95%이상 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하였으며 실제 포장에서는 밭고랑과 두둑의 높이, 작물의 생육 물성치를 고려한다면 100% 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하다 하겠다.

3) 인공광 100W와 60W를 혼합하여 Z형태로 배열할 경우

그림 14는 100W인공광과 60W인공광을 혼합하여 Z형태의 배열로 지면으로부터 1.5m 높이에 길이방향

Table. 9 Illumination value at each point of Z-type for the optimal arraying of incandescent lamp (100W)

		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
		0, 0	1.25, 0	2.5, 0	0, 1.5	1.25, 1.5	2.5, 1.5	0, 3	1.25, 3	2.5, 3
Illumination effect from the each lights	A	1			5	4	3	10	9	8
	B	57	38	15	30	20	10	10	9	8
	C	4	7	15	3	6	10	2	5	8
	D					2	3	2	5	8
RESULT		62	45	30	38	32	26	24	28	32
Average		35								
Value	Max	62								
	Min	24								

으로 6m, 폭 방향으로 5m되게 배열하였을 때 대칭하여 나타나는 한 구간의 임의의 점에서 조도분포가 어떻게 나타나는지 보여준 것으로 그림에서와 같이 100W인공광은 위와 같은 조건하에서 조도치가 0lx에 도달하는 지점이 인공광의 중심으로부터 약 600cm이며, 60W인공광은 540cm로 나타났다. 또한 구간 내에서 대칭이 되는 부분을 고려하여 P_1에서 P_9까지의 임의의 점을 선정하여 조도치 산출은 각 지점에서 영향을 받는 인공광을 모두 고려하여 계산되어졌다.

표 11은 100W인공광과 60W인공광을 혼합하여 Z

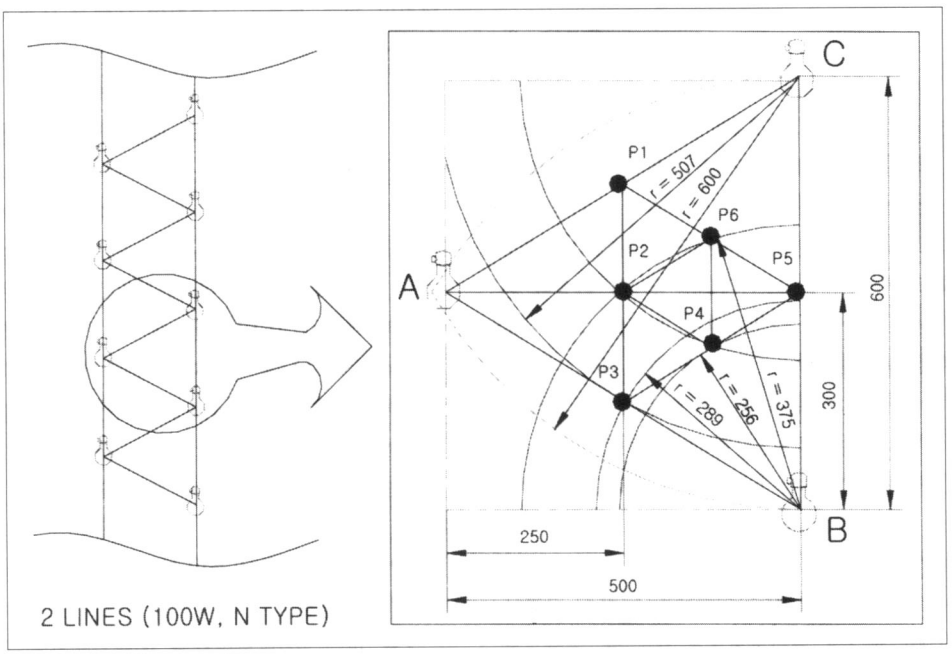

Fig. 13. Schematic drawing to set up optimal illuminating interval of 2 lines system (100W Incandescent lamp, N-type, 1.5m height from the ground)

Table. 10 Illumination value at each point of N-type for the optimal arraying of incandescent lamp (100W)

		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
		0, 0	1.25, 0	2.5, 0	0, 1.5	1.25, 1.5	2.5, 1.5
Illumination effect from the each lights	A	12	15	12	7	4	8
	B	3	8	3	17	10	7
	C	12	8	12	8	10	17
RESULT		27	31	27	33	24	33
Average		29					
Value	Max	33					
	Min	24					

형태로 6m 간격으로 설치하였을 때 대칭되는 단면에서의 임의의 각 지점에서 조도를 나타낸 것으로 표에서와 같이 인공광의 설치를 2열 전조 방식으로 할 경우 6m 간격으로 할 때 온실의 폭 방향과 길이 방향에서 전조재배에 적합한 조도치 30~50lx(本多,1991)를 90%이상 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하였으며 실제 포장에서는 밭고랑과 두둑의 높이, 작물의 생육 물성치를 고려한다면 100% 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하다 하겠다. 여기서 100W 인공광과 60W 인공광을 혼합하여 Z형태로 6m간격으

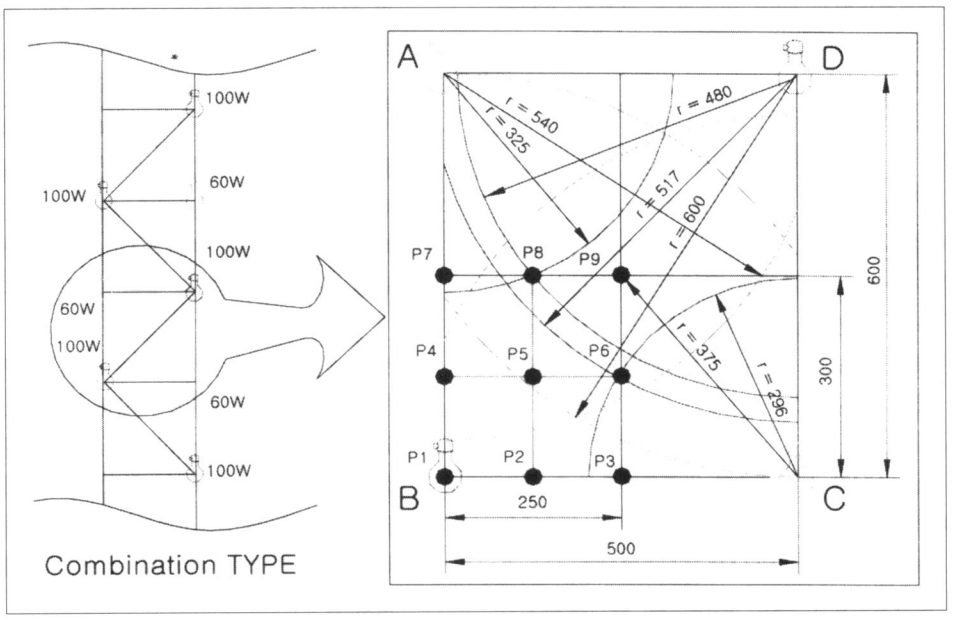

Fig. 14. Schematic drawing to set up optimal illuminating interval of 2 lines system (100W Incandescent lamp, Combination-type, 1.5m height from the ground)

Table. 11 Illumination value at each point of Combination-type for the optimal arraying of incandescent lamp

		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9
		0, 0	1.25, 0	2.5, 0	0, 1.5	1.25, 1.5	2.5, 1.5	0, 3	1.25, 3	2.5, 3
Illumination effect from the each lights	A				4	2	2	6	5	4
	B	57	38	15	30	20	10	10	9	8
	C	1	4	9	1	4	6		3	4
	D					2	3	2	5	8
RESULT		58	42	24	35	28	21	18	22	24
Average		30								
Value	Max	58								
	Min	18								

로 설치하였을 때보다 100W 인공광만을 Z형태로 6m 간격으로 설치하였을 때가 조도 분포 면에서는 보다 우수하였지만 실제 포장에서는 밭고랑과 두둑의 높이, 작물의 생육 물성치를 고려한다면 2방식 모두 전조재배에 필요한 조도치 30~50lx(本多,1991)를100% 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하다 하겠다. 또한, 에너지 감소측면에서 60W 인공광을 적절히 혼합하여 사용한다면 적정 조도치 만족과 함께 전력소모량도 줄일 수 있겠다.

Ⅳ. 결론

농업시설의 효율적인 인공광 설치의 표준화 확립을 위한 기초자료를 제공할 목적으로 인공광 설치 형태에(거리, 폭, 높이, 인공광의 종류) 따른 조도분포 모델링(Modeling)을 한 결과 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 30, 60, 100W인 백열전구를 지면으로부터 80, 100, 130, 160cm높이에 설치하고 인공광의 중심으로부터 25cm간격으로 300~350cm지점까지의 조도치를 분석한 결과 모든 조도분포 그래프로부터 일반식 $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx] 를 유도해 낼 수 있었으며, 전구의 종류와 지면으로부터의 인공광원 까지의 높이를 알면 이에 따른 계수 a, b, c, d, e, f 값으로부터 각 위치별 조도값을 예측할 수 있었다.

2. 60W의 백열전구에 갓을 씌운 인공광을 지면으로부터 80, 100, 130, 160cm높이에 설치하고 인공광의 중심으로부터 25cm간격으로 300~350cm지점까지의 조도치를 분석한 결과 모든 조도분포 그래프로부터 일반식 $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx] 를 유도해 낼수 있었으며, 갓을 씌우지 않은 자연상태 60W 인공광과 비교해볼 때 인공광의 바로 밑에서(0cm)는 1.2~1.5배정도 높은 조도치를 나타냈으나 150cm를 지나는 지점부터 조도치의 감소정도가 거의 동일하였다.

3. 100W의 백열전구에 각기 다른 색상[노란색, 은색, 무색(차광막을 칠하지 않음), 녹색, 금색, 흑색, 빨간색]의 차광막을 칠한 인공광에 지면으로부터 80, 100, 130, 160cm높이에 설치하고 인공광의 중심으로부터 25cm간격으로 300~350cm지점까지의 조도치를 분석한 결과 모든 조도분포 그래프로부터 일반식 $y = \frac{a+bx+cx^2}{1+dx+ex^2+fx^3}$ [lx] 를 유도해낼 수 있었으며, 노란색의 차광막을 칠한 인공광에서는 차광막을 칠하지 않은 자연상태 100W인공광과 비교해볼 때 인공광의 바로 밑에서(0cm) 1.3배정도 높은 조도치를 나타냈다.

4. 30, 60, 100W인 백열전구를 지면으로부터 0~160cm높이에 설치하고 인공광의 중심으로부터 50cm간격으로 300cm지점까지의 조도치를 분석한 결과 전구의 종류와 지면으로부터의 인공광 높이, 인공광 중심으로부터 측방향의 거리를 알면 식으로부터 각 위치별 조도값을 예측할 수 있었다.

5. 실측치로부터 유도되어진 유도식을 이용한 계산치와 실측치와의 조도값 비교에서 인공광의 조사가 중첩이 일어나는 부분에서는 ±5lx의 범위내에서 차이가 났으나 그 오차 값이 작기 때문에 작물의 생장에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있으며, 중첩되지 않는 부분에서는 약 100% 동일한 조도 값으로 나타났다.

6. 100W 인공광을 지면으로부터 설치높이 1.5m, 2열 전조 방식으로 배열할 경우 최적의 인공광 설치간격은 4m로 나타났다.

7. 100W 인공광을 Z형과 N형태로 전구간격 6m, 지면으로부터 설치높이 1.5m, 2열 전조 방식으로 배열할 경우 대칭되는 단면에서의 임의의 각 지점에서 조도를 산출한 결과 온실의 폭 방향과

길이 방향에서 전조재배에 적합한 조도치 30~50lx(本多,1991)를 95%이상 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하였다.

8. 100W 인공광과 60W 인공광을 혼합하여 Z형태로 6m간격으로 설치하였을 때보다 100W 인공광만을 Z형태로 6m 간격으로 설치하였을 때가 조도 분포 면에서는 보다 우수하였지만 실제 포장에서는 밭고랑과 두둑의 높이, 작물의 생육 물성치를 고려한다면 2방식 모두 전조재배에 필요한 조도치 30~50lx(本多,1991)를 100% 만족하는 범위 내에서 조사가 가능하다 하겠다. 또한, 에너지 감소측면에서 60W 인공광을 적절히 혼합하여 사용한다면 적정 조도치 만족과 함께 전력 소모량도 줄일 수 있다고 본다.

참고문헌

1. 田中 逸夫, 1995, 往復移動光源下における葉菜類の生長特性, 日本農業氣象學會1995年度全國大會, 日本生物環境調節學會第33回集會, 平成7年度農業施設學會大會 合同大會 講演要旨, pp.190-191.
2. 人科 弘重 등, 1995, 低照度下長期間の植物の生育特性に基ついた室內の植物配置デザインシステム (1)(2) 日本農業氣象學會1995年度全國大會, 日本生物環境調節學會第33回集會, 平成7年度農業施設學會大會 合同大會 講演要旨, pp.286-2879.
3. 羽生 擴道, 庄子和博, 1995, 遠赤色光の附加照射に對する いインゲンマメの慢性品種と矮性品種の反應, 日本農業氣象學會1995年度全國大會, 日本生物環境調節學會第33回集會, 平成7年度農業施設學會大會, 合同大會, 講演要旨 pp.192-193.
4. 高木 史人, 高田博充, 三船榮之助, 1991, 完全人工光型植物生産システムの開發(3) -CO_2濃度・光强度の違いとサラダ菜の生育-, 日本農業氣象學會1991年度全國大會, 日本生物環境調節學會第29回集會合同大會講演要旨, pp.142-143.
5. 池田彰, 河相好孝, 1991, 螢光ランプを用いた人工光型野菜工場の研究, 日本農業氣象學會1991年度全國大會, 日本生物環境調節學會第29回集會合同大會講演要旨, pp.144-145.
6. 北宅善昭, 今中常仁, 清田信, 相賀一郎, 1990, 人工光型 植物工場における光および空間の有效利用 -各種野菜の逆下げ栽培の可能性-, 日本農業氣象學會1990年度全國大會, 日本生物環境調節學會第28回集會 合同大會講演要旨集, pp.312-313.
7. 安西良 , 山崎擴義, 山ノ下眞理, 1982, 間歇光照射の植物生長への影響(1), 日本生物環境調節學會第24回集會講演要旨, pp.36-37.
8. 宇野 浩, 1982, 人工光を用いた制御環境下におけるトマトの生育, 日本生物環境調節學會第24回大會講演要旨集, pp.92-93.