

실내조명용 LED 광천장 조명기구 설계

(Design of LED light ceiling luminaires for indoor lighting)

김 기훈* · 김 진홍, 송 상빈
(한국광기술원)

(Gi-Hoon Kim*, Jin-Hong Kim · Sang-Bin Song)

요 약

본 논문에서는 실내전반 조명용 LED 광천장 모듈의 렌즈설계와 이를 적용한 사무실 조명설계를 하였다. 본 연구에서는 조명광학 설계 전용 프로그램인 Photopia 2.0과 조명계산 전용 프로그램인 LumenMicro 2000을 활용하여 LED 광천장 모듈의 통합형 렌즈를 설계 하고 사무실에 적용하여 작업면의 조도분포, 평균조도, 균제도 등을 계산하였다.

1. 서 론

본 논문에서는 실내전반 조명용 LED 광천장 모듈 설계를 위해서 실내조명의 기준과 요건을 조사하고 LED 광천장 모듈이 광학적으로 달성해야할 목표배광의 설정을 위하여 실내 전반조명에 사용되는 조명제품의 배광 성능을 조사하였다. 그리고 광천장 모듈에 적용될 0.2W의 포탄 타입 LED Package의 광학적, 전기적 성능을 측정하여 분석하고 광천장 모듈의 사이즈와 LED의 배열 방식을 결정하였다. 또한 목표 배광의 달성을 위한 광학설계를 실시하고 설계된 LED 광천장 모듈을 가지고 사무실 작업면의 조도분포, 평균조도, 균제도 등을 계산하여 사무실 조명설계를 하였다.

2. 실내조명 기준

물체를 보거나 작업을 하는 데는 필요한 밝기가 있다. 우리나라는 한국공업규격(KSA 3011)으로 조도기준을 정하고 있다. 작업의 성격에 따른 조도의 단계 및 사무실, 공장, 학교의 장소별 조도기준을 각각 표 1과 표 2에 나타낸다.

실내 작업장의 기준면은 보통 바닥으로부터 85cm가 되는 수평면을 기준면으로 삼는다. 작업 장소가 알려져 있고 명확히 규정되어져 있는 공간에서 기준면은 작업 구역이나 작업 영역으로 규정되어진 영역으로 이루어진다. 그러나 작업이 수평면이 아니거나 높이가 다른 경우의 기준면은 작업면의 각도 또는 작업 높이가 되어야 한다. 실내조명의 균제도 기준은 기준면에서 평균 조도에 대한 최소 조도의 비는 0.8 이상이고, 작업실 내의 일반 영역의 평균조도는 작업영역 평균 조도의 1/3 이상 이어야 한다. 또한 인접 실내의 평균 조도비는 5 : 1 을 초과하면 안 된다[1].

표 1. 조도의 단계

작업의 성격	표준기준조도 [lx]	조도범위 [lx]
초정밀	2,000	1,500~3,000
정밀	1,000	600~1,500
보통	450	300~600
단순	200	150~300
거친	125	100~150

표 2. 장소별 조도기준

작업의 성격	사무실	공장	학교
초정밀	설계 제도 타이프 계산	초정밀 작업	정밀제도 정밀실험 미상재봉
정밀	도서열람 설계 사무실 제도실 제어실 일반 사무실	정밀작업 권선 조선 검사	흑판면 도서열람 재봉, 미술 공예제작
보통	회의실 서고 응접실 강당, 식당 화장실 조리실	보통작업 배선 일반 도장	일반교실 연구실험실 강의실 교직원실 회의실 실내운동장 관리실
단순	휴게실 욕실 강의실	거친작업 절연처리	라커룸 복도, 계단 화장실 강당
거친	차고, 창고 석탄실	건조	테니스 코트 육외운동장 구내통로

3. LED 광천장 모듈의 광학설계

3.1 목표배광의 설정을 위한 실내용 조명 기구의 배광곡선 사례조사

광천장 모듈의 광학 설계를 위하여 실내 다운라이트용 조명기구 배광의 종류를 조사하였다. 표 3은 옥내 다운라이트용 조명기구의 배광의 종류를 나타내고 있고 그림 1은 그 사례와 조명제품의 배광을 나타내고 있다.[2]

표 3. 옥내 다운라이트용 조명기구의 배광의 종류

	전반조명용	일 위시용	벽도조명용	스포트 조명용
배광곡선(cd/1000lm)				
용도	방면 보조조명으로 사용	커튼, 그림, 장식용 선반 등의 벽면 조명용	벽도 길이방향으로 평평의 저어기가 없다.	계선대 등의 스포트 조명으로 사용

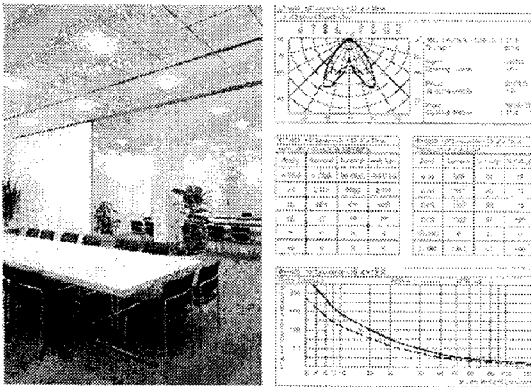


그림 1. 실내용 조명기구 적용 사례 및 배광곡선

LED 광천장 모듈의 배광 실내 전반조명의 목적으로 사용될 것이므로 눈부심의 방지와 실내 작업면의 균제도, 조명기구의 설치간격 연장이 매우 중요하다. 따라서 그림 1의 배광형태를 목표로 하여 LED 광천장 모듈의 광학설계를 실시하였다.

3.2 LED 패키지 선정 및 성능측정

LED 광천장 모듈에 적용하기 위한 LED Package는 국내 L(사)에서 직접 제작한 0.2W 포탄형 5Φ LED로 하였다. 다음의 그림 2와 표 4는 이들 제품의 배광과 광학적, 전기적 성능측정 결과를 나타내고 있다. 0.2W의 포탄형 LED는 sample 하나만을 선정하여 측정 데이터로 활용한다면 생산되는 LED Package 전체에 대한 신뢰성이 없으므로 5개의 샘플을 선정하여 배광, 전

기적, 광학적 성능을 측정하였다.

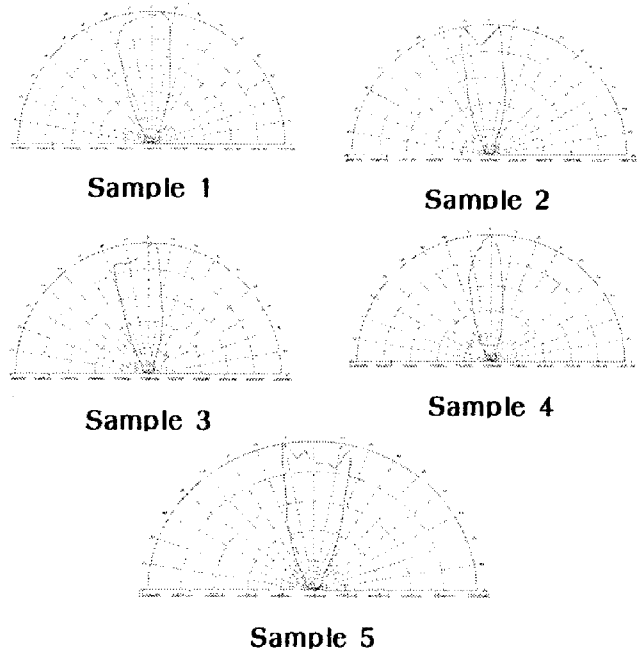


그림 2. 0.2W 5Φ 포탄형 White LED의 배광

표 4. 0.2W 포탄형 White LED의 광학적, 전기적 성능측정 Data

	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4	sample 5	
정격전류[mA]	50	50	50	50	50	
정격전압[V]	3.13	3.166	3.05	3.06	3.15	
정격전력[W]	0.16	0.1583	0.15	0.15	0.16	
광속[lm]	10.25	10.20	10.74	10.64	9.61	
중심광도[cd]	9.31	11.60	9.39	11.29	9.66	
지향각[degree]	47.70	37.6	46.50	41.70	43.40	
발광효율[lm/w]	66.50	65.36	71.55	70.63	61.52	
색온도[CT]	7026	6626	6465	6550	7492	
색좌표	x	0.3067	0.3116	0.3139	0.3127	0.3002
	y	0.3131	0.3221	0.3257	0.3232	0.3065

발광효율에서 0.2W 포탄형 White LED의 샘플 1에서 5가지의 평균값은 67lm/W이다. 이것은 1W Lambertian White LED의 발광효율인 25.23lm/W 보다 매우 높다. 따라서 발광효율 면에서는 0.2W 포탄형 White LED가 1W Lambertian White LED 보다 매우 우수하다는 것을 알 수 있다. 그리고 지향각이 1W Lambertian White LED의 경우에는 약 119°, 0.2W 포탄 타입의 White LED가 약 43° 이다. 지향각은 0.2W 포탄 타입의 LED가 1W Lambertian 타입보다 좁지만 광천장 모듈의 광학적 설계로 목표배광을 달성하면 되므로 문제시 되지 않는다. 따라서 광천장용 LED 모듈에 적용하기 위한 LED Package는 0.2W, 포탄 타입의 White LED로 선정하였다.

3.3 광천장 모듈의 크기 및 LED 배치

광천장 모듈의 크기는 100×100mm, 200×50mm, 200×200mm 등 3가지로 설계하기로 하였다. LED 배치는 100×100mm의 모듈 크기에 대해서는 4개×4개를 등간격으로 배치하였고 200×50mm의 모듈 크기에 대해서는 2개×8개를 등간격으로 배치하였다. 또한 200×200mm의 모듈 크기에 대해서는 8개×8개를 등간격으로 배치하였다. 그림 3에 LED 광천장의 모듈 크기에 대한 LED의 배치도를 단면으로 나타내었다. 그림 3에서 ○로 표시되어 있는 부분이 LED의 위치이다.

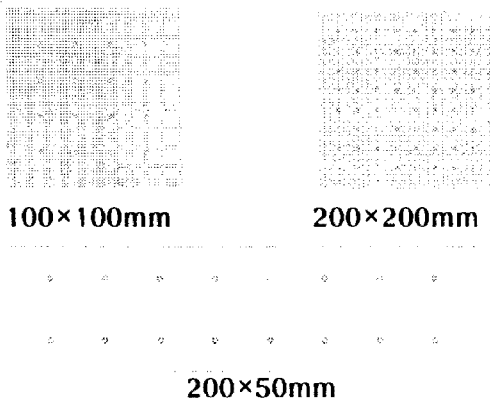


그림 3. LED 광천장 모듈 크기 및 LED 배치도

3.4 LED 광천장 모듈 렌즈 설계

어떠한 광학설계도 하지 않고 0.2W 포탄 타입의 White LED를 그림 3과 같이 배치하였을 때의 배광곡선과 Ray tracing결과는 그림 4와 같다. 시뮬레이션에 사용된 소프트웨어는 Photopia 2.0이고 시뮬레이션에 적용된 LED 모듈의 크기는 100×100mm 크기의 LED 4개×4개가 배열된 형태이다. 200×200mm, 200×50mm 크기의 시뮬레이션 결과도 동일한 배광으로 시뮬레이션 되었으므로 특별히 본 문에서 제시하지는 않는다.

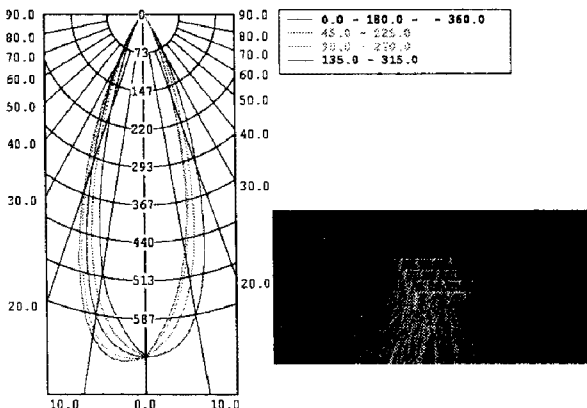


그림 4. LED 자체 배열 만에 의한 Ray tracing 및 배광특성

그림 4와 같이 렌즈 설계를 하지 않은 LED 자체만의 배광을 가지고 그림 21 배광을 만족시키기 위하여 광학 설계를 실시하였다. 그림 1의 목표배광을 달성하기 위한 LED 개별 렌즈의 형상은 그림 5와 같으며 렌즈 재료는 Standard acrylic로서 굴절율 1.49이다. 조명용 렌즈 재료로는 Standard acrylic이 가장 일반적이므로 이와 같은 재료로 사용하였으며 렌즈 경사면의 역할은 다음과 같다.

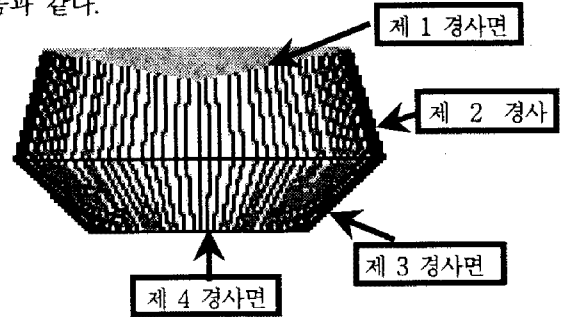


그림 5. 목표배광을 달성하기 위한 렌즈 구조

제 1 경사면의 역할은 LED 중심점이 제 1 경사면이 이루는 삼각형의 수평선 중심에 위치할 때 중심부로 향하는 광선을 바깥쪽 방향으로 보내는 역할을 하며, 제 2 경사면은 일정 각도로 기울어 지지 않고 수직일 경우에는 제 1 경사면에 의해 바깥쪽으로 향한 광선이 렌즈 내부에서 상호 반사하기 때문에 경사를 주어 내부 상호 반사 성분을 제거하고 광선을 아래쪽으로 향하도록 하여 효율을 상승시키는 역할을 한다. 제 3 경사면은 렌즈 중심축으로부터 30~40°로 향하는 빛은 목표배광을 위해 그대로 통과시키는 역할을 한다. 그리고 제 4 경사면인 렌즈의 바닥면에 해당하는 부분은 굴절율에 의해 광선을 바깥쪽으로 통과시키는 역할을 한다.

그림 5는 0.2W 포탄 타입의 LED 배광에 적용될 수 있는 형상이며 1W Lambertian LED일 경우에는 0.2W 포탄 타입의 LED와 배광이 다르기 때문에 그 구조는 동일하나 각 경사면의 기울기를 달리하여야 한다.

이와 같은 렌즈를 100×100mm의 광천장 모듈 크기에 0.2W 포탄 타입의 White LED 각각 개별적으로 적용하고 시뮬레이션 하여 다음 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 이러한 배광의 형상은 그림 1의 목표배광과 매우 유사하며 중심축의 광도가 낮고 중심축으로부터 20°에서 최대 광도 값이 최대이며 30° 이상의 빛은 엄격히 제어하는 형태의 배광이다. 따라서 눈부심이 강한 LED를 사용하였을 때 광원 중심축으로 부쳐 30°이상의 방향에서 광천장 모듈을 보았을 때 눈부심의 거의 발생하지 않는다. 또한 중심축 광도가 낮고 20° 방향의 광도가 최대이기 때문에 조도의 거리의 역제곱 법칙에 의해서 광천장 모듈을 실제 조명공간에 설치하였을 때 조도 균제도를 향상시킬 수 있고 조명기구 설치간격을 연장시킬 수 있다.

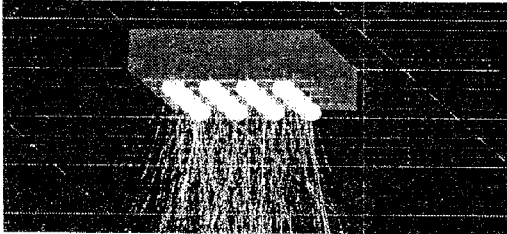
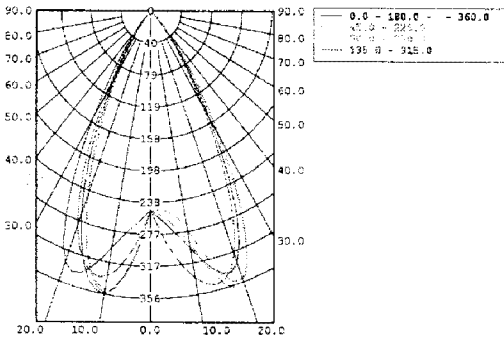


그림 6. 0.2W 포탄 타입 LED용 렌즈의 광학 설계 결과 Ray tracing 및 배광 특성

그러나 이와 같은 렌즈를 광천장 모듈에 사용되는 LED의 개수만큼 금형가공을 하여 제품을 생산하기에는 매우 많은 비용이 소비된다는 문제점이 있다. 따라서 내부 상호 반사가 발생한다고 하더라도 그림 5의 제 2 경사면을 수직으로 하고 동일한 렌즈재료로 일체화 하였다. 그림 7은 이와 같은 형태로 렌즈 설계안을 변경 하였을 때의 시뮬레이션 결과이다.

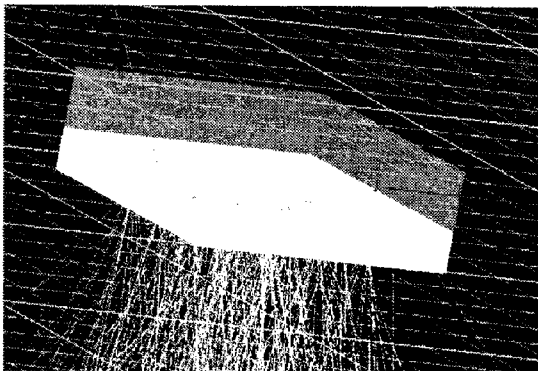
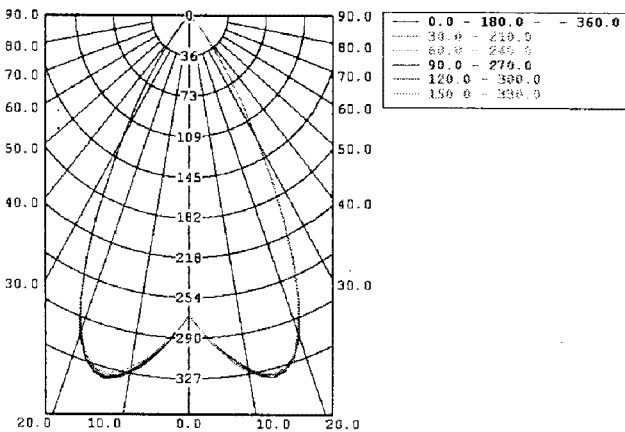


그림 7. 0.2W 포탄 타입 LED용 통합형 렌즈의 광학 설계 결과 Ray tracing 및 배광 특성

그림 6과 7을 비교하여 보면 배광의 형태는 크게 달라지지 않았으나, 최대 광도의 값이 약 356 cd에서 328 cd로 다소 감소하였음을 알 수 있다. 그러나 감소량이 그리 크지 않으므로 그림 7과 같은 형태의 광천장 모듈을 선정하여 이 후 생산 제품으로 적용하기로 하였다. 또한 이번에 개발한 광천장 모듈의 통합형 렌즈는 LED 개별적으로 광선을 제어하기 때문에 광천장 LED 모듈의 사이즈가 변하고, LED 개수가 변화하여도 LED 각각에 대한 렌즈 구조로 금형가공을 하면 동일한 목표배광을 달성할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 LED의 종류가 변화하여 LED 자체의 배광이 변화하면 렌즈 경사면의 기울기와 세그먼트의 길이는 변화시켜야 한다.

4. LED 광천장 모듈의 조명계산

4.1 LED 광천장 모듈 1대 시물실 중앙 배치

지금 까지 수행한 LED 광천장 모듈을 가지고 실제 사무실에 적용하여 조도 및 균제도를 계산하였다. 조명 계산에 이용된 프로그램은 LumenMicro 2000이다.

그림 8은 100×100mm 크기의 광천장 모듈 1개를 6×6×3m인 크기의 사무실에 배치하였을 때의 작업면(바닥면)으로 부터(85cm) 조도분포를 계산한 것이다.

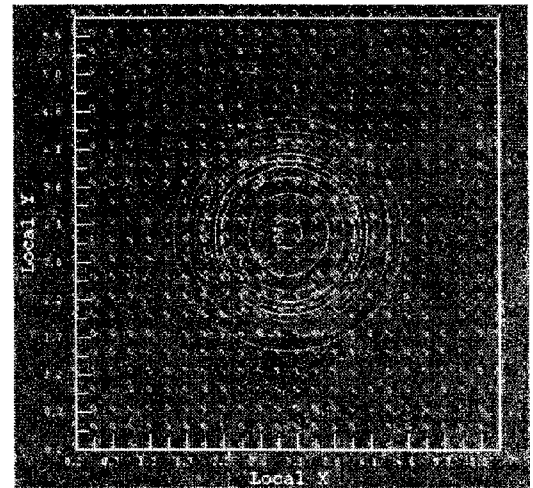


그림 8. LED 광천장 모듈 1대 설치시의 작업면 조도 분포

광천장 모듈의 직하점 조도는 35~37lx로 계산되었고 광천장 모듈의 크기에 비해 방의 크기가 매우 크므로 바닥면의 조도가 대부분 2lx 이하로 매우 어둡다는 것을 알 수 있다.

4.2 LED 광천장 모듈 50대 설치시 지그 배열

그림 9는 광천장 모듈의 크기와 방의 크기는 앞에서와 마찬가지로 하고 광천장 모듈 50대를 6×6×3m인 크기의 사무실에 0.65m 간격으로 배치하였을 때의 조명기구 배치도를 나타내고 있다. 조명기구의 배치는 지그재그 식으로 배열하였다. 그리고 이때의 사무실의 작업면 조도 분포는 그림 10과 같고 사무실 내 작업면의 조도 분포 값을 표로 나타내면 표 5와 같다.

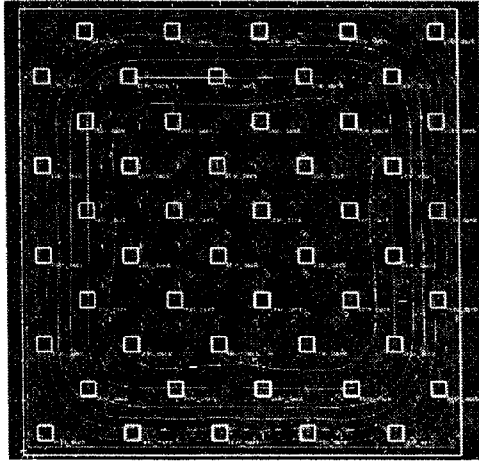


그림 9. LED 광천장 모듈 50대 배열 방식

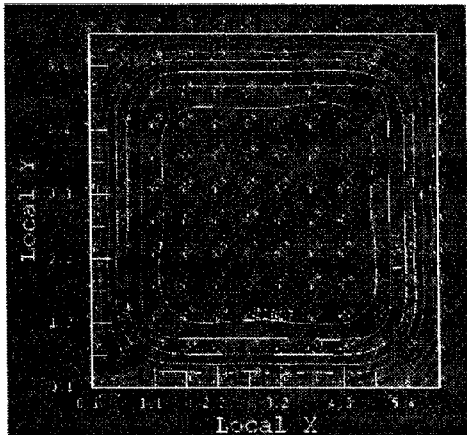


그림 10. LED 광천장 모듈 50대 지그재그 배열시 작업면 조도분포

표 5. LED 광천장 모듈 50대 지그재그 배열시 작업면 조도분포

X \ Y	0.1	0.6	1.1	1.7	2.2	2.7	3.2	3.8	4.3	4.8	5.4	5.9
5.9	63	88	109	119	113	121	113	121	115	116	103	67
5.4	88	135	166	173	173	173	173	174	175	169	146	105
4.9	109	166	200	208	208	208	208	210	209	203	172	122
4.4	119	173	208	216	217	216	217	217	217	210	179	120
3.8	113	173	208	217	217	218	217	219	217	211	178	127
3.3	121	173	208	216	218	216	218	217	217	210	178	118
2.8	113	173	208	217	217	218	217	218	217	210	179	127
2.2	121	174	210	217	218	217	218	218	218	211	179	120
1.7	115	175	209	217	217	217	217	218	218	211	179	125
1.2	116	170	203	210	211	210	210	211	211	205	173	117
0.6	103	146	173	179	179	178	179	179	180	173	144	94
0.1	67	104	122	120	127	118	127	120	125	117	94	70

그리고 표 5의 조도 분포 값의 평균, 최대, 최소조도 및 균제도를 계산하여 정리하면 표 6과 같다.

표 6. LED 광천장 모듈 50대 지그재그 배열시 조도 값 및 균제도

	Ave	Max	Min	Ave/Min	Max/Min
Horizontal Grid	171.3	218.5	62.5	2.7	3.5

표 6을 보면 보통 시작업의 사무실에서는 조도와 균제도의 문제가 있음을 알 수 있다. 보통 시작업시의 일반사무실의 평균조도 기준은 표 1에서와 같이 300~600lx의 조도값을 만족시켜야 하기 때문이다. LED 광천장 모듈 50대를 지그재그 배열로 6×6×3m인 크기의 방에 설치하였을 때는 표 6과 같이 평균조도 값이 171.3lx로 계산되기 때문이다. 균제도 또한 최소조도/평균조도의 값이 0.8이상을 만족시켜야 하지만 표 12에서 평균/최소의 값이 2.7이므로 균제도 값은 0.37(1/2.7)에 해당한다. 그러므로 균제도 또한 실내 전반조명의 기준을 만족시키지 못한다. 그러므로 바람직한 조명 설계를 위해서는 조명기구의 대수를 증가시키거나 조명기구의 배치를 다시 고려하여야 한다.

4.3 LED 광천장 모듈 100대의 바둑판식 배열

그림 11, 12는 100×100mm 크기의 광천장 모듈 100대를 6×6×3m 크기의 사무실에 바둑판식으로 0.65m 간격으로 배열 하였을 때의 조명기구 배치도와 작업면의 조도 분포를 나타내고 있다.

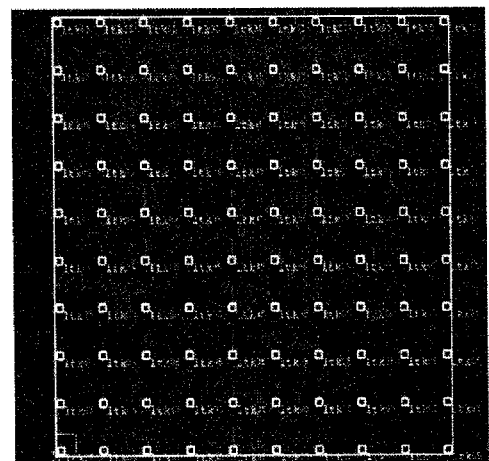


그림 11. LED 광천장 모듈 100대 배열 방식

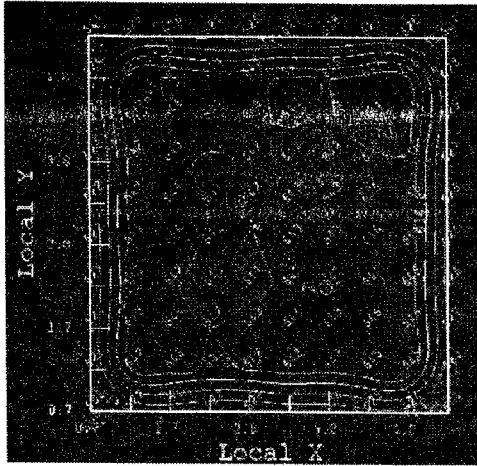


그림 12. LED 광천장 모듈 100대 바둑판식 배열시 작업면 조도분포

그리고 6×6×3mm 사무실 작업면의 조도분포 값을 표 7로 정리하면 표 7과 같고 평균, 최대, 최소 조도 및 균제도 값을 정리하면 표 8과 같다.

표 7. LED 광천장 모듈 100대 바둑판식 배열시 작업면 조도분포

X \ Y	0.72	1.23	1.74	2.24	2.75	3.26	3.77	4.27	4.78	5.29
5.28	603	625	627	626	626	627	627	629	627	606
4.77	624	645	646	644	645	646	646	648	648	627
4.27	625	645	646	644	645	646	645	648	648	628
3.76	622	642	642	640	642	643	642	645	645	626
3.26	622	642	644	641	641	643	643	646	646	626
2.75	621	642	643	641	642	642	642	645	645	625
2.25	622	641	642	639	640	642	641	644	644	626
1.74	623	643	643	641	643	644	643	645	646	626
1.24	621	641	643	640	641	643	642	645	644	624
0.73	600	622	623	622	621	623	623	625	624	603

표 8. LED 광천장 모듈 100대 바둑판식 배열시 조도값 및 균제도

	Ave	Max	Min	Ave/Min	Max/Min
Horizontal Grid	636.3	648.8	600.9	1.1	1.1

표 8을 보면 평균조도가 636.3lx로서 이 값은 표 1에 서의 보통 및 정밀 작업이 이루어지는 사무실 공간의 조도 기준을 만족하는 값이다. 또한 균제도의 값도 평균/최소의 값이 1.1이므로 최소/평균(1/1.1)의 값으로 수정하면 0.90이다. 이것은 사무실 조명의 균제도 기준을 만족시키는 값이다.

그림 13은 LumenMicro 2000의 시뮬레이션 결과로

서 바둑판식으로 배치하였을 때의 사무실 조명상황을 나타내고 있고 그림 14는 LED 광천장 조명에 의한 빛의 Rendering 효과를 나타내고 있다.

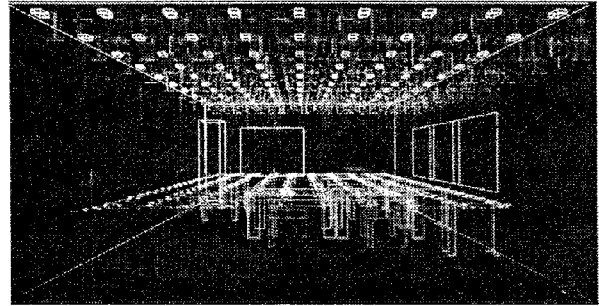


그림 13. LumenMicro 2000을 이용한 LED 광천장 조명에 의한 사무실 조명 상황

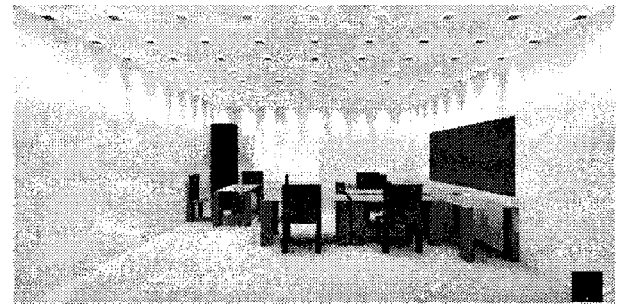


그림 14. LumenMicro 2000을 이용한 LED 광천장 조명에 의한 사무실 조명 Rendering 결과

5. 결론

본 연구에서는 조명광학 설계 전용 프로그램인 Photopia 2.0과 조명계산 전용 프로그램인 LumenMicro 2000을 활용하여 LED 광천장 모듈의 통합형 렌즈를 설계 하고 사무실에 적용하여 작업면의 조도를 계산하였다. 광학설계 결과 실내 전반조명의 요건을 만족시키는 배광을 구현하였으며, 조도계산 결과 사무실조명의 조도기준을 만족시키기 위한 LED 광천장의 개수는 100×100mm의 0.2W 16개의 LED가 포함된 광천장 모듈을 사용할 경우 약 100대가 설치되어야 한다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 광산업기술력향상사업의 수행결과임

참고 문헌

- (1) 한국조명전기설비 학회, "조명디자인자격인증교재", 1999, pp.7-1~7-23
- (2) 日本照明學會, "照明基礎講座テキスト", 1996, p.4-8
- (3) 日本照明學會, "LED 핸드북", 2006, pp.128~159