

자연채광 성능평가용 인공천공돔(Sky Simulator)의 개발 및 신뢰성 검증

Development and its Validation of Sky Simulator Facilities for Daylighting Evaluation

김 정 태*
Kim, Jeong-Tai

김 곤**
Kim, Gon

유 인 혜***
Yu, In-Hye

Abstract

For the evaluating daylighting performance, field measurement, scale model test and a set of computer tools can be applied. For the scale model measurements, the sky simulator is a vital facility to represent the desired sky conditions consistently. Recently K university has developed a large size sky simulator, 6m-diameter and 3.7m-height, that is suitable for the international standard. To verify the reliability of the sky simulator, the luminance distribution on the inner sky surface was measured and compared with the CIE standard overcast sky model. It is found that the sky simulator can be reproduced the CIE standard overcast sky condition with 4.3% as mean difference. K university sky simulator is fully validated for usability and accuracy for daylighting researches.

Keywords : sky simulator, artificial sky, CIE standard overcast sky, luminance distribution

1. 서 론

생활의 질이 향상됨에 따라 건축환경에 대한 질적 요구가 증가하고 있다. 빛환경은 거주자에게 직접적인 영향을 미치므로 건축 환경의 질을 결정하는데 조명의 역할은 매우 크다. 이러한 가운데 전 세계적인 에너지 소비의 증가로 인한 대체에너지 개발에 대한 연구가 진행되고 있으며, 건물의 에너지 소비에 대한 관심이 증가하고 있다. 선진 대학과 연구소에서는 이러한 자연채광의 중요성을 인지하여 자연채광에 대한 연구를 다양한 방법으로 진행하고 있다.

자연채광에 대한 성능평가는 설계과정에서 다양한 방안이 고려되어야 하며 정확성을 갖춘 기준으로 평가되어야 한다. 축소모형실험은 자연채광 성능평가의 한 방법으로서 다양한 형태의 공간을 평가할 수 있으며, 빛의 일관성이라는 특징으로 높은 신뢰도를 갖는 방법이다. 따라서 축소모형실험은 자연채광 성능평가의 유용한 방법이며 연구자들에게 용이하게 선택된다.

이러한 자연채광 실험 시에는 천공상태가 일관성 있게 유지되어야 하는 것이 기본 조건이다. 하지만 실제 천공의 상태는 매우 다양하므로 객관적인 결론 도출을 위한 정확성을

갖춘 기준이 필요하다. 이에 CIE(국제조명위원회)에서는 자연채광 설계용 천공으로서 CIE 표준 담천공(CIE Standard Overcast Sky)과 CIE 표준 청천공(CIE Standard Clear Sky)을 제시하고 있다. 이러한 기준 천공을 재현하는 평가 시설로서 인공천공돔(Sky Simulator, Artificial Sky Dome)이 있으며 선진 대학이나 연구소에서는 이를 제작하여 자연채광 연구에 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 인공천공돔에 대한 기본적 이론과 기존 개발사례에 대한 고찰과 함께 자체 개발된 K대학 인공천공돔의 제원 및 특성을 소개하고자 한다. 또한 이 인공돔의 신뢰성을 검증하여 향후 진행될 천공돔 내 축소모형실험의 기초자료를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 인공천공돔의 개요 및 개발사례

2.1 인공천공돔의 개요

인공천공돔은 객관적인 천공을 구현하기 위한 자연채광 평가시설로서 무광택 내부표면의 반구형 돔이 기본적인 형상이다. 보편적으로 돔내 하부에 수십개의 램프를 설치하여 반구 내표면을 조사함으로써 균일천공(Uniform Sky) 또는 CIE 표준 담천공(CIE Standard Overcast Sky)을 등의 기준 천공을 구현한다. 인공광원 외에 태양의 역할을 하는 인공 태양을 설치하여 보다 다양한 천공상태를 재현하기도 한다.

* 경희대학교 건축공학과 교수
** 강원대학교 건축학부 부교수
*** 경희대학교 건축공학교 석사과정

다양한 천공상태를 구현하기 위하여 램프의 밝기 및 각도 조절이 용이하여야 한다. 또한 인공천공돔 내부는 확산성이 높은 도료로 마감되어 빛의 분포가 균일하도록 되어야 하며 축소모형실험을 위한 적절한 크기가 요구된다.

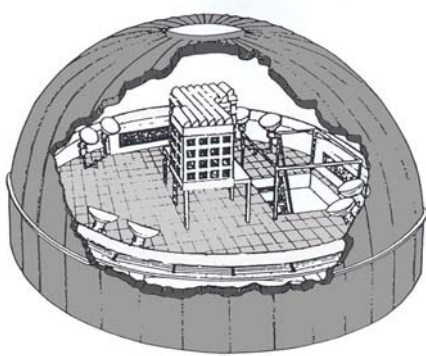


그림 1. 인공천공돔의 투시 개념도

2.2 인공천공돔의 기존 제작사례

해외의 선진 대학이나 연구소에서는 수년전부터 인공 천공 돔을 제작 개발하여 이를 이용한 자연채광 연구를 수행하고 있다. 이들의 사례를 인공천공돔 만으로 천공을 구현하는 인공천공 자체형과 인공태양장치인 헬리오돈을 천공 내부에 설치한 헬리오돈 일체형으로 구분하여 조사하였다.

표 1. 인공 천공돔의 기존사례

구분	인공 천공돔	기구제원	
인공 천공 자체형		소재지	Lawrence Berkeley National Lab
		규격	직경 7.2m
		인공광원	108개의 형광튜브
		인공태양	1000W 할로젠램프
헬리오돈 일체형		소재지	Texas A&M 대학
		규격	직경 8.5m, 높이3.6m
		인공광원	HID 램프 8개, 형광램프 80개
			소재지
규격	직경 8m		
인공광원	에너지 절약형 콤팩트 형광등		
인공태양		인공태양	1000W 텅스텐램프 575 HMI 램프
		부가장치	모델스코프, CCD카메라
		소재지	Bartlett, University College London
인공광원		규격	직경 5.4m
		인공광원	에너지 절약형 콤팩트 형광등

3. K대학 인공천공돔의 개발

3.1 목적 및 제원

K대학에서는 기존 인공천공돔의 제원과 특성을 참고 하여, 국제적 기준에 적합한 인공천공돔을 자체 개발·제작하였다. 인공천공 자체형으로 반구형의 보편적인 형상이며, 직경 6[m], 높이 3.7[m] 이다. 반구체는 총 145개의 분절면으로 이루어져있으며, 돔의 형상이 완전한 곡면을 이루도록 하기 위하여 각 분절면에 해당하는 곡률을 계산하여 컴퓨터를 이용한 절삭·곡률 생성·시공이 되도록 하였다. 내부는 확산성이 높은 도료로 마감하여 담천공 재현 시 광학적으로 이상적인 빛의 분포가 이루어지도록 고려하였다. 모형실험 시 Li-cor사의 조도 측정 장치와 데이터 저장기를 통해 데이터를 취득하며, 높이조절과 이동이 가능한 모형 설치용 평판이 구비되어 있다.



그림 2. K대학 인공천공돔 외부



그림 3. K대학 인공천공돔 내부

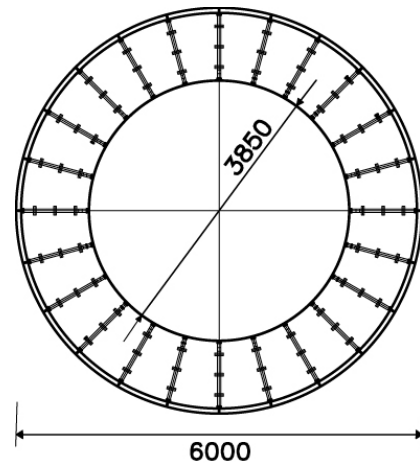


그림 4. 인공천공돔의 평면

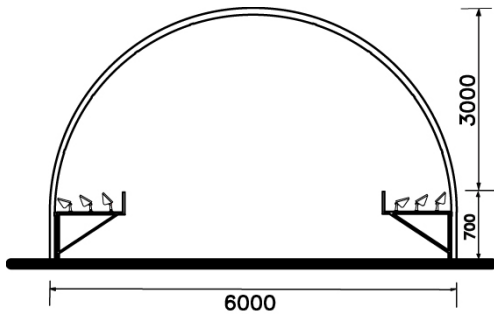


그림 5. 인공천공돔의 단면

돔의 수평 가장자리에는 72개의 할로겐램프가 3행씩 24열로 설치되어 있다. 모든 램프를 점등하였을 때, 지표상 최대 수평조도는 약 7,020[lx], 천공휘도는 약 3,400[cd/m²]까지 구현할 수 있다.

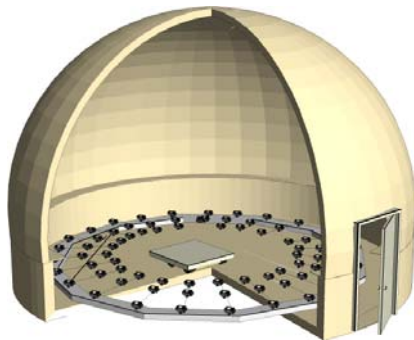


그림 6. 인공천공돔의 투시도

3.2 조명설비 및 제어

각각의 광원은 개별적으로 각도가 조절되므로 다양한 천공 상태를 재현할 수 있다. 광원의 밝기 또한 램프조절용 디머를 통해 개별적으로 제어할 수 있어 사용목적에 적합한 천공 상태를 구현할 수 있다.



그림 7. 인공천공돔의 등기구 사진 및 도면

표 2. 인공천공돔 내부 램프의 제원

	Lamp Type	Halogen Lamp
	소비전력	500[W]
	광 량	9,500[lm]
	색 온도	3,000[°K]



그림 8. 조명제어 시스템과 밝기가 조절된 모습

할로겐램프의 열로 인해 과열된 공기는 돔 내부 2대의 에어컨과 상부 지름 0.4[m]의 환기구를 통해 조절된다. 환기구는 그림 9와 같이 원형 덕트를 통해 외부로 연결되어 있다.



그림 9. 인공천공돔의 공조시스템

3.3 헬리오돈 및 인공태양

K대학은 보다 객관적이고 과학적인 천공조건을 구현하기 위하여 인공천공돔 외에 인공광원과 평판을 사용하여 자연광과 대기환경을 구현하는 Heliodon을 제작하였다. PEC Heliodon의 형태와 작동 원리를 기초로 하여, 높이 1.115[m]의 태양고정형으로 설계되었다. 각도 조절부분과 평판이 조립 가능하도록 제작되었으며, 바퀴와 바퀴 고정장치가 설치되어 이동성을 높였다.

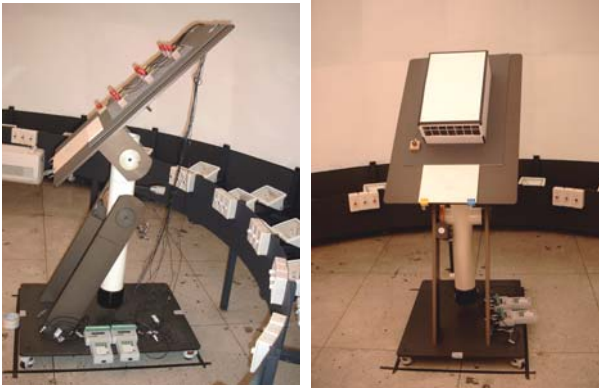


그림 10. K대학 헬리오돈 및 실험 예

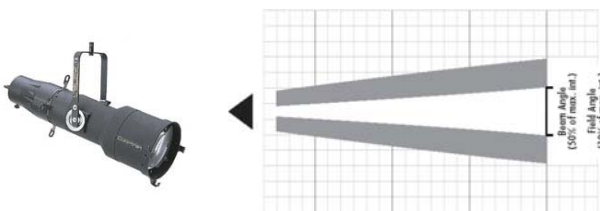


그림 11. 인공태양 및 배광형태

그림 11은 헬리오돈 실험 시 사용되는 인공태양으로 빛의 직진성을 고려한 조사각 5[°]의 제품이다.

4. K대학 인공천공돔의 광학특성

4.1 신뢰성 검증 방법

인공천공의 신뢰성을 검증하기 위하여 다음과 같은 방법으로 측정을 실시하였다. 5열의 램프를 점등하였을 때와 24열의 모든 램프를 점등하였을 때를 대상으로 2차에 걸쳐 인공천공의 휘도분포를 측정하였다.

측정은 CIE 표준 답천공의 휘도분포에 근접하도록 램프의 밝기와 각도를 조정한 후 실시하였으며, CIE 기준값과 천공내의 휘도 측정값에 대한 평균값을 비교하였다. 또한 디지털 광학측정기기인 ProMetric1400을 이용하여 물리값 및 가시적인 휘도분포를 확인하여 인공 천공의 유용성을 검증하였다.

CS-100을 이용한 휘도측정은 CIE 표준 답천공의 휘도분포에 근접하도록 조정된 인공천공의 휘도를 그림 14와 같이 휘도계를 이용하여 측정하였다. 천정에서 지표까지의 면을 5등분하여 6개의 각도에서 선정하였다.

그림 13, 14와 같이 5열을 점등하였을 때는 3방향에서, 24열을 점등하였을 때는 6방향에서 측정하였다.

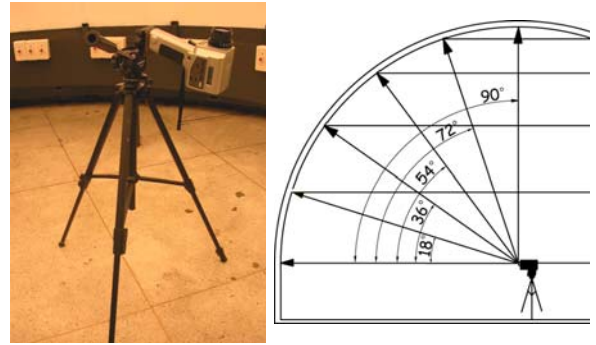


그림 12. CS-100과 측정각

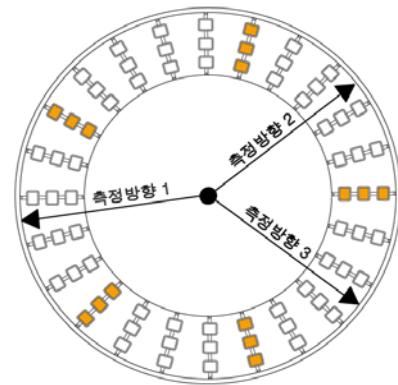


그림 13. 5열 점등 시 휘도 측정방향

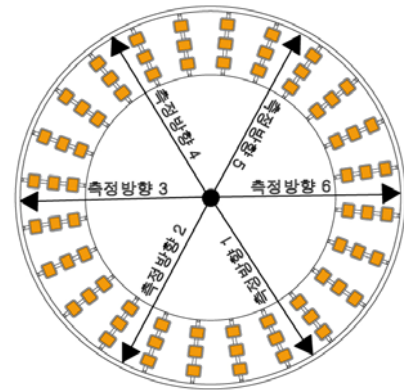


그림 14. 24열 점등 시 휘도 측정방향

ProMetric1400은 디지털 광학 측정기기로서 촬영된 이미지를 분석하는 프로그램을 이용하여 휘도, 색도, 색온도 등의 물리값을 생성하는 장비이다. 기존의 측정기와 같은 점측정 방식이 아닌 150만 포인트의 다측정시스템으로서 2차원과 3차원의 데이터를 취득할 수 있는 강점이 있다. 인공천공돔 내부 휘도분포의 물리적 수치의 확인외에 가시적인 휘도분포의 확인을 위하여 ProMetric 1400을 이용하여 내부를 측정하였다. 그림을 15와 같이 3개의 범위로 나누어 측정을 실시하였다.

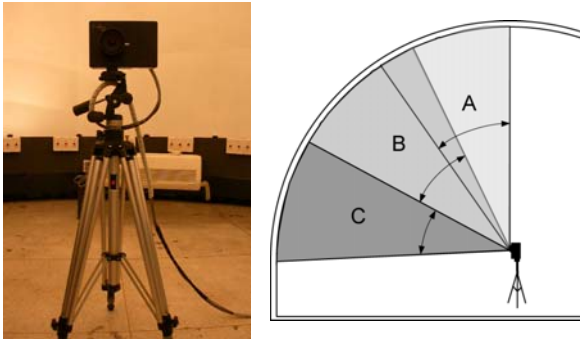


그림 15. ProMetric1400 및 측정범위

4.2 5열 램프 점등 시 휘도검증

휘도분포 검증의 첫 번째 측정으로 5열의 15개 램프를 점등한 후 3개의 방향에서의 측정값은 표 3과 같다. 이때의 천정의 휘도값은 798[cd/m²], 작업면 수평조도는 2,273[lx]로 나타났다.

측정된 천정의 휘도값, 798[lx]를 CIE 표준 답천공 모델 식에 근거하여 지정된 6개의 각도에서의 기준 휘도값을 산정하였다. 표 3은 산정된 기준 휘도값과 실제 측정된 값을 비교한 오차율을 나타낸 것이다.

표 3. 5열 램프 점등 시 휘도 측정값과 CIE모델값의 비교

구분	90°	72°	54°	36°	18°	0°	
CIE 표준 답천공 [cd/m ²]	798	747	665	551	414	266	
측정 방향 1	휘도 [cd/m ²]	798	767	707	564	393	270
	표준값과의 차이[%]	0	2.68	6.32	2.36	5.34	1.50
측정 방향 2	휘도 [cd/m ²]	798	780	730	568	406	267
	표준값과의 차이[%]	0	4.42	9.77	3.09	1.97	0.38
측정 방향 3	휘도 [cd/m ²]	798	777	728	580	397	275
	표준값과의 차이[%]	0	4.02	9.47	5.26	4.28	3.38

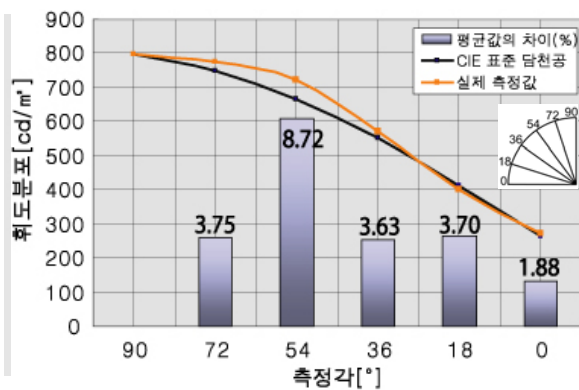


그림 16. 5열 램프 점등 시 인공천공 내부의 휘도분포

각 측정점의 평균값을 비교하면 최소 0.4[%], 최대 9.8[%], 전체 평균 4.4[%]의 차이가 나타났다. 측정각도에 따른 평균값의 차이는 측정각 0°에서 평균 1.9[%]로 가장 낮았으며, 측정각 54°에서 평균 8.7[%]로 가장 큰 차이가 나타났다. 세 측정지점 모두 상향각 54°에서 6[%] 이상의 차이가 나타났다. 그러나 이 외의 측정점에서는 평균값이 1.9[%] ~ 3.8[%]로 나타나 답천공을 재현하는 도구로서 신뢰성이 충분한 것으로 검증되었다. 또한 천정과 지표의 휘도비가 2.9:1로서 CIE 표준 답천공 휘도분포의 3:1과 매우 유사한 값을 나타내는 것이 확인되었다.

ProMetric1400을 이용한 측정된 휘도분포는 그림 17과 같이 나타났다. 측정된 휘도값은 앞서 CS-100을 통해 측정된 휘도값과 같이 지표휘도 약 260[cd/m²]에서 천정 휘도 약 800[cd/m²]까지의 분포를 보였으며, 휘도변화가 내부 표면을 따라 고르게 나타남이 확인되었다.

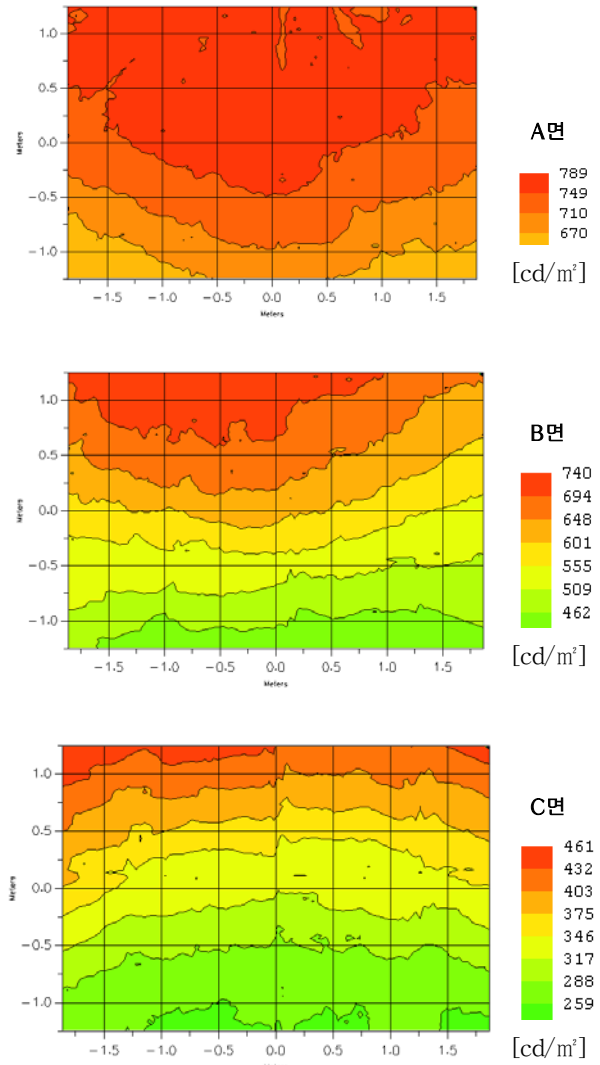


그림 17. 5열 램프 점등 시 ProMetric에 의한 천공 내부면의 휘도분포

4.3 24열 램프 점등 시 휘도검증

인공천공돔에 설치된 24열의 총 72개의 램프를 점등하고 CIE 표준 담천공의 휘도분포에 근접하도록 조정된 뒤 그림 14과 같이 6개의 방향에서 지정된 6개 각도의 휘도를 측정하였다. 이때의 천공 휘도는 2,550[cd/m²], 작업면 수평조도는 5,080[lx]로 나타났다.

표 4. 24열 램프 점등 시 휘도 측정값과 CIE모델값의 비교

구분	90°	72°	54°	36°	18°	0°	
CIE 표준 담천공 [cd/m ²]	2,550	2,388	2,125	1,761	1,324	850	
측정 방향 1	휘도 [cd/m ²]	2,550	2,540	2,320	1,730	1,340	852
	표준값과의 차이[%]	0	5.98	9.18	1.76	1.21	0.24
측정 방향 2	휘도 [cd/m ²]	2,550	2,560	2,300	1,690	1,270	847
	표준값과의 차이[%]	0	7.2	8.24	4.03	4.08	0.35
측정 방향 3	휘도 [cd/m ²]	2,550	2,580	2,280	1,740	1,300	842
	표준값과의 차이[%]	0	8.04	7.29	1.19	1.81	0.94
측정 방향 4	휘도 [cd/m ²]	2,550	2,540	2,250	1,710	1,290	847
	표준값과의 차이[%]	0	6.37	5.88	2.9	2.57	0.5
측정 방향 5	휘도 [cd/m ²]	2,550	2,550	2,330	1,690	1,290	866
	표준값과의 차이[%]	0	6.78	9.64	4.03	2.57	1.88
측정 방향 6	휘도 [cd/m ²]	2,550	2,570	2,280	1,690	1,280	851
	표준값과의 차이[%]	0	7.62	7.29	4.03	3.23	0.12

각 지점의 휘도값을 측정하여 CIE 표준 담천공 값과 비교하면 평균값이 최소 0.1[%]에서 최대 9.6[%]로 나타났으며 전체적으로 4.2[%]로 나타났다. 측정각에 따른 차이는 앞서 5열을 점등하였을 때와 마찬가지로 0°에서 평균 0.7[%]로 가장 낮았으며, 54°에서 평균 7.9[%]로 가장 높은 차이가 나타났다.

천정과 지표의 휘도비는 3:1로 CIE 표준 담천공 휘도분포의 3:1과 동일하게 나타났다.

ProMetric1400을 이용한 천공 내부 표면 휘도값의 측정은 수평면에서 천정까지를 3등분하여 측정하였으며, 측정 데이터는 그림 19와 같이 나타났다.

측정된 휘도값은 앞서 CS-100을 통해 측정된 휘도값과 같이 수평면의 휘도 약 900[cd/m²]에서 천정휘도 약 2,600[cd/m²]까지의 분포를 보였으며, 휘도변화가 내부 표면을 따라 고르게 나타나는 것이 확인되었다.

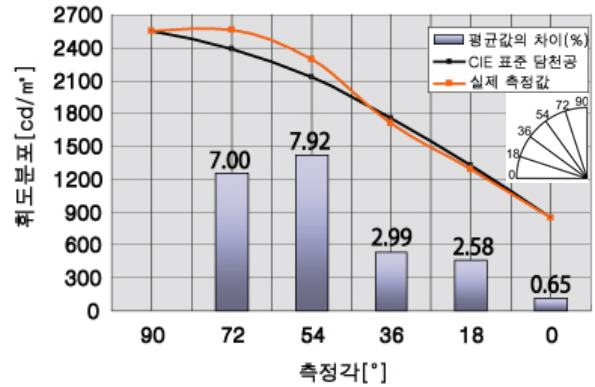


그림 18. 24열 램프 점등 시 인공천공 내부의 휘도분포

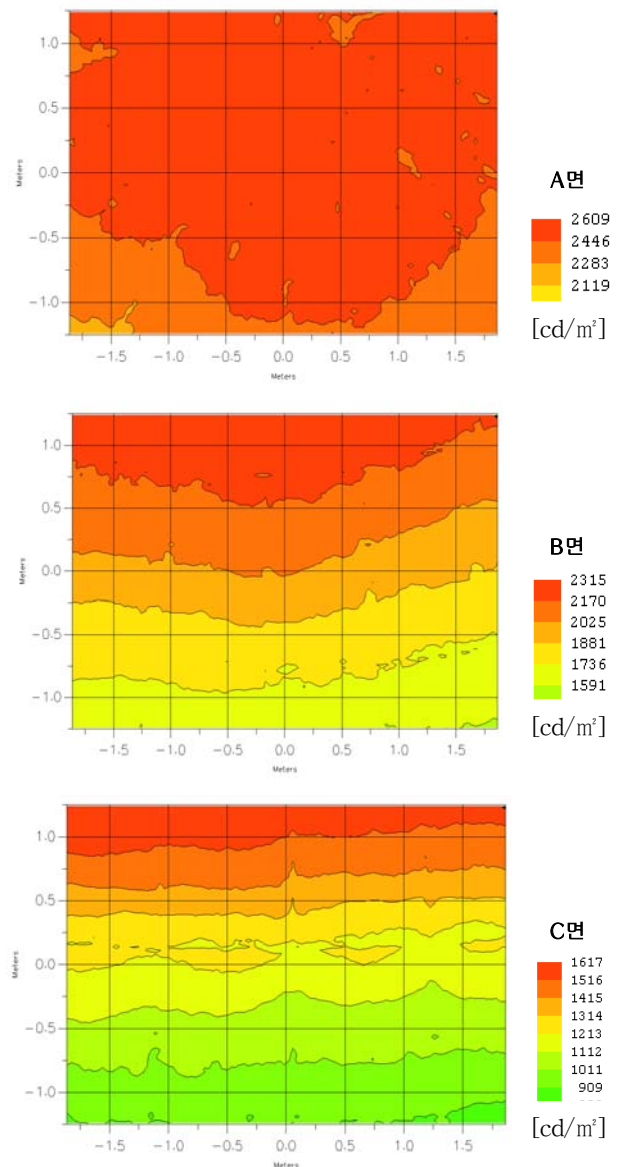


그림 19. 24열 램프 점등 시 ProMetric에 의한 천공 내부면의 휘도분포

5. 결 론

인공천공돔은 축소모형을 이용한 자연채광 성능평가의 핵심적인 평가시설이며, 천공상태를 임의로 조정하여 기준 천공을 구현함으로써 객관적인 실험을 가능하게 한다.

K대학에서는 이러한 인공천공돔을 자체적으로 설계하여 제작하였다. 특히 이 인공천공돔은 국제적 규모인 지름 6[m]의 형상을 갖추었으며, 72개 램프를 개별적으로 조광할 수 있는 조명제어 시스템을 갖추고 있다. 또한 실험 시 72개 광원에서 발생하는 돔 내부의 열을 외부로 배출시킬 수 있는 플렉서블 연결 덕트와 2대의 에어컨 냉방시설을 돔 내부에 설치하여 돔 내부에서 실험 시 과열로 인한 어려움이 없도록 설비가 되어있다.

이 인공천공돔의 신뢰성을 검증하기 위하여 돔 내부의 휘도분포를 램프의 점등 수를 달리하여 두 가지 경우에서 측정하여 기준천공의 재현 여부를 검토하였다. 인공천공돔 내부의 휘도값을 측정하여 CIE 표준 답천공 모델과 비교한 결과 평균값이 차이는 4.3[%]로 나타나, 자연채광 평가시설로서 매우 유용한 천공을 재현하는 것으로 판단되었다.

또한 ProMetric 시스템을 이용하여 인공천공돔 반구체 내부표면을 수평면에서 천정까지 3개면으로 분할하여 휘도분포를 측정 하였다. 2차원의 이미지로써 취득된 휘도분포는 CS-100의 측정값과 같이 기준 천공의 휘도 비율과 유사한 분포를 나타냈으며, 내부표면을 따라 휘도가 고르게 분포함이 확인되어 천공돔의 신뢰도가 중복 검토되었다.

본 논문에서 검증한 K대학 인공천공돔은 두 가지 정확성 검증의 연구 결과 자연채광 설계 및 성능평가의 도구로서의 유용성이 확인되었다. 인공천공돔이 제공하는 일관성 있는 답천공 상태에서, 객관적이고 정확성 있는 자연채광 연구가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 과학기술부 국가지정연구실사업 (과제번호 M1-0300-00-0258)의 연구비 지원에 의한 연구결과의 일부임

참 고 문 헌

1. 김정태, 김곤, "인공천공돔과 헬리오돈의 개발 및 성능실험사례 연구", 한국생태환경건축학회논문집, Vol. 3, No.1, pp.21~29, 2003.03.
2. 김재수, "건축환경공학", 도서출판 서우, p.269, 2004.02
3. 이경희, "건축환경계획", 문운당, pp.296~302, 2003.01
4. 송규동, 최봉철, 이주윤, "자연채광 연구용 인공천공의 휘도분포 조정연구 및 주요 오차요인 분석", 대한건축학회논문집 계획계, Vol. 18, No. 12, pp.207~214, 2002.12.
5. Boyer L.L. and Degelman L.O. , "A Large Sky simulator for Daylighting Studies at a Texas University", Proc. II of Int'l

Daylighting Conference, Long Beach, CA, pp.125~133, 1989

6. Evans, B.H. Daylight in Architecture, McGraw-Hill, Inc., New York, NY., 1981
7. Littlefair P J , "Constraints on reflectance in artificial sky domes", Lighting Res. Technol. 19(4) pp.115~118
8. Stein, Reynolds B. and J. Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. p. 974 1992.