

자연채광 성능평가용 인공천공돔(Sky Simulator)의 개발

(Developing a Sky Simulator for Daylighting Performance Evaluation)

유인혜* · 김 곤** · 김정태***

(In-Hye Yu · Gon Kim · Jeong Tai Kim)

*경희대학교 석사과정 · **강원대학교 부교수 · ***경희대학교 교수

Abstract

자연채광 성능평가의 연구 방법으로는 현장측정, 축소모형실험, 수학적 알고리즘에 기초한 컴퓨터 시뮬레이션 등이 있다. 현장측정과 축소모형실험은 비교적 높은 신뢰도를 얻을 수 있는 방법이지만, 변화가 많은 자연광의 특성으로 인해 객관성 있는 측정결과를 얻는 것에 제한적이었다. 인공천공돔(Sky Simulator, Artificial Sky Dome)은 축소모형 실험 시 이러한 문제점의 보완을 위한 평가 시설이며 천공의 상태를 일관성 있게 조정함으로써 보다 객관성 있는 자연채광연구를 실시할 수 있다. 이에 따라 K대학에서는 직경 6[m], 높이 3.7[m]의 인공천공돔을 자체 개발·제작하여 연구에 사용하고 있다. 본 연구에서는 인공천공돔 기존사례에 대한 고찰과 이를 바탕으로 제작된 K대학 인공천공돔의 개요를 소개하고 기본적인 물리량 측정을 통해 인공천공돔의 신뢰성을 검증하고 유용성을 제시하였다.

1. 서 론

1.1. 연구의 배경 및 목적

건축환경에 대한 질적 요구의 증가와 건물 에너지 절약에 대한 관심의 증대로 인하여 자연채광에 대한 중요성이 점점 증가하고 있다. 자연채광에 대한 성능평가는 설계과정에서 다양한 방안이 고려되어야 하며 정확성을 갖춘 기준으로 평가되어야 한다.

자연채광 성능평가의 연구 방법으로는 현장측정, 축소모형실험, 컴퓨터 시뮬레이션 등이 있다. 최근 자연채광 설계 및 해석용 프로그램이 개발되어 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 연구가 진행되고 있다. 하지만 대상 공간으로서 장방형과 같은 단순한 형태만이 가능하거나, 답천광 등 적용가능한 천공 상태가 제한적이거나 그 신뢰성을 충분히 확보하지 못하고 있다. 반면 현장측정과 축소모형실험은 다양한 형태의 공간을 평가할 수 있으며, 측정의 정확성과 객관성의 보장 아래 높은 신뢰도를 갖는 방법이다. 현장측정은 장소선택상의 제약으로 인해 축소모형실험이 상대적으로 용이하게 평가할 수 있는 방법이다.

자연채광실험 시 가장 기본적인 사항은 천공상태가 일관성 있게 유지되어야 하는 것이다. 그러나 실제 자연천공은 지역, 시간, 계절에 따라 매우 다

양하므로 객관성 있는 결과를 도출하는 것이 어렵다. 이와 같은 문제점의 보완을 위해 외국의 대학이나 연구소에서는 인공천공을 제작하여 인공천공돔(Sky Simulator, Artificial Sky Dome) 내 축소모형 실험을 통해 자연채광 연구를 실시하고 있다.

본 연구에서는 그동안 개발된 국내·외 인공천공에 대한 사례를 조사하고, 이를 바탕으로 개발된 K대학 인공천공돔의 제원 및 특성을 소개하고자 한다. 또한 K대학 인공 천공돔 내의 휘도분포를 측정하여 인공천공돔의 신뢰성을 검증하고, 향후 진행될 인공천공돔 내 축소모형실험 조건의 기초 자료를 제시하는 것이 본 연구의 목적이다.

1.2. 연구 내용 및 방법

자연채광 성능평가 장치의 사용 현황을 파악하기 위하여 현재 개발되어 사용되고 있는 인공천공돔의 사례를 조사하였다. 국외 사례로는 Lawrence Berkeley National Lab, Texas A&M University, 카디프 대학, University College London과 국내 사례로서 H대학의 인공천공돔을 조사하였다. 또한 이를 바탕으로 제작된 K대학 인공천공돔의 제원 및 특성을 소개하고, 인공천공돔 내의 수평면 조도 및 CIE 표준 답천공의 기준과 유사하도록 조정된 휘도분포를 측정하여 정확성을 검증하였다.

2. 인공 천공동의 이론적 고찰

2.1. 축소모형을 이용한 제광성능평가

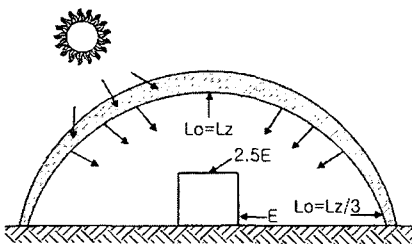
기하학·광학적으로 동일한 물리적 환경 내에서 빛은 동일한 작용과 역할을 한다. 이러한 빛의 일관성이라는 물리적 특성으로 인해 축소모형 실험은 오차가 적으며, 실제 건물의 상태를 정확히 재현할 수 있는 방법이다.

축소모형은 모형의 크기는 1:24 비율 이상으로 제작하고, 모듈화 하여 성능비교 평가가 용이하도록 한다. 또한 축소모형 실험 시 자연천공상태는 매우 다양하게 변화하기 때문에 객관성 있고 일정한 결과를 얻기 위해서는 인공천공동 내에서의 실험이 권장된다.

2.2. 인공천공동의 개요

2.2.1. 천공 조건 및 천공모형

인공천공동 내부의 천공의 휘도분포는 CIE 표준 답천공을 기준으로 한다. 실제 답천공의 휘도는 균일하지 않으며 지평상의 각도에 따라 변화한다. CIE 표준 답천공은 실제의 답천공의 휘도와 유사한 상태의 표준 답천공을 모델로 정한 것이다. 이는 천정과 수평선의 휘도비가 약 3:1 정도 되며, 건물의 외부 수평면조도와 외부수직면 조도의 비는 약 2.5:1 정도 된다. 수평면의 어느 한 지점에서 천공휘도는 식 (1)과 같다.



$$L_o = \frac{L_z(1 + 2\sinh)}{3} \quad \text{식(1)}$$

여기서, L_o : 천공휘도
 L_z : 천정의 휘도
 h : 태양의 고도

그림 1. CIE 표준 답천공 모델
 Fig. 1. CIE standard overcast sky model

2.2.2. 인공천공동의 기능적 요건

인공천공동의 보편적인 형상은 반구형 돔으로서 돔내에 수십 개의 램프를 설치하여 답천공을 재현한다. 휘도분포는 CIE 표준 답천공 모델을 따르며 다양한 천공상태를 구현하기 위해 램프의 밝기 및 각도조절이 용이하여야 한다. 인공광원 외에 태양의 역할을 하는 인공태양을 설치하기도 하며 보다 다양한 천공상태를 구현할 수 있게 된다. 인공천공동 내부는 확산성이 높은 도료로 마감되어야 하며 축소모형 실험을 위한 적절한 크기가 요구된다.

2.3. 인공천공동의 기존 제작 사례

해외의 선진 대학이나 연구소에서는 수년전부터 인공천공동을 이용한 자연채광 연구를 수행하고 있으며 국내에서는 H대학에서 제작한 바 있다. 이들의 사례를 인공천공동만으로 천공을 구현하는 유형과 인공태양장치인 헬리오돈을 천공 내부에 설치한 헬리오돈 일체형으로 구분하여 조사하였다.

표 1. 인공천공동의 기존사례
 Table 1. Examples of sky simulator

| 구분 | 인공천공동 | 기구제원 |
|----------------|-------|---|
| 인공천공 자체형 | | 소재지 Lawrence Berkeley National Lab 규격 직경 7.2m |
| | | 인공광원 108개의 형광튜브 인공태양 1000W 할로겐램프 |
| | | 소재지 Texas A&M 대학 규격 직경 8.5m, 높이 3.6m |
| | | 인공광원 HID 램프 |
| | | 소재지 국내 H대학 규격 직경 6.5m, 높이 5m |
| | | 인공광원 300W 텡스텐할로겐램프 (3행 × 32열) |
| 인공천공과 헬리오돈 일체형 | | 소재지 카디프 대학 규격 직경 8m |
| | | 인공광원 에너지 절약형 콤팩트 형광등 인공태양 1000W 텡스텐램프 575 HMI 램프 |
| | | 부가장치 모델스코프, CCD카메라 |
| 인공천공 자체형 | | 소재지 University College London 규격 직경 5.4m |
| | | 인공광원 에너지 절약형 콤팩트 형광등 |

3. K대학 인공천공돔의 설계 및 제작

3.1. 목적 및 제원

K대학에서는 앞서 조사된 인공천공돔의 제원을 바탕으로 하여, 객관성 있는 자연채광 실험을 위한 인공천공돔을 개발하였다(이하 KSS라 칭함). 반구형의 보편적인 형상으로서 직경 6[m], 높이 3.7[m]이다.

인공천공의 형상이 완전한 곡면을 이루도록 하기 위하여 반구형의 철골 프레임을 제작한 후 각 분절면에 해당하는 곡률을 계산하여 컴퓨터를 이용한 절삭·곡률 생성·시공이 되도록 하였다.

확산성이 높은 도료로 내부를 마감하여 담천공 재현 시 광학적으로 이상적인 빛의 분포가 이루어지도록 고려하였다. 모형 실험시 Licor사의 조도 측정 장치와 데이터 저장기를 통해 데이터를 취득하며, 높이조절이 가능한 모형 설치용 평판이 구비되어 있다.



그림 2. K대학 인공천공돔 외부 및 내부
Fig. 2. Outdoor and indoor view of KSS

돔의 수평가장자리에는 72개의 할로젠 램프가 3행씩 24열로 설치되어 있다. 모든 램프를 점등하였을 때, 작업면 높이 최대 수평조도 약 6,730[lx], 천공휘도 약 27,000[cd/m²]까지 구현할 수 있다.

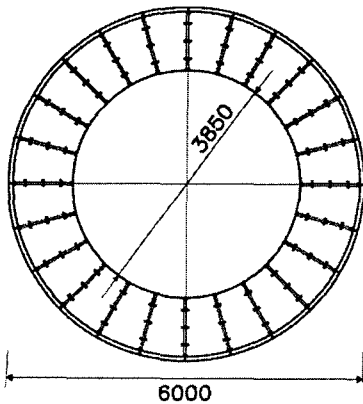


그림 3. 인공천공돔의 평면
Fig. 3. Floor plan of KSS

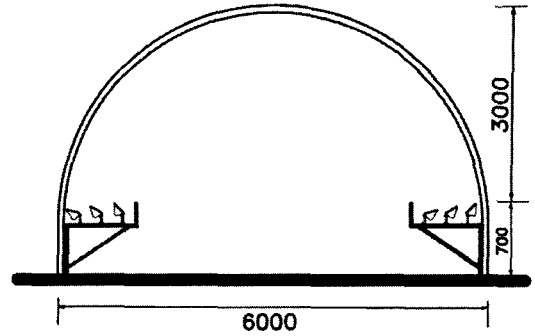


그림 4. 인공천공돔의 단면
Fig. 4. Section plan of KSS

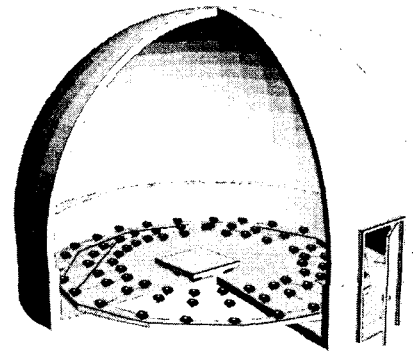


그림 5. 인공천공돔의 투시도
Fig. 5. Interior perspective of KSS

3.2. 헬리온 및 인공태양

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

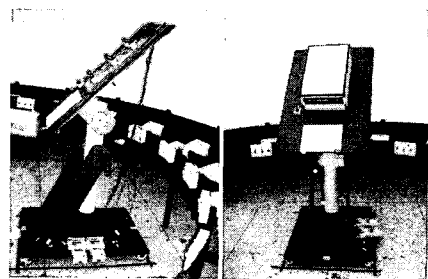


그림 6. K대학 헬리온 및 실험 예
Fig. 6. Helidon and its experiment example

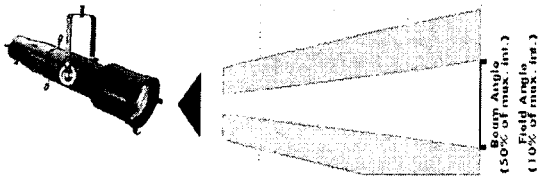


그림 7. 인공태양 및 배광형태
Fig. 7. Artificial sun and light distribution

3.3. 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.

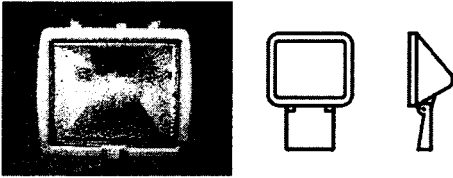


그림 8. 인공천공동의 등기구 사진 및 도면
Fig. 8. The luminaire within KSS

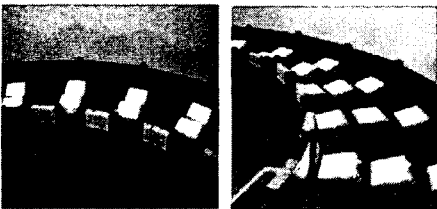


그림 9. 인공동내부 램프점등모습
Fig. 9. Lamps within KSS

표 2. 인공동내부 램프의 제원
Table 2. Specification of the lamp

| | Lamp Type | Halogen Lamp |
|--|-----------|--------------|
| | 소비전력 | 500[W] |
| | 광량 | 9500[lm] |
| | 색온도 | 3000[°K] |

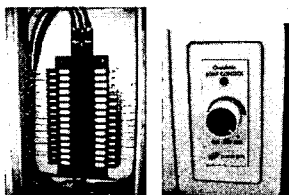


그림 10. 인공동의 분전반과 램프조절용 디머
Fig. 10. Electricity control panel and dimmer

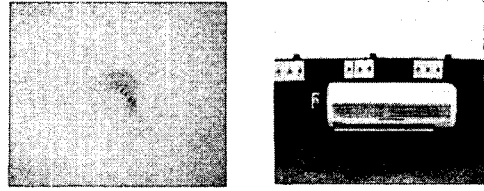


그림 11. 동상부 환기구와 동내부 에어컨
Fig. 11. Vents and air conditioner within KSS

4. K대학 인공천공동의 광학 특성

4.1. 평가도구의 신뢰성

인공천공의 신뢰성을 검증하기 위하여 아래의 방법으로 인공천공 내의 휘도분포를 측정하였다.

- ① 5열의 램프를 점등한 후 CIE 표준 답천공의 휘도분포에 근접하도록 램프의 밝기와 각도를 조정하였다.
- ② CS-100 휘도계를 이용하여 임의의 지점의 휘도를 측정하고 CIE 표준 답천공의 휘도값과 비교하여 오차율을 확인하였다.
- ③ 디지털 광학측정기기인 ProMetric 1400을 이용하여 물리값 및 가시적인 휘도분포를 확인하여 인공 천공의 유용성을 검증하였다.

4.1.1. 휘도 측정 및 CIE모델의 비교

CIE 표준 답천공의 휘도분포로 조정된 인공천공의 휘도를 그림 12, 그림 13과 같이 CS-100 휘도계를 이용하여 3개 지점을 각각 6개의 각도에서 측정하였다.

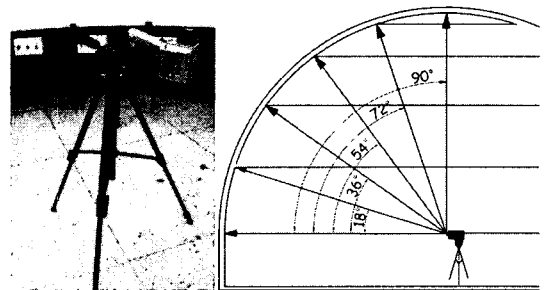


그림 12. 측정기기 및 측정지점
Fig. 12. Luminance meter and measuring point

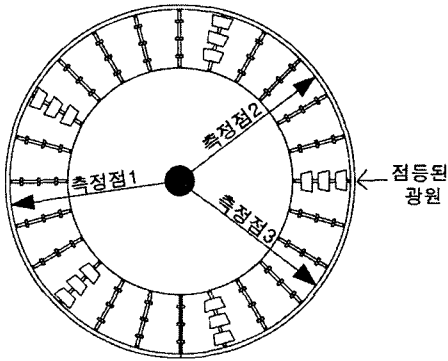


그림 13. 측정지점의 위치
Fig. 13. Location of measuring point

측정된 천정의 휘도값, 768[cd/m²]를 CIE 표준 답천공 모델 식(1)에 근거하여 지정된 6개의 각도에서의 기준 휘도값을 산정하였다. 표 3은 산정된 기준 휘도값과 실제 측정된 값을 비교한 오차율을 나타낸 것이다. 비교한 결과 각 지점의 오차율은 최소 0.38%, 최대 9.77%로 나타났다. 측정각도에 따른 오차율은 측정각 0°에서 평균 1.88%로 가장 낮았으며, 측정각 54°에서 평균 8.72%로 가장 큰 오차율을 보였다.

세 측정지점 모두 상향각 54°에서 6%이상의 상대오차가 나타나 비교적 큰 오차율을 보였다. 그러나 이 밖의 지점에서는 평균 상대오차 1.88% ~ 3.76%로서 답천공을 재현하는 도구로서 신뢰성을 검증하였다. 또한 천정과 지표의 휘도비가 2.94:1로서 CIE 표준 답천공 휘도분포의 3:1에 근사한 값을 나타나는 것이 확인되었다.

표 3. 인공천공의 휘도 측정값과 CIE모델의 비교
Table 3. Comparison of KSS with CIE model [cd/m²]

| 구분 | 90° | 72° | 54° | 36° | 18° | 0° | |
|---------------------------------|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| CIE 답천공 모델 (cd/m ²) | 798 | 747 | 665 | 551 | 414 | 266 | |
| 측정점 1 | 휘도 (cd/m ²) | 798 | 767 | 707 | 564 | 393 | 270 |
| | 상대오차 (%) | 0 | 2.68 | 6.32 | 2.36 | 5.34 | 1.50 |
| 측정점 2 | 휘도 (cd/m ²) | 798 | 780 | 730 | 568 | 406 | 267 |
| | 상대오차 (%) | 0 | 4.42 | 9.77 | 3.09 | 1.97 | 0.38 |
| 측정점 3 | 휘도 (cd/m ²) | 798 | 777 | 728 | 580 | 397 | 275 |
| | 상대오차 (%) | 0 | 4.02 | 9.47 | 5.26 | 4.28 | 3.38 |

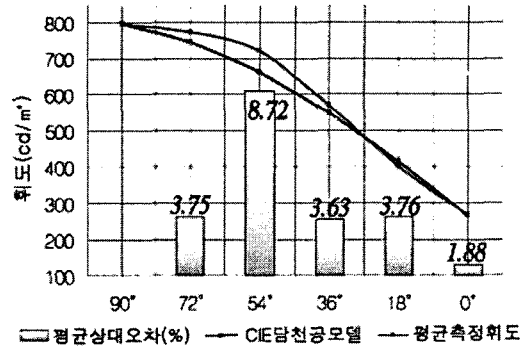


그림 14. 측정휘도분포와 CIE 답천공모델의 비교
Fig. 14. Comparison of KSS with CIE model [cd/m²]

4.1.2. 휘도분포 측정 및 유용성 확인

ProMetric 1400은 디지털 광학 측광기기로서 촬영된 이미지를 분석프로그램을 이용하여 휘도, 색도, 색온도 등의 물리값을 생성하는 장비이다. 기존의 측정기와 같은 점측정 방식이 아닌 150만 포인트의 다측점 측정시스템으로서 2차원과 3차원의 데이터를 취득할 수 있는 장점을 가지고 있다.

인공천공돔 내부 휘도분포의 물리적 수치 확인 외에 가시적인 휘도분포의 확인을 위하여 ProMetric 1400을 이용하여 내부를 측정하였다. 그림 15와 같이 3지점을 측정하였으며 측정 데이터가 그림 16, 그림 17, 그림 18과 같이 나타났다.

측정된 휘도값은 앞서 CS-100을 통해 측정된 휘도값과 같이 지표휘도 약 260[cd/m²]에서 천정휘도 약 800[cd/m²]까지의 분포를 보였으며, 휘도변화가 내부 표면을 따라 고르게 나타남이 확인되었다.

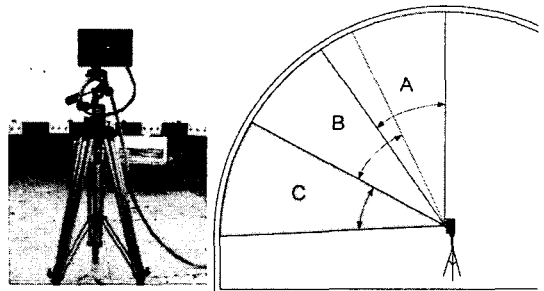


그림 15. 측정기기 및 측정지점
Fig.15. ProMetric 1400 and measuring point

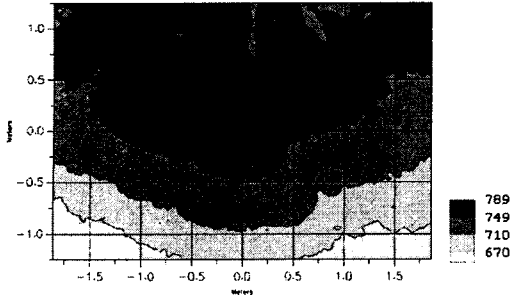


그림 16. A면의 휘도분포
Fig. 16. Luminance distribution on surface A

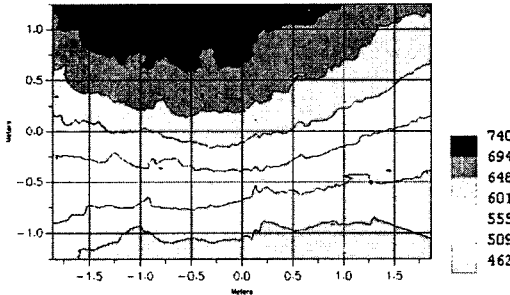


그림 17. B면의 휘도분포
Fig. 17. Luminance distribution on surface B

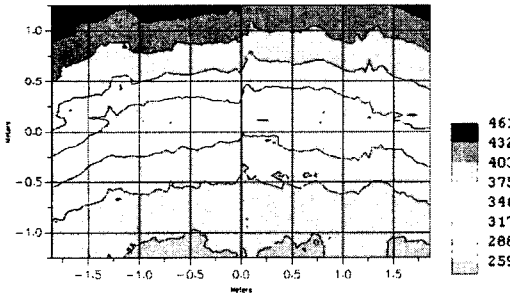


그림 18. C면의 휘도분포
Fig. 18. Luminance distribution on surface C

5. 결론

건축디자인 과정에서 건물과 빛의 관계는 공간 특성과 중요도에 따라 정성적 평가와 정량적 측정의 두 가지로 대별되며 가장 일반적인 방법은 축소 모형을 이용하여 조명과 관련된 물리량 및 조명 이미지를 평가하는 것이다. 이를 위한 가장 기본적이고도 핵심적인 평가시설은 천공의 상태를 일관적이며 인공적으로 재현할 수 있는 인공천공돔과 인공 태양이다.

이에 K대학에서는 국제적 기준에 적합한 대형 인공천공돔을 설계하여 정밀한 시공과정을 통하여

제작하였다. 제작된 인공천공돔의 평가 도구적 신뢰성을 검증하기 위하여 인공천공돔의 천공 휘도를 측정하여 CIE 표준 답천공의 휘도 분포와 비교하였다.

천정과 수평지점의 휘도 값의 비율과 아울러 천공 표면 지점의 상향 고도각에 따른 휘도값을 측정하여 이론치와 비교하였다. 또한 표면 휘도를 2차원 이미지를 생성하여 통합적으로 측정하는 ProMetric 시스템을 이용하여 답천공의 휘도분포와 재차 비교하여 천공돔의 신뢰도를 중복 검토하였다.

두 가지 방법으로 휘도분포를 비교·분석한 결과 측정 방향 및 지점에 따라 오차율의 변화가 다소 나타났으나 전체적으로 CIE 답천공의 휘도분포와 유사한 결과를 나타내었다. 이는 축소모형의 위치 및 방향을 설정함에 있어 가장 오차율이 작은 지점을 기준으로 일관성 있게 유지하는 경우 본 인공천공돔의 신뢰도와 유용성은 더욱 향상됨을 의미한다.

천공돔이 제공하는 일관된 답천공 조건에서 측정된 조도의 비율은 주광을 개념으로 환산되어 빛 환경 평가지표로서 의미 있게 사용될 수 있다. 추후 ProMetric 시스템의 광각화 이미지프로세싱을 통하여 보다 정밀한 CIE 표준 답천공의 휘도분포를 재현할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 김정태, 김근, "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) 송규동, 최봉철, 이주윤, "자연채광 연구용 인공천공의 휘도분포 조정연구 및 주요 오차요인 분석", 대한건축학회논문집 계획계, Vol. 18, No. 12, pp.207~214, 2002.12.
- (4) 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
- (5) Evans, B.H. Daylight in Architecture, McGraw-Hill, Inc., New York, NY., 1981
- (6) Littlefair P J, "Constraints on reflectance in artificial sky domes", Lighting Res. Technol. 19(4) pp.115~118
- (7) Stein, Reynolds B. and J. Mechanical and Electrical Equipment for Buildings, 8th Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. p. 974 1992.