

RADIANCE 시뮬레이션에 의한 인공천공의 휘도분포 조정 연구

Calibrating the Luminance Distribution of an Artificial
Sky Chamber by RADIANCE Simulation

발 표 자 : 이 주 윤

지도교수 : 송 규 동

한양대학교 건축환경시스템연구실

<http://aesi.hanyang.ac.kr>

연구의 배경

- 자연채광 설계 방안에 대한 평가

- 자연채광에 있어서 가장 불리한 조건인 담천공(**overcast sky**)상태에서 실내외 조도를 측정

- 실제의 천공에서도 실험은 가능

- 인공천공(**sky-dome**)의 사용

- CIE 담천공의 천공휘도분포

- 객관성 부여

- 세계 어느 곳에서 행해지더라도 같은 조건하에서 행해짐

- CIE담천공을 정확하게 묘사할 수 있는 방법이 요구

연구 목적

- 반사형 인공천공의 휘도분포 조정 보다 정확하고 시간을 절약할 수 있는 방법 제시
 - 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 인공천공에 설치된 조명기구의 위치와 조사각에 따른 인공천공의 휘도분포를 예측하고 검증

연구 범위 및 방법

- 대상 : H대학 돔형 인공천공
- RADIANCE 프로그램을 이용한 천공의 휘도분포 계산
 - 조명기구의 조사각에 따른 천공의 휘도분포를 계산하여 CIE 담천공 모델을 만족하는 조사각을 산출
- 최적의 조사각을 실제 조명기구에 적용
 - 인공천공면의 휘도분포를 측정하고 CIE 담천공 모델과 비교
- 인공천공과 외부 담천공 상태에서 축소모형 실험
 - 축소모형 실험을 실시하여 얻은 주광율을 비교함으로써 인공천공의 정확성과 유용성을 검증

CIE 담천공 모델

- 천정의 휘도가 지평선부근 휘도 보다 약 3배정도 밝은 천공

$$L_{p,o} = L_{z,o} \left[(1 + 2 \sin \theta) / 3 \right]$$

$L_{p,o}$: 임의의 지점에서의 휘도값[cd/m²]

$L_{z,o}$: 천정의 휘도값[cd/m²]

θ : 임의의 지점이 수평선과 이루는 각도[°]

- 채광 계산에서는 천공의 휘도를 균일하다고 가정하는 것이 일반적이었지만, CIE 표준담천공을 사용하는 것이 더 객관적인 것으로 평가

주광율(Daylight factor)

- 천공의 휘도분포는 극히 불안정한 경우가 많으므로 조도에 대신하는 채광 계획의 지표로서 주광율이 정의

$$D = \frac{E_i}{E_o} \times 100(\%)$$

D : 주광율

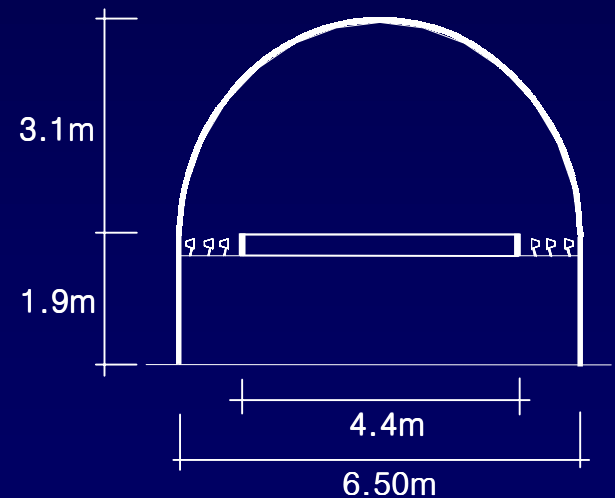
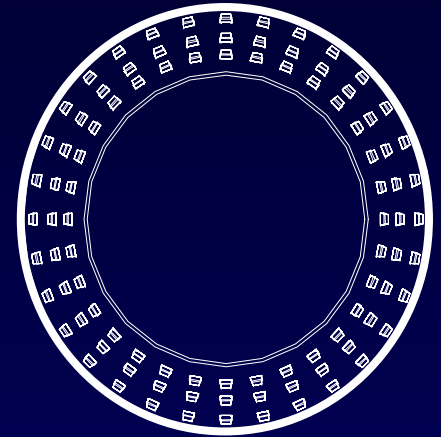
E_i : 실내 수조점의 수평면 조도[cd/m²]

E_o : 외부수평면 조도[cd/m²]

- 천공의 상대적인 휘도분포를 결정하면 주광률은 기하학적인 수치로 결정되며, 채광 계산의 지표로 할 수가 있다

H대학 인공천공의 개요

- 반사면의 반구형 돔
 - 반경이 3.25m이고 높이가 5m
- 돔 하부에 조명기구 설치
 - 총 98개의 300W 텅스텐 할로겐 램프
 - 반구 하단부에 3행×32열로 설치
- 300mm 높이의 빛 차단벽이 설치
 - 측창에 대한 자연채광 조도 측정시 창문이 조명기구에 직접 노출되는 것을 방지



인공천공실의 제원
평면도(위), 단면도(아래)



인공천공 외부전경



인공천공 내부전경

조명기구의 제원

제 품 명	QVF-435 (P사)
출 력	300W
총 광 속	5600lm
크 기	13 × 18 × 25(cm)

조명기구의 제원



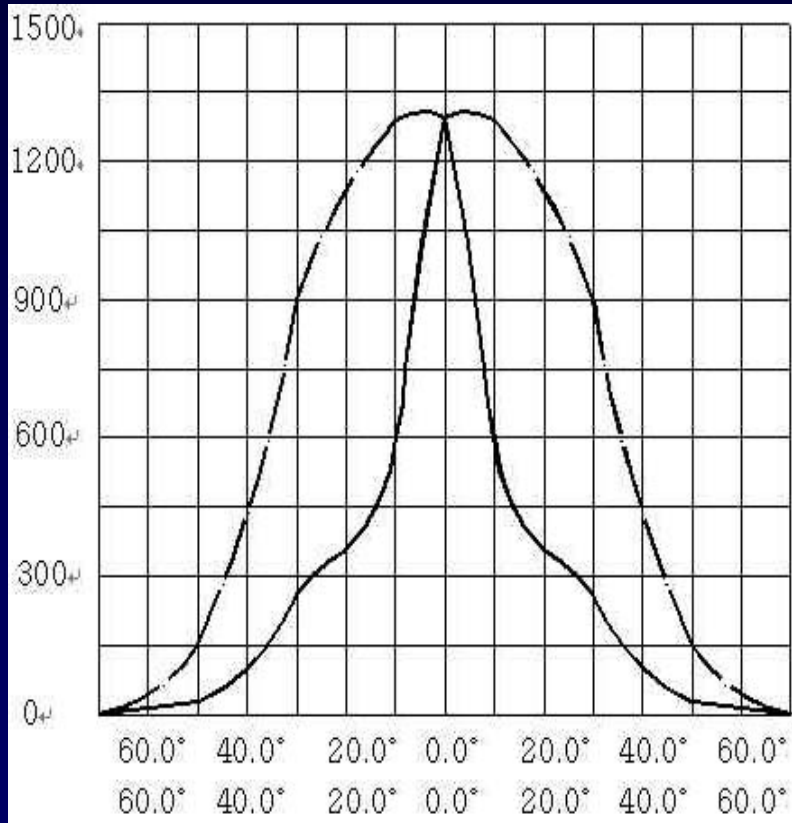
조명기구의 형태



인공천공실 내부에서 설치된 조명기구의 전경

조명기구 배광곡선

단위 : candela/1000lumen



배광곡선

단위 : candel power candela mutiplier : 5

수직각도 \ 수평각도	0°	30°	60°	90°
0°	448.5	448.5	448.5	448.5
10°	506.9	188.2	455.1	438.4
20°	392.4	444.9	487.3	400.6
30°	251.6	269.2	407.9	334.0
40°	75.04	110.6	232.4	181.1
50°	29.15	34.62	69.11	33.19
60°	10.72	10.83	9.002	13.01
70°	2.122	1.954	2.963	4.372
80°	0.112	0.112	0.224	0.336
90°	0	0	0	0

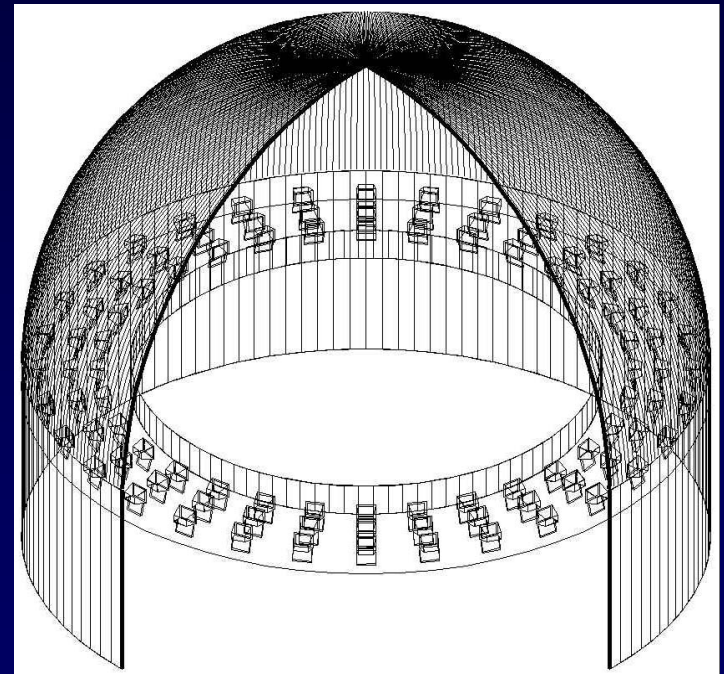
수직 각도별 배광데이터

RADIANCE 시뮬레이션

- **인공천공실의 3D 모델링**
- CAD파일을 rad파일로 변환
- **인공조명의 배광데이터 입력**
- **인공천공의 내부반사율 입력**

구 분	반 사 율
천 공 면	0.85
바 닥 면	0.09

인공천공 내부반사율 측정값



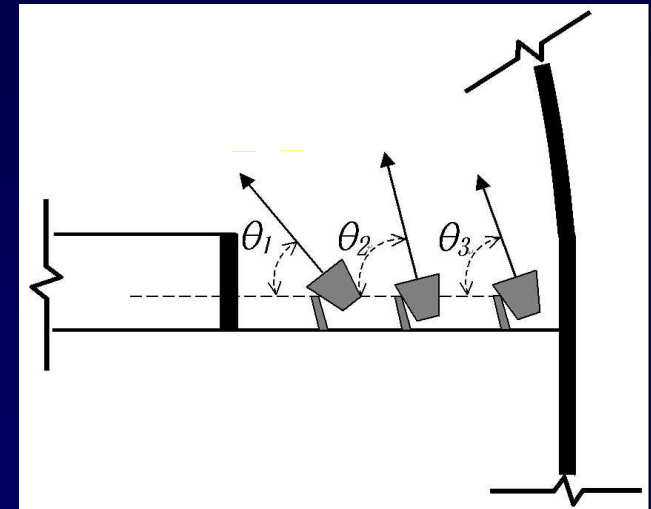
인공천공의 3D 모델링 단면

RADIANCE 시뮬레이션

- 3열로 배치된 조명기구의 조사각 구분
 - 1열(θ_1), 2열(θ_2), 3열(θ_3)
- 각각의 조사각을 조합
 - 총 280경우의 시뮬레이션 실시

구분	시뮬레이션 적용 조사각(°)	경우의수
θ_1	40, 50, 60, 70	4
θ_2	30, 40, 50, 60, 70, 75, 80	7
θ_3	40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85	10
총 시뮬레이션 ($\theta_1 \times \theta_2 \times \theta_3$)		280

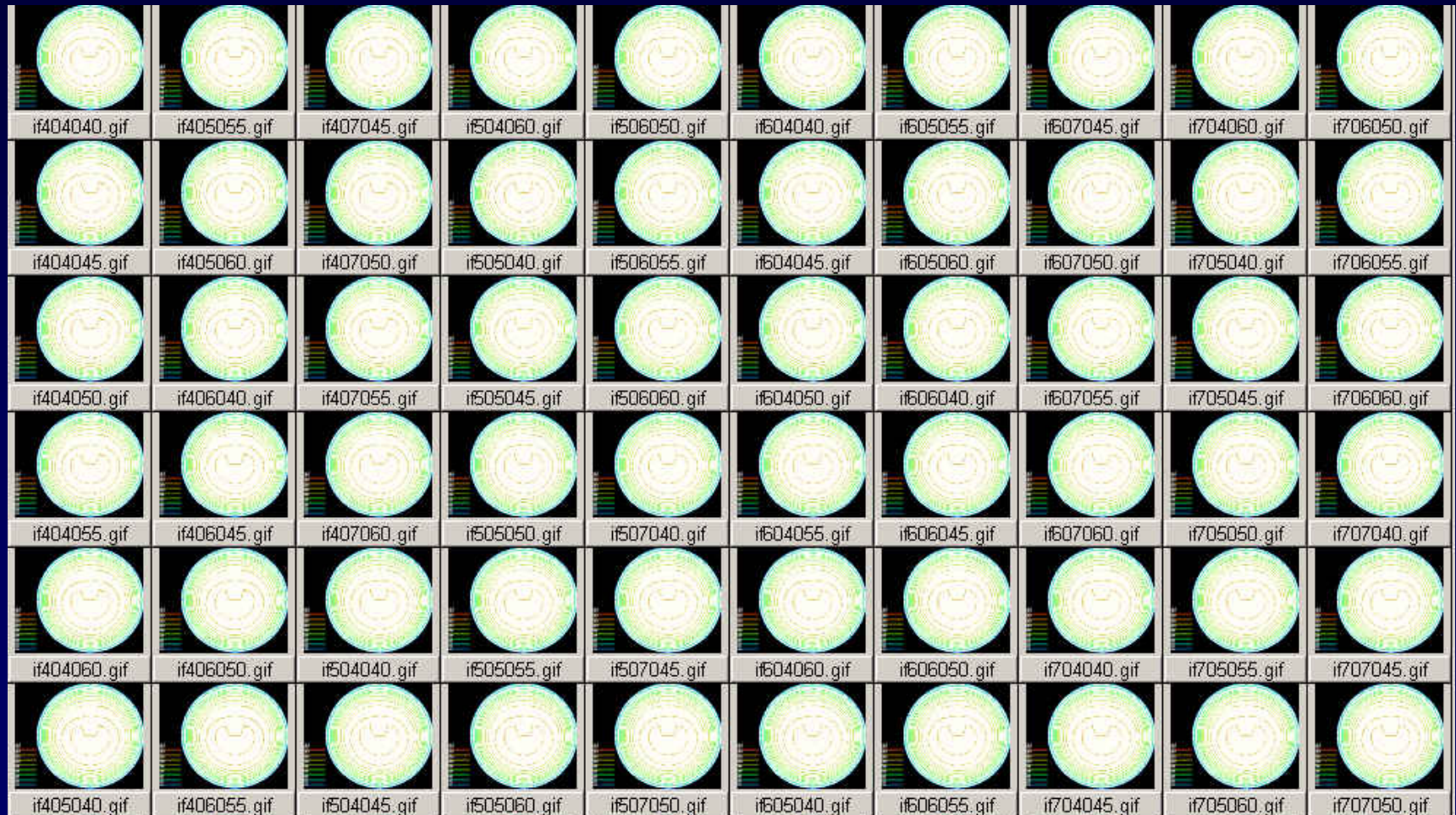
조명기구별 시뮬레이션 적용 조사각



조명기구별 조사각 구분

조명기구 각도별 시뮬레이션

- 조명기구 각도별 시뮬레이션 결과



조명기구 각도별 시뮬레이션

- 조명기구 각도별 시뮬레이션 결과의 상대오차 비교
- CIE 담천공 모델에 대한 상대오차를 나타냄

단위 : %

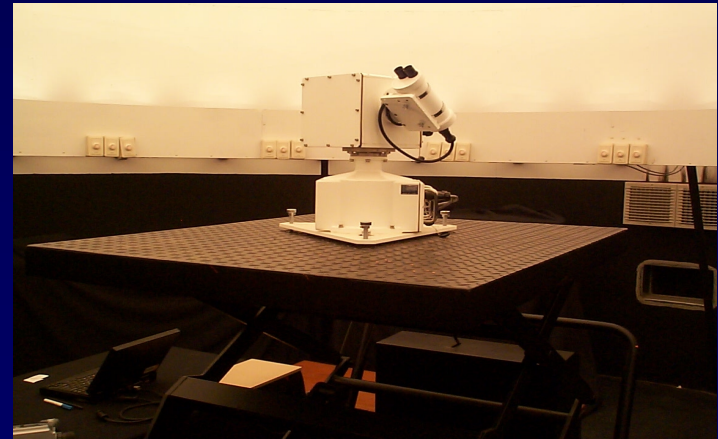
수 직 각 도 조 사 각 $\theta_1/\theta_2/\theta_3$	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
40/40/40	0	1.86	1.95	5.09	7.24	12.67	18.04	11.42	12.82	5.1
40/60/70	0	1.86	1.95	4.32	7.24	12.67	17.46	12.06	13.17	4.07
40/50/75	0	4.13	3.23	2.40	0.27	3.79	8.81	15.89	11.14	7.57
40/40/80	0	4.13	3.23	2.40	0.27	4.26	8.81	15.89	11.14	7.57
40/60/80	0	4.13	3.23	2.40	0.27	4.26	9.34	18.50	9.92	3.18
40/70/80	0	4.13	3.23	2.40	0.27	3.79	8.81	16.24	12.80	7.57
50/70/60	0	1.86	1.95	4.32	7.24	12.67	18.57	12.73	13.60	5.13
50/40/70	0	1.86	1.95	5.09	7.24	12.67	17.46	12.73	13.60	4.07
50/60/75	0	3.92	1.95	2.13	4.99	3.79	8.81	15.89	14.83	7.57
50/50/80	0	4.13	3.23	2.40	0.27	3.32	8.27	15.25	14.83	3.77
50/70/80	0	4.13	3.23	2.40	0.27	3.79	8.81	15.90	9.91	7.57
50/40/75	0	1.86	1.95	5.09	7.24	4.26	8.81	15.89	11.14	7.57
50/75/70	0	1.32	2.12	1.90	0.19	2.02	11.74	13.64	6.26	8.25
60/40/50	0	3.92	0.19	2.13	4.99	10.80	15.56	19.08	15.84	4.96
60/70/60	0	3.92	0.19	2.13	4.99	10.30	14.48	19.08	16.60	7.12
60/60/70	0	1.86	1.95	5.09	7.24	14.10	21.26	16.56	11.18	4.07
60/50/75	0	4.13	3.23	1.97	0.27	4.77	9.34	18.50	8.31	7.57
60/40/80	0	4.13	3.23	2.40	0.70	4.26	9.34	16.53	10.34	7.57
60/70/80	0	3.92	1.95	2.13	4.99	4.26	9.34	16.53	9.91	7.57
60/50/80	0	4.13	3.23	1.97	0.70	4.26	9.88	17.86	9.91	7.57

인공천공의 휘도분포 측정

- 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 최적의 조사각 적용
 - 각도자를 이용하여 각 열($\theta_1, \theta_2, \theta_3$)의 조명기구 조사각 조정
- 인공천공 반사면의 휘도분포 측정
 - Sky Scanner를 이용하여 휘도분포 측정



조명기구의 조사각 조정



인공천공의 휘도분포 측정

인공천공 캘리브레이션의 검증

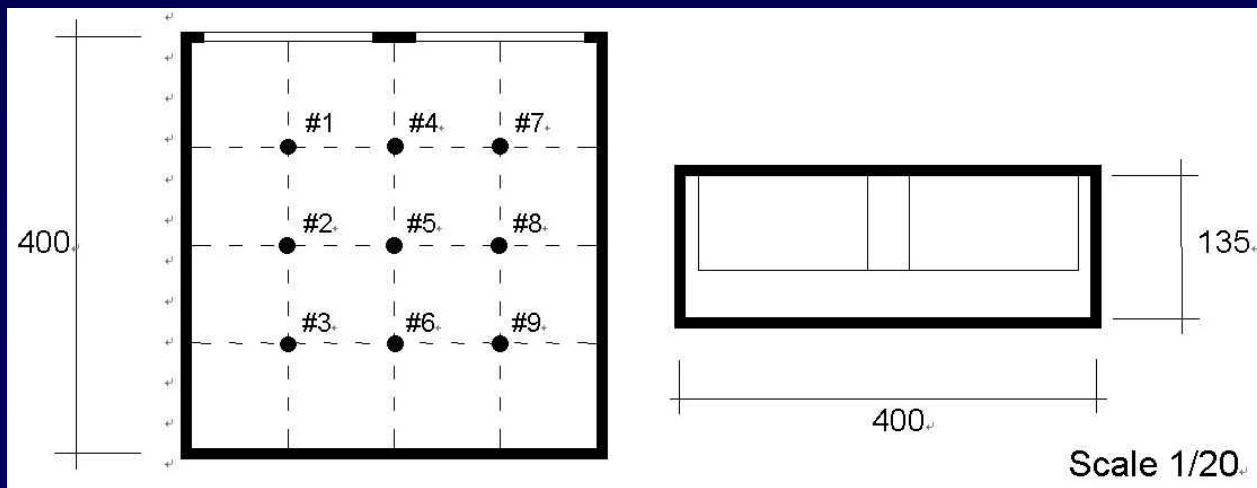
- 측정된 인공천공 반사면의 수직각도별 휘도분포와 CIE 담천공 모델 비교
 - 인공천공의 천정 휘도값을 기준으로 CIE 담천공 모델 계산
 - 최고 6.16%의 상대오차를 나타냄

구 분	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
휘도분포 측정값 (cd/m ²)	2345	2305	2281	2177	2032	1793	1477	1349	1118	815
CIE 담천공 모델 (cd/m ²)	2345	2321.25	2250.72	2135.55	1979.25	1786.56	1563.33	1316.36	1053.14	781.67
상대오차 (%)	0	0.70	1.35	1.94	2.67	0.36	5.52	2.48	6.16	4.26

인공천공과 CIE 담천공의 휘도분포 비교

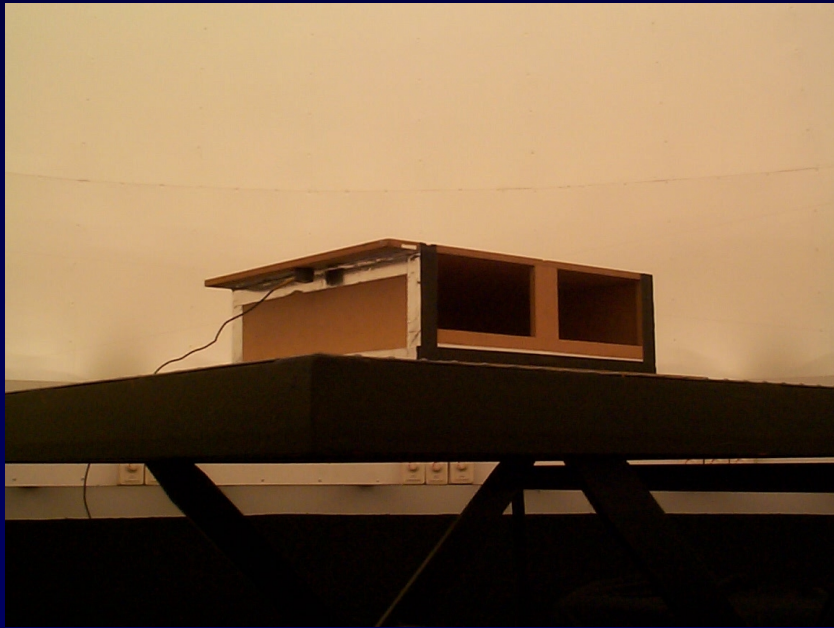
축소모형 실험에 의한 검증

- 일반적인 사무공간(8m × 8m × 2.7m) 축소모형 제작
- 인공천공과 실제 외부환경에서의 조도분포측정
 - 모형 내부에 9개의 측정점 선정
- 실내외 조도값에 의한 주광을 산출

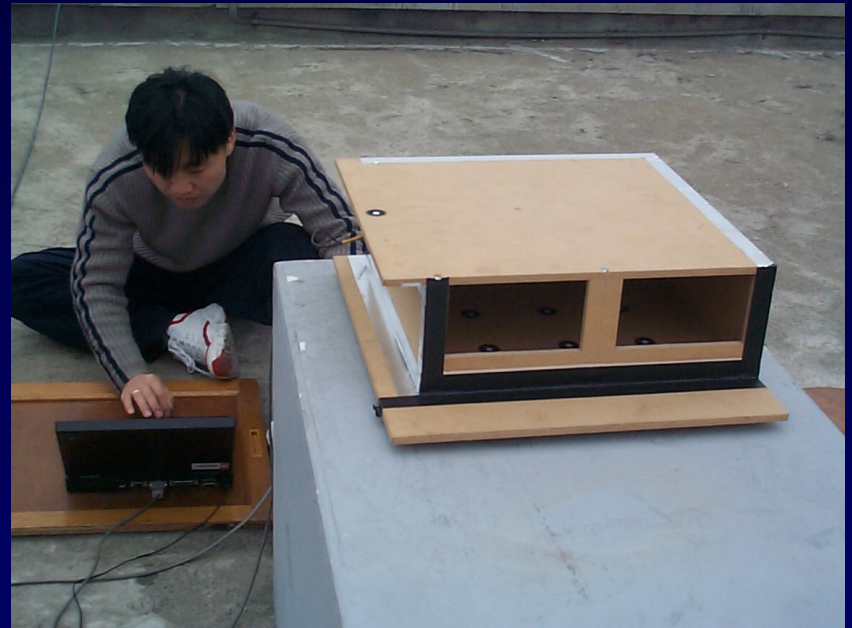


축소모형의 제원

축소모형 실험

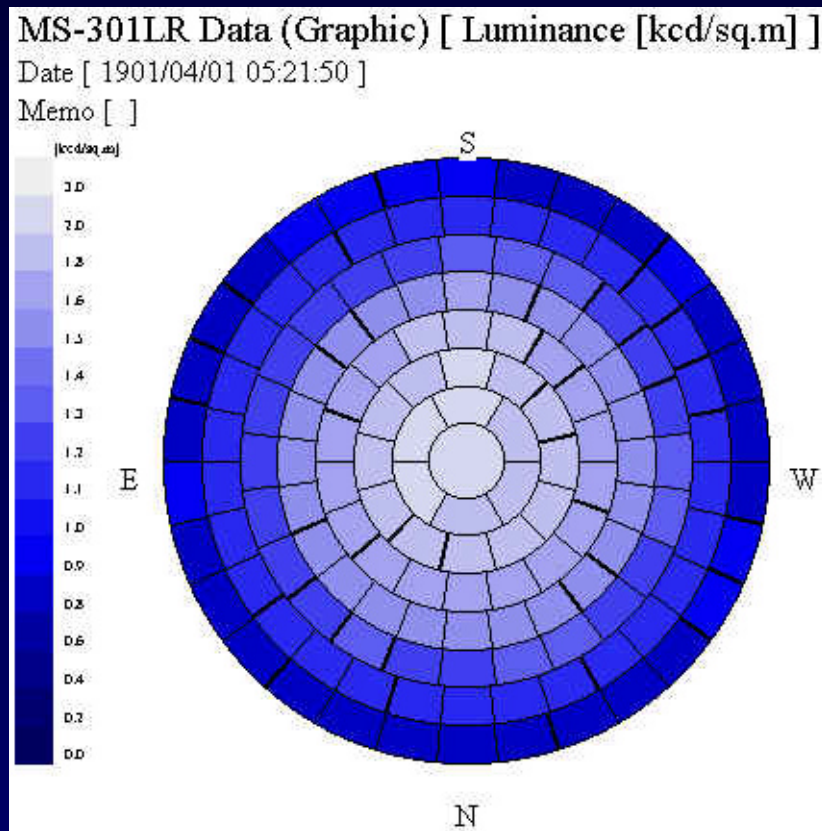


인공천공에서의 모형실험

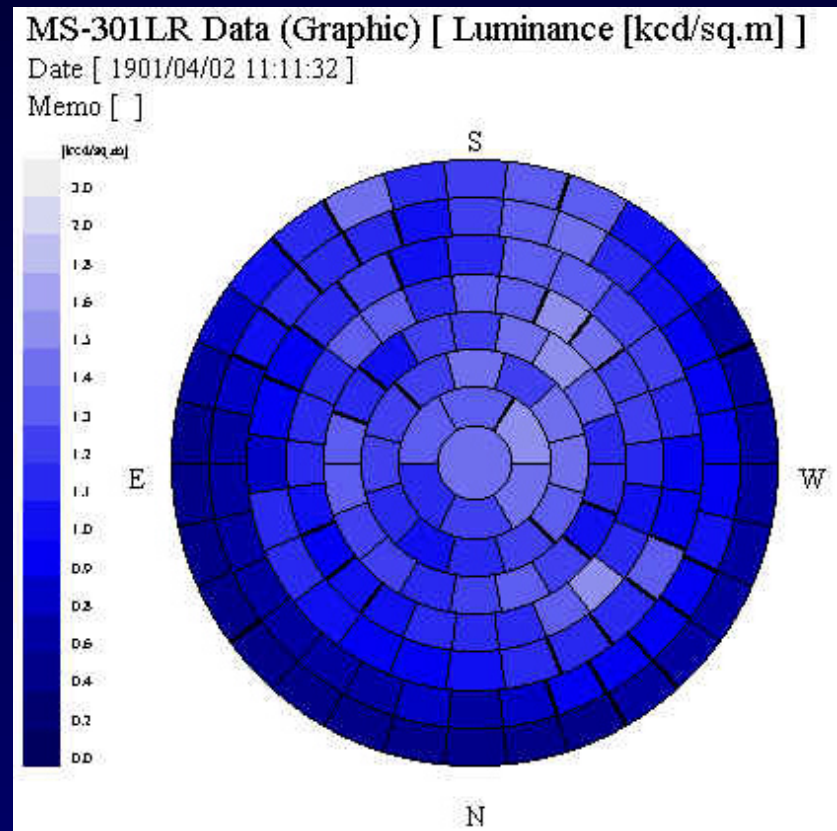


실제 담천공에서의 모형실험

- 모형실험대상 천공의 휘도분포



인공천공의 천공면 휘도분포



실제 담천공에서의 휘도분포

축소모형 실험결과

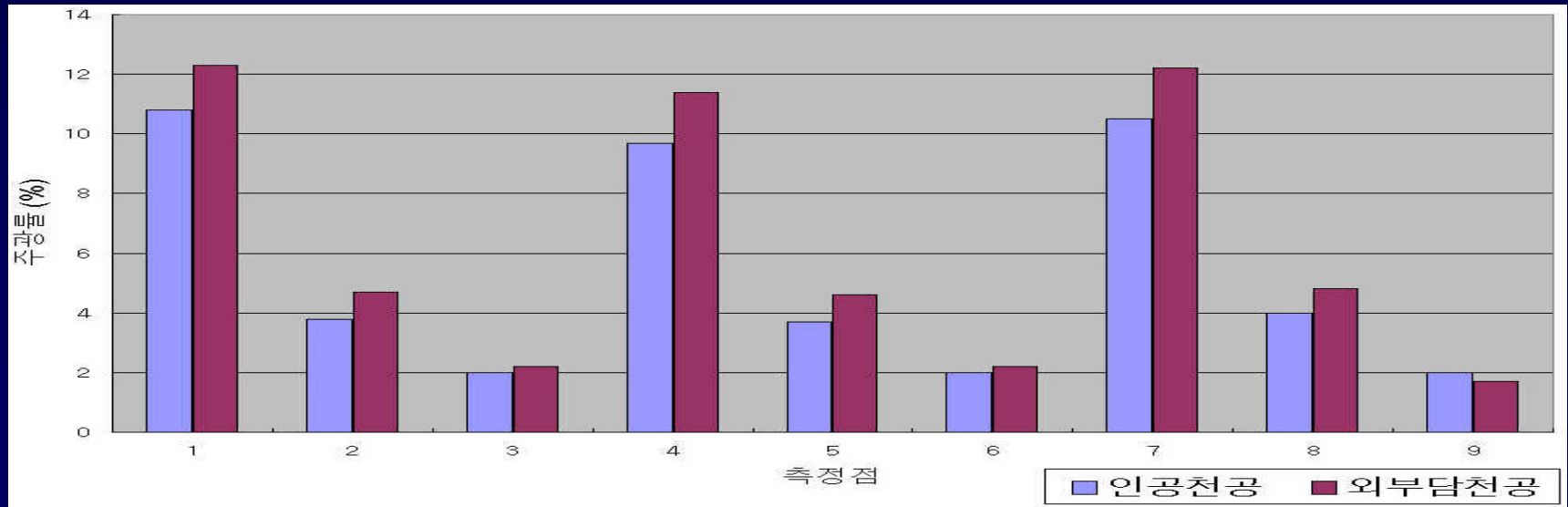
- 인공천공과 외부 담천공의 천공휘도 분포의 차이
 - 외부수평면 조도값에 대한 실내 조도비인 주광율로 비교

구 분	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	외부수평면 조도
인공천공 (lux)	112	220	590	108	207	544	109	215	604	5598
주광율 (%)	2.0	4.0	10.5	2.0	3.7	9.7	2.0	3.8	10.8	-
외부담천공 (lux)	104	293	751	138	282	701	133	287	760	6171
주광율 (%)	1.7	4.8	12.2	2.2	4.6	11.4	2.2	4.7	12.3	-

인공천공과 외부 담천공의 조도분포 비교

축소모형 실험결과

- 측정점별 주광율의 변화가 거의 동일하게 나타남
 - CIE 담천공으로 캘리브레이션된 인공천공의 정확성과 유용성 확인



인공천공과 외부 담천공의 주광율로 비교

결론

- RADIANCE 프로그램에 의한 인공천공의 휘도분포 시뮬레이션을 통하여 인공천공 조명기구의 조사각을 보다 많은 경우에 대하여 신속하게 비교함으로써 조명기구의 조사각을 쉽게 얻을 수 있었다.
- 캘리브레이션된 인공천공의 휘도분포 측정값과 CIE 담천공 모델값을 비교한 결과 최대 6.16%의 상대오차를 보임.
- 외부 천공과 인공천공에서의 건물 축소모형 실험 결과 H대학 인공천공에 대한 자연채광 설계 및 평가 도구로서의 정확성과 유용성을 확인할 수 있었다.
- RADIANCE 프로그램에 의한 인공천공 휘도분포 캘리브레이션 방법은 향후 인공천공 신설시 정확한 담천공 상태를 조성하는데 도움이 될 것으로 사료된다.