

3 면형 정방형 아트리움에서의 자연채광에 의한 공간 조도분포 해석에 관한 연구

Three Dimensional Daylight Illuminance Distributions in 3-Sided Square Atria

○ 김민성* 송규동**
Kim, Min Sung Song, Kyoo Dong

Abstract

The purpose of this study was to develop a computer model which could accurately predict the 3-dimensional daylight illuminance distributions in 3-sided atrium spaces. The developed computer model was based on the Monte-Carlo method and Ray-tracing technique, and the accuracy was validated through a series of physical scale model measurements. This paper mainly presents the basic algorithms and validation process.

키워드: 아트리움, 자연채광, 공간조도, 몬테카를로 방법, 광선추적법, 페레즈 천공모델

Key Words : Atrium, Daylighting, Spatial illuminance, Monte Carlo Method, Ray-tracing Technique, Perez Sky Model

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

3 면형 아트리움은 도심지 고층건물의 하층부 또는 중간층 부분에 수개층을 하나의 공간으로 만들어 로비 또는 휴식공간으로 사용하는 건축 방식이다. 이러한 형태의 아트리움은 한쪽면이 전부 유리벽으로 처리되어 외부를 조망할 수 있을 뿐만 아니라 충분한 자연광이 유입되어 실내의 조경을 통해 건물내의 쾌적성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다(Bednar,1986).

그러나 유리벽을 통해 입사하는 직사일광은 현휘를 유발시킬수 있고, 연중 한쪽 방향으로만 입사하는 자연광은 실내에 조경된 식재가 빛이 입사하는 방향으로만 자라는 굴광성에 의해 비대칭적으로 자라는 문제점을 야기시킬 수 있다(Saxon,1987).

따라서 본 연구는 3 면형 아트리움의 공간내 조도 분포를 예측할 수 있는 컴퓨터 소프트웨어를 개발하여 아트리움 설계시 각종 식재의 생장에 적합한 빛의 양과 방향성이 확보되는지 여부를 판단할 수 있도록 하는 것을 목표로 수행되었다.

1.2 연구의 진행 방법 및 범위

본 연구는 3 차원 공간 조도분포를 정량적으로 측정할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하고 이

를 축소모형을 통해 검증하였으며, 검증된 모델을 통해 특정 대상일의 공간상 조도분포를, 정량적으로 평가하는 방법으로 진행되었다. 연구의 범위는 3 면형 정방형 아트리움으로 제한하였으며 실험 변수에 따라 비교 분석하였다. 본 연구의 주요 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 3 면형 정방형 아트리움에서의 자연채광과 관련된 주요 변수 정립
- 2) 몬테카를로 방법(김재삼,1997), 광선추적법, Perez 천공모델(Perez,1990)을 이용한 공간 조도 계산용 컴퓨터 모델 개발
- 3) 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 3 면형 아트리움 내 공간조도 계산
- 4) 축소모형 실험을 통한 컴퓨터 모델의 정확성 검증
- 5) 검증된 모델을 이용하여 아트리움 내 특정일 공간 조도벡터의 정량적 분석

2. 컴퓨터 모델의 기본 이론

2.1 공간조도

조명조건은 보통 주어진 평면상 그것도 흔히 수평의 작업면 상의 조도를 중심으로 측정 또는 규정되나 수직 또는 경사면상의 조도를 문제삼을 때도 있다. 주어진 조도는 하나의 특정 방향으로부터 오는 광선에 의해 생길 수도 있고, 또는 모든 방향으로부터 오는 광자에 의해 생길

* 정회원, 한양대 대학원 석사과정

** 정회원, 한양대 건축공학과 교수

본 연구는 1996년도 한양대학교 교내 연구비에 의해 지원되었음

수도 있다. 평면조도계(Planar Illuminance Meter)는 반구면으로부터 오는 광선만 기록하고 좁은 대역의 광선과 확산장을 구분하지 못한다.

평균구면조도는 모든 방향으로부터 작은 구가 받는 평균 조도이다. 즉 구면의 전입사광속을 그 표면적으로 나눈 값이다. 이 값을 E_s 라 하며 lx 로 측정된다. 따라서 E_s 는 그 방향에 관계없는 전광량의 척도이다.

조도벡터는 크기와 방향을 갖는 합성량이다. 그 크기는 작은 구면상의 서로 반대편에 있는 두 점 간의 조도의 최대차이다. ΔE_{max} 로 표시되며 lx 로 측정된다. 그 방향은 최대차가 측정된 두 점을 연결하는 직경에 의해 구해진다. 이 방향은 2개의 각을 중심으로 정의될 수 있다. 즉 하나는 편리한 기준 방향으로부터 측정한 수평각이고, 다른 하나는 수평으로부터 측정한 수직각이다.

벡터/스칼라 비는 빛의 방향성의 척도로서 조각 등의 입체감을 표시하는데 좋은 지표가 된다. $\Delta E_{max}/E_s = 4$ 일 경우는 완전한 단일 방향의 빛이다. 실제로 이 값은 항상 4 이하이다. 한편 0은 완전 확산의 전방향의 빛을 가리킨다.

만약 구에의 전입사광속이 F 라면, 구면의 평균조도(스칼라)는 식(1)이 된다.

$$E_s = \frac{\Phi}{4\pi r^2} \quad \text{식(1)}$$

만약 이 모든 광속이 한 방향으로부터 온다면, 벡터의 크기는 식(2)로 표현할 수 있다.

$$\Delta E_{max} = \frac{\Phi}{\pi r^2} - 0 = \frac{\Phi}{\pi r^2} \quad \text{식(2)}$$

따라서 가능한 최대의 벡터/스칼라 비는 식(3)이 된다.

$$\frac{\Delta E_{max}}{E_s} = \frac{\Phi}{\pi r^2} \div \frac{\Phi}{4\pi r^2} = 4 \quad \text{식(3)}$$

균일한 확산장에서 $\Delta E_{max}=0$ 이다. 따라서 벡터/스칼라 비는 $0/E_s=0$ 이다.

2.2 몬테카를로 방법

몬테카를로 방법은 통계적 문제를 해결할 때, 난수(Random-Number)를 이용한 무작위적인 표본을 사용하는 방법이라고 할 수 있다. 이러한 방법은 컴퓨터 모델에서 재료의 반사특성에 따라서 빛의 초기 방향을 결정하는데 필요하다. 만약 난수발생 방법으로 균일 확률 분포를 갖는 난수 발생기를 만들었으면 그것을 이용하여 재료의 특성에 따른 확률 분포를 갖도록 변화시켜야 한다. 변환 방법으로는 일반적으로 역변환 방법과 거부법이 사용된다(김재삼,1997).

2.3 광선추적기법(Ray-Tracing Technique)

광선추적기법은 광자의 움직임에 따른 운동 방향과 크기를 벡터화시켜 공간 내에서 광자의 운동경로를 수학적으로 예측할 수 있는 기법이다. 따라서 이 방법을 문제 해결에 적용시키기 위해서는 벡터에 대한 기본적인 이론을 이해하고 이 벡터가 공간상의 어떤 평면과 만날 경우, 만나는 점의 교점과 이루는 각 등을 계산하는 식을 알아야 한다. 교차한 면에 대한 빛의 반사 특성, 투과특성 등과 같은 벡터의 방향이나 크기에 변화를 줄 수 있는 요인 등을 고려하여 새로운 벡터의 방향과 크기를 결정할 수 있게 된다.

2.4 Perez 천공모델

자연채광에 의한 실내 조도를 예측하기 위해서는 직사일광과 확산 천공광에 의한 외부조도를 알아야 하는 것이 무엇보다 중요하다. 직사일광의 경우 일반적으로 방위각과 고도각을 통한 계산식으로 해결할 수 있지만, 천공광의 경우 실제 천공 상태의 휘도 분포를 정확하게 예측하기란 거의 불가능하다. 하지만 많은 연구에 의해서 실제 천공상태와 비슷한 천공 모델들이 개발되었다. 현재까지 개발되어 있는 천공 휘도 분포 모델 중 다양한 상태의 천공 조건에 대해 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 모델은 Perez 모델이라고 할 수 있다. Perez 모델은 태양 천정각, 천공의 청정도, 천공의 밝기 및 대기의 수증기량의 4 가지 인자를 이용하여 천공의 휘도분포를 계산해 낼 수 있다.

3. 수치모델 개발

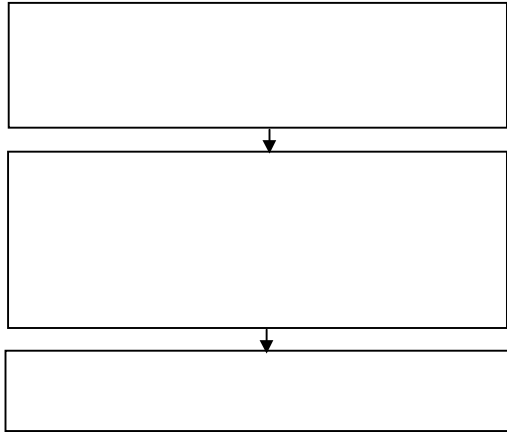
3.1 공간조도 측정 모델

일반적으로 공간조도는 공간조도계를 이용한 공간내 벡터와 스칼라의 양을 측정하고 그 비를 벡터의 방향과 함께 도식화하여 나타낼 수 있다. 그러나 이러한 측정방법은 인공조명을 이용한 실제 건물내에서 이루어지므로 시시각각으로 변하는 태양 고도와 방위각의 변화에 따른 측정이 불가능하고, 축소모형에 의한 사전평가가 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 아트리움 3 차원 공간 조도값을 측정하기 위해 그림 1 에서와 같은 단위공간을 정육면체의 6 등분으로 나눈 뒤 서로 대칭되는 값의 차를 이용한 3 차원 벡터로서 표현하였다. 우선 단위 공간내로 입사되는 총광속을 육면체의 표면적으로 나누어 평균조도(스칼라조도)를 구하고, 6 방향으로부터 입사하는 빛의 조도값을 각각 스칼라조도로 나누어 그림 2 에 보인 \vec{u} , \vec{v} , \vec{w} 의 크기를 결정한다. 그리고 \vec{u} , \vec{v} , \vec{w} 를 벡터의 가법에 의해 그 지점에서의 최종 벡터인 $\vec{u} + \vec{v} + \vec{w}$ 의 방향과 크기를 결정한다.

3.2 수치모델의 흐름도

다음은 본 연구의 수치모델에 대한 흐름도를 나타낸 것이다.



4. 수치모델의 검증을 위한 축소모형 제작

4.1.3 3 차원 공간 조도 측정 장치

본 연구에서는 그림 3 에서와 같이 전·후·좌·우·상의 다섯 방향의 조도를 측정할 수 있는

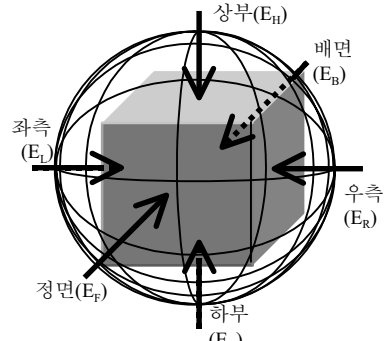


그림 1 공간조도의 개념

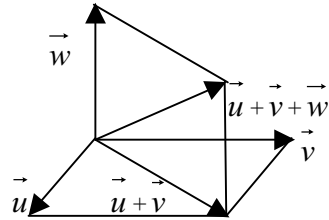


그림 2 벡터의 가법

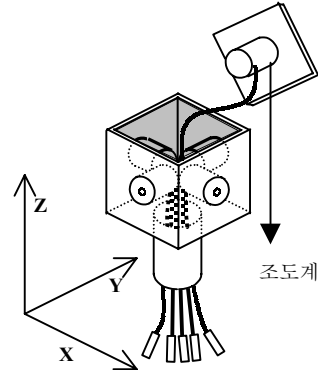


그림 3 3 차원 조도 측정 도구

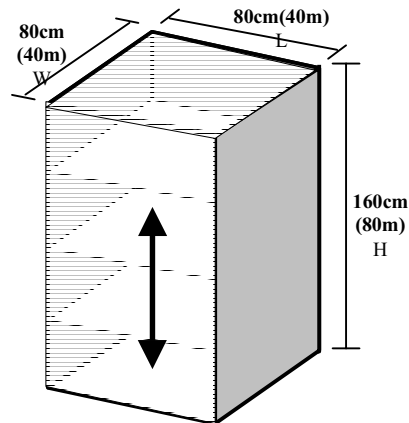


그림 4 3 면형 아트리움의 축소모형

3 차원 공간 조도 측정장치를 제작하였다. 이 측정장치는 5 개의 Li-Cor 조도 센서를 목재 상자에 고정시킨 것이다.

4.2 축소모형의 제작

본 연구에서는 3 차원 공간 조도를 예측할 수 있는 수치모델을 검증할 목적으로 1/50 의 3 면형 아트리움의 축소모형을 제작하였다. 그림 4 에서와 같이 축소모형은 광정지수를 변화시킬 수 있도록 아트리움 바닥을 움직일 수 있게 제작하였다.

4.3 모형실험 및 수치모델의 정확성 검증 결과

- 1) 일자 : 1998. 4. 4
- 2) 측정시 주요변수 :
 - 천공상태 : 청천공, 담천공
 - 광정지수 : WI=0.5, WI=1, WI=1.5, WI=2
 - 방위 : 정남, 정북
 - 측정점 높이 : 4m, 8m, 12m
 - 천정 투과율 : 투명, 불투명

본 실험은 유리벽을 갖는 3 면형 아트리움을 창측면이 정남을 향하도록 하고, 수평계를 이용하여 측정면과 모형이 수평을 유지하도록 하였다. 그림 5 는 아트리움내에 위치한 공간조도 측정장치를 보인 것이고 그림 6 은 공간조도 측정장치가 위치한 바닥면상의 점들을 보인 것이다. 그리고 Perez 모델의 천공 휘도 분포계산에 필요한 입력자료로서 이용하기 위해서 실험당시의 노점온도와 일사량도 함께 측정하였다. 표 1 은 축소모형실험에 이용된 장비를 나타낸 것이다.

그림 7 과 표 2 는 외부 수평면 조도에 대한 각 지점의 조도비로서 축소모형 실험값과 수치모델에 의한 계산값을 비교한 것이다. 비교한 시점에서의 주요 변수값들은 아래와 같다.

- 천공상태 : 부분 담천공
- 광정지수 : 1
- 측정높이 : 16cm(실제높이 8m)
- 방 위 : 정남

두 값사이의 오차율은 식(4)에 의해 계산한 결과 컴퓨터 모델의 오차율이 4.08%정도로서 수치모델이 95%이상의 정확성을 갖는 것으로 검증되었다.

$$\text{오차율} = \frac{\text{측정값의평균} - \text{계산값의평균}}{\text{계산값의평균}} \times 100 [\%] \quad \text{식(4)}$$

표 1 측정도구

항 목	수량
조도센서 (LI-210SA)	16
일사계 (LI-200SA)	1
데이터 로거 (DataScan)	1
노트북 컴퓨터	1
아스만 건습구 온도계	1

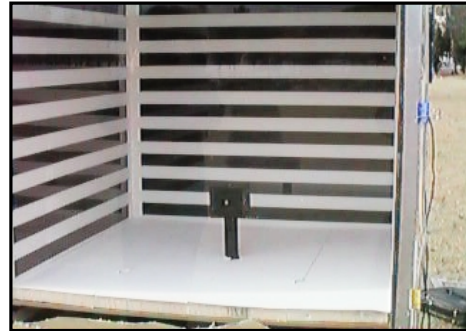


그림 5 아트리움내 설치된 공간조도 측정도구

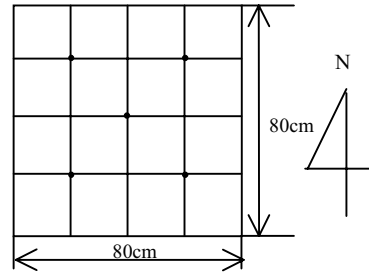


그림 6 바닥면 측정 위치

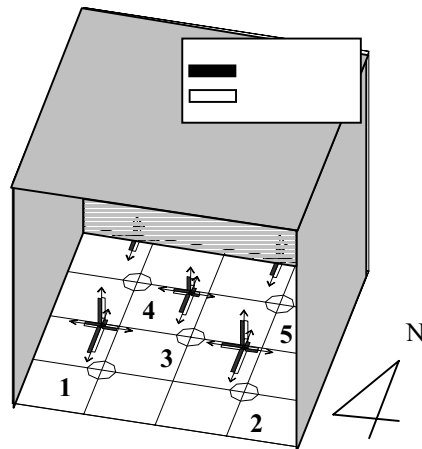


그림 7 측정값과 계산값의 비교

6. 공간 벡터 조도 분포의 계산 및 가시화 예

본 연구에서는 공간 벡터 조도를 정량적으로 계산하여 가시화하기 위하여 그림 8 에서와 같이 아트리움 실내로 유입되는 빛의 방향을 수평선을 기준으로 아래로 향할 경우에는 (+), 위로 향할 경우에는 (-)의 각도로서 규정하였다. 표 3 은 불투명 지붕을 갖는 광정지수 0.5 의 3 면형 아트리움에서 하지일인 6 월 21 일과 동지일인 12 월 21 일의 정오시 벡터조도의 계산결과를 보인 것이다. 그리고 그림 10 과 그림 11 은 각각 6 월 21 일 정오시와 12 월 21 일 정오시의 벡터조도를 가시화 한 예를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 태양의 고도가 낮은 동지일의 벡터조도의 값이 태양고도가 높은 하지일의 값보다 큰 것을 알 수 있다. 즉 태양고도가 낮은 직사일광에 의해 공간내의 빛의 방향성이 커진다는 것을 가시적으로 보여주고 있다.

표 4 와 표 5 는 각각 불투명 지붕을 갖는 3 면형 아트리움과 투명한 지붕을 갖는 광정지수 1.0 의 3 면형 아트리움의 6/21 과 12/21 의 벡터조도의 계산 결과를 보인 것이다.

그리고 그림 12 와 그림 13 은 표 4 와 표 5 의 벡터조도를 가시화한 것이다.

두 그림에서 알 수 있듯이 불투명한 지붕을 갖는 3 면형 아트리움에서는 벡터가 창면으로부터 실내의 반대쪽 벽으로 향하고 있지만 투명한 지붕의 아트리움의 경우 그 방향은 바닥쪽을 향하고 있지만 측창으로부터 입사하는 광선의 영향에 의해 벡터의 크기는 작아지는 것을 알 수 있다.

위의 예는 아트리움내의 식재 계획시 식재의 굴광성에 대한 요인인 공간내 빛의 방향성을 사전에 정량적으로 평가하는 것이 가능함을 보여주고 있다.

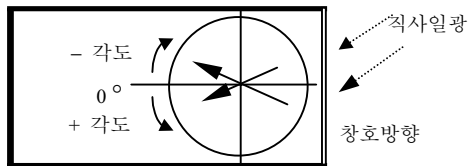


그림 8 조도벡터의 방향 각도 정의

표 2 측정성분비와 계산성분비 비교

위치	1	2	3	4	5	
X	20cm	60cm	40cm	20cm	60cm	
Y	20cm	20cm	40cm	60cm	60cm	
Z	8cm	8cm	8cm	8cm	8cm	
E _□	측정	0.350	0.337	0.177	0.124	0.137
	계산	0.332	0.330	0.194	0.140	0.187
E _□	측정	0.134	0.110	0.063	0.061	0.037
	계산	0.129	0.114	0.067	0.061	0.039
E _L	측정	0.140	0.193	0.134	0.061	0.133
	계산	0.140	0.193	0.142	0.090	0.148
E _F	측정	0.368	0.358	0.304	0.175	0.237
	계산	0.385	0.348	0.276	0.167	0.212
E _B	측정	0.100	0.120	0.098	0.064	0.092
	계산	0.081	0.070	0.061	0.047	0.069

표 3 벡터조도 (광정지수=0.5 천정:불투명)

	위 치			6/21		12/21	
	X	Y	Z	방향	길이	방향	길이
F1	d/4	d/2	d/10	17.38	1.49	10.49	1.26
F2	d/4	d/2	2d/10	-7.00	1.11	4.17	1.14
F3	d/4	d/2	3d/10	-24.68	0.89	-0.78	1.07
M1	d/2	d/2	d/10	14.34	1.01	9.83	1.33
M2	d/2	d/2	2d/10	-7.87	1.17	-8.07	1.36
M3	d/2	d/2	3d/10	-7.86	1.01	-17.5	0.79
B1	3d/4	d/2	d/10	18.54	1.16	-5.97	1.26
B2	3d/4	d/2	2d/10	-6.44	1.06	-21.3	0.96
B3	3d/4	d/2	3d/10	7.98	0.98	-18.5	0.82

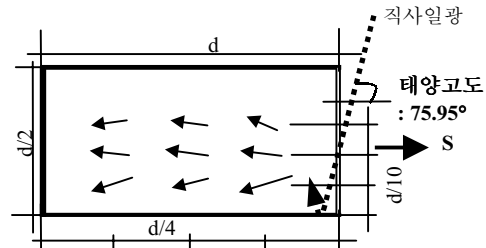


그림 10 실내 조도 분포(6/21 12:00)

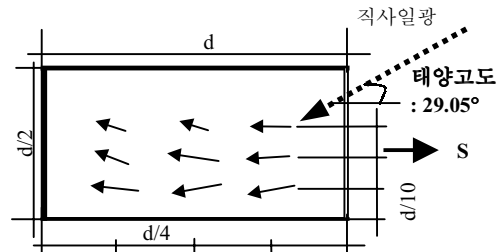


그림 11 실내 조도 분포(12/21 12:00)

7. 결론

본 연구의 수행결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 몬테카를로 방법과 광선추적기법을 적용한 수치 모델은 기존의 주광율법이나 광속전달법을 응용한 수치모델에서는 불가능한 공간상의 조도를 정확하게 계산할 수 있는 것으로 나타났다.
- 본 연구에서 개발된 수치모델에 의한 계산결과를 축소모형실험에 의한 결과와 비교한 결과 정확성이 95%이상 확보되는 것으로 검증되었다.
- 아트리움내 변수에 따른 벡터조도의 방향성을 정량적으로 평가할 수 있었다.
- 본 연구에서 개발된 컴퓨터 모델은 향후 아트리움내의 식재 계획시 3면형 아트리움과 같이 빛이 어느 한 방향에서 주로 유입되는 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 설계도구로서 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김재삼. 1997. 몬테카를로 방법의 물리학적응용, 1 판, 민음사, 서울.
2. Bednar, M.J. 1986. The New Atrium, McGraw-Hill Book Company, New York.
3. Saxon, R. 1987. Atrium Buildings-Development and Design, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, Co., New York.
4. Perez, R.; P. Ineichen; R. Seals.; J. Michalsky; and R. Stewart. 1990. *Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*, Solar Energy, Vol.44, No.5, pp.271-289.
5. Perez, R.; R. Seals ; and J. Michalsky. 1993. *Modeling Skylight Angular Luminance Distribution from Routine Irradiance Measurements*, Journal of the IES, Vol.22, No.1, pp.10-17.

표 4 벡터조도 (광정지수=1.0 천정:불투명)

	위 치			6/21		12/21	
	X	Y	Z	방향	길이	방향	길이
F1	d/4	d/2	d/10	-11.08	1.59	13.30	1.20
F2	d/4	d/2	2d/10	-31.40	1.45	7.63	1.06
F3	d/4	d/2	3d/10	-38.81	1.18	9.49	1.17
M1	d/2	d/2	d/10	11.19	1.22	12.82	1.13
M2	d/2	d/2	2d/10	2.50	1.47	1.24	1.14
M3	d/2	d/2	3d/10	-18.09	1.46	1.52	1.17
B1	3d/4	d/2	d/10	17.56	1.19	12.36	0.98
B2	3d/4	d/2	2d/10	11.70	1.14	-1.32	1.05
B3	3d/4	d/2	3d/10	-7.24	1.00	1.38	1.04

표 5 벡터조도 (광정지수=1.0 천정:투명)

	위 치			6/21		12/21	
	X	Y	Z	방향	길이	방향	길이
F1	d/4	d/2	d/10	100.3	1.28	25.87	0.85
F2	d/4	d/2	2d/10	91.30	1.01	18.05	0.71
F3	d/4	d/2	3d/10	90.51	0.94	22.38	0.72
M1	d/2	d/2	d/10	66.57	0.75	26.55	0.84
M2	d/2	d/2	2d/10	58.04	0.31	14.00	0.79
M3	d/2	d/2	3d/10	70.47	0.38	21.38	0.78
B1	3d/4	d/2	d/10	76.84	0.63	30.10	0.84
B2	3d/4	d/2	2d/10	30.89	0.40	20.83	0.79
B3	3d/4	d/2	3d/10	38.89	0.55	22.51	0.88

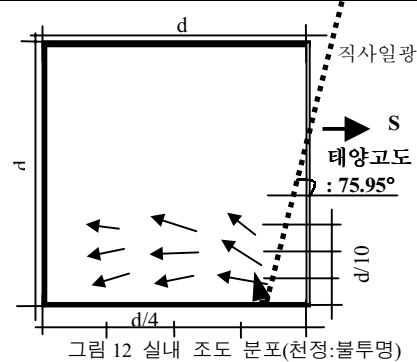


그림 12 실내 조도 분포(천정:불투명)

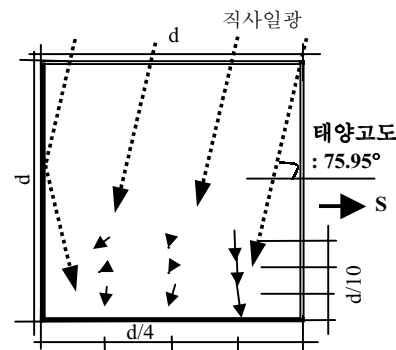


그림 13 실내 조도 분포(천정:투명)