

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 22, No. 2, 2002

자연채광 성능평가에 있어서 축소모형실험 방법론의 유용성 검증에 관한 연구

Validity Evaluation of Scale Model Experiments in Architectural Daylighting Performance

김정태*, 정유근**, 정인영***, 황민구***

J. T. Kim*, Y. G. Chung**, I. Y. Jeong***, M. K. Hwang***

Key words : 자연채광(daylighting), 축소모형(scale model), 실험(experiment),
성능(performance), 평가(evaluation)

Abstract

Daylighting is a powerful vehicle of architectural expression and provides buildings a living quality due to constantly changing properties in intensity and color. As an environmental system, daylighting should be subjected to the same level of rigorous analysis and review that any environmental system receives. For example, increasing cooling loads and causing visual displeasure are easily occurred owing to the excessive sunlight through windows. Therefore, daylighting performance attributes and physical characteristics must be described qualitatively and quantitatively in early design process. In various architectural daylighting performance evaluation methods, the scale model experiment can be applied due to its simplicity and usefulness. So, this study aims to evaluate the validation of scale model experiments in architectural daylighting performance. For the purpose, two scale model experiments under clear sky are conducted. And, the validation of the experiments are evaluated by computer simulations.

* 경희대학교 건축공학과 교수

* Professor, Ph. D., Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University

** 경희대학교 건축공학과 Post Doc.

** Post Doc., Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University

*** 경희대학교 건축공학과 박사과정

*** Ph. D. Candidate, Department of Architectural Engineering, Kyung Hee University

1. 서론

효과적으로 자연채광을 이용하면 실내 시환경의 쾌적성 및 작업성능을 향상하며 조명 에너지를 절약하는 등 많은 장점을 지니고 있다. 또한, 독특한 건축의장 설계가 가능해 창의적이고 독창적인 건축계획이 가능하다.

그러나, 부적합한 자연채광 계획은 과도한 태양광의 실내 유입으로 불쾌 glare의 발생 및 여름철 냉난방부하가 증가 등 오히려 실내환경의 악화가 우려된다.

그러므로, 효과적으로 자연채광 설계를 위해 건물계획 초기단계에 자연광의 도입으로 인한 채광 성능을 정확히 평가하여야 한다. 건축물의 자연채광 성능을 예측하기 위한 평가기법으로 축소모형실험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 평가방법 등이 있다.

축소모형 실험을 이용한 평가방법은 실제 건축물을 일정 스케일로 축소된 모형을 이용하여 건축물의 채광성능을 예측하는 방법으로 간단히 가장 실제와 유사한 측정결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

이에 본 연구는 자연채광성능평가에 있어서 축소모형실험의 유효성을 검증하였다. 이를 통하여 앞으로 수행될 다양한 자연채광 성능평가를 위한 축소모형실험의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 축소모형실험 방법

2.1. 축소모형실험 개요

축소모형실험은 실제 건축물과 유사한 내부표면, 가구, 재질감, 그리고 건축재료 등을 사용하여 제작된 모형을 이용하여 실내의 채광특성을 측정·분석하고 이를 근거로 건축물의 채광특성을 예측하는 기법이다.

그러므로, 다양한 설계조건에 따른 건축물의 채광성능을 계획초기 단계에서 손쉽게 예측할 수 있어 건축가와 채광기술자들이 보다 효과적인 자연

채광 설계가 가능하다. 또한, 모형의 정밀도에 따라 매우 신뢰성 높은 측정데이터를 얻을 수 있다.

그러나, 모형기법의 여러 장점에도 불구하고 축소모형 실험은 모형제작의 한계상 그 결과의 유용성이 특정의 프로젝트 또는 건물에 한정되는 단점을 지니고 있다. 이를 보완하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 등 수치적 해석방법에 의한 기법과 병용이 필요하다.

2.2. 축소모형의 제작

자연채광 성능평가를 위해 제작되는 축소모형은 모형의 외부의 충격에도 견딜 수 있는 견고한 재료를 사용하여야 한다. 또한, 상세한 부분까지 배려하여 현실감을 높이며 불필요한 빛이 스며들지 못하도록 제작하여야 한다.

모형제작에 사용되는 재료는 실물의 반사율과 질감을 대신할 수 있는 재료의 선택이 필요하고 실내공간의 빛 분배특성과 그림자 패턴을 3차원적으로 느낄 수 있도록 만들어져야 한다 (그림 1)

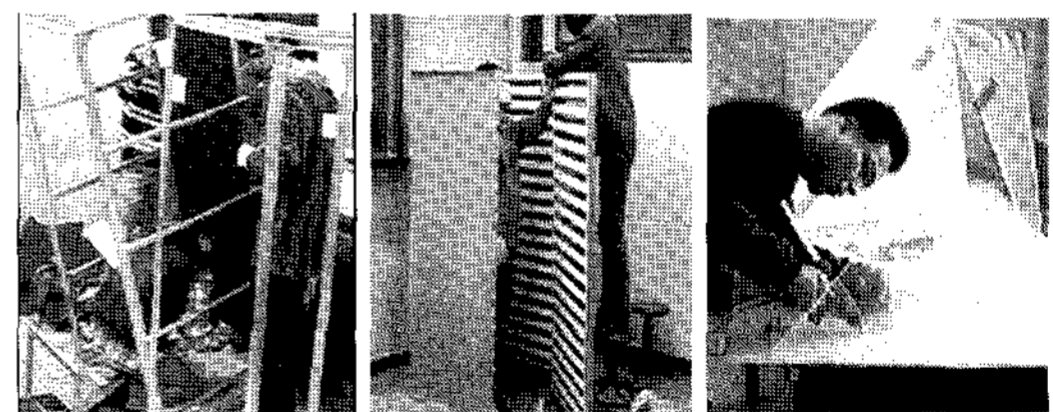


그림 1. 축소모형의 제작 예

이 때, 모형제작에 사용되는 재료의 반사율을 모르는 경우에는 휘도계 등 측정기구를 이용하여 반사율을 예측한다 (그림 2). 측정에 의해 재료의 반사율을 예측하는 경우에 허용오차는 10% 이내로 한다.

자연채광 성능평가를 위한 축소모형의 스케일은 보통 1/400~1/50 규모의 스케일이 많이 사용된다. 그러나 천공광과 직사일광의 건물내부 유입 및 분배특성을 분석하기 위해서는 1/24~1/16 스케일의 축소모형이 필요하다.

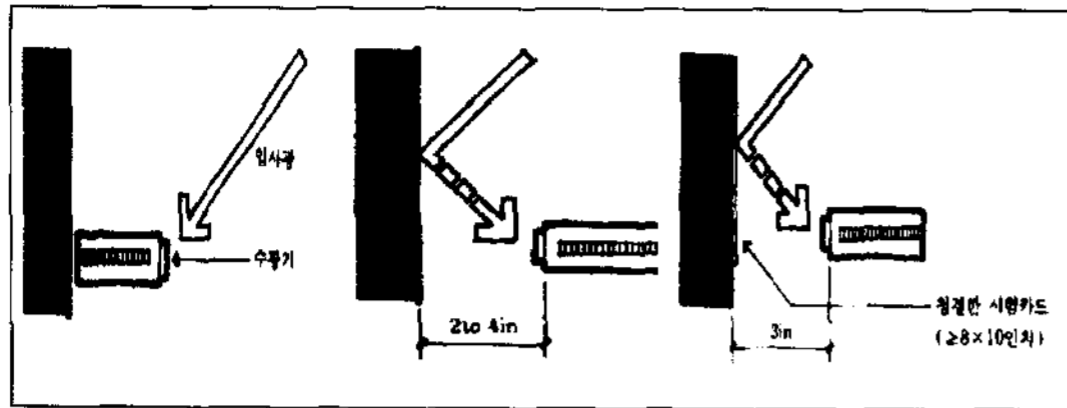


그림 2. 휘도계를 이용한 반사율 측정

관찰점을 통해 눈으로 실내 채광특성을 관찰하기 위해서는 1/24~1/12 스케일의 축소모형이, 카메라 렌즈를 통해 내부를 관찰하기 위해서는 1/8~1/4 스케일의 모형이 요구된다. 또한, 실제 크기의 모형을 제작하여 직접 사람이 들어가 채광 성능을 평가하는 경우도 있다.(그림 3)

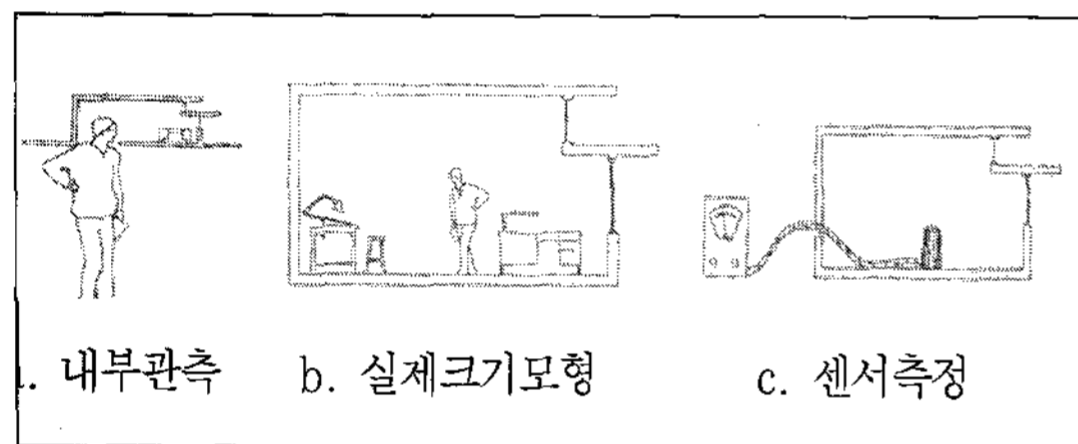


그림 3. 축소모형의 규모

2.3 축소모형실험 및 보정

축소모형을 이용한 채광성능 평가는 인공천공 돔 또는 자연천공 상태에서 실시된다. 인공천공에서의 측정은 천공상태를 다양하게 변화할 수 있어 다양한 기상조건에 따른 채광성능과 안정적인 측정결과를 얻을 수 있다.

그러나, 인공천공의 제작이 어려우며, 잘 계획할 경우에 자연천공에서의 실험은 실제 기상데이터에 의한 측정결과를 얻을 수 있고 경제적이므로 현실적으로는 대부분 자연천공 상태에서 측정이 이루어지고 있다 (그림 4).

자연천공에서의 축소모형실험은 보통 청천공과 담천공 중 하나의 천공상태를 위주로 계획되어지나, 양쪽 천공상태 모두에서 수행되어 건물의 전반적인 채광성능을 평가하는 것이 바람직하다.

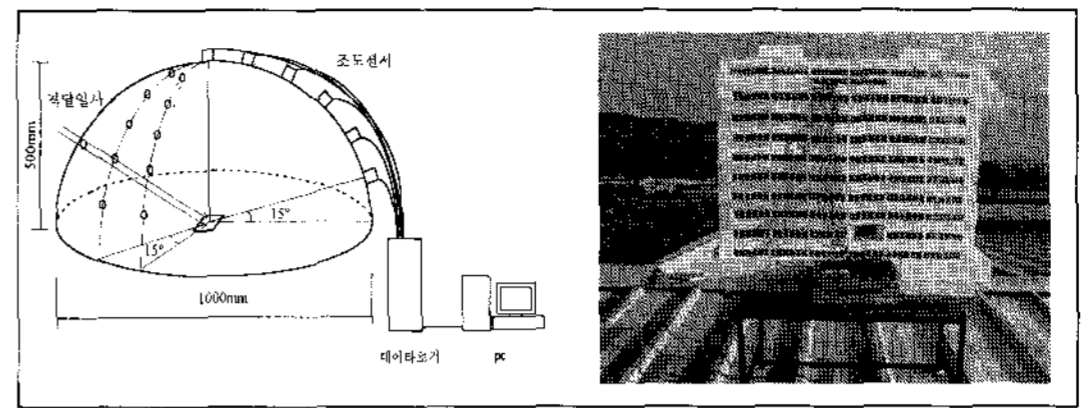


그림 4. 인공천공 돔과 자연천공에서의 측정

방위각과 고도를 변화하여 계절에 따른 채광성능의 평가하는 경우에 다음과 같은 보정이 필요하다. 즉, 계절에 따른 공기의 밀도와 특성이 변화에 의한 태양광 강도의 보정과 모형을 기울일 때 변하는 지면 반사광의 영향에 대한 보정이 중요하다.

$$RE = E_{ex} / E_{test} \quad (\text{식 1})$$

식에서, E_{ex} : 얻고자 하는 시간의 외부 수평면 조도

E_{test} : 측정이 이루어지는 시간의 외부 수평면 조도

이와 같이 계산된 보정률(RE)에 고도와 방위각을 변화시켜 얻은 실내조도의 측정값 ($E_{sp, test}$)를 곱하면 얻고자 하는 시간의 실내 조도 값을 얻을 수 있다.

$$E_{sp} = (E_{sp, test}) \times (RE) \quad (\text{식 2})$$

2.4 측정데이터의 수집 및 분석

축소모형의 채광성능을 측정하기 위한 측정기기는 설치가 간단하고 자료의 산출 및 기록이 용이한 기기를 사용한다. 일반적으로 사용하는 측정기기는 조도센서가 부착된 조도계와 컴퓨터 또는 데이터 기록계 등의 기록장치가 사용된다.

조도센서의 크기는 작을수록 유리하며, 축소모형 내부의 조도측정은 그 복잡함 정도에 따라 지점 측정, 선형측정, 그리고 그리드에 의한 측정으로 구분된다.

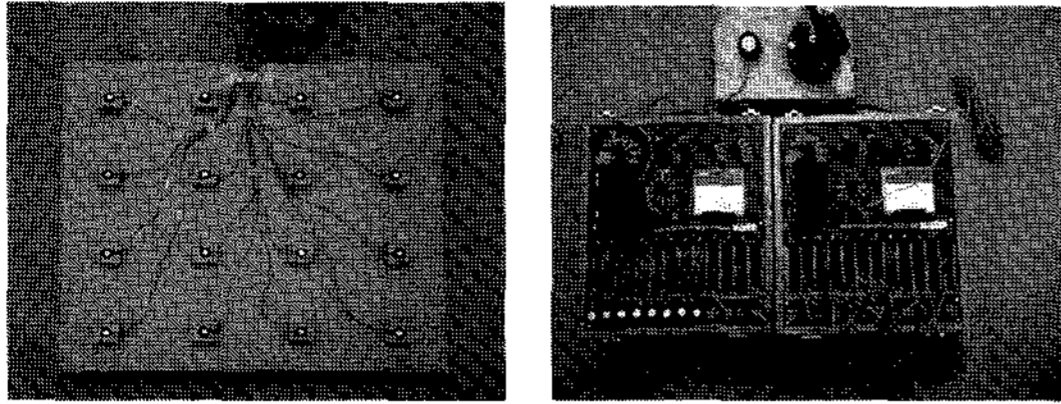


그림 5. 조도센서 및 측정기기

실내채광 특성 및 채광 분위기를 평가하기 위하여 카메라를 이용하여 시환경관 관련된 유용한 정보를 수집할 수 있다. 실내 시환경 측정을 위해서 사람의 눈의 인지 각도에 가장 근접하는 줌 기능을 지닌 어안(魚眼)렌즈가 적합하다.

카메라에 사용되는 필름은 보통 칼라 필름이 쓰이나, 빛의 대비와 현휘, 밝거나 어두운 느낌에 대한 유효한 정보를 제공하기 위하여 종종 흑백사진이 사용되곤 한다. 일반적으로 ASA 400 정도의 칼라 또는 흑백필름에서 최상의 결과를 얻을 수 있다.

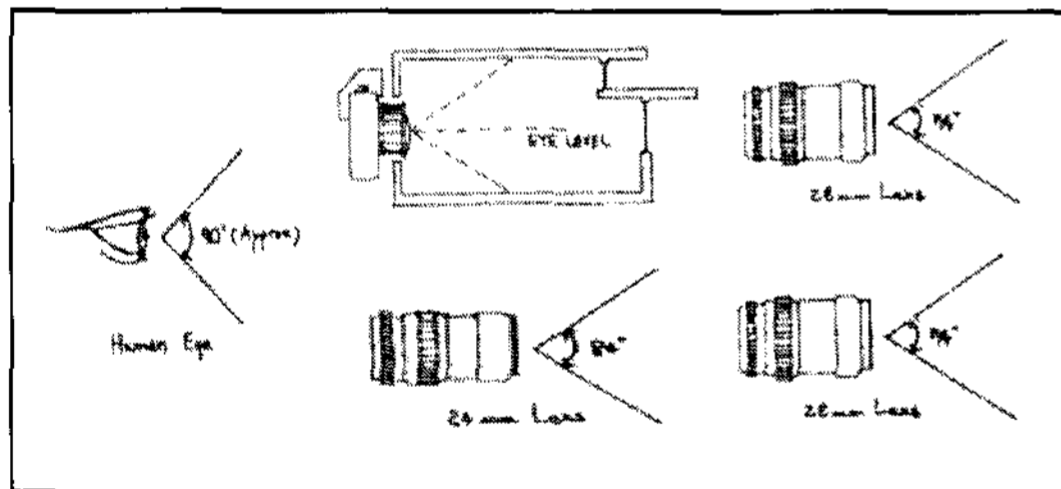


그림 6. 어안(魚眼)렌즈

3. 축소모형실험의 채광성능평가 및 유효성 검증

3.1 천창채광 건물의 채광성능 평가

1) 축소모형의 제작 및 개요

축소모형실험을 위해 9m×18m의 평면을 지닌 높이 18m(5층 규모)의 장방형 아트리움 건물을 선정하였다. 제작된 축소모형은 1/25 스케일로

가능한 실제 건물과 유사한 시각적 분위기를 연출할 수 있도록 제작되었다.

아트리움 건물의 천창은 유리의 투과율에 따라 다양하게 바꿀 수 있도록 제작되었고 아트리움의 내부 벽 반사율 45%, 바닥 반사율 20% 그리고 인접공간과 연결된 내부 창의 투과율 80%로 설정하였다 (표 1).

표 1. 축소모형의 개요

내벽반사율	45 %
바닥반사율	20 %
천창투과율	30, 80, 100 %
내벽개구율	63 %
내벽창투과율	80%

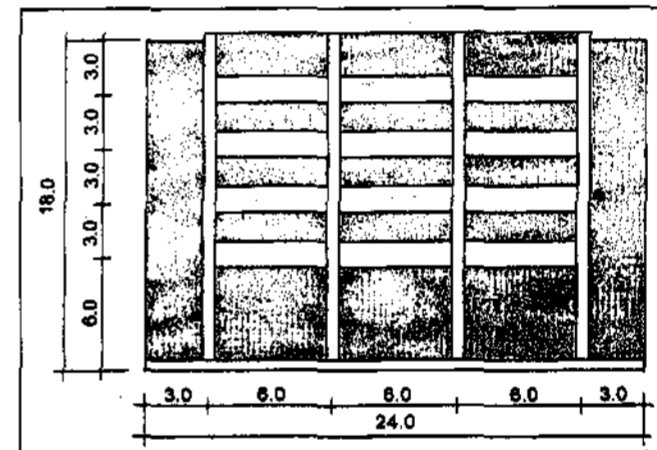


그림 7. 축소모형의 단면도

축소모형은 나무와 폼보드를 이용하여 제작되었다. 또한, 모든 접합부는 빛이 새어들지 않도록 검은색 종이테이프로 처리하였고 아트리움 건물의 내부는 일정 반사율을 지닌 색지를 사용하여 마감하였다.

2) 축소모형 실험

축소모형실험은 외부장애물의 영향을 받지 않는 K대학 공과대학 옥상에서 자연천공에서 실시하였다. 측정은 기상조건으로 오차가 심한 날을 제외하고 2002년 4월7일부터 10일 동안 실시되었다.

축소모형실험 시간은 태양의 남중시간을 기준으로 약 2시간이 소요되었으며 실험시의 천공상

태는 청천공과 담천공 아래에서 각각 실시되었다. 실험의 진행에 따른 태양고도 및 방위각의 오차는 3~4 ° 이내이다.

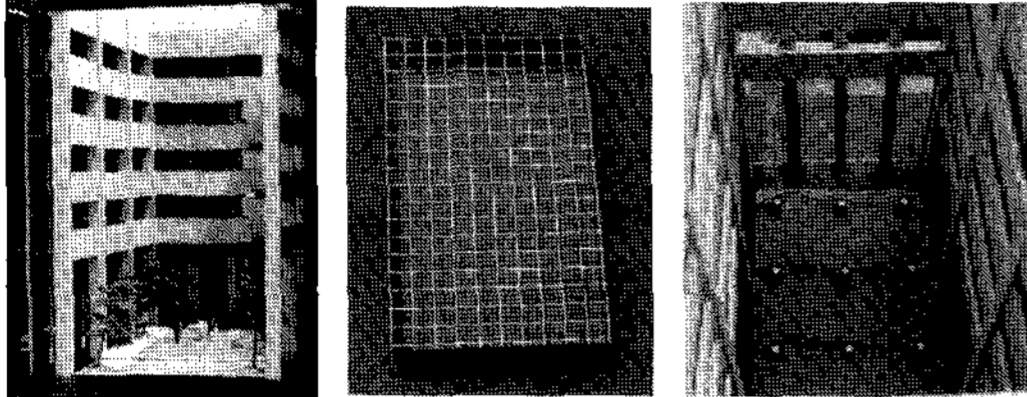


그림 8. 축소모형의 내부전경 및 천창

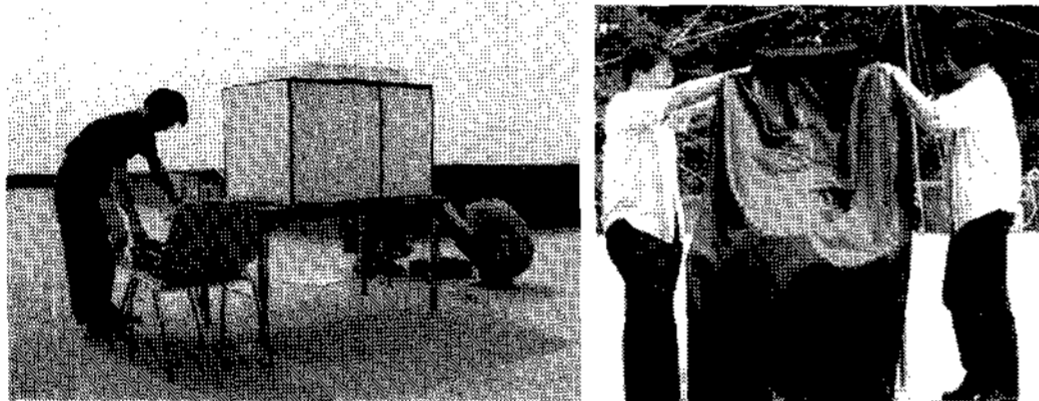


그림 9. 축소모형실험

3) 채광성능 평가

축소모형실험 결과를 이용하여 장방형 atrium 건물의 채광성능을 분석하였다 (그림 10). 채광성능 분석은 천창의 투과율, 내부 벽 반사율, 그리고 atrium의 폭과 바닥의 높이에 따라 분석되었다.

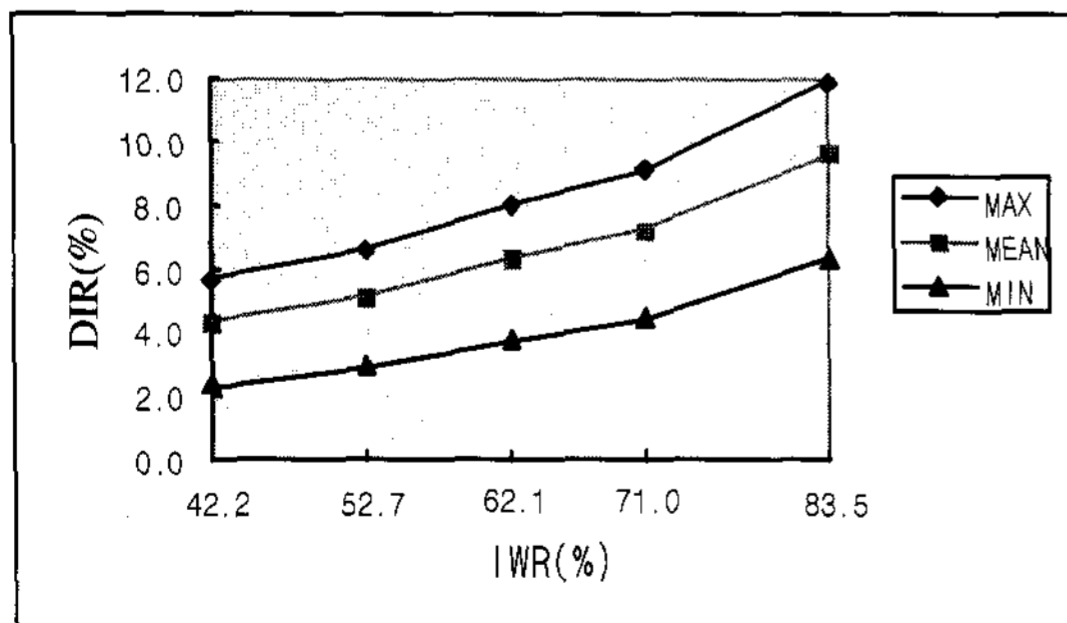


그림 10. 채광성능 분석 예

천창의 투과율 및 내부 벽 반사율 변화에 따른 채광성능은 유사한 특성을 보이는 것으로 분석되었다. 이 때, 직사일광에 의한 영향이 가장 큰 변화를

보여 일조조절 장치가 필요한 것으로 분석되었다.

특히, 내부 반사율 60% 이상에서 실내 채광성능의 변화가 가장 크게 나타나는 것으로 분석되었고, 천창의 투과율 80% 이상에서 필요이상의 자연광이 실내로 유입되는 것으로 분석되었다.

또한, atrium 건물의 높이가 바닥 폭의 변4 배 이상일 경우에 자연채광 효과를 기대하기 어렵고, 높이와 바닥 폭의 비가 1이하인 경우에 글레어의 발생이 우려되는 것으로 분석되었다.

3.2 일조조절장치건물의 채광성능평가

1) 축소모형의 제작 및 개요

축소모형은 바닥평면 12m×12m 그리고 높이 22m의 천창형 atrium 건물을 대상으로 제작되었다. 제작된 축소모형의 스케일은 1/35로 가능한 실제 건물과 유사한 시각적 분위기를 연출할 수 있도록 제작되었다.

일조조절 장치는 atrium 건물의 천창에 설치되며, 천창의 투과율은 100%로 설정하였다. atrium의 내부 벽 반사율 45%, 바닥 반사율 15% 그리고 인접공간과 연결된 내부 창의 반사율은 20%로 설정하였다 (표 2).

축소모형은 폼보드로 제작하였고 접합부는 검은 색 종이테이프로 빛이 새들지 않도록 처리하였다. 천창의 루버는 반사율과 각도변화에 따라 조절할 수 있으며, atrium 벽과 바닥의 반사율은 색상지를 붙여 조정하였다.

표 2. 축소모형의 개요

atrium 건물의 반사율	내벽	43%
	내벽 창	15%
	바닥	20%
내벽의 개구율		54%
일조조절장치(루버)	각도	45°, 60°, 90°
	반사율	50%, 70%
측정점수		16
태양고도		64(±2~3)

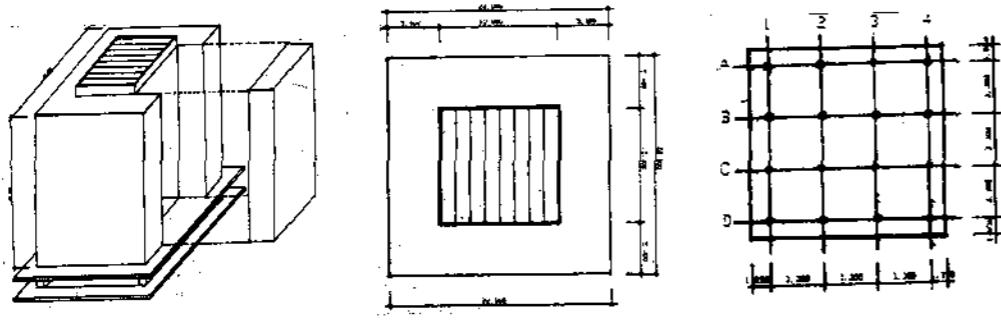


그림 11. 축소모형 단면 및 천창

2) 축소모형 실험

축소모형실험은 외부장애물의 영향을 받지 않는 K대학 공과대학 옥상에서 자연천공 아래에서 실시하였다. 축소모형실험은 청천공 아래에서 오전 12시를 기준으로 약 2시간 30분의 실험시간이 소요되었다.

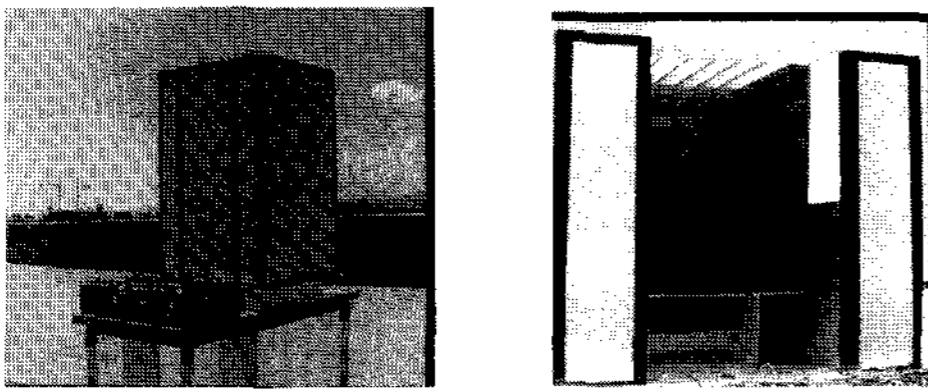


그림 12. 축소모형실험

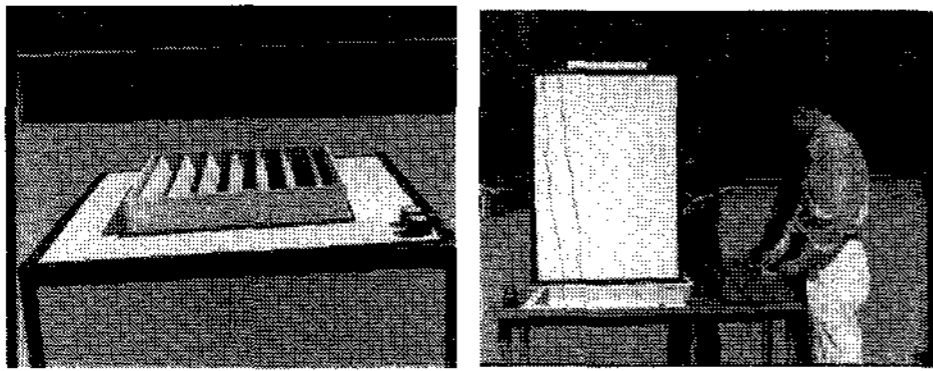


그림 13. 천창 및 실험모습

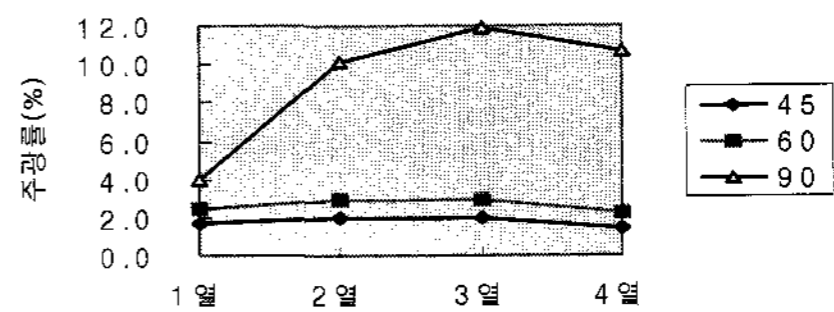
측정은 2002년 5월 1일부터 5일까지 8일 동안 실시되었으며 일조조절장치의 성능을 평가하기 위해 청천공 아래의 측정결과를 분석에 이용하였다. 옥외조도의 측정은 직사일광과 전공광 조도를 동시에 기록하였다.

실내 채광성능은 루버형태에 따라 실내 주광률을 측정하였다. 실험의 진행에 따른 태양고도의 변화는 남중시간을 기준으로 하여 2~3°의 변화를 보였으며 방위각의 변화는 28° 정도 변

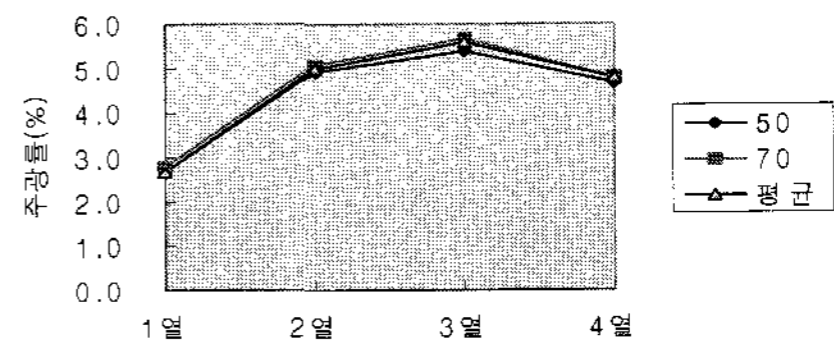
화하였고 측정시 방위각 오차는 약 3° 정도가 된다.

3) 채광성능 평가

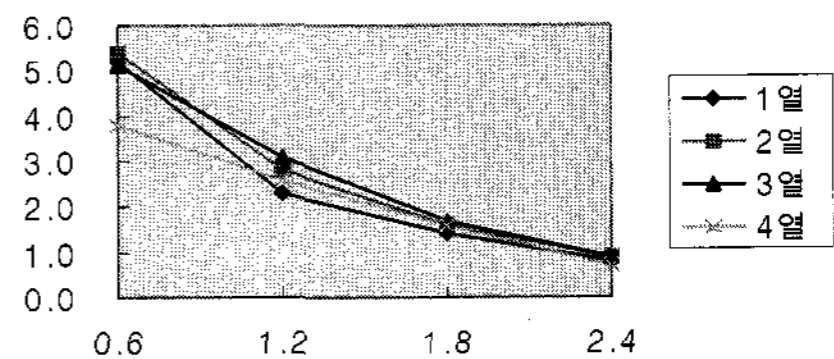
일조조절 장치에 따른 아트리움 건물의 채광성능을 루버각도 및 반사율과 SAR(아트리움의 폭과 바닥의 높이의 비)의 변화에 따라 분석한 결과는 다음과 같다 (그림 14).



a. 루버각도에 따른 채광성능



b. 루버반사율에 따른 채광성능



c. SAR에 따른 채광성능

그림 14. 채광성능분석 예

루버의 각도변화에 따른 채광성능은 루버각도가 45°와 60°에서 비슷한 변화를 보이지만 90°

에는 작업면 위치에 따라 부분적으로 직사일광이 드는 곳이 발생하여 부분변화가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

따라서, 루버각도에 따른 개별제어가 필요할 것으로 판단되며, 일반적으로 SAR이 작을수록 루버각도의 변화에 의한 영향이 증가하는 것으로 분석되었다.

루버의 반사율에 의한 영향은 SAR이 작을수록 증가하며 아트리움 바닥 중앙부에서 영향이 큰 것으로 분석되었다. 또한, 루버 반사율에 따른 채광 성능 변화보다는 각도변화에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었다.

3.3 시뮬레이션에 의한 축소모형실험의 유효성 검증

1) 시뮬레이션 프로그램

채광성능 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 1970년대에 시작되어 80년대 PC의 급속한 보급과 더불어 다양한 프로그램이 개발되어 왔다. 미국에서는 "DOE-2", "Superlite" 및 "Micro-lite" 프로그램 등이 개발되었다.

또한, IEA(International Energy Agency)에 의해 진행중인 연구 프로젝트의 12개 과제 중 하나로서 ADELIN 프로그램이 개발되었다. 이 프로그램은 4개국 연구소의 공동연구로 수행되었으며, 실내 조도 및 휘도분포와 에너지 절약량 및 최대 냉방부하의 감소량을 계산할 수 있다.

ADELIN 프로그램은 5가지 요소로 구성되며 건축모델을 입력하기 위한 "Scribe Modeller", 모델을 입력파일로 전환시키는 "PLink", 광석전달법에 의해 채광성능을 예측하는 "Superlite,와 "Radiance", 그리고 에너지소비량 예측용 "Superlink"와 "Radlink"로 구성된다(그림 15).

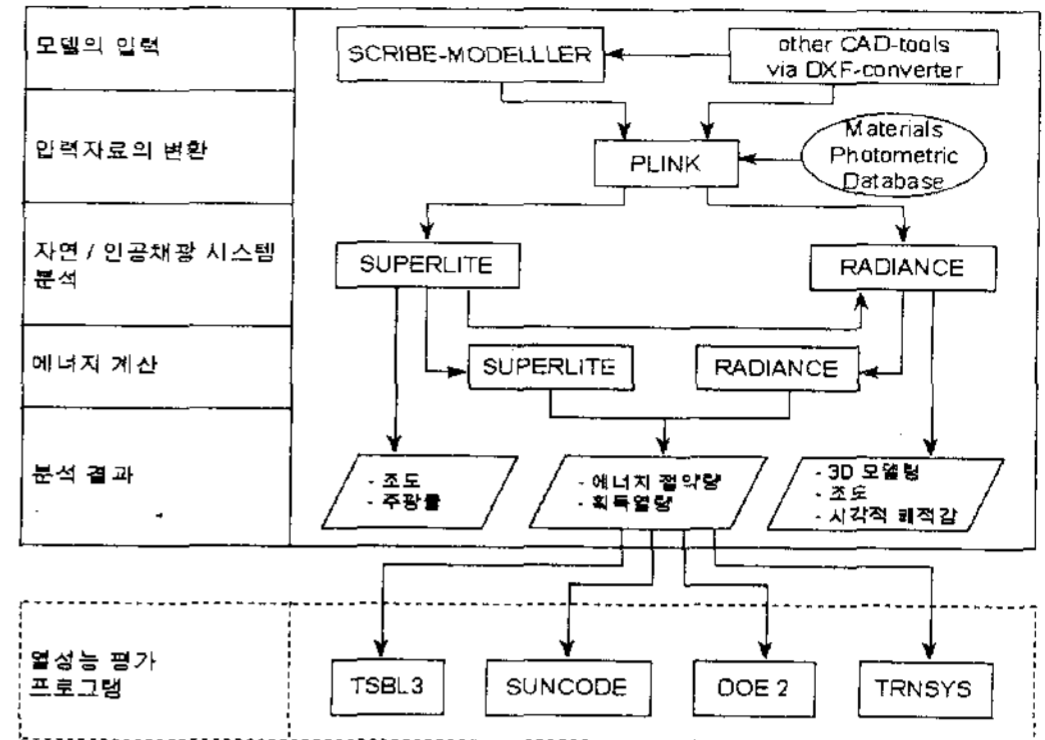


그림 15. ADELIN 프로그램의 구성도

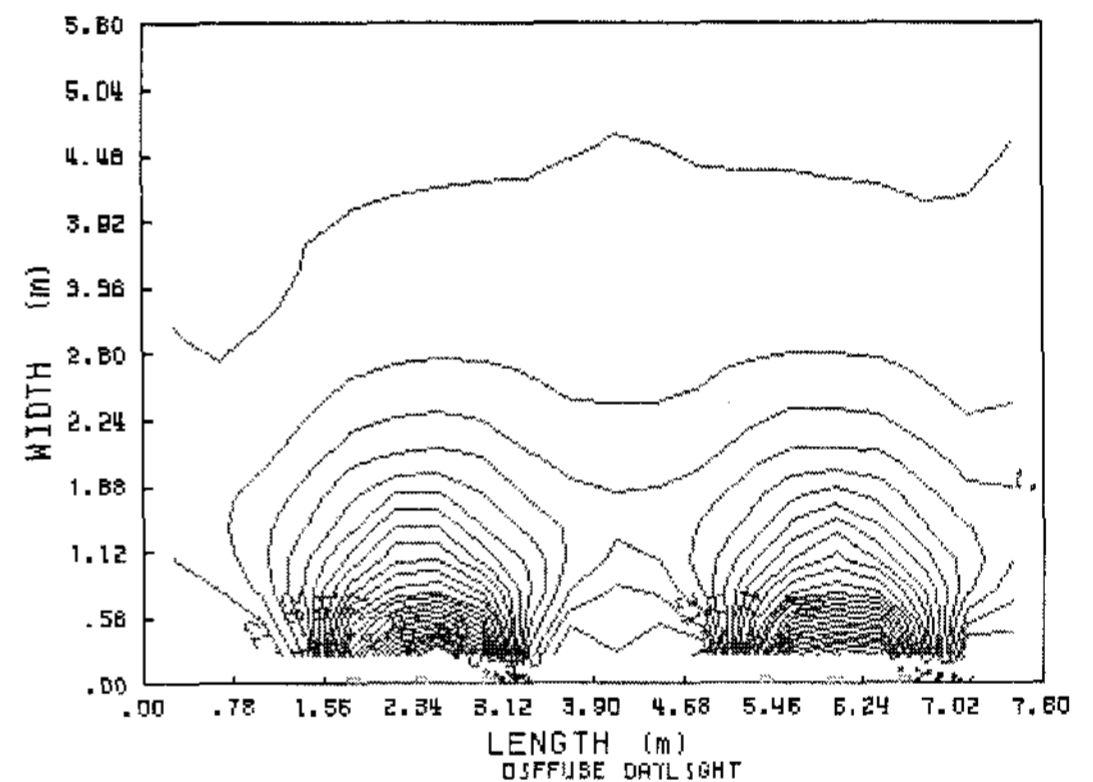


그림 16. 시뮬레이션 실행 예

2) 축소모형실험의 유용성 평가

축소모형실험에 의한 채광성능 분석결과의 유효성을 검증하기 위해서 시뮬레이션 결과와 비교·분석하였다. 시뮬레이션에 의한 유효성 검증은 천창 및 루버형 일조조절 장치를 지닌 아트리움 건물에서 각각 실시하였다.

시뮬레이션의 실행은 축소모형과 같은 조건에서 하지를 기준으로 실행되었다. (표 3, 4)는 천창형 아트리움 건물을 대상으로 축소모형실험의 유효성을 검증하기 위한 실험결과를 나타낸다.

이 때, 축소모형실험의 유용성의 검증은 (식 3)과 같이 오차율에 의해 계산하였다.

$$\text{오차율} = \frac{(\text{축소모형성능} - \text{시뮬레이션성능})}{(\text{시뮬레이션성능}) \times 100} \quad (\text{식 3})$$

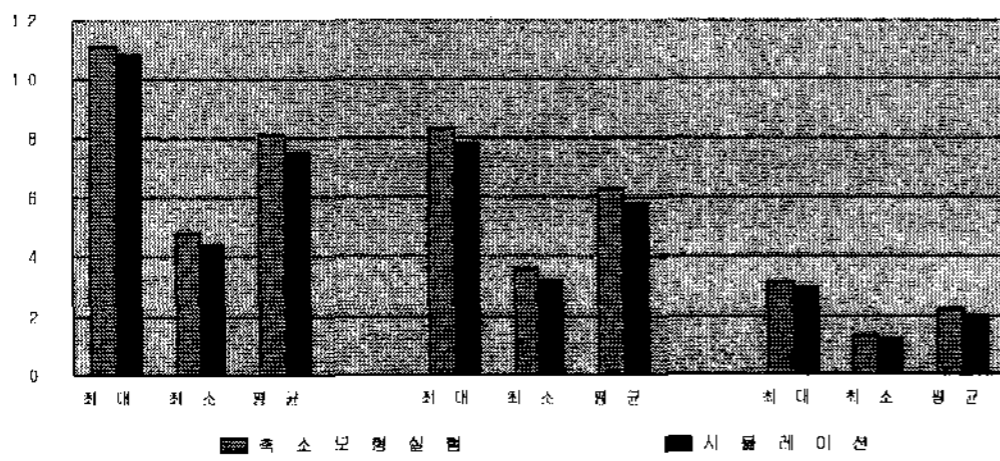
축소모형 실험의 유용성은 최대, 최소 및 평균 주광율을 이용하여 검증하였다. 유용성 검증 결과, 축소모형실험과 시뮬레이션에 의한 채광 성능의 분포특성은 매우 유사한 것으로 분석되었다.

표 3. 축소모형실험결과

천창	투명 피라미드			와플 천장		
	투과율 100%	투과율 80%	투과율 30%	투과율 100%	투과율 80%	투과율 30%
최대	18.6	13.9	5.2	11.1	8.3	3.1
최소	8.7	6.5	2.4	4.8	3.6	1.3
평균	14.3	11.1	4.1	8.1	6.3	2.2

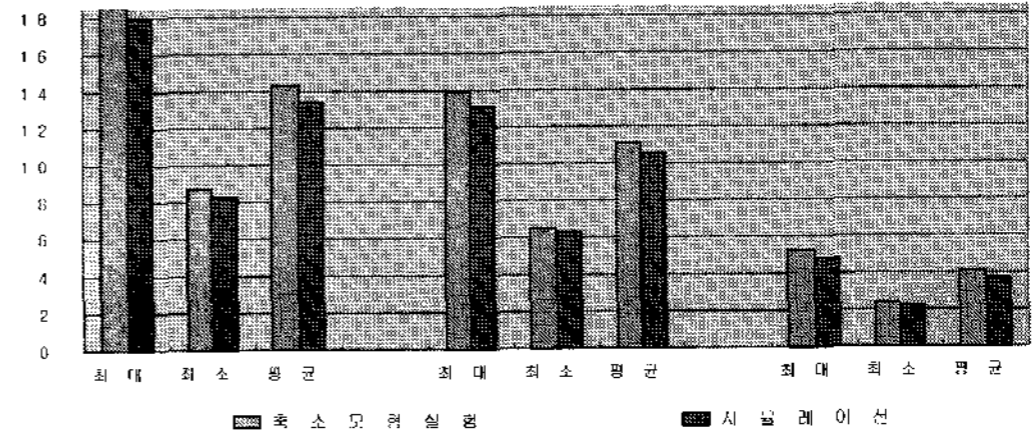
표 4. 시뮬레이션결과

	투명 피라미드			와플 천장		
	투과율 100%	투과율 80%	투과율 30%	투과율 100%	투과율 80%	투과율 30%
최대	18.0	13.1	4.8	10.3	7.8	2.9
최소	8.3	6.3	2.2	4.4	3.2	1.2
평균	13.4	10.5	3.7	7.5	5.8	2.0



투과율100% 투과율80% 투과율30%

그림 17. 축소모형실험의 유용성 검증 (와플 천장)



투과율100% 투과율80% 투과율30%

그림 18. 축소모형실험의 유용성 검증 (투명 피라미드 천장)

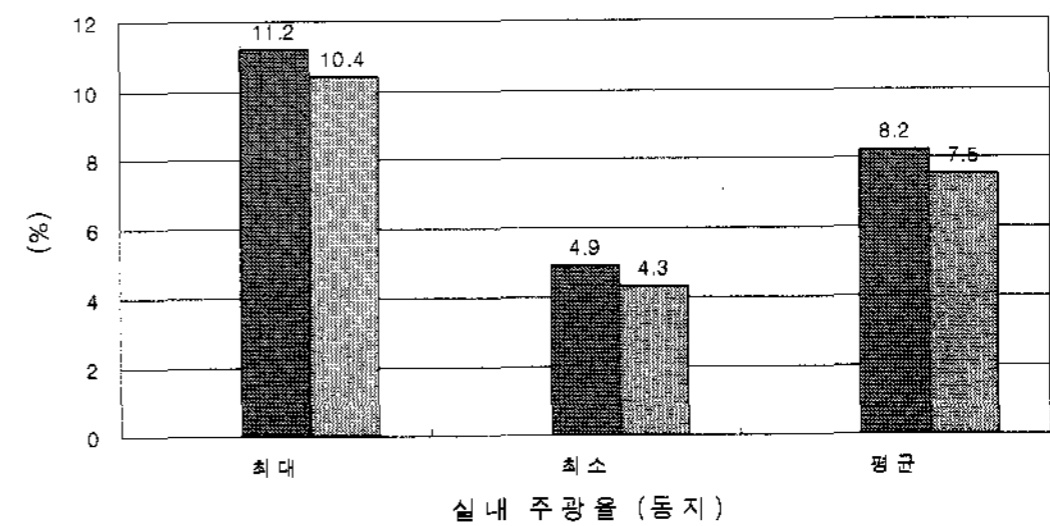
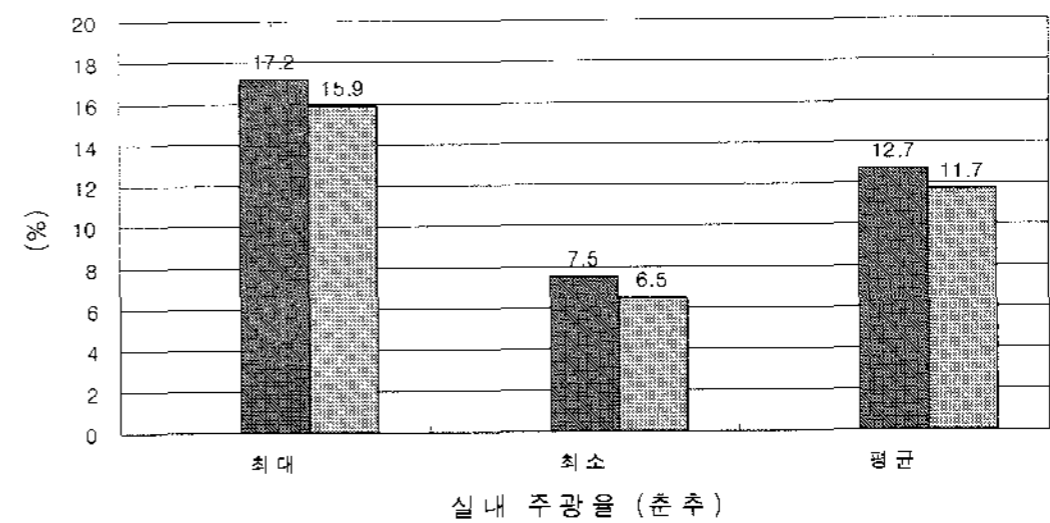
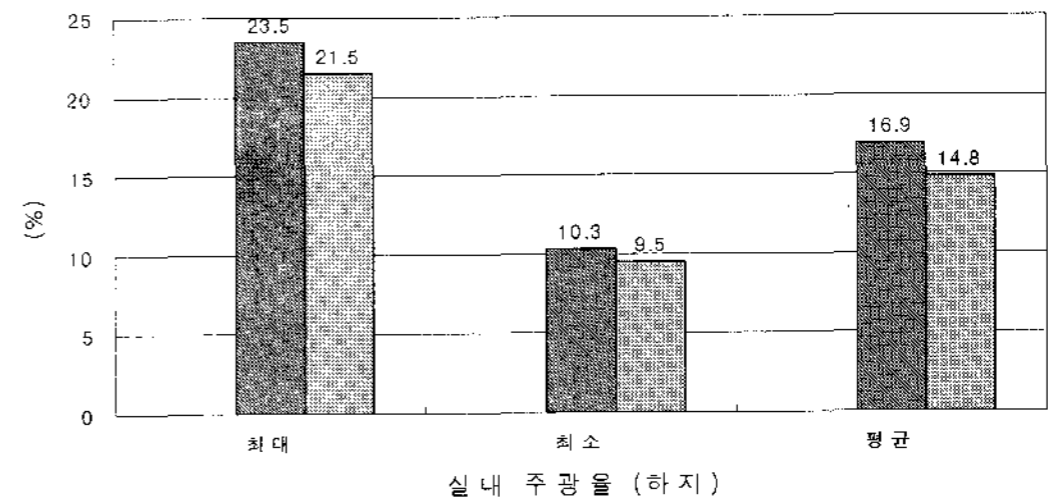


그림 19. 축소모형실험 유용성 검증(루버설치)

또한, 축소모형실험 결과와 시뮬레이션 결과 사이의 오차율은 최소 주광율에서 가장 낮으며, 평균 주광율 오차는 7% 이내로 분석되어 축소모형 실험에 의한 채광성능 분석이 유효한 것으로 검증되었다.

루버형 일조조절 장치를 설치한 아트리움 건물을 대상으로 축소모형실험의 유용성을 검증한 결과는 (그림 18)과 같다. 검증을 위한 실험은 루버 반사율 45%, 각도 50° 로 선정하여 실시하였다.

분석결과, 축소모형실험과 프로그램의 예측결과를 비교하면 최대 주광율은 계절에 따라 7.1~8.5%, 최소 주광율 6.7~8.3%, 그리고 평균 주광율은 7.8~8.4% 오차를 지녀 축소모형실험의 유효성이 검증되었고 동지에 오차가 가장 크게 나타났다.

4. 결론

본 연구는 건물계획 초기단계에 자연광의 도입으로 인한 채광성능을 평가하기 위한 평가방법으로 축소모형실험의 유용성을 검증하였다. 연구결과는 다음과 같다.

① 축소모형은 모형은 외부의 충격에 견딜 수 있는 재료의 선택이 필요하고 상세한 부분까지 배려하여 현실감을 높이며 빛이 스며들지 못하도록 제작하여야 한다. 또한, 기상조건에 따른 보정 및 데이터의 수집에 따른 오차를 최소화하도록 측정계획을 수립하여야 한다.

② 천창형 아트리움 건물을 대상으로 축소모형실험의 유효성을 검증한 결과, 채광성능의 오차가 7% 이내로 분석되어 축소모형실험에 의한 채광성능 평가방법이 유효한 것으로 검증되었다.

③ 루버형 일조조절 장치를 설치한 아트리움 건물을 대상으로 축소모형실험의 유용성을 검증한 결과, 채광성능의 오차는 평균 7.8~8.4%

로 분석되어 축소모형실험이 유용한 것으로 검증되었고 동지에 오차가 가장 큰 것으로 분석되었다.

건축물의 자연채광 성능을 건축계획 초기단계에서 예측하기 위해 축소모형실험은 매우 유용한 평가기법으로 간단하며 신뢰성 높은 측정데이터를 얻을 수 있다. 그러나, 실험결과가 특정 건물에 한정되는 단점을 지니고 있어 시뮬레이션을 병용할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 과학기술부 국가지정연구실사업(과제번호 M1-0104-00-0272)의 지원에 의해서 연구되었음.

참고문헌

- 1) 김정태·정유근, "태양광 제어방식에 따른 아트리움의 채광성능 평가", 대한건축학회 논문집, 15권 9호 통권 131호, 1999. 9.
- 2) ADELIN 2.0 User's Manual, Lawrence Berkely Lab., 2001. 5.
- 3) P. Greenup, J. M. Bell, I. Moor, "The Importance of Interior Daylight Distribution in Buildings on Overall Energy Performance", Renewable Energy, Vol. 22, Issue 1 to 3, 2001. 1~3.
- 4) T. Herzog, "Solar Energy in Architecture and Urban Planning", Prestel, 2000.
- 5) 建築照明の計算法, 日本建築學會, 1998. 9.