

# Modified Split Flux를 이용한 주광률 계산식 적용에 관한 연구

## Application of the Daylight Factor Formula with the Modified Split Flux

윤수인\* · 윤경\*\* · 김강수\*\*\*†

Yun Su-In\*, Yun Gyeong\*\* and Kim Kang-Soo\*\*\*†

(Submit date : 2014. 10. 2., Judgment date: 2014. 10. 6., Publication decide date : 2014. 12. 19.)

**Abstract :** Daylighting has a great effect on people inside the room. It is also closely related to the lighting energy consumption. Daylight factor(DF) is a very important index for evaluation of the daylighting in overcast sky. The objective of this study is to verify the suitability of the Tregenza's Modified Split Flux formula for the calculation of the daylight factor. We compared the daylight factors calculated by two methods; one by a measurement with 1/5 scale model and the other by the Daysim program. We used variables for verification as window wall ratios(WWR) and angles of the sky visible. As a result, daylight factor calculated by Modified Split Flux is similar to the measurement when more daylight enters the inside. And error is significantly increased when the angle of the sky visible is 50°.

**Key Words :** 주광률(Daylight Factor), Modified Split Flux, 모형실험(Scale model testing), 데이심(Daysim), Overcast Sky

### 1. 서 론

#### 1.1 연구의 목적

실내의 자연채광유입은 채실자의 심리적, 신체적인 쾌적도와 관계가 있을 뿐 아니라 실

내 조명에너지 사용량과도 연관성이 깊다.

그러나, 실무자들이 현재 사용되고 있는 주광해석 시뮬레이션 툴은 숙지하는데 시간이 많이 걸려, 주광률 계산을 하는데 어려움을 겪고 있다. 답천공시 주광의 유입률을 나타내는

\*\*\*† 김강수(교신저자) : 고려대학교 건축학과  
E-mail : kskim@korea.ac.kr, Tel : 02-3290-3335  
\*윤수인 : 고려대학교 건축학과  
\*\*윤경 : 고려대학교 건축학과

\*\*\*† Kim Kang-Soo(corresponding author) : Department of Architecture, Korea University.  
E-mail : kskim@korea.ac.kr, Tel : 02-3290-6179  
\*Yun Su-In : Department of Architecture, Korea University.  
\*\*\*Yun Kyeong : Department of Architecture, Korea University.

주광률은 실내의 빛 쾌적에 관한 중요한 지표가 된다고 할 수 있는데<sup>1)</sup>, 수식을 이용해 비교적 간단한 방법으로 주광률을 평가할 수 있는 방법이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수식을 이용하여, 측정이나 시뮬레이션 없이 건축물의 주광률을 계산하여 간이적으로 건축물의 주광평가가 가능하게 하고자 하였다.

## 1.2 연구의 방법 및 절차

### (1) 연구의 방법

본 연구에서는 모형을 이용하여 측정한 값으로 계산한 주광률과, 시뮬레이션 툴을 사용하여 시뮬레이션한 값으로 계산한 주광률을 비교하여 시뮬레이션 툴을 검증하였다. 그리고 앞서 검증한 시뮬레이션 툴로 시뮬레이션한 값으로 계산한 평균 주광률과 Tregenza의 Modified Split Flux 계산식으로 계산한 평균 주광률을 비교하여 Modified Split Flux 계산식에 대한 신뢰도를 증명하는 방법으로 연구를 진행하였다.

본 연구에서 주광률은 실내 조도의 평균값을 외부 조도로 나눈 값인 평균주광률( $DF_{average}$ )로 계산하였다.

### (2) 측정시 천공조건

본 연구에서는 Radiance 프로그램에서 계산된 CIE overcast sky의 default 외부조도인 18,000 lux를 상한선으로 두고, 외부조도가 18,000 lux 이하이고 sky clearness가 1.23 이하인 천공을 대상으로 주광률 분석을 수행하였다. Sky clearness는 측정된 확산일사량과 직달일사량을 이용하여, Perez가 제안한 천공청명도 모델(sky clearness,  $\epsilon$ )로 계산하였다<sup>2)</sup>.

### (3) 시뮬레이션 툴 선정

주광률 계산을 위한 시뮬레이션 툴은 Daysim 프로그램을 사용하였다. Daysim 프로그램은 NRCC (National Research Council Canada)에 의해 개발되었으며, 자연채광 성능을 분석할 수 있는 동적 시뮬레이션 프로그램이다. Daysim 프로그램에는 Radiance와 동일한 계산 알고리즘이 이용되었다<sup>3)</sup>.

## 2. 이론 고찰

### 2.1 선행 연구 고찰

Tregenza<sup>4)</sup>는 1989년 일정한 형태의 장애물이 있는 경우에 국한하여 주광률을 계산할 수 있었던 기존의 Split Flux 식을 변형시켜 다양한 형태의 장애물이 있을 때에도 주광률 평가가 가능한 Modified Split Flux 식을 제안하였다.

E Ng BA<sup>5)</sup>는 2000년 밀도가 높은 도시 환경에서 실내 주광률을 계산할 수 있는 두 가지 식인 CIBSE 계산식과 Modified Split Flux 계산식을 분석하고, 실제 측정값과 비교하여 계산식의 실제 적용 가능성에 대해 평가했다. 그 결과 CIBSE 계산식 보다 Modified Split Flux 계산식이 낮은 오차율로 측정값과 비슷하게 평가되었다.

국내 상황에서는 현재까지 간략한 방법으로 답천공시 실내 주광률을 계산할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 미흡하여 Modified Split Flux 식의 적용성 평가에 관한 연구를 수행하였다.

### 2.2 Modified Split Flux

Modified Split Flux는 Tregenza가 제안한 CIE overcast sky 조건에서 내부 평균 주광률을 예측할 수 있는 식이다. 이 식은 기존의 일정한 형태의 장애물만을 고려할 수 있었던 Split

Flux식을 일정하지 않은 스카이라인에도 적용할 수 있도록 변형한 식이다. Split Flux는 주광률을 직달 성분(Direct Component), 외부 반사 성분(Externally Reflected Component), 내부 반사 성분(Internally Reflected Component)으로 나누어 정의하고 있다. Modified Split Flux 식은 아래와 같다.

$$DF_{Average} = tA_w \frac{C}{A_{fw}} + IRC_{mean} (\%) \quad (1)$$

$$IRC_{mean} = t \frac{A_w}{A} \frac{C\rho_{fw} + D\rho_{cw}\rho_g}{1 - \rho} (\%) \quad (2)$$

여기서,

$A_w$  : Window area  $A$  : Total internal area

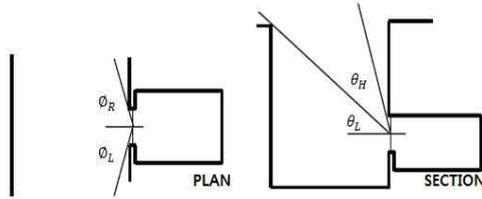


Fig. 1. The definition of sky visible area

$A_{fw}$  : Area of the floor and wall surfaces below the centre-height of the windows, excluding the window wall surfaces

$t$  : Overall transmittance of the glazing, taking into account diffuse glass transmittance and dirt factor

$\rho_{fw}$  : Mean reflectance of the floor and wall surfaces below the centre height of the windows, excluding the window

$\rho_{cw}$  : Mean reflectance of the ceiling and wall surfaces above the centre height of the windows, excluding the window

$\rho_g$  : Mean ground reflectance

$\rho$  : Mean internal reflectance: floor, walls, ceiling, windows

이다.

$C$ 와  $D$ 는 각각 창면 중앙점을 기준으로 위쪽과 아래쪽에서 반사되는 일사 성분과 관계된 상수이다.

$$C = \frac{9}{7\pi} f \left( 1 + \frac{\rho_b}{\pi(1-\rho_0)} g \right) \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$D = \frac{E_g}{2E_h} \times 100 (\%) \quad (4)$$

여기서

$$f = \frac{1}{3} (\sin\Phi_L + \sin\Phi_R) \quad (5)$$

$$\times \left( \frac{\theta_H - \theta_L}{2} + \frac{\sin 2\theta_H - \sin 2\theta_L}{4} \right) \left( - \frac{2\cos^3\theta_H - 2\cos^3\theta_L}{3} \right)$$

$$g = \frac{\pi}{2} - (\sin\Phi_L + \sin\Phi_R) \quad (6)$$

$$\times \left( \frac{\theta_H - \theta_L}{2} + \frac{\sin 2\theta_H - \sin 2\theta_L}{4} \right)$$

$$\rho_0 = \frac{\rho_b + \rho_g}{4} \quad (7)$$

$\rho$  : Mean ground reflectance

$\rho_b$  : Mean reflectance of obstructing buildings

$E_g$  : Illuminance on the ground outside

$E_h$  : Illuminance on a horizontal surface from an unobstructed overcast sky

이다. 상수  $D$ 는 외부 대지의 반사율에 관한 상수로, 일반적으로 25(%)로 둔다<sup>4)</sup>.

### 3. 평가모델의 개요와 시뮬레이션 조건

#### 3.1 평가모델의 개요

본 연구의 평가모델(축소 모형)의 개요는 다음과 같다.

Table. 1 Model conditions

실 크기	540mm(W) × 1000mm(D) × 560mm(천장고)
반사율	천장 79%, 벽 60%, 바닥 23%,
창면적비	50% (Base Model)
창 투과율	100% (no glass)
향	정남향

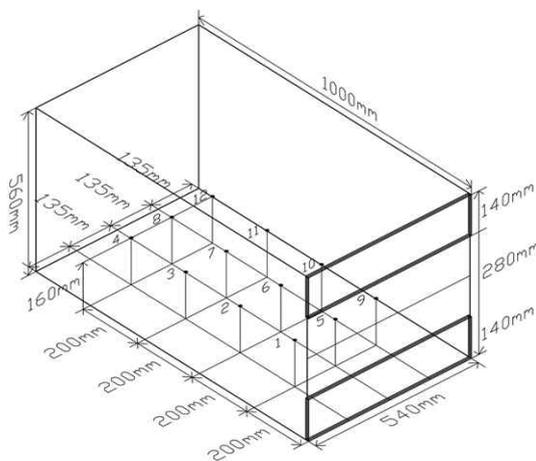


Fig. 2. Model size and sensor location

평가모델은 폭 540mm, 깊이 1,000mm, 천장고 560mm의 1/5 스케일 모델(실제 scale : 폭 2.7m, 깊이 5m, 천장고 2.8m)이다. 반사율은 IESNA Lighting Handbook을 기준으로 페인트를 이용하여 조절한 후 시뮬레이션 모형에 같은 값을 적용하였다<sup>6)</sup>. 반사율은 천장 79%, 벽 60%, 바닥 23%이다. 창면적비는 건축물 에너지 절약 설계기준에서 권장하는 창면적비 최대치인 50%로 설정했고<sup>7)</sup>, 창문은 빛이 투과되면서 생길 수 있는 오차를 줄이기 위해

유리를 설치하지 않고, 투과율 100%로 설정하여 진행했다.

평가 공간에서의 시뮬레이션 틀 검증을 위한 조도 센서는 창면중심으로부터 200mm 간격으로 4개를 바닥으로부터 160mm 높이에 설치하였으며, 이는 실제 스케일에서 창면으로부터 1m간격, 바닥으로부터 0.8m 높이에 설치하는 것과 같다. 이는 Fig. 2에서 센서 위치 5번부터 8번까지이다.

Tregenza의 Modified Split Flux 계산식 검증을 위한 시뮬레이션은 평균주광률을 계산해야 하므로 창면으로부터 200mm 간격, 가로 폭으로는 135mm 간격의 그리드 형태로 총 12개의 센서를 바닥으로부터 160mm 높이에 설치하였다. 이는 실제 스케일에서 창면으로부터 1m간격, 가로 폭으로 0.675m간격, 바닥으로부터 0.8m 높이에 설치하는 것과 같다. 이는 Fig.2에서 센서 위치 1번부터 12번까지이다.

#### 3.2 측정과 시뮬레이션 조건

Table. 2 Measurement and simulation conditions

날짜	6/5 - 7/17
장소(측정)	K대학교 공학관 옥상
시간 및 간격	AM 9 - PM 6 / 1분 간격
외부조도조건	18,000 lux 이하
Sky Clearness	1.23 이하
샘플 개수	329개

조도측정은 K대학교 공학관 옥상에서 6월 5일부터 7월 17일 까지 오전 9시부터 오후 6시까지 1분 간격으로 진행하였다. 측정된 데이터 중 외부 수평 진조도가 18,000 lux 이하인 동시에 Sky Clearness가 1.23 이하인 담천공 데이터는 329개였고, 그 값을 평균하여 주광률을 계산했다. Sky Clearness 계산을 위한 일사량

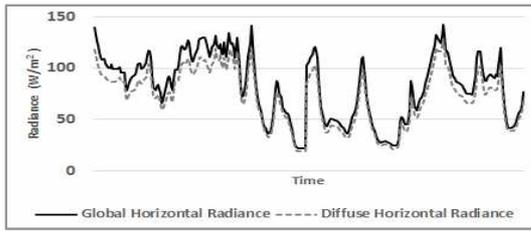


Fig. 3. Global Horizontal Radiation and Diffuse Horizontal Radiation of measurement

측정은 조도측정과 같은 조건에서 진행하였고, 그 측정값은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 x축은 측정기간 중 Sky Clearness가 1.23이고 외부 수평 전조도가 18,000 lux 이하인 분 단위의 측정값을 시간 순으로 나열한 것으로 그 시간간격은 일정하지 않다. 측정에 사용된 모형과 센서 위치는 Fig. 4와 같다.



Fig. 4 Scale model

Daysim 프로그램은 weather file을 입력하여 dynamic simulation이 가능하다. 4.1장에서 측정 시점과 같은 천공 상태를 적용하여 시뮬레이션하기 위해 건물 옥상에서 1분 단위로 실제 측정한 일사량 값을 직접 입력해 수정된 weather file을 이용하여 시뮬레이션을 진행한 후 주광률 계산에 활용했다.

4.2의 Modified Split Flux 식의 검증을 위한 시뮬레이션은 Daysim 프로그램 검증 때와 마찬가지로 측정된 날짜의 weather file의 일사량을 측정된 일사량 값으로 수정하여 1분 단위로 시뮬레이션 하였는데, 측정이 일정 기간 동안만 이루어졌으므로 결과의 신뢰도를 높이

기 위해 서울의 연간 기상 데이터를 이용하여 1시간 단위로 시뮬레이션을 추가로 진행하였다. 이 때 창면적비와 천정(Zenith)수직선부터 장애물까지의 각도( $\theta_H$ )를 변수로 하여 Modified Split Flux 식과 Daysim의 결과를 비교하였다. 창면적비와 장애물의 각도는 Fig. 5, Fig. 6과 같다.

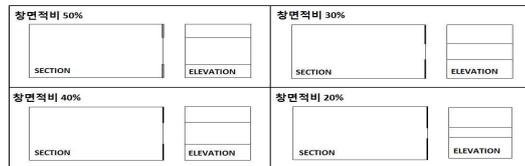


Fig. 5 Variables 1 - The ratios of window in section and elevation

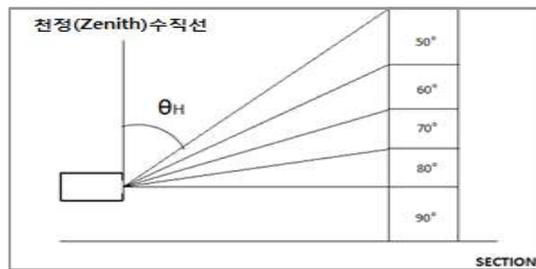


Fig. 6 Variables 2 - Angles of the sky visible in section

## 4. 결과 분석

### 4.1 측정과 Daysim을 이용해 계산한 주광률 비교를 통한 시뮬레이션 틀 검증

외부 수평면 전조도 측정과 Daysim 시뮬레이션 결과 값을 비교한 그래프는 Fig. 7과 같고, 실내 조도 측정과 Daysim의 실내조도의 평균을 비교한 그래프는 Fig. 8과 같다.

시뮬레이션결과와 정확도 분석을 위해 M&V Guideline에서 제안한 MBE(Mean Bias Error), RMSE(Root Mean Square Error)분석을 하였다<sup>8)</sup>. 외부 수평면 전조도의 오차율은 MBE - 4%, Cv(RMSE) 6%이고 실내 평균 조도의 오차율은

MBE - 1%, Cv(RMSE) 24%로 오차율이 허용 가능한 범위에 있다고 할 수 있다(Table. 3).

Table. 3 Error of daysim smulation

Sensing Position	MBE (%)	Cv(RMSE) (%)
Global Horizontal Illuminance	-4	6
Average of Indoor Illuminance	-1	24

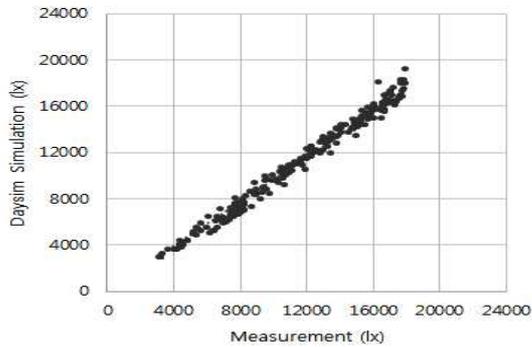


Fig 7 Comparison of global horizontal illuminance between measurement and daysim simulation

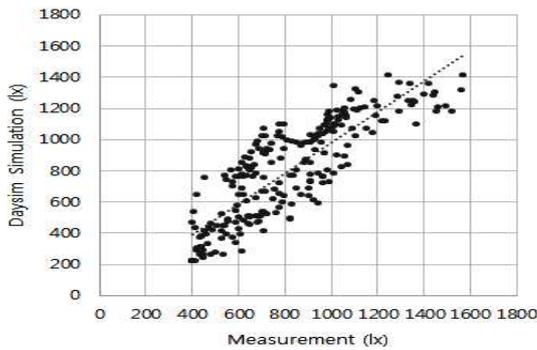


Fig. 8 Comparison of average of indoor illuminance between measurement and daysim simulation

측정된 값으로 계산한 주광률의 평균은 7.46% 이고, Daysim 시뮬레이션 결과 값으로 계산된 주광률의 평균은 7.46%이다. 이때 오차율은 MBE가 -2%, Cv(RMSE)가 27%이다(Table. 4). 이는 M&V에서 제안한 오차율 허용범위에 든

다고 할 수 있다<sup>2)</sup>.

Table. 4 Daylight factor(DF) of measurement and daysim

	DF(%)	Error	
Measurement	7.46	MBE	-2%
Daysim	7.46	Cv(RMSE)	27%

따라서 본 논문에서 이용하고자 하는 Daysim 프로그램은 주광률 평가에 적합한 것으로 검증되었다.

#### 4.2 Daysim을 이용해 계산한 주광률과의 비교를 통한 Modified Split Flux 식 검증

창면적비(WWR)와 장애물과의 각도( $\theta_H$ )를 변수로 하여 평균 주광률( $DF_{average}$ )을 Daysim 을 이용하여 두 가지 방법으로 시뮬레이션 하여 계산한 값과 Modified Split Flux를 이용해 계산한 값을 비교하였다.

창면적비를 변수로 하고 서울의 연간 기상 데이터를 이용하여 Daysim으로 시뮬레이션 한 주광률(Daysim 1), 측정 기간 동안 측정된 일사량을 weather file에 입력하여 수정한 후 시뮬레이션 한 값으로 계산한 주광률(Daysim 2)과 Modified Split Flux를 이용해 계산한 주광률을 비교한 그래프는 Fig 9와 같고, 주광률의 평균과 오차율은 Table 5와 같다.

Table. 5 Average daylight factor according to the Window to Wall Ratio (WWR)

		WWR				
		50%	40%	30%	20%	
Daysim 1 Simulation (Whole year weather data)	DF Average(%)	7.63	6.55	5.16	3.46	
	Error	MBE	-7.4%	-13.9%	-18.1%	-18.5%
		Cv(RMSE)	11.4%	16.3%	20.1%	20.6%
Daysim 2 Simulation (Measured period 6/9-7/17)	DF Average(%)	7.04	6.07	4.78	3.21	
	Error	MBE	0.3%	-7.2%	-11.6%	-12.1%
		Cv(RMSE)	3.4%	7.8%	12.3%	12.4%
Modified Split Flux(%)		7.06	5.64	4.23	2.82	

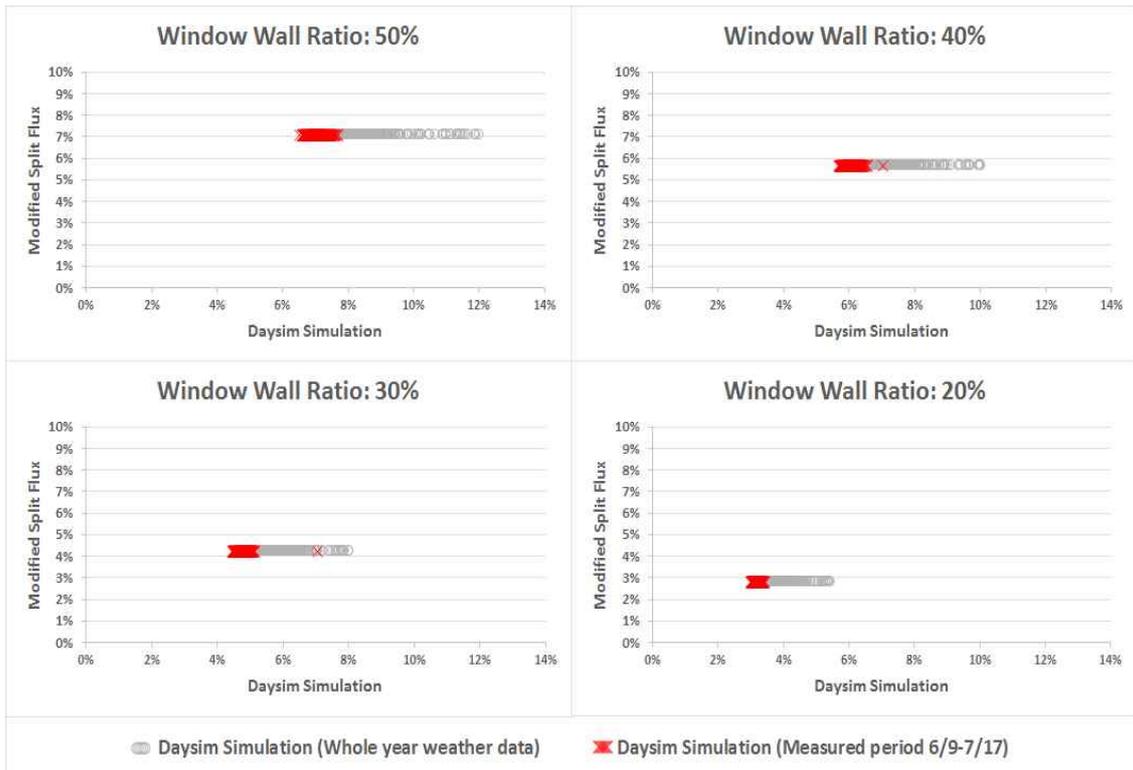


Fig 9 Average daylight factor according to the window wall ratio

Daysim 1, Daysim 2에 의한 주광률 값이 Modified Split Flux로 계산한 주광률 값과 각각 유사하다는 것을 알 수 있다(Fig 9). 두 가지 방법으로 진행한 시뮬레이션에서 계산된 주광률은 모두 창면적비가 클 때 오차율이 작았으며, 창면적비가 줄어들수록 오차율도 커지는 경향이 있었다(Table 5).

장애물의 각도( $\theta_H$ )를 90°부터 50°까지 변화시키면서 서울의 연간 기상데이터로 시뮬레이션 하여 계산한 주광률(Daysim 1), 측정된 일사량 값으로 weather file을 수정하여 시뮬레이션한 주광률(Daysim 2)과 Modified Split Flux를 이용해 계산한 주광률을 비교한 그래프는 Fig 10과 같고, 주광률의 평균과 오차율은 Table 6과 같다.

Table. 6 Average Daylight Factor according to angle of the area of sky visible

장애물각도( $\theta_H$ )		90°	80°	70°	60°	50°	
Daysim 1 Simulation (Whole year weather data)	DF Average(%)	7.60	6.91	5.67	4.27	2.97	
	Error	MBE	-7.1%	-9.5%	-11.1%	-20.0%	-50.8%
		Cv(R MSE)	11.1%	12.1%	12.9%	20.6%	50.8%
Daysim 2 Simulation (Measured period 6/9-7/17)	DF Average(%)	7.03	6.32	5.12	3.82	2.67	
	Error	MBE	0.4%	-1.2%	-1.6%	-10.4%	-45.4%
		Cv(R MSE)	3.4%	4.6%	6.1%	12.5%	45.8%
Modified Split Flux(%)		7.06	6.25	5.04	3.42	1.46	

장애물의 각도( $\theta_H$ )를 변수로 지정했을 때는 창면적비를 변수로 지정했을 때와 마찬가지로 대부분 유사한 주광률의 결과를 나타내었으며, 각도( $\theta_H$ )가 클수록(장애물의 높이가

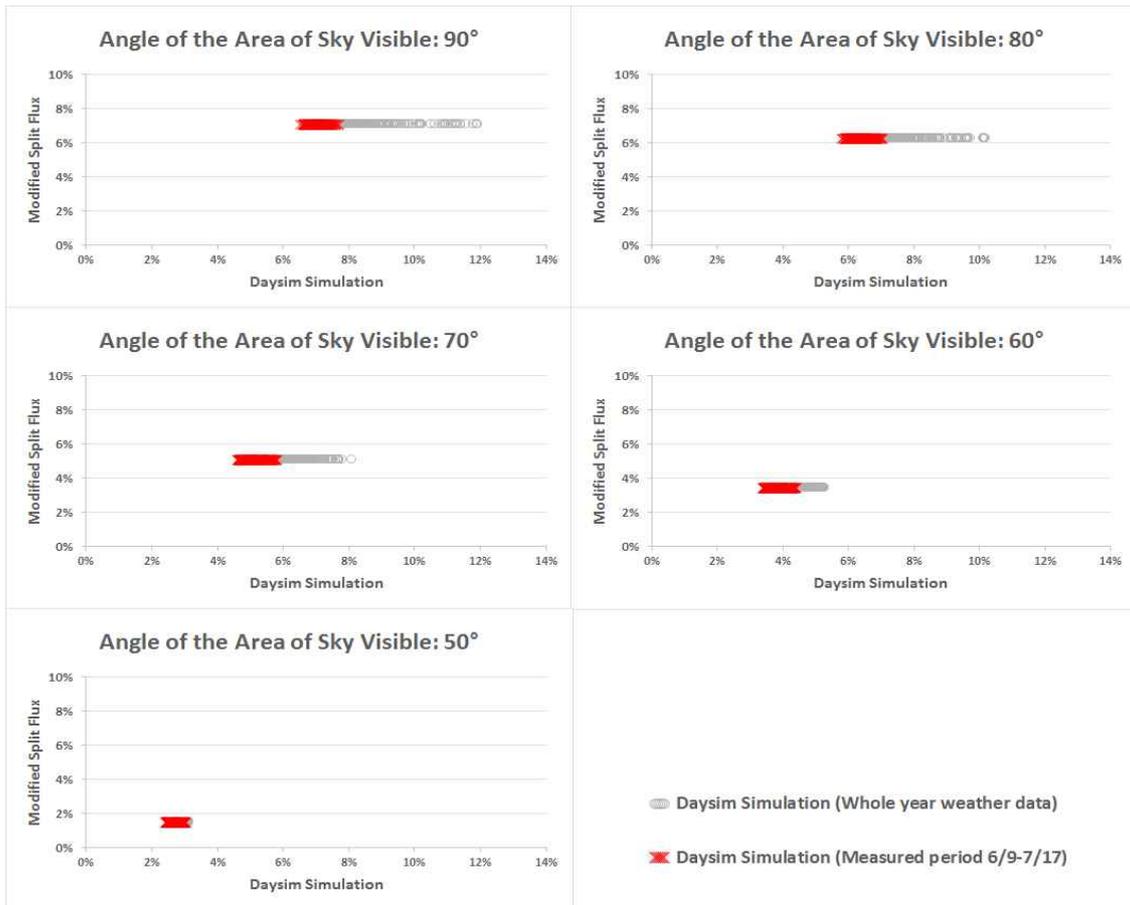


Fig. 10 Average Daylight Factor according to angles of the sky visible

낮을수록) Modified Split Flux로 계산한 주광률 값과 유사했다.

창면적비를 변수로 두었을 때와 장애물 각도를 변수로 두었을 때 모두 측정된 일사량으로 weather file의 일사량을 수정하여 시뮬레이션(Daysim 2)한 것이 서울 기상 데이터를 이용하여 연간 주광률을 시뮬레이션 한 결과(Daysim 1)보다 오차율이 낮아, Modified Split Flux 식은 측정된 값으로 weather file을 수정한 값에 더 가까운 것을 알 수 있었고, 기상 데이터를 이용한 연간 주광률(Daysim 2)과도 오차율이 크지 않아 Modified Split Flux 식은

연간 주광률의 평균과 비슷한 값을 계산할 수 있다고 할 수 있다. 단 천정(Zenith) 수직선부터 장애물까지의 각도( $\theta_H$ )가 50°일 때는 MBE, Cv(RMSE) 모두 증가하는 경향이 있어, 장애물 각도가 50°보다 작아질 경우(장애물의 높이가 높아질 경우)에는 추가적인 시뮬레이션이 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기초설계 단계에서 담천공시 건축물의 주광률 평가를 할 수 있는 Modified

Split Flux 계산식에 대한 평가와 활용범위에 대한 연구를 수행하였으며 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) Daysim 프로그램의 실외, 실내 조도평가에서 외부수평면조도의 경우 MBE -4%, Cv(RMSE) 6%이며, 실내조도 평균값의 경우 MBE -1%, Cv(RMSE) 24%로 허용 가능한 수준으로 평가할 수 있고, 주광률의 평균한 값도 MBE -2%, Cv(RMSE) 27%로 유사하여 Daysim은 주광률 평가 연구에 적절하게 이용될 수 있음이 검증되었다.
- (2) Modified Split Flux는 서울 기상데이터를 이용하여 연간 시뮬레이션 하여 평균을 계산한 주광률(Daysim 1)보다는 측정된 일사량으로 weather file의 일사량을 수정하여 1분 단위로 시뮬레이션 한 주광률(Daysim 2)의 오차율이 더 작게 계산되었지만 두 값의 차이는 크지 않았다. 즉, Modified Split Flux는 실제 측정값에 더 근사한 주광률 값을 계산할 수 있다.
- (3) Modified Split Flux 계산식은 창면적비가 낮아질수록 오차율은 커지는 경향이 있었고, 장애물 각도가 작을수록 오차율이 커지는 경향이 있었다. 두 경우 모두 실내로 유입되는 일사량이 줄어들수록 주광률의 절대값이 작기 때문에 오차율이 커지는 경향을 보인다.
- (4) 천정(Zenith) 수직선으로부터 장애물의 각도( $\theta_H$ )가  $50^\circ$ 일 경우에는 장애물의 높이가 높아 계산식에 대한 신뢰도가 저하되므로 추가적인 시뮬레이션 툴을 이용하여 실내 주광평가를 해야 할 필요성이 있다.
- (5) Modified Split Flux식은 Split Flux식을 발전시킨 식으로 담천공 시 외부 장애물의 크기 등을 보다 효과적으로 시뮬레이션 할 수 있다. 앞으로의 연구에서는 장애

물의 각도가  $50^\circ$  이하인 경우에 대하여 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A2 A10005456)

## 참 고 문 헌

1. Yoon, K.C, Yun, G, Kim, K. S., Comparison of Measurement and Calculation Models of Solar Luminous Efficacy for All Sky Conditions in Seoul, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 6, 2011.
2. Richard Perez, Pierre Ineichen, Joseph Michalsky, Modeling Daylight Availability And Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, 1990.
3. Reinhart CF, Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design, Harvard University, 2010.
4. Tregenza P.R., Modification of the Split Flux Formulae for Mean Daylight Factor and Internal Reflected Component with Large External Obstructions, Lighting Research and Technology, 1989.
5. E Na BA, A Simplified Daylighting Design Tool for High-Density Urban Residential Buildings, International Journal of Lighting Research & Technology, 2000.
6. IESNA, The IESNA Lighting Handbook (Ninth Edition ed.), 2000, ch11.
7. 국토해양부, 건축물의 에너지절약 설계기준 해설서, 에너지관리공단, 2011, p96.
8. M&V guidelines, Measurement and Verification for Federal Energy Projects version 3.0, US Department of Energy, 2008, 4-20~4-22.