

수직장방형 광덕트의 광속전달율의 예측을 위한 수치모델의 개발 및 검증

The Development and Validation of a Numerical Model to Predict Luminous Flux Transfer Ratio of Vertical Rectangular Daylight Duct Systems

○ 서 광 범*, 송 규 동**
 Seo, Kwang-Bum, Song, Kyoo D.

ABSTRACT

Daylight duct systems and atria are important and necessary design features for underground spaces which are increasingly developed and utilized to enhance the land use of congested urban areas. However, building designers face obstacles in properly designing those daylighting systems mainly due to the lack of easy-to-use and accurate design/evaluation tools. The goal of this study is to develop design/evaluation tools and guidelines of daylighting systems for underground and/or atrium spaces which can be easily used by building designers in the early stage of design process. The current paper presents the developed numerical model to predict the luminous flux transfer ratio of vertical rectangular daylight duct systems that can take into account both diffuse skylight and direct sunlight effects. The accuracy of the numerical model was validated through scale model measurements under various skies with different solar angles. Results show that the percent differences between calculated values and field measured values were less than ± 5 percent.

1. 서론

근래 들어 우리나라에서도 아트리움 건축과 지하공간의 활용에 점점 관심이 고조되고 있다. 최근에 건설된 대규모 건물들은 로비공간으로서 아트리움 방식을 채용하는 사례가 점점 늘어나고 있으며 이러한 추세는 앞으로도 지속적으로 증가될 전망이다(Bednar, 1986). 또한, 고층건물에 의한 도심지의 과밀 현상을 억제하기 위해 정책적인 차원에서 적극적으로 지하공간을 개발하여 이용하려는 움직임이 일고 있다(Sterling and Carmody, 1993). 특히, 도심지에 건설되는 지하공간은 자연채광과 통풍 등 건축환경적으로 불리한 점을 갖고 있지만 아트리움 방식과 설비형 자연채광 시스템을 채택함으로써 이러한 불리한 점을 상당히 극복할 수 있게 된다. 그러나 건물설계자들이 직면하고 있는 가장 큰 문제점은 다양한 종류의 아트리움 방식과 설비형 자연채광 시스템의 효과를 신속, 정확하게 평가할 수 있는 도구가 개발되고 있지 않다는 것이다.

본 연구에서는 아트리움 방식과 자연채광 시스템에서 많이 응용될 수 있는 수직장방형 광덕트의 직사일광 및 확산천공광에 의한 자연채광 효과를 신속, 정확하게 평가할 수 있는 광속전달율 계산 수치모델을 개발하였다. 또한, 모형 실험을 통해 본 연구에서 개발된 수치모델의 그 정확성에 대해 검토하였다. 본 연구에서 개발된 수치모델은 아트리움의 상호시스템으로 많이 채택되는 장방형 광정(Light Well)과 지하공간의 자연채광을 위한 광덕트 시스템의 광속전달율, 즉, 상부 입구에서의 입사광속(F_{in})에 대한 하부의 출력광속(F_{out})의 비율을 다양한 천공상태에 대해 정확하게 계산할 수 있도록 되어 있다.

2. 광속전달율 수치모델

2.1 수치모델의 개요

본 수치모델은 유한요소해석법(Robins, 1986)을 적용한 것으로서 광속전달율을 계산하기 위해 광덕트 내면을 다수의 그리드요소로 나누고, 모든 그리드요소는 일정한 반사율을 지닌 확산반사를 일으키는 표면으로 가정하고 있다. 전달된 광속은 상호반사성분과 직접성분으로 구분하여 계산하

는데, 여기서 상호반사성분은 직사일광 및 확산천공광이 하부의 출구에 직접 도달하지 않고 덕트 내면에서 상호반사를 한 다음 하부의 출구에 도달하는 성분을 말하며, 직접성분은 직사일광 및 확산천공광이 덕트 내면에 부딪히지 않고 직접 하부의 출구에 도달하는 성분을 말한다. 그림 1은 수치모델의 구성과 흐름도를 보인 것이다.

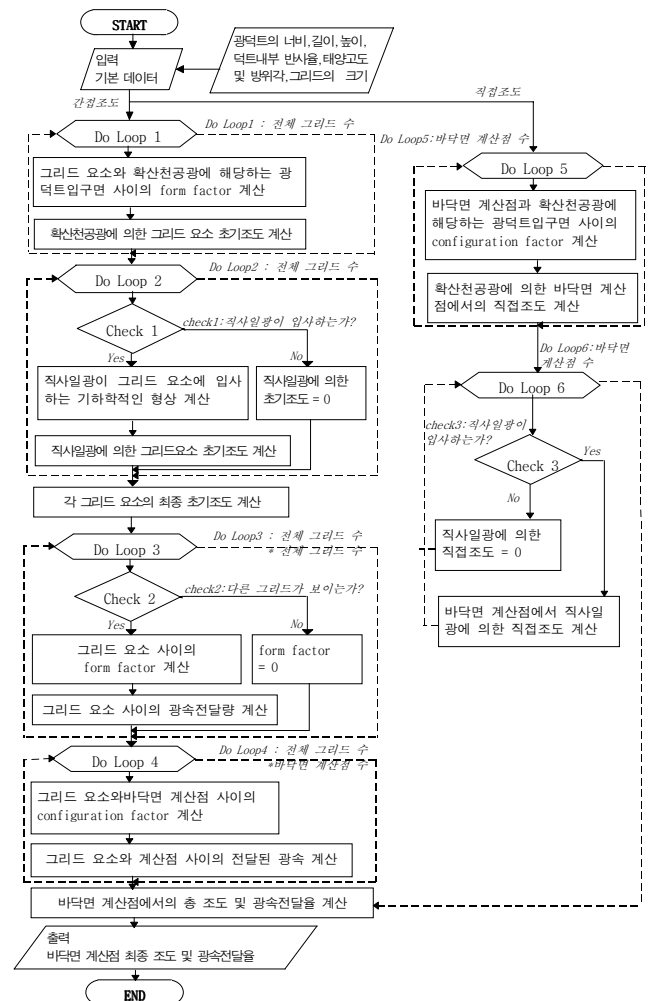


그림 1. 수치모델의 구성 및 흐름도

* 정희원, 한양대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
 ** 정희원, 한양대학교 건축공학과 조교수, 건축학박사

본 연구는 한국과학재단의 '96 핵심전문연구지원비에 의해 수행되고 있음.

2.2 상호반사성분에 의한 조도계산

2.2.1 직사일광에 의한 그리드요소의 초기조도 결정

직사일광에 의한 광덕트 내면 그리드요소의 초기조도는 태양의 고도 및 방위각과 덕트의 기하학적 형상의 관계를 고려하여 계산한다. 그림 2와 그림 3은 다양한 태양고도와 방위각에 대해서 직사일광이 덕트 내부에 들어오는 형상을 표현한 것이다.

그림 2에서 태양입사각과 평행한 바닥면에서의 단면길이 l_y 는 그림 3(a)로부터 식 (1)의 관계를 도출할 수 있다.

$$l_y = \frac{l_E}{\cos \phi} \quad (1)$$

단, l_E : 덕트의 길이 [mm], ϕ : 태양 방위각 [°]

그림 2와 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 태양의 고도에 따라 광덕트 표면에 입사하는 직사일광의 형상은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 직사일광이 수직 벽면에만 도달하는 경우(Case 1)이며, 둘째는 바닥면과 수직 벽면에 동시에 도달하는 경우(Case 2)이다. 두가지 경우에 대해서 수직 벽면에 도달하는 길이 S_h 와 바닥에 도달하는 길이 S_f 는 각각 식 (2)와 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{(Case 1): } \alpha &= \alpha_1 \\ S_h &= S_{h1} = l_y \times \tan \alpha \\ S_f &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{(Case 2): } \alpha &= \alpha_2 \\ S_h &= S_{h2} = H \\ S_f &= (l_y \times \tan \alpha - S_{h2}) \times \tan(90^\circ - \alpha) \\ S_f &= S_f \times \cos \phi \end{aligned} \quad (3)$$

단, α : 태양의 고도 [°], H: 광덕트의 높이 [mm]

Case 1의 경우에는 광덕트 내부 표면에 직사일광이 입사하여 생기는 그림자 선인 z_1 , z_2 및 z_3 를 각각 y축과 z축에 대한 식 (4), 그리고 x축과 z축에 대한 식 (5)와 (6)과 같이 일차원 방정식으로 표현할 수 있다.

$$z_1 = \frac{S_h}{l_E} \cdot y \quad (4)$$

$$z_2 = S_h \quad (5)$$

$$z_3 = -\frac{S_h}{(l_S - l_x)} \cdot (y - l_x) \quad (6)$$

여기서, l_x 의 값은 다음과 같은 방법에 의해 구할 수 있다. 그림 3(a)에서 직선 y_1 은 태양이 입사하는 방향의 축을 Y_s 라 하고 직각방향을 X_s 라 설정할 경우 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$y_1 = \tan(90^\circ - \phi) \cdot x_s + b \quad (7)$$

직선 y_1 이 지나가는 점 P_1 의 좌표인 $(-l_s \cdot \cos \phi / 2, l_s \cdot \sin \phi / 2)$ 를 식 (7)에 대입하면 미지의 수 b를 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

$$b = l_s \cdot \sin \phi + \tan(90^\circ - \phi) \cdot \left(-\frac{l_s}{2}\right) \cdot \cos \phi \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 식 (9)를 얻을 수 있

다.

$$y_1 = \frac{\cos \phi}{\sin \phi} \cdot x_s + \frac{l_s}{2} \cdot \frac{1}{\sin \phi} \quad (9)$$

같은 방법으로 직선 y_2 의 방정식을 구하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$y_2 = -\tan \phi \cdot x_s + \frac{l_E}{2} \cdot \frac{1}{\cos \phi} \quad (10)$$

위에서 구한 두 직선 y_1 과 y_2 가 만나는 점의 X_s 축상의 좌표 x_s 는 식 (11)을 사용하여 구할 수 있다.

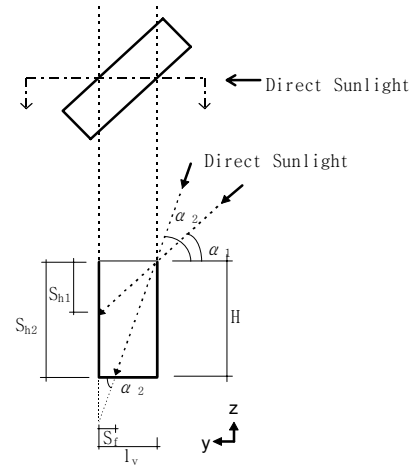


그림 2. 직사일광이 입사하는 광덕트의 단면

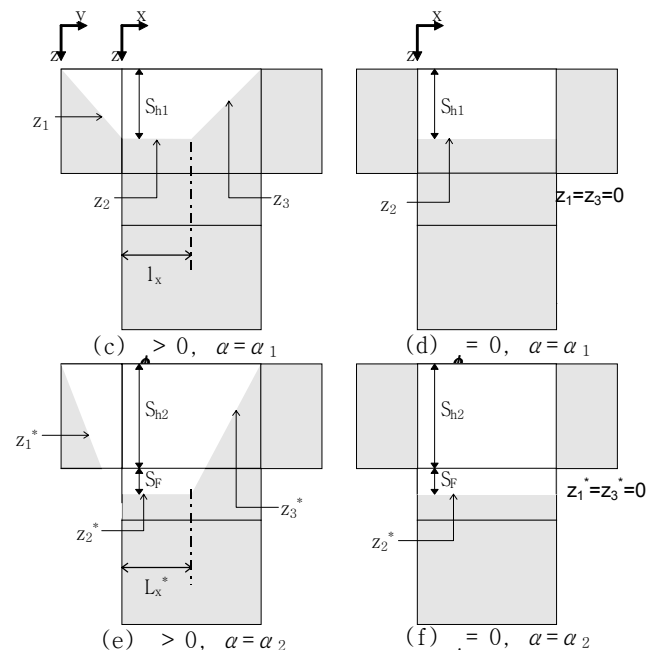
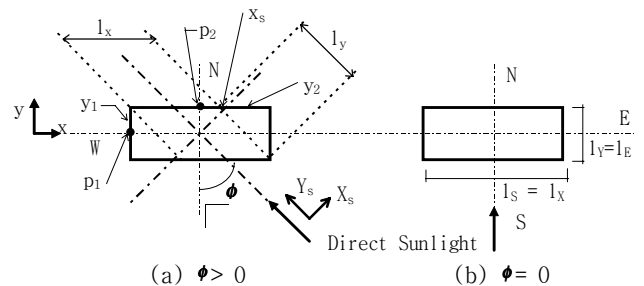


그림 3. 다양한 태양 고도 및 방위각에 대해 광덕트 내면에 직사일광이 들어오는 형상

$$x_s = \frac{1}{2}(\sin \phi \cdot l_E - \cos \phi \cdot l_S) \quad (11)$$

결과적으로, l_x 는 식 (12)로 구할 수 있다.

$$l_x = \frac{2|x_s|}{\cos \phi} \quad (12)$$

Case 2의 경우 덕트 내부 표면에 직사일광이 입사하여 생기는 그림자 선인 z_1^* , z_2^* 및 z_3^* 는 각각 y축과 z축에 대한 식 (13), 그리고 x축과 z축에 대한 식 (14)와 (15)와 같이 일차원 방정식으로 표현될 수 있다.

$$z_1^* = \frac{S_v}{(l_E - S_F)} \cdot y \quad (13)$$

$$z_2^* = S_{h2} + S_F \quad (14)$$

$$z_3^* = -\frac{S_{h2} + S_F}{(l_S - l_x^*)} \cdot (x - l_x^*) \quad (15)$$

여기서, l_x^* 는 식 (16)으로 구할 수 있다.

$$l_x^* = l_x + \frac{l_E}{2} \tan \phi \quad (16)$$

단, x_s 값이 0 이하가 되는 경우, 즉, l_x 가 음의 길이를 갖는 경우 l_E 는 l_S , l_S 는 l_E , ϕ 는 $(90^\circ - \phi)$ 로 치환하여 동일한 계산식을 적용하면 된다. 덕트 내면에 설정한 단위 그리드요소로 직사일광이 입사하는 형상은 그림 4에서 보여준 것처럼 총 7가지의 경우로 구분될 수 있다. 그리고 각 그리드요소의 초기조도(E_{element_i})는 각각의 좌표값과 직선의 방정식으로 그 형상을 판단하여 식 (17)에 의해 계산한다.

$$E_{\text{element}_i} = \frac{A_{\text{sun}_i}}{A_{\text{element}_i}} \times E_{dv} \times \cos \phi \quad (17)$$

- 단, A_{sun_i} : 단위 그리드요소가 직사일광에 노출되는 면적 [m^2]
- A_{element_i} : 단위 그리드요소의 면적 [m^2]
- E_{dv} : 직사일광의 정남향 수직면 조도 [lx]
- ϕ : 태양 방위각 [$^\circ$]

식 (17)에서 단위 그리드요소가 직사일광에 노출되는 면적은 식 (4)~(6), (13)~(15)를 이용하여 각 요소의 좌표값을 가지고 그림 4에서 보인 7가지의 경우 중 어느 형상에 해당하는지 판단하여 구할 수 있다. 여기서 직사일광의 외부 수직면 조도는 식 (18), (19) 및 (20)(The IES Calculation Procedures Committee, 1984)을 이용하여 구할 수 있다.

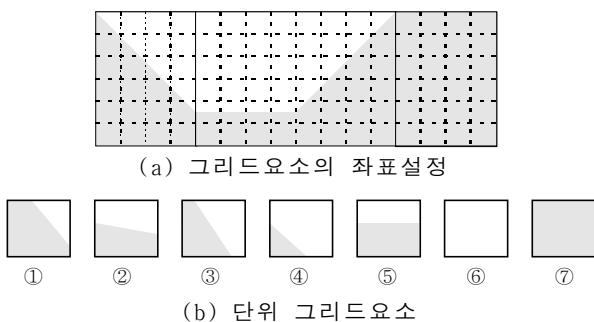


그림 4. 직사일광에 노출된 단위 그리드요소의 7가지 형상

$$E_{dh} = E_{dn} \sin \alpha \quad (18)$$

- 단, E_{dn} : 직사일광의 법선면 조도 [lx]
- E_{dh} : 직사일광의 외부 수평면 조도 [lx]

$$E_{dv} = E_{dn} \cos i \quad (19)$$

- 단, i : 직사일광의 입사각 [$^\circ$]

$$i = \cos^{-1}[\cos \alpha \times \cos \phi] \quad (20)$$

식 (18)과 식 (20)을 식 (19)에 대입하면 식 (21)을 얻을 수 있다.

$$E_{dv} = \frac{E_{dh}}{\sin \alpha} \times \cos[\cos^{-1}(\cos \alpha \times \cos \phi)] \quad (21)$$

여기서 태양 방위각 ϕ 는 태양이 남중했을 때를 0° 로 한 것이므로 양 측면에서의 E_{dv} 를 구할 경우 ϕ 대신에 $(90^\circ - \phi)$ 를 대입하여 계산한다.

2.2.2 확산천공광에 의한 그리드요소의 초기조도

그림 5와 같이 광덕트 내면의 한 점에서 천공을 보았을 때 그 형상은 광덕트 입구의 형상과 같다. 따라서 본 수치 모델에서는 광덕트 입구의 장방형 면과 각 요소와의 Form Factor(면 : 면)(Brackette et al., 1983) 계산값 및 수평면 확산천공광에 의한 조도를 사용하여 각각의 그리드요소의 초기 조도를 결정하게 하였다. 광덕트 입구를 통해 보이는 천공의 휘도분포가 일정하다고 가정한다면 각각의 그리드요소의 조도는 식 (22)로 구할 수 있다.

$$\bar{E}_2 = \frac{M_1 A_1 F_{1 \rightarrow 2}}{A_2} \quad (22)$$

- 단, A_1 : 광원면의 면적 [m^2]
- A_2 : 수광면의 면적 [m^2]
- M_1 : 표면 A_1 의 광속발산도 [lm/m^2]
- $F_{1 \rightarrow 2}$: 그리드요소 2에 대한 그리드요소 1의 Form Factor

2.2.3 그리드요소 상호간 광속 전달량

덕트 내면에 설정한 각 그리드요소 사이의 광속전달량은 Form Factor의 개념을 적용하여 계산할 수 있다. 본 수치 모델에서는 장방형 광덕트만을 고려하였으므로 수직, 수평한 위치관계를 갖는 그리드요소 사이의 Form Factor 계산식을 사용하였다.

바닥면의 최종조도를 계산하기 위해서는 먼저 그리드요소 상호간의 광속전달에 의한 각각의 그리드요소의 최종 조도를 계산할 필요가 있다. 하나의 그리드요소와 나머지 모든

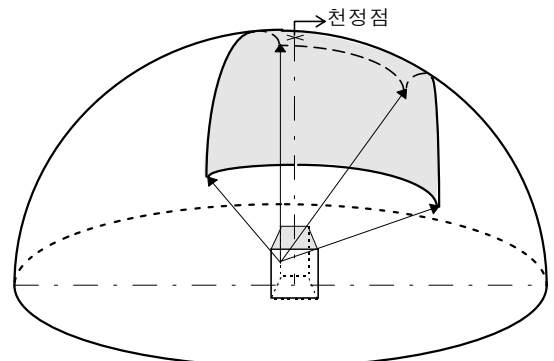


그림 5. 덕트 내부의 그리드요소에서 볼 수 있는 천공부분

그리드요소 사이의 Form Factor 값과 그리드요소의 초기조도 및 반사율이 주어지면 각각의 그리드요소의 최종 조도는 식 (23)(IESNA, 1993)을 사용하여 계산할 수 있다. 각 요소의 최종 조도를 계산하기 위하여 설정한 그리드요소의 수가 N 개라고 한다면 N 개의 독립적인 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M_1 &= M_{01} + \rho_1(M_1F_{11} + M_2F_{12} + \dots + M_nF_{1n} + M_0F_{10}) \\
 M_2 &= M_{02} + \rho_2(M_1F_{21} + M_2F_{22} + \dots + M_nF_{2n} + M_0F_{20}) \\
 &\vdots \\
 M_n &= M_{0n} + \rho_n(M_1F_{n1} + M_2F_{n2} + \dots + M_nF_{nn} + M_0F_{n0})
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

단, M_n : n번째 그리드요소의 최종 광속발산도 [lm/m^2]
 M_{0n} : n번째 그리드요소의 초기 광속발산도 [lm/m^2]
 F_{nm} : 그리드요소 n 에 대한 그리드요소 m의 Form Factor
 ρ_n : n 번째 그리드요소의 광학적 반사율

방정식 (23)의 해는 Gauss Seidel 방법처럼 반복계산법을 적용(Saraiji and Mistrick, 1992)하여 근사값으로서 구할 수 있다. M_n 의 초기값은 M_{0n} 과 같다. 그리드요소 n 에 대해 새롭게 계산된 광속발산도 값은 다른 그리드요소의 초기값에 따라 그리드요소 n+1 에 대한 방정식에서 사용된다. 이와 같은 방법으로 각 방정식을 통해 계산을 반복하면서 각 요소의 반사율 때문에($\rho_n < 1$) 수렴하는 최종 광속발산도의 계산값을 그 차이가 $1 [lm/m^2]$ 이하가 될 때까지 계산하도록 하였다.

2.2.4 상호반사성분에 의한 하부출구 계산점에서의 조도

최종 광속발산도 값이 계산되면 벽면의 그리드요소와 하부출구의 계산점 사이의 Configuration Factor 에 의해 하부출구 계산점에서의 조도를 식 (24)(IESNA, 1993)에 의해 계산할 수 있다.

$$E = MC \tag{24}$$

단, E: 하부출구로 도달하는 빛의 조도 [lx]
M: 벽면 그리드요소의 광속발산도 [lm/m^2]
C: 바닥면 계산점에 대한 벽면 각 그리드요소의 Configuration Factor

2.3 직접 성분에 의한 조도

2.3.1 직사일광에 의한 하부 출구에서의 조도

식 (2)와 식 (3)을 이용하여 하부출구에 직사일광이 직접 도달하는지 판단하고 Case 2의 경우일 때, 식 (14)와 식 (15), 그리고 하부출구의 각 계산점의 좌표값을 사용하여 각각의 계산점이 직사일광에 노출되는지 여부를 판단한다. 직사일광이 하부 출구에 직접 도달하는 경우, 하부출구 계산점에서의 조도는 직사일광에 의한 외부 수평면 조도와 같은 값을 사용하며 직사일광이 입사하지 않는 경우에는 그 값을 0 으로 한다.

2.3.2 확산천공광에 의한 하부출구에서의 조도

그림 5에 보인 것처럼 확산천공광에 의한 하부출구에서의 조도는 계산점에서 바라본 덕트 입구면의 Configuration Factor 를 먼저 계산한 다음, 덕트 입구를 통해 들어오는 광속을 곱하여 계산한다. 이때 덕트 입구를 통해 들어오는 광속은 확산천공광에 의한 외부 수평면 조도에 입구의 면적을 곱하여 계산한다.

2.3.3 직접성분에 의한 하부출구에서의 조도

직접성분에 의한 바닥면 계산점에서의 조도는 확산천공광에 의한 값과 직사일광에 의한 값을 합하여 구할 수 있다.

2.4 하부출구의 광속 및 광속전달율

2.4.1 하부출구 계산점에서의 최종조도

최종적으로 2.2 절에서 설명한 간접성분에 의한 조도와 2.3 절에서 설명한 직접성분에 의한 조도를 합하여 하부출구 계산점의 최종조도를 구할 수 있다.

2.4.2 하부 출력 광속 및 광속전달율 계산

하부출구의 계산점을 각 그리드요소의 중심점으로 설정하고 계산점에서의 조도를 그 면의 대표값으로 사용하였다. 따라서 계산된 조도와 설정된 그리드요소의 면적을 곱하여 모두 합계함으로써 최종 하부 출력 광속이 계산된다. 또한 광속전달율 F_{ratio} 는 식 (25)를 이용하여 구할 수 있다.

$$F_{ratio} = \frac{F_{out}}{F_{in}} \times 100 [\%] \tag{25}$$

단, F_{in} : 광덕트 입구에서 입사하는 총광속 [lm]
 F_{out} : 광덕트하부에서 출력하는 총광속 [lm]

3. 축소모형실험을 통한 수치모델의 타당성 검증

3.1 축소모형 실험 개요

본 연구에서 개발한 수직장방형 광덕트의 광속전달율 계산용 수치모델의 정확성을 검증하기 위해서 다양한 형상과 반사율을 갖는 광덕트의 축소모형을 이용한 실험을 행하였다. 표 1은 축소모형의 제원을 보인 것이다. 덕트의 형상은 광정지수(Well Index)(Robins, 1986)로 나타내는데 여기서 Well Index(WI)는 광덕트 바닥면적에 대한 높이의 비를 나타내는 무차원수로서 일반적으로 아트리움 공간의 깊이의 정도를 나타낼 때 사용되며 식 (26)으로 표현된다.

$$Well \ Index = \frac{(W + L) \times H}{2 \times (W \times L)} \tag{26}$$

단, W: 너비, L: 길이, H: 높이

수직장방형 광덕트의 광속전달율에 영향을 미치는 변수에는 1)덕트의 Well Index 2)덕트의 내부표면 반사율 3)천공상태(천공공시 태양의 위치) 등 3 가지로 요약될 수 있다. 또한, 수치모델의 계산결과와 소요시간에 영향을 미치는 변수로는 너비, 길이, 높이 방향으로 설정한 그리드요소의 갯수이다.

표 1. 광덕트 축소모형의 제원

번호	기호	너비×길이×높이 ; 단위 mm	WI	반사율
1	W1R0.9	200×200×200	1	0.9
2	W2R0.9	200×200×400	2	0.9
3	W4R0.9	200×200×800	4	0.9
4	W8R0.9	200×200×1,600	8	0.9
5	W4R0.8	200×200×800	4	0.8
6	W4R0.7	200×200×800	4	0.7
7	W4R0	200×200×800	4	0
8	W3R0.9	200×400×800	3	0.9
9	W2.5R0.9	200×800×800	2.5	0.9

3.2 수치모델의 정확성 및 적용한계에 대한 검토

3.2.1 담천공 상태

1) 그리드요소의 갯수와 계산결과의 정확성

그림 6은 담천공상태에서 너비, 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 계산치의 실측치에 대한 오차를 식 (27)을 이용하여 구한 결과와 계산에 소요된 시간을 비교한 것이다.

$$\text{오차} = \frac{\text{실측치} - \text{계산치}}{\text{계산치}} \times 100 [\%] \quad (27)$$

그림을 살펴보면 높이방향으로 나눈 그리드요소의 수가 증가할수록 오차가 작아지며 높이방향의 그리드요소 수가 8개 이상이 됨으로써 오차가 5% 이하로 수렴하고 있으나 너비와 길이방향의 그리드요소 수는 오차에 거의 영향이 없으며 너비와 길이방향의 그리드요소 수가 증가함에 따라 계산시간은 3 배, 7 배 이상으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 담천공 상태에서는 너비와 길이방향의 그리드요소 수를 1로 설정하고 높이방향의 최적 그리드요소의 수를 설정하는 것이 계산결과의 정확성을 증가시키고 계산시간 면에서도 효율적인 것으로 판명되었다.

2) 광덕트의 WI와 계산결과의 정확성

그림 7은 담천공 상태에서 WI 값이 1, 2, 4, 8인 4가지 광덕트 모형에 대하여 측정결과와 계산결과의 오차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 높이방향으로 나눈 그리드요소 수의 차이는 있지만 모두 오차가 5% 이하로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 높이방향으로 그리드요소의 수를 많이 나눌수록 더 정확한 값에 접근하며 높이가 커질수록 정확한 계산결과를 얻기 위해서는 더 많은 그리드요소 수가 필요한 것을 알 수 있다. 기호 W1R0.9인 광덕트 모형은 다른 조건에 비해 계산결과와 측정결과의 오차가 크다. 이것은 프로그램 모델에서는 천공의 휘도분포가 일정한 것으로 가정하고 있지만 WI 값이 작은 W1R0.9의 경우 다른 모형에 비해 더 넓은 면적의 불균일한 휘도분포를 갖는 천공이 각각의 그리드요소에서 보여지기 때문인 것으로 사료된다.

3) 광덕트의 내부 반사율과 계산결과의 정확성

그림 8은 담천공 상태에서 반사율이 0.9, 0.8, 0.7인 광덕트 모형에 대하여 계산결과의 측정결과에 대한 오차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 3가지 경우 모두 비슷한 경향으로 수직방향의 그리드요소 수가 증가하면서 오차가 줄어들고 그리드요소 수가 7~8개 됨으로써 5% 이하로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 수직장방형 광덕트의 광속전달율을 정확하게 계산하기 위해 요구되는 높이방향의 그리드요소의 수는 반사율에 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다.

4) 담천공에서의 최적 그리드요소 수의 결정

본 연구의 결과 담천공 상태에서 95% 정도 정확성을 갖게 하는 최적 그리드요소의 수는 표 2와 같이 나타났다.

표 2. 담천공에서의 최적 그리드요소의 수

너비와 길이방향의 그리드요소 수	$n_h = 1$
높이방향의 그리드요소 수	$n_v = 2WI$

3.2.2 청천공 상태

1) 그리드요소의 수와 계산결과의 정확성

그림 9는 태양이 남중한 9월 21일 12시, 그리고 그림 10은 9월 21일 9시($\alpha=34.06^\circ$, $\phi=58.60^\circ$)인 청천공 상태에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 오차를 비교한 것이다. 그림 9를 살펴보면 담천공상태와 마찬가지로 태양의 방위각이 0° 인 12시에서 너비 및 길이방향의 그리드요소 수의 변화는 오차크기에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 그림 10을 살펴보면 태양 방위각이 0° 가 아닌 경우 너비 및 길이방향의 그리드요소의 수가 증가함에 따라 오차가 변화하며 너비와 길이방향의 그리드요소 수가 3개, 그리고 높이방향의 그리드요소 수가 13~14개가 되었을 때부터 오차의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

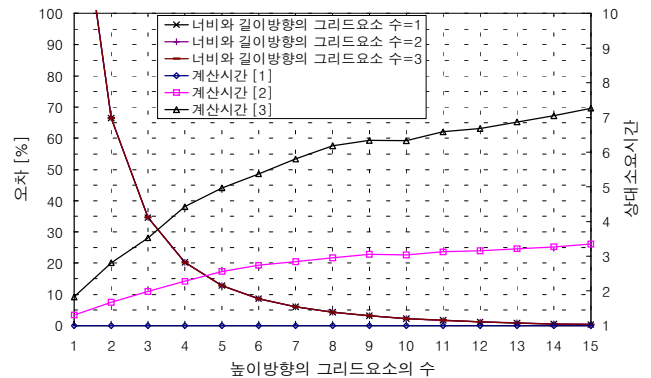


그림 6. 담천공에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차 및 계산시간 [W4R0.9]

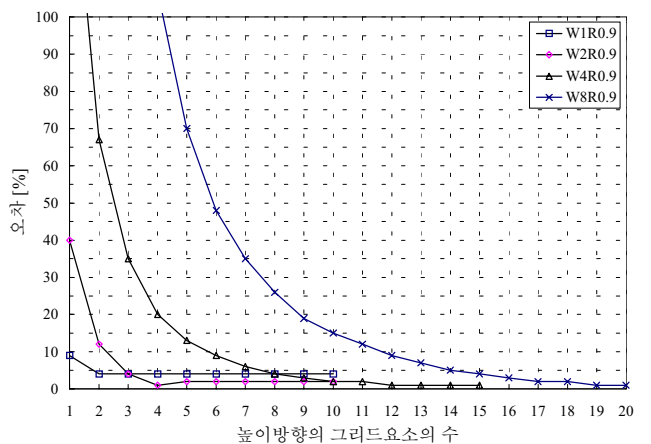


그림 7. 담천공에서 Well Index와 높이방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차

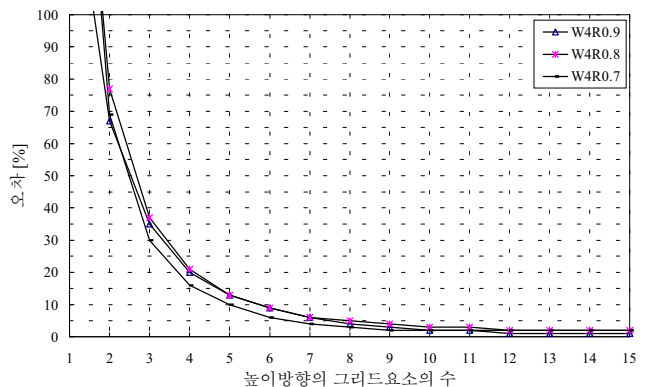


그림 8. 담천공에서 내부 반사율과 높이방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차

따라서, 신속한 계산을 위해서 태양의 방위각이 0° 일 경우

에는 너비와 길이방향의 그리드요소의 수를 1로 하고 높이방향의 최적 그리드요소 수를 설정하며, 태양의 방위각이 0° 가 아닐 경우는 너비와 길이방향 및 높이방향의 최적 그리드요소 수를 모두 설정해야 할 필요가 있는 것으로 나타났다.

2) 광덕트의 WI와 계산결과의 정확성

그림 11은 청천공(9월 21일 12시) 상태에서 WI 값이 1, 2, 4, 8인 광덕트 모형에 대하여 계산결과와 측정결과 사이의 오차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 담천공 상태에서의 높이변화에 대한 오차와 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며 모형 W1R0.9를 제외하고는 오차가 5% 이하로 수렴하는 것을 알 수 있다. 모형 W1R0.9는 담천공상태에서와 마찬가지로 실제 천공의 휘도분포차의 영향으로 다른 모형과 비교해 볼 때 오차가 큰 것으로 나타났다.

3) 청천공에서의 최적 그리드요소 수의 결정

본 연구의 결과 청천공 상태에서 95% 정도 정확성을 갖게 하는 최적 그리드요소의 수는 표 3과 같이 나타났다.

표 3. 청천공에서의 최적 그리드요소의 수

$\phi = 0^\circ$	너비와 길이방향의 그리드요소 수	$n_{h,\phi=0} = 1$
	높이방향의 그리드요소 수	$n_{v,\phi=0} = 2WI$
$\phi \neq 0^\circ$	너비와 길이방향의 그리드요소 수	$n_{h,\phi \neq 0} = 3$
	높이방향의 그리드요소 수	$n_{v,\phi \neq 0} = 3WI + 1$

4. 결론

본 연구에서는 수직장방향 광덕트의 광속전달율 예측 수치모형을 개발하였으며 모형실험을 통해 그 정확성을 검토하였다. 검토한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 담천공과 청천공 모두에 대해서 높이방향의 그리드요소 수를 증가시킬수록 정확성이 증가하였다.
- 2) 담천공 및 태양방위각이 0° 인 청천공상태에서 너비와 길이방향의 그리드요소 수는 계산결과의 정확성에 거의 영향을 미치지 않았다.
- 3) 태양방위각이 0° 가 아닌 청천공 상태에서는 너비와 길이방향의 그리드요소 수가 증가할 수록 오차가 줄어들었다.
- 4) 덕트 내부 반사율은 계산 결과의 정확성에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 5) 본 연구에서는 광속전달법(Luminous Flux Transfer Method)을 적용하여 수직장방향 광덕트에서의 광속전달율을 계산할 경우 계산의 정확성과 계산시간의 단축을 동시에 고려한 최적 그리드요소의 수를 다양한 천공상태와 광덕트의 제원에 대해 제시하였다.(표 2, 3 참조)

5. 참고문헌

[1] Bednar, M.J. 1986. *The New Atrium*, McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
 [2] Brackette, W.E., W.L. Fink, and W. Pierpoint 1983. "Interior Point-by-Point Calculations in Obstructed Spaces," *Journal of the IES*, October, pp. 14~25.

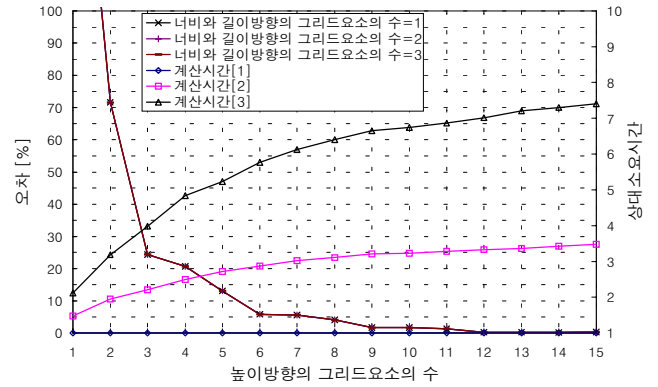


그림 9. 청천공(9월 21일 12시)에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수의 변화에 대한 오차
 [W4R0.9, $\alpha = 52.46^\circ$, $\phi = 0^\circ$]

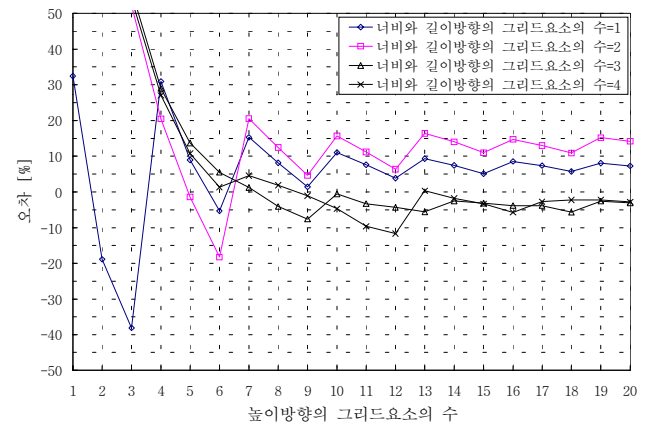


그림 10. 청천공(9월 21일 9시)에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수의 변화에 대한 오차
 [W4R0.9, $\alpha = 34.06^\circ$, $\phi = 58.60^\circ$]

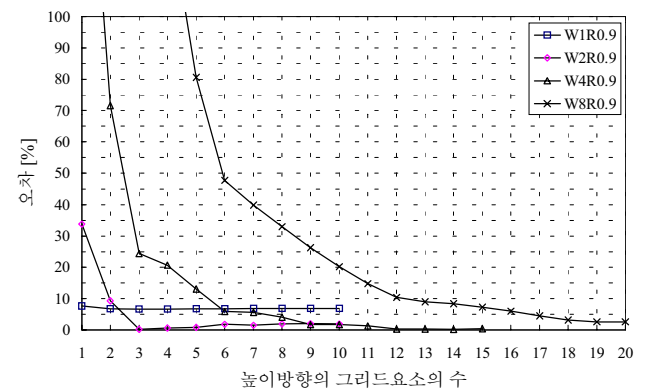


그림 11. 청천공(9월 21일 12시)에서 WI와 높이방향의 그리드요소 수에 대한 오차
 [W4R0.9, $\alpha = 52.46^\circ$, $\phi = 0^\circ$]

[1] IESNA 1993. *Lighting Handbook, Reference & Application, 8th Ed.*, IESNA, New York, NY.
 [2] Robins, C.L. 1986. *Daylighting, Design and Analysis*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY.
 [3] Saraji, R.M.N. and R.G. Mistrick 1992. "Calculation Methods, Error Tendencies, and Guidelines for Finite Element Flux Transfer," *Journal of the IES*, Winter, pp. 92~102.
 [4] Sterling, R.L. and J. Carmody, 1993. *Underground Space Design*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY.
 [5] The IES Calculation Procedures Committee, 1984. "Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability," *Journal of the IES*, July, pp.381~392.