

地下空間의 自然採光을 위한 광덕트 시스템의 設計道具 開發

The Development of Design Tools of Daylight Duct Systems for
Underground Spaces

서 광 범*, 송 규 동**

Seo, Kwang-Bum, Song, Kyoo-Dong

한양대학교 대학원 건축공학과* 한양대학교 건축공학과 교수, 건축학박사**

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구비 지원에 의해 수행됨

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 stages of design process. The current paper presents daylighting design tools such as graphs, tables and equations for calculating illuminances on the work plane of underground spaces with vertical rectangular daylight duct systems.

키워드 : 광속전달율, 자연채광, 직사일광, 광덕트 시스템, 지하공간, 설계도구

1. 서 론

산업화에 따른 도시로의 급속한 인구 유입은 대도시의 인구 과밀화 현상을 가져와 부수적으로 교통 및 운송 문제와 주거 공간 확보 문제 등을 야기시켰으며, 이에 대한 대책으로 건물의 고층화와 지하공간의 활용과 같은 토지의 입체적 이용을 강구하게 되었다. 특히, 최근 들어 각종 건축 설비의 발전에 힘입어 지하공간도 지상공간이나 거의 다름없는 다각적인 용도로의 이용이 적극적으로 검토되고 있다(Sterling and Carmody, 1993). 도심지에 건설되는 지하공간은 자연채광과 통풍 등 건축환경적으로 불리한 점을 갖고 있지만 설비형 자연채광 시스템을 채택함으로써 이러한 불리한 점을 상당히 극복할 수 있게 된다. 그러나, 건물설계자들이 직면하고 있는 가장 큰 문제점은 다양한 종류의 설비형 자연채광 시스템의 효과를 신속, 정확하게 평가할 수 있는 도구가 개발되고 있지 않다는 것이다.

광덕트를 이용한 자연채광 시스템의 합리적인 설계를 위해서는 각종 변수들 즉, 광덕트의 면적과 높이, 지하공간의 평면에 대한 광덕트의 상대위치, 각종 집광 및 반사장치의 제원, 광덕트내 표면의 반사율, 그리고 실면적 대 높이의 비 등이 실내 조도에 미치는 영향에 대한 연구가 선행되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 일반적인 지상의 건물에서처럼 측광이나 천창을 통해 주광을 받아들이기 어려운 지하공간 거주역의 자연채광을 위해 수직장방형 광덕트를 올바르게 설계하는데 필요한 설계도구와 자료를 제시하였다. 즉, 설계자가 지하공간을 설계할 때 다양한 크기의 광덕트 시스템의 자연채광 효과를 정확하고 손쉽게 평가해 볼 수 있도록 수식 및 각종 그래프를 제공하였다.

2. 광속전달을 수치모델의 개발

2.1 수치모델의 개요

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

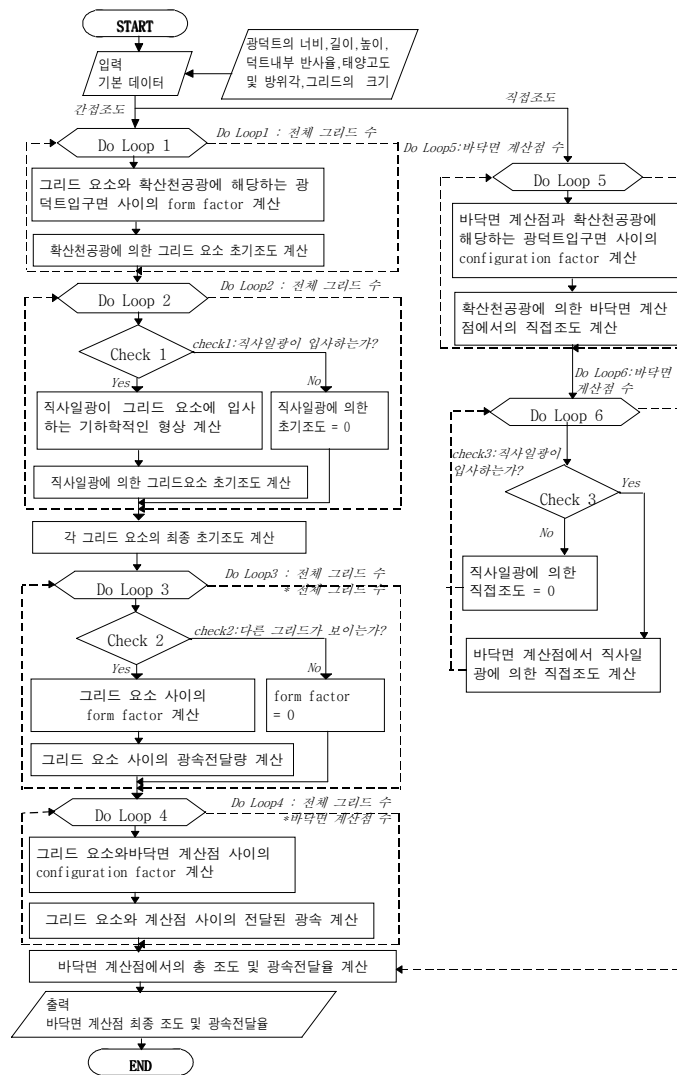


그림 1. 수치모델의 구성 및 흐름도

2.2 상호반사성분에 의한 조도계산

(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.

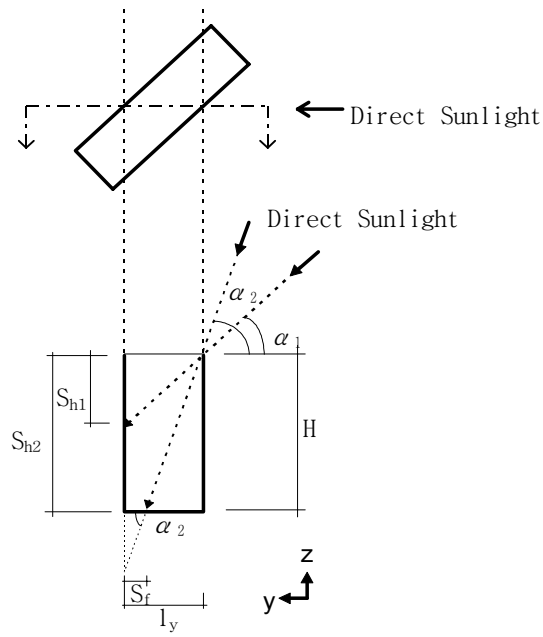


그림 2. 직달일광이 입사하는 광덕트의 단면

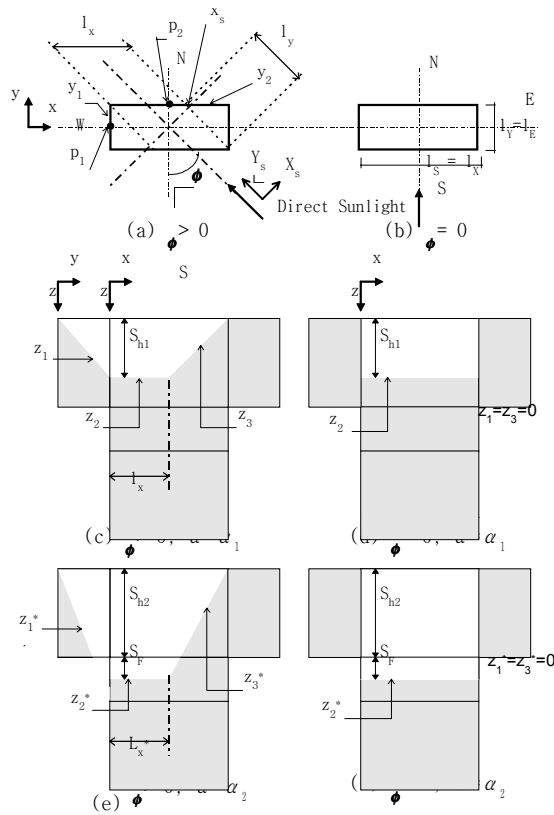


그림 3. 다양한 태양 고도 및 방위각에 대해 광덕트 내면에 직사일광이 들어오는 형상

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.

(Case 1) : $\alpha = \alpha_1$

$$S_h = S_{h1} = l_y \times \tan \alpha$$

$$S_f = 0 \quad (2)$$

(Case 2) : $\alpha = \alpha_2$

$$S_h = S_{h2} = H$$

$$S_f = (l_y \times \tan \alpha - S_{h2}) \times \tan(90^\circ - \alpha)$$

$$S_f = S_f \times \cos \phi \quad (3)$$

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 을 각각 y축과 z축에 대한 식 (4), 그리고 x축과 z축에 대한 식 (5)와 (6)과 같이 1차 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 $\left(-\frac{l_S \cdot \cos \phi}{2}, \frac{l_S \cdot \sin \phi}{2}\right)$ 를 식 (7)에 대입하면 미지

의 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 있다.

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

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.

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

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 y 축과 z 축에 대한 식 (13), 그리고 x 축과 z 축에 대한 식 (14)와 (15)와 같이 일차원 방정식으로 표현될 수 있다.

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

$$z_2^* = S_{l2} + S_F \quad (14)$$

$$z_3^* = -\frac{S_{l2} + S_F}{(l_S - l_x^*)} \cdot (x - l_x^*) \quad (15)$$

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 보여진 것처럼 총 7가지의 경우로 구분될 수 있다. 그리고 각 그리드 요소의 초기조건(Element i)는 각각의 좌표값과 직선의 방정식으로 그 형상을 판단하여 식 (17)

에 의해 계산한다.

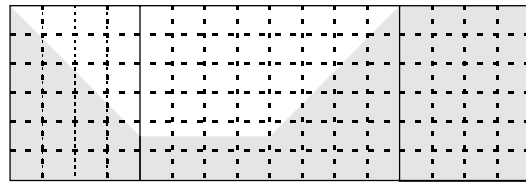
$$E_{Element\ i} = \frac{A_{sun\ i}}{A_{element\ i}} \times E_{dv} \times \cos \phi \quad (17)$$

단, $A_{sun\ i}$: 단위 그리드요소가 직사일광에 노출되는 면적 [m^2]

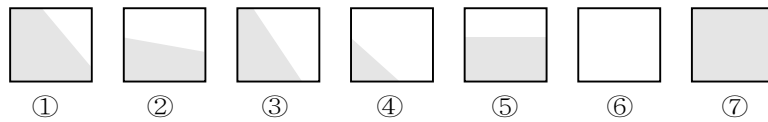
$A_{element\ i}$: 단위 그리드요소의 면적 [m^2]

E_{dv} : 직사일광의 정남향 수직면 조도 [lx]

ϕ : 태양 방위각 [$^\circ$]



(a) 그리드요소의 좌표설정



(b) 단위 그리드요소

그림 4. 직사일광에 노출된 단위 그리드요소의 7가지 형상

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.

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

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 대신에 $(90^\circ - \phi)$ 를 대입하여 계산한다.

(2) 확산천공광에 의한 그리드요소의 초기조도

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

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

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

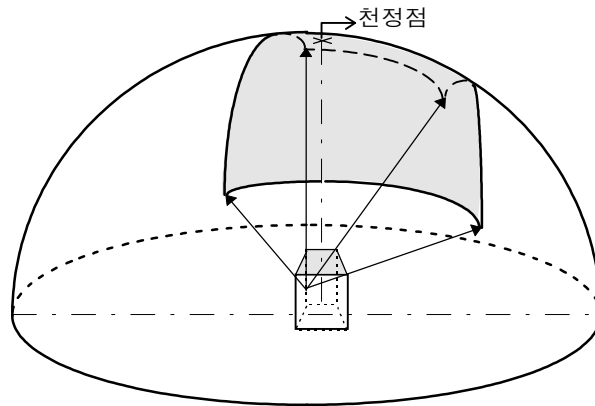


그림 5. 덕트 내부의 그리드요소에서 볼 수 있는 천공부분

(3) 그리드요소 상호간 광속전달량

덕트 내면에 설정한 각 그리드요소 사이의 광속전달량은 Form Factor의 개념을 적용하여 계산할 수 있다. 본 수치모델에서는 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 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.

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

단, M_n : n번째 그리드요소의 최종 광속발산도 [lm/m^2]
 M_{0n} : n번째 그리드요소의 초기 광속발산도 [lm/m^2]
 F_{mn} : 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 n에 대해 새롭게 계산된 광속 발산도 값은 다른 그리드요소의 초기값에 따라 그리드요소 n+1에 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.

(4) 상호반사성분에 의한 하부출구 계산점에서의 조도

최종 광속발산도 값이 계산되면 벽면의 그리드요소와 하부출구의 계산점 사이의 Configuration Factor에 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

(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 직사일 광에 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 0으로 한다.

(2) 확산천공광에 의한 하부출구에서의 조도

그림 5에 보인 것처럼 확산천공광에 의한 하부출구에서의 조도는 계산점에서 바라본 덕트 입 구면의 Configuration Factor를 먼저 계산한 다음, 덕트 입구를 통해 들어오는 광속을 곱하여 계 산한다. 이때 덕트 입구를 통해 들어오는 광속은 확산천공광에 의한 외부 수평면 조도에 입구의 면적을 곱하여 계산한다.

(3) 직접성분에 의한 하부출구에서의 조도

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

2.4 하부출구의 광속 및 광속전달율

(1) 하부출구 계산점에서의 최종조도

최종적으로 2.2 절에서 설명한 간접성분에 의한 조도와 2.3 절에서 설명한 직접성분에 의한 조

도를 합하여 하부출구 계산점의 최종조도를 구할 수 있다.

(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 수직장방향 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)(Robbins, 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.

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

단, W : 너비

L : 길이

H : 높이

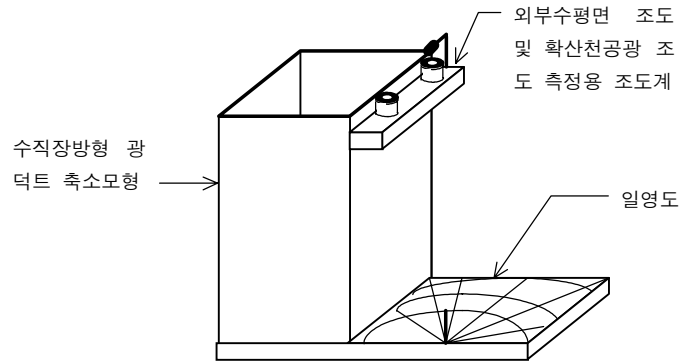
표 1. 광덕트 축소모형의 제원

번호	기호	너비×높이×길이 ; 단위 mm	WI	반사율 [%]
1	W1R0.9	200×200×200	1	90
2	W2R0.9	200×200×400	2	90
3	W4R0.9	200×200×800	4	90
4	W8R0.9	200×200×1,600	8	90
5	W4R0.8	200×200×800	4	80
6	W4R0.7	200×200×800	4	70
7	W4R0	200×200×800	4	0
8	W3R0.9	200×400×800	3	90
9	W2.5R0.9	200×800×800	2.5	90

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

그림 6은 축소모형실험을 수행하고 있는 모습으로서, 광덕트 입구면에 외부 수평면조도와 외부 확산조도를 측정하는 조도계를 광덕트 입구면과 평행하게 설치하였고, 바닥면에는 무광흑색의 페인트로 칠하고 조도계를 3개씩 3열로 설치하였다. 또한 계산 결과를 검증할 때 참고자료로 사용

하기 위해서 사방 측면의 조도를 벽면에 구멍을 내어 조도계를 설치하였다. 6월 21일, 9월 21일, 12월 21일 오전 9시부터 오후 17시까지 한시간 간격으로 그림자의 길이를 이용하여 태양의 위치를 알 수 있도록 제작한 일영도를 이용하여 각각의 시간에 대하여 측정을 수행하였다.



(a) 광덕트의 축소모형과 일영도



(b) 광덕트 축소모형의 바닥과 벽면에 설치된 조도센서

그림 6. 축소모형을 이용한 광덕트 하부의 조도를 측정하는 장면

3.2 수치모델의 정확성 및 적용한계에 대한 검토

(1) 답천공 상태

① 그리드요소의 갯수와 계산결과의 정확성

그림 7은 답천공상태에서 너비, 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 계산치의 실측치에 대한 오차율을 식 (27)을 이용하여 구한 결과와 계산에 소요된 시간을 비교한 것이다.

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

그림을 살펴보면 높이방향으로 나눈 그리드요소의 수가 증가할수록 오차율이 작아지며 높이방향의 그리드요소 수가 8개 이상이 됨으로써 오차율이 5% 이하로 수렴하고 있으나 너비와 길이방향의 그리드요소 수는 오차율에 거의 영향이 없으며 너비와 길이방향의 그리드요소 수가 증가함

에 따라 계산시간은 3배, 7배 이상으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 담천공 상태에서는 너비와 길이방향의 그리드요소 수를 1로 설정하고 높이방향의 최적 그리드요소의 수를 설정하는 것이 계산결과의 정확성을 증가시키고 계산시간면에서도 효율적인 것으로 판명되었다.

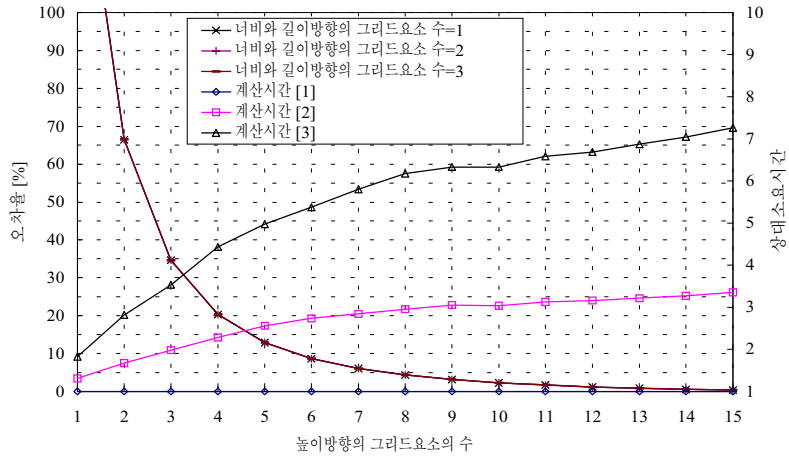


그림 7. 담천공에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 및 계산시간 [W4R0.9]

② 광덕트의 WI와 계산결과의 정확성

그림 8은 담천공 상태에서 WI 값이 1, 2, 4, 8인 4가지 광덕트 모형에 대하여 측정결과와 계산결과의 오차율을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 높이방향으로 나눈 그리드요소 수의 차이는 있지만 모두 오차율이 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 오차율이 크다. 이것은 프로그램모델에서는 천공의 휘도분포가 일정한 것으로 가정하고 있지만 WI값이 작은 W1R0.9의 경우 다른 모형에 비해 더 넓은 면적의 불균일한 휘도분포를 갖는 천공이 각각의 그리드요소에서 보여지기 때문인 것으로 사료된다.

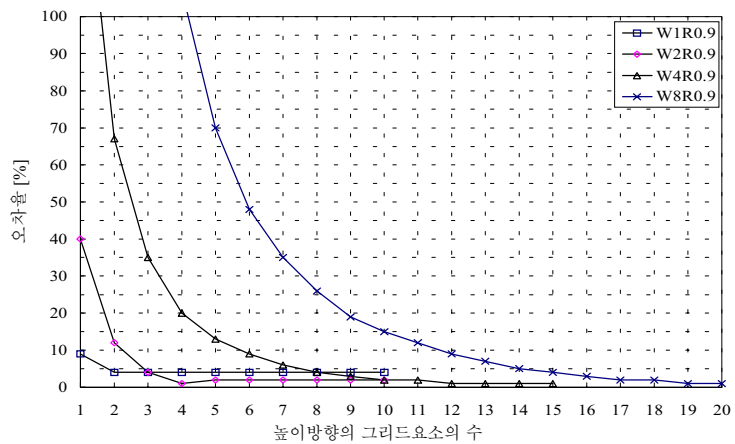


그림 8. 담천공에서 Well Index와 높이방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율

③ 광덕트의 내부 반사율과 계산결과의 정확성

그림 9는 담천공 상태에서 반사율이 90, 80, 70%인 광덕트 모형에 대하여 계산결과의 측정결과에 대한 오차율을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 3가지 경우 모두 비슷한 경향으로 수직방향의 그리드요소 수가 증가하면서 오차율이 줄어들고 그리드요소 수가 7~8개 됨으로써 5% 이하로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 수직장방향 광덕트의 광속전달율을 정확하게 계산하기 위해 요구되는 높이방향의 그리드요소의 수는 반사율에 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다.

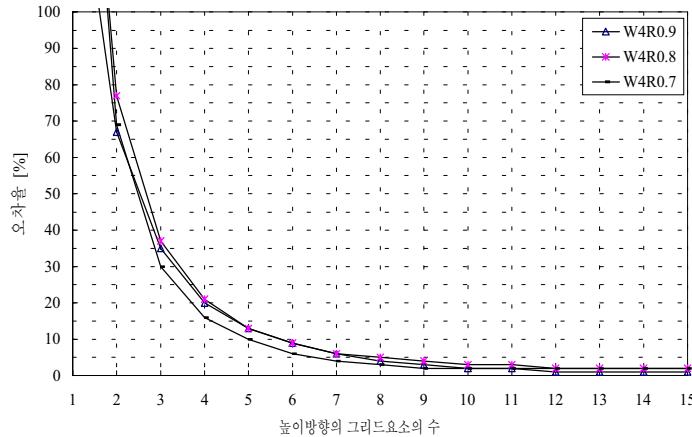


그림 9. 담천공에서 내부 반사율과 높이방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율

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 그리드요소의 수	$n_h = 1$
높이방향의 그리드요소의 수	$n_v = 2W$

(2) 청천공 상태

① 그리드요소의 수와 계산결과의 정확성

그림 10은 태양이 남중한 9월 21일 12시, 그리고 그림 11은 9월 21일 9시($\alpha = 34.06^\circ$, $\gamma = 58.60^\circ$)인 청천공 상태에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 오차율을 비교한 것이다. 그림 10을 살펴보면 담천공상태와 마찬가지로 태양의 방위각이 0° 인 12시에서 너비 및 길이방향의 그리드요소 수의 변화는 오차율의 크기에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 그림 11을 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 때 부터 오차율이 5% 이하가 되는 것으로 나타났다.

따라서, 신속한 계산을 위해서 태양의 방위각이 0° 일 경우에는 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.

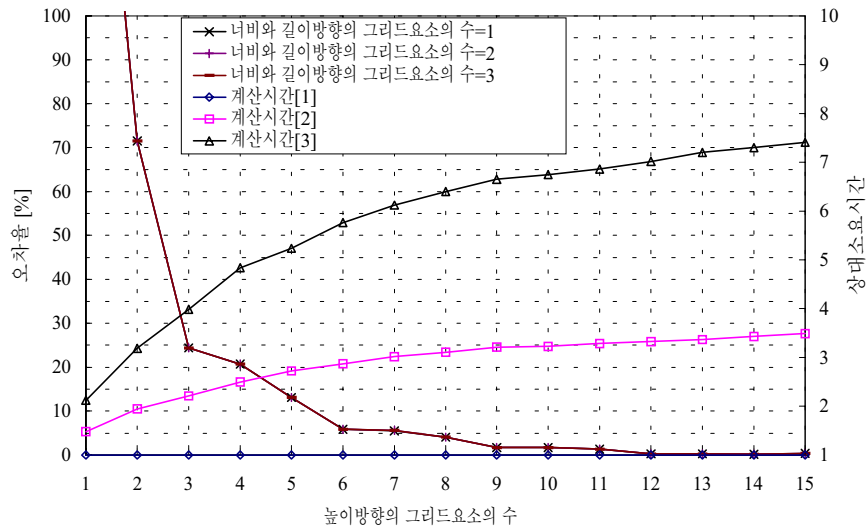


그림 10. 청천공(9/21 12:00)에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수의 변화에 대한 오차율
 [W4R0.9, $\alpha=52.46^\circ$, $\phi=0^\circ$]

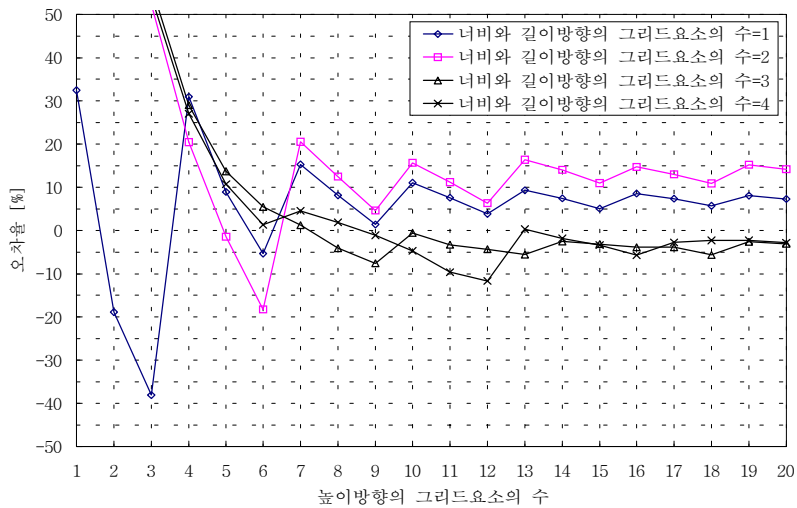


그림 11. 청천공(9/21 9:00)에서 너비와 길이 및 높이방향의 그리드요소의 수의 변화에 대한 오차율
 [W4R0.9, $\alpha=34.06^\circ$, $\phi=58.60^\circ$]

② 광덕트의 WI와 계산결과의 정확성

그림 12는 청천공(9월 21일 12시) 상태에서 WI 값이 1, 2, 4, 8인 광덕트 모형에 대하여 계산결과와 측정결과 사이의 오차율을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 담천공 상태에서의 높이변화에 대한 오차율과 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며 모형 W1R0.9를 제외하고는 오차율이 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.

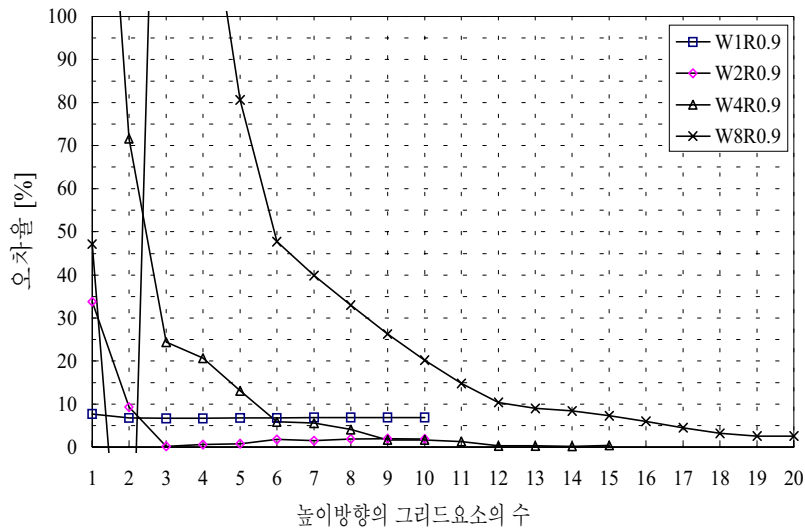


그림 12. 청천공(9/21 12:00)에서 W1와 높이방향의 그리드요소 수에 대한 오차율
 $[\alpha=52.46^\circ, \phi=0^\circ]$

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

4. 수직장방향 광덕트를 갖는 지하공간내의 조도

4.1 실험 개요

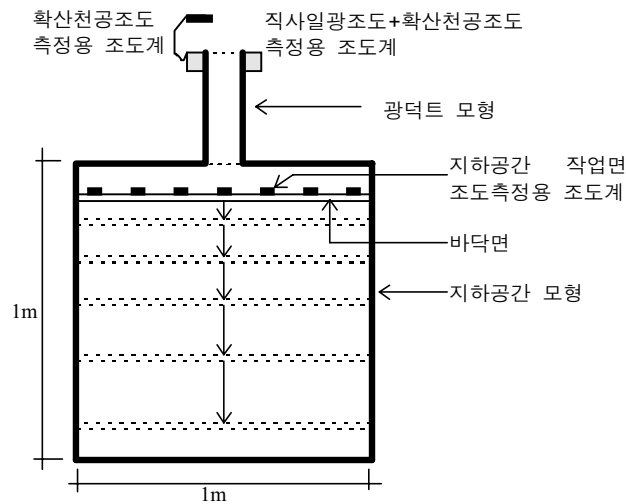
지하공간에서 광덕트 하부출력 광속에 대한 실내 조도의 직접성분 및 간접성분을 계산하기 위해 축소모형 실험을 수행하였다. 모형은 $1m \times 1m \times 1m$ 크기의 상자를 2개 제작하여 상부에 광덕트를 설치할 수 있는 구멍을 뚫은 후에 내부를 1개는 무광흑색으로, 다른 1개는 일반 건축물의 반사율인 벽면 50%, 바닥 30%, 천정면 70%의 무채색으로 내부를 칠하였다. 각각의 모형은 그림 13에서 보인 것처럼 지하공간의 높이를 변화시켜가며 작업면 조도(IR ; Illuminance Ratio)를 측정할 수 있도록 제작하였으며 모형의 크기는 전기조명 계산법에서 사용되는 실지수(Room Index)를 사용하여 나타내었다. 여기서 실지수는 식 (28)을 이용하여 구할 수 있으며 표 4는 제작된 모형의 실내공간의 크기를 실지수로 나타낸 것이다.

$$\text{실지수}(RI) = \frac{W \times L}{H \times (W + L)} \quad (28)$$

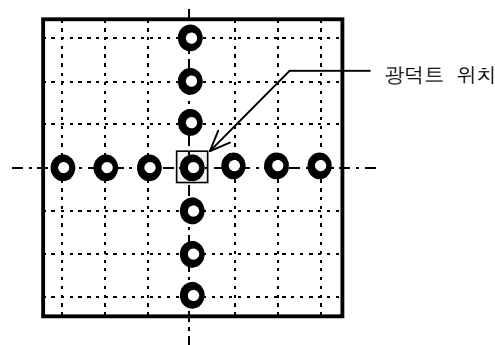
단, W : 실내공간의 너비
 L : 길이
 H : 높이

표 4. 실내공간 모형의 제원

번호	너비×길이×높이 ; 단위 mm	RI
1	1000×1000×100	5.0
2	1000×1000×125	4.0
3	1000×1000×167	3.0
4	1000×1000×200	2.5
5	1000×1000×250	2.0
6	1000×1000×333	1.5
7	1000×1000×400	1.25
8	1000×1000×500	1.0
9	1000×1000×625	0.8
10	1000×1000×833	0.6



(a) 광덕트 및 지하공간의 모형 단면도



(b) 광덕트와 측정점의 수평위치관계

그림 13. 광덕트 및 지하공간 축소모형의 단면 및 평면

직접성분은 내부를 무광흑색 페인트로 칠한 모형을 이용하여 측정하였으며, 상호반사성분은 일반인 건축물의 반사율을 갖는 모형을 이용하여 전체성분을 측정한 후에 직접성분을 소거하여 구하였다. 조도측정은 광덕트의 제원과 조도계의 높이 및 위치, 그리고, 서울지방의 6월 21일, 9월 21일, 12월 21일 9시~17시에서의 태양의 위치 등을 변화시켜가며 수행하였다. 광덕트의 Well Index는 표 1에서의 모형과 같게 하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

그림 14는 청천공상태(9월 21일 12시)에서 광덕트의 WI변화에 따른 광덕트 하부의 조도에 대한 실내 공간의 작업면 조도의 비를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 WI의 값이 증가함에 따라 광덕트의 하부의 조도에 대한 작업면 조도의 비도 점점 증가하고 있으며, 직사일광이 직접 입사하는 중앙점에서 제일 높은 값을 나타내고 중앙점에서 멀어질수록 조도비가 줄어드는 것을 알 수 있다. 여기에서 광덕트의 깊이가 증가할수록 조도비가 증가한다는 것이 지하공간 작업면 조도가 높아진다는 것을 의미하지는 않는다. 이것은 광덕트의 길이가 증가할수록 광덕트 하부의 조도는 감소함으로 지하공간 작업면 조도와는 차이가 작아지는 것을 의미한다.

그림 15는 광덕트 WI의 값이 4일 때 청천공상태(6월 21일 12시)에서 실내공간의 실지수 값의 변화에 따른 광덕트 하부의 조도에 대한 실내공간의 작업면 조도의 비를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 실지수 값이 증가할수록(즉, 공간의 높이가 낮아질수록) 조도비도 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 낮은 천정고로 인하여 직사일광이 바닥 일부분에 직접 도달하기 때문이다.

그림 16은 청천공상태(9월 21일 12시)에서 실내공간의 실지수 변화에 대한 실내공간의 직접성분 및 간접성분의 변화를 나타낸 것이다. 그림 15(a)를 살펴보면 실지수 값이 2.0일 때 간접성분보다 직접성분이 전체조도에 영향을 많이 미치고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 실지수 값이 1.0인 그림 16(b)의 경우 중앙부에서는 간접성분에 의한 조도비가 직접성분보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 실지수 값이 작아질수록(즉, 공간의 높이가 증가할수록) 작업면에 도달하는 빛 중에서 주위 벽체에 반사된 빛의 비율이 증가하기 때문이다.

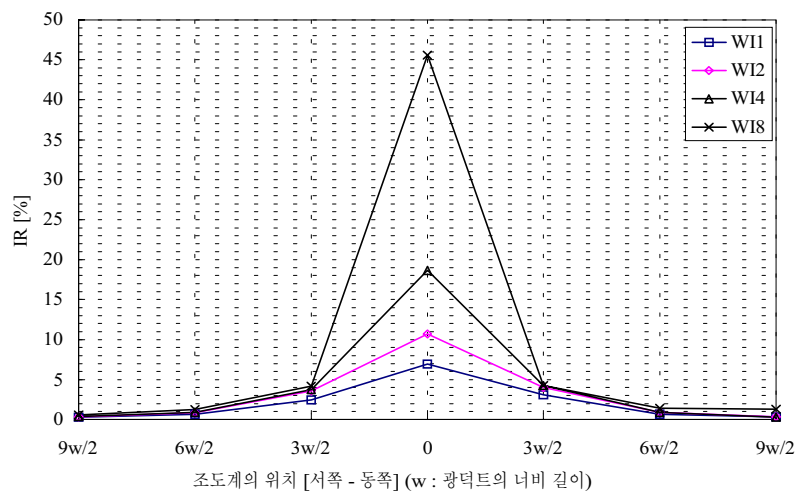


그림 14. 청천공 상태(9/21 12:00)에서 광덕트의 WI변화에 대한 IR의 변화 [실지수=2.0]

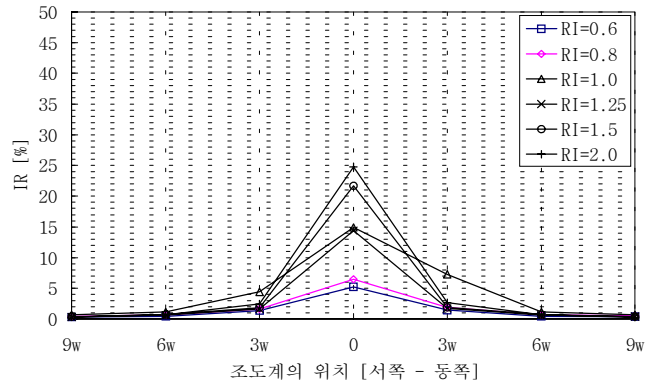
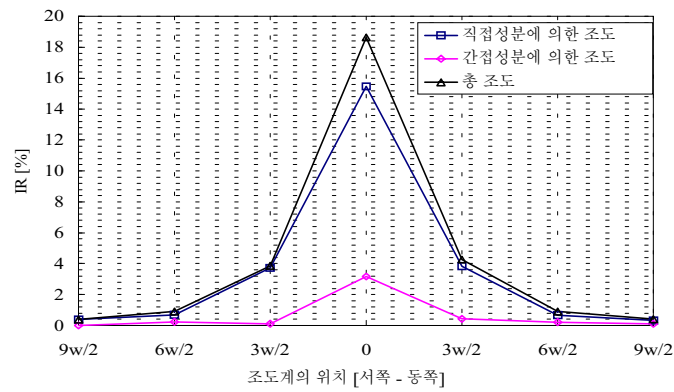
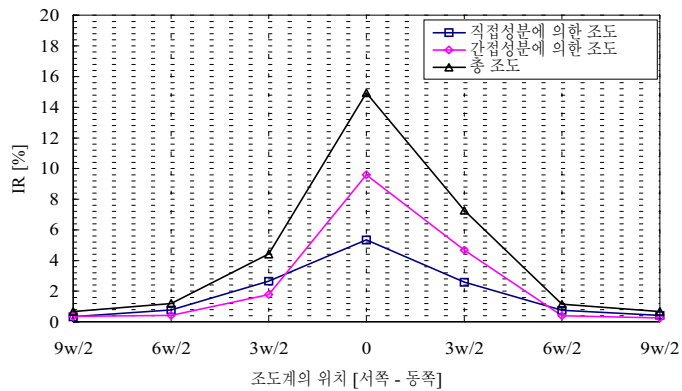


그림 15. 청천공 상태(6/21 12:00)에서 지하공간 모형의 실지수(RI)변화에 대한 조도비(IR)의 변화 (WI=4)



(a) 실지수= 2.0



(b) 실지수 =1.0

그림 16. 청천공 상태(9/21 12:00)에서 실내공간 실지수 변화에 대한 직접성분 및 간접성분의 변화 [WI=4]

5. 설계도구의 개발

5.1 연간 시간별 조도 데이터베이스의 작성

서울지방 표준년 기상자료에는 외부 조도데이터가 없으므로 일사량 데이터에 주광의 발광효율 이론을 적용하여 연간 시간별 외부조도 데이터베이스를 작성하였다. 이 때 주광의 발광효율이란 수평면 일사량에 대한 수평면 조도의 비를 말하며(Treado and Kusuda, 1981) 본 연구에서는 宿谷昌則와 木村建一 의 실험식을 사용하였다(宿谷昌則, 木村建一, 1980). 식 (29)는 직달일사에 대한 발광효율을, 식 (30)은 천공확산일사에 대한 발광효율을 나타낸 것이다.

$$\eta_D = \eta_o \cdot b \cdot K_{DR} + \eta_o \cdot c \quad (29)$$

단, η_o : 대기권의 발광효율(93.7 lm/W)

b, c : 태양고도별 실험상수

K_{DR} : 대기권의 수평면 일사량에 대한 지상에서의 수평면 일사량의 비

$$\eta_d = \eta_o \cdot d \quad (30)$$

단, d : 태양고도별 실험상수

표 5는 식 (29)와 (30), 그리고 서울지방 표준년 기상자료의 일사량 데이터를 이용하여 구한 연간 시간별 조도데이터의 일부를 보인 것이다.

표 5. 서울지방 외부 수평면 조도데이터

날짜	내용 시간	9	10	11	12	13	14	15	16	17
6/21	직달조도	31950	48093	57318	58425	52896	57088	56646	52479	43589
	확산조도	15719	17101	17766	18270	18396	17766	16742	15464	13663
9/21	직달조도	45122	46267	34400	30246	30885	28861	31327	32026	10507
	확산조도	13406	15592	16870	17253	17125	16486	15468	13406	7585
12/21	직달조도	5973	9211	16106	23089	29978	30099	28880	11391	0
	확산조도	6526	11085	12890	14179	14308	12927	11044	6107	0

5.2 지하공간 자연채광 설계도구의 개발

본 연구에서 개발한 지하공간 자연채광 설계용 도구는 다양한 형상의 장방향 광덕트의 출력광속인 FTR을 쉽게 구할 수 있게 되어 있고 또한, 광덕트 하부의 조도에 대한 지하공간 작업면상 임의점에서의 조도비인 IR_D 와 IR_d 를 쉽게 구할 수 있게 되어 있다. 따라서, 외부 수평면조도만 주어지면 식 (31)을 이용하여 지하공간내 작업면상 임의의 점에서의 자연광 조도를 신속하게 구할 수 있다.

$$E_p = E_{in} \times FTR \times (IR_D + IR_d) \quad (31)$$

단, E_{in} : 외부수평면조도[lx]

FTR : 광속전달율

IR_D : 광덕트 하부의 조도에 대한 실내 직접성분의 조도비

IR_d : 광덕트 하부의 조도에 대한 실내 간접성분의 조도비

식 (31)에서 사용되는 FTR, IR_D , IR_d 의 값은 앞에서 언급한 수치모델과 모형실험을 통해 개발

된 그래프에 의해서 그 값을 각각 구할 수 있다. 그림 17~그림 20은 설계도구로서 이용가능한 그래프의 예를 나타낸 것이다. 그림 17은 청천공 상태(9월 21일 12시), 그림 18은 담천공상태일 때 FTR 값을 구할 수 있는 그래프이며, 그림 19와 그림 20은 각각 청천공상태일 때의 IR_D , IR_d 의 값을 구할 수 있는 그래프이다.

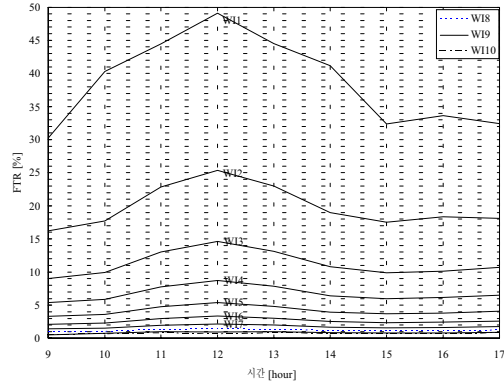


그림 17. 청천공상태에서 다양한 WI에 한 광속전달율 [9/21]

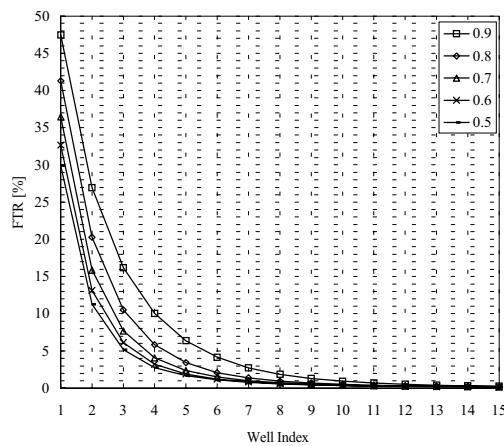


그림 18. 담천공상태에서 다양한 WI와 반사율에 대한 광속전달율

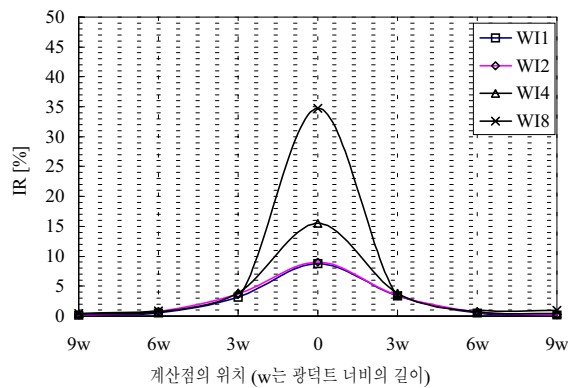


그림 19. 청천공상태(9/21 12:00)에서 WI의 변화에 대한 직접성분의 IR_D (실지수=2.0)

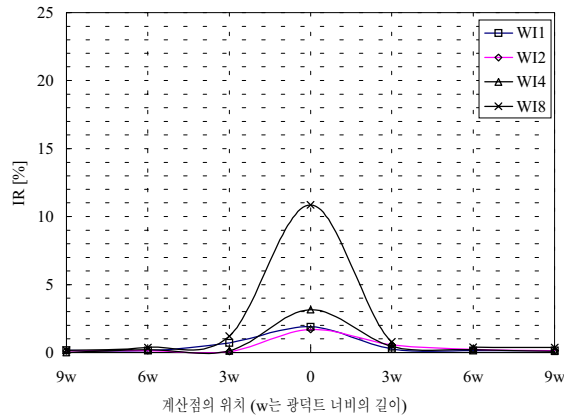


그림 20. 청천공상태(9/21 12:00)에서 WI의 변화에 대한 간접성분의 IR_d (실지수=2.0)

6. 결 론

본 연구에서 수직장방향 광덕트 시스템의 자연채광 효과를 예측 및 평가하기 위한 광덕트 시스템의 설계에 관한 연구를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수치모델과 축소모형실험을 비교하여 그 정확성을 검토한 결과 그리드요소의 수의 증가에 따라 그 오차율이 $\pm 5\%$ 이하로 작아졌다.
- 2) 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).
- 3) 확산면을 갖는 수직장방향 광덕트를 설치한 지하공간에서 자연채광 효과를 예측 및 평가할 수 있는 설계도구인 답천공 상태 및 청천공 상태에서 수직장방향 광덕트의 광속전달율을 예측 및 평가할 수 있는 그래프(그림 17, 18 참조)와 광덕트의 채광효과에 의한 실내 공간의 직접조도 및 간접조도를 계산할 수 있는 그래프(그림 19, 20 참조)를 제시하였다.

7. 향후 연구과제

추후에 광덕트에 의한 실내 공간의 정밀한 직접조도 및 간접조도에 대한 보강연구가 필요하며, 광덕트 입구의 유리 및 창호구조의 종류와 태양입사각에 대한 빛의 투과특성에 관한 연구가 수행되어야 한다. 또한 정반사 특성을 갖는 광덕트에 대한 광속전달율 계산용 수치모델의 개발도 수행되어야 한다.

8. 참고 문헌

- [1] Brackette, W.E., W.L. Fink, and W. Pierpoint, Interior Point-by-Point Calculations in Obstructed Spaces, Journal of the IES, October, p.p.14~25, 1983.
- [2] IESNA, Lighting Handbook, Reference & Application, 8th Ed., IESNA, New York, NY, 1993.
- [3] Robbins, C.L., Daylighting, Design and Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1986.
- [4] Saraiji, R.M.N. and R.G. Mistrick, Calculation Methods, Error Tendencies, and Guidelines for Finite Element Flux Transfer, Journal of the IES, Winter, p.p. 92~102, 1992.

- [5] Sterling, R.L. and J. Carmody, Underground Space Design, Van Norstrand Reinhold Company, New York, NY, 1993.
- [6] The IES Calculation Procedures Committee, Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability, Journal of the IES, July, p.p.381~392, 1984.
- [7] Treado, S. and T. Kusuda, Solar Radiation and Illumiantion, NBS Technical Note, U.S. Department of Commerce/National Bureau of Standards, p.p.48, 1981.
- [8] 宿谷昌則, 木村建一, 晝光の發光効率たよる毎時水平面日射量からの照度の推定, 日本建築學會論文報告集, 第 293號, 1980.