

## 제 4 장 축소모형 실험을 통한 수치 모델의 타당성 검증

### 4.1 축소 모형 실험 개요

#### 4.1.1 실험 개요

본 연구에서 개발한 수직장방형 광덕트의 광속전달율 계산용 수치 모델을 검증하기 위해서 다양한 형상과 반사율을 갖는 광덕트의 축소 모형을 이용한 실험을 행하였다. 실험 장소 및 기간은 다음과 같다.

- (1) 실험 장소 : 경기도 안산시 H 대학교 제2 공학관 옥상
- (2) 기 간 : 1996년 8월 27일 [예비 측정]  
1996년 8월 28일 [본 측정 : 담천공 상태]  
1996년 9월 2일 [본 측정 : 청천공 상태]

#### 4.1.2 광덕트의 광속전달율에 영향을 미치는 주요 변수

수직장방형 광덕트의 광속전달율에 영향을 미치는 변수는 다음의 4가지로 요약될 수 있다.

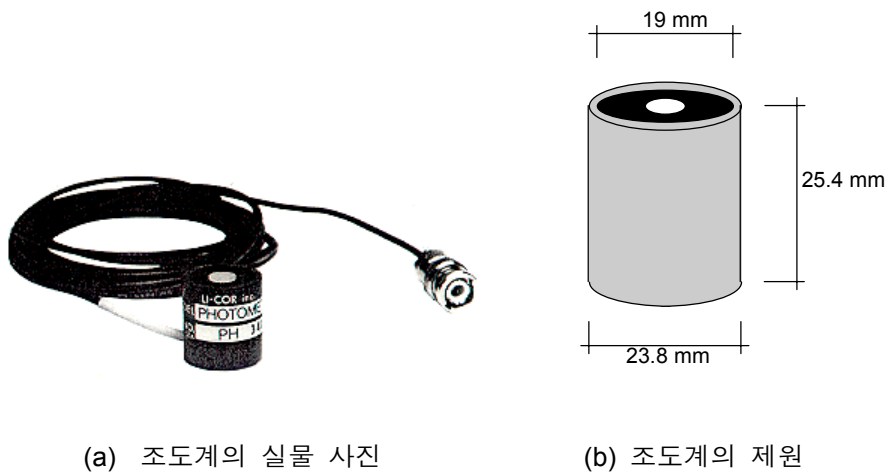
- (1) 광덕트의 제원 (너비, 길이, 높이)
- (2) 광덕트의 내부 반사율 및 반사 특성
- (3) 천공의 상태
- (4) 태양의 위치

광덕트의 제원의 경우 입구면 면적에 대해 높이가 변화함에 따라 광속전달율이 변화하며 너비와 길이의 변화도 광덕트 바닥면의 광속 분포에 영향을 미친다. 광덕트 내부의 표면 반사 특성에는 확산 반사면과 정반사면이 있다. 이 두 가지 종류는

빛의 이동을 해석하는데 있어서 다른 방법으로 접근해야 한다. 따라서 본 연구에서는 확산 반사면만을 고려하여 광속전달법을 적용하였다. 천공의 상태로서는 담천공과 청천공 상태로 나누어 고려하였으며 청천공 상태에서는 태양의 고도와 방위각을 변화시켜가며 측정하였다.

#### 4.1.3 축소 모형의 제작

축소 모형은 목재를 사용하여 광덕트의 각각의 제원 및 반사율에 따라 제작하였다. 모형 광덕트의 크기는 조도계의 면적과 광덕트의 바닥면 면적을 비교하여 그 크기가 100 배 이상이 되도록 설정하였다. 이것은 광덕트의 크기가 조도계에 비하여 지나치게 작으면 바닥면의 조도를 측정하는 조도계가 점이 아닌 면으로 인식되어 계산식과의 오차가 커지기 때문이다. 또한, 모형이 지나치게 크면 모형을 손쉽게 다루기가 어렵기 때문에 적절한 크기로 제작하는 것이 필요하다. 본 축소 모형 실험에서 사용한 조도계의 형태와 크기는 [그림 4.1]과 같다.



[그림 4.1] 축소 모형 실험에 사용된 조도 센서

조도계의 안쪽 직경은 19mm로서 조도계의 면적은  $283.53 \text{ mm}^2$ 이다. 따라서 요구되는 바닥면의 면적은  $28,353 \text{ mm}^2$ 로서 광덕트가 정방형이라고 할 때 한 변의 길이는 최소한 168 mm가 되어야 한다. 본 연구에서는 모형 제작이나 계산의 편의를

위해서 기준이 되는 광덕트의 한 변의 길이를 200 mm 로 결정하였다.

다음 <표 4.1>은 제작한 모형을 크기와 반사율에 따라 기호로 나타낸 것이다. 덕트의 크기는 광정지수(WI: Well Index)(Robbins, 1986)로서 나타내는데, 여기서 광정지수(WI)는 광덕트 바닥 면적에 대한 높이의 비를 나타내는 무차원 수로서 일반적으로 아트리움 공간의 깊이의 정도를 나타낼 때 사용되며 식 (4.1)로 표현된다.

$$WI = \frac{(W + L) \times H}{2 \times (W \times L)} \quad (4.1)$$

단, W: 너비 [mm]

L: 길이 [mm]

H: 높이 [mm]

<표 4.1> 광덕트 모형

번호	기 호	광덕트의 크기: 너비×길이×높이 [단위 mm]	Well Index	반사율 [%]
1	W1R90	200×200×200	1	90
2	W2R90	200×200×400	2	90
3	W4R90	200×200×800	4	90
4	W8R90	200×200×1,600	8	90
5	W4R80	200×200×800	4	80
6	W4R70	200×200×800	4	70
7	W4R0	200×200×800	4	0
8	W3R90	200×400×800	3	90
9	W2.5R90	200×800×800	2.5	90

제작한 모형의 반사율은 무광 백색 페인트와 무광 흑색의 색소를 배합 비율로 조정하였으며 [그림 4.2]와 같이 조도계와 휘도계를 사용하여 측정된 값을 식 (4.2)에 대입하여 반사율을 구하였다.



[그림 4.2] 조도계와 휘도계를 사용하여 반사율을 측정하는 장면

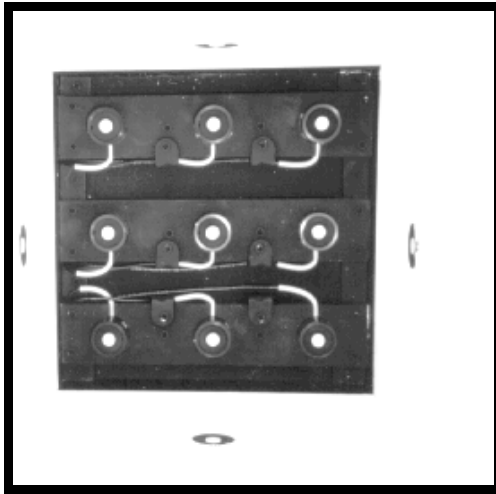
$$r = \frac{L \times \rho}{E} \quad (4.2)$$

단,  $\rho$ : 반사율

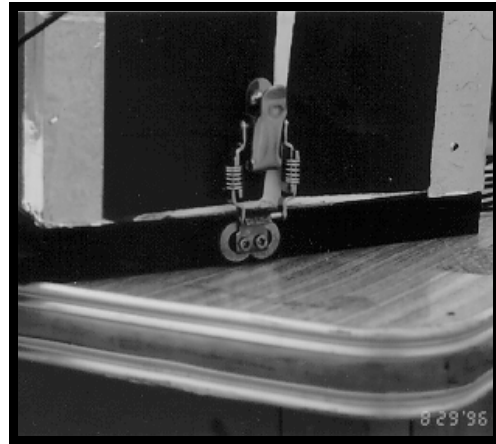
L: 휘도 [ $\text{cd}/\text{m}^2 = \text{lm}/\text{sr} \cdot \text{m}^2$ ]

E: 조도 [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ]

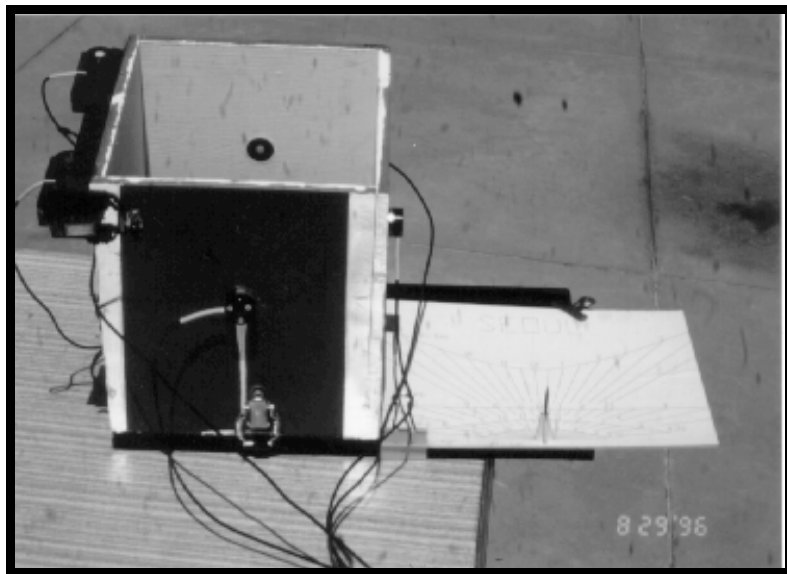
바닥면 조도를 측정하기 위하여 [그림 4.3]과 같이 조도계 3 개를 1 세트로 만들어 바닥판에 고정할 수 있도록 제작하였으며([그림 4.3(a)], 탈착용 철물을 이용하여 광덕트 하부에 탈착이 가능하도록 하였다([그림 4.3(b)]). 또한 광덕트 내부 표면의 조도를 검증 자료로서 사용하기 위해 바닥면에서 20 cm 높이의 중앙에 사방으로 구멍을 뚫어서 조도계를 설치하였다. 외부 조도는 조도계 2 개를 광덕트의 입구면과 평행하게 설치하여 1 개는 전체 조도를, 다른 조도계는 직사일광을 가린 확산 천공광 조도를 측정하였다([그림 4.3(c)]).



(a) 바닥면에 설치된 조도계



(b) 광덕트 하부에 부착된 바닥면

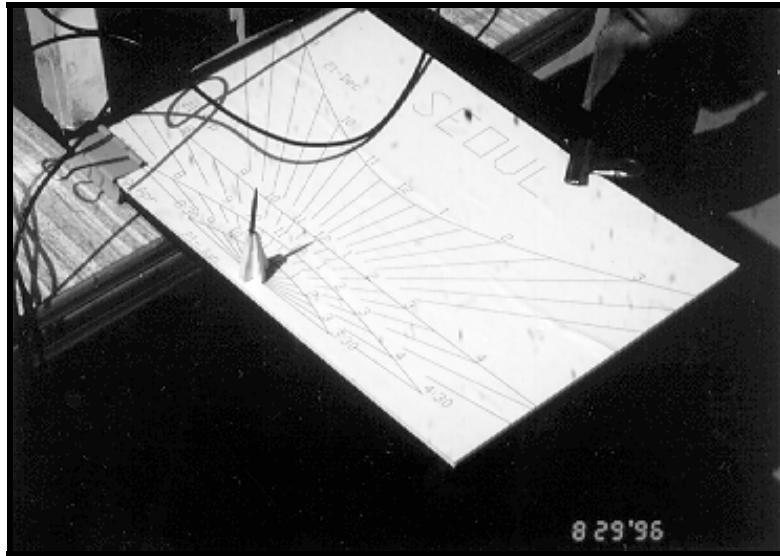


(c) 광덕트 모형의 내부 수직면 및 외부 조도 측정용 조도계 설치 모습

[그림 4.3] 광덕트 모형의 바닥면과 내부 벽면에 설치된 조도계

태양 고도 및 방위각은 [그림 4.4]와 같이 태양 적위의 대표값을 갖는 6월 21

일, 9월 21일, 12월 21일을 기준일로 정하고 각 시간별로 태양 고도와 방위각에 따라 그림자 길이를 나타내는 일영도를 이용하여 결정하였다.



[그림 4.4] 일영도

#### 4.1.4 측정기기 및 측정 방법

##### 1) 측정기기

본 측정에서 사용된 측정기기는 <표 4.2>와 같다.

##### <표 4.2> 측정기기

- 
- 모형 측정용 조도계 LI-210SA 15 개
  - 데이터로거 DATASCAN 1 대
  - 휘도계 LS110 1 대
  - 디지털 조도계 1 대
  - 측정 데이터 저장 및 처리용 컴퓨터 486DX<sub>2</sub> 50 1 대
  - 다양한 제원과 반사율을 갖는 광덕트 축소 모형 9 개
- 

##### 2) 측정 방법

수직장방형 광덕트의 광속전달을 측정을 위한 본 실험은 청천공 상태와 담천공

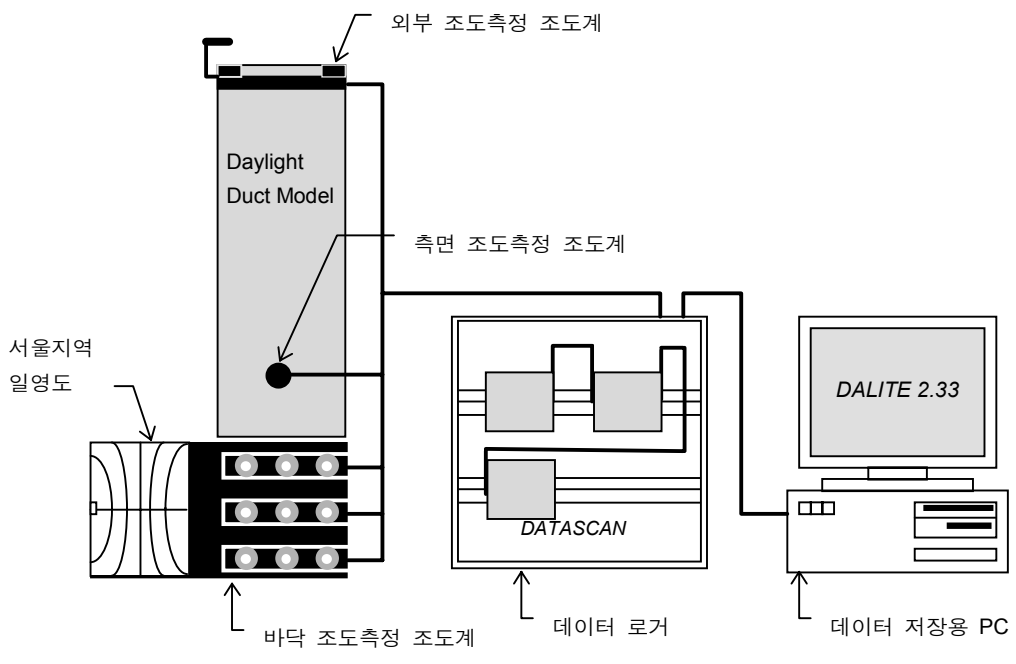
상태일 때 실시되었다. 담천공 및 청천공 상태에서의 측정 순서는 <표 4.3>에서 나타내었다.

<표 4.3> 담천공 및 청천공 상태에서의 측정 순서

기호	광정지수(WI)	반사율[%]	측정 대상 일시(청천공 상태)
W1R90	1	90	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W2R90	2	90	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W4R90	4	90	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W8R90	8	90	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W3R90	3	90	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W2.5R90	2.5	90	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W4R80	4	80	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W4R70	4	70	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00
W4R0	4	0	서울 지역 6/21, 9/21, 12/21 9:00 ~ 17:00

[그림 4.5]는 측정 장비의 설치 개념도를 나타낸 것으로서, 조도계와 연결한 데이터로거를 제어하는 DALITE 프로그램을 이용하여 각 항목에 대하여 2 초 간격으로 1 분간 데이터를 측정 및 저장하였다.

바닥판에 설치된 조도계는  $\mu V$ 의 신호를 데이터로거로 전송한다. 전송된  $\mu V$ 의 신호를 읽은 컴퓨터는 DALITE 프로그램을 이용하여 각각의 조도계가 갖는 상수값을 곱함으로써 조도의 단위인 lx로 데이터를 저장한다. 다음 <표 4.4>는 각각의 조도계의 상수를 계산한 값을 나타낸 것이다.

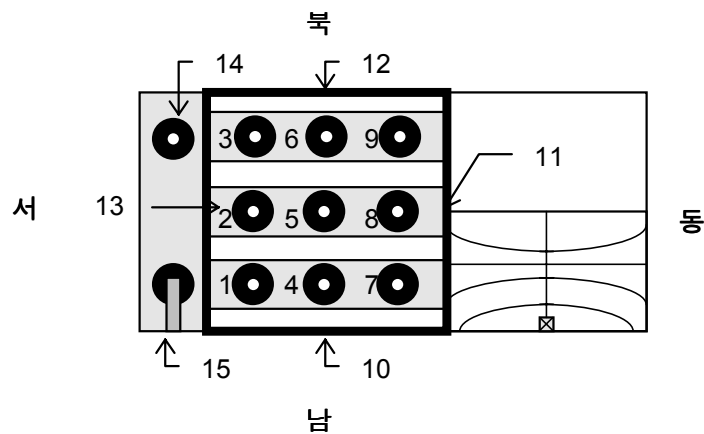


[그림 4.5] 측정 장비 설치 개념도



<표 4.4> 축소 모형 실험에 사용된 조도계 상수의 계산

분류	번호	계산 상수 [ $\mu A/100klux$ ]	계산	조도변환 상수 [ $lux/\mu V$ ]
바닥면	1	35.12	$35.12 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2121248 [\mu V/lux]$	4.7142
	2	32.68	$32.68 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1973872 [\mu V/lux]$	5.0662
	3	34.57	$34.57 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2088028 [\mu V/lux]$	4.7892
	4	32.70	$32.70 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1975080 [\mu V/lux]$	5.0631
	5	34.11	$34.11 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2060244 [\mu V/lux]$	4.8538
	6	29.54	$29.54 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1784216 [\mu V/lux]$	5.6047
	7	31.68	$31.68 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1913472 [\mu V/lux]$	5.2261
	8	34.11	$34.11 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2060244 [\mu V/lux]$	4.8538
	9	33.10	$33.10 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1999240 [\mu V/lux]$	5.0019
측면	10	33.41	$33.41 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2017964 [\mu V/lux]$	4.9555
	11	33.48	$33.48 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2022192 [\mu V/lux]$	4.9451
	12	35.59	$35.59 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.2149636 [\mu V/lux]$	4.6520
	13	31.58	$31.58 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1907432 [\mu V/lux]$	5.2427
$E_T$	14	31.96	$31.96 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1930384 [\mu V/lux]$	5.1803
$E_d$	15	32.64	$32.64 \mu A/100000lux \times 604 Ohm = 0.1971456 [\mu V/lux]$	5.0724



[그림 4.6] 조도계 배치도

## 4.2 컴퓨터 모델의 정확성 및 적용 한계에 대한 검토

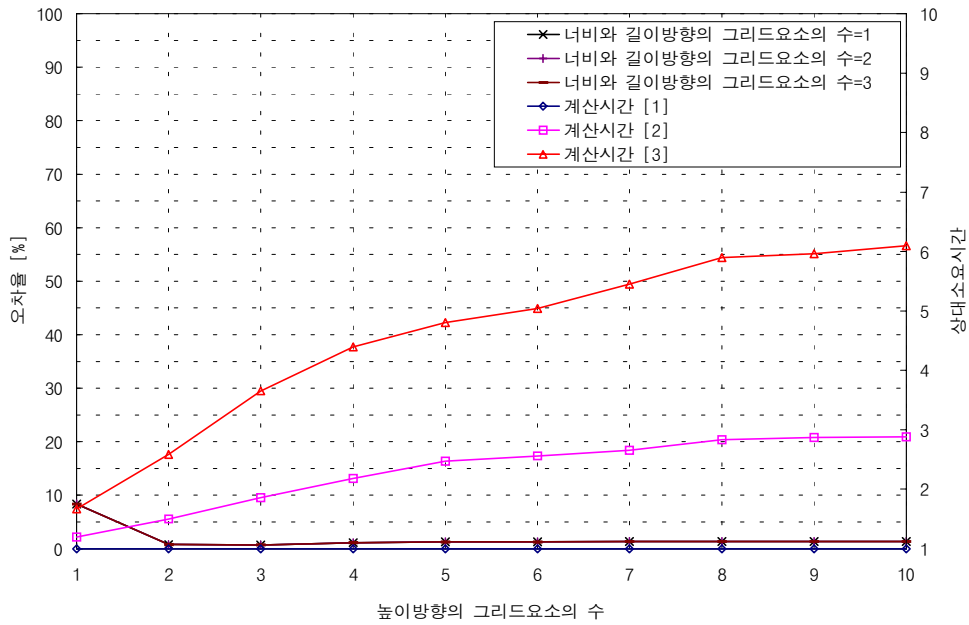
### 4.2.1 담천공 상태

#### 1) 그리드요소의 개수와 계산 결과의 정확성

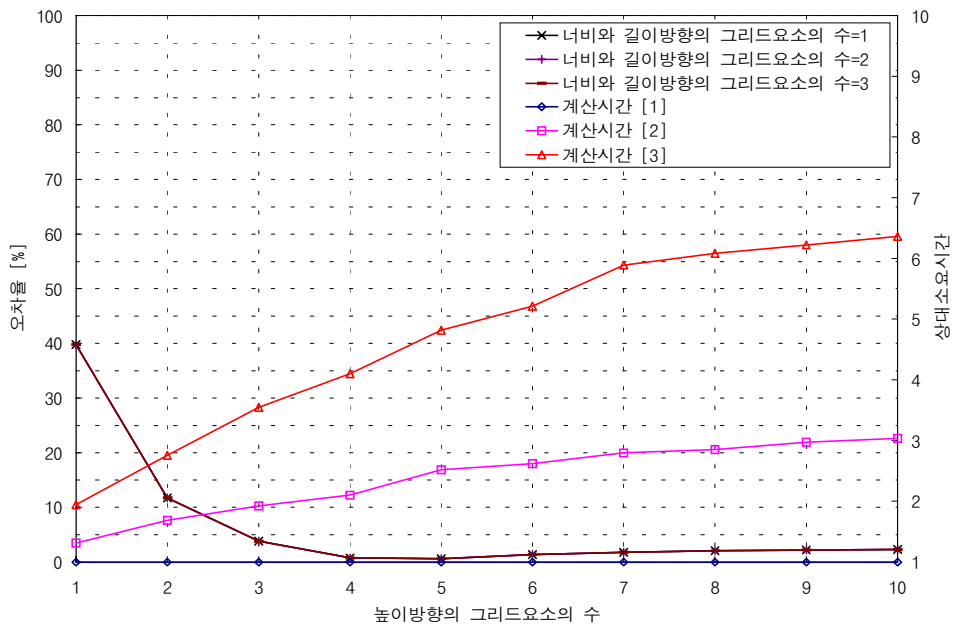
[그림 4.7]~[그림 4.10]은 담천공 상태에서 너비, 길이 및 높이 방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 얻은 계산 결과와 실측 결과를 식 (4.3)을 이용하여 구한 오차율과 계산에 소요된 시간을 나타낸 것이다.

$$\text{오차율} = \frac{\text{실측치} - \text{계산치}}{\text{계산치}} \times 100 [\%] \quad (4.3)$$

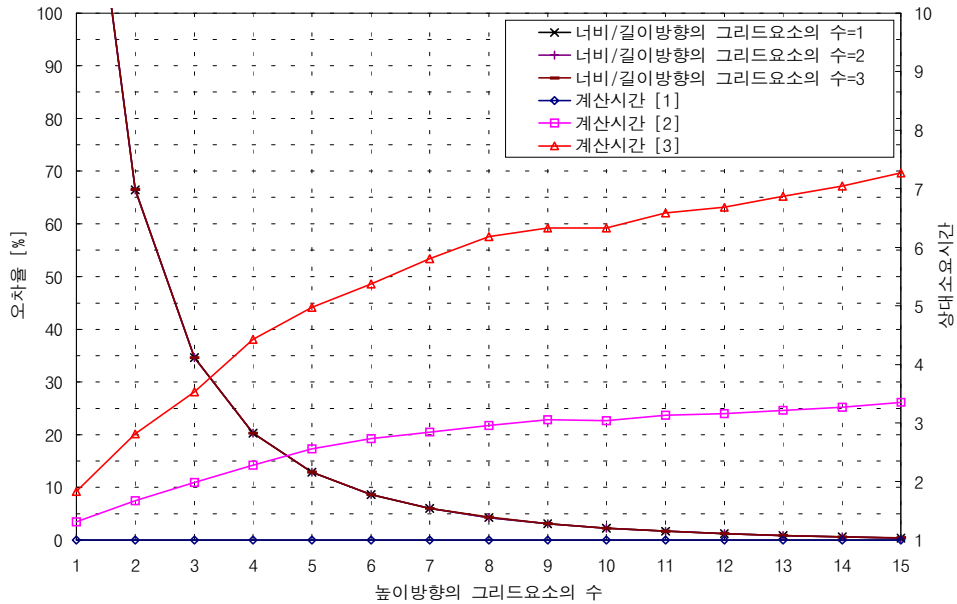
그림을 살펴보면 그래프마다 WI의 값에 따라 차이는 있지만 높이 방향으로 나눈 그리드요소의 수가 증가할수록 오차율이 작아졌다. 오차율 5% 이하가 되는 높이 방향의 최소 그리드요소의 수는 WI의 값이 1일 때는 2, 2일 때는 4, 4일 때는 8, 8일 때는 16으로 나타났다. 반면, 너비와 길이 방향의 그리드요소 수의 증가가 1, 2 그리고 3인 곡선은 거의 일치되어 나타나고 있다. 이것은 너비와 길이 방향의 그리드요소 수의 증가가 오차율에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다. 그러나, 너비와 길이 방향의 그리드요소 수가 증가함에 따라 계산 시간은 WI의 값에 따라 다소 차이는 있지만 대략적으로 높이 방향의 그리드요소의 수가 10일 때 3배, 6배 이상으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 담천공 상태에서는 너비와 길이 방향의 그리드요소 수를 1로 설정하고 높이 방향의 최적 그리드요소의 수를 설정하는 것이 계산 결과의 정확성을 증가시키고 계산 시간면에서도 효율적인 것으로 판명되었다.



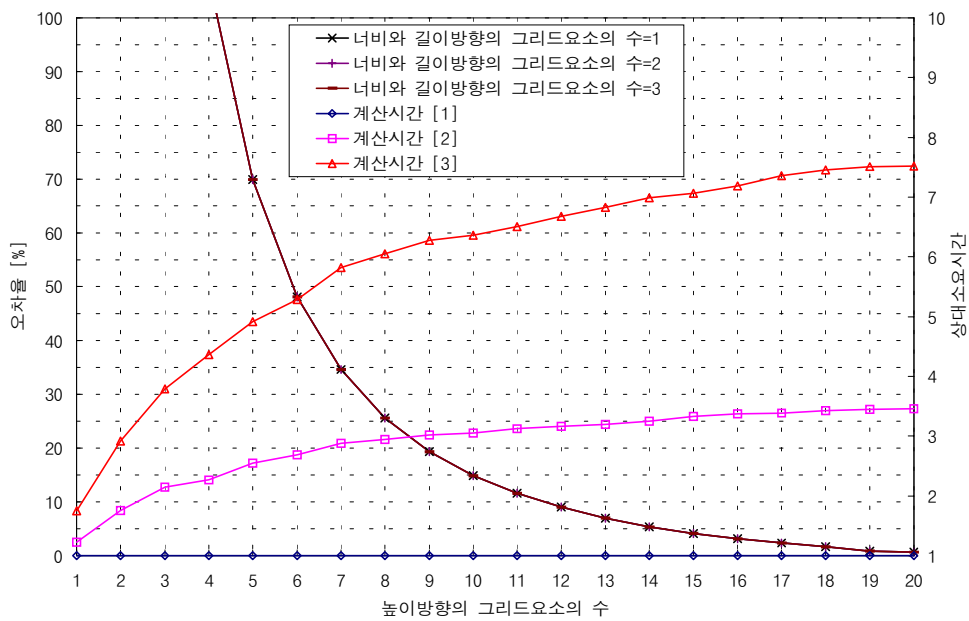
[그림 4.7] 담천공 상태에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 및 계산 시간 [WI=1, 반사율=90%]



[그림 4.8] 담천공 상태에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 및 계산 시간 [WI=2, 반사율=90%]



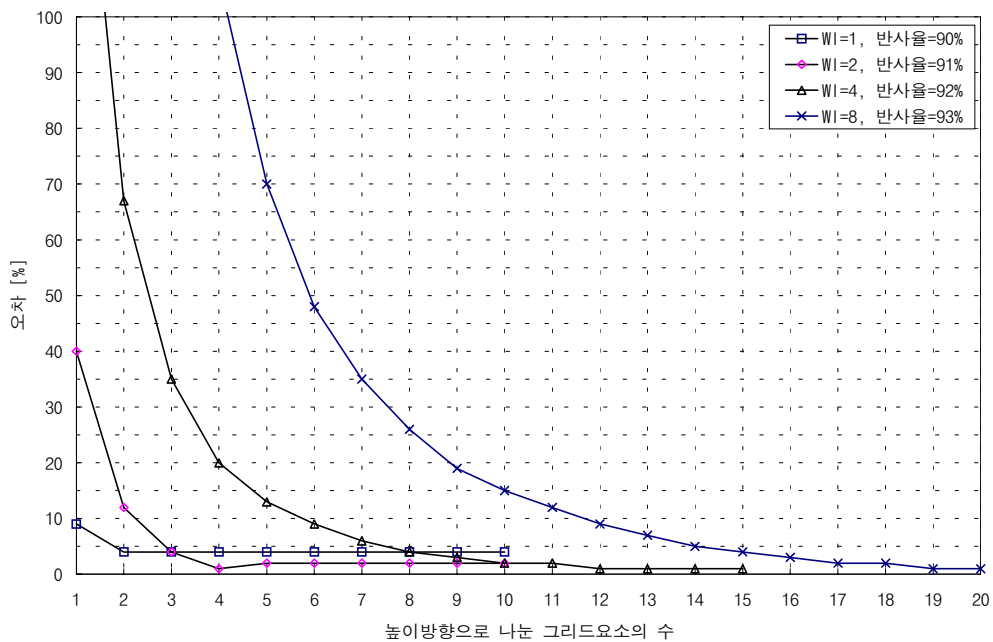
[그림 4.9] 담천공 상태에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 및 계산 시간 [WI=4, 반사율=90%]



[그림 4.10] 담천공 상태에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 및 계산 시간 [WI=8, 반사율=90%]

2) 광덕트의 WI와 계산 결과의 정확성

[그림 4.11]은 담천공 상태에서 WI 값이 1, 2, 4, 8 인 4 가지 광덕트 모형에 대하여 너비 및 길이 방향의 그리드요소의 수를 1로 설정하고 높이 방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 얻은 측정 결과와 계산 결과의 오차율을 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 높이 방향으로 나눈 그리드요소 수의 차이는 있지만 모두 오차율이 5% 이하로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 높이 방향으로 그리드요소의 수를 많이 나눌수록 더 정확한 값에 접근하며 높이가 커질수록 정확한 계산 결과를 얻기 위해서는 더 많은 그리드요소 수가 필요한 것을 알 수 있다. 정확성이 95% 이상이 되는 최소의 높이 방향의 그리드요소의 수는 WI의 값이 1일 때 2, 2일 때 4, 4일 때 8, 그리고 8일 때 16 등으로 WI 값의 배수를 나타내는 것을 알 수 있다. WI의 값이 1, 반사율이 90%인 광덕트 모형은 다른 조건에 비해 계산 결과와 측정 결과의 오차율이 크다. 이것은 수치 모델에서는 천공의 휘도 분포가 일정한 것으로 가정하고 있지만 WI 값이 작은 기호 W1R90 인 모형의 경우 다른 모형에 비해 더 넓은 면적의 불균일한 휘도 분포를 갖는 천공이 각각의 그리드요소에서 보여지기 때문인 것으로 사료된다.

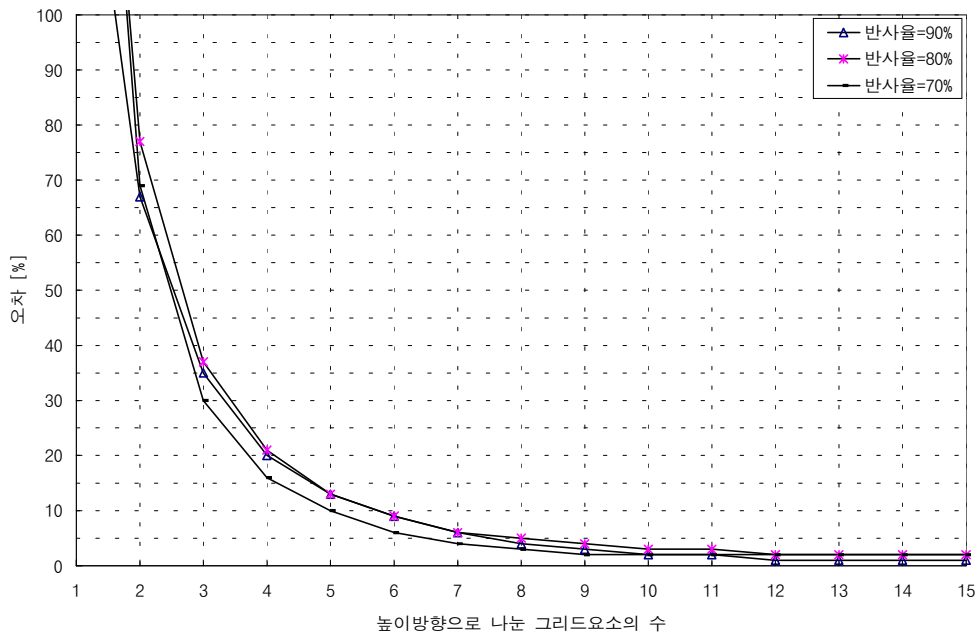


[그림 4.11] 담천공 상태에서 Well Index 와 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율

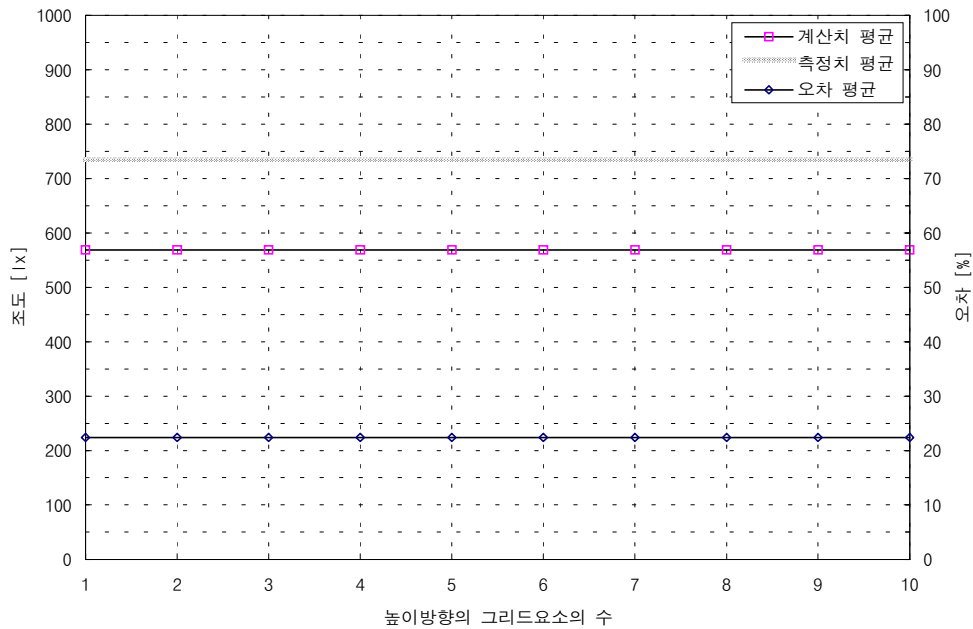
### 3) 광덕트의 내부 반사율과 계산 결과의 정확성

[그림 4.12]는 담천공 상태에서 반사율이 90, 80, 70 %인 광덕트 모형에 대하여 계산 결과의 측정 결과에 대한 오차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 3 가지 경우 모두 비슷한 경향으로 수직 방향의 그리드요소 수가 증가하면서 오차율이 줄어들고 그리드요소 수가 7~8 개 됨으로써 5% 이하로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 담천공 상태에서 수직장방향 광덕트의 광속전달율을 정확하게 계산하기 위해 요구되는 높이 방향의 그리드요소의 수는 반사율에 거의 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다.

[그림 4.13]은 반사율이 0%인 무광 흑색을 내부에 칠한 모형을 대상으로 측정한 결과로서 오차율이 다른 경우에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이것은 확산천공광이 광덕트 표면으로 입사하는 각도가 클 경우 표면의 반사율보다는 표면의 상태에 영향을 더 많이 받기 때문에 실제로 측정된 모형 실험의 값이 계산 결과보다 높게 나온 것으로 사료된다.



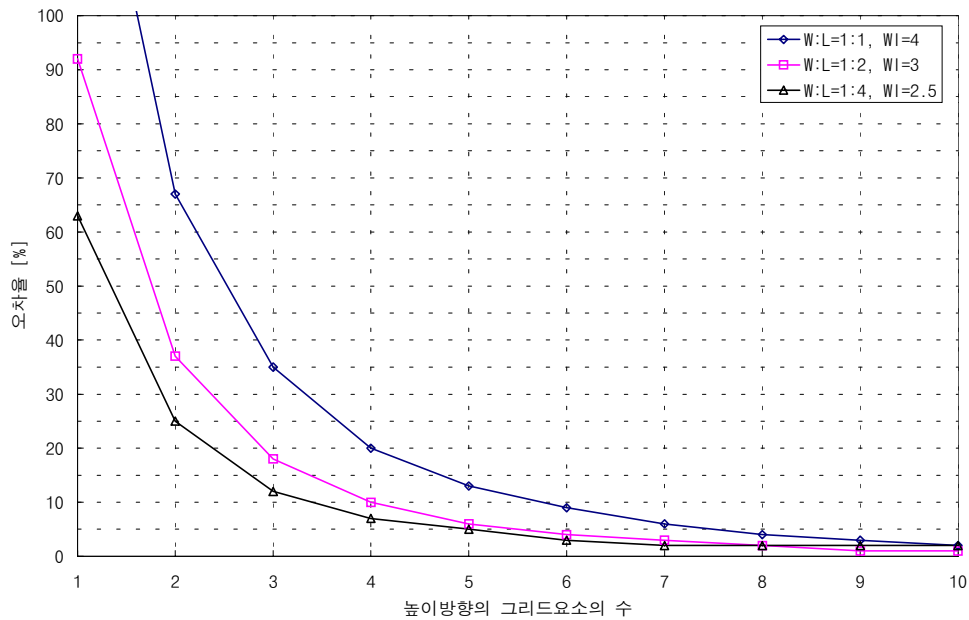
[그림 4.12] 담천공 상태에서 내부 반사율과 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=4]



[그림 4.13] 담천공 상태에서 내부 반사율이 0%일 때 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=4]

#### 4) 광덕트의 너비 대 길이의 비와 계산 결과의 정확성

[그림 4.14]는 광덕트의 높이에 대하여 너비 대 길이의 비가 변화할 때 오차율을 비교한 그래프이다. 그림을 살펴보면 너비 방향의 길이에 대하여 길이 방향의 길이가 2 배, 4 배로 늘어날 때 동일한 높이 방향의 그리드요소의 수에서 오차율이 작아지는 것을 알 수 있다. 오차율 5% 이하가 되는 높이 방향의 그리드요소의 수는 WI의 값이 4 일 때는 8, 3 일 때는 6, 2.5 일 때는 5로 나타났다. 이것은 앞에서 살펴본 바와 같이 95% 이상의 정확한 계산을 하기 위해 요구되는 높이 방향의 최소 그리드요소의 수는 WI의 값의 배수임을 알 수 있다.



[그림 4.14] 담천공 상태에서 광덕트의 너비 대 길이의 비와 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율

5) 담천공 상태에서의 최적 그리드요소 수의 결정

본 연구의 결과 담천공 상태에서 95% 정도 정확성을 갖게 하는 최적 그리드요소의 수는 <표 4.5>와 같이 나타났다.

<표 4.5> 담천공 상태에서의 최적 그리드요소의 수

너비와 길이 방향의 그리드요소 수	$n_h = 1$
높이 방향의 그리드요소 수	$n_v = 2WI$

4.2.2 청천공 상태

1) 그리드요소의 수와 계산 결과의 정확성

[그림 4.15]는 태양이 남중한 9월 21일 12시, 그리고 [그림 4.16]~[그림 4.19]는

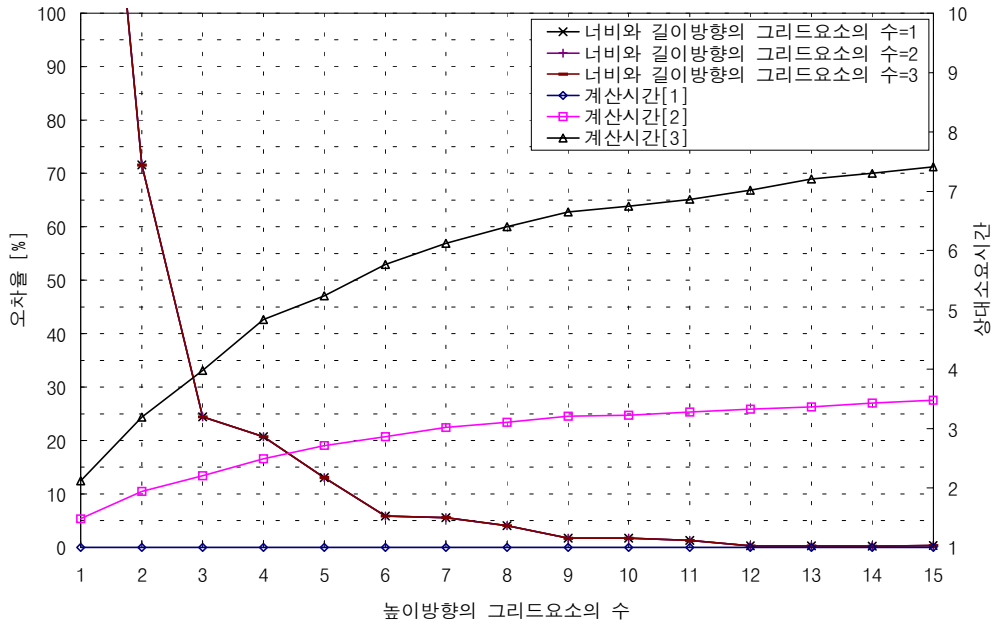


9월 21일 9시( $\alpha=34.06^\circ$ ,  $\phi=58.60^\circ$ )인 청천공 상태에서 WI의 값이 1, 2, 4 그리고 8일 때 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소의 수를 변화시키면서 오차율을 비교한 것이다.

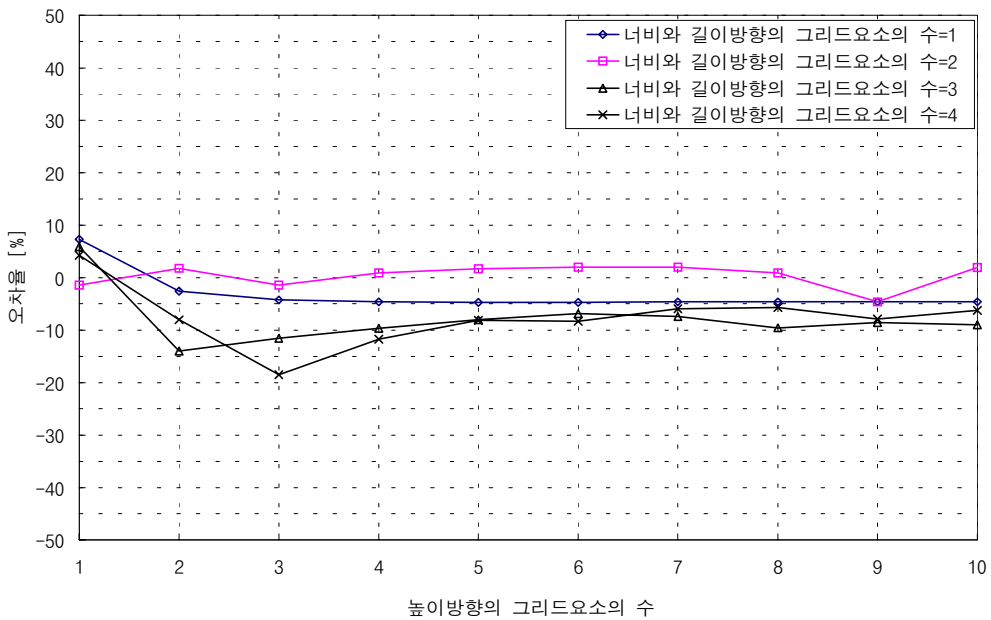
[그림 4.15]를 살펴보면 담천공 상태와 마찬가지로 태양의 방위각이  $0^\circ$ 인 12시에서 너비 및 길이 방향의 그리드요소 수의 변화는 오차율의 크기에 별다른 영향을 미치지 않기 때문에 너비 및 길이 방향의 그리드요소의 수가 1, 2 그리고 3인 곡선은 일치되어 나타났다. 그러나, 너비와 길이 방향의 그리드요소 수가 증가함에 따라 계산 시간은 높이 방향의 그리드요소 수가 15일 때 3배, 7배 이상으로 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나, [그림 4.16]~[그림 4.19]를 살펴보면 태양 방위각이  $0^\circ$ 가 아닌 오전 9:00의 경우 너비 및 길이 방향의 그리드요소의 수가 증가함에 따라 오차율이 변화하며 너비와 길이 방향의 그리드요소 수가 3개일 때 오차율을 나타내는 곡선이 0%로 수렴하며 오차율 5% 이하가 되는 높이 방향의 그리드요소의 수는 WI의 값이 2일 때는 7, 4일 때는 13, 8일 때는 25로 나타났다. 단, WI의 값이 1일 때는 오차율이 약 10% 정도를 나타내고 있다. 이것은 앞에서 살펴본 담천공 상태에서 나타난 현상처럼 수치 모델에서는 천공의 조도가 일정한 것으로 가정하고 있으나 실제 천공 상태의 휘도 분포는 불균일함으로 WI의 값이 작은 기호 W1R90인 모형의 경우 다른 크기의 모형에 비해 더 넓은 면적의 불균일한 휘도 분포를 갖는 천공이 각각의 그리드요소에서 보여지기 때문인 것으로 사료된다.

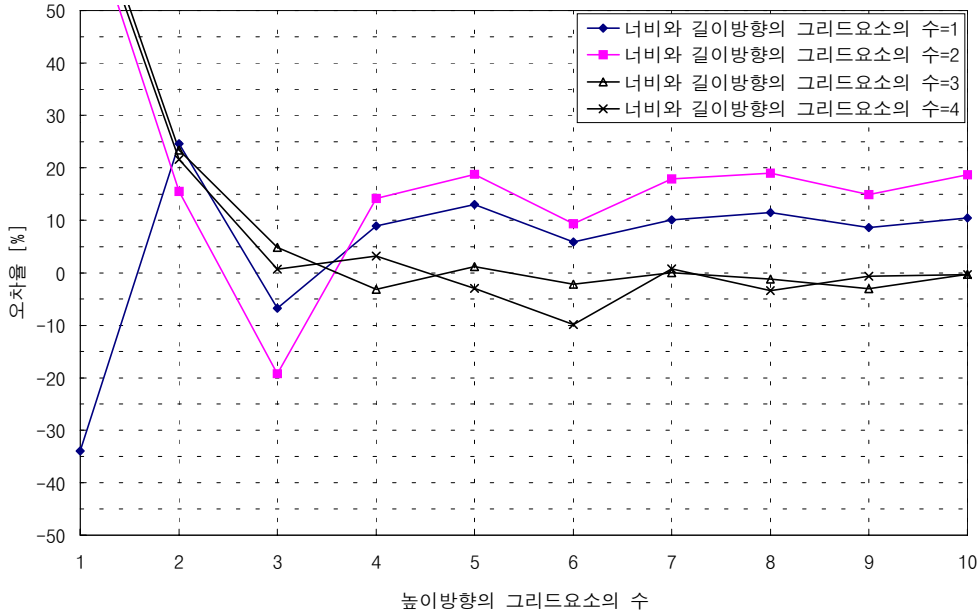
따라서, 신속하고 정확한 계산을 하기 위해서 태양의 방위각이  $0^\circ$ 일 경우에는 너비와 길이 방향의 그리드요소의 수를 1로 하고 높이 방향의 그리드요소 수를 담천공 상태와 동일한 조건인 2WI로 설정하며, 태양의 방위각이  $0^\circ$ 가 아닐 경우는 너비와 길이 방향의 최적 그리드요소 수를 3으로 하고 높이 방향의 그리드요소의 수를  $3WI+1$ 로 설정해야 하는 것으로 판명되었다.



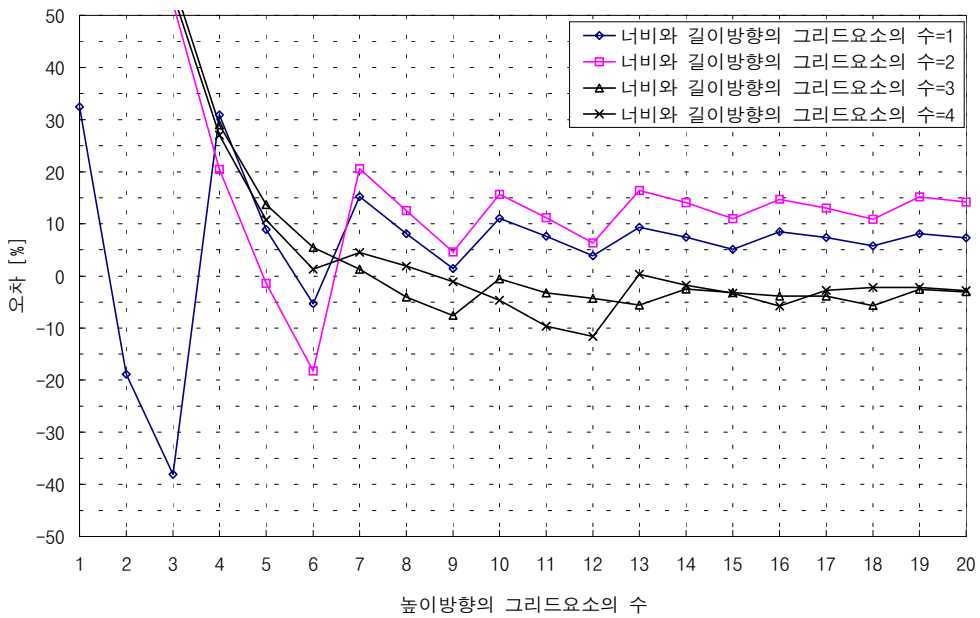
[그림 4.15] 청천공 상태(9/21 12:00)에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=4, 반사율=90%,  $\alpha=52.46^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ ]



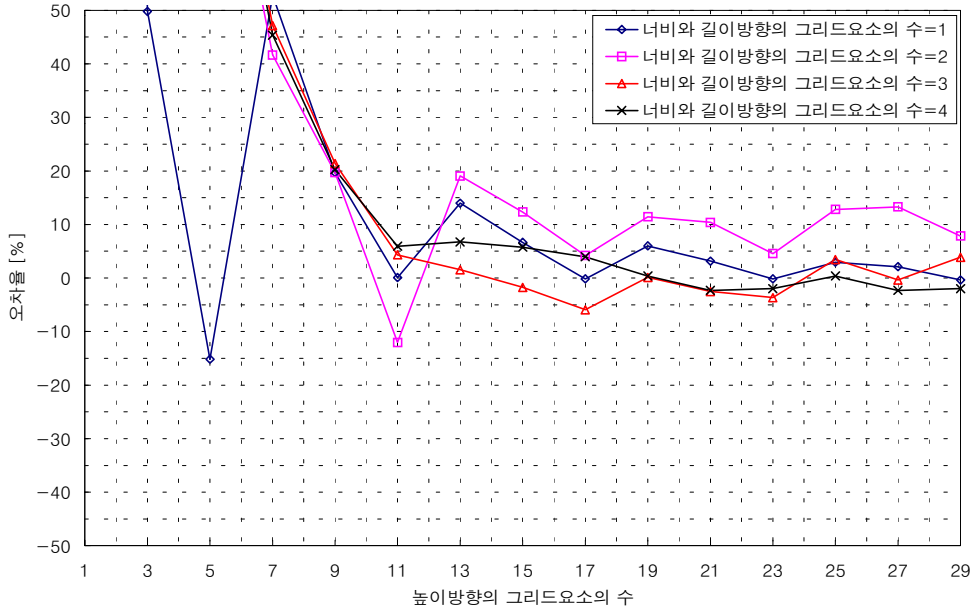
[그림 4.16] 청천공 상태(9/21 9:00)에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=1, 반사율=90%,  $\alpha=34.06^\circ$ ,  $\phi=58.60^\circ$ ]



[그림 4.17] 청천공 상태(9/21 9:00)에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=2, 반사율=90%,  $\alpha = 34.06^\circ$ ,  $\phi = 58.60^\circ$ ]



[그림 4.18] 청천공 상태(9/21 9:00)에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=4, 반사율=90%,  $\alpha = 34.06^\circ$ ,  $\phi = 58.60^\circ$ ]

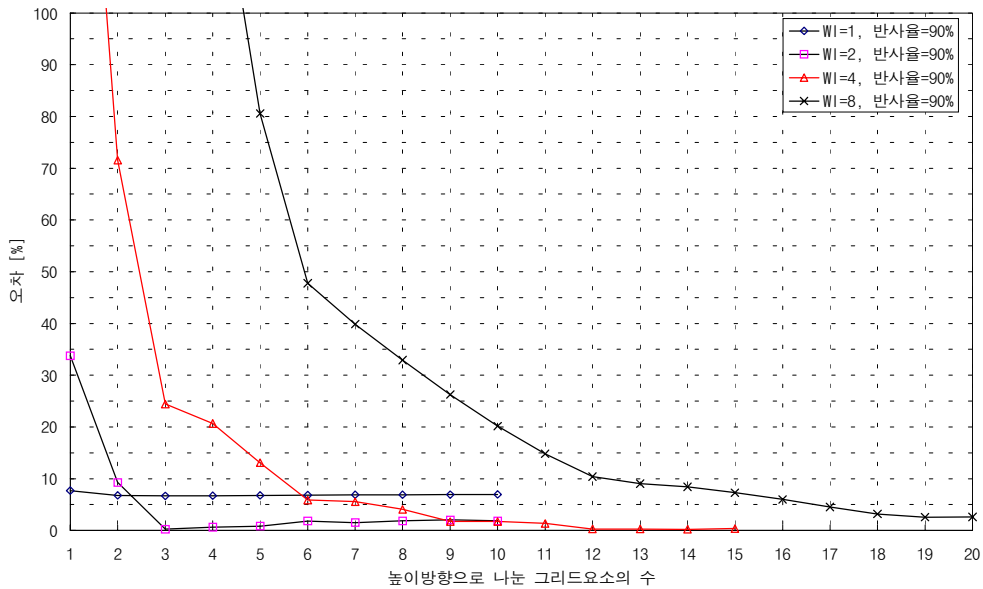


[그림 4.19] 청천공 상태(9/21 9:00)에서 너비와 길이 및 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=8, 반사율=90%,  $\alpha = 34.06^\circ$ ,  $\phi = 58.60^\circ$ ]

## 2) 광덕트의 WI와 계산 결과의 정확성

[그림 4.20]은 9월 21일 태양이 남중한 12시 청천공 상태에서 WI 값이 1, 2, 4, 8인 광덕트 모형에 대하여 계산 결과와 측정 결과 사이의 오차율을 나타낸 것이다. [그림 4.20]을 살펴보면 담천공 상태에서의 높이 변화에 대한 오차율과 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며 기호 W1R90인 모형을 제외하고는 오차율이 5% 이하로 수렴하는 것을 알 수 있다. 기호 W1R90인 모형은 담천공 상태에서와 마찬가지로 실제 천공의 휘도 분포차의 영향으로 다른 크기의 모형과 비교해 볼 때 오차율이 큰 것으로 나타났다.

태양이 남중하지 않은 청천공 상태에서는 WI의 값과 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율은 앞의 1)항에서 [그림 4.16]~[그림 4.19]을 통해 살펴 보았다.

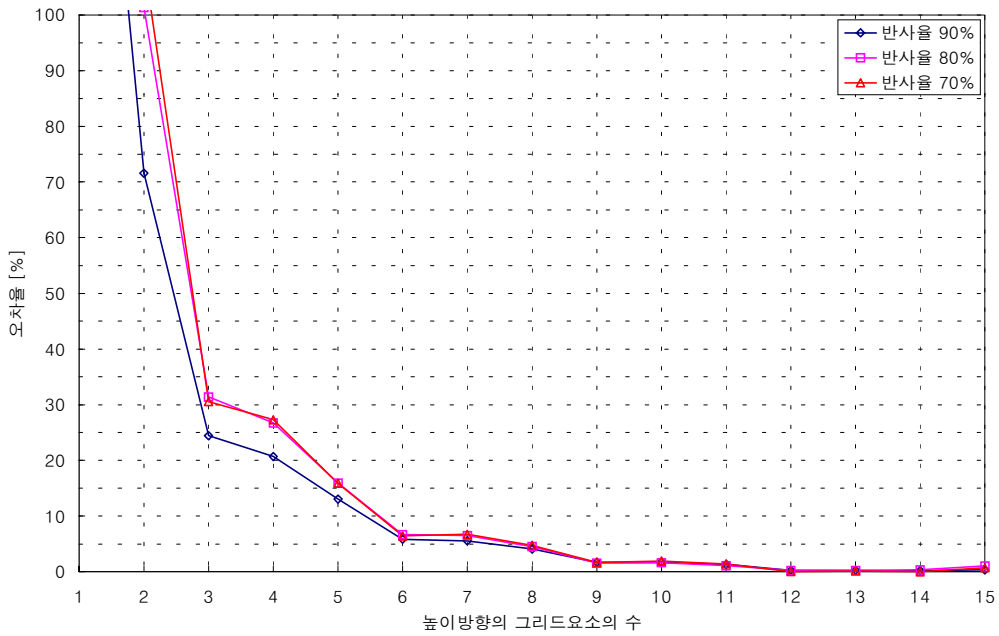


[그림 4.20] 청천공 상태(9/21 12:00)에서 WI와 높이 방향의 그리드요소 수에 대한 오차율 [ $\alpha=52.46^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ ]

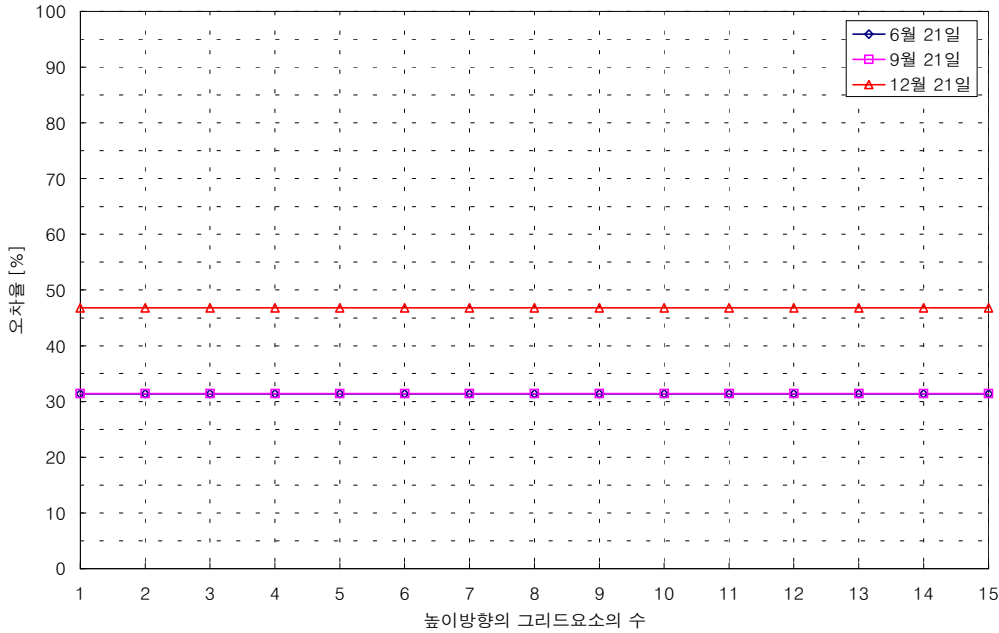
### 3) 광덕트의 내부 반사율과 계산 결과의 정확성

[그림 4.21]은 청천공 상태(9/21 12:00)에서 반사율이 90, 80, 70 %인 광덕트 모형에 대하여 계산 결과의 측정 결과에 대한 오차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 담천공 상태에서 살펴본 결과와 마찬가지로 3 가지 경우 약간의 차이는 있지만 모두 비슷한 경향으로 수직 방향의 그리드요소 수가 증가하면서 오차율이 줄어들고 있으며 그리드요소 수가 8 개가 됨으로써 5% 이하로 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 청천공 상태에서 수직장방향 광덕트의 광속전달율을 정확하게 계산하기 위해 요구되는 높이 방향의 그리드요소의 수는 반사율에 거의 영향을 받지 않는 것으로 판명되었다.

[그림 4.22]는 반사율이 0%인 무광 흑색을 내부에 칠한 모형을 대상으로 청천공 상태에서 6월 21일, 9월 21일 그리고 12월 21일의 12:00 인 조건에서 측정된 결과로서 오차율이 다른 경우에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이것은 담천공 상태에서 살펴본 바와 마찬가지로 직사일광 및 확산천공광이 광덕트 표면으로 입사하는 각도가 클 경우 표면의 반사율 보다는 표면의 상태에 영향을 더 많이 받기 때문에 실제로 측정된 모형 실험의 값이 계산 결과보다 높게 나온 것으로 사료된다.



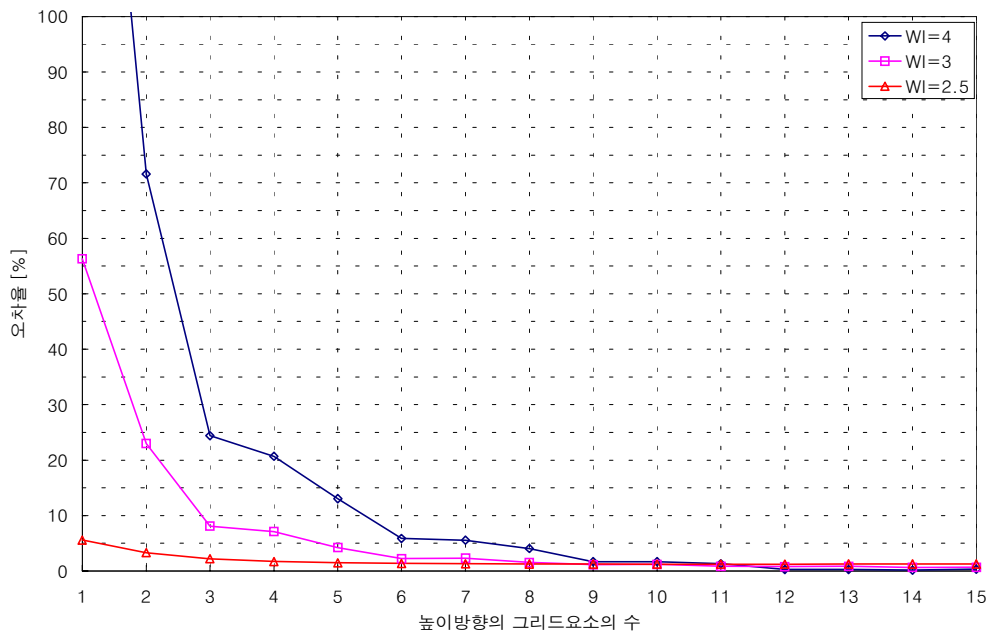
[그림 4.21] 청천공 상태(9/21 12:00)에서 내부 반사율과 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=4,  $\alpha=52.46^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ ]



[그림 4.22] 청천공 상태에서 내부 반사율이 0%일 때 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율 [WI=4,  $\phi_{6/21\ 12:00}=76.11^\circ$ ,  $\phi_{9/21\ 12:00}=52.46^\circ$ ,  $\phi_{12/21\ 12:00}=29.21^\circ$ ]

#### 4) 광덕트의 너비 대 길이의 비와 계산 결과의 정확성

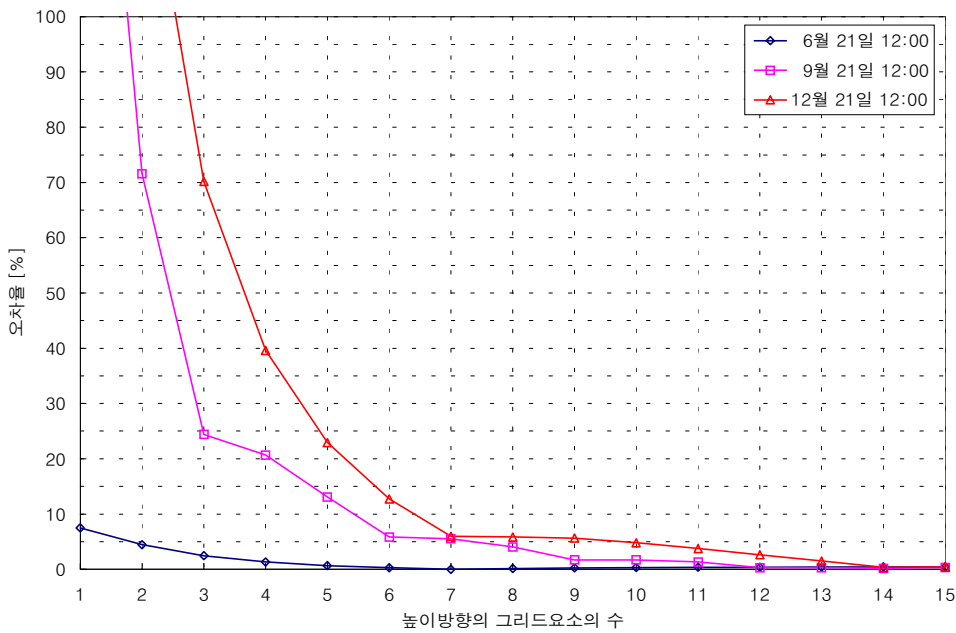
[그림 4.23]은 9월 21일 태양이 남중한 12:00 일 때 광덕트의 높이에 대하여 너비 대 길이의 비가 변화할 때 오차율을 비교한 그래프이다. 그림을 살펴보면 너비 방향의 길이에 대하여 길이 방향의 길이가 2 배, 4 배로 늘어난 경우 동일한 높이 방향의 그리드요소의 수에서 비교해 볼 때 오차율이 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나, 담천공 상태에서 비교한 것처럼 오차율 5% 이하가 되는 높이 방향의 그리드 요소의 수는 WI의 값의 배수로 나타나지 않았다. WI의 값이 4인 경우는 8, 3인 경우는 5, 그리고 2.5인 경우는 2를 나타냈다. 이것은 광덕트 모형의 높이가 같은 상태에서 WI의 값이 작아질 수록 바닥면에 직사일광이 더 많이 입사하기 때문에 상호반사성분의 바닥면 조도에 대한 영향보다는 직사일광에 의한 직접성분의 영향이 더 커지기 때문인 것으로 사료된다.



[그림 4.23] 청천공 상태(9/21 12:00)에서 광덕트의 너비 대 길이의 비와 높이 방향의 그리드요소 수의 변화에 대한 오차율

5) 태양의 고도와 계산 결과의 정확성

[그림 4.24]는 태양의 고도가 서로 다른 6월 21일 12:00, 9월 21일 12:00, 그리고 12월 21일 12:00의 상태에서 모형실험을 통해 측정된 값과 계산 결과를 오차율로 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 태양 고도가 높을 수록 높이 방향의 그리드 요소 수의 증가에 따른 오차율의 감소 추세는 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한, 9월 21일과 12월 21일은 높이 방향의 그리드 요소의 수가 7~8일 때 대체로 오차율 5% 이하가 되지만 6월 21일인 경우 오차율이 다른 날에 비해 전체적으로 상당히 적어서 2개일 때 오차율 5% 이하가 되었다. 이것은 6월 21일 12:00의 경우 직사 일광이 바닥면 계산점(혹은 측정점)에 직접 입사하여서 상호반사성분에 의한 바닥면의 조도에 미치는 영향이 다른 날보다 적기 때문인 것으로 사료된다.

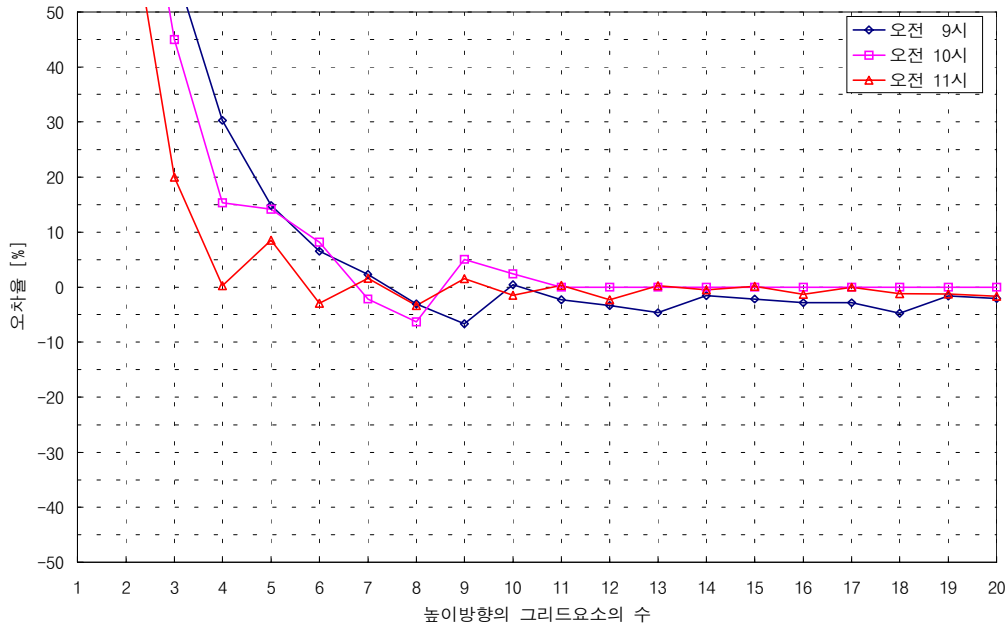


[그림 4.24] 태양이 남중한 청천공 상태에서 태양 고도에 대한 오차율  
 [WI=4, 반사율=90%,  $\phi_{6/21\ 12:00}=76.11^\circ$ ,  $\phi_{9/21\ 12:00}=52.46^\circ$ ,  $\phi_{12/21\ 12:00}=29.21^\circ$ ]



6) 태양의 방위각과 계산 결과의 정확성

[그림 4.25]는 태양 방위각이 서로 다른 9월 21일 9시, 10시 그리고 11시일 때 WI의 값이 4, 반사율이 90%인 광택트 모형을 대상으로 측정한 결과와 계산 결과를 비교한 것이다. 계산 결과를 얻기 위하여 너비와 길이 방향의 그리드요소의 수를 3으로 설정하고 높이 방향의 그리드요소의 수를 변화시켰다. 그림을 살펴보면 3가지 경우 모두 높이 방향의 그리드요소의 수가 증가할수록 오차율이 줄어들었으며 높이 방향의 그리드요소의 수가 10개 정도가 되었을 때부터 오차율이 5% 이하가 되는 것을 알 수 있다.



[그림 4.25] 청천공 상태(9/21)에서 태양 방위각에 대한 오차율  
 $[\alpha_{9:00}=34.06^\circ, \phi_{9:00}=58.60^\circ, \alpha_{10:00}=43.35^\circ, \phi_{10:00}=43.44^\circ, \alpha_{11:00}=49.98^\circ, \phi_{11:00}=23.73^\circ]$

7) 청천공 상태에서의 최적 그리드요소 수의 결정

본 연구의 결과 청천공 상태에서 95% 정도 정확성을 갖게 하는 최적 그리드요소의 수는 <표 4.6>과 같이 나타났다.

<표 4.6> 청천공 상태에서의 최적 그리드요소의 수

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

### 4.3 소결(小結)

본 4 장에서는 3 장에서 개발한 수직장방향 광덕트의 광속전달율 예측 수치 모델을 축소 모형 실험을 통해 얻은 데이터와 비교하여 그 정확성을 검토하였다. 검토한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

#### 4.3.1 담천공 상태일 때

- 1) 높이 방향의 그리드요소 수를 증가시킬수록 정확성이 증가하였다.
- 2) 너비와 길이 방향의 그리드요소 수는 계산 결과의 정확성에 거의 영향을 미치지 않았으나 소요된 상대 계산 시간은 크게 증가하였다.
- 3) 광덕트의 내부 반사율은 계산 결과의 정확성에 크게 영향을 미치지 않았다. 그러나 반사율이 0%에 가까워질 경우 광속전달율의 계산은 반사율보다 확산 공광이 광덕트 표면에 입사하는 각도에 대한 고려가 더 중요한 것으로 나타났다.
- 4) 광속전달법(Luminous Flux Transfer Method)을 적용하여 수직장방향 광덕트에서의 광속전달율을 계산할 경우 계산 결과의 95% 이상의 정확성과 계산 시간의 단축을 동시에 고려한 최적 그리드요소의 수를 다양한 광덕트의 제원에 대해 제시하였다(표 4.5 참조).

#### 4.3.2 청천공 상태일 때

- 1) 높이 방향의 그리드요소 수를 증가시킬수록 정확성이 증가하였다.
- 2) 태양 방위각이  $0^\circ$ 인 청천공 상태에서 너비와 길이 방향의 그리드요소 수는 계산 결과의 정확성에 거의 영향을 미치지 않았으나 소요된 상대 계산 시간은 크게 증가하였다.
- 3) 태양 방위각이  $0^\circ$ 가 아닌 청천공 상태에서는 너비와 길이 방향의 그리드요소 수가 증가할 수록 오차율이 줄어들었다.
- 4) 광덕트의 내부 반사율은 계산 결과의 정확성에 크게 영향을 미치지 않았다. 그러나 반사율이 0%에 가까워질 경우 광속전달율의 계산은 반사율보다 직사일광 및 확산공광이 광덕트 표면에 입사하는 각도에 대한 고려가 더 중요한 것으로 나타났다.
- 5) 태양 고도 및 방위각의 변화에 대한 오차율의 크기는 크게 변화하지 않았다. 단, 직사일광이 바닥면 계산점(또는 측정점)에 바로 입사하는 경우가 많아질 때 상호반사성분의 바닥면 조도에 미치는 영향이 작아지기 때문에 그리드요소의 수의 변화에 따라 오차율의 변동폭이 작아졌으며, 95% 이상의 정확한 계산 결과를 얻기 위해 요구되는 높이 방향의 그리드요소의 수도 작아졌다.
- 6) 광속전달법(Luminous Flux Transfer Method)을 적용하여 수직장방형 광덕트에서의 광속전달율을 계산할 경우 계산의 정확성과 계산 시간의 단축을 동시에 고려한 최적 그리드요소의 수를 다양한 광덕트의 제원에 대해 제시하였다 (표 4.6 참조).