

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 25, No. 2, 2005

지붕 일체형 태양광 발전 시스템의 응용에 관한 연구

- 시스템의 최적길이비 산정을 중심으로 -

김의종*, 최원기*, 서승직**

*인하대학교 대학원 건축학부(kim_with_jesus@yahoo.com), (iachoi7205@hotmail.com),

**인하대학교 건축학부 교수(energeti@inha.ac.kr)

A study on the Application of Roof Integrated Photovoltaic System

- Focused on the Optimal Length Ratio Calculation of System -

Kim, Eui-Jong*, Choi, Won-Ki*, Suh, Seung-Jik**

*Dept. of Architecture, Graduate School, Inha University(kim_with_jesus@yahoo.com),
(iachoi7205@hotmail.com),

**Professor, Dep. of Architectural Engineering, Inha University (energeti@inha.ac.kr)

Abstract

To improve the performance of the top-positioning space in buildings, we suggested the environment-friendly system integrating various design techniques in the previous paper. This work discussed to calculate the length of PV considering a part of metallic radiators for radiative cooling, an critical element of the whole system, for shading not to prevent the PV on roof from generating electricity. In the process of calculating the shading area, we used the geometrical relationship between the sun-rays and the variable roof. For general applications, we utilized DL, the ratio of the length of PV and that of metallic radiator on roof, as a design factor, and then used the maximum insolation and the specific insolation($200\text{W}/\text{m}^2$) to decide the distance off the axis of rotation. As a result, for DL, we found out the reasonable value of 1.0 with full covering, 1.2 with 90%, and 2.0 with 70% in PV covering.

Keywords : 지붕일체형 PV 시스템(Roof Integrated PV System), 최적 설계(optimal design method analysis), 음영면적 (shading area)

기 호 설 명

- h : 태양 고도 (rad)
- A : 태양 방위각 (rad)
- ϕ : 프로파일각 (rad)
- θ : 지붕의 경사각 (rad)
- α : 회전축과 인접 PV가 이루는 각 (rad)
- PVL : 지붕위의 PV가 놓이는 가로방향 길이
- NPVL : 지붕위의 경량 금속체의 가로방향 길이
- TL : 단위 지붕길이
- DL : PVL과 NPVL의 길이비

1. 서 론

일반적으로 건물의 최상층은 열적으로 가장 열악한 환경을 형성하여 냉·난방비의 상승을 초래한다. 이러한 최상층의 열악한 환경 개선을 위해 도입된 자연형 시스템으로 옥상녹화, 지붕 축열, 증발 및 천공 복사 냉각 등이 있다.

그리고 빛 환경 시스템으로의 천창은 실내의 조도를 균일하게 분포시키는 장점은 있으나 열환경 측면에서 보면 겨울과 여름철에는 냉·난방 부하의 증가 요인이 되기도 한다.

그러나 환경과 에너지 문제에 대한 관심의 고조로 건축 분야에서는 태양열과 태양광을 이용한 다양한 시스템들이 개발되어 적용되고 있다.

이에 본 연구에서는 자연형 태양열 시스템을 이용하여 건물 최상층이 갖는 취약한 열적 성능 개선은 물론 실내의 균일한 조도분포와 태양에너지를 적극 활용할 수 있는 새로운 지붕 일체형 PV 시스템을 제안하였다.

선행 연구¹⁾²⁾를 통해 제안된 시스템의 기본 열 성능에 대한 분석을 실시하여 그 우수성을 입증하

였다. 따라서 본 연구에서는 이미 제안된 시스템의 최적 설계 방법에 관한 연구를 진행하였다. 특히 시스템 성능과 관련한 효율과 운용상에서의 적정 디자인 패턴을 찾고자 하였다. 이러한 연구는 이와 유사한 가동형 시스템의 디자인 방법론에도 크게 활용될 수 있을 것이다.

2. 시스템 개요

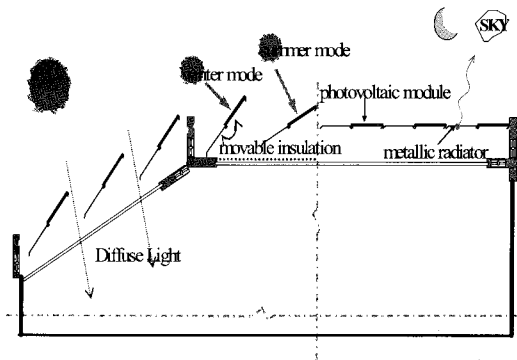


그림 1. 시스템 개념도

그림 1은 건축적으로 취약한 최상층 환경 개선을 위하여 본 논문에서 제안한 다목적 자연형 태양 에너지 시스템의 개념도를 나타낸 것이다.

그림 1의 시스템은 다음과 같은 다양한 기능이 결합된 다목적 시스템이다.

- ① 태양광기술(PV)
- ② 태양열기술(집열판)
- ③ 천공 복사 냉각(경량 금속체)
- ④ 천창 시스템(각도 조절)
- ⑤ 열적 완충공간(밀폐시)

그러나 이러한 다양한 기능이 최적 성능을 발휘하기 위해서는 경사각도 조절이 필수적이다. 이때 PV 모듈의 구조는 PV셀을 직렬로 연결한 방식이므로 음영시 음영으로 인한 발전량 감소가 예상되는 바 이에 대한 기하학적인 접근을 통해 적절한 크기와 비율을 산정하고 최적 디자인 요소의 결정이 필수적이다.

1) 김의중외, 집열장치와 PV를 통합한 가변 지붕 시스템, 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 제 24권 2호, 2004.

2) 김의중외, Variable Photovoltaic System Equipped with Roof, Asia-Pacific Conference of ISES, 2004

3. 이론 해석

그림 1의 시스템 개념도를 통해 알 수 있듯이 시스템의 효율적인 운용을 위해서는 되도록 큰 면적의 PV를 지붕에 설치하고 보다 효과적인 일사량의 취득을 위해 PV를 개별적으로 운전해야하며 동시에 음영이 생기지 않도록 해야 한다.

그러나 각각의 상관관계로 인해 제한된 지붕면적에서 이 세 가지를 완벽히 충족시킬 수 없다. 즉 계절별 혹은 시간별 누적 일사량이 큰 범위로 PV시스템을 경사지도록 운전 시 PV의 면적을 크게 할수록(회전축을 중심으로 PV부분이 길수록) 인접한 PV모듈에 생기는 음영비율은 더욱 증가하게 된다.

따라서 다음의 이론적 고찰을 통해 PV모듈과 야간 천공복사를 위한 경량 금속체간의 적절한 길이비를 산정하려고 한다.

3.1 기하학적 계산 방법

지붕의 PV모듈은 정남을 향하는 경우에 한하여 계산 방법을 고찰하였다. 왜냐하면 지붕의 경우 건물의 배치와 상관없이 PV경사면을 남향으로 배치할 수 있기 때문이다.

그리고 경사지붕의 경우에는 지붕의 경사각이 30~60°범위일 경우, 일사의 법선방향으로 PV모듈이 조절되어도 인접부 PV로 인한 음영은 생기지 않기 때문에 본 연구에서는 평지붕에 한하여 연구를 진행하였다.

3.1.1 지붕과 태양과의 기하학적 관계

음영의 발생정도를 확인하기 위해 그림 2와 같이 기본적인 지붕요소를 생각하고 PV가 놓이게 될 부분의 단면 길이를 PVL, 경량 금속체 부분을 NPVL 그리고 이 두 요소의 합한 길이를 TL이라고 지정하였다.

음영이 발생하는 주된 이유는 태양고도이지만 태양의 고도의 변화는 태양방위각의 변화와 함께

일어나기 때문에 본 연구에서는 방위각과 고도를 모두 고려한 개념인 태양 프로파일각(그림 3)을 이용하여 태양과 지붕의 기하학적 관계를 고찰하였다.

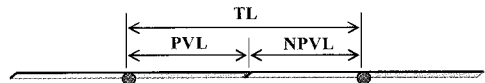


그림 2. 단일 시스템의 크기

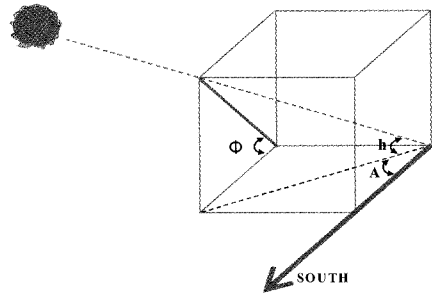


그림 3. 프로파일각의 개념도

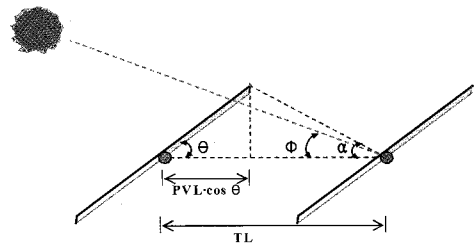


그림 4. 경사각도 조절에 따른 위치관계

그림 4는 θ , PVL, ϕ 의 관계를 도식적으로 표현한 것으로 이를 통해 태양의 프로파일각 변화에 따른 인접한 PV설치면의 기하학적 관계를 쉽게 파악할 수 있다.

다음의 계산식은 태양의 프로파일각 변화에 따른 인접한 PV면의 음영 발생여부를 확인하기 위한 관계식이다.

$$\tan \alpha = \frac{PVL \cdot \sin \theta}{(PVL + NPVL) - PVL \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

여기서 $DL = PVL/NPVL$ 로 표현하면,

$$\tan \alpha = \frac{\sin \theta}{(1 + 1/DL) - \cos \theta} \quad (2)$$

$$\tan \phi = \frac{\tanh}{\cos A} \quad (3)$$

$$\tan \phi \geq \tan \alpha \quad (4)$$

즉 식(4)의 조건을 만족할 때에 인접 PV면에 음영은 발생하지 않는다.

3.1.2 음영 발생 면적 계산

하루중 음영이 생기는 시간은 PV면의 경사에 따라 다양한 분포를 보이지만 일반적으로 태양의 고도가 낮은 시간대에 주로 발생하게 된다.

그림 5는 태양의 고도가 낮은 시간대의 음영패턴을 표시한 것으로 태양방위각의 영향으로 회전축 방향의 끝부분은 음영이 생기지 않음을 쉽게 확인할 수 있다.

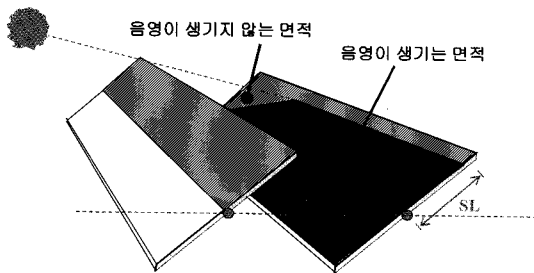


그림 5. 방위각이 클 때의 PV경사면의 음영패턴

그러나 본 연구는 음영이 되도록 생기지 않는 범위 내에서의 최적 설계를 목적으로 하기 때문에 태양의 방위각이 클 때의 음영이 생기지 않는 면적은 적정길이산정에 있어 양적(+)요인일 뿐 아니라 TL의 크기에 의해 변화하므로 그림 6처럼 회전축에 수직인 평면에서의 음영길이를 사용하여 음영 분포를 계산하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 이는 가동지붕의 단위 면적을 가로 4m x 세로 0.4m(DL=1)로 가정했을 때 동짓날 방

위각이 가장 큰 오전 8시경의 방위각으로 인한 축면효과를 음영률에 적용시 6.26%의 오차를 보이고 또한 방위각의 감소에 따라 함께 줄어드는 수치라는 점을 통해서도 확인할 수 있다.

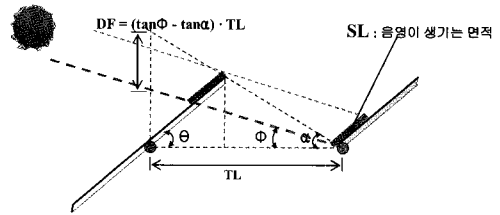


그림 6. 음영면적 개념도

그림 6을 통해 알 수 있듯이 $DF \leq 0$ 일 때 PV모듈에 직달일사로 인한 음영이 생기게 된다.

음영의 길이를 구하기 위해서 위의 기하학적 형상을 좌표계로 이동시켜 직선의 방정식을 이용하면 SL을 계산할 수 있다.

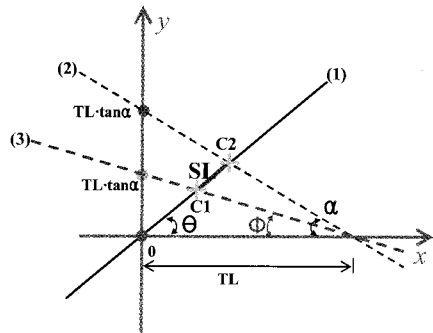


그림 7. 좌표계를 통한 해석

그림 7의 세 개의 직선을 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$y = \tan \theta \cdot x \quad (5)$$

$$y = -\tan \alpha \cdot x + TL \cdot \tan \alpha \quad (6)$$

$$y = -\tan \phi \cdot x + TL \cdot \tan \phi \quad (7)$$

(5) 과 (6), (5) 과 (7)을 연립하여 해를 구하

면 두 교점 C1, C2의 좌표를 얻을 수 있다. 이어서 C1, C2의 두 점 사이의 거리를 구하면 곧 음영 길이(SL)를 구할 수 있게 된다.

그러나 위의 TL의 경우 아직 정해지지 않은 값이기 때문에 DL을 이용하여 방정식의 해를 정리하고 마지막으로 음영이 생기는 면적비를 방정식 (9)와 같이 정리하여 프로그램을 작성하면 DL의 변화의 따른 음영비율의 변화를 확인할 수 있다.

$$\text{value} = \text{SL}/\text{PVL} \times 100(\%) \quad (8)$$

$$\text{value} = \sqrt{A^2 + \tan^2 \theta} \cdot A^2 \times 100(\%) \quad (9)$$

$$A = \frac{(1 + \frac{1}{\text{DL}}) \cdot \tan \alpha}{\tan \theta + \tan \alpha} - \frac{(1 + \frac{1}{\text{DL}}) \cdot \tan \phi}{\tan \theta + \tan \phi}$$

3.2 일사량과의 관계

여름철의 경우에는 높은 태양 고도로 인하여 PV 모듈에 음영이 발생하는 경우는 없으므로, 겨울철 태양의 남중 고도가 가장 낮은 동지를 기준으로 누적일사량에 따른 적정 경사각을 선정하여 음영비율을 계산하였다.

표 1. 일사량 프로그램 작성 입력값

| 입력 항목 | 입력 값 |
|----------------------------|-----------------------|
| 태양정수 | 1353 W/m ² |
| 계산일(통산일) | 355일(동지) |
| 위도 | 37.28°N |
| 대기청명도(P) | 0.8 |
| 특정일사량 K _c (3)4) | 200 W/m ² |

3) 태양광 발전의 효율은 일사량의 변화에 따라 발전효율도 변하는 특징을 보인다. 일사량 대 효율의 그래프에서 특정 일사량(K_c)을 지나면 효율의 증가가 둔화되는 포화특성을 보인다. 즉 효율을 근사화할 때 일사량 0에서 K_c까지 범위에서는 일사량과 효율과의 곱에 추가로 η_c/K_c의 손실효율을 곱해야 한다. 이를 수식으로 표현하면 P_{pv}(τ) = η_cG_t × (η_c/K_c) (단, 여기서 괄호안의 계산은 0 < G_t < K_c인 경우에만 곱해줌)

이러한 특정 일사량은 PV의 종류에 따라 다양한 분포를 보이지만 본 논문에서는 일반적인 수치인 200 W/m²를 사용하였다.

표 1은 PV경사에 따른 일사량을 확인하기 위하여 사용된 기본값들이다. 일사량을 계산하기 위해서 이미 이론적으로 정립된 태양 기하학을 사용하여 프로그램을 작성하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 일사량 분포에 따른 경사각 결정

그림 8을 통하여 알 수 있듯이 동지날 일사량을 가장 많이 받을 수 있는 경사각은 61°로 태양의 남중고도와 수직인 방향인 것을 알 수 있다.

그러나 이 경사각으로 설계를 할 경우 음영이 지지 않기 위해서는 PVL보다 NPVL의 길이가 두 배 이상 길어야 하기 때문에 합리적인 설계라 볼 수 없다. 따라서 경사에 따른 누적일사량과 특정일사량 이상의 누적값이 큰 차이를 보이지 않는 범위내에서 설계각을 결정하여야 한다.

계산결과 경사각이 45°인 경우 최대 누적일사량을 보이는 61°의 누적일사량에 비해 3.43% 정도의 근소한 일사량 감소를 보여 경사각 45°를 설계각으로 하여 DL에 대한 계산을 진행하였다.

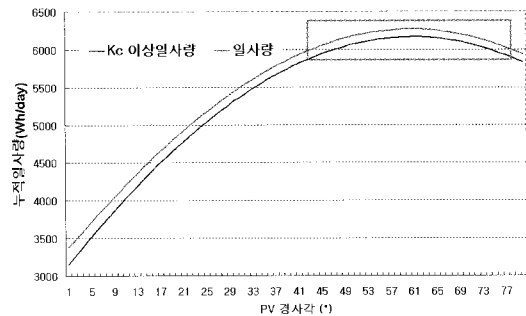


그림 8. PV 경사에 따른 누적일사량

4.2 길이비에 따른 음영률

회전축을 중심으로 좌측은 야간복사를 위한 경

4) 배인수외, 태양광 발전이 도입된 배전계통에서 날씨효과를 고려한 신뢰도 산정, 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회, 2003.

량 금속체, 우측은 PV모듈을 설치하게 되는 본 시스템에서 좌·우측비인 DL에 따른 동짓날의 음영비율을 확인하였다.

그림 9를 보면 동짓날 최대일사량일 때 DL=3인 경우는 음영비율이 32%를 나타내다가 DL의 감소로 인해 음영비율로 낮아져 DL=1일 때는 정오를 기준으로 약 2시간동안 음영이 생기지 않음을 확인할 수 있다.

발전효율이 일사의 세기에 의존하여 감소하기 시작하는 특정 일사량 부근에서의 음영비율은 DL=3일 때 약 65%에서 점점 감소하다가 DL=1일 때 45%정도의 음영비율을 나타내어 다소 높은 음영분포를 보이고 있다.

그러나 동짓날 전혀 음영이 생기지 않기 위한 DL의 값은 0.3으로 PV 발전을 통해 적극적으로 자연에너지를 이용하려는 본 시스템의 목적에 부합하지 않으므로 PV의 면적이 상대적으로 크고 PV 후면의 유체유동공간이 지붕의 경사조절로 인해 영향을 적게 받는 경우를 적정 길이비라 판단하여 각 경우의 일사량과 음영에 따른 위험률 등을 종합적으로 계산하였다.

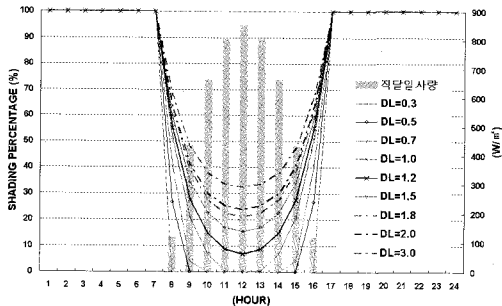


그림 9. 동짓날의 길이비에 따른 음영률

4.3 일변화에 따른 음영률

그림 10, 11은 본 시스템에 적용 가능한 DL에 대하여 각각 최대일사량과 특정일사량일 때의 통산일 변화에 따른 음영변화를 나타낸 그림이다.

그림 10은 겨울철 경사지붕에 대하여 경사면에

떨어지는 일사량이 최대일 때의 인접 PV모듈로 인한 음영률을 나타낸 것이다. 그림에서 DL=1.2일 때는 최대 직달일사에 대한 음영비율이 10% 미만으로 다소 적으나 다른 경우에 대해서는 15-25% 사이의 다소 높은 분포를 보이고 있고 통산일의 변화에 따라 상대적으로 빠르게 음영비율이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

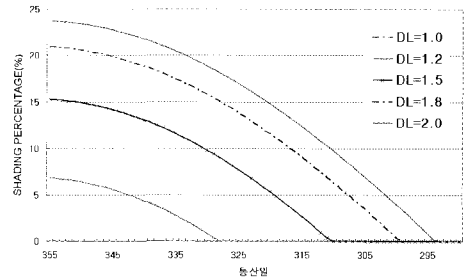


그림 10. 최대일사량일 때의 각 통산일의 음영비

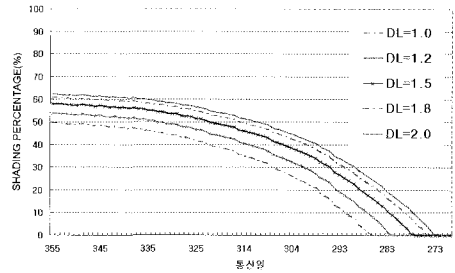


그림 11. 특정일사량일 때의 각 통산일에 따른 음영비

표 23. 설계 PV모듈 구조

| DL | 합리적 설계 (최대 일사량) | 안전 설계 (특정 일사량) |
|-----|--------------------|-------------------|
| 1.0 | 전면부 설치 PVL | 50% 설치 PVL×0.5 |
| 1.2 | 90% 설치 PVL×0.9 | 50% 설치 PVL×0.5 |
| 2.0 | 70% 설치 PVL×0.7 | 40% 설치 PVL×0.4 |

그림 11은 PV 최대효율에 영향이 없는 일사량인 특정일사량일 때의 음영비율을 나타낸 것으로 DL의 변화에 따른 음영비율은 거의 비슷한 분포를 보이고 있으며 통산일의 변화에 따른 음영비율은 상대적으로 작게 감소하는 것을 알 수 있다.

따라서 겨울철에 발전량을 고려함과 동시에 되도록 적은 음영을 위한 가동 PV모듈의 최적설계에 있어서 최대일사량을 기준으로 한 평가방법이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

위의 결과를 종합하여 음영 및 총발전량을 모두 고려하여 시스템을 결정하면 다음 표 2와 같다.

5. 결 론

본 연구는 태양광, 태양열, 복사냉각, 자연채광 등의 이용을 위한 자연형 시스템의 최적 설계 방법에 관한 것으로 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 태양의 프로파일각과 좌표계를 통한 기하학적 해석을 통해 음영이 생기는 면적을 계산할 수 있다.
- 2) 음영이 가장 생기기 쉬운 동짓날을 기준으로 누적일사량을 계산한 결과 설계각도로 45°로 설정하여 계산하여도 전체 누적일사량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.
- 3) 동짓날 DL을 변화시키면 음영비율을 계산한 결과 음영이 전혀 생기지 않는 DL은 0.3으로 나타났다. 이는 시스템의 목적에 부합되지 않으므로 합리적인 수준에서의 최소한의 음영비율에 대한 고려가 필요하다.
- 4) 통산일의 변화에 따른 음영비율을 계산한 결과 특정일사량을 기준으로 한 평가보다 최대일사량 기준의 평가방법이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

- 5) 종합하여 적절한 길이비에 따른 PV모듈의 설계길이를 계산한 결과 DL=1인 경우는 회전축으로부터 전구간에 PV를 설치하고 DL=1.2인 경우는 회전축으로부터 PV의 10% 이격된 지점에서, DL=2인 경우는 30% 이격된 지점으로부터 PV를 설치하는 것이 합리적이다.

본 연구를 통하여 자연형 시스템의 합리적인 시스템 설계 자료를 구축하였다. 추후 시스템 성능과 관련한 다른 여러 가지 요소와의 상관관계를 고려하여 시스템의 운용에 따른 다양한 설계기법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2005학년도 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. 김의종 외 3명, 집열장치와 PV를 통합한 가변 지붕 시스템, 대한건축학회 추계학술발표 논문집, 제 24권 2호, 2004.
2. 김의종 외 3명, Variable Photovoltaic System Equipped with Roof, Asia-Pacific Conference of ISES, 2004.
3. 배인수의 4명, 태양광 발전이 도입된 배전계통에서 날씨효과를 고려한 신뢰도 산정, 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회, 2003.
4. 서승직, 건축환경공학, 일진사, 1991.
5. 宇田川光弘, パソコンによる空調調和計算法, オーム社, 1986.
6. Duffie & Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd., JOHN WILEY & SONS, INC., 1991.