

첨단 건물용 프레넬 집광 프리즘 배광형 자연채광기술

의의준, 강은철, 김기세, 정학근, 정봉만, 한수빈\*  
한국에너지기술연구원\*

Fresnel Collector and Prismatic Pipe Daylighting System  
For Advanced Building

E.-J. Lee, E.-C. Kang, K.-S. Kim, H.-G. Jung, B. M. Jung, S.-B. Han\*  
Korea Institute of Energy Research\*

1. 서 론

최근 건물에서 사용되는 조명에너지 절감을 위한 방안으로 고효율 램프, 반사갓 교체 등 ESCO관련 사업과, 친환경 조명 기술 개발이 한창이며 이러한 시점에서 첨단 건물의 실내조명에 있어서도 기존 전기조명보다는 자연채광을 선호하는 경향이 나타나고 있다. 자연광은 실내에서 사용되는 일반적인 조명에 비해 200배 이상이나 강하기 때문에 이 빛을 효과적으로 쓸 수 있는 기술개발에 노력을 경주하고 있다.<sup>(1)</sup> 기존의 자연광을 이용한 에너지 기술 개발 방법 중에 하나는 건물의 옥상이나 벽면에 대형으로 설치되는 집광장치 시스템 설계였다. 그러나 이러한 대규모 집광시스템의 경우 고가이며 설치비용이나 규모에 비해 효율이 극히 저조하고, 시스템의 제어가 어렵다는 문제점 등을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 시스템 규모의 최소화와 집광효율의 극대화를 위한 방안으로 경량 프레임에 프레넬(Fresnel) 및 프리즘 필름(Prism Film)의 개념을 적용하여 집광효율을 증대시키고 가동 및 제어가 편리한 저가형 자연채광 시스템의 개발에 목표를 두었다. 연구 수행은 우선 소형이며 저가인 프레넬 렌즈를 이용한 광파이프 시스템 최적설계연구를 진행하고, 개발된 시스템의 현장실험을 통한 데이터 분석 및 효율극대화 방안을 연구하였다. 또한 광(光)분석 프로그램으로 공인받은 Trace-pro 프로그램을 이용하여 해석모델을 개발하고 보정하여, 해석모델을 근거로 태양고도각 및 방위각에 따른 시뮬레이션을 수행하여 시스템의 계절별 효율 분석을 수행하였다.

2. 시스템 개념

본 시스템은 그림1에서 보는 바와 같이 건물 외벽의 개구부나 또는 옥상 등에 직접 설치하도록 설계되었으며 집광부(light collector), 변광부(light transformer)와, 집광된 주광을 실내로 배분하는 배광부(light pipe)의 3단계로 구성되어져 있다. 일사조건이 유리한 건물의 외면에 프레넬 필름 이용한 태양 집광장치를 설치하는데, 이때 집광부에 태양추적장치를 설치하여 태양고도에 따라 집광부가 상하로 움직일 수 있도록 설계하였다. 태양추적장치의 설치로 태양의 고도각 및 방위각에 대한 조절을 할 수도 있으나 상하좌우로 조절되는 장치로 설계할 경우 집광 부분이 자유롭게 움직일 수 있는 공간의 확보가 필요하고, 또한 시스템의 단순화를 위해서는 태양고도각 만을 조절하는 것이 유리하다고 판단하여 태양고도각 만을 조절할 수 있도록 설계하였다. 또한 동일 공간에서 집광효율을 높이기 위해 집광부의 표면을 등각에 처리하여 가능한 많은 양의 주광을 집광할 수 있도록 설계하였다. 집광부 표면에 도달한 태양광은 프레넬 필름 투과하면서 렌즈표면에 형성된 요철에 따라 굴절을 하게 되는데 이때 굴절각을 조절하여 태양광을 변광부 표면에 직선으로 포커스 되도록 설계되었다. 이렇게 하나의 직선으로 집광되어진 태양광은 변광부로 들어가고, 변광부 내벽에 붙어있는 프리즘 필름에 의하여 다시 하나의 초점화된 광으로 변환되고 변광부에 설치된 전반사필름을 통해 다시 배광부로 전송되어진다. 배광부에 들어온 빛은 배광파이프 내측에 설치된 필름의 유무에 따라 실내로 투사되거나, 또는 배광부의 끝단부분으로 전송된다.

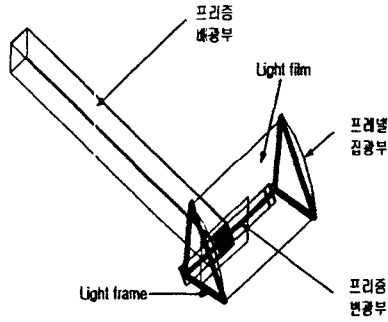


그림 1. 프레넬, 프리즘필름을 이용한 자연채광 시스템 개요

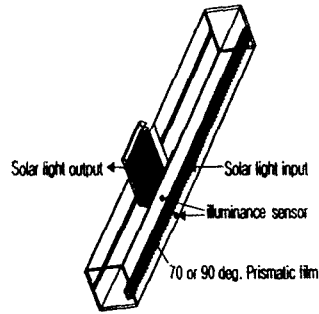


그림 2 변광부의 형상 및 구성요소

변광부를 통해 하나의 초점으로 형성된 빛은 배광부에 연결된 Light Pipe를 따라 실내로 유입된다. 광 파이프의 내부에는 전반사 되도록 구성된 Extractor 필름이 부착되어있는데, 변광부를 통해 배광부로 유입된 빛은 파이프 하부의 투명상태에서는 실내로 확산되고 상단에 부착된 이 extractor 필름에 의해 광파이프 안쪽으로 전송 또는 산란되기도 한다. 즉 Snell's Law에 따르면 파이프에 도달하는 빛의 입사각이 임계각 이내가 되면 빛은 전반사를 하게 되고 입사각이 임계각보다 크게 되면 광파이프 외부로 투과가 나타난다. 이때 광파이프의 하부를 통해 실내로 확산되는 빛이 비로소 실내조명으로 사용되는 것이다.

### 3. 시스템 효율 측정

자연광을 실내의 조명광원으로 사용할 경우에는 외부 천공상태에 따라 실내에서 필요로 하는 조도를 유지하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 따라서 자연채광시스템의 경우 수시로 변화하는 외부 조건에 따라 실내 조도를 일정하게 유지하고, 담천공 상태나, 우천시, 야간에 필요로 하는 조도를 확보하기 위해서는 인공광원과 병행하여 사용하는 것이 일반적이다. 본 시스템의 경우도 마찬가지로 인공조명과 병용으로 활용할 수 있도록 설계하였는데, 작업면 위치에서 일정조도를 유지하도록 제어하는 일정조도 제어기를 설치하여 보조광원으로 사용하였다. 여기서 사용한 일정조도 제어기는 기본적으로 자연광을 활용한 광파이프를 통해 획득된 조도를 측정하고 측정값이 요구되는 조도값 이하로 측정될 경우 인공조명을 활용하여 Dimming 제어할 수 있도록 구성하였다.

#### 3.1 효율 측정 이론식

태양광을 이용한 자연채광 시스템의 광전송 성능은 집광부( $\eta_c$ ), 변광부( $\eta_T$ ), 배광부( $\eta_P$ )에서의 각각의 효율을 구함으로써 얻어질 수 있다.

$$\eta_{total} = \eta_C \times \eta_T \times \eta_P$$

$$\eta_{total} = \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_C \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_T \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_P$$

- $\eta_{total}$  : 시스템 전체 효율
- $\Phi_i$  : 시스템 입구에서의 광속 [lm]
- $\Phi_o$  : 시스템 출구에서의 광속 [lm]
- C : light collector (집광부)
- T : light transformer (변광부)
- P : light pipe (배광부)

위 식에서  $(\Phi_i)_c$  는 태양에서 집광부로 도달하는 전체 광속(total luminous)을 나타내고 있다. 집광부 내부

에 설치된 전반사 필름에 의해 집광부 내부에서의 손실량은 거의 없다면 집광부에서 집광된 모든 광량은 변광부의 입구로 전송되는 광량과 동일하다 할 수 있다. 또한 변광부 내부에서도 전반사 필름에 의한 손실을 무시하면 변광부의 끝단에서 배광부의 입구로 전송되는 광량은 거의 동일하다는 이론이 성립된다.

$$(\Phi_o)_C = (\Phi_i)_T, (\Phi_o)_T = (\Phi_i)_C$$

따라서 본 시스템의 전체 효율 관계식은 집광부에 도달한 전체 광속 $(\Phi_i)_C$  중 배광부를 통해 실내로 유입되는 광속 $(\Phi_o)_P$ 의 비로 나타낸다.

$$\eta = \frac{(\Phi_o)_P}{(\Phi_i)_C}$$

### 3.2 효율 측정 실험 분석

자연채광시스템의 종합효율을 측정하기에 앞서 실시된 예비실험에서 태양고도각 만큼 고려한 본 시스템의 경우 태양방위각에 의한 손실변수가 가장 민감한 요인인 것으로 분석되었다. 따라서 태양 방위각에 의한 효율을 극대화하기 위한 방안으로는 집광부와 변광부에서 필름의 각도 조절로 효율을 높일 수 있음을 발견하였다. 그러나 집광부의 경우 태양방위각을 고려한 프레넬 필름의 변형하여 제작할 경우 오히려 태양고도각에 의한 효율을 저하시키는 변수로 작용하게 되는 것으로 파악되어 변광부의 프리즘필름 각도 조절에 의한 방법<sup>(2)</sup>으로 효율을 높이는 방안을 모색하였다.

표 1. 실험기간중 대전지역 기상조건

조건 일자	운량 (할)	일조시간 (시간)	평균기온 (℃)	평균풍속 (m/sec)	기상상태
01.06.01	1.9	12.3	20.4	4.0	맑음
01.06.02	0	12.7	23.0	2.1	맑음
01.06.07	0.6	11.4	25.1	1.8	맑음
01.06.08	2.4	10.9	25.2	1.8	맑음
01.06.09	4.1	9.5	25.4	2.0	구름조금
01.06.10	3.0	10.8	25.5	1.7	구름조금

\* www.weather.co.kr 제공

\* 일중 일조량 100,000 Lux이상 기준

위와 같은 이론을 근거로 실증실험을 위해 주변에 태양광을 차단하는 요소가 전혀 없는 곳을 선정하여 한국에너지기술연구원의 연구동 옥상에 실험시설을 구성하였다. 실험은 청명한 날을 선택하여 2001년 6월 중 진행하였으며, 청공상태가 양호하고 데이터가 온전한 대표일을 선정하여 데이터 분석을 수행하였다.



그림 3. 실험용 자연채광시스템의 집광부 규모

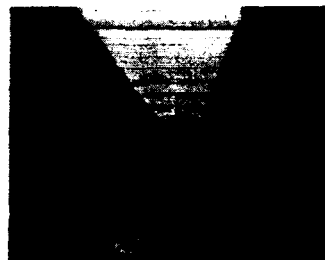


그림 4. 실험용 자연채광시스템의 배광부 규모

표 2. 프레넬 자연채광시스템 실측실험 데이터 효율분석

Time	Input Flux(Lm)	Output Flux(Lm)	Efficiency(%)
10:00	112,360	988.5	0.88
10:30	124,675	1,543.8	1.24
11:00	131,023	1,877.6	1.43
11:30	141,814	3,084.1	2.17
12:00	147,274	5,396.9	3.66
12:30	148,670	7,378.7	4.96
13:00	149,432	6,140.3	4.11
13:30	144,734	4,591.4	3.17
14:00	141,306	2,175.3	1.54
14:30	132,673	1,843.4	1.39
15:00	125,436	1,424.2	1.14
15:30	113,248	865.4	0.76
16:00	101,568	509.9	0.50

프레넬, 프리즘필름을 활용한 자연채광장치의 전체효율을 평가하기 위해서는 집광부 프레넬필름 표면에 도달한 전체 광속에 대하여 배광부 Light Pipe를 통하여 실내로 유입되는 광속의 비로 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실외와, 시스템이 설치된 실험실의 실내 작업면 위에 조도측정기를 설치하여 내외부의 조도값을 비교하는 것으로 효율을 측정하였다. 표 4는 실험을 통해 얻어진 데이터 중 오전 10시부터 오후 4시까지 평균 일조량이 100,000Lux 이상이 되는 날을 선택하여 각 시간대별로 평균하여 얻은 값이다.

위 데이터는 집광부의 양쪽에 설치된 조도측정기에 의해 측정된 값으로 태양고도를 추적하여 집광부(Fresnel Lens)에 떨어진 광속(Lm)이 실내로 얼마만큼 유입되는지를 나타내고 있다. 전체적으로 자연채광시스템의 효율은 5% 이내로 나타났으며, 아침에 해가 뜨면서부터 효율이 점점 좋아져서 태양이 남중하여 집광부에 거의 수직의 위치에 도달했을 때 가장 좋은 효율을 갖고, 오후로 되면서 집광효율은 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 집광기 자체가 태양고도각 만큼 추적하는 장치로 구성되어 있기 때문인 것으로 분석된다.

실제로 설계된 시스템의 경우 부착된 프레넬 필름이 일정한 간격과 각도를 가진 요철로 구성되어 있기 때문에 태양의 방위각에 따라 항상 일정하게 초점화되지 않고 집광부 표면으로부터 태양이 남중하는 시간대를 제외하면 변광부의 약간 앞쪽으로 초점화 되기 때문에 오전과 오후시간대의 집광효율은 떨어지게 된다. 따라서 집광부로부터 변광부로 전송되는 빛을 일정하게 전송하기 위해서는 집광부가 태양의 고도각과 방위각을 모두 추적하는 시스템으로 구성되든지, 아니면 변광부의 위치가 태양의 방위에 따라 상하로 움직이도록 구성이 되어야 가장 좋은 효율을 기대할 수 있게 된다. 그러나 본 연구에서는 태양의 고도각만을 고려한 시스템을 채용했고, 적은 설치면적과 저가형 시스템 개발이라는 목표를 충실하기 위해서 변광부를 태양의 남중시간대에 맞추어 설계하였다. 따라서 본 연구에서는 태양고도에 따른 추적장치를 설치한 사례를 우선으로 분석 연구하고, 향후 개선된 시스템으로 발전시키는 것으로 연구범위를 축소하였다. 측정된 데이터를 보면 예상했던 대로 태양이 남중하는 시간대인 11:30분부터 13:30 사이에 시스템의 효율이 가장 높게 나타났는데 이때의 실내유입 광속은 32watt형 형광등 2기 정도에서 측정되는 광속을 나타내고 있었다.

#### 4. 시스템 효율 simulation 분석

주광의 활용 및 효율분석을 위한 해석프로그램의 경우 외부주광의 가용성 및 주광율법(Daylight factor method)은 기존에 자연채광 해석에 활발히 사용되던 방식이며, 좀더 개선된 방식으로 현재는 열복사해석법(Radiosity)과 광추적방식(Ray Tracing)라는 방법이 많이 사용되고 있다. 자연채광해석의 경우 경면반사가 포함되는 액티브형 자연채광시스템의 해석을 위해서는 열복사해석법 및 광추적방식의 활용이 필수적이라 할 수 있다.<sup>(3)</sup>

본 연구의 경우 태양광에 의한 복사열에 영향은 고려하지 않고 시스템을 통해 유입되는 광도 및 광속에 대한 연구로 국한하였기 때문에 광선추적방식의 해석을 위주로 개발된 Trace-pro 프로그램을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 통해 분석하고자 하는 내용은 프레넬 필름을 이용한 본 자연채광시스템의 변광부 최적설계

를 위한 기초자료 조사와 계절에 따라 변하는 태양고도각에 의한 효과 등 프레넬 필름을 이용한 자연채광시스템의 해석모델을 구축하는데 목적이 있다. 우선 시뮬레이션을 위한 해석모델은 그림 1에 나타난 바와 같이 실제 시스템 작성을 위해 설계된 도면을 그대로 입력조건으로 하여 작성하였다. 시스템 해석을 위한 첫 번째 선결조건으로 프레넬 필름의 정확한 묘사가 중요한데, 이는 실제 시스템에서 집광부 표면을 통과한 빛이 프레넬 필름을 통하여 선형화 된 빛으로 모아지는 현상을 컴퓨터상에 표현하기 위해서는 집광표면이 길이방향으로 볼록한 형상으로 묘사되어야 하기 때문이며, 또한 집광되어 변광부 표면에 초점화 되는 거리가 렌즈의 굴곡에 따라 다르기 때문에 태양남중시에 도달하는 에 거리의 조정이 가장 중요하다. 따라서 수차레의 집광부에 대한 수정작업을 거쳐 그림5와 같이 실제시스템과 동일한 집광거리를 가진 시스템을 모델링 하였다.

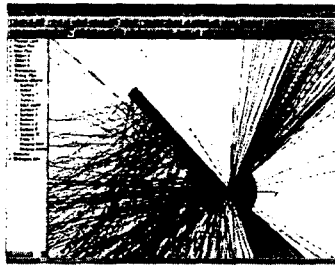


그림 5. Trace-Pro Simulation Results.(Ray Tracing)

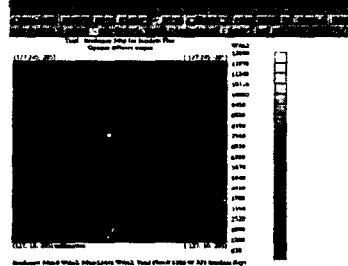


그림 6. Trace-Pro Simulation Results. (Irradiance Mapping)

실제 시스템에서는 태양광이 집광부를 통해 들어와 변광부를 거쳐 배광부를 통해서 실내로 유입되는 것이지만, 컴퓨터상에서는 시스템 외부로부터 투사되어 집광부로 유입되는 빛에 대한 해석이 불가능하기 때문에 여기서는 집광부의 내부표면이 전체가 광원이 되는 것으로 묘사하여 변광부로 전송되는 것으로 묘사하였다. 따라서 시뮬레이션의 결과는 특정 조도값의 입력에 따른 실내에서의 조도값의 비로 효율을 분석하는 것이 아니라, 집광부에서 발산되는 광량을 100으로 하고 그에 따라 변광부 및 배광부를 거쳐 실내로 유입되는 광량의 비로 시스템의 효율을 분석할 수 있는 것이다. 또한 본 해석과정이 시간대에 따른 효율분석이나, 확산광 등을 고려하지 않았으며, 태양남중시의 경면반사에 의한 순수한 시스템의 효율분석을 목적으로 하였다.

표 3. Simulation Results

	100	9.52
	100	8.55
40	100	9.86
	100	7.90
20	100	8.59
	100	6.76
30	100	6.40
	100	5.10
10	100	4.72

그림 5는 해석모델의 시뮬레이션 결과로 분석된 그림인데, 그림에서 나타나듯이 집광부로부터 전송되는 대부분의 빛이 효과적으로 실내로 유입되는 것으로 나타났으나, 집광부와 변광부의 연결부, 변광부와 배광부의 연결부로부터 실외로 유출되는 빛도 상당히 많은 것으로 분석되었다. 실제로도 시스템을 아무리 견고하고 세심하게 제작하여도 집광부 표면이 외부로 개방되어있는 형태이고, 또한 각 연결부에서 육안으로 확인되지 않는 손실부분이 있는 것을 감안하면 실제시설에 상당히 유사하게 묘사된 모델이라고 할 수 있겠다. 그림 6은 실내의 바닥을 향한 배광부의 밑면에서 측정되는 광량을 도식적으로 표현한 그림인데, 그림의 아랫쪽이 변광부와 연결되는 부분이다. 그림에 나타난 것처럼 변광부와 가까운 쪽에서는 보다 많은 양의 광이 측정되었으며 실내부로 갈수록 광량이 작아지는 현상을 나타내고 있다.

표 3는 태양 고도각에 따라 집광부에 입력되는 광량을 100이라 했을 때 실내측에서 측정되는 광량의 비율 표시한 것으로 즉, 시스템의 효율을 나타내고 있다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 시스템의 효율값은 실제 시스템에서 측정된 데이터보다 전체적으로 높은 효율을 갖는 것으로 분석되었는데, 이런 결과값이 발생하는 이유는 실제시스템에서는 프레넬 필름을 통과한 빛이 하나의 선상으로 초점화 되어지기는 하나 실제로 필름의 부착상태나 곡면의 부정확도 등에 의해 일정한 폭을 가지는 초점으로 집광되고 또한 집광부 내부표면으로부터 실외측으로 재 반사되는 빛이 있는 반면, 해석모델의 경우에는 변광부에 도달하는 빛의 형태가 정확하게 일치선으로 초점화 되어져 집광부에서 전송되는 빛이 거의 완벽하게 100% 변광부로 전송되는 것으로 해석되기 때문에 나타나는 오차인 것으로 판단된다.

실험이 진행된 하절기를 기준으로 시뮬레이션을 통한 해석모델의 신뢰성을 판단하기 위해서 태양이 남중했을 경우 측정되는 효율값 분석이 필요하다. 따라서 대전지역의 하지를 기준으로 한 태양고도각은 74°이고, 배광부와 변광부의 연결부분이 약 55° 정도 각을 이루고 있는 것을 감안하면, 태양이 남중했을 경우는 표 5에 나타난 고도각이 20° 인 경우의 데이터를 비교하면 가능하다. 표 4에 나타난 시스템 실측실험에서의 태양남중시 시스템 효율은 4.96이고 시뮬레이션을 통해 얻은 8.59로 약 3.5%의 오차를 보이고 있다. 여기에서 실제시설의 경우 시스템 전체에서의 외부로 재반사 되는 손실이나, 프레넬, 프리즘 필름 등의 부착상태 그리고 각 연결부 등에서의 손실을 고려한다면 시뮬레이션과 실측데이터와의 오차값은 상당히 양호한 것으로 분석할 수 있겠다. 따라서 Trace-pro 프로그램을 이용하여 제안한 해석모델은 프레넬 필름을 활용한 자연채광시스템의 해석용으로 활용할 수 있을것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 차세대형 조명시스템인 프레넬 및 프리즘 필름을 이용한 Solar Fresnel Prismatic Daylighting(SFPD) 복합조명시스템의 설계와 개발을 통해 실측실험을 진행하였으며, 자연채광시스템의 시뮬레이션 해석모델을 개발하고 신뢰성을 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 태양광을 광원으로 하여 경량형 프레넬 필름을 이용한 집광부, 프리즘 필름을 이용한 변광부, 배광부로 구성되는 차세대형 첨단 복합조명시스템을 개발하였다.
- 태양 고도각만을 추적하는 방식으로 하는 자연조명시스템의 경우 태양방위각에 대한 효율을 극대화하기 위한 방안으로 직선상으로 집광되는 태양광을 초점화 시키기 위해서는 오전 9시부터 11시 사이와, 오후 1시부터 3시 사이에는 90° 각을 가진 프리즘 필름을, 또한 태양이 남중하는 시간대인 오전 11시부터 오후 1시사이에는 70° 각을 갖는 프리즘 필름을 이용하는 것이 가장 효율적인 것으로 분석되었다.
- 본 연구에서 제안된 자연채광시스템의 경우 태양이 남중하는 시간대를 기준으로 약 4.5%이상, 실내 작업면조도기준 500Lux이상의 조도를 확보할 수 있어, 일반적인 32Watt 형광등 2기에서 발생하는 조도값에 상응하는 조명효과가 있는 것으로 분석되었다.
- 빛의 경면반사율 효과적으로 분석하는 Ray-Trace 방식을 사용하는 Trace-pro 시뮬레이션 도구를 활용하여 해석모델을 개발하고 시뮬레이션을 수행한 결과 실측실험에서 측정된 데이터 값에 비교하여 약 3.5% 정도의 오차를 나타내어, 개발된 모델이 자연채광시스템의 의 효율 분석 및 다양한 변수 시뮬레이션을 수행할 수 있는 해석모델로 신뢰성이 검증되었다.

국내에서 추진중인 국내 ESCO, GB 인센티브 제도 및 첨단건물 인증제도 IB-2001이나, 시환경과 에너지 환경을 고려하는 최근 국제적인 연구 동향을 보면 자연채광 적용기술이 주요 평가 항목으로 지목되고 있다. 이런 상황에서 기존의 자연채광시스템의 주요 문제점으로 지적된 무거운 중량에 따른 제어나 경제성 등의 문제를 본 논문에서 제안하는 경량형 프레넬 & 프리즘 필름을 활용한 자연채광시스템은 해결할 수 있는 방안을 제시했다는 점에서 의미가 있다 하겠다. 현재 한국에너지기술연구원에서는 계속해서 이러한 첨단 조명 제어 시스템의 하나로, 이와 같은 경량 프레넬 및 프레넬 필름과 light pipe를 활용한 첨단 자연 채광 조명 시스템 개발 및 가변 초점화 이슈와 자연채광시스템의 다기능성, 제어에 관한 문제 등에 대한 실제 성능 평가가 계속 진행중이며, SFPD 시스템 병용 고휘도 조명용 최적 조명제어 시스템 Prototype 개발이 진행 중에 있다.

<본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업으로 지원된 연구 결과의 일부임.>

## 6. 참고문헌

1. 산업자원부 에너지 관리공단, ESCO 사업 안내서 (1999)
2. 강은철, 이의준, 한수빈, Derek Mackay, "Fresnel 및 Prism 렌즈 활용 Solar 자연채광 시스템 Prototype 개발 연구", 대한설비공학회 하계학술발표회 논문집, 2001. 7., pp.387-390.
3. 조일식, 김기새, 윤종호, 이진숙, "Lightscape를 이용한 광선반의 주광성능 해석 및 평가", 한국태양에너지학회 춘계학술대회발표논문, 2001. 5., pp.61-70.
4. Nils Larsson, Case study Analysis of the C-2000 Energy Criteria and National Energy Code, CANMET, 1996
5. Hong Ma, The Roller Blind Heliostat "Engineering Physics Projects", The University of British Columbia, 1999
6. Lambda Research Corporation, Trace-Pro User's Manual (2000)
7. N. Baker et al, Daylighting in architecture European reference book, 1993, pp 4.1-4.18.
8. Whitehead, L. A. & Hoffmanm, K., Method for Estimating the efficiency of prism light guide luminaires, paper #11., 1998.
9. Whitehead, L. et al, Hollow light guide technology and applications, 1999.