

미세 필름을 이용한 집광 및 조명장치 연구

A Study on Light Collector and Luminaire Design using Microstructured Film

정학근*
Jeong, Hak-Geun
정봉만**
Jung, Bong-Man

한수빈**
Han, Su-Bin
이의준**
Lee, Euy-Jun

Abstract

Solar daylighting system provides free and comfort lighting, but its cost has been key issue due to difficult design and control of the heavy light collecting system. One of the solutions for the heavy design issues would be using a light framed film such fresnel and prism lens. Prism light guide luminaires have for some time been used to distribute light when it is desirable to have remote light sources. These systems are helpful when it is desirable to have fewer light sources, and/or to position light sources in places where lamp maintenance is easier, or electrical hazard is reduced. This proposed prototype system consists of light collector, light transformer and light pipe.

Keywords : Fresnel, Prism, Hybrid Lighting, Light Pipe

1. 서론

광원으로부터 멀리 떨어진 위치까지 빛을 옮기는 시도로, 19세기초부터 거울을 튜브의 벽면에 설치하고 거울의 반사작용을 이용하여 빛을 이동시키고자 하였지만 이 때 광을 받아 처리할 수 있는 작은 렌즈 반경의 절반이하이며 평균적으로 95%에 불과한 금속 거울의 반사율 때문에 구 소련에서 많이 이용되기는 하였지만 상용화가 어려웠다. 보편적인 광전송 도구로서는 광파이프(Light Pipe)가 이용되었으며 이는 말 그대로 광원으로부터 멀리 떨어진 곳까지 빛을 옮기는 파이프를 뜻하는 것으로 파이프 안에 물이나 기름대신 빛을 흐르게 한다는 개념이다. 광파이프로 광을 전송할 경우는 전송받는 곳은 광원의 과열, 폭발 등의 문제에서 벗어날 수 있으므로 안정성이 향상되고 광파이프로 배광까지 가능하다면 광원의 수가 줄어들며 조명시설의 유지보수 가격이 떨어지는 등의 장점이

있다. 광섬유도 자외선, 적외선을 제외한 가시광선을 전송하는데 사용되고 빛이 광섬유 안에서 계속적인 반사를 통해 전달되는 동안 손실이 발생되는데, 손실의 양은 광섬유의 질에 따라 좌우된다. 대략 길이 30cm 당 0.1~1% 정도의 손실이 발생되며 광섬유의 효율 향상을 위해서 광섬유 안에 센터 코어(center core)를 삽입하여 빛의 손실을 최소화하기도 한다. 광섬유를 이용한 시도는 상당히 긍정적으로 평가되었으나, 신호 전달 및 표시등의 소량의 광신호가 아닌 조명용의 대량 광 운송에는 광섬유의 직경이 비약적으로 커져야 하고 이에 따른 무게와 비용이 광섬유의 응용을 비경제적인 것으로 만들었다.

기존의 광전송 수단에서 광파이프는 효율면에서 문제가 있고 광섬유는 조명용의 대량의 광 전송에는 비경제적이 되는 문제가 존재하였다. 이러한 문제를 해결하기 위한 시도로서 프리즘 효과를 이용한 빛의 이동수단이 개발되었다. 1981년 캐나다 UBC(University of British Columbia) 대학의 학생이었던 Lorne Whitehead가 프리즘 성질을 띤 재료가 빛의 이동수단이 될 수 있음을 파악하고 광전송용 프리즘을 개발하였다. 이후 광 운송재료의 개발은 비약적인 발전을 하였고 아크릴 패널 대신 얇은 필름을 이용하게 되었으며 이를 이용한 미세 프리즘 개

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(2000-N-NL-01-C-291) 지원으로 수행되었음

* 한국에너지기술연구원, 연구원

** 한국에너지기술연구원, 책임연구원

말까지 이어졌다. OLF(Optical Lighting Film)는 미세 프리즘이 연속적으로 배열된 필름으로서 빛의 입사각에 따라 투명한 창이 되기도 하고, 거울이 되기도 하는 특성을 지니고 있다. 그리고 태양광의 집광을 위해서 사용되던 기존의 큰 렌즈를 대체할 수 있는 프레넬 필름 또한 개발되어 기존의 집광 시스템의 무게와 공간의 단점을 보완할 수 있게 되었다.

본 논문에서는 이러한 미세필름을 이용한 집광 및 배광 시스템의 해석 및 제작을 통하여 그 특성 및 상용화 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 시스템의 구성 및 원리

광전송 및 배광 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 집광장치(light collector)와 배광장치(light pipe), 그리고 그 사이에 집광장치에 의해서 집광된 광을 배광장치에서 사용이 가능하도록 광을 변환하는 변광장치(light transformer)로 구성된다.

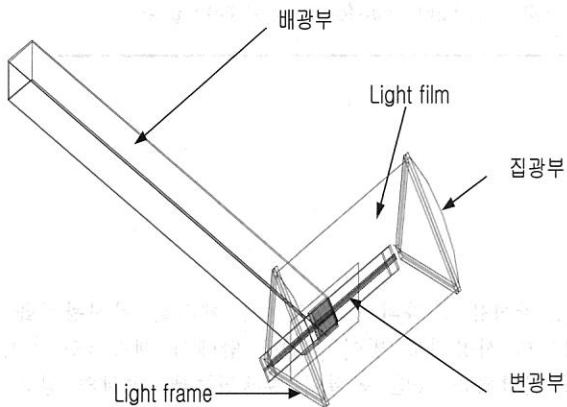


그림 1. 광전송 및 배광시스템의 구성

시스템은 태양이 잘 비추는 창가나 옥상 등에 프레넬 렌즈를 이용한 태양 집광장치를 설치하고 이 집광장치에 추적 장치를 연결하여 태양고도에 따라 집광부가 상하로 움직일 수 있도록 설계한다. 프레넬 렌즈에 도달한 태양 빛은 프레넬 렌즈를 투과하면서 굴절을 하게 되는데 이때 굴절각을 조절하여 태양 빛을 하나의 초점 선상에 나타나게 한다. 이렇게 형성된 빛은 변광부로 들어가고, 변광부 내벽에 붙어있는 전반사필름을 통해 다시 배광부로 나가게 된다. 배광부에 들어온 빛은 입사각도에 따라 전 반사 되거나 실내로 투과된다.

2.1 집광장치(Light Collector)의 원리

태양은 멀리 떨어져 있는 광원이라 볼 수 있으며 태양 으로부터 지구로 내리 쬐는 광선은 평행하게 도달한다. 우리가 이미 알고 있는 바와 같이 평행한 빛은 렌즈를 통해 하나의 점 초점을 형성하게 되고 이러한 렌즈를 길

이 방향으로 확장시키면 초점은 하나의 선의 형태로 나타난다. 이렇게 여러 개의 렌즈를 연결하여 하나의 필름으로 제작한 것을 프레넬 렌즈(Fresnel lens)라 한다. 초점의 위치는 렌즈의 두께에 따라 변하며, 태양의 입사각이 바뀌면 초점의 위치도 바뀌게 된다. 따라서 초점이 항상 일정하게 유지하기 위해서는 렌즈의 각을 조절하여 태양의 입사각이 일정하도록 해야 한다.

2.2 변광부와 배광장치의 원리

그림 2에서 보는 바와 같이 프리즘형 광파이프는 OLF를 이용하므로 내부는 매끄럽고 외부는 삼각형의 프리즘 형태로 원통형 또는 사각형으로 만들어진다.

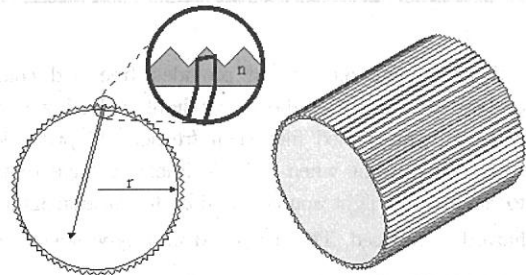
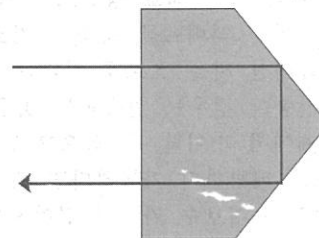


그림 2. 프리즘 조명기구의 구조

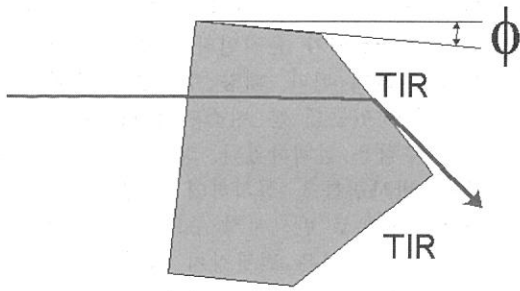
OLF는 미세 프리즘이 연속적으로 배열된 필름으로서 빛의 입사각에 따라 투명한 창이 되기도 하고, 거울이 되기도 하는 특성이 있어 필름의 반사특성에 따라 반사가 되는 빛의 입사각이 임계각 이내이면 반사율은 99%에 이른다. 때문에 빛은 광파이프를 따라 매우 효율적으로 이동할 수 있다.

그림 3과 같이 임계각 이내의 광은 전반사(a) 되고 이외의 빛은 투과(b)하게 된다. 임계각의 크기는 광파이프 물질의 굴절률에 의해 식(1)에 의해서 결정된다.

$$\theta_c = \arcsin \sqrt{(3 - 2\sqrt{2})(n^2 - 1)} \quad (1)$$



(a) 전반사(임계각 이내의 입사각)



(b) 투과(임계각을 벗어나는 입사각)

그림 3. 입사각에 따른 광의 전반사와 투과

따라서 광파이프를 이용하여 광을 유효하게 전송하기 위해서는 광파이프에 임계각 이내의 빛이 입사되도록 하여야 함을 알 수 있다.

그림 4에서 보는 바와 같이 광파이프를 이용한 광전송 및 배광 시스템은 빛이 임계각 이내로 광파이프로 입사되도록 하는 광 변환기(Light Injector), 광파이프 뒷면으로 투과된 빛을 다시 광파이프로 유입시켜주는 반사갓(Reflective Cover) 그리고 빛이 투과되는 발광면(Emitting Area)로 구성된다.

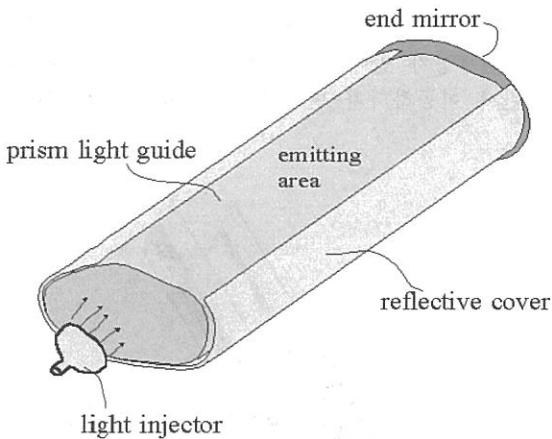


그림 4. 프리즘 조명기구의 구조

일반적으로 임의의 광파이프 전송 및 배광 시스템을 광파이프의 길이(L) 혹은 길이와 광파이프 단면적(W_g)의 비를 이용하여 특징을 정의하려고 하는 것은 유용하지 못한 방법이다. 비슷한 길이 또는 길이와 단면적의 비를 가진 광파이프라 하더라도 그 특성은 완전히 달라지기 때문이다.

$$AR = \frac{L}{W_g} \quad (2)$$

따라서 광파이프 등기구의 특징을 규정하는 좋은 방법은 광파이프 내에서 평균적으로 반사되는 횟수(N_g)를 이용하는 것이다. 예를 들어 평균 반사수가 3보다 작다면 일반 반사체를 이용하여서도 충분히 광을 전송할 수 있

으므로 프리즘형 광전송 장치는 필요 없을 것이다. 또한 평균 반사수가 30보다 크다면 프리즘형 광전송 장치를 이용하더라도 손실이 커서 유용하지 못할 것이다.

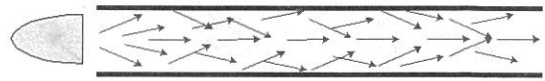


그림 5. 조명기구내에서의 광의 전송 형태

광파이프에 입사한 광의 평균 반사수는 광파이프의 길이에 비례하고, 단면적에 반비례함을 직관적으로 짐작할 수 있으므로 아래 식과 같이 표현할 수 있다. 정확하게 평균 반사수를 구하기 위해서는 광의 입사각의 평균 탄젠트를 구함으로써 얻을 수 있을 것이다.

$$N_g \propto \frac{L}{W_g} \quad (3)$$

그러나 입사광의 평균 탄젠트를 구하는 것은 아주 힘든 작업이므로 광파이프 전송 및 배광을 처음으로 제안했던 White Head 교수는 광의 입사각($\theta_{1/2}$)을 이용하여 다음 식으로 근사화 하였다. 광파이프 설계시 이 식을 이용하여 $6 \leq N_g \leq 24$ 의 조건을 만족하도록 단면적과 크기 및 광원을 선택하게 된다.

$$N_g \approx \frac{\theta_{1/2}}{50} \frac{L}{W_g} \quad (4)$$

광파이프 전송 및 배광에 있어서 또하나의 중요한 문제는 광파이프 발광면이 길이 방향으로 일정하게 광분포를 가지도록 하는 문제이다. 그림 4와 같이 구성된 프리즘 광파이프는 임계각 이내로 광이 입사된다면 발광면을 통해서 나오는 빛은 거의 없다고 할 수 있다. 원하는 배광을 위해서는 발광면 반대편에 그림 6과 같이 광추출기(Extractor)가 설치되어야 한다.

광추출기는 빛을 완전 확산시키는 물질로 임계각 이내로 입사되어 전반사되고 있는 빛을 산란시켜 임계각을 벗어나는 광을 유도해 발광면을 통하여 빛이 투과하도록 하는 작용을 한다. 따라서 광추출기의 길이방향에 따른 크기에 따라 광파이프 발광면의 배광 형태가 달라진다. 즉 광파이프를 이용한 조명에 있어서 원하는 배광 형태에 따라 광추출기를 다르게 설계함으로써 그 목적을 달성할 수 있게 된다.

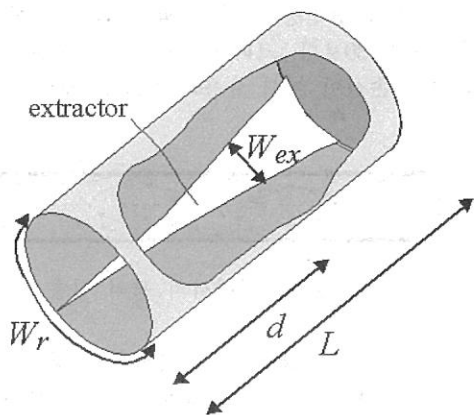


그림 6. 광추출기의 설계요소

3. 시스템의 제작

3.1 집광부(Light Collector)

태양광 에너지를 많이 받기 위해서는 집광부 면적이 커야 한다. 그러나 면적이 커지면 집광장치를 구성하고 있는 렌즈의 무게가 상당할 뿐만 아니라 제작하기도 쉽지 않다. 현재 3M사에서 생산하고 있는 프레넬 필름은 아크릴이나 폴리탄산에스테르를 소재로 하여 제작하였으며, 무게가 가볍고 잘 구부러지는 특징이 있으므로 본 시스템에서는 프레넬 렌즈 필름을 이용하여 집광장치를 구성하였다. 프레넬 렌즈에는 서로 다른 2개의 필름이 연결되어 있는데, 위쪽에 있는 필름은 평평한 필름으로 빛을 1차 굴절시키고, 아래쪽의 필름은 다양한 렌즈로 구성되어 태양 빛이 항상 일정하게 도달하도록 한다. 따라서 집광장치에 수직으로 도달하는 태양 빛은 렌즈의 각을 조금씩 달리하여 등근 형태로 구성하면 하나의 초점 상에 모을 수 있다.

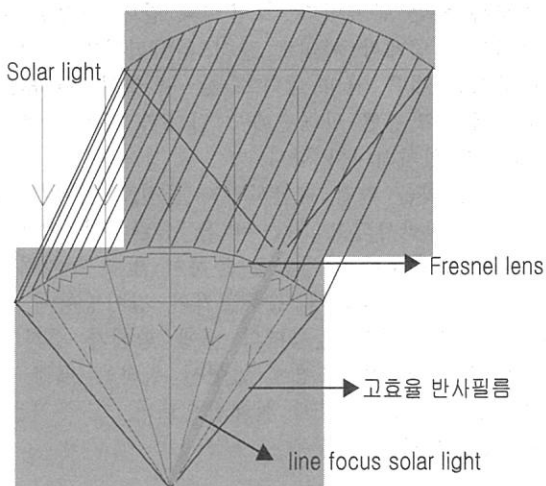


그림 7. 집광장치의 구조

태양은 시간에 따라 항상 위치가 변하기 때문에 태양을 추적할 수 있는 추적장치를 연결해야 한다. 그러나 태

양의 이동 경로는 포물선 형태를 띠고 있으며 태양의 움직임을 따라 집광장치가 움직인다면 빛이 모이는 초점의 위치가 변해 버리게 된다. 태양 추적은 좌우이동 추적과 상하이동 추적이 있는데 본 시스템에서는 태양고도에 따른 상하이동 추적을 선택하였다. 그리고 집광부 좌우측면에는 고효율 반사필름을 설치하여 측면으로 빠져나가는 빛을 변광부 입구부로 반사시켜 주도록 설계하였다.

태양고도 추적 방법은 변광장치 입구부 상·하에 2개의 조도측정센서를 설치하여 이 센서에서 조도를 실시간으로 읽어들이고, 조도차가 발생하면 프레넬 렌즈가 오전에는 위쪽으로 오후에는 아래쪽으로 조도값이 같을 때까지 움직이게 된다.

3.2 변광부(Light Transformer)

변광부는 집광부를 통해 들어온 긴 라인의 입력 빛(line focus solar light)을 배광부에서 요구하는 형태의 입사각으로 조절하여 보내주는 역할을 수행한다.

변광부 입구부에는 그림 8에서 보는 바와 같이 70° 혹은 90°의 Prismatic 필름을 연결하여 집광된 빛을 변광부 안으로 투과시킨다. 90° 필름은 오전 9~11시, 오후 1~3시 사이에 사용하고, 70° 필름은 오전 11~오후 1시 사이에 사용하여 변광 시스템 효율을 증가시키도록 한다. 이 필름을 거치면서 빛은 굴절되어 변광상자 안으로 들어가게 되고, 변광상자 안에는 전반사필름이 있어 빛은 계속해서 전반사 이동하다가 변광부 출구 쪽으로 빠져나가게 된다.

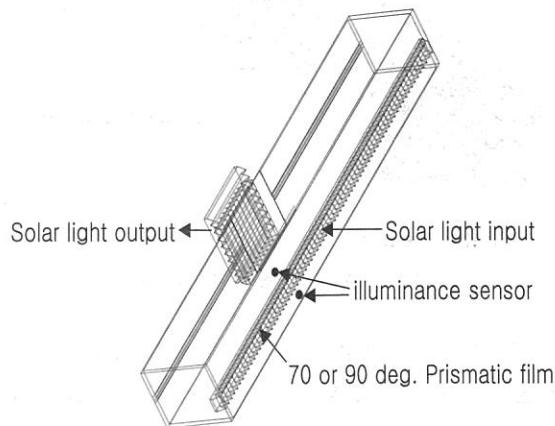


그림 8. 변광장치의 구조

3.3 배광부(Light Pipe Luminaire)

변광부를 통해 나온 빛은 배광부 태양광 파이프를 따라 실내로 유입된다. 태양광 파이프로 유입되는 빛은 광파이프를 둘러싼 extractor 필름에 의해 Fig 9에서와 같이 실내로 투과되기도 하고 90° Optical Light Film에 의해 전반사 되기도 한다. 즉 파이프에 도달하는 빛의 입사각이 임계각 이내가 되면 빛은 전반사를 하게 되고 입사각이 임계각보다 크게 되면 광파이프 외부로 투과가 나타난다.(Snell's law) 이때 투과된 빛은 실내조명에 사용

되어진다.

$$\eta = \frac{(\Phi_o)_P}{(\Phi_i)_C} \quad (8)$$

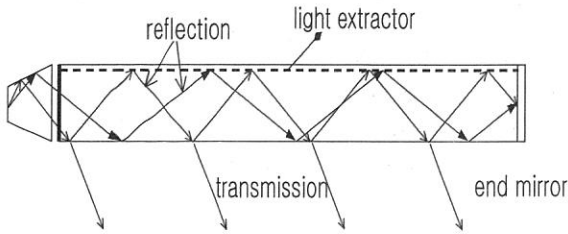


그림 9. 배광장치의 구조

4. 시스템 성능 분석

광파이프 조명시스템의 성능은 집광부(η_C), 변광부(η_T), 배광부(η_P)에서의 각각의 효율을 구함으로써 얻어질 수 있다.

$$\eta_{total} = \eta_C \times \eta_T \times \eta_P \quad (5)$$

$$\eta_{total} = \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_C \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_T \times \left(\frac{\Phi_o}{\Phi_i}\right)_P \quad (6)$$

여기서 η_{total} 는 시스템 전체 효율, Φ_i 는 시스템 입구에서의 광속 [lm], Φ_o 는 시스템 출구에서의 광속 [lm], C는 light collector (집광부), T는 light transformer (변광부) 그리고 P는 light pipe (배광부)이다.

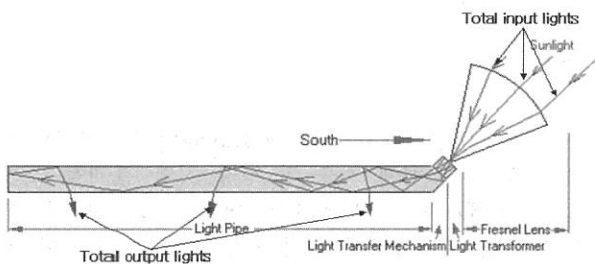


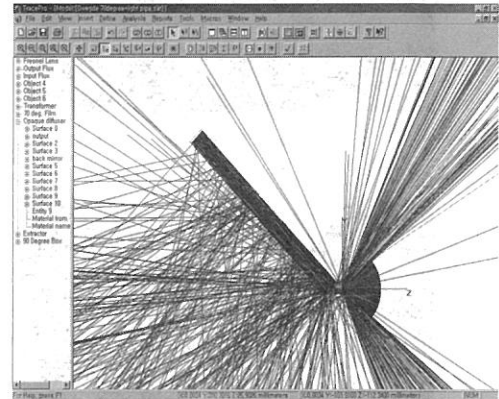
그림 10. 시스템 효율 구성도

위 식에서 $(\Phi_i)_C$ 는 태양에서 집광부로 도달하는 전체 광속(total luminous)을 나타내고 있다. 집광부에서 나가는 광속은 변광부로 들어가는 광속과 같은 값이고, 변광부에서 나오는 광속은 배광부로 들어가는 광속과 같은 값이다.

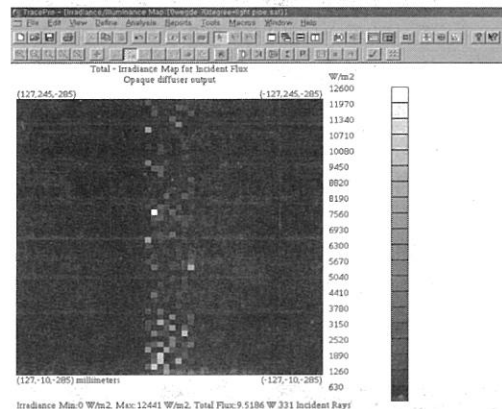
$$(\Phi_o)_C = (\Phi_i)_T, \quad (\Phi_o)_T = (\Phi_i)_C \quad (7)$$

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.

광파이프 조명시스템의 이상적인 효율을 측정해 보기 위해서 광분석 프로그램인 Trace-Pro를 이용하여 측정해 보았다. 이 실험에서 빛의 분산은 고려하지 않았으며 단지 직진 이동하는 것으로 가정하여 수행하였다.



(a) 광의 경로 추적(Ray Tracing)

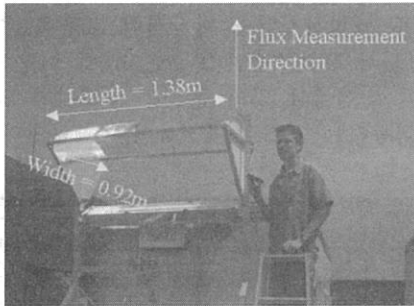


(b) 배광장치에서의 광의 분포

그림 11. Trace-Pro를 통한 모의실험 결과

실제 시스템에서의 광원은 태양이며 태양광이 시스템의 집광부(Light Collector)를 통해 들어와 변광부(Light Transformer)를 거쳐 배광부(Light Pipe)를 통해서 실내로 유입되는 것이지만 본 Simulation에서는 집광부의 Fresnel Lens 설계가 불가능하기 때문에 Fresnel Lens에 도달한 태양광을 시스템의 Input 값으로 정하여 실험을 하였다. 따라서 여기서 얻어낸 효율은 Fresnel Lens에서의 효율은 고려하지 않은 값이다. 또한 Simulation을 통해 얻어낸 시스템 효율이 실제 효율보다 크게 나타났는데 그 이유는 Simulation에서의 광속은 초점이 정확하게 형성되어 변광부로의 태양광 유입이 이상적으로 이루어지기 때문이다. 반면 실제로는 시스템 구성이 완벽하게 이루어지지 못하기 때문에 오차가 발생하는 것으로 사료

된다. 그림 12은 모의실험을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 집광부와 배광부를 제작한 것이다.



(a) 집광장치



(b) 배광장치

그림 12. 집광장치와 배광장치의 설계 파라미터

시스템 효율은 집광부 프레넬 렌즈 표면에 도달한 전체 광속에 대하여 배광부 Light Pipe를 통하여 실내로 유입되는 광속의 비로 나타낼 수 있으며, 조도측정기를 이용하여 광속을 측정할 수 있다. 효율 측정을 위해 오전 10:00부터 오후 4:00시까지 30분 간격으로 태양고도를 추적하여 그 결과 표 1에 정리하였다.

표 1. Efficiency Data

Time	Input Flux [lm]	Output Flux [lm]	Efficiency (%)
10:00	112,360	989	0.9
10:30	124,675	1,544	1.24
11:00	131,023	1,878	1.43
11:30	141,814	3,084	2.17
12:00	147,274	5,397	3.66
12:30	148,670	7,379	4.96
13:00	149,432	6,140	4.11
13:30	144,734	4,591	3.17
14:00	141,306	2,175	1.54
14:30	132,673	1,843	1.39
15:00	125,436	1,424	1.14
15:30	113,248	865	0.76

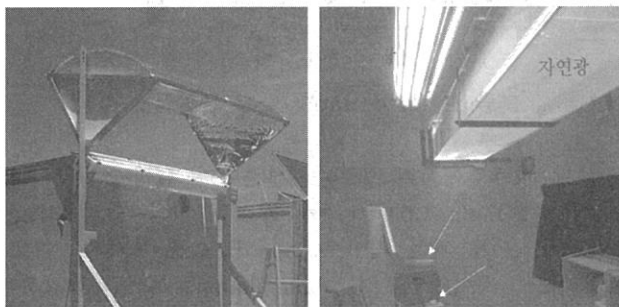
실험은 태양의 방위각(Azimuth Angle)은 고려하지 않았고 단지 태양의 고도(Altitude Angle)만을 추적하여 얻어낸 결과이다. 위에서 알 수 있듯이 일사 조건이 좋은 낮 시간(11:30~13:30)에는 집광부에 떨어지는 일사량도 많을 뿐만 아니라 실내로 유입되는 광속도 크게 나타났으며 이는 32watt형 형광등 2기 정도의 밝기를 보여주고 있었다. 그러나 그 외의 시간에서는 자연광시스템의 효율이 낮게 나타나고 있는데, 이것은 태양의 방위각이 시스템 효율에 영향을 미치기 때문이며 따라서 이 시간대에는 인공광을 이용하여 실내조도를 적정 조도로 유지해 주도록 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 Solar Fresnel Daylighting (SFD) 복합 조명 시스템의 설계 기술 및 성능 시험 결과를 소개하였다. 본 SFD 시스템은 집광부, 변광부 그리고 배광부로 구성된 자연광 시스템과 형광등 안정기 조도 제어 시스템이 구비된 인공광 시스템으로 구성되었다. 실외 성능 측정 결과, 이 SFD 시스템은 무한한 자연 태양광을 직접 활용하여 100,000[lx] 외기 조도일 때 내부 작업면 조도 500[lx]를 만족시키면서, 실제 성능 시험 종합 결과 적어도 32watt형 2기 형광등에 상응하는 조명 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- Whitehead, L.A., Prism Light Guide Luminaire US patent #4,750,798, October 7, 1986.
- A. Zastrow, V. Wirrer: Daylighting with mirror light popes and with flourescent planar concentrators, Proc. SPIE 692 227(1987)



(a) 집광시스템 (b) 배광 및 제어시스템

그림 13. 시스템의 성능 실험