

비냉각형 고효율 태양광 채광시스템 및 응용에 관한 연구

준회원 이 호 열*, 정회원 김 명 진**, 종신회원 신 서 용*

Un-Cooled High Efficient Solar Lighting System and its Application

Hoe-youl Lee* *Associate Member*, Myoung-jin Kim** *Regular Member*
Seoyong Shin*^o *Lifelong Member*

요 약

본 논문은 포물 반사경 방식 및 프레넬 렌즈 방식을 이용한 태양광 집광장치 및 이의 응용에 관한 것이다. 본 시스템은 대구경 반사경과 더불어 2차 광학계를 도입하여 광섬유로 입사되는 빛의 입사각을 광섬유의 개구수보다 작게 함으로써 집광효율을 극대화하였다. 또한 광섬유 단면에 입사하는 빛의 에너지 밀도를 낮게 하기 위해 광섬유 다발 직경 크기와 동일한 평행광이 광섬유로 입사되게 함으로써 반사경을 사용한 집광 시 문제가 되는 열발생 문제를 별도의 냉각장치 없이 근원적으로 차단하였다. 최근 각광받고 있는 식물공장에 주로 쓰이는 LED와 같은 인공광원 대신 본 연구에서 개발한 태양광 집광장치를 식물공장에 적용하여 인공조명과 태양광의 혼합조명장치를 통해 식물을 재배하였다. 그 결과 낮 시간대에 인공조명에 소요되는 전기에너지를 대폭 절감할 수 있었다. 혼합조명장치에서는 조도센서를 활용하여 항상 일정량의 빛이 식물에 제공되도록 LED등의 밝기를 조절하였다. 하루 10시간 기준으로 100평 규모의 식물공장에 태양광 채광시스템을 적용할 경우 한 달에 약 28,080KWh의 에너지 절감효과가 있다.

Key Words : Solar Lighting System, Parabolic Reflector, Fresnel Lens, 식물공장, 태양추적

ABSTRACT

This paper describes solar light collecting system which employs parabolic reflector and Fresnel lens and its industrial application. We have introduced second-stage optical system so that it makes optical fiber overcome its numerical aperture limitation and also it makes focused light become collimated, which results in decreased light energy density. As result of these, light collecting efficiency become maximized and the system does not require separate cooling apparatus any more. The developed solar lighting system together with artificial light source like LED has been applied to plant factory as a hybrid lighting source. This makes us save electric energy for artificial lighting during day time. The intensity of LED light in the hybrid lighting system is controlled automatically according to ambient-light-sensor installed in the system so that the light intensity for a plant always keeps the same level no matter how the sun light changes. For a plant factory whose size is 330 square meters, when solar lighting system is applied, 28,080KWh electric energy can be saved per month.2 times.

I. 서 론

1997년 교토 의정서가 발효된 이래, 신재생 에너지

의 이용에 대한 관심과 연구는 꾸준히 이어져왔다. 대부분의 연료를 수입에 의존하고 있는 우리나라 역시 신재생 에너지에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으

※ 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0012926).

* 명지대학교 정보통신공학과 광통신연구실(amita1227@nate.com, sshin@mju.ac.kr), (° : 교신저자)

** (주)옵티베이스(kimmj@opti-base.com)

논문번호 : KICS2011-08-341, 접수일자 : 2011년 8월 6일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 28일

며 특히 무한 청정에너지 자원으로서의 태양광은 새로운 대체 에너지로 각광 받고 있다. 이에 따라 국내는 물론 해외에서도 태양광을 집광하여 조명에 이용하는 자연 채광시스템이 건물에 도입되고 있는 추세이다^[1].

일반적으로 태양광 집광시스템에는 거울방식, 파라볼릭방식, 프리즘 굴절방식, 렌즈집광 방식 등이 있으나 최근에는 반사경을 이용하는 채광방식과 프레넬 렌즈 방식이 많이 사용되고 있다. 반사경을 이용하는 방식은 점시형 포물 반사경을 사용하여 집광된 빛을 광섬유를 통해 전송하는 방식이다. 이때 반사경은 항상 태양과 정면으로 향하도록 제어하기 때문에 태양의 고도 및 위치 변화에도 불구하고 항상 일정한 채광 효율을 얻을 수 있다. 또한 광섬유의 저 손실 특성으로 인해 전송거리의 제약이 거의 없으며 설계의 자유도가 높은 것이 이 방식의 특징이다^[2]. 프레넬 렌즈를 이용하는 방식은 프레넬 렌즈에 도달한 태양 빛을 원하는 방향으로 굴절 시켜 하나의 초점에 빛을 모으는 방식이다. 프레넬 렌즈 방식은 기존의 점시형 포물 반사경 형태의 집광장치와 집광효율은 비슷하면서도 매우 저렴하여 간편하게 구현할 수 있는 특징이 있다^{[3],[4]}.

실제적으로 국내외에서 제작된 태양광 집광장치 시스템에 있어서 가장 큰 문제로 손꼽히는 부분 중 하나는 태양 집광 시 발생하는 섭씨 500도 이상의 고열 문제이다. 태양광의 스펙트럼을 분석하면 대부분의 열은 적외선 성분에 의해 발생한다. 이에 적외선 및 자외선을 차단시키는 필터를 사용하여 열 문제를 해결하는 방법이 사용되어왔다. 하지만 가격이 비싸며 단기적인 효과만 있을 뿐 결국은 열로 인해 필터의 코팅 부분이 노화되는 단점이 있다^[5]. 본 논문에서 반사경 및 프레넬 렌즈를 사용하는 집광방식에 적용한 열문제 해결 방안은 다음과 같다. 포물 반사경을 사용하는 경우에는 기존의 평면경 혹은 타원경을 2차 반사경으로 적용한 경우^{[6],[7]}와는 달리 구면경을 장착하였다. 그 결과 포물경에서 1차 반사된 태양광을 평행광으로 만들어 다발형 광섬유로 입사시킴으로써 한 점으로 집광되어 발생하는 열문제를 구조적으로 해결하였다. 프레넬 렌즈 방식에서는 렌즈를 통해 집광된 빛을 다발형 광섬유로 입사시키기 전에 평오목(Plano-Concave)렌즈를 통과하게 함으로써 평행광으로 만들어 광섬유에 입사 시키는 방법으로 열 문제를 해결하였다.

집광부에 사용되는 광섬유는 실리카 재질의 광섬유로서 코어 및 클래드 직경이 각각 1.45mm 및 1.65mm의 채광용 광섬유 52가닥을 다발(bundle)로

묶어 구현하였다^[8]. 집광된 빛의 전송을 위해서는 유리 광섬유에 비해 손실은 떨어지지만 가격이 훨씬 저렴한 플라스틱 광섬유를 사용하였다. 유리 광섬유와 플라스틱 광섬유의 결합을 위해 특수 제작한 결합장치(연결자)를 사용하였으며 두 종류의 광섬유 사이에는 굴절률 결합 젤(index matching gel)을 발라 광섬유 사이에서 발생할 수 있는 약 8%의 전달 손실을 제거하였다.

이렇게 제작한 집광시스템에 태양광 추적 장치^[9]를 장착하였으며 전동형식으로 설계한 산란 장치를 식물 재배판에 부착하여 세계적으로 이슈가 되고 있는 식물공장 시스템의 인공광원^[10]에 응용하였다. 본 논문의 구성은 제 II장에서 태양광 집광장치의 세부적인 구성에 대하여 소개하고 제 III장에서는 실제 식물공장 시스템에 응용방안에 대해 제시하고, 제 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 태양광 집광장치 제작

일반적으로 태양광 채광시스템은 크게 3부분으로 구성된다. 센서나 프로그램에 의해 태양광을 추적하고 빛을 집광하는 추적장치 및 집광부, 집광된 빛을 실내로 전송하는 전송부, 그리고 실내공간에 전송된 태양광을 산란하는 산란부 등 세가지 유니트(unit)로 구성되어 있다. 이 장에서는 본 연구에서 설계 및 제작한 태양광 집광장치의 세부적인 구조와 그 특징들을 설명한다.

2.1 집광부

최근에는 태양광을 집광하는 집광부는 포물 반사경을 이용하는 방식과 프레넬 렌즈를 이용하는 방식이 많이 사용된다. 본 논문도 이러한 두가지 방식을 이용한 집광장치를 각각 제작하였다.

2.1.1 점시형 포물 반사경 방식

1차 반사경은 태양을 추적하여 태양광을 집광하는 장치이다. 제작된 1차 반사경은 광학 설계를 통해서 직경 320mm의 스테인레스 스틸 재질로 개발 되었다. 그림 1은 각각 포물 반사경 방식에 사용된 포물경의 기본 특성 및 궤적(a)와 광학 설계툴인 LightToolsTM를 이용하여 포물 반사경에 반사된 빛이 한 점으로 모이는 것을 보여주는 시뮬레이션 결과(b)이다. 포물 반사경의 규격은 식(1)을 통해 구했다.

$$y^2 = 4 \times f \times x \quad (1)$$

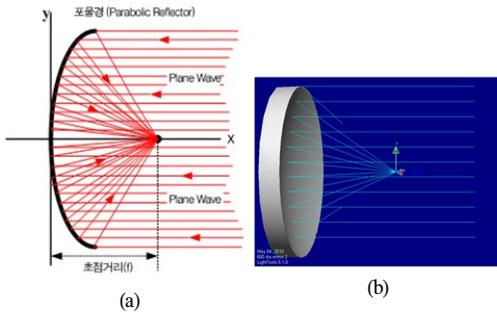


그림 1. (a) 포물경의 기본 특성 및 빛의 제적, (b) LightToolsTM를 이용한 포물반사경의 집광 시뮬레이션
 Fig. 1. (a) Parabolic Reflector's basic characteristics and light beam trajectory, (b) Light collecting simulation of parabolic reflector using LightToolsTM

여기서 y 는 반사경의 반경, f 는 초점거리, x 는 포물경의 깊이를 나타내며 원하는 초점거리를 미리 설정하고 x 축 거리와 y 축 거리를 계산하여 포물경을 제작하였다. 실제 제작된 포물경의 사양은 초점거리(f) = 128mm, 직경 = 320mm, 포물경의 깊이 = 50mm 이다.

1차 반사경만을 이용하여 빛을 집광하는 경우에는 입사각이 본 연구에서 사용하는 광섬유의 NA값인 0.22(12.5°) 값을 만족하여야한다. 광섬유의 NA값보다 더 큰 입사각으로 빛이 들어오면 빛의 손실이 발생하며 집광효율은 크게 떨어지게 된다. 이때 고정된 초점거리 조건하에서 빛의 손실이 없이 특정 NA값을 갖는 광섬유에 빛을 집광시키고자 할 때 반사경의 크기는 식(2)에 의해 결정된다.

$$\tan\theta = \frac{z}{f} \quad (2)$$

여기서 θ 는 NA에 의해 결정되는 광섬유로의 입사각, z 는 반사경의 반경, f 는 초점거리를 의미한다. 그림 2는 1차 반사경만을 사용했을 때, NA의 입사각에 의해 반사경의 크기가 결정되는 것을 보여준다. 초점거리는 실제 제작된 포물경의 초점거리 128mm로 지정하였다. 이 경우 반사경의 크기는 불과 지름이 56.74mm로 제한된다.

이에 우리는 1차 반사경에서 반사된 빛을 직경 10cm 가량의 2차 반사경을 이용하여 재반사, 광섬유의 개구수 한계를 극복함으로써 직경이 큰 포물경을 제작 가능하게 하였다. 그로인해 1차 반사경만을 사용했을 때보다 더 많은 양의 태양광을 집광하여 집광효율을 극대화 하였다. 실제 1차 반사경만을 사용했을 때 직경 56.74mm 정도의 크기만 수광 가능하였으나 2

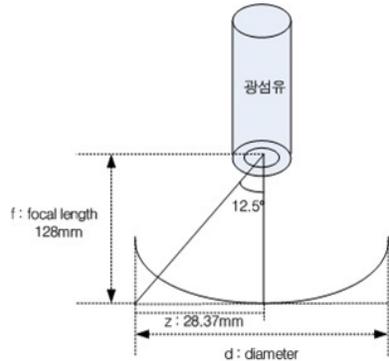


그림 2. 1차 포물경 만을 사용할 때 광섬유의 NA에 의해 제한되는 빛의 입사각 및 그에 따른 반사경의 크기
 Fig. 2. For only single-stage optical reflecting system, incident angle of the light and accordingly the reflecting mirror size become limited by NA of the fiber

차 반사경을 사용하였을 시 더 큰 직경의 1차 반사경을 제작 할 수 있었다. 기존에 국내외에서 제작된 반사경의 경우는 2차 반사경으로 평면경을 사용하는 경우가 대부분 이었다. 광학정렬 등 구성의 용이함과 상대적으로 저가에 2차 반사경을 제작 할 수 있다는 장점이 있다. 반면 2차 반사경에서 반사된 빛들이 광섬유 다발에 한 점으로 집광되면 500도 이상의 고열이 발생하여 구성품이 손상되는 단점이 있다. 실제로도 이러한 고열 문제를 해결하기 위하여 태양광의 스펙트럼 상 고열 발생에 가장 큰 영향을 미치는 적외선 및 자외선을 반사시키는 필터를 이용하는 방법이 이용되어 왔다. 하지만 추가 비용이 발생하며 단기적으로 효과가 있을 뿐 열로 인한 필터의 코팅 부분의 노화를 막을 순 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 2차 반사경 방향으로 입사되는 빛을 평행광으로 반사시키는 구면경의 특성을 이용하여 열전도율이 높은 반사경을 구면경으로 설계하였다. 또한 광섬유 다발을 금속물질(알루미늄)로 감싸 열 방출이 원활하게 이루어지게 하였다. 그 결과 자외선 및 적외선 필터를 필요로 하지 않고도 집광된 고온의 태양광을 방열할 수 있는 새로운 열방출 구조의 태양광 집광장치를 설계하였다. 그림 3은 구면경 형태의 2차 반사경에서 빛이 반사되어서 평행광으로 광섬유 다발로 전달되는 과정과 2차 반사경의 위치를 보여주고 있다.

식(3)은 구면경의 곡률반경과 초점거리에 관한 식이다.

$$R = 2 \times f \quad (3)$$

2차 반사경의 위치는 1차 반사경의 초점이 2차반사

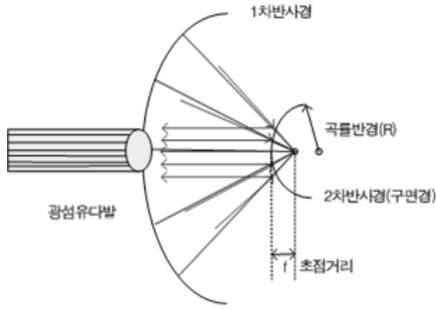


그림 3. 2차 반사경인 구면경 반사에 의해 형성되는 평행광
Fig. 3. Collimated reflected from second-stage reflector of spherical mirror

경의 곡률반경의 1/2인 지점인 초점과 동일한 지점에 설치 되어야하며 실제 제작된 2차 반사경의 사양은 지름 = 25.0mm, 초점거리 = -7.75mm, 곡률반경(R) = 15.50mm 이다.

2.1.2 프레넬 렌즈 방식

프레넬 렌즈를 이용한 방식은 프레넬 렌즈에 도달한 태양 빛을 원하는 방향으로 굴절 시켜 하나의 초점 선상에 빛을 모으는 방식이다. 프레넬 렌즈는 작고 좁은 원형의 돌기들로 이루어져 있으며 각각의 돌기들은 모두가 빛을 굴절시키는 프리즘 형태의 개별 렌즈들이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 포물 반사경의 높은 제작 비용 및 과중량으로 인한 문제를 해결 할 수 있는 경량의 프레넬 렌즈를 이용한 집광 시스템을 제작하였다. 정육면체 형태의 500 × 500 × 500 mm의 사각 프레임에 이용하여 플라스틱 판형태의 300 × 300 mm의 프레넬 렌즈를 고정하였다. 프레넬 렌즈를 통해 한 점으로 모여진 태양광은 열 문제를 해결하기 위해서 광섬유 다발로 입력되기 전에 평오목(plano-concave) 렌즈를 통과하게 함으로써 한 점으로 모였던 빛을 직경이 굵은 평행광으로 변환시켰다. 이렇게 평행광으로 변환된 빛을 광섬유 다발로 들어가게 함으로써 열 발생 문제를 해결하였다. 이 경우에도 광섬유 다발은 열전도율이 높은 금속물질(알루미늄)로 감싸져 있어 열이 쉽게 방출된다. 그림 4는 일정한 비율에 의해 다른 각도로 설계된 프레넬 렌즈를 통해 빛이 하나의 초점으로 모여지는 프레넬 렌즈의 특성을 나타낸 것(a)과 실제 제작에 사용된 프레넬 렌즈(b)이다. 그림 5는 프레넬 렌즈를 통해 집광된 빛이 평오목 렌즈를 지나면서 평행광으로 변환되는 모습이다. 프레넬 렌즈 역시 접시형 반사경과 마찬가지로 평오목 렌즈를 사용하여 빛을 재반사 시킴으로써 광섬유

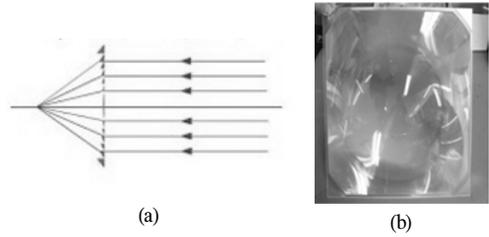


그림 4. (a) 프레넬 렌즈의 집광 특성, (b) 실제 제작된 프레넬 렌즈
Fig. 4. (a) Focusing characteristics of Fresnel lens, (b) Designed and fabricated Fresnel lens

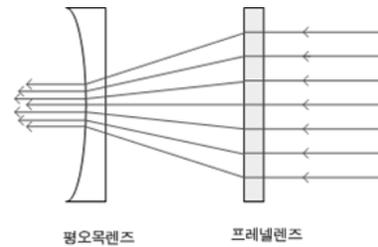


그림 5. 평오목(plano-concave) 렌즈의 특성.
Fig. 5. Characteristics of plano-concave lens.

의 개구수 한계를 극복하였다.

실제 제작된 Fresnel Lens의 사양은 크기 : 310 × 310mm, 초점거리 : 330mm이며 2차 반사경의 사양은 지름 : 25mm, 초점거리 25mm의 Plano-cave 형태의 Lens로 제작되었다.

2.2 태양광 추적 장치

태양광 채광 시스템을 가장 효율적으로 사용하기 위해서는 태양광을 항상 최대로 집광을 하여야 한다. 즉 태양광 집광기는 최대 집광을 위하여 항상 태양을 추적하고 향하여야 한다. 이러한 최대 집광을 위해서는 태양광 추적 장치기 반드시 필요하다. 1축 구동형 태양광 추적시스템은 구동축의 여부에 따라 1축 또는 방위각만을 추적할 수 있도록 설계된 추적 시스템이다. 구조가 간단하여 유지 보수비용이 적게 든다는 장점이 있으나 정확한 추적이 불가능하여 고효율을 요구하는 자연채광방식에서는 적합한 형태가 아니다. 2축 구동형 태양광 추적 시스템은 태양의 고도각과 방위각 모두에 대하여 태양을 추적함으로써 1차 구동형 태양광 추적 시스템에 비해 정확한 태양 추적이 가능한 시스템이다. 본 논문에서 사용된 태양광 추적 장치는 태양 추적을 위해 방위각, 고도각 추적방식을 사용하는 2축 구동형 태양광 추적 장치이다. 또한 태양광 추적 장치는 태양 추적신호의 방식에 따라 프로그램

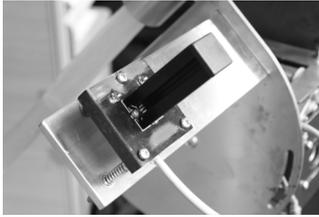


그림 6. 제작된 태양광 추적 장치
Fig. 6. Designed and installed solar tracking system



그림 7. (a) 접시형 포물 반사경 형태의 태양광 집광장치, (b) 프레넬 렌즈 형태의 태양광 집광장치
Fig. 7. (a) Parabolic reflector type solar light collecting system, (b) Fresnel lens type solar light collecting system

방식, 센서 방식, 프로그램-센서복합 방식으로 나누어진다. 우리가 사용한 방식은 센서방식으로 그림 6과 같이 태양의 위치를 찾기 위해 그림자 막대를 세우고 주변에 다수의 광감지 센서를 설치하여 태양을 정밀하게 추적하였다. 각각의 광감지 센서는 태양으로부터 온 태양광의 조도를 감지한다. 이때 태양과 정면이 아닐 시에는 그림자 막대로 인해 생긴 그림자를 통해 달라진 각 센서의 조도를 파악한다. 이후 그 양을 서로 비교하여 센서에 동일한 값의 조도가 들어가도록 태양의 위치를 계산 및 설정하고 동작 모드제어기에 동작을 위한 정보를 전달한다. 이를 구동모터에 전달함으로써 모터를 움직인다. 광센서를 이용한 태양광 추적 시스템은 회로가 간단하면서도 비교적 높은 정확도가 유지된다는 장점이 있다. 그러나 날씨가 흐리거나 태양이 잠시 구름에 가려질 때, 태양이 광센서의 감지 범위 밖에 있을 경우의 작동에 있어서는 아직까지는 부족한 점이 있다. 그림 7은 태양광 추적 장치가 포함되어 제작된 접시형 포물 반사경 및 프레넬 렌즈 형태의 태양광 집광장치이다.

2.3 전송부

열 문제를 해결하여 효율 높게 빛을 집광하는 것도 중요하지만 그 빛을 원하는 장소까지 손실 없이 전달하는 것 역시 중요하다. 기존의 태양광 채광 시스템 중 반사거울을 사용하여 빛을 실내로 유입시키는 광파이프 시스템은 집광된 빛에 대해 손실이 큰 단점이

있다. 본 연구에서 사용한 다발형 광섬유 전송 장치는 빛의 손실이 거의 없는 반면 장거리 전송 시 광섬유의 가격이 많이 든다는 단점이 있다. 이러한 장점은 살리고 단점을 극복하기 위해 집광부에서는 가격은 비싸지만 손실 특성이 우수하며 고열에도 강한 유리 광섬유를 소량 사용하고 전송부에서는 가격이 싼 플라스틱 광섬유를 사용함으로써 가격문제를 해결하였다. 최근에는 실내에서도 태양광과 동일한 수준의 빛을 받아들일 수 있는 친환경 유리 광섬유가 국내에서도 개발되었다. 이 채광용 유리광섬유는 빛의 투과율이 뛰어나 자연 그대로의 상태로 태양광을 공급할 수 있어 건축물 내부공간에서도 자연 광을 이용하여 식물을 키울 수 있다. 반면 플라스틱 광섬유는 광학적 특성과 가공성이 우수하다. 또한 광섬유 단면적 대비 코어의 비율이 크기 때문에 빛 전달 효율이 매우 높다.

광섬유 다발(bundle)에 들어가는 광섬유의 개수는 빛의 전달 효율특성을 측정 및 분석하여 총 54가닥으로 제작하였다. 또한 집광용 유리 광섬유를 통해 전달된 빛은 특수 제작된 결합 어셈블리에 의해 플라스틱 광섬유로 전달되어 빛을 전송 하도록 함으로써 집광효율은 최대로 하면서 가격적인 요소를 낮추었다. 그림 8은 전송부에 대한 개략도(a)와 플라스틱 광섬유

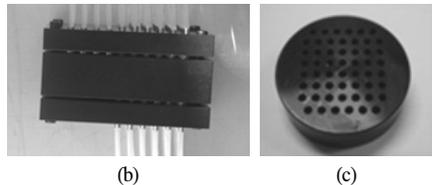
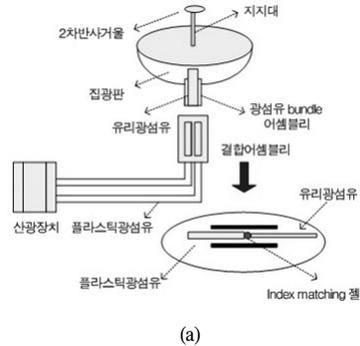


그림 8. (a) 태양광 채광 시스템의 전송부 개략도, (b) 플라스틱 광섬유 다발 간을 연결하는 연결자, (c) 결합어셈블리 내에 설치되는 유리 광섬유 다발과 플라스틱 광섬유 다발 간을 결합하는 결합자
Fig. 8. (a) Schematic diagram of transmitting part of the solar lighting system, (b) Connector between plastic optical fiber bundles, (c) Coupler between glass bundle inside coupling assembly

다발 간을 연결하는 연결자(b) 및 광섬유 다발을 감싸는 금속 재질, 즉 결합 어셈블리 내부에서 유리광섬유 다발과 플라스틱 광섬유 다발을 연결할 때 사용하는 결합자에 관한 것(c)이다.

2.4 산란부

집광부와 전송부를 걸쳐서 전송된 빛은 산란부를 통해서 빛을 산란 즉, 발광시킨다. 광섬유 다발을 통해 전달된 빛은 최종 산란 장치에서 필요에 따라 광섬유 가닥 개수를 정하고 이를 렌즈 형태의 산란 장치에 연결하여 빛을 발광 시켰다. 실제로 어두운 장소에서 확인 하였을 때 눈에 띄게 밝게 빛을 산란함을 알 수 있었다. 집광된 빛을 좀 더 효율적으로 산란시키기 위해 우리는 다양한 종류의 산란용 렌즈를 적용하여 빛을 산란시킴으로써 최대의 효과가 발생 하도록 하였다. 또한 조명장치에 렌즈를 고정시키기 위한 모듈을 제작하였다. 그림 9는 실제 제작 장치를 통해 집광된 빛이 산란되는 모습(a)과 설계 및 제작된 다양한 종류의 렌즈(b), 그리고 산란 장치인 렌즈를 고정하는 조명 모듈(c)을 나타낸다.

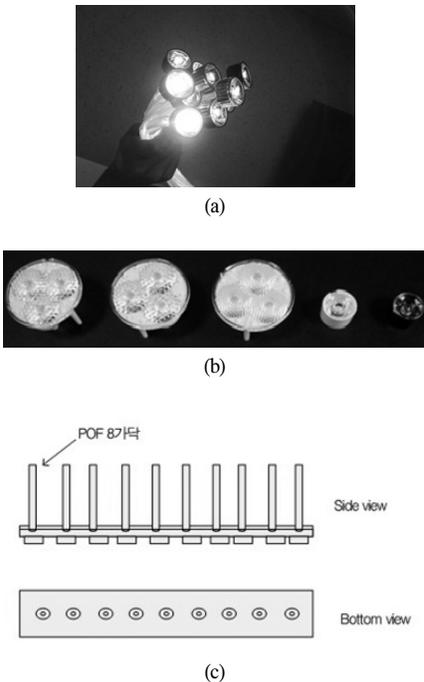


그림 9. (a) 전달된 빛이 산란 장치를 통해 산란되는 모습, (b) 설계 및 제작된 다양한 종류의 렌즈, (c) 렌즈를 고정하는 조명 모듈
 Fig. 9. (a) Scattered light through scattering lens, (b) Various types of scattering lens, (c) Lighting module fixing lenses

III. 태양광 채광 시스템의 응용

최근 태양광 채광 시스템은 건축, 농업 및 다양한 산업분야에 걸쳐 응용되고 있다. 본 연구에서는 이 가운데 최근 세계적으로 이슈가 되고 있는 식물공장 시스템의 핵심기술 가운데 하나인 인공광원 분야에 태양광 채광 시스템을 적용하였다. 식물공장 시스템은 농작물에 대하여 통제된 일정한 시설 내에서 빛, 온도, 이산화탄소 농도 및 배양액 등의 환경 조건을 인공적으로 제어하여 계절이나 장소에 관계없이 식물을 계속해서 재배하여 생산하는 시스템을 말한다. 한마디로 온도와 습도를 제어하고 인공 광원으로 농작물을 재배하는 시설농업으로서, 날씨나 계절에 관계없이 농작물을 연중 안정적으로 생산할 수 있다. 그림 10은 실제적으로 식물이 재배되고 있는 식물공장의 모습이다.

기존의 식물공장에서는 인공광원으로 형광등, 백열등, 및 할로겐등 등을 사용해 왔으나 최근 들어서는 친환경적인 LED를 식물생장을 위한 조명으로 사용하고 있는 완전 제어형 시스템이 빠른 속도로 늘어나고 있다. 하지만 밤에도 식물을 재배하기 위해서는 조명을 계속적으로 유지 시켜야 하므로 상당량의 전력을 필요로 한다. 또한 100% 인공광원에서 자란 채소에 대한 소비자들의 우려도 고려할 필요가 있다. 우리는 이러한 문제들을 완화하기 위해 기존의 LED 조명만으로 운영되는 식물공장에 자연광인 태양광 채광 시스템을 접목함으로써 전력비용을 감소시키고 100% 인공광원에 대한 거부감을 완화하는 방안을 제시하였다. 태양이 있을 때에는 태양광 집광 장치 및 산란 장치를 이용하여 태양광을 식물에 전달함으로써 전기에너지를 절약하며 친환경적으로 식물을 재배 하였다. 태양이 없는 야간, 혹은 및 혹서 환경 하에서는 인공



그림 10. 운영되고 있는 식물공장의 실제모습
 Fig. 10. Inside of plant factory

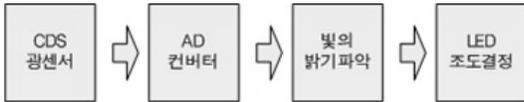


그림 11. 조도제어 시스템의 기본 제어 과정
 Fig. 11. Basis control process of ambient-light control system

조명을 가해 식물 성장을 지속시키는 효과를 얻었다.

이를 위해 CDS조도센서가 부착된 LED 인공조명 장치와 본 연구에서 개발한 태양광 채광 시스템을 결합함으로써 태양광의 광량 변화에도 불구하고 항상 일정량의 빛이 식물에 전달되게 하였다. 그 결과 자연 광인 태양광에 의한 재배라는 친환경성 부각과 전력 소비량 감소의 두 가지 효과를 동시에 달성하였다. 그림 11은 CDS센서에 태양광이 들어왔을 때 빛의 세기에 따라 MCU(마이크로 컨트롤러 유닛)에 의해 전압이 컨트롤되어 LED의 조도를 제어하는 시스템의 기본 프로세스 블록도이다. 전류가 일정하게 흐르는 회로에서, 빛이 닿으면 조도에 따라 전기 저항이 달라지는 성질을 갖고 있는 일종의 가변 저항 소자인 CDS 광센서에 집광된 태양광이 들어오면 소자에 대한 저항값이 달라져 전압값이 변화한다. 달라진 전압값은 A/D 컨버터가 내장된 MCU를 통해 빛의 밝기를 판단하여 그에 맞는 전압을 MCU에서 내보낸다. 이렇게 나온 전압에 의해 LED의 조도가 결정된다. 일반적으로 CDS 광센서에서는 빛의 세기와 저항값이 반비례한다. 만약 회로에서 CDS소자와 저항값을 반대로 연결하면 전압은 기존 시스템과 반대로 작동 할 것이다. 즉 태양광이 들어올 때 LED빛의 세기는 줄어들어 두 가지 빛이 합해졌을 때 항상 일정한 빛이 식물에 전달 된다.

그림 12는 우리가 제시하는 태양광-LED 하이브리드 조명을 기반으로 하는 식물공장에 대한 가상도이다. 식물재배 장치의 각 식물 재배판 밑바닥에 LED

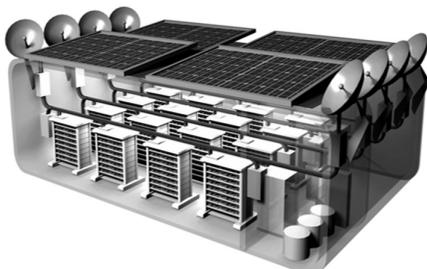


그림 12. 태양광-LED 하이브리드 조명 기반의 미래 식물공장 가상도
 Fig. 12. Future virtual plant factory based on solar-LED hybrid lighting system

조명장치와 태양광 산란 장치를 함께 부착하여 아래 쪽 식물 재배판의 광원 역할을 하게 하였다. 또한 다수의 태양광 집광장치를 설치하여 모든 재배판에 충분한 양의 태양광이 공급되도록 하였다. 식물공장의 옥상에 태양전지를 설치하여 낮 시간 동안 전기에너지를 생산하고 이를 축전지에 저장한 후, 저녁때 태양이 진후 LED 조명을 위한 전기에너지원으로 활용하는 방식이다. 초기 투자비용은 높을 것이나 태양광을 있는 그대로 활용하고 또한 전기에너지로 변환하여 사용함으로써 공장 운용비용을 최소화하여 ROI (Return of Investment)를 높일 수 있다.

위와 같은 태양광-LED 하이브리드 조명 기반의 식물공장의 구현 가능성을 타진하기 위하여 본 연구에서는 실제 식물공장 내에서 적용하고 있는 식물 재배판을 제작하였다(그림 13). 식물 재배판의 상단에는 형광등과 특수 제작한 다양한 종류의 렌즈가 배치된 태양광 조명모듈을 장착하였다. 또한 식물 재배판을 검은색의 부직포로 감싸 빛이 들어오는 것을 차단하였다. 그리하여 태양광 집광장치를 통해 들어온 빛이 주변의 빛에 영향을 받지 않은 환경을 구현하였으며 실제 식물공장에서 재배되고 있는 상추를 재배 하였다. 그림 14는 우리가 제작한 식물 재배판과 실제적으로 식물이 자라고 있는 그림이다.

실험을 통해서 태양광과 인공광원을 접목 하였을 때 식물이 성장하는데 있어서 큰 문제가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 농업적인 측면에서 식물의 성장 속도나 발육 정도를 정확하게 실험 할 수는 없었다. 하지만 기존에 100% 인공조명 하에서 성장한 상추와 비교했을 때 이파리 색은 홍조를 띠고 진행으며 섬유질 감이 높았다. 실험은 1단의 식물 재배판에서 이루어 졌지만 식물공장에 적용된다면 상당한 경제적 효과를 가져 올 것으로 예상된다.

실제적으로 식물재배 조명을 LED로 사용할 경우 다수의 LED칩으로 이루어진 LED bar에서 LED칩의



그림 13. 실제 제작된 식물 재배판의 장치
 Fig. 13. Implemented plant cultivation-plate



그림 14. 식물이 자라고 있는 모습
Fig. 14. Appearance of plants growing

1개당 소비전력은 시간당 약 1W가 된다. 또한 LED에 전력을 공급하는 전원장치와 LED 구동회로에서 소비되는 전력소모율은 각각 15%(효율 85%기준)로 총 30%의 전력 손실이 발생하게 된다^[11]. 실험에서 사용된 1단의 식물 재배판의 경우 전력 소모량은 180W(3개의 LED bar 내 LED칩 180개) × 1.3(손실 30%포함)에서 약 234W가 된다. 24시간동안 LED를 연속으로 켜 놓는다고 하면, 이때의 전력 소모량은 1개월을 기준으로 234W × 24시간 × 30일에서 168.480KWh에 달한다. 태양이 존재하는 오전부터 오후까지 10시간 동안 본 연구에서 제작한 태양광 집광장치를 사용함으로써 LED 조명을 대체한다면 월 평균 70.2KWh 만큼의 에너지를 절감할 수 있다. 이를 5단의 식물 재배판으로 구성되는 식물재배 장치(가로×세로×높이 : 1400mm × 400mm × 2000mm) 80기가 장착될 수 있는 100평 규모의 식물공장에 적용할 경우 월 28,080KWh의 에너지 절감효과가 있다. 즉, 농사용 전기요금 기준으로 월 1,025,322원을 절약할 수 있다. 이 정도의 절감이라면 초기 투자비용이 비록 적지 않으나 본 연구에서 개발한 태양광 채광시스템의 식물공장으로의 적용은 경제적으로도 충분히 타당할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 포물 반사경 및 프레넬 렌즈를 사용하는 집광 장치, 집광된 빛을 광섬유 다발을 통해 전송하는 전송 장치, 및 전송된 빛을 다양한 형태의 산란 장치를 통해 빛을 발광하는 발광장치를 제작하였다. 또한 그 성능을 평가하고 이를 식물재배 장치에 적용한 결과를 기술하였다. 포물 반사경을 사용하는 경우, 집광 효율 및 빛의 강도 면에서 프레넬 렌즈 방식보다 비교우위의 장점이 있는 반면 포물 반사경의 제작 상 어려움과 그로인한 비용 증대의 단점이 있으

며 유지보수가 비교적 용이하지 않다는 특징을 갖고 있다. 이에 반해 프레넬 렌즈를 사용하여 집광을 하는 경우, 집광 효율 및 빛의 강도는 반사경 방식과 비슷하면서도 간단한 제작과정 및 매우 낮은 제작비용과 유지보수를 거의 필요로 하지 않는다. 또한 프레넬 렌즈 방식의 경우에는 집광 장치가 원천적으로 경량 제작되므로 모듈 단위로 만들 경우, 대용량의 집광 장치도 모듈 단위의 결합을 통해 쉽게 제작할 수 있는 특징이 있다. 이러한 장점으로 인해 향후 태양광 채광시스템은 프레넬 렌즈 방식으로 나아가야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 제작한 채광 시스템을 식물재배 장치에 적용할 목적으로 인공조명과 함께 혼합조명(hybrid lighting system) 광원으로 사용하였다. 혼합조명 광원을 이용하여 채소를 재배한 결과, 100% 인공광원만을 사용하여 재배된 채소와 비교해 아무런 손색도 없었다. 또한 태양광을 접목했다는 점에서 인공적인 먹거리를 우려하는 소비자에게 친근하게 다가갈 수 있는 특성이 있음을 파악하였다. 100평 규모의 식물공장에 본 연구에서 개발한 태양광 채광시스템을 적용할 경우, 월 28,080KWh의 전력 절감효과를 얻을 수 있어 향후 식물공장과 같이 새로운 먹거리 산업을 창출하는데 있어서 본 태양광 채광시스템이 기여하는 바가 클 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] 정유근, “태양광 채광시스템의 건축물 적용사례”, *조명·전기설비*, 21(3), pp.2-112, 6월, 2007.
- [2] 정주희, 이종수, 김정태, “거울형 태양광 채광시스템의 공간유형별 적용현황 분석”, *Journal of the KIEAE*, 8(6), 12월, 2008.
- [3] Ralf Leutz, Akio Suzuki, “Nonimaging Fresnel lenses: design and performance of solar concentrator”, *Springer*, 2001.
- [4] 채수조, “하이브리드 태양광 집광장치”, *광한국산·재생에너지학회 2009년도 춘계학술대회논문집*, pp.53-56, 6월, 2009.
- [5] 박현국, “광섬유형 태양광 채광조명 기술”, *세라미스트*, 13(3), pp.3-92, 6월, 2010.
- [6] Theodore G. Stern, Mickey Cornwall, Bela Kaincz, James W. Mildice, “Point focus solar concentrator using reflector strips of various geometries to form primary and secondary reflectors”, *US Patent*, 4,784,700, 1988.

- [7] 임상훈, “특수집광기를 활용한 자연채광장치 개발”, *과학기술부*, 2001.
- [8] 신승봉, 정창현, 이경구, 오치환, 유기선, 강희진, 박중선, 최창호, “유리광섬유를 이용한 자연채광 시스템과 그 특성”, *CICS 2009 정보 및 제어 학술대회 논문집*, pp.3-469, 10월, 2009.
- [9] 박영칠, “집광형 태양열 집열기의 태양추적시스템”, *대한설비공학회 1999년도 자동제어부문 강연회*, pp.3-283, 11월, 1999.
- [10] 이상우, “집식물공장과 LED 인공광을 이용한 식물재배”, *광학과 기술*, 14(3), pp.3-41, 7월, 2010.
- [11] <http://www.sunnyfield.co.kr/>, (주)카스트친환경 농업기술

신 서 용 (Seoyong Shin)

종신회원



1987년 2월 서울대학교 제어계측공학과 공학사

1992년 12월 Texas A&M Univ. 공학박사

1994년 8월 한국전자통신연구원 선임연구원

1994년 9월~현재 명지대학교

정보통신공학과 교수

<관심분야> Core Sunlighting System, EDFA 이득 제어, 광통신 기능성 모듈

이 호 열 (Hoe-youl Lee)

준회원



2010년 2월 명지대학교 통신공학과 공학사

2010년 3월~현재 명지대학교 정보통신공학과 석사과정

<관심분야> 광통신공학, 광소자, 태양광채광시스템

김 명 진 (Myoung-Jin Kim)

정회원



1988년 2월 인하대학교 응용물리학과 공학사

1990년 2월 인하대학교 응용물리학과 공학석사

2003년 8월 인하대학교 전자재료공학과 공학박사

2007년 4월 전자부품연구원 광

부품연구센터

2010년 4월 (주)이스트포티닉스 연구소장

2011년~현재 (주)옵티베이스 대표이사

<관심분야> 산업용 레이저 분야, 태양광 조명 분야