https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.396

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. ISSN 2508-5107(Online)

광전송 매질에 대한 태양광 전송 이론식 구축과 실험에 의한 고찰

한수원^a, 홍준희^{b*}, 김 현^{c*}

A Study on the Theoretical Formula Construction and Experiment of Solar Light Transmission for Optical Transmission Media

Su Won Han^a, Jun Hee Hong^{b*}, Hyun Kim^{c*}

^a Department of Mechanical Systems, Korea Polytechnics Daejeon Campus ^b Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University ^c Institute of Quantum Systems, Chungnam National University

ARTICLE INFO

Article histo Received Revised Accepted	ory: 29 16 1	September November December	2022 2022 2022
Keywords: Solar light transmission Transmission theory Transmission rate Light transmission experiment Transmission panel			

ABSTRACT

This paper, the principle that optical transmission occurs by a pattern in a transparent medium was theoretically established, and the change in energy according to the pattern density was considered based on the theoretical equation. In addition, approximately 3,900 pieces were processed such that the projection base area of the right-angled triangle horn $\sigma_t \simeq 10.8 \text{ cm}^2$ and pattern density $\rho \simeq 10.8/\text{cm}^2$, and the following optical transmission experiment results were obtained. When 40 mW of incident light was irradiated on the optical transmission panel, theoretically calculated results at the first 2 cm were similar at 5 mW, indicating the possibility of theoretically predicting the light transmission results of the fabricated panel. The theoretical calculation at a length of 18 cm showed a difference of approximately 2.3 times between 40.5 mW and experimentally measured 17.2 mW.

1. 서 론

친환경 에너지인 태양광은 지구에 생존하는 모든 생명체의 에너 지원이다. 인류는 산업혁명기 즈음 실용화된 전기에너지를 이용하 여 밤과 낮 그리고 지상과 지하의 제한 등을 어느 정도 극복하였으 나, 태양으로부터 얻게 되는 따스함과 안락함이 주는 삶의 질 및 생산성 향상 등은 대체 불가하다. 태양을 대신하는 좋은 광원을 찾기 위한 연구는 계속되어왔지만, 여전히 태양을 완전히 대신할 수는 없으며 이후에도 그럴 것이다. 이러한 태양광의 스펙트럼은 적외선과 가시광선 그리고 자외선에 이르기까지 전 영역을 포함하 고 있기 때문에 사람에게 최적화된 빛이며 이를 건물 내부로 전송 하여 실내 조명으로 사용하는 자연채광을 위해서는 장치의 고안이 필요하다.

이러한 자연채광 시스템은 반사형과 태양추적방식, 광덕트형, 광 섬유형 등으로 분류할 수 있다^[1]. 그런데 이런 기존의 시스템들은 구현하기가 매우 복잡하고 비용이 많이 든다. 예를 들어, 반사거울 형 태양광 채광시스템은 채광 돔과 베이스, 1·2차 반사거울, 추적 제어장치와 구동부, 그리고 시스템 설치대 등으로 구성된다^[2]. 또

^{*} These authors contributed equally to this work.

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5642 *E-mail address:* hongjh@cnu.ac.kr (Jun Hee Hong).

^{*} Corresponding author. Tel.: +82-42-821-7474 *E-mail address:* uhvacuum@cnu.ac.kr (Hyun Kim).

광 덕트 방식은 건물 외부에 태양광을 채집하는 집광기를 설치하 고 광 덕트를 활용하여 실내로 태양광을 이송하는 방식으로서 집 광부, 광이송부, 산광부로 구성된다^[3]. 마지막으로 광섬유를 이용 한 자연채광 시스템은 그림자 격벽센서에 의하여 태양을 정밀하게 추적하면서 프레넬렌즈로 채광된 태양광을 자연채광용 유리 광섬 유를 통하여 빛을 전달하며^[4], 산광부도 매우 복잡한 구성을 지닌 다. 이에 반하여 여기서 제안하고자 하는 것은 보다 단순하고 효율 적인 형태의 태양광 전송 장치로서 아크릴 재질의 패널 구조이다. 아크릴은 투명하고 표면 질감이 우수하며 가공성이 좋을 뿐만 아 니라 유지 보수성이 뛰어나 건축 내외장재로 다양하게 사용되고 있으므로^[5] 더 효율적인 태양광 전송패널의 재질로 사용하였다^[6]. 본 논문에서는 태양광 전송패널의 광전송에 관한 원리를 이론적 으로 정립하고 이론식을 바탕으로 패턴 밀도에 따른 에너지의 변 화에 대하여 고찰하였다. 그리고 아크릴 재질의 광전송 패널을 제 작한 다음, 이론적으로 계산된 전송 에너지와 실험 장치를 통해 측정한 전송 결과에 관하여 비교 및 고찰하였다.

2. 광전송 이론 정립 및 고찰

2.1 광전송 형상

Fig. 1은 서로 다른 두 매질을 통과하는 빛의 굴절에 대한 스넬 의 법칙(Snell's law)을 나타내며 식(1)의 관계를 갖는다.

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_t} = \frac{n_t}{n_i} \tag{1}$$

여기서 $\sin\theta_t = 1$ 즉, $\theta_t = 90^\circ$ 일 때 빛이 경계면을 투과하 지 못하고 전반사하게 된다. 이 전반사하는 각도를 임계각이라 하 며 θ_c 로 나타내기로 하고 식(1)을 정리하면 임계각 θ_c 는 식(2)와



Fig. 1 A drawing of refraction and reflection at two types of dielectric interface





(a) Reflection on the side(b) A frontal reflectionFig. 2 Reflective appearance of light by pattern type

같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_i \ge \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_t}{n_i} \tag{2}$$

식(2)에서 n_i는 아크릴 재질의 굴절률이라 하고 n_t를 공기의 굴 절률이라 하면 임계각 θ_c =41.8°가 된다. 그런데 빛을 한 방향으 로 전반사시키기 위한 광전송용 형상으로 직각 삼각뿔이 적합하다 고^[1] 하였으므로 여기서도 직각 삼각뿔을 광전송용 형상으로 채택 한다. 따라서 임계각이 41.8°가 되도록 아크릴 패널 표면에 하나의 직각 삼각뿔을 가공한다고 가정하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있 다. 즉, 임계각(θ_c)는 Fig. 2(a)와 같으며 아크릴 패널 위에서 직각 으로 바라본 모습은 Fig. 2(b)와 같이 나타낼 수 있다.

2.2 광전송 에너지식 정립

태양광 전송패널에는 직각 삼각뿔을 패턴으로 가공한다고 가정하 고 패널에 조사되는 빛은 패널 평면에 수직 방향이라고 가정한다. 패널의 폭을 *W* 라 하고 패턴이 가공된 패널의 측면에서 본 조사 모습과 평면에서 본 수광부(absorption area) 및 전송부(transport area)를 Fig. 3과 같이 나타내기로 한다. 입사된 빛이 입사면 및 직각 삼각뿔 형상들의 음각된 면이 지닌 매질과 공기의 굴절률 차 이에 의하여 전반사되는 것을 패널의 측면에 나타내었다. Fig. 4는 Fig. 3의 측면에서 본 하나의 직각 삼각뿔을 조사 빛에 수직한 입 체 모양으로 나타낸 부분 "B"이다. Fig. 4에서 θ_c는 임계각이며 A는 직각 삼각뿔 형상으로 가공된 전반사 면이다. σ_t 는 조사 빛이 임계각 θ_c에 대한 직각 삼각뿔에 투영된 밑면적이며

$$\sigma_t = A\cos\theta_c \tag{3}$$

식(3) 이다. 그런데, 각각 가공된 형상의 면적이 일정하지는 않으 므로 이때 발생되는 오차 $\Delta \sigma_t$ 을 고려하면 $\sigma_t = \sigma_t \pm \Delta \sigma_t$







Fig. 4 The area σ_t by the critical angle and the right triangle shape of enlarged "B"



Fig. 5 A plane view of pattern density ρ

라고 할 수 있다.

그리고 Fig. 3의 평면에서 본 수광부(absorption area)에 있는 직각 삼각뿔 형상들의 가공된 배열을 패턴이라고 한다. 패턴에는 가로와 세로의 간격이 일정한 바둑판 모양과 간격이 랜덤한 것 등 이 있지만 여기서는 Fig. 5와 같이 랜덤한 것으로 한다. 이렇게 간격이 랜덤하면서 단위 면적당 균등하게 분포된 직각 삼각뿔 형 상들의 개수를 패턴 밀도 ρ 라고 정한다.

전반사된 빛은 패널 내부의 위와 아랫면에서 전반사를 거듭하며 한 방향으로 전송된다. 빛의 세기 *I*₀가 패널에 대하여 수직인 경우,

$$x_0 = t \tan 2\theta \tag{4}$$

식(4) 이다.

직각 삼각뿔 밑면의 반사율 γ 는 패널 바닥에 해당하는 밑면 전체의 면적 중에서 직각 삼각뿔의 투영된 밑면적이 차지하는 비 율에 따라 결정되므로 반사율 γ는

$$\gamma = 1 - \rho \sigma_t \tag{5}$$

식(5) 이다.

조사되는 빛의 세기 *I*₀, 빛이 통과하는 미소 길이 *dx*, 전송되는 미소 에너지 *dP*, 전송되는 빛이 거리 *x*를 통과하는 동안 바닥 면에 서 몇 번 반사되는지에 따라 전송량이 결정되므로 전송되는 미소 에너지 *dP*는 반사율 γ에 대한 승수로 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dP = I_0 W \rho \sigma_t (1 - \rho \sigma_t)^{\frac{x}{2x_0}} dx = I_0 W \rho \sigma_t \gamma^{\frac{x}{2x_0}}$$
(6)

여기서 양변을 적분하여 계산하면 전송되는 에너지 P는

$$P = \int dP = \int_{0}^{x} I_{0} W \rho \sigma_{t} e^{\frac{x \ln \gamma}{2x_{0}}} dx$$
$$= I_{0} W \rho \sigma_{t} \frac{-2x_{0}}{\ln \gamma} (1 - e^{\frac{x \ln \gamma}{2x_{0}}})$$
(7)

식(7) 이다.

한편, 아크릴에 가공된 전반사 면에 의한 반사율을 β 라 하면 β 는 100%가 아닌 예를 들어, $\beta = 90 \pm \Delta\beta$ 이라 할 수 있다. 따라 서 이 경우 전송되는 에너지 P는

$$P_{(\sigma_t, \rho, I_0, W, \dots, \beta)} = I_0 W \rho \sigma_t \frac{-2x_0}{\ln \gamma} (1 - e^{\frac{x \ln \gamma}{2x_0}}) \times \beta$$
(8)

식(8) 로 표현될 수 있다. 그리고 여러 변수에 대한 오차들로 이 루어진 오차의 전파(propagation of error)를 함수로 나타내면,

$$\Delta P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \sigma_t} \Delta \sigma_t\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \Delta \rho\right)^2 + \cdots}$$
(9)

식(9) 이다.

2.3 패턴 밀도에 따른 전송 에너지 변화 고찰

선행 기초 연구에서^[6] 패널에 음각으로 가공되는 직각 삼각뿔 형상의 밑면적 σ₁와 관련된 삼각형 밑변 크기와 전송 조도에 관하



Fig. 6 Transmitted light power as a function of absorption length and pattern density

여 고찰했으므로 여기서는 식(7)로부터 단위 면적당 직각 삼각뿔 형상의 개수인 패턴 밀도 ρ에 따른 전송 에너지 *P*의 변화에 관하 여 고찰한다. 즉, 광전송 에너지 식(7) 결과 값들에 영향을 미치는 대표적인 변수로는 패턴 밀도(ρ)와 선행 기초 연구로부터^[6] 직각 삼각뿔 형상의 밑면적(σ_t)을 들 수 있다.

조사되는 광의 세기 I_0 는 W/m²의 단위를 가지며, 입사하는빛의 단위 시간당 단위 면적당 복사 에너지로 정의되고 표준시험조건 (standard test condition, Air Mass 1.5, 온도 25℃기준)의 태양광 스펙트럼 조사 강도(irradiance)로서 $I_0 = 1,000 \text{ W/m^2}$ 이다. 직각 삼각뿔 형상의 밑변과 높이를 각각 2 mm로 하면 직각 삼각뿔의 투영된 밑면적 σ_t 는 $\sigma_t \simeq 0.0000015 \text{ m}^2$ 이고, 패널의 두께 t = 0.003m, 가로 폭 W = 0.2 m 일때, 수광부 세로 길이 x가 0에서 2.25 m까지, 패턴 밀도 ρ 을 50,000/m² 부터 250,000/m²까지 50,000/m² 단위로 계산하여 Fig. 6 그래프에 결과를 비교하여 나타냈다.

x~0.3 m까지는 패턴 밀도 ρ = 250,000/m² 일 때 전송 에너지 가 가장 높고, x~1 m 이후부터는 패턴 밀도 ρ = 100,000/m² 일 때 전송 에너지가 가장 높은 것으로 나타난다. 즉, 패턴 밀도 ρ가 클수록 전송 에너지가 더 빨리 포화되는 것이다. 다시 말해서, 패턴 밀도가 높을수록 태양광을 급격하게 전반사 시키지만, 패널 내부 에서 전송되는 빛을 가로막게 되어 세로 길이가 증가하면 측정부 에서의 전송 에너지는 오히려 더 작아진다. 이렇게 단위 면적당 직각 삼각뿔 형상의 개수인 패턴 밀도 ρ 에 따라 전송 에너지가 변화되는 것으로부터 패턴 밀도를 필요에 맞게 고려함으로써 경제 적이고 효율적인 태양광 전송패널이 제작될 수 있다^[7].

3. 실험 장치 및 결과 고찰

3.1 광전송 아크릴 패널 제작

아크릴은 투명하고 가공성이 좋으며 광학적 특성이 유리와 같이 우수하므로 기초 연구에서처럼^[6] 반사율 6.88%, 흡수율 0.12%, 투과율 93% 인 아크릴 재질로 태양광 전송패널을 제작하였다. 두께 t가 0.3 cm, 가로 폭 W는 20 cm, 전체 세로 길이 L은 45 cm 이다. 여기서 빛을 받는 패널의 수광부 세로 길이 x는 18 cm이므 로 Fig. 6에 의해 x = 0.18 m에서 $\rho = 250,000/m^2$ 로서 패턴 밀도가 $25/cm^2$ 이고 $\sigma_t \simeq 0.015 cm^2$ 일 때 에너지 전송이 가장 좋다. 그러나, 실제로 cm^2 에 25개를 가공하기는 매우 어려우므로 여기서는 직각 삼각뿔의 투영된 밑면적 $\sigma_t \simeq 0.01 cm^2$ 로 하였으며, $\rho = 100,000/m^2$ 을 기준으로 하여 $\rho \simeq 10.8/cm^2$ 으로 했다. 앞서 제작된 패턴 가공 제어 장치^[8]로 Fig. 7 사진과 같이 수광부 360 cm^2 (20×18 cm) 내에 약 3,900개를 랜덤하게 가공하였다.

3.2 실험 장치

Fig. 8은 광전송된 에너지를 측정하기 위한 실험 장치이다. 입사광 *I*₀는 *I*₀≃40 mW/*cm*²이며, 565~590 nm 파장의 노란색 단일광으로 하였고, 이것의 조도는 9,260 lx 이다. 광검출기는 Hamamatsu 사 (社)의 Si Photodiode S1336-5BQ와 Testo 사(社)의 TESTO- 540 을 사용했다. S1336-5BQ의 Spectral response는 580 nm에서 Photosensitivity가 약 0.3A/W이고, TESTO-540의 측정 범위는 0~99,999 lx 이며 분해능은 1 lx 이다.

3.3 실험 방법 및 결과 고찰

먼저, 아크릴 패널의 패턴 가공면을 밑면으로 하고 패널 윗면에 수직 입사광을 조사한다. Fig. 9와 같이 수광부의 가로 폭 W는 20 cm로 일정하게 하고 빛을 완전히 차단하는 빛 가림막을 사용하 여 세로 길이 x가 2 cm부터 18 cm까지 2 cm 단위로 빛을 받는 면적을 두 배씩 증가시키면, 빛이 패널 내에서 반사되고 굴절되어



Fig. 7 An enlarged photo of the light transmission panel produced



Fig. 8 Experimental equipment

전송되므로 그 전송량을 광검출기로 측정한다.

제작된 패널의 광전송 에너지를 엑셀(Microsoft excel)을 사용 하여 이론적으로 계산한 결과와 실험적으로 측정한 결과를 Table 1에 비교하여 나타내었고, Fig. 10은 두 결과를 표준 오차(standard error)를 이용하여 나타낸 추론적 오차막대 그래프이다.

처음 세로 길이 x = 2 cm에서는 5.26 mW와 5.55 mW로서 두 결과가 거의 비슷한데 이것은 제작된 패널의 광전송을 이 론식으로 예측할 수 있음을 보여준다. 그 후 차이가 점차 증가 하여 x = 18 cm일 때 40.5 mW와 17.2 mW로서 약 2.3배의 차이를 보였다. 이렇게 결과에 차이가 나는 것은 제작된 패널 에 비선형적인 전송 손실이 있음을 의미한다. 손실이 발생한 이유는 패널 양옆 측면으로의 빛의 산란에 의한 손실과 패널 표면에 존재하는 스크래치에 의한 손실, 백색광 잡음 등 측정 실험 환경으로부터 발생되는 것 등이 원인으로 생각된다. 그 리고 패널에 음각으로 직각 삼각뿔 가공시 밑변 크기가 2 mm 일 때 가장 크게 광전송^[6]되는데 여기서는 Fig. 11 과 같이 직 각 삼각뿔의 밑변 크기(A)가 일정하게 가공되지 못하고 1.4

Table 1 Transmitted power results of calculation and experiment Absorption length 2 4 6 8 10 12 14 16 18 [cm] Calculation 10.3 | 15.1 | results 19.8 24.3 28.6 32.7 36.7 40.5 5.26 [mW]Experiment results 5.55 9.37 11.9 13.7 15.0 15.9 16.5 16.9 17.2 [mW]



Fig. 9 Experiment of light transmission panel by a light screen

Fig. 10 Error bar graph of the results

Fig. 11 Photo of the fabricated pattern (length A is 1.4 mm)

Fig. 12 Transmitted light intensity was measured with a TESTO-540 illuminance meter

mm이하로 불균일하게 가공되어 전반사가 충분히 일어나지 못하게 된 것도 전송 손실의 원인으로 사료된다.

다음으로 광전송 조도가 얼마나 되며, 그것이 KS 조도 기준의 어디에 해당하는지를 확인하기 위해 TESTO-540 조도계로 광전 송을 측정하여 Fig. 12에 그래프로 나타냈다. 세로 길이 *x*가 *x* = 18 cm일 때 광전송은 298 lx로서 조도 기준(KS A 3011)에서 공간의 전반 조명 방법 이상의 일반적인 작업면 조명 F에 해당하 며, 입력 조도 9,260 lx 대비 약 3%에 해당한다.

4. 결 론

본 연구에서는 먼저 투명한 매질의 음각 패턴에 의해 광전송이 일어나는 원리를 이론적으로 정립하고 이론식을 바탕으로 패턴 밀 도에 따른 에너지의 변화에 관하여 고찰하였다. 그리고 두께가 0.3 cm이며 가로 및 세로가 20×18 cm 인 아크릴에 직각 삼각뿔의 투 영 밑면적 $\sigma_t \simeq 0.01 \ cm^2$ 과 패턴 밀도 $\rho \simeq 10.8/cm^2$ 가 되도록 약 3,900개를 가공하여 광전송 실험 결과를 얻었다.

광전송 패널에 입사광 *I*₀≃40 mW/cm²을 조사하면 처음 *x* = 2 cm에서 이론적으로 계산한 결과는 5.26 mW이고, 실험적으로 측 정한 결과는 5.55 mW로 거의 비슷했으므로 이것은 제작된 패널 의 광전송 결과를 이론식으로 예측하는 것이 가능함을 보여준다. 또한 세로 길이 *x* = 18 cm에서 이론적으로 계산한 결과 40.5 mW 와 실험적으로 측정한 결과 17.2 mW로서 약 2.3배의 차이를 보였으며, 이것은 제작된 패널에 비선형적인 전송 손실이 있음을 의미 한다. 여기서 입사광이 9,260 lx 일 때 광전송 조도는 298 lx 로서 입사광의 약 3%에 해당하며, 이것은 KS A 3011조도 기준의 F에 해당하는 것을 확인했다. 마지막으로, 단위 면적당 직각 삼각뿔 형 상의 개수인 패턴 밀도가 높을수록 짧은 거리에서도 전송되는 광 련이 급격히 증가하지만, 총전송 에너지는 더 빨리 포화되므로 광 전송 패널을 제작할 때에는 패턴 밀도가 필요에 맞게 잘 고려되어

야 한다.

이후에는 랜덤한 패턴이 아니라, 바둑판 모양으로 간격을 일정하 게 하여 패널을 제작하고 광전송 측정 결과를 비교 고찰하거나, 거리에 따른 패턴의 밀도에 변화를 주어 최적의 태양광 전송 패널 을 제작할 것이다. 그리고 패널의 소재를 다양화하여 광학적 특성 이 비슷한 유리 재질로 패널을 제작하여 태양광 전송을 측정하고, 상용 소프트웨어로 광전송을 시뮬레이션하여^[9] 측정 결과와 비교 분석 함으로써 신뢰성을 확보하는 등에 관한 연구가 진행되어 야 할 것이다.

References

- [1] Han, S. W., Hong, J. H., 2021, A Study on the Illuminance of Output Light according to the Size of Light Transmission Processing Pattern by Acrylic Plate, Proc. Korean Soc. Manuf. Process. Eng. Spring Conf., 113.
- [2] Kim, J. T., Chung, Y. G., Hwang, M. G., Kang, Y. H., Lim, S. H., 2002, A Development on Solar Mirror Sunlighting Systems, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, 18:6 109-116.
- [3] Kim, J. M., 2013, Artificial Lighting Energy Reduction using Optical Duct Daylight System, A Thesis for a Master, Kyungpook University, Republic of Korea.
- [4] Shin, S. B., Jung, C. H., Lee, K. G., Ouh, C. H., Ryu, K. S., Kang, H. J., Park, J. S., Choi, C. H., 2009, Solar Lighting Systems using Glass Optical Fiber and it's Characteristics, Conference on Information and Control Systems (CICS'09), 269-270.
- [5] Kil, G. S., 2003, Properties of Acrylic Panels Prepared by Film Coating Molding, Doctoral Dissertation, Chungbuk University, Republic of Korea.
- [6] Han, S. W., Hong, J. H., 2022, A Basic Study on Efficient Acrylic Plate Light Transmission Road Machining, J. Korean Soc. Manuf. Process Eng., 21:1 95-101, https://doi.org/10.14775/ksmpe. 2022.21.01.095.
- [7] Han, S. W., Kim, H., Hong, J. H., 2022, Construction of Optical Transmission Theoretical Equation for Pattern Processing of Solar Transmission Panels, Proc. Korean Soc. Manuf. Process Eng. Spring Conf., 296-297.
- [8] Han, S. W., Hong, J. H., 2020, A Study on the Development of a Controller for Pattern Processing of Solar transmission Device, Proc. Korean Soc. Manuf. Process Eng. Spring Conf., 53.
- [9] Han, S. W., Hong, J. H., Kim, H., Kim, D. H., 2022, Simulation

of Optical Transmission of Panel by Optical Transmission Theoretical Formula, Proc. Korean Soc. Manuf. Tech. Eng. Spring Conf., 153.

Su Won Han

Invited Professor in the Department of Mechanical Systems, Korea Polytechnics Daejeon Campus. His research interest is Mechanical Precision Machining and Design, Systems Control.

E-mail: swhan@kopo.ac.kr

Jun Hee Hong

Professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is Intelligent Measurement. E-mail: hongjh@cnu.ac.kr

Hyun Kim

Research professor in the Institute of Quantum Systems, Chungnam National University. His research interest is atomic collision physics. E-mail: uhvacuum@cnu.ac.kr