

## 효율적인 아크릴판 광전송로 가공에 관한 기초 연구

한수원\*, 홍준희\*,#

\*충남대학교 기계공학과

### A Basic Study on Efficient Acrylic Plate Light Transmission Road Machining

Su-Won Han\*, Jun-Hee Hong\*#

\*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

(Received 28 September 2021; received in revised form 30 October 2021; accepted 18 November 2021)

#### ABSTRACT

This paper proposes a method to process the shape of an optical transmission road and attempts to determine the most suitable single processing method for an acrylic plate optical transmission road. In addition, by manufacturing an automatic pattern processing device to generate certain shapes on the acrylic plate at regular intervals, and measuring the illuminance of the patterned acrylic plate optical transmission road, the measured illuminance was confirmed to fall under the KS illuminance values presented in Table 1. In conclusion, when an incident light of approximately 20,000 lx is applied, the transmission illumination is approximately 200 lx, which represents a transmission rate of approximately 1% for incident light and corresponds to the KS illumination criterion F. Additionally, the right-angle triangular pyramid base size (A) processed at a temperature of 350 °C for one second was 2 mm, exhibiting the largest transmission illumination of 280 lx. When the transparent acrylic plate was set to a constant size of 1.6 mm at the bottom of the right-angle triangular pyramid, the fastest response occurred at a processing tip temperature of 350 °C (0.04 s). On the other hand, it took 10 s to process the size of the bottom of the right-angled triangular pyramid at a temperature of 200 °C to 1.6 mm, and it was confirmed that the optical transmission efficiency was significantly reduced because of the burr that occurred at this time.

**Keywords :** Pattern Machining(패턴 가공), Solar Transmission(태양광 전송), Illuminance Measurement(조도 측정), Thermostatic System(온도 제어 시스템), Automatic Motion Control(모션 자동 제어)

## 1. 서 론

식물의 광합성과 조명 등을 위한 가시광선, 비타민 생성과 살균을 위한 자외선 그리고 가열 및 건조를 위한 적외선과 같은 태양 빛을 실내 광원으로 사용하는 것을 자연채광이라고 한다. 태양광의 자

연채광을 실내에 적용하기 위한 태양광 전송 장치에 대한 연구가 계속되고 있으며, 이러한 자연채광 시스템은 반사형과 태양추적방식, 광덕트형, 광섬유형 등으로 분류할 수 있다.<sup>[1]</sup> 그런데 이러한 기존의 시스템들은 구현하기가 매우 복잡하고 비용이 많이 든다. 예를 들어, 반사거울형 태양광 채광시스템은 채광 돔과 베이스, 1·2차 반사거울, 추적제어장치와 구동부, 그리고 시스템 설치대 등으로 구성된다.<sup>[2]</sup> 그리고 광 덕트 방식은 건물 외부에 태양광을 채집

# Corresponding Author : hongjh@cnu.ac.kr

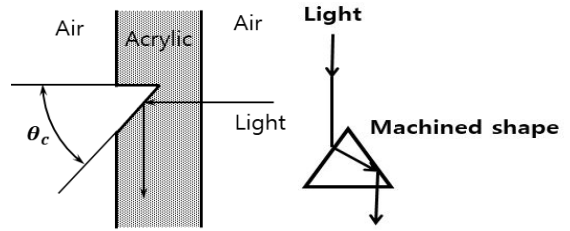
Tel: +82-42-821-5642, Fax: +82-42-822-5642

하는 집광기를 설치하고 광 덕트를 활용하여 실내로 태양광을 이송하는 방식으로 집광부, 광이송부, 산광부로 구성된다.<sup>[3]</sup> 마지막으로 광섬유를 이용한 자연채광 시스템은 그림자 격벽센서에 의하여 태양을 정밀하게 추적하면서 프레넬렌즈로 채광된 태양광을 자연채광용 유리 광섬유를 통하여 빛을 전달하며,<sup>[4]</sup> 산광부도 매우 복잡한 구성을 지닌다. 이에 반하여 여기서 제안하고자 하는 것은 보다 단순하고 효율적인 형태의 태양광 전송 장치로서 아크릴 재질의 필름 구조이다. 아크릴 판재는 투명하고 표면 질감이 우수하며 가공성이 좋을 뿐만 아니라 유지 보수성이 뛰어나 건축 내외장재로 다양하게 사용되고 있으므로<sup>[5]</sup> 더 효율적인 태양광 전송 장치로서 아크릴 필름을 사용하였다.

본 논문은 광전송로 가공 형상을 제안하고 아크릴판 광전송로의 가장 적합한 단일 가공 방법을 찾고자 하였다. 또한 자동 패턴 가공 장치를 제작하여 특정 형상들을 아크릴판에 가공하고 패턴 가공된 아크릴판 광전송로의 조도를 측정함으로써 측정된 조도가 Table 1의 KS조도 기준에서 어디에 해당 하는지를 확인하였다.

**Table 1 Illumination Values according to Light Classification and General Activity Type(KS A3011)**

Activity Type	Light Range (lx)
Sample-specific work in a dark atmosphere (A)	3-4-6
Intermittent start-ups in a dark atmosphere (B)	6-10-15
Simple start-up in a dark atmosphere (C)	15-20-30
Simple start-up for a while (D)	30-40-60
Frequent Startup (E)	60-100-150
Start-up of high luminance or large object targets (F)	150-200-300
Normal luminance contrast or start-up of small object targets (G)	300-400-600
Low luminance contrast or start-up of very small objects (H)	600-1,000-1,500



(a) Reflection on the side (b) A Frontal Reflection  
**Fig. 1 Reflective Appearance of Light by Pattern Type**

## 2. 광전송용 가공 형상과 패턴 형상

### 2.1 광전송용 가공 형상 제안

아크릴의 굴절률  $n$ 은 보통 1.48~1.6 정도로 모두 동일하진 않지만 여기서는 1.5로 하고, 공기의 굴절률  $n'$ 은 1로 하면 Fig. 1에서 가공 경사면의 정반사 되는 입계각  $\theta_c$ 는 스넬의 법칙에 의해 다음과 같이 된다.<sup>[6]</sup>

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n'}{n} = \sin^{-1} \frac{1}{1.5} = 41.8^\circ$$

즉, 아크릴판에서 입사광이 정반사할 수 있는 입계각은  $41.8^\circ$ 이며 옆면에서 볼 때 Fig. 1(a)와 같이 가공 면의 각도를 입계각  $41.8^\circ$ 로 하면 된다. 그러므로 Fig. 1(a) 측면도와 같은 형상뿐만 아니라 Fig. 1(b) 정면도에서처럼 빛을 정반사시키기 위한 형상으로서 직각 삼각뿔 모양을 제안한다. 이때 직각 삼각뿔 형상의 가공될 깊이는 아크릴판 두께와 가공 팁 크기를 고려하여 정한다.

### 2.2 광전송용 패턴 형상 제안

입사광의 정반사 빛을 연속적으로 전달하기 위한 패턴 형상은 Fig. 2와 같이 가로와 세로의 간격이 일정한 바둑판 모양으로 할 것을 제안한다. 여기서 패턴들의 간격은 아크릴판 크기와 모션 제어 소프트웨어의 제한 조건들을 고려하여 정하도록 한다.

## 3. 패턴 가공 장치 제작

### 3.1 가공 팁

아크릴판에 패턴 형상을 가공하기 위해서 직각 삼각뿔 모양의 가공 팁을 가열하여 이것으로 아크

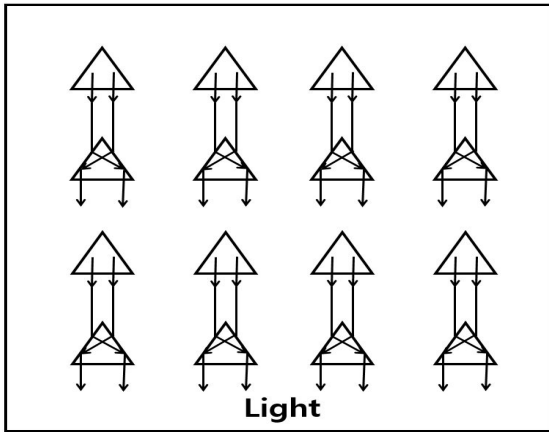


Fig. 2 Light Transmission Pattern

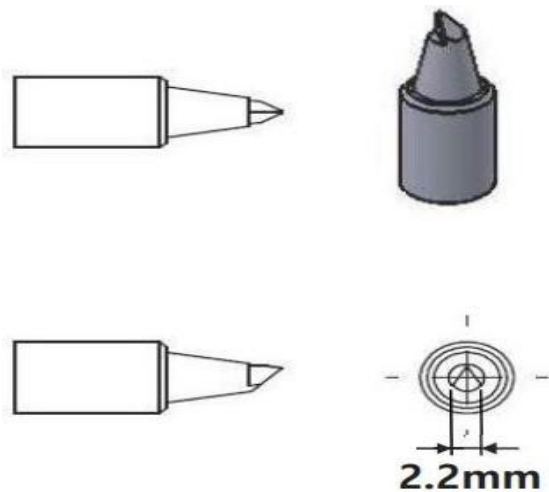


Fig. 3 Drawing of the Tip Model

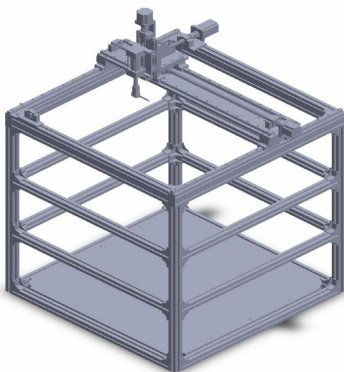


Fig. 4 3-Axis Stage

릴을 녹여서 가공하는 방법으로 해야 가능하다. 따라서 최종적으로 가열할 가공 팁의 형상은 Fig. 3과 같고 재질은 SUS304이다.

### 3.2 패턴 가공 장치

가공 팁으로 투명 아크릴판에 패턴을 가공하기 위해 Fig. 4와 같은 3축 스테이지(3-Axis Stage)를 구현<sup>17)</sup>하였고 스테이지의 스트로크는 X축 700mm, Y축 780mm, Z축 80mm이며 각 축에 모터와 센서를 부착하여 3축 제어를 가능하게 하였다. 여기에 가공 팁을 가열하기 위한 온도 제어 시스템도 제작하였으며 Fig. 5는 제작된 자동 패턴 가공 장치이다.



Fig. 5 The Pattern Machining Device

스텝	X축 명령	Y축 명령
0	INC [Pos:162 pulse], [Speed: 1], [Timer: 0], [End Pulse: 0], [Both: 0]	
1	OPT [Port:0], [Next:OFF], [Time:1000 msec]	
2	IRD [Port:0]	
3	TIM [Delay:1000 msec]	
4	REP [Count:13]	
5	INC [Pos:162 pulse], [Speed: 1], [Timer: 0], [End Pulse: 0], [Both: 0]	
6	TIM [Delay:1000 msec]	
7	OPT [Port:0], [Next:OFF], [Time:1000 msec]	
8	IRD [Port:0]	
9	TIM [Delay:1000 msec]	
10	OFF	
11	INC [Pos:0 pulse], [Speed: 1], [Timer: 0], [End Pulse: 0], [Both: 1]	INC [Pos:0 pulse], [Speed: 1], [Timer: 0], [End Pulse: 0], [Both: 1]
12	INC [Pos:162 pulse], [Speed: 1], [Timer: 0], [End Pulse: 0], [Both: 0]	INC [Pos:162 pulse], [Speed: 1], [Timer: 0], [End Pulse: 0], [Both: 0]
13	TIM [Delay:1000 msec]	TIM [Delay:1000 msec]

Fig. 6 A Part Figure of Motion Device Integrated Management Program 'atMotion' of X, Y Axis

#### (1) 모듈 사양

스테이지 제어용 모듈은 PMC-2HSP-USB 컨트롤러

2개와 MD5-HF14 5상 스테핑 모터 드라이버 3개로 구성되어 있다. 컨트롤러의 전원 전압은 24VDC, 운전 속도는 1pps ~ 4Mpps, 통신 프로토콜은 ModbusRTU이다. 드라이버의 최대구동전류는 1.4A/Phase, 최대소비전류는 3A이다.

### (2) 모터 사양

모터는 ㈜오토닉스 社의 A8K-M566을 3축에 사용하였으며 모터의 사양은 기본 스텝각이 0.72도, 최대정지토크가 8.3kgf·cm, 정격 전류가 1.4A/Phase이다.

### (3) 센서 사양

위치를 감지하기 위해 센서를 사용하였는데 omron SX674의 광센서 9개를 사용하였다. 광센서의 감지 거리는 5mm, 전압은 5~24V, 응답 시간은 1ms로 빔투과 형태이다.

### (4) 모션 제어 소프트웨어

제어 소프트웨어는 ㈜오토닉스社에서 제공하는 모션 디바이스 통합관리 프로그램인 atMotion을 사용하였으며 이것을 통해 개인용 컴퓨터에서 199개 라인까지 프로그램하여 상호 간 통신으로 스테이지를 제어할 수 있다. Fig 6은 X, Y축 제어 프로그램의 일부를 보여주고 있다.

### (5) 온도 제어 시스템

온도 제어 시스템은 온도 조절기로부터 온도 센서와 무점접 릴레이 SSR 그리고 히터를 연결하여 구성하였다. 여기서 사용된 온도조절기는 ㈜오토닉스 社의 TK4S-14SN으로서 전원 전압은 100~240VAC이고 SSR 구동출력 일반형이며 50ms의 고속 샘플링 및 ±0.3%의 표시 정도이며 0.1~999.9℃까지 설정 가능하다. 온도 제어 시스템으로 가공 팁을 가열한 시간과 그에 따른 가공 팁 온도 변화 그래프는 Fig. 7과 같다. 가공 팁의 온도는 처음 약 900초(15분) 동안은 3.3초당 약 1℃씩 비례적으로 가열되어 300℃에 이르렀으나 300℃ 이후 1,800초(30분)까지는 9초당 약 0.5℃씩 매우 느리게 가열되어 350℃에 도달하였다. 그런데 그 이상으로 계속 더 가열하면 장치 연결부 등의 부위가 까맣게 그을리는 등 시스템에 무리가 발생했기 때문에 350℃를 최고 온도로 정하였다.

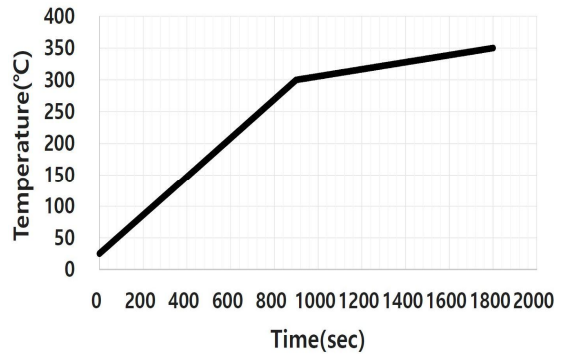


Fig. 7 Tip's temperature according to Time



Fig. 8 Machining Shape at Top View

## 4. 단일 가공 및 패턴 가공

### 4.1 단일 가공 및 형상의 크기

아크릴은 150 ~ 160℃ 정도에서 용이하게 조작할 수 있을 정도로 유연해지므로,<sup>[5]</sup> 가공 팁 가열 온도를 200℃ 부터 시작하여 350℃ 까지 50℃ 단위로 정하였다. 그리고 두께가 3mm인 아크릴판을 대상으로 가공 팁의 폭이 2.2mm인 것을 고려하여 가공 깊이를 최대 2mm로 하였다. 이때 단일 가공 시간은 1초로 일정하게 하였다. 즉, 1초 동안 가공 팁 온도에 따라 가공된 직각 삼각뿔 형상 밑변의 크기 A가 어떻게 변하는지를 디지털현미경(BB739)으로 측정했으며 그 형상은 Fig. 8과 같다. 그 결과 200℃에서 1.4mm, 250℃에서 1.6mm, 300℃에서 1.8mm, 350℃에서 2.0mm이었으므로 온도가 높을수록 가공이 잘 된 것을 알 수 있다.

## 4.2 가공 팁 온도에 따른 패턴 가공

아크릴판의 가로 및 세로는 100 x 100mm이며, 모션 제어 소프트웨어 atMotion으로 프로그램 가능한 라인 수가 최대 199개이므로 100 x 100mm 영역 안에 직각 삼각뿔 형상을 일정한 간격으로 최대한 많이 가공하기 위해서 가로와 세로 각 14개씩 모두 196개를 가공하였다. 즉, 가공 팁 온도 200°C에서 X와 Y축을 6.5mm씩 이동하며 단일 가공하는 것을 196번 반복하였으며 그 결과는 Fig. 9와 같다. 이때 196개의 가공 시간은 패턴 가공 시간으로 바꾸어 말할 수 있으며 소요된 패턴 가공 시간은 약 16분이다. 그리고 250°C와 300°C, 마지막으로 350°C에서 동일한 방식으로 각각 패턴 가공하였다.

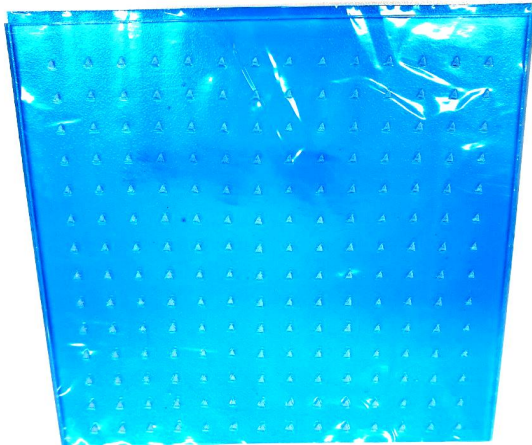


Fig. 9 The Result of Machined Patterns

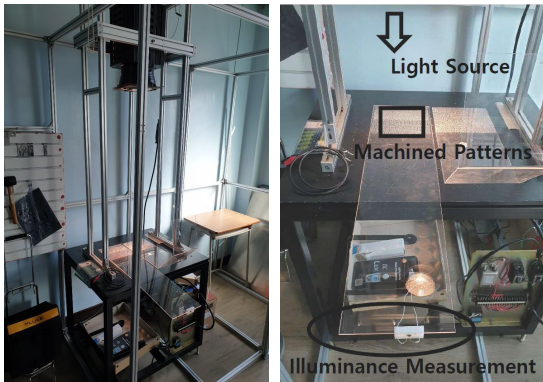


Fig. 10 Experimental Equipment

## 5. 광전송 실험 장치 및 결과

### 5.1 실험 장치

Fig. 10은 전송된 방출 조도를 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 패턴 가공면 위에 수직 입사광(스포츠라이트 약 20,000lx)을 비추면 이것이 다른 쪽 끝 측면으로 반사되고 굴절되어 전송되며 그 전송된 출력 조도를 측정한다. 조도 측정 장치는 테스트 사(社)의 TESTO-540 디지털 조도계이다. 이것은 측정 범위가 0~99,999lx이고, 측정 방법은 포토 다이오드이며 분해능은 1lx이다. 전송 조도 측정 실험은 200°C에서 350°C까지 50°C씩 증가시켜 패턴 가공한 아크릴판에 스포트라이트 조명을 비춰 측정하였다.

Table 2 Illuminance and Size according to Machined Temperature (Machined Time 1.0 second)

Temperature (°C)	Size A (mm)	Illuminance (lx)
200	1.4	85
250	1.6	195
300	1.8	235
350	2.0	280

### 5.2 실험 결과

가공 팁을 200°C로 가열하여 아크릴에 가공한 직각 삼각뿔 형상의 밑변 A 크기는 1.4mm이며 전송 조도는 85lx로 나타났다.

가공 팁을 250°C로 가열하여 아크릴에 가공한 직각 삼각뿔 형상의 밑변 A 크기는 1.6mm이며 전송 조도는 195lx이었다.

가공 팁을 300°C로 가열하여 아크릴에 가공한 직각 삼각뿔 형상의 밑변 A의 크기는 1.8mm로 전송 조도는 235lx 이었다.

가공 팁을 350°C로 가열하여 아크릴에 가공한 직각 삼각뿔 형상의 밑변 A의 크기는 2.0mm로 전송 조도는 280lx 이었다.

위의 실험 결과를 정리하여 Table 2에 제시하였다. 250°C 이상일 때 입력 조도 20,000lx에 대하여

약 1%의 전송률을 보이고 있으며 이것은 Table 1의 KS 조도 기준 F에 해당한다.

결과로부터 알 수 있듯이 가공된 직각 삼각뿔 형상의 밀변 크기가 커질수록 전송된 빛의 조도 또한 커지는 것으로 나타났다.

### 5.3 일정 조도에 따른 가공 조건 고찰

이번에는 Table 1의 KS 조도 기준 F에 해당하면서 직각 삼각뿔 형상 밀변의 크기를 1.6mm로 일정하게 하고 가공 온도와 가공 시간에 따라 전송 조도가 어떻게 차이 나는지 비교해 보았다.

즉, 200°C에서 350°C까지 50°C씩 증가시키고 가공 시간을 조절하여 일정한 크기로 패턴 가공한 아크릴판에 스포트라이트 조명을 비춰 전송 조도를 측정하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 이 결과로부터 알 수 있는 것은 가공 팁의 온도를 350°C에서 가공할 때

**Table 3 Illuminance variation table regarding added experiments**

Temperature (°C)	Size A (mm)	Machined time (sec)	Illuminance (lx)
200	1.6	10.0	125
250	1.6	1.0	195
300	1.6	0.5	192
350	1.6	0.04	202

202lx를 얻어 전송 조도가 가장 좋았으며 가공 시간도 0.04초로 가장 짧았다. Fig. 7의 결과로부터 가공 팁의 가열 시간이 300°C를 넘어서면 3.2 (5)에서 언급한대로 350°C에 도달하기까지 2배 오래 걸리더라도 생산의 효율성을 고려한다면 가공 속도가 매우 빠르므로 350°C로 하는 것이 좋다고 판단할 수 있다. 또한 가공 팁의 온도가 200°C일 경우 직각 삼각뿔 형상 밀변의 크기를 1.6mm로 하기 위한 가공 시간은 10초로 가장 길었으며 방출부에 전송된 측정 조도 역시 125lx로서 가장 작았다. 이것은 가공시 발생한 버로 인하여 광전송이 작게 된 것으로서 나쁜 조건으로 판단된다. 따라서 가공 팁의 온도를 200°C 이하로 하는 것과 가공 시간을 10초 이상으로 하는 것은 피해야 한다.

## 6. 결론

아크릴판을 이용하여 태양광을 전송하고 조명으로 사용하기 위해 가공 형상을 제안하였다. 그리고 자동 패턴 가공 장치를 제작하여 가로 및 세로가 100 x 100mm이며 두께 3mm인 아크릴판을 광전송로로 패턴 가공하고 광전송로 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 입사광(스포트라이트 조명; 약 2만lx)을 비출 때 전송 조도는 약 200lx로 이것은 입사광에 대해 약 1%의 전송률을 보인 것이며 KS조도 기준(KS A 3011) F에 해당하는 것을 확인하였다.
2. 가공 팁의 온도 350°C에서 1초 가공한 직각 삼각뿔 밀변 크기 A가 2mm로 가장 큰 전송 조도 280lx를 나타내었다.
3. 가공 팁 온도 350°C에서 투명 아크릴판에 가공된 직각 삼각뿔 밀변의 크기를 1.6mm로 일정하게 설정하고 가공한 결과, 0.04초의 가공 시간이 가장 빠른 것으로 나타났다.
4. 반면 온도 200°C에서 직각 삼각뿔 밀변의 크기를 1.6mm로 가공하는데 10초가 걸렸으며 이때 발생하는 버로 인하여 광전송 효율이 현저히 떨어진 것을 확인했다.

향후 더욱 정밀한 PLC를 적용하여 패턴 개수를 늘려 더 높은 KS조도 기준을 만족하도록 할 것이며 지금의 규칙적인 바둑판 모양의 일정한 마킹 가공 패턴과는 다른 규칙성 또는 난수 발생 등을 통해 불규칙성을 지니도록 패턴 가공을 하여 조도 변화를 분석하거나 또는 재질을 변경하여 조도를 높이고자 한다.

## REFERENCES

1. Han, S. W., "A Study on the Illuminance of Output Light according to the Size of Light Transmission Processing Pattern by Acrylic Plate", Proceedings of the KSMPE Spring Conference, Republic of Korea, pp. 113, 2021.
2. Kim, J. T., Jeong, Y. G., "A Development on solar Mirror Sunlighting Systems", Journal of the

- Architectural Institute of Korea Planning & Design,  
Vol. 18, No. 6, pp. 109-116, 2002.
3. Kim, J. M., "Artificial lighting energy reduction using Optical Duct Daylight system", A Thesis for a Master, Kyungpook University, Republic of Korea, pp. 12, 2013.
  4. Shin, S. B., Jeong, C. H., "Solar Lighting Systems using Glass Optical Fiber and it's Characteristics", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers of Information and control Symposium, pp. 269-270, 2009.
  5. Kil, G. S. "Properties of Acryl Panels Prepared by Film Coating Molding", A Thesis for a degree of Doctor, Chungbuk University, Republic of Korea, pp. 1, 2003.
  6. Kim, H., Shin, W. C., "Transmission Apparatus of Solar Light", A Patent Application, Reference Number DP20170198, pp. 9~21, 2018.
  7. Han, S. W., "A Study on the Development of a Controller for Pattern Processing of Solar Transmission Device", Proceedings of the KSMPE Spring Conference 2020, Republic of Korea, pp. 53, 2020.