

태양열 집광관의 반사율 변화 연구

이현진*, 김종규*, 이상남*, 강용혁*, 이성욱**, 박문희***

*한국에너지기술연구원(hj.lee@kier.re.kr), *한국에너지기술연구원(rnokim@kier.re.kr),
*한국에너지기술연구원(snlee@kier.re.kr), *한국에너지기술연구원(yhkang@kier.re.kr),
NANOCMS(lsw4004@nanocms.co.kr), *호서대학교 정보통계(mhpark@hoseo.edu)

A Study of Reflectance Variations of Solar Concentrators

Lee, Hyun-Jin* Kim, Jong-Kyu* Lee, Sang-Nam* Kang, Yong-Heack*
Lee, Seong-Uk** Park, Moon-Hee***

*Solar Thermal and Geothermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(hj.lee@kier.re.kr),
*Solar Thermal and Geothermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(rnokim@kier.re.kr),
*Solar Thermal and Geothermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(snlee@kier.re.kr),
*Solar Thermal and Geothermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(yhkang@kier.re.kr),
**NANOCMS Co., Ltd.(lsw4004@nanocms.co.kr),
***Dept. of Informational Stat., Hoseo University(mhpark@hoseo.edu)

Abstract

Understanding of reflectance of solar concentrators is important for assessing concentration performance. However, inaccurate data about refractive indices of constituent materials and dust accumulation on the surface often prevent figuring out reflectance variations. The current study proposes an approach calculating concentrator reflectance based on the refractive index of glass obtained from reflectance and transmittance measurements. This approach improved accuracy of solar-averaged reflectance from 2.9% to 0.4% compared to the use of existing reference data. Reflectance variations with incidence angles are negligible up to 60° at various glass thicknesses. When concentrators are contaminated with dust during 2 months, specular reflectance loss of vertically exposed concentrators is less than 7%. However, for horizontally exposed concentrators, the loss significantly increases up to 40% while dependence of reflectance on incidence angles becomes strong. Measurements of hemispherical reflectance indicate that 80 percentage of the loss comes from scattering rather than absorption by dust. Data of refractive index and reflectance provided in the current study will help estimate or model the concentrated solar flux.

Keywords : 태양열 집광기(Solar Concentrators), 굴절률(Refractive Index), 정반사율(Specular Reflectance), 반구반사율(Hemispherical Reflectance), 먼지(Dust), 반사율 손실(Reflectance Loss)

투고일자 : 2010년 9월 13일, 심사일자 : 2010년 9월 21일, 게재확정일자 : 2010년 10월 8일
교신저자 : 이현진(hj.lee@kier.re.kr)

기 호 설 명

R	: 반사율
T	: 투과율
d	: 유리의 두께
k	: extinction coefficient
n	: refractive index
\tilde{n}	: 복소 굴절률 ($n + ik$)
λ	: 빛의 파장 (nm)
θ	: 각도

1. 서 론

집광형 태양열 발전(concentrating solar power) 시스템은 크게 집광부, 흡수부, 발전부로 구성된다.¹⁾ 집광부는 입사되는 태양 복사 에너지를 흡수부로 모으는 역할을 하므로 높은 반사율을 가진 평면 또는 곡면의 반사판으로 만든다. 따라서 발전 시스템의 성능 예측이나 흡수부의 설계를 위해 집광 성능의 파악이 중요하다. 이를 위해서 반사판의 반사율에 대한 지식이 선행되어야 한다.

반사판은 주로 저철분 석회 유리에 금속 코팅하여 제작한다. 반사판의 반사율을 계산하기 위해서는 유리의 굴절률이 필요하다. 다양한 유리 제작업체가 조성 등을 바꾸면서 광학 성능을 향상을 꾀한다. 따라서 다양한 종류의 유리 제품이 존재하게 되고, 기존 문헌에서 연구한 유리와 사용하고자 하는 유리가 다를 수 있다. 본 연구에서 증명하듯이 기존 문헌의 굴절률을 사용하였을 때, 반사율 계산값이 측정값과 차이를 보일 수 있다. 또한 정확한 굴절률 데이터를 갖고 있어도, 집광기 표면에 먼지 등의 오염물질이 쌓이면 반사율은 파장, 입사각, 반사각에 따라 크게 변할 뿐만 아니라 반사율 손실이 발생한다.²⁾

본 연구의 목적은 태양열 집광기의 반사율을 정확하게 파악하는 것이다. 이를 위해, 기존 문헌을 참조하는 대신에, 사용하고자 하는

유리의 굴절률을 얻어서 유리 반사판의 반사율을 계산하는 방법을 제시하고 있다. 그리고 외기 노출로 쌓인 먼지가 얼마만큼 반사율의 손실을 주는지 조사하고 있다.

2. 반사율 측정 방법

본 연구에서는 주된 측정 장비로서 Perkin Elmer Lambda 1050 모델 UV/VIS/NIR spectrophotometer를 사용하였다. 이 장비는 deuterium lamp와 tungsten lamp를 광원으로 사용하여 0.18 ~ 3.3 μm 파장영역에서 측정이 가능하다. 각각 UV/VIS과 NIR 영역에서 두 개의 monochromator를 사용하여 파장을 선택한다. Detector도 photomultiplier과 InGaAs 두 가지 종류를 사용한다. 파장이 0.86 μm 일 때를 기준으로 monochromator와 detector가 전환된다. Detector는 지름 150 mm의 적분구(integrating sphere) 아래에 위치하여 적분구에서 모아진 빛을 측정할 수 있게 한다. 제조사에 따르면, 장비의 측정 오차는 흡수율 기준으로 0.0008 정도이다.

반사율 측정 시, 샘플을 적분구 뒤에 놓으면, 측정값은 hemispherical reflectance가 된다. 수직입사(normal incidence)에서 광원과 detector의 간섭으로 반사율 측정이 곤란하므로, 일반적으로 8° 입사각을 수직입사로 간주한다. 반투명 샘플을 적분구 앞에 놓으면, hemispherical transmittance 측정이 가능하다. 그리고 적분구를 제거하고 detector를 입사각과 동일 직선에 위치하면, specular transmittance도 측정할 수 있다. 투과율이나 반사율 측정에 앞서, Labsphere사의 표준샘플이 있을 때와 없을 때를 두 번 측정하여 베이스라인에 대한 보정을 먼저 실시하였다.

태양열의 집광에는 반사판의 specular reflectance가 중요하다. 하지만, diffuse 성분이 많은 샘플에 대해, 적분구를 사용하는 spectrophotometer로 specular reflectance를 측정하려면 보조 장

치가 필요하다. 따라서 먼지로 오염된 샘플의 입사각에 따른 specular reflectance 변화를 측정하기 위해 gonio-reflectometer를 사용하였다. 장비는 J&C Tech, Co.에서 제작한 RT 300S 모델로 bidirectional reflectance와 transmittance 측정이 가능하다. 입사각은 $8^\circ \sim 60^\circ$ 범위에서 변경할 수 있고, 반사각에 대해서는 85° 이하의 천정각과 전 범위의 방위각이 가능하다. Halogen lamp가 광원으로 사용되었고, 한 개의 monochromator가 $0.38 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 범위에서 파장을 선택한다. 샘플에서 조사되는 영역의 지름은 대략 8 mm이다. 약 8 mm 지름의 입구를 가진 photodiode array를 detector로 사용하였다. Detector와 샘플 간격이 200 mm 이므로, 측정기의 solid angle은 1.26×10^{-3} 이고 half angle은 1.14° 이다. 제작사에 따르면, 반사측정기는 diffuse 샘플에 대해서 0.4%의 정확도를 갖는다.

3. 반사판의 광학 물성

유리판 한 장이나 유리 반사판의 광학물성은 그림 1처럼 두께가 semi-infinite 평면인 매질 1(공기)과 3에 낀 유리의 3층 구조로 해석 가능하다. 다만, 차이는 매질 3이 공기 또는 은 코팅이라는 점이다. 본 연구에서 관심이 있는 반사판은 유리에 120 nm 두께 은코팅과 이를 보호하는 코팅으로 이루어진다. extinction coefficient를 바탕으로 은코팅 내부에서 빛의 mean free path — absorption coefficient의 역수를 감안한다면, 120 nm는 광학적으로 충분히 두껍다.²⁾ 즉, 광학적으로 은코팅은 반무한 평면이고, 빛은 그 아래에 있는 보호코팅에 도달하지 못한다.

그림 1에서 매질 2의 두께가 파장보다 충분히 크다면 ($d \gg \lambda$), 빛의 파장 특성을 무시하고 ray tracing 결과로 반사율과 투과율의 계산이 가능하다.²⁾

$$R = \rho_{12} + \frac{\rho_{23} + (1 - \rho_{12})^2 \tau^2}{1 - \rho_{12} \rho_{23} \tau^2} \quad (1)$$

$$T = \frac{(1 - \rho_{12})(1 - \rho_{23})\tau}{1 - \rho_{12} \rho_{23} \tau^2} \quad (2)$$

여기서, 접촉면에서의 반사율 ρ 와 두 번째 층에서의 내부 투과율 τ 는 아래와 같다.

$$\rho_{jj'} = \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{n}_j \cos \theta_{j'} - \tilde{n}_{j'} \cos \theta_j}{\tilde{n}_j \cos \theta_{j'} + \tilde{n}_{j'} \cos \theta_j} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\tilde{n}_j \cos \theta_j - \tilde{n}_{j'} \cos \theta_{j'}}{\tilde{n}_j \cos \theta_j + \tilde{n}_{j'} \cos \theta_{j'}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\tau = \exp\left(-\frac{4\pi kd}{\lambda \cos \theta_2}\right) \quad (4)$$

위식에서 아래첨자 j 는 층의 번호로 $j = 1, 2$, 또는 3이고 $j' = j \pm 1$ 이다. 일반적으로 굴절률은 복소수이다. 복소수 굴절률의 실수부는 refractive index이고, 허수부는 extinction coefficient이다. 일반적으로 굴절률이라 하면, 복소수 굴절률을 지칭한다. 각층에서 refraction angle은 Snell's law에 의해 결정된다. 예를 들어, $\theta_2 = \sin^{-1}(n_1 \sin \theta_1 / n_2)$. 그리고 수식 (3)에서 $\rho_{jj'} = \rho_{j'j}$ 이 성립한다.

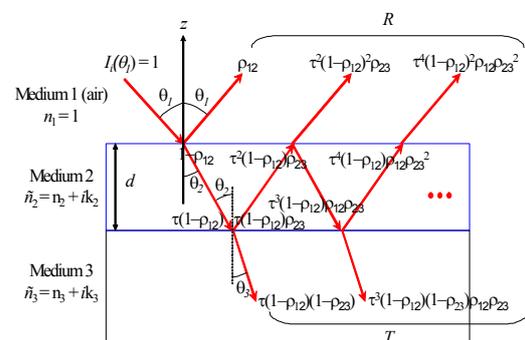


그림 1. 3층 구조의 반사율과 투과율

4. 깨끗한 반사판

4.1 유리의 굴절률

그림 1에서 매질 3이 공기인 경우 수식 (1) ~ (4)를 사용하면, 수직입사에서 측정된 유리판의 반사율과 투과율로 유리의 굴절률을 얻을 수 있다. 이 조건에서 $\theta_1 = 0^\circ$ 이고 $\rho = \rho_{12} = \rho_{23}$ 이다. 유리는 $n \gg k$ 이므로, n 과 k 는 아래와 같이 표현된다.³⁾

$$n = \frac{1 + \sqrt{\rho}}{1 - \sqrt{\rho}} \quad (5)$$

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi d} \ln\left(\frac{R - \rho}{\rho T}\right) \quad (6)$$

$$\rho = -\frac{\beta - \sqrt{\beta^2 - 4(2-R)R}}{2(2-R)} \quad (7)$$

$$\beta = T^2 - R^2 + 2R + 1 \quad (8)$$

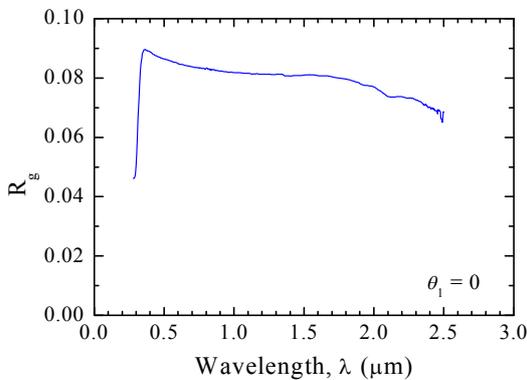


그림 2. 유리판의 반사율 스펙트럼

그림 2와 3은 유리의 굴절률을 얻기 위해 측정된 4 mm 두께 유리판의 투과율과 반사율을 보여주고 있다. 아래첨자 g 는 유리를 의미한다. 유리가 이상적이라면, 산란되는 빛이 없다. 하지만, 실제로는 산란이 존재하게 되고 specular 값과 hemispherical 값은 차이를 보인

다. 유리의 경우 반사율은 투과율에 비해 훨씬 작기 때문에, specular reflectance와 hemispherical reflectance 차이는 작다. 하지만, 그림 3의 투과율에서는 최대 0.053, 평균 0.010 만큼의 차이가 있다.

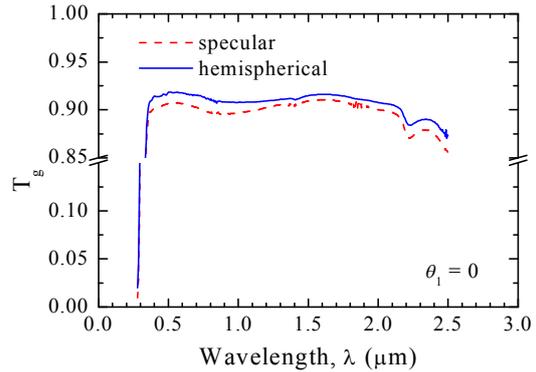


그림 3. 유리판의 투과율 스펙트럼

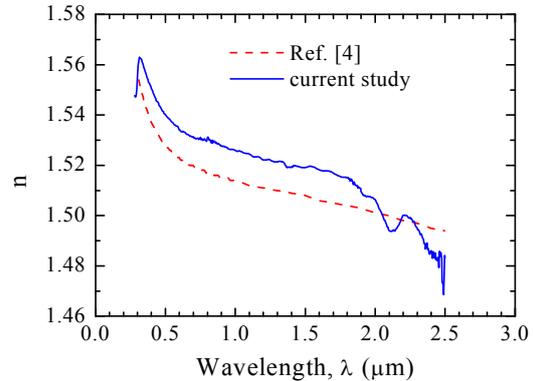


그림 4. 유리의 refractive index

여기서는 굴절률을 구할 때, T_g 값으로는 specular 값과 hemispherical 값의 평균을 사용하였다. 왜냐하면, 그림 3의 specular 값은 산란으로 인해 이상적인 유리에 비해 더 작다. 또한, hemispherical 값은 은코팅에서 반사된 빛 중의 일부분이 유리층 안에서 산란되어 다시 적분구 안으로 들어와 투과율로 측정될 수 있기 때문이다 (그림 1 참조). 실제로도 그림 2의 반사율과 그림 3의 hemispherical 투과

율을 합했을 때, 1보다 큰 경우도 발생하였다.

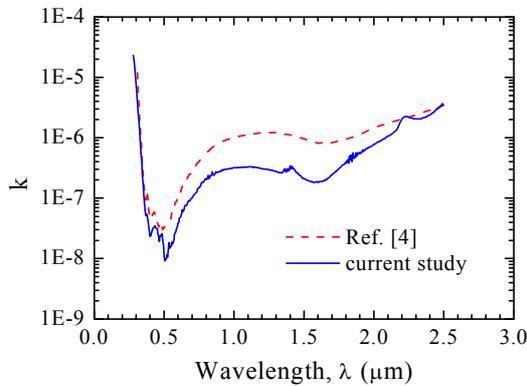


그림 5. 유리의 extinction coefficient

그림 4와 5는 위에서 언급한 유리의 반사율 R_g 과 투과율 T_g 측정값을 수식 (5) ~ (8)에 대입하여 얻어진 n 과 k 를 보여준다. Rubin의 연구와 비교하면, 전반적으로 n 은 다소 크고 k 는 다소 작다.⁴⁾ 본 연구에서 조사된 유리는 참고문헌 4에 나오는 유리와는 다르게 조성의 변화가 있었던 것으로 예상된다.

4.2 집광기의 반사율

앞에서 얻어진 유리의 굴절률과 참고문헌 5의 은의 굴절률을 이용한다면, 수식 (1) ~ (4)로 집광기 표면의 반사율을 주어진 파장과 입사각에 대해 구할 수 있다 (그림 1에서 매질 3이 은코팅인 경우). 먼저 4 mm 두께의 유리로 만든 집광기의 수직입사 반사율 스펙트럼을 그림 6에 도시하였다.

근적외선 영역에서는 여전히 차이가 존재하지만, 참고문헌 4의 유리 굴절률로 계산한 값보다는 정확하다. 오차의 최대값은 12.2%에서 6.3%로, 오차의 산술평균값은 3.4%에서 1.7%로 줄었다. 특히 작은 파장영역에서 정확성 증가는 태양평균(solar-averaged) 반사율 측면에서 명확하다. 태양을 5777K의 흑체(blackbody)로 간주하여, 방사에너지로 가중 평균하여 태양평균 반사율을 계산하였다. 참

고문헌 4의 굴절률을 바탕으로 계산한 태양평균 반사율이 0.871인 반면, 그림 4와 5의 굴절률을 바탕으로 계산한 값은 0.893이다. 측정값으로 계산한 태양평균 반사율이 0.897이므로 오차가 2.9%에서 0.4%로 7배 이상 줄었다.

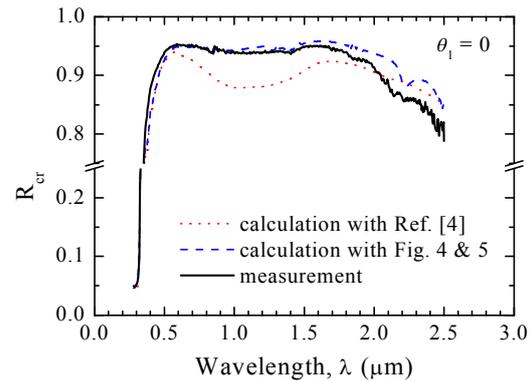


그림 6. 깨끗한 반사판의 반사율 스펙트럼

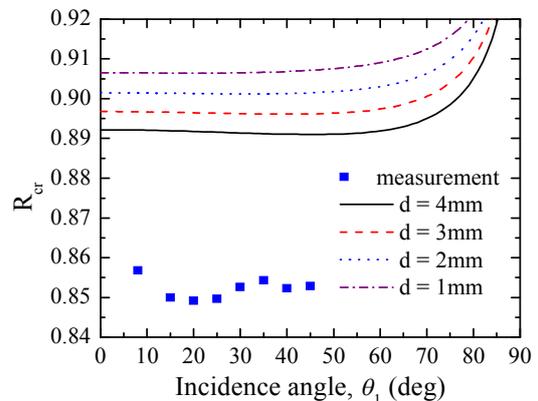


그림 7. 깨끗한 반사판의 태양평균 반사율 변화

그림 7은 계산을 통해 두께와 입사각에 따른 태양평균된 반사율의 변화를 보여준다. 약 60°까지는 반사율 변화가 0.003 이하로 매우 작다. 따라서 입사각이 크지 않으면, 입사각에 상관없이 반사율이 일정하다고 가정할 수 있다. 주로 수직반사율을 대표값으로 사용한다. 예상대로 두께가 감소할수록 반사율은 증가한다. 수직반사율 기준으로 4 mm 대비 1

mm에서 0.014 증가했고, 평균적으로 1 mm 두께당 0.005 만큼 반사율이 증가한다.

4 mm 두께 대해 gonio-reflectometer로부터 얻은 반사율도 같이 비교하였다. 60°까지 계산값 평균 0.892에 비해 측정값 평균은 0.852로 0.040만큼 작다. 빛의 산란이나 흡수 손실로 계산값이 작겠지만, 차이는 다소 큰 편이다. Petit과 Freese는 0.003 이하의 손실을 보고하였다.⁶⁾ 하지만, 본 연구에서 사용된 유리는 그림 3에서 투과율만으로도 평균 0.010 만큼의 산란 효과가 있다. 그림 1에서 multiple reflection 현상과 유리의 높은 내부 투과율 τ 을 감안한다면, 반사판에서 반사되기까지의 빛들의 경로가 유리판 한 장에서 투과되기까지의 경로보다 크다. 따라서 산란으로 인한 반사판 반사율의 측정값과 계산값 간의 차이가 그림 3의 유리판 투과율 차이 1% 보다는 클 것이다. 그럼에도 불구하고 그림 7의 0.040 차이는 예상보다 더 크다. 일반적인 gonio-reflectometer의 정확도를 감안한다면,⁷⁾ 장비의 정확도는 제조사의 주장보다는 큰 것으로 판단된다.

5. 오염된 반사판

5.1 오염된 샘플 준비

지금까지 깨끗한 반사판의 광학 물성 변화를 살펴보았다. 깨끗한 반사판은 이론적으로 물성 계산이 용이하지만, 먼지로 오염 되어 산란현상이 중요해지면 이론적인 접근이 어렵다. 그래서 먼지로 오염된 반사판의 반사율의 손실을 측정에 근거하여 조사하였다. 먼저 깨끗한 반사판을 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 크기의 사각형으로 자른 뒤, 2010년 4월 2일에 전체 6개의 샘플을 대전시의 한국에너지기술연구원에 배치하였다. 지상에서 약 3 m 위에 수직과 수평으로 각각 두었으며, 노출 동안 반사판을 청소하지 않았다. 수직과 수평 샘플을 각각 한 장씩 쌍으로 같은 날에 회수하였다. 샘플에 대한 정보는 표 1에 요약하였다.

표 1. 외부에 노출된 샘플

샘플명	노출조건	회수일	노출기간
V1	수직	5월 7일	35일
V2	수직	5월 19일	47일
V3	수직	6월 3일	61일
H1	수평	5월 7일	35일
H2	수평	5월 19일	47일
H3	수평	6월 3일	61일

5.2 Specular reflectance

태양에너지의 집광은 빛의 직달(direct)성분만을 사용하기 때문에, 오염된 반사판에서는 먼지의 산란과 흡수로 인한 specular reflectance 손실을 아는 것이 중요하다. 그림 8와 9은 오염된 샘플에 대해 specular reflectance의 손실률을 보여준다. 데이터는 $0.38 \sim 0.95 \mu\text{m}$ 파장 범위에서만 태양평균 하였으며, 각각의 입사각에 대해 그림 7의 깨끗한 반사판의 반사율 R_{cr} 으로 나누었다.

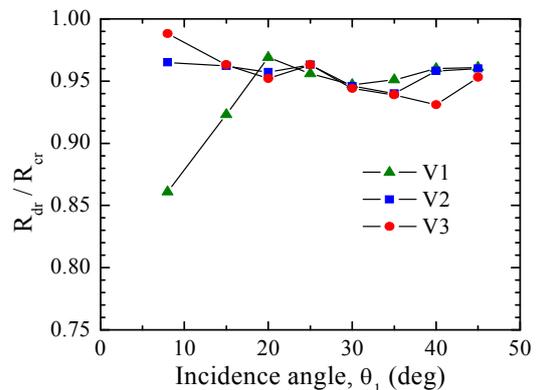


그림 8. 수직오염 샘플의 입사각에 따른 태양평균 specular reflectance loss

우선 먼지 증착이 매우 불균일함 밝힌다. 봄철의 먼지는 주로 황사와 꽃가루로 이루어져서 먼지의 크기가 매우 다양하다. 무엇보다도, 먼지 증착된 먼지에 의한 표면 상태 또는 비에 의한 씻겨 나간 정도나 방식 등에 의해 증착이 달라지므로 시간이 지날수록 증착 불균일도는 더욱 증가한다. 불균일도는 반사판의 일관성 있는 물성 측정을 어렵게 한다. 일반적으로 먼지에

의한 반사율 손실이 입사각이 커지면서 증가함을 고려하면,⁸⁾ 작은 입사각에서 그림 8의 V1이나 그림 9의 H1의 측정값은 신뢰도가 떨어지며 이는 불균일도에 기인한 것으로 추정된다.

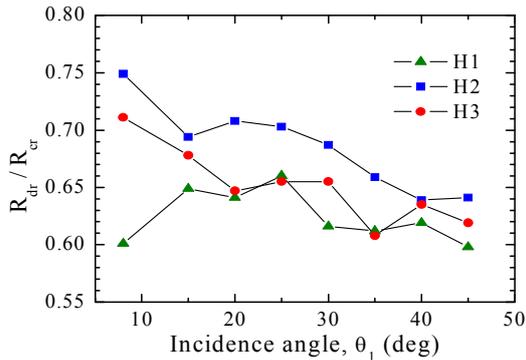


그림 9. 수평오염 샘플의 입사각에 따른 태양평균 specular reflectance loss

그림 8에서 비록 세 샘플 간 노출 기간이 다르지만, 전반적으로 반사율 손실의 차이가 크지는 않다. 그리고 입사각에 대한 반사율 변화도 크게 두드러지지 않으며, 최대로 7% 반사율 손실이 관찰된다. 반면에 그림 9에서 수평조건에서 오염된 샘플은 당연히 수직조건에 비해 큰 반사율 손실을 보인다. 입사각이 커질수록 손실도 증가하는 경향이 뚜렷해서, 특히 V2와 V3에서, 최대 40%까지 손실이 발생한다. 입사각이 클 때, 입사광선이 먼지와 더 많이 상호작용하여 산란이나 흡수를 일으키기 때문이다. 참고문헌 8에 따르면, 70°까지 손실이 증가하는 경향이 있다.⁸⁾ 일반적으로 실제 시스템에서 사용하는 집광판의 위치는 수직과 수평의 중간이겠지만, 비운전중의 위치가 수평임을 감안하면 실제로 사용하는 반사판의 반사율 감소는 그림 9의 수평조건에서 보다 가까울 것으로 판단된다.

5.3 Hemispherical reflectance

그림 10과 11은 spectrophotometer로 측정된 hemispherical reflectance 손실률을 보여준다. 각각의 파장에 대해서 그림 6에 나타난 깨끗한

반사판의 반사율로 나누었다. 먼지에 의한 산란과 흡수가 발생할 때, 적분구가 산란된 빛은 모으므로 hemispherical reflectance는 흡수에 의한 반사율 손실만을 나타낸다. 그림 10에서 수직노출 샘플에 대해 자외선영역에서 높은 손실을 보이지만, 그림 6에서 보듯이 반사율 변화가 급격하므로 정확한 판단이 어렵다. 가시광선 영역에서는 손실이 약 2% 까지 발생하지만, 0.9 μm 이상에서는 손실을 무시할 만하다. 태양평균 반사율 관점에서 보면, 그림 10에 나타난 샘플에 대해 손실률은 1% 미만이다. 결과적으로 수직으로 작동하는 반사판은 가시광선 영역에서 먼지들의 흡수에 의한 손실이 존재하지만, 그 영향이 미미하며 오염기간이 증가해도 크게 변하지 않는다.

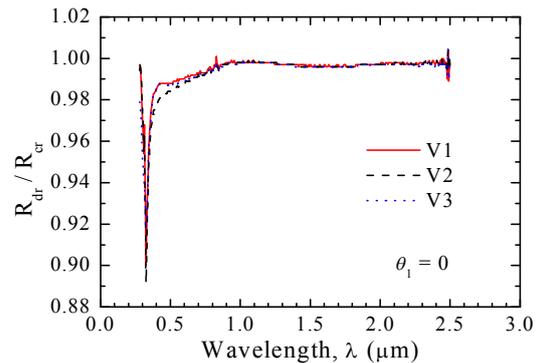


그림 10. 수직오염 샘플의 hemispherical reflectance loss 스펙트럼

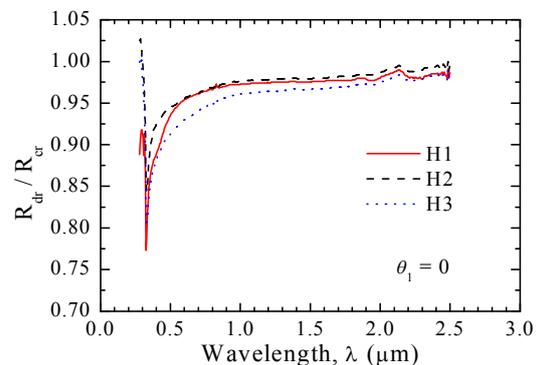


그림 11. 수평오염 샘플의 hemispherical reflectance loss 스펙트럼

그림 10과 비교하여 그림 11에서 수평샘플에서 먼지의 흡수에 의한 손실은 증가한다. 가시광선 영역에서는 최대 11.8%, 0.8 μm 이상 적외선 영역에서 최대 5.1%이다. 오염 기간에 비례해서 흡수에 의한 손실이 반드시 증가하지는 않는다. 외부 노출 기간이 길었던 H2가 H1보다 손실이 작게 나왔다. 하지만 그 차이가 작은 것으로 비추어 샘플 표면의 불균일도가 그 원인으로 추정된다. 그림 11에서 흡수 손실이 가장 큰 H3의 태양평균 반사율 손실은 6.4%이고, H2는 4.1% 손실을 보였다. 그림 9에서 산란과 흡수 모두에 의한 손실이 H2와 H3이 각각 25.1%, 28.9%이므로, 먼지에 의한 흡수가 전체 손실의 약 20% 정도를 차지함을 알 수 있다.

6. 결 론

태양 집광기 표면의 반사율을 정확하게 파악하기 위한 본 연구의 결론을 요약하면 아래와 같다.

- (1) 반사율과 투과율 측정값으로 계산된 유리의 굴절률로 집광판의 반사율을 정확하게 얻는 방법을 제시하였다. 참고문헌 대비하여, 태양평균 반사율 계산 오차가 2.9%에서 0.4%로 개선되었다.
- (2) 깨끗한 반사판의 태양평균 반사율 변화는 입사각 60°까지 무시할 만하다. 유리 두께가 4 mm에서 반사율이 0.892로 계산되었으나, 실제 유리에서 산란으로 인한 손실을 고려한다면 0.02 ~ 0.04 정도 차감하는 것이 합리적이다.
- (3) 약 두 달가량 수직으로 외기에 노출된 반사판의 specular reflectance는 45°까지 입사각이 변하더라도 먼지에 의한 반사율 손실률이 7%이하이다. 하지만, 수평으로 노출된 반사판은 specular reflectance가 입사각에 대한 의존도도 클 뿐만 아니라 손실률도 40%까지 증가하였다.
- (4) 수직으로 노출된 반사판의 hemispherical reflectance는 먼지에 의한 손실이 1% 이

하로 매우 작다. 하지만, 수평 노출 반사판에서 손실은 4 ~ 6% 정도이다. 이는 먼지가 빛의 흡수보다는 산란으로 반사율 손실의 약 80%를 일으킴을 의미한다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 연구비지원으로 수행되었음. (과제번호 : 2008NSO12P01301 02009)

참 고 문 헌

1. Romeo-Alvarez, M., Zarza, E., Concentrating Solar Thermal Power, (Kreith, F., Goswami, Y., ed., Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy), CRC Press, New York, 2007.
2. Modest, M.F., Radiative Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, 1993.
3. Furler, F.A., Angular Dependence of Optical Properties of Homogeneous Glasses, ASHRAE Transactions, 1991, Vol. 97, pp.1129-1133.
4. Rubin, M., Optical Properties of Soda Lime Silica Glasses, Solar Energy Materials, 1985, Vol. 12, pp.275-288.
5. Palik, E.D., Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Orlando, 1985.
6. Pettit, R.B., Freese, J.M., Wavelengths Dependent Scattering Caused by Dust Accumulation on Solar Mirrors, Solar Energy Materials, 1980, Vol. 3, pp.1-20.
7. Shen, Y.J. et al., A Scatterometer for Measuring the Bidirectional Reflectance and Transmittance of Semiconductor Wafers with Rough Surfaces, Review of Scientific Instruments, 2003, Vol. 74, pp.4885-4892.
8. Chin, S., Solar Reflectivity and Absorptivity Studies, Master Thesis, Texas Tech Univ., 1978.