

몽떼－까를로방법에 의한 태양빛선택성흡수막설계

박 문 무

태양빛을 최대한 흡수하고 해당 작업온도에서 열복사가 최소로 되는 선택성흡수막은 태양에너지리용분야에서 필수적인 재료로 되고있다. 이러한 재료를 제작하는데서 조종이 정밀하면서도 간단하고 환경오염도 없는것으로 하여 비산에 의한 다층막제조방법이 광범히 리용되고있다.

비산법으로는 요구하는 박막두께를 정확하게 얻을수 있으므로 리상적인 선택성흡수막설계가 선행되는것이 중요하다.

태양빛선택성흡수막의 최량설계와 컴퓨터모형화에 대해 언급[1]된것들이 있으나 구체적인 알고리즘과 방법, 파라메터들은 밝혀진것이 없다.

우리는 새로운 가치함수를 제기하고 그것을 리용하여 선택성흡수재료의 하나인 Mo-Al₂O₃/Cu박막의 최량설계를 진행하였다.

선택성흡수막의 구조는 그림과 같다.

선택성흡수막은 간섭성쌍층구조형식으로 모형화할수 있다.

반사방지막은 유전체매질로서 굴절률이 실수이고 그 값이 비교적 작은 매질이다. 이것은 태양빛과장대역의 빛을 손실없이 모두 투과시킬것을 목적으로 한다.

LMVF(low metal volumn fraction)는 포함되어있는 금속성분의 체적비가 작은 금속－유전체복합층이고 HMVF(high metal volumn fraction)는 금속체적비가 큰 금속－유전체복합층이다.

이 2개 층은 기본흡수층으로서 태양빛이 여기서 흡수된다.

마지막의 금속반사층은 적외선반사층으로서 동작온도에서의 열복사와장대역의 빛들을 반사시켜 열복사를 작게 한다.

이러한 간섭성쌍층구조의 다층박막은 전통적인 점변태구조나 균질구조에 비하여 태양열흡수성능이 높다.[1, 2]

고온집열기에서는 녹음점이 높고 높은 온도에서도 그 광학적성질이 안정한 Mo와 Al₂O₃을 리용한 금속－유전체복합재료로 다층박막을 형성해준다.

태양빛선택성흡수재료를 특징짓는 특성량은 태양빛흡수비(α)와 열방출비(ε)로서 다음과 같다.

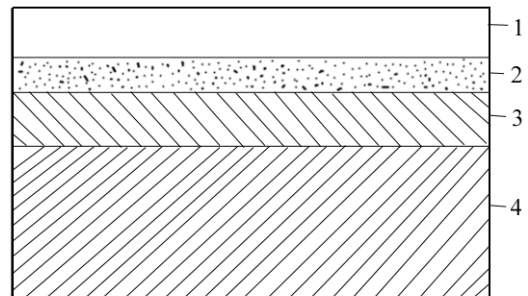


그림. 선택성흡수막의 구조
1－반사방지막, 2－LMVF, 3－HMVF,
4－금속반사층

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot (1 - \gamma(\lambda)) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda} b(\lambda, T) \cdot (1 - \gamma(\lambda)) d\lambda}{\int_{\lambda} b(\lambda, T) d\lambda} \quad (2)$$

여기서 $\gamma(\lambda)$ 는 선택성 흡수재료의 반사율, $\Phi(\lambda)$ 는 태양빛스펙트르, $b(\lambda, T)$ 는 온도가 T 인 흑체의 복사스펙트르이다.

태양빛선택성 흡수막은 태양빛 흡수비는 최대로 크고 열방출비는 최소로 작아야 한다. 이 두 량은 서로 독립적인 량이므로 이 2개를 결합시켜 평가함수를 다음과 같이 정하였다.

$$F = (1 - \alpha) \cdot \varepsilon \quad (3)$$

F 가 최소로 되는 재료가 적합한 선택성 흡수재료라고 할수 있다.

태양빛파장대역은 $0.3 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 로서 태양에너지의 99% 이상이 이 대역에 있다. 따라서 α 의 적분구간은 이 파장대역이며 우리 나라의 지리적위치에 맞게 태양빛복사스펙트르 $\Phi(\lambda)$ 는 AM1.5에 해당하는 값을 리용하였다.

작업온도는 고온집열기의 작업온도인 400°C 로 정하였다.

매 박막층에서의 빛의 입사, 반사, 투과는 다음의 4단자행렬에 의해 특징지어진다.

$$\begin{pmatrix} \cos(k_i h_i) & j \sin(k_i h_i) / Y_i \\ j Y_i \sin(k_i h_i) & \cos(k_i h_i) \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 $k_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i$, $h_i = d_i \cos \theta_i$, $Y_i = n_i \cos \theta_i = \sqrt{\varepsilon_i} \cos \theta_i$ 이며 n_i , ε_i 는 i 번째 층 박막의 파장이 λ 인 빛에 대한 굴절률과 유전률이며 d_i , θ_i 는 i 번째 층 박막의 두께와 거기에 입사하는 빛의 입사각이다.

선택성 흡수막의 특성을 평가하는데 대체로 빛이 수직으로 입사할 때의 특성값들을 리용하므로 입사각을 0으로 정한다.

기본흡수층들인 HMVF, LMVF층의 유전함수는 막스웰-가니트리론과 브루그맨리론에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$\varepsilon^{\text{MG}} = \varepsilon_B \frac{\varepsilon_A + 2\varepsilon_B + 2f_A(\varepsilon_A - \varepsilon_B)}{\varepsilon_A + 2\varepsilon_B - f_A(\varepsilon_A - \varepsilon_B)} \quad (5)$$

$$f_A \frac{\varepsilon_A - \varepsilon^{\text{BR}}}{\varepsilon_A + 2\varepsilon^{\text{BR}}} + (1 - f_A) \frac{\varepsilon_B - \varepsilon^{\text{BR}}}{\varepsilon_B + 2\varepsilon^{\text{BR}}} = 0 \quad (6)$$

여기서 ε^{MG} , ε^{BR} 는 복합물유전함수의 막스웰-가니트 및 브루그맨근사이며 ε_A , ε_B 는 금속 및 유전체의 유전함수이고 f_A 는 금속체적비이다. 금속체적비가 작을 때에는 막스웰-가니트근사가 잘 맞고 금속체적비가 클 때에는 브루그맨근사가 잘 맞는다.

우리는 HMVF와 LMVF층의 금속체적비를 각각 0.5, 0.2로 정하고 이때 매 층의 두께를 계산하였다.

적외선반사층은 전도도가 큰 동(Cu)으로, 흡수층은 $\text{Mo-Al}_2\text{O}_3$ 으로, 반사방지막은 Al_2O_3

으로 설계하였으며 파장에 따르는 그것의 유전함수값은 편람자료값을 리용하였다.

계산알고리즘은 다음과 같다.

① 구하려는 박막의 두께범위 $(a_i, b_i), i = \overline{1, 4}$ 와 시행수 N , 초기평가함수값 F_0 , 허용오차 ϵ 를 결정한다.

② $(0, 1)$ 사이의 균등분포의 우연수 4개를 발생시켜 $X^k = (X_1^k, X_2^k, X_3^k, X_4^k)$ 를 정하고 그것에 해당하는 평가함수를 구하는데 이 공정을 N 번 반복하여 평균값을 구한다.

③ 계산값을 F_0 과 비교하여 크면 ②로 가고 작으면 그 값을 F_0 에 할당하고 ④로 간다.

④ $|b_i - a_i| < \epsilon, i = \overline{1, 4}$ 이면 계산을 끝내고 그렇지 않으면 X 의 최소값을 새로운 a_i 로, X 의 최대값을 새로운 b_i 로 정한다.

계산결과는 표와 같다.

이 다층박막의 태양빛 흡수비는 $\alpha = 96.0\%$, 열방출비는 $\epsilon = 5.02\%$, 집열효율은 $f = \alpha \times (1 - \epsilon) = 91.2\%$ 이다.

이 계산방법은 다른 선택성 흡수막설계에도 쓰일수 있다.

표. 선택성흡수막설계	
박막층	두께/nm
반사방지막(Al_2O_3)	66.66
LMVF층($\text{Mo-Al}_2\text{O}_3$)	64.93
HMVF층($\text{Mo-Al}_2\text{O}_3$)	65.54
적외선반사층(Cu)	15.6

참 고 문 헌

[1] Q. C. Zhang et al.; J. Appl. Phys., 72, 3013, 1992.

[2] X. Y. Liu et al.; Applied Mechanics and Materials, 260–261, 40, 2012.

주체105(2016)년 2월 5일 원고접수

Design of Solar Selective Absorption Coatings using MC Method

Pak Mun Mu

We discussed new merit function and calculated the thickness of each film at Mo- Al_2O_3 /Cu solar selective coatings by Monte-Carlo method.

For designed multi-films, the solar absorption ability α is 96.0%, thermal emittance ϵ is 5.02% and photo-thermal conversion efficiency is 91.2%.

Key word: solar selective absorption coating