

반응표면분석법을 이용하여 노광기 램프하우스의 냉각조건 수치해석

김영신¹, 전의식^{1*}
¹공주대학교 기계공학

Numerical Analysis for Cooling Condition of a Lamp House in the Exposure Device by Response Surface Methodology

Youngshin Kim¹ and Euysik Jeon^{1*}

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju National University

요 약 노광기의 램프 냉각은 노광성능 및 기기수명에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 노광장치로 유입되는 냉각 공기의 속도를 도출하기 위해 램프하우징 내부의 열유동 해석을 수행하였다. 램프하우징의 냉각성능은 하부와 측면의 냉각 공기 속도에 의해 영향을 받는다. 하부 및 측면의 냉각 공기 속도를 독립변수로 설정하고, 상부 반사경 온도, 타 원경의 온도 및 상부 배출공기의 온도를 종속변수로 설정하였다. 효율적인 냉각 해석을 위해 반응표면분석법에 의해 해석 조건을 설정하였다. 설정된 조건에 따라 해석을 수행하였으며, 수행된 결과를 바탕으로 냉각 공기 속도에 따른 램프 하우스 주요부 온도를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 또한 종속변수를 목표온도까지 냉각하기 위한 냉각 공기의 유입속도를 설정하였다.

Abstract The lamp cooling system of the exposure has effect on the exposure efficiency and device lifetime. In this paper, we performed the numerical analysis about the thermal flow in the lamp housing of the exposure apparatus for the cooling air inflow rate. We set up the velocity of cooling air of side and bottom as the independent variables because cooling performance of the lamp housing is affected by the velocity of the cooling air side and bottom. The cooling state of lamp housing depend on three dependent variables; the temperature at top mirror and exhaust gas, ellipsoidal mirror. Response surface methodology was used in order to establish the efficient cooling analysis plan. The regression equation predicting the variables temperature of lamp housing according to the cooling air velocity were drawn. The velocity of cooling air to reach the optimum temperature of the lamp housing were derived.

Key Words : Cooling system design, Exposure device, Lamp house, Response surface methodology(RSM)

1. 서론

국내 반도체, 디스플레이 및 스마트 기기 산업이 전 세계의 IT업계를 선도함에 따라, 핵심 부품인 PCB(Printed Circuit Board) 및 ITO(Indium Tin Oxide) Glass로 이루어진 Mobile display의 패턴 형성에 대한 많은 연구가 진행 중이다[1,2].

ITO Pattern은 LCD(Liquid Crystal Display) 제조 및

각종 Touch screen cover glass 제조의 핵심 공정이며, 적용제품의 고집적화로 인해 패턴회로에 대한 높은 신뢰도를 요한다[3]. 또한 대량생산 기반 마련을 통해 급증하는 수요에 대응하고 제품 단가를 낮출 수 있는 기술이 요구된다. 최근 이런 요구에 발맞추어 Multi array 노광 및 절단 할 수 있는 노광장비의 개발이 진행 중이다. Mobile display 용도의 제품은 보통 소형으로 다수의 실물 패턴을 배치하고 이것을 한 번에 노광할 때 대량생산이 가능

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

*Corresponding Author : Euysik Jeon (Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9284 email: osjun@kongju.ac.kr

Received February 4, 2014

Revised February 14, 2014

Accepted March 6, 2014

하다. 특히 TSP(Touch Screen Panel)에 사용되는 ITO 패턴은 Mobile display의 호황으로 그 수요가 증가하고 있는 추세이며, Multi array된 제품을 한 번에 노광하여 생산 원가를 줄이는 방법이 개발 중이다[4].

Touch screen cover glass의 노광은 여러 가지 핵심기술을 필요로 하며, 이중 패턴의 고정세화, 고화질화를 위해 높은 파장의 세기와 재현성을 가진 고압 수은 아크(High-pressure Mercury Arc) 램프가 사용된다. 아크 램프를 사용 시 많은 열이 발생하여 램프와 주위가 고온으로 가열된다. 이는 자외선 조도의 유지 및 램프의 수명과 깊은 관련이 있어 램프하우스 내부의 온도 제어가 필수적이다. 작은 영역의 아크 램프 내에서 높은 전기력을 방사선과 열로 변환하기 때문에 적절한 냉각이 이루어지지 않을 경우 수은 램프의 특성상 수명이 단축된다. 또한 반사경의 열팽창에 의해 빛의 산란 및 굴절이 발생하여 제품의 성능저하를 야기한다. 반대로 과도한 냉각은 램프의 전압을 떨어뜨리게 되며, 램프 내의 수은이 부분적으로 응축되고 램프의 빛의 강도가 줄어들게 된다. 그러므로 램프 하우스는 램프가 적절한 효과를 낼 수 있도록 열 교환이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 노광장치의 램프냉각을 위한 냉각공기 유입속도 최적화를 위해 램프하우스 내부의 열 유동 수치해석을 수행하였다. 램프하우스의 냉각성능은 하부와 측면에서 유입되는 공기의 속도에 의해 좌우된다. 냉각에 영향을 미치는 하부의 공기 유입 속도와 측면의 공기 유입속도를 독립변수로 설정하였으며, 상부 반사경(Cold mirror)의 온도, 타원경(Elliptical mirror)의 온도, 상부 배출공기(Outlet) 온도를 종속변수로 설정하였다.

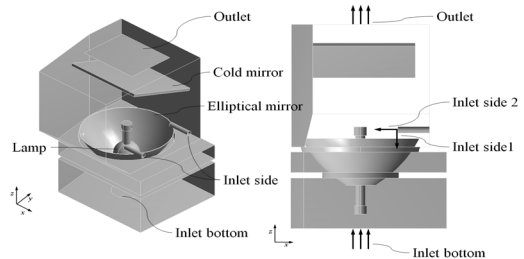
해석의 효율성 향상을 위해 반응표면분석법을 이용하여 해석계획을 수립하였다. 설정된 조건에 의해 총 13번의 해석을 수행하였으며, 수행된 결과를 바탕으로 설계변수에 따른 종속변수를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 또한 이를 바탕으로 종속변수를 목표온도까지 냉각하기 위한 최적의 냉각공기 유입속도를 설정하였다.

2. 반응표면분석법을 이용한 램프하우스 냉각 해석

2.1 램프하우스 모델

노광기 램프 하우스의 냉각은 수은 램프 및 램프 하우스, 반사경 등이 열로 인한 손상을 방지하기 위한 필수적인 기술이다. 램프 하우스의 효율적인 냉각을 위해 냉각 구조를 단순 모델링 후 램프의 발열을 통해 내부 열 유동 해석을 수행하였다.

램프 하우스는 크게 발열체인 램프와 빛을 모아주는 타원경, 자외선을 반사하는 반사경으로 구성된다. 또한 램프의 냉각을 위해 하부와 측면에 각각 냉기 유입구가 있으며 상부에는 내부 공기를 배출하기 위한 배출구가 있다. Fig. 1은 노광장치 시물레이션을 위한 개념도를 나타낸 것이다. 냉각해석은 Ansys의 CFX 열유동 해석프로그램을 이용하였으며, 램프의 중앙은 700℃ 램프의 상·하부는 200℃로 설정하였다. 여러 가지 난류 모델 중 Launder와 Spalding[5]이 제시한 표준 k-ε모델을 사용하였다.



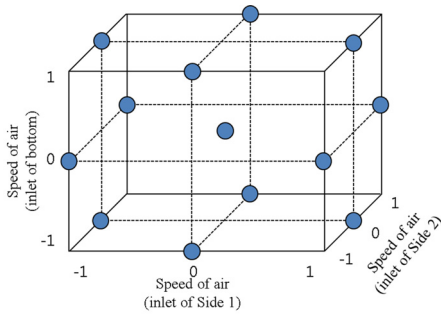
[Fig. 1] Schematic diagram of exposer

2.2 해석조건 설정

램프 하우스 내부의 냉각은 유입되는 공기의 속도에 의해 많은 영향을 받는다. 냉각효율을 높이기 위한 냉각공기의 유입조건을 설계변수로 설정하고 이에 따른 내부 주요부 온도를 반응변수로 설정하였으며, 반응표면분석법 중 Box-Behnken 법에 의해 해석 조건을 설정하였다. 반응표면분석법은 실험 및 해석 데이터에 근거하여 설계변수와 반응변수 관계를 수식화 하고 최적조건을 도출하기 위한 방법이다[6,7]. 설계변수로는 노광기 하부를 통해 유입되는 공기의 속도, 측면 두 곳을 통해 유입되는 공기의 속도로 3가지의 변수를 각 3수준으로 설정하였다. 내부의 반사경 온도, 타원경 온도, 출구온도는 반응변수로 설정하였다. Table 1은 각 설계변수 및 수준을 나타낸 것이며, Fig. 2는 Box-Behnken의 모델을 나타낸 것이다. Table 2는 설계변수에 설정에 따른 해석조건을 나타낸 것이다.

[Table 1] Setting of process parameters

Parameters	Unit	Symbol	Level		
			-1	0	1
Speed of air (Inlet of bottom)	m/s	A	6	8	10
Speed of air (Inlet of side 1)		B	3	4	5
Speed of air (Inlet of side 2)		C	3	4	5



[Fig. 2] Model of Box-Behnken

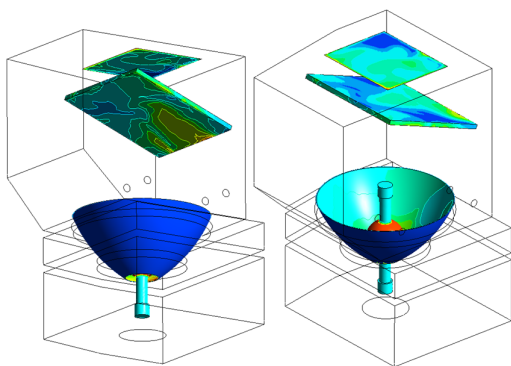
[Table 2] Design matrix for Simulation by Box-Behnken

NO.	A	B	C
1	6	3	4
2	6	4	3
3	6	4	5
4	8	5	4
5	8	3	3
6	8	4	4
7	8	5	3
8	8	5	5
9	8	3	4
10	10	3	4
11	10	4	3
12	10	4	5
13	10	5	4

2.3 해석 결과

설정된 조건에 의해 램프 하우스 내부의 냉각해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 3은 냉각해석 후 타원경, 반사경 및 출구 온도분포를 나타낸 것이며 각 위치의 최대 온도를 확인하여 Table 3에 나타내었다.



[Fig. 3] Temperature distribution of the simulation result

[Table 3] Maximum temperature of the simulation for each conditions

NO.	T _c Temperature of cold mirror(°C)	T _E Temperature of elliptical mirror(°C)	T _O Temperature of outlet (°C)
1	70.995	81.923	57.247
2	68.822	80.267	60.864
3	78.569	84.671	58.451
4	71.599	73.471	51.695
5	68.887	74.711	51.018
6	69.861	72.468	50.178
7	72.048	75.166	48.984
8	65.647	68.243	51.159
9	67.331	70.672	50.706
10	64.287	67.529	49.618
11	62.572	68.212	48.28
12	68.236	70.718	47.837
13	57.474	71.502	48.733

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 결과분석

해석된 결과를 토대로 유입공기의 속도 변화에 따라 반응변수의 예측이 가능한 회귀식을 도출 하고자 하였다. 회귀식은 식 (1)과 같은 형태로 2차 다항식으로 도출 하였으며, 각 항의 유의성을 확인하여 유의성이 낮은 항은 삭제하고 도출 하였다.

$$T_c(A, B, C) = a_0 + a_1A + a_2B + a_3C + a_4A^2 + a_5B^2 + a_6C^2 + a_7AB + a_8AC + a_9BC \quad (1)$$

여기서,

T_x : 반응변수(T_c, T_E, T_O)

a_i : 계수

A : 하부 유입공기(Inlet of bottom) 속도

B : 측면 1 유입공기(Inlet of side 1) 속도

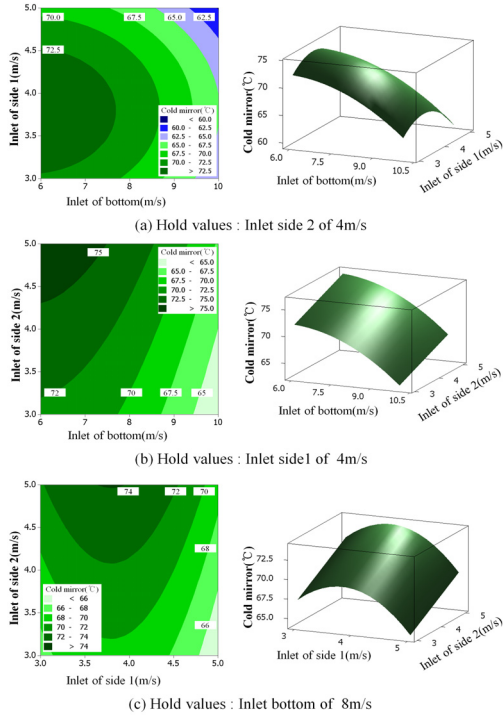
C : 측면 2 유입공기(Inlet of side 2) 속도

3.2 반응회귀식 도출

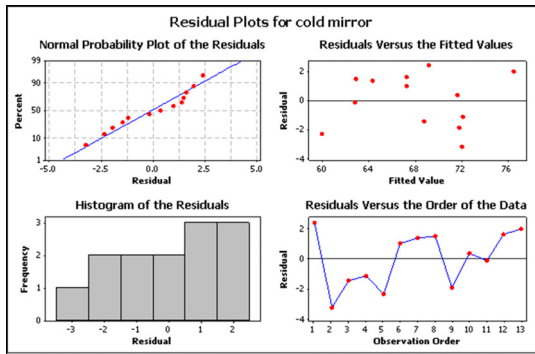
3.2.1 반사경 온도 예측 회귀식

Fig. 4는 설계변수 변화에 따른 반사경의 온도분포를 나타낸 등고선과 표면그래프를 나타낸 것이다. Fig.4(a)는 Inlet of side 2의 속도를 4m/s로 고정하고 Inlet of bottom과 Inlet of side 1의 공기유입 속도 변화에 따른 반사경의 온도 예측값을 나타낸 것이다. Inlet of side 1과 Inlet of bottom 속도에 의한 곡률효과가 발생함을 확인할 수 있

다. Fig. 4(b)는 Inlet of side 1의 속도를 4m/s, Fig. 4(c)는 Inlet of bottom 속도를 8m/s로 고정하였을 경우 반사경의 온도예측 그래프 이다.



[Fig. 4] Temperature distribution of the cold mirror

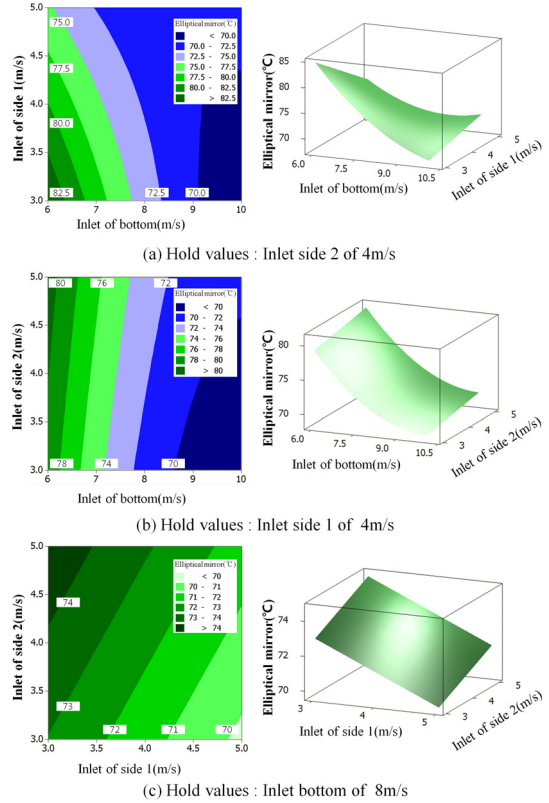


[Fig. 5] Residual plots for cold mirror

설계변수에 따른 반사경의 냉각온도를 예측하기 위해 식(2)와 같이 도출하였다. 기본형태의 회귀식을 도출 후 유의성이 낮은 항은 제거하여 모형을 축소하였으며 회귀식의 수정결정계수는 77.7%이다. 또한 분산분석을 실시하여 회귀식의 타당성을 검증하였다. Fig. 5는 분산분석 후 오차의 잔차도를 나타낸 것이다.

$$T_c = 71.67 - 4.68A - 1.50B + 2.26C - 2.03A^2 - 3.65B^2 \quad (2)$$

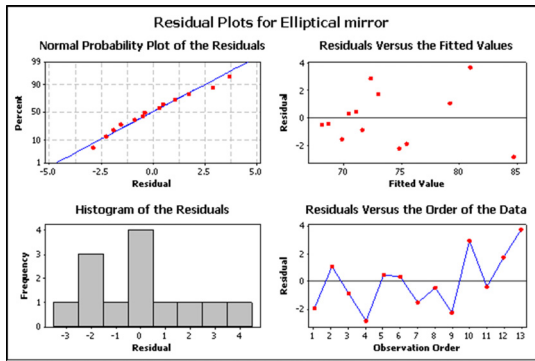
3.2.2 타원경 온도 예측 회귀식



[Fig. 6] Temperature distribution of the elliptical mirror

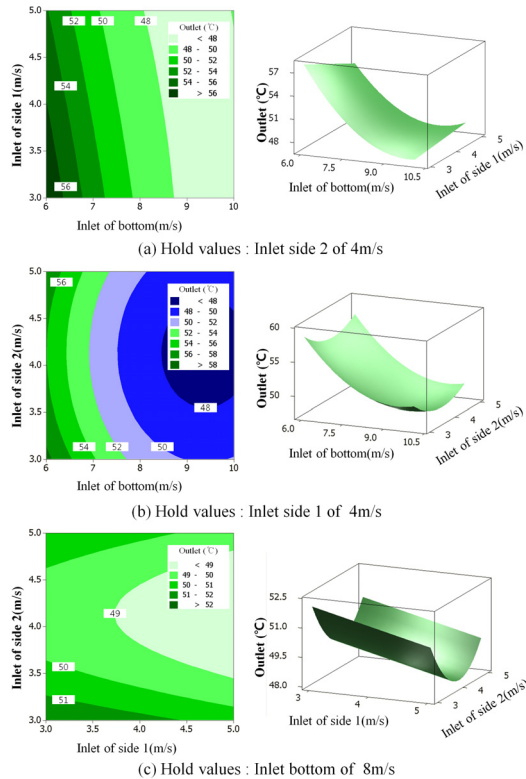
Fig. 6는 설계변수 변화에 따른 타원경의 온도 분포를 나타낸 등고선과 표면그래프이다. Fig. 6(a)는 Inlet of bottom과 Inlet of side 1이 증가할수록 타원경의 온도가 낮아짐을 나타낸다. 또한 Fig. 6(b)는 Inlet of side 2의 영향은 적고 하부의 유속에 의해 타원경의 냉각온도가 달라짐을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 Inlet of side 2의 공기 유입속도가 감소할수록 냉각이 증가하는 특징을 보인다. 설계변수에 따른 타원경의 냉각온도는 식(3)과 같이 도출하였다. 유의성이 낮은 항은 제거하여 모형을 축소하였으며 회귀식의 수정결정계수는 77.3%이다. Fig. 7은 회귀식의 잔차도를 나타낸 것이다.

$$T_E = 72.25 - 5.30A - 0.59B + 0.89C + 2.53A^2 + 3.11AB \quad (3)$$



[Fig. 7] Residual plots for elliptical mirror

3.2.3 출구온도 예측 회귀식

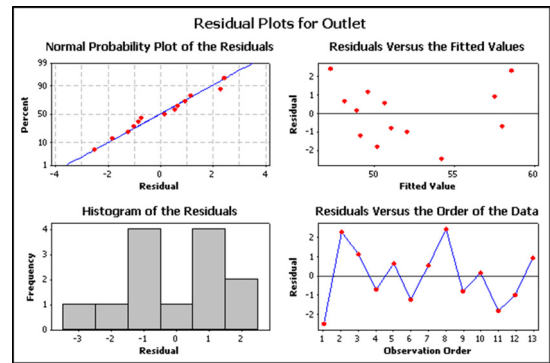


[Fig. 8] Temperature distribution of the Outlet

Fig. 8는 설계변수 변화에 따른 출구의 온도분포를 등고선그래프와 표면그래프를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 Inlet of side 2의 속도를 4m/s로 고정하였을 경우 출구의 온도를 나타낸 것이다. Inlet of bottom의 속도가 증가할 경우 출구온도는 낮아지는 반면 Inlet of side 1에 의한 온도변화는 미미함을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 Inlet of

side 1의 속도를 4m/s로 고정하였을 경우 하부와 Inlet of side 2의 교호작용이 발생함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8(c)는 Inlet of bottom의 속도를 8m/s로 고정하였을 경우의 온도분포이며 이는 Inlet of side 1과 Inlet of side 2 사이에 교호작용이 발생함을 확인하였다. 그래프 분석 결과를 바탕으로 설계변수에 따른 출구의 온도는 식(4)와 같이 도출하였다. 교호작용이 발생하는 항은 회귀식에 포함하여 식을 도출하였으며 이중 유의성이 낮은 항은 오차항으로 제거하여 회귀식을 축소하였다. 회귀식의 수정결정계수는 73.9%이다. 또한 분산분석을 실시하여 회귀식의 타당성을 검증하였다. Fig. 9는 잔차 플롯을 나타낸 것이다.

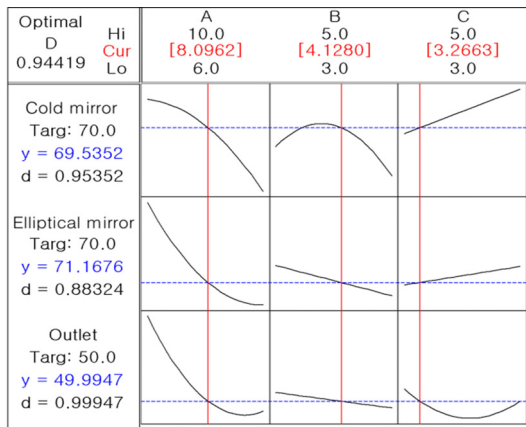
$$T_0 = 48.84 - 4.68A - 0.72B - 0.52C + 3.02A^2 + 1.96C^2 + 1.17AB \quad (4)$$



[Fig. 9] Residual plots for outlet

3.3 최적조건 도출

반사경 70℃, 곡률경 70℃, 출구온도 50℃로 냉각하기 위한 최적 조건을 앞 절에서 도출된 회귀식을 통해 도출하였다. 냉각 최적 조건은 Inlet of bottom 유속은 8.1m/s, Inlet of side 1의 유속은 4.1m/s, Inlet of side 2의 유속은 3.3m/s 으로 설정하여 냉각 해석을 수행할 경우 반사경의 온도는 69.53℃, 타원경의 온도는 71.16℃, 출구온도는 49.99℃로 예측되었다. Fig. 10은 Minitab을 통한 반응변수의 목표 값 달성을 위한 설계변수의 최적조건을 나타낸 것이다. 또한 예측 값의 확인을 위해 도출된 최적 조건을 토대로 냉각 시뮬레이션을 수행하여 Table 4에 나타내었다. 수행결과 예측 값과 해석 값은 2.5%내의 오차를 보였다.



[Fig. 10] Optimization plot

[Table 4] Results of simulation by optimal condition

Parameters	Symbol	Data
Speed of air (inlet of bottom)	A	8.1 m/s
Speed of air (inlet of side 1)	B	4.1 m/s
Speed of air (inlet of side 2)	C	3.3 m/s
Temperature of cold mirror	T_C	71.2 °C
Temperature of elliptical mirror	T_E	71.4 °C
Temperature of outlet	T_O	50.9 °C

4. 결론

본 논문에서는 노광기의 램프하우스의 냉각공기 유입 속도 결정을 위해 열유동 해석을 수행하였다. 램프하우스의 냉각공기는 하부 및 측면 두 곳에서 유입되며 이를 통해 내부의 반사경, 타원경 및 출구부의 온도가 결정된다.

해석의 효율 향상을 위해 유입공기의 속도를 3요인 3수준으로 설정하고 반사경, 타원경, 출구부 각각의 온도를 종속변수로 설정하였다. 설정된 설계변수는 반응표면분석법 중 Box-Behnken법에 의해 해석조건을 설정하였다.

해석결과를 바탕으로 공정변수 변화에 따른 종속변수의 영향도 분석을 위해 등고선그래프 및 표면그래프를 이용하였으며 이를 토대로 설계변수에 따라 종속변수를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 유의성이 낮은 항은 오차항으로 삭제하였으며 분산분석을 통해 회귀식의 타당성을 검증하였다.

또한 종속변수의 목표온도에 도달할 수 있는 설계변수의 최적조건을 도출하였으며 이를 통한 해석결과 예측값과 2.5% 이내의 오차를 보임을 확인하였다.

References

- [1] S. K. Kim, W. Y. Lee, H. S. Kang, "A study on substrate stage temperature", *KSDET*, Vol. 5, No. 4, pp. 35-40, 2006.
- [2] J.H. Ahn, K. T. Kang, K. H. Ahn, "Development and Evaluation of Differential Pressure Type Mass Flow Controller for Semiconductor Fabrication Processing", *KSDET*, Vol. 7, No. 3, pp. 29-34, 2008.
- [3] W. S. Y. Kim, Y. J. Kim., "Numerical analysis on Heat Transfer Characteristics in a Lamp House", *KSME*, pp. 183-188, 2005.
- [4] J. J. Kim1, S. B. Kim, G. S. Ham, H. M. Jo, J. K. Kim, "Improvement of Pattern Uniformity by Controlling Thermal Expansion of Mirror System", *KSPE*, pp. 719-720, 2013.
- [5] D. B. Spalding, B. E. Launder, "The numerical computation of turbulent flows", *CMAME*, Vol. 3, pp. 269-289, 1974
- [6] H. Joardar, N.S. Das, G. Sutradhar, S. Singhc, "Application of response surface methodology for determining cutting force model in turning of LM6/SiCP metal matrix composite", *Measurement*, Vol. 47, pp. 452-464, 2014
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.023>
- [7] J. Kim, E. Jeon, "Optimization of Ingredients for Vacuum Glazing Pillar Using DOE" *KAIS*, Vol. 13, No. 3 pp. 1002-1007, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.1002>

김 영 신(Youngshin Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 2012년 6월 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 공학박사 수료

<관심분야>
진공유리 공정기술, 구조재료공학

전 의 식(Euysic Jeon)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한양대학교 대학원
기계공학과 (공학박사)
- 1989년 4월 ~ 현재 : 공주대학교
기계자동차공학부 교수

<관심분야>

진공유리 공정기술, 구조재료공학, 반도체자동차공학