근적외선 가열 시스템의 냉각 성능에 대한 수치적인 연구

A Computational Study on the Cooling Performance of a Near Infrared Radiative Heating System

유근표(Keun-Pyo Yoo)¹, 한민섭(Minsub Han)^{1*}, 김제덕(Jae-Duck Kim)², 최원택(Won-Taek Choi)²
¹인천대학교 기계시스템공학부, ²얼라이드레이테크놀로지(주)

¹Dept. of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 406-772, Republic of Korea

²Araytech, Incheon 405-310, Republic of Korea

(Received January 16, 2013; revision received March 25, 2013)

Abstract A near infrared (NIR) heating system has advantages over the conventional convection-based systems, in terms of heating uniformity and energy efficiency. When it is over-heated during its operation, the radiation lamp gets blackened, and the life of the radiation module becomes severely limited. The heat transfer system in the module is based on a high operating-temperature, and the radiation makes it difficult to analyze in detail the reliability issue, with an experimental approach alone. We developed a numerical heat-transfer model of the NIR heating system. We applied a ray-tracing method on the radiative heat transport, and a finite volume method on the conductive and convective systems, respectively. The cooling performance of the system is presented, based on the energy and flow distributions in the module. The factors that directly affect the module life are analyzed, such as the surface temperatures of the lamp glass and the reflector, and design improvements are discussed.

Key words Solvent(용매), Coating(코팅), CD(전산수치해석)

* Corresponding author, E-mail: mhan@incheon.ac.kr

기호설명

ρ	: 반사율
n	: 굴절율
k	: 흡광계수
τ	: 투과율
κ	: 흡수계수
s	: 거리(m)
μ	: 점성계수($n \cdot s/m^2$)
C_p	: 정압비열($kJ/kg \cdot K$)

1. 서 론

근적외선(near-infra-red : NIR) 가열 모듈은 파장 영역이 $0.8 \sim 1.5 \mu m$ 에 속하는 전자기파를 열원으로 이용하는 장치를 말한다(Fig. 1). 이것은 건조와 열처리 및 큐어링(curing) 등의 산업 공정에 주로 이용된다. 근적외선은 열대류를 이용한 종래의 가열 방식과는 달리

수용성 매질에 대한 침투성이 우수한 특징을 갖는다. 예로, 보통의 수용성 매질의 건조 시에 기존의 건조방식인 열 대류방식으로는 내부가 필요한도에 도달할 때까지 10~20분간의 긴 시간이 필요하다. 모재는 많은 열을 받고 표면부터 건조되어 굳어지므로 내부에 빠져나가지 못한 용매, 수분 등이 잔류하여 버블현상이 생기며 표면에 많은 응력이 발생한다. 또 내부의 잔류물 질들은 모재와의 완전한 접촉을 방해하여 접착성이 떨어지는 결과를 가져온다. 이에 비해, 근적외선을 이용

Fig. 1 The category of light based on wavelength.

한 가열 시스템은 투과성이 좋은 복사 에너지에 의해 열이 전달되어 전체적인 가열을 균일하게 수행할 수 있는 장점이 있다. 특히 근적외선의 파장에 용매 OH-H₂O 등이 직접 공진하며, 모재가 열을 받는 시간이 매우 짧아 열에 민감한 모재에도 사용이 가능하여 PVC의 파우더 코팅 공정에 적용한 예가 있다.

한편 근적외선 가열 모듈에서는 고에너지의 파가 방출되며 주변의 램프 유리관 및 반사판을 과열시킬 여지가 많다. 특히, 유리관의 표면온도가 지나치게 상승하면 흑화 현상이 발생하며, 흑화가 발생한 유리관 표면에서는 다시 복사열이 집중되어 온도 상승이 가속화하고 램프 파손에 이를 수 있다. 이러한 흑화현상을 방지해야만 근적외선 램프의 수명을 연장시킬 수 있으며 모듈의 작동 신뢰성을 확보할 수 있다. 또 설계에는 반사판의 과열을 막기 위한 냉각 시스템도 함께 고려해야 한다. 이것은 모듈 설계 시에 유리관 및 반사판의 냉각용량을 충분히 확보해야하는 동시에 모듈의 램프 간 온도 불균일도를 최대한 낮추어야 함을 의미한다. 그러나 충분한 설계 자료 확보에 있어, 복사 열 전달 현상과 작동온도 조건의 특성상 램프 표면의 정밀한 표면 온도의 측정이 어려운 점 등의 실험상의 제약이 많다. 이에 따라 수치해석을 통한 열전달 특성의 파악 및 설계 자료 확보의 필요성이 대두된다.

본 연구에서는 근적외선 가열 모듈에서 발생하는 복합 열전달 현상을 해석할 수 있는 모델을 개발하였다. 이 모델은 복사, 대류, 전도 등의 열전달 메커니즘을 포함하며 각 전달 경로들로 배분되는 열량의 분포를 평가할 수 있다. 이 모델을 이용하여 램프 유리관, 냉각 공기, 냉각수 등의 온도 분포를 포함한 모듈 수명 관련 데이터를 얻었다. 또 냉각 공기 및 냉각수의 유로 최적화 및 개선설계를 위한 데이터를 확보하였다.

2. 해석 개요

2.1 열전달 모델 개요

Fig. 2는 근적외선 가열 모듈을 모델링한 것이다. 주요 요소로는 필라멘트와 유리관 및 소켓부를 포함하는 램프 유닛이 있고, 반사면과 워터자켓을 포함한 반사판 유닛이 있으며, 냉각수 및 냉각공기의 배관 등이 있다. 모듈 당 6개의 램프로 구성되어 있다. Fig. 3은 근적외선 가열 모듈의 주요 열전달 경로들을 요약하여 도식화한 것이다. 근적외선 가열의 열원은 램프 유리관의 중심에 위치한 필라멘트에서 발생한다. 필라멘트에서 발생한 열은 유리관에서 반사, 흡수(경로①), 투과 등의 과정을 거친다. 유리관에서 반사한 파는 필라멘트로 재흡수 되고, 유리관을 투과한 파는 반사판에서 반사 또는 흡수되거나(경로②) 스크린(경로③) 또는

Fig. 2 CAD model of a NIR heating module.

(a)

(b)

Fig. 3 Schematic of various heat transfer routes in NIR heating module.

다시 유리관이나 필라멘트로 흡수된다. 램프 유리관에서 흡수된 열은 냉각 공기(경로④)를 통해 빠져 나가고 반사판에서 흡수된 열은 대부분 냉각수(경로⑥)와 냉각 공기(경로⑤)를 통해 빠져 나간다. 이때 유리관의 국소 부위에 열이 적층되어 일정 온도 이상이 될 경우

흑화현상이 발생되고, 흑화는 열의 적층을 또 가속화시켜 램프의 고장으로 이어진다. 그러므로 램프의 표면온도 유지가 근적외선 가열기모듈의 신뢰성에 지대한 영향을 끼친다. 본 연구에서는 근적외선 가열기 모듈에서 발생하는 복사(경로①~③), 전도(경로⑥), 대류(경로④~⑥)를 포함한 복합 열전달 현상을 다음과 같은 방법으로 해석하였다.

먼저, 복사 열전달 과정을 대류 및 전도 과정과 분리하여 광선추적법(ray tracing method)을 사용하여 해석하고 램프에서 발생한 열이 각 구성체에 분배되는 양을 계산하였다. 이 결과를 조건으로 대류 및 전도를 포함한 복합 열전달 현상을 유한체적법(finite volume method)을 바탕으로 해석하였다. 다음 단락에서 세부 해석 과정을 각각 상세히 기술한다.

2.2 복사모델

복사 열전달의 해석은 광선추적법을 바탕으로 수행하였다. 광선추적법은 빛이 운동하는 방향과 크기를 벡터화하여 진행 경로를 흡수될 때까지 추적하는데 그동안 산업적인 광학 시스템의 해석에 많이 적용되어 왔다.⁽¹⁻³⁾

본 연구에서는, 램프 필라멘트의 각각 위치에서 광입자의 묶음이 주어진 에너지와 파장을 갖고 방사되어 여러 경로를 거쳐 최종적으로 흡수되는 과정을 추적하였다. 물질 경계에서의 반사는 프레넬(Fresnel) 반사 방정식을 따른다.

$$\rho = \frac{(n \cos \theta - 1)^2 + (k \cos \theta)^2}{(n \cos \theta + 1)^2 + (k \cos \theta)^2} + \frac{(n - \cos \theta)^2 + k^2}{(n + \cos \theta)^2 + k^2} \quad (1)$$

유리 표면에서의 굴절은 스넬의 법칙을 따른다.

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

유리 내의 흡수 특성은 다음의 관계식을 따른다.

$$\tau = \exp(-\kappa s) \quad (3)$$

또 램프유리관(SiO₂)과 반사판(Al)의 파장별 광학 특성이 고려되었다. 필라멘트와 스크린의 흡수율은 모두 100%로 가정하였으며, 냉각 공기는 비참여 기체로 간주하여 복사에너지 전달 모델에 포함시키지 않았다. 이 과정을 통해 램프 유리관과 반사판에 흡수되는 복사 에너지의 분포를 얻을 수 있었다. Fig. 4는 추적한 광입자 묶음들의 경로를 추적한 예를 보여준다. 상세한 모델링 방법 및 사용한 물성값, 스크린에 얻어지는

Fig. 4 A sample of the traces of the rays. Only a few rays are selected for clarity of view.

광분포 특성 및 파장 별 전달 에너지 분포 등의 결과는 참고 문헌⁽⁴⁾에 기술되어 있다.

본 논문에서는 근적외선 모듈의 냉각 특성 분석을 위한 램프 유리관과 반사판에로의 총 열전달량 측면만을 다룬다. 본 연구의 접근 방법이 기존의 복사 열전달 해석 방법들과 구별되는 점은, 복잡한 기하학적 구조를 가지고 있고 유체의 복사 참여가 적은 복사열전달 시스템의 해석에 적합하다는 사실이다.^(5, 6)

2.3 대류 및 전도 모델

근적외선 가열 모듈은 모듈 당 6개의 램프로 구성되어 있고 더 복잡한 구조의 통합된 냉각수로를 가지게 된다. 그러나 설계 초기에 기본적인 냉각 성능의 평가를 하기 위해서는 전체 모듈에 대한 상세한 해석보다는 모델의 수정이 용이하고 계산비용이 저렴한 부분 모델의 해석이 더 적절하다. 본 연구에서는 먼저 부분 모델 해석을 수행한 이후에 다음 단계로 전체 가열 모듈의 해석을 추가로 수행하여 램프 간 편차 및 통합된 냉각수로의 성능을 평가하였다. 냉각수와 냉각공기에서의 대류는 비압축성 유체에 대한 나비에-스톡스 방정식, 연속 방정식, 에너지 방정식을 만족하고 부력의 영향은 무시하였다.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \dot{q} + k \nabla^2 T \quad (5)$$

반사판에서의 전도는 에너지 방정식을 만족한다. 대류 및 전도에 의한 열전달의 해석은 유한체적법을 바탕으로 한 열유체 상용코드(Fluent : ANSYS V12.1)를 사용하여 수행하였다.

Fig. 5는 램프 1개로 구성된 부분 모듈을 모델링한 결과를 보여 준다. 여기서 반사판이 냉각 공기와 닿는 면의 모델링은 추가적인 주의가 필요하다. 이 반사판 면에서 램프로 부터의 복사 에너지가 흡수되므로 이를 전도 및 대류 해석에서 열원(heat source) 경계 조건으로 주어야 한다. 열원 조건을 주는 동시에 대류와 전도를 연계해서 해석하기 위해, 반사판 면을 포함하는 상대적으로 얇은 부피를 정의하여 이 영역에서 열원이 발생하는 것으로 모델링하였다(Fig. 5). 램프 유리관은 면(surface)으로 모델링하였고 전달되는 복사 에너지의

Fig. 5 Single lamp model for heat transfer analysis.

Fig. 6 The surface temperature of the water jacket with respect to the increase of mesh density.

Table 1 Material properties for convection and conduction

	밀도 (kg/m^3)	비 열 (J/kgK)	열전도계수 (W/mK)
고체	알루미늄	2719	871
	유리	2225	835
			202.4
			1.4

분포는 FLUENT의 profile 기능을 사용하여 주어졌다. 해석 모델의 신뢰성을 확보하기 위해 모델에 사용되는 격자의 수를 조절해가며 해석결과가 어떻게 달라지는지 확인하였다. Fig. 6가 보여주는 것과 같이, 시험적으로 변화시킨 격자수에서 반사판의 냉각수로 면의 온도 값들이 전 범위에 걸쳐 수렴함을 알 수 있다. 이에 따라 해석은 격자의 수가 약 730만개(수로 85만개, 반사판 55만개)로 구성된 모델을 이용하여 수행하였다. 본 연구에서 냉각공기와 냉각수는 k- ϵ 난류모델을 사용하여 계산하였다. 전도 해석에서 사용한 물성치는 Table 1에 정리되어 있다.

3. 결과

3.1 복사 열전달

근적외선 가열 시스템의 정격 램프 조건은 10 A, 380 V이다. 누설 전류를 포함한 여러 전력 손실 요인들이 있으나 이번 연구에서는 더 상세히 정량화하지 않고 램프 필라멘트의 복사 조건을 3025 K의 흑체로 가정하여 계산을 진행하였다. 이는 한 램프의 시간 당 에너지 방사량을 약 3788 W으로 둔 것이다. 램프의 필라멘트에서 발생한 열에너지의 전달을 광선추적법을 통해 계산한 결과, 복사 열전달을 통해 램프 유리관으로 15.0%, 반사판으로 3.0%, 스크린으로 67.9%, 그리고 필라멘트로 다시 들어간 양은 14.1% 으로 각각 얻어졌다. 램프 당 전달되는 총 시간당 에너지량을 Table 2에 정리하였다. 또 반사판, 스크린, 램프 유리관에 복사를 통해 흡수된 에너지의 분포를 Fig. 7, Fig. 8에 각각 제시했다. 반사판에서는 해석 영역의 좌우 끝단에 많은 양의 에너지가 전달됨을 보여준다. 램프 유리관

Table 2 Total power transferred to each location

	열 전달량(W)
유리관	568.5
반사판	113.7
스크린	2573.1

Fig. 7 The heat flux distribution of the reflector.

Fig. 8 The heat flux distribution of the lamp glass.

의 경우에는 수직면이 스크린과 평행한 방향의 위치에서 상대적으로 많은 양의 에너지를 흡수하고 있다. 이 복사 해석 결과를 바탕으로 반사판과 램프에 복사를 통해 발생하는 열을 열원으로 처리하여 다음 단계에서 대류 및 전도해석을 수행하였다.

3.2 램프 유리관

먼저 램프 유리관에서 발생하는 온도 및 유동 분포 특성을 분석하였다. Fig. 9는 램프 유리관의 온도 분포를 계산한 결과를 보여 준다. 램프유리관의 축 방향으로의 표면온도 분포를 각도에 따른 변화를 평균하여 얻었다. 냉각수의 유량은 $0.16 \text{ m}^3/\text{min}$ 으로 고정하였고, 냉각공기량을 변화하였다. 전체적으로 약 50 mm 까지 비선형적으로 온도가 증가하다가 그 뒤에는 선형적인 증가를 보인다. 그러므로 최고 온도 지점은 냉각공기의 출구에 가장 가까운 영역에 위치한다. 냉각공기량에 따른 최고 온도의 변화도 비선형적인 경향을 가지고 있다. Fig. 10는 램프 축 방향의 특정 위치를

Fig. 9 Average temperature of the lamp glass. The volume flow rate of cooling water is $0.16 \text{ m}^3/\text{min}$. The average is over the angle Θ .

Fig. 10 Average temperature of the lamp glass. The volume flow rate of cooling water is $0.16 \text{ m}^3/\text{min}$. The average is over the X coordinate.

중심으로 각도에 따른 온도 분포를 보여 준다. 여기서 냉각공기와 냉각수의 유량은 각각 $20.5 \text{ m}^3/\text{min}$, $0.16 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. 전체적으로 램프가 반사판과 마주보는 영역($\Theta \sim 90^\circ, 360^\circ$)에서 특히 과열되는 것을 볼 수 있다. 이런 경향은 냉각공기 출구로 갈수록 더 심해지고 있다. 이것은 구조상 반사판과 램프 사이의 유동이 램프와 스크린 사이의 유동보다는 적게 형성되어 있기 때문이다. 복사로 인해 유입되는 에너지가 가장 많은 영역($\Theta \sim 90^\circ, 270^\circ$)이 이곳과 대략적으로 일치한다는 점이 또 반영되어 있다.

Fig. 11, Fig. 12는 램프 끝단에서 냉각공기가 출구로 빠져 나가는 영역의 온도 및 유동 분포를 보여 준다. 램프 끝단에서 와류가 발생되지만 램프 유리관과 소켓이 위치한 영역까지는 균일한 유동이 유지되어 냉각에 큰

Fig. 11 The temperature(K) contour near the end of the lamp and the exit of cooling air.

Fig. 12 The velocity(m/s) contour near the end of the lamp and the exit of cooling air.

영향이 없다. 냉각공기의 입출구 덕트에서도 와류가 발생하나 램프에서 멀리 위치하여 냉각에 직접적인 영향은 적다. 이것은 냉각공기 펌프 효율에 직접적인 영향을 주며, 이에 대한 유로 개선의 여지가 남아 있다.

Fig. 13 The maximum temperature of the lamp glass.

다음으로 Fig. 13은 냉각공기와 냉각수량의 변화에 따른 램프 유리관의 최고 온도 분포를 보여 준다. 냉각수량이 램프유리관의 온도에 미치는 영향이 있긴 하지만 전체적으로 미미하다. 반면 냉각공기량은 지배적으로 작용한다. 흑화 온도를 1073.15 K로 예상한다면, 흑화 방지를 위한 최소 냉각 공기량은 약 $41 \text{ m}^3/\text{min}$ 로 추정할 수 있다.

3.3 반사판의 온도 분포

Fig. 14는 냉각공기와 냉각수의 입구 유량에 따른 반사판의 최고 온도를 보여 준다. 반사판(Al)의 녹는 온도는 약 933.57 K로 전체적으로 냉각이 잘 이루어지고 있다. 반사판의 냉각은 냉각수의 영향이 지배적인 반면에 냉각 공기의 영향은 제한적이어서 램프 유리관의 경우와 대견된다. 이것은 램프의 냉각은 냉각 공기, 또 반사판의 냉각은 냉각수로 역할 분담이 잘 되고 있음을 의미한다.

3.4 램프별 편차

다음 단계로 램프 6개를 포함한 전체 모듈의 해석을 수행하였다. 특히 램프 간 냉각 성능의 편차가 클수록 모듈 전체의 수명에 악영향을 끼치므로 이에 대한 분석에 집중하였다. 단일 램프 모델과 전체 모듈 모델과의 가장 큰 차이는 냉각수 워터자켓의 구조에 있다. 냉각수 워터자켓은 통합된 구조를 가지고 있어 한 수로가 여러 램프의 반사판을 냉각시키도록 설계되었다(Fig. 15). 반면 냉각 공기의 통로는 입구에서 분배되고 출구에서 모아져서 나가는 것을 제외하고는 단일 램프 모델과 흡사하다.

Fig. 16은 램프 사이의 최고 온도 편차를 보여 준다. 이것은 냉각공기와 냉각수의 유량을 각각 $48 \text{ m}^3/\text{min}$,

Fig. 14 The maximum temperature of the reflector.

Fig. 15 The modeling of the water jacket of 6-lamp NIR heating module.

Fig. 16 The maximum temperature distribution according to the positions of lamps in the NIR heating module.

0.08 m^3/min 로 주었을 때의 조건이다. 이 조건에서 단일 램프 모델의 램프 유리관과 반사판의 최고 온도는 각각 945.5 K, 325.8 K이다. 전체 모듈 모델의 최고 온도 평균과는 0.5, 13%의 차이가 있다. 이것은 공기의 유동의 차이와 워터 자켓의 구조의 차이 때문이라고 추정된다. 램프의 최고 온도 편차는 최대 4.863 K로 입출구의 냉각공기의 분배가 균일하지 않음으로 인해 편차가 발생한다. 반사판의 최고 온도 편차는 최대 52.68 K로 가장 자리의 램프들(1, 6번)에 해당하는 반사판이 더 열부하에 취약하다. 이것은 가장 가까운 냉각수로가 다른 램프들에 비해 상대적으로 멀리 배치되어 있기 때문으로 판단된다. 램프 별 냉각성능의 편차를 줄이기 위해서는 냉각유로에 대한 개선 설계가 요구되나 본 연구 내용에는 포함하지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 근적외선 가열 모듈의 복합 열전달 해석을 통해 냉각성능을 분석하였다. 이를 위해 단일 램프 모델과 전체 모듈 모델을 각각 개발하였다. 여기에 가열 모듈에서 발생하는 복사, 대류, 전도 열전달을 모델링하고 온도 및 유동 분포를 분석하였다. 모듈의 수명에 직접적인 영향을 끼치는 램프 유리관 및 반사판의 표면온도를 평가하고 이에 대한 개선점을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 근적외선 가열 모듈의 냉각에 있어 램프 유리관은 냉각공기량에, 반사판은 냉각수량에 각각 지배적인 영향을 받는다.
- (2) 모듈을 안정적으로 가동할 수 있는 냉각공기 및 냉각수의 유량 범위를 제시하였다.
- (3) 램프 간 온도 편차는 냉각수 워터자켓과 냉각공기 입출구의 유동 비균일성으로 인해 발생하고 이를 위한 최적 설계가 요구된다.
- (4) 램프 유리관 표면온도의 평가를 통해 흑화현상을 억제하고 모듈 수명을 증가시키기 위한 설계데이터를 확보하였고, 근적외선 가열 모듈에서 발생하는 복합 열전달 해석 기술을 얻음으로써 향후 냉각 시스템의 최적설계를 위한 기반 기술을 확보할 수 있었다.

후 기

이 논문은 인천대학교 2009년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Jung, H. Y., Song, T. H., and Yoo, S. Y., 2008, Optical Analysis and Experimental Method for Design of Radiative Thermal Reflector, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 563-569.
2. Seo, H. K., Kang, N. K., Ryu, Y. S., Kim, S. C., Hahn, K. S., and Choi, J. S., 2003, A theoretical Basis for the Development of LCD Backlight Unit Simulation, Journal of KIISE, Vol. 30, No. 1, pp. 812-814.
3. Park, J. H., Lee, J. H., Jeon, J. H., Nahm, K.-B., and Ko, J.-H., 2007, Optical Simulation Study on the Performances of Collimating films for LCD Backlight Applications, Hankook Kwanghak Hoeji, Vol. 18, No. 6, pp. 432-440.
4. Kim J.-H., Choi, W.-T., and Han, M., 2011, Effect of Radiant Spectral Characteristics on Performance of a

- Near-Infra-Red Heating Module, Journal of Thermal Science, Vol. 20, No. 6, pp. 510-515.
5. Michael, F. M., 2013, Radiative Heat Transfer, Third Edition, Academic Press
 6. Lee, S. H., Shin, D. H., Kim, H. J. Park, S., and Lee, J. S., 2006, Numerical investigation on optical and heat transfer characteristics of a rapid, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, pp. 339-406.