

석영 가열램프의 열 유속 특성 파악을 통한 고온 구조시험의 열 하중 설계에 관한 연구

김 준 혁^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 미사일연구원

A Study on Heat Flux Characteristics of Tubular Quartz Lamp for Thermal Load Design of High Temperature Structural Test

Junhyeok Kim^{*,1)}

¹⁾ Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 11 March 2022 / Revised 1 July 2022 / Accepted 29 July 2022)

Abstract

Development of supersonic flying vehicle is one of the most latest issue in modern military technology. Specifically, structural integrity of supersonic flying vehicle can be verified by high temperature structural test. High temperature structural test is required to consider thermal load caused by aerodynamic heating while applying structural load simultaneously. Tubular quartz lamps are generally used to generate thermal load by emitting infrared radiation. In this study, modified heat flux model of tubular quartz lamp is proposed based on existing model. Parameters of the proposed model are optimized upon measured heat flux in three dimensions. Finally, thermal load of plate specimen is designed by the heat flux model. In conclusion, it is possible to predict heat flux applied on plate specimen and desired thermal load of high temperature structural test can be obtained.

Key Words : Tubular Quartz Lamp(원통형 석영 가열램프), High Temperature Structural Test(고온 구조시험), Heat Flux Characteristics(열 유속 특성), Thermal Load(열 하중)

기 호 설 명

$q(x, y, H)$: 석영 가열램프의 열 유속
 Q_0 : 열 유속 보정 계수
 a : 석영 가열램프와 시편의 최단 거리

d : 석영 가열램프의 임의 위치에서 시편까지의 거리
 H : 시편에서 석영 가열램프 중심까지의 거리
 L : 석영 가열램프의 길이
 θ, ϕ : 석영 가열램프와 시편 사이의 각도
 β, γ : 석영 가열램프의 길이와 시편 위치
 L_{eff} : 석영 가열램프 유효길이
 H_R : 석영 가열램프와 반사판의 거리
 d_s : 반사판에 의한 열 유속 음영 거리

* Corresponding author, E-mail: kjh1219@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

r : 석영 가열램프 필라멘트의 반지름
 e : 반사판의 반사율

1. 서 론

초음속 비행체의 개발에 따라 기체 구조물의 구조적 건전성을 검증하는 단계에서 구조 하중뿐만 아니라 공력가열현상으로 인한 열 하중의 고려가 요구된다^[1]. 따라서 초음속 비행체의 기체 구조물은 구조 하중뿐만 아니라 열 하중을 인가하는 고온 구조시험을 통해 구조적 건전성 혹은 열 방호 성능을 검증할 수 있다^[2,3]. 또한 고온 구조시험의 기법 측면에서 구조 하중을 인가하는 환경에서 요구에 따른 열 하중을 인가하는 방법에 관한 연구가 이루어졌다^[4]. 특히 고온 구조시험의 열 하중을 구현하기 위해 석영 가열램프(적외선 가열램프)를 사용하여 복사열을 인가하는 방법에 관한 연구가 이루어졌다^[4,5]. 복사 가열의 경우 물리적인 접촉 없이 시편을 가열할 수 있어 구조 하중을 인가하는 장비와의 간섭을 최소화하는 장점이 있다. 최근 국내에서 석영 가열램프를 사용하여 시편 온도를 약 1,000 °C까지 신뢰성 있게 가열할 수 있는 장비를 개발하였다^[5]. 따라서 최근까지의 연구를 통해 고온 구조시험 장비의 안정성이 확보되었다고 판단되며, 이러한 장비를 바탕으로 열 하중을 정밀하게 구현하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

고온 구조시험의 열 하중 요구 조건을 구현하기 위한 기존의 접근 방법은 시편의 특정 위치에서 온도를 기준으로 하는 한계점을 가지고 있다^[6]. 극단적인 경우, 특정 위치에서 목표 온도를 구현하더라도 시편 전반에 걸쳐 열 하중이 적절하게 인가되지 않는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 시편 전반에 인가되는 열 유속을 고려하여 열 하중을 구현하는 연구에 대한 필요성이 제안되었다. 반면, 국외에서는 석영 가열램프의 열 유속 특성을 분석하고 고온 구조시험에 적용하는 연구가 이루어졌다^[6]. 따라서 국내에서 개발된 장비 또한 이러한 연구 결과와 유사한 열 유속 특성을 나타낼 것으로 예상할 수 있다. 그러나 국내에서 구축된 장비는 국외의 연구 결과와 같은 제원의 석영 가열램프를 사용하지 않으며, 석영 가열램프를 고정하는 세라믹 클립 등 세부적인 부품의 국산화가 이루어지면서 열 유속 모델의 개선과 시험을 통한 보정이 요구된다. 또한 국외의 연구 결과는 석영 가열램프의 최종적인 배

열에 따라 시편에 인가되는 열 유속의 예측에 관한 내용이 명확하지 않은 한계를 보인다. 따라서 단일 석영 가열램프의 열 유속 모델을 바탕으로 시편에 인가되는 열 하중을 설계하는 연구의 필요성이 제안되었다.

본 논문에서는 석영 가열램프의 열 유속 특성 파악을 통한 고온 구조시험의 열 하중 설계에 관한 연구를 다루었다. 이를 위해 석영 가열램프에 관한 기존 연구를 바탕으로 개선된 열 유속 모델을 제안하였다. 이후 시험을 통해 열 유속 모델의 변수를 선정하고 제안한 열 유속 모델이 석영 가열램프의 열 유속 특성을 적절하게 나타낼 수 있음을 검증하였다. 최종적으로 수립한 석영 가열램프의 열 유속 모델을 바탕으로 평판형 시편에 인가되는 고온 구조시험의 열 하중을 설계하였다.

2. 석영 가열램프의 열 유속 특성

2.1 석영 가열램프 열 유속 해석

석영 가열램프의 열 유속에 대한 기하학적인 접근 개념은 Fig. 1과 같다. 열 유속이 도달하는 영역에 비해 필라멘트의 지름이 상대적으로 작다고 가정하여 지름이 존재하지 않는 선으로 가정하였다. 또한 석영 가열램프를 고정하는 세라믹 클립에 의해 발생하는 음영과 석영 관(Quartz envelope)에 의한 굴절과 같은 영향을 무시할 수 있다고 가정하였다.

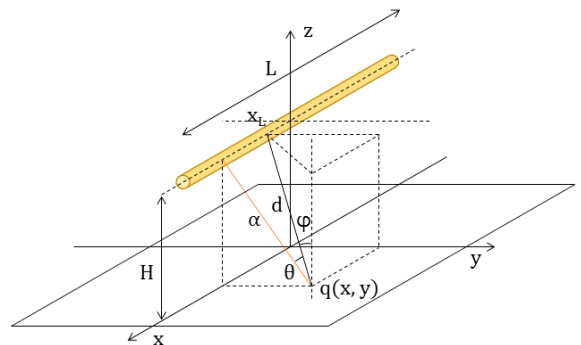


Fig. 1. Geometrical scheme of a single quartz lamp heat flux

시편과 석영 가열램프가 평행하고, 시편에서 석영 가열램프의 중심까지의 거리가 H만큼 떨어져 있을 때, 석영 가열램프의 중심을 기준으로 석영 가열램프

의 방향과 일치하는 좌표계를 선정하였다. 따라서 석영 가열램프를 기준으로 상대 좌표 x, y 에 따른 열 유속을 $q(x, y)$ 로 정의 할 수 있다.

석영 가열램프에서 발생하는 열 유속은 전체 길이 L 에서 균일하게 발생한다고 가정하였다. 따라서 균일하게 나누어진 열 유속은 석영 가열램프의 임의 위치 (x_L)에서 발생하여 시편에 도달한다고 계산할 수 있다. 또한 석영 가열램프의 임의 위치에서 발생하는 열 유속은 시편과의 상대 거리(d), 석영 가열램프와 수직 한 면과 석영 가열램프의 임의 위치에서 시편까지의 벡터가 이루는 각도(θ), 석영 가열램프의 임의 위치에서 시편까지의 벡터가 시편과 이루는 각도(ϕ)로 계산할 수 있다.

석영 가열램프의 모든 위치에서 발생하는 열 유속을 합하였을 때의 열 유속은 식 (1)과 같이 열 보정 계수(Q_0)를 적용하여 계산할 수 있다. 이때, 열 보정 계수를 제외하고 기존의 연구에서 제안된 석영 가열램프의 열 유속 모델^[6]의 계산 방식을 적용하였다.

$$q(x, y) = Q_0 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{1}{d^2} \cos\phi \cos\psi dx_L \quad (1)$$

석영 가열램프와 시편의 최단 거리(α)는 Fig. 1를 바탕으로 기하학적으로 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 같은 방법으로, 석영 가열램프의 임의 위치에서 시편까지의 거리(d)는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\alpha = \sqrt{y^2 + H^2} \quad (2)$$

$$d = \sqrt{(x - x_L)^2 + \alpha^2} \quad (3)$$

석영 가열램프와 시편이 이루는 각도에 대한 삼각 함수 값은 Fig. 1을 바탕으로 기하학적으로 식 (4) 및 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos\theta = \frac{\alpha}{d} \quad (4)$$

$$\cos\phi = \frac{H}{d} \quad (5)$$

최종적으로 Fig. 1을 바탕으로 기하학적으로 수립한 결과인 식 (2)부터 식 (5)까지를 식 (1)에 대입할 수

있다. 따라서 시편에서 석영 가열램프의 중심까지의 거리 H 에 대하여 시편의 특정 위치에 도달하는 열 유속은 식 (6)과 같이 정의 할 수 있다. 이때, Fig. 1을 바탕으로

$$q(x, y, H) = Q_0 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\alpha H}{\{(x - x_L)^2 + \alpha^2\}^2} dx_L \quad (6)$$

최종적으로 식 (6)을 정적분 하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 편의를 위해 정의한 β 와 γ 는 기존의 연구에서 제안된 열 유속 모델^[6]을 참고하여 식 (8) 및 식 (9)와 같이 정의하였다.

$$q(x, y, H) = \frac{Q_0 H}{2\alpha} \left\{ \frac{\beta}{\beta^2 + \alpha^2} - \frac{\gamma}{\gamma^2 + \alpha^2} + \frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) - \frac{1}{\alpha} \tan^{-1} \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right) \right\} \quad (7)$$

$$\beta = x + \frac{L}{2} \quad (8)$$

$$\gamma = x - \frac{L}{2} \quad (9)$$

열 유속 계산 결과는 기존의 연구들과 유사함을 확인할 수 있다^[5,6]. 그러나 열 보정 계수를 적용하면서 기존의 연구와 계수의 차이가 발생하였다. 이는 최종적으로 실험을 통해 보정되기 때문에 유효한 차이를 가지지 않는다고 판단하였다. 또한 앞서 석영 가열램프의 모든 영역에서 균일하게 열 유속이 발생할 것으로 가정하였으나 실제로 석영 가열램프의 양 끝단에서는 클립의 영향 등으로 인해 오차가 존재한다. 따라서 시험을 통한 보정에는 석영 가열램프의 유효길이 (L_{eff})를 적용하여 변수를 최적화하였다.

기존 연구에 따르면 열 유속 모델에 반사판을 적용하면 최종적인 열 유속은 식 (10)과 같다^[5].

$$q_{total}(x, y, H) = q(x, y, H) + eq_{ref}(x, y, H + 2H_R) \quad (10)$$

평판 형상의 반사판이 석영 가열램프로부터 H_R 의 거리를 가지고 평행하게 위치할 때 가상의 석영 가열램프는 반사판 방향으로 H_R 의 거리에 위치한다. 또한 이때 반사판에 의한 가상의 석영 가열램프로부터 발생하는 열 유속은 반사율(ϵ)만큼 감소한다.

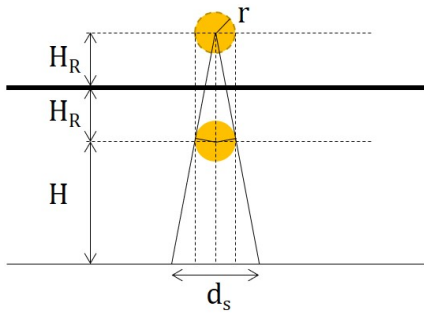


Fig. 2. Single quartz lamp with reflector imaginary source and shadowed area

석영 가열램프에서 직접 시편에 도달하는 열 유속과 달리 반사판에 의한 열 유속은 필라멘트에 의해 시편에 복사열이 도달하지 않는 구간이 발생한다. 복사열이 도달하지 않는 구간은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. 가상의 석영 가열램프는 이상적으로 지름이 존재하지 않는 선으로 가정하였다. 따라서 열 유속은 필라멘트의 중심에서 발생하는 것으로 가정하였다. 또한 석영 관에 의한 굴절 및 반사 또한 열 유속 모델의 복잡도를 크게 상승시키는 반면 열 유속 값을 크게 변화시키지 않는 것으로 판단하였다.

반사판에 의해 시편에 도달하는 열 유속이 도달하지 않는 구간은 Fig. 2를 바탕으로 기하학적으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 반사판의 영향은 식 (12)와 같은 조건문을 적용할 수 있다. 반사판의 영향이 도달하는 영역은 반사율이 0보다 크며 1보다 작은 값을 가지며, 음영 구역은 반사율을 0으로 선정하였다.

$$d_s = 2(H + 2H_R) \tan\left(\sin^{-1}\left(\frac{r}{2H_R}\right)\right) \quad (11)$$

$$\begin{cases} e < 1 & \text{if } x > \frac{d_s}{2} \\ e = 0 & \text{if } x < \frac{d_s}{2} \end{cases} \quad (12)$$

결론적으로 단일 석영 가열램프에 대한 열 유속 모델이 수립되면 반사판이 존재할 때의 석영 가열램프의 열 유속 모델은 반사율의 선정만이 요구된다.

2.2 석영 가열램프 열 유속 계측 시험 설계

단일 석영 가열램프의 열 유속 특성을 파악하기 위

해 설계한 시험 장비의 개념은 Fig. 3과 같다. 기존 연구에서 석영 가열램프의 열 유속 특성을 파악하기 위한 시험 장비^[4]와 유사한 개념으로 설계하였다. 석영 가열램프가 설치된 구조물은 상하로 이동할 수 있으며 열 유속 센서가 설치된 구조물은 x축 및 y축 평면에서 이동할 수 있다. 석영 가열램프를 설치하는 구조물은 발생한 복사열이 구조물에 반사되는 영향을 최소화하는 형상으로 설계되었다. 시험 방법 또한 기존의 연구 방법과 유사하게 수행하였다. 그러나 적용된 장비의 특성을 반영하여 수정하여 적용하였다.

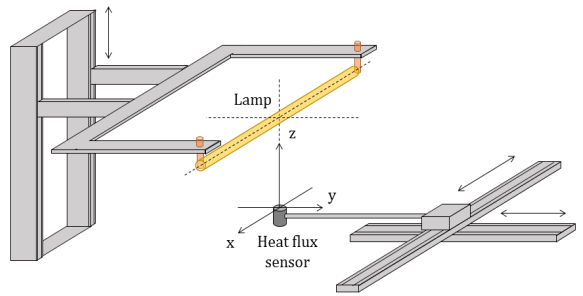


Fig. 3. Concept design of a single quartz lamp heat flux characteristic test

석영 가열램프는 PCS 사의 BAP-6M-2600-0686-U 모델을 사용하였다. 석영 가열램프의 필라멘트 지름은 3 mm이며 발광 영역의 길이는 248 mm이다. 정격전압 (Rated voltage)은 480 V이며 최대 소비전력은 6,000 W이다. 금속 클립이 적용된 모델을 사용하였다. 석영 가열램프의 전력 공급을 위한 SCR은 Research Inc. 사의 model 3629C를 사용하였다. 열 유속 센서는 MEDTHERM 사의 64-100-80(MgO)-19K 모델을 사용하였다. 또한 일정한 초기 조건을 구현하기 위해 시험 중 냉각수의 온도는 약 23 °C로 유지하였으며 유량은 0.8 L/s에서 0.9 L/s 수준으로 유지하였다. OMEGA 사의 유량 센서 FLR1012-D와 온도 센서 PR-20-2-100-1/8-2를 사용하였다. 데이터 획득을 위해 Vishay-Micro Measurement 사의 System7000을 사용하였다. 최종적인 시험 장비의 모습은 Fig. 4와 같다.

앞서 해석적으로 얻은 열 유속 모델인 식 (7)을 바탕으로 고려하였을 때, 석영 가열램프의 열 유속은 석영 가열램프의 중심을 기준으로 점대칭이다. 이를 통해 중복되는 시험을 제외할 수 있으며 그 결과 시험 영역 선정 개념은 Fig. 5와 같다.

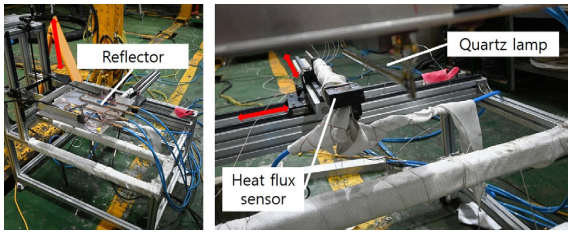


Fig. 4. Test equipment setting to measure heat flux characteristic of a single quartz lamp with reflector

마지막으로 시험을 통해 계측된 열 유속은 모델과 시험 결과의 차이를 최소자승법(Least Square Method)으로 오차를 선정하고 변수의 범위 내에서 전역 최적화를 수행하였다. 전역 최적화는 MATLAB의 Global optimization toolbox를 사용하였다.

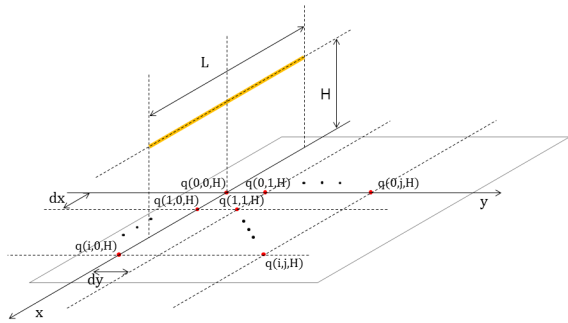


Fig. 5. Heat flux measuring position scheme

2.3 석영 가열램프 열 유속 계측 시험 결과

단일 석영 가열램프의 열 유속 계측 시험 결과와 이를 바탕으로 열 유속 모델의 변수를 선정한 결과는 Fig. 6에서부터 Fig. 8까지와 같다. 열 유속 센서와 석영 가열램프의 z축 거리는 일반적인 석영 가열램프와 시편의 거리를 반영하여 50 mm, 75 mm, 100 mm로 선정하였다. 또한 x축과 y축은 50 mm 단위로 계측하였다. 이때 반사판이 존재하지 않는 단일 석영 가열램프의 열 유속 모델의 유효길이(L_{eff})는 234.5 mm로 선정되었으며, 열 유속 보정 계수(Q_0)는 715 W로 선정되었다.

석영 가열램프의 높이가 50 mm, x축 값이 100 mm, y축 값이 0 mm의 시험 결과를 제외하고 Fig. 6에서 전반적으로 시험 결과와 수립한 열 유속 모델이 일치한다. 시험 결과와 열 유속 모델이 일치하는 경우, 최대 오차는 약 0.18 W/cm^2 수준이며 평균적으로 0.04

W/cm^2 수준의 차이를 보인다. 그러나 모델과 일치하지 않는 하나의 시험 결과는 계측 결과와 약 0.94 W/cm^2 수준의 차이를 보인다. 따라서 이는 좌표계의 혼동 등 시험자의 오류로 인해 계측이 적절하게 수행되지 않았다고 판단된다. 따라서 해당 시험 결과는 열 유속 모델 구현에 반영하지 않았다. 반면 Fig. 7와 Fig. 8에서는 선정된 유효길이와 열 유속 보정 계수를 적용하였을 때 특별한 오차 없이 전반적으로 계측 시험 결과가 열 유속 모델과 일치함을 확인할 수 있다.

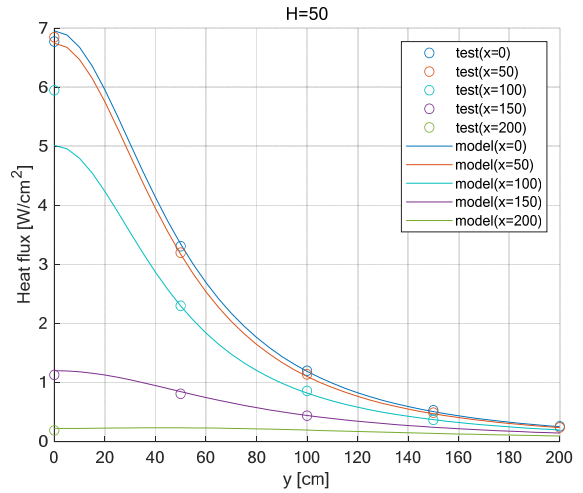


Fig. 6. Heat flux results of a single quartz lamp without reflector(H = 50)

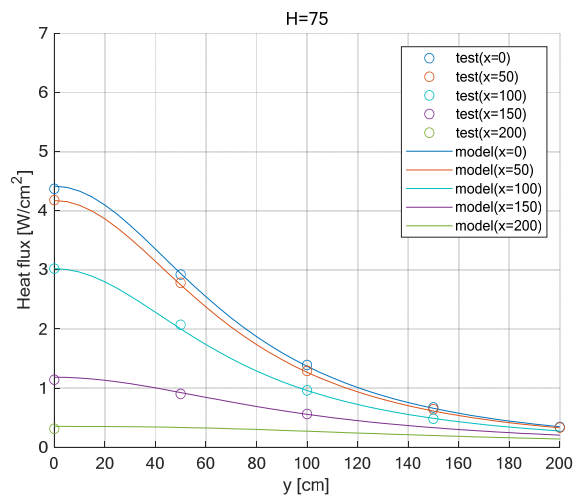


Fig. 7. Heat flux results of a single quartz lamp without reflector(H = 75)

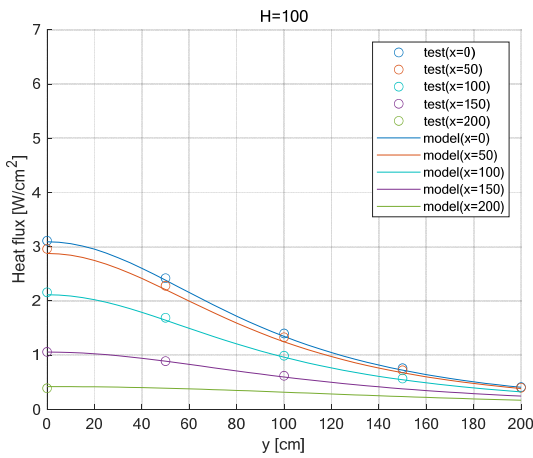


Fig. 8. Heat flux results of a single quartz lamp without reflector(H = 100)

최종적으로 시편과 석영 가열램프의 거리가 75 mm 인 경우의 열 유속 모델은 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 가로축과 세로축은 앞서 수립한 석영 가열램프의 중심을 기준으로 하는 시편의 x축과 y축이며, 색상은 열 유속의 수준을 나타낸다.

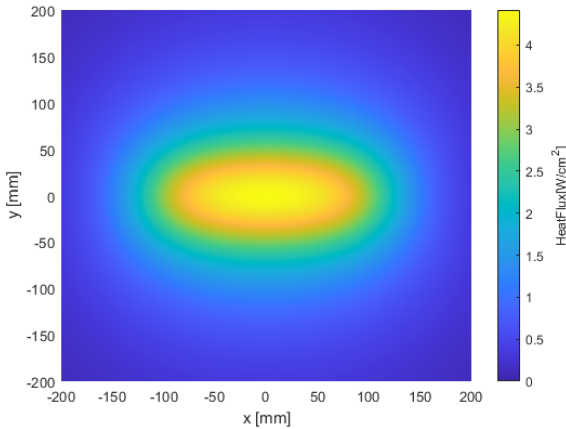


Fig. 9. Heat flux model of a single quartz lamp without reflector(H = 75)

2.4 반사판 석영 가열램프 열 유속 계측 시험 결과 반사판을 석영 가열램프의 중심으로부터 50 mm 거리(H_R)에 설치하였다. 반사판을 적용되었을 때, 단일 석영 가열램프의 열 유속 계측 시험 결과와 이를 바탕으로 열 유속 모델의 변수를 선정할 결과는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 열 유속 센서와 석영 가열램프의 z

축 거리는 50 mm와 75 mm로 선정하였다. x축과 y축 또한 단일 석영 가열램프 시험과 유사하나 추가로 y축 25 mm에서 계측을 수행하였다. 열 유속 모델의 유효길이와 열 유속 보정 계수는 단일 석영 가열램프의 열 유속 계측 시험 결과를 적용하였으며 수립된 반사율(c)은 0.849이다. 석영 가열램프의 필라멘트에 의한 음영으로 인해 Fig. 10과 Fig. 11에서 y축 값이 0일 때 일관적으로 열 유속이 감소하는 현상이 발생한다. 따라서 석영 가열램프의 필라멘트에 의한 음영 구역을 포함하여 수립한 열 유속 모델이 시험 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

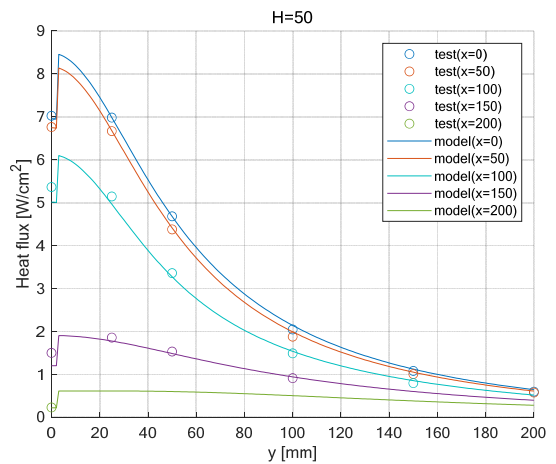


Fig. 10. Heat flux test results of a single quartz lamp with reflector(H = 50, H_R = 50)

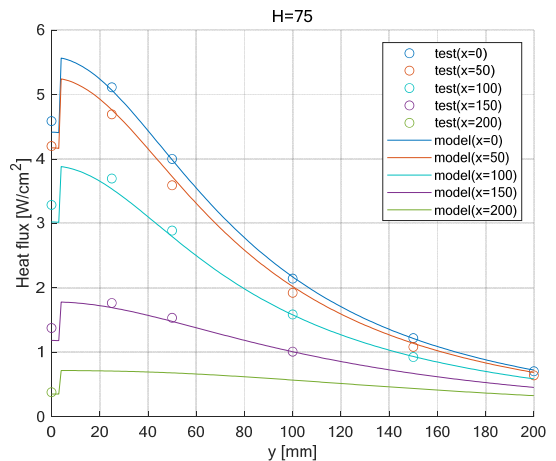


Fig. 11. Heat flux test results of a single quartz lamp with reflector(H = 75, H_R = 50)

최종적으로 시편과 석영 가열램프의 거리가 75 mm 인 경우의 열 유속 모델은 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다. 가로축과 세로축은 앞서 수립한 석영 가열램프의 중심을 기준으로 하는 시편의 x축과 y축이며, 색상은 열 유속의 수준을 나타낸다. 필라멘트에 의한 음영 구역을 확인할 수 있다.

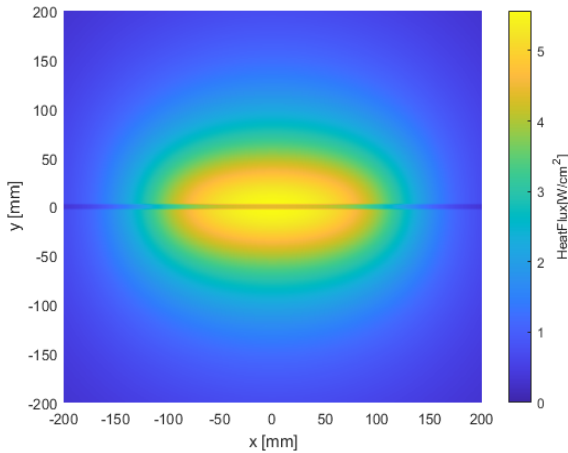


Fig. 12. Heat flux model of a single quartz lamp with reflector($H = 75$, $H_R = 50$)

3. 고온 구조시험 열 하중 설계

석영 가열램프의 열 유속 특성의 분석을 바탕으로 평판 형상의 구조물의 고온 구조시험 열 하중을 구현하였다. 평판 형상의 구조물의 고온 구조시험은 반사판 또한 평판형을 사용한다. 따라서 앞서 분석한 석영 가열램프의 특성을 적용할 수 있다고 판단하였다. 최종적으로 수직 방향 배열과 수평 방향 배열의 석영 가열램프 배치를 통해 시편에 인가되는 열 하중을 설계하고자 하였다.

구조 하중에 의해 시편의 변형을 고려하여 석영 가열램프와 시편의 높이는 90 mm로 선정하였다. 또한 반사판과 석영 가열램프의 거리는 43 mm로 선정하였다. 석영 가열램프의 수량은 국내의 고온 구조시험에 관한 연구를 적용하여 시편의 온도 상승률과 시편의 중량을 기준으로 33개로 선정하였다^[7,8]. 시편에 인가되는 구조 하중 치구와 간섭을 고려하여 석영 가열램프를 배치하였다. 시편의 양 면에 같은 석영 가열램프와 반사판을 설치하여 가열하였으며 열 유속의 분석

은 한 면에 대해서 한쪽의 석영 가열램프만 영향을 미치는 것으로 가정하였다. 이는 시편이 존재하는 면에서는 한쪽 면의 석영 가열램프가 반대쪽 면의 반사판에 도달할 수 없으며, 시편이 존재하지 않는 면에서는 충분한 거리가 확보되며 두 번 이상의 반사로 인해 열 유속이 감소 될 것으로 판단하였다. 또한 이러한 설계 방법은 열 유속을 보수적으로 예측하기 때문에 열 하중을 안정적으로 구현할 수 있다.

시편의 표면을 x축과 y축으로 충분히 작은 간격으로 나눈 뒤 각 위치에서 모든 석영 가열램프와의 상대적인 거리와 각도를 계산하여 열 유속을 계산하였다. 이때 반사판의 음영 구간은 해당 석영 가열램프에서만 고려하였다. 또한 반사판의 크기는 시편과 비교하여 충분히 확보되어 반사되는 복사열의 제약이 없다고 가정하였다. 석영 가열램프의 중심으로부터 상대적인 시편의 위치를 x_i 와 y_i 로 나타내고 단일 석영 가열램프의 열 유속 모델을 $q_{total,i}$ 라고 했을 때, 모든 석영 가열램프로부터 도달하는 열 유속은 식 (13)과 같다.

$$q(x,y) = \sum_{i=1}^{33} q_{total,i}(x_i, y_i, H) \quad (13)$$

각각의 석영 가열램프에서 발생하는 열 유속은 독립적으로 중첩된다고 가정하였다^[5]. 이는 다중 석영 가열램프의 열 유속을 계산하는 가장 단순한 방법으로, 기존의 연구를 바탕으로 오차가 과도하게 발생하지 않음을 확인할 수 있다^[5,6]. 따라서 시편에 인가되는 열 하중의 형상은 적절한 수준으로 예측할 수 있다고 판단하였다.

가열램프의 수직 방향 배열 설계 결과는 Fig. 13과 같으며 수평 방향 배열 설계 결과는 Fig. 14와 같다.

석영 가열램프의 두 가지 배열 설계에 대한 열 유속 분석 결과는 Fig. 15 및 Fig. 16과 같다. 석영 가열램프 배열 방향에 따른 반사판의 음영 구역을 확인할 수 있다. 수직 방향 배열 설계의 경우 시편의 한 면에 조사되는 최대 열 유속은 약 34 W/cm² 수준이며 평균적으로 약 28 W/cm² 수준으로 예측되었다. 그러나 시편의 y축 중앙 부근에서 열 유속이 고르지 않게 발생하는 현상을 확인할 수 있다. 수평 방향 배열 설계의 경우 시편의 한 면에 조사되는 최대 열 유속은 31 W/cm² 수준이며 평균적으로 약 28 W/cm² 수준으로 예측된다. 시편 전체적으로 열 유속이 고르게 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

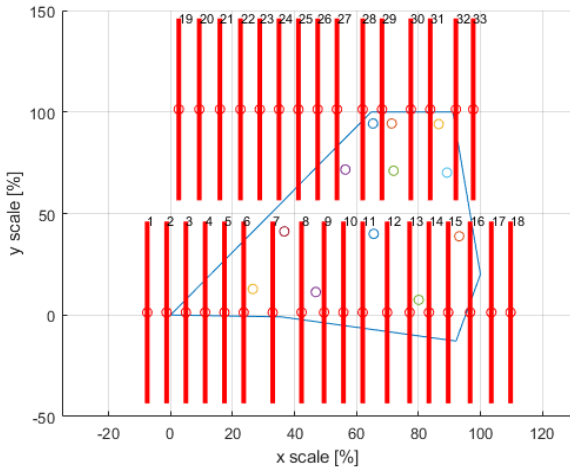


Fig. 13. Quartz lamps design in vertical direction for high temperature structural test

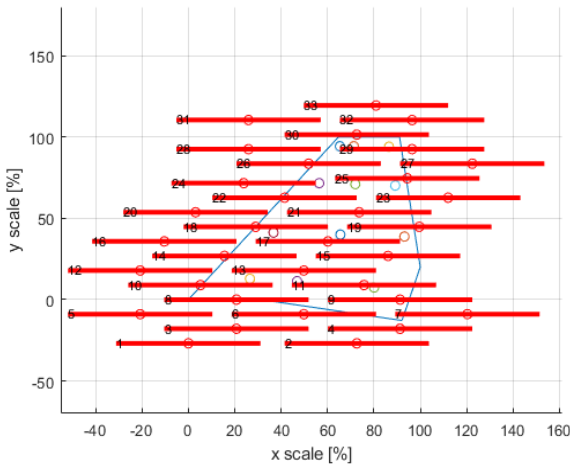


Fig. 14. Quartz lamps design in horizontal direction for high temperature structural test

석영 가열램프를 수직 방향으로 설계했을 때, 구조 하중 치구와 석영 가열램프의 물리적인 간섭이 발생할 가능성이 작다. 또한 배열이 규칙적이고 반사판 전체 크기가 작아서 상대적으로 경제적인 반사판을 제작할 수 있다. 그러나 시편에 인가되는 열 유속이 고르지 않은 명확한 한계를 가지고 있다. 반면 석영 가열램프를 수평 방향으로 설계했을 때, 구조 하중 치구와 석영 가열램프의 물리적인 간섭이 발생할 가능성이 존재한다. 또한 석영 가열램프의 배열이 규칙적이지 않고 반사판 전체 크기가 크므로 반사판 설계 및

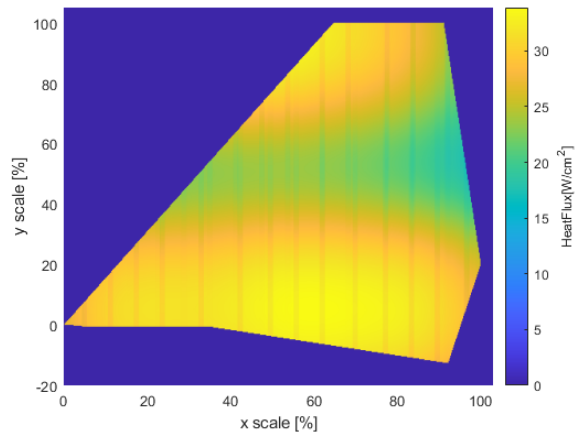


Fig. 15. Heat flux expectation of high temperature structural test for plate specimen using quartz lamp in vertical direction

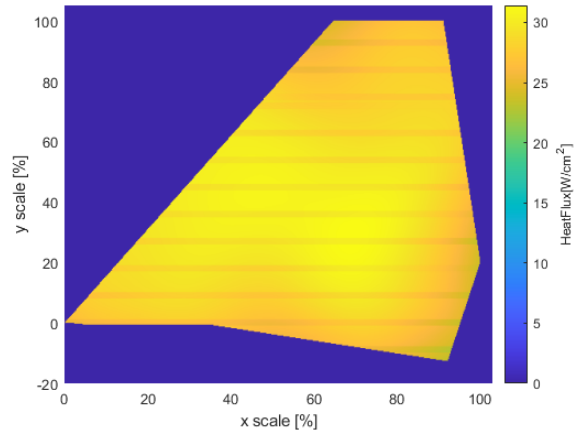


Fig. 16. Heat flux expectation of high temperature structural test for plate specimen quartz lamp in horizontal direction

제작이 복잡한 한계를 가지고 있다. 그러나 열 유속이 시편에 고르게 분포되는 장점이 있다. 최종적으로 석영 가열램프의 열 유속 분석을 통해 열 하중 설계를 수행할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 석영 가열램프의 열 유속의 특성을 분석하여 고온 구조시험의 열 하중 구현에 적용하는

내용을 다루었다. 이를 위해서 첫 번째로 석영 가열램프의 열 유속 모델을 수립하였다. 기존 연구를 바탕으로 석영 가열램프의 기초적인 열 유속 모델을 수립하였다. 이후 장비의 특성을 고려하여 시험 결과와의 유사성을 확보하기 위해 열 유속 보정 계수와 유효길이를 적용하였으며, 반사판을 사용할 때 복사열이 도달하지 못하는 음영 구역을 선정하였다. 두 번째로 시험을 통해 석영 가열램프의 열 유속을 계측하여 앞서 수립한 열 유속 모델의 변수를 선정하였다. 반사판을 사용하지 않는 단일 석영 가열램프의 시험을 통해 열 유속 보정 계수와 유효길이를 선정하였으며, 반사판을 사용하는 단일 석영 가열램프의 시험을 통해 반사판의 반사율을 선정하였다. 이를 통해 시험 결과를 적절한 수준으로 모사하는 열 유속 모델을 구현하였다. 세 번째로 단일 석영 가열램프의 열 유속 모델을 적용하여 평판형 시편의 고온 구조시험의 열 하중의 구현에 적용하였다. 석영 가열램프의 배치에 따라 시편의 특정 위치에서 단일 석영 가열램프의 열 유속 모델을 중첩하여 인가되는 열 유속을 예상할 수 있었다. 이를 통해 고온 구조시험의 열 하중 구현 측면에서 시편 온도뿐만 아니라 시편에 인가되는 열 유속에 대한 정보를 확보할 수 있었다. 결론적으로 본 논문에서 제시한 석영 가열램프의 열 유속 모델을 바탕으로 고온 구조시험의 열 하중을 적절하게 구현할 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 열 하중 설계에 따라 실제로 평판 형상의 구조물에 인가되는 열 하중을 계측한 뒤, 예측값의 보정이 이루어지지 못한 한계점을 가지고 있다. 따라서 단순 중첩이 아닌 다수의 석영 가열램프를 사용하였을 때의 열 유속 모델 수립에 관한 후속 연구가 이루어져야 할 것이다. 그러나 본 논문에서 제안된 단일 석영 가열램프의 열 유속 모델과, 이를 중첩하는 방법은 상대적으로 단순한 연산을 통해 시편에 인가되는 열 하중의 형상을 파악할 수 있다. 따라서 신속하게 열 하중 설계를 수행하고 고온 구조시험에 적용하여 초음속 비행체 개발의 구조적 건전성 검증에 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] E. A. Thornton, "Aerospace Thermal-Structural Testing Technology," American Society of Mechanical Engineers, Appl. Mech. Rev., Vol. 50, No. 9, pp. 477-498. 1997.
- [2] V. T. Le, N. Goo, J. Kim, "Thermomechanical Behavior of Superalloy Thermal Protection System Under Aerodynamic Heating," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 56, No. 5, pp. 1432-1448. 2019.
- [3] V. T. Le, N. Goo, "Design, Fabrication, and Testing of Metallic Thermal Protection System for Spaceplane Vehicles," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 58, No. 4, pp. 1043-1060. 2021.
- [4] H. A. Hanson, J. J. Casey, "High-Temperature Test Technology," 1986.
- [5] R. L. Ash, "An Analysis of the Radiation Field Beneath a Bank of Tubular Quartz Lamps," No. NASA-CR-191551, 1972.
- [6] T. L. Turner, R. L. Ash, "Numerical and Experimental Analyses of the Radiant Heat Flux Produced by Quartz Heating Systems," Vol. 3387, 1994.
- [7] J. Jun, H. Kang, M. Yang, "Development and Application of the Super High Temperature Thermal Test Equipment," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 43, No. 1, pp. 33-39, 2015.
- [8] K. Lee, J. Kim, K. Lee, J. Jung, "The Study on Structural Strength Test Technique for Cylindrical Supersonic Vehicle Subjected to Severe Heating Environment," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 33(6), pp. 83-91, 2005.