

적외선 센서용 극저온 용기의 냉각특성에 관한 실험적 연구

강 병 하[†], 이 정 훈*, 김 호 영**

국민대학교 기계·자동차공학부, *국민대학교 대학원, **KIST 열유동제어연구센터

An Experimental Study on the Cooling Characteristics of an Infrared Detector Cryochamber

Byung Ha Kang[†], Jung Hoon Lee*, Ho-Young Kim**

School of Mechanical & Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 136-791, Korea

(Received May 10, 2004; revision received July 21, 2004)

ABSTRACT: Infrared (IR) detectors are widely used for many applications, such as temperature measurement, intruder and fire detection, robotics and industrial equipment, thermoelastic stress analysis, medical diagnostics, and chemical analysis. Quantum detectors commonly need to be refrigerated below 80 K, and thus a cooling system should be equipped together with the detector system. The cooling load, which should be removed by the cooling system to maintain the nominal operating temperature of the detector, critically depends on the insulation efficiency of the cryochamber housing the detector. Thermal analysis of cryochamber includes the conduction heat transfer through a cold well, the gases conduction and gas outgassing, as well as radiation heat transfer. The transient cooling characteristics of an infrared detector cryochamber are investigated experimentally in the present study. The transient cooling load increases as the gas pressure is increased. Gas pressure becomes significant as the cooling process proceeds. Cool down time is also increased as the gas pressure is increased. It is also found that natural convection effects on cool down time become significant when the gas pressure is increased.

Key words: Cryochamber(극저온 용기), IR sensor(적외선 센서), Transient heat transfer(과도열 전달), Cool down time(냉각시간)

기 호 설 명

C : 비열 [J/kgK]

\dot{Q} : 열유입량 [W]

t : 시간 [s]

Δt : 시간차 [s]

T : 온도 [K]

V : 체적 [m³]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

그리스 문자

ϵ : 방사율

ρ : 밀도 [kg/m^3]

상첨자

i : 시간간격

하첨자

s : 온도센서부분

1. 서 론

적외선 센서를 이용하는 야간 투시경이나 감시, 조준 망원경 등은 현대전에 있어서 필수 장비로 되어 있다. 적외선 센서란 물체에서 방사되는 파장 $0.75\mu\text{m}$ 이상의 복사선을 검출하여 식별하는 소자로서 기계, 구조 및 건물의 이상 감지를 위한 열화상진단, 의학 분야에서의 신경기구 분석, 에너지 분야의 화염, 연소가스의 온도분포 계측 등에 활용되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 적외선 센서는 액체질소 온도 이하의 저온에서 우수한 성능을 가지므로 휴대용 열상장비의 개발을 위해서는 77 K 이하까지 냉각이 가능한 극저온 소형 냉동기의 개발이 선행되어야 한다.

한편 냉동기는 저온부의 온도가 낮아질수록 냉동효율이 이에 비례하여 낮아지며, 80 K 근처에서는 통상적으로 2~5% 정도의 매우 낮은 값을 가진다. 따라서 극저온을 유지하기 위한 단위 냉동용량당 냉동기의 소요동력이 매우 커지므로, 극저온 냉각장비의 효율적 운영을 위해서는 냉동부하 자체를 최소화하는 것이 매우 중요하다.

극저온에서의 작동이 필요한 적외선 센서 및 초전도 필터 어셈블리의 경우, 어셈블리 자체의 발열량이 냉동부하로 작용하게 되지만, 극저온 챔버로의 전도 및 복사 열전달에 의한 열유입이 상당한 냉동부하를 차지하게 된다. 이러한 열유입이 클 경우, 극저온을 유지하지 못하게 됨으로써 적외선 센서 및 초전도 필터가 제 성능을 구현하지 못하게 된다.

따라서 장비 기동시 원활한 동작을 위해서는 이러한 열유입을 최소화할 수 있도록 전류도입선 및 극저온 용기를 설계 제작하여야 한다.

기존의 연구 동향은 이러한 극저온 용기에 대하여 정상상태 열전달이 용기재료 및 기체압력 등

에 의하여 변화하는 양상을 해석적으로 구하고, 주어진 냉동기 성능을 가정하여 상온에서 77 K까지 냉각되는 시간인 cool-down 시간을 계산하였다.⁽⁴⁾ 그리고 냉동기 성능을 가정하는 대신 적외선 센서부분이 액체질소의 비등점 온도로 상변화를 하면서 등온이 유지됨을 가정하여 극저온 용기의 과도 열전달 특성에 대하여 연구하였다.⁽⁵⁾

본 연구는 극저온 용기의 과도 열전달 특성에 대한 보다 더 깊은 이해를 위하여 용기 내부의 압력을 변화시키면서 실험을 실시하여 보어의 온도분포 및 온도강하 특성을 규명하였으며, 기존에 연구된 수치해석 결과와 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 모델인 적외선 센서용 극저온 용기의 형상과 열전달 모드에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실제모델은 크기가 너무 작아 극저온 영역의 온도측정이 불가능하여 극저온 용기의 냉각에 따른 온도변화와 압력변화를 측정할 수 있는 장치를 scale-up하여 제작하였다. 실험에 사용된 극저온 용기의 크기, 재질들은 Table 1에 나타내었으며, 물성치는 참고문헌⁽⁶⁾에서 참조하였다. 또한 극저온 용기가 용기 내의 압력에 따라 열전

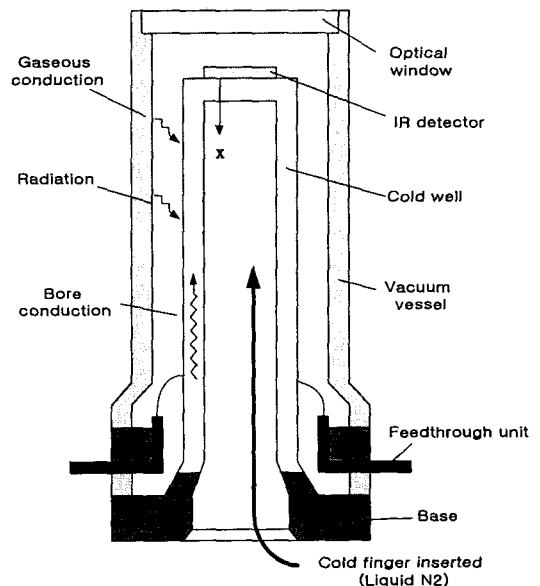


Fig. 1 Schematic diagram of cryochamber and mechanisms of heat transfer.

Table 1 Part list of the cryochamber

Part	Material	Dimensions	Properties (at 300 K)
Vacuum vessel	Stainless steel	Inner diameter=80 mm	$\epsilon \approx 1$
Cold well (glass bore)	Pyrex glass	Outer diameter=27 mm Thickness=2.5 mm Length=140 mm	$\epsilon \approx 0.8$ $\rho = 2,640 \text{ kg/m}^3$ $C = 800 \text{ J/kgK}$ $k = 1.0 \text{ W/mK}$
Base	Stainless steel		

달에 어떠한 영향을 주는지 알기 위하여 Fig. 2와 같이 실험장치를 제작하였다.

극저온 용기 실험장치는 시험부인 극저온 용기와 용기 내부를 진공으로 만들기 위한 진공펌프, 보어를 냉각시키기 위한 액체질소 주입기로 구성되어 있다. 보어의 온도분포를 측정하기 위해 보어의 외부 표면에 측정범위 1.4~500 K, $\pm 0.5 \text{ K}$ 의 정확도를 갖는 실리콘 다이오드 온도센서(DT-670-SD, Lake shore)를 사용하였고, 유리보어 냉각부분의 온도구배가 크기 때문에 보어의 냉각부분부터 10 mm 간격으로 4개를 설치하였다. 극저온 용기는 진공상태를 유지하면서 온도센서의 신호를 받기 위해 피드쓰루(feed-through)를 사용하였다. 극저온 용기 내부를 진공펌프로 진공상태를 만들고, 극저온 용기 내의 압력을 측정할 수 있도록 진공펌프와 극저온 용기의 사이에 진공압력계(UPC No. 686800, Lake shore)를 설치하였다.

극저온 용기의 적외선 센서부분을 냉각하기 위하여 액체질소를 사용하였으며, 액체질소 주입기는 얇은 관을 이용해 액체질소가 소량으로 일정

하게 주입되어 액체질소의 비등하는 액면높이를 일정하게 유지하였다. 또한, 외부로 열유출을 막기 위해 보어의 내면은 냉각부를 제외하고 베이클라이트 단열재를 이용하여 단열하였다.

적외선 센서 극저온 용기의 과도냉각 특성에 관한 수치해석과 비교하기 위하여 용기 내의 압력이 대기압(760 Torr), 50 Torr, 1 Torr, 0.1 Torr가 되도록 진공펌프를 사용하여 진공을 만든 후 밸브를 닫아 용기 내의 진공이 유지된 상태에서 액체질소 주입기를 이용하여 유리보어의 내부에 소량의 액체질소를 주입하여 극저온 용기 내의 보어 끝부분을 냉각하면서 시간에 따른 온도의 변화와 압력의 변화를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 적외선 센서 극저온 용기의 과도 냉각특성을 규명하기 위하여 극저온 용기 내의 압력변화에 따른 보어의 온도변화를 측정하였다. 실험은 진공용기 내의 초기압력을 대기압(760

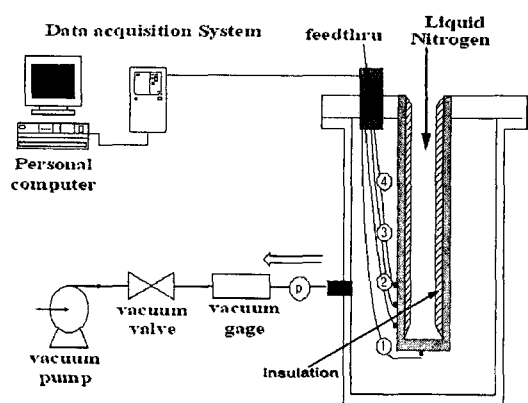


Fig. 2 Schematic diagram of the Infrared detector cryochamber experimental setup.

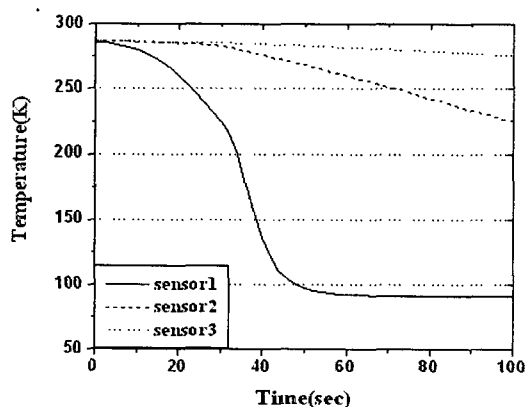


Fig. 3 Cool down characteristics in the cold well at the gas pressure 0.1 Torr.

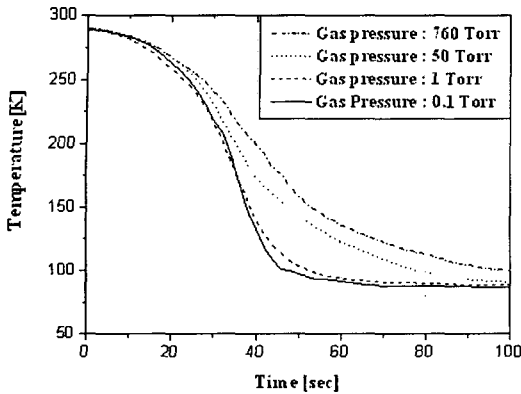


Fig. 4 Cool down characteristics of cold tip.

Torr), 50 Torr, 1 Torr, 0.1 Torr로 만든 상태에서 액체질소로 보어의 끝부분을 냉각시킬 때 극저온 용기 내의 보어의 온도변화를 측정하였다. 온도 센서와 보어의 접촉저항은 저온 그리스(Type N, Apiezon)를 사용하여 부착하여 접촉되는 두께가 매우 작아 접촉저항의 값이 작으며, 신호선의 재질은 구리이지만, 신호선의 직경이 0.25 mm이며, 길이는 200 mm로 열저항의 값이 커서 신호선을 통한 열유입은 22 mW로 무시할 수 있다.

Fig. 3은 0.1 Torr에서의 각 센서에서의 온도변화 특성을 보여주고 있다. 적외선 센서에서부터 10 mm 간격으로 4개의 온도센서를 부착하고 온도변화를 측정하였으나 적외선 센서에서 30 mm에 위치한 센서 4는 온도의 변화가 없어 그림에 타내지 않았다. 센서 1의 온도변화 특성은 냉각초기에는 온도구배가 작지만 냉각이 진행됨에 따라 온도구배가 점점 커지다가 100 K 이하에서는 온도구배가 다시 아주 작아진다. 이것은 액체질소의 비등에 의해 설명할 수 있는데, 냉각 초기에는 보어와 질소의 온도차가 커서 막비등이 발생하여 열전달률이 작게 나타나지만 냉각이 진행됨에 따라 핵비등으로 바뀌면서 열전달률이 급격하게 증가하여 온도구배가 커지게 된다. 그러나 온도가 100 K 이하에서는 보어와 질소의 온도차가 적어 열유입이 적기 때문에 온도구배는 다시 작게 된다.

Fig. 4는 용기 내부 압력에 따라 유리보어의 끝부분(Cold tip)에서의 온도변화 특성을 나타낸다. 센서 2와 센서 3의 온도변화 특성은 압력에 따라 큰 변화가 없어 그림에 나타내지 않았다. 그림에 나타나듯이 용기의 압력에 따라 센서 1의 온도변

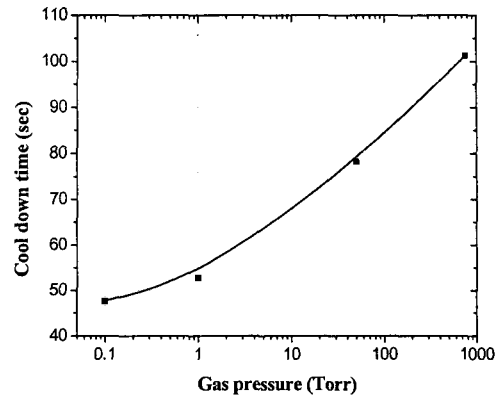


Fig. 5 Dependence of the cool down time on the gas pressure.

화 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다. 압력이 낮은 0.1과 1 Torr에서는 희박기체의 상태로 자연대류의 영향은 적고 가스에 의한 전도가 발생하게 되어 온도변화 특성이 유사하지만, 압력이 증가함에 따라 50 Torr와 대기압에서는 온도변화가 급격하게 이루어지지 않는다. 이것은 자연대류의 영향이 희박기체 상태에서는 무시할 수 있었으나, 압력이 높아짐에 따라 자연대류의 영이 점점 커지기 때문에 판단된다. Fig. 5는 유리보어의 끝부분이 초기상태인 대기온도에서 100 K에 도달하는 냉각시간을 압력에 따라 나타내었다. 용기 내 압력이 증가하면 가스에 의한 전도와 자연대류에 의한 열유입의 증가로 인하여 냉각시간도 증가하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 액체질소에 의한 냉각이 진행됨에 따라 여러 초기압력상태에서 용기 내부의 압력변화를 나타낸다. 극저온 용기 내의 압력이 높으면 용기 내의 압력의 변화가 작게 나타나지만 극저온 용기 내의 압력이 낮아질수록 cryopumping 효과로 인하여 용기 내부 압력은 냉각되는 보어의 끝부분에 있는 센서 1의 온도변화와 비슷한 양상으로 변화하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 실험으로 얻어진 온도결과로 다음 식을 이용하여 보어의 끝 부분에서 과도상태 열전달량을 환산하였다.⁽⁶⁾

$$Q = \rho CV \frac{T_s^{i+1} - T_s^i}{\Delta t} \quad (1)$$

식에서 ρ 는 보어의 밀도, C 는 보어의 비열, V 는

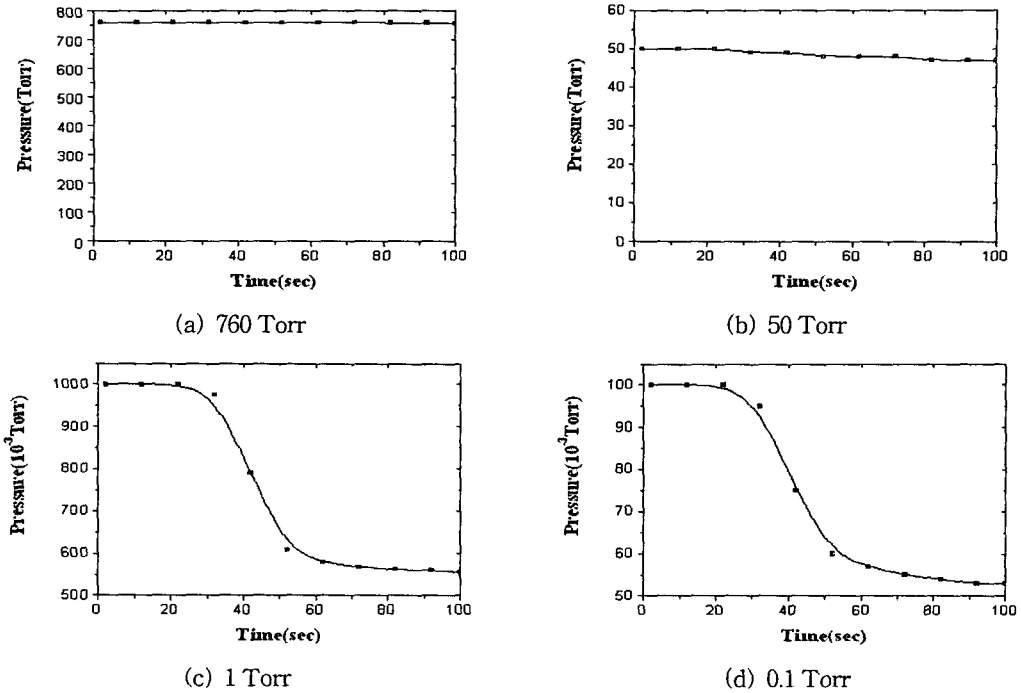


Fig. 6 Pressure variation in the cryochamber at initial pressure.

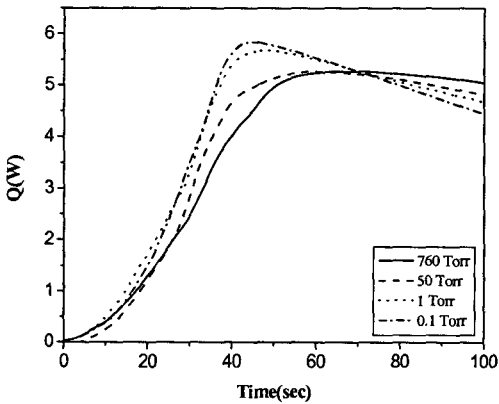


Fig. 7 Heat transfer variation with gas pressure.

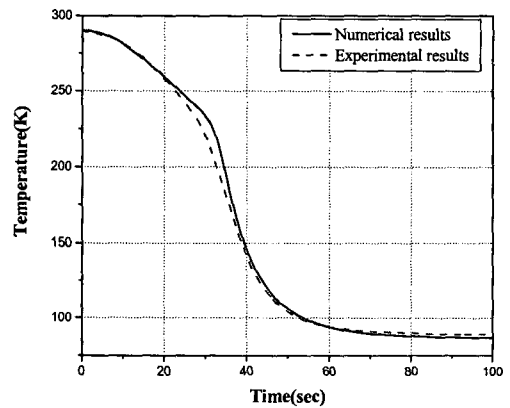


Fig. 8 Comparison of numerical and experimental results.

보어 상판의 부피, Δt 는 온도를 읽는 시간간격을 나타내고, 온도차 $T_s^{i+1} - T_s^i$ 은 온도센서 1의 Δt 시간 동안의 온도 온도차이다. 그림에서 나타난 것처럼 보어로 유입되는 열전달은 냉각 초기에는 큰 차이가 없지만 냉각이 진행되면서 열유입량은 점차 증가하다가 다시 감소하게 된다. 압력이 높은 경우에는 냉각이 진행됨에 따라 압력이 낮은 경우에 비해 초기에는 열유입량이 적지만 점차

커지는 것을 볼 수 있다. 이것은 보어온도가 낮아짐에 따라 자연대류에 의한 영향이 증가하기 때문이다.

실험결과로 얻어진 온도강하 특성을 이 극저온 용기에 대한 기존 수치해석 결과와 비교하였다.⁽⁵⁾ 기존 수치해석의 경계조건은 등온조건으로 해석을 하였지만, 경계조건을 다음 식(2)와 같은 비등열유속으로 대체하여 수치해석한 결과와 비교하였다.

$$Q_b = \bar{h}_b A_b (T_s - 77) \quad \text{at } x=0 \quad \text{for all } t \quad (2)$$

여기서, Q_b 는 비등열전달, A_b 는 비등이 일어나는 면적, T_s 는 센서부의 온도를 나타내고, \bar{h}_b 는 비등열전달계수를 나타내는데, 비등의 형태는 막비등에서 핵비등으로 천이 되면서 복잡한 열전달계수 값을 갖는다.⁽⁷⁾ 상온의 용기 내에서 액체질소를 주입하였을 때 용기 표면에서의 비등열전달계수는 시간에 따라 감소하는 경향으로 식(3)과 같이 모델링하여 수치해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

$$\bar{h}_b = 30t^{0.8} + \frac{3000 - 100}{1 + \exp\left(\frac{25-t}{10}\right)} \quad (3)$$

Fig. 8은 용기 내 압력이 1 Torr인 경우에 유리보어 끝부분의 온도변화 특성에 대하여 수치해석결과와 실험 결과를 비교한 것이다. 그림에 나타내듯이 비등열전달계수에 대한 적절한 모델링에 의하여 수치해석 결과와 실험 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 적외선 센서용 극저온 용기의 열유입을 최소화하기 위하여 과도상태 냉각특성을 파악하였다. 외기에서 감지기로의 열전달은 보어를 통한 전도, 가스에 의한 전도, 복사에 의한 열전달로 구성된다. 챔버 내 압력을 대기압, 50 Torr, 1 Torr, 0.1 Torr로 기체압력을 변화시키면서 실험을 수행하여 보어의 온도변화특성 및 과도상태의 열전달특성을 규명하였다.

냉각시간과 열유입은 챔버 내 압력에 영향을 크게 받게 되지만 압력이 1 Torr 이하의 희박기체상태에서는 압력에 따른 변화가 적게 나타나며, 온도변화특성도 유사하게 나타났다. 용기 1내의 압력이 희박기체가 아닌 상태에서는 냉각시간

과 열유입이 자연대류의 영향을 크게 받게 된다.

후 기

본 연구는 과학기술부와 국방과학연구소의 민간겸용 기술개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Morten, F. D., 1971, Applications of infrared detectors, In: Infrared detectors and their applications, Philips Publication Dept., Eindhoven, Netherlands, Chapter 1.
2. Kaplan, H., 1992, Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment, SPIE, Bellingham.
3. Fisher, R. E., 1991, Lens design for the infrared, Infrared optical design and fabrication (Ed. R. Hartmann and W. J. Smith), SPIE, Bellingham.
4. Kim, H.-Y., Kang, B. H. and Lee, D.-Y., 2000, A parametric study on the cooling characteristics of an infrared detector cryochamber, Cryogenics, Vol. 40, pp. 779-788.
5. Lee, J. H., Kim, H.-Y. and Kang, B. H., 2002, Numerical analysis on the transient cooling characteristics of an infrared detector cryochamber, The Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 4, No. 2, pp. 68-72.
6. Mills, A. F., 1992, Heat and Mass Transfer, Irwin, Concord. Chapter 3.
7. Okuyama, K. and Iida, Y., 1990, Transient boiling heat transfer characteristics of nitrogen (bubble behavior and heat transfer rate at stepwise heat generation), Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 10, pp. 2065-2071.