https://doi.org/10.21289/KSIC.2023.26.1.183

바이오 시료의 적정온도 사이클 유지를 위한 채널형 히트싱크에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Channel Type Heat Sink to Maintain Proper Temperature Cycle of Bio-Sample

황정규[1], 박상희[2*]

Jeong-Gyu Hwang[1], Sang-Hee Park[2*]

〈Abstract〉

This study was conducted experimentally to investigate the surface temperature of the heat sink, the air temperature in the flow channel and the sample temperature by changing the channel number of channel type heat sink and the air flow rate when heating and cooling the bio sample. The target temperature of the sample was 15℃ or less as the minimum value and 82℃ or more as the maximum value. In this study, the channel number of the heat sink(N = 1, 2, 4, 5, 10) and the air flow rate(Q=25, 42, 54m^3/min) were varied. The bio sample was replaced with water, and the volume of water is 4mL. The size of the heat sink is 80x73x150mm and the material is aluminum. When cooling the sample, the surface temperature, the air temperature and the sample temperature were highly dependent on the number of channels and the flow rate. However, when the sample is heated, the surface temperature, air temperature and sample temperature do not depend on the number of channels and the flow rate. It was found that the conditions for satisfying the minimum temperature of 15℃ or less when cooling the sample were the number of channels N≥5 and the flow rate Q≥42m^3/min. When heating the sample, the conditions to satisfy the maximum temperature of 82℃ or more are the number of channels N≤5 and the air flow rate Q≤42m^3/min.

Keywords : Bio Sample, PCR Device, Thermoelectric Element, Channel Type Heat Sink, Air Flow Rate

1 금오공과대학교 기계공학과 대학원

2* 정회원, 교신저자, 금오공과대학교 기계공학과, 교수
E-mail: parksh@kumoh.ac.kr

1 Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology

2* Dept. of mechanical engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor

1. 서 론

바이러스, 효소, 미생물 등과 같은 바이오 시료는 온도가 변함에 따라 DNA 및 RNA의 안정성과 단백질의 구조와 기능에 영향을 미치게 된다. 이런 미생물들의 성장에 가장 적합한 온도를 최적온도라고 하며, 이 온도를 기준으로 한 미생물의 성장 관리가 매우 중요하다.

바이오 시료는 최적온도를 기준으로 높거나 낮으면 대사에 필요한 효소의 활성도가 달라진다. 시료의 온도가 너무 높으면 단백질과 효소의 변형이 발생되고 최적온도보다 낮으면 효소작용이 느려져 미생물이 느리게 성장하게 된다. 그리고 미생물은 성장할 수 있는 최저온도와 최고온도의 범위를 벗어나게 되면 더 이상 성장할 수 없어 결국 사멸하게 된다[1].

바이오 시료의 종류는 온도에 대한 반응 차이로 저온균, 중온균, 고온균 그리고 초고온균으로 분류한다. 저온균은 추운 환경에서 자라는 미생물로서 최적성장온도가 15℃ 이하이다. 중온균은 자연 생태계에서 가장 흔하게 발견할 수 있으며, 성장온도의 최저치는 8℃이고 최고치는 48℃이다. 고온균은 최적온도가 60℃ 부근이고 30℃ 이하에서는 성장할 수 없는 세균을 말한다. 고온균 중에서도 82℃ 이상에도 생존 가능한 세균을 초고온균이라 한다[2].

이러한 바이오 시료 중에서 잠재적인 산업적 활용성으로는 저온균과 초고온균이 주목받고 있다. 저온균은 최적의 성장 온도가 15℃ 이하인 미생물로서 원유와 같은 유기 물질을 안전하게 분해하는 데 이용할 수 있으며, 초고온균은 고온균 중에서도 80℃ 이상에도 생존 가능한 균으로 산업적으로 응용 가능성이 높다[3,4].

이러한 바이오 시료를 산업용으로 응용하기 위해 관찰하는 장치로 PCR 장비가 있다. PCR 장비는 바이오 시료를 관찰하기 위한 온도 사이클 시스템으로 열전소자를 이용하여 가열과 냉각을 주기적으로 수행하여 바이오 시료의 온도에 대한 영향을 관찰할 수 있다.

열전소자는 두 장의 세라믹 판 사이에 N형 반도체와 P형 반도체를 배열한 반도체 소자로서 펠티에 효과를 이용한다. 열전소자에 전류를 인가하면 한쪽 세라믹 판은 냉각이 되고 반대쪽 세라믹 판은 가열된다. 또한, 열전소자에 전류 공급을 반대로 인가하면 냉각면은 가열면으로, 가열면은 냉각면으로 서로 바뀌게 된다. 열전소자는 N형과 P형 반도체를 통하여 열전도가 일어나고 주울열이 발생하여 열전소자가 고온으로 되어 파손되기도 하고 냉각 효과에도 한계가 있다. 그래서 열전소자에 히트싱크를 부착하여 열전소자의 성능을 제어할 수 있다.

현재까지 바이오 시료의 온도 유지를 위한 열전소자를 이용한 PCR 장비에 관한 선행 연구는 다음과 같다. Oh 등[5]은 열전소자와 PWM방식을 이용하여 온도 사이클링 시스템을 구현하였다. Huang 등[6]은 ANSYS 상용S/W를 활용하여 열전소자의 온도를 입력전력에 따라 분석하였다. Qiu와 Yuan[7]은 PCR 장비의 온도 제어를 정확히 하기 위해 알고리즘을 하이브리드 제어 방식으로 연구하였다. Cho 등[8]은 열전소자를 이용하여 60℃와 95℃로 유지되는 유전자 증폭 온도 사이클 시스템을 개발하였다.

이와 같은 선행 연구에서는 열전소자의 성능 및 온도 제어 방식을 개발하여 바이오 시료를 가열 및 냉각할 수 있는 PCR 시스템을 구동시키는 방법을 연구하였다. 그러나 바이오 시료는 최적의 온도 관리가 매우 중요하므로 열전소자에 채널형 히트싱크를 부착하여 열전소자의 성능을 제어하면서 최적온도를 유지하는 방법에 대하여는 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 논문의 목적은 바이오 시료의 가열과 냉각 시 열전소자에 부착된 채널형 히트싱크의 채널 수와 풍량을 변화시켜 저온균의 성장온도인 15℃ 이하와 초고온균의 성장온도인 82℃ 이상으로 유지할 수 있는 채널형 히트싱크의 열성능을 규명하는 것이다. 본 연구에서는 채널형 히트싱크의 채널 수와 유량을 변화시켜 열전소자의 가열과 냉각의 변화에 따른 히트싱크의 표면온도, 채널 내의 공기온도, 바이오 시료의 온도에 대한 기초자료를 얻고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용된 전체적인 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험장치는 시험장치, 전력공급장치, 데이터처리장치로 구성된다. 시험장치는 채널형 히트싱크의 상단 표면에 열전소자를 부착하였고, 열전소자의 상부 표면에는 시료 케이스를 설치하였다. 시료 케이스 상부에는 시료의 온도를 균일하게 유지하기 위해 교반기를 설치하였다. 채널형 히트싱크의 입구에 축류팬을 설치하여 히트싱크 내부로 공기를 흐르게 하였다. 전원공급기 3대를 사용하여 열전소자, 교반기 그리고 팬으로 각각 전류를 공급하였다. 데이터처리장치는 Agilent 34970A를 사용하였다.

Fig. 2는 유동 채널 수가 4개인 채널형 히트싱크의 설계도를 나타낸다. 채널형 히트싱크의 전체 크기는 폭 80mm, 높이 73mm 그리고 길이 150mm이다. 공기가 흘러가는 유동채널 1개의 크기는 폭 14.5mm, 높이 60mm 그리고 길이 150mm이다. 히트싱크의 재질은 알루미늄이다. 채널형 히트싱크 상부 표면의 중앙에 열전소자를 부착하기 위하여 가로 60mm, 세로 40mm 그리고 깊이 2mm 정도를 밀링으로 가공하여 홈을 만들었다. 이 가공된 홈 부분에 열전도성이 우수한 접착제를 이용하여 열전소자를 부착하였다. 또한, 이 홈의 바닥면에 깊이 1mm의 미세한 홈을 15mm 간격으로 3개 지점을 만들었다. 이 홈에 T-형 열전대를 부착시켜서 열전소자와 히트싱크의 접촉부 온도를 측정할 수 있게 하였다.

Fig. 3(a)~(e)는 실험에 사용된 실제 채널형 히트싱크의 시제품이다. 히트싱크의 전체적인 크기와 재질은 Fig. 2에서 설명한 것처럼 모두 같지만 유동채널 수와 총 유동단면적은 서로 다르게 된다.

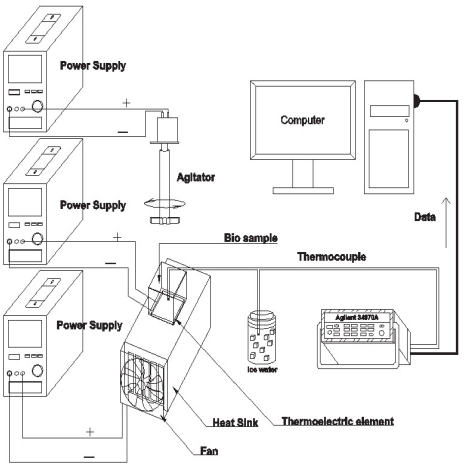


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

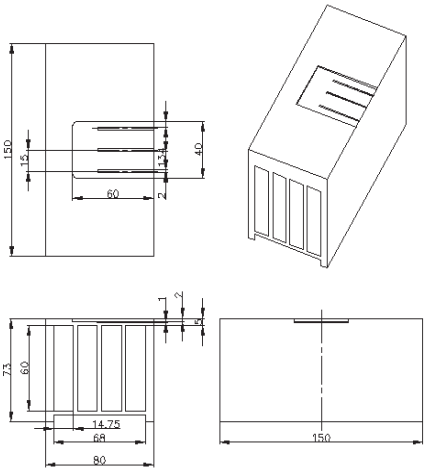
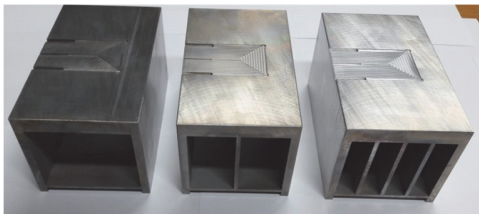
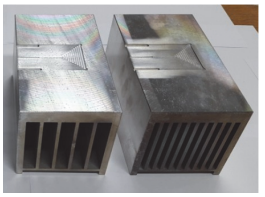


Fig. 2 Heat sink schematic at N = 4



(a) N = 1 (b) N = 2 (c) N = 4



(d) N = 5 (e) N = 10

Fig. 3 Channel heat sink

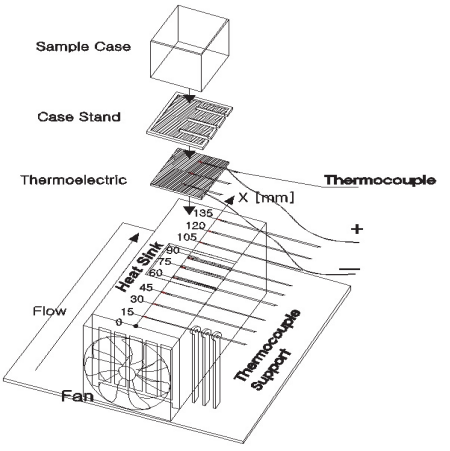


Fig. 4 Heat sink temperature measurement

Fig. 3(a)는 채널 수 N=1개이고 채널의 크기는 68×6×150mm이다. 채널의 총 유동단면적은 4,080mm^{2}이다. Fig. 3(b)는 N=2개이고 유동채널 1개의 크기는 32.55×60×150mm이다. 채널의 총 유동단면적은 3,906mm^{2}이다. Fig. 3(c)는 N=4개이고 채널 1개의 크기는 14.5×60×150mm이다. 채널의 총 유동단면적은 3,480mm^{2}이다. Fig. 3(d)는 N=5개이고 채널 1개의 크기는 11.2×60×150mm이다. 채널의 총 단면적은 3,360mm^{2}이다. Fig. 3(e)는 N=10개이고 채널 1개의 크기는 4.1x60x150mm이다. 총 유동단면적은 2,460mm^{2}이다.

Fig. 4는 시료의 가열과 냉각을 수행하는 시험장치의 개략도이다. 채널형 히트싱크의 입구에는 크기가 70×70mm인 팬을 설치하여 공기를 채널 내부로 흐르게 하였다. 공기 유량은 Q=25, 42, 54m^3/min으로 변화시켰다. 열전소자(HM6040)는 40×40×3.9mm의 크기를 가지며, 인가전압은 DC 12V이다.

히트싱크의 상부 표면온도와 채널 내의 공기온도는 히트싱크의 선단부로부터 후단부까지 15mm 간격으로 x=135mm까지 총 9개 지점을 각각 설정하여 T-형 열전대로 측정하였다. 히트싱크 표면에 열전대의 부착은 Aiolos사의 써머테이프를 사용하였다. 온도측정 시 열전대는 휘어짐 등을 방지하기 위하여 히트싱크 측면에 아크릴 지지대를 제작하여 고정하였다. 히트싱크 채널 내부의 공기온도는 채널 내의 상부 표면으로부터 10mm 떨어진 지점에 설치된 열전대 고정바에 열전대를 고정시켜 측정하였다. 또한, 열전소자 상단부의 표면온도는 3개 지점을, 시료의 온도는 시료케이스 내에 4개 지점을 설정하여 온도를 측정하였다.

본 실험에서 바이오 시료는 물로 대체하였으며 물의 양은 40mL이다. 실험 시 정상상태의 온도는 각 측정 지점에서의 온도차가 0.1℃ 이내를 기준으로 하였다. 열전소자를 이용한 가열 및 냉각 시간은 각각 40분으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시료 냉각 시

Fig. 5~9은 시료를 냉각시킬 때 공기유량 Q=25, 42, 54m^3/min과 히트싱크의 채널 수 N=1,

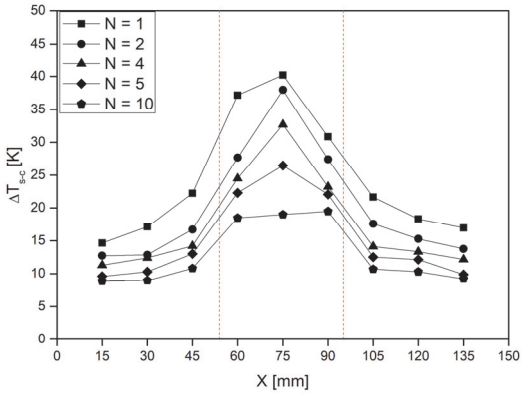


Fig. 5 Surface temperature of a heat sink at Q=25m³/min

2, 4, 5, 10으로 변화시켜 히트싱크의 표면온도와 채널 내의 공기온도 그리고 시료의 온도를 측정한 결과를 나타낸다. 그림에서 두 개의 수직점선 사이에는 열전소자가 설치된 영역(x=55~95mm)을 나타낸다.

Fig. 5는 Q=25m³/min으로 일정할 때 히트싱크의 채널 수 N=1~10개로 변화시켜 히트싱크의 선단부로부터 거리 x에 따른 히트싱크의 표면온도를 나타낸다. $\triangle T_{s-c}$는 시료 냉각 시 히트싱크의 표면온도와 실내공기 온도와의 차이이다.

히트싱크의 표면온도는 x방향으로 서서히 증가하다가 x=45mm 부근에서부터 열전소자가 위치한 중심(x=75mm)까지 급격하게 증가하면서 x=75mm에서 최대 온도를 나타내고, 이 이후부터 x=105 mm 부근까지 급격하게 감소함을 보였다. 이러한 현상은 시료 냉각 시 히트싱크와 접촉된 열전소자의 하부 표면은 방열이 일어나서 열전소자 주변 영역으로 열이 전도되고 있다는 것을 보여준다.

또한, 유동채널의 수 N가 증가할수록 히트싱크의 표면온도는 급격하게 낮아짐을 보였다. 이것은 채널 수가 증가할수록 유동단면적이 감소하여 채널 내의 유속이 증가되어 열전소자로부터의 방열 능력이 증가되었기 때문이다.

Fig. 6은 Q=25m³/min일 때, 채널 수에 따른 채널 내의 공기온도를 나타낸다. $\triangle T_{a-c}$는 히트싱크 내의 공기온도와 실내공기 온도와의 차이이다. 공기온도는 유동방향으로의 거리 x가 증가할수록 증가함을 보이고 있다. 이것은 열전소자의 방열에 의해 채널 내의 공기가 가열되기 때문이다. 또한, 채널 수 N가 증가할수록 공기온도는 가장 높게 나타남을 보였다. 이것은 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 채널 수가 증가할수록 채널의 유동단면적이 감소하여 공기의 흐름이 빨라지면서 열전소자로부터 공기로의 방열량이 증가되어 공기가 가열되기 때문이다.

Fig. 7은 N=5일 때 풍량에 따른 히트싱크의 표

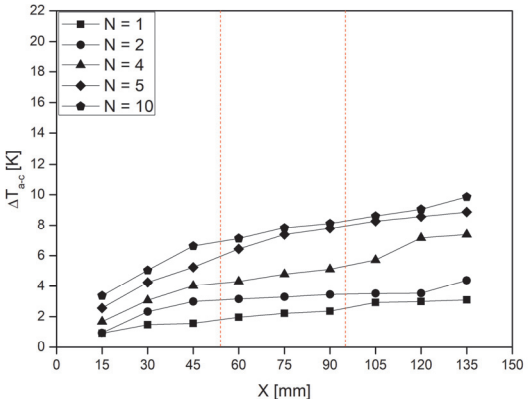


Fig. 6 Air temperature in heat sink at Q=25m³/min

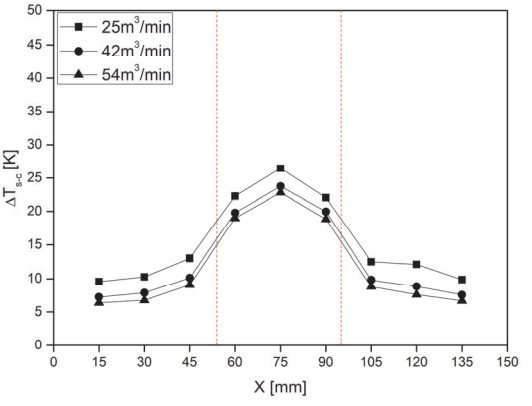


Fig. 7 Surface temperature of a heat sink at N=5

면온도를 나타낸다. 히트싱크의 표면온도는 Fig. 5에서 설명한 바와 같이 변화하였으며, 열전소자의 중심 위치인 x=75mm를 기준으로 한 표면의 온도분포는 대칭적으로 나타남을 보였다. 또한, 유량이 증가할수록 표면온도는 감소함을 보였다. 그러나 유량을 42m^3/min에서 54m^3/min으로 증가시켜도 히트싱크의 표면온도는 2℃ 이내로 나타남을 보였다.

Fig. 8은 N=5일 때, 유량에 따른 채널 내의 공기온도를 나타낸다. 공기온도는 풍량이 증가할수록 감소함을 보였다. 풍량이 25m^3/min에서 42m^3/min으로 증가할 때 표면온도의 감소는 1.8℃(x=45mm)~2.3℃(x=135mm) 정도로 나타났으나, 풍량이 42m^3/min에서 54m^3/min으로 증가할 경우에는 x 위치에 관계없이 표면온도감소가 1℃ 이내로 나타남을 보였다.

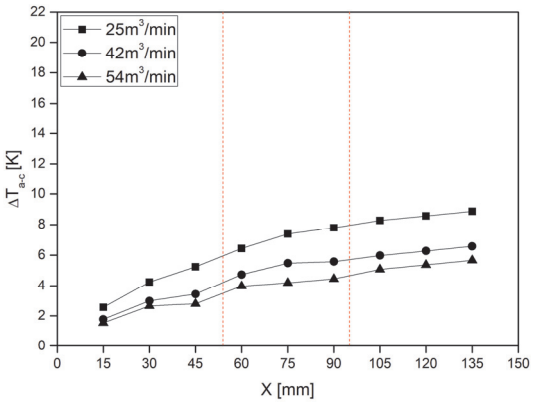


Fig. 8 Air temperature in heat sink at N=5

Fig. 9는 시료 냉각 시 채널 수와 풍량에 따른 시료(물)의 평균온도를 나타낸다. 그림에서 수평점선은 냉각 시 목표온도인 15℃를 나타낸다. 시료를 냉각할 때 시료의 온도는 히트싱크의 유동채널 수 N가 증가할수록 급격하게 감소함을 보였다. Q=42m^3/min으로 일정할 때 시료온도는 24.8℃(N=1), 19.3℃(N=2), 17.2℃(N=4), 13.6℃(N=5), 8.9℃(N=10)로 감소하였다. 또한, 유량이 증가할수록 시료온도도 감소함을 보였다.

따라서 시료를 냉각할 때 저온균의 최적 성장온도인 15℃ 이하를 동시에 만족하는 채널 수와 풍량 조건은 채널 수가 5개 이상일 경우와 풍량이 42m^3/min 이상일 경우임을 알 수 있었다.

3.2 시료 가열 시

Fig. 10~14는 시료를 가열 시 풍량 Q=25, 42, 54m^3/min과 유동채널 수 N=1, 2, 4, 5, 10으로 변화할 때의 히트싱크의 표면온도와 채널 내의 공기온도 그리고 시료의 온도를 측정한 결과이다.

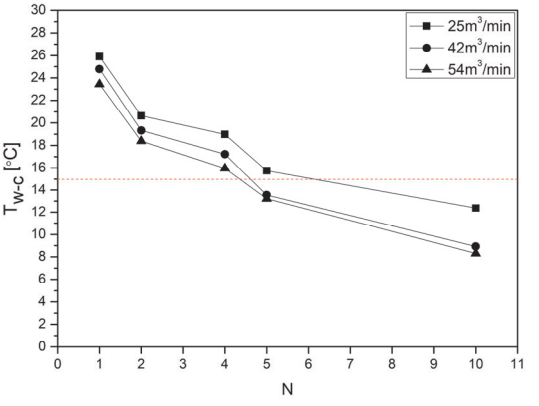


Fig. 9 Sample average temperature at cooling mode

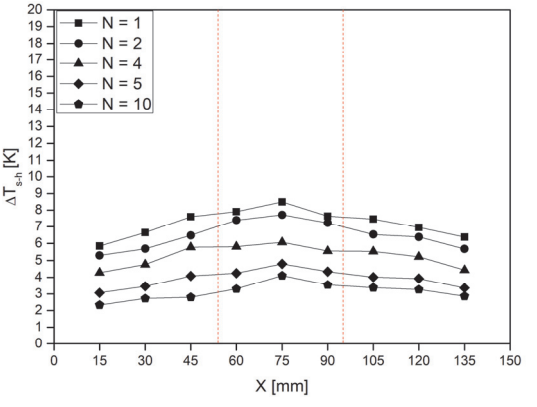


Fig. 10 Surface temperature of a heat sink at Q=25m^3/min

그림에서 두 개의 수직점선 사이에는 열전소자의 설치된 위치를 나타낸다.

Fig. 10은 유량이 25m^3/min일 때 히트싱크의 채널 수에 따른 히트싱크의 선단부로부터 거리 x에 따른 히트싱크의 표면온도를 나타낸다. $\triangle T_{s-h}$는 시료 가열 시 히트싱크의 표면온도와 실내공기 온도와의 차이이다.

표면온도는 선단부 부근(x=15mm)에서부터 x=75mm(열전소자의 중심)까지 서서히 증가하였고 x=75mm부터 후단부(x=135mm)까지 서서히 감소함을 보였으며, x=75mm를 기준으로 온도분포가 좌우 대칭적으로 나타났다. 시료 가열시 히트싱크와 접촉된 열전소자의 하부면은 냉각되어 히트싱크의 표면온도가 8.5℃(N=1) 이하를 나타내었다.

또한, 유동채널의 수가 증가할수록 히트싱크의 표면온도는 낮아짐을 보였다. 즉 x=75mm의 위치에서 표면온도는 8.5℃(N=1)~4.1℃ (N=10) 정도로 나타났다. 표면온도는 Fig. 4에서 설명한 것처럼 시료의 냉각 시보다 온도 변화폭이 작게 나타남을 보였다. 이것은 히트싱크 방향으로부터 열전소자가 흡열작용을 하기 때문인 것으로 추측된다.

Fig. 11은 Q=25m^3/min일 때, 채널 수에 따른 채널 내의 공기온도를 나타낸다. $\triangle T_{a-h}$는 가열시 히트싱크 내의 공기온도와 실내온도와의 차이이다. 공기온도는 유동방향의 거리 x가 증가할수록 약간 증가함을 보였다. 이것은 Fig. 10의 결과에서 보였듯이 히트싱크 표면온도가 너무 낮아서 채널 내의 공기로 전달되는 열이 적기 때문인 것으로 추측된다.

Fig. 12는 채널 수가 5개일 때 풍량에 따른 히트싱크의 선단부로부터 x방향으로의 표면온도를 나타낸다. 히트싱크의 표면의 온도분포는 Fig. 7의 시료를 냉각시킬 때의 온도분포와 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 유량이 증가할수록 표면 온도는 감소함을 보였다. 그러나 표면온도의 감소량은 유

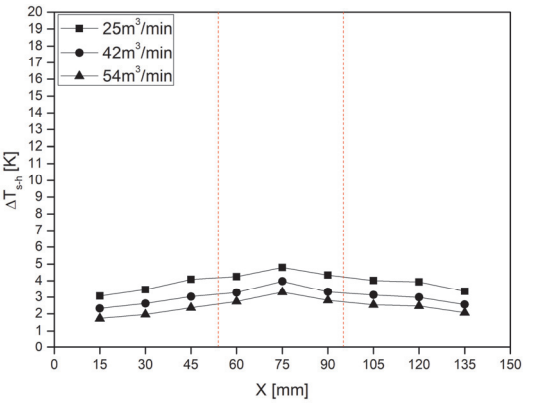


Fig. 12 Surface temperature of a heat sink at N=5

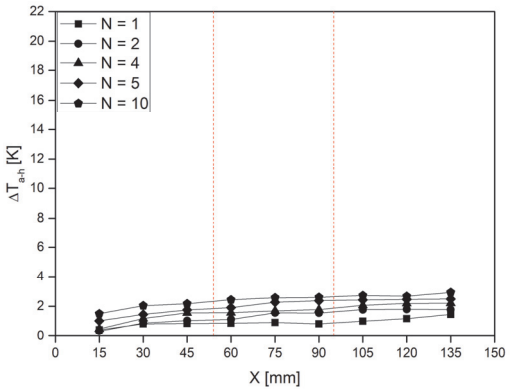


Fig. 11 Air teperature in a heat sink at Q=25m^3/min

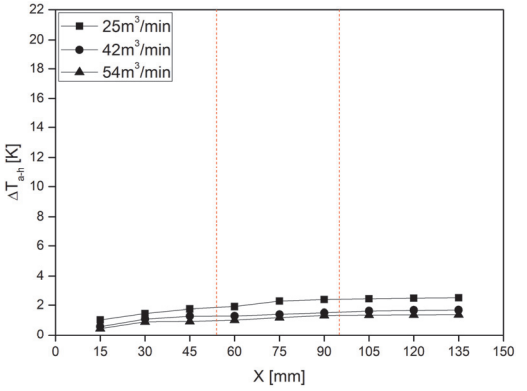


Fig. 13 Air temperature in heat sink at N=5

량을 42m³/min에서 54m³/min으로 증가시켜도 약 1℃ 정도로 매우 작게 나타났다.

Fig. 13은 N=5일 때, 유량에 따른 채널 내의 공기온도를 나타낸다. Fig. 11에서 설명하였듯이 표면온도가 매우 낮기 때문에 유동방향으로의 채널 내의 공기온도는 매우 작게 증가됨을 보였다. 유량이 증가하여도 공기온도의 감소는 매우 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 14는 시료를 가열할 때 채널 수와 유량에 따른 시료의 평균온도를 나타낸다. 그림에서 수평점선은 시료(초고온균)의 연구 목표 온도인 82℃를 나타낸다. T_{w-h}는 시료을 가열할 때의 시료의 평균온도이다.

시료를 가열할 때 시료의 온도는 유동채널 수가 증가할수록 감소함을 보였다. Q=42m³/min으로 일정할 때 시료온도는 85.5℃(N=1), 82.3℃(N=5), 81.2℃(N=10)이다. 또한, 유량이 증가할수록 시료온도도 감소함을 보였다.

따라서 시료를 가열할 때 초고온균의 성장온도인 82℃ 이상을 동시에 만족하는 채널 수와 유량 조건은 채널 수가 5개 이하일 때와 유량이 42m³/min 이하일 때임을 알 수 있었다.

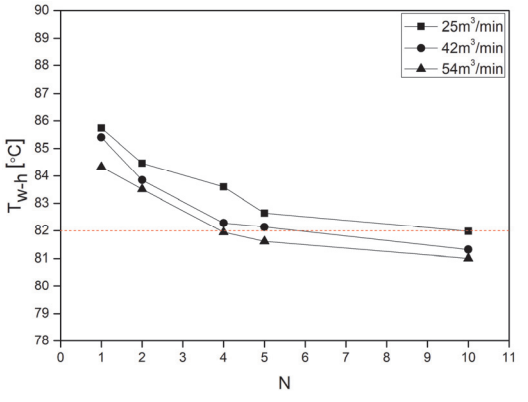


Fig. 14 Sample average temperature at heating mode

4. 결 론

본 연구는 열전소자를 이용하여 바이오 시료를 가열 및 냉각 시 열전소자에 부착된 채널형 히트싱크의 유동채널 수와 풍량을 변화시켜 히트싱크의 표면온도, 채널 내의 공기온도 그리고 시료의 온도를 실험적으로 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 시료를 냉각시킬 때 히트싱크의 유동채널의 수와 공기유량이 증가할수록 히트싱크의 표면온도와 채널 내의 공기온도 그리고 시료의 온도는 급격하게 낮아짐을 보였다. 따라서 시료를 냉각할 경우 표면온도, 공기온도 그리고 시료온도는 채널 수와 유량에 크게 의존함을 알 수 있었다.

(2) 시료를 가열시킬 때 히트싱크의 표면온도와 채널 내의 공기온도 그리고 시료의 온도는 유동채널 수와 유량에 크게 의존하지 않음을 보였다.

(3) 시료를 냉각할 경우 저온균의 최적온도인 15℃ 이하를 만족하는 조건은 채널 수가 5개 이상 그리고 풍량이 42m³/min 이상일 경우임을 알 수 있었다. 또한, 시료를 가열할 때 초고온균의 성장온도인 82℃ 이상을 만족하는 조건은 채널 수가 5개 이하이고 유량이 42m³/min 이하일 때임을 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서 개발한 채널형 히트싱크는 PCR 장비에 적용하여 바이오 시료의 적정 온도를 유지할 수 있는 사이클 시스템에 활용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(202000960001).

참고문헌

[1] Colleen Belk and Virginia Borden Maier, “Biology-Science for Life with Physiology”, 3rd ed., Benjamin-Cummings, (2009).

[2] Prescott, L.M., Harley, J.P., and Klein, D.A., “Microbiology”, 5th ed., McGraw-Hill, INC, pp.126-127, (2002).

[3] M.T. Madigan, J.M. Martinko, J. Parker, T.D. Brock, “Brock Biology of Microorga-nisms”, 8th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, (1997).

[4] C. Vieille, G. J. Zeikus, “Hyperthermophilic Enzymes: Sources, Uses, and Molecular Mechanisms for Thermostability”, Microbiol. Mol. Biol. Rev. 65, pp.1-43, (2001).

[5] Do Chang Oh, Jong Hae Kim, Seuk Yong Cho, “Thermal Cycling Control System Design for Polymerase Chanin Reaction(PCR) Machine”, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.12, no. 5, pp. 419-424, (2006).

[6] Jing Huang, Zhangwei Chen, Kewei Hu, “FEA for Steady-State Thermal Performance of PCR Thermal-Cycler Based on Thermoelectric Cooler”, IEEE. BMEI, pp. 1097-1100, (2011)

[7] X Qiu, J Yuan, “Temperature Control for PCR Thermocyclers Based on Peltier-Effect Thermoelectric”, IEEE Engineering in medicine and Biology 27th annual conference, pp. 7509-7512, (2005).

[8] Jae Seol Cho, Se Hun Jung, Jae Young Nam, Jae Boong Choi, Young Jin Kim, "Application of thermoelectric module to DNA amplifyng thermal cycle system", KSME, pp. 210-215, (2004).

(접수: 2023.01.16. 수정: 2023.01.20. 게재확정: 2023.01.27.)