

피에조 팬 냉각 성능 측정을 위한 실험장치 구축

오명훈* · 박수현* · 고재익* · 최민석[†]

Experimental Facility for Measuring the Cooling Performance of a Piezoelectric Fan

Myong Hun Oh*, Soo Hyun Park*, Jae Ik Ko* and Minsuk Choi[†]

Abstract In this study, an experimental facility has been built to measure the cooling performance of a piezoelectric fan. The facility is composed of a heat source made of 50 μm Ni-Cr foil, a piezoelectric fan and a rotary fan for cooling the heat source. For two cases where the foil is vertical or horizontal, the surface temperature on the foil has been measured by an IR camera with and without cooling and the cooling performance of both fans has been analyzed. With cooling by both fans, the rotary fan lowers the surface temperature of the foil as a whole, while the piezoelectric fan lowers the surface temperature at the center of the foil locally. It is also found that the cooling effectiveness of the piezoelectric fan is higher on the horizontal foil than on the vertical foil because the natural convection interferes with the jet from the piezoelectric fan.

Key Words : Piezoelectric Fan(피에조 팬), Cooling Performance(냉각성능), Experimental Facility(실험장치)

기호설명

- f_0 : 피에조 팬 공진주파수
- h_0 : 피에조 팬 최대 진폭
- L : 피에조 팬 실제 길이
- τ : 피에조 팬 폭

1. 서론

새로운 공정 및 제작기법의 발달로 전자 부품의 크기가 점점 작아지고 전자장비의 집적도가 높아지기 때문에, 전자 부품 및 장비의 온도를 적절하

게 제어할 필요성이 높아지고 있다. 일반적으로 회전형 팬이 주요 냉각 장치로 사용되고 있지만, 회전형 팬은 일정크기 이하로 만들기 어렵고 크기가 작아질수록 공력 및 냉각 성능이 감소하는 단점이 있다. 최근, 피에조 물질을 도포한 진동 평판이 작은 부품 소자를 냉각하기 위한 대체 도구로 대두되고 있는데, 피에조 팬은 구조가 간단하여 작은 크기로 만들기 쉬울 뿐만 아니라 소모 전력이 적고 냉각에 필요한 충분한 풍량을 만들어내는 장점이 있다.

진동평판의 원리가 부채와 같음에도 불구하고, 1970년대에 들어서서 Toda^[1,2]가 처음으로 진동평판이 유동을 발생시키는 원리를 분석하였고 진동평판이 트랜지스터를 냉각시킬 수 있음을 확인하였다. 그 이후로 많은 연구자들이 진동평판 주위에

[†] Dept. of Mechanical Engineering, Myongji Univ.
E-mail: mchoi@mju.ac.kr

* Dept. of Mechanical Engineering, Myongji Univ.

발생하는 유동을 이해하고 진동평판의 냉각성능을 높이기 위한 이론 및 실험 연구를 수행하였다.^[3-9] 특히, Kim 등^[5,6]은 피에조 팬 주위의 유동을 PIV(Particle Image Velocimetry) 기법을 이용해서 측정하고 팬의 끝단으로부터 반대로 회전하는 두 개의 와류가 번갈아 가며 발생함을 보였다. Açikalin 등^[7]은 피에조 팬의 여러 변수들을 변화시켜 실험을 수행한 후, 팬의 공진주파수와 실제 진동수의 차이와 팬의 진폭이 팬의 냉각성능을 결정하는 중요한 두 개의 인자임을 밝혔다. Eastman과 Kimber^[8,9]는 피에조 팬에 의해서 생성되는 주력을 측정하였고 팬의 성능을 개선할 수 있는 끝벽의 형상을 제안하였다.

최근 동적 격자 및 경계조건에 대한 수치해석 기법의 발전은 연구자들이 진동하는 평판 주위의 유동을 수치적으로 해석하고 연구할 수 있는 기반을 마련하였다.^[10-16] 특히, Choi 등^[11]은 피에조 팬 주위유동에 대한 2차원 수치해석 결과를 Kim 등^[5]의 결과와 비교하여 검증하였고, 팬 끝단에서의 압력 차이에 의해서 와류가 생성됨을 발견하였다. Lin^[12,13]은 3차원 수치해석을 통해서 피에조 팬의 냉각효과에 대한 예측을 수행하고, 실험을 통해 계산의 정확성을 검증하였다. Agarwal 등^[14]은 3차원

유동해석과 PIV기법을 이용한 실험을 통해서 진동하는 평판 주위에 말발굽 모양의 와류 튜브가 생성됨을 확인하였다. Oh 등^[15,16]은 최근 육면체 격자만을 이용한 수치해석을 통해서 끝벽으로 둘러싸인 피에조 팬에서 발생하는 와류의 3차원 형상을 명확하게 제시하였다.

본 연구 그룹에서는 다년간의 연구를 통해서 피에조 팬 주변에서 발생하는 3차원 와류의 형상을 정확하게 파악할 수 있는 수치해석 기법을 확립하였고, 실험을 통해서 충분히 검증하였다.^[11,15,16] 이러한 선행연구를 토대로 최근 피에조 팬 냉각성능 예측을 위한 수치해석 연구를 시작하였으며, 수치해석 연구 결과의 검증을 위한 실험장치를 구축하였다. 이 연구에서는 구축된 실험장치를 통해서 피에조 팬 냉각 성능을 측정하였으며, 열원인 니크롬(Ni-Cr) 박판의 설치 방향(수직/수평)에 따른 영향을 고려하였다.

2. 피에조 팬 냉각 실험 장치

실험장치는 크게 발열평판과 냉각장치인 피에조 팬 및 회전형 팬으로 구성되어 있다. Fig. 1 및 2와 같이 발열평판과 피에조 팬은 주위의 영향을

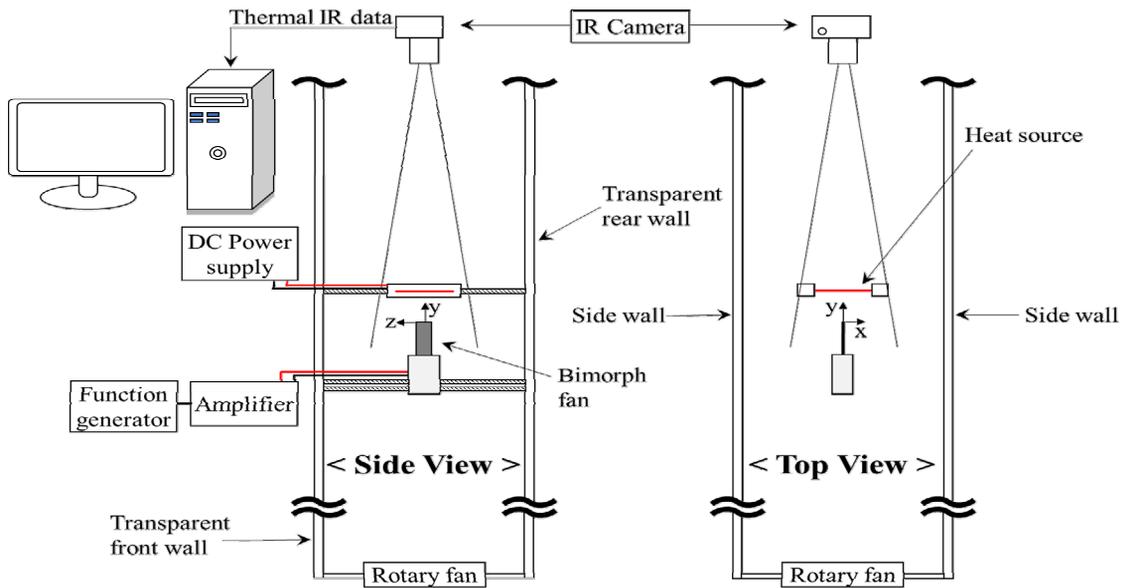


Fig. 1. Schematic diagram of experimental facility for measuring the cooling performance of a piezoelectric fan

최소화 하기 위해서 폭 200mm, 높이 190mm, 길이 1,000mm인 아크릴 챔버에 둘러싸여 있으며, 회전형 팬은 아크릴 통의 입구에 부착되어 있고 출구는 개방되어 있다. Fig. 3은 구축된 실험장치를 수직으로 설치한 사진으로, 수평으로 설치했을 때보다 자연 대류에 의해서 평판의 온도에 불균일이 발생하는 것을 방지할 수 있다. 참고로 실험장치를 수직으로 배치하면 박판이 수평이 되고, 실험 장치를 수평으로 배치하면 박판이 수직이 된다.

발열 평판은 폭 100mm, 높이 40mm, 두께가 $50\mu\text{m}$ 인 니크롬 박판으로 최대한 균일하게 전류를 흘려주기 위해서 구리 판으로 양 끝이 고정되어 있기 때문에, 실제로 유동에 노출되는 면적은 폭 70mm, 높이 40mm이다. 발열평판에 전원을 공급하기 위해서 Toyotech 사의 DP30-10DU 전원장치를 사용하였으며 공급되는 전압은 0.9V이고 전류는 10A이다.

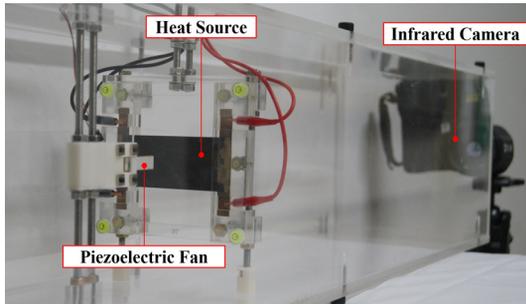


Fig. 2. Main components for the experimental facility

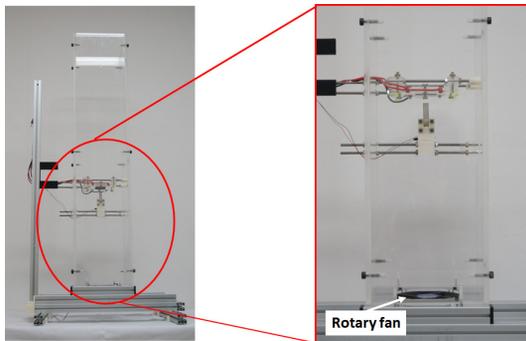


Fig. 3. Horizontal configuration of a Ni-CR foil

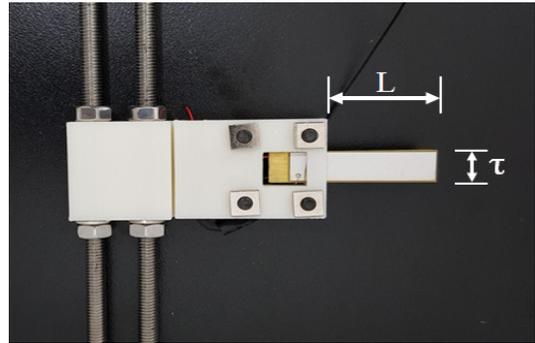


Fig. 4. Piezoelectric fan clamped by a block

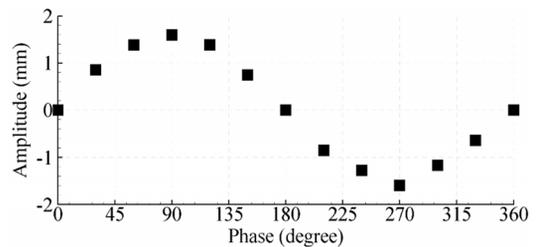


Fig. 5. Tip deflection of piezoelectric fan during a period

니크롬 박판의 온도를 측정하기 위해서 열화상 카메라인 FLIR 사의 T530sc 모델을 이용하였다. 모든 물체는 절대온도 이상의 온도를 가지고 있고 그 온도에 상응하는 열에너지를 적외선 형태로 방산하고 있는데, 열화상 카메라는 적외선의 열에너지를 측정하여 온도로 표시한다. T530sc 모델의 해상도는 320×240 픽셀(pixel)이고, 열 민감도와 정확도는 30°C 기준으로 0.03°C 와 $\pm 2\%$ 이다. 각 실험에서는 5분 동안 니크롬 박판의 온도를 7,800번 측정하였으며, 박판의 온도 분포가 준정상 상태에 도달한 후의 데이터만 평균하여 사용하였다. 니크롬 박판에 의한 빛의 반사를 줄이기 위해서 무광택의 검은색 페인트로 코팅하였으며, 이 때 니크롬 박판의 방사율은 Kimber와 Garimella^[17]를 참고하여 0.95로 설정하였다.

피에조 팬은 PiezoDrive사의 BA4510 모델로 전체 길이는 45mm, 폭(τ)은 10mm, 두께는 0.5mm이지만, Fig. 4와 같이 블록에 고정했을 때 실제 움직이는 길이(L)는 30mm이다. 이 피에조 팬에 100V의 교류 전압을 공진주파수(f_0)인 170Hz로 걸어주

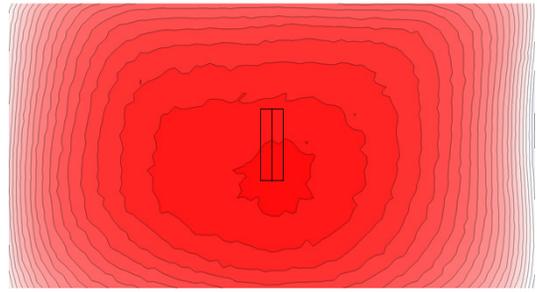
면 피에조 팬의 끝은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 썩인 파형을 따라 진동하며, 이 때 최대 진폭(h_0)은 1.6mm이다. 피에조 팬의 끝단은 니크롬 박판으로부터 3mm 떨어져 있으며, 박판에 수직으로 설치되어 있다. 피에조 팬에 전원을 공급하는 함수 발생기와 앰프는 각각 Agilent사의 33210A 모델과 NF Cooperation사의 BA4825를 이용하였다.

로터리 팬은 개인 컴퓨터 냉각에 많이 사용되는 Zalman사의 직경 120mm ZM-F3 모델을 사용하였다. 이 모델은 팬에 부가되는 전압 및 전류에 따라 회전수가 변하지만, 이 냉각실험에서는 팬 회전수를 685rpm으로 고정하였고, 이 때 팬 하류의 평균 유속은 약 0.35m/s이다.

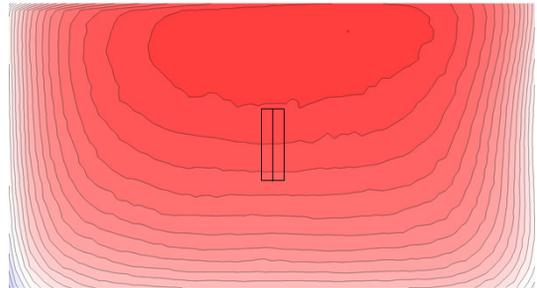
3. 박판 온도 측정 결과

Fig. 6은 니크롬 박판에 전원을 연결한 후 온도 분포가 더 이상 변하지 않을 때 온도를 측정된 결과를 나타내는데, 그림에서 검은색 박스는 피에조 팬의 끝이 움직이는 영역을 나타낸다. 수직으로 실험장치를 설정했을 경우에는 니크롬 박판이 수평으로 위치하므로 온도가 중심에서 높게 나타나고 가장자리로 갈수록 낮은 온도가 나타나는데, 박판 중심을 기준으로 상하좌우 대칭의 형상을 가진다. 그러나, 실험장치를 수평으로 배치한 경우에는, 박판이 수직으로 배치되기 때문에 자연 대류에 의해서 평판의 아래쪽이 냉각되면서 온도가 가장 높은 영역이 박판 위쪽으로 이동하고, 니크롬 박판의 온도가 전체적으로 낮아진다.

니크롬 박판의 냉각을 위해서 피에조 팬만 작동시킨 경우에 박판의 온도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 피에조 팬에 의해서 번갈아 가면서 발생하는 와류는 와류 사이에 강한 제트를 생성한다. Kim 등^[5]과 Eastman과 Kimber^[9]에 따르면, 피에조 팬 하류에서 와류에 의해서 형성되는 유동의 시간 평균된 형태는 정지된 대기 중으로 분출되는 제트의 형상과 같다. 따라서, 피에조 팬에서 발생한 제트가 니크롬 박판에 부딪힌 후 좌우로 이동하면서 박판 표면의 온도를 상당히 감소시킨다. 이러한 현상은 온도 골(trough)이 피에조 팬의 앞부분에서 좌우로 발생하는 것으로 확인할 수 있다. 박판이 수평으로 배



(a) Horizontal foil

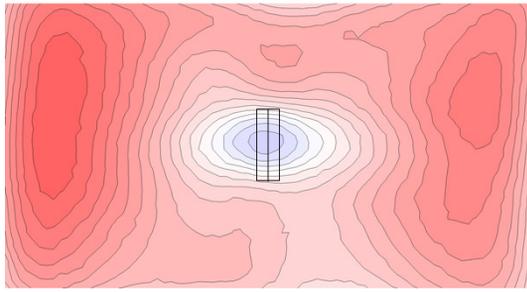


(b) Vertical foil

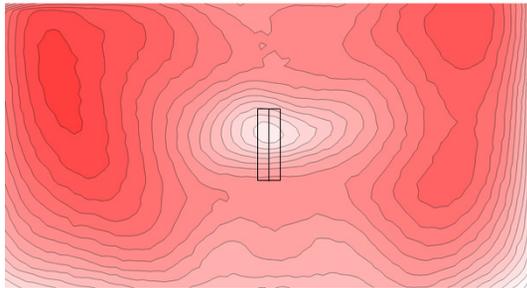


Fig. 6. Temperature distribution on Ni-Cr foil without cooling (unit: °C)

치되어 있는 경우에는 피에조 팬을 중심으로 대체로 온도장이 상하좌우 방향으로 대칭이 되지만, 박판이 수직으로 배치되어 있을 때는 박판 상부의 온도장이 더 높게 나타난다. 이 그림에서 파악할 수 있는 다른 중요한 점은 동일한 피에조 팬을 동일한 조건으로 작동시켰지만, 수평으로 박판이 배치된 경우에 피에조 팬의 냉각효과가 더 높아 평판 중심에서 더 낮은 온도를 가진다는 것이다. 이것은 박판이 수평인 경우에는 피에조 팬에 의해서 발생한 제트가 박판에 수직으로 직접 부딪쳐 박판을 냉각시키지만, 수직으로 박판이 배치된 경우에는 자연 대류와 피에조 팬의 제트가 서로 간섭하여 박판에 부딪히는 속도를 감소시키고 아래쪽의 데워진 공기가 자연대류에 의해서 중심으로 상승하여 중심 온도를 더 높여주기 때문이다.



(a) Horizontal foil

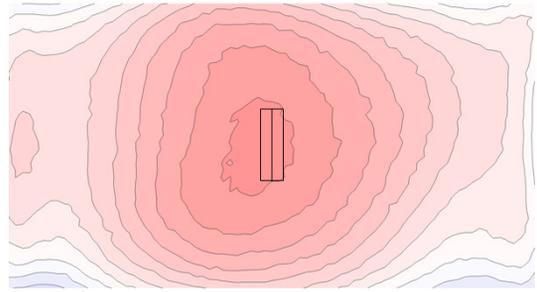


(b) Vertical foil

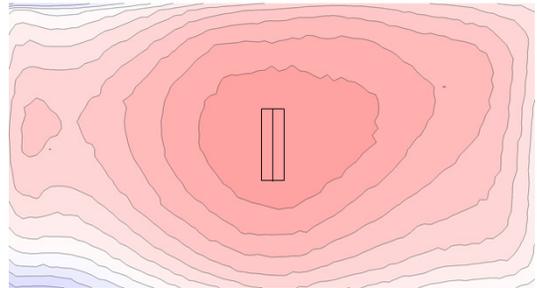


Fig. 7. Temperature distribution on Ni-Cr foil with cooling by piezoelectric fan only (unit: °C)

Fig. 8은 니크롬 박판을 회전형 팬을 통해서 냉각하는 경우에 온도 분포를 나타낸다. 회전형 팬에 의해서 발생하는 유동은 박판을 감싸고 지나가게 되는데, 이 때문에 전체적으로 박판 표면의 온도가 감소하게 된다. 특히, 박판 상부 및 하부 가장자리의 온도가 많이 떨어지는데, 좌우에는 박판을 고정하기 위한 부분이 주변 유동을 방해하여 회전형 팬에 의한 유동이 대부분 박판 상부와 하부로 지나가기 때문이다. 이 때문에 박판의 중심에서 온도가 가장 높게 나타난다. 특이한 점은 박판이 수직으로 배치된 경우에도 박판의 중심에서 온도가 가장 높게 나타난 것인데, 이것은 회전형 팬에 의한 유동이 박판의 온도에 의해서 발생하는 자유 대류보다 강하기 때문에, 자연대류에 의한 효과가 상대적으로 줄어들기 때문이다.



(a) Horizontal foil



(b) Vertical foil



Fig. 8. Temperature distribution on Ni-Cr foil with cooling by rotary fan only (unit: °C)

회전형 팬을 작동하는 경우에도 박판의 중심에서 가장 높은 온도를 나타내기 때문에, 중심 온도를 낮추기 위해서 최종 실험에서는 회전형 팬과 피에조 팬을 모두 작동시켰다. 그 결과 Fig. 9에 나타난 것처럼 회전형 팬에 의해서 전체적으로 박판의 온도가 감소하였고, 중심에서 온도가 높은 부분은 피에조 팬에 의해서 독립적으로 냉각시킬 수 있었다. 이 실험에서도 박판이 수평으로 배치된 경우에 박판 중심에서 더 높은 냉각효과를 얻을 수 있었다. 박판이 수직인 경우에는 피에조 팬에 의해서 온도가 높은 영역이 박판 좌우 가장자리로 밀려가 있지만, 수직인 경우에는 온도가 높은 영역이 중심과 가장자리의 중간 정도에 형성된다. 이러한 차이는 피에조 팬에 의해서 발생하는 제트와 자연대류의 간섭 때문으로 예상되지만, 추후 수치해석을 통해서 정확하게 분석되어야 한다.

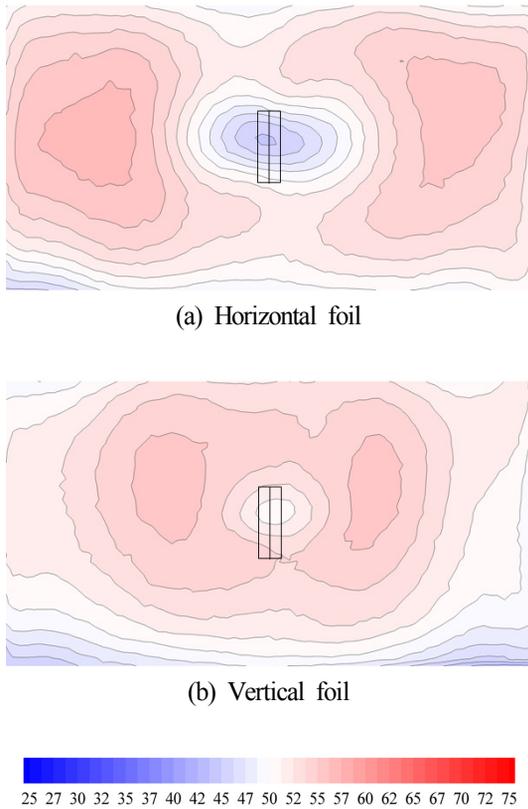


Fig. 9. Temperature distribution on Ni-Cr foil with cooling by both piezoelectric fan and rotary fan (unit: °C)

실험을 수행한 각각의 경우에 온도 변화를 정량적으로 판단하기 위해서, 니크롬 박판을 좌우로 가로지르는 중심선을 따라 온도분포를 Fig. 10에 나타내었다. 각각의 경우에 박판 중심에서의 온도는 Table 1에 나타내었다. 박판을 수평으로 배치한 경우에 박판의 중심 온도가 수직으로 배치한 경우보다 더 높다. 그러나, 피에조 팬을 작동한 경우에 수평으로 배치된 박판에서는 중심온도가 약 28°C 감

Table 1. Static temperature at the center of Ni-Cr foil depending on the orientation of the facility

| Temperature(°C) | Vertical | Horizontal |
|--------------------------------|----------|------------|
| Without Cooling | 73.75 | 67.56 |
| Piezoelectric fan only | 45.66 | 52.46 |
| Rotary fan only | 60.40 | 59.93 |
| Piezoelectric fan + Rotary fan | 44.80 | 50.72 |

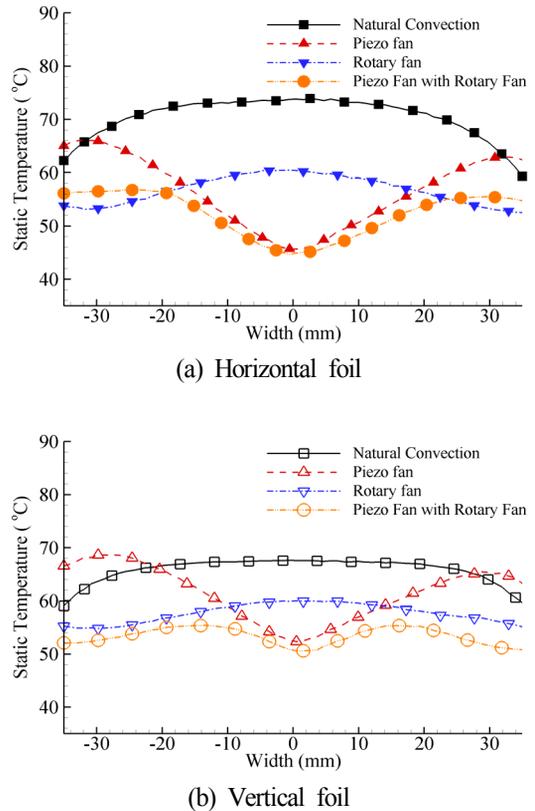


Fig. 10. Temperature distribution along the center line

소하였고, 수직으로 배치된 박판에서는 약 15°C 감소하였다. 결과적으로 피에조 팬은 박판이 수평으로 배치된 경우에 더 높은 냉각 성능을 얻을 수 있었다. 회전형 팬만 작동하는 경우에는 회전형 팬에 의한 유동이 자유 대류보다 커 두 평판의 온도가 비슷하게 유지되었다. 회전형 팬 및 피에조 팬을 동시에 작동시킨 경우에는, 회전형 팬이 니크롬 박판의 온도를 전체적으로 감소시키고 피에조 팬이 박판 중심의 온도를 국부적으로 냉각시켜 더 나은 냉각효과를 얻을 수 있었다. 그리고, 박판이 수평으로 배치된 경우에 수직으로 배치된 경우보다 더 낮은 중심 온도를 얻을 수 있었다.

4. 결론

피에조 팬의 냉각효과를 측정하기 위한 실험장치를 구축하였고, 회전형 팬과의 조합 냉각 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 니크롬 박판을 수직으로 배치한 경우에 자연 대류에 의한 냉각효과로 박판의 중심 온도가 더 낮았으며 온도가 가장 높은 영역이 박판의 상부에 나타난다. 반면에, 박판을 수평으로 배치하는 경우에는 박판 중심에서 가장 높은 온도가 관찰되었다.
2. 박판을 수평으로 배치한 경우에 수직으로 배치한 경우보다 피에조 팬이나 회전형 팬에 의한 냉각효과가 더 높게 나타났다.
3. 회전형 팬은 박판의 온도를 전체적으로 감소시키지만 피에조 팬은 국부적으로 온도를 상당히 감소시킨다. 그 결과 두 팬을 동시에 작동시킬 경우에는 각각의 냉각 효과가 더해진 효과를 얻을 수 있다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업(No. 2016R1D1A1B03932666) 결과임.

REFERENCE

- 1) Toda, M., 1978, "Theory of Air Flow Generation by a Resonant Type PVF2 Bimorph Cantilever Vibrator," *Ferroelectrics*, Vol. 22, pp. 911~918.
- 2) Toda, M., 1981, "Voltage-induced Large Amplitude Bending Device - PVF2 Bimorph - its Properties and Applications," *Ferroelectrics*, Vol. 32, pp. 127~133.
- 3) Burmann, P., Raman, A. and Garimella, S. V., 2002, "Dynamics and Topology Optimization of Piezoelectric Fans," *IEEE Trans. Compon. Packaging Technol.*, Vol. 25, pp. 592~600.
- 4) Açikalin, T., Raman, A. and Garimella, S. V., 2003, "Two-dimensional Streaming Flow Induced by Resonating Thin Beams," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 114, 1785~1795.
- 5) Kim, Y. -H., Wereley, S. T. and Chung, C. -H., 2004, "Phase-resolved Flow Field Produced by a Vibrating Cantilever Plate between Two Endplates," *Phys. Fluids*, Vol. 16, pp. 145~162.
- 6) Kim, Y. -H., Cierpka, C. and Wereley, S. T., 2011, "Flow Field around a Vibrating Cantilever: Coherent Structure Eduction by Continuous Wavelet Transform and Proper Orthogonal Decomposition," *J. Fluid Mech.*, Vol. 669, pp. 584~606.
- 7) Açikalin, T., Garimella, S. V., Raman, A. and Petroski, J., 2007, "Characterization and Optimization of the Thermal Performance of Miniature Piezoelectric Fans," *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 806~820.
- 8) Eastman, A., Kiefer, J. and Kimber, M., 2012, "Thrust Measurements and Flow Field Analysis of a Piezoelectrically Actuated Oscillating Cantilever," *Exp. Fluids*, Vol. 53, pp. 1533~1543.
- 9) Eastman, A. and Kimber, M., 2014, "Analysis of Three-dimensional Attributes and Flow Intake for an Oscillating Cantilever," *Exp. Fluids*, Vol. 55, p. 1664.
- 10) Açikalin, T. and Garimella, S. V., 2009, "Analysis and Prediction of the Thermal Performance of Piezoelectrically Actuated Fans," Vol. 30, pp. 487~498.
- 11) Choi, M., Cierpka, C. and Kim, Y. -H., 2012, "Vortex Formation by a Vibrating Cantilever," *J. Fluids Struct.*, Vol. 31, pp. 67~78.
- 12) Lin, C. -N., 2012, "Analysis of Three-dimensional Heat and Fluid Flow Induced by Piezoelectric Fan," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 55, pp. 3043~3053.
- 13) Lin, C. -N., 2013, "Heat Transfer Enhancement Analysis of a Cylindrical Surface by a Piezoelectric Fan," *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 50, pp. 693~703.
- 14) Agarwal, A., Nolan, K. P., Stafford, J. and Jeffers, N., 2017, "Visualization of Three-dimensional Structures Shed by an Oscillating Beam," *J. Fluids Struct.*, Vol. 70, pp. 450~463.
- 15) Oh, M. H., Park, S. H., Kim, Y. -H. and Choi, M., 2018, "3D Flow Structure around a Piezoelectrically Oscillating Flat Plate," *Eur. J. Mech. B-Fluids*, Vol. 67, pp. 249~258.
- 16) Oh, M. H., Seo, J., Kim, Y. -H. and Choi, M., 2018, "Endwall Effects on 3D Flow around a Piezoelectric Fan," *Eur. J. Mech. B-Fluids* (in press).
- 17) Kimber, M. and Garimella, S. V., 2009, "Measurement and Prediction of the Cooling Characteristics of a Generalized Vibrating Piezoelectric Fan," *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 52, pp. 4470~4478.