

## 압전세라믹 냉각팬에 대한 수치해석적 연구

박지호<sup>1</sup> · 김은필<sup>†</sup>

(원고접수일 : 2011년 6월 17일, 원고수정일 : 2011년 9월 27일, 심사완료일 : 2011년 9월 27일)

### A Numerical Analysis in Piezoelectric Fan Systems

Ji-Ho Park<sup>1</sup> · Eun-Pil Kim<sup>†</sup>

**요약** : 본 논문은 압전소자의 주기적인 발진운동을 탄성 변환하여 유체유동을 유발하는 압전소자 팬의 수치해석 모델에 대한 연구이다. LED 모듈 등의 고밀도 열이 발생하는 소형 전자장치의 냉각에 적용이 가능한 압전소자 냉각팬의 성능 향상을 위해 CFD 도구를 이용하였다. 본 논문의 결과는 압전소자의 길이 5cm와 방열판의 길이 3cm라는 비율이 효과적이었다. 이는 기하학적으로 비슷한 형태를 가지고 다른 치수를 가지는 모델에서 기초적인 설계를 하는데 도움이 될 것이다.

**주제어** : 압전소자 팬, 냉각팬, 전산열유체, Dynamic Mesh

**Abstract**: In this study, the piezoelectric fan cooling system is investigated. In order to find the proper geometry and configuration, the numerical model for the flow field and heat transfer investigation is used. A simplified nonlinear deformation model is employed for transient solutions of a piezoelectric fan with the dynamic mesh and user defined function capability. The results show that the cooling is most effective when the length of a piezoelectric fan is 5 cm and the cooling plate is 3 cm. The results can be used to develop a new design method of heat sink for piezoelectric fans.

**Key words**: Piezoelectric fan, electronic device cooling, CFD, Dynamic Mesh

### 1. 서 론

최근의 전자기기의 부품 중 CPU(중앙처리 장치)나 LED와 같은 반도체 소자의 경우 기술의 발전에 따라 성능 및 효율이 향상되면서 그 크기가 점점 소형화되고 있으며, 모바일 분야의 경우에도 이러한 반도체 집적 기술의 발달과 리튬이온 배터리 등의 전력 저장 기술의 발달로 차츰 고성능의 CPU나 GPU(그래픽 처리 장치) 등이 탑재되면서 소형의 장치에 다양한 기능을 가진 제품들이 경쟁적으로 출시되고 있다. 그러나 반도체 소자는 그 소모 전력 만큼의 발열을 필연적으로 동반하게 된다. 저전력 성능을 요구하는 시장의 추세에 따라 소비전력은 줄어들었지만 이러한 저전력 기술을 실현시

키는 것 중에 가장 큰 역할을 한 것이 고밀도 집적기술이었기 때문에 소자의 표면적 또한 급격히 작아져 단위면적당 발열량은 오히려 증가하였기 때문에 전자장치의 안정적인 작동 및 사용자의 안전한 사용을 위해 반도체 소자 부품의 표면온도를 유지하는 것이 점점 더 큰 도전이 되어가고 있다.

이러한 기술적 난관을 극복하기 위하여 소형 전자부품의 냉각을 위한 새로운 방식들이 시도되고 있으며 기존의 방열판과 축류식 팬을 조합한 방식도 많은 개선이 이루어 졌다. 하지만 일반적인 방열판과 팬의 조합의 적용이 어려운 작은 부피를 가지는 제품에서도 기존의 자연대류에 의존하던

<sup>†</sup> 교신저자(부경대학교 냉동공조공학과, E-mail:ekim@pknu.ac.kr, Tel:051-629-6182)

<sup>1</sup> 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

냉각방식으로는 곤란한 상황이 되어 가고 있고 휴대용 장치의 경우에는 보다 소비전력이 적은 방식이 필요하게 되므로, 이를 해결하기 위한 효과적인 냉각방법에 대한 연구가 요구되는 실정이다. 압전소자 팬은 그러한 설치 공간, 소비 전력의 최소화 및 소음 면에서 한계를 가지는 기존의 방식을 대체 할 수 있는 가능성을 가지고 있다.

압전소자 팬(Piezoelectric fan)이란 그림 1[1]에 나타낸 것처럼, 극성이 다른 압전소자를 서로 맞대어 굽힘 운동이 발생하도록 한 것에 인가되는 전류의 극성을 주기적으로 바꾸어 그 입력된 전류의 주파수에 따른 진동을 발생하게끔 하고 그 끝에 얇고 긴 진동판을 부착하여 압전소자의 진동을 증폭시킨 장치이다.

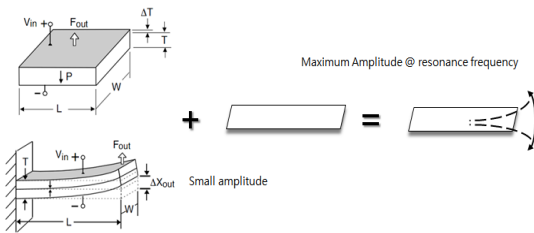


그림 1: 압전소자의 구동 원리와 압전 소자 팬의 작동 원리.

이러한 압전소자의 작동은 초당 50~100회 정도로, 마치 매우 빠른 속도의 부채질을 하는 것과 같은 효과로 진동판 주변에 유동을 만들어 내며 이때 진동판 끝의 진폭은 해당 압전소자 팬의 공진 주파수와 같은 주파수의 전류가 인가되었을 때 같은 전압에서 최대의 진폭을 갖게 된다. 따라서 압전소자 팬은 공진 주파수 영역에서 작동하게 되며 이때의 주파수를 가청 주파수대역 이하로 할 수 있다면 무소음 운전도 가능하게 된다[2].

[2]은 수치해석적인 방법을 통하여 공진주파수에서 진동하는 빔의 2차원 유동을 시각화하고 실험을 통한 유동의 시각화와 비교하였다. 그리고 DOE 분석 기법을 활용한 실험 데이터를 기반으로 압전소자 팬의 최적 설계에 대한 전달 함수를 제시하고 CFD를 이용하여 이차원 환경에서의 과도해석을 통해 압전소자 팬에 의해 유도된 유동을 시각

화하였으며 열전달 성능을 시뮬레이션하였다. 또한 소형 전자기기의 냉각에 대한 압전 소자 냉각 팬의 실용성에 대해서도 Acikalin과 [3]이 연구하였다. 그리고 [4]은 지지대를 통한 압전소자 팬의 내구성 향상 및 얇은 압전소자 여러 겹으로 구성된 다층 구조를 통해 같은 크기에서도 낮은 전압에서 작동하여 보다 낮은 전력소비를 보이는 압전소자 팬을 제작하였고 실험을 통해 실제 제품에 응용한 사례를 보여 주었으며, 압전소자 팬에 대한 몇 가지 새로운 디자인 들을 제시하였다. [5]는 밀폐된 공간 내에서의 압전소자 팬의 열 성능에 대한 실험적 연구를 통해 유동을 시각화하고 최적 열 성능을 위한 압전소자 팬의 배치에 관한 데이터를 제시하였다.

상기의 연구들은 소형 전자 부품들에 대한 압전소자 팬의 냉각 성능을 입증 하고 이러한 압전소자 팬의 성능 향상 및 소음, 설치 공간에 있어서의 최적화 등에 관한 연구에 초점을 둔 것을 알 수가 있다. 본 연구에서는 다양한 변수에 적용 가능한 설계를 위해 압전소자 팬의 CFD 해석 모델을 개발하고, 이를 바탕으로 좁은 공간에서 열전달 면적을 늘릴 수 있는 압전소자 팬의 방열판 설계를 개발하여 압전소자 팬의 성능을 향상 시키고자 하였다. 이를 위하여 우선 Dynamic mesh의 적용과 같이 주기적으로 운동하는 압전소자 팬에 관한 CFD 모델의 구축에 있어 필수적인 요소들을 이차원 환경에서 분석검토 하여 기반이 되는 모델을 구축하였고 이것을 토대로 압전소자 팬에 적용 할 새로운 방열판 디자인의 개념을 적용한 분석을 실시하였다.

## 2. 압전소자 팬의 방열판 설계

그림 2는 가상의 수직면에 대한 압전소자 팬 주변의 열전달을 제외한 유동만을 나타낸 것이다. 팬 날 끝 주변에 원형의 회전하는 유동이 발생하고 이것이 가까이 위치한 수직면에 눌러져 수직면을 따라 더 강한 유속이 발생한다는 것을 볼 수가 있다.

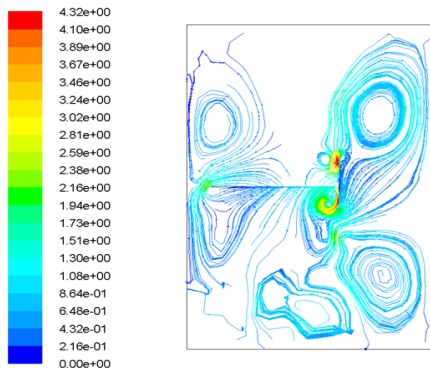


그림 2: 팬 주변의 유동.(유속, m/s)

지금까지 진행된 압전소자 팬의 연구들에서 보여진 문제들 중 하나는 적용 가능한 방열 면적을 늘리는 것이 난해하다는 것이 있으며 이것은 보통 압전소자에 팬에 의해 발생한 유동이 유속은 상당해도 그 효력을 발생 시키는 공간이 작기 때문에 압전소자 팬에 적용되는 방열 면은 팬의 날 끝과 수직인 좁은 면에 국한되기 때문이었다.

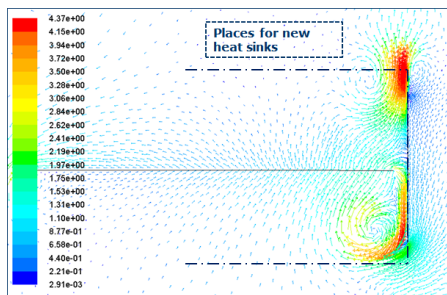


그림 3: 방열판의 위치에 대한 계획.

그러나 그림 2 및 3에서도 나타난 바와 같이 유도된 유동은 회전하는 형태로, 그 접촉면을 수직면 단 하나가 아닌 2개 이상으로 하는 것이 가능하다. 따라서 유도된 회전 형태의 유동을 작은 공간 내에 유지시키면서 그로인한 열전달 면적을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 그림 3은 이러한 개념을 나타낸 것이며, 이를 통해 2가지의 새로운 모델을 제시해 보았다.(그림 4) 모델 1은 압전소자 팬의 주변을 가로막는 형태의 방열판이며, 모델 2는 그러한 방열판에 부하 면에 바로 맞닿은 수직면 바로 위의 위치에 작고 가는 직사각형의

홈을 낸 형태의 것이다. 이 홈은 모델 1에서 예상되는 유체의 정체현상을 해결하기 위한 것이며 후술하는 바와 같이 이 홈을 통해 발생한 팬 날 끝 상하의 상이한 압력차로 인해 핀 외부 유체와의 교류가 있는 것을 볼 수가 있었다.

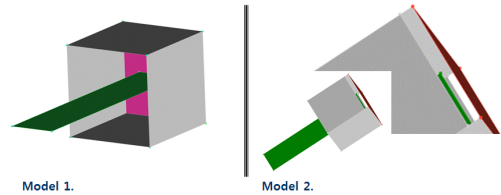


그림 4: 방열판의 두 가지 모델.

### 3. 수치해석 모델

#### 3.1 압전소자 팬 모델

압전소자 팬의 크기 및 작동 조건은 상대적인 검토가 용이하고 시뮬레이션을 간소화하기 위해 간략화된 것을 취하였다. 그에 따른 팬의 사양은 표 1과 같다. 압전소자에 적용되는 열 부하는 면적  $2\text{cm}^2$ 을 가지는 정사각형 평면을 가정하여 2D 도메인에서 수직으로 2cm 길이를 가지는 면으로 설정하였으며 이 면적에 방열량 1W를 상정하여 여기에 따른 열 유속을 경계조건으로 삽입하였다(표 2). 또한 이 표들의 값은 시뮬레이션 간에 서로 동일한 경계조건의 값이 된다.

시뮬레이션에서 압전소자 팬은 주변 공기의 온도가 300K를 유지하는 2D 공간에 위치하며 각기 다른 길이를 가지는 압전소자용 방열판이 적용된 경우들에 대하여 각각 연산이 수행되었다.

표 1: 시뮬레이션 상의 압전소자 팬 사양.

길이	5 cm
너비	1 cm
진폭	1 cm (상하 0.5cm)
주파수	50 Hz

표 2: 압전소자에 수직인 방열 표면.

면적	$0.0004 \text{ m}^2$ (2cm × 2cm)
방열량	1 W
열 유속	$2,500 \text{ W/m}^2$

시뮬레이션 내에서의 압전소자 팬은 그림 6의 왼쪽 항목에서 볼 수 있는 것처럼, 그 수직 단면을 묘사하여 주변 돌레의 온도가 300K를 유지하는 15cm × 20cm 의 닫힌 공간에 위치하도록 하였으며 주기적인 운동으로 유체유동을 유발하는 압전 팬의 운동 및 그 유동은 FLUENT의 UDF 및 Dynamic mesh를 통해 구현하였다[6]. 그리고 이러한 압전 팬의 움직임을 나타내는 데 간단한 2차 곡선의 움직임을 한다고 가정하였으며 식 (1), (2)와 같이 정의한다.

$$G(x) = \left(\frac{x}{L}\right)^2 \times \frac{1}{2} Amp \tag{1}$$

$$y(t) = G(x) \times \sin(2P\pi t) \tag{2}$$

식 (1)의 G(x)는 압전소자로 가정된 외팔보의 고정점을 원점으로 하는 수평선의 x방향의 변위(노드의 좌표 값)에 따른 y축 방향으로의 변화량이다. G(x)는 식 (2)의 y(t)에 삽입되어 사인파 형태의 주기를 갖게 하였으며 미리 주어진 값들인 식 (1), (2)의 Amp와 L 및 P에 의해 압전 소자의 움직임을 묘사하게 하였다. 여기서 Amp와 L 그리고 P는 각각 압전소자 팬의 진폭 및 길이, 주파수이며 이 값들은 임의로 설정되거나 실험 시에 사용되는 압전소자 팬의 사양이 될 수 있다. 본 연구에서는 비례적인 정보 수집 및 시뮬레이션의 간소화를 위하여 임의의 값이 사용 되었다(예: 방열판 모델의 편 길이 1cm~5cm).

3.2 유체 유동의 지배 방정식

본 시뮬레이션에 적용된 지배 방정식은 다음과 같다.

질량보존 방정식

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{3}$$

운동량 보존 방정식

x-momentum

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \tag{4}$$

y-momentum

$$\nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \tag{5}$$

에너지 방정식

$$\nabla \cdot (\rho h_0 \vec{V}) = -p \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \tag{6}$$

상태 방정식

$$p = \rho RT \tag{7}$$

여기서 각 변수는 참고문헌[7]을 참조한다.

3.3 시뮬레이션

과도해석으로(transient solution) 수행한 본 연구에서의 시뮬레이션에 사용된 이차원 도메인은 그림 5의 형태에서 각 모델의 형상으로 하였다. Hybrid형의 격자망을 구성하였고 동적 격자(dynamic mesh)를 구현에 있어선, 반복적인 변형에서도 일정한 격자의 품질을 유지 할 수 있는 size function scheme을 사용하였다. 압전소자 팬 1회 왕복의 움직임을 100 등분하였고, 따라서 50Hz의 주파수를 가지는 팬의 과도해석 상에서의 1회의 솔루션에 대한 시간은 0.0002 초가 되었고, 1초당 5000번의 솔루션으로 구성되었다. 그림 5는 이러한 size function re-meshing scheme 기반에서 실시한 mesh motion preview를 통해 최대 변형시의 mesh 및 1초(5000 step)가 지난 후의 mesh를 나타낸 것이다.

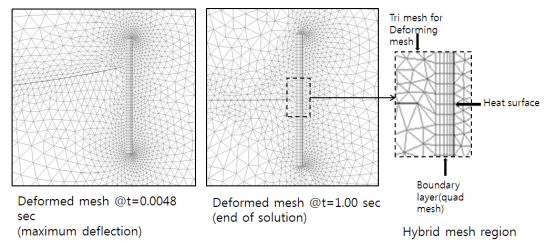


그림 5: 최대 변형 시, 1초 (5000 time-step)후 종료 시의 mesh 상태.

그림 5에 나타낸 것과 같이, 격자망에 대하여 도메인의 일반적인 공간에서는 해석프로그램의 deforming mesh를 지원하기 위한 삼각형 요소가

사용되었고, 열전달 표면 부근에는 해당 표면의 열 경계층의 특징을 얻어내기 위하여 사각형의 균일한 격자망을 배치한 hybrid-mesh 구조를 구현하였다.

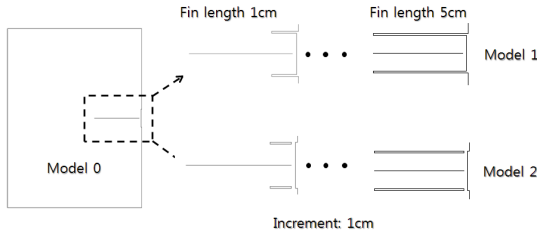


그림 6: 비교대상인 기본 설정의 압전소자 팬의 지오메트리(모델 0) 및 모델 1, 2의 방열판 길이 변화에 대한 매개변수 시뮬레이션의 구성.

최종적인 연산은 그림 6에서 나타난 것처럼 1cm 씩의 변화를 통한 모델 1,2 각각의 시뮬레이션으로 구성 하였으며 비교를 위한 기본적인 설정의 모델도 모델 0으로 설정하였다. 비교적 작은 유속 및 작은 치수로 인해 이차원 도메인에서 난류 및 부력의 효과는 무시하였다. 이는 Grashof 수 분석 결과 부력 효과를 무시할 수 있는 것으로 나타난 것과  $(Gr/Re^2 < 0.1)$ , 과도해석 수행 전 Boussinesq 밀도 변화 모델을 통하여 자연대류 조건에서 수행한 정상상태 솔루션을 초기 값으로 시작하여 부력효과를 포함한 과도 해석 결과에서도 초기의 자연대류 효과는 압전 팬의 작동에 의해 곧 사라짐이 확인 된 것에 따른 것이다.

#### 4. 결과 및 토의

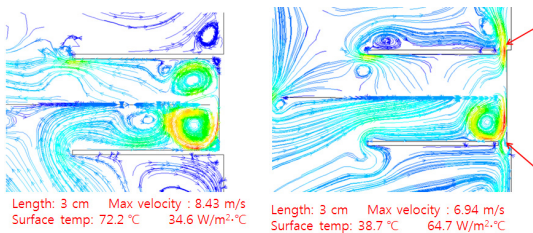


그림 7: 모델1과 모델2의 velocity pathline

그림 7은 왼쪽부터 각각 모델 1과 2의 방열판이 압전소자 팬 주변에 적용되었을 때의 유동 형태를

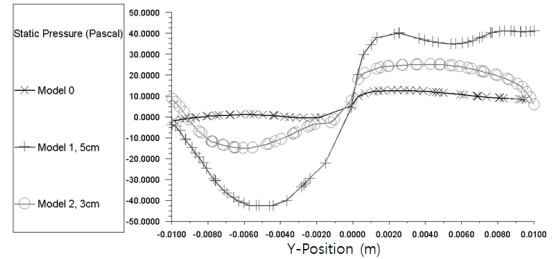


그림 8: 모델 0, 1, 2에 대한 압력 분포.

나타낸 것이다. 두 그림 모두 팬이 아래쪽 방향에서 올라와 중심부분에 복귀 하고 있을 때의 상태이다. 이 경우 팬의 아래쪽 부분에서는 팬이 중심부로 복귀함에 따라 공간이 확장되며 발생한 부압으로 주변 공기를 빨아들이고 윗부분에서는 이전 사이클에서 확장되었던 공간이 줄어들어 따라 압력이 상승하는 것을 볼 수가 있다(그림8 참고). 모델 1에서는 이때 발생한 압력이 즉시 해소되지 않아 잔류하게 되면서 방열판 내부 공기의 흐름을 방해 하는 것으로 나타났다. 모델 2의 경우 압력 변동에 따라 수직 방열면 근처의 홈(슬릿)을 통한 공기의 출입이 일어나는 것을 볼 수가 있었는데, 이는 방열판 내부의 정체현상을 해소함과 동시에 이러한 유동이 방열에 가까운 지역에서 일어나게 하면서(그림7 화살표) 그림 9에서 후술하는 바와 같이 전반적인 열전달 성능을 향상시키는 것으로 나타났다.

그림8은 압전소자 팬 주변에 방열판이 적용되지 않은 경우를 모델 0이라 할 때, 각각 모델 0, 1, 2에서 압전소자 팬 날 끝 주변의 압력 분포를 나타낸 것이다. 중심점(y=0)을 기준으로 압력의 차가 큰 것은 그만큼 팬 상하 양단의 유속이 큰 것임을 나타낸다. 가장 큰 압력차를 나타낸 모델 1에선 방열판 내부의 유속도 가장 크게 나타났지만 이러한 압력의 상승이 적절히 해소되지 못하여 방열판 내부로 흘러들어가야 할 공기의 흐름을 방해하게 되었으며 모델 2의 경우 작은 홈의 적용에 따라 압력변동 및 유속의 상승이 감소되긴 했지만 압력의 상승에 따른 유동의 저해 요소가 적절히 해소되면서 모델 2에 비해 낮은 유속에도 불구하고 열전달에 있어서는 더 뛰어난 모습을 보였다.



그림 9: 압전소자용 방열판의 모델 1 및 2에 대한 열 성능 데이터.

모델 0 및 모델 1과 2의 설정(그림 6 참고)에 따른 방열판 길이 별 성능을 그림 9에 나타내었다. 그래프에서 대류 열전달 계수 및 평균 표면 온도는 솔루션 수행 중 수렴 여부를 판단하기 위해 모니터링 한 변수들의 출력 값에 따른 것이며, 대류 열전달 계수는 솔루션 데이터의 온도분포를 바탕으로 식 (8)에 의해 계산되었다.

$$h = \frac{-k_{fluid}(\partial T/\partial y')_{y'=0}}{T_s - T_\infty} \quad (8)$$

여기서  $y'$ 은 대류 열전달 표면에서의 수직높이이며,  $(\partial T/\partial y')_{y'=0}$ 은 해당 표면에서의 온도구배를 나타낸다.

참고를 위하여 모델 0에 관한 데이터를 각 그래프마다 표시하였다(x축 0의 위치). 그래프에서 주목할 것은 모델 1, 2의 표면온도와 열전도율의 그래프의 위치가 서로 반전되어 있는 것이다. 앞서 서술한 것과 같이 슬릿의 적용에 따라 팬 상하 간 압력 분포 및 최고 유속과는 별개로 모델 2의 방열판이 열전달에서 있어서 더 효율적이며 따라서 표면온도도 더 낮게 나온 것으로 알 수가 있다. 그리고 모델2 중에서도 5cm 길이를 갖는 압전소자 팬 길이의 60%에 해당하는 3cm 길이의 방열판의 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

주기적으로 진동하는 압전소자 냉각 팬의 움직임을 시뮬레이션하였다. 주변으로 곧 분산되어 제한된 면적에서 성능을 발휘하는 압전소자 팬에 의해 유도된 유동을 효율적으로 활용하기 위하여 압

전소자 팬 및 수직 열전달 표면 주변에 유동을 일부만 가로 막는 형태의 방열판을 설정해 보았다. 이러한 방열판의 형태는 유도된 유동을 가두어 유속을 증가 시킬 수 있었으며 여기에 방열 면과 수직한 부분에 작은 홈을 추가하여 압력 상승에 따른 열의 정체 현상을 해소하여 냉각성능을 개선할 수 있음이 예상되었다.

이상적인 치수로서 표현된 압전소자의 길이 5cm와 방열판의 길이 3cm라는 상대적인 비율(60%)은, 기하학적으로 비슷한 형태를 가지고 다른 치수를 가지는 모델에서 기초적인 설계를 하는데 도움이 될 것이다.

### 후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-073).

### 참고문헌

- [1] piezo.com
- [2] T., Acikalin, A., Raman and S.V, Garimella, "Two-dimensional streaming flows induced by resonating, thin beams", J. Acoust. Soc. Am. vol. 114, pp. 1785-1795, 2003
- [3] T., Acikalin, S.M., Wait, S.V., Garimella and A. Raman, "Experimental investigation of the thermal performance of piezoelectric fans", Heat Transfer Eng. vol 25, pp. 4-14, 2004
- [4] Kuo Hao Tseng at al., "Piezo fan for thermal management of electronics", 2010, Fujikura Technical Review, no. 39, pp. 39-43, 2010
- [5] 박상희, 최문철, "밀폐공간 내에서 압전세라믹 냉각팬의 열성능에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제30권, 제12호, pp. 1173-1180, 2006
- [6] FLUENT 6.2 Theory Guide. ANSYS, INC.
- [7] R, Byron Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot, Transport Phenomena, JHON WILEY & SONS, INC, 2002

## 저 자 소 개



### 박지호(朴志洙)

1984생. 2009년 부경대학교 기계공학부 졸업. 부경대학교 냉동 공조공학과 재학 중.



### 김은필(金恩弼)

1987년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1991년 미국피츠버그 대학 기계공학과 졸업 공학석사, 1995년 미국 피츠버그 대학 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 부경대학교 냉동공조공학과 교수