

초음파 진동자에 의해 유도된 음향유동을 이용한 첨단 냉각법

A Novel Cooling Method by Acoustic Streaming Induced by Ultrasonic Resonator

노 병 국*, 이 동 렬**
(Byoung-Gook Loh*, Dong-Ryul Lee**)

*대구가톨릭대학교 기계자동차 공학부, **대구가톨릭대학교 기계자동차 공학부
(접수일자: 2003년 1월 7일; 수정일자: 2003년 3월 5일; 채택일자: 2003년 3월 31일)

30 kHz의 초음파 (ultrasonic wave)의 미세 진동에 의해서 유도된 음향유동 (acoustic streaming)에 의한 공기대류를 이용한 새로운 냉각방법을 소개한다. 초음파 진동은 압전소자 (piezoelectric device)에 의해서 얻어지며 50 m 정도의 진동진폭을 얻기 위해 기계적 진동 증폭자인 혼 (horn)을 추가하여 전체 진동 시스템이 공진하도록 구성된다. 음향유동에 의한 열전달 효과의 상승을 측정하기 위해 열원 (heat source) 및 열원 주위의 대기의 온도변화를 실시간으로 측정하였다. 초음파 진동 시작 후 시간지연없이 음향유동이 유도되어 진동자 주위의 대량의 공기유동으로 인한 급격한 온도감소가 관찰되었다. 또한 열원과 진동자와의 거리가 방사 (radiation)되는 음파 (sound wave)의 반파장 (half wave length)의 정배수가 될 때 열원의 냉각효과가 극대화됨을 실험적으로 관찰하였다. 이는 음파의 공진현상에 기인한 것으로 이론적 고찰을 통한 검증 또한 수행되었다. 음향유동을 이용한 냉각법의 장점은 초음파 진동을 이용하기 때문에 무소음이며 이동 형태의 부품이 없기 때문에 반영구적으로 사용할 수 있다. 또한 기존의 전기모터를 이용한 냉각팬 (cooling fan)으로는 냉각이 어려운 초소형 기전시스템 (MEMS)의 냉각법으로 사용될 수 있는 첨단 냉각방법이다.

핵심용어: 초음파 진동, 음향유동, 열전달, 공진, 냉각

무고분야: 초음파 및 탄성과 분야 (4.6)

A novel cooling method induced by acoustic streaming generated by ultrasonic vibration at 30 kHz is presented. Ultrasonic vibration is obtained by piezoelectric devices and the maximum vibration amplitude of 50 m is achieved by including a horn, mechanical vibration amplifier in the system and making the complete system resonate. To investigate the enhancement of heat transfer capability of acoustic streaming, the temperature variations of heat source and air in the vicinity of heat source are measured in real-time. It is observed that acoustic streaming is instantly induced by ultrasonic vibration, resulting in the significant temperature drop due to the bulk air flow caused by acoustic streaming. In addition, it is observed that the cooling effect on the heat source is maximized when the gap between the ultrasonic vibrator and heat source coincides with the multiples of half-wavelength of the ultrasonic wave. This fact results from the resonance of the sound wave. The theoretical analysis of the dependence on the gap is also accomplished and verified by experiment. The advantage of the proposed cooling method by acoustic streaming is noise-free due to the ultrasonic vibration and maintenance-free because of the absence of moving parts. Moreover, This cooling method can be utilized to the nano and micro-electro mechanical systems, where the fan-based conventional cooling method can not be employed.

Keywords: Ultrasonic vibration, Acoustic streaming, Heat transfer, Resonance, Cooling

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.6)

I. 서론

음향유동(acoustic streaming)은 고주파(high frequency) 진동에 의해 생성되는 와류 형태(vortex)의 정상 상태 공기 대류(steady convective airflow) 현상이다 [1-3]. 음성(voice) 같은 일반적인 음파가 대기 중에 전파될 경우 공기는 파동을 전달하는 매체로 파동 전파에 의해 생기는 공기분자(air particle)의 움직임은 수십 m 이내이다. 이 경우 음파전파에 따른 대류(convection)에 의한 열전달 효과의 향상은 거의 없다. 그러나 초음파 전파의 경우에는 수십 μm 이내의 1차의 주기적인(periodic) 공기분자의 운동 외에 음향유동(acoustic streaming)이라 불리는 2차적인 와류(vortex)의 공기유동이 생성된다. 이러한 2차적인 공기유동의 생성의 원인은 음파와 물리적인 장애물 사이의 마찰에 의한 에너지 손실로 알려져 있다[4]. 저주파(low frequency) 음파의 경우에는 이러한 에너지의 손실이 무시할 정도로 작지만 주파수가 증가할수록 에너지 손실은 증가하며 특히 초음파의 경우에는 고속의 와류를 생성할 정도로 에너지 손실은 커진다[5]. 음향유동은 경계층(boundary layer) 이내에서 발생하는 내측 음향유동(inner acoustic streaming)과 내측 음향유동에 의해서 유도되는 외측 음향유동(outer acoustic streaming)으로 구분된다. 열전달 효과의 상승은 대량의 공기유동을 유발하는 외측 음향유동에 의해서 얻어진다[1].

음향유동에 관한 연구는 Faraday[6]에 의해 처음 시작되었으며 그 후 Rayleigh[7], Schlichting[8], Nyborg[9], Lighthill[4]에 의해서 이론적으로 정립되었으며 음향유동이 의한 열전달 효과의 상승은 Vainshtein[10], Gorinath [11], Mills[12], Uhlenwinkel[13], Loh and Ro[2]에 의해서 보고되었다. 그 중 Loh and Ro[2]의 초음파 굽힘진동(bending vibration)에 의해서 유도된 음향유동에 관한 연구는 개수로(open-channel)에서 유도되었다는 점과 컴퓨터 냉각팬에 필적하는 열전달 상승효과를 유발하였다는 점에서 주목할 만하다. 그러나 굽힘파(bending wave)에 의해서 유도된 음향유동은 경계조건(boundary condition)의 불연속성으로 인해 이론적인 해석이 용이하지 않으며 특성상 3차원 유동임에도 불구하고, 30 kHz에 이르는 고주파 수와 이동벽 경계(moving-wall boundary)조건이라는 초음파 진동의 특성상 3차원 유동의 전산유체역학(computation fluid dynamics, CFD) 상용코드에 의한 유동 해석도 과도한 슈퍼컴 사용

시간(100시간 이상)의 필요라는 제약으로 심도있는 유동 해석이 불가능하였다.

따라서 본 연구에서는 전산유체역학을 이용한 3차원 유동해석을 위하여 원형 초음파 진동자를 이용하여 축대칭(axis symmetry)의 형태로 실험장치를 재구성하였다. 이는 초음파 진동의 근원(source)을 굽힘진동(bending vibration)이 아닌 막대수직진동(rod vibration)으로 대체함으로써 가능하게 되었다. 또한 열원에서의 온도 변화 뿐만 아니라 진동자와 열원 사이의 공기의 음향유동에 의한 온도 변화를 실시간으로 측정할 수 있게 되었다. 언급한 실험적 관찰 외에 진동자와 열원 사이의 간격의 변화와 음파의 파장과의 상관관계를 실험적 및 이론적으로 고찰하고 검증하는 것도 본 연구의 목적 중의 하나이다.

압전(piezoelectric) 소자를 이용한 초음파 진동에 의해 생성된 음향유동을 이용한 냉각법은 초음파 진동을 이용하기 때문에 무소음이라는 장점 이외에 기존의 전기모터를 이용한 냉각팬이 사용될 수 없는 초소형 기전시스템(microelectro mechanical systems, MEMS)에 응용될 수 있는 유망한 미래의 첨단 냉각법으로 진동 특성에 따른 음향유동의 형성 패턴과 속도에 따른 열전달 특성을 연구하는 것은 큰 의미가 있다.

II. 이론적 배경

2.1. 음향유동 이론

Nyborg[9]는 연속 근사법(successive approximation method)에 근거하여 근 경계층 음향유동(near boundary layer acoustic streaming) 이론을 아래와 같이 제안했다.

$$\mu \nabla^2 u_2 - \nabla P_2 + F = 0 \quad (1)$$

$$F = -\rho_0 \langle (u_1 \cdot \nabla)u_1 + u_1(\nabla \cdot u_1) \rangle \quad (2)$$

μ : dynamic viscosity, ρ_0 : constant equilibrium density, u_1 : oscillatory particle velocity, u_2 : 음향유동(acoustic streaming) velocity, P_2 : steady state "dc" pressure, F : nonlinear driving forcing term, 그리고 $\langle \rangle$ 는 충분한 cycle 동안의 시간 평균을 의미한다. 시간 평균을 취하지 않으면 비선형 구동항(nonlinear driving forcing term)인 F 는 시간에 따른 변화가 없는 dc 부분과 sine 함수의 형태로 주기적으로 변하는 부분을 포함한다. 비선형 구동항 중 dc부분이 음향유동을 유발한다. 오랜

주기 동안 평균을 취했을 때 sine 함수 형태로 주기적으로 변하는 부분의 영향은 사라지며, 즉 sine 함수를 한 주기 동안 적분하면 결과는 0이며 단지 시간에 따라 변화가 없는 dc 부분의 영향만이 해 (solution)에 나타나게 된다. 음향유동속도, u_x 는 진동자로부터의 거리가 무한대로 증가할 때 상수 값으로 수렴한다. 그 극한 속도 (limiting velocity, U_L)는 시간과 무관하며 (time independent) 다음과 같이 유도된다, $U_L = -\frac{3}{4\omega} U \left(\frac{dU}{dx} \right)$, ω : 가진 주파수 (excitation frequency), U : 경계면에 평행한 비회전 속도의 진폭, x : 경계면에 평행한 방향[14]. 일반적으로 U 는 다음식과 같이 표현될 수 있다[4].

$$U = U_0 \sin(kx) \cos \omega t \tag{3}$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{U_0^2 k}{2} \sin(2kx) (\cos \omega t)^2, (\cos \omega t)^2 = (1 + \cos 2\omega t) / 2 \tag{4}$$

$$= \frac{U_0^2 k}{4} \sin(2kx) \cos 2\omega t + \frac{U_0^2 k}{4} \sin(2kx) \tag{5}$$

여기서, k 는 파동수 (wave number, $k = \omega / c$, c : 음속)이다. 식 (5)에서 첫번째 항은 위에서 언급한 주기적으로 변하는 항이며, 시간에 따라 변하지 않는 두번째 항이 음향유동의 속도를 나타낸다. 대량의 공기유동을 유발하는 외측 음향유동 운동을 계산하기 위해서는 극한속도 U_L 을 고체 경계면에서의 미끄럼 (slip)속도로 사용하여 Stoke 경계층 두께는 무시할 수 있다는 가정하에 구할 수 있다.

III. 실험장치 및 방법

실험장치는 그림 1에 나타난 바와 같이 초음파 진동자 (Bolted Langevin type transducer), 혼 (horn), 열원, 초음파 가진기 (ultrasonic wave exciter) 및 실시간 데이터 습득 장치 (real-time data acquisition system)로 구성되어 있다[3,15]. 초음파 진동자는 진폭을 극대화하기 위해 30 kHz에서 공진 (resonance)하도록 설계 되었으며 혼 (직경 40 mm)이라는 기계적 진동 증폭자를 같은 주파수에서 공진하도록 하여 초음파 진동자 위쪽에 부착하였다. 초음파 진동자와 혼 부착시 기계적 부하에 의해 공진 주파수에 약간의 변화가 있었으나 이는 초음파 가진기에서의 다음과 같은 보정을 통해 보상할 수 있다. 즉, 시스템이 공진시 초음파 진동자의 임피던스 (impedance)는 최저이므로 초음파 진동자에 걸리는 전압의 변화를 입력신호의 주파수 변화에 따라 모니터링하면서 공진 주파수를 동조 (tuning)할 수 있었다. 본 실험기에서 최대 초음파 진동을 발생하기 위해서 필요한 초음파 진동자의 구동전력은 60 W (전압: 50 V) 이었다. 초음파 열원의 상세도는 그림 2에 나타나 있다. 가열을 위해 저항을 두께 3 mm이며 직경 40 mm 인 알루미늄 판 위에 부착했으며 이 저항에 전류를 흘려보내는 양을 조절함에 따라 열원에 가해지는 열량을 조절할 수 있다. 알루미늄 판의 온도변화를 측정하기 위해 4개의 열전대 (thermocouple, T-type, AWG No. 36 (선폭: 0.127 mm))를 알루미늄 판 위에 90도 간격으로 같은 원주상에 접착했다. 단열을 위해 알루미늄 판 위쪽에 두께 40 mm의 폴리우레탄 발포재 (polyurethane foam)를 고내열 (heat-resistance) 에폭시 (epoxy)를 이

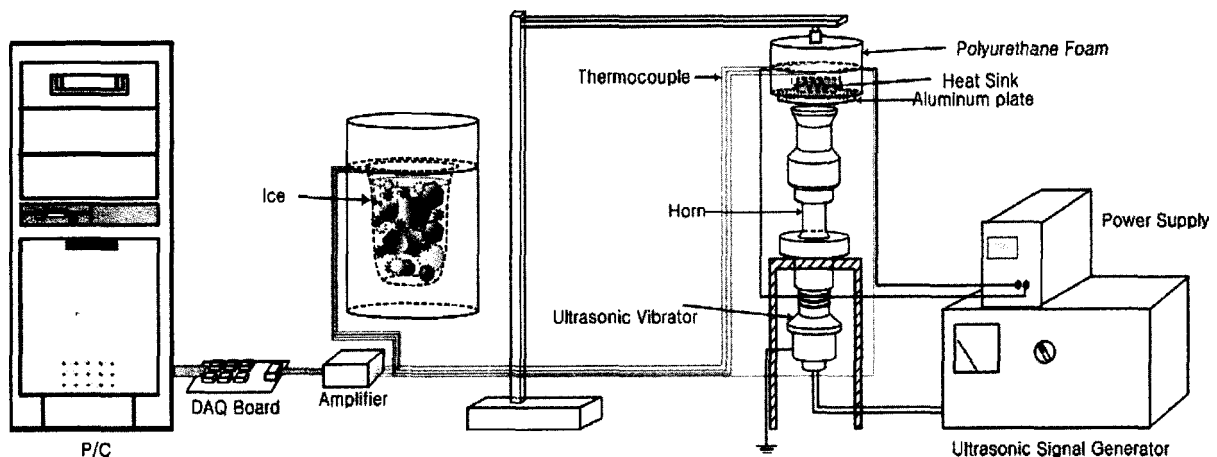


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic Diagram of the Experimental Setup.

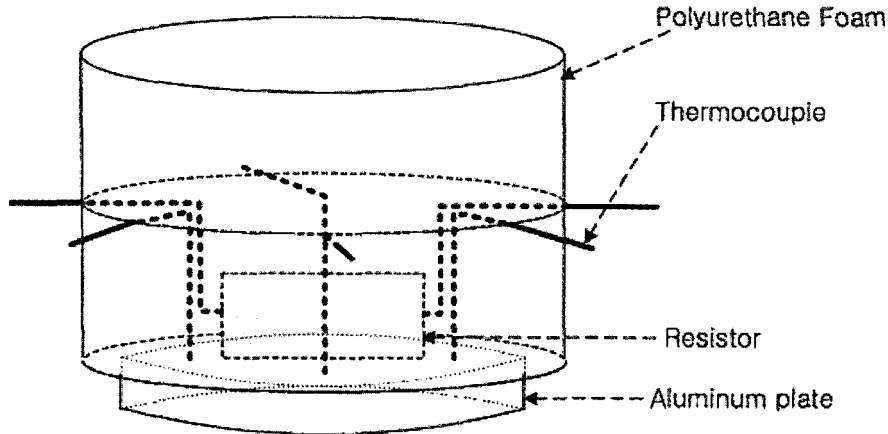


그림 2. 열원의 상세도
Fig. 2. Detailed Schematic of the Heat Source.

용하여 접착했다. 열전대에서 얻어지는 전기신호는 범용의 데이터 습득장치를 이용하여 측정하기에는 너무 미약하여 신호 증폭기를 이용하여 증폭하였으며 전기적 잡음(noise) 제거를 위해 저역필터(low-pass filter)를 이용하여 필터링을 하였다. 데이터 습득보드(data acquisition board, DAQ)를 이용하여 실시간으로 8 채널의 데이터를 습득할 수 있었다. 공진 시 진동 진폭은 초정밀 정전용량 센서(capacitance gauge)를 이용하여 측정하였으며 측정된 진폭은 50 μm 였다.

열원에 전원을 계속 공급한 상태에서 초음파 진동이 가진(excitation)되었다. 음향유동에 의해서 시간지연 없이 열원의 온도가 급속히 감소하는 것이 보여진다. 열원의 온도를 측정하는 4개의 열전대가 서로 다른 초기 온도값을 보이는데 이는 열전대의 전기 신호를 증폭(amplification)하는 과정에서 실험실에서 자체 제작한 증폭기를 사용한 관계로 증폭비가 4개의 채널에 대해서 균일하지 않았기 때문이며 또한 4개의 열전대의 전압 대 온도 변환 보정(calibration)이 균일하지 않았기 때문이다. 그러나 이 실험에서 중요한 것은 초음파 진동 전후의 상대 온도 차이이며 이는 대략 4개의 채널 모두 60°C 정도를 보이고 있다. 앞으로 나타내는 결과에서는 4개 채널의 평균값을

IV. 결과 및 토의

4.1. 음향유동에 의한 열원 및 열원 주위의 실시간 온도 변화

초음파 진동 전후의 음향유동에 의한 열원 및 열원 주위의 실시간 온도 변화가 그림 3에 나타나 있다. 실험 관찰 시간은 10분이었으며 실험 시작 100초 후 초음파 진동이 가해 졌으며 500초 후 초음파 진동을 멈추었다. 채널(channel, ch) 0~3은 열원에 부착된 4개의 열전대의 온도 편호를 나타내며 ch4는 실내 온도, ch5~7은 열원과 진동자 사이의 온도 변화를 나타낸다. 열원과 진동자 사이의 간격은 12 mm 이다. Ch5는 진동자의 중심으로부터 수직 방향으로 3 mm 위쪽 방향에 위치하였으며 ch6은 6 mm, ch7은 9 mm 위쪽에 위치하고 있다. 실험 시작 전 4 W를 결원의 저항에 공급해서 열원은 정상 상태(steady state) 온도에 이를 때까지 가열되었다. 이는 실험 시작 후 100초 동안 열원의 온도가 그림 3에 나타난 것같이 변화하지 않는다는 것으로 검증할 수 있다. 실험 시간 100초에서

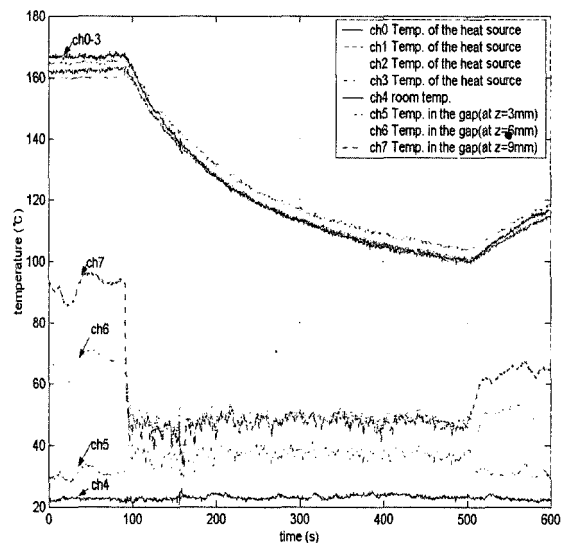


그림 3. 초음파 진동 전후의 온도 vs. 시간
Fig. 3. Temperature vs. time without and with ultrasonic vibration.

열원의 온도 변화로 나타낸다. 실험 시간 500초에서 열원의 온도가 바로 상승하는데 이는 초음파 진동이 중단되었기 때문이다. 진동자와 열원 사이의 실시간 온도 변화를 나타내는 ch5~7 중 ch7이 가장 높은 초기 온도를 보이는데 이는 ch7이 열원에 가장 근접하게 위치하였기 때문이다. 초음파 진동 가진 후 즉각적으로 온도가 현격히 감소하여 초음파 진동이 유도되는 동안은 감소한 상태의 거의 일정한 온도로 유지됨을 볼 수 있다. 이런 결과는 ch6에서도 관찰되고 있다. 진동자에 가장 근접하게 위치한 ch5에서는 온도 감소가 아닌 약간의 온도 증가가 초음파 진동 후에 유발됨을 관찰할 수 있다. 음향유동은 방사된 음파가 장애물을 만날 때 유도되며 그 세기는 물리적 경계면에서의 거리가 증가할수록 감소한다. 또한 초음파 진동에 의해 진동자의 온도도 상승하므로 진동자에 가장 근접한 ch5에서는 음향유동에 의한 온도 감소보다 진동자의 온도 증가에 의한 영향이 더 커져 온도가 약간 증가함을 관찰할 수 있다.

4.2. 열원과 진동자 사이의 간격 변화에 따른 열원의 온도감소

열원과 진동자 사이의 간격 (gap)과 음향유동에 의한 열원의 온도 감소 사이의 상관 관계 (correlation)를 고찰하기 위해 간격을 변화시키면서 열원의 온도 감소량을 측정하였다. 그 결과는 그림 4에 나타나 있다. 가장 위쪽에 나타나 있는 사각형 기호는 초음파 진동 전의 열원의 정상상태 온도를 나타내며 다이아몬드 기호는 진동 개시 5분 후의 열원의 온도를 나타낸다. 그림 4의 가장 아래쪽의 원 기호는 진동 전후의 온도 차이를 나타낸다.

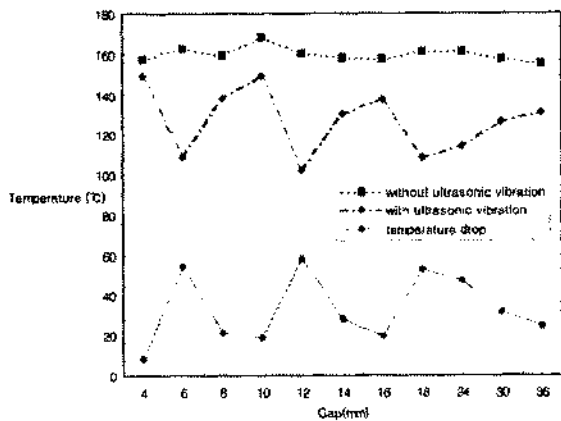


그림 4. 초음파 진동 전후의 온도 vs. 간격
Fig. 4. Temperature vs. gap without and with ultrasonic vibration.

간격이 약 6 mm (반파장: $\lambda/2 = 5.67$ mm)의 정배수가 될 때 온도 감소는 다른 간격에 비해 월등히 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 음파의 공진 현상에 기인한 것으로 그 이론적인 설명은 다음과 같다. 실험 장치의 단순 개략도는 그림 5에 나타나 있다. 그림 5에서 보여진 바와 같이 아래쪽의 진동판은 $\xi(z, t) = \xi(0, t) = \xi_0 e^{i\omega t}$ 와 같은 초월 함수 형태의 주기적인 진동을 한다고 가정하고 ξ : 공기 변위 분포 (air particle displacement distribution), z : 진동판으로부터의 수직 거리, t : 시간, ω : 주파수, i : imaginary operator, ξ_0 : 최대 진폭이다. 위쪽 판은 정지 상태, 즉 $\xi(z, t) = \xi(h, t) = 0$ 이다. 선형 음향학 (linear acoustics) 이론을 이용하여 공기 변위 분포를 다음의 파동해 (wave solution) 형태로, $\xi(z, t) = Ae^{i(\omega t - kz)} + Be^{i(\omega t + kz)}$, 가정한 후 위에서 언급한 경계 조건 (boundary condition)을 적용하면 해를 다음과 같이 구할 수가 있다 (A, B : unknown coefficient, k : wave number).

$$\xi(y, t) = \xi_0 \frac{\sin k(h-y)}{\sin kh} e^{i\omega t} \tag{6}$$

식 (6)에서 분모항, $\sin kh$ 가 0으로 수렴할 경우 ($kh = n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)) 일 경우 공기 변위, ξ 는 최대값을 가지며 $h = n \pi/k$ 는 최대 수직 방향 (z -direction) 공기 속도를 유발하는 간격이 된다. 이 속도와 연속 방정식 (continuity equation)을 이용하여 경계 면에 평행한 (x -direction) 비회전 속도의 진폭, U_0 를 구할 수 있으며 공기 분자 수직 방향 변위, ξ 가 최대일 경우 비회전 속도, U_0 또한 최대이다[2]. 따라서 간격이 음파의 반파장의 정수 배 일 경우 음향유동속도 또한 최대가 되며 그로 인한 온

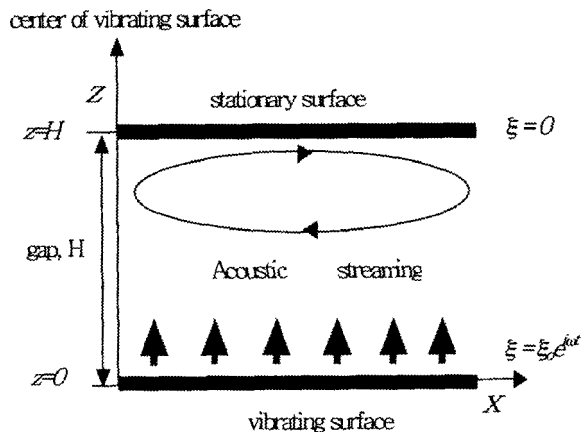


그림 5. 실험장치의 단순 개략도
Fig. 5. Simplified schematic diagram of experimental set

도 감소 또한 최대가 된다.

간격이 18 mm 이상 증가하는 경우 음파의 전달 손실(propagation loss)에 따른 음압의 감소로 간격이 24, 30, 36 mm로 증가함에 따라 간격이 반파장의 정배수임에도 불구하고 온도 감소가 점차적으로 줄어가는 현상을 관찰할 수 있다. 그러나 간격이 30 mm 일 경우에도 온도 감소량은 간격이 4 mm나 8 mm 인 경우보다 10°C 이상 높으며, 이는 기존의 냉각팬을 이용할 경우에 온도 감소량은 팬에서의 거리에 비례한다는 기존의 냉각 방법과는 상이한 결과로 초음파 진동을 이용한 냉각법에서만 발생하는 유일한 현상이다. 따라서 초음파 진동을 이용하여 냉각할 경우 열원의 이상적이며 최적 설계적 위치는 진동자로부터 방사되는 음파의 반파장의 정배수에 해당되는 거리이며 음압의 전달 손실을 고려하여 반파장의 2~3배 이내가 최적 거리임을 알 수 있다.

V. 결론

초음파 진동자를 이용하여 생성된 음향유동의 열전달 특성을 고찰하였다. 진동자와 열원 사이의 공기의 온도 및 시간 변화를 음향유동의 유도 전후를 기점으로 모니터링한 결과 수십 도의 온도 변화를 유발할 만큼 상당히 많은 양의 공기 유동이 진동 시작 후 곧바로 생성됨을 실험적으로 검증하였다. 또한 진동자와 열원 사이의 거리에 따른 음향유동의 세기의 변화가 실험적으로 관찰되었다. 이 변화는 음파의 공진 현상에 기인한 것으로 진동판과 열원의 거리가 음파의 반파장의 정배수가 될 때 음향유동의 세기가 극대화되고 열전달 효과도 최대가 된다는 것을 실험 및 이론을 통해 검증하였다. 이는 기존의 냉각팬을 이용하여 냉각을 할 경우 열전달 효과는 냉각팬과의 거리에 비례해서 증가하는 결과와는 비교되는 음향유동을 이용한 냉각법에서만 보여지는 유일한 현상이다.

음향유동은 음압(sound pressure)의 세기가 강한 음장(sound field) 내에서 일어나는 매질 전달(medium transport) 현상으로 열전달 효과 상승 이외에도 초소형 시스템에서의 펌프와 같은 구동원으로도 확대 적용될 수 있는 현상이다. 즉, 강력한 세기의 초음파 진동을 초소형 시스템의 채널로 방사할 경우 채널 벽면을 따라 음향유동을 유발시킬 수 있으며 채널 내에 기체가 아닌 유체가 있는 경우에도 방향성 있는 유동을 채널 내에 생성할 수 있다. 이 경우 음향유동을 초소형 장치 외부에 위치한 구동

원으로서 이용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 대구가톨릭 대학교 연구비 지원에 의한 것임.

참고 문헌

1. C. P. Lee and T. G. Wang, "Outer acoustic streaming," *J. of Acoust. Soc. Am.*, **88** (5), 2367-2375, 1990.
2. B. Loh, S. Hyun, P. Ro, and C. Kleinstreuer, "Acoustic streaming induced by ultrasonic flexural vibrations and associated enhancement of convective heat transfer," *J. of Acoust. Soc. Am.*, **111** (2), 875-883, 2002.
3. P. I. Ro and B. Loh, "Feasibility of using Ultrasonic Flexural Waves as a Cooling Mechanism," *IEEE Industrial Electronics*, **48** (1), 143-150, 2000.
4. J. Lighthill, "Acoustic streaming," *J. of Sound and Vib.*, **61** (3), 391-418, 1978.
5. M. F. Hamilton and D. T. Blockstock, *Nonlinear Acoustics*, Academic Press, 1998.
6. M. Faraday, *Phil. Trans.*, **121**, 229, 1831.
7. Rayleigh, *Theory of Sound*, Dover Publication, New York, 1945.
8. H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1955.
9. W. L. Nyborg, "Acoustic streaming near a Boundary," *J. of Acoust. Soc. Am.*, **30** (4), 329-339, 1958.
10. P. Vainshtein, M. Fichman and C. Cuffinger, "Acoustic enhancement of heat transfer between two parallel plates," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, **38** (10), 1893-1899, 1995.
11. A. Gopinath and F. Mills, "Convective heat transfer from a sphere due to acoustic streaming," *J. of Heat Transfer*, **115**, 332-341, 1993.
12. A. Gopinath and F. Mills, "Convective heat transfer due to acoustic streaming across the ends of kundt tube," *Journal of Heat Transfer*, **116**, 47-53, 1994.
13. V. Uhlenwinkel, R. Meng, K. Bauckhage, P. Schreckenber, and O. Andersen, "Heat transfer to cylindrical bodies and small particles in an ultrasonic standing-wave fields of melt atomizer," *Multiphase-Flow and Heat Transfer in Materials Processing ASME*, FED-201/HTD-297, 19-24, 1994.
14. J. M. Andres and U. Ingard, "Acoustic streaming at high reynolds numbers," *J. of Acoust. Soc. Am.*, **25** (5), 928-937, 1953.
15. T. Sashida, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Clarendon Press, Oxford, 1993.

저자 약력

● 노 병 국 (Byoung-Gook Loh)



1993년: 고려대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
1995년: North Carolina State University 기계공학과 졸업 (공학석사)
1996년~1997년: 포스코건설
2000년: North Carolina State University 기계공학과 졸업 (공학박사)
2000년~2001년: IBM (USA), 선임연구원
2002년~현재: 대구가톨릭대학교 기계자동차 공학부 교수

● 이 동 렬 (Dong-Ryul Lee)



1986년: 연세대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
1989년: Oklahoma State University 기계공학과 졸업 (공학석사)
1995년: State University of New York at Stony Brook 기계공학과 졸업 (공학박사)
1995년~1996년: State University of New York at Stony Brook, Thermal Science Research Laboratory (USA), 선임연구원
1996년~1997년: 삼성자동차(주) 기술연구소