

초음파 진동에 의해 발생된 음향유동을 활용한 급속냉각 메카니즘

Rapid Cooling Mechanism Utilizing Acoustic Streaming Generated by Ultrasonic Vibrations

노 병 국* · 이 동 렬† · 권 기 정**

Byoung-Gook Loh, Dong-Ryul Lee and Kijung Kwon

(2006년 8월 9일 접수 ; 2006년 9월 26일 심사완료)

Key Words : Ultrasonic Vibration(초음파 진동), Resonance(공진), Convective Cooling(대류냉각), Heat Transfer Enhancement(열전달 향상), Particle Imaging Velocimetry(입자 영상 유속계), Acoustic Streaming(음향유동), Flow Visualization(유동가시화)

ABSTRACT

Acoustic streaming induced by longitudinal vibration at 30 kHz is visualized for a test fluid flow between the stationary glass plate and ultrasonic vibrating surface with particle imaging velocimetry(PIV). To measure an increase in the velocity of air flow due to acoustic streaming, the velocity of air flow in a gap between the heat source and ultrasonic vibrator is obtained quantitatively using PIV. The ultrasonic wave propagating into air in the gap generates steady-state secondary vortex called acoustic streaming which enhances convective cooling of the stationary heat source. Heat transfer through air in the gap is represented by experimental convective heat transfer coefficient with respect to the gap. Theoretical analysis shows that gaps for maximum heat transfer enhancement are the multiple of half wavelength. Optimal gaps for the actual design are experimentally found to be half wavelength and one wavelength. A drastic temperature variation exists for the local axial direction of the vibrator according to the measurement of the temperature distribution in the gap. The acoustic streaming velocity of the test fluid in the gap is at maximum when the gap agrees with the multiples of half wavelength of the ultrasonic wave, which are specifically 6 mm and 12 mm.

1. 서 론

음향유동(acoustic streaming)은 고주파 진동에 의해 가진체와 박막 또는 벽과 같은 물리적 경계 표면에서 생성되는 와류(vortex)구조의 형태를 보이는

정상 상태의 공기 유동 현상이다. 이 음향 유동은 자유 공간에서의 음파의 공간적 감쇠와 매질과 진동체 사이의 대체적으로 무시할 수 있는 마찰로 인해 음향유동이 발생된다. 음파의 흡수와 분산이 파의 전파 과정에서 음파의 감쇠를 야기시킨다. 이 고주파수 음장에서 음파의 전파와 관련된 손실은 일반적으로 무시될 수 있지만 대량의 정상 상태의 공기 회전 운동을 생성하기에 충분한 중요한 압력의 감소를 가져온다. 이런 유형의 유동은 고점도의 매체에서 흔히 발생한다. 다른 유형의 음향유동은 진동하는

† 책임저자; 정회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : dlee@cu.ac.kr

Tel : (053)850-2717, Fax : (053)850-2710

* 한성대학교 기계시스템공학과

** 한국항공우주연구원 공력성능연구그룹

매질과 고정벽 사이 또는 반대의 경우의 마찰에 기인한다. 이 연구는 이런 종류의 근 경계 음향 유동 (near-boundary acoustic streaming)에 초점을 맞추고 있다. 대량의 회전성을 띤 2차 정상 공기 유동을 야기시키는 와류구조의 이 음향 유동은 특히 대류 열 및 물질 전달, 인체 내부의 혈류 순환 및 신진대사 촉진, 생물학적인 세포변화, 생체 피부 및 치아 표면 접착층 제거등과 관련 있는 고체와 유체의 경계 면에서 흔히 발생하는 전달 과정 속도(rate of transport process)의 향상에 매우 효과적이다.

음향 유동에 관한 연구는 Faraday⁽¹⁾에 의해 처음으로 시작되었으며 이론적인 해석은 Rayleigh⁽²⁾, Schlichting⁽³⁾, Nyborg⁽⁴⁾, Lighthill⁽⁵⁾에 의해 수행되었다. Jackson⁽⁶⁾은 초음파 진동에 의해 유도되는 초음파 유동에 의한 유동가시화에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Gopinath 및 Mills⁽⁷⁾는 Kundt 관의 양 끝의 음향 유동에 의해 야기되는 대류 열전달 현상에 대해 연구하였다. Nguyen⁽⁸⁾은 초음파 굽힘 진행파(flexural traveling wave)에 의해 유도된 음향 유동의 MEMS 적용에 대해 연구하였고 Gould⁽⁹⁾는 음속의 상황에서 유도된 음향 유동이 존재할 때 고체와 유체의 경계를 통과하는 열전달을 연구하였고 Ro 및 Loh⁽¹⁰⁾, Loh et al.⁽¹¹⁾, Loh 및 Lee⁽¹²⁾는 음향 유동의 열전달 특성을 조사하여 급격한 열전달률 및 전달 과정 속도의 향상을 가져오기에 충분한 음향 유동 생성에 관한 연구를 수행하였다. 이런 모든 연구들의 기본 시스템에서 음향 유동에 의한 전달 과정의 특성은 3차원이다. 이런 초음파 진동에 의해 발생하는 음향 유동의 난해성으로 인해 이론적인 해석 방법으로는 최소의 해석만이 가능할 뿐이다. 그리하여 3차원 전산유체해석(computational fluid dynamics, CFD)이 음향 유동 현상을 전적으로 이해하는 데에 필요한 방법들 중의 하나라고 생각되지만 고주파의 가진 주파수와 이동 벽 경계조건(moving-wall-boundary condition)을 포함하는 해석에 대한 긴 전산 해석 시간으로 인해 결코 평이한 일이 아니라고 생각되며 직접 실험에 의한 3차원 유동가시화 또한 고가의 실험장비 및 까다로운 실험조건 설정 등으로 인해 이 또한 단순한 일이 아니라고 생각된다. 그러나 3차원 실험 및 해석 없이는 초음파 진동에 의해 발생하는 음향 유동 현상의 깊이 있는 이해를 얻을 수 없다. 이 음향 유동의 발생은 굽힘 진동(flexural vibration) 또

는 수직 막대진동(longitudinal vibration)에 의해 발생되고 음향 유동의 강도는 주파수 및 진폭에 따라 증가한다. 실제적으로 관찰할 수 있는 음향유동을 발생하기 위하여 주파수와 진폭의 곱의 크기가, 원래의 복잡한 음향 유동의 구조로 인하여 음향 주파수와 진폭의 함수인자가 불분명한 어떤 특정한 값 을 초과하여야 한다.

음향 유동에 의한 유동 속도의 증가와 대류 냉각 메카니즘의 특성을 충분히 이해하는 데 있어서 음향 유동의 유동 형태를 가시화하는 일은 매우 중요한 일이다⁽¹³⁻¹⁵⁾. 그러나 음속의 주파수에서 미세 음향 유동을 가시화하는 실험이 수행된 Jackson⁽⁶⁾의 연구를 제외하고는 대부분의 이전의 연구는 이론적인 평가와 전산유체해석(CFD)에 국한되었다. 이 같은 이론적인 연구는 단순 경계조건에서만 적용되었고 열린 채널의 경계 조건에서 불연속성의 추가로 이론 및 전산해석의 실험적인 검증이 유동을 가시화하는 방법으로 수행되어야 한다고 생각된다.

유동가시화는 과정 현상(process phenomena)을 실제 실험적으로 영상으로 표현하는 것으로 속도, 압력, 응력, 밀도 및 온도 등과 같이 우리 눈에는 보이지 않는 유동 정보의 공간분포를 시간과 공간의 어떤 범위 안에서 가시화하도록 하는 실험방법을 말한다. 유동가시화는 대부분 비 접촉 방식으로 유동 자체를 교란시키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화함으로써 측정하고자 하는 유동에 대한 시간 및 공간적인 유동정보를 제공한다^(16,17).

기계/전자/통신 산업 및 컴퓨터산업의 발달과 레이저기술 및 입자 영상처리기술의 도입으로 유동 입자들의 시간의 변화에 따른 변위정보를 담고 있는 입자 화상(particle image)을 이용한 속도장 측정기법(particle image velocimetry, PIV)이 개발되어 정성적인 순간 유동 정보 뿐만 아니라 정량적인 속도장 및 유동의 변동(fluctuation)정보를 제공하여 유동구조를 높은 공간 분해능으로 정확히 분석하는 것도 가능하게 되었다⁽¹⁸⁻²¹⁾.

이 연구에서는 음향 유동에 의한 공기의 유동 형태와 유동 속도는 위에서 언급한 입자 영상 유속계(particle imaging velocimetry, PIV)에 의해 실험적으로 측정되었고 궁극적으로 냉각 대상이 되는 열원 표면의 온도 변화와 열원과 초음파 진동자 사이의 간극 내의 시험유체의 온도 분포는 열원과 시험

유체 중에 설치된 열전대를 통하여 실시간으로 측정되었다. 음향 유동의 생성은 열린 채널에서 막대 수직 초음파 진동에 의해 이루어 졌고 열원은 전원공급기에 의해 전력을 공급하여 제작하였다. 이 연구의 목적은 음향 유동의 정량적인 해석을 위한 3차원 유동가시화를 수행할 수 있는 실험장치를 설계하고 음향 유동을 규명할 수 있는 3차원 실험 데이터를 습득하여 초음파 진동자와 열원 사이의 음향유동의 형태 및 속도, 간극의 변화, 음파의 파장 및 열전달 향상과의 상관관계를 이론적 및 실험적으로 검증하여 급속냉각 메카니즘의 최적 설계에 두었다.

2. 이론적 배경

Nyborg⁽⁴⁾는 연속 근사법(successive approximation method)에 근거하여 근 경계층 음향유동(near-boundary layer acoustic streaming) 이론을 아래와 같이 제안하였다.

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

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

- μ : coefficient of dynamic viscosity,
- ρ_0 : constant equilibrium density,
- u_1 : oscillatory particle velocity,
- u_2 : acoustic streaming velocity,
- P_2 : steady state "dc" pressure,
- F : nonlinear driving forcing term,

그리고 $\langle \rangle$ 는 충분한 싸이클 동안의 시간 평균을 의미한다. 시간 평균을 취하지 않으면 비선형 구동항(nonlinear driving forcing term)인 F 는 시간에 따른 변화가 없는 dc부분과 sine함수의 형태로 주기적으로 변하는 부분을 포함한다. 오랜 주기 동안 평균을 취했을 때 sine함수 형태로 주기적으로 변하는 부분의 영향은 사라지며, 즉 sine함수를 한 주기 동안 적분하면 결과는 0이며 단지 시간에 따라 변화가 없는 dc부분의 영향만이 해(solution)에 나타나게 된다. 비선형 구동항 중 dc부분이 음향유동(acoustic streaming)을 유발한다. 음향유동(acoustic streaming) 속도, u_2 는 진동자로부터의 거리가 무한대로 증가할 때 상수 값으로 수렴한다. 시간에 독립한 이 극한 속도(limiting

velocity, U_L)는 다음과 같이 유도된다.

$$U_L = -\frac{3}{4\omega} U \left(\frac{dU}{dx} \right) \quad (3)$$

여기서 ω 는 가진 주파수(excitation frequency)이고, U 는 경계면에 평행한 비회전 속도의 진폭이며 x 는 경계면에 평행한 방향에서의 위치이다. 외부의 음향 유동의 운동을 해석하기 위하여, Stoke 경계층 두께를 무시할 수 있다고 가정할 때 극한 속도, U_L 는 고정 표면에서의 slip 속도로 사용된다^(22,23).

접선방향의 비회전 속도, U 는 연속방정식(zero divergence condition)에 의해 법선방향의 비회전 속도, V 로부터 계산될 수 있다. Fig. 1의 경우에 V 를 계산하기 위하여 진동자의 표면은 $\xi(z, t) = (0, t) = \xi_0 \sin(\omega t)$ 식과 같이 조화운동을 하며 고정 평판은 정지하고 있다고 가정하여야 한다. 그 외에도 진동자와 고정 평판의 길이는 초음파의 파장과 비교하여 충분히 크다고 가정하여야 한다. 선형 음향학 이론과

$\xi = \xi_0 \sin(\omega t)$ at $z=0$ and $\xi = 0$ at $z=H$ 의 경계조건을 이용하여 공기 입자의 변위는 다음과 같이 얻어 진다.

$$\xi(z, t) = \xi_0 \frac{\sin k(H-z)}{\sin kH} \sin(\omega t) \quad (4)$$

여기서 k 는 음향파동수(acoustic wave number)이고 H 는 Fig. 1에 보여진 바와 같이 진동 표면과 고정 평판 사이의 간극이다. 식 (4)의 시간 도함수를 취하면 V 는 곧바로 유도될 수 있다. 그리고 연속방정식(zero

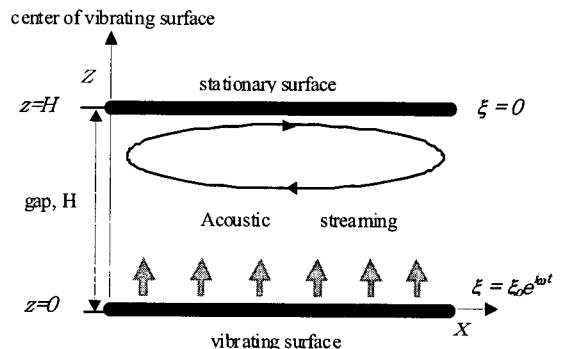


Fig. 1 Simplified schematic diagram of experimental apparatus

divergence condition, $\partial U/\partial x + \partial V/\partial z = 0$ 을 사용하면 접선방향의 속도의 진폭은 다음과 같이 주어진다.

$$U = i\xi_0 \omega k \frac{\cos k(H-z)}{\sin kH} x \sin(\omega t) \quad (5)$$

식 (5)에서 U 는 $kH = n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$)에서 최대가 됨을 알 수 있다. 식 (5)의 목적은 정량적인 음향 유동속도를 계산하는 것이 아니라 특정한 gap에서 급격한 음향 유동 속도의 증가를 정성적으로 설명하는 데 있다. 감쇠항의 영향은, $kH = n\pi$ 에서 음향 유동 속도를 계산하기 위하여 고려되어야 한다. 그러나 경계 조건에서 불연속성이 존재하기 때문에 이론적인 방법으로 정확한 정량적인 음향 유동 속도의 해석은 매우 어려운 일이다. 간극의 크기가 $n\pi/k$ 와 일치할 때의 음향 유동 속도의 증가 추세를 설명하기 위하여 감쇠항이 없는 단순한 식이 이용될 수 있다. $k=2\pi/\lambda$ (λ : wavelength)인 관계식을 이용하여 최대 법선방향 비회전 속도를 발생하는 간극은 $H = n\lambda/2$ 이 될 때 유도된다. 그러므로 고정 평판과 진동 표면 사이의 간극이 음파의 반파장과 일치할 때 최대 음향 유동 속도를 발생시키면서 접선방향 비회전속도, U 가 최대가 된다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 2에 보여진 실험장치는 초음파 유동장 측정을 위한 2차원 PIV시스템이며 초음파 진동자(bolted langevin type transducer), 혼(horn), 열

원(heat source), 연기 발생기(smoke generator), 초음파 가진기(ultrasonic wave exciter) 및 실시간 데이터 습득 장치(real-time data acquisition system), 함수 발생기(function generator), 지연 발생기(delay generator), CCD 카메라, Nd:YAG 레이저 등으로 구성되어 있다⁽¹⁸⁾. 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 부착 시 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. 이 실험기에서 최대 초음파 진동을 발생하기 위해서 필요한 초음파 진동자의 구동전력은 60 W(전압: 50 V)이었다.

레이저 광원은 200 mJ 이중 헤드 펄스 Nd:YAG 레이저(dual head pulsed Nd:YAG laser, Quantel)이다. 광원으로부터 볼록 렌즈 후의 원통형 렌즈로 구성되어 있는 sheet beam optics로 레이저를 전달하기 위하여 3개의 거울이 사용되었다. Sheet beam은 약 10도 정도의 확대각(expanding angle)을 가지고 있다. 그러므로 측정 위치에서의 빛(light sheet)의 폭과 두께는 각각 100 mm와 1 mm이다. 레이저면(laser sheet plane)은 초음파 진동자의 축방향 및 반경방향 유동속도 성분을 측정하기 위하여 고정되어 있는 유리 평판에 수직으로 장착되어져야 한다. CCD카메라의 해상도(Kodak MEGAPLUS ES 4.0)는 2k×2k이고 카메라는 레이저 sheet부터 1100 mm 정도 떨어져 위치하고 있으며 또한 레이저 sheet에 수직방향으로 놓여져 있다. CCD카메라와 레이저 광원은 지연 발생기(delay generator, BNC, Model 555)에 의해 싱크로나이즈 되었고 주 트리거 신호(main trigger signal)에 대해서는 첫 레이저 광원으로부터의 트리거 출력값(trigger output)이 사용되었다. 영상을 취득하기 전에 유동 측정 공간은 라스킨 노즐(Laskin nozzle, TSI, Model 9307)로부터 생성되는, 직경이 1 μm인 올리브유 입자 성분의 연기로 일정하게 채워졌다.

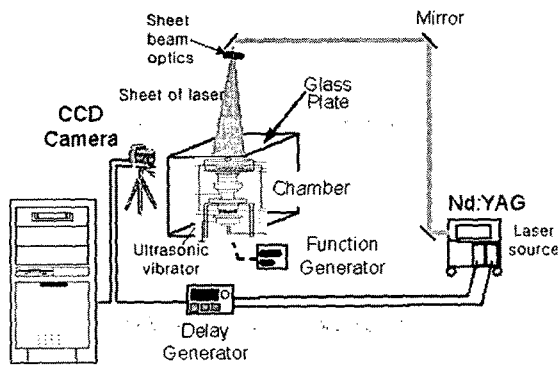


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

유동의 영상 측정 영역크기는 60×60 mm이다. 두 개의 영상이 $600 \mu\text{s}$ 의 시간 지연을 가지고 취득되었으며 두 개의 프레임에 의한 상호 상관법(cross-correlation method)에 의해 처리되었다. 레이저로 얻어진 두 개의 입자 영상을 이미지 테이더로 PC에 습득하여 디지털 데이터 처리 기술로 분석함으로써 시간 지연($\Delta t = 600 \mu\text{s}$) 동안 이동한 유동 입자들의 변위를 계측하여 유동 속도 성분은 이동한 입자들의 변위를 시간 간격(Δt)으로 나누어 속도벡터를 구할 수 있다. 초당 4쌍의 영상을 얻었으며 한 개의 측정조건을 위해 64쌍의 영상을 평균하여 구하였다.

초음파 진동자 상부에 위치한 열원(heat source)은 가열을 위해 저항을 두께 3 mm이며 직경 40 mm인 알루미늄 판 위에 부착했으며 이 저항에 전류를 흘려 보내는 양을 조절함에 따라 열원에 가해지는 열량을 조절할 수 있다. 알루미늄판의 온도변화를 측정하기 위해 4개의 열전대(thermocouple, J-type, Omega, Inc.)를 알루미늄판 위에 90도 간격으로 같은 원주상에 접착했다. 열원의 상부 축방향 단열을 위해 알루미늄판 위쪽에 두께 40 mm의 폴리우레탄 발포재(polyurethane foam)를 고내열(heat-resistance) 에폭시(epoxy)를 이용하여 접착했다. 열전대에서 얻어지는 전기신호는 범용의 데이터 습득장치를 이용하여 측정하기에는 너무 미약하여 신호 증폭기를 이용하여 증폭하였으며 전기적 잡음(noise) 제거를 위해 저역 필터(low-pass filter)를 이용하여 필터링을 하였다. 데이터 습득보드(DAQ board)를 이용하여 실시간으로 8채널의 데이터를 습득할 수 있었다. 공진 시 진동 진폭은 초정밀 정전 용량 센서(capacitance gauge)를 이용하여 측정하였으며 측정된 진폭은 $50 \mu\text{m}$ 였다. 초음파 진동자와 열원 사이의 간극내의 시험유체(공기)중의 반경방향 및 축방향의 국소적인 온도분포를 측정하기 위하여 진동자의 반경방향 및 축방향으로 열전대를 각각 4개 및 5개를 각각 설치하였다. 실험데이터의 반복성을 확인하기 위하여 유동장 및 온도 분포를 각각 2회 측정하여 데이터의 반복성을 검증하였다.

4. 결과 및 토의

고정된 평판 형태의 열원과 초음파 진동자 사이의

공진 간극($H=6,12,18,24,30,36$ mm) 및 비공진 간극($H=8,10,14,16$ mm) 내에서의 시험유체(공기)의 평균 속도장, 열전달률을 측정하여 공진 및 비공진 상태가 열원의 열전달 변화 및 간극내의 유체 유동에 미치는 영향을 조사하였다.

Fig. 3은 비공진 상태의 간극에서의 반경방향 및 축방향에 대한 평균 속도장을 보여주고 있고 Fig. 4는 공진상태의 평균 속도장을 나타내고 있다. 비공진 상태의 간극에서는 아주 적은 평균속도가 분포하고 공진 상태의 간극에서는 비공진 간극의 평균속도와 비교하여 큰 평균속도가 존재한다. 또한 비공진 상태의 간극에서는 반경방향(r)에서 진동자의 중심($r=0$)영역에서는 유체의 유동이 거의 존재하지 않으며 진동자의 양끝단으로 근접할수록 평균속도가 증가하였다. 공진상태의 간극에서는 비공진 상태와는 달리 간극 내의 진동자의 중심영역에서의 속도는 진동자의 양끝단에서의 속도보다 더 큰 속도분포를 나타내었으나 진동자의 표면 근처에서는 진동자의 중심에서보다 진동자의 양끝단에서 보다 큰 평균속도 분포를 나타내었다. Fig. 4에서 보여진 바와 같이 간극이 18 mm일 때 최대 평균유동속도가 존재하였

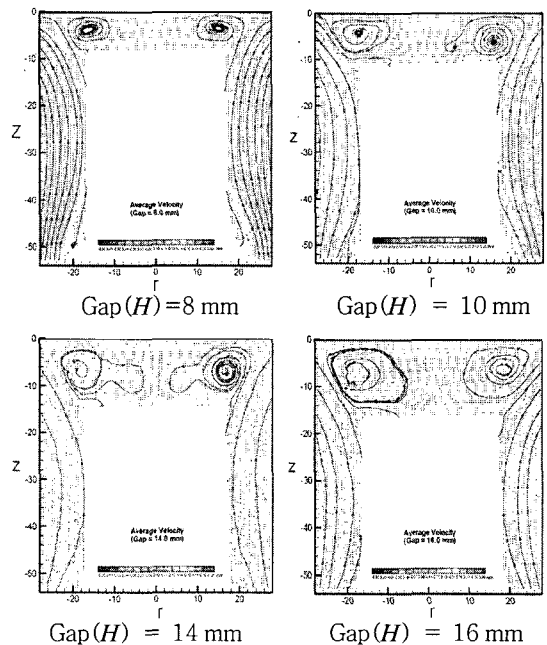


Fig. 3 Average velocity fields of an acoustic streaming by ultrasonic vibration at non-resonance

고 공진 간극 내의 유동 평균속도는 진동자의 중심 영역과 진동자의 양끝단에서 비공진 간극의 유동속도보다 10~20배 정도로 증가하였으며 공진 간극 내의 최대 평균속도도 비공진 간극 내의 최대 평균속도 보다 10~20배 정도 더 크게 존재하였다. 또한 비공진 및 공진 간극에서는 와류(vortex)구조의 속도분포가 존재하였고 특히 공진 간극에서 뚜렷한 와류를 발견할 수 있었으며 공진 간극이 커질수록 와류의 크기가 점점 커지고 평균유동속도는 작아짐을 알 수 있었다. 공진 상태의 간극에서의 축방향 위치 (z)에서는 국소적으로 고정 열원 보다 진동자에 가까운 위치에서의 평균속도가 증가하였다.

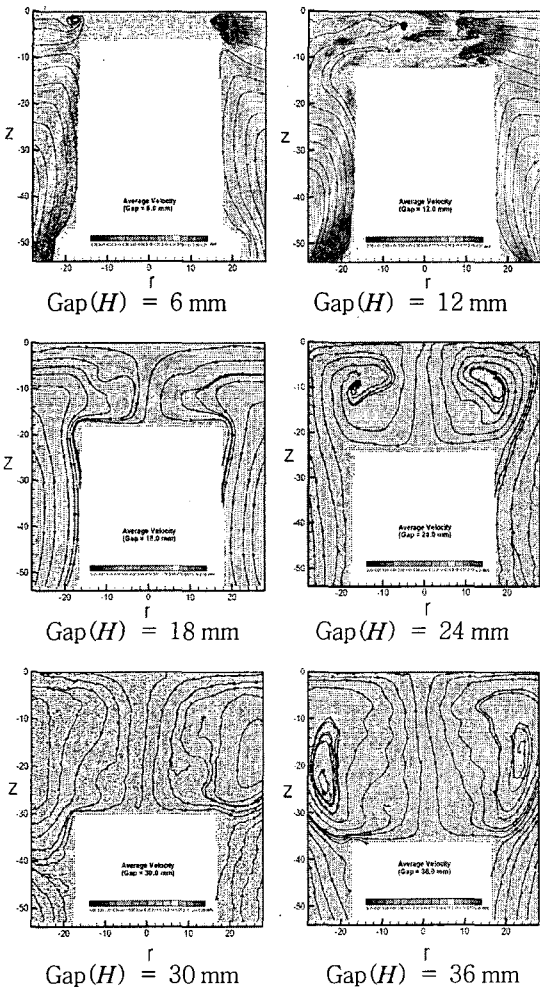


Fig. 4 Average velocity fields of an acoustic streaming by ultrasonic vibration at resonance

Fig. 5 및 6은 축방향 위치(z)와 반경방향 위치 (r)에 따른 비공진상태 및 공진상태에서의 국소 속도 섭동(local velocity fluctuation)을 보여준다. 이는 국소 속도와 국소 속도의 평균치의 차이를 의미한다. 공진상태의 간극 내의 진동자의 중심영역과 비공진 상태의 간극 내의 진동자의 양끝단에서 국소 속도섭동이 다른 영역보다 더 크게 분포되었고 공진 간극의 경우 진동자의 중심영역($r=0$)에 최대 국소 속도 섭동이 존재하였고 비공진 간극에서는 진동자의 중심에서 국소 속도 섭동이 최소가 되었고 진동자 양끝단에서는 최대 국소 속도섭동이 존재하였다. 또한 공진상태의 간극에서 진동자의 양 끝단에서 거의 0에 가까운 국소 속도 섭동이 분포하였다.

열원과 진동자 사이에 일정한 간극($H=6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 24, 30, 36$ mm)을 유지하면서 각각의 간극에 대해 초음파 진동을 진동자에 의해 가진하여 진동자 상부에 위치해 있는 열원의 표면온도를 실시간으로 측정하여 열전달 현상을 조사하였다.

Fig. 7은 초음파 진동 전후의 열원 표면에서 원주 방향으로 90도씩 변화한 국소적인 온도와 간극에서의 축방향으로의 국소 시험유체온도 및 대기온도 분포를 보여주고 있다. Channel (ch)0~3은 열원에 부착되어 있는 4개의 열전대의 온도변화를 나타낸다. ch0~3의 온도차이는 5 °C이며 이는 각각의 channel의 증폭비와 열전대의 보정에서 기인된다고 판단된다. ch4는 실험 중 항상 일정하게 유지되고 있는 간극 외부의 대기온도를 나타낸다. ch5~7는 12 mm 간극 내에있는 시험유체의 국소적인 온도변화를 보여준다. ch5는 초음파 진동자 중앙에서 3 mm 상부에 위치하고 있으며 ch6은 6 mm, ch7는 9 mm 상부에 위치하고 있다. 열원의 온도는 30분 정도 후면 약 160 °C에 정상상태로 도달된다. 초음파 진동은 열원에 일정한 전력을 공급하여 데이터 습득을 시작한 후 100초에서 가진되고 500초가 되면 가진을 멈추게 된다. 열원의 온도는 초음파 가진 후 순간적으로 급속히 감소하다가 초음파 가진 중지 후에는 다시 급격히 증가한다. 열원의 온도 강하는 5분내에 60 °C정도가 발생한다. 간극 내의 시험유체 온도(ch5~7)중에서 ch7는 열원에 가장 근접해 있기 때문에 초음파 가진 직전에는 가장 높은 온도분포를 나타내고 있다. ch7의 온도는 초음파 가진 직후 급격한 감소를 보여주며 초음파 가진 중에는 10

℃ 온도변동폭을 유지한다. 이전의 유동장 결과에서도 언급하였듯이 간극 내에서의 음향유동속도는 간극 별로차이를 나타내며 열원의 온도 강하는 음향유동속도에 비례하고 있음을 온도측정을 통해 알 수 있다. ch5에서는 음향유동속도의 크기의 감소와 초음파 진동자 자체 발생 열로 인해 초음파 가진 후 5℃ 정도의 온도 상승이 초래되었다. 이는 초음파 진동이 진동자 표면의 온도 증가를 가져와 진동자 표면에 아주 근접한 위치에서는 상대적으로 적은 열전달 향상이 나타날 수 있다. 근경계층 음향유동은 물리적 경계와 방사 음파의 상호 작용으로부터 야기된다. 음향 유동 속도는 물리적 경계표면으로부터 멀어질수록 감소한다. Fig. 8은 열원과 진동자 사이의 간극의 변화가 열원의 온도 강하에 미치는 영향을 보여주고 있다. 삼각형 기호는 초음파 진동이 발생되기 전의 열원의 정상 상태의 온도를 나타내며 사각형 기호는 초음파 진동이 가진 된 후에 5분 후의 열원의 온도를 나타낸다. 다이아몬드 기호는 초음파 진동시와 무진동시의 열원의 온도 강하를 나타낸다. 초음파 진동에 의한 열원의 온도 강하는 간극에 대해 큰 의존성을 가지고 있으며 간극이 초음파 진동에 의해 방사되는 초음파의 반파장이 되는 약 6mm의 정수배가 될 때 온도강하가 최대가 된다. 이 현

상은 초음파의 공진현상으로부터 기인한다. 전형적인 냉각팬 타입의 냉각법은 열원과 냉각팬 사이의 거리에 비례하는 온도강하를 야기시킨다. 그러나 음향유동을 이용한 냉각에 대해서는 Fig. 8에 보여진 것처럼 열전달률 향상을 위한 최적의 간극이 존재한다. 6 mm 간극에서는 12 mm 간극과 거의 동일한 온도강하를 유발하며 36 mm간극은 8 mm 및 10 mm 간극보다 더 큰 온도 강하를 야기시킨다. 간극이 18 mm보다 더 크게 되면 간극이 비록 초음파의 반파장의 정수배가 되더라도 온도강하의 정도는 작아지게 됨을 또한 알 수 있다. 이는 아마도 파동의 전파 손실에 의해 기인한 초음파 강도 및 음향유동속도의 감소의 원인이라고 생각된다. 결론적으로 최적의 간극은 전파손실을 고려할 때 파의 반 파장 또

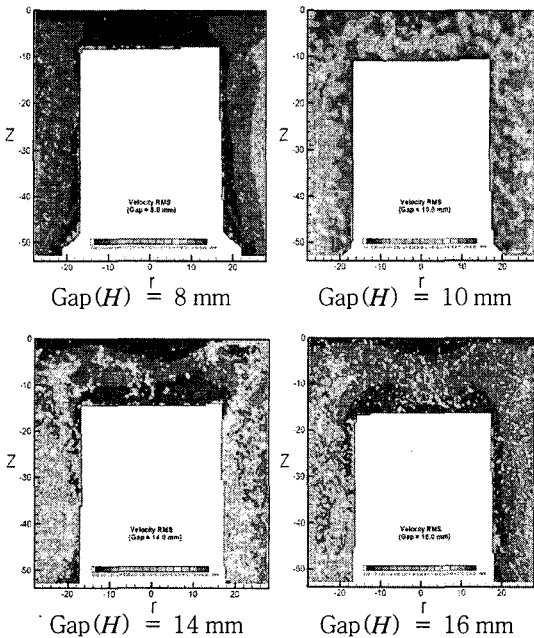


Fig. 5 Local velocity fluctuation at non-resonance

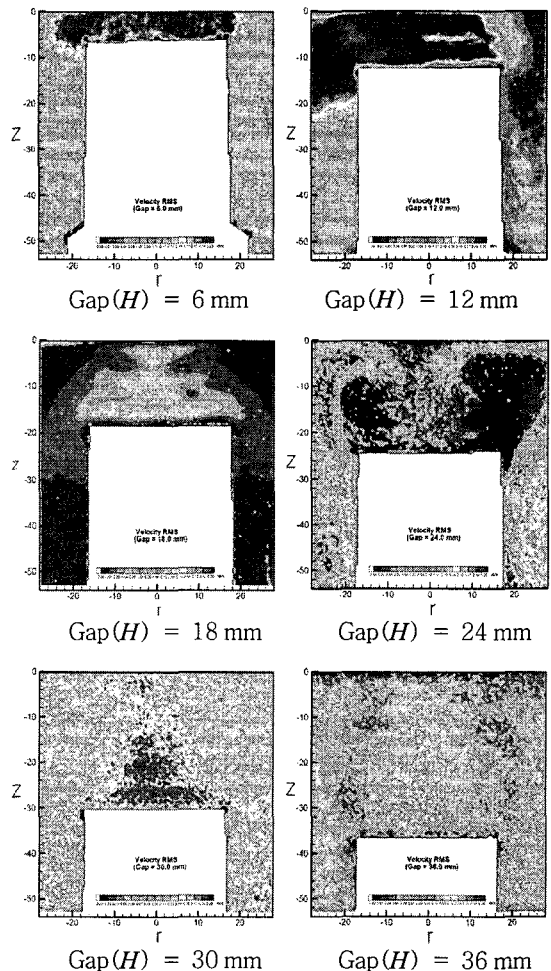


Fig. 6 Local velocity fluctuation at resonance

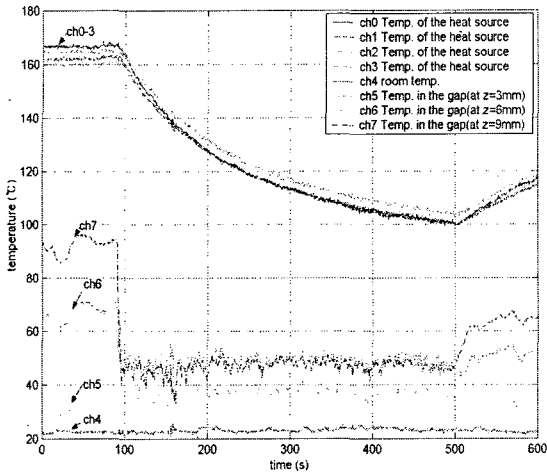


Fig. 7 Temperature vs. time without and with ultrasonic vibration

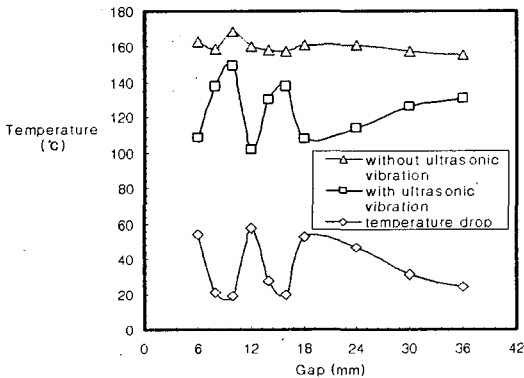


Fig. 8 Temperature vs. gap without and with ultrasonic vibration

는 한 파장일 때라고 예측된다.

열원과 진동자 사이의 간극의 크기가 열전달에 미치는 영향은 Fig. 9에 나타나 있다. 음향유동에 의해 야기된 대류에 의한 열전달 계수(h) 변화는 간극의 변화에 크게 좌우되며 열전달 계수는 간극의 크기가 6 mm의 정수배가 될 때 최대가 되었다. 또한 냉각 시스템의 설계에 필요한 최적의 간극이 존재함도 명백히 검증되었다. Fig. 9은 Fig. 8에서의 온도강하와 유사한 추이를 또한 보여 주었다.

Fig. 10은 열원과 진동자 사이의 간극의 다양한 변화에 대한 최대 음향유동 속도의 크기를 보여준다. 간극의 변화에 대한 열원의 온도 강하의 추이처럼 간극의 크기가 6 mm의 정수배일 때 음향유동속도가 최대가 되었고, 특히 간극이 초음파의 반 파장

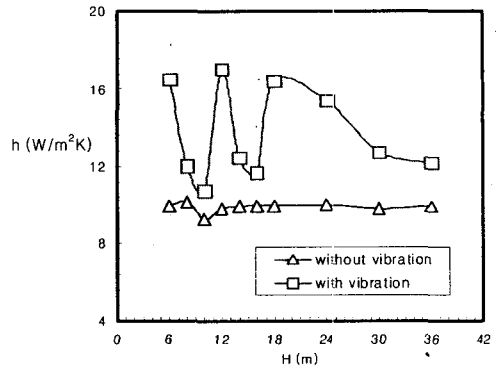


Fig. 9 Heat transfer coefficient vs. gap without and with ultrasonic vibration

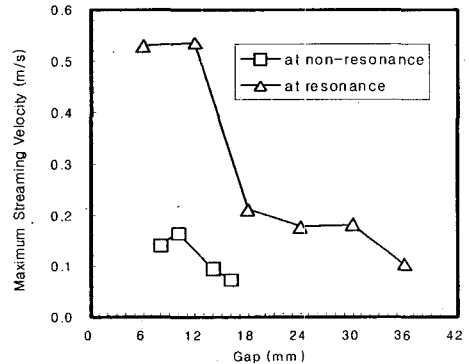


Fig. 10 Maximum streaming velocity vs. gap at resonance and non-resonance

과 한파장일 때가 최대의 음향 유동 속도를 나타내었고 간극이 12 mm를 초과할 때는 음향유동속도가 100 ~ 400 % 정도 감소하였다. 삼각형 기호는 공진 상태에서의 최대 음향유동 속도이며 사각형 기호는 비공진 상태에서의 최대 음향유동 속도를 나타낸다.

5. 결론

고정된 열원과 수직으로 초음파 진동을 하는 진동자 사이의 간극 내에 시험유체 속으로 전파되는 초음파는 정상상태의 2차 유동의 와류에 의해 음향유동을 발생하여 시험유체의 유동속도를 증가시켰고 냉각대상이 되는 열원의 대류 냉각을 향상시켰다. 초음파 진동이 존재하는 유동장내에서의 열전달은 시험유체내의 대류 열전달의 상호작용으로 표현되는 대류 열전달 계수에 의해 실험적으로 표시 되었다. 수직 초음파 진동에 의해 유도된 음향유동의 강도 및 열전달 계수는 열원과 진동자 사이의 간극에 의

해 크게 좌우되었고 공진상태에 있는 초음파 진동은 PIV유동장 측정과 열원의 온도강하 측정을 통해 비공진 상태에서 보다 음향유동속도를 증가시켜 대류에 의한 열전달 향상을 초래하였다. 열전달 향상이 최대가 되는 최적의 간극은 초음파의 반파장의 정수배가 되었고 실제적으로 설계에 활용될 수 있는 최적의 간극의 크기는 초음파의 반 파장 및 한 파장이 되었다.

간극내의 시험유체의 온도 분포와 간극 주위의 외부 유체의 온도분포도 실험적으로 측정하였다. 그 결과, 간극내의 시험유체의 온도 분포는 국소적으로 진동자의 축방향으로는 급격한 변화가 존재하였다. 간극내의 시험유체의 음향유동속도는 간극의 크기에 좌우되며 6배수가 될 때 최대가 되었고 특히 6 mm 및 12 mm에서 음향유동속도가 최대가 되었다.

결론적으로 초음파 진동을 이용한 음향유동의 유도에 의한 최적 냉각시스템의 설계를 위해서는 냉각 대상물체와 냉각장치간의 간극과 간극내의 국소적인 위치를 결정하는 것이 중요한 설계 방향이 된다.

참 고 문 헌

(1) Faraday, M., 1831, Phil.Trans., p. 121, p. 229.
 (2) Rayleigh, L., 1945, "Theory of Sound", Dover Publication, New York.
 (3) Schlichting, H., 1955, Boundary Layer Theory, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
 (4) Nyborg, W. L., 1958, "Acoustic Streaming Near a Boundary", J. of Acoust. Soc. Am., Vol. 30, No. 4, pp. 329~339.
 (5) Lighthill, J., 1978, "Acoustic Streaming", J. of Sound and Vib., Vol. 61, No. 3 pp. 391~418.
 (6) Jackson, F. J. and Nyborg, W. L., 1960, "Sonically-induced Microstreaming Near a Plane Boundary. II. Acoustic Streaming Field", J. of Acoust. Soc. Am., Vol. 32, No. 11, pp. 1387~1396.
 (7) Gopinath, A. and Mills, F., 1994, "Convective Heat Transfer Due to Acoustic Streaming Across the Ends of Kundt Tube", Journal of Heat Transfer, 116 pp.47~53.
 (8) Nguyen, N. T. and White, R. M., 1999,

"Design and Optimization of an Ultrasonic Flexural Wave Micropump Using Numerical Simulation", Sensors and Actuators, 77, pp. 229~236.

(9) Gould, R. K, 1966, "Heat Transfer across a Solid-liquid Interface in the Presence of Acoustic Streaming", J. of Acoust. Soc. Am., Vol. 40, No. 1, pp. 219~225.

(10) Ro, P. I. and Loh, B., 2000, "Feasibility of Using Ultrasonic Flexural Waves as a Cooling Mechanism", IEEE Industrial Electronics, Vol. 48, No. 1, pp.143~150.

(11) Loh, B., Hyun, S., Ro, P. and Kleinstreuer, C., 2002, "Acoustic Streaming Induced by Ultrasonic Flexural Vibrations and Associated Enhancement of Convective Heat Transfer", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 111, No. 2, pp. 875~883.

(12) Loh, B. and Lee, D., 2003, "A Novel Cooling Method by Acoustic Streaming Induced by Ultrasonic Resonator", J. of Acoust. Soc. Kor., Vol. 22, No. 3, pp. 217~223.

(13) Loh, B. and Lee, D., 2003, "Experimental and Analytical Study of a Cooling Mechanism Using Acoustic Streaming by Ultrasonic Vibrations", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 9, pp. 694~702.

(14) Lee, D., Loh, B, Kwon, K. and Lee, J., 2004, "Flow Visualization of Acoustic Streaming Induced by Ultrasonic Vibration Using Particle Imaging Velocimetry", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 528~535.

(15) Lee, D. and Loh, B., 2004, "Study of Acoustic Streaming at Resonance by Longitudinal Ultrasonic Vibration Using Particle Imaging Velocimetry", J. of Acoust. Soc. Kor., Vol. 23, No. 5. pp. 340~352.

(16) Miller, R. W., 1989, "Flow Measurement Engineering Handbook". 2nd ed. New York, McGraw-Hill.

(17) Merzkirch, W., 1987, "Flow Visualization", Academic Press, 2nd ed.

- (18) Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging Technique for Experimental Fluid Mechanics", *Ann.Rev.Fluid Mech.*, pp. 261~304.
- (19) Dracos, Th., 1996, "3-D Velocity & Vorticity Measuring & Image Analysis Techniques", Kluwer Academic Pub.
- (20) Hassenlink, I., 1998, "Digital Image Processing in Flow Visualization". *Ann. Rev. Fluid Mech.*, pp. 421~485.
- (21) Lee, S. J., 1999, "PIV(Particle Image Velocimetry) Velocity Field Measurement", AFERC.
- (22) Andres, J. M. and Ingard, U., 1953, "Acoustic Streaming at High Reynolds Numbers", *J. of Acoust. Soc. Am.*, Vol. 25, No. 5, pp. 928~937.
- (23) Hamilton, M.F. and Blockstock, D.T., 1998, "Nonlinear Acoustics", Academic Press.