

사각 공동구의 하부 벽면 가진의 진폭 변화에 따른 자연 대류 유동의 공진 현상에 관한 연구

Amplitude Effect on the Resonance of Natural Convection inside a Square Cavity with a Vibrating Bottom Wall

허남건¹⁾, 김욱²⁾, 김영규³⁾, 강병하⁴⁾
 N. Hur, W. Kim, Y. Kim, B. H. Kang

In the present study a numerical simulation is performed on a natural convection inside a square cavity with a vibrating bottom wall. The heat transfer coefficients for various amplitudes of the bottom wall vibration were compared to the case without the bottom wall excitation. From the results, it is seen that the local temperature distribution in a cavity becomes more uniform as the amplitude of the bottom wall vibration is increased. Also, it was seen that the heat transfer coefficient increased on the heating wall as the applied amplitude increased.

1. 서론

사각 공동구의 가열면의 온도가 주기적으로 변하는 경우 열전달 계수가 증가하게 되는데, 그 가열 주기가 사각 공동구의 공진 주파수와 일치하는 경우에 열전달 계수가 더 크게 증가하는 것으로 알려지고 있다. 이러한 사각 공동구내의 자연 대류 공진 현상은 여러 사람들에 의해 연구되어 왔다. Kwak과 Hyun^[1]은 벽면에서 온도를 주기적으로 변화시키는 경우의 유동 특성을 연구하였으며, Kwak 등^[2]은 주기적으로 가열면의 온도나 열전달량이 변하는 경우 공진 주파수를 예측하는 방법을 제시하였다. 또한 Antohe 등^[3-4]은 주기적으로 열을 가할 경우 가열되는 양의 진폭이 공진 현상에 미치는 영향을 연구하여

분석적인 방법과 수치적인 방법으로 공진 주파수를 예측하기 위한 방법을 제시하고 실험도 수행하였다. Fu 등^[6]은 중력과 진동을 고려한 사각 공동구 내에서의 자연대류를 연구하였고, Xia 등^[7]은 벽면의 온도가 주기적으로 변할 때 공동구 내에서의 유동 안정성에 대해서 연구하였다. 그러나 열전달 촉진시키기 위한 목적으로 주기적인 온도 또는 열량을 벽면에 인가시키는 것은 현실적이지 못하며, 벽면의 가진에 의한 유동을 교란시키므로서 자연대류 유동을 공진시키는 것이 현실적일 것이다. 한

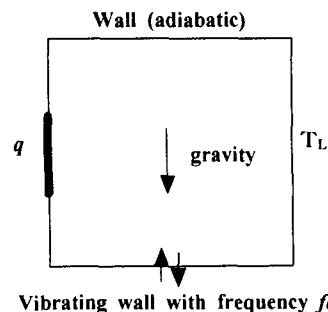


Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain with boundary conditions

- (1) 서강대학교 기계공학과
- (2) 서강대학교 기계공학과 대학원
- (3) 서강대학교 기계공학과 대학원
- (4) KIST

예로, 최근 컴퓨터 CPU 냉각을 위하여 스피커를 사용하여 가진 한 경우 열전달이 촉진되어 좋은 냉각 성능을 얻은 실험연구가 수행된 바 있다.¹⁸⁾ 또한, 허남건 등¹⁹⁾은 사각 공동구 내에서 아래 벽면을 가진 시킨 경우 내부의 자연대류 현상에 대해서 연구한 바 있다. 그들의 연구 결과에 따르면 어느 특정한 주파수로 가진을 시킨 경우 공동구 내부에서 공진이 일어나는 것을 밝혔고 가열되는 양이 증가할수록 그 가진 주파수와 공진 주파수도 증가하는 것을 밝혔다. 따라서 본 연구에서는 벽면 가진의 진폭이 자연대류의 공진 현상에 어떠한 영향을 미치는 지를 수치적으로 연구하였다.

2. 수치해석

본 연구에서 수치 해석한 사각 공동구는 그림 1과 같은 형상이며, 계산 격자는 49 x 49개이다. 수치 해석은 상용 코드인 STAR-CD를 이용하였으며, 각각의 계산 Case에 대하여 Silicon Graphics사의 Origin 2000 workstation CPU 1개를 사용하여 약 110시간의 계산 시간이 소요되었다. 경계 조건을 살펴보면 오른쪽 벽의 중앙에 가열 부분이 있고 왼쪽 벽은 냉각면이다. 가열 부분은 1000W/m²의 조건을 주어 수치 해석하였으며 냉각면은 288 K의 온도로 유지된다고 가정하였다. 초기상태의 공동구 내부 온도는 293K로 설정하였다. 공동구의 윗면은 단열 경계 조건을 주었으며 아래면의 유동 가진이 있는 면은 시간에 따라 삼각 함수의 형태로 진폭이 a의 크기인 스피커와 같이 진

동하는 막으로 가정하고 이를 미분하여 다음 식처럼 주기적으로 변하는 수직 속도를 경계 조건을 주어 유동 가진을 묘사하였다

$$v = 2\pi a f \sin(2\pi f t) \quad (1)$$

자연 대류 문제의 수치 해석은 Boussinesq 근사의 방법을 이용하는 것이 일반적이지만 본 연구에서와 같이 공동구의 하단면이 진동하는 경우는 압축성이 나타나기 때문에 자연대류 문제를 압축성 코드를 이용하여 수치 해석하였다. 시간 간격은 가진 주기의 40분의 1로 하였다.

사각 공동구 내에 유동 가진을 하여 공진 현상이 일어나는 것을 관찰하기 위하여 열량 q를 1000W/m²로 하고 여러 가지 진폭(0mm, 0.5mm, 1mm, 2mm, 3mm)에 대하여 수치 해석하였다. 사각 공동구의 크기는 0.3m x 0.3m이며 허남건 등의 결과에서부터 가진 주파수를 50Hz로 하였다.

3. 결과

그림 2는 사각 공동구의 중심에서 시간에 따른 온도 변화를 여러 가지 가진 진폭에 대해 나타내었다. 그림 2(a)는 아래면에서 가진을 하지 않은 경우이다. 이 그림에서는 온도가 293K에서 366K까지 완만하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 그림 2(b)~(e)는 온도가 진동하면서 진동하는 것을 볼 수 있고, 특히 그림 2(e)에서는 진동이 상당히 요란한 것을 볼 수 있다. 또한 가진 진폭이 증가하면 증가할수록 공진이 더 빨리 일어나는 것을 볼 수 있다. 1mm로 가

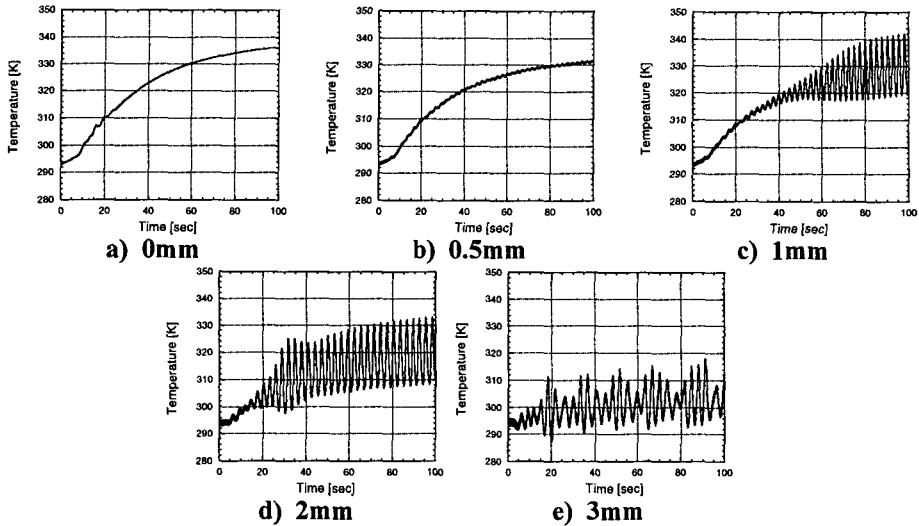


Fig. 2 Temperature history at the center of the cavity for various applied amplitudes of the vibrating bottom wall

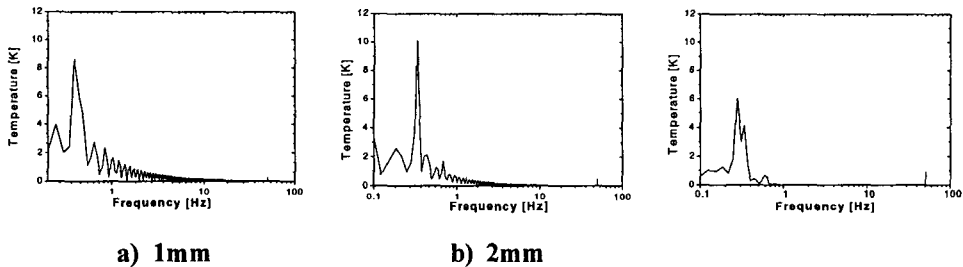


Fig. 3 FFT results of the monitoring cell for 3 cases

진을 한 경우 공진 진폭이 최대가 되는 시간이 80초 정도 이후이지만 가진 진폭이 3mm인 경우에는 거의 시작하자마자 최대의 진폭으로 공진을 한다.

허남건 등⁽⁹⁾의 연구에 따르면 $q=1000W/m^2$ 일 때 1mm로 가진하는 경우 공진 주파수는 0.4 Hz로 밝혀졌다. 그러나 본 연구에서는 가진 진폭이 변하면서 공진 주파수도 변하는 것으로 나타났고 또한 3mm로 가진하

는 경우에는 공진주파수가 하나가 아닌 두 개로 나타났다. FFT 결과는 그림 3에 나타내었다. 0.5mm일 때에는 가진에 의한 공진의 효과가 거의 나타나지 않았다. 그림 3 a)~c)까지는 공진 주파수와 가진 주파수를 명백히 볼 수 있다. 1mm로 가진한 경우 공진 주파수가 0.4Hz로 나오는데 그 주파수의 온도 변화는 8.6 K로 나타났다. 그러나 전체적인 온도 변화는 약 14 K로 나오는데 8.6 K밖에 나

Table 1. FFT results of the monitoring cell data

Amplitude	Resonant freq. f_{r1}	Resonant T_{r1}	Resonant freq. f_{r2}	Resonant T_{r2}
0.5mm	0.38 Hz	0.3 K		
1mm	0.40 Hz	8.6 K		
2mm	0.47 Hz	10 K		
3mm	0.27 Hz	6 K	0.33Hz	4 K

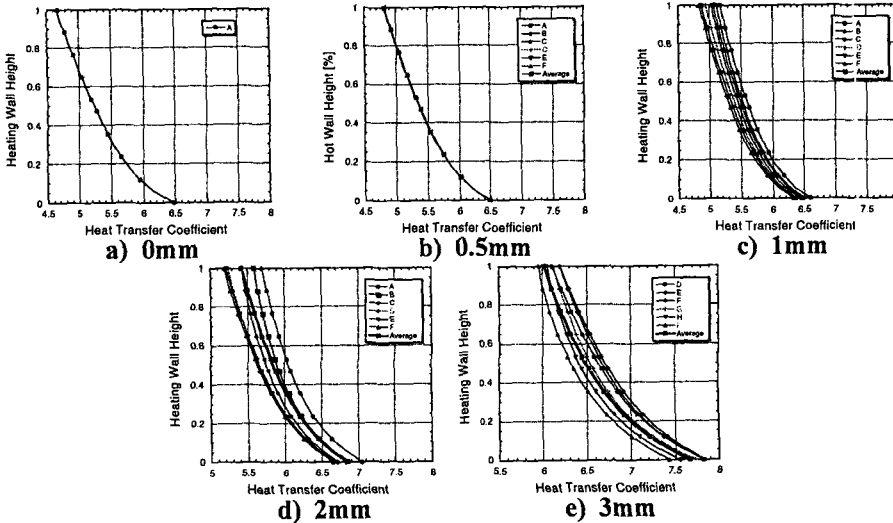


Fig. 4 Heat transfer coefficient during one cycle for various applied amplitudes

오지 않는 이유는 다른 주파수에서도 공진에 영향을 미치지 때문이라고 생각한다. 가진 진폭을 2mm로 하였을 때에도 1mm와 비슷하게 나온다. 그러나 3mm로 가진을 하는 경우에는 공진 주파수가 두 개로 나타나는데 이렇게 0.27 Hz와 0.33 Hz로 공진을 하기 때문에 이 두 공진 주파수에 의한 공진 현상이 나타나게 되는 것이다.

열전달 측면에서 공진의 효과를 보기 위해서 가열면의 열전달 계수를 살펴보았다. 그림 4는 가열면의 열전달 계수를 여러 가지 가진 조건에 대

해서 나타내었다. 가진을 하지 않은 조건인 그림 a)는 가열면 아랫부분의 열전달 계수가 높은 것을 알 수 있고 올라갈수록 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 b)는 공진의 효과를 볼 수 없지만 1mm로 가진을 한 그림 c)의 경우에는 공진 효과가 확실히 볼 수 있다. 가열면의 아랫부분은 열전달 계수의 시간 평균값이 거의 비슷하지만 윗부분은 열전달 계수가 증가한 것을 볼 수 있다. 열전달 계수의 진폭이 평균값에 비해 대략 2.5%가 된다. 2mm로 가진을 한 경우도 현상은 비슷한데 열전달 계수의 진폭이 6.5%로 증가한다. 그러나 3mm로 가진을 한 경우에는 열전달 계수의 진폭이 평균값의 약 3%밖에 되지 않지만 시간 평균값은 다른 경우에 비해 $1W/m^2K$ 정도가 증가한 것을 볼 수 있다.

그림 5는 각 가진 조건에 대하여 시간에 대해 평균한 가열면의 열전달 계수를 나타낸 그림이다.

그림 6에서는 여러 가지 가진 조건

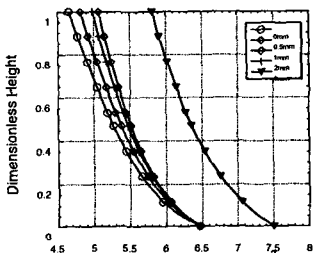


Fig. 5 Cycle averaged heat transfer coefficients at the heating wall

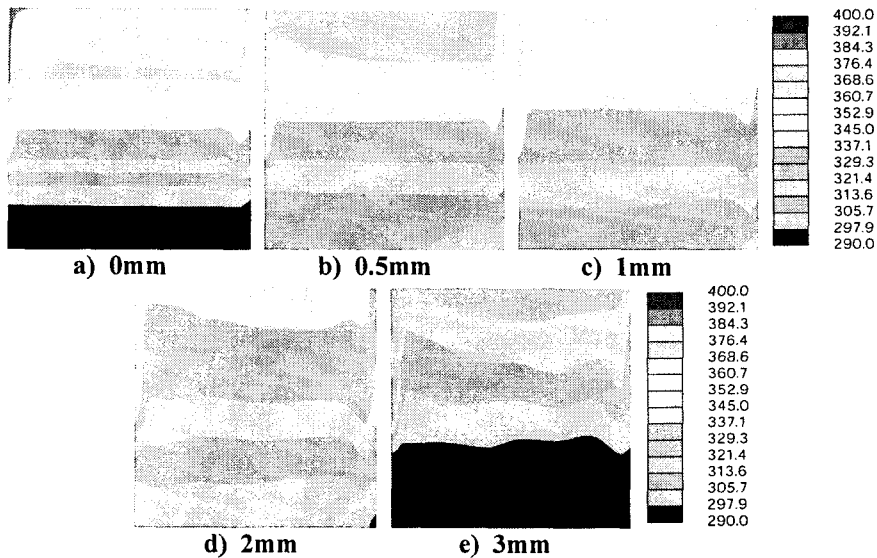


Fig. 6 Temperature contours inside the cavity for various applied amplitudes of the vibrating bottom wall

에 대하여 사각 공동구 내부의 온도 분포를 시간 평균하여 나타내었다. 가진하지 않은 경우에는 윗면과 아랫면의 온도편차가 큰 것을 볼 수 있다. 특히, 가열하는 부분에서는 온도가 더 높은 것을 볼 수 있다. 그러나, 0.5mm로 가진을 하면서 온도편차가 공진의 영향에 의해 약간 줄어든 것을 볼 수 있다. 특히, 2mm로 가진한 경우에는 공동구의 윗면이 350K밖에 되지 않는 것을 볼 수 있다. 그리고 3mm로 가진한 경우에는 공동구 윗면에서의 온도가 약 330K이고 등고선이 다른 경우에 비해 많이 불규칙적인 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 가로 세로 크기가 0.3m인 공동구에서 아래면을 여러 가지 진폭으로 가진한 경우에 대하여 내부 자연대류 현상을 수치 해석하였다. 연구 결과, 아래면에서 가진 진폭

이 증가할 경우, 가열 벽면에서부터 나오는 열에너지가 공진의 효과에 의하여 가진이 없는 경우에 비하여 더 고르게 확산되어 전체적으로 온도 편차가 줄어드는 것을 알았다. 그리고 공동구의 중앙에서의 온도 변화는 가진 진폭이 증가할수록 평균 온도가 낮아지고 공진 주파수도 낮아지는 것을 알 수 있다. 열전달 측면에서도 또한 가진 진폭이 강할수록 가열면에서 열전달 계수도 증가하는 것을 알았다.

후 기

본 연구는 과학 기술부 지원 국가 지정 연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

[1] Kwak, H.S. and Hyun, J.M., "Natural



- convection in an enclosure having a vertical sidewall with time-varying temperature," *Journal of Fluid Mechanics*. 1996. vol.329, pp. 65-88.
- [2] Kwak, H.S., Kuwahara, K. and Hyun, J.M., "Technical Note: Prediction of the resonance frequency of natural convection in an enclosure with time-periodic heating imposed on one sidewall," *Int J Heat Mass Transfer*. vol. 41 (1998), pp. 3157-3160.
- [3] Antohe, B.V. and Lage, J.L., "Amplitude effect on convection induced by time-periodic horizontal heating," *Int J Heat Mass Transfer*. vol. 39 No. 6 (1996), pp. 1121-1133.
- [4] Antohe, B.V. and Lage, J.L., "Experimental investigation on pulsating horizontal heating of an enclosure filled with water," *ASME J Heat Transfer*, vol. 118 (1996), pp. 889-896.
- [5] Lage, J.L. and Bejan, A., "The resonance of natural convection in an enclosure heated periodically from the side," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 36 (1993), pp. 2027-2038.
- [6] Fu, W.S. and Shieh W.J., "A study of thermal convection in an enclosure induced simultaneously by gravity and vibration," *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 35 (1996), pp. 1695-1710.
- [7] Xia, Q., Yang, K.T. and Mukutmoni, D., "Effect of imposed wall temperature oscillations on the stability of natural convection in a square enclosure," *ASME J Heat Transfer*, vol. 36 (1995), pp. 437-452.
- [8] 김서영, 강병하, "유동공진 대류 열전달 촉진기술과 응용," 대한기계학회 2000년도 유체공학 부문 학술 강연회 강연집 (2000), pp.118-126.
- [9] 허남건, 김욱, 김영규, 강병하, "사각 공동구의 하부 벽면 가진에 의한 자연 대류 유동의 공진 현상에 관한 연구," 제1회 한국유체공학 학술대회 논문집 (2000), pp. 31-34.