

사각 공동구의 벽면 가진에 의한 자연 대류 유동의 공진 현상 및 열전달에 관한 연구

허남건* · 김영규** · 강병하***

Resonance of Natural Convection and Heat Transfer inside a Square Cavity due to a Vibrating Wall

N. Hur*, Y. Kim** and B. Kang***

Key Words: Flow Control(유동제어), Natural Convection(자연대류), Resonance(공진)

Abstract

In the present study a numerical simulation is performed on a natural convection inside a square cavity with a vibrating wall. The study has been conducted varying the heat transfer rate, wall excitation frequency and also the orientation of the cavity. The temperature and velocities inside the cavity was observed and also, the heat transfer coefficients on the heating wall was seen. From the results, it can be seen that the temperature inside the cavity decreases when excited with the proper frequency and the heat transfer coefficient increased with cavity inclination angle, θ . It is also found from the results that flow resonance is occurred near the inclination angle $\theta=90^\circ$.

1. 서 론

사각 공동구 내에서 공진의 영향은 여러 사각에 의해 연구가 진행되어왔다. 한 가지 방법으로는 주기적인 열량 혹은 주기적인 가열 온도로 공진을 일으키는 방법으로 Kwak, Hyun, Antohe, Lage, Bejan 등^[1-6]이 많은 연구를 해왔다. 이들은 사각 공동구 안에서 유동 특성, 온도, 열전달 계수 등을 관찰하였다. 이때 어떤 특정한 주파수에서만 공진이 일어나는 것을 알았고 공진의 영향으로 열전달이 증가하는 것을 알았다. 또한 Antohe와 Lage는 주기적으로 가열할 경우 가열되는 양의 진폭이 공진에 미치는 영향에 대해서 연구하였는데 이때 공진 주파수에는 영향을 미치지 않고 열전달량에 영향을 미치는 것을 알았다. 또한 분석적인 방법과 수치적인 방법으로 공진

주파수를 예측하기 위한 방법을 제시하고 실험도 수행하였다. 그리고 이들은 다공 물질로 채워진 공동구 내에서 주기적으로 열을 가했을 때도 비슷한 유동현상을 관찰하였다. Xia 등^[7]은 벽면의 온도가 주기적으로 변할 때 공동구 내에서의 유동 안정성에 대해서 연구하였다. 최근에는 Kwak과 Hyun^[8]은 지금까지 진행되어온 주기적인 가열에 의한 공진 현상을 정리하였다.

사각 공동구에서 열전달을 촉진시키기 위한 또 하나의 방법은 물리적으로 진동시키는 방법이다. Fu와 Shieh^[9]는 가열량이 일정할 때 공동구 전체를 위아래로 진동시킬 경우 그 내부에서 발생하는 유동에 대해서 연구하였다. 최근에는 컴퓨터 CPU 냉각을 위하여 스피커를 사용하여 가진한 경우 열전달이 촉진되어 좋은 냉각 성능을 얻은 실험 연구가 수행된 바 있다.^[10]

허남건 등^[11]은 그림 1과 같이 사각 공동구 내에서 각도가 90° 이고 가열량이 일정할 때 벽을 가진하는 방법으로 연구를 하였다. 사각 공동구의 한 면의 일부분을 1000W/m^2 로 가열하고 50

* 서강대학교 기계공학과, nhur@ccs.sogang.ac.kr

** 서강대학교 대학원, browser@nownuri.net

*** 국민대학교 기계공학과, bhkang@kookmin.ac.kr

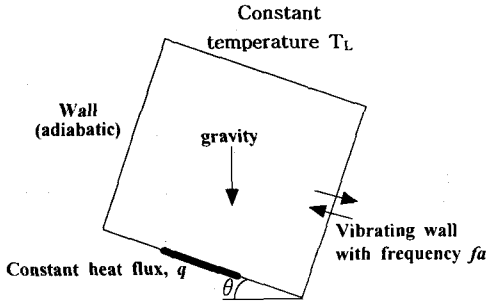


Fig. 1 Schematic diagram of the computational domain with boundary conditions

Hz로 가진했을 때 그림 2과 같은 공진 현상을 관찰할 수 있고 그림 3과 같이 공동구 중심에서 시간에 따른 온도 그래프를 볼 때 50 Hz의 가진 주파수와 0.4 Hz의 공진 주파수를 잘 나타내주고 있다. 이런 경우에도 주기적인 가열과 비슷하게 특정한 주파수에서 공진이 일어나는 것을 밝혔고 진폭에 의한 영향^[12]을 연구한 결과 공진에 의한 열전달 촉진의 경우 공진 주파수는 일정한 0.4Hz 였지만 진폭이 큰 경우에는 가진에 의한 영향도 있으므로 공진 주파수가 두 개로 비선형적인 현상을 보여주었다.

본 연구에서는 사각 공동구를 가진한 경우 공동구의 기울기에 따른 공진 현상을 관찰하기 위하여 한 벽면을 수십 Hz의 주파수로 가진 시키고 공동구의 기울기를 변화시키면서 내부의 자연 대류의 공진 현상을 수치적으로 연구하였다.

2. 수치 해석

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 Intel Pentium III 850 MHz Linux Workstation을 사용하여 약 110시간의 계산 시간이 소요되었다. 경계 조건을 살펴보면 오른쪽 벽의 중앙에 가열 부분이 있고 왼쪽 벽은 냉각면이다. 가열 면은 1000 W/m²의 조건을 주어 수치 해석하였으며 냉각면은 288 K의 온도로 유지된다고 가정하였다. 공동구의 왼쪽면은 단열 경계 조건을 주었으며 오른쪽 면의

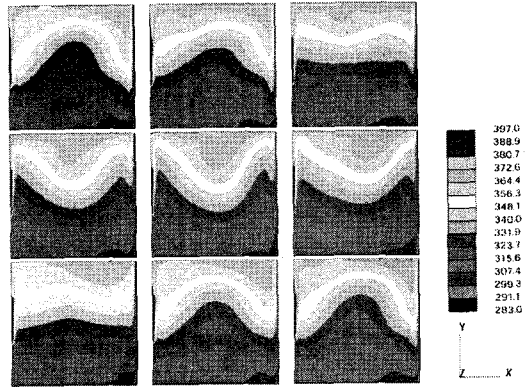


Fig. 2 Temperature contours inside the cavity for one resonating cycle when $q=1000\text{W/m}^2\text{K}$

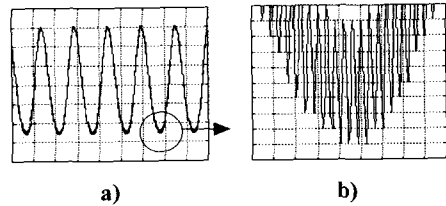


Fig. 3 Oscillating temperature at the center of the cavity when $q=1000\text{W/m}^2$ showing resonant and applied frequency

유동 가진이 있는 면은 시간에 따라 삼각 함수의 형태로 진폭이 a의 크기인 스피커와 같은 진동하는 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 간편하지만 본 연구에서와 같이 공동구의 하단면이 진동하는 경우는 압축성이 나타나기 때문에 자연 대류 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 50 Hz에서 90 Hz까지 10 Hz 단위로 다양한 경우에 대하여 수치 해석하였다. 사각 공동구의 크기는 0.3m x 0.3m이며 이에 대하여 세가지 가열면의 열전달량 q에 대하여 여러 가지 가진 주파수 f_a 를 인가한 경우를 수치 해석하였다. 또한 공동구의 기울임

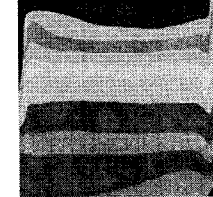
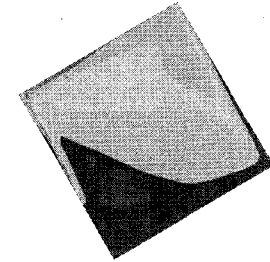
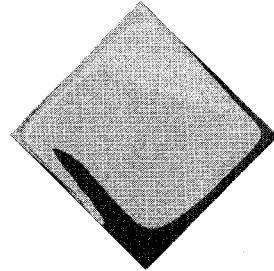
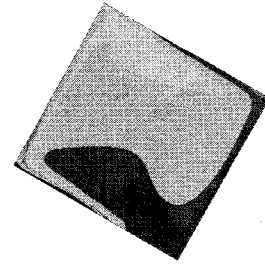
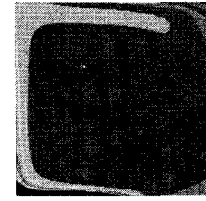
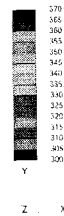
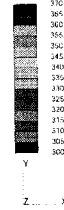
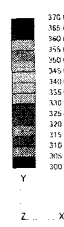
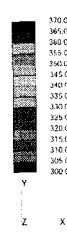
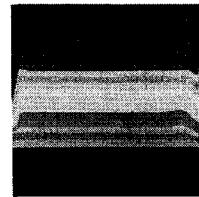
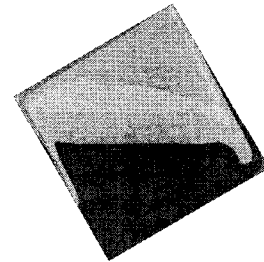
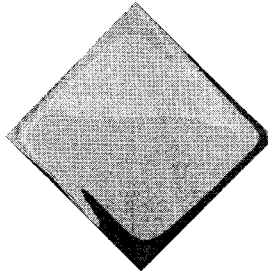
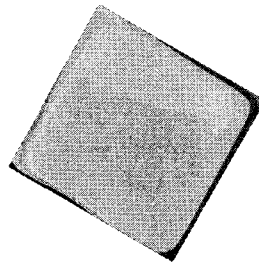
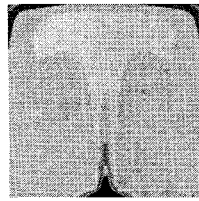
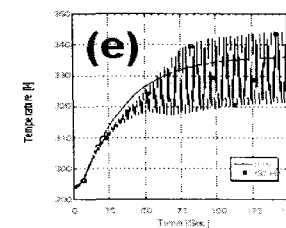
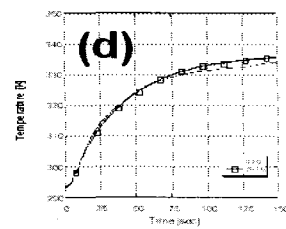
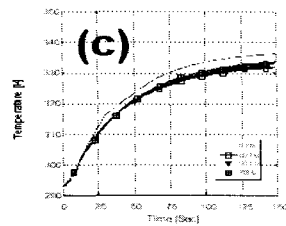
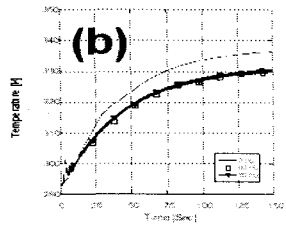
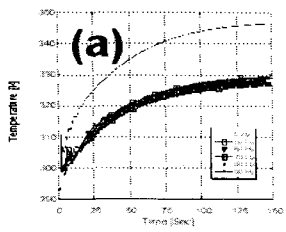


Fig. 4 Temperature history at the center of the cavity

Fig. 5 Temperature contours inside the cavity without excitation

Fig. 6 Cycle averaged temperature contours with excitation

의 영향을 보기 위해 시계방향으로 30, 45, 60, 70, 80, 85 그리고 90도를 돌려서 계산을 하였다.

3. 결과

3.1 온도 분포 및 속도장

그림 4는 사각 공동구 중심에서 시간에 따른 온도 그래프이다. 가진한 경우는 일반적으로 가진하지 않은 경우보다 온도가 더 낮은 것을 볼 수 있다. 허남건 등^[11]의 연구와는 달리 기울기가 90도인 경우 이외에는 공동구 중심에서 공진에 대한 영향을 볼 수 없었다. 60도까지는 공동구 중심에서는 온도가 가진에 의해 아주 작게 진동하는 것으로 나타났다. 그러나 90도의 경우 50Hz로 가진을 한 경우에는 0.4Hz로 공진을 하고 이때의 진폭은 약 12K로 나타났다.

사각 공동구 안에서 유동이 완전히 발달했을 때 내부의 온도 분포를 나타낸 그림은 5과 6에 있다. 그림 5는 가진을 하지 않은 경우이고 그림 6은 가진을 한 경우이다. 그림 5-(a)는 좌우 대칭 공간에서 바닥면을 가열할 때 중앙선을 따라 뜨거워진 유체가 올라가고 양 벽면을 따라 식

혀진 유체가 내려오는 대류 현상이다. 그러나 가진을 하면 그림 6-(a)처럼 유체가 시계방향으로 회전하는 것을 볼 수 있다. 또한 이때 전체적으로 온도는 상당히 감소했다. 공동구를 30도 회전한 경우도 내부에서 하나의 유체 바퀴처럼 회전하는 것을 볼 수 있다. 가진을 한 경우 6-(b)처럼 가열면 근처를 제외하고는 가진하지 않은 5-(b)에 비교해서 온도가 전체적으로 감소한 것을 볼 수 있다. 공동구가 45도 기울여진 경우인 5-(c)와 6-(c)에서도 비슷한 현상을 볼 수 있다. 공동구가 60도 기울여진 경우에는 약간 다른 현상을 볼 수 있다. 이때 가진하지 않은 경우의 그림 5-(d)의 공동구 중심부에서는 온도가 층이 진 것을 볼 수 있다. 이 경우도 역시 유체가 시계방향으로 회전하는 것을 볼 수 있다. 공동구를 90도 회전한 경우에는 다른 경우와는 다른 온도 분포를 보여준다. 가진하지 않은 경우, 그림 5-(e)에서 온도가 층이 진 것을 볼 수 있고 온도 편차가 상당히 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 가진한 경우 그림 6-(e)에서 볼 수 있듯이 공동구 내부에서 확산이 더 잘되어 온도 편차가 상당히 줄어든 것을 알 수 있다.

기울기가 60도까지인 경우에는 중심에서 온도가 낮지만 보통 가진을 하지 않은 경우보다는 크

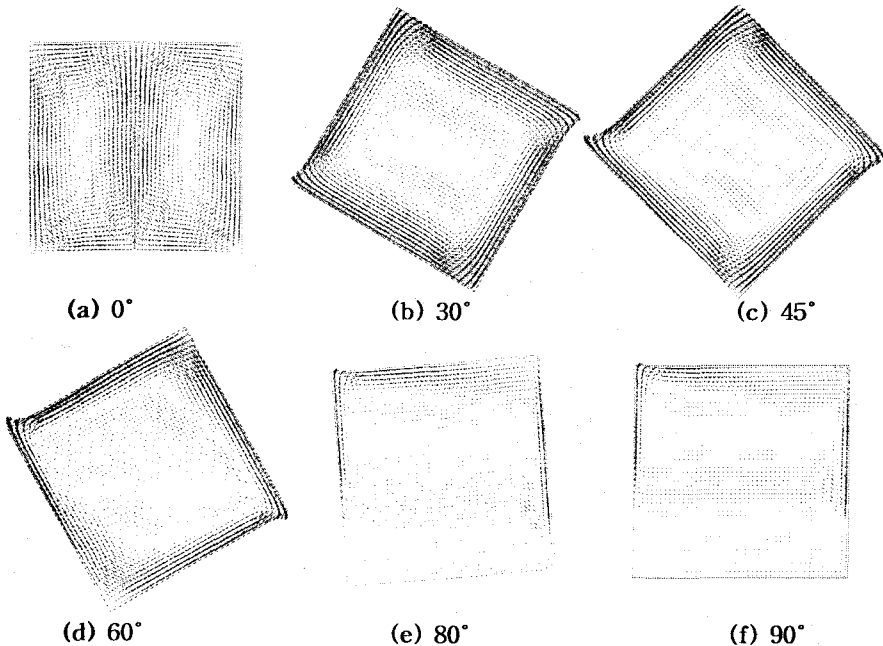


Fig. 7 Velocity plots inside the cavity for various orientation without the excitation.

게 줄어들지 않은 것을 볼 수 있다. 가열된 공기는 코안다의 효과로 계속 벽에 붙어있는 것을 볼 수 있다.

공진이 일어나는 공동구의 기울기의 범위를 알아내기 위해 추가로 70°, 80°, 85°를 계산하였다. 그러나 공진이 서서히 생기는 현상을 기대했으나 공진은 85°에서만 일어나는 것을 보았다. 따라서 공동구 내에서 공진의 현상은 기울기에 상당히 민감한 것으로 나타났다. 이때 공진을 일으키기 위한 가진 주파수는 50Hz로 나타났고 이때 공진 주파수는 0.35 Hz, 온도의 진폭은 약 10K로 나타났다. 따라서 기울기를 줄일수록 가진을 한 경우 공동구 내에서 주기는 길어지고 온도의 진폭은 줄어드는 것을 알 수 있다.

가진하지 않은 경우 공동구 내의 속도 분포를 그림 7에 나타내었다. 기울기가 0도인 경우에는 고전적인 경우로 그림 7-(a)와 같이 가열면에서 뜨거운 공기가 위로 솟아오르는 것을 볼 수 있다. 그림 7-(b)와 같이 30도 기울인 경우에는 벽면 근처에서만 높은 속도를 볼 수 있고 중심부

에서는 거의 정지해 있는 것을 볼 수 있다. 기울기가 45도 인 경우에도 비슷한 속도장을 볼 수 있지만 30도 기울여진 경우에 비해서 속도가 높은 영역이 줄어든 것을 볼 수 있고 그림 7-(d)에서는 그 영역이 더 줄어든 것을 볼 수 있지만 이때 벽면 근처에서 속도가 증가한 것을 볼 수 있다. 그림 7-(e)와 (f)와 같이 80, 90도 기울여진 경우 벽면에서도 속도가 상당히 작은 것을 알 수 있고 이러한 이유로 이 경우 공동구 내부에 온도가 상당히 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2 열전달 계수

가진을 한 경우 시간 평균을 하기 위해서 가열면 중에서 진동하는 벽에서 가장 가까운 곳을 선택하여 시간에 따라 열전달 계수를 관찰하였다. 이 결과를 그림 8에 나타내었다. 0도에서 60도 기울여진 경우에는 그림 8-(a)와 비슷한 그림을 보여준다. 일정한 주기를 갖고 있지만 공진하는 현상은 관찰할 수 없었다. 이 네 가지 경우 모



Fig. 8 Heat Transfer coefficients at the heating wall for one cycle

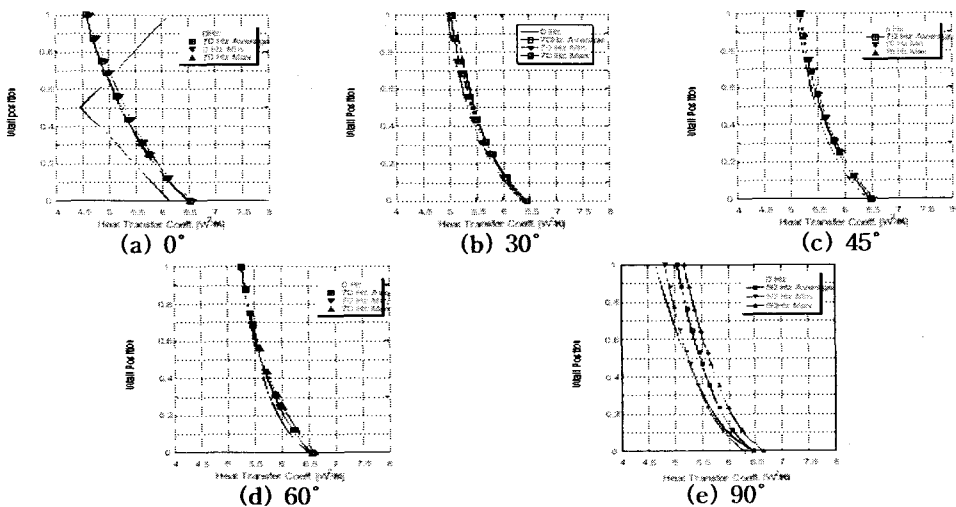


Fig. 9 Cycle averaged heat transfer coefficients for various orientations when with and without excitation.

두 주기가 약 11초였다. 공진에 의한 뚜렷한 현상은 기울기가 90도 일 때 그림 8-(b)에서 확실히 볼 수 있다. 이때 0.4Hz의 공진과 50Hz의 가진을 확실히 볼 수 있다.

이 그래프를 이용하여 벽면 전체의 시간에 대해 평균한 그래프를 그림 9에 나타내었다. 일반적으로 가진을 한 경우 가열면에서 열전달 계수가 가진하지 않은 경우보다 증가한 것을 알 수 있다. 가열면의 시작 부분(진동하는 벽과 가까운 부분)에서 모든 경우 열전달 계수가 일정한 $6.5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 인 것을 알 수 있다. 그러나 끝 부분에서는 일반적으로 기울기가 커질수록 열전달 계수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 크기가 가로 세로 0.3 m인 공동구에서 가진 시 공진의 영향으로 열전달 향상을 여러 가지 기울기에 대해서 관찰하였다. 그러나 기대와는 달리 기울기가 90도인 경우를 제외하고는 주기적인 유동만 있을 뿐 공진 현상은 발견하지 못했다. 추가로 세 가지 기울기인 70°, 80°, 85°를 계산 해본 결과 85°에서도 공진이 일어나는 것을 볼 수 있었다. 온도 분포를 볼 때 적절한 주파수로 가진 시 공동구 내부의 온도가 줄어드는 것을 볼 수 있었고 가열면에서 가진의 영향으로 열전달 계수가 증가하고 그의 진폭도 증가하는 것을 볼 수 있었다.

참고문헌

(1) Kwak, H.S. and Hyun, J.M., 1996, "Natural convection in an enclosure having a vertical sidewall with time-varying temperature," *Journal of Fluid Mechanics*, vol.329, pp. 65-88.
 (2) Kwak, H.S., Kuwahara, K. and Hyun, J.M., 1998, "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,

pp. 3157-3160.
 (3) Antohe, B.V. and Lage, J.L., 1996, "Amplitude effect on convection induced by time-periodic horizontal heating," *Int J Heat Mass Transfer*, vol. 39 No. 6, pp. 1121-1133.
 (4) Antohe, B.V. and Lage, J.L., 1996, "Experimental investigation on pulsating horizontal heating of an enclosure filled with water," *ASME J Heat Transfer*, vol. 118, pp. 889-896.
 (5) Antohe, B. V. and Lage, J.L., 1997, "The Prandtl number effect on the optimum heating frequency of an enclosure filled with fluid or with saturated porous medium," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol 40 No. 6, pp. 1313 - 1323.
 (6) Lage, J.L. and Bejan, A., 1993, "The resonance of natural convection in an enclosure heated periodically from the side," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 36, pp. 2027-2038.
 (7) Xia, Q., Yang, K.T. and Mukutmoni, D., 1995, "Effect of imposed wall temperature oscillations on the stability of natural convection in a square enclosure," *ASME J Heat Transfer*, vol. 36, pp. 437-452.
 (8) Kwak, H. S. and Hyun, J. M., 2000, "Buoyant convection in an enclosure under time -dependent boundary conditions," *JSME International Journal*, vol. 43 No. 4, pp. 532 - 537.
 (9) Fu, W. S. and Shieh, W. J., 1992, "A study of thermal convection in an enclosure induced simultaneously by gravity and vibration," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 35 No. 7, pp. 1695 - 1710.
 (10) 김서영, 강병하, 2000, "유동공진 대류 열전달 촉진기술과 응용," 대한 기계학회 2000년도 유체공학 부문 학술 강연회 강연집, pp. 118-126.
 (11) 허남건, 김욱, 김영규, 강병하, 2000, "사각 공동구의 하부 벽면 가진에 의한 자연 대류 유동의 공진 현상에 관한 연구," 제1회 한국유체공학 학술대회 논문집 (2000), pp. 31-34.
 (12) 허남건, 김욱, 김영규, 강병하, 2000, "사각 공동구의 하부 벽면 가진의 진폭 변화에 따른 자연 대류 유동의 공진에 관한 연구," 한국 전산유체 공학회 2000년도 추계 학술대회 논문집, pp. 66-71.