

【論文】

레이저 斑點을 이용한 四角形 空洞내의
自然對流 流動場 測定

Flow Field Measurement of Natural Convection in a Rectangular
Cavity Using Laser Speckle Photography

梁 承 孝* 鄭 愚 南** 朴 贊 國** 강 영 규***
Yang, Soong-Hyo Chung, Woo-Nam Park, Chan-Kuk Kang, Yung-Kyu

Abstract

A two-dimensional velocity map of natural convection in a rectangular cavity is determined using laser speckle photography. Isovelocity contour drawn by spatial filtering and local velocity by pointwise method are obtained. These results are compared with those of numerical analysis.

1. 緒 論

유체의 유동속도 측정에는 피토크를 이용하는 방법, 熱線風速計를 이용하는 방법, 레이저 散亂光을 이용하는 방법등이 있다. 그러나 피토크를 이용하는 방법과 熱線風速計를 이용하는 방법은 유체유동에 교란을 야기시키며, 熱線風速計를 이용하는 방법은 온도변화를 갖는 유체유동의 경우에는 이용하기가 곤란하다. 특히 自然對流의 경우는 유동이 저속일 뿐만 아니라 온도변화가 있기 때문에 유동측정은 더욱 곤란하다. 산란된 레이저광에 의한 유체유동의 측정에 대해서는 10수년간 연구되어 왔으나 거의가 도플러효과에 의한 측정에 근거를 두고 있으며 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 이 방법도 한 점에서 순간속도를

측정하기 때문에, 유동의 전영역을 측정하기 위해서는 계속된 반복측정을 수행하여야 한다. 이러한 이유로 지금까지 자연대류의 유동측정은 거의 可視化 수준에 머물고 있다. 흔히 재료의 변형에 의한 변위측정에 이용되었던 레이저 반점 측정 방법을 이용한 대류열전달에의 응용을 고려할 때 작은 입자를 유체에 미량 첨가하여 레이저를 照射하여 촬영하면 반점 사진을 얻을 수 있으며 그 영상 필름을 後處理하여 유동단면 전체의 속도를 측정할 수 있음이 기초적인 논문에 밝혀져 있다.^{1,2,4,5,6)} 이러한 논문들은 기초적인 응용에 국한되어 있으며 오히려 광학적인 접근이고 공학에의 응용면은 알다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 두 개의 동일하고 상호 변위된 반점구조가 광학적인 Fourier 面에서 간섭무늬를 일으키는 것을 이용한 레이저 반점 유속계를 검토하여 시험 제작한 후 속도측정의 어려움 때문에 거의 可視化 정도에 그쳤던 四角空洞 内の 正常自

* 正會員 ; 全南大學校 工科大學
** 全南大學校 工科大學
*** 全北大學校 工科大學

然對流의 流動場을 측정하고 그 측정방법의 적합성과 정확성을 數値解析 결과와 비교하여 검토한다.

2. 實驗

자연대류 유동을 위한 試驗部와 레이저 반점을 위한 실험장치의 배열은 Fig. 1과 같다. Fig. 에서 시험부는 한변이 30 mm인 정사각형 단면을 가지며 길이는 100 mm이다. 정사각형의 垂直壁은 銅板으로 만들어져 있고 한벽은 等溫冷却, 다른벽은 等溫加熱되도록 하였으며 위 아래 경계면은 아크릴로 제작하고 스티로폼을 이용하여 충분히 斷熱시켰다. 시험부내의 유체는 물을 이용하였으며 물속에 직경 4 μm 정도의 粒子 (Pliolite, 비중 약 1.026)를 浮遊시켰다.

아르곤 레이저 光源에서 방출되는 레이저 빔은 볼록렌즈, 원통형렌즈를 통하여 얇은 板과 같은 쉼트로 만들어져 시험부의 중간 위치에 있는 슬릿을 통하여 유동장의 한 단면을 비추도록 되어 있으며 물속에 부유하는 입자에 의한 영상을 사진기로 촬영하였다. 이때 입자의 영상을 동일 필름 위에 일정한 시간간격으로 중복 촬영함으로써 일정시간에 발생한 입자의 변위량을 영상화할 수 있다. 이와 같은 多重露出을 수행할 때에 露出時間과 露出間隔을 조정하기 위하여 광원 바로 다음에 PC와 스텝모터에 의하여 제어되는 차단기 (me-

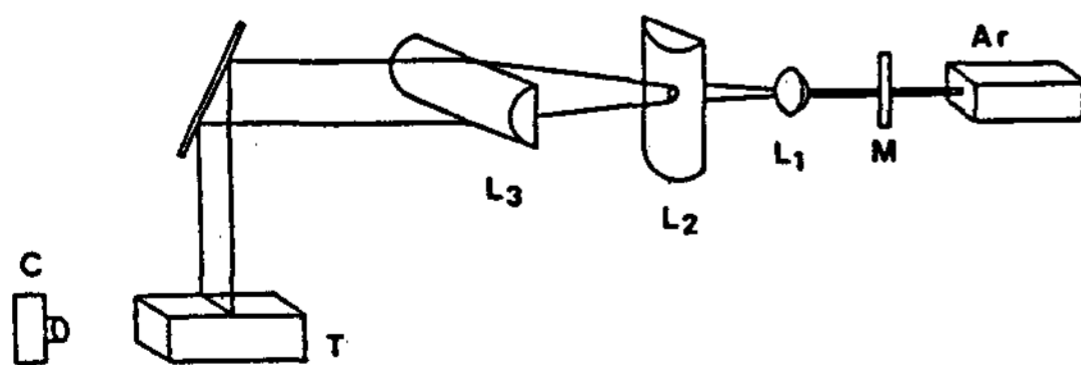


Fig. 1 Experimental arrangement for laser speckle photography. L₁: convex lens; L₂, L₃: cylindrical lens; T: test section; M: mechanical chopper; C: camera; Ar: Argon laser

chanical chopper)를 설치하였다.

다중노출된 斑點 사진을 대상으로 하여 유동속도를 측정하는 방법은 2가지가 있다. 첫째는 Fig. 2와 같이 전 流動場의 영상을 空間 濾過시키는 방법이다. 다른 변위를 갖는 반점에 의하여 형성되는 간섭무늬를 Fourier 평면에 설치되어 있는 遮斷幕에 뚫려 있는 濾過 구멍을 통하여 여과를 시키면 여과 구멍의 위치에 따라 $d = n\lambda/\theta$ 로 계산되는 변위에 대한 간섭무늬만을 얻을 수 있다. 여기에서 d는 입자의 변위량, n은 정수, λ는 光源의 波長, θ는 Fig 2에 표시된 각을 나타낸다.

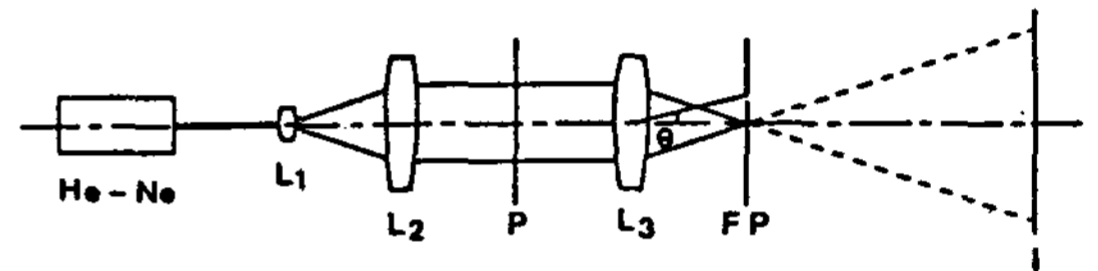


Fig. 2 Spatial filter. L₁, L₂: beam expander; P: photograph; FP: Fourier plane with mask; L₃: transform lens; I: image plane

이때 여과 구멍을 수평 혹은 수직 방향으로 위치시키면 이에 따라 나타나는 等水平變位 혹은 等垂直變位線을 얻을 수 있다. 두번째로 전체 사진에서 등속도선 내지는 등변위선도를 얻는 방법과는 달리 한 점에서 속도를 측정하는 방법은 레이저빔을 반점 사진의 한 점에 投射시키는 방법으로 가능하다. 평행하는 줄무늬로 나타나는 간섭무늬의 간격 ξ와 필름으로부터 영상막까지의 거리 L을 측정함으로써 변위량 $d = \lambda L/\xi$ 로 계산할 수 있으며 레이저빔의 투사 위치를 바꾸어 여러 점의 속도를 측정할 수 있다.

본 실험에서 양 벽면의 온도차는 6.9°C, Rayleigh 수는 2.62×10^6 일 때에 수행하였으며 이때에 노출간격은 500-1500 ms, 노출 횟수는 2-7회의 범위에서 간섭무늬가 잘 나타나는 간격과 횟수를 조정하였다.

3. 數值解析

수직벽에서 加熱, 冷却되는 정사각형내에 있어서 정상상태의 대류유동에 대한 운동량 및 에너지 방정식은 다음과 같이 쓰여진다.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \underline{v} &= 0 \\ \underline{v} \nabla \cdot \underline{v} &= -\nabla P + Pr \nabla^2 \underline{v} + Pr Ra T \\ \underline{v} \nabla \cdot T &= \nabla^2 T\end{aligned}$$

위 식에서 각 변수들은 길이는 정사각형 변의 길이 D , 속도는 α/D , 온도는 $\Delta T = T_H - T_L$ 에 대하여 無次元化 되었으며 $Ra = g\beta \Delta T D^3 / \nu \alpha$ 는 Rayleigh 수, $Pr = \nu / \alpha$ 은 Prandtl 수이다. 한편 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\underline{v} &= 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 & y = 0, \quad y = 1 \\ \underline{v} &= 0, \quad T = 0 & x = 1 \\ \underline{v} &= 0, \quad T = 1 & x = 0\end{aligned}$$

2차원 유동에 대한 위 식의 수치해석은 대

Table 1. Comparison between numerical results of de Vahl Davis and Leong and those of present work: $Pr=0.71, Ra=10^6$.

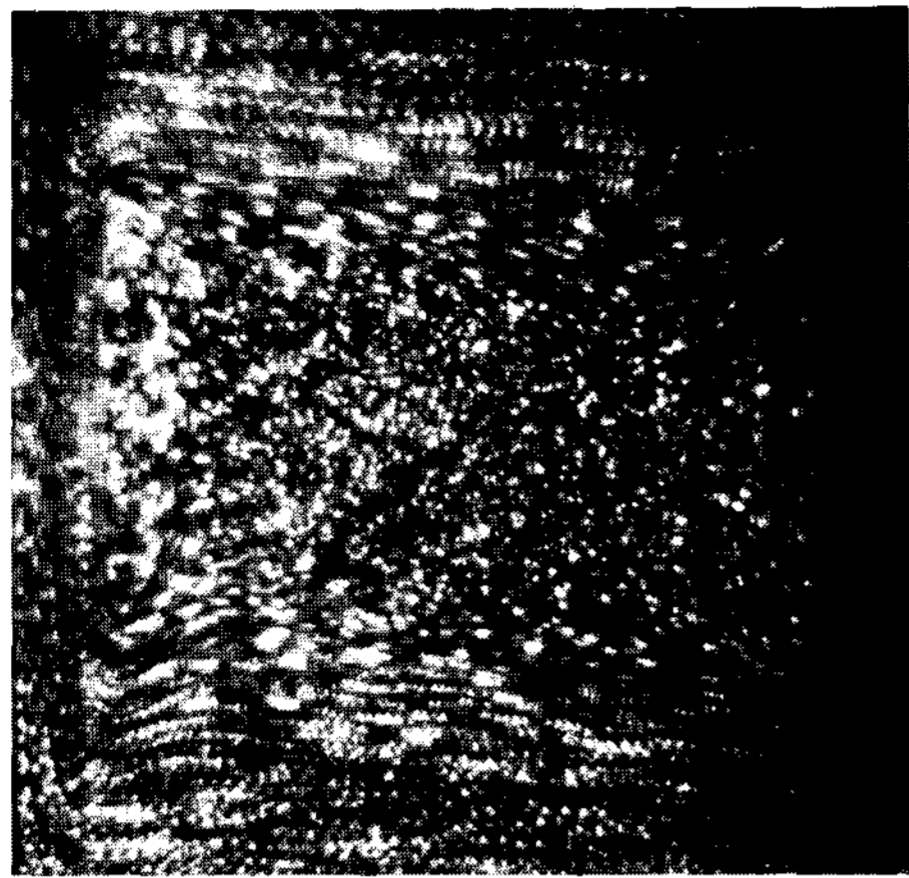
	Present work	de Vahl Davis and Leong
Method	SIMPLE	Fourth-order
Number of grids	21 x 21	61 x 61
Average Nusselt number	9.41	8.615
V_y , max ($y=0.5$)	216.0	221.3
location	0.0441	0.0378
V_x , max ($x=0.5$)	72.0	64.96
location	0.912	0.85
Ψ ($x=0.5, y=0.5$)	17.2	16.41
Ψ max	17.4	16.84
location on x	0.147	0.15
location on y	0.559	0.547

류항을 power law scheme으로 처리한 SIMPLE 알고리즘을 이용하였으며 格子數는 21×21 , 질량 생성항에 대한 오차의 한계는 10^{-4} 으로 하였다. 또한 수치해석은 실험과같은 조건인 $Pr = 6.94, Ra = 2.62 \times 10^6$ 인 경우에 대하여 수행하였다.

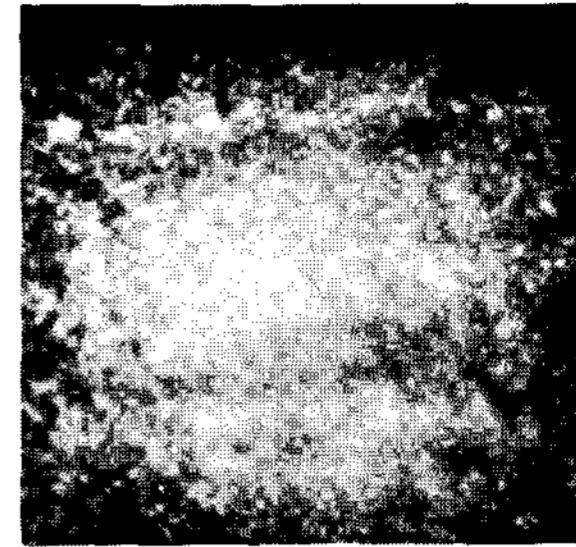
본 프로그램의 정확성을 확인하기 위하여 $Pr = 0.71, Ra = 1 \times 10^6$ 인 경우에 본 프로그램의 결과와 다른 수치해석의 결과¹⁷⁾를 비교하였으며 특히 de Vahl Davis와 S.S. Leong의 결과와의 비교를 Table 1에 나타내었다. Table에서 두 결과는 거의 일치하고 있음을 알 수 있으며 따라서 본 프로그램의 정확성을 확인할 수 있었다.

4. 實驗 및 數值解析의 結果에 대한 考察

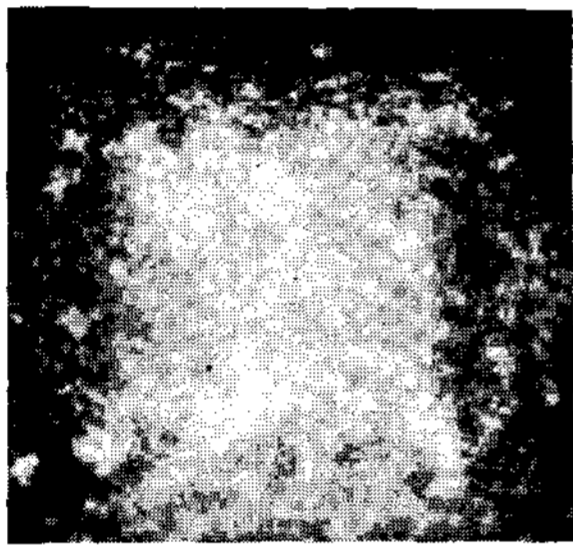
부유하는 입자에 의한 流動 可視化 사진은 Fig. 3-a와 같으며 Fig. 4에서 볼 수 있는 유선과 양상이 비슷한 것을 알 수 있다. Fig. 3-b와 Fig. 3-c는 Fig. 3-a에 대하여 첫째 방법인 whole field 법으로 얻은 등수평 속도 및 등수직속도선이며 水平速度는 $V_x = 0.150 \text{ mm/s}$, 垂直速度는 $V_y = 0.269 \text{ mm/s}$ 인 경우이다. 이때 노출간격은 1165 ms이었다. Fig.에서 등속 도선은 각각 1개씩밖에 나타나 있지 않으나 더욱 정교한 반점 사진을 얻을 수 있다면 여러개의 등속도선이 나타나는 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 한편 Fig 3-d는 한 점에서 속도를 측정하는 방법으로 얻은 결과에 대하여 Fig. 3-b와 같은 경우인 $V_x = 0.150 \text{ mm/s}$ 의 등속도선을 그려 본 것이다. Fig 3-b와 3-d는 같은 상태이지만 달리 촬영한 필름으로써 약간의 차이는 있으나 거의 비슷한 양상을 나타내고 있으며 따라서 실험의 再現性을 확인할 수 있다. 그러나 전체 유동장에 대한 결과인 Fig.3-b가 불분명한데 반하여 Fig. 3-d에서는 여러



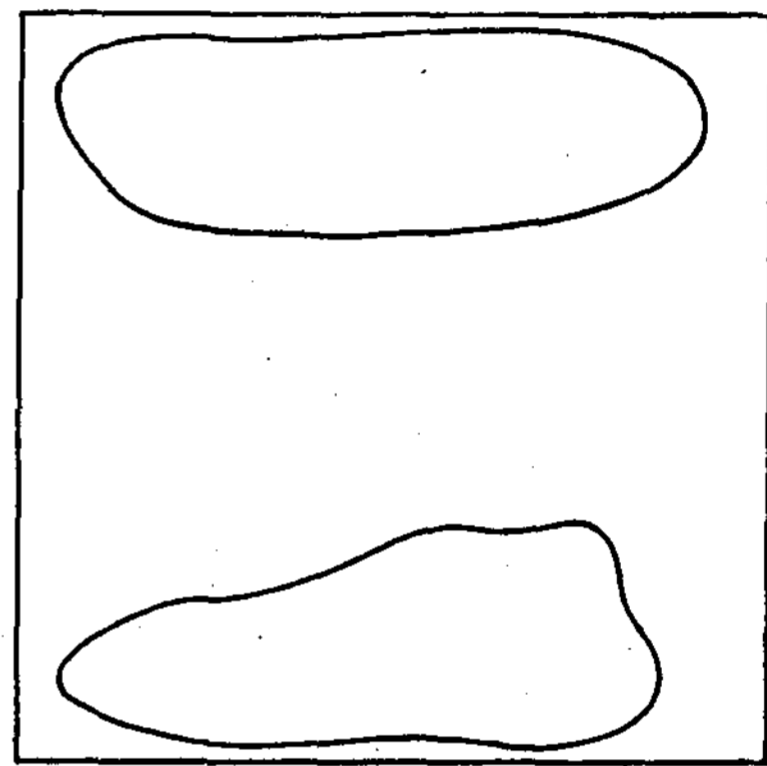
a)



b)

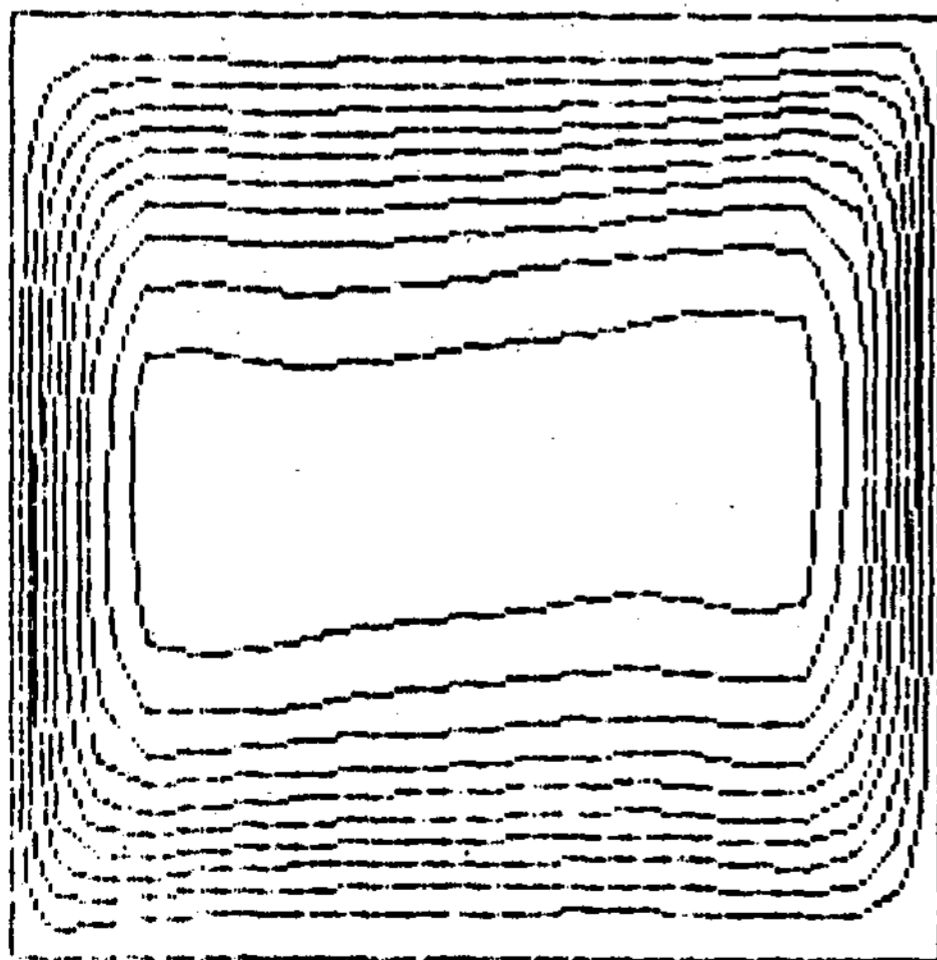


c)

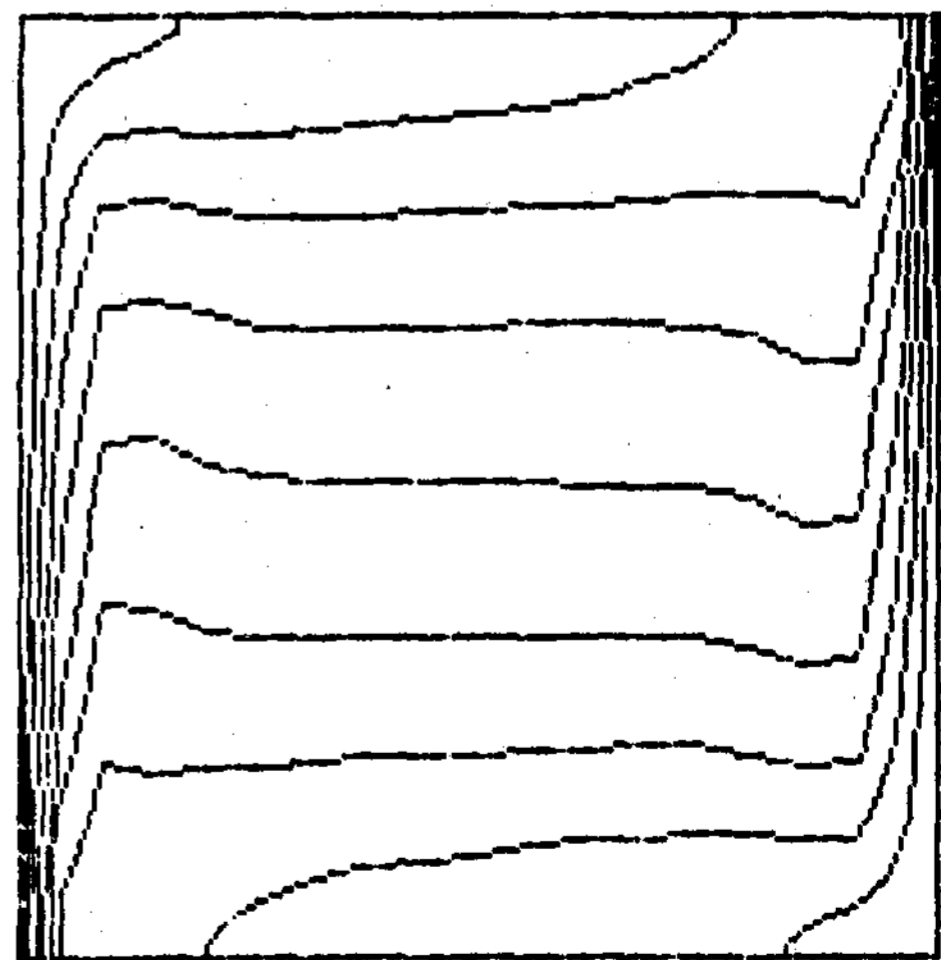


d)

Fig. 3 a) Multiple exposure photograph of convection flow.
 b) Filtered image for horizontal velocity component, $\Delta V_x=0.150\text{mm/s}$.
 c) Filtered image for vertical velocity component, $\Delta V_y=0.269\text{mm/s}$.
 d) Isovelocity contour by local illumination, $\Delta V_x=0.150\text{mm/s}$.



a) Streamlines

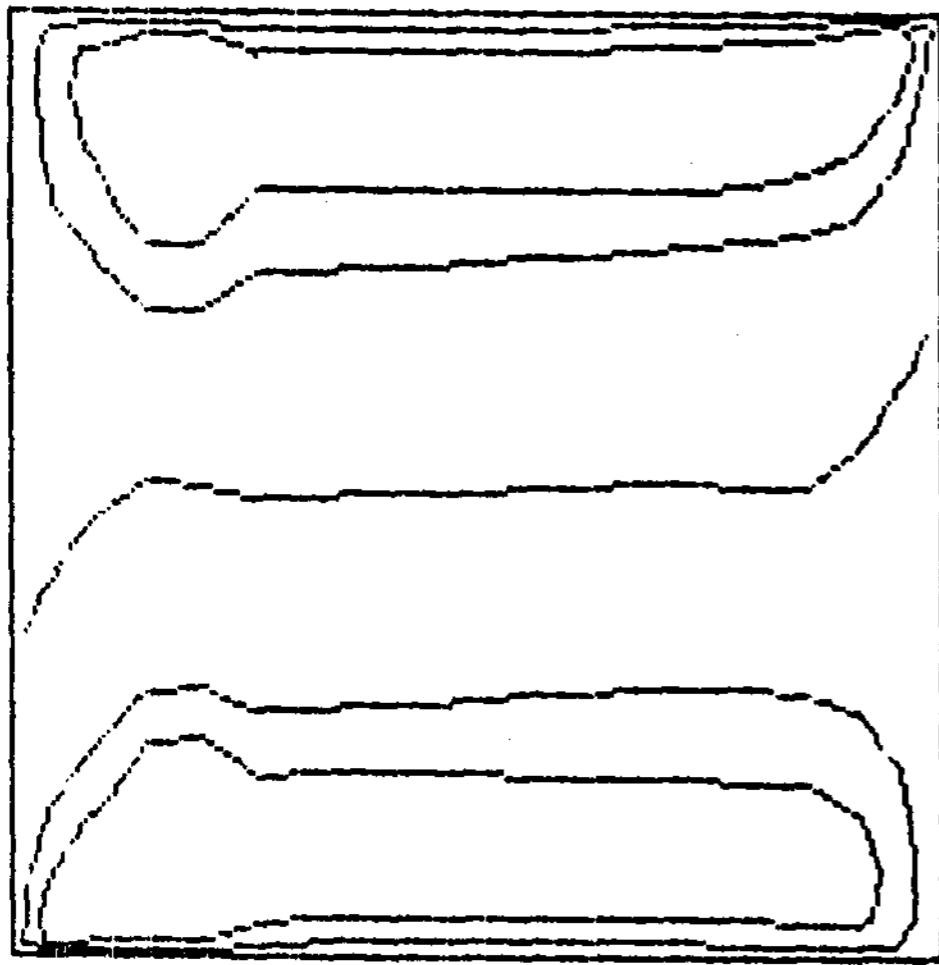


b) Iso-thermal lines

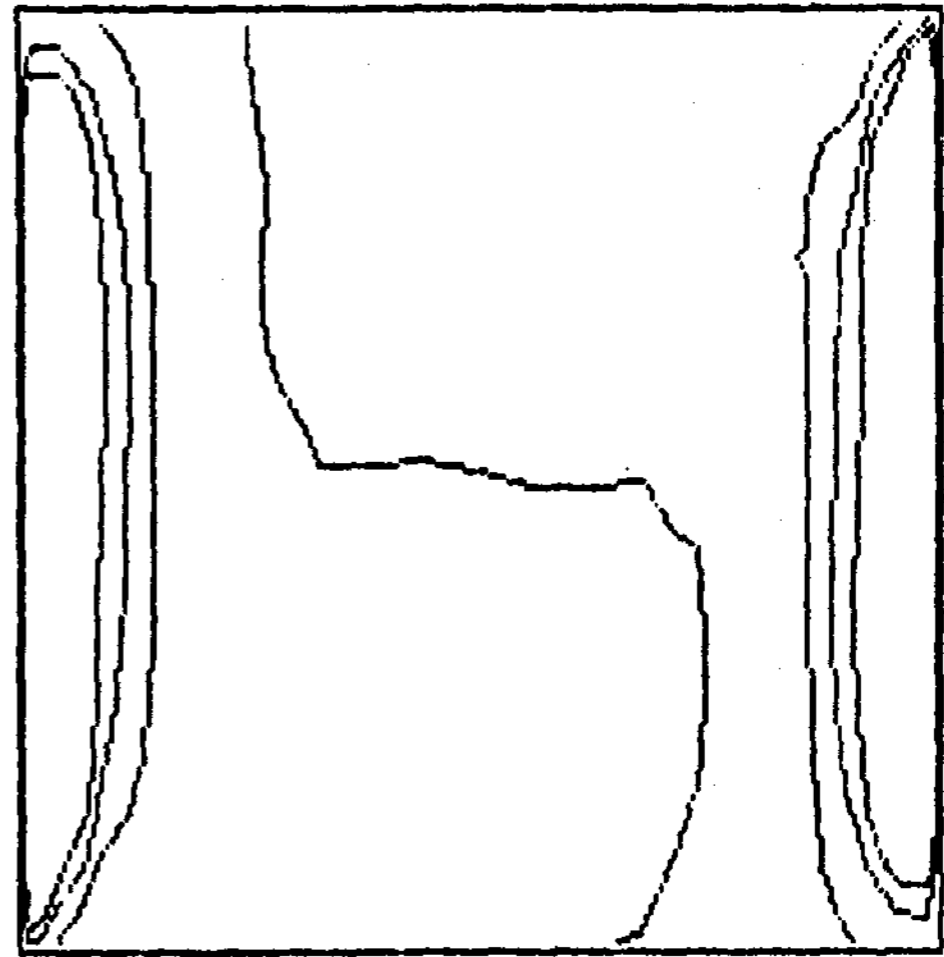
Fig. 4 Streamlines and isothermal lines. $\Delta\Psi=2, \Delta T=0.1$.

점에서의 속도를 얻을 수 있어 더욱 정확한 속도의 측정에 유리할 것으로 판단된다. 또한 Fig. 5-a는 수치해석에서 얻은 속도로부터 수평방향의 등속도선을 도시한 것이며 여기에서도 실험결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 5-b는 실험결과인 Fig. 3-c와 같은 수직방향의 등속도선을 도시한 數値解析 結果이며 실험에서는 하나의 선만 나타나 있으나 수치해석의 결과와 거의 비슷한 양상을 나타내고 있음을 볼 수 있다. Fig.

6은 유동장의 중간 단면 즉 $x = 0.5$ 에서 수평방향속도 V_x 의 수치해석 결과와 실험결과를 비교한 것이다. Fig.에서 실선은 수치해석 결과를, 원은 실험결과를 나타낸다. 두 결과는 30%의 오차 이내에서 일치하고 있음을 알 수 있으며 따라서 더욱 정교한 사진을 얻어 정확하게 분석을 하면 자연대류에 있어서 전유동장에 대한 속도를 동시에 정확하게 측정할 수 있을 것으로 판단된다.



a) Horizontal component



b) Vertical component

Fig. 5 Isovelocity contours, $\Delta V_x=0.2\text{mm/s}$, $\Delta V_y=0.2\text{mm/s}$

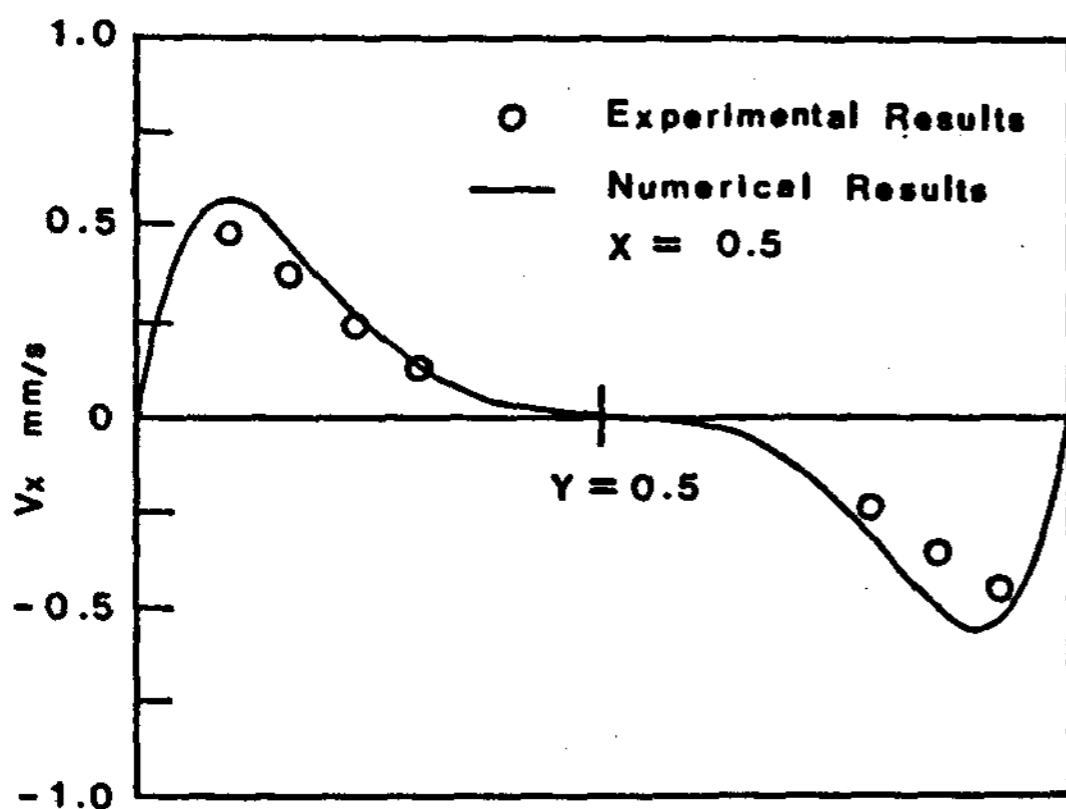


Fig. 6 Comparison of V_x between numerical and experimental results: $Pr=6.94$, $Ra=2.62 \times 10^6$

5. 結 論

레이저 반점에 의한 流動 可視化 사진으로부터 2가지 방법에 의한 속도측정을 실험적으로 수행하고 이를 비교한 결과 實驗의 再現性を 확인할 수 있었으며 실험과 같은 조건에서 수행한 數値解析 결과와 비교하여 거의 비슷한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 따라서 레이저 반점에 의한 自然對流 流動의 速度測定은 매우 가치 있는 것으로 판단되며 變位量의 限界 즉 速度와 露出 間隔의 調整 범위에 따라서는 正常流動뿐만 아니라 非定常

流動의 경우에 대해서도 전유동장에 대한 속도측정이 가능할 것으로 생각된다.

附 記

논문은 1988년 한국학술진흥재단 학술연구 조성비에 의하여 연구되었으며 이의 지원에 심심한 사의를 표합니다.

記 號

- D : 試驗部の 변길이
- d : 變位量
- g : 중력가속도
- L : 필름으로부터 영상막까지의 거리
- n : 정수
- Pr : Prandtl 수
- Ra : Rayleigh 수
- T : 온도
- \underline{V} : 속도벡터
- V_x : 수평방향속도성분
- V_y : 수직방향속도성분
- x : 수평방향 좌표
- y : 수직방향 좌표
- α : 열확산계수
- β : 열팽창계수
- λ : 光源의 波長
- ν : 동점성계수
- ξ : 間渉무늬의 간격
- θ : 그림 2에 표시된 각

REFERENCE

1. R. Meynart, Convective flow field measurement by speckle velocimetry, *revue phys. Appl.* 17, pp. 301-305, 1982.
2. R. Meynart, Equal velocity fringes in a Reyleigh-Benard flow by a speckle method, *Appl. Optics* 19, pp. 1385-1386, 1980.
3. R. Meynart, Instantaneous velocity field measurements in unsteady gas flow by speckle velocimetry, *Appl. Optics* 22, pp. 535-540, 1983.
4. R. Meynart, speckle velocimetry study of vortex pairing in a low-Re unexcited jet, *phys. Fluids* 26, pp. 2074-2079, 1983.
5. C.J.D. Pickering and N.S. Halliwell, Laser speckle photography and particle image velocimetry: photographic film noise, *Appl. Optics* 23, pp. 2961-2969, 1984.
6. C.J.D. Pickering and N.A. Halliwell, speckle photography in fluid flows: signal recovery with two-step processing, *Appl. Optics* 23, pp. 1128-1129, 1984.
7. C. Shakher, Laser speckle photography used for NDT of diaphragms, *Appl. Optics* 21, pp. 367-369, 1982.
8. C. Shakher and G.V. Rao, Use of holographic optical elements in speckle metrology, *Appl. Optics* 23, pp. 4595-4595, 1984.
9. P.G. Simpkins and T.D. Dudderar, Laser speckle measurements of transient Benard convection, *J. Fluid Mech.* 89, pp. 665-671, 1978.
10. R. Grousson and S. Mallick, Study of flow pattern in a fluid by scattered laser light, *Appl. Optics* 16, pp. 2334-2336, 1977.
11. R.K. Mohanty, C. Joenathan, and R.S. Sirohi, Fringe sharpening and information coupling in speckle shear interferometry, *Appl. Optics* 23, pp. 4596-4600, 1984.
12. C.A. Schmidt-Harms, Velocimetry of moving phase plates using laser speckle patterns, *Appl. Optics* 23, pp. 2353-2358, 1984.
13. P.V. Farrell and D.L. Hofeldt, Temperature measurement in gases using speckle photo-

- graphy, Appl. Optics 23, pp. 1055-1059, 1984.
14. K.H. Guenther, P.G. Wierer, and J.M. Bennett, Surface roughness measurements of low-scatter mirrors and roughness standards, Appl. Optics 23, pp. 3820-3836, 1984.
 15. D. Noh, et al., Measurement of sauter mean droplet sizes by light scattering technique, Energy R & D 8, pp. 78-87, 1986.
 16. Patankar, S.V., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Pub. Co., New York, 1980.
 17. G. de Vahl Davis and S.S. Leong, Natural convection in an enclosed cavity: A fourth-order finite difference solution. Numerical solutions for a comparison problem on natural convection in an enclosed cavity, edited by I.P. Jones and C.P. Thompson, Computer Science and System Division, AERE Harwell, Oxfordshire, 1981.