

홀로그래피 간섭 토모그래피 개발 및 3차원 자연대류 열전달에의 적용

이수만* · 강민구** · 차동진*** · 주원종**** · 강보선†

Development of a Holographic Interferometric Tomography System and Its Application to Three-Dimensional Natural Convection

Soo-Man Lee, Min-Gu Kang, Dong-Jin Cha, Won-Jong Joo, and Bo-seon Kang,

Key Words: Holographic Interferometric Tomography(홀로그래피 간섭 토모그래피), Three-Dimensional Natural Convection(3차원 자연대류)

Abstract

In this study, a practical holographic interferometric tomography system, which is instantaneous and non-contact for measuring three dimensional flow field, was developed. The system consists of holographic recording/reconstruction system, fringe analysis code and computational tomography code and it is developed with GUI environment for general users. The developed system was applied to three-dimensional natural convection from a discrete flush-mounted circular heat source on the bottom of a cubic enclosure. The heat source was located at the off-center of the bottom plate so that three-dimensional temperature field can be achieved. A set of multi-directional holographic interferograms was recorded by employing a double-reference beam, double-exposure holographic technique. Optical pathlength data were extracted from the recorded interferometric data and finally three dimensional temperature field inside the cube was reconstructed.

1. 서 론

최근의 열·유체 관련 계측 장비들은 관심 영역의 일점 측정의 제한성을 극복하기 위하여, 레이저를 이용한 전체 영역에서의 물리량을 짧은 시간에 측정할 수 있는 비접촉식 측정 방법들에 대한 관심이 증가하고 있다. 온도장 계측에 있어서도 기존의 홀로그래피 간섭법을 이용한 온도장의 2차원 측정에서, 3차원 측정이 가능한 홀로그래피 간섭 토모그래피(Holographic Interferometric Tomography) 방법에 대한 연구가 활발히 진행되

고 있다. 현재까지 보고된 대표적 연구 결과들은 (1) 다양한 해석 알고리즘의 개발 및 이를 검증하기 위한 단순한 유동장에의 적용 (2) 단순한 알고리즘을 사용하여 3차원 유동장 해석을 시도한 연구 등으로 분류할 수 있으며, 초고속 공기역학⁽¹⁾⁽²⁾, 열전달⁽³⁾⁽⁴⁾, 연소 분야⁽⁵⁾ 등에서 적용되고 있다. 홀로그래피 간섭 토모그래피 방법은 지금까지의 충분한 해석 알고리즘 개발 및 문제점 해결의 연구를 바탕으로, 이제는 3차원적 물리량 측정을 필요로 하는 일반 사용자들이 보다 짧은 시간에 더 쉽고 용이하게 접근, 활용할 수 있는 시스템을 개발해 나가는 단계에 진입하였다고 볼 수 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 3차원 온도장 재현을 위한 광학 기록 및 재생시스템 및 절차를 제시하고, 다방향 간섭 사진 획득 후 전용 해석 코드를 이용하여 간섭 프린지를 해석하고, 전산 토

† 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail: bskang@chonnam.ac.kr

Tel: (062)530-1683 Fax: (062)530-1689

* 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, (주) Intekplus 연구소

*** 회원, 한밭대학교 건축설비공학과

**** 회원, 서울산업대학교 기계설계자동화학부

모그래피 코드를 이용하여 3차원 온도장을 정확하고 신속하게 재현할 수 있는 실용 HIT 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템을 정육면체 공간 내부에 존재하는 원형 발열체에 의한 3차원 자연대류 현상에 적용시켜 보았다.

육면체 밀폐 공간 내부의 국소 발열원에 의해 발생하는 자연대류는, 전자 장비의 자연대류를 이용한 냉각 현상이나, 건물 내 밀폐된 방에서 발생된 화재 등에 적용될 수 있으며, 수직벽에 발열원이 존재하는 경우⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾ 및 육면체 바닥면에 발열원이 존재하는 경우^{(10), (11)}에 대한 다양한 연구가 수행된 바 있다.

본 연구에서는 정육면체 공간 바닥면에 존재하는 편심된 원형 발열원과 마주보는 수평 상부벽의 냉각에 의해 발생하는 3차원 자연대류 현상에 대해, 이중 기준광 / 이중 노출법 홀로그래피 방법을 이용하여 다방향 간섭 사진을 기록하고, 개발된 HIT 코드를 이용하여, 다방향 간섭 프린지 해석, 3차원 토모그래피를 적용하여 3차원 온도장을 재현하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 장치

3차원 자연대류 열전달을 기록하기 위한 홀로그래피 간섭 기록 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. HIT 프로그램을 적용하여 3차원 온도장을 재현하기 위해서는, 실험 체적을 다각도에서 기록한 다수의 홀로그램이 필요하며, 다방향에서 획득한 홀로그램이 많을수록 재현되는 온도장의 정확성은 높아진다. 반복 실험을 통하지 않고도 이를 달성하기 위하여, 본 시스템에서는 실험 체적을 산란판을 이용하여 후방에서 비춤으로써, 다각도로 산란되는 산란광을 물체광으로 사용하였다. 따라서, 기록된 홀로그램을 재생할 때 실험 체적을 다각도에서 관찰할 수 있으며, 여러 각도에서 실험 체적을 기록하는 것과 동일한 효과를 갖게 된다. 또한, 실험 체적을 90° 간격의 양 방향에서 기록하여, 단일 실험으로 넓은 각도에서의 간섭 사진을 확보할 수 있도록 하였다.

광원은 30 mW의 He-Ne 레이저(632.8 nm)이며, 3개의 가변 빔분할기에 의해 2 방향의 기준광과 물체광으로 분리된다. 기준광과 물체광의 강도 비율은 시행 착오를 거쳐 결정되었으며, 가변 빔

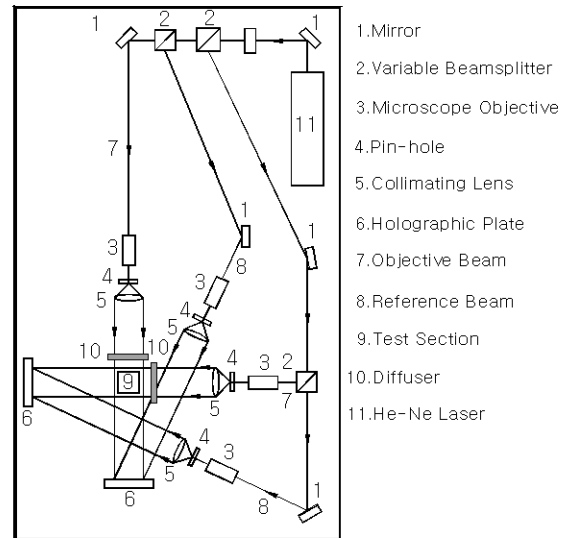


Fig. 1 Schematic diagram of the holographic interferometry recording system

분할기를 통과한 빛의 편광 방향은 1/2파 파동판(waveplate)을 이용하여 동일하게 하였다. 각 기준광과 물체광은 40 배율의 대물렌즈, 지름이 10 μm 인 핀홀을 사용하여 노이즈가 제거된 후, 직경이 10 cm인 렌즈를 통과하여 평행광이 형성되게 하였다. 산란판에 의해 산란되는 빛이 실험 체적을 통과하여 물체광이 되고, 필름 수직 방향과 약 20°를 이루는 기준광과 만나서, 필름에 간섭 무늬가 기록된다. 모든 광학 요소들은 기준광과 물체광의 광경로차가 최소가 되도록 배치하였다.

실험 체적은 Fig. 2에, 전체 실험 장치 시스템의 개략도는 Fig. 3에 나타내었다. 실험 체적은 수평 바닥면에 국소 발열원이 있고 마주 보는 상부 천장면 전체가 냉각되며 증류수를 실험 유체로 하는 3차원 자연대류 열전달 실험장치이다. 실험 체적은 정육면체(70×70×68.2 mm)이며, 히터를 제외한 바닥면은 단일 효과가 우수한 두께 30.5 mm의 MC를 사용했고, 수직벽은 두께 5 mm의 투명 아크릴로 제작되었다. 상부 냉각판은 열전도도가 높은 구리판에 냉각수 유로를 가공하고, 항온조와 연결하여 저온의 냉각수를 지속적으로 순환하게 하였다. 발열원의 지름은 10 mm이며, 정격 출력이 50 W인 카트리지형 히터를 사용하였다. 발열원의 온도는 온도 조절기와 전력 조절기를 이용하여, 온도를 일정하게 유지하였으며, 전원 공급 후 약 15 분이 경과되면 정상 상태에 도달하고, 정상 상태 도달 후 발열원의 온도 변화

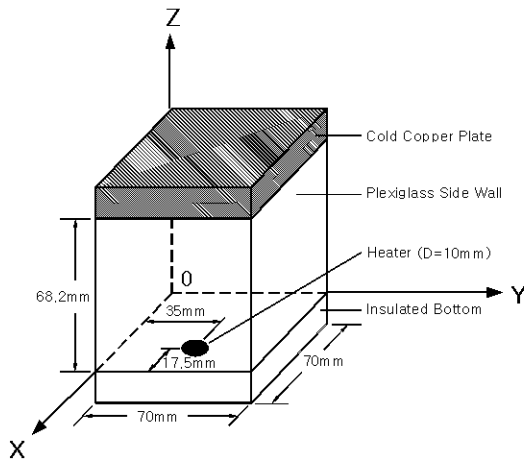


Fig. 2 Schematic diagram of the test section

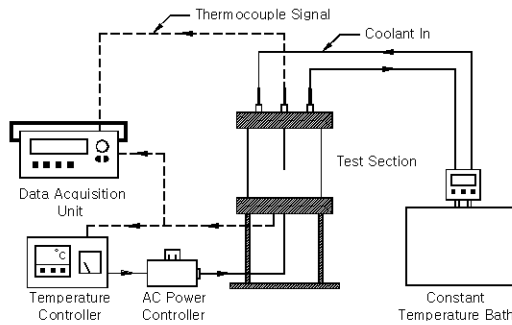


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

는 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되었다. 실험 체적 내 높이에 따른 물의 온도 측정을 위해서 실험 체적 상부로부터 지름이 1.1 mm인 8 개의 T형 열전대를 내부로 삽입할 수 있도록 지름 1.5 mm의 구멍을 냉각관에 가공하였다. 열전대로부터의 모든 전기적 신호는 데이터 수집장치(HP, 34970A)를 통하여 컴퓨터에 저장되었다.

2.2. 실험 방법 및 조건

홀로그래프 간섭 사진은 이중 노출 방법을 이용하여, 전원 공급 전에 1초간 노출시키고, 전원을 공급하여, 온도장이 정상 상태 도달 후 충분한 시간이 경과하였다고 판단되는 2 시간 이후에 다시 1 초간 노출시켰다. 노출된 필름은 사진 현상 과정을 거친 후 Fig. 4의 홀로그래프 재생 시스템에 의해 재생된다. 홀로그래프 필름 뒤에 CCD 카메라를 위치시키고, 카메라의 각도를 회전하면서 다 방향 간섭 사진을 획득하였다.

실험 조건은 발열원 온도를 31.3°C , 상부 냉각관의 온도는 15.9°C 로 유지하였으며, 온도차는 약

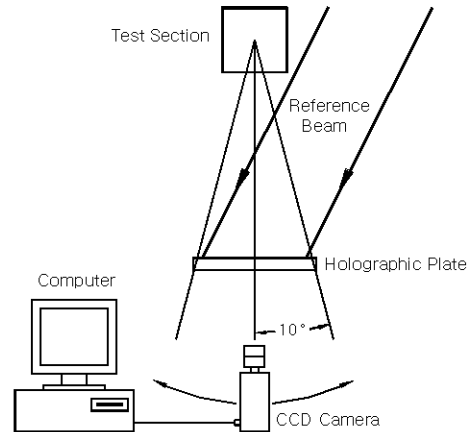


Fig. 4 Schematic diagram of the reconstruction system

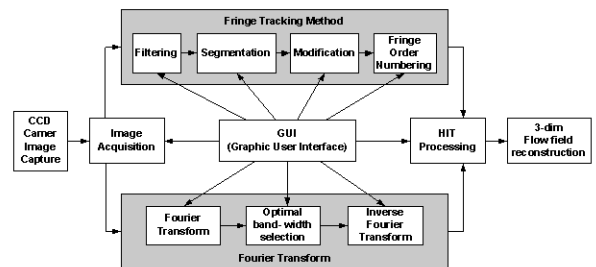


Fig. 5 Structure of HIT program and its flow chart

15.4°C 이다. 자연 대류 특성을 나타내는 Rayleigh 수는 정육면체의 벽면 높이를 특성 길이로 하여 5.32×10^7 이다.

2.3 HIT 프로그램

HIT 프로그램은 획득한 간섭 이미지를 입력 데이터로 하여, 데이터 리덕션, 토모그래피 재현, 후처리 등의 전 과정을 GUI 환경에서 처리할 수 있도록 구현하였다. Fig. 5는 HIT 프로그램 전체의 구조 및 작업 흐름도를 나타낸 것으로, 간섭 이미지 획득, 프린지 추적법 또는 푸리에 변환법에 의한 데이터 리덕션, 토모그래피 재현 및 후처리 작업을 단계별로 모듈화할 수 있도록 설계되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 프린지 간섭 이미지

Fig. 6은 기록된 홀로그래프로부터 간섭 이미지를 관찰할 수 있는 시야각을 나타낸다. 양방향에 걸쳐 총 34° 의 시야각으로부터 36장의 이미지를 획득하였으며 그 중 일부를 Fig. 7에 나타내었으며, 시야각의 변화에 따라 프린지 패턴의 변화를

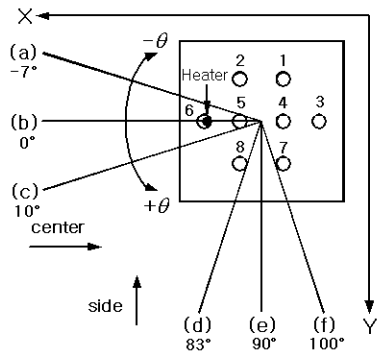


Fig. 6 Viewing angles and thermocouple positions

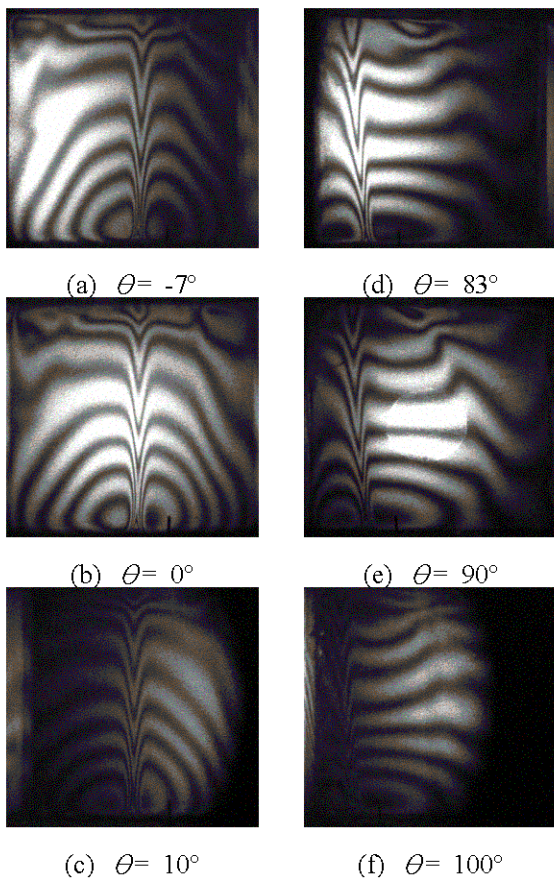


Fig. 7 Photographs of multidirectional fringe

확인할 수 있다. 각 방향의 중심인 0° (Fig. 7b)와 90° (Fig. 7e)로부터 멀어진 각도에서 획득한 간섭 이미지의 프린지는 선명하지 않고, 일부 지역은 보이지 않는 불량도를 내포하고 있다.

간섭 사진의 프린지 방향을 통해서 유추할 수 있는 유동의 형태는, 발열원 상부로는 상승 유동이 발생하고, 상부벽에서 수평 방향으로 유동의 방향이 바뀐 후, 상부벽을 타고 가면서 상부 냉각관에 의하여 유체의 온도가 하강한다. 수직벽

에 도달한 유체는 냉각에 의해 밀도가 증가하여 수직벽을 타고 하강하는 유동이 형성된다. 0° 에서 획득한 프린지 사진을 보면, 발열원을 중심으로 거의 대칭적인 프린지 패턴을 나타내며, 90° 방향의 프린지 사진은 좌측으로 편심된 발열원에 의한 비대칭적인 패턴을 보여 주고 있다.

3.2 간섭 이미지 해석

Fig. 8은 간섭 사진에 대한 일련의 처리 과정을 보여 주고 있다. 실험에 의해 획득된 간섭 이미지(Fig. 8a)에 해석 영역을 선정하고, 네 가지 필터(normal averaged, median-filtered, directional smoothed, background-eliminated)를 사용하여 간섭 이미지의 전 영역에 분포해 있는 다양한 노이즈를 제거한 후(Fig. 8b), 이진화한다(Fig. 8c). 에지 검출 과정(Fig. 8d)을 통해 화소 단위의 데이터를 선 단위의 데이터로 변환시키고, 체인 코드화 작

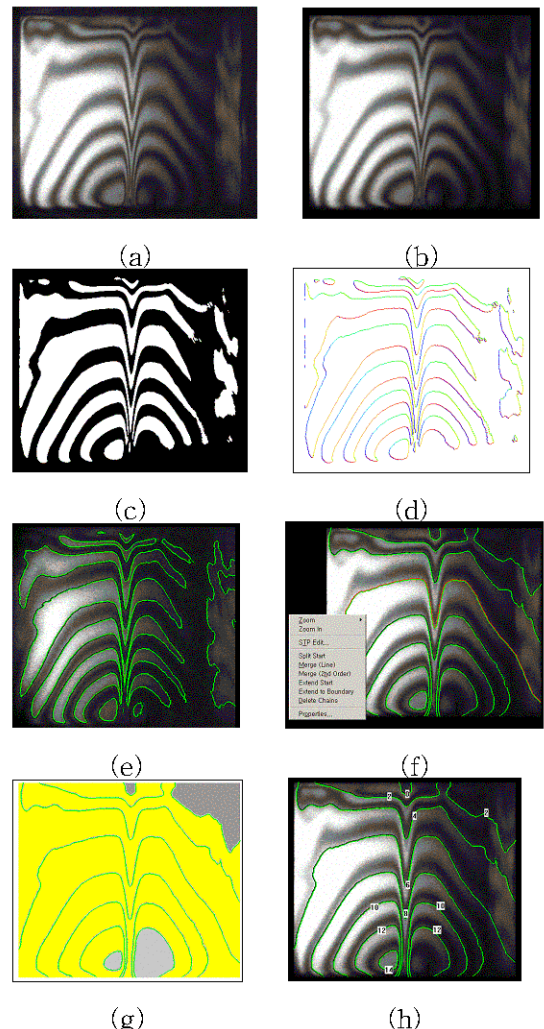


Fig. 8 Processes of fringe analysis of typical interferogram

업(Fig. 8e)으로 선 프린지를 얻은 후, 왜곡된 부분은 찾아 수정하고(Fig. 8f), 복원된 정상 프린지에 최상부 냉각관에 나타난 영역을 기준 프린지 차수(0)로 하여 프린지 차수(fringe number)를 부여한다(Fig. 8g).

Fig. 8 (g)와 같이 부여된 프린지 차수는 프린지 선을 따라서만 불연속적으로 존재하며, 프린지를 벗어난 영역의 차수 데이터는 존재하지 않는다. 하지만, 토모그래피를 적용하기 위해서는 2차원 공간 모든 위치에서의 프린지 차수 데이터가 필요하기 때문에, 불연속적인 프린지 차수 데이터를 보간법(interpolation)을 사용하여, 전 영역에 걸친 연속 데이터로 만들어 주어야 한다. 본 연구에서는 관측점이 불규칙한 경우의 등고선이나 곡면의 보간에 유용한 Kriging 알고리즘(in Tecplot)을 사용하여 2차원 보간을 시행하였다.

2차원 보간의 결과, 데이터가 부족한 영역에서는 노이즈가 발생하고, 특히 발열원 상부의 급경사 영역에서는 데이터 선이 끊기거나 잘못 연결되는 등, 원래의 데이터와 비교할 때 왜곡된 보간 결과가 나타났다. 이를 보완하기 위하여, 데이터가 부족한 영역은 적정값을 삽입하고, 발열원 상부 영역은 별도로 1차원 보간하여 대체시킨 후 전체 데이터를 유연화시켜 최종적인 프린지 차수 데이터를 완성시켰으며, 이러한 과정을 거쳐 구해진 보간 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

3.3 토모그래피 재현 및 온도장

Fig. 10은 선행 과정을 거쳐 얻어진 최종 프린지 차수 데이터를 입력으로 하여, 3차원 영역을 계산할 수 있는 전산 토모그래피 창이다. 0°와 90°에서 획득된 이미지의 기준 프린지 차수의 차이는 시행착오 방법에 의하여 -0.8로 결정되었다. 계산된 굴절률과 온도와의 관계는 온도에 대한 굴절률 구배를 실험 온도 범위에서 일정하다고 가정하고, 그 값을 $-0.985 \times 10^{-4} K^{-1(12)}$ 로 취하

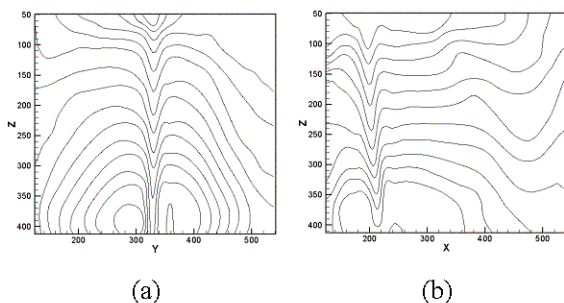


Fig. 9 Interpolated data; (a) 0°(b) 90°

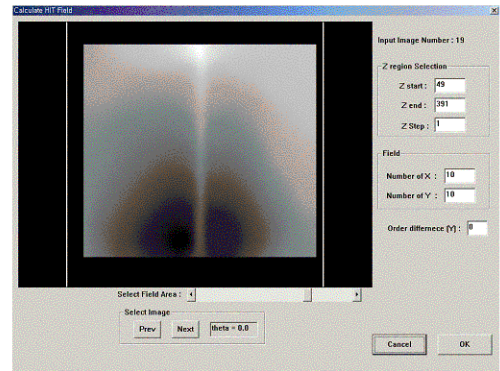


Fig. 10 Computational tomography window

여 온도장으로 환산하는데 적용하였으며, 대표적 단면에서 재현된 온도장을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11 (a)는 X=0.75 위치의 YZ 단면, (b)는 Y=0.5 위치의 XZ 단면, (c)는 높이 방향 Z=0.5 위치의 XY 단면에서의 온도 분포를 각각 나타낸다. X, Y는 수평 바닥면의 변 길이, Z는 높이로 무차원화한 길이이며, 발열원은 수평 바닥면 X=0.75, Y=0.5에 위치한다.

발열원의 위치로부터 예측할 수 있듯이, YZ 단면에서는 Y=0.5를 중심축으로 대칭적인 온도 분포 및 상승 유동에 의한 산 모양의 상승 등온선이 나타나며, XZ 단면에서는 X=0.75에 위치한 발열원에 의한 상승 등온선이 나타나는 등 정성적인 경향은 일치하고 있지만, 정량적인 해석을 수행하기에는 미흡한 결과가 나타났다. 이는 실험 체적 내부의 공간 위치 변화에 따른 온도 변화가 크지 않은 상황에서, 전체 360° 중에서 10%에도 미치지 못하는 34°의 시야각에서만 획득한 간섭 이미지를 이용하여, 전체 영역의 온도장을 재현한 데이터 부족의 한계로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다방향 간섭 사진 획득 후 간섭 프린지를 해석하고, 전산 토모그래피 코드를 이용하여 3차원 온도장을 정확하고 신속하게 재현할 수 있는 실용 HIT 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 정육면체 공간 바닥면에 존재하는 편심된 원형 발열원과 수평 상부벽의 냉각에 의해 발생하는 3차원 자연대류 현상에 적용하여, 3차원 온도장을 재현하였다. 향후 보다 체계적인 검증을 통하여 HIT 코드의 추가적인 문제점을 보완, 개선시킨다면, 우수한 3차원 열유동장 측정 시스템이 될 수 있을 것으로 전망된다.

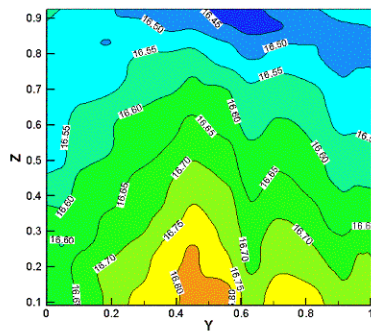
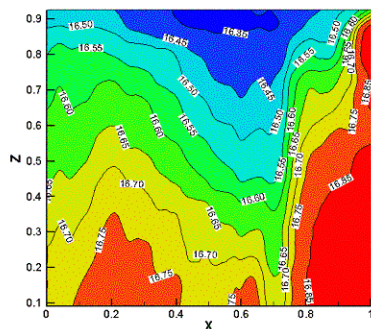
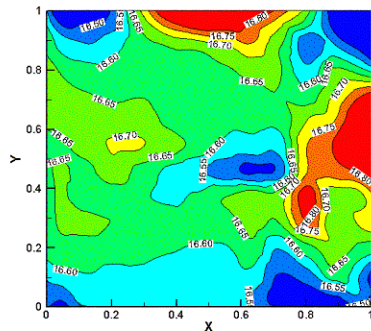
(a) $X=0.75$ (b) $Y=0.5$ (c) $0.5H$

Fig. 11 Predicted temperature distribution

후 기

본 연구는 한국과학기술단 목적기초연구(R01-1999-000-00249-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Matulka, R.D. and Collins, D.J., 1971, "Determination of Three-dimensional Density Fields from Holographic Interferograms," *J. of Applied Physics*, Vol. 42, No. 3, pp. 1109~1119.
- (2) Doerr, S., 1992, "Measurement of a Three-dimensional Hypersonic Density Field,"

AIAA Paper 92-0383.

- (3) Sweeny, D.W. and Vest, C.M., 1974, "Measurement of Three-dimensional Temperature Fields above Heated Sources by Holographic Interferometry," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 17, No. 12, pp. 1443~1454.
- (4) Watt, D.W. and Vest, C.M., 1990, "Turbulent Flow Visualization by Interferometric Integral Imaging and Computed Tomography," *Experiments in Fluids*, Vol. 8, pp. 301~311.
- (5) Linuma, K., Asanuma, T., Ohsawa, T., and Doi, J., 1987, *Laser Diagnostics and Modeling of Combustion*, Springer-Verlag.
- (6) Tou, S.K.W., Tso, C.P., and Zhang, X., 1999, "3-D Numerical Analysis of Natural Convective Liquid Cooling of a 3×3 Heater Array in Rectangular Enclosures," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3231~3244.
- (7) Kulkarni, R. and Cooper, P., 1995, "Temperature Distribution and Fluid Flow in an Enclosure with Localised Heating and Cooling," *Int. Comm. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 22, No. 5, pp. 729~739.
- (8) Wroblewski, D.E. and Joshi, Y., 1993, "Computations of Liquid Immersion Cooling for a Protruding Heat Source in a Cubical Enclosure," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 5, pp. 1201~1218.
- (9) Baek, C. I., Lee, K. S., Kim, W. S., 1996, "An Experimental And Numerical Study On Natural Convection-Radiation Conjugate Heat Transfer In A Three-Dimensional Enclosure Having A Protruding Heat Source," *Trans. of the KSME*, Vol. 20, No. 10, pp. 3344~3354.
- (10) Sezai, I. and Mohamad, A.A., 2000, "Natural Convection from a Discrete Heat Source on the Bottom of a Horizontal Enclosure," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 2257~2266.
- (11) Zhang, Y. and Ruff, G.A., 1994, "Interferometric Tomography Investigation of Three-Dimensional Natural Convective Flows," AIAA Paper 94-0278.
- (12) Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*, New York, John Wiley & Sons.