

홀로그래피 간섭 토모그래피를 이용한 3 차원 자연대류 해석

심동식* · 이수만** · 강보선*** · 차동진**** · 주원종*****

Analysis of Three-Dimensional Natural Convection Using a Holographic Interferometric Tomography

Dong-Sik Shim, Soo-Man Lee, Bo-Seon Kang, Dong-Jin Cha and Won-Jong Joo

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

Abstract

Three-dimensional natural convection from a discrete flush-mounted circular heat source on the bottom of a cubic enclosure was studied by using a holographic interferometric tomography. 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 multidirectional holographic interferogram was recorded by employing a double-reference beam, double-exposure holographic technique in order to eventually reconstruct the temperature fields. The recorded interferometric data appear good enough to be further processed to extract optical pathlength data from them and finally reconstruct the temperature fields. A complete analysis of the temperature fields including the field reconstructions and comparison with thermocouple measurements is underway and will be reported shortly.

1. 서 론

최근의 열·유체 관련 계측 장비들은 관심 영역의 일점 측정의 제한성을 극복하기 위하여 레이저를 이용한 비접촉식, 전체 영역에서의 물리량을 짧은 시간에 측정할 수 있는 방법들에 대한 관심이 급증하고 있다. 온도장 계측에 있어서도 기존의 홀로그래피 간섭법을 이용한 온도장(굴절률장)의 2차원 측정에서, 3차원 측정이 가능한 홀로그래피 간섭 토모그래피(HIT; Holographic Interferometric Tomography) 방법에 대한 연구가 많이 진행되고 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 있으며, 이는 현재 진행중인 본 연구의 최종적인 목적이기도 하다. 이를 위해 본 연구에서는 정육면체 공간 내부에 존재하는 원형 발열체에 의한 3차원 자연대류 현상을 대상으로, 개발된 HIT 알고리즘을 적용시켜 보고 열전대 측정 결과와의 비교를 통하여 개발된 프로그램을 검증하고자 한다.

육면체 밀폐 공간 내부의 수직벽에 발열원이 존재하는 경우의 3차원 자연대류에 관한 연구로는, Tou 등⁽⁶⁾이 수직벽면에 발열원이 행렬 형태로 존재하고 반대 수직벽면이 냉각되는 경우를 중형

* 회원, 부국산업

** 회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 전남대학교 자동차공학부

E-mail: bskang@chonnam.ac.kr

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

**** 회원, 한밭대학교 건축설비공학과

***** 회원, 서울산업대학교 자동차공학과

비와 Rayleigh 수를 변화시키며 수치해석하였다. Kulkarni 및 Cooper⁽⁷⁾는 정육면체 한 수직 벽면의 하부는 가열되고 상부는 냉각되는 경우에 대해 실험하였으며, Wroblewski 및 Joshi⁽⁸⁾는 수직벽에 들출 발열원이 존재하고 마주보는 면이 냉각되는 경우에 대해, 발열원이 놓인 수직벽의 열적 전도성과 Rayleigh 수의 영향을 기존 실험 자료와 비교하여 수치해석하였다. 백창인 등⁽⁹⁾은 Wroblewski 및 Joshi와 같은 경우에 대해, 전도-대류-복사의 복합 열전달 해석 모델을 개발하고, 실험적으로 검증하였다. 육면체 바닥면에 발열원이 존재하는 경우에 대해, Sezai 및 Mohamad⁽¹⁰⁾는 발열원의 종횡비와 Rayleigh 수의 영향을 수치해석하였고, Zhang 및 Ruff⁽¹¹⁾는 바닥 중앙에 발열원이 존재하고 마주보는 천장면이 냉각되는 육면체에서의 3차원 자연대류 현상을 홀로그래피 간섭 토모그래피를 이용하여 해석하였다.

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 간섭사진을 기록하였고, HIT 코드 해석 결과와의 비교, 검증을 위한 열전대 측정 결과를 획득하였다. 이후, 개발된 HIT 코드를 적용하여 3차원 온도장을 재현하고 열전대 측정결과와 비교하여, 개발된 HIT 프로그램의 타당성을 확인하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험 장치

3차원 자연대류 열전달을 기록하기 위한 홀로그래피 간섭 기록 시스템의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 시스템의 특징은 실험 체적을 산란판을 이용하여 비축으로써, 다각도로 산란되는 산란광을 물체광으로 사용한 것이다. 또한, 실험 체적을 90° 간격의 양 방향에서 기록할 수 있도록 기준광과 물체광을 구성하였다. 광원은 30 mW의 He-Ne 레이저이며, 3 개의 가변 빔분할기에 의해 2 방향의 기준광과 물체광으로 분리된다. 기준광과 물체광의 강도 비율은 시행 착오를 거쳐 결정되었으며, 가변 빔분할기를 통과한 빛의 편광 방향은 1/2파 파동판(waveplate)을 이용하여 동일하게 하였다. 각 기준광과 물체광은 40

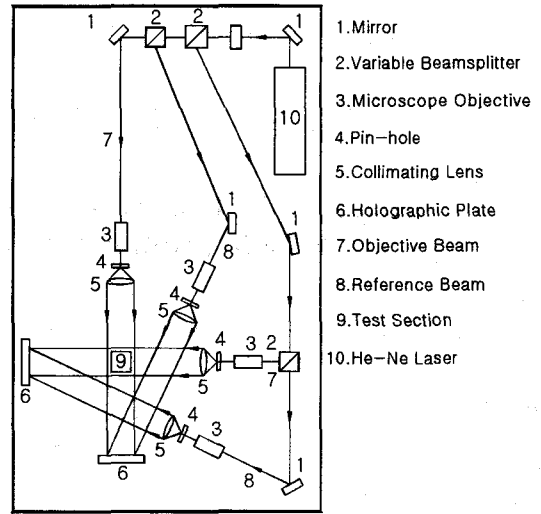


Fig. 1 Schematic diagram of the holographic interferometry recording system

배율의 대물렌즈, 지름이 10 μm인 핀홀을 사용하여 노이즈가 제거된 후, 직경 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, 홀로그래피 필름에 간섭 무늬가 기록된다. 모든 광학 요소들은 기준광과 물체광의 광경로차가 최소가 되도록 배치하였다.

HIT 프로그램 검증용 실험 체적은 Fig. 2에, 전체 실험 장치 시스템의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험 체적은 수평 바닥면에 국소 발열원이

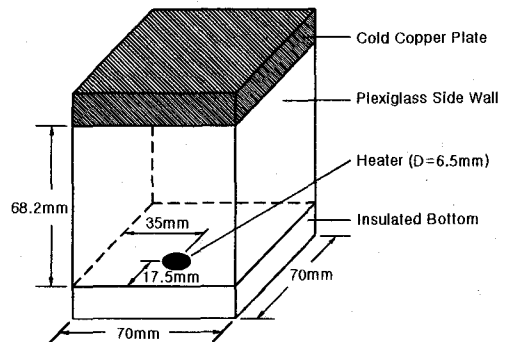


Fig. 2 Schematic diagram of the test section

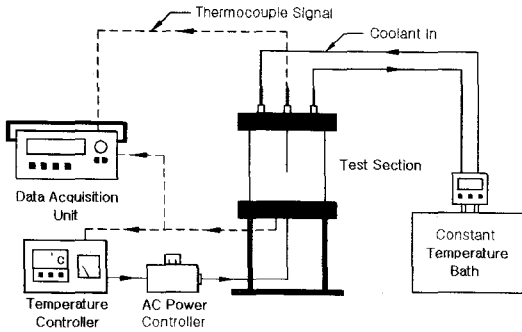


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

있고 마주 보는 수평 천장면 전체가 냉각되는 물을 실험 유체로 하는 3차원 자연대류 열전달 실험 장치이다. 실험 체적은 정육면체($70 \times 70 \times 68.2 \text{ mm}^3$)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 저온 냉각수를 지속적으로 순환하게 하였다. 발열원은 지름이 6.5 mm, 길이가 30 mm이며 정격 출력이 50 W인 카트리지형 히터를 사용하였다. 발열원의 온도는 온도 조절기와 교류용 전력 조절기를 이용하여, 온도를 일정하게 유지하였으며, 전원 공급 후 약 15 분이 경과되면 정상 상태에 도달하며, 정상 상태 도달 후 발열원의 온도 변화는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내로 유지되었다. 실험 체적 내 높이에 따른 물의 온도 측정을 위해서 실험 체적 상부로부터 8 개의 지름 1.1 mm, K 형 열전대를 내부로 삽입할 수 있도록 지름 1.5 mm의 구멍을 냉각판에 가공하였다. 열전대로부터의 모든 전기적 신호는 데이터 수집장치(HP, 34970A)를 통하여 컴퓨터에 저장되었다.

2.2 실험 방법

홀로그래프 간섭 사진은 이중 노출 방법, 즉, 발열원 전기 공급 전에 1 초간 노출시키고, 발열원에 전원을 공급하여, 실험 공간내 온도장이 정상 상태 도달 후 충분한 시간이 경과하였다고 판단되는 2 시간 이후에 다시 한 번 0.5 초간 노출시켰다. 노출된 홀로그래프 필름은 사진 현상 과정을

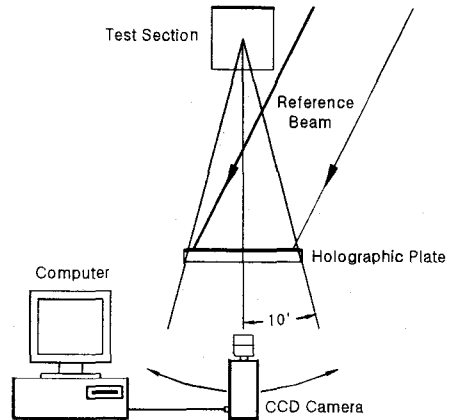


Fig. 4 Schematic diagram of the reconstruction system

거친 후 Fig. 4에 나타난 홀로그램 재생 시스템에 의하여 프린지가 재생된다. 재생된 프린지를 촬영하기 위하여, 홀로그램 필름 뒤에 일반 또는 CCD 카메라를 위치시키고, 카메라의 각도를 회전시켜서 다방향 프린지 간섭 사진을 촬영하였다.

실험 조건은 히터 온도를 36.5°C 로 가열, 유지하고 상부 냉각판의 온도는 16.2°C 로 냉각하여 고온부와 저온부의 온도차를 약 20.3°C 로 유지시켰다. 자연 대류 특성을 나타내는 무차원 변수 Rayleigh 수는 정육면체의 벽면 높이를 특성 길이로 하여 6.28×10^7 이다.

2.3 홀로그래피 간섭 토모그래피

간섭 사진으로부터 필요한 광경로길이 데이터(OPD, Optical Pathlength Data)를 추출하는 다양한 방법⁽¹²⁾이 있으나 본 연구에서는 간섭 사진의 인텐시티 데이터로부터 곡선 적합(curve fitting)법을 이용하여 OPD를 얻는다. 곡선적합은 비교적 간단한 광학계를 이용하여 얻은 간섭 사진으로부터 비교적 높은 정확도의 OPD 추출이 가능하며, 열전달계수 등을 계산하는데 필요한 유동장 구배를 근사 모델로부터 직접 계산할 수 있다. 구배가 급격한 열원 주위 등에서는 매우 미세한 간섭 무늬(프린지)가 형성되므로, 각 프린지에서 적어도 10 개 이상의 인텐시티 데이터를 얻을 수 있도록 CCD 카메라를 이용하여 확대, 스캔한다. 유동장 내의 좌표 원점으로부터의 반경 거리 ρ 를 따라

완전한 데이터 세트를 얻기 위해서는 다수의 디지털 프레임을 획득하여 합성한다.

본 연구에서는 비선형 곡선적합⁽¹³⁾ 방법을 활용한다. 인텐시티 데이터는 노이즈없는 프린지 형태를 나타내는 식 (1)로 접합되었다.

$$I(\rho) = b(\rho) + a(\rho) \times \cos\{p(\rho)\} \quad (1)$$

여기서 $b(\rho)$, $a(\rho)$, $p(\rho)$ 는 각각 백그라운드 인텐시티, 변조 진폭, 및 위상함수들이다. 각 함수는 미지 파라미터를 가진 다항식 또는 기타 함수로 근사시킬 수 있다. 각 투영각 θ 에 대해 추출된 위상함수들을 종합하면 2 차원 데이터 세트 $p(\rho_j, \theta_j)$ 를 얻고, $2\pi/\lambda$ 로 나누면 OPD인 $g(\rho_j, \theta_j)$ 를 얻게 된다. 여기서 λ 는 사용한 레이저의 파장이다.

다방향 간섭법(multidirectional interferometry)에서 투영된 간섭 사진에 수직한 유동단면 $n(x, y)$ 의 OPD $g(\rho, \theta)$ 는 좌표 원점으로부터 거리 ρ 와 투영각 θ 로 측정될 수 있다. 투영각 범위로 정의된 시야각(view angle)내에서 얻을 수 있는 투영데이터 $g(\rho, \theta)$ 는 다음과 같이 탐상선을 따라 재현될 굴절률장 $n(x, y)$ 의 선적분이다.

$$g(\rho, \theta) \cong \int_{ms} n(x, y) ds \quad (2)$$

그러므로, 유동장의 토모그래피 재현은 역선적분이 요구된다. HIT에서 3차원 유동장 재현은 재현된 2차원 유동장 단면을 적층하여 얻게 된다. 간섭 토모그래피의 재현법⁽¹²⁾은 변환법과 급수 전개법으로 대별할 수 있다. 전자의 대표적인 방법은 푸리에 방법과 convolution backprojection 방법이다. 이 해석적 방법은 편리한 반면, 투영과 스캐닝에서 완전(즉, 180° 전 시야각과 차단되지 않는 투영)하고 균일한 OPD를 요구한다. 실제 실험에서는 불충분한 OPD의 획득이 불가피하므로 내삽 또는 외삽을 통하여 보완하여 완전한 데이터 세트를 이용하게 된다. 그러나, 불량도(degree of ill-posedness)가 증가할수록 보완 데이터의 비중이 커지며 부정확해져 재현 결과를 왜곡시키게 된다.

급수전개법에서 유동장 $n(x, y)$ 는 아래와 같이

국소(local) 또는 비국소 기준함수(nonlocal basis function)의 유한 급수로 근사된다.

$$n(x, y) \cong \sum_{i=1}^N c_i b_i(x, y) \quad (3)$$

여기서 $b_i(x, y)$ 및 c_i 는 각각 급수전개 기준함수 및 그 계수이다. 국소 기준함수법에서 각 급수항의 기준(basis)은 재현 유동장의 해당 국소지역으로 제한된다. 식 (2)의 선적분 변환은 선형적이므로 선적분 변환과 그 역변환은 각 항별로 수행될 수 있다. 그러므로, 계수 c_i 는 아래 연립선형 대수방정식을 풀어 결정한다.

$$g(\rho_j, \theta_j) \cong \sum_{i=1}^N c_i a_i(\rho_j, \theta_j) \quad (4)$$

여기서 $a_i(\rho_j, \theta_j)$ 는 기준함수 $b_i(x, y)$ 의 선적분이고 하첨자 j 는 측정 데이터를 나타낸다. 일반적으로 식 (4)는 최소자승법 또는 대수재현법(algebraic reconstruction technique)을 사용하여 해를 구한다.

본 연구에서는 국소 기준함수를 사용한 급수전개법을 이용하여 프린지 간섭사진으로부터 3차원 온도장을 재현하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 간섭 사진

프린지 간섭 사진은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 양 방향에서 15°에 걸쳐서 1° 간격으로 총 32

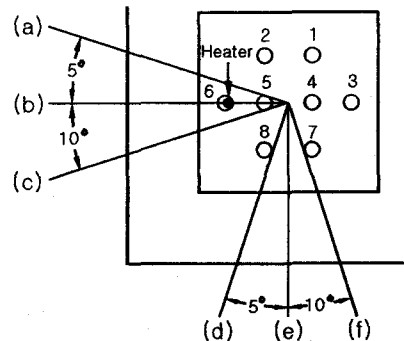


Fig. 5 Viewing angles and thermocouple positions

장을 획득하였으며 Fig. 5에 표시한 방향에서 획득한 간섭 사진들을 Fig. 6에 나타내었으며, 시야각의 변화에 따라, 프린지 패턴의 변화를 확인할 수 있다. 0° (Fig. 6b)와 90° (Fig. 6c) 방향에서 획득한 사진외에는 시야각의 마지막 위치에서 획득한 사진들이기 때문에 프린지의 선명도가 좋지 않고, 일부 지역은 보이지 않는 불량도가 심한 상황을 나타내고 있다.

간섭 사진의 프린지의 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. 수직벽에 도달한 유체는 냉각에 의한 밀도의 증가 및 수직벽으로 인하여, 수직벽을 타고 하강하는 유동이 존재함을 확인할 수 있다. 0° 방향에서

획득한 프린지 사진을 보면, 발열원을 중심으로 거의 대칭적인 프린지 패턴을 나타내고 있으며, 90° 방향의 프린지 사진은 좌측으로 편심된 발열원에 의한 비대칭적 패턴을 보여 주고 있다.

3.2 열전대 측정 결과

획득된 간섭 사진을 2.3절에서 설명한 HIT 알고리즘에 의하여 해석하면 3차원 온도장을 구할 수 있다. 해석에 의하여 구해진 온도장을 열전대를 이용하여 측정한 온도값과 비교하여 개발된 HIT 프로그램의 타당성을 검증하게 된다. 이를 위하여, Fig. 5에 나타난 8 군데의 열전대 위치에서 높이를 0.07H, 0.4H, 0.69H로 바꾸어 가며, 유체의 온도를 측정하였으며, 측정 결과를 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Thermocouple measurement results

No.	Fluid Temperature (°C)		
	4.5 mm (0.07H)	27 mm (0.4H)	47 mm (0.69H)
1	17.4	17.5	17.7
2	17.4	17.5	17.5
3	17.3	17.3	17.3
4	17.3	17.3	17.6
5	17.2	17.2	17.2
6	17.8	17.4	17.3
7	16.8	16.9	16.8
8	16.7	16.8	16.7

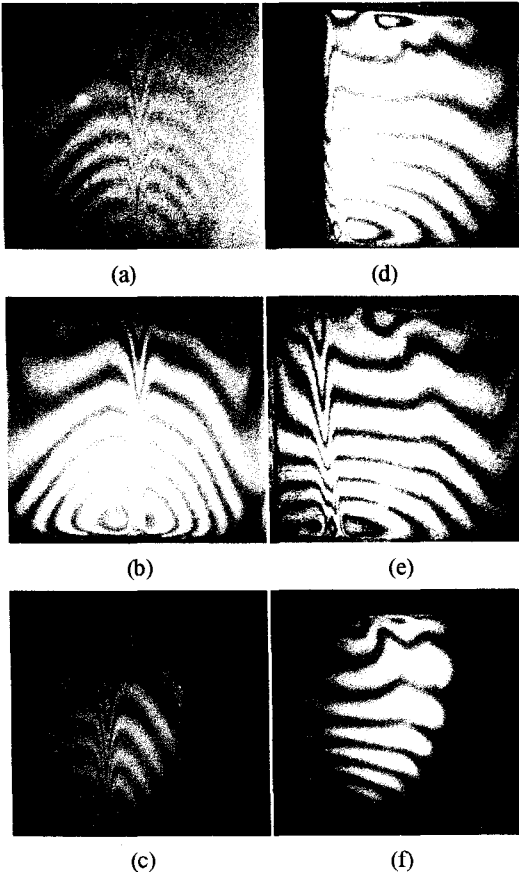


Fig. 6 Photographs of multidirectional fringes;
(a) -5° (b) 0° (c) 10° (d) 85° (e) 90° (f) 100°

4. 결 론

홀로그래피 간섭 토모그래피 방법은 복잡한 유동현상을 실험적으로 이해하는 데 필요한 3차원 측정법으로 실용화되는 단계에 있다. 지금까지의 충분한 해석 알고리즘 개발 및 문제점 해결의 연구를 바탕으로, 3차원적 물리량 측정을 일반 사용자들이 보다 짧은 시간에 보다 용이하게 접근, 활용할 수 있게 될 것으로 예상된다.

본 연구는 이러한 HIT 방법의 실용화 연구의 일환으로 수행되었으며, 우선 정육면체 공간 바닥면에 존재하는 편심된 원형 발열원과 수평 상부벽의 냉각에 의해 발생하는 3차원 자연대류 현상에 대해, 이중 기준광 / 이중 노출법 홀로그래피 방법을 이용하여 다방향 간섭사진을 기록하였고 검증용 열전대 측정 결과를 획득하였다. 이는, 비교적 복잡한 3차원 온도장의 특성을 나타내는 다방향 간섭 사진을 성공적으로 획득하였다는 데

의미가 있다. 현재, 개발된 HIT 코드를 적용하여 3차원 온도장을 재현하고 있으며, 열전대 측정결과와 비교하여 개발된 HIT 방법의 타당성을 확인할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-304-001-3) 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., Asamuna, 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. Communication 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) 백창인, 이관수, 김우승, 1996, "돌출 열원을 갖는 3차원 밀폐 공간내에서의 자연대류-복사 복합 열전달에 대한 실험적 및 수치적 연구," *대한기계학회논문집*, 제20권, 제10호, 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) Cha, S.S., 1992, "Holographic Interferometric Tomography for Reconstructing Flow Fields: A Review," AIAA Paper 92-3934.
- (13) Slepika, J.S. and Cha, S.S., 1995, "Stabilized Nonlinear Regression for Interferogram Analysis," *Applied Optics*, Vol. 34, No. 23, pp. 5039~5044.