

## 3차원 유동장 측정용 홀로그래피 간섭토포그래피

### Holographic interferometric tomography for reconstructing a three-dimensional flow field

차 등 진\*, S. S. Cha\*\*  
D. J. Cha, S. S. Cha

**Key words:** Three-dimensional flow fields(3차원 유동장), Flow diagnostics(유체계측), Quantitative visualization(정량적 가시화), Holography interferometric tomography (홀로그래피 간섭토포그래피), Ill-posed reconstruction(불량 재현)

#### ABSTRACT

Holographic interferometric tomography can provide reconstruction of instantaneous three-dimensional gross flow fields. The technique however confronts ill-posed reconstruction problems in practical applications. Experimental data are usually limited in projection and angular scanning when a field is captured instantaneously or under the obstruction of test models and test section enclosures. An algorithm, based on a series expansion method, has been developed to improve the reconstruction under the ill-posed conditions. A three-dimensional natural convection flow around two interacting isothermal cubes is experimentally investigated. The flow can provide a challenging reconstruction problem and lend itself to accurate numerical solution for comparison. The refractive index fields at two horizontal sections of the thermal plume with and without an opaque object are reconstructed at a limited view angle of 80°. The experimental reconstructions are then compared with those from numerical calculation and thermocouple thermometry. It confirms that the technique is applicable to reconstruction of reasonably complex, three-dimensional flow fields.

#### 1. 서론

에너지 효율적이며 환경친화적인 설비의 중요성이 강조될수록 설비내 3차원 유동을 보다 심도 있게 이해할 필요가 있고, 이에 부응하여 첨단 유체계측법에 대한 요구가 증대되고 있다. 레이저유도형광법(laser induced fluorescence, LIF) 및 입자영상유속계(particle image velocimetry,

PIV) 등의 2차원 측정법은 이미 기존 점측정법의 저유도형광법(laser induced fluorescence, LIF) 한계를 극복하며 실험유체역학에 많은 기여를 하고 있으며, 3차원 측정을 위한 다양한 변형을 시도하고 있다.

복잡한 유동현상을 이해하는 데 3차원 측정법(또는 정량적 가시화법)의 필요성은 아직 절실하다. 이런 점에서 다방향 홀로그래피 간섭사진(multidirectional holographic interferograms)으로부터 3차원 굴절률장 측정하는 홀로그래피 간섭토포그래피(holographic interferometric tomo-

\* 정회원, 대전산업대학교 건축설비공학과

\*\* University of Illinois at Chicago, Department of Mechanical Engineering

graphy, HIT)는 주요한 3차원 유동장 측정법이 될 수 있다. 홀로그래피 간섭법(holographic interferometry, HI)을 이용한 2차원 - 탐상선(probing ray) 방향으로 물성 변화가 없는 - 또는 측대칭 유동장 측정은 이미 확립·실용화되어 있으나, 3차원 유동장을 위한 HIT는 최근 괄목할 만한 진척에도 불구하고 아직 실용 단계에 있지 않다. 간섭법에 의해 재현되는 굴절률장은 유동 유체의 밀도,<sup>(1)</sup> 온도,<sup>(2)</sup> 화학농도,<sup>(3)</sup> 등 다양한 물리량과 상관관계가 있으므로, 초고속 공기역학,<sup>(1, 4)</sup> 열·물질전달<sup>(2, 5)</sup>에서 이미 잘 활용되고 있다.

간섭사진 기록, 데이터 리덕션(reduction), 전산 토모그래피 재현(computational tomographic reconstruction), 등 세 단계로 구성되는 HIT는 불량(adverse) 데이터 조건에서 유동장을 재현하여야 하는 난제를 안고 있다. HIT로 재현하는 유동장은 대개 점진적 변화를 보이나, 경계층에서의 급격한 변화 및 충격파에서의 비연속성을 나타내기도 한다. 또한 유동장 간섭사진은 샘플링 시 비균일하고, 특히 투영 및 스캐닝에서 불완전하다. 이러한 문제들은 홀로그래피 순간적(예를 들면, 수 ns)으로 기록되거나, Fig. 1에 예시한 바와 같이 불투명 실험모델 및 유한 광학창이 존재하는 경우 발생한다. 이러한 모든 불량(ill-posed) 데이터조건은 불량 재현(ill-posed reconstruction) 문제를 초래한다.

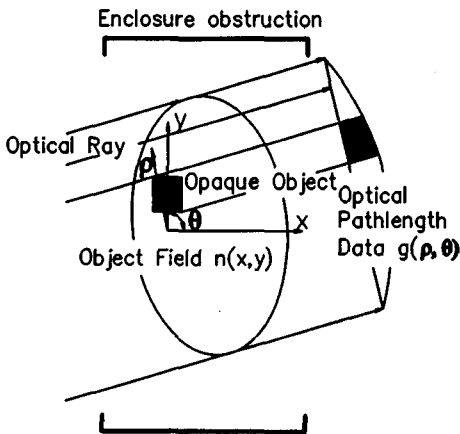


Fig. 1 Optical pathlength data in multidirectional interferometry of a flow field.

다방향 간섭법(multidirectional interferometry)에서 투영간섭사진에 수직한 유동단면  $n(x,y)$ 의 광경로길이데이터(optical pathlength data, OPD 또는 투영데이터)  $g(\rho, \theta)$ 는 Fig. 1에서와 같이 원점으로부터 거리  $\rho$ 와 투영각  $\theta$ 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.

$$g(\rho, \theta) \cong \int_{ray} n(x,y) ds \quad (1)$$

그러므로, 유동장의 토모그래피 재현은 역(inverse)선적분이 요구된다. HIT에서 3차원 유동장 재현은 재현된 2차원 유동장 단면을 적층하여 얻게 된다. 간섭토모그래피<sup>(6)</sup>의 재현법은 변환법<sup>(7)</sup>과 급수전개법<sup>(8)</sup>으로 대별할 수 있다. 전자의 대표적인 방법은 푸리에방법<sup>(9)</sup>과 회선후투영법(convolution backprojection)<sup>(10)</sup>이다. 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 셀을 이용하게 된다. 그러나, 불량도(degree of ill-posedness)가 증가할수록 보완데이터의 비중이 커지며 부정확해져 재현 결과를 왜곡시키게 된다.

급수전개법에서 유동장  $n(x,y)$ 는 아래와 같이 국소(local) 또는 비국소 기준함수(nonlocal basis function)의 유한급수로 근사된다.

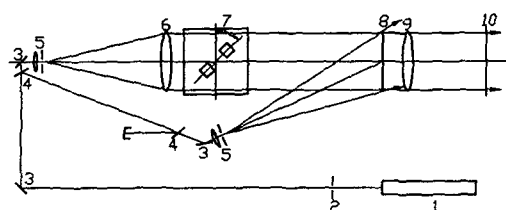
$$n(x,y) \cong \sum_{i=1}^N c_i b_i(x,y) \quad (2)$$

여기서  $b_i(x,y)$  및  $c_i$ 는 각각 급수전개 기준함수 및 그 계수이다. 국소기준함수법에서 각 급수항의 기준(basis)은 재현유동장의 해당 국소지역으로 제한된다. 식(1)의 선적분변환은 선형적이므로 선적분변환과 그 역변환은 각 항별로 수행될 수 있다. 그러므로, 계수  $c_i$ 는 아래 연립선형대수방정식을 풀어 결정한다.

$$g(\rho_j, \theta_j) \cong \sum_{i=1}^N c_i a_i(\rho_j, \theta_j) \quad (3)$$

여기서  $a_i(\rho_j, \theta_j)$ 는 기준함수  $b_i(x, y)$ 의 선적분이고 하첨자  $j$ 는 측정 데이터를 나타낸다. 일반적으로 식(3)은 최소자승법 또는 대수재현법(algebraic reconstruction technique)을 사용하여 해를 구한다. 대표적인 급수전개법은 고정격자법(fixed grid method)<sup>(6)</sup>이다. 이 고전적인 방법(conventional method, CM)은 균일격자요소로 정의된 정사각형(square-pulse) 국소기준함수를 사용한다. 급수전개법은 불완전한 투영데이터 셀으로도 재현이 가능하여 전술한 데이터 보간이 필요하지 않다. 특히 국소기준함수를 사용한 경우 유동장 경계형태, 양의 값 등 사전인지 정보의 활용이 용이하다. 그러나 모든 급수항에 대하여 균일한 크기와 중첩비의 기준함수를 사용하므로 위 제한된 데이터 조건에서 CM으로 세운 연립대수방정식은 ill-behaved하고 재현 유동장을 왜곡시킨다.

불량 재현문제의 정확도 향상을 목적으로 가변격자법(variable grid method, VGM)으로 명명된 전산토모그래피 재현법이 최근 개발되었다.<sup>(11)</sup> VGM은 비균일 직사각형(rectangular-pulse) 국소기준함수를 사용하여, 유동장을 크기와 중첩비가 각기 다른 직사각형 도메인으로 분할한다. 비균일 기준(bases)은 다음과 같은 특성을 지니도록 생성된다. 첫째, 유동장의 기준은 각 기준에 적절한 수의 탐상선이 지나도록 조정된다. 이리함으로써, 생성되는 선형대수방정식의 각 계수는 온당히 균일한 용장성(redundancy)을 갖게 되어 well-behaved 매트릭스를 구성하고, 계수의 안정된 해를 기대할 수 있다. 둘째, VGM 알고리즘은 보다 많은 탐상선으로 스캔된 유동장내 관심지역을 미소한 기준들로 분할되게 하여 보다 나은 공간분해능과 정확도로 유동장을 재현하도록 한다. 데이터 보간이 필요한 경우 보간 인터벌은 원 간섭사진에서의 인터벌과 비례하도록 하여 공간분해능 정보를 유지하였다. 예비적인 컴퓨터 시뮬레이션 결과, VGM이 불량 조건 및 국소 언더샘플링에서도 CM에 비해 월등히 많은 수의 급수항으로 재현 분해능과 정확도를 높일 수 있음을 확인하였다.<sup>(11)</sup> VGM 알고리즘은 참고문헌 11에 소개되어 본 논문에서는 생략한다.



1) argon-ion laser, 2) shutter, 3) mirror, 4) variable beam splitter, 5) objective pin hole assembly, 6) collimating lens, 7) test section & rotated model, 8) hologram, 9) imager and 10) interferogram

Fig. 2 Optical arrangement.

본 연구에서는 상기 불량 조건에서 적절한 복잡성을 갖는 3차원 유동장을 실제 재현하여 VGM을 전산토모그래피 재현법으로 사용하는 HIT가 실용성이 있는지 확인하고자 한다.

## 2. 실험

글리세린에 잠긴 두 등은 정육면체 주위의 층류 정상 자연대류유동을 실험적으로 조사하였다. 45° 대각선 방향으로 중심간 거리가 한 변 길이의 1.77배 떨어져 있는 두 열원이 15.2 cm 직경의 두 광학창을 가진 25.4x25.4x35.6 cm<sup>3</sup> 부피의 직육면체 테스트섹션에 놓여 있었다. 열원의 표면온도는 내부에 설치된 히터에 공급되는 전원으로 조절하고, 주변유체 온도는 테스트 섹션 내면에 설치된 열교환기 튜빙에 일정 온도의 냉각수를 흐르게 하여 일정하게 유지하였다. 다수의 열전대를 열원 내부와 열원 주변 유체에 설치하여 온도 측정을 하였다. Fig. 2에 예시한 바와 같이, 대상 유동장을 고정 단방향 탐상법에 대하여 회전시켰고, 따라서 다방향 투영데이터를 얻기 위해 수 차례 홀로그래프를 기록하였다. 이러한 비순간적인 데이터 획득은 정상유동임을 가정하게 하였었고, 매 실험 시 허용오차 내에서 동등한 유동장을 요구하였다. 본 HIT의 실용성이 입증되면, 본 연구에서 채택한 고전적인 홀로그래프 기록방법 대신 광학 디퓨저나 페이스 그레이팅을 활용한 다방향 조명을 통하여 한 홀로그래프에 전 유동장을 순간적으로 캡처(capture)하여 기록하고 재현할 수 있다. 이는 홀로그래피가 3차원 기록이 가능한 것에 근거하나, 시야각은 제한된다. 따라서,

불량 조건에서도 충분한 정확도로 유동장을 재현할 수 있는 토모그래피재현법이 필요하다.

전 실험에 걸쳐, 열원 표면온도는 각 열전대 위치에서  $0.03^{\circ}\text{C}$  이내, 주변유체온도는  $0.1^{\circ}\text{C}$  이내로 변화하였다. 실시간 홀로그래피를 이용하여 테스트섹션 벽면이 유동장에 영향(벽면 효과)을 미치지 않을 정도로 테스트섹션이 충분히 큰 것을 확인하였다.

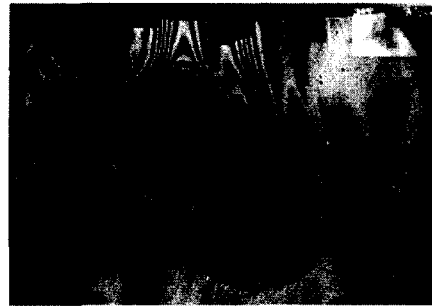
## 2.1 간섭사진 기록

전술한 바와 같이, 고전적인 이중노출 홀로그래피 간섭법에 의해 다방향 간섭사진을 기록하였다. 광학계는 Fig. 2와 같다. 먼저 알콘이온레이저빔은 두 갈래로 나뉘어 평면파 목적빔과 구면파 기준빔이 되었다. 홀로그램은 Agfa-Gevaert 10E75 ( $10.2 \times 12.7 \text{ cm}^2$ )에 기록되었다. 홀로그램과 간섭사진은 표준암실절차<sup>(6)</sup>에 따라 처리되었다. 테스트 섹션 내 유체는 수 시간동안 일정온도·정적 상태로 유지하여 두 정육면체열원과 열 평형상태가 되도록 하였고, 이때 일차 노출로 홀로그램을 기록하였다. 곧 이어, 열원을 가열하여 규정 표면온도로 정상상태를 얻은 후 동일 홀로그램에 이차 노출을 실시하였다. 홀로그램 기록은 두 열원을  $-40^{\circ}$ 에서  $40^{\circ}$ 까지  $10^{\circ}$ 간격으로 회전시키며 반복하였다.

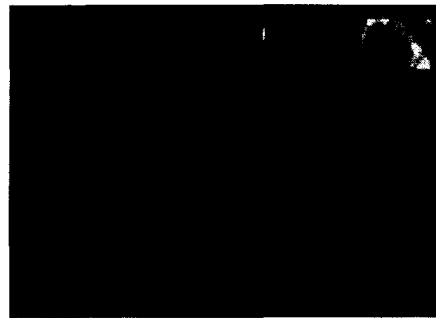
목적빔 경로를 차단한 후 기록 시와 동일한 광학계에서 두 목적빔을 재현하여 간섭무늬를 형성하였고, 사진건판에 간섭사진을 기록하였다. 대표적으로 투영각  $10^{\circ}$ 에서 기록한 홀로그래피 간섭사진이 Fig. 3이다. 정육면체 열원 지지봉과 열전대가 인근 유동장을 교란시키므로, 그림과 같이 두 간섭사진(지지봉을 열원 좌측에 둔 사진과 우측에 둔 사진)을 얻고 각각의 교란받지 않은 부분을 합성하여 한 투영 간섭사진을 취하였다.

## 2.2 간섭데이터 리덕션

간섭사진으로부터 필요한 OPD를 추출하는 다양한 방법<sup>(12)</sup>이 있으나 본 연구에서는 간섭사진의 인텐시티 데이터로부터 곡선적합(curve fitting)법을 이용하여 OPD를 얻었다. 곡면적합은 Fig. 2와 같이 비교적 간단한 광학계를 이용하여 얻은 간섭사진으로부터 비교적 높은 정확도의 데이터



(a)



(b)

Fig. 3 Holographic interferograms at a projection angle of  $10^{\circ}$ : support bars at (a) RHS and (b) LHS.

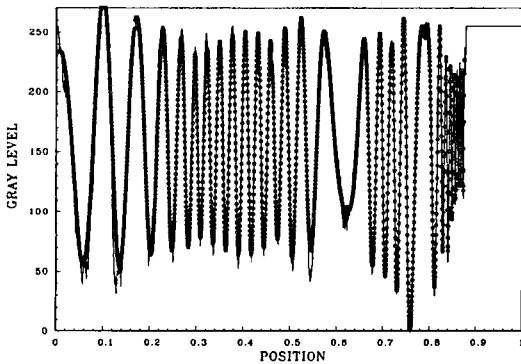
리덕션이 가능하며, 열전달계수 등을 계산하는데 필요한 유동장 구배를 근사 모델로부터 직접 계산할 수 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 열원 주위에는 매우 미세한 간섭무늬(프린지)가 형성되므로, 각 프린지에서 적어도 10개 이상의 인텐시티 데이터를 얻을 수 있도록 CCD 카메라를 이용하여 확대·스캔하였다. Fig. 1의 좌표  $\rho$ 를 따라 완전한 데이터 셀을 얻기 위해서는 다수의 디지털 후레임을 획득하여 합성하였다.

본 연구에서는 비선형 곡선적합<sup>(13)</sup>을 활용하였다. 인텐시티 데이터는 노이즈없는 프린지 형태를 나타내는 식(4)으로 적합되었다.

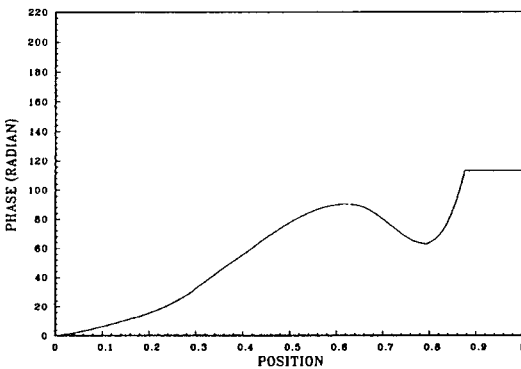
$$I(\rho) = b(\rho) + a(\rho) \times \cos\{p(\rho)\} \quad (4)$$

여기서  $b(\rho)$ ,  $a(\rho)$ , 및  $p(\rho)$ 는 각각 백그라운드 인텐시티, 변조 진폭, 및 위상함수들이다. 각 함수는 미지 파라미터를 가진 다항식 또는 기타

함수로 근사시킬 수 있다. 대표적인 측정 인텐시티 플롯이 Fig. 4(a)에 나타나 있다. 이 커브는 Fig. 5의 단면 BB의 좌측 절반에 대응하는 Fig. 3(a)의 간섭사진의 수평선상의 값에 해당한다. 또한, Fig. 4(a)의 측정 인텐시티 커브에 추가된 데이터 점들은 비선형 곡선적합 해석 결과이다. 이때 추출된 위상함수가 Fig. 4(b)에 나타나 있다. 각 투영각  $\theta$ 에 대해 추출된 위상함수들을 종합하면 2차원 데이터 세트  $p(\rho_j, \theta_j)$ 를 얻고,  $2\pi/\lambda$ 로 나누면 식(3)의 OPD인  $g(\rho_j, \theta_j)$ 를 얻게 된다. 여기서  $\lambda$ 는 레이저 파장이다.



(a)



(b)

Fig. 4 Example of interferogram reduction: (a) plot of regression data (dotted line) and measured intensity (solid line) and (b) extracted phase function.

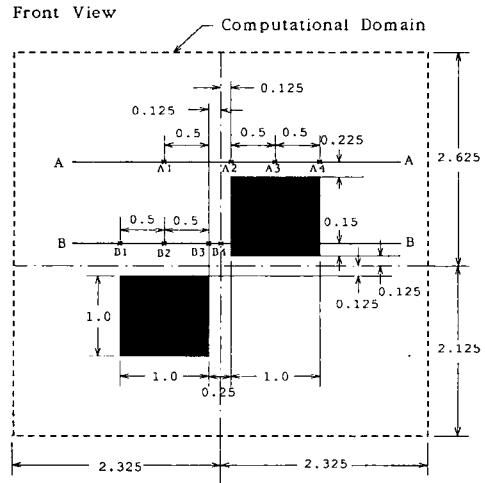


Fig. 5 Vertical symmetric plant of the flow field indicating two horizontal cross sections of investigation and thermocouple positions: dimensions are normalized by a cube side length.

### 2.3 전산토모그래피 재현

Fig. 5의 단면 AA는 불투명 테스트 모델을 포함하지 않는 반면, 단면 BB는 포함한다. 이 두 수평단면에서의 굴절률장을 VGM 및 CM을 이용하여 재현하였다. 이 방법들에서 재현 유동장은 스텝함수로 표시되므로, B-spline 보간을 이용하여 매끄럽게 하였다. 각 기준의 중심에서의 재현 값이 사용되었다. 유동장 구배가 현격히 변하므로, 프린지 스페이싱에 따라 OPD를 부등 간격으로 샘플링하였다. 이렇게 함으로써, 계산 부담을 최소화하며 관심영역에서의 공간적 정보가 확보된다. 불투명 테스트 모델에 차단되어 OPD 일부가 손실되었고 시야각도  $80^\circ$ 로 제한되어 있으므로, 매우 불량한 재현 문제를 다루어야 한다. 사용된 총 OPD 데이터 점은 단면 AA 및 BB에 대하여 각각 대략 635 및 460개이었다.

VGM과 CM의 입력 파라미터의 최적치는 샘플된 OPD를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 근사적으로 찾게 된다. 이 스트레티지는 아래와 같이 요약할 수 있다. 먼저, 근사 유동장을 가정한다. 즉, Fig. 6(a) 및 Fig. 7(a)와 같은 수치해의 결과를 본 연구에서는 이용하였다. 다음, 실험

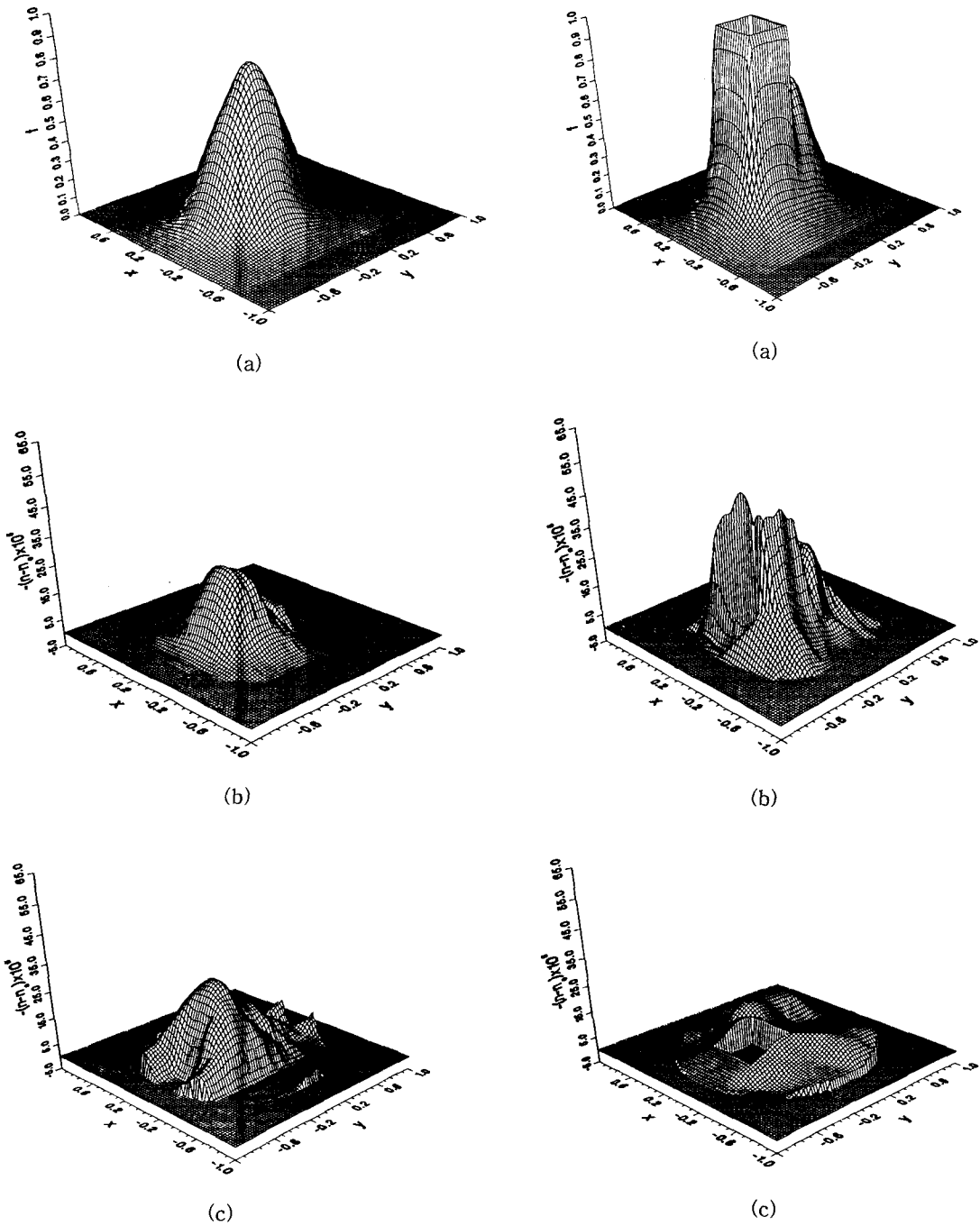


Fig. 6 Thermal plume at section AA: (a) flow field obtained from numerical solution; (b) reconstruction by the VGM; (c) reconstruction by the CM, at a view angle of  $80^\circ$ .

Fig. 7 Thermal plume at section BB: (a) flow field obtained from numerical solution; (b) reconstruction by the VGM; (c) reconstruction by the CM, at a view angle of  $80^\circ$ .

조건과 동일한 조건에서 선적분변환을 통하여 근사 유동장으로부터 OPD를 산출한다. 이렇게 컴퓨터로 산출된 OPD로 유동장을 재현하고 원 유동장(본 연구에서는 수치해에 의한 유동장)과 비교한다. 주어진 데이터 셀에 대하여 기준의 수, 등 최적 입력 파라미터를 결정하게 된다. 많은 응용분야의 경우, 재현하고자 하는 유동장의 수치해가 항상 가용한 것은 아니나, 개략적 근사 유동장으로도 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 적절한 최적 파라미터 값을 계산할 수 있다.

### 3. 재현 결과 및 비교

단면 AA의 유동장 재현에 대하여 원형 경계 구속을 - 경계의외부의 굴절율은 영으로 설정 - 적용하였다. Fig. 6(b) 및 (c)는 각각 VGM 및 CM을 이용하여 재현한 결과이다. Fig. 6(a)의 유동장과 비교할 때, VGM 재현결과는 전체 형상이 상당히 유사하다. 반면 CM 결과는 험프(hump)도 왜곡되어 있고 경계에서도 증폭된 노이즈 성분을 관찰할 수 있다. 단면 AA의 재현과 같은 방법으로, 단면 BB의 유동장 재현도 VGM 및 CM으로 실시하였다. 이 경우 유동장 경계 형상에 따라 타원형 경계 구속을 적용하였다. Fig. 7(b) 및 (c)는 각각 VGM 및 CM을 이용하여 재현한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, VGM은 테스트 모델 부근의 험프를 성공적으로 재현하고 있다. CM은 험프는 물론 전체 형상에서도 재현에 실패하고 있다. 본 재현 문제가 매우 불량한 관계로 CM은 매우 적은 수의 기준함수를 사용하여 필요한 공간분해능을 확보하지 못하였고, 이로 인해 위의 결과를 초래한 것으로 판단된다. 일정한 유동장 값을 갖는 테스트 모델 표면 지역은 매우 급격한 구배를 보이고, 또한 매우 적은 수의 탐상선을 통과시키게 된다. 그러므로, VGM으로도 이 지역의 정확한 재현은 불가능하였고, 테스트 모델 부근에서 재현 오차를 최소화하기 위해 불투명 물체의 표면값에 근거한 보간이 필요하다.

간섭법으로 온도  $T$ 를 측정하기 위해서는 굴절률  $n$ 을 온도로 변환하여야 한다. 불확정도가 2% 이내로 알려진 아래 경험식<sup>(14)</sup>을 사용하여 환산하였다.

$$\frac{dn}{dT} = -\frac{3}{2} \frac{n(n^2-1)}{2n^2+1} \beta \quad (5)$$

여기서  $\beta$ 는 유체의 체적열팽창계수이다. 단순화시키기 위해 식(5)를 관심 온도 범위 내에서 선형관계로 근사시켜 사용하였다. 약  $22.8^\circ\text{C}$ 인 주변 유체의 범위는 열 플룸(plume)의 크기에 비해 상대적으로 크고, 재현 온도 계산 시 주변 온도는 일정하다고 가정하였다. 그러나, 미지 크기인 주변 온도의 국소 변동치는 재현 부정확도의 주요 요인으로 추정된다. 기타 오차요인들(예를 들면,  $\lambda/100$  미만<sup>(13)</sup>인 간섭데이터 리덕션 불확정도)은 무시 가능하다.

재현 결과의 신뢰성을 알아보기 위해 HIT 결과를 Fig. 6의 수치해 및 Fig. 5에 표시된 위치에서의 열전대 측정결과(TC)와 비교하였다. 다방향 홀로그램 기록 후, 두 수평단면의 대칭 중심선을 따라 각 네점씩(즉, 단면 AA에서 A1-A4점, 단면 BB에서 B1-B4점)에서 열전대로 온도를 읽었다. 두 차례 별도 실험중 유동장 교란을 최소화하기 위해 일회 실험에 각 수평단면의 네 열전대만을 삽입하였다. 열전대 측정 시 유동장은 다방향 홀로그램 기록 시 유동장과 측정오차 범위 내에서 복원(replicate)되었다고 추정된다.

Fig. 6(b) 및 7(b)의 VGM 재현결과에서 환산된 온도로부터 각 열전대 위치의 값을 Table 1에 정리하였다. TC, HIT, 및 수치해로부터의 온도를 각각  $T^{TC}$ ,  $T^{RE}$ , 및  $T^{NU}$ 로 표기하였다. 상대온도차  $\epsilon$ 을 아래와 같이 주변 유체온도  $T_\infty$ 의 백분율로 정의하였다.

$$\epsilon = 100 \times \frac{(T^i - T^j)}{T_\infty} \quad (6)$$

여기서  $(T^i - T^j)$ 는 각 측정간의 차이이며, Table 2에 정리하였다. 예상했던 바와 같이, 단면 AA에서의 결과가 단면 BB에 비해 우수한 것을 알 수 있었다. 이는 단면 BB가 단면 AA보다 현저히 큰 온도 구배를 갖고 있기 때문에 열전대의 미세한 위치오차에도 상당한 차이를 보일 수 있다.

VGM 및 CM의 재현온도와 열전대 측정온도의 상대온도차를 Table 3에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이, A3 및 B2에서의 상대온도차의 크기가 다른 점과 비교하여 크게 나타나고 있다. 이는 Fig. 6 및 7에서 보는 바와 같이 유동장 험

Table 1 Temperatures obtained from TC, HIT, and numerical computation

TC No.	$T^{TC}, ^\circ C$	$T^{RE}, ^\circ C$	$T^{NU}, ^\circ C$
A1	23.75±0.01	23.7	23.46
A2	24.69±0.01	24.1	24.97
A3	25.34±0.01	24.6	25.19
A4	23.93±0.01	24.0	24.26
B1	23.42±0.01	23.7	23.55
B2	25.07±0.01	24.5	24.50
B3	24.22±0.01	24.2	24.80
B4	24.67±0.01	24.2	24.89

Table 2 Relative temperature difference between the results from TC, HIT, and numerical computation

TC No.	$\epsilon, \%$		
	$T^{RE} - T^{TC}$	$T^{NU} - T^{TC}$	$T^{NU} - T^{RE}$
A1	-0.35	-1.28	-0.77
A2	-2.12	1.23	-0.66
A3	-2.69	0.62	2.13
A4	0.13	1.43	1.12
B1	0.95	0.58	-0.43
B2	-2.37	-2.49	-0.15
B3	-0.24	2.58	2.51
B4	-1.89	0.98	2.75

Table 3 Relative temperature differences of reconstructions at a view angle of 80°

TC No.	$\epsilon, \%$	
	VGM	CM
A1	-0.35	0.88
A2	-2.12	-1.26
A3	-2.69	-2.36
A4	0.13	-0.32
B1	0.95	0.00
B2	-2.37	-5.44
B3	-0.24	-1.47
B4	-1.89	-3.07

프의 최대치가 낮아진 때문이다. 단면 AA에 대하여 VGM의  $\epsilon$  값이 CM과 비교하여 현저히 작지 않지만, Fig. 6(b) 및 (c)에서와 같이 전체 형상은 월등히 우수한 것을 알 수 있다. 단면 BB에 대하여는 VGM의  $\epsilon$  값이 CM과 비교하여 작고, Fig. 7(b) 및 (c)의 전체 형상도 월등히 우수한 것을 알 수 있다. VGM을 채용한 HIT는 80°의 좁은 시야각에서도 우수하게 3차원 유동장을 재현하였다.

#### 4. 결론

본 실험연구 결과, 불량 조건에서도 VGM을 활용한 HIT의 재현 결과가 수치계산과 열전대 측정 결과와 상당히 일치함을 확인하였다. 측정 불확정도는 미지의 주변 유체온도의 변동폭과 근접한 것으로 추정된다. 그러므로, 본 HIT는 매우 제한된 데이터만을 얻을 가능성이 높은 열·유체 실험에 적절함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 다방향 스캔을 위해 유동장을 회전시키는 고전적 방법을 채택했으나, 실제 응용에서는 광학 디퓨저나 그레이팅을 활용한 광학계를 사용하여 하나 또는 소수의 홀로그램에 순간적인 유동장 데이터 기록이 가능하다.

#### 후기

본 논문은 1998년도 대전산업대학교 교내학술연구비(1998-02-01)의 일부 지원에 의하여 작성되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Doerr, S., 1992, Measurement of a three-dimensional hypersonic density field, AIAA Paper 92-0383.
2. Sweeny, D. W. and Vest, C. M., 1974, Measurement of three-dimensional temperature fields above heated sources by holographic interferometry, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 17, No. 12, pp. 1443-1454.
3. Hertz, H. M., 1987, Experimental determination of two-dimensional temperature fields



- by holographic interferometry, *Optical Communications*, Vol. 54, pp. 131-136.
4. Snyder, R. and Hesselink, L., 1984, Optical tomography for flow visualization of the density field around a revolving helicopter rotor blade, *Applied Optics*, Vol. 23, No. 20, pp. 3650-3656.
  5. Cha, D. J. and Cha, S. S., 1995, Three dimensional natural convection flow around two interacting isothermal cubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 13, pp. 2343-2352.
  6. Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*, Wiley, New York, Chap. 6.
  7. Lewitt, R. M., 1983, Reconstruction algorithms: transform methods, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 71, No. 3, pp. 390-408.
  8. Censor, Y., 1983, Finite series-expansion reconstruction methods, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 71, No. 3, pp. 409-419.
  9. Crowther, R. A., DeRosier, D. J., and Klug, A., 1970, The reconstruction of a three-dimensional structure from projections and its applications to electron microscopy, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 317, No. 1530, pp. 319-340.
  10. Ramachandran, G. N. and Lakshminarayanan, A. V., 1971, Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: Part III -Description and application of the convolution method, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, Vol. 9, No. 11, pp. 997-1003.
  11. Cha, D. J. and Cha, S. S., 1997, Variable grid decomposition for ill-posed interferometric tomography: comparison of algorithms, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 181-197.
  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.
  14. Murphy, C. G. and Alpert, S. S., 1971, Dependence of refractive index temperature coefficients on the thermal expansivity of liquids, *American Journal of Physics*, Vol. 39, pp. 834-836.