

고속 이산화탄소 유동장의 속도 및 밀도 동시 분석에 관한 연구

김용재* · 고한서† · Koji Okamoto**

A Study on Simultaneous Analysis of Velocity and Density Distributions for High-Speed CO₂ Flow

Yong-Jae Kim, Han Seo Ko and Koji Okamoto

Abstract

Velocity and density distributions of a high-speed and initial CO₂ jet flow have been analyzed simultaneously by a developed three-dimensional digital speckle tomography and a particle image velocimetry(PIV). Three high-speed cameras have been used for tomography and PIV since a shape of a nozzle for the jet flow is asymmetric and the initial flow is fast and unsteady. The speckle movements between no flow and CO₂ jet flow have been obtained by a cross-correlation tracking method so that those distances can be transferred to deflection angles of laser rays for density gradients. The three-dimensional density fields for the high-speed CO₂ jet flow have been reconstructed from the deflection angles by a real-time tomography method, and the two-dimensional velocity fields have been calculated by a PIV method simultaneously and instantaneously.

Key Words : Visualization(가시화), Tomography(토모그래피), PIV(입자영상속도계), Initial flow(초기 유동), CO₂(이산화탄소)

1. 서론

최근 여러 가지 물성을 가시화 기법을 이용하여 동시에 측정하는 사례가 늘고 있으며 특히 속

도장과 온도장 동시 측정의 연구가 많이 이루어지고 있다. 본 연구에서는 속도장과 함께 밀도장의 동시 측정 및 분석을 시도하였으며, 밀도 측정의 경우 1/15000초 간격으로 3차원 밀도장 재건을 시도하였다. 속도장 측정에는 널리 알려져 있는 PIV(particle image velocimetry), 밀도장 측정에는 디지털 스페클 토모그래피(digital speckle tomography) [1][2][3]가 동시에 사용되었다.

토모그래피(tomography) 방법은 레이저를 이용하여 열 유동을 비침투적으로 측정하고 그 투사 데이터를 이용하여 정량적으로 온도나 밀도를

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : hanseoko@yurim.skku.ac.kr

* 성균관대학교 기계설계학과 대학원

** 일본 동경대학교

계산할 때 효과적인 도구이다[4][5][6]. 그 중에서 가장 많이 쓰이는 방법이 algebraic reconstruction technique(ART)[7][8]인데 이를 응용한 multiplicative algebraic reconstruction technique (MART)[9]도 밀도 분포 재건에 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 기존의 MART 기법을 기초로 개발된 3차원 MART를 이용하여 이산화탄소의 초기 고속 유동 밀도를 재건하였고, 동시에 PIV[10] 방법을 이용하여 속도장을 측정하였다.

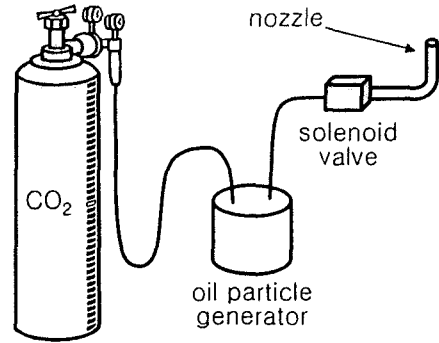


Fig. 1 Experimental setup

2. 실험 장치

2.1 이산화탄소 노즐

노즐을 통해 분출되는 이산화탄소의 초기유동을 관찰하기 위해 5기압 정도의 이산화탄소 탱크를 2기압으로 유지시켜주는 레귤레이터를 통해 노즐로 연결하였다 (Fig. 1). 노즐은 전기신호에 의해 작동하는 솔레노이드(solenoid) 밸브에 연결하였으며, 솔레노이드 밸브와 레귤레이터 사이

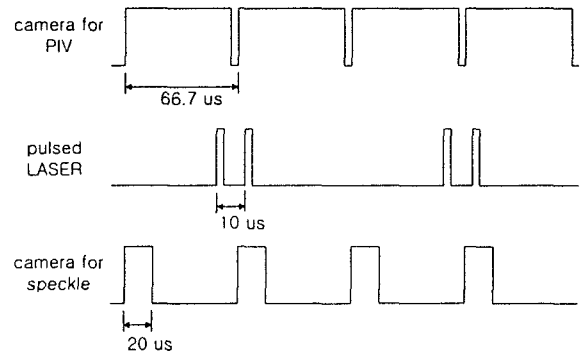


Fig. 2 Time table for synchronization

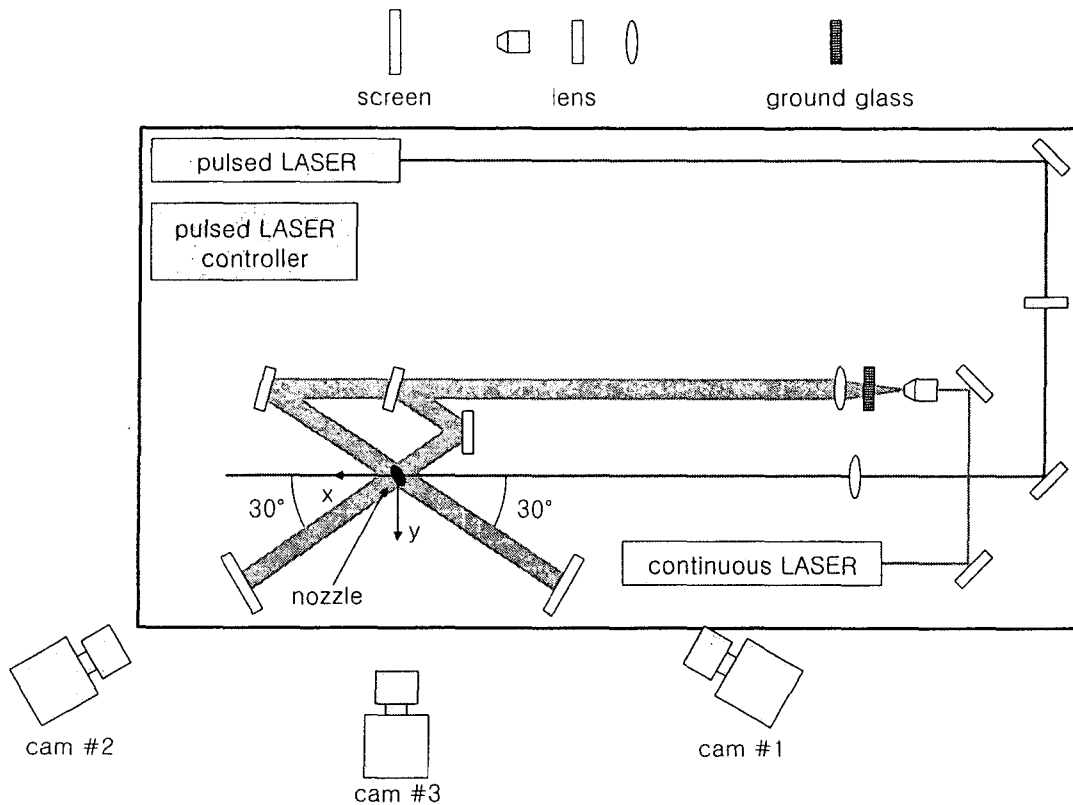


Fig. 3 Optical setting for experiment

에는 PIV 측정을 위해 오일 입자 생성기를 두어 이산화탄소 가스가 오일 입자를 포함하도록 하였다. PIV 측정을 위한 입자는 올리브 오일을 이용하였으며 이산화탄소 속에 부유하도록 하였다.

2.2 광학 세팅

총 3대의 고속카메라와 레이저 그리고 솔레노이드 밸브는 하나의 동기화 시스템에 연결되어져 있으며 솔레노이드 밸브에 신호가 입력되는 순간부터 레이저와 고속카메라들이 동시에 작동되도록 하였다. 고속카메라들과 레이저와의 동기신호 체계를 Fig. 2에 나타내었다.

노즐로부터 빠른 속도로 분출되는 이산화탄소의 초기유동을 관찰하기 위해 Fig. 3에 보이는 것처럼 3대의 고속카메라가 사용되었다. 비대칭인 노즐로부터 분출되는 이산화탄소의 3차원 밀도 분포를 측정하기 위해 256×256 화소의 해상도에서 1/15000초 간격으로 촬영이 가능한 두 대(cam #1, cam #2)의 고속카메라가 사용되었으며 384×384 화소의 해상도에서 1/15000초 간격으로 촬영이 가능한 한 대(cam #3)는 PIV를 이용한 2차원 속도 분포 측정을 위해 사용되었다. 밀도 분포 측정을 위한 두 대의 고속카메라는 +X 축을 기준으로 30°, 150° 각도에서 바라보도록 설치되었다.

본 실험에서는 디지털 스펙클 토모그래피를 위해 최대 5W의 출력을 낼 수 있는 Nd-YAG CW(continuous wave) 레이저와 PIV를 위해 최대 10W의 출력을 내는 Nd-YAG pulsed wave 레이저가 사용되었다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서 노즐 부근까지는 오일 입자를 포함하고 있는 이산화탄소가 가득 찬 상태를 2기압을 유지하였다. 그리고 순간적으로 노즐을 개방하면서 3대의 고속카메라를 이용해 PIV 영상(Fig. 4)과 디지털 스펙클 영상(Fig. 5)을 획득하였다. PIV의 경우 영상을 1/15000초 간격으로 획득하였지만 2-frame cross-correlation 방법을 사용하였기 때문에 속도분포는 2/15000초 간격으로 재건하였다. 디지털 스펙클의 경우도 2-frame cross-correlation을 사용하나 두 개의 영상 중 하나는 유동이 있기 전의 영상을 이용하

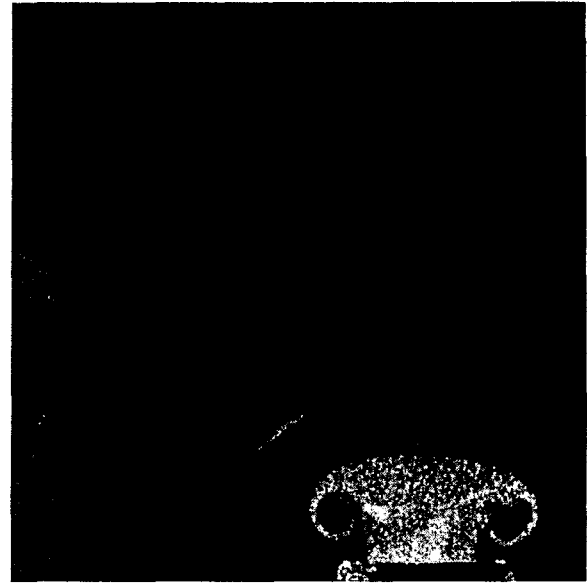
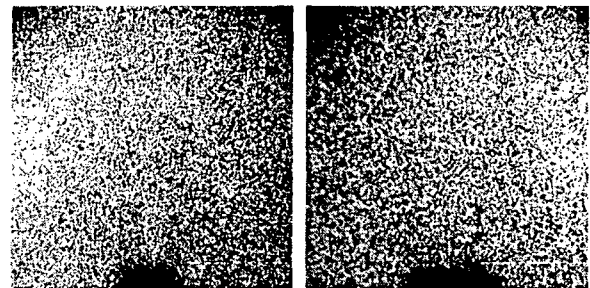


Fig. 4 Captured image for PIV at 24/15000 sec after opening nozzle



(a) cam #1

(b) cam #2

Fig. 5 Captured images for digital speckle tomography at 31/15000 sec after opening nozzle

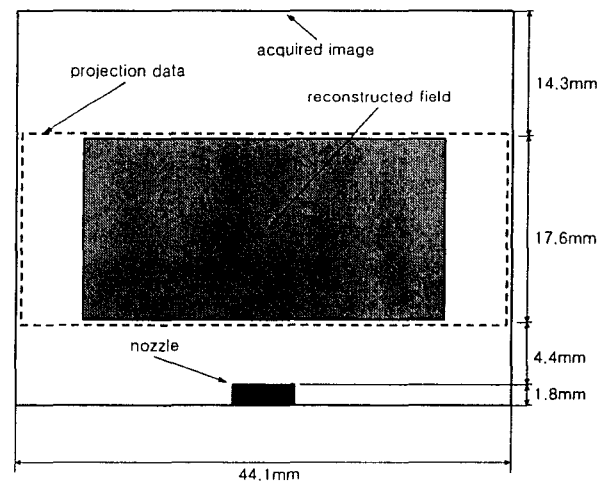


Fig. 6 Area of reconstructed field above nozzle

기 때문에 밀도 분포를 1/15000초 간격으로 재
 건하였고 밀도 분포 분석은 Fig. 6의 영역에서
 수행하였다.

의 각도에 따라 노즐의 넓이가 다르게 보이고 있
 다.

밀도 분포의 재건을 위해서 본 연구에서 개발
 된 3차원 MART 기법이 사용되었다. 재건에 있어

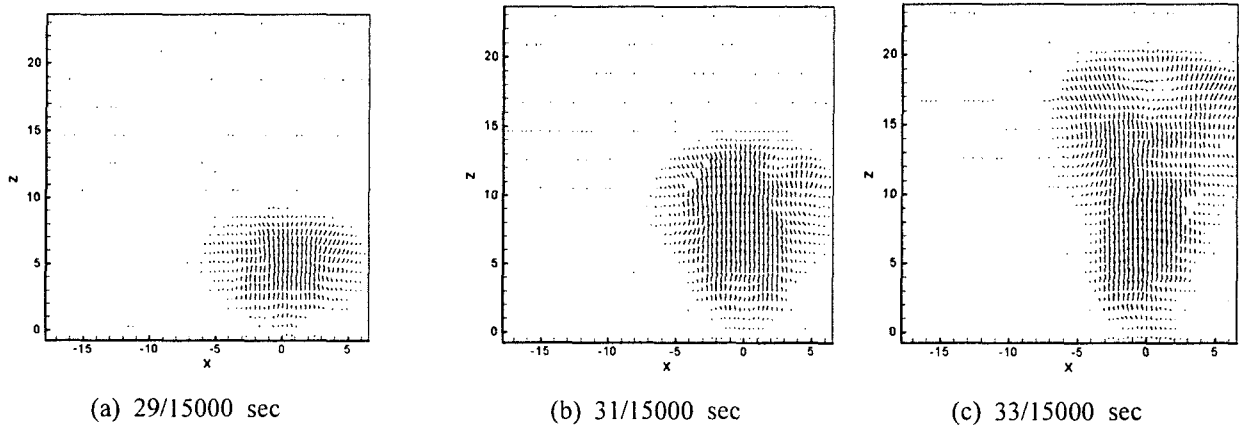


Fig. 7 Velocity distributions for high speed CO2 flow

3.1 시간에 따른 속도 분포

PIV 영상에서 노즐이 중앙으로부터 오른쪽으로
 치우친 것은 고속카메라의 왼쪽 부분에 노이즈가
 발생하여 이로 인한 에러 발생을 최소한으로 줄
 이기 위한 보정이다.

획득된 영상과 Fig. 7에서 볼 수 있는 속도 벡
 터 분석 결과 초기 유동에서 와환(vortex ring)이
 형성된 후 상승하면서 형상이 불안정해지는 것이
 관찰되었다. 초기 유동의 선단에서 관찰된 속도
 는 약 35m/s 정도였으며 정상상태 이후 노즐 중
 심의 속도는 약 80m/s에 도달했다.

PIV를 이용해 노즐로부터 분출되는 이산화탄소
 의 유동은 관찰할 수 있었으나 이로 인해 유발되
 는 노즐 주변 유동 측정은 쉽지 않았다. 주변의
 유동을 알아보기 위해 노즐 주변에 오일 입자를
 미리 분산시킨 후 실험에 들어갔으나 측정 시에
 는 입자들이 사라져 관찰이 어렵게 되었다. 따
 라서 유동에 영향을 주지 않으면서 분사된 입자가
 사라지지 않는 방법을 개발한다면 주변의 유동
 관찰이 가능할 것이다.

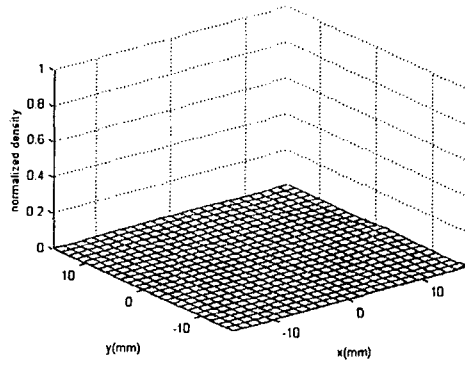
3.2 시간에 따른 밀도 분포

노즐이 축을 중심으로 비대칭적인 형상을 지니
 고 있기 때문에 Fig. 5에서 보는 것처럼 카메라

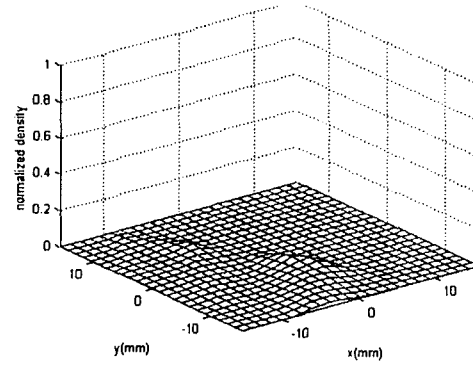
서 어려움은 고속 촬영을 통해 얻은 영상의 해상
 도(256×256 화소)가 좋지 않다는 점이였다. 조
 밀한 디지털 스페클 투사 데이터를 얻기 위해서
 256×256 화소의 영상을 보간법을 이용해
 1024×1024 화소의 영상으로 확대한 후
 cross-correlation[10] 기법을 적용하였다. 그 결
 과 각 카메라의 각 단면 당 150개의 디지털 스페
 클 투사 데이터를 얻을 수 있었다. 이 투사 데
 이터를 이용하여 각 단면의 밀도를 100×100 해
 상도로 재건할 수 있었다. 그러나, 3차원 토모그
 래피를 적용시키다보니 컴퓨터 성능(CPU
 P4-3.0GHz, RAM 1GB)의 한계로 인해 25×25
 해상도(3차원 25×25×25)로 재건하였다. 2차원
 토모그래피를 적용한다면 현재 컴퓨터 성능으로
 100×100 해상도의 밀도 분포 재건도 가능하다.

밀도 분포의 경우 Fig. 6에서 보는 것과 같이
 노즐로부터 거리가 4.4~22mm 되는 부분이 재건
 되었다. 3차원으로 재건이 되었지만 2차원 지면
 으로 표현하기 위해 대표적으로 4.4mm, 22mm
 면의 밀도 분포만을 Fig. 8에서 보여 주고 있으
 며, 솔레노이드 밸브가 열린 후 27/15000초가
 되었을 때 와환이 관찰되었다.

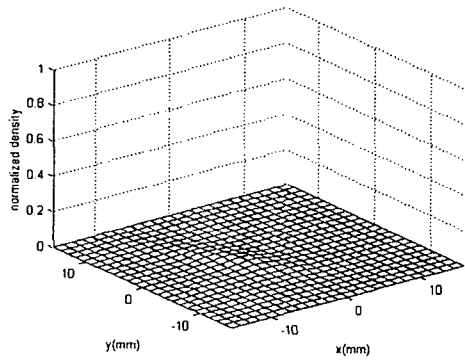
와환의 선단이 4.4mm 부근에 도달한 것을
 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 29/15000초가 지난



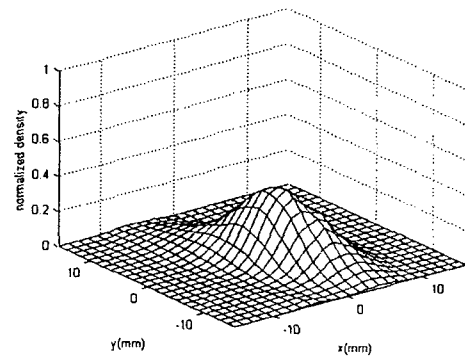
(a) 27/15000sec, 22mm above nozzle



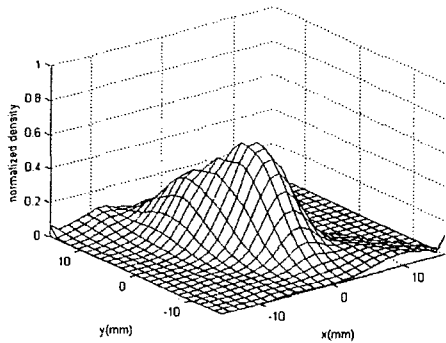
(b) 27/15000sec, 4.4mm above nozzle



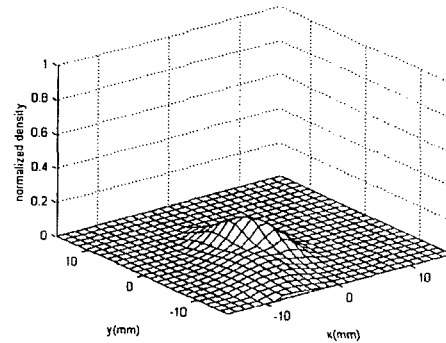
(c) 29/15000sec, 22mm above nozzle



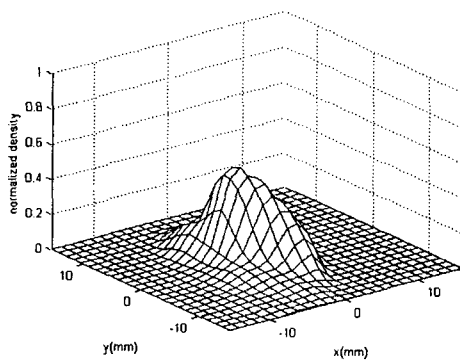
(d) 29/15000sec, 4.4mm above nozzle



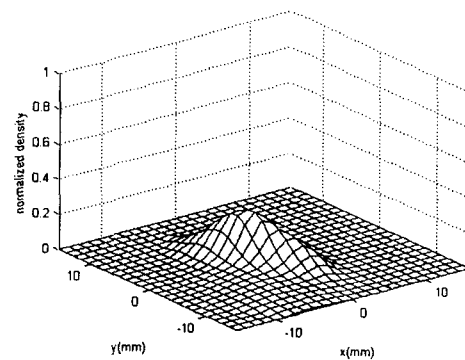
(e) 31/15000sec, 22mm above nozzle



(f) 31/15000sec, 4.4mm above nozzle



(g) 33/15000sec, 22mm above nozzle



(h) 33/15000sec, 4.4mm above nozzle

Fig. 8 Density distributions with height and time variation for high speed CO₂ flow

후에는 와환의 선단이 완전히 4.4mm 면을 통과하고 있으나 아직 22mm 면에 도달하지 못한 것을 확인하였다. 31/15000, 33/15000초에서는 와환 선단의 넓은 밀도 분포가 상승하면서 4.4mm 면보다 22mm 면의 밀도 분포가 넓게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

위 결과를 통해 초기 고속 유동에서 와환의 움직임을 PIV 뿐만 아니라 디지털 스페클 토모그래피를 이용한 밀도 분포 재건을 통해서도 관찰할 수 있음을 보여주었다. 그러나, 재건 해상도의 문제로 인하여 와환의 밀도 분포를 세밀하게 표현하는데 한계가 있다는 문제점이 드러났다. 이는 스페클 토모그래피를 위한 투사 데이터를 얻을 수 있는 방향이 2각도로 한정된 점과 컴퓨터 사양의 한계 때문인 것으로 사료된다. 따라서 각도의 수를 늘리고 컴퓨터 사양이 더 좋아진다면 와환의 세밀한 밀도 분포를 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

PIV와 디지털 스페클 토모그래피 방법을 이용하여 이산화탄소의 초기 고속 유동에 대한 속도와 밀도 분포 변화를 2/15000초 간격으로 동시에 관찰하였다. 본 연구에서 이루어진 실험 방법을 이용할 경우 3차원 밀도 분포와 2차원 속도 분포를 실시간으로 동시에 측정함으로써 비정상 상태에서 빠르게 변화하는 유동 구조를 파악하는 작업이 가능할 것으로 사료된다. 또한, 두 유동가시화 기법을 함께 이용할 경우 입자의 속도 측정을 통해 유체의 흐름을 파악하는 PIV의 신뢰성 문제를 검증하는데 유용할 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- 1) Fomin, N.A., 1998, "Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements," Springer, Berlin.
- 2) Françon, M., 1979, "Laser Speckle and Applications in Optics," Academic Press, New

- York.
- 3) Kihm, K.D., Kim, J.H. and Fletcher, L.S., 1993, "Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Converging Channel Flows Using a Specklegram Technique," Journal of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 140-148.
- 4) Ko, H.S. and Kim, Y.J., 2002, "Comparison and Analysis of Tomography Methods for Reconstruction of Three-dimensional Density Distributions in Two-phase Flows," Journal of Nondestructive Testing, Vol. 22, pp. 545-556.
- 5) Ko, H.S. and Kim, Y.J., 2003, "Tomographic Reconstruction of Two-phase flows," KSME Int J, Vol. 17, pp. 571-580.
- 6) Liu, T.C., Merzkirch, W. and Oberste-Lehn K, 1989, "Optical Tomography Applied to a Speckle Photographic Measurement of Asymmetric Flows with Variable Density," Experiments in Fluids, Vol. 7, pp. 157-163.
- 7) Gordon, R., 1974, "A Tutorial on ART," IEEE Trans. on Nuclear Science, NS-21, pp. 78-92.
- 8) Ko, H.S. and Kihm, K.D., 1999, An Extended Algebraic Reconstruction Technique (ART) for Density-Gradient Projections: Laser Speckle Photographic Tomography," Experiments in Fluids, Vol. 27, pp. 542-550.
- 9) Verhoeven, D., 1993, "Limited-data computed tomography algorithms for the physical sciences," Applied Optics, Vol. 32, pp. 3736-3754.
- 10) Raffel, M., Willert, C.E. and Kompenhans J., 1998, "Particle Image Velocimetry," Springer, Berlin.