

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.6.009>

입자 부상 제트에서 오리피스 길이가 입자 분포에 미치는 영향에 대한 연구

윤정수* · 백경엽** · 길태옥*** · 윤영빈****†

Effect of Orifice Length on Particle Distribution in Particle-laden Jet

Jungsoo Yoon* · Kyong-Yup Paik** · Taeock Khil*** · Youngbin Yoon****†

ABSTRACT

As a propellant of a high speed underwater vehicle, the hydro-reactive solid metal particles using seawater as a oxidizer maximizes its specific impulse when the solid metal particles and the seawater are uniformly mixed in the combustion chamber. The purpose of this study is to investigate the effects of injector geometry on the particle distribution of similarity point of view. For the purpose of this similarity of the mean velocity and particle number density along the radial direction was measured by Particle Image Velocimetry(PIV).

초 록

추력변화를 초공동 수중운동체의 추진체로 사용되는 수반응성 금속입자와 해수는 연소챔버 내에서 균질하게 혼합될 때 비추력이 극대화 된다. 본 연구의 목적은 상사성의 관점에서 분사기 형상이 입자 분포에 미치는 영향을 알아보는 것이다. 이를 위해 PIV기법을 이용하여 반경방향의 입자 분포와 입자 평균속도의 상사성에 대하여 알아보았다.

Key Words: Particle-laden Jet(입자 부상 제트), Similarity(상사성), Particle Image Velocimetry(PIV), Number Density(수밀도)

1. 서 론

제트는 단순한 구조로도 유동의 혼합이 강해 지기 때문에 연소, 추진, 혼합, 공기역학적 소음 등에 관련된 실제 연소 시스템에 적용되고 있다. 이러한 제트의 자기상사성에 대한 연구는 제트의 기본구조를 파악하는데 그 정보가 유효하다. 가장 단순한 제트 유동인 단공형 노즐에서의 자기 상사성에 대한 연구는 예전부터 많이 이루어

접수일 2012. 8. 10, 수정완료일 2012. 9. 25, 게재확정일 2012. 10. 2

* 학생회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 정회원, 서울대학교 항공우주신기술연구소

*** 정회원, LIG넥스원(주) PGM연구센터

**** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부

† 교신저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

져 왔다. Wynnanski와 Fielder은[1] 선형화된 hot-wire를 이용하여, 지름이 2.54 cm, 공기유속이 51 m/s인 제트에서 평균속도, 난류 스트레스, triple correlation 계수 등의 profile에 대한 측정을 수행하였다. Hussein 등은[2] hot-wire와 LDA 측정 방법을 이용하여 실험하였다. 정지된 hot-wire와 움직이는 hot-wire의 두 종류를 사용하여 측정한 결과, 움직이는 hot-wire는 LDA와 유사한 값을 보이는 반면 정지된 hot-wire는 난류 강도가 2차, 3차인 경우 LDA와 매우 다른 경향을 보였다. 이는 정지된 hot-wire가 국부적으로 큰 난류 강도에 영향을 받기 때문에 cross flow, rectification, drop-out 등의 에러가 발생하여 측정의 정확도가 떨어진다고 하였다.

이렇게 단공형 분사기에서 공기의 자기 상사성에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만 입자 부상 제트의 자기 상사성에 대한 연구는 많이 진행되지 않은 실정이다. 입자 부상제트는 Integrated Gasfication Combined Cycle(IGCC) [3], 초고속 수중운동체의 분사기 또는 차세대 로켓추진 시스템 등과 관련된 연구에서 많이 이루어지고 있다. 이러한 입자 부상 제트 중에서 본 연구에서 사용한 알루미늄과 마그네슘과 같은 수반응성 금속연료의 경우에는 초공동 수중운동체의 연료로써 사용될 수 있고, 공급 분말의 유량을 제어함으로써 추력제어가 가능하며 연료의 취급이 액체추진제에 비하여 용이하다. 또한 이들 연료의 연소 생성물이 환경 친화적이므로 차세대 동력 생산원으로 떠오르고 있을 뿐만 아니라, 차후 달 또는 행성 탐사 시 행성표면의 물과 수반응성 금속을 활용하여 연료 사용면에서 비약적인 발전을 이룰 수 있으므로 수반응성 금속 연료의 분사 및 연소는 큰 잠재력을 지닌 연구 분야로 주목받고 있다[4].

따라서 이러한 금속분말을 사용하기 위해서는 유체속의 금속분말의 속도 분포 및 분말 확산 정도 등의 분부 특성을 파악할 수 있는 실험이 필요하다. 본 연구에서는 단공형 오리피스 타입의 분사기를 이용하여, 입자 부상 제트에서의 오리피스 길이에 따른 입자 및 공기의 상사성에 대한 연구를 수행하였다. 오리피스 길이는 분사기

의 출구속도와 입자들 간의 충돌정도를 결정하는 중요한 인자이기에 오리피스 길이를 본 연구에 사용된 분사기의 기하학적 변수로 사용하였다. 분말의 거동을 파악하기 위하여 PIV 기법을 통해 분말의 속도 분포를 측정하였고, CCD 이미지로부터 이미지 처리 기법을 사용하여 입자 수밀도 분포를 측정하였다. 본 연구의 실험 결과로부터 입자 부상 제트의 경우 입자의 밀도와 입자 로딩비가 같을 경우 오리피스 길이가 변화하여도 입자 수밀도가 동일한 분포를 가지고 있음을 확인하였다.

2. 실험방법 및 장치

Figure 1은 본 실험에서 사용된 분사기이다. 분사기 오리피스의 길이는 10, 20, 30 mm 이고 지름은 3.5 mm이다. 분사기 내부 챔버 직경은 9 mm 로서, 1/4 inch 공급 라인과 분사기 사이에서 발생하는 압력손실을 최소화 할 수 있도록 설계되었다. 분말 이송 유체로 공기가 사용되었으며 공기의 유량은 디지털 유량계(Alicat Scientific : M-1500SLPM-D)와 레귤레이터를 이용해 1.18 ~ 2.37 g/s의 범위로 제어하였다. 본 실험에 사용된 금속분말은 산화알루미늄 파우더로써, 본 연구의 주제인 분사기의 기하학적 변수에 의한 영향이 아닌 분말 자체의 특성인 분말의 크기나 밀도의 영향을 제거하기 위하여 분말의 크기와 밀도는 고정변수로 결정하였다. 평균 입자 지름은 42.5 μm 이고 공기 흐름을 측정하기 위한 추적 입자역시 산화알루미늄 파우더로써, 평균입자 지름은 1.25 μm 이다.

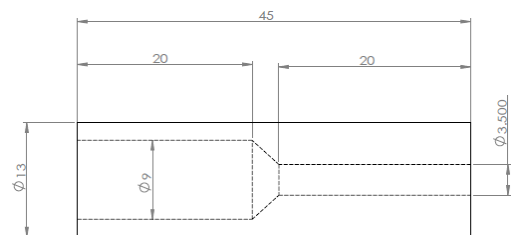


Fig. 1 Plain Orifice Type Injector

Table 1. Experimental Conditions

Air flow rate (g/s)	1.97
Particle feeding rate (g/s)	0.34
Orifice diameter (mm)	3.5
Orifice length(L_o) (mm)	10, 20, 30
Nd-YAG Laser pulse freq (Hz)	10
Particle and Tracer	Al ₂ O ₃
Particle and Tracer density (g/cm ³)	3.97
Particle diameter (μm)	35 ~ 50
Tracer diameter (μm)	0.5 ~ 2

추적입자가 주어진 실험조건에서 공기의 유동을 잘 따라가는가를 확인하기 위하여 Stokes수를 계산 하여 보았다. Stokes수는 다음과 같은 식으로 정의가 되며, 이 값이 0에 가까울수록 입자가 완벽하게 유선을 따라 움직인다는 뜻이다[6]. 아래의 식에 따라 계산한 결과 추적입자의 Stokes수는 7.066×10^{-5} 으로 거의 0에 가까우므로 입자가 유선을 따라 움직인다고 할 수 있다.

$$St = \frac{S}{L} = \frac{\tau U}{L} = \frac{(\rho_p d_p^2 U C_c)}{(18 \mu L)} \quad (1)$$

(S=멈춤거리, L=특성길이, τ =완화시간)

본 연구에 사용된 분말 분사 실험장치는 Fig. 2와 같다. 입자는 스크류를 이용한 입자 공급장치로부터 공급되며, 스크류에 연결된 모터의 속도에 따라 입자 공급유량이 0.14 ~ 0.67 g/s 까지 변경된다.

분말 공급 유량의 섭동을 줄이기 위하여 분사기 상단에 텀핑 챔버를 철시하였다. PIV 계측을 위한 레이저는 Dual head PIV ND-YAG (Surelite II-PIV)를 사용하였고, 레이저에서 생성된 두 개의 beam은 디지털 펄스 발생기 (Stanford Research System : DG535)를 통해 4 μs의 시간차로, 10 Hz의 주기로 발진된 후 광학 렌즈를 통과하여 sheat beam의 형태로 분무의

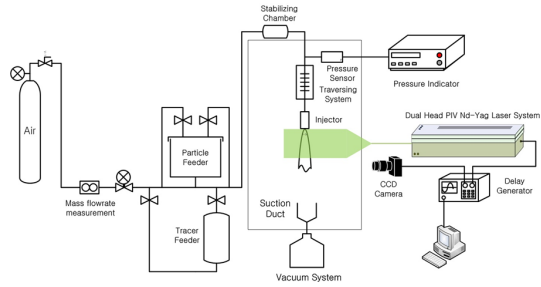
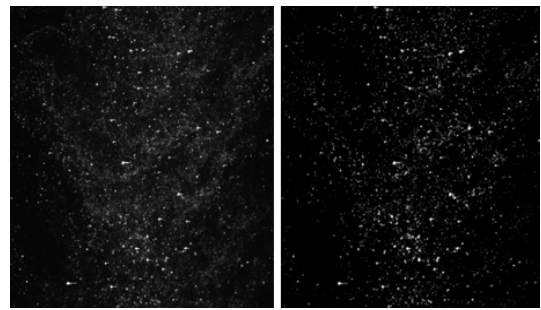


Fig 2. Experimental Apparatus



(a) (b)

Fig. 3 Image Processing

(a) Original Image (b) Post-processed Image

분사 방향과 평행하게 분무를 통과하게 된다. 이때 입자들에 의해 생성된 산란신호를 CCD 카메라를 이용하여 촬영된다. 시간 평균 속도장을 얻기 위하여 각 실험 조건마다 300장의 CCD 이미지를 얻었다. 이렇게 얻어진 이미지로부터 PIV 계측법을 이용하여 추적 입자 및 입자의 속도장을 얻었고, CCD 이미지로부터 입자 수밀도 및 분무 분포에 대한 정보를 분석하였다.

입자 수밀도 분석은 CCD이미지로부터 이미지 분석기법을 이용하여 분석하였다. 입자 수밀도를 분석하기에 앞서 레이저 평면광의 선상에 있지 않은 입자의 2차 전자 방출 (secondary emission)에 의하여 생성된 배경잡음을 제거하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 이미지 세기 히스토그램에서 가장 큰 기울기의 80% 되는 지점을 한계값으로 취하여 배경잡음을 제거하였다[7]. 이러한 방법으로 처리된 결과는 Fig. 3과 같다. 이렇게 후처리된 이미지에서 Khalitov 등이[8] 제시한

가장자리 검출기법을 통하여 입자의 가장자리를 찾아 각 입자를 구분하였다. 하지만 이미지에서 보는 것과 같이 입자들이 매우 밀집된 상태에서 구분된 입자는 여러 입자들이 밀집된 상태이다. 따라서 이러한 이미지를 입자의 평균이미지 크기로 나누어 입자 수밀도를 측정하였다.

$$d_s = 2.44(1 + M)f\lambda \quad (2)$$

(d_s : airy function, M : 배율, f : f-number, λ : 레이저 파장)

$$d_e = \sqrt{M^2 D_p^2 + d_s^2} \quad (3)$$

(d_e : 이미지에 측정된 입자 크기, D_p : 실제 입자크기)

입자의 평균이미지 크기는 입자의 실제 크기와 다르게 측정된다. 그 이유는 측정된 입자의 크기는 레이저에 의해 산란된 이미지로부터 얻어지기 때문에 실제 입자의 크기와는 다르게 측정되기 때문이다. 본 논문에서는 Eq. 2, 3과 같이 Adrian에 의하여 제시된 입자 크기 계산 기법을[9] 통하여 측정된 입자의 평균 크기를 계산하였다.

3. 실험 결과

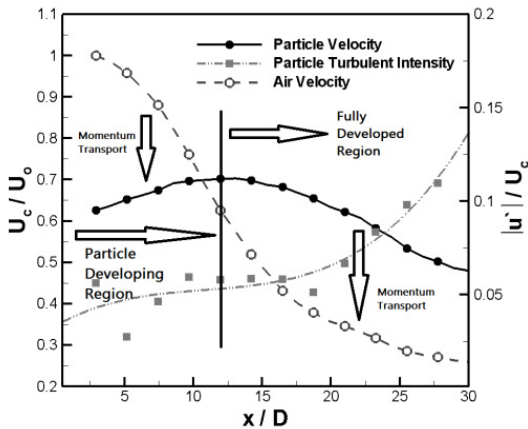


Fig. 4 Developing Region ($\Phi=0.34$, $U_0=152.8$ m/s)

3.1 입자 발달영역

본 실험에서 이상 제트는 Fig. 4와 같이 오리피스 출구 이후부터 입자 속도가 가장 큰 지점으로 정규화한 입자 발달영역이다. Fig. 4의 실험에서 입자 로딩비는 $\Phi=0.34$ 로 고정하였고 ($\phi = \frac{m_p}{m_a}$), 공기의 출구 속도는 152.8 m/s 이다.

오리피스 길이가 짧을 경우, 오리피스 입구로부터 공기에 의해 입자들은 가속되지만, 관성에 의해 출구공기 속도에 미치지 못하여 분말 분사 발달 영역을 나타낸다. 분말 분사 발달 영역 이후 입자들의 속도는 감소하기 시작하며, 난류 강도가 증가하는 것을 보여주고 있다. 이러한 현상은, 분말 분사발달 영역 이후부터 제트 중심으로 들어온 주위가스들이 입자들과 활발하게 모멘텀을 교환하는 것으로 보여 진다. 오리피스 출구로부터 분말 분사발달 영역이 길어질수록 입자들의 확산 지점이 더 멀어진다. 그러므로 분말 발달 영역의 길이는 축 방향으로의 입자 확산도에 대한 정보가 포함된 것으로 판단된다.

3.2 자기 상사성

일반적으로 제트의 초기 구조는 Fig. 5와 같이 Potential core를 포함하는 초기발달영역(Initial Development Region)과 난류의 여러 성질들이 평형상태에 도달하는 상사영역(Similarity Region), 그리고 그 사이의 천이영역(Transition Region)으로 구분되어진다. 초기발달영역은 Potential Core와 혼합영역으로 나누어지는데 Potential Core는 출구에서의 초기조건이 보존되는 영역이고 혼합영역은 제트가 주위의 유체와 혼합되는 영역이다. 유체가 상사영역에 도달하게 되면 제트의 초기 조건 (레이놀즈수, 노즐형상

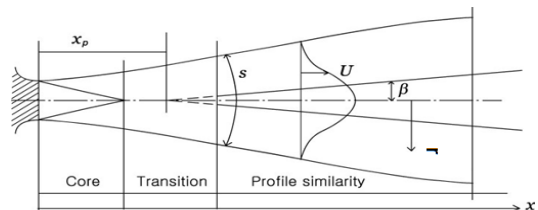


Fig. 5 Structure of Jet

등)에 관한 정보를 상실하게 되어 제트의 모든 성질이 하나의 profile을 갖게 된다.

Malmstrom 등은 축방향의 평균 속도 감소율에 대하여 출구 속도와 노즐 직경의 영향에 대하여 실험을 하였는데, Malmstrom 등에 의하면 자기 상사성이 유지될 때 반경 방향 평균 속도는 다음과 같은 Gaussian 분포 함수로 표현된다고 하였다[10].

$$\frac{u(x,\eta)}{U_c} = \exp(-K_u \eta^2) \quad (4)$$

(U_c : 중심축 속도, η : $\frac{r}{x-x_p}$, x_p : 가상원점, K_u : 상수)

Figure 6은 공기 평균속도의 반경방향 분포를 나타낸 것이다. 평균 속도의 측정 위치는 x/d 가 10~50이다. 그림에서 보는 것과 같이 $x/d=30$ 이상인 지점에서 모든 속도 데이터가 하나의 라인에 들어가게 됨을 알 수 있었다. 또한 본 실험의 측정값과 비교하기 위하여 Panchapakesan 등과 [5], Hussein 등의[2] 실험 데이터를 표시하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 본 실험의 결과는 Hussein 등의 실험결과와 비슷한 속도 분포를 보임을 알 수 있다.

Figure 7은 입자 평균속도 분포를 반경방향으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 입

자의 경우에는 공기의 경우와 달리 $x/d=20$ 이상인 지점에서 모든 속도 데이터가 하나의 라인에 들어가게 됨을 알 수 있다. 이는 입자 자체가 가지는 모멘텀에 의하여 입자의 상사성이 공기에 비해 빠르게 나타난다고 생각된다. Fig. 7에서 Panchapakesan 등과 Hussein 등의 실험은 결과와 본 실험의 결과가 차이가 나는 이유는 Panchapakesan 등과 Hussein 등의 실험은 난류 제트에서 공기의 상사성에 대하여 측정된 것이기 때문에, 본 실험에서 사용된 입자의($42.5 \mu\text{m}$) 결과와는 상이하게 나온 것으로 생각된다.

3.3 입자 수밀도 분포

입자 수밀도는 입자 부상 제트에서 입자 수송 가스의 난류 구조변화에 중요한 영향을 미치므로 입자 수밀도 분포에 대한 연구가 필요하다 [11]. 따라서 입자 수밀도의 반경방향 분포에 대하여 알아 보았다. CCD 이미지로 부터 이미지 처리를 하여 입자들을 구분하여 입자 수밀도를 계산하였다. 아래의 식에서 보는 것과 같이 속도 분포와 마찬가지로 젯 중심부의 입자 수밀도로 부터 정규화하였다.

$$\frac{N(x,\eta)}{N_c} = \exp(-K_u \eta^2) \quad (5)$$

(N_c : 중심축 속도, η : $\frac{r}{x-x_p}$, x_p : 가상원점, K_u : 상수)

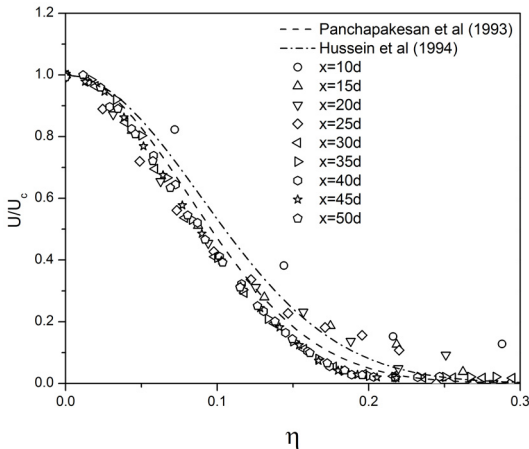


Fig. 6 Air Velocity Profile ($U_0=152.8 \text{ m/s}$, $Lo=30$)

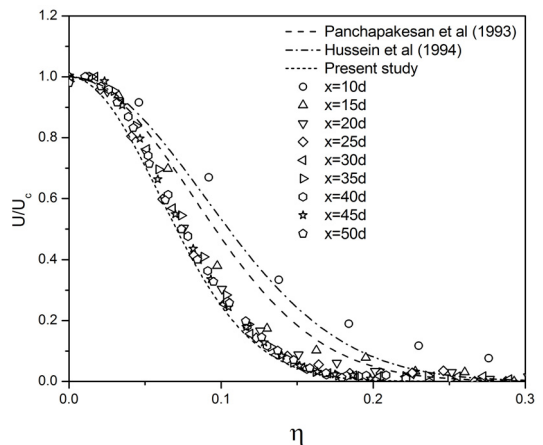


Fig. 7 Particle Velocity Profile ($U_0=152.8 \text{ m/s}$, $Lo=30$)

Figure 8은 입자의 수밀도 분포를 나타내고 있는데, 속도 분포의 경우와 마찬가지로 상사성이 있음을 확인 할 수 있다. 하지만 속도 분포와 달리 $x/d=10$ 이상인 지점부터 상사성이 있다는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 Fig. 4에서 보는 것과 같이 Potential core에서도 켓의 외부에서는 혼합이 활발하게 일어나기 때문에 속도분포에 비하여 입자 수밀도 분포의 상사성이 빠르게 나타난다고 생각된다. 또한 큰 입자의 수밀도 분포는 추적입자의 수밀도 분포 보다 훨씬 좁은 영역의 분포를 보임을 알 수 있다. 이를 Eq. 4의 값으로 나타내면 Hussein 등($K_u = 63.0$)과 Panchapakesan 등($K_u = 75.2$)의 결과보다 큰 184.6의 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 이는 입자가 관성력에 지배를 받기 때문인데 이는 Eq. 1을 통해 계산 할 수 있는 stokes수를 계산해 보면 평균크기 $42.5 \mu\text{m}$ 의 입자에서 stokes수는 660이므로 입자의 운동이 관성력에 지배 받는다고 할 수 있다.

Figure 9는 오리피스 길이 변화에 따른 입자의 수밀도 분포를 나타낸다. Gore 등에 의하면 입자의 크기가 충분히 큰 경우 입자의 거동은 입자의 관성력뿐만 아니라 입자들간의 충돌에 의하여 지배받는다고 하였다[12]. 이렇게 입자들간의 충돌이 입자의 거동을 지배하는 영역에서는

오리피스 길이가 길어질수록 입자들간의 충돌이 오리피스 내부에서 활발히 일어나게 되므로 오리피스 길이가 입자 수밀도 분포에 영향을 미치는 인자가 될 수 있으나 본 연구에서와 같은 크기의 입자에서는 동일한 입자 로딩비에서 오리피스 길이가 입자 수밀도 분포에 미치는 영향이 없음을 Fig. 9로부터 알 수 있었다.

4. 결 론

단공형 분사기를 이용하여 산화알루미늄 분말의 분사 속도 및 분사기 형상에 따른 자기 상사성에 대한 실험을 수행하였다. 입자 수밀도 분포를 측정하기 위하여 이미지 프로세싱 기법을 개발하였으며 이송가스에 대한 정보를 얻기 위하여 $1 \mu\text{m}$ 의 추적 입자가 사용되었고 입자는 평균 크기 $42.5 \mu\text{m}$ 의 입자를 사용하였다. Nd-YAG 레이저를 이용하여 분말 분사 형상 이미지를 얻었고 이미지 분석을 통하여 입자 수밀도에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 입자 속도와 입자 수밀도에 대하여 모두 상사성이 성립함을 알 수 있었고, 공기 흐름에 비하여 입자의 분포는 입자의 관성력에 의하여 상대적으로 좁게 분포함을 알 수 있었다. 또한 본 실험을 통하여 입자 수밀도

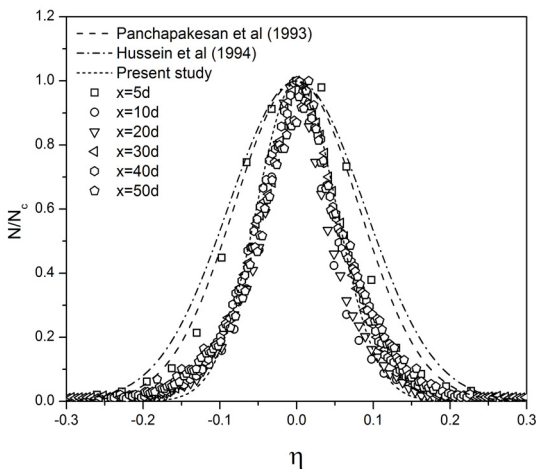


Fig. 8 Particle Number Density Profile ($\Phi = 0.34$, $L_o=30$)

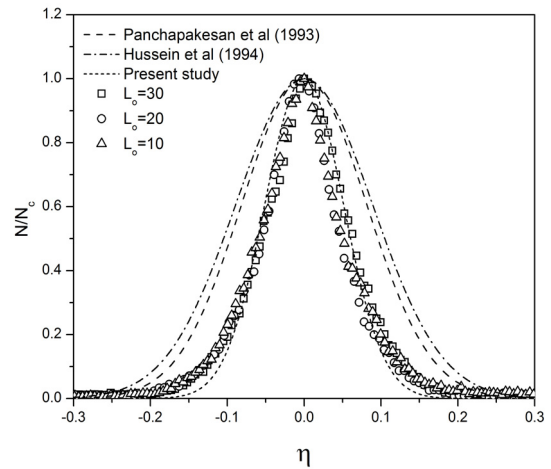


Fig. 9 Particle Number Density Profile ($\Phi = 0.34$, $x/d=30$)

분포의 상사식을 얻을 수 있었으므로 분말 분사기의 설계에 도움을 줄 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 LIG Nex1의 “수반응성 알루미늄 분말 분사기 설계 기술 연구(Y12-007)”와 국방과학연구소의 “초공동 수중운동체 통합연구과제(09-01-05-24)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Wagnanski, I. and Fielder H., "Some measurements in the self-preserving jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 38, Issue 3, 1969, pp.577-612
2. Hussein, J. H., Steven, P. C. and William, K. G., "Velocity measurements in a high Reynolds number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 258, 1994, pp.31-75
3. Hyung-Taek Kim, Young-Hwan Lim, Young-Shin Jeon, and Young-Don Yoo, "A study on the two phase (gas/solid) flow characteristics in the entrained coal gasifier," *Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-97, Proceedings of the 32nd Intersociety*, Vol. 2, 1997, pp.927-931
4. Timothy, F. Miller and John, D. Herr, "Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water," 2004, AIAA 2004-4037
5. Panchapakesan, N. R. and Lumley, J. L., "Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Part 1. Air jet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 246, 1994, pp.197-223
6. Rhodes, Martin, J., *Introduction to Particle Technology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons Inc, 2008
7. Kim, I., and Lee, S., "A Simple Technique for Sizing and Counting Spray Drops Using Digital Image Processing," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 3, No. 2, 1990, pp.214-221
8. Khalitov, D. A., and Longmire, E. K., "Simultaneous two-phase PIV by two-parameter phase discrimination," *Experiments in Fluids*, Vol. 32, No. 2, 2002, pp.252-268
9. Ronald, J. Adrian., "Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annu Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, 1991, pp.261-304
10. Tor, G. Malmstrom., Allan, T. Kirkpatrick., Brian, Christensen., and Kevin, D. Knappmiller., "Centerline velocity decay measurements in low-velocity axisymmetric jets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 246, 1997, pp.363-377
11. Gilandt, I., Fritsching, U., and Bauckage, K., "Measurement of phase interaction in dispersed gas/particle two-phase flow," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 27, No 8, 2001, pp.1313-1332
12. Gore, R. A., Crowe, C. T., "Effect of particle size on modulating turbulent intensity," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15, No. 2, 1989, pp.279-285