한국자동차공학회논문집 제 10 권 제 1 호, pp.9-16

평판에 충돌하는 미립자의 유동분석

Analysis of Particle Motion Impinging on a Flat Plate

김 진*, 김 병 문*
Jin Kim, Byung Moon Kim

The particles velocity in the instantaneous flow field and velocity change of particles along the jet centerline for various particle diameter in a circular turbulent impingement jet are investigated by using particle image velocimetry(PIV) and an equation of particle motion simplified by terms of inertia forces, drag and gravitational force. The jet Reynolds number was 3300 and 8700, and glass beads of 30, 58 and 100μm in diameter were used. The PIV results show that the direction and size of velocity depends not only on the number density of particle but also on the particle momentum. The results obtained form calculation suggest that the particle velocity near the first impingement region deviated from local air velocity, which accords well with the PIV results. The rebound height of particle increase with the particle diameter. In the second-impingement, particle velocities increased sluggishly with Re=3300 but particle velocities uniformed with Re=8700 in stagnation region.

주요기술용어 : Impingement(충돌), Particle image velocimetry(입자상속도계), Particle motion(입자운동), Rebound(반발), Flat plate(평판)

Nomenclature

C_D	:	drag coefficient
d	:	nozzle diameter
d_p	:	particle diameter
g	:	gravitational acceleration
S_t	:	stokes number
u	:	velocity at nozzle exit
μ	:	viscosity
ρ	:	density
τ_f	:	characteristic time of flow
τ_p	:	particle aerodynamic response time

Subscripts

f	:	air
p	:	particle

* 회원, 경일대학교

1. 서 론

화상처리를 이용한 유동장 해석이 컴퓨터 기술 및 카메라의 발달로 이공학 및 공업분야에 폭넓게 응용되고 있다. 화상처리는 화상내에 포함된 정보를 유출・가공하여 2차원 및 3차원 정보로부터 시각적 평가, 정량적인 정보 획득 및 정도가 높은 유동장의 공간 구조해석이 가능한 이점이 있다. 순간유동장의 다점 동시 유속분포측정은 입자화상 유속계(PIV),[1] 입자추적 유속계(PTV)[2] 및 유직선 유속계[3] 등이 일반적으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 PIV 및 입자운동방정식을 이용하여 평판에 충돌하는 원형 난류 충돌분류내의 미립자운동을 규명하고자 한다. 혼상(고체-기체)충돌분류에 의한 미립자 운동은, 동력원의 용량이 비교적 작고, 미립자의 직경선택, 유량조절이 간단하여 국소적으로 높은 열전

달이 가능하기 때문에 캐스케이드 임펙터, 표면처리, 전열촉진, 플라즈마 용사코팅,[4] 농약살포, 내연기관내의 연료분사 등 산업분야에 폭 넓게 이용되고 있다. 미립자를 포함한 기체의 충돌분류는 열역학 및 유체역학적인 관점으로부터 미립자의 질량비, 입경, 노즐과 평판의 충돌거리를 중요 변수로 하여 미립자의 속도 및 온도계산,[5] 미립자와 기체의 상호관계,[6] 미립자의 열전달 매카니즘,[7] 반발입자의 운동궤적,[8] 등의 연구가 진행되고 있다. 하지만, 충돌 미립자의 유동을 규명하기 위하여 정체점 근방의 미립자유동과 수밀도 분포 및 미립자의 반발높이가 충돌영역을 벗어난 미립자의 유동에 관한 정보가 필요하지만 아직까지 예측의 단계에 머물러 있다. 이러한 관점으로부터 본 연구는 노즐출구의 기체유동 (Re=3300 및 8700)에 유리입자(d_p=30, 58, 100㎛)를 혼입하여 노즐로부터 100mm 떨어진 평판에 충돌시켜 충돌영역내외의 미립자 유동현상을 PIV (Particle Image Velocimetory)실험 통하여 분석하였으며, 입자운동방정식을 이용하여 노즐 축 중심의 미립자속도 및 반발높이를 계산하여 PIV실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에, PIV시스템의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험방치는 분류장치, 노즐, 충돌판, DOP발생장치, 유리입자 공급장치로 구성된다. 풍동 시험부는 단면 350×350mm, 길이 850mm의 투명 아크릴로 제작하였으며, 풍동의 상부에 필라민트 스크린과 하부에 팬을 설치하여 풍동내의 분진혼입 제어 및 기체가 풍동 상부에서 수직 하방으로 일정속도를 유지할 수 있도록 하였다. 이 때, 중앙에 설치한 원형노즐에 미량의 미립자를 분출시켜 평판에 충돌시켰다. 분류노즐은 기체를 충분히 발달한 난류상태로 분출시키기 위해 외경 12mm, 내경 10mm, 길이 1000mm의 니켈 원관을 사용하였다.

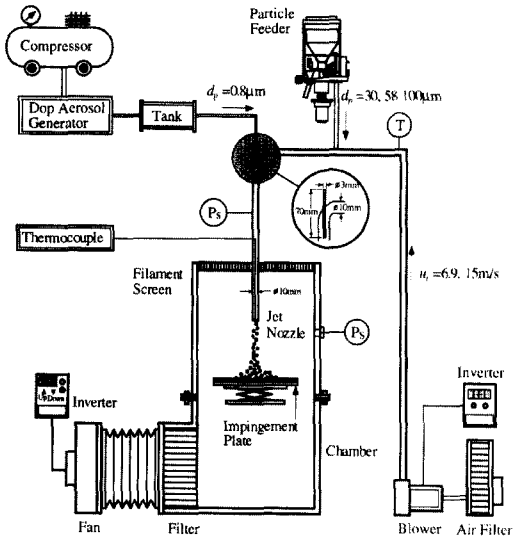

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

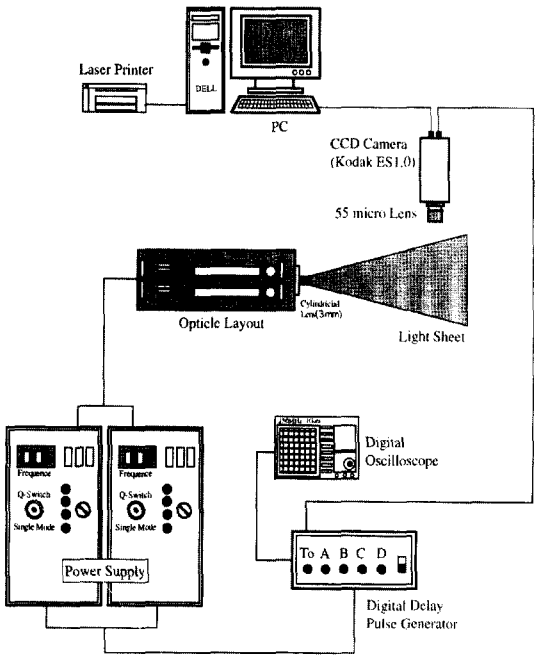

Fig. 2 PIV system consisted of Nd:YA apparatus generator and CCD camera

노즐 출구에서의 기체의 Re수 (3300, 8700)에 대한 입자의 최대속도를 Table 1에 나타내었다 이것은 PIV 실험으로부터 구한 값이다.

Table 1 The initial velocities at nozzle exit

Re	0.8 ㎛	30 ㎛	58 ㎛	100 ㎛
3300	6.9m/s	5.88m/s	5.16m/s	4.50m/s
8700	15m/s	12.36	10.03m/s	8.79m/s

입자의 순간유동을 측정하기 위한 PIV시스템은 YAG레이저(Minilite2-Qswitch, 파장 532nm), CCD 카메라(Kodak-ES1.0), 디지털 딜레이 펄스 발생기로 구성되어 있으며, PIV계산용 화상은 입자의 3차원 유동 및 계산의 정도를 고려하여 입자의 최대 이동거리가 12 Pixel 내에 포함되도록 펄스발생기를 조절하여 빔을 발사하였으며, 화상은 PIV연산 프로그램을 이용하여 속도벡터를 산출하였다. 충돌분류중심과 평판의 교점을 기준으로 하여, 수직 노즐 방향을 χ, 반경방향을 r로 정의하여 데이터를 정리하였다.

3. 미립자

본 실험에 사용된 입자의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 0.8㎛의 DOP(Dioctyl Phthalate) 입자는 28%의 DOP용액에 0.01%의 안트라센(Anthracene, C_6H_4:CH)과 72%의 에탄올(Ethanol, C_2H_5OH)를 첨가하여 제작하였다. 0.8㎛ 입자는 공력응답시간(τ_p)과 기체분류의 대표적 흐름(τ_f)과의 비가 작기 때문에 기체분류의 난류에 충분히 추수할 수 있는 입자로서 기체의 분출속도로 대신할 수 있다. 유리입자(30, 58, 100㎛)는 표준편차가 작고, 단분산 입자이며, 구형률 95%이다. Fig. 3에 본 실험에 사용된 유리입자의 SEM사진을 나타내었다. S_t가 20 이상의 유리입자는 기체에 추수하기 어렵기 때문에 직선에 가까운 궤적운동을 한다고 볼 수 있다.[9]

미립자의 공급량은 미립자간의 간섭 및 미립자 혼입에 따른 기체유동의 변화를 무시할 수 있도록 조절하였다. Shin[10]의 의하면 미립자의 질량유동과 유체질량의 비가 0.3 % 이내이면 미립자가 기체에 영향을 무시할 수 있다고 보고하였

Table 2 Physical properties of particles (d_p=0.8, 30, 58, 100㎛)

Material	d_p (㎛)	ρ (kg/m³)	Mass (kg)	Standard devation
DOP	0.8	0.99	2.65×10^{-16}	1.30
Glass	30	2500	3.53×10^{-11}	1.62
Glass	58	2500	2.83×10^{-10}	2.46
Glass	100	2500	1.30×10^{-9}	2.68

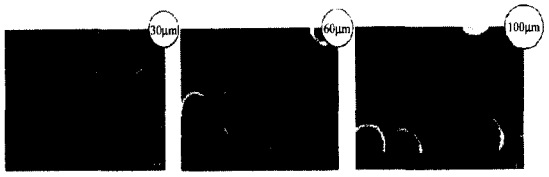

Fig. 3 SEM photograph of the glass beads

으며, 小林[11]은 1.4 %까지는 미립자간의 간섭이 적고, 열선 유속계로 계측한 기체속도 및 혼상류의 기체속도가 동일하다는 실험결과를 보고하였다. 본 연구에서도 미립자 상호간의 충돌 및 입자가 기체에 미치는 영향을 무시할 수 있도록 *Re* 수에 관계없이 질량비(입자질량/공기질량)를 DOP 0.46 %, 유리입자 1.2 %로 각각 공급하여 실험을 행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

PIV 계측시스템과 속도계산프로그램을 이용하여, 충돌미립자의 속도벡터 계산, 충돌분류영역에서의 PIV연산의 타당성 검토 및 문제점을 나타내었다. 프로그램은 계산의 정도향상 및 과오벡터 제거를 위해 농도패턴상관 프로그램에 서브-픽셀 계산 및 표준편차 계산 프로그램을 도입하였다. PIV연산 알고리즘의 검증 및 평가를 위해 인터넷(Http://www.or.jp/piv/image.othml)을 통해 배포된 2차원 PIV 표준화상을 이용하였다.[12] 화상은 콘트라스트 100, 상관 메트릭스 61×61 Pixels, 조사 메트릭스 31×31 Pixels로 하여 PIV

계산을 하였다.

Fig. 4는 Re=3300에 따른 미립자의 속도벡터를 나타내었다. 노즐 축 중심의 경우, 0.8㎛ 입자는 평판에 대하여 수직방향의 속도벡터를 나타내고 있다. 30㎛ 입자는 반경방향의 속도벡터가 일부분 나타나지만, 58, 100㎛ 입자는 평판에 대해서 거의 수직방향의 속도벡터가 나타난다. 정체점 근방의 경우, 0.8㎛ 입자는 반경방향의 속도벡터가 나타난다. 충돌 후, 충돌면을 따라 이동하면서 r/d=5에서 와류의 발생으로 속도벡터가 급격한 방향변화를 나타내고 있다. 30㎛ 입자는 기체의 벽면분류의 영향으로 평판에 대해서 수직 및 수평의 속도벡터가 함께 나타나며, 58㎛ 입자는 노즐내의 벽면과 충돌한 후 반경방향의 속도성분을 가지고 노즐출구에서 분사되어 정체점에 도달한다. 하지만, 100㎛ 입자는 운동량이 크고 기체의 벽면분류의 영향이 작으므로 수직방향의 속도벡터만 나타난다. 30, 58㎛ 입자의 반

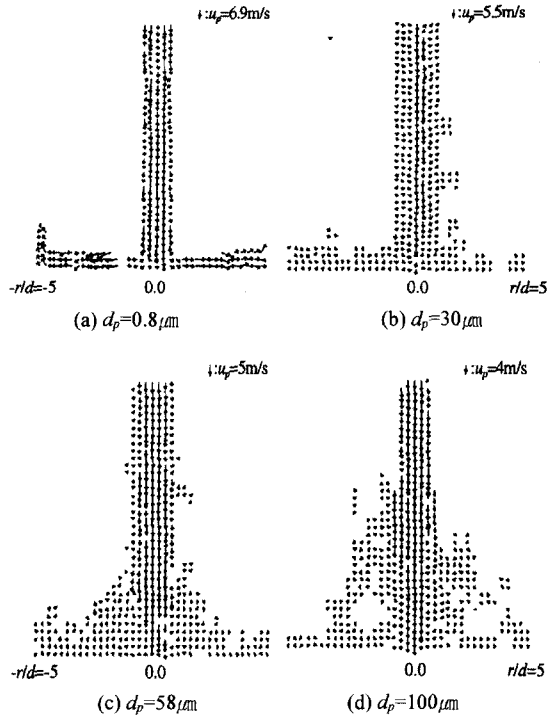

Fig. 4 Particle velocity vectors with Re=3300 for various particle diameters(d_p=0.8, 30, 58, 100㎛)

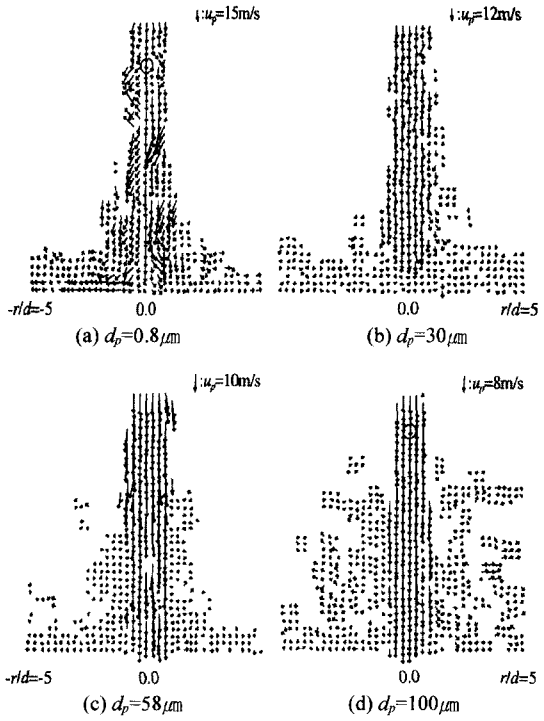

Fig. 5 Particle velocity vectors with Re=8700 for various particle diameters(d_p=0.8, 30, 58, 100㎛)

발 유동은 충돌영역 내에 존재하지만 100㎛ 입자는 운동량이 크고 기체의 벽면분류 영향이 작기 때문에 충돌영역을 벗어나고 있다. 충돌영역을 벗어난 후, 2차 충돌입자는 주위 기체의 엔트라이먼트 영향이 작기 때문에 평판을 향하는 수직성분의 벡터가 전반적으로 나타난다.[8]

Fig. 5는 Re=8700에 따른 입자의 속도벡터를 나타내었다. 0.8㎛ 입자는 충분히 발달한 유동이기 때문에 노즐 출구에서 충돌면까지 반경방향의 속도성분을 가진 벡터가 전반적으로 나타나고 있으며, 충돌면을 따라 횡 방향으로 이동할 때는 입자가 가속되어 노즐출구와 동일한 속도벡터가 나타난다.[13] 노즐 축 중심의 경우, 30㎛ 입자는 S_t가 5.76으로 기체유동의 영향을 받아서 충돌영역으로 이동하면서 반경방향의 속도벡터가 나타나며, 하류로 갈수록 속도벡터의 반경방향 성분이 크게 나타나고 있다. 이러한 이유는 기체의 벽면분류 영향이라 생각된다. 기체의 유동에

동반하기 어려운, 추수성이 나쁜 58, 100㎛ 입자는 S_t가 21, 64, 68이므로 수직방향의 속도벡터만 나타난다.

충돌분류에 대한 PIV연산에서 정체점 근방은 Re 수에 관계없이 충돌하는 입자와 반발입자가 동시에 존재하지만 연산결과는 1차 충돌입자의 속도성분 벡터만 나타난다. 이러한 이유는 정체점 근방의 반발입자의 반발 각이 커서 충돌하는 입자의 수밀도가 높기 때문이라 생각된다. 그리고 정체점으로 부터 멀어진 영역의 경우, 주위기체의 엔트라이먼트 속도와 입자의 운동량에 의해 평판을 향하여 수직으로 2차 충돌하는 속도벡터와 노즐 축 중심을 향하는 속도벡터가 나타난다. 하지만, 입자의 공간 수밀도가 부족하기 때문에 정도가 높은 연산결과를 얻기 어렵다.

Fig. 6은 노즐 축 중심의 미립자 수밀도 분포(개수/단위체적)를 이치화한 화상을 이용하여 나타내었다. 정체점 근방의 속도벡터 방향과 크기는 충돌하는 입자와 반발하는 입자의 수밀도에 의해 변화됨을 알수 있다. Re=3700의 경우 입경에 관계없이 노즐출구로부터 χ/d=2.5까지 일정한 수밀도 분포를 나타내고 있지만 χ/d=0.5에서는 충돌전의 입자와 반발입자가 동시에 존재하기 때문에 입자의 수밀도가 노즐출구보다 약 2.4배 증가함을 나타내고 있다. Re=8700의 30㎛ 미립자는 58, 100㎛ 미립자보다 정체점 근방에서의 급격히 수밀도가 증가하고 있다. 이러한 이유는 미립자의 반발각이 작아서 충돌영역내에 미립자가 분포하기 때문이라 생각된다. 따라서 미립자의 수밀도 분포의 정보로부터 정체점 근방의 반발입자의 수의 예측이 가능하다.

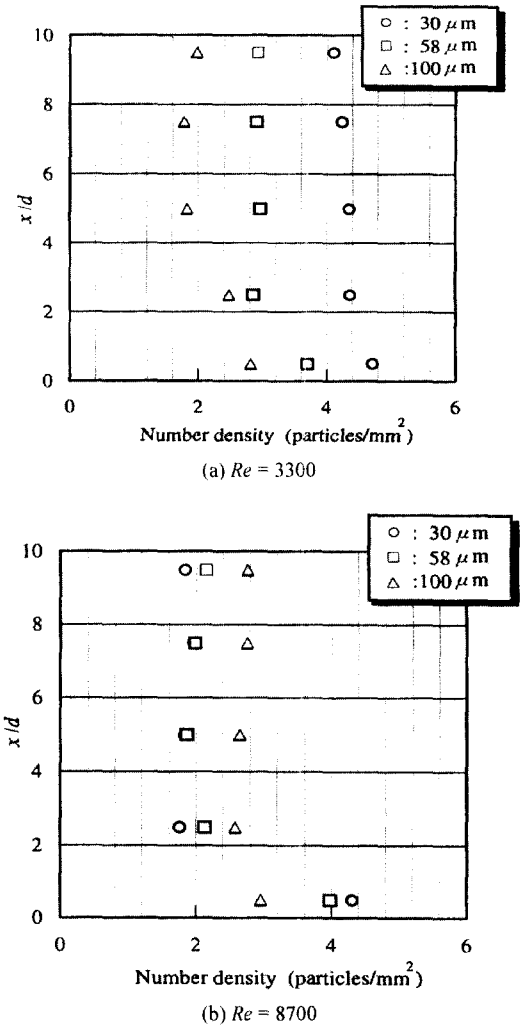

Fig. 6 Particle number density distribution along the jet centerline

5. 충돌 미립자의 운동계산

입자운동방정식을 이용하여 노즐 축 중심속도, 반발속도, 2차 충돌속도를 계산하여, PIV결과와 비교하였다.

5.1 입자운동방정식

유체내에 입자가 운동하는 경우, 입자와 유체간의 속도차가 생기면 입자와 유체는 항력을 받는다. 유체중의 입자운동을 규제하는 것은 입자에 작용하는 중력, 원심력, 전기력 등의 외력과 유체로부터 받는 항력과의 대소이며, 이 관계로부터 입자의 속도 및 유체의 속도가 변화된다. 유체중의 구형입자운동에 대하여 Lagrange법으로 계산하는 Tchen[14]의 입자운동방정식에서 미소항을 생략하고 관성항, Stokes항 및 중력항을 고려한 입자운동방정식을 이용하였다. 방정식은 다음과 같다.

Table 3 Aerodynamic characteristics of particles

Re	d_p(㎛)	u_p (m/s)	τ_p	S_t
3300	0.8	6.90	1.95×10^{-6}	8.47×10^{-4}
	30	5.88	6.86×10^{-5}	2.95
	58	5.16	0.025	10.86
	100	4.50	0.077	33.48
8700	0.8	15	1.95×10^{-6}	1.68×10^{-5}
	30	12.36	6.86×10^{-5}	5.76
	58	10.03	0.025	21.0
	100	8.79	0.077	64.48

$$\frac{\pi}{6}d_p^3\rho_p\frac{du_p}{dt}=C_D\frac{\pi}{8}d_p^2\rho_f|u_f-u_p|(u-u_p)+\frac{\pi}{6}d_p^3(\rho_p-\rho_f)g \quad (1)$$

Stokes항에 의한 입자운동방정식에는 Re수의 유효범위가 작다. 만약 유효범위를 벗어나면 항력이 과소 평가되기 때문에 직경이 큰 입자에 대한 계산의 정도가 저하된다. 따라서 본 계산에서는 이러한 사항을 고려하여 Re수의 유효범위를 크게 한 수정 Stokes항력을 이용하였다. 수정 Stokes 항력계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_D=\frac{24}{|u_f-u_p|d_p/\nu}+\frac{4}{(|u_f-u_p|d_p/\nu)^{1/3}} \quad (2)$$

본 계산에 이용한 미립자의 직경에 따른 출구속도 및 Stokes수를 Table 3에 나타내었다.

5.2 계산결과

Fig. 7은 Re=3300에 따른 미립자의 속도분포를 축방향 χ, 반경방향 r를 노즐직경 d로 각각 무차원하여 나타내었다. 1차 충돌의 경우, 자유분류 영역에서의 기체의 속도는 포텐셜코아가 존재하는 축류노즐[15]과 비교하여 보면, 원관은 노즐출구에서부터 속도감쇠가 일어나는 특징을 잘 나타나고 있다. 그리고 정체점 근방에서 충돌분류의 속도감쇠 곡선은 χ/d=2.3에서 자유분류로부터 벗어나, 급격히 속도가 감쇠하여 정체점에서 0이 된다.

1차 충돌의 경우, 30㎛ 입자는 노즐출구부터 χ/d=8.5까지 가속된 후 χ/d=2에서 급격히 감속하면서 평판과 충돌이 일어나며, 정체점 근방에서의 속도감쇠는 기체와 동일한 경향을 나타내고 있으며 실험결과와 일치하고 있다. 58, 100㎛ 입자는 30㎛ 입자보다 추수성이 나쁘기 때문에 속도감쇠가 서서히 일어난다. 이러한 이유는 기체와 입자의 속도차에 의해 미립자가 가속되기 때문이다.

반발높이의 경우, 정체점의 1차 충돌속도에 의존하지 않고 입경이 클수록 높게 나타나고 있으며 PIV실험 결과와 일치하고 있다. 2차 충돌의

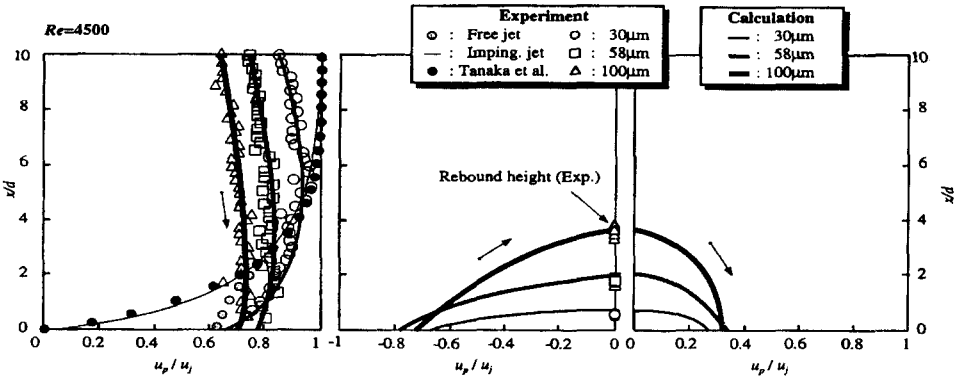

Fig. 7 Particle velocity distribution along the jet centerline for nozzle exit velocity Re=3300, with different particle diameters(d_p=30, 58, 100㎛)

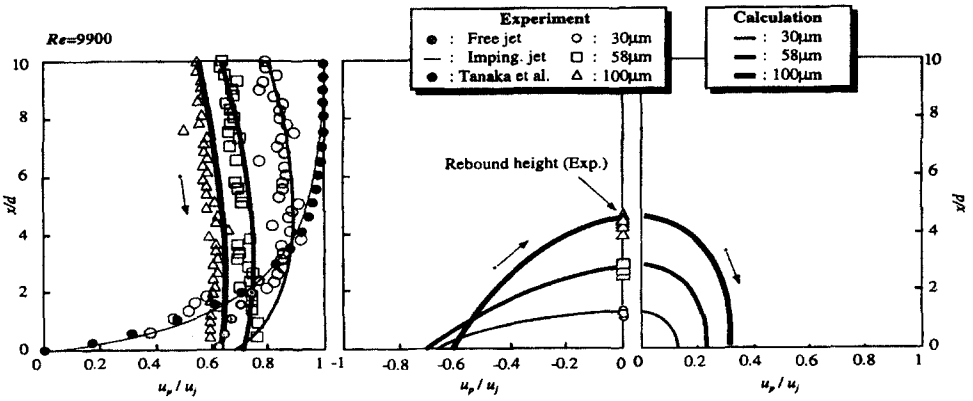

Fig. 8 Particle velocity distribution along the jet center-line for nozzle exit velocity Re=8700, with different particle diameters(d_p=30, 58, 100μm)

경우 30, 58μm 입자는 속도가 χ/d와 함께 증가하면서 평판과 충돌한다. 그러나 100μm 입자는 정체점 근방에서 충분히 가속된 후 평판과 충돌한다. 이것은 미립자의 S_t가 크고 기체로부터 영향이 적기 때문이라 생각된다.

Fig. 8은 Re=8700에 따른 미립자의 속도분포를 나타내고 있다. 1차충돌 및 반발은 Re=3300의 미립자운동과 동일한 경향을 나타내고 있다. 충돌분류 영역내의 30μm 입자는 계산 및 실험결과가 다르게 나타나고 있다. 이러한 이유는 PIV실험에서 반발입자의 수밀도가 크게 나타나기 때문에 정량적인 값을 구할 수 없기 때문이다. 2차 충돌에서 30μm 입자는 정체점 근방에서 속도가 약간 증가하면서 충돌하지만, 58, 100μm 입자는 충분히 가속된 후 일정한 속도를 유지하면서 평판과 충돌한다.

6. 결 론

본 연구는 충돌입자의 운동을 규명하기 위해, PIV을 이용하여 기체의 노즐출구 Re 수(3300, 8700)에 따른 d_p=30, 58, 100μm 입자의 운동을 조사하였으며, 입자운동방정식을 이용하여 노즐 축 중심의 미립자 1, 2차 충돌속도 및 반발높이를 계산하여 PIV 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

6.1 PIV 실험의 경우

1) 30μm 입자는 기체유동에 영향을 받아 정체점 근방에서 반경방향의 속도벡터가 전반적으로 크게 나타나지만, 58μm, 100μm 입자는 추수성이 나쁘기 때문에 수직방향의 속도벡터만 나타난다.

2) 정체점 근방 및 충돌영역을 벗어난 입자 유동의 PIV연산결과는 충돌하는 입자와 반발하는 입자의 공간 수밀도에 의존한다.

6.2 속도계산의 경우

1) 미립자의 1차 충돌에서, 58, 100μm 입자는 30μm 입자와 비교해서, 추수성이 나쁘기 때문에 완만한 속도감쇠가 일어난다.

2) 반발입자의 경우, 30, 58μm 입자는 100μm 입자보다 완만한 속도증가를 나타내고 있으며, 반발높이는 실험결과와 일치한다.

3) 미립자의 2차 충돌의 경우, Re=3300의 미립자는 χ/d와 함께 가속하면서 평판과 충돌하지만 Re=8700의 미립자는 충분히 가속된 후 일정한 속도를 유지하면서 평판과 충돌한다.

참 고 문 헌

1) H. Hayami, D. Chen, T. Koso, "Application of Image Processing Measurement to a Relative

Flow in a Pump-Turbine Runner," Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 2, pp.75-77, 1995.
2) R. Evavarasan, L. Venkatakrishnan, A. Korothapalli and L. Lourenco, "A PIV Study of a Supersonic Jets," Proceeding of VSJ-SPIE98, Japan, Vol.6-9, 1998.
3) K. Kamemoto, H. Okamoto, S. Satiou, S. Ohira, E. Tanka, "Application of a Twinkle-Laser-Sheet Technique for Velocity Measurement in Unsteady Flow Fields," Proceedings of the International Conference on Fluid Dynamic Measurement and its Applications, Beijing, China, pp.25-28, 1989.
4) R. Suyanarayanan, "Plasma Spraying : Theory and Applications," World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1993.
5) 西山 秀哉 大久保 雅章, 宮寺 智之, 神山新一, "粒子を含むプラズマジエツトの熱流動解析," 日本機論(B), Vol.58-547, pp.736-742, 1992.
6) H. Yoshida, K. Suenaga, R. Echigo, "Turbulent Structure and Heat Transfer of a Two- Dimension Impinging jet with Gas-Solid Suspensions," Int. J. Heat Mass Tranfer, Vol.33-5, pp.859-867, 1990.
7) Y. Kurosaki, S. Murasaki, Y. Sahoh, T. Kashiwagi, "Study of Heat Mechanism of a Gas-Solid Suspension Impinging Jet(Affect of Particle Sizes and Thermal Properties)," Heat Tranfer, Vol.5, pp.2587-2592, 1986.
8) 金丙文, 荒巻 森一朗, "平板に衝突する跳返り軌跡," 日本可視化情報, Vol.19, No.1, pp. 41-44, 1999.
9) T. Koso, S. Kitagawa, H. Hayami, "Simulation of Particles Dispersion in the Near-Field of a Turbulent Circular Jet," Proceedings of the 2nd International Conference on Multiphase Flow, April 3-7, Vol.3, pp.9-16, 1995.
10) T. H. Shin, J. L. Lumley, "Second-Order Modeling of Particle Dispersion in a Turbulent Flow," J. fluid Mech, Vol.163, pp.349-359, 1985.
11) 小林 啓信, 松谷 正男, 森田 茂樹, "二次元せん斷流における粒子擧動の檢討", 日本機論(B), Vol.56-528, pp.1349-1349, 1985.
12) 金丙文, 權種完, "濃度패턴을 利用한 相關法의 精度向上 및 平價," 慶一大學校 産業技術研究所 論文集 Vol.6, pp.55-67, 1999.
13) 湯 晋一, 原田 洋, 梅景 俊彦, "平板へ衝突する氣體混層の數値計算," 第28會亂流シンポジウム講演論文集, pp.137-138, 1996.
14) C. M. Tchen, "Mean Value and Correlation Problems Connected with the Motion of Small Particles Suspended in a Turbulent Fluid," Ph. D thesis, 1947.
15) 田中 敏雄, 川合 晴司, 田中 榮一, 井上 吉弘, "圓柱壁面噴流と平板の衝突に關する研究," 日本機論(B), Vol.56-524, pp.56-62, 1990.