

초음속 연마가공 노즐의 성능개선에 관한 연구

곽지영*, 전익준**, 박세은**, 이 열**,#

*한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과, **한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Improvement of the Performance of the Supersonic Abrasive Blasting Nozzle

Ji-Young Kwak*, Ik-Jun Jeon**, Se-Eun Park**, Yeol Lee**,#

*Graduate School, Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, KAU UNIV.,

**School of Aerospace and Mechanical Engineering, KAU UNIV.

(Received 16 September 2015; received in revised form 8 November 2015; accepted 16 December 2015)

ABSTRACT

The dynamics of gas-particle flow from a supersonic abrasive blasting nozzle have been studied by 1-D analytical calculation, including wall friction effects inside the nozzle. The developed code in the present study shows a satisfactory agreement with the other study's results. By utilizing the code, the redesign and optimization of the inner contour of a commercial abrasive blasting nozzle were carried out, and it was found that the redesigned nozzle in the present study can produce faster particle velocities at the nozzle exit by up to 22% compared with the original commercial nozzle.

Key Words : Supersonic Nozzle(초음속 노즐), Abrasive Blasting(연마가공), Particle Acceleration(입자가속), Fanno Flow(Fanno 유동)

기호설명(Nomenclature)

A : 노즐 단면적
A_p : 입자 단면적
D : 노즐 내경
d_p : 입자 직경
f : 마찰계수
M : 마하수
M_{rel} : 상대 마하수
m_p : 입자 질량
r : 반경 방향 좌표

u : 종 방향 유동속도
u_p : 종 방향 입자속도
x : 종 방향 좌표
γ : 기체 비열비

1. 서 론

연마가공(Abrasive Blasting) 장치는 노즐을 통하여 가속된 작은 입자를 노즐 출구 하류에 위치한 작업표면에 충돌시킴으로 구조물 표면의 도료나 이물질 제거, 의치 및 보석의 가공 등 다양한 산업현장에서 응용되고 있다. 관련된 산업규모의 높은 시장가치로 인하여 해당 작업의 효율을 개선하

Corresponding Author : ylee@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0113, Fax: +82-2-3158-2191

고자 하는 많은 연구가 국내외에서 진행되어 왔다. 일반적으로 연마가공의 효율은 단위시간 당 수행된 작업면적으로 평가할 수 있는데, 이와 관련되는 주요 관계변수로는 노즐의 형상과 운용압력 등 노즐설계에 관련된 요소와 연마재의 종류와 크기 등 매우 다양하다.

과거에 진행된 관련분야 연구에서 Settles 등^[1]은 노즐의 내부형상 설계 개선만으로도 연마노즐의 작업성능을 크게 개선할 수 있다고 지적한 바 있다. 또한 스프레이 코팅(용사공정)에 사용되는 유사한 노즐의 유동 및 입자의 거동에 관한 실험과 수치해석적 연구를 통하여 Jodoin^[2]은 노즐 외부에서 발생할 수 있는 충격파로 인한 노즐 운용 마하수의 제한범위를 제시한 바 있다. Li 등^[3]은 노즐설계의 개선을 통하여 짧은 길이의 노즐로도 고밀도의 작업면 코팅이 가능함을 보인 바 있으며, 배한진 등^[4]은 노즐형상 및 운용압력, 입자 강도와 크기, 소비량 등 다양한 조건에 대한 현장실험을 통하여 작업성능 개선방법을 제시한 바 있다. 이민욱 등^[5]은 초음속 유동 내 입자크기에 따른 속도발달에 관한 수치해석적 연구를, 권의혁 등^[6]은 2차원 노즐의 압력 및 온도 변화에 따른 작업면 충돌입자의 거동을 수치해석적으로 관찰한 바 있다.

이러한 연마가공 효율개선의 높은 시장가치와 파급성, 그리고 과거 진행된 다양한 조건에서의 입자거동에 관한 연구에도 불구하고, 노즐설계의 기초적 단계에서 항공우주공학적인 이론 적용에 한계가 있어 왔다. Settles^[7,8]는 노즐 내부형상이 노즐출구에서 유출하는 연마용 입자의 속도에 미치는 영향에 관한 연구에서, 구형 입자에 작용하는 항력은 노즐 내부 유동속도와 입자속도와의 차이에서 정의되는 상대 마하수가 1.4 근처일 때 최대값을 갖고 이때 노즐 유동에 의한 입자의 가속

이 크다는 논지를 근거로 간단한 노즐설계 지침을 제시한 바 있다.

산업현장에서 응용되는 많은 연마노즐은 초음속 유동 조건에서 운용되며, 유동이 노즐 내부에서 초음속으로 흐를 때 내부벽면에서 나타나는 마찰효과(Fanno 유동)^[9]를 무시하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 노즐 내부에서 나타나는 벽면 마찰효과를 1차원 유동해석 기법에 반영하여 그 영향성을 추가로 평가하였다. 이에 개발된 코드를 사용하여 초음속 노즐 내부유동과 입자의 거동을 평가하고, 이를 통하여 노즐출구에서의 입자속도를 최대화 시킬 수 있는 노즐 내부형상을 설계하고 그 개선점을 정량적으로 평가하여 보았다.

2. 입자거동의 해석방법

2.1 1차원 해석코드

다음 Fig. 1에는 본 연구를 통하여 얻어진 노즐 내부유동 및 입자거동을 해석하는 코드를 검증하기 위하여 사용된 노즐의 형상이 나타나 있다. 설계마하수가 2.2인 초음속 수축-확대 노즐의 형상은 Settles 등^[8]의 연구에서 사용한 일정 목면적부를 가지는 노즐형상을 이용하였다. 노즐내부 공기 유동(비열비 1.4)은 이상기체를 가정하고, 노즐 전압은 완전팽창에 가까운 790kPa, 노즐 전온은 292K, 노즐외부는 대기압으로 가정하였다.

노즐 내부 중 방향을 따라 총 300개의 계산점에 대하여 1차원 유동의 속도변화를 공기역학 이론^[9]을 이용하여 얻어내고, 이를 통하여 단일 구형(sphere) 입자에 작용하는 항력을 평가하여 입자의 후방 속도발달을 계산하는 방법을 사용하였다. 이를 위하여 각 계산점에서의 레이놀즈수(Re)를 평가하고, 그 조건에 맞는 항력계수(C_d)와 항력을 평가한 후 입자의 가속 및 속도를 계산하였다. 입자의 운동계산에 사용된 항력계수의 평가는 다음 식 (1)에 주어진 단일 구형 입자에 대한 경험식^[10]을 사용하였다. 이 식에서 레이놀즈수는 유동속도와 입자속도의 차이에 의하여 정의되는 상대 레이놀즈수이며 그 정의가 다음 식 (2)에 제시되어 있다.

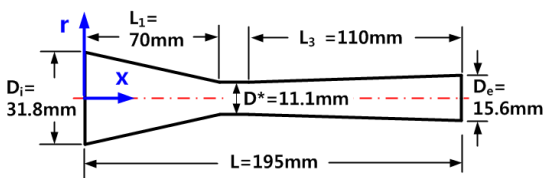


Fig. 1 Schematic of the nozzle (not to scale)

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (1)$$

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (2)$$

위 식에서 a_1, a_2, a_3 는 상수^[10], ρ, μ 는 각각 노즐 내부유동의 밀도와 점성계수를 나타낸다.

2.2 노즐 벽면 마찰의 영향

초음속 내부유동에서 나타나는 벽면마찰 효과를 평가하여 본 연구에 개발된 해석코드에 반영하였다. 마찰이 있는 노즐 내부의 1차원 이상기체 유동에 근거하여 연속방정식과 운동방정식을 정리하면 다음 식 (3)이 얻어지고(Fanno 유동)^[9], 이를 초음속 유동이 나타나는 노즐 확대부에 적용하였다. 노즐 내부 각 계산점에서의 상태량 평가에 기준이 되는 마하수 계산은 식 (3)을 4차 Runge-Kutta 방법으로 얻어내었으며, 이후 기체역학 이론을 사용하여 다른 상태량의 값을 각 계산점에 대하여 얻어내었다.

$$\frac{1}{2} \gamma M^2 \frac{f}{D} = \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} + \frac{2(1-M^2)}{M[2+(\gamma-1)M^2]} \frac{dM}{dx} \quad (3)$$

여기서 M 은 유동 마하수, A 는 노즐 단면적, f 는 마찰계수, D 는 노즐 내경을 의미한다.

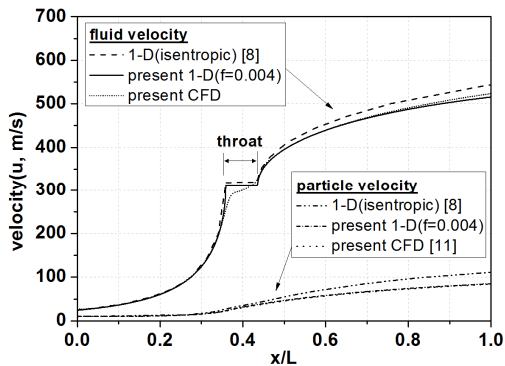


Fig. 2 Air-particle velocities inside the nozzle

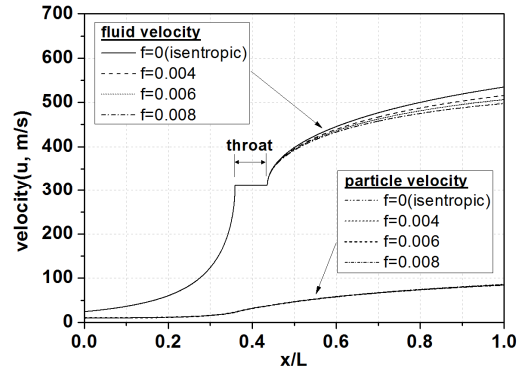


Fig. 3 Effects of the friction coefficient on the flow and the particle velocities

3. 결과 및 고찰

3.1 해석코드의 검증

본 연구에서 개발한 해석코드의 검증을 위하여, 그 계산결과를 동일한 경계조건에서 수행된 과거 연구결과^[8]와 비교하였으며, 그 결과가 다음 Fig. 2에 제시되어 있다. 유동전압이 790kPa, 노즐 내벽 마찰계수(f)가 0.004, 구형입자의 크기가 817 μ m, 밀도는 7,600kg/m³(steel grit G40 기준)로 주어질 때 얻어진 본 연구의 계산결과는, 과거 연구결과^[8]와 노즐출구에서의 유동 및 입자 속도에서 각각 약 5%, 약 23%정도 과소평가되고 있다. 그러나 과거 연구결과는 마찰을 고려하지 않은 등엔트로피 조건에서 계산되어 마찰이 고려된 본 연구결과와의 직접적인 비교에는 한계가 있었고, 따라서 별도로 진행된 노즐 내부유동의 수치해석적 결과^[11]와 추가 비교되었다. Fig. 2에서 제시된 바와 같이 본 연구의 1차원 해석결과는 노즐 중심축에서의 수치해석적 결과와 약 1% 이내에서 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구의 경우처럼 유동의 마찰효과를 고려하고 입자의 올바른 항력평가를 한다면, 간단한 1차원 노즐유동 계산으로도 수치해석적 결과(CFD)에서 얻어지는 입자거동을 쉽게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

다음 Fig. 3에서는 본 연구의 해석코드를 이용하여 노즐 내벽의 마찰계수가 유동과 입자속도 발달에 미치는 영향을 비교하여 나타내고 있다. 마

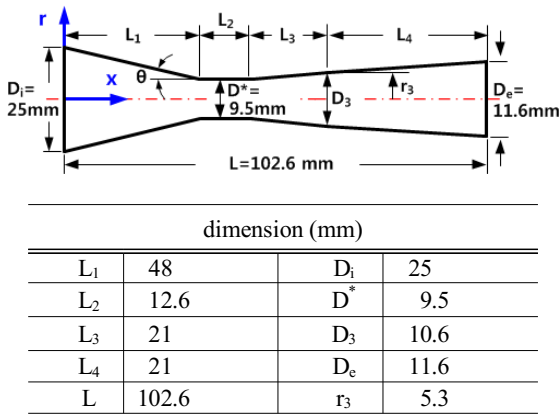


Fig. 4 Nozzle geometry (B6M4-F, Kennametal)

찰계수가 증가함에 따라 노즐출구에서의 유동속도가 감소하는 것이 관찰되었다. 즉 마찰계수가 0.008인 조건에서 얻어진 노즐출구 유동속도는 등엔트로피 조건에서 얻어진 것과 비교하여 약 7% 감소하여, 유동속도에 미치는 마찰계수의 영향성이 무시할 수 없음을 알 수 있다. 그러나 본 연구의 조건에서 마찰계수 변화가 노즐 입자속도에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 확인되었다.

3.2 노즐형상 변화에 따른 입자속도

초음속 노즐에서 노즐입구에서 노즐목까지 이르는 수축부(converging)의 형상은 유동 및 입자거동의 변화에 미치는 영향이 상대적으로 적다. 이에 따라 노즐 확대부(diverging) 형상변화가 노즐출구에서의 입자속도 변화에 미치는 영향에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 본 연구를 통하여 개발된 코드가 적용된 상용 연마노즐은 Kennametal사의 B6M4-F 노즐(이하 기준노즐, reference nozzle)이며, 해당 노즐의 자세한 형상정보가 다음 Fig. 4에 제시되어 있다.

노즐의 형상변수는 Fig. 4에 나타난 표와 같이 노즐의 총 길이(L), 노즐목(D*)과 노즐 출구직경(D_e) 등 여러 가지가 있는데, 제시된 상용노즐의 개선을 위한 본 연구의 수정노즐(modified nozzle)의 형상변화 범위는 노즐입구 직경(D_i)와 노즐목(D*), 그리고 노즐출구 직경(D_e)이 고정된 조건을 설정하여 기준노즐의 설계 마하수(1.85)가 변화하

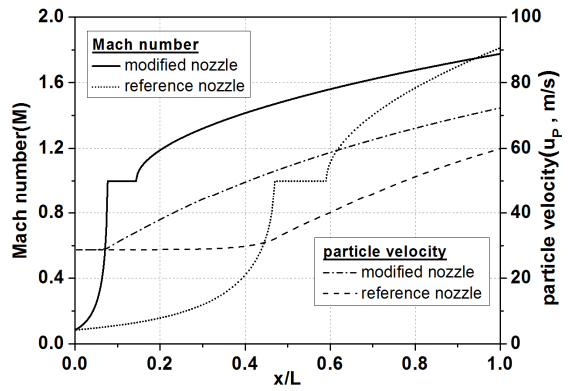


Fig. 5 Effect of the longer diverging section

지 않는 조건을 정하였다. 유동속도가 그리 크지 않아 입자가속에 큰 도움을 주지 못하는 노즐 수축부의 길이(L₁)는 줄이고 그에 따라 늘어난 노즐 확대부를 두 구간으로 나누어 각각의 경우에 유동과 입자의 거동 변화를 살펴보았다. 따라서 본 연구의 경우 수정노즐 형상에 관한 직접적인 변수는 수축부의 길이 L₁, 확대부 길이 L₃와 L₄, 그리고 해당 각 구간의 확장각에 영향을 주는 반경 r₃가 될 수 있다. 아울러 노즐의 운용조건은 노즐이 완전팽창 하는 조건에 맞추어 유동 전압이 620kPa, 유동 온도가 292K이며, 연마재 입자는 817μm, 밀도는 7,600kg/m³(steel grit G40 기준)로 설정하였다.

3.2.1. 확대부 길이의 증가 영향

기준노즐과의 비교를 위해 설계 마하수 및 노즐 총 길이(L)를 일정하게 고정시킬 때, 노즐의 확대부의 길이가 확장되도록 수축부의 길이를 축소하였다. Chin 등^[12]이 제시한 연구결과를 참고하여, 유동의 가속 특성이 손상되지 않는 최대 수축각도(θ) = 45°(Fig. 4 참조)를 설정하여 확대부의 길이를 최대한 확보하였다. 이때 일정 단면적을 갖는 노즐목의 길이(L₂)는 기존 12.6mm에서 7mm로 축소하였다. 이러한 확대부 형상변화를 갖는 수정노즐에서 나타나는 유동마하수와 입자속도 변화가 다음 Fig. 5에 나타나 있다. 노즐 총 길이가 같은 조건에서 확대부 길이의 증가만으로 입자의 가속은 급격하게 증가하여 입자의 출구속도는 기준노즐과 비교하여 약 21% 상승함을 알 수 있다. 또

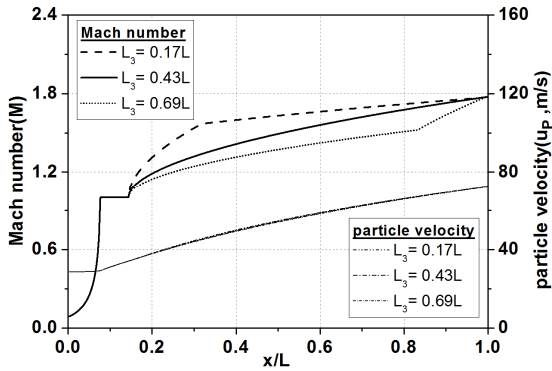
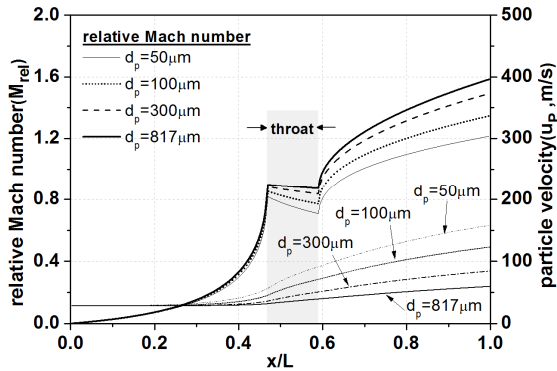
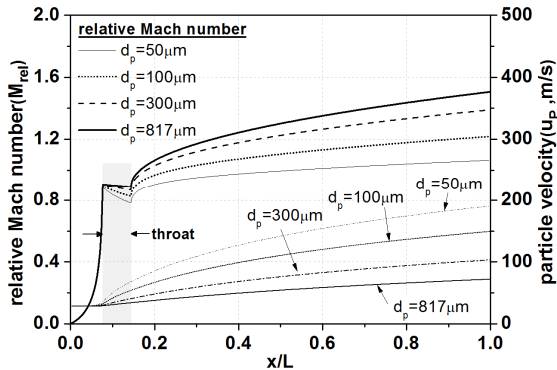


Fig. 6 Mach number and particle velocity for various combination of L3 and L4



(a) Reference nozzle



(b) Modified nozzle

Fig. 7 Relative Mach number and particle velocity for various particle sizes

한 노즐출구에서의 유동마하수는 마찰의 영향에도 불구하고 기준노즐과 수정노즐 사이의 설계마하수

(1.85)에서 큰 차이를 보이지 않고 있다.

3.2.2. 확대부 각 구간길이의 변화 영향

두 개로 나누어진 확대부 구간의 형상변화 따른 입자가속의 특성을 관찰하기 위해, 전술된 확대부의 길이가 88mm(0.86L)로 고정된 조건에서 세 가지 L_3 에 대한 ($L_3=0.17L, 0.43L, 0.69L$) 1차원 해석이 수행되었다. 이때 L_3 가 0.43L인 조건은 Fig. 5에 나타난 수정노즐의 형상과 일치한다. L_3 와 L_4 구간의 확장각에 영향을 주는 r_3 는 5.3mm로 고정되었고, 이는 별도의 해석결과 r_3 의 크기변화가 유동 및 입자가속에 미치는 영향이 매우 작음(최대 2% 이내)이 확인되었기 때문이다. 해석결과 얻어진 유동 마하수와 연마재 입자의 속도변화가 다음 Fig. 6에 비교되어 있다. L_3 가 짧은 조건($L_3=0.17L$)에서 유동의 마하수가 다른 조건보다 빠르게 상승하여 입자와의 상대속도 차이가 큰 영역이 넓게 형성되어 있다. 그러나 세 가지 L_3 조건에서 연마재 입자의 속도변화는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 입자크기가 상대적으로 큰 ($817\mu\text{m}$) 현재 조건에서 두 개의 확대부 구간의 형상변화가 유동속도에는 어느 정도 영향을 주나 입자의 가속에까지 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 다음 식 (4)에 제시된 구형 입자의 가속 방정식을 보면 입자가속은 상대속도 ($u-u_p$) 뿐만 아니라 유동밀도 ρ 와 직접적으로 관련되고 있다. 노즐 확대부에서 나타나는 초음속 유동의 특성상 유동밀도가 후방으로 감소되므로, 상대속도 증가와 밀도 감소는 입자가속에 서로 상충되는 영향을 주게 된다. 이에 따라 작은 유동속도 변화가 제한된 구간에서 상대적으로 큰 ($817\mu\text{m}$) 입자가속에 미치는 영향은 크지 않다.

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F = C_d A_p \frac{\rho}{2} (u - u_p)^2 \quad (4)$$

3.3 입자직경에 따른 입자가속도 변화

3.3.1 입자크기(d_p) 변화의 영향

Fig. 7에는 기준노즐(Fig. 7-(a))과 수정노즐(Fig. 7-(b)) 두 경우에 대하여 동일한 밀도를 가진 연마

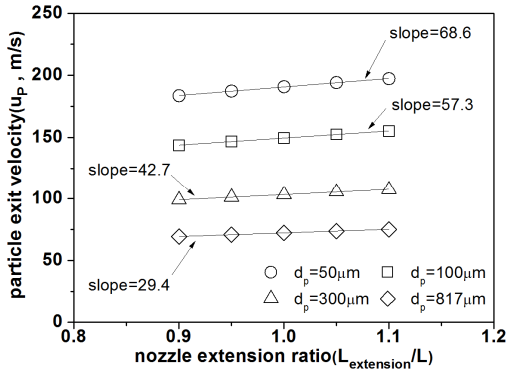


Fig. 8 The particle velocity at the nozzle exit for extended nozzle length

제 입자크기가 각각 50 μm , 100 μm , 300 μm , 817 μm 크기로 변화할 때 노즐 내부에서의 입자속도와 상대마하수(M_{rel}) 변화가 비교되어 있다. 수정노즐은 기준노즐에 비하여 입자의 상대마하수가 1.4에 도달하는 지점이 노즐 상류로 이동되어, Settles^[8]가 지적한 대로 입자가속에 도움이 되고 있음을 알 수 있다. 또한 연마재 입자의 크기가 작아질수록 입자의 가속은 증가하고 노즐출구에서의 입자속도도 커지는 것을 알 수 있다. 기준노즐과 수정노즐의 비교에서, 노즐출구에서의 입자속도 개선(증가)은 최대 약 22% 증가하는 것으로 나타났다.

3.3.2 입자크기(d_p)와 노즐길이(L)의 영향

수정노즐에 대하여 출구직경(D_o), 수축부(L_1)와 일정 목면적부(L_2)가 일정한 조건에서, 노즐 확대부의 길이를 변화시켜 노즐 총 길이(L)가 변화하는 경우 입자크기에 따른 입자 출구속도를 비교하였으며, 그 결과가 Fig. 8에 제시되어 있다. Fig. 8에서 노즐의 총 길이가 늘어남에 따라 연마재 입자는 충분한 가속영역을 확보하게 되어 입자의 출구속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 여기서 유동은 마찰의 영향을 받아 노즐출구 속도가 소폭 감소하는데 그 감소의 폭은 10% 길이 증가변화에 대비하여 약 0.3% 감소를 보여주어 그 차이는 크지 않다. Fig. 8에는 노즐 총 길이와 노즐출구에서의 입자속도 변화에 대한 선형회귀분석 결과가 같이 제시되어 있다. 입자크기가 작을수록 노즐 길이변화에 따른 입자 출구속도 증가 기울기가 커져, 입자직경이 작을수록

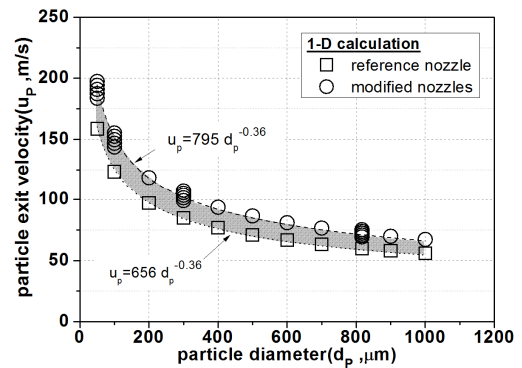


Fig. 9 Correlation of the particle diameter and the particle exit velocity

노즐길이 변화에 따른 입자 출구속도가 민감하게 변화하는 것이 확인되었다.

3.3.3 입자직경과 입자 출구속도의 상관관계

과거 연구결과^[13]를 보면, 연마노즐에 대한 입자 직경(d_p)과 입자 출구속도(u_p)의 경험적 상관관계가 다음 식 (5)와 같이 제시된 바 있다.

$$u_p \propto d_p^{-0.36} \quad (5)$$

본 연구에서 얻어진 기준노즐과 수정노즐에서의 다양한 입자직경에 따른 입자 출구속도를 분석하여 식 (5)에 제시된 과거 상관관계식과의 비교가 수행되었다. 특히 수정노즐의 경우에는 노즐 총 길이 변화에 관한 결과까지 포함되었다. 다양한 노즐 형상에 관한 상관관계 결과가 다음 Fig. 9에 제시되어 있다. 본 연구의 노즐형상 조건에서 얻어진 각각의 1차원 코드결과는 식 (5)에 제시된 기존 상관관계식과 잘 일치하고 있음이 확인되었다.

4. 결론

초음속 노즐유동에서 쉽게 무시할 수 없는 벽면마찰 효과가 추가 고려된 1차원 유동해석 기법을 이용하여 노즐 내부에서의 유동 및 입자거동이 해석되었다. 노즐 출구에서의 입자속도를 최대화

시킬 수 있는 노즐 내부형상 설계에 관한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 노즐 전체 길이가 일정한 조건에서 노즐 확대부 길이의 비율증대에 따라 입자 출구속도가 최대 약 22% 향상될 수 있음이 관찰되었다.

(2) 동일한 확대부 길이와 노즐출구 면적비를 갖는 조건에서 확대부의 형상변화에 따른 입자의 출구속도 변화는 2% 이내로 나타나 확대부에서의 형상변화가 입자 출구속도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 확인되었다.

(3) 노즐 확대부 길이가 증가하는 본 연구의 조건에서, 입자의 출구속도 증가비율은 입자크기가 작을수록 크게 나타난다.

(4) 본 연구의 기준노즐과 수정노즐에 대하여 입자직경과 노즐출구에서의 속도변화는 과거 연구에서 제시된 상관관계식과 잘 일치하고 있다.

후 기

“이 논문의 일부 내용은 2015년도 한국연구재단의 기본연구지원사업(과제번호: 2014R1A1A2058320) 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

- Settles, G. S. and Garg, S., “A Scientific View of the Productivity of Abrasive Blasting Nozzles,” *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 35-41, 1996.
- Jodoin, B., “Cold Spray Nozzle Mach Number Limitation,” *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 496-507, 2002.
- Li, W. Y. and Li, C. J., “Optimal design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space,” *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 14, No. 3, pp. 391-396, 2005.
- Bae, H. J., Baek, J. J., Lee, C. S., Shin, C. S., Lee, B. H., Shin, S. R., Baek, K. K. and Kim, K. S., “Improving Blasting Productivity by Optimizing Operation Parameters,” *Journal of Protective Coating and Linings*, Vol. 24, No. 11, 2007.
- Lee, M. W., Yoon, S. G., and Kim, H. Y., “Numerical study on characteristics of particle velocity with various particle size in the supersonic flow,” *Proceedings of KSME 2009 Fall Annual Meeting*, 2009.
- Kwon, E. H., Cho, S. H., Han, J. W., Lee, C. H., and Kim, H. J., “Particle Behavior in Supersonic Flow during the Cold Spray Process,” *Metals and Materials International*, Vol. 11, No. 5, pp. 377-381, 2005.
- Settles, G. S., “Abrasive Blast Cleaning Nozzle,” *US Patent-5,975,996*, 1999.
- Settles, G. S. and Geppert, S. T., “Redesigning Blasting Nozzles to Improve Productivity,” *J. of Protective Coatings and Linings*, Vol. 13, pp. 64-72, 1996.
- John, J. E., and Keith, T. G., *Gas Dynamics*, 3rd ed., Prentice Hall, pp. 311, 2006.
- Morsi, S. and Alexander, A. J., “An Investigation of Particle Trajectories in Two Phase Flow Systems,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 55, No.2, pp. 193-208, 1972.
- Jeon, I. J., Park, S. E., Lee, Y., “Study on the Behavior of Particles in the Abrasive Blasting Nozzle,” *Fall Conference of Korean Society of Propulsion Engineers*, 2015.
- Chin, J. S. and Lefebvre, A. H., “A Design Procedure for Effervescent Atomizers.” *ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, pp. V03BT16A093 - V03BT16A093, 1993.
- Momber, A., *Blast Cleaning Technology*, Springer, pp.75, 2008.