

2상 유동에 의한 로켓 노즐 마모 특성에 대한 고찰

김완식* · 유만선* · 조형희** · 배주찬***

Effects of Two Phase Flow on Erosion Characteristic in a Rocket Nozzle

W.S. Kim* · M.S. Yu* · H.H. Cho** · J.C. Bae***

ABSTRACT

A numerical analysis of two phase flow in the solid rocket nozzle was conducted. Stoke number was defined over the various aluminum oxide(Al_2O_3) particle sizes and particle trajectories were treated by Lagrangian approach. Particle stability was considered by the definition of Weber number in a rocket nozzle. Large particles are divided after the nozzle throat as the flow accelerates rapidly. The division of particles changes the particle distribution at the nozzle exit. From the above results, it was found that the nozzle converge section surface might be affected by aluminum oxide particles. Also, Mechanical erosion rate of nozzle surface was predicted for different materials.

초 록

본 논문에서는 고체 로켓 노즐 내부의 2상유동 및 노즐 표면 마모 특성에 관하여 수치적으로 연구하였다. 로켓 노즐 내부의 연소 가스에 포함된 여러 가지 크기의 산화알루미늄 입자에 대해서 Stoke 수를 정의하고, 입자의 궤적을 라그랑지안 방법을 통하여 추적 및 분석하였다. 아울러 Weber 수를 정의하여 산화알루미늄 입자의 안정성을 고찰하였다. 큰 입자들은 유동의 급가속에 의하여 노즐목을 통과한 후 분리되었다. 이와같이 분리된 입자들은 노즐 출구에서의 입자분포를 크게 변화시켰다. 위와 같은 계산 결과로부터 노즐벽의 수축부분은 산화 알루미늄 입자의 영향을 받을 수 있는 가능성이 있음을 확인하였다. 그리고 입자가 노즐벽면과 충돌시에 발생하게되는 노즐 표면의 기계적 마모 현상을 예측하였다.

* 연세대학교 대학원 (Yonsei University, Graduate School)

** 연세대학교 기계공학과 (Yonsei University, Dept. of Mechanical Eng.)

*** 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

기호 설명

C_S : 미끄럼 보정계수
 C_D : 항력계수
 C_P : 산화알루미늄 입자 비열 (1,419 J/Kg · K)
 D_0 : 특성길이
 d_P : 입자 상용직경 [m]
 e_γ : 입자 표면 수직 탄성계수
 h : 엔탈피
 L : 노즐목 길이(2 cm)
 Ma : 마하수 ($\sqrt{\gamma RT/a}$)
 m : 산화알루미늄 입자의 질량
 ($\rho P \cdot \pi \cdot d_P^3/6$)
 P : 유체 압력 [Pa]
 q : 입자에 의한 노즐 표면으로의 열전달량
 [W/m²]
 r : 노즐 반경방향 좌표
 R : 기체상수
 Re_P : 국소 입자 Reynolds 수
 ($\frac{d_P |\vec{v}_P - \vec{v}|}{\nu}$)
 Stk : Stoke 수
 T : 유체 온도[K]
 T_P : 입자 온도[K]
 T_W : 노즐 내부벽 표면 온도[K]
 t : 시간
 u : 유동 속도 x-방향 성분
 v : 유동 속도 y-방향 성분
 \vec{v} : 유동 속도 벡터
 \vec{v}_P : 입자 속도 벡터
 V : 입자 유입속도
 \vec{V} : 무차원 유동속도 벡터 (\vec{v}/V)
 \vec{V}_P : 무차원 입자속도 벡터 (\vec{v}_P/V)
 We : Weber 수
 γ : 비열비
 θ : 무차원 시간 ($\frac{tV}{D_0}$)
 μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 ρ : 유체 밀도

ρ_p : 입자 밀도
 σ : Al₂O₃의 표면장력

1. 서 론

고체 추진제로 추진되는 로켓의 경우, 추력벡터를 효과적으로 제어하여 로켓 발사 초기에 비행체의 자세 설정 및 조정 안정성을 확보하는 것이 매우 중요한 요소이다. 이러한 추력벡터를 제어 할 때에는 로켓 노즐에 간단한 구조물의 설치로 추력벡터를 제어할 수 있는 방법이 필수적인데, 실용적인 제어 방법으로서 제트베인(jet vane)이 일반적으로 많이 이용되어지며, 실제적으로는 Sidewinder 공대공, Seasparrow 함대공, Javelin 대전차 미사일등에 사용되어졌으며, 우주 개발용 로켓 등에도 적용되어진다. 그런데 제트베인 등의 추력벡터 조절 장치의 경우는 노즐 내부로 돌출되어 있어서 로켓 추진시 발생하는 고온·고압의 연소가스와 로켓 추진체의 연소시 발생하는 산화알루미늄 입자(Al₂O₃ particles)의 영향으로 삭마(ablation)되기 때문에 로켓의 발사 초기 추력 제어 성능을 저하시키는 주요한 원인이 된다¹⁾.

이러한 추력 벡터 조절 장치의 삭마량을 예측하기 위해서는 로켓 모터 작동시에 로켓 노즐 내부에서 발생하는 2상유동(연소가스-산화알루미늄 입자)의 특성을 이해하는 것이 필수적인 요소이며, 특히 고온·고속으로 운동하며 금속성분을 가진 산화알루미늄의 운동 특성을 예측하는 것이 매우 중요하다. 실제로 로켓 연소가스에서 산화알루미늄 입자는 약 20%의 물분율을 차지하는 것으로 알려져 있다. 또한 고체 추진제 로켓의 연소시에 발생하는 산화알루미늄 입자는, 연소 가스와 입자간의 비평형 상태와 속도 및 열적 차이에 의해서, 로켓 노즐내부 유동의 효율적 팽창과정을 저하시키는 요소로서 작용한다고 Johnston²⁾ 등이 보고하였다. 또한 추진제 연소시에 발생하는 산화알루미늄 입자는 높은 열과 큰 운동량을 가지고 로켓 노즐 내부를 유동하게 되며, 고온·고속의 유체 내부에서 유동하는 입자는 일반적으로 액적 상태로 존재하게 된다. 이러한 액적은 표면 장력과 유동과 액적간의 속도차이에 의한 항력에 의해

서 상대적으로 큰 액적에서 작은 액적으로 분리되므로 액적의 유동 궤적이 상대적으로 상당히 변화되게 되며, 노즐의 출구부분에 설치되는 제트베인, 스포일러 탭 등의 노즐 내부 돌출물에 충돌·고착할 가능성이 높아지게 된다. 이와 같은 입자들이 금속 성분과 함께 고온 고속으로 노즐 벽면이나 기타 구조물(제트베인, 스포일러 탭 등)에 충돌 및 고착할 경우, 앞에서도 언급한 것처럼 열적 삭마나 기계적 마모 등에 의한 노즐 표면 및 추력 방향 제어장치 등의 파손으로 인해서 로켓의 방향 제어 및 조정 안정성을 저하시키고 로켓 구조물을 약화시키게 된다³⁾.

따라서 본 연구에서는 노즐내부의 2상유동 특성 및 열적 특성을 이해하기 위하여 로켓 노즐 내부의 연소 부산물(산화알루미늄 입자)들의 이동 경로와 충돌 및 고착 위치, 입자의 분리현상에 따른 궤적 추적, 노즐 표면에서의 입자충돌에 따른 에너지 전달 특성 등을 수치 해석적으로 연구하였다. 또한 기존의 실험자료를 바탕으로 노즐 벽면에서의 기계적 마모특성을 수치적으로 예측하여 노즐 내부의 구조물에 대한 산화알루미늄 입자의 영향을 종합적으로 고려할 수 있도록 하였다⁴⁾.

2. 수치해석 방법

노즐 내부로 유입되는 입자 대 작동 유체의 질량비가 1보다 작을 경우에는 입자가 유동에 미치는 영향이 무시할 정도로 적기 때문에, 본 연구에서는 노즐내부에서의 유동을 완전히 수립시켜 얻어낸 다음 유동장에서 입자를 부유시켜서 궤적을 추적하는 Lagrangian 수치해석 방법을 적용하였다.

2.1 유동수치해석

SIMPLER 방법⁵⁾을 이용하여 수치 계산을 수행하였다. 노즐 유동을 계산시에는 노즐 입구의 가스 유입 속도를 65 m/s, 입구 압력은 6900KPa, 가스 온도는 실제의 경우와 비슷하도록 3550K로 가정하여 로켓 노즐 내부에서의 유동을 계산하였다.

계산에 사용된 노즐은 C. J. Hwang⁶⁾등이 사용한 ASME-standard 노즐을 기본으로 하였으며, 계산 영역은 Fig. 1과 같다. 노즐 입구 부분에서는

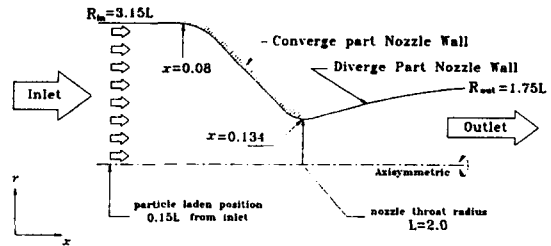


Fig. 1 Calculation Domain.

연소가스에 포함된 입자 부유시에, 입자의 유동을 안정적으로 가속시키기 위해서, 노즐의 수축부로부터 상류 방향으로 1.65L만큼 확장시켜 계산하였으며, 또한 하류 부분의 확대 노즐 부분은 경사충격파를 방지함과 동시에, 노즐의 확산부 초기 부분에서 흐름의 급팽창을 발생하도록 하고, 출구 부분에서는 균일하고 평행한 축방향의 흐름을 얻기 위해서 이상벨 노즐(ideal bell nozzle)을 적용하였다.

2.2 입자수치해석

입자 궤적의 추적은 Lagrangian 방법을 적용하여, 노즐 내부로 부유된 입자 궤적을 추적하였다^{7,8)}. 입자 궤적 계산에는 유동에 대한 입자의 항력이 지배적이므로 속도 구배가 큰 곳에서도 입자의 항력을 계산할 수 있는 입자 유동 방정식을 채택하였다. 계산에 있어서 입자는 완전 구형으로 가정하였으며, 입자의 유동 방정식은 다음과 같다^{7,8)}.

$$\frac{d\vec{V}_p}{d\theta} = C_D \frac{Re_p}{24 Stk} (\vec{V}_p - \vec{V}) \quad (1)$$

연소된 산화알루미늄 입자의 단위 부피당 질량⁶⁾은 실제의 산화알루미늄 입자의 경우인 1,900 Kg/m³로 적용하였다. 또한 입자의 초기 부유 위치를 Fig. 1에서처럼 하여, 노즐 수축부의 급격한 가속 유동으로부터 영향을 받지 않도록 하였다. 노즐의 중심 축을 지나는 입자를 고려할 수 있도록 입자 궤적 계산시에도 축대칭 조건을 적용하였다. 자세한 입자 부유의 위치는 Fig. 1에 표시되어져 있다.

일반적으로 입자 거동을 추적하기 위한 무차원 변수로서 Stoke 수는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Stk} = \frac{\rho_P d_P^2 V C_S}{18 \mu D_0} \quad (2)$$

노즐 내부 유동의 경우, 작동 유체의 유입 속도와 입자의 초기 부유속도는 모두의 경우에 대해서 65m/s로 고정되어 있고, 다른 변수들도 일정한 값을 사용하기 때문에, 본 연구에서의 Stoke 수는 입자의 크기에 대한 매개변수이다.

노즐 내부에 존재하는 산화알루미늄 입자는 고온의 연소가스로 인해서 일반적으로 액적 상태로 존재하게 된다. 따라서 로켓 노즐내부의 2상유동에 있어서 유동 속도와 유동에 포함된 액적의 속도 차가 커짐에 따라서 상대적으로 큰 액적의 표면에서는, 유동과 액적간의 마찰력이 표면장력보다 커지는 경우가 발생하게 되는데, 이러한 경우에는 큰 액적이 상대적으로 더 작은 액적으로 분리되게 된다. 이러한 액적의 안정성을 판별할 수 있는 Weber 수는 다음과 같이 정의 된다.

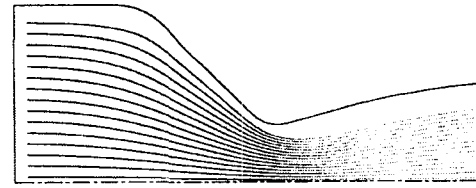
$$\text{We} = \frac{\rho_F [(u - u_P)^2 + (v - v_P)^2] d_P}{\sigma} \quad (3)$$

여기서 로켓 노즐에서의 액적 안정성 판별에 사용된 산화알루미늄(Al_2O_3) 액적의 표면 장력은 약 438 dyne/cm 정도²⁾인 것으로 알려져 있다. $\text{We} > 16$ 일 경우는 액적이 매우 불안정해지며, 크기가 큰 액적은 상대적으로 작은 액적으로 분리되게 된다.

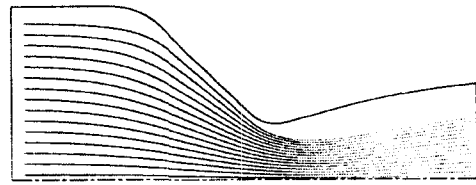
3. 결과 및 해석

3.1 입자 궤적 추적

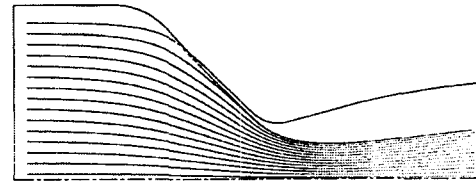
Fig. 2에서 보여지는 것처럼 계산의 대상이 되어진 경우는 $\text{Stk} = 0.0292, 0.115, 0.456, 1.81, 11.3$ ($d_P = 5, 10, 20, 40, 100 \mu\text{m}$)로 모두 5가지로 하였다. Fig. 2(a)에서 보여지는 것처럼 입자의 크기가 가장 작은 $\text{Stk} = 0.0292$ 인 경우는 입자들이 유선을 잘 따르는 궤적의 양상을 나타내고 있다. 이것은 입자의 크기가 매우 작으므로 입자가 작은 관성력을 가지고 있기 때문이다. 또한 노즐목을 지난 후에는



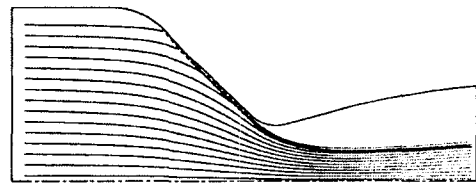
(a) $\text{Stk} = 0.292$ ($5 \mu\text{m}$)



(b) $\text{Stk} = 0.115$ ($10 \mu\text{m}$)



(c) $\text{Stk} = 0.456$ ($20 \mu\text{m}$)



(d) $\text{Stk} = 1.81$ ($40 \mu\text{m}$) (slip)



(e) $\text{Stk} = 11.3$ ($100 \mu\text{m}$) (slip)

Fig. 2 Particle trajectories.

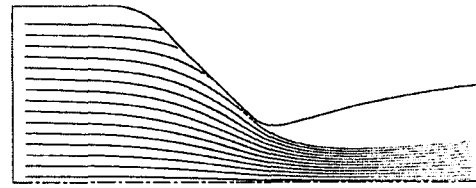
유동 속도가 $\text{Ma} > 1$ 이 되므로 입자의 속도가 급격히 증가하기 때문에, 입자 궤적에서 볼 수 있는 것처럼 노즐 수축부(아음속부)의 입자 궤적에 비해서 확산

부 노즐 부분에서는 입자의 궤적이 상대적으로 흐리게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 $Stk=0.115$ 인 경우를 나타내는데, $Stk=0.0292$ 인 경우에 비해서 노즐의 확산부분(초음속부)에서 입자가 존재하지 않는 지역인 입자자유지역(particle free zone)이 약간 넓어진 것을 볼 수 있다. 이것은 입자들이 유선을 따르는 궤적을 보이지 못하고 유선을 이탈하는 양상을 보이기 시작하게 되는 것이다.

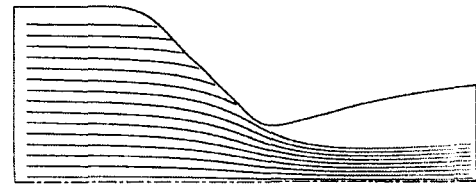
Fig. 2(c)는 $Stk=0.456$ 인 경우를 보여주고 있다. 입자의 크기가 $20 \mu m$ 정도에서는 노즐의 수축부 벽에 충돌하는 입자가 발생하는 것을 볼 수 있다. 부유된 입자 모두가 수축부분 노즐벽에 충돌하는 것은 아니지만, 노즐 중심으로부터 가장 멀리 떨어진 곳에서 부유된 입자는 노즐벽에 충돌하는 입자 궤적의 양상을 보여주고 있다. 이것은 노즐의 수축부에서 입자의 관성력으로 인해서 부유된 입자가 유선을 이탈하여 진행되기 때문이다. 또한 입자자유지역도 상당히 넓어진 것을 알 수 있으며, 확산부 노즐 부분에서 입자의 속도 분포도 수축부의 궤적에 비교하여 궤적 농도가 크게 감소하지 않는 것으로 미루어 입자의 크기가 커지면 가속정도가 상당히 낮아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 2(d), (e)에서 볼 수 있듯이 입자의 크기가 증가함에 따라서 수축부분의 노즐벽으로 충돌하는 입자가 더욱 증가한다. 이것은 위에서 설명한 것과 같은 원인으로, 관성력이 입자 유동에 더욱 지배적인 요소인 것을 나타내는 것이다. 또한 노즐의 중심부를 통과한 입자는 고속 유동의 영향을 받아서 노즐의 출구 부분에서 노즐의 벽근처 보다는 중심부에 집중되어 노즐 출구를 빠져나갈 것으로 예상된다.

Fig. 2(f), (g)는 부유된 입자가 노즐 수축부에 충돌시 점착하였을 경우를 고려하여 $Stk=1.81, 11.3$ 인 입자크기에 대해 나타낸 것이다. Fig. 2(f), (g)로부터 노즐 표면에 점착하는 입자의 양은 입자의 크기가 클수록 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 크기가 큰 입자일수록 자체의 관성 때문에 유선을 따르는 곡선형태의 궤적보다는 초기 부유시에 가지고 있던 수평방향의 궤적을 유지하게되어 노즐 수축부에 충돌할 가능성이 커지기 때문이다. 이와 같은 고속, 고온의 입자 점착 현상은 노즐 수축부에 기계적, 열적 에너지 전달을 발생시켜, Fig. 2(d), (e)에 보



(f) $Stk=1.81 (40 \mu m)$ (adhesion)



(g) $Stk=11.3 (100 \mu m)$ (adhesion)

Fig. 2 Particle trajectories.

이는 입자의 충격량 전달보다 노즐 표면에 더 큰 손실을 가져오게 된다.

3.2 입자안정성 판별 및 분리현상

앞절에서 언급한 것과 같이 노즐 내부의 산화알루미늄 입자는 액적 상태로 고온·고속의 유동 내부에 존재하는데, 이런 경우 유동과의 속도차이로 인한 입자 분리현상이 발생하게 되며, 이를 판별하기 위한 매개변수인 Weber 수 분포는 Fig. 3과 같다. 노즐목($X/L=0$)을 지나면서 유동의 급격한 가속에 따라서 입자의 속도와 유동의 속도가 급격한 차이를 보이게 되며, 본 연구에서는 입자의 크기가 대략 $d_p > 50 \mu m$ 이면 입자의 분리 현상이 발생하게 된다. 본 연구에서는 입자가 유동과의 속도차이에 의해서 2개로 분리되는 것으로 가정하여 정성적으로 모사하였다. 이러한 가정은 실험값 등이 주어지면 실제현상을 예측할 수 있도록 전산 코드를 작성하였다.

Fig. 4에서는 $Stk=11.3$ 인 경우에 대해서 입자 분리 현상을 고려하여 입자궤적을 추적한 경우를 보여주고 있다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 노즐목을 지난 직후인 $Ma=1$ 부근에서 $We > 16$ 이 되므로 입자가 분리되며, 분리된 후에는 일정 각도로 분리·운동하는 것을 알 수 있다. 또한 부유된 위치에 따라서도 분리 궤적이 서로 다른 것을 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 분리현상은 분리현상이 고려되지 않았

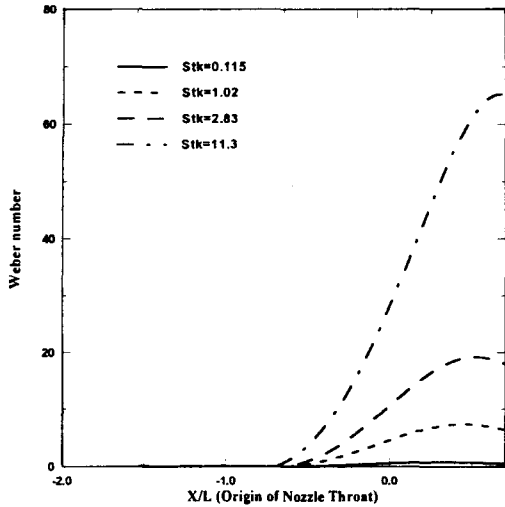


Fig. 3 Weber number distribution of laden droplets.



Fig. 4 Droplet trajectories for $Stk=11.3$ ($d_p=100 \mu m$).

을 때보다 입자자유지역(particle free zone)의 크기를 크게 감소시켜서 노즐 내부에 설치되는 각종 구조물(제트베인, 스포일러 탭 등)에 주는 부정적인 영향을 증가시킬 수 있다⁹⁾.

3.3 입자 충돌각도 및 충격량

Fig. 5은 $Stk=0.456, 1.02, 1.81, 2.83$ ($d_p=20, 30, 40, 50 \mu m$)에 대한 노즐 수축부 벽면으로의 충돌 각도를 나타내고 있다. Fig. 5에서 가로축도는 Fig. 1의 수축부 노즐 벽면(Converge part nozzle wall)을 의미하며($x=0.08$:노즐출구, $x=0.134$:노즐목), 세로축도는 이 벽면으로의 입자충돌각을 의미한다. Fig. 5에서 볼 수 있는 것처럼 입자의 크기가 매우 작을 경우인 $Stk=0.456$ 에서는 충돌 각도가 노즐목 부분으로 접근함에 따라서 점차로 충돌 각도가 0° 로 접근하고 있다. 이것은 노즐목 부근에서는 입

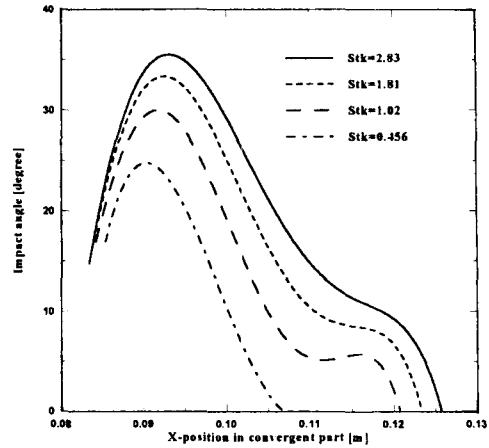


Fig. 5 Impact angle in convergent part.

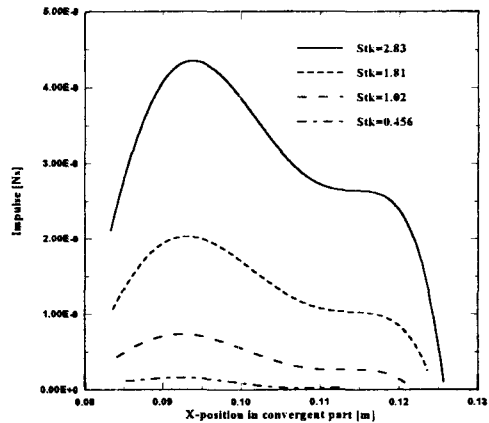


Fig. 6 Impulse in convergent part.

자들이 유선을 따르는 궤적의 양상을 보이기 때문에 노즐 경사 기울기와 거의 동일하게 운동하는 것을 의미하는 것이다. 그리고 충돌각이 최대를 보이는 경우는 충돌이 발생하는 위치에서 입자가 유동을 따르지 못하고 유선을 이탈하여, 노즐벽에 최대 충돌각도로 충돌하는 것을 나타낸다. 입자의 크기가 커짐에 따라서 충돌각도 또한 점차적으로 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 $Stk=0.456, 1.02, 1.81, 2.83$ ($d_p=20, 30, 40, 50 \mu m$)에 대한 노즐 수축부 벽면으로의 입자 충돌시, 전달되는 충격량을 나타내고 있다. 충격량 계산시에는 충돌 입자 속도 성분 중 벽면에 수직인 속도 벡터를 이용하였는데, 입자 충돌 후에는 노

즐 벽 표면을 따르는 미끄럼 모델을 적용하여 충돌 후 수직 속도는 0으로 가정하였다.

각 입자 크기에 따른 운동량 계산 결과는 수축부 노즐 벽면 위의 2곳에서 극대점이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 입자의 크기에 따라서 그 정도가 다르기는 하지만, 경향은 일정한 것을 알 수 있다. 우선 $x=0.10$ 에서의 최대값은 Fig. 5에서 볼 수 있는 것과 같이 최대 충돌각이 발생하는 부분이므로 표면에 대한 수직 속도 벡터의 절대값이 최대가 되기 때문에 발생한다. 두 번째 극점이 나타나는 노즐 목 근처인 $x=0.12$ 부근에서는 각도의 영향으로 생각하기는 어렵고, 노즐목 부근에서 유동의 급가속에 따른 입자 운동 속도의 급격한 증가가 주요한 원인으로 생각된다. 따라서 이 두 부분들에서의 노즐 표면 파손이 다른 부분에 비해서 상대적으로 많을 것으로 예측할 수 있다.

3.4 입자충돌밀도 및 운동에너지 전달

Fig. 7는 노즐 수축부 벽에서 $Stk=0.456, 1.02, 1.81, 2.83$ ($d_p=20, 30, 40, 50 \mu m$)에 대한 노즐 벽면으로의 충돌 위치에서의 충돌 입자에 의한 운동에너지를 나타내고 있다.

Fig. 7에서 볼 수 있는 것처럼, 운동에너지는 노즐 목 부근(상류)에서 입자 크기에 관계없이 크게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 운동에너지가 입자의 운동 속도의 제곱에 비례하기 때문에, 노즐목 부근에서 높은 가속정도로 인한 운동에너지의

급격한 증가에 기인한다.

Fig. 7에서 볼 수 있는 특이한 점은 노즐목 근처에서는 운동에너지의 급격한 증가가 발생하지만, 노즐목 부근을 제외한 수축부분 노즐벽의 상류부근에서는 운동에너지의 양이 거의 일정한 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 Fig. 6에서 보여주듯이 운동량이 $x=0.10$ 에서의 극대점 이후 감소하지만 입자 속도는 가속되므로 운동에너지량은 일정하게 유지되기 때문으로 생각할 수 있다.

입자의 유동 및 벽면으로의 충돌 현상은 통계적인 방법에 의해서 실제 현상을 모사할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 수축부 노즐 표면에서의 입자 충돌 확률을 계산하기 위해서 입자 충돌밀도^(10,11)를 구하였다. 여기서 얻은 입자 충돌밀도는 각 위치에서 충돌 가능성을 비교하기 위한 상대적인 값이다.

본 연구에서는 $Stk=0.456, 1.02, 1.81, 2.83$ ($d_p=20, 30, 40, 50 \mu m$)에 대하여 입자 충돌밀도를 계산하였다. Fig. 8에서 볼 수 있는 것처럼 가로 척도는 노즐 수축부분(Converge part nozzle wall)의 x 좌표를 나타낸 것이고, 세로척도는 충돌밀도를 나타내고 있다.

Fig. 8에서 볼 수 있는 것처럼 충돌밀도는 $x=0.095$ 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 이것은 다른 부분에 비해서 이 부근에 상대적으로 더욱 많은 입자들이 충돌 및 고착될 수 있는 경향을 나타내고 있는 것이다. 이는 노즐의 수축 시작 위치에서 입자들이 관성력에 지배적으로 영향을 받아서 유동

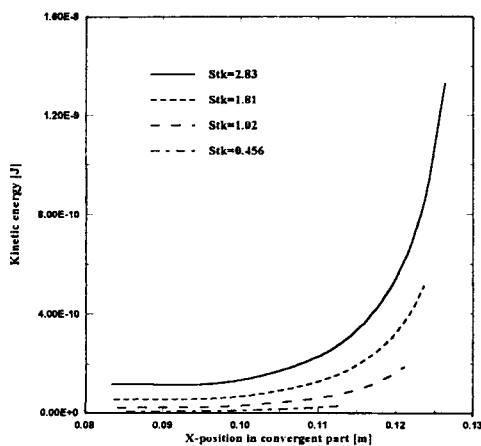


Fig. 7 Kinetic energy transfer in convergent part.

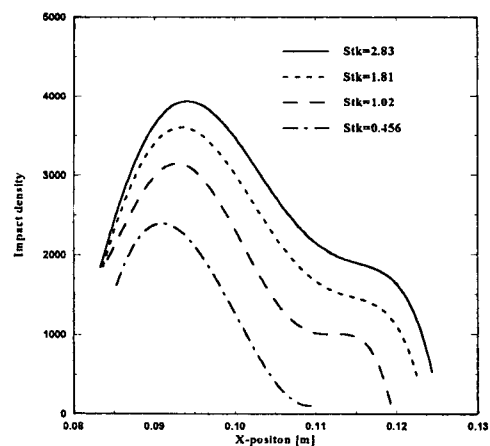


Fig. 8 Droplet Impact density in convergent part.

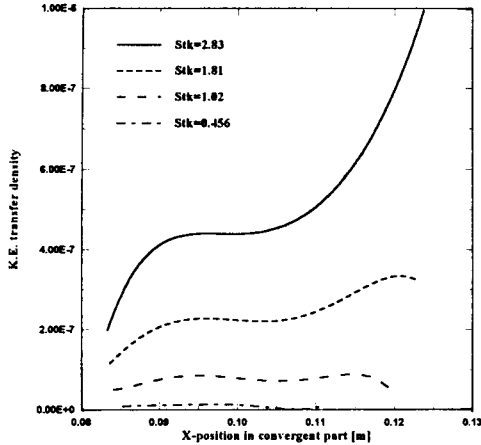
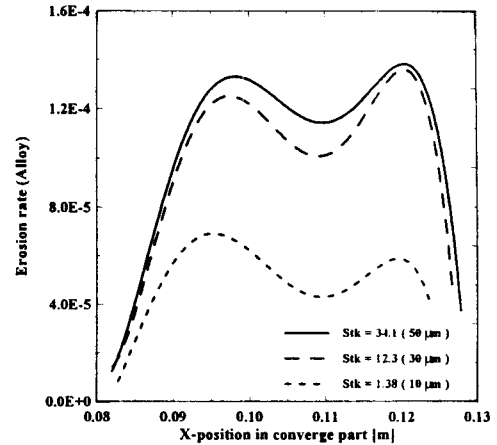


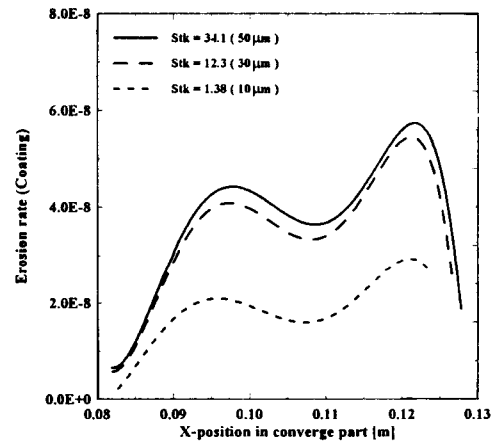
Fig. 9 Kinetic energy transfer density in convergent part.

의 유선에서 이탈하는 경향을 나타내기 때문이다. 노즐목 부근에서는 충돌밀도가 크게 감소하는데, 이것은 입자들이 유선을 따르는 운동 양상을 가지며, 노즐 목 부근에서 급가속 됨에 따라서 입자들이 노즐 중심부로 집중되는 현상이 발생하기 때문이다. 또한 입자의 크기에 따른 충돌밀도는 입자의 크기가 증가함에 따라서 다소 증가하는 경향을 보이며, 보다 더 넓은 영역에 걸쳐서 많은 개수의 입자들이 충돌하게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 9은 앞에서 구한 노즐 표면으로의 운동에너지 전달량에 입자충돌 밀도 분포를 반영한 것이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 입자 크기가 큰 $Stk=1.81, 2.83$ 인 경우는 노즐목 근처에서 최대 에너지 전달분포를 보이고 있는데 이는 유동장내에서 관성에 의한 입자의 수평적 거동으로 인하여 노즐목 가까운 지점에서도 노즐벽으로의 입자 충돌 분포가 존재하게 되고, 노즐 목 지점에서의 급가속에 의한 입자의 큰 운동에너지가 곱하여짐으로써 얻어지는 결과라고 생각할 수 있다. 반면에 입자 크기가 상대적으로 작은 $Stk=0.456, 1.02$ 의 경우는 노즐 수축부 전체적으로 큰 변화없이 균등한 에너지 전달분포를 보이고 있는데, 이는 노즐 목 근처에서의 낮은 입자 충돌 분포와 함께 입자 운동에너지가 수축부의 다른 지점과 큰 차이를 보이고 있지 않기 때문이라고 생각된다.



(a) Alloy material



(b) Coating material

Fig. 10 Erosion rate of two materials in convergent part nozzle.

3.5 노즐표면 기계적 삭마

본 연구에서는 수치계산 모델의 타당성 검증을 위하여 실제 노즐에 사용되는 재질은 아니지만 마모특성을 알고있는 내열 합금재와 세라믹 코팅재에 대하여 기계적 마모 특성을 고찰하였다.

수축부 노즐 표면에서의 마모율은 Fig. 10(a)와 (b)에 나타나 있다. 합금재의 경우는 마모율이 $x=0.10$ 과 $x=0.12$ 의 두 부분에서 최대를 보이고 있다. 즉, $x=0.10$ 에서의 마모율 최대값은 큰 충돌각도로 수축부 노즐벽에 충돌하기 때문이며, $x=0.12$ 에서의 마모율 최대값은 노즐목 부근에서의 급격한 가속에 따른 입자 속도의 영향에 따른 것이다.

또한 Stoke 수가 증가함에 따라서(입자의 크기가 커짐에 따라서) 마모율도 크게 증가되는 것을 알 수 있다. 코팅재의 경우는 10^{-8} order로서 10^{-4} order의 합금재에 비해서 마모율이 상당히 낮아지는 것을 알 수 있다. 마모 경향은 합금재와 유사한 경향을 보이고 있지만, 코팅재의 경우 각도의 영향보다는 노즐목 부근에서의 속도의 영향을 더욱 많이 받는 것으로 판단할 수 있다. 코팅재의 경우에서도 입자의 크기가 증가함에 따라서(Stoke 수가 증가함에 따라서) 마모율이 증가되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

고체 추진제 로켓 내부의 2상유동에 대한 수치적, 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 산화알루미늄 입자의 유동 양상은 입자의 무게, 즉 Stoke 수가 지배적인 요소임을 알 수 있었다.
2. 산화알루미늄 입자의 충돌 각도가 수축부 노즐의 특정 위치에서 극대값을 보이는 부분이 나타났다. 충돌 입자에 의한 운동량 변화는 충돌 각도에 의한 영향과 노즐목 근처에서의 유동 급가속에 의한 영향으로 노즐 수축부 벽면 두지점에서 극대값을 나타내는 경향을 보이고 있다.
3. 입자의 안정성을 조사해본 결과, 본 연구에 사용된 노즐의 경우 노즐목 하류 부분에서 입자들의 분리 현상이 관찰되었으며, 노즐 출구부분에 설치될 추력 벡터 조정 장치에 부정적인 영향을 줄 수 있다.
4. 충돌 입자에 의한 수축부 노즐 표면으로의 충격량 및 운동에너지 전달량이 계산되어졌으며, 입자 충돌 분포가 운동에너지 전달량과 함께 고려되어 입자 크기에 따라 노즐 수축부에서의 에너지 전달 경향에 차이가 있음을 알게 되었다.

후 기

본 연구는 1998년도 국방과학연구소 기초연구비

(과제번호: ADD-98-5-4) 지원에 의해 수행된 결과이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김대인, 전승배, 김승우, 1998, "Jet Vane이 장착된 TVC용 초음속 노즐의 3D 유동 해석", 제8차 유도무기 학술대회 추진기관분야 논문집, pp. 120~127.
2. W. A. Johnston, J. W. Murdock, S. Koshigoe, P. T. Than, 1995, "Slag Accumulation in the Titan Solid Rocket Motor Upgrade," J. of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 5, pp. 1012~1020.
3. V. Mironov, 1998, Seminar on Jet Vane Thrust Vector Control System.
4. 김완식, 조형희, 배주찬, 1999, "로켓 노즐 내부에서의 이상유동 및 노즐표면의 삭마특성", 제9차 유도무기 학술대회 기체/발사대 및 체계분야 논문집 pp. 131~138.
5. K. C. Karki, S. V. Patankar, 1988, "Calculation Procedure for Viscous Incompressible Flows in Complex Geometries," Numerical Heat Transfer, Vol. 14, pp. 295~307.
6. C. J. Hwang, 1988, "Numerical Study of Gas-Particle Flow in a Solid Rocket Nozzle," AIAA Journal Vol. 26, No. 6, pp. 682~689.
7. S. Michael James, 1987, "Numerical Prediction of Fluid and Particle Motions in Flow Past Tubes," University of California Berkeley, Ph. D thesis.
8. Friedlander, S. K., 1977, "Smoke, Dust and Haze," Wiley-Interscience, New York.
9. 김완식, 조형희, 배주찬, 1999, "고체 로켓 노즐에서 2상유동에 의한 충돌에너지 특성 연구", 한국항공우주학회 '99 춘계학술발표회 논문집, pp. 318~322.
10. 조형희, 이재근, 박호동, 사태원, 1998, "분체 이

송관내 압력조절을 위한 오리피스 주위에서의 입자유동 및 마모해석”, 대한기계학회 논문집 B, 제22권, 제11호, pp. 1499~1508.

11. 김완식, 조형희, 1998, “터빈 익렬 주위에서의 부유 입자 유동 해석,” 한국추진공학회지, 제2권, 제2호, pp. 14~23.