

## 터빈익렬 유로에서 2상유동에 따른 삭마량 예측

유만선\* · 김완식\* · 조형희\*\*

### Prediction of Erosion Rate in Passages of a Turbine Cascade with Two-Phase flow

Man Sun Yu\*, Wan Sik Kim\*, Hyung Hee Cho\*\*

Key Words: Two-phase flow(이상유동), Turbine cascade(터빈 익렬), Rocket nozzle(로켓 노즐), Particle trajectory(입자궤적)

#### ABSTRACT

The present study investigates numerically particle laden flow through compressor cascades and a rocket nozzle. Engines are affected by various particles which are suspending in the atmosphere. Especially in the case of aircraft aviating in volcanic, industrial and desert region including many particles, each components of engine system are damaged severely. That damage modes are erosion of compressor blading and rotor path components, partial or total blockage of cooling passage and engine control system degradation. Numerical prediction and experimental data, erosion rates are predicted for two materials - ceramic, soft metal - on compressor blade surface. Aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) particles included in solid rocket propellant make ablative the rocket motor nozzle and impeded the expansion processes of propulsion. By the definition of particle deposition efficiency, characteristics of particles impaction are considered quantitatively. Stoke number is defined over the various particle sizes and particle trajectories are treated by Lagrangian approach. Particle stability is considered by definition of Weber number in rocket nozzle and particle breakup and evaporation is simulated in a rocket nozzle.

#### 1. 서 론

2상유동은 고속으로 작동하는 각종 기계들 예를 들면, 가스터빈, 로켓노즐, Hard Disk와 같은 장치들의 작동환경에서 고려되어야 할 조건이다.

항공기용 가스터빈 엔진의 경우, 전반부에 여과기 설치가 불가능한 관계로 대기중을 떠다니는 이물질의

유입을 피할 수가 없다. 특히, 화산 지역, 먼지 입자 부유물이 많은 공업지대 또는 사막지역 등에서는 모래 알갱이, 먼지, 및 연소 입자와 같은 비교적 큰 질량을 갖는 이물질들이 고속으로 터빈에 유입되어 터빈 성능 저하 및 냉각통로의 막힘, 압축기와 터빈 날개의 손상 등을 발생시킨다.<sup>(1)</sup> 이러한 손상들은 초기에는 미세하게 발생하지만, 손상 정도가 점점 누적됨에 따라서 항공기의 안전 운전에 심각한 위험 요소로써 작용할 수 있으며, 경제적으로도 기관의 유지보수비용의 증가를 가져 올 수 있다. 따라서, 2상유동 수치해석으로부터

\* 연세대 대학원

\*\* 연세대학교 기계공학과

장치내에 유입된 입자의 거동을 예측함으로써 손상부위 및 그 정도를 파악하는 것이 필요하다.<sup>(2,3)</sup>

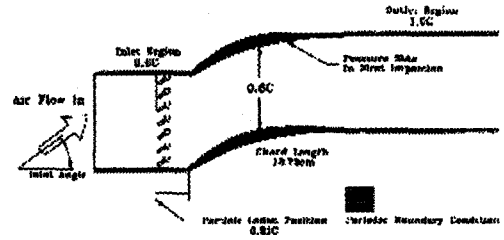
고체 추진로켓의 경우 추력 증가를 위하여 추진제에 알루미늄 분말을 함유시키고 있다. 이 알루미늄 분말은 연소시 산화알루미늄( $Al_2O_3$ ) 액적을 형성하게 되는데, 이 고온의 액적은 연소가스에 부유되어 유동하면서 로켓 노즐 벽면 및 후방에 설치된 제트 배인등의 물출물에 큰 손실을 주게 된다. 그러므로 로켓 노즐내에서 2상 유동 해석 및 삭마량 예측은 운전중인 로켓모터의 성능 예측 및 추력 제어에 필요하며, 이는 로켓 노즐 및 제트배인 설계에 중요한 인자이다. 고체 로켓 모터에서 산화알루미늄 입자는 연소가스 중에서 약 20%의 물분율을 차지하는 것으로 알려져 있다. 대형 고체 로켓의 경우 잠입노즐(submerged nozzle) 입구 부분에 축적되는 많은 양의 산화알루미늄 입자 때문에 추력이 크게 저하된다. 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 작용할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 2상유동 모델 적용의 두 가지 사례인 터빈 압축기와 고체 로켓 노즐부에 대하여 수치해석을 수행하여 보았고, 얻어진 결과를 통하여 장치내의 국부적인 마모특성에 대하여도 살펴보았다.

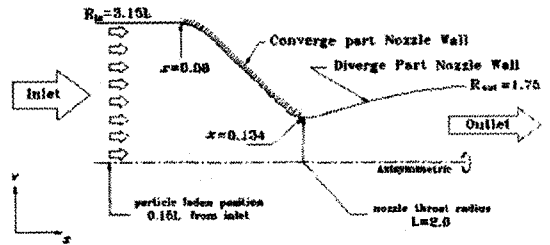
## 2. 수치해석 기법

노즐 내부로 유입되는 연소가스와 입자의 질량비가 1보다 작을 경우에는 입자가 유동에 미치는 영향이 적기 때문에, 본 연구에서는 먼저 노즐내부의 유동장을 해석한 후, 계산된 유동장에 입자를 부유시켜서 그 궤적을 추적하는 Lagrangian 수치해석방법을 수행하였다.

유동장은 SIMPLER 알고리즘을 사용하였으며, 터빈 압축기의 경우 Low Reynolds Number  $k-\epsilon$  난류모델을 첨가시킴과 동시에 입,출구와 벽 경계조건을 제외한 곳에서는 주기 경계조건(periodic boundary condition)을 채택하였다.<sup>(4)</sup> 로켓 노즐내 유동 계산의 경우 아음속에서 초음속으로의 속도 변화가 큰 유동장을 가지며, 축대칭 경계조건(axisymmetry boundary condition)을 사용하였다. Fig. 1(a), (b)에 수치해석의 대상이 된



(a) Turbine Cascade



(b) Rocket Nozzle

Fig. 1 Computational Domain

압축기 익셀 및 로켓 노즐부의 계산 영역을 도시하였다.

## 3. 압축기 수치해석 결과

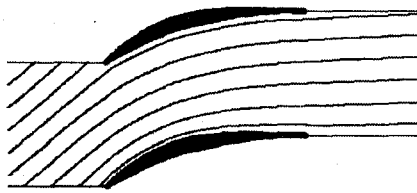
### 3.1 입자 궤적 추적

입자 거동을 추적하기 위한 무차원 변수로서 Stoke Number는 다음과 같이 정의된다.

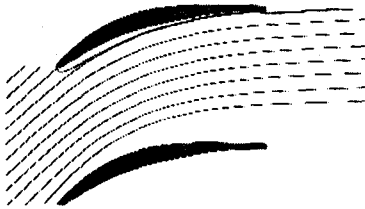
$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 V C_S}{18 \mu L} \quad (1)$$

공기의 유입 속도와 입자의 초기 부유속도는 각각의 유입각에 대해서 85m/s로 고정되어 있으므로 Stoke number는 입자의 크기에 대한 매개변수이다.

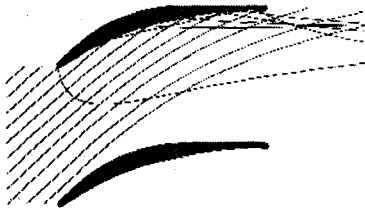
Fig. 2는 유동 입각이 날개의 설계각과 동일한 4°에 대한 익셀 유로내의 유선의 분포와 여러 가지 크기의 입자 궤적을 나타내고 있다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이  $Stk=0.188$ 의 경우는 부유된 입자가 대부분



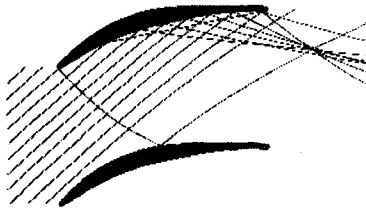
(a) Stream Line



(b) Stk=0.188 (5 $\mu$ m)



(c) Stk=2.99 (20 $\mu$ m)



(d) Stk=18.6 (50 $\mu$ m)

Fig. 2 Particle Trajectory as the Stoke number ( Inlet Angle 40° )

유선과 동일한 궤적을 보인다. Fig.2(b), (c), (d)에서 볼 수 있는 것처럼 Stoke 수가 증가함에 따라서 입자들은 상대적으로 큰 운동량을 가지게 되며, 관성력이 커지게 되어 유선을 따라 이동하지 못하고, 유선을 이탈하여 점차적으로 유동 입구각과 유사한 각도로 익렬의 유로를 직선적으로 이동하게 된다. 전연부분에서의 충돌은 Stoke 수가 증가함에 따라서 더욱 격렬해지며, Fig. 2(b)의 Stk=0.188인 경우는 전연부분에 충돌

한 입자는 상대적으로 작은 관성력을 가지고 있으므로 충돌-반사(impact-rebound) 후 유선과 동일한 궤적으로 빠르게 회복하는 것을 볼 수 있으며, 또한 작은 반발력으로 인해서 반사도 크게 일어나지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 2(d)의 Stk=18.6인 경우는 전연부분에 충돌한 입자가 마주보고 있는 날개의 흡입면에 다시 재충돌(reimpact)하는 궤적의 양상을 보이게 되는데, 이것은 입자의 크기가 증가함에 따라 입자가 유로내의 유동에 영향을 거의 받지 않고 입자의 관성력이 지배적인 것을 의미하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 Stoke 수가 증가할수록 더 많은 입자들이 유선을 이탈하게 되므로 날개의 압력면에 더 많은 충돌 입자를 발생시켜, Stoke 수가 작은 경우보다 상대적으로 심한 마모와 부식이 예상된다. 그러나 입자의 크기가 커지게 되면 상대적으로 큰 반발력으로 한번 압력면에 충돌한 입자가 동일한 압력면으로 재충돌(reimpact) 하는 경향은 점점 작아지게 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 Stk=0.753에 대하여 유동 입구각을 변화시킨 모습이다. 유동입구각 35° 와 40° 의 경우 Fig. 3(a), (b)에서 볼 수 있는 것처럼 35° 일 경우가 상대적으로 40° 인 경우보다 날개의 압력면에 충돌하지 않고, 유로를 통과하는 것을 알 수 있는데, 정량적으로는 40° 인 경우가 35° 보다 약 10%정도 날개면에 더 충돌한다. Fig. 3의 (c), (d)는 위의 경우와 동일한 Stk=0.753에 대해 유동 입구각을 46° 과 50° 로 적용시킨 경우이다. 유입각이 설계각보다 크기 때문에 흡입면의 전연부분에서 미세한 선단 박리기포가 발생하게 되며, 50° 의 경우는 흡입면 후연부분에 거대한 박리가 생겨서 스톱(Stall)이 발생할 수 있는 유동 양상을 나타내게 된다. 입자의 궤적을 살펴보면 46° 의 경우보다 유입각이 설계각으로부터 상대적으로 더 많이 이탈된 50° 의 경우가 익렬의 압력면에 더 많은 충돌량을 보이게 된다. 그리고 46° , 50° 의 경우는 35° , 40° 의 유입각보다 압력면에 1차 충돌한 입자들이 동일 압력면에 상대적으로 더 많은 재충돌(reimpact)을 일으키게 된다. 위의 결과를 종합해 보면, Stoke 수가 증가할수록 큰 관성력에 영향을 받아 입자들이 유선을 이탈하여 날개의 압력면에 더 많이 충돌하게 되며, 유입각이 커질수록 유입된 더 많은 입자가 압력면에 충돌하게 된다. 그러나 입자의 크기가 커지게 되면 상대적으로 큰 반발력으로 1차 충돌 후 동일한 압력면으로의 재충돌 영향은 작아지게 되고 있는 것을 알 수 있다.

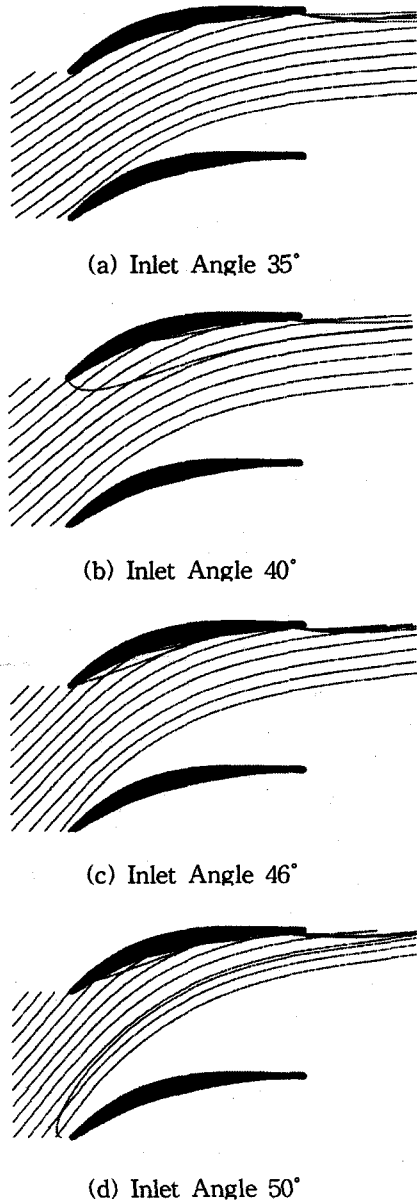


Fig. 3 Particle Trajectory as the inlet angle  
( Stk=0.753  $d_p=10\mu m$  )

### 3.2 입자충돌 효율

본 수치계산에서는 압력면의 입자 충돌량을 정량적으로 알아보기 위하여 다음과 같은 입자 충돌 효율을 정의하였다.

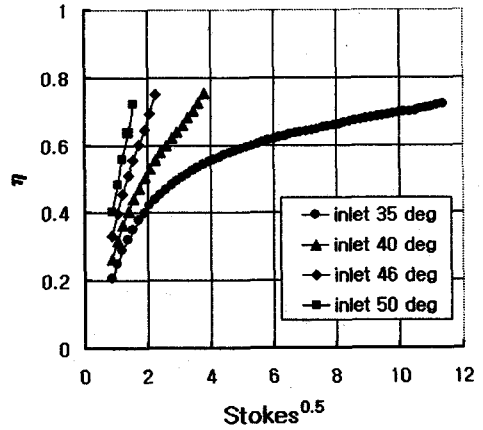


Fig. 4 Particle deposition efficiency

$$\eta = \frac{\text{압력면에 처음 충돌한 입자의 수}}{\text{부유된 입자의 총 개수}} \quad (2)$$

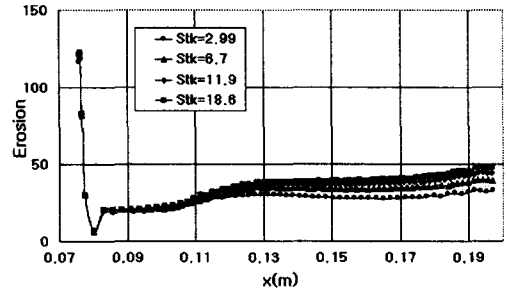
식 (2)에서 분모는 수치 계산 영역으로 부유된 입자의 총 개수를 나타내며, 분자는 부유된 입자 중에서 압력면에 충돌한 개수를 나타내는데, 재충돌은 고려의 대상이 아니며, 각 입자가 압력면에 처음 충돌한 회수만을 의미하는 것이다. Fig. 4는 4 가지의 입자 부유각에 따른 Stoke 수에 대한 입자 충돌 효율을 나타내고 있다. 입자의 크기가 증가함에 따라서, 즉 Stoke 수가 커짐에 따라서, 충돌 효율이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다.

일반적으로 이상적인 경우에 있어서는 Fig. 4에서 나타난 것과 같은 입자 충돌 효율은 계단 함수의 형태(13)를 나타내기 때문에 충돌 여부를 결정하는 단일 입자 크기( Single value of Stk0.5 )가 존재한다, 그러나 실제의 경우에는 계단 함수의 형태를 나타내지 못하고, 일정한 입자 크기(Stk0.5)의 범위에서 입자 충돌 효율이  $\eta=1$ 로 급격히 증가하게 된다. 따라서 충돌 여부를 결정하는 단일 입자 크기를 결정하기 위하여 50% cut-point를 정의하는데, 이것은 입자 충돌 효율  $\eta=0.5$ 에서의 Stk0.5 값을 나타낸다. 유입각이

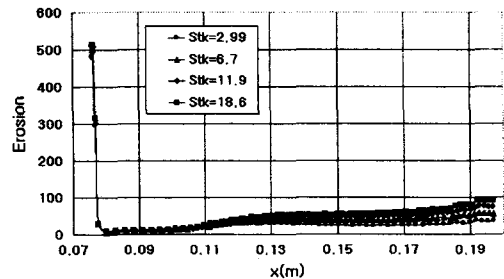
설계각 이상인 경우는  $Stk_{0.5} \leq 3$  ( $d_p \leq 35\mu m$ )에서 입자 충돌 효율이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 50% cut-point가  $Stk_{0.5} \leq 3$ 에 존재하는 것을 나타내는 것이다.  $40^\circ$ ,  $46^\circ$ ,  $50^\circ$  인 각 경우에 대하여 50% cut-point는 각각  $Stk_{0.5}=1.9$  ( $d_p=21.9\mu m$ ),  $Stk_{0.5}=1.38$  ( $d_p=15.9\mu m$ ),  $Stk_{0.5}=1.2$  ( $d_p=13.8\mu m$ )이다. 이것은 유동 입구각이 날개의 설계각 이상이 되면  $Stk_{0.5} \geq 3$ 인 입자크기 이상에서는 부유된 대부분의 입자가 충돌하는 것을 의미한다. 즉,  $Stk_{0.5} \leq 3$ 에서 입자 충돌 효율이 급격히 증가하게 되어  $Stk_{0.5} \geq 3$ 에서는 입자 충돌 효율이  $\eta=1$ 로 접근하게 되는 것을 나타내는 것이다. 유동 입구각이  $35^\circ$ 인 경우는  $Stk_{0.5}=3.1$  ( $d_p=35.7\mu m$ )이 50% cut-point이며, 다른 유입각과는 달리  $Stk_{0.5}=11$  ( $d_p \sim 120\mu m$ ) 정도까지 완만한 증가를 보이지만,  $Stk_{0.5}=12$  이상이 되면 급격히 증가된다. 이것은 입자 충돌 효율이 증가하는 입자 크기의 범위가 다른 경우보다 상당히 넓은 것을 의미하며,  $120\mu m$  정도의 입자 크기가 되면 큰 관성력으로 인해서 유입각이 작아도 유선을 이탈하여 압력면에 충돌하는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 입자의 궤적 추적의 결과와 잘 일치하는 것으로 입자의 크기가 충돌의 여부를 결정하는 중요한 매개 변수인 것을 증명하는 것이고 일정한 범위의 입자 크기 이상이 되면 부유된 입자가 모두 날개면에 충돌하는 것을 나타낸다.

### 3.3 마모량 예측

Fig. 5(a), (b)에서는 유동입구각  $40^\circ$ 인 경우에 Stokes 수에 따른 연강과 세라믹의 두 가지 물질에 대한 날개 표면의 마모량을 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 볼 수 있는 것처럼 연강의 경우는 전연에서 큰 마모량을 나타내고 있으며, 그 상대적인 값은 약 120정도이다. 그리고 이 부분을 제외한 부분에서는 후연부분으로 가면서 약간 증가하기는 하지만 거의 일정한 마모량을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 5(b)에서 보여지는 것처럼 세라믹의 경우, 전연에서는 충돌각이 거의  $90^\circ$ 에 가깝고 충돌 속도 또한 매우 빠르기 때문에 상대적인 마모량은 500정도이며 연강에 비해서 매우



(a) Soft metal



(b) Ceramic

Fig. 5 Erosion rate of two materials  
(Inlet angle  $40^\circ$ )

큰 마모량을 나타내고 있다. 그러나 전연을 제외한 부분에서는 후연으로 가면서 점차 마모량이 다소 증가되기는 하지만 연강의 경우와 같이 거의 일정한 마모량을 보여 주고 있다. 전연 부분에서 두 물질에 대해서 마모량의 차이를 보이는 것은 두 가지 물질의 마모 특성이 다르기 때문이다.

## 4. 로켓노즐부 수치해석 결과

### 4.1 입자궤적 추적

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 계산의 대상이 되어진 경우는  $Stk=0.00131, 0.0188, 0.115, 1.02$  ( $d_p=1, 4, 10, 30\mu m$ )로 모두 4가지로 하였다. Fig. 6(b)에서 보여지는 것처럼 입자의 크기가 가장 작은  $Stk=0.00131$ 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 유동 속도가  $Ma > 1$ 이 되므로 입자의

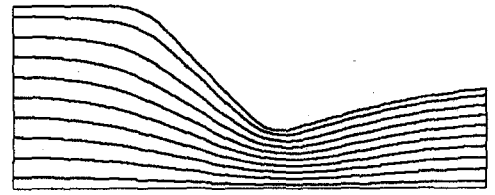
속도가 급격히 증가하기 때문에, 입자 궤적에서 볼 수 있는 것처럼 노즐 수축부(아음속부)의 입자 궤적간격에 비해서 확산부 노즐 부분에서는 입자 궤적의 간격이 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6(c)는  $Stk=0.0188$ 인 경우를 나타내는데,  $Stk=0.00131$ 인 경우에 비해서 노즐의 확산부(초음속부)에서 입자가 존재하지 않는 지역인 입자 자유 지역(particle free zone)이 약간 넓어진 것을 볼 수 있다. 이것은 입자들의 궤적이 유선을 따르지 못하고 이탈하는 양상을 보이기 시작하기 때문이다.

Fig. 6(d)는  $Stk=0.115$ 인 경우를 보여주고 있다. 입자의 크기가  $10\ \mu m$  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 수축부분에서 입자의 관성력으로 인해서 부유된 입자가 유선을 이탈하여 진행되기 때문이다. 또한 입자 자유 지역도 상당히 넓어진 것을 알 수 있으며, 확산부 노즐 부분에서 입자의 분포도 수축부의 궤적에 비교하여 입자궤적간의 간격이 크게 증가하지 않는 것으로 미루어 입자의 크기가 커지면 가속정도가 상당히 낮아지는 것을 알 수 있다.

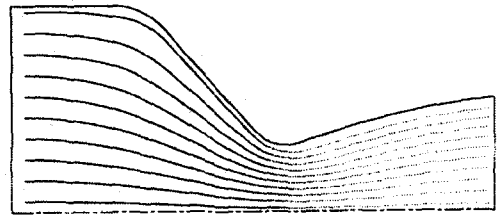
입자의 크기가 증가함에 따라서 수축부분의 노즐벽으로 충돌하는 입자가 더욱 증가하는 것을 Fig. 6(e)에서 알 수 있다. 이것은 위에서 설명한 것과 같은 원인으로, 관성력이 입자 유동에 더욱 지배적인 요소인 것을 나타내는 것이다. 또한 입자에 대해서도 유동처럼 축대칭 조건을 적용하여 입자 궤적을 추적하였는데, 큰 입자의 경우 노즐의 출구 부분에서 노즐의 벽 근처보다는 중심부 쪽으로 집중되어 분포하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 유사한 노즐 형태에서 2상유동현상을 해석한 Hwang<sup>(5)</sup>의 결과와 잘 일치한다.

#### 4.2 입자의 분리 및 상변화

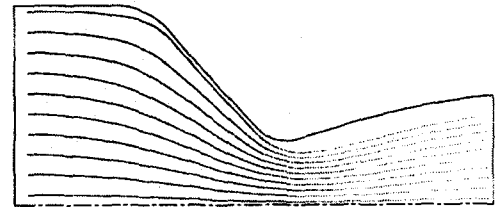
노즐 내부의 산화알루미늄 입자는 액적 상태로 고온·고속의 유동 내부에 존재하는데, 이런 경우 유동과의 속도차이로 인한 입자 분리현상이 발생하게 되며, 이를 판별하기 위한 매개변수인 Weber 수 분포는 Fig. 7과 같다. 노즐목( $X/L=0$ )을 지나면서 유동의 급격한 가속에 따라서 입자의 속도와 유동의 속도가 급격한 차이를 보이게 되며, 본 연구에서는 입자의 크기가 대



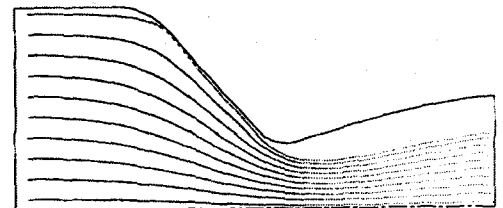
(a) Stream line



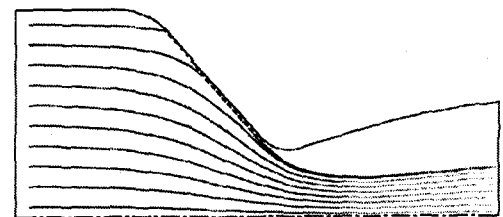
(b)  $Stk=0.00131$  ( $d_p=1\ \mu m$ )



(c)  $Stk=0.0188$  ( $d_p=4\ \mu m$ )



(d)  $Stk=0.115$  ( $d_p=10\ \mu m$ )



(e)  $Stk=1.02$  ( $d_p=30\ \mu m$ )

Fig. 6 Particle trajectories.

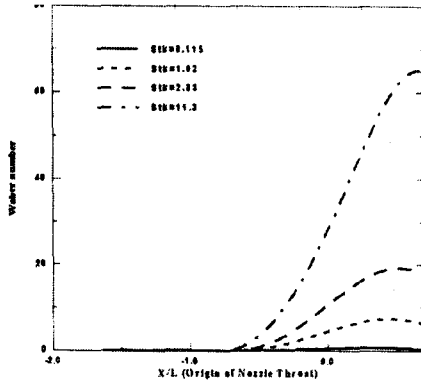
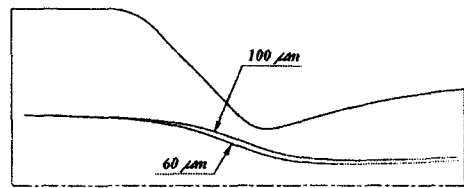


Fig. 7 Weber number distribution of laden droplets.

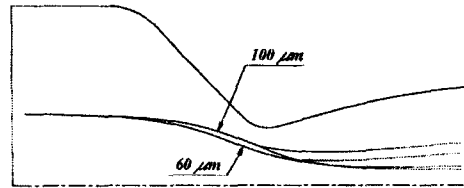
략  $d_p > 50 \mu\text{m}$ 이면 입자의 분리 현상이 발생하게 된다. 본 연구에서는 입자가 유동과의 속도차이에 의해서 2개로 분리되는 것을 정성적으로 모사하였다.

Fig. 8은  $Stk=4.08$ 와  $Stk=11.3$ 의 경우 입자의 분현상이 고려되지 않은 경우와 분리현상이 고려된 경우를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼  $Ma=1$  부근에서  $We > 16$ 이 되므로 입자가 분리되어 운동하는 것을 알 수 있다. 상대적으로 작은 입자인  $Stk=4.08$ 인 경우에 있어서는  $Stk=11.3$ 의 경우보다 입자의 분리 지점이 더욱 하류로 이동되는 것을 알 수 있으며, 분리된 후에도 더 작은 각도를 형성하며 운동하는 것을 알 수 있다. 이것은  $Stk=4.08$ 의 경우 분리된 후에도  $Stk=11.3$ 의 경우보다 더 작은 입자를 형성하므로 그만큼 관성력의 영향을 덜 받기 때문이다. 또한 Fig. 8(a)와 (b)를 비교하여 보면 입자 분리현상이 입자 자유 지역(particle free zone)의 크기를 크게 감소시켜서 노즐 내부에 설치되는 각종 구조물(체트베인등)에 주는 부정적인 영향을 증가시키는 것을 알 수 있다.<sup>(6)</sup>

Fig. 9에서는 고속·고온 속에서 유동하는 산화알루미늄 액적이 유동과의 속도차로 인해서 액적의 표면에서 증발현상이 발생한다고 가정하였을 경우를 나타내고 있다. 이러한 증발현상의 고려는 유동과 액적간의 속도차와 온도차에 의한 물질전달을 종합적으로 적용하여 수치계산을 수행하였다. Fig. 7에서 보여지는 것처럼 액적의 증발이 고려되면 확산 노즐부분에서 액적들이 유선을 비교적 잘 따르는 유동의 양상을 보이며, 입자 자유지역 또한 상당히 좁아지게 되는 것을 볼 수 있다. 또한 액적이 증발됨에 따라서 가속정도 또한

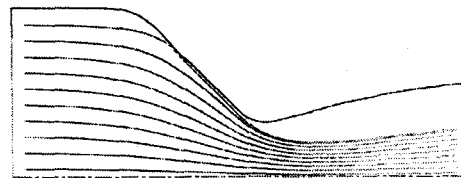


(a) Without breakup

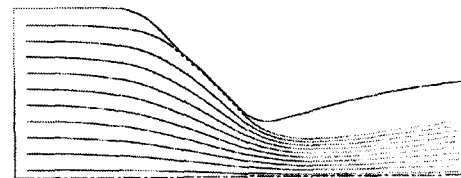


(b) With breakup

Fig. 8 Droplet trajectories for  $Stk=4.08$  ( $d_p=60 \mu\text{m}$ ),  $Stk=11.3$  ( $d_p=100 \mu\text{m}$ )



(a) Without vaporization



(b) With vaporization

Fig. 9 Droplet trajectories for  $Stk=0.115$  ( $d_p=10 \mu\text{m}$ ).

급격히 증가하는 것을 액적의 궤적 농도로부터 알 수 있다. 따라서 이러한 현상 또한 노즐 내부의 돌출물에 많은 영향을 줄 것으로 생각된다. 이와 같은 결과는 유사한 노즐 형태에서 2상유동현상을 해석한 Hwang의 결과와 잘 일치한다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 터빈 압축기 날개와 고체 로켓 노즐에서의 2상유동 수치해석을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

터빈 압축기에 있어서,

- 1) 입구 유입각이 작을수록 그리고 Stoke 수, 즉 입자 크기가 작을수록 관성력이 작아지므로 입자는 유선을 따라서 유동하게 되며, 입자의 크기가 커지고 유입각이 증가되는 경우는 입자가 유선을 이탈하여 날개의 표면에 상대적으로 더 많은 충돌을 보이게 된다.
- 2) 세라믹의 경우는 전연에서 심각한 마모가 예상되며, 연강의 경우는 전연부에서 세라믹에 비해서 상대적으로 작은 마모량을 나타내고 있지만, 날개면에 비해서는 전연부의 마모량이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 또한 세라믹은 전연을 제외한 날개면에서 상대적으로 연강보다 많은 마모량을 나타내고 있다. 따라서 날개 표면의 마모를 방지하기 위해서 전연에서의 세라믹과 같은 경도가 높은 물질의 코팅 등은 바람직하지 않다.

로켓 노즐부에 있어서,

- 3) 산화알루미늄 입자의 유동 양상은 입자의 무게, 즉 Stoke 수가 지배적인 요소임을 알 수 있었다.
- 4) 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. 또한 입자의 상변화 현상이 입자 궤적을 변화시킬 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) M. G. Dunn, A. J. Baran, J. Miatch, "Operation of Gas Turbine Engines in Volcanic Ash Clouds", J. of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, 1996, pp. 724~731
- (2) 김완식, 조형희, 1998, "분진 유입에 따른 압축기 날개주위의 2상유동 및 마모량 예측," 공기조화 냉동공학회 '98 하계학술발표회 논문집, pp. 153-158.
- (3) 조형희, 이재근, 박호동, 서태원, 1998, "분체 이송 관내 압력 조절을 위한 오리피스 주위에서의 입자 유동 및 마모 해석," 대한기계학회논문집B, 제22권, 제11호, pp.1499-1508
- (4) K. C. Karki, S. V. Patankar, "Calculation Procedure for Viscous Incompressible Flows in Complex Geometries", Numerical Heat Transfer, Vol. 14, 1988, pp. 295~307
- (5) C. J. Hwang, 1988, "Numerical Study of Gas-Particle Flow in a Solid Rocket Nozzle," AIAA Journal Vol. 26, No. 6, pp. 682~689.
- (6) 김완식, 조형희, 배주찬, 1999, "고체 로켓 노즐에서 2상유동에 의한 충돌에너지 특성 연구", 한국항공우주학회 '99 춘계학술발표회 논문집, pp. 318~322.