

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(7), 593-602(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.7.593

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 초음속기체-금속액체 분사기의 미립화 과정에 대한 수치해석

황원섭, 김귀순, 최정열\*

## Numerical Study on the Atomization Process of a Supersonic Gas-Metallic Liquid Atomizer

Won-Sub Hwang, Kui-Soon Kim and Jeong-Yeol Choi\*

Department of Aerospace Engineering, Pusan National University

## ABSTRACT

Numerical simulations on the close-coupled supersonic gas atomizer for metallic powder production were performed in this study. A proper turbulence model was chosen and then VOF (Volume of Fluid) and DPM (Discrete Phase Model) methods were sequentially applied for the simulations of primary and secondary break-up processes of liquid metal. Diameters of parent droplets were calculated by analyzing Level-Set function contour from the VOF result. Finally, the distribution of particle diameter was obtained from the DPM result at exit of the computational domain.

## 초 록

본 연구에서는 근접연계방식의 초음속기체 금속분말 미립화장치에 대한 수치해석을 수행하였다. 액체금속의 미립화 과정에서 발생하는 1, 2차 액적분열을 모사하기 위해서 난류 모델을 선정하고 VOF (Volume of Fluid), DPM (Discrete Phase Model) 해석을 차례대로 수행하였다. 해석결과, Level-Set function 분포도를 통해 1차 분열액적의 직경을 계산할 수 있었으며 이 데이터를 DPM 해석에 반영해 도메인 출구에서 수집된 입자들의 최종직경분포를 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Supersonic gas atomizer(초음속 기체 미립화장치), Volume of Fluid(VOF), Discrete Phase Model(DPM), Particle diameter distribution(입자직경분포)

## 1. 서 론

액체미립화는 어떤 양의 액체를 어떤 목적을 위해 다수의 미세한 액적 또는 입자로 생성시키는 기술을 의미한다. 액체미립화 기술은 여러 산업분야에 적용되어 사용되어지고 있는데 그 응용분야는 연소, 도장, 제약, 식품, 의약, 농업, 금

속, 환경분야 등 아주 다양하다. 따라서 액체 미립화장치는 해당 환경에 맞는 적합한 분무특성을 얻기 위해 수많은 형태가 만들어졌고 발전되어왔다. 이러한 미립화장치의 구분방법에는 여러 가지가 있고 특히 에너지원에 따라서도 분류가 가능하다. 즉 압력에너지, 기체에너지, 원심력에너지, 역학적에너지, 전기에너지, 열에너지 등 에

† Received : April 25, 2016    Revised : June 17, 2016    Accepted : June 17, 2016

\* Corresponding author, E-mail : aerochoi@pusan.ac.kr

너지형태에 따라 장치분류가 가능하다. 그 중 기체에너지를 이용하는 이유체 미립화장치(twin-fluid or pneumatic atomizer)는 액체를 공기 등의 제 2 유체가 갖는 운동에너지를 이용하여 미립화시키는 장치로서 크게 기체보조 미립화장치, 기체충돌 미립화장치, 기체주입 미립화장치 등으로 분류할 수 있다. 이 중 기체보조 미립화장치는 고속의 기체기류를 이용하고, 기체와 액체사이의 전단력 또는 고속기류에 의한 충격력에 의해 액체를 미립화시키는 원리를 가지고 있다. 기류속력은 100 m/s 이상에서 초음속에 달한다. 기체충돌 미립화장치는 기체보조 미립화장치와 동일한 미립화원리를 가지고 있으나 기류의 속력이 100 m/s 이하이고 기체 공급압력도 기체보조형보다는 떨어진다. 하지만 기체충돌형은 액체가 공기와 충돌 이전에 액체를 액막으로 프리필밍(pre-filming)[1] 시킬 수 있는 내부구조를 가지고 있어 분무 효율이 상대적으로 크게 떨어지지 않는다.

이러한 이유체 미립화장치는 금속분말 제조공정에도 적용이 되어 왔는데 금속분말을 제조하는 다른 방식들에 비해 제조된 분말입자크기가 균질하고 대체적으로 구형이며 대부분의 합금들이 생산에 적용될 수 있다는 장점들을 가지고 있다[2]. 이유체 미립화장치를 통해 미립화된 금속의 분말크기는 일반적으로 대략 1~5,000  $\mu\text{m}$ 이고 미립화된 분말은 소결합금 부품제조, 경랍 땀재료, 도장재료, 폭약재료 등의 원료로 쓰인다[3].

액체고속 미립화장치는 흔히 자유낙하방식(free-fall type)과 근접연계방식(close-coupled type)으로 구분되는데 자유낙하방식은 액체가 액체수송관 출구로부터 나오면서 자유낙하, 이후 액주를 형성하고 주위에서 분사되는 고속의 기체가 액주를 미립화하는 형식으로 기체보조 미립화장치의 구조를 가진다. 반면 근접연계방식은 액체수송관 출구로부터 나오는 액체가 주위에서 분사되는 고속의 기체에 의해 형성된 출구 쪽 압력분포에 의해 액막을 형성해가면서 미립화되는 형식으로 기체보조형식에 프리필밍효과가 더해진 방식이다.

이 중 근접연계방식을 이용한 액체미립화에 대한 이론적, 실험적 연구들은 오래전부터 많은 이들에 의해 수행되어져왔다. Dombrowski와 Fraser[4]는 Fig. 1과 같은 프리필밍방식의 이유체 미립화장치에 대한 실험적 연구를 이미 과거에 수행하였고, 기체유동패턴을 연구하고 더불어 분열 액적들의 입경을 측정하고자 하였다. 특히

미세분말 제조에 필수적인 초음속기체를 이용한 근접연계방식의 미립화장치에 대해서는 Ting과 Anderson[5]이 전산유체해석 및 실험을 실시하였고 액체고속 수송관 출구부의 기저압 분석을 통해 기체유동 해석모델 선정에 대한 중요성을 강조하였다. Zhao 등[6] 역시 전산유체해석 및 실험을 실시하였고 RANS 모델간의 결과비교를 통해 좀 더 정확한 기체유동 해석모델을 찾고자 했다. 더불어 1차 액적분열(primary break-up)에 대한 다상유동해석을 아주 간단히 수행하였다. Zeoli와 Gu[7]는 기체유동과 2차 액적분열(secondary break-up)에 대한 해석을 실시하였고 TAB(Taylor Analogy Breakup)모델과 KH(Kelvin-Helmholtz)모델을 액적분열 모델로 사용하였으며 그 사이에서 1차 액적분열과정에 대한 자세한 해석과 언급은 배제하였다. Markus와 Fritsching[8]은 기체유동과 1, 2차 액적분열에 대한 단일 수치해석틀을 제시하였으나 기체는 비압축성이었으며 근접연계방식이 아닌 자유낙하방식의 미립화장치 해석에만 적용이 가능한 방법이었다. Firmansyah 등[9]은 기체-액적간의 운동량, 에너지 교환이 고려된 2차 액적분열 해석을 실시하였고 역시 1차 액적분열과정에 대한 해석은 구체적으로 수행하지 않았다.

본 논문에서는 근접연계방식의 초음속 미립화장치에 대해 기존에 수행되었던 기체유동과 2차 액적분열 해석에 더불어 1차 액적분열과정에 대한 해석을 추가로 수행하였으며 이를 통해 해당 장치의 미립화 과정에 대한 수치해석적 분석과 해석 절차수립을 도모하였다.

이를 수행하기 위해 본 연구에서는 Transition SST 난류모델, VOF(Volume of Fluid) 다상유동 모델 그리고 이산상 모델(Discrete Phase Model or DPM)을 유동해석모델로 선정하였다. 이산상

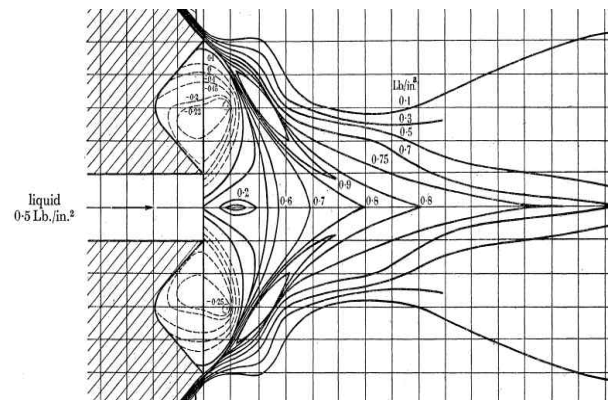


Fig. 1. An example of pre-filming, twin-fluid atomizer with isobaric lines[4]

모델은 Wave Breakup 액적분열모델과 입자운동 방정식(Particle Motion Theory)을 포함하는 개념으로 본 연구에서 사용하였다.

## II. 수치해석 방법 및 모델

### 2.1 금속분말 생산장치

기체분사를 이용한 금속분말의 제조과정은 다음과 같다. Fig. 2(a)와 같이 진공로에서 액체금속을 과열상태로 녹인 후 도가니(holding chamber)에 부으면 액체금속은 자체 자중과 도가니 내부 높은 압력에 의해 수송관(delivery tube)을 타고 흐르게 된다. 액체금속은 확대된 그림에서 볼 수 있듯이 수송관 출구에서의 압력분포에 의해 액막으로 퍼지게 되며 반경방향으로 흐르다가 환형 노즐에서 불어오는 고속의 기체와 만나게 된다. 기체가 가진 운동에너지에 의해 1차, 2차 분열을 연속적으로 일으키며 미립화가 된다. 미립화 후 응고된 분

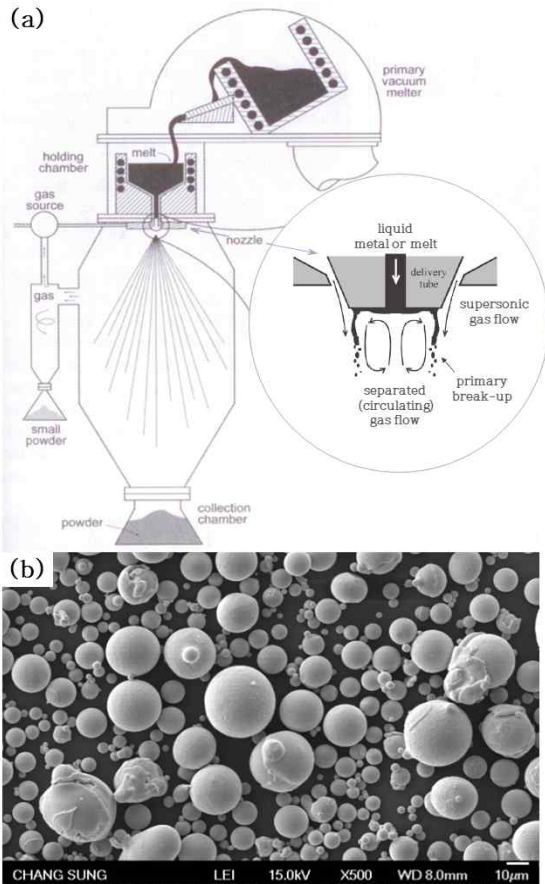


Fig. 2. (a) A gas atomizer system for metallic powder production[2,10], (b) Atomized powder of Ni-based alloy(ChangSung Corp.)

말의 입자는 대개 수~수백 마이크로미터 수준의 구형입자를 이루게 된다(Fig. 2(b)).

### 2.2 수치해석기법

#### 2.2.1 해석 방법

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 Fluent CFD 해석 패키지를 해석에 사용하였다. 모든 유동해석에서 압력 기반 해석기를 사용하였으며, 공간 차분기법은 밀도, 운동량 그리고 에너지 방정식들의 경우 각각 2차 정확도의 풍상차분법을, 난류 스칼라 값들은 1차 정확도의 풍상차분법을, 계면 추적과 Level-Set Function에는 각각 Compressive와 QUICK 차분법을 사용하였다. 그리고 구배 보간기법은 셀 기반 최소자승구배법을, 시간적분 기법은 1차 정확도의 내재적 시간적분법을 사용하였다.

#### 2.2.2 난류 모델

$k$ - $\omega$  난류모델은 Navier-Stokes 방정식에서 추가적으로  $k$ (turbulence kinetic energy)와  $\omega$ (specific dissipation rate)을 풀어 유동장을 모사하게 되며 RANS 계열의 난류모델에서  $k$ - $\epsilon$  난류모델 등과 함께 산업분야에서 널리 쓰이는 모델이다. 특히 SST  $k$ - $\omega$  모델은 기존의  $k$ - $\omega$  모델에서 난류점성(turbulent viscosity)항이 수정되었으며 내부 경계층(inner boundary layer)과 외부 경계층(outer boundary layer)의 유동을 적절히 모사할 수 있게 하였다. Transition SST(T-SST) 모델은 기존 SST  $k$ - $\omega$  모델에서 intermittency와 momentum-thickness Reynolds number 항들이 추가된 모델이며 본 연구에서는 유동장내 저속, 고속, 박리 및 천이영역을 적절히 모사하기 위해 T-SST 모델을 난류모델로 사용하였다.

#### 2.2.3 다상유동 모델

VOF 모델은 2개 또는 그 이상의 유체의 유동에 대해 체적분율을 추가적으로 계산하여 계면을 추적하는 기법이다. 이 모델은 각 유체들에 대한 연속방정식들과 하나의 운동량 방정식, 에너지 방정식, 체적분율을 고려하여 다상유동장을 모사하며 본 연구에서는 Level-Set 기법이 연계되어있는 CLSVOF(Coupled Level-Set and VOF) 기법을 적용하였다. CLSVOF 기법은 계면의 곡률을 잘 모사하는 Level-Set 기법의 장점과 물리적으로 타당한 결과를 주는 VOF 기법의 장점이 결합된 다상유동 기법으로 본 연구에서는 1차 분열액적의 크기를 포착하기 위해 CLSVOF 기법을 사용하였다.

#### 2.2.4 이산상 모델

입자운동방정식은 라그랑지안 기준틀에서 입자

에 작용하는 항력, 압력, 중력, 가상질량힘 및 기타 체적힘을 고려하여 입자의 속도, 궤적을 계산한다.

Wave Breakup 모델은 액적분열모델 중 하나로 액적 내 파동길이와 그 성장률이 자입자들의 수와 크기를 결정한다는 Kelvin-Helmholtz instability 이론을 근거로 한 모델이다. 이 모델은 빠른 속도의 액체분사유동에 적합하고 상대기체의 웨버수가 대략 100 이상인 유동에 적합하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 2차 분열액적의 궤적을 계산하고 최종입도크기를 확인하기 위해서 본 기법들을 해석에 적용하였다.

### 2.3 미립화 장치 모델과 해석 조건

본 연구에서는 고속의 기체와 액체금속이 만나 1차 분열이 일어나는 과정까지를 T-SST 난류모델과 VOF 모델로 해석하였고, 1차 분열이후의 과정은 T-SST 난류모델과 DPM으로 해석을 진행하였다.

해석도메인은 미립화가 발생하는 영역, 즉 1, 2차 분열이 주로 발생하는 영역을 충분히 포함하는 사각형 형태의 도메인(Fig. 3)을 설정하였고 격자는 VOF 해석의 경우 계산시간을 고려하여 축대칭 격자를, DPM 해석은 그 축대칭 격자를 축 중심으로 회전, 3차원 격자로 만들어 해석에 사용하였다.

Table 1은 해석도메인에 사용된 경계조건 및 경계 값들을 보여주며 side와 outlet에서의 경계 값들은 실제측정값이 존재하지 않기 때문에 그 값을 구하기 위해 Fig. 2(a)에 나와 있는 챔버 전체에 대해서 기체유동해석을 별도로 실시하였다.

축대칭 해석의 격자 모양은 사각형, 면(face)수는 약 8만개이고 VOF 해석 시 계면의 해상도를 높이기 위해서 축 근처 격자를 세밀히 하였으며, 격자의 최소길이는 0.12 mm이다. 3차원 해석의 격자 모양은 육면체, 셀(cell)수는 약 32만개이며 축 주변 격자 세분(refinement)은 따로 하지 않았다.

분사용 기체는 99% 순도의 아르곤이고 분말제조용 금속은 순수 니켈이며 그에 대한 물성치는 Table 2에 나타내었다.

모든 해석은 비정상 상태 해석을 실시하였으며 DPM 해석의 경우에는 액적들의 유동으로 인한 기체유동장의 교란이 작다고 가정하고 기체-액적 간 운동량, 에너지 교환을 고려하지 않았다.

해석 시간 간격은 기체유동, VOF, DPM 해석 각각  $1 \times 10^{-7}$ ,  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ ,  $1 \times 10^{-7}$  sec으로 두었고 그에 따른 유동시간은 각각 3.0, 20.61, 8.0 msec이었다. 기체유동 해석은 해를 충분히 수렴시키는데 3.0 msec 가 소요되었고 VOF 해석은 액체금속이 수송관에서 나와 1차 분열이 되는 과정까지를 전부 해석하기 위해 상대적으로 큰 유동 시간이 소요되었다.

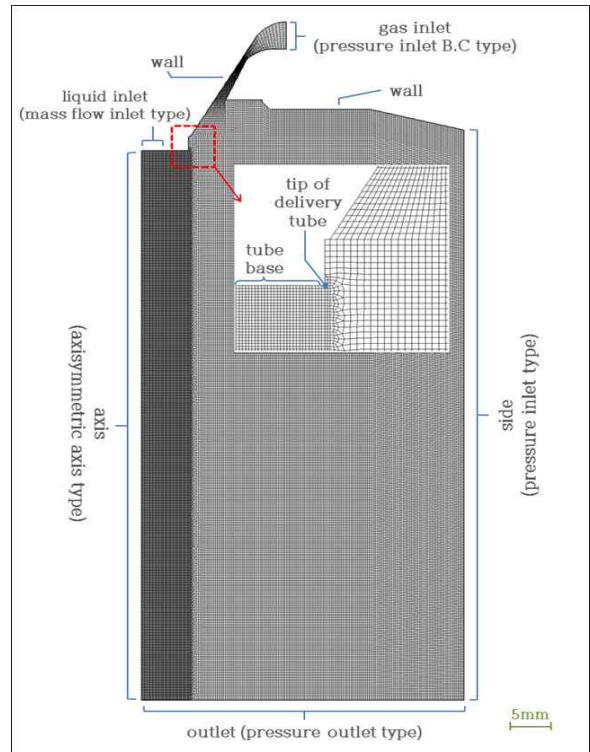


Fig. 3. Axisymmetric computational domain

Table 1. Boundary conditions

| Boundary     | Specification                                     |
|--------------|---|
| gas inlet    | $p_0 = 2,062,655$ Pa, $T_0 = 300$ K               |
| liquid inlet | $\dot{m}_{liquid} = 0.2068$ kg/s, $T_0 = 1,823$ K |
| side         | $p_0 = 102,306$ Pa, $T_0 = 450$ K                 |
| outlet       | $p_0 = 102,306$ Pa, $T_{0,backflow} = 450$ K      |
| wall         | non-slip condition                                |
| axis         | axisymmetric axis                                 |

Table 2. Physical properties of the materials

|                              | Argon(g)         | Nickel(l)  |
|------------------------------|------------------|------------|
| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Ideal gas law    | 7,810[11]  |
| Specific heat (J/kg·K)       | 520.6            | 662.7[12]  |
| Thermal conductivity (W/m·K) | 0.0158           | 53[13]     |
| Viscosity (kg/m·s)           | Sutherland's law | 0.0068[14] |
| Surface tension (N/m)        | 1.823[15]        |            |

### III. 수치해석 해석결과

#### 3.1 기체유동 해석결과

##### 3.1.1 원통형물체 가스유동 해석결과

수송관 기저부(tube base)에서의 압력분포예측이 상당히 중요한데 그 이유는 이 압력분포가 출구에서 빠져나온 액체금속의 유동 패턴, 특히 액막의 두께나 유량 등을 결정하는 주요인자이고 이 인자들은 액적의 1차 분열시 자입자의 크기, 궤적결정에 중요한 영향을 미치기 때문이다. 따라서 분사기 기저부 압력분포모사를 위해 몇 가지의 RANS 난류모델비교를 수행하였다.

본 해석모델의 수송관 기저부 압력에 대한 실험값이 충분치 않았기 때문에 본 연구에서는 해석모델을 원통형 물체로 가정하고 주위에서 초음속기체가 불어오는 초음속 기체유동해석을 따로 수행하였다. 그에 대한 해석모델은 Fig. 4의 Herrin과 Dutton[16]의 실험모델로 선정하였다. 축대칭모델로 해석하였고 실험과 수치해석의 기저부 압력분포결과를 비교해보았으며 유입기체의 조건들은 Table 3과 같다. 유입기체는 공기이며 원통의 반지름(R)은 31.75 mm이었다.

중심축( $r=0$ mm)에서 기저부 말단( $r=R$ )까지 압력계수( $C_p = 2[(p/p_\infty) - 1]\gamma_\infty^{-1}M_\infty^{-2}$ )를 확인

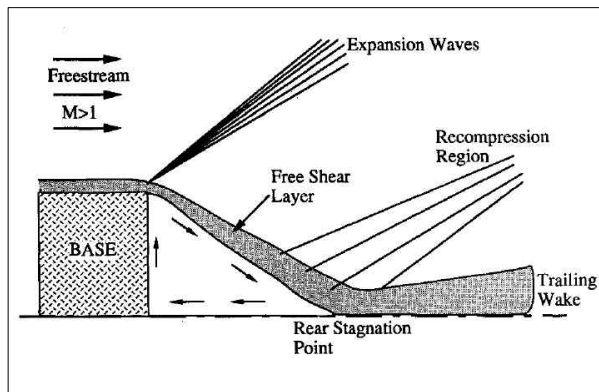


Fig. 4. Supersonic, axisymmetric base flow schematic for cylindrical afterbody[16]

Table 3. Inflow conditions

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| $M_\infty$                         | 2.46   |
| $\rho_\infty$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 0.7549 |
| $p_\infty$ (kPa)                   | 31.415 |
| $T_\infty$ (K)                     | 145    |
| $U_\infty$ (m/s)                   | 593.8  |

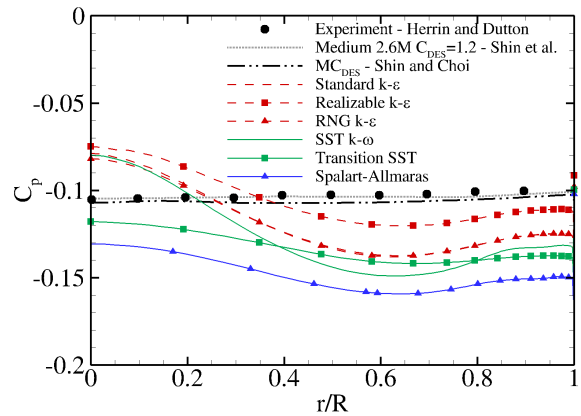


Fig. 5. Time-averaged pressure coefficient distribution along base surface of cylinder

결과 Fig. 5에서 볼 수 있듯이  $k-\epsilon$  계열의 난류 모델들이 실험값과 편차가 작았으며, 특히 Realizable  $k-\epsilon$  모델이 실험값과 편차가 작았다. 그 다음으로 SST  $k-\omega$ , T-SST 그리고 Spalart-Allmaras의 순으로 실험값과 편차를 보였다.

모든 난류모델들의 압력구배패턴을 보면 중심점에서 반경방향으로 가면서 S자 구배패턴을 보여준다. 이러한 압력구배의 원인은 Fig. 4의 후방 정체점에서부터 기저부로 거슬러 올라온 유동이 기저부 중심점에서 잠시 정체되었다가 반경방향으로 가속되어 흐르게 되는데, 말단부에서 다시 초음속 기체에 의해 유동이 가로막혀 정체가 되기 때문이다. 이와 같은 압력구배패턴은 Fig. 4와 같은 원통형 물체에 대한 초음속유동해석에서 RANS 난류모델을 사용하였을 때 주로 나타나는 패턴이다. 반면 Fig. 5에서  $C_{DES}=1.2$ [17]와  $MC_{DES}$  [18]를 사용한 DES 해석 결과는 실험값과 매우 근사한 균일한 압력 분포를 보인다.

Figure 5에서 실험값의 압력계수는 반경방향에 걸쳐 거의 일정한 모습을 보여주고 있는데 T-SST 모델과 Spalart-Allmaras 모델이 이러한 경향성을 잘 모사한 반면  $k-\epsilon$  계열과 SST  $k-\omega$  모델은 상대적으로 떨어지는 모습을 보여주었다.

이후 모든 난류모델들을 가지고 본 미립화장치에 대한 3차원 기체유동해석을 따로 실시해보았다. 그 결과,  $k-\epsilon$  계열의 모델들과 SST  $k-\omega$  모델에서 비 축대칭(asymmetric) 유동현상이 발생하였다. 따라서 기저부 압력구배모사 정확성과 유동장모사의 안정성(stability) 관점에서 최종적으로 T-SST 모델을 본 연구의 난류모델로 선택하였다.

##### 3.1.2 미립화장치 가스유동 해석결과

미립화장치의 가스유동해석결과 노즐 출구부에



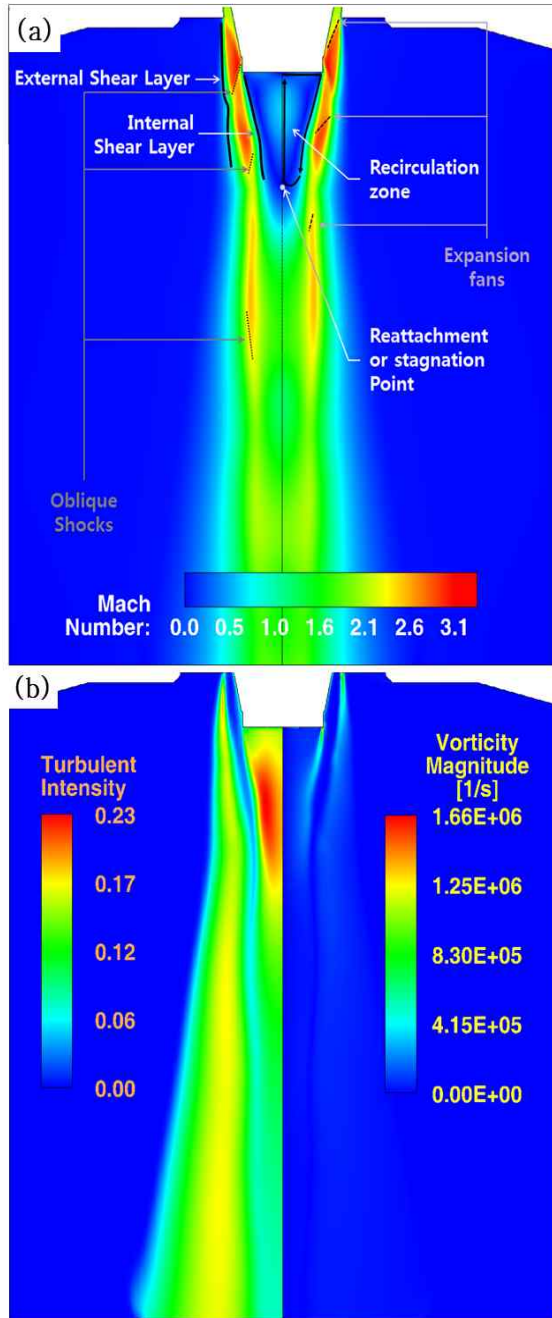


Fig. 6. Contours of gas flow simulation, (a) Structure of supersonic gas phase flow field, (b) Turbulent intensity and vorticity magnitude contours

서의 평균 마하수는 약 2.1이고 평균 속력( $U_{avg}$ )은 약 405 m/s에 달하였다. 고속의 기체가 환형의 노즐에서 분사되어 하류로 퍼져나가므로 챔버 내, 특히 챔버 중심축 부근에서는 기체의 난류유동이 활발할 것으로 예상할 수 있다. 해석결과 Fig. 6(b)의 난류강도 분포도에서 알 수 있듯이 난류강도( $u'/U_{avg}$ )는 Fig. 6(a)의 재순환영역(recirculation

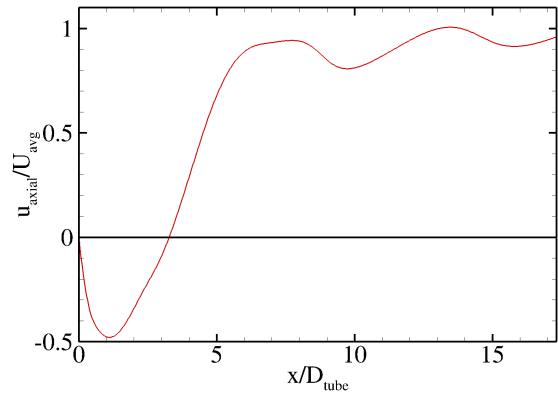


Fig. 7. Time-averaged axial velocity along centerline downstream of tube base (inner diameter of tube is denoted as  $D_{tube}$ )

zone)에서 최대 23%에 달하였으며 하류로 가면서 반경방향으로 확산되는 경향을 보여주었다.

Figure 6(a)에서 볼 수 있듯이 출구에서 빠져나온 초음속 기체는 하류로 내려가면서 팽창파와 충격파를 반복하는 것을 확인할 수 있다. 재 부착점(reattachment or stagnation point)을 기점으로 상류에서는 역류, 즉 저속의 재순환 유동이 발생하였다. 즉 원통물체의 유동에서와 마찬가지로 역류유동은 재 부착점에서 기저부 쪽으로 흐르면서 일시적으로 가속이 되었다가 기저부 중심점에 정체가 된다(Fig. 7). 유동은 다시 기저부를 타고 반경방향으로 흐르다가 기저부 말단(tip)에서 최고 마하수 3.1의 초음속 기체와 만나 급격한 속도구배의 내부전단층(internal shear layer)을 만들고 다시 재 부착점으로 흐르게 된다. 이 내부전단층은 Fig. 6(b)에서와 같이 기저부 말단부에서 아주 강한 와도(vorticity)를 형성시켰으며 이 와도의 강도는 액적의 1차 분열 크기에 큰 영향을 미친다. 재 부착점을 기준으로 하류로 갈수록 코어유동부의 속력은 줄어들었으며 동시에 전단층의 속도 구배가 완만해지고 두꺼워지는 확산유동을 보여주었다.

이러한 기체유동구조는 수렴-발산 형태의 노즐을 가진 일반적인 HPGA(High-Pressure Gas Atomization) 미립화장치의 가스유동장에서 볼 수 있는 구조이다.

### 3.2 기체-액체 이상유동 해석결과

수렴된 기체유동장에 액체금속을 주입하기 시작하면 액체금속은 Fig. 8(a)의 압력분포도에 나와 있듯이 역류에 의해 만들어진 출구 쪽 높은 압력(약 95 kPa)에 의해 자유낙하하지 못하고 Fig. 9의  $t = 8.01$  ms에서 보여지듯 출구 쪽 바로

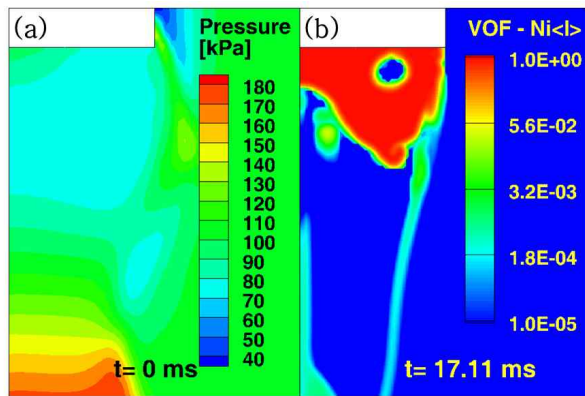


Fig. 8. Contours of VOF simulation, (a) Absolute pressure contour without liquid metal, (b)VOF contour in log scale

아래에서 정지한 후,  $t = 17.71$  ms에서처럼 반경 방향 유동패턴을 보여준다. 이후 기저부 말단에서 불어오는 초음속 기체와 만나 발생하는 강한 전단력에 의해  $t = 18.21, 19.71$  ms에서처럼 1차 분열이 연속적으로 일어난다.

$t = 19.71$  ms에서 분열되는 액막의 유동은 파형을 이루고, 아래로 갈수록 그 두께가 점차 얇아지는 것이 Dombrowski와 Johns가 제안한 액막분열모델[19]과 아주 유사하다. 따라서 액막은 ligament로 분열되고 그 ligament는 다시 구형액적 등으로 분열된다고 볼 수 있을 것이다.

액체금속은 수송관 내부에서의 큰 섭동이 발생하지 않는 이상은 대개 일정 액막두께를 유지하면서 흐르게 되며,  $t = 19.71$  ms에서 보이듯 액적들이 떨어져나가 야기된 작은 크기의 와동(eddy)들이 발생하면 기존 재순환영역이 붕괴되면서 역류속도가 약해져 액막두께가 증가하는 모습도 보였다.

본 해석은 축대칭 해석이므로 1차 분열된 액체의 실제 3차원 형상은 원환면(toroid)이지만, 앞서 언급했듯이 모두 구형 액적으로 가정하고 그 직경을 계산해보았다. Figure 9의  $t = 18.21, 19.71$  ms에서 Level-Set 결과를 보면 액적의 단면이 원(circle)보다는 타원에 가까운 것들이 존재하는데 이 액적들은 3차원 관점에서 구(sphere) 대신 타원면(ellipsoid)이라 가정하고 그 부피를 계산하였고 다시 그 타원면 부피에 상당하는 구의 지름을 찾아내었다. 원과 타원의 구분 경계는 액적단면의 최소/최대 지름의 비가 0.75를 넘으면 원, 0.75보다 작으면 타원으로 가정하였다. 따라서 1차 분열되는 모든 액적들에 대해서 평균 지름을 계산한 결과 0.539 mm를 얻을

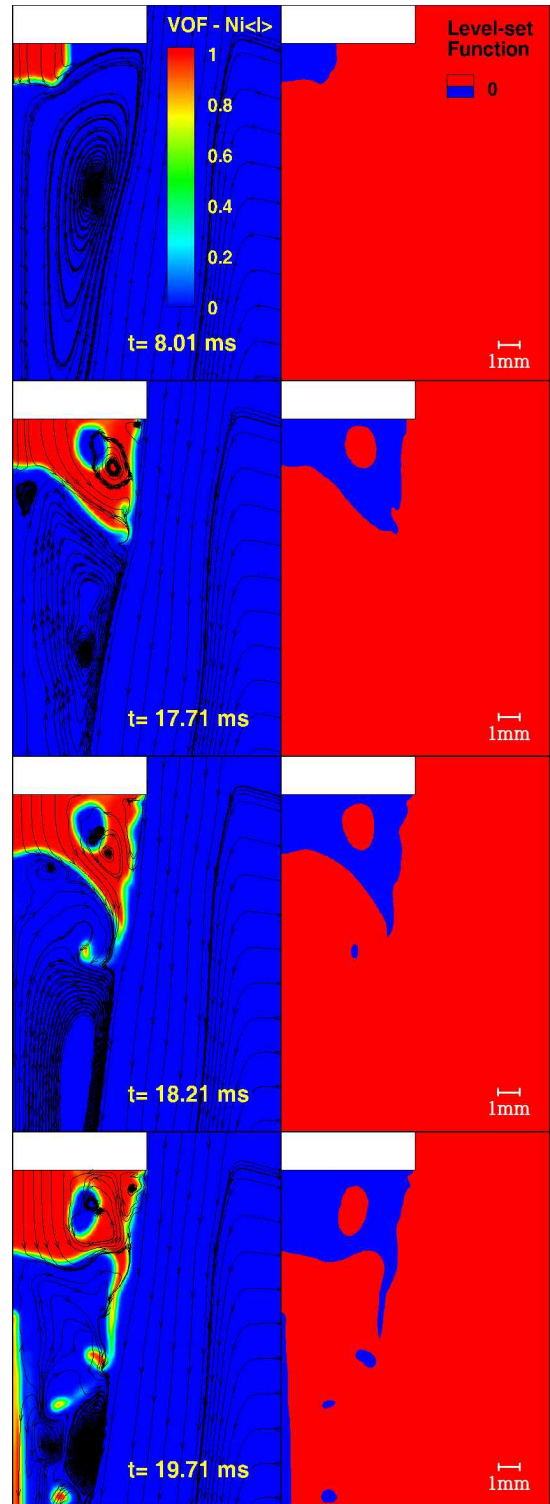


Fig. 9. VOF and Level-Set function contours for successive primary break-up processes

수 있었고 액적-액적사이 평균 분출시간간격은 0.383 ms, 그 질량유량( $\dot{m}_{droplet}$ )은 0.08526 kg/s 이었다.

본 격자의 최대 액적포착 해상도는 약 71  $\mu\text{m}$  수준이었고 그 이하크기의 미세액적들은 Fig. 8(b)의 VOF 분포도에서처럼 1차 분열 후 전단층을 따라 흘러갔다. 하지만 그 질량유량은  $\dot{m}_{droplet}$ 에 비해 무시할 만큼 작은 수준이었다.

### 3.3 입자상 유동 해석결과

VOF 해석으로부터 얻은 DPM 관련 인자들은 Table 4와 같고 이 인자들을 수송관 기저부의 말단에서 분사되는 액적들의 초기분사조건에 사용하였다. 즉 VOF 해석에서는 1차 분열되는 위치가 기저부 말단에서 약간 아래 떨어진 곳이라면 DPM 해석에서는 해석의 편의를 위해 1차 분열되는 액적들이 말단에서 분사되는 것으로 가정하였다. 더불어 액적의 분열, 궤적 계산은 해석도메인을 빠져나가는 순간 종료가 되고 그 입자들에 대한 직경 및 기타 물리적인 데이터들은 입자가 빠져나가는 경계에서 수집되게 하였으며 따라서 본 해석에서는 outlet과 side에서 최종입자데이터를 수집하였다.

해석결과 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 분열액적들의 궤적은 기체의 코어유동부를 대부분 벗어나지 않았고, 작은 크기의 액적들은 내부전단층을 따라 하류로 흘러가는 반면 상대적으로 큰 액적들은 내부전단층 아래의 재순환영역에 상주하거나 중심축 부근에 밀집되어 움직이는 결과를 보

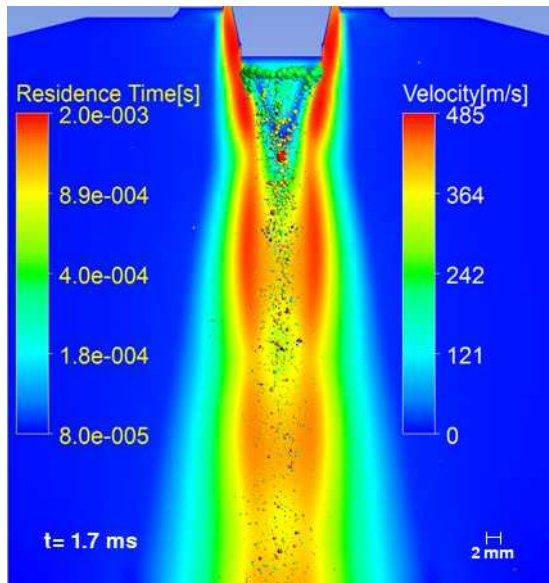


Fig. 10. Residence time for particles which are modeled in sphere (scaled-up 5 times the original particle diameter) with gas velocity magnitude as background contour

Table 4. Injection conditions

| Condition              | Value   |
|------------------------|---------|
| Diameter(mm)           | 0.539   |
| Temperature(K)         | 1,823   |
| Injection time(ms)     | 1.915   |
| Injection interval(ms) | 0.383   |
| Mass flow rate(kg/s)   | 0.08526 |

Table 5. Particle statistics at domain exit

|                      | Simulation | Experiment |
|----------------------|------------|------------|
| D50( $\mu\text{m}$ ) | 45.86      | 21.46      |

였다. 일부의 액적들은 재순환영역을 오랜 시간 동안 빠져나가지 못하고 상주하는 것을 Fig. 10의 재순환영역에서 확인할 수 있다.

액적들의 온도는 하류로 내려가면서 약 1,450 ~ 1,670 K까지 감소하는 것이 확인 되었으며 이는 순수 니켈의 응고점인 1,728 K보다 낮으며 따라서 액적들은 outlet과 side에 가까이 도달 할수록 점점 응고되어 고체입자로 변한다고 볼 수 있다. 액적의 분열은 내부전단층 부근에서 가장 활발하였으며 동시에 기체 웨버수( $We_g = \rho_g U_{rel}^2 D_l / \sigma$ )도 그곳에서 가장 높았다.

Outlet과 side에서 수집된 최종입자직경 데이터를 분석한 결과 Table 5와 같이 본 해석의 D50은 실험값에 비해 24  $\mu\text{m}$  가량 높았으며 직경의 구간별 분포도인 Fig. 11을 보면 해석결과는 30  $\mu\text{m}$  이하인 입자들의 비중이 상당히 작았다. 반면에 입자의 최대직경은 실험값이 114.1  $\mu\text{m}$ , 해석 값이 148.6  $\mu\text{m}$ , 즉 23% 차이로 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 실제 1차 분열되는 액적들의 최대 직경은 0.539 mm를 넘지 않을 것으로 판단된다. 반면에 최소 직경은 0.539 mm보다 작음을 유추할 수 있다.

Figure 11의 수치해석 직경분포를 보면 쌍봉형(bi-modal) 분포를 보여주는데 실험값 분포도 마찬가지로 약하지만 쌍봉형 분포를 보여준다. 이는 이미 언급하였지만 말단에서 떨어져나간 1차 분열 액적이 다시 2차 분열될 때 액적의 일부는 전단층을 타고 흐르는 반면 나머지 액적들은 저속의 재순환영역으로 빠지게 된다. 전단층을 타고 흐르는 액적들은 빠른 기체 속도에 의해 분열이 가속화되는 반면 나머지 액적들은 그렇지 못한 것이 쌍봉형 분포형성의 원인으로 보인다. 비슷한 유동현상이 Firmansyah 등[9]에 의해서도 이미 보고가 되었다. 해석 도메인 출구에서 수집된 입자군(parcel)의 수는 9,080개 이었다.



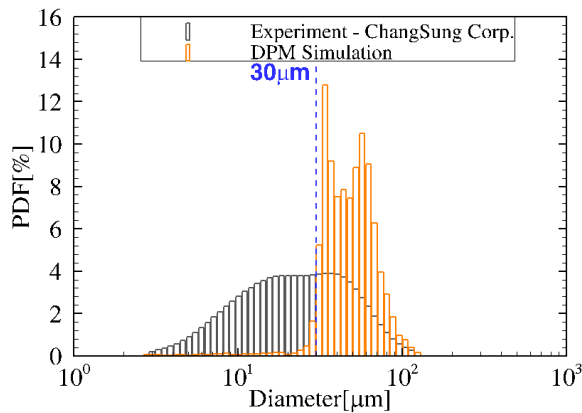


Fig. 11. Distribution of final particle diameter

#### IV. 결 론

근접연계방식의 액체금속 초음속 미립화장치에 대한 기체유동, 다상유동, 이산상유동 해석을 차례대로 수행하였고 최종적으로 얻어진 입자직경분포를 실험값과 비교를 하였다. 입자의 D50은 실험값과 24 μm의 차이를 보여주며 차이가 컸으나 최대직경은 근소한 차이를 보여주었다. 따라서 실제 1차 분열되는 액적의 평균크기는 해석으로부터 얻어진 액적크기보다 작을 것으로 예측된다. 따라서 좀 더 정확한 분열 액적 크기를 얻기 위해서는 3차원 VOF 해석을 통한 액체금속의 1차 분열크기 확인이 필요하다. 더불어, 장치의 실제작동 조건에서는 도가니 내 액체금속의 수위가 줄면서 액체금속 공급유량이 줄어 기저부 액막의 두께와 1차 분열액적의 크기가 줄어들기 때문에 이러한 분열액적의 크기감소를 DPM 해석에 반영시켜 입도데이터를 수집하면 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

본 연구를 통해 근접연계방식의 미립화장치의 미립화 과정에 대한 수치해석적 분석방법 및 기법들을 제시하였고 더불어 난류모델 선정 및 기체유동장 해석의 중요성에 대해 언급하였다. 몇 가지 보완사항을 통해 분말의 최종직경을 실제에 근사되게 맞춰나갈 필요가 있으며 이후 해석절차가 확립되면, 이 해석절차는 기존 미립화장치의 성능 보완 및 새로운 미립화장치 개발에 도움이 될 것으로 기대한다.

더불어 본 연구에서 쓰인 분석방법과 해석기법들이 금속분말제조용 미립화 장치뿐만 아니라 통상적인 이유체 미립화장치나 그 외 미립화장치 해석에도 반영이 될 수 있을 것이다. 따라서 액체로켓 분사기에 주로 쓰이는 동축 분사기나 항공용 가스터빈엔진 및 액체로켓 분사기에 쓰이는

선회 분사기 또는 동축 선회 분사기의 미립화 과정 연구에도 활용이 될 수 있기를 기대한다.

#### 후 기

본 연구는 방위사업청의 지원으로 수행한 민군겸용기술사업(UM13020RD1) 및 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업으로 수행되는 서울대학교 차세대 우주추진연구센터(NRF-2013R1A5A1073861)의 지원을 받아 수행되었으며 지원 감사드립니다.

#### References

- 1) Jeon, H. S., *Liquid Atomization*, Munundang, Jongno, Seoul, 2009, pp. 466-467.
- 2) German, R. M., *Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing*, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, USA, 2005, pp. 70-71.
- 3) Bayvel, L. and Orzechowski, Z., *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, Washington, DC, USA, 1993, p. 11.
- 4) Dombrowski, N. and Fraser, R. P., "A Photographic Investigation into the Disintegration of Liquid Sheets", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 247, No. 924, 1954, pp. 101-130.
- 5) Ting, J. and Anderson, I. E., "A Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of the Wake Closure Phenomenon", *Materials Science and Engineering*, Vol. 379, No. 1-2, 2004, pp. 264-276.
- 6) Zhao, W., Cao, F., Ning, Z., Zhang, G., Li, Z. and Sun, J., "A Computational Fluid Dynamics (CFD) Investigation of the Flow Field and the Primary Atomization of the Close Coupled Atomizer", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 40, 2012, pp. 58-66.
- 7) Zeoli, N. and Gu. S., "Numerical Modelling of Droplet Break-up for Gas Atomisation", *Computational Materials Science*, Vol. 38, 2006, pp. 282-292.
- 8) Markus, S. and Fritsching, U., "Discrete Break-up Modeling of Melt Sprays", *International Journal of Power Metallurgy*, Vol.42,

No. 4, 2006, pp. 23-32.

9) Firmansyah, D. A., Kaiser, R., Zahaf, R., Coker, Z., Choi, T. Y. and Lee, D. G., "Numerical Simulations of Supersonic Gas Atomization of Liquid Metal Droplets", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, No. 5, 2014, pp. 05HA09-1~05HA09-7.

10) Mates, S. P. and Settles, G. S., "A Study of Liquid Metal Atomization Using Close-Coupled Nozzles, Part 1: Gas Dynamic Behavior", *Atomization and Sprays*, Vol. 15, No. 1, 2005, pp. 19-40.

11) Smithells, C. J. and Brandes, E. A., *Metals Reference Book*, 6th ed., Butterworth, London, 1983, p. 14-7.

12) Chase, M. W., *NIST-JANAF Thermochemical Tables Part II Cr-Zr, ACS AND AIP for NIST*, American Chemical Society, Washington, D.C., USA, American Institute of Physics for the National Institute of Standards and Technology, Woodbury, N.Y., USA, 4th ed., 1998, pp. 1697-1700.

13) Nishi, T., Shibata, H., Ohta, H. and Waseda, Y., "Thermal Conductivities of Molten Iron, Cobalt, and Nickel by Laser Flash Method", *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing*

*Science*, Vol. 34, No. 12, 2003, pp. 2801-2808.

14) Lida, T. and Guthrie, R. L., *The Physical Properties of Liquid Metals*, Oxford, U.K, Clarendon Press, 1988, p. 183.

15) Xiao, F., Fang, L. and Nogi, K., "Surface Tension of Molten Ni and Ni-Co Alloys", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 21, No. 2, 2005, pp. 201-206.

16) Herrin, J. L. and Dutton, J. C., "Supersonic Base Flow Experiments in the Near Wake of a Cylindrical Afterbody", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 1, 1994, pp. 77-83.

17) Shin, J. R., Moon, S. Y., Won, S. H. and Choi, J. Y., "Detached Eddy Simulation of Base Flow in Supersonic Mainstream", *The Korean Society for Aeronautical & Sciences*, Vol. 37, No. 10, 2009, pp. 955-966.

18) Shin, J. R. and Choi, J. Y., "Dynamic Correction of DES Model Constant for the Advanced Prediction of Supersonic Base Flow", *The Korean Society for Aeronautical & Sciences*, Vol. 38, No. 2, 2010, pp. 99-110.

19) Dombrowski, N. and Johns, W. R., "The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets", *Chemical Engineering Science*, Pergamon Press Ltd., Oxford, Great Britain, Vol. 18, 1963, pp. 203-214.