

## 작동유체에 따른 초음속 제트유동에 의해 생성되는 충격파와 영향에 관한 수치해석

정종길<sup>1</sup>, 윤준규<sup>2</sup>, 임종한<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>가천대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>가천대학교 기계공학과

## Numerical Analysis on Shock Waves Influence Generated by Supersonic Jet Flow According to Working Fluids

Jong-Kil Jung<sup>1</sup>, Jun-Kyu Yoon<sup>2</sup>, Jong-Han Lim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon Univ.

<sup>2</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.

**요약** 고압을 사용하는 초음속 제트기술은 작동유체와 관련하여 다양한 형태의 산업 및 공학응용분야에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 고압파이프에서 분출되는 초음속 제트유동에 의해 생성되는 충격파의 영향을 고찰하기 위해 ANSYS FLUENT v.16를 가지고 SST  $k-\omega$  난류모델을 적용하여 작동유체(공기, 산소, 수소)에 따른 압력비 및 Mach수의 유동특성을 해석하였다. CFD 해석시 경계조건으로 입구의 가스온도는 300 K이고, 압력비율은 5:1로 설정하였으며, 밀도함수는 이상기체의 법칙을 이용하였고, 점성함수는 Sutherland 점성의 법칙을 이용하였다. 그 해석결과로 작동유체의 밀도가 작은 기체일수록 분출거리에 따라 압력비가 더 크게 떨어짐을 알 수 있었고, Mach수는 작동유체의 밀도가 높을수록 낮음을 알 수 있었다. 따라서 작동유체의 밀도에 따라 충격파의 영향이 크다는 점을 알았다. 본 연구를 토대로 다양한 작동유체에 따른 제트의 형상 및 직경 변화, 압력비의 변화 등에 따른 초음속 제트유동이 충격파에 미치는 영향에 대한 실험 및 CFD 해석연구와 실증연구가 병행하여 진행된다면 해석결과의 신뢰성은 더 높아질 것으로 사료된다.

**Abstract** Supersonic jet technology using high pressures has been popularly utilized in diverse industrial and engineering areas related to working fluids. In this study, to consider the effects of a shock wave caused by supersonic jet flow from a high pressure pipe, the SST turbulent flow model provided in the ANSYS FLUENT v.16 was applied and the flow characteristics of the pressure ratio and Mach number were analyzed in accordance with the working fluids (air, oxygen, and hydrogen). Before carrying out CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis, it was presumed that the inlet gas temperature was 300 K and pressure ratio was 5 : 1 as the boundary conditions. The density function was derived from the ideal gas law and the viscosity function was derived from Sutherland viscosity law. The pressure ratio along the ejection distance decreased more in the lower density working fluids. In the case of the higher density working fluids, however, the Mach number was lower. This shows that the density of the working fluids has a considerable effect on the shock wave. Therefore, the reliability of the analysis results were improved by experiments and CFD analysis showed that supersonic jet flow affects the shock wave by changing shape and diameter of the jet, pressure ratio, etc. according to working fluids.

**Keywords** : Supersonic Jet, Shock Wave, Blast Wave, Mach Number, SST Turbulent Model

\*Corresponding Author : Jong-Han Lim (Gachon Univ.)

Tel: +82-31-750-5650 email: kkjong@gachon.ac.kr

Received April 28, 2016

Revised May 16, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

## 1. 서론

초음속 제트(Supersonic jet)는 고압의 유체를 작은 구멍을 통해 외부로 분출하면 속도가 고른 분자류를 얻는데 이 분자류의 유속은 음속보다 수배 이상으로 빠르게 되어 이를 초음속 제트라 한다. 이에 사용되는 작동유체로는 기체 및 액체 모두 사용이 가능하고, 이 기술은 작동유체의 제약이 많지 않아 응용성이 뛰어나며 다양한 형태의 산업 및 공학 응용분야에 적용이 가능함으로 유동해석연구에 많은 관심을 갖고 있다. 초음속 제트의 외형은 비교적 단순하지만 제트의 내부현상으로는 난류혼합, 충격, 열전달 특성 및 다른 압축효과 등의 복잡한 현상들이 발생하여 분무실험 및 CFD해석을 통한 여러 설계방안이 제시되고 있다. 유래를 보면 Bowdend와 Bruntos[1]은 1950년대에 고속의 항공기가 빗물로 인하여 표면을 깎이며 변형되는 현상을 관측하여 그 현상을 분석 및 고찰하게 되어 초음속 제트에 대한 연구의 필요성을 갖게 되었다. 그로 인해 초음속 액체제트 분사기술이 발전하기 시작하여 현재에는 고압을 응용한 초음속 제트로 재료의 세척 및 절단 등의 물리적 현상에도 널리 적용 및 설계[2]되고 있어 초음속 제트의 연구를 발전시키고 있다. 이와 관련된 연구동향으로서 Kang 등[3]은 다중 노즐로 구성되는 충돌 제트시스템에 대하여 초음속의 작동유체를 분출시켜 Reynolds수의 변화 따른 열유동특성을 분석하였고, 충돌평판 이동속도에 따른 열전달 성능은 감소하나 노즐근방에서 Nusselt수가 최대가 된다고 나타냈으며, Yu 등[4]는 2차원 축소-확대노즐인 초음속 추력편향노즐의 축소모델을 이용하여 Mach수를 변화시켜 피치 편향각 및 피치 플랩길이에 따른 추력을 측정하여 노즐의 내부유동특성을 고찰하였고, Park 등[5],[6]은 직경이 다른 마이크로 Shock tube를 이용한 내부유동특성을 조사하기 위하여 두 개의 격막을 설치하여 파막 압력의 변화에 따른 단면 공간내의 압력차로 생성되는 충격파특성을 조사하여 작은 직경 3 mm가 큰 직경 6 mm보다 Shock tube에서 충격파의 속도 및 압력강하가 더 떨어짐을 보였다. Lee 등[7]은 초음속영역에서 원뿔형상의 표면에 형성되는 충격파의 영향을 조사하기 위해 풍동실험장치를 이용하여 압력을 측정하면서 쉘리렌 가시화사진을 통한 충격파의 형태도 확인하였으며 실험치와 이론치를 비교한 결과로 3%이하의 오차를 보여 해석의 정확도를 보였으며, Hong 등[8]은 충격기류분사시

스템의 탈진성능 향상을 위해 탈진부위의 형상별로 탈진 공기량, 기류분포 및 유입속도분포 등을 고찰하여 최적의 설계방안을 제시하였고, Kwon 등[9]는 가스폭발로 인하여 생성되는 충격파의 속도를 관측하는 연구를 진행하여 폭발로 인하여 생성되는 충격파가 사람 고막에 미치는 영향을 고찰하여 충격파의 중요성을 제시하였다.

본 연구에서는 고압파이프(분사노즐)의 파열로 고압의 기체가 대기로 분출되는 초음속 제트유동으로 인하여 생성되는 충격파의 영향을 고찰하기 위해 먼저 Mohamed와 Paraschivoiu의 기존 연구[10]의 결과와 비교를 통해 수치해석 난류모델에 대한 타당성 검증을 수행한 후 동일한 입구압력에서 작동유체에 따른 압력비 및 Mach수 등의 유동특성을 고찰하였다.

## 2. 이론해석

### 2.1 해석모델

본 연구는 ANSYS v.16의 전처리 프로그램인 Design Modeler를 이용하여 고압파이프와 노즐의 형상 및 해석영역을 모델링하였으며, Fig. 1에 나타내었다.

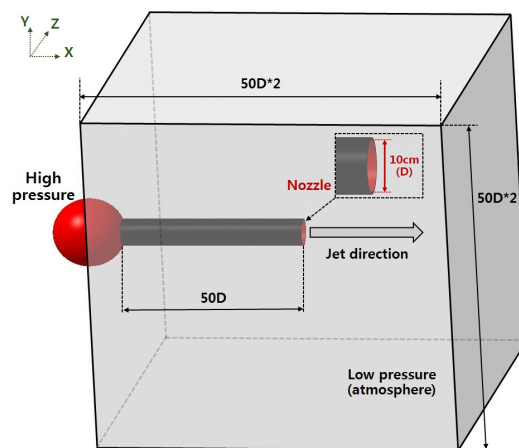


Fig. 1. Geometry of the pipe configuration and analysis domain

여기서 Table 1에 나타난 바와 같이 고압파이프(분사노즐)의 내경(D)은 10 cm이고, 해석영역의 계산범위는 충격파(Shock wave)의 유동특성을 충분히 나타내기 위하여 분사노즐을 기점으로 제트의 진행방향( $\pm X$ 축)으로 각

각 파이프 내경의 50배, 제트의 직각방향(Y축)으로 파이프 내경의 50배로 확대하여 설계하였다.

Table 1. Configuration of pipe

| Contents           | Size          |
|--------------------|---------------|
| Nozzle diameter, D | 10 cm         |
| analysis scale     | (50D+50D)×50D |

## 2.2 지배방정식

본 연구에서 초음속 제트의 내부유동은 2차원 비정상 상태, 압축성 난류유동으로 가정하였고, 작동유체의 밀도는 이상기체방정식을 적용하여 산출하였다. 본 해석 연구에 적합한 난류모델을 설정하기 위해 One Equation 모델 중 익형 및 미사일 등의 해석에 권장되는 S-A(Spalart-Allmaras) 모델[11]과, Two Equation 모델 중 난류운동에너지( $k$ )와 난류소산율( $\omega$ ), 수송방정식 등의 두개의 방정식을 고려한 RNG(Re-Normalization Group)  $k-\varepsilon$ 모델[12] 및 SST (Shear Stress Transport)  $k-w$ 모델[13]을 선정하였으며, 그 결과로 난류모델 중에서 SST  $k-w$  난류모델이 여러 난류모델 중 유동의 박리와 경계층해석에 안정적이고, 민감도분석에서 가장 근사한 결과[14]를 얻게 되어 수치해석의 타당성을 검증하여 본 연구에서는 SST  $k-w$ 모델을 선정하여 적용하였으며, 그 지배방정식은 다음과 같다[15].

- 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

- 난류 운동에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2)$$

- 난류 소산율 수송방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (3)$$

여기서  $\Gamma$ 는 유효확산계수,  $G$ 는 난류에너지,  $Y$ 는 난류 손실,  $D$ 는 상호확산항,  $S$ 는 사용자정의 항 등을 나타낸다.

## 2.3 수치해석

본 연구는 대기로 분출된 초음속 제트유동으로 인하여 생성되는 충격파특성을 고찰하기 위해 해석 Solver는 FLUENT를 사용하였으며, 상용프로그램인 ANSYS Workbench의 Geometry 및 Mesh를 사용하여 모델링하였다. 격자(mesh)는 해석의 정확도를 높이기 위하여 2차원 격자 중 사각형(Quadrilateral) 격자를 사용하였고, 형상의 특성상 Symmetry 경계조건을 부여하여 해석시간을 줄였다. 총 격자수는 약 50만개이며, 격자의 Orthogonal Quality의 최소값 1, Skewness 최대값 0, Aspect Ratio 최대값 1의 Quality로 격자시스템을 구축하였다. 압력비율은 5:1, 온도는 300K로 설정하였으며, 밀도함수는 이상기체의 법칙을 이용하였고, 점성함수는 Sutherland 점성의 법칙을 이용하였다. 여기서 계산의 수렴조건은 해석의 정확성을 기하기 위해 모든 변수에 대해  $10^{-7}$ 까지 수렴하도록 하였으며, 매 시간 Step마다 15회 이상 반복 수행하였다. Fig. 2는 격자계의 구성을 나타낸 것이며, 원 점선영역은 확대할 위치를, 사각 점선영역은 확대한 파이프 및 노즐의 형상을 나타낸다.

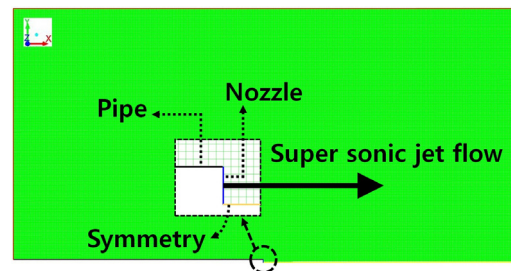


Fig. 2. Mesh System

Table 2. Quality of mesh

| Type               | Quad only |
|--------------------|-----------|
| Initial cells      | 500,000   |
| Orthogonal Quality | 1 (min)   |
| Skewness           | 0 (Max.)  |
| Aspect Ratio       | 1 (Max.)  |

Table 2 및 Table 3은 해석을 위한 격자의 Quality 및 상세 설정조건을 나타낸 것이고, Table 4에는 작동유체의 물리적 성질을 나타내었다.

Table 3. Detail conditions for analysis

| Type            | Conditions    | Detailed setting   |
|-----------------|---------------|--------------------|
| Solver          | FLUENT        | Density-based      |
| Turbulent model | 2 Equation    | SST $k-\omega$     |
| Time            | Unsteady stae | $1 \times 10^{-6}$ |
| Space           | Symmetry      | -                  |
| Temperature     | 300 K         | Default            |
| Pressure ratio  | 5 : 1         | -                  |

Table 4. Physical Properties of working fluids

| Item \ Gas                            | Air    | O <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
|---------------------------------------|--------|----------------|----------------|
| Molecular weight [kg/kmol]            | 28.97  | 31.999         | 2.016          |
| Critical temperature [K]              | 133.0  | 154.6          | 33.1           |
| Critical pressure [Mpa]               | -      | 5.04           | 1.297          |
| Density at 300 K [kg/m <sup>3</sup> ] | 1.1774 | 1.3007         | 0.08185        |

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수치해석 검증

본 연구는 Mohamed와 Paraschivoiu의 기존연구의 결과[10]와 비교 및 분석하기 위하여 동일한 형상 및 압력비율을 5:1로 동일하게 적용하여 튜브길이에 따른 정압(Static pressure) 및 온도의 특성을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과로 기존연구의 결과값과 SST  $k-\omega$  모델을 적용한 해석값을 비교할 때 근사한 결과를 얻게 되어 수치해석의 타당성을 검증할 수 있었다. 그 결과로  $6 \times 10^{-5}$  s 시점에서 거리  $\pm 0.1$  m(총 20 cm) 내에서 혼합이 진행이 되어 혼합과정에서 충격파가 일어남을 알 수 있었다. 이는 전압(Total pressure) 및 마하수의 특성에서 나타난 바와 같이 충격파의 원리[16]을 잘 묘사한 것으로 유체가 충격파를 거치게 되면 전압과 마하수가 감소하면서 온도는 상승하는 특성을 보임을 알 수 있었다.

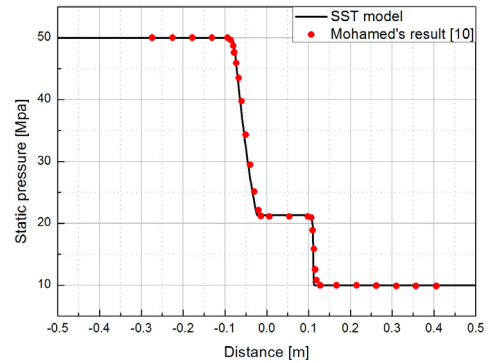


Fig. 3. Static pressure characteristics according to tube distance

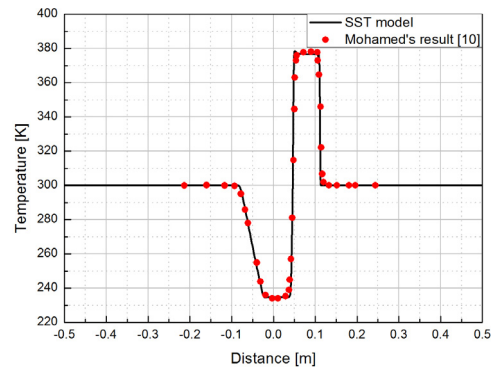
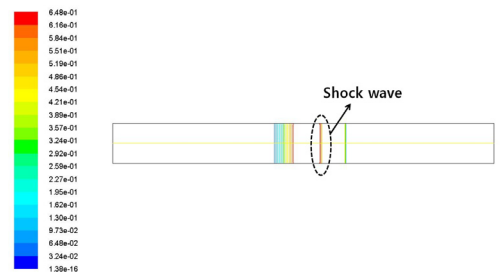
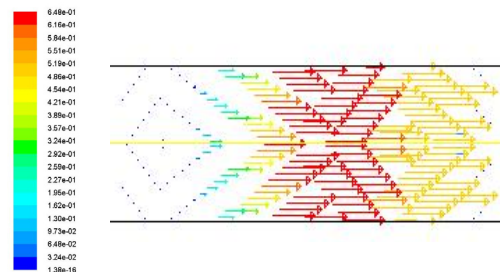


Fig. 4. Temperature characteristics according to tube distance



(a) Generation of shock wave



(b) Diamond Shock for velocity field

Fig. 5. Shock wave and velocity field of shock tube

Fig. 6은 Shock tube내에서 충격파 생성 및 유동장 특성을 나타낸 것이다. Fig. 6의 (a)는 Shock tube내의 충격파 생성을 가시화한 것으로 짧은 구간에 온도가 급상승되는 현상을 나타내기 위함이고, Fig. 6의 (b)는 초음속 제트유동을 벡터장으로 나타낸 것으로 다이아몬드형태의 충격파현상이 관측됨으로써 Shock tube내에서 충격파가 생성됨을 알 수 있었다.

### 3.2 초음속 제트유동의 특성

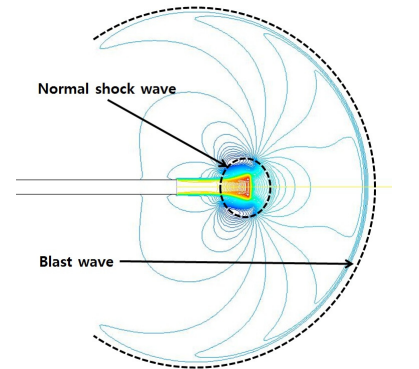
초음속 제트유동은 음속 이상의 속도를 가진 유동으로 유동의 거동에 따라 종류가 다른 충격파가 생성된다. 충격파는 생성위치와 생성전후의 물성치의 변화에 여러 충격파로 구분되는데 기본적인 형태는 수직인 막형태를 띤 수직인 충격파로서 나타나며  $Ma > 1$ 에서  $Ma < 1$ 로 변화되는 특성으로 초음속이 충격파를 거치며 아음속으로 변화한다. 보통 초음속 제트유동의 직접적인 영향은 충격파이지만 간접적인 영향으로 폭풍파(Blast wave)도 발생된다. 이 폭풍파는 충격파와는 달리 유동과 직접적인 접촉없이 유동 주위의 공기가 밀리면서 생성되는 파동으로 구의 형태로 퍼져나가는 특성을 나타낸다. 이런 특성이 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 본 연구결과에서 얻어진 충격파 및 폭풍파의 형태와 Vortex ring의 형태를 확인할 수 있었다. 이와 같이 충격파는 강한 유동으로 생성되는 유선에서만 영향을 미치는 반면에 폭풍파는 유동이 생성되지 않는 노즐후방 및 주위에 영향을 미침으로 초음속 제트 설계시 안전을 확보해야 할 유동인자를 고려해야 필요가 있다. 또한 초음속 제트유동이 대기로 분출되면서 고속의 작동유체가 주위공기와 마찰을 일으키게 되어 강한 와류형태로 Vortex ring이 생성됨을 확인할 수 있었다.

### 3.3 작동유체의 변화에 따른 압력비의 특성

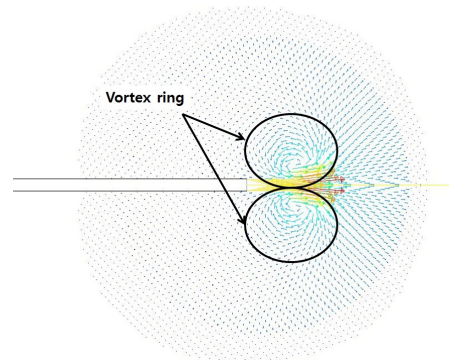
일반적으로 고압 Pipe에서 대기로 흐르는 초음속 제트유동에 의하여 생성되는 충격파 압력은 노즐부에서부터 거리에 따라 영향이 크게 미친다.

Fig. 8은 작동유체를 변경했을 때  $X/D$ (무차원길이)에 따른 압력비( $P_t/P_0$ )의 특성을 나타낸 것이다. 여기서  $X$ 는 전방길이,  $D$ 는 고압파이프의 직경(분사노즐의 직경),  $P_0$ 는 초기의 전압력,  $P_t$ 는 거리에 따른 전압력이다.

그 결과로 압력비의 변화특성을 3단계영역으로 나누어 고찰할 수 있었다. 1단계영역에는 압력비가 약 1정도



(a) Contour of shock wave and blast wave



(b) Vortex ring

Fig. 6. Supersonic jet flow field generated at shock tube

로 일정하게 유지되는 위험영역(Dangerous zone)이며, 2 단계영역은 어느 정도 거리가 떨어지면서 압력비가 큰 폭으로 감소되는 압력비가 0.9~0.2 범위로 경계영역(Warning zone)이고, 3단계영역으로 압력비가 0.2이하인 안전영역(Safety zone)으로 각각 구분하여 분석할 수가 있었다. 그 특성으로 작동유체에 따라 압력비가 0.2로 떨어지는 안전영역의 거리가 달라지는데, 공기의 경우는  $X/D=27.4$  이후이며, 산소의 경우는  $X/D=27.6$  이후이고, 수소의 경우는  $X/D=22.1$  이후에서 안전영역이 나타남을 알 수 있었다. 이는 작동유체의 밀도가 낮은  $H_2 > 공기 > O_2$  순으로 압력 즉 힘의 세기를 적게 받아 안전영역이 빨리 도달되고 멀리까지 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 초음속 제트유동으로 인한 충격파 및 폭풍파의 형태를 고찰하기 위한 정압(Static pressure) 및 속도(Velocity Magnitude)의 contour특성을 나타낸 것이다.

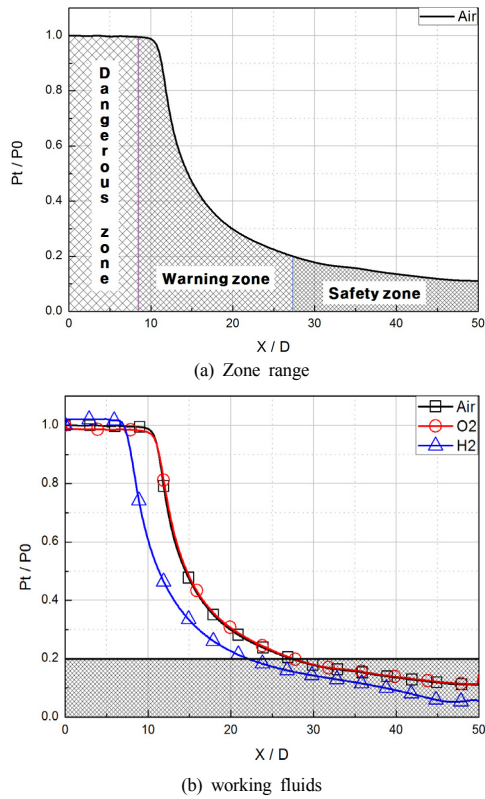


Fig. 7. Pressure ratio characteristics according to working fluids

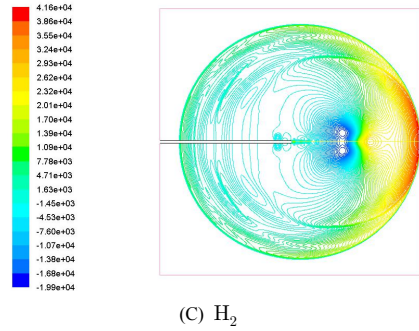
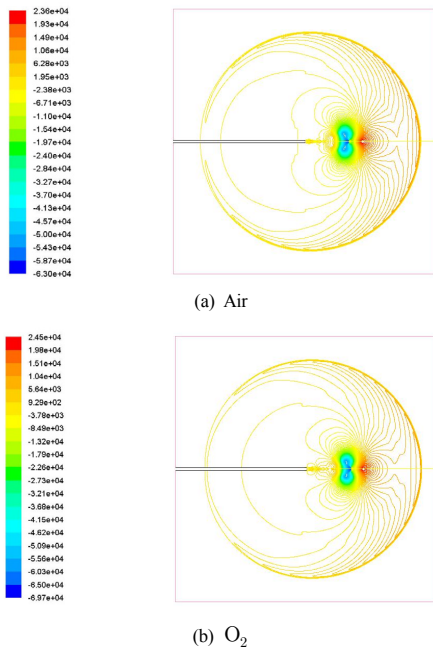
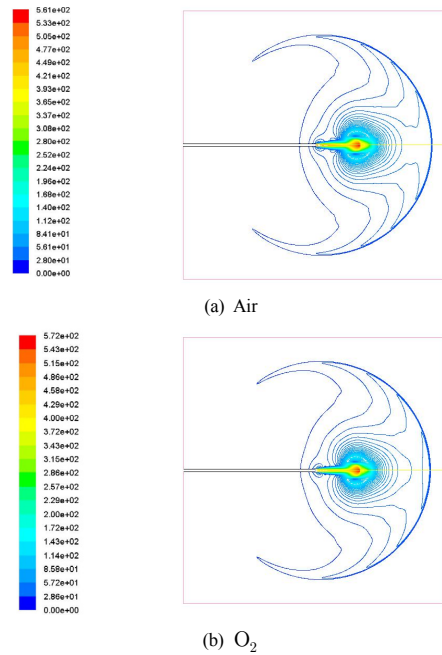


Fig. 8. Static pressure contour in accordance with working fluids at 11.3 ms

그 결과로 Fig. 9에 나타난 바와 같이 동일한 시간 11.3 ms에서 작동유체(공기, 산소, 수소) 모두 충격파가 생성된 뒤로 Vortex Ring이 생성되어져 있는 형태를 볼 수 있었으며, 특히 밀도가 낮은 H<sub>2</sub>의 경우는 고속성분으로 인하여 주위공기가 밀리면서 생성되는 2차 폭풍파가 선명하게 나타남을 관찰할 수 있었으며, 공기와 산소보다 빠르게 진행되어 가는 형태를 관측할 수 있다.



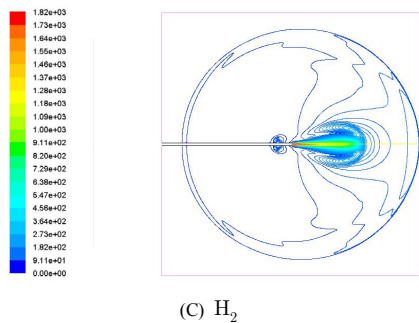


Fig. 9. Mach number contour in accordance with working fluids at 11.3 ms

또한 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 동일한 시간 11.3 ms에서 작동유체의 폭풍과 특성을 살펴보면, 공기와  $O_2$ 는 중심부에 근사한, 같은 위치에 근사한 속도의 특성이 보이며,  $H_2$ 는 제2차 폭풍과의 여파로 비록중심부가 가장 큰 속도특성을 보이지 않지만  $H_2$ 의 속도성분이 가장 큰 속도특성을 내재하고 있어 가장 강한 폭풍파를 생성했음을 알 수 있다.  $H_2$ 의 폭풍파의 영향범위가 공기와  $O_2$ 보다 완벽한 구형태로 나타나는 것은 밀도가 가장 낮은  $H_2$ 에 의해 생성된 폭풍파가 반경 내의 위력이 공기와  $O_2$ 보다 크다는 것을 알 수 있다.

### 3.4 작동유체의 변화에 따른 Mach수의 특성

Fig. 11은 파이프 파열지점(노즐)에서 대기로 흐르는 초음속 제트유동의 Mach수를 산출하여 작동유체를 변경했을 때  $X/D$ (무차원길이)에 따른 Mach수의 특성을 나타낸 것이다. 그 결과로 노즐부근에서의 Mach수 특성은 초기 충격파의 영향으로 정압과 동압의 에너지교환으로 불안정한 속도변화를 나타내어 위험영역(Dangerous zone)을 지나고 경고영역(Warning zone)에 들어서면서 Mach수가 급격히 감소하며, 초음속이 아음속( $Ma < 1$ )으로 변화하는 지점을 지난 후에 안전영역(Safety zone)에 들어가는 것을 확인할 수 있었다. 특히 경고영역을 들어서면서 밀도가 낮은  $H_2$ 의 경우가 Mach수가 더 빠르게 떨어짐을 확인할 수 있어 밀도가 낮은  $H_2 > O_2 >$  공기 순으로 아음속( $Ma < 1$ )영역으로 빨리 진입함을 알 수 있었다.

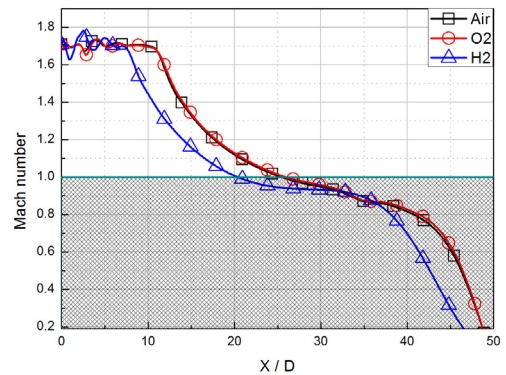


Fig. 10. Mach number characteristics according to working fluids

## 4. 결론

본 연구에서는 고압의 작동유체에 의해 생성되는 충격파의 영향범위를 고찰하기 위하여 Shock Tube의 선행연구[10]와 CFD 해석결과를 비교하여 수치해석적으로 검증하였고, 작동유체에 따른 초음속 제트유동에 생성되는 충격파의 영향을 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) 난류모델의 타당성을 검증하기 위해 선행연구를 통해 선정된 SST  $k-\omega$  난류모델의 해석결과와 와 기존연구의 결과를 비교하여 민감도 분석을 수행한 결과로 근사한 해석결과를 나타냈다.
- (2) 작동유체의 밀도가 작은 기체일수록 분출거리에 따라 압력비가  $H_2 >$  공기  $>$   $O_2$  순으로 더 크게 떨어짐을 알 수 있었다.
- (3) 작동유체에 따른 초음속 제트유동의 Mach수는 작동유체의 밀도가 높을수록 낮음을 알 수 있었다. 이는 대기압으로 작동유체가 지나감에 있어 밀도가 높은 기체가 저항의 영향을 받아 유체의 Mach수가 낮아지는 것으로 예측된다.

그 결과로 초음속 유동에 있어서 작동유체의 밀도는 충격파의 속도와 압력의 영향을 결정짓는 인자임을 알 수 있어, 본 연구의 결과를 기초로 다양한 작동유체에 따른 제트의 형상 및 직경 변화, 압력비의 변화 등에 따른 초음속 제트유동이 충격파에 미치는 영향에 대한 실험 및 CFD 해석연구와 병행하는 실증연구가 진행된다면 신뢰성은 더 높아 질 것으로 사료된다.

## References

- [1] F. P. Bowden and J. H. Brunton, "Damage to solids by liquid impact at supersonic speeds", *Nature*, Vol. 181, No. 4613, pp. 873-875, 1958.
- [2] S. M. Jeong and S. M. Jang, "A design and development of multi air gun for suction and shooting a jet of compressed air", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 11, pp. 4944-4949, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.11.4944>
- [3] S. J. Kang, S. W. Seo and K. S. Lee, "Effect of moving plate on flow and thermal characteristics of dryer with jet impingement", *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 112-115, 2011.
- [4] D. W. Yu, S. M. Choi and S. H. Oh, "Experimental study of the thrust vectoring characteristics in a two-dimensional convergent-divergent nozzle", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 84-93, 2013.
- [5] J. O. Park, G. W. Kim and H. D. Kim, "An Experimental study on micro shock tube flow", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 74-80, 2012.
- [6] J. O. Park, G. W. Kim and H. D. Kim, "Experimental study of the shock wave dynamics in micro shock tube", *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 54-59, 2013.
- [7] J. H. Lee, J. H. Choi, H. G. Yoon and K. H. Kim, "The consideration about pressure on surface of cone shape in experiments of supersonic wind tunnel I", *KSPE Spring Conference*, pp. 391-394, 2011.
- [8] S. G. Hong, Y. J. Jung, K. W. Park, M. H. Jeong, K. H. Lim, H. M. Suh and B. H. Shon, "A study on the optimization design of pulse air jet system to improve bag-filter performance", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 13, No. 8, pp. 3792-3799, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.8.3792>
- [9] H. K. Kwon, K. J. Tak, J. H. Kim, M. Oh, J. S. Chae, H. S. Kim and I. Moon, "Maximum pressure and the blast wave analysis of a amount of HMX", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 52, No. 6, pp. 706-712, December, 2014.
- [10] K. Mohamed, M. Paraschivoiu, "Real gas numerical simulation of hydrogen flow", *International Energy Conversion Engineering Conference Technical Papers*, pp. 727-740, 2004.
- [11] P. R. Spalart and S. R. Allmaras, "A One-equation turbulence model for aerodynamic flows", *Recherche Aerospaciale*, Vol. 1, pp. 5-21, 1994.
- [12] V. Yakhot, S. Thangam, T. B. Gatski, S. A. Orszag, C. G. Speziale, "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", *Physics of Fluids*, Vol. 4, No. 7, pp. 1510-1520, 1992.
- [13] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [14] H. D. Kam, and J. S. Kim, "Assessment and validation of turbulence models for the optimal computation of supersonic nozzle flow", *The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 18-25, 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.1.018>

- [15] ANSYS FLUENT Theory Guide 16.1 *ANSYS Inc.*, 2016
- [16] J. D. Anderson "fundamentals of aerodynamics", Fifth edition, *Mcgraw hill*, pp. 515-543, 2011.

### 정 종 길(Jong-Kil Jung)

[준회원]



- 2015년 2월 : 가천대학교 기계·자동차공학과 (공학학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 대학원 기계공학과 재학

<관심분야>

열유체공학, CFD

### 윤 준 규(Jun-Kyu Yoon)

[정회원]



- 1987년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 명지대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

열유체공학, 자동차공학

### 임 종 한(Jong-Han Lim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1992년 8월 : 경희대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

열유체공학, 자동차공학