

# 비대칭 3차원 핀틀 노즐의 연결관 각도와 핀틀 위치에 대한 성능 특성 해석

이강민\* · 홍지석\* · 성홍계\*\*† · 허준영\*\*\* · 진정근\*\*\* · 하동성\*\*\*

## Performance Characteristics Analysis of a Three Dimensional Asymmetric Pintle Nozzle Induced by Connection-Tube Angle and Pintle Stroke Position

KangMin Lee\* · JiSeok Hong\* · Hong-Gye Sung\*\*†  
Junyoung Heo\*\*\* · Jungkun Jin\*\*\* · DongSung Ha\*\*\*

### ABSTRACT

A three dimensional numerical analysis has been conducted to analyze the effects of a pipe angle, connecting a combustion chamber and a pintle nozzle, and pintle position on pintle nozzle performance. The compressibility correction of  $k-\omega$  SST turbulent model was implemented to precisely predict the characteristics of complex flow structures inside a supersonic pintle nozzle. Due to an 3-D asymmetric pintle nozzle configuration, complex helical flow streamlines and large flow separations were observed, which resulting in significant nozzle performance losses. As the angle of connection-tube decreases, the coefficient of performance increases and Since the flow structures are evidently changed to the pintle stroke position, the performance characteristics was analyzed.

### 초 록

비대칭 3차원 핀틀 노즐 형상에서 연소실과 핀틀 노즐의 연결관 각도와 핀틀 위치가 성능계수에 미치는 영향을 분석하기 위해 3차원 수치해석을 수행하였다. 초음속 노즐을 통해 배출되는 유동 특성을 정확히 예측하기 위하여  $k-\omega$  SST의 압축성 보정 난류모델을 적용하였다. 비대칭 3차원 형상에 의한 복잡한 유동 구조로 인하여 나선형 형태의 유선과 유동 박리가 관찰되었으며, 이로 인하여 유동의 전압력 손실이 크게 발생되었다. 유입관의 각도가 감소할수록 성능계수가 증가하였으며, 핀틀의 위치에 따른 유동구조가 크게 변화되기 때문에 이에 대한 성능 특성을 분석하였다.

Key Words: Pintle Nozzle(핀틀노즐), Compressibility Correction Turbulent Model(압축성 보정 난류 모델), Coefficient of Performance(성능계수)

\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

\*\*\* 국방과학연구소 추진기관부

† 교신저자, E-mail: hgsung@kau.ac.kr

## 1. 서 론

핀틀 노즐 추진기관은 고체로켓의 추력 제어를 위한 가장 효율적인 기술에 해당되며, 비행체의 정밀한 궤도천이 및 자세제어를 도모한다. 이 기술은 연소실 내부에 축방향 이동이 가능한 핀틀을 삽입하여 핀틀 이동에 따른 노즐 목 면적 변화를 통해 추력을 제어하는 기술이다[1]. 핀틀이 이동하게 되면 노즐에 다양한 충격파와 박리유동이 형성되고, 이들의 간섭현상으로 경계층의 난류발생을 증가시키고 유동의 불안정성을 일으킬 수 있다. 본 논문에서는 연결관이 존재하는 삼차원 비대칭 핀틀 노즐의 유동 특성을 연구하였으며, 연결관의 각도 변화와 핀틀 스트로크 변화가 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 수치 해법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 3차원 Favre-averaged 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 사용하였으며, 이는 다음과 같다[2].

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij})}{\partial x_j} = \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_j'' u_i''})}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{E}}{\partial t} + \frac{\partial ((\bar{\rho} \tilde{E} + \bar{p}) \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial (\tilde{u}_i \tau_{ij} - \overline{\rho h'' u_i''})}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

여기서, 첨자 “-” 는 시간 평균량, 첨자 “~” 는 평균 질량에 가중된 평균량을 나타낸다. 첨자  $i, j$  는 space tensor indices을 나타낸다.

### 2.2 난류모델

핀틀에 의한 연소실 내부의 복잡한 유동장과 핀틀 노즐을 통해 배출되는 복잡한 초음속 유동구조를 정확하게 모사하기 위해 Menter의 k- $\omega$  SST에 압축성 보정 난류 모델을 적용하였으며

대표적인 지배방정식은 다음과 같다[3,4].

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho w k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt}(\rho \omega) = & \frac{\gamma \rho}{\mu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ & + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 모델상수는 DNS를 기반으로 결정된 값을 사용한다.  $F_1$ 은 blending function으로 불리며, 벽면(경계층) 근처에서 1의 값을 가지고, 벽으로부터 멀어질수록 0의 값을 가지게 된다.

### 2.3 수치기법

3차원 유동을 효과적으로 계산하기 위해 시간에 대해서 LU-SGS(Lower - Upper Symmetric Gauss-Seidel) 기법을 적용하였다. 셀 경계에서 플럭스 계산을 위해 ASUMPW+ 기법을 이용하였고, 유동 변수에 대한 수치해의 불안정성을 감소시키기 위해 MUSCL 외삽기법을 이용하여 고차의 공간정확도를 갖게 하였다. 그리고 광범위한 마하수와 세장비가 다양한 격자크기에 안정적인 수치해를 얻기 위하여 예조건(percondition) 기법을 사용하였다. 또한, 수치 연산 속도를 빠르게 하기 위해 다중블록/다중영역 분할 기법을 적용하였다[1, 2, 5].

## 3. 해석 모델 및 경계 조건

연결관 각도는 사전 연구를 바탕으로 60, 75, 90도로 선정하였으며 계산 격자의 구성과 연결관의 3가지 형상은 Fig. 1과 같다. 정확한 유동 특성을 파악하기 위하여  $y^+$ 를 고려하여 격자를 생성하였다. 계산 영역은 총 92개의 블록이며, 격자수는 약 2,000만개로 구성하였다. 수치해석에 적용된 연소실의 경계조건은 모든 핀틀 위치에 대하여 연소실의 압력(103 MPa)과 온도(2870 K)를 유지하도록 질량유량을 조정하였다. 외기

(Outlet)의 경계조건은 고도 20 km 조건으로 하였다.

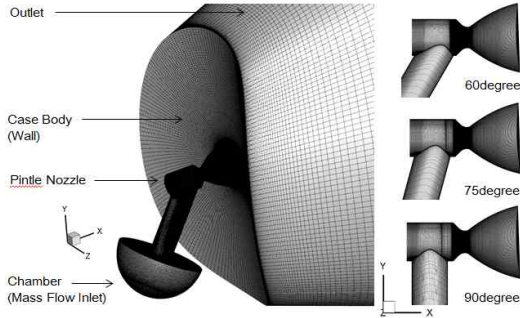


Fig. 1 Mesh Construction and Boundary Conditions of a Pintle Nozzle

#### 4. 결 과

##### 4.1 연결관의 유입 각도의 영향

유입각 75도와 핀틀 스트로크 0 mm 에서의 핀틀 내부의 유동 구조를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 연결관을 통해 유입되는 유동은 나선형(Helix)으로 회전하면서 노즐을 통해 분출되는 것을 알 수 있다. 유동의 나선형 구조는 연결관의 입사각과 핀틀의 현상에 의해 결정된다. 유동의 방향성은 크게 두 부분으로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째는 핀틀노즐 상단벽으로 이동하는 유동(Top flow)이며, 두 번째는 핀틀의 하단을 따라 핀틀 팁으로 이동하는 유동이다. 상단의 유동(Bottom flow)은 연결관을 통해 유입된 유동이 핀틀의 좌우 면을 따라 노즐 상단벽에서 충돌이 일어나 유동이 분산되며 핀틀노즐의 윗면을 따라 이동한다. 하단 유동은 연결관으로 유입된 유동의 급격한 방향전환과 노즐의 오목한 형상에 의해 유동의 회전과 재순환이 상호작용하면서 핀틀 팁 쪽으로 이동하게 된다. 그 후 이 두 유동은 핀틀 팁에서 박리에 의한 회전과 함께 충돌하며 노즐을 통해 분출된다. 유동의 재순환 영역은 핀틀노즐 챔버의 앞과 뒤 그리고 핀틀 팁에서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 유동의 회전과 박리가 심각한 에너지 손실을 발생시킬 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3

은 연결관 각도 변화에 따른 전압력과 유선을 나타낸다. 전압력의 결과를 통해 각도가 감소할수록 노즐을 통해 배출되는 유동의 영역이 넓어지면서 에너지 손실이 점차 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 추력이 증가할 것으로 예측할 수 있다. 또한, 노즐 출구의 중심부를 기준으로 전압력 값이 상단 영역에 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 연결관 존재에 의한 배출 유동의 비대칭성으로 인하여, 축(Y) 방향 추력이 작용할 것으로 판단된다. 유선을 통하여 각도가 감소할수록 재순환영역과, 챔버 상단벽에 반사되는 유동패턴이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

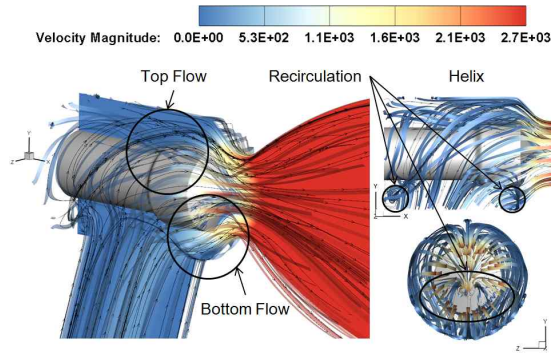


Fig. 2 Helix and Recirculation of Pintle Nozzle

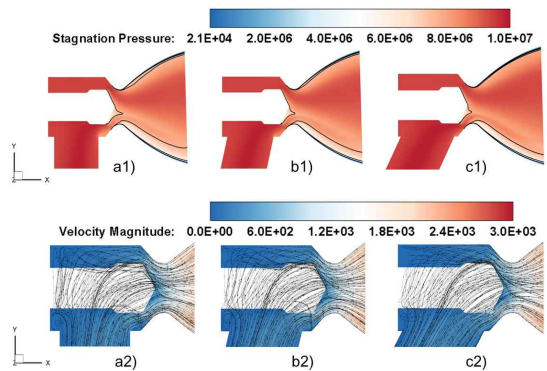


Fig. 3 Contours of Stagnation Pressure and Velocity Magnitude Including Stream line; a) Angle 90, b) Angle 75, c) Angle 60 degrees and 1) Stagnation Pressure, 2) Velocity Magnitude

위에서 살펴본 나선형 유동과 유동 박리에 의해 성능 손실이 발생되는데 이를 정량적으로 나타내기 위하여 성능계수(추력 및 배출 계수)을 분석하였으며 연결관의 각도별 성능계수를 Table 1에 나타내었다. 성능 보정 계수는 약 0.8 정도의 수준인데 일반 추진기관 노즐의 보정계수가 0.97 이상임을 감안하면 상당히 낮은 수준이다. 또한, 연결관 각도가 감소함에 따라 보정계수가 증가하는데 이는 연결관 각도가 감소하게 되면 연결관과 핀틀 노즐의 연결부 면적이 넓어지고 유입각도가 더 완만해지면서 배출 유량이 증가하고, 핀틀 면과 핀틀 노즐 벽을 치고 나가는 유동의 충돌 및 간섭에 의한 운동량 손실이 감소하기 때문이다.

**Table 1** Performance Correction Coefficients

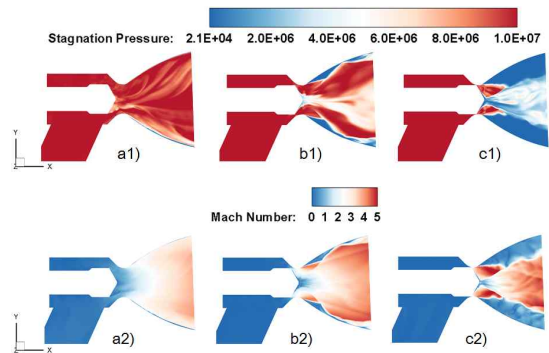
Angle (degree)	DCC*	TCC**
60	0.812	0.802
75	0.802	0.792
90	0.794	0.782

\*Discharge Correction Coefficient, \*\*Thrust Correction Coefficient

#### 4.2 핀틀 위치의 영향

핀틀 위치는 최소, 중간, 최대 스트로크의 형상을 적용하였다(연결관 각도 65 도). Fig. 4는 전압력과 마하수 분포를 나타낸다. 핀틀의 위치가 이동함에 따라 노즐목 이후의 유동이 매우 복잡해 짐을 알 수 있다. 핀틀 위치가 1일 때에는 유량이 노즐 팽창부에 꽂차있으나 아랫면에서는 전압력 손실이 발생한다. 이는 아랫면에서 충격파가 발생되어 나타나는 결과이다. 아랫면에서 충격파가 발생된 이유는 연결관 유입부의 아랫면(유입관과 노즐의 연결부분)에서 급격한 유동방향의 전환이 이루어져야 하는데 유입 유동이 빠르기 때문에 유질이 고르지 못한 상태에서 노즐 확대부에서 유속이 초음속으로 가속됨에 따라 충격파가 발생된다. 또한 핀틀팁(nozzle

tip)에서 압력 손실이 크게 발생됨을 알 수 있다. 이는 전절에서 언급되었듯이 핀틀 단면이 급격하게 작아짐에 따라 유동 박리와 충격파의 간섭이 발생되기 때문이다. 이러한 압력 손실 현상은 성능에도 영향을 미칠 것임을 예상할 수 있다. 핀틀 위치 2에서는 유량이 노즐 팽창부를 채우는 데 다소 부족하게 되고 이에 따라 노즐 벽면에서 흐름 박리가 발생됨을 알 수 있다. 위치 3에서는 노즐목의 위치가 노즐 축소부에서 발생되어 흐름 박리가 위치 1, 2처럼 노즐 팽창부가 아닌 노즐 축소 부에서 발생되었다. 이와 같이 핀틀 노즐에서는 핀틀 위치에 따른 유동의 형태가 매우 크게 변할 뿐 만 아니라, 전압력 손실이 매우 큼에 따라 수치해석을 통하여 성능 계수를 조사하였다 (Table 2).



**Fig. 4** Contours of Stagnation Pressure and Mach number at the pintle locations; a) Stroke Number 1, b) Stroke Number 2, c) Stroke Number 3 and 1) Stagnation Pressure, 2) Mach Number

**Table. 2** Performance Correction Coefficients

Stroke Number	DCC	TCC
1	0.872	0.842
2	0.968	0.934
3	0.999	0.525

## 5. 결 론

3차원 수치해석 방법을 적용하여 비대칭적인 3차원 핀틀노즐의 유입관 각도와 핀틀의 위치가 성능계수에 미치는 영향을 분석하였다. 유입관의 각도와 핀틀 위치마다 다양한 유동구조를 보이며, 이로 인하여 성능인자는 이론적인 값과 매우 상이하게 나타났다.

연결관 각도가 감소할수록 성능계수가 증가하는데, 이는 핀틀 노즐로 유입되는 유동의 회전력과 유동박리가 줄어들기 때문이다. 복잡한 비대칭적 유동 구조와 유동 박리로 인하여 추력 보정계수 및 배출 보정계수는 약 0.8 수준으로 매우 손실이 크을 알 수 있었다. 핀틀이 전방으로 이동할수록 특정 위치(핀틀 위치 3)를 제외한 성능 계수는 증가하는데 이는 기하학적 노즐목의 위치와 실제 유동에 의한 노즐목 위치의 차이와 관련이 있다.

## 참 고 문 헌

1. J. Y. Heo, K. Y. Jeong and H. G. Sung, "Numerical Study of the Dynamic Characteristics of Pintle Nozzles for Variable Thrust", Journal of Propulsion and Power, Vol. 31, No. 1, pp.230~237, 2015.
2. H. G. Sung, K. Y. Jeong and J. Y. Heo, "Performance Characteristics of a Pintle Nozzle Using the Conformal Sliding Mesh Technique," Aerospace Science and Technology. Vol. 61, pp.85~94, 2017.
3. H. G. Sung, S. J. Kim, H. W. Yeom and J. Y. Heo, "On the Assessment of Compressibility Effects of Two-Equation Turbulence Models for Supersonic Transition Flow with Flow Separation," International Journal of Aeronautical and Space Sciences. Vol. 14, No. 4, pp.387~397, 2013.
4. F. R. Menter, M.Kuntz and R. Langtry, "Ten Years of industrial Experienced with the SST Turbulence Model," Turbulence Heat and Mass Transfer, pp.625~632. 2003.
5. K. Y. Jeong, J. S. Hong, J. Y. Heo, H. G. Sung, J. S. Yang, D. S. Ha, "Thrust Characteristics of Through-type Pintle Nozzle at Operating Altitudes Condition", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol.20, No. 4, pp.59~67, 2016.