

# 핀틀을 적용한 듀얼 벨 노즐의 유동 특성

김정훈\* · 허준영\* · 하동성\*

## Flow Characteristics of Dual Bell Nozzle with Pintle

Jeonghoon Kim\* · Junyoung Heo\* · Dongsung Ha\*

### ABSTRACT

Flow characteristics of dual bell nozzle with pintle were investigated. Thrust and thrust coefficient were compared with the pintle-bell nozzle of the same condition, and difference according to the pintle stroke was investigated. At stroke 0 mm, the thrust of the dual bell nozzle was about 13.18% higher than the bell nozzle, and when the pintle was backward, it was similar to the bell nozzle. The change in expansion ratio with stroke was considered to be more advantageous for a dual bell nozzle that performs altitude compensation through separation and transition.

### 초 록

핀틀을 적용한 듀얼 벨 노즐의 유동해석을 통해 유동 특성을 조사하였다. 동일한 조건의 핀틀-벨 노즐과 추력계수 및 추력을 비교하였고, 핀틀 스트로크에 따른 차이를 조사하였다. 스트로크 0 mm 에서는 듀얼 벨 노즐의 추력이 벨 노즐보다 약 13.18% 높았고, 핀틀이 후진했을 때는 벨 노즐과 유사하였다. 스트로크에 따른 팽창비 변화는 박리와 천이를 통해 고도 보정을 수행하는 듀얼 벨 노즐 에게 더 유리한 것으로 판단된다.

Key Words: Pintle(핀틀), 스트로크(Stroke), Dual Bell Nozzle(듀얼 벨 노즐), Separation(박리), Solid Rocket Motor(고체 추진기관)

### 1. 서 론

기술이 발전함에 따라 새로운 기술들도 등장 하지만 통상적으로 사용되어 왔던 기술들 또한 단점을 보완하거나 효율 높이는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 일례로 노즐의 고정된 팽창비의 한계를 극복하면서 효율을 높이기 위해 고

도 보정(altitude compensation) 노즐에 대한 연구가 다수 수행되어 왔다[1]. 특히 변곡점(inflexion point)을 기준으로 팽창비가 다른 두 개의 벨 노즐을 결합한 듀얼 벨 노즐은 고도 보정 노즐의 일종으로 해외에서는 이미 상당한 연구가 진행되었다[1-5]. 두 개의 팽창비를 통해 벨 노즐보다 고도에 적합한 성능을 낼 수 있는 장점이 있지만 노즐 길이 연장으로 인한 무게 증가와 유동의 불안정성이라는 해결 과제가 남아

\* 국방과학연구소 제4기술연구본부 1부

† 교신저자, E-mail: jh890@add.re.kr

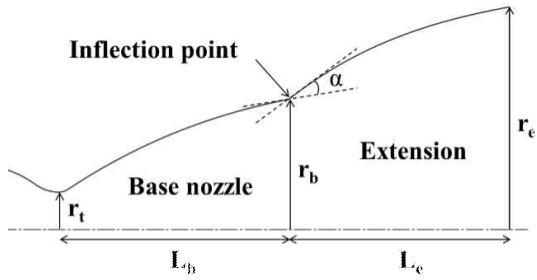


Fig. 1 Schematic of dual bell nozzle[5]

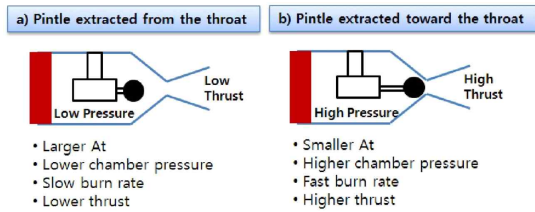


Fig. 2 Thrust control with pintle-nozzle[6]

있다[5]. Fig. 1은 듀얼 벨 노즐의 모식도이다.

또 다른 예로 핀틀(pintle)이라는 구조물을 통해 고체추진기관의 추력을 제어하는 연구들이 진행되어 왔다[6]. 고체 추진기관은 연소가 시작되면 추진제를 모두 소모할 때까지 연소가 지속되기 때문에 추력 조절에 어려움이 있다. 추진제 그레인(grain) 형상의 다양한 설계를 통해 추력을 제어하더라도 한계가 존재하였다. 따라서 Fig. 2와 같이 핀틀을 추진기관 내부에 설치하여 앞뒤로 구동함으로써 노즐 목 면적 변화로부터 발생하는 연소실 압력을 조절함과 동시에 추력 조절을 수행한다.

본 논문에서는 두 기술의 장점을 참고하여 듀얼 벨 노즐에 핀틀을 적용하는 연구를 수행하였다. 전산수치해석을 활용하여 유동 특성과 성능을 비교하였다.

## 2. 핀틀-노즐 설계 및 해석 조건

핀틀을 적용한 듀얼 벨 노즐은 Fig. 3(a)와 같다. 일반 벨 노즐에 핀틀을 적용했을 때와의 차이를 파악하기 위해 동일한 길이와 팽창비를 가

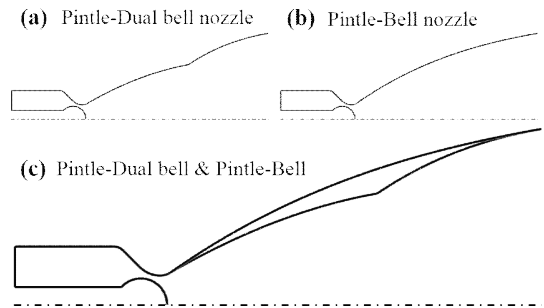


Fig. 3 Designed pintle-nozzles

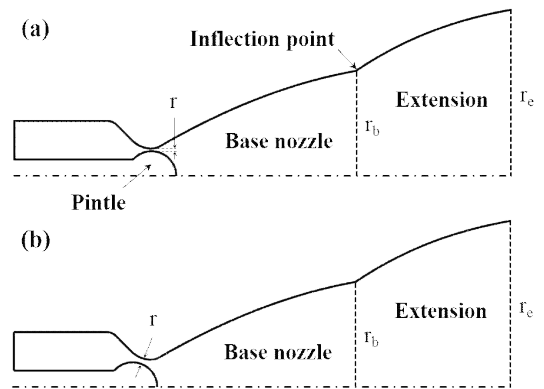


Fig. 4 Schematic of dual bell nozzle with pintle

진 벨 노즐(Fig. 3(b)) 또한 설계하였고, 비교 결과는 Fig. 3(c)와 같다.

핀틀-노즐은 본래 노즐 목이 위치해있던 부분에 핀틀이 들어가게 되므로 노즐 목은 Fig. 4와 같이 가장 좁아지는 지점으로 정의한다.  $r$ 은 핀틀-노즐 목의 길이로써 핀틀의 움직임 즉, 스트로크(stroke)에 따라 변하게 된다. 따라서 목 면적 계산 시에도 3차원 형상을 고려하여 계산해야한다. 본 논문에서는 Fig. 4(a)와 같이 핀틀의 가장 높은 부분과 노즐의 가장 낮은 부분이 동일한 선상에 존재할 때 스트로크가 0 mm인 것으로 정의하며 이 이상 핀틀이 전진하지 않는다. 즉, 핀틀 스트로크가 0 mm일 때 팽창비가 가장 크다. Fig. 4(b)는 핀틀이 뒤로 후진한 상태를 나타낸다. 본 논문에서는 스트로크가 0 mm일 때와 후진한 상태일 때에 대해 연구를 진행하였다.

유동 특성을 파악하기 위해 2D 축대칭 해석을

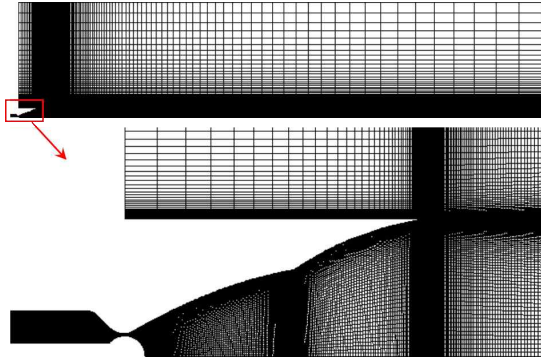


Fig. 5 Computation grids

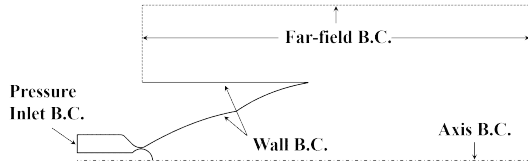


Fig. 6 Boundary conditions

진행하였다. 약 10만개의 격자를 생성하였으며 Fig. 5와 6에 격자 생성 결과 및 경계조건을 나타내었다.

해석은 상용코드인 ANSYS Fluent를 사용하였다. 난류 모델은 SST(Shear Stress Transport)  $k-\omega$ [7] 모델을 사용하였다. 챔버 압력은 모든 케이스에 대해서 50 bar로 일정하다. 실제로는 핀틀이 전진하여 목 면적을 감소시키면 챔버 압력이 상승하지만 본 논문에서는 다축 핀틀 추력기에 대한 압력제어가 수행되고 있다는 전제하에 핀틀을 구동한다고 가정하였다. 상온 공기를 작동 유체로 선정했기 때문에 챔버 온도는 300 K으로 설정하였다. 해석 고도는 20 km이다.

### 3. 해석 결과

해석 결과, 핀틀을 적용한 두 노즐은 서로 다른 양상을 보였다. Fig. 7에 따르면, 스트로크가 0 mm일 때 듀얼 벨 노즐은 변곡점에서 박리가 발생하지만 벨 노즐은 박리가 발생하지 않았다. 두 노즐 모두 팽창비는 동일할지라도 듀얼 벨

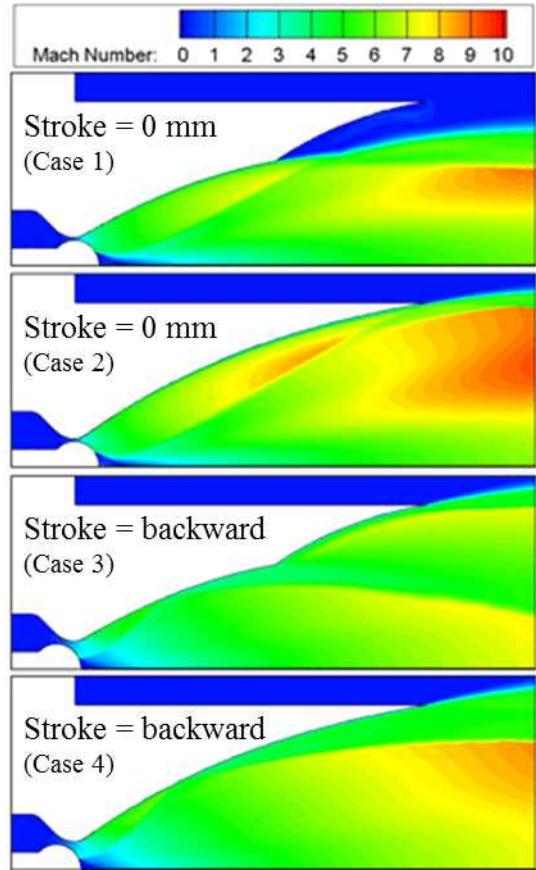


Fig. 7 Mach number contour of pintle-nozzles

Table 1. Computation results

Case	Thrust unit : kN					
	CFD results		Design values		Error, %	
	Thrust	$C_F$	Thrust	$C_F$	Thrust	$C_F$
1*	12.54	1.602	11.62	1.555	7.9	3.0
2**	11.08	1.557	11.62	1.555	4.6	0.1
3*	25.00	1.650	25.87	1.648	3.4	0.1
4**	25.04	1.651	25.87	1.648	3.2	0.2

\*Dual bell nozzle, \*\*Bell nozzle

노즐의 경우 중간에 변곡점이 존재하고 이 변곡점은 박리를 야기하는(혹은 고착시키는) 역할을 한다. 결과적으로 Case 1과 Case 2의 차이는 노즐 형상에 의한 것이라 판단된다. 핀틀이 후진했을 때는 두 노즐 모두 노즐 끝단까지 유동이 팽

창(full-flowing)한 것을 보여준다.

Table 1은 성능측면에서 해석 결과와 이론값(설계값)을 비교한 표이다. Case 1의 결과값에 대한 차이가 가장 큰 이유는 Fig. 7에서 보듯이 Case 1은 Case 2와 달리 변곡점에서 박리가 됐기 때문이다. 일반 벨 노즐은 특정 고도에서만 성능이 가장 높는데 반해 듀얼 벨 노즐은 두 가지 팽창비로 작동하기 때문에 성능이 높은 구간이 특정되지 않는다. 고도 20 km에서 Case 2는 고도에 비해 큰 팽창비를 가지기 때문에 비교적 성능이 낮은 구간(최적 성능을 낼 수 있는 고도보다 낮은 고도)에 위치해 있고, Case 1은 베이스 노즐의 작은 팽창비를 이용하므로 동일 고도에서 팽창비가 큰 경우보다 상대적으로 추력이 높은 구간에 있다. 이론 계산식에서는 듀얼 벨 노즐의 변곡점을 고려하지 못하기 때문에 이론값의 경우 두 노즐 모두 추력과 추력계수 값이 같으며 벨 노즐과 유사하다. 한편 스트로크가 후진한 상태 즉, Case 3과 4의 경우에는 두 노즐 모두 동일한 팽창비로 작동하기 때문에 추력과 추력계수가 유사하게 계산되었고, 이론값과의 차이도 작은 것을 볼 수 있다. 결과적으로 고도 20 km에서 스트로크가 0 mm일 때 듀얼 벨 노즐이 벨 노즐보다 추력이 약 13.18% 높지만 핀틀이 후진했을 때는 차이가 약 0.16%로 비교적 유사하다. Case 1, 2와 Case 3, 4의 추력 차이는 노즐 목 면적과 질량유량의 차이에서 기인한다. Case 3, 4의 목 면적이 더 크기 때문에 질량유량이 증가하고 추력 또한 증가하게 된다.

#### 4. 결 론

핀틀을 적용한 듀얼 벨 노즐의 특성을 파악하였다. 전산수치해석을 활용하였으며 동일한 길이와 팽창비를 가진 벨 노즐에 핀틀을 적용한 것과 비교하였다.

해석 결과 고도 20 km 조건에서 듀얼 벨 노즐의 고유 특성(박리 및 천이)으로 인해 성능 차이가 발생하였다. 본 논문의 모델은 스트로크 0 mm일 때 듀얼 벨 노즐의 추력이 약 13.18% 높

았다. 핀틀이 후진한 상태에서는 유사한 추력을 나타내었다. 결과적으로 핀틀 스트로크에 따른 팽창비 변화는 두 가지 팽창비를 갖고 있는 듀얼 벨 노즐에게 더 유리하게 작용하였고, 고도 보정에 따른 성능 향상을 보여주었다.

듀얼 벨 노즐이 갖고 있는 두 팽창비가 최대 효율을 낼 수 있는 고도에서 스트로크 제어를 통해 박리 위치를 조절한다면 고도에 따른 성능 향상을 꾀할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 향후 추력 제어 및 성능 향상의 가능성을 확인하기 위한 수치해석을 진행할 계획이다.

#### 참 고 문 헌

1. Hagemann, G., Immich, H., Nguyen, T. V. and Dumnov, G. E., "Advanced Rocket Nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, 1998, pp.620-634
2. 김정훈, 허환일, "독일 DLR의 듀얼 벨 노즐 특성 및 핵심 변수," *한국항공우주학회지*, 제 43권, 제11호, 2015, pp.952-962
3. 김정훈, 허환일, "독일 DLR의 고도 보정용 듀얼 벨 노즐 연구개발 동향," *한국추진공학회 춘계학술대회 논문집*, 2015, pp.46-49
4. 김정훈, 허환일, "듀얼 벨 노즐을 적용하는 발사체의 성능 이득," *한국추진공학회 추계학술대회 논문집*, 2015, pp.62-64
5. 김정훈, 최준섭, 허환일, "한국형발사체를 기반으로 한 듀얼 벨 노즐의 전산수치해석 기초 결과," *한국추진공학회지*, 제20권, 제6호, 2016, pp.18-28
6. 진정근, 하동성, 오석진, "핀틀-노즐이 적용된 고체추진기관의 연소 시험 성능 분석," *한국추진공학회지*, 제18권, 제5호, 2014, pp.19-28
7. Menter, F. R., "Two-Equation-Eddy Viscosity Turbulence Models Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, 1994, pp.1598-1605