



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.6.019>

핀틀 변곡 각도에 따른 E-D 노즐 특성에 대한 전산수치해석 연구

박상현^a · 문태석^a · 허환일^{b,*}

Numerical Study on an E-D Nozzle Characteristics with Various Pintle Inflection Angles

Sanghyeon Park^a · Taeseok Moon^a · Hwanil Huh^{b,*}

^aDepartment of Aerospace Engineering, Graduate School of Chungnam National University, Korea

^bDepartment of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea

*Corresponding author. E-mail: hwanil@cnu.ac.kr

ABSTRACT

In this study, a numerical study was conducted to characterize the E-D nozzle which changes according to the nozzle pressure ratios. Three different numerical analysis models were designed by changing the pintle inflection angles. When the nozzle pressure ratio is low, the outside air flows into the E-D nozzle to form an open flow field. As the nozzle pressure ratio increases, the flow transition occurs to become the closed flow field where the recirculation region is isolated inside the nozzle. Also, the highest thrust coefficient was obtained in the analytical model with high pintle inflection angle at all nozzle pressure ratios.

초 록

본 논문에서는 E-D 노즐 공압 실험 연구의 선행 연구로써, 노즐 압력비에 따라 변화하는 E-D 노즐 특성 파악을 위한 해석적 연구가 수행되었다. 설계 변수 중, 핀틀 변곡 각도를 하나의 변수로 하여 서로 다른 세 가지 수치해석 모델을 설계하였다. 노즐 압력비가 낮을 때는 E-D 노즐 내부로 외부 대기가 유입되어 개방 유동장이 형성되었다. 노즐 압력비가 높아짐에 따라 노즐 내부에 재순환 영역이 고립되는 폐쇄 유동장으로 유동 천이가 발생함을 확인하였다. 또한, 전체 노즐 압력비 구간에서 핀틀 변곡 각도가 높은 해석 모델에서 가장 높은 추력 계수가 도출되었다.

Key Words: Expansion-Deflection Nozzle(E-D 노즐), Cold Gas(냉가스), Computational Fluid Dynamics(전산유체해석), Pintle Inflection Angle(핀틀 변곡 각도)

Received 13 November 2017 / Revised 3 June 2018 / Accepted 10 June 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

로켓 엔진은 고도에 따라 추력 성능이 변화된다. 이는 노즐 출구 압력과 노즐 외부 압력 간의 압력 차이로 인한 성능 손실로, 일반적으로 저고도에서는 노즐 출구 압력이 외부 압력보다 낮아 과대팽창(over-expansion)이 발생되고 고고도에서는 노즐 외부 압력이 현저하게 낮아져 과소팽창(under-expansion)이 발생된다. 따라서 노즐 팽창비가 고정된 로켓 엔진을 사용하는 우주 발사체의 경우, 이상팽창(ideal-expansion)이 형성되는 특정 고도를 제외하고는 성능 손실이 불가피하다[1].

이러한 고도에 따라 발생하는 노즐 성능 손실을 감소시키기 위해서 과거 1960년대부터 고도 보정(altitude compensation) 노즐에 관한 연구가 수행되었다[2]. E-D(Expansion-Deflection) 노즐은 고도 보정 노즐의 한 종류로, 고도 보정 효과와 함께 노즐 길이를 단축할 수 있는 잠재적인 이점을 가진다[3]. E-D 노즐의 특징으로는 노즐 목 이후에 고정된 핀틀이 위치하여 연소실 압력(P_c)과 노즐 외부 압력(P_a)의 압력비(P_c/P_a)인 노즐 압력비(nozzle pressure ratios, NPR)에 따라 노즐 내부 유동장이 변화하며 노즐 출구에서 유효 노즐 출구 면적(effective nozzle exit area)을 변화시킨다. Fig. 1은 고도에 따라 E-D 노즐 내부에 형성되는 유동장을 모사한 그림으로, 저고도에서는 노즐 내부로 외부 유동이 유입되어 재순환 영역이 형성되고 노즐 압력비가 변화함에 따라 유효 노즐 출구 면적이 변화하는 개방 유동장(open wake)이 형성된다. 고도가 높아짐에 따라 더 이상의 외부 유동 유입은 사라지고, 내부 유동이 고립되는 폐쇄 유동장(closed wake)이 형성된다[4].

이처럼 E-D 노즐 내부에 형성되는 복잡한 유동장과 노즐내부에 위치한 고정된 핀틀로 인한 설계 제작에 제한이 있는 단점 등으로 과거 초창기 E-D 노즐이 제시되었을 시기에는 연구에 많은 제약이 있었으며, 안정성과 높은 신뢰성이 요구되는 우주발사체의 특성상 발사체에 적용한 사례는 존재하지 않는다[6]. 2000년대에 들어서

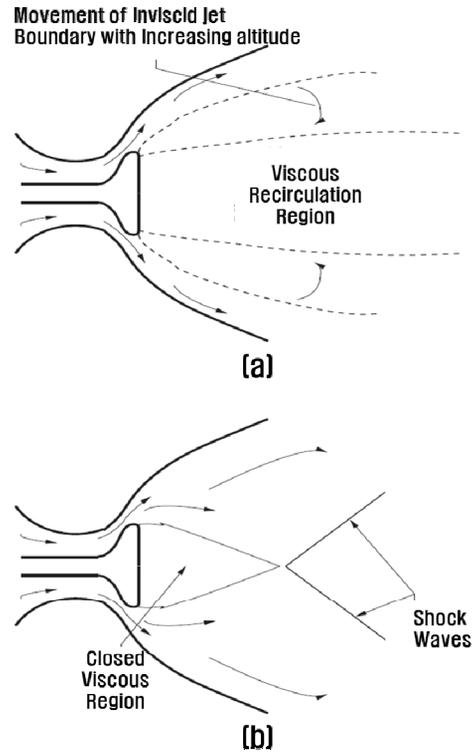


Fig. 1 E-D nozzle flow field schematic, (a) Open wake flow($P_e < P_a$) and (b) closed wake flow($P_e > P_a$)[5].

우주선진국인 영국과 독일 및 호주 등에서 E-D 노즐 설계 변수에 관한 연구와 기초 전산수치해석 및 실험적 연구[2~9]가 수행되고 있는 반면, 국내에서는 E-D 노즐 동향에 관한 분석 연구[10]가 수행되었으며, 추가적인 기초연구가 필요한 실정이다.

이러한 기초 연구의 필요성으로, 본 논문에서는 노즐 압력비에 따라 E-D 노즐 내부에 형성되는 유동장에 대한 이해와 노즐 특성 파악을 위한 전산수치해석 연구를 수행하였으며, 추후 진행될 공압 실험 연구의 선행연구로써 실험 가능성 및 유동장 형성 유무 등을 확인하였다.

2. 수치해석 방법 및 조건

2.1 수치해석 모델 설계

E-D 노즐은 노즐 설계에 있어 다양한 변수 [6,11]들이 존재하지만, 핀틀 변곡 각도(θ_i)에 따른 E-D 노즐의 성능 특성 변화를 분석하기 위해서 팽창비 12인 벨 노즐 내부에 Fig. 2의 영국

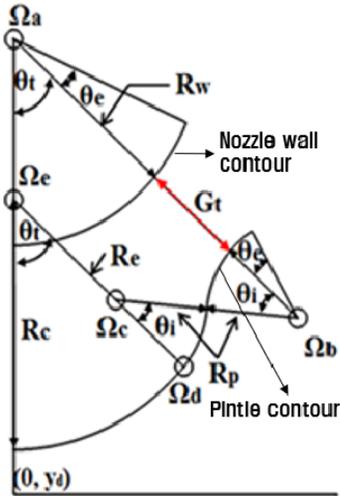


Fig. 2 E-D nozzle throat design schematic in Bristol Univ.[6].

Table 1. E-D nozzle design parameters.

	Case 1	Case 2	Case 3
θ_i	30°	40°	50°
R_w	4.69 mm		
G_t	4.71 mm		
R_p	2.36 mm ($R_p = 0.5G_t$)		
θ_t	28.6°		

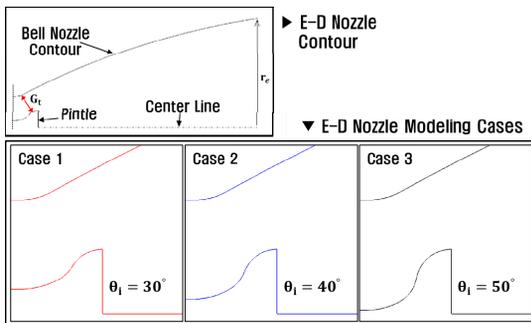


Fig. 3 E-D nozzle scheme for the analysis.

브리스톨 대학의 Taylor가 제시한 E-D 노즐 목 설계법[6]을 적용하여 E-D 노즐을 설계하였다.

핀틀 목 각도(θ_i)와 노즐 최소 거리(G_t), 핀틀 반지름(R_p) 등의 설계 변수 값은 Table 1과 같다.

노즐 최소 거리(G_t)는 노즐 내부의 질식 유동(chocking)이 시작되는 노즐 목(nozzle throat)이며 일반적으로 E-D 노즐을 설계할 경우, 노즐 최소 거리(G_t)를 기준으로 핀틀 반지름(R_p)을 정한다[6]. 핀틀의 경사를 조절할 수 있는 핀틀 변곡 각도(θ_i)는 노즐 내부에 핀틀을 설계하는데 있어 한계각을 가지게 되며, 최소 각도와 최대 각도를 포함한 세 가지 각도(30° , 40° , 50°)에 대해서 해석 모델 설계를 수행하였다. 또한, 핀틀 변곡 각도(θ_i) 이후에 존재하는 핀틀 각도(θ_e)의 크기에 대해서는 고려하지 않고, 핀틀 변곡 각도(θ_i) 이후부터 수직이 될 때까지 핀틀을 연장하였다. 설계한 해석 모델은 Fig. 3과 같다.

2.2 수치해석 조건

E-D 노즐 내부에 형성되는 복잡한 유동을 해석하기 위해서 상용코드 ANSYS Fluent ver. 17.0을 사용하였으며, 압축성 유동 해석에 용이한 density based solver를 사용하여 정상(steady)상태 해석을 수행하였다. 유동장 내에 발생하는 충격파의 거동을 잘 모사하기 위해서 풍상 차분법(up wind scheme)을 적용하였다. Fig. 4와 같이 입구조건은 압력 입구 조건(pressure inlet)으로 설정하였고, 내부 핀틀과 노즐 벽면은 단열(adiabatic), 점착(no slip) 조건의 벽면(wall)으로 설정하였다. Pressure far-field의 압력 조건은 해수면(sea level) 조건인 101,325 Pa로 선정하였다.

해석 도메인(domain size)은 Table 2에서처럼 노즐 후류 유동이 충분히 발달할 수 있는 크기로 선정하였으며, 복잡한 유동 발생이 예상되는 부분에 격자를 집중하여 약 20만 개의 정렬격자를 생성하였다. y^+ 값은 1 이하로 설정하였으며, 생성한 격자의 전체적인 모습은 Fig. 5와 같다. 작동 유체는 이상기체의 공기이며, 온도는 288.15 K으로 설정하였다.

Table 2. Numerical domain conditions.

Domain size	$x/G_t=150, y/G_t=50$
y^+	< 1
Boundary conditions	Pressure inlet, Wall, Pressure far-field

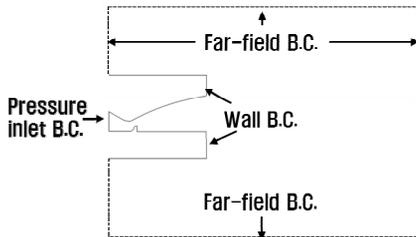


Fig. 4 Boundary conditions.

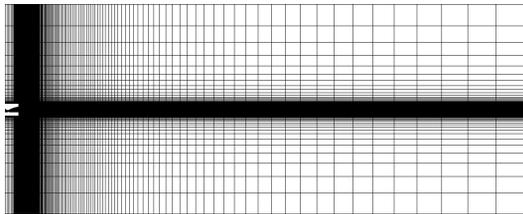


Fig. 5 Computation grids.

난류 모델은 E-D 노즐 내부에 발생이 예측되는 유동 박리 현상과 일반적으로 초음속 노즐 해석에 많이 사용되는 SST $k-\omega$ (shear stress transport) 모델을 사용하였다[11].

2.3 해석 결과 그래프 기준점 정의

본 연구에서 E-D 노즐 설계는 벨 노즐 곡선(nozzle contour)이 시작되는 부분($x=0$ mm)을 기준점으로 설계되었다. 또한, 노즐 압력비 구간에 따른 해석 모델별 전산수치해석 결과를 비교하기 위해서 해석 모델 모두 동일하게 변하지 않는 노즐 최소 거리(G_t) 길이(4.71 mm)로 기준점으로부터 노즐 출구까지의 X축 방향 길이를 무차원하였다.

2.4 격자민감도 해석

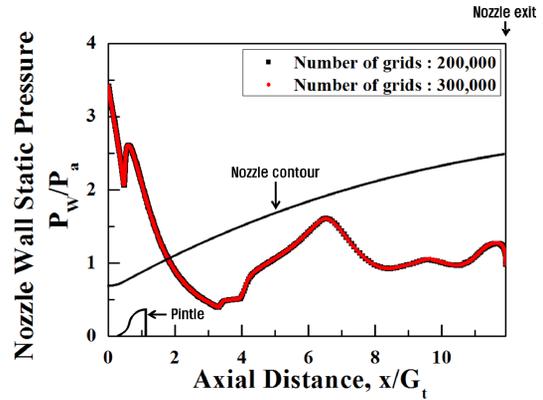


Fig. 6 Nozzle wall static pressure distributions, Case 2, NPR=5.

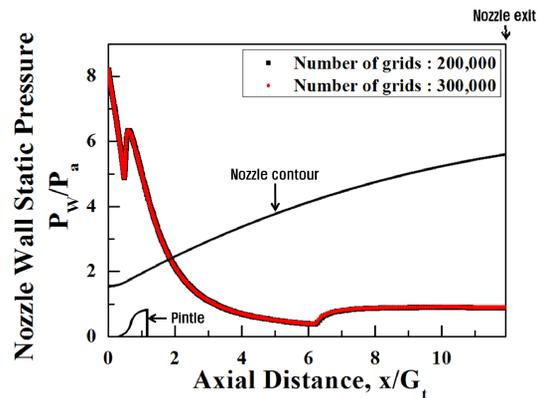


Fig. 7 Nozzle wall static pressure distributions, Case 2, NPR=12.

Table 3. Nozzle exit mass flow rate according to different grid models.

Number of grids	Nozzle exit MFR (g/s)	
	200,000	NPR=5
	NPR=12	133.16
300,000	NPR=5	55.43
	NPR=12	133.17

전산수치해석은 운동량과 에너지 등 여러 지배방정식의 반복 계산을 통해서 결과를 도출하므로 격자 수와 격자 질(quality)이 중요하다. 따라서 해석 모델의 형상 및 유동 발생 등을 고려하여 해석 도메인에 맞게 적절하게 격자를 생성

해야 한다. 이는 해석의 정확도뿐만 아니라 해석 시간에도 직접적인 영향을 미치기 때문에 E-D 노즐 해석에 앞서 적합한 격자 수를 찾고자 동일한 해석 조건에서 격자 수에 따른 수치해석을 진행하였다. 약 20만개, 30만개의 격자 수에서 노즐 압력비 5, 12구간에서의 노즐 벽면 정압력 분포와 노즐 내부의 유동장 박리 지점이 일치함을 확인하였다. 또한, Table 3과 같이 노즐 출구에서의 질량 유량(mass flow rate)을 분석한 결과, 약 0.006% 내의 오차로 거의 동일함을 확인하였다. 따라서 전체 해석 모델의 격자 수를 약 20 만개로 구성하여 해석 연구를 수행하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 노즐 압력비에 따른 E-D 노즐 특성

E-D 노즐은 고도에 따라 다르게 형성되는 노즐 압력비(P_c/P_a)로 인하여 노즐 내부에 형성되

는 유동장이 크게 두 가지 형태(개방 유동장, 폐쇄 유동장)로 나뉜다. 이러한 유동장의 형태를 확인하기 위해서 노즐 외부의 경계조건을 해수면 조건(101,325 Pa)으로 고정하고, 챔버 압력을 조절하여 노즐 압력비를 모사하였다. 이는 추후 진행될 E-D 노즐 공압 실험의 실험 조건(해수면 조건)과 동일하게 하기 위해서 노즐 외부 압력을 낮추는 방식이 아닌, 외부 압력이 고정된 상태에서 챔버 압력의 조절로 노즐 압력비를 형성하였다. 해석 모델별로 개방 유동장과 폐쇄 유동장을 모두 비교하기 위해서 노즐 압력비 5, 7, 12, 20 구간에서 해석을 수행하였다.

노즐 압력비에 따른 E-D 노즐 해석 모델 내부에 형성되는 유동장은 Fig. 8의 마하수 분포를 통해 확인할 수 있다. 각각의 해석 모델 별로 노즐 압력비가 증가함에 따라(고도 증가) 유효 노즐 출구 면적이 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 초기 낮은 노즐 압력비 구간인 5와 7에서는 노즐 내부 유동이 노즐 위쪽 벽면을 따라 형

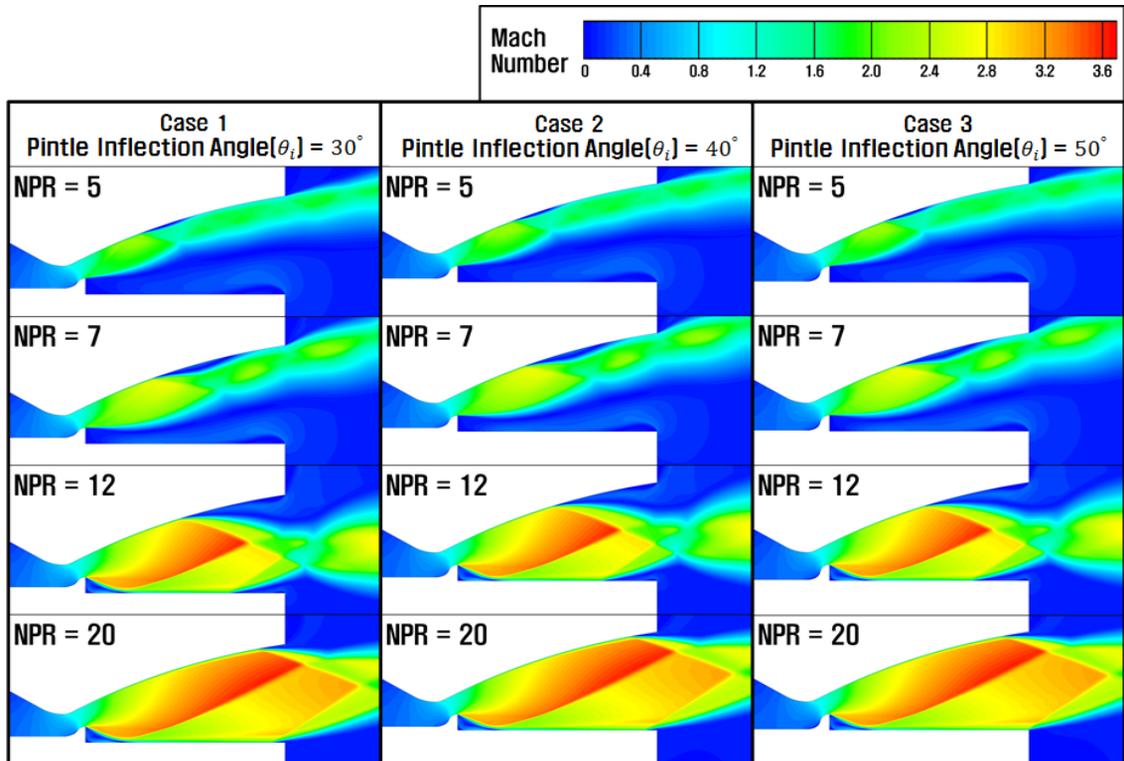


Fig. 8 Mach contour of numerical E-D nozzle models(2-D planar) according to different nozzle pressure ratios.

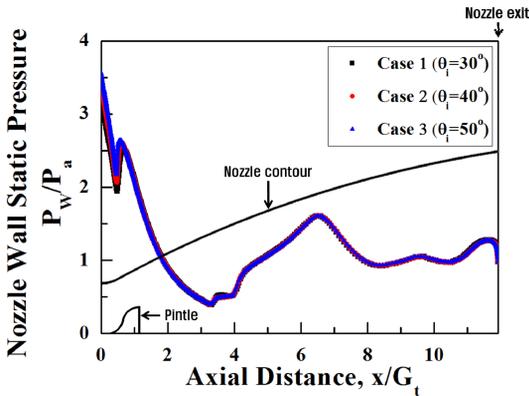


Fig. 9 Nozzle wall static pressure distribution, NPR=5.

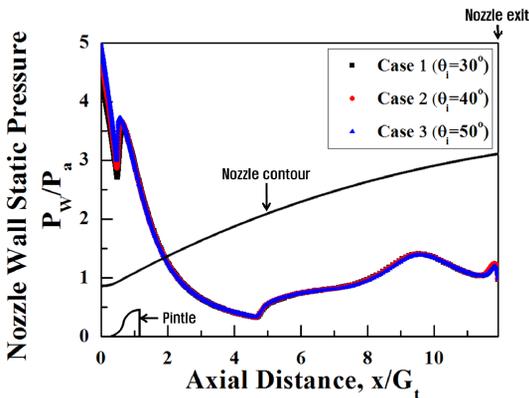


Fig. 10 Nozzle wall static pressure distribution, NPR=7.

성되는 것을 확인할 수 있다. 노즐 압력비 5와 7에서의 해석 모델별 노즐 벽 압력 분포는 Fig. 9, 10과 같다.

해석 결과를 살펴보면, 세 가지 E-D 노즐 해석 모델 모두 유사한 벽 압력 분포가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 노즐 압력비 5구간에서는 핀틀에서 발생한 경사충격파(oblique shock)가 노즐 벽면에 바로 부딪히면서 경계층 박리 거품(separation bubble)이 발생되며, 이로 인하여 노즐 내부에 유동 박리와 유동 재부착 등 복잡한 유동장이 형성되었다. 노즐 압력비 7구간에서도 마찬가지로 노즐 내부에 박리 거품(separation bubble)이 발생되었고, 노즐 압력비 5구간에 비해 전반적으로 노즐 내부 유동 박리점이 노즐 출구 쪽으로 이동하였다. 또한, 공급압력이 증가

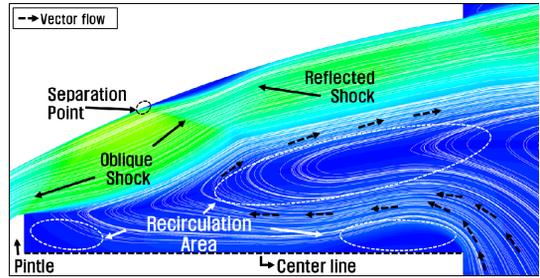


Fig. 11 Flow structure in E-D nozzle, NPR=5.

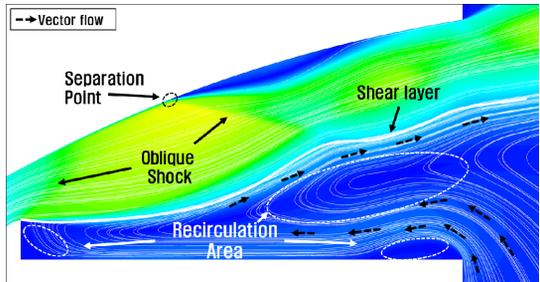


Fig. 12 Flow structure in E-D nozzle, NPR=7.

함에 따라 노즐 내부 주 유동장 면적이 노즐 중심선(center line)으로 넓어짐을 확인할 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 노즐 압력비 5, 7에서의 핀틀 이후의 유선(stream line)과 마하수 분포(Mach contour)를 함께 나타낸 그림이다.

핀틀 위에서 발생한 경사 충격파(oblique shock)와 노즐 벽면에서 처음으로 유동 박리가 시작되는 박리점(separation point)이후 발생하는 경사충격파와 반사충격파(reflected shock)가 유동장 내부에 형성됨을 확인할 수 있다. 일반적인 벨 노즐의 노즐 출구 유동장과는 다르게, 경사충격파와 반사충격파가 발생하는 지점에서 수직 충격파로 인하여 유동이 아음속으로 변하는 마하디스크(Mach disk)가 발생되지 않아 노즐 내부의 유동이 모두 초음속 유동으로 유지된다.

핀틀 끝단에서 발생하는 전단층(shear layer)을 따라 노즐 내부 유동장이 형성되며, 노즐 압력비가 증가함에 따라 형성되는 전단층이 노즐 중심선으로 이동함을 확인할 수 있다. 또한, 전단층 아래로 노즐 내부에 재순환 영역(recirculation

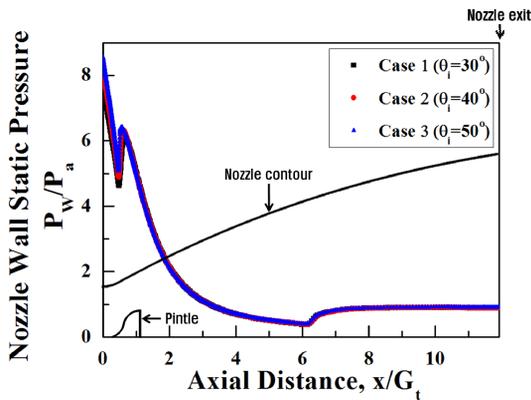


Fig. 13 Nozzle wall static pressure distribution, NPR=12.

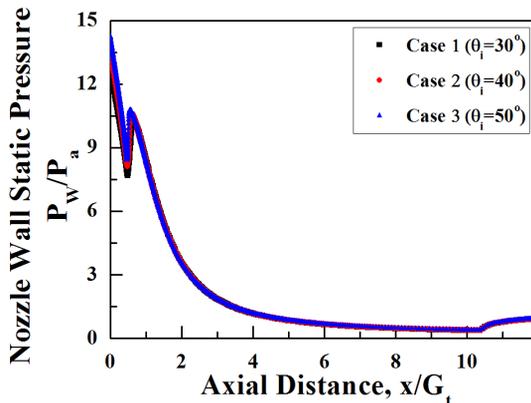


Fig. 14 Nozzle wall static pressure distribution, NPR=20.

area)이 형성되는 것을 확인할 수 있는데, 유선 분포를 통해서 노즐 외부 대기가 노즐 내부 핀틀 위치까지 침투하였다가 노즐 내부의 초음속 유동 흐름 방향을 따라서 다시 노즐 출구로 배출되는 유동 흐름을 가짐을 알 수 있다. 이러한 전체적인 재순환 영역의 크기는 노즐 압력비가 증가함에 따라 작아지며, 노즐 출구에서의 유효 노즐 출구 면적은 재순환 영역과는 다르게 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 노즐 압력비 12와 20에서의 노즐 벽 압력 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면, 세 가지 해석 모델 모두 유사한 노즐 벽 압력 분포를 가진다. 낮은 노즐 압력비 구

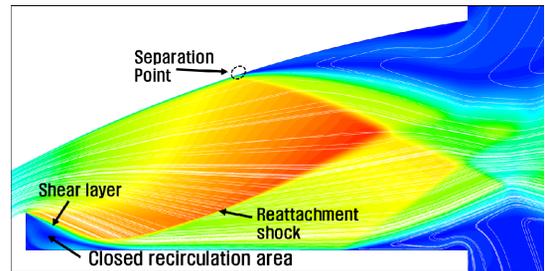


Fig. 15 Flow structure in E-D nozzle, NPR=12.

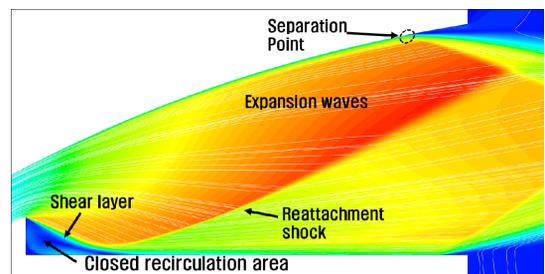


Fig. 16 Flow structure in E-D nozzle, NPR=20.

간에서 발생하던 노즐 내부의 경계층 박리 거품(separation bubble)은 발생되지 않으며, 노즐 압력비가 증가함에 따라 노즐 내부 유동 박리점(separation point)이 노즐 출구 쪽으로 밀려나는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 9, 10의 벽 압력 분포와는 다르게 노즐 벽 압력이 유동 박리점이 전까지 균일하게 감소됨을 보아 E-D 노즐 내부에 개방 유동장(open wake)이 아닌 다른 형태의 유동장이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 15, 16은 노즐 압력비 12, 20에서의 핀틀 이후의 유선(stream line)과 마하수 분포(Mach contour)를 함께 나타낸 그림이다. Fig. 11, 12의 유동장과는 다르게, 노즐 외부 대기가 노즐 내부로 침투하여 형성되던 내부의 재순환 영역(recirculation area)이 사라지고 외부 대기의 유입이 차단된 폐쇄 재순환 영역(closed recirculation area)이 핀틀 이후에 발생됨을 확인할 수 있다. 이러한 노즐 압력비 증가에 따른 개방 유동장(open wake)에서 폐쇄 유동장(closed wake)으로의 유동 천이는 핀틀 끝단에서 발생하는 전단층(shear layer)과 관계가 있다. 노즐 목 이후의 유

동이 팽창함에 따라 전단층이 노즐 중심선(center line)으로 꺾이게 되고, 노즐 내부 주유동이 중심선으로 재부착 된다. 노즐 중심선의 재부착 지점에서는 재부착 충격파(reattachment shock)가 발생되며, 핀틀과 노즐 중심선, 전단층으로 둘러싸여 더 이상의 외부 공기 유입이 없는 고립된 재순환 영역이 형성된다.

3.2. 핀틀 변곡 각도에 따른 E-D 노즐 특성

동일한 챔버 압력조건에서 각각의 다른 핀틀 변곡 각도(θ_i)를 가지는 세 가지 해석 모델별 노즐 성능을 비교하기 위해서 전체 노즐 압력비 구간에서 해석 모델별 추력(thrust)을 비교하였으며, 도출된 추력(F)과 노즐 목 면적(A_t), 챔버 압력(P_0)을 활용하여 아래의 추력 계수(C_F , thrust coefficient)식 Eq. 1을 통해 Table 4에 나타내었다.

$$C_F = \frac{F}{A_t P_0} \quad (1)$$

핀틀 변곡 각도(θ_i)로 50° 를 가지는 세 번째 해석 모델에서 전체 노즐 압력비 구간에 걸쳐 가장 높은 추력계수를 가졌다. 이는 동일한 챔버 압력을 가지는 조건에서, 핀틀 변곡 각도(θ_i)가 높아짐에 따라 E-D 노즐 성능이 향상된다는 선행 연구 결과[9]와 동일한 결과이다.

이러한 핀틀 변곡 각도(θ_i)에 따른 노즐 성능 변화는 실험을 통한 검증이 필요하다고 판단된다. 따라서 본 전산수치해석 연구를 바탕으로, 향후 진행될 E-D 노즐 공압 실험 연구를 통해 노즐 압력비에 따라 실제 노즐 내부에 형성되는 유동장과 핀틀 변곡 각도(θ_i)가 노즐별 노즐 성능에 관한 연구를 진행하고자 한다.

4. 결 론

본 논문은 E-D 노즐 공압 실험 연구에 앞서, 실험으로 형성될 수 있는 노즐 압력비 구간에서

Table 4. Thrust coefficient of nozzle cases according to NPR.

NPR	C_F			
	5	7	12	20
Case 1	1.47	1.34	1.27	1.30
Case 2	1.50	1.36	1.29	1.32
Case 3	1.54	1.39	1.31	1.33

의 E-D 노즐 내부에 형성되는 유동장에 관한 기초적인 이해와 실험 가능성을 판단하기 위한 기초 연구로써 수행되었다.

고정된 형상을 가지는 벨 노즐 내부에 국외 선행 연구 내용 분석을 바탕으로 핀틀을 설계하여 E-D 노즐로 설계하였고, 핀틀 변곡 각도를 바꾸어가며 노즐 압력비 구간에 따라 해석 모델별 유동장과 노즐 성능을 분석하였다. 실험 환경과 동일하게 노즐 압력비를 조절하기 위해서 노즐 외부 압력을 대기압으로 고정하고, 챔버압력 조절을 통해서 역으로 구현하였다.

해석결과, 노즐 압력비 5와 7에서는 노즐 출구 외부 대기가 E-D 노즐 내부의 핀틀 근처까지 유입되어 노즐 내부에 재순환영역이 크게 발생하는 개방 유동장(open wake)이 형성되었다. 노즐 압력비가 높아짐에 따라 핀틀 끝단에서 발생하는 전단층이 노즐 중심선으로 움직이며 노즐 목을 지난 유동이 팽창되었고, 이로 인해 더 이상 노즐 외부 대기가 유입되지 못하는 폐쇄 유동장(closed wake)으로 천이가 발생됨을 확인하였다.

또한, 해석 모델 별 추력 계수를 계산하여 비교한 결과, 전체 노즐 압력비 구간에서 핀틀 변곡 각도(θ_i)가 50° 인 세 번째 모델의 추력 계수가 높았으며, 이러한 노즐 성능 변화는 국외 선행 연구 결과와 동일했다.

본 전산수치해석 결과를 토대로, E-D 노즐 유동장 및 핀틀 변곡 각도에 따른 노즐 특성을 확인할 수 있었으며, 추후 진행될 E-D 노즐 공압 실험 연구와의 결과 분석을 위한 기초 연구 자료로써 활용될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업(NRF-2014 M1A3A3A02034776)과 서울대학교 차세대 우주 추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도 연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

References

1. Hagemann, G., Immich, H., Nguyen, T.V. and Dumnov, G.E., "Advanced rocket nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, pp. 620-634, 1998.
2. Wagner, B., Stark, R., and Schlechtriem, S., "Experimental Study of a Planar Expansion-Deflection Nozzle Flow Field," *4th European Conference for Aerospace Sciences*, Saint Petersburg, Russia, pp. 641-654, July, 2011.
3. Goetz, A., Hagemann, G. and Kretschmer, J., "Advanced Upper Stage Propulsion Concept-The Expansion-Deflection Upper Stage," In *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Tucson, Arizona, pp. 3752, 2005.
4. Taylor, N.V. and Sato, T., "Experimental and Computational Analysis of an Expansion Deflection Nozzle in Open-wake Mode," *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Honolulu, Hawaii, pp. 6924, 2008.
5. Taylor, N.V., Hemsell, C.M., Macfarlane, J., Osborne, R., Varcill, R., Bond, A. and Feast, S., "Experimental Investigation of the Evacuation Effect in Expansion Deflection Nozzles," *Acta Astronautica*, Vol. 66, pp. 550-562, 2010.
6. Taylor, N.V. and Hemsell C.M., "Throat Flow Modelling of Expansion Deflection Nozzles," *JBIS*, Vol. 57, pp. 242-250, 2004.
7. Wagner, B. and Schlechtriem, S., "Numerical and Experimental Study of the Flow in a Planar Expansion-Deflection Nozzle," In *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, San Diego, California, Vol. 5942, 2011.
8. Schomberg, K., Olsen, J., Neely, A., and Doig, G., "Experimental Analysis of a Linear Expansion-Deflection Nozzle at Highly Overexpanded Conditions," *19th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Melbourne, Australia, pp. 74-77, 2014.
9. Schomberg, K., Doig, G. and Olsen, J., "Geometric Analysis of the Linear Expansion-Deflection Nozzle at Highly Overexpanded Flow Conditions," *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Cleveland, OH, pp. 4001, July, 2014.
10. Moon, T.S., Park, S.H., Choi, J.S., and Huh, H., "Research Trends of an E-D Nozzle for Altitude Compensation," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 45, No. 10, pp. 844-854, 2017.
11. Kam, H.D., and Kim, J.S., "Assessment and Validation of Turbulence Models for the Optimal Computation of Supersonic Nozzle Flow," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp. 18-25, 2013.