Check for updates

Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 26, No. 5, pp. 11-23, 2022

Research Paper

DOI: https://doi.org/10.6108/KSPE.2022.26.5.011

노즐 길이 단축 방안에 따른 ED 노즐의 성능 분석

이주미[a] · 최준섭[a] · 허환일[b,*]

Performance Analysis of an Expansion Deflection Nozzle by Nozzle Length Reduction Method

Joomi Lee[a] · Junsub Choi[a] · Hwanil Huh[b,*]
[a]*Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Chungnam National University, Korea*
[b]*Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: hwanil@cnu.ac.kr*

ABSTRACT

For the design of the shortened ED(Expansion Deflection) nozzle, a numerical study of ED nozzle was performed according to the length reduction methods. The first method is to reduce the extension length of the ED nozzle with 80% bell nozzle length by 10%, 20% and 30%. The second method is to shorten the extension length by increasing the nozzle throat angle. Due to the increase in the curvature of the contour as the length shortened, the decrease in the nozzle exit velocity between the ED nozzle with 80% bell nozzle length and the ED nozzle in the first method was reduced, and the thrust become similar. The ED nozzle of the second method increased the thrust by increasing the nozzle exit velocity compared to the ED nozzle with 80% bell nozzle length.

초 록

길이를 단축한 ED(Expansion Deflection) 노즐의 설계를 위해 길이 단축 방안에 따른 ED 노즐의 수치적 연구를 수행하였다. 첫 번째 방안은 80% 벨 노즐 길이를 갖는 ED 노즐의 확장부 길이를 10%, 20%와 30%씩 단축하는 것이다. 두 번째 방안은 노즐 목 각도를 증가시켜 확장부 길이를 단축하는 것이다. 길이 단축에 따른 윤곽선의 곡률 증가로 인해 80% 벨 노즐 길이인 ED 노즐과 첫 번째 방안의 ED 노즐의 출구 유동 속도의 감소폭이 줄어들어 추력이 유사해졌다. 두 번째 방안의 ED 노즐은 80% 벨 노즐 길이인 ED 노즐보다 출구 유동 속도가 증가하여 추력이 증가하였다.

Key Words: Altitude Compensation Nozzle(고도보정노즐), Expansion Deflection Nozzle(ED 노즐), Nozzle Length(노즐 길이), Nozzle Throat Angle(노즐 목 각도)

1. 서 론

뉴스페이스 시대를 맞이하여 규모가 커지는 우주 시장에서 발사체의 경쟁력 확보가 중요하다. 발사체의 경쟁력을 확보하기 위해서는 발사

Received 7 June 2022 / Revised 9 October 2022 / Accepted 15 October 2022
Copyright Ⓒ The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

체의 개발 비용을 고려한 성능 개선이 요구된다. 발사체의 비추력을 개선하는 방안에는 Fig. 1과 같이 연소실의 특성인 특성 배기 속도(C^*, effective exhaust velocity)를 높이는 방법과 노즐의 특성인 추력 계수(C_F, thrust coefficient)를 높이는 방법이 있다. 이 중에서 특성 배기 속도를 높이기 위한 연소실의 개발에는 많은 예산과시간이 소요된다. 노즐 형상 변경만으로 추력 계수를 높여 비추력을 향상한다면 발사체 기술 개발에 기술적, 경제적 부담을 줄일 수 있다. 이러한 방안에는 고도 보정 노즐(altitude compensation nozzle)이 있다. 고도 보정 노즐은 고도에 따라 노즐 유동이 이상팽창 할 수 있도록 유효 노즐 출구 면적이 변화하는 고도 보정 효과로 추력 계수를 향상할 수 있다[1].

고도 보정 노즐 중에는 Fig. 2와 같이 노즐 내부 중앙에 핀틀이라는 구조체가 존재하는 ED (Expansion Deflection) 노즐이 있다. ED 노즐은 핀틀로 인해 노즐 벽면으로 유도된 유동이 저고도, 고고도에 따라 각각 개방유동장, 폐쇄유동장을 형성하면서 노즐 출구 유효 면적이 변하여 고도 보정 효과가 발생한다[3]. ED 노즐에 대한 연구는 1960년대부터 시작하여 영국, 독일, 호주, 유럽, 중국 등에서 수행되었다[3-12]. 국내에서는 충남대학교에서 ED 노즐에 대한 연구를 진행중에 있다[13-32]. ED 노즐에 대한 국내외 연구는 주로 ED 노즐의 설계 변수에 따른 고도 보정 효과에 대하여 수행되었다.

ED 노즐에 대한 연구 중 일부 연구는 ED 노즐의 고도 보정 효과을 고려하지 않고, 발사체의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성에 대하여 확인하였다[33-34]. 이 중에서 유럽 EADS와 ESA는 ED 노즐을 Ariane 5 발사체 상단에 적용하였을 때에 성능을 분석하였다[33]. 연구에서는 길이를 단축한 ED 노즐을 역연소실(inverse thrust chamber)과 결합하여 상단 엔진을 설계하였다. 역연소실은 연료의 분사 방향이 노즐 내부로 향하는 연소기이다. 설계한 ED 노즐 상단 엔진을 발사체에 적용하여 성능을 분석하였다. 성능 분석시에 기존 Ariane 5의 발사대의 적용 가능성을 고려

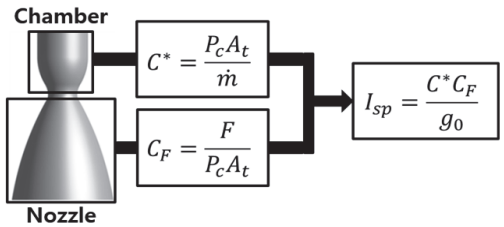

Fig. 1 Relationship among the I_{sp}, C^* and C_F.

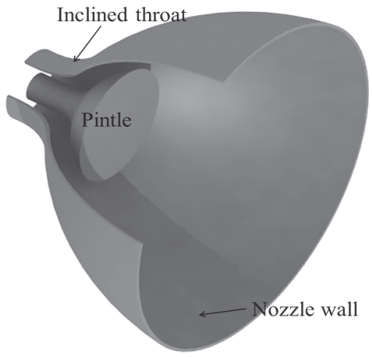

Fig. 2 Schematic of ED(expansion deflection) nozzle[2].

하였다. 발사체의 성능 분석 결과, ED 노즐을 적용한 상단 엔진이 기존 벨 노즐을 적용한 상단 엔진보다 진공 비추력이 2 s가 증가하였다. 또한 GTO(Geo Transfer Orbit)에 투입하는 탑재중량은 180 kg으로 약 1.5%가 증가하였다. 탑재중량의 증가는 ED 노즐의 길이 단축을 통해 추력중량비(thrust to weight ratio)가 향상했기 때문으로 밝혔다. 선행연구는 연구결과를 통해 ED 노즐의 길이 단축을 통한 상단 엔진의 무게 절감과 비추력 개선 가능성을 확인한 것에 의의가 있다. 충남대학교에서는 ED 노즐을 적용한 한국형 발사체(KSLV-Ⅱ)의 길이 절감 가능성을 확인하기 위한 성능 분석을 진행하였다. 한국형발사체(KSLV-Ⅱ)의 1단 노즐에 핀틀을 적용하였고, 노즐 확장부의 길이만을 10%씩 일정하게 단축하였다[34]. 해석 결과, 길이를 단축한 ED 노즐의 비추력과 추력 계수가 길이를 단축하지 않은 ED 노즐보다 증가하였다. 연구 결과를 통해 ED 노즐의 적용을 통한 한국형 발사체(KSLV-Ⅱ)의 비추력 개선과 길이 단축을 통한 한국형 발사체

(KSLV-Ⅱ)의 무게 절감 가능성을 확인하였다. 이처럼 길이가 단축된 ED 노즐을 이용하였을 때에 발사체의 무게 절감 및 비추력 향상 가능성이 존재한다. 특히 발사체 상단에 적용한다면 무게 절감을 통해 발사체의 구조비를 효율적으로 낮출 수 있다. 구조비는 발사체 전체 무게에 대한 구조물의 무게 비율이다. 따라서 발사체 상단에 길이가 단축된 ED 노즐을 적용한다면 구조비 감소를 통해 발사체의 탑재물 운송 능력을 개선할 수 있다. 선행연구[34]에서는 한국형 발사체(KSLV-Ⅱ) 1단을 대상으로 하여 해수면 조건에서의 길이를 단축한 ED 노즐 성능을 제시하였지만, 이를 발사체 상단에 적용하기 위해서는 높은 고도에서의 ED 노즐 성능을 제시할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 국내 선행연구에서 이용한 방안을 포함하여 연소실의 형상이 고정된 상태에서 노즐 확장부의 형상을 변경하는 ED 노즐의 길이 단축 방안을 제시하고자 한다. 또한 비교적 높은 고도에서의 ED 노즐 내부 유동장 및 추력 변화를 확인하여 발사체 상단을 대상으로 ED 노즐 길이 단축 방안의 적용 가능성을 확인하고자 한다. 본 연구 내용은 발사체 상단의 성능 향상을 위한 ED 노즐 설계의 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

2. ED 노즐 설계

ED 노즐의 핀틀은 Fig. 3과 같이 영국 브리스톨 대학의 Taylor와 Hempsell이 제안한 설계 방법을 이용하여 설계하였다[5]. Fig. 3에 나타낸주요 설계 변수는 노즐 목 각도(θ_t), 핀틀 변곡 각도(θ_i), 노즐 외벽 반지름(R_w), 핀틀 최소 거리(G_t)와 핀틀 반지름(R_p)이다. 핀틀 최소 거리는 ED 노즐의 목 역할을 수행하며, 노즐 윤곽선과 핀틀 윤곽선 사이의 최단거리이다. 핀틀 설계 방법에 따르면 각 설계 변수가 연계되어있기 때문에 하나의 설계 변수가 달라지면 핀틀 형상이 달라진다. 예시로 노즐 목 각도가 증가하면서 기하학적인 노즐 목 면적을 일정하게 유지하기 위

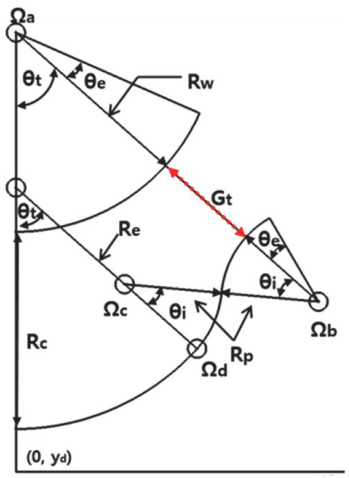

Fig. 3 Design parameters of ED nozzle(Bristol Univ.) [5].

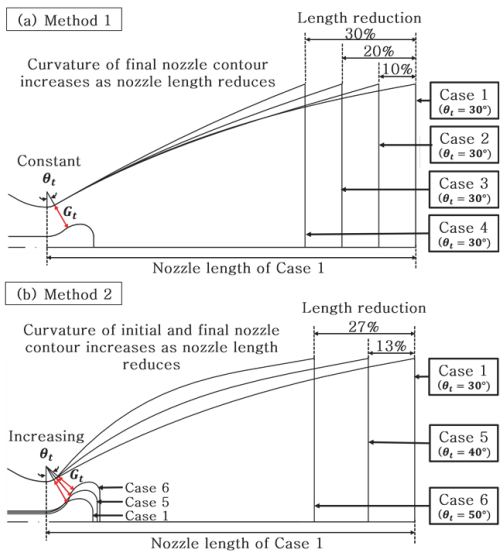

Fig. 4 ED nozzles for the analysis.

해서는 핀틀 최소 거리가 줄어들기 때문에 핀틀 최소 거리 이후의 핀틀 크기가 커진다[26]. ED 노즐의 윤곽선은 일반적으로 사용되고 있는 TOP(Thrust Optimized Parabola) 방법을 이용하였다.

선행 연구에서 15°의 확산반각을 가지는 원뿔형 노즐 길이의 80%인 벨 노즐에 핀틀을 적용하고, ED 노즐의 확장부 길이를 10%씩 단축하여

노즐 길이의 절감 가능성을 확인한 바 있다[34]. 이와 같은 방안을 첫 번째 길이 단축 방안으로 이용하여 Fig. 4의 (a)와 같이 Case 1~4를 설계하였다. Case 1은 80% 벨 노즐의 윤곽선에 핀틀을 적용한 ED 노즐이다. Case 2~4는 Case 1의 노즐 길이를 10%, 20%와 30%씩 단축한 ED 노즐이다. Case 2~4는 Case 1과 노즐 목 각도, 노즐 출구 직경과 노즐 목 직경을 동일한 상태에서 노즐 길이를 줄였기 때문에 후반부 노즐 윤곽선의 곡률이 증가하였다.

TOP 방법으로 설계된 노즐 확장부의 길이는 노즐 목 각도를 증가시켜 줄일 수 있다[35]. 이를 두 번째 방안으로 활용하여 Fig. 4의 (b)와 같이 노즐 목 각도가 각각 40°, 50°인 Case 5~6을 설계하였다. Case 5~6은 Case 1과의 길이 단축에 따른 추력 비교를 위하여 기하학적인 노즐 목 면적이 동일하도록 설계하였다. 또한 핀틀 최소 거리 이전의 핀틀 형상이 유사하도록 최대 핀틀 변곡 각도, 핀틀 최소 거리와의 비율이 동일한 노즐 외벽 반지름과 핀틀 반지름을 갖도록 하였다. Case 2~4와 다르게 Case 5~6은 노즐 목 각도의 증가로 인해 노즐 윤곽선의 초기 곡률도 증가하였다. 노즐 확장부의 길이가 단축된 ED 노즐에 사용된 설계 변수, 기하학적인 노즐 목 면적, 팽창비와 Case 1 대비 길이 단축률은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. ED nozzle design parameters.

Method 1	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
ε	16			
A_t (mm^2)	154.00			
R_e (mm)	28.00			
θ_t (deg)	30			
θ_i (deg)	10			
R_w (mm)	2.67			
G_t (mm)	4.55			
R_p (mm)	1.0 G_t			
L (mm)	64.26	57.83	51.41	44.98
Length reduction	0%	10%	20%	30%
Method 2	Case 5		Case 6	
ε	16			
A_t (mm^2)	154.00			
R_e (mm)	28.00			
θ_t (deg)	40		50	
θ_i (deg)	18		24	
R_w (mm)	2.67			
G_t (mm)	4.03		3.61	
R_p (mm)	1.0 G_t			
L (mm)	55.91		46.91	
Length reduction	13%		27%	

3. ED 노즐 수치해석 방법 및 조건

노즐 확장부의 길이를 단축한 ED 노즐의 수치해석은 ANSYS Fluent 17.0을 사용하였다. 일반적으로 압축성 유동에 사용되는 밀도 기반과 노즐 형상인 2D 축대칭 형상을 이용하여 수치해석을 진행하였다. 난류 모델은 k-ω SST 모델을 이용하였다[36]. 선행연구에서는 k-ω SST 모델을 이용한 수치해석 결과가 ED 노즐 공압 실험 결과와 유사함을 밝힌 바 있다[18].

작동 유체는 이상기체의 공기를 사용하였다. Fig. 5는 수치해석에 사용된 경계 조건과 격자를 나타낸다. 각 경계 조건은 Table 2와 같이 2.0 MPa, 298.15 K의 압력 입구 조건과 고도 13 km의 외기 조건을 사용하였다. 경계 조건은 향후

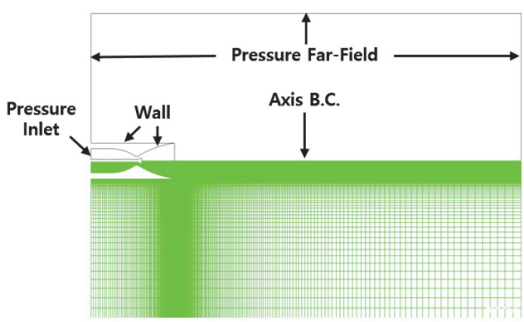

Fig. 5 Boundary conditions and grids.

Table 2. Numerical conditions.

Domain size	$x/R_e = 100, y/R_e = 30$
Boundary conditions	Pressure inlet, Pressure far-field, Wall

수행할 공압 실험의 환경을 고려하여 선정하였다. 노즐 벽면과 핀틀은 단열(adiabatic), 점착(no-slip) 조건을 이용하였다. 원거리장(far-field)의 크기는 노즐 출구 유동의 역류를 방지하고, 충분히 발달할 수 있도록 노즐 출구 반지름을 기준으로 가로 100배, 세로 30배가 되도록 구성하였다.

수치해석의 정확도와 해석 소요 시간을 고려한 격자 수를 선정하기 위하여 격자 민감도를 수행하였다. Hwang 등은 격자 민감도를 통해 선정한 격자 수를 이용한 해석 결과를 동일한 노즐 형상에 대한 공압 실험 결과와의 비교 평가를 통해 검증한 바 있다[13]. 격자 민감도는 격자 수에 따른 E-D 노즐의 노즐 벽 압력 분포와 핀틀에 가해지는 공력 하중을 비교하여 수행하였다. 격자 민감도 결과로 격자 수 약 21만 개와 28만 개의 노즐 벽 압력 분포가 유사하였고, 핀틀에 가해지는 공력 하중이 약 0.06%로 유사하여 격자 수를 약 21만 개로 선정하였다. 본 연구에서는 Hwang 등[13]이 이용한 격자 민감도 방법을 적용하여 격자 민감도를 수행하였다. 본 논문의 노즐 형상이 Hwang 등[13]의 것과 다른 점을 고려하여 약 20만 개, 30만 개, 40만 개의 정렬 격자를 구성하였다. 격자는 핀틀에 의해 노즐 벽면으로 유도되는 유동과핀틀, 노즐의 벽면에서 발생하는 경계층을 고려하여 y+가 1이 되도록 구성하였다.

격자 민감도 결과를 Fig. 6과 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 격자 수에 따른 노즐 벽 압력 분포이다. 가로축은 노즐 확장부의 길이를 이용하여 노즐 축 방향 거리를 무차원화하였고, 세로축은 챔버 압력을 이용하여 노즐 벽 압력을 무차원화하였다. Fig. 6을 통해 격자 수 약 30만 개와 40만 개의 노즐 벽 압력 분포가 유사함을 확인하였다. 선행연구에서는 핀틀의 공력 하중을

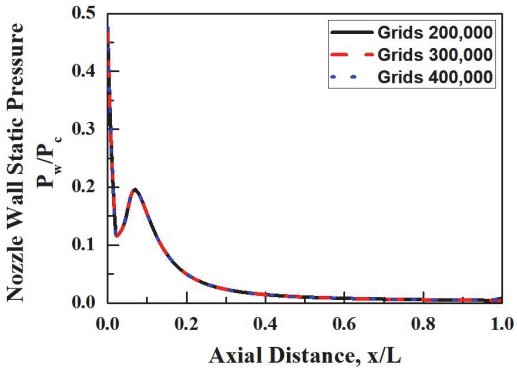

Fig. 6 Nozzle wall static pressure distribution for grid sensitivity test.

Table 3. Results of grid sensitivity test.

	Number of grids		
Variables	200,000	300,000	400,000
$\dot{m}$ [kg/s]	0.638	0.644	0.644
F_{thrust} [N]	413.728	410.641	410.524
C_F	1.221	1.212	1.211

분석하기 위해 수행되었기 때문에 격자 수에 따른 핀틀에 가해지는 공력 하중을 비교하였으나, 본 연구에서는 성능을 분석하기 위해 질량 유량, 추력과 추력 계수를 비교하였다. Table 3을 통해 격자 수 약 30만 개와 40만 개의 질량 유량, 추력과 추력 계수가 0.03% 이내로 유사하였다. 이는 Hwang 등[13]이 수행한 격자 민감도 결과 중 격자 수에 따른 주요 지표의 차이인 0.06%보다 작기 때문에 향후 수행할 공압 실험의 결과와 일치할 것으로 판단된다. 따라서 약 30만 개의 정렬 격자를 선정하여 수치해석을 진행하였다.

4. ED 노즐 수치해석 결과

4.1 길이 단축 방안에 따른 유동장 변화

Fig. 7은 ED 노즐의 마하수 분포이다. 첫 번째 길이 단축 방안을 이용한 Case 2~4는 노즐 출구 부근에서의 마하수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 길이 단축 방안을 이용한

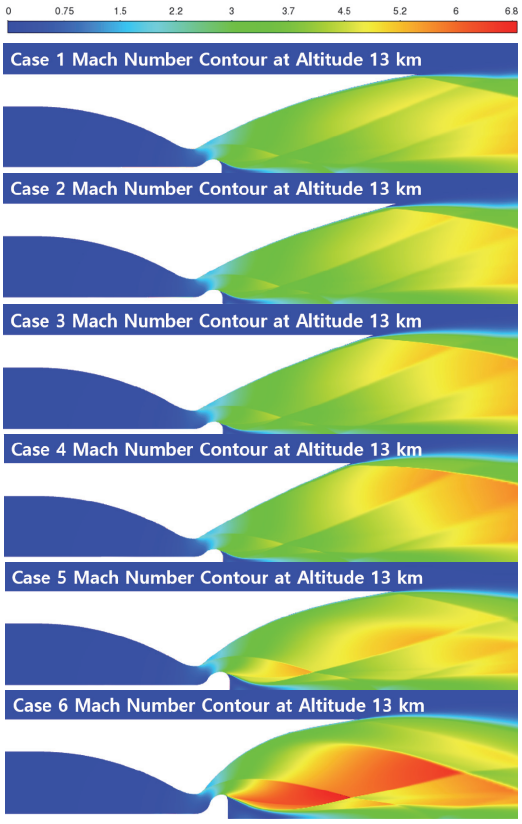

Fig. 7 Mach number contour of ED nozzles.

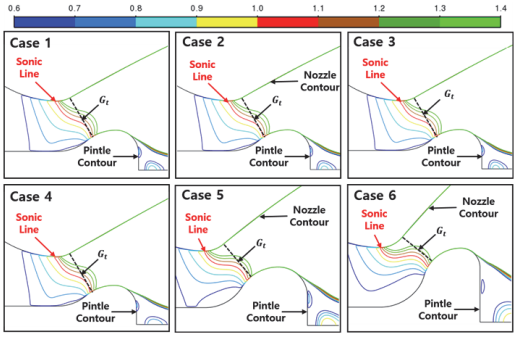

Fig. 8 Mach number lines of ED nozzles.

Case 5~6은 노즐 출구 부근과 핀틀 후반부에 존재하는 재순환 영역의 윗부분에서 마하수가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

마하수의 증가 원인을 파악하기 위하여 Fig. 8과 같이 노즐 목 부근 마하수 분포를 확인하였다. 실제 형성한 노즐 목이 설계 시 노즐 목을 수행하는 핀틀 최소 거리에서 왜곡되어 물결 형태인 것을 확인할 수 있다. 노즐 목 각도를 증가시킨 두 번째 방안은 첫 번째 방안보다 더 왜곡되었다. 선행 연구의 노즐 목 각도에 따른 노즐 목 면적에서도 이와 유사한 경향성이 나타났다[26]. 해석 결과 형성한 유효 노즐 목 면적을 Table 4에 나타내었다. 두 가지 방안 모두 기하학적 노즐 목 면적보다 유효 노즐 목 면적이 증가하였다. 두 번째 방안의 경우에는 노즐 목 각도 증가로 인하여 더 왜곡되었기 때문에 첫 번째 방안보다 유효 노즐 목 면적의 증가율이 크다.

Table 4. Comparison of throat area.

Nozzle	Throat area [㎡]	
	$A_{t,geometric}$	$A_{t,effective}$
ED301010	154.0	169.5
ED301090		
ED301080		
ED301070		
ED401887		183.1
ED502473		209.1

노즐 목 이후 유동의 팽창을 확인할 수 있도록 Fig. 9~10과 같이 핀틀 벽 압력 분포를 나타냈다. Fig. 9~10의 가로축은 핀틀 전체 길이로 무차원화한 핀틀 축 방향 거리이다. 가로축의 0.0은 연소실 입구이며, 1.0은 핀틀의 끝단이다. Fig. 10에 수직선으로 핀틀 벽에서의 노즐 목 위치를 나타냈다. 핀틀 벽 압력 분포는 노즐 수축부에 의하여 압력이 감소하고, 핀틀 곡률에 의해 압력이 증가하였다가 감소한다. 이후 노즐 목을 형성하여 압력이 계속하여 감소하고, 핀틀 끝단에서는 재순환 영역으로 인해 압력이 증가한다. Fig. 10에 나타낸 노즐 목 이후 압력 분포를 보면 두 번째 방안이 첫 번째 방안보다 핀틀 벽 압력이 급격하게 감소하였다. 이를 통해 두 번째 방안의 노즐 목 이후 유동이 크게 팽창하였음을 알 수 있다. 이는 노즐 목 각도와 핀틀 변곡 각도가 모두 증가한 핀틀 형상에 대한 선행 연구와 동일한 경향성을 보인다[26]. 따라서 노즐 목 각도와 핀틀 변곡 각도가 증가한 두 번째 방안

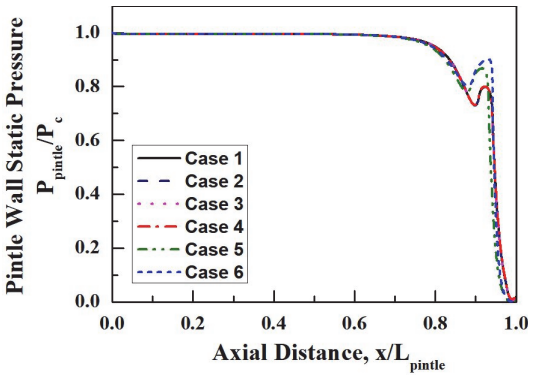

Fig. 9 Pintle wall pressure distribution of ED nozzles.

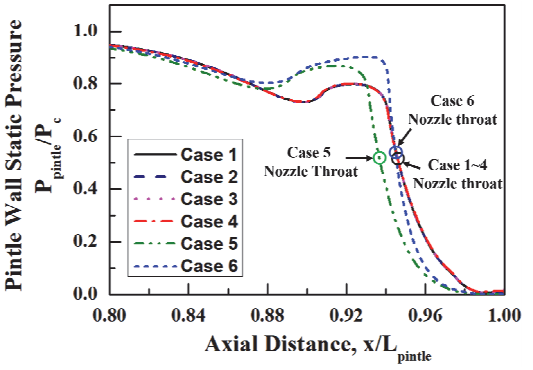

Fig. 10 Pintle wall pressure distribution of ED nozzles near pintle end.

의 핀틀 형상으로 인해 노즐 목 이후 유동이 크게 팽창하여 재순환 영역의 윗부분에서 마하수가 증가한 것으로 판단된다.

첫 번째와 두 번째 방안을 이용한 ED 노즐의 노즐 출구에서의 마하수 증가 원인을 파악하기 위해 Fig. 11~13과 같이 노즐 출구에서의 마하수, 유동 속도와 온도를 확인하였다. Fig. 11~13의 세로축은 노즐 출구 반지름으로 무차원화한 노즐 반경 방향 거리이다. 먼저 첫 번째 방안을 이용한 Case 2~4의 노즐 출구에서의 마하수가 Case 1보다 감소하였다. 이는 변곡점 이전 윤곽선의 곡률이 동일하지만 변곡점 이후에는 달라지면서 곡률의 불연속성이 증가하여 발생한 것으로 판단된다. 하지만 확장부의 길이를 단축함에 따라 Case 1과의 Case 2~4의 노즐 출구에서

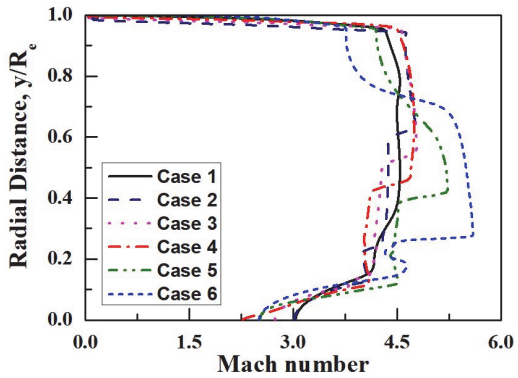

Fig. 11 Mach number distribution on ED nozzle exit plane.

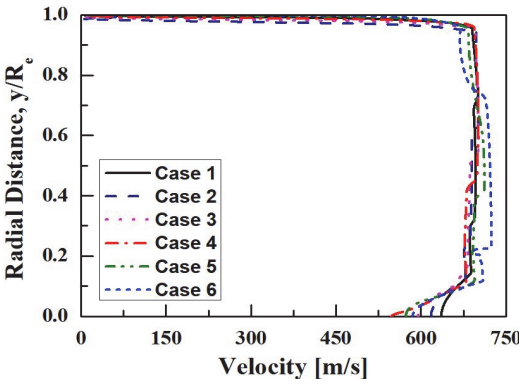

Fig. 12 Velocity distribution on ED nozzle exit plane.

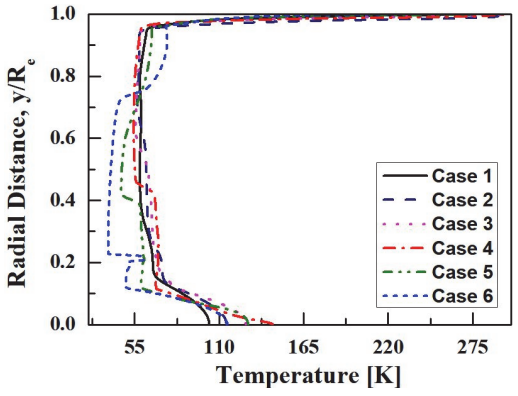

Fig. 13 Temperature distribution on ED nozzle exit plane.

의 마하수 감소폭이 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 확장부의 길이를 단축함에 따라

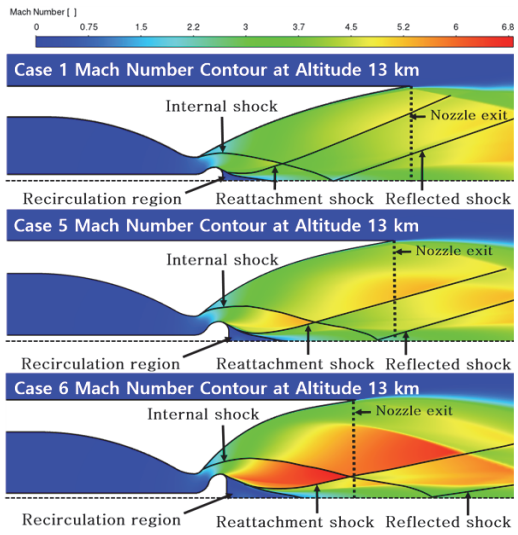

Fig. 14 Flow structure of ED nozzles.

증가한 윤곽선의 곡률로 인해 발생한 것으로 판단된다. 노즐 윤곽선의 곡률 증가는 노즐 반경의 증가로 이어지고, 이로 인해 유동의 팽창이 빨라져 마하수를 증가시킨다[37].

두 번째 방안을 이용한 Case 5~6은 Case 1과 비교하였을 때에 노즐 출구에서의 마하수가 크게 증가하여 마하수 증가폭이 커지는 것을 확인할 수 있다. Case 5~6의 노즐 출구에서의 마하수 증가 원인을 파악하기 위해 Fig. 14에 Case 1, Case 5와 Case 6의 노즐 내부 유동 구조를 나타냈다. 노즐 윤곽선의 변곡점으로 인한 내부 충격파(internal shock)와 내부 충격파가 노즐 중심선에서 반사하여 형성된 반사 충격파(reflected shock), 핀틀 이후 팽창하는 유동의 전단층이 노즐 중심선에 재부착하면서 형성된 재부착 충격파(reattachment shock)를 나타냈다. Case 5~6의 마하수가 크게 증가한 구간이 재부착 충격파의 윗부분이며, Case 5~6의 노즐 출구에서의 재부착 충격파의 위치가 Case 1보다 노즐 중심선에 가까운 것을 확인할 수 있다. Case 5~6의 노즐 출구에서의 재부착 충격파 위치 변화 원인을 파악하기 위하여 재부착 충격파가 발생하는 재순환 영역 근처의 유선을 Fig. 15에 나타내었다. 또한 Fig. 15에 나타난 재부착 충격파의 이전과 이후의 마하수와 충격파 각도(shock-wave angle),

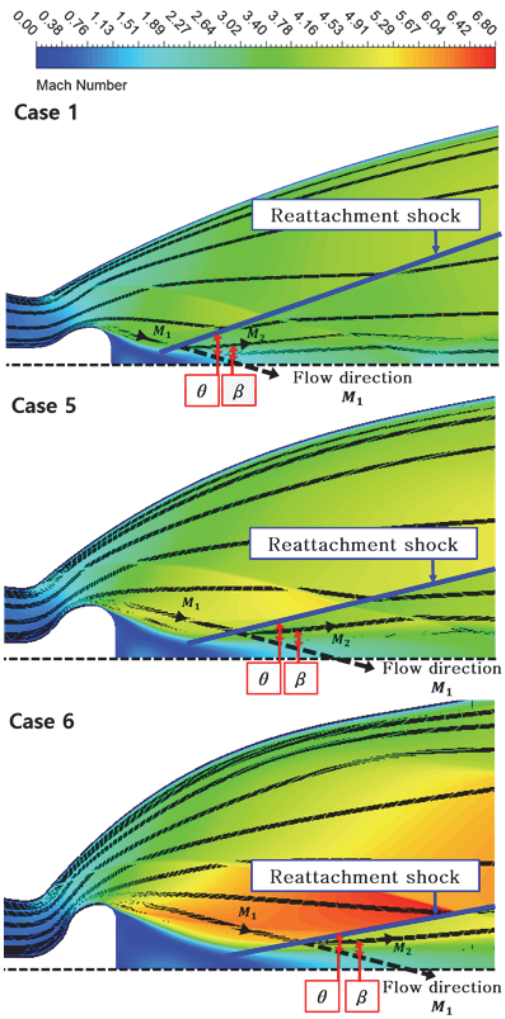

Fig. 15 Streamlines of ED nozzles.

Table 5. Reattachment shock of ED nozzles.

Nozzle	M1	M2	Angle (deg)	
			Shock wave (θ)	Deflection(δ)
Case 1	3.5	2.8	31.1	16.8
Case 5	4.6	3.6	25.7	17.5
Case 6	5.8	4.4	22.0	13.6

전향각(deflection angle)을 Table 5에 나타내었다. 이를 통해 Case 5~6의 재부착 충격파 이전의 마하수가 점차 증가하며 충격파 각도가 작아

지는 것을 확인하였다. 따라서 Case 5~6의 재순환 영역 윗부분의 마하수가 증가함에 따라 재부착 충격파의 전향각이 작아져 재부착 충격파가 노즐 중심선에 가까워진 것으로 판단된다. 또한 Kim 등[26]의 길이를 단축하지 않고 노즐 목 각도와 핀틀 변곡 각도를 증가시킨 ED 노즐의 재부착 충격파보다 노즐 후반부에서의 재부착 충격파의 위치가 노즐 중심선에 가까운 경향성을 나타냈다. 따라서 노즐 윤곽선의 곡률로 인해 빠르게 팽창하는 유동에 대한 재부착 충격파의 영향이 작아지며 Case 5~6의 노즐 출구에서의 마하수가 Case 1과 비교하여 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 16은 노즐 벽 압력 분포이며, Fig. 17은 노즐 출구 부근에서의 노즐 벽 압력 분포를 나타낸다. Fig. 16과 Fig. 17의 가로축은 노즐 확장부의 길이로 무차원화한 노즐 축 방향 거리이며, 세로축은 챔버 압력으로 무차원화한 노즐 벽 압력이다. Fig. 16을 통해 Case 1~6의 전체적인 노즐 벽 압력 분포가 유사함을 확인할 수 있다. Fig. 17을 통해 Case 1~6은 모두 외부 압력보다 노즐 출구 압력이 낮은 과대 팽창이 발생하였다. 과대 팽창으로 인한 유동 박리가 발생하여 노즐 벽 압력이 증가하였다. 첫 번째와 두 번째 방안 모두 확장부의 길이를 단축할수록 유동 박리 지점이 상류 방향으로 이동하였다. 이는 윤곽선의 곡률이 증가함에 따라 유동이 분리되는 압력비에 빨리 도달한 Fouladi 등과 Takahashi 등의 연구 결과와 유사하다[38,39]. 따라서 두 가지 길이 단축 방안에 따른 유동 박리 지점의 이동 경향성은 윤곽선의 곡률이 증가하여 발생한 것으로 판단된다.

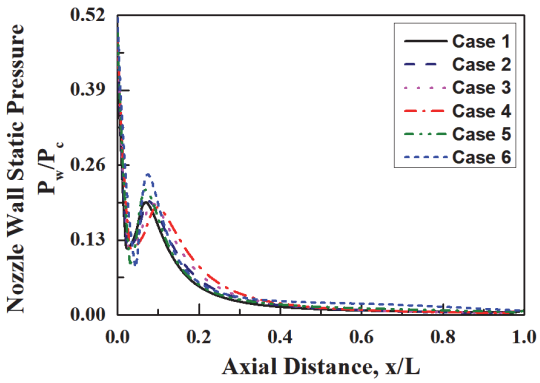

Fig. 16 Nozzle wall pressure distribution of ED nozzles.

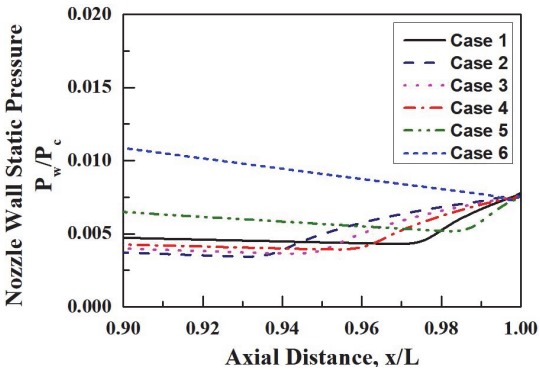

Fig. 17 Nozzle wall pressure distribution of ED nozzles near nozzle exit.

4.2 길이 단축 방안에 따른 추력 변화

길이 단축한 ED 노즐의 추력, 비추력과 추력 계수를 Table 6에 나타내었다. 추력, 비추력과 추력 계수는 Eq. 1~3의 식을 이용하여 구하였다.

$$F_{thrust} = \dot{m} v_e + (p_e - p_a) A_{e,effective} \quad (1)$$

$$I_{sp} = \frac{F_{thrust}}{\dot{m} g_0} \quad (2)$$

$$C_F = \frac{F_{thrust}}{p_c A_{t,effective}} \quad (3)$$

두 가지 방안을 각각 이용한 Case 2와 Case 5

Table 6. Performance of ED nozzle cases.

Nozzle	Performance at Altitude 13 km		
	F_{thrust} [N]	I_{sp} [s]	C_F
Case 1	413.4	65.4	1.22
Case 2	401.8	63.6	1.19
Case 3	407.7	64.5	1.20
Case 4	412.7	65.3	1.22
Case 5	411.2	65.9	1.12
Case 6	416.7	66.9	1.00

의 추력과 비추력이 Case 1보다 감소하였지만, 확장부 길이를 단축할수록 점차 추력과 비추력이 증가하였다. 따라서 첫 번째 방안을 이용하여 길이를 단축한 Case 4는 Case 1의 추력, 비추력과 유사해졌다. 두 번째 방안을 이용한 Case 6은 Case 1보다 추력, 비추력이 향상하였다. 확장부 길이를 단축함에 따라 추력과 비추력이 증가하는 것은 확장부 길이 단축에 따라 증가하는 노즐 곡률로 인한 노즐 출구에서의 유동 속도가증가하는 경향성 때문이다. 이로 인해 첫 번째 방안을 이용한 경우에 점차 추력 계수가 증가하였다. 하지만, 두 번째 방안을 이용한 경우에는 추력 계수가 감소하였다. 이는 Table 4와 같이 노즐 목 각도의 증가로 인해 해석 결과 나타난 유효 노즐 목 면적이 증가하였기 때문이다.

5. 결 론

본 논문은 노즐 길이가 단축된 ED 노즐의 설계를 위하여 길이 단축 방안에 따른 ED 노즐 내부 유동장과 성능을 분석하였다. 첫 번째 길이 단축 방안은 80% 벨 노즐의 윤곽선을 갖는 ED 노즐의 확장부 길이를 10%, 20%와 30%씩 단축하는 것이다. 두 번째 길이 단축 방안은 벨 노즐 윤곽선의 초기 각도에 해당하는 노즐 목 각도를 증가시켜 노즐 확장부 길이를 단축하는 것이다.

확장부의 길이를 단축함에 따른 윤곽선의 곡률 증가로 인하여 80% 벨 노즐의 길이를 갖는 ED 노즐과 비교하였을 때에 첫 번째 방안을 이용한 ED 노즐의 출구에서의 유동 속도 감소폭이 작아졌다. 두 번째 방안을 이용한 ED 노즐은 유동 속도 증가폭이 커졌다. 이러한 노즐 출구에서의 유동 속도 변화로 인하여 80% 벨 노즐의 길이를 갖는 ED 노즐과 비교하였을 때에 첫 번째 방안을 이용한 ED 노즐의 추력은 유사하였고, 두 번째 방안을 이용한 ED 노즐의 추력은 증가하였다. 하지만 두 번째 방안을 이용한 ED 노즐은 노즐 목 각도 증가로 인한 유효 노즐 목 면적의 증가로 추력 계수가 감소하였다.

본 연구 결과를 통해 두 가지 방안을 이용하여 길이를 단축한 ED 노즐의 성능이 80% 벨 노즐 길이를 갖는 ED 노즐과 유사하거나 향상함을 확인하였다. 이를 통해 제시한 두 가지 방안을 적용하여 성능을 고려한 ED 노즐 길이 단축이 가능함을 확인하였으며, 발사체 상단 성능 향상을 위한 ED 노즐 설계의 기초 자료에 활용될 수 있는 것에 의의가 있다. 향후에는 길이 단축 방안을 이용한 ED 노즐을 제작하여 공압실험을 수행하고, 수치해석과 비교하여 ED 노즐 길이 단축 방안을 검증할 계획이다.

후 기

본 논문은 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 스페이스챌린지사업(NRF-2021M1A3B8078915)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

1. Hagemann, G., Immich, H., Nguyen, T. V. and Dumnow, G. E., “Advanced Rocket Nozzles,” *Journal of Propulsion and Power,* Vol. 14, No. 5, pp. 620-634, 1998.
2. Moon, T., Park, S., Choi, J. and Huh, H., “Research Trends of an E-D Nozzle for Altitude Compensation,” *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences,* Vol. 45, No. 10, pp. 844-854, 2017.
3. Taylor, N.V. and Sato, T., “Experimental and Computational Analysis of an Expansion Deflection Nozzle in Open-wake Mode,” *AIAA Aerodynamics Conference,* H.I., U.S.A., AIAA 2008-6924, Aug. 2008.
4. Rao, G.V.R., “Analysis of a New Concept Rocket Nozzles,” *Journal of Liquid Rockets and Propellants,* Vol. 2, pp. 669-682, 1960.
5. Taylor, N.V. and Hempsell C.M., “Throat Flow Modelling of Expansion Deflection

Nozzles," *JBIS*, Vol. 57, pp. 242-250, 2004.
6. Taylor, N.V., Hempsell 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, No. 3-4, pp. 550-562, 2010.
7. Wagner, B. and Schelchtriem, S., "Numerical and Experimental Study of the Flow in a Planar Expansion-Deflection Nozzle," 47*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference,* Cal., U.S.A., AIAA 2011-5942, Jul. 2011.
8. Schomberg, K., Doig, G., Olsen, J. and Neely, A., "Geometric Analysis of the Linear Expansion-Deflection Nozzle at Highly Overexpanded Flow Conditions," 50*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference,* O.H., U.S.A., AIAA 2014-4001, Jul. 2014.
9. Schomberg, K., Olsen, J. and Doig, G., "Analysis of a Low-Angle Anuular Expander Nozzle," *Shock and Vibration,* Vol. 2015, pp. 1-8, 2015.
10. Schomberg, K., Doig, G. and Olsen, J., "Numerical Analysis of a Linear Expansion-Deflection Nozzle at Open Wake Conditions," 16*th Australasian International Aerospace Congress,* M.E.L., A.U., pp. 493-498, Feb. 2015.
11. Wang, G., Chen, L., Zhou, B., Guan, B., and Wang, G., "Numerical Investigation on Thrust Efficiency Dropping Phenomenon of Annular Expansion-Deflection Nozzles," *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 12, p. 126107, 2021.
12. Wang, Y., Lin, Y., Eri, Q. and Kong, B., "Flow and Thrust Characteristics of an Expansion-Deflection Dual-Bell Nozzle," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 123, p. 107464, 2022.
13. Hwang, H. and Huh, H., "Numerical Study on Thrust Characteristics of an E-D Nozzle for Altitude Compensation," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 20, No. 3, pp. 87-95, 2016.
14. Park, S., Moon, T. and Huh, H., "Study of an E-D Nozzle Design Parameters for Altitude Compensation," *Korean Society of Aeronautical and Space Science Fall Conference,* Jeju, Korea, pp. 1162-1163, Nov. 2016.
15. Moon, T., Park, S. and Huh, H., "Basic Numerical Study for Performance Analysis of an E-D nozzle according to the Minimum Distance," *Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference,* Busan, Korea, pp. 73-74, Nov. 2017.
16. Moon, T. and Huh, H., "Evaluation of Payload Gain according to E-D Nozzle Length Reduction," *Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology,* Seoul, Korea, pp. 485-487, Oct. 2017.
17. Moon, T., Park, S., Choi, J. and Huh, H., "Performance Analysis of an Expansion-Deflection Nozzle According to Initial Angle of a Pintle," *Europe-Korea Conference on Science and Technology,* S.T.O., Sweden, Abstract 321, Jul. 2017.
18. Park, S., Moon, T., and Huh, H., "Numerical Analysis and Preliminary Experimental Results of E-D Nozzle in Low Nozzle Pressure Ratios," *Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference,* Busan, Korea, pp. 71-72, Nov. 2017.
19. Moon, T. and Huh, H., "Specific Impulse Gain for KSLV-Ⅱ with Combination of Dual Bell Nozzle and Expansion-Deflection Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 22, No. 1, pp. 16-27, 2018.
20. Choi, J., Moon, T., Choi, J., Park, S., Kim, H. and Huh, H., "Technology and patent

Trends of Altitude Compensation Nozzles," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences,* Vol. 46, No. 8, pp. 662-670, 2018.

21. Park, S., Moon, T., and Huh, H., "Numerical Study on an E-D Nozzle Characteristics with Various Pintle Inflection Angles," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 22, No. 6, pp. 19-27, 2018.
22. Lee, K. and Huh, H., "Fundamental Experimental Study of a 3D Printing E-D Nozzle after Improvement of Surface Roughness," *Korean Society of Propulsion Engineers Spring Conference,* Jeju, Korea, pp. 553-554, May 2018.
23. Lee, K., Lee, Y., Park, S. and Huh, H., "Preliminary Results of E-D Nozzle Pneumatic Experiment using 3D Printer," *Korean Society of Aeronautical and Space Science Fall Conference,* Jeju, Korea, pp. 1201-1202, Nov. 2018.
24. Kim, H., Lee, J. and Huh, H., "Conceptual Design of External Pintle Nozzle with Pintle Injector," *Korean Society of Aeronautical and Space Science Fall Conference,* Jeju, Korea, pp. 1199-1200, Nov. 2018.
25. Lee, K., Choi, J. and Huh, H., "Analysis of E-D Nozzle Flow in Transition Nozzle Pressure Ratios," 10th *National Congress on Fluid Engineering,* Yeosu, Korea, Aug. 2018.
26. Kim, H., Moon, T., Lee, J. and Huh, H., "Flow Characteristics through Numerical Analysis of External Pintle Nozzle with Nozzle Throat Angle," 10th *National Congress on Fluid Engineering,* Yeosu, Korea, Aug. 2018.
27. Lee, K., Park, S., Koo, J., and Huh, H., "Experimental Study on a 3D Printed Altitude-Compensating Expansion-Deflection Nozzle for a Launch Vehicle," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers,* Vol. 43, No. 12, pp. 859-869, 2019.
28. Lee, K., Kim, H., Moon, T. and Huh, H., "Fundamental Numerical Study for Performance of E-D Rocket Nozzle according to the Pintle Design Parameters," 10*th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science & 4th Asian Joint Symposium on Aerospace Engineering,* Hsin Chu, Taiwan, 2019-04-006, Aug. 2019.
29. Kim, H., Lee, K. and Huh, H., "Design of External Pintle Nozzle with Pintle Injector for Methane Rocket Engine," *US-Korea Conference on Science, Technology and Enterpreneurship,* C.H., U.S.A., p. 196, Aug. 2019.
30. Lee, K., Park, S. and Huh, H., "Experimental Study on an Expansion-Deflection Nozzle Characteristics according to the Pintle Inflection Angle," *US-Korea Conference on Science, Technology and Enterpreneurship,* C.H., U.S.A., p. 195, Aug. 2019.
31. Lee, K., Kim, H. and Huh, H., "Fundamental Numerical of an Expansion-Deflection Nozzle according to the Base Nozzle Length," *Europe-Korea Conference on Science and Technology,* V.I.E., A.T., Abstract 229, Jul. 2019.
32. Lee, K., Kim, H. and Huh, H., "Fundamental Numerical Study for Performance of an E-D Rocket Nozzle according to the Pintle Radius," *Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference,* Busan, Korea, pp. 729-730, Nov. 2019.
33. Goetz, A., Hagemann, G., Kretschmer, J. and Schwane, R., "Advanced Upper Stage Propulsion Concept – The Expansion-Deflection Upper Stage," *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference,&Exhibit*, A.Z., U.S.A., AIAA 2005-3752, Jul. 2005.
34. Lee, K., Kim, H., and Huh, H., "Possibility of Reducing Nozzle Length for the KSLV-

Ⅱ an External Pintle Nozzle," *Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference,* Busan, Korea, pp. 61-62, Nov. 2019.

35. Sutton, G.P., *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1992.
36. Ansys, Inc., "ANSYS Fluent Theory Guide," Campmsburg, P.A., U.S.A., 2016.
37. Jeon, T.J. and Park, T.S., "Effect of Nozzle Initial and Exit Wall Angles on Supersonic Flow Field in a Thrust Optimised Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers,* Vol. 25, No.3, pp. 1-13, 2021.
38. Fouladi, N. and Farahani, M., "Numerical Inverstigation of Second Throat Exhaust Diffuser Performance with Thrust Optimised Parabolic Nozzles," *Aerospace Science and Technology,* Vol. 105, p. 106020, 2020.
39. Takahashi, M., Ueda, S., Tomika, T., Takahashi, M. and Tamura, H., "Transient Flow Simulation of a Compressed Truncated Perfect Nozzle," 37*th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference,* U.T., U.S.A., AIAA 2001-3681, Jul. 2001.