

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(10), 844-854(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.10.844

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

고도 보정용 확장-굴절(E-D) 노즐의 국외 연구 동향

문태석*, 박상현*, 최준섭*, 허환일**

Research Trends of an E-D Nozzle for Altitude Compensation

Taeseok Moon*, Sanghyeon Park* Junsob Choi* and Hwanil Huh**

Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Chungnam National University*

Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University**

ABSTRACT

The Expansion-Deflection(E-D) nozzle is a nozzle that has a performance gain through the altitude compensation effect by changing the effective area within the nozzle according to the altitude. An E-D nozzle has been known to reduce the length of the nozzle and achieve the payload gain of the launch vehicle. Due to the potential advantages of an E-D nozzle, related research has been carried out in the United Kingdom, Germany, Australia and Europe etc. In the UK, the flow characteristics of the E-D nozzle and the performance comparison with the dual-bell nozzle which is altitude compensation nozzle were studied. In order to understand the transition characteristics of the E-D nozzle in DLR, the transition characteristics according to the nozzle pressure ratio change were analyzed. In Europe, numerical study using the E-D nozzle concept on upper stage of the launch vehicle Ariane 5 ESC-B was carried out to confirm the possibility of payload gain according to the nozzle length reduction. In this paper, research trends of an E-D nozzle performed outside the country are classified and analyzed according to their characteristics and utilized as basic data of E-D nozzle research in the future.

초 록

E-D 노즐은 고도에 따라 노즐 내의 유효 면적을 변화시켜 고도 보정 효과를 통해 성능 이득을 가지는 노즐이다. E-D 노즐은 노즐의 길이를 절감시켜 발사체의 탑재중량 이득을 얻을 수 있다고 알려져 있는데, 이러한 E-D 노즐의 장점과 잠재적인 가능성 때문에 영국, 독일, 호주, 유럽 등에서 관련된 연구가 수행되었다. 영국의 경우 E-D 노즐의 유동 특성과 고도 보정 노즐 중 듀얼 벨 노즐과의 성능 비교 연구를 수행하였고, DLR에서는 E-D 노즐의 천이 특성을 파악하기 위해 노즐 압력비 변화에 따른 천이 특성을 중점적으로 분석하였다. 유럽에서는 실제 발사체 Ariane 5 ESC-B 상단에 E-D 노즐 개념을 적용한 수치적 연구를 수행하여 노즐 길이 절감에 따른 탑재중량 이득 가능성을 확인하였다. 본 논문에서는 국외에서 수행한 E-D 노즐의 연구 동향을 특징 별로 분류 및 분석하였고, 향후 E-D 노즐 연구의 기초 자료로 활용하고자 한다.

Key Words : Expansion-Deflection Nozzle(E-D 노즐), Altitude Compensation(고도 보정), Geometric Design Parameters(형상 설계변수) Research Trends(연구 동향)

† Received : December 26, 2016 Revised : August 14, 2017 Accepted : September 18, 2017

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

1. 서론

오늘날 우주발사체 산업에서는 발사체 성능 향상과 발사 비용을 줄이기 위한 연구로 저비용 및 재사용 발사체 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 이 중 발사체 성능 향상을 위한 연구로 동일한 엔진에서 노즐 형상 변경만으로 성능 이득을 얻는 고도 보정 노즐에 관한 연구가 우주 개발 선진국에서 다양하게 수행되고 있다[1~14].

다양한 고도 보정 노즐 형상 중 특히 듀얼 벨(dual-bell) 노즐과 E-D(Expansion-Deflection) 노즐에 관해 미국, 영국, 일본, 독일 등에서 관련 연구가 수행되고 있다[1~24]. 특히 독일 DLR(German Aerospace Center)은 듀얼 벨 노즐과 E-D 노즐에 관해 연구한 최선진국으로써 최근까지 꾸준히 연구를 수행 중에 있다[1~6].

고도 보정 노즐의 경우 새로운 로켓 엔진을 개발하지 않고, 기존의 로켓 엔진을 활용하여 노즐 교체만을 통해 추력 및 비추력과 같은 발사체 성능 향상을 가능하게 한다. 따라서 발사체 성능 향상을 위한 연소기 개발에 비해 상대적으로 소요되는 시간과 노력을 줄일 수 있게 된다.

Figure 1 형상의 E-D(Expansion-Deflection) 노즐은 저고도에서 고도 보정 효과를 가지며 상대적으로 노즐 길이를 단축시켜 탑재중량 측면에서 이점을 얻을 수 있다는 가능성이 존재한다[4].

E-D 노즐은 고도에 따른 노즐 압력비(Nozzle Pressure Ratio, NPR)변화를 통해서 Fig. 2 (a)저고도에는 외부 대기압이 노즐내부로 침투하여 노즐 유효면적비가 작은 개방 유동장(open wake)의 유동 형태를 가지며 (b)고고도에서는 유효면적비가 높은 폐쇄 유동장(closed wake)을 가진다[5]. E-D 노즐은 외부 대기압의 영향으로 노즐 가스 팽창이 제한되는 개방 유동장을 가질 때, 고도 보정 효과가 크게 발생되며, 한번 폐쇄된 유동장은 더 이상 천이가 이루어지지 않으며 고도 보정 효과는 사라지게 된다[6].

이러한 E-D 노즐은 고도 보정 효과를 통한 성능 이득과 노즐 길이 절감을 통한 탑재중량 이득을 가질 수 있는 노즐로 알려져 있다. 하지만 일반적인 노즐 형상에 비해 상대적으로 설계가 복잡하고 노즐 목 부분에서 발생하는 높은 열하중을 해결해야 한다는 문제점이 존재하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 독일 DLR에서는 연소 전의 추진제를 노즐 목 주변에 순환시켜 열교환을 할 수 있는 팽창식 사이클(expander cycle)을 제시하였지만, 아직까지 실제 발사체에 적용된 사례는 존재하지 않는다[11].

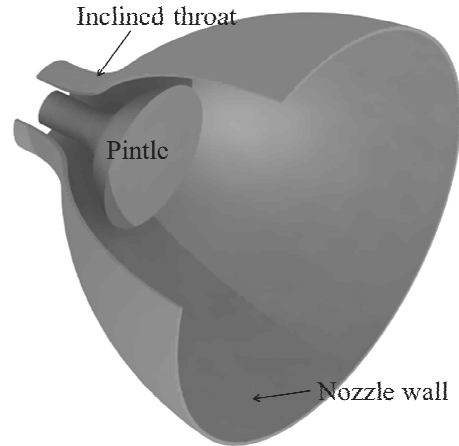


Fig. 1. Expansion-Deflection(E-D) nozzle

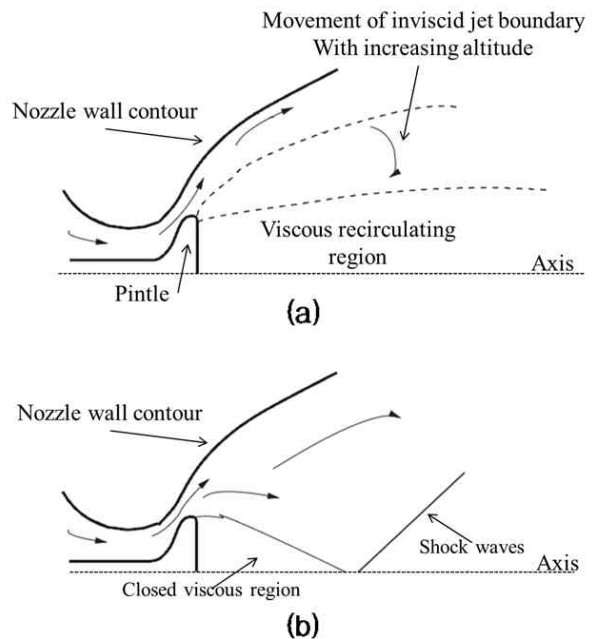


Fig. 2. E-D nozzle operating mode (a)open wake mode at low altitude and (b)closed wake at high altitude[8]

그렇지만 E-D 노즐이 가지는 잠재적인 이점에 대한 가능성 때문에 국외에서는 E-D 노즐의 유동 특성 및 성능분석에 관한 연구[6~14]가 다수 수행되었다. 이에 반면 국내에서는 충남대학교에서 기초적인 일차원 E-D 노즐 해석연구가 진행되었지만 아직 기초 수준 단계이다[15]. 따라서 본 논문에서는 국외에서 수행된 E-D 노즐의 동향에 관해 분석하고, 설계 방법 및 변수를 도출하여, 추후 E-D 노즐 연구의 기초 자료로 활용하고자 한다.

II. E-D 노즐 설계방법 분석

2.1 E-D 노즐 설계방법

2.1.1 TOC(Thrust Optimised Contour)

일반적으로 E-D 노즐을 설계하는 방법은 MOC(Method of Characteristics)를 이용하고 Rao에 의해 고안된 식을 통해 최적의 추력을 내는 추력 최적화 형상(Thrust Optimised Contour, TOC) 방법이다[7]. 영국 Bristol 대학과 독일의 DLR에서는 E-D 노즐 설계 시 Fig. 3 (a)의 MOC를 기반으로 한 TOC 방법을 이용해 E-D 노즐 형상을 설계하였다[16,17].

형상 설계 시 가장 먼저 초기 기준점(Ω_a)을 선정하고 그 점으로부터 노즐 외벽 반지름(R_w), 노즐 최소 거리(G_t), 핀틀 반지름(R_p) 순으로 설계한다. 두 번째 기준점은 식 (1)에 의해 선정된다.

$$(\Omega_b)_x = (\Omega_a)_x + (R_p + R_w + 1)\sin(\theta_t) \quad (1)$$

선정된 두 번째 기준점으로부터 핀틀 형상을 설계하고 식 (2)를 통해 세 번째 기준점(Ω_c)이 선정된다. 최종적으로 핀틀 초기 각도(θ_i)와 연장선(R_c)을 이용해 핀틀 최소 높이(y_d)를 설계한다.

$$(\Omega_c)_x = (\Omega_b)_x - 2R_p\sin(\theta_t + \theta_i) \quad (2)$$

특징으로는 초기 기준점(Ω_a)이 포함된 기준 수직 축 위에 초기 핀틀 반지름(R_c)의 중심이 포함된다는 것이다. 따라서 해당 방법으로 E-D 노즐을 설계하면 핀틀 반지름(R_c) 설계 시 노즐 목 각도(θ_i)와 핀틀 변곡 각도(θ_i)가 고정되기 때문에 설계변수의 범위와 수가 제한되게 된다[12].

2.1.2 Circular arcs

호주 UNSW(The University of New South

Wales)에서는 MOC를 기반으로 한 TOC 설계 방법에서 설계변수가 제한된다는 한계점을 보완하기 위해 반지름이 주어진 1개의 원호와 2개의 직각삼각형을 이용한 circular arcs 방법으로 E-D 노즐을 설계하였다[12].

Circular arcs 방법의 경우 동일한 성능을 내는 일반적인 노즐과 비교하였을 때, 7.5% 길이 절감 효과를 얻을 수 있고, E-D 노즐 핀틀 형상 설계 시 Fig. 3(b)의 핀틀 초기 반지름(r_{ab})과 핀틀 초기 각도(θ_b)와 같은 설계변수를 추가적으로 변경시켜주어 성능 이득을 얻을 수 있게 된다[12,18].

형상 설계는 핀틀 최소 높이(y_a)로부터 최초 핀틀 초기 반지름(r_{ab})과 핀틀 각도(θ_b)를 이용해 설계한다. 설계 시 Fig. 3(b)의 b지점과 c지점이 일치하는 경우 식 (3)을 이용해 최종 핀틀 반지름(r_{ac})을 구하고, 반대로 일치하지 않는 경우 식 (4)를 이용해 중간부분의 핀틀 반지름(r_{ab})을 구한다. 그 후 목 각도(θ_t)를 이용해 c지점에서 노즐 최소 거리(G_t)와 노즐 외벽 반지름(r_{mn})을 설계하고, 핀틀 설계 시 d지점의 각도(θ_d)는 0도, e지점의 각도(θ_e)는 90도로 임의적으로 고정한다[12].

Circular arcs 방법의 특징으로 노즐 확장부 형상이 원호를 이용해 설계되었기 때문에, 일반적인 노즐 확장부 형태와는 차이점이 존재한다.

$$r_{ac} = \frac{G_t(C - \cos\theta_c) + r_{mn}(\cos\theta_a - \cos\theta_c)}{(\cos\theta_a - \cos\theta_c)} = r_{mn} + G_t \left(\frac{C - \cos\theta_c}{\cos\theta_a - \cos\theta_c} \right) \quad (3)$$

$$r_{ab} = \frac{r_{ac}(\cos\theta_a - \cos\theta_c) - r_{bc}(\cos\theta_c - \cos\theta_b)}{(\cos\theta_a - \cos\theta_c)} \quad (4)$$

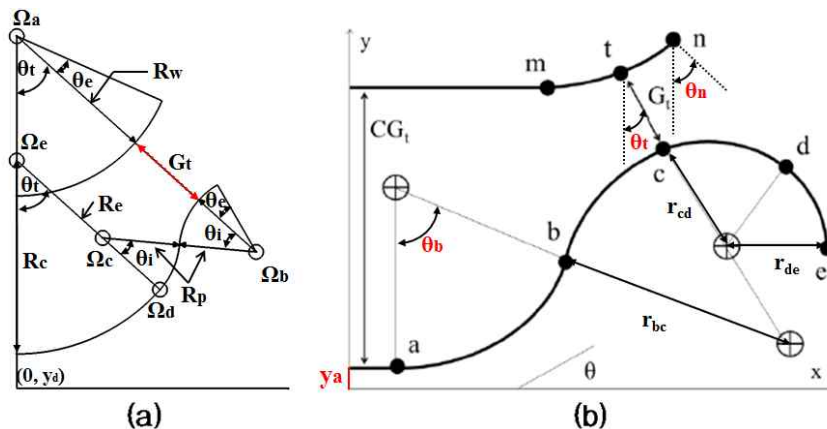


Fig. 3. Schematics of E-D nozzle each of (a)TOC and (b)circular arcs method[7,12]

III. E-D 노즐 국외 동향 현황

3.1 E-D 노즐의 유동 특성 및 성능분석

영국 Bristol 대학에서는 해당 기관에서 보유하고 있는 Fig. 4의 고공환경 모사 시험 장비 EMEGG 시설[19]을 활용하여 E-D 노즐의 유동장 변화와 성능분석 연구에 관한 실험적 연구를 수행하였다[6,8,16].

실험 시 가압된 공기를 사용하였고, 가압 공기의 압력은 12 bar, 노즐 후단 압력은 0.1 bar 조건을 형성하여 고공환경을 모사 하였다. 노즐 압력비(NPR)를 1부터 100까지 다양하게 변화시켜 가며, 실험을 통해 얻은 E-D 노즐 내의 입구에서 발생하는 초기 충격파와 E-D 노즐의 핀틀 윗면에서 생성되는 팽창파(expansion fan)의 위치를 수치해석 결과 값과 비교 분석하였다[6].

분석 결과 유동장 구조는 대부분 일치하게 나타남을 확인하였지만, 충격파가 발생하는 부분의 벽 압력 결과 값에서 차이를 보였다. 이러한 차이가 발생하는 이유에 관해 Bristol 대학에서는 역 압력 구배(adverse pressure gradient)로 인해 발생하는 Fig. 5의 박리 기포(separation bubble) 현상 때문이라 판단하였다[6].

E-D 노즐 내에서 발생하는 박리 기포 현상은 핀틀 윗면에서 생성된 경사충격파가 노즐 벽면에 부딪히면서 발생하는데, 이로 인해 경계층이 분리되는 현상이 발생하고 노즐 팽창부에서 박리로 인해 나타난 충격파(induced separation shock)와 재 부착 충격파(reattachment shock)의 상호작용으로 인한 복잡한 유동 구조가 형성되게 된다[21]. 이 복잡한 유동 내에서 충격파가 전단층(shear layer)을 따라 반복해서 발생하며 벽 압력 결과 값에 차이를 나타내게 된 것으로 판단된다.

또한 Bristol 대학에서는 듀얼 벨 및 E-D 노즐

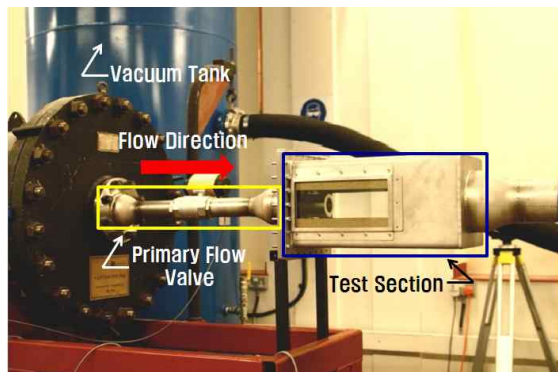


Fig. 4. The EMEGG nozzle facility in Bristol univ.[16]

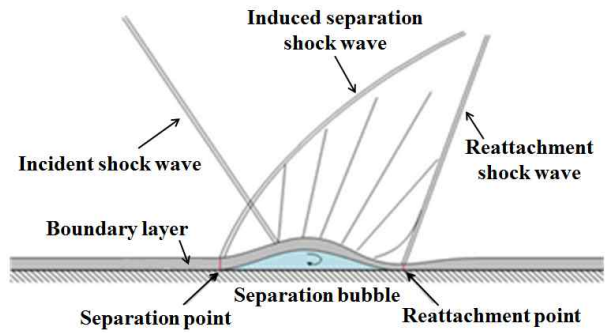


Fig. 5. Separation bubble phenomenon[21]

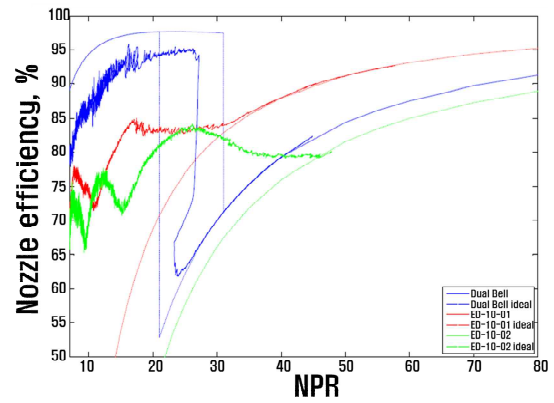


Fig. 6. Nozzle efficiencies of the dual-bell nozzle and E-D nozzle[16]

의 고도에 따른 추력계수(C_F)를 일반적인 벨 노즐과 비교를 위해 실험적 연구를 수행하였다[16].

실험에 사용된 듀얼 벨 노즐과 E-D 노즐의 성능 비교 분석을 위해 식 (5)의 노즐 효율을 활용하고자 하였고, 식 (6)의 추력(T)과 총 압력(P_c)을 이용해 얻은 추력 계수(C_F)와 식 (7)을 통해 도출한 등엔트로피(isentropic) 과정의 이상적인 노즐 추력 계수(C_F^0)를 활용하였다[16].

$$\eta = \frac{C_F}{C_F^0} \tag{5}$$

$$C_F = \frac{T}{P_c A_t} \tag{6}$$

$$C_F^0 = \left(\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left(1 - \left[\frac{P_e}{P_c} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

실험 시 Table 1에 언급된 2개의 E-D 노즐 형상과 1개의 듀얼 벨 노즐을 설계하여 고도에 따른 추력 계수 성능 비교 연구를 진행하였다[16].

고도에 따른 노즐 압력비(NPR)를 변수로 하여 분석한 결과 듀얼 벨 노즐과 E-D 노즐 모두 저

Table 1. Specifications of E-D nozzle and dual-bell nozzle in Bristol univ.[16]

Property	ED-10-01	ED-10-02	
Throat angle, degree	30	60	
R_p^-, G_t	10	10	
R_w^-, G_t	10	5	
R_p^+, G_t	10	3	
R_w^+, G_t	10	5	
Pintle entry angle, degree	33	29	
Pintle radius	6.2	6.5	
Design M_e	3.8	5.3	
G_t	0.888	0.847	
dual-bell, DB-10-01			
Inner nozzle:		Total nozzle:	
Exit P_e , bar	0.38	Exit M_e	3.8
Length, mm	16.2	Length, mm	56.7
Area ratio	3.08	Area ratio	19.0

고도에서 일반적인 벨 노즐 성능에 비해 노즐 효율이 높게 나타남을 확인하였다[16].

두 가지 고도 보정 노즐 모두 일반적인 벨 노즐에 비해 고도에 따른 추력 성능은 높게 나타났으나, 천이 시 발생하는 성능 손실이 크게 나타났다. 이는 천이 시 진행되는 유동의 팽창 변화가 크기 때문에 발생하게 된다. 따라서 E-D 노즐을 비롯한 고도 보정용 노즐은 천이 시 발생하는 유동 특성에 관한 연구가 반드시 수행되어야 하고, 천이 시 발생하는 성능 손실 구간을 최소화하기 위한 최적설계 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2 노즐 압력비에 따른 E-D 노즐의 천이 특성 분석

영국에서 E-D 노즐에 관해 수행된 연구를 바탕으로, 독일 DLR에서는 P6.2[4] 냉가스 시험설비를 이용하여 상온 고압 질소가스를 활용한 평면(planar) E-D 노즐의 천이 특성 연구를 수행하였다. Fig. 7은 시험부에 노즐을 결합한 모습이다. 실험에 사용된 평면 E-D 노즐의 목 각도는 40°이며 노즐 상단 벽(upper nozzle contour), 핀틀(pintle), 중심선(centre line)에 정압을 측정하기 위한 지름 0.5 mm의 구멍을 뚫어 노즐 길이에 따른 노즐 내부의 벽 압력(p_w)의 변화를 외부 대기압(p_a)과의 비로 나타내었다[9]. 또한 쉐리렌 가시화(schlieren visualization)를 통해 핀틀 후단과 노즐 출구 유동을 분석하였다.

Figure 8은 노즐 압력비에 따른 노즐 (a)상단 및 (b)하단(핀틀 및 노즐 중심선)의 압력 값을 실험을 통한 결과 값과 수치해석을 활용하여 얻은 결과 값 사이의 비교를 나타낸 그래프이다. 분석

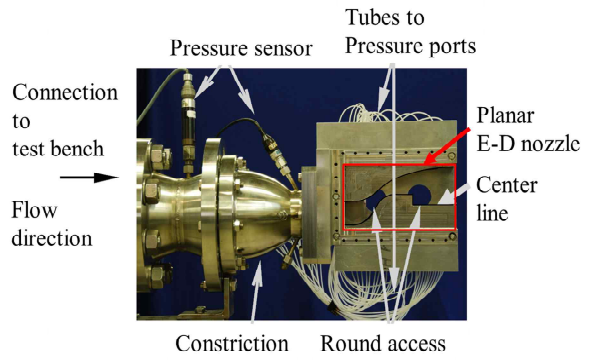


Fig. 7. The E-D nozzle mounted on the test rig in DLR[10]

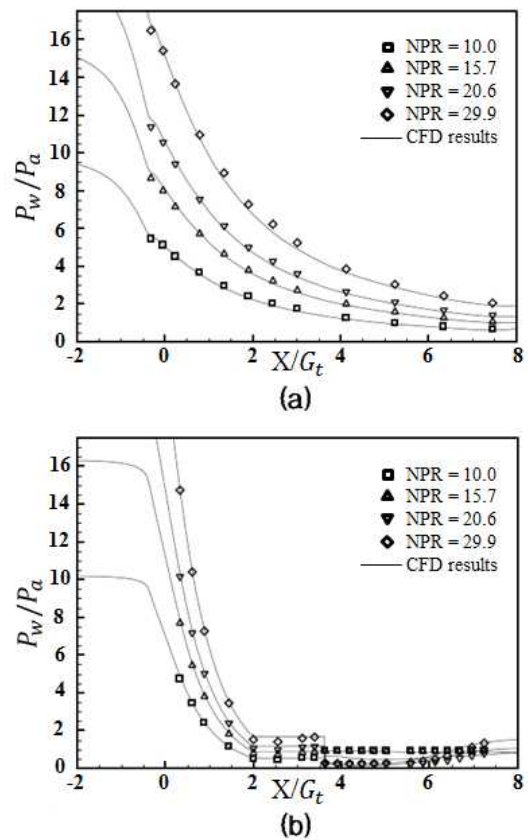


Fig. 8. Experimental wall pressures and CFD results obtained on a 2D mesh at (a)upper nozzle contour and (b)lower nozzle contour[9]

결과 그래프를 살펴보면, 전체적인 p_w/p_a 값이 수치해석 결과와 실험 값이 크게 차이가 나지 않음을 확인 할 수 있었다. 또한 노즐 압력비 변화에 따라 3D 형태의 E-D 노즐 시험부를 모델링하여 수치해석을 함께 수행하였고, 결과 값 비교를 Fig. 9와 같이 분석하였다[9,10].

개방 유동장을 형성하는 노즐 압력비 10에서

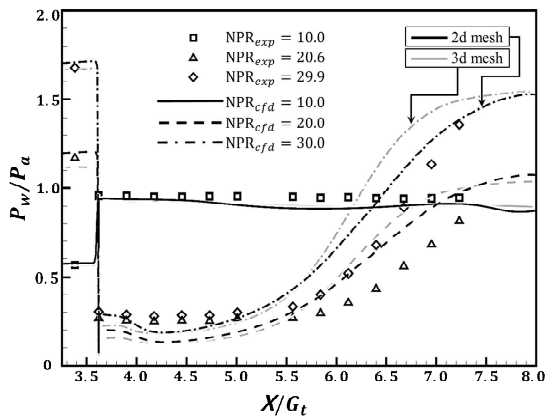


Fig. 9. Experimental and CFD results obtained on 2D and 3D meshes[9]

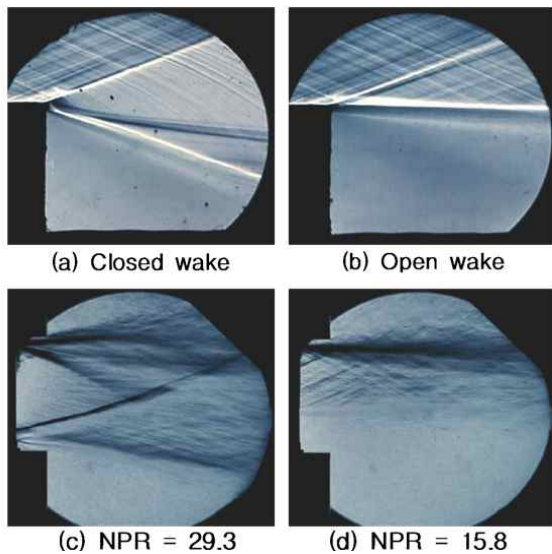


Fig. 10. Schlieren images of flow[9,10]

는 2D와 3D의 수치해석 값이 비슷함을 확인할 수 있다. 이러한 개방 유동장에서는 유동의 박리가 핀틀 끝단에서 발생되며 중심선의 압력은 대기압이 흘러들어와 가압되고, 유동이 빨라짐에 따라 p_w/p_a 값이 1 이하로 떨어지게 된다. 폐쇄 유동장을 형성하는 노즐 압력비 20 이상에서는 p_w/p_a 값이 실험 값과 수치해석 값, 2D 형태와 3D 형태에 관계없이 노즐 후단으로 갈수록 증가하는 추세를 확인할 수 있다. 이는 핀틀 끝단에서 시작한 전단층이 노즐 중심선에 재 부착되며 발생하는 재 부착 충격파에 의한 압축으로 인한 결과임을 DLR에서는 명시하고 있다. 이러한 핀틀 후단 이후의 전단층과 충격파는 노즐 압력비를 조절하며 개방 유동장과 폐쇄 유동장에서의 형태를 Fig. 10에서처럼 쉐리렌 가시화를 수행하

였다[9,10].

독일에서는 E-D 노즐의 개방 유동장에서 폐쇄 유동장으로 천이되는 순간의 벽 압력 분포 및 유동 특성을 중점적으로 연구를 수행하였다. 하지만 실제 발사체에 E-D 노즐 개념을 적용하기 위해서는 E-D 노즐의 핀틀에 작용하는 공력하중 문제를 고려해야만 한다.

과거 충남대학교에서 핀틀에 작용하는 공력하중에 관한 기초 전산수치해석 연구[15]를 통해 추력성능이 높아질수록 핀틀에 발생하는 공력하중이 높아진다는 경향을 확인하였다. 이를 통해 시스템 설계가 단순히 공력하중 문제가 아닌 노즐 성능적인 측면도 함께 고려 되어야한다는 것을 알 수 있다. 따라서 원하는 성능을 내며 실제로 구현 가능한 E-D 노즐 설계를 위해서는 적절한 trade-off가 필요하다고 판단된다.

3.3 E-D 노즐의 탑재중량 이득 가능성 확인을 위한 수치적 연구

범유럽 항공 및 방위 산업체인 EADS Space Transportation GmbH와 유럽 우주국 ESA ESTEC(European Space Research and Technology Center)에서는 우주발사체 Ariane 5 ESC-B의 상단 Vinci 엔진에 E-D 노즐 개념을 적

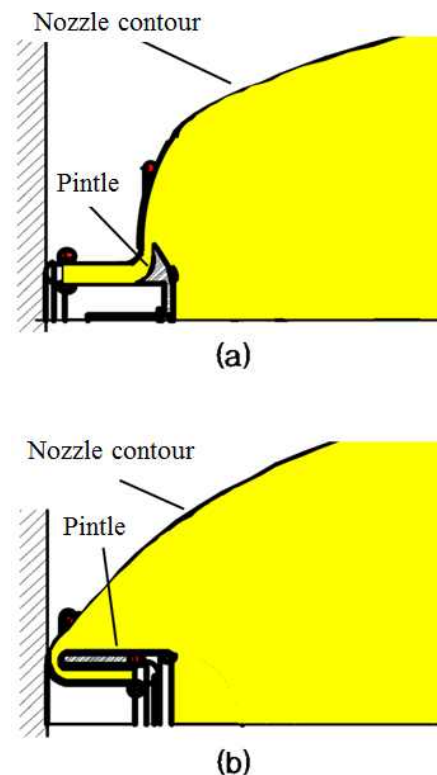


Fig. 11. Concept of (a)classical and (b)counterflow E-D nozzle[4]

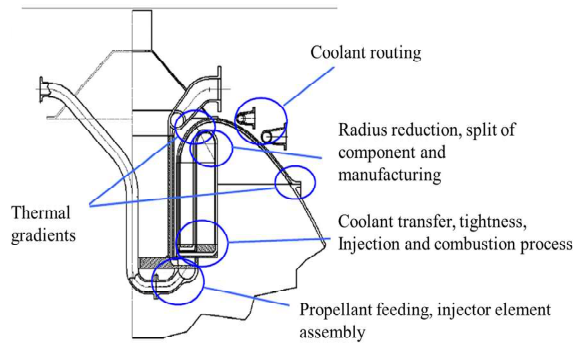


Fig. 12. Critical design issues for the E-D TCA[4]

용하여 기존의 벨 노즐 형태의 상단 엔진과의 무게 비교를 통해 발사체 탑재중량 이득에 관한 수치적 연구를 2005년 발표하였다[4].

일반적인 E-D 노즐의 형태인 Fig. 11의 (a)와 같은 핀틀 구조물이 아닌 (b)에서처럼 연소실에서 나오는 유동방향이 노즐 출구방향과 정반대인 E-D 노즐을 설계하여 연구를 진행하였다. 또한 노즐 형태와 더불어 전체적인 노즐 및 챔버의 구조를 재설계하여 단지 노즐 형태를 바꾼 것이 아닌 Fig. 12에서처럼 연소실과 노즐을 묶어 E-D 노즐 TCA(Thrust Chamber Assembly) 개념으로 연구를 진행하였다. 수치해석의 경우 오일러법(Euler solution)과 나비에-스토크스법(Navier-Stokes solution)을 동시에 수행하여 E-D 노즐 내부의 마하수 분포를 비교하였고 유동장이 안정적으로 생성됨을 확인하였다[4].

연구의 목적인 탑재중량이득을 비교하기 위해 해당 연구에서는 Table 2에 언급된 조건으로 가상의 GTO(Geo Transfer Orbit) 미션을 통한 기존 Vinci ESC-B와의 탑재중량 이득을 비교하였다. 시뮬레이션 결과 상단 엔진에 E-D 노즐 개념을 적용한 엔진은 총 12,237 kg을 탑재할 수

Table 2. GTO mission constraints[4]

GTO Mission constraints
-Launch azimuth is 90 degree east and Fairing jettison constrained by max. thermal flux level
-Time interval between EAP separation and fairing jettison requested to be greater than 50 s
-Fallout of EPC with an aerodynamic longitude lower than 0.5 degrees
-Perigee altitude between 200 and 250 km
-Visibility constraints with minimum required overlap time between 2 ground stations of 10 seconds

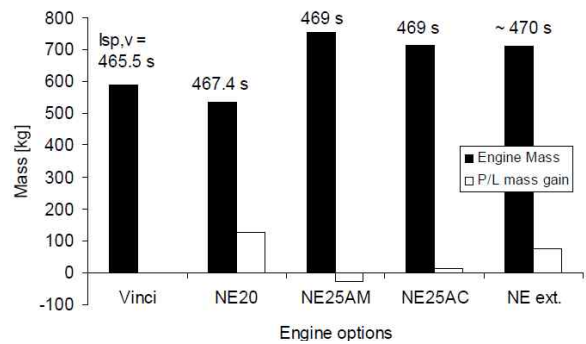


Fig. 13. Comparison of engine performance[4]

있었고, 기존 Vinci ESC-B 보다 약 182 kg의 탑재중량 이득을 얻는 결과 값을 보였다.

또한 Fig. 13에 나타난 바와 같이 다양한 엔진 형상에 E-D 노즐의 TCA 개념을 적용하여, Vinci 엔진과의 성능 및 노즐 길이 절감을 통한 탑재중량이득 가능성을 수치적으로 확인하였다. 비교 결과 동일한 성능을 내는 엔진에 비해 최대 약 100 kg의 이득을 얻을 수 있었다[4].

이처럼 독일과 유럽의 경우에는 E-D 노즐의 고도 보정 효과보다 노즐 길이 절감을 통한 탑재중량 이득 가능성 보기 위한 연구를 수행하였다[4]. 하지만 E-D 노즐 내부 핀틀 구조물에 집중적으로 부하되는 열하중을 완화시키기 위한 구체적인 냉각 시스템 연구는 아직까지는 이루어지지 않은 상황이다. 향후 열하중 문제를 해결하기 위한 냉각 연구가 수행되어 실제 발사체에 적용 가능하게 된다면 국내에서도 차세대 발사체 개발에 긍정적인 영향을 줄 수 있을 것이라 판단된다.

3.4 E-D 노즐 설계변수 연구 및 성능분석

호주의 UNSW에서는 E-D 노즐 설계변수가 추력 계수를 결정짓는데 수치적으로 어떤 영향을 주는지에 대한 실험 및 해석적 연구가 수행되었다. 설계변수로 Fig. 3의 (b)와 Table 3에 언급된 노즐 벽 반지름(r_{mn}), 구간별 핀틀 반지름($r_{bc\sim de}$), 핀틀 각도(θ_b), 목 각도(θ_t), 노즐 변곡각(θ_n), 핀틀 최소 높이(y_a) 8개로 정의할 수 있다. 언급한 8개의 설계변수에 대해 노즐 압력비 5, 10, 20, 30, 50에서 핀틀과 노즐 확장부 형상을 바꾸어가며 각 설계변수에 따른 성능 변화를 분석하였다[12].

실험 시 Fig. 14와 같이 4개의 공기를 담은 볼베를 연결하여 10초간 5~25 bar의 압력을 유지하였고, 노즐 형상은 16가지로 다양하게 축소 설계하였다. 이 중 대표적인 4가지 모델의 설계변수가 Table 3에 언급되어 있으며, 7번과 10번 형상에 관해 4개의 노즐 압력비에서 수행한 실험과

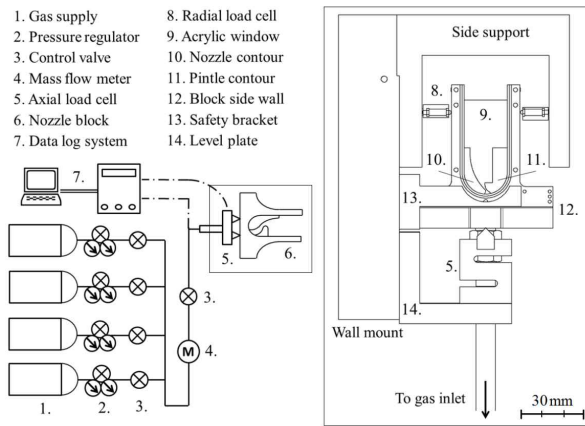


Fig. 14. Experimental setup with nozzle block schematic in UNSW[12,13]

수치해석 값이 Fig. 15에 나타나 있다. 비교 분석을 위한 추력 계수는 식 (8)에 의해 결정된다 [12].

$$C_F = \frac{\dot{m}v_e + A_e(P_e - P_{amb})}{A_t P_0} \quad (8)$$

7번과 10번 실험 결과 값의 검증을 위해 Fig. 15에서 Inviscid, SST k- ω , SA(Spalart Allmaras) 난류모델 해석결과 값과 비교하였다. SST 난류모델과 SA 난류 모델을 비교한 결과 7번, 10번 형상에 관해 각각 2.5%, 7.5%의 차이를 보였다.

두 난류 모델의 차이가 존재하는 이유로 호주 UNSW에서는 E-D 노즐의 핀틀 형상 차이로 인해 전단층에 의한 박리 지점이 다르게 나타나기 때문이라 추정하였다[12]. 또한 7번 형상은 10번 형상에 비해 노즐 목 각도의 크기가 약 2배 이상 크게 되는데, 이 경우 동일한 성능을 낸다는 조건하에 노즐의 길이가 절감되게 되고 결과적으로 전단층과 후류 지역의 간섭이 줄어들게 되어 추력 효율의 이점을 얻게 된다[12]. 결과적으로 노즐 목 각도의 크기가 커지게 되면 노즐 길이 절감은 물론 성능 이득까지 얻을 수 있게 된다.

UNSW에서는 Fig. 16과 같이 E-D 노즐의 설

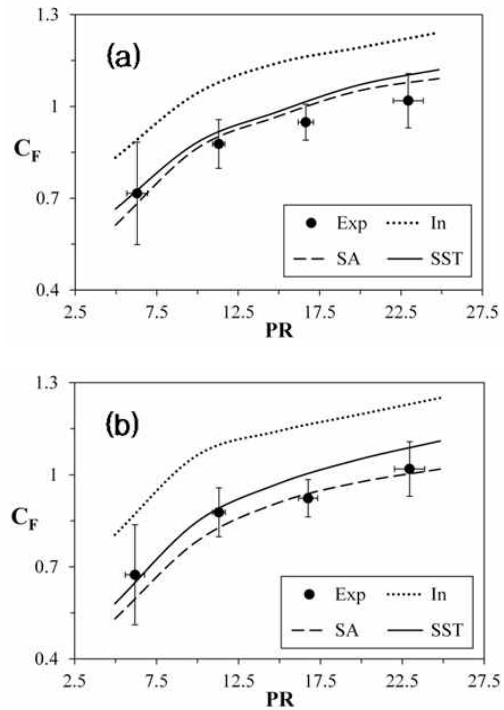


Fig. 15. Comparison of numerical and experimental thrust coefficient in configuration (a)7 and (b)10[12]

계변수 중 목 각도(θ_t)가 저각으로 설계된 E-D 노즐이 노즐 길이가 동일하게 설계된 일반적인 C-D(convergent-divergent) 노즐과 비교를 위한 실험적 연구를 진행하였다. 실험조건으로는 최대 가압 압력이 700 kPa인 건공기를 이용하였다 [13,14]. C-D 노즐의 경우 고정된 팽창비에서 노즐이 작동하기 때문에 이상팽창이 되기 전까지 약 15%의 노즐 성능 손실이 발생하게 된다. 따라서 고도 보정 효과를 통해 성능 이득을 얻는 E-D 노즐과의 비교를 수행하여 C-D 노즐과의 차이점을 비교하였다. E-D 노즐의 핵심 설계변수 중 노즐 목 각도(θ_t)를 저각으로 설계하여 고도 보정 효과 확인과 노즐 내부 유동 셀리렌 촬영을 통해 유동 특성 분석을 수행하였고, 목 각도(θ_t)가 작게 설계된 E-D 노즐과 동일한 길이를 가지

Table 3. Geometric design parameters of E-D nozzle in UNSW, $G_t=15$ mm[12]

No	r_{mn}	θ_n	$\theta_t=\theta_c$	r_{bc}	θ_b	r_{cd}	y_a	r_{de}
1	G_t	45°	$0.67\theta_n$	G_t	$45^\circ+0.5\theta_t$	G_t	$0.5G_t$	$0.5G_t$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
7	G_t	75°	θ_n	G_t	$45^\circ+0.5\theta_t$	G_t	$0.5G_t$	$2G_t$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	$5G_t$	45°	$0.67\theta_n$	$2.5G_t$	$45^\circ+0.5\theta_t$	$10G_t$	$3G_t$	$0.5G_t$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
16	$5G_t$	75°	θ_n	$2.5G_t$	$45^\circ+0.5\theta_t$	$10G_t$	$3G_t$	$2G_t$

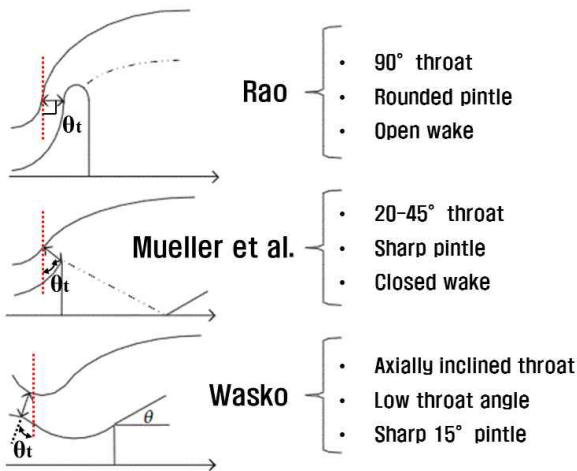


Fig. 16. Various of E-D nozzle design[13,14]

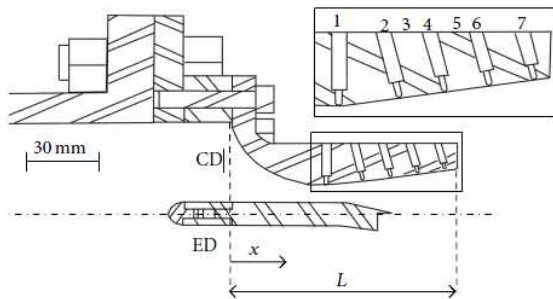


Fig. 17. Half diametric sectioned view of C-D and E-D nozzle configurations[13]

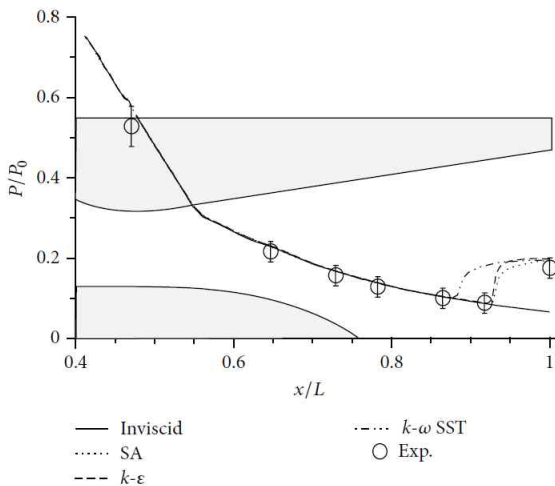


Fig. 18. Pressure distribution of experimental and numerical results through x/L [13]

는 C-D 노즐은 Fig. 17과 같다.

실험 결과 값의 검증에 위해 Inviscid, $k-\omega$ SST, SA, $k-\epsilon$ realizable 모델을 선정하여 수치해석을 수행하였고, Fig. 18과 같이 노즐 위치에 따

른 벽 압력 분포 그래프 노즐 내부에서 발생하는 충격파의 위치를 비교하였을 때 SA 난류 모델이 실험 값과 가장 유사함을 확인하였다[13].

분석 결과 목 각도(θ_t)가 약 15° 로 설계된 E-D 노즐은 동일한 길이를 가지는 C-D 노즐과 비교하였을 때 과대팽창 조건에서 노즐 유효 면적비 차이가 없기 때문에, 고도 보정 노즐로써의 개념으로는 적합하지 않다는 결론이 내려졌다[13,25].

IV. 결론

본 논문에서는 향후 진행할 고도 보정용 E-D 노즐의 연구에 기초 자료로 활용하고자 E-D 노즐과 관련하여 국외 항공우주분야 선진국에서 수행된 연구 동향을 분석하였고, E-D 노즐의 설계 방법 및 설계변수를 도출하였다.

분석 결과 영국 Bristol 대학, UNSW, 독일 DLR에서는 E-D 노즐의 연구로써 고도 보정 효과를 보기 위한 유동 및 천이 특성과 성능분석에 관한 연구를 주로 수행하였다.

또한 독일과 유럽의 경우 E-D 노즐의 고도 보정 효과보다 노즐 길이 절감을 통한 발사체의 탑재중량이득을 얻기 위한 연구가 중점적으로 수행되었다. 이를 위해 과거 실제로 사용된 Ariane 5 발사체 상단 Vinci 엔진에 E-D 노즐 개념을 적용한 수치적 연구를 수행하여, 탑재중량 이득 가능성을 보았다. 실제로 독일에서는 차세대 Ariane 발사체 개발로 1단 엔진에는 듀얼 벨 노즐을 적용하고, 상단 엔진에는 E-D 노즐 개념을 적용하는 연구가 최근 진행 중에 있다. 이는 고도 보정 노즐 개념이 단순한 아이디어가 아닌 실제 발사체에 적용될 수 있다는 가능성이 있음을 보여주고 있다.

따라서 E-D 노즐을 비롯한 고도 보정 노즐에 관한 기초 연구 수행을 통해, 국내 한국형발사체 개발 이후 차세대 발사체 개발의 아이디어 혹은 대안으로도 활용 가능할 것이라 판단된다.

E-D 노즐 설계변수로는 노즐 벽 반지름(r_{mn}), 구간별 핀틀 반지름(r_{bc-de}), 핀틀 각도(θ_b), 목 각도(θ_t), 노즐 변곡각(θ_n), 핀틀 최소 높이(y_a) 8가지로 정의할 수 있다. 이 다양한 설계변수 중 핵심 설계 변수인 노즐 목 각도(θ_t)는 클수록 노즐 성능이 좋아지지만 공력하중은 커지게 된다. 또한 너무 작아지게 되면 고도 보정 노즐로써의 효과가 없어진다는 문제점이 있게 된다. 따라서 적합한 목 각도(θ_t)의 범위 제시를 위해, 공력하중 및 설계변수에 관한 기초 연구가 수행되어야 할 것이라 판단된다.

후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2014M1A3A3A02034776).

References

- 1) Genin, C., Stark, R., Haidn, O., Quring, K. and Frey, M., *Experimental and Numerical Study of dual-bell Nozzle Flow*, Progress in Flight Physics, Vol. 5, Torus Press, Moscow, 2013, pp.363~376.
- 2) Genin, C., Gernoth, A. and Stark, R., "Experimental and Numerical Study of Heat Flux in dual-bell Nozzles," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 1, 2013, pp.21~26.
- 3) Genin, C. and Stark, R. "Experimental Study of dual-bell Nozzles," *2nd European Conference for Aerospace Sciences*, 2007.
- 4) Goetz, A., Hagemann, G. and Kretschmer, J., "Advanced Upper Stage Propulsion Concept-The Expansion-Deflection Upper Stage," *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, AIAA 2005-3752, July 2005.
- 5) 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.
- 6) Taylor, N. V. and Sato, T., "Experimental and Computational Analysis of an Expansion Deflection Nozzle in Open-wake Mode," *26th AIAA Aerodynamics Conference*, AIAA 2008-6924, August 2008.
- 7) Taylor, N. V. and Hemsell C. M., "Throat Flow Modelling of Expansion Deflection Nozzles," *JBIS*, Vol. 57, 2004, pp. 242~250.
- 8) 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 Astronautic a66*, Vol. 66, March 2010, pp.550 - 562.
- 9) Wagner, B. and Schlechtriem, S., "Numerical and Experimental Study of the Flow in a Planar Expansion-Deflection Nozzle," *In 47rd Joint Propulsion Conference*, Vol. 5942, 2011.
- 10) Wagner, B., Stark, R. and Schlechtriem, S., "Experimental Study of a Planar Expansion-Deflection Nozzle Flow Field," *4th European Conference for Aerospace Sciences*, July 2011.
- 11) Schomberg, K., Olsen, J., Doig, G. and Neely, A., "Numerical Analysis of a Linear Expansion-Deflection Nozzle at Open Wake Conditions," *16th Australian International Aerospace Congress*, February 2015, pp.493-498.
- 12) 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*, AIAA 2014-4001, July 2014.
- 13) Schomberg, K., Olsen, J. and Doig, G., "Analysis of a Low-Angle Annular Expander Nozzle," *Shock and Vibration*, March 2015.
- 14) Schomberg, K., Olsen, J. and Doig, G., "Computational Analysis of Pintle Variation in an Expansion-Deflection Nozzle," *13th Australian Space Science Conference*, 2013, pp.261~271.
- 15) Hwang, H. and Huh, H., "Numerical Study on Thrust Characteristics of an E-D Nozzle for Altitude Compensation," *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 3, 2016, pp.87~95.
- 16) Taylor, N., Steelant J. and Bond, R., "Experimental Comparison of dual-bell and Expansion Deflection Nozzles," *AIAA/ASME/SAE/ASEE*, July-August 2011.
- 17) Wagner, B., Stark, R. and Schlechtriem, S., *Experimental Study of a Planar Expansion-Deflection Nozzle*, Progress in Propulsion Physics, Vol. 2, EDP Sciences, 2011, pp. 641~654.
- 18) Schomberg, K. and Olsen, J., "Design of High Area Nozzle Contours Using Circular Arcs," *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Vol. 32, No. 1, 2014, pp. 188~195.
- 19) Taylor, N. V. and Aghababaie A. A., "Enhancements to Compensating Nozzle Test Facilities at the University of Bristol," *7th European Symposium on Aerothermodynamics*, May 2011, pp. 175.

20) Taylor, N. V., "Simulating Cross Altitude Performance of Expansion Deflection Nozzles," *57th International Astronautical Congress Valencia, Spain*, IAC-06-C4.5.7, January 2006.

21) Park, H., "Numerical Study on Dynamic Characteristics of Pintle Nozzle for Variant Thrust," *Master's Thesis*, Korea Aerospace University, South Korea, 2011.

22) Schäfer, K., Böhm, C., Kronmüller, H., Stark, R. and Zimmermann, H., "P6. 2 Cold Gas Test Facility for Simulation of Flight Conditions-Current Activities," *EUCASS*, July 2005.

23) Robert A. W., "Performance of Annular Plug and Expansion-Deflection Nozzles

Including External Flow Effects At Transonic Mach Numbers," NASA Technical Note, NASA TN D-4462, 1968.

24) Tomita, T., Takahashi, H., Genin, C. and Schneider, D., "LOX/CH₄ Hot Firing dual-bell Nozzle Testing : Part II-Characteristics of Combustion Instability and Heat Flux-," *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, AIAA 2015-4156, 2015.

25) Choi, J., Kim, D. and Huh, H., "Numerical Study on Thrust Characteristics of an External Pintle Thruster," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 12, 2015, pp.1071~1078.