Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 21, No. 3, pp. 68-75, 2017

Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2017.21.3.068

팽창비가 고정된 듀얼 벨 노즐의 천이특성에 대한 수치해석 연구

최준섭[a] · 허환일[b,*]

Numerical Study on Transition Characteristics of Dual Bell Nozzle with Expansion Ratio Fixed

Junsub Choi[a] · Hwanil Huh[b,*]

[a]*Department of Aerospace Engineering, Graduate School at Chungnam National University, Korea*
[b]*Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: hwanil@cnu.ac.kr*

ABSTRACT

Dual bell nozzle is a type of altitude compensation nozzle, which is a nozzle that minimize the losses of the specific impulse at the off-design point of a typical bell nozzle. In this paper, numerical computations are performed to understand the transition characteristics of dual bell nozzles with fixed expansion ratios. The major design variables are the length of extension and the angle of inflection. As the length of the extension increased, the transition altitude and transition duration increased and the reduction of the thrust coefficient decreased. As the angle of inflection increased, the transition altitude and transition duration decreased and the reduction of the thrust coefficient increased.

초 록

듀얼 벨 노즐은 고도 보정 노즐의 일종으로 일반적인 벨 노즐의 탈설계점에서의 비추력 손실을 최소화할 수 있는 노즐이다. 본 논문에서는 팽창비가 고정된 듀얼 벨 노즐의 천이특성을 파악하기 위하여 전산수치해석을 수행하였다. 주요 설계변수로는 확장부 길이와 변곡각 크기를 선정하였다. 확장부 길이가 증가할수록 천이고도 및 천이지속시간은 증가하였고, 추력계수 감소폭은 감소하였다. 변곡각 크기가 증가할수록 천이고도 및 천이지속시간은 감소하였고, 추력계수 감소폭은 증가하였다.

Key Words: Dual Bell Nozzle(듀얼 벨 노즐), Transition Characteristics(천이특성), Altitude Compensation(고도 보정), Extension(확장부), Inflection Angle(변곡각)

1. 서 론

고도 보정 노즐은 통상적으로 사용되는 벨 노즐과 달리 고도에 따라 추력계수를 향상시켜 성

Received 4 April 2017 / Revised 8 May 2017/ Accepted 13 May 2017
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.

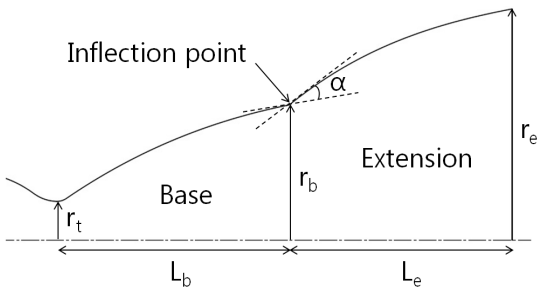
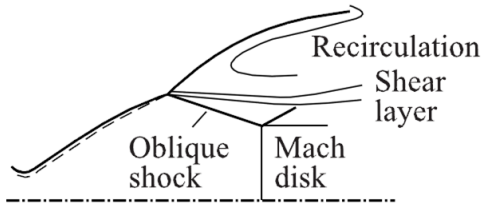


Fig. 1 Schematics of dual bell nozzle[4].

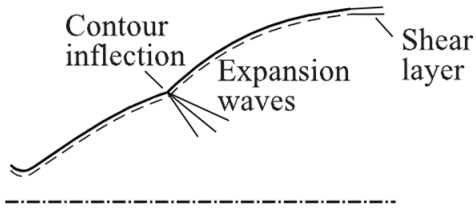
능 효율을 증가시킬 수 있다. 일반적인 벨 노즐은 운용 중에 형태가 변하지 않으므로 과소팽창이나 과대팽창과 같이 탈설계점에서의 성능 손실이 존재한다. 하지만 고도 보정 노즐의 경우 노즐 형상의 변경 또는 구조물을 추가함으로써 성능 손실을 줄일 수 있다. 이러한 고도 보정 노즐의 종류로는 듀얼 벨 노즐, E-D 노즐, Aerospike 노즐 및 Plug 노즐 등이 있으며, 미국, 유럽을 비롯한 항공우주기술 선진국을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다[1-3].

듀얼 벨 노즐은 일반적인 벨 노즐과 달리 변곡점(inflection point)을 중심으로 팽창비가 다른 두 개의 벨 노즐이 결합된 형상이며, 개략도는 Fig. 1과 같다[4]. 변곡점을 기준으로 노즐 목과 가까운 팽창비가 작은 부분을 베이스 노즐(base nozzle)이라 하고, 변곡점 이후 노즐 출구까지 팽창비가 큰 부분을 확장부(extension)라 한다. 변곡각(inflection angle, α)은 베이스 노즐 끝의 팽창각과 확장부 시작점의 확산각의 차로 정의한다. 이러한 듀얼 벨 노즐의 개념은 F. Cowles와 C. Foster[5]에 의해 언급되었으며, 1990년대 이후 고도 보정 노즐에 대한 관심이 증가하면서 수치해석 및 실험 연구가 진행되었다[2].

외부 환경변화에 따라 작동 모드가 다른 듀얼 벨 노즐의 유동 형태는 Fig. 2와 같다[6]. Fig. 2의 (a)는 해수면 고도에서의 작동 상태로 높은 대기압으로 인해 변곡점에서 유동 박리가 발생하고 확장부에는 재순환 영역이 형성된다. Fig. 2의 (b)는 고고도에서의 작동 상태이다. 고고도에서는 낮은 대기압으로 인해 유동의 박리점이 확장부 끝으로 이동하는 천이(transition)가 발생



(a) Operating mode at sea level.



(b) Operating mode at high altitude.

Fig. 2 The dual-bell nozzle and its operating mode[6].

한다. 듀얼 벨 노즐은 저고도에서 고고도로 이동할 때 천이가 발생하며, 이를 통해 고도 보정 효과를 가진다. 천이가 발생하는 시점에 따라 듀얼 벨 노즐의 성능이 달라지므로 천이 NPR (Nozzle Pressure Ratio)을 제어하는 것이 성능을 결정하는 중요한 요소라고 볼 수 있다.

국외에서는 실험과 수치해석을 통해 유동 박리와 천이특성에 대한 연구[7-9]가 독일 DLR 등에서 꾸준히 진행되고 있다. 국내에서는 충남대학교에서 듀얼 벨 노즐의 개발 동향[2]과 특성 및 핵심변수[4] 등에 대해 분석하는 연구가 진행되었다. 최근에는 한국형발사체(KSLV-Ⅱ)를 기반으로 한 듀얼 벨 노즐의 수치해석 기초연구[10]가 수행되었다.

본 논문에서는 듀얼 벨 노즐에 대한 기초연구로서 여러 설계 변수 중 노즐 팽창비를 고정한 상태에서 변곡각의 변화와 확장부의 길이가 천이에 미치는 영향에 대해 전산수치해석을 이용하여 분석하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 듀얼 벨 노즐 설계

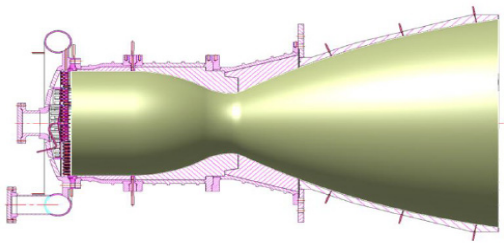


Fig. 3 Designed KSLV-II 1st stage engine[10].

본 연구에서는 한국형발사체의 1단 노즐을 기반으로 하여 듀얼 벨 노즐을 설계하였다. Fig. 1의 개략도처럼 듀얼 벨 노즐은 베이스 노즐과 확장부로 구성되어 있다. 베이스 노즐은 한국형발사체 1단 노즐과 동일하게 설계하였다. 한국형발사체 1단 노즐의 제원[11, 12]과 설계 방법[13]은 공개된 자료를 참조하였다. 확장부는 한국형발사체 2단 노즐의 팽창비만을 차용하여 설계하였다. 선행연구[10]에서는 한국형발사체 2단 노즐의 길이가 1단 노즐에 비해 상당히 길기 때문에 무게 증가 및 천이 고도가 감소하는 문제점을 지적하였다. 따라서 확장부 길이를 베이스 노즐 길이와 동일하게 설계한 후 확장부의 길이를 조절하였다. Fig. 3은 베이스 노즐을 한국형발사체 1단 노즐과 동일하게 설계하였음을 보여주며, Fig. 4는 확장부까지 설계한 레퍼런스 듀얼 벨 노즐의 개략도이다.

독일의 DLR에서 진행한 듀얼 벨 노즐 관련 연구를 분석하여 핵심변수를 정리한 결과[4]를 보면 듀얼 벨 노즐의 성능에 영향을 미치는 설계 변수 중 변곡각의 크기와 확장부 길이가 천이에 영향을 주는 요인이라는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 Table 1과 같이 확장부 길이와 변곡각 크기가 서로 다른 모델을 설계하였다. 여기서 DB는 듀얼 벨(Dual Bell)의 약자를 표현한 것이다. 네 자리의 숫자 중 앞의 두 자리는 확장부 길이를 나타낸 것으로 07은 확장부 길이가 베이스 노즐 길이의 70%를 의미한다. 뒤의 두 자리는 변곡각 크기를 나타낸 것으로 24는 변곡각이 24°임을 의미한다.

2.2 수치해석 조건

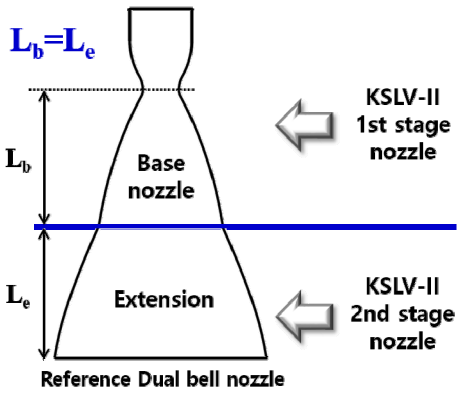


Fig. 4 Reference dual bell nozzle.

Table 1. Type of dual bell nozzle and design values.

Dual bell nozzle type	Le/Lb	α
DB0724	0.7	24
DB0824	0.8	24
DB0820	0.8	20

듀얼 벨 노즐의 천이특성을 살펴보기 위해 작동유체는 한국형발사체에 사용되는 추진제인 Jet A-1과 LOx로 선정하였다. CEA 코드를 사용하여 동결유동 조건으로 8가지 화학종 선정하여 입구조건으로 결정하였다. 본 논문은 노즐에서의 유동 변화를 관찰하는 것이 중요한데, 선행연구[10]를 통하여 동결유동으로 입구조건을 선정하는 것에 대한 타당성을 확인하여 동일한 조건으로 수치해석을 진행하였다.

해석 도메인은 노즐 후류 유동이 충분히 발달할 수 있도록 하기 위해 가로는 노즐 출구 반경의 150배, 세로는 노즐 출구 반경의 50배의 크기로 설정하였다. 경계층을 충분히 고려할 수 있도록 노즐 벽면에서의 y+ 값은 1이하로 설정하였다. 입구조건은 압력입구조건(pressure inlet)으로 설정하였고, Fig. 5를 통해 경계조건을 확인할 수 있다.

수치해석은 상용코드인 Ansys Fluent를 사용하여 2차원 축대칭 조건으로 정상상태 계산을 수행하였다. 난류모델은 선행연구[10]의 난류모델 평가 결과를 참조하여 SST k-ω 모델을 선정

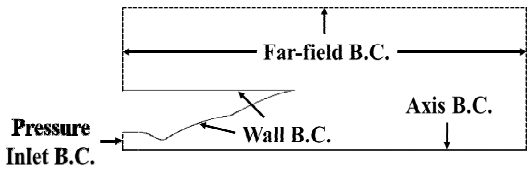


Fig. 5 Boundary conditions.

Table 2. Computation conditions.

Solver	Ansys Fluent
Configuration	Axisymmetric
Turbulent model	SST k-ω
Propellant	Jet A-1/LOx
Chamber pressure	60 bar
Chamber temperature	3701 K (by CEA)

하였고, second order upwind scheme을 적용하였다. 격자의 개수 또한 선행연구[10]의 격자 민감도 해석 결과를 바탕으로 약 15만개로 구성하였다. 연소실 압력은 한국형발사체와 동일하게 60 bar를 적용하였다. 이상의 해석 조건을 Table 2에 정리하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 확장부 길이에 따른 천이특성

확장부 길이에 따른 천이특성을 파악하기 위해 베이스 노즐과 확장부의 팽창비를 고정하고 고도에 따라 수치해석을 진행하였다.

독일 DLR의 연구결과[8]에 따르면 듀얼 벨 노즐의 천이는 두 단계에 걸쳐서 진행된다. NPR이 증가할 때, 즉 고도가 증가할 때 박리점이 변곡점 부근에서 조금씩 움직이는 것을 sneak 천이라 한다. Sneak 천이에 이어서 유동의 박리점이 특정 고도에서 급격하게 노즐 끝단으로 이동하는 것을 actual 천이라고 한다.

DB0724 모델의 고도에 따른 유동 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 고도 5 km에서 sneak 천이가 시작되어 고도 6.4 km까지 진행된 후 actual 천이가 진행되어 고도 6.6 km에서 천이가 완료되

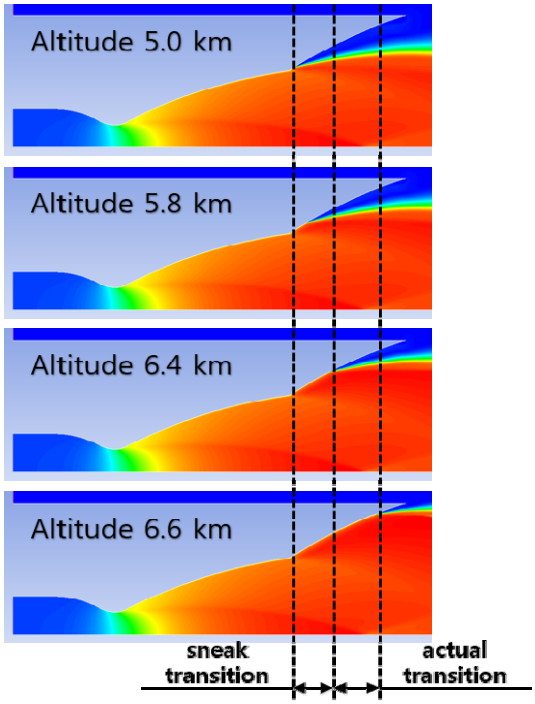


Fig. 6 Comparison of DB0724 model's flow according to altitude.

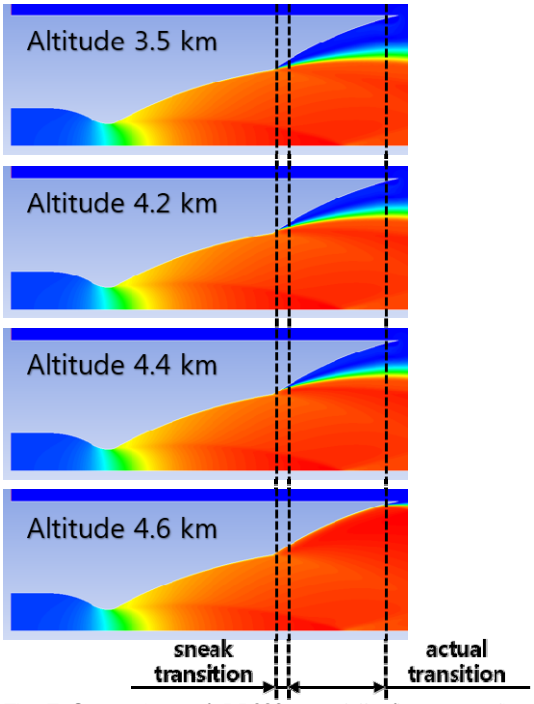


Fig. 7 Comparison of DB0824 model's flow according to altitude.

었다. Actual 천이는 짧은 구간에서 빠르게 진행된데 반해, sneak 천이는 약 1.4 km의 넓은 구간에 걸쳐 진행되었다.

DB0824 모델의 고도에 따른 유동 변화는 Fig. 7과 같다. 고도 3.5 km에서 sneak 천이가 시작되어 고도 4.4 km까지 진행된 후 actual 천이가 진행되어 고도 4.6 km에서 천이가 완료되었다. 확장부 길이가 길어진 DB0824 모델의 경우 DB0724 모델에 비해 천이가 시작된 고도가 1.5 km 낮아진 결과를 보였다. 이것은 DLR의 확장부 길이가 길어질수록 천이 NPR이 낮아진다는 결과[8]와 동일한 경향성을 보이고 있다. 또한 sneak 천이 구간이 0.9 km로 DB0724 모델에 비해 짧은 구간내에서 sneak 천이가 진행됨을 알 수 있다.

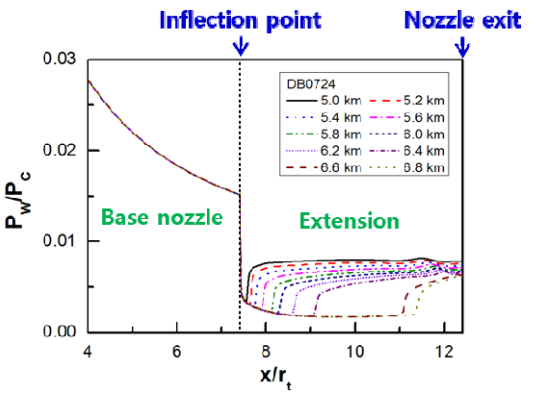


Fig. 8 Nozzle wall pressure distribution according to altitude of DB0724 model.

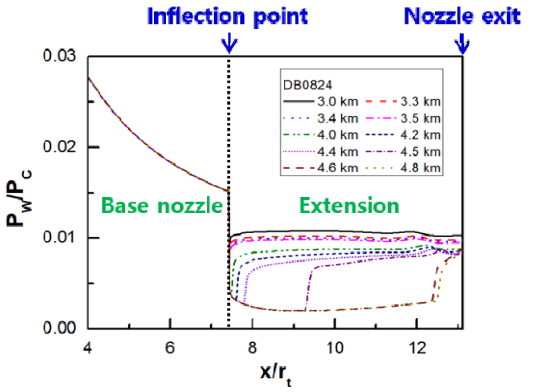


Fig. 9 Nozzle wall pressure distribution according to altitude of DB0824 model.

DB0724 모델은 앞서 언급한 것처럼 넓은 구간에 걸쳐서 sneak 천이가 진행함과 동시에 노즐 벽면에서도 확장부 중간지점까지 박리점이 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 8의 노즐 벽면 압력 분포에서도 알 수 있는데, 넓은 고도 구간에 걸쳐 sneak 천이가 진행되면서 박리점이 지속적으로 노즐 후류 방향으로 이동함을 보이고 있다. 이는 천이지속시간이 증가한다고 볼 수 있는데, DLR 연구결과[8,14]에서도 천이지속시간이 증가하는 결과를 보이고 있어 동일한 경향성이 있다고 판단된다. 그런데 DLR에서는 확장부 길이가 짧아져 천이지속시간이 증가하면 노즐 벽면에 작용하는 측하중이 감소한다고 밝혔다. 이 부분은 비정상상태 수치해석 및 실험을 통해 추후 확인이 필요할 것으로 판단된다.

반면에 DB0824 모델은 확장부 길이가 길어진 만큼 천이구간 및 천이지속시간이 감소하는 결과를 보이고 있으며, Fig. 9의 노즐 벽면 압력 분포에서도 이를 확인할 수 있다. 특히 sneak 천이가 진행되는 동안에 유동 박리점이 변곡점 부근에 머무르다가 actual 천이 시 상당한 거리를 이동하게 되는데, 이 현상이 노즐 벽면 측하중 증가에 영향을 미치는 원인이 되는지에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2 변곡각 크기에 따른 천이특성

변곡각 크기에 따른 천이특성을 파악하기 위해 베이스 노즐과 확장부의 팽창비를 고정하고, 확장부 길이가 동일한 상태에서 변곡각 크기에 따라 수치해석을 고도별 수치해석을 진행하였다. DB0824 모델의 유동은 Fig. 7과 같으며, 변곡각을 20°로 변경한 DB0820 모델의 유동은 Fig. 10과 같다. 우선 sneak 천이가 시작된 고도가 변곡각 크기를 줄일 모델이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 sneak 천이가 4 km에서 시작되어 5.2 km까지 진행되면서 천이지속시간은 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 sneak 천이 시작지점에서의 박리점 위치가 변곡점에서 떨어져 후류 방향으로 이동한 상태에서 진행됨을 알 수 있다. 앞에서 천이지속시간이 길어지면 노즐 벽면의 측하중이 감소한다는 결과를 언급한바 있

다. 변곡각의 크기가 줄어들 경우 천이지속시간은 증가하지만 박리점이 후류 방향으로 이동해 있는 것이 측하중에 어떤 영향을 미치는지에 대해서 실험 등에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다. DLR에서는 듀얼 벨 노즐의 천이에 대한 실험 연구[8]를 통해 변곡각과 팽창비가 증가하면 천이 NPR이 증가한다고 밝히고 있다.

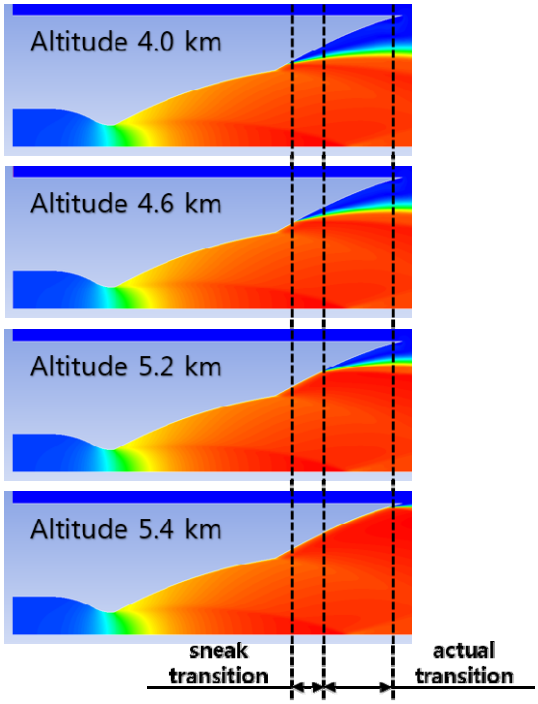


Fig. 10 Comparison of DB0820 model's flow according to altitude.

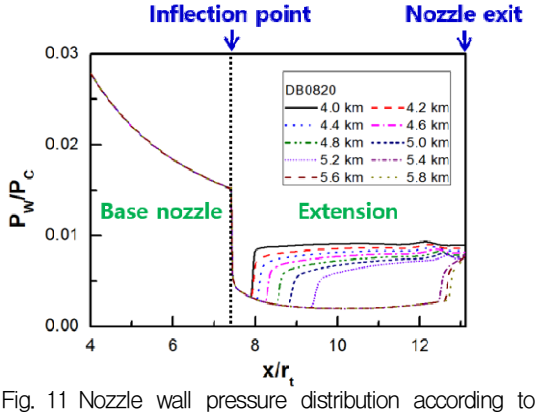


Fig. 11 Nozzle wall pressure distribution according to altitude of DB0820 model.

본 논문에서는 팽창비를 고정한 상태에서 변곡각의 크기를 증가하였는데, 천이 NPR이 오히려 감소하는 결과를 보이고 있다. 따라서 천이 NPR 증가를 목적으로 변곡각의 크기를 변경한다면, 팽창비도 증가시켜야 한다는 결론을 도출할 수 있다.

DB0820의 노즐 벽면 압력 분포는 Fig. 11과 같다. 노즐 벽면 압력 분포를 보면 고도 4 km에서 sneak 천이가 시작될 때 박리점은 변곡점에서 노즐 후류 방향으로 이동해 있는 것을 알 수 있다. 또한 천이지속시간이 증가하면서 sneak 천이 구간에서의 박리점 위치도 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 이를 통해 천이지속시간이 증가하면 sneak 천이 구간에서의 박리점이 노즐 벽면에서 넓게 분포하는 경향성이 있다고 판단할 수 있다.

3.3 확장부 길이 및 변곡각 크기에 따른 비교

팽창비가 고정된 듀얼 벨 노즐에 대해 확장부 길이와 변곡각 크기가 천이에 미치는 영향에 대한 분석하였고, Fig. 12~13에 추력계수와 비추력을 종합적으로 비교하였다.

듀얼 벨 노즐은 천이가 발생하기 전 단계에서는 유동이 베이스 노즐에서만 흐르므로 확장부는 노즐로서의 의미가 없다고 볼 수 있다. 따라서 천이가 발생하기 전의 저고도에서 추력계수는 증가한다. Fig. 12를 보면 설계변수(확장부 길이, 변곡각 크기)에 관계없이 저고도에서 추력계수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이후 추력계수가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 천이의 첫 번째 단계인 sneak 천이에서는 추력계수가 넓은 구간에 걸쳐 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 Fig. 6, 7, 10의 sneak 천이에서의 유동과 일치하는 결과를 보이고 있다. Sneak 천이 이후에 천이의 두 번째 단계인 actual 천이는 짧은 구간에서 급격하게 추력계수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Actual 천이는 짧은 구간에서 빠르게 박리점이 이동하는데, 그 결과로 추력계수가 급격히 감소하는 것으로 판단된다.

DB0820 모델을 기준으로 하여 확장부 길이가 짧아지면 추력계수의 감소폭도 짧아지게 되고,

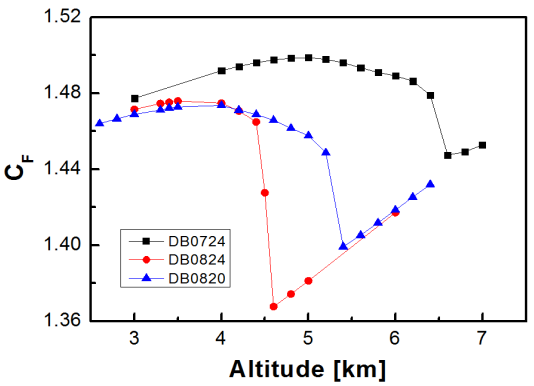


Fig. 12 Comparison of thrust coefficient of transition.

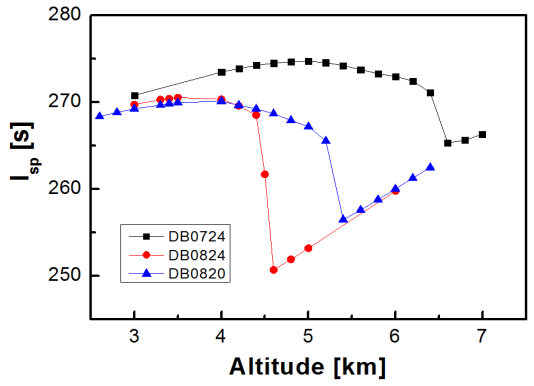


Fig. 13 Comparison of thrust coefficient of specific impulse.

변곡각의 크기가 증가하면 추력계수의 감소폭도 증가하는 경향을 보이고 있다. 추력계수가 감소하는 것은 듀얼 벨 노즐의 성능 저하를 의미하므로, 팽창비를 고정한 상태에서 변곡각을 증가시키는 것은 효율측면에서 볼 때 적절하지 않다고 판단된다. 반면에 팽창비를 고정한 상태에서 확장부 길이를 감소시키면 천이 NPR 증가 및 actual 천이 시 추력계수 감소폭도 작아진다. 추력계수 측면에서 볼 때 확장부 길이 감소는 긍정적인 요인으로 작용하지만, 천이지속시간 증가가 노즐에 미치는 영향에 대해 추가적인 연구가 필요하므로 확장부 길이 감소가 반드시 장점이라고 할 수 없다고 판단된다.

천이구간에서 설계변수에 따른 비추력은 Fig. 13에서 비교하였다. 입구조건이 동일한 상태에서 설계변수에 따라 듀얼 벨 노즐의 형상만을 변경하였기 때문에 고도에 따른 비추력 곡선은 추력계수와 같은 경향성을 보이고 있다.

4. 결 론

듀얼 벨 노즐의 천이특성을 파악하기 위해 팽창비를 고정한 상태에서 확장부 길이와 변곡각의 크기를 변경하여 노즐을 설계하였고, 상용코드를 활용하여 전산수치해석을 수행하였다. 특히 베이스 노즐은 한국형발사체 1단 노즐과 동일하게 설계하였고, 확장부는 2단 노즐의 팽창비를 차용하였다. 또한 다양한 설계변수 중에서 확장부 길이 변화와 변곡각의 크기 변화가 천이에 미치는 영향에 대해 파악하고자 하였다. 설계변수별로 천이고도가 다르기 때문에 각각의 천이고도에 맞게 수치해석을 진행하였다.

본 논문에서는 팽창비가 고정된 듀얼 벨 노즐의 천이특성을 다음과 같이 도출하였다.

1. 확장부 길이가 감소하면 천이고도가 증가하고, 넓은 구간에 걸쳐 sneak 천이가 진행된다. Actual 천이 시 추력계수의 감소폭이 줄어든다.
2. 팽창비가 고정된 상태에서 변곡각의 크기만 증가시키면 천이고도는 감소하게 된다. 저고도에서 베이스 노즐만 작동할 때 추력계수는 유사한 경향을 보인다. 변곡각의 크기가 증가하면 actual 천이 시 추력계수의 감소폭도 증가한다.
3. Actual 천이는 설계변수와 관계없이 짧은 구간에서 빠르게 진행된다.

향후 베이스 노즐 및 팽창비를 변경한 연구를 통해 설계변수별 천이특성을 파악하고, 어떤 설계 변수가 천이고도 변화에 지배적인지에 대해 확인할 계획이다. 또한 비정상상태 수치해석을 통해 천이지속시간과 노즐 벽면에 작용하는 측하중에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

후 기

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

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. Choi, J. and Huh, H., "Technology Review and Development Trends of Dual-Bell Nozzle for Altitude Compensation," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 5, pp. 456-465, 2015.
3. Choi, J., Hwang, H. and Huh H., "Technology Review of an E-D Nozzle for Altitude Compensation Purpose," *The Korea Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Busan, Korea, pp. 80-83, May 2015.
4. Kim, J. and Huh, H., "Characteristics and Key Parameters of Duel Bell Nozzles of the DLR, Germany," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 11, pp. 952-962, 2015.
5. Foster, C.R. and Cowles, F.B., *Experimental Study of Gas-Flow Separation in Overexpanded Exhaust Nozzles for Rocket Motors*, Jet Propulsion Lab., California Inst. of Technology, Progress Rept. pp. 4-103, Pasadena, CA, U.S.A., 1949.
6. Genin, C., Stark, R., Haidn, O., Quering, K. and Frey, M., *Experimental and numerical study of dual bell nozzle flow*, Progress in Flight Physics, Vol. 5, Torus Press, Moscow, pp. 363-376, 2013.
7. Frey, M. and Hagemann, G., "Critical Assessment of Dual-Bell Nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 1, pp. 137-143, 1999.
8. Genin, C. and Stark, R., "Experimental Study on Flow Transition in Dual Bell Nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 3, pp. 497-502, 2010.
9. Genin, C., Stark, R., Karl, S. and Schneider, D., "Numerical Investigation of Dual Bell Nozzle Flow Field," *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, G.A., U.S.A., AIAA 2012-4164, Sep. 2012.
10. Kim, J., Choi, J. and Huh, H., "Preliminary CFD Results of a Dual Bell Nozzle based of the KSLV-Ⅱ," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 6, pp. 18-28, 2016.
11. Moon, Y. and Nam, C., "A Study of KSLV-II Engine System Development Test Program," *The Korea Society of Propulsion Engineers Spring Conference*, Busan, Korea, pp. 732-736, May 2013.
12. Choi, H., Han, Y., Ryu, C. and Kim, S., "Analytic Considerations of Liquid Rocket Engine Thrust Chamber Design for the KSLV-Ⅱ," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 71-80, 2010.
13. Kim, S., Moon, Y. and Park, T., "Development of Chemical Equilibrium CFD Code for Performance Prediction and Optimum Design of LRE Thrust Chamber," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-8, 2005.
14. Genin, C. and Stark, R., "Side Loads in Dual Bell Nozzles, Part 2 Design Parameters," *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Nashville, T.N., U.S.A., AIAA 2010-6730, Jul. 2010.