

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(11), 952-962(2015)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.11.952>

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

## 독일 DLR의 듀얼 벨 노즐 특성 및 핵심 변수

김정훈\*, 허환일\*\*

Characteristics and Key Parameters of Dual Bell Nozzles  
of the DLR, Germany

Jeonghoon Kim\* and Hwanil Huh\*\*

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

Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University\*\*

## ABSTRACT

Various types of altitude compensation nozzles have been investigated to develop an effective propulsion system. In order to obtain baseline data for future study of dual bell nozzles, main characteristics and key parameters of dual bell nozzles are summarized and described by analysing DLR dual bell nozzles. DLR's experimental researches show that inflection angle is proportional to transition NPR, and extension length is proportional to side load, but inversely proportional to transition NPR and transition duration. Therefore, the nozzle geometry can be determined through the performance prediction process and thus the optimization process is required to meet performance requirements between parameters.

## 초 록

효율적인 추진기관 개발을 위해 여러 종류의 고도 보정 노즐에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 향후 듀얼 벨 노즐 연구를 위한 기초자료로서의 활용을 위해 독일 DLR에서 수행한 연구내용을 바탕으로 듀얼 벨 노즐의 주요 특성을 조사하고 핵심 변수를 도출하였다. DLR은 다양한 실험을 통해 변곡각과 천이 NPR은 비례한다는 것과 확장부 길이와 측하중은 비례하지만 천이 NPR과 천이 지속시간과는 반비례한다는 것을 밝혔다. 성능 예측 과정을 통해 노즐의 형상이 결정될 수 있고 요구 성능에 맞게 변수간의 최적화가 필요하다.

**Key Words** : Dual Bell Nozzle(듀얼 벨 노즐), Inflection Point(변곡점), Flow Transition (유동 천이), Altitude Compensation(고도 보정), Review(동향분석)

## 1. 서 론

오늘날의 우주발사체는 임무 달성에 필요한 최종속도를 보다 용이하게 얻기 위해 단단(single-stage) 로켓보다 다단(multi-stage) 로켓을

주로 사용한다. 하지만 이는 구조의 복잡성 및 비용의 증가로 이어진다. 로켓 개발은 많은 비용과 시간이 소모되는 일인 만큼 비용 절감과 효율 증대는 반드시 해결해야할 과제이다.

최근에 비용 절감 측면에서 한번 사용하고 버

† Received : August 3, 2015

Revised : October 12, 2015

Accepted : October 26, 2015

\*\* Corresponding author, E-mail : [hwanil@cnu.ac.kr](mailto:hwanil@cnu.ac.kr)

리는 것이 아닌 재사용, 즉 수직이착륙 로켓에 대한 관심이 증가되고 있고 실제로 스페이스X가 수직이착륙 로켓을 개발하여 여러 비행시험을 수행한 바 있다[1].

추진기관의 효율을 높이는 방법으로는 고도 보정 노즐이 제기되고 있다. 고도 보정 노즐은 고도가 바뀌어도 비추력 손실이 적기 때문에 항상 최적의 효율을 낼 수 있다. 대표적인 고도 보정 노즐은 aerospike/plug 노즐, 가변식 확장(extensible) 노즐, E-D(expansion-deflection) 노즐, 듀얼 벨(dual bell) 노즐이 있다[2]. 이 중 듀얼 벨 노즐은 추가적인 구동장치 없이 노즐의 형상만으로 고도에 따라 최적 효율을 낼 수 있는 장점이 있다[3]. 이러한 장점 때문에 현재 미국, 유럽, 일본, 인도 등 세계 각국에서 활발히 연구 중이다[1]. 국내에서는 안동대학교에서 듀얼 벨 노즐의 유동 특성 파악을 위한 해석적 연구[4,5]가 진행되었고, 충남대학교에서 해외의 듀얼 벨 노즐 연구동향 조사[1] 및 E-D 노즐의 기술 분석[6], 그리고 E-D 노즐과 유사한 개념의 외부형편틀 추력기에 대한 연구가 진행되었다[7]. 아직 국내에서는 듀얼 벨 노즐에 대한 본격적인 연구는 진행되지 않았다.

듀얼 벨 노즐에 대해 연구한 여러 기관들 중에서 독일 DLR(German Aerospace Center)은 여타 기관들과 비교하였을 때 상당히 오랜 기간 동안 듀얼 벨 노즐에 대해 연구해왔다. 아직 국내에서 듀얼 벨 노즐에 대한 연구가 많이 수행되지 않은 만큼 오랜 기간 동안 꾸준히 연구해 온 내용들을 우선적으로 분석할 필요성이 있다. 따라서 본 논문에서는 DLR에서 수행한 연구내용을 바탕으로 듀얼 벨 노즐의 특성을 조사하고 핵심 변수를 도출하여 추후에 듀얼 벨 노즐 연구를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## II. 듀얼 벨 노즐의 개요

로켓 엔진에 사용되는 일반적인 벨 노즐은 팽창비가 고정되어 있어 저고도와 고고도에서 과대/과소팽창으로 인한 효율 저하를 피할 수 없다. 그러나 듀얼 벨 노즐은 Fig. 1과 같이 변곡점(inflexion point)을 기준으로 팽창비가 다른 두 개의 벨 노즐이 붙어있다. 이러한 개념은 Foster and Cowles[8]가 1949년에 처음으로 제시하였다. 노즐 목과 가까운, 즉 변곡점 이전의 팽창비가 작은 부분을 베이스(base) 노즐, 변곡점 이후의 팽창비가 큰 부분을 확장부(extension)라 부른다. 그리고 변곡각( $\alpha$ )은 베이스 노즐 끝에서의 접선

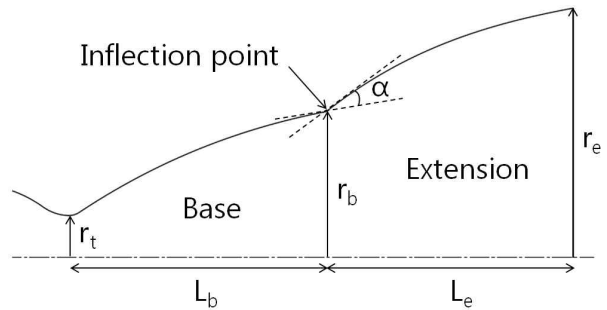


Fig. 1. Schematics of dual bell nozzle

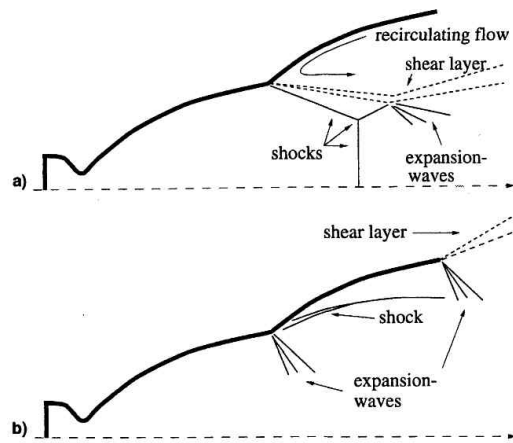


Fig. 2. Dual bell nozzle flow field : a) sea level mode, b) high altitude mode[9]

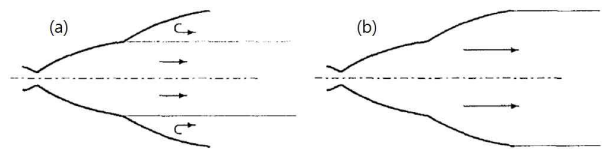


Fig. 3. Different operating mode in dual bell nozzle : (a) sea level mode, (b) high altitude mode[10]

과 확장부 시작점에서의 접선 사이의 각도로 정의한다. 또한 베이스 노즐의 팽창비(base expansion ratio,  $\epsilon_b$ )는 베이스 노즐 출구 면적과 노즐 목 면적의 비로 계산되고, 확장부의 팽창비(extension expansion ratio,  $\epsilon_e$ )는 확장부 출구 면적과 노즐 목 면적의 비로 계산된다[9]. 팽창비가 다른 두 벨 노즐을 결합함으로써 외부환경에 따라 작동 상태가 변하게 된다. Fig. 2는 듀얼 벨 노즐의 두 가지 작동 상태를 나타낸다[9]. Fig. 2에서 (a)는 해수면 조건의 작동 상태를 나타낸 것이고, 해수면에서는 대기압이 상대적으로 고고도보다 높기 때문에 변곡점 부근에서 유동 박리가 발생한다. 박리에 의해 확장부에는 재순환 영역이 발생하고 결과적으로 노즐은 저고도에 맞는

작은 팽창비로 작동한다. Fig. 2(b)는 고고도에서의 작동 상태이다. 고고도에서는 대기압이 낮기 때문에 천이(transition)가 발생하며 박리점이 노즐 끝으로 이동하는데, 이러한 과정은 급격하게 일어난다. 결과적으로 고고도에서 효율적인 높은 팽창비로 작동하게 된다. Fig. 3(a)는 저고도, (b)는 고고도에서의 유동 형태를 간단하게 표현한 것이다[10].

### III. 듀얼 벨 노즐 특성

독일 DLR에서는 실험과 해석을 통해 듀얼 벨 노즐에 대한 여러 연구를 수행하였다. 1990년대 연구 초기단계에서는 주로 수치기법을 이용한 해석적 연구를 수행하였고, 2000년 이후에는 유동 분석을 위해 P6.2[11]와 M11[12] 시험 설비를 이용하여 냉가스 또는 연소 실험을 진행하였다. 최근에는 실험과 해석 연구를 진행하여 비교 분석을 하는 추세이다. Table 1은 연도 별 사용 실험 조건과 설비를 나타낸 것이다[13-19]. 3D는 축대칭 형상이며, 2D는 평면(planar) 형상으로 노즐 깊이(depth)가 45 mm로 모두 동일하다. 확장부 길이의 영향을 알아보기 위해 여러 노즐을 설계해서 실험한 경우도 있지만 기준이 되는 노즐만 표에 나타내었고, 표에 언급한 것 외에도 많은 실험을 했지만 대표적으로 몇 가지 실험만 언급하였다. 표에 명시된 챔버 압력(chamber pressure) 값은 NPR(Nozzle Pressure Ratio,  $P_0/P_a$ )이 최대일 때의 값이다. 시험환경(test environment) 항목에서 'Sea level'은 지상시험실에서 챔버 압력을 조절하여 NPR을 바꿔가며 실험한 경우이고, 'High altitude'는 고고도 환경

모사 장치에서 실험한 경우이다.

DLR은 이러한 실험적 연구를 통해 듀얼 벨 노즐의 유동 박리 특성, 천이 특성, 노즐 길이의 영향, 측하중(side load), 열하중(thermal load)에 대해 분석하였다.

### 3.1 유동 박리

듀얼 벨 노즐은 박리에 의해 고도에 따라 작동하는 팽창비가 바뀐다. 초기 박리점의 위치는 저고도에서의 성능을 결정하므로 베이스 노즐의 길이 및 팽창비는 저고도 성능의 주요 변수가 될 수 있다.

DLR의 연구 결과에 따르면, 특정 대기압 범위에서 변곡점 이전의 요구 벽 압력 값을 예측함으로써 변곡점에서의 박리 예측이 가능하다[9].

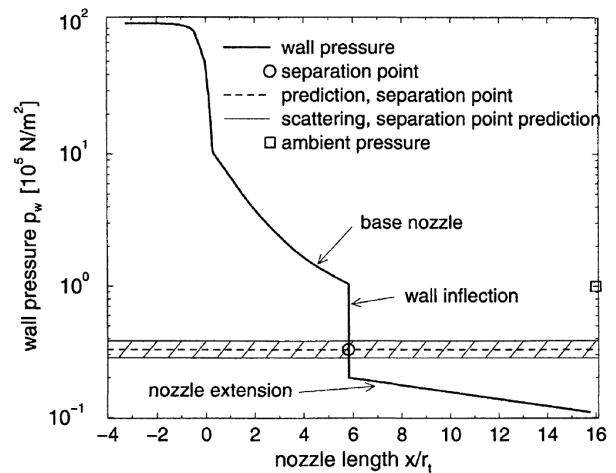


Fig. 4. Wall pressure distribution of dual bell nozzle under vacuum condition, and separation point prediction under 1 bar ambient pressure condition[9]

Table 1. Primary tests conducted by DLR[13-19]

Year	2009		2010		2011				2012		2013	
Throat radius( $r_t$ ), mm	10		10		10		8		9		10	
Base length( $L_b$ ), mm	52		60.7		52		130		135.9		62	
Extension length( $L_e$ ), mm	83		135		135		120		107.1		83	
Base expansion ratio, $\epsilon_b$	11.3		11.3		11.3		3.95		3.9		11.3	
Extension expansion ratio, $\epsilon_e$	27.1		27.1		27.1		7.97		7.1		27.1	
Inflection angle( $\alpha$ ), deg	9		9		9		15		15		7.2	
Nozzle configuration	3D		3D		3D		2D		2D		3D	
Chamber pressure(max.), bar	50	50	35	50	35	30	60	30	55	30	60	
Total temperature, K	300	300	300	300	300	1000	300	1000	300	1000	300	
Propellant	N <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		N <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Test environment	Sea level	Sea level	High altitude	Sea level	High altitude	Sea level		Sea level	Sea level	Sea level	Sea level	
Test facility	P6.2		P6.2		P6.2		M11.1	P6.2	M11.1	P6.2	M11.1	P6.2

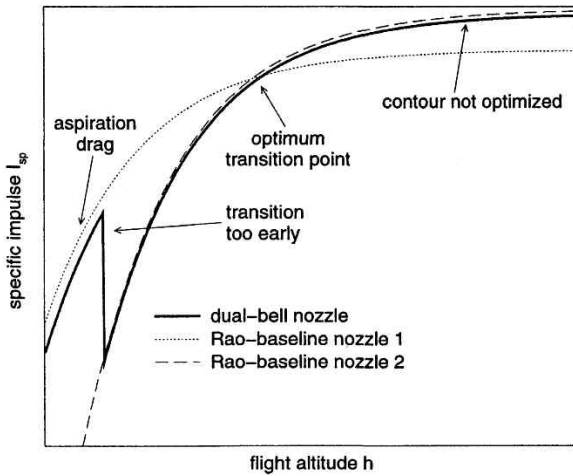


Fig. 5. Comparison of specific thrust with altitude[10]

Fig. 4는 진공 조건에서 듀얼 벨 노즐의 벽 압력 분포를 나타낸 것이며, 대기압 1 bar 조건에서 박리 기준에 의해 예측된 압력(점선)이 변곡점에서의 압력 강하에 따른 벽 압력 곡선과 교차하는 것으로부터  $x/r_t=5.9$ 에서 박리가 발생됨을 예측한 것이다[9]. 이러한 방식으로 박리의 예측은 어느 정도 가능하지만 요구 성능과 조건에 맞는 듀얼 벨 노즐 설계를 위해서는 지속적인 연구가 필요하다.

듀얼 벨 노즐은 저고도에서 작동할 때 박리에 의한 추력 손실이 발생하는데, DLR은 이때 추력 손실을 유발하는 저항을 aspiration drag라 하였다. aspiration drag가 발생하는 이유에 대해서 참고문헌[10]은 다음과 같이 설명하고 있다. 듀얼 벨 노즐이 저고도에서 작동하는 동안 변곡점에서 박리가 일어날 경우 Fig. 3(a)와 같이 확장부에 대기가 유입되어 재순환 영역이 형성된다. 이 영역에서, 박리된 혼합층(mixing layer)의 동조효과(entrainment effect)에 의해 재순환 유동이 가속되고, 이로 인해 재순환 영역의 압력강하가 일어나 추력 손실이 발생한다[10]. Fig. 5를 통해 aspiration drag에 의한 성능 손실을 확인할 수 있다. DLR은 주로 저고도에서 발생하는 이 손실은 3% 이하이며 천이 전까지 작용한다는 것을 수치 시뮬레이션 연구 결과를 통해 밝혔다[10].

### 3.2 천이 특성

듀얼 벨 노즐의 주요 특성 중 하나인 유동 천이는 NPR이 변하기 때문에 발생한다. 로켓의 실제 비행에서, 일반적으로 챔버 압력( $P_0$ )은 일정하고 로켓이 상승함에 따라 대기압( $P_a$ )이 작아지므로 NPR 값은 커진다. 즉, 천이는 고도가 상승할

때 발생한다[3].

DLR에서 실험 시 천이를 위해 NPR을 변화시킬 때는 일반적으로 대기압이 일정한 상태에서 챔버 압력을 조절하여 NPR을 변화시켰으며, 챔버 압력이 증가할 때 변곡점 부근에서 발생하는 급격한 유동 변화를 천이(transition)라 하고 챔버 압력이 높아진 상태에서 챔버 압력을 다시 낮출 때 발생하는 것을 재천이(retransition)라고 하였다. 실제 상황에서는 로켓이 상승할 때 발생하는 것이 천이이고, 하강할 때 발생하는 것이 재천이라고 볼 수 있다.

천이는 급격한 유동 전환을 통해 듀얼 벨 노즐의 작동 상태를 바꾸지만 통상적인 벨 노즐 보다 높은 추하중을 발생시킨다는 문제가 있다[20]. 따라서 심각한 추하중을 방지하고 설계점에서 천이하기 위해서는 천이 제어가 필수적이다. Fig. 5는 저팽창, 고폽창의 Rao 노즐과 듀얼 벨 노즐의 성능을 고도에 따라 비교한 그래프이다. Fig. 5에서 듀얼 벨 노즐은 최적교차점(optimum transition point) 이전에 천이가 발생하는 경우를 나타낸다. Fig. 5에 따르면 천이가 최적교차점보다 일찍 발생할 경우 비추력이 급격히 떨어지는 구간이 존재한다. 따라서 효과적인 고도 보정을 위해서는 적절한 천이 제어가 필요하다.

#### 3.2.1 Sneak transition

DLR에서는 천이 제어를 위한 연구에 앞서 천이 특성을 관찰하기 위해 쉘리렌(Schlieren) 가시화 실험을 수행하였다[12,21]. 축대칭 듀얼 벨 노즐을 이용한 가시화 실험에서는 후류에 발생하는 충격파로부터 박리 위치를 유추하였고[21], 2차원 듀얼 벨 노즐을 이용한 가시화 실험에서는 변곡점 부근에 창(window)을 내어 유동 변화를 관찰하였다[12].

Figure 6은 질소 냉가스를 이용한 축대칭 노즐의 가시화 결과를 나타낸 것이다. NPR이 증가함에 따라 마하 디스크(mach disk)가 후류 방향으로 이동하며 박리점 및 박리 충격파(separation shock) 또한 후류 방향으로 이동한다. Fig. 7은 2차원 형상의 듀얼 벨 노즐이며 수소-산소를 이용한 연소 실험에 사용되었다. 실험 결과 축대칭 형상의 노즐에서와 같은 결과를 얻었다(Fig. 8, 9). Fig. 8은 다양한 NPR에 대해 촬영한 쉘리렌 사진이다. Fig. 8(a)와 (b)는 각각 NPR이 11.73과 16.38일 때이고, 박리가 변곡점 이전과 변곡점에서 발생한 것으로부터 저고도 조건임을 보여준다. (c)는 NPR이 25.02일 때이고, 박리점이 확장부로 이동하기 시작하는 것을 보여준다. (d)는 NPR이 27.37일 때이고, 박리점이 확장부에서 좁

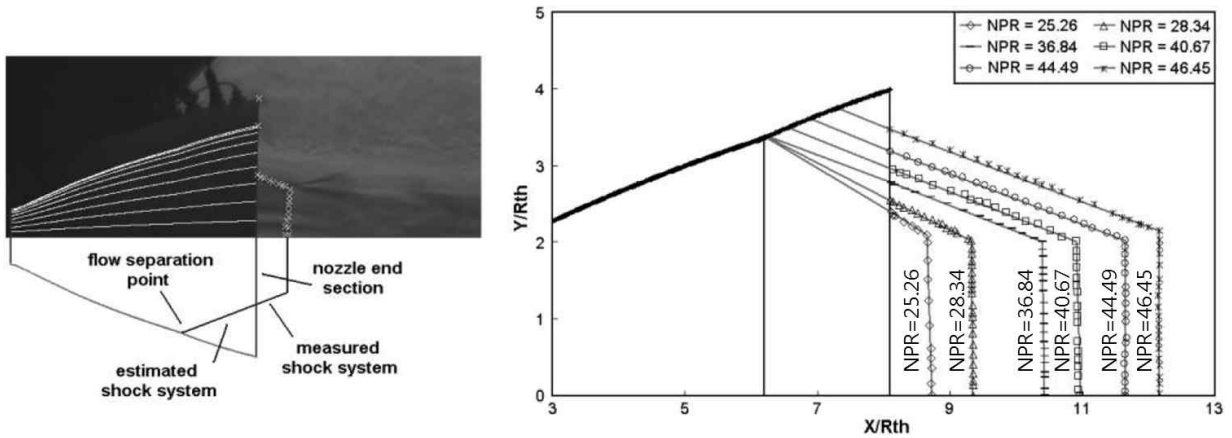


Fig. 6. Observation of the shock and flow evolution using axisymmetric dual bell nozzle[21]

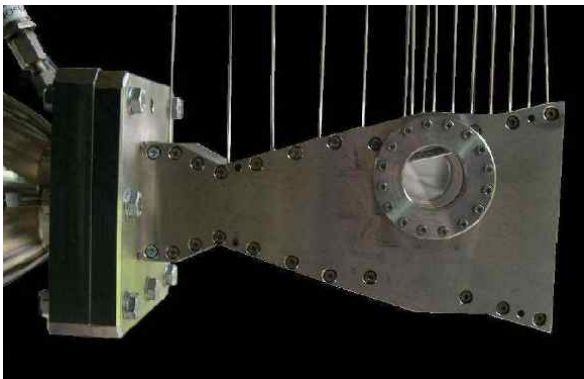


Fig. 7. Planar 2-D dual bell nozzle for H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> combustion experiments[12]

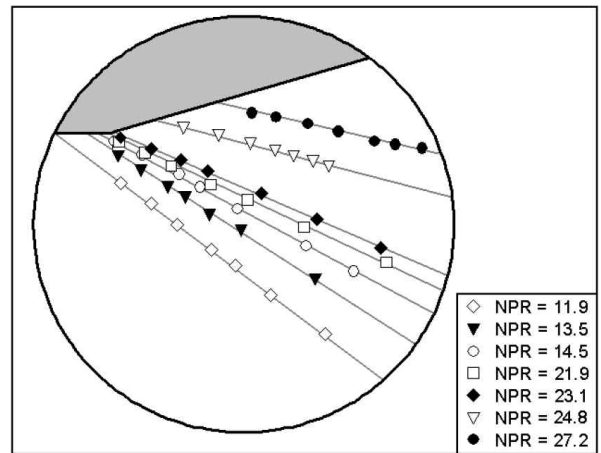


Fig. 9. Comparison of separation shock with NPR[12]

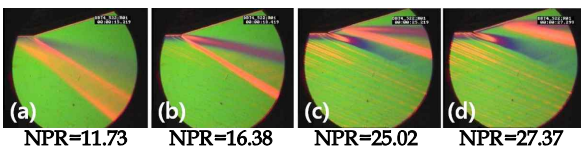


Fig. 8. Evolution of the flow at wall inflection point[12]

더 후류 쪽으로 이동한 모습이다. Fig. 9는 Fig. 8보다 더 다양한 NPR에 대해 실험한 결과를 보기 쉽게 표현한 그림이다. 실선은 마하 디스크와 연결(Fig. 6 참조)되는 박리 충격파이다. Fig. 6, 8 과 동일하게 NPR이 증가함에 따라 박리 위치 및 박리 충격파가 후류 방향으로 이동하는 것을 보여준다.

DLR은 실험 결과를 통해 듀얼 벨 노즐의 천이는 NPR이 증가할 때 즉, 고도가 상승할 때 급격하게 발생하는 것이 아니라 변곡점 근처에서는 NPR이 증가하더라도 박리점의 이동 거리가 매우 짧으며, 특정 NPR까지 천천히 천이가 일어나다가 특정 NPR에 도달했을 때 박리점이 급격하

게 노즐 끝으로 이동하며 천이가 완료된다는 것을 밝혔다[21]. DLR에서는 급격한 천이 이전에 박리 위치가 조금씩 후류 방향으로 이동하는 현상을 ‘sneak transition’이라 명명하였다[21].

3.2.2 노즐 형상에 따른 천이 특성

베이스 노즐과 확장부를 잇는 변곡점은 듀얼 벨 노즐 성능과 유동 특성에 영향을 미치는 요소 중 하나이다. DLR에서는 변곡각의 영향을 알아보기 위해 식 (1)~(5)를 이용하여 변곡각에 따른 천이 NPR을 예측하였다[21]. 식 (1)은 Prandtl-Meyer 함수이며 노즐 출구 마하수와 비열비의 관계식이다. 변곡각( $\alpha$ )은 식 (2)와 같이 베이스 노즐과 확장부의 Prandtl-Meyer 함수의 차로 정의한다[21].

$$\nu = \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \arctan \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}} (M^2-1) - \arctan \sqrt{M^2-1} \tag{1}$$

$$\alpha = \nu_e - \nu_b \quad (2)$$

천이 NPR은 등엔트로피 관계식인 식 (3)과 Stark 등[22]이 제시한 박리 기준식인 식 (4)를 이용하여 구할 수 있으며 그 결과는 식 (5)이다.

$$\frac{P_0}{P_e} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

$$\frac{P_{sep}}{P_a} = \frac{1}{M_{sep}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} NPR_{trans} &= \frac{P_0}{P_{a,trans}} = \frac{P_0}{P_e} \frac{P_{e,sep}}{P_a} = \frac{P_0}{P_e} \frac{1}{M_e} \\ &= \frac{1}{M_e} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (1)~(5)를 통해 변곡각에 따른 천이 NPR을 이론적으로 예측하였으며 실험값과 비교하였다. 그 결과 변곡각이 커질수록 천이 NPR 값이 증가하였으며, 이론적 예측 값과 비교하였을 때 유사함을 확인하였다[21]. Fig. 10은 해당 연구의 비교 결과이다. 이를 통해 천이 NPR을 이론적으로 예측하는 것이 충분히 가능하다고 판단되며, 천이 예측 과정으로부터 팽창비나 변곡각과 같은 노즐 형상이 결정될 수 있다.

또한 노즐 길이에 따른 천이 특성 연구를 위해 확장부 길이가 다른 6개의 듀얼 벨 노즐을 사

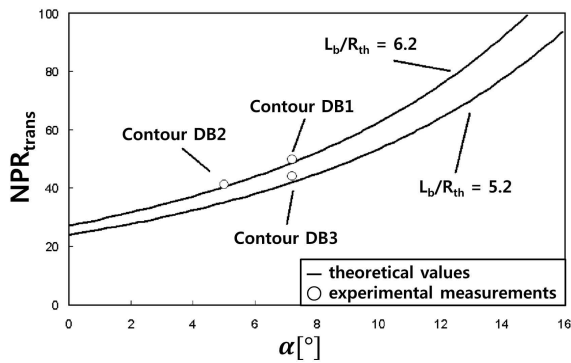


Fig. 10. Transition NPR comparison between theoretical values and experiments[21]



Fig. 11. Dual bell nozzles with different lengths for N<sub>2</sub> cold gas experiments[13]

Table 2. Transition and retransition NPRs with nozzle extension length[13]

Series	1	2	3	4	5	6
L'	0.16	0.30	0.41	0.49	0.56	0.61
NPR <sub>trans</sub>	48.6	47.0	46.2	45.4	44.3	43.8
NPR <sub>retrans</sub>	-	45.1	41.9	38.3	34.9	32.7
Difference	-	1.90	4.30	7.10	9.40	11.1

용하여 질소 냉가스 실험을 수행하였다[13,21]. Fig. 11은 실험에 사용한 듀얼 벨 노즐 중 3개의 모습을 나타낸 것이다. 그리고 Table 2에 상세한 노즐 확장부의 길이와 실험을 통해 측정된 천이, 재천이 NPR 값을 정리하였다. L'은 확장부 길이를 노즐 총 길이로 나눈 값으로 식 (6)과 같이 정의한다.

$$L' = L_e / L_{tot} \quad (6)$$

실험 결과에 따르면 확장부 길이가 길수록 천이/재천이 NPR이 감소하였고, 재천이 NPR이 천이 NPR보다 작았다. 그리고 천이/재천이 NPR의 차는 확장부 길이가 길수록 증가하였다.

### 3.2.3 천이 지속시간

듀얼 벨 노즐이 한 상태에서 다른 상태로 천이하는 동안에는 높은 측하중을 발생시키므로 천이 지속시간은 구조물의 안정성에 있어서 중요한 요소이다[20]. 특히 실제 천이에 앞서 발생하는 sneak transition은 Fig. 9에서와 같이 NPR 변화에 비해 매우 느리기 때문에 실제 천이 외에도 sneak transition에 따른 측하중 발생을 예상할 수 있으며, 구조물(엔진, 탑재물)의 손상을 방지하기 위해서는 천이 시간을 최소화해야 한다.

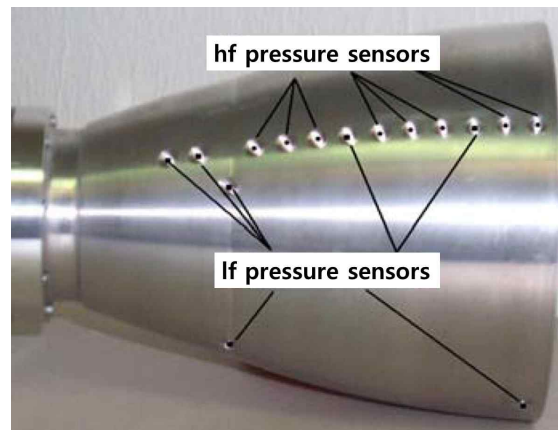


Fig. 12. Dual bell nozzle to measure transition duration[23]

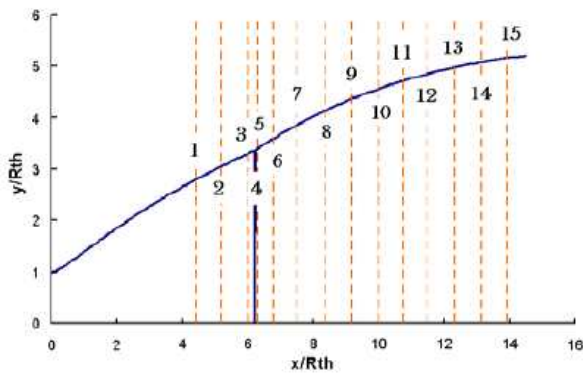


Fig. 13. Pressure sensor positions[23]

천이 지속시간 감소의 필요성에 따라 축소 모형 듀얼 벨 노즐의 질소 냉가스 실험을 통해 천이 지속시간을 측정하는 연구가 진행되었다[23]. 천이 지속시간은 쉐리렌 가시화 기법과 확장부에 압력센서를 설치한 후 첫 번째 센서(변곡점)와 마지막 센서(노즐 출구)에서 측정되는 시간을 통해 천이 지속시간을 계산하였다. Fig. 12, 13은 실험에 사용된 듀얼 벨 노즐과 압력 센서의 위치를 나타낸 것이다.

Figure 14는 쉐리렌 가시화 실험의 결과이다. (a)는 변곡점에서 박리가 된 상태이기 때문에 마하 디스크가 노즐 확장부 안쪽에 존재한다. (b), (c), (d), (e)는 천이가 일어나는 과정이고 마하 디스크가 점차 후류 쪽으로 이동한다. 마지막으로 (f)는 천이 후 유동이 안정된 사진이다. 천이의 지속시간은 천이가 발생할 때 측정하기 시작하여 천이가 완료되고 유동이 안정되면 측정을 종료하는 방식으로 진행하였다[23].

천이 지속시간은 각 실험에서 평균을 취하여 계산하였고 그 결과는 Table 3과 같다. 천이 지속시간은 NPR 구배가 커질수록 감소했고 압력 측정을 통해 계산한 결과와 쉐리렌 가시화 실험을 통해 계산한 결과는 약 1% 차이가 발생했다.

또한 확장부 길이가 천이 지속시간에 미치는 영향에 대한 연구도 수행하였다[13,20,21]. 천이 특성 연구와 마찬가지로 여러 확장부 길이를 가진 듀얼 벨 노즐로 실험하였고, 확장부 길이가 길수록 천이 지속시간이 짧아진다는 결과를 얻었다. Fig. 15는 해당 실험의 결과이다.

Table 3에서 NPR 구배에 따른 천이 지속시간 측정 연구의 시간 단위는 밀리초(ms)이다. 그러나 Fig. 15에서 확장부 길이에 따른 천이 지속시간 측정 연구의 단위가 초(s)인 이유는 sneak transition의 지속시간까지 포함된 시간이기 때문이다. 이를 통해 sneak transition의 지속시간이 실제 천이에 비해 상당히 긴 것을 알 수 있다.

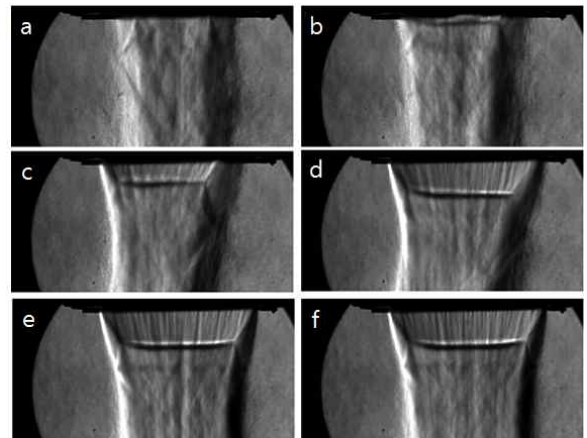


Fig. 14. Schlieren visualization of the flow transition[23]

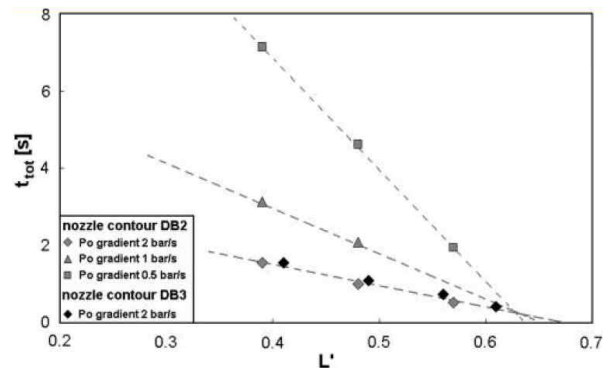


Fig. 15. Total transition duration for various extension lengths[21]

Table 3. Comparison of Pressure measurements with Schlieren[23]

Pressure gradient $\Delta(P_0/P_a)/\Delta t$	Transition duration	
	Pressure measurements	Schlieren optics
$0.7 \text{ s}^{-1}$	4.85 ms	4.80 ms
$1.2 \text{ s}^{-1}$	4.30 ms	4.33 ms
$1.7 \text{ s}^{-1}$	4.22 ms	-

### 3.3 측하중 및 열하중

#### 3.3.1 측하중(side load)

일반적으로 사용되는 벨 노즐에는 측하중이 발생한다. 듀얼 벨 노즐의 경우 벨 노즐의 특성을 모두 갖고 있기 때문에 동일한 현상이 발생하지만 천이에 의해 벨 노즐보다 심각한 측하중이 발생할 수 있다. DLR에서는 이러한 심각한 측하중의 크기를 줄일 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였다[20,24,25]. 측하중 발생에 있어서 다양

한 기하학적 변수들의 영향을 조사하기 위해 질소를 사용한 냉가스 실험을 진행하였다[25]. 실험에 사용된 노즐과 실험 장치를 Fig. 16에 나타내었다.

측하중 측정 방법은 다음과 같다. Fig. 16에서 볼 수 있듯이 횡력(lateral force)에 민감하고 얇은 튜브(thin-walled bending tube)를 유동 불균형과 불안정에 의해 굽힘이 발생하는 노즐의 수축부 상류에 부착한다. 두 쌍의 스트레인 게이지

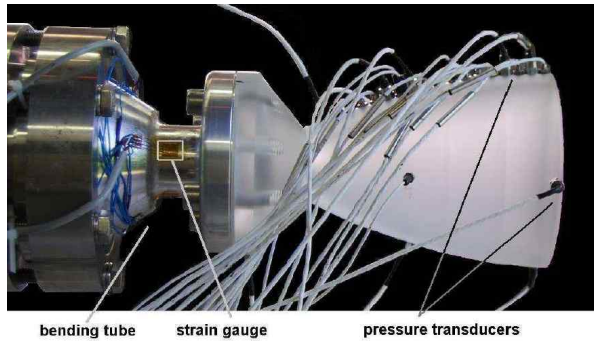


Fig. 16. Dual bell nozzle on the horizontal rig for side load measurements[25]

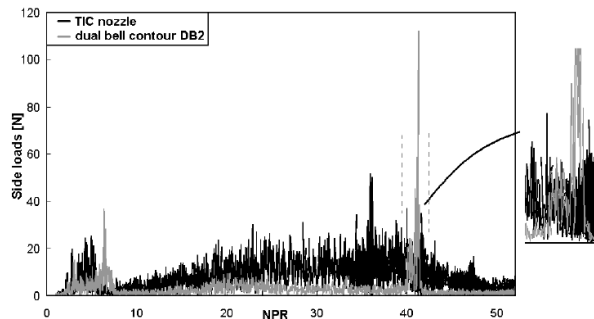


Fig. 17. Comparison of the side load value as a function of NPR[25]

를 90도 간격으로 튜브 벽에 위치시키고 실험 동안 발생하는 횡력에 의해 발생하는 변형을 측정한다[25].

Figure 17은 일반적으로 사용되는 벨 노즐과 듀얼 벨 노즐의 측하중 비교 실험의 결과이다[25]. 벨 노즐의 경우 천이 현상이 발생하지 않기 때문에 측하중이 급격하게 증가하는 구간이 없다. 반면에 듀얼 벨 노즐은 천이 순간에 급격한 측하중 증가를 보인다. 또 하나 주목할 점은 듀얼 벨 노즐의 경우 천이가 발생하기 전까지는 벨 노즐의 특성과 유사하므로 측하중 역시 비슷한 값을 나타낼 것으로 예상되는데 천이 순간을 제외하면 벨 노즐의 측하중이 듀얼 벨보다 높다는 점이다. 이에 대해서는 참고문헌에 언급되지 않았지만 천이가 발생하기 전에 형성되는 재순환 영역이 듀얼 벨 노즐의 측하중 안정화에 영향을 끼쳤다고 판단되며 지속적인 연구가 필요하다.

확장부 길이가 다른 4개의 노즐을 이용한 실험을 통해 측하중의 최댓값이 확장부 길이에 영향을 받는다는 것을 밝혔으며, Fig. 18은 해당 연구의 결과이다[20]. 측하중의 최댓값은 확장부가 길수록 증가하였고  $L^*=0.23$  일 때는 천이가 발생하지 않았기 때문에 급격히 증가하는 측하중이 측정되지 않았다[20]. 그리고 측하중의 크기는 천이(왼쪽) 때보다 재천이(오른쪽) 때 더 작은 경향을 보였다.

측하중은 엔진과 탑재물(payload)의 손상을 막기 위해 크기와 지속시간이 제한되어야 한다. DLR에서는 측하중이 노즐 확장부 길이에 영향을 받으므로, 이것은 설계 시 중요한 변수로 작용할 수 있음을 강조하였다[20].

### 3.3.2 열하중(thermal load)

실제 로켓 엔진은 연소가스를 배출하므로 열에 의한 하중도 고려해야 한다. 특히 듀얼 벨 노

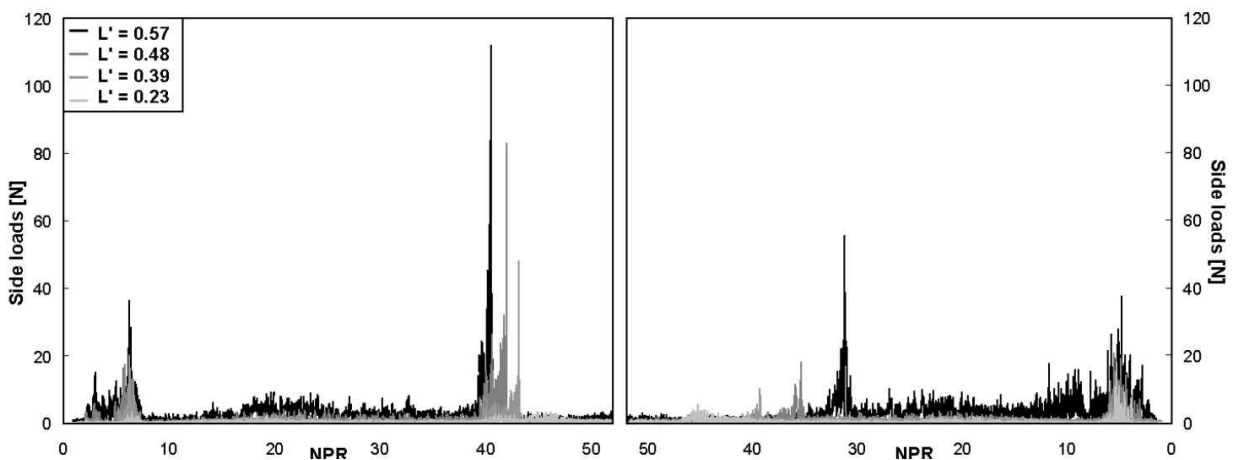


Fig. 18. Result of side load measurements[20]



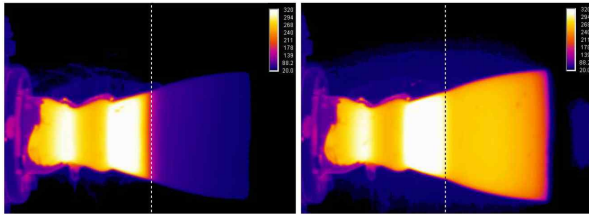


Fig. 19. Result of Thermography test(left : sea level mode, right : high altitude mode)[12]

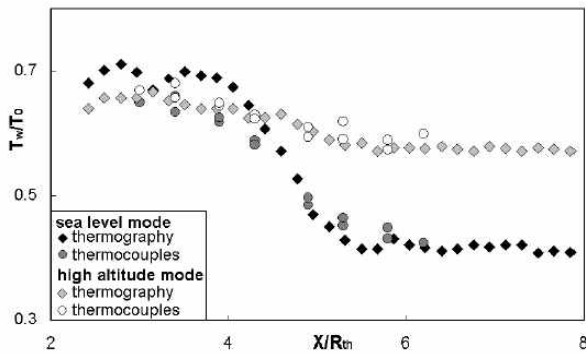


Fig. 20. Wall temperature measured with thermography and thermocouples[12]

즐은 변곡점이라는 부분이 존재하므로 이 부분에 대한 열해석이 필요하다. DLR에서는 수소-산소를 이용한 연소 실험을 통해 축대칭 듀얼 벨 노즐의 위치에 따른 온도 변화를 관찰하였다[12]. 열화상(Thermography)과 열전대(Thermocouple)를 이용하여 온도를 측정하고 이를 비교하였다.

열화상을 이용하여 온도를 측정한 결과, 해수면 조건에서는 변곡점을 전후로 온도가 급격하게 변화하였고, 고고도에서는 변곡점을 지난 후 점차 감소하는 것을 확인하였다(Fig. 19). 해수면 조건에서는 변곡점에서 박리가 일어나기 때문에 확장부에 대기압이 유입되어 온도가 떨어지지만 고고도에서는 천이에 의해 변곡점에서의 온도가 확장부까지 유지된다. Fig. 20에서 열화상과 열전대로 측정한 결과는 유사한 경향을 보였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 향후 진행할 듀얼 벨 노즐의 연구에 대한 기초자료로 활용하기 위해 DLR에서 수행한 연구내용들을 바탕으로 듀얼 벨 노즐의 특성을 조사하고 핵심 변수를 도출하였다.

듀얼 벨 노즐의 특성을 연구하는 과정에서 쉘리텐 가시화 기법을 통해 sneak transition을 발견하였고 천이 지속시간 중에 상당부분을 차지한

다는 사실을 실험적으로 검증하였다. 그리고 천이 전과 후의 측하중은 일반적인 벨 노즐보다 낮았지만 천이 순간에는 월등히 높다는 점을 통해 노즐 설계 시 이를 고려해야 한다는 점을 강조하였다. 또한 연소 실험을 실시하여 확장부 벽면 온도를 측정하였고 해수면 조건에서 재순환 영역으로 인해 박리 전과 후의 온도 차이가 발생하는 것을 보였다.

듀얼 벨 노즐의 성능에 영향을 미치는 변수로는 베이스 노즐 및 확장부의 길이와 팽창비, 변곡각이 있다. 박리 지점의 예측을 통해 박리 조절이 가능하며 이 과정에서 베이스 노즐 형상이 결정될 수 있다. 또한 비추력 손실을 최소화하는 것뿐만 아니라 엔진의 성능에 따라 원하는 시점에서 천이를 발생시키기 위해 천이를 예측하는 과정에서 확장부의 팽창비나 변곡각이 결정될 수 있다.

DLR에서 실험을 통해 제시한 핵심 변수에 따른 특성 변화는 다음과 같다.

1. 변곡각이 커질수록 천이 NPR은 증가한다.
2. 확장부 길이가 길수록 천이 순간의 측하중 값이 증가한다.
3. 확장부 길이가 길수록 천이 NPR과 천이 지속시간은 감소한다.

확장부 길이는 듀얼 벨 노즐 성능에 있어서 중요한 설계 변수이다. 빠른 작동상태전환 및 엔진과 탑재물(payload)을 보호하기 위해 천이 지속시간의 감소가 필요하지만 확장부 길이가 길어지면 노즐 무게뿐만 아니라 천이 순간의 측하중 값이 증가하고 천이 NPR 또한 영향을 받게 된다. 따라서 요구 성능이나 목적에 맞게 필요 변수들을 선정하여 각 변수간의 적절한 조절을 통해 노즐의 최적화를 수행해야 한다.

DLR에서는 축소 모델에 대해 실험과 해석을 통한 듀얼 벨 노즐의 특성을 연구하였다. 그러나 실제 로켓 노즐 설계에 적용할 경우 고려해야 할 추가적인 인자들이 존재한다. 먼저 스케일 증가에 따라 유동의 속도 성분이 준일차원 보다는 3차원에 가까워진다는 것과 경계층의 영향을 들 수 있고, 실제 로켓은 대기가 희박하고 온도가 낮은 환경에서 운용되므로 대기의 밀도와 온도가 실제 스케일의 듀얼 벨 노즐의 작동상태에 끼치는 영향도 중요 인자라 판단된다.

#### 후 기

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

## References

- 1) 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, 2015, pp.456~465.
- 2) 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.
- 3) Kim, J. and Huh, H., "Recent Progress in R&D of Altitude Compensation Dual Bell Nozzle in DLR of Germany," *KSPE Spring Conference*, 2015, pp.46~49.
- 4) Kim, H. and Koo, B., "A Study of the Flow Characteristics through a Supersonic Dual Bell Nozzle," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 4, No. 4, 2000, pp.70~77.
- 5) Rajesh, G. and Kim, H., "A CFD Study on the Supersonic Flow through a Dual Bell Nozzle," *KSPE Spring Conference*, 2012, pp.324~330.
- 6) Choi, J. and Huh, H., "Technology Review of an E-D Nozzle for Altitude Compensation Purpose," *KSPE Spring Conference*, 2015, pp.80~83.
- 7) Choi, J. and Huh, H., "Performance Estimation of the Altitude Compensating External Pintle Thruster," *KSAS Fall Conference*, 2015, pp.549~552.
- 8) 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. 4-103, Pasadena, CA, 1949.
- 9) Frey, M. and Hagemann, G., "Critical Assessment of Dual-Bell Nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 15, No. 1, 1999, pp.137~143.
- 10) Hagemann, G., Frey, M. and Manski, D., "A Critical Assessment of Dual-Bell Nozzles," *AIAA paper 3299*, 1997.
- 11) Stark, R., Bohm, C., Haidn, O. J., and Zimmermann, H., "Cold Flow Testing of Dual-Bell Nozzles in Altitude Simulation Chambers," *Proc. of EUCASS European Conference for Aerospace Sciences*, Moscow, 2005.
- 12) Genin, C. and Stark, R., "Hot Flow Testing of Dual Bell Nozzles," *49th Aerospace Science Meeting*, 4-7 Jan, 2011.
- 13) Genin, C. and Stark, R., "Flow Transition in Dual Bell Nozzles," *Shock Waves*, Vol. 19, No. 3, 2009, pp.265~270.
- 14) Genin, C., Gemoth, A. and Stark, R., "Experimental and Numerical Study of Heat Flux in Dual Bell Nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 29, No. 1, 2012, pp.21~26.
- 15) Verma, S. B., Stark, R., Genin, C. and Haidn, O., "Cold Gas Experiments to Study the Flow Separation Characteristics of a Dual Bell Nozzle during its Transition Modes," *Shock Waves*, Vol. 20, No. 3, 2010, pp.191~203.
- 16) Verma, S. B., Stark, R., Genin, C. and Haidn, O., "Cold gas Dual-Bell Tests in High-Altitude Simulation Chamber," *Shock Waves*, Vol. 21, No. 2, 2011, pp.131~140.
- 17) Genin, C. and Stark, R., "Experimental Investigation of the Inflection Geometry on Dual Bell Nozzle Flow Behavior," *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2011.
- 18) Genin, C., Stark, R. and Schneider, D., "Numerical Investigation of Dual Bell Nozzle Flow Field," *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2012.
- 19) 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, 2013, pp.363~376.
- 20) Genin, C. and Stark, R., "Side Loads in Dual Bell Nozzles, Part 2 Design Parameters," *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.
- 21) Genin, C. and Stark, R., "Experimental Study on Flow Transition in Dual Bell Nozzles," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 3, 2010, pp.497~502.
- 22) Stark, R. and Wagner, B., "Experimental Study of Boundary Layer Separation in Truncated Ideal Contour Nozzles," *Shock Waves*, Vol. 19, No. 3, 2008, pp.185~191.

23) Genin, C. and Stark, R., "Experimental Study of Dual Bell Nozzles," *2nd European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)*, Brussels, Belgium, 2007.

24) Stark, R., Genin, C., Wagner, B. and Koschel, W., "The Altitude Adaptive Dual Bell

Nozzle," *16th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR)*, 2012.

25) Stark, R. and Genin, C., "Side Loads in Dual Bell Nozzles, Part 1 Phenomenology," *46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.