

탈설계 조건에서 추력 증대를 위한
에어로 스파이크 핀틀 노즐의 설계인자 분석 연구김정진^{1,†}¹국방과학연구소 미사일연구원 1부Design Factor Analysis of Aerospike Pintle Nozzle
for Increasing Thrust in Off-DesignJeongjin Kim^{1,†}¹Agency for Defense Development, Missile Research Institute, 1st Directorate

Abstract

A design factor analysis was conducted to reduce the thrust reduction in the off-design, due to the driving of the aerospike pintle nozzle. The close (NPR 100) as well as the open (NPR 11) stroke were fixed, as under-expansion conditions. The pintle contour, pintle head radius (R), cowl angle (θ), and cowl exit length (L) were selected as design factors. The change in thrust was analyzed, using a verified numerical analysis technique. First, the pintle head radius and the length of the cowl exit had little influence on the thrust. The cowl angle changed the mass flow rate by affecting the effective nozzle throat area, and created a reverse pressure gradient at the cowl exit. As a result of applying the dual aerospike contour, it was confirmed that the thrust in the design-off increased by approximately 1.2%, compared to the reference case and by approximately 3.4% compared to the worst case.

초 록

에어로 스파이크 핀틀 노즐의 구동으로 인한 탈설계 조건에서의 추력 감소를 저감하고자 설계인자 분석 연구를 수행하였다. Close (NPR 100), open (NPR 11) 스트로크 모두 부족팽창 조건으로 고정되었다. 설계인자로 핀틀 형상, 핀틀 헤드 반경 (R), 덮개 각도 (θ), 덮개 출구 길이 (L)를 선정하였다. 검증된 수치해석 기법으로 설계인자로 인한 추력 변화를 분석하였다. 먼저 핀틀 헤드 반경과 덮개 출구 길이는 추력에 미치는 영향이 적었다. 덮개 각도는 유효 노즐목 면적에 영향을 주어 질량 유량을 변화시키고, 덮개 출구에서의 역압력 구배를 생성하였다. 이중 에어로 스파이크 형상을 적용한 결과, 탈설계 조건에서의 추력이 기준 case 대비 약 1.2%, 가장 악조건인 case 대비 약 3.4% 증가하였다.

Key Words : Aerospike Pintle Nozzle(에어로 스파이크 핀틀 노즐), Pintle Contour(핀틀 형상), Cowl Shape(덮개 형상), Dual Aerospike(이중 에어로 스파이크)

1. 서 론

노즐목의 면적을 변화시켜 추력의 크기를 조절하는 핀틀 구동 시스템은 특수추진기술이다. 특히 자체적으로는 추력 조절이 불가능한 고체로켓 추진기관에 있어

매력적인 선택지이며, 국내외에서 핀틀 형상 및 유동 구조에 관한 연구가 활발히 수행되었다[1-4]. 다만 기존의 핀틀 연구에서는 핀틀과 노즐은 개별적으로 존재하였다. 이에 추력 조절을 위해 핀틀 구동이 요구되는 상황에서 핀틀 자체가 노즐로서 확대부의 역할까지 병행하는 시스템을 구상하였다.

이를 위해서 핀틀의 형상을 에어로 스파이크로 선택하였다. 일반적인 벨노즐과 반대로 노즐목 부근에서는 중심축에서 떨어져 있고, 가스가 팽창할수록 중심축에

Received: Apr. 13, 2021 Revised: Aug. 10, 2022 Accepted: Aug. 17, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-42-821-0616, E-mail: jjkim09@add.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

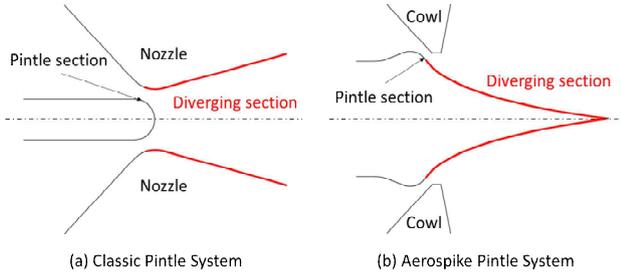


Fig. 1 Pintle System Configuration

가까워지기 때문에, Fig. 1과 같이 핀틀이 노즐의 역할을 동시에 수행할 수 있다.

사전 연구로써 수치해석 기법을 검증하고, 검증된 기법을 통해 NPR (nozzle pressure ratio)에 따른 단일 원뿔형 스파이크와 단일 에어로 스파이크의 성능 차이를 확인하였다[5]. 다음으로 노즐과 핀틀을 결합한 에어로 스파이크 핀틀 노즐 시스템을 설계하여 공압시험을 수행하였다. 이를 통해 에어로스 파이크 핀틀 노즐 시스템의 타당성을 확인하고, 수치해석으로 유동 특성을 확인하였다[6]. 다만 이전 연구 결과, close 조건에서는 만족스러운 결과를 얻었지만, 스트로크 변화에 따른 open 조건에서의 성능은 현저하게 낮았다[6]. 이에 핀틀 구동에 의한 open 조건을 탈설계(design off) 조건으로 정의하였다.

본 연구에서는 기존에 검증된 수치해석 기법을 활용하여, 에어로 스파이크 핀틀 노즐의 추력 성능에 영향을 주는 설계인자를 선별하고, 탈설계 조건에서 추력 성능 하락을 저감시키는 방향을 제시하고자 하였다.

2. 설계인자 선정

2.1 노즐목 면적 및 NPR 고정

연료 유량을 조절함으로써 직접적으로 추력을 제어할 수 있는 액체로켓 추진기관과 다르게 고체로켓 추진기관은 노즐목 면적을 변화시킴으로써 추력 크기를 제어한다. 다만 질량보존 법칙에 따라 챔버압력은 Eq. 1과 같이 추진제 연소면적과 노즐목 면적 비율에 비례하게 된다.

$$P = \left(\frac{\rho a}{C_D} \frac{A_b}{A_t} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (1)$$

P : 챔버압력

ρ : 추진제 밀도

a : 연소속도 상수

n : 연소속도 지수

A_t : 노즐목 면적

A_b : 추진제 연소면적

C_d : 유출계수

여기서 끝단연소 고체 추진기관을 가정하게 되면, 추진제 연소면적이 일정하여서, 핀틀 시험이나 수치해석 조건을 선정하기 용이해진다. 챔버압력과 노즐목 면적이 반비례 관계가 되면서 Fig. 2와 같이 스트로크 감소로 인하여 노즐목 면적이 최소가 되었을 때, 챔버압력이 최대가 된다(Close 조건). 반대로 스트로크 증가로 인하여 노즐목 면적이 최대가 되었을 때, 챔버압력이 최소가 된다(Open 조건).

다음으로 핀틀 노즐을 적용한 고체 추진기관에서 순항이 가능한 최소추력이 정해지고, 목표하는 추력비를 생성하기 위해 일반적인 추진기관보다 높은 챔버압력이 요구된다. 이에 close 조건의 NPR은 100, open 조건의 NPR은 11로 선정하였다.

마지막으로 제한된 추진기관 반경 내에 가능한 구동 시스템에 적절한 반경의 핀틀 바디를 선정하다 보니 노즐 출구 반경이 제한되어 close 조건의 NPR과 open 조건의 NPR 모두 주어진 면적비에 대해 부족팽창 조건이 되었다.

따라서 에어로 스파이크 노즐에서 과대팽창 조건은

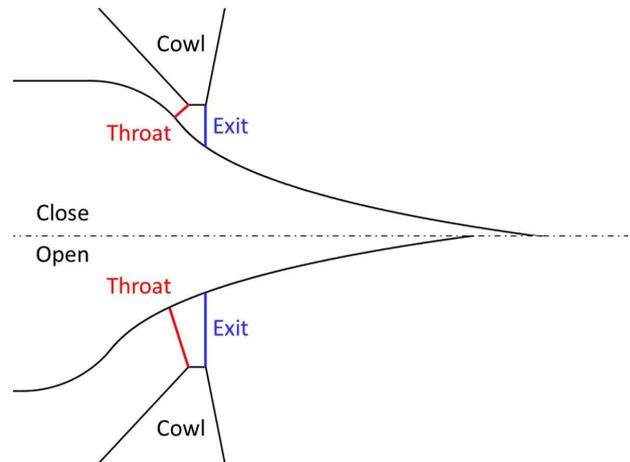


Fig. 2 Comparison between Close and Open Condition

본 논문에서 고려하는 상황에서 중요도가 떨어진다. 최종적으로 설계인자 변화에 따른 성능을 확인하기 위하여, close 조건에는 NPR 100, open 조건에는 NPR 11로 각각 스트로크에서 결정되는 면적비에 대해 부족 팽창 상태를 해석조건으로 고정하였다.

2.2 핀틀 형상

특정 스트로크에서 고정된 단일 에어로 스파이크 노즐을 가정하였을 때, 가장 높은 추력을 발생시키는 노즐 형상을 설계하는 방법은 Prantl-Meyer 함수를 만족시키는 것이다[5]. 초음속에서의 유동팽창은 Prantl-Meyer 함수를 따르게 되는데, 이때 각 미소꺾임각에 맞는 면적비를 제공하게 되면 팽창이 완료된 유동은 중심축에 평행하게 되어, 반경 방향 추력 성분이 없이 온전하게 사용할 수 있다. 다만 특정 스트로크 조건에 최적화된 형상을 선정하였다고 하여도, 본 연구에서와 같이 핀틀 구동으로 인하여 다른 작동 포인트로 이동하게 되면 탈설계 조건이 된다.

Close 조건에서 Prantl-Meyer을 만족하게 설계된 형상이 open 조건으로 이동할 경우, 목표하는 챔버압력을 형성하는 노즐목 면적을 확보할 순 있지만, 핀틀 팁의 기울기 변화가 적다. 이에 Fig. 3과 같이 각각의 스트로크 조건에서 설계 조건이 될 수 있도록 접합한 이중 핀틀 형상을 설계하였다.

최종적으로 close 조건의 노즐목 면적비로 결정되는 단일 형상과 close, open 조건에서 결정된 형상을 접합한 이중 형상을 설계인자로 사용하였다.

다른 문헌들[7, 8]에서 연구되었던 절단(truncated)

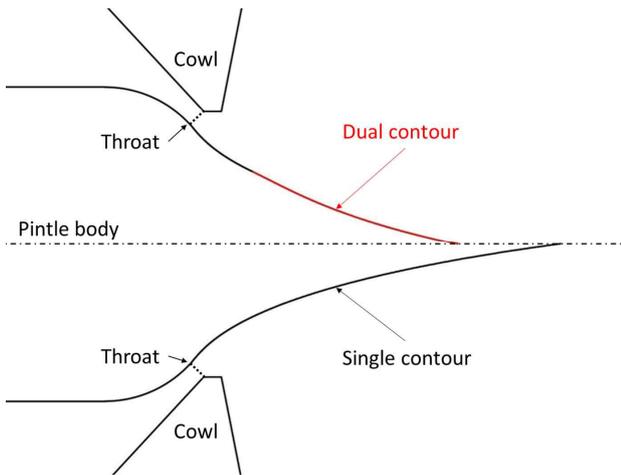


Fig. 3 Comparison between Single and Dual Contour

형상은 과대팽창 조건에서 적합하며, 스트로크의 변화로 인하여 핀틀이 덮개(cowl) 안쪽으로 이동하면, 부족팽창 조건에서 최소한의 팽창을 보장하지 못하기 때문에 본 연구에서는 설계인자로 고려되지 않았다.

2.3 핀틀 헤드 반경

Prantl-Meyer 팽창과 공식을 만족하도록 설계하여, 노즐목 이후의 형상이 결정된다. 하지만 노즐목 이전인 아음속 영역에의 핀틀 헤드 설계가 남아있다. 아음속 영역의 진입 유로 영향을 알아보기 위해 Fig. 4와 같이 핀틀 헤드의 회전 반경 R 을 15 mm와 10 mm로 나누어 확인해보았다. 유로의 왜곡 현상을 최대한 배제하고자, 핀틀 헤드 반경에 맞추어 핀틀 바디 두께를 결정하였다.

2.4 덮개 각도

단일 에어로 스파이크 노즐과 다르게 구동장치가 들어가게 되면, 장치 보호를 위해 들어가는 내열재는 물론, 충분한 유로 확보를 위해 Fig. 4의 수축 각도 θ 가 증가할 가능성이 다분하다. 반대로 수축 각도가 기준보다 감소할 경우, 노즐목이 의도된 설계지점 이전에 최소 단면적을 형성하게 된다. 따라서 close 조건의 단일 형상의 회전각인 47도와 그보다 10도 증가한 57도를 덮개 각도를 설정하였다. 이를 통해 Fig. 5와 같이 각도를 변경하였지만, 덮개와 핀틀의 동일한 지점에서 기하학적인 노즐목이 위치하도록 하였다.

2.5 덮개 출구 길이

추력은 Eq. 2와 같이 압력에는 비례하지만, 유량이 유속에 비례하기 때문에 유속에 대해서는 제곱에 비례

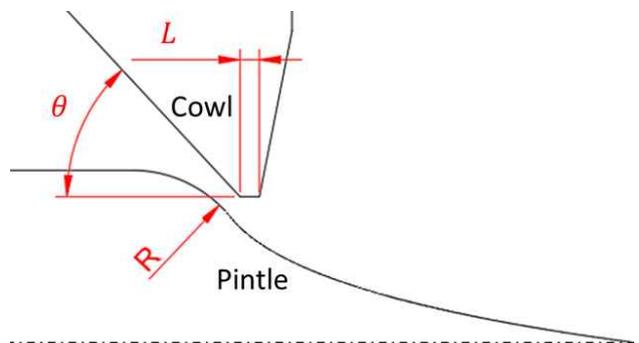


Fig. 4 Configuration of Aerospike Pintle Nozzle

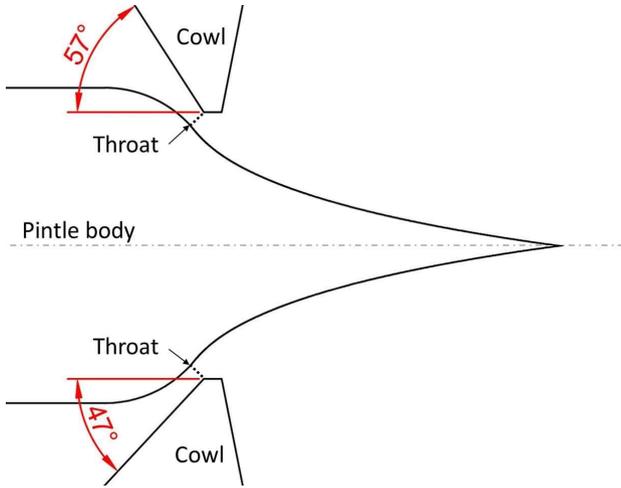


Fig. 5 Comparison of Cowl Angle

Table 1 Design Parameter of the Pintle Nozzle

Design Parameter	Design Values
Pintle Contour	Single, Dual
Pintle Head Radius (R) [mm]	10, 15
Cowl Angle (θ) [deg]	47, 57
Cowl Exit Length (L) [mm]	2.29, 4.58

하게 된다. 따라서 출구 압력이 대기압보다 낮아지기 전까지 작동유체를 팽창시키는 것이 유리하다. 에어로 스파이크 노즐에서 동일하게 적용될 수 있는지 확인해 보기 위하여, 덮개 출구에서 수직으로 가상의 선을 내려서 생성되는 단면적이 출구 면적의 절반일 때의 출구 길이와 그보다 2배인 출구 길이를 선택하였다.

$$F = \dot{m} V_{exit} + (P_{exit} - P_a) A_{exit} + \int (P_w - P_a) \cos \theta dA \quad (2)$$

V_{exit} : 중심축 방향 출구 평균유속

P_{exit} : 출구 평균압력

P_w : 출구 이후 핀틀의 표면압력

P_a : 대기압

θ : 중심축과의 각도

이 밖의 기타 내부 형상 등의 설계요인들은 해석에서 제외하였다. 최종적으로 Table 1과 같이 비교할 설계인자들을 정리하였다.

3. 수치해석 및 해석조건

3.1 수치해석 기법

본 연구에 사용되는 수치해석 기법으로 상용 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 해석조건으로 density-based typed, steady, 2d axisymmetric이며, 난류 모델로 k- ω SST를 사용하였다. 해당 기법은 공압 시험을 수행하여 얻은 NPR 및 스트로크 조건에 따른 추력 데이터를 활용하여 검증이 완료되었다[6].

3.2 해석조건

설계인들의 변화에 따른 효과를 비교하기 위하여, case 1을 기준으로 잡았다. 이후 특정 설계인자 하나를 변경하면서, 나머지 설계인자는 고정하는 방식으로 Table 2와 같이 해석 모델을 구성하였다. case는 각각 close 조건과 open 조건으로 해석되었다.

본 연구에서는 설계인자의 독립적인 영향만을 보았지만, 향후 설계인자 간의 복합적인 영향을 확인하기 위하여 반응 표면 탐색법을 적용한 최적화 연구를 수행할 필요가 있다.

Table 2 Test Matrix

Case	Pintle Contour	Pintle Head Radius [mm]	Cowl Angle [deg]	Cowl Exit Length [mm]
1	Single	15	47	2.29
2	Dual			
3	Single	10		
4		15	57	
5			47	4.58

4. 해석 결과

4.1 핀틀 형상

Case 별로 close, open 조건의 추력을 Table 3과 같이 나타내었다. 추력 변화율은 case 1의 추력을 기준으로 계산하였다. 추력 계산에는 Eq. 2를 사용하였다. 뿔개 출구에서 일정한 반경이 끝나는, Fig. 6에서 푸른색으로 표시한 출구 단면을 기준으로 계산되는 유속항, 압력항과 뿔개 출구 이후 붉은색으로 표시한 핀틀 형상이 받는 압력 적분항으로 구분된다.

이중 핀틀 형상이 적용된 case 2의 경우 close 조건에서는 동일 챔버압력에서 추력의 감소가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 세분화시키면 뿔개 출구에서의 유속항과 압력항이 만들어내는 추력은 동일하였다. 다만 압력 적분항이 다소 작아졌다. Fig. 7은 뿔개 출구 이후 핀틀 표면이 받는 압력을 나타낸다. 압력은 챔버 압력으로 무차원화 되었으며, 거리는 삼입된 핀틀 형상에 푸른색으로 표시된 길이로 무차원화 되었다. 해당 길이는 case 1의 close 조건에서 뿔개의 일정한 반경이 시작되는 지점에서 핀틀 팁까지의 거리이다. 실제로 Fig. 7의 case 1, 2의 close 조건에서 접합지점 이전까지 압력은 동일하다. 이중 형상의 경우 Fig. 8에 붉은 원으로 표시한 접합지점부터 압력이 급격히 감소했다가 회복된다. 하지만 핀틀 형상은 끝으로 갈수록 중심축과 평행해진 상태이기에 추력 상승에는 도움이 되지 않는다. 비슷하게 무차원 길이 0.15~0.4 구간에 압력 손실 또한 절댓값이 작을 뿐만 아니라 이미 각도가 충분히 작아져 있으므로 약간의 손실만을 초래한다. 이는 에어로 스파이크의 특성상 벨노즐에 비해 유동의 회전 및 팽창이 핀틀 전단부에서 주로 일어나기 때문이다. 이 관점에서 close 조건에서 팽창이 주로 일어나는 전단부는 Fig. 8에서와 같이 유사하다.

반대로 open 조건에서는 close 조건에서 최적 설계되었던 단일 핀틀 형상보다는 이중 핀틀 형상에서 추력이 약 1.2% 증대됨을 확인하였다. 사전 연구에서 동일한 수치해석 기법으로 최소 격자 크기를 1/3로 줄였을 때 추력에서 -0.2%의 차이만을 보여주었다[6]. 따라서 이중 핀틀 형상을 적용하였을 때, 약 1.2%의 차이이지만 비추력 확보가 중요한 고체 추진기관에 있어

Table 3 Thrust according to Cases

Case	Close		Open	
	Thrust [N]	Rate of Change	Thrust [N]	Rate of Change
1	386.87	0	89.34	0
2	386.28	-0.15	90.37	1.16
3	387.02	0.04	89.34	0
4	382.14	-1.22	87.37	-2.21
5	387.11	0.06	89.32	-0.02

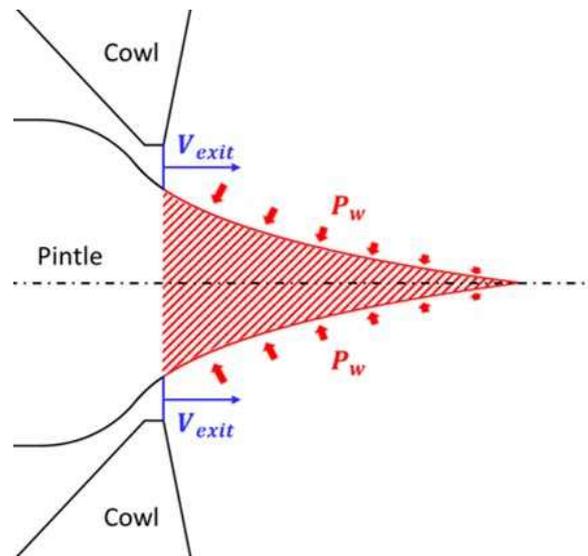


Fig. 6 Diagram for Thrust Generation Terms

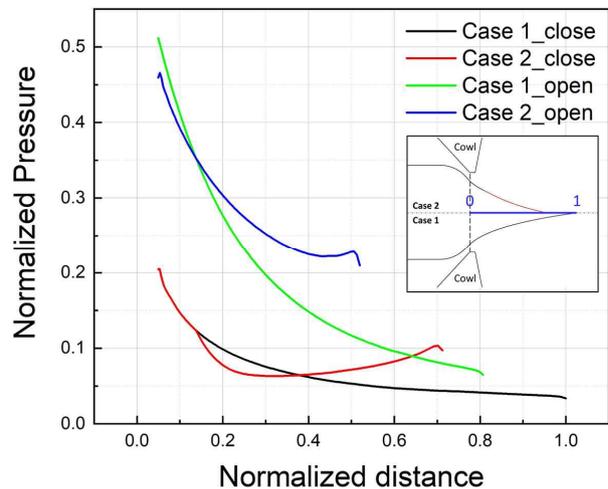


Fig. 7 Pressure Distribution of Pintle after Cowl Exit

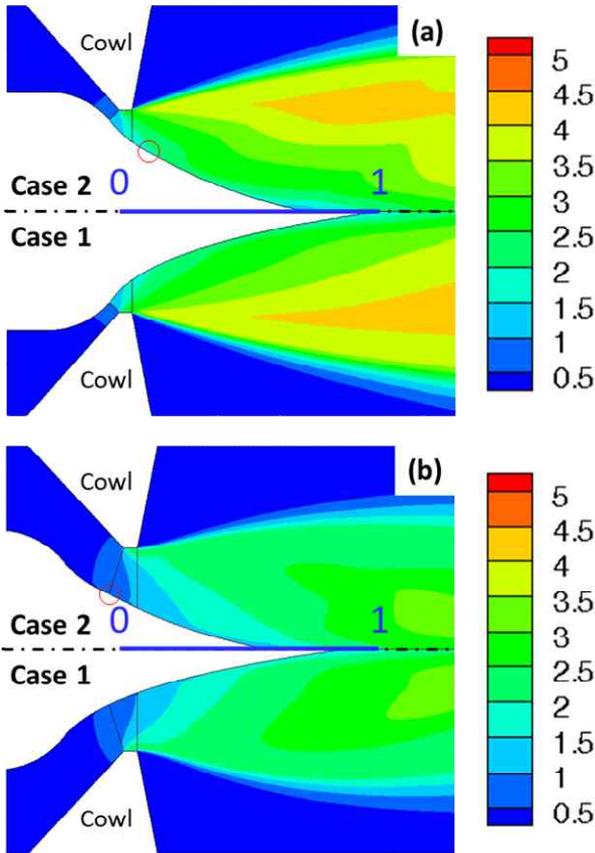


Fig. 8 Mach Number Contour according to Pintle Contour; (a) Close; (b) Open

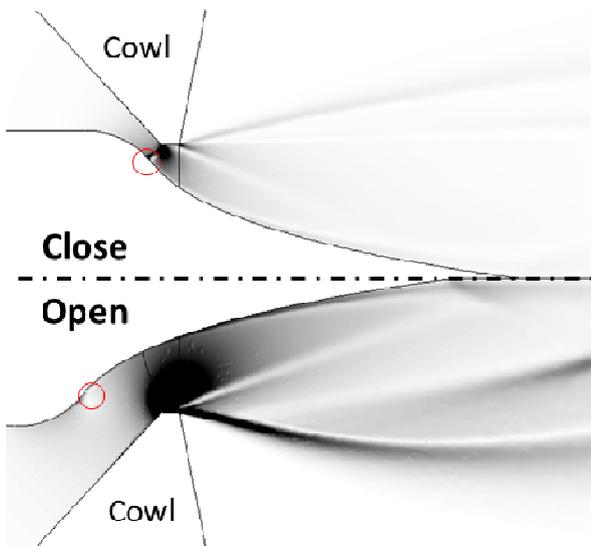


Fig. 9 Numerical Schlieren Graph of Case 3

효과적인 추력 상승으로 판단되었다.

스트로크가 증가된 open 조건에서 덮개 출구를 기준으로 수직으로 가상의 선을 내렸을 때의 단면적이

늘어나서 압력이 줄어들어 확인된다. 실제로 Eq. 2의 출구 단면에서의 압력항에 의한 추력 발생이 -1.01% 감소하였지만, 출구 단면에서의 유속항이 1.41% 증가하고 압력 적분항이 0.77% 증가하였다.

단일 핀틀 형상은 핀틀 전단부에서 이미 회전이 집중되고, 실제 스트로크 증가로 open 조건에서 노즐목이 위치할 후단부에서는 기울기의 변화가 적다. 반면에 이중 핀틀 형상에서는 이에 맞춰 접합되어 있어서 open 조건 시에도 Fig. 8에서와 같이 원활하게 팽창할 수 있다. 이를 통해 덮개 출구 이전에는 압력보다는 유속을 확보하고, 덮개 출구 이후의 핀틀 형상의 평균 각도도 높아 압력 적분항을 확보하기에 유리하다.

4.2 핀틀 헤드 반경

핀틀 헤드 반경을 줄인 case 3의 결과를 보면 close 조건에서 미미한 추력 상승이 있었지만, 증감률을 보았을 때, 의미 있는 결과로 보이지 않는다. 마찬가지로 open 조건에서도 추력의 변화를 보이지 않았다.

Figure 9는 case 3의 밀도구배크기를 보여주고 있다. 핀틀 헤드 반경으로 인한 추력 크기 변화 뿐만 아니라 유동구조 변화 또한 없었다. 특히 핀틀 헤드 반경과 스트로크에 상관없이 일정한 반경을 가진 핀틀 헤드에서 에어로 스파이크 형상으로 진행되는 부분에서 부분적인 팽창 현상이 발견되었다. 급격한 회전으로 인하여 유속이 빨라지고 압력이 회복되지 못하는 Vena contracta 현상으로 판단된다.

핀틀 헤드 반경 변경으로는 Vena contracta를 해결할 수 없어서 추력 변화가 없었으며, 다른 방식으로 유로 개선이 요구된다.

4.3 덮개 각도

덮개 각도를 증가시킨 case 4의 경우 close, open 모두 유의미한 추력의 감소가 나타났다. 추력 감소의 원인은 2가지 관점에서 생각해볼 수 있다. 먼저 동일한 챔버압력과 동일한 기하학적인 노즐목을 지나는 유량이 변하였다. close 조건에서 case 1에 비해 case 4의 질량 유량은 약 -1.3% 감소하였으며, open 조건의 경우에도 약 -2.2% 감소하였다. 이는 기하학적인 노즐목 단면적과 덮개를 타고 내려오는 중심 유동의

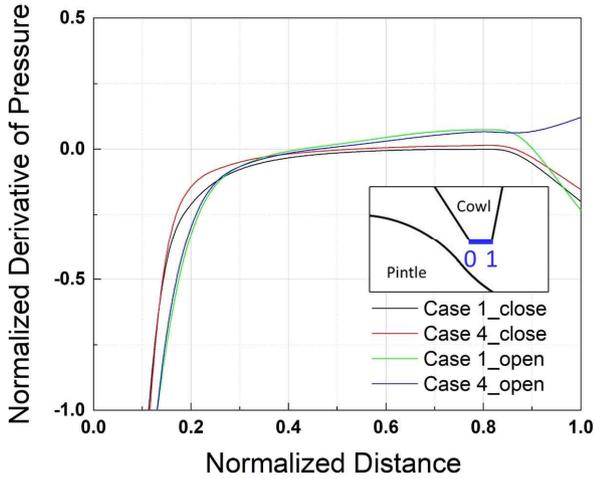


Fig. 10 Static Pressure Gradient along the Cowl Exit according to the Cowl Angle

각도 차이가 증가하면서 유효 노즐목 면적이 감소함에 따라 발생한 것으로 판단된다.

따라서 이런 관점에서 애초에 구동기의 존재로 인하여 구조적으로는 불가능한 상황이지만, 각도가 낮아지는 경우를 생각해본다면, close 조건에서의 질량 유량은 각도 차이로 인해 case 1보다 감소할 것이고, open 조건에서의 질량 유량은 각도 차이가 줄어들면서 case 1보다 증가할 것이다.

두 번째로 덮개 출구에서의 유동 특성이 상이해진다. Fig. 10은 노즐 출구에서의 거리에 따른 압력 변화율을 나타내고 있다. 압력은 챔버압력으로 무차원하였으며, 길이의 경우 중심축에 평행한 노즐 출구의 시작(0)부터 끝(1)까지를 기준으로 하였다.

Case 1의 close 조건에서는 기하학적 노즐목과 덮개 각도가 수직이기 때문에, 설계 의도에 맞춰 노즐 출구 전체 영역에서 압력 변화율 값이 음수이다. 반면에 수축 각도가 증가한 case 4의 close 조건에서는 0.58~0.86 무차원거리에서 변화율의 값이 양수이다. 이는 덮개의 수축부를 따라 가속된 유동이 노즐목 부근을 회전하면서 핀틀 표면에서와 달리 압력을 회복하지 못하고 유속이 빨라지면서 상대적으로 저압이 형성되었기 때문이다[6]. Fig. 11에서도 Case 4의 기하학적 노즐목 근처에서의 마하 선(M=1)이 기울어짐이 확인된다. 이러한 유동 특성으로 인하여 생성된 역압력 구배가 원할한 팽창을 방해한다.

Open 조건의 경우, 2가지 case 모두 해당 기하학적

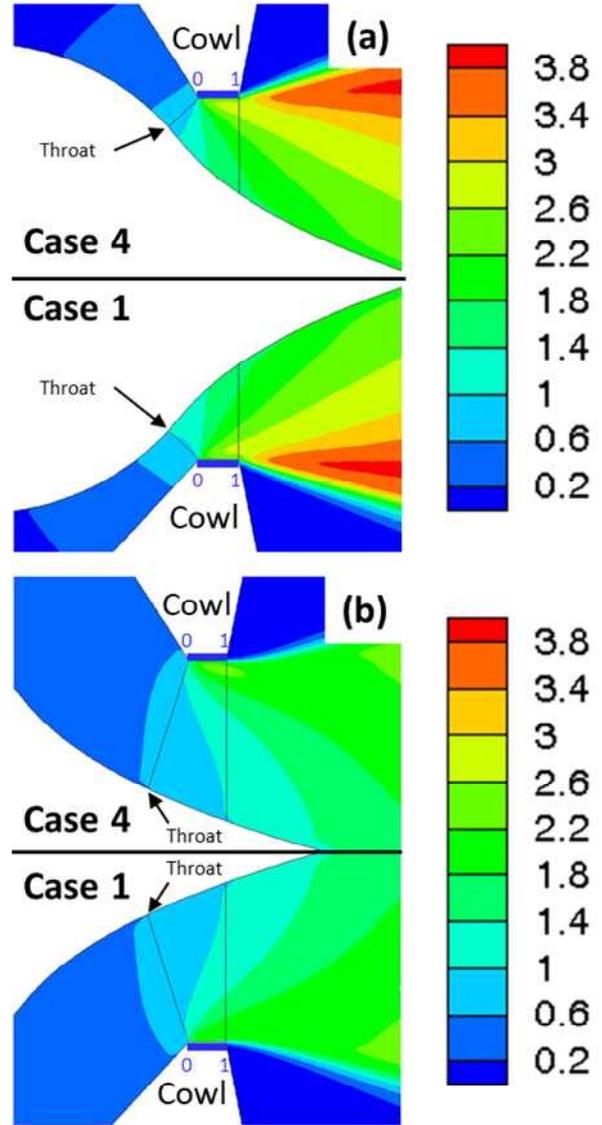


Fig. 11 Mach Number Contour according to Cowl Angle; (a) Close; (b) Open

목면적으로 출구 기준으로 평행하게 팽창시키는 각도보다 훨씬 더 높은 상태이다. 따라서 Fig. 10과 같이 두 case 경우 모두 노즐 출구에서 역압력 구배가 걸려 있고, Fig. 11에서도 두 case 모두 마하 선(M=1)이 기울어져 있다.

4.4 덮개 출구 길이

마지막으로 덮개 출구 길이를 증가시킨 case 5의 경우 close 조건에서는 추력이 증가하고, open 조건에서는 감소하였다. 하지만 변화율의 절댓값 자체가 작아 수치적인 오류를 고려한다면 의미 있는 설계인자가

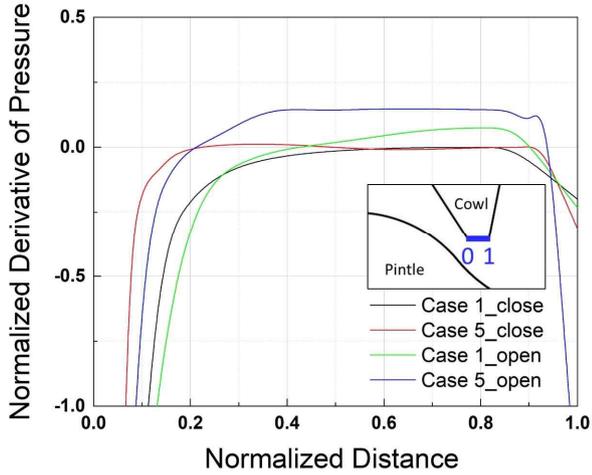


Fig. 12 Static Pressure Gradient along the Cowl Exit according to the Cowl Exit Length

아니었음을 확인할 수 있다.

Eq. 2로 추력 생성을 구분하여 볼 때, 덮개 출구가 2배 긴 case 5는 배압과 구분되어 보다 팽창할 기회를 얻기 때문에 유속 증가로 인한 추력 생성량은 증가하지만 그만큼 압력으로 생성되는 추력 생성량은 줄어들기 때문이다.

다만 덮개 각도는 변하지 않았기 때문에 case 5의 open 조건에서도 Fig. 12와 같이 덮개 출구의 역압력 구배가 확연히 나타난다. case 5의 덮개 길이가 case 1의 길이의 2배임을 고려하면 실제 동일한 위치에서 역압력 구배가 시작됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 13과 같이 close 조건과 open 조건 모두 덮개 출구 길이 변화로 인한 유동 구조는 유사하였다.

따라서 추력 성능에 큰 영향을 주지 않는 덮개 출구의 길이는 내열 설계 관점에서 최적화시키는 게 바람직한 것으로 판단된다. 다만 구동장치의 존재로 인하여 수축 각도가 커지거나, open 조건에서와 같이 필연적으로 수축 각도와 기하학적 노즐목의 각도 차이가 발생하는 경우에는 역압력 구배가 시작하기 전까지만 덮개 길이를 설계하는 것이 추력 증대를 가져올 것이다.

5. 결 론

추력 조절을 위해 고체 추진기관에 내장된 핀틀의 형상을 에어로 스파이크로 설계하면, 노즐의 역할까지

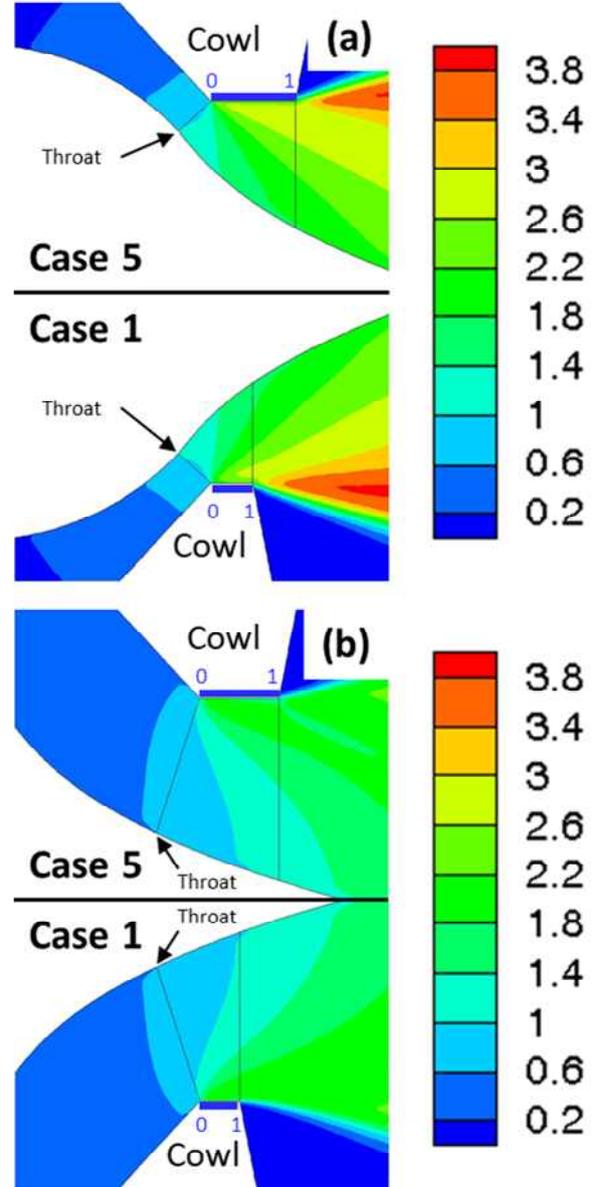


Fig. 13 Mach Number Contour according to Cowl Angle; (a) Close; (b) Open

수행할 수 있다. 사전 연구로 공압시험용 에어로 스파이크 핀틀 노즐을 설계하였지만, 개선의 필요성을 확인하였다.

이에 검증된 수치해석 기법을 활용하여 에어로 스파이크 핀틀 노즐의 설계인자 4개를 선택하여, 총 5가지 case에 대하여 close, open 조건에서의 추력을 비교하였다. 해석 결과 핀틀 헤드 반경은 추력에 큰 영향을 주지 못했다. 또한 덮개 출구 길이 또한 큰 영향을 주지 않았다.

결과적으로 덮개의 수축 각도를 해당 노즐목의 회전

각에 맞추고, 탈설계 조건에서도 최대한 팽창을 하도록 이중 형상으로 설계된 case 2의 경우가 기준이 되는 case 1에 비해 약 1.2%의 추력 증대를, 가장 약조건인 case 4에 비해 약 3.4%의 추력 증대를 가져옴이 확인되었다.

특히나 순항 모드에 해당하는 open 조건의 상태가 작동시간에서 높은 비율을 차지할수록 close 조건의 약간의 추력 감소는 충분히 감수할 수 있기에 이중 핀틀 형상 설계가 바람직하다.

References

- [1] J. Heo, K. Jeong, H. Sung, "Numerical Study of the Dynamic Characteristics of Pintle Nozzles for Variable Thrust," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 31, no. 1, pp. 230-237, Jan. 2015.
- [2] H. Sung, K. Jeong, J. Heo, "Performance characteristics of a pintle nozzle using the conformal sliding mesh technique," *Aerospace Science and Technology*, vol. 16, pp. 85-94, Feb. 2016.
- [3] G. Lee and H. Sung, "Three-dimensional Effects of an Axi-symmetric Pintle Nozzle," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 22, no. 6, pp. 47-55, Dec. 2018.
- [4] S. S. Park, Y. Moon, J. S. Kawk, "Numerical Analysis and 2-D Experiment of Heat Transfer Coefficient on the Pintle of a Controllable Thruster Nozzle," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 24-28, Dec. 2012.
- [5] J. Kim, S. Oh, J. Heo, D. Lee, "Analysis of the Flow Characteristics of Plug Nozzle for Cold Air Test with Pintle Shape and Operating Pressure," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, vol. 23, no. 3, pp. 28-34, June 2018.
- [6] J. Kim, "Analysis of the Characteristics of an Aerospike Pintle nozzle in terms of Stroke and Operating Pressure," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 14, no. 4, pp. 1-9, Mar. 2020.
- [7] S. B. Verma, "Performance Characteristics of an Annular Conical Aerospike Nozzle with Freestream Effect," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 25, no. 3, pp. 783-791, May 2009.
- [8] P. P. Nair, A. Suryan, H. D. Kim, "Study of Conical Aerospike Nozzles with Base-Bleed and Freestream Effects," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 56, no. 4, pp. 990-1005, July 2019.