

# 절삭 노즐 적용 추진기관의 추력 손실

이정섭\* · 박재범\* · 이상연\*

## Thrust Loss of Propulsion System with Scarfed Nozzle

Jeongsub Lee\* · Jaebum Park\* · Sangyon Lee\*

### ABSTRACT

The nozzle exit shape is scarfed according to the external shape of missile when the nozzle axis should be canted from missile axis due to missile system application. There is inevitable thrust loss for the scarfed nozzle comparing to non-scarfed nozzle. The numerical analysis is necessary to calculate the thrust loss in design process, and ground tests of rocket motor were performed to verify the calculation results. From the comparison of non-scarfed nozzle and scarfed nozzle experiment results, the thrust loss from calculation was about 16.6% and that from experiments was about 15.0%.

### 초 록

무기체계 운용 방식으로 인해 추진기관의 노즐이 축방향과 일정한 각도를 갖게 될 경우 노즐 출구 형상이 전체 외형의 형상에 부합되도록 설계하기 위해서 절삭을 하게 되는 경우가 발생하게 된다. 이러한 절삭 노즐의 경우 비절삭 노즐에 비해 필연적으로 추력 손실이 발생하게 된다. 설계 단계에서 이러한 추력 손실을 모사하기 위해서는 유동해석을 통한 계산이 필요하며, 해석을 통해 계산한 추력 손실을 검증하기 위해 연소시험을 수행하였다. 절삭 노즐과 비절삭 노즐을 비교시험한 결과 유동해석을 통해 계산한 추력 손실은 약 16.6%이며 시험에서 도출된 추력 손실은 약 15.0%로 나타남을 확인하였다.

Key Words: Scarfed Nozzle(절삭 노즐), Thrust Loss(추력 손실), Motor(추진기관)

### 1. 서 론

일반적인 추진기관은 추진기관과 동축으로 노즐이 장착되어 추력을 발생하게 된다. 노즐이 추진기관과 경사를 갖게 되면 그 각도에 따라 추력의 손실이 발생하기 때문에 노즐 축과 추진기

관 축을 일치시켜야 한다. 그러나 무기 체계의 운용 및 사용 목적에 따라 노즐축과 추진기관 축이 일정 각도를 유지해야 하는 경우가 발생하게 된다. 일반적으로 소형 고체 모터 추진기관을 사용하는 무기 체계에서 이와 같은 경사형 노즐이 적용되는 것을 볼 수 있다. 라파엘 사의 SPIKE 무기 체계를 보면 노즐 출구가 미사일의 옆면으로 향하도록 배치되어 있으며, 양 쪽에 두

\* 국방과학연구소 4기술연구본부

† 교신저자, E-mail: windmeely@add.re.kr

군대의 노즐을 배치하여 반경방향의 힘은 상쇄되도록 설계하였다. 경사형 노즐을 적용할 경우 노즐 출구의 형상은 대개 무기 체계의 외형 형상을 따라서 설계되는 경우가 일반적이다. 외형과 상관없이 노즐 출구 면을 노즐 축에 수직하게 설계하게 될 경우 무기 체계와 노즐 배출 화염의 간섭 등을 고려해야하며, 공력 저항이 증가할 수 있기 때문이다. 따라서 노즐 출구 면을 무기 체계 외형에 맞추어 절삭하게 되며, 이 경우 노즐 출구 면이 경사지게 되므로 이에 따른 추력 손실이 발생하게 된다.

절삭 노즐이 적용된 추진기관을 설계하기 위해서는 절삭 노즐에서 발생하는 추력 손실을 예측할 수 있어야 한다. 이를 위해 절삭 노즐과 비절삭 노즐을 적용한 추진기관의 연소시험을 통해 절삭 노즐의 추력 손실율을 시험적으로 획득하였다. 또한 절삭 노즐 손실을 예측하는 방법으로 기존의 내탄도 해석 결과에 유동해석 결과를 보정하는 방식을 사용하여 시험값과 비교하였다.

## 2. 절삭 노즐 추력 손실 계산

### 2.1 절삭 노즐에서 발생하는 추력 손실

절삭 노즐을 적용하는 경우 비절삭 노즐대비 추가적으로 발생하는 추력 손실을 편의상 주추력 손실과 절삭 노즐 추력 손실로 구분하여 접근할 수 있다. 절삭 노즐부는 초음속 영역이기 때문에 벽면이 존재하는 부위는 벽면을 따라 팽창하여 압력이 감소하게 된다. 따라서 절삭 노즐부에서 박리가 발생하지 않도록 하기 위해서 절삭 노즐 출구 최대 직경에서 박리가 발생하지 않도록 설계해야 한다. 따라서 절삭 노즐 부 시작점의 노즐 직경이 비절삭 노즐대비 작아질 수밖에 없다. 이는 곧 주추력의 감소로 이어지게 되는 주추력 손실이 발생하게 된다. 이러한 주추력 손실은 절삭 노즐 부에 노즐 팽창각이 존재하는 경우에 고려해야 하며, 본 시험에서는 절삭 노즐 부 직경이 일정한 형상이므로 비절삭 노즐과 절삭 노즐의 주추력 계산은 동일하기 때문에 주추력 손실을 고려하지 않는다.

절삭 노즐 추력 손실은 절삭 노즐 부 벽면이 노즐 축에 대해 비대칭 형상을 갖기 때문에 발생한다. 절삭 노

즐 부 벽면 내외부의 압력차에 의해서 힘이 발생하게 되고, 이 힘은 절삭 노즐 부 벽면의 각도에 의해 노즐 축 방향 힘과 노즐 반경 방향 힘으로 나뉘게 된다. 이를 다시 경사각도로 보정하여 추진기관 축 방향 힘을 보정하게 된다. 일반적으로 벽면에 작용하는 힘은 추진기관을 진행방향에 반대방향으로 미는 힘이 존재하므로 이 힘이 곧 절삭 노즐 추력 손실이 된다.

### 2.2 절삭 노즐 추진기관 추력 예측

절삭 노즐과 비절삭 노즐의 추력을 계산하기 위해서 Javed 등은 유동해석 결과로부터 노즐 출구면을 통해 배출되는 가스의 모멘텀과 압력으로부터 추력을 계산하였다[1]. 그러나 이러한 방법은 기본 설계 단계에서 노즐 형상이 수정될 때마다 유동해석을 수행해야하기 때문에 시간 소요가 커질 수밖에 없다.

본 논문에서는 절삭 노즐이 적용된 추진기관의 성능 설계를 위해서 추력을 예측하는 방법은 내탄도 성능 해석에 유동해석 결과를 보정하는 방식이다. Fig. 1에서 절삭 노즐부를 제외한 기본 노즐 형상에 대해서 내탄도 성능 해석을 통해 추력을 계산하고 이를 주추력이라 명한다. 이후 성능 해석 결과를 적용하여 전체 노즐 내부 유동 해석을 수행한 후 절삭 노즐 부의 벽면에 작용하는 힘으로부터 절삭 노즐 추력 손실을 계산한다. 이 두 값으로부터 주추력 대비 절삭 노즐 추력 손실율을 정하고, 추력 손실율로 주추력을 보정하여준다. 이러한 방법은 초기 설계 단계에서 노즐 형상이 변경되는 경우 매번 유동해석을 수행하지 않고도 추력 손실율을 기반으로 기본 설계를 수행할 수 있기 때문에 초기 설계 단계에서 유용하게 사용할 수 있다.

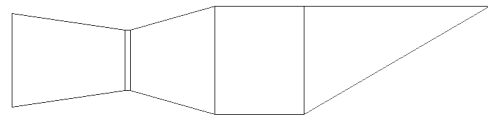


Fig. 1 Scarfed nozzle configuration

### 2.3 유동해석을 통한 절삭 노즐 추력 손실 계산

주추력 손실은 내탄도 성능 해석을 통해서 계산하며, 절삭 노즐 추력 손실은 내탄도 성능 해석으로부터 노즐 입구 조건을 정한 뒤 유동 해석을 통해 절삭 노즐 부 벽면에 작용하는 힘을 계산하여 구할 수 있다.

주추력 계산은 4차 Runge-kutta 방법을 적용하여 내탄도 해석을 수행하였으며, 시험 조건과 동일한 추진제 연소속도, 물성치, 노즐 형상 정보를 사용하여 계산하였다.

절삭 노즐 추력 손실은 유동해석을 통해서 압력에 의한 힘을 계산해 도출하였다. 내부 압력 분포를 계산하는 것이 유동해석의 주목적이었으며, Fluent 프로그램을 사용하여 k-ε 난류모델, standard wall function 조건을 적용하여 계산하였다. 노즐 입구 조건은 내탄도 설계 결과로부터 획득한 평균압력, 화염온도, 비열비 등을 적용하였다. Fig. 2와 3은 유동해석 결과로서 노즐 내부의 압력 및 온도 분포를 보여주고 있다.

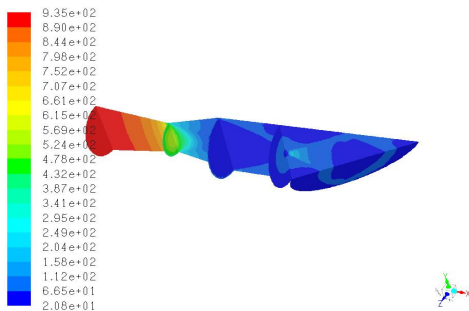


Fig. 2 Pressure results of numerical analysis of scarfed nozzle

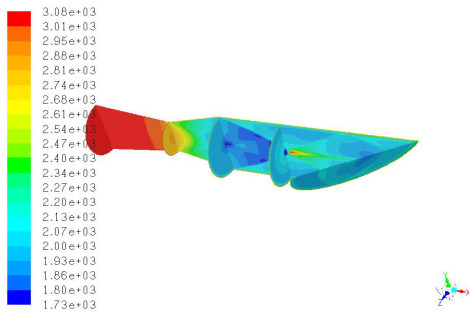


Fig. 3 Temperature results of numerical analysis of scarfed nozzle

계산 결과 절삭 노즐 부 벽면에 작용하는 노즐 축 방향 힘은 노즐 반경 방향 힘의 약 1.6% 수준으로 미미한 것으로 나타났으며, 이는 점성에 의한 값으로서 현재 계산에서는 벽면 조건을 정확하게 모사하지 않고 있기 때문에 무시하도록 하고 노즐 반경 방향으로 작용하는 힘만을 고려하도록 한다. 절삭 노즐은 기본적으로 경사를 갖고 있기 때문에 경사각도를 고려하면 추진기관 축방향 힘이 추진기관 반경 방향 힘의 약 60% 수준으로 나타나고 있으며, 반경 방향의 힘은 좌우 대칭 노즐에 의해 상쇄되므로 축방향 힘만을 추력 손실로 고려해야 한다. 추력 손실은 비절삭 노즐 추력, 즉 주추력 대비 약 16.6% 수준으로 나타나고 있다.

### 3. 절삭 노즐 추진기관 연소 시험

#### 3.1 연소시험 결과 분석

비절삭 노즐과 절삭 노즐을 적용하여 각각 연소시험을 수행하였다. 시험 결과 Fig. 5와 같이 두 경우 모두 유사한 연소 압력을 형성하였으나 Fig. 6과 같이 추력에서 차이를 보이고 있다. 절삭 노즐은 노즐 목 하류에 존재하기 때문에 노즐 목 상류에는 영향을 미치지 않기 때문에 압력은 유사하게 나타나는 것이 물리적으로 타당하다. 시험에서 발생하는 압력 차이는 무시할 수 있는 수준이며 모터별 노즐 목 직경과 추진제 질량 및 충전 상태의 미세한 차이 등에 의해 약간의 차이가 발생할 수 있다. 본 시험에서는 절삭 노즐의 노즐 목 직경이 비절삭 노즐의 목 직경 대비 약 0.3% 작기 때문에 압력이 약간 높게 나타난 것으로 판단된다.

시험 결과 비절삭 노즐의 평균 추력과 절삭 노즐의 평균 추력으로부터 도출한 추력 손실율은 약 15.0%로 나타나고 있다. 유동해석을 통해 계산한 16.5%와 큰 차이가 없다고 판단할 수 있으며, 이를 통해 절삭 노즐 추력 손실 계산 방법을 통해 절삭 노즐 추력 설계를 수행하는데 큰 문제가 없음을 확인하였다.

#### 4. 결론

절삭 노즐이 적용된 추진기관에서 발생하는 추력 손실을 예측하기 위해서 내탄도 해석 결과에 유동해석 결과를 보정하여 손실율을 계산해 주추력에 보정하는 방법과 실제 연소시험 결과를 비교하여 큰 오차가 없음을 확인하였으며, 초기 개발 단계에서 기본 설계 방법으로 사용하는 데 큰 무리가 없다고 판단하였다.

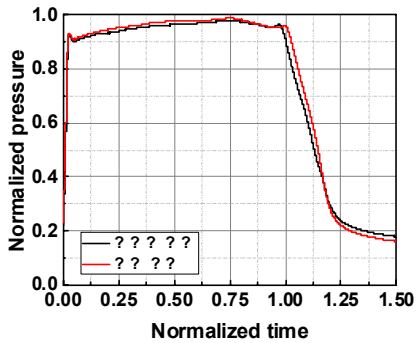


Fig. 4 Ground test normalized pressure results of non-scarfed nozzle and scarfed nozzle

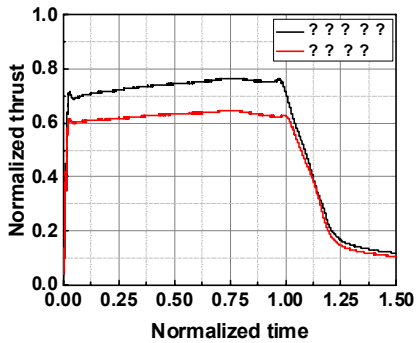


Fig. 5 Ground test normalized thrust results of non-scarfed nozzle and scarfed nozzle

#### 참고문헌

1. Javed, A. and Chakraborty D., "Numerical Simulations of Canted Nozzle and Scarfed Nozzle Flow Fields," Journal of the Institution Engineers(India): Series C, DOI 10.1007/s40032-016-0305-2, 2016.