

## 소형 추진기의 성능 개선을 위한 액체 추진제 주입기의 전산유체해석

이 세 민,<sup>1</sup> 박 수 형,<sup>\*2</sup> 김 성 균,<sup>3</sup> 변 도 영,<sup>2</sup> 유 명 종<sup>4</sup>

### A CFD ANALYSIS OF LIQUID PROPELLANT INJECTOR FOR PERFORMANCE ENHANCEMENT OF SMALL THRUSTER

Semin Lee,<sup>1</sup> Soo Hyung Park,<sup>\*2</sup> Sung Kyun Kim,<sup>3</sup> Doyoung Byun<sup>2</sup> and Myoung Jong Yu<sup>4</sup>

*CFD analysis of the fuel injection pattern and the flow field surrounding the liquid propellant injector of a small thruster is performed. A good agreement is shown with PIV test data for the initial configuration. Analysis on various injector shapes is performed to observe the effect of injector shape on the trajectories of liquid droplet. A various shapes of injector is investigated to enhance spray pattern of the small injector.*

**Key Words :** 단일 추진제 추진기(mono-propellant thruster), 주입기(injector), 분사(spray), 액적(droplet)

#### 1. 서 론

단일추진제 추진기(mono-propellant thruster) 시스템은 1960년대 처음으로 응용된 이래 지난 40년 동안 우주추진기관의 진형으로 가장 광범위하게 이용되고 있다. 이 시스템은 단일 추진제 추력기, 추진제를 저장하기 위한 탱크와 배관, 압력 조절기 및 각종 밸브들로 구성된다. 단일 추진제 추력기는 추진제가 촉매대로 분사되고, 열 분해된 고온의 기체가 노즐을 통해 배출되면서 추력을 발생하게 된다[1].

추진제와 촉매대를 이용한 반응 시험이 수행되어져 왔고 주입기를 통해 분사되는 추진제의 거동에 대한 연구가 수행되어져 왔다[2]. 추진제 거동의 주입기 형상에 대한 연관성을 파악하고 이와 관련된 주입기 형상의 설계 변수를 최적화함으로써 소형 액체 추진기의 성능을 극대화 시킬 수 있다.

본 연구에서는 상용 CFD코드를 이용하여 추진제 탱크로부터 추진제가 분사되는 과정에서의 압력손실을 예측하기 위하여 3차원 비압축성 정상상태 해석을 수행하였고 주입기의 형

상에 따른 추진제의 분사패턴을 파악하기 위하여 주입기의 홀의 개수, 주입기와 중심축과의 각도, Cone Angle에 따른 분사 액적의 궤적과 주변 유동 장에 대한 해석을 수행하였다. 국부적으로 급격한 수축영역이 존재하는 주입관의 경우 주어진 유동조건을 만족하도록 타당한 모델링 과정을 통해 수축부의 면적을 결정하였다. 이는 주어진 설계도면 형상으로 해석 시 유동의 입구조건을 만족 할 수 없었기 때문이다. 연료 탱크로부터 유입된 연료와 촉매대의 충돌현상이 전체 시스템에 주요한 과정이기는 하지만 주입구 형상에 따른 분사패턴을 파악 하는 데는 고려 대상이 아니므로 충돌과정은 배제하였다. Fig. 1은 해석모델의 전체적인 형상을 나타낸다. 점선이 위치하는 곳이 수축부가 존재하는 영역이다.

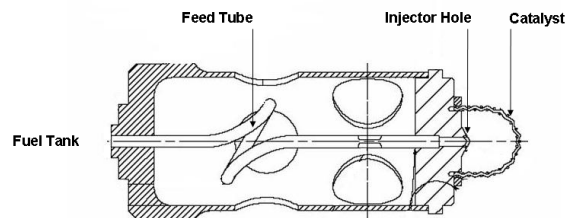


Fig. 1 Schematic of model thruster

1 학생회원, 건국대학교 대학원 항공우주정보시스템공학과

2 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

3 정회원, 건국대학교 기계공학과

4 정회원, 한국항공우주연구원

\* Corresponding author, E-mail: pish@konkuk.ac.kr



## 2. 수치적 기법

### 2.1 관 유동 해석의 수치기법

본 연구에서는 SIMPLE 알고리즘을 사용한 상용코드인 CFD-ACE 를 이용하여 계산을 수행하였다. 3차원 정상 난류 유동장 해석을 위해 난류 모델은 wall function을 적용한  $k-\epsilon$  2방정식 모델을 사용하였으며 난류강도는 1%로 설정하였다. 공간 정확도는 2차 정확도의 upwind 방법을 사용하였다. 속도와 난류 방정식은 예조건화된 Conjugate Gradient Squared 방법으로 반복 계산하여 정상 해를 구하고 압력장은 AMG(Algebraic Multi Grid)방법을 적용하였다. 수치적인 방법은 참고문헌[3]에 자세히 설명되어 있다.

#### 2.1.1 유동조건 및 경계조건

연료로 사용되는 하이드라진(hydrazine)은 물(water)과 물리적 특성이 유사하여 물로 간주하여 계산하였다. 입구를 통해 초당 2g의 물이 유입되고 구부러진 관과 급격한 수축·확대(sudden contraction-expansion)부를 지나 8개의 주입구를 갖는 주입기를 통해 빠져나간다. 입구에서의 유동조건은 Table 1에 정리하였다. 경계조건으로는 주어진 질량유량을 입구 단면적에 수직한 방향으로 설정하였고 출구조건으로 압력을 고정하였다.

Table 1 Inlet flow condition

Conditions	Value
working fluid	water
mass flow rate	2 g/s
static pressure	350 psi
temperature	20 °C
density	998 kg/m <sup>3</sup>
viscosity	1.003E-3 kg/m · s
average velocity	14 m/s
Reynolds No.	7832

#### 2.1.2 격자구성

3차원 전체형상에 대하여 정렬격자(structured grid)를 구성하였다. 격자수는 node point를 기준으로 약 100만개이다. 급격한 수축·확대영역에서는 면적의 변화로 인한 급격한 유속의 변화를 동반하고 큰 압력손실이 발생한다[4]. 격자수에 따른 영향을 고려하여 적절한 격자수를 결정하였다.

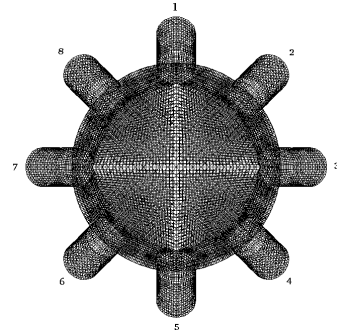


Fig. 2 Computational Grid

### 2.2 분사 패턴 해석의 수치기법

분사된 액적과 공기와의 상대적인 속도 차에 의하여 액적은 분열된다. 이러한 현상은 다양한 인자들에 의해 영향을 받기 때문에 이 과정을 명확히 해석하기 쉽지 않다. 분사된 물은 초기 액주의 분열과정인 1차 분열에 이어 2차 분열 과정을 통해 더욱 세분화되며 TAB(Taylor Analogy Breakup)모델은 2차 분열 과정을 모사한다. TAB모델은 액적의 변형을 스프링-질량계의 감쇠강제조화운동으로 모사하여 액적의 표면장력을 스프링의 복원력으로, 액적에 작용하는 공기항력은 질량에 작용하는 외력으로 간주한다[5]. Injector type은 Plain Jet Atomizer이다[6]. 제트 안정성 이론을 이용한 Blob Model을 사용하여 액적의 분열을 모사한다[3]. 해석에 사용한 spray 모델 및 Injector 모델은 Table 2와 같다[3].

Table 2 flow condition

Conditions	Value
working fluid	water
surrounding fluid	air
temperature	20 °C
mass flow rate	0.25 g/s (each hole)
injector type	plain jet atomizer
plain jet type	Blob model
secondary breakup	TAB model

#### 2.2.1 유동조건 및 경계조건

축에 대하여 30°의 각도를 갖는 직경이 150 micron의 주입기 홀을 통하여 초당 0.25g의 물이 일정한 정압을 갖는 공기 중으로 분사된다.

경계조건으로는 각 주입기 홀에 수직한 방향으로 질량유량을 고정시켰으며 출구조건으로 압력을 고정하였다. 압력은 1기압으로 주었다.

2.2.2 격자구성

입자의 궤적(trajecory)을 구하기 위하여 CFD-ACE에서는 Euler grid에서 계산된 유동 결과를 Lagrangian grid에서 적분을 수행한다[3]. 따라서 정확한 계산을 위해서는 입자크기가 grid의 크기보다 작아야한다. 계산영역은 원통형관 으로 구성 하였으며 실제 chamber 크기보다 크게 설정하였다 격자수는 node point를 기준으로 약 30만개이다.

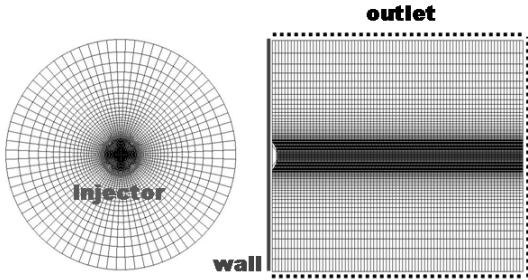


Fig. 3 Computational grid

3. 해석결과

3.1 주입관(Feed Tube)내의 유동 해석

주입관과 주입기가 결합된 전체형상에 대한 해석을 수행하였다. 설계도면의 형상을 가지고 계산을 수행 하였을 시 주어진 두 가지 입구조건을 동시에 만족할 수 없었다 날카로운 모서리를 갖는 수축 부분을 대신하여 Fig. 4와 같이 원형관의 수축 부를 갖는 모델을 구성하였다. 원래의 형상에서 Feed Tube의 직경 D와 수축부의 길이를 동일하게 유지한 상태에서 수축부의 직경 d의 크기를 조정하며 반복 계산하여 두 가지 입구조건을 동시에 만족하는 면적을 구할 수 있었다. 수정된 면적을 갖는 원형 관으로 대체하여 계산하였을 시 전압손실은 약 37%임을 확인하였다. 이때 수축부의 직경 d는 0.24mm 이다.

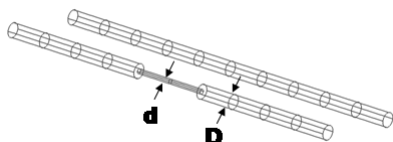


Fig. 4 Model of sudden contraction & expansion

Table 3은 동일 출구 압력에서의 수축부 직경에 따른 입구 압력을 나타낸다. 수축부 직경이 작아질수록 입구 압력은 증

가한다. 수축부의 면적이 작아질수록 동일한 유량을 공급하기 위해서 연료탱크의 압력이 커져야 함을 의미하며 주입관 설계 시 중요하게 고려되어야 한다고 판단된다.

Table 3 Case

	$D(mm)$	$d(mm)$	$P_{inlet}(Pa)$
A	0.41	0.41	1277364
B	0.41	0.30	1534982
C	0.41	0.26	1959893
D	0.41	0.24	2380894
E	0.41	0.20	4219374

3.2 주입기(Injector)의 분사패턴 해석

3.2.1 기존 형상 해석

기존 형상의 주입기를 이용하여 분사패턴을 해석하였다. 기존 설계도면의 주입기의 구체적인 형상은 Table 4와 같다.

Table 4 Specification of injector

Conditions	Value
diameter	152.4micron
number of hole	8 EA
spray angle	30 °
cone angle	0 °

초기 분사속도가 약13.8m/s이고 초기 분사된 액적의 평균 직경은 injector 직경과 동일한 152.4micron이다. 분사된 액적의 크기는 계산영역 내에서 초기 분사 시의 크기와 거의 동일하게 유지되었다. 이는 주입기 형상이 직경이 일정한 원형 관으로 cone angle이 0 ° 이기 때문이다. 이러한 형상은 분사된 액체 연료가 주입기 방향으로 퍼짐이 없이 분사되도록 하여 초기 분사 속도를 유지시켜 가장 강한 충격력을 얻을 수 있어 강한 타력이 요구되는 곳에 사용된다[7]. 기존 설계도면의 주

Table 5 Case of computation

	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$n$	$d(micron)$
case 1	15	0	8	152.4
case 2	45	0	8	152.4
case 3	30	10	8	152.4
case 4	30	30	8	152.4
case 5	30	0	4	215.5
case 6	30	0	12	124.4

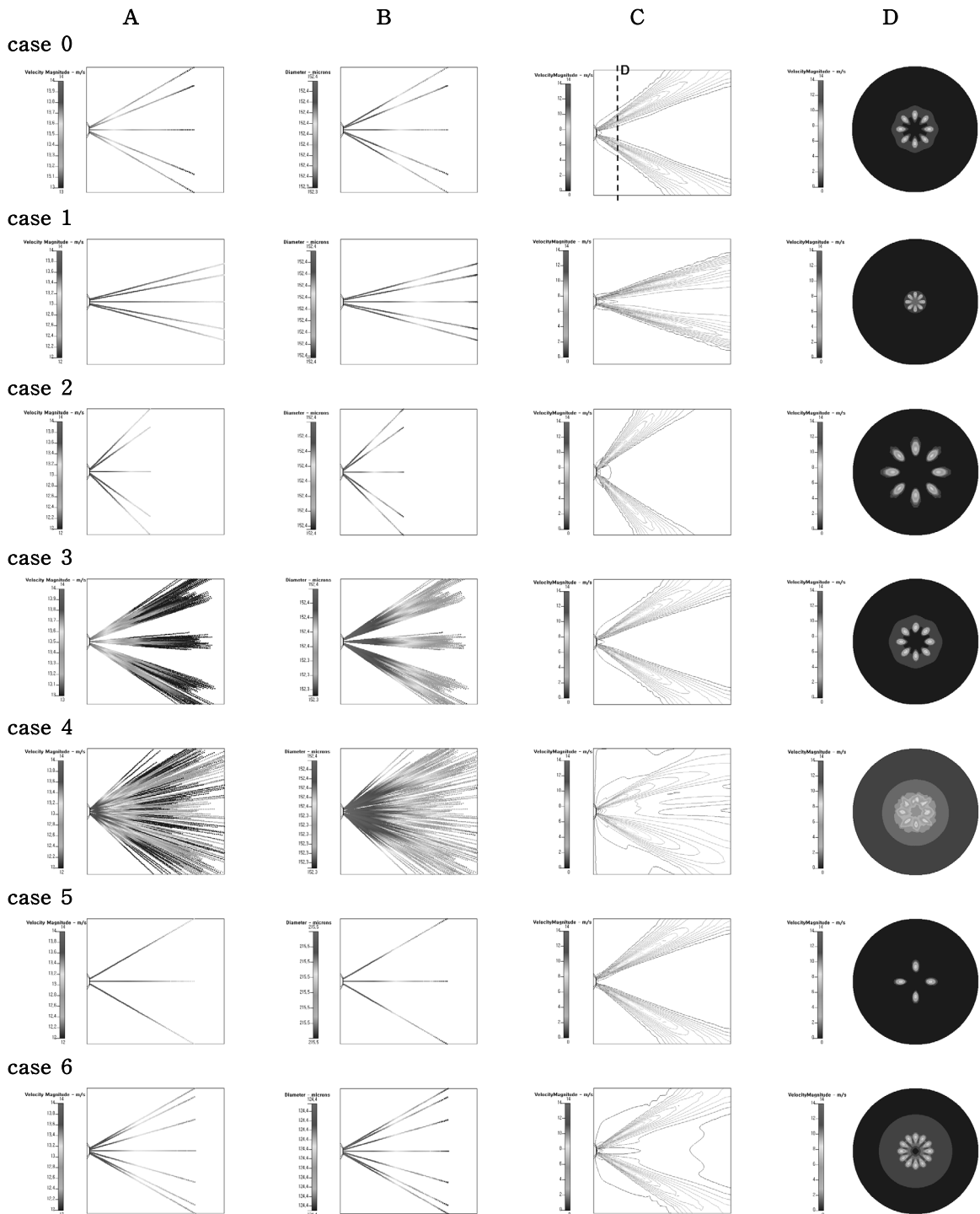


Fig. 5 Spray pattern



입기는 분사된 추진제가 촉매와 충돌하여 분열되고 분열된 추진제가 열 분해되어 고온의 가스를 생성시켜 추력을 발생시킨다는 점에서 촉매대와 충돌한 연료가 강한 충격력을 갖도록 설계되어진 것으로 판단된다.

### 3.2.2 형상변수에 따른 해석

기존 주입기형상에 대한 해석 후 분사패턴에 영향을 주는 주입기 형상 인자를 도출하고 연관성을 알아보기 위한 해석을 수행하였다. 관내의 유동현상과 독립적으로 수행하기 위하여 모든 경우에 대하여 주입기 출구에서의 속도를 동일하게 유지시켰다. 이는 출구 속도가 주입관 형상에 의하여 결정되었기 때문이다.

고려한 형상인자로는 주입기 홀의 개수( $n$ ), 분사각( $\alpha$ ), cone angle( $\beta$ )이고 모든 경우에 초기 분사속도를 동일하게 유지하도록 홀의 직경과 질량유량을 결정하였다. 형상 인자에 따른 경우와 각 경우에서의 주요 값은 Table 5에 나타내었다.

Fig. 5의 열 A는 분사된 입자의 속도를 나타내고 B는 액적의 직경, C는 유동장내의 속도분포를 나타내고 D는 실제 모델의 촉매대가 위치하는 지점의 축 단면에서의 속도분포를 나타낸다. case 0은 형상의 변화가 없는 기존 모델을 이용한 것이다. case 5,6의 경우 속도를 유지시키기 위해 직경을 변환하였다.

case 3과 case 4에서 cone angle이  $10^\circ$ 와  $30^\circ$ 일 때 초기 분사된 액적의 퍼짐이 발생하여 다른 모델에 비해 넓은 면적으로 분사됨을 확인하였다. 이는 cone angle이 중요한 형상인자임을 의미한다. 궤적에 따른 액적의 크기는 모든 계산에서 초기 분사시의 액적의 크기와 동일하게 유지되었으며 이는 분사 후 액적의 분열이 거의 일어나지 않았음을 의미한다. 촉매대와와의 충돌면이 위치한 단면(D)에서의 액적의 속도는 초기 분사시의 속도와 큰 차이를 보이지 않는다. 액적의 충돌속도와 촉매대와와의 접촉면적이 클수록 추력기의 성능이 향상된다는 점에서 넓은 면적을 갖는 cone angle이 존재하는 형상이 바람직한 형상임을 알 수 있다.

## 4. 결론 및 향후 계획

소형 추진기의 주입관의 유동해석과 주입기의 몇 가지 형

상에 따른 분사패턴을 확인하였다. 주입관에 존재하는 수축부분에 의한 압력손실이 전체 유동에 미치는 영향이 큼을 확인하였고 이는 주입관 설계 시 중요하게 고려되어야 하는 부분이라고 할 수 있다.

주입기 형상에 따른 분사패턴을 확인하여 분사 후 액적의 속도와 미립화정도를 파악하였다. 모든 계산에서 액적의 분열은 거의 일어나지 않았으며 분사시의 초기 속도가 유지됨을 확인하였다. 추력기의 성능 향상을 위해서 주입기의 cone angle이 중요한 설계변수로 고려되어야 함을 알 수 있었다.

향후 분사된 연료와 촉매대의 충돌 과정에 대한 모델링을 통해 연료의 미립화 과정을 알아보고 동일 모델을 이용한 PIV실험과 비교할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 “다목적실용위성 3호 개발사업”과제(세부과제 “소형 추력기의 성능 개선을 위한 액체 추진제 주입기 최적설계 및 추진제 거동 연구”)결과 중 일부이며 지원에 감사드립니다. CFD-ACE 사용을 지원해 주신 경원테크(주)에도 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 2002, 이성택, 이진봉, “인공위성 자세제어용 단일 하이드라진 추력기 개발 기술,” 2002년도 산학연 연합심포지엄 (한국항공우주학회 편).
- [2] 2007, 안성용, 권세진, “소형 액체 추력기 설계 및 성능평가,” 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, pp.1354-1357.
- [3] 2008, *CFD-ACE Manual VI*, www.esi-group.com.
- [4] 2004, White, F.M., *Fluid Mechanics 5/E*, McGraw-Hill, pp.328-335.
- [5] 1997, Tanner, F.X., "Liquid Jet Atomization and Droplet Breakup Modeling of Non-Evaporating Diesel Fuel Sprays," *Fuel Spray Studies SAE*, SP-1219.
- [6] 1996, 이상용, 액체의 미립화, 민음사, pp.133-220.
- [7] 1989, Lefebvre, A.H., *Atomization and Sprays*, Taylor & Francis, pp.238-308.