

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.4.341

소형 추력기의 성능 개선을 위한 액체 추진제 주입기 최적 설계 및 추진제 거동 연구

김기로*, 김수겸***, 변도영*, 이세민**, 정강수**, 박수형**, 김성균**, 유명중***

Study on Spray Phenomena and Optimal Design of Injector for Improving Small Thruster Performance

Kiro Kim*, Su-Kyum Kim***, Do-Young Byun*, Se-Min Lee**, Kang-Su Jung**, Soo-Hyung Park**,
Sung-Kyun Kim** and Myoung-Jong Yu***

ABSTRACT

This work studies the performance of an injector for a monopropellant thruster, comparing a conventional and new injector types. The conventional injector consists of 8 nozzles on a convex surface allowing the jet to be diverged. The new injector, we suggested, is an impinging type with nozzle holes on a concave surface. The fuel streams through the nozzle holes are collide at a point on an axial direction, which allow to atomize the liquid streams and to spray more uniformly along circular direction. The performance of the injectors is investigated by using computational fluid dynamics, particle image velocimetry and high speed camera visualization.

초 록

본 연구는 기존의 인젝터와 새로운 형태의 인젝터를 비교분석 함으로써 소형 추력기의 성능을 연구하였다. 기존의 인젝터는 볼록한 표면에 8개의 노즐로 구성되어 액체 추진제를 분사하는 형태로 제작되었다. 우리가 제안한 새로운 형태의 인젝터는 오목한 표면에 4, 5, 6, 8, 9개의 노즐로 구성된 충돌형 인젝터이다. 노즐의 구멍을 통해 분사되는 액체 추진제는 축 방향으로 한 점에서 부딪히게 설계되었으며, 이는 분사되는 액체 추진제의 입자를 더욱 세분화하여 사방으로 일정하게 분무할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 전산유체역학, 입자 유속계 및 고속 카메라를 이용하여 분무 가시화 및 인젝터의 성능을 연구 하였다.

Key Words : Monopropellant thruster(단일 추진제 추력기), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Particle Image Velocimetry(입자 유속계), Injector(주입기), Spray(분무)

1. 서 론

마이크로/나노 규모의 인공위성이 연구, 개발되면서 그 크기 및 부피 등은 갈수록 작아지는 반면 임무 수행을 위한 인공위성의 수명은 오랜 기간 동안 유지될 수 있도록 요구되고 있다. 그에 따라 단일 추진제 추력기(Monopropellant

† 2010년 11월 15일 접수 ~ 2011년 3월 31일 심사완료

* 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
교신저자, E-mail : dybyun@konkuk.ac.kr
서울시 광진구 화양동 1번지

** 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

*** 정회원, 한국항공우주연구원

Thruster)의 중요성이 강조되고 있다. 일반적으로 단일 추진제에서 액체 상태의 하이드라진은 챔버 안으로 주입되면서 연소기 내의 촉매 물질과 화학반응을 일으키게 된다. 이로 인해 발열성의 물질이 분해되며 고온/고압의 가스를 분출하여 추력을 발생한다.^[1] 대표적인 하이드라진(Hydrazine, N₂H₄)을 추진제로 이용한 단일 추진제 추력기는 거의 무한한 재 점화 능력과 높은 신뢰도로 인하여 우주 공간에서 다양한 임무를 수행하는 인공위성에 광범위하게 사용되고 있다. 그에 따른 하이드라진 분해 성능 시험 및 추력기 성능 해석에 대해 많은 연구가 진행 되었다.^[2-5]

단일 추진제 시스템의 장점은 비교적 덜 복잡하고 개발비가 상대적으로 저렴하며, 탱크, 부품, 배관 등이 일련의 세트에 요구되고, 시스템 저장성이 양호하다는 점 등을 들 수 있다. 따라서 가능한 한 복잡성을 최소화하는 반면 추력기 시스템의 성능을 최대화하는 연구가 선행되어야 한다.^[6]

본 연구에서는 단일 추진제의 인젝터 형상에 대한 연관성을 파악하는데 중점을 두고 이와 관련된 설계 변수를 최적화함으로써 소형 액체 추진제 추력기의 성능을 극대화하기 위해 수치적, 실험적으로 연구하였다.

II. 본 론

2.1 Injector 형상 및 개발

기존의 인젝터는 Fig. 1과 같은 개념도를 바탕으로 제작되었으며, 액체 추진제가 주입되는 노즐 부분이 약 30도의 각도로 분사되는 형태이다. 그 크기는 직경이 12mm, 높이는 4mm 이며, 액체 추진제가 분사되어 나오는 노즐의 직경은 150 μm, 노즐의 개수는 8개로 설계 제작되었다.

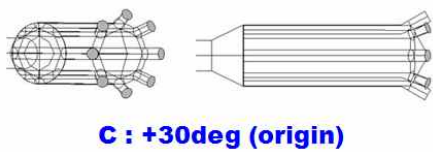


Fig. 1. schematic of the conventional injector

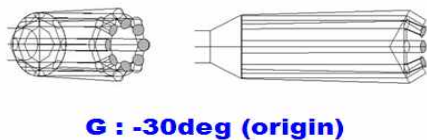


Fig. 2. schematic of the new designed injector

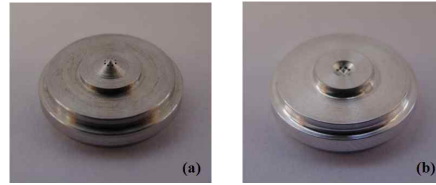


Fig. 3. conventional injector(a) and new designed injector(b)

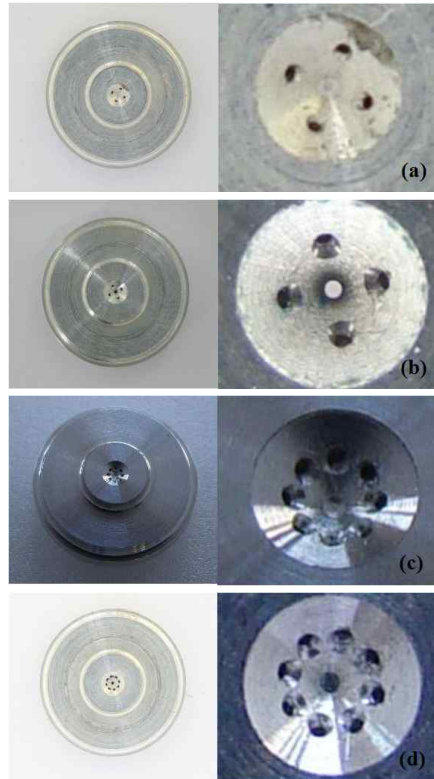


Fig. 4. The new designed injector (a) 4 holes, (b) 5 holes, (c) 8 holes, (d) 9 holes

새로이 제안하는 인젝터는 Fig. 2와 같이 제작되었다. 액체 추진제가 분사됨과 동시에 축 방향의 한 지점에서 충돌하는 형태로서, 본 논문에서는 충돌형 인젝터라 명명하겠다. 충돌형 인젝터는 기존의 인젝터와는 달리 분사된 액체 추진제를 더욱 더 미립화하여 더 넓은 각도로 분사시키기 위하여 설계되었다. Fig. 3은 기존의 인젝터와 충돌형 인젝터의 실제 제작된 모습의 사진이다.

새로 제안된 충돌형 인젝터의 경우, 직경 및 높이, 크기는 기존 인젝터와 동일하게 제작되었다. 노즐의 개수에 따른 영향을 살펴보기 위하여 4, 5, 8, 9개로 달리 제작되었다. Fig. 4는 각각의 노즐로 구성된 인젝터의 사진이다.

2.2 Injector 가시화를 위한 PIV적용

실험의 수행을 위하여 인공위성의 추진 장치에서 연료를 공급하는 것과 같은 조건의 압력으로 공급하는 시스템을 구성하였다. Fig. 5는 연료 공급 장치의 개념도와 제작된 시스템을 보여주고 있다.

본 실험은 위에서 언급된 두 가지의 인젝터를 이용하여 고압 연료 공급 장치 및 압력 계측 장치 등을 설계, 제작, 시험 수행하였다. 인가할 수 있는 압력의 범위는 0~23.816atm이다. 분무 특성을 연구하기 위하여 분무 가시화를 수행하였다. 실제 추력기에서 사용되는 하이드라진(N₂H₄)의 유독성 때문에 물성치가 비슷한 증류수(deionized water)를 사용하여 실험하였다.

Fig. 6은 PIV system의 기본 원리와 인젝터의 분무 가시화를 위한 고속 카메라가 설치된 것을 보여주고 있다.⁽⁵⁾

PIV를 이용한 속도장 계측기법의 기본원리는 시간간격 Δt 동안 움직인 추적 입자들의 변위 정보를 화상 입력장치에 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자변위를 계측하고 시간간격 Δt 로 나누어 줌으로써 속도벡터를 추출하는 것이다. 속도장 계측은 입자화상 (particle image) 취득, 속도벡터 추출, 추출한 속도장 결과를 나타내는 3단계 과정으로 이루어 진다.

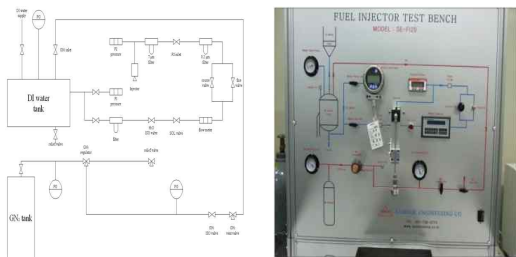


Fig. 5. The injector test bench for jetting test and flow chart

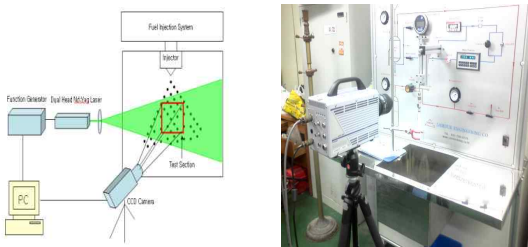


Fig. 6. Schematic of PIV and experimental setup for high speed camera

2.3 CFD를 이용한 분무 특성 분석

Fig. 7은 연료 주입관과 인젝터의 전체 형상을 보여주고 있다. CATIA V5 프로그램을 이용하여 해석에 필요한 해당 부분을 추출하였다.

본 해석은 CFD Ace 프로그램을 이용하여 수행되었으며, 해석 모델로는 TAB(Taylor Analogy Breakup) model을 적용하여 해석하였다.

연료 주입관에 연결된 탱크와 8개의 노즐을 갖는 인젝터의 출구 사이의 전압손실을 예측하는 것이 주요한 목표이며, 해석영역은 Fig. 7의 면으로 표시되는 부분에 해당한다.

Fig. 8은 구성된 격자의 특정 위치에서의 단면을 나타낸다. 단면 A와 단면 B의 구성방식이 다른 이유는 단면 A로 구성된 입구영역에서 불필요한 경계의 생성을 막기 위함이며, 단면 B의 경

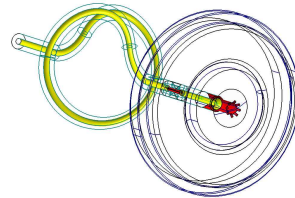


Fig. 7. Configuration of injector for CFD analysis

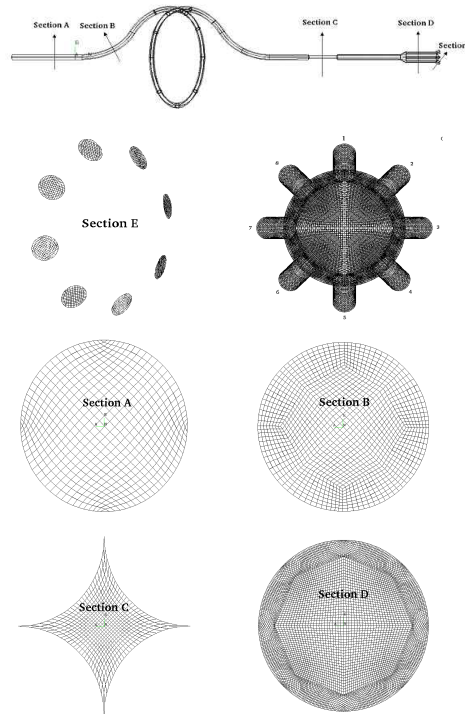


Fig. 8. Grid section

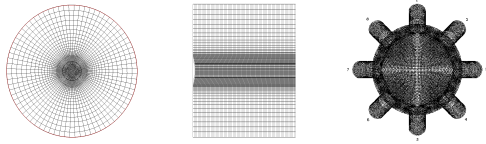


Fig. 9. Grid section for Spray analysis and injector grid with front view

Table 1. Condition of Fluid

| Properties of conditions | Given value |
|------------------------------|---------------------------|
| Mass flow rate | 2 g/s |
| Static pressure | 2413156.64 Pa |
| Temperature | 20 ℃ |
| Density(water) | 998 kg/m ³ |
| Viscosity(water) | 1.00e-3 kg/m ² |
| Average velocity at entrance | 14 m/s |
| Reynolds No.(entrance) | 7832 |

Table 2. Condition of Spray analysis and model

| | |
|---------------------|------------------------|
| Material | Water |
| Material (surround) | Air |
| Mass flow rate | 2 g/s(0.25g/øeachhole) |
| Temperature | 20 ℃ |
| Injector type | Plain jet atomizer |
| Plain jet type | Blob Model |
| Secondary breakup | TAB model |

우 5개의 블록으로 구성하여 수렴특성을 향상시켰다. 임의 경계를 구성하여 단면 A와 B를 연결하였다. 단면 C의 경우 주어진 형상을 4개의 변을 갖는 6개의 면으로 구성하였다. 단면 D와 단면 E의 결합은 계산영역을 각 인젝터의 노즐들이 단면에 부합하도록 쪼개어 구성하였다.

또한, 인젝터에서 분무하는 액적의 거동을 해석하였다. 해석에 사용한 격자는 Fig. 9와 같다. 격자는 정렬 격자계로 구성하였으며 격자점은 약 30만개 이다. Fig. 9는 스프레이 해석을 위한 격자 단면과 정면에서 바라본 인젝터 구성 격자를 보여주고 있다.

Table 1은 전체 유동의 입구 조건을 나타내며 Table 2는 분무 해석 조건 및 모델을 보여주고 있다.

2.4 CFD 해석 결과

Table 3과 Table 4는 인젝터 형상에 따른 연료 탱크와 노즐 사이의 전압손실에 대한 결과이다. 인젝터 형상에 따라 인젝터 출구의 방향각 존재

Table 3. Static pressure

| Deg | Inlet pressure (Pa) | Outlet pressure (Pa) | Mass flow rate (g/s) |
|---------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| +30 (model C) | 2380894 | 1.00E+05 | 2 |
| 0 | 2478331 | 1.00E+05 | 2 |
| -30 (model G) | 2549819 | 1.00E+05 | 2 |

Table 4.Total pressure

| Deg | Total Inlet pressure (Pa) | Total outlet pressure (Pa) | Difference (%) |
|---------------|---------------------------|----------------------------|----------------|
| +30 (model C) | 2500491 | 891047 | 35.63 |
| 0 | 2597931 | 820250 | 31.57 |
| -30 (model G) | 2669417 | 865317 | 32.42 |

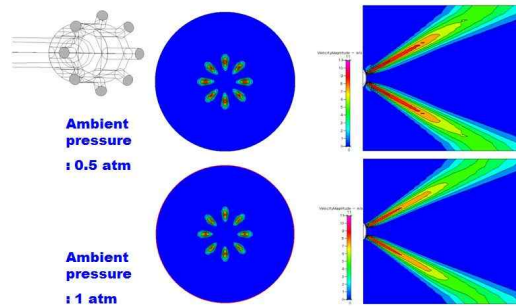


Fig. 10. Velocity distribution of the conventional injector at 0.5atm and 1atm

로 인해 추가적인 전압손실이 발생하는 것을 알 수 있는데, 충돌형 인젝터의 경우가 기존의 인젝터에 비해 탱크와 노즐 사이에서의 전압손실이 적다는 것을 알 수 있다. 따라서 충돌형 인젝터 형상의 전압손실이 적기 때문에 같은 압력과 유량의 조건에서는 더 효율적이라 할 수 있다.

기존의 인젝터 형상에 대한 분무 해석을 수행하였다. Fig. 10은 계산영역의 축 방향 단면과 횡방향단면에서의 분사 시 속도분포를 나타낸다. 주변압력(ambient pressure)이 0.5atm(상)일 때, 1atm(하)일 때의 속도 분포를 비교하였다. 주변압력이 상대적으로 낮을 때 초기 분사속도가 좀 더 유지되는 경향을 보였다.

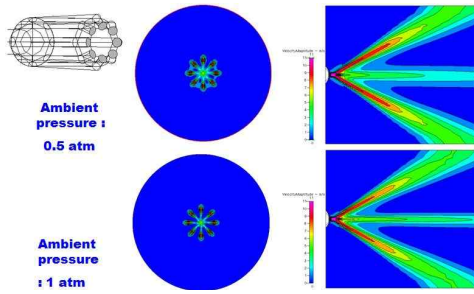


Fig. 11. Velocity distribution of the new designed injector at 0.5atm and 1atm

충돌형 인젝터의 분무 특성에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 11은 계산영역의 축 방향 단면과 횡방향단면에서의 분사 시 속도분포를 나타낸다. 앞서 수행한 것 과 같이 주변압력이 0.5atm과 1atm 일 때의 속도분포를 비교하였다. 기존 인젝터의 분무특성과 같이 주변압력이 상대적으로 낮을 때 초기 분사속도가 좀 더 유지되는 경향을 보였다.

인젝터에서 분사된 액체 유동의 충돌로 인하여 기존 인젝터와는 달리 축과 평행한 방향으로 유동장의 속도 변화가 존재함을 알 수 있었다. 횡 단면에서 나타나는 두 방향이 아닌 세 방향으로의 모멘텀의 전달이 일어난 것이다. 이는 연료가 더 넓은 면적으로 분사가 가능하다는 점에서 기존의 인젝터에 비하여 연료의 연소성능을 향상시킬 것으로 판단된다.

2.5 PIV 해석 결과

Fig. 12는 기존의 인젝터를 이용하여 500회 측정 결과의 평균값으로서 주입압력이 23.816atm, 유량이 236ml/min 일 때, 최대 속도가 60m/s인 결과를 보여주고 있다.

전체 유동장의 모습을 살펴보면, 방사형으로 퍼져 분사되는 물줄기 주변으로 상대적으로 작은 입자들이 느린 속도로 빠르게 움직이는 물줄기 주위에서 함께 퍼져나가고 있다. 하지만, 물줄기들의 중앙 부분에서는 상승하는 유동을 보여주고 있다. 상승한 물 입자들은 다시 노즐 근처에서 물줄기 분사와 함께 다시 아래쪽으로 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 기존의 인젝터를 이용하여 압력에 따른 분무 결과를 보여주고 있다.

충돌형 인젝터에 대해 압력에 따른 분무 가시화를 수행하였다. Fig. 14는 충돌형 인젝터의 노즐 개수에 따른 분무 결과이며, 주입압력이 23.816atm 일 때, 최대 분무 속도는 48m/s의 결과 값을 보여주고 있다.

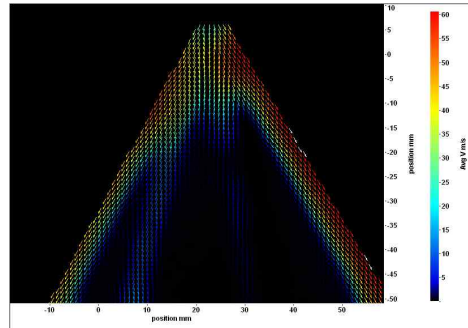


Fig. 12. The result of PIV system at injection pressure : 23.816atm (ensemble average: 500) ; The conventional injector

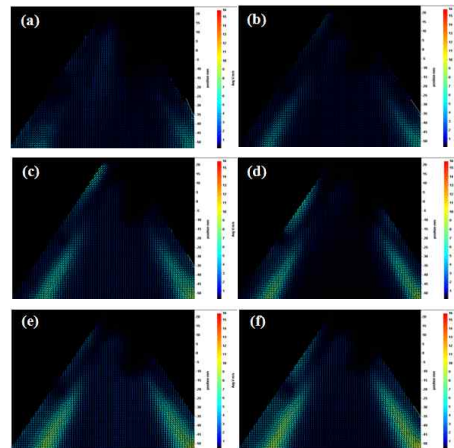


Fig. 13. The result of PIV system at injection pressure : (a) 3.4atm, (b) 6.8atm, (c) 10.2atm, (d) 13.6atm, (e) 17atm, (f) 20.4atm (ensemble average : 500) ; The conventional injector

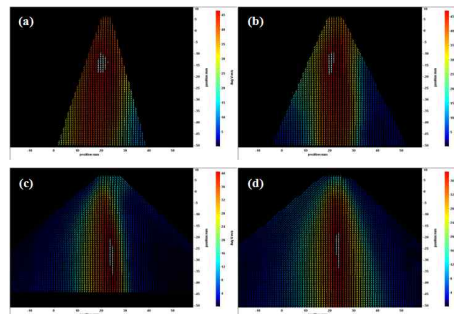


Fig. 14. The result of PIV system at injection pressure : 23.816atm (a) 4holes, (b) 5holes, (c) 8holes, (d) 9holes (ensemble average : 500) ; The new designed injector

2.6 고속 카메라 가시화 해석 결과

본 연구에서는 기존의 인젝터와 충돌형 인젝터의 분무 형태를 분석하고, 충돌형 인젝터의 경우 어느 정도의 각도로 분사되는지 확인하기 위해 고속 카메라를 이용하여 실험을 수행하였다.

Fig. 15는 실제 단일 추진제 추력기에서 촉매제를 지탱하기 위해 설치된 스크린이 없는 상태에서인 자유 분사를 촬영한 결과이다. 기존의 인젝터는 설계 도면에서와 같이 분사 각도는 약 60°로 일정하게 퍼져 나가는 것을 알 수 있었다. 그에 반해, 충돌형 인젝터의 경우에는 설계 개념과 같이 분사된 액체가 더욱 더 미립화 되어 최대 분사 각도가 135°로 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있었다.

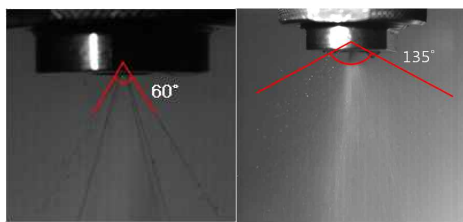


Fig. 15. The conventional (left) and the new designed (right) injector jetting visualization without the net

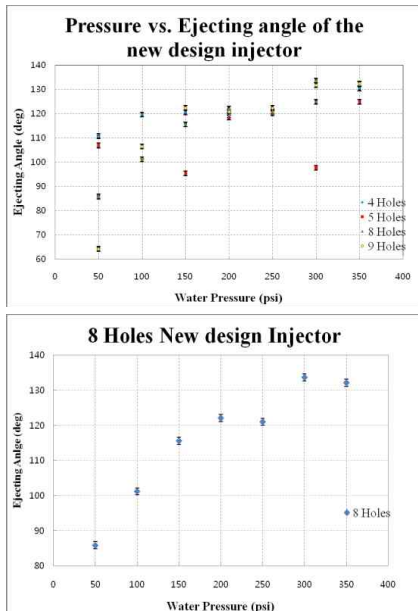


Fig. 16. At 23.816atm, pressure vs. ejecting angle of the new designed injector (up) and 8 holes only (down) without the net

Fig. 16은 충돌형 인젝터의 분무 각도를 측정 한 것으로, 노즐의 개수에 따른 분무 각도를 나타낸 것이다. 전체적으로 압력이 낮을 때는 노즐의 개수가 적을수록 분무 각도가 크고, 압력이 높을 때에는 노즐의 개수가 많을수록 분무 각도가 큰 것으로 확인 되었다. 따라서, 실제 단일 추진제 추력기에서 액체 추진제가 분사되는 압력인 약 23.816atm 조건에서는 hole의 개수가 많을수록 더 좋은 분무 형태를 갖는 것으로 판단 된다.

Fig. 17은 분사 압력이 23.816atm 일 때, 기존의 인젝터와 충돌형 인젝터를 이용하여 실제 추력기에 적용되는 반원 형태의 스크린(좌, 가운데)을 붙여서 실험을 수행한 것이다. 또, 반원 형태의 스크린이 아닌 평판 형태의 스크린(우)을 충돌형 인젝터에 붙여서 수행하였다. 각각의 분무 각도는 충돌형 인젝터에 평판 형태의 스크린을 장착하였을 때 가장 큰 각도를 보였다.

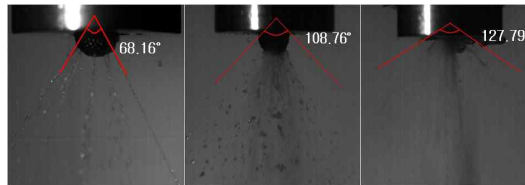


Fig. 17. Sequential jetting photos. At 23.816atm the conventional injector with the semicircle net, the particle (Al2O3) and sand (up) and the new designed injector with flat net, the particle (Al2O3) and sand (down)

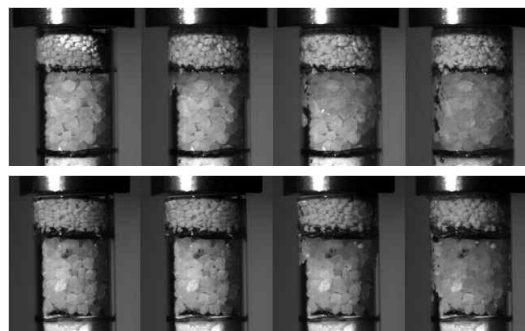


Fig. 18. Sequential jetting photos. At 23.816atm the conventional injector with the semicircle net, the particle (Al2O3) and sand (up) and the new designed injector with flat net, the particle (Al2O3) and sand (down)

Fig. 18은 실제로 단일 추진제 추력기와 같은 형태의 조건을 형상화하여 분사형 인젝터 및 반원 형태의 스크린(상)과 충돌형 인젝터 및 평판한 스크린(하)을 장착하여 1초 동안 분무 가시화 실험을 수행한 것이다.

각각 다른 형태의 인젝터와 스크린을 이용한 결과, 평판한 스크린이 장착된 경우에는 좀 더 많은 양의 촉매제를 탑재 할 수 있었고, 두 가지의 경우 모두 비슷한 형태로 액체 추진제가 퍼져 나가는 것을 알 수 있었다.

III. 결 론

본 논문에서는 기존의 인젝터와 새로 제안 한 충돌형 인젝터를 설계 및 제작하여 CFD와 PIV 및 고속 카메라를 이용하여 각 인젝터의 분무 특성을 분석하였다.

충돌형 인젝터는 축 방향으로 한 점에서 부딪히게 설계되어 분사되는 액체 추진제의 입자를 더욱 세분화하여 사방으로 일정하게 분무할 수 있도록 하였다. 따라서 고속 카메라 가시화 실험 결과와 같이 최대 분무 각도가 135°로 기존 인젝터의 분무 각도인 60° 보다 큰 각을 이루게 된다. 이는 액체 추진제와 촉매제의 반응을 더욱 균일하게 할 수 있다. 또, 노즐의 개수에 따른 분무 성능이 비슷한 경향을 보임에 따라 노즐의 수를 기존의 8개에서 4개로 줄여 가공 측면에서의 이점을 얻을 수 있다. 그리고 충돌형 인젝터에 반원 형태의 스크린이 아닌 평판한 형태의 스크린을 붙여 사용함으로써 챔버 안에서 반원 형태 스크린이 차지하는 체적만큼의 촉매제를 더 충전할 수 있다는 장점이 있다.

소형 추력기의 개발에 있어서 인젝터를 최적화함으로써 관련 기술의 자립화 및 인젝터의 성능 개선으로, 향후 발생할 것으로 예측되는 추력기와 인젝터의 수입대체 효과가 기대된다. 또, 각종 설

계 변수를 연구하여 다목적 실용위성 추력기의 성능 개선에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 학연협력강화 사업 성과창출형과제의 지원에 의해 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Ellion et al., "Monopropellant Thruster", *UnitedStatesPatent*, 1978, No. 4, 069,664.
- 2) 한조영, 박태선, 이균호, 유명중., "Performance Analysis of the Satellite Monopropellant Hydrazine Thruster", *한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집*, 2004, pp. 137~139.
- 3) 김수겸, 유명중, 이균호, 김인태, 이재원, 조성준., "Performance Test of Hydrazine Decomposition Catalyst for Monopropellant Thruster", *항공우주학회 추계학술대회 논문집*, Vol. 2, 2007, pp. 1432~1435.
- 4) Sungyong An, Sejin Kwon., "Experimental approach for catalyst bed sizing of liquid propellant thruster", *한국추진공학회 한국추진공학회지*, Vol. 12, No. 3, pp. 24-33
- 5) Sarah Barley, Phil L. Palmer, "Evaluating the Miniaturization of a Monopropellant Thruster", *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Exhibit*, Sacramento, California, U.S.A. 2006.
- 6) Jihoon Kim, Doyoung Byun, Hanseo Ko, "Experimental Study on Slip Flows in Superhydrophobic Microchannel", *한국가시화정보학회 추계학술대회 논문집*, 2007, pp. 84~87.