

리세스 길이가 다른 동축 와류형 분사기들에 대한 수치해석

이 봄* · 윤원재* · 윤영빈** · 안규복†

Numerical Study on Swirl Coaxial Injectors with Different Recess Lengths

Bom Lee, Wonjae Yoon, Youngbin Yoon and Kyubok Ahn

Key Words: Discharge coefficient(유량계수), Recess length(리세스 길이), Spray angle(분무각), Swirl coaxial injector (동축 와류형 분사기)

Abstract

Numerical study under single-injection on bi-swirl coaxial injectors with different recess lengths was performed using ANSYS Fluent. The bi-swirl coaxial injectors which consisted of inner closed-type and outer open-type swirl injectors, had three different recess lengths. By changing mass flow rates, numerical simulation was repeated using the Reynolds stress BSL turbulent model. The numerical results such as discharge coefficient and spray angle were compared with previous experimental data and were found to be approximately matched well with them, irrespective of recess length. Quantitative data which was hard to be measured from experiments, were successfully obtained through the present numerical study.

기호설명

A_n : 오리피스 면적
 C_D : 유량계수
DM : 설계 유량
 d_h : 접선홀 지름
 d_n : 오리피스 지름
 d_s : 와류실 지름
HM : 설계 유량에서 20% 증가한 유량
LM : 설계 유량에서 20% 감소한 유량
 L_R : 리세스 길이
 m : 질량유량
 n_h : 접선홀 수

R : 접선홀 중심과 분사기 중심간 거리
 ΔP : 분사차압
 ρ : 유체 밀도

1. 서 론

액체연료를 사용하는 로켓, 가스터빈, 자동차 엔진 등과 같은 연소장치에서 분사기는 연료를 작은 액적으로 분열시켜 연소실로 공급하는 역할을 한다. 액체로켓엔진에는 총돌형, 와류형, 전단형 등의 분사기가 주로 사용되는데, 연소 성능 및 안정성에 큰 영향을 주는 핵심 부품이기 때문에 많은 연구가 수행되고 있다. 이 중 와류형 분사기에서는 추진체가 접선방향 입구로 유입된 후 분사기 벽면을 따라 와류 운동을 하며 흐르게 된다. 이러한 원심력으로 인해 노즐 끝단에서 추진체는 중공 원뿔(hollow cone) 형태로 분사되며, 분사기 내부에는 기체층(gas core)이 형성되는 특징이 있다. 와류형 분사기에서의 분무각, 액막 두께, 분열길이 등 분무특성은 액체로켓엔진의 성능 및 연소안정성에 큰 영향을 준다

(Received: 16 Jan 2018, Received in revised form: 19 Feb 2018, Accepted: 20 Feb 2018)

*충북대학교 기계공학부

**서울대학교 기계항공공학부

†책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : kbahn@cbnu.ac.kr

TEL : (043)261-3596, FAX : (043)263-2448

고 알려져 있다⁽¹⁻⁴⁾.

동축 와류형 분사기는 두개의 와류형 분사기가 동축으로 결합된 형태로, 하나의 분사기에서 연료와 산화제를 모두 공급할 수 있게 해준다. 와류형 분사기에서 분무각, 유량계수, 액막 두께, 액적 크기 등의 분무특성은 분사기 형상에 따라 달라지며, 동축 와류형 분사기에서 두 추진제의 혼합특성은 리세스 길이에 의해 큰 영향을 받는다. 이에 따라 다양한 형상을 갖는 단일 와류형 분사기와 동축 와류형 분사기에 대한 많은 실험적 연구들이 수행되어왔다. 단일 분사기의 경우 내부 유동 가시화나 액막 두께 측정이 이루어지기도 했지만, 분사기의 크기나 재질 등으로 인해 동축 와류형 분사기에 대한 실험적 연구들은 유량계수, 분무각, 액적 속도/크기 등 분사기 외부에서의 결과만을 제시하였다⁽⁵⁻¹⁷⁾.

실험적 연구들에 비해 해석적 연구는 상대적으로 적은 편이며, 대부분 단일 와류형 분사기에 대해 수행되었다. Sumer 등은 닫힘형(closed-type) 와류형 분사기를 Fluent를 사용하여 해석한 후 실험결과와 비교하였다. 해석연구를 통해 공기층의 형성을 확인하였으며, 해석결과를 이용하여 SMD를 구하는 식을 도출하였다.⁽¹⁸⁾ Zhao 등은 압력식 와류형 노즐의 미립화 특성에 대한 연구를 수행하였다. DPM(discrete phase model)을 사용하여 전반적인 미립화 과정을 확인하였으며, PDPA로 측정된 실험결과와 비교하였다. 해석결과 저압 영역에서는 오차가 다소 크게 발생하지만 고압의 경우에는 오차가 감소하는 것을 확인하였다⁽¹⁹⁾. Kim 등은 닫힘형 와류형 분사기의 내부 유동에 대해 해석연구를 수행한 후 실험결과와 비교하여, 공기층의 최소 직경을 고려하여 격자를 생성해야 한다고 주장하였다⁽²⁰⁾.

최근 수행된 동축 와류형 분사기 실험에서 리세스가 짧아 외부혼합(external mixing) 특성을 갖는 경우 두 추진제의 분무각은 단일 분무와 달리 서로의 유량에 영향을 받으며, 리세스가 길어 내부혼합(internal mixing) 특성을 갖는 경우 바깥쪽 분사기의 유량계수는 안쪽 분사기의 유량이 증가함에 따라 감소하는 결과를 나타내었다⁽²¹⁾. 이러한 현상의 원인을 실험적으로 증명하기는 어려우며, 해석적 연구의 필요성이 제기되었다. 본 연구팀의 초기 연구에서는 닫힘형 와류형 분사기, 열림형(open-type) 와류형 분사기에 대해 격자 크기, 계산 횟수, 난류 모델에 따른 결과를 분석하여, 최적화된 격자 크기와 난류 모델을 선정하였다⁽²²⁾. 최종목표는 앞에서 언급한 실험결과와 원인을 파악하는 것이지만, 그에 앞서 본 연구에서는 리세스 길이가 다른 동축 와류형 분사기에

서 단일 분사(single-injection) 시 분무특성에 대해 살펴 보았으며 기존 실험결과와 비교를 수행하였다⁽²¹⁾.

2. 해석조건 설정

2.1 분사기 모델링 및 격자 설정

Figure 1은 본 연구에 사용된 동축 와류형 분사기의 개략도를 나타내며, 안쪽 분사기는 닫힘형, 바깥쪽 분사기는 열림형 와류형 분사기 형태를 갖는다. 전산해석을 위해 동축 와류형 분사기는 실제 실험에서 사용한 분사기와 동일하게 모델링하였다. 실험에서는 리세스 길이에 따라 5개의 분사기를 제작하였으나, 해석에서는 외부혼합, 팁혼합(tip mixing), 내부혼합에 해당하는 리세스 길이 0.0, 3.6, 6.0 mm의 경우에 대해서만 연구를 수행하였다⁽²¹⁾. 분사기의 형상정보를 Table 1에 정리하였

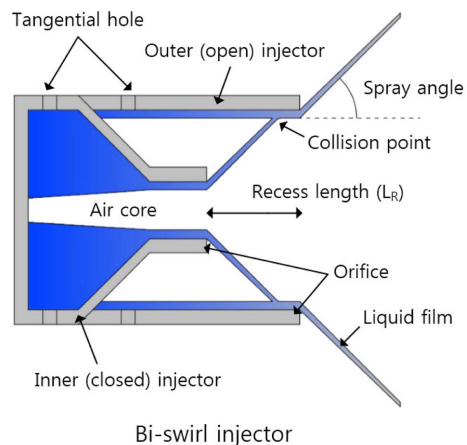


Fig. 1 Schematic of the present bi-swirl coaxial injector with internal mixing⁽²²⁾

Table 1 Geometric information of the present bi-swirl coaxial injectors

Injector	Unit	Inner	Outer
n_h	-	8	4
d_n	mm	3.5	7.5
d_h		1.48	0.86
d_s		6.7	7.5
R		2.45	3.25
L_R		0.0, 3.6, 6.0	

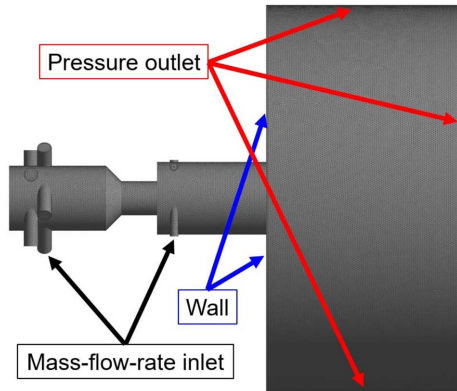


Fig. 2 Modeling and boundary conditions of the present injector with $L_R = 6.0$ mm

다. 분무각 측정을 위해 분사기 하단에 원기둥의 공기영역(지름 40 mm, 길이 20 mm)을 설정하였다.

격자 설정은 Yoon 등의 연구결과를 참고하여 설정하였다⁽²²⁾. 공기영역 보다 분사기 영역의 격자 크기를 작게(격자 개수를 많게) 하기 위해, 분사기 영역과 공기영역을 분할하였다. 체적 크기(body sizing)를 조절하였으며, 벽면을 제외한 영역은 테트라(tetra) 격자로, 벽면은 프리즘(prism) 격자로 생성하였다. 리세스 길이에 따른 각 분사기의 격자(element) 개수는 21,429,810($L_R=0.0$ mm), 21,448,762($L_R=3.6$ mm), 21,460,617($L_R=6.0$ mm) 이었다. 결국 리세스 길이가 증가함에 따라 격자 수가 증가하였다. Fig. 2는 리세스 길이가 6.0 mm일 때 분사기 및 공기영역의 격자생성 결과를 나타낸다.

2.2 경계조건 및 해석조건 설정

실제 실험은 물의 유량을 기준으로 수행되었기 때문에 Fig. 2에서와 같이 접선흐름 입구를 질량유량 입구(mass-flow inlet)로, 공기영역의 좌측을 벽면(wall)으로, 공기영역의 상/하단 및 우측을 압력 출구(pressure outlet)로 설정하였다. 또한 실험조건을 모사하기 위해 공기영역 출구의 압력을 0.1 MPa로 입력하였으며, Table 2에서와 같은 유량조건에서 해석을 진행하였다. 이 유량조건은 실제 액체로켓엔진 연소기용 분사기 수류실험 조건과 동일하며, 설계 유량인 DM을 기준으로 $\pm 20\%$ 한 것이 각각 LM, HM에 해당한다.

전산해석은 상용 유동해석 프로그램인 ANSYS Fluent v17.2를 사용하였다. 해석은 정상(steady) 조건으로 수행하였으며, 비압축성 유동에 해당하기 때문에 PBS(pressure-based solver)를 사용하였다. 수류실험의 유동특성

Table 2 Numerical simulation conditions for mass-flow inlet

Test No.	Inner (closed-type) injector [g/s]	Outer (open-type) injector [g/s]
LM	129.77	46.35
DM	162.21	57.93
HM	194.65	69.52

을 모사하기 위한 해석 시 유체는 공기와 물을 사용하였다. 본 해석은 공기와 물의 이상(two-phase) 유동이기 때문에 VOF(volume of fluid) 모델을 사용하였으며, 초기 분사기에 공기가 채워져 있다가 물이 유입되는 형태이기 때문에 주상(primary phase)을 공기로, 보조상(secondary phase)을 물로 설정하였다. 선행연구로 수행된 Yoon 등의 연구결과를 바탕으로 난류 모델은 RSM(Reynolds stress model)-BSL(baseline)을 이용하였으며, 계산 횟수는 5,000번을 수행하였다⁽²²⁻²⁴⁾.

3. 해석결과

3.1 분무형상 및 분무각

Table 3은 분사기 내/외부 단면에서의 상(phase)에 따른 체적 분율(volume fraction) 해석결과를 정리한 결과로, 그림들로부터 리세스 길이와 유량에 따른 분무형상을 파악할 수 있다. 바깥쪽 분사기의 경우 리세스의 영향을 받지 않기 때문에 리세스 길이 6.0 mm인 경우에 대해서만 해석을 수행하였다.

리세스 길이가 0.0 mm인 경우는 안쪽 분사기에서 분사된 물이 바깥쪽 분사기에 영향을 받지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 리세스 길이가 3.6 mm인 경우는 안쪽 분사기에서 분사된 물이 바깥쪽 분사기 노즐 끝단에 충돌할 것으로 예측된 조건이다. 해석결과에서도 완전히 끝단에 충돌하지는 않았지만, 거의 스치고 지나가는 형상을 보이고 있다. 만약 이중 분사(bi-injection)로 해석을 수행하였다면, 안쪽 분사기에서 분사된 액막(liquid sheet)이 바깥쪽 분사기에서 생성되는 액체 막(liquid film)과 바깥쪽 분사기 노즐 끝단에서 충돌했을 것으로 예상할 수 있다.

리세스 길이가 6.0 mm인 경우 안쪽 분사기에서 공급된 물이 바깥쪽 분사기 내부 벽면에 충돌 후 바깥쪽 분사기 내부를 채우면서 공기영역으로 배출되는 형상을

Table 3 Cross-section of volume fraction

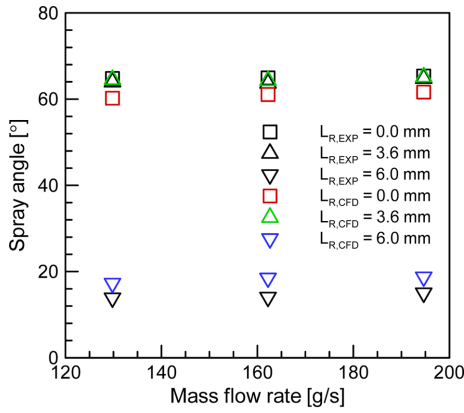
Injector type	L_R [mm]	LM	DM	HM
Inner (closed-type) injector	0.0			
	3.6			
	6.0			
Outer (open-type) injector	6.0			

나타내었다. 충돌로 인해 접선방향 속도가 감소되면서 분무각이 크게 줄어들었다. 또한 축방향 속도에 비해 접선방향 속도가 작고, 반경 반지름이 크기 때문에 분사기 끝단에서의 초기 분무는 축방향과 평행하게 관찰된다. 이러한 분무 경향은 실험결과와 일치한다.⁽²¹⁾

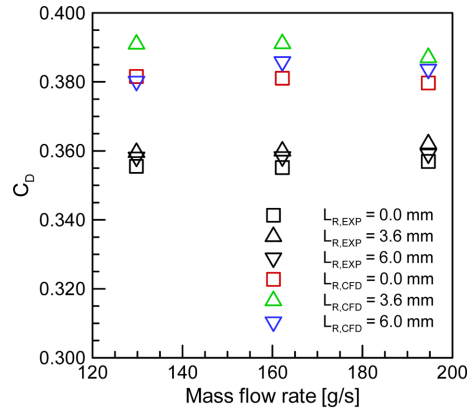
리세스 길이가 6.0 mm인 경우 바깥쪽 분사기에서 분무형상은 기존의 리세스 길이 0.0 mm인 경우와 차이가 없는 것을 알 수 있었다.⁽²²⁾ 안쪽/바깥쪽 분사기의 모든 해석조건에서 분무차압이 0.5 MPa 이상으로 완전발달 조건이었기 때문에, 분무형상은 유량에 의해 거의 영향을 받지 않았다.

Table 3에 정리된 분무형상을 이용하여 분무각을 측정하였으며, Fig. 3에 실험결과와 함께 나타내었다. 실험결과

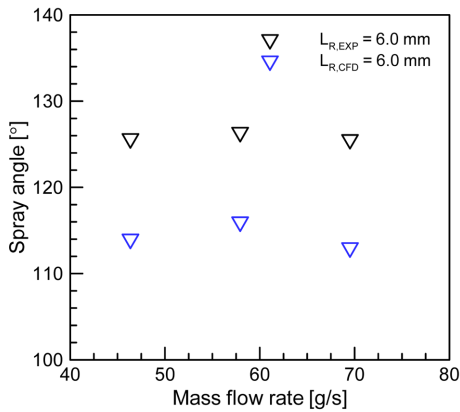
와의 비교를 위해 분무형상 이미지에서 분사기 출구 10 mm ~ 15 mm 사이의 분무형상 중 분무 외곽을 선택하여 분무각을 계산하였다. 각 분사기에서의 분무각은 유량의 변화에 상관없이 일정하였으며, 리세스 길이가 6.0 mm인 안쪽 분사기의 경우 확연히 작은 값을 보였다. 안쪽 분사기 분무각의 경우 리세스 길이 등에 큰 영향 없이, 해석결과는 작은 오차 범위 안에서 실험결과를 예측하였다. 바깥쪽 분사기의 분무각은 약간 과소 예측되었는데, 선행연구로 수행된 Yoon 등의 연구결과와 비교하면 리세스 길이가 0.0 mm에서 6.0 mm로 증가함에 따라 분무각은 10° 정도 증가한 결과를 나타내었다.⁽²²⁾ 바깥쪽 분사기의 분무각도 유량에 큰 영향이 없었으며, 실험결과와의 오차는 10° 정도로 해석결과의 신뢰성을 파악할 수 있었다.



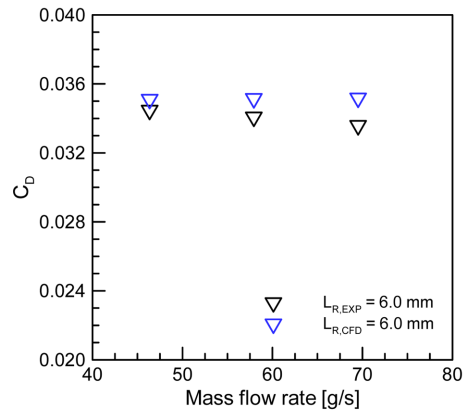
(a) Inner swirl injector



(a) Inner swirl injector



(b) Outer swirl injector



(b) Outer swirl injector

Fig. 3 Comparison of spray angle between experiments and numerical simulations

Fig. 4 Comparison of discharge coefficient between experiments and numerical simulations

3.2 유량계수

유량계수는 식 (1)과 같이 정의되며, 분무차압과 연관되기 때문에 와류형 분사기 설계에 있어 상당히 중요한 변수가 된다. 실험에서 유량계수는 유량계 데이터와 분사기 매니폴드 압력 데이터를 기준으로 계산되었다. 해석에서는 분사기 매니폴드까지 격자를 생성하게 되면 격자의 수가 너무 많아지기 때문에 Fig. 2에서와 같이 접선홀 입구부터 모델링을 하였다. 접선홀은 매니폴드와 분사기 와류실 사이에 단면적을 줄이는 오리피스 역할을 하기 때문에, 일반적으로 사용되는 오리피스 입구에서의 손실계수 0.5를 사용하여 추가적인 압력손실을 고려하였다⁽²²⁾.

$$C_D = \frac{\dot{m}}{A_n \sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (1)$$

보정된 유량계수 해석결과를 Fig. 4에 실험결과와 함

께 정리하였다. 실험결과와 마찬가지로 유량 변화에 따른 유량계수의 차이는 거의 없다는 것을 알 수 있으며, 리세스 길이에 따라서도 두드러진 차이가 발생하지 않았다. 선행연구와 마찬가지로 리세스 길이에 상관없이 안쪽 분사기의 경우 실험결과에 비해 5~8% 정도, 바깥쪽 분사기의 경우 2~3% 정도 높게 예측하여 해석결과의 신뢰성을 파악할 수 있었다. 지금까지 해석결과를 실험에서 확보된 결과들과 비교하여 해석의 신뢰성을 살펴보았다.

다음 절에서는 실험에서 얻기 힘든 속도와 압력 분포에 대해 분석하였다.

3.3 분사기 내/외부 속도 및 압력 분포

리세스 길이 0.0 mm를 갖는 분사기 축중심 단단면에서의 내/외부 속도 및 압력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 축방향 속도 분포를 살펴보면 와류실을 지나 노즐 입구

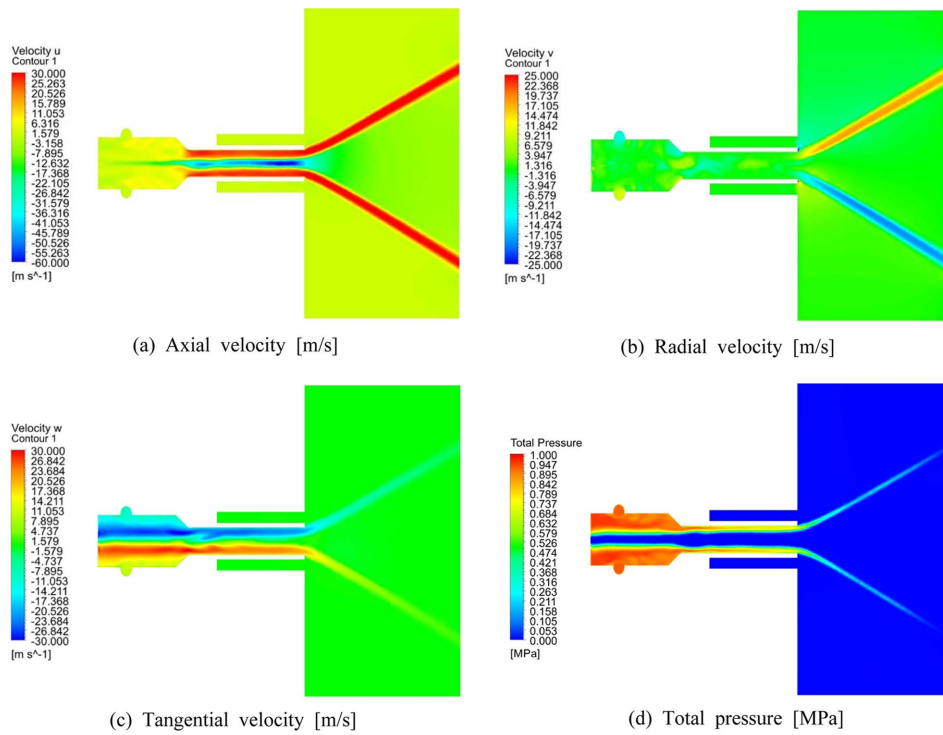


Fig. 5 Velocity and pressure distribution for DM case of the injector with $L_R = 0.0$ mm

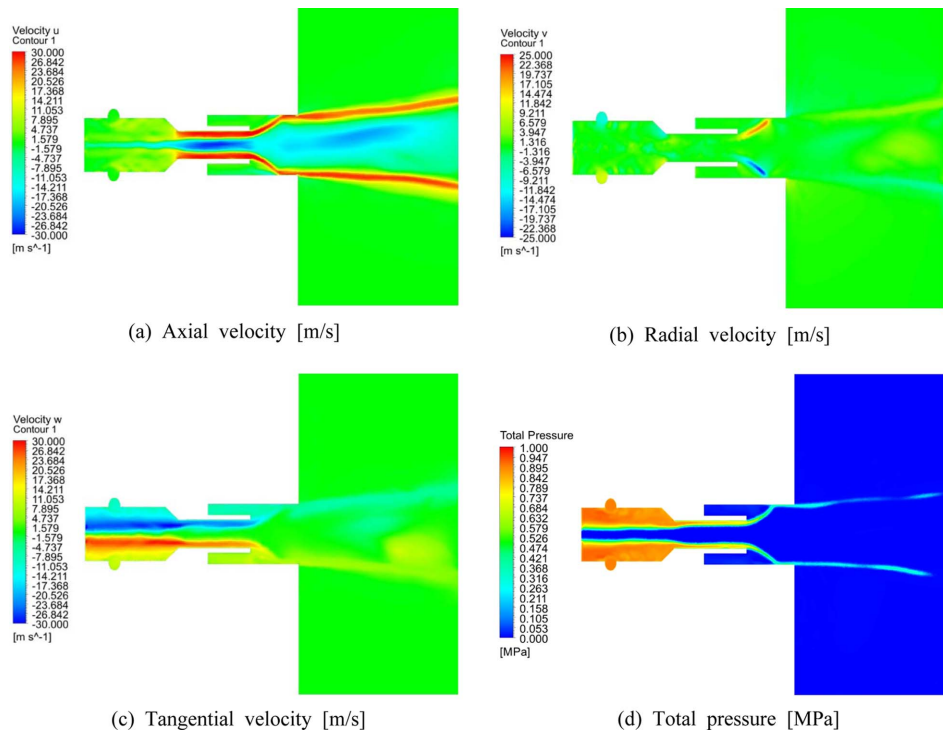


Fig. 6 Velocity and pressure distribution for DM case of the injector with $L_R = 6.0$ mm

부분에서 속도가 증가한 후 분사기 외부에서도 액막의 축방향 속도는 크게 변하지 않음을 알 수 있다. 그리고 분사기 내부 기체층의 형성을 위해 노즐 출구 중심부에서 기체의 강한 역류를 확인할 수 있다. 분사기 내에서 반경방향 속도는 무시할 만큼 작고, 접선방향 속도는 기체층의 경계 부분으로 갈수록 커진다. 하지만 노즐 출구 이후 접선방향 속도성분이 반경방향 속도로 전환되면서 하류로 갈수록 접선방향 속도는 급격히 작아진다. 전압 분포로부터 상당량의 압력손실이 빠른 유속으로 인한 노즐부에서의 마찰손실과 노즐 끝단에서의 곡부손실에 기인함을 알 수 있다.

리세스 길이 6.0 mm를 갖는 분사기 축중심 단면에서의 내/외부 속도 및 압력 분포를 Fig. 6에 정리하였다. 축방향 속도의 경우 노즐 출구 중심부에서의 기체 역류 속도가 리세스 길이 0.0 mm 분사기에 비해 작아진 것을 확인할 수 있다. 반경방향 속도의 경우 바깥쪽 분사

기 충돌 전까지는 큰 값을 보이지만, 충돌 후 접선방향 속도의 감소로 인해 바깥쪽 분사기 외부에서의 반경방향 속도는 작은 값을 갖게 된다. 안쪽 분사기에서 공급된 액체가 바깥쪽 분사기 내부를 채우면서 속도가 줄긴 하지만 충돌 전과 동일한 접선방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 이러한 안쪽 분사기 액체의 영향으로 이중 분사 시 바깥쪽 분사기에서 공급되는 액체의 흐름에 방해가 되어 바깥쪽 분사기의 유량계수가 감소하는 원인이 되는 것으로 판단된다.

분사기 중심축에서 바깥쪽 분사기 노즐 끝단으로부터 축방향 거리에 따른 정압 데이터를 Fig. 7에 도시하였다. 기체의 역류로 인해 액막 내부와 액막 외부에서 압력 차이가 발생함을 알 수 있으며, 유량이 커질수록 액막 내부의 압력이 대기압에 비해 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 외부혼합 특성을 갖는 동축 와류형 분사기의 경우 두 추진제의 분무각은 단일 분무와 달리 서로의 유량에 의해 크게 변화되는데⁽²⁾, 이중 분무 시 각 액막 사이의 압력 변화가 힘으로 작용하여 분무각에 영향을 주는 것으로 예상된다. 하지만 단일 분무 시에는 유량 증가에 따라 액막의 모멘텀 또한 증가하여 압력 차이가 커지더라도 Fig. 3과 Fig. 4에서와 같이 분무각, 유량계수에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

리세스 길이에 따른 분무특성을 확인하기 위해, 리세스 길이 0.0, 3.6, 6.0 mm를 갖는 동축 와류형 분사기의 단일 분무에 대한 전산해석을 수행하였다. 모든 해석조건에서 분사기 내부에 기체층이 제대로 형성되었으며, 분무형상 및 분무각의 경우 실험결과를 큰 오차 없이 예측함을 확인할 수 있었다. 리세스 길이가 6.0 mm인 경우 안쪽 분사기에서 분사된 물이 바깥쪽 분사기 내부를 채우게 되는데, 이러한 현상이 이중 분사 시 바깥쪽 분사기의 분무차압 증가(유량계수 감소)에 영향을 주는 것으로 판단하였다.

단일 분무 시 리세스 길이 및 유량의 변화는 유량계수에 거의 영향을 주지 않았으며, 해석결과는 8% 이내의 오차 범위 내에서 실험결과를 예측하였다. 바깥쪽 분사기인 열림형 와류형 분사기의 해석은 3% 이내의 오차를 나타내었다. 실험에서 확인하지 못한 분사기 내/외부 속도 및 압력 분포를 확인하여, 이중 분사 시 외부혼합 동축 와류형 분사기에서 분무각의 변화가 액막 사이

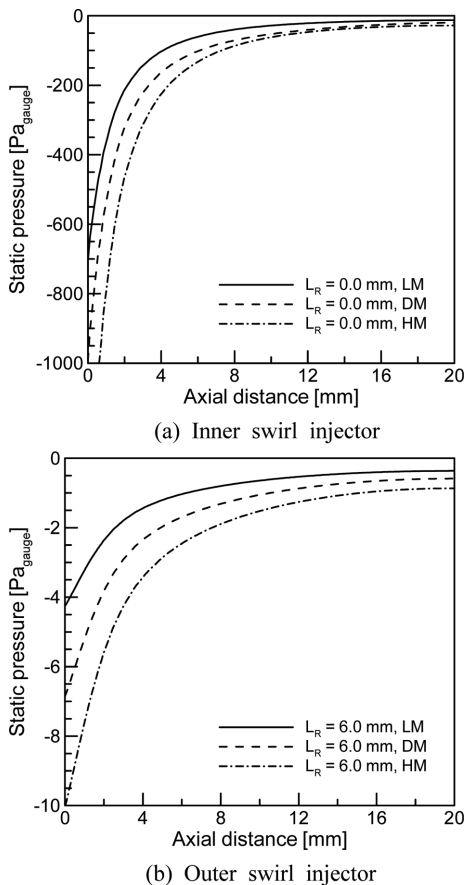


Fig. 7 Static pressure data at the centerline of the injectors

의 압력 차이에 의해 영향을 받을 수 있음을 살펴보았다. 이러한 결과를 바탕으로 현재 동축 와류형 분사기의 이중 분사에 대한 해석을 수행 중이며, 실험에서 발견된 현상에 대한 원인을 정량적으로 분석할 예정이다.

마지막으로 신뢰성을 문제 삼을 정도는 아니었지만 해석결과와 실험결과 사이에는 어느 정도 오차가 발생하였다. 이는 해석 시 격자 크기로 인해 매우 작은 직경의 점선홀을 완벽하게 모사하지 못했다는 한계와 공기 영역의 크기가 실험과는 달리 한정되어 있어 분무각이 큰 경우 유입되는 공기로 인해 오차가 커진 것으로 예측된다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1A1A1A05001237, NRF-2017M1A3A9032498) 및 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1989.
- (2) V. G. Bazarov, *Liquid Injector Dynamics*, Moscow, Mashinostrenie, 1979.
- (3) G. P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.
- (4) D. K. Huzel and D. H. Huang, *Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines*, 2nd ed., AIAA, Washington D.C., 1992.
- (5) T. Marchione, C. Allouis, A. Amoresano and F. Beretta, "Experimental investigation of a pressure swirl atomizer spray", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 5, 2007, pp. 1096-1101.
- (6) Y. Chung, H. Kim, S. Jeong and Y. Yoon, "Dynamic characteristics of open-type swirl injector with varying geometry", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 32, No. 3, 2016, pp. 583-591.
- (7) Q. F. Fu, L. J. Yang and X. D. Wang, "Theoretical and experimental study of the Dynamics of a liquid swirl injector", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 1, 2010, pp. 94-101.
- (8) Q. F. Fu, L. J. Yang and Y. Y. Qu, "Measurement of annular liquid film thickness in an open-end swirl injector", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 15, No. 2, 2011, pp. 117-124.
- (9) C. Chen, Y. Yang, S. H. Yang and H. L. Gao, "The spray characteristics of an open-end swirl injector at ambient pressure", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 67, 2017, pp. 78-87.
- (10) M. Rashad, H. Yong and Z. Zekun, "Effect of geometric parameters on spray characteristics of pressure swirl atomizers", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, 2016, pp. 15790-15799.
- (11) T. Inamura, H. Tamura and H. Sakamoto, "Characteristics of liquid film and spray injected from swirl coaxial injector", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 4, 2003, pp. 632-639.
- (12) Q. F. Fu and L. J. Yang, "Visualization studies of the spray from swirl injectors under elevated ambient pressure", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 47, 2015, pp. 154-163.
- (13) J. Cui, H. Lai, J. Li and Y. Ma, "Visualization of internal flow and the effect of orifice geometry on the characteristics of spray and flow field in pressure-swirl atomizers", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, 2017, pp. 812-822.
- (14) S. Yao, J. Zhang and T. Fang, "Effect of viscosities on structure and instability of sprays from a swirl atomizer", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 39, 2012, pp. 158-166.
- (15) S. Kim, D. Kim, T. Khil and Y. Yoon, "Effect of geometry on the liquid film thickness and formation of air core in a swirl injector", 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE, Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007.
- (16) S. Kim, T. Khil, D. Kim and Y. Yoon, "Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector", *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 2009, 015403.
- (17) S. Oh, G. Park, S. Kim, H. Lee, Y. Yoon and J. Y. Choi, "A study on dynamic characteristics of gas-centered swirl coaxial injector varying tangential inlet diameter with liquid pulsation", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 22, No. 2, 2017, pp. 62-68.
- (18) B. Sumer, N. Erkan, O. Uzol and I. H. Tuncer, "Experimental and numerical investigation of a pressure swirl atomizer", 12th Triennial International Conference on

- Liquid Atomization and Conference on Liquid Atomization and Spray System, 2012.
- (19) J. Zhao and L. Yang, "Simulation and experimental study on the atomization character of the pressure-swirl nozzle", *Open Journal of Fluid Dynamics*, Vol. 2, 2012, pp. 271-277.
- (20) J. Y. Kim, Y. Yoon and J. Y. Choi, "Numerical analysis of internal flow of closed-type swirl injector using VOF method", *Korean Society of Propulsion Engineering Fall Conference Paper*, 2016, pp. 419-421.
- (21) W. Yoon, "A study on the spray characteristics of bi-swirl injectors", *Master Thesis*, Chungbuk National University, 2017.
- (22) W. Yoon, B. Lee and K. Ahn, "A study on the spray characteristics of swirl injectors using ANSYS Fluent", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 22, No. 4, 2017, pp. 159-168.
- (23) ANSYS Fluent Theory Guide, v17.2, Canonsburg, PA, 2016.
- (24) ANSYS Fluent User's Guide, v17.2, Canonsburg, PA, 2016.