

ANSYS Fluent를 이용한 와류형 분사기의 분무특성 연구

윤원재* · 이 봄* · 안규복†

A Study on the Spray Characteristics of Swirl Injectors Using ANSYS Fluent

Wonjae Yoon, Bom Lee and Kyubok Ahn

Key Words: Swirl Injector(와류형 분사기), CFD(전산유체해석), Spray Angle(분무각), Discharge Coefficient(유량계수)

Abstract

Numerical studies on the spray characteristics of closed-type and open-type swirl injectors were conducted using ANSYS Fluent. By changing injection pressures, discharge coefficient and spray angle were calculated using the Reynolds stress BSL turbulent model. The numerical results were compared with previous experimental data to examine their accuracy. For a closed-type swirl injector, spray angles matched well with experimental results and discharge coefficients showed approximately 8% differences. On the contrary, discharge coefficients of an open-type swirl injector were similar with experimental result but its spray angles presented around 15% differences. Though the numerical results were not perfectly consistent with experimental data, it is thought that they could be sufficiently used for analyzing spray characteristics, specially which is hard to be measured from experiments. Numerical simulation with different turbulent models was also performed to examine their effects on the numerical results.

기호설명

A_o : 오리피스 면적

C_D : 유량계수

d_h : 접선홀 지름

d_o : 오리피스 지름

d_s : 와류실 지름

L_R : 리세스 길이

m : 질량유량

n_h : 접선홀 수

P_{loss} : 접선홀에서의 압력손실

R : 접선홀 중심과 분사기 중심간 거리

v_h : 접선홀에서의 유속

ΔP : 분사차압

ρ : 유체 밀도

2θ : 분무각

1. 서 론

와류형 분사기는 가스터빈, 램제트, 액체로켓엔진 등의 연소실에 널리 사용되는 장치로써 연소를 빠르게 진행시키기 위해 액체 추진제를 작게 분열시키는 역할을 수행한다. 추진제의 혼합, 분포, 미립화 특성은 분사기의 형상 및 분사조건에 영향을 받는데, 일반적으로 와류형 분사기는 큰 분무각으로 인해 우수한 혼합 및 미립화 특성을 가지고 있다고 알려져 있다^(1,4).

Figure 1은 일반적인 닫힘형(closed-type) 와류형 분사

(Received: 27 Feb 2017, Received in revised form: 22 Mar 2017, Accepted: 22 Mar 2017)

*충북대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부

E-mail : kbahn@cbnu.ac.kr

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

기를 나타낸다. 와류 분무는 접선홀(tangential hole)로 유입되는 액체의 접선방향 속도로 인해 생성되게 되는데, 와류실(swirl chamber)로 유입된 액체는 원심력에 의해 분사기 중심을 기준으로 회전하면서 오리피스를 향하며 오리피스 끝에서 얇은 액막(liquid film)형태로 축방향, 접선방향 속도를 가지고 분사하게 된다. 이때 액막 안쪽에는 공기(기체)층이 형성되는데, 와류형 분사기의 분무특성은 분사기 내의 액막/기체 유동특성과도 밀접한 연관이 있기 때문에 이에 대한 이해가 필요하다.

와류형 분사기의 분무특성을 살펴보기 위해 실험 및 수치해석을 통한 많은 연구들이 수행되어왔다. 실제 분사기 내부를 가시화하기가 쉽지 않기 때문에 실험적인 연구들은 대부분 분사된 후의 분무특성을 연구하였다⁽⁵⁻⁹⁾. 예외적으로 아크릴 등으로 제작된 분사기를 이용하여 내부유동을 가시화하거나 액막 두께를 실험적으로 측정하기도 하지만 이는 실제 분사기 재질이 아니라는 한계를 갖는다^(10,11). 분사기 내부유동에 대한 연구는 주로 수치해석을 통해 이루어졌다. 하지만 수치해석 결과는 실험결과와 비교했을 때 정확도가 부족하여 분무특성 변화의 경향성을 이해하는 정도로 활용되었다⁽¹²⁻¹⁵⁾.

와류형 분사기 유동을 수치해석적으로 연구하기 어려운 이유 중 하나는 기본적인 유체 지배방정식에 실제 현상들을 고려한 비정상적인 요소들이 추가되어야 하기 때문이다. 하지만 이에 대한 명확한 기준이 없어 연구자별로 개별적인 코드를 개발해 수치해석에 활용하고 있으며 결과도 다소 일관적이지 못하다. 따라서 와류형 분사기에 대한 수치해석적인 연구를 수행하기 위해서는 많은 노후가 필요하며 많은 자원의 소모 역시 불가피하였다.

하지만 컴퓨터의 성능향상 및 상용 소프트웨어의 발전으로 인해 현재는 과거보다 더 쉽고 정확하게 유동해석을 수행할 수 있게 되었다. 본 연구의 목적은 수치해석 코드에 대한 특별한 노하우 없이도 상용 유동해석 프로그램을 이용하여 와류형 분사기의 유동특성을 파악할 수 있는지 그 가능성을 탐색해보는 것이다. 이를 위해 유량계수 및 분무각과 같은 분무특성을 수치해석을 통해 계산하고 실험결과와 비교하여 상용 유동해석 프로그램의 정확성을 확인하고자 하였다.

2. 해석조건 설정

2.1 난류모델 설정

본 연구에서는 상용 유동해석 프로그램인 ANSYS

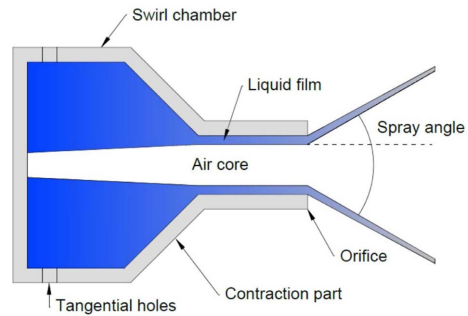


Fig. 1 Schematic of a typical closed-type swirl injector

Fluent를 사용하여 와류형 분사기를 해석하였다. Fluent에는 다양한 유동상태를 해석하기 위한 난류모델이 존재하는데 일반적으로 많이 사용되는 모델은 $k-\epsilon$ (k-epsilon), $k-\omega$ (k-omega), SST(shear stress transport)와 같은 모델들로, 방정식이 간단하고 정확성이 높기 때문에 해석소요시간 절감을 위해 주로 이용된다. 하지만 와류형 분사기의 내부유동을 해석하기 위해서는 더욱 정확한 난류모델이 요구되며, 레이놀즈 스트레스 모델(Reynolds stress model, RMS)을 이용해야 정확성이 높아지는 것으로 알려져 있다⁽¹⁶⁾.

Fluent v17.1를 포함한 상위 버전에서는 RSM 모델 중 ω , BSL(baseline) 모델이 사용가능한데, 이중 RSM-BSL 모델(이하 BSL 모델)은 허리케인과 같이 회전성이 존재하는 강한 난류유동을 해석하기에 적합한 모델이다. 따라서 와류 유동을 해석하기에 기존 모델들보다 적합하다고 할 수 있으므로 본 와류형 분사기 해석에서는 BSL 모델을 이용하였다. BSL 모델의 기본적 원리는 $k-\omega$ 모델에서 발전된 것으로 참고자료^(17,18)에서 자세한 내용을 확인할 수 있다.

2.2 분사기 모델링

연구에 사용된 와류형 분사기는 Fig. 2와 같으며, 안쪽 분사기가 닫힘형, 바깥쪽 분사기가 열림형(open-type)인 동축 와류형 형태를 갖는다. 닫힘형과 열림형 분사기를 구분짓는 기준은 분사기 오리피스의 형태이다. 닫힘형 분사기는 Fig. 1에서와 같이 와류실과 오리피스 사이에 면적이 수축되는 부분(contraction part)이 존재하여 와류실의 지름이 오리피스 지름보다 큰 분사기를 말한다. 반면 열림형 분사기는 와류실과 오리피스 사이에 수축부가 존재하지 않아 와류실의 지름과 오리피스의 지름이 같다. 본 연구에 사용된 동축 와류형 분사기는 열림형 분사기의 오리피스 지름이 닫힘형 분사기보다

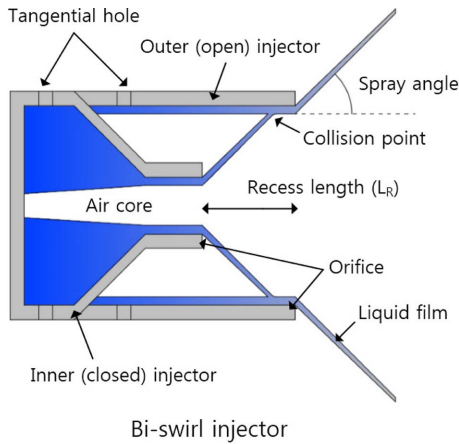


Fig. 2 Schematic of a typical bi-swirl coaxial injector with internal mixing

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

Injector	Unit	Inner	Outer
n_h	mm	8	4
d_o		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	

크기 때문에 열림형 분사기가 바깥쪽에, 닫힘형 분사기가 안쪽에 배치되었다.

해석에서는 안쪽과 바깥쪽 분사기에 독립적으로 액체를 공급하여 기존에 연구되었던 동축 와류형 분사기의 단일분사 실험결과와 비교하였다. 분무가 빠져나가는 분사기 후단의 공기영역은 20 mm × 20 mm의 원통으로 모델링하였다. Table 1은 본 연구의 모델이 된 동축 와류형 분사기의 형상정보를 나타내며, 리세스 길이가 0 mm로 단일분사 시 안쪽/바깥쪽 분사기의 분무는 다른 분사기에 의해 영향을 받지 않게 된다.

2.3 격자 및 경계조건 설정

Fluent를 이용한 수치해석은 격자(mesh)의 개수에 따라 해석결과가 상이하기 때문에 해석결과의 신뢰성을 높이기 위해 소위 격자의존성(mesh dependence) 테스트라고 불리는 격자에 따른 결과 변동성의 확인이 필요하

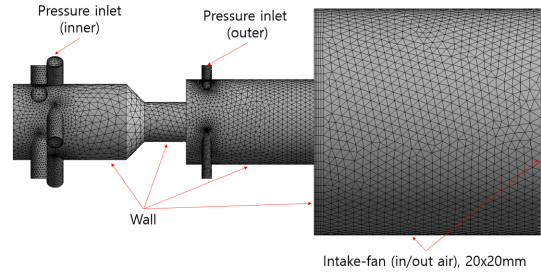


Fig. 3 Modeling and boundary conditions of the present bi-swirl coaxial injector

다. 이를 위해 총 다섯 단계의 격자를 설정하여 해석결과를 비교하였다. 분사기 내부 유동상황은 액체가 유입되기 전 공기가 분사기 내에 가득 차있고 액체가 유입되면서 공기가 빠져나가게 된다. 그리고 액체와 공기가 빠져나가는 만큼 다시 공기가 유입되어야 하므로 Fig. 3과 같이 공기영역의 경계면을 intake-fan 조건으로 설정하였다. 이는 유체의 입/출입이 자유로운 경계조건으로, 본 해석에서는 이 경계면을 통해 물과 공기가 빠져나가지만 공기만 다시 유입되도록 설정하였다. 분사기와 닿는 면이 벽면으로 설정된 이유는 실제 수류실험에서도 해당 면은 분사기 치구의 벽면에 해당하기 때문이다.

입구 경계조건은 압력(pressure-inlet)으로 설정하였으며, 분사차압을 5, 7, 10, 13, 15 bar로 변경하며 해석을 수행하였는데 이는 유사한 압력범위에서 측정된 실험결과와 비교하기 위해서이다.

3. 해석결과

3.1 격자의존성 및 반복계산에 따른 변화

Table 2는 격자갯수에 따른 질량유량의 변화를 나타내는 격자의존성 테스트 결과이다. 경계조건은 닫힘형

Table 2 Mass flow rate by the variation of mesh level at $\Delta P = 10$ bar

Level	Number of mesh	m [g/s]
Lv. 1	323,383	216.37
Lv. 2	1,214,054	177.55
Lv. 3	2,366,990	166.47
Lv. 4	7,863,641	164.41
Lv. 5	12,764,566	168.00

분사기의 분사차압 10 bar를 기준으로 하였으며, 계산횟수는 모두 3000번이었다. Fig. 4는 격자갯수에 따른 유동형상을 나타낸다. 그림을 살펴보면 Lv. 1과 같이 격자의 개수가 매우 작을 경우 와류 분무조차 형성되지 않음을 확인할 수 있으며, Lv. 2, Lv. 3에서는 와류 분무가 생성은 되었지만 분사기 내에 공기층이 제대로 형성되

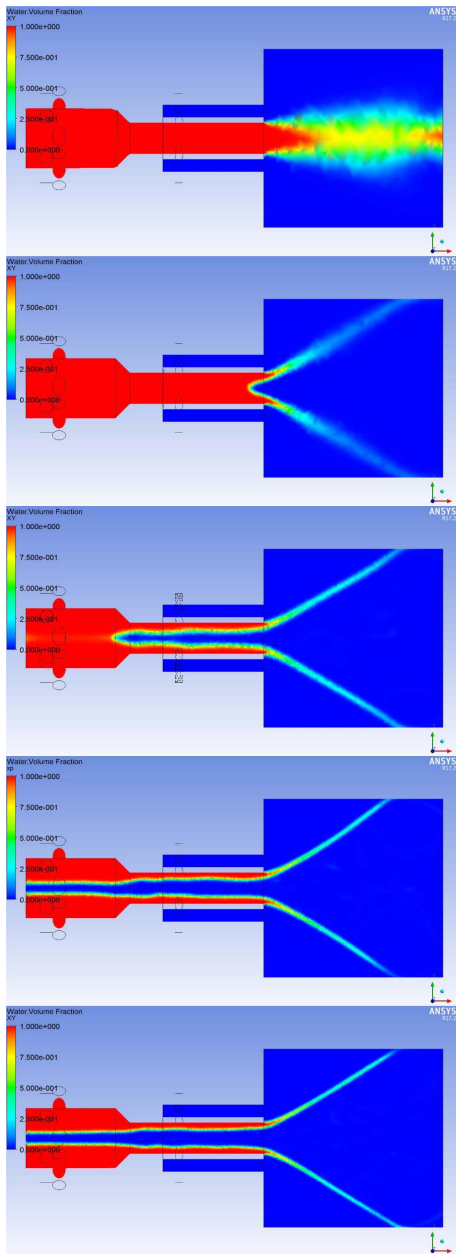


Fig. 4 Spray patterns of the closed-type swirl injector at $\Delta P = 10$ bar (from top to bottom: Lv. 1, 2, 3, 4, 5)

Table 3 Mass flow rate by the variation of iteration number at $\Delta P = 10$ bar

	Iteration no.	m [g/s]	Value/(last no.) [%]
Inner (closed-type)	1,000	109.19	64.3
	2,000	156.03	91.9
	3,000	164.95	97.2
	4,000	169.11	99.6
	5,000	168.84	99.5
	6,000	168.78	99.4
	7,000	169.76	100.0
Outer (open-type)	500	78.12	99.7
	1,000	78.39	100.0
	1,500	78.39	100.0
	3,000	78.39	100.0

지 않음을 알 수 있다. 하지만 격자갯수가 증가함에 따라 공기층 생성이 더욱 더 확장되어지고, Lv. 4, Lv. 5에서는 실제 유동현상과 유사하게 공기층이 생성됨을 확인할 수 있다. 질량유량 측면에서 살펴보면 Lv. 3부터 수렴성이 확인되었지만 Lv. 4부터 실제 유동현상과 유사한 분무패턴이 확인되었기에, 압력변화에 따른 해석은 Lv. 4 조건의 격자설정을 이용하여 수행되었다.

수치해석에 있어서 격자의 개수만큼 중요한 것이 계산횟수이다. 이는 해석에 소요되는 시간과 직접적인 관련이 있으므로 신뢰성 있는 결과를 도출하면서 해석에 요구되는 소요시간을 절약하기 위해 계산횟수에 따른 해석결과를 비교해볼 필요가 있다. Table 3은 계산횟수에 따른 질량유량의 변화이며 Fig. 5는 각 계산횟수에 따른 닫힘형 분사기의 분무패턴의 변화를 나타낸다.

계산횟수에 따른 비교는 격자 Lv. 4를 적용하여 해석을 수행했기 때문에 적은 계산횟수에서도 분사기 내에 공기층이 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 질량유량은 계산횟수에 따라 증가하는 양상을 보인다. 따라서 낮은 계산횟수에서는 해석결과의 신뢰성이 낮다고 할 수 있다. 총 7,000회의 계산결과를 살펴보면 약 4,000회 이상에서 수렴성이 있는 것을 확인할 수 있다. 완전히 수렴되지 않는 이유는 닫힘형 분사기의 유동이 비정상상태인데 반해 정상상태로 가정하고 해석으로 수행했기 때문이다. 이러한 이유로 닫힘형 분사기는 5,000회의 계산횟수를 적용하였다.

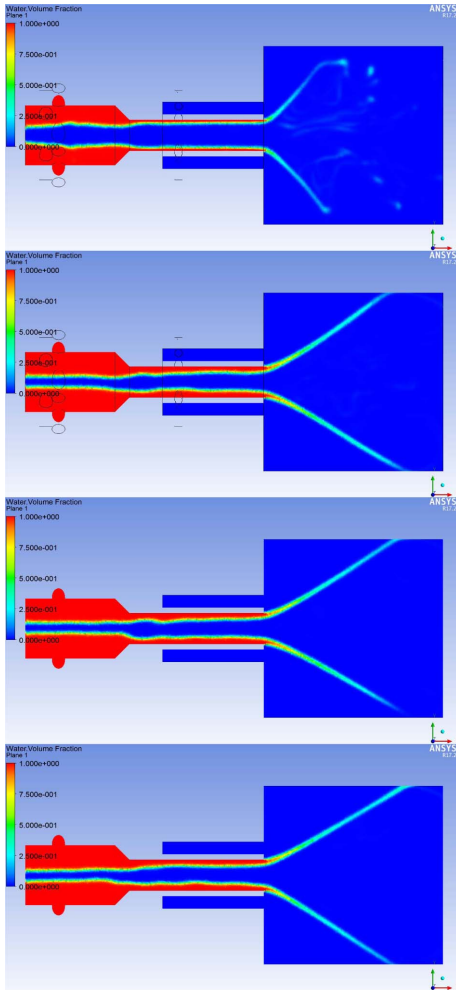


Fig. 5 Spray patterns by iteration number (from top to bottom: Iteration no. 1,000/3,000/5,000/7,000)

이와 더불어 열림형 분사기에서도 계산횟수에 따른 질량유량 변화를 살펴보았다. 열림형 분사기는 닫힘형 분사기에 비해 형상이 단순하고 분사기 내부에서 속도 변화가 심하지 않기 때문에 해석의 난이도가 높지 않다. 적은 계산횟수에서 질량유량이 수렴하였지만 해석환경에 따른 이유로 3,000회의 계산횟수를 적용하였다.

3.2 닫힘형 외류형 분사기 해석결과

격자 및 계산횟수에 따른 해석결과를 바탕으로 격자 개수 Lv. 4, 계산횟수 5,000회를 기준으로 닫힘형 분사기의 분무패턴과 유량계수를 입구압력을 변화시켜가며 확인해보았고 그 결과를 Fig. 6 및 Table 4에 나타내었다. 이때 외류형 분사기의 유량계수는 아래 식과 같이

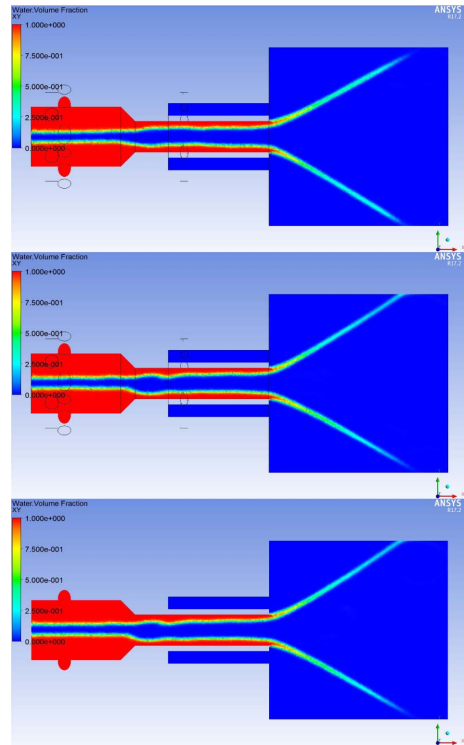


Fig. 6 Spray patterns of the close-type swirl injector (from top to bottom: ΔP = 5, 10, 15 bar)

Table 4 Numerical results of the closed-type swirl injector at different ΔP

ΔP [bar]	2θ [°]	m [g/s]	C _D
5	56.6	119.74	0.3939
7	57.4	141.54	0.3935
10	63.4	168.84	0.3928
13	63.0	191.91	0.3915
15	64.2	207.02	0.3932

정의되었다.

$$C_D = \frac{m}{A_o \sqrt{2\rho\Delta P}} \tag{1}$$

분사압력에 따른 분무형상은 거의 동일해 보인다. 실제 외류형 분사기의 분무는 낮은 압력에서는 분사압력이 증가함에 따라 분무각이 증가하지만 일정압력 이상에서는 분무가 완전발달(fully-developed)되어 분무각이 일정한 값으로 수렴한다. 본 연구에서의 해석조건들은

분무가 완전발달되는 조건들이기 때문에 압력에 따른 분무각의 변화가 크지 않다는 것을 해석상으로도 확인할 수 있었다.

와류형 분사기의 유량계수는 분무가 완전발달되는 조건에서는 분사압력에 상관없이 일정한 것으로 알려져 있으며, 해석결과 역시 이와 유사하게 유량계수에 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 와류형 분사기의 분무각과 유량계수는 분사기 형상에 따라 크게 영향을 받으며 기존에 수행되었던 이론적/실험적 연구결과들을 통해 예측이 가능하다^(19,22). 본 연구에 사용된 분사기의 형상으로 예측된 이론적 분무각은 57.9°이며 유량계수는 0.3717이다. 이 값들과 비교해보면, 해석결과 분무각은 최대 6°도 정도, 그리고 유량계수는 6% 정도 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

3.3 열림형 와류형 분사기 해석결과

단힘형 분사기와 동일한 조건 및 방법으로 열림형 분사기의 분무형상 및 유량계수를 확인하였고, 그 결과를 Fig. 7 및 Table 5에 나타내었다. 계산횟수에 따른 결과에서 살펴보았듯이 열림형 분사기는 단힘형 분사기에 비해 상당히 빠르게 수렴되었다. 모든 분사압력 조건에서 분무형상은 매우 유사하였으며, 계산된 분무각과 유

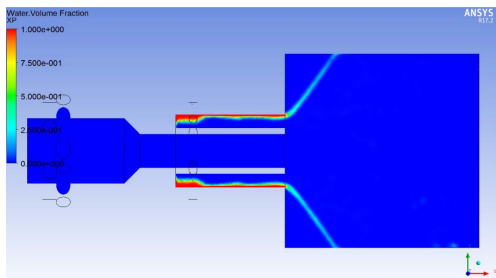


Fig. 7 Spray pattern of the open-type swirl injector at ΔP = 10 bar

Table 5 Numerical results of the open-type swirl injector at different ΔP

ΔP [bar]	2θ [°]	m [g/s]	C _D
5	107.2	55.15	0.0395
7	107.2	65.42	0.0396
10	107.2	78.39	0.0397
13	107.2	89.51	0.0398
15	107.2	96.23	0.0398

량계수 또한 거의 동일함을 알 수 있었다. 하지만 본 열림형 분사기의 이론적 분무각은 121.4°, 유량계수는 0.0336으로 해석결과와 다소 차이가 있다. 이러한 차이점에 대해서는 실험결과와의 비교를 통해 함께 논의하도록 하겠다.

4. 실험결과와 비교 및 고찰

동일한 형상의 단힘형 및 열림형 분사기에서의 분사 실험은 Fig. 8과 같은 구성을 가진 실험장치를 통해 수행되었다. 분사기는 액체산소와 케로신을 분사하는 용도로 설계되었지만, 본 연구에서는 분무특성을 파악하기 위해 물을 모사 추진제로 사용하였다.

물을 분사하기 위해 물탱크를 고압 공기로 가압하였으며 각 분사기 공급라인 및 매니폴드에 유량계(Kometer, NK-250)와 압력센서(Sensys, PSH model)를 설치하여 유량과 압력값을 측정하였다. 또한 물의 밀도를 계산하기 위해 K-type 열전대를 이용하여 물의 온도를 측정하였다. 측정된 데이터들은 NI-cDAQ에 저장되었으며, 이 데이터들을 이용하여 유량계수를 계산하였다.

분무는 고속카메라(Vision Research, Phantom v9.1)와 광원(Polarion, PS-X1)을 이용하여 촬영된 후 이미지 프로세싱을 통하여 분무각을 측정하였다. 분무 촬영조건은 1000 fps로 5 μs의 노출시간을 적용하였다. 실험은 Table 6과 같이 유량을 기준으로 수행되었으며 각 유량

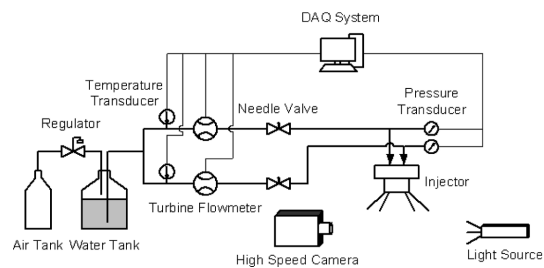


Fig. 8 Experimental setup for the cold-flow tests of the bi-swirl coaxial injector

Table 6 Experimental conditions for the inner/outer mass flow rates

Injector	Mass flow rate [g/s]		
Inner (closed)	129.77	162.21	194.65
Outer (open)	46.35	57.97	69.52

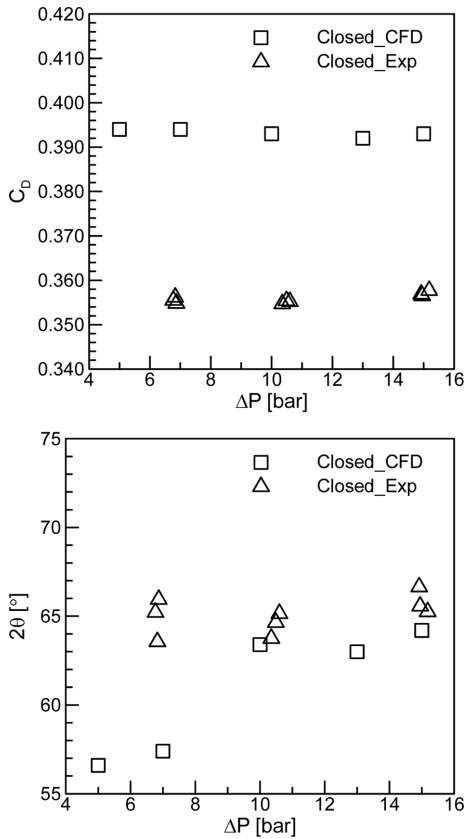


Fig. 9 Comparison of discharge coefficient and spray angle for the closed-type swirl injector

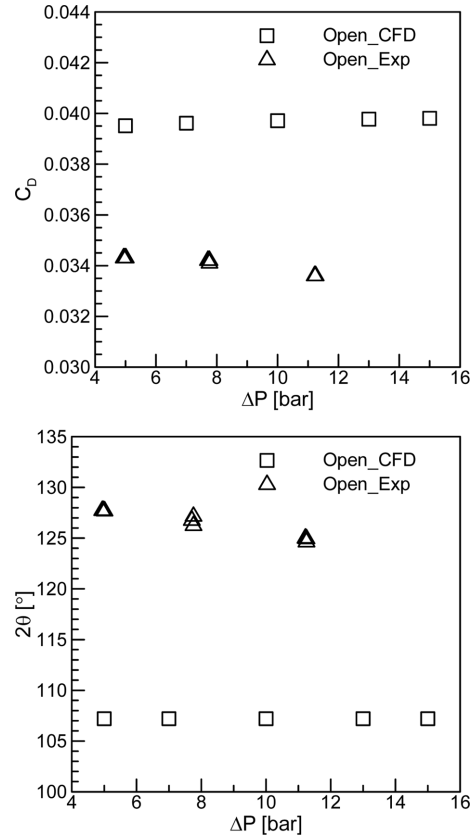


Fig. 10 Comparison of discharge coefficient and spray angle for the open-type swirl injector

조건은 해석조건으로 적용된 5~15 bar 사이의 분사차압을 갖는다.

단함형 및 열림형 분사기에서의 해석결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 우선 단함형 분사기의 비교결과를 살펴보면 유량계수는 해석, 실험 모두 압력에 상관없이 유사한 값을 가진다는 경향성은 일치하였지만, 절대적인 값에서 다소 차이를 보였다. 그에 반해 분무각의 경우 10 bar 이상에서는 실험결과와 상당히 유사한 값을 나타내었다. 열림형 분사기의 경우는 유량계수와 분무각 모두 실험결과와 10% 이상의 오차를 나타내었다.

본 연구에서는 분사기 내부에 공기층이 잘 형성되어 대략적인 분무형상은 실험과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었지만, 실험과 해석결과간의 무시할 수 없는 오차가 있었기 때문에 이에 대한 원인을 분석해 보았다. 가장 큰 오차 원인은 실제 매니폴드에서 점선홀로 유체가 유입될 때 단면적이 감소되며 이로 인해 점선홀에서 유

속이 증가하고 압력손실이 발생한다는 것이다. 실험에서는 매니폴드에서 압력을 측정하지만, 본 연구에서는 모델링의 복잡함 및 해석시간을 줄이고자 Fig. 3에서와 같이 점선홀 입구부터 해석을 수행하였다.

점선홀은 매니폴드와 분사기 와류실 사이에 단면적을 줄이는 오리피스 역할을 하기 때문에, 일반적으로 사용되는 오리피스 입구에서의 손실계수 0.5를 사용하여 추가적인 손실을 고려할 수 있다. 점선홀 입구에 액체가 유입될 때 발생하는 압력손실을 추가적으로 계산하고, 이를 보정한 유량계수를 Table 7에 정리하였다.

단함형 분사기는 점선홀의 면적이 상대적으로 크게 설계되었기 때문에 유속이 작았으며, 그에 따른 압력손실 및 유량계수 감소가 적었다. 하지만 점선홀의 면적이 작았던 열림형 분사기에서는 점선홀의 유속이 매우 컸으며 이에 따른 압력손실 역시 매우 큰 것으로 나타났다. 그렇기 때문에 유량계수 역시 압력손실을 고려하기 전보다 크게 감소하였다.

Table 7 Pressure loss at tangential holes' inlet and corrected discharge coefficient

	ΔP [bar]	v_h [m/s]	P_{loss} [bar]	C_D
Inner (closed)	5	8.87	0.20	0.3862
	7	10.46	0.28	0.3858
	10	12.35	0.40	0.3851
	13	14.06	0.52	0.3840
	15	15.03	0.60	0.3855
Outer (open)	5	26.24	1.72	0.0341
	7	31.13	2.42	0.0342
	10	37.29	3.47	0.0342
	13	42.59	4.53	0.0343
	15	45.78	5.23	0.0343

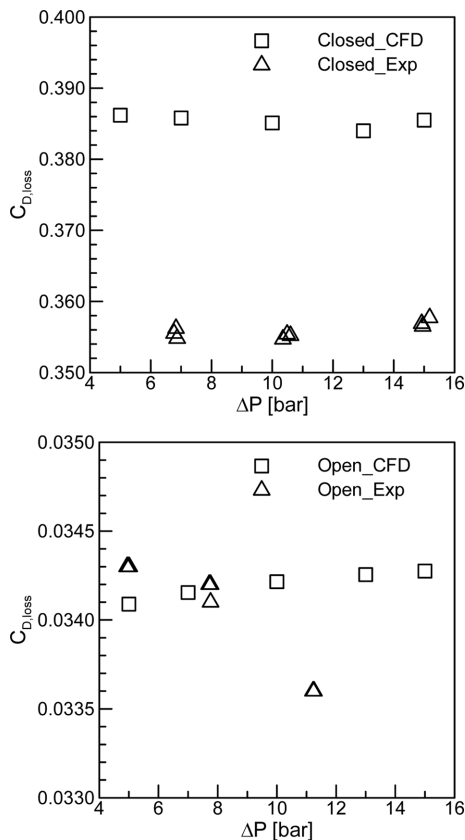


Fig. 11 Comparison of corrected discharge coefficient for the close and open-type swirl injectors

Figure 11은 점선홀에서의 압력손실이 고려된 유량계수와 실험에서 측정된 유량계수를 비교한 그래프이다.

실험결과와 비교했을 때 닫힘형 분사기의 경우 약 8% 정도 오차가 발생했지만 열림형 분사기에서는 1% 미만의 오차를 보였다. 실제 실험에서도 가공오차, 센서오차 등으로 인한 측정오차가 있기 때문에, 이 정도의 차이는 신뢰성 있는 결과로 판단된다.

5. 해석모델에 따른 비교

본 연구에서는 유량계수 및 분무각을 해석하기 위해 RSM-BSL 모델을 사용했기 때문에 다른 모델들도 해석을 수행하여 BSL 모델의 신뢰성을 알아보고자 하였다. Table 8은 일반적으로 많이 사용되는 k-ε, k-ω, SST, RSM-omega 모델을 이용하여 닫힘형 분사기의 질량유량을 해석한 결과이며, Fig. 12은 각 모델별 분무패턴을 보여준다. 이때 해석조건은 모두 격자 Lv. 4와 5,000회의 계산횟수를 적용하였다.

모든 모델에서 계산된 질량유량은 본 연구에 사용된 RSM-BSL 모델과 크게 다르지 않다. 하지만 k-ε 모델의 경우 최종 계산값은 위와 같았으나 계산횟수에 따른 수렴성이 없었기 때문에 신뢰할 수 없는 결과라고 할 수 있다. k-ω 모델의 경우 BSL 모델의 기본이 되는 모델이며, SST 모델 역시 k-ω 모델의 발전형이라고 할 수 있다. 질량유량 및 계산횟수에 따른 수렴성은 존재했으나 분무패턴에서 공기층이 형성되지 않음을 알 수 있다. 반면 RSM-omega 모델의 경우 BSL 모델과 거의 유사한 모델로 해석결과는 질량유량이나 분무패턴 모두 BSL 모델과 매우 유사한 것을 알 수 있다. 하지만 후속 연구로 수행되었던 동축 와류형 분사기의 혼합분무에서 적합한 해석결과가 나타나지 않았기 때문에 본 연구에서는 후속연구와의 일관성을 위해 사용하지 않았다. 참고 문헌⁽¹⁸⁾에 따르면 두 모델의 사이는 낮은 레이놀즈 수에 대한 보정 여부인데, 동축 분사기에 비해 상대적으로 단

Table 8 Comparison of mass flow rate for the closed-type swirl injector by solvers

	ΔP [bar]	m [g/s]
k-ε	10	164.32
k-ω		158.42
SST		161.58
RSM-omega		168.63
RSM-BSL		168.84

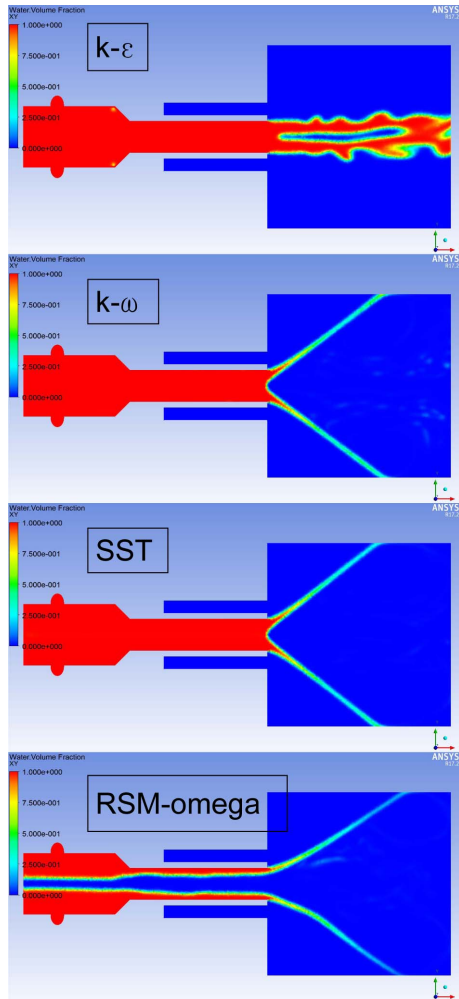


Fig. 12 Spray patterns of the closed-type swirl injector by solvers

순한 단일분무에 대해서는 omega 모델도 충분히 해석이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

와류형 분사기의 유동특성을 상용 프로그램인 ANSYS Fluent를 이용하여 수치해석적으로 연구하였다. 해석결과를 실험결과와 비교하여 해석결과 타당성을 확인하였다.

분사압력이 분무가 완전발달되는 조건이었기 때문에 실험과 마찬가지로 해석에서도 분사압력에 따른 분무각

은 크게 변하지 않았다. 닫힘형 분사기에서는 실험결과와 매우 유사했지만 열림형 분사기에서는 실험결과 대비 15% 정도 작게 예측이 되었다.

분사압력 증가에 따라 유량은 증가하였으며 유량계수는 분사압력에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이 역시 실험적으로 측정된 유량계수의 경향성과 유사하나 닫힘형 분사기에서는 유량계수가 8% 정도 차이가 있었던 것에 반해 열림형 분사기에서는 실험과 매우 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다.

난류모델에 따른 해석결과 단일 와류형 분사기는 RSM-BSL, RSM-omega 모델이 적합하다고 볼 수 있으며 단순 유량만 비교한다고 하면 k-ω, SST 모델도 사용 가능하다고 여겨진다. 하지만 간략화된 난류모델은 분사기 내부에 공기층이 형성되지 않는 문제가 있기 때문에 레이놀즈 스트레스모델을 사용하는 것이 바람직하다.

향후 동축 와류형 분사기의 이중분사 연구를 통해 레이놀즈 스트레스 모델 간 차이를 비교해보고 더 적합한 해석조건 및 모델설정에 대한 연구를 수행할 계획이다.

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) V. G. Bazarov, "Fluid Injectors Dynamics", Mashinostroenie Publication, Moscow, Russia, 1979.
- (2) G. S. Gill and W. H. Nurick, "Liquid rocket engine injectors", NASA Rep. SP-8089, 1976.
- (3) M. Popp, J. Hulka, V. Yang and M. Habiballah, "Liquid Rocket Thrust Chambers", Progress in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- (4) N. Ashgriz, "Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications", New York: Springer, 2011.
- (5) Q. Fu and L. Yang, "Visualization studies of the spray from swirl injectors under elevated ambient pressure", Aerospace Science and Technology, Vol. 47, 2015,

- pp. 154~163.
- (6) D. J. Kim, J. H. Im, P. G. Han and Y. B. Yoon, "The effect of Operation Conditions and Injector Geometry on the Spray Characteristics of Swirl Injectors", Journal of ILASS-Korea, Vol. 9, No. 1, 2004, pp. 21~29.
- (7) D. J. Kim, J. H. Im, H. K. and Y. B. Yoon, "Effect of Ambient Gas Density on Spray Characteristics of Swirling Liquid Sheets", Journal of Propulsion and Power, Vol. 23, No. 3, 2007, pp. 603~611.
- (8) J. H. Lee, G. J. Park and Y. B. Yoon, "A Study on Dynamic Characteristics of Gas Centered Swirl Coaxial Injector with Acoustic Excitation by Varying Momentum Flux Ratio", Journal of ILASS-Korea, Vol. 20, No. 3, 2015, pp. 168~174.
- (9) G. J. Park, J. H. Lee, I. K. Lee and Y. B. Yoon, "Spray Characteristics of Gas-Centered Swirl Coaxial Injectors according to Injection Conditions", Journal of ILASS-Korea, Vol. 19, No. 4, 2014, pp. 167~173.
- (10) 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.
- (11) R. J. Kenny, J. R. Hulka, M. D. Moser and N. O. Rhys, "Effect of Chamber Backpressure on Swirl Injector Fluid Mechanics", Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 4, 2009, pp. 902~913.
- (12) A. Datta and S. K. Som, "Numerical prediction of air core diameter, coefficient of discharge and spray cone angle of a swirl spray pressure nozzle", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, No.4, 2000, pp. 412~419.
- (13) G. Amini, "Liquid flow in a simplex swirl nozzle", International journal of Multiphase Flow, Vol. 79, 2016, pp. 225~235.
- (14) X. Wang, V. Yang, "Supercritical Mixing and Flow Dynamics of Liquid Oxygen, Kerosene Swirl Coaxial Injectors", ICLASS 2015, 13th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2015.
- (15) H. Park, T. Kim and Y. Kim, "Dual Swirl Injector Recess", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 7, No. 3, 2003, pp. 30~37.
- (16) H. K. Versteeg and W. Malalasekera, "An introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method", Longman Scientific & Technical, 1995.
- (17) F. R. Menter, A. V. Garbaruk and Y. Egorov, "Explicit Algebraic Reynolds Stress Models for Anisotropic Wall-Bounded Flow", Progress in Flight Physics, Vol. 3, 2012, pp. 89~104.
- (18) ANSYS FLUENT User's Manual v17.2.
- (19) A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Bristol, PA: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- (20) L. Bayvel and Z. Orzechowski, "Liquid Atomization", Washington, DC: Taylor & Francis, 1993.
- (21) Q. Fu, L. Yang, W. Zhang and K. Cui, "Spray Characteristics of an Open-end Swirl Injector", Atomization and Sprays, Vol. 22, No. 5, 2012, pp. 431~445.
- (22) K. Ahn and H. S. Choi, "Experimental study on discharge coefficient of swirl injector", ILASS-Asia 2014, 17th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2014.