이중 스월 인젝터의 분무특성에 관한 연구

박희호* · 정충연* · 김 유**

Investigation for Spray Characteristics of Dual Swirl Injector

Hee Ho Park* · Chung Yon Jeong* · Yoo Kim**

ABSTRACT

Both numerical analysis and cold tests for the swirl coaxial type injector were performed to obtain the influence of spray angle, velocity ratio and liquid film thickness for pressure drop and recess. The basic experimental and numerical data obtained in this study can be applicable to the performance design of swirl coaxial type injector. Spray angle was not affected by the applied test pressure drop, but spray angle was affected by tangential velocity ratio and shape factors. Feasibility of numerical analysis for the liquid film thickness and spray angle was confirmed, and the change of liquid film thickness by tangential velocity ratio affected more seriously than pressure drop, and liquid film thickness was decreased with increasing tangential velocity ratio.

초 록

본 연구에서는 이중 스월 동축형 분사기의 운용조건인 산화제 및 연료 적용 압력, Recess에 의한 영향이 추진제의 분산각, 인젝터 출구에서의 속도성분, 오리피스에서의 액막 두께 등의 영향을 확인하여 설계에 반영할 수 있도록 비연소 시험과 아울러 분사기에서의 유동조건과 관련한 수치해석을 수행하였다. 추진제의 분산각은 적용한 압력 강하량에는 크게 변화하지 않으나 입구에서의 접선방향 속도성분비와 인젝터 형상계수에는 민감하게 반응하여 변하는 것을 알 수 있었다. 수치해석을 통한 인젝터 오리피스 내부 액막 두께 해석 및 연소실 내부 분산각 거동 해석의 타당성을 확인하였으며, 액막 두께 변화에 속도성분비가 압력 강하량 변화에 비해 상대적으로 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었고, 속도성분비율이 증가할수록 액막 두께가 감소하는 경향을 보였다.

Key Words: Swirl Coaxial Type Injector(스월동축형 분사기), Spray Angle(분산각), Liquid Film Thickness(액막 두께), Tangential Velocity Ratio(접선방향 속도성분비)

1. 서 론

인젝터 개발은 과거에는 경험과 직관적으로 연소시험에 따른 개량에 의존하였기 때문에 성

† 2004년 12월 10일 접수 ~ 2005년 1월 6일 심사완료
* 학생회원, 충남대학교 기계공학과 대학원
** 종신회원, 충남대학교 기계공학과
연락저자, E-mail: hohee@cnu.ac.kr

능향상에 많은 시간이 소요되었지만, 최근에는 축적된 경험과 비연소시험 및 컴퓨터에 의한 연소장 해석의 발전으로 인젝터의 설계방법도 합리화되어가고 있다. 그러나 추진제의 종류와 분사형식 등에 의하여 분무 특성, 연소특성이 달라지고, 또한 연소에 관련된 과정과 현상이 복잡해지기 때문에 인젝터의 설계 방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

스월 동축형 분사기의 스월링 모션은 축에 대해 접선 방향을 가지는 산화제와 연료의 주입에 의해 주어지고 확정된 기하학적인 형상에 의해서 분무각이 결정된다. 이러한 분무각을 조절할 수 있는 기하학적인 변수로 recess가 있는데, Fig. 1과 같이 산화제 포스트가 분사기 면에 대해 얼마만큼 들어갔는가를 나타내주는 치수이다. 따라서 산화제 포스트를 분사기 면의 안쪽으로 위치시킴으로써 분사기 노즐 내에서 내부 혼합의 효과를 낼 수 있다[1].

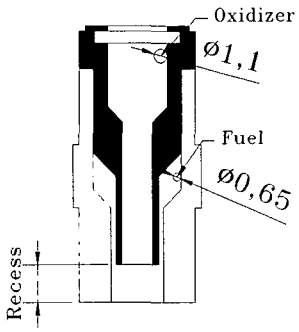


Fig. 1 Fuel & oxidizer swirl chamber

인젝터 오리피스 내부 또는 출구에서의 액막은 분무 액적 크기와 직접적으로 연관관계를 가지므로 정확한 측정이 요구된다. 그러나 액막 두께 측정을 위하여 많은 측정 방법이 제시되었지만 특정한 형상의 인젝터에 한정되어 적용된 특정한 경우를 제외하고는 정확한 측정이 이루어지지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 스월 동축형 인젝터의 운용 조건별 분무특성 변화를 알아보기 위한 비연소 시험과 상용 열유동 해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 액막 두께를 2차원의 연소실 유동해석을 수행하여 수치해석적으로 해석하여 제시하였다.

2. 해석 모델

21. 해석방법

유동에 대한 전산 수치 해석은 크게 두 가지의 경우로 나누어서 수행하였다. 우선 연료와 산화제의 스월 효과를 파악하기 위하여 설계된 기하학적 조건의 분사기 와류실을 3차원으로 모사하여 정상상태(steady)의 와류실 및 오리피스 내부에서의 스월 효과를 해석하고, 이러한 해석 결과를 다시 입력으로 이용해서 연소실 내부에서 형성되는 분산각을 해석하기 위하여 2차원의 Axisymmertic swirl 기법, VOF(Volume of Fraction) 모델을 적용하여 연소실 내부의 분산각 및 내부 유동을 비정상상태(unsteady)로 해석하였다.

VOF 모델은 체적분율이라는 개념을 사용하여 각 상을 구분하여 계산한다[2]. 만약 다상유동 계통에서 q번째 유체의 체적분율을 α_q라 표시할 때, $\alpha_{q=0}$는 제어체적에 유체가 전혀 없음을 $\alpha_{q=1}$은 제어체적이 q번째 유체로 전부 채워져 있음을, $0<\alpha_q<1$는 제어체적이 다상유동의 경계면에 위치함을 의미한다. 따라서 각 제어체적에서는 체적 분율 α_q값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 지배방정식 및 물성치는 다음과 같이 표시된다[3].

q번째 상에 대한 연속방정식

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = S\alpha_q \tag{1}$$

밀도, 점성계수

$$\Phi = \sum \alpha_q \Phi_q \tag{2}$$

운동량보존방정식

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu}{\partial x_i}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right) + \rho g_j + F_j \tag{3}$$

연소실 내부의 분무거동 해석에는 라그란지언 방법에 의하여 Discrete phase mass, Hydrodynamic drag 등을 포함하는 Discrete phase model의 분무현상을 해석하였다. 액적들의 궤도는 액적에 작용하는 다음과 같은 운동량보존방정식[3]을 적용하여 계산된다.

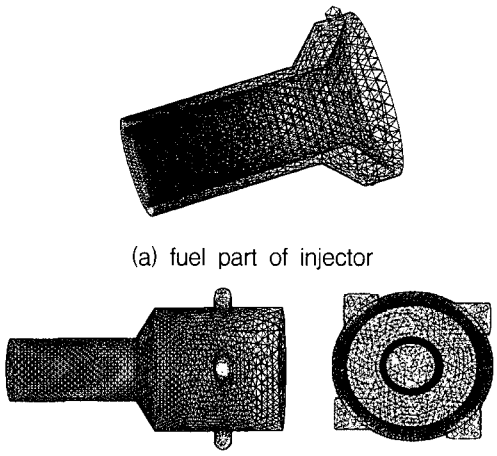
운동량보존방정식

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u-u_p) + g_x\frac{\rho_P-\rho}{\rho_P} + F_x \qquad (4)$$

여기서 $F_D(u-u_p)$는 단위 입자질량에 대한 마찰력이다. 분무해석을 위하여 본 연구에서 사용한 모델은 Pressure-Swirl Atomizer Model로서 이는 schmidt[4] 등이 제안한 Linearized Instability Sheet Atomization 모델을 적용하였으며, 이 모델은 Film formation과 Sheet breakup and Atomization으로 구분된다. 이러한 모델을 적용하여 계산 시에는 주위기체의 영향, 표면장력, 액체 점성 등이 고려된다. Fluent에는 두 개의 Spray breakup 모델이 사용 가능하나 본 연구에서는 낮은 Weber수와 저속의 분무에 적절한 Taylor Analogy Breakup(TAB) 모델[5]을 적용하였다. TAB모델은 액적에 작용하는 외력과 표면장력을 spring-mass로 고려하며 점성을 고려한다.

2.2 스월챔버 유동해석

인젝터 내부 유동해석을 위한 모델에서는 온도조건이 특별히 필요하지 않으므로 에너지 계산식은 고려치 않았으며 유동은 비압축성으로 간주하였다. 난류모델에 대한 운동에너지(k) 값을 위해 입구에서의 난류강도는 10%, 소산률(ε)을 위한 특성 길이는 0.001m를 사용하였다. 와류실 내부 유동 해석을 위한 격자 모델은 우선 산화제의 유동현상을 파악하기 위하여 인젝터 내부의 산화제 유동구간의 와류실과 4개의 접선방향 주입구와 연소실로 유출되는 오리피스 끝단 부위를 출구로 하여 모델링 하였고 또한 연료인 케로신의 유동현상을 파악하기 위하여 인젝터 내부 외곽부위의 연료 유동구간의 와류실과 4개의 주입구와 연소실로 유출되는 오리피스 끝단 부위를 출구로 하여 격자를 모델링 하였다.



(a) fuel part of injector

(b) oxidizer part of injector

Fig. 2 Injector with recess length

각각의 유동현상을 계산하기 위한 격자는 Fig. 2의 (a),(b)와 같으며 격자수는 약 4만 개의 비정상격자(unstructured)를 사용하였다. 입구와 출구조건은 출구 압력을 대기압으로 가정하고, 입구영역에서의 압력조건은 필요한 차압조건에 해당하는 입구압력을 가정하고 3차원의 정상유동 모델로 계산하였다. 해석은 연료와 산화제 두 가지 모두 입구와 출구의 차압이 10bar에서 40bar사이에 5bar 간격으로 7 가지 경우 에 대하여 수행하여, 출구 부위에서의 축방향 속도와 접선방향 속도의 비율을 구하였고, 또한 이러한 결과들을 연소실 유동해석에 필요한 입력조건으로 사용하였다.

2.3 분산각 거동 해석

연소실 내부에서 에너지 계산식은 고려치 않았으며 유동은 비압축성으로 간주하였다. 난류모델에 대한 운동에너지(k)값과 입구에서의 난류강도 역시 동일한 조건을 사용하였다. 연소실 내부 유동해석을 위한 격자 모델은 약 2만 개의 정렬격자를 사용하였다. 와류실의 스월 유동 해

석결과를 이용하여 연소실내 유동 현상을 2차원의 Axisymmertic swirl 모델로 모사하여 비정상 유동 해석을 수행하였다. 즉 연소실 내부 유동 현상 해석에서 구한 오리피스 끝단 부위의 속도 성분비율을 초기 입력조건으로 사용하였다. 연료는 축방향 속도성분 45%, 접선방향 속도성분 55%를 입구조건으로 적용하였으며, 산화제는 축방향 속도 성분 10% 접선방향 속도 성분 90%를 입구조건으로 적용하였다. 적용 압력은 출구를 대기압 상태로 가정하고 산화제 연료 단독 및 혼합주입의 모든 경우 공통적으로 차압이 10bar가 되도록 적용하였다. 해석 경우는 연료와 산화제가 각각 연소실로 유입되는 경우에 대한 유동해석을 수행하여 연소실 액막(liquid film)에 의해 형성되는 오리피스에서의 액막 두께 및 air core 등의 연소실 내부 및 오리피스 유동현상을 모사하였다. 또한 산화제 단독 분사시 해당 차압과 해당 속도 비에 대한 해석을 수행하여 분산각 변화 경향을 파악하였다.

3. 실험 장치 및 실험방법

스월 동축형 인젝터의 운용 조건별 분무특성 변화를 알아보기 위한 비연소 시험은 산화제인 액체산소의 모의액으로 밀도비가 비슷하고, 취급이 용이한 물, 연료는 케로신을 그대로 사용하여 인젝터 설계변수인 압력 강하량, Recess가 있는 경우 등이 인젝터의 분산각에 미치는 영향을 영상처리장치를 사용하여 고찰하였다.

레귤레이터 압력을 조절하면서 우선 물과 케로신 각각에 대해서 분산각을 촬영하였다. 분산각 가시화를 위해 수동카메라와 디지털 캠코더를 이용하여 측정한 결과 디지털 캠코더는 촬영 후 바로 결과를 볼 수 있다는 장점이 있으나 선명도가 떨어지고 셔터 속도를 조정할 수 없다는 단점이 있어 사진기만 사용하였다. 수동카메라는 니콘 F-807을 사용하였고, 광원으로는 stroboscope를 이용하였다. 밝은 뒷배경과 선명한 분산각의 외각선을 얻기 위해 stroboscope는 사진기의 맞은편에 설치하였고, 이 경우 직광을 받기 때문에 기름종이를 이용하여 stroboscope 앞을 막아주어 간접조명을 얻을 수 있었다. 필름은 감도 ISO400 흑백과 칼라 모두 사용하였다. 셔터 속도는 저압에서 1/30sec, 고압에서는 1/60sec로 조절하였고, 이 때 한 장에 분산각 외각선이 두번 이상 잡히도록 하기 위해 stroboscope는 7200rpm으로 고정하였다. 압력이 높을수록 분사속도가 빨라져 사진기의 셔터 속도를 증가시켜야 했으나 이럴 경우 셔터속도에 비해 광원의 강도가 작고 stroboscope의 속도 조절 범위를 벗어나 상이 잡히지 않아 셔터 속도는 1/60sec 이상으로 증가시키지 않았다.

실험조건에서 각 두 컷의 사진을 촬영하였으며, 실험 압력 근처에서 압력이 안정되었을 때 촬영하였다. 분산각은 노즐 근처에서 각도기를 이용하여 여러 차례 측정하여 최고값과 최저값을 버린 후 평균값을 취하였다.

4. 결과 및 고찰

실험과 아울러 이중 스월 동축형 분사기의 운용조건인 산화제 및 연료 적용 압력, Recess에 의한 영향이 추진제의 분산각, 인젝터 출구에서의 속도성분, 오리피스에서의 액막 두께 등과 단독 분무에 의한 분산각 변화의 영향을 확인하여 설계에 반영할 수 있도록 분사기에서의 유동조건과 관련한 여러 가지 현상에 대한 수치해석을 수행하였다.

4.1. 분산각

4.1.1 비연소 실험

단독 스월 인젝터 경우, 분산각은 스월 인젝터 내부 유동이론에 따른 이론적 설계 분산각의 계산이 가능하나, 혼합 분사의 경우 또는 Recess가 있는 경우 이론적인 계산방법으로는 예측하기 어려우므로 실험을 통하여 측정하여야 한다. Fig. 3과 4는 연료와 산화제 각각에 대하여 이론적으로 계산한 인젝터 오리피스 출구에서의

축방향 속도와 접선방향 속도를 나타낸 것이며, 또한 접선방향 속도 성분비를 백분율로 표현한 것이다. 연료의 접선방향 속도 성분비는 67.46%로 산화제의 접선방향 속도 성분비 52.22% 보다 크게 유지되고, 또한 연료의 접선방향 속도 크기가 산화제의 접선방향 속도 크기보다 큰 값을 가짐을 확인할 수 있으므로, 단독 분사 시 연료의 분산각이 산화제 분산각보다 클 것이라 예측할 수 있다. 또한 산화제 연료 모두 적용 차압의 증가에 따라 축방향 및 접선방향 속도가 증가하나, 접선방향 속도 성분비의 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 증가량의 비가 동일하여 속도 성분비가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 적용차압의 증가에도 불구하고 분산각의 변화가 없을 것이라는 것을 예측할 수 있다.

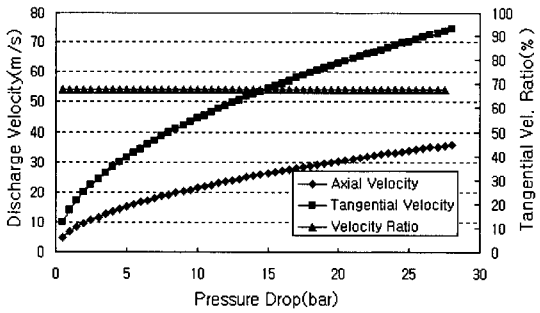


Fig. 3 Theoretical velocity variation of fuel with pressure drop

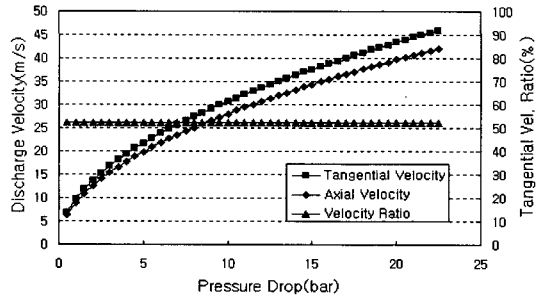


Fig. 4 Theoretical velocity variation of oxidizer with pressure drop

Fig. 5 Spray angle of fuel with pressure drop (kgf/cm2)

Fig. 6 Spray angle of oxidizer with pressure drop (kg_f/cm^2)

Figure 5와 6은 연료와 산화제의 단독 분사 시 적용압력 변화에 대한 분산각 변화를 나타내고 있다. 연료의 분산각이 산화제 분산각에 비해 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 산화제와 연료의 분산각 모두 압력변화에 대하여 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

Figure 7과 8은 실험에서 구한 산화제와 연료 단독 분사 시 분산각과 이론적으로 계산한 분산각을 표현한 것이다. 실험결과 Fig. 3, 4에서 예측한대로 압력변화에 대하여 분산각이 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 적용 차압이 대략 3bar이상에서는 분산각이 큰 변화를 보이지 않고 있으며 연료는 대략 115°정도에서, 산화제는 대략 70°정도에서 수렴하고 있음을 확인하였다. 그러나 Fig. 3, 4의 속도성분비를 식 (5)에 의거하여 계산한 이론적 분산각은 Fig. 7과 8의 이론적 분산각 그래프에서 보듯이 산화제는 85°, 연료는 128.5°로서, 실험결과는 설계치보다 작게 나타났다. 이는 유체 점성과 오리피스 등에서의 조도에 의한 마찰력 등의 영향 때문이라고 사료된다.

$$\tan\frac{\alpha}{2} = \frac{\text{축방향속도}}{\text{접선방향속도}} \qquad (5)$$

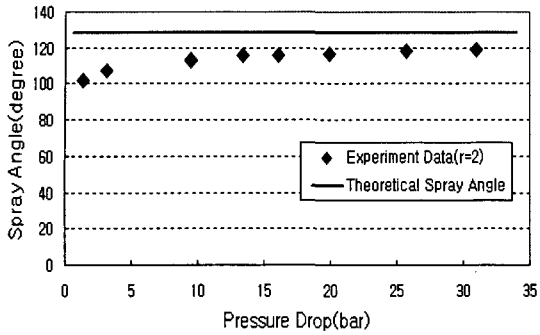


Fig. 7 Spray Angle of fuel with pressure drop

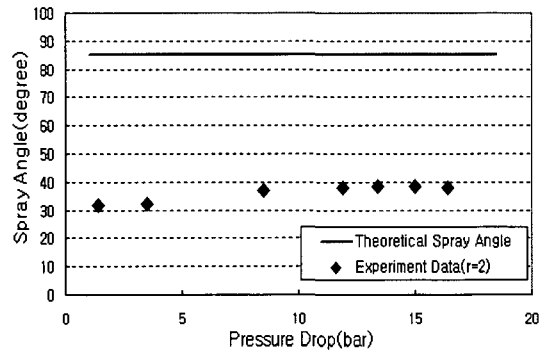


Fig. 8 Spray Angle of Oxidizer with pressure drop

단일 인젝터의 경우 이론적으로 형상계수가 변하지 않는 이상 이와 상관관계가 있는 분산각은 변하지 않으며, 오리피스 직경과 접선방향 주입구 직경은 모두 같으므로 형상 계수는 같은 값을 가진다.

4.1.2 속도성분 비율 해석에 의한 분산각 모사

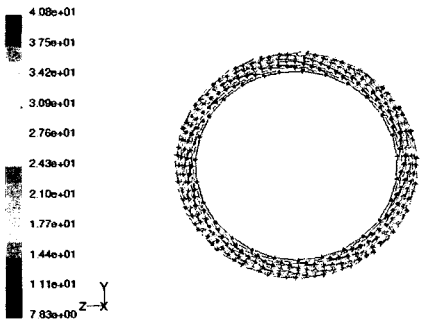


Fig. 9 Velocity profile of fuel part (m/s)

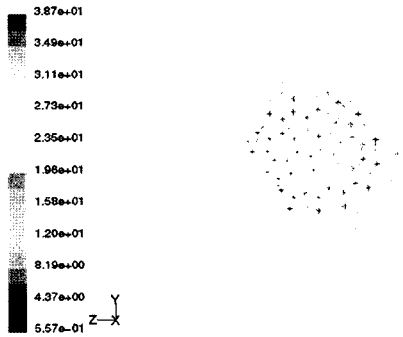


Fig. 10 Velocity profile of oxidizer part (m/s)

인젝터 오리피스 출구에서의 접선방향 속도와 축방향 속도 성분비는 연소실 내부 분산각 형성에 결정적인 역할을 할 것으로 예측된다. 따라서 오리피스 출구에서의 속도 성분비의 결정은 연소실 내부 유동 거동을 예측하기 위하여 절대적으로 필요하다. Fig. 9는 스월 챔버 유동 해석에 의한 오리피스 출구에서의 접선방향 속도비를 적용 압력강하량에 대하여 나타낸 것이다. 여기서의 속도 성분은 스월 챔버 유동해석에서 구한 접선방향 속도 및 축방향 속도성분 각각을 오리피스 출구에서의 질량가중 평균값으로 계산하여 속도 성분 비율을 구하였다. 해석결과에 의한 대표적인 결과인 오리피스 끝단속도 성분은 Fig. 9, 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 접선방향의 스월 효과가 확실하게 나타남을 알 수 있다.

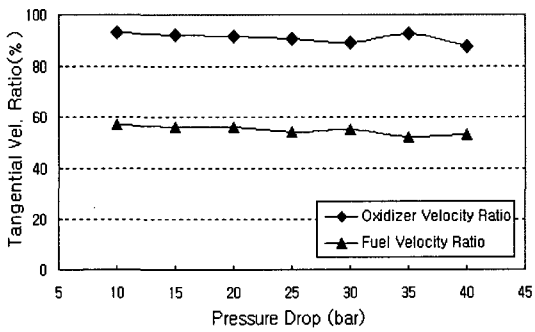


Fig. 11 Numerical analysis for tangential velocity ratio with pressure drop

Figure 11에서 볼 수 있듯이 산화제의 속도비는 압력 강하량에 대해 전체적으로 90% 정도에서 수렴하고 있음을 알 수 있고, 연료 속도비는

전체적으로 55% 정도에서 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이는 이론적으로 계산한 속도성분비(Fig. 3과 4)와는 다른 값이며, 이는 최대 속도비에 의한 속도성분비, 비점성 유동, 3차원 형상 등에 기인한 것이라 사료된다. 그림에서 알 수 있듯이 산화제 연료 모두 속도 성분비율이 압력 강하량에 대하여 크게 변하지 않는 모습을 나타내고 있다.

Figure 12는 liquid film에 의해 형성되는 2차원의 분산각을 나타낸 것으로, 연소실 내부 유동장에서 분무에 의한 분산각 거동을 수치 해석한 결과로서 liquid film에 의해 형성되는 2차원의 분산각을 수치 모사할 수 있음을 확인할 수 있었다.

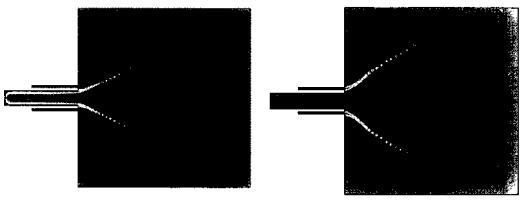


Fig. 12 Mixing spray angle (recess=2mm)

Figure 12는 연료 및 산화제의 단독 분사를 모사한 결과로서 Fig. 7과 8의 실험 결과와 동일하게 단독 분무 시 연료 분산각이 산화제 분산각보다 상당히 크게 형성되는 것을 알 수 있다. 본 해석을 위한 입력조건으로 압력 강하량은 10bar를 적용하였고, 입구에서의 접선방향 속도 성분비율은 와류실 유동해석 결과의 평균값인 연료는 55% 산화제는 90%를 적용하였다.

Figure 13은 인젝터의 입구 접선방향 속도성분비율을 90%로 고정하고 압력 강하량을 변화한 것에 대한 산화제의 해석적 분산각 변화를 실험 분산각 및 이론적 분산각 결과와 함께 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 해석적 분산각 역시 이론적 계산 및 실험 분산각과 유사하게 압력

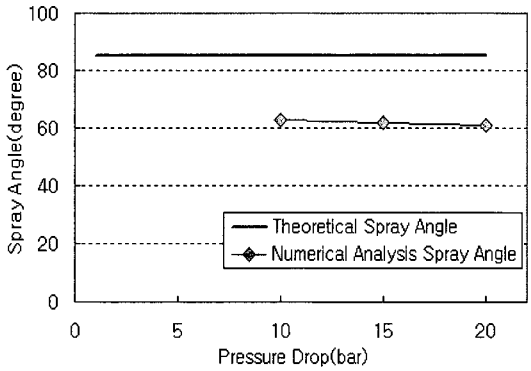


Fig. 13 Numerical analysis for spray angle of oxidizer with pressure drop

강하량의 증가에도 불구하고 분산각은 크게 변화하지 않는 모습을 보이며, 이는 앞에서의 형상계수가 변하지 않으면 분산각이 변하지 않는다는 사실과 일치하는 경향성을 보이고 있다. 전체적으로 해석 분산각이 실험결과에 비해 약 15% 정도 작은 분산각 결과를 나타내고 있다. 이는 실험에서의 분산각은 분무의 안개효과에 의하여 액주에 의한 실제 분산각보다 크게 평가될 수 있으며, 또한 해석 분산각을 수치해석하기 위하여 적용한 VOF모델의 오차 등에 기인한 결과라고 사료된다.

Figure 14는 인젝터의 입구 적용 압력 강하량을 10bar로 고정하고 접선방향 속도성분비에 대한 산화제 해석 분산각 거동을 표현한 것으로, 접선방향 속도성분이 증가할수록 산화제의 분산각이 증가하는 거동을 보이고 있다. 이는 적용되는 속도 성분비의 변화에 대하여 분산각이 변화하며 접선 방향 속도 성분 증가에 비례하여 분산각이 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 따라서 분산각 거동에는 적용되는 속도 성분 비율이 더 직접적인 영향을 끼침을 확인할 수 있다. 즉 추진제의 분산각은 적용한 압력 강하량에는 크게 변화하지 않으나 입구에서의 접선방향 속도성분비와 인젝터 형상계수에는 민감하게 반응하여 변하는 것을 알 수 있다.

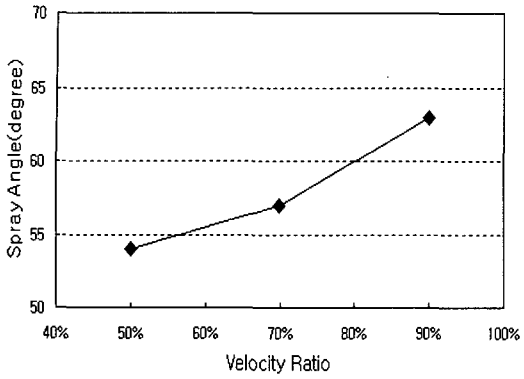


Fig. 14 Numerical analysis for spray angle of oxidizer with velocity ratio

4.2. 액막 두께(Film thickness) 해석

연소실 유동해석을 위하여 와류실 유동해석에서 구한 산화제 및 연료의 속도성분과 적용되는 압력 강하량을 입력으로 사용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 15 Numerical analysis for film thickness of oxidizer with 90% velocity ratio

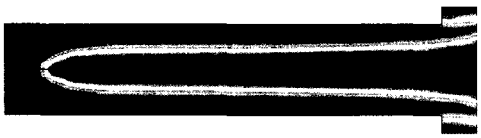


Fig. 16 Numerical analysis for film thickness of oxidizer with 50% velocity ratio

Figure 15, 16은 압력 강하량을 10bar로 고정하고, 각각 90%와 50%의 접선방향 속도 성분비율을 사용한 산화제 유동해석 결과 구해진 오리피스 내부 및 출구에서의 액막 두께를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 속도성분 비율에 따라 액막 두께가 상당히 달라질 수 있음을 보이고 있다. 90% 속도성분비를 적용하면 액막이 얇고 air core가 대부분을 차지하는 것을 알 수 있고, 50% 속도성분비에서는 액막과 air core가 약 절반 정도로 구분되는 것을 알 수 있다. 또한 오리피스 입구부분은 유동이 충분히 발달되지 않아 유동 액막이 정상적으로 형성되지 않았음을 보여주고 출구부분은 내부 액막에 비해 두께가 감소하는 모습을 보인다. 따라서 결과 분석 시에는 유동이 충분히 발달되지 않은 입구 부분은 제외하였다.

Figure 17과 18은 압력강하량 및 접선방향 속도성분비에 대한 액막의 두께를 나타낸 것이다. Fig. 17은 속도성분비를 90%로 고정하고 적용 압력 강하량을 다르게 적용한 경우의 액막 두께 변화를 표현한 것으로 적용압력 강하량에 따라 액막 두께가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 오리피스 입구에서 중간 부분으로 진행할수록 액막 두께가 높아지고 중간부분에서 최고 높이를 보인 후 출구 쪽으로 갈수록 다시 감소하며 출구에서는 모두 비슷한 두께가 되는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 분사압력이 증가하면 공기역학적 영향으로 미립화 성능이 우수하다고 알려져 있는데 액막 두께의 감소에 의한 영향도 있으리라 판단된다. Fig. 18은 압력 강하량을 10bar로 고정하고 속도 성분비율을 변경하여 적용하였을 경우의 액막 두께를 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 오리피스 진행방향에 대해서는 Fig. 17과 유사한 경향을 보이고 있으며, 속도 성분비율이 감소할수록 액막 두께가 증가하는 경향을 알 수 있으며, 두께 변화폭이 Fig. 17의 압력 강하량 변화에 비해 크게 변화하는 모습을 볼 수 있다. 이는 액막 두께 변화에 속도성분비가 상대적으로 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있고, 이는 압력 변화보다 접선방향 속도성분비가 유량 계수에 더 큰 영향을 끼치는 것과 같은 현상[6]이라고 할 수 있다.

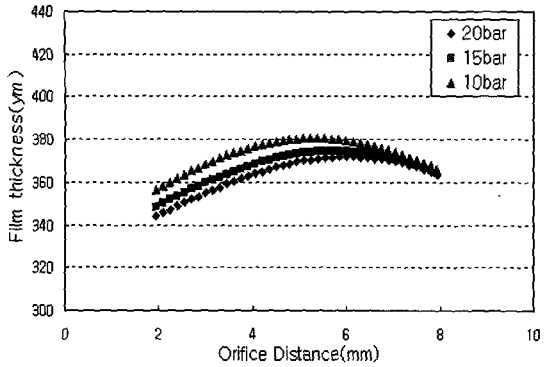


Fig. 17 Numerical analysis for film thickness of oxidizer with pressure drop

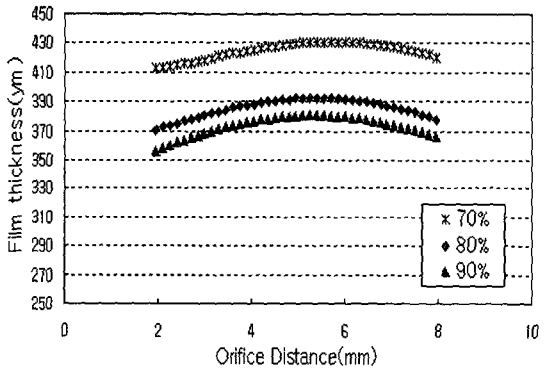


Fig. 18 Numerical analysis for film thickness of oxidizer with velocity ratio

그러나 해석결과 압력 강하량의 변화나 접선방향 속도성분비율의 변화는 액막 두께 변화를 야기하며 이는 분사의 유량 계수나 미립화 등에 영향을 끼치는 변수라는 것을 확인할 수 있다.

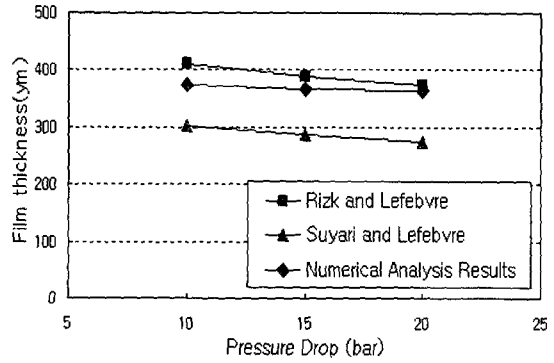


Fig. 19 Film thickness comparison with pressure drop

Figure 19는 속도성분비율 90%로 고정하고 적용 압력 강하량을 변경하여 적용하였을 경우의 액막 두께를 식 (6)의 Rizk and Lefebvre와 식 (7)의 Suyari and Lefebvre 관계식[7]과 비교하여 표시하였다. 여기서 사용된 액막 두께는 해석에서 구한 오리피스 내부 액막 두께를 평균하여 사용하였다.

$$t = 3.66\left(\frac{d_o m_L \mu_L}{\rho_L P_L}\right)^{0.25} \quad (6)$$

$$t = 2.7\left(\frac{d_o m_L \mu_L}{\rho_L P_L}\right)^{0.25} \quad (7)$$

t : liquid film thickness,
do : orifice diameter, mL : mass flow rate,
μL : dynamic viscosity, ρL : density,
PL : pressure

그림에서 알 수 있듯이 해석한 액막 두께 결과는 기존의 발표된 액막 두께 계산식의 결과와 상당히 유사한 경향성을 보이고 있으며 특히 Rizk and Lefebvre식의 결과와 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 실험을 통하여 보정된 Suyari and Lefebvre 관계식 보다는 조금 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 액체로켓 엔진에 적용되는 이중 스월 동축형 인젝터의 운용 조건별 분무특성 변화를 알아보기 위한 비연소 시험과 상용 열유동 해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 유동해석을 수행하였다.

1. 분산각은 적용된 압력강하에 무관하게 일정하였으나, 접선방향 속도 성분비 증가에 따라 분산각이 증가하였다.
2. 액막 두께의 경우, 접선방향 속도 성분비 증가가 적용 압력강하에 비해 상대적으로 더 큰 영향을 미치며, 속도 성분비가 증가하면

액막 두께가 감소하였다.

3. 인젝터 오리피스 내부 액막 두께 해석 및 연소실 내부 분산각 거동 해석의 타당성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 박희호, 김태한, 김 유,"Dual Swirl Injector Recess 길이에 따른 분산각 평가", 한국추진공학회지 Vol. 7, No. 3, 2003, pp.30-37

[2] C.W. Hirt, and B.D. Nichols," Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries,"Journal of Computational Physics, Vol. 39, 1981, pp.201-225

[3] Patankar,"Numerical Heat Transfer and Fluid Flow,"McGraw-Hill, 1980.

[4] D. P. Schmidt, I. Nouar, P. K. Senecal, C. J. Rutland, J. K. Martin and R. D. Reitz," Pressure Swirl Atomization in the Near Field, "SAE Paper 01-0496, SAE, 1996

[5] G. I. Taylor,"The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream." Technical Report, In the Scientific Papers of G. I. Taylor, ed., G. K. Batchelor, 1963

[6] 정해승, 김선진,"Dual Swirl 인젝터의 분산각에 관한 해석적 연구", 한국군사과학기술학회지 Vol. 6, No. 4, 2003, pp.132-144

[7] N. K. ,Rizk and A. H. Lefebvre," Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers," ICLASS-85.S.V.

[8] M. Sasaki, H. Sakamoto, M. Takahashi, T. Tomita, H. Tamura,"Comparative study of recessed and non-recessed swirl coaxial injectors,"33rd AIAA/ASME/SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1997

[9] 八柳信之,"氣液同軸型噴射要素による噴霧流のし實驗および解析(3)",航空宇宙技術研究所報告 769호, pp.1-30

[10] FLUENT user's manual, version 6.0