

Dual Swirl 인젝터의 분산각에 관한 해석적 연구

Numerical Investigation for Spray Angles of Dual Swirl Injector

정 해 승*
Jeong, Hae-Seung

김 선 진**
Kim, Sun-Jin

ABSTRACT

Numerical analysis of the spray angles of Dual swirl injector were investigated to obtain basic design data and to predict the combustion performance. Using the commercial thermal hydraulic program, discharge coefficients and spray angles were numerically analyzed with recess length, pressure drop, velocity ratio, mixture ratio and back hole length. Water was used as simulants for oxidizer and fuel, respectively to compare the experimental results. Swirl injectors were designed to inject oxidizer of 70.5g/s and fuel of 29.5g/s at the pressure drop of 1MPa and two recess lengths were considered. In addition, the effect of injector geometry coefficient and velocity ratio on the discharge coefficient was studied.

주요기술용어 : LRE(Liquid Rocket Engine)(액체로켓엔진), swirl injector(스월 인젝터), spray angle(분사각)

1. 머리말

액체추진 로켓엔진은 추진제를 공급하는 추진제 공급장치와 추진제 공급장치로부터 공급된 추진제를 연소하여 추력을 얻는 추력실로 구성되며, 액체추진제 로켓엔진의 성능은 추력실에 크게 의존한다. 액체로켓의 추력실에서 인젝터는 설계추력을 낼 수 있도록 적정량의 산화제와 연료를 미립화 및 혼합시켜 연소실

로 공급하는 장치로, 로켓엔진의 중요한 부분이다.

일반적으로 인젝터는 작은 구멍이 있는 원판형이지만 이런 작은 구멍으로부터 분사된 산화제 및 연료가 적당하게 분무 및 혼합되어 안정하고 효율이 좋은 연소가 진행되는 동시에 과대한 열부하가 발생하지 않아야 하는 등, 여러 가지 요구를 만족시켜야 한다. 인젝터의 개발은 과거에는 경험과 직관적으로 연소시험에 따른 개량에 의존하였기 때문에 성능향상에 많은 시간이 소요되었지만, 최근에는 축적된 경험과 비연소 시험 및 컴퓨터에 의한 연소장 해석의 발전으로 인젝터의 설계방법도 합리화되어가고 있다. 그러나 추진제

* 충남대학교 기계공학과 대학원 박사과정

** 청양대학 소방안전관리과 조교수

의 종류와 분사형식 등에 의하여 분무 특성, 연소특성이 달라지고, 또한 연소에 관련된 과정과 현상이 복잡해지기 때문에 인젝터의 설계 방법에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 상용 열유동 해석 프로그램인 Fluent를 사용하여 Uni-element 스월 동축형 인젝터의 기하학적 설계변수와 운용조건이 추진제의 분산각 및 인젝터의 유량계수에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 해석모델

2.1 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 Axisymmetric swirl 기법, VOF (Volume of Fraction) 모델을 적용하여 연소실 내부의 분산각 및 내부 유동을 비정상상태(unsteady)로 해석하였다.

본 연구에서는 속도와 같은 스칼라량을 같은 위치에 저장하는 집중격자(non-staggered grid)를 사용하였으며, 난류유동 해석에 있어서는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 또한 와류실의 스월 유동해석과 연소실의 분산각 거동해석은 모두 first-upwind 차분방법을 적용하였고, 와류실 유동해석 및 분무거동 해석에서는 SIMPLE 연산법을, 연소실내부 분산각거동 해석에서는 PISO 연산법을 사용하였다.

분산각 거동 해석에는 다상유동 해석 모델 중에서 혼합되지 않는 다상 유동의 경계 위치 해석에 적용할 수 있는 VOF 모델^[1]을 해석모델로 선정하였다. 연소실 내부의 분무거동 해석에는 라그랑지언 방법에 의하여 discrete phase mass, hydrodynamic drag 등을 포함하는 discrete phase model의 분무현상을 해석하였다. 액적들의 궤도는 액적에 작용하는 다음과 같은 운동량보존방정식을 적용하여 계산하였다.

운동량보존방정식

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + g_x \frac{\rho_P - \rho}{\rho_P} + F_x \quad (1)$$

여기서 $F_D(u - u_p)$ 는 단위 입자질량에 대한 마찰력이다. 분무해석을 위하여 본 연구에서 사용한 모델은 Pressure-Swirl Atomizer Model로서 이는 Schmidt 등이 제안한 Linearized Instability Sheet Atomization 모델^[2]을 적용하였으며, 이 모델은 film formation과 sheet breakup and atomization으로 구분된다. 이러한 모델을 적용하여 계산 시에는 주위기체의 영향, 표면장력, 액체 점성 등이 고려되는데 낮은 Weber수와 저속의 분무에 적절한 Taylor Analogy Breakup(TAB) 모델을 적용하였다.

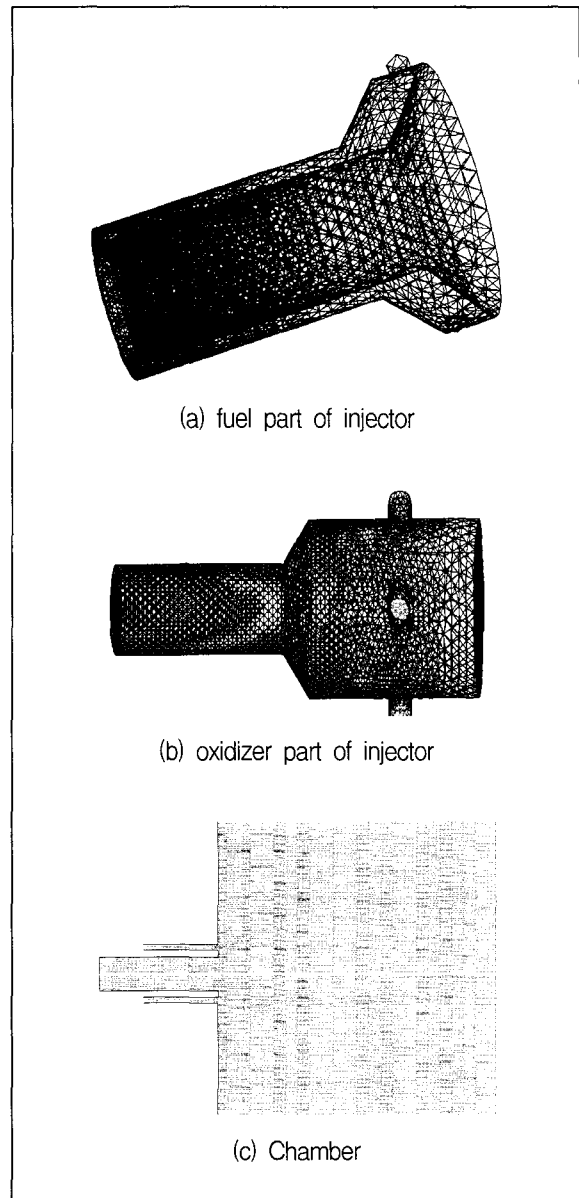
2.2 스월챔버 유동해석

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 외류실과 4개의 접선방향 주입구와 연소실로 유출되는 오리피스 끝단 부위를 출구로 하여 모델링 하였고 또한 연료인 케로신의 유동현상을 파악하기 위하여 인젝터 내부 외곽 부위의 연료 유동구간의 외류실과 4개의 주입구와 연소실로 유출되는 오리피스 끝단 부위를 출구로 하여 격자를 모델링하였다. 각각의 유동현상을 계산하기 위한 격자는 그림 1(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 40bar사이에서 5bar 간격으로 7가지 경우 및 backhole의 길이가 1mm, 2mm인 경우 등에 대하여 수행하여, 출구 부위에서의 축방향 속도와 접선방향 속도의 비율을 구하였고, 또한 이러한 결과들을 연소실 유동해석에 필요한 입력조건으로 사용하였다.

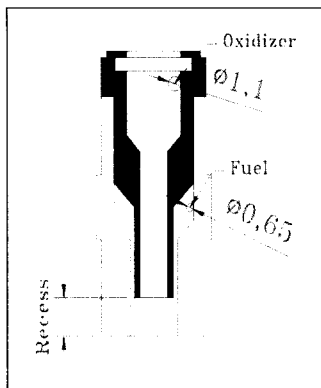
2.3 분산각 거동 해석

연소실 내부에서의 분산각 거동 해석에서도 역시 에너지 계산식은 고려치 않았으며 유동은 비압축성으로 간주하였다. 난류모델에 대한 운동에너지(k)값과 입구에서의 난류강도 역시 동일한 조건을 사용하였다. 연소실 내부 유동해석을 위한 격자 모델은 그림 1(c)와 같으며 약 2만 개의 정렬격자를 사용하였다. 외류실의 스웰 유동 해석결과를 이용하여 연소실내 유동현상을 2차원의 axisymmetric swirl 모델로 모사하여 비정상 유동 해석을 수행하였다. 즉 연소실 내부 유동현상 해석에서 구한 오리피스 끝단 부위의 속도

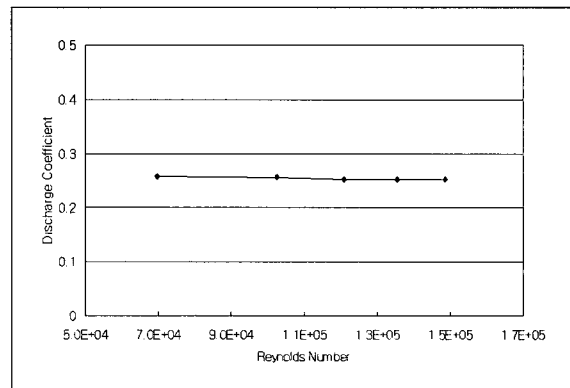


[그림 1] Grid systems

성분비율을 초기 입력조건으로 사용하였다. 연료는 축방향 속도 성분 45% 접선방향 속도 성분 55%를 입구조건으로 적용하였으며, 산화제는 축방향 속도 성분 10% 접선방향 속도 성분 90%를 입구조건으로 적용하였다. 적용 압력은 출구를 대기압 상태로 가정하고



[그림 2] Injector with recess length



[그림 3] Discharge coefficient with Re.

산화제 연료 단독 및 혼합주입의 모든 경우 공통적으로 차압이 10bar가 되도록 적용하였다.

해석은 연료와 산화제가 각각 연소실로 유입되는 경우에 대한 유동해석과 연료와 산화제가 동시에 연소실로 유입되는 경우에 대한 해석을 수행하여 연소실 liquid film에 의해 형성되는 분무각과 오리피스에서의 액막 두께 및 air core 등의 연소실 내부 및 오리피스 유동현상을 모사하였다.

또한 인젝터의 기하학적 형상변수인 산화제 오리피스의 길이를 변화시켜 recess 길이 변화에 대한 분산각 거동 변화를 확인하기 위해 그림 2의 형상에서 recess 길이를 -3mm~2mm 까지 0.5mm 단계로 증가시키면서 해석을 수행하여 그 영향을 비교 분석하였다. 또한 산화제 단독 분사 시 해당 차압과 해당 속도 비에 대한 해석을 수행하여 분산각 변화 경향을 파악하였다.

3. 해석결과

3.1 유량 계수

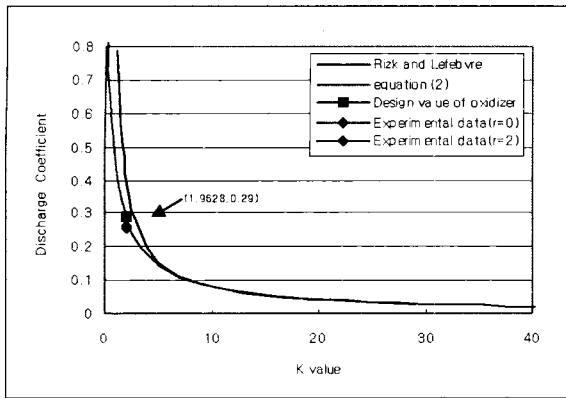
일반적으로 스웰 동축형 인젝터 경우에 인젝터 오

리피스 면을 따라서 환상 형태의 액막이 형성된다. 이 때문에 유동 단면적이 줄어들어 유량 계수는 대체로 낮은 값을 보인다. 낮은 레이놀즈 수 영역에서는 점도의 영향이 지배적이므로 점도가 증가할수록 오리피스 내부 액막의 두께가 두꺼워져 유량 계수는 증가한다. 반면에 레이놀즈 수가 인젝터의 일반적인 사용 범위인 3,000 이상의 레이놀즈 수 영역에서는 유량 계수가 레이놀즈 수에 따라서 크게 변하지 않게 되는데, 일반적으로 스웰 동축형 인젝터는 이러한 유동 조건을 기준으로 설계된다.

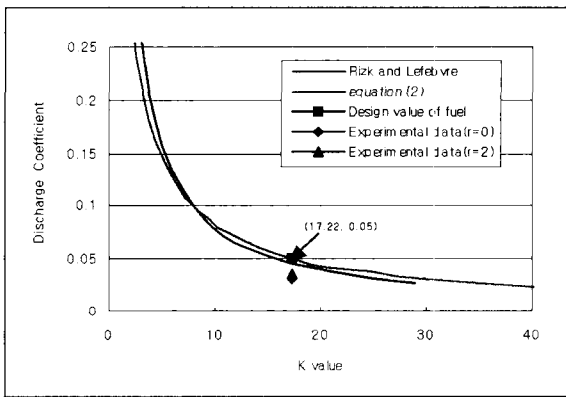
그림 3은 설계 제작된 recess 없는 스웰 동축형 인젝터 산화제에 대한 유량 계수(Cd) 실험 결과를 레이놀즈 수(Reynolds number)에 대하여 나타낸 것이다. 그림 2의 실험 결과에서도 확인할 수 있듯이 높은 레이놀즈 수 영역에서는 레이놀즈 수가 변하여도 유량 계수가 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

유량계수와 스웰 동축형 인젝터의 설계 형상계수(K)의 관계는 식(2)와 같다. ϵ 은 스웰 동축형 인젝터에 사용되는 추진제의 필링계수이다.

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{K^2/(1-\epsilon) + 1/\epsilon^2}} \quad (2)$$



[그림 4] Discharge coefficient of oxidizer



[그림 5] Discharge coefficient of fuel

이는 ϵ 가 크면 작은 gas core를 가지며 큰 C_d 를 의미하며 ϵ 가 작으면 큰 gas core를 가지며 작은 C_d 를 의미한다.

그림 4과 그림 5는 실험에 사용된 스웰 동축형 인젝터의 설계 형상계수(K)에 대한 설계 유량 계수 및 관련식을 측정된 산화제 유량 계수 및 연료 유량 계수와 함께 나타낸 것이다.

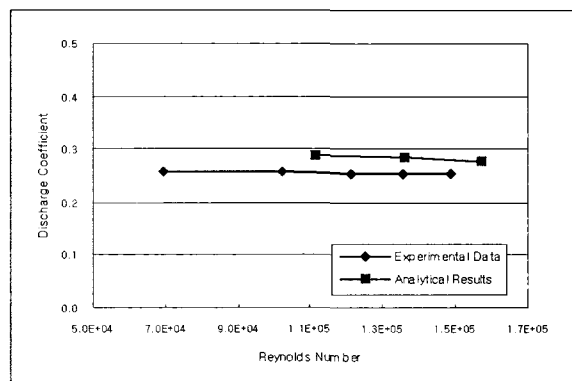
그림에서 알 수 있는 바와 같이 recess없는 인젝터 경우 산화제 및 연료측 실험 유량 계수 결과와 0.25876 및 0.03125로서 두 추진제 모두 설계 유량 계수보다 작은 값을 나타내고 있음을 알 수 있는데, 이

는 설계 값은 비점성 유동 이론에 의한 것이나 실험 유체는 점성이 있으며 또한 인젝터 가공상 조도 등에 의한 마찰증가에 의한 영향 때문이라고 판단된다. 그리고 recess가 있는 인젝터의 연료 및 산화제 유량 계수가 recess없는 인젝터에 비해 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 유동이 접촉하는 길이가 recess 차이만큼 상대적으로 작아지기 때문에 마찰력도 동시에 감소하기 때문이라고 사료된다. 또한 Rizk와 Lefebvre^[3]가 제안한 인젝터 형상계수에 의한 유량 계수 관계식도 본 연구에서 인젝터 설계를 위하여 적용한 식과 상당히 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

$$C_d = 0.35 \left(\frac{A_b}{D_s d_o} \right)^{0.5} \left(\frac{D_s}{d_o} \right)^{0.25} \quad (3)$$

따라서 유량 계수는 적용압력에 따른 레이놀즈 수에 따라서 크게 변하지 않는 것을 나타내고 있으며, 이는 인젝터의 기하학적 형상계수가 변화하지 않으면 레이놀즈 수의 변화에 대해서는 유량 계수가 변하지 않음을 알 수 있다.

그림 6은 연소실 유동을 수치 해석하여 해석된 유



[그림 6] Discharge coefficient with Reynolds No.

량 계수 결과를 적용된 압력에 따른 레이놀즈 수에 대하여 실험결과와 함께 나타낸 것이다. 오리피스 입구에서의 접선방향 속도성분비를 90%로 고정하고 각각의 압력 강하량에 따른 레이놀즈 수에 대하여 해석한 결과로서, 해석된 유량 계수는 레이놀즈 수 변화에 대하여 아주 미세하게 감소하는 경향을 나타내고 있으나, 그 변화는 크게 심각하지 않음을 알 수 있다.

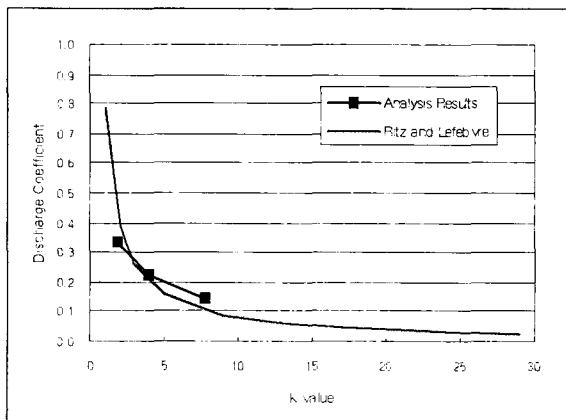
이것은 유량 계수는 높은 레이놀즈 수 영역에서는 레이놀즈 수에 관계없이 일정한 값을 갖는 결과와 동일한 경향을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 해석한 유량 계수 값이 실험 결과에 비해 약 10% 정도 높은 값을 보이고 있으며 이는 수치해석에서 가공상 조도 등에 대하여 이상적 유동조건을 적용한 차이에 기인한 것이라고 사료된다.

그림 7은 오리피스 유량 계수를 외류실 유동해석을 통하여 인젝터 운용 조건별 즉 인젝터 형상계수 변화에 대한 해석적 유량 계수를 구한 결과를 나타낸 것으로, 산화제 외류실 유동해석에서 적용 압력 강하량을 15 bar로 고정하고 외류실로의 접선방향 주입구 개수를 4개, 2개, 1개로 변화하면서 해석한 유량 계수 결과를 인젝터 형상계수에 대하여 나타낸 것이다. 접

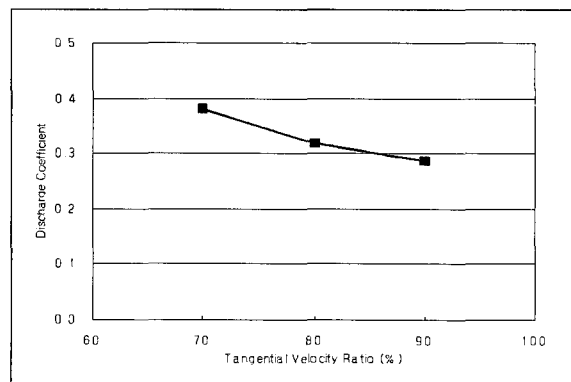
선방향 주입구 4개인 경우가 본 연구에서 사용하는 산화제 인젝터 설계 형상계수로 1.96이다.

형상계수는 접선방향 주입구가 적어질수록 큰 값을 가진다. 그림에서 알 수 있듯이 인젝터 형상계수가 증가할수록 유량 계수가 감소하며, 이는 Rizk와 Lefebvre의 관계식 결과와도 상당히 유사한 경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 인젝터 형상계수는 유량 계수에 결정적인 영향을 주는 변수임을 확인할 수 있으며, 또한 설계된 형상계수 값에서 해석된 유량 계수 결과가 실험 결과치보다도 조금 크게 나오는 것은 해석에서 사용된 이상적 유동조건 때문이라고 사료된다.

그림 8은 오리피스 입구에서의 압력 강하량을 15bar로 고정하고 입구 접선방향 속도성분비 변화에 대하여 해석한 유량 계수 결과를 나타낸 것으로, 그림 6의 레이놀즈 수에 대한 유량 계수 변화와는 달리 접선방향 속도 성분비에 따라 유량 계수 변화가 상당한 차이로 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 접선방향 속도성분의 감소는 상대적으로 축방향 속도성분의 증가를 의미한다. 따라서 접선방향 속도 성분비 감소에 따른 축방향 속도성분의 증가는 인젝터 오리피스



[그림 7] Discharge coefficient of oxidizer orifice



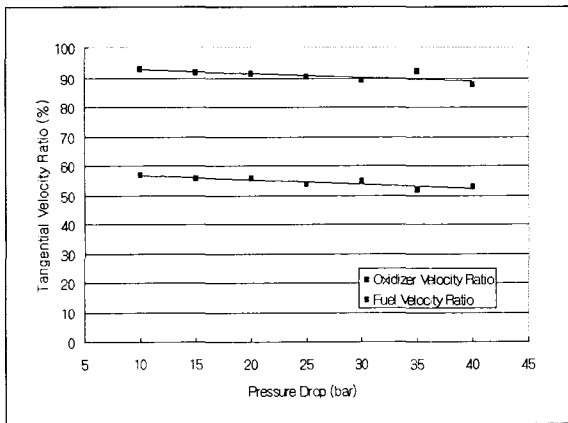
[그림 8] Discharge coefficient with tangential velocity ratio

내부 유동량을 증가시키고, 이는 유량 계수의 증가를 야기한다고 사료된다. 그러므로 레이놀즈 수 변화보다는 속도성분비의 변화가 유량 계수에 대한 영향력이 더 크게 작용되고 있음을 알 수 있다. 즉 스윙 동축형 인젝터의 유량 계수는 인젝터 형상계수 및 오리피스 입구에서의 속도 성분비 변화에 따라 민감하게 변하는 것을 알 수 있다.

3.2 속도성분 비율 해석

인젝터 오리피스 출구에서의 접선방향 속도와 축방향 속도 성분비는 연소실 내부 분산각 형성에 결정적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 오리피스 출구에서의 속도 성분비의 결정은 연소실 내부 유동 거동을 예측하기 위하여 절대적으로 필요하다.

그림 9는 스윙 챔버 유동 해석에 의한 오리피스 출구에서의 접선방향 속도비를 적용 압력강하량에 대하여 나타낸 것이다. 여기서의 속도 성분은 스윙 챔버 유동해석에서 구한 접선방향 속도 및 축방향 속도 성분 각각을 오리피스 출구에서의 질량가중 평균값으로 계산하여 속도성분 비율을 구하였다. 그림에서 볼 수 적으로 90% 정도에서 수렴하고 있음을 알 수 있고

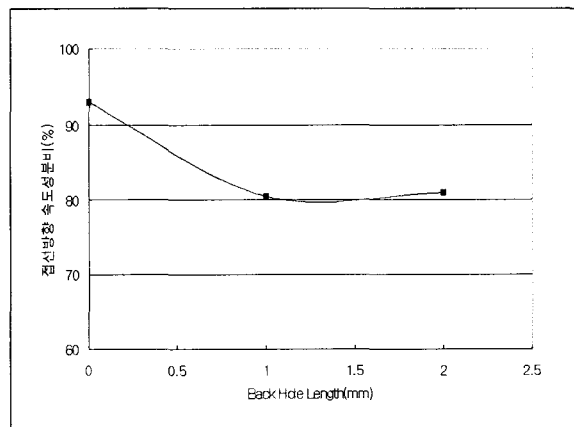


[그림 9] Tangential velocity ratio with pressure drop

있듯이 산화제의 속도비는 압력 강하량에 대해 전체 연료 속도비는 전체적으로 55% 정도에서 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이는 이론적으로 계산한 속도성분비와는 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. 이는 인젝터의 형상계수가 변하지 않는 한 분산각을 결정하는 속도성분이 변하지 않는다는 이론적인 해석 및 실험결과와도 유사한 경향을 보여주고 있다.^[3] 그러나 그림에서 보이는 압력 강하량 증가에 따른 미세한 속도 성분비율의 감소는 실험시 측정 정밀도의 향상이나 해석시 수치계산의 정확도 향상시에는 분산각 변화 등에 미치는 영향을 좀 더 세밀하게 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

Back hole은 인젝터 내부 스윙 챔버안에 적용된 감쇠구조로 인젝터 산화제 스윙 챔버의 접선방향 주입구 후방에 존재하는 여분의 빈 공간을 말한다.^[6] 그림 10은 접선방향 주입구로부터 후방으로 존재하는



[그림 10] Tangential velocity ratio with back hole length

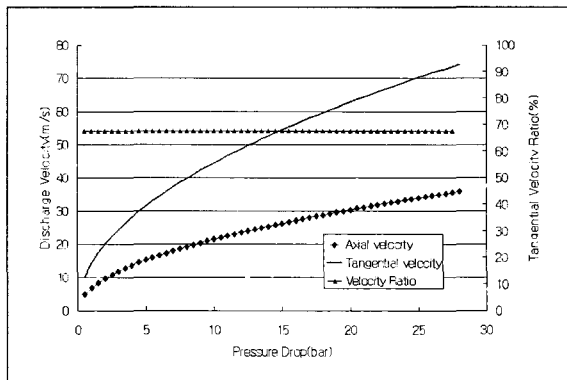
backhole의 수직 길이변화에 대한 속도 성분비율의 변화를 해석하여 분산각의 변화를 예측하였다.

Backhole이 없는 경우의 속도성분 비율에 비해 backhole이 있는 1mm, 2mm의 경우에는 속도성분 비율이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 그러나 backhole의 크기 즉 길이 변화에는 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 그러므로 이러한 backhole의 길이 변화로 표현되는 backhole의 존재는 분산각 형성에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예측된다. 따라서 backhole은 분산각 거동을 조절하는 새로운 변수가 될 수 있을 것이라 사료된다.

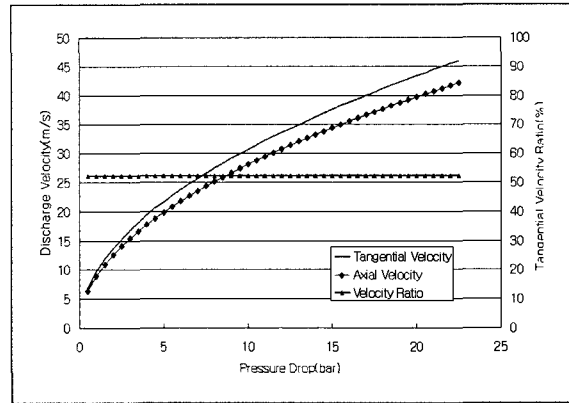
3.3 분산각

3.3.1 단독 분산각

그림 11과 그림 12는 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 크

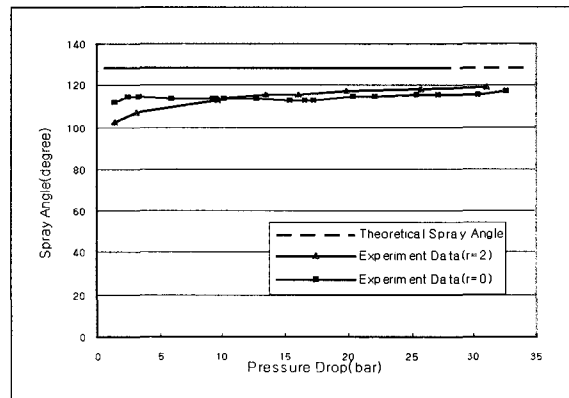


[그림 11] Velocity variation of fuel part with pressure drop

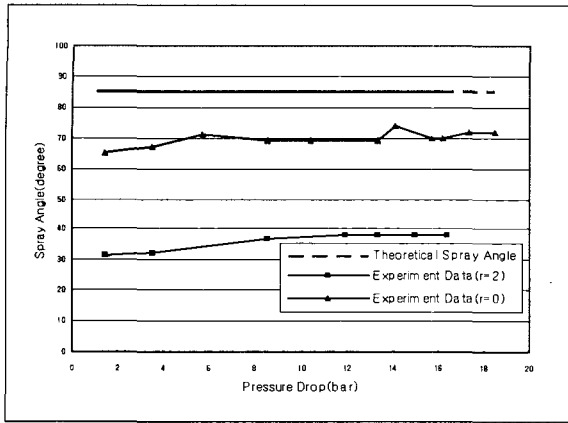


[그림 12] Velocity variation of oxidizer with pressure drop

기보다 큰 값을 가짐을 확인할 수 있으므로, 단독 분사시 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.



[그림 13] Spray angle of fuel part with pressure drop



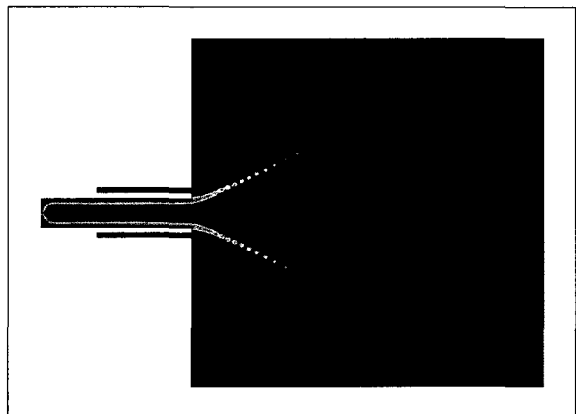
[그림 14] Spray angle of oxidizer with pressure drop

그림 13과 그림 14는 실험에서 구한 산화제와 연료 단독 분사시 분산각과 이론적으로 계산한 분산각을 표현한 것이다. 실험결과 그림 11과 그림 12에서 예측한대로 압력변화에 대하여 분산각이 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 적용 차압이 대략 3bar 이상에서는 분산각이 큰 변화를 보이지 않고 있으며 연료는 대략 115° 정도에서, 산화제는 대략 70° 정도에서 수렴하고 있음을 확인하였다. 그러나 그림 11과 그림 12의 속도성분비를 통해 계산한 이론적 분산각은 그림 13와 그림 14의 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.

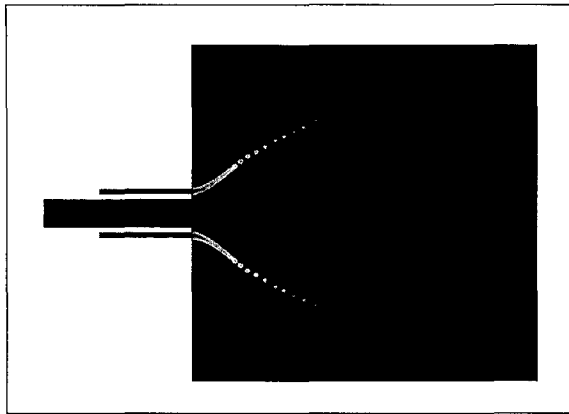
또한 그래프에서 알 수 있듯이 recess는 산화제 분산각에는 큰 영향을 끼치지 않으나 연료 분산각은 recess의 영향이 상당히 분산각의 차이가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 연료 분사시 배출 유동이 바깥쪽 노즐 벽면에 부딪혀 접선방향 속도 성분의 감소로 인한 것이라 판단된다.

이는 인젝터의 형상계수 등에 의한 이론적 유동 해석으로 파악할 수 없는 부분이다. 단일 인젝터의 경우 이론적으로 형상계수가 변하지 않는 이상 이와 상관관계가 있는 유량 계수, filling 계수, 분산각은 변하지 않으며, 오리피스 직경과 접선방향 주입구 직경은 모두 같으므로^{[4][5]} 형상 계수는 같은 값을 가진다. 따라서 연료측 분산각이나 recess되지 않은 산화제 분산각은 일정하게 유지됨을 확인할 수 있다.

그림 15와 그림 16은 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. 그림 15와 그림 16은 연료 및 산화제의 단독 분사를 모사한 결과로 그림 13과 그림 14의 실험 결과와 동일하게 단독 분무시 연료 분산각이 산화제 분산각보다 상당히 크게 형성되는 것을 알 수 있다. 본 해석을 위한 입력 조건으로 압력 강하량은 10bar를 적용하였고 입구에서의 접선방향 속도 성분비율은 외류실 유동해석 결과의 평균값인 연료는 55% 산화제는 90%를 적용하였다.

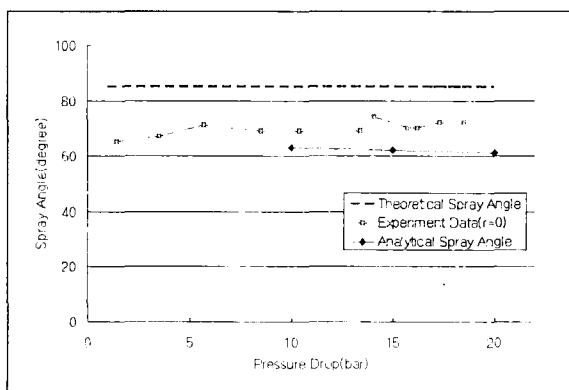


[그림 15] Spray angle of oxidizer

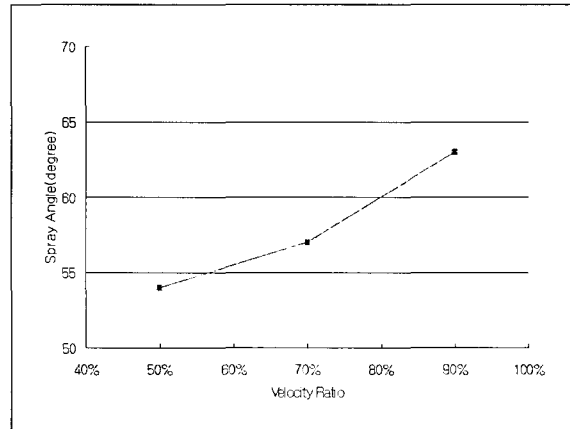


[그림 16] Spray angle of fuel

그림 17은 recess가 없는 인젝터의 입구 접선방향 속도성분 비율을 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 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.



[그림 17] Spray angle of oxidizer with pressure drop

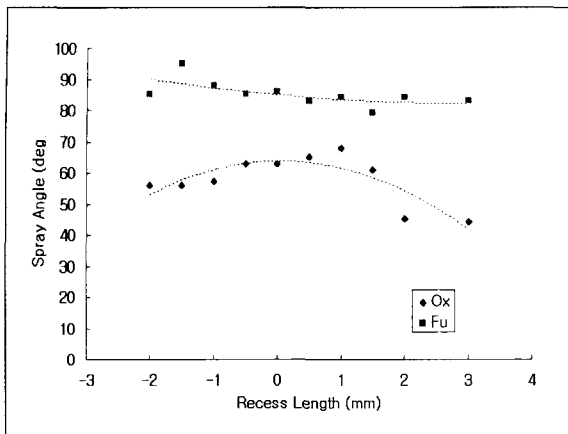


[그림 18] Spray angle of oxidizer with velocity ratio

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.

그림 18은 recess가 없는 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 압력 강하량에는 크게 변화하지 않으나 입구에서의 접선방향 속도성분비와 인젝터 형상계수에는 민감하게 반응하여 변하는 것을 알 수 있다.

그림 19는 산화제와 연료의 단독 분사시 분산각을 나타낸 것으로, 연료 분산각이 평균적으로 88° 정도이며 산화제 분산각은 평균적으로 60° 정도로 실험결과보다 해석 분산각이 전체적으로 작게 모사되었으며

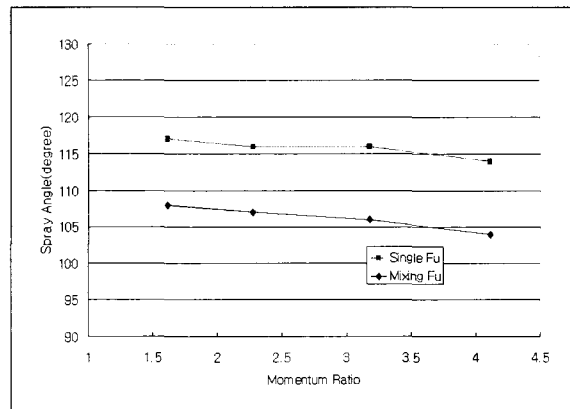


[그림 19] Analytical spray angle of oxidizer and fuel

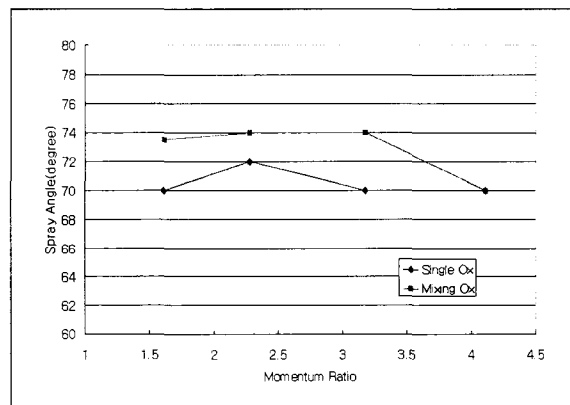
연료 분산각은 약 23%, 산화제 분산각은 약 15%의 차이를 나타내고 있다. 또한 연료는 recess 길이에 대하여 전체적으로 큰 변화는 없으나 음의 recess 길이 쪽으로 분산각이 조금씩 커지는 경향을 볼 수 있고, 산화제 분산각은 약 0.5mm recess 길이를 정점으로 분산각이 가장 크고 recess가 양쪽 방향으로 길어지면 분산각이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 산화제 오리피스 recess가 2mm와 같이 내부 쪽으로 형성된 경우에는 연료 오리피스 벽에서의 충돌로 인한 손실로 분산각이 작아지고 충돌이 없는 0.5mm 정도에서 가장 큰 분산각이 형성되고 다시 -2mm recess에서는 상대적으로 긴 오리피스에 의한 손실로 분산각이 감소된 결과로 판단된다. 상대적으로 연료 분산각은 recess에 의한 영향을 적게 받는 것을 알 수 있다.

3.2.2 혼합 분산각

인젝터 추진제의 단독 분사시의 분산각은 이론적으로 계산하여 예측가능하나 두 추진제를 동시에 분사하는 혼합분사의 경우에는 두 유동의 간섭에 의해 분산각의 변화가 생기므로 이론적 예측이 불가능하여 실험에 의존하여 확인하여야 한다.



[그림 20] Spray angle w.r.t momentum ratio and mixing(Fuel)



[그림 21] Spray angle w.r.t momentum ratio and mixing(Oxidizer)

그림 20과 그림 21은 recess가 없는 인젝터 각각의 운동량비에서 추진제 단독 분사와 혼합분사시의 분산각 변화를 나타낸 것으로, 연료는 혼합분사시 단독분사 경우에 비해 분산각이 감소하고 산화제는 혼합분사 경우 단독분사의 경우에 비해 분산각이 증가하고 있음을 보여준다. 이러한 경향은 전체적으로 운동량비 변화에 특별히 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 혼합분사의 경우는 단독분사와 달리 두 추진제 분무사이에 외부 공기의 주입이 없어 압력이 낮아지게 되고,

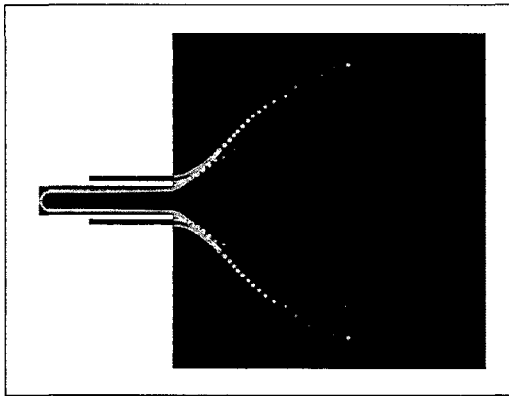
그 결과 바깥쪽 분무 즉 연료의 분산각은 줄어들고 안쪽 분무 즉 산화제 분산각은 증가하게 된다. 그림에서 보듯이 모의 산화제 분산각보다 연료 분산각의 변화폭이 더 큰 것으로 보아 분산각 변화는 연료 속도보다 산화제 질량유량의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

그림 22와 그림 23은 혼합분사를 수치 해석한 결과로서 recess가 없는 경우에는 오리피스 외부에서 연료와 산화제가 합쳐져서 연소실로 분사되는 외부혼합을 확인할 수 있으며, recess가 있는 경우에는 오리피스 내부에서 합쳐지는 내부 혼합의 분무거동을 확인

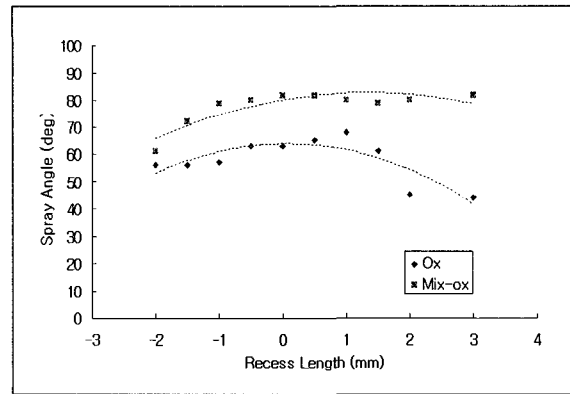
할 수 있으나 이는 속도성분 비율에 따라 차이가 있을 것으로 판단된다.

그림 24는 산화제 분산각을 단독 분사시와 혼합 분사 경우에 대하여 나타낸 것으로 실험결과에서와 같이 혼합 분산각이 산화제 단독 분산각보다 커지게 됨을 알 수 있다. 혼합 분산각 변화는 recess가 긴 쪽에서 상대적으로 큰 변화가 발생하고 이는 recess에 의한 영향도 확인할 수 있다.

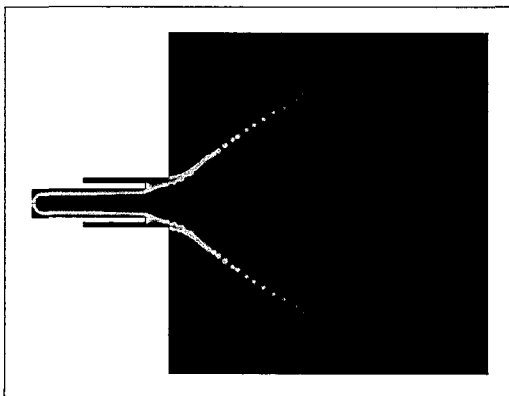
그림 25는 연료의 분산각을 단독 분사시와 혼합 분사 경우에 대하여 나타낸 것으로 혼합 분산각이 단독 분산각보다 작게 나타나는 것을 알 수 있으나 큰 차



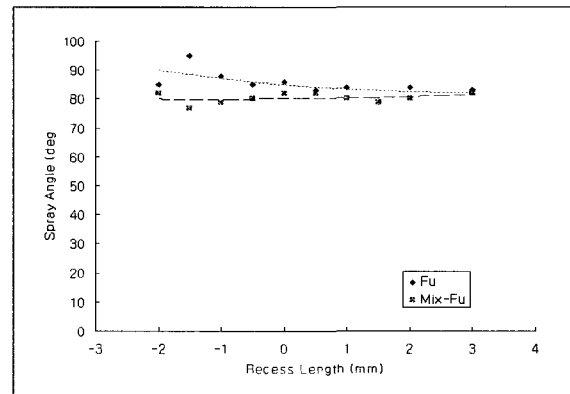
[그림 22] Mixing spray angle(r=0)



[그림 24] Mixing spray angle of oxidizer



[그림 23] Mixing spray angle(r=2)



[그림 25] Mixing spray angle of fuel

이를 보이지 않고 있으며, 또한 recess가 길수록 거의 같은 분산각이 형성됨을 알 수 있고, 이는 내부 혼합에 의한 영향으로 판단된다.

이러한 단독 분사 대비 혼합 분사시 연료와 산화제 분산각 변화는 혼합 분사시 두 추진제 분무사이에 외부 공기의 주입이 없어 압력이 낮아지게 되고, 그 결과 바깥쪽 분무 즉 연료의 분산각은 줄어들고 안쪽 분무 즉 산화제 분산각은 증가하게 되기 때문이며 또한 recess에 의한 내부 혼합의 영향도 작용하리라고 사료된다.

4. 맺음말

본 연구는 액체로켓 엔진에 적용되는 이중 스윙 동축형 인젝터의 기하학적 설계변수와 운용조건이 추진제의 분산각에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 예측한 것으로서, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 유량계수는 실험 시 적용된 $5.0E+04$ 이상의 높은 Reynolds No. 영역에서는 Reynolds No.에 무관하게 일정하였으나, 인젝터의 기하학적 형상계수와 속도성분비 변화에는 민감하게 변화하였다.
- 2) 분산각은 적용된 압력강하에 무관하게 일정하였으나, 접선방향 속도성분비 증가에 따라 분산각이 증가하였으며, 혼합 분사 경우에는 추진제 상호 간섭에 의해 연료 분산각은 감소하고, 산화제 분산각은 증가하였다.

참 고 문 헌

- [1] C.W. Hirt, and B.D. Nichols, "Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol.39, pp.201~225, 1981.
- [2] 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.
- [3] N. K. Rizk and A. H. Lefebvre, "Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers", ICLASS-85.
- [4] 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.
- [5] 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, 1983.
- [6] S.H. Hwang, Y.B. Yoon, "Effect of Backhole on Spray Characteristics of Swirl Injectors in Liquid Propellants Rocket Engine", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol.7, No.2, pp.23~35, 2003.