

Dual Swirl Injector Recess 길이에 따른 분산각 평가

박희호* · 김태한** · 김 유***

A Study on Spray Angle of Dual Swirl Injector with Different Recess Length

Hee-Ho Park* · Tae-Han Kim** · Yoo Kim***

ABSTRACT

Spray angle of dual swirl injector is established according to the velocity ratio at orifice exit. Due to the internal mixing at recess and lack of correlation for the combined two fluid injection, prediction of spray angle is very difficult. This study deal with experimental work and numerical simulation on spray angle with different recess length. Among the multiphase flow models, the VOF model was selected to simulate the spray angle. Feasibility of numerical analysis are confirmed by comparing the results with the experimental data, and the effect of recess on spray angle are analyzed for single and combined spray case.

초 록

Swirl 인젝터는 유체가 접선방향의 주입구를 통해 주입되어 인젝터 내부에서 접선방향 속도와 축방향 속도를 갖고 흐르다 노즐에서는 속도성분비에 의해 결정된 분산각에 따라 흐른다. 이러한 분산각은 특히 이중 swirl 인젝터에서 두 유체가 분무되어 서로 간섭을 주고 특히 recess가 있는 경우 내부 혼합 등의 이유로 예측이 어렵다. 이러한 분산각 현상을 recess 길이별로 실험을 통하여 규명하고 또한 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version6.0을 사용하여 수치해석하였다. 다상유동 해석 모델 중 VOF (Volume Of Fluid) 모델을 사용하여 모사하고 실험결과와 비교하여 적용 타당성을 확인하였으며, recess가 단독 분사시와 혼합 분사시 분산각에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

Key Words: Spray Angle (분산각), Swirl Injector (스월형 분사기), Recess Length (후퇴 길이)

1. 서 론

액체로켓 엔진은 인젝터와 연소실 그리고 노즐로 구성되고 이러한 부분들 중 엔진의 성능과 안전성에 가장 밀접한 관계를 가지는 것이 인젝터이다. 인젝터의 주요 기능은 추진제를 분사하고 또한 연소실내에서 산화제와 연료의 국부적 혼합율과 미립화 정도를 결정하는 역할을 하

† 2003년 3월 18일 접수 ~ 2003년 6월 1일 심사완료

* 학생회원, 충남대학교 기계공학과 로켓실험실

** 비회원, 충남대학교 기계공학과 로켓실험실

*** 종신회원, 충남대학교 기계공학과 로켓실험실
연락처, E-mail: thkim8995@hanmir.com

기도 한다[1]. 본 연구에서 사용한 swirl 인젝터는 비 충돌형 인젝터의 일종으로 회전유체의 충돌로 인하여 미립화되고 혼합되는 방식이다[2]. 이중 Swirl 인젝터 바깥쪽 인젝터 길이 끝단에 대한 안쪽 인젝터 길이 끝단이 내부로 들어간 길이를 recess라고 한다. 이중 swirl 인젝터의 연소효율과 미립화 정도는 인젝터 출구에 형성된 콘형의 연료와 산화제 분산각과 밀접한 연관성을 가진다. Swirl 인젝터에서 유체는 접선방향 주입구를 통해 swirl chamber로 유입 되어 내부에서 접선방향 속도와 축방향 속도를 모두 갖고 유동이 형성되어 흐르다가 인젝터 출구에서는 이 속도 성분비에 의해 결정된 분산각에 따라 연소실 내부 유동이 형성된다. 이러한 swirl 인젝터 분산각은 swirl 챔버 내부 유동이 원을 통해 구할 수 있으나 이는 단일 swirl 인젝터인 경우에만 해당된다[3]. 그러나 이중 swirl 인젝터에서는 두 유체가 분무되는 것이므로 분무된 두 유체는 서로 간섭을 주고 특히 recess가 있는 경우 두 유체가 바깥쪽 인젝터 오리피스 내부에서 만나게 되므로 매우 복잡한 유동을 형성하게 된다. 그러므로 recess 길이는 산화제와 연료의 유동 형성에 영향을 미쳐 분산 각과 혼합특성, 그리고 미립화에 지대한 영향을 미친다. 하지만 recess 길이가 이론적 분산각 해석에는 포함되지 않으므로 recess 길이에 따라 분산각이 어떻게 변하는지 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이중 swirl 인젝터에서 산화제, 연료 각각을 분무할 경우와 혼합 분무할 경우 recess 변화가 분산각에 미치는 영향을 비연소 수류 실험으로 규명하였다. 또한 recess에 의한 분산각 변화에 대한 수치해석을 상용 열수력 해석 코드인 FLUENT Version 6.0의 내재된 다상유동 해석 모델 중 VOF 모델을 사용하여 산화제/연료/공기 등의 다상유동을 해석하였다. 해석결과를 실험결과와 비교 분석하여 전산코드 및 해석모델의 적용 가능성도 평가하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 실험방법

본 연구에서는 그림 1과 같이 접선방향 주입구의 개수는 연료, 산화제 모두 일반적으로 많이 사용하는 4개를 선정하였다. 본 연구에 사용한 인젝터 설계 요구조건은 표 1과 같고 Recess 길이는 그림 2와 같이 3mm, 2mm, 0mm와 산화제 노즐을 연료노즐보다 상대적으로 2mm 나오게 한 네 종류의 인젝터를 제작하였다.

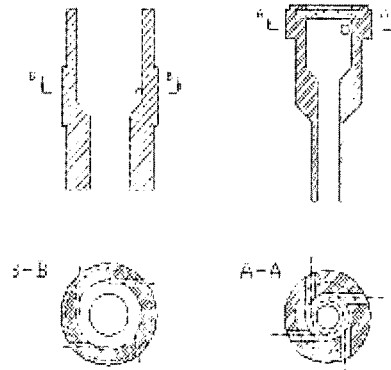


Fig. 1 연료 & 산화제 Swirl Chamber

B-B : 연료, A-A : 산화제

Table 1. 인젝터 설계변수

Thrust	71 lbf
Pch(연소챔버압력)	300psia
Pe(노즐출구압력)	14.7psia
ΔP (차압)	147psia
Propellants	LOX
	Kerosene
O/F	2.385

비연소 실험을 위한 실험장치는 그림 3과 같다. 모의 추진제는 물과 kerosene을 이용하였으며 모의 추진제를 40 bar까지 견딜 수 있는 고압탱크에 진공펌프를 사용하여 주입한 후 고압의 질소가스를 사용하여 인젝터에 공급하였다. 추진제가 분무되면서 탱크 내부의 압력이 떨어지는 것을 방지하기 위해 가스 질소 통에 레귤레이터를 장착하여 1차압이 연료는 34bar 산화제는 25bar 까지 되도록 가압하고, 인젝터 전단에 needle valve를 장착하여 압력을 제어하였다. 압력 센서

는 needle valve와 인젝터 사이에 설치하였다. 분산각 가시화를 위하여 수동카메라를 사용하였고 광원으로는 stroboscope을 사진기 맞은편에 설치하였다. 실험은 적용 압력별 여러 조건에 대하여 연료 및 산화제 단독 분사 및 혼합분사 조건에 대하여 수행하였다. 분산각 사진은 적용 압력이 안정되었을 때 촬영하여 각도기에 의한 측정 평균값을 분산각으로 취하였다.

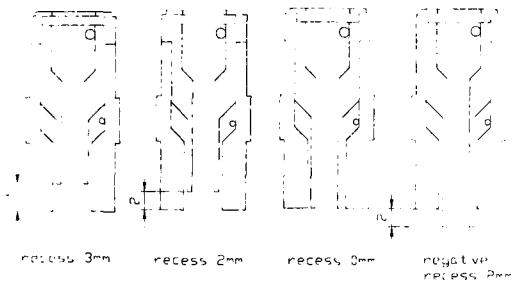


Fig. 2 4종의 recess 인젝터

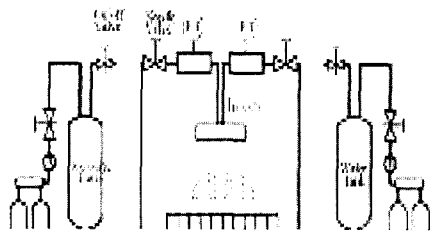


Fig. 3 실험 장치 개략도

2.2 실험결과

그림 4는 약 10 bar의 차압을 적용하였을 경우의 연료 분산각으로 약 115°이며 recess에 의한 영향이 크게 나타나지 않음을 보여준다. 그림 5는 8~10 bar의 차압을 적용하였을 경우 약 30~70°의 산화제 분산각을 나타낸 것으로 recess가 길어짐에 따라 분산각이 작아짐을 알 수 있다. 그림 6은 동일한 유량을 분사하는 경우 혼합 분산각을 나타낸 것으로 recess가 긴 3mm, 2mm인 경우에는 완벽히 내부 혼합되어 분사되는 것을 확인할 수 있고 recess가 0인 경우에는 두 추진제의 분산각 구분이 어려울 정도의 분산각이 나타나며 recess가 -2mm인 경우에는 완전히 구분된 분산각 즉 혼합되지 않는 분무형태

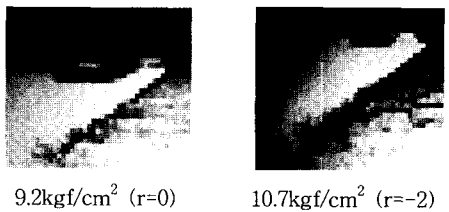
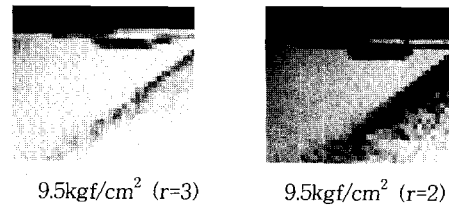


Fig. 4 Recess 길이별 연료 분산각

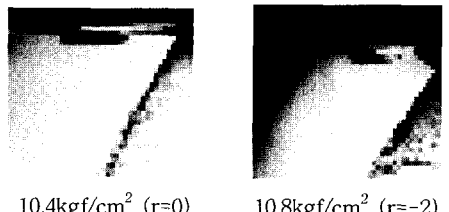
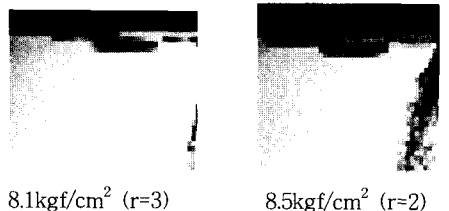
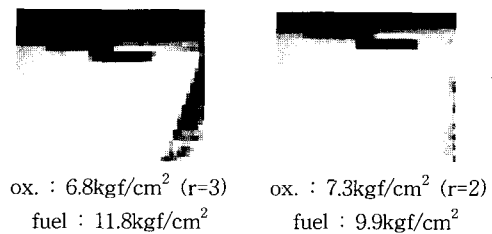
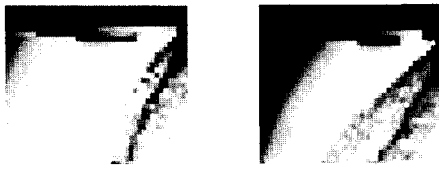


Fig. 5 Recess 길이 별 산화제 분산각

가 형성됨을 알 수 있다. 또한 혼합 분산각은 단독 분무와는 다른 분산각 즉 바깥쪽 연료 분산각은 줄어들고 안쪽 산화제 분산각은 증가하였다. 이는 두 액체 분무사이의 모멘텀 interaction에 기인되는 압력저하로 인한 영향 때문이라고 판단된다.





ox. : 7.7kgf/cm²(r=0) ox. : 8.3kgf/cm² (r=-2)
 fuel : 12.6kgf/cm² fuel : 13.3kgf/cm²

Fig. 6 혼합분산각(total mass flow rate : 70g/s)

그림 7은 여러 적용 압력에 대한 연료 분산각을 나타낸 것으로 6 bar이상에서 115°에 수렴함을 나타내고 있으며, 최대 분산각은 recess에 따른 큰 변화가 없음을 보여준다 그림 8은 산화제의 압력별 분산각을 나타낸 것으로 recess에 따른 분산각 차이가 나타남을 알 수 있고 이는 3mm, 2mm recess 경우 내부 노즐에서의 충돌에 의한 영향으로 판단되고 내부 충돌이 없는 0mm, -2mm recess에서는 분산각 70°에 수렴함을 알 수 있다.

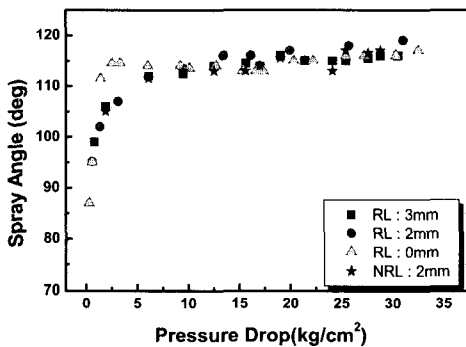


Fig. 7 적용 압력별 산화제 분산각

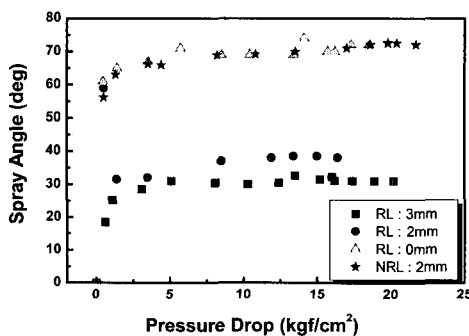


Fig. 8 적용압력별 연료 분산각

2.3 전산 해석

2.3.1 수학적 모델

실험과 아울러 이중 swirl injector의 산화제/연료 오리피스 출구에서 liquid film에 의해 형성되는 분산각에 대한 수치해석을 수행하였다. 해석은 동일한 압력이 적용되는 경우 recess 길이별로 연료 및 산화제 분산각을 각각 모사하고 또한 혼합분사시의 분산각을 모사하여 그 영향을 파악하였다. 본 연구를 위한 열유동해석은 두 가지의 경우로 크게 나누어서 수행하였다. 우선 연료와 산화제의 swirl 효과를 파악하기 위하여 설계된 기하학적 조건의 swirl chamber를 3차원으로 모사하여 swirl chamber 및 오리피스에서의 swirl 효과를 해석하고, 이러한 결과를 다시 입력으로 이용하여 연소실 내부에서 형성되는 유동 현상을 해석하기 위하여 2차원의 axisymmetric swirl 기법을 사용하여 VOF 모델을 적용하여 분산각 및 내부 유동을 해석하였다. 분산각 거동 해석에는 다상유동 해석 모델 중에서 혼합되지 않는 다상 유동의 경계 위치 해석에 적용할 수 있는 VOF 모델을 해석모델로 선정하였다. VOF 모델은 체적분율이라는 개념을 사용하여 각 상을 구분하여 계산한다[4]. 만약 다상유동 계통에서 q번째 유체의 체적분율을 α_q 라 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 다상 유동의 경계면에 위치함을 의미한다. 따라서 각 제어체적에서는 체적 분율 α_q 값을 기초로 하여 적절한 변수값 및 물성치들이 할당되게 된다. 지배방정식 및 물성치는 다음과 같이 표시된다[5].

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

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

α_q : fluid's volume fraction

2.3.2 난류모델

Swirl chamber에서의 3차원 정상 유동해석이나 2차원의 연소실 비정상 유동은 약 35m/s의 고속 난류 유동영역으로 유동계산시 난류를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 유동해석에서 가장 일반적으로 사용되는 난류모델인 표준 k-ε모델[1]을 사용하고 입구난류 강도는 10%를 적용 하였다.

2.3.3 계산방법

2.3.3.1 Swirl chamber 유동해석

연료와 산화제 각각에 대한 swirl chamber에서의 유동현상을 파악하기 위하여 각각을 대상으로 3차원 모델링하여 격자를 구성하고 해석하였다. 해석대상은 산화제의 유동현상을 파악하기 위하여 인젝터 내부의 산화제 유동구간의 swirl chamber와 4개의 접선방향 주입구와 연소실로 유출되는 오리피스 끝단 부위를 출구로 하여 모델링하였다. 또한 연료인 케로신의 유동현상을 파악하기 위하여 인젝터 내부 외곽부위의 연료 유동구간의 swirl chamber와 4개의 주입구와 연소실로 유출되는 오리피스 끝단 부위를 출구로 하여 격자를 모델링하였다. 입구와 출구조건은 출구 압력을 대기압으로 가정하고, 입구영역에서의 압력조건은 필요한 차압조건에 해당하는 입구압력을 가정하고 3차원의 정상유동 모델로 계산하였다.

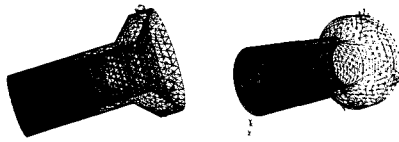


Fig. 9 연료 및 산화제 swirl chamber 및 오리피스 격자

각각의 유동현상을 계산하기 위한 격자는 그림 9와 같으며 격자수는 약 2만 개를 사용하였다. 해석 경우는 연료와 산화제 두 가지 모두 입구와 출구의 차압이 10bar에서 40bar사이 5bar 간격으로 7 가지 경우에 대하여 수행하여, 연소실 유동해석에 필요한 입력조건인 출구 부위에서의 축방향 속도와 접선방향 속도의 비율을 구하였다.

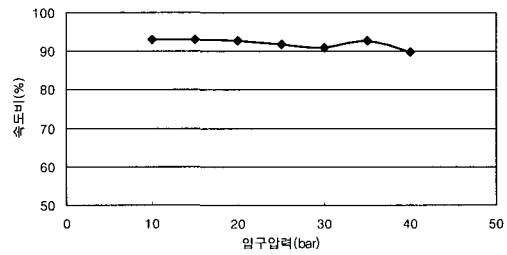


Fig. 10 산화제 접선방향 속도비율

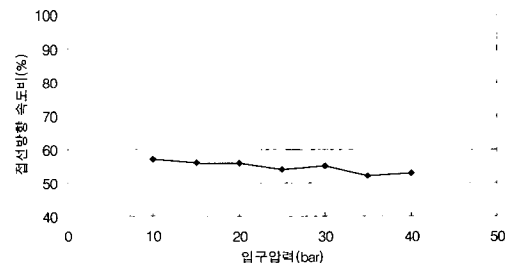


Fig. 11 연료 접선방향 속도비율

2.3.3.2 연소실 유동해석

그림 10과 11은 연료 및 산화제의 swirl 유동 해석결과로서, 여러 압력에서 질량 가중 속도비율을 나타낸 것이다. 적용 차압에 따라 속도비가 크게 좌우되지 않는 경향을 보이며 산화제는 약 10% 대 90%의 비율이고, 연료의 축방향 대 접선방향 속도비율은 평균적으로 약 45% 대 55%의 비율로 계산됨을 알 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 연소실내 유동 현상을 2차원의 Axisymmetric swirl 모델로 모사하여 비정상 유동 해석을 FLUENT를 사용하여 수행하였다.

연소실 내부 유동현상 해석을 위하여 3차원 swirl chamber 해석에서 구한 오리피스 끝단 부위의 속도 성분비율을 초기 입력조건으로 사용하였다. 연료는 축방향 속도성분 45% 접선방향 속도성분 55%를 입구조건으로 적용하였으며, 산화제는 축방향 속도성분 10% 접선방향 속도성분 90%를 입구조건으로 적용하였다. 적용 차압은 출구를 대기압 상태로 가정하고 산화제 연료의 단독 및 혼합주입의 모든 경우 공통적으로 10bar를 적용하였다. 또한 인젝터 recess 길이 변화에 대한 분산각 영향을 확인하기 위하여 recess 길이가 -3mm인 경우에서 2mm인 경우까지 0.5mm 단계로 증가시키면서 해석을 수행하여 그 영향을 비교 분석하였다.

2.3.4 수치해석 결과

해석결과 그림 12와 같은 liquid film에 의해 형성되는 2차원의 분산각을 모사할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그림 12, 13은 recess 길이가 0인 경우 연료 및 산화제를 단독 및 혼합 분사하는 경우를 나타낸다.

그림 12와 13에서 알 수 있는 것과 같이 개별 분무시 연료 분산각이 산화제 분산각보다 상당히 크게 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 이는



Fig. 12 산화제 / 연료 분산각($r=0$)



Fig. 13. 혼합 분산각($r=0$)

입력조건의 축방향 속도와 접선방향 속도비율 차이에 기인한 당연한 결과라고 판단된다. 또한 그림 12에서 보는 것처럼 오리피스에서 공기 core가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 13에서 나타난 것과 같이 recess가 영인 경우 오리피스의 상대적 길이 차이가 없는 경우에도 혼합 분사시 연료와 산화제가 합쳐져서 연소실로 분사되고 있음을 확인할 수 있으나 이는 속도성분 비율에 따라 차이가 있을 것으로 판단된다.



혼합 분사($r=3$) 혼합 분사($r=2$)



혼합 분사($r=1$) 혼합 분사($r=-1.5$)

Fig. 14 연료 및 산화제 혼합 분사

그림 14에서 볼 수 있는 바와 같이 recess 길이가 3mm, 2mm 등의 경우에는 연료와 산화제가 완벽히 내부 혼합되어 연소실로 분사됨을 확인할 수 있다. 그러나 recess가 음의 방향으로 1.5mm가 되면 두 개의 추진제는 서로 혼합되지 않고 연소실로 분사됨을 확인할 수 있다. Recess가 -1mm인 경우는 추진제가 연소실로 분사되면서 외부 혼합되는 사실을 알 수 있으며 이러한 경향은 오리피스 입구의 속도성분 비율에 따라 차이가 있을 수 있다고 판단된다. 그림 15는 recess 길이별 분산각을 나타낸 것으로 단독분사 경우 연료 분산각이 약 88° 로 가장 크게 나타나고 산화제 분산각은 평균 60° 로 가장 작게 나타남을 나타낸다. 혼합 분산각은 각각 분사시와 비교하여 연료 분산각은 작아지고 산화제 분산각은 커지는 경향이 실험에서와 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

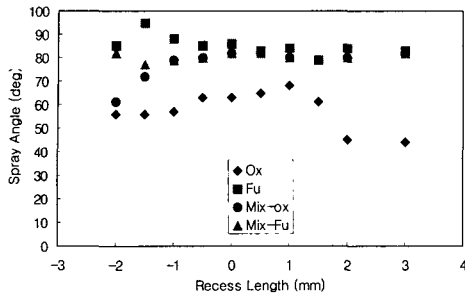


Fig. 15 recess 길이별 분산각

그러나 실험결과보다 수치해석 분산각이 전체적으로 작게 묘사되었으며 연료 분산각은 약 23%, 산화제 분산각은 약 15%의 차이를 나타내고 있다. 이는 작은 계산영역 등의 차이에 의한 것으로 사료된다. 그림 16은 산화제와 연료 분산각을 비교하여 표시한 것으로 연료는 recess 길이에 대하여 전체적으로 큰 변화는 없으나 음의 recess길이 쪽으로 분산각이 조금씩 커지는 경향을 볼 수 있고, 산화제 분산각은 약 0.5mm의 recess길이를 정점으로 분산각이 가장 크고 recess가 양쪽 방향으로 길어지면 분산각이 작아짐을 볼 수 있다. 이는 산화제 오리피스 recess가 3mm, 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 등의 recess에서는 상대적으로 긴 오리피스에 의한 손실로 분산각이 감소된 결과로 판단된다.

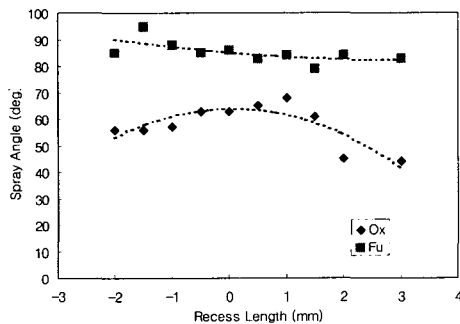


Fig. 16 산화제와 연료 분산각 비교

그림 17은 산화제 분산각을 나타낸 것으로 실험에서와 같이 산화제 혼합 분산각이 단독 분산각보다 커지게 됨을 알 수 있고 이는 실험과 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

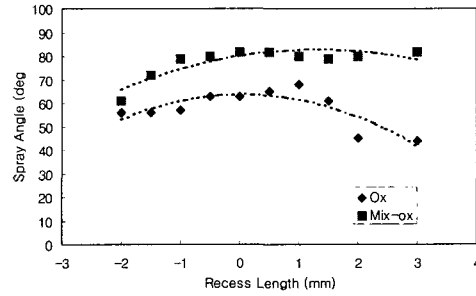


Fig. 17 산화제 단독 및 혼합분사 분산각

그림 18은 연료의 분산각을 나타낸 것으로 혼합 분산각이 단독 분산각보다 작게 나타나나 큰 차

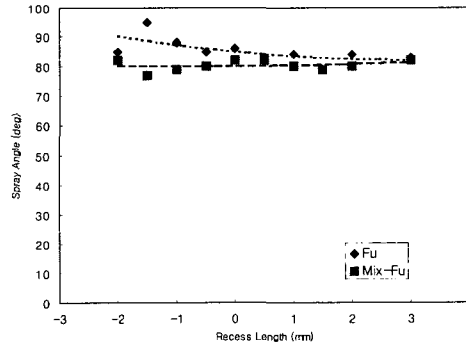


Fig. 18 연료 단독 및 혼합분사 분산각

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

그림 19는 혼합 분사시 분산각을 나타낸 것으로 recess가 -1mm까지 내부 혼합 또는 외부 혼합되어 동일한 분산각을 갖는 것을 알 수 있으며 실험 결과와 동일한 경향을 나타내고 있다.

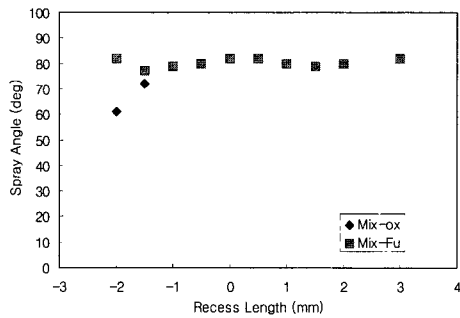


Fig. 19 연료 및 산화제 혼합 분산각

3. 결론

이중 swirl 인젝터의 recess 변화가 분산각에 미치는 영향을 비연소 수류 실험과 상용 유동 해석 코드의 다상유동 해석모델인 VOF 모델을 사용하여 수치 해석하였다. Recess가 긴 3mm, 2mm인 경우에는 내부 혼합되어 분사되므로 recess가 분산각에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 혼합 분사시 연료와 산화제 상호 간섭에 의한 분산각 변화도 그림 15에서와 같이 확인할 수 있었다. 수치해석 결과 실험결과

와 비교하여 분산각 거동의 경향 파악을 위한 만족할 만한 결과를 얻었다. 또한 swirl chamber에서 형성된 속도 성분비율이 분산각 변화에 지대한 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 설계조건에 대한 연료 산화제의 혼합위치를 사전 예측할 수 있으므로 설계 시 효율성을 향상할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 홍용식, "우주추진공학", 청문각, 1990.2
2. Vladimir G. Bazarov, "Hydraulics of Swirl Propellant Injectors, 9th Annual Conference of propulsion Engineering Research, 1997
3. N. K. Rizk and A. H. Lefebvre, "Prediction of velocity coefficient and spray cone angle for simplex swirl atomizers", ICLASS-85
4. Hirt, C.W. and Nichols, B.D., "Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries," Journal of Computational Physics, Vol 39, pp201-225, 1981
5. FLUENT user's manual, version 6.0