Dual Swirl 인젝터의 성능 평가에 관한 연구

A Study on the Performance Evaluation of Dual Swirl Injectors

김 선 진* 정 해 승**
Kim, Sun-Jin Jeong, Hae-Seung

ABSTRACT

Both numerical analysis and experiment of cold and hot tests were performed to obtain basic design data for the swirl coaxial type injector and to predict the combustion performance. Mass distribution, mixing distribution, mixing efficiency, characteristic velocity efficiency were measured by the cold tests and numerical analysis using the commercial thermo-hydraulic program. Test and analysis variables were recess, pressure drop, velocity ratio, mixing spray, mixture ratio. Hot tests were performed for the Uni-element injector to compare the performance with the cold test results, and, hot tests for Multi-element injector were performed to compare the performance with Uni-element injector.

Designed thrust of the Uni-element injector liquid rocket was 35kgf at sea level and combustion chamber pressure, 20bar. Kerosene and Lox were used as a propellant.

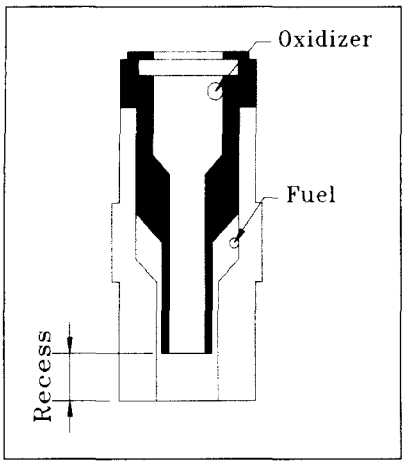
주요기술용어 : LRE(Liquid Rocket Engine)(액체로켓엔진), swirl injector(스월 인젝터)

1. 머리말

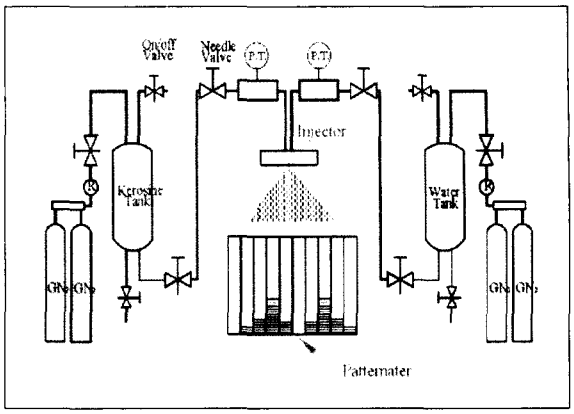
인젝터의 주요 기능은 적절한 추진제의 유량을 유지 시켜주는 것이며, 또한 연소실내에서 산화제와 연료의 국부적 혼합률과 미립화의 정도를 결정하는 역할을 한다. 스월 인젝터는 노즐 출구에 형성된 cone 형의 액체 면에 의해 연소실에서 생성되는 높은 Heat Flux로부터 인젝터 면을 보호하며 화염이 보다 안정된다. 따라서 스월 인젝터를 사용한 액체로켓 엔진은 연소 안정성과 높은 효율을 가지며, 또한 실험결과에 의하면 광범위한 범위에서 추진제 조절이 안정되게 적용된다고 알려져 있다.[1][2]

본 연구는 그림 1과 같은 uni-element 스월 동축형 인젝터의 기하학적 설계변수와 운용조건이 추진제의 분무특성, 질량분포 및 혼합성능에 미치는 영향을 수류실험 등의 비연소실험을 수행하여 규명하고, 아울러 상용 열유동 해석 프로그램을 사용한 수치해석을 통

* 청양대학 소방안전관리과 조교수
** 충남대학교 기계공학과 대학원 박사과정



[그림 1] Injector element



[그림 2] Schematic diagram of cold flow test system

하여 인젝터 설계변수와 운용조건에 의한 연소실내에서의 유동 거동을 예측하고 실험결과와 비교하였다. 이 결과를 바탕으로 인젝터의 제반 성능을 평가하고, 연소성능을 예측하였다. 그리고 연소성능실험을 통해 엔진의 정상 연소성능을 평가하고, 비연소실험으로부터 얻은 결과와 수치해석 결과와의 비교 및 검증을 통해서 합리적인 인젝터 설계 변수자료를 확립하였다.

또한 Multi-element 스월 동축형 인젝터로 구성된 로켓엔진의 연소실험을 통하여 엔진의 정상 연소성능을 평가하고 이를 Uni-element 인젝터의 연소성능과 비교하여, 대형 로켓개발에 앞서 필요한 각 축소모델에 대한 특정 Scale에서의 Multi-element 인젝터에 의한 연소성능을 예측하고 평가하였다.

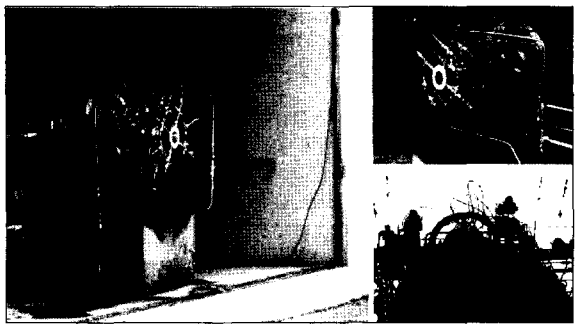
2. 실험장치

2.1 비연소실험장치

비연소 실험을 위한 실험장치는 그림 2와 같다. 모의 추진제는 물과 Kerosene을 이용하였으며 모의 추진제를 40bar까지 견딜 수 있는 고압탱크에 진공펌프를 사용하여 주입한 후 고압의 가스 질소를 사용하여 인젝터에 공급하였다. 추진제가 분무되면서 탱크 내부의 압력이 떨어지는 것을 방지하기 위해 질소가스 공급부에 레귤레이터를 장착하여 1차압이 연료는 34bar, 산화제는 25bar까지 되도록 가압하고, 인젝터 전단에 needle valve를 장착하여 압력을 제어하였다. 압력 센서는 needle valve와 인젝터 사이에 설치하였으며, Sensotec사의 압력센서를 사용하여 이 신호를 컴퓨터로 받아 압력 단위로 환산하였다.

2.2 연소실험장치

연소실험은 비연소실험에 사용된 Uni-element 인젝터를 이용하여 연소실험을 수행하였으며, 수류 및 연소성능실험에 의해 수정/보완된 설계와 실험절차를 바탕으로 Multi-element 인젝터을 이용한 245kgf급 로켓엔진을 제작하고 연소실험을 수행하였다. 연소실험에서는 추진제로 액체산소/케로신을 사용하였고, 연소실험장치는 그림 3과 같이 추진제 저장 및 공급장치, 연소실험대, 자료획득 및 처리장치 등으로 구성되었다.



[그림 3] Combustion test facility

2.3 연소실험 방법

2.3.1 Uni-element 인젝터의 연소성능 실험

비연소실험에 사용된 uni-element 인젝터를 이용하여 인젝터의 recess와 추진제의 혼합비가 연소성능에 미치는 영향을 고찰하고, 비연소실험 결과와 비교하였다.

추진제 유량을 100g/s로 고정하고, resess가 있는 인젝터를 사용하여 일정한 추진제 총유량에 대한 혼합비 1.8~3.0에서의 연소실험을 수행하였다. 연소시간은 연소실 압력의 정상상태를 고려하여 5초로 하였으며, 연소 중 노즐 목의 면적변화를 막기 위해서 내열복합재(ATJ) 노즐을 이용하였다.

표 1은 Uni-element 인젝터의 연소실험 조건을 나타낸 것이다.

[표 1] Test Conditions for uni-element injectors

Thrust	35kgf
Chamber Pressure	20bar
Total Mass Flow Rate	100g/s
Mixture Ratio(O/F)	1.8~3.0

2.3.2 Multi-element 인젝터의 연소성능 실험

비연소실험 결과 및 Uni-element 인젝터의 연소실험 결과를 바탕으로 245kgf급 로켓엔진을 제작하고 연소실험을 수행하였다. 성능실험에 앞서 내열 복합재로 만들어진 연소실과 노즐을 이용하여 안정된 점화와 연소가 이루어질 수 있도록 하였다.

연소성능 실험은 일정한 추진제 총유량에 대한 혼합비 1.8~3.0에서의 연소실험을 수행하였다. 연소시간은 5초로 하였으며, 표 2는 245kgf급 로켓엔진의 연소 성능을 파악하기 위한 실험조건을 나타낸 것이다.

[표 2] Test Conditions for multi-element injectors

Thrust	245kgf
Chamber Pressure	20bar
Total Mass Flow Rate	700g/s
Mixture Ratio(O/F)	1.8~3.0

3. 실험결과

3.1 비연소실험 결과

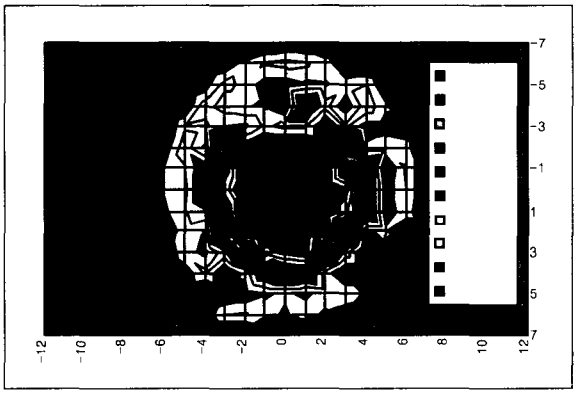
3.1.1 질량분포

설계변수 및 운용변수가 질량분포특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 25×15 셀로 구성된 패터네이터를 사용하여 수류실험을 수행하였다.

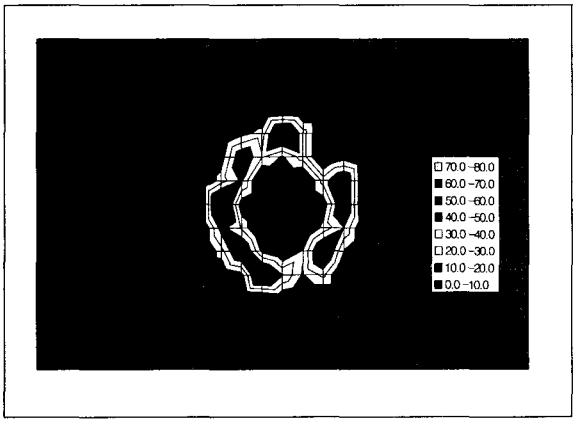
Recess가 있는 경우와 없는 경우 및 혼합비에 따른 영향을 고찰하기 위하여 패터네이터를 인젝터로부터 수직하방으로 60mm 떨어진 곳에 x-y평면에 평행하도록 설치하였다. 10개 조건에 대한 수류실험결과 분사된 전체 질량에 대한 패터네이터에 의해 채집된 질량 정도를 나타내는 채집효율은 최저 92.6%이상을 상회하는 결과로 자료의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

그림 4와 그림 5는 이중스월 동축 인젝터에 의해 형성되는 전형적인 질량 분포도를 나타낸 것으로, x축

과 y축의 값은 패터네이터의 25×15 셀을 의미한다. 그림 4는 recess가 없는 경우 MR(mixture ratio)가 2.385인 경우에 대한 연료 및 산화제의 전체 질량분포를 2차원 평면으로 표현하였고, 그림 4는 recess가 2mm있는 MR가 2.385인 경우에 대한 질량분포를 2차원 평면으로 표현하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 이중 스월 동축형 인젝터에 의해 형성되는 질량분포는 내부가 빈 콘(cone)형태의 전형적인 모습을 나타내고 있음을 확인 할 수 있었으며, x-y평면에 대하여 360° 방향으로 특정부분에 치우치지 않고 전체적으로 고르게 분포함을 알 수 있다.

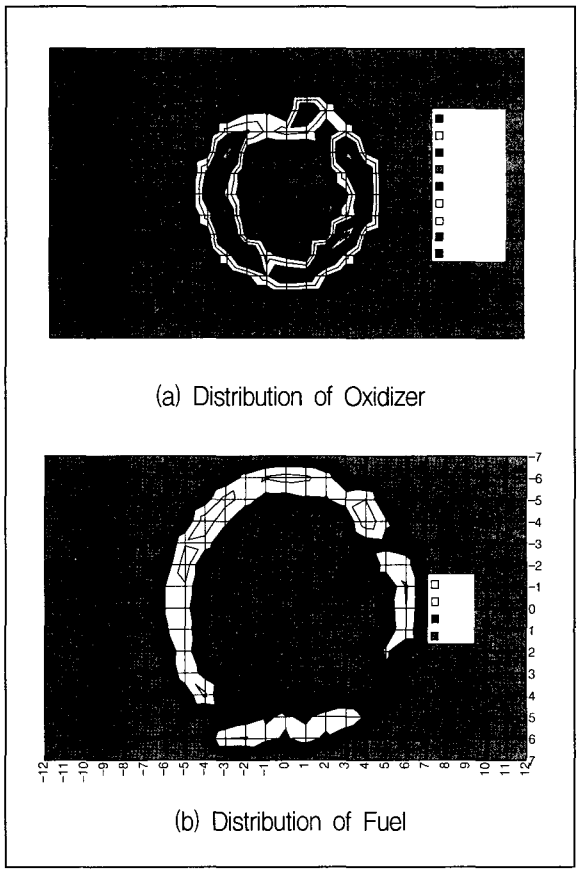


[그림 4] Mass distribution at MR=2.385(Recess=0)



[그림 5] Mass distribution at MR=2.385(Recess=2mm)

그림 5는 recess가 2mm인 경우의 질량분포를 나타낸 것으로 그림 4의 질량분포 그림과 같이 내부가 빈 원형의 콘 형태 모습을 보이고 있으며, x-y평면에 대하여 360° 방향으로 대체적으로 고르게 분포하는 경향을 나타낸다. 그러나 그림 4의 recess가 없는 경우와는 달리 recess가 있음으로 인하여 전체적인 질량분포가 x-y평면에서 상당히 축소되어 좁게 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 질량 높이는 좁은 범위의 특정부분에 집중되어 상대적으로 더 높은 경향을 나타내고 있다. 그림 5의 질량분포가 그림 3의질량분포에 비해 x-y평면에서 전체적으로 축소되어



(a) Distribution of Oxidizer

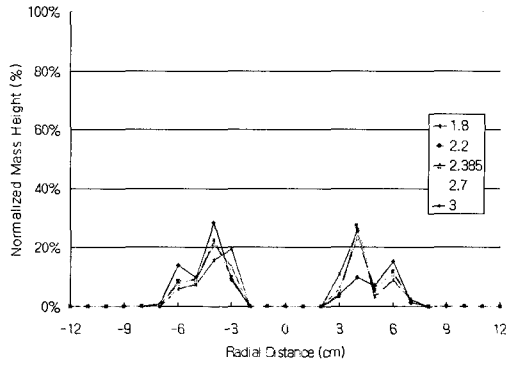
(b) Distribution of Fuel

[그림 6] Plane mass distribution at MR=2.385 (Recess=0)

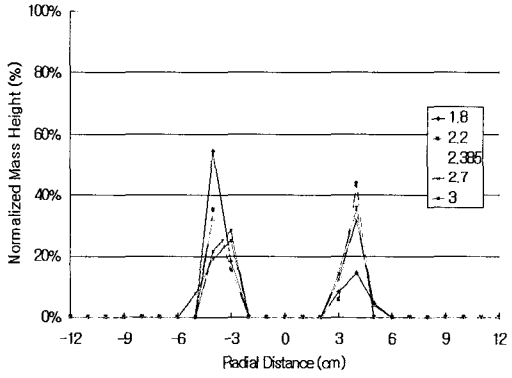
나타나는 차이는 recess가 있으므로 분산각이 작아진 현상에 기인한 것이라고 판단된다. 따라서 스월 동축 인젝터에서 recess는 중요한 기하학적 변수임을 다시 한번 확인할 수 있다.

그림 6에서 그림 9는 산화제와 연료의 혼합성과 각각의 질량분포를 고찰하기 위하여 나타낸 그림으로서, 그림 6과 그림 8은 recess가 없는 인젝터와 recess가 있는 인젝터에 대하여 MR가 2.385인 경우에 대한 연료와 산화제의 질량분포 각각을 2차원의 평면으로 표현하였고, 그림 7과 그림 9는 두 가지 인젝터에 대하여 혼합비를 변경하면서 수행한 질량분포로서 패터네이터의 세로 가운데 셀 한 줄에 대한 질량분포를 무차원화하여 백분율로 표현한 것이다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 recess가 없는 인젝터의 경우 산화제는 x-y평면에서 좁게 분포되어 있음을 알 수 있고, 연료는 상대적으로 넓게 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 두 추진제의 경우 모두 대체적으로 고르게 분포되어 있으나 부분적인 불균형은 제작성에 기인한 것이라 사료되나 성능에 특별한 영향을 미칠 정도는 아니라고 사료된다. 이러한 연료와 산화제의 질량 분포 차이는 앞의 분산각 실험에서 확인한 연료와 산화제의 분산각 차이라고 판단된다.

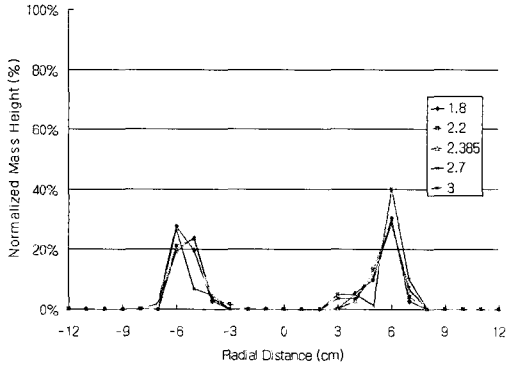
또한 그림 7에서 알 수 있는 것과 같이 연료와 산화제의 분산각 차이에 의한 분포차이가 두 추진제의 혼합분사 시에는 각각 분사시의 분포에 비해 중간 부분에 분포되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 혼합분사에 의한 두 추진제의 상호 간섭으로 분산각이 변하여 연료분산각 보다는 작게, 산화제 분산각보다는 크게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 두 추진제 내부에서 혼합되지 않고 외부에서 혼합된다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 질량분포를 통하여 recess가 없는 인젝터인 경우에는 외부혼합으로 혼합



(a) Distribution of oxidizer & fuel with MR



(b) Distribution of oxidizer with MR

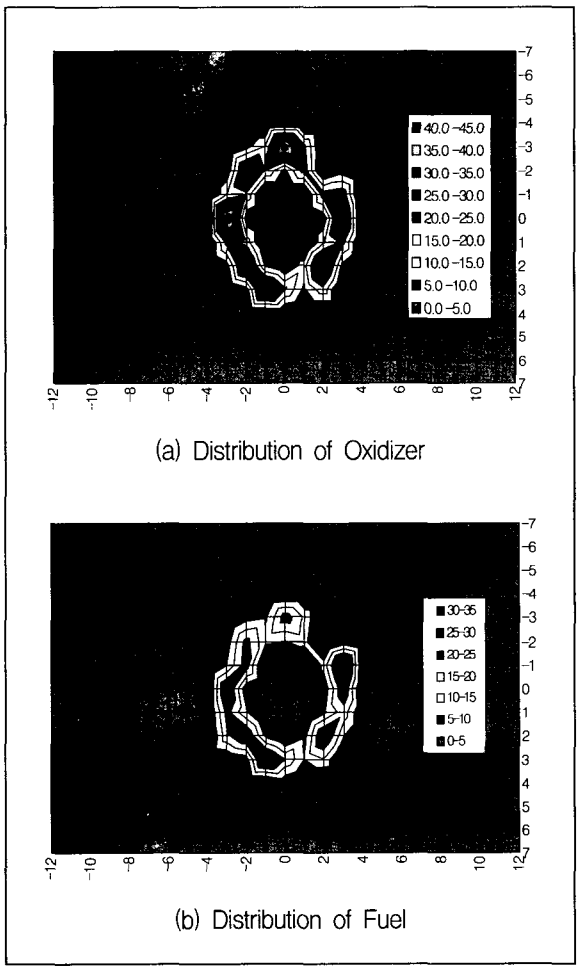


(c) Distribution of Fuel with MR

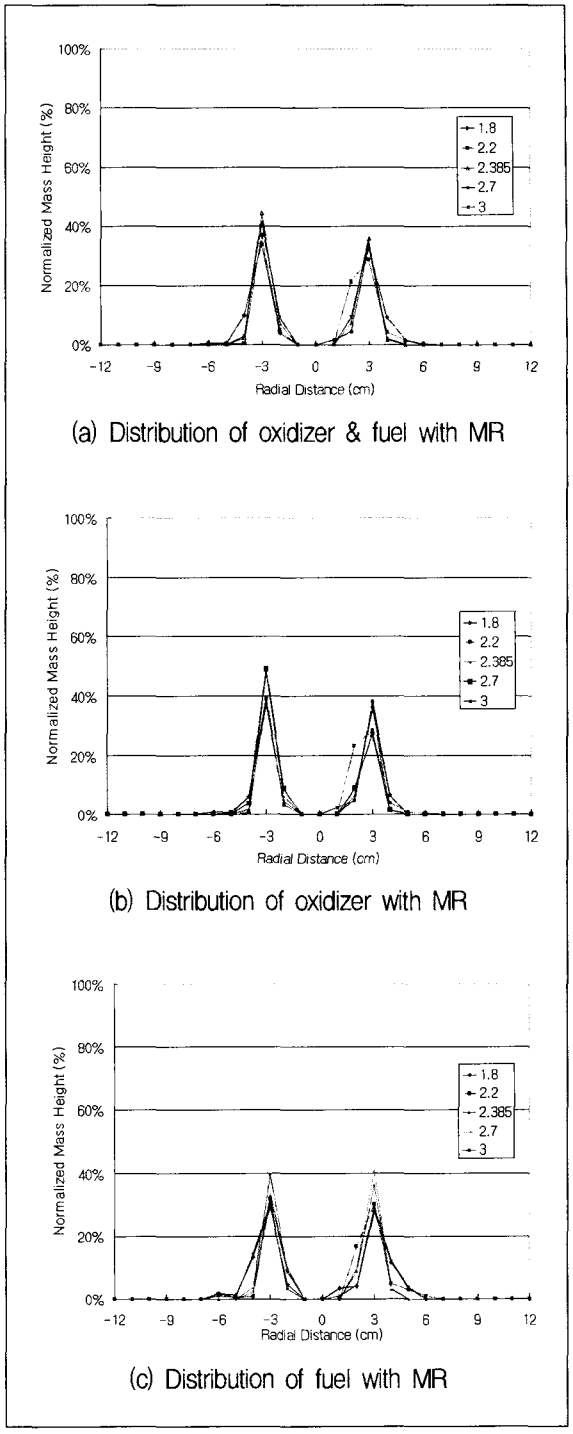
[그림 7] Normalized mass distribution at MR=2.385 (Recess=0mm)

효율이 나쁠 것으로 예상된다.

그림 8은 recess가 2mm인 인젝터 경우 연료와 산화제의 x-y평면(x와 y축값은 패터네이터의 각 셀의 위치값)에서 질량분포를 각각 표현한 것으로 그림 6과는 달리 연료와 산화제가 상대적으로 분포의 차이를 보이지 않고 거의 동일한 범위에 분포되어 있음을 확인할 수 있으며 또한 전체적으로 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이는 산화제와 연료의 분산각이 크게 다르지 않음을 의미한다.

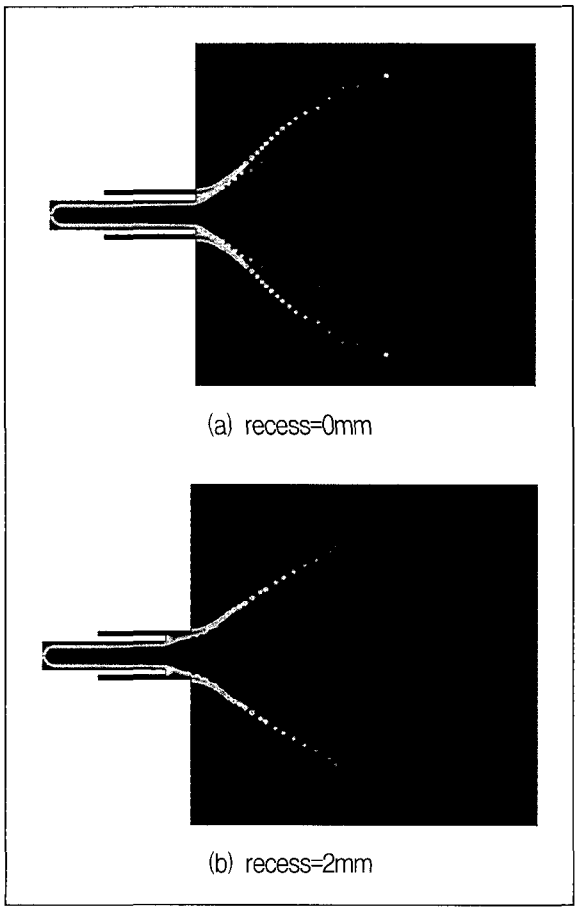


[그림 8] Plane mass distribution at MR=2.385 (Recess=2mm)



[그림 9] Normalized mass distribution vs. radial distance(Recess=2mm)

또한 그림 9에서도 알 수 있는 바와 같이 연료와 산화제 분포가 유사한 경향을 나타내고 또한 두 추진제의 혼합분사 시에도 단독분사시의 분포와 구분하기 힘들 정도로 유사한 분포를 보이고 있다. 따라서 이러한 질량분포를 통해서 recess가 있는 스월 동축 인젝터에서는 두 추진제가 인젝터 내부에서 혼합되어 분사되는 것으로 판단할 수 있으며, 또한 이는 분산각을 수치 해석한 그림 10의 결과와도 일치함을 알 수 있다. 따라서 이런 내부 혼합된 추진제의 분사는 두 추진제 혼합효율의 증가에 상당한 기여를 할 것으로 예측할 수 있다.



(a) recess=0mm

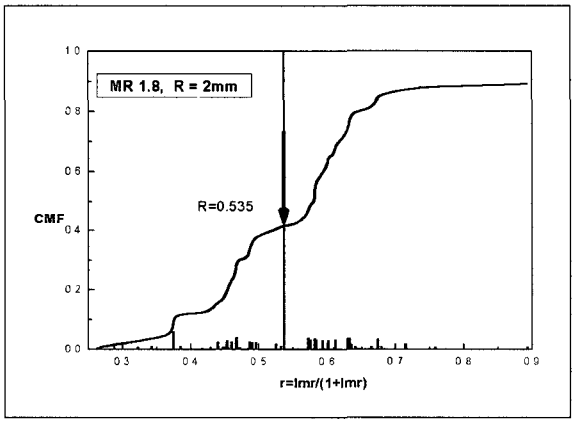
(b) recess=2mm

[그림 10] Mixing spray angle

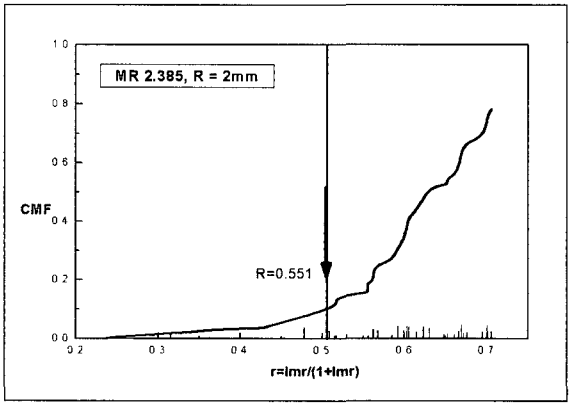
3.1.2 혼합 성능 및 특성속도 효율

연소실 압력 300psia, Lox/kerosene을 추진제로 하여 CEC 코드를 사용하여 계산하였고, 특성속도 효율은 증발효율을 100%로 가정하고 계산하였다.

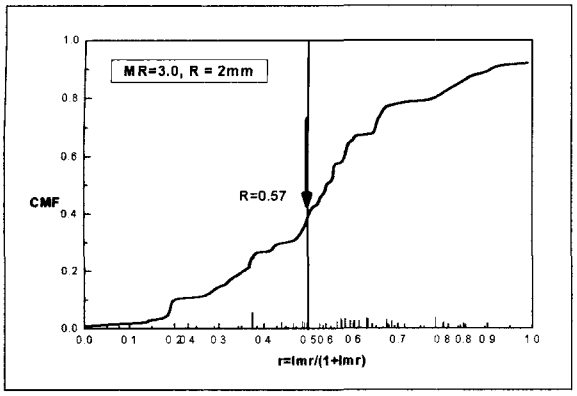
그림 11~그림 13는 총 혼합비에 대한 각 샘플의 혼합비 빈도분포를 나타낸 것이다. x축(r)은 국부혼합비를 무차원화 한 것이고 y축에서 실선은 누적질량분포(Cumulative Mass Fraction)를 나타낸 것이며, 막대선은 혼합비 빈도분포를 나타낸 것이다. 빈도란 모



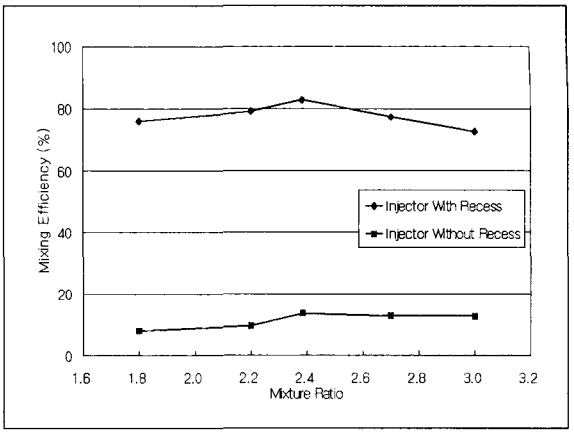
[그림 11] CMF with dimensionless mixture ratio at MR=1.8(Recess=2mm)



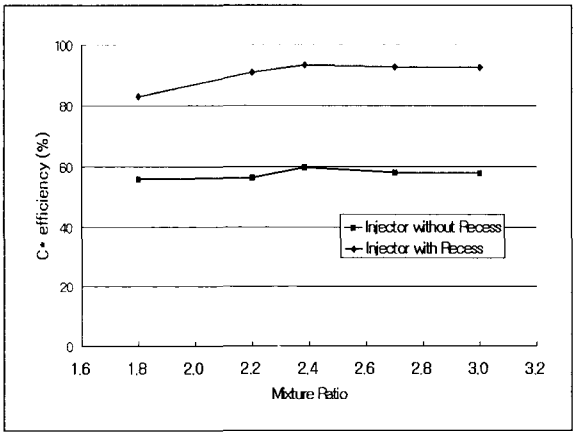
[그림 12] CMF with Dimensionless Mixture Ratio at MR=2.385(Recess=2mm)



[그림 13] CMF with Dimensionless Mixture Ratio at MR=3.0(Recess=2mm)



[그림 14] Mixing Efficiency vs. Mixture Ratio



[그림 15] Characteristic Velocity Efficiency vs. Mixture Ratio

의추진제의 국부질량과 총질량의 비이며 누적질량분포란 빈도분포의 누적합을 말한다.[3][4],[5] 그림에서 보면 전체적으로 국부 무차원 혼합비에 대한 국부 mixture ratio는 균일한 분포를 보이고 있으며, 그림 12는 R값(monodisperse mixture일 때의 혼합비)에 대하여 혼합비 빈도분포 막대선이 좌우 이탈한 정도가 상대적으로 그림 11과 13에 비교해 적기 때문에 혼합효율이 좋음을 알 수 있다.

그림 14는 recess가 있는 인젝터와 없는 인젝터에 대한 혼합효율을 혼합비 변화에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 recess가 없는 경우에는 혼합효율이 상당히 낮은 것을 알 수 있으며, recess가 2mm인 경우에는 상대적으로 혼합효율이 상당히 좋게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 질량분포에서 예측한대로 recess가 없는 경우는 질량분포 및 분산각 결과에서 확인한 것처럼 추진제의 충돌이 이루어지지 않은 상태에서 연소실로 분무되기 때문에 혼합효율이 상당히 좋지 않음을 알 수 있고, 반면 recess가 있는 경우에는 인젝터 내부 또는 분사기 면 근처에서 두 추진제의 혼합이 이루어지므로 혼합효율을 상승시킬 것으로 판단된다. 따라서 recess 유무에 따라 추진제의 혼합성능이 다르게 나타남을 확인하였으며, 이 결과는 recess가 연소성능에 영향을 크게 미치는 요인임을 알 수 있다. 그림 15는 recess가 있는 인젝터와 없는 인젝터에 대한 혼합 특성속도 효율을 혼합비 변화에 대하여 나타낸 것이다.

두 경우 모두 혼합효율 결과에서 예측할 수 있듯이 혼합비 2.385에서 가장 큰 혼합 특성속도효율을 보였으며, 두 인젝터 모두 다른 혼합비와 비교할 때 혼합 특성속도 효율이 큰 차이를 보이지 않으며, 또한 혼

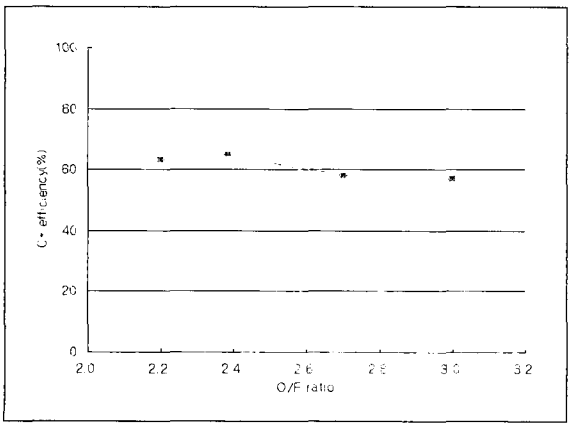
합비 변화에 따라 비교적 안정된 혼합 특성속도효율을 보였다. 혼합 특성속도효율의 전체적인 경향은 산화제 과잉 상태에서 연료 과잉 상태보다 효율변화가 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 따라서 산화제 과잉 상태에서는 넓은 혼합비 영역에서 효율의 큰 손실 없이 연소가 가능할 것이라 예측된다. 이러한 사실은 스월 동축 인젝터의 전형적인 특징으로서 비교적 넓은 범위의 혼합비에서 안정되게 사용될 수 있음을 의미한다.

3.2 연소실험 결과

3.2.1 Uni-element 인젝터

Uni-element 인젝터에 대한 연소실험은 수류실험에서 혼합효율과 혼합특성속도 효율에서 상당히 좋은 결과를 보인 recess가 있는 인젝터에 대하여 혼합비를 변화시키며 연소실험을 수행하였다.

연소시간은 냉각장치가 없고 또한 정상 연소 성능 평가를 위한 실험인 것을 감안하여 약 5초로 하였고, 5초 연소가 끝나면 purge용 질소가스가 인젝터를 통하여 연소실로 주입된다. 따라서 연소가 끝난 후에도 연소압력이 계측되는 원인이 된다. 실험 자료는 연소



[그림 16] Uni-element C* efficiency w.r.t O/F ratio

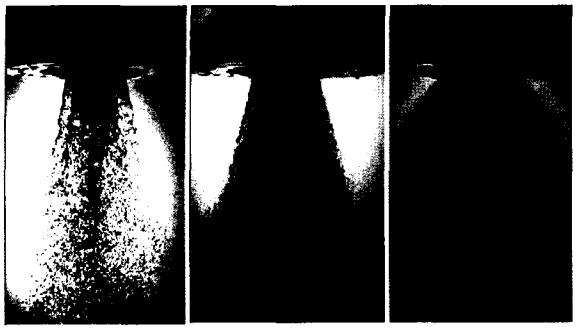
구간에서 안정 상태에 도달한 값 중 약 2초 정도의 압력을 평균하여 정상연소 성능해석을 위한 자료로 활용하였다.

그림 16은 혼합비 변화에 대한 특성속도 효율을 나타낸 것으로, recess 길이 2mm의 인젝터를 이용하여 총유량을 고정한 상태에서 O/F ratio를 변화시켜가며 연소실험을 수행하였다. 실험에서의 각 조건마다 연소실험 시 주입된 산화제와 연료의 총질량과 주입 혼합비를 이용하여 이론 특성속도를 계산한 다음 실험으로부터 계측된 특성속도로 나누어 특성속도 효율을 계산하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 혼합비 2.385에서 최대 특성속도 효율이 발생되는 것을 확인할 수 있고 이는 혼합특성속도 효율과 동일한 경향을 보이고 있다. 그러나 그림에서 나타난 것처럼 혼합비에 대한 특성속도 효율의 차이는 그리 크지 않았다. 이는 비연소실험에서의 혼합비 변화에 대한 인젝터의 혼합효율과 특성속도 효율이 거의 비슷한 경우와 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 그림 15에서 예측한 약 90%의 혼합특성속도 효율에는 미치지 못하는 약 60%의 혼합특성속도 효율 결과는 혼합특성속도 효율 계산 시 증발효율을 100%라고 가정한 것이 실제 실험에서는 증발효율이 100%가 되지 않는 것과, 연소실 내부에서의 분무 침투가 길게 형성되어 연소가 연소실 후반부에서 형성되므로 인한 차이에 기인한 것이라 사료된다.

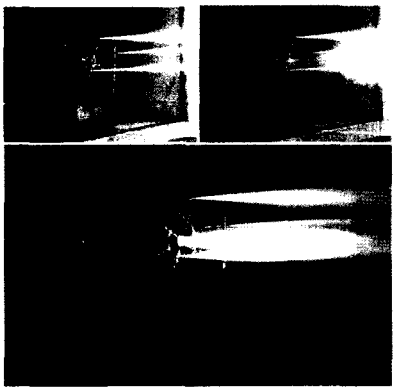
따라서 recess가 있는 스월 동축형 인젝터의 경우 넓은 범위의 혼합비에서 안정적인 연소를 보이며, 연소성능이 추진제의 혼합성능에 상당히 영향을 받음을 알 수 있다.

3.2.2 Multi-element 인젝터

Uni-element 인젝터를 적용한 로켓 엔진 연소성능



[그림 17] Spray patterns

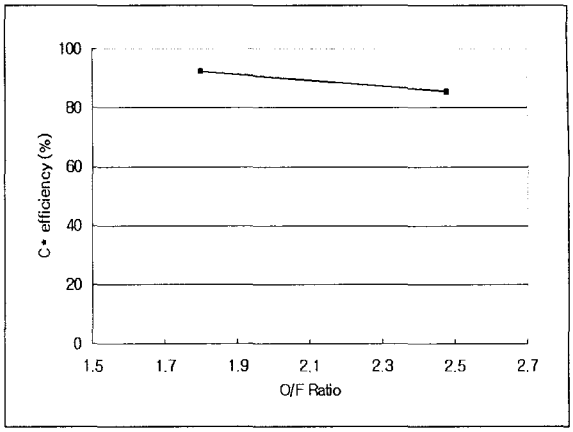


[그림 18] Hot firing tests

실험을 통해 입증된 recess 2mm의 245kgf급 엔진을 제작, 연소실험을 수행하였다. 그림 17은 모의 추진제로 물을 사용한 245kgf급 엔진의 multi-element 인젝터 헤드의 분무형상을 나타내고 있다.

실험 자료는 uni-element 인젝터의 경우와 동일하게 연소구간에서 안정 상태에 도달한 값 중 약 2초 정도의 압력을 평균하여 정상연소 성능해석을 위한 자료로 사용하였다. 그림 18은 연소실험 장면을 나타낸 것이다.

그림 19는 multi-element 인젝터를 적용한 축소모델 로켓 엔진의 연소 성능을 나타내기 위한 특성속도 효율을 나타낸 것으로, uni-element 인젝터의 경우와 유사하게 혼합비 변화에 따라 크게 변하지 않는 특성

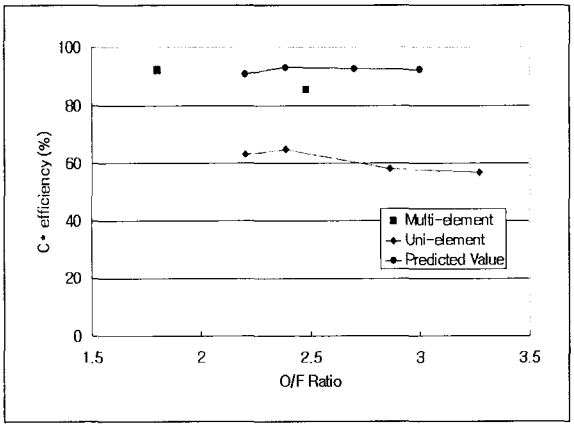


[그림 19] Multi-element C* efficiency w.r.t O/F ratio

속도 효율을 보이고 있음을 알 수 있다.

그러나 uni-element 인젝터 경우와는 달리 특성속도 효율이 약 85% 이상의 효율을 보였으며, 이는 상호 충돌 및 중첩의 영향으로 추진제의 미립화와 혼합을 향상시킨 결과라고 사료된다.

그림 20은 비연소 실험에서 수행한 혼합성능에 의하여 예측한 특성속도 효율과 uni-element 인젝터를 사용한 연소실험에서의 특성속도 효율 그리고 multi-element 인젝터를 사용한 연소실험에서의 특성속도 효율을 함께 나타낸 것이다.



[그림 20] C* efficiency w.r.t O/F ratio

전체적으로 혼합비에 대한 특성속도 효율은 큰 변화가 없으며 수류 실험의 혼합성능에 의한 예측된 특성속도 효율은 uni-element 인젝터를 사용한 경우와는 가정한 100%의 증발효율 때문에 차이가 발생한다고 판단되며, multi-element 인젝터를 사용한 경우와는 상당히 유사한 결과를 보이는 바, 이는 multi-element 인젝터에서의 중첩에 의한 영향 때문이라고 판단된다.

따라서 수류 실험의 혼합성능에 의해 예측된 특성속도 효율은 uni-element 인젝터의 연소성능 뿐만 아니라 multi-element 인젝터를 사용한 경우의 연소성능 예측에도 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 스월 동축형 인젝터의 작동은 혼합비의 변화에 따라 크게 변하지 않으며 넓은 범위의 작동영역에서 안정하게 사용할 수 있음을 수류 실험과 연소실험을 통하여 확인할 수 있었다.

4. 맺음말

본 연구는 액체로켓 엔진에 적용되는 이중 스월 동축형 인젝터의 기하학적 설계변수와 운용조건이 추진제의 분무특성 및 혼합성능과 연소성능에 끼치는 영향을 수치해석 및 실험적으로 평가하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) Recess가 있는 스월 동축형 인젝터의 혼합 분사 경우 연료와 산화제 각각의 질량 분포 범위가 유사하고, 전체적으로 고르게 혼합된 국부 혼합비 분포를 보였다.
2) 모의 추진제 물과 kerosene은 혼합비 2.385에서 최대 혼합비 82.86%를 얻을 수 있었으며, recess가 있는 인젝터의 경우가 없는 인젝터에 비해 최대 69.14% 더 높은 혼합효율을 보였으며, 연료 과잉 상태에서 더 큰 감소율을 보였다.
3) 실제 연소실험에서 연소 효율은 혼합비 2.385에서 최대치를 나타내며 연료 과잉 구역과 산화제 과잉 구역에서 연소효율은 감소하는 경향을 보인다.
4) Multi-element 인젝터를 적용한 로켓엔진의 연소성능은 uni-element 인젝터를 적용한 로켓엔진보다 높은 연소성능을 보였으며, 혼합성능에 의한 연소성능 예측방법을 적용할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 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.

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

[3] Hiroshi Tamura, etc, "Injection and Combustion Characteristics of Unlike Impinging Triplet Injector for LOX-Kerosene Rocket Combustor", NAL TR 648, 1980.

[4] Martin Hersch, "A Mixing model for rocket engine combustion", NASA TN D-2881, 1965.

[5] Kazuo SATO , "A Study of N2O4/Amine Injector Elements Part 1 Cold Flow Test", 航空宇宙技術報告 TR-899, pp.1~13, 1986. 2.