

11. 학사논문 지도교수: 윤 영 빈

- 11-1. 수치해석을 이용한 핀틀 분사기의 고압 분무 특성 분석
- 11-2. 2중 홀형 핀틀 분사기의 기하학적 형상에 따른 분무 특성 확인
- 11-3. 단일 수소 연소기에서의 연소 특성 파악
- 11-4. 전단동축형 분사기의 분무 특성 연구

교수 연락처 전화: (02)880-1904 , E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

실험실: 로켓추진 연구실 (<http://rpl.snu.ac.kr>)

연락처 전화: (02)880-7396, 주제에 대한 문의는 각 담당 조교에게 부탁드립니다.

11-1. 수치해석을 이용한 핀틀 분사기의 고압 분무특성 분석

통상의 로켓엔진은 고정된 설계 추력을 가지며, 해당 추력 부근에서만 운용된다. 그러나 최근 우주 시장이 확대됨에 따라 우주 임무가 다양해지고 복잡해지면서, 추력조절이 가능한 로켓엔진, 즉 가변추력 로켓엔진에 대한 수요가 증가하고 있다. 로켓엔진의 추력조절을 실현하는 방식에는 여러 가지가 있으나, 핀틀 분사기를 사용하는 방식이 효과적인 방식 중의 하나로 알려져 있어 전 세계에서 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

핀틀 분사기는 이원추진제 충돌형 분사기의 한 종류로, 추력 단계에 따라 추진제의 분사 면적을 조절함으로써 넓은 범위에서의 추력조절을 가능케 한다. 핀틀 분사기는 NASA의 Apollo 달 착륙선 및 SpaceX의 Falcon 9 발사체에 적용되어 그 효용성이 입증되었으며, 국내에서도 한국항공우주연구원, 서울대학교, 한국항공대학교 등에서 핀틀 분사기 수류실험을 포함한 기초 연구를 수행하고 있다.

수류실험은 점화 없이 분사기에서 추진제를 분사하여 분무 형상, 분무각, 액적 크기, 액적 분포도 등의 분무특성을 파악할 수 있는 실험으로, 분사기의 분무특성과 연소기의 연소특성이 밀접하게 연관되어 있기에 로켓엔진 연소기의 개발에 필수적인 과정이다. 현재까지 본 연구실에서는 핀틀 분사기의 상압(대기압) 수류실험을 주로 수행하였으며, 핀틀 분사기의 분사 조건과 상압 분무특성 사이의 상관관계를 파악하였다.

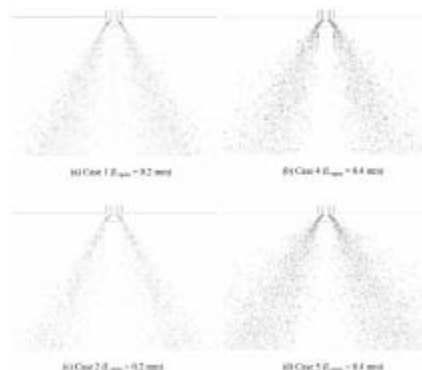
추후 본 연구실에서는 상압 수류실험의 다음 단계에 해당하는 고압 수류실험을 수행할 예정이며, 분사 조건에 따른 고압 분무특성을 파악하고자 한다. 본 연구에서는 이러한 고압 수류실험 결과의 보조지표로서 ANSYS Fluent를 이용하여 고압 수류실험을 모사하고 분사 조건에 따른 고압 분무특성을 파악한 뒤, 수치해석 결과를 실제 고압 수류실험 결과와 비교함으로써 수치해석 결과를 검증하고자 한다. 이후 더욱 다양한 실험 조건에서의 결과를 획득하는 것을 최종적인 목표로 한다.



[그림 1] 고압 수류실험 장치



[그림 2] 핀틀 분사기의 분무 형상



[그림 3] 수치해석을 이용한 핀틀 분사기의 분무 형상 (한국항공대)

11-2. 2중 홀형 핀틀 분사기의 기하학적 형상에 따른 분무특성 확인

핀틀 분사기는 두 추진제가 수직에 가까운 큰 각도로 충돌하며 미립화되는 것을 이용한 분사 기이다. 엔진마다 한 개의 핀틀 분사기가 사용되어 수십에서 수백 개의 분사기가 장착되는 다른 종류 분사기와 비교했을 때 경제적이고, 연소불안정에 강하다는 장점이 있다.

선행 연구에 의하면 2중 홀형 핀틀 분사기의 연소효율이 가장 높지만, 설계에 요구되는 기하학적 변수가 연속형 혹은 (단일) 홀형 분사기에 비해 많다. 각각의 기하학적 변수가 연소효율에 미치는 영향을 파악한다면 이후 분사기 설계에 활용할 수 있으나, 다회의 연소시험을 수행하는 것은 비용과 안전 측면에서 좋지 않다. 일반적으로 수류시험을 통해 얻어진 분무각, 액적 크기, 액적 분포 등의 분무특성과 연소시험을 통해 얻어진 연소효율, 연소불안정 등의 연소특성 사이에는 밀접한 관련성이 있는 것으로 받아들여지며, 일부 분무특성으로부터 연소특성을 유추할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 기하학적 변수와 분사기 분무특성 간 관계를 파악하는 것을 목표로 모사유체를 사용한 수류시험을 수행한다. 여러 기하학적 변수 중 홀의 크기 및 배치와 관련된 변수를 독립적으로 변경하였을 때 분무각과 액적 크기, 액적 분포 및 혼합도를 확인함으로써 해당 변수의 영향을 파악한다. 분무각과 액적 크기는 스트로보스코프와 DSLR, 레이저와 초고 속카메라를 사용해 촬영한 이미지로부터 분석하고, 액적 분포 및 혼합도는 기계식 패턴미터를 사용하여 확보할 예정이다.

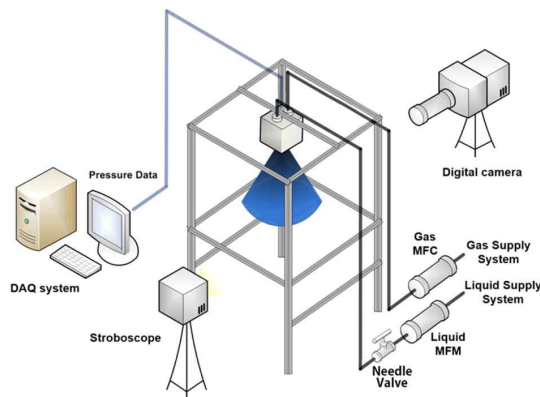


그림 1 수류시험 장치 개략도



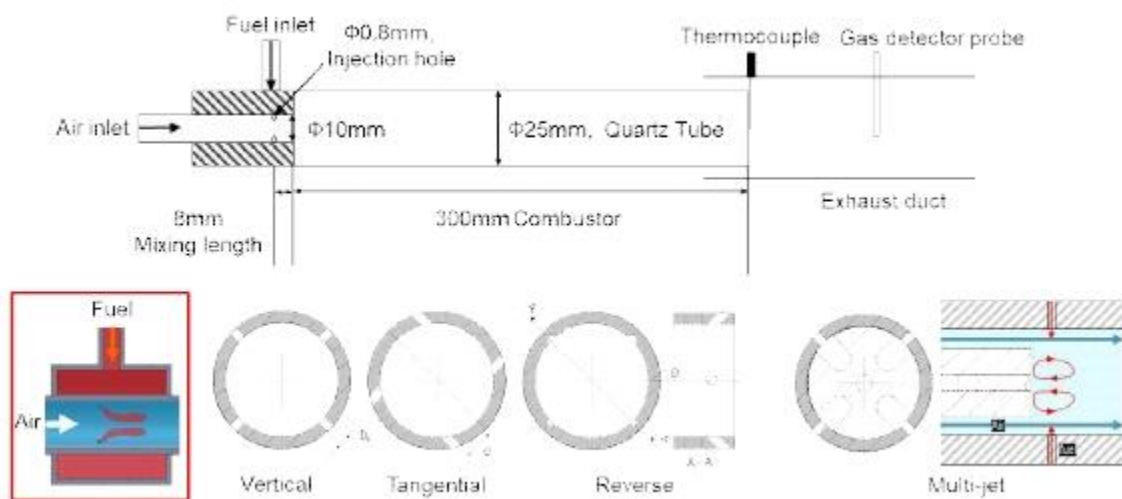
그림 2 분사기 촬영 이미지

11-3. 단일 수소 연소기에서의 연소특성 파악

전세계적으로 대기 환경 오염에 대한 관심이 증가함에 따라, 에너지 발전 분야에 대한 규제가 강화되고 있다. 가스터빈 발전에서 주 규제 배기 성분은 질소산화물(NOx)과 일/이산화탄소 (CO,CO₂), 그리고 최근 이슈가 되는 미세 먼지의 주 성분이 되는 미연탄화수소(UHC) 등이 있다. 수소 연료는 연소 시 탄소 산화물을 배출하지 않는 점으로서, 미래 청정 연료로서 주목받고 있다. 하지만, 수소 연료의 높은 화염 속도로 인해 역화 문제가 발생하기 때문에, 기존 가스터빈 장치에서는 수소 연료의 도입이 어렵다. 기존의 high-swirl 가스터빈의 경우, 수소를 주 연료로 사용하는 것이 제한적이다. 이는 swirler로 인해 유동 속도가 감소하고, 강한 vortex-breakdown 현상으로 인해 flashback 현상이 발생하기 때문이다. swirl 연소기는 높은 혼합과 강한 재순환영역으로 화염을 안정적으로 유지시킬 수 있었으나, 수소를 사용함으로써 이것이 오히려 안정성을 해치는 요인이 된 것이다. 따라서 새로운 형태의 연소기가 연구되고 있다.

마이크로믹서(Micromixer)연소기는 다수의 소형 노즐을 사용하여, 높은 축방향 속도를 유지하면서 연료의 혼합을 극대화하고 화염을 연소실 전반으로 분산시켜, 화염의 고온부를 최소화하는 동시에 화염의 연소실 내 체류시간(residence time)을 감소시켜 최종적으로, NOx 배출을 감소시키는 특성을 지닌다. 배기 성분 중 NOx는 화염 온도와 체류시간에 큰 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다. 현재 다양한 연구기관에서 마이크로믹서 연소기에 대한 연구가 진행 중이며, 그 중 독일 Aachen 공대와 일본 Kawasaki 중공업은 협업을 통해 현재 5MW 출력의 실스케일 연소기를 제작하여 실험 운전 중에 있다. 또한 GE, Parker-Hannifin, Mitsubishi, 등의 기업에서도 유사한 원리의 연소기를 제작하여 수소 연소 또는 수소 함량이 높은 연료의 연소기로서 사용하기 위해 연구를 진행 중에 있다.

본 연구에서는 마이크로믹서 연소기에 사용된 단일 노즐에 대한 특성을 분석한다. 하나의 노즐을 통해 다양한 혼합 방식에 따른 화염의 특성을 파악하고, 궁극적으로 연소의 배기 특성과 연소 불안정 특성에 대한 분석을 진행한다.

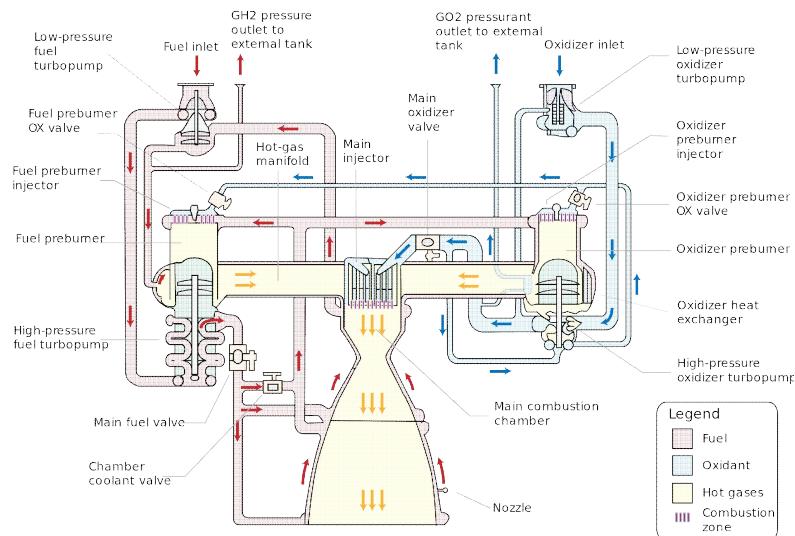


11-4. 전단동축형 분사기의 분무특성 연구

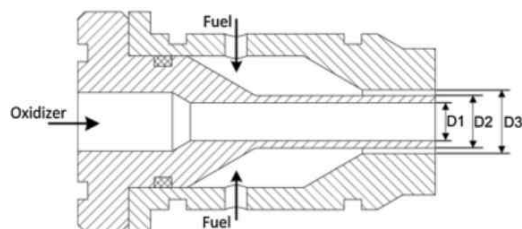
전단동축 분사기(shear coaxial injector)는 중심의 액체 줄기와 주변의 기체가 빠르게 분사하면서 분열되는 로켓 분사기다. 미국 스페이스 셔틀의 메인엔진에 장착된 분사기 종류로서 유럽에서는 HM7, HM60의 아리안 로켓 계열에도 쓰인 것으로 알려져 있다. 미국 스페이스 셔틀이 1981년부터 2011년 마지막 비행을 할 때까지 쓰인 분사기 종류인데, 요즘에는 동축분사기도 전단동축보다는 혼합효율 등을 이유로 와류형 동축분사기를 쓰는 추세이다. 한국형 발사체 누리호에 쓰인 것도 케로신 액체산소의 액체/액체 와류형 동축분사기이다.

그렇지만 전단동축 분사기는 그 분무 형태가 단순하면서도 분석하기 용이한 형태로 다양한 학문적 연구가 이루어지고 있고 최근에도 관련 논문들이 발표되고 있다. 근래에 각광받기 시작한 친환경 연료로서 메탄이 활용도가 넓어지면서 팽창식 사이클에서 메탄을 기체로 하여 액체산소와의 추진제 조합도 생각해 볼 수 있다.

따라서 추진제 모사매질로서 물과 공기를 이용하여 분사기의 분무특성을 파악하고자 하며, 이를 바탕으로 연소에서의 영향성을 판단해본다. 분사기의 기하학적 변수로 리세스 길이가 있으며 분사조건으로는 분사압이 있다. 따라서 유량 및 운동량비에 따른 분무특성을 계측하면서 전단동축형 분사기의 기본적인 성질을 파악할 것이다.



<스페이스 셔틀엔진의 연료과잉 다단엔진 사이클 모식도와 엔진 헤드부에 표시된 전단동축형 분사기>



<전단동축형 분사기 단면 형상 - Aerospace Science and Technology Vol. 59>