분리 3중 충돌형 분사요소 혼합특성

(Mixing Characteristics of Split Triplet Injection Element)

이은제, 이성웅, 조용호, 윤웅섭

연세대학교

(e-mail : wsyoon@yonsei.ac.kr)

레이놀즈 수 3000 -12000 사이의 난류제트를 사용하는 분리 3중 충돌형(Spli Triplet impinging) 분사기의 분무 혼합특성을 모의 추진제에 의한 실험적인 방법으 연구하였다. 모의 추진제로 사용된 물과 케로신(Kerosene)의 비중차를 이용 2층으로 분리하여 추진제의 혼합분포를 측정하였다. 60o의 충돌각, 0.4 mm의 분사공 직경 L/D가 6인 분사기를 사용하여, 난류 제트의 영역인 제트 레이놀즈 수 4,000 정도로 연료유량(1.98 g/sec)을 고정시킨 후 산화제 유량을 증가시키면서(0.5부터 8까지의 동량비) 패터네이터(Patternator)를 이용, 분사기에서 분사된 추진제를 채집, 질량 측정하여 혼합비를 산출하는 방법으로 실험하였다. 실험에서 사용된 이중충돌형 분 사기는 추진제의 배열에 따라 OFFO, FOOF 두가지로 구분된다. 즉 연료의 유량은 고정된 상태에서 측면(OFFO) 또는 중앙(FOOF)의 산화제 유량을 변화시켜 운동량비 의 증가를 얻는다. 모의 추진제의 질량분포는 실험된 모든 분리 충돌형 분사기에 대해 다음의 세가지 경우에 대해 공통적인 특성을 나타낸다.

첫번째로 중앙제트의 운동량이 측면제트의 운동량보다 큰 경우, 질량분포에서 상대적으로 넓게 나타나는 것은 모두 운동량이 작은 측면제트에 해당한다. OFFO의 경우 산화제의 질량분포는 연료의 질량분포에 비해 작게 나타나는 반면 FOOF의 경우 연료의 질량분포 영역이 산화제 보다 큰 것을 알 수 있다. OFFO분사기의 경 우, 연료와 산화제 모두 한곳으로 집중되는 현상을 나타낸다. 이것은 미립화 측면에 서 볼 때 제트의 붕괴가 크지 않음을 나타낸다. 1차 충돌 시 중앙제트의 강한 운동 량에 의해 측면 제트가 바깥으로 밀리는 현상으로 생기는 작은 2차 충돌각으로 2차 충돌 후 연료와 산화제는 한곳으로 집중된다. 1차 충돌후 작은 충돌각으로 미립화 가 크게 진행되지 않은 두 추진제 제트는 2차 충돌에서도 효과적인 미립화를 나타

내지 못한다. 그러나 혼합적 측면에서 보면, 연료와 산화제의 분포가 비록 작지만 두 추진제 모두 같은 채집셀 영역으로 분포하며, 제트가 좀더 크게 붕괴되는 산화제의 분포 영역 또한 연료보다 약간 큰 분포를 나타내어 높은 혼합 효율을 발생한다. MR=0.5의 경우 약 80%의 혼합효율을 나타내는데 이것은 FOOF의 MR=0.5보다 약 15% 높은 것을 알 수 있다. 이것은 FOOF의 MR>1.0의 경우와도 상당히 일치하는 것을 볼수 있는데 중앙제트의 운동량이 측면제트보다 2배가 되는 MR=2.0의 경우 약 90%의 혼합 효율을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 여기서 OFFO의 MR=0.5보다 높게 혼합효율이 나타나는 것은 고정된 연료제트 비해 산화제의 유량은 증가했기 때문이다.

평행제트와 측면제트의 운동량이 같은 경우 OFFO, FOOF 모두 연료와 산화제가 같은 영역에 비슷한 크기로 분포하는 것을 볼 수 있었다. 이는 1차 충돌에서 각각의 제트는 서로 같은 정도의 침투와 미립화를 일으키며, 뒤섞인 연료와 산화제 액주가 생성, 1차 충돌지점 하류에서 다시 충돌하면서 혼합, 연료와 산화제의 질량분포가 서로 OFFO, FOOF 모두 비슷하게 나타난다. 이 결과로 두 이중충돌형 분사기 모두 연료와 산화제의 운동량이 같은 경우 가장 좋은 혼합효율을 나타낸다. 이는 1차 충돌후 연료와 산화제의 제트가 모두 비슷한 정도의 붕괴를 보이고, 또한 2차 충돌각의 증가로 좋은 혼합특성을 나타낸다.

측면제트의 운동량이 큰 OFFO MR>1.0과 FOOF MR<1.0의 경우, 중앙의 제트는 충돌후 생성된 액막 양 끝쪽으로 크게 편중되어 나타나는 것을 볼 수 있으며, 측면의 큰 운동량을 갖는 제트 또한 매우 큰 타원형의 질량 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 이중충돌형 제트의 2차 충돌이 갖는 특성 때문이다. 즉 측면의 강한 제트는 1차 충돌 후에도 제트의 성질을 그대로 유지 2차 충돌에서 강한 운동량을 갖는 제트끼리의 충돌을 발생시킨다. 이 결과로 측면제트는 넓은 타원형의 질량분포를 나타낸다. 또한 중앙제트는 2차 충돌시 강한 측면제트의 영향으로 바깥쪽으로 밀려 액막 방향 양끝으로 편중되는 것을 볼 수 있다. 측면 제트의 운동량증가에 따른 가장 큰 변화는 2차 충돌각의 증가이다. 측면제트의 운동량증가는 1차 충돌후에도 제트의 특성을 그대로 유지시켜 2차 충돌각을 설계 충돌각인 60도에 가깝게 증가시키며, 2차 충돌은 1차 충돌후 제트의 특성을 유지하는 측면제트의 이탈을 줄이는 동시에 제트의 특성을 유지하는 제트를 미립화 시키는 역할을 한다. 즉 1차

충돌후 미립화 되지않은 측면 제트를 미립화 시켜 좋은 미립화 효율 즉 넓은 연료와 산화제 분포를 얻을 수 있다. 그러나 혼합 효율면에서 좋지 않은 특성을 나타내는데 측면의 강한 제트가 2차 충돌시 중앙제트를 바깥쪽 즉 액막 방향으로 밀어낸다. 질량분포에서 중앙제트가 액막 방향 끝으로 편중되어 나타나는 것은 이것을 증명한다. 이런 편중된 질량분포로 인해 혼합효율은 급격히 떨어진다. 이것은 실험된 분리 충돌형 분사기에서 중앙제트와 측면제트의 운동량비가 0.5와 2.0인 경우를 비교하면 OFFO는 0.5의 경우가 FOOF는 2.0의 경우가 높은 혼합효율을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다.

2유체(bipropellant) 모의 추진제의 비연소 실험을 통해 혼합 효율을 계산하면 추진제의 증발률과 같은 물성치를 결정하거나 혹은 가정하여 연소성능을 예측할 수 있다. 여기에 사용되는 파라미터로는 연소실 내에서 혼합정도에 의한 연소성능을 나타내 주는 혼합 특성 속도(C*mix)와 불완전한 혼합에 의한 연소 성능의 손실을 직접적으로 나타내는 혼합 특성 속도 효율(ηC*mix)이 있다. 특성 속도와 특성 속도 효율에 기초하여 로켓의 엔진 성능이 변하기 때문에 충돌형 분사기의 혼합의 질을 평가함에 있어 혼합지배특성속도가 고려된다. 엔진연소에서 실제로 발생하는 것은 효율이 아니고 특성속도 그 자체이기 때문이다. 여기서 혼합 특성 속도는 비연소 실험이 실제 연소환경에서의 혼합과 거의 일치한다는 가정하에서 이루어 진 것으로, 특성 혼합 속도 효율과 마찬가지로 분무의 공간 질량 분포와 모사추진제의 혼합비에 의존하는 값이다. 또한 이 두 파라미터를 결정하는 과정에서 이론 특성 속도를 구해야 하는데 이는 액적의 100% 기화율을 가정하여 화학평형코드를 통해 계산되었다.

운동량 비가 2 이상인 영역에서 FOOF의 C*mix와 ηC*mix 값이 OFFO에 비해 변화가 거의 없고 또한 높은 값을 가지는 것을 통해 양호한 혼합은 곧 연소성능을 향상시킴을 확인할 수 있었다. 특기할 것은 FOOF의 경우 운동량 비가 2이상인 영역에서 운동량비가 증가할수록 혼합 특성 속도 효율이 감소하지만, 혼합 특성 속도는 운동량비 2~4인 영역에서 거의 일정하게 유지된다는 것이다. 이는 연소에 의한 열방출량을 직접 나타내는 혼합 특성 속도가 이론혼합비인 2.3정도에서 최대 값을 보이고 이론혼합비에서 벗어남에 따라 완만히 감소되는 평형화학반응 계산결과와 매우 유사하다. 즉 FOOF에서의 혼합효율이 매우 높으며 이에 따라 균일 혼합에 의

한 연소성능이 발생됨을 보이고 있다. 운동량 비가 1보다 작은 경우 OFFO의 혼합효율이 FOOF 보다 큰 반면, 혼합 특성 속도 효율은 두 경우 모두 거의 비슷한 값을 가진다. 이는 혼합비의 분포가 선형적으로 산술 평균된 반면, 단열화염온도는 국소 혼합비에 의해 일정한 압력에 대하여 비선형적으로 변화되기 때문이다.

분리 3중 충돌형 분사기의 운동량비에 따른 혼합효율 및 혼합특성속도, 혼합특성속도 효율을 각각 고찰하고 비교/분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. FOOF 형식이 OFFO 형식보다 혼합효율 면에서 더 양호한 결과를 나타내었다. 이는 산화제가 측면 제트로 분사되는 OFFO의 경우 연료 제트에 대한 침투 정도가 증가하여, 운동량 비가 증감함에 따라 산화제의 국소적 집중현상에 의해 혼합성능이 더욱 급격히 저하하기 때문이다.

2. FOOF 형식이 OFFO 형식보다 혼합 지배적인 연소 성능에서도 보다 양호한 결과를 나타내었다.

3. 향후, 추가적인 수류 및 연소실험을 통하여 분리 3중 충돌형 분사요소의 혼합 및 혼합지배연소성능을 실험, 고찰할 예정이다.