

액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무특성 Part I : 분사조건에 따른 특성

김동준* · 임지혁* · 한풍규** · 윤영빈***

Spray Characteristics of a Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injector Part I : Effect of Injection Condition

Dongjun Kim* · Ji-Hyuk Im* · Poonggyoo Han** · Youngbin Yoon***

ABSTRACT

The influences of injection conditions and recess configuration of liquid-liquid swirl coaxial injectors on spray characteristics were investigated. The characteristics of the coaxial spray in internal mixing injection region were mainly controlled by the merging phenomenon and momentum balance between two liquid sheets, but those in internal mixing injection region were influenced by the impingement phenomenon as well as momentum balance between two liquid sheets.

초 록

본 연구는 케로신-LOX를 추진제로 하는 액체로켓엔진용 스월 동축형 인젝터의 분사조건에 따른 분무특성 파악을 목표로 하였다. 또한 동축형 인젝터에서 일반적으로 많이 적용되는 리세스 형상이 리세스가 없는 경우와 어떤 차이를 보이는 지에 대해서도 비교 분석하였다. 분무형상, 분무각, 분열길이 등의 측정에 따르면, 액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무특성은 내부 산화제 분무와 외부 연료 분무의 결합 및 혼합에 의한 상호작용에 의하여 그 경향성이 크게 달라지고 있음을 알 수 있었다.

Key Words: Swirl Coaxial Injector(스월 동축형 인젝터), Spray Characteristics(분무특성), Spray Angle(분무각), Breakup Length(분열길이), Merging Point(혼합위치), Recess(리세스)

1. 서 론

추진제의 빠른 미립화와 균일한 질량분포 및

혼합은 액체로켓엔진의 연소성능을 좌우하는 중요한 특성들이며, 액체로켓엔진에서는 인젝터가 이 역할을 담당하고 있다. 그 중에서 같은 동심축을 가지는 동축형 인젝터는 미립화 성능이 좋고 넓은 작동 조건에서 연소불안정성이 작은 장점이 있어 설계 및 제작 상의 어려움에도 불구하고 로켓엔진에서 많이 활용되고 있다[1].

† 2005년 12월 28일 접수 ~ 2006년 6월 12일 심사완료

* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부

** 정회원, (주)로템 기술연구소

*** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

내부 산화제 액상제트를 둘러싼 외부 연료 기상제트 형태를 가지는 동축형 인젝터는 SSME(Space Shuttle Main Engine)을 비롯하여 실제 많은 액체로켓엔진에 적용되어 왔으며, 이러한 인젝터의 분무특성에 관한 연구도 많이 수행되어왔다. 반면, 케로신/LOX와 같이 액체-액체 추진제 조합을 가지는 동축형 인젝터는 효율적인 미립화와 혼합을 위하여 스윙 동축형으로 사용해야 하고[2], 러시아에서 주로 사용되어왔다. 하지만, 액체-액체 스윙 동축형 인젝터의 분무특성에 대한 연구문헌은 매우 부족한 실정이다. Seol 등[3]은 dual-orifice 형태의 인젝터를 이용하여 내부와 외부 액막의 상호작용에 대하여 가시화를 하였으나, 분사압력이 매우 낮은 조건에서 실험이 이루어졌다. 또한, Sivakumar와 Raghunandan[2, 4]은 액체-액체 스윙 동축형 인젝터의 상호작용에 관한 체계적인 연구를 수행하였고, hysteresis 현상을 보이는 두 추진제의 결합 및 분리 과정이 액적크기 변화에 큰 영향을 미치고 있음을 보고하였다.

본 연구에서는 액체-액체 추진제를 사용하는 스윙 동축형 인젝터를 대상으로 각각의 추진제의 분사압력에 해당하는 분사조건이 분무특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 또한 Part II의 연구에서는 동축형 인젝터에서 가장 중요한 형상변수인 리세스에 따른 분무특성을 분석해보기로 한다.

2. 실험 장치 및 조건

본 연구에 사용된 스윙 동축형 인젝터는 케로신-LOX를 추진제로 하는 액체로켓엔진용 인젝터를 모델로 하고 있으며, Fig. 1과 같이 내부 및 외부 인젝터, 인젝터 케이스로 구성되어 있다. 스윙 동축형 인젝터는 내부 인젝터에 유량이 많은 산화제를, 외부 인젝터에는 연료를 배열하는 경우와 그 반대의 경우가 모두 사용되고 있는데, 이것은 액체로켓엔진의 작동 환경과 조건에 따라 달라진다. 본 연구에서는 유량이 많은

산화제를 내부에 배치하고, 외부에 연료를 배치한 스윙 동축형 인젝터를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 인젝터는 스윙을 생성하기 위하여 탄젠트 입구 홀을 사용하였다. 실험은 내부와 외부 인젝터 분사압력을 각각 1 - 6 bar 까지 변화시키면서 수행되었다.

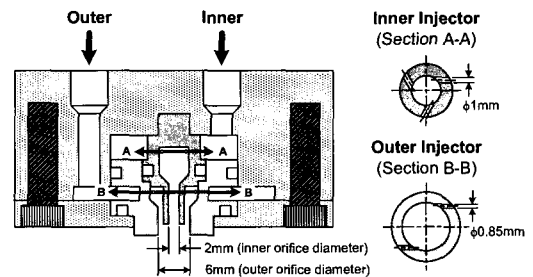


Fig. 1 Swirl Coaxial Injector Design

스윙 동축형 인젝터의 오리피스 내경은 2 mm이며, 외부의 연료 스윙 인젝터는 6 mm이다. 내부 산화제 인젝터는 1 mm 직경의 탄젠트 유입구 3개를 120° 간격으로, 외부 연료 인젝터는 0.85 mm 직경의 탄젠트 유입구 2개를 180° 마다 배치하였다. 한편, 리세스에 따른 분무특성 차이를 파악하기 위하여 리세스가 없는 조건과, 내부 산화제 인젝터가 외부 연료 인젝터 끝단으로부터 4 mm 안쪽으로 위치한(리세스 4 mm) 두 가지 조건을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 분무 형상

일반적으로 단일 스윙 인젝터에서 형성되는 분무는 분사압력이 증가함에 따라, dribble, distorted pencil, onion, tulip과 fully developed spray 단계를 거치는 것으로 알려져 있다[1]. 분사압력에 따른 일반적인 단일 분무형상은 이전 연구에서 많이 소개되었으므로[1, 5] 본 논문에서는 동축 혼합분무 형상을 중심으로 표현하기로 한다. 따라서, 외부 연료 분사압력을 2 bar로 고정한 채, 내부 산화제 인젝터의 분사압력을 증

가시킴으로써 획득한 분무형상을 리세스 유무에 따라 구별하여 보여주고 있다. 내부 산화제와 외부 연료의 개별 분무사진을 살펴보면 외부 연료의 분무각이 내부 산화제 분무각에 비하여 상대적으로 크기 때문에, 리세스가 없는 조건에서는 두 추진제가 서로 만나지 않을 것으로 예상되지만, 산화제의 분사압력이 1 bar일 때를 제외하고는 모든 조건에서 연료와 산화제가 만나서 합쳐지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 전체적인 분무 형상으로부터 내부 산화제의 분사압력이 증가함에 따라 분무의 분열길이는 짧아지고, 분무각은 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 리세스가 있는 경우에는 산화제와 연료가 인젝터 내부에서 만나기 때문에 내부 산화제의 압력이 낮은 조건에서도 연료와 산화제가 독립적으로 분무되는 현상은 관찰되지 않았다. 두 추진제가 인젝터 내부에서 만나는 경우를 내부 혼합분무(internal mixing injection), 외부에서 만나는 경우를 외부 혼합분무(external mixing injection)라 한다.

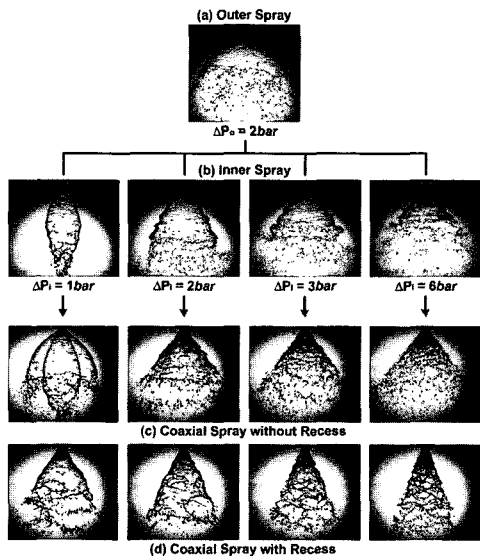
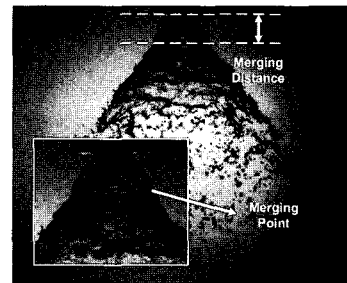


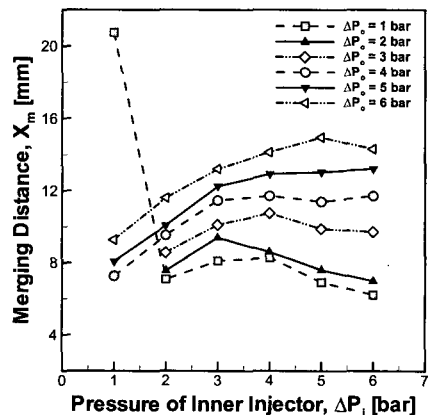
Fig. 2 Coaxial Sprays according to the Injection Pressure of an Inner Oxidizer Injector

외부 혼합분무의 경우에는 Fig. 3(a)와 같이 연료와 산화제가 만나기 이전에 불룩한 형상이 관찰되었다. 즉, 인젝터 출구면에서 어느 정도 떨

어진 위치에서 두 추진제가 서로 만나는데, 이 혼합거리 또는 혼합위치(merging point, X_m)는 분무특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig. 3(b)에는 분사조건에 따른 두 추진제의 혼합 위치를 나타내었다. 전체적으로 두 추진제는 인젝터로부터 약 7 - 14 mm 떨어진 거리에서 만나고 있으며, 외부 연료의 분사압력이 클수록, 즉 외부 연료 분무각이 클수록 혼합위치는 인젝터로부터 멀어지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 산화제 분사압력이 1 bar이며, 연료 분사압력이 2, 3 bar일 때에는 두 추진제가 합쳐지지 않고 독립적으로 분무되기 때문에 혼합위치는 존재하지 않으며, 두 추진제의 분사압력이 모두 1 bar인 경우에는 인젝터로부터 가장 먼 약 21 mm 정도 떨어진 거리에서 혼합되고 있다.



(a) Merging Distance or Point, X_m



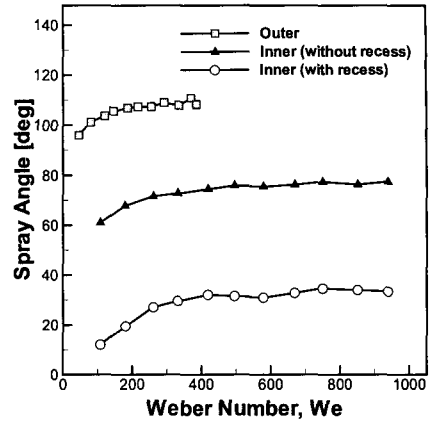
(b) Merging Distance with ΔP_i

Fig. 3 Merging of Coaxial Spray in the External Mixing Injection Region

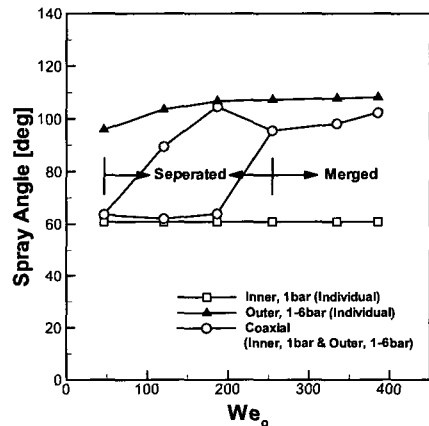
일반적으로 분사압력이 매우 높은 조건을 제외하고, 스윙 분무는 완전한 원뿔 형상을 가지지 못하고 중심부로 휘어진 벨 형상을 보이는데, 이는 분무 내부의 기체가 원추형 액막에 의해서 막혀있기 때문에 분무의 외부와 내부에서 유입되는 주위 기체의 압력차가 발생하기 때문으로 알려져 있다. 동축 분무에서는 이러한 현상이 더욱 심해지는데, 외부 연료 분무의 경우에 대해서 생각해 보면, 내부에 산화제 액막이 존재하기 때문에 내부로 유입되는 기체의 양이 더욱 줄어들어 액막 내외부의 압력차가 심화되고, 따라서 분무각이 모든 실험 조건에서 개별 분무 때보다 작아지게 된다. 반면 내부 산화제 분무의 경우에는 외부 연료분무의 존재로 인하여 액막의 내외부 사이의 압력차가 거의 발생하지 않게 되며, 심지어 산화제 분사압력이 큰 조건에서는 외부 연료 분무와 내부 산화제 분무 사이의 기체 부피가 매우 작으므로 오히려 분무가 바깥쪽으로 휘어질 가능성이 있다. 이러한 상호간섭의 현상들로 인하여 리세스가 없는 경우에서도 산화제와 연료의 동축분무는 합쳐져서 분무되고 있음을 알 수 있다.

3.2 분무각

스윙 인젝터의 분무각은 추진제의 공간적인 질량 분포와 혼합효율을 결정하기 때문에 연소 시스템의 점화 성능과 냉각특성에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이다. Fig. 4(a)에는 산화제와 연료를 개별 분무하였을 때의 분무각을 나타내었는데, 리세스가 없을 때 산화제는 Onion($We_i = 109$), Tulip($We_i = 261$) 단계를 거쳐 $We_i = 419$ 이후에는 77°정도의 분무각을 유지하였고, 분무형상도 완전한 원추 형태로 성장하였다. 그러나, 리세스가 있을 때에는 외부 인젝터 벽면에 충돌한 다음 분사되므로 리세스가 없는 조건에서보다 작은 분무각을 가지게 되는데, 본 연구에서는 $We_i = 419$ 이후에 32°정도의 분무각을 가지는 것으로 측정되었다. 외부의 연료도 Tulip($We_o = 47$) 단계를 거쳐 $We_o = 102$ 이후에는 완전한 원추 형태에 도달하였다.



(a) Individual Spray Angle with We



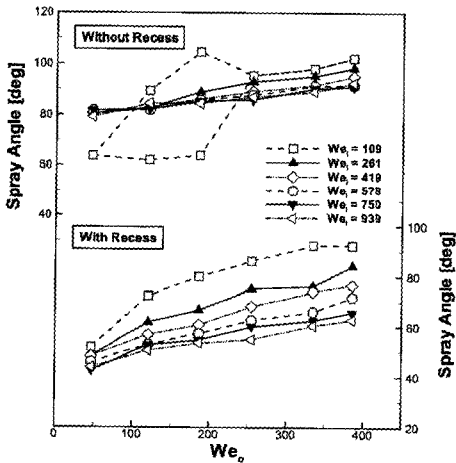
(b) Spray Angle Change with We_o

Fig. 4 Spray Angle Variations

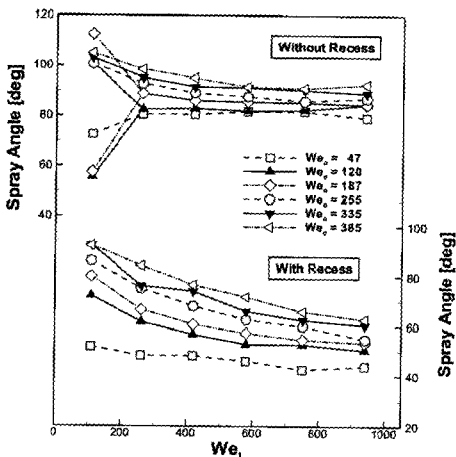
Figure 4(b)에는 외부혼합분무의 경우에서 관찰된 산화제와 연료의 결합 현상을 확인하기 위하여, 산화제를 $We_i = 109$ 로 유지한 채 We_o 를 높여가면서 측정된 분무각을 나타내었다. 앞서 설명한대로 연료의 분사압력이 $We_o = 47$ 일 때에는 혼합분무를 형성하지만, 이후 연료의 분사압력이 $We_o = 187$ 에 도달할 때까지는 연료와 산화제가 서로 만나지 않고 독립적으로 분무되며, $We_o = 255$ 이상이 되면 두 추진제가 다시 결합하게 된다. 분무각의 크기 면에서 비교해보면, $We_o = 47$ 일 경우에는 산화제 개별 분무의 분무각보다 조금 큰 분무각을 가지는 혼합분무가 형성되었지만, 연료의 분사압력이 증가할수록

($We_o = 255 - 385$) 혼합분무의 분무각은 오히려 연료 개별 분무의 분무각과 근접해 가고 있었다. 이를 근거로 분무각이 작은 산화제 분무와 분무각이 큰 연료 분무 사이에서 상대적으로 모멘텀이 큰 쪽의 경향성을 따라가고 있음을 유추할 수 있다. 두 추진제가 결합되지 못하고 독립적으로 분사되는 $We_o = 120, 187$ 의 경우에는 앞서 설명한대로 두 분무 액막 사이의 압력감소로 인하여 연료 분무의 경우에는 각각의 개별 분무보다 약간 작은 분무각을, 산화제 분무의 경우에는 약간 큰 분무각을 형성하고 있음을 알 수 있다.

외부 연료와 내부 산화제의 분사조건에 따라 측정된 동축분무의 분무각을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)는 각각의 고정된 내부 산화제 분사 조건에서 외부 연료 분사압력을 변화시키면서 측정된 분무각이며, 외부 혼합분무의 $We_i = 109$ 인 경우는 앞서 Fig. 4(b)에서 설명하였으므로 생략하기로 한다. Fig. 5(a)의 각 기호들은 동일한 산화제 분사조건을 나타내고 있는데, 내부 산화제 분사조건을 고정하고, 외부 연료 분사조건 즉, We_o 를 증가시켰을 경우, 전체적으로 두 추진제가 결합된 혼합 분무각은 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서 확인할 수 있는 바와 같이 외부 연료의 분무각 증가에 따라 혼합위치가 인젝터로부터 멀어지므로 작은 분무각을 가지는 내부 산화제 분무의 영향이 줄어들기 때문으로 판단된다. 또한 We_i 가 작을수록 We_o 에 따른 증가의 정도는 더 심해진다.



(a) Coaxial Spray Angle as Increasing We_o



(b) Coaxial Spray Angle as Increasing We_i

Fig. 5 Coaxial Spray Angle Variations

Figure 5(b)에는 내부 산화제 We_i 에 따른 혼합 분무각의 변화를 도시하였는데, 외부 혼합분무가 $We_i = 109$ 이고, $We_o = 120$ 또는 187 일 때 Fig. 5(a)의 결과와 마찬가지로 두 추진제가 개별 분무되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 결과에 따르면, We_i 의 증가에 따라 혼합 분무각이 점차 감소하다가 $We_i = 120$ 이후에는 거의 일정해지는 경향성을 보였는데, 이는 두 추진제의 혼합위치가 산화제 분사압력 3 bar 이상의 조건에서 대체로 수렴하는 Fig. 3의 결과와 연관성을 가진다. 내부 혼합분무의 경우에는 We_i 의 증가에 따라 혼합 분무각은 계속 감소하고 있었으며, We_o 가 클수록 We_i 에 의한 감소가 커짐을 알 수 있었다. 즉, 단일 분무각이 비교적 큰 차이를 보이는 두 추진제의 혼합 분무각은 혼합위치에 상당히 큰 영향을 받으며, 두 추진제의 상대적인 모멘텀 차이에 의해서 결정된다고 할 수 있다.

두 추진제의 모멘텀 비에 따른 혼합 분무각의 경향성을 파악하기 위하여, Fig. 6과 같이 두 추진제의 We 비에 따른 혼합 분무각을 도시하였다. 측정값들은 흩어지지 않고, 리세스 유무에 따라 특정한 경향성을 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 5의 결과와 같이, 동축 혼합 분무각은

We_o 에 따라 증가하고, We_i 에 따라 감소하고 있었다. 또한 외부 혼합분무의 경우가 내부 혼합분무의 분무각보다 크음을 알 수 있으며, 낮은 We 비에서는 약 2배 정도의 차이가 있었으나, 높은 We 비에서는 그 차이가 줄어들었다. 내부 산화제 분무 모멘텀이 상대적으로 큰 낮은 We 비 조건에서는 내부 산화제 개별 분무각이 리세스가 있는 경우 절반 정도 작기 때문에 이러한 큰 차이가 발생하는 것으로 생각된다. 측정된 혼합분무각은 We 비에 따라 뚜렷한 경향성을 보이고 있으나, 하나의 변수만으로 규정된다고 보기는 어렵고, Eq. 1과 같이 축방향, 원주방향의 모멘텀 식을 이용하여 혼합 분무각을 예측하여 보았다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_i u_i + \dot{m}_o u_o &= (\dot{m}_i + \dot{m}_o) u \\ \dot{m}_i w_i + \dot{m}_o w_o &= (\dot{m}_i + \dot{m}_o) w \end{aligned} \quad (1)$$

스웰 분무각은 간단히 원주방향 속도 w 와 축방향 속도 u 의 비로 표현할 수 있는데, Eq. 1에서 원주방향 모멘텀식을 축방향 모멘텀식으로 나누게 되면, Eq. 2와 같이 동축 혼합 분무각을 구할 수 있다.

$$\tan(\theta/2) = \frac{\dot{m}_i u_i \tan(\theta_i/2) + \dot{m}_o u_o \tan(\theta_o/2)}{\dot{m}_i w_i + \dot{m}_o w_o} \quad (2)$$

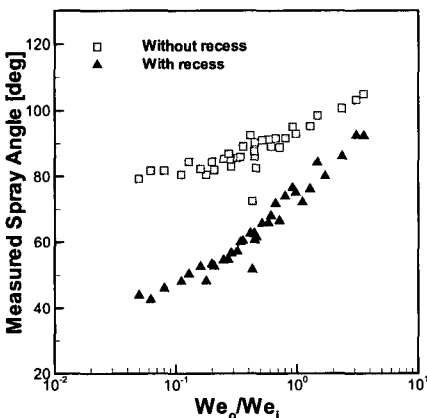


Fig. 6 Spray Angle with We ratio

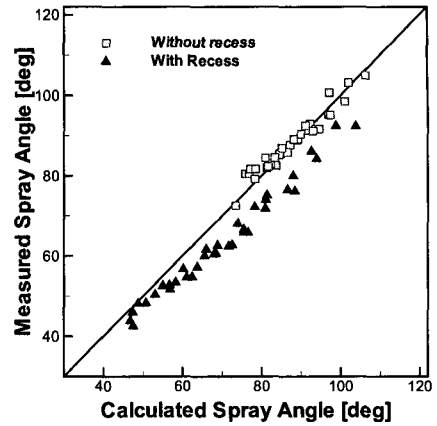


Fig. 7 Comparison between Measured and Calculated Spray Angle

혼합 분무각의 측정값과 Eq. 2를 이용한 계산값을 Fig. 7과 같이 비교해보았다. 외부혼합분무의 경우에는 매우 잘 일치하고 있으나, 내부혼합분무의 경우에는 계산값이 측정값보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 리세스가 있는 경우, 내부 산화제 분무가 외부 인젝터 벽면을 따라 흐르는 외부 연료분무에 충돌하게 되면, ripple이 생겨나게 된다. 이 ripple의 형성은 kinetic energy의 손실로 볼 수 있기 때문에 실제 분무각이 작아지는 것으로 사료된다. 위 결과들을 통하여, 두 추진제의 혼합 분무각은 외부 혼합분무의 경우, 두 추진제의 운동량비에 의해서 주로 결정이 되며, 내부 혼합분무의 경우에는 운동량비 뿐만 아니라 두 추진제의 내부충돌 현상에도 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

3.3 분열길이

Figure 8에는 외부 연료와 내부 산화제 개별 분무의 분사조건에 따른 분열길이를 나타내었다. 외부 연료분무의 분열길이는 We 가 증가함에 따라 초기에는 증가하다가 최대값에 도달한 후, 감소하고 있었다. 이러한 초기의 분열길이 증가 원인은 표면장력에 의한 것으로 생각할 수 있는데, 분사속도가 작을 때에는 분무 중앙으로 작용하는 표면장력이 크게 작용하여 분무각이 크게 퍼지지 못하고, 두꺼운 film 두께로 인하여 빨리

분열된다. $We = 120$ 이후에는 공기역학적 힘에 의하여 분열길이가 지속적으로 감소하게 된다. 한편, 내부 산화제 분무는 리세스 유무와 관계없이 We 에 따라서 분열길이가 감소하고 있으며, 전체적으로 리세스가 있는 경우의 분열길이가 리세스가 없는 경우에 비하여 벽면 충돌에 의하여 짧아지는 것을 볼 수 있다.

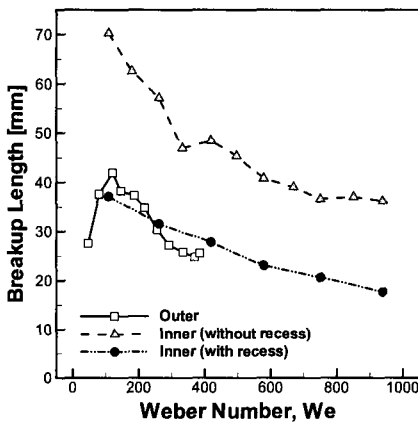
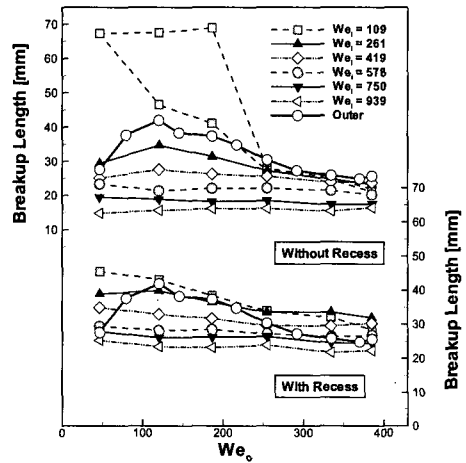


Fig. 8 Individual Breakup Length with We

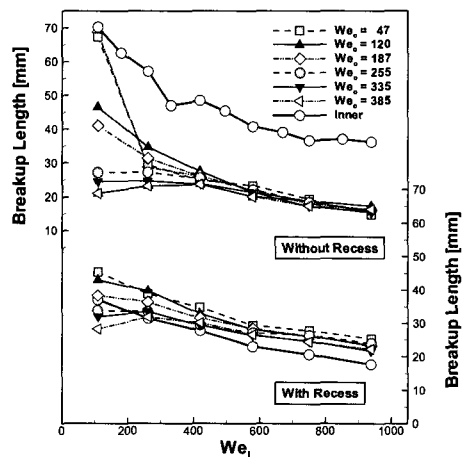
외부 연료 분무와 내부 산화제 분무의 분사조건에 따른 분열길이 변화를 개별분무의 분열길이와 함께 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)는 We_i 를 고정한 채, We_o 를 증가시키면서 측정한 분열길이이다. 외부 혼합분무의 경우에는 동축 분무의 분열길이가 내부 산화제와 외부 연료의 개별 분무 분열길이보다 모두 짧았다. 낮은 $We_i(261 - 419)$ 에서는 분열길이의 변화가 외부 연료 분무의 경우와 유사하였으나, We_i 가 578보다 커지면, 분열길이는 We_o 의 증가에도 불구하고 거의 변화가 없었다. 내부혼합분무의 경우에도 마찬가지로 낮은 We_i 조건에서는 We_o 가 증가함에 따라 분열길이가 서서히 감소하였으나, 높은 We_i 조건에서는 거의 변화가 없었다.

한편, Fig. 9(b)에는 We_i 에 따른 동축분무의 분열길이를 내부 산화제 분무의 개별 분열길이와 함께 나타내었다. We_o 에 따른 경향성과 달리, We_i 가 증가함에 따라 동축분무의 분열길이는 뚜렷하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 리세스 유

무에 관계없이 낮은 $We_o(120 - 187)$ 조건에서는 내부 산화제 개별 분무의 분열길이가 같이 지속적으로 감소하고 있으나, We_o 가 255보다 큰 조건에는 초기의 We_i 증가에는 분열길이가 거의 변하지 않다가 We_o 가 300 이상이되면 감소한다.



(a) Breakup Length as Increasing We_o



(b) Breakup Length as Increasing We_i

Fig. 9 Breakup Length Variations

내부 산화제와 외부 연료의 분사조건 변화에 따른 동축분무의 분열길이 변화를 하나의 변수로 표현하기 위하여 동축분무의 축방향 속도(u)와 액막 두께(h)를 이용한 동축 We 수, $We_{co}(= \rho u^2 h / \sigma)$ 를 도입하였다. Fig. 10은 We_{co} 의 log 스

케일에 따른 동축분무의 분열길이를 나타내고 있다. 리세스의 유무와 관계없이 동축분무의 분열길이는 We_{co} 의 증가에 따라 감소하고 있으며, 외부 혼합분무의 분열길이가 내부 혼합분무에 비하여 더 짧은 것을 알 수 있다. 리세스가 없는 경우에는 두 추진제가 혼합될 때, 충돌 및 중첩의 영향이 그대로 혼합분무에 전달되는 반면, 리세스가 있는 경우에는 외부 인젝터 벽면에서 두 추진제가 충돌하더라도 최종 인젝터면을 벗어나기 전에 스월 방향으로 같이 회전하면서 완전히 동일한 분무로 섞일 수 있기 때문에 이러한 차이점이 발생한다. 따라서 두 추진제의 내부 충돌에 의한 영향은 리세스 길이변화에 따라 달라질 수 있기 때문에 Part II 논문에서 다루기로 한다.

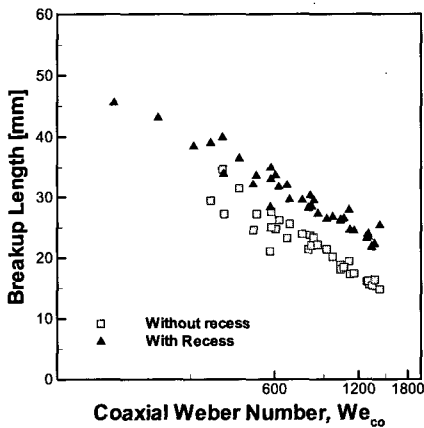


Fig. 10 Breakup Length with We_{co}

4. 결 론

케로신과 액체산소를 추진제로 하는 액체로켓 엔진용 스월 동축형 인젝터의 분무특성을 파악하기 위하여, 분사조건과 리세스 형상의 영향에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 리세스 유무에 따라 두 추진제가 만나는 지점이 달라지게 되는데 외부 혼합분무인지 내부 혼합분무인지에 따라서 분무특성이 매우 달라짐을 알 수 있었다. 외부 혼합분무는 내부 혼합분무에 비하여 분무각이 크고, 분열길이는 짧은 것으로 측정되었다.
2. 두 추진제의 분사조건 변화에 따른 분무특성은 상대적으로 내부 산화제와 외부 연료 분무 중 모멘텀이 증가하는 쪽으로 분무특성이 옮겨감을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, 1989
2. D. Sivakumar and B. N. Raghunandan, "Hysteretic interaction of conical liquid sheets from coaxial atomizers: Influence on the spray characteristics," *Physics of Fluids*, vol. 10, no. 6, pp. 1384-1397, June, 1998
3. W.S. Seol, Y.M. Han, M.S. Yoon and D.S. Lee, "A Visualization Study of Dual Spray Interaction of a Dual-Orifice Fuel Injector at Low Pressure Drop," *Journal of Flow Visualization & Image Processing*, 5, 1998
4. D. Sivakumar and B.N. Raghunandan, "Formation and Separation of Merged Liquid Sheets Developed from the Mixing of Coaxial Swirling Liquid Sheets", *Physics of Fluids*, 15(11), 2003
5. 김성혁, 김동준, 윤영빈, "스월 인젝터에서의 액막두께 측정에 관한 연구", *한국추진공학회지*, 제10권, 제2호, 2006, pp.70-77