

액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무특성

김동준* · 임지혁* · 한풍규** · 윤영빈*

Spray Characteristics of a Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injector

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

ABSTRACT

The influences of injection conditions and recess configuration of liquid-liquid swirl coaxial injector 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 분무 특성 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 동심

축을 가지는 동축형 인젝터는 미립화 성능이 좋고 넓은 작동 조건에서 연소불안정성이 작은 장점이 있어 설계 및 제작 상의 어려움에도 불구하고 로켓엔진에서 많이 활용되고 있다[1].

내부 산화제 액상제트를 둘러싼 외부 연료 기상제트 형태를 가지는 동축형 인젝터는 SSME를 비롯하여 실제 많은 액체로켓엔진에 적용되어 왔다. 하지만, 액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무특성에 대한 연구문헌은 매우 부족한 실정이다. Seol 등[2]은 dual-orifice 형태의 인젝터를

* 서울대학교 기계항공공학부

** (주)로템 액체로켓엔진시스템 연구실
연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

이용하여 내부와 외부 액막의 상호작용에 대하여 가시화를 하였으나, 분사압력이 매우 낮은 조건에서 실험이 이루어졌다. 또한, Sivakumar와 Raghunandan[3,4]은 액체-액체 스웰 동축형 인젝터의 상호작용에 관한 체계적인 연구를 수행하였고, hysteresis 현상을 보이는 두 추진제의 결합 및 분리 과정이 액체크기 변화에 큰 영향을 미치고 있음을 보고하였다. 본 연구에서는 액체-액체 추진제를 사용하는 스웰 동축형 인젝터를 대상으로 각각의 추진제의 분사압력에 해당하는 분사조건이 분무특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.

2. 실험장치 및 조건

본 연구에 사용된 스웰 동축형 인젝터는 케로신-LOX를 추진제로 하는 액체로켓엔진용 인젝터를 모델로 하고 있으며, Fig. 1과 같이 내부 및 외부 인젝터, 인젝터 케이스로 구성되어 있다. 실험에 사용한 인젝터는 스웰을 생성하기 위하여 탄젠트 입구 홀을 사용하였다. 실험은 내부와 외부 인젝터 분사압력을 각각 1 - 6 bar까지 변화시키면서 수행되었다. 스웰 동축형 인젝터의 오리피스 내경은 2 mm이며, 외부의 연료 스웰 인젝터는 6 mm이다. 한편, 리세스에 따른 분무특성 차이를 파악하기 위하여 리세스가 없는 조건과, 내부 산화제 인젝터가 외부 연료 인젝터 끝단으로부터 4 mm 안쪽으로 위치한(리세스 4mm) 두 가지 조건을 사용하였다.

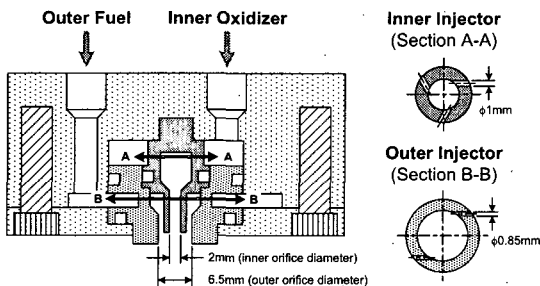


Fig. 1 Swirl Coaxial Injector Design

3. 결과 및 토의

3.1 분무 형상

분사압력에 따른 일반적인 단일 분무형상은 이전 연구에서 많이 소개되었으므로 본 논문에서는 동축 혼합분무 형상을 중심으로 표현하기로 한다. 따라서, 외부 연료 분사압력을 2 bar로 고정한 채, 내부 산화제 인젝터의 분사압력을 증가시키면서 획득한 분무형상을 리세스 유무에 따라 구별하여 보여주고 있다. 내부 산화제와 외부 연료의 개별 분무사진을 살펴보면 외부 연료의 분무각이 내부 산화제 분무각에 비하여 상대적으로 큼에도 불구하고, 리세스가 없는 조건에서 산화제의 분사압력이 1 bar일 때를 제외하고는 모든 조건에서 연료와 산화제가 만나서 합쳐지고 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.

일반적으로 스웰 분무는 완전한 원뿔 형상을 가지지 못하고 중심부로 휘어진 벨 형상을 보이는데, 이는 분무 내부가 원추형 액막에 의해서

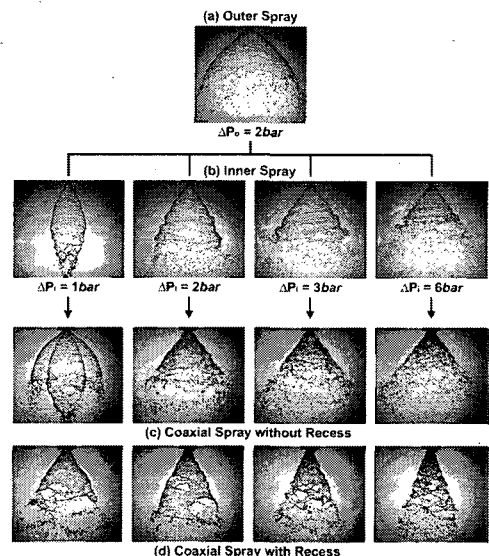


Fig. 2 Coaxial Sprays according to the Injection Pressure of an Inner Oxidizer Injector

막혀있기 때문에 분무의 외부와 내부의 기체 유입으로 인하여 압력차가 발생하기 때문으로 알려져 있다. 동축 분무에서는 이러한 현상이 더욱 심해지는데, 외부 연료 분무의 경우에는 내부에 산화제 액막이 존재하기 때문에 액막 내외부의 압력차가 심화되고, 따라서 분무각이 개별 분무 때보다 작아지게 된다. 반면 내부 산화제 분무의 경우에는 오히려 분무가 바깥쪽으로 휘어질 가능성이 있다. 이러한 상호간섭의 현상들로 인하여 리세스가 없는 경우에서도 산화제와 연료의 동축분무는 합쳐지고 있음을 알 수 있다.

3.2 분무각

Figure 3에는 리세스가 없는 경우의 산화제와 연료의 결합 현상을 확인하기 위하여, 산화제의 분사압력을 1 bar로 유지한 채 연료의 분사압력을 높여가면서 측정된 분무각을 나타내었다. 두 추진제의 분사압력이 모두 1 bar일 경우에는 산화제 개별 분무의 분무각보다 조금 큰 분무각이 있었지만, 연료의 분사압력이 증가할수록($\Delta P_o = 4 - 6$ bar) 혼합분무의 분무각은 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.

Figure 4에는 연료와 산화제의 We 비에 따른

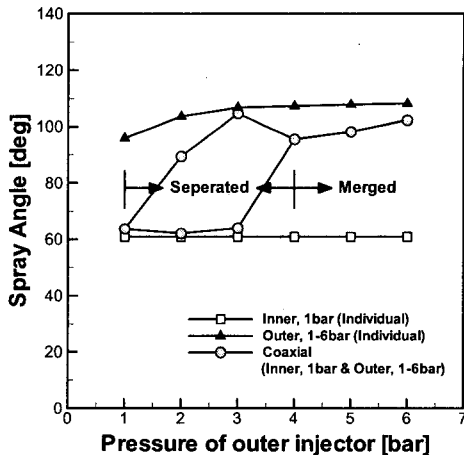


Fig. 3 Coaxial Spray Angle Change

분무각 변화를 나타내었다. 리세스 유무에 관계없이 전체적으로 We_o 가 증가할수록 분무각은 증가하며, We_i 가 증가할수록 분무각은 감소한다. 앞서 확인한 바와 같이(Fig. 3), 상대적으로 모멘텀이 증가하는 쪽으로 동축 분무각이 결정되고 있음을 알 수 있다. 두 추진제의 축방향과 원주방향 모멘텀식을 이용하여 동축 분무각을 예측할 수 있는데, Fig. 5에 계산과 측정값을 비교하여 나타내었다. 리세스가 없는 경우에는 예측값이 측정값과 잘 일치하고 있으나, 리세스가 있는 경우에는 두 추진제의 내부충돌에 의해서 ripple이 형성되어 모멘텀 손실이 발생하므로 측정된 분무각이 계산값보다 작은 것을 알 수 있다.

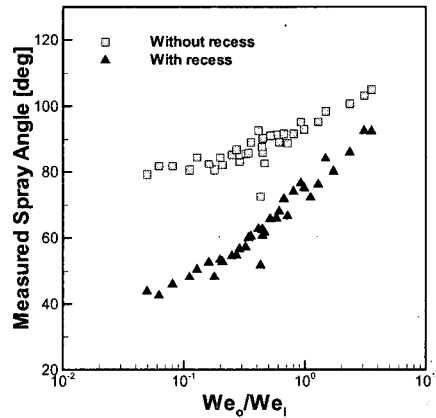


Fig. 4 Spray Angle with We Ratio

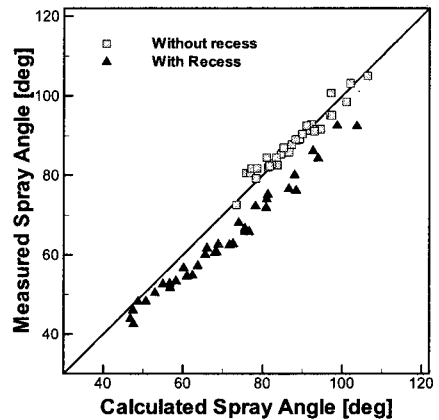


Fig. 5 Comparison between Measurement and Calculation

3.3 분열길이

동축분무의 분열길이는 Fig. 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 리세스의 유무와 관계없이 내부 산화제의 분사압력이 증가함에 따라 분무의 분열길이는 짧아지고 있다. Figure 6에는 동축 분무의 분열길이를 동축 Weber 수, We_c 에 대해서 log 스케일로 표현한 그림을 나타내었다. 전체적으로 내부 산화제 분무나 외부 연료 분무의 속도가 증가함에 따라 분열길이는 짧아지고 있다. 또한 리세스가 있는 경우에는 리세스가 없는 형상에 비하여 혼합분무의 분열길이가 조금 더 크게 측정되었는데, 리세스가 없는 경우에는 두 추진제가 혼합될 때, 충돌 및 중첩의 영향이 그대로 혼합분무에 전달되는 반면, 리세스가 있는 경우에는 외부 인젝터 벽면에서 두 추진제가 충돌 하더라도 최종 인젝터면을 벗어나기 전까지 스월 방향으로 같이 회전하면서 완전히 동일한 분무로 섞일 수 있기 때문에 이러한 차이점이 발생한다.

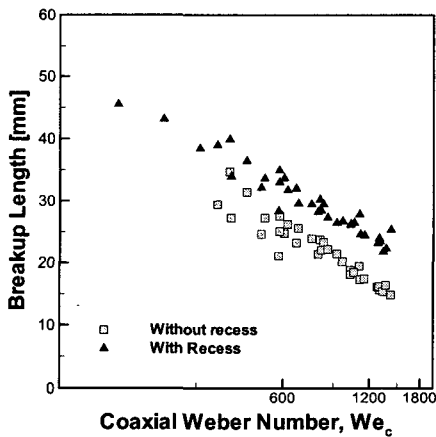


Fig. 6 Breakup Length with Coaxial We_c

4. 결 론

케로신과 액체산소를 추진제로 하는 액체로켓 엔진용 스월 동축형 인젝터의 분무특성을 파악하기 위하여, 케로신과 물을 유사추진제로 사용

하는 인젝터 시제를 제작하였고 리세스와 분사 조건의 영향에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 리세스가 없는 조건에서는 내부 산화제 분무와 외부 연료 분무 사이의 상호작용에 의하여 분무특성이 크게 달라진다.
2. 리세스는 산화제와 연료의 내부혼합을 유도하여 추진제의 전체적인 혼합비를 균일하게 만드는 역할을 하는 동시에, 내부 추진제의 분사압력이 어느 한계 이상으로 높아질 경우 혼합효율을 감소시키는 원인이 되기도 한다.

참 고 문 헌

1. A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, 1989.
2. 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.
3. 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.
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. 정원호, 김동준, 한풍규, 임지혁, 윤영빈, "액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무특성에 관한 연구", 제 4회 우주발사체기술 심포지엄, 2003.
6. 김동준, 임지혁, 윤영빈, "고압환경에서 스월 동축형 인젝터의 분무특성 연구", 제 5회 우주발사체기술 심포지엄, 2004.