액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무특성 Part II : 리세스 형상에 따른 영향

김동준* · 김성혁* · 한풍규** · 윤영빈***

Spray Characteristics of a Liquid-Liquid Swirl Coaxial Injector Part II : Effect of Recess Configuration

Dongjun Kim* · Sunghyuk Kim* · Poonggyoo Han** · Youngbin Yoon***

ABSTRACT

The influences of recess length of a liquid/liquid swirl coaxial injector on spray characteristics were investigated. It was revealed that the internal impinging phenomenon played an important role in the spray characteristics, such as spray angle and breakup length. Also, as the recess length increased, the mean drop size increased due to the increase of effective film thickness and mixing efficiency increased, but in the case of very deep recess length, the mixing efficiency decreased.

초 록

본 연구는 케로신-LOX를 추진제로 하는 액체로켓엔진용 스월 동축형 인젝터의 리세스 길이에 따른 분무특성 파악을 목표로 하였다. 리세스 길이에 따른 두 추진제의 내부충돌현상에 의한 ripple의 형성과 감쇠가 인젝터 외부의 분무안정성에 영향을 미치므로 분무특성과 큰 연관성을 가진다. 또한, 리세스 길이가 증가함에 따라 평균액적크기는 증가하였으며, 혼합효율은 증가하다가 최대값에 도달한 후 다시 감소하는 경향성을 보였다.

Key Words: Swirl Coaxial Injector(스월 동축형 인젝터), Spray Characteristics(분무특성), Spray Angle(분무각), Breakup Length(분열길이), Mixing Efficiency(혼합효율), 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].

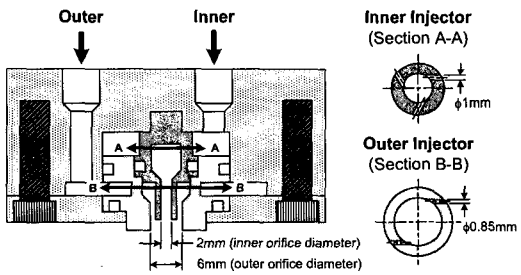
† 2005년 12월 28일 접수 ~ 2006년 6월 12일 심사완료
* 학생회원, 서울대학교 기계항공공학부
** 정회원, (주)로템 기술연구소
*** 종신회원, 서울대학교 기계항공공학부
연락저자, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

동축형 인젝터에서 매우 일반화된 기구로 사용되어 온 리세스는 내부 인젝터가 외부 인젝터 면으로부터 안쪽으로 들어간 형상을 일컫는다. 프랑스의 Kendrick 등[2]은 리세스가 극저온 화염안정화 영역 구조에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였는데, 리세스가 미립화 효율을 향상시켜서 화염이 비교적 넓게 존재하고 있음을 밝혔다. 독일의 Mayer 등[3]은 연소 환경에서 LN2/GH2 엔진의 분무특성 실험을 수행하였는데, 리세스 유무에 따라 미립화 특성은 크게 변하지 않지만, 리세스가 교란을 받지 않는 작은 챔버 역할을 하기 때문에 화염이 인젝터 근방에 부착되게 하여 화염안정성 측면에서 큰 역할을 하고 있다고 설명하였다. 화염부착기구로 작용하는 리세스 영역 내 재순환 유동의 존재는 Glogowski 등[4]의 실험을 통해서도 확인할 수 있다. 이러한 리세스 형상은 인젝터 내부에서 연료와 산화제의 내부혼합을 유도하여 혼합 및 성능을 향상시키는 장점을 가질 뿐 아니라, 액체로켓엔진의 작동 중에 화염을 안정화시키는 역할을 한다고 알려져 있다.

Sivakumar와 Raghunandan[5]은 액체-액체 스월 동축형 인젝터에서 리세스의 영향에 대해서 실험을 수행하였는데, 기체-액체 동축형 인젝터와 반대로 리세스가 증가함에 따라 미립화 특성이 나빠지는 결과를 얻었다. 하지만, 리세스 길이 변화의 개수가 많지 않았으며, 액적크기 외에 리세스 길이에 따른 분무특성 분석이 이루어지지 않았다. 박희호 등[6]은 액체-액체 이중 스월 동축형 분사기의 분사압력 및 리세스가 분무각, 출구 속도성분, 액막두께에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 하지만, 액체-액체 추진제를 사용하는 동축형 인젝터에 대한 문헌은 매우 부족한 실정이다. 따라서 Part I에서 다룬 액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분사조건에 따른 분무특성 실험의 연장으로, 본 연구에서는 액체-액체 추진제 조합을 사용하는 스월 동축형 인젝터에 대하여 리세스가 미립화 및 분무특성, 더 나아가 혼합특성에 미치는 영향에 대하여 알아보았다.

2. 실험 장치 및 조건

본 연구에서 사용된 스월 동축형 인젝터는 케로신과 액체산소를 추진제로 하는 액체로켓엔진용 인젝터를 모델로 하고 있다. 내부 인젝터에는 산화제를, 외부 인젝터에는 연료를 배열하였고, 기하학적 변수인 리세스의 영향을 고려하기 위해서 부품의 교체 조립이 가능하도록 Fig. 1과 같이 제작하였다. 실험에 사용된 스월 동축형 인젝터는 잘 알려진 수력학적 절차에 의하여 설계되었으며, 내부 산화제와 외부 연료 인젝터 각각의 오리피스 내경은 2 mm와 6 mm로 고정하였다. 리세스가 없는 경우부터 8 mm 리세스 길이까지 총 8가지로 제작하였다. 실험조건은 0.6 MPa에서 산화제와 연료의 유량이 25.6 g/s와 10.76 g/s로 분사되도록 하여 O/F 비가 2.38을 만족하도록 설계하였다.



(a) Swirl Coaxial Injector Design

(b) Inner Injector Having Various Length

Fig. 1 Schematics of Swirl Coaxial Injectors

리세스에 따른 분무형상과 분열길이 등의 분무특성을 관찰하기 위해서 stroboscope를 이용한 후광 직접사진 촬영을 하였는데, 연료와 산화제의 유사추진제로 모두 물을 사용하였다. 그리고 미립화 특성을 알아보기 위해서 PDPA를 이용하여 리세스 길이에 따른 액적크기를 측정하였다.

평균액적크기(SMD)의 계측 위치는 원추형 액막이 완전히 분열되어 화염이 형성되는 영역으로 판단되는 인젝터 출구 하방 50 mm로 하였다.

3. 결 과

3.1 무차원화된 리세스수의 정의

보통 형상변수로서 리세스는 전단 동축형 인젝터의 경우에는 리세스 길이와 외부 인젝터의 오리피스 내경의 비로 무차원화하여 주로 사용된다. 그런데 액상의 연료와 산화제를 사용하는 스월 동축형 인젝터의 경우에는 분무특성 중의 하나인 내부 인젝터의 분무각에 의해 연료와 산화제의 충돌(또는 내부혼합)의 위치가 결정되므로, 전단 동축형 인젝터와 달리 내부 인젝터의 출구면에서 연료와 산화제의 충돌거리와 리세스 길이의 비로 새로이 정의하였다. 앞서 설명한 충돌거리는 Fig. 2와 같이 외부 인젝터의 오리피스 내경과 내부 인젝터의 분무각에 의해 결정되므로 액상의 추진제를 사용하는 스월 동축형 인젝터의 리세스 수는 결국 Eq. 1과 같이 리세스 길이(L_r)를 내부 산화제 분무가 외부 인젝터 벽면에 닿는 거리(L_c)로 나눈 형태로 주어진다.

$$RN = \frac{L_r}{L_c},\quad L_c = \frac{r_0 - r_i}{\tan\theta_i} \tag{1}$$

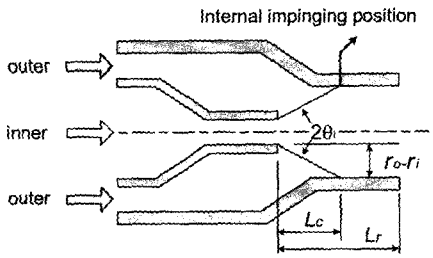


Fig. 2 Definition of recess number

이때 내부 인젝터의 분무각은 설계시 사용했던 수력학적 이론에 의해서 구할 수 있으나, 이론에 의한 분무각은 마찰과 점성의 영향이 고려되지 않으므로, 본 연구에서는 산화제의 단일분무로부터 계측한 분무각(77.32°)을 사용하였다.

3.2 분무형상

앞서 Part I의 논문에서 스월 동축형 인젝터의 분사조건이 분무특성에 미치는 영향에 대해 살펴보았고, 스월 동축형 인젝터의 분무특성은 내부 혼합분무(internal mixing injection)인지 외부 혼합분무(external mixing injection)인지에 따라서 그 특성이 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 내부 인젝터의 리세스 길이 또한 두 추진제의 충돌위치를 변화시키게 되므로 분무특성을 바꿀 수 있는 변수로 고려되어야 한다. Fig. 3은 고정된 분사조건에서 리세스 길이를 변화시키면서 획득한 액체-액체 스월 동축형 인젝터의 분무형상이다. 실험을 통하여 측정한 산화제의 단일 분무각은 77.32°로 Eq. 1을 이용하여 계산한 리세스 수는 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. Eq. 1에 따르면, 내부 산화제 분무는 Lr과 Lc가 같은 지점, 즉 리세스 수가 1인 지점에서 정확히 외부 인젝터 끝단에서 만나게 된다. 하지만, 내부 산화제 분무는 어느 정도의 두께를 가지고 분무되므로, 두 추진제는 리세스 수가 1보다 약간 큰 조건에서 외부 인젝터 끝단 바로 안쪽에서 만나게 된다. Fig. 3으로부터 이 조건은 리세스 수 1.2임을 알 수 있었다

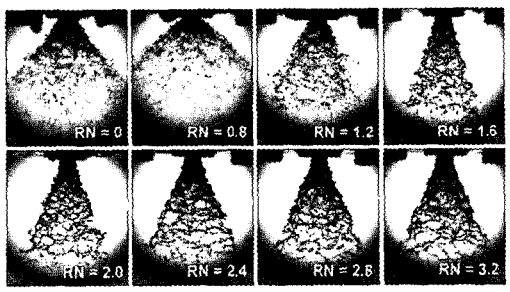


Fig. 3 Spray patterns with recess number

Figure 3에서 RN = 0일때의 분무형상은 두 추진제가 인젝터 외부에서 만나게 되는 외부 혼합분무이다. 외부 연료분무 또한 어느 정도 두께를 가지면서 분무되므로, RN = 0.8인 조건에서

두 추진제는 외부 인젝터 끝단 바로 바깥쪽에서 만나고 있다. 엄밀히 말해서 RN = 0.8은 외부 혼합분무이지만, 내부 산화제 분무가 외부 연료 분무를 스치듯이 지나가므로, 어느 정도 혼합거리를 두고 만나는 일반적인 외부 혼합분무와는 분무형상이 조금 차이를 보인다. 전체적으로, 외부 혼합분무는 인젝터 외부에서 얇은 두 액막이 만나서 분열이 이루어지므로, 미립화가 잘 일어나며, 둘 중에서 RN = 0.8인 조건에서 분무폭이 더 넓고, 분열길이가 짧은 것을 볼 수 있다. 한편, 리세스 수가 1.2보다 큰 내부 혼합분무가 되면, 분무폭은 급격히 줄어들고, 분열길이는 길어진다. 내부 혼합분무 영역의 분무특성에 대해서는 다음절에서 상세히 다루기로 한다.

3.3 내부 충돌 현상

Figure 3에서 완전한 내부 혼합분무 영역에 있는 조건은 리세스 수 1.6에서 3.2까지이다. 리세스 수가 작을 때에는 분무 표면의 교란 크기가 커서 분열길이가 매우 짧다. 리세스 수가 증가할수록 동축 분무는 보다 안정해져서 분열 이전에 액막으로 존재하는 길이가 길어진다. 이것은 리세스 영역에서 두 추진제의 충돌에 의한 ripple의 형성과 감쇠로 설명할 수 있다.

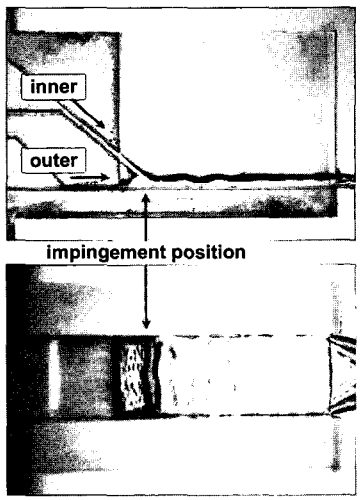


Fig. 4 Visualization of Internal Impinging Phenomenon

내부 산화제분무가 외부 인젝터 벽면을 따라 흐르는 외부 연료분무에 충돌하게 되면, 충돌위치에 ripple이 생겨나게 된다. 또한 이 ripple의 진폭은 혼합분무가 인젝터 끝단으로 진행할수록 줄어든다. 이러한 두 추진제의 충돌에 의한 ripple의 형성과 감쇠를 Fig. 4와 같이 단순화된 모델 인젝터로 가시화하였다. 단순화를 위하여 원주방향 속도 성분은 고려하지 않았으며, 두 추진제가 축방향 속도만을 가지고 충돌하도록 하였다. 외부 연료분무는 0.8 mm, 내부 산화제분무는 1 mm의 두께를 가지고, 외부 연료분무에 대해서 약 40°로 충돌하도록 설계되었다. 투명하게 제작된 인젝터 벽면으로 고속 카메라 (FASTCAM, Photron)를 이용하여 가시화하였다. 충돌 이후의 벽면효과와 난류성분이 큰 이유로 선명한 이미지를 얻지는 못하였으나, 두 추진제의 충돌에 의한 ripple 형상을 관찰할 수 있었다. 또한, 충돌 후 혼합분무가 흘러감에 따라 ripple의 진폭이 감소하고 있음을 확인하였다.

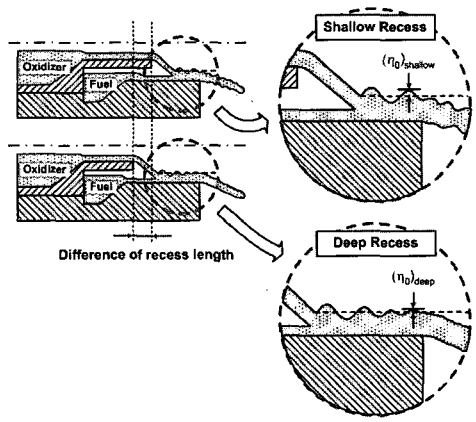


Fig. 5 The Influence of Recess Length on the Internal Liquid Sheets

Figure 4에서 확인한 리세스 길이에 따른 두 추진제의 내부 충돌현상을 재구성하여 Fig. 5에 나타내었다. 두 추진제의 분사조건은 고정되어 있기 때문에 두 추진제의 충돌에 의한 ripple의 초기 진폭은 리세스 길이에 관계없이 일정하다. 하지만, 혼합분무가 진행함에 따라 이 진폭이 감

쇠되기 때문에 깊은 리세스 조건에서 인젝터 끝단에서의 교란 진폭은 얕은 리세스 조건보다 더 작게 된다. 즉, 리세스 수가 증가할수록 더 안정한 분무를 형성하며, 이것은 Fig. 3의 분무형상과도 일치한다. 따라서 리세스 길이 증가에 따른 ripple 진폭의 감소는 내부 혼합분무 영역에서의 분무특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3.4 분무각 및 분열길이

리세스 수에 따른 분무각의 변화를 Fig. 6에 나타내었는데, Fig. 3을 통해서 관찰한 바와 같이 외부 혼합분무인지 내부 혼합분무인지에 따라서 그 경향성이 확연히 달라짐을 알 수 있다. 동축 혼합 분무각이 가장 큰 조건은 RN = 0.8로 측정이 되었는데, 이 조건은 앞서 설명한 바와 같이 내부 산화제 분무가 외부 인젝터 끝단 바로 바깥에서 외부 연료분무를 스치듯이 만나고 있으므로, 전체적인 분무특성은 외부 연료분무 쪽에 가깝게 나타났다. 또한 RN = 1.2일 때에는 두 추진제의 충돌이 외부 인젝터 끝단에 걸쳐서 이루어지므로, 완전한 내부 혼합분무보다 조금 큰 분무각을 보인다.

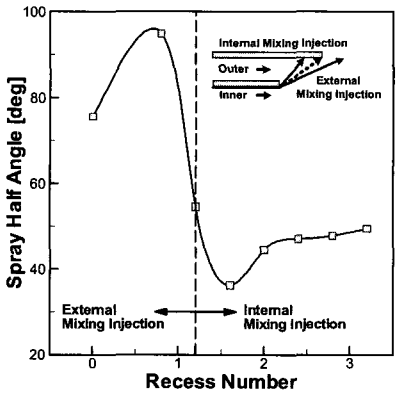


Fig. 6 Spray Angles with Recess Number

완전한 내부 혼합분무 영역에서는 리세스 수가 증가함에 따라서 분무각이 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 앞절에서 설명한대로 두 추진제의 내부 충돌에 의한 것으로 설명할 수 있다. 리세스 길이가 길어질수록 인젝터 끝단에서의 ripple 진폭은 감소하여, 이 감소된 진폭은 다시 스월 모멘텀으로 바뀌게 되므로 분무각이 서서히 증가하는 것이다.

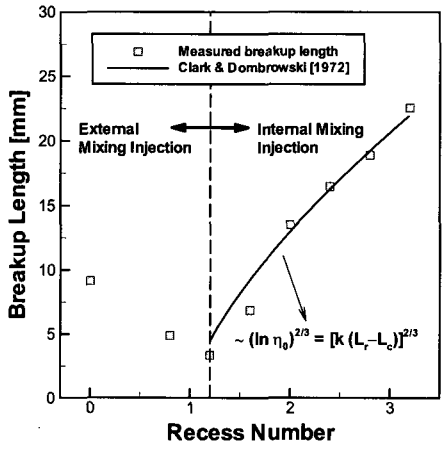


Fig. 7 Breakup Length with Recess Number

Figure 7은 리세스 수에 따른 분열길이의 변화를 나타내고 있다. 본 연구에서 분열길이는 액막의 끝단 부분, 즉 액주나 액적이 생겨나기 시작한 부분으로 정의된다. Fig. 6의 분무각 결과와 마찬가지로 리세스 수에 따른 분열길이의 경향성은 내부 혼합분무인지 외부 혼합분무인지에 따라서 달라짐을 알 수 있다. 리세스 수가 증가할수록 외부 혼합분무 영역에서의 분열길이는 감소하고 있지만, 내부 혼합분무 영역에서의 분열길이는 증가하고 있다. 즉, 두 추진제가 만나는 지점이 외부 인젝터 끝단에 가까울수록 분열길이는 짧아져서 RN = 1.2인 조건에서 최소 분열길이를 나타내고 있다.

일반적으로 단일 스월 분무에서는 air core 내부에서부터 주위기체와의 공기역학적 힘에 의해서 불안정한 교란이 발생하고, 이러한 교란 중 진폭이 가장 빨리 성장하는 주파수에서 분열이 일어난다고 알려져 있다. 따라서, 액막의 분열은 인젝터 끝단에서의 wave 초기 진폭, η_0에 영향을 받으며, Clark과 Dombrowski[7]는 불안정 이론에 근거하여 Eq. 2와 같이 액막의 분열길이에

관한 식을 유도하였다. 이 식에서 ρ_l과 ρ_a는 각각 액체와 주위기체의 밀도를 나타내며, K는 액막 두께 변화에 대한 상수, k는 최대성장률이 가장 큰 wavenumber이다. 본 연구에서는 두 추진제의 내부 충돌에 의해서 ripple이 형성됨을 확인하였고, 두 추진제의 충돌에 의해서 발생하는 ripple의 진폭이 air core 내부에서 주위기체와의 공기역학적 힘에 의해서 발생하는 교란의 진폭보다 훨씬 크다. 따라서 두 추진제의 충돌에 의한 ripple의 진폭이 동축분무의 분열과정을 지배한다고 생각할 수 있고, 리세스 길이에 따른 η_0의 변화를 예측하여 Eq. 2에 적용함으로써, 분열길이를 비교하였다.

$$X_b = \sqrt{\frac{9\rho_l K u^2}{32\left(\rho_a u^2 k - \sigma k^2\right)}}\, cosh^{-1}\left[8\left(\eta_0 k\right)^{-2}+1\right] \quad (2)$$

Figure 4에서 확인한 바와 같이, 충돌 이후에 인젝터 벽면을 따라 흘러가면서 wave의 진폭은 감소하며, 이 길이방향의 감쇠는 Eq. 3과 같이 표현할 수 있다. 여기서, η_0는 인젝터 끝단에서의 wave 진폭, η_{ini}는 충돌위치에서의 초기 wave 진폭, (L_r-L_c)는 이동거리이다. η_0는 이동거리가 증가함에 따라 감소하므로, k_c는 음수값을 가진다. 또한 본 실험에서 두 추진제의 분사조건은 고정되어 있으므로, η_{ini}는 일정하며, Eq. 2의 다른 물성치들도 상수로 취급된다.

$$\eta_0 = \eta_{ini}\exp\left[k_c\left(L_r - L_c\right)\right] \quad (3)$$

Figure 7에 내부 혼합분무의 리세스 수에 따른 분열길이를 Clark과 Dombrowski[7]에 의해서 제안된 식과 비교하여 나타내었는데, 본 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 결과적으로 두 추진제의 충돌에 의한 ripple의 형성과 리세스 길이에 따른 진폭 감쇠의 차이는 분무각과 분열길이와 같은 분무특성에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

3.5 미립화특성

분무에 관한 기존의 연구는 대부분 평균액적크기와 액적크기의 분포에 관한 것이었으며, 이것은 엔진의 성능과 안정성, 그리고 연소효율에 크게 영향을 미치기 때문이다. Fig. 8에는 PDPA를 이용하여 측정한 리세스 수에 따른 평균액적크기의 반경방향 분포를 나타낸 그림이다. SMD 분포 결과는 리세스 수 4가지에 대해서 나타내었다. 리세스가 없는 리세스 수 0인 조건에서는 분무형상 결과에서 살펴본 대로 분무의 폭이 넓으며 상대적으로 SMD가 작은 결과를 나타냈다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 두 추진제가 충분히 얇아져서 분열이 시작되는 위치에서 혼합되므로 두 추진제의 병합이 미립화특성에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다. 외부 인젝터 끝단에서 두 추진제가 만나게 되는 리세스 수 1.2 조건에서는 분무의 폭이 상당히 줄어들었지만, 두 추진제의 충돌이 미립화에 큰 영향을 미치고 있으므로 측정된 SMD는 그리 크지 않다.

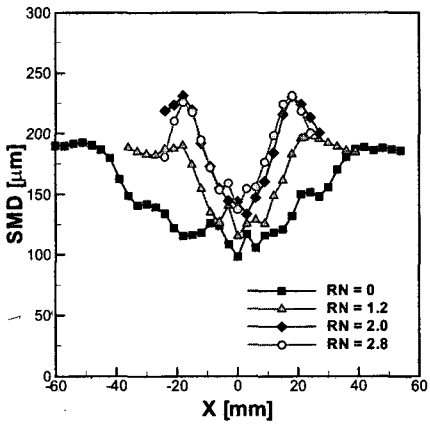


Fig. 8 Radial SMD with Recess Number

하지만, 리세스 수가 더욱 증가하여 완전한 내부 혼합분무 영역으로 바뀌게 되면 분무의 폭은 현저히 줄어들며, 인젝터 중심부와 분무의 외곽부분의 SMD가 모두 증가하게 된다. 이러한 경향성은 리세스에 따라 미립화효율이 향상되는 기체-액체 추진제를 사용하는 동축형 인젝터의 결과[2, 3]와 상반되는 것으로, 내부 혼합분무 영역에서 SMD가 증가하는 이유를 다음의 2가지로

생각해 볼 수 있다. 첫째, 분무각이 감소하여 분무폭이 줄어들기 때문에 원추형 액막 두께가 얇아지는 정도가 느리게 되며, 분열 후 액적간의 합착 등의 영향이 크기 때문이다. 둘째로 분열 이전의 두 추진제의 내부 혼합에 의해서 최종적으로 분사되는 액막의 두께가 증가하기 때문에 분열된 액적의 크기는 증가하게 된다. 이러한 경향성은 Sivakumar와 Raghunandan[5]의 결과에서도 확인된 바 있으며, 오히려 내부 인젝터가 외부 인젝터 출구면보다 길게 나와있는 positive 리세스 영역에서 미립화특성이 더 우수한 결과를 나타냈다.

리세스 수에 따른 SMD의 경향성을 한눈에 알아보기 위하여 각 리세스 수에서의 대표 SMD를 구하였다. 전체 측정 평면에 대한 대표 SMD를 구하기 위해서 Eq. 4와 같이 측정면적과 data rate의 가중치를 이용하였다. Data rate은 단위시간동안 몇 개의 액적이 감지되었는지를 나타내는 수치로, PDPA 측정으로부터 얻을 수 있다. 따라서 Eq. 4는 단위시간 동안 한 평면상의 모든 액적크기에 대한 평균을 나타낸다고 할 수 있다.

$$\overline{SMD} = \frac{\sum_i (Data\ rate)_i A_i (D_{32})_i}{\sum_i (Data\ rate)_i A_i} \quad (4)$$

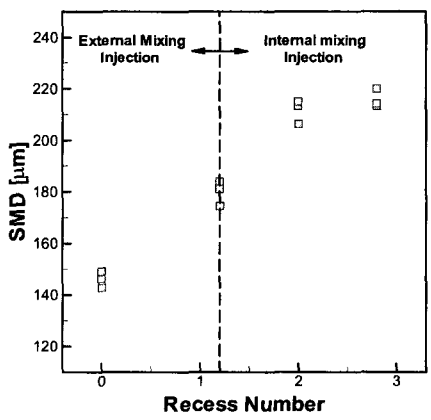


Fig. 9 SMD with Recess Number

Figure 9의 결과를 살펴보면, 앞서 확인한 바와 같이 리세스 수에 따라 평균액적크기는 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

3.6 혼합특성

액체로켓엔진 인젝터의 성능을 예측하기 위해서 비연소 환경에서 혼합특성 실험이 수행되었다. 연소효율은 액상 혼합의 균일도 뿐만 아니라 추진제의 공간적인 분포 및 혼합비에 의해서 큰 영향을 받는다. Fig. 10은 mechanical patternator를 이용하여 리세스 수에 따라 측정한 혼합효율을 나타낸 그림이다. 실제 케로신을 연료로 사용하였으며, 산화제로 물을 사용하였다. 혼합효율을 구하기 위해서 Rupe[8]가 제시한 Eq. 5가 보통 사용된다. 여기서, M_t는 채집된 총 질량, m_l은 각 셀마다 채집된 질량을 말한다. 또한, R은 전체 혼합비, r은 각 셀마다의 혼합비이고, r≥R일 때, $\bar{r}$이 사용된다. 각 셀마다 채집된 질량과 부피를 측정함으로써, 각 셀의 혼합비와 전체 혼합비에 대한 정보를 얻을 수 있었고, Eq. 5에 대입하여 혼합효율을 구할 수 있었다.

$$E_m = 1 - \left[\frac{\sum_0^n m_l (R-r)}{M_t R} + \frac{\sum_0^{\bar{n}} m_l (R-\bar{r})}{M_t (R-1)} \right] \quad (5)$$

where $R = \frac{M_{t,ox}}{M_{t,f} + M_{t,ox}}$, $r = \frac{m_{l,ox}}{m_{l,f} + m_{l,ox}}$

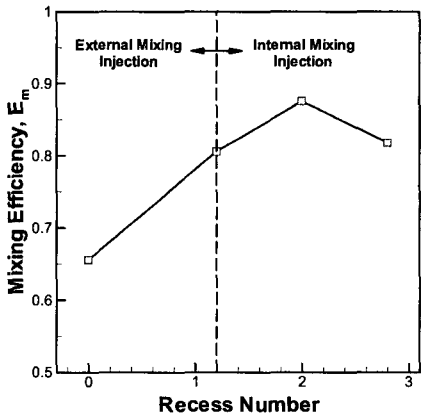


Fig. 10 Mixing Efficiency with Recess Number

Figure 10에 따르면, 예상한대로 내부 혼합분무 영역의 혼합효율이 외부 혼합분무 영역보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 외부 혼합분무 영역에서도 두 추진제의 병합이 일어나지만, 두 추진제 액막의 분열 이전에 인젝터 내에서 만나게 되면 두 추진제의 속도차에 의해서 혼합이 활발해진다. 리세스 수 2.0 부근에서 최대혼합효율을 보이고 있고, 리세스 수가 더 증가하게 되면 혼합효율은 오히려 감소하는 결과를 나타내고 있다. 이에 대한 이유는 Fig. 11을 통하여 설명할 수 있는데, 산화제 분무 형상은 분무각이 약간 증가했을 뿐 큰 차이점을 보이지 않지만, 연료분무는 리세스 수 2.8 조건에서 중심부근에 상대적으로 많이 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 연료로 사용한 케로신의 밀도는 798 kg/m^{3}으로 물의 밀도 998.4 kg/m^{3}보다 약간 작다. 밀도가 큰 물의 관성력이 케로신보다 더 크기 때문에 반경방향으로 더 확장하게 되고, 연료의 상당량이 중심부에 분포하게 되는 것이다. 여러 번의 반복실험에서도 동일한 결과를 얻을 수 있었고, 리세스 길이가 어느 지점 이상으로 과도하게 증가하게 되면 두 추진제의 밀도차에 의해서 추진제 분리현상이 발생함을 확인할 수 있었다.

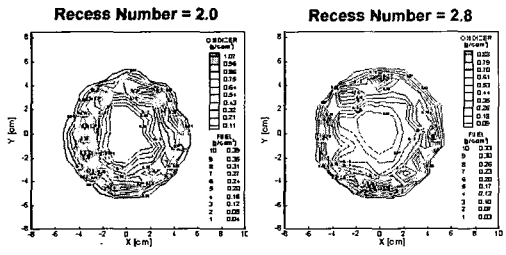


Fig. 11 Spatial Distributions with Recess Number

본 실험은 인젝터면으로부터 50 mm 떨어진 위치에서 측정한 결과이며, 추진제 분리현상에 대한 구체적인 현상을 관찰하기 위해서 축방향 위치를 50 mm 보다 가까운 몇 지점에서의 추가적인 실험이 필요하다. 하지만 본 실험에서 사용한 mechanical patternator의 해상도 한계로 인하여 만족할만한 결과를 얻지 못하였고, 두 추진제의 혼합을 보다 상세하게 진단할 수 있는 새로운 기법이 요구된다. 본 연구를 통해서 최대의 효율을 기대할 수 있는 최적의 리세스 길이가 존재함을 알 수 있었고, 무차원화된 리세스 수 2.0 부근에서 최대의 혼합효율을 나타내고 있다.

4. 결 론

케로신/액체산소를 추진제로 하는 스월 동축형 인젝터의 분무특성을 파악하기 위하여, 케로신과 물을 유사추진제로 사용하는 인젝터 시제를 제작하였고 리세스 영향에 대한 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 리세스 길이에 따른 두 추진제의 혼합 위치에 따라 external mixing injection과 internal mixing injection으로 구분할 수 있는데, 이 두 영역에 따라 분무특성은 크게 달라지고 있음을 확인할 수 있었다.
2. Internal mixing injection 영역에서는 리세스 수가 커짐에 따라 분무각과 분열길이가 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 인젝터 내부에서 두 추진제의 충돌에 의한 wave의 영향으로 설명할 수 있다.
3. 액체-액체 스월 동축형 인젝터의 경우, 리세스 수의 증가에 따라 미립화특성은 감소하게 되는데, 이는 감소된 분무각과 내부혼합에 의한 분무 액막 두께의 증가 때문이다.
4. 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. Lefebvre, A.W., Atomization and Sprays, Hemisphere Publishing Corporation, 1989

2. D. Kendrick, G. Herding, P. Scouflaire, C. Rolon and S. Candel, "Effects of a Recess on Cryogenic Flame Stabilization", Combustion & Flames, 118, 1999
3. W. Mayer, A. Schik, D. Talley and R. Woodward, "Atomization and Breakup of Cryogenic Propellants under High-Pressure Subcritical and Supercritical Conditions", J. Propulsion and Power, 14(5), 1998
4. M. Glogowski and M. Micci, "Shear Coaxial Injector Spray Characterization Near the LOX Post Tip Region", AIAA 95-2552, 1995
5. D. Sivakumar and B.N. Raghunandan, "Role of Geometric Parameters on the Drop Size Characteristcs of Liquid-Liquid Coaxial Swirl Atomizers", Atomization and Sprays, 8, 1998
6. 박희호, 정충연, 김유, "이중 스월 인젝터의 분무특성에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제9권 제1호, 2005, pp.17-26
7. C.J. Clark and N. Dombrowski, "Aerodynamic Instability and Disintegration of Inviscid Liquid Sheets," Proc. Roy. Soc. A, 1972
8. J. Rupe, "The Liquid-Phase Mixing of a Pair of Impinging Stream", Jet Propulsion Lab., Progress Report 20-195, 1953