

스윙 동축형 인젝터에서 리세스 길이에 따른 내부 혼합 유동의 특성 연구

김성혁* · 윤정수* · 윤영빈**

Study on the Internal Mixing Flow Characteristics for Recess Length in a Swirl Coaxial Injector

Sunghyuk Kim* · Jungsoo Yoon* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

This study aim to investigate the internal mixing flow characteristics by recess length of swirl coaxial injector for gas generator has propellant of Kerosene-LOx. Recess length is a very important element, have influence in spray stability and LOx post damage. The influence of recess length was analyzed by visualizing internal flow and measuring liquid film thickness and manifold pressures. Also, frequency characteristics were analyzed by liquid film thickness measurement with mixing time.

초 록

본 연구는 Kerosene-LOx를 추진제로 하는 가스발생기용 스윙 동축형 인젝터의 리세스 길이에 따른 내부 혼합 유동의 특성 파악을 목표로 하였다. 리세스 길이는 분무 안정성, 내부 LOx post 손상 등에 영향을 미치는 중요한 요소로 액막두께, 매니폴드 압력 측정 및 내부 유동 가시화를 통해 리세스의 영향을 분석하였고, 추진제 혼합 전후의 액막두께 변화를 측정함으로써 주파수 특성을 분석하였다.

Key Words: Swirl Coaxial Injector(스윙 동축형 인젝터), Gas Generator(가스발생기), Recess Number(리세스 수), Liquid Film Thickness(액막두께), Internal Flow(내부 유동)

1. 서 론

액체로켓엔진에서 open cycle에 사용되는 가스발생기는 기본적인 인젝터 설계 방식과 크게

다르지 않지만, 터보펌프를 구동하는 데 있어 터빈에 공급되는 연소 가스 온도의 제한으로 인해 연료와 산화제의 혼합비가 조절되어야 한다. 일반적으로 연소 가스 온도는 터빈의 재질에 의해 1000K 이내로 제한 받기 때문에 연료 과농(fuel-rich)이나 산화제 과농(oxidizer-rich) 조건에서 연소가 이루어져야 한다. 가스발생기에서 인젝터의 중요성은 주 엔진에서와 마찬가지로 연

* 서울대학교 기계항공공학부

** 서울대학교 항공우주신기술연구소

연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

소 안정성 등에 직접적으로 영향을 준다.

동축형 인젝터에서 일반적인 화염부착기구로 사용되고 있는 리세스는 내부 인젝터가 외부 인젝터 면으로부터 안쪽으로 들어간 형상을 말한다. Clark과 Dombrowski[1]는 공기역학적 불안정 이론에 근거하여 액막의 분열길이에 관한 식을 유도하였으며, 김동준 등[2]은 두 추진제의 내부 충돌에 의한 ripple의 형성을 확인하고, 리세스 길이에 따른 ripple의 진폭이 동축 분무의 분열과정을 지배한다고 하였다. Glogowski와 Micci[3]는 화염부착기구로 작용하는 리세스 영역 내의 재순환 유동의 존재를 실험적으로 확인하였다. Sivakumar와 Raghunandan[4]은 액체-액체 스윙 동축형 인젝터에서 리세스 길이에 따른 미립화 특성을 연구하였으며, 리세스 길이가 증가함에 따라 미립화 특성이 나빠지는 결과를 언급하였다. 박희호 등[5]은 이중 스윙 인젝터에서 분사압력 및 리세스가 분무각, 출구속도 성분, 액막두께에 미치는 영향에 대해 수치 해석적 연구를 수행하였다.

실제 가스발생기에 대한 연구결과로는 송주영 등[6]이 연소시험 중 내부 LOx post 손상에 대한 원인을 연소불안정, 종단시 purge, LOx 분사기 유량, 큰 분무각 등으로 분석하였으며, 안규복 등[7]은 분사기 당 유량에 따른 실물형 가스발생기의 연소특성을 비교하였으며, 분사기 수가 증가함에 따라 LOx post 손상이 증가한다고 하였다.

본 연구에서는 가스발생기용 스윙 동축형 인젝터에서 리세스 길이에 따른 내부 유동의 특성을 주로 살펴보았으며, 지금까지의 연구 결과들과 달리 노즐 끝단 부근에서의 정확한 액막두께 측정과 가시화 등을 통해 두 추진제의 내부 충돌 전후의 유동 변화 등을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 인젝터 설계 및 장치구성

본 연구에서는 Kerosene과 LOx를 추진제로 사용하는 스윙 동축형 인젝터를 설계 제작하였으나, 인젝터 재질이나 실험조건 등으로 인해 유

사 추진제로 물을 사용하였다. 실험에 사용된 스윙 동축형 인젝터는 일반적인 수력학적 절차에 의해 설계되었으며, 내부는 산화제용 인젝터가 외부는 연료용 인젝터가 위치하고 있다. Fig. 1(a)에서와 같이 내부 산화제 인젝터는 리세스 길이에 따른 내부 유동을 분석하기 위해 교체 가능하도록 제작하였다. 외부 연료 인젝터는 가시화를 시도하기 위해 다른 part가 겹치지 않도록 아크릴 재질로 투명하게 제작되었다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 주로 사용된 액막두께 측정 방식을 나타낸다. 액막두께 측정은 Kim 등[8]의 전기전도도를 이용한 방식을 사용하였으며, 보다 정밀한 측정을 위해 전극 간격을 1.1 mm로 절반 이상을 축소하였으며, 기존의 오링을 이용해 기밀하는 방식이 아닌 전극 면 전체의 기밀을 위해 테프론 재질의 가스켓을 사용하였다. 전극은 오리피스 끝단에서 1 mm 상부에 위치하고 있어 액막두께 변화를 정확하게 측정할 수 있다. 실험장치 구성은 Fig. 2와 같으며, 산화제와 연료의 각 매니폴드에 유체 공급라인 외에 압력을 측정할 수 있도록 2 mm의 hole을 추가하였다. 실제 측정에서는 산화제와 연료의 매니폴드 압력변화, 액막두께 등이 동시에 이루어진다.

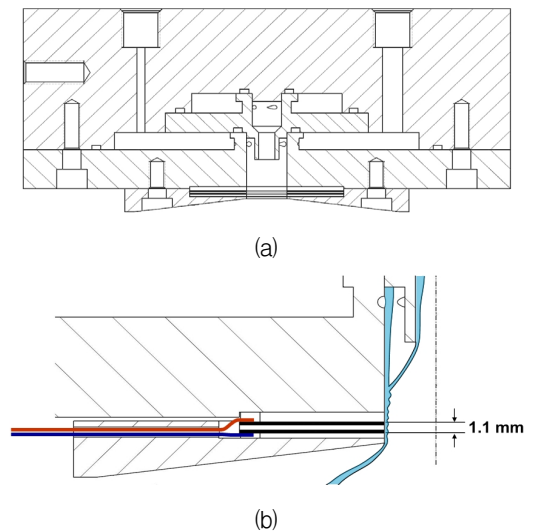


Fig. 1 Schematic of swirl coaxial injector :
 (a) overall cross section
 (b) detail view of electrode section

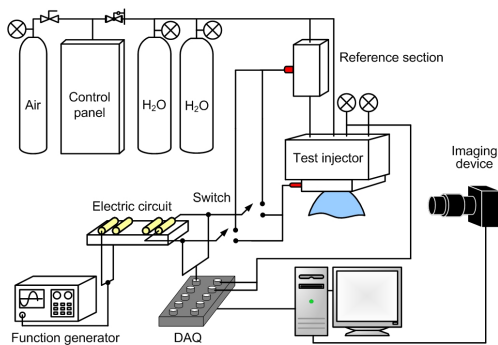


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1. Design specification of swirl coaxial injector

항 목	Oxidizer	Fuel	unit
유 량	56.32	175.26	g/s
O/F ratio	0.321		-
ΔP	7.6	8.5	bar
d_{nozzle} (오리피스 직경)	4	10	mm
μ (discharge coeff.)	0.123	0.081	-
n_p (홀의 개수)	4	6	-
d_p (홀의 직경)	1	1.2	mm

세부 인젝터 설계 조건은 Table 1에 나타나 있다. O/F ratio가 0.321로 연료 과농형이며, 산화제와 연료의 유량이 각각 56.32, 175.26 g/s이다. 설계 유량은 항공우주연구원에서 개발한 30톤급 액체로켓엔진에 사용되고 있는 가스발생기에 사용되는 개당 분사기 유량과 유사하게 하였다.

2.2 실험방법

리세스 수는 오리피스 끝단으로부터의 리세스 길이를 내부 산화제 분무가 외부 인젝터 벽면에 닿는 거리로 나눈 형태로 결정된다. 내부 산화제 인젝터의 분무각은 일반적으로 설계시 사용되는 수력학적 이론에 의하여 계산할 수 있으나, 이론에 의한 분무각은 마찰과 점성의 영향이 고려되어 있지 않기 때문에 리세스 길이가 0 mm인 산화제 단일 분무로부터 계측된 분무각(88.4°)을 사용한다. 각 경우에 대해 액막두께 측정, 산화제

연료 동축 분무를 측정하는 방식으로 이루어진다. 산화제와 연료의 단일 분무를 측정하는 이유는 리세스 길이가 산화제 분무뿐만 아니라 연료의 단일 분무에도 미치는 영향을 조사하기 위함이다.

3. 실험결과

3.1 리세스 길이에 따른 분무각 변화 측정

Figure 3은 리세스 수에 따른 분무 패턴을 나타낸다. 리세스 수가 증가함에 따라 분무각이 감소하는 경향이 있지만, 분무각 변화의 폭이 대체로 작게 나타났다. 이는 실험에 사용된 인젝터가 연료 과농형으로 외부(연료) 인젝터의 유량이 내부(산화제) 인젝터의 유량보다 3배 이상 많기 때문에 리세스 길이에 따른 분무각 변화가 작게 나타나고 있는 것으로 보인다. 내부 인젝터의 리세스 길이는 두 추진제의 충돌(혼합)위치를 변화시키게 되므로 분무특성에 영향을 미치는 변수로 고려되어야 한다. 그러나 본 연구에서와 같이 유량이 많은 경우에는 분무 이미지만으로는 외부혼합에서 내부혼합으로 변경되는 지점을 명확히 구분하기가 거의 불가능하다. 이와 같은 경우에 리세스 수에 따른 정확한 액막두께 변화를 측정할 수 있다면, 천이 지점을 파악하는 것도 가능해진다.

3.2 리세스 수에 따른 내부 유동의 변화 측정

산화제, 연료 단일 분무를 통해 리세스 길이가

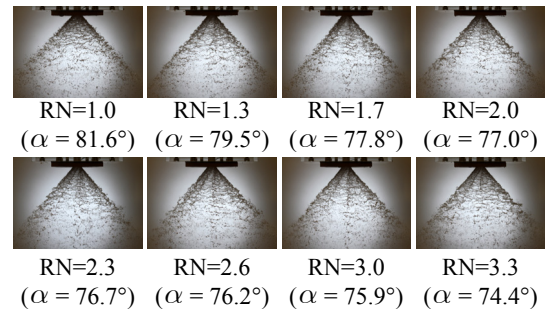


Fig. 3 Spray patterns with recess number

단일 분무에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 연료 단일 분무에서는 리세스 길이가 증가함에 따라 액막두께가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 연료 단일 분무시 유동이 내부 산화제 인젝터 오리피스에 영향을 받는다는 것을 나타낸다. 독립적인 관점에서 인젝터 내부를 볼 때, 연료 단일 분무는 내부 유동이지만, 산화제 단일 분무는 외부 유동으로 볼 수 있다. 산화제 단일 분무 시 오리피스 끝을 떠난 유동이 연료 인젝터 벽면과 충돌할 때, 충돌지점에서 재순환 영역이 존재함도 알 수 있었다.

Figure 4는 연료 과농형 스월 인젝터에서 리세스의 존재에 따른 내부 혼합 형태를 나타내고 있다. 기본적으로 연료의 유량이 산화제의 유량보다 3배 이상 많지만, 산화제 유동에 의해 연료 유동이 영향을 받고 있으며, 연료 단일 분무에서의 액막두께보다 동축 분무일 때의 액막두께가 더 작게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 액막두께 측정 결과를 통해서도 확인해 볼 수 있다.

Figure 5는 리세스 수에 따른 추진제 간의 혼합 전후의 매니폴드 압력 변화를 나타낸다. 리세스 수에 따라 분무각 등은 일정한 변화 경향을 보이지만, 매니폴드 압력 변화에서는 특정한 경향이 나타나지 않았다. 이에 비해 Fig. 5(b)의 액막두께 변화에서는 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 리세스 수가 총 8 경우로 변하는 동안 매니폴드 압력은 측정된 값을 살펴보았을 때, 진폭 변화 등이 거의 없다. 이에 비해 액막두께는 리세스 수가 변화에 따라 혼합 후의 액막두께 증감 경향 및 진폭 변화가 뚜렷이 나타난다. 이와 같이

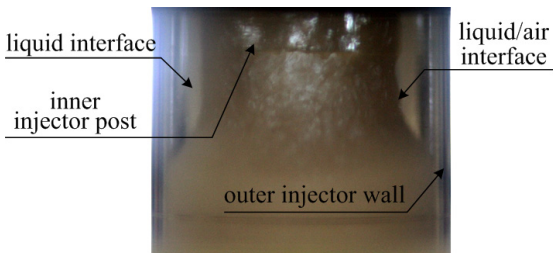


Fig. 4 Internal mixing pattern in recessed swirl coaxial injector

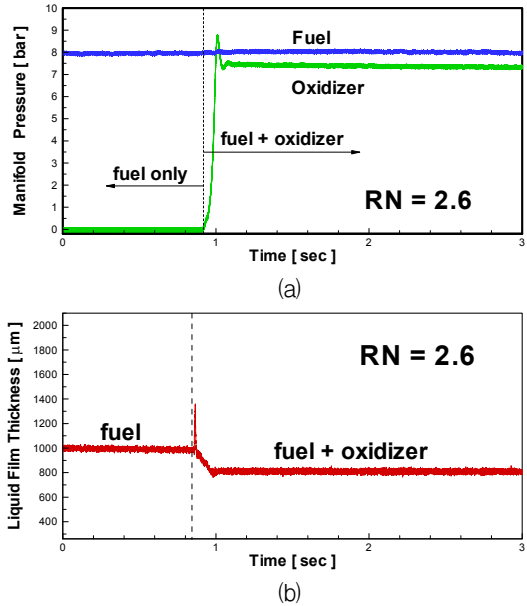
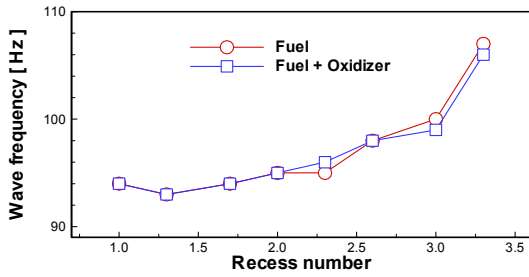


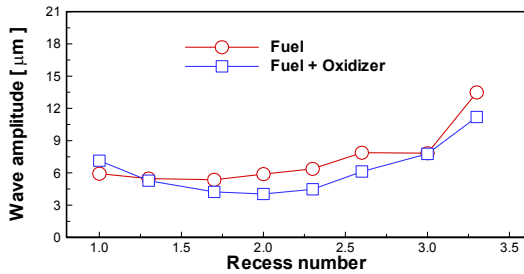
Fig. 5 Simultaneous measurement at $RN = 2.6$
 (a) pressure variations in manifold
 (b) film thickness variations in the exit orifice

액막두께 측정결과는 분무 이미지를 통해 추정해 볼 수 있는 사항을 수치적으로 명확하게 살펴볼 수 있는 장점이 있다.

Figure 6는 리세스 수에 따른 wave의 주파수 및 진폭 변화를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서는 추진제 혼합 전 연료 단일 유동과 혼합 유동 모두 리세스 수가 증가함에 따라 wave의 주파수가 증가하고 있음을 알 수 있고, 추진제 혼합 전후의 주파수 대역은 거의 일치하고 있음을 살펴볼 수 있다. 주파수 분석에서 연료 단일 유동과 혼합 유동을 비교한 것은 혼합유동에서 발생하는 저주파 대역이 내부(산화제) 유동에 영향을 받는지의 여부를 판단하기 위함이다. 실험에 사용된 스월 동축형 인젝터의 O/F ratio가 0.321로 연료의 유량이 산화제 유량보다 약 3배 정도 많기 때문에 내부 인젝터로부터의 유동이 외부 인젝터의 유동에 별다른 영향을 끼치지 않은 것으로 판단된다. Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이, 리세스 길이가 1 mm 간격으로 차이가 별로 크지 않기에, wave의 진폭 값이 리세스 수에 따라 큰



(a)



(b)

Fig. 6 Wave analysis based on mixing point ; (a) wave frequency [Hz] (b) wave amplitude [μm]

차이를 보이지 않는다. Wave의 진폭 변화를 보면, 혼합 전과 후 모두 리세스 수에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. O/F ratio에 의해 혼합 전과 후의 주파수 변화가 거의 없기 때문에, 내부(산화제) 유동이 미치는 영향은 작지만, 외부(연료) 유동의 진폭을 약간 줄이는 결과가 나타났다.

Figure 7에서는 연료 단일 분무에서는 리세스 길이가 증가함에 따라 액막두께가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 연료 단일 분무 시 유동이 LOx post tip에 영향을 받는다는 것을 나타낸다. 앞서 살펴본 분무각 변화에서는 알 수 없었던 내부/외부 혼합 유무도 판정해 볼 수 있다. 혼합 전 외부(연료) 인젝터 유동의 평균 액막두께와 혼합 유동의 평균 액막두께를 비교해보았을 때, 평균 액막두께가 거의 같은 지점을 내부/외부 혼합의 천이 영역으로 볼 수 있다. 또한, 리세스 길이에 따른 외부(연료) 인젝터 유동은 일정한 액막두께를 나타내지 않고 일정한 경향으로 변하는데, 이는 외부(연료) 인젝터 벽면과 내부(산화제) 인젝터 post tip과의 간격과 리세스

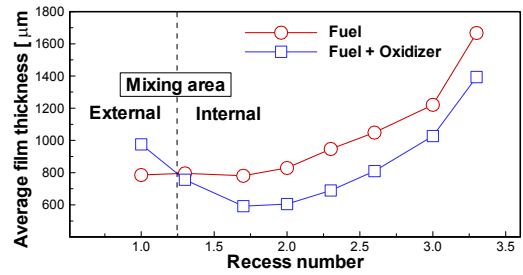


Fig. 7 Averaged liquid film thickness based on mixing point

길이에 의한 영향으로 판단된다. 이는 실제 연소 시 발생하고 있는 LOx post tip 손상과도 연관한 것으로 여겨지며, 추가적인 실험과 분석이 요구된다.

4. 결 론

액체로켓엔진의 가스발생기에서 사용되는 연료과농형 스월 동축형 인젝터에서 리세스 길이에 따른 내부 유동의 특성을 살펴보았다. 지금까지 스월 동축형 인젝터에서 내부유동의 특성에 대한 실험적 연구는 거의 이루어지지 않았었기 때문에 본 논문에서의 연구 결과는 앞으로 활용 가치가 클 것으로 기대된다. 정확한 분석을 위해 인젝터의 오리피스 끝단 부분에 위치하는 전극을 통해 액막두께를 측정하였고, 추진제 혼합 전후의 내부 유동 특성을 주파수 및 진폭 변화를 통해 살펴보았으며, 리세스의 영향에 대한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 추진제 간 충돌 이후의 유동 변화를 오리피스 내부의 가시화, 액막두께 측정을 통해 분석하였으며, 내부(산화제) 인젝터 유동의 영향으로 외부(연료) 인젝터 유동의 액막두께가 감소함을 확인할 수 있었다. 각 유동의 단순 합이 아닌 O/F ratio 및 리세스 수에 따라 추진제 혼합 후의 액막두께 변화가 나타났다.
2. 내부유동을 가시화하는 방법으로는 발견할 수

없었던, 추진제 간 충돌 이후 유동에서 나타나는 wave의 주파수나 진폭 등의 존재 여부를 정확히 측정할 수 있었으며, 리세스가 유동의 wave에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. 연료 과농형 인젝터에서는 wave의 특성이 추진제 혼합과정 이전의 외부(연료) 인젝터 유동에 지배적인 영향을 받음을 알 수 있었다.

3. 추진제 간 충돌 이후의 유량 섭동이 추진제 공급 라인에서의 압력 섭동과 함께 실 연소기에서 발생될 수 있는 특정 저주파의 원인으로도 볼 수 있다는 가능성을 발견하였으며, 여기에는 추가적인 분석과 실험 연구가 요구된다. 연료 과농형 인젝터에서는 리세스수에 따라 내부(산화제) 인젝터 유동이 외부(연료) 인젝터 유동에 거의 영향을 끼치지 않았으며, 이런 결과를 통해 O/F ratio에 따른 추가 분석 및 실험이 요구됨을 알 수 있었다.
4. 내부 오리피스에서의 액막두께 측정 방법을 통해 동축 분무뿐만 아니라 추진제 단일 분무에서도 리세스에 대한 영향을 알 수 있었고, 분무 사진이나 분열 길이를 통해 리세스의 영향을 분석하는 방법보다 더 신뢰성이 있음을 확인하였다. 또한 연료 단일 유동이 산화제 오리피스의 길이 등에 영향을 받는 등의 실험 결과를 통해, 연소시험 시 LOx post 손상 등의 문제를 일으키는 원인을 분석하고 해결방안을 모색하는데 활용될 수 있는 가능성도 살펴볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL)과 중견연구자지원사업(핵심연구)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (No. 0498-20100025, 0498-20100003).

참 고 문 헌

1. C.J. Clark and N. Dombrowski, "Aerodynamic Instability and Disintegration of Inviscid Liquid Sheets," Proc. Roy. Soc. A, 1972
2. 김동준, 김성혁, 한풍규, 윤영빈, "액체-액체 스윙 동축형 인젝터의 분무특성 Part II : 리세스 형상에 따른 영향," 한국추진공학회지 제10권 3호, 2006, pp.9-17
3. M. Glogowski and M. Micci, "Shear Coaxial Injector Spray Characterization Near the LOX Post Tip Region," AIAA 95-2552, 1995
4. D. Sivakumar and B.N. Raghunandan, "Role of Geometric Parameters on the Drop Size Characteristics of Liquid-Liquid Coaxial Swirl Atomizers," Atomization and Sprays, Volume 8, Issue 5, 1998
5. 박희호, 정충연, 김유, "이중 스윙 인젝터의 분무특성에 관한 연구," 한국추진공학회지, 제9권 1호, 2005, pp.17-26
6. 송주영, 김종규, 문일윤, 한영민, 최환석, "가스 발생기 분사기 LOx post 손상 방지를 위한 분사기 개발," 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회 논문집
7. 안규복, 서성현, 이광진, 한영민, 최환석, "분사기 설계에 따른 실물형 가스발생기 연소특성 비교," 한국추진공학회 2006년도 추계학술대회 논문집
8. Sunghyuk Kim, Taeock Khil, Donjun Kim and Youngbin Yoon, "Effect of geometric parameters on the liquid film thickness and air core formation in a swirl injector," Measurement Science and Technology, Vol. 20, No. 1, 2009, 015403