

# 가스발생기용 스월 동축형 인젝터에서 내부 유동의 특성에 대한 실험적 연구

김성혁\* · 윤정수\* · 윤영빈\*\*

## Experimental Study on the Internal Flow Characteristics in a Swirl Coaxial Injector for Gas Generator

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

### ABSTRACT

This study aim to investigate the internal 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, each spray characteristic by recess length was investigated in internal or external injector.

### 초 록

본 연구는 Kerosene-LOx를 추진제로 하는 가스발생기용 스월 동축형 인젝터의 리세스 길이에 따른 내부 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 분석하였다. 또한, 리세스 길이에 따른 내부 또는 외부 인젝터 각각의 분무특성도 살펴보았다.

Key Words: Swirl Coaxial Injector(스월 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 터

빈에 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 연소 안정성 등에 직접적으로 영향을 준다.

동축형 인젝터에서 일반적인 화염부착기구로

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 서울대학교 항공우주신기술연구소

연락처, E-mail: ybyoon@snu.ac.kr

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 유사 추진제로 물을 사용하였다. 실험에 사용된 스

윙 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 교체가 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.

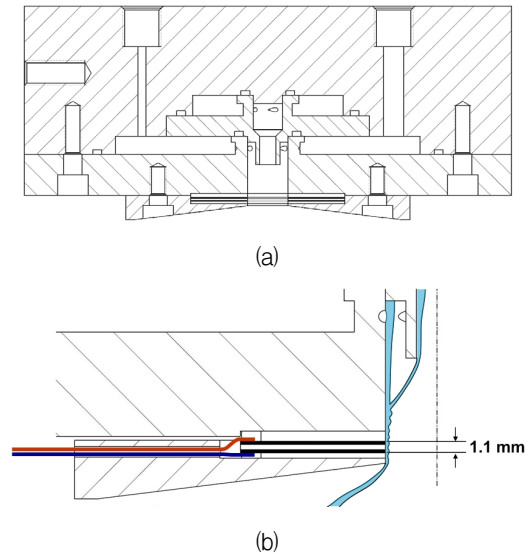


Fig. 1 Schematic of swirl coaxial injector :  
 (a) overall cross section  
 (b) detail view of electrode section

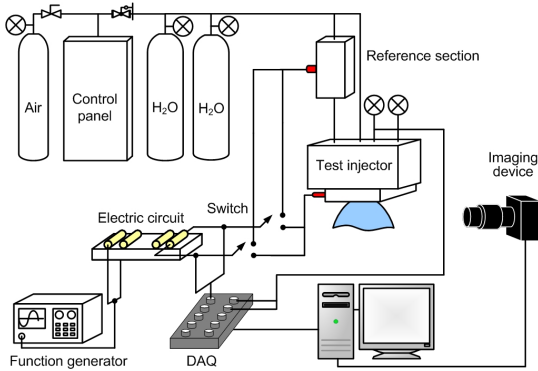


Fig. 2 Experimental apparatus

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		-
$\Delta P$	7.6	8.5	bar
$d_{\text{nozzle}}$ (오리피스 직경)	4	10	mm
$\mu$ (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

인젝터 실험조건은 Table 2와 같다. 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 산화

Table 2. Change of recess condition by assembling electrodes parts

조건 No.	측정부 부착 전		측정부 부착 후	
	recess length	RN	recess length	RN
case 1	0	0	3.1	1.0
case 2	1	0.3	4.1	1.3
case 3	2	0.7	5.1	1.7
case 4	3	1.0	6.1	2.0
case 5	4	1.3	7.1	2.3
case 6	5	1.6	8.1	2.6
case 7	6	1.9	9.1	3.0
case 8	7	2.2	10.1	3.3

제 단일 분무로부터 계측된 분무각(88.4°)을 사용한다. 본 연구에서는 액막두께 측정을 위한 전극 부착으로 인해 오리피스 길이가 3.1 mm 만큼 증가하기 때문에 리세스 수가 전극 부착 전후로 달라진다. 리세스 길이는 내부 산화제 인젝터의 오리피스 길이를 1 mm 간격으로 변화시켜 총 8경우로 구분된다. 측정부 부착 전에는 리세스 수가 0부터 2.2까지 약 0.3 간격으로 변화하여, 측정부 부착 후에는 리세스 수가 1.0부터 3.3까지 약 0.3 간격으로 변화한다.

각 경우에 대해 액막두께 측정은 산화제 단일 분무 측정, 연료 단일 분무 측정, 산화제 연료 동축 분무를 측정하는 방식으로 3번 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

인젝터 설계 시, 처음에는 산화제 연료 인젝터의 오리피스 직경은 각각 3, 8 mm이었으나, 인젝터 재질로 인한 내부 산화제 인젝터 오리피스 벽두께와 실험의 편의성을 위해 오리피스 직경을 각각 4, 10 mm로 수정하였다. 그 결과, Fig. 3에서와 같이 분무각이 대체로 크게 측정되었지

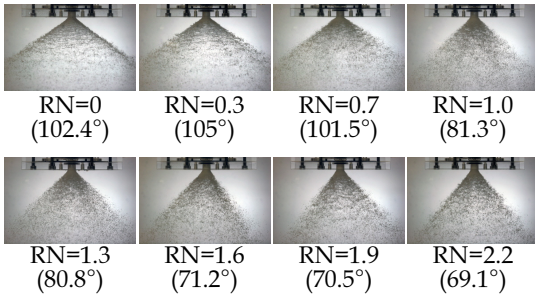


Fig. 3 Spray patterns with recess number

만, 리세스 수가 증가함에 따라 분무각이 감소하는 경향은 변함이 없었다. 분무각 측정 시에는 정확성을 위해 액막두께 측정부를 제거하였으므로, Table 2에서의 리세스 수가 적용된다. 분무각 변화 폭을 살펴보면, 리세스 수가 0.7에서 1.0으로 변할 때 약 20°만큼 감소함을 알 수 있다. 이를 통해 외부혼합에서 내부혼합으로 천이되는 지점임을 추정해 볼 수 있었다.

### 3.2 리세스 수에 따른 내부 유동의 변화 측정

산화제, 연료 단일 분무를 통해 리세스 길이가 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 리세스 수 2.0(측정부 부착 전 1.0)일 때 동축 분무에 대한 매니폴드 압력 및 액막두께 변화를 나타낸다. 측정은 연료 분사 중 시작하여 산화제를 분사하면서 이루어졌다. 분무각이 리세스 수 0.7에서 1.0으로 변할 때 가장 큰 차이를 보였음을 감안할 때, Fig. 4(b)의 액막두께 변화를 살펴보면, 산화제 분사 이후 유동이 불안정하게 나타남을 알 수 있다. 이는 액막두께

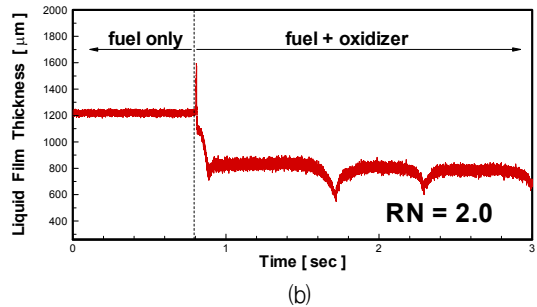
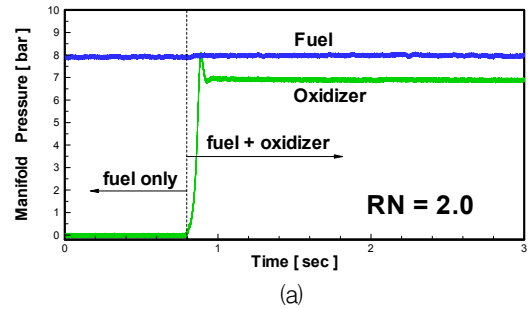


Fig. 4 Simultaneous measurement at RN = 2.0  
(a) pressure variations in manifold  
(b) film thickness variations in the exit orifice

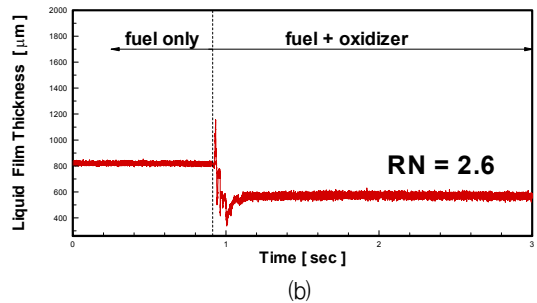
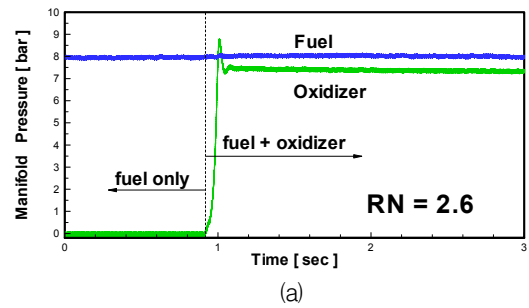


Fig. 5 Simultaneous measurement at RN = 2.6  
(a) pressure variations in manifold  
(b) film thickness variations in the exit orifice

측정 지점이 유동 변화가 심한 내부 유동간의 충돌 지점 직후라는 점을 추정해 볼 수 있다.

Figure 5는 리세스 수 2.6(측정부 부착 전 1.6) 일 때 동축 분무에 대한 매니폴드 압력 및 액막 두께 변화를 나타낸다. Fig. 4의 리세스 수 2.0일 때의 결과와 비교해 보았을 때, 산화제 분사 이후의 액막두께 변화가 안정적임을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5에서 추진제의 내부 혼합 시 액막 두께가 감소하는 경향이 공통적으로 나타났다. 이는 산화제 분사 유량이 연료 분사 유량에 비해 상대적으로 작은 점과 속도 모멘텀의 차이로 인한 것으로 추정된다. 추진제 내부 혼합 이후의 액막두께 증감에 대한 정확한 분석을 위해서는 내부 산화제 인젝터의 유량이 더 많은 주 분사기를 대상으로 한 실험과 비교해볼 필요가 있을 것으로 여겨진다.

#### 4. 결 론

가스발생기용 스월 동축형 인젝터에서 리세스 길이에 따른 내부 유동의 특성을 살펴보았다. 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 본 연구 결과가, 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. 0498-20090029, 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 스월 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 스월 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