

## 2유체 동축인젝터의 공급 운동량비가 화염부상거리에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

문일윤\*, 김 유\*\*, 박희호\*\*, 김선진\*\*\*

### The Experimental Study on the Lift-off Height due to Momentum Ratio in Swirl-Coaxial Injector

I. Y. Moon\* · Y. Kim\*\* · H. H. Park\*\* · S. J. Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

The experimental study on the lift-off height of diffusion flames was conducted to investigate the damage of swirl-coaxial injector used in  $GO_2$ /kerosene rocket engine during initial stage of ignition. To investigate the causes of damage and to prevent further damage of the injector, experimental injector was designed and hot fire tests were performed with varying propellant momentum ratio( $\frac{\text{Momentum of } GO_2}{\text{Momentum of Kerosene}}$ ) from 1 to 12. In experimental coaxial injector, kerosene is sprayed from the central nozzle with swirl and  $GO_2$  sprayed around the kerosene nozzle in the direction parallel to the axis of combustion chamber. Chamber pressure are close to the atmospheric condition. Lift-off height was measured by still images from camcorder and average values were used as data.

#### 초 록

$GO_2$ /kerosene을 추진제로 하는 로켓엔진 개발에 사용된 swirl-coaxial injector의 점화초기 및 소염시에 발생하는 파손 원인을 규명하고자 실험용 인젝터를 제작하여 추진제간의 운동량비를 1-12 범위에 서 변화시켜가며 화염 부상 거리를 실험적으로 측정하였다. 실험에 사용된 인젝터는 kerosene을 인젝터의 중심에서 접선형 선회기를 통하여 분사되도록 하였으며 그 주위로  $GO_2$ 를 연소실의 축방향에 수평하게 분사되도록 설계하였다. 연소압을 대기압으로 하여 실험하였으며, 캠코더로 촬영된 이미지로부터 화염의 순간상들을 얻어 측정한 후 이를 평균하여 화염부상거리를 구하였다. 본 연구에서는 추진제간의 운동량비 증가에 따라 화염 부상 거리가 증가함을 알 수 있었으며, 추진제간의 운동량비가 과다하게 커지는

\*한국항공우주연구소 (Korea Aerospace Research Institute)

\*\*충남대학교 기계공학과 (Chungnam National University, Dept. of Mechanical Engineering)

\*\*\*청양대학 소방안전관리과 (Chongyang Provincial College, Dept. of Fire Safety)

경우 분무에 간섭을 일으켜 인젝터 파손의 원인이 됨을 알 수 있었으며, 안정적인 연소시스템 및 인젝터 설계를 위해서는 점화초기 및 소염시 추진제의 공급운동량을 제어할 수 있는 제어시스템이 필수적임을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

일반적으로 액체연료를 추진제로 하는 액체로켓의 추진제 공급시스템으로 압축가스식과 터보펌프 공급시스템이 있다. 터보 펌프식 추진제 공급시스템은 터빈으로 펌프를 작동하여 펌프가 추진제를 추력실로 공급하는 방식으로 고추력이고 연소시간이 비교적 긴 엔진에 응용되며, 압축가스식 추진제 공급시스템은 헬륨이나 질소와 같은 불활성 가스를 고압탱크에 저장해 두었다가 압력조절기를 통해 연소압력보다 높은 일정한 압력으로 추진제 탱크내의 추진제를 밀어내어 공급하는 방법으로 비교적 간단하면서 신뢰도가 높아 개발초기인 우리나라의 지상연소시험장 대부분이 채택하고 있는 방식이다. 압축가스식 추진제 공급시스템을 채택한 지상연소 실험에서 시동초기 연소실 압력은 대기압이므로 인젝터와 연소실간의 차압은 정상연소시의 차압과는 상당히 다르므로 정상연소시의 연소실 압력을 고려하여 설계된 인젝터로부터 공급되는 각 추진제의 유량과 속도는 설계된 것과 달라 인젝터가 손상될 수 있는 문제점이 있다.

본 실험을 하게 된 동기는  $GO_2$ /kerosene을 추진제로 하는 로켓엔진 개발에 사용된 coaxial injector에서 화염이 인젝터 면에 형성되어 인젝터를 손상시키는 것으로 생각되는 여러 사고들로 인해 서이다. 본 연구는 시동초기에 발생하는 coaxial injector 손상의 원인을 규명하여 안정적인 인젝터와 연소시스템 설계에 도움을 주기 위한 목적으로 실험용 인젝터를 제작하여 연소압을 대기압으로 하여 추진제간의 운동량비에 따른 화염 부상 특성을 실험적으로 연구하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

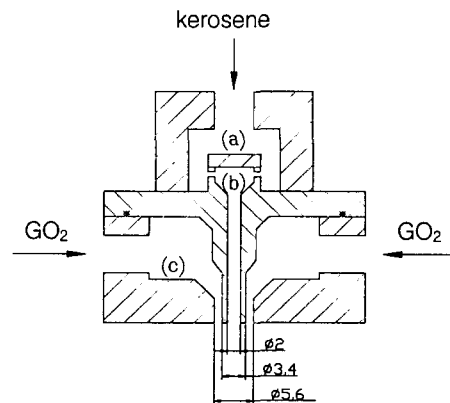
### 2.1 실험 장치 및 구성

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 2-유체 swirl-

coaxial injector를 사용하였다. 연료인 kerosene을 인젝터의 중심에서 점선형 선화기를 거쳐 직경 2mm의 노즐에서 분사되도록 하였으며 그 주위로 산화제인 기체산소를 연료 노즐 면적의 5배로 설계된 노즐을 통하여 연소실의 축방향에 수평 하게 분사되도록 설계하였다. 맥동현상을 방지하고 노즐 출구에서 분무되는 기체산소의 유동조건이 정상상태가 되도록 노즐 내부에 완충부를 두었으며, 노즐 내면에서의 유체 박리현상에 의한 영향을 완화시키기 위하여 모서리부분을 매끄럽게 제작하였다.

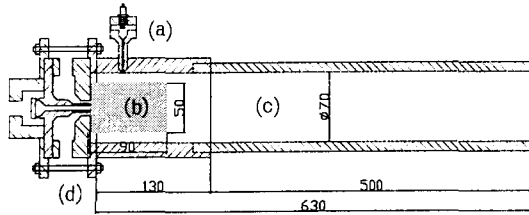
연소실은 대기중 산소의 영향을 막기 위하여 충분히 길게( $L=630mm$ ) 제작하였으며, 인젝터면에서의 화염 특성을 관찰할 수 있도록 윈도우( $90mm \times 50mm$ )를 설치하였다. Fig. 2는 연소실험 장치 개략도로 좌측에 인젝터를 볼트를 이용하여 연소실에 결합하였으며 기체수소와 기체산소로 점화 할 수 있는 전기 불꽃 점화장치를 부착하였다.

연속적인 추진제 공급을 위해서는 기체산소와 kerosene의 공급장치가 필요하게 된다. 기체 산소 유동의 맥동을 억제하고 안정화시키기 위해 압력제어탱크를 설치하였으며 regulator를 사용하여 공급

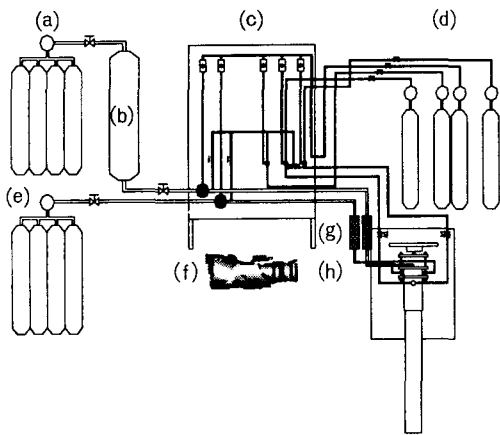


(a) manifold of kerosene (b) swirler  
(c) manifold of  $GO_2$

Fig. 1. The schematic of swirl coaxial injector



(a) ignitor (b) window (90mm×50mm)  
 (c) chamber (L=630mm) (d) injector  
 Fig. 2 The schematic of thrust chamber



(a) GN<sub>2</sub> bombes (b) kerosene storage tank  
 (c) solenoid valve units  
 (d) GH<sub>2</sub> & GO<sub>2</sub> bombes  
 (e) GO<sub>2</sub> bombes (f) camcorder  
 (g) mass flow meters (h) thrust chamber  
 Fig. 3. The schematic of the experiment setup

압력을 제어하였다. 100kPa까지 견딜 수 있는 특수 용기에 저장된 kerosene은 가연성이 없는 질소가스로 가압하였고 regulator를 사용하여 가압 압력을 제어하였으며 relief valve를 설치하여 노즐에 안정적으로 kerosene을 공급할 수 있도록 하였다. 추진제의 공급과 차단은 solenoid valve를 사용하였다. 노즐에서 분무되는 추진제의 분무압력을 측정하기 위해 인젝터의 각 manifold에 strain gauge type 압력계를 설치하였으며 coriolis의 측정원리를 이용한 micro motion사의 유량계(모델명: DO40H-SS-200)를 사용하여 공급유량을 측정하여 개인용 컴퓨터에 저장·분석하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

2-유체 coaxial injector의 난류 확산 화염에서 연료와 산화제의 혼합은 화염 특성을 결정하는 주요 변수이므로 인젝터로부터 분무되는 추진제간의 운동량비( $MR = \frac{\text{Momentum of } GO_2}{\text{Momentum of Kerosene}}$ )를 변화시켜 화염 부상 거리를 측정하여 그 결과를 분석하였다.

kerosene의 유량을 31.8 g/s로 고정하고 기체산소를 choking조건에서 유량을 증가시켜 운동량비를 1~12까지 변화시키면서 대기압상태에서 연소실험을 하였다. 노즐 출구에서의 추진제의 운동량은 분무 유량과 분출속도로부터 계산되었다. 노즐로부터 분무되는 기체산소의 속도는 일정하므로 운동량은 유량의 영향을 받는다.

화염 부상 거리를 측정하는 전통적인 방법으로 간단한 사진촬영(Kalghatgi 1984) 또는 probe를 사용한 측정(Chen and Goss 1989)이 있다. 본 실험에서는 화염을 S-VHS 캠코더로 촬영한 후 촬영된 동화상에서 정지화상을 취하여 화염 부상 거리를 측정한 후 평균값을 취하였다.

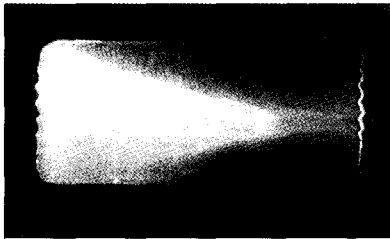
3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 각 조건에서 촬영된 동영상으로부터 화염 부상 거리를 측정하기 위해 얻어진 정지화상의 흑백 이미지이다.

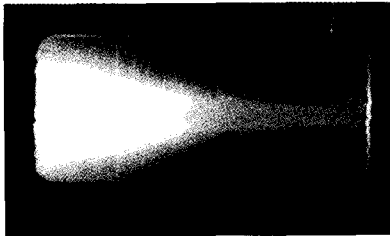
Fig. 5는 확산화염에서의 화염 부상 거리를 설명해 주는 그림으로 Fig. 4에서 인젝터면으로 부터 화염의 밝게 빛나는 부분까지의 거리를 화염부상거리라 한다. 화염부상은 화염이 인젝터 노즐 출구에 부착되어 안정화되지 못한 채, 출구에서 얼마 떨어진 곳에서 안정화 될 때 발생하는 현상이다. 실험에 사용된 swirl-coaxial injector는 51°의 분산각을 가지고 분무되는 kerosene에 연소실의 축방향으로 분사되는 기체산소가 직접 충돌하므로써 미립화 특성이 우수하며 균일하게 혼합된다. 분무연소에서 미립화 특성이 양호하고 연소용 산화제가 충분히 공급되며 혼합이 균일할 때는 예혼합된 mixture와 같은 특성을 갖는다. 따라서, 난류확산화염의 부상화염 모델 중 평균속도장에 대해서 평균연료 농도장을 통한 걸보기 난류화염속도로 전파해가는 예혼합화염의 메



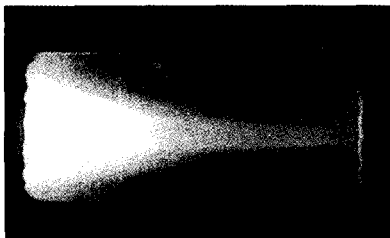
(a) MR = 1.9, lift-off height = 0 mm



(b) MR = 3.6, lift-off height = 21.2 mm



(c) MR = 5.7, lift-off height = 46.5 mm



(d) MR = 10.5, lift-off height = 57.1 mm  
Fig. 4. Lifted flames due to momentum ratio

카니즘으로 보는 예혼합 연소이론(The premixed combustion theory)으로 화염 부상의 메카니즘을 잘 설명할 수 있다. swirl-coaxial injector에서 가스상태의 산화제와 액체상태의 연료의 혼합과 미립화는 주로 gas와 액체사이의 전단력에 의해 이루어지며 상대적으로 큰 산화제의 운동량이 연료에 전달

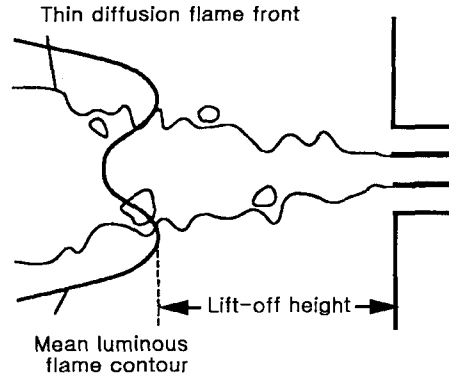


Fig. 5. The schematic illustration of the lift-off height of diffusion flame

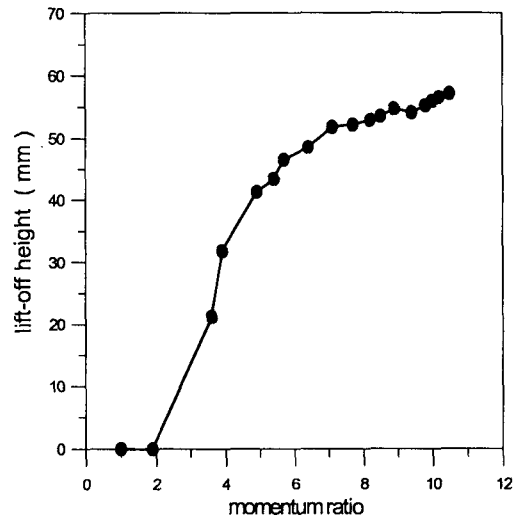


Fig. 6. The graph of lift-off height due to momentum ratio

된다. 따라서 산화제의 운동량이 클수록 충돌후의 혼합된 연료와 산화제의 속도도 커지게 된다. 그러므로 운동량비가 클수록 화염면으로 공급되는 mixture의 속도가 증가하므로 화염 부상 거리도 증가하게 된다고 사료된다.

Fig. 6은 인젝터에서 분무되는 추진제간의 운동량비 변화에 대한 화염 부상 거리를 나타낸 그래프이다. 인젝터면에 형성된 화염은 운동량비 2에서 부상하기 시작하여 2~6 운동량비 구간에서는 운동량비가 증가함에 따라 화염 부상 거리가 급격히 증가하

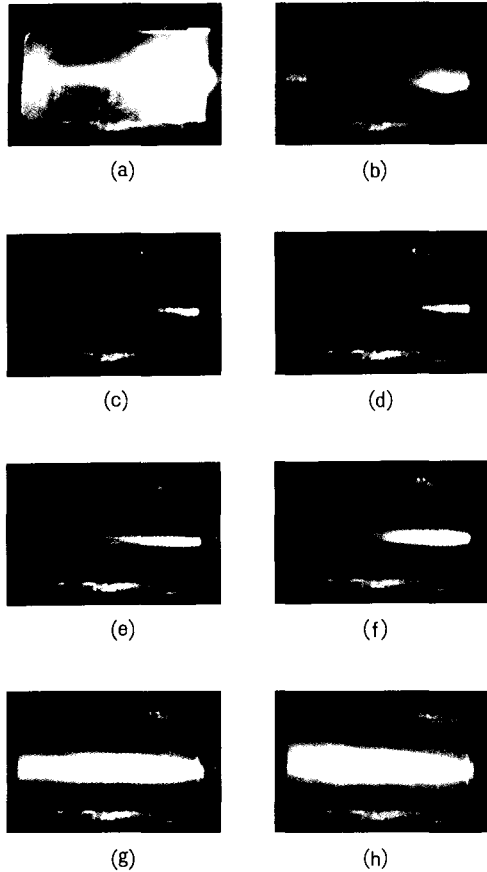


Fig. 7. Back-flame around MR 12

였으며 6 이상의 운동량비부터는 완만히 증가함을 볼 수 있다.

운동량비 12 부근에서는 인젝터의 post가 파손되었는데 이는 kerosene에 비해 상대적으로 큰 기체산소의 운동량에 의해 kerosene의 분무가 간섭을 받아 불안정해지면서 일어난 역화 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 운동량비 12부근에서 인젝터의 post가 파손되는 과정을 순차적으로 보여주는 사진이다.

Fig. 7의 (a)~(c)에서 점화시 화염이 미처 부상하지 못하고 인젝터방향으로 화염이 빨려 들어가다 (d)~(h)에서와 같이 다시 분출되기를 여러 번 반복하며 인젝터의 post를 파손시킨다. 인젝터 manifold의 압력선도로부터 화염이 처음 인젝터로 들어갔을 때 인젝터의 post가 파손되었음을 알 수 있었으며 유량선도로부터 kerosene의 분무가 불안정해졌음을

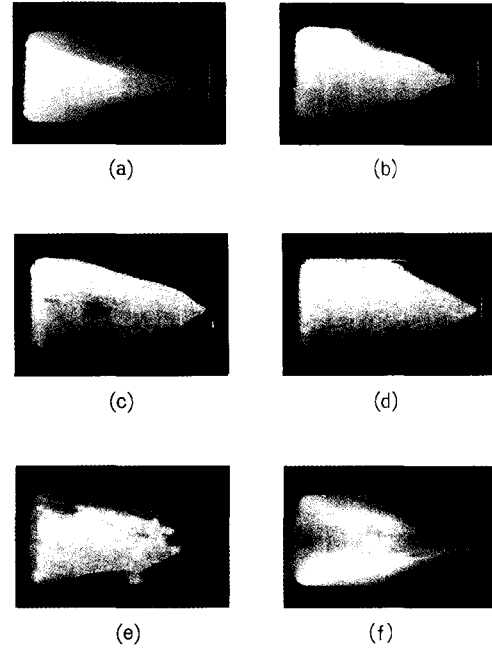


Fig. 8. Flames during quenching

알 수 있었다. 이러한 현상은 추후 cold flow test를 통해 좀더 정확한 규명이 필요하다고 생각된다. 본 연구에 사용된 연소시스템은 기체산소의 공급이 먼저 중단된 후 kerosene의 공급이 중단되며 소멸된다. Fig. 8은 기체산소를 공급하는 solenoid valve가 닫힌 후 공급관내에 남아 있는 기체산소가 공급되는 동안의 화염 형상을 순차적으로 보여주는 사진이다. 이때 기체산소의 공급이 choking조건이 아니므로 정확한 운동량을 알 수 없으나 추진제간의 운동량비는 1보다 작은 구간이다. 이처럼 운동량비가 작을 경우 화염이 인젝터면으로 급격히 당겨짐을 볼 수 있는데 이는 인젝터 파손으로 이어질 수 있다. 따라서 소멸시 추진제간의 운동량비를 제어할 수 있는 추진제 공급시스템이 필요하다고 사료된다.

#### 4. 결 론

로켓엔진에 사용되는 인젝터의 설계는 어느 정도의 기본 이론을 근거로 해서 설계하지만 설계-시제-시험-재 설계의 과정을 여러 번 거쳐서 최종설계가 얻어지는 경험적 지식에 의존하므로 화염의 거동

을 이해하고 조절하는 방법을 안다는 것은 최적의 설계를 얻기 위한 설계자의 본질적인 과제라고 여겨진다.

2-유체 동축인젝터의 난류확산화염에 관한 특성은 지금까지 많은 연구가 이루어져 여러 가지 이론이 제시되었으나 노즐의 형태와 연료의 물성치 및 분무의 초기조건, 경계조건 등에 의하여 제한되며 주로 버너나 가스터빈에 대한 연구가 대부분으로 액체로켓에 대한 연구는 연구주제의 특성상 연구자료의 획득이 쉽지 않은 실정이다.

본 연구에서는 기체산소와 kerosene을 추진제로 한 액체로켓용 동축인젝터(center swirl)에서 추진제간의 공급 운동량비에 따른 화염 부상 거리를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 추진제간의 공급 운동량비가 증가할수록 화염 부상 거리가 증가하였으며, 예혼합화염의 메카니즘으로 보는 예혼합 연소이론(The premixed combustion theory)으로 화염 부상 거리의 증가를 잘 설명할 수 있었다.
2. 운동량비 2이하에서는 화염이 인젝터의 노즐출구에 형성되었으며, 운동량비 2부근에서 화염이 급격히 부상하기 시작하였다. 운동량비 2~5구간에서는 운동량비의 증가에 따라 화염 부상 거리가 크게 변하였으며 6이상의 운동량비부터는 화염 부상 거리가 완만히 증가함을 볼 수 있었다. 운동량비 11 부근에서는 역화되어 인젝터의 post가 파손되었다.
3. 운동량비 2~5구간에서는 작은 운동량비의 변화에도 화염 부상 거리가 크게 변하여 소음 및 진동을 유발하고 연소불안정현상을 야기할 수 있으므로 시동초기에 운동량비의 변화에 대해 화염 부상 거리의 변화가 적은 6~9의 운동량비에서

연소될 수 있도록 인젝터 및 추진제 공급시스템을 설계하는 것이 바람직하다.

이상의 결과로 특히 높은 연소압에서 압축성 추진제를 사용하는 연소시스템에서는 초기 점화시와 소염시의 천이영역에서 각 추진제의 운동량을 제어할 수 있는 인젝터 및 추진제 공급 시스템이 필수적이라고 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. G. P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements", 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., 1992.
2. J. Warnatz, U. Mass, R. W. Dibble, "Combustion", Springer, 1996
3. Vanquickenborne, L., and Van Tiggelen, A., "The stabilization mechanism of lifted diffusion flames", Comb. Flame, 1966, Vol.38(3), pp.577~612
4. Gunther, R., Horch, K., and Lenze, B., "The stabilization mechanism of free diffusion flames", First Specialists Meeting (International) of the Combustion Institute, Bordeaux, July, 1981, pp.117~122
5. Kalghatgi, G. T., "Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air". Combust. Sci. and Tech., 1984, Vol.41, pp.17~29
6. Peters, N., and Williams, F. A., "Lift-off characteristics of turbulent jet diffusion flames", AIAA J., 1983, Vol.21, pp.423~429