論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.3.222>

분사기 냉각이 초저온 분무의 점화에 미치는 영향

김도현*, 이진혁**, 구자예***

Effect of Injector Cooling on Ignition of Cryogenic Spray

Dohun Kim*, Jinhyuk Lee** and Jaye Koo***

ABSTRACT

The cooling of a injector effects on the vapor pressure of cryogenic oxidizer spray, and it decides the phase transition point at the ignition process, when the combustion chamber pressure increases drastically. The phase transition of oxidizer spray affects the ignition characteristics, and several ignition tests with the LOx/GCH₄ uni-element coaxial swirl injector was performed in the different initial temperatures of oxidizer injector, in order to investigate the effect of injector cooling on the ignition transient characteristics. At the transition point of oxidizer phase, where the combustion chamber pressure increased over the LOx vapor pressure, the temporary quenching phenomenon of the flame occurred. The lower temperature of chilled down injector and tubing tends to move up the phase transition earlier.

초 록

점화 시의 분사기의 냉각은 분사순간의 초저온액체상태의 산화제 분무의 증기압에 영향을 미치고, 이는 연소반응에 따른 연소실 압력상승 과도단계에서 분무의 상(phase) 천이 시점을 결정하는 인자 중 하나이다. 분무의 상변화는 액체로켓 연소기의 점화특성에 큰 영향을 미치며, 액체산소/메탄 추진제를 사용하는 연료과잉 폐쇄형사이클 액체로켓엔진의 주연소기용 분사기로 사용될 수 있는 액체-기체 동축형 스월분사기에 대하여 점화초기 분사기 냉각온도에 따른 점화시험을 수행하였다. 초기 냉각온도에 따라 점화 시 산화제 분무의 액상으로의 천이시기가 달라지며, 충분한 냉각을 통해 산화제 분무의 증기압을 낮춘 경우 산화제 분무의 상 천이 시기를 나타내는 화염 quenching 현상이 일찍 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Injector Cooling(분사기 냉각), Cryogenic Spray(초저온 분무), Ignition Characteristics(점화특성), Vapor Pressure(증기압)

1. 서 론

액체로켓엔진의 추진제로 사용되는 초저온 액체는 매우 낮은 기화점을 가지기 때문에 대기압,

상온 조건으로 분사될 때 즉시 기화되어 기체상태의 분무특성을 가진다. 점화 시 연소실 내부의 압력은 보통 대기압 또는 그 이하이지만, 추진제의 점화와 동시에 연소반응에 의해 연소실의 압력은 빠르게 상승한다. 연소실의 압력이 초저온 추진제 분무의 증기압보다 높아지게 되면 분무의 상(phase)은 기체에서 액체로 천이 현상이 발생하게 된다. Fig. 1은 액체산소/메탄을 추진제로 하는 연료과잉 폐쇄형사이클 액체로켓 주연소기에 사용될 수 있는 액체-기체 동축형 스월분사기의

† 2011년 7월 28일 접수 ~ 2012년 2월 14일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
교신저자, E-mail : jykoo@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

Fig. 1. Recessed region of a liquid-gas swirl coaxial injector

개략도이다. 이와 같은 동축형 분사기의 리세스 영역은 산화제와 연료 분무가 전단력에 의한 운동량전달을 통해 추진제의 혼합 및 미립화가 시작되는 영역이며, 이곳에서의 산화제의 상온 분무 및 연소특성에 매우 큰 영향을 미친다[1-4].

독일의 DLR(German Aerospace Center)에서는 OH기 자발광(OH*- chemiluminescence) 이미징 기법을 이용하여 액체산소/수소 및 액체산소/메탄 추진제의 점화 초기 화염전파과정 및 화염 안정화과정에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히 액체로켓엔진의 점화과정을 4단계(점화초기단계-화염전파단계-화염부양단계-화염안착단계)로 나누어, 점화 시 분무의 운동량 비(momentum flux ratio, J) 및 웨버수(Weber number, We)에 따른 각 단계에서의 화염거동특성을 연구하고 있다[5-10].

본 연구에서는 액체산소/기체메탄을 추진제로 사용하는 단일 동축형 스윙분사기 액체로켓 연소기 및 초저온 추진제 공급/제어시스템을 이용하여, 산화제 배관의 냉각정도에 따른 산화제 분무의 점화 시 증기압 과도특성을 분석하고, 기체산소/기체메탄 토치점화기를 이용한 점화시험을 수행하여 점화 시 분사기의 냉각온도에 따른 점화특성에 대한 고찰을 수행하였다.

II. 실험장치 및 방법

2.1 단일분사기 연소시험장치

시험에 사용된 단일 동축형 스윙 분사기의 구조는 Fig. 2와 같으며, Table 1에 각 형상인자의 값을 표시하였다. 중심포스트에서는 산화제인 액체산소가 선회유동을 가지는 액막 형태로 분사되고, 포스트 외측 둘레의 환형 갭에서는 연료인 기체메탄이 축방향으로 분사된다. 연소시험을 위해서 초저온 추진제 공급 및 제어 시스템의 구축

Fig. 2. Dimensions of a swirl coaxial injector

이 필요하며, 액체산소를 약 20초간 최대 0.38 kg/s의 유량으로 공급할 수 있는 가압식 초저온 추진제 공급 시스템 및 LabVIEW compact-RIO 플랫폼을 이용한 시퀀스 제어 및 데이터 수집장치를 구축하였다.

추진제 공급시스템의 개략도는 산화제측과 연료측을 구분하여 Fig. 3에 도시하였다. 분사기에서의 정확한 추진제 분사시점 제어를 위해서는 밸브개방신호 인가시점에서부터 분사기 끝단에서 추진제 분무가 나타나기까지의 지연시간, 즉 추진제 분사지연시간의 측정이 필요하다. 추진제 주밸브 개방신호에 동기된 L.E.D 램프와 분사기 끝단을 초고속 CCD 카메라로 동시에 촬영하여 추진제 분사지연시간이 측정되었으며, 본 추진제 공급시스템에서의 산화제 분사지연시간은 평균 1046.7 ms, 연료 분사지연시간은 평균 122.4 ms로 측정되었다. 추진제 분사지연시간은 산화제 주밸브에서 분사기까지의 거리가 연료측보다 더 길고, 배관 내 유체의 수격현상으로 인한 산소의 자발화 현상을 방지하기 위해 밸브 작동속도를 1 초 정도로 느리게 설정하였기 때문이다. 추후에는 분사기의 상류 인접부에 설치하여, 산화제의 분사 지연시간을 최대한 줄일 계획이다.

초저온 액체상태의 산소 및 기체상태의 메탄이 추진제로 사용되므로 온도 및 압력에 따른 밀도의 변화가 고려되어야 한다. 정확한 질량유량의 계산을 위해서는 각 유량측정부에 설치된 열전대 및 압력 트랜스듀서에서 추진제의 온도 및 압력을 측정하고, SUPERTRAPP에서 얻은 예상 운용 범위의 추진제 물성 데이터 맵을 입력받아 3차원 보간을 통한 현재 유량측정부의 물리적 조건에 해당하는 밀도를 계산하였다. SUPERTRAPP은 대응상태의 원리에 따라 기준유체로부터 온도 및 압력에 따라 탄화수소화합물의 물성치를 계산하는 코드이다[11].

점화시험을 위한 연소기의 대략적인 형상은 Fig. 4에 도시하였으며, 주요 치수는 Table 2에

Fig. 3. Schematic of a Propellant feeding system; (a)LOx, (b)GCH₄

Fig. 4. Cross-sectional schematic of a thruster assembly

Table 2. Dimensions of combustion chamber

L _{cc}	307 mm	D _{cc}	φ 60 mm
D _t	φ 15.12 mm	D _e	φ 30.2 mm

2.2 액체 산소 분무의 증기압

모든 물질의 증기압은 Clausius-Clapeyron 관계에 따라 온도에 대해 비선형적 비례관계를 가진다. 액체 산소의 증기압은 온도가 54.36~154.33K의 범위에 있을 때, 다음 Antoine 관계식에 의해 계산할 수 있으며[12], Fig. 5는 이를 통해 계산된 온도에 따른 산소의 증기압 선도를 나타낸다.

$$\log_{10}(P_{\text{vapor}, \text{LOX}}) = 3.9523 - \left(\frac{340.024}{T_{\text{oxygen}} - 4.144} \right)$$

T_{oxygen} 은 Fig. 6과 같이 산화제 분사기 헤드 내부(스윙 챔버 접선포트 인접부)에서 측정되는 산화제의 온도를 사용한다. 온도 측정용 T-type 열전대는 와이어 접합부가 보호관에서 노출된 exposed 형을 사용하였으며, 시상수가 0.125 sec 정도로 반응속도가 빠른 장점이 있다.

연소실에서 추진제의 점화가 이루어지지 않았고(높지 않은 연소실 온도) 충분한 배관-분사기 헤드의 냉각이 수행되었으므로, 액체 산소 온도가 측정되는 스윙 챔버 내부와 분사기 끝단에서는 산화제의 온도 차이가 거의 없다고 가정할 수 있다. 따라서 리세스 영역에서의 액체 산소 분무 증기압은 스윙 챔버에서 측정된 액체 산소의 온도를 이용하여 계산된 $P_{\text{vapor}, \text{LOX}}$ 와 같다고 볼 수 있다.

Fig. 5. Vapor pressure of liquid oxygen in terms of temperature

Fig. 6. Location of a exposed-junction T-type thermocouple at swirl chamber

Fig. 7. Ignition sequence and corresponding time-history of thrust and combustion chamber pressure

2.3 점화 시퀀스

일관된 조건에서 점화시험을 수행하기 위하여, 각 시험 Case에서는 동일한 점화시퀀스가 사용되었다. 추진제 분무의 배관충진 소요시간(추진제 분무지연시간) 및 점화기 작동지연 시간이 고려되었으며, 점화제트의 화염발달 지연 등의 영향을 피하기 위하여 점화기의 유량 및 작동시간이 조정되었고, 점화시퀀스 시작 전 액체산소를 이용한 냉각으로 인한 과농산소 분위기에서의 hard-start를 방지하기 위하여 연료분사기로의 기체질소 weak-blowing이 적용되었다. Fig. 7은 시험에 사용된 점화시퀀스 및 연소실압력, 추력 선도를 나타낸다.

III. 실험결과

3.1 분사기냉각온도

Figure 8은 산화제 배관 및 분사기의 초기 냉각정도에 따른 연소 시 산화제 분무의 온도선도이다. 초기 냉각온도($T_{LOx, M/H, init}$, 분사기헤드 내부 산화제 매니폴드에서 측정된 온도)가 각각 -122°C , -131°C , -137°C 인 세 가지 경우에 대한 비교가 이루어졌으며, 점화 시퀀스 및 추진제 유량은 모두 동일하다. 분사가 진행될수록 산화제 분무의 온도는 감소하며, 분무 초기의 온도에 따라 연소 정상상태에서의 분무 온도는 다르게 나타난다. 산화제 밸브가 개방되고 오랜 시간동안 분무를 지속시키면 세 경우 모두 액체산소의 기화점 근처의 온도로 수렴하지만, 산화제 밸브가 개방된 이후 모든 점화 시퀀스가 종료되기까지는 일반적으로 5초 이내의 시간을 가지므로 연소기간 내에서의 산화제 분무의 온도는 초기 냉각온도에 영향을 받는다. 따라서 점화 시퀀스 시작 이전의 냉각온도는 점화단계 뿐만 아니라 정상상태 분무의 온도에도 영향을 미친다고 할 수 있다.

3.2 점화시험

점화시험은 Table 3와 같이 약 65% 추진제 유량 스톱틀링 조건인 액체산소 질량유량 0.13 kg/s , 기체메탄 질량유량 0.05 kg/s , O/F 비 2.60에서 수행되었다. 각 시험케이스는 스월챔버 표면에서 측정된 점화 시의 산화제 분사기 냉각온도에 따라 3가지로 분류되었고, 각 케이스에서의 분사기 냉각온도, 추진제 질량유량, O/F비를 Table 4에 표기하였다. 점화 시퀀스 작동 이전의 냉각온도, $T_{LOx, M/H, init}$ 가 -122°C 인 Case 1의 경우 시간에 따른 산화제 분무의 증기압 및 연소실

압력 선도는 Fig. 9(a)와 같다. 추진제가 점화되고, 연소되는 동안 산화제인 액체산소의 증기압은 항상 연소실 압력보다 높게 측정되었으며, 점화된 후의 실제 리세스 영역에서 산화제의 증기압은 연소실 내부 화염으로부터 분사기로의 복사열전달 등으로 인해 더 높을 것으로 생각된다. 즉, 산화제는 리세스 영역에서 분사와 동시에 기화하기 때문에, 연료인 기체메탄과 기체-기체 상태로 혼합되어 연소반응이 일어나며, 산화제는 기화로 인해 체적유량이 증가하여 분사속도가 빨라진다. 이로 인하여 산화제-연료 간의 운동량 비가 낮아지기 때문에 혼합성능이 떨어지며[9], Fig. 9에 나타난 바와 같이 점화초기 성능에 부정적인

Fig. 8. Traces of LOx temperature at swirl chamber in each case, smoothed plot

Table 3. Comparison of ignition test conditions with design point

설계 추진제 유량			
$\dot{m}_{LOx, design}$	0.20 kg/s	$\dot{m}_{CH_4, design}$	0.07 kg/s
O/F 비		2.86	
점화시험 추진제 유량			
$\dot{m}_{LOx, ign test}$	0.13 kg/s	$\dot{m}_{CH_4, ign test}$	0.05 kg/s
O/F 비		2.60	

Table 4. Operating conditions of each test case

	Case 1	Case 2	Case 3
$T_{LOx, M/H, init}$	-122°C	-131°C	-137°C
$\dot{m}_{LOx, measure}$	0.1273 kg/s	0.1281 kg/s	0.1286 kg/s
$\dot{m}_{CH_4, measure}$	0.0464 kg/s	0.0472 kg/s	0.0470 kg/s
O/F 비	2.744	2.714	2.736

영향(낮은 연소실 압력)을 미치게 된다. 각 Case 의 점화초기 연소압력은 점화 후 1~2초 영역의 연소실압력의 평균값을 계산하여 비교하였으며, 점화부터 소화까지 연소실 압력이 산화제 분무의 증기압보다 높은 Case 3의 경우 평균 연소실 압력은 13.00 bar로, 점화부터 소화까지 연소실 압력이 산화제 분무의 증기압보다 낮은 Case 1의 11.94 bar 보다 약 8.9 %가량 높게 나타났다. Fig. 10은 점화 시 배기 플룸의 정상상태로의 발달과정을 나타낸다. 높은 증기압으로 인한 기체 상태 산화제는 높은 축방향 속도로 분사되며, 이는 점화 시의 일시적인 화염 blow-off 현상을 야기한 것으로 생각된다.

Fig. 9(b)는 $T_{LOX, M/H, init} = -131^{\circ}C$ 인 Case 2의 산화제 분무의 증기압 및 연소실 압력선도를 나타낸다. 초기 냉각온도가 더 낮아진 만큼 연소단계에서의 산화제 분무의 증기압은 15 bar 이하로 연소실 압력보다 낮게 유지된다. Fig. 9에서 증기압이 연소실 압력보다 낮아지는, 즉 리세스 영역에서 산화제 분무가 액상으로 천이되는 것으로 예상되는 지점은 점화 후 약 164 ms 시점이며, Fig. 11에서 연소배기 화염의 일시적인 quenching 이 나타나는 시점은 약 140 ms 시점으로 나타났다. 이는 산화제 분무가 상 천이되는 순간 축방향 속도가 낮아져, 화염의 길이가 급격히 줄어들기 때문이다[9]. 화염의 quenching은 초당 300 frame 으로 촬영되는 고속 영상을 frame 단위로 분석하여, 배기화염이 순간적으로 노즐 상류로 사라지는 시점으로 판단되었다. 연소기간 중반까지 산화제분무의 증기압과 연소실압력이 비슷하게 측정되었는데, 이 시기에서는 산화제의 부분적인 기화가 발생할 것으로 생각되며, 일정하지 않은 분무조건 및 연소혼합비의 불균형으로 배기플룸 화염의 색깔이 불규칙적으로 주황빛에서 푸른빛으로 변화한 것으로 생각된다[13].

초기 냉각온도가 $-136^{\circ}C$ 로 더 낮은 Case 3의 경우, Fig. 9(c)에 나타난 바와 같이 산화제 분무의 증기압이 전 영역에 걸쳐 더 낮고 점화 시 연소실 압력이 더 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이 때 산화제 분무가 액상으로 천이되는 지점은 점화 후 약 103 ms이며, Fig. 12에서 연소배기 화염이 순간적으로 quenching되는 시점은 약 83 ms로 측정되었다. 이는 배관 및 분사기의 충분한 냉각이 산화제 분무가 더 빨리 액상으로 천이될 수 있게 함을 나타낸다.

(a) $T_{LOX, M/H, init} = -122^{\circ}C$ (Case 1)

(b) $T_{LOX, M/H, init} = -131^{\circ}C$ (Case 2)

(c) $T_{LOX, M/H, init} = -137^{\circ}C$ (Case 3)

Fig. 9. Vapor pressure and combustion chamber pressure trace during ignition process

Fig. 10. Exhaust plume development in case 1
($T_{LOX, M/H, init} = -122^{\circ}\text{C}$)

Fig. 11. Exhaust plume development in case 2
($T_{LOX, M/H, init} = -131^{\circ}\text{C}$)

Fig. 12. Exhaust plume development in case 3
($T_{LOX, M/H, init} = -137^{\circ}\text{C}$)

IV. 결 론

액체산소/기체메탄 추진제를 사용하는 단일분사기 액체로켓엔진의 65% 유량 스톱틀링 조건에서의 점화시험을 수행하였고, 이를 통해 산화제 배관 냉각에 따른 점화초기 산화제분무의 상에 따른 점화 과도특성을 분석하였다. 분사기의 초기냉각온도는 작은 차이로도 점화 시의 산화제분무 증기압의 크기에 큰 영향을 미쳤으며, 이는 점화 및 연소단계에서 연소실 압력에 따라 산화제 분무의 상을 결정하는 요소이다. 점화 초기 분사기의 냉각온도에 따라 산화제 분무의 증기압이 연소실 압력보다 낮아지는 시점, 즉 산화제 분무의 상이 기체에서 액체로 천이되는 지점의 차이를 보였으며, 냉각온도가 낮을수록 산화제 상변화에 의한 일시적인 화염 quenching 시점이 빨라지는 경향을 보였다. 각 시험케이스에서의 분사기 스월챔버 냉각온도는 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 이내로 크지 않은 차이였지만, 이에 따른 실제 점화 과도단계에서의 산화제 분무의 증기압의 크기는 연소실 압력의 ± 5 bar 이상으로 나타났다. 이는 점화 과도단계에서 산화제 분무의 상이 액체인지(연소실 압력 > 증기압) 또는 기체인지(연소실 압력 < 증기압)에 큰 영향을 미치며, 즉 분사기의 냉각이 안정적인 점화과정 설계에서 간과할 수 없는 인자임을 의미한다.

계속되는 연구에서는 연소실 내부 화염가시화를 추가로 수행하여, 분사기 냉각온도에 따른 추진제 분무 및 점화 천이과정에서의 연소실 내부

화염 거동에 대한 정량적 연구를 진행할 계획이며, 이는 초저온 추진제를 사용하는 액체로켓의 점화과정에서 최적 분사기 냉각온도 결정기법을 제시할 수 있을 것으로 생각한다.

V. 후 기

이 논문은 한국연구재단의 기초연구사업(핵심 연구, 과제번호: 2011-0015435)의 지원을 받아 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) B. D. Kim, Stephen D. Heister and S. H. Collicott, "Three-Dimensional Flow Simulations in the Recessed Region of a Coaxial Injector," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 21, No. 4, 2005, pp. 728-742
- 2) D. Kim, P. Han, J. Im, Y. Yoon, and V. G. Bazarov, "Effect of Recess on the Spray Characteristics of Liquid - Liquid Swirl Coaxial Injectors," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 23, No. 6, 2007, pp. 1194-1203
- 3) L. Yang, M. Ge, M. Zhang, Q. Fu and G. Cai, "Spray Characteristics of a Recessed Gas - Liquid Coaxial Swirl Injector," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 6, 2008, pp. 1332-1339
- 4) J. Lux. and O. J. Haidn, "Effect of Recess in High-Pressure Liquid Oxygen/Methane Coaxial Injection and Combustion," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, 2009, pp. 24-32
- 5) V. Schmidt, O. Gurliant, M. Oschwald and O. J. Haidn, "Influence of J and We number on GH₂/LOX Ignition Process," ILASS-Europe, 2002.
- 6) F. Cuoco, B. Yang, C. Bruno, O. J. Haidn and M. Oschwald, "Experimental Investigation on LOx/CH₄ Ignition," 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper 2004-4005, 2004.
- 7) V. Schmidt, U. Wepler, O. J. Haidn and M. Oschwald, "Characterization of the Primary Ignition Process of a Coaxial GH₂/LOX Spray," 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2004-1167, 2004.
- 8) M. De Rosa, J. Sender, H. Zimmermann and M. Oschwald, "Cryogenic Spray Ignition at High Altitude Conditions," 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA Paper 2006-4539, 2006.
- 9) O. J. Haidn et al., "Flame Stabilization in High-Pressure Liquid Oxygen/Methane Rocket Engine Combustion," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, 2009, pp. 15-23
- 10) O. J. Haidn et al., "Kinetic Mechanism For Low Pressure Oxygen / Methane Ignition and Combustion," 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA Paper 2011-94, 2011..
- 11) M. L. Huber, "NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) Version 3.2 Users' Guide," NIST
- 12) G. T. Brower et al., "Vapor Pressures of Liquid Oxygen Between the Triple Point and Critical Point, *J. Chem. Eng. Data*, 1968, 13, 2, 262-264
- 13) G. D. Roy, "Combustion Preprocesses in Propulsion: Control, Noise, and Pulse Detonation," Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.