

수직분사제트에서의 헥산 증기농도측정

오정석† · 이원남* · 이종근** · 도미니크 산타비카**

Hexane Vapor Concentration Measurement of a Liquid Jet in Crossflow

Jeongseog Oh† · Wonnam Lee* · Jonggeun Lee** · Dominique A. Santavicca**

ABSTRACT

The vapor concentration of hexane in a liquid spray jet in crossflow was qualitatively measured on the basis of the infrared (IR) extinction techniques. The objectives of the present study are to understand the whole evaporation process from droplet breakup to vapor and to confirm the usefulness of IR emission method in a lab-scale ramjet combustor. From the experimental results, we concluded that hexane vapor mole fraction increased with temperature rise and kept nearly constant during the variation of fuel to air momentum ratio.

초 록

적외선 흡수법을 사용하여 액체 헥산 수직분사제트의 증기농도를 정성적으로 측정하였다. 본 연구의 목적은 모형 램젯 연소기에서 레이저를 이용한 적외선 흡수법으로 액체연료의 분열부터 기화까지의 과정을 이해하는 것이다. 실험결과로부터 헥산 증기 몰분율은 온도가 증가함에 따라 증가하였으나 연료 공기 운동량비 변화에 대해서는 큰 차이가 나지 않았다.

Key Words: hexane(헥산), IR absorption technique(적외선 흡수법), Vapor concentration measurement (증기농도측정), Jet in crossflow(수직분사제트)

1. 서 론

액체의 수직분사제트(jet in crossflow)는 유체의 물성치(점성, 표면장력)와 운동에너지(분사압력, 관성력)의 상호작용으로 이루어진다. 실용적인 관

점에서 이러한 수직분사방법은 탄화수소화합물(JP-7, 8 10 등)을 연료로 사용하는 램젯 및 스크램젯 엔진 또는 가스터빈을 사용하는 전투기의 애프터버너에서 추력을 얻기 위하여 사용되어 왔다. 액체 연료의 연소는 기화과정을 거쳐 화학 반응에 이르기 때문에 분사부터 액주 및 액적분열(breakup), 미립화(atomization), 기화(vaporization), 혼합(mixing), 대류(convection), 연소(chemical reaction) 과정을 거치게 된다. 상업용 가스터빈의 경우 배기배출물에 대한 규제

† 오정석, 회원, (주)현대로템 의왕기술연구소
연락처, E-mail: jeongs5@snu.ac.kr

* 단국대학교 기계공학과

** 펜실베이니아 주립대학교 기계원자력공학부

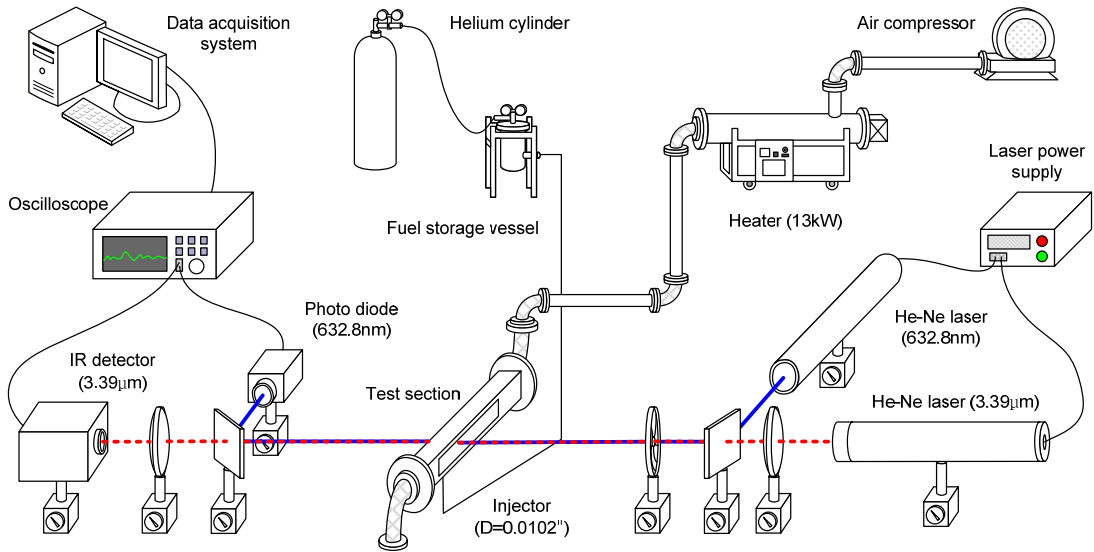


Fig. 1 Schematic diagrams of an experimental setup for hexane vapor measurements with IR detecting method.

가 강화되고 희박가연한계 근처에서 연소가 이루어짐에 따라 연소불안정(combustion instability) 현상이 대두되었다 [1]. 여기서 액체 연료가 연소에 이르는 과정(분무, 무화, 기화, 공기와의 혼합, 대류 연소)에서 외부교란에 대한 상호작용이 연소불안정에 큰 영향을 주기 때문에 이를 저감하기위한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [2, 3].

램젯 및 스크램젯 엔진에서 액체연료를 사용하는 경우 비행체의 작동환경에 따라 연료분사 압력으로 연소실에 공급되는 연료량을 조절하여 추력을 결정한다 [4]. 특히 램젯과 스크램젯 추진방식을 이용한 전술미사일 등에서는 다양한 운전조건에 대응한 화염안정성(flame stabilization)이 중요시된다. 이때 분사된 액적의 궤적과 기화된 연료의 농도분포는 화염안정성을 결정하는 주요인이므로 액체 연료의 기상 농도 측정이 필요하다 [5].

이러한 연구의 연장선상으로 수직분사제트에서 액상 핵산의 기상 농도측정에 대한 연구를 수행하였다. 그러므로 본 연구의 목적은 액상 핵산을 수직 분사하였을 때 온도 및 운동량 변화에 따른 기체상태 핵산의 농도 분포를 측정하고 이를 통해 분무특성을 이해하는 것이다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 크게 분사기 및 모형 램젯 연소기, 연료 및 공기 공급장치, 레이저 및 광학장비의 세 부분으로 구성된다. 이를 Fig. 1에 나타내었다. 먼저 탄화수소계열 액체연료의 증기 농도를 측정하기 위하여 두 대의 He-Ne 레이저를 사용하였다. 출력 파장은 참고광으로 632.8 nm와 흡수광으로 3.39 μm를 사용하였다. 연소기를 통과한 레이저를 수광하기 위하여 두 대의 photodiode를 사용하였고 취득된 강도 값을 오실로스코프를 통해 저장하였다. 분무가 이루어지는 모형 램젯 연소기(lab-scale ramjet combustor)의 크기는 1×1×16 inch이고 액체 핵산을 수직분사하기 위하여 0.0102 inch 직경을 가지는 분사기를 장착하였다. 연소실에 안정적으로 연료를 공급하기 위하여 연료통을 헬륨으로 가압하였고 불 유량계(rotameter)로 분사기에 주입되는 유량을 조절하였다. 13 kW 용량의 공기가열기(air heater)를 사용하여 압축기에 의해 공급되는 공기온도를 제어하였고 연소기 과열방지 및 연소실 내의 공기온도를 확인하기 위하여 3개의 K형 열전대(K-type thermo-couple)를 사용하였다.

Table 1 Experimental condition.

Variables	Range
Temperature (°C)	20, 130, 240
Measured location, L (inch)	0.0~2.5 (0.5 step)
Momentum ratio of fuel to air, q_F/A	20, 40, 60
	$u_A=46.7\sim 81.8$ m/s, $u_F=8.9\sim 20.5$ m/s

2.2 실험조건

탄화수소계열 액상연료의 수직분무 특성파악 및 증기농도측정을 위하여 헥산(85% n-hexane, 15% hexane isomers)을 사용하였다 [6]. 실험인자로 주입되는 공기온도는 20°C, 130°C, 240°C로 하였고 연료와 공기의 운동량비($q_{F/A}=\rho_F V^2/\rho_A V^2$)는 20, 40, 60로 하였다. 이때 모형 램젯 연소실(test section)로 분사되는 헥산의 유량을 제어하기 위하여 압력용기에 연료를 넣고 헬륨으로 가압하여 압력계이지와 볼 유량계로 그 양을 조절하였고 분사되는 헥산이 연소실 윗벽에 부딪히지 않도록 실험조건을 정하였다. 헥산증기농도 측정위치는 분사기를 기준으로 하여 후류방향(L(x))으로는 0.5 inch 간격(2.5 inch까지)으로 수직방향(H(y))으로는 0.1 inch 간격으로 정하였다.

3. 실험결과

3.1 적외선 농도측정법의 이론적 배경

탄화수소화합물의 증기 물분율을 정량적으로 측정하기 위하여 적외선 흡수법(infrared extinction method)을 사용하였다 [7, 8]. 특히 헥산 증기의 경우 3.39 μm 의 파장을 가지는 레이저를 조사하였을 때 분자구조상의 C-H 결합 구조가 빛에너지를 받아 늘어나는 성질(C-H stretching)이 있다. 이 때문에 헥산 증기에 흡수되어 줄어드는 레이저 강도의 양은 그 물분율에

비례하게 된다. 반면 632.8 nm의 파장을 지나는 레이저를 조사하였을 때에는 손실 없이 그대로 투과하므로 적외선 흡수법에서는 참조광으로 사용된다. 그러므로 조사되는 레이저의 파장에 따라 선택적으로 흡수 및 투과하기 때문에 이러한 물성을 이용하여 헥산 증기의 농도를 측정할 수 있다. 다음은 증기농도측정에 관한 이론적 수식이다.

먼저 흡수광(3.39 μm)의 강도 표현식은 다음의 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{I}{I_0}(3.39 \mu\text{m}) \\ &= \exp\left(-\overline{C_n} l \frac{\pi}{4} \int_0^x Q_{scattering} D^2 \overline{N(D)} dD\right) \\ & \quad \times \exp\left(-\overline{C_n} l \frac{\pi}{4} \int_0^x Q_{absorption} D^2 \overline{N(D)} dD\right) \\ & \quad \times \exp(-k_v \overline{P_v} l) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 헥산 증기의 광학적 두께(optical thickness)는 다음의 식(2)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \tau_{drop, 3.39 \text{ nm}} &= \overline{C_n} l \frac{\pi}{4} \int_0^\infty Q_{extinction} D^2 \overline{N(D)} dD \\ (\because Q_{extinction} &= Q_{scattering} + Q_{absorption}) \end{aligned} \quad (2)$$

참조광(632.8 nm)의 강도 표현식은 다음의 식(3) 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{I}{I_0}(632.89 \text{ nm}) \\ &= \exp\left(-\overline{C_n} l \frac{\pi}{4} \int_0^x Q_{scattering} D^2 \overline{N(D)} dD\right) \\ &= \exp(-\tau_{drop, 632.8 \text{ nm}}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 I은 레이저가 투과하는 헥산 증기유동장의 특성길이이다.

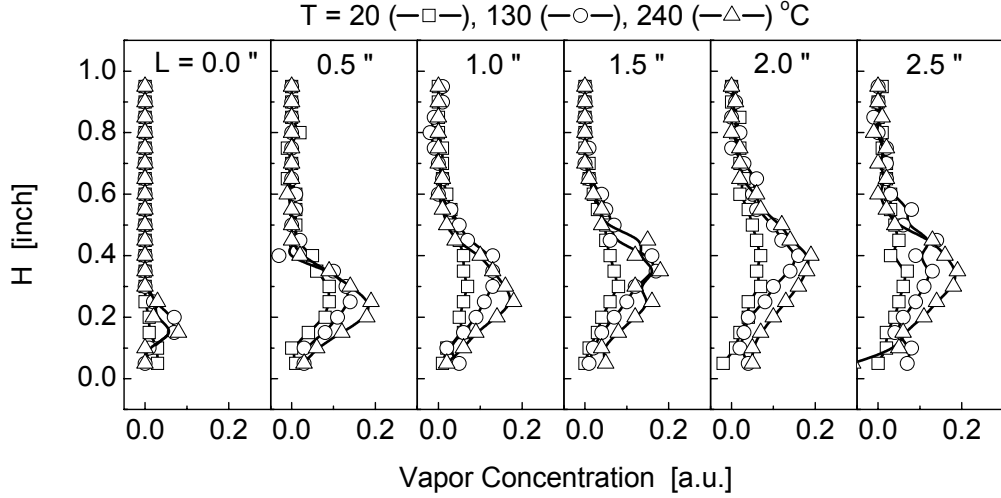


Fig. 4 The distribution of hexane vapor concentration, as going downstream with a step of 0.5 inches, when inlet temperature was varied in 20, 130, and 240 °C.

식(1)과 (2)에서 다음의 식(4)가 유도된다.

$$\begin{aligned}
 \overline{P}_v &= \frac{1}{k_v l_v} \left\{ -\tau_{drop, 3.39 \mu m} - \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{3.39 \mu m} \right\} \\
 &= \frac{1}{k_v l_v} \left\{ -\tau_{drop, 632.8 nm} \left(\frac{\tau_{drop, 3.39 \mu m}}{\tau_{drop, 632.8 nm}} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{3.39 \mu m} \right\} \\
 &= \frac{1}{k_v l_v} \left\{ -\ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{632.8 nm} \times R \right. \\
 &\quad \left. - \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{3.39 \mu m} \right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 두 과정의 광학적 두께 비는 다음의 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\int_0^\infty (Q_{extinction})_{3.39 \mu m} D^2 \overline{N(D)} dD}{\int_0^\infty (Q_{extinction})_{632.8 nm} D^2 \overline{N(D)} dD} \\
 &= \frac{\tau_{drop, 3.39 \mu m}}{\tau_{drop, 632.8 nm}} \rightarrow 1
 \end{aligned} \tag{5}$$

따라서 hexan 증기 물분율을 구하기 위한 이론식은 아래의 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\overline{P}_v = \frac{1}{k_v l_v} \left\{ -\ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{632.8 nm} - \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)_{3.39 \mu m} \right\} \tag{6}$$

3.3 온도 변화에 따른 hexan 농도 실험적 측정

Figure 4는 연료-공기 운동량비를 고정하였을 때 온도변화에 따른 증기 hexan 농도분포를 보여 준다. 분사기 출구에서 후류(downstream)로 갈수록 전체 증기의 양은 증가하고 있고 또한 Fig. 5에서 보듯 각각의 단면에서 증기농도의 최고 강도위치는 후류로 갈수록 높아짐을 알 수 있다. 액체상태의 hexan이 증기가 되는 과정에는 열이 큰 영향을 미치므로 액주보다는 상대적으로 표면적이 넓은 액적이 상변화하기 쉽다. 그러므로 각각 단면에서의 농도분포는 액적분포에 영향을 받는다. 여기서 각각의 액적은 연료 및 공기의 관성력과 표면장력, 점성력의 상호작용으로 액주에서 분열되므로 액적의 분포는 분무계적에 따라 달라진다 [9-11]. 그러므로 Fig. 4에서

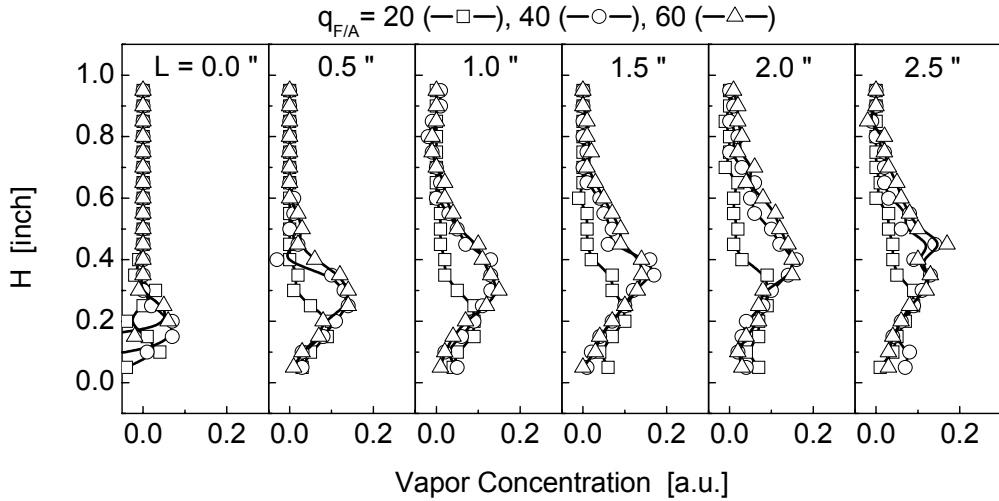


Fig. 5 The distribution of hexane vapor concentration, as going downstream with a step of 0.5 inches, when the momentum ratio of hexane to air was changed in 20, 40, and 60.

보통 연료-공기 운동량비가 일정할 경우 hexan 증기의 최고 농도위치나 각각 단면에서 유사한 증기분포 양상을 설명할 수 있다. 반면 Fig. 4에서 온도 증가에 따라 hexan 증기 농도분포가 증가함을 볼 때 증발율(evaporation rate)에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 온도임을 알 수 있다.

3.4 운동량 변화에 따른 hexan 농도 실험적 측정

Figure 5는 연소실로 공급되는 공기의 온도를 고정하였을 때 연료-공기 운동량비 변화에 따른 증기 hexan의 농도분포를 보여준다. hexan 증기물 분율은 분사기에서 후류로 갈수록 증가하고 연료-공기 운동량비 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 그러나 운동량비가 40과 60을 비교해 볼 때 증기농도는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 측정위치에 따른 hexan 증기농도의 최고 강도 위치 비교에서도 확인할 수 있다. 연료-공기 운동량비가 클수록 분사되는 연료의 양이 많아지고 공기 중으로 침투되는 분사각이 커지며 액주 내부의 난류도 증가로 액적분열이 빨라지지만 주위 공기로부터 얻을 수 있는 열에너지의 양이 제한적이므로 증발율에서의 차이는 적은 것으로 생각된다.

3.5 액적궤도와 농도분포 비교

본 연구에서 측정한 hexan 증기농도 분포를 선행연구에서 측정한 액주궤적 실험식과 수치해석적으로 예측한 직경 30 m의 액적의 궤적과 비교해 보았다 [12, 13]. 이 때 사용된 액주궤적 실험식은 다음과 같다.

$$\frac{y}{d} = 3.127 \times q^{0.425} \times \left(\frac{x}{d}\right)^{0.364} \quad (7)$$

Figure 6은 온도 변화가 hexan 증기농도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 공급되는 공기와 분사되는 hexan의 운동량비가 일정하기에 액주의 궤적에는 큰 변화가 나타나지 않았다. 이는 액주궤적이 점성과 표면장력, 관성력의 함수로 표현됨을 고려할 때 온도의 영향은 미미함을 알 수 있다. 반면 온도변화에 따른 증기농도분포는 크게 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 수치해석 결과가 보여주는 직경 30 μm 의 액적궤적은 주입되는 공기의 온도가 20 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 보다 240 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 더욱 낮아졌다. 이는 액적이 주위공기온도에 의해 기화되므로 크기가 작아진다. 그러므로 줄어든 액적질량에 의해 공기와 연료의 운동

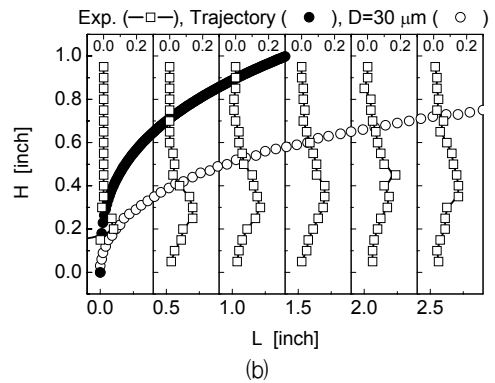
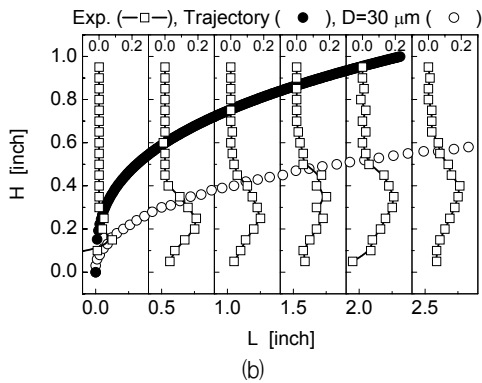
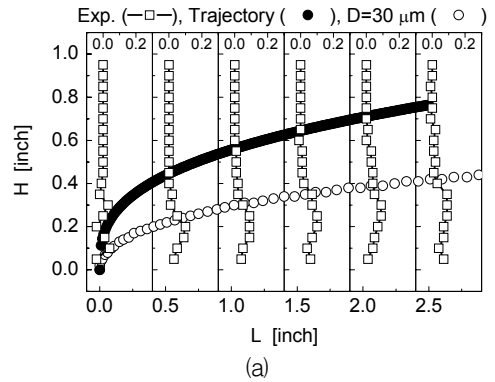
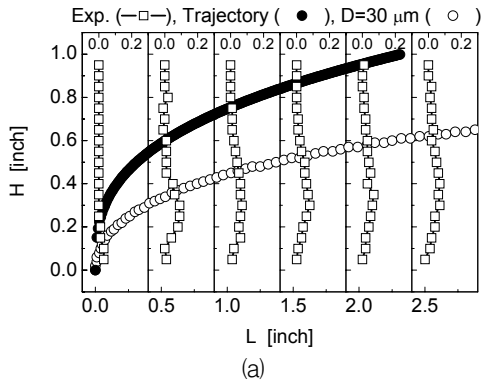


Fig. 6 Effect of temperature variation on vapor concentration distribution, spray trajectory, and a $30\ \mu\text{m}$ single droplet movement at (a) $qF/A=40$ and $T=20\ ^\circ\text{C}$, (b) $qF/A=40$ and $T=240\ ^\circ\text{C}$.

Fig. 7 Effect of momentum ratio variation on vapor concentration distribution, spray trajectory, and a $30\ \mu\text{m}$ single droplet movement at (a) $qF/A=20$ and $T=130\ ^\circ\text{C}$, (b) $qF/A=60$ and $T=130\ ^\circ\text{C}$.

량비($q_{F/A}$)가 줄어들므로 액적궤도가 낮아지는 것으로 생각된다. 실험적으로 측정된 액적궤적식과 핵산증기 농도분포를 비교해볼 때 핵산증기는 주로 액적궤적의 아래쪽에 분포하였으며 분포의 정도는 $20\ ^\circ\text{C}$ 일 때 보다 $240\ ^\circ\text{C}$ 일 때가 보다 아래쪽에 위치하였다. 이는 상대적으로 공기온도가 낮을 때 액주 및 액적들이 분사초기의 고온 공기에 의해 보다 빨리 기화하여 증기 농도분포에 영향을 준 것으로 생각된다.

그리고 연료-공기 운동량비가 큰 경우 측정위치에 따른 핵산증기 농도가 크고 넓게 분포함을 알 수 있다. 이를 분석해 볼 때 공급되는 공기의 온도가 같기에 열에 의한 액체 핵탄의 증발율에는 큰 차이가 없으리라 생각된다. 그러나 Fig. 9에서 보듯 분무궤적과 증기농도분포에서

의 차이는 액체 핵탄의 운동량에 기인함을 추정할 수 있다. 먼저 연료-공기 운동량비가 큰 경우 작은 경우보다 상대적으로 많은 연료가 분사되므로 증발되는 핵탄의 양이 많을 것으로 생각된다. 또한 핵탄 액주의 운동량비 증가로 인해 분열(breakup)되는 액적들(primary/secondary droplets, ligaments)이 많아지고 공기와 접촉하는 액주 및 액적의 표면적이 넓어지므로 핵산증기의 양이 증가할 것으로 생각된다.

Figure 6과 7을 비교해 볼 때 연료-공기 혼합의 관점에서 주입되는 공기의 온도와 연료-공기 운동량비는 연료농도분포의 인자가 되고 이로 인한 혼합기의 분포 및 농도구배는 화염전파속도 및 연소불안정성에 영향을 주므로 추진기관을 설계할 때 운전조건에 따라 적절한 고려가

필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

모형 램젯 연소기에서 공급공기 방향에 수직으로 분사한 액체 핵산의 증기농도 측정을 실험적으로 수행하였다. 적외선 레이저 흡수법을 이용하여 핵산 증기 물분율을 정성적으로 측정하였고 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 참조광(632.8nm)과 흡수광(3.39 μ m)을 이용한 적외선 레이저 흡수법은 핵산 증기 농도측정에 유용한 기법임을 확인하였다.
- (2) 연소기 내부에서 수직, 수평방향으로 측정된 핵산 증기농도는 연료-공기 운동량비가 증가함에 따라 증가하였다.
- (3) 연소기 내부에서 수직, 수평방향으로 측정된 핵산 증기농도는 주입되는 공기 온도가 증가함에 따라 증가하였다.

참 고 문 헌

1. 오정석, 윤영빈, "가스터빈에서의 연소불안정 현상", 한국추진공학회지, 제12권 제4호, 2008, pp. 63~77.
2. 오정석, 김민기, 허필원, 이장수, 윤영빈, "GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기 연구: Part I 운전조건 최적화", 한국추진공학회지, 제12권 제5호, 2008, pp. 43~50.
3. 오정석, 김민기, 허필원, 이장수, 윤영빈, "GE 7FA+e DLN-2.6 가스터빈 연소기 연구: Part II 모형 덤프 연소기 설계", 한국추진공학회지, 제12권 제5호, 2008, pp. 51~59.
4. 임진식, 윤현걸, 김현용, "덕티드 로켓을 이용한 중장거리용 대공 유도무기 소개, 국방과학기술플러스", vol. 57, 2008, pp. 1-12.
5. Jeongseog Oh, Qasim Sarwar Khan,

Youngbin Yoon, "Nitrogen dilution effect on flame stability in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air", Fuel, vol. 89(7), 2010, pp. 1492-1498.

6. Marcus, T., "The Properties of Solvents", Wiley, NY, USA, Series in Solution Chemistry vol. 4, 1998.
7. Drallmeier, J.A., "Hydrocarbon vapor measurements in fuel sprays: A simplification of the infrared extinction technique", Applied Optics, vol. 33(30), 1994.
8. Drallmeier, J.A., "Hydrocarbon-vapor measurements in pulsed fuel sprays," Applied Optics, vol. 33(33), 1994.
9. Faeth, G.M., Hsiang, L.P., Wu, P.K., "Structure and breakup properties in sprays", International Journal of Multiphase flow, vol. 21, 1995, pp. 99-127.
10. Wu, P.K., Kirkendall, K.A., Fuller, R.P., Nejad, A.S., "Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows," Journal of Propulsion and Power, vol.13(1), 1997, pp. 64-73.
11. Deepe, J.M., Lee, J.G., Santavicca, D.A., Lee, W.N., "Effect of weber number on the fuel transfer function for modulated liquid jets", 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA 2006-1223, 2006.
12. Stenzler, J.N., "Modulated jets in a crossflow for active combustion control", Penn state university, Ph.D thesis, 2005.
13. Stenzler, J.N., Lee, J.G., Santavicca, D.A., Lee, W.N., "Penetration of liquid jet in a crossflow", 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, AIAA 2003-1327, 2006.