

# PLIF를 이용한 ATR 연소기 축소모형의 연료분포 측정연구

진유인\* · 양인영\*\* · 최영환\*\* · 양수석\*\*\*

## Measurement of the fuel distribution in a scaled ATR combustor using PLIF

Yu-In Jin\* · In-Young Yang\*\* · Young-Hwan Choi\*\* · Soo-Seok Yang\*\*\*

### ABSTRACT

Mixing performance between fuel and oxidizer is a significant parameter of combustion efficiency and stability in an air-turbo ramjet combustor. Two types of petal mixer were experimented to research the mixing performance. Mixing performance and fuel distribution images were obtained for petal mixers. Planar laser-induced fluorescence(PLIF) was used to obtain 2-D fuel distribution. The obtained images were processed in order to make use of the image information to a quantitative level. The results of analyzing the fluorescence images could be useful to find better mixing performance between mixers.

### 초 록

에어 터보 램제트 엔진 연소기에서 연료와 공기의 혼합성능은 연소 효율과 안정성에 중요한 요인이 된다. 에어 터보 램제트 축소모형의 연소기에서 혼합기에 따른 혼합성능을 파악하기 위하여 두 개의 꽃잎형 혼합기를 제작하였고, 각각에 대하여 연료 분포를 측정하였다. 2차원 연료 분포 측정에는 평면 레이저 유도 형광 기법을 사용하였다. 획득한 아세톤 형광 이미지는 이미지 처리 기법을 사용하여 정량적 연료 분포로 나타내었다. 이러한 연료 분포 이미지를 바탕으로 연료와 공기의 혼합성능이 좋은 혼합기를 알아내었다.

Key Words: Air Turbo Ramjet Engine(에어 터보 램제트 엔진), Planar Laser-Induced Fluorescence(평면 레이저 유도 형광), Mixer(혼합기)

### 1. 서 론

† 2005년 10월 21일 접수 ~ 2005년 12월 8일 심사완료

\* 학생회원, 과학기술연합대학원대학교

\*\* 정회원, 한국항공우주연구원 항공추진그룹

\*\*\* 종신회원, 한국항공우주연구원 항공추진그룹  
연락처, E-mail: youwin1004@hanmail.net

오늘날 스크램제트(scramjet) 엔진이나 복합 사이클 엔진과 같은 고속 추진기관이 로켓을 대신할 차세대 발사체로 거론되면서, 연구자들의 관심이 집중되고 있다. 그중 에어 터보 램제트(air

turbo ramjet; ATR) 엔진은 가스 터빈을 기반으로 하는 공기 흡입형 복합 사이클 엔진의 한 종류로서 다른 복합 사이클 엔진에 비해 간단한 구조를 지니고 있다. 엔진의 개념 설계에 있어 이륙 시점부터 음속 부근까지는 가스터빈엔진과 동일한 추진 시스템을 이용하며, 음속영역 이후로는 램(ram) 압축으로 추력을 발생시켜 정지 상태부터 마하 6 부근까지 넓은 엔진 작동 영역을 가질 것으로 기대되고 있다[1].

고속추진 시스템에서 연소 기술은 시스템 구현을 위해 가장 먼저 해결해야할 연구주제이며, 특히 연소기 내에서의 공기와 연료의 혼합 성능은 중요한 인자로 대두되고 있다. 본 연구의 대상이 되는 ATR 엔진의 경우 산화제와 연료의 유량이 많으며 고속의 유동이다. 기존의 가스터빈에 사용되는 노즐을 사용할 경우, 차압이 증가하므로 동력의 손실이 발생하여 압축기의 효율을 떨어뜨리게 된다. 그러므로 기존의 연료 노즐은 ATR 엔진의 혼합기로 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 기존의 원뿔형 혼합기에 비해 고속 유동에서 혼합 성능이 우수하며 압력 손실이 적은 주름형(lobed-type) 혼합기를 선택하였다[2, 3].

본 연구에서는 주름형(lobed-type) 혼합기의 형상에 따른 혼합 성능을 정량적으로 측정하고 그 결과를 비교하여 혼합기의 설계에 이용하고자한다. 이를 위해 ATR 엔진 실험용 축소 시스템과 2개의 혼합기를 제작하였으며, 연소실 내의 2차원적인 연료 혼합 분포를 측정하기 위해 아세톤을 이용한 평면 레이저 유도 형광 기법(planar laser-induced fluorescence; PLIF)을 적용하였다[4]. 일반적으로 PLIF는 2차원의 정성적 이미지를 얻는 방법으로 알려져 있으나 본 연구에서는 정량적으로 측정하기 위한 방법을 제시하였고, 이를 통해 연소실 내의 혼합 성능을 정량적인 2차원 이미지로 나타내었다.

PLIF는 기저상태(ground state)에 있는 원자나 분자에 레이저 빔을 쏘아 강제로 여기상태(excited state)로 만들고, 여기상태의 원자나 분자가 다시 기저상태로 돌아오면서 발생하는 형

광 신호(fluorescence signal)의 세기를 측정하여 기저상태의 물리량을 간접적으로 측정하는 방법이다. 아세톤에 의해서 발생하는 형광신호에 대한 이론적 관계는 Eq. 1과 같다[5].

$$S_f = \frac{E}{hc/\lambda} n_{opt} dV_c [\chi_{acetone} \frac{P}{kT}] \sigma(\lambda, T) \Phi(\lambda, T, P, \sum_i \chi_i) \quad (1)$$

여기서

$E$  : 레이저 에너지

$hc/\lambda$  : 광자의 에너지

$\lambda$  : 여기 파장

$n_{opt}$  : 측정 장치의 전체효율

$dV_c$  : 측정부위의 부피

$\sigma$  : 분자의 흡수 단면적

$\Phi$  : 형광 양자율 수

$[\chi_{acetone} \frac{P}{kT}]$  : 아세톤의 수 밀도

Wolff 등(1993)은 아세톤과 공기 혼합물의 형광신호가 0.05~30 atm, 300~650 K에서는 압력과 온도에 대하여 중요한 종속성을 가지지 않는다는 것을 보여주었다[6]. Bryant는 아세톤 형광 신호가 아세톤의 농도와 레이저 세기에 비례하다는 것을 실험을 통해 검증하였다[7]. 따라서 측정된 형광 신호의 세기는 기저상태에 있는 물질의 몰 분율에 직접적으로 비례하므로, PLIF는 물질의 농도 측정에 직접적으로 사용할 수 있다[8].

PLIF는 관찰하고자 하는 흐름영역에서 유동에 영향을 주지 않고 그 평면에서의 순간적인 정보를 획득할 수 있다. 또한 다른 레이저 측정 방법에 비해 측정되는 신호의 세기가 강하고, 매우 높은 공간 분해능을 가지며, 측정방법이 비교적 간단하다는 장점이 있다[13].

## 2. 실험 장치

### 2.1 연소기 혼합 실험 모델 및 혼합기



관계로 본 혼합 실험에서는 연료 모사 기체로서 공기를 선택하였다[1]. 다만 이렇게 공기를 연료 모사 기체로 사용할 경우, 난류 전단 혼합에서 중요한 인자가 되는 밀도 차의 영향을 모사할 수 없는 한계가 있다.

공기 공급 장치는 Ingersoll-Rand 사의 50 hP 급 회전 스크류 타입 압축기로서 최대 압력 676 kPaG, 최대 유량 120 g/s를 공급할 수 있다. 또한 안정적인 압력을 공급하기 위해 3 m<sup>3</sup>의 공기 receiver tank를 사용하였고, 정화된 공기를 공급하기 위해 제습기와 필터를 추가하였다. 공급된 공기 중 일부는 아세톤과 혼합되어 연료 모사 기체로 사용하며, 나머지 공기는 산화제로서 혼합기에 공급된다.

아세톤 혼합 장치는 스테인리스 스틸로 만들어진 300 liter 용량의 저장 용기이다. 저장 용기에는 일정 유량의 아세톤을 채워 두고, 용기의 밑면으로부터 공기를 주입하여 아세톤을 증발시킨다. 증발된 공기와 아세톤의 혼합 기체는 상부에 연결된 출구로 분출되게 되며, 이를 연료 모사 기체로 사용한다.

아세톤 혼합 장치에 공급되는 연료 측 유량 조절 장치로는 SIERRA 사의 thermal mass flow meter와 공압용 자동 밸브를 사용하였다. 자동 밸브의 조절은 PID 제어를 통해 수행하였다.

연소기 내로 들어가는 공기 측 유량은 음속 벤추리 노즐(sonic venturi nozzle)과 regulator를 사용하여, 음속 벤추리 노즐의 상류 압력을 조절함으로써 결정하였다.

8개의 T-type 열전대(thermocouple) 및 7개의 압력 센서를 사용하여 장치 내 주요 지점에서의 압력 및 온도를 7 Hz로 측정하였고, A/D 및 D/A 변환기로는 NI 사의 cFP-AI-100, cFP-TC-120, AO-200을 사용하였으며, 제어 및 데이터 획득 프로그램으로는 동 사의 LabView program을 사용하였다.

### 2.3 광학 측정 장치

연소실 내의 형광 이미지를 얻기 위한 광학 측정 장치는 Fig. 3과 같이 레이저, 광학기구, 이

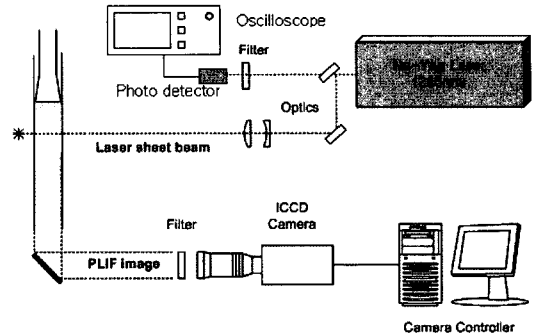


Fig. 3 Configuration of Experimental Apparatus

미지 획득 장치로 구성된다.

아세톤을 여기 시키기 위하여 1064 nm의 파장을 형성시키는 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 또한 Nd:YAG 레이저에 4th harmonic generator를 설치하여 266 nm의 자외선 영역의 레이저 파장을 얻었다. 이 때 레이저의 펄스폭은 3~6 nsec이다.

아세톤의 형광효율(fluorescence efficiency)은 0.2%이고, 4 nsec 이내의 짧은 수명(lifetime)을 갖는다. 아세톤의 흡수 파장대는 225~320 nm에 걸쳐 있으며 270~280 nm 사이에서 최고 값( $\sigma = 4.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )을 가진다[8].

평면 레이저를 만들기 위해서는 원형( $f=1000 \text{ mm}$ ) 렌즈와 실린더 형( $f=100 \text{ mm}$ ) 렌즈를 사용하였다. 포토 디텍터(UV-100BG)는 자외선 통과 필터(UG11, Melles-Griot)를 통과한 레이저 빛을 받아 전압으로 변환한다. 이 값은 PLIF 데이터 처리 시 레이저 펄스 에너지의 변동을 보정하기 위해 사용된다.

이미지 획득 장치는 ICCD 카메라(PI-MAX, Princeton Instruments), UV 렌즈(Nikkor, Nikon), cut-off 파장이 305 nm인 low-pass 필터(WG305), 화상 획득 보드(ST-133 Controller)를 사용하였다. ICCD 카메라와 레이저의 동기화를 위하여 레이저의 트리거 신호를 사용하였으며, 카메라의 펄스 폭은 30 nsec, delay time은 970 nsec로 고정하였다. 이는 아세톤의 형광신호에 비해 수명이 긴 인광(phosphorescence) 신호를 제거하기 위해서다[9].

### 3. 실험조건 및 방법

#### 3.1 실험조건

각 혼합기의 혼합 성능을 파악하기 위하여, 연료(공기-아세톤 혼합 기체)와 산화제(공기)의 유량은 일정하게 유지하고 혼합기를 바꾸어 가며 PLIF 영상을 획득하였다.

아세톤을 이용한 PLIF 기법에서 중요한 것은 실험을 수행하는 동안 공급되는 모사 기체 내의 아세톤 몰 분율을 일정하게 유지하는 것이다. 아세톤 증기압은 온도의 함수로서, Eq. 2와 같이 나타낼 수 있다[10].

$$\log_{10}P(\text{torr}) = 7.125 - \frac{1214.2}{230.0 + T(^{\circ}\text{C})} \quad (2)$$

위의 식으로부터 실험시간 동안 아세톤 혼합 장치 내의 아세톤 온도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다. 본 실험의 경우, 모든 실험에서 아세톤 혼합 장치 내의 온도는  $-7 \sim -8^{\circ}\text{C}$ 를 유지하였다. 또한 아세톤 혼합 장치로 유입되는 연료 모사용 기체의 유량은  $10 \text{ g/s}$ 로 하였으며, 아세톤 혼합 장치 내 압력은 대기압보다 약간 높았다( $3 \text{ kPaG}$ ). 이로부터 실험시간 동안 연료 측의 아세톤 몰 분율은  $5 \sim 6\%$ 로 일정한 것으로 계산되었다. 공기 측의 음속 노즐 입구 압력은  $120 \text{ kPaG}$ 를 유지하였으며, 이는 공기 유량  $70 \text{ g/s}$ 에 해당한다.

실험을 하는 동안 측정된 아세톤 온도, 아세톤 혼합 장치 압력, 아세톤 저장 용기로 주입되는 공기 유량, 음속 노즐을 지나는 공기 유량, settling chamber 내의 온도 등의 표준편차는 평균에 대해 각각  $0.1\%$ ,  $8\%$ ,  $3\%$ ,  $0.2\%$ ,  $0.1\%$ 로 나타났다.

#### 3.2 실험방법

각 혼합기의 혼합 성능을 알아보기 위하여 혼합기 하류에서 유동 방향에 수직인 4개의 평면을 정해 혼합 기체의 PLIF 이미지를 획득하였다(Fig. 4). 또한 본 연구에서는 이미지 보정을 통

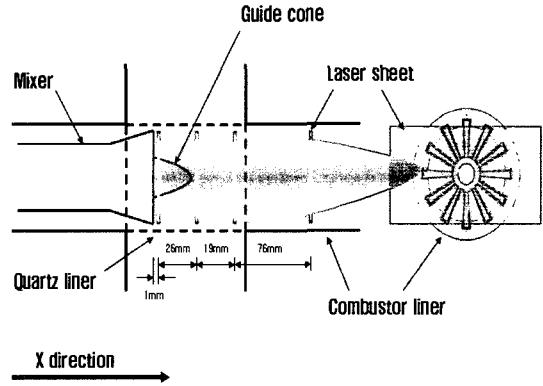


Fig. 4 Configuration of Laser Sheet

해 정량적인 데이터를 획득하기 위한 배경 이미지 및 균일 분포 이미지를 획득하였다. 이러한 이미지 획득은 혼합 기체의 경우와 같은 4개 평면 각각에서 수행하였다. 모든 측정은 각 평면에 대해 40회씩 실시하였다.

### 4. 형광신호 처리

각 혼합기의 혼합 성능을 비교하기 위해서는 실험 후 획득한 형광 이미지에 대한 적절한 이미지 처리가 필요하다. 또한 형광 이미지에 영향을 주는 요인들을 찾아 보정해야 혼합기의 성능을 적절하게 비교할 수 있다. 형광 이미지에 영향을 주는 주요한 원인들로는 펄스 레이저의 세기 변화, 평면 레이저의 공간적 불균일, 가시화창의 곡률에 의한 왜곡, ICCD 카메라에서의 각 픽셀(pixel)들의 감도 차이, 아세톤 첨가제 이외의 물질에 의한 형광 발생 등이 있다[11].

#### 4.1 표준화 (Normalization)

표준화는 각 레이저 펄스의 에너지 변화에 대한 형광 이미지를 보정하기 위한 것이다. 펄스 레이저는 오랜 시간 동안 평균 레이저 세기를 안정하게 유지하지만, 각각의 레이저 펄스의 에너지는 변동이 있을 수 있다. 획득되는 형광 신호는 이러한 레이저의 세기에 비례하므로, 레이저 세기 변동은 형광 이미지의 정확도를 떨어뜨

린다[11].

여기에서는 모든 이미지를 획득할 때마다 동시에 레이저 펄스 세기를 함께 측정하여 이미지를 표준화하도록 하였다. 레이저 광이 최초로 266 nm 거울에서 반사될 때, 2% 정도의 빛은 반사되지 않고 거울을 통과한다. 이 때, 통과한 빛의 세기를 포토 디텍터를 사용하여 측정하도록 하였고, 포토 디텍터를 통해 측정한 레이저 세기와 유동의 형광 신호가 선형성을 갖는지를 확인하였다. Figure 5는 레이저 세기와 형광 신호의 데이터를 직선으로 fitting하고, 이 직선으로부터 20% 이상 벗어나는 값들을 제거한 그래프이다. 이 그래프로부터 레이저 세기와 아세톤 형광 세기 사이의 선형성을 확인하였다.

#### 4.2 배경차감 (Background Subtraction)

PLIF 이미지의 정량화를 위해서는, 획득한 이미지에 형광 신호 이외의 다른 신호 성분은 포함되지 않아야 한다. 본 연구에서는 카메라의 pulse width를 좁게 함으로서 주변의 빛이 카메라에 주는 영향을 최소화 하였고, 필터(WG305)를 사용하여 레이저 신호의 유입을 차단시켰다. 이상적인 경우 아세톤이 존재하지 않는 상태에서 획득한 이미지의 밝기는 0의 값을 가져야 할 것이다.

Figure 6은 산화제(공기) 측에 70 g/s의 일정한 공기를 공급한 상태에서 이미지를 획득하여, 밝기를 환산하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수

있듯이 실제로 획득한 배경 이미지의 값은 0이 아니다. 이는 앞에서 언급했듯이 가시화 창외의 굴곡, 레이저광의 UV 성분, 실험부에 있는 아세톤 이외의 물질 등에 기인한다.

그러나 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 이러한 배경 신호는 레이저의 세기와 무관하게 1% 범위 내에서 일정하게 유지된다. 따라서 혼합 유동의 이미지를 획득하는 각 위치에서 반복 실험을 통한 40 개의 배경 이미지를 얻어 이를 평균하여 평균 배경 이미지를 얻고, 이를 혼합 유동 이미지로부터 차감하는 것으로 배경 신호의 영향을 보정하였다.

#### 4.3 균일 분포 보정(Flat Field Correction)

표준화 및 배경 차감을 한 이후에는 균일 분포 보정을 수행하였다. 이상적인 경우 아세톤이 균일하게 섞인 유동을 연소기에 주입하였을 때, 획득한 형광 이미지는 모든 픽셀 값이 균일해야 한다. 그러나 실제로는 카메라 CCD 소자와 평면 레이저의 불 균일 등의 원인 때문에 픽셀 값이 균일하지 않다. 따라서 형광 신호를 정량적으로 논하기 위해서는 이러한 불균일성 보정이 필요하다.

본 연구에서는 아세톤이 균일하게 섞인 연료 모사 기체를 10 g/s의 유량으로 연소기에 유입시키면서 획득한 형광 이미지를 균일 분포 이미지로 사용하였다. 이러한 균일 분포 이미지는 혼합 기체 이미지를 획득하는 각 측정 평면마다

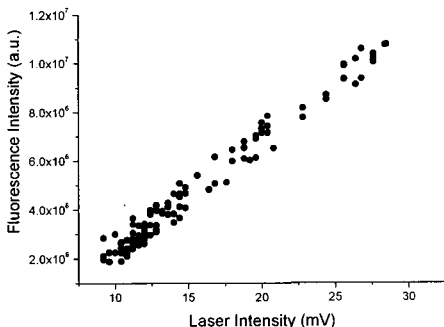


Fig. 5 Correlation of Laser Intensity and Fluorescence Intensity

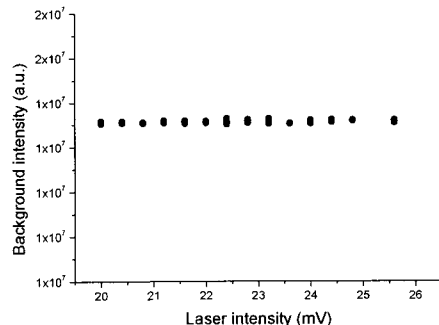


Fig. 6 Correlation of Laser Intensity and Background Intensity

40개씩 획득하고, 이를 평균하여 사용하였다.

4.4 정량화(Quantification)

이상에서 획득한 데이터를 사용하여 혼합 기체 형광 이미지에 대한 정량화를 수행하였다. 정량화를 하기 위해 보존 스칼라인 혼합분율(f) 개념을 사용하였다. 초기 형광 신호에 대한 이후의 형광신호세기는 Eq. 3과 같다[7].

$$\frac{(S_f/E_f)}{(S_f/E_f)_0} = \frac{N_a}{N_{a,0}} F(T, P, \lambda) \quad (3)$$

여기서

$E_f$ : 레이저 세기

$$F = (\sigma_a \Phi) / (\sigma_{a,0} \Phi_0)$$

N: 수 밀도

아래첨자 0: 초기상태

아래첨자 a: 아세톤

온도와 압력의 변화가 거의 없으므로 F=1이 되고, 형광세기는 아세톤의 수 밀도에 비례한다 [7]. Equation 4는 혼합분율에 대한 식이다.

$$f = \left[ \left(1 - \frac{M_B}{M_A}\right) + \frac{M_B}{M_A} \frac{1}{X_A} \right]^{-1} \quad (4)$$

여기서

M: 분자량

X: 몰 분율

아래첨자 A와 B: 기체의 종류

이 실험에서 연료(아세톤+공기, A)와 공기(B)가 사용되므로  $M_A \approx M_B$  이고, mixer 출구의 core에서  $X_A=1$ ,  $X_B=0$ 이므로 Eq. 5를 유도할 수 있다.

$$\frac{N_a}{N_{a,0}} = \frac{N_A}{N_{A,0}} = X_A \frac{pT_0}{p_0T} \quad (5)$$

본 실험은 대기상태에서 실험하므로 온도와 압력이 거의 일정하다. 따라서 Eq. 3, 4, 5로부터 Eq. 6을 얻는다[7].

$$f = \frac{(S_f/E_f)}{(S_f/E_f)_0} \quad (6)$$

혼합기 출구에서 core가 생성되는 지점을 찾았고, 그 지점의 형광세기를 f=1로 정했다.

Figure 7은 연료유로 각도가 7°인 혼합기로부터 27 mm 떨어진 곳의 연소기 내부 단면의 중심을 세로방향으로 가로지면서 나타낸 형광세기이며, 261 pixel 근처에서 core가 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 같은 위치와 단면적에서 가로방향으로 가로지면서 얻은 결과도 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. 두 결과에서 261 pixel 전후 지점을 평균하여 f=1의 세기를 2.34로 결정하였다. 따라서 위에서 언급한 형광신호 처리를 한 이후에 f=1 지점의 형광세기를 나눔으로써 정량화하였다.

정량화의 과정은 Fig. 8의 순서도와 같다. 우선 혼합 기체 이미지 및 균일 분포 이미지에서 평균 배경 이미지를 차감하고 표준화하였으며, 다시 혼합 기체 이미지에서 평균 균일 분포 이미지와 f=1인 지점의 형광세기를 나누어 정량화된 혼합기체 이미지를 얻는다. 이렇게 획득된 40개의 이미지를 평균하여, 주어진 실험 평면에 대한 정량화된 평균 혼합 기체 이미지를 얻었다.

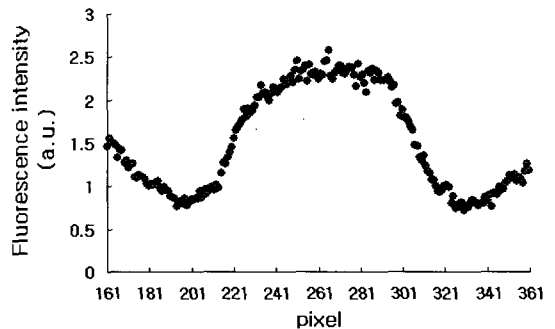


Fig. 7 Fluorescence Intensity around the Core

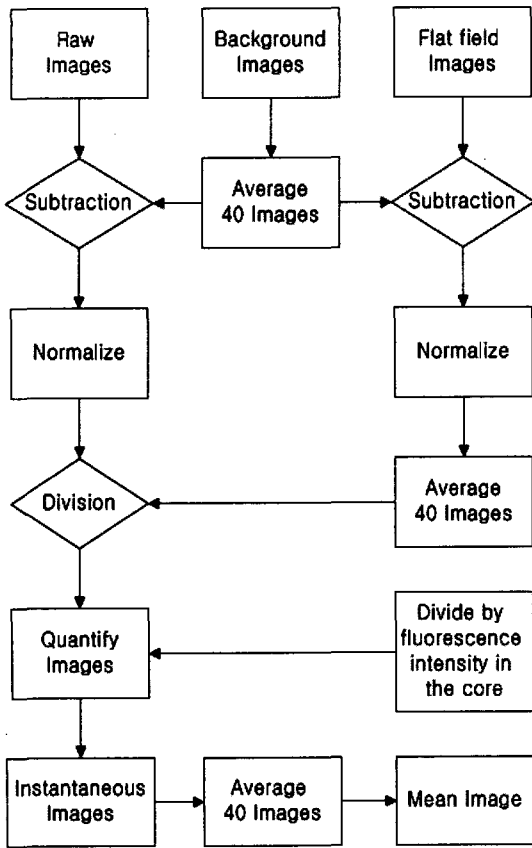


Fig. 8 Flow Chart of Image Processing

5. 실험 결과 및 분석

형광신호 처리를 하여 얻은 평균 연료분포 이미지가 얼마나 일관성이 있는지 알아보기 위하여 같은 실험조건에서 측정을 10회 반복하였다. 그 결과 배경차감과 표준화를 통하여 얻은 평균 균일 분포 이미지에서 형광세기 평균분의 표준편차는 7%였고, 균일 분포 이미지를 보정하여 최종적으로 얻은 평균 연료분포 이미지는 6%를 나타냈다.

$f=1$ 인 지점은  $X_F=1$ 이므로 정량화된 이미지의 세기로부터 아세톤의 농도를 유추할 수 있다.

Figure 9는 혼합기 출구로부터의 거리에 따른 평균 혼합 기체 이미지이며, index의 1과 0은 각각  $X_F=1$ ,  $X_F=0$ 을 나타낸다. 앞에서 이미 설

명한 것과 같이 7°, 12°의 연료 유로를 갖는 Mixer 1과 2는 모두 하류로 갈수록 연료가 혼합되면서 분포가 균일해지는 것을 관찰할 수 있다. Figure 9에서 혼합기로부터 1 mm 떨어진 지점에서 획득한 이미지들은 하류의 다른 이미지들과 크게 다르게 나타났다. 본 실험에서 레이저는 오른쪽으로부터 입사되며, 출구로부터 약 25 mm 지점까지 guide cone이 있기 때문에 1 mm 지점에서 획득한 형광 이미지들은 왼쪽 부분이 잘려진 것처럼 보이게 된다. 이로 인해 출구로부터 분사된 아세톤은 레이저에 충분히 여기 되지 못하게 되어 연소실 하류에 비해 전체적으로 작은 형광 이미지 세기를 가지게 되므로(Table 1) 이 영역에서 구해지는 값들은 정량화 대상으로 고려되지 않는다. 하지만 혼합기의 형상이 다른 위치에 비해 뚜렷하게 보이므로 혼합이 거의 일어나지 않았음을 확인할 수 있다.

또한, 각 이미지마다 혼합기의 tip 부분에서 연료 농도가 높게 나타났다. 이는 혼합기가 tip 부분에서 슬롯의 폭이 더 넓은 형상이기 때문이다.  $x = 122$  mm 지점까지 mixer 1 과 mixer 2는 혼합기 tip 부분 및 중심 부분의 농도를 높게 유지함을 알 수 있으며, 전체적으로 연료와 공기의 혼합은 원주 방향으로 활발하나 반경 방향으로 활발하지 못함을 알 수 있다. 따라서 혼합기의 중심 부분은 연료 유로 면적을 더 줄여야 함을 알 수 있다.

Table 1은 각 위치에서 형광 세기의 총합을 나타낸 표이다. 형광세기의 총합은 아세톤의 수 밀도와 비례하는 값이므로, 아세톤 분자의 수 밀도가 보존된다고 하면 이 값이 일정해야 할 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 Mixer 2의 27 mm 지점은 다른 값에 비해 크게 나타났으며, 전반적으

Table 1. Fluorescence Intensity Summation of Mean Images at Each Position(  $\times 10^4$  )

	1 mm	27 mm	46 mm	122 mm
mixer 1	1.8823	3.8814	3.8347	3.8502
mixer 2	3.1511	5.1147	4.2076	4.2773



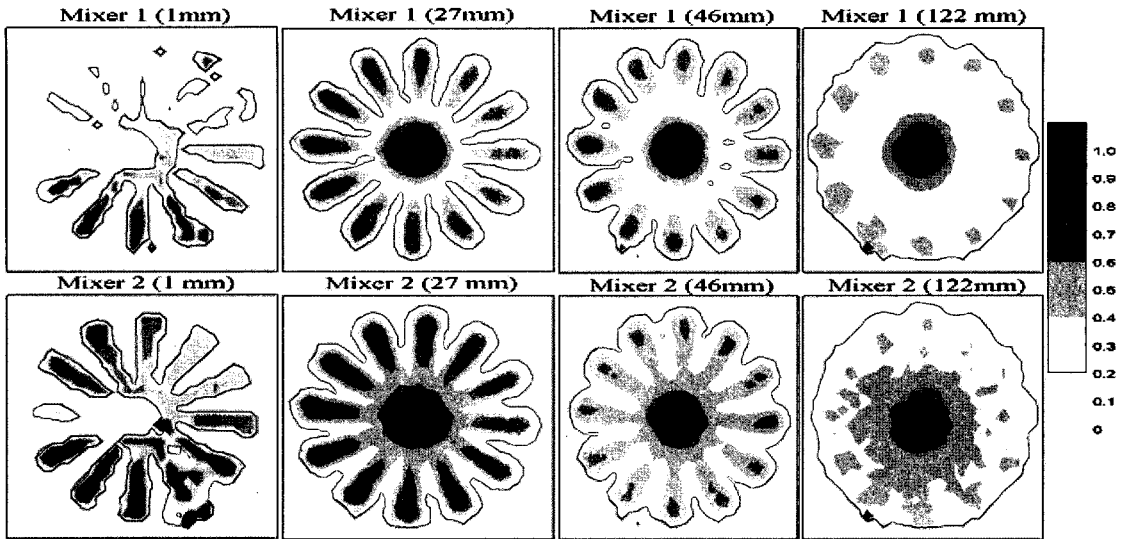


Fig. 9 Fuel Distribution along the Flow Direction

로 Mixer 1보다 Mixer2의 값이 큼을 확인할 수 있다. 이는 혼합기에 의해 실험하는 부위의 온도와 압력에 변화가 생기고, 카메라에 도달하기 전에 감쇠되는 아세톤 형광세기의 비율 등에 의한 원인으로 추정된다. 하지만 Mixer 1에서 1 mm 위치를 제외한 곳의 값들은 큰 차이가 없으며, 이는 본 실험에서 획득/처리한 이미지의 질(quality)을 다시 한 번 확인할 수 있는 증거라 하겠다.

Table 2는 각 위치의 단면에서 형광신호의 표준편차를 평균으로 나눈 값이다. 형광신호의 세기가 아세톤의 농도이므로 혼합이 잘 되어 있는 영역은 평균에 대한 표준편차비가 작을 것이고 혼합이 되어 있지 않은 부분은 그 값이 클 것이다. Figure 9에서 관찰되듯이 Table 2에서 Mixer 2의 값이 Mixer 1보다 더 작게 나왔다. 따라서 Mixer 2의 혼합성능이 더 좋음을 알 수 있다.

각각의 혼합기는 연료 유로 각도의 차이로 인해 출구에서의 연료 유로 단면적이 다르게 되며, 결과적으로 Mixer 1의 연료 유로 단면적이 Mixer 2보다 작다. 실험에서 산화제 및 연료의 유량과 혼합기 출구에서의 각 유로의 단면적, 온도, 압력 조건을 알고 있으므로 이로부터 혼합기 출구에서의 속도를 계산하였다(Table 3). 연료에

대한 산화제의 속도 비(velocity ratio)는 Mixer 2가 Mixer 1보다 더 큼을 알 수 있고, 이는 이전의 실험 결과에서도 확인할 수 있었다[12]. 따라서 이로부터 속도 비가 1에서 멀어질수록 혼합 성능이 좋아짐을 알 수 있다.

Table 2. Standard Deviation/Average at Each Position

	1 mm	27 mm	46 mm	122 mm
mixer 1	1.3185	0.7218	0.6049	0.3544
mixer 2	1.0305	0.5992	0.4994	0.3106

Table 3. Fuel and Oxidizer Velocity and Velocity Ratio

	$V_f$ (m/s)	$V_a$ (m/s)	$r = \frac{V_a}{V_f}$
mixer 1	16.7	19.9	1.19
mixer 2	10.0	23.0	2.30

## 6. 결 론

본 연구에서는 아세톤 PLIF를 사용하여 ATR

연소 실험 모델에서 두 가지 형태의 혼합기의 혼합 성능을 정량적으로 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

PLIF 실험을 통하여 정량적 형광 이미지를 얻기 위해서는 레이저 세기의 변동에 대한 보정, 배경 이미지의 차감, 레이저와 CCD 카메라 소자의 불균일성 보정이 필요하였으며, 이를 수행하였다.

본 연구에서 획득한 연료분포 값은 core에서 획득한  $X_F=1$ 의 상대적인 값이므로 연료분포의 변화를 관찰할 수 있다. 그러나 이러한 조건이 성립하기 위해서는 측정단면의 형광신호의 총합이 서로 같아야 한다. Mixer 1의 경우는 그 값이 위치에 따라 거의 일정하였기 때문에 정량화를 성공적으로 할 수 있었다.

두 가지 형태의 혼합기에 대하여 연료 분포 성능을 알아보았고 연료에 대한 산화제의 속도비가 1에서 멀어질수록 혼합 성능이 우수하다는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 산화제의 속도가 너무 커지면 연소기 내에서 연소 성능이 떨어질 수 있으므로 최적화된 선택이 요구된다.

본 실험 조건에서는 혼합기의 영향으로 인한 실험 부위의 온도와 압력에 대한 영향을 고려하지 않았고, 이러한 영향으로 Mixer 2의 형광신호 합이 Mixer 1보다 크게 나왔다고 추정된다. 또한 본 실험에서는 측정 부위와 카메라 사이의 거리가 멀어서 형광신호가 중간에 damping out 되는 현상도 고려하지 않았다. 그래서 Mixer 2의 경우 27 mm 지점에서 보다 큰 값이 나왔다고 추정된다.

정량화를 위해 혼합분율의 개념을 도입했지만 측정부위의 정확한 온도와 압력을 알아야만 정확한 혼합분율을 획득 할 수 있으며, 각각의 혼합기에 대한 총합이 같아야만 명확한 비교를 할 수 있다. 따라서 향후 온도와 압력의 영향을 고려한 실험이 추가적으로 이행 되어야 할 것이다. 또한, 측정부위와 카메라의 거리를 짧게 하고 형광신호가 유동의 영향을 받지 않도록 축 방향에 대한 수평단면 화상을 찍어서 형광신호가 얼마만큼 damping out 되는지 파악하는 실험이 필

요하겠따.

향후 PLIF의 정량적인 기법을 보완하여 ATR 연소실험 모델의 혼합기 시제품 제작에 그 결과를 반영할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원 "에어 터보 램 제트 엔진 요소기술 개발" 과제로 진행되었으며, 이와 관련하여 다 방면으로 도움을 주신 항공추진그룹 분들에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 차봉준 외, "에어 터보 램 제트 엔진 요소기술 개발," 공공기술연구회 보고서, 2001.
2. 차봉준 외, "에어 터보 램 제트 엔진 요소기술 개발," 공공기술연구회 보고서, 2003.
3. A. R. Srikrishnan, J. Kurain, V. Sriramulu, "Experimental Study on Mixing Enhancement by petal nozzle in supersonic flow," Journal of Propulsion and Power, Vol. 12, No. 1, pp.165-169, 1996.
4. P. J. Rubas, M. A. Paul, G. C. Martin, R. E. Coverdill, R. P. Lucht, J. E. Peters, "Methane Jet Penetration in a Direct-injection Natural Gas Engine," SAE 980143, 1998.
5. M. C. Thurber, "Acetone laser-induced fluorescence for temperature and multiparameter imaging in gaseous flows," Topical report TSD-120, 1999.
6. D. Wolff, H. Schluter, V. Beushausen, P. Andresen, "Quantitative Determination of Fuel Air Mixture Distributions in an Internal Combustion Engine Using PLIF of Acetone," Ber. Bunsenges. Phys. Chem., Vol. 97, pp.1738-1741, 1993.

7. R. A. Bryant, "Planar laser induced fluorescence images of fuel mixing and the reaction zone in a supersonic combustor," a dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for Ph.D in the University of Michigan, 1998.
8. A. Lozano, B. Yip, R. K. Hanson, "Acetone : a Tracer for Concentration Measurements in Gaseous Flows by Planar Laser-induced Fluorescence," Experiments in Fluids, Vol. 13, pp.369-376, 1992.
9. J. Heicklen, "The Fluorescence and Phosphorescence of Biacetyl Vapor and Acetone Vapor," The Journal of Chem. Soc., Vol. 81, pp.3858-3863, 1959.
10. D. Ambrose, C. H. S. Sprake, R. Townsend, "Thermodynamic Properties of Organic Oxygen Compounds - XXXIII. The Vapour Pressure of Acetone," The Journal of Chem. Thermodynamics, Vol. 6, pp. 693-700, 1974.
11. J. D. Hiltner, "The impact of fuel distribution on cyclic combustion variations in a natural gas fueled spark ignition engine," a dissertation for Ph.D in the Graduate School of The Ohio State University, 1997.
12. 박승재 외, "PLIF를 이용한 ATR 연소기 내부의 연료분포 측정," 한국추진공학회 추계 학술대회논문집, pp.274-277, 2004.
13. 정기훈 외, "PLIF 기법을 이용한 액체로켓 용 충돌분사 인젝터의 분무분포 특성 해석," 한국추진공학회지, 제4권1호, pp.36-45, 2000.