大韓環境工學會誌 · 論文 - Original Paper - 442～448. 2009.

동시 시계열 계측에 의한 예혼합 분무화염 내 유적군 연소기구의 평가

황 승 민

호서대학교 벤처전문대학원 보건환경학과

(2008년 11월 19일 접수, 2009년 6월 22일 채택)

Evaluation of Combustion Mechanism of Droplet Cluster in Premixed Spray Flame by Simultaneous Time-Series Measurement

Seung-Min Hwang

Department of Heanth Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University

ABSTRACT : To evaluate the combustion mechanism of each droplet cluster downstream of the premixed spray flame, the simultaneous time-series measurements were conducted by using optical measurement system consisting of laser tomography, multi-color integrated Cassegrain receiving optics (MICRO) and phase Doppler anemometer (PDA). Furthermore, the group combustion number of droplet cluster was estimated experimentally, and the combustion mechanism of droplet cluster was examined applying the theoretical analysis. The group combustion number, G_c, was experimentally estimated about all droplet cluster verified by planar images, and it was classified into the internal group combustion mode and the external group combustion mode according to the theoretical analysis. It is found that there are cases in which the group combustion number estimated experimentally for droplet cluster agree or disagree with the classification by theoretical analysis. The reason of disagreement is considered due to that the group combustion number was only estimated by the geometrical arrangement of droplets in cluster, and that the actual phenomenon is three-dimensional but the measurement system is two-dimensional.

Key Words : Premixed Spray Flame, Group Combustion, Droplet Cluster, Optical Measurement, Simultaneous Time-Series Measurement

요약 : 예혼합 분무화염의 유적군 연소 기구를 평가하기 위하여 레이저 가시화법, MICRO (multi-color integrated Cassegrain receiving optics) 및 PDA (phase Doppler anemometer) 광학계측 시스템을 이용하여 동시 시계열 계측을 실시하였다. 또한 유적군의 군연소수를 실험적으로 산출하여 이론해석에 적용하였을 경우 실제로 관찰되는 군연소 형태와 일치하는지에 대하여 검토하였다. 유적군 단면화상에 의해 확인된 모든 유적군에 대하여 실험적으로 군연소수 G_c를 산출한 결과 주로 내부 군연소와 외부 군연소로 분류되었으며 이론해석과 일치하였다. 또한 실제 관찰된 군연소 형태와 그 유적군의 군연소수를 이론해석에 적용한 경우에 군연소 형태가 일치하는 경우와 일치하지 않는 경우가 있었다. 일치하지 않는 원인은 군연소수를 유적의 기하학적 배치만으로 결정한 것이나 현상의 3차원성이 측정 결과에 영향을 미친 것이라고 생각되어진다.

주제어 : 예혼합 분무화염, 군연소, 유적군, 광학계측, 동시 시계열 계측

1. 서 론

에너지 문제가 심각해지는 요즘 에너지 획득을 위한 새로운 기술개발이 각 방면으로 급속하게 진행되고 있다. 그러나 신기술의 확립 및 실용화 측면에 있어서 아직 많은 시간이 필요하며 앞으로도 석유나 석탄을 비롯한 화석연료의 이용에 크게 의존해 갈 것으로 예상 된다.[1,2] 이러한 상황 하에서 최근에 지구환경 오염이나 공해문제 대응책의 하나로서 연소 배출물에 대한 규제강화가 행하여지고 있으며 그 규제치는 점점 더 강화되어지고 있다. 또한 저공해화에 대한 연소기술의 요구도 한층 엄격함을 더하고 있다. 이러한 요구에 부응하여 친환경적이며 고효율적인 연소를 실현하기 위해서는 유해한 연소 배출물을 제거하기 위한 후처리 기술개발뿐만이 아니라 연소현상 그 자체에 대한 제어가 필수 불가결하다.

연소 기술 중 분무 연소(spray combustion)는 응답성이 좋고 고부하 연소가 가능하며 가스터빈 등의 에너지 변환장치나 로켓트 엔진 등의 추진장치를 비롯하여 많은 공업장치에 폭넓게 이용되어지고 있다. 그러나 분무연소는 액체연료의 미립화, 액적의 분산, 연료증기의 증발 및 공기와의 혼합이라고 하는 많은 소과정이 동시에 진행되면서 연소반응을 일으키기 때문에 그 화염구조는 매우 복잡하며 이들 과정을 제어하는 기초적인 물리현상은 아직 불명확하다.[3~6] 또한 이와 같은 화염구조의 복잡성은 CO, HC, NOx 및 입자상 물질(PM) 등과 같은 유해가스 생성에 크게 영향을 미치며, 따라서 효율적이고 친환경적인 연소기의 설계나 운전을 위해서는 분무연소 구조를 정확히 예측

† Corresponding author
E-mail: hwangsm@hoseo.edu
Tel: 02-523-3015 Fax: 02-2055-1405

할 필요가 있다.

연료분무 중에는 크고 작은 입경을 갖는 여러 유적(droplet)이 존재하며 유동장에 대한 추종성이 다르기 때문에 분무류 중에는 필연적으로 불균일한 유적 수밀도장이 형성된다. 예를 들어, 1 mL의 액체연료가 입경 20 μm의 유적으로 미립화 되었다고 하면 약 2.4억 개의 유적이 생성되어지며 실제 분무화염 중에는 천문학적인 수의 유적이 존재하게 된다. 더욱이 미립화에 의해 생성되는 유적은 본질적으로 입경분포를 가지며 이 입경분포의 차이가 현상을 더욱 복잡화하는 원인이 된다.[4,5]

이와 같이 분무류 중에는 유적 수밀도가 높은 영역이 존재하며 이러한 유적의 밀집효과는 국소적으로 연료 과농영역을 만들어 내는 결과가 된다. 유적의 밀집영역 내부에서는 산소가 부족하며 화염이 그 내부에 진입하기 어렵기 때문에 유적군(droplet group)은 하나의 커다란 군화염(group flame)을 형성하여 확산적인 연소형태를 이룬다. 그러나 형성된 유적군이 모두 이와 같은 군연소 형태를 나타내는 것은 아니며 유적군 내에 포함된 유적 총수나 유적간 거리의 차이, 즉 유적의 수밀도 차이에 의해 연소형태가 변한다. 이러한 점에 입각하여 Chiu 등은 유적의 군연소(group combustion) 형태를 모델화하여 이론 해석하였다.[7,8]

이에 대하여 Akamatsu 등은 분무화염 중에 있어서 유적의 군연소 거동을 실험적으로 해명하였다.[9~12] 그들은 시간 평균적 통계량의 측정뿐만 아니라 고시간·고공간 분해능을 갖는 다채널의 동시 시계열(simultaneous time-series) 데이터를 상세히 해석하여 군연소 가설을 실험적으로 입증하는데 성공하였다. 그 결과, 분무화염은 Chiu 등이 당초 제시한 유적군 연소의 개념을 훨씬 뛰어넘는 복잡한 구조를 갖고 있는 것을 알았다. 즉, 분무화염은 단적연소(single droplet combustion)의 집합체가 아닌 유동장 중의 난류나 유적간 상호 간섭의 영향이 분무화염의 연소특성을 지배하고 있으며 분무의 불균일성이 만들어낸 군거동의 시간적·공간적 변화가 분무 연소기구와 깊게 결부되어 있다는 사실 등을 밝혔다. 그러나 유적군의 길이 스케일, 즉 유적군을 구형으로 가정한 직경을 검출된 국소 Mie 산란광의 지속시간과 유적속도의 곱으로 계산하여 군연소를 산출하였기 때문에 실제 화염 중에 있어서 유적군의 군연소수를 산출하기 위해서는 분무 단면화상으로 유적군의 형상을 확인하고 그것으로부터 유적군의 길이 스케일을 구할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 보다 정확한 유적군의 군연소수(group combustion number)를 산출하기 위해 분무 단면화상으로 유적군의 형상을 확인하고 그것으로부터 유적군의 길이 스케일을 구할 필요가 있다고 생각하여 소형 모델버너를 이용한 예혼합 분무화염(premixed spray flame)을 대상으로 고정밀도의 광학계측에 의해 화염구조를 상세히 평가하고 그 연소 기구를 해명하였다. 또한 복수 물리량의 순간값을 동시 시계열로 측정하여 유적군의 군연소 거동을 실험적으로 해명하고 Chiu 등의[8] 이론해석에 적용하였을 경우 실제로 관찰되는 군연소 형태와 일치하는지에 대해 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 예혼합 분무버너

본 연구에서 이용한 예혼합 분무버너의 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 예혼합 분무버너는 주류 버너포트(내경 52.7 mm)와 주위에 폭 1 mm의 환상수소 확산 파이롯트 버너로 구성되어 있다. 또한 그 주위에는 내경 58.7 mm, 외경 80.9 mm의 환상유로로 이루어져 있으며 주류와 동축·동속의 공기류를 공급하는 것에 의해 화염을 안정화시킴과 동시에 분무유선의 확대를 억제하는 구조로 되어 있다. 또한 이 버너는 등유뿐만 아니라 연소용 공기의 유로에 프로판(C_3H_8) 유로를 연결하는 것으로 프로판을 연소용 공기에 예혼합하여 프로판-등유의 기·액 혼합연소 화염을 형성하는 것도 가능하다.

주류 공기는 송풍기로부터 진동억제 용기를 통과한 후 오리피스를 지나 버너 하부에서 공급되어 연료분무와 혼합되어지며 예혼합 분무류로서 버너포트로부터 윗 방향으로 분사된다. 또한 파이롯트 화염용 수소(H_2)는 오리피스를 지나 환상 파이롯트 버너포트로부터 공급된다. 액체 연료인 백등유는 연료펌프에 의해 버너포트 상류 440 mm 위치에 설치된 이유체 분무노즐로 공급되어지며 컴프레서로부터 승압되어진 분무용 공기에 의해 미립화 된다.

본 연구의 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 연소용 공기의 출구단면 평균유속을 5.5 m/s, 등유-공기 질량 유량비를 0.045 kgfuel/kgair(공급당량비 약 0.75에 상당), 이유체 분사노즐의 분무용 공기압력을 0.4 MPa로 하였다. 계측시 좌표계는 버너포트 출구의 중심을 원점으로 하여 화염 하류방향을 h축, 반경방향을 r축으로 하였다.

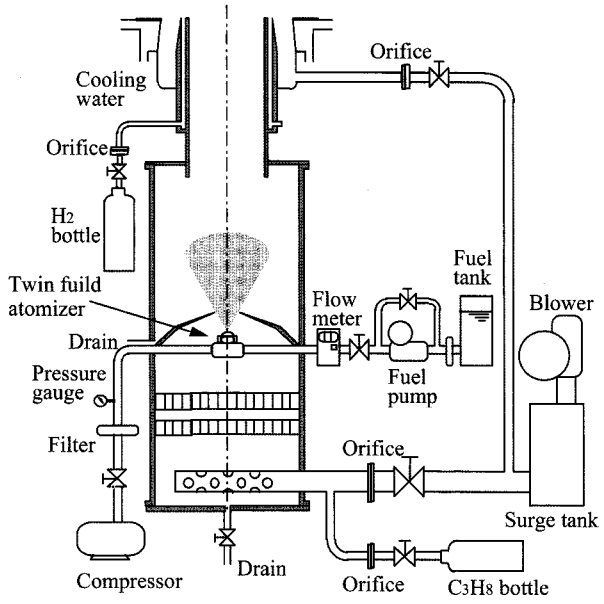


Fig. 1. Configuration of premixed spray flame.

Table 1. Experimental conditions

Nominal bulk velocity of the main airflow	5.5 m/s
Liquid fuel	Kerosene
Kerosene-to-air mass ratio	0.45 kg/kg
Bulk equivalence ratio	0.75
Atomizing pressure	0.4MPa

2.2. 광학계측 시스템

본 연구에서는 예혼합 분무화염 하류영역에 대하여 고속도 CCD (charge-coupled device) 카메라를 이용하여 유적군 전체의 분무 단면화상을 시계열 촬영하였다. 그와 동시에 PDA (phase Doppler anemometer)에 의한 유적군 내부의 유적입경 및 속도의 2신호와 국소 화염 자발광 집광광학계(multi-color Cassegrain receiving optics; MICRO)[13,14]에 의해 집광되어진 OH라디칼 자발광 신호, CH밴드 화염 발광 신호와 레이저 시트에 의해 조사되어진 유적으로부터의 Mie 산란광 신호의 3신호를 더해 총 1화상, 5신호의 동시 시계열 측정을 실시하였다.

Fig. 2에 동시 시계열 측정의 개략도를 나타내었다. Ar^+ 레이저(Spectra Physics, BeamLok 2080)의 시트광에 의해 조사된 유적의 Mie 산란광 화상은 광간섭 필터, 이미지 증폭장치(I.I)를 통하여 레이저 시트에 수직방향으로 설치된 고속도 CCD 카메라(Kodak, Ektapro HS Model 4540)에 의하여 프레임 레이트 13,500 fps로 4,096장(촬영시간 0.303초) 연속촬영 된다. 화상 데이터는 유효 화소수 128×128 pixel(실공간 30×30 mm)로 8비트($2^8=256$)로 변환되어 디지털로 기록되어진다.

MICRO에 의해 집광된 다색 혼합광은 광화이버를 지나 고속파장 분리기에 보내져 OH발광용 필터(중심파장 306.6 nm, 반치폭 9.3 nm), CH밴드 발광용 필터(중심파장 431.1 nm, 반치폭 3.0 nm) 및 Mie 산란광용 필터(중심파장 488.1 nm, 반치폭 1.0 nm)에 의해 각 파장으로 분리된다. 분리 후의 각 파장성분의 광은 광전자 증폭배관에 의해 전류신호로 전환된 후 I/V 변환기에 의해 전압신호로 변환되어 샘플 레이트 20 kHz로 A/D 컨버터에 기록된다.

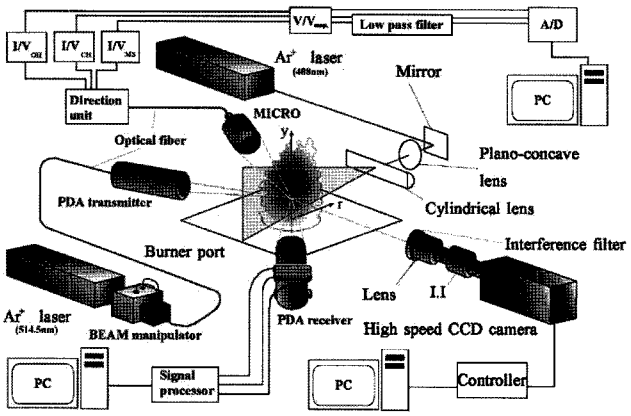


Fig. 2. Schematic diagram of simultaneous measurement system.

PDA 광원에는 Ar^+ 레이저(Spectra Physics, Stable 2017, 발진파장 514.5 nm)를 이용하였다. 송광계로부터 나온 레이저는 측정점에서 교차하고 그 측정체적을 통과하는 연료유적으로부터의 도플라 신호가 수광계의 광전자 증배관에 검출된다. PDA 계측은 화상촬영 영역의 중심에 위치하는 한 점, 즉 r = 0 mm, h=100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 mm의 7점에서 고속도 CCD 카메라에 의한 분무단면 계측과 MICRO의 계측과 동기 시켜 동시에 계측하였다.

화상촬영 장치와 A/D 컨버터의 동기에는 2대의 펄스 딜레이 제네레이터(pulse delay generator; Stanford Research System, WC Model DG535)를 이용하였다. 화상중심의 h 좌표를 대표높이 hr로 하여 화상촬영 영역은 유적군이 빈번히 관찰되는 r = -15 ~ 15 mm, hr = 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 mm의 7영역으로 하였다.

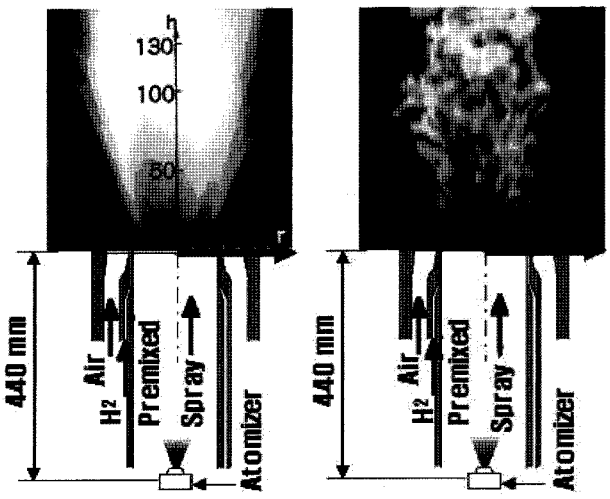
3. 결과 및 고찰

3.1. 분무화염의 가시화

Fig. 3에 버너에 형성된 분무화염의 직접사진을 나타내었다. (a)는 비교적 긴 로광 시간(1/15초)으로 촬영된 것으로 눈으로 관찰한 화염 외관에 상응한다. 이 사진만으로 판단하면 분무화염도 기체연료의 화염과 같이 일정한 화염구조를 갖는 것으로 생각 할 수 있다. 그러나, (b)에 나타낸 화염의 단시간 로광 사진(1/1000초)을 보면 순간적으로 상당히 랜덤한 휘염군이 다수 존재하고 있으며 분무화염은 시간적으로도 공간적으로도 상당히 불균일한 구조를 갖고 있는 것을 알 수 있다.

3.2. 군연소수 유도

Chiu 등의 이론해석[7,8]에 의하면 등간격으로 배치된 입경 d의 균일입경 유적으로 형성되는 직경 D_c의 구형 유적군에 있어서 유적군에 포함되는 유적의 총 증발율과 확



(a) Exposure time: 1/15 sec (b) Exposure time: 1/1000 sec

Fig. 3. Direct photograph of the premixed spray flame; (a) Exposure time: 1/15 sec, (b) Exposure time: 1/1000 sec.

산에 의해 유적군 내외의 가스성분 교환율비로 되는 군연소수 G는

$$G = 1.5Le(1 + 0.276Sc^{1/3}Re^{1/2})n_T^{2/3}(d/L) \quad (1)$$

로 정의된다. 여기서, Le는 루이스 수, Sc는 슈미트 수, Re는 유적과 기상과의 속도차를 이용한 유적 레이놀즈 수, nT는 유적군 내부에 포함된 유적의 총수, d는 단일 유적 직경, L은 유적간 평균거리이다. Chiu 등은 G값에 대하여 단적연소($G < 10^{-2}$), 내부 군연소($10^{-2} < G < 1$), 외부 군연소($1 < G < 10^2$) 및 외곽연소($10^2 < G$)의 4종류의 유적군 연소형태(Fig. 4)로 분류하였다. 또한 무차원 유적간 거리 S를

$$S = (L/10d)/(1 + 0.276\,Sc^{1/3}Re^{1/2}) \quad (2)$$

로 정의하면 군연소수 G는 S와 유적군 내의 유적 총수 n_T를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G = 0.15\,Le \cdot n_T^{2/3}/S \quad (3)$$

여기서, 루이스 수 Le = 1로 하면 Fig. 5 (a)에 나타낸 것과 같이 S-n_T평면에 등 G선과 각 군연소 형태가 나타나는 영역으로 나타낼 수 있다.

실험 데이터로부터 개개의 유적군의 군연소수 G를 산출하기 위하여 Chiu 등의 이론해석에 이용한 균일 유적직경 d를 유적군 내부에 포함된 유적의 산술평균 입경 d_{10}으로 치환하고 유적군 직경 D_c는 화상처리에 의해 유적군의 단면적 S를 산출하여 그것과 동일한 단면적을 갖는 등기구 직경 l_c를 이용하였다.

$$l_C = \sqrt{4S_i/\pi} \quad (4)$$

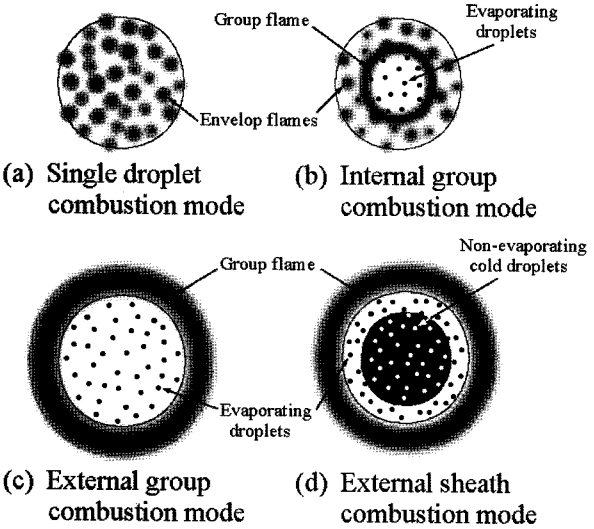


Fig. 4. Droplet group combustion modes by Chiu et al.[7,8]

또한 본 연구에서는 유적과 기상과의 속도차가 상당히 적은 예혼합 분무를 이용하였기 때문에 유적 레이놀즈 수 Re = 0으로 하고 루이스 수 Le = 1로 두면 실험으로부터 구한 군연소수 G_c는 식 (3)으로부터

$$G_C = 1.5n_T^{2/3} \cdot d_{10}/L \quad (5)$$

로 된다. 여기서, 유적간 평균거리 L은 PDA 데이터를 이용하여 다음 식으로부터 산출하였다.

$$L = \sum_{i=1}^{Nc-1}(t_{i+1} - t_i) \cdot V_i/(N_c - 1) \quad (6)$$

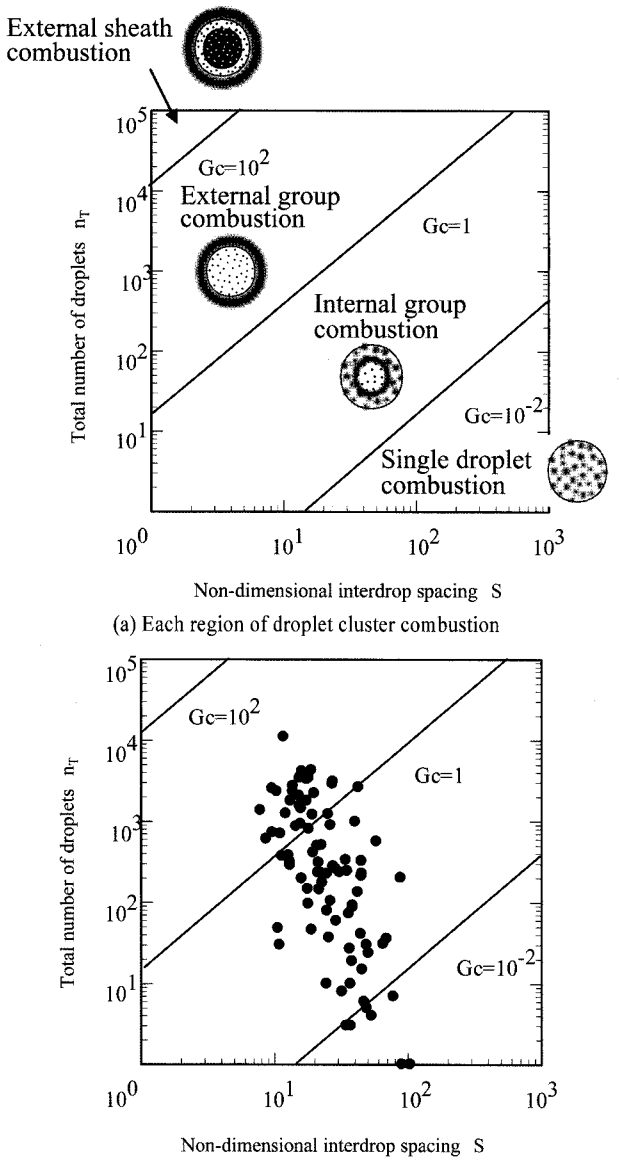


Fig. 5. Group combustion number of each droplet cluster plotted on S-n_T plane; (a) Each region of droplet cluster combustion, (b) Group combustion number of each droplet cluster.

단, N_c는 개개의 유적군 내에서 계측된 PDA 데이터 개수, t_i는 i번째 유적의 실시간, V_i는 i번째 유적 속도이다. 또한 유적군 내의 유적 총수 n_T는 직경 l_c의 구형 유적군 내부에 유적이 등간격 L로 충전되어 있다고 가정하여 다음 식으로부터 계산하였다.

$$n_T = (\pi / 6 \cdot l_C^3) / L^3 \tag{7}$$

이상의 절차로부터 화상 촬영에 의해 확인된 유적군의 군연소수 G_c를 산출하여 Fig. 5(b)의 S-n_T평면에 나타내었다. G_c는 Chiu 등의 이론해석 범위 내에 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 단적연소는 유적 총수가 10개 이하로 한정되어 있으며 지배적인 군연소 형태는 내부 군연소와 외부 군연소이다.

3.3. 유적군의 연소특성

개개의 유적군에 주목하여 산출한 G_c를 Chiu 등의 이론에 의한 군연소 형태의 분류에 적용한 경우, 실제로 관찰된 군연소 형태와 일치하는지에 대해 검토하였다. Fig. 6에 h_r = 110 mm에 있어서 OH자발광 신호, CH밴드 발광신호, 유적 Mie 산란광 신호, 유적 입경과 속도 및 분무단면 화상의 동시 시계열 데이터를 나타내었다. 화상중심에 +로 표시된 점이 화상중심, 즉 MICRO와 PDA의 측정점이다. 분무단면 화상과 동시 측정한 결과, 어느 형상의 유적군이 측정점을 어떻게 통과하는지를 확인할 수 있다.

먼저 유적군 (a)의 결과를 보면 이 유적군의 군연소수를 구한 결과 G_c = 1.28이며 Chiu 등의 분류에 의하면 군연소 형태는 외부 군연소에 해당한다. MICRO에 시계열 데이터를 보면 전체적으로는 유적군에 대응하는 유적 Mie 산란광 신호의 유지기간 전후에 OH라디칼 자발광, CH밴드 화염발광 신호가 강하며 유적군 내부에서의 화염발광 신호는 미약하다. 이것으로부터 유적군을 에워싸는 것과 같은 연소반응 영역이 존재하며 그 내부에서는 연소반응이 거의 일어나고 있지 않다고 말할 수 있기 때문에 이 유적군 전체의 연소형태는 외부 군연소라고 판단할 수 있다. 따라서 이 유적군으로부터 실험적으로 산출한 군연소수는 Chiu 등의 분류에 적용한 경우와 일치하고 있다고 할 수 있다.

다음으로 유적군 (b)에 주목하면 G_c = 0.422이며 Chiu 등의 분류에 의하면 그 연소형태는 내부 군연소에 해당한다. MICRO의 시계열 데이터로부터 유적군 내부에서 화염발광 신호가 검출되지만 그 중심부근에서의 화염발광 신호강도가 약하기 때문에 내부 군연소에 가까운 연소형태라고 생각되어지며 이 유적군의 군연소 형태는 Chiu 등의 분류와 일치하다고 할 수 있다.

유적군 (c)는 G_c = 0.0677이며 Chiu 등의 이론해석에 의하면 그 군연소 형태는 내부 군연소에 해당한다. 그러나 발광신호의 시계열 데이터를 보면 화염발광 신호는 Mie

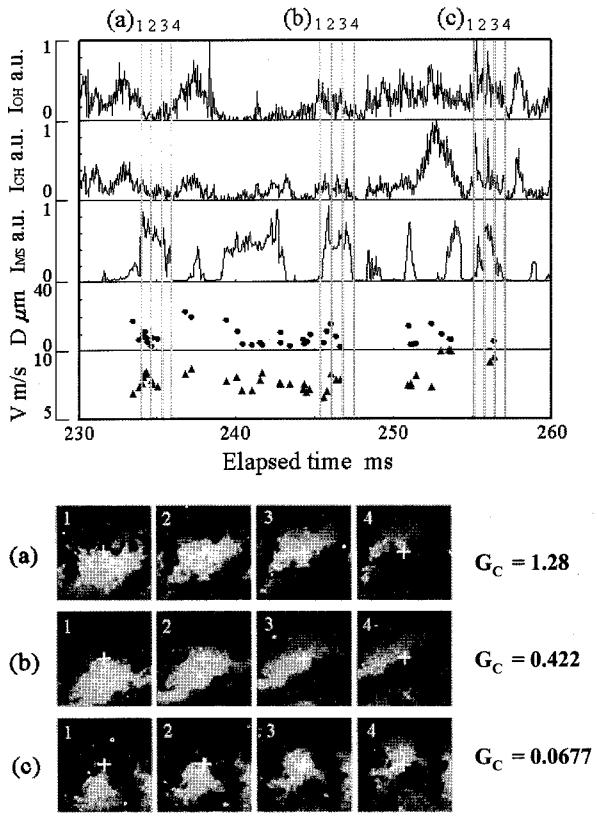


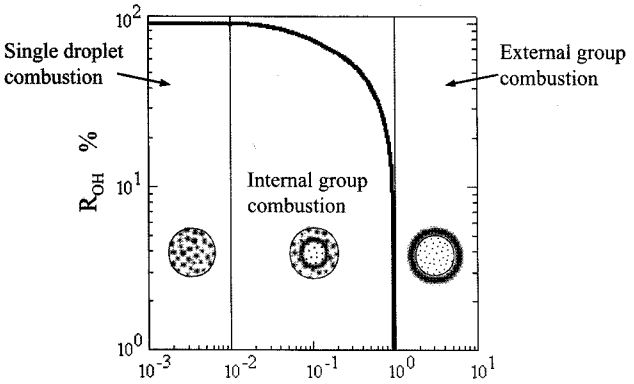
Fig. 6. Simultaneous time-series images in downstream region (h = 95 ~ 125 mm) with signals of OH chemiluminescence, CH band light emission, Mie scattering, diameter and velocity from a local point (hr = 110 mm) of the premixed spray flame; (a) G_c = 1.28, (b) G_c = 0.422 and (c) G_c = 0.0677.

산란광 신호와 유사한 파형을 나타내고 있다. 즉, 유적군 전체에 연소반응이 일어나고 있기 때문에 실제 관찰된 유적군의 연소형태는 단적연소의 군연소 형태라고 생각되어지며 Chiu 등의 분류와 일치하지 않는 결과를 나타내고 있다.

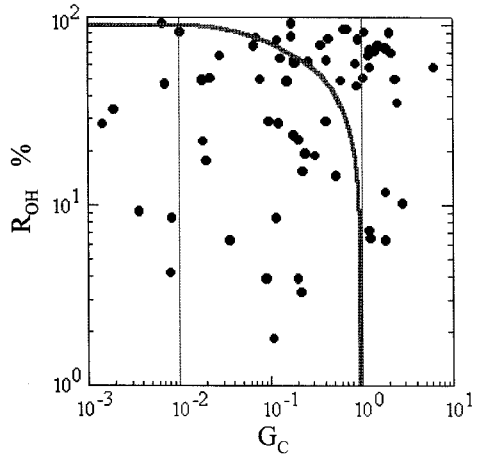
이상 검토한 바와 같이 실험적으로 산출한 군연소수를 Chiu 등의 이론해석에 적용하였을 경우, 실제 관찰된 유적군의 군연소 상태가 일치하는 경우와 일치하지 않는 경우가 있다는 것을 확인하였다. 따라서 이 일치, 불일치를 관찰된 모든 유적군에 대하여 정량적으로 확인하기 위하여 각각의 유적군에 대하여 유적군이 MICRO 측정점을 통과하는 시간 내에 OH라디칼 자발광이 검출된 시간비율 ROH와 G_c의 관계에 대하여 조사하였다.

Chiu 등의 이론해석으로 상정된 결과와 본 연구로부터 얻어진 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과로부터 ROH와 G_c의 관계에는 눈에 띄는 상관은 없으며 G_c가 대응하는 4개의 군연소 형태와 일치하지 않는 유적군이 많이 관찰되었다.

이러한 요인 중 하나로 유적군의 분무특성 및 그 형상을 생각할 수 있다. Chiu 등은 등간격으로 배치된 입경 d의 균일입경 유적으로 형성된 직경 Dc의 구형 유적군을



(a) Result estimated from theoretical analysis of Chiu et al.



(b) Result estimated from experiment

Fig. 7. Relation between ROH and G_c about each droplet cluster; (a) Result estimated from theoretical analysis of Chiu et al., (b) Result estimated from experiment.

상정하여 이론해석을 하였으나 실제 내부 분무특성은 불균일하며, 더욱이 유적군 주위의 가스조성, 분위기 온도 등도 불균일하다고 생각되어진다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 산출한 군연소수는 유적의 기하학적 배치만으로 결정한 것으로 그 외 대향효과나 온도장, 물질확산 등의 요인을 고려하지 않았다. 이러한 것으로부터 이론해석과의 불일치가 생겼다고 할 수 있다.

또 하나의 원인으로는 유적군 형상의 3차원성을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 레이저 시트법에 의한 화상계측 및 MICRO, PDA에 의한 점계측을 하였으나, 유적군 중심이 레이저 시트에 의해 조사된 단면 및 측정점을 반드시 통과한다고는 볼 수 없다. 만약 내부군연소 형태(Fig. 4의 (b))의 구형 유적군이 존재한다고 할 때 그 가장자리가 레이저 시트 단면 및 측정점을 통과하면 유적군 단면화상 상에는 실제 유적군의 크기보다 작게 관찰되어지며 화염발광 신호의 시계열 데이터는 단적연소의 경우와 같은 결과가 되어버린다. 또한 본 연구에서 관찰된 유적군은 복잡한 3차원성을 갖고 있기 때문에 유적군 단면화상 상에서는 그 단면이 작게 관찰되었다 할지라도 레이저 시트 두께 방향으로 커다란 크기를 갖는 경우에는 이와 같은 유적군 단면으로부터 유적 전체의 크기를 산정하는 방법은 부적합하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 복수의 레이저 시트, 고속도 CCD 카메라를 이용하여 복수의 유적군 단면의 동시 시계열 촬영을 하여 보다 정밀한 유적군 크기를 산정할 필요가 있다고 생각되어진다.

4. 결 론

예혼합 분무화염 하류영역에 있어서 개개의 유적군의 연소 기구를 시계열로 관찰하기 위하여 PDA에 의한 유적군 내부의 유적 입경과 속도, 카세그렌 광학계 MICRO에 의한 국소 OH라디칼 자발광신호, CH밴드 화염발광 신호와 유적으로부터의 Mie 산란광 신호 및 고속도 CCD 카메라에 의한 분무단면 화상촬영을 동시 시계열로 측정하였다. 또한 관찰된 유적군의 군연소수를 실험적으로 산출하여 Chiu 등의 이론해석에 적용하여 유적군 연소 기구에 대하여 검토하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 연소시의 분무단면 화상의 촬영을 예혼합 분무화염 전체에 대하여 행한 결과, 분무류 상류에서 선택적 화염전파에 의해 분무류가 분단되어 유적군이 형성되는 모습이 관찰되었다.

2) MICRO, PDA에 의해 얻어진 시계열 데이터 및 유적군 단면화상은 각각 시간적으로도 공간적으로도 잘 대응하고 있으며 OH라디칼 자발광 신호와 CH밴드 화염발광 신호의 상관이 관찰되었다.

3) 유적군 단면화상에 의해 확인된 88개의 모든 유적군에 대하여 실험적으로 군연소수 Gc를 산출하여 Chiu 등의 이론해석에 적용한 결과, 주로 내부 군연소와 외부 군연소의 군연소 형태로 분류되었다.

4) MICRO, PDA에 의해 얻어진 시계열 데이터 및 유적군 단면화상으로부터 실제 관찰된 개개의 유적군의 군연소 형태와 그 유적군의 군연소수를 Chiu 등의 이론해석에 적용한 경우에 군연소 형태가 일치하는 경우와 일치하지 않는 경우가 있었다. 일치하지 않는 원인은 군연소수를 유적의 기하학적 배치만으로 결정한 것과 현상의 3차원성이 측정결과에 영향을 미친 것이라고 생각되어진다.

참고문헌

1. 국가에너지위원회, "제1차 국가에너지 기본계획(2008~2030)," (2008).
2. 이인영, "중장기 대체에너지기술개발 및 보급기본계획 수립방안 연구," 산업자원부(2003).
3. 황승민, 김장우, 정진도, "층류 대향류장에 형성된 분무화염의 2차원 비정상 모델링," 대한환경공학회지, **29**(11), 1223~1230(2007).
4. Hwang, S. M., "A Study on Flame Structure of Multi-Phase Combustion by Optical Diagnostic Measurement," Ph. D Thesis, Osaka University (in Japanese), (2005).

5. Akamatsu, F., "A Study on Combustion Behavior of Droplet Cluster in Liquid Fuel Spray," Ph. D Thesis, Osaka University (in Japanese), (1996).
6. Kim, D. H., Lee, S. J., and Seo, Y. C., "Evaluation of combustion characteristics of a liquid waste incinerator using liquid droplet size analysis and thermogravimetric data," *Environ. Eng. Res.*, **5**(1), 1~9(2000).
7. Chiu, H. H. and Liu, T. M., "Group combustion of liquid droplets," *Combust. Sci. Technol.*, **17**, 127~142 (1977).
8. Chiu, H. H., Kim, H. Y., and Croke, E. J., "Internal Group Combustion of Liquid Droplet," *Proc. Combust. Inst.*, **19**, 971~980(1982).
9. Akamatsu, F., Nakabe, K., Mizutani, Y., and Katsuki, M., "Optical Measurement of Burning Droplet Clusters in a Premixed Spray," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **60**(577)B, 3172~3178(1994).
10. Akamatsu, F., Mizutani, M., Katsuki, S., and Cho, Y. D., "Measurement of Local Group Combustion Number of Droplet Clusters in a Premixed Spray Stream," *Proc. Combust. Ins.*, **26**, 1723~1729(1996).
11. Akamatsu, F., Mizutani, Y., Katsuki, M., Tsushima, S., and Cho, Y. D., "Group Combustion Behaviors of Premixed Spray Streams and Group Combustion Number," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **62(596)B**, 1622~1628(1996).
12. Tsushima, S., Saitoh, H., Akamatsu, F., and Katuski, M., "Macroscopic Flame Structure in Premixed-Spray Burner," *JSME International Journal*, Ser, **B 44**, 616~623(2001).
13. Wakabayashi, T., Akamatsu, F., Katsuki, M., Mizutani, Y., Ikeda, Y., Kawahara, N., and Nakajima, T., "Development of a Multi-Color Light Collection Probe with high Spatial Resolution (Part 1 Evaluation of Spatial Resolution by Ray-Tracing Method)," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **64**(619)B, 923~930(1998).
14. Akamatsu, F., Wakabayashi, T., Tsushima, S., Katsuki, M., Mizutani, Y., Ikada, Y., Kawahara, N., and Nakajima, T., "The Development of Light-Collecting Probe with High Spatial Resolution Applicable to Randomly Fluctuating Combustion Fields," *Meas. Sci. Technol.*, **10**, 1240~1246(1999).