

< 논문 >

## 압력변동이 연료 분사구에서의 당량비 변동에 미치는 영향에 관한 수치 해석

김현준\* · 홍정구\* · 신현동†

(2006년 11월 15일 접수, 2007년 2월 8일 심사완료)

### Numerical Simulation of the Effect of Pressure Fluctuation on the Modulation of Equivalence Ratio at the Fuel Injection Hole

Hyeon Jun Kim, Jung Goo Hong and Hyun Dong Shin

**Key Words :** Pressure Fluctuation(압력 변동), Equivalence Ratio Fluctuation(당량비 변동), Numerical Simulation(수치해석)

#### Abstract

In gas turbine technology, the flame stability is inherently greater in conventional diffusion type combustion over a wider range fuel to oxidizer ratio. However, premixed type combustion which has narrow flame stability region, is widely used due to environmental reason. It has been observed in experiments that combustion instability of low frequency (~10Hz) results from the modulation of equivalence ratio at fuel injection hole when a pressure fluctuation propagates upwards along the channel of the burner under an unchoked fuel flow condition. In this study, a commercial program was used to determine how the fuel flow rate changed with respect to the pressure, velocity of the fuel flow and the mass fraction in a choked and an unchoked condition. The calculation focuses on the upstream of the dump plane to know how the forced pressure with the fuel injection conditions affects the modulation of the equivalence ratio. Therefore, it is found that pressure fluctuation leads to oscillation of mass flow rate and then results in equivalence ratio modulation under the unchoked fuel flow condition.

#### 기호설명

$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 3}, C_{\epsilon 4}$  : 난류 모델 상수

$f_i$  : 체적력(body force)

$F_{h,j}$  : j 방향의 확산 에너지 플럭스(flux)

$F_{m,j}$  : 확산 플럭스 성분

$h$  : 총 엔탈피

$k$  : 열전도 상수

$k_t$  : 난류 운동 에너지

$s$  : 생성항

$t$  : 시간

$u_i$  : 속도 성분

$V_{m,j}$  : 확산 속도

$Y_m$  : 혼합기의 질량 분율

$\epsilon$  : 에디(eddy) 소산율(dissipation rate)

$\rho$  : 밀도

$p$  : 압력

$\delta_{ij}$  : dirac delta 함수

$\sigma_{h,i}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$  : 난류 Prandtl 수

$\tau_{ij}$  : 전단 응력

#### 하첨자

$t$  : 난류

$m$  : 화학종

$h$  : 에너지

$i, j, k$  : 방향 성분

' : 유동 변수의 변동 성분

- : 평균화된 유동 변수

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hdshin@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-8829 FAX : (042)869-8820

\* 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과

#### 1. 서론

현재 대부분의 발전용 가스터빈은 공해 저감효

과가 큰 예혼합 연소 시스템을 사용하고 있다. 이러한 예혼합 연소 시스템은 비예혼합 연소 시스템에 비해 안정적인 운전조건이 좁은 특징을 가지고 있다. 예혼합 연소에서 불안정한 연소 발생 메커니즘은 그 동안 많은 연구자에 의해 실험, 혹은 수치적인 방법으로 접근을 해왔지만 대부분의 연구가 초우크 연료 분사 조건(choked fuel flow condition)을 가지는 운전 조건 하에서 연구가 이루어져 왔다.<sup>(1,2)</sup> 그러한 이유는 대부분의 연소기가 음향장이 상류에 영향을 미치는 효과를 막기 위해 초우크 조건을 기본적으로 만족하여 제작이 된다는 점과 수치적인 도구를 이용할 때 화염으로부터 상류 방향으로 계산 영역을 확장함으로써 소요되는 계산량을 최대한 줄여 연소가 일어나는 연소기 부분만을 보고자 하였기 때문이다. 하지만 연소 불안정의 근본적인 원인이 당량비의 급격한 변화에 의한 사실이 연구자들에 의해 보고됨<sup>(3,4)</sup>에 따라 연소불안정을 실제로 유발하는 화염이 존재하는 하류가 아닌 연료와 공기가 혼합이 되는 상류 부분에서 당량비 변동에 관심을 가지게 되었다.<sup>(5)</sup>

최근 Hong<sup>(5)</sup> 등은 초우크 조건과 언초우크 조건(unchoked fuel flow condition)을 만족하는 덤프 연소기를 제작하여 당량비의 변동에 관한 연구를 수행하였다. 그의 실험 장치는 스윌러(swirler)가 장착된 덤프형 연소기로 초우크, 언초우크 조건을 만족하는 연료 분사구(fuel injection hole)을 가지는 구조로 되어 있다. 이러한 장치에 초우크와 언초우크 조건에서 서로 동일한 당량비 조건으로 비교 실험을 하였다. 그의 실험 결과에서 0.54~0.6의 당량비 영역에서 압력 변동이 큰 Noisy period와 압력변동이 작은 Silent period가 10Hz 주기로 반복적으로 나타남을 관찰하였다. 하지만, 초우크조건일 경우 10Hz 주기의 저주파수 대역의 압력변동은 존재하지 않았다.

이러한 저 주파수의 압력변동에 대한 발생원이 초우크 조건을 만족하지 못하여 생기는 문제로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 부분에 초점을 맞추어 Hong<sup>(5)</sup>의 실험과 더불어 수치해석 방법으로 결과를 분석하고자 하였다. 이에 대한 방법으로 동적 시스템에 강제 가진을 시켜 시스템의 특성을 알아보는 것과 동일한 방법으로 출구 쪽 경계에 실험 결과에서 도출된 10kPa의 진폭을 가지는 압력 변동을 강제적으로 가진을 시킴으로써 연료 분사구에서 연료의 주기적인 진동에 의해 당량비 변화가 어떻게 동적 특성을 보이며 변화하는지 수치해석을 통해 연구를 하였다. 단, 본 연구에서 도출된 결과는 cold mixing을 해석한 결과이므로 수치적인 에러가 수반될 수 있다. 그러나 방법론적인 측면에서 연료와 산화제의 혼합 거동에 의해 당량비 변동을 예측을 통해 연소상황을 추측할 수 있는 방법으로써 활용할 수 있을 것으로 보인다.

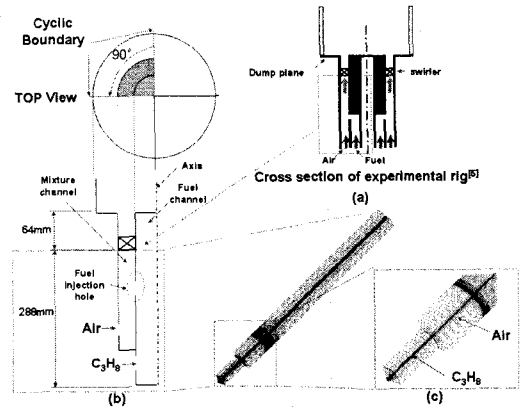


Fig. 1 Schematic diagram of the numerical domain

## 2. 계산 방법

### 2.1 모델 연소기와 실험장치

본 연구에서는 상용 코드인 STAR-CD v3.26를 이용하여 출구 쪽에서 10kPa의 압력변동이 전파하여 연료 분사구의 크기에 따라 당량비가 어떻게 변조되어 나오는지에 관하여 cold mixing 상황에서 정량적 값을 얻는데 초점을 맞추었다.

본 연구에서 사용한 형상은 Hong<sup>(5)</sup> 등의 실험장치인 Fig. 1(a)에서와 같이 버너의 상류부분을 모사하여 격자를 만들었다. 계산 영역(computational domain)은 스윌러가 존재하므로 이를 피하기 위해서 Fig. 1(b)와 같이 덤프(dump)면을 기준으로 스윌러부터 아래로 64mm에서부터 격자를 생성하였다. 한편 본 연구에서는 Fig. 1(a)의 중심축 pilot flame을 위한 채널의 반경이 0.5mm정도로 매우 작기 때문에 Fig. 1(b)와 같이 모두 연료 채널로 모사하였고 덤프면으로부터 64mm가 되는 지점을 기준으로 288mm까지의 형상이 계산 영역이 되도록 설정하였다. 여기에서 사용된 경계조건은 프롭과 공기를 위한 총 2개의 입구 조건이 사용되었고 90°의 cyclic 경계 조건을 적용하였다. 마지막으로 출구 쪽을 압력 경계(Pressure boundary)조건을 적용하여 총 5개의 경계조건을 사용하였다.

Fig. 2(a)에서와 같이 상부 출구 부분을 압력 경계 조건으로 설정하였다. 압력 경계 조건으로부터 아래로 221mm 떨어진 지점에 연료 분사구가 존재하고 형상의 전체 길이는 288mm가 된다. 사용된 좌표는 실린더 좌표계로 원점은 연료 유동 영역의 상부 끝단이 된다. 연료와 산화제가 만나는 지점인 연료 분사구는 2번 위치가 되고 1번과 3번이 속해 있는 관은 각각 혼합기 유동 영역과 연료 유동 영역이다. Fig. 2(c)는 2차원의 모델을 알기 쉽게 3차원 형태로 나타내었다. 3차원 그림에서 공기와 연료는 각각 혼합기 유동 영역과 연료 유동 영역으로 들어간다.

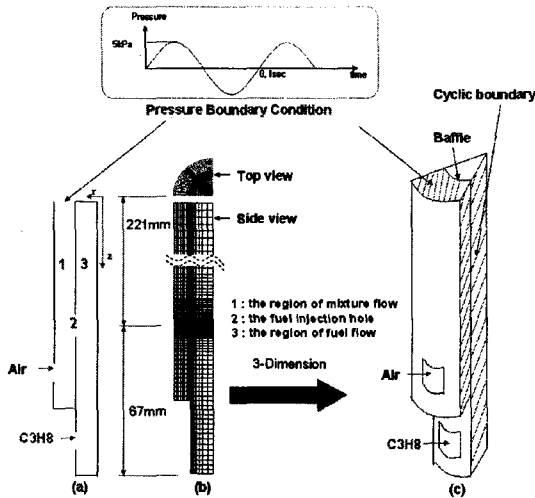


Fig. 2 Schematic diagram for boundary conditions

Fig. 2에서 데이터를 분석하기 위한 지점을 나타내기 위해 다음과 같은 지점을 표시하였다.

- (1)번 위치: 혼합기 유동 영역
  - 압력 경계 조건으로부터 100 mm 지점
- (2)번 위치: 연료 분사구
  - 압력 경계 조건으로부터 221 mm 지점
- (3)번 위치: 연료 유동 영역
  - 압력 경계 조건으로부터 100 mm 지점

위와 같이 총 3부분의 지점에서 압력과 속도 및 당량비의 시간에 따른 데이터를 정리하였다.

2.2 계산 방법

계산 방법은 Kim<sup>(6)</sup>가 정상상태 연소장의 해에 섭동을 가해 유동 교란을 통해 연소불안정성을 조사하는 연구의 아이디어를 이용하였다. 본 연구에서는 압력 경계 조건에 섭동대신 실제 실험에서 연소 불안정이 생긴 진폭 10kPa의 압력 변동을 강제 가진 형태로 수치계산을 수행하였다. 이를 위해 먼저 정상상태 해를 얻고, 이렇게 수립된 해를 초기 조건으로 하여 비정상 상태로 계산한다. 비정상 상태를 계산 할 때에는 출구 쪽인 압력 경계 조건 부분에 사인함수(sinusoidal function)을 이용하여 전체 10kPa의 진폭과 10Hz의 주기로 압력을 가한다. 이를 위해 압력 경계 조건을 위한 간단한 포트란 코드를 작성하여 이러한 가진 효과를 주었다. 압력변동에 의한 초우크 조건에 의한 유동 특성을 알기 위해서는 압축성 코드를 이용해야 한다. 또한 계산의 신뢰성을 위해 시간에서 대해 Crank-Nicholson, 공간에 대해 MAR(monotone advection and reconstruction) scheme<sup>(7)</sup>을 적용하였다. 난류에

Table 1 Numerical condition for mass flow rate

|                   | Flow rate (lpm) |      | Temperature (K) |      | Inlet equivalence ratio | Hole Diameter (mm) | Pressure fluctuation |
|-------------------|-----------------|------|-----------------|------|-------------------------|--------------------|----------------------|
|                   | Air             | fuel | Air             | fuel |                         |                    |                      |
| CASE 1 (choked)   | 30              | 7.05 | 288.7           | 293  | 0.56                    | 0.3                | 10kPa (10Hz)         |
| CASE 2 (unchoked) | 30              | 7.05 | 288.7           | 293  | 0.56                    | 0.7                | 10kPa (10Hz)         |

대해 표준  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용하였고 압력 변동을 모사하기 위해 에너지 방정식을 적용하였다. 추가로 질량 유동에 대해 공기는  $N_2$ ,  $O_2$ 를 프로판에 대해  $C_3H_8$ 의 화학종 방정식을 계산하였다. 따라서 연소가 일어나지 않는 cold mixing 상황에서 연료와 산화제의 혼합으로 인한 당량비 변동을 확인하고자 하였다.

분사구 크기는 결정은 Hong<sup>(5)</sup> 등이 제시한 직경 0.3mm는 초우크 조건, 0.7mm는 언초우크 조건을 본 연구의 변수로 그대로 사용하였다. Table 1에서 본 연구에 관한 case study를 요약해 보았다. 모든 경우에 대해 당량비는 0.56으로 고정하고 입구 조건 또한 모두 동일하다. 본 연구에서 변수는 연료 분사구 직경이 된다. 연료 분사구 직경이 작을수록 형상에 대해 많은 격자를 필요로 하게 되고, 압력의 진동이 커지면 이를 모사하기 위해 시간 분해능(time resolution)이 더욱 작아지므로 이것은 결국 많은 계산 자원과 시간을 요구하게 된다. 그러므로 Fig. 2(b)에서와 같이 격자계(grid system)는 실린더 좌표계로 CASE 1은  $22 \times 27 \times 149$ , CASE 2는  $16 \times 23 \times 134$ 의 격자로 이루어져 있고 연료 분사구에 격자가 집중되어 있다. 이렇게 각 경우에 대해 격자 개수 차이가 나는 이유는 연료 분사구가 존재하는 영역의 정확한 모사와 계산의 발산을 막기 위해 격자를 더 조밀하게 만들 필요가 있었다.

3. 수치 해석 방법

3.1 지배방정식

수치해석에 적용된 지배 방정식<sup>(7)</sup>은 다음과 같다.

Continuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0$$

Momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i$$

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Energy

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j + F_{h,j} - u_j \tau_{ij}) = -\frac{\partial p u_j}{\partial x_j} + s_h$$

$$F_{h,j} = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} + \overline{\rho u_j h'} + \sum_m h_{m,j} \rho V_{m,j}$$

**Species**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho Y_m u_j + F_{m,j}) = s_m$$

$$F_{m,j} = \rho Y_m V_{m,j} + \overline{\rho u_j Y_m'}$$

$$\sum_m Y_m = 1$$

밀도의 경우 압축성 유동이므로 이상 기체 상태방정식을 적용하였으며 온도 변화를 고려하기 위해 에너지 방정식을 적용하였다. 물성치는 각 화학종에 대해 적용하였다. 위의 방정식에서 모든 생성항과 외력항은 무시한다.

**3.2 난류모델**

본 연구에서는 난류유동해석을 위해 일반적으로 사용되고 있는 표준  $k-\varepsilon$  난류모델<sup>(7)</sup>을 사용하였다. 표준  $k-\varepsilon$  난류 모델의 난류 운동에너지  $k$ 와 에너지 소산률  $\varepsilon$ 에 대한 전달 방정식들은 Navier-Stokes 방정식으로부터 얻을 수 있으며 그 식들은 아래와 같다.

**Turbulence kinetic energy**

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j k_i - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_i}{\partial x_j} \right] = \mu_t (P + P_b) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \rho k_i \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t P_{NL}$$

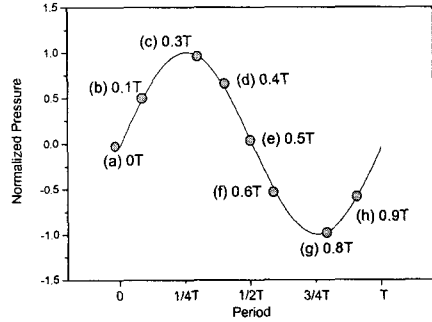
$$P = S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad P_b = -\frac{g_i}{\sigma_{k,b}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}$$

$$P_{NL} = -\frac{\rho}{\mu_t} \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \left[ P - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k_i}{\mu_t} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]$$

**Turbulence dissipation rate**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho u_j \varepsilon - \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k_i} \left[ \mu_t P - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \rho k_i \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \\ + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k_i} \mu_t P_b - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k_i} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 5} \frac{\varepsilon}{k_i} \mu_t P_{NL} \end{aligned}$$

위의 방정식 중 부력항은 무시하였고 각 방정식의 생성항은 연소장을 해석하지 않기 때문에 사용하지 않는다. 또한 방정식의 계수(coefficients)는 상용 코드의 값<sup>(7)</sup>을 그대로 사용하였다.



**Fig. 3** Pressure history of CASE 1(or CASE 2) at the region of mixture flow

**4. 계산 결과 및 고찰**

**4.1 압력변동에 따른 연료 분사 상태**

먼저 압력변동에 따라 유동 방향에 대한 단면의 연료 분포를 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서 사용된 데이터는 limit cycle에 이르는 1초에서 1.5초까지 데이터를 이용하였다. 이 중 Fig. 3은 1.3초에서 1.4초까지 압력변동을 나타낸 그래프이고 이를 0.1초를 한 주기로 하여 표현하였다. 시간에 따른 압력의 변동은 압력의 최대치를 기준으로 압력 변동을 나눠 정규화(normalized)시켰다. 따라서 압력 변동의 최대치는 "1"에 가까울수록 진폭이 5kPa의 값을 갖는다. 반대로 "-1"에 이르면 -5kPa의 값을 갖는다. 이와 같은 한 주기 중 (a) 0T, (b) 0.1T, (c) 0.3T, (d) 0.4T, (e) 0.5T, (f) 0.6T, (g) 0.8T, (h) 0.9T의 총 8개의 시간대에서 (1)번 위치의 단면을 프로판의 질량 분율(mass fraction)의 분포 수준(contour level)으로 표시하여 연료의 혼합 여부를 가시화 하였고 그 결과를 Fig. 4에서 알 수 있다. 당량비 0.56에서 이론적인 연료의 질량 분율은 약 0.03465의 값을 갖는다. 이를 기준으로 Fig. 4를 분석할 수 있다.

전체 분포 수준 범위는 0.01746~0.04893의 질량 분율 범위를 가지고 있고 이러한 분포 수준 범위는 각 시간마다 모두 동일하다. CASE 1은 (a) ~ (h)에 이르기 까지 각 시간에 따른 프로판의 질량 분율의 변화가 대부분 0.03005~0.04106의 범위에서 일어나므로 작은 변동 범위를 가지고 있음을 알 수 있다.

반면, CASE 2는 CASE 1과는 반대로 급격한 연료의 질량 분율 분포 변화를 보인다. Fig. 4(a)에서는 0.04893의 영역을 보이는 구역이 45°에서 크게 나타나고 그 양쪽 끝단에서 그 분포가 크게 나타난다.

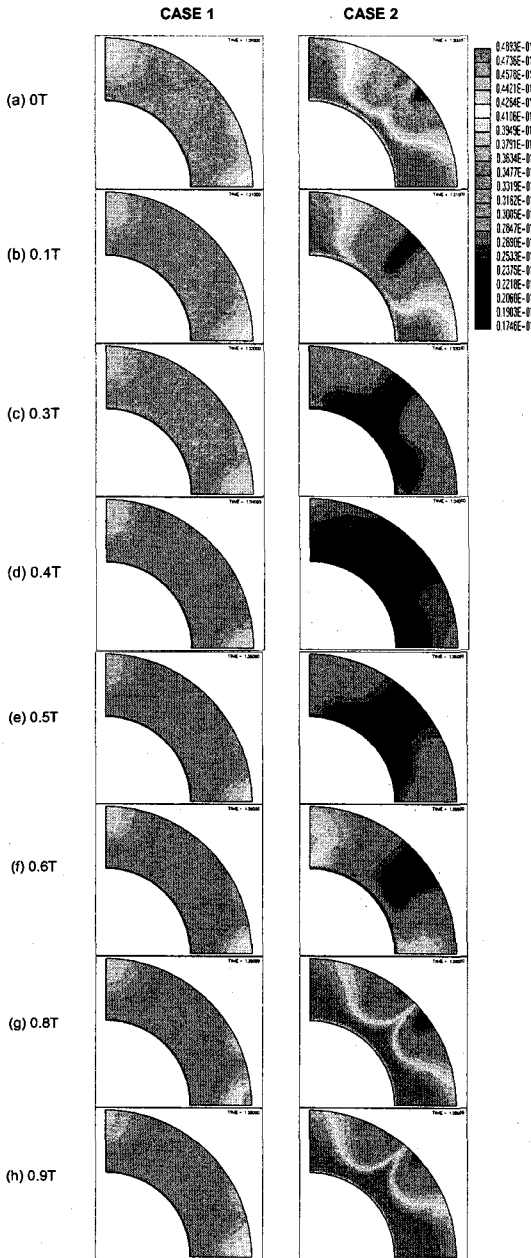


Fig. 4 Contour of mass fraction of propane at the region of mixture flow for CASE 1(choked) and 2(unchoked)

반대로 외곽은 상대적으로 0.02060 영역이 45° 중심의 양쪽으로 작은 분포를 보이고 있다. (a)시간에서 0.04893의 질량 유량 영역이 좁아지면서 (b)시간에서는 0.02060 이하 범위의 질량 유량 영역이 45° 를 기준으로 점차 넓게 나타나기 시작한다.

(c)시간에서는 0.04893의 영역이 급격하게 감소되어 거의 보이지 않는다. (d)시간에서는 0.04893의 영역은 거의 사라졌고 0.02060이하의 범위를 갖는 영역이 좀 더 확장되었다. (e)시간에서는 다시 0.04893 영역대가 45° 기준으로 점차 좁아지게 된다. (f)시간에서 0.04893대의 질량 유량 영역이 나타나기 시작한다. (g)시간에서 이제 0.04893 영역이 점차 넓어져 첫 주기가 시작되었던 시간대인 (a)와 비슷해진다.

이때 압력은 음의 최대값을 가지는 지점을 지난다. (h)에서는 (g)와 비교할 때 시각적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 이러한 주기적인 특성이 1.0T 주기 이후로 다시 반복적으로 나타난다. 따라서 상기의 결과들을 살펴볼 때 연료 분사 조건이 언초우크인 경우 프로판 분사 상태는 초우크인 경우에 비해 공간적으로 불균일 함을 뚜렷이 관찰할 수 있었다.

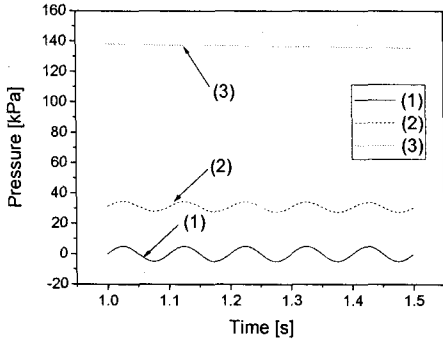
#### 4.2 각 지점에서 압력 및 속도 변동

##### 4.2.1 초우크와 언초우크 조건일 때 압력 변동

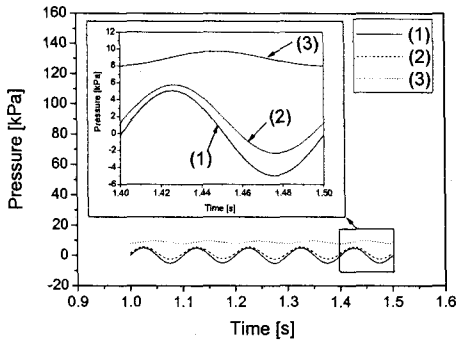
Fig. 5는 가진한 뒤 limit cycle에 이르는 1초에서 1.5초까지 데이터를 도시하였다. 전체 그래프의 범위는 서로 동일하게 하여 상대적인 비교가 가능하도록 하였다. Fig. 5(a)은 CASE 1에서 (1): 혼합기 유동 영역, (2): 연료 분사구, (3): 연료 유동 영역 이렇게 3부분에서 압력의 거동을 표시하였다. (1)번 위치는 강제적인 압력 진동이 그대로 해에 반영이 되므로 거의 10kPa의 진폭으로 진동하는 모습을 보여주고 있다. (2)번 위치는 혼합기 유동 영역의 압력 변동의 영향으로 30kPa에서의 거동을 보여주고 있다. (3)번 위치에서는 1초에서 1.5초까지 130kPa 정도로 거의 변동이 없었다.

Fig. 5(b)에서는 CASE 2에서 압력의 거동을 도시하였다. 먼저 (1)번 위치와 (2)번 위치는 CASE 1과 같이 거의 10kPa의 진폭으로 진동하는 모습을 보이고 있다. 한편 (3)번 위치는 그 거동이 7.5 ~ 10kPa의 범위에서 거동한다.

CASE 1과 CASE 2의 압력 변화를 비교해 보면 (1)번 위치는 CASE 1, 2 양쪽에서 약 10kPa의 진폭으로 진동하는 결과를 얻어 그다지 큰 차이를 얻을 수 없었다. (2)번 위치에서 CASE 1은 약 30kPa, CASE 2는 거의 0kPa의 평균 압력에서 거동하는 차이를 보이고 있다. (3)번 위치에서 두 가지 경우에 대해 차이는 뚜렷하다. CASE 1은 130kPa, CASE 2는 약 8kPa의 위치에서 거동하는 모습을 보이고 있다. 이러한 차이는 CASE 1은 (3)번 위치의 내부 압력이 CASE 2보다 상대적으로 높기 때문에 (1)번 위치에서 압력 변동이 (3)번 위치에 영향을 덜 미치는 것이 원인인 것으로 보인다.



(a) CASE 1



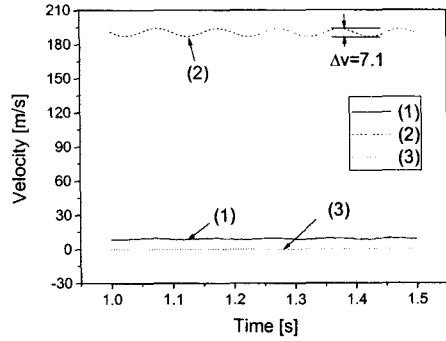
(b) CASE 2

Fig. 5 Time records of pressure at each position; (a) CASE 1 (choked) and (b) CASE 2 (unchoked)

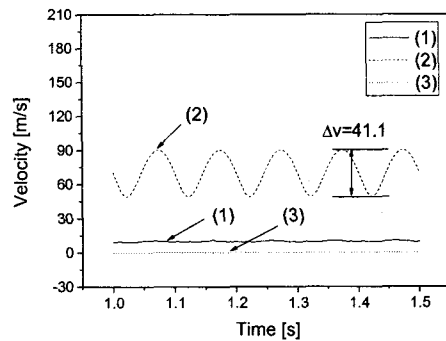
4.2.2 초우크와 언초우크 조건일 때 속도 변동

Fig. 6(a)는 1초에서 1.5초까지 시간에 대해 (1), (2), (3)의 3 지점에서 CASE 1의 속도 분포를 살펴 보았다. (1)번 위치는 거의 10m/s의 속도에서 진동하는 모습을 보여주고 있고, (3)번 위치에서는 초우크 조건의 영향으로 내부 유동 변화가 심하지 않으므로 속도의 진동과 그 범위가 거의 0에 가까운 결과를 얻게 된다. 한편 (2)번 위치에서는 가장 높은 속도 범위를 갖게 되는데 그 이유는 (1)번 위치보다 (3)번 위치의 내부 압력이 크기 때문에 (2)번 위치에서 약 190m/s의 높은 속도에서 진동하는 모습을 보인다.

Fig. 6(b)는 CASE 2에서 속도의 거동을 도시 하였다. (1)번 위치는 약 10m/s 정도의 속도 범위를 갖고 (3)번 위치는 내부 유동 변화가 거의 없기 때문에 거의 0에 가까운 속도를 갖는다. 한편 (2)번 위치에서는 언초우크 조건을 만족하도록 설계 되었으므로 혼합기(mixture)에서 압력변화가 (2)번 위치에 직접적으로 영향을 주어 35~90m/s의 속도



(a) CASE 1



(b) CASE 2

Fig. 6 Time records of velocity at each position; (a) CASE 1 (choked) and (b) CASE 2 (unchoked)

범위로 상당히 큰 속도 변화를 보이고 있다.

CASE 1과 CASE 2의 속도 변화를 비교해 보면 (1)번 위치는 CASE 1, 2 양쪽에서 약 10m/s 근처의 속도 범위를 가지고 거동하는 모습을 보이고 있어 압력에서의 비교와 마찬가지로 큰 차이를 보이지 않는다. 한편, (3)번 위치에서는 위의 압력 비교와는 다르게 CASE 1, 2의 차이가 없었다. 그 이유는 CASE 1, 2에서 (3)번 위치는 (2)번 위치로부터 위로 100mm가 되는 지점이므로 (2)번 위치의 속도 변화가 (3)번 위치의 속도 거동에 영향을 크게 미치지 않기 때문인 것으로 보인다. 한편 (2)번 위치에서 CASE 1, 2의 차이가 두드러지게 나타난다. CASE 1은 (3)번 위치와 (1)번 위치의 큰 압력차이로 인하여 평균 190m/s 정도의 속도를 갖고 CASE 2는 평균 70m/s 정도의 속도를 갖는 것으로 나타났다.

또한 그 진폭에 있어서도 CASE 1은 속도 변동이 7.1m/s, CASE 2는 41.1m/s의 속도 진폭을 갖는 거동을 보였다. 따라서 (2)번 위치에서 언초우크 조건을 만족하는 경우는 그렇지 않는 조건에 비해 약 6배의 높은 속도 변동을 보였다.

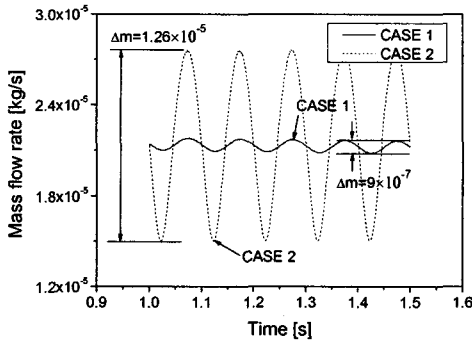


Fig. 7 Time records of mass flow rate of propane at fuel injection hole

4.3 연료 분사구에서 연료의 질량 유량 변동

Fig. 7은 (2)번 위치에서 시간에 따른 프로판의 질량 유량(mass flow rate) 변동을 나타낸 그래프이며 (2)번 위치와 인접한 격자로부터 1.0~1.5초까지 데이터를 처리하였다. CASE 1의 질량 유량 변동은 약  $9 \times 10^{-7} \text{ kg/s}$  이고, CASE 2는 약  $1.26 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$  의 질량 유량 차이를 보였다. 연료의 작은 변동은 당량비 변동에 큰 영향을 미치므로 언초우크 조건의 연료의 심한 변동은 산화제와 혼합되어 전체 당량비 변동에 영향을 줄 것으로 예상된다.

4.4 혼합기 유동 영역에서 당량비 변동

당량비는 전체 질량 분율로 볼 때 연료의 변화에 민감하므로 연료의 낮은 비율의 변화로도 상당히 큰 당량비 변동을 야기할 수 있다. 따라서 언초우크 조건을 만족하는 연료 분사구의 크기는 상당히 큰 당량비 변동을 야기 할 것이고 이것은 결국 화염의 압력의 변동에 영향을 미치게 될 것이다. 이러한 당량비 변동을 Fig. 8에서 볼 수 있다. Fig. 8은 (1)번 위치에서 단면에 대해 당량비를 환산하였다.

Fig. 8의 CASE 1은 초우크 조건을 만족한 경우 당량비의 변화를 나타내었다. 진동하는 범위는 0.54~0.57의 당량비 범위에서 시간에 따라 거동하고 있다. 실제 당량비는 0.56으로 맞추어 계산을 수행하였으나 데이터를 수집하여 적분하고 이를 평균하면 0.561의 당량비로 약 0.001정도의 오차가 발생하였다.

Fig. 8의 CASE 2는 언초우크 조건을 만족할 경우 당량비 변화를 표시하였다. 진동하는 범위는 0.35~ 0.7의 당량비 범위에서 시간에 따라 거동하고 있다. 실제 당량비는 CASE 1과 마찬가지로 0.56으로 맞추어 초기 조건을 주었으나 시간에 대해 당량비를 적분하여 평균하면 0.559의 당량비가 나오게 되고 약 0.001의 오차를 보였다.

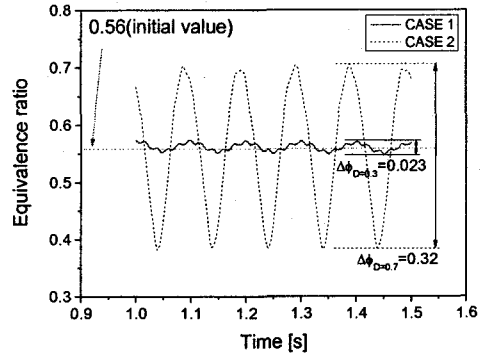


Fig. 8 Time records of equivalence ratio for CASE 1, 2

다음은 당량비 변동 결과를 서로 비교해 보았다. CASE 1과 CASE 2를 비교하면 초우크 조건을 만족하는 CASE 1에서 상대적으로 당량비 변동 폭이 작게 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 6(a)와 (b)의 (2)번 위치에서 속도를 서로 비교한 결과에서 알 수 있다. (2)번 위치에서 CASE 1의 속도 변동은 7.1m/s를 CASE 2의 속도 변동은 41.1m/s의 진폭을 갖는 거동에서 약 6배의 속도 차이는 Fig. 8에서와 같이 CASE 1은 0.023, CASE 2는 0.32의 당량비 변동을 갖게 되어 약 14배의 당량비 변동 차이를 가져왔다. 이러한 결과는 분사구에서 속도와 하류에서 당량비 변동간의 선형적인 관계로 생각하는 것 보다는 연료 분사구의 크기에 따라 당량비가 달라지는 관점에서 바라봐야 할 것으로 보인다.

5. 결론

지금까지 본 연구에서는 CFD기법을 이용하여, 연소실의 상류영역을 계산 영역으로 한 후 강제 압력 가진을 통한 방법으로 연료 분사구에서의 연료 분사 상태를 알아보았다. 그 결과, Hong<sup>(5)</sup>의 실험결과 가운데 저 주파수(~10Hz) 대역에 해당되는 불안정한 화염 거동에 대해 당량비 변동이 어떠한 역할을 하는지 유추해 볼 수 있었고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 강제 압력 가진에 대해 연료 분사조건이 언초우크 조건일 경우 분사상태는 초우크 조건일 경우에 비해 공간적으로 불균일 함을 관찰 할 수 있었다.

(2) 동일한 압력 변동을 가할 때 초우크 조건에서 당량비 변동은 0.023이고, 언초우크 조건에서는 0.32로 연료 분사구의 크기가 작을수록 작은 진폭으로 진동하는 것으로 나타났다.

(3) 본 결과는 연소에 의한 압력 변동을 모사하지 않았다. 또한 초우크 조건은 수치적으로 모사

할 때 에러가 존재할 수 있다는 점을 알려준다. 하지만 인초우크 조건하에서 불안정한 연소가 일어날 때 상류 측에 어느 정도의 당량비 변동이 일어나는지에 관한 정량적인 예측을 해줄 수 있는 방법으로써 유용할 것으로 보인다.

### 후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC)와 BK21 그리고 미쓰비시 중공업(Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Robert C. Steele, Cowell Luke H., Cannon Steven M. and Smith Clifford E., 2000, "Passive Control of Combustion Instability in Lean Premixed Combustors," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122, pp. 412-419.
- (2) Hantschk, C. C. and Vortmeyer, D., 2002, "Numerical Simulation of Self-excited Combustion Oscillations in Non-premixed Burner," *Combustion Science and Technology*, Vol. 174, pp. 189-204.
- (3) Lieuwen Tim and Zinn Ben T., 1998, "The Role of Equivalence Ratio Oscillations in Driving Instabilities in Low NOx Gas Turbines," *27th International Symposium on Combustion*, pp. 1809-1816.
- (4) Shih Wang-ping, Lee Jong Guen and Santavicca Domenic A., 1996, "Stability and Emissions Characteristics of a Lean Premixed Gas Turbine Combustor," *26th International Symposium on Combustion*, pp. 2771-2778.
- (5) Hong Jung Goo, Lee Min Chul, Lee Uen Do, Oh Kwang Chul and Shin Hyun Dong, 2005, "An Experimental Study on the Instability of Combustion in a Dump Combustor with Respect to Fuel and Air Mixing and Flow Conditions," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 29, No. 8, pp. 963-970.
- (6) Kim Hyeon Jun, 2005, "Numerical Simulation on Thermoacoustic Instability in the Dump Combustor," M.S Thesis, KAIST.
- (7) 2004, "Methodology for STAR-CD v3.20a," *CD-adapco Group*.