

## 가스발생기 내부 유동 특성에 관한 수치 연구

유정민\* · 이창진\*\*

### Numerical study on the reactive flow in Gas Generator

Jungmin Yu\* · Changjin Lee\*\*

#### ABSTRACT

Gas generator is the equipment to produce high enthalpy gas used to generate sufficient power to operate turbine and pump system for propellant feeding in liquid rocket engine. Since the limit in operating temperature is imposed due to turbine blade, the gas generator has to be operated at the temperature far below stoichiometric maintaining fuel rich combustion. In this research, fundamental study was performed to understand the non-equilibrium combustion process with in-house code and CFD-ACE as well.

#### 초 록

가스발생기는 액체 추진 로켓의 터보 펌프 시스템에서 터빈을 구동시키기 위한 중요한 장치이다. 터빈 블레이드의 보호를 위해서 가스발생기의 출구 온도가 제한을 받으며, 이를 위해 농후 연소를 발생시킨다. 본 연구에서는 가스발생기의 연소에 대한 수치적 연구를 통하여 가스발생기 내부의 유동 특성을 이해하고 나아가 가스발생기의 성능을 예측할 수 있는 수치 해석 도구의 개발을 목표로 하고 있다.

**Key Words:** Liquid Rocket(액체 로켓), Turbopump system(터보펌프 시스템), Gas generator(가스발생기), O/F ratio(산화제/연료 혼합비), F-O-F triplet impinging injector(연료-산화제-연료 충돌형 인젝터)

#### 1. 서 론

가스발생기는 액체 추진 로켓의 연료 공급 방식 중 하나인 터보펌프 시스템에서 터보펌프의 터빈을 구동시키기 위한 장치이다. 가스발생기는 주 추진제의 일

부를 연소하여 생긴 고 엔탈피의 가스를 통해 터빈을 구동시킨다. 터빈 블레이드를 보호하기 위하여 주 O/F ratio를 변화시켜 농후 혼합 연소(Fuel rich)가 일어나게 하여 연소온도를 1000K 정도로 유지한다. 가스발생기의 연소는 비 평형 화학반응이며 이로 인한 검댕의 발생은 터빈 블레이드의 손상을 가져올 수 있으므로 연소실 내 잉여 연료의 혼합은 매우 중요하다.[1] 이를 위해 난류 고리와 같은 장치를 이용하기

\* 건국대학교 대학원 항공우주공학과

\*\* 건국대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: jungmin4692@hotmail.com

도 한다.[2]

가스발생기에서의 연소는 비 평형 화학반응이기 때문에 정확한 예측이 불가능하며 실험에는 많은 시간과 개발비가 소요되므로 가스발생기의 성능 예측을 위한 수치 도구가 필요하다. 가스발생기의 수치 연구는 궁극적으로는 비 평형 화학 반응과 액적의 분무 모델, 난류 고리가 장착되었을 때의 해석이 필요하며 현재 건국대학교에서 수치 해석 코드에 대한 연구가 진행 중에 있다.

본 연구의 목표는 건국대학교에서 설계되어 연소 실험을 거친 가스발생기에 대한 수치 해석을 통해 실험 결과와 비교하여 해석 코드의 검증을 하며 최종적으로는 비 평형 화학반응을 고려하여 가스발생기에 대한 수치 해석을 진행할 것이다.

## 2 본 론

본 수치 연구의 대상은 건국대학교에서 설계하여 연소 실험을 마친 가스발생기로 기본 형상은 Fig 1과 같으며 실험에 대한 자세한 내용은 참고문헌[3]에 나와 있다.

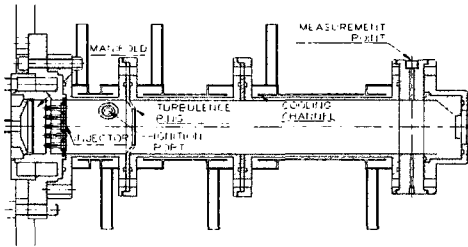


Fig. 1 Gas Generator

### 2.1 지배방정식

가스발생기 내부 유동의 지배방정식은 연속방정식, 운동량 방정식, 에너지 방정식으로 구성된다. 지배방정식의 일반적인 표현은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{U}\phi) - \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) = S_{\phi,g} + S_{\phi,l} \quad (1)$$

위의 식에서  $\phi$  는 해당 종속변수이고,  $\vec{U}$  는 속도벡터,

$\rho$ 는 밀도,  $\Gamma_\phi$ 는 확산항의 변환 계수이고,  $S_{\phi,g}$  과  $S_{\phi,l}$  은 소스 항을 나타낸다. 변수 명들과 소스 항에 대한 내용은 참고문헌[4]에 자세히 나와 있다.

### 2.2 난류 모델

난류 모델은 표준 k-ε 모델을 사용하며, 와류점성계수는 다음의 식으로 표현된다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

k와 ε에 대한 transport 방정식은 식 (3), (4)과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \rho P - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = C_{\varepsilon_1} \frac{\rho P \varepsilon}{k} - C_{\varepsilon_2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

생성항에 관한 방정식은(Production term) 다음의 식으로 표현된다.

$$P = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \quad (5)$$

위의 식들에서 쓰인 상수 값들은 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon_1} = 1.44, C_{\varepsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

가스발생기 내부 벽면 근처에서의 유동은 점성에 의한 영향이 크므로 난류 모델은 완전 난류 영역에서 사용하며 벽면 근처에서는 벽 함수(Wall function)를 사용한다. 벽 함수를 고려할 경우의 무차원식은 다음과 같다.

$$\left(1 + \frac{V_\tau}{\nu}\right) \cdot \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = 1 \quad (6)$$

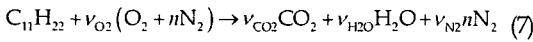
위의 식 (6)에서  $y^+ = yu_\tau/\nu$ ,  $U^+ = U/u_\tau$  이다.

벽 함수의 실제 적용은 점성 저층에서의 선형 속도 분포와 관성 저층에서의 대수적인 속도 분포가 만나는 지

짐에서 정의된 국부 레이놀즈수,  $y^+$ 가 11.63보다 크면 순수 난류이며 11.63이하에서는 순수 점성 유동으로 가정하여 응력 효과를 고려해 주는 방법을 사용한다.

### 23 화학 반응 모델

케로신과 LOx의 화학 반응식은 다음과 같은 1단계 비가역 반응으로 가정하였다.



화학반응식에  $N_2$ 가 추가된 것은 cold flow의 계산을 위한 것으로 실제 화학 반응에서는 고려되지 않는다.

가스장의 화학반응에서 지배적인 1단계 반응율은 식 (8)과 같다.

$$\dot{\omega}_f = A [C_{fuel}]^r [C_{O_2}]^b \text{Exp} \left[ -\frac{E_a}{R'T} \right] \quad (8)$$

식 (8)에서  $A$ 는 Arrhenius 계수,  $E_a$ 는 activation energy이고 케로신에 대해서는  $A = 2.8 \times 10^{15}$ ,  $E = 45$ 이다.

난류 반응 유동장에 대한 eddy dissipation model은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\omega}_f = -C_\omega \kappa \frac{E}{k} \min \left[ \bar{Y}_{\min}, \bar{Y}_p, (\bar{Y}_{\min} + \bar{Y}_p) \gamma_\lambda \right] \bar{Y}_{\min} = \min \left[ \bar{Y}_f, \bar{Y}_o \right] \quad (9)$$

여기서  $\bar{Y}_f = Y_f / I$ ,  $\bar{Y}_o = Y_o / s$ ,  $\bar{Y}_p = (Y_{CO_2} + Y_{H_2O}) / (1 + s)$  이다.  $s$ 는 stoichiometric 산소/연료비,  $\gamma_\lambda$ 는  $C_\lambda (\gamma \ell / k^2)^{1/4}$  이고, 상수  $C_\omega$ 와  $C_\lambda$ 는 각각 11.1과 2.1이다. 계수  $\kappa$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa = \frac{(\bar{Y}_{\min} + \bar{Y}_p)^2}{(\bar{Y}_f + \bar{Y}_p)(\bar{Y}_o + \bar{Y}_p)} \quad (10)$$

위의 혼합 지배적인 반응율 식은 밀도 난류 시간 단

위,  $k/\ell$ , 화학종 질량분율 등의 국부 특성치와 관련되며 연료의 반응율은 연료, 산소, 생성물의 가장 느린 난류 확산율, 즉 가장 작은 반응율이 선택된다. 마지막으로 이 반응율은 화학반응 지배적인 1단계 반응 모델 값과 비교하여 작은 값으로 선택된다.

Kerosene의 화학 반응율을 기본으로 하여 나머지 화학종들의 생성, 소모율은 다음과 같은 단순 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_f &= \frac{1}{s} \dot{\omega}_{O_2} = -\frac{1}{s+1} \dot{\omega}_p, \\ \dot{\omega}_{CO_2} &= \frac{\gamma_{CO_2} W_{CO_2}}{\gamma_{CO_2} W_{CO_2} + \gamma_{H_2O} W_{H_2O}} \dot{\omega}_p, \\ \dot{\omega}_{H_2O} &= \frac{\gamma_{H_2O} W_{H_2O}}{\gamma_{CO_2} W_{CO_2} + \gamma_{H_2O} W_{H_2O}} \dot{\omega}_p \end{aligned} \quad (11)$$

### 24 분무 모델링

실험에 사용된 인젝터 요소는 F-O-F 형이다.[5] 인젝터에서 젯이 분사되어 충돌하는 지점을 액적이 생성되는 지점으로 가정하였으며, 초기의 유량으로부터 인젝터 1개당 분사되는 유량을 구할 수 있다. 또한 액적이 충돌하여 퍼지는 방향의 개수를 지정하면 액적의 평균 지름으로부터 방향 당 액적의 개수를 구할 수 있다.

### 25 액적의 지배 방정식

액적은 액체 연료와 액체 산소 두 종류로 구분되며 각각의 지배 방정식은 동일하다. 액적의 질량, 운동량, 에너지 방정식은 Lagrangian 좌표계에서 계산되며 그 결과로부터 얻어지는 생성량들은 가스장의 소스 항이 된다. 액적의 질량 방정식은 식 (12)과 같다.

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_p = 2\pi d_p \rho D \ln(1+B)Nu \quad (12)$$

여기서  $d_p$ 는 액적의 지름,  $D$ 는 가스 확산 계수,  $B$ 는 Spalding 수를 나타내며  $Nu$ 는 Nusselt 수이다.

액적의 운동량 방정식은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$m_p \left( \frac{du_{p,i}}{dt} \right) = \frac{1}{2} \rho C_D (u_i - u_{p,i}) \bar{u} - \bar{u}_p |A_p \quad (13)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i$$

위 식에서  $m_p$ 는 액적의 질량을 나타내며  $\bar{u}_p$ 는 액적의 속도벡터,  $C_D$ 는 항력계수, 그리고  $\rho$ ,  $\bar{u}$ 는 각각 가스장의 밀도, 속도 벡터를 나타낸다.  $A_p$ 는 액적의 표면적을 의미하며  $m_p/\rho_p$ 과  $\pi d_p^3/6$ 는 액적의 체적을 나타낸다.

액적의 에너지 방정식은 식 (14)과 같다.

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = Nu \pi k d_p (T - T_p) - L \dot{m}_p \quad (14)$$

이때  $L$ 은 증발잠열,  $C_{p,p}$ 는 액적의 비열,  $k$ 는 가스장의 열전도도를 나타낸다. 위의 지배 방정식으로부터 액적의 증발량과 직경의 변화를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_p = \frac{1}{L} \pi k d_p (T - T_p) Nu \quad (15)$$

$$- \frac{d}{dt} \left( \frac{\rho_p \pi d_p^3}{6} \right) = \dot{m}_p \quad (16)$$

### 2.6 그리드와 계산 조건

가스발생기의 해석에는 축대칭의 그리드가 사용되며 가스발생기의 기본 사이즈와 그리드의 형상은 다음의 Fig.3, Fig.4와 같다.

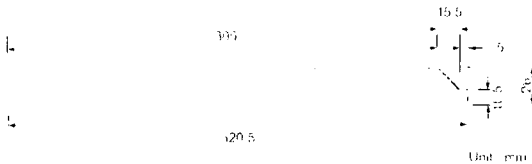


Fig.3 Baseline of Gas Generator

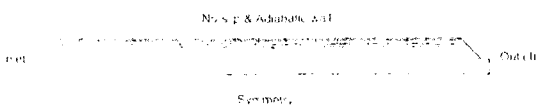


Fig.4 270x50 Grid of Gas Generator

그리드의 선정은 예비 계산 결과를 토대로 하여, 충분한 정확성을 얻을 수 있도록 하여 결정하였으며 선정된

그리드는 270x50이다. 격자의 수는 노즐 출구부분으로 약간 집중되어있다.

계산 시 초기 조건은 실험의 결과를 토대로 하여 연소실 내부 온도 980K, 압력 2.21Mpa 이며, 유량은 0.9Kg/s이다.

### 3. 결 론

수치 해석의 결과로부터 알고자 하는 것 중에서 중요한 것은 온도분포이다. 이는 가스발생기 후단의 터빈 블레이드의 재질에 따른 것으로 터빈 블레이드가 고온의 가스에 견딜 수 있어야 한다. 가스발생기의 온도 분포가 난류 고리가 있는 경우와 없는 경우에 편차가 다르게 나타나는데 이는 난류 고리가 장착된 경우 난류의 발생으로 농후 연소시의 유동의 혼합이 잘 이루어 졌기 때문이다. 또한 축 방향으로의 온도 분포도 유동의 혼합 정도를 알아볼 수 있는 방법이다. 축 방향의 온도 분포를 통해 가스발생기의 불필요한 축 방향 길이를 줄일 수 있다.

앞으로의 수치 해석에서도 최종적으로는 난류 고리가 장착된 형상의 가스발생기에 대한 연구가 진행될 것이며 터빈 블레이드에 나쁜 영향을 미치는 검댕의 발생을 예측 가능하도록 비 평형 화학 반응에 대한 수치 연구가 진행 될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. H. J. Dennis, Jr, and T. Sanders, NASA *Fastrac Engine Gas Generator Component Test Program and Results*, AIAA paper 2000-3401, AIAA/ASME/SAE/ASEE 36th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000.
2. C. S. Mah, "Evaluating the Operational Limits of a Gas Generator", AIAA paper 2001-3990, AIAA/ASME/SAE/ASEE 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit (2001).
3. 권순탁, '액체로켓 가스발생기의 최적설계 및

- 검증을 위한 연소실험', 건국대학교 석사학위  
청구논문, 2003
4. 장선용, '가스발생기 성능에 관한 수치 연구'  
건국대학교, 2004
  5. 권순탁, 이창진, 액체로켓 가스발생기용  
*F-O-F* 인젝터의 설계와 분사특성, 2003 추  
계 항공우주학회 학술대회, pp 1039-1043.  
2003