OpenFOAM을 이용한 비평형 플라즈마 연소 수치해석

박영도* · 허강열*†

Numerical analysis of nonequilibrium plasma assisted combustion using OpenFOAM

Yeongdo Park*, Kang Y. Huh*†

ABSTRACT

The nonequilibrium plasmas in which electrons have much higher energy compared to heavy species that cannot be represented with single temperature can enhance combustion reaction significantly. Therefore the nonequilibrium plasmas provide new effective mechanism to control combustion to overcome difficulties advanced combustion devices exploiting extreme operating parameters for high efficiency, lower emission.

Key Words : PAC, nonequilibrium plasma, OpenFOAM

인류가 사용하는 에너지는 연소기술에 크게 의존하고 있지만 화석 연료가 유한하고 연소기술에 동반하는 환경에의 영향에 따른 규제 강화로 인해 더욱 효율적이고 친환경적인 연소기술이 필요하다.

비평형 플라즈마는 연소의 화학적 특성을 변화시킬 수 있고[6], 비평형 플라즈마를 이용하여 연소 현상을 개선할 수 있음이 많은 연구를 통하여 시연되었다. 여러 가지 플라즈마 방전이 엔진 점화와 가스 터빈 안정화에 성공적으로 적용되었다. 또한 플라즈마 방전에 의해 연소기에서 배출되는 SOx, NOx, soot 등의 유해 물질이 감소하였다.[5]

비평형 플라즈마는 열역학적으로 평형 상태가 아니기 때문에 복수의 온도를 가진다. 플라즈마의 기체 성분은 상온 근처 정도의 낮은 온도를 가질 수 있으며 전자는 상대적으로 높은 온도를 가진다[3].

높은 에너지를 가지는 전자들이 중성 입자와 충돌하여 입자를 이온화하거나 여기하고(excitation) 해리하여 반응성이 높은 화학종들을 생성하며 또한 생성된 이온이나 여기된 입자들이 다시 중성 입자와 충돌하여 반응성 높은 입자들을 재차 생성하는 식으로 플라즈마에 의해 화학 반응이 촉진된다.[5]

따라서 기존에 사용되는 연소 반응 메커니즘에 더하여 이러한 새로운 반응들이 추가되어야 한다. 그 중에서도 전자가 관여하는 반응은 반응속도를 계산하기 위한 반응 속도 상수를 전자의 에너지 분포 함수와(EEDF) 전자 에너지의 함수인 충돌 단면적을 적분하여 얻는다.[7]

문헌 조사를 통해 전자의 충돌 단면적을 얻을 수 있고 two-term expansion Boltzmann 방정식 solver를[2] 이용하여 EEDF를 계산할 수 있다.

또한 플라즈마의 거동을 모사하기 위해 유체 방정식에 플라즈마의 전기적 특성에 의한 항을 추가한 방정식과 전기 포텐셜에 대한 Poisson 방정식을 함께 풀어야 한다[3].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{u}) + \nabla\cdot(\rho_s\vec{u}\vec{u}) + \nabla p = -\nabla\cdot\tau + \sum_{s=1}^{n} N_s e Z_s \vec{E} \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla\cdot\vec{j}_e = \omega_e,\ \vec{j}_e = -n_e\mu_e\vec{E} - \frac{D_e}{T_e}\nabla(n_e T_e) \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\nabla\phi,\quad \nabla^2\phi = -\frac{e}{\epsilon_0}\sum_{s=1}^{n} N_s Z_s \quad (3)$$

* 포항공과대학교 기계공학과
† 연락저자, huh@postech.ac.kr
TEL: (054) 279-2177 FAX: (054) 279-3199

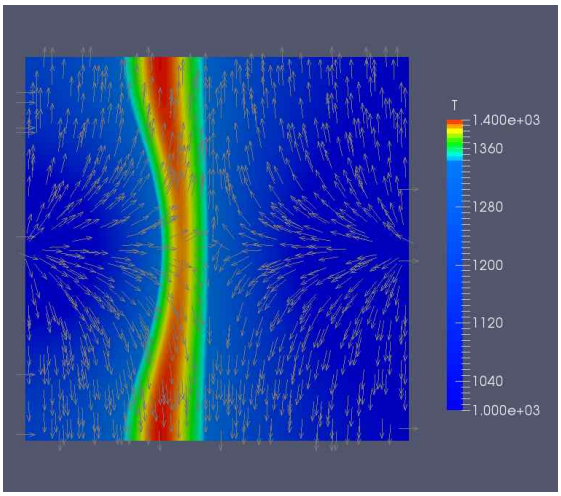

Figure 1. Temperature contour

OpenFOAM[4]은 이산화된 스칼라, 벡터, 텐서장(fields)에 대한 기본적인 연산과 finite volume method를 구현한 라이브러리를 중심으로하여 주로 열유동 분야의 다양한 문제에 대한 수치해석 프로그램을 포함하는 opensource CFD toolbox 이다.

본 연구에서는 OpenFOAM을 기반으로 그러한 방정식에 대한 수치 해석 프로그램을 작성하였는데 reacting flow 에 대한 core library를 수정하여 plasma 화학 반응의 반응 속도 계수를 계산

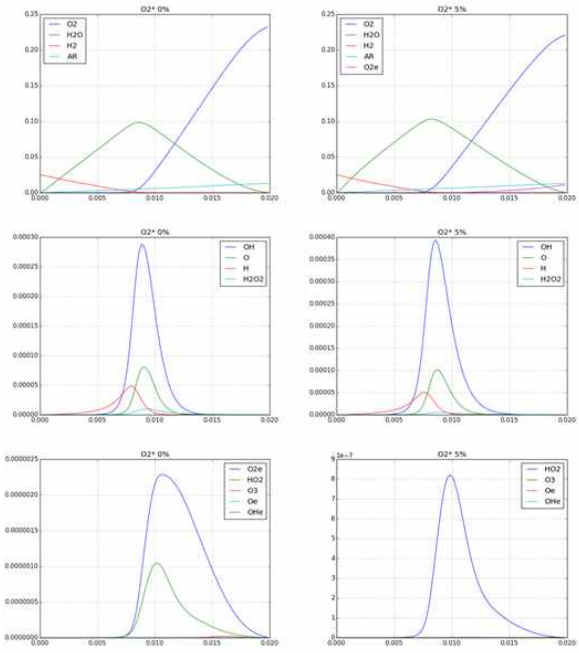

Figure 2. Mass fractions along center line

할 수 있게 하였으며 새로운 OpenFOAM solver를 작성하여 플라즈마의 유체 방정식과 Poisson 방정식을 구현하였다.

작성된 프로그램을 이용하여 플라즈마에 의한 반응성 높은 화학종이 포함된 2차원 대향류 확산 화염을 수치 모사하였다.

해석에 사용된 실험은 [1]에서 수행한 $1mm \times 38mm$ slit nozzle을 이용한 대향류 확산 화염으로 질소로 희석된 수소와 산소를 연료와 산화제로 각각 사용하였다. 해석 결과가 Fig. 1 과 Fig. 2 에 나와 있다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014R1A2A1A11051489).

참고 문헌

[1] Bourig, A., Thévenin, D., Martin, J. -., Janiga, G., & Zähringer, K. (2009). Numerical modeling of H2-O2 flames involving electronically-excited species O2(a1Äg), O(1D) and OH(2Ó+). *Proceedings of the Combustion Institute, 32 II*, 3171-3179.

[2] BOLSIG+, http://www.bolsig.laplace.univ-tlse.fr/

[3] Meichsner, J., Schmidt, M., Schneider, R., & Wagner, H. E. (Eds.). (2012). *Nonthermal plasma chemistry and physics*. CRC Press.

[4] OpenFOAM, http://openfoam.org/

[5] Starikovskiy, A., & Aleksandrov, N. (2013). Plasma-assisted ignition and combustion. *Progress in Energy and Combustion Science, 39*(1), 61-110.

[6] Sun, W. (2013). *Non-equilibrium plasma-assisted combustion* (Order No. 3553244). Available from ProQuest Dissertations & Theses Global. (1314388109).

[7] Hagelaar, G. J. M., & Pitchford, L. C. (2005). Solving the boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. Plasma Sources Science and Technology, 14(4), 722-733.