

탄화수소 연료 로켓 노즐의 화학적 평형 및 비평형 성능해석

최정열*, 정은주**, 정인석**

*부산대학교 항공우주공학과, **서울대학교 기계항공공학부

(E-mail : aerochoi@pusan.ac.kr)

일반적으로 산소를 산화제로 하는 로켓 연소실의 온도는 3,000-4,500K 정도이며, 압력은 수십 기압 정도에 이른다. 로켓 노즐을 통하여 외부 대기 조건까지 팽창하는 짧은 시간 동안 유동은 심한 온도와 압력의 변화를 겪는다. 이 과정에서 연소실에서 해리 상태에 있던 화학 조성은 온도 감소 과정을 거치면서 재결합하게 되고, 열 해리에 이용되었던 많은 양의 열이 환원된다. 따라서 연소실과 노즐 출구의 화학성분 조성에는 많은 차이가 발생하게 되며, 성분 조성을 잘 예측할 수 있어야 열역학적인 성능을 정확히 평가할 수 있게된다. 한편, 유동의 물성은 온도, 압력은 물론, 화학 조성의 함수이기 때문에, 화학 조성의 변화를 고려하지 않고 물성의 변화만을 정확히 고려할 수 있는 방법은 없다. 따라서 온도 변화에 따른 화학 조성의 변화와 물성의 변화를 고려하지 않는 동결 유동의 해석 방법으로는 로켓의 설계과정에 필요한 신뢰할 수 있는 해를 얻을 수 없다.(1)

화학조성의 변화를 고려하는 방법으로는 화학적 최종 상태를 고려하는 화학평형 해석 방법과, 반응속도를 고려하는 비평형 해석으로 구분하여 볼 수 있다. 그 동안의 전산 유체 해석에서는 공기를 대상으로 하는 재돌입 극초음속 유동의 화학평형 해석이 많이 이루어 졌으며, 잘 정리된 Curve-Fit 데이터를 이용하는 것이 보통이었다. 그러나 임의의 탄화 수소연료의 연소 생성물에 대한 화학평형 해석은 기존의 데이터가 존재하지 않으므로 각 위치에서 화학 평형 식을 풀이하여 조성을 결정하는 방법을 이용하여야 한다.(1)

한편, 화학적 비평형 해석, 또는 보다 명확한 용어로서, 반응속도 해석의 경우에는 기존에 연소 속도 해석이나 극초음속 유동의 비평형 해석 방법을 이용할 수 있다. 이 경우 고려하여야 할 사항은, 변화된 성분 조성에 따른 적절한 반응 메커니즘을 이용하여야 하는 것이며, 주된 반응의 해리 및 폭발 반응이 아니라 재결합 반응

이기 때문에 해리 에너지로부터 열에너지를 회복하는 과정이라는 것이다.(1,2)

동결 유동해석의 경우, 노즐에서의 에너지 회복을 고려하지 못하기 때문에 노즐의 최소 성능을 제시하여 주는 반면, 화학 평형 해석의 경우는 유속에 비해 반응 속도가 매우 빠른 극한에 해당하여 열에너지 회복이 최대인 노즐의 최대 성능을 예측케 하여 준다. 화학 평형 해석은, 연소해석의 기초 과정에 해당하여 이전의 연구에서 이론적인 노즐 성능 해석 과정에 이용되어 왔으나, 최근의 전산 유체 해석과 함께 이용하여 노즐 성능을 해석한 경우는 찾아보기 힘들다. 이는 보다 정확한 결과를 예측할 수 있는 비평형 해석이 이미 일반화되었기 때문이지만, 비평형 해석에 비하여 수렴특성이 좋으며, 노즐 성능의 최대 한계를 제시하여 줄 수 있다는 점에서 의미를 가진다고 할 수 있다.(1,3)

따라서 본 연구에서는 일차적으로 임의의 탄화수소 연료에 대한 화학 평형 해석 방법을 개발하고, 기존의 동결 유동 해석 코드를 수정하여 화학 평형 해석 방법을 결합함으로써 화학적 평형 유동의 해석 코드를 개발하였다. 또한 기존의 비평형 유동의 해석 코드(4,5)를 수정하여 로켓 노즐 유동을 해석함으로써, 동결, 화학적 평형 및 비평형 유동 해석에 따른 로켓의 추진 성능 변화를 비교 검토하였으며, 각 해석 방법의 정확도 및 계산 소요 시간 등에 따른 유용성을 살펴보았다.

참고문헌

- (1) Sutton, G.P., Rocket Propulsion Elements 6th Ed., John Wiley & Sons, 1992, New York.
- (2) Turns, S.R., An introduction to Combustion, McGraw-Hill, 1996, New-York.
- (3) Barrère, M., Jaumotte, A., Fraeijs de Veubeke, B. and Vandénkerckhove, J., Rocket Propulsion, Elsevier, 1960, Amsterdam.
- (4) Choi, J.-Y., Jeung, I.-S. and Yoon, Y., "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion, Part 1: Validation," AIAA Journal, Vol. 38, No. 7, July 2000, pp.1179-1187.
- (5) Choi, J.-Y., Jeung, I.-S. and Yoon, Y., "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion, Part 2: Comparison,"

Table 1 Summary of Exit Flow

	Frozen	Equilibrium	Non-Equil.
I_{sp} [s]	321	361	344
T [K]	900.4	2176	1458
$\gamma = C_p/C_v$	1.29	1.18	1.22
<i>Mach No.</i>	5.01	3.83	4.41
x_{H_2O}	0.403	0.623	0.497
x_{CO_2}	0.104	0.286	0.200
x_{CO}	0.168	0.037	0.092

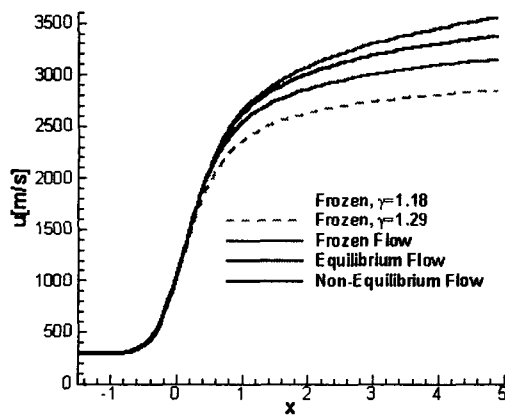


Fig. 1 Velocity Distribution along the Axis of Symmetry

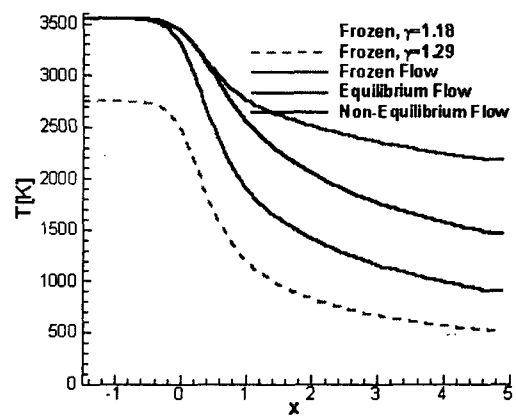


Fig. 2 Temperature Distribution along the Axis of Symmetry