

# KARI 30톤급 액체로켓엔진 노즐 유동 화학 반응 해석

이대성\* · 강기하\* · 조덕래\* · 최정열\*\* · 최환석\*\*\*

## Chemical Reacting Flow Analysis of the 30 tonf - class KARI LRE Nozzle

Dae-Sung Lee\* · Ki-Ha Kang\* · Duck-Rae Cho\* · J.-Y. Choi \*\* · H.-S. Choi \*\*\*

### ABSTRACT

Three methods of nozzle flow analysis, frozen-equilibrium, shifting-equilibrium and non-equilibrium approaches, were used to rocket nozzle flow, those were coupled with the methods of computational fluid dynamics code. For a design of high temperature rocket nozzle, chemical equilibrium analysis which shares the same numerical characteristics with frozen flow analysis can be an efficient design tool for predicting maximum thermodynamic performance of the nozzle. In this study, shifting-equilibrium flow analysis was carried out for the 30 tonf-class KARI liquid rocket engine nozzle together with frozen flow. The performance evaluation based on the 30 tonf-class KARI LRE nozzle flow analyses will provide an understanding of the thermochemical process in the nozzle and performances of nozzle.

### 초 록

로켓 노즐 유동해석에는, 전산 유체 역학 코드와 결합된 동결 유동 해석, 화학 평형 해석, 화학 비평형 해석이 사용되어진다. 고온 로켓 엔진 노즐의 설계에서, 동결 유동 해법과 동일한 수치적 특성을 가지는 화학평형 해석은 노즐의 열역학적 최대 성능을 예측하는 효율적인 설계 도구가 될 수 있다. 본 연구에서는 30톤급 KARI 액체 로켓 엔진 노즐에 대하여 동결유동 해석 및 화학평형 유동 해석을 수행하였다. 유동 해석 결과에 기초한 30톤급 KARI 액체 로켓 엔진 성능 평가는 노즐에서의 열화학적 특성에 대한 이해와 노즐의 성능을 제공할 것이다.

Key Words: KARI-30tonf-Class Liquid Rocket Engine(KARI 30톤급 액체로켓엔진), LOx(액체산소), Kerosene(케로신), Chemical-Equilibrium(화학평형), Rocket Performance(로켓 성능)

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원  
\*\* 정회원, 부산대학교 항공우주공학과  
\*\*\* 정회원, 한국항공우주연구원 엔진그룹  
연락처, E-mail: aerochoi@pusan.ac.kr

### 1. 서 론

일반적으로 산소를 산화제로 하는 로켓 연소

실의 온도는 3,000-4,500K 정도이며, 압력은 수십 기압 정도에 이른다. 로켓 노즐을 통해 외부 대기 조건까지 팽창하는 시간이 짧기에, 유동은 급격한 온도와 압력의 변화를 겪게 된다. 이 과정에서 연소실에서 해리 상태에 있던 화학 조성은 온도 감소 과정을 거치면서 재결합되고, 열해리에 이용된 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 있게 된다. 유동의 물성은 온도, 압력 외에도 화학 조성의 함수이기에, 화학 조성의 변화에 대한 고려가 없이, 물성의 변화만을 고려할 수 있는 방법은 없다. 따라서 온도 변화에 따른 화학 조성의 변화와 물성의 변화를 고려하지 않는 동결 유동의 해석방법은 로켓의 설계과정에서 요구되는 신뢰할 수 있는 해를 얻을 수 없다.[1]

화학조성의 변화를 고려하는 방법으로는 화학적 최종 상태를 고려하는 화학평형 해석 방법과, 반응속도를 고려하는 비평형 해석으로 구분할 수 있다. 탄화 수소연료의 연소 생성물에 대한 화학평형 해석은 기존의 데이터가 존재하지 않으므로 각 위치에서 화학평형 식을 풀어서 조성을 결정하는 방법을 이용해야 한다.

동결 유동해석의 경우, 노즐에서의 에너지 회복을 고려하지 못하기 때문에 노즐의 최소 성능을 제시해 주는 반면, 화학평형 해석의 경우는 유속에 비해 반응 속도가 매우 빠른 극한에 해당하기에 열에너지 회복이 최대인 노즐의 최대 성능을 예측가능하게 만들어준다.

이전의 KSR-III 로켓 노즐 성능해석과 같은, 화학 평형 해석과 전산 유체 해석이 함께 이용된 경우를 찾아보기는 쉽지 않다. 이는 보다 정확한 결과를 예측할 수 있는 비평형 해석이 이미 일반화되었기 때문이지만, 화학평형은 수렴특성이 더욱 좋으며, 노즐 성능의 최대 한계를 제시하여 줄 수 있다는 점에서 의미를 가진다.[2]

본 연구에선 기존의 동결 유동 해석 코드와 이를 수정한 탄화수소 연료에 대한 화학 평형 해석 방법이 적용된 화학적 평형 유동의 해석 코드를 이용한다. 이들 해석방법으로 KARI의 30

톤급 액체로켓엔진을 대상으로 하여 성능을 해석하며, 각 해석 방법의 정확도 및 계산소요 시간 등에 따른 유용성도 같이 살펴본다.

## 2. 지배방정식 및 해석 방법

### 2.1 동결 및 평형 유동의 방정식

본 연구에서 고려하는 동결 및 평형 유동의 방정식을 벡터형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} + \frac{1}{r} H = 0 \quad (1)$$

$$Q = (\rho, \rho u, \rho v, e)^T, \quad (2)$$

여기서 화학조성의 변화와 비열의 온도에 따른 변화를 고려하는 경우, 전체 에너지와 압력은 다음과 같이 정의된다.

$$e = \sum_{k=1}^{NS} x_k \left( \int_{T_{ref}}^T \frac{C_{v_k}}{M_{w_k}} dT + H_{f_k}^o \right) + \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2) \quad (3)$$

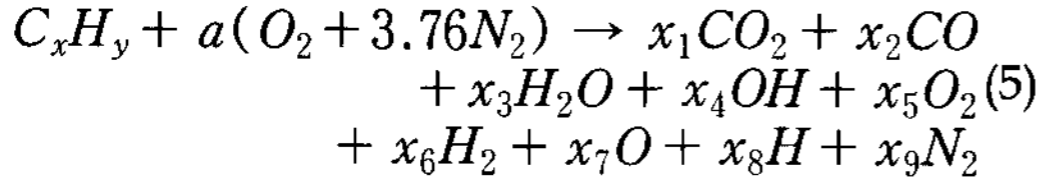
$$p = \rho RT / \sum_{k=1}^{NS} x_k M_{w_k} \quad (4)$$

이 방정식은 기존의 동결 유동 해석 방법으로 해석할 수 있으나, 비열과 압력이 온도의 함수이므로, (3) 식으로부터 온도의 계산을 수행하여야 하며, 정확도와 안정성을 위하여 기존의 해법에서 압력의 편도함수에 해당하는 부분을 수정하여야 한다. [3,4,5] (3,4)식의 물분을  $x_k$  는 다음 절의 화학평형 계산으로부터 얻어지며, (3,4)식에서 계산된 온도와 압력은 평형 조성의 계산에 다시 이용되어 반복적인 계산이 이뤄진다. 한편 물분율,  $x_k$  는 온도 및 압력에 관계없이 일정한 경우에는 비열을 온도만의 함수로 고려하는 동결유동의 해법이 된다. 온도의 계산과 평형 상수 계산에 이용되어진 열역학 데이터들은 NASA Polynomial Fit 를 이용하였다.[6]

### 2.2 화학 평형 해석

본 연구의 화학 반응 해석에서는 탄화수소 연료의 연소 생성물로서 ( $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $N_2$ ) 등이며, 질소는 불활성으로 가정

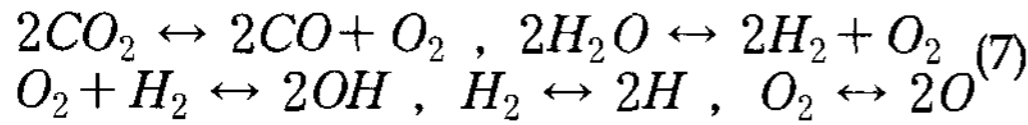
하였다. 이 경우 임의의 탄화수소 연료가 연소하는 경우의 총괄 반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서 성분의 비율을 계산하기 위하여 필요한 것은 각 원소에 대한 성분 보존식과 온도 및 압력의 함수로 표현된 화학 평형식이다.

$$R_{C/O} = x/2a, \quad R_{H/O} = y/2a, \quad (6)$$

$$R_{N/O} = 3.76, \quad \sum_{k=1}^{NS} x_k = 1$$



위의 (6), (7)식은 닫힌 형태의 대수적 연립 방정식을 이루며, Newton 반복 해법으로 풀어낼 수 있다.

노즐 유동의 입구 조건을 위해서는 연소 온도, 압력 및 화학 조성을 구해야하는데, 질 유량과 관련 있는 연소실의 압력은 60 bar로 가정하였고, 온도 및 화학 조성은 연소 과정을 정압 단열 과정으로 가정하여 (6), (7)의 화학 평형식과 엔탈피 보존식을 이용하여 구하였다.[1,2] 본 연구에서는 KARI 30톤급 액체로켓엔진에 이용된 케로신과 액체산소를 1.4의 당량비 조건에서 연소시켰으며, 여기서 얻어진 연소실 출구에서의 압력, 온도 및 성분 조성을 노즐 유동 해석에 입구 조건으로 이용하였다.

유동장의 화학적 평형 해석은 (1)식의 유동 해석에서 얻어진 온도와 압력으로 (6), (7)식으로부터 화학조성을 구하여 다시 유동장으로 환원하는 반복적 계산을 통하여 이루어진다.

### 2.3 유동 해석 조건

본 연구에서 고려하는 로켓 엔진은 KARI 30톤급 액체로켓엔진으로 노즐 출구 대 노즐 목면 적비가 60 이다. 계산 격자는 동결 유동과 평형 유동 계산에 노즐 벽면과 노즐목에 모아진 120×90 격자를 이용하였으며, 축 선상에서 대칭

조건을 적용하였다. 계산의 초기 조건으로는 연소실의 단열 계산 결과를 전 영역에 부여하였으며, 경계조건으로는 노즐 벽면에서 단열조건을 이용하였고, 입구에서는 속도를 외삽하는 아음속 조건을 이용하였다. 출구에서는 계산의 초기에 빠른 수렴을 위하여 낮은 압력을 부여한 후, 출구 마하 수가 1을 넘으면, 외삽하는 유출류 경계 조건을 이용하였다. 이러한 초기 및 경계 조건은 동결, 평형 유동에 모두 동일하게 적용하였다.

## 3. 계산 결과 비교 및 검토

### 3.1 계산 결과 비교

본 연구에서 이용한 동결 해법은 화학 성분 변화를 고려하지 않지만, 비열을 상수로 가정한 경우보다는 더 낮은 결과를 보여줄 수 있다. 단 각 노드에서 반복적인 온도계산이 요구되어지게 되면 시간이 더 소요되며, 수렴성에는 차이가 없다.

화학 평형해석은 유동의 측면에서는 압력이 대수적 평형 계산으로부터 얻어지는 성분 조성의 비선형 함수라는 점에서 다소 차이가 있지만 수렴성에서는 근본적으로 차이가 없다. 그러나 이 경우 각 노드에서 평형 상수 계산과 비선형 연립 대수 방정식을 해석해야 하기에 훨씬 많은 계산 시간이 요구된다. 본 연구에선 CFL 수를 10을 사용하였다.

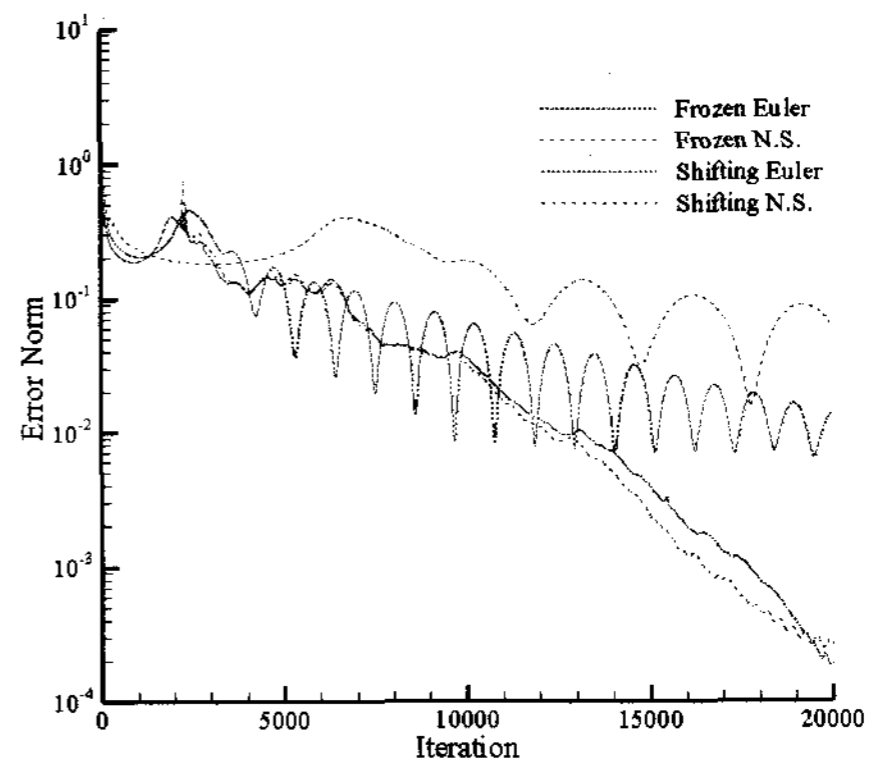


Fig. 1 Comparison of Convergence History

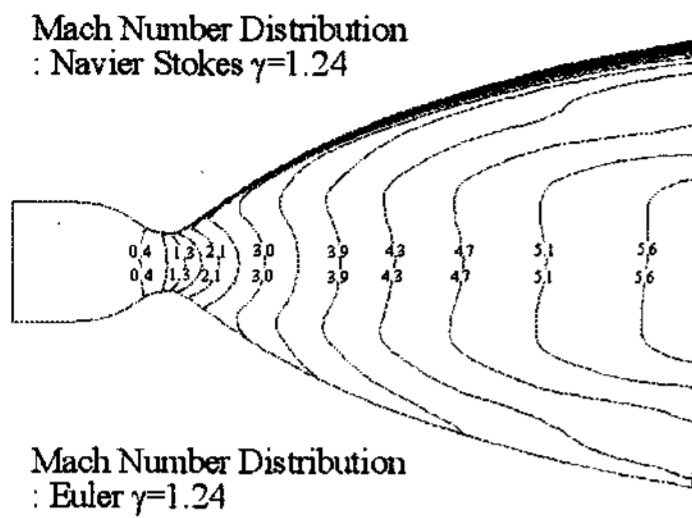


Fig. 2 Flow Field Results from Constant  $\gamma$  Flow Calculation

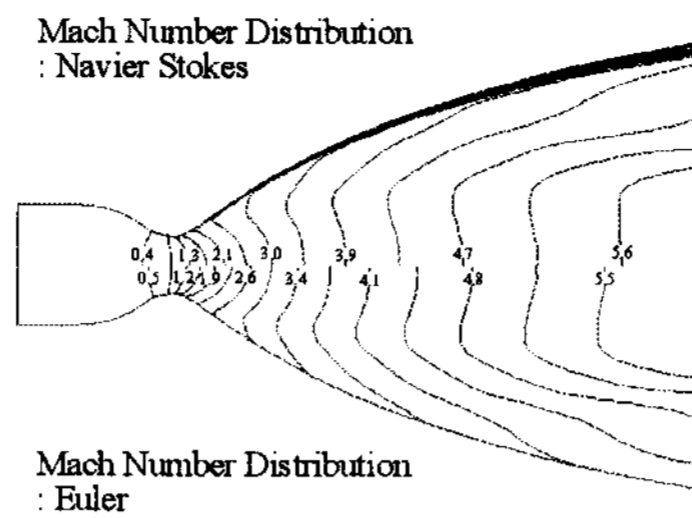


Fig. 3 Flow Field Results from Frozen Flow Calculation

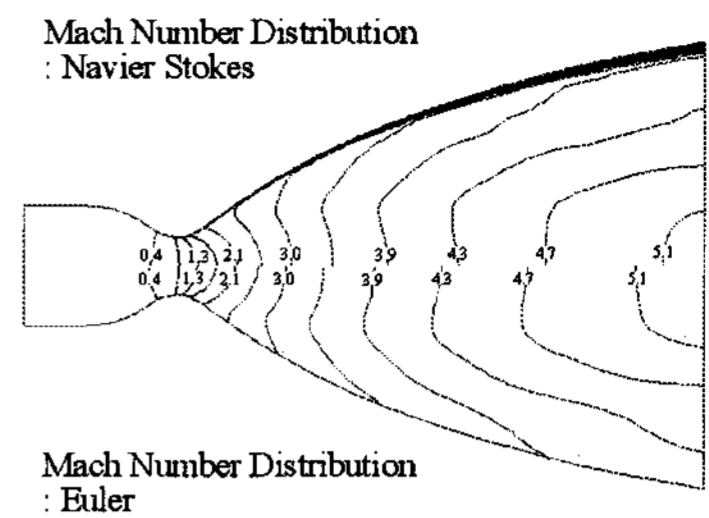


Fig. 4 Flow Field Results from Equilibrium Flow Calculation

각 해석 방법에 소요된 계산 시간 및 수렴 곡선을 Table 1과 Fig.1에 도시하였다.

Table 1. Computing Times/Iteration

	Constant $\gamma$	Frozen	Equilibrium
Euler	0.02 sec	0.03 sec	2.37 sec
N.-S.	0.02 sec	0.03 sec	2.83 sec

### 3.2 결과 검토

각 해석 방법에 따른 해석 결과 중 유동장의 마하 수를 점성해석과 비점성 해석으로 나누어 Fig. 2-4에 도시 하였으며, 점성 해석에 기초하여 노즐 출구에서의 성분 분포와 음속 및 비추력을 Table 2에 정리하였다. 동결 유동의 경우 노즐에서 팽창 과정 중에서 재결합 반응이 이루어 지지 않기에, 온도가 회복되지 않아서 화학평형 해석에 비해 낮은 온도가 나타남을 볼 수 있다. 약 500K 이상의 온도 차이를 보이며 이는 노즐 설계에 중요한 차이를 보일 수 있다.

Table 2를 통해서 노즐에서의 재결합 반응으로 수증기 및 이산화탄소 등이 생성되는 것이 확인 가능하며, 동결 유동 해석의 경우 추력이 283,000N 이며 화학평형 해석의 경우 328,000N 으로 30톤급에 맞는 추력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Summary of Exit Flow

	Constant	Frozen	Shifting
$I_{sp}$ [s]	402	339	402
$T$ [K]	1071.1	1081	1461.7
$\gamma=C_p/C_v$	1.24	1.22	1.24
Mach No.	5.20	5.20	5.61
$x_{H_2O}$	0.264	0.264	0.318
$x_{CO_2}$	0.131	0.131	0.133
$x_{CO}$	0.320	0.320	0.345

### 4. 결 론

동결 해석과 화학평형 해석으로 KARI 30톤급 액체로켓엔진의 최저 성능과 최고 성능은 물론, 노즐내의 화학 조성 분포도 예측할 수 있었다. 비록 비평형 유도 해석이 실제 상황에 가까운 결과를 주지만, 계산에 소요되는 시간의 효율성을 고려할 때 동결 유동 및 화학평형유동 해석이 노즐 유동에서 발생할 수 있는 한계 성능을 제시하기에 충분히 활용가치가 있는 것으로 생각되어 진다.

### 참고 문헌

1. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992

2. Turns, S. R., An introduction to Combustion, McGraw-Hill, 1996, New-York.
3. 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
4. Choi, J.-Y., Jeung, I.-S. and Yoon, Y., "Computational Fluid Dynamics Algorithms for Unsteady Shock-Induced Combustion, Part 2: Comparison," AIAA Journal, vol. 38, No. 7, July 2000, pp.1188-1195
5. 최정열, 김진수, 오세중, "압축성 실제기체에 대한 Roe의 해법," 2000년도 항공우주학회 추계 학술발표회논문집, pp.646-649, 2000년 11월 11일, 울산대학교