

과산화수소 단일 추진제 PDE의 성능 특성에 관한 수치적 연구

조홍식* · 정인석* · 최정열**

Performance Characteristics of Hydrogen Peroxide Mono Propellant PDE (Pulse Detonation Engine)

Heung-Sik Cho, In-Seuck Jeung and Jeong-Yeol Choi

ABSTRACT

Supersonic and hypersonic aircrafts must pass wide range of speed to reach high speed region. But for existing engines the most efficient operating speed ranges are decided according to their flying speed, so an engine which mixes several engines like TRJ (Turbo Ramjet) and ARJ (Air Turbo Ramjet) has been planed.

This mixed type engine has inefficiency that more than two engines must be installed simultaneously, but the pulse detonation engine (PDE) that uses detonation wave has a strong point that it can operate in all speed range with single engine.

This paper deals with the simulation of the pulse detonation engine which uses hydrogen peroxide (H_2O_2) mono propellant. Hydrogen peroxide is low-cost propellant, and it is reacted without oxidizer. Comparison between H_2-O_2 mixture with H_2O_2 mono propellant about thrust, pressure, temperature and velocity shows that H_2O_2 is a very useful propellant.

Key Words : Pulse Detonation Engine, Detonation Combustion, Hydrogen Peroxide

1. 서론

초음속, 극초음속 항공기는 이륙에서 고속비행에 진입하기까지 넓은 속도범위를 운행하여야 한다.

그러나 기존의 엔진들은 비행속도에 따라 가장 효율적으로 작동하는 속도범위가 정해져 있기 때문에 TRJ(Turbo Ramjet)나 ARJ(Air Turbo Ramjet)과 같은 몇 개의 엔진을 복합한 엔진이 구상 되어져 왔다.

이러한 복합엔진은 두 개 이상의 엔진을 동시에 장착하여야 하는 비효율성을 가지고 있으나 테토네이션 연소를 이용하는 주기적 테토네이션 엔진(Pulse Detonation Engine)은 하나의 엔진만으로 전 속도 범위를 비행할 수 있다는 점에서 최대의

장점이 있다.[1]

본 연구에서는 PDE가 추진제와 산화제의 혼합비를 적절히 조절하지 않으면 테토네이션을 유발하지 못하는 문제점을 해결하기 위해서 산화제 없이 반응하는 과산화수소(H_2O_2) 추진제를 이용하여 그 특성을 살펴보고, 과산화수소를 단일 추진제로 사용하는 PDE의 성능 특성에 관해 수치적 계산을 수행하여, 과산화수소가 단일 추진제로써 효율성이 있는가를 알아보려고 한다.

2. 과산화수소의 특성 및 수치 해법

2.1 과산화수소의 특성

2차 세계 대전에서 독일이 처음 잠수함의 추진제로 개발하였던 과산화수소는 무색무취이고 끓는점 $150^{\circ}C$, 어는점 $-0.4^{\circ}C$ 인 상온에서 액체 상태로 존재하는 물질이다. 별도의 산화제 없이도 반응($H_2O_2 \Rightarrow H_2O + 1/2O_2$)하기 때문에 미국 등

* 서울대학교 항공우주공학과

† 연락저자, remo113@snu.ac.kr

** 부산대학교 항공우주공학과

각국에서는 로켓이나 기타 엔진의 추진제로 각광을 받고 있고, 계속 연구 중에 있다. 또한 다른 추진제에 비해 가격이 저렴하여 추진제로 사용하기에 유리하다.

추진제로 사용되는 과산화수소는 95% 이상의 높은 농도가 요구되는데, 농도가 높아야 추진제로 사용이 가능하지만, 강력한 폭발의 위험성이 있으므로 주의하여야 한다.

자세한 성질은 아래의 표와 같다.

General	
Name	Hydrogen Peroxide
Chemical formula	H ₂ O ₂
Appearance	Colorless liquid
Physical	
Formula weight	34.0 amu
Melting point	272.6 K (-0.4°C)
Boiling point	423 K (150°C)
Density	1.4×10 ³ kg/m ³
Thermochemistry	
Δ _f H ^o _{gas}	-136.11 kJ/mol
Δ _f H ^o _{liquid}	-188 kJ/mol
Δ _f H ^o _{solid}	-200 kJ/mol
S ^o _{gas,1bar}	232.95 J/mol · K
S ^o _{liquid,1bar}	110 J/mol · K
Price	
95% Concentrate	\$ 1.00 per/kg
98% Concentrate	\$ 2.00 per/kg
Safety	
Ingestion	Death possible
Skin	Causes bleaching
Eye	Dangerous

Table 1. 과산화수소의 성질

2.2 수치 해법

연소기 내의 화학반응이 있는 초음속 유동장을 해석하기 위하여, 축대칭/2차원 Euler 방정식을 사용하였고, Navier-Stokes 방정식을 이용한 계산 결과와 비교하였다.

아래의 방정식은 축대칭/2차원 Navier-Stokes 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \alpha H = \frac{\partial F_v}{\partial x} + \frac{\partial G_v}{\partial y} + \alpha H_v + W$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \vdots \\ \rho_N \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ \rho k \\ \rho \omega \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho_1 u \\ \vdots \\ \rho_N u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ (e+p)u \\ \rho uk \\ \rho u \omega \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} \rho_1 v \\ \vdots \\ \rho_N v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ (e+p)v \\ \rho vk \\ \rho v \omega \end{bmatrix} \quad H = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} \rho_1 v \\ \vdots \\ \rho_N v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ (e+p)v \\ \rho vk \\ \rho v \omega \end{bmatrix}$$

$$F_v = \begin{bmatrix} -\rho_1 u_x^d \\ \vdots \\ -\rho_N u_N^d \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \beta_x \\ \mu_k \partial k / \partial x \\ \mu_\omega \partial \omega / \partial x \end{bmatrix} \quad G_v = \begin{bmatrix} -\rho_1 v_x^d \\ \vdots \\ -\rho_N v_N^d \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \beta_y \\ \mu_k \partial k / \partial y \\ \mu_\omega \partial \omega / \partial y \end{bmatrix} \quad H_v = \frac{1}{y} \begin{bmatrix} -\rho_1 v_x^d \\ \vdots \\ -\rho_N v_N^d \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} - \tau_{yy} \\ \beta_y \\ \mu_k \partial k / \partial y \\ \mu_\omega \partial \omega / \partial y \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}$$

$$p = \sum_{k=1}^N \frac{\rho_k}{M_k} RT$$

여기서, M_k는 화학종의 k의 분자량이고 R은 일반 기체상수이다. 온도 T는 정의된 총 에너지 양으로부터 Newton-Raphson 반복법을 이용하여 구하였다.

화학 반응 모델은 GRI-Mech 2.11을 바탕으로 한 수소-공기 연소에 관한 9화학종 25단계 상세 화학 반응 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 질소의 해리 반응이 전체 유동장의 특성에 영향을 주지 않기 때문에 질소를 비활성 기체로 가정하였다. 각 화학종의 비열과 동점성 계수, 열전달계수는 6000K까지 유효한 NASA 다항식을 이용하였다.[2]

난류 모델은 벽면 경계층에서 유리한 SST(Shear Stress Transport)모델을 이용하였다.[3]

지배 방정식은 유한 체적법을 이용하였고, 점성항은 중심 차분법을 이용하여 이산화하였다. 공간 차분은 Roe의 FDS (Flux Difference Splitting)기법을 이용하였고, 고차의 공간 차분 정확도는 MUSCL (Monotone Upstream Method for Scalar Conservation Law)기법으로 유지하였으며, TVD 성질을 유지하기 위하여 미분형 제한자를 사용하였다. 또한 시간 적분은 LU-SGS 기법을 이용하였다.[4]

2.3 계산 격자

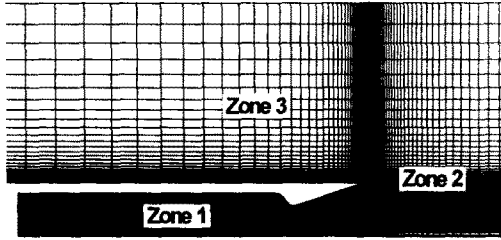


Fig. 1 계산 격자

확산형 노즐이 있는 연소실 형상으로 계산 격자를 만들었다. 계산 격자는 3개의 영역으로 나누어져 있는데, 연소실과 노즐을 Zone1, 나머지 부분은 Zone2, Zone3로 하였다. 노즐을 포함한 연소실의 총 길이는 80cm, 연소실의 직경은 16cm, 노즐 목의 직경은 12cm, 노즐 출구의 직경은 20cm로 하였다. 총 격자점의 개수는 약 100000개이고, 연소실과 노즐 부분에 더 많은 격자를 배치하여 해의 정확도를 높였다.

3. 결과검토

3.1 N-S 와 Euler의 비교

N-S 방정식과 Euler 방정식을 이용하여 계산한 결과를 추력, 압력, 온도, 속도에 대하여 비교하였고, 초기 조건은 지상 조건($p=1\text{atm}$, $T=300\text{K}$)으로 하였다. 자세한 결과는 Fig. 2와 같다.

계산 결과 값들은 노즐 끝 중심부에서 측정된 값들이다. 또한 연소파가 노즐에서 반사되어 앞쪽 벽면에 다시 돌아오는데 걸리는 시간이 1ms이기 때문에 이 때까지의 계산 결과 값을 비교하였다. Fig. 2를 살펴보면 N-S와 Euler의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 계산 시간을 절약하기 위해 이후의 모든 계산은 Euler로 하였다.

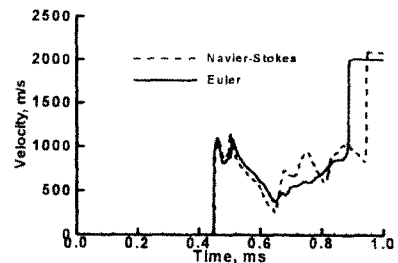
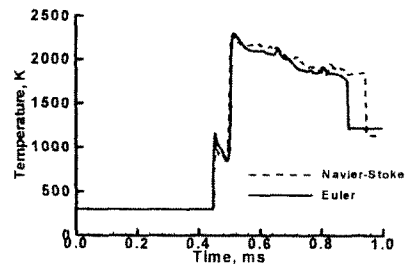
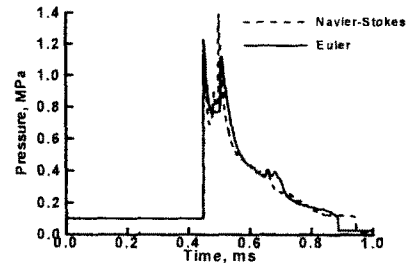
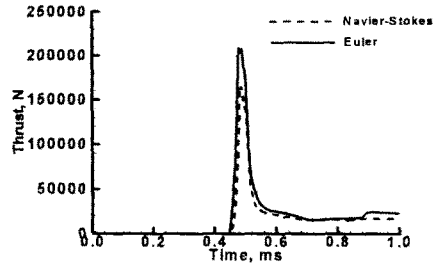


Fig. 2 N-S 와 Euler의 추력, 압력, 온도, 속도에 대한 비교

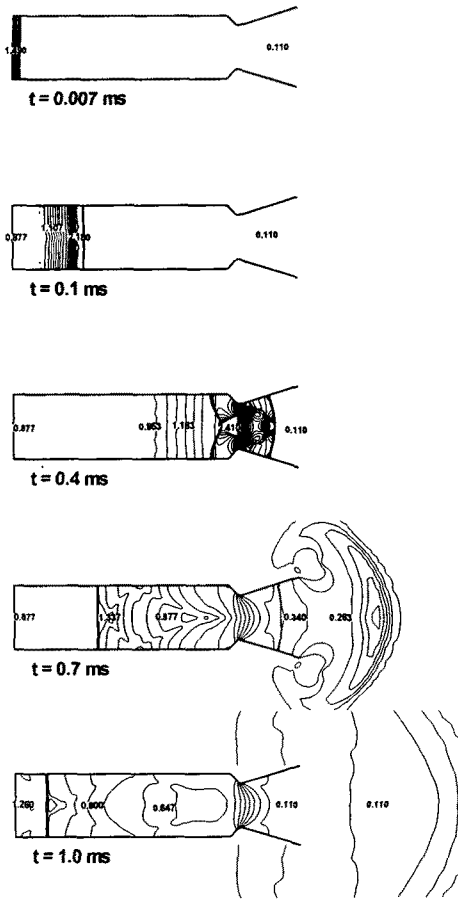


Fig. 3 시간에 따른 압력[MPa] 분포

Fig. 3의 시간에 따른 압력 분포를 살펴보면, 폭굉파 전과 후의 압력차가 약 20배 정도이고 폭굉파가 노즐을 통과 할 때 걸리는 시간이 약 0.4ms이고 전체의 길이가 80cm 이므로 폭굉파의 속도는 약 2000m/s이다.

이는 C-J 데토네이션 조건[6]을 만족하는 값으로 실제로 데토네이션이 형성되었음을 알 수 있다.

또한 약 0.9ms 일 때에 노즐 효과에 의해 폭굉파가 팽창하므로 압력과 온도는 떨어지지만, 속도가 증가하는 것을 알 수 있다.

추력의 경우를 보면, 실제로는 3ms 이상 지나야 연소 가스가 완전히 배출된다. 즉 연발 구동을 가정하면 처음 점화를 한 후에 재 점화까지 걸리는 시간이 약 3.5ms 이다. 이 시간까지의 평균 추력을 계산하면 약 17000 N 이다.

3.2 H₂-O₂와 H₂O₂의 비교

추진제를 H₂-O₂ 혼합기와 H₂O₂ 단일 추진제를 이용한 경우에 대하여 계산하였다. 초기 조건은 지상 조건(p=1atm, T=300K)으로 하였다.

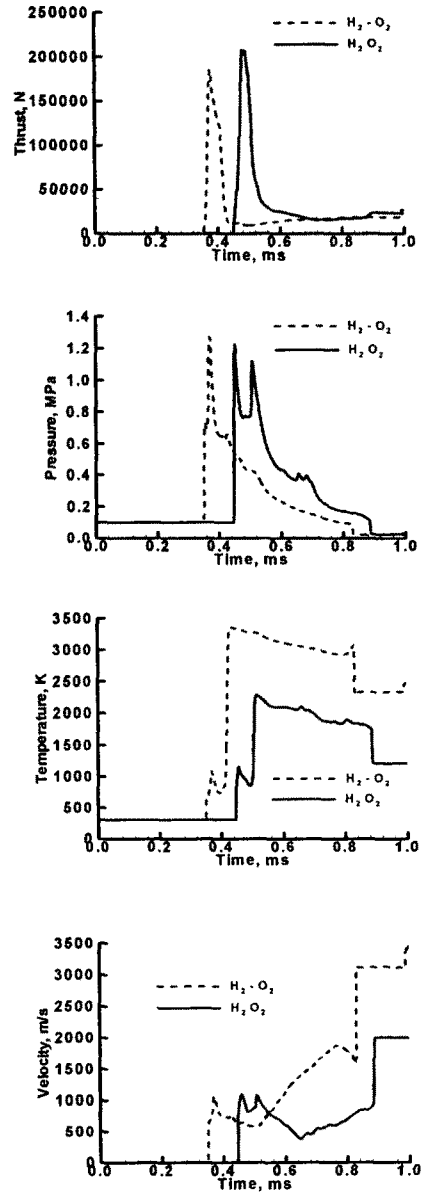


Fig. 4 H₂-O₂ 혼합기와 H₂O₂ 단일 추진제의 추력, 압력, 온도, 속도에 대한 비교

결과에서 H_2-O_2 혼합기를 사용했을 경우, H_2O_2 단일 추진제를 사용했을 때 보다 시간이 0.1ms 정도 빠르고, 온도와 속도가 더 높은 것으로 보아 연소가 더 활발히 진행됨을 알 수 있다. 그러나 추력은 거의 차이가 없었다. 이는 연소할 때의 압력 값이 두 경우 모두 비슷하기 때문이다. 즉 PDE에서는 압력이 추력을 결정하는 중요한 요소라는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

기존 PDE의 추진제로 과산화수소 단일 추진제의 사용이 가능한지를 알아보기 위하여 Euler 방정식을 이용하여 계산하였다. 또한 H_2-O_2 혼합기를 이용하여 계산한 결과와 비교하면 H_2 와 O_2 의 반응이 단일 추진제의 반응 보다 더 활발하여 연소 온도와 폭굉파의 속도는 높지만, 추력 값에는 큰 차이가 없었다.

이것은 과산화수소 단일 추진제를 사용하면 산화제가 필요 없기 때문에 실제 엔진의 제작이 용이해지고, 로켓과 같이 산화제를 따로 공급해 주어야 하는 엔진의 추진제로써 매우 유용하다는 것을 보여준다.

과산화수소 단일 추진제는 가격이 저렴하고, 산화제 없이 반응을 하는 특성을 가지고 있어서 추진제로 사용하면 많은 장점이 있지만 또한 강력한 폭발의 위험성도 있기 때문에 이에 대한 더 많은 연구가 있어야 하겠다.

후 기

본 연구는 2003년도 두뇌한국21사업으로 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. Helman, R.P. Shreeve, S. Eidelman, "Detonation Pulse Engine", AIAA Paper 86-1683, Jun. 1986
- [2] W. C. Jr. Gardiner, "Combustion Chemistry," Springer-Verlag, New York, 1984
- [3] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Application," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, 1994, pp.1598-1605
- [4] S. Shuen and S. Yoon, "Numerical Study of Chemically Reacting Flows Using a Lower-Upper Symmetric Successive Overrelaxation Scheme", AIAA Journal, Vol. 27, No.12, 1989, pp.1752-1760
- [5] Choi, J. Y. "Supersonic detonative Mode Starting Process of Supersonic Combustion Ram Accelerator", Ph. D. Dissertation, Seoul National Univ., 1997
- [6] D. L. Chapman, "On the Rate of Explosion of Gases", Philosophical Magazine, Vol. 47, 1899, pp.90-103