

케로신-공기 혼합물의 비정상연소 모델과 탄소성 관의 동적 거동 수치해석

이영헌* · 광민철* · 여재익*†

Numerical Analysis of Responses of a Elasto-plastic Tube under Kerosene-air Mixture Detonation

Younghun Lee*, Min-cheol Gwak*, Jai-ick Yoh*†

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation on kerosene-air mixture detonation and behaviors of thermal elasto-plastic thin metal tube under detonation loading based on multi-material analysis. The detonation loading is modeled by the kerosene-air mixture detonation which is compared with CJ condition and experimental cell size. And the thermal softening effect on elasto-plastic model of metal tube is indicated by different dynamic response of detonation loaded tube in various temperature and tube thickness.

Key Words : Kerosene-air mixture, Detonation, Thermal softening, Elasto-plastic behavior

PDE(Pulse detonation engine)는 비정상 연소인 데토네이션의 강한 압력과 온도에 기인한 높은 포텐셜 에너지를 이용하는 고효율의 엔진으로서, 항공/우주 추진 분야에서 연구되어 오고 있다. PDE의 연료로는 수소, 메탄 등이 사용되고, 연료 특성에 대한 연구를 위하여 연소폭발전이현상을 비롯한 데토네이션 특성에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 또한 적용되는 엔진의 종류에 따라 수 mm에서 수 m에 이르는 다양한 크기의 PDE에 대한 연구에 이르기 까지 광범위한 연구가 진행되어 오고 있다[1-4].

특히 케로신의 경우, 기존의 로켓 및 항공기의 연료로 사용되거나 엔진의 효율을 높이기 위하여 PDE기술을 적용하는 시도가 있어왔고, 이를 위하여 케로신에 대한 데토네이션 연구가 실험적으로 수행되고 있다.[3,4]. 하지만 케로신 데토네이션은 연료의 복잡한 성분으로 인하여 모든 화학반응식을 고려한 수치 해석은 계산 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 그 정확도를 높이는 것이 어렵다. 따라서 여러 종류의 가연성 기체 혼합물에 대하여 계산 효율 및 용이성을 위하여 1단계의 화학반응식을 사용한 연구가 수행된 사례[2, 5]를 바탕으로 1차적으로 1단계 화학반응식을 기

반으로 하는 반응식이 제안되었다. 본 연구에서는 케로신 혼합물의 기화 온도 보다 높은 433 K으로 예열되어 있는 가연성 기체 혼합물을 반응물로 하는 케로신-공기 혼합물의 데토네이션을 모델링을 수행하였다. 데토네이션 모델은 C-J 값과 실험적 데토네이션 셀 사이즈와의 비교를 수행하여 검증하였다. 하중에 의해 탄소성 거동하는 구조에 대하여 소성/탄성 거동은 bending 문제를 통하여 각각 실험값 및 MSC. NSTRAN (FEM) 결과와의 비교를 수행하였다. 또한 다물질 해석을 기반으로 하여 기체 혼합물의 데토네이션의 전파와 고체 벽면의 상호 작용에 대한 해석을 수행하여, 고체의 탄성 변형이 데토네이션 전파에 미치는 영향을 분석 하였다. 이는 작은 크기의 PDE 설계 및 다물질 연구에 있어서 연구적 기반을 제공할 것이다.

본 연구에서는 얇은 스테인레스 스틸 관 내 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 전파에 미치는 관의 탄소성 변형의 영향을 수치적으로 살펴보았다. 여기서, 케로신-공기 혼합물의 초기 온도는 433 K으로 가정하여 기체 혼합물로 가정된 연소를 해석하였다. 관 내부에서 발생하는 혼합물의 데토네이션 전파 현상 및 관의 탄소성 변형을 확인하기 위하여 2차원 직교/원통 좌표계를 이용하여 계산을 수행하였으며 사용된 원통 좌표계의 지배 방정식은 아래의 식 (1)-(5)과 같다.

* 서울대학교 항공우주공학부

† 연락처, jjyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1507 FAX : (02)-882-1507

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) + \frac{\rho u_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_r) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r^2 + P) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_r u_z) \\ & + \frac{\rho u_r^2}{r} - \delta \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr}}{r} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_z) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z^2 + P) \\ & + \frac{\rho u_r u_z}{r} - \delta \left(\frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial r}\{u_r(\rho e + P)\} + \frac{\partial}{\partial z}\{u_z(\rho e + P)\} \\ & + \frac{u_r(\rho e + p)}{r} - \phi \rho Q_i \dot{\omega}_i \\ & - \delta \left\{ \frac{u_r \tau_{rr} + u_z \tau_{rz}}{r} + \frac{\partial(u_r \tau_{rz} + u_z \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(u_r \tau_{rr} + u_z \tau_{rz})}{\partial r} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\phi \left\{ \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho Y_i u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho Y_i u_z) - \rho \dot{\omega}_i \right\} = 0 \quad (5)$$

여기서, $\delta = 0$ ($\phi = 1$)일 경우, 케로신-공기 혼합물에 대한 지배 방정식이며, $\delta = 1$ ($\phi = 0$)일 경우, 금속관에 대한 지배 방정식이다. 또한 $\beta=0$ ($\beta=1$)은 하중이 있을(없을) 경우에 적용된다. 위의 식들에서 ρ , u_r , u_z , P , τ_{ij} , e , Q_i , ω , T , k , a , λ , G , ε_{ij} 는 각각 밀도, r축 속도, z축 속도, 압력, 편향응력, 총 에너지 밀도, 화학에너지 발열량, 화학반응률, 온도, 열전달 계수, 열팽창 계수, Lamé의 첫 번째 변수, 전단 응력, 변형률이다. 금속관의 경우, 편향 응력에 대한 계산은 후의 법칙과 고변형의 소성 이론을 기반으로 하여 Ref.[7]에서의 식을 활용하였다.

케로신-공기 혼합물의 경우, 이상 기체 상태 방정식을 통하여 압력을 구한 반면, 금속관의 압력은 Mie-Grueisen EOS를 통하여 획득한다. 금속관의 강성모델은 전단율과 온도를 고려한 Johnson-Cook 모델을 사용한다. 다른 물질 간의 경계면을 추적 및 경계값을 결정하기 위하여, GFM (Ghost Fluid Method)을 기반으로 하는 HPLM (Hybrid Particle Level-set Method)을 사용한다[7].

선행 연구[7]를 통해 언급되었듯이 케로신-공기 혼합물 데토네이션 모델은 아래의 Table 1의 물성치 및 초기값을 활용하였으며, Fig. 1와 같이 CJ데토네이션 속도 (1750 m/s) 및 압력 (18P₀)에 근접한 값을 모사하기 위한 resolution test를 수행하였다. Fig. 1은 1/15, 1/50, 1/100 mm의 mesh 크기에 따른 데토네이션 구조를 보여주고 있다. 1/50과 1/100 mm의 경우, von Neumann spike와 CJ 압력의 위치 및 크기 (1740 m/s, 17.5P₀)가 거의 동일하며 CJ데토네이션 조건에 근접하기 때문에 본 연구에서는 1/50

mm를 적정 mesh 크기로 간주하여 사용하였다. 여기서 1/50 mm는 1기압 하에서 케로신-공기 혼합물의 화염 두께는 대략 0.1 ~ 0.2 mm이며, 계산 node를 5~10 가량 위치시킬 수 있는 크기이며, 연구에서 다루는 최소 관 두께, 0.15 mm 내 7개의 node를 위치시키는 크기이기 때문에 적절하다고 판단된다.

Table 1. Parameters of kerosene-air mixture

Parameter	Kerosene-air mixture [7]
Initial density, ρ_0	1.236 kg/m ³
Initial pressure, P_0	1.01x10 ⁵ Pa
Initial temperature, T_0	433 K
Specific heat ratio, γ	1.33
Pre-exponential factor, A	8.0x10 ⁸ m ³ /(kg-s)
Activation energy, E_a	71036 J/mol
Chemical heat release, q	1.9x10 ⁶ J/kg
CJ detonation pressure	1.8x10 ⁶ Pa ⁽³⁾
CJ detonation velocity	1750 m/s ⁽⁴⁾

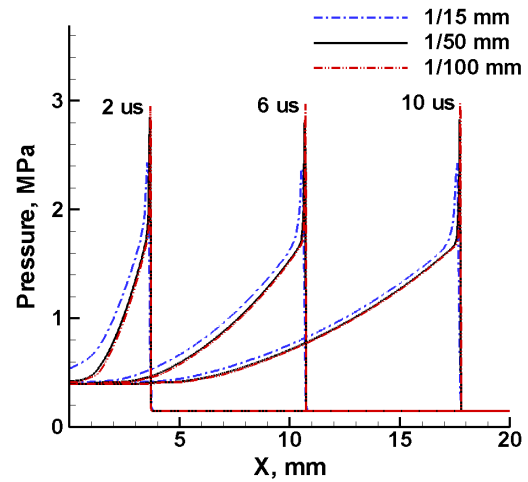


Fig. 1 Resolution test using pressure profiles

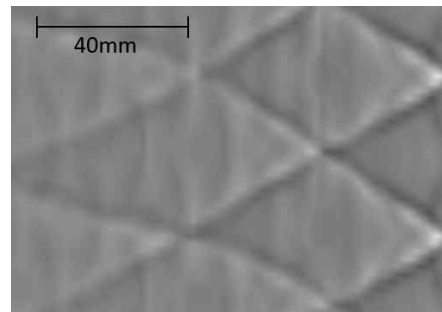


Fig. 2 Shadowgraph of Kerosene-air mixture detonation cell structure simulation results of 1 bar

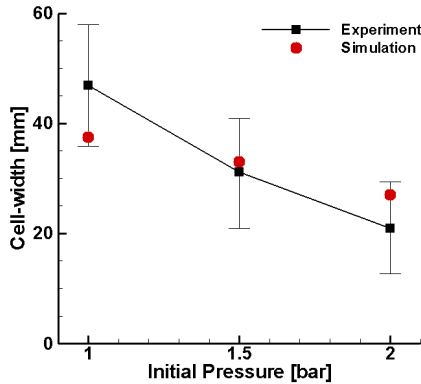


Fig. 3 Comparison between simulation and experiment [8] using cell-width in various initial pressure

또한 2D 원통 좌표계 하에서 다양한 압력 (1, 1.5, 2 bar)에 따른 데토네이션 셀 직경을 실험값과의 검증을 수행하였다. 아래의 Fig. 2는 1 bar 하에서 전파하는 데토네이션의 shadowgraph 보여주는데, 여기서, 데토네이션 셀 사이즈는 대략 40 mm로서 Fig. 3과 같이 실험값[8] 범위에 든다. 또한 동일한 화학반응식을 활용하여 1.5와 2 bar에서의 셀 사이즈를 비교하면 이 또한 실험값 범위에 든다는 것을 확인할 수 있다.

금속의 탄성 거동을 확인하기 위해서 2D 직교좌표계에서 아래의 Fig. 4과 같은 수치적 형상을 기반으로 관의 vibration을 모델링하였다.

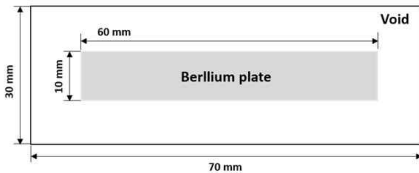


Fig. 4 Schematic of 2D rectangular coordinate calculation setup for elastic vibration problem

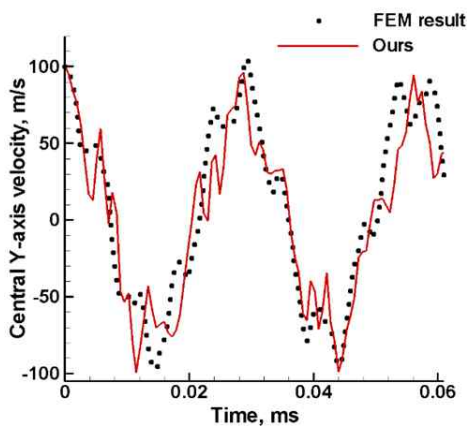


Fig. 5 Comparison between FEM result based on Ref. [9] and ours using history of y-axis velocity at center point

Table 2. Parameters of copper and beryllium

Parameter	STS 304	Beryllium
Initial density, ρ_0	7900 kg/m ³	1845 kg/m ³
Initial Temp., T_0	293 K	293 K
Specific heat, c_v	J/(kgK)	1825 J/(kgK)
Poison's ratio, γ	0.29	0.053896
Shear modulus, G	77.5 GPa	153 GPa
Grueisen coeff, Γ_0	1.93	2.0
Sound speed, c_0	4570 m/s	12870 m/s
S_0	1.49	1.124
Initial yield strength, $\sigma_{Y,0}$	220 MPa	10 GPa
Melting temp., T_m	1694 K	1560 K

탄성 거동을 위해 항복 응력이 높은 베릴륨을 Table 2에서의 변수값을 활용하여 모델링하였다. 해석결과 초기 속도에 의해 관이 반복적으로 휘는 현상을 확인할 수 있는데, 이는 운동 에너지가 내부 에너지로, 다시 내부 에너지가 운동 에너지로 소성 변형없이 반복적으로 변화하기 때문이다. 이러한 반복적인 변화는 Fig. 5를 통하여 재확인할 수 있다. 그림의 y축 속도는 관 중앙에서 확인된 것이며, 이때의 관 변형 주파수는 대략 33 kHz에 해당하는 관의 고유진동수를 유지하고 있다. 이는 MSC. NSTRAN[9] (FEM 결과)을 이용하여 계산된 1차 bending 모드인 33198 Hz와의 오차 범위 1%에 든다는 것을 확인하였다.

상기의 해석결과를 토대로 검증된 케로신 데토네이션 모델과 금속관 모델을 사용하여, 케로신의 데토네이션전파가 금속관의 떨림에 의하여 어떻게 변화하는지를 살펴보았다. 관의 떨림은 PDE가 작동하는 과정에서 관의 고유진동수로 떨리게 될 것이라고 판단하고, FEM 수치 해석 결과를 통해 관의 고유진동수인 31 kHz (z축 방향의 1번 모드와 r축 방향의 2번 모드)로 관이 떨린다고 가정하여, 최대 0.00025의 변형율을 가지도록 하였다. 관의 떨림이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 해석을 수행하였고 Fig. 6은 z축 방향으로 시간에 따라 관의 내부 압력을 도시한 것이다. 해당 그래프를 보게 되면 4 μ s까지는 관의 떨림의 유무에 관계없이 같은 압력 분포를 보이는 것을 확인할 수 있으나, 탄성 거동에 의하여 관의 변형이 최대가 되는 8 μ s에 도달하게 되면, 점차적으로 관의 탄성 거동에 의하여 내부의 유동장이 간섭을

받게 되고 압력의 구배가 생기는 것을 확인할 수 있다. 더욱 자세한 관 내부의 유동장 변화는 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다.

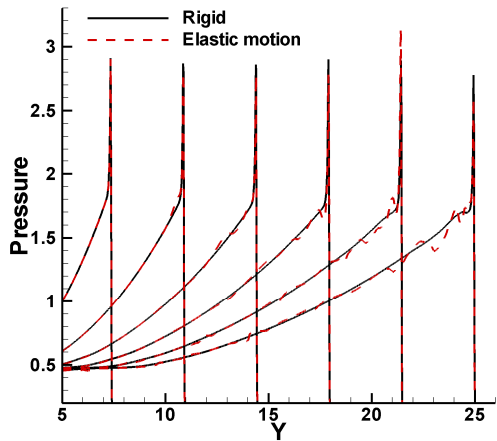


Fig. 6 Pressure profile of rigid and elastic motion cases

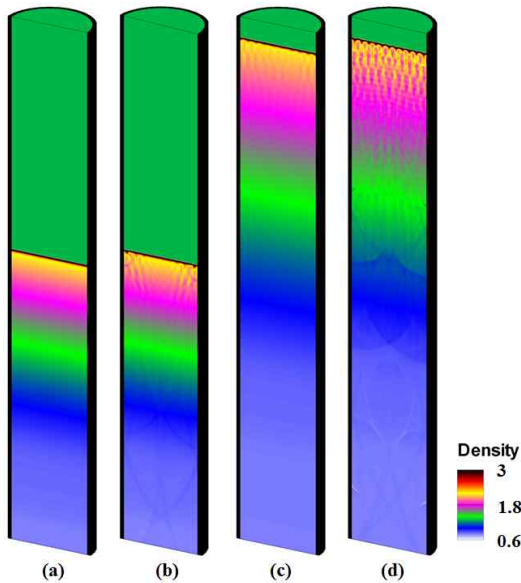


Fig. 7 Snapshots of density [unit: kg/m³] in comparison between (a),(c) rigid case and (b,d) elastic motion case at (a,b) 8 μs and (c,d) 14 μs

관의 떨림이 없는 경우인 Fig. 7의 (a)와 (c)는 관 벽에서의 no-slip 조건에 의하여 간섭이 일어나기 때문에 벽면에서 나타나는 화염면의 불연속이 늦게 나타나지만, 관 벽의 떨림이 있는 경우인 Fig. 7의 (b)와 (d)에서는 no-slip과 벽면의 변형에 의하여 r축 방향으로 압력구배가 빠르게 나타나게 되고 이것이 작은 압력파를 발생시켜 유동장에 불규칙한 화염면이 발생하게 한다. 이러한 불규칙한 화염면의 발생은 실제 PDE에서 나타나는 현상으로 관의 떨림을 고려

한 해석이 고려하지 않은 것보다 현실적인 결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] P.G. Harris, R.A. Stowe, R.C. Ripley, S.M. Guzik, " Pulse Detonation Engine as a Ramjet Replacement", Propulsion and Power, Vol. 22, 2006, pp. 462-473.
 [2] M.C. Gwak, Y.H. Lee, K.H. Kim, J.J. Yoh, "Deformable Wall Effects on the Detonation of Combustible gas Mixture in a Thin-walled Tube", Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, 2015, pp. 3006-3014.
 [3] Y. Huang, H. Tang, J. Li, C. Zhang, "studies of DDT Enhancement Approaches for Kerosene-Fueled Small-Scale Pulse Detonation Engines Applications", Shock Waves, Vol. 22, 2012, pp. 615-625.
 [4] F.K. Lu, E.M. Braun, "Rotating Detonation Wave Propulsion: Experimental Challenges, Modeling, and Engine Concepts", J. Propulsion and Power, Vol. 30, 2014, pp. 1125-1142.
 [5] E.S. Oran, V.N. Gamezo, " Origins of the Deflagration-to-Detonation Transition in gas-phase Combustion", Comb. and Flame, Vol. 148, 2007, pp.4-47.
 [6] K. Wang, W. Fan, X. Zhu, Y. Yan, Z. Gao, " Experimental Investigations on Effects of Wall-Temperature on Performance of a Pulse Detonation Rocke Engine", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 48, 2013, pp. 230-237.
 [7] 이영현, 광민철, 여재익, "케로신-공기 혼합물의 데토네이션 모델과 구조체 모델을 통한 금속관의 수치해석," 한국추진공학회지, Vol. 19, 2015, pp.29-37
 [8] R. Akber, P.A. Thibault, P.G. Harris, L.S. Lussier, F. 코푹, S.B. Murray, K. Gerrard, "Detonation Properties of Unsensitized and Sensitized JP-10 and Jet-A Fuels in Air for Pulse Detonation Engines", 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Vol. 1, 2000, pp. 1-14.
 [9] Reference manual, MSC. NASTRAN, Version r2, MSC. Software, 2012