Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers
Vol. 20, No. 5, pp. 60-69, 2016

Research Paper DOI: http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2016.20.5.060

케로신-공기 혼합물의 데토네이션 하중에 의한 열탄소성 관의 동적 거동 해석

곽민철[a] · 이영헌[a] · 여재익[a,*]

Numerical Investigation of Dynamic Responses of a Thermal Elasto-plastic Tube under Kerosene-air Mixture Detonation

Min-cheol Gwak[a] · Younghun Lee[a] · Jai-ick Yoh[a,*]
[a]*Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Korea*
[*]*Corresponding author. E-mail: jjyoh@snu.ac.kr*

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation on kerosene-air mixture detonation and behaviors of thermal elasto-plstic 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 Chapman–Jouguet (C-J) condition and experimental cell size. To conform the elasto-plastic model, plastic and elastic behaviors are verified by Taylor impact and plate bending motion, respectively. The numerical results are compared with the theory on burst pressure of tube. The critical deformable thickness with the thermal softening considered is good agreement with the theoretical value.

초 록

본 연구에서는 케로신-공기 혼합물 데토네이션 계산과 다물질 해석을 기반으로 데토네이션 하중에 의한 얇은 금속관의 열탄소성 거동에 대한 수치계산을 수행하였다. 데토네이션 하중은 케로신-공기 혼합물의 데토네이션을 활용하여 모델링하였으며, 검증을 위해 해석 결과를 C-J 조건과 실험적 셀 직경을 통해 비교 검증하였다. 또한 금속의 탄성/소성 거동을 확인하기 위하여, 소성 거동은 구리의 Taylor impact 문제로, 탄성 거동은 베를리움 평판 떨림 문제를 활용하였다. 온도에 의한 관의 탄소성 거동 변화를 확인하기 위하여 동일한 데토네이션 하중 하에서 초기 온도가 다른 관의 거동을 확인하고 이론식과의 비교를 통해 열연화 효과가 고려되어야 함을 확인하였다.

Key Words: Kerosene-air Mixture(케로신-공기 혼합물), Detonation(데토네이션), Thermal Softening (열연화), Elasto-plastic Tube(탄소성 관)

Received 5 December 2015 / Revised 8 August 2016 / Accepted 14 August 2016
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548
[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 추계학술대회(2015. 11. 25-27, 경주 현대호텔) 발표논문을 심사하여 수정 · 보완한 것임.]

Nomenclature

e : Total energy density

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

G : Shear modulus
k : Conduction coefficient
P : Pressure
Q_i : Chemical energy released
S_{ij} : Deviatoric stress
u_r : r-axis velocity
u_z : z-aixs velocity
a : Thermal expansion coefficient
$\dot{\epsilon}_{ij}$: Strain rate
λ : Lame's first parameter
ρ : Density
σ_{ij} : Cauchy stress
$\dot{\omega}$: Chemical reaction rate

1. 서 론

PDE(Pulse Detonation Engine)는 비정상 연소인 데토네이션의 고온 및 고압에 의한 높은 포텐셜 에너지를 이용하는 고효율 엔진으로서, 현재까지 지속적으로 항공/우주 추진 분야에서 개발 및 적용 연구가 되어 오고 있다. 그에 관련된 연구로서 수소, 메탄 등 사용되는 연료에 대한 연소폭발천이현상을 비롯한 데토네이션 특성에 대한 연구에서 부터 수 mm에서 수 m에 이르는 다양한 크기의 실제적인 PDE 엔진 운용에 대한 연구에 이르기 까지 광범위한 실험적 연구와 수치적 연구가 진행되어 오고 있다[1-11].

특히 본 연구에서 다루고 있는 케로신의 경우, 기존의 로켓 엔진의 효용에 더하여 PDE에 활용하기 위한 데토네이션에 연구가 실험적으로 수행되고 있다[6-8]. 수치 해석적 측면에서 케로신의 데토네이션 해석은 복잡한 연료 성분에 의하여 모든 화학반응식을 고려한 해석은 계산 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 그 정확도를 높이는 것 역시 어렵다는 단점이 있다. 그래서 여러 종류의 가연성 기체 혼합물에 대하여 다단계 화학반응식을 사용한 연구 뿐 아니라 계산 효율 및 용이성을 위하여 1단계의 화학반응식을 사용한 연구가 수행된 사례[4,12]를 바탕으로 1차적으로 1단계 화학반응식을 기반으로 하여 데토네이션의 특성을 반영할 수 있는 반응식이 제안되어 오고 있다[12].

또한, 기체 혼합물의 데토네이션은 고온 및 고압, 그리고 빠른 전파 속도 (1000~2000 m/s)를 가지고 있기 때문에 데토네이션이 전파되는 수 ms 동안 엔진 내부의 기체 온도가 3000 K 을 넘어가지만 한 번의 전파를 다루는 충격파관 실험에서는 높은 온도가 유지되는 시간이 열전달이 이루어질 정도로 길지 않기 때문에 벽면의 온도는 문제가 되지 않는다. 하지만 10~30 Hz의 주기로 연속적인 데토네이션이 발생하는 PDE에서는 벽면이 달궈지게 되고 벽면온도가 1000 K까지 올라가게 된다[9]. 따라서 높아진 벽면 온도에 의하여 엔진의 구조체의 물성치가 바뀌게 되고 이에 따라 엔진의 변형 및 손상이 발생할 수 있기에 정상 온도에서부터 고온에 이르는 벽면 온도에 따른 관의 거동에 대한 해석이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 3가지 해석 (i) 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 해석, ii)하중에 의해 탄소성으로 거동 해석, iii) 다물질 해석을 기반으로 하여 데토네이션 하중이 고체 벽면에 가해질 경우, 벽면 거동 해석)을 기반으로 온도의 영향을 고려하기 위하여 열연화 현상을 구조체 모델에 적용하고, 해석 결과는 동적 증폭 인자 (DAF, Dynamic Amplification Factor)를 적용한 최대 허용 관 두께에 관련된 이론값과 비교하여 해석 결과를 검증하였다.

2. 수치적 모델

본 연구에서는 얇은 구리 관 내 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 전파에 따른 관의 탄소성 변형 현상을 수치적으로 살펴보았다. 여기서, 케로신-공기 혼합물의 초기 온도는 433 K으로 가정하여 1단계 화학반응을 고려한 연소해석을 수행하였다. 관 내부에서 발생하는 혼합물의 데토네이션 전파 현상 및 관의 열탄소성 변형을 확인하기 위하여 2차원 직교/원통 좌표계를 이용하여 계산을 수행하였으며 사용된 원통 좌표계

의 지배 방정식은 Eqs. 1-5와 같다.

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

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

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

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}(\rho e)+\frac{\partial}{\partial r}\left[u_r(\rho e+P)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[u_z(\rho e+P)\right]\\&-\frac{u_r(\rho e+p)}{r}-\varphi\rho Q_i\dot{w}_i+\delta\left(\alpha T(3\lambda+2G)\left(\dot{\varepsilon}_{rr}+\dot{\varepsilon}_{zz}\right)+\rho c\dot{T}\right)\\&-\delta\left(\frac{u_r\tau_{rr}+u_z\tau_{rz}}{r}+\frac{\partial\left(u_r\tau_{zr}+u_z\tau_{zz}\right)}{\partial z}+\frac{\partial\left(u_r\tau_{rr}+u_z\tau_{rz}\right)}{\partial r}\right)\\&+\delta\left(k\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+k\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\beta\left(S_{rr}D_{rr}^E+S_{zz}D_{zz}^E\right)\right)=0\end{aligned} \tag{4}$$

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

여기서, δ = 0(ϕ = 1)일 경우, 케로신-공기 혼합물에 대한 지배 방정식이며, δ = 1(ϕ = 0)일 경우, 금속관에 대한 지배 방정식이다. 또한 β=0(β=1)은 하중이 있을(없을) 경우에 적용된다. 위의 식들에서 ρ, u_r, u_z, P, τ_{ij}, e, Q_i, $\dot{\omega}$, T, k, a, λ, G, $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 각각 밀도, r축 속도, z축 속도, 압력, 편향응력, 총 에너지 밀도, 화학에너지 발열량, 화학반응률, 온도, 열전달 계수, 열팽창 계수, Lame의 첫 번째 변수, 전단 응력, 변형률이다. 또한 $u_{E,i}$는 운동 에너지와 탄성 에너지의 관계에 의하여 Eqs. 6-7을 활용하여 획득된다. $S_{rz}D^E_{rz}$는 $S_{rr}D^E_{rr}$와 $S_{zz}D^E_{zz}$에 비하여 값의 크기가 작기 때문에 무시하며, Eq. 7에서의 벡터 $\vec{a}$와 $\vec{b}$는 각각 노드의 초기 위치 벡터와 이동한 위치 벡터이다.

$$\frac{1}{2}\rho u_{E,k}\cdot u_{E,k}=\rho e_E=\int\left(S_{ij}:D_{ij}^E\right)dt \tag{6}$$

$$\vec{u}_E=\frac{\vec{a}-\vec{b}}{\left|\vec{a}-\vec{b}\right|}\cdot\left|\vec{u}_E\right|=\frac{\vec{a}-\vec{b}}{\left|\vec{a}-\vec{b}\right|}\cdot\left[\frac{2}{\rho}\int\left(S_{ij}:D_{ij}^E\right)dt\right]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

금속관의 경우, 편향 응력에 대한 계산은 Hooke의 법칙과 고변형의 소성 이론을 기반으로 하여 Ref.[13]에서의 식을 활용하였으며, Cauchy 응력 계산 시, 편향응력에 추가적으로 온도에 의해 유도되는 열응력을 Eqs. 8-9와 같은 전개 방정식을 활용하여 계산한다.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{8}$$

$$\sigma_{ij}=\tau_{ij}-\alpha(3\lambda+2G)\left(T-T_{ref}\right)\delta_{ij}-P\delta_{ij} \tag{9}$$

케로신-공기 혼합물의 경우, 이상 기체 상태 방정식을 통하여 압력을 구한 반면, 금속관의 압력은 Mie-Grueisen 상태방정식을 통하여 획득한다. 금속관의 강성모델은 전단율과 온도를 고려한 Johnsom-Cook 모델을 사용한다. 다른 물질간의 경계면을 추적하고 경계값을 결정하기 위하여, GFM (Ghost Fluid Method)을 기반으로 하는 HPLM (Hybrid Particle Level-set Method)을 사용한다[14].

3. 검증 및 평가

관 내부 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 전파에 의한 금속관의 열탄소성 변형을 모델링하기에 앞서, 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 모델, 관의 탄소성 거동, 그리고 다물질 해석에 대한 검증이 선행되어야 한다.

따라서 아래와 같은 일차원 및 이차원 모델을 통해 케로신-공기 혼합물 데토네이션 모델을 검증하고, 금속의 소성/탄성 거동은 구리를 활용한 Taylor impact 문제와 베를리움 판을 이용한 떨림 문제를 통해 확인한다. 다물질 경계 추적 및 경계값 처리의 경우도 이론값과의 비교를 통해 검증을 수행하였다.

3.1 케로신-공기 혼합물 데토네이션 모델

선행 연구[13]를 통해 언급되었듯이 케로신-공기 혼합물 데토네이션 모델은 아래의 Table 1의 물성치 및 초기값을 활용하였으며, Fig. 1과 같이 C-J데토네이션 속도(1750 m/s) 및 압력($18P_0$)에 근접한 값을 모사하기 위한 격자 해상도 의존성 평가를 수행하였다. Fig. 1은 1/15, 1/50, 1/100 mm의 격자 크기에 따른 데토네이션 구조를 보여주고 있다. 1/50과 1/100 mm의 경우, von Neumann spike와 C-J 압력의 위치 및 크기(1740 m/s, $17.5P_0$)가 거의 동일하며 C-J 데토네이션 조건에 근접하기 때문에 본 연구에서는 1/50 mm를 적정 격자 크기로 간주하여 사용하였다. 여기서 1/50 mm는 1기압 하에서 케로신-공기 혼합물의 화염 두께는 대략 0.1 ~0.2 mm이고, 계산 격자를 5~10개 가량 위치시킬 수 있는 크기이며, 본 연구에서 다루는 최소 관 두께인 0.15 mm 내에 7개의 격자를 위치시키는 크기[15]이기 때문에 화염 및 구조진동을 확인할 수 있는 최소 크기로 판단된다.

또한 이차원 원통 좌표계 하에서 다양한 압력(1, 1.5, 2 bar)에 따른 데토네이션 셀 직경을 실험값과의 검증을 수행하였다. Fig. 2는 1 bar 하에서 전파하는 데토네이션의 smokefoil을 보여주는데, 여기서, 데토네이션 셀 사이즈는 대략 40 mm로서 Fig. 3과 같이 실험값[16] 범위에 든다. 또한 동일한 화학반응식을 활용하여 1.5와 2 bar에서의 셀 사이즈를 비교하면 이 또한 실험값 범위에 든다는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Prarameters of kerosene-air mixture.

Parameter	Kerosene-air mixture [13]
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
Molecular weight, M_W	0.03036 kg/mol
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
C-J detonation pressure	1.8x10^6 Pa[6]
C-J detonation velocity	1750 m/s[7]

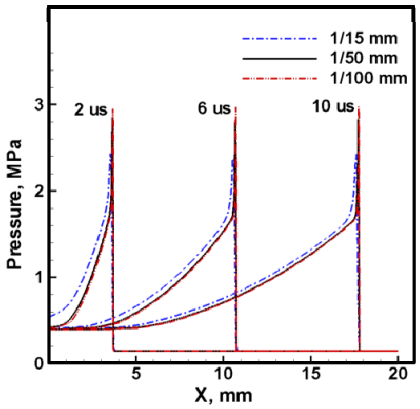

Fig. 1 Resolution test using pressure profiles.

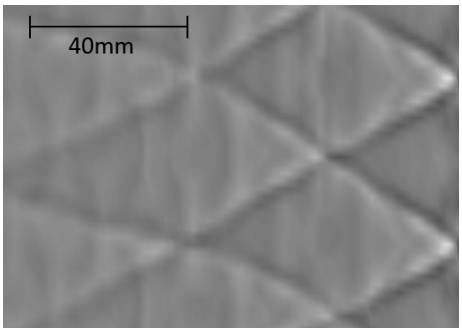

Fig. 2 Numerical smokefoil of Kerosene-air mixture detonation cell structure simulation results of 1 bar.

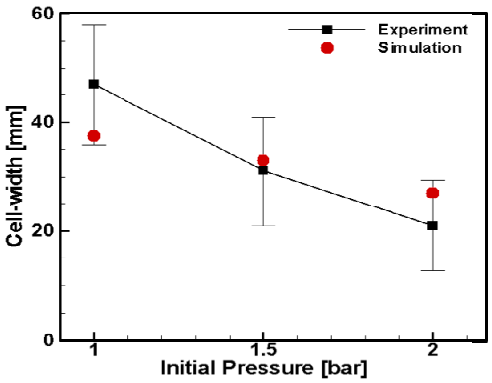

Fig. 3 Comparison between simulation and experiment [16] using cell-width in various initial pressure.

3.2 금속의 소성 거동 - Taylor impact 문제

소성 거동의 평가 기준 문제로서 실험과 비교 검증을 위해 이차원 원통좌표계 하에서 구리의 Taylor impact 문제를 고려하였다[17]. 아래의 Fig. 4와 같이 계산 영역 (58 X 8.5 mm)을 설정하고 구리 막대를 189 m/s의 속도로 벽에 충돌시킴으로서 구리 막댈의 소성변형을 살펴보았으며, Table 2와 같이 구리를 모델링하였다.

주어진 모델링 조건에서 구리 막대의 소성 변형은 대략 80 μs에 종료되며 이는 Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 전체 에너지가 유지되는 하에서 운동 에너지가 내부 에너지로 변환되어 소성 변형을 일으키는 것이다. 충격 후 시간에 따른 길이와 직경의 변화를 실험과 비교할 경우, Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 33 μs에서는 실험 대비 계산 오차가 대략 6~10% 정도 나는 반면 후반에는 0.4~4%까지 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

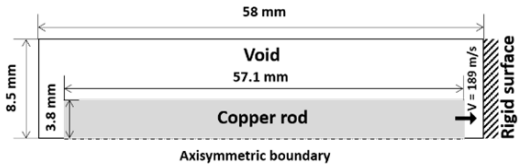

Fig. 4 Schematic of 2D cylindrical coordinate calculation setup for Taylor problem.

Table 2. Prarameters of copper and beryllium.

Parameter	Copper [13]	Beryllium [18]
Initial density, ρ_0	8930 kg/m^3	1845 kg/m^3
Initial Temp., T_0	293 K	293 K
Specific heat, c_v	368 J/(kgK)	1825 J/(kgK)
Poison's ratio, γ	0.35	0.053896
Shear modulus, G	45 GPa	153 GPa
Grueisen coeff, Γ_0	2.0	2.0
Sound speed, c_0	3940 m/s	12870 m/s
S_0	1.49	1.124
Activation energy, a_0	0.47	0.5
Initial yield strength, $\sigma_{Y,0}$	400 MPa	10 GPa
A	292 MPa	-
B	0.025	-
n	0.31	-
m	1.09	-
Melting temp., T_m	1351 K	1560 K

3.3 금속의 탄성 거동 - Vibration 문제

금속의 탄성 거동을 평가하기 위해서 이차원 직교좌표계에서 Fig. 7과 같은 수치적 형상을 기

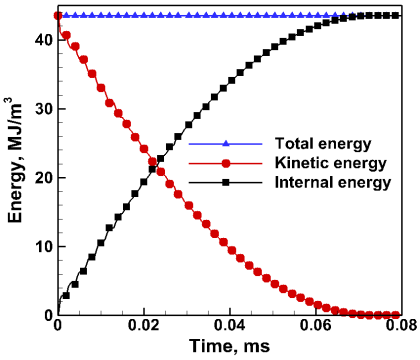

Fig. 5 Histories of the values of total, kinetic, and internal energy density under Taylor impact.

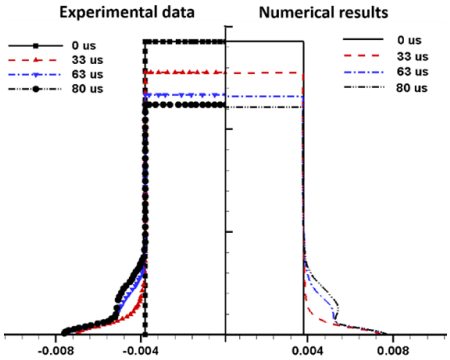

Fig. 6 Comparison between experimental data [17] and numerical results of copper rod shape.

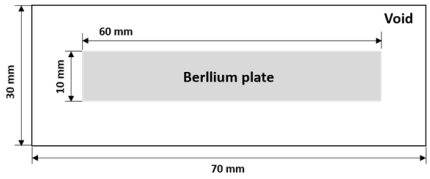

Fig. 7 Schematic of 2D rectangular coordinate calculation setup for elastic vibration problem.

반으로 판의 vibration을 모델링하였다.

탄성 거동을 위해 항복 응력이 높은 베릴리움을 Table 2에서의 변수값을 활용하여 모델링하였으며, Eq. 10과 같은 y축 속도를 초기에 설정하여 판의 변형을 유도하였다.

$$u_y(x,y) = A\sin\left(\frac{x-0.025}{0.03}\pi\right)\text{m/s} \tag{10}$$

Fig. 8은 시간이 지남에 따른 판의 형상 변화를 속도의 절대값 크기를 활용하여 표현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 속도에 의해 판이 반복적으로 휘는 현상을 확인할 수 있는데, 이는 소성 변형없이 운동 에너지가 내부 에너지로, 다시 내부 에너지가 운동 에너지로 반복적으로 변화하기 때문이다. 이러한 반복적인 변화는 Fig. 9를 통하여 재확인할 수 있다. Fig. 9의 y축 속도는 판 중앙에서 확인된 것이며, 이때의 관 변형 주파수는 대략 33 kHz에 해당하는 판의 고유진동수를 유지하고 있다. 이는 MSC. NASTRAN (FEM 결과)[19]을 이용하여 계산된 1차 bending 모드인 33.198 kHz와의 오차 범위 1%에 든다는 것을 확인하였다.

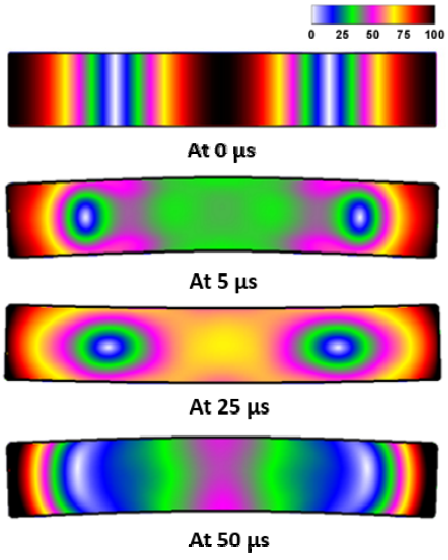

Fig. 8 Snapshots of velocity magnitude (unit: m/s) field inside of elastic vibration of beryllium plate.

3.4 다물질 경계 추적 및 경계값 처리

앞 서 언급하였듯이 물질 간 경계 추적 및 경계값은 HPLM와 GFM을 통하여 결정되게 되는데, 이는 Eq. 11과 같은 간단한 문제로 Fig. 10과 같이 수치 계산으로 구해지는 값과 exact 값과의 비교로 검증할 수 있다. 그림은 t=0.015일 때의 밀도와 속도 분포를 보여 주는데, 압력파의 위치, 접촉면, 팽창파 등이 정해와 현재결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다.

$$(\rho, u, P, \gamma) = \begin{cases} (1, 0, 500, 1.4) & \text{if } x < 0.5 \\ (1, 0, 0.2, 1.667) & \text{if } x > 0.5 \end{cases} \tag{11}$$

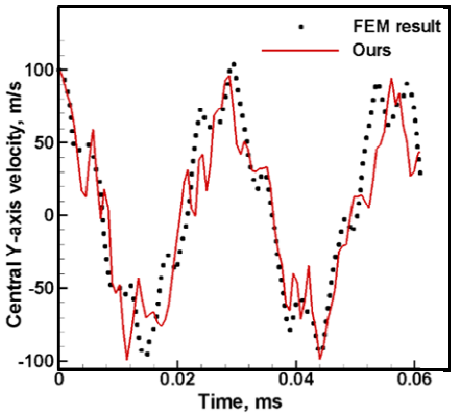

Fig. 9 Comparison between FEM result based on Ref.[19] and ours using history of y-axis velocity at center point.

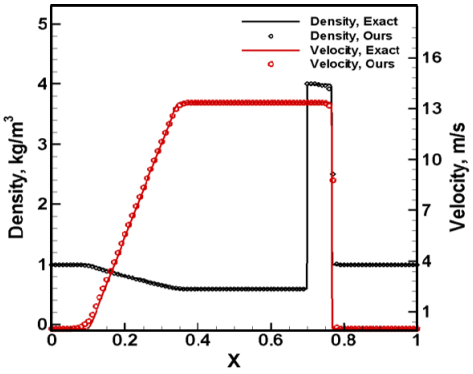

Fig. 10 1D shock tube problem to check multi-material interface tracking and treatment using exact solution[20].

4. 결과 및 논의

4.1 이차원 해석 대상 설정

관 내부 케로신-공기 혼합물 데토네이션 전파에 의한 구리관의 열탄소성 변형을 모델링하기 위해 Fig. 11과 같이 구성하였다. 열탄소성 변형의 차이를 확인하기 위하여 관에 다른 온도와 두께를 설정하여 계산을 수행하였다. 7가지 (0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 mm) 다른 두께의 구리관을 사용하였으며, PDE 엔진 운용 시 1000 K 가까이 벽면 온도가 상승하기 때문에 [18], 케로신-공기 혼합물이 기체라고 가정할 수 있는 온도에서부터 1000 K 사이의 여러 온도 (433 , 573, 773, 973 K)에 대한 계산을 수행하였다.

계산 영역에서의 상단, 하단, 좌측, 우측 경계 조건은 각각 대칭 조건, 유출 조건, 외삽 조건($X_{boundary}$ = $0.95X_1+0.05X_0$), 유출 조건을 사용하였다. 여기서 X_1은 데토네이션 전파를 위한 C-J 조건에 해당하는 값이며, X_0는 초기 조건에 해당하는 값이다.

4.2 온도 및 두께에 따른 구리 관의 거동 해석

온도 및 두께에 따른 관의 거동을 수치적 계산 이전에 이론적인 DAF, Φ와 최대 허용 압력, P_{burst}를 통하여 이론적 최대 허용 두께를 고려하였다[15]. 우선, 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 속도, 대략 1750 m/s에 대한 구리 관 두께에 따른 Φ는 아래 Fig. 12와 같이 2.03임을 확인할 수 있다.

Eq. 12와 같이 σ_y(항복 응력), T(온도), DAF, r_i(관의 내경), t(관의 두께)를 통하여 P_{burst}를 구할 수 있으며, 데토네이션 전파 압력을 P_{burst}라 할 경우, 이론적 최대 허용 두께를 구할 수 있으며 이를 통해 Fig. 15의 실선을 구할 수 있다.

$$p_{burst} \approx \sigma_y \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^{1.09} \right] \frac{t}{\Phi\left(r_i + t/2\right)} \qquad (12)$$

온도에 따른 관의 열연화 효과는 크게 항복 응력의 감소와 열응력의 생성이다. 우선, 항복 응력의 감소 현상만을 고려하여 관두께 및 온도에 따른 관의 탄소성 변형을 살펴보면, Fig. 13과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 13(a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이 관의 두께가 얇아질수록 관의 변형이 잘 발생한다. 하지만, Fig. 13(b)와 (c)를 비교하여 보면 온도가 높은 관이 낮은 관에 비하여 변형이 덜 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 비물리적인 현상이다. 이러한 현상은 고온일 경우, Johnsom-Cook 모델에 의하여 항복 응력이 감소하게 되고 이에 따라 편향 응력의 감소 현상을 유도하게 된다. 감소된 편향 응력은 관의 팽창 속도를 감소시키는 역할을 하게 되기 때문에 관의 변형이 상온에 비해 작게 되는 것이다.

하지만, Fig. 14와 같이 동일한 온도 조건에서 열응력을 적용하였을 경우, 적용하지 않은 경우에 비하여 빠르게 변형하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고온일 경우, 열응력이 Cauchy 응력에

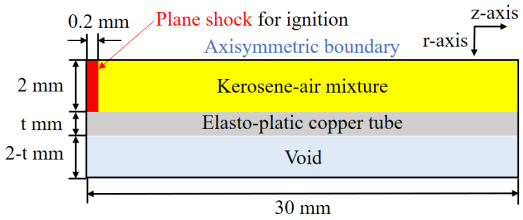

Fig. 11 Schematic of kerosene-air mixture detonation-loaded copper tubes simulation.

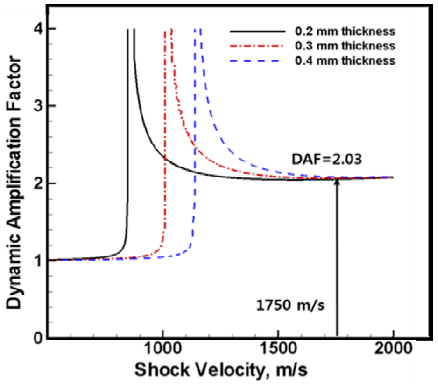

Fig. 12 DAF versus velocity of varying copper tube thicknesses.

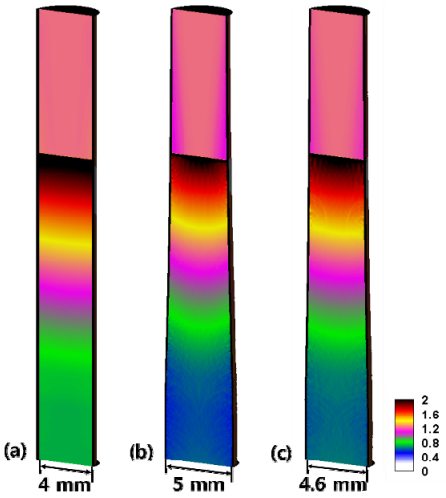

Fig. 13 Snapshots of density [unit: kg/m^3] in (a): T_w= 433 K, t= 0.2 mm, (b): T_w= 433 K, t= 0.15 mm, and (c) T_w= 973 K, t= 0.15 mm, all of which taken at 11.5 μs without thermal softening.

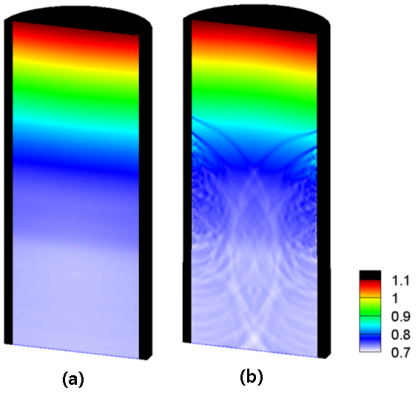

Fig. 14 Snapshots of density [unit: kg/m^3] in comparison between (a) no thermal softening and (b) with thermal softening under T_w= 773 K and t= 0.25 mm tube at 10 μs.

영향을 주기 때문이다.

다음으로 다양한 관두께와 온도 조건에서 이론값과 수치 값의 비교를 수행하였다. Fig. 15는 관 온도에 따른 이론적 최대 허용 두께와 수치 값에서 소성 변형이 발생하지 않는 안전한 두께를 보여준다. Fig. 15에서 확인할 수 있듯이 열연화 효과가 고려된 경우, 온도가 증가함에 따라

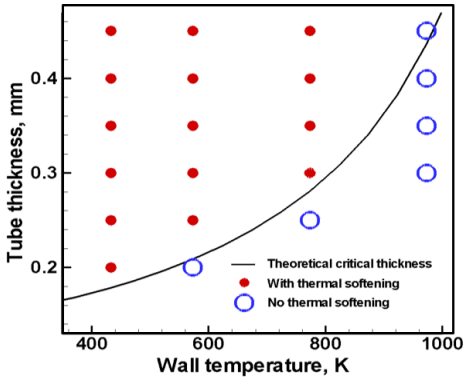

Fig. 15 The calculated (symbol) and theoretical (solid line) critical thickness plotted against heated wall temperature.

소성 변형이 잘 발생하게 되며 이론값에도 잘 부합함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 케로신-공기 혼합물의 데토네이션 계산과 다물질 해석을 기반으로 데토네이션 하중에 의한 얇은 금속관의 열탄소성 거동에 대한 수치 계산을 수행하였다. 데토네이션 하중은 1단계 화학반응식을 사용한 케로신-공기 혼합물의 데토네이션모델을 활용하여 계산하였으며, 해석 결과는 C-J 조건과 실험적 셀 직경 비교를 통해 검증하였다. 또한 금속의 탄성/소성 거동을 확인하기 위하여, 소성 거동은 구리의 Taylor impact 문제로, 탄성 거동은 베릴리움 평판의 떨림 문제를 활용하였으며, 각각 실험값 및 MSC. NASTRAN(FEM) 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 온도에 의한 관의 탄소성 거동 변화를 확인하기 위하여 동일한 데토네이션 하중 하에서 초기 온도가 다른 관들의 거동을 확인하였고, 최대 허용 압력과 관련된 이론식과의 비교를 통해 고온 조건에서는 열연화 효과가 고려되어야 함을 확인하였다. 본 연구를 통하여 얇은 관의 온도에 따른 관의 변형 및 손상이 이루어지지 않는 최소 관 두께를 이론 및 해석적으로 도출하였다. 이는 작은 크기의 PDE 설계 및 다물질 연

구에 있어서 연구적 기반을 제공할 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

References

1. Roy, G.D., Frolov, S.M., Borisov, A.A. and Netzer, D.W., "Pulse Detonation Engine: Challenges, Current Status, and Future Perspective," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30, No. 6, pp. 545-672, 2004.
2. Harris, P.G., Stowe, R.A., Ripley, R.C. and Guzik, S.M., "Pulse Detonation Engine as a Ramjet Replacement," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 2, pp. 462-473, 2006.
3. Smirnov, N.N. and Nikitin, V.F., "Modeling and Simulation of Hydrogen Combustion in Engines," *Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 2, pp. 2025-2033, 2014.
4. Gwak, M.C., Lee, Y.H., Kim, K.H. and Yoh, J.J., "Deformable Wall Effects on the Detonation of Combustible gas Mixture in a Thin-walled Tube," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 7, pp. 3006-3014, 2015.
5. Tsubio, N., Watanabe, Y., Kojima, T. and Hayashi, A.K., "Numerical Estimation of the Thrust Performance on a Rotating Detonation Engine for a Hydrogen-Oxygen Mixture," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 35, No. 2, pp. 2005-2013, 2015.
6. Huang, Y., Tang, H., Li, J. and Zhang, C., "Studies of DDT Enhancement Approaches for Kerosene-Fueled Small-Scale Pulse Detonation Engines Applications," *Shock Waves*, Vol. 22, No. 6, pp. 615-625, 2012.
7. Lu, F.K. and Braun, E.M., "Rotating Detonation Wave Propulsion: Experimental Challenges, Modeling, and Engine Concepts," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 5, pp. 1125-1142, 2014.
8. Shen, H., Wang, G., Liu, K. and Zhang, D., "Numerical Simulation of Liquid-Fueled Detonations by an Eulerian-Lagrangian Model," *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, Vol. 13, No. 2, pp. 177-188, 2012.
9. Wang, K., Fan, W., Zhu, X., Yan, Y. and Gao, Z., "Experimental Investigations on Effects of Wall-Temperature on Performance of a Pulse Detonation Rocket Engine," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 230-237, 2013.
10. Wu, M.H. and Lu, T.H., "Development of a Chemical Microthruster Based on Pulsed Detonation," *Journal of Micromechaics and Microengineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 1-10, 2012.
11. Smirnov, N.N., Betelin, V.B., Nikitin, V.F., Phylippov, Y.G. and Koo, J., "Detonation Engine Fed by Acetylene-Oxygen Mixture," *Acta Astronautica*, Vol. 104, No. 1, pp. 134-146, 2014.
12. Oran, E.S. and Gamezo, V.N., "Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion," *Combustion and Flame*, Vol. 148, No. 1, pp. 4-47, 2007.
13. Lee, Y.G., Gwak, M.C. and Yoh, J.J., "Numerical analysis of detonation of kerosene-air mixture and solid structure," *Journal of the Korean Society of Propulsion*

Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 29-37, 2015.

14. Kim, K. and Yoh, J.J., "A Particle Level-set Based Eulerian Method for Multi-Material Detonation Simulation of High Explosive and Metal Confinements," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, No. 1, pp. 2025-2033, 2013.
15. Gwak, M.C., Lee, Y.H., Kim, K.H. and Yoh, J.J., "Deformable Wall Effects on the Detonation of Combustible gas Mixture in a Thin-walled Tube," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 7, pp. 3006-3014, 2015.
16. Akber, R., Thibault, P.A., Harris, P.G., Lussier, L.S., Zhang, F., Murray, S.B. and Gerrard, K., "Detonation Properties of Unsensitized and Sensitized JP-10 and Jet-A Fuels in Air for Pulse Detonation Engines," *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Las Vegas, N.Y., U.S.A., AIAA-2000-3592, July, 2000.
17. House, J.W., Aref, B., Foster Jr., J.C. and Gillis, P.P., "Film data reduction from Taylor impact tests," *Journal of Stain Analysis*, Vol. 34, No. 5, pp. 337-345, 1999.
18. Menshov, I.S., Mischenko, A.V. and Serejkin, A.A., "Numerical modeling of elastoplastic flows by the Godunov method on moving eulerian grids," *Mathematical Models and Computer Simulations*, Vol. 6, No. 2, pp. 127-141, 2014.
19. Reference manual, MSC. NASTRAN, Version r2, MSC. Software, 2012.
20. Hu X.Y. and Khoo, B.C., "An interface interaction method for compressible multifluids," *Journal of Computational Physics*, Vol. 198, No. 2, pp. 35-64, 2004.