

탄소성 금속관 내 가스 폭굉의 수치적 연구

곽민철* · 도영대** · 박정수** · 여재익*†

Numerical investigation of gaseous detonation observed in the elasto-plastic metal tubes

Min-cheol Gwak*, Yeong-dea Do**, Jeong-su Park**, Jai-ick Yoh*†

ABSTRACT

We present a numerical investigation on gaseous (ethylene-air mixture) detonation in the elastoplastic metal tubes to understand the wall effects associated with the developing detonation instability. The acoustic disturbances originating from the rapidly expanding tube walls reach the detonating flame surface, thereby causing flame distortions and total energy losses. The compressible Navier-Stokes equations with equation of state for gas and elasto-plastic deformation field equations for inert tubes are solved simultaneously to understand the complex multi-material interaction in the rapidly expanding gas pipe. In order to track governing variables across the material interface, we use the hybrid particle level-set and ghost fluid methods to precisely estimate the interfacial quantities. Features observed from the deforming (thin) tube show substantially different behavior when a detonation propagates in the rigid (thick) tube with no acoustically responding wall conditions.

Key Words : Multi-material interaction, Detonation, Expansion wave

비정상 화염인 폭굉은 초음속 화염으로서 큰 압력과 밀도의 변화를 유발시킨다. 그러한 이유로 폭굉은 갑작스런 압력의 증가로 인하여 구조물 손상 및 인명 피해 등의 많은 문제점을 발생시킬 수 있다. 예를 들어 연료 이송 관 및 고온의 환경에서의 폭굉 발생은 주위 구조물 및 인명에 큰 피해를 줄 수 있다[1-2].

본 연구에서는 관에서의 초음속 화염 전파가 관에 미치는 영향과 관의 변형이 유동장에 미치는 영향을 복합적으로 살펴보기 위한 기초 연구로써, 관의 변형으로 인하여 화염 내 팽창파의 발생 및 간섭 현상에 대한 내용을 다룰 것이다. 이는 다상 물질 해석을 기반으로 하게 되는데, 다상 물질에서의 상호 작용을 해석하기 위한 여러 방법들 중 본 연구에서 level-set을 기반으로 한 방법을 사용하였으며 이는 고속 변형을 해석하는 선행 연구들이 수행되고 있다[3-5]. 이러한 연구들 중 대부분은 비 반응성 물질들을 다루거나 반응성 물질을 다루더라도 폭약과 같은 특수

한 경우에 대한 문제들을 다루고 있다[3,4]. 기체 상태의 연소장을 다룰 경우일지라도 반응물과 생성물의 경계[5]를 나누는데 국한되어 있었다. 하지만 본 연구에서는 탄화수소 계열의 에틸렌-공기 혼합물과 고체로써 금속관 (구리, 알루미늄, 텅스텐)을 활용하여 다상 물질 간의 상호 작용을 고려하였다. 이를 위하여 기체 상태의 전파 (에틸렌-공기 혼합물의 초음속 화염 전파) 계산을 위하여 Navier-Stokes 식을 바탕으로 1단계 화학 반응식을 사용하였으며 본 연구에서 사용하는 동점성 계수, 확산계수 그리고 열전달 계수는 온도에 의존하며 $Le=Pr=Sc=1$ 로 설정하였다[6]. 또한 점성항 계산은 constitutive relation을 활용하여 계산하였다. 또한 금속관을 해석하기 위하여 압력 및 응력 계산은 Mie-Gruneisen 상태 방정식과 strength 모델로서 Johnson-Cook 모델을 활용하였다[4].

우선, 에틸렌-공기 혼합물의 초기 조건 및 기계적 화학적 변수 값과 금속관 물성치는 아래의 Table 1과 2에 나타나 있다. 표의 값을 바탕으로 관 내부, 즉 기체 영역에서 전파되는 관 내 전파하는 초음속 화염과 금속관의 상호 작용을 확인하기 위하여 평행한 이차원 실린더 관을 사용하였으며, 계산 영역의 크기는 $35 \times 250 \text{ mm}^2$ 로 설정하고 계산 영역에서의 경계 조건으로 아래쪽은

* 서울대학교 기계항공공학부

** 국방과학연구소

† 연락처, jiyoh@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1507 FAX : (02)-880-3199

유입 조건을, 위쪽은 방출 조건을 각각 설정하였으며, 왼쪽은 대칭 조건을 사용하였다. 관 내부 벽면 경계의 추적 및 경계 값은 hybrid particle level-set 기법과 ghost fluid 기법을 통하여 결정하였다.

Table 1 Initial conditions and parameters of ethylene-air mixture

Initial temperature	T_0	293
Initial pressure	P_0	1.33×10^4
Initial density	ρ_0	0.158
Adiabatic index	γ	1.15
Molecular weight	M	29×10^3
Pre-exponential factor	A	3.2×10^8
Activation energy	E_a	$35.35RT_0/M$
Chemical energy release	Q	$48.82RT_0$

Table 2 Parameters of metal tubes

	Tungsten	Copper	Aluminum
$\Gamma(\text{kg/m}^3)$	1.4	2.0	2.0
$\rho(\text{kg/m}^3)$	17600	8930	2700
$C_p(\text{W/mK})$	477	385.5	1000
k , (J/(kgK))	38	401	170
$\sigma_y(\text{GPa})$	1.51	0.4	0.255
$T_0(\text{K})$	298	298	298
$E(\text{GPa})$	200	117	70
ν	0.29	0.35	0.35
$G(\text{GPa})$	124	43.33	26

초기 저압 기체의 초음속 화염 전파에 의한 벽면의 변형 현상을 직접적으로 확인하기 위해서는 얇은 관의 사용하였으며, Fig. 1은 두께, 1mm의 구리 관에서 초기 압력, 0.1 bar의 에틸렌-공기 혼합물의 초음속 화염 전파 (전파 속도, 1850 m/s)의 밀도장을 보여주고 있다. 여기서, 계산 영역 내 최초 초음속 화염의 전파에 의해 관의 팽창 현상과 더불어 체적 증가된 부분에서의 밀도 감소 현상 또한 확인할 수 있다. 최초 팽창과는 대략 $60 \mu\text{s}$ 부터 확인되었으며 시간이 흐름에 따라 팽창과가 전파되면서 유동장 내 여러 팽창파와의 간섭 현상을 확인하였다. 또한 초음속 화염의 압력에 의해 변형하는 구리 관은 effective plastic strain rate의 증가함을 통하여 확인할 수 있다(see Fig. 2).

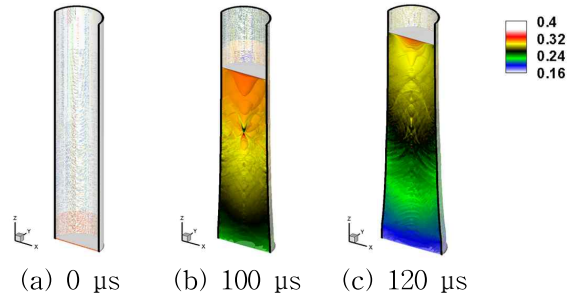


Fig. 1 Density (unit: kg/m³) in 1 mm thickness thin copper tube

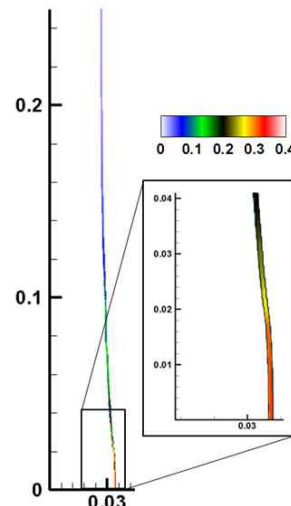


Fig. 2 Effective plastic strain rate at $120 \mu\text{s}$

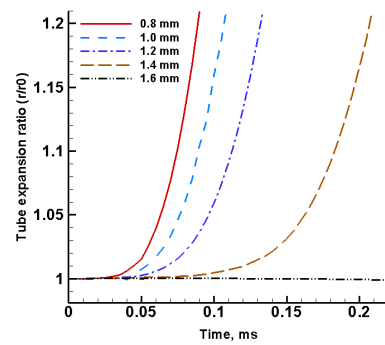


Fig. 3 Tube expansion ratios of different metal tubes

관 팽창과 관 두께간의 상관 관계는 아래의 Fig. 3을 통하여 확인할 수 있는데 그림에서 보는 바와 같이 계산 영역 내 가장 변화가 심한 부분에서의 관 팽창의 비는 관 두께가 두꺼워짐에

따라 감소하며 1.5 mm의 구리 관의 경우는 120 μ s까지 약간의 진동만을 가질 뿐 팽창에 의한 변화가 없음을 확인할 수 있다. 이는 추후 연구에서 구리 관 내 초음속 화염 전파 시 안전성을 확보하기 위한 최소한의 관 두께를 예측할 수 있는 기틀을 제공한다.

또한 동일한 초음속 화염의 압력 하에서 종류에 따른 1 mm 금속관 변형의 정도를 살펴보면 아래 Fig. 4와 같이 항복 응력이 작은 알루미늄의 경우, 짧은 시간 내에 빠른 변형 및 내부 팽창파의 전파를 확인할 수 있는 반면, 구리와 텅스텐의 경우는 보다 늦은 변형 반응을 확인할 수 있다.

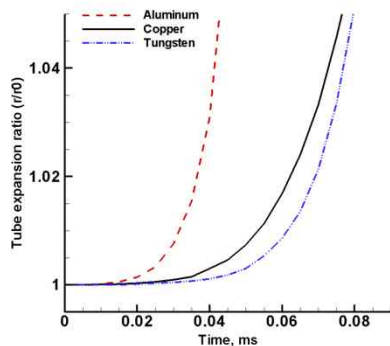


Fig. 4 Tube expansion ratios of different metal tubes

본 연구에서는 다상 물질이 고려된 수치 해석을 통하여 초음속 화염의 전파에 의한 관의 변형과 관의 변형에 의해 유도되는 화염 내 팽창파의 발생 및 간섭 현상에 대해 살펴보았으며 낮은 초기 압력 (0.1 bar) 하에서 에틸렌-공기 혼합물의 초음속 화염 발생 시 안전성을 확보하기 위해 최소한의 구리 관 두께 예측 및 관의 재질에 따른 변화를 수치적 기반을 마련하였다. 추후 실험이 이루어진다면 검증을 통하여 수정/보정할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 고압충격 폭발현상 해석기법 특화연구실의 HH-5 과제와 ADD 위탁과제 (열 및 충격 하중에 대한 고체 추진기관 거동 예측 기술)에 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대하여 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] D. H. Kim and J. J. Yoh, "Predictive model of onset of pipe failure due to a detonation of hydrogen-air and hydrocarbon-air mixtures," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 1613-1619.
- [2] M. C. Gwak and J. J. Yoh, "Gaseous deflagration-to-detonation impact simulation on copper-based furnace injector," *Combustion Explosion and Shock Waves*, Vol. 47, 2011, pp. 457-463.
- [3] T. G. Liu, B. C. Khoo, and K. S. Yeo, "Ghost fluid method for strong shock impacting on material interface," *J. Comput. Phys.*, Vol. 190, 2003, pp. 651-681.
- [4] L. B. Tran and H. S. Udaykumar, "A particle-level set-based sharp interface cartesian grid method for impact, penetration, and void collapse," *J. Comput. Phys.*, Vol. 193, 2004, pp. 469-510.
- [5] D. Hartmann, M. Meinke, and W. Schroder, "A level-set based adaptive-grid method for premixed combustion," *Combust. Flame*, Vol. 158, 2011, pp. 1318-1339.
- [6] E. S. Oran and V. N. Gamezo, "Origines of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion," *Combust. Flame*, Vol. 148, 2007, pp. 4-47.