

수치모사를 통한 가스-스팀 발사체계의 열유동과 탄의 운동성능 예측

김현묵* · 배성훈* · 배대석* · 박철현** · 전혁수** · 김정수*†

A Numerical Prediction for the Thermo-fluid Dynamic and Missile-motion Performance of Gas-Steam Launch System

Hyun Muk Kim* · Seong Hun Bae* · Bae Dae Seok* · Cheol Hyeon Park** · Hyeok Soo Jeon** · Jeong Soo Kim*†

ABSTRACT

Numerical simulations were carried out to analyze thermo-fluid dynamic and missile-motion performance by using two-phase flow model and dynamic grid system. To analyze the interaction among the hot gas, coolant, and mixture flow, Realizable $k-\epsilon$ turbulence and VOF(Volume Of Fluid) model were chosen and a parametric study was performed with the change of coolant flow rate. As a result of the analysis, pressure of the canister showed a large difference depending on the presence or absence of the coolant, and also showed a dependency on the amount of coolant. Velocity and acceleration were dependent on the canister pressure.

초 록

이상유동 모델과 동적격자계를 활용하여 탄의 사출관 내부의 열유동과 탄의 운동성능을 해석하는 수치모사를 진행하였다. 고온의 공기와 냉각제간의 상호작용 및 유동장을 해석하기 위해, Realizable $k-\epsilon$ 난류 모델과 VOF (Volume Of Fluid) 모델을 선정하고 냉각제 유량변이에 따른 수치 해석을 진행하였다. 해석결과, 사출관의 압력은 냉각제의 유무에 따라 큰 차이를 보였고, 냉각제량에 따라서도 각각의 차이를 보였다. 탄의 속도와 가속도의 변이는 압력에 종속하여 나타났다.

Key Words: Gas-steam Ejection(가스 스팀 발사), Ejection Canister(사출관), Multi-phase Flow(다상 유동), Volume Of Fluid(VOF), Dynamic Grid(동적 격자)

1. 서 론

탄을 발사관 밖으로 사출시키기 위한 방법은 로켓모터 추진력의 일부를 사출에 사용하는 부스터 발사방식(hot launch)과 별도의 동력원을 이용하는 사출발사방식(cold launch)으로 크게 구분된다. 각각의 발사방식은 장단점이 존재하여

* 부경대학교 기계공학과

** 국방과학연구소

† 교신저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

유도탄 발사 플랫폼의 상황에 맞춰 적절한 발사 방식을 채택한다.

이 중 사출발사는 부스터의 에너지가 아닌 별도 에너지원의 필요로 인한 추가적인 장치 때문에 구조가 복잡해지는 단점이 있으나, 발사초기, 탄의 발사관 이탈에 소모되는 추진기관의 에너지를 절감할 수 있어 그로 인한 유도탄 사거리 증가의 장점을 갖는다. 또한 로켓모터의 화염이 발생하는 부스터 발사방식에 비해 사출발사방식은 부스터의 화염이 없어 발사 플랫폼 및 유도탄의 생존성을 증대시킬 수 있다.

사출발사방식에 쓰이는 별도의 동력원으로는 고체추진제 가스발생기를 주로 사용한다. 그러나 가스발생기에서 생성되는 고온의 가스가 사출관의 벽면과 미사일의 꼬리부에 직접적으로 영향을 미쳐 손상이나 변형을 유발할 수 있어, 사출관과 미사일 아랫부분의 닫힌 공간으로 고온 가스가 도달하기 전에 냉각물질을 혼합시켜 주는 가스-스팀 사출발사방법(gas-steam eject launch method)이 최근에 이르러 효과적인 대안으로 떠오르고 있다.

최근에는 상용 CFD 소프트웨어의 발전으로 이를 이용한 가스-스팀 사출발사의 수치해석 연구가 수행되어 오고 있다. Liu와 Xi[1]는 상용 소프트웨어인 Fluent를 사용하여, 3상 유동모델과 동적격자(dynamic grid)로 수치해석모델을 수립한 뒤 사출관의 압력과 탄의 속도, 가속도 등을 실험 데이터와 비교분석하였는데, 상용프로그램으로도 상당히 실험에 근접한 해석결과를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

이번 연구에 앞서 저자들은 적절한 수치해석 방법과 해석모델 채택을 위해 탄이 움직이지 않는 상황을 가정하고 수치해석을 진행한 바 있다 [2]. 이전 해석 이래 본 연구에서는 실험 설비 구축 이전에 설계관련 데이터를 확보하기 위해, Fluent를 활용하여 다상 유동모델과 동적격자로 해석모델을 수립하여 수치모사하고 그 결과를 고찰하기로 한다.

2. 수치해석 방법

2.1 다상 유동 모델과 지배방정식

본 해석에서는 다상 유동 해석 모델로서 고정된 격자계(fixed Eulerian mesh)에 대해 표면 추적 기법을 사용하여 2개 이상의 상에 대한 경계면 분포를 해석하는 VOF (Volume Of Fluid) 모델을 사용하였다. 해석 시간 증분(Δt)의 제약을 피하고자 음함수(implicit) VOF 모델을 사용하였고, 계면을 구분하기 위한 interface scheme은 compressive 기법을 채택하였다.

VOF 모델은 일반적인 질량보존식과 운동량보존식을 사용하지만 상의 구분을 위해 체적분율에 관한 식이 추가된다. 또한, 에너지 방정식의 경우 확산에너지와 점성소산율을 고려하지 않는 단순화된 에너지보존식을 사용하고 에너지는 질량평균식을 통해 각 상의 체적분율에 따라 가중치를 두게 된다.

2.2 난류 모델

Realizable k- ϵ 모델은 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ϵ 을 풀어 난류유동장을 모사하는 Standard k- ϵ 난류 모델을 유체의 변형율과 회전율, 와도(vorticity)의 요동(fluctuation)을 고려하여 변형한 모델이다. 이 모델은 Standard k- ϵ , RNG k- ϵ 모델에 비해 실제에 근접한 난류유동을 모사한다고 알려져 있다[3]. 본 연구에서는 사출관 형상으로 인해 사출관 바닥면에서 복잡한 유동이 형성 되므로 유체의 변형과 회전을 고려하여 보다 정확한 난류유동을 모사할 수 있는 Realizable k- ϵ 모델을 사용하였다.

2.3 사출관의 형상과 격자

Fig. 1은 가스-스팀 사출발사 방법의 개략도와 해석 영역을 나타낸다. 본 해석에서 고려하는 축소형 모델 사출관은 직경 150 mm, 높이 150 mm의 원통형 구조이고, 유체가 사출관의 하부 중심을 향하도록 45° 기울어진 주입구가 형성되어 있으며, 주입구 직경은 향후 차원해석을 고려하여 사출관 원통 둘레의 1/6에 해당하는 부채꼴의 현과 동일한 길이인 38.82 mm로 두었다. 또한, 주입구 직경의 1/4에 해당하는 지름 9.705

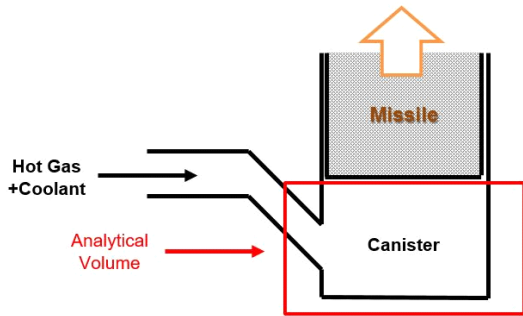


Fig. 1 Schematic of the ejection canister.

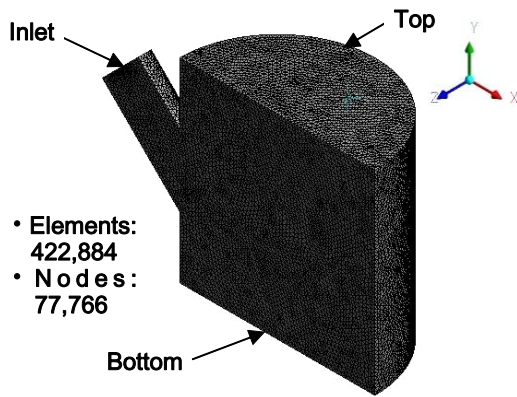


Fig. 2 Canister mesh system.

mm의 냉각제 입구를 추가하여, 공기(air)와 냉각제 수증기(water-vapor)가 함께 사출관 내부로 분사되도록 하였다.

계산을 위한 격자점 생성은 ANSYS mesh editor를 이용하였다. 사출관은 X-Y 좌표면 기준으로 좌우대칭의 형상이므로, 계산의 효율성을 위해 절반의 geometry만 사용하여 격자점을 생성하고 대칭 절단면을 symmetric boundary condition으로 설정하였다. 경사진 주입구에 의해 형성되는 난류유동을 정확하게 모사하기 위해 tetrahedral 격자를 생성하였는데, Fig. 2에 보이는 계산영역 격자계는 약 423,000개 요소와 78,000개의 격자점으로 구성되어 있다.

3. 해석 조건

입구를 통하여 1200 K인 고온의 공기와 냉각

제 역할을 하는 373.15 K의 수증기를 각각 분사하여 사출관 내부의 수증기의 분포, 압력과 온도의 변화 그리고 그에 따른 탄의 운동성능 변화 등을 해석하였다. 수증기의 경우 주입구 부분에서 증발이 완료된 상태를 가정하여 온도를 설정하였고, 발사체의 운동성능 해석을 위해 탄의 무게를 80 kg으로 가정, 9.81 m/s^2 의 중력 가속도를 적용하고 외부 대기압을 1 atm으로 설정하였다.

냉각제가 없는 단상(single-phase)유동의 경우(only air)와 냉각제가 있는 이상유동(two-phase)의 경우(air/water-vapor)에서 해석을 진행하였으며, 냉각제의 유량은 공기 유량(0.03 kg/s) 대비 5%, 10%, 15%로 설정하여 각각 계산을 수행하였다.

4. 수치해석 결과

압력은 사출관에서 발사되는 탄의 운동성능을 결정하는 중요한 변수로 사출관 하부공간의 온도, 부피와 상호작용하면서 변화한다. Dynamic grid와 연계해서 이러한 상호작용을 계산할 수 있었으며, 사출관 내부의 물리거동을 확인할 수 있는 의미있는 압력데이터를 확보할 수 있었다.

Fig. 3는 전체 계산시간($t = 0.1 \text{ s}$)동안의 압력변화를 도시하는 그래프이다. 단상유동의 경우와 이상유동의 경우의 압력변이가 확인한 차이를 보이며, 이상유동 사이에서도 냉각제량 증가에 따른 압력의 차이가 나타난다. 이전의 연구[2]에서, 탄이 움직이지 않아 밀폐, 고정된 경우, 냉각제 첨가에 의한 총 질량유량(air + water-vapor) 증가의 영향으로 인해 공간상의 압력과 온도는 이상유동의 경우가 단상유동의 경우보다 크게 증가하는 것을 확인하였다. 본 해석에서는 보다 복잡한 현상이 발생하는데, Fig. 3에서 이상유동은 단상유동보다 더욱 짧은 시간(약 0.036 s)에 최대값에 도달하고, 냉각제의 질량유량이 클수록 압력의 최대값은 더 높다. 또 이상유동의 경우 압력이 최대값 도달 직후 빠르게 감소하면서 단상유동의 그것보다 현격히 낮아지게 되고, 또한

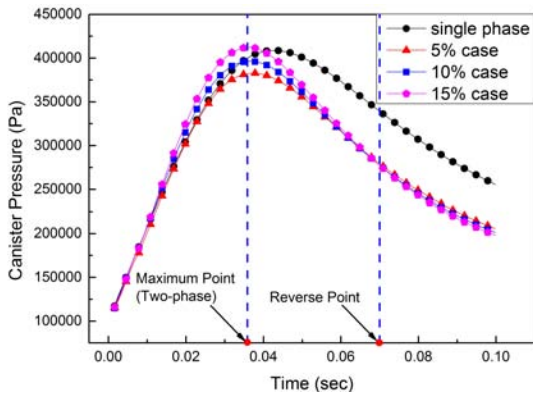


Fig. 3 Average-pressure variation inside canister at top surface.

특정 시점(약 0.07 s)이후 이전의 압력 경향이 역전되어 냉각제의 질량유량이 클수록 압력이 더 낮아지는 모습까지 보인다. 경계(혹은 사출관 체적)가 변하지 않는 경우와는 크게 다른 위와 같은 현상은 Table 1에 정리되어 있는 열역학적 요인들을 통해 설명할 수 있다. 즉, 탄이 이동하면서 이동 경계를 갖는 사출관에 gas와 함께 냉각제가 유입됨에 따라, 사출관 내부에는 압력 증가에 기여하는 총 질량유량 증가 요인과 냉각으로 인한 온도감소를 통하여 압력저하에 기여하는 열전달 요인, 그리고 탄의 움직임으로 발생하는 사출관내 체적의 증가로 압력저하에 기여하는 요인 등이 혼재한다. 따라서 사출관 내 압력은 이들 세 가지의 요인들이 서로 경쟁적으로 영향을 주고받으며 비선형적으로 형성되고 변화한다.

탄의 하부면 넓이와 질량은 변하지 않고 사출관 하부에서 가해지는 압력만 변화하므로 탄의

Table 1. Factors of pressure increase and decrease

Factors		Results
Increasing of canister volume		Pressure decrease
Increasing of coolant mass flow rate	Temperature decrease	
	Increasing of total mass flow rate	Pressure increase

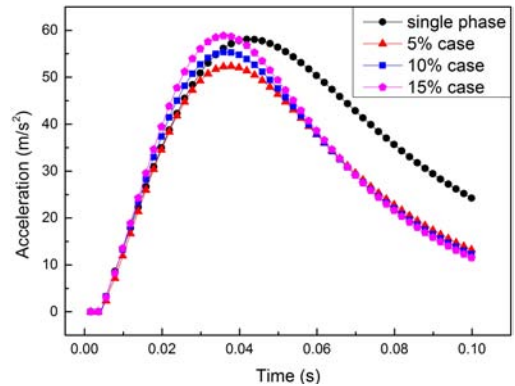


Fig. 4 Missile acceleration.

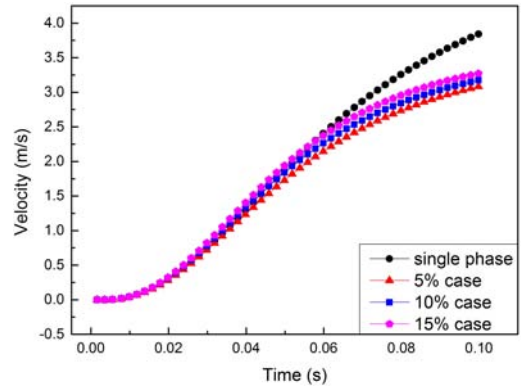


Fig. 5 Missile velocity.

가속도선도는 사출관의 압력선도와 동일한 형태로 나타난다. Fig. 4은 탄의 가속도를 나타내고 사출관 작동초기의 탄이 움직이기 시작할 때까지의 짧은 기간을 제외하고는 Fig. 3와 유사한 경향을 보인다. 단상유동의 경우 최대가속도 값은 58 m/s²로 나타나고 이상유동 5%, 10%, 15% case의 경우 각각 52 m/s², 55 m/s², 59 m/s²의 최대가속도에 도달한다.

Fig. 5은 탄의 속도를 나타내는 그래프로서 Fig. 4의 가속도 그래프와 연관되어 있다. Fig. 4에서 가속도가 최대값에 도달한 직후 급격히 감소하므로 속도는 가파르게 증가하다가 시간이 지날수록 기울기가 감소하게 된다. 압력과 가속도는 약 0.07 s 이후 냉각제의 질량유량이 클수록 값이 더 낮아지므로, 0.1 s 이상 해석을 진행할 경우 종국에는 속도값이 역전될 수 있음을 예측할 수 있다.

5. 결 론

가스-스팀 발사체계 개발을 위한 사출관 실험 설비구축에 앞서 설계관련 기초데이터를 확보하기 위해, Realizable k- ϵ 난류 모델과 VOF 모델, 동적격자계를 사용하여 단상유동과 이상유동 해석을 수행하였고 사출관 내부에서 형성되는 유동과 압력변화, 탄의 가속도 및 속도의 변화, 냉각제의 거동 등을 분석하였다.

해석결과, 압력은 이상유동이 단상유동에 비해 빠르게 최대압력값에 도달한 뒤 급격히 줄어들어 종국에는 단상유동보다 낮은 압력값이 나타났다. 또한 이상유동끼리 비교하였을 때, 총 질량유량의 영향이 지배적으로 작용하여 냉각제량이 클수록 압력이 높았으나, 0.07 s 이후에는 냉각제량이 증가할수록 압력이 낮아지는 모습을 보였다. 탄의 가속도는 사출관내 압력에 종속적이므로 가속도의 변이선도는 압력의 그것과 같았고, 속도는 단상유동일 경우 가장 크게 나타나고 이상유동의 경우 냉각제의 질량유량이 클수록 높은 값을 보였다.

본 연구를 통해 추가적인 수치해석 또는 사출관 실험설비 구축에 필요한 기초데이터를 확보할 수 있었다. 그러나 증발과정에 대한 모델링을 생략하였기 때문에 향후 실제에 가까운 열전달 해석을 위해 증발효과를 추가한 해석모델을 개

발하고 그에 대한 심도있는 수치계산을 진행할 필요가 있다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소(ADD-14-01-08-11)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

1. Liu, Y. and Xi, A., "An Interior Trajectory Simulation of the Gas-steam Missile Ejection," *Journal of Computers*, Vol. 8, No. 5, pp. 1321-1326, 2013.
2. Kim, H.M., Bae, S.H., Park, C.H., Jeon, H.S. and Kim, J.S. "Thermo-fluid Dynamic Analysis through a Numerical Simulation of Canister," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 1, pp. 72-83, 2017.
3. ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, 2012.