



냉각제의 분사조건 및 상변화가 혼합가스 사출시스템의 성능에 미치는 영향

김현목^a · 김정수^{a,*}

Effect of Heat Transfer and Phase Change of Coolant on the Performance of Mixed-gas Ejection System

Hyun Muk Kim^a · Jeong Soo Kim^{a,*}^aDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) numerical simulations have been carried out to study how coolant injection conditions influence the cooling efficiency and projectile ejection performance in a mixture-gas ejection system (or gas-steam launch system). The 3D single-phase computational model was verified using a 1D model constructed with reference to the previous research and then a two-phase flow computation simulating coolant injection on to hot gas was performed using a DPM (Discrete Phase Model). As a result of varying the coolant flow rate and number of injection holes, cooling efficiency was improved when the number of injection holes were increased. In addition, the change of the coalescence frequency and spatial distribution of coolant droplets caused by the injection condition variation resulted in a change of the droplet diameter, affecting the evaporation rate of coolant. The evaporation was found to be a critical factor in the design optimization of the ejection system by suppressing the pressure drop while the temperature decreases inside the breech.

초 록

냉각제 분사조건이 변화할 때 혼합가스 사출시스템 (또는 가스-스팀 발사체계) 냉각효율 및 발사체 사출성능의 변화를 확인하기 위해 3차원 수치모사를 수행하였다. 선행연구를 참조하여 구축한 1차원 모델을 통해 3차원 단상(single-phase) 계산모델을 검증한 후, Discrete Phase Model을 활용하여 고온의 기체에 냉각제 분사를 모사한 이상(two-phase) 유동 계산을 수행하였다. 냉각제 유량과 분사구 개수를 각각 변화시키면서 계산을 수행한 결과, 분사구 개수를 증가시켰을 경우 냉각효율이 보다 개선되었다. 또한 분사조건에 따라 냉각제 액적 서로간의 coalescence 발생 빈도 및 공간분포 변화가 발생하여 액적의 직경이 달라졌고, 이는 냉각제 증발률에 영향을 미쳤다. 냉각제의 증발은 breech 내부의 온도를 감소시키는 반면에 압력감소를 억제하여 사출시스템 최적화 설계에 있어 중요한 요소임을 확인하였다.

Key Words: Gas-steam Launch(가스-스팀 발사), Dynamic Grid System(동적격자계), Discrete Phase Model(이산상 모델), Multi-phase Flow(다상 유동)

Received 25 June 2018 / Revised 28 August 2018 / Accepted 3 September 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

발사체를 발사관 밖으로 사출시키기 위한 방법은 발사체 자체의 추진력을 사출에 사용하는 hot launch와 별도의 동력원을 이용하는 cold launch로 크게 구분된다. Cold launch가 가진 가장 큰 특징은 발사관이 발사체의 로켓모터 화염에 직접 노출되지 않는다는 점과 그로 인해 발사관의 열손상이 없다는 점이다. 이러한 특징들로 인해 cold launch는 연소가스의 노출이 안전에 심각한 영향을 미칠 수 있는 밀폐공간인 잠수함이나 발사 플랫폼의 재활용이 필요한 이동식발사대 또는 전투함선의 VLS (Vertical Launch System) 등에서 자주 사용된다.

Cold launch를 위한 별도의 동력원으로써 압축기체를 사용할 수도 있으나 이는 탄도미사일과 같은 큰 중량의 발사체를 사출하기에 추진효율이 낮다. 따라서 이러한 발사체에는 고체추진체를 이용하는 가스발생기가 주로 사용된다. 이 경우, 비록 발사체 로켓모터가 내뿜는 지속적이고 강력한 연소화염에 대한 노출은 없지만 가스발생기 또한 연소반응을 이용하기에 고온가스에 의한 발사관 열손상이 발생할 수 있다. 혼합가스 사출시스템(또는 가스-스팀 사출체계)은 그와 같은 열손상을 방지하기 위해 냉각제를 분사하여 연소가스와 혼합시키고, 냉각제의 증발에 의해 혼합가스가 생성된다(Fig. 1). 해당 시스템은 고온의 연소가스와 냉각제의 상호작용으로 인한 온도변화, 발사체의 상승에 따른 혼합가스의 부피 증가 등 압력에 관여하는 요소들이 서로 얽혀 사출시스템의 성능 예측이 어려우므로 심도 깊은 연구를 필요로 한다.

Edquist와 Romine[1]은 가스-스팀 사출발사방식 연구를 위해 이상기체와 실제 혼합가스 상태를 가정하고, 열손실이 포함된 모델을 구현하여 해석을 수행한 다음 실제 미사일 사출 실험 데이터와 비교분석하였다. 그리고 10년 후 소형 대륙간 탄도미사일과 잠수함 발사 탄도미사일의 연구개발을 위해 가스 다이내믹 모델을 개발하여, 실제 peacekeeper 탄도미사일 발사 데이터, 소형 대륙간 탄도미사일의 실험 데이터와 비교

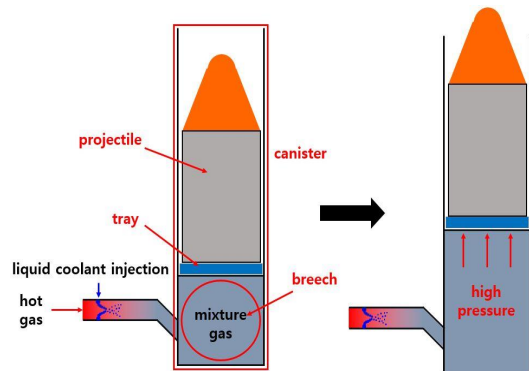


Fig. 1 Schematic of mixture-gas ejection system.

분석하였다[2]. Edquist의 연구는 실제 실험과 미사일 발사 데이터를 통한 검증으로 신뢰도가 높아 혼합가스 사출시스템과 관련된 많은 연구에서 인용되고 있다.

비교적 최근에는 상용 CFD 소프트웨어의 발전으로 이를 이용한 가스-스팀 사출발사의 수치해석 연구가 수행되어왔다. Liu와 Xi[3]는 Fluent를 사용하여 다상 유동모델과 동적격자(dynamic grid)로 수치해석모델을 수립한 뒤, 사출관의 압력과 탄의 속도, 가속도 등을 실험 데이터와 비교분석한 결과, 실험에 근접한 해석결과를 제시할 수 있었다.

국내에서도 가스-스팀 사출발사에 대한 연구가 수행된 바 있다. Byun[4]은 Edquist와 마찬가지로 열손실 모델을 적용하여, 발사장치 내부의 열역학적 거동과 유도탄의 동적거동에 대하여 물리적인 모델을 수립하였다. Baek과 Yim[5]은 가스발생기용 저 연소속도 HTPB/AP계 고체추진체의 조성에서 냉각역할을 하는 Oxamide와 Melamine이 추진체의 연소특성에 미치는 효과를 고찰하였다. 본 연구팀도 냉각제 증발속도를 매우 높게 가정하여 냉각제와 연소가스와의 혼합유동이 사출시스템에 미치는 영향을 분석한 바 있다[6,7].

본 연구에서는 액체 냉각제의 분사조건에 따라 혼합가스 사출시스템의 냉각효율 및 발사체의 사출성능 변화를 파악하기 위해 3차원 전산모사 실험을 수행하였다. 먼저 혼합가스 사출발사 방식에 대한 선행연구들[1,2]을 참조하여 1차

원 계산모델을 구축한 뒤 동적격자계를 적용한 3차원 계산모델과 해석결과를 비교하여 계산의 정확성을 검증하였다. 또 혼합가스 사출시스템에 사용된 냉각방식의 효율성을 파악하기 위해 앞서 검증된 3차원 계산모델에 DPM (Discrete Phase Model) 해석기법을 도입하여 사출시스템에 대한 보다 실제적인 성능해석을 수행하였다.

2. 3차원 수치해석 방법

2.1 DPM (Discrete Phase Model)과 지배방정식

고온의 기체가 발사관으로 진입하기 전 분사된 액체 상태의 냉각제가 미립화되고 고온기체와 만나면서 증발되는데(Fig. 1 참조), 이 과정을 모사하기 위해 DPM (Discrete Phase Model)을 사용하였다. DPM은 다상(multiphase)유동 모델 중의 하나로서 액체상과 기체상을 각각 Lagrangian과 Eulerian 해석을 통해 계산하며 각 상의 경계에서 서로의 질량, 운동량 그리고 에너지의 전달을 계산하여 상호작용을 모사할 수 있다.

2.2 액적의 분열(breakup)과 충돌(collision)

액적의 분열을 표현하기 위해 Reitz[8]의 wave breakup 모델을 사용하였다. 이 모델은 액체상과 기체상의 상대속도로부터 액적의 분열을 예측하고 분열시점 및 생성된 액적의 크기가 제트 안정성 분석으로부터 유도된 fastest-growing Kelvin-Helmholtz 불안정성과 관련이 있다고 가정한다. 이 불안정성의 파장과 성장률은 분열 및 충돌 이후 새로 형성된 액적의 세부사항을 예측하는 데 사용된다.

액적의 충돌은 O'Rourke[9]의 알고리즘을 사용하여 계산한다. 이는 컴퓨팅 자원 소모를 효율적으로 줄이기 위해 액적의 충돌발생을 기하학적이 아닌 확률적으로 분석하고, 액적이 동일한 격자 내에서만 충돌할 수 있다고 가정한다. 충돌이 발생한 후 액적이 유착(coalescence)되는지 또는 bouncing outcome을 생성하는지는 Eq. 1을

통해 충돌 웨버수(We_c)를 구한 뒤 실험식에 대입하여 결정한다.

$$We_c = \frac{\rho U_{rel}^2 \bar{D}}{\sigma} \quad (1)$$

위 식에서 ρ 는 액적의 밀도, U_{rel} 은 두 액적의 상대속도, \bar{D} 는 두 액적의 산술평균 직경 그리고 σ 는 표면장력을 나타낸다. 충돌 후 액적의 상태는 충돌 결과에 따라 수정된다.

2.3 난류 모델

난류 모델은 난류운동에너지 k 와 난류운동에너지 소산율 ϵ 을 풀어 난류유동장을 모사하는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 유체의 변형률과 회전율, 와도(vorticity)의 요동(fluctuation) 등을 고려하여 변형한 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 이 모델은 Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ 모델에 비해 실제에 보다 가깝게 난류유동을 모사한다고 알려져 있다[10]. 따라서, 발사관의 형상으로 인해 복잡한 유동이 형성되므로 본 연구에서는 유체의 변형과 회전을 고려하여 보다 정확하게 난류유동을 모사할 수 있는 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

2.4 3-D 계산모델의 형상

계산영역은 냉각제와 고온가스가 섞이는 도관부분과 breech 부분이다. 여기서 breech는 발사관 전체가 아닌 혼합가스가 진입하는 발사체 하부의 공간을 지칭한다(Fig. 1 참조). 해석에 사용된 geometry는 주입구 직경 40 mm의 도관이 수평으로 약 300 mm 이어지다가 완만하게 45° 기울어져 직경 150 mm, 초기 높이 150 mm의 breech에 연결되는 형상으로 Fig. 2에 나타내었다.

2.5 모델의 격자

계산 모델의 형상적 특징으로 인해 유체의 흐름은 직선적이지 않다. 이러한 경우 tetrahedral 격자가 hexahedral 격자보다 해석에 유리하기에 비정렬 tetrahedral 격자를 사용하였다. Fig. 3의 좌측에 보이는 계산영역의 초기 격자계는 588,503개 요소와 109,947개의 격자점으로 구성

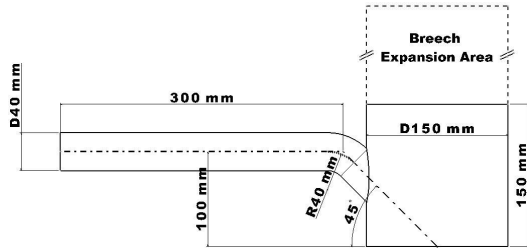


Fig. 2 Geometry of analysis model.

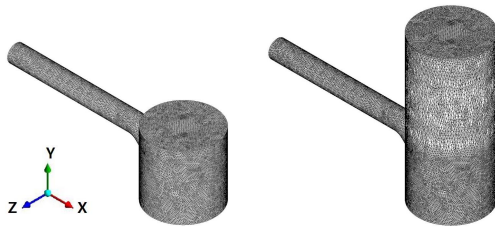


Fig. 3 Mesh system at calculation starting phase (left) and ending phase (right).

되어 있다. 계산을 위한 격자 생성은 ANSYS mesh editor[10]를 이용하였다.

Breech에서 생성되는 압력이 발사체의 무게(피스톤 또는 물체의 무게)를 극복하고 그것을 움직일 수 있을 때, breech의 부피가 증가하기 시작하고 그로 인해 계산영역의 확장이 필요하게 되므로 동적격자계(dynamic grid system)를 사용한다. 동적격자계에서는 Fig. 3과 같이 breech의 압력에 따라 이동하는 상부면에 맞춰 격자를 stretching 또는 dividing하며 계산 영역을 확장하게 된다.

2.6 해석 방법

해석을 위해 Intel사의 E5-2680 v3 CPU 2개 (CPU당 12개 코어)로 계산을 수행하였다. 3차원 모델 계산을 위해 상용 소프트웨어인 Fluent를 사용하였으며 압력 기반의 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) 해석 알고리즘을 채택하였다[10]. 운동량, 난류 스칼라 값, 에너지 방정식들의 경우 각각 2차 상류차분식의 공간이산화 기법을 사용하였고, 구배 보간법은 셀 기반 최소제곱법, 시간적분 기법은 1차 정확도의 음함수 시간적분법을 사용하였다.

Table 1. Initial and boundary conditions for 3-D calculation model.

Initial Condition	
Canister Pressure	1 atm (101,325 Pa)
Canister Temperature	300 K
Boundary Condition	
External Pressure	1 atm (101,325 Pa)
Air Inlet	$\dot{m}_{i,air} = 0.06 \text{ kg/s}$ $T_{i,air} = 1200 \text{ K}$
Wall	Non-slip Condition, Adiabatic
Projectile Mass	80 kg

Table 2. Liquid-water coolant injection conditions for 3-D calculation model.

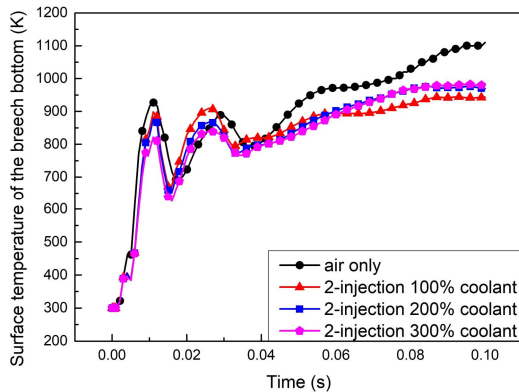
Mass Flow rate ($\dot{m}_{i,water}$)	100% case	0.06 kg/s
	200% case	0.12 kg/s
	300% case	0.18 kg/s
Temperature ($T_{i,water}$)	300 K	

Injection point and angle

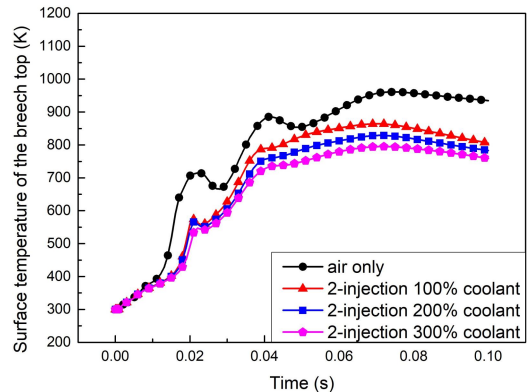
The number of injection and position

3. 해석 조건 및 결과

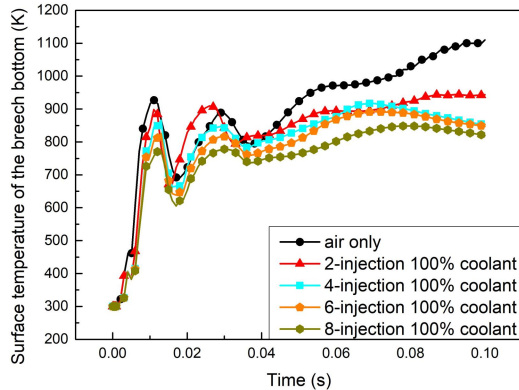
3차원 해석모델을 Edquist의 해석모델[1,2]과 비교하여 동적격자계의 신뢰성을 확보한 다음, breech로 들어오는 고온의 기체에 액체 냉각제가 분사되어 증발되는 과정을 모사하여 그 결과를 분석하였다. 해석조건으로 발사체의 무게는 80 kg으로 가정, 9.81 m/s²의 중력 가속도를 적용하고 외부 대기압을 1 atm으로 설정하였다.



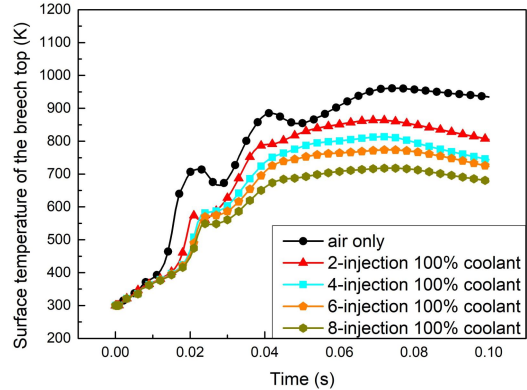
(a) Breach bottom area-average temperature according to coolant mass flow change.



(b) Breach top area-average temperature according to coolant mass flow change.



(c) Breach bottom area-average temperature according to the number of coolant injection holes.



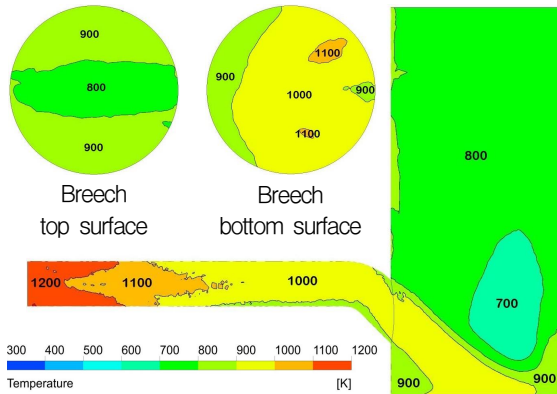
(d) Breach top area-average temperature according to the number of coolant injection holes.

Fig. 4 Area-average temperature of the breach top and bottom surface.

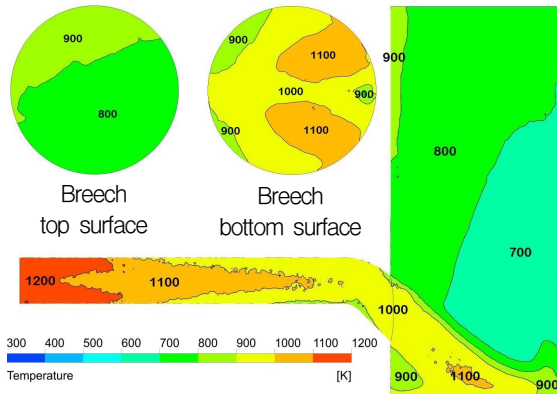
해석을 단순화하기 위해 연소가스 대신 1,200 K의 고온 air를 0.06 kg/s 유량으로 breach를 향해 주입한다. 이러한 경계조건들 및 기타조건들을 Table 1에 정리하였다. 냉각제는 온도 300 K의 액체상태 water로 설정하였고 유량의 변화와 분사구의 개수를 냉각 성능의 매개변수로 택하였다. Table 2는 3차원 계산에 사용된 냉각제 분사 조건들을 상세히 정리하고 있다. 먼저 분사구 개수를 2개로 하고 냉각제 유량은 air 유량 대비 100%, 200%, 300%에 해당하는 조건으로 변화를 주어 계산을 수행하였고, 냉각제 유량을 air 유량 대비 100%로 고정하고 분사구의 개수를 2, 4, 6, 8개로 변화시키며 계산을 수행하였다. 분사구의 직경은 모두 동일하게 2 mm이며 Table 2에

서 보이는 그림과 같이 분사구의 위치는 각 case 별로 등각을 이루도록 위치하고 도관의 측면에서 보았을 때 입구에서 10 mm 떨어진 곳에서 냉각제가 분사된다. 또한 냉각제 액적의 과도한 coalescence를 방지하기 위해 분사구의 수직축에서 45° 기울어진 상태로 냉각제가 분사된다. 초기조건 및 air의 경계조건은 Table 1과 동일하다. 해석은 비정상상태 조건에서 $1 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-6}$ s의 시간증분으로 0.1 s까지 수행하였다.

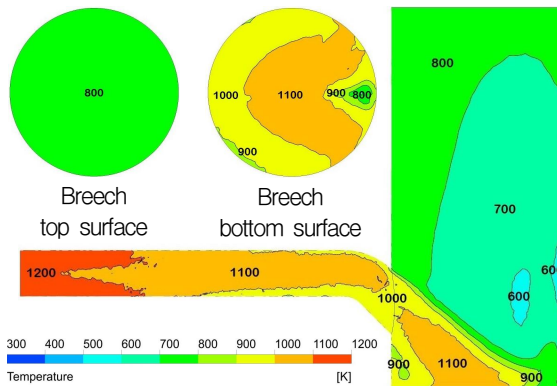
Fig. 4는 각 case별로 breach의 상, 하부 면의 시간에 따른 온도변이를 나타낸 그림이다. breach 하부면은 도관을 통해 들어온 혼합가스가 가장 먼저 맞닿아 가장 높은 온도분포가 예상되는 곳이며, breach 상부면은 혼합가스에 노



Symmetry surface
(a) 2-injection 100% case.



Symmetry surface
(b) 2-injection 200% case.

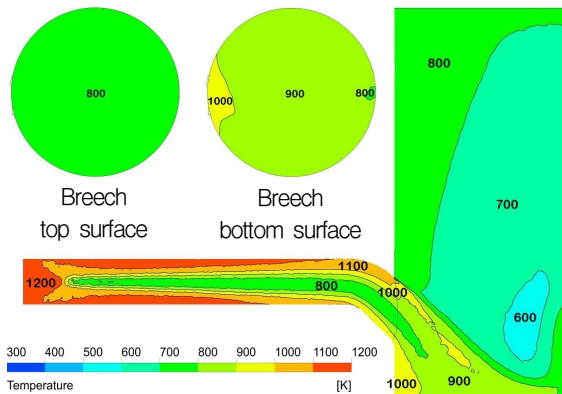


Symmetry surface
(c) 2-injection 300% case.

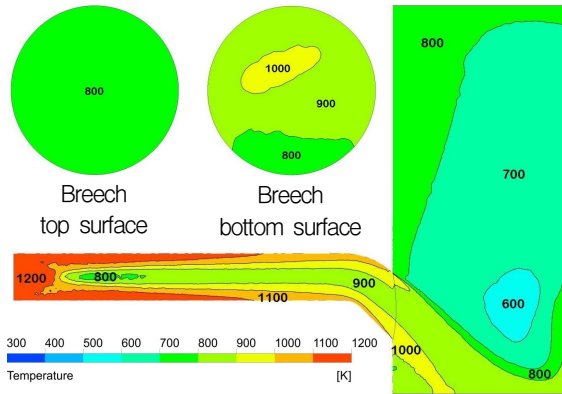
Fig. 5 Temperature distributions at 0.1 s with varying coolant mass flow rate.

출된 발사체의 하부면에 해당한다. Fig. 4(a), (b)에서 상, 하부면 면적평균 온도는 냉각제의 유무에 따라 큰 차이를 나타낸다. 하지만 냉각제 양에 따른 온도 차이는 그리 크지 않은데, 이는 냉각제의 유량이 증가하면서 생기는 액적 상호간 coalescence 또는 미처 증발되지 못한 과도한 액적의 존재로 인해 냉각제 질량당 기여하는 혼합물의 온도감소 효과가 크지 않기 때문으로 판단된다. Fig. 4(a)에서 200% case와 300% case는 초기에는 100% case 보다 낮은 온도를 보였으나 시간이 지남에 따라 오히려 100% case에서 가장 낮은 온도를 나타내는데 이는, coalescence로 인한 냉각효율 감소가 냉각제 유량 증가로 인한 온도 감소 효과보다 크게 나타나서 생기는 현상으로 보인다. 다만 그러한 현상은 상부면에서 다소 완화되어 냉각제 증가의 효과가 다소 뚜렷해지는 것이 관찰된다(Fig. 4(b) 및 Fig. 4 (d)). Fig. 4(c), (d)에서는 냉각제 분사구의 개수를 증가시키는 것이 유량을 증가시키는 것보다 온도 감소에의 영향이 크다는 사실을 보이고 있다. 이는 동일 유량에서 분사구의 개수가 늘어남에 따라 액적이 넓고 고르게 분포되어 냉각제 질량당 기여하는 혼합물의 온도 감소 효과가 증가하기 때문으로 사료된다. 하지만 분사구가 4개에서 6개로 증가할 시 온도 감소 효과가 다소 줄어드는데, 이는 액적의 공간적인 분포 특성에 따른 현상이다. Fig. 4의 분석을 통해 좁은 공간 내에서 많은 양의 액적이 존재하는 것보다 적은 양의 액적이 넓은 공간에 퍼져있는 것이 고온 기체의 냉각에 더욱 유리함을 알 수 있다. 또, Fig. 4의 그래프에서 약 0.04 s 이전까지 평균온도의 fluctuation이 존재하는 특성을 발견할 수 있는데, 이는 계산모델의 기하학적 특성에 기인하여 생기는 circulation 유동으로 인해 초기 breech에 존재하던 상온의 air와 고온의 혼합기체가 섞이면서 나타나는 현상이다.

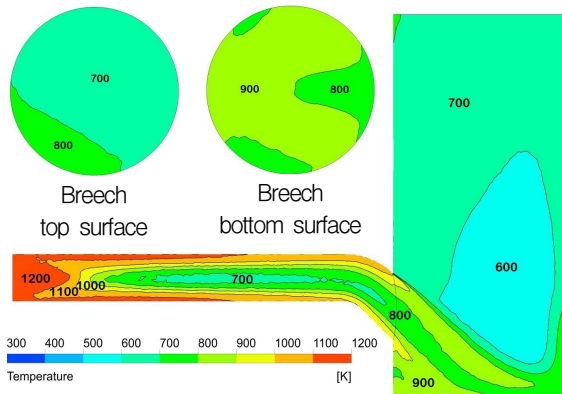
Fig. 5, 6은 공간적인 온도 분포 특성을 확인하기 위해 0.1 s 시점에서 breech의 중앙 분할면, 상부면, 하부면의 온도분포를 각 case별로 나타낸 것이다. 2개의 분사구에서 air 유량 대비 100%, 200%, 300% 냉각제 유량을 분사하는 경



Symmetry surface
(a) 4-injection 100% case.



Symmetry surface
(b) 6-injection 100% case.



Symmetry surface
(c) 8-injection 100% case.

Fig. 6 Temperature distributions at 0.1 s with varying number of coolant injection holes.

위의 온도분포를 각각 나타내는 Fig. 5에서는, 중앙 분할면 온도분포를 통해 도관 내부의 혼합가스 온도 변화를 확인할 수 있다. 그림에서 도관 내 혼합가스 온도는 냉각제 유량이 증가할수록 오히려 높아진다는 것을 확인할 수 있는데 이는 Fig. 4에서 전술하였듯이, 액적간의 coalescence로 인한 냉각효율의 감소효과 때문이다. 이러한 효과는 유입된 혼합가스와 직접 접촉하게 되는 breech 하부면에 지대한 영향을 미친다. 실제로 Fig. 5의 breech 하부면은 냉각제 유량이 증가할수록 더 높아지는 온도수준을 보이고 있다. breech 중앙부에서는 circulation 유동으로 인해 냉각제가 넓게 퍼지고 냉각효율이 증가하면서 전반적으로 낮은 온도 분포를 보인다. Coalescence로 인한 냉각효율 감소로 100% case 보다 하부면 온도가 높았던 200%, 300% case도 전술한 circulation 유동의 영향으로 냉각제가 넓게 퍼지면서 유량증가의 효과가 나타나서 냉각제 유량의 증가와 함께 breech 중앙부 온도와 상부면의 온도는 더욱 낮아지게 된다. Fig. 6은 고온의 air 유량 대비 냉각제 100%의 동일 유량으로 각 4, 6, 8개의 분사구를 통해 냉각제를 분사할 때의 온도분포를 나타내고 있다. 그림의 중앙 분할면 contour에서 도관의 온도분포는 분사구가 2개일 때에 비해 매우 낮은 온도분포를 보여준다. 이러한 현상은 분사구의 개수를 증가시켜 액적 간의 coalescence를 크게 억제시켜 나타난 결과로 앞서 말한 바와 같이 breech 영역의 냉각효율에도 크게 영향을 미치게 된다. 즉, 분사구 개수가 증가함에 따라 breech의 상, 하부 경계면을 포함하여 전체 영역에서 낮은 온도분포를 유지하게 된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각 case별로 breech 내에 분사된 냉각제의 증발량과 증발분률의 시간에 따른 변이를 나타낸 그래프이다. 냉각제의 분포 특성은 냉각제 증발과 밀접한 연관이 있다. 먼저 2개의 분사구에서 냉각제 유량이 air 유량 대비 100%, 200%, 300%인 경우를 보면 Fig. 7의 냉각제 증발량은 유량이 증가할수록 미미하게 높아지지만, Fig. 8의 증발분률은 오히려 유량이 많을수록 낮은 수치를 나타낸다. 이는 유량이 증가

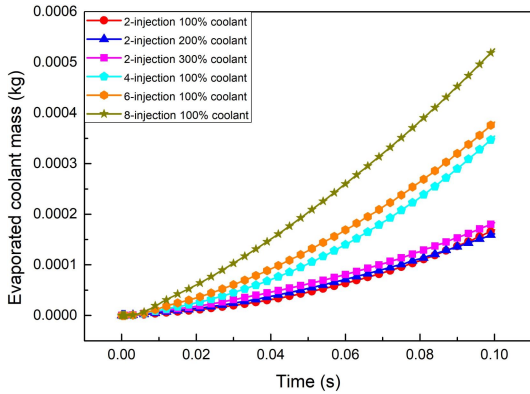


Fig. 7 Variation of evaporated coolant mass.

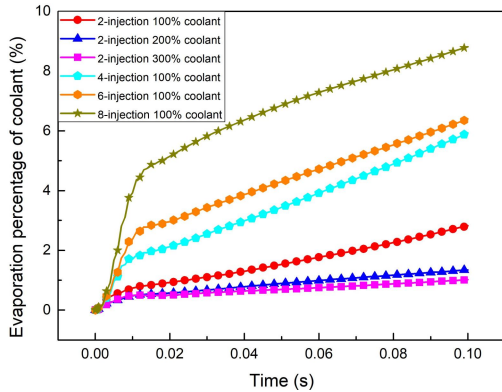
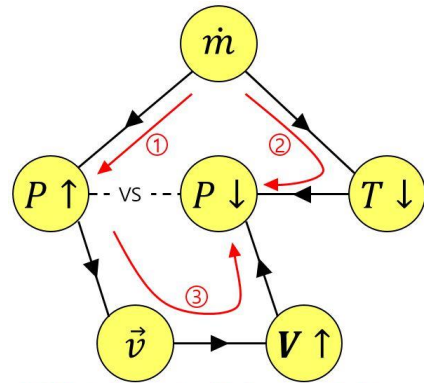


Fig. 8 Evaporation rate of coolant.

함에 따라 액적 coalescence에 의해 직경이 증가하면서 나타나는 현상이다. 또한 air 유량 대비 100% 냉각제 유량에서 분사구를 증가시키는 경우, 냉각제 증발량이나 증발분률 모두 뚜렷이 증가하는 결과를 보인다.

액적의 증발로 인한 water-vapor의 생성은 혼합가스 사출시스템의 성능에 중요한 영향을 미친다. 이를 설명하기에 앞서 사출시스템의 breech 내부 압력에 영향을 미치는 기구 (mechanism)들에 대해 언급하자면, 먼저 breech에 주입되는 혼합가스의 질량으로 압력증가에 기여하는 혼합가스 질량전달 기구와 냉각제에 의한 온도감소를 통해 압력저하에 기여하는 열전달 기구, 그리고 발사체의 이동을 모사하는 경계면(breech 상부면)의 움직임에 기인하는 breech의 체적증가로 압력저하에 기여하는 경계 이동 기구가 존재한다. 사출성능의 지표가 되는 시간에 따른 압력은 전술한 기구들의 경쟁적인



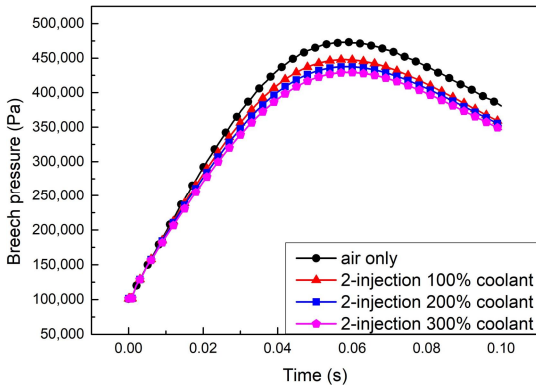
- ① Effect of mass transfer (pressure rise)
- ② Effect of heat transfer (pressure drop)
- ③ Effect of moving boundary (pressure drop)

Fig. 9 Competitive mechanism affecting thermodynamic properties change in mixture-gas ejection system.

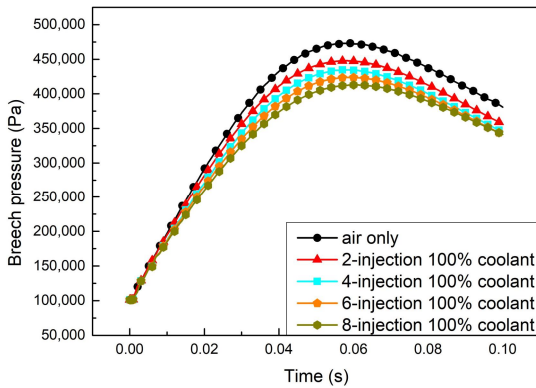
복합작용으로 결정된다. Fig. 9에서는 이러한 기구들의 영향을 직관적으로 파악할 수 있다. 액적이 증발하면서 발생하는 water-vapor의 생성은 breech 내부 혼합가스 질량을 증가시키므로, 이는 혼합가스의 온도감소와 breech의 부피 증가로 인한 압력감소를 상쇄시킬 수 있다.

Fig. 10은 각 case에서 시간에 따른 압력변이를 나타낸 것으로 Fig. 10의 압력변이와, Fig. 4의 온도변이를 비교하면, 몇몇 경우를 제외하고는 온도감소에 비해 압력감소가 그리 크지 않으므로 전술한 water-vapor 생성으로 인한 압력감소 상쇄를 확인할 수 있다. 또한 냉각제의 증발률이 높은 case로 갈수록 압력감소를 대비 온도감소율이 커지므로 이를 통해 냉각제 증발을 통한 온도저하 효과를 확인할 수 있다. Breech의 압력은 발사체의 사출속도를 결정하므로, 냉각제 증발을 제어는 혼합가스 사출시스템의 주목적이고 온 연소가스의 냉각효과를 달성함과 동시에 발사체의 사출성능 감소를 최소화할 수 있는 최적화 설계의 핵심요소라고 할 수 있다.

Fig. 11는 각 case별로 발사체의 사출 가속도 및 속도의 시간변이를 나타낸 그래프이다. 대기압 하에서 발사체의 질량이 변하지 않고 마찰력을 고려하지 않았기에 발사체 가속도는 오로지 breech의 압력에 종속되므로 가속도 그래프는



(a) Breach pressure according to coolant mass flow change.



(b) Breach pressure according to the number of coolant injection holes.

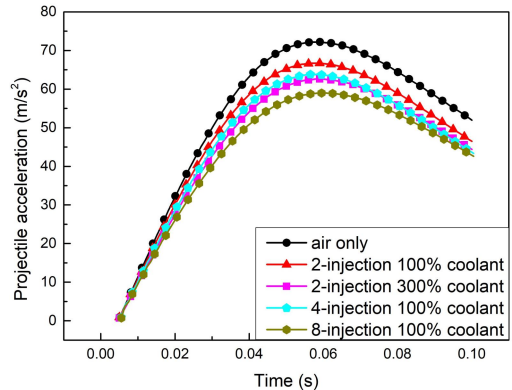
Fig. 10 Pressure transients inside breach of each case.

약 0.06 s에서 최대값에 도달하는 Fig. 10과 유사한 형태를 보인다. 또 그림의 발사체 속도변이 선도에서는 가속도에 따라 기울기가 증감하는 단조 증가현상을 관찰할 수 있고, 가속도는 최대값에 도달한 직후 급격히 감소하므로 0.1 s 이상 해석을 진행할 경우 종국에는 속도값이 감소할 수 있음을 예측할 수 있었다.

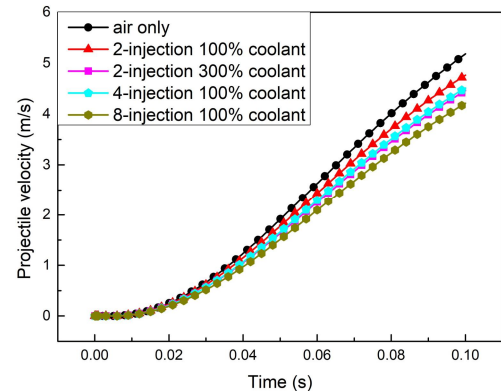
4. 결론 및 요약

잠수함 및 이동식 발사대에 사용되는 혼합가스 사출시스템의 수치적 분석을 위해 다상유동 모델과 동적격자계를 사용하여 3차원 계산모델을 수립하였다.

계산모델을 검증하기 위해 Edquist[1,2] 등의



(a) Projectile acceleration according to coolant mass flow change and the number of coolant injection holes.



(b) Projectile velocity according to coolant mass flow change and the number of coolant injection holes.

Fig. 11 Projectile acceleration and velocity of the mixture gas ejection system.

연구를 참조하여 1차원 계산 모델을 수립한 뒤 계산 결과를 비교하였고, 그 결과 약 4%의 오차를 나타내어 3차원 계산모델의 동적격자계 설정이 공동의 압력 정보에 잘 연동되었음을 확인하였다.

검증된 3차원 모델을 이용하여 breach로 주입되는 고온의 air에 liquid-water 냉각제를 분사하는 전산모사를 수행하였다. Air의 유량을 고정변수로 두고 냉각제의 유량 및 분사구의 개수를 변화시키면서 계산을 수행하여 냉각성능 및 발사체 운동성능을 분석하였다. 먼저 breach의 상, 하부면 온도그래프를 분석한 결과 냉각제 유량 증가보다 분사구 개수 증가가 냉각에 보다 효과

적임을 파악할 수 있었다. 그 다음 breech의 중앙분할면 및 상, 하부면 온도 contour를 분석하면서 각 case별로 공간적인 온도 분포 특성을 확인하였다. 추가적으로 각 case별 냉각제 증발량 및 증발률 그래프를 분석하고 액적의 공간적 분포 특성과 냉각제 증발률 사이의 관계를 파악하여, 액적끼리의 coalescence로 인해 직경이 커질 때 냉각제 증발률이 매우 저조해짐을 확인하였다. 그리고 breech의 압력 그래프와 온도 그래프를 비교했을 때 대부분의 case에서 온도감소에 비해 압력감소가 적은 특징을 확인하였다. 이러한 분석결과로 발사체의 운동성능 희생을 최소화하면서 고온의 연소가스를 충분히 냉각할 수 있도록, 즉 혼합가스 사출시스템을 최적화 할 수 있는 핵심설계요소는 냉각제의 증발에 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 분사구의 개수를 늘림으로써 액적간의 coalescence를 억제하여 냉각제 증발률을 조정할 수 있다는 것을 확인하였지만, liquid-water 냉각제에 에탄올과 같은 액체를 일정 비율 혼합하여 냉각제 자체의 증발률을 늘릴 수도 있다. 물론 이러한 방식은 냉각제의 열용량을 감소시킬 수 있기에 적정비율을 찾는 것이 중요하므로 이에 대한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 과학기술정보통신부와 교육부의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 우주핵심기술개발사업(NRF-2016M1A3A3A02018009)과 기초연구사업(NRF-2016R1D1A3B01012622)의 연구결과임.

References

- Edquist, C.T. and Romine, G.L., "Canister Gas Dynamics of Gas Generator Launched Missiles," *16th Joint Propulsion Conference*, Hartford, C.T., U.S.A., AIAA 1980-1186, Jun. 1980.
- Edquist, C.T., "Prediction of the Launch Pulse for Gas Generator Launched Missiles," *24th Joint Propulsion Conference*, Boston, M.A., U.S.A., AIAA 1988-3290, Jun. 1988.
- 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.
- Byun, J.R., "Analytical Study on the Launching System with gas Generator," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 5, No. 3, pp. 52-59, 2001.
- Baek, G.H. and Yim, Y.J., "Coolant Effect on Gas Generator Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-8, 2005.
- 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. 64-72, 2017.
- Kim, H.M., Bae, S.H., Park, C.H., Jeon, H.S. and Kim, J.S., "Thermo-fluid Dynamic and Missile-motion Performance Analysis of Gas-Steam Launch System Utilizing Multiphase Flow Model and Dynamic Grid System," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 2, pp. 48-59, 2017.
- Reitz, R.D., "Modeling Atomization Processes in High-pressure Vaporizing Sprays," *Atomization and Spray Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 309-337, 1987.
- O'Rourke, P.J., "Collective Drop Effects on Vaporizing Liquid Sprays," Ph.D. Dissertation, Princeton University, Princeton, N.J., U.S.A., 1981.
- ANSYS, Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*, P.A., U.S.A., ISO 9001:2008, 2012.