



수치 모사를 통한 사출관 내부의 열유동 해석

김현목^a · 배성훈^a · 박철현^b · 전혁수^b · 김정수^{a,*}

Thermo-fluid Dynamic Analysis through a Numerical Simulation of Canister

Hyun muk Kim^a · Seong hun Bae^a · Cheol hyeon Park^b ·
Hyeok soo Jeon^b · Jeong Soo Kim^{a,*}

^aDepartment of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Korea

^bAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

ABSTRACT

A thermo-fluid dynamic analysis was performed through the numerical simulation of a missile canister. Calculation was made in a fixed analytical volume and fully evaporated water was used as a coolant. 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 parametric study was performed with the change of coolant flow rate. It could be found that the pressure on the canister top nonlinearly increased with the increase of coolant flow rate. Temperature and coolant distribution were closely related to the flow behavior in canister. Temperature on the canister bottom indicated a decrease being proportional to coolant flow rate in early times but after a specific time, the temperature increased with the tendency being reversed. In addition, the early part of temperature showed a fluctuating phenomenon because of the overall circulatory flow of mixture gas.

초 록

본 연구에서는 유도탄 사출관 내부의 수치모사를 통해 이상 유동에 대한 열·유체역학적 분석을 수행하였다. 고정된 해석영역에서 계산이 진행되었고 증발이 완료된 물을 냉각제로 사용하였다. 고온의 공기와 냉각제간의 상호작용 및 유동장을 해석하기 위해, Realizable $k-\epsilon$ 난류 모델과 VOF (Volume Of Fluid) 모델을 선정하고 냉각제 유량에 따른 수치 해석을 진행하였다. 해석결과, 사출관 상부 압력은 냉각제 유량에 따라 비선형적으로 증가하였다. 그리고 내부에서의 유동 진행 과정과 온도분포, 냉각제분포가 밀접한 연관이 있음을 확인하였다. 사출관 하부의 초기 온도는 냉각제량의 증가에 비례하여 감소하지만, 특정시간 이후 경향이 역전되면서 오히려 온도의 상승을 유발하였다. 또한, 혼합가스의 순환유동에 의해 초기의 온도변화가 요동하는 경향도 확인되었다.

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

Received 2 December 2016 / Revised 9 January 2017 / Accepted 13 January 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

E	: energy
E_q	: energy of phase
\vec{g}	: gravity vector
k	: thermal conductivity
k_{eff}	: effective thermal conductivity
$\dot{m}_{i,air}$: inlet air mass flow rate
$\dot{m}_{i,vapor}$: inlet vapor mass flow rate
n	: total number of phase
p	: pressure
t	: time
T	: temperature
$T_{i,air}$: inlet air temperature
$T_{i,vapor}$: inlet vapor temperature
\vec{v}	: velocity vector
\vec{v}_q	: velocity vector of phase
\vec{v}^T	: symmetric velocity vector
α	: volume fraction
α_q	: volume fraction of phase
μ	: friction coefficient
ρ	: density
ρ_q	: density of phase

1. 서 론

발사관에서 발사체를 사출시키기 위한 방법에는 로켓모터 추진력의 일부를 사출에 사용하는 부스터 발사방식(hot launch)과 별도의 사출장치를 이용하는 사출발사 방식(cold launch)으로 크게 구분된다. 그 중 사출관과 발사체 하부면의 닫힌 공간에서 가스발생기를 점화하여 발생하는 연소가스를 이용, 강한 압력으로 발사체를 밀어내는 사출발사 방식이 주로 적용되고 있는 추세이다.

사출발사방식은 부스터의 에너지가 아닌 별도의 에너지원을 필요로 하는데, 주로 사용되는 것이 고체추진제를 사용한 사출용 가스발생기이다. 사출발사는 별도의 장치로 인해 구조가 복잡해지는 단점이 있으나, 발사초기, 탄의 발사관 이탈에 소모되는 추진기관의 에너지를 절감할 수

있어 그로 인한 유도탄 사거리 증가와 발사장치 재사용 등의 장점을 갖는다. 또한 로켓모터의 화염이 발생하는 부스터 발사방식에 비해 사출발사방식은 부스터의 화염이 없어 발사 플랫폼 및 유도탄의 생존성을 증대시킬 수 있다. 하지만 가스발생기에서 생성되는 고온의 가스가 사출관의 벽면에 직접적으로 영향을 미쳐 벽면의 손상 및 변형을 유발하기도 한다. 그리하여 미사일의 꼬리부와 사출관 벽면의 손상을 최소화하기 위해, 사출관과 미사일 아랫부분의 닫힌 공간으로 고온 가스가 도달하기 전에 냉각물질을 혼합시켜주는 가스-스팀 사출발사 방법(gas-steam eject launch method)이 적용되며, 해외에서 많은 관련 연구가 수행되고 있다.

Edquist와 Romine[1]은 가스-스팀 사출 미사일의 가속도율에 대한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 열손실이 포함된 해석 매커니즘을 구현한 것이 특징이었으며, 이후 소형 대륙간탄도탄을 사출관으로부터 발사하는 과정을 포함한 가스 역학 모델 개발하였다[2]. Rui와 Xing[3]은 가스-스팀 발사 방법, 가스 사출법, 압축공기 발사방법을 비교하여 사출 시스템의 발사관 압력과 온도, 탄의 가속도, 속도, 위치, 사출시간 등에 대해 연구했다. 그 결과 가스-스팀 발사방법이 모든 방식 중 가장 뛰어나다는 사실을 확인하였다. 또한 Qi[4]등과 Tang[5]등은 난류유동과 역학 그리드를 추가한 3상 유동 해석방법을 이용하여 사출관 내부에 대한 수치 해석을 수행하였다.

국내에서는 Byun[6]이 가스발생기 발사시스템에 대한 해석적 연구를 수행하였고, 이를 통해 가스발생기의 압력, 사출관 하부의 압력, 사출가속도, 그리고 사출속도 등을 예측한 바 있다. 이 연구에서 발사체의 총 질량, 사출관의 직경, 사출관 하부의 초기 부피, Tray(발사체를 밀어올리는 판) 직경, 그리고 추진체의 특성을 변수로 적용하였고, 사출시스템의 기하학적 특성에 따른 차이도 보여주고 있다. Baek과 Yim[7]은 가스발생기용 추진체에 대한 냉각제의 효과를 연구하였고 HTPB/AP계 고체추진체의 조성에서 냉각제인 oxamide와 melamine이 추진체의 연소특성

에 미치는 효과를 고찰하였다.

국내의 경우, 가스발생기에 대한 연구는 많이 진행되어있는 반면 기연 gas와 냉각제간의 상호작용으로 발생하는 열·유체역학적 현상에 대한 연구는 아직 수행된 바 없다. 하지만 성공적인 가스-스팀 발사 체계의 개발을 위해 이러한 연구들은 반드시 수행되어야 한다.

본 논문에서는 사출관의 발사성능연구에 앞서 기초적인 단계의 수치해석을 위해 탄의 사출전 상황에서, 냉각제의 질량유량 변화에 따른 사출관 내부에서 형성되는 유동과 온도, 압력, 냉각제의 분포, 냉각효과 등을 해석하는 연구내용을 기술한다.

2. 수치해석 방법

2.1 다상 유동 모델과 지배방정식

VOF (Volume Of Fluid) 모델은 고정된 격자계(fixed Eulerian mesh)에 대해 표면 추적 기법을 사용하는 다상 유동 해석 모델로서 2개 이상의 상에 대한 경계면 분포를 해석한다. 이 모델은 하나의 운동 방정식을 모든 상에서 공유하고, 격자 안에서 각 상의 체적분율을 고려하여 계산을 진행한다. 본 연구에서는 해석 시간 증분(Δt)의 제약을 피하고자 음함수(implicit) VOF 모델을 사용하였고, 해당 설정에서 가장 선명한 계면추적을 보이는 compressive 기법[8]을 사용하였다.

VOF 모델은 일반적인 단상유동과 같은 지배방정식을 사용하지만 체적분율에 대한 식이 추가되고 이를 고려한 에너지보존식이 사용된다. 해당 모델의 질량 보존식과 운동량 보존식은 다음과 같이 Eq. 1, Eq. 2로 나타낼 수 있다. Eq. 2의 경우 전술한 바와 같이 모든 상에서 공유된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) \\ & = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} \end{aligned} \quad (2)$$

체적분율식인 아래의 Eq. 3은 기본상(primary-phase)에 대해서 풀지 않는다. 기본상은 2차상(secondary-phase)에 대한 체적분율을 구한 뒤, Eq. 4를 이용하여 구한다. Eq. 4는 모든 상에 대한 체적분율의 합이 1인 것을 나타낸다.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4)$$

위 식들에서 α 는 체적분율, 하첨자 q 는 상(phase) 식별인수, n 은 고려중인 전체상의 수를 나타낸다.

에너지보존식 Eq. 5에서 에너지는 질량평균변수식 Eq. 6으로 다루어진다. 그리고 에너지 또한 모든 상에서 공유된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \end{aligned} \quad (5)$$

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (6)$$

2.2 난류 모델

k- ϵ 난류 모델은 Navier-Stokes 방정식에서 추가적으로 난류운동에너지 k와 난류운동에너지 소산을 ϵ 을 풀어 유동장을 모사하는 모델이다. Realizable k- ϵ 모델은 기존 난류 모델의 난류점성(turbulent viscosity)항에서 상수였던 부분이 유체의 변형율과 회전율을 고려하는 변수로 바뀐다. 또한, 와도(vorticity)의 요동(fluctuation)을 표현하는 식으로부터 기존의 난류운동에너지 소산율 식을 변형하여 사용한다. 그리하여 Standard k- ϵ , RNG k- ϵ 모델에 비해 비교적 실제에 가까운 난류유동을 모사한다. 사출관의 주입구가 경사를 갖기 때문에 단순한 직선유동에 비해 더 많은 유체의 변형과 회전이 일어나므로,

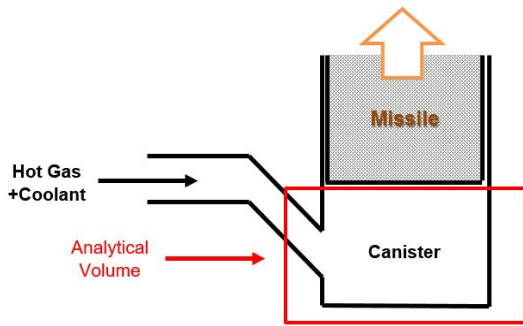


Fig. 1 Schematic of ejection canister.

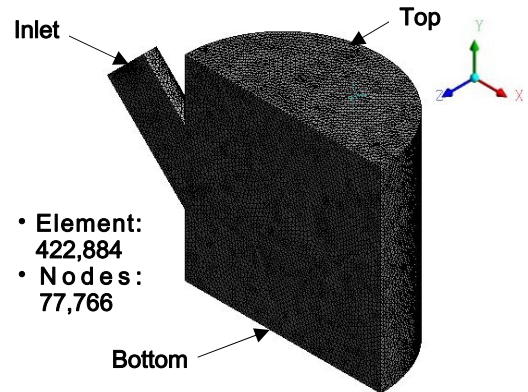
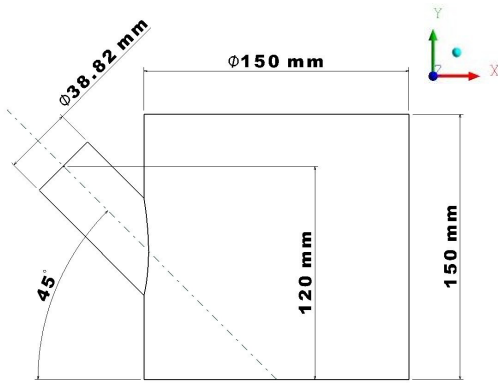
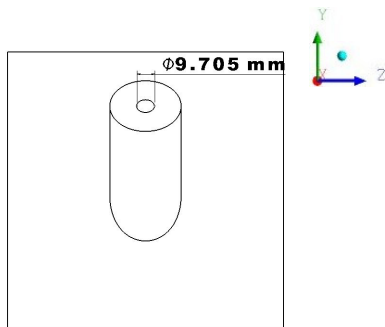


Fig. 3 Canister mesh system.



(a) Side view



(b) Front view

Fig. 2 Geometry of the ejection canister.

정확한 난류유동 해석을 위해 본 수치모사에서 사용하는 Realizable k- ϵ 모델을 선정하였다.

2.3 사출관의 형상과 격자

Fig. 1은 가스-스팀 사출발사 방법의 개략도와

해석 영역을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 사출관은 직경 150 mm, 높이 150 mm의 원통형 구조이며, 유체가 사출관의 하부 중심을 향하도록 45° 기울어진 주입구가 형성되어 있다. Fig. 2에서 보이듯이, 주입구 직경은 향후 차원해석을 고려하여, 사출관 원 둘레의 1/6에 해당하는 부채꼴의 현과 동일한 길이인 38.82 mm이다. 그리고 이 길이의 1/4에 해당하는 지름 9.705 mm의 냉각제 입구를 추가하여, 공기(air)와 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 생성하였다. Fig. 3에 보이는 계산영역 격자계는 약 423,000개 격자와 78,000개의 격자점으로 구성된다.

2.4 해석 방법

본 연구에서는 상용 소프트웨어인 Fluent를 사용하여 해석을 진행하였으며 압력 기반의 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) 해석 알고리즘을 사용하였다. 운동량, 난류 스칼라 값, 에너지 방정식들의 경우 각각 2차 상류차

분석의 공간이산화 기법을 사용하였고, 구배 보간법은 셀 기반 최소제곱법, 시간적분 기법은 1차 정확도의 음함수 시간적분법을 사용하였다.

3. 해석 조건

입구를 통하여 1200 K인 고온의 공기와 373.15 K의 수증기를 각각 분사하여 사출관 내부에서 발생하는 유동 및 상들 간 상호작용을 해석하였다. 실제 가스-스팀 발사 방식은 가스발생기로부터 생성된 고온의 기연가스로 인한 냉각제 증발효과가 적용되었지만, 본 해석에서는 사출관 주입구 부분에서 이미 증발이 완료되었다고 가정한 후, 단순히 두 기체간의 상호작용과 그에 따른 냉각효과 및 압력변화를 분석하였다. 또한 탄이 움직이기 전까지의 유동을 가정하였기 때문에 outlet이 없는 밀폐된 해석영역을 고려하였다.

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(0.01 kg/s)대비 1%, 3%, 5%의 유량으로 설정하여 각각 계산을

Table 1. Initial and boundary conditions.

Initial Condition			
Canister Pressure	1 atm (101,325 Pa)		
Canister Temperature	300 K		
Boundary Condition			
Air Inlet	$\dot{m}_{i,air} = 0.01$ kg/s	$T_{i,air} = 1200$ K	
Water-vapor Inlet	$\dot{m}_{i,vapor}$		
	1% case	3% case	5% case
	0.0001 kg/s	0.0003 kg/s	0.0005 kg/s
	$T_{i,vapor} = 1200$ K		
Wall	Non-slip Condition, Adiabatic		

수행하였다. 초기 및 경계조건들은 Table 1에 나타내었다. 모든 수치계산은 비정상 상태로 이루어졌으며 시간 증분은 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ s로 최종 시간 1.0 s까지 해석을 수행하였다.

4. 수치해석 결과

압력은 사출관에서 발사되는 탄의 속도와 가속도 등의 운동을 결정하는 중요한 변수이다. 주입구로 혼합기체가 일정한 유량으로 분사된다면, 사출관 하부에서 발사체가 움직이기 전 짧은 시간동안 형성되는 압력을 통해 발사체가 사출관

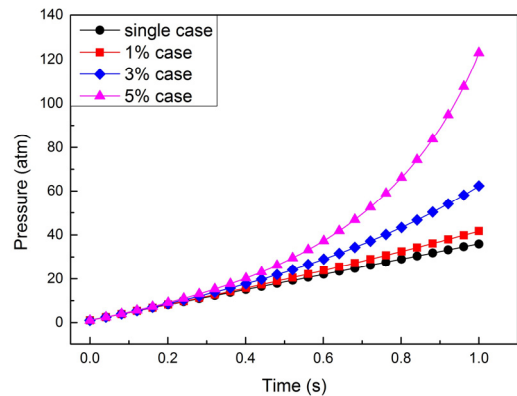


Fig. 4 Average pressure variation on the top surface of canister.

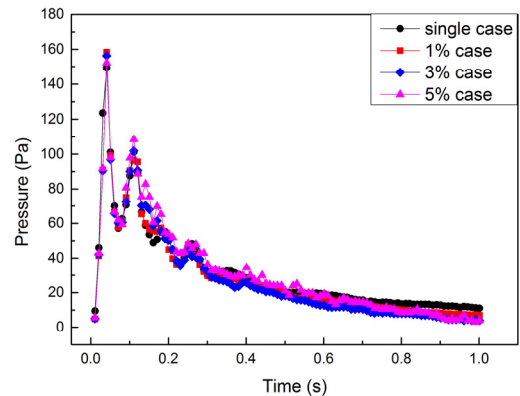


Fig. 5 Pressure differences between minimum value and maximum value on the top surface of canister.

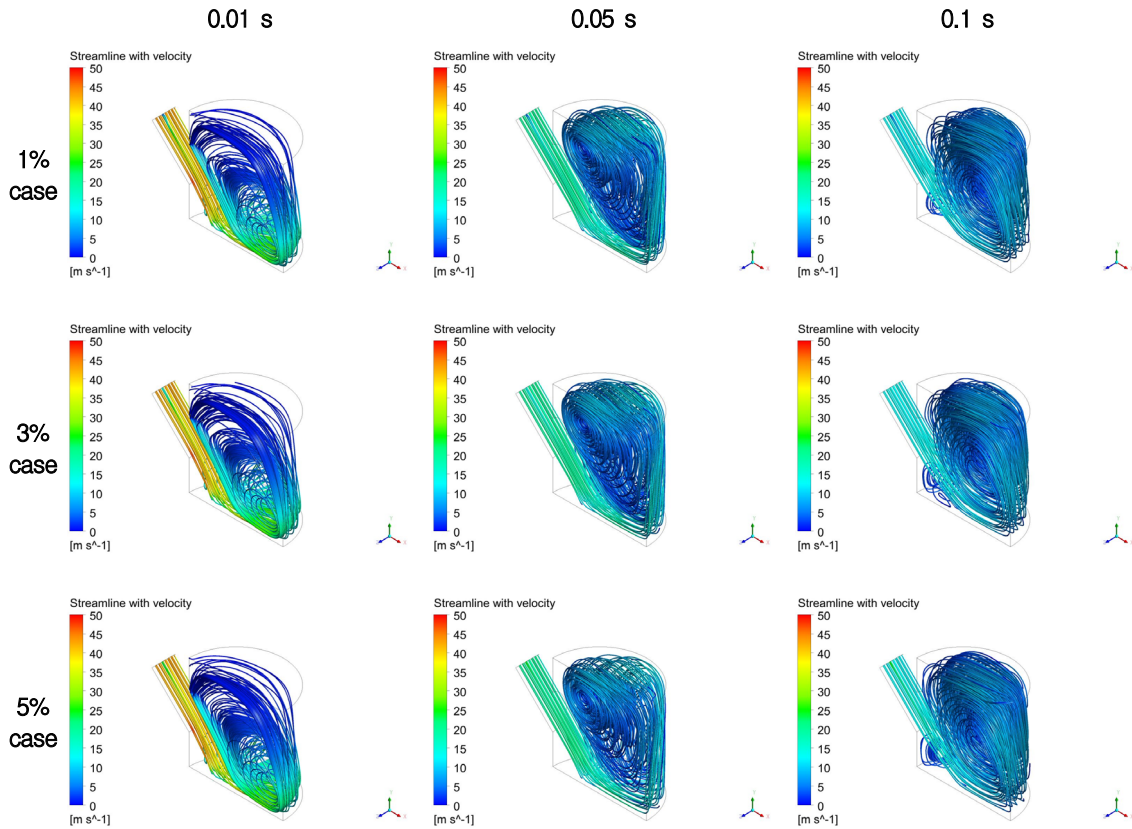


Fig. 6 Streamlines with velocity magnitudes in canister.

에서 벗어날 때의 최종속도를 예측할 수 있다. 실제로 발사체가 움직이는데 걸리는 시간은 매우 짧으나 고정된 해석영역으로 제한하여 1.0 s 까지 탄이 움직이지 않는다고 가정하고 압력의 변이거동을 파악하였다.

Fig. 4는 탄이 맞닿아있는 사출관 상부에서 시간에 따른 평균 압력을 나타내고 있다. single case의 경우, 시간의 경과에 따라 압력은 선형적으로 변한다. 1% case는 single case보다 근소하게 증가한 압력과 미세한 비선형성을 나타내지만 3% case와 5% case에서는 확연한 비선형 곡선을 나타내고 있다. 이는 단상유동에 비해 이상유동의 물리현상이 더욱 비선형적으로 진행되기 때문으로, 냉각제의 유량이 증가하면서 압력이 급격하게 늘어나는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 사출관 상부에서 공간상의 최대 압력과 최소 압

력의 차이를 시간에 따라 나타내었다. 단상 유동과 이상 유동 모두 같은 경향을 보이는데, 초기에 최대/최소 압력차가 급격히 증가한 후 약 0.05 s 이후 줄어들어 이후에는 차이가 0에 수렴하는 그래프 형태를 보여준다. 사출관 상부에서 형성되는 압력이 불균일할 경우 사출되는 탄의 궤도가 틀어질 가능성이 있다. 그러나 압력차이의 최대값이 약 160 Pa정도로써, 평균압력의 증가가 수십 기압($\sim 10^6$ Pa)의 order로 증가함을 고려할 때 탄저부에서 발생하는 압력의 불균형은 매우 적어, 그 불균형이 탄의 운동에 미치는 영향은 무시할 만하다 할 수 있다.

사출관 내부의 초기 온도 분포와 수증기의 체적분율은 내부에서 형성되는 유동과 밀접한 연관이 있다. Fig. 6은 좌측에서부터 시간변화에 따라 0.01 s, 0.05 s, 0.1 s에 해당하고, 종방향으

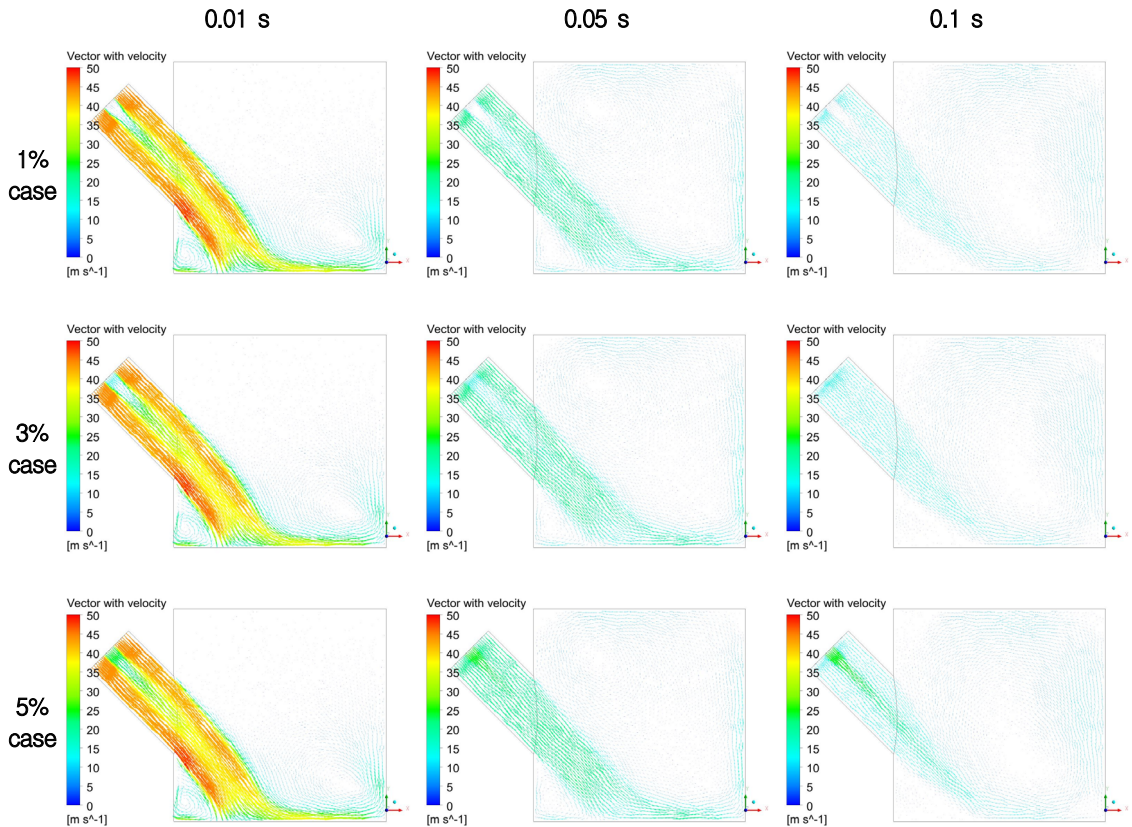


Fig. 7 Velocity vector field in canister.

로는 냉각제 유량 증가에 따라 1%, 3%, 5%에 해당하는 유선을 isometric view로 나타내었다. 또한 속력에 따라 유선의 색상에 차이를 두었다. 먼저, 0.01 s에서는 냉각제와 공기가 사출관의 바닥면으로부터 벽면으로 이동하는데, 이때 혼합기체의 유동과 벽면이 만나는 아래쪽 부분에서 점착조건으로 인한 속도구배가 생기면서 와류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 0.05 s에서는 순환유동의 중심이 벽면을 따라 사출관 상부로 이동하면서 순환유동의 규모가 커지고 유동과 벽면의 접점을 따라 그 중심도 같이 이동하는 것을 보여준다. 0.1 s에 이르러서는 순환유동의 규모가 사출관 전체에 이르고, 그 중심은 사출관 중앙으로 이동하고 있다. 이러한 유동 변화는 냉각제 유량 증가에 따라서도 크게 변하지 않고 유사한 경향을 나타내는 것을 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 구도로 벡터의 변화를 시간과 냉각제 유량에 따라 Z축이 0인 X-Y (Z=0) 평면 시점으로 나타내었으며 속력에 따라 벡터의 색상에 차이를 두었다. Fig. 6에서 시간의 흐름에 따라 사출관 내부에서 유동의 속력이 빠르게 감소하는 것을 예측할 수 있는데, Fig. 7의 벡터를 통해 그 차이를 명확하게 관찰할 수 있다. 이는 사출관 내부의 압력이 빠르게 증가하고 전파되면서 내부 공간상의 압력차이가 줄어들어 생기는 결과이다. Fig. 7의 0.01 s을 볼 때, 좌측 하단의 좁은 공간에서 작은 와류가 생기는데, 이는 주입구 유동이 바닥면에서부터 좌우로 나누어진 후, 좌측으로 나누어진 유동이 벽면의 점착조건에 영향을 받아 발생하는 현상이다. 하지만 전체 유동의 속력이 빠르게 줄어들면서 좌측 하단의 와류도 대부분 사라지게 되고, 이후에

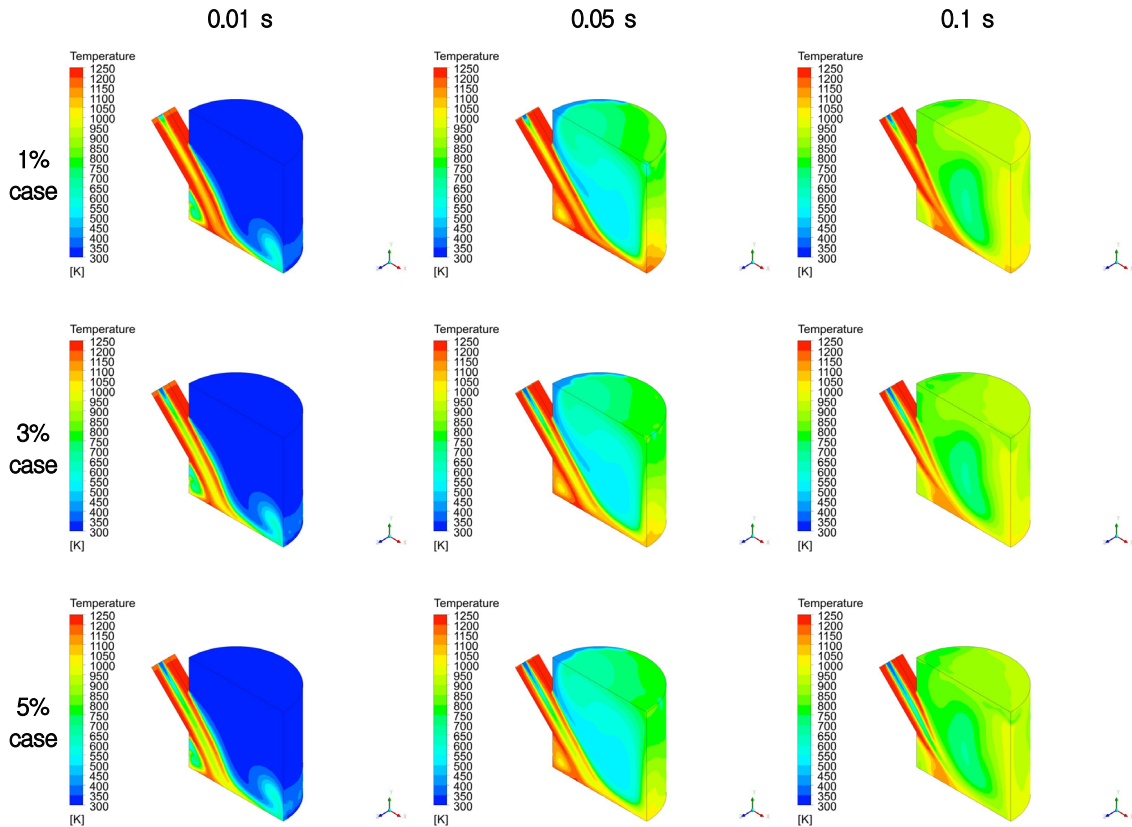


Fig. 8 Temperature distribution in canister.

는 앞서 설명한 사출관 전체를 순환하는 유동만 희미하게 남는다.

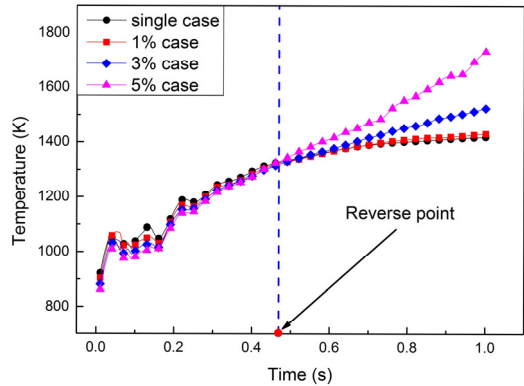
가스-스팀 발사방법의 목적은 냉각제로 고온 가스의 온도를 낮춰 사출관의 열손상을 방지하는데 있으므로, 온도는 가스-스팀 발사방법 효율의 척도가 되는 중요한 변수이다. 사출관의 온도 분포는 Fig. 6, 7에서 나타나는 유동의 흐름과 관련되어 나타난다. Fig. 8은 사출관의 온도 분포를 Fig. 6과 동일한 구조로 시간과 냉각제 유량에 따라 isometric 시점으로 나타내고 있다. 그림을 볼 때, 초기에는 주입구로부터 공기와 수증기가 같이 들어와 사출관 하부에 낮게 깔리고 바닥에서부터 온도가 증가한다. 우측하단에서는 Fig. 6에서 언급한 와류가 생기면서 온도등고선도 환형 모양으로 나타나고 있다. 0.05 s에서는 유동의 중심이 바닥면에서부터 벽면을 따라 사

출관 상부까지 올라가면서 온도 또한 벽면을 타고 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 좌측 하단의 좁은 공간에서 다른 영역보다 훨씬 빠르게 온도가 증가된 것을 알 수 있는데, 이는 고온상태로 유입된 유동이 0.01 s에서 나타나는 좁은 영역의 와류에 갇혀 생기는 현상이다. 작은 와류가 극대화된 시점과 온도가 증가한 시점이 차이 나는 것은 유동의 전파속도가 온도의 전파속도보다 빠르기 때문이다. 이러한 현상은 Fig. 6과 Fig. 8을 비교하여 좌측 하단의 좁은 영역뿐만 아니라 다른 영역에서도 확인 할 수 있다. 0.1 s에 이르러서 전체적인 순환유동으로 인해 주입구 영역을 제외한 모든 부분에서 온도가 균일하게 형성되고, 좌측 하단의 작은 와류도 흩어지게 되면서 온도가 낮아지게 된다. 이후 1.0 s까지 공간상의 큰 변화 없이 지속적으로 온도가 증가한다. 주입

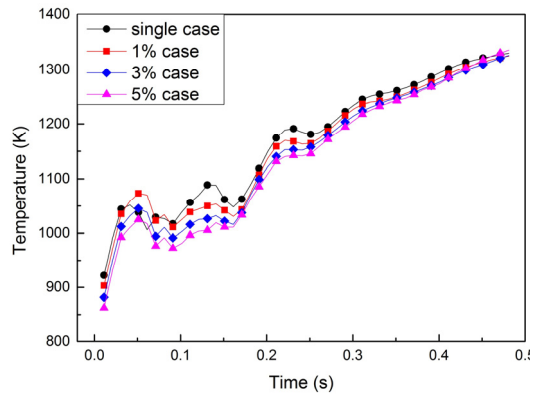
구의 온도분포에서, 초기조건인 1200 K의 공기 온도 보다 높은 영역이 나타나는데 이는 사출관 내부의 압력증가에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 canister 내에서 가장 높은 온도 분포를 보이는 사출관 하부면의 평균온도를 각 case 별로 시간에 따라 도시한 것으로 1.0 s까지의 온도 변이를 고찰할 수 있다. 온도는 약 0.48 s를 기준으로 경향이 다르게 나타나므로 Fig. 9(b)와 Fig. 9(c)로 시간을 나누어 다시 나타내었다. Fig. 9(a)를 보면 약 0.3 s 경부터 주입되는 공기의 온도인 1200 K보다 오히려 온도가 증가하는데, 이는 outlet이 없는 고정된 영역으로 유체가 계속 주입되어 압력이 계속 증가하기 때문이다. Fig. 9(b)에서 온도 그래프는 냉각제의 유량이 증가할수록 single case에 비해 낮은 온도를 나타낸다. 비록 시간이 지나면서 주입되는 고온의 공기보다 온도가 증가하기는 하지만, 각 case를 비교한다면 vapor에 의한 확실한 냉각효과가 관찰되고 있다. 그러나 시간이 지날수록 압력이 더욱 증가하면서 각 case끼리의 온도 차이는 줄어들어, 약 0.48 s 이후에 이르러서는 온도 경향이 역전되어 오히려 냉각제의 유량이 클수록 온도가 높아지게 된다(Fig. 9(c)). 따라서 약 0.48 s를 기점으로, 냉각제에 의한 열전달 효과보다 한정된 부피내의 총 유량 증가로 인한 압력증가 효과가 바닥면 온도 분포에 더 지배적으로 작용한다는 것을 알 수 있다. 추가적으로, Fig. 9(b)의 온도 그래프에서 초기의 온도 곡선이 fluctuation을 나타내는데, 이는 Fig. 8의 공간상의 온도분포 경향과 연관이 있다. 유동이 주입구에서 들어올 때 사출관 바닥면에 곧바로 맞닿기 때문에 온도가 급격히 상승하는 곡선을 그리지만, 이후 순환유동이 생성되고 기존의 사출관에 있던 상온의 공기와 유입 유동이 섞이면서 바닥면의 온도 값이 fluctuation을 보이게 된다. 이후 지속적인 순환 유동으로 사출관의 온도분포가 주입구 부분을 제외하고 공간전체에 걸쳐 균일하게 형성되면 그와 같은 현상은 거의 나타나지 않게 된다.

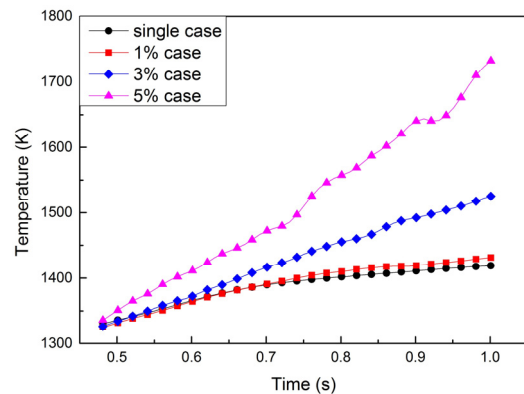
Fig. 10에서는 사출관 내부 수증기의 체적분율을 도시하고 있다. Fig. 10(a), (b), (c)는 본 연구에서 변수로 사용한 유량의 중간값에 해당하는



(a) Temperature from 0 to 1.0 s



(b) Temperature before 0.48 s



(c) Temperature after 0.48 s

Fig. 9 Average-temperature variation on the bottom surface of canister.

3% case에서의 체적분율을 나타낸다. 이는 모든 case를 대표해서 Fig. 6, 7과 비교할 때, 유선을

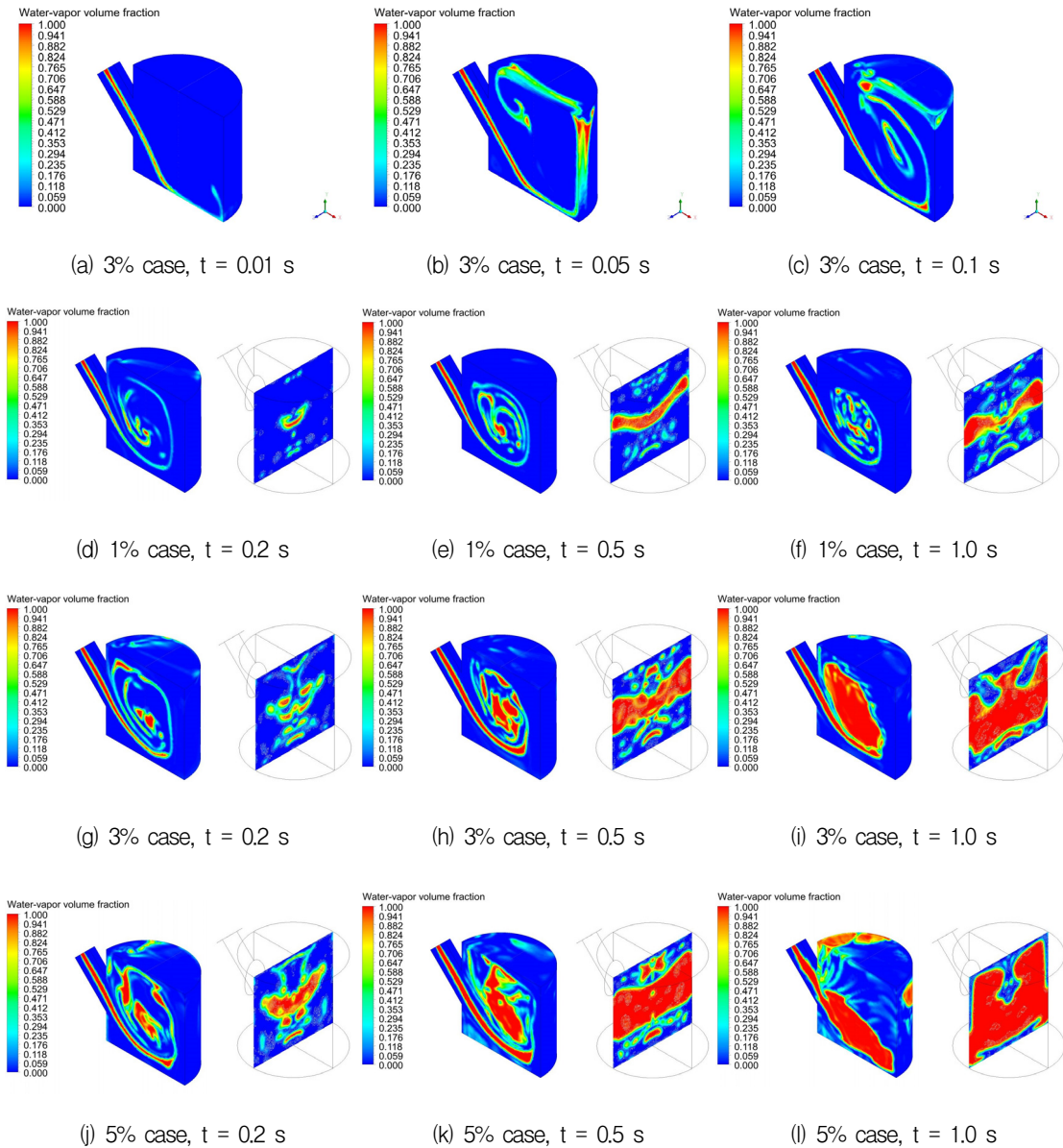


Fig. 10 Variation of water-vapor volume fraction in canister.

따라 냉각제가 흐르는 것을 보여준다. Fig. 10(d)~(l)은 유동이 사출관 전체에 걸쳐 순환하기 시작하는 약 0.1 s 이후, 0.2 s부터 1.0 s까지 냉각제의 흐름을 isometric과 X축이 0인 Y-Z (X=0) 좌표 평면 시점으로 나타내고 있다. Y-Z 평면 시점의 그림은 미러이미지를 이용하여 전체 구조를 나타내었다. Fig. 10(d)에서 냉각제는 순환

유동을 타고 이동하다가 순환의 중심으로 계속 모이는 것을 볼 수 있다. Fig. 10(e)에서는 냉각제가 중심부에 계속 쌓이면서 냉각제의 소용돌이가 좌우대칭으로 퍼진다. Fig. 10(f)의 시점에 이르러서는 사출관 벽면에 의해 좌우로 더 이상 퍼지지 못하고 상하로 확산하기 시작한다. 이렇게 냉각제가 사출관 전체로 퍼지는 과정은 주입

되는 냉각제의 유량이 많을수록 빠르게 진행되는데 이는 Fig. 10(g)~(l)과 비교하여 확인할 수 있다.

5. 결 론

가스-스팀 발사체계 개발을 위한 사출관 연구에 앞서 필요한 선행연구를 위해, Realizable k- ϵ 난류 모델과 VOF 모델을 사용하여 단상유동과 이상유동 해석을 수행하였고 사출관 내부에서 형성되는 유동과 압력변화, 온도분포 및 변화, 냉각제의 거동 등을 분석하였다.

해석결과, 압력은 단상유동의 경우 선형적인 압력증가를 보였으나, 이상유동의 경우 냉각제 유량이 증가할수록 압력증가의 비선형성이 강하게 보이고, 급격히 압력이 증가함을 관찰할 수 있었다. 혼합기체의 유동은 벽면을 따라 이동하다가 유동과 벽면의 접점에서 순환유동이 발생하고 유동의 중심이 벽면을 따라 이동하였다. 이후 순환유동의 크기가 커지고 그 중심이 사출관 중심으로 이동하면서 사출관 전체를 순환하는 유동으로 변하는 것을 확인하였다. 온도는 유동을 따라 시간차를 두고 공간상으로 전파되며, 온도경향은 약 0.48 s 이전에는 냉각제 유량에 따라 냉각효과가 두드러지게 보였으나 이후 총 유량이 클수록 오히려 온도가 증가하는 경향을 보였다. 냉각제는 온도와 마찬가지로 유동을 따라 이동하며 순환유동의 중심으로 모이다가, Y-Z 평면 시점 기준에서 좌우로 퍼지고 이후 상하로 확산하면서 사출관 전체로 확대되는 형상을 보였다.

본 연구를 통해 사출관 이상유동에 대한 수치해석적 기법 및 분석방법들에 대한 기초를 확립하였고, 난류모델과 다상유동모델에 대한 합리적인 모델선정 기준을 정립하였다. 또한 사출관 내부 현상에 대한 기초적인 데이터들을 확보하여 향후 실질적인 사출관 연구를 위한 기반을 마련할 수 있었다. 그러나 경계가 고정된 해석영역과 증발과정을 무시한 열전달 해석으로 사출관 내부의 현상에 대해 아직 파악하지 못한 부분이

있는 만큼, 향후 dynamic grid와 증발현상을 추가하여 해석을 진행할 필요가 있다.

후 기

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

References

1. 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.
2. 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.
3. Rui, S. and Xing, Y., "Comparative Studies of Interior Ballistic Performance among Several Missile Eject Power Systems," *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 35, No. 6, pp. 766-770, 2009.
4. Qi, Q., Chen, Q., Zhou, Y., Wang, H. and Zhou, H., "Submarine-Launched Cruise Missle Ejecting Launch Simulation and Research," *2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, Harbin, Heilongjiang, China, pp. 4542-4545, Aug. 2011.
5. Tang, Y., Xing, Y. and Zhang, C., "Working Process Simulation of Gas and Steam Launching System," *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, Vol. 24, Issue 4, pp. 431-434, 2009.
6. Byun, J.R., "Analytical Study on the

-
- Launching System with gas Generator," *Journal of the Korea Society of Propulsion Engineers*, Vol. 5, No. 3, pp. 52-59, 2001.
7. Baek, G.H. and Yim, Y.J., "Coolant Effect on Gas Generator Propellant," *Journal of the Korea Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-8, 2005.
8. ANSYS, Inc., ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, 2012.