

입자 특성에 따른 고체모터 플룸 이상유동 해석

김성룡*, 김인선**

Two phase analysis of solid rocket motor plume as particle characteristics

Seong-Lyong Kim*, Insun Kim**

Abstract

KSLV-I KM plume including alumina particle has been studied using the continuum solver. Alumina particles are assumed to have 7 different diameters, and the specific ratio of the plume gas is assumed to be 1.2, with which the internal nozzle flow characteristics are similar to those of the chemically equilibrium analysis results. The results showed that the expansion angle of the particles is smaller than that of the gas phase, and that the big sized alumina particles are gathered in the plume core and the expansion angles of the big sized particles are smaller than those of the light particles. When the emissivity of the particles are assumed to be 0.1, the radiative heat flux is equivalent to those measured during the flight test of KSLV-I.

초 록

알루미나 입자가 포함된 KSLV-I KM 고공 플룸 유동을 연소실에서 노즐 출구의 고공 팽창과정을 해석하였다. 알루미나 입자 및 플룸 가스의 물성치 및 분포를 달리하여 해석한 결과 연소가스 비열비를 1.2로 알루미나 입자의 직경 분포를 7가지로 가정하면 노즐 내부 유동 특성이 평형유동 해석 결과와 비교적 일치하였다. 입자의 팽창각은 가스유동보다 작으며 입자 직경이 클수록 팽창각은 더 작았다. 알루미나 입자의 광학 열물성을 변화시키며 KM TVC 분배기 위치의 복사열을 계산한 결과 알루미나 입자의 방사율이 0.1일 때 비행 시험 결과와 비슷한 수준을 예측하였다.

키워드 : KSLV-I (KSLV-I), 킥모터 (Kick Motor), 고체모터(solid rocket motor), 플룸 (plume), 플룸 복사열 (plume radiative heating)

1. 서 론

위성의 궤도 투입에 사용되는 킥모터는 고공에서 작동하여 높은 온도의 플룸 가스를 발생시키며, 고온의 플룸에서 발생한 복사열은 킥모터 주변에 장착된 여러 기기들에 열하중을 가한다.

1.1 연구의 필요성

접수일(2009년12월21일), 수정일(1차 : 2010년 5월 4일, 2차 : 2010년 6월 15일, 게재 확정일 : 2010년 7월 1일)

* 열공력팀/saintl@kari.re.kr

** 열공력팀 /iskim@kari.re.kr

기기들의 열하중을 방지하기 위해서는 복사열을 예측 또는 시험하여 단일 설계를 하는 데 키크모터의 작동 환경이 진공이기 때문에 지상시험에서 진공환경을 구현하여 시험하는 것은 불가능하다. 따라서 발사체 선진국은 지상시험에서 측정된 복사 특성을 바탕으로 고공 복사 열유속을 예측하여 단일설계를 하는 것이 일반적이다.

항우연에서도 여러차례 진행된 지상시험에서 플룸 열복사를 반경방향 축방향 등에서 측정하였으며[1] 가능한 한 고공에서 발생할 플룸 열복사를 예측하고자 노력하였다[2,3]. 고공에서 발생할 플룸 열복사를 예측하기 위해서는 매우 복잡하고 어려운 플룸 유동의 해석이 선행되어야 한다. 고공 고체모터의 해석이 어려운 것은 고체 모터 내부는 고온 고압 유동이지만 플룸으로서는 진공에서 유동이 퍼져나가는 희박가스 영역이기 때문에 전통적인 전산유체기법(CFD)과 더불어 희박기체에서 유용한 DSMC (Direct Simulation Monte Carlo) 방법이 병용되어야 한다는 점이다.

플룸 유동 해석을 위해서는 연소실에서 노즐 출구까지의 플룸 특성이 먼저 밝혀져야 한다. 노즐 내부의 플룸은 상변화, 화학반응, 복사 열전달 등이 복잡하게 관여한다. 연소실에서 생성되는 알루미늄 입자는 연소실 고온에 의해 액체상태로 존재하고 노즐을 지나면서 팽창에 따른 온도 감소로 고체로 상변화 한다. 액체-기체 상변화는 잠열 효과로 기체 운동에 영향을 주기 때문에 발생하는 위치가 중요하다. 일부 문헌에서는 액체 상태의 알루미늄 입자의 복사열이 고체 알루미늄보다 매우 크다는 결과도 있다[4]. 또한 고체 입자의 냉각은 기체와의 대류 열전달이 큰 역할을 하지만 복사열전달에 의한 냉각도 무시할 수 없기 때문에 플룸 유동장의 온도 변화를 제대로 예측하기 위해서는 입자와 기체를 포함한 복사열전달이 고려되어야 한다. 화학반응은 연소실에서 가장 크지만 노즐에서도 발생하고 있다. 지상 시험의 경우 고온의 플룸 가스에 포함된 일부 화학종들이 주변 공기와 만나 다시 연소되는 재연소 현상이 발생하며, 재연소 현상에 의한 열발생과 복사 열전달은 주변에 플룸 가열을 일으킨다. 다만 고공에서는 재연소 반응을 일으킬 공기가 없

기 때문에 노즐을 빠져나온 플룸의 화학반응까지는 고려하지 않는 것이 일반적이다.

플룸 복사열은 사용 연료, 노즐 형상, 작동 압력, 작동 온도, 작동 환경에 따라 큰 차이가 있다. 액체와 고체 엔진도 차이가 크지만 액체 엔진에서도 사용되는 연료에 따라 플룸 광학두께가 달라진다. 예를 들어 H₂-O₂ 엔진의 경우에는 H₂O이외에 복사에 영향을 끼치는 성분이 없어 광학두께가 매우 얇지만 케로신과 같이 탄소계열의 연료를 사용하면 필연적으로 soot이 발생하기 때문에 광학두께가 두꺼워져 복사열이 증가하게 된다.

고체 모터의 경우에는 기체 복사를 일으키는 화학종이 충분히 발생하지만 플룸에 포함된 고체 입자에 의한 열복사가 지배적이다. 고체 입자는 추진체에 포함된 금속 재료에 따라 달라지지만 많이 사용되는 알루미늄이 추진체에 포함된다면 고체 입자는 알루미나 입자이다. 알루미나 입자는 고체모터에 포함된 알루미늄 조성에 따라 크게 달라진다. 보통 18-20%의 질량분율로 포함되면 플룸에서 알루미나 입자가 차지하는 질량분율은 30%가 넘는다. 또한 추력이나 노즐 직경에 따라 알루미나 입자의 직경 분포가 달라지기 때문에 같은 추진체라도 추력과 노즐에 따라 복사열 특성은 달라지게 된다.

플룸 유동 및 열복사에 가장 큰 영향을 주는 것 중 하나는 작동 고도이다. 작동 고도는 노즐 유동에서 배압으로 표현되는 데, 배압이 바깥에 따라서 노즐 유동은 과대, 과소 팽창이 된다. 저고도에서는 배압이 높기 때문에 과대 팽창이 나타나기 쉽고 고고도에서는 대부분 과소 팽창이 나타난다. 과대/과소 팽창은 노즐 내부만 아니라 노즐 바깥에서 플룸 유동이 얼마만큼 팽창하는지를 결정한다. 플룸의 팽창 여부에 따라 로켓과 플룸 사이의 보기 계수가 변하고 플룸 내부 유동과 입자 온도가 달라지기 때문에 로켓에 가하는 플룸 복사열도 역시 달라진다. 따라서 지상시험에서 측정된 플룸 복사열이 고공에 직접 적용할 수 없는 이유가 된다.

1.2 고체모터 플룸 연구 역사

고체 모터는 대부분 군사용으로 사용되기 때문에 고체 모터의 플룸 복사 데이터는 공개된 것이 매우 제한적이다. 특히 플룸 복사 특성은 비행 중인 모터의 종류를 파악할 수 있기 때문에 미사일 방어 계획의 핵심적인 부분이라 공개적인 정보 뿐만이 아니라 학술적인 정보 교류도 매우 힘들다. 따라서 고체 모터 플룸에 관련된 대부분의 학술 논문은 실제 모터와 다른 이상적인 경우에 한정된 것이고, 실질적인 데이터는 매우 오래전의 결과밖에 없는 경우가 허다하다. 다만 플룸 복사는 파장별 복사를 측정할 수 있는 열환경에 영향을 미치는 열복사로 구분할 수 있는데 열복사에 관한 연구결과는 파장별 복사에 비하여 제한이 심하지 않아 그나마 찾을 수 있는 것이 있고, 미국에서 최근에 비밀 해제된 보고서들에는 고체모터의 열복사에 관한 내용이 다수 포함되어 있다. 비밀 해제된 보고서에서 상당한 시험 결과를 발견할 수 있고 발달된 광학기술과 컴퓨터 계산능력의 덕택으로 과거에 알지 못했던 플룸의 다양한 속성이 밝혀지고 있다.

초기 로켓 배기 플룸에 의한 저부 가열 현상의 예측은 기하학적 모델링을 사용한 방법이다. Bobco 플룸 가열 모델[5]이 대표적으로 매우 오랜 기간 동안 로켓 개발에 사용되었으며 개선된 모델이 개발되었다[6]. Bobco의 기하학적 모델은 유효한 플룸을 여러 구간으로 나누어 각 구간의 온도 변화, 추력, 목면적, 팽창비, 고도, 입자 크기 및 분포, 입자 방사율 등의 파라미터만 정해 주면 플룸 가열량을 매우 쉽고 빠르게 예측할 수 있다는 장점이 있다. 대신 간단한 만큼 많은 오차를 포함하고 있어서 정확한 예측에 한계가 있다.

저부가열 예측을 위한 플룸 연구는 로켓 개발 초기부터 매우 활발하게 진행되었지만 보다 체계적인 연구는 비록 외부에 개방되지 않지만 JANNAF Exhaust Plume Technology Subcommittee에서 찾아볼 수 있다[7-10]. 현재는 공개가 제한되어 있다. 최근까지의 로켓 플룸에 관한 전반적인 내용은 Simmons의 책[11]에 정리되어 있다.

최근에는 Burt와 Boyd[12]는 Erdmann 등[13]

의 측정결과를 수치해석하여 알루미늄 입자의 상변화, 크기, 분포, 그리고 비평형 온도 등의 효과를 고려한 고공의 복사열전달을 연구하였다. 이 밖에도 미국에서는 NASA와 산학 등에서 수많은 보고서가 발표되었으며 인터넷 등에서 쉽게 찾을 수 있다. 유럽에서도 Gosse 등[14]이 알루미늄 입자의 광학 물성과 크기 분포 등을 정밀히 측정하였으며, Troyes 등[15]은 지상 조건에서 화학반응과 두 종류의 알루미늄 입자를 사용한 해석을 발표하였다. 일본에서 발표된 Takahash 등의 보고서[16]는 고체 모터 열복사 측정값이 기술되어 있기 때문에 열복사에 기인하는 단열설계에 직접적인 도움이 된다. 일본에서 진행된 일련의 개발 시험에서 측정된 축소형, 실물형 고체 모터 지상 시험에서 측방향 반경방향으로 열복사를 측정하였으며 고고도 시험장비에서 진행된 시험에서도 열복사 측정을 시도하여 성공하였다. 일본에서 사용한 고체 모터는 KSLV-I KM과 유사하기 때문에 KM 열복사를 예측하는데 있어서 매우 큰 도움이 되었다.

국내에서는 김만영과 백승욱이 [17] 플룸 열복사의 고체 입자 영향을 살핀 논문에서 고체 입자의 온도, 기체와 고체의 온도차이, 고체입자의 분포도, Searchlight emission 등을 살폈으며 고체 입자의 복사 열전달이 지배적임을 밝혔다. 김과 백의 연구결과는 실제적인 고체 모터 플룸에 대한 것이 아니라 이상화된 플룸에 대한 것으로 실제 로켓에 적용하긴 한계가 있지만 플룸에 관한 전반적인 지식을 넓힐 수 있다. 최근 국내에서 연속체와 희박기체에 모두 적용 가능한 GH(Generalized Hydrodynamics) 방정식 해법이 등장했지만[18] 충분히 검증된 결과가 나오지 않았기 때문에 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각되며, 만약에 검증만 된다면 고공 플룸 해석에 매우 중요한 수단이 될 것으로 사료된다.

1.3 연구내용

KSLV-I KM에 적용된 엔진은 미국 Star-48과 추력과 크기가 비슷한 고체 모터이다. 항우연은 KM 플룸에 의한 저부가열량을 예측하고자 지상

시험 결과를 바탕으로 기하학적 플룸 가열 모델을 개발하였다[2,9]. 개발된 모델을 다른 고체 모터 시험결과와 비교하여 타당성을 확보하였으며, 고공 환경의 플룸 유동장을 해석하여[3] 플룸 모델에 필요한 매개변수를 제공하였다.

그러나 실제 비행시험에서 측정된 플룸 가열량은 예측치보다 낮은 값을 나타냈다[19]. 비록 플룸 가열량 예측시 안전을 위해 보수적으로 접근했지만, 차이가 크기 때문에 플룸 유동장을 재해석하여 과거 분석의 문제점을 찾고자 한다. 고공 플룸은 앞서 언급하였듯이 매우 복잡한 물리 과정을 거치며 수치해석에도 수많은 모델링이 고려되어야 한다. 현실적으로 항우연이 보유한 해석 장비로 모든 사항을 고려한다는 것은 한계가 있고, 세계적으로도 유사한 사례가 없기 때문에 현재 단계에서는 입자 효과에 집중하여 분석하고자 한다. 해석적인 방법은 선행연구[3]와 동일하며 선행 연구의 결과를 보완하여 추가된 해석을 제시하고자 한다.

2. 플룸 해석

2.1 비행시험 결과

KSLV-I 비행시험에서 노즐 및 플룸을 바라보는 면에 4개의 복사열 센서를 장착하여 복사열을 측정하였다. 측정위치는 KMS에서 플룸의 바깥 방향을 바라보는 면과, KM 저부의 단열재 위, 그리고 KM 측면에서 KM 축방향으로 플룸을 바라보는 TVC 분배기 면이다. 이 중 단열재 위에 장착된 것은 단열재 성능 및 직접적 영향을 살피기 때문이며, 형상 정보가 부정확하나, KMS와 TVC 분배기에 장착된 것은 일정한 방향을 바라보기 때문에 분석의 대상이 된다. 보다 자세한 것은 KSLV-I 비행 보고서를 참조하기 바란다. 그림 1에 측정된 복사열을 나타냈다.

측정된 최대 복사열은 TVC 분배기의 4.81kW/m^2 로서 예측값의 약 20% 정도이다. 20%라면 예측 오차로서는 큰 범위에 속하지만 플룸 복사를 비교한 논문[10]에서 보면 로그 스케일 상에서 크기 비교를 하고 간단한 기하 모델을

을 사용한 것에 비하면 감수할만한 수준이라 사료된다. 다만 정량적인 차이가 발생한 원인이 어디에 근거하는 지 파악해야 추후 고체 모터 개발 및 적용에 응용이 가능하기 때문에 본 연구에서는 고체모터 플룸을 재분석하고자 한다.

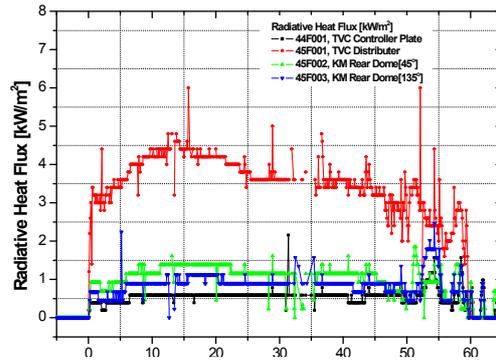


그림 1. KM 접화에 따른 복사 열전달 측정 결과

2.2 고체 모터의 플룸 성분

플룸 유동을 해석하기 위해서는 화학적 조성을 알아야 한다. 플룸의 조성은 대기 중 팽창과정을 결정짓는 중요한 인자이고, 특히 비열, 비열비, 확산계수 등이 중요하다. 플룸은 다원화합종이며 온도 압력 등의 상태에 따라 조성이 계속 변하기 때문에 유동조건에 따라 평형 또는 비평형으로 해석하는 것이 맞지만 비평형 해석은 많은 화학종을 고려해야하기 때문에 본 연구에서는 플룸을 적절한 비열비를 갖는 단일 화학종으로 간주하였다. 결과적으로 전체 유동은 공기와 플룸의 이원 화학종(binary mixture)으로 가정하였다.

플룸의 열역학적 상태를 알기 위해 연소실에서 노즐 팽창부까지 평형 유동 해석하여 조성을 파악하였다. 플룸의 대기 팽창 과정에서도 온도가 떨어지며 조성이 계속 바뀌지만 해석의 편의상 노즐 출구값과 동일한 값들을 갖는다고 가정하였다. 화학 평형해석은 CEA(chemical equilibrium analysis)[21]를 이용하였으며 계산 결과 출구의 물질율은 $\text{CO}(24.8\%), \text{CO}_2(1.5\%), \text{HCL}(13.5\%), \text{H}_2(33.6\%), \text{N}_2(10.5\%), \text{Al}_2\text{O}_3(8.8\%)$ 이며 비열비 $\gamma=1.20$ 이다.

2.3 플룸 알루미늄 입자

고체모터의 플룸 복사열은 대부분 알루미늄 입자에서 나오기 때문에 알루미늄 입자의 모델링이 플룸해석에서 가장 중요하다고 할 수 있으며, 입자 연구는 고체모터에 관한 연구에서 가장 중요한 부분 중 하나이다. 고체모터에서 알루미늄이 보통 15%~20% 정도 포함되고 알루미늄 입자가 플룸에서 차지하는 질량분율은 28~37% 정도에 이른다. 그러나 체적분율로는 10%미만이기 때문에 플룸 팽창의 유체역학적 거동은 기체의 영향이 크다고 할 수 있으며 온도, 상변화 등과 같은 열역학적 변화는 고체의 영향이 반드시 포함되어야 한다. 고온의 연소실에서 알루미늄은 액체 상태로 존재하며 노즐 팽창 과정에서 냉각되며 고체 입자로 바뀐다. 일반적으로 2327K 이상이면 액상으로 간주할 수 있으나, 입자 내부의 열전달 때문에 입자의 크기에 따라서 온도 및 상태가 다르다는 것이 확인된다[10]. 입자의 크기가 크면 노즐 출구에서의 온도가 높고 속도가 느리며 대부분 액체 상태로 존재한다. 반면 입자의 크기가 작으면 온도도 낮으며 속도가 빠르고 고체와 기체 상태가 섞여 있다. 그런데 고체모터에서 나오는 알루미늄 입자의 크기는 모터마다 다르기 때문에 고체모터 플룸 연구에 어려움이 있다. 대개 모터의 추력과 노즐 직경이 클수록 입자의 직경이 커지는 경향이 있다[4]. 일본 ISAS에서 개발된 고체모터의 알루미늄 입자에 대한 정보는 ISAS Report[23,24]에서 찾을 수 있다. ISAS 보고서에는 목면적에 따라서 평균 입자 직경에 일정한 규칙성이 있음을 발견하였다. 이 보고서에 따르면 KSLV-I KM의 평균 입자 직경은 약 3~5 μm 에 해당한다. 그러나 평균 입자 직경에 대해서는 추론이 가능하지만 입자 분포도에 대해서는 정확한 정보를 찾기 힘들다. Bobco를 비롯한 많은 문헌들에서 고체 모터의 입자 분포를 Rosin-Rammler 분포로 가정하였는데, 이 분포가 타당하더라도 KM에 적용하기 위해서는 분포 곡선에 따른 몇 가지 형상값을 제공하여야 한다. 그러나 KM에 대하여 측정값이 없기 때문에 이는 외부에서 추론한 값을 사용하여야 한다. 알려진 입자 분포는

Burt와 Boyd[12]가 적용한 분포도가 있는데 이를 KM의 알루미늄 질량 분출율로 환산하여 정리하면 표 1과 같다. 평균값은 약 3.7 μm 로서 ISAS 보고서와도 비교적 일치한다.

표 1. 가정된 플룸 입자 분포

Diameter(μm)	Mass Rate (kg/sec)
0.3	0.017768
0.4	0.01472
0.6	0.053345
1	0.237446
2	0.918498
4	3.020215
6	0.738007

플룸 복사열의 대부분이 알루미늄 복사열이기 때문에 알루미늄의 정확한 광학 열물성은 복사열 예측에서 매우 중요하다. 그러나 방사율이나 산란계수 등의 광학 열물성은 알루미늄의 상(Phase)에 따라 차이가 크며 온도, 크기, 순도 등에 의해 차이가 있다[25]. 따라서 알루미늄의 방사율을 일률적으로 얼마라고 가정하는 것은 복사열 예측에 오차를 수반할 수밖에 없다. 과거의 연구 중에서 Yamamoto와 Oguchi[24]의 연구에서는 0.11로 가정하였으며 Edwards 등[6]은 0.1에서 0.3까지 변화시키며 연구를 하였다. 일반적으로 0.4 이하의 값을 취하는 것으로 파악되는데 보다 자세한 분석을 한 연구에서는 과장별로 다르게 접근한다. 본 연구에서는 보수적으로 접근하여 0.3으로 가정하였다. 알루미늄 밀도는 3960 kg/m^3 이며, 비열은 1255 $\text{J}/\text{kg} - \text{K}$ 로 설정하였다.

2.4 해석방법

플룸 해석은 연속체 방정식을 적용하였다. 일반적으로 희박 정도를 나타내는 누젠수를 이용하여 적용의 타당성을 확인할 수 있으며 노즐 출구에서부터 밀도가 어느 정도 존재하는 팽창구역까지는 타당한 접근 방법이다. 그런데 알려지다시피 고체모터의 내부는 화학반응, 복사, 이상(two phase) 유체, 상변화 등이 발생하기 때문에 각각

이 플룸 팽창에 미치는 영향을 미리 고려하여야 한다. 스페이스 셔틀을 개발하면서 Smith 등이 연구한 내용[26]에 따르면 연소실 압력, 노즐목의 곡률, 입자의 항력모델, 입자 열전달 모델 등이 기체 팽창에 미치는 영향은 작고, 고려된 화학모델, 평균 입자 직경, 입자의 질량 분율 등은 큰 영향을 미친다고 하였다. 또한 입자의 분포를 고려한 것과 평균 입자를 사용한 것에는 큰 차이가 없다고 한 바 있다. 그런데 이 연구는 플룸 팽창에 대한 연구이기 때문에 본 연구에서 고려하고 있는 입자의 팽창에 위 결론이 타당한지는 추가적으로 검토하여야 한다.

Smith 등이 연구한 내용은 매우 다양한 파라미터를 이용하였지만 본 연구에서는 연구 자원의 한계 때문에 고려할 수 있는 파라미터에는 한계가 있다. 일단 화학반응 자체를 고려하는 것은 불가능하고 비반응 유동을 고려할 수밖에 없으며 이상(two phase)을 위해 선택할 수 있는 방법도 한계가 있기 때문에 복잡한 해석은 추후의 과제로 남길 수밖에 없다. 해석 프로그램은 상용의 Fluent 6.3을 이용하였다. Fluent 6.3을 이용하면 고체입자와 더불어 고체입자에 의한 복사열전달까지 고려할 수 있다. 공간 차분은 2차 정확도의 Roe차분을 적용하였다. 기체와 입자 모두 정상상태로 가정하였다. 알루미늄 거동을 위해서 기체와 입자를 개별적으로 해석하고 기체와 입자간의 운동량과 에너지 교환이 고려된 DPM (Discrete Particle Method)을 적용하였다. DPM을 적용하기 위해서는 입자가 충분히 희박하여야 한다는 가정이 적용되어야 하는 데, 이미 언급하였듯이 알루미늄 입자가 플룸에서 차지하는 질량분율이 30%를 넘지만 체적 비율은 9%이하로 충분히 낮기 때문에 위 가정이 어느 정도 충족되리라 판단한다. 다만 화학적 평형 유동 해석 (CEA) 결과로는 알루미늄이 모두 고체입자로 나오지만 실제로 노즐 출구 직후에는 입자에 따라 속도, 온도가 다르고 액상과 기상이 섞여 있으며 작은 입자부터 고체로 바뀌고 큰 입자의 경우에는 상당 시간 액체로 존재한다[15]. 노즐 내부의 유동해석과정에서 고체입자를 연소실에서부터 고려하면 입자의 속도, 온도 변화를 확인할 수는 있겠지만 상

변화에 따른 잠열효과 및 출구 유동이 달라지기 때문에 어느 것이 더 나은 결과를 보여줄지는 확신할 수 없다. 대개의 플룸 유동해석은 실험이나 다른 해석 도구에서 구한 특성치를 이용하여 노즐 출구 에서부터 해석하는 것이 일반적이다.

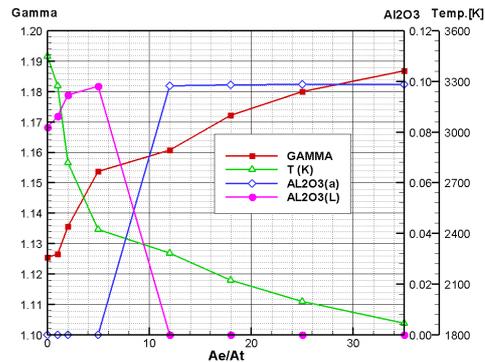


그림 2 평형 코드에서 추출한 플룸 내부의 성분 변화

해석을 위해 격자는 선행연구의 결과와 같은 격자를 적용하였다. Fluent는 연속체 유체를 해석하는 프로그램이기 때문에 고공 팽창에서 중요한 기체의 진공 팽창 과정을 해석하기 불가능하지만 대기압을 충분히 낮추면 입자의 팽창 과정은 충분히 살펴볼 수 있을 것으로 사료된다. 이를 위해 대기압은 정지해 있는 5pa로 가정하였다.

3. 고체입자 모델 검증

3.1 고체입자 모델에 따른 분석

고체 입자 해석에서 고려해야 하는 것은 지름을 포함한 형상, 밀도, 비열 등의 물성치, 플룸내의 분포도 등이다. 특히 입자 지름과 밀도는 입자 거동을 결정짓는 매우 중요한 인자로서, 연소압, 연소 온도, 노즐목 직경 등에 따라 약간 다르다고 알려져 있다. 보통 10 μ m를 넘지 않는다고 알려져 있다. 플룸의 거동을 파악하기 위해서는 노즐 내부의 유동을 선행해서 해석하여야 한다. 노즐 내부의 물성치는 평형화학반응을 이용한 CEA결과가 나와 있지만 실상 CEA는 노즐의 성

능해석을 목적으로 한 평형 해석이기 때문에 실

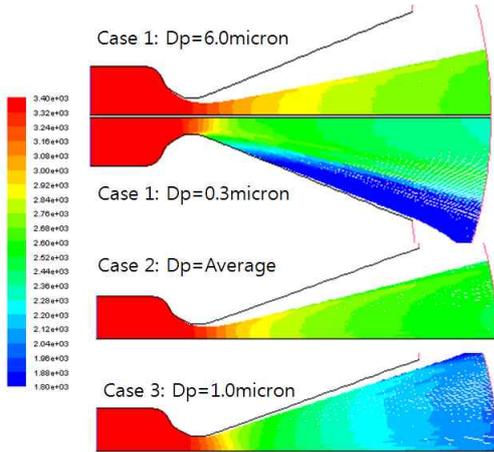


그림 3. Case1,2,3의 입자 온도 분포

제 물리현상을 제대로 설명하기 어렵다. 대표적으로 팽창비 35의 노즐 출구에서 알루미늄은 전부 고체라는 결과가 CEA에서 나오지만 참고문헌의 결과만 보더라도 일부 액체가 존재한다. 액체와 기체의 상변화는 잠열 때문에 플룸 에너지 변화에 일정한 영향을 끼칠 것이기 때문에 이 결과는 무시하기 힘들 것이다. 이를 위해 CEA 결과 중 출구온도가 1868K, 출구속도 2929m/s와 비교하여 결과를 검토하도록 하겠다. 해석은 여러 가지로 파라미터를 바꾸어가며 계산하였다.

(1) 가스 비열비 $\gamma=1.2$, 가스 비열은 2603.60, 입자는 7개 분포인 경우로서 노즐 내부에서 작은 입자는 기체와 비슷하게, 큰 입자는 중심에 몰려 팽창하는 등 팽창각이 입자의 크기에 따라 달라지는 것을 확인한다. 특이한 것은 작은 입자의 온도가 큰 입자와 겹쳐지는 플룸 코어에서의 온도와 그렇지 않은 부분의 온도차이가 명확하게 나타난다는 점이다. 노즐 출구에서 기체의 평균 속도는 2927m/sec이며 평균 온도는 1945K로 계산된다. 단, 노즐 출구는 편의상 노즐 끝 원주의 중심이 아니라 노즐 팽창부의 가상 중심으로 만들어진 원주로 취했으며 실제 노즐 끝보다 약 4.9cm 후단이다. 플룸의 팽창 과정이 더 진행지만 전체적인 경향성을 파악하는 데 문제가 없을 것으로 판단된다.

(2) 가스 비열비 $\gamma=1.2$, 가스 비열은 2603.60, 입자는 평균 직경만 갖는 경우로서 입자 분포를 사용하지 않고 평균 직경의 대표 입자만사용하였다. 입자의 팽창각이 앞선 예의 중간정도에 머물고 노즐 출구의 평균 온도는 1962K, 평균 속도는 2904m/sec이다.

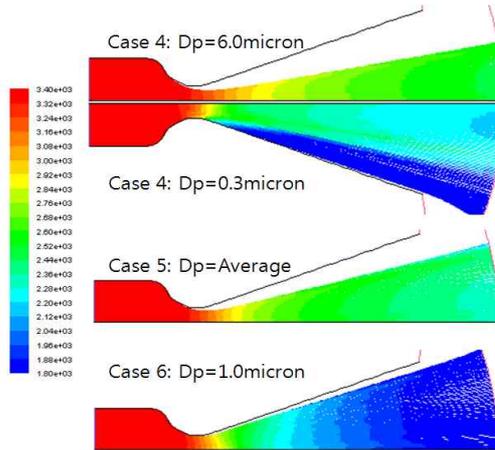


그림 4. Case 4,5,6의 입자 온도 분포

(3) 가스 비열비 $\gamma=1.2$, 가스 비열은 2603.60, 입자는 1.0 μm 만 존재한다고 가정한 경우로서 팽창각이 커지고 노즐 출구의 평균 속도는 2940m/sec, 평균 온도는 2004K로 계산된다.

(4) 가스 비열비 $\gamma=1.3$, 가스 비열은 1880.37, 입자는 7개 분포 가정에서는 $\gamma=1.2$ 인 경우에 비하여 팽창각은 비슷하지만 온도는 약간 감소한 것을 확인할 수 있다. 노즐 출구에서의 속도는 2810m/sec, 온도는 1729K로 계산된다. 평균속도와 평균온도가 CEA에서 예측한 값보다 작다.

(5) 가스 비열비 $\gamma=1.3$, 가스 비열은 1880.37, 입자는 평균직경으로 일정하다고 가정하면 노즐 출구에서의 속도는 2776m/sec 온도는 1733K로 계산된다. 앞선 입자 분포를 사용한 경우와 마찬가지로 평균속도와 평균온도가 CEA에서 예측한 값보다 작다.

(6) 가스 비열비 $\gamma=1.3$, 가스 비열은 1880.37, 입자는 1 μm 라고 가정하면 노즐 출구에서 1701K, 2848m/sec의 평균치가 계산된다.

위의 결과들을 정리하면 표 2와 같다.

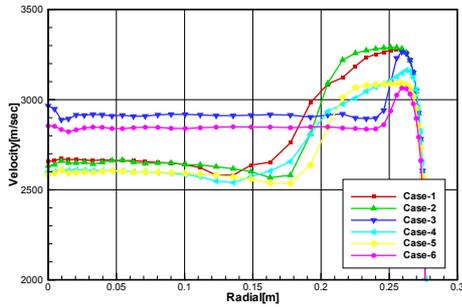


그림 5. 노즐 출구의 입자 속도 비교

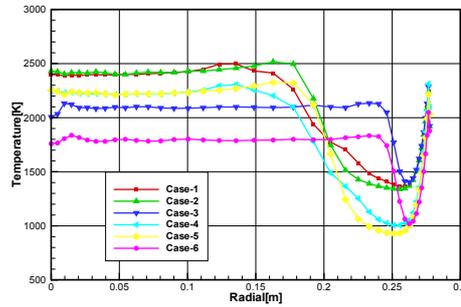


그림 6. 노즐 출구의 입자 온도 비교

표 2. 비열비 및 입자 분포에 따른 노즐 출구의 평균온도와 속력

	출구 온도 (K)		출구속력 (m/sec)	
	1.2	1.3	1.2	1.3
비열비	1.2	1.3	1.2	1.3
분포 입자 (7 stream)	1963	1729	2912	2810
입자직경 3.7 μ m	1971	1733	2897	2776
입자직경 1.0 μ m	2009	1701	2935	2848

과라미터를 달리하여 해석한 결과 비열비에 따라 큰 차이가 있으며 CEA에서 제시한 온도 속도는 기체의 비열비를 1.2를 취한 값에 좀더 근접하는 것으로 나타난다. 결과적으로 비열비를 1.2와 1.3사이에서 1.2에 가까운 값을 취하면 CEA에서 제시한 노즐 출구 조건과 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 결과는 CEA에서 구한 비열비의 변화와 차이가 있는데 CEA에서는 연소실에서부터 비열비가 1.13에서 1.19까지 서서히 증가한다. 반면에 Fluent 해석에서는 가스의 비열도 일정하고 비열비도 변하지 않는다. 물론 온도에 의존적인 비열과 분자량을 정의하여 이를 모사할 수는 있겠지만 화학반응과 그에 따른 비열의 변화가 포함되지 않는 한 비물리적인 수밖에 없으며 본 연구의 한계이다.

위 결과에서 입자 직경이 1.0 μ m인 경우 나머지 입자의 경우보다 차이가 더 벌어지고, 평균 직경 하나만을 고려한 경우와 입자 직경을 분포시킨

경우는 비슷하다고 볼 수 있다. 다만 계산된 유동장을 보면 분포 입자의 경우가 평균 입자만 고려한 경우보다 반경 방향으로 변화가 심하게 나타난다. 또한 공통적인 특징으로 축 중심에서 물려있는 큰 입자의 영향으로 플룸의 중심은 노즐 벽에 가까운 플룸보다 온도가 훨씬 높다는 것을 보여준다.

위 계산들은 알루미늄 입자가 미리 생성되어 연소실에서부터 유동과 같이 진행된다는 가정에서 계산한 결과이다. 그 결과 노즐목 이전까지 골고루 분포된 알루미늄 입자는 노즐목에서 입자 직경에 따라 통과하는 부분이 약간씩 달라지며 노즐 팽창부에서는 팽창각에 차이가 발생한다. 실제 고체모터에서도 알루미늄 입자는 연소실에서 생성되고 노즐목과 팽창부에서는 더 이상 생성되지 않고 액체-고체의 상변화만 있기 때문에 위 계산결과에서 크게 벗어나지 않을 것으로 사료된다. 다만 알루미늄 액체나 고체 입자가 서로 부딪혀 합쳐지거나 큰 직경의 알루미늄 입자가 잘게 부서지는 현상이 얼마만큼 나타나는 지가 관건인데 현재로서는 정확히 예측 또는 관측하기란 매우 어렵다. 예를 들어 아래 그림의 KSLV-KM 3차 지상시험에서 고속 카메라로 관측한 결과, 시험 중간에 복사열이 갑작스럽게 증가한 시간에 밝게 빛나는 덩어리가 노즐에서 튀어나오는 것이 관측되는 데, 이것이 알루미늄 덩어리라 보는 것이 타당하다.

3.3 고공 노즐을 이용한 고공 입자 해석

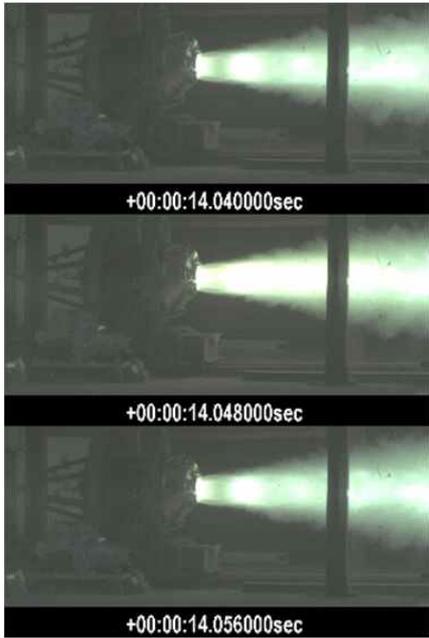


그림 7. 복사열의 될 때의 플룸 변화

노즐에서 벗어난 플룸은 대기 상태에 따라 기체 및 고체의 팽창각은 달라진다. 관성력이 큰 고체 입자는 중심부에 몰려 있으며 가벼운 고체 입자는 크게 팽창하고 기체는 기체 운동의 원리에 따라 팽창한다. 진공환경의 고공 플룸의 팽창각은 90° 이상이다. 고체 모터 고공 플룸의 복사열은 대부분 알루미늄 입자에서 발생하기 때문에 알루미늄 입자의 팽창각을 예측하는 것이 무엇보다도 중요하고, 실제로 알루미늄 입자의 크기 분포, 크기에 따른 팽창각, 크기에 따른 온도가 무엇보다도 중요하다. 그러나 어떠한 연구 사례에서도 위 세가지 사항이 동시에 고려된 경우는 없다. 대부분의 경우가 노즐 출구에서의 플룸을 가정한 경우이고 가장 최근의 Burt와 Boyd의 연구조차 알루미늄 입자의 분포와 광학 열물성을 가정하여 해석한 예이고, 연소실을 포함하여 해석한 Troyes 등의 연구[15]는 출구까지만 해석하였다. 본 연구에서는 앞서 구한 $\gamma=1.2$ 에 7가지 입자 직경을 갖는 경우에 대하여 여러 파라미터를 고려하여 해석을 수행하고자 한다.

Fluent에서 DPM을 사용하면서 복사열전달을 고려할 수 있다. 관련 옵션으로 입자의 방사율과 산란율을 입력하여야 하는데 방사율은 앞서 언급하였듯이 0.1에서 0.3까지 변화시키며 결과를 확인하겠지만 산란율에 대해서는 특별한 정보를 찾을 수 없어 기본값으로 주어진 1.0과 이를 반감시킨 0.5에 대해서만 결과를 확인하겠다. 참고적으로 입자의 산란이 고려되면 기체의 산란은 계산하지 않는다. 유동장은 선행연구에서 크게 달라진 것이 없기 때문에 TVC 분배기 위치에서 구한 복사열만 도시하도록 하겠다.

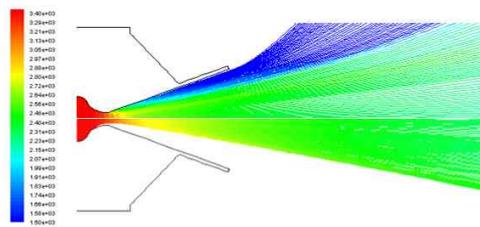


그림 8. 입자 크기에 따른 팽창 과정 (위 0.3 μm , 아래 6.0 μm)

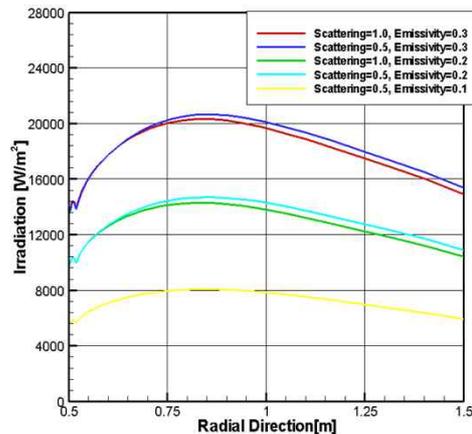


그림 9. 입자 광학열물성에 따른 TVC 분배기에서의 복사열

그림 9에서 보듯이 산란율은 별 영향이 없는 것으로 나타나고 방사율에 따른 복사열의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 비록 본 연구가 연속체 방정

식을 해석하여 가열량을 계산하였지만 저부가열을 일으키는 높은 온도의 플룸은 노즐 출구쪽에 몰려있고, 노즐 출구는 비교적 높은 밀도 때문에 누젠수가 높아 연속체 방정식이 유효하다고 볼 수 있다. 계산된 복사열과 비행시험에서 측정된 복사열 4.81kW/m^2 과 비교하면 알루미늄 입자의 방사율이 0.1이면 비행시험과 비슷한 크기임을 확인할 수 있다. 물론 가정된 방사율이 실제 방사율인지는 현재시점에서는 확인할 수 없다. 또한 비행시험에서 측정된 플룸 가열량 4.81kW/m^2 자체가 외국에서 보고된 사례보다 훨씬 작은 양이기 때문에 본 연구의 결과와 외국의 결과를 직접적인 비교하기는 곤란하다.

다만 본 연구 결과에서 확인 가능한 것은 진공에서 알루미늄 입자는 입자 크기에 따라 팽창각이 다르며 온도 또한 다르다는 것을 확인하였으며, 알루미늄 입자의 방사율에 따라 모터 저부에 입사되는 가열량이 다르다는 것이다. 본 연구는 알루미늄 입자의 상변화와 열물성과 광학 열물성의 온도 의존성이 고려되지 않은 결과이므로 검증된 결과로 보긴 힘들지만 연구 결과로 판단컨대 알루미늄 입자의 방사율은 0.1 정도일 가능성이 매우 큰 것이 확인되었다.

4. 결 론

고체입자를 포함한 KSLV-I KM 고공 플룸을 해석하여 비행시험 결과와 비교하였다. 연속체 유동해석 프로그램으로 연소실 내부에서부터 노즐 출구까지 기체와 알루미늄 입자를 함께 고려하였으며, 고체모터 성능해석 프로그램과 유사한 결과를 갖는 해석조건으로 노즐 출구 이후의 팽창과정까지 해석하였다. 알루미늄 입자는 서로 다른 직경의 7개의 입자흐름으로 형성하였으며 연소가스는 비열비가 1.2일때 노즐 출구에서의 온도 속도 등이 성능해석 프로그램 CEA의 결과와 유사하였다. 해석결과 노즐 출구에서 노즐 중심과 벽면 사이의 온도 차이가 있는 것을 확인하였으며, 입자의 직경에 따라 속도 및 온도가 다르고 크기가 큰 입자들이 중심축 부근에 몰려 있

었다. 노즐 플룸을 진공으로 팽창시키면 입자 직경에 따라 팽창각이 다른 것을 다시 한번 확인하였다. 알루미늄 입자의 광학 열물성을 변화시키며 KM TVC 분배기 위치의 복사열을 계산한 결과 알루미늄 입자의 방사율이 0.1일 때 비행시험 결과와 유사하였다.

참 고 문 헌

1. 김성룡 등, "KM 지상단열 및 열유속, 온도 측정 보고서", 항우연 TR14431PA00000-0002, 2007.
2. 고주용 등, "고공에서의 고체모터 플룸에 의한 저부가열 모델링", 우주발사체 기술 심포지움, 2005.
3. 김성룡, 고체모터 플룸의 고체 입자 유동 해석, KARI-TAT-TM-2009-009, 한국항공우주연구원, 2008.
4. Y. Sakurai and H. Kimura, "Technical overview of plume radiation from solid rocket motor," ISAS Report, 1986
5. Bobco, R. P., "Radiation from Conical Surfaces with Nonuniform Radiosity," AIAA Journal, Vol. 4, 1966, pp. 554-546
6. D. K. Edwards, Y. Sakurai and D. S. Babikian, "Examination of an alternative to the Bobco Plume Radiation Model," AIAA-85-1069
7. Rocket Exhaust Plume Technology, JANNAF Handbook, CPIA Publication 263, 1975
8. Rocket Exhaust Plume Technology, JANNAF Handbook, CPIA Publication 263, 1981
9. JANNAF 12th Plume Technology Meeting, CPIA Publication 332, 1980
10. JANNAF 13th Plume Technology Meeting, CPIA Publication 357, 1982
11. F. S. Simmons, Rocket Exhaust Plume Phenomenology, The Aerospace Press, 2000
12. J. M. Burt and I. D. Boyd, "High Altitude Plume Simulation for Solid Propellant Rocket", AIAA Journal Vol 45, No. 12, Dec. 2007.
13. P. W. Erdman, E. Zipf, P. Espy, C. Howlett,

- D. A. Levin, and G. V. Candler, "In situ Measurement of UV and VUV Radiation from a Rocket Plume and Re-Entry Bow shock," AIAA Paper 92-0124, 1992.
14. S Gosse, L. Hespel, P. Gossart, and A. Delfour, "Morphological Characterization and Particle Sizing of Alumina Particles in Solid Rocket Motor," J. of Propulsion and Power, Vol. 22, No. 1, pp. 127-135, 2006.
 15. J. Troyes, I. Dubois, V. Borie, A. Boisshot, "Multi phase reactive simulations of a model solid rocket motor exhaust jet", 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-2006-4414, 2006.
 16. Takahashi et al. NAL TR-990 고체 로켓 플룸의 열방사, 1988
 17. M. Y. Kim, and S. W. Baek, "Influence of Particles on Radiative Base Heating from the Rocket Exhaust Plume", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.45, No.3, pp.454-458, 2008
 18. 안재완, 노오현, 김인선, "고체입자를 포함하는 저밀도 Rothe 노즐 유동해석," 제6회 우주발사체기술 심포지움, 2005.
 19. 고주용 등, "고체모터연소에 의한 플룸열복사 특성연구", 한국군사과학기술학회, 2005.
 20. KSLV-I 1차 비행시험 보고서, 한국항공우주연구원, 2009.
 21. S. Gordon & B. J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, NASA RP-1311
 22. R. W. Herman, "Aluminum Oxide Particle Size for Solid Rocket Motor Performance Prediction," J. Spacecraft, Vol. 18, No. 6, 1981.
 23. R. Akiba and Y. Inatani, "Alumina Particles exhausted from solid propellant rocket motor as a potential source of space debris," ISAS Report, 1990.
 24. M. Yamamoto and H. Oguchi, "Gas Particle Mixture Flows in a Spinning Solid Rocket Motor", ISAS Report 607, 1983
 25. Anfimov, N. A., Karabadjak, G. F., Khmelinin, B. A., Plastinn, Y. A., and Rodinov, A. V., "Analysis of Mechanisms and Nature of Radiation from Aluminum Oxide in Different Phase States in Solid Rocket Exhaust Plumes," AIAA Paper 93-2818, 1993.
 26. S. D. Smith, J. A. Tevepaugh, and T. M. Penny, Space Shuttle SRM Plume expansion sensitivity analysis, LMSC-HREC TM D496636, 1975, Lockheed Missile & Space Company Inc.