

# 상세 화학반응 모델을 이용한 발사체 터빈 배기가스의 이차연소 해석의 축대칭 해석

김성룡\*<sup>†</sup> · 김인선\*

## An Axisymmetrical Study on the Secondary Reaction of Launch Vehicle Turbine Exhaust Gas Using the Detailed Chemistry Model

Seong-Lyong Kim\*<sup>†</sup> · Insun Kim\*

### ABSTRACT

3 dimensional turbine exhaust gas flow was simplified to an axisymmetrical flow and calculated with detailed chemistry models. GRI 35 species-217 reaction step model and simplified 11 species 15 reaction model was applied to the secondary reaction of the turbine exhaust gas and compared. All the model captured the secondary combustion on the base region, and the temperature was 600K higher than that without turbine exhaust gas. This means the local temperature of the base can be higher in the case of real 3 dimensional flow. The simplified model show the similar results to the GRI detailed chemistry model although the former affected the engine plume structure slightly

### 초 록

상세 화학반응 모델을 이용하여 3차원 터빈 배기가스 유동을 2차원 축대칭 유동으로 가정하여 해석하였다. GRI의 35 화학종 217 단계의 상세 모델과 메탄 반응만을 간략화시킨 11화학종 15단계 모델을 적용하여 비교하였다. 메탄 화학반응을 적용한 결과 저부에서 터빈 배기가스의 이차 연소가 나타났다 터빈 배기 노즐이 없는 경우에 비하여 온도가 600K 정도 더 높게 나타났다. 실제 3차원 문제에서는 국부적인 온도는 더 높을 수 있음을 의미한다. 화학 반응 모델에 따라 저부에서의 연소 영역과 화학종 분포도 약간 다르지만 저부에서의 이차 연소는 모두 포착하였다. 다만 간략화된 모델인 경우 엔진 플룸의 구조에 약간의 영향을 주는 것을 관측된다.

Key Words: Turbine Exhaust Gas(터빈 배기가스), Secondary Reaction(이차 연소), Clustered Engine(클러스터드 엔진), KSLV-II(한국형발사체) Base Heating (저부 가열)

\* 한국항공우주연구원 발사체열공력팀

<sup>†</sup> 교신저자, E-mail: saintL@kari.re.kr

발사체 액체 엔진의 가스발생기에서 생성된 연료 농후의 가스는 터보 펌프의 터빈 작동을 거쳐 엔진 근처에서 분출되는 데, 이 터빈 배기가스는 비행 상황에 따라 고온의 플룸을 만나 이차연소 현상이 나타난다[1]. 터빈 배기가스의 이차연소 현상은 엔진 저부 영역에 플룸 이외의 추가적인 가열을 발생시켜 엔진 저부의 열하중을 높이기 때문에 이러한 배치를 피하거나 열하중을 방지할 수 있도록 배치 설계되어야 한다[2]. 발사체 개발 초기에는 슈퍼터나 새턴 발사체 같이 이차연소 현상을 피하기 위해 터빈 배기 노즐을 엔진 노즐로부터 멀리 떨어뜨려 위치시키거나 터빈 배기가스 자체를 엔진 노즐 안으로 분사하여 엔진 플룸과 같이 움직이도록 하는 방법이 사용되었다. 그러나 최근의 아리안 IV나 장정 발사체와 같이 터빈 배기 노즐의 위치에 구애받지 않는 경우가 많은 데 이 경우에는 단열체를 강화하여 추가적인 열하중에 견디도록 한 것으로 판단된다.

터빈 배기가스 이차연소 현상을 시험이나 수치해석을 통해 분석하는 것은 매우 어려운 작업으로서, 과거 터빈 배기가스 이차연소 현상도 연소 현상 자체를 관측한 것이 아니라 갑작스런 저부 가열량 증가로 이차연소 현상을 판단하였다[3]. 이차연소 현상을 수치해석으로 모사하기 위해서는 3차원 유동에 비평형 연소 반응을 고려하여야 하는 데, 이차연소 현상이 나타나는 유동 조건이 대기압보다 매우 낮고, 다양한 속도 분포를 갖는 유동 영역에 속할뿐더러, 고려되어야 할 화학종이 지나치게 많다는 어려움이 있다. 현재까지도 이러한 해석을 시도했다는 연구 결과는 찾을 수 없었다. 이에 본 연구는 3차원 터빈 배기가스 유동을 2차원으로 가정하여 특정한 조건에서 해석하여 이차연소 과정을 해석하고자 한다.

터빈 배기가스 유동은 엔진 노즐과 직경과 팽창비가 다른 별도의 노즐로서 엔진 노즐을 2차원 축대칭으로 가정하면 터빈 배기 노즐이 엔진 노즐을 둘러싸는 동축 노즐과 같이 가정될 수밖에 없는 데 실제적인 유동 전개 과정과 상당한 차이가 있을 수밖에 없다. 특히 공기, 플룸의 혼

합 과정과 추가적인 터빈 배기 유동의 혼합 과정이 실제와 많이 달라진다. 특히 터빈 배기가스의 이차연소는 역류 혹은 팽창된 플룸과 공기가 만나는 지점에 터빈 배기가스가 투입될 경우 나타날 확률이 높는데 이러한 과정이 축대칭 가정을 거치면 정확한 묘사가 불가능하다. 그럼에도 불구하고 현실적인 계산 능력의 한계와 제한적인 모델링 때문에 이러한 접근이 실제적으로 가능한 수준이라 판단되며 제한적이지만 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 해석 모델링

### 2.1 형상 모델

엔진 형상은 한국형 발사체 1단에 사용될 예정인 75톤급 엔진을 적용하였다. 75톤급 엔진은 연소압 6MPa, 팽창비 12의 조건이며 케로신-액체산소로 구동한다. 터빈 배기 노즐은 정제압 0.3MPa에 온도 700K, 팽창비 2.59로 가정하였다. 현재까지 개발 중인 모델이므로 형상 및 연소실 조건 터빈 노즐 조건은 매우 유동적이며, 특히 터빈 노즐의 경우 엔진 노즐을 2차원 축대칭으로 가정하였기 때문에 환형의 형태로 해석된다. 이러한 이유로 터빈 노즐을 2차원 축대칭 문제에 맞도록 팽창비만 유지하고 목직경을 40mm로 가정하였다.

화학종과 화학반응 개수가 많은 관계로 격자 개수에 제한이 있어서 23,077개를 사용하였다. 또한 별도의 격자 수렴성을 시험하지 않았다. 외부 유동은 저부 역류가 나타나기 시작하는 고도 15km를 맞추어 마하수 2.035, 압력 11722.7Pa, 온도 216.6K로 가정하였다.

### 2.2 연소 모델

화학반응 모델은 2가지 경우를 고려하였는데, 첫째로는 GRI V3.0[4]의 메탄 관계 화학반응식을 전부 고려한 식으로, 화학종은 H<sub>2</sub>, H, O, O<sub>2</sub>, OH, H<sub>2</sub>O, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, C, CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>2</sub>(S), CH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HCO, CH<sub>2</sub>O, CH<sub>2</sub>OH, CH<sub>3</sub>O, CH<sub>3</sub>OH, C<sub>2</sub>H, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, HCCO, CH<sub>2</sub>CO, HCCOH,

C3H7, C3H8, CH2CHO, CH3CHO, N2의 35화  
 학종이며 화학반응 개수는 217개이다. 둘째는 메  
 탄을 제외한 CH 계열 화학종은 무시하고 메탄  
 해리를 간략한 1 단계 모델로 가정하고 나머지  
 화학반응은 H2, O2, CO, CO2 와 관련된 GRI  
 관계식을 추출하여 구성한 모델이다. 이 경우 고  
 려되는 화학종은 H2, H, O, O2, OH, H2O,  
 HO2, CO, CO2, CH4의 10개이며 메탄 해리식 1  
 개를 포함한 총 15개의 화학반응식이 고려되었  
 다. 메탄 해리식은 Fluent에서 기본적으로 제공  
 하는 식을 사용하였다[5]. 어느 경우이든지 CH4,  
 CO, H2 등의 혼합기의 발열량, 연소속도 등의  
 검증이 우선되어야 하나 많이 적용되는 모델인  
 관계로 본 연구에서는 생략하였다.

### 2.3 해석 방법 및 경계 조건

해석은 상용의 Fluent를 사용하였으며 다원화  
 학종의 플룸 유동은 플룸 경계면에서 전단 불안  
 정이 나타나는 경우가 많아 비정상 과정으로 해  
 석하였다. 각 화학종의 비열과 열전달계수, 혼합  
 계수 등은 Fluent에서 기본으로 제공하는 NASA  
 다항식과 분자 동력학을 이용한 관계식을 적용  
 하였다. 엔진실 입구 조건은 압력 조건을 사용하  
 였으며 입구의 화학종은 무차원평형 반응식을  
 이용한 CEA에서 구한 노즐 입구조건 화학종  
 분포를 적용하였다.

Table 1. 엔진 노즐 입구의 화학종 분포

| 화학종  | CO     | CO2    | H      | H2     |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 질량분율 | 0.3286 | 0.3235 | 0.0008 | 0.0052 |
| 화학종  | H2O    | O      | OH     | O2     |
| 질량분율 | 0.2562 | 0.0076 | 0.0467 | 0.0314 |

터빈 배기 노즐 입구 조건은 CEA에서 구할  
 수 있지만 연료 과다 혼합기의 경우 잘 맞지 않  
 기 때문에 CEA의 결과 중 기체만을 추출하고  
 CH4, CO, CO2, H2O를 제외한 성분은 비슷한  
 분자량의 다른 기체로 치환하였다.

Table 2. 터빈 배기 노즐 입구의 화학종 분포

| 화학종  | CH4   | CO    | CO2   | H2O   |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 질량분율 | 0.336 | 0.298 | 0.154 | 0.212 |

각각의 경우의 수렴은 연속 방정식 레지듀얼

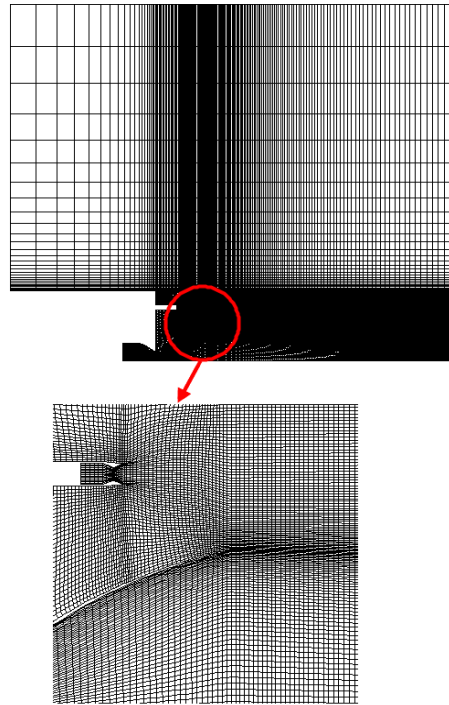


Fig. 1 계산에 적용된 격자계

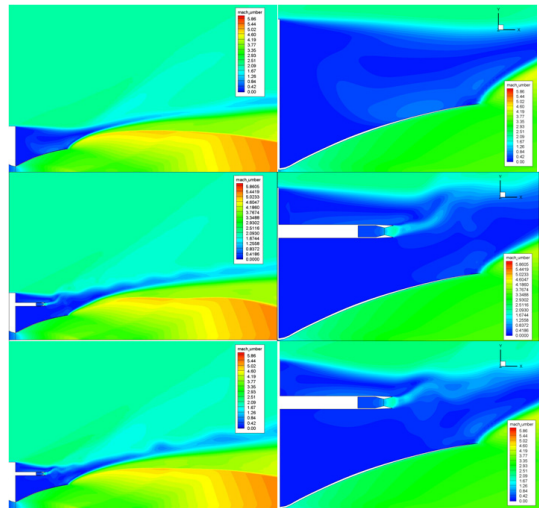


Fig. 2 마하수 분포 (상: 터빈노즐 없는 10화학종, 중:11화학종, 하: 35화학종 모델)

이 1E-3 이하로 떨어지고 전체 영역의 압력장과  
 마하수 분포에 변화가 없을 때로 가정하였다. 그  
 러나 엔진 저부의 터빈 배기 노즐이 위치한 부  
 분은 역류 유동의 경우 비정상성이 나타나기 때  
 문에 유동의 변화는 주로 엔진 플룸의 변화로

판단하였다. 또한 터빈 배기 유동 분석을 위해 엔진 노즐만 있는 경우의 유동을 추가로 해석하여 비교하였다. 이 경우 CH4를 고려하지 않는 14 GRI 반응 모델을 적용하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 유동장 비교

터빈 배기가스에 의한 유동장 변화를 살피기 위해 배기 노즐의 유무에 따른 마하수 분포를 비교하였다. 세 경우 모두 비슷한 엔진 플룸 변화를 나타내고 있으나 저부 유동에서는 차이가 나타난다. 첫째로 저부 역류 유동의 터빈 노즐과 터빈 노즐 유동에 의해 간섭을 받아 속도 분포의 차이가 나타나고 둘째로 외기 유동의 저부 침투에서도 차이가 있다. 터빈 유동 자체도 주변 유동의 영향을 받아 노즐을 빠져 나오자마자 흩어지게 되는데 화학 반응 모델에 따라 차이가 있는 것으로 보인다. 그러나 원래 저부 유동이 유동 불안정성이 나타나는 부근이기 때문에 터빈 유동 자체의 불안정성에 근거하는 지 아니면 화학반응의 차이에 의한 것인지는 현재의 결과로서는 판단하기 곤란하다. 또한 터빈 배기가스가 엔진 플룸의 구조에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타나는 데, 이는 각각이 갖는 운동량의 차이가 너무 크기 때문으로 3차원 터빈 가스 유동을 나타낸 연구[2]에서도 비슷한 결과를 나타냈다.

300K에서 2200K까지의 온도 분포를 나타낸 그림 3에서 터빈 유동에 의한 변화를 더 명확히 볼 수 있다. 터빈 배기 노즐이 없는 경우 엔진 저부로 역류된 플룸의 일부가 정체되어 1600K 정도의 유동 온도를 나타내며 비정상성이 잘 보이지 않는다. 그에 반하여 터빈 배기가스를 포함한 유동에서는 엔진 저부에 2200K를 상회하는 가스 분포가 나타난다. 이는 터빈 배기 플룸이 500K 정도의 낮은 온도임을 감안할 때 터빈 배기가스의 재연소로 인한 온도 상승이라 판단할 수 있다. 그림으로 판단하면 11화학종 모델의 재연소 온도가 35화학종 모델보다 높아 보이지만 유동 자체의 비정상성으로 인한 것일 수 있으므로 구

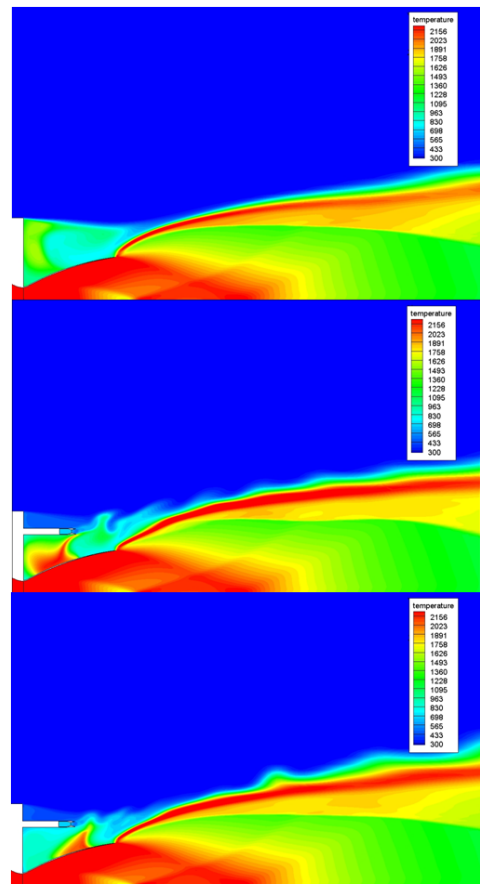


Fig. 3 온도 분포 (상: 터빈노즐이 없는 경우, 중: 11화학종 모델, 하: 35화학종 모델)

체적인 판단은 유보할 수밖에 없다. 다만 어느 경우이든지 터빈 배기가스의 재연소를 잘 포착하였고, 비슷한 온도 상승을 예측함이 확인되었다.

#### 3.2 재연소 반응 분석

11화학종 모델과 35화학종 모델이 엔진 플룸 구조에는 큰 차이가 없는 대신 엔진 저부에서의 온도 분포에 차이가 있기 때문에 화학종 및 재연소 반응 영역에 대한 분석이 필요하다. 우선 화학반응 모델을 비교하기 전에 터빈 가스의 재연소와 구분하기 위해 엔진 플룸의 재연소 과정을 분석할 필요가 있다. 이를 위해 OH 농도를 비교하였다. 그림 4에서 보듯이 OH 농도는 노즐 내부와 플룸-공기 경계면에서 가장 활발하게 나

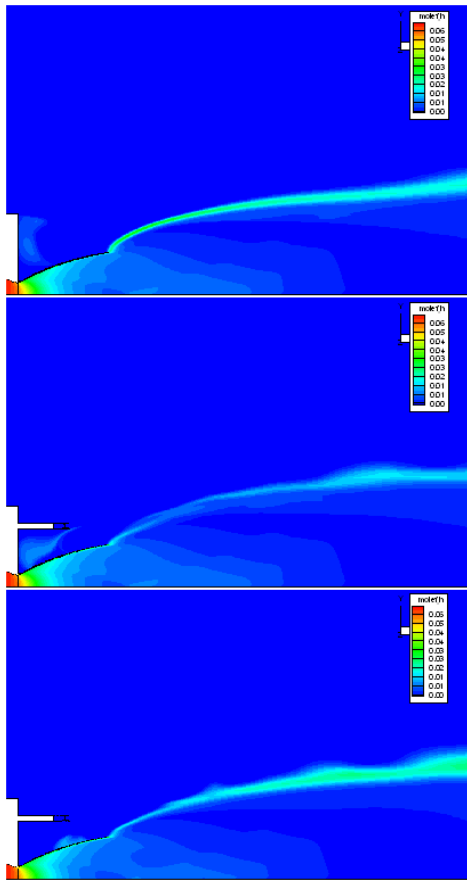


Fig. 4 OH 분분율 (상: 터빈노즐이 없는 경우, 중: 11화학종 모델, 하: 35화학종 모델)

타나고 엔진 저부에서도 약간의 농도가 나타난다. 엔진 저부의 OH 농도는 터빈 유동이 있을 경우에 더 크고 그림으로 표기하지 않았지만 H나 O의 농도도 훨씬 강하게 나타난다. 그럼에도 불구하고 엔진 플룸 경계면에서의 OH 농도에서 뚜렷한 차이를 발견할 수 없기 때문에 터빈 배기가스에 의한 재연소 증가를 확인하기 매우 힘들다. 이는 여러 가지로 해석될 수 있지만 가장 큰 것은 실제 3차원 유동을 2차원으로 가정하였기 때문에 플룸 경계면에 투입되는 터빈 배기가스의 절대적인 양이 실제보다 적기 때문인 것으로 추정된다. 3차원 유동에서는 플룸 경계면 중 일부에 터빈 배기가 접촉하고 있는 반면 2차원 가정에서는 같은 양의 터빈 배기가스가 플룸 경계면 전체에 접촉하고 있기 때문에 각 경계면에

서의 절대적인 터빈 배기가스의 양이 적기 때문이다. 따라서 저부영역에서의 OH 농도 분포는 터빈 배기가스의 재연소가 일어나고 온도 증가가 있다는 사실을 확인하는 선에 그친다.

화학 반응 모델에 따른 저부 가열의 차이는 우선 그림 5에 메탄 농도 변화에서 비교를 하였다. 11 화학종 15 반응 모델이 탄화수소 계열은 메탄 하나만 고려했지만 35화학종 모델에서는 가능한 모든 탄화수소 계열 화학종의 변화를 나타냈기 때문에 실제에 가깝다고 볼 수 있다. 그림 5 위의 11화학종 모델에서 메탄은 35화학종 모델보다 더 넓고 길게 퍼져 있다. 특이한 것은 메탄의 일부가 플룸 경계면에서 플룸과 섞이는 것이 보인다. 이는 그림 2 11화학종 모델의 마하수 그림에서 엔진 플룸의 팽창 과정 중간이 다른 경우와 달리 약간의 플룸 경계면 변화가 있는 것과 관련이 있다. 즉, 메탄 해리 반응만을 고려할 경우 모든 화학종을 고려하는 217 반응 모델에 비하여 해리가 약간 더디게 진행되어 플룸 내부로 침투하는 경향을 띠고 이는 엔진 플룸의 구조에 약간의 영향을 미친다는 것으로 해석될 수 있다. 또한 이 경우 메탄의 저부 침투가 상세 화학반응 모델에 비하여 더 크게 나타나는 그림 5의 결과를 설명해준다.

### 3.3 고도에 따른 변화 분석

일반적으로 여러 개의 엔진을 묶어서 사용하는 클러스터드 엔진은 고도가 높아질수록 엔진의 중심부에 강한 엔진 플룸의 역류가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이는 단기의 엔진에서도 동일하게 발생하지만 역류된 플룸이 외기 영역과 직접적으로 접촉되는 관계로 그 심각성은 덜하다고 볼 수 있다.

그림 6은 11화학종 모델의 외기 조건을 고도 30km 마하수 4.017로 변화시켜 구한 결과를 고도 15km 결과와 비교하였다. 마하수, 온도, OH 분분율을 비교하면 플룸 팽창을 확인할 수 있다. 고도 높아지면서 터빈 배기 유동의 배압이 낮아지는 효과가 생겨서 고도 15km에 비하여 터빈 배기 플룸의 직진성이 강해지고 엔진 플룸과 직접적으로 만난다. 팽창된 플룸은 고도 15km에서

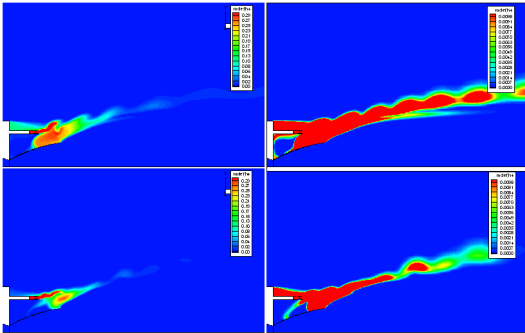


Fig. 5 메탄 물분율 분포 (상: 11화학종 모델, 하: 35 화학종 모델)

와 마찬가지로 엔진 플룸 경계면에 영향을 미치고 그 변화는 고도 15km일 때보다 강해지는 것으로 보인다.

다른 무엇보다도 고도에 따른 저부 유동의 변화가 특징적이다. 저부의 온도는 고도 15km에 비하여 낮아졌으며 OH 물분율도 저부에서 확연히 감소하였다. 이는 고도 15km에서는 터빈 배기 플룸이 외기와 곧바로 섞여서 엔진 저부로 역류하는 반면 고도 30km에서는 외기와 상대적으로 덜 혼합하여 엔진플룸 방향으로 진행하기 때문에 엔진 저부로 역류하는 터빈 배기가스의 양이 감소한 덕분으로 판단된다. 다만 이러한 경향은 실제의 클러스터드 엔진과 다른 현상으로, 클러스터드 엔진의 중심부는 어느 정도 고도 이상이면 초킹 현상으로 저부 압력이 더 이상 낮아지지 않기 때문에[1] 그림 6과 같은 현상은 나타나지 않을 수 있다. 그러므로 30km 이상의 고도에서는 실제 3차원 반응 해석을 해야 정확한 터빈 배기가스 이차 연소를 분석할 수 있을 것으로 본다.

#### 4. 결 론

상세 화학반응 모델을 이용하여 3차원 터빈 배기가스 유동을 2차원 축대칭 유동으로 가정하여 해석하였다. 상세 화학반응 모델은 GRI의 35화학종 217단계의 모델과 GRI H2-O2-CO 14 반응식에 메탄 해리 반응만을 첨가한 11화학종 15단계 모델을 적용하여 비교하였다. 메탄 화학반응

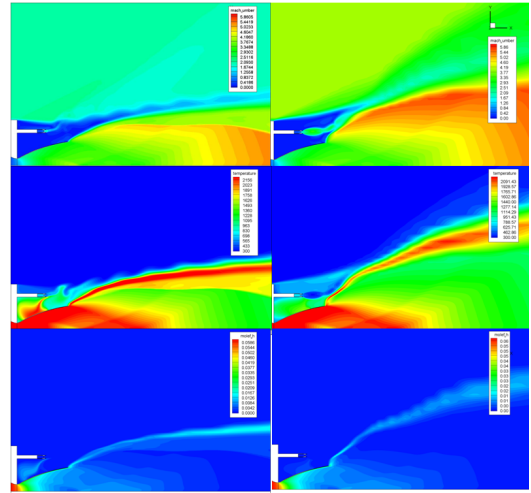


Fig. 6 고도에 따른 변화 (좌: 15km, 우: 30km, 상: 마하수, 중: 온도, 하: OH 물분율)

을 적용한 결과 저부에서 터빈 배기가스의 이차 연소가 나타남을 확인하였으며 터빈 배기 노즐이 없는 경우에 비하여 온도가 600K 정도 더 높게 나타났다. 화학 반응 모델에 따라 저부에서의 연소 영역과 화학종 분포도 약간 다르지만 저부에서의 이차 연소는 모두 포착하였다. 다만 간략화된 모델인 경우 엔진 플룸의 구조에 약간의 영향을 주는 것을 관측된다. 마지막으로 고고도 클러스터드 엔진의 이차 연소를 해석하기 위해서는 실제 3차원 해석을 할 필요성을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. Saturn Base Heating Handbook, NASA CR-61390
2. 김성룡 "한국형 발사체 터빈 노즐 위치에 따른 저부 유동 분석", DR790000PA0000, 한국항공우주연구원, 2011.
3. N.T. Musial & J.J. Ward, "Base flow characteristics for several four clustered rocket configuration at Mach No. from 2.0 to 3.5", NASA TN D-1093, 1961
4. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)
5. Fluent Verion 12.1 User's Guide