

# CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> Vitiated 공기가열기에서의 오염도 분석

나재정\* · 이정민\* · 임진식\*

## Analysis of Contaminants in a CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> Vitiated Air Heater

Jae Jeong Na\* · Jung Min Lee\* · Jin Shik Lim\*

### ABSTRACT

This study was conducted to explore the flow contamination in the CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> vitiated air heater. Non-equilibrium and equilibrium calculation were made of the flow processes in the heater and nozzle assuming the inviscid and one dimensional flow. The results were compared with the measurement data. The overall results of this study showed additional non-equilibrium calculation should be considered to assess the presence of NO, which species could yield the combustion delay or no reaction, as a contaminant.

### 초 록

CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> vitiated 공기가열기에서의 유동 오염도 분석을 위해 가열기 및 노즐 영역에 대한 평형 및 평형 유동장 계산을 수행하였다. 유동장은 일차원 비점성 유동으로 가정하였으며 계산 결과는 측정값과 비교하였다. 연구결과 연소 지연이나 중단 현상에 영향을 주는 오염원으로써 NO 성분의 존재를 파악하기 위해서는 비평형 유동장 계산이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

Key Words: Vitiated Air Heater(연소식 공기가열기), Non-equilibrium Flow(비평형 유동), Chemical Species(화학성분), Contaminants(오염원)

### 1. 서 론

스크램제트 초음속 연소시험을 위해서는 비행 조건에 상응하는 엔탈피 수준으로 공기를 가열할 필요가 있다. 이를 위한 지상시험장치로는 아크가열식 시험장치(Arc Heated Test Facility)와 수소 혹은 메탄 연료를 사용하는 연소식 공기가

열기(Vitiated Air Heater), 그리고 축열식 공기가열기(Storage Air Heater) 등이 있다. 아크가열식 시험장치는 높은 열전달율을 만들어 낼 수 있고 작동기체로 공기만을 사용하기 때문에 화학적 조성면에서 장점이 있다. 하지만 고온의 아크실에서 공기의 해리현상으로 인해 상당량의 산화질소(NOx)가 생성되는 단점이 있다. 연소식 공기가열기에서는 산소과잉(Oxygen Replenishment) 상태의 연료와 함께 공급공기를 가열시킨다. 따라서 연소식 공기가열기에서의 유동은 사

\* 국방과학연구소

† 교신저자, E-mail: naseoyung@hanafos.com

용된 연료에 따라 오염 성분을 포함하는 화학적 조성상의 단점이 있는 반면에 공급공기 유량이 큰 경우 공기가열에 따른 비용을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 연소식 공기가열기를 사용한 지상시험에서는 이와 같은 시험부 유동 오염이 존재하므로 스크램제트 초음속 연소특성 시험은 공기 혹은 실제 비행조건과 다른 결과를 포함하게 된다. 수소와 탄화수소계열 연료를 사용하는 극초음속 추진기관 지상 연소시험 과정에서는 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>는 연소과정에 영향이 그다지 크지 않은 반면에 NO 성분은 점화 및 반응시간에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 지상시험을 통해 얻어진 시험 결과가 실제 비행조건으로 해석되기 위해서는 시험부 유입유동 즉 가열기 노즐 출구유동에서의 열역학적 유동조건뿐만 아니라 오염성분을 포함한 화학성분의 농도(Chemical Species Concentrations)를 계산하여야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> 연료와 공기를 사용한 Vitiated 공기 가열기에서 유동 오염을 계산하고 이를 측정결과와 비교하였다. 연소실로 유입되는 시험부 유동특성을 알기 위해서는 먼저 가열기 및 노즐에서의 유동경로에 따른 열역학적 유동조건을 알아야 한다. 이를 위해서, 비점성 일차원 유동을 가정하여 혼합실 유입전의 가열기 및 노즐 유동장에 대한 계산을 수행하였다. 일반적으로 연소식 가열기에서 유동장은 평형상태로 가정하여 계산하므로 시험부 유동에서 NO 성분이 없는 것으로 나타난다. 하지만, 측정결과 시험부 유동에서 NO 성분이 검출되었다. 이와 같은 결과는 시험장치 유동장에서의 비평형 현상에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혼합실 유입전 유동 영역에 대하여 비평형 계산을 수행하였다.

계산 결과 혼합실 유입전 가열기 및 노즐 유동장에서의 열역학적 유동 조건과 화학성분 농도 변화를 제시할 수 있었다. 계산 결과는 혼합실 유입전 온도 및 NO 측정결과와 비교하여  $7.926 \cdot 10^{-4}$  mole percent 로 약 5 % 범위의 근사치를 얻었고 NO 뿐만아니라 OH 성분 역시  $2.474 \cdot 10^{-5}$  mole percent 존재함을 확인하였다.

## 2. 연소식 공기가열기 구성

스크램제트 연소시험장치의 연소식 공기가열기 구성은 Fig. 1과 같다. 이 시험장치 구성의 목적은 스크램제트 연소실로 유입되는 초음속 비행조건과 동일한 시험부 유동을 만들어 내는 것이다. 본 연구에서는 중/대용량의 공기를 약 600 K로 공급하는 연소식 공기가열기를 대상으로 하였다. 상세한 구성과 성능은 참고문헌 [2]에 기술되어 있으므로 본 연구에서는 유동경로 및 과정만을 설명한다.

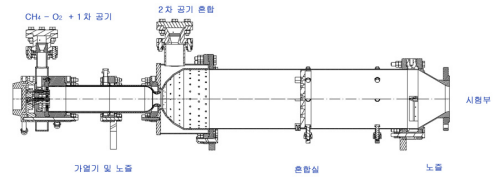


Fig. 1 연소식 공기가열기 구성

가열과정은 CH<sub>4</sub>와 O<sub>2</sub>를 연료와 산화제로 하여 연소시키고 이 연소가스와 다량의 공기를 혼합하므로 공기를 직접 가열하여 공급하는 형태이다. CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> 및 1차 공기가 가열기에서 연소되고 필요시 추가로 공급되는 2차 공기가 가열기에서 나오는 고온의 연소가스와 혼합실에서 혼합된다. 시험부에 공급되는 공기 내에 연소가스를 포함하게 되므로 축열식이나 아크가열식과 비교할 때 순수하지 못한(Vitiated) 공기가 공급되는 단점이 있다. 가열기 후류부분 레이크에서 온도, 압력, 및 산소 부피비와 NO 함유량을 측정하도록 되어있다.

## 3. 유동특성 및 화학성분 조성 계산

유동특성 및 화학성분 조성의 계산은 혼합실 유입전 가열기 및 수축확산 노즐 영역에서 일차원 정상상태 계산을 통해 구하였다. 일차원 유동 계산에서 정상상태 일차원 보존식(Steady-state Conservation Equations)은 다음과 같다.

$$\rho u A = \dot{m} \quad (1)$$

$$\rho u \frac{du}{dx} = -\frac{dp}{dx} \quad (2)$$

$$h_t + h_v + h_r + h_0 + \frac{1}{2}u^2 = constant \quad (3)$$

화학성분의 질량변화율 식은 다음과 같다.

$$\rho u \frac{d\gamma(i)}{dx} = \dot{w} \quad (4)$$

가열기 노즐에서 유속 마하 1.02인 지점까지는 유동은 평형상태인 것으로 가정하였다. 노즐 면적비(Area Ratio) 2 가 되는 지점까지의 노즐 유동은 평형과 비평형계산을 모두 수행하였다. 비평형 상태는 노즐목 하류지점 면적비 1.02인 지점부터 시작된다. 평형영역과는 달리 비평형 영역에서는 병진-회전온도 T와 진동온도 Tv는 서로 편향된다.

본 연구에서 비평형 영역은 잘 알려진 이원온도모델(Two-temperature Model)을 사용하여 계산하였다. 노즐은 축대칭 쌍곡선 형상이다.

Table 1에서 나타낸 바와 같이 CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> 연료와 공기에 대한 화학적 모델로써 16개의 화학성분(O, N, H, C, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, NO, OH, CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, HCO, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HCHO), 진동이완(Vibration Relaxation Data)[3], 그리고 22가지 화학반응[4]을 적용하였다. Table 2에서 반응계수는 다음 식과 같다.

$$k_f = AT^n \exp(-C/T) \quad (5)$$

Equation 5에서 T는 정반응 및 역반응에 해당하는 온도이다. 반응율 변수 A, n, 및 C는 Park[3]과 NASP[4]의 값을 적용하였다.

가열기 및 노즐의 평형영역의 계산에서 화학성분의 조성과 열역학적 유동특성은 유동경로에 대하여 압력(Pressure Specified Method) 혹은 면적분포를 정의(Area Specified Method)하여 계산한다. 본 계산에서는 노즐목 부근에서의 특이성(Singularity) 문제를 해결하기 위하여 압력을

정의하는 방식을 사용하였다. 노즐의 비평형 영역 계산에서는 화학성분과 진동에너지를 노즐 축 유동경로를 따라 푼다. 연소반응에 의한 화학성분의 농도와 함께, 병진-회전 온도 및 분자 단위 질량 당 진동에너지를 종속변수로 한다.

Table 1 진동이완(Vibration Relaxation) 데이터

Species	Cp/R	Vibration Mode	g	$\omega_e$
O	2.5	0	1	-
N	2.5	0	1	-
H	2.5	0	1	-
C	2.5	0	1	-
O <sub>2</sub>	3.5	1	1	1580.19
N <sub>2</sub>	3.5	1	1	2358.57
H <sub>2</sub>	3.5	1	1	4401.2
NO	3.5	1	1	1904.10
OH	3.5	1	1	3735.2
CO	3.5	1	1	2169.5
H <sub>2</sub> O	4.0	3	1	3651.1, 1594.7, 3755.9
CO <sub>2</sub>	4.0	3	1	1333.0, 667.0, 2349.0
HCO	4.0	3	1	2596.4, 1380.0, 1065.9
HO <sub>2</sub>	4.0	3	1	3268.5, 1285.0, 299.1
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4.0	6	1	3618.0, 1393.5, 877.9
				370.9, 3618.9, 1273.7
				2738.0, 1746.0, 1500.0
HCHO	4.0	6	1	2843.0, 1249.0, 1167.0

비평형계산은 노즐목 하류지점 면적비 1.02인 지점부터 적용하며 면적분포를 정의하는 방법을 사용하였다. 비평형 영역 계산에서 사용된 에너지 식은 다음과 같다.

$$H = \sum_i \left( \frac{C_p}{R} \right)_i \times 8.31434 T \cdot \gamma(i) + \sum_i \frac{8.31434 \times 1.4388 \omega_e}{\exp \left[ \frac{1.4388 \omega_e}{T_v} - 1 \right]} \cdot \gamma(i) \left[ \frac{J}{kg} \right] \quad (6)$$

Equation 6에서  $\gamma(i)$ 는 화학성분 농도 [mol/kg] 이며, Eq. 6의 오른쪽 첫째 항은 병진 및 회전 에너지를 포함하고 둘째 항은 진동 에너지를 나타낸다.

가열기 및 노즐에서 유동경로에 따른 열역학적 계산 결과는 Fig. 2와 같다. 비평형 계산결과 노즐 출구에서의 압력은 1.73 atm, 마하수는 2.0, 병진-회전온도는 1053.5 K, 진동 온도는 1066.3 K, 그리고 밀도는 0.571 kg/m<sup>3</sup> 으로 나타났다. 계산 결과는 실제 온도 및 압력 측정결과와 평

형 계산 결과를 비교하였다. 평형 계산은 널리 알려진 NASA의 CEA2 Code를 사용하였다. 비평형 계산에서 화학성분 조성에 대한 결과는 가열기 및 노즐 유동경로에 대하여 화학성분 농도 (Species Concentration)로써 Fig. 3 으로 나타내었다. 계산결과는 실제 NO 측정 결과와 비교하였다.

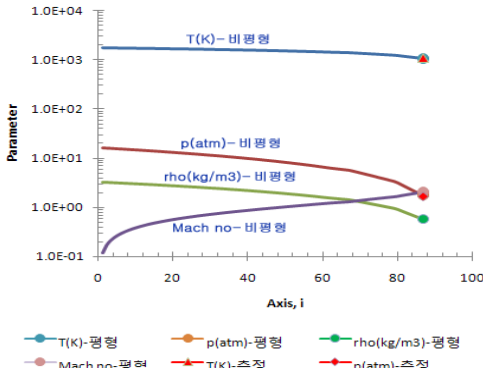


Fig. 2 열역학적 계산결과

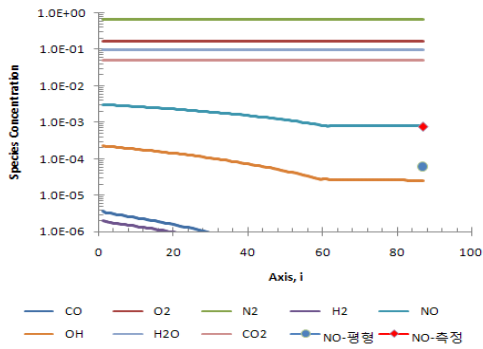


Fig. 3 화학성분조성 계산 결과

Figure 3에서 알 수 있는 바와 같이 화학성분 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, 및 CO<sub>2</sub>의 경우 비평형 및 평형 유동 계산에서 동일한 결과를 얻을 수 있었다. NO의 경우 평형 유동 계산에서는 노즐 출구 조건에서 거의 존재하지 않는 것으로 계산 되었으나 동일 유동영역의 비평형 계산에서는  $7.926 \cdot 10^{-4}$  mole percent 존재하는 것으로 나타나 실제 측정값인  $7.506 \cdot 10^{-4}$  mole percent 에 근접한 결과를 보였다. OH 역시 비평형 유동 계

산에서  $2.474 \cdot 10^{-5}$  mole percent 존재하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> Vitiated 공기가열식 시험장치에서의 유동 오염도 분석을 위해 가열기 및 노즐 영역에 대한 비평형 유동장 계산을 수행하였다. 계산 결과 가열기 노즐 출구조건에서 열역학적 유동 변수는 평형계산결과와 일치하였으며 온도 및 압력 측정 결과와 비교하여 10% 이하의 오차를 보였다. 화학성분 조성은 O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>O, 및 CO<sub>2</sub>의 경우 비평형 및 평형 유동 계산에서 동일한 결과를 보였으나 NO의 경우 평형 계산과는 달리 비평형 계산결과는 측정값과 5% 이내로 나타났다. 이와 같은 계산 및 측정 결과로부터 실제 연소식 공기가열기를 사용한 지상시험 장치에서 일반적으로 알려진 바와는 달리 일부 비평형 유동 영역이 존재하며 이로 인한 NO 성분의 영향을 고려하여야 함을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- Lai H. T., and Thomas S. R., "Numerical Study of Contaminant Effects on Combustion of Hydrogen, Ethane and Methane in Air", AIAA paper 95-6097, 1995
- 이정민, 강경택, 이규준, 임진식, "연소식 공기가열기 개발과 성능평가", 2010년 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 2010
- Park C., "Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics", John Wiley & Son, New York, 1990
- Oldenberg R., et al., "Reaction Rate(Baulch) NASP", Status Report of the Rate Constant Committee, NASAP High Speed Propulsion Technology Team, 1989