

# CEA를 이용한 다단연소사이클 및 가스발생기 사이클 LRE 배출가스 성분 분석

문인상\*† · 문일윤\* · 이수용\*

## A Study on the Exhaust Gas Created by Staged Combustion and Gas Generator Cycle LRE by Using CEA

Moon, Insang\*† · Moon, Ilyoon\* · Lee, SooYong\*

### ABSTRACT

Recently environmental issue is more and more emphasized and 'Green Growth' became on of the key words of this Government. Based on this trend, the exhaust gases out of the gas generator cycle and the staged combustion cycle LRE whose propellants are kerosene and LOx were compared. For this purpose, 8 tonf class of each cycle engine was designed and the amount and the components of the gases were investigated by using CEA. As expected, the staged combustion cycle engine generates less pollutants than the other cycle. In addition, the graphite that is generated by the gas generator can be reacted with the oxygen in the atmosphere creating additional pollutants.

### 초 록

최근 환경문제가 대두되고 정부에서 장려하는 녹색성장에 입각하여 비교적 저공해 발사체로 인정 받고 있는 케로신-액체산소를 추진제로 하는 가스발생기 사이클 엔진과 다단연소사이클 엔진의 배출 가스 양과 성분을 비교예측 하여보았다. 이를 위해 8톤급의 가스발생기 사이클 엔진과 다단연소사이클 엔진의 규격을 결정한뒤 배출되는 가스의 성분과 양을 CEA를 통해 분석하여 보았다. 결과적으로 전반적으로 효율이 높은 다단연소사이클 엔진에서 모든 부분에서 발생가스의 양이 적었다. 가스발생기 사이클 엔진에서 압도적으로 많이 발생하는 그래파이트 성분은 대기의 산소와 반응하여 2차 연소를 통해 부가적 오염물질을 유발할 가능성을 확인하였다.

Key Words: Staged Combustion Cycle (다단 연소사이클), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Green Growth (녹색성장), Pollutant (공해물질)

### 1. 서 론

\* 한국항공우주연구원 미래로켓추진팀

† 교신저자, E-mail: insang@kari.re.kr

독성 추진제를 사용하는 발사체와는 달리 케로

신-액체산소 발사체는 비교적 친환경적 발사체이지만 케로신은 분자구조가  $C_{12}H_{23}$ 인 고단위 탄소화합물이기 때문에 이를 연소시켜 추력을 얻게 되면 이 과정에서 많은 종류의 탄소화합물이 발생하게 된다. 이 중 탄소화합물이 연소할 때 산소가 부족하거나 온도가 낮아 완전연소가 일어나지 못하는 경우에 많이 발생하는 일산화탄소는 인체에 매우 유독한 독성물질이다. 흡입을 하였을 경우 혈액 속의 헤모글로빈과 결합하여 혈액의 산소운반기능을 상실하게 하는데 일산화탄소와 헤모글로빈의 결합력은 산소와 헤모글로빈의 결합력의 약 250 배[1][2]로 매우 강하기 때문에 극소량만으로도 인체에 무산소증을 유발하게 된다. 따라서 일산화탄소는 독성이 매우 강한 기체에 속하며 국내 대기 중 일산화탄소 허용기준은 1시간 평균 25ppm 이하, 8시간 평균 9 ppm 이하이다. 아직까지 발사체와 관련하여서는 특별한 규정이 없으나 가스발생기방식의 액체로켓엔진에 사용되는 가스발생기는 낮은 온도에서 연료과잉 연소를 하게 되므로 일산화탄소가 생성되기에 매우 적합한 환경을 가지고 있다.

반면에 다단연소사이클 엔진에 사용되는 예연소기는 산화제 과잉연소를 하기 때문에 거의 대부분의 모든 탄소가 이산화탄소를 형성하는데 사용된다. 따라서 가스발생기 보다는 적은 양의 일산화탄소를 배출하게 된다. 이 밖에 다른 연소화합물의 정량적인 비교 검토를 위하여 8톤급의 엔진을 설계하여 각각의 연소가스 성분과 양을 비교하여 보았다.

## 2. 본 론

### 2.1 8톤급 액체로켓엔진

가스발생기 사이클 엔진과 다단연소사이클 엔진의 추진제 소모량을 표 1과 2에 나타내었으며 연소실내 연소모델은 CEA[3]를 사용하였다.

Table 1. Mass flow rate of the GG cycle engine and the specific impulse

	가스발생기	연소기	엔진
유량 [kg/sec]	1.067	24.36	25.43
O/F	0.39	2.48	-
비추력 [sec]	-	328.2	314.7

Table 2. Mass flow rate of the staged combustion cycle engine and the specific impulse

	예연소기	연소기	엔진
유량 [kg/sec]	16.98	23.44	23.44
O/F	60	2.48	2.48
비추력 [sec]	-	341.35	341.35

### 2.2. O/F ratio와 배출가스

연소압 80 bar 일 경우 CO와 CO<sub>2</sub>의 발생량은 다음과 같다.

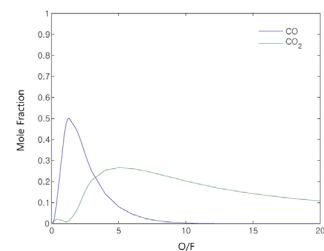


Fig. 1 Creation ratio of CO and CO<sub>2</sub> for kerosene-LOx Combustion

윗 그림에서 O/F ratio 가 10 이상에서는 CO가 거의 발생되지 않고 탄소는 모두 CO<sub>2</sub>를 생성하는데 사용되는 것을 알 수 있다. 따라서 산화제 과잉 연소를 하는 예연소기에서는 CO가 거의 발생되지 않을 것으로 예측된다.

가스발생기는 일반적으로 O/F ratio 가 0.4 이하인 경우에서 연소가 이루어지는 연료과잉 연

소를 하게 된다. 이러한 O/F ratio에서는 산소량에 비하여 연료가 매우 많기 때문에 기체 연소 화합물 뿐 아니라 그래파이트 탄소가 생성된다. 대표적인 배출 가스 생성 비는 그림 2에 나타내었다.

반면에 산화제 과잉 연소를 하게 되면 케로신에 함유된 대부분의 원소들이 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 바뀌게 된다. 그림 3은 산화제 과잉 구간에서 발생하는 연소화합물로서 O<sub>2</sub>는 포함하지 않았다.

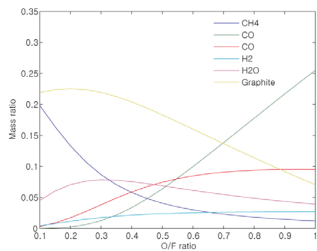


Fig. 2 Fuel rich combustion product

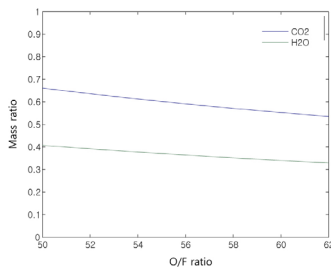


Fig. 3 Oxygen rich combustion product

### 2.3. 가스발생기 사이클 엔진과 다단연소 사이클 엔진 배출 연소화합물 비교

가스발생기와 예연소기 자체의 연소를 비교하면 그림 4와 같이 연소화합물이 생성되며 2.1에서 언급한 바와 같이 예연소기는 거의 공해물질을 발생시키지 않는 것을 알 수 있다. 참고로 예연소기 연소가스의 대부분을 차지하고 있는 산소가스는 그 양이 상대적으로 매우 많고 인체에 무해하므로 그래프에서 제외하였다.

실제로 발사체가 비행할 때에는 가스발생

기나 예연소기의 연소보다는 엔진시스템의 연소가 더 중요하다. 비행 중 엔진에서 배출되는 가스의 분포는 그림 5에, 그리고 두 엔진의 차이는 그림 6에 나타내었다. 그림 6으로부터 가스발생기 사이클 엔진은 동급의 다단연소사이클 엔진에 비해 더 많은 생성물을 만들어내며 특히 약 0.46 kg/sec의 일산화탄소와 0.24 kg/sec의 탄소 그래파이트를 더 많이 배출하는 것을 알 수 있다. 이는 가스발생기 사이클 엔진은 가스발생기가 주연소기와는 별도로 추진지를 소모하기 때문으로 파악된다.

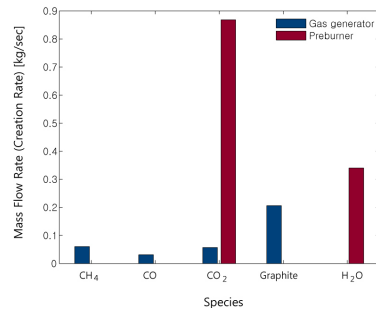


Fig. 4 Comparison of the exhaust gas from the gas generator and the preburner

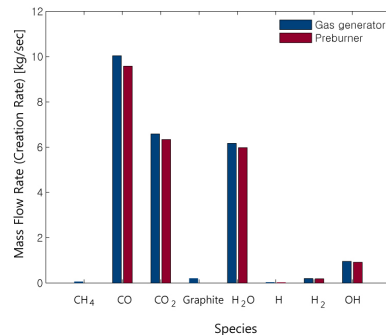


Fig. 5 Comparison of the exhaust gas from the gg cycle engine and staged combustion cycle engine

또 하나 주목할 만한 것으로 연소기체 사용되는 추진제는 케로신과 액체산소에는 질소가 섞여 있지 않기 때문에 최근 이슈가 되고 있는 NOx를 직접 발생시키지 않는다.

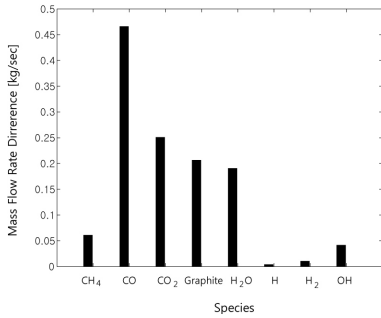


Fig. 6 Difference of the exhaust gases ('+' means that more amount of the exhaust gases from the gg cycle)

직접 발생시키지 않는다.

그러나 로켓의 엔진에서 배출되는 가스는 그 온도가 매우 높아 배출되는 가스가 주변의 공기와 반응하여 NO<sub>x</sub>를 생성할 가능성이 있다. 또한 가스발생기에서 배출되는 가스는 온도가 연소기에서 배출되는 가스에 비해 매우 낮다고는 하나 주위의 온도에 비해 비교적 높고 다량의 탄소를 포함하고 있기 때문에 비행 중, 대기의 산소와 반응하여 추가 연소화합물을 발생할 여지가 많다. 가스발생기를 통해 배출되는 가스는 터빈을 지난 뒤 식(1)과 같이 온도가 하강하게 된다.

$$T_2 = T_1 \left[ 1 - \eta_T \left( 1 - \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1)$$

여기서  $T_2$ 는 배출온도,  $T_1$ 은 터빈입구온도,  $\eta_T$ 는 터빈효율,  $\frac{p_1}{p_2}$ 는 터빈압력비 그리고  $k$  비열비이다.

배출되는 연소 생성물 중 모든 탄소가 공기 중의 산소와 반응한다고 가정하고 식(1)에서의 변수를 다음과 같이 가정하면 엔진의 배기가스로 인한 2차 연소화합물을 다음과 같다.

$$\eta = 0.57, k=1.13, T_1=1300k, T_2=564k \quad (2)$$

Table 3. Additional combustion product

species	mole fraction	mas fraction	mass created [kg/sec]
Ar	0.00925	0.37	0.030626
CO	0.02329	0.65212	0.053977
CO <sub>2</sub>	0.18401	8.09644	0.670158
NO	0.00341	0.1023	0.008468
N <sub>2</sub>	0.76984	21.55552	1.784193
O	0.00052	0.00832	0.000689
O <sub>2</sub>	0.00968	0.30976	0.025639

### 3. 결 론

다단연소사이클 엔진과 가스발생기 사이클 엔진에서 배출되는 연소가스의 성분과 양을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 그 결과 연소효율이 높은 다단연소사이클 엔진의 공해물질 배출이 현저히 적음을 알 수 있었다.
- 2) 특히 인체에 치명적인 일산화탄소는 약 0.46 kg/sec 정도 가스발생기 사이클 엔진에서 더 많이 생성되었다.
- 3) 엔진 자체에서는 NO<sub>x</sub>가 생성이 되지 않지만 배기가스의 높은 온도로 인하여 대기와의 반응을 통해 NO<sub>x</sub>가 생길 가능성이 있다. 특히 가스발생기에서 발생하는 탄소가 모두 연소된다고 가정하면 8.47 g/sec 정도의 NO가 발생된다.

### 참 고 문 헌

1. <http://100.naver.com/100.nhnn?docid=130133>
2. <http://en.wikipedia.org>
3. S. Gordon and B. J. McBride, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications, NASA Reference Publication 1311, 1994.