

산화제 과잉 예연소기를 위한 TEAL 점화연구

문인상* · 문일윤* · 유재한* · 이선미* · 이수용*

Study of the Ignition with TEAL for an Oxygen Rich Preburner

Moon, Insang* · Moon, Ilyoon* · You, JaeHan* · Lee, SunMee* · Lee, Soo Yong*

ABSTRACT

It is critical to set up the starting sequence of liquid rocket engines because not carefully arranged process can lead the engine damages. Thus, many efforts were made to prevent the hard start at the ignition. Hypergolic fuels are frequently used to ignite LRE and TEAL, one of the hypergolic fuel is also used for kerosene-LOx LRE ignition. However, since we are still lack of experiences igniting oxygen rich preburners of the staged combustion cycle engines, it would be helpful to estimate the TEAL ignition phenomena before the actual tests.

초 록

액체로켓엔진의 점화는 그 시퀀스가 대단히 중요하며 시퀀스에 따라 엔진에 손상이 갈 수도 있다. 따라서 시동 시 hard start가 일어나지 않도록 많은 연구가 이루어지고 있다. 액체로켓의 점화 방법은 점화성 연료를 많이 사용하며 그 중 TEAL 역시 대기 중의 산소와 접촉하면 발화되는 자연발화 물질이다. TEAL을 사용하는 점화방법은 케로신-액체산소 엔진의 주요한 점화방식 중의 하나이나 아직까지 국내에서는 다단연소사이클 산화제 과잉 예연소기에 TEAL을 사용하여 점화 시험을 실시한 경험이 거의 없기 때문에 본격적인 시험에 앞서 이를 예측해 보고자 한다.

Key Words: Staged Combustion Cycle(다단 연소사이클), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Preburner(예연소기), TEAL, Start(시동)

1. 서 론

TEAL은 Triethylaluminum의 약자로 TEA라고도 불린다. 화학식은 $C_6H_{15}Al$ 이며 알루미늄

원자를 중심으로 3개의 에틸기가 붙어있는 형태이다. 분자량은 114.1648이며 화학구조는 다음 그림 1과 같다.

TEAL은 공기 중에 노출되면 산소와 반응하는 자연발화 물질로서 이와 같은 성질로 인하여 액체로켓엔진의 주연소기 뿐만 아니라 가스발생기 혹은 예연소기의 점화연료로 많이 사용되고 있

* 한국항공우주연구원 발사체미래기술팀
교신저자, E-mail: insang@kari.re.kr

다. 한국항공우주연구원에서도 KSR-III 이후 개발하고 있는 75톤 엔진의 축소모델 그리고 75톤 엔진 연소기의 점화 용도로도 사용하고 있다.

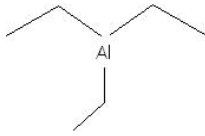


Fig. 1 Chemical structure of TEAL

그러나 지금까지 다단연소사이클에 대한 개발 경험이 없기 때문에 산화제 과잉 연소를 하는 예연소기에 TEAL을 적용하여 점화를 시킬 경우에 대한 예측을 위한 자료가 전무한 형편이다.

점화 순간이 액체로켓엔진의 운용 중에 가장 위험한 순간이라고 해도 과언이 아닐 만큼 엔진의 점화에는 많은 위험이 따르며 이에 따라 점화 시퀀스를 결정하기 위해 대단히 많은 노력을 기울이게 된다. 점화시퀀스가 잘못된다면 연소기의 점화가 이루어지지 않거나 폭발이 일어나 엔진이 손상을 입게 된다. 이렇게 점화 시 엔진 내부에서 폭발이 일어나는 것을 hard start라고 하며 정도의 차이에 따라 단순 엔진 손상을 넘어서 위험한 순간이 도래할 수도 있다.

더구나 TEAL을 적용하여 점화시키고자 하는 예연소기는 그림 2와 같이 점화용 분사기가 따로 장착되어 있지 않고 모든 연료 분사기에서 TEAL을 분사하는 방식이기 때문에 hard start가 일어날 가능성이 매우 커진다. 또한 산화제가 혼합헤드의 분사기뿐만 아니라 중앙의 분사공으로부터도 유입되므로 액체산소를 어디에서 얼마나 유입시킬 것인가를 결정하여야 한다. 그림 2에서 알 수 있듯이 연소실을 냉각시키기 위한 액체산소는 모두 중앙분사공을 통해서 나오게 되며 혼합헤드로부터 유입되는 액체산소는 연소실 벽의 냉각에 큰 역할을 하지 않는다. 그러므로 예연소기의 점화시퀀스를 잡기 위해서는 연소뿐 아니라 연소실 벽의 냉각까지 고려하여야 한다.

점화 시점에서 중앙의 분사공을 통해 유입되는 산소가 많다면 연소실의 냉각에는 유리하겠지만 점화전에 지나치게 많은 산화제가 존재하

면 기화할 때의 팽창으로 인하여 폭발의 위험이 존재한다. 또한 유입되는 TEAL이 많은 산화제로 인하여 예혼합 연소와 유사한 반응을 하게 되어 deflagration이 아닌 detonation 쪽으로 반응을 하게 되는 것 역시 주의하여야 한다.

이 연구에서는 점화 시 예연소기 내에 잔류하는 산화제의 양과 온도, 내부압력과 관계를 예측하여보았다.

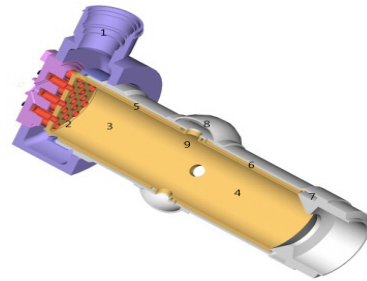


Fig. 2 Preburner 3D cad model. 1. LOx inlet, 2. head, 3. first combustion zone, 4. second combustion zone, 5. forward cooling channel, 6. reverse cooling channel, 7. reverse cooling channel manifold, 8. manifold, 9. LOx injection hole [1]

2. 본 론

2.1 예연소기 형상과 추진제 유로

현재 개발 중인 예연소기는 그림 3과 같이 헤드와 연소실이 분리되어있는 분리형 예연소기이다. 연소실에는 냉각채널이 장착되어있고 액체산소는 이 냉각채널을 따라 흐르면서 연소실 벽을 냉각시키고 중앙의 분사공을 통해 연소실 내부

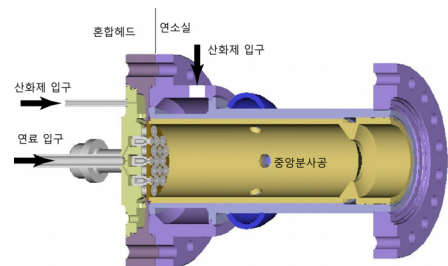
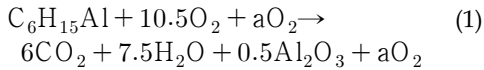


Fig. 3 Head-chamber separable preburner

로 들어가는 구조이다. 따라서 헤드와 냉각채널의 유량을 밸브만의 동작으로 독립적으로 조절할 수가 있다. 향후 일체형 예연소기에서는 헤드의 내부부피의 변화 등을 통하여 filling time을 조절하여 내부로 분사되는 추진제의 시퀀스를 조절할 수 있다.

2.2 점화 시 연소반응

TEAL과 산소의 간단한 반응식은 식(1)과 같다. 이 때 모델의 단순화를 위하여 C, CO, O, H, H₂ 등과 이온은 포함하지 않았으며 단순한 1차원 반응만을 고려하였다.



여기서 a는 TEAL과 반응 후 잉여 산소의 몰수이며 시동시퀀스를 조절하여 조절이 가능하다. 그리고 예연소기의 구조상 stoichiometric mixture ratio보다 낮은 혼합비에서는 연소가 일어나지 않을 것으로 예상하여 이때의 반응은 고려하지 않았다.

또한 열손실을 고려하지 않으면, 반응전과 반응후의 엔탈피 변화에 의해 온도의 변화가 발생하므로 반응 후의 온도를 예측하여 엔탈피를 구하고 계산된 엔탈피를 사용하여 다시 온도를 결정하는 반복된 계산을 통하여 반응 후의 온도를 계산할 수 있다. 반응전과 반응후의 총엔탈피는 각각 식(2)와 (3)과같이 구할 수 있다.

$$H' = H_{TEAL}^{298} + H_{O_2}^{93} \quad (2)$$

$$H'' = H_{CO_2}^T + H_{H_2O}^T + H_{Al_2O_3}^T + H_{O_2}^T \quad (3)$$

여기서 H'는 reactant들의 총 엔탈피이며 H''는 product들의 총 엔탈피이다. 각각의 엔탈피는 식 단위 질량당 엔탈피와 질량의 곱이므로 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$H_i = m_i h_i \quad (4)$$

여기서 m_i 는 i 번째 분자의 질량을 h_i 는 i 번째 분자의 질량당 엔탈피이다. 또한 단위 질량당 엔탈피는 생성엔탈피와 생성온도와 목적하는 온도에서의 엔탈피 차이과의 합이므로 식 (5)과 같이 된다.

$$h_i = \Delta_f h^o + h^T - h^o \quad (5)$$

여기서 $\Delta_f h^o$ 는 생성엔탈피이다.

식 (1)에 사용된 분자들의 특성값 중 TEAL과 Al₂O₃의 특성값은 표 1과 2에 나타내었다. 나머지 분자들의 특성은 [2]를 참고하였다.

Table 1 Properties of TEAL [2]

항목	값
$\Delta_f h^o$	$-187.3 \pm 5.1 \text{ kJ/mol}$
C_p	239.0 J/molK
분자량	114.1648

Table 2 Properties of Al₂O₃ [3]

항목	값
$\Delta_f h^o$	-1675.7 kJ/mol
C_p	600.0 J/kgK
분자량	101.96

엔탈피가 결정되면 식 (6)과 (7)을 통해 온도를 구할 수 있다.

$$T = \bar{c}_p (H' - H'') \quad (6)$$

$$\bar{c}_p = \sum_{i=1}^N c_{p,i} Y_i \quad (7)$$

여기서 \bar{c}_p 는 평균 비열, $c_{p,i}$ 는 분자 i 의 비열 그리고 Y_i 는 분자 i 의 질량비이다.

식 (1)에서 (7) 그리고 각 분자들의 물성치를 사용해서 연소실 내부에 존재하는 식(1)을 따라 반응한다고 가정하여 연소실 내부에 존재하는 산소와 연소실 온도와의 관계를 그려보면 그림 4와 같다.

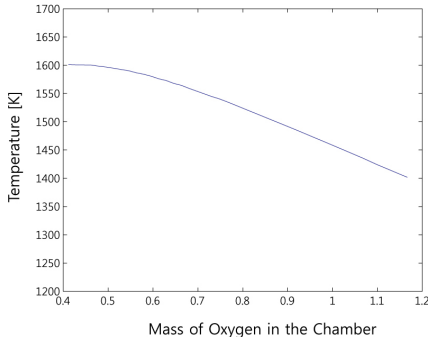


Fig. 4 Estimated temperatures inside the chamber depending on the mass of the O₂

연소실 내부에서 TEAL과 산소가 반응을 하게 되면 이때 발생하는 열로 인하여 산소가 급격히 팽창하게 되어 압력이 상승하게 된다. 이때 산소 양과 압력과의 관계는 그림 5와 같다.

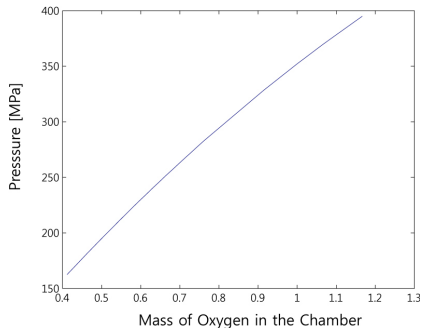


Fig. 5 Estimated pressure inside the chamber depending on the mass of the O₂

그림 5는 연소실 내부에서 모든 산소가 동시에 팽창되며 팽창되는 동안 연소실 출구를 통해 밖으로 유입되는 현상이 배제되어있기 때문에 실제 현상에 비해 매우 과장된 압력을 나타내고 있다. 그러나 온도의 상승에 따라 밀도의 변화가 1000배 이상이므로 순간적으로 압력이 급격히

상승할 수 있다는 것을 예측하는 것은 어렵지 않다. 만일 점화 시 예연소기 내부에 액체산소가 가득 차있다면 산소의 무게는 약 1.2 kg이 되므로 연소실이 단힌계라 가정할 때에 내부압력이 약 350 MPa까지 상승하게 된다. 이는 팽창되는 동안 밖으로 유출되는 산소를 감안하더라도 설계값보다 매우 높은 압력이 되리라는 것을 예측할 수 있다.

3. 결론 및 향후 계획

TEAL을 사용하여 예연소기를 점화할 경우 점화시의 내부온도와 압력에 대해서 예측해 보았다. 내부온도는 액체산소의 양에 대략 1600 K 이하의 분포를 보였으며 압력은 150 MPa 이상의 극단적으로 높은 값을 나타내었다. 압력이 이와 같이 비정상적으로 높은 값을 갖게 된 이유로는 산소의 팽창이 동시에 이루어졌으며 팽창되는 동안 밖으로 유출되는 산소 혹은 연소가스를 배제하였기 때문이라고 생각된다. 따라서 보다 정확한 압력값의 예측을 위해서는 시간에 따른 열팽창과 출구를 통해 유출되는 연소가의 양을 먼저 예측한 뒤에 내부압력을 구해야 할 것이다.

그럼에도 불구하고 압력과 산소의 양과의 관계를 살펴보면 그림 5와 같이 산소의 양이 증가할수록 압력 역시 꾸준히 증가함을 알 수 있다. 또한 산소의 양에 따른 온도의 차이는 약 200 K 이내이므로 산소의 양으로 조절되는 온도의 차이는 매우 미미하다고 할 수 있겠다. 따라서 시동시퀀스는 가급적 연소실에 산소가 적게 잔류할 수 있도록 결정할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 문인상, 신강창, '소형 액체로켓엔진용 예연소기 냉각채널 유동해석', 한국추진공학회 2010년 춘계학술대회 논문집, 2010.
2. <http://www.NIST.com>
3. <http://makeitfrom.com/data/?material=Alumina&type=Thermal>