친환경 추진제를 사용하는 액체로켓엔진의 막냉각링 설계 및 열해석

김정훈* · 이재원* · 이양석** · 고영성** · 김 유*** · 김선진****

Design of Film-cooling Ring of The Engine Using Green Propellant And Thermal Analysis

Junghoon Kim* · Jaewon Lee* · Yangsuk Lee** · Youngsung Ko** · Yoo Kim*** · Sunjin Kim****

ABSTRACT

The purpose of this study is to design of film-cooling ring for the small thrust rocket engine using green propellants(Hydrogen peroxide and kerosene). Cold flow test was carried out to measure the mass flow rate and atomizing characteristic. Required mass flow rate was obtained from thermal analysis of the engine, and measured flow rate 42.25g/s was in the range of permissible coolant flow rate. With the same mass flow rate, cooling ring with more hole and high velocity shows better spray pattern. The result of thermal analysis, cooling ring has enough cooling performance.

초 록

본 연구는 친환경 추진제인 과산화수소(H_2O_2)와 케로신을 추진제로 하는 액체 로켓 엔진에서의 막냉각 장치 개발을 목적으로 이를 위하여 막냉각링을 설계/제작하고, 수류 시험을 통해 분무 특성과 공급 유량을 확인하였다. 또한 설계/제작된 막냉각링의 성능 예측을 위하여 열해석을 수행하였다. 수류 실험 결과 설계 유량(42.25g/s)이 공급됨을 확인하였고, 상대적으로 유속이 빠르고 홀 개수가 많은 막냉각링이 더 좋은 분무패턴을 보임을 확인하였다. 또한 열해석 결과 설계된 막냉각링이 충분한 냉각 성능을 가짐을 확인하였다.

Key Words: Hydrogen Peroxide(과산화수소,H_2O_2), Film-cooling(막냉각), Cold Flow Test(수류시험), Swirl Angle(선회각), Thermal analysis(열해석)

1. 서 론

액체 로켓 엔진 설계에 있어서 가장 중요한 인자 중 하나는 냉각장치의 설계라 해도 과언이 아니다. 다른 열기관과 비교하였을 때 일반적인

* (주) 한화 대전공장 개발부
** 충남대학교 항공우주공학과
*** 충남대학교 기계공학과
**** 청양대학교 소방안전학과
연락저자, E-mail: kjh75@hanwha.co.kr

대형 액체 로켓 엔진의 연소실은 대체로 고온/고압의 극한 조건에서 작동하며 열전달 과정도 매우 복잡하다. 또한 연소 생성물이 연소실내에서 매우 빠른 속도로 움직이기 때문에, 고온의 연소 생성물로부터 엔진의 벽에 전달되는 대류 열전달량은 매우 높다[1-3].

따라서 고온 연소 가스에 의한 높은 열유속으로부터 연소실을 보호하기 위해서 액체 로켓 엔진의 운용 목적과 조건에 맞는 적절한 냉각이 절대적으로 필요하다. 일반적으로 액체 로켓의 냉각은 사용된 추진제의 종류, 추진 기관의 용도 및 추진 기관의 구조에 따라서 다르다. 보통 추진제를 연소실 내부로 공급하기 전에 노즐 및 연소실 외벽을 하나 또는 두 가지 추진제를 이용하여 냉각하는 재생냉각 방식을 채택한다. 그러나 대부분의 재생냉각의 액체 로켓 엔진의 경우 외벽을 통과하는 추진제만을 이용하여 고온의 연소 가스에 의한 높은 열용량을 흡수하기에는 냉각제의 양이 충분하지 않거나 추진제 자체가 불안정하여 냉각제로 사용하기에 매우 큰 제약이 따르게 마련이다. 이에 추가적인 냉각 방법으로 연소실 내부 막냉각(internal film cooling) 방법이 있다. 이는 연소실 내부의 벽면에 인위적으로 냉각제를 공급하여 연소실 벽면에 막을 형성하여 냉각시키는 방법으로 냉각제로는 추진제 중 하나를 사용하거나 별도의 유체를 사용하여 공급하는 것이 일반적이다.

최근 친환경성/무독성 및 취급이 용이한 추진제에 대한 관심이 대두되는 상황에서 과산화수소/케로신 액체 로켓 엔진의 경우 두 추진제 모두 냉각제로 사용이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 국내에서는 아직 과산화수소/케로신 액체 로켓 엔진에 대한 연구가 미흡한 상태이며 또한 막냉각에 대한 연구는 전무한 상태라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 과산화수소/케로신 액체 로켓 엔진의 막냉각링 개발에 앞서 막냉각링을 설계/제작하고 수류 시험을 통해 분무 특성과 공급 유량을 파악하였다. 또한 설계/제작된 막냉각링의 성능 예측을 위하여 연소시험에 앞서 열해석을 수행하였다.

2. 막냉각링 설계 및 실험 장치

2.1 설계 변수

막냉각링의 성능을 결정하고 설계시 중요한 변수로는 크게 냉각제의 종류, 냉각제의 공급유량, 냉각제의 공급 유속, 냉각 채널의 개수 및 냉각 채널의 각도 등으로 나누어진다.

본 실험에서는 추진제로는 친환경 추진제인 고농도 과산화수소를 산화제로 케로신을 연료로 사용하고 막냉각용 냉각제로는 과산화수소를 사용하였다. 냉각제의 공급 유량은 총 추진제의 10 ~ 20%로 결정하였으며, 오리피스를 이용한 유량 제어가 가능하도록 설계하였다.

또한 냉각제의 공급 유속은 0.2m/s와 16.5m/s로 공급할 수 있도록 설계하였다.

막냉각 공급 유로의 개수는 냉각제의 총 유량과 공급 유로의 총면적을 고정시킨후 냉각 채널의 개수만 15개와 30개로 설계하여 공급 유로의 분포도에 따른 실험이 가능하도록 설계하였다. 마지막으로 막냉각 공급 유로의 선회각의 변화에 따라 막냉각이 가능하도록 설계하였다.

2.2 기본설계

막냉각링에 공급되는 냉각제의 공급 유량은 전체 유량의 10 ~ 20%로 선정하였다. 추진제의 유량은 산화제가 149g/s 이며 연료는 20g/s 이다. 공급 유로의 개수는 15개와 30개 두 가지로 설계하였다. 공급 유량과 공급 유로의 개수에 따라 공급 유로의 면적은 식 (1)에서 유도된다.

$$A = \frac{\dot{m}_c}{nC_d\sqrt{2\rho\Delta P}} \qquad (1)$$

막냉각제는 연소실 내벽에 '번아웃(burnout)'이 생기지 않도록 연소실 내부에 고르게 분사시켜야 한다.[4] 이를 위해서 본 연구에서는 공급 유로를 등간격으로 배치하였으며 선회각을 주어 분사되도록 하였다. 선회각은 연소실 축방향과 18˚, 36˚, 54˚를 이루어 분사되도록 설계하였다.

막냉각링 설계 포인트는 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1. Design condition of film cooling ring

	유속	선회각	유로개수	총면적
Type 1	0.2m/s	18°	30개	150mm^2
Type 2	16.5m/s	18°	30개	1.78mm^2
Type 3	16.5m/s	18°	15개	1.78mm^2
Type 4	16.5m/s	36°	15개	1.78mm^2
Type 5	16.5m/s	54°	15개	1.78mm^2

Fig. 1. Film cooling ring

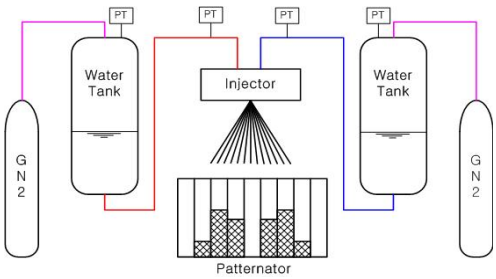

Fig. 2. Schematic diagram of cold flow test

3. 수류시험 및 결과

3.1 수류시험 장치

본 연구에서 설계/제작된 막냉각링의 분무 형태와 유량을 파악하기 위하여 수류시험을 수행하였다. 수류시험 장치는 Fig. 2와 같이 모의 추진제 공급장치, 실험대(test section)로 구성되어 있다. 모의 추진제로는 취급이 용이한 탈이온수(dionized water)를 사용하였고, 추진제를 냉각링으로 공급하기 위해 고압의 가스 질소를 추진제 탱크에 직접 공급하여 탱크를 가압하는 가압방식을 사용하였다. 추진제 탱크 및 냉각링 내부에서의 압력 데이터는 전기식 압력 센서를 이용하여 측정하였고, 데이터 수집과 개인용 컴퓨터를 이용하여 데이터를 처리하였다.

3.2 수류시험 결과

Fig. 3은 공급탱크 가압압력이 약 4bar에서 설계 유량($42.25g/s$)이 공급될 때 막냉각링의 분무 상태를 보여준다. type 1의 경우 막냉각링 유입 전단에 오리피스(직경 1.3mm)를 설치하여 가압 압력이 4 bar일 때 설계 유량이 공급되도록 하였다. Fig. 3을 보면 type 1, 2는 유속에 따른 분무 상태로 type 1의 경우 분사 속도가 작아 모멘텀이 감소하여 완전하게 선회각을 형성하지 못한 분무 상태를 보이는 반면 type 2는 상대적으로 높은 분사 속도로 인하여 선회각을 형성하는 분무 상태를 확인하였다. type 2, 3은 홀 개수에 따른 분무 상태로 상대적으로 홀이 많은 type 2가 type 3에 비해 좀 더 조밀한 분무 상태를 확인하였다. type 3, 4, 5는 유로의 선회각에 따른 분무 상태로 유로의 선회각 영향으로 서로 다른 선회각으로 분무됨을 확인하였다.

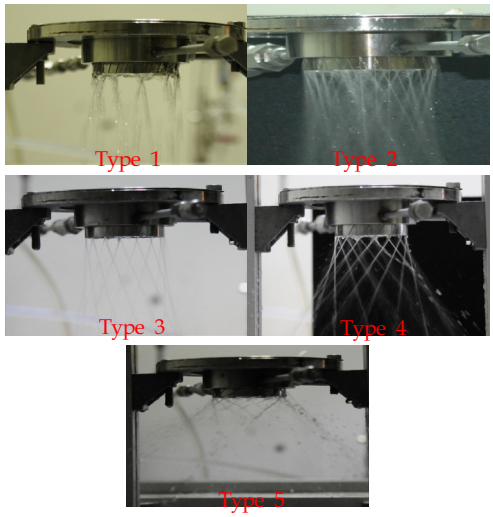

Fig. 3. Cold Flow Test

4. 열해석

막냉각의 성능 해석에 필수적인 연소실 구조물에서의 열 해석을 하기 위해서는 연소실 벽으로 전달되는 열유속 (q_G)을 알아야한다.

$$q_G = q_{con} + q_{rad} \quad (2)$$

대류에 의한 열유속은 다음 관계식을 사용한다.

$$q_{con} = B\frac{\tau(\lambda)}{B^{1.82}}\frac{P_c^{0.85}}{d_{cr.sec}^{0.15}}\frac{S(k_m, T_w)}{\Pr^{0.58}} \quad (3)$$

또한 복사에 의한 열유속은 다음 관계식을 사용한다.

$$q_{rad.cham} = \varepsilon_{st.ef} C_0 \left[\varepsilon_g (T_g/100)^4 - A_g (T_w/100)^4\right] \quad (4)$$

여기서, $S(k_m, T_w)$, Pr 그리고 지수 $B(k_m, T_w)$를 구하기 위해서는 벽 근처에서 성분 관계식을 알아야 하며, 이들의 관계를 나타내는 K_m는 벽 근터 경계층에서의 mixing에 의하여 발생하는 것으로 다음의 관계식을 사용한다.

$$K_m = \frac{K_{mo}\left[1 + 2\overline{m_c}/(1-\overline{m_c})\right]}{\left[1 - exp(-K\cdot(m_w/m_c)\cdot\overline{x^2}\right]} \quad (5)$$

Fig. 4과 Fig. 5는 총 유량의 20%에 해당하는 막냉각제를 사용하였을 경우 이를 열 해석한 결과로 연소실 벽에서의 정상상태의 온도와 열전달 분포를 나타낸다. Fig. 3을 보면 설계 온도라고 할 수 있는 연소실 재질(SUS 316)의 녹는점을 넘지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 열해석 결과 막냉각 유량으로 총유량의 20%가 적절함을 확인하였다.

5. 결 론

막냉각링을 설계/제작하여 수류 시험 한 결과 설계 유량(42.25g/s)이 공급됨을 확인하였고, 상대적으로 유속이 빠르고 홀 개수가 많은 막냉각링이 연소실 벽면을 고르게 냉각시킬 수 있는 분무 패턴을 보임을 확인하였다. 또한 열해석 결과 총 유량의 20%에 해당하는 냉각제를 사용하였을 경우 연소실이 버티기에 충분한 냉각 성능을 가짐을 확인하였다.

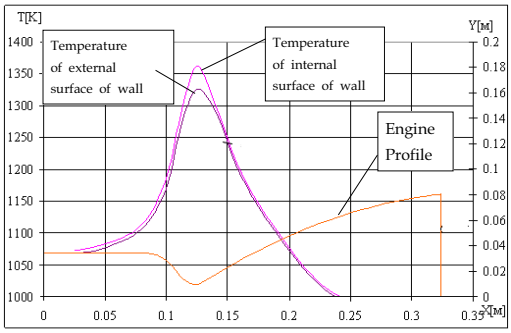

Fig. 4. Temperature of a Wall

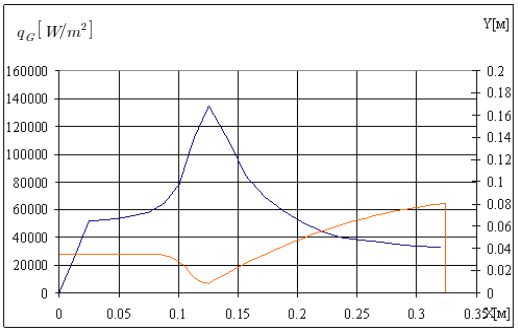

Fig. 5. heat flux along the chamber

참 고 문 헌

1. G. P. Sutton, "Rocket Propulsion Element", 7th John Wiley & Sons Inc, 1992, pp.89-97
2. Dieter K. Huzel and David H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid - Propellant Rocket Engines", AiAA, Vol. 147, Progress in Astronautics & Aeronautics, 1992, pp.85
3. G. P. Sutton, W. R. Wagner and J. D. Seader, "Advanced Cooling Techniques for Rocket Engines", Astronautics & Aeronautics, January 1966, pp.60-71
4. 조용일, 유만선, 정학재, 조형희, " 축소노즐 내 슬롯 막냉각에서의 열전달 특성", 한국추진공학회지, 제5권 제1호, 2001, pp.34-41