

모사 냉각채널을 이용한 케로신 열전달 특성에 대한 실험적 연구

이봄* · 이원구* · 송윤호* · 황동현* · 안규복*†

Experimental Study on Kerosene Heat Transfer Characteristics Using Simulating Cooling Channels

Bom Lee* · Wongoo Lee* · Yoonho Song* · Donghyun Hwang* · Kyubok Ahn*†

ABSTRACT

In a liquid rocket engine using hydrocarbon fuels, cooling of the combustion chamber wall is necessary to prevent the combustion chamber wall from melting or structurally deforming due to high heat flux. Among the various methods, regenerative cooling, which uses fuel as a coolant and then injects it into the combustion process, has good performance. This study investigated the heat transfer characteristics of kerosene as a coolant by varying the copper cross-sectional area, the flow rate in the channel, and the current applied to the channel. Convective heat transfer occurred rapidly when the cross-sectional area of the copper channel was small and when the kerosene flow velocity was fast.

초 록

탄화수소계열의 연료를 사용하는 액체로켓엔진에서 높은 열유속으로 인해 연소실 벽면이 구조적으로 손상 및 변형되는 것을 방지하기 위하여 연소실 벽면의 냉각은 필수적이다. 여러 가지 방법 중 연료를 냉각제로 사용 후 연소과정에 투입시키는 재생냉각 방식은 엔진 성능을 높여준다. 본 연구는 구리 단면적, 채널 내 유속, 채널에 가해지는 전류를 변화시켜 냉각제로 사용하는 케로신의 열전달 특성에 대해 알아보았다. 채널의 구리 단면적이 작을수록, 케로신의 유속이 빠를수록 대류 열전달이 빠르게 일어남을 알 수 있었다.

Key Words: Regenerative Cooling Channel(재생냉각채널), Kerosene(케로신), Heat Transfer(열전달)

1. 서 론

탄화수소계열의 연료를 사용하는 액체로켓엔

진과 같은 추진기관은 연소과정에서 고압, 고온의 가스가 생성된다. 따라서 장시간 추진기관을 작동시키기 위해서는 연소실 벽면을 냉각해야한다. 높은 열유속이 연소실 벽면에 가해졌을 때 냉각이 없다면 구조적으로 손상 및 변형이 발생하게 된다. 이러한 문제로부터 연소실을 보호하

* 충북대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr

기 위해서 재생냉각(regenerative cooling), 배출 냉각(dump cooling), 막냉각(film cooling), 침투 냉각(transpiration cooling), 용융냉각(ablative cooling), 복사냉각(radiation cooling) 등의 냉각 방식들이 사용된다. 이 중에서 재생냉각 방식은 연료를 이용하여 연소실 벽면을 냉각한 뒤 분사기를 통해 연소실로 분사하는 방식이다. 이때 연소실의 냉각에 사용되어 온도가 상승된 연료가 연소과정에 투입되기 때문에 냉각과정에서 얻은 엔탈피를 재사용할 수 있어 효율을 높일 수 있다는 장점이 있다. 국내에서는 케로신 열전달 특성에 관한 자료가 비교적 부족하며, 엔진 설계를 위한 자료도 부족한 편이다[1-4].

본 연구는 이 과정에서 사용되는 연료인 케로신의 냉각채널 내 열전달 특성에 대해 알아보고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

실험 장치는 크게 케로신을 저장하는 탱크, 가압 레귤레이터, 정류기, 열교환기, 배수탱크로 구성되어 있다. 시편은 내부는 구리로 이루어져있고 외부는 SUS로 이루어져 있다. 이때 SUS의 외경은 4 mm로 동일하며, 구리 내경이 1.6, 2.0, 2.4 mm로 설계하여 제작되었다. 시편이 있는 부분은 강화 플라스틱으로 만든 상자를 덮은 뒤 내부에 기체 질소를 공급해주어 시험 중 시편 파손에 의한 화재를 방지하였다. 시편에는 총 6개의 온도센서를 설치하였으며, 시편 전단과 후단에 압력계와 온도센서를 설치하여 데이터를 측정하였다. 모든 데이터는 NI-cDAQ를 통해 기록되었다. 시편 가열을 위한 정류기는 최대 5000 A x 12 V로 변환되어 전원을 공급해준다. 수동으로 조절하여 전원을 공급하였다.

2.2 실험 과정

실험은 후단 압력이 50 barg와 30 barg일 때 유속조건과 가열조건을 변경하여 수행하였다. 유속이 10, 20 m/s 조건에서 CFX로 해석한 데이

터를 기준으로 구리 부분의 온도가 500 K이 넘지 않는 경우만 실험을 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 유량 측정 결과

Figure 1은 구리 내경이 1.6 mm인 시편을 사용하여, 후단압력이 30 barg이며 시편 내 유속이 10 m/s, 전류가 2000 A일 때의 시간에 따른 유량 측정 결과이다. 정류기를 가동하는 시간동안 측정되는 유량이 급격하게 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 전류가 높아질수록 더 크게 나타나는데, 이는 전류가 가해지면 노이즈가 발생하기 때문이라 생각된다. 그렇기 때문에 데이터 분석 시에 이를 보정해주었다.

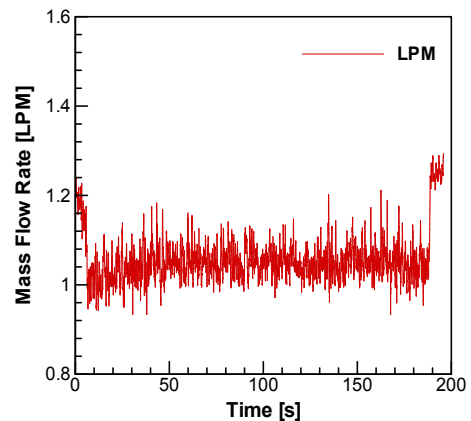


Fig. 1 Variation of flow-rate with time

3.2 온도 측정 결과

Figure 2는 구리 내경이 2.4 mm, 후단 압력 30 barg, 유속 20 m/s, 전류 3000 A일 때, 시간에 따른 온도 변화를 보여준다. 실험은 시간에 따라 온도가 크게 변하지 않는 지점까지 수행하였다. 측정된 온도 값이 온도 센서마다 다소 차이가 있다는 것을 알 수 있는데, 이것은 시편 두께가 균일하지 못한 결과로 생각된다. 또한 실제 이론적으로는 T1에서 T6로 갈수록 온도가 조금씩 증가해야하지만, 시편의 두께가 균일하지 못

하면 이와 같은 차이가 발생할 것이라 생각한다. 가열이 되지 않는 T_{inlet} 의 경우는 온도가 거의 변하지 않는다.

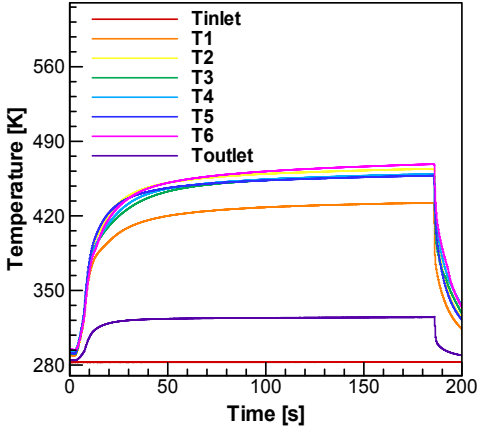


Fig. 2 Variation of temperature with time

3.2 대류 열전달계수

대류 열전달 계수를 구하기 위한 식은 Eq.1과 Eq.3을 통하여 구할 수 있다. 이때 물성치는 bulk 온도를 통해 구한 값을 이용한다. bulk 온도의 정의는 Eq. 3에 나타나있다. Fig. 3은 bulk 온도와 실험조건에 따른 대류 열전달계수를 보여준다. 유속이 높으면 대류 열전달계수가 증가함을 알 수 있으며, 후단 압력에는 영향을 크게 받지 않는다.

$$\ddot{q} = \dot{m}c_p(T_{outlet} - T_{inlet})/A \quad \text{Eq. 1}$$

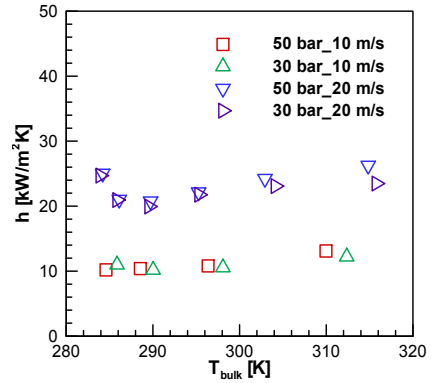
$$\ddot{q} = h(T_{bulk} - T_{ave}) \quad \text{Eq. 2}$$

$$T_{bulk} = (T_{inlet} + T_{outlet})/2 \quad \text{Eq. 3}$$

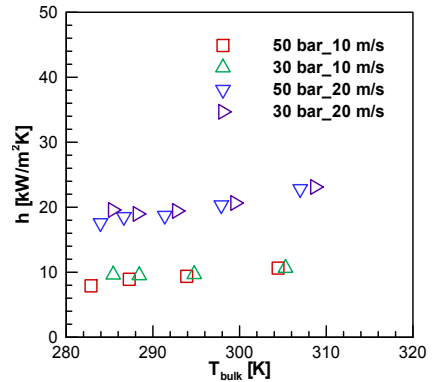
이때 \ddot{q} 은 열유속, c_p 는 bulk 온도에서 케로신의 비열이며, A는 열전달을 받는 면적을 의미한다. 또한 h는 대류 열전달계수를 의미한다. T_{ave} 는 시편에 부착된 6개의 온도센서로 얻은 온도를 평균한 값이다.

Figure 4는 전류에 따른 대류 열전달계수를 보여준다. 일부의 경우를 제외하면 시편의 구리내

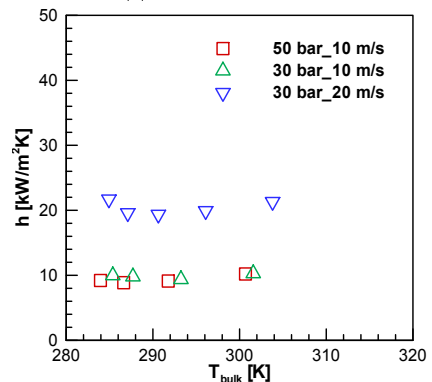
경이 작을수록 열전달 계수가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.



(a) $D_{cu} = 1.6 \text{ mm}$



(a) $D_{cu} = 2.0 \text{ mm}$



(a) $D_{cu} = 2.4 \text{ mm}$

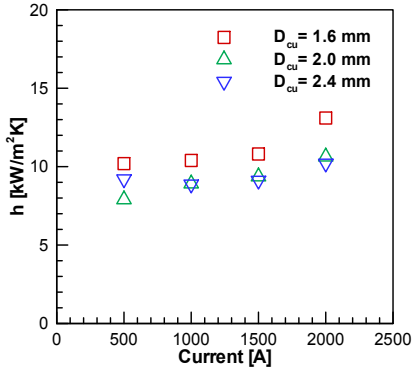
Fig. 3 Variation of convective heat transfer coefficient with bulk temperature at (a) $D_{cu} = 1.6 \text{ mm}$, (b) $D_{cu} = 2.0 \text{ mm}$ (c) $D_{cu} = 2.4 \text{ mm}$

이 경우에서도 후단 압력은 대류 열전달계수

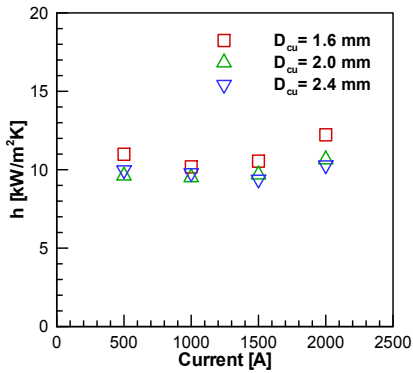
에 큰 영향을 주지 않으며, 유속이 증가하면 대류 열전달계수가 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

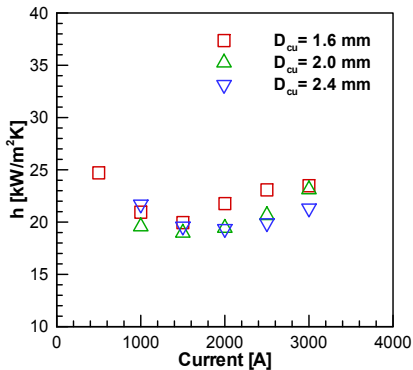
모사 냉각채널을 이용하여 케로신의 열전달 특성에 대해 실험적으로 연구하였다. 채널의 구리 단면적이 작을수록, 채널 내부에 흐르는 케로신의 유속이 높을수록 열전달이 잘 일어나게 된다. 또한 케로신이 압력이 supercritical 이상의 조건일 경우 후단 압력이 열전달 특성에 영향을 주지 않는다.



(a) 50 bar_10 m/s



(b) 30 bar_10 m/s



(c) 30 bar_20 m/s

Fig. 4 Variation of convective heat transfer coefficient with current under (a) 50 bar_10m/s, (b) 30 bar_10 m/s, (c) 30 bar_20 m/s

참고 문헌

1. Huzel, D. and Huang, D., "Modern Engineering for design of Liquid-Propellant Rocket Engines, 4th" Volume 147, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, Washington, DC, USA
2. Wang, H., Luo, Y., Gu, H., Li, H., Chen, T., Chen, J. and Wu, H., "Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of kerosene at supercritical pressure in square and circular tube with artificial roughness," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, 2012, pp.16-24
3. Liang, K., Yang, B. and Zhang, Z, "Investigation of Heat Transfer and Coking Characteristics of Hydrocarbon Fuels," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, 1998, pp.789-796
4. Park, H.H., Lee, Y.S., and Kim, S.J., "Experimental Investigation on Forced Convective Heat Transfer Characteristic Generated to Heated Tube," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 90-98, 2006