

로켓엔진 고공환경 모사용 디퓨저의 냉각 채널 열 해석

조기주*, 김용욱**, 강선일***, 오승협****

Thermal Analysis of Exhaust Diffuser Cooling Channels for High Altitude Test of Rocket Engine

Kie-Joo Cho*, Yong-Wook Kim**, Sun-Il Kang***, Seung-Hyub Oh****

Abstract

Water cooling ducts are installed in the exhaust diffuser for high altitude tests of rocket engine to protect diffuser from high-temperature combustion gas. The mass flow rate and pressure of cooling water is designed to prevent boiling of cooling water in the ducts. Therefore, the estimation of maximum temperature of duct wall is important parameter in design of cooling system, especially pressure of cooling water. The method for predicting maximum temperatures of duct walls with variation of coolant flow rates was derived theoretically.

초 록

로켓엔진 고공 환경 모사용 디퓨저에는 연소가스의 고열로부터 디퓨저를 보호하기 위해 물을 이용한 냉각시스템이 사용되며 냉각수의 유량 및 압력은 냉각 채널 내부에서 냉각수의 비등이 발생하지 않도록 결정된다. 따라서 냉각수 유량의 변화에 따른 냉각 채널 벽면의 최고온도 예측은 냉각시스템의 운용 압력을 결정하는데 주요한 변수가 된다. 본 연구에서는 열평형 이론에 근거하여 유량 변화에 따른 채널 벽면의 최고온도를 예측하는 방법을 기술하였다.

키워드 : 로켓엔진 (rocket engine), 고공환경모사 (high altitude simulation), 디퓨저 (diffuser), 냉각채널 (cooling channel)

1. 서 론

본 연구는 로켓엔진의 고공 환경 모사용 디퓨저의 냉각 설계에 있어 냉각수 유량 변화에 따른 디퓨저 냉각 채널 온도 변화 예측에 관한 것이다. 디퓨저 냉각 채널의 열 특성 분석을 위해서는

디퓨저 내부의 고온의 초음속 연소가스와 디퓨저 벽면사이의 열 전달 예측이 요구된다. 이를 위해서는 축소형 모델의 시험이나 고성능 계산기에 의한 수치해석이 필요하다. 그런데 실제 시험 설비의 구축이나, 디퓨저 냉각 채널의 제작 정밀도 등에 의해 각 냉각 채널로 공급되는 냉각수 유량

접수일(2010년 1월 8일), 수정일(1차 : 2010년 4월 13일, 2차 : 2010년 6월 14일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

* 추진기관체계팀 /kjcho@kari.re.kr ** 추진기관체계팀 /kyw421@kari.re.kr

*** 추진기관체계팀 /aerodol@kari.re.kr **** 추진기관체계팀 /shoh@kari.re.kr

의 미세 조정이 필요하며, 이러한 모든 경우에 축소형 모델 시험이나 방대한 수치해석을 수행하는 것은 지극히 비효율적인 작업이 된다.

따라서 본 연구에서는 로켓엔진의 연소 가스 온도, 유량 및 압력과 대표적으로 정해진 냉각수 유량에 대해 얻어진 디퓨저 내부의 연소가스 및 디퓨저 벽면 사이의 열전달 특성을 기반으로 하여, 냉각수의 유량 변화시의 냉각 채널 및 냉각수 온도 변화를 예측하는 기법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 디퓨저 및 냉각 채널간의 열평형식

그림 1에서 디퓨저 내부 연소 가스 및 냉각수 채널 간의 열전달 개념도를 나타내고 있다.

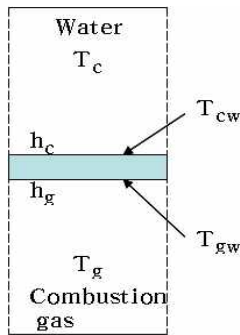


그림 1 디퓨저 냉각 채널에서의 열전달 개념도

여기에서 T_c, T_{cw}, h_c 는 각각 냉각수의 온도, 디퓨저의 냉각수측 벽면 온도, 냉각수 및 디퓨저 벽면간의 열전달 계수를 나타내며, T_g, T_{gw}, h_g 는 각각 디퓨저 내부를 통과하는 연소가스의 온도, 디퓨저의 연소가스측 벽면 온도, 연소가스 및 디퓨저 벽면간의 열전달 계수를 나타낸다. 이와 같은 상황에서 디퓨저 내의 연소가스와 냉각 채널내의 냉각수사이의 열전달 평형식을 정리하면 다음과 같다:

$$q = h_g(T_g - T_{gw}) = \kappa/t(T_{gw} - T_{cw}) \quad (1)$$

$$= h_c(T_{cw} - T_c) \quad (2)$$

여기서 H 는 총괄 열전달 계수로서

$$H = \frac{1}{1/h_g + t/k + 1/h_c} = \frac{1}{A + 1/h_c} \quad (3)$$

와 같이 정의되며, κ, t 는 각각 디퓨저 냉각 채널의 열전도 계수 및 두께를 나타낸다[1].

식 (1), (2), (3)을 재정리하면

$$(1 + Ah_c)(T_{cw} - T_c) = T_g - T_c \quad (4)$$

와 같은 식을 얻을 수 있다.

냉각 채널 내의 열전달 계수 h_c 는 다음과 같은 실험식으로 예측 할 수 있다[2]:

$$h_c = C m^{0.8} \left(\frac{C_p}{\mu}\right)_w^{0.4} \kappa_w^{0.6} \quad (5)$$

여기서 계수 C 는 냉각 채널의 기하학적 형상, 열원과의 접촉 면적 등의 영향을 나타낸다. 따라서 열전달 계수의 값이 냉각수의 유량 $m^{0.8}$ 에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

2.2 냉각수 유량 증가에 따른 냉각수측 디퓨저 벽면 온도 변화

현재 설계 유량에 비해 냉각수 유량을 증가시켜 열전달 계수 값 h_c^* 이

$$h_c^* = \alpha h_c \quad (6)$$

와 같이 되었을 경우에 식 (4)는

$$(1 + \alpha Ah_c)(T_{cw}^* - T_c) = T_g - T_c \quad (7)$$

으로 정리되며, 냉각수의 온도 T_c^* 를

$$T_c^* = T_c - \Delta T_c \quad (8)$$

와 같이 표현하면 [Note : 냉각수의 유량을 증가시키면 냉각수의 온도는 감소한다] 식 (7)은 다음과 같이 정리된다:

$$(1 + \alpha Ah_c)(T_{cw}^* - T_{cw}) = (1 - \alpha)Ah_c(T_{cw} - T_c) - \alpha Ah_c \Delta T_c \quad (9)$$

식 (9)을 냉각 채널 온도 감소량, $\Delta T_{cw} = (T_{cw} - T_{cw}^*)$ 에 대해 다시 정리하면

$$\Delta T_{cw} = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1/(Ah_c)}(T_{cw} - T_c) + \frac{\alpha}{\alpha + 1/(Ah_c)}\Delta T_c \quad (10)$$

와 같이 된다.

일반적으로 액체측 대류 열전달 계수(h_c)가 기체측 대류 열전달 계수(h_g)에 비해 큰 값을 가진다[2]. 따라서

$$Ah_c = h_c/h_g + h_c t/\kappa \gg 1 \quad (11)$$

와 같이 놓을 수 있으며, 이로부터 식 (10)은 다음과 같이 근사될 수 있다:

$$\Delta T_{cw} \approx \frac{\alpha - 1}{\alpha}(T_{cw} - T_c) + \Delta T_c \quad (12)$$

2.3 냉각수 유량 증가에 따른 냉각수 평균 온도 변화, ΔT_c



그림 2 냉각채널 흐름 방향의 온도 변화 개념도

그림 2과 같이 미소 길이 dx 에서의 냉각수 온도를 일정하다고 가정하면, 냉각 채널 흐름 방향

으로의 온도 변화 및 벽면으로 부터의 열전달 상관을 정리하면 아래와 같다[1]:

$$m C_p (T_{c2} - T_{c1}) = H dx (T_g - T_{c1}) \quad (13)$$

이를 재정리하면

$$T_{c2} - T_{c1} = \frac{H dx}{m C_p} (T_g - T_{c1}) \quad (14)$$

와 같이 된다.

여기서, 식 (3)을

$$H \approx \frac{1}{A} \quad (15)$$

와 같이 근사하면 식 (14)는

$$T_{c2} - T_{c1} = \frac{dx}{Am C_p} (T_g - T_{c1}) \quad (16)$$

으로 정리된다.

냉각수의 유량을 Δm 만큼 증가시켰을 때, 냉각 채널 흐름 방향으로의 냉각수 온도, T_{c2}^* 는 식 (16)에서

$$T_{c2}^* - T_{c1}^* = \frac{dx}{A(m + \Delta m) C_p} (T_g - T_{c1}^*) \quad (17)$$

와 같이 되고 식 (16), (17)을 조합하면

$$T_{c2}^* - T_{c1}^* = (T_{c2} - T_{c1}) \frac{m}{m + \Delta m} \left(\frac{T_g - T_{c1}^*}{T_g - T_{c1}} \right) \quad (18)$$

와 같은 결과를 도출할 수 있다. 여기서 $T_g \gg T_{c1}$, T_{c1}^* 임을 고려하면 식 (18)은

$$T_{c2}^* - T_{c1}^* \approx (T_{c2} - T_{c1}) \frac{m}{m + \Delta m} \quad (19)$$

와 같이 근사된다.

3. 결 과

KSLV-I 2단용 추진기관의 고공환경 모사를 위한 디퓨저의 설계 개념도가 그림 3에 주어졌다.

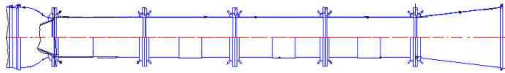


그림 3 고공환경 모사용 디퓨저 개념도

디퓨저는 4개의 실린더부와 1개의 cone부로 나누어져 있으며, 각각 별도의 냉각수 공급/배출 라인이 부착된다. 공급된 냉각수는 냉각 채널을 통과하면서 연소가스로부터 전달되는 열을 흡수하여 배출되는데, 냉각채널 내부에서의 냉각수의 비등이 발생하지 않도록 공급 압력 및 공급 유량이 결정된다.

표 1에서는 냉각수 공급 압력 20bar에서 설정된 각 section별 냉각수 설계 유량을 나타내고 있다[3]. 이 유량은 냉각 채널 전체 구간에서 연소가스에서 전달되는 열을 흡수하여도, 냉각채널 출구까지 냉각수의 비등이 발생하지 않도록 설정된 값이다. 그러나 디퓨저의 구조 제작성이나 설치된 냉각 시스템의 운용 효율성 최적화를 위해 냉각수 공급 압력을 변화시키고 이에 따른 필요 냉각수량을 예측하여, 최적의 운용 조건 설정이 필요하다.

Section No.	냉각수 유량, kg/s	
	채널별	총량
1	0.033	6
2	0.036	6.5
3	0.047	8.5
4	0.069	12.5
5 (Cone)	0.092	22

표 1 디퓨저 각 section별 냉각수 설계 유량

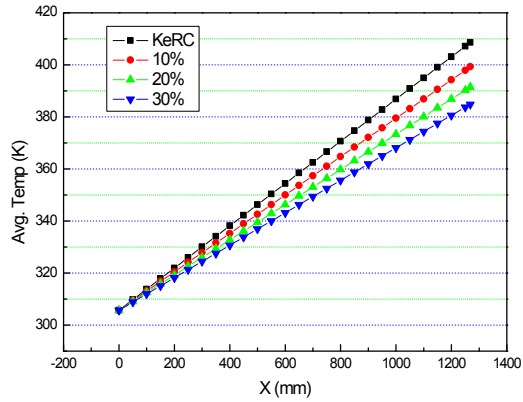


그림 4 냉각수 유량 증가에 따른 냉각수 평균온도 변화

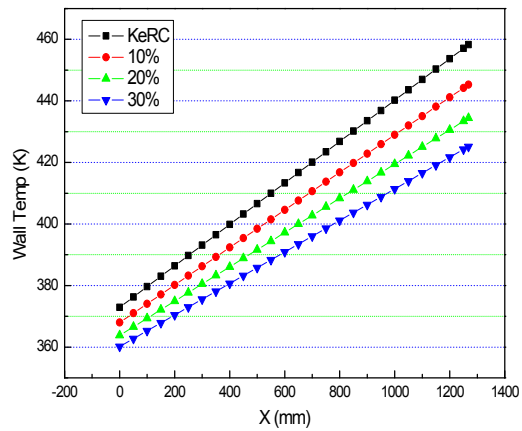


그림 5 냉각수 유량 증가에 따른 냉각 채널 벽면 온도 변화

그림 4, 5에서는 section #2의 냉각수 유량을 기존 값 (6.5kg/s)에서 30%까지 증가시켰을 경우의 냉각수 평균 온도 (그림 4) 및 냉각채널 벽면 온도 (그림 5)의 변화를 나타내고 있다. 그림 5에 의하면 냉각채널 출구에서의 벽면 최대 온도는 냉각수 유량 증가에 따라 표 2와 같이 감소한다.

냉각수 유량, kg/s	냉각 채널 벽면 최대 온도, K	포화압력, MPa
6.5 (설계값)	458.3	1.13
7.15 (10% 증가)	445.3	0.83
7.80 (20% 증가)	434.4	0.64
8.45 (30% 증가)	425.1	0.50

표 2 냉각수 유량 증가에 따른 냉각채널 최대 벽면온도 변화

온도의 감소는 냉각수의 비등이 발생하는 포화압력이 감소를 동반하는데, 냉각수 유량을 30% 증가시킬 경우, 벽면 최대온도는 약 425K 으로서 냉각채널 출구 압력을 0.5MPa 이상으로 유지할 경우, 비등을 방지하여 정상 운용을 할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 대류 및 전도 열전달의 기본적인 이론 및 근사 과정을 통하여 디퓨저 냉각 채널의 유량 변화에 따른 냉각 시스템의 운용 조건을 간단히 예측하는 방법을 제시하였다.

KSLV-I 2단용 추진기관의 고공환경 모사를 위한 디퓨저의 냉각 설계는 해외 기관과의 협력을 통해 이루어 졌으며 냉각 채널의 냉각수 유량 설정을 위해서 내부의 초음속 연소가스를 포함한 방대한 수치해석이 수반되었다. 설계 제한 조건은 공급 가능한 냉각수 유량이며, 주어진 유량에서 냉각수의 비등이 발생하지 않도록 하는 냉각수 공급 압력이 설계 결과로서 제시되었다.

그러나 디퓨저 제작/설치 및 시운전 과정에서 디퓨저의 구조적 안정성 확보를 위해 냉각수 공급 압력의 낮추어야 하는 상황이 발생하였으며, 이 때 냉각수의 비등 방지를 위한 냉각수 공급 유량을 증가시켜야 하였다.

유량의 변화에 따른 허용 압력 변화 선도를 확보하기 위해 방대한 수치해석을 수행하는 것은

지극히 비효율적이었으며, 이를 대체하기 위하여 본 연구에서 제시된 냉각수 유량 변화에 따른 냉각 채널 벽면 온도 및 평균 온도 변화 예측 기법을 적용하였다. 본 기법을 활용하여 디퓨저 냉각 시스템의 최적화된 운용 조건을 간단히 예측하였고, KSLV-I 2단용 추진기관의 고공 성능 검증 시험을 성공적으로 수행하였다[4].

참 고 문 헌

1. F. P. Incropera, D. P. De WITT, Introduction to heat transfer, John Wiley & Sons, 1985.
2. W. M. Kays, M. E. Crawford, Convective heat and mass transfer, McGraw-Hill, 1980.
3. V. V. Mironov, et al., Analysis and provisional designing of exhaust diffuser for testing of SRM for KSLV, Keldysh Research Center, 2006.
4. 김용욱, 이정호, 유병일, 김상헌, 조상연, 조기주, 디퓨저를 이용한 킥모터 고공환경 모사시험, KARI-PST-TM-2008-018, 2008