

축소형 칼로리미터의 냉각성능 해석

조원국* · 문윤완**

Cooling Performance Analysis of a Sub-scale Calorimeter

Won Kook Cho* · Yoon Wan Moon**

ABSTRACT

A cooling performance analysis has been made in the 8-channel calorimeter based on sub-scale KSR-III engine. Three-dimensional heat transfer analysis in cooling channels has been performed using the heat flux distribution through the chamber wall predicted from axi-symmetric compressible flow inside the combustion chamber. The heat flux distribution is verified against the published literature. Presented for the development and operation of the calorimeter are the coolant pressure drop, coolant temperature rise and the maximum chamber wall temperature. Required coolant flow rate is determined for given chamber pressure. Cooling performance is also predicted for temperature dependant coolant properties.

초 록

KSR-III 축소형 엔진을 원형으로 하는 8채널형 칼로리미터의 냉각성능해석을 수행하였다. 축대칭 압축성 해석을 통해서 연소실 벽으로의 열유속을 예측하였으며 이를 이용하여 3차원 냉각유로 내부의 열전달 해석을 수행하였다. 연소실벽으로의 열유속은 문헌에서 제시하는 수준으로 확인되었으며 열전달 해석을 통하여 칼로리미터 개발과 운용에 필요한 냉각수의 압력강하, 온도상승 및 연소실벽의 최고온도를 제시하였다. 연소실 압력증가에 따른 냉각요구량을 결정하였으며 냉각수의 물성변화에 의한 냉각성능 변화를 예측하였다.

Key Words: Calorimeter(칼로리미터), Regenerative Cooling(재생냉각), Computational Analysis (전산해석), Bartz Correlation(Bartz 관계식)

1. 서 론

로켓엔진은 3000 K 이상의 고온에서 작동되는 것이 일반적이며 따라서 적절한 냉각이 필수적이다. 이에 적용 가능한 냉각방식은 매우 다양하며 두 가지 이상의 냉각방식이 동시에 사용

† 2003년 2월 22일 접수 ~ 2003년 4월 15일 심사완료

* 정희원, 한국항공우주연구원 엔진그룹

** 정희원, 한국항공우주연구원 엔진그룹
연락처자, E-mail: wkcho@kari.re.kr

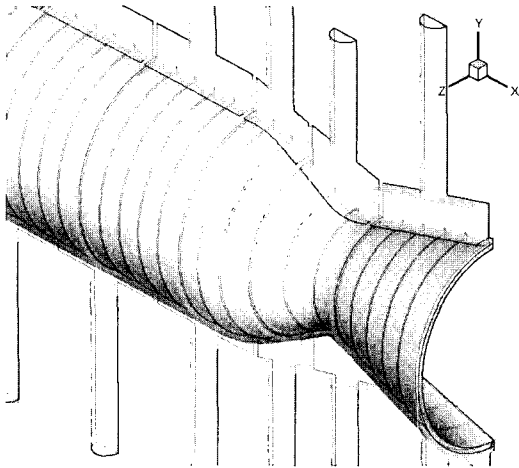


Fig. 1 Sketch of calorimeter

되기도 한다. 이 중 재생냉각[1-4]은 냉각시 흡수한 에너지를 다시 연소실로 공급하는 방식으로 엔진 효율의 저하가 없어 고효율 엔진에 적합하다. 이의 개발에는 연소실로부터의 전열량과 재생냉각 유로에서의 냉각 성능해석이 선행되어야 한다. 냉각 유로에서의 열전달 특성은 실험적/이론적으로 잘 알려져 있으나 연소실측의 전열량은 그렇지 못하며 따라서 고온/고압에서 로켓엔진의 열특성을 측정할 수 있는 장치인 칼로리미터[5,6]는 로켓엔진 개발의 선행연구로서 매우 중요한 의미를 가진다.

칼로리미터의 냉각은 재생냉각과 유사하며 연소실 벽으로의 열유속 측정은 냉각수의 온도상승 관측에 의하여 이루어진다. 따라서 칼로리미터에 의한 실험은 재생냉각 연소실의 개발을 위하여 선행되어야 한다. 또한 연소실의 냉각에 의하여 장시간 또는 반복적인 시험이 가능하며 탄화수소 계열의 연료를 사용할 경우 연소실벽에 형성되는 탄소 침착물에 의한 열저항을 고려할 수 있는 특징이 있다[6]. 발사체 선진국의 경우, 이미 재생냉각 연소실과 칼로리미터에 관한 연구가 다수 발표되었으나 국내의 경우, 소수의 연구[6,7]가 보고되어 있는 수준이다.

Figure 1은 본 연구에서 개발하고자 하는 칼로리미터의 외형을 나타내며 Fig. 2는 냉각수 공급 배관에 센서가 장착된 개념도를 나타낸다.

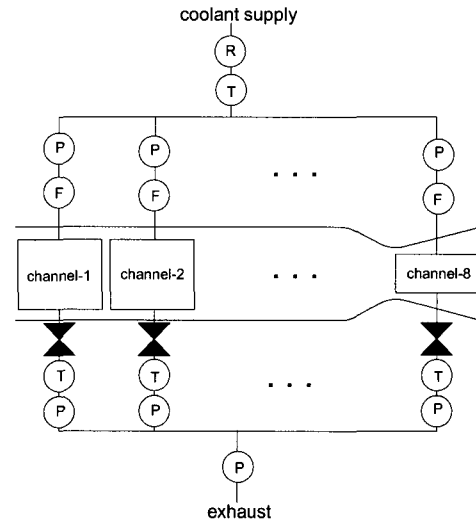


Fig. 2 Schematic of calorimeter

냉각유로는 8개의 채널로 분리되어 있으며 연소실은 KSR-III 축소형 엔진[8]을 원형으로 한다. 냉각수 유로는 축방향으로 매우 긴 형상을 하고 있어 구조적으로 취약할 수 있으므로 내부에 지지벽을 설치하여 구조적인 안정성을 확보하고 있다. 또한 이 지지벽은 편효과를 가져 냉각에 도움이 될 것이다.

칼로리미터의 냉각성능은 Fluent v5.5[9]를 사용하여 계산하였다. 냉각수 유량변화에 의한 냉각성능 변화와 압력강하를 관찰하여 적절한 냉각수 유량과 이의 공급에 필요한 가압설비의 용량을 결정하게 될 것이다. 이러한 내용은 칼로리미터의 개발과 연소시험에 앞서 준비되어야 하는 필수 자료라 할 수 있다.

2. 본 론

연소실에서의 냉각성능 예측을 위하여 연소실 내부의 압축성 유동과 냉각수의 비압축성 유동에 대한 해석이 요구된다. 연소실 내부의 압축성 유동해석에서 냉각수의 열전달 특성은 다음의 식[1]으로 평가되며 연소실 벽의 열저항은 1차원 전도에 의한 값이 경계조건으로 주어진다.

$$Nu = C_1 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (1)$$

식 (1)에서 Nu 은 무차원 열전달 계수인 누셀 수를 나타내며, Re , Pr 은 레이놀즈 수, 프란틀 수를 나타낸다. C_1 은 경험상수이며, μ 는 유체의 점성계수이다. μ_w 는 냉각유로 벽면에서의 값으로 경계층에서 물성 변화를 고려하는 역할을 한다.

연소실 내부형상은 축대칭이며 연소기체는 분자량 22[8]의 이상기체로 가정하였으며 온도에 변화에 의한 물성변화는 고려하지 않았다. 연소실의 압력은 13기압이며 온도는 3000 K이다[8]. 냉각수의 평균온도는 300 K이며 냉각유로 높이 2 mm에서 평균 유속 10 m/s일 때의 냉각 조건에서 레이놀즈수는 약 2×10^4 이며 열전달률은 식 (1)을 이용하여 구한다. 수치해석에 적용된 방법은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Computational methods

	2-D	3-D
flow solver	compressible coupled	incompressible segregated
scheme	2nd order UD	QUICK
turbulence	standard $k-\epsilon$	standard $k-\epsilon$
convergence	10^{-3}	10^{-3}
thermal B.C.	convection	heat flux

칼로리미터는 복잡한 3차원 구조를 가지므로 국부적인 냉각성능 저하를 확인하기 위해서는 3차원 열전달 해석이 요구되며 이때 연소실에서의 전열량은 앞서 기술한 방법으로 구한 열유속 분포가 경계조건으로 사용된다[3]. 냉각수의 물성 변화가 냉각 성능에 미치는 영향이 다루어질 것이나 별도의 언급이 없을 경우, 냉각수의 물성은 300 K에서의 값이다.

연소실 내부의 압축성 유동해석결과, 노즐목에서 음속을 돌파하는 전형적인 압축성 유동장이 관찰된다. 이에 관한 자세한 결과는 관련 문헌[8]에서 확인할 수 있으며 본 연구는 주요 목

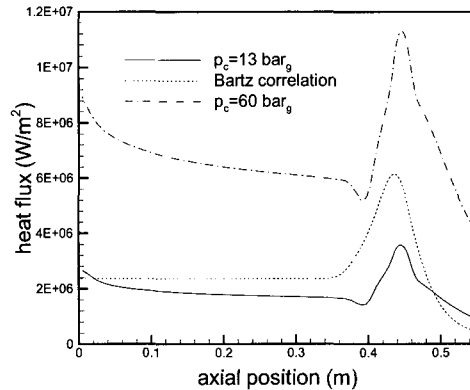


Fig. 3 Heat flux variation on chamber wall along axial distance

적은 냉각형 칼로리미터의 개발이므로 이에 관한 토의는 생략한다. Fig. 3은 연소실 벽으로 전달되는 열유속 변화 축방향에 대하여 도시하는 것으로 Fluent의 UDF 기능을 이용하여 냉각수 열전달해석의 경계조건으로 적용된다. 이때 열유속은 칼로리미터의 채널별로 각각 2차 곡선으로 근사되며 이에 의한 오차는 거의 없다. 연소실이 시작되는, 그림상에서 축방향 좌표, $x=0-0.1$ 위치에서 열유속이 높게 나타나는 것은 연소특성이 반영되지 않은 것이 기인하며 유동이 발달하면서 약간 감소하는 특성을 가진다. 실제로는 분사면 근처에서는 연소가 충분히 이루어지지 않으므로 열유속이 매우 낮으며[5] 해석 역시 연소실 앞부분은 생략하여 $x=0.3$ 이후의 연소실에 대한 냉각성능만을 대상으로 하였다. 그림에서 Bartz 관계식[1]으로 구한 결과는 냉각수의 온도를 400 K로 일정하게 가정한 것이며 본 해석결과와 비교하여 약 70 % 과도한 값을 가진다. 이러한 경향은 실험적으로 확인된 바 있으며 문헌[7]에 의하면 Bartz 관계식에 의한 열유속은 실험결과보다 약 50 % 과대평가되는 것으로 보고되었다. 또한 2차원 해석에서 고온가스의 물성을 공기의 물성으로 가정하였기 때문에 고온에서 확산계수의 값이 실제보다 작게 주어졌을 것이며 이러한 이유로 그림의 열유속은 과소평가되었을 수 있다.

노즐목을 감싸는 냉각유로에서 유선을 Fig. 4

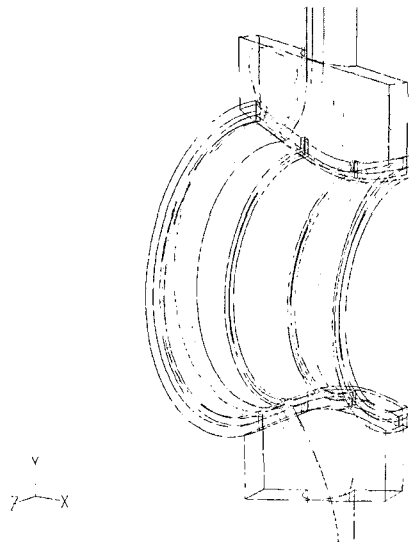


Fig. 4 Path-lines through the throat channel

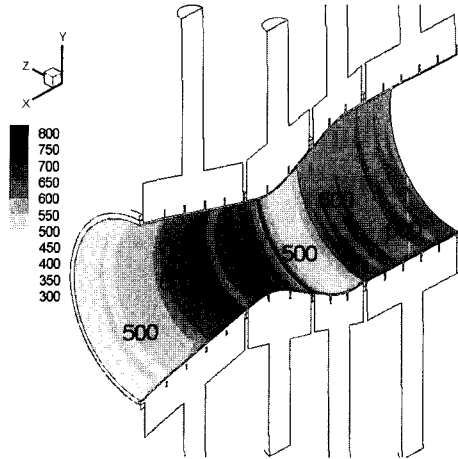


Fig. 5 Temperature distribution on hot-gas side wall of stainless for chamber pressure of 13 bar

에 나타내었다. 중심부에서 유입된 냉각수가 유로 면적을 고르게 흐르는 것이 확인된다. 강도 보강을 위한 지지벽이 냉각수가 한쪽으로 치우치는 것을 방지하는 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한 냉각수 공급 매니폴드가 적절한 기능을 하여 냉각유로에서 재순환 등 냉각성능에 부정적인 특성이 없는 것이 확인된다.

앞서 구한 열유속 분포를 경계 조건으로 칼로리미터의 3차원 냉각유로에 대한 열전달 해석

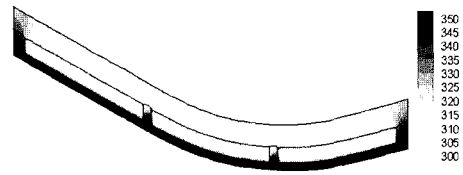


Fig. 6 Temperature distribution at $y=0$ plane

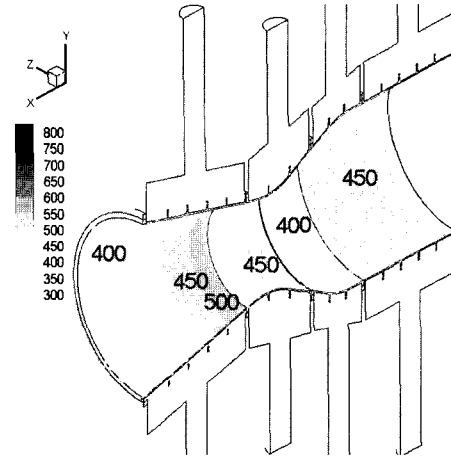


Fig. 7 Temperature distribution on hot-gas side wall of copper alloy for chamber pressure of 13 bar

결과를 Fig. 5에 도시하였다. 이때 내벽의 소재는 스테인리스를 사용하였다. 냉각유로의 각 채널은 서로 분리해서 해석하였으며 이는 축방향으로의 열확산량이 매우 작다는 것을 가정하는 것이다. 그림은 냉각유로의 내부 형상과 냉각수의 흐름을 반영한다. 즉, 냉각유로 지지벽 사이로 냉각수가 고르게 분포되어 냉각성능이 취약한 부분이 없음이 확인된다. 열유속이 가장 큰 노즐목에서 냉각수의 양을 충분하게 하여 연소실벽의 온도가 안전한 범위에 있도록 하였다. 노즐목에서 최고온도의 적정 수준을 660 K[1]로 제시하고 있으므로 본 해석 결과 안전한 범위에 있는 것으로 판단된다. 노즐목에서 온도가 확대부보다 낮은 것은 채널별로 유량을 다르게 공급하기 때문이며 냉각조건을 동일하게 가져간다면 열유속에 비례하는 벽온도가 얻어질 것이다.

Fig. 6은 $y=0$ 인 (대칭) 단면에서의 온도를 나

Table 2. Heat transfer of a calorimeter with a copper alloy liner for chamber pressure of 13 bar

	chamber	contraction	throat	nozzle.
\dot{m} (kg/s)	0.5	0.5	1.0	0.5
u_c (m/s)	3.7	6.9	10.7	2.6
Re	3700	7000	11000	2600
Δp (bar)	0.14	0.37	0.75	0.12
T_{max} (K)	511	455	484	542
T_{av} (K)	450	388	415	426
ΔT_c (K)	20	11	9	15

타내는 것으로 역시 스테인리스 소재를 대상으로 한다. 외벽의 온도는 보강재가 있는 위치를 제외하고는 거의 상승하지 않으며 냉각수의 국부적인 온도상승은 심각하지 않다. 이로써 외벽의 열전달을 무시한 단열조건이 타당성이 확인된다.

소재를 구리합금 계열로 변경할 경우, 내벽의 온도분포를 Fig. 7에 도시하였다. 최고온도가 500 K 수준으로 낮아지므로 정확한 측정을 위하여 냉각수의 유량을 감소시킬 여지가 있다. 연소실 압력이 높아질 경우, 냉각성능 향상을 위하여 구리계열의 소재가 필수적일 수 있으며 그림은 구리의 냉각성능 향상 정도를 제시하고 있다. Table 2는 연소실 압력 13 bar에서의 해석 결과를 정리한 것으로 냉각수 유량과 압력강하 결과가 포함되어 있다. 냉각수 유량은 1차원 해석을 기반으로 수차례의 시행착오로 적절한 범위를 결정하였다. 냉각유로의 압력은 연소실의 압력보다 높은 것이 사고시 안전성 확보차원에서 유리하며 상기의 압력강하를 고려하여 제작되어야 한다. 또한 정확한 열유속 측정을 위하여 냉각수의 온도 상승이 높은 것이 유리하므로 냉각에 문제가 없는 수준에서 냉각수 유량을 감소시키는 것이 필요하다. 표에서 연소실 벽온도는 다소 여유가 있으며 이와 관련하여 최적의 냉각수 유량을 결정하는 연구가 계속되어야 할 것이다.

연소실 압력이 60 bar로 상승할 경우 연소실 벽으로의 전열량이 증가하여 스테인리스 재질의

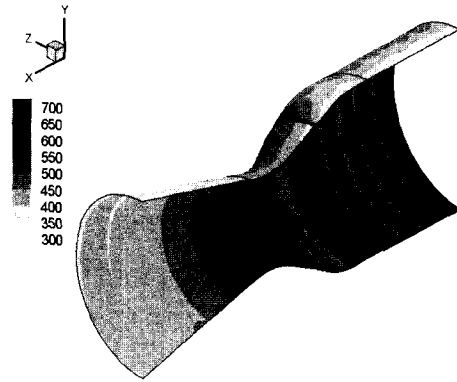


Fig. 8 Temperature distribution on hot-gas side wall of copper alloy for chamber pressure of 60 bar

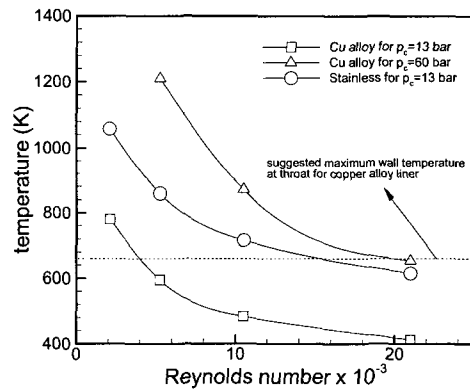


Fig. 9 Maximum temperature at throat vs. Reynolds number of coolant flow

경우 냉각이 어렵다. 이와 비교하여 구리합금의 열전도계수는 10배 이상이므로 동일한 냉각조건에서 연소실 내벽의 온도를 낮출 수 있다. Fig. 8은 구리 합금을 사용한 연소실 내벽의 온도분포를 나타내는 것이다. 막냉각이나 열차폐코팅 등의 도움 없이 물냉각만으로 냉각이 가능함을 알 수 있다. 이때 냉각유로에서의 레이놀즈 수는 연소실, 축소부, 노즐목, 노즐에서 각각 1.5×10^4 , 1.4×10^4 , 2.1×10^4 , 1.0×10^4 이다. 상기 레이놀즈 수는 유로에서 평균 유속과 유로 높이를 기준으로 한 값이다.

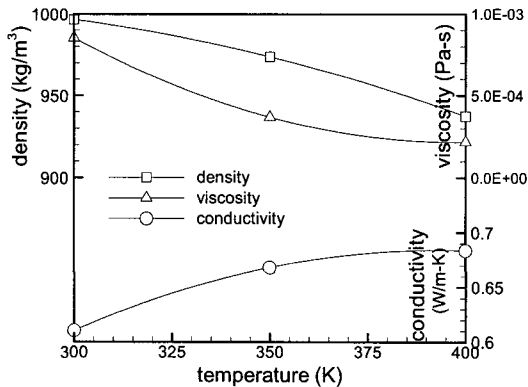


Fig. 10 Temperature dependency of material properties of coolant

Figure 9는 냉각유로에서의 레이놀즈수 증가에 대한 노즐목 내벽의 최고온도 변화를 도시한 것이다. 스테인리스 내벽을 적용할 경우, 구리합금인 경우에 비하여 동일한 냉각조건에서 연소실 내벽의 온도가 200 K 이상 높다. 또한 레이놀즈수가 20,000을 넘을 경우, 냉각성능이 포화되므로 실제 연소기의 경우 재생냉각 이외에 추가적인 냉각기법이 중첩적용되어야 할 것으로 판단된다. 또한 냉각수 공급에 필요한 가압량은 레이놀즈수의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 재생냉각에 의한 냉각량을 적절한 수준으로 제한할 필요가 있다.

앞서 보인 해석 결과는 냉각수의 물성변화를 고려하지 않은 것으로 이는 냉각수의 온도 상승이 크지 않다는 사실에 근거를 둔 것이다. 그러나 재생냉각 시스템의 경우, 냉각유체의 압력이 50기압 이상인 경우가 흔하다. 이러한 환경에서 냉각유체의 온도상승이 크더라도 비등현상이 발생하지 않으며 탄화수소 계열의 냉각유체를 사용할 경우, (물에 비하여) 비열이 작으므로 온도상승이 큰 경우가 보통이다. 따라서 냉각유체의 물성에 의한 냉각성능 변화를 확인할 필요가 있다. 이와 관련하여 냉각수의 물성 변화를 고려한 냉각해석을 수행하였으며 Fig. 10은 압력 2.5 기압, 온도 300~400 K 구간에서 냉각수의 밀도, 점성계수, 열전도계수[10]를 2차식으로 근사한 결과를 도시한다. 연소실 압력 60 기압에서 레

이놀즈수 2.1×10^4 인 경우에 대하여 물성 변화를 고려한 결과 최대온도가 545 K로 확인되었으며 이는 물성변화를 고려하지 않은 결과에 비하여 17 % 감소한 것이다. 이는 온도가 상승할 경우, 열전도 계수 증가에 의한 전열량 상승과 점성계수 감소에 의한 경계층 두께의 감소에 의한 냉각성능 향상에 의한 것으로 판단된다. 또한 고온가스의 물성 역시 열유속 평가에 중요한 영향을 미칠 것이므로 이의 영향을 포함하는 연구가 향후 계속되어야 할 것으로 판단된다.

3. 결론

KSR-III 축소형 엔진을 원형으로 하는 칼로리미터의 냉각성능해석을 수행하였다. 연소실 벽으로의 열유속은 문헌에서 제시하는 수준으로 나타났으며 냉각수 유로에서의 3차원 열전달해석을 통하여 예상되는 압력강하와 연소실 벽온도를 결정하였다. 연소실 압력 13 bar에서 구리합금 내벽의 경우 스테인리스 소재에 비하여 동일한 냉각조건에서 연소실 내벽온도가 200 K 이상 낮게 유지되었다. 냉각수의 물성변화를 관찰한 결과 냉각유로 벽면에서 냉각수의 온도상승에 의하여 열전도계수가 높아지고 점성계수는 낮아졌으며 이러한 특성은 냉각성능을 향상시킨다. 본 해석 결과를 이용하여 칼로리미터의 설계가 완료되었으며 제작/시험을 거쳐 본 연구방법의 검증이 이루어질 것이다. 이러한 내용은 재생냉각형 로켓엔진의 설계/제작/시험 기법으로 활용될 것이다.

후 기

본 연구는 공공기술이사회에서 시행한 “로켓엔진 연소기 고성능화 기술개발” 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Huzel, D.K. and Huang, D.H., Modern engineering for design of liquid-propellant rocket

- engines, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1992
2. Liquid rocket engine fluid-cooled combustion chamber, NASA SP-8087, 1972
 3. 정용현, 조원국, 한상엽, 류철성, "소형 연소기 냉각 유로 개념 설계," 한국추진공학회지 제6권 제4호, 2002, pp.1-6
 4. 김지훈, 박희호, 김유, 황수권, "액체로켓엔진 추력실의 재생냉각 기관 설계," 한국추진공학회지 제6권 제4호, 2002, pp.25-35
 5. P.A. Master, E.S. Armstrong and H.G. Price, "High-pressure calorimeter chamber tests for liquid oxygen/kerosene (LOX/RP-1) rocket combustion", NASA technical paper, 1988
 6. 김병훈, 박희호, 황수권, 김유, "액체로켓 추력실에서 heat flux 측정을 위한 calorimetric chamber의 연구," 한국항공우주학회지 제31권 제4호, 2003, pp.76-81
 7. 김유, 단일요소 분사기의 연소성능시험, 한국항공우주연구원, 2002
 8. 채연석 외, 3단형 과학로켓 개발 사업(I), 한국항공우주연구원, 1998
 9. Fluent v.5 User's Guide, 1998
 10. <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>