

가열된 튜브에서 발생하는 강제 대류열전달 특성에 관한 실험적 연구

박희호* · 이양석** · 김선진***

Experimental Investigation on Forced Convective Heat Transfer Characteristic Generated to Heated Tube

Hee-ho Park* · Yang-suk Lee** · Sun-jin Kim***

ABSTRACT

The Heated Tube Facility(HTF) was fabricated to identify the forced convective heat transfer and the cooling characteristic for the hydrocarbon fuel(Jet A-1), which is used for the coolant of the regenerative cooling system. The forced convective heat transfer coefficient was calculated from the measured coolant and tube surface temperature. In case of using the Jet A-1, the maximum heat flux which the coolant can absorb was identified by determining the critical wall temperature generating the burnout on the fixed flow condition. The inlet bulk-temperature of the coolant has a direct influence on the forced convective heat transfer characteristic.

초 록

재생냉각 시스템의 냉각제로 사용하는 탄화수소계열 연료인 Jet A-1의 냉각특성과 강제대류 열전달 특성을 파악하기 위해 가열된 직선 튜브를 제작하였다. 냉각제의 입, 출구온도와 튜브의 외벽 온도를 측정하여 강제대류 열전달 특성을 고찰하였다. 결과를 통하여 Jet A-1을 사용한 경우에는 일정 유동조건에 대하여 burnout이 발생하는 최초의 벽 온도를 결정함으로써 냉각제가 수용할 수 있는 최대 열유속을 확인하였다. 냉각제의 유속과 입구온도가 대류열전달 특성에 직접적인 영향을 주는 인자임을 확인하였다.

Key Words : Regenerative Cooling(재생냉각), Heat Transfer(열전달), Heat Flux(열유속), Jet A-1

1. 서 론

액체 추진기관의 연소 시 연소실 및 노즐에는 사용되는 벽재질의 용융온도에 거의 2배까지 육박하는 고온(1,900~3,700K), 고압, 큰 열 유속의 연소가스가 발생된다. 따라서 운용 시간 동안 적절한 냉각이 없이 연소실과 노즐을 비롯한 엔진 시스템을 보호하는 것이 불가능하다.

† 2005년 10월 8일 접수 ~ 2006년 8월 25일 심사완료

* 정회원, (주)삼성테크윈 파워시스템연구소

** 학생회원, 충남대학교 항공우주공학과

*** 정회원, 청양대학 소방안전관리과
연락처, E-mail: hohee@hanmail.net

액체추진기관에서 가장 널리 사용되는 냉각방법은 추진제를 냉매로 사용하는 재생냉각(Regenerative cooling)방식이다. 이는 연소 시 발생하는 고온, 고압의 연소가스에 의하여 연소실 및 노즐 벽면으로 유입되는 큰 열 유속을 벽면에 냉매를 강제 순환시켜 흡수함으로써 벽면을 보호할 뿐만 아니라 벽면으로 유입된 큰 에너지를 냉매가 흡수하여 기화기에서 재생하는 방식으로써, 장시간 연소에도 추진기관에 이상이 없도록 함과 동시에 추진기관의 에너지 효율을 극대화할 수 있게 된다. 그러나 이러한 시스템은 인젝터 및 연소기의 성능에 따라 국부적으로 냉각채널 내의 압력강화로 인해 기화가 발생하거나 냉각채널 내에 탄소 침전물(Carbon deposit)을 형성하여 냉각채널이 파손되는 현상이 발생하며, 이를 방지하기 위해서는 냉각채널에서 발생하는 강제 대류열전달 현상에 대한 정확한 예측이 필요하다. 냉각채널에서의 강제 대류열전달 현상에 대한 특이현상(국부적인 가열, Carbon deposit의 영향, 거칠기 효과, Curvature 효과)을 이론적으로 연구하거나 실험적 기법을 통해 연구하기는 매우 어렵다. 특히, 실험에 의한 기법은 많은 예산을 필요로 하며, 측정의 어려움과 위험성을 크게 내포하고 있다. 상사성을 고려하여 냉각채널을 모사한 전기로 가열되는 튜브에 대한 실험기법은 예산, 위험성, 실험 정확도 등에서 효과적임으로 미국, 러시아 등에서 수행되어지고 있다.

Keming Liang[2]은 스테인레스 강과 구리 재료의 튜브를 사용하여 여러 종류의 탄화수소 계열의 연료에 관한 열전달 특성을 파악하였고, 액체 메탄, 프로판, 케로신에 대한 강제대류 열전달 관계식을 산출하였으며, 튜브의 번 아웃(burnout)이 발생되었을 때의 열 유속을 조사하였다. E. Choi[4]등은 지름의 950배가 되는 상대적으로 긴 원형 튜브에 흐르는 물의 난류유동에서 열전달 계수와 마찰 현상을 연구하였고, 국부적인 Re 수와 Pr 수를 사용하여 국부적인 Nu 수를 결정하기 위해서 국부적인 Bulk-mean Temperature (T_{LB})를 사용하여 새로운 난류 열

전달 관계식을 산출하였다. Diane L. Linne[5]등은 초음속 추진기관과 관련하여 냉각제로써 JP-7의 냉각성능을 평가하기 위해서 전기적으로 가열된 튜브실험을 수행하였다. 927°C까지의 표면 온도에서 JP-7의 열전달 성능, 탄소 침전물 형성, 재료와의 적합성을 확인하기 위해 지름이 0.125in인 다양한 재질(SUS 304, Inconel 617, Haynes 188, 50/50 Moly-Rhenium)의 튜브를 사용하여 실험하였다. 낮은 열유속에서 냉각제의 열전달은 Dittus-Boelter 경험식과 일치함을 확인하였다. 높은 열유속에서는 소음을 동반한 불안정 현상이 관찰되었으며, 이는 냉각수의 열전달 증가에 중요한 요인이 됨을 밝혔다. 또한 낮은 열유속에서는 볼 수 없었던 탄소 침전물의 적층이 존재하는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 액체추진기관의 냉각채널을 모사하여 실험할 수 있는 전기로 가열되는 튜브에 대한 실험기법을 통하여 1차적으로 실험기법 정립 및 냉매에 따른 영향을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험장치

Heated Tube Facility(HTF)를 이용한 실험은 유체유동에서 발생하는 강제대류 열전달 현상 등의 기초 자료를 제공하기 위해 널리 사용되는 방법이다. HTF는 전력 공급부, 실험부(test section), 냉각제 저장 및 공급부, 가압부의 네 부분으로 구성된다. Fig. 1은 Heated Tube Facility(HTF)의 간략화 된 도식을 보여준다.

2.1.1 전력공급장치

연소 시 발생하는 열 유속을 모사하여 test rig에 열을 발생시키기 위해 고전류와 저전압의 전력을 제공하는 직류 전력 공급 장치(DC Power Supply System)를 채택하였다.

Tube Heater Power 제어를 위하여 3상 440V 60Hz로 공급되는 1차 교류 전압을 DC 0~50V,

0~800A로 변환하여 최대 40KW의 전력을 공급할 수 있는 장치로써, 임계 열유속 측정 및 열유동 특성, 열전달에 관한 실험자료의 산출, 열전달 특성에 관한 측정기술의 획득, 계측기기 개발 및 특성평가와 보정, 상기 실험을 통하여 냉각 유체 특성분석 및 자료 획득을 목적으로 제작되었다.

본 장치는 가변 저항(Variable Resistance ; VR)에 의해 전력을 제어하는 방식으로 외부에 디스플레이용 인디케이터(indicator)를 통해 전력공급 장치로부터 공급되는 전류, 전압, 전력을 작동자가 확인하여 제어할 수 있게 된다. 또한, 과전류가 발생하여 실험장치(test rig) 주위의 온도가 과열되거나 장비에 이상이 발생하였을 경우 이를 자동 감지하여 전원공급을 차단시킴으로써, 장비와 작업 인력을 보호할 수 있는 안전장치가 구비되어 있다.

최대 3상 380V의 교류전압만이 공급되는 연구실 여건으로 인하여, 본 장비의 가동에 필요한 440V의 1차 교류전압의 공급을 위해서 변압기(transformer)를 사용하였다. 그리고 전자기 에너지의 축적에 의한 전류의 급격한 변화에 대해서 큰 유도성 리액턴스를 제공하기 위해 리액터(reactor)를 사용하였다.

2.1.2 실험부 (test section)

Figure 2는 본 실험에 사용된 가열튜브의 개략도이다. 3/8" Stainless steel 304(t=0.7mm) 튜브

를 사용하였고, 유체의 유동을 안정화시키기 위하여 공급탱크와 히터 사이의 간격을 약 1m로 유지하고, 튜브 내의 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 히터 후단에 오리피스를 설치하였다. 그리고 튜브에 일정한 열에너지 공급을 위한 전원공급 장치로써 자동전압조정기(Auto Voltage Regulator)를 사용하였다. 온도 측정 장치로는 K-type 열전대(thermocouple)을 튜브 외벽에 축방향으로 일정한 간격(30mm)을 유지하도록 하여 점용접(spot welding)함으로써 정확한 온도측정에 신뢰도를 높일 수 있었다. 또한 히터 전, 후단에 열전대를 설치하여 냉각제의 온도 상승을 간접적으로 확인할 수 있었다.

Table 1. Physical Property Of The Stainless-Steel 316 and Tube Specification

Density	8.0mg/m ³	
Conductivity (W/m · K)	100℃	16.2
	500℃	21.6
Specific Heat (J/kg · K)	at 0~100℃	502
Specific Resistance (ρ)	Ω · mm	74×10 ⁻⁶
Melting Point	℃	1375~1400
Outer-diameter	6.35 mm	
Inner-diameter	3.85mm	
Wall Thickness	1.25mm	
Total Test Rig Length	1340mm	
Heated Tube Length	500mm	

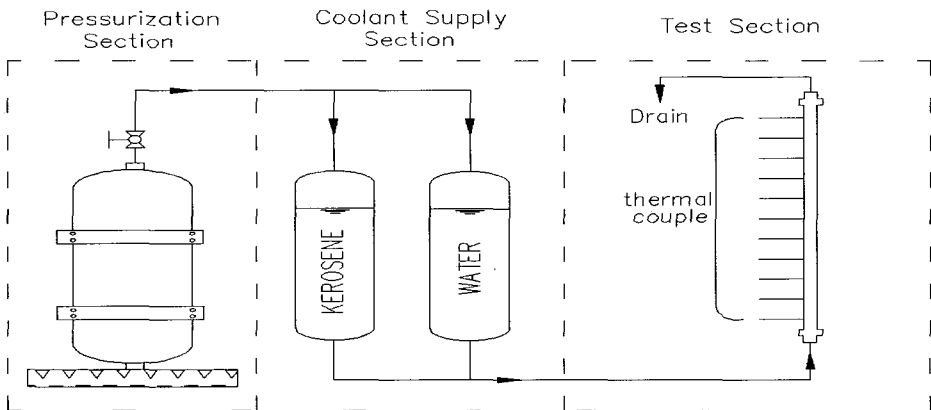


Fig 1. Schematic of Heated Tube Facility (HTF)

2.2 실험방법

본 실험에 앞서 튜브 외벽에 부착한 열전대의 온도측정의 정확성을 확인하기 위하여 cooled junction된 온도보드를 통한 각각의 열전대의 온도를 확인하였다. 그리고 추가적으로 끓는 물을 튜브 안으로 주입하여 측정된 온도의 균일성을 비교, 확인하였다.

본 연구에서는 튜브 내부 압력을 8kgf/cm^2 으로 고정하고, 출구 끝단에 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 3.85mm의 오리피스를 장착하여 냉각제의 유량을 조절하였다. 실험장치에 전력을 인가하기에 앞서 튜브 내에서의 유동 안정화를 위해 약 10초 동안 냉각제를 공급하고, 실험장치 전단에 설치된 압력변환기를 통한 측정압력이 8kgf/cm^2 가 유지됨을 확인한 후 전력 공급장치를 가동시켰다. 가변 저항에 의해 실험조건에 따른 전력을 고정된 후, 일정 시간이 경과하면 튜브 표면온도와 냉각제 출구온도가 평형상태에 도달하였다. 이를 확인한 후 총 2회에 걸쳐 각각 20초간 냉각제를 포집하여 전자저울을 이용하여 유량을 측정하였다. 이 때 측정된 유량을 실험부 전단 배관에 설치된 coriolis force type 유량계로 측정된 유량과 비교함으로써 측정의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 마지막 과정으로 전력 공급장치의 작동을 멈추고, 측정온도가 상온이 될 때까지 실험장치를 냉각시킨 후 냉각제의 공급을 중단하였다. 모든 실험은 냉각제의 출구온도가 끓는 점 이하에서 수행하였다.

2.2.1 실험 조건

냉각제의 냉각성능을 파악하기 위해서 전기로 가열된 튜브를 이용하여 다음과 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

첫째, 안정성이 높은 물과 탄화수소 계열 연료인 Jet A-1을 사용하여 냉각제에 따른 냉각특성을 파악하였다. 이 때, 전력량은 5, 9, 14KW 각각에 대하여 유속을 6, 10, 13m/s로 고정된 상태에서 실험을 수행하였다. 둘째, 전력량을 일정하게 고정하고, 유속을 변화시키면서 각각의 냉각제에 대하여 유속에 따른 강제대류 열전달 특성을 파악하였다. 물의 경우, 5, 9, 14KW로 전력량을 고정하고, 각각에 대하여 유속을 변화시켰으며, Jet A-1의 경우에는 7, 19KW를 추가하여 유속에 대한 영향을 분석하였다. 셋째, 유속을 일정하게 고정된 상태에서 전력량을 변화시켜, 각각의 냉각제에 대하여 전력량이 강제대류 열전달 특성에 미치는 영향을 파악하였다. 넷째, 냉각제로 탄화수소 계열 연료인 Jet A-1을 사용할 경우, 냉각제의 입구온도(T_{in})가 강제대류 열전달 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 이 때, T_{in} 를 $30\text{ }^\circ\text{C} \sim 41\text{ }^\circ\text{C}$ 사이에서 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2.2.2 계산 방법

냉각제의 냉각성능은 열전달계수를 통해 파악할 수 있다. 열전달계수(h_f)는 측정된 튜브 표면온도($T_{w,o}$)와 Eq. (1)의 튜브 내부에서 유체 정

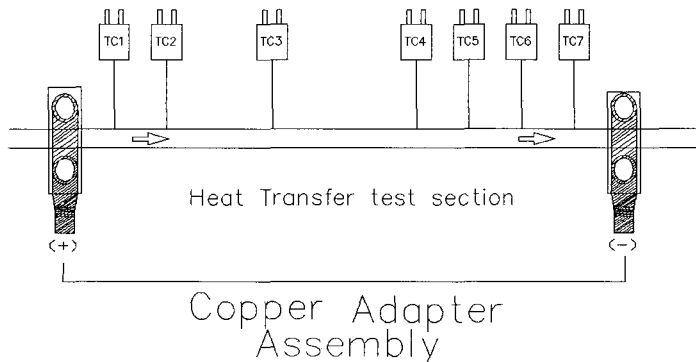


Fig. 2 Schematic of Test Rig and Thermocouple (TC)

상유동의 에너지 보존 방정식을 통해 산출한 열 유속(\dot{q})을 이용하여 일련의 전도와 대류의 열전달 과정을 거쳐 도출된다.

$$\dot{q} = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in})/A \quad (1)$$

여기서, T_{in} 과 T_{out} 은 각각 입/출구에서의 유체온도(°C), C_p 는 입/출구 온도를 산술평균한 $(T_{in} + T_{out})/2$ 온도에서의 비열(J/kg · °C)을 나타낸다. 또한 A 는 열전달이 이루어지는 튜브 내부 벽 면적이다. 따라서 Eq. 2와 같은 관계가 성립한다.

$$\dot{q} = \dot{q}_{cond} = \dot{q}_{conv} = const \quad (2)$$

일정하게 공급되는 전력은 튜브를 저항체로 하여 열량으로 변환되고, 열은 전도에 의해 연소실 벽을 따라 전달되어 Eq. 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{q}_{cond} = \lambda_{tube} \frac{T_{w,o} - T_{w,l}}{\delta_{tube}} = \dot{q} \quad (3)$$

여기서, λ_{tube} 는 튜브의 열전도도(W/m · °C), δ_{tube} 는 튜브의 벽 두께(m)를 나타낸다. $T_{w,o}$ 는 평형상태에서의 온도를 적용하였다. 따라서 Eq. 3을 통해 냉각제 쪽 벽면온도($T_{w,l}$)를 도출한다.

평형상태를 유지할 때, 튜브 안에서 유체의 온도는 입구온도부터 출구온도까지 길이방향으로 선형적으로 증가한다. 따라서 입/출구온도를 이용하여 측정위치에서 유체의 bulk 온도(T_x)를 산출하였다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \dot{m}C_p(T_1 - T_{in})/A_1 \\ &= \dot{m}C_p(T_2 - T_1)/A_2 \\ &= \dots \\ &= \dot{m}C_p(T_{out} - T_7)/A_7 \end{aligned} \quad (4)$$

Equation 4에서 C_p 는 각 항의 유체온도를 산술평균한 값에서의 비열, A_x 는 측정위치 사이에서 튜브의 내부면적을 나타낸다. 벽으로부터

냉각제 쪽으로의 열전달량은 다음과 같은 Eq. 5에 의해 정의된다.

$$\dot{q}_{conv} = h_l(T_{w,l} - T_x) = \dot{q} \quad (5)$$

Equation 5에 의해 벽으로부터 냉각제로의 강제대류 열전달계수(h_l)를 산출한다.

3. 결 과

3.1 온도분포

실험기법에 대한 타당성 검증을 위하여 비열이 커서 안정적이고, 통상적으로 물성치가 정확하게 알려져 있는 물을 냉각제로 선정하였다.

냉각제로 물을 사용하여 유속을 1.45m/s로 일정하게 유지시킨 후, 4.87KW의 전력을 70초 동안 일정하게 실험부에 인가하였다. 이러한 유속 조건에서 Re 수는 11,700으로 실험부에서의 유동이 층류를 형성하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3은 앞서 설명한 실험조건에서 튜브의 표면온도와 냉각제의 입, 출구 온도를 나타내고 있다. 전력을 인가한 후 약 30초가 경과하면서 모든 구간에서의 온도가 평형상태에 도달하였으며, 입구에서 출구 방향으로의 외벽온도가 일정하게 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 외부에서 일정하게 공급되는 열량을 냉각제가 지속적으로 흡수함으로써 길이방향으로 갈수록 냉각제가 함유하는 열량이 증가하기 때문에 나타나는 현상이다. 냉각제로 물을 사용했을 경우, 전력과 유속의 크기에 상관없이 모든 조건에서 이와 같은 경향을 확인할 수 있었다. 단, 모든 실험조건에서 냉각제의 출구온도를 끓는점 이하로 유지시켰다. 이와 같은 결과를 통해 냉각제의 냉각특성 파악을 위하여 본 실험기법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 전력 5.08KW, 유속 10.39m/s의 조건에서 냉각제로 Jet A-1을 사용하였을 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 물에서의 온도분포와 같이 길이방향으로 온도가 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

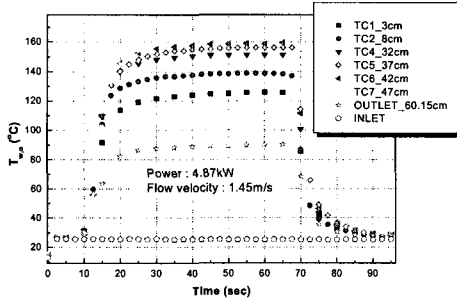


Fig 3. Out-wall Temperature Profile Measured With a Stable Condition (Water)

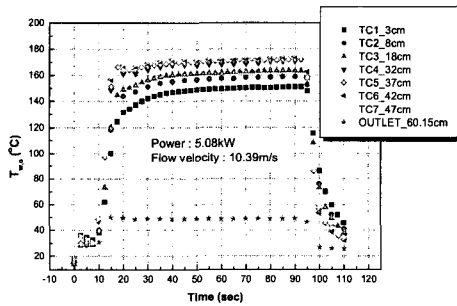


Fig. 4 Out-wall Temperature Profile Measured With a Stable Condition (Jet A-1)

3.2 전력량과 냉각제의 열유량

Table 2는 전력 공급장치로부터 실험부에 인가된 전력량과 실험부 입, 출구에서 측정된 온도 차이를 이용하여 계산된 열유속을 비교한 것이며, 이를 통해 실험장치의 실효성을 판단하였다. 물에 대해서는 압력, 온도에 따른 정확한 물성치를 적용할 수 있어 계산에 있어서의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

여기서 냉각제의 비열(C_p)은 입, 출구의 평균 온도를 적용한 값을 사용하였다. 그 결과, 모든 실험조건에 대하여 약 97%의 장치 효율을 확인할 수 있었으며, 이는 전력 공급장치에서 인가된 전력의 대부분이 냉각제 쪽으로 전달되고 있으며, 일부 소량만이 자연 대류로 인해 외부로 방출되고 있음을 의미한다.

Table 2. Heat Transfer Test Conditions and Heated Tube Efficiency For The Water (P_inlet = 8kgf/cm² ; const)

No.	Power (KW)	power/Af (MW/m ²)	Heat flux (MW/m ²)	Heated tube efficiency (%)
1	4.88	0.81	0.75	93.2
2	5.13	0.85	0.82	96.1
3	5.17	0.85	0.83	97.4
4	5.32	0.88	0.85	97
5	9.05	1.5	1.45	97.1
6	9.13	1.51	1.48	98.2
7	9.18	1.52	1.5	98.6
8	14.18	2.34	2.27	96.9
9	14.38	2.38	2.33	97.9
10	14.41	2.38	2.32	97.6
11	14.43	2.39	2.33	97.6

3.3 냉각제의 비등과 burn-out 현상

Figure 5는 물에 대하여 Fig. 3, Fig. 4에서 보여준 실험조건 중에서 외벽의 온도분포가 높은 조건을 선정하여 내부 벽면온도($T_{w,i}$), 유체온도(T_b) 그리고 열전달계수(h_x)를 길이방향으로 나타낸 것이다. Fig. 5는 냉각제로 물을 사용한 경우로 $T_{w,i}$ 이 끓는점 이하로 유지되고 있으며, 열전달 계수는 증가함을 확인할 수 있다. 일정한 열량이 지속적으로 공급되는 상태에서 냉각제는 길이방향으로 갈수록 흡수한 열량을 축적하게 되고, 이로 인한 온도의 상승은 냉각제의 점성을

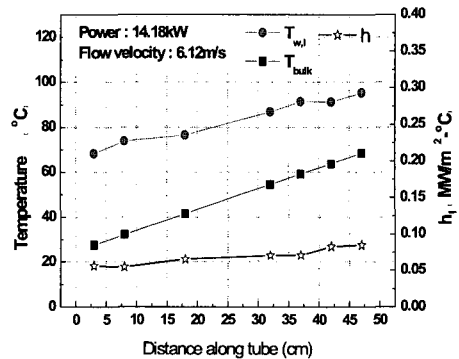


Fig. 5 Typical Experimental Inner-Wall Temperature ($T_{w,i}$), Bulk Temperature (T_b), and Heat Trans Coefficient (h_x) Profiles

감소시켜 Re 수를 증가시킴으로써 열전달계수를 증가시키게 된다.

Figure 7은 Jet A-1을 사용하여 유속을 5m/s로 일정하게 유지하고, 18KW의 전력을 인가하였을 때, 외부 벽면온도 분포를 나타낸 것이다. 전력 인가 후 10초정도 경과하자 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 실험부 입구에서 약 43cm 위치에서 burn-out이 발생하였다. Fig. 6을 살펴보면, 47cm 지점(TC4)에서 측정된 외벽온도가 1020°C까지 상승했음을 확인할 수 있다. 벽 소재가 내열강도성 철인 경우 녹는점이 1,000~1,300K임을 감안하면, TC4근처에서 burn-out이 발생했음을 판단할 수 있다. 같은 시점에 출구온도는 316°C까지 도달했으며, 출구에서는 액체가 아닌 기화로 인한 기체가 분출되는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 또한 탄화수소계열 연료를 사용하는 엔진의 설계에 있어 실제 로켓은 고압, 고속, 고온의 조건에서 운용되는 만큼 이러한 영역에서 추가실험의 필요성을 인식할 수 있었다.



Fig. 6 Burn-out Photos

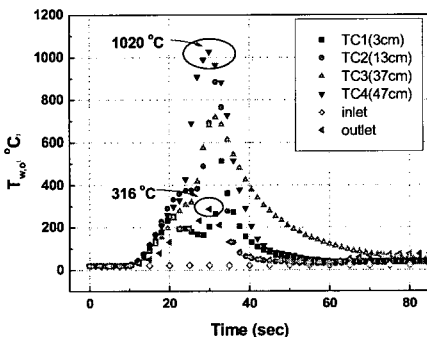


Fig. 7 Burn-out Test Condition for Jet A-1
(Power : 18KW, Flow Velocity : 5m/s)

3.4 Jet A-1의 열전달에 대한 입구온도의 영향

Figure 8에서는 압력 8kgf/cm², 유속 14.3m/s의 조건에서 연료의 입구온도($T_{b,in}$)가 열전달에 미치는 영향을 확인하였다. 입구온도가 높아질수록 열전달계수도 높아짐을 볼 수 있다. 이는 냉각제의 온도(T_b)가 높아질수록 점성은 낮아지고, Re 수가 높아짐에 따른 결과이다.

Figure 2에서 설명한 재생냉각시스템에서 입구온도를 고려한 냉각채널 설계가 이루어진다면 더욱 효율적인 열전달 모델을 구성할 수 있을 것이다.

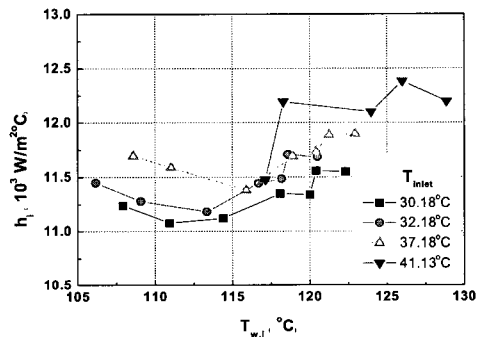


Fig. 8 Effect of inlet bulk temperature on Jet A-1 heat transfer

3.5 냉각제로 물을 사용한 경우

모든 실험조건에서 산출한 강제대류 열전달계수(h_l)를 이용하여 Eq. (1)에서 언급한 바와 같이 무차원 Nu 수를 도출하였다.

$$Nu_{exp} = \frac{h_l d_e}{\lambda_l(T_l)} \tag{6}$$

그리고 실험적으로 도출한 Nu 수(Nu_{exp})를 경험식들($Nu_{semi-ex}$)과 비교함으로써 냉각제에 따른 적용 가능성을 확인하였다.

$$Nu_{LA} = 0.005 Re_b^{0.95} Pr_B^{0.4} \tag{7}$$

; Liang' s equation

$$Nu_{DB} = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4}$$

; Dittus-Boelter' s equation (8)

$$Nu_{ST} = 0.027 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_{w,l}} \right)^{0.1}$$

; Sieder-Tate' s equation (9)

$$Nu_{TL} = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4} \left(\frac{T_{w,l}}{T_b} \right)^{-0.57 - \frac{1.59}{x/D}}$$

; Taylor' s equation (10)

Figure 9는 냉각제로 물을 사용하였을 때, 각각 test rig의 42cm 지점에서의 실험결과를 토대로 하여 Nu_{exp} 을 $Nu_{semi-exp}$ 와 비교한 것이다. 출구 쪽 지점에서 Fig. 9의 경우에는 Nu_{LA} 과는 비교적 일치하고 있으나, Nu_{ST} 와는 -10%로 오차가 커졌음을 확인할 수 있으며 Nu_{DB} 는 -20%로 증가, Nu_{TL} 는 -30%로 감소된 경향을 보인다.

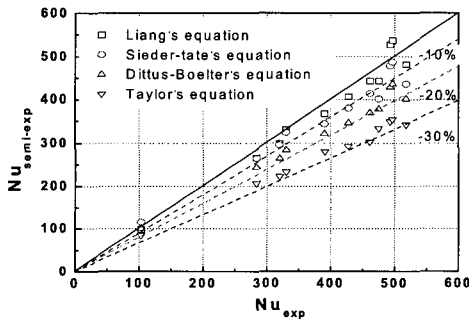


Fig. 9 Comparison of Nusselt Numbers Calculated by Semi-Experimental Equation With The Experimental Values (For The Water 42cm Point from The Inlet)

Figure 9의 결과를 통해 Taylor식의 경우 다른 식들에 비해 큰 오차를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Taylor식이 수소, 헬륨, 질소 등 기체에 적용할 때 주로 사용하는 식으로 이를 액체인 물에 적용했기 때문에 나타나는 경향으로 판단된다.

3.6 냉각제로 Jet A-1을 사용한 경우

냉각제로 탄화수소 계열 연료인 Jet A-1을 사용한 실험결과에 대해서도 동일한 방법으로 고찰해 보았다.

Jet A-1은 물과는 다른 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있는데, 물의 경우에는 Liang식과 유사한 경향을 나타내는데 반해 Jet A-1에서는 Dittus-Boelter식과 유사한 경향을 보이고 있다. 출구 쪽 지점에서 Fig. 10의 경우에도 Nu_{DB} 과는 일치하고 있으며, Nu_{ST} 과 Nu_{LA} 와는 +7.8% 이내의 오차로 유사한 경향을 보인다. Nu_{TL} 는 -53.3%로 감소된 경향을 보인다. 이는 Jet A-1의 비열이 물에 비해 상대적으로 작으며, 상이한 물성치로 인해 나타나는 결과로 판단된다.

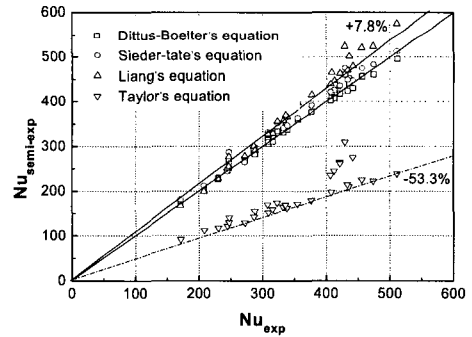


Fig. 10 Comparison of Nusselt Numbers Calculated by Semi-Experimental Equation With The Experimental Values (For The Jet A-1 42cm Point From The Inlet)

4. 결 론

재생냉각 시스템의 냉각제로 사용하는 탄화수소 계열 연료인 Jet A-1의 냉각특성 및 냉각채널 내에서의 강제대류 열전달 특성을 파악하기 위해 전기적으로 가열된 직선 튜브를 제작하였다. 냉각제의 입, 출구온도와 튜브의 외벽온도를 측정하여 강제대류 열전달 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 안정성이 높은 물을 냉각제로 사용하여 실험

한 결과, 온도분포의 균일성을 확인하였고, 전력량과 냉각제의 열유량 비교를 통해 약 97%의 장치 효율을 확인하였다.

2. 냉각제로 Jet A-1을 사용한 경우, 일정 유동조건에 대하여 burnout이 발생하는 최초의 벽 온도를 결정함으로써 냉각제가 수용할 수 있는 최대 열유속을 확인하였다.

3. 냉각제의 입구온도가 강제대류 열전달 특성에 직접적인 영향을 주는 인자임을 확인하였다.

4. 실험적으로 도출한 Nu 수(Nu_{exp})를 경험식들($Nu_{semi-ex}$)과 비교함으로써 냉각제에 따른 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구를 통해 냉각제의 냉각특성을 평가하는 실험기법을 정립하였으며, 냉각 시스템 설계를 위한 기초자료를 습득하였다. 추후 본 실험기법을 이용하여 냉각채널 내의 강제대류 열전달 특성에 영향을 미치는 인자인 표면 거칠기, 곡률, 채널형상에 대한 연구가 수행된다면, 그 결과를 보강함으로써 재생냉각 엔진을 설계 시 더욱 유용한 자료로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. G. P. Sutton, "Rocket Propulsion Element", 6th John Wiley & Sons, Inc. 1992
2. Liang Keming, Yang Baoe, Zhang Zhong, "Investigation of heat transfer and coking characteristics of hydrocarbon fuels", Journal of propulsion and power, Vol. 14 No. 5, 1998, pp.789-796
3. 홍용식, "우주추진공학, 청문각, 1994
4. E. Choi, Y. I. Cho, "Local Friction and Heat Transfer Behavior of Water in a turbulent Pipe Flow With a Large Heat Flux at the Wall". Journal of Heat Transfer, Vol. 117, 1995
5. Diane L. Linne, Michael L. Meyer, "Evaluation of Heat Transfer and Thermal Stability of Supercritical JP-7 Fuel" AIAA, 1977
6. 안원근, "液體로켓 추력실에서 發生하는 Heat Flux에 관한 實驗的 研究" 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 2003
7. D. R. Bartz, "A Simple Equation for Rapid Estimation of Rocket Nozzle Convective Heat-Transfer Coefficients.", Jet Propulsion, January, 1957
8. Dieter K. Huzel, David H. Huang "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines", AIAA Publ., Vol. 147, Prog. in Astronautics & Aeronautics, Washington DC, 1992
9. 박계승, 김유, 김태한, "액체로켓엔진 추력실의 재생냉각에 관한 실험적 연구(I)", 한국추진공학회지, 제7권 제1호, 2003, pp.12-20