

재생냉각 연소기용 구리합금과 연료 적합성 검증시험

임병직* · 김종규* · 강동혁* · 김홍집* · 김희태* · 한영민*

Compatibility Assessment of Copper Alloy and Hydrocarbon Fuel for Regeneratively Cooled Combustion Chamber

Byoungjik Lim* · Jonggyu Kim* · Dong-Hyuk Kang* · Hong-Jip Kim* · Hui-Tae Kim* · Yeoungmin Han*

ABSTRACT

In the regeneratively cooled combustion chambers using hydrocarbon fuels, coking occurs as the wall temperature increases which generates compounds deposition on the wall. This phenomenon reduces cooling capability of the coolant, finally it can cause damage to combustor by overheating of chamber wall. In this paper electrical heating equipment which is used for the coking experiments and the test results are introduced. The compatibilities of copper alloy with Jet A-1 were assessed at each condition based on the test results.

초 록

구리합금을 연소실 내벽으로 사용하고 탄화수소계 연료를 추진제로 사용하는 재생냉각 연소기에서 냉각채널 벽면온도가 상승함에 따라 냉각채널에 반응물이 침착되는 코킹현상이 일어난다. 이러한 현상은 냉각채널을 흐르는 연료에 의한 냉각효과를 감소시키게 되고, 높은 열유속으로 운영되는 연소기 내부벽면을 과열시켜 손상에 이르게 한다. 본 논문에서는 구성된 전기가열장치에 대해 소개하고 연소실 재질로 사용되고 있는 구리합금과 추진제로 사용되는 탄화수소계 연료 Jet A-1에 대해 가열시험 결과를 제시한다. 시험결과에 따라 각 조건에서의 구리합금과 Jet A-1의 적합성을 평가하였다.

Key Words: Jet A-1, Regenerative Cooling(재생냉각), Copper Alloy(구리합금), Sulfur(황), Coking (코킹)

1. 서 론

로켓엔진에 사용되는 연소기는 연소실에서 발생하는 고밀도의 에너지를 버텨내야 하는 가혹한 환경에서 운영된다. 이와 같은 이유로 열전도성이 우수한 구리계열을 이용하여 연소실을 제

작하는 것이 일반적이며 벽면 냉각을 위해 연료를 이용한 막냉각, 재생냉각 등의 방법과 열전달을 감소시키는 열차폐코팅이 복합적으로 사용된다(Fig. 1).

국내에서 개발 중인 재생냉각 연소기는 Jet A-1을 냉각유체 및 연료로 사용한다. 또한 높은 열전달 특성을 이용하고 강도를 높이기 위해 구리합금(크롬동)을 연소실 내벽 재질로 사용한다. 일반적으로 구리합금 연소실과 탄화수소계 연료

* 한국항공우주연구원 연소기그룹
연락처, E-mail: tachyon@kari.re.kr

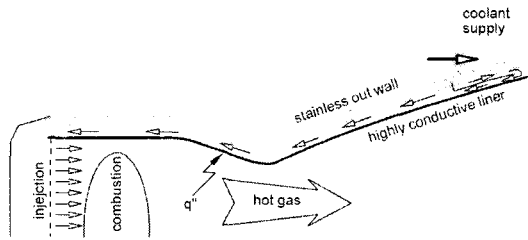
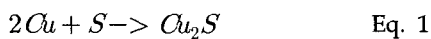


Fig. 1 Schematic of Regenerative Cooling System[1]

의 조합에서는 재생냉각 채널의 온도상승에 따라 연료에 포함된 성분과 벽면재질인 구리가 반응하여 반응물을 형성하는 코킹현상이 발생된다 [2-4]. 코킹현상이 발생하면 연소실 내벽에서 냉각유체로의 열전달이 감소하고 연소실에서 발생하는 고밀도 에너지가 연소실 벽면에 축적되면서 연소기에 손상을 입히게 된다. 로켓의 실패 원인이 될 수 있는 코킹현상 발생여부를 확인하고 방지하기 위해 연료와 연소실 벽면 재질의 적합성에 대한 정량적인 평가가 요구된다. 또한 발사체 선진국에서와 같이 자체적인 규격을 제정하여 로켓에 사용되는 연료를 관리할 필요성이 대두된다.

탄화수소계 연료로서 가장 많이 사용되는 것은 미국에서 주로 사용하는 RP-1과 러시아에서 사용하는 RG-1이다. RP-1에 대한 연료가열시험 결과는 여러 문헌을 통해 확인이 가능하다. 시험 결과들에서 코킹현상의 발생여부를 결정하는 가장 중요한 요소는 연료와 접하는 재생냉각채널의 벽면온도이다. RP-1의 경우는 시험조건에 따라 580~730K의 넓은 온도 범위에서 코킹현상이 발생하는 것으로 알려져 있다[5]. 또한 반응물이 연료에 포함된 황성분과 벽면재질인 구리성분의 반응에 의해 생성(Eq. 1)되기 때문에 표준 RP-1을 정제하여 황성분을 감소시킨 연료에 대한 시험도 수행되었다[6].



러시아와 미국에서 사용되고 있는 탄화수소계 연료에는 황성분의 허용 수치가 각각 100 ppm, 500 ppm 이하인 반면 Jet A-1의 경우는 3,000 ppm 이하를 기준으로 하고 있다(Table 1). 또한

Table 1 Specification of Hydrocarbon Fuel

Requirement	RP-1	RG-1	Jet A-1
Specific Gravity	0.799-0.815 @15°C	0.830-0.836 @20°C	0.775-0.840 @15°C
Sulfur (total wt%, max.)	0.05	0.01	0.3
Mercaptan-Sulfur (wt%, max.)	0.005	none allowed	0.003
Aromatics (max.)	5.0 vol%	5.0 mass%	25.0 vol%
Olefins (max.)	2.0 vol%	-	-
Naphthalenes (max.)	-	-	3.0 vol%
Kinematic Viscosity (CS, mm ² /s)	max.16.5 @-34°C	min.2.5 @20°C min.2.5 @-40°C	max.8 @-20°C
Net Heat of Combustion(MJ/kg)	min. 43.0	min. 42.9*	min. 42.8
Initial Boiling Point	-	min. 195°C	-
10% recovered	185-210°C	max. 210°C	max. 205°C
50% recovered	-	max. 235°C	-
90% recovered	-	max. 260°C	-
Evap. End Point	max. 274°C	max. 270°C	max. 300°C
Flash Point	min. 43°C	60°C	min. 38°C
Freezing Point	max. -37.8°C	max. -60°C	max. -43.9°C

* Value of T-1 (Russian Aviation Fuel)

실제 사용되고 있는 RP-1은 50 ppm 이하[5]인 것으로 알려져 있으며 국내 연소기 개발에 사용되고 있는 Jet A-1은 1,500~2,000 ppm의 황성분이 포함되어 있다. 이러한 연료의 특성으로 인해서 다른 탄화수소계 연료와 비교하여 Jet A-1에서 반응물이 더욱 빠르고 많이 생성될 것으로 추정된다.

하지만 Jet A-1을 이용한 재생냉각 연소기의 코킹현상에 대한 신뢰성 있는 시험결과는 기존 문헌에서 찾을 수 없다. 로켓 선진국에서 일반 제트연료의 로켓엔진 적용에 문제점이 있음을 파악하고 규격이 강화된 새로운 연료를 개발한 역사[5]를 통해서 볼 때 Jet A-1 연료 역시 일정 온도 이상에서 반응물이 생성되는 코킹현상이 발생할 것으로 추정된다. 따라서 재생냉각 연소기의 완전한 개발을 위해서는 연소기 자체설계뿐만 아니라 연료에 대한 개발 혹은 검증이 병행되어야 한다.

2. 시험설비

2.1 설비구성

시험설비는 연료를 저장하고 압력을 가하는 가압탱크, 전원을 공급하여 시편을 가열하는 전원공급장치, 시험대상인 시편과 스탠드, 시편출구에서 고온의 연료를 냉각하여 회수하는 열교환기와 회수탱크로 구성된다. 설비상의 적당한 위치에 압력과 유량을 제어하는 압력조절기와 밸브들이 갖춰져 있으며, 압력과 유량, 온도 측정을 위한 센서들이 설치된다(Fig. 2).

냉각유체의 공급압력은 자동제어시스템에 의해 일정하게 유지되며 냉각유체의 공급/차단은 자동밸브가 조절한다. 시편내부에서 실제 연소기 재생냉각채널을 모사하는 압력을 유지하기 위해 유량조절 오리피스 역할을 수행하는 수동밸브는 시편 후단에 설치하였다. 직접 가열되는 시편부는 강화플라스틱으로 만들어진 상자로 덮고 내부로 질소를 계속 공급하여 시험 중 시편파열현상에 의한 화재 위험을 제거하였다.

시편가열을 위해 전원을 공급하는 정류기는 380 V x 3 phase의 전원을 공급받아 최대 5,000 A x 12 V로 변환시켜 공급해준다. 정류기에서 시편으로 공급되는 전원제어는 수동조절기를 통해 이루어진다. 시험이 고온/고압의 조건에서 수행되기 때문에 시험상황을 확인/기록하기 위해 비디오 카메라를 설치하였고 설비자동제어를 수행하는 제어실에서 실시간으로 확인한다.

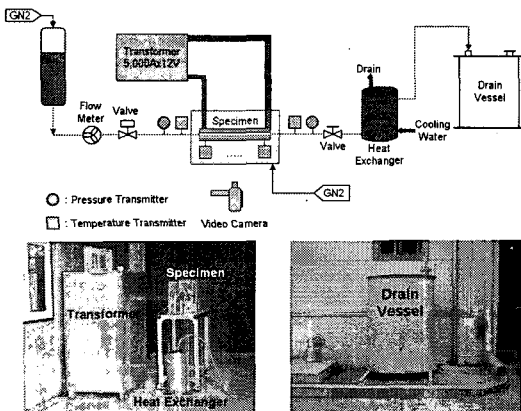


Fig. 2 Schematic and Photos of Test Facility

2.2 시편

코킹현상과 관련된 시험은 대부분의 문헌들에서 전기가열장치를 이용하여 이루어진다[2-4, 6-10]. 높은 열전도 특성을 지닌 구리를 전기적으로 가열하여 연소실의 벽면온도를 모사하기 위해서는 고전류의 전원장치가 요구된다. 또한 주어진 전류공급 능력에서 높은 가열효과를 얻기 위해, 즉 구리시편의 저항을 증가시키기 위해 시편의 단면적을 최소로 만드는 것이 유리하다.

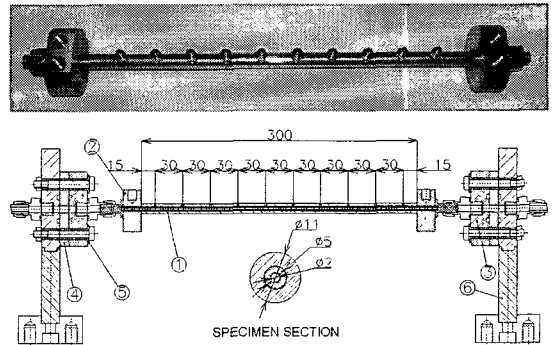


Fig. 3 Photo and Section Drawing of Specimen

제작된 시편은 전원공급능력을 고려하여 코킹현상 발생에 가장 중요한 요소인 재생냉각채널 벽면온도를 실물형 연소기와 동일하게 유지할 수 있도록 설계되었다. 또한 대류에 의한 열전달 특성을 모사하기 위해 채널에서의 평균유속을 동일하게 하였다. 시편제작에 사용된 구리합금은 국내개발 중인 연소기와 동일한 재질이다.

Figure 3의 ①은 연료가 통과하는 시편으로 단면도에 나타난 바와 같이 내경 2 mm, 외경 5 mm의 구리합금을 두께 3 mm의 스테인레스 스틸(STS)이 감싸고 있다. 시편 길이방향으로 10개소 위치에서 구리표면 온도를 측정하였다. ②는 정류기와 시편을 연결하는 부분으로 시편에 전류를 공급해준다. 앞서 언급한 바와 같이 정류기는 최대 60 kW(5,000 A x 12 V)의 전력공급이 가능하다. ③은 시편과 연료공급설비를 연결해주는 플랜지 부분으로 STS로 이루어져 있다. ④와 ⑤는 테프론 재질로 제작되어 시편으로 공급되는 전류가 다른 설비들로 흐르는 것을 막아주는 역할을 한다. ⑥은 시편을 스탠드에 고정하는 부

분으로 가열된 시편의 열팽창에 의한 휘어짐을 방지하기 위해 축방향으로 미끄러질 수 있도록 설치되었다.

3. 시험조건 설정

3.1 측정값

코킹현상이 발생하여 시편내벽에 반응물이 침착되면 열저항으로 작용하고 유체로의 열전달량을 감소시킨다. 감소된 열전달량으로 인해 유체 출구온도($T_{c,o}$)가 감소하며 표면침착에 의해 시편 전후단의 압력차도 증가한다. 코킹현상이 발생하는 시험조건에서의 구리벽면온도 역시 측정되어야 한다. 이와 같은 현상들을 확인하기 위해 Fig. 2의 설비 개략도에 나타난 바와 같이 시편 전후단의 압력과 온도, 공급유량, 시편 표면온도를 측정한다.

3.2 결과예측

시험조건 설정을 위해 시험결과에 대한 간단한 계산을 수행하였다. 계산을 단순화하기 위해 시편이 구리만으로 이루어졌으며 열전달은 구리에서 유체로만 이루어진다고 가정하였다(Fig. 4). 그리고 구리시편이 전체적으로 동일한 온도(T_{cu} , K)인 것으로 가정하였다. 냉각유체와 구리시편은 공급되는 전력량(Q , W)에 의해 냉각유체가 시편을 통과하는 시간(Δt , sec)동안 가열된다. 초기에 공급되는 전력량은 구리시편 온도상승과 냉각유체 온도(T_c , K) 상승에 모두 소요되지만, 일정시간이 흐르고 정상상태에 도달하게 되면 냉각유체의 온도상승에만 기여한다. 최종적으로 일정한 출구온도가 된다($T_{c,o}$, K).

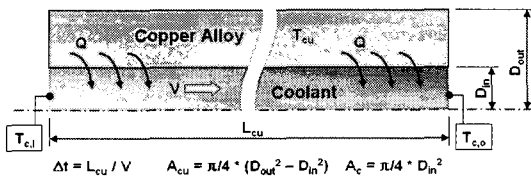


Fig. 4 Schematic for Calculation of Steady State Temperature of Coolant and Copper Alloy

$$Q \cdot \Delta t = C_{cu} m_{cu} (T_{cu,t} - T_{cu,t-\Delta t}) + C_c m_c (T_{c,o} - T_{c,i})$$

$$C_c m_c (T_{c,o} - T_{c,i}) = \pi D_{in} L_{cu} h_c (T_{cu,t} - T_{w,o}) \cdot \Delta t$$

$$Q = I^2 \alpha L_{cu} / A_{cu} \quad h_c = Nu \cdot k / D_{in}$$

$$Nu = 0.0214 \cdot Re^{0.8} Pr^{0.4} (\mu_c / \mu_{c,w})^{0.14}$$

$$T_{c,o} = T_{c,i} + 2 \frac{I^2 \alpha / A_{cu} + C_{cu} \rho_{cu} A_{cu} \cdot (T_{cu,t} - T_{c,i})}{\frac{C_{cu} \rho_{cu} A_{cu} \cdot C_p \rho_c A_c}{\pi D_{in} h_c \cdot \Delta t} + (C_{cu} \rho_{cu} A_{cu} + C_p \rho_c A_c)}$$

$$T_{cu,t} = \frac{T_{c,o} + T_{c,i}}{2} + \frac{I^2 \alpha / A_{cu}}{C_{cu} \rho_{cu} A_{cu} \cdot \Delta t} \cdot \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{2}$$

여기서,

C : 비열 (J/kgK) m : 질량 (kg)

T : 온도 (K) a : 구리비저항 ($\Omega \cdot m$)

k : 열전도도 (W/mK)

subscript

cu : 구리합금 c : 냉각유체

t : 시간 (sec) i : 입구조건

o : 출구조건 w : 벽면조건

공급된 전력량은 공급전류(I, A)와 구리시편 형상에 의해 결정된 저항을 통해 계산되며 열전달계수(h_c , W/m²K) 계산에 사용된 Nusselt 수는 Re, Pr 와 점성계수(μ , Ns/m²)를 이용하여 계산되었다[11].

3.3 시험조건

실물형 연소기에 대해 열전달 해석을 수행한 결과[1]에 의하면 적절한 막냉각에 의해 벽면 근

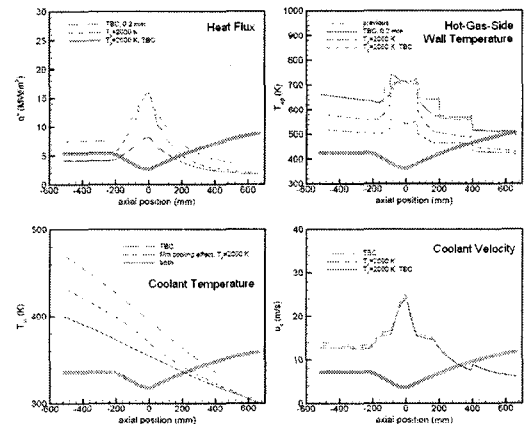


Fig. 5 Analysis for Regenerative Cooling System[1] (Heat Flux, Hot-gas-side Wall Temp., Coolant Temp. and Velocity)

처의 연소가스 온도를 2,000 K로 유지하거나 열차폐코팅(TBC)을 적용하였을 때 연소실 벽면 최대온도는 700 K, 재생냉각 채널 최대온도는 650 K로 유지가능하다. 이 경우 최대 열유속은 15 MW/m²이며 두 가지를 모두 적용하게 되면 열유속이 절반 수준인 8 MW/m²으로 감소하고 연소실 벽면온도 최대 온도는 560 K로 감소한다 (Fig. 5).

앞서 언급한 바와 같이 코킹현상을 모사하기 위한 본 시험에서는 재생냉각채널의 벽면온도와 채널 내부로 흐르는 냉각유체(Jet A-1)의 유속을 실험용 연소기와 일치시켰다. 이에 따라 채널벽면온도 650 K, 유속 25~27 m/s(유량 : 4.5

liter/min)이 기준점이 된다. 시험은 기준점에서 전력량 변화(벽면온도 변화)를 주면서 수행되었다. 시험조건(유량, 공급전력량)에 따른 채널 벽면온도(T1) 상승의 계산결과를 참조하면 3.29~3.63 MW/m²의 열유속에서 기준점에 해당하는 벽면온도를 나타내고 있다(초기온도 283K 가정, Fig. 6).

4. 시험결과

4.1 예비시험

실 유체인 Jet A-1을 사용한 시험을 수행하기 전 연료에 비하여 열용량과 열전도율이 우수하며 반응물 생성 가능성이 없는 물(water)을 이용한 예비시험이 이루어졌다(Table 2). 예비시험은 계산결과와 타당성, 설비 공급능력과 정류기 가열능력 등을 확인하는데 목적이 있었다.

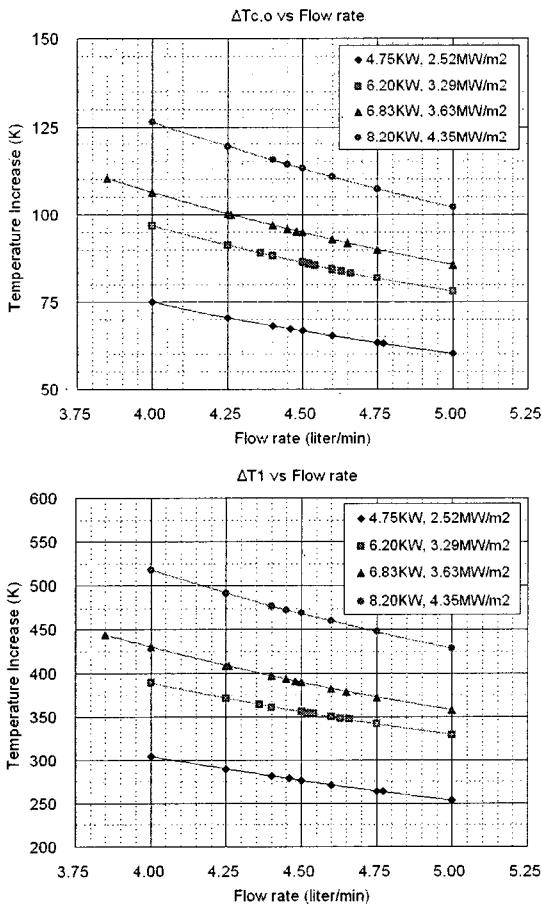


Fig. 6 Calculated Temperature Increase of Tc,o and T1 at Various Heat Flux and Volume Flow Rate

Table 2 Results of Preliminary Tests

No.	Heat Flux MW/m ²	Design		Experiment		Diff. (K)
		Flow rate*	ΔTc,o [†] (K)	Flow rate*	ΔTc,o [†] (K)	
1	0.051	3.60	0.7	3.30	0.3	0.4
2	0.206		2.9	3.36	2.1	0.8
3	1.285		18.2	3.39	14.6	3.6
4	0.206	4.80	2.2	4.58	1.9	0.3
5	0.822		8.6	4.60	7.3	1.3
6	1.850		18.6	4.79	16.6	2.0
7	0.206	6.0	1.7	5.97	1.0	0.7
8	1.285		10.3	6.00	8.1	2.2
9	3.289		26.1	6.06	22.2	3.9
10	4.349		34.6	6.07	29.3	5.3

* Dimension : liter/min

† Difference of the steady state from initial state of Tc,o

예비시험을 통해 설비의 유량공급 및 조절능력과 공급압력 제어, 전력공급이 정상적으로 이루어짐을 확인하였다. 온도 예측결과와 측정결과 사이에 발생하는 차이는 계산과정에서 제외되었

던 외부 STS의 영향으로 판단된다. 하지만 온도 차이가 크지 않아 계산과정에서 적용된 단순화된 모델을 통해서 충분히 온도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

4.2 본시험

물을 이용한 예비시험 결과를 바탕으로 실 유체 시험조건을 설정하고 본시험을 진행하였다. 전체적으로 4개 시편을 이용한 17회 시험이 수행되었다(Fig. 7). Figure 7에서 공급 열유속에 해당하는 Y축은 공급전류와 시편형상에 의해 결정되는 값으로 유체로 전달된 실 열유속을 의미하지 않는다. 전체 17회에 대한 시험결과를 정상상태 평균값을 기준으로 Table 3에 정리하였다.

①-③의 시험은 예비시험에서 검증된 온도예측 결과가 실 유체에서도 적용되는지 확인하기 위한 시험으로 결과에서 예측된 온도와 근사한 값을 보여주었다. 또한 일정시간동안 계측된 냉각 유체 출구온도의 결과에서 온도감소 현상이 나타나지 않아 열유속을 감소시키는 반응물의 생

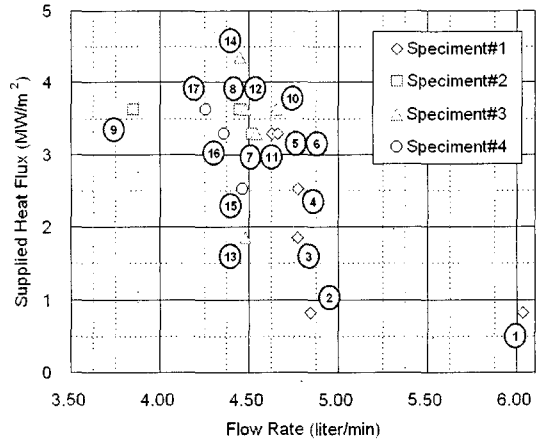


Fig. 7 Experiment Condition using Jet A-1

성은 없었던 것으로 판단된다.

④번 시험은 기존 문헌[5]에서 코킹현상이 발생하는 온도로 언급한 최저 냉각채널온도(=580 K)와 유사한 시험조건(=550 K)이다. 시험은 정상상태기준으로 420 sec 동안 진행되었으며 냉각 유체 출구온도($T_{c,o}$ or $TT002$)를 기준으로 300

Table 3 Test Results - Mean Value (using Jet A-1)

No.	Specimen	Flow Rate liter/min	Total Test Duration sec	Calculation (Initial Temp. 283 K)			Experiment		Heat Flux (MW/m ²)		Deposit Formation
				$\Delta T1$ K	$\Delta T2$ K	ΔTc K	$T_{c,i}$ K	$\Delta T_{c,o}$ K	Supply	Measure	
1	#1	6.03	120	74.9	77.0	16.7	282.0	15.1	0.82	0.666	×
2		4.84	300	89.2	91.3	20.7	281.1	19.2	0.82	0.677	×
3		4.77	120	195.1	199.9	46.7	279.9	44.9	1.85	1.591	×
4		4.77	600	263.5	269.3	63.0	280.4	64.6	2.52	2.322	▲
5		4.63	abt.90	348.2	355.7	84.0	278.5	89.6	3.29	3.145	·
6		4.66	abt.65	347.0	353.9	83.5	280.0	82.8	3.29	2.919	·
7	#2	4.52	600	354.4	361.2	86.0	284.2	76.1	3.29	2.598	●
8		4.45	abt.150	393.8	400.9	95.9	272.4	91.4	3.63	3.076	·
9	#3	3.85	abt.150	444.1	451.9	110.2	286.4	92.6	3.63	2.733	·
10		4.65	abt.310	378.9	387.6	92.0	285.4	107.8	3.63	3.853	·
11		4.54	600	353.2	360.0	85.6	286.0	97.3	3.29	3.378	▲
12		4.48	300	390.9	399.4	95.3	284.5	111.2	3.63	3.814	·
13		4.48	400	205.5	210.0	49.7	291.0	54.4	1.85	1.839	×
14	#4	4.45	600	473.3	482.0	114.3	288.9	142.6	4.35	4.949	·
15		4.46	700	278.5	284.2	67.3	285.0	61.3	2.52	2.055	▲
16		4.36	700	363.5	370.2	89.1	282.7	84.9	3.29	2.808	▲
17		4.26	700	408.0	416.3	100.1	279.5	100.2	3.63	3.252	▲

× : no indication of coking

· : impossible to identify

▲ : light indication of coking

● : apparent indication of coking

sec 동안 2.0 K 감소하는 현상을 보였다. 한편 유체로 전달된 열유속은 최대 2.358에서 2.287 MW/m²으로 감소되어 최대값 기준으로 3.0% 감소하는 결과를 나타내었다. 감소한 값은 크지 않지만 반응물 생성에 의한 열전달 감소의 경향성을 확인할 수 있었다.

⑤, ⑥번 시험은 기준점 조건(=640 K)에 해당하는 시험으로 ④번 시험 직후에 동일한 시편으로 수행된 시험이다. 두 시험은 가열과정에서 전극부와 시편이 연결되는 부분에 국부적인 가열 현상이 발생하여 시험을 중단하였다. 정상상태 기준으로 두 시험은 각각 30, 10 sec 동안 지속되었다. 이러한 국부적인 가열현상은 예비시험을 포함한 14회의 반복적인 가열냉각과정에서 끼워맞춤으로 조립되어진 부분이 떨어지면서 일부 접촉면을 통해 전체전류 공급되면서 발생한 것이다. 짧은시간 동안의 ⑤번 시험이지만 정상상태 30 sec 구간에서도 출구온도 4.9 K, 열유속이 0.233 MW/m² (7.2%) 감소하는 현상을 보였다. 동일한 비율로 감소한다고 가정할 수는 없지만 반응물의 추가 생성으로 판단하기에는 충분한 근거가 된다. ⑥번 시험은 경향을 판단하기에는 너무 짧은 시간동안 시험이 수행되어 논외로 한다. 하지만 ⑤번 시험과 동일한 조건으로 수행되었음에도 유체출구 온도와 열유속의 절대값이 감소하였다. 즉 ⑤번 시험에 의한 추가 반응물 생성을 다시 한번 확인할 수 있는 결과이다. 하지만 경향성을 판단하기에 짧은 시험시간이기 때문에 코킹현상이 발생한 시험에는 포함시키지 않았다.

⑦번 시험은 시편을 교체하여 시편 #2로 수행된 시험으로 조건은 ⑤, ⑥번 시험과 동일하다. 시험시간을 증가시키고 유량도 기준점에 맞춰 ⑤, ⑥번 시험에서 발견된 현상의 경향성을 확인하기 위한 시험이다. 시험결과는 코킹현상 발생을 명확히 규정할 수 있는 경향성을 보였다. 즉, 출구온도(TT002)와 유체로 전달되는 열유속(q")이 시간에 따라 지속적으로 감소하는 현상이 나타났다. 하지만 반응물 생성에 의한 시편 전후단 차압(ΔP)이 증가하는 현상은 보이지 않았고 오히려 감소하는 특성을 보였다(Fig. 8). 이 현상은

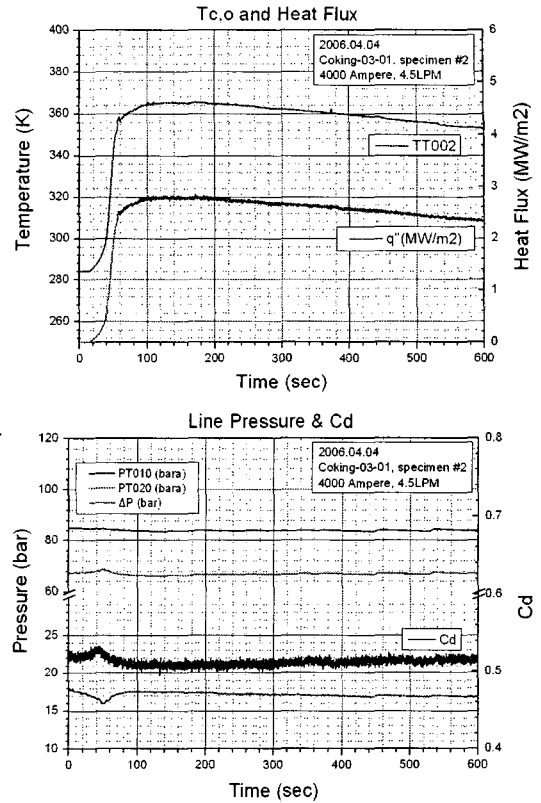


Fig. 8 Results of Test #⑦

유체로의 열유속 감소로 되고 시편온도가 상승하면서 시편이 열팽창하여 발생한 것으로 판단된다. 500 sec의 정상상태동안 출구온도 기준으로 12.2 K가 감소하였고, 열유속은 2.786에서 2.338 MW/m²으로 16.1% 감소하는 현상을 나타내었다.

⑧, ⑨번 시험은 ⑦번 시험보다 높은 전력(Tcu ≃670 K)을 공급한 시험이다. 코킹현상이 발생한 시편에 더 높은 열량을 공급하였을 때 시편이 손상되거나 현상이 심화되는지를 확인하고자 한 시험이다. 하지만 두 시험 모두 경향성을 확인할 수 있는 시간이 확보되기 전에 시험이 중단되어 판단이 불가능하였다. ⑧번 시험은 시편후단 테프론 부분에서 누유가 발생되었고 ⑨번 시험은 질차상의 오류로 시편이 파열되었다.

⑩번은 시편 #3을 이용하여 ⑧, ⑨번 시험과 동일한 조건에서 수행된 시험이다. 시험과정에서 시편 중앙부분이 파열되는 현상으로 인하여 시

험을 조기에 중단하였다. 정상상태가 200 sec 이상 유지되었는데 ⑦번 시험과 마찬가지로 최고 온도에 도달한 이후에 출구온도가 감소 경향으로 변하였다. 하지만, 외부 STS에서 발생한 이상 과열현상으로 인하여 전체적인 온도가 상승하면서 시험이 마무리되었다. 과열현상 발생 전의 측정값으로 판단할 때 정상적인 온도가 유지되었다면 반응물이 생성되면서 출구온도가 감소하는 경향을 나타내었을 것으로 추정된다.

⑪번 시험은 뚜렷한 코킹현상을 보여준 ⑦번 시험을 재현하기 위한 시험이다. 시험결과는 정상상태 450 sec 동안 출구온도가 1.5 K 감소하고 열유속은 0.11 MW/m^2 (3.2%) 감소한 것으로 나타났다. 하지만 앞선 ④번 시험과 비교할 때 높은 전력량에서 시험한 ⑪번 시험에서의 감소율이 더 적게 나타났다. 이것은 국부적인 가열현상이 발생한 ⑤번 시험 이전에 이미 전류공급 불균일성이 발생하였고 이로 인하여 ④번 시험에서 국부적으로 반응물이 생성되면서 발생한 현상으로 판단된다.

⑫번 시험은 중앙부분이 과열되어 시험을 조기 중단한 ⑩번 시험과 동일한 조건에서 수행하였다. ⑩번 시험과 마찬가지로 일시적인 온도 감소현상이 나타난 이후 동일한 부분에서 발생한 과열현상에 의해 출구온도는 일부 상승한 상태에서 마무리되었다.

⑬번 시험은 기존 ③번 시험에서 반응물 생성이 없는 것으로 판단한 시험의 재현성 확인을 위한 시험이다. ③번 시험이 반응물 생성이 없었던 시편을 사용한 반면 ⑬번 시험은 반응물이 생성된 시편을 이용하여 시험을 수행하였다. 즉 생성되어진 반응물에 의해 같은 조건에서 반응물 생성유무가 변하는지 확인할 수 있는 시험이다. 시험결과에서 유량차이와 반응물에 의해 전달되는 열유속의 절대값에는 차이가 발생하였다. 하지만 시간의 흐름에 따라 출구온도가 감소하는 경향을 나타내지 않아 ⑬번 시험에서 반응물이 추가로 생성되지 않은 것을 확인할 수 있었다.

⑭번 시험은 기준점보다 높은 채널표면 온도 ($T_{cu} \approx 750 \text{ K}$)에서의 결과를 확인하기 위해 수행

된 시험이다. 동일한 시편을 이용한 ⑩, ⑫과 마찬가지로 STS표면이 과열되는 현상이 발생하였으나 시험을 중단하지 않고 전체 시험시간 600 sec, 정상상태 기준 520 sec 이상 시험을 수행하였다. 시험시간동안 출구온도가 매끄럽게 상승하지는 않지만 시편 과열에 따라 상승하는 경향을 나타내고 있다. 또한 측정된 구리외벽의 온도로 1,000 K 이상 상승하여도 파손없이 시험이 마무리되었으며 열유속도 역시 감소하지 않았다.

⑮-⑰번 시험은 새로운 시편 #4를 이용하여 지금까지의 시험을 정리하고 재현성을 확인하는 것이 목적이었다. 그래서 최초로 출구온도 감소 및 열유속 감소 경향을 나타낸 ④번 시험과 동일조건($T_{cu} \approx 560 \text{ K}$)에서 시험을 수행하고 기준점에 해당하는 3.29 MW/m^2 ($T_{cu} \approx 640 \text{ K}$)와 3.63 MW/m^2 ($T_{cu} \approx 670 \text{ K}$)의 시험을 차례대로 수행하였다(Fig. 9-11). 각 시험은 500 sec의 정상

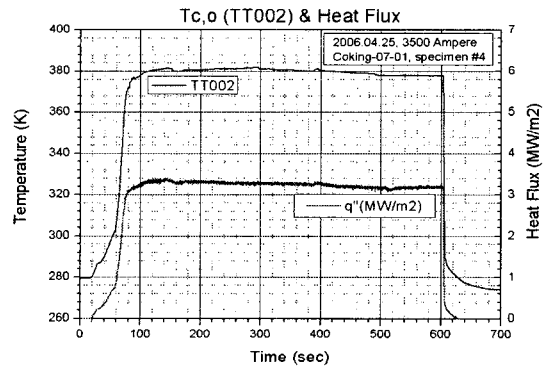


Fig. 9 Results of Test #17

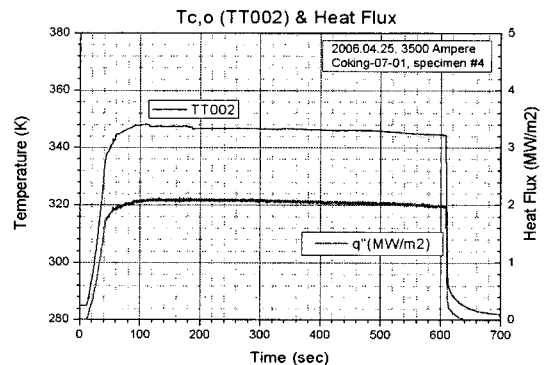


Fig. 10 Results of Test #18

5. 결 론

재생냉각 연소기 제작에 사용되는 구리합금과 연료로 사용되는 Jet A-1의 적합성에 대한 검증 시험을 전기가열장치를 이용하여 수행하였다. 현재까지 알려진 문헌들에서 로켓연소기에 RP-1을 이용한 시험결과는 다수 찾을 수 있었지만 Jet A-1을 이용하여 정량적인 평가를 수행한 문헌을 찾을 수 없었다. 본 시험 통해 Jet A-1에서 코킹 현상이 발생하는 조건과 열유속의 감소율을 정량화 할 수 있었다.

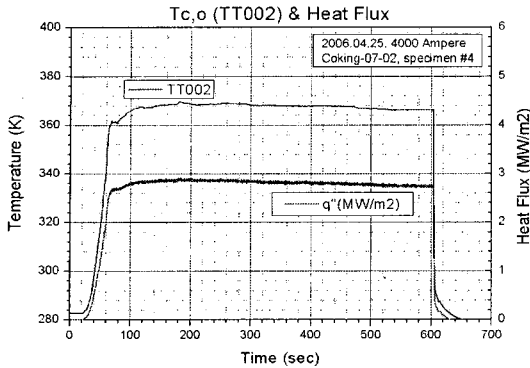


Fig. 11 Results of Test #16

구간동안 출구온도와 열유속이 감소하는 경향성을 나타내었다. 하지만 이전 시험과 동일하게 급격한 열유속의 변화는 발생하지 않았으며 구리 외벽온도 역시 시편 위치에 따른 온도차이는 있지만 시간에 따라 온도가 급격히 증가하는 현상 역시 발생되지 않았다.

4.3 코킹현상 발생 시험정리

17회의 시험에서 반응물이 생성된 것으로 판단할 수 있는 6회의 시험에 대해 출구온도와 열유속의 변화를 감소량을 정리하였다(Table 4). ⑦번 시험을 제외하면 시험시간동안 5% 이내의 열유속 변화를 보여 코킹발생이 시편에 문제를 발생시키지 않았다.

Table 4 Decrease of Tc,o and Heat Flux

Test No.	Tc,o (K)		Heat Flux (MW/m ²)			
	max.	min.	max.	min.	ratio,%	rate*
4	346.3	344.3	2.358	2.287	3.00	0.85
7	365.3	353.3	2.786	2.338	16.06	3.52
11	384.2	382.7	3.428	3.318	3.21	0.85
15	348.0	344.6	2.073	1.985	4.23	0.64
16	369.1	366.1	2.875	2.737	4.83	1.05
17	380.0	378.0	3.332	3.166	4.99	1.60

* dimension : MW/m² · h

1. Jet A-1은 재생냉각채널 구리표면 온도 540 K 부근에서 코킹현상이 발생하기 시작한다.
2. 코킹현상이 발생하여도 출구온도, 구리시편 온도의 급격한 변화는 발생하지 않는다.
3. 코킹현상에 따른 열유속 변화는 500 sec 동안 5% 내외이다.
4. 명확한 코킹현상이 진행된 ⑦번 시험에서는 500 sec 동안 16.1%의 열유속이 감소하였고, 출구온도는 12.0 K 감소하였다.
5. 실물형 연소기와 비교하여 공급되는 열유속이 낮은 조건이지만 구리 벽면온도를 코킹현상 발생의 가장 중요한 요소로 판단하고, Fig. 5의 해석결과를 근거로 하면 Jet A-1과 구리합금을 이용한 재생냉각연소기 개발은 가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 조원국, "재생냉각연소실의 열전달 해석", KARI-REG-TM-2004-001-v.1-rev.1, 2004
2. Keming Liang, Baoe Yang, and Zhongli Zhang, "Investigation of Heat Transfer and Coking Characteristics of Hydrocarbon Fuels", Journal of Propulsion and Power, Vol.14, No.5, 1998
3. Anthony J. Giovanetti, Louis J. Spadaccini, and Eugene J. Szetela, "Deposit Formation and Heat Transfer Characteristics of

- Hydrocarbon Rocket Fuels", *Journal of Spacecraft*, Vol.22, No.5, 1984
4. S.D. Rosenberg, M.L. Gage, G.D. Homer, and J.E. Franklin, "Hydrocarbon-Fuel/Copper Combustion Chamber Liner Compatibility, Corrosion Prevention and Refurbishment", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.8, No.6, 1992
 5. Tim Edwards, "Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion : 1903-2003", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.19, No.6, 2003
 6. S.A. Irvine, A.K. Schoettmer, R.W. Bates, and M.L. Meyer, "History of Sulfur Content Effects on the Thermal Stability of RP-1 Under Heated Conditions", 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004
 7. A.J. Giovanetti and E.J.Szetela, "Long-Term Deposit Formation in Aviation Turbine Fuel at Elevated Temperature", *Journal of Propulsion*, Vol. 2, No. 5, 1986
 8. Daine L. Linne and William M. Munsch, "Comparison of Coking and Heat Transfer Characteristics of Three Hydrocarbon Fuels in Heated Tubes", 32nd JANNAF Combustion Meeting, CPIA Publication 631, Vol. II, pp. 95-101, 1995
 9. R.W. Bates, Tim Edwards and Michael L. Meyer, "Heat Transfer and Deposition Behavior of Hydrocarbon Rocket Fuels", AIAA 2003-123, 41st ASME, 2003
 10. B.R. Stiegemeier, M.L. Meyer and E. Driscoll, "RP-1 Thermal Stability and Copper Based Materials Compatibility Study"
 11. D.K. Huzel and D. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engine", AIAA, 1992