

로켓엔진 연소기 재생냉각채널을 모사한 탄화수소계 연료가열시험

임병직* · 이광진* · 김종규** · 양승호** · 김희태** · 강동혁** · 김홍집** · 한영민* · 최환석*

Hydrocarbon Fuel Heating Experiments Simulating Regeneratively Cooled Channels of LRE Combustor

Byoungjik Lim* · Kwang Jin Lee* · Jong Gyu Kim** · Seung Ho Yang** · Hui Tae Kim**
· Dong Hyuk Kang** · Hong Jip Kim** · Yeoung Min Han* · Hwan Seok Choi*

ABSTRACT

In the regeneratively cooled combustion chambers of liquid rocket engine using hydrocarbon fuels, coking occurs as the wall temperature increases which results in compounds deposition on the wall of cooling channels. This phenomenon reduces cooling capability of the coolant which finally causes damage to the combustor by overheating of the chamber wall. In this paper, experiment results using an electrical heating equipment to simulate the regeneratively cooled channel are introduced and based on the results the compatibility of copper alloy with hydrocarbon fuel Jet A-1 is investigated.

초 록

탄화수소계 연료를 사용하는 재생냉각 로켓엔진 연소기에서는 벽면온도가 올라감에 따라 냉각채널 벽면에 화합물이 침전되는 코킹현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이 현상은 냉각 유체에 의한 냉각 성능을 감소시키고 결과적으로 과열에 의한 연소기 손상을 야기할 수 있다. 본 논문에서는 재생냉각채널을 모사하는 전기가열장치 실험결과를 소개하고 실험결과를 바탕으로 구리합금과 탄화수소계 연료(Jet A-1)와의 적합성에 대해서 검토하였다.

Key Words: Regenerativley Cooled Combustion Chamber(재생냉각 연소실), Hydrocarbon Fuel(탄화수소계연료), Coking(코킹), Copper Alloy(구리합금), Thermal Barrier Coating(열차폐코팅, TBC), Film Cooling(막냉각)

† 2007년 8월 10일 접수 ~ 2007년 10월 7일 심사완료

* 종신회원, 한국항공우주연구원 연소기팀

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

1. 서 론

로켓엔진 연소기는 발사체 추력을 담당하는

부분으로 상당한 양의 추진제를 연소시켜 에너지를 얻는다. 연소기는 이러한 과정에서 발생하는 열과 압력을 견뎌야 하는 가혹한 환경에서 운영되기 때문에 고도의 제작 기술력과 냉각설계, 적합한 재질이 요구된다. 이와 같은 요구조건을 만족시켜 연소기의 손상을 방지하기 위해 해외의 많은 연소기에서 열전도성이 우수한 구리 혹은 첨가물이 일부 포함된 구리합금을 사용하여 내벽을 제작하고, 외벽과의 사이에 냉각채널을 확보하여 추진제로 냉각하는 재생냉각방식을 적용하고 있다.

국내 개발 중인 연소기 역시 열전도성이 우수한 구리합금을 내벽으로 채택하고 벽면냉각을 위해 재생냉각과 막냉각(Fig. 1)을 적용하고 있으며 추가적인 열적 보호를 위해 열차폐코팅도 적용하고 있다.

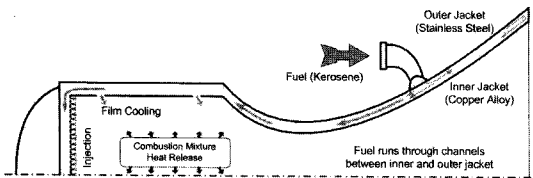


Fig. 1 Schematic of Regenerative Cooling and Film Cooling using Fuel

많은 연소기들에서 적용되고 있는 방식임에도 불구하고 탄화수소계 연료를 사용하는 로켓엔진에서는 재생냉각설계에 좀 더 세심한 주의를 기울여야 한다. 이것은 내벽의 주성분에 해당하는 구리(Cu)와 탄화수소계 연료에 포함된 불순물인 황(S)이 서로 반응하여 침착물을 생성하는 코킹현상의 발생 때문이다. 코킹현상에 의해 침착물이 생성되면 연료를 통한 냉각능력이 감소되고 허용범위를 초과하게 되면 연소기에 손상을 입히게 된다[1-3].

이에 따라 실제 연소기에 재생냉각을 적용하기 위해서는 연소기 개발에 사용되는 연료와 재질을 이용한 정량적인 평가가 요구된다. 이러한 목적을 위해 제작된 시편과 시험 장치에 대해서 소개하고 수행된 70회 시험(시험번호 1~10 : 물을 이용한 예비가열시험, 시험번호 11~70 : 케로

신을 이용한 실 유체 가열시험)에 대한 결과를 정리하였다.

2. 시험장치 및 시편

시험 장치와 시편은 참고문헌[1~4]의 내용을 바탕으로 구성되고 설계되었으며, 보유하고 있는 전기 공급 장치의 용량에 맞춰 원하는 목표로 가열할 수 있도록 시편직경 및 두께가 결정되었다. 시험 장치는 연소기와 가스발생기 시험을 위해 사용되던 가압식 유량공급 설비를 이용하였다. 시험 장치와 시편에 대한 자세한 규격과 형상은 참고문헌[5, 6]을 통해 확인 가능하며 Fig. 2와 Fig. 3은 각각의 구성을 나타내주는 개념도와 간단한 사진들이다.

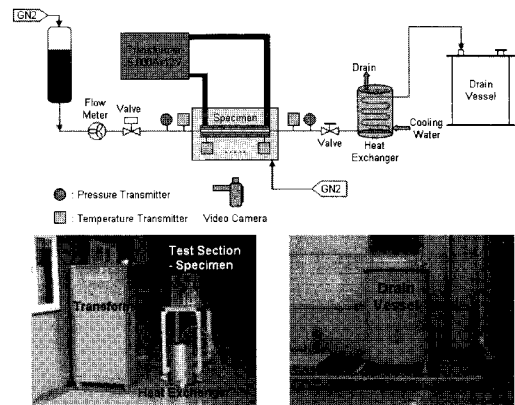


Fig. 2 Schematic and photos of test equipment

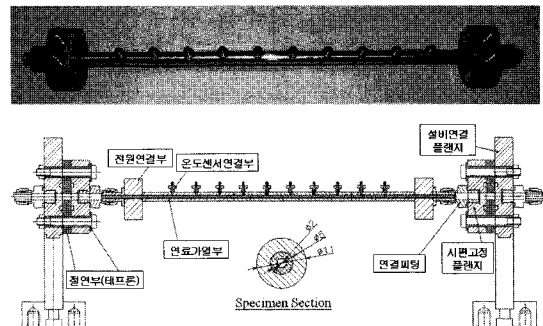


Fig. 3 Photo and drawing of typical test specimen

3. 시험조건

코킹현상 발생 여부 및 정도는 유체온도, 냉각 채널 표면온도, 냉각채널 표면조도, 재질, 연료압력, 유속, 시간 등의 다양한 요인에 의해 변화한다. 하지만 재질과 연료가 주어진 상태에서 가장 큰 영향을 주는 요인은 냉각채널 표면온도와 냉각유체의 유속이라고 알려져 있다[1~4]. 이와 같은 사실과 실물형 연소기에 대한 해석결과를 바탕으로 시편에 대한 시험조건을 설정하였다. 현재 개발 중인 연소기는 열유속이 가장 큰 노즐목 부근에서 유속 25m/s 이상, 채널 벽면온도 650 K 이하를 유지하도록 설계를 수행하고 있기 때문에 시험 조건도 이 값에 목표를 두고 설정하였다.

이 조건에 맞는 전원 공급량을 결정하기 위해 계산과 물을 이용한 예비가열시험을 먼저 수행하여 케로신 가열시험 이전에 시험장치의 안전성과 전원 공급량의 정확성을 높이도록 하였다. Figure 4는 케로신 가열시험을 수행하여 얻어진 결과로서 유량을 통해 계산된 유속과 시편의 구리외피 평균온도를 나타낸 것이다. 평균온도는 시편의 10개 위치(Fig. 3의 ⑧)에서 측정된 온도의 평균이다.

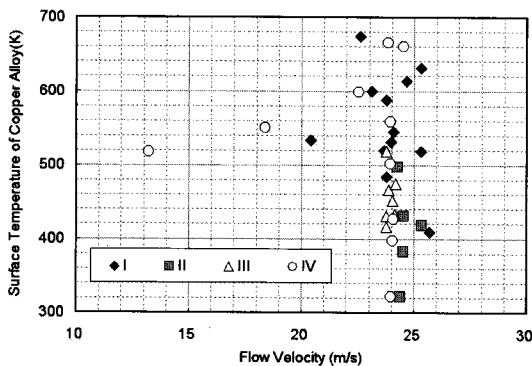


Fig. 4 Test Conditions - Flow Velocity and Outer Surface temperature of Copper Alloy

표시된 기호들이 4종류로 분리되어 있는 것은 4가지 형상의 시편(Table 1)을 사용했다는 것을 의미한다[6]. 4종류의 시편 형상은 시험 진행에

따라 내경, 두께, 제작방식 등이 변화된 것이다. 시험조건에서 나타난 바와 같이 대부분의 시험이 22~26 m/s의 유속 조건에서 온도를 변화시키면서 수행되었으며, 상대적으로 낮은 유속에서 3회의 시험이 수행되었다.

Table 1. Dimensions of Each Specimen

시편 종류	구리합금		STS	길이
	내경	두께	두께	
I	2.0mm	1.5mm	3.0mm	300mm
II	1.7mm	1.0mm	3.0mm	300mm
III	2.0mm	0.8mm	3.0mm	300mm
IV	2.0mm	0.8mm	3.0mm	256mm

4. 시험결과

4.1 물을 이용한 예비가열시험

실유체인 케로신을 이용한 시험 이전에 물을 이용하여 예비시험을 수행함으로써 시험장치의 안전성을 점검하고 열전달 예측의 정확도를 확보하여 케로신 가열조건을 설정하는데 이용하였다. Figure 5는 유체 출구온도의 변화량 나타낸 것으로 10번째 예비시험 결과에서 예측 값과 측정 값 사이에 10K 이상의 차이가 발생하였다. 하지만 이것은 전원공급을 최대로 높이면서 정류기 전압상태가 불안정하여 가열이 제대로 이루어지지 않았기 때문에 발생한 현상으로 나머지 9회의 결과를 통해 케로신을 이용한 시험조건을 설정할 수 있는 충분한 자료는 마련되었다.

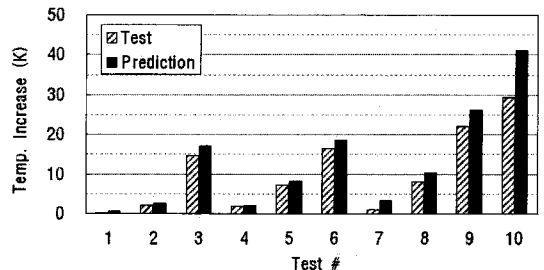


Fig. 5 Preliminary Test Results

4.2 케로신을 이용한 실 유체 가열시험

실유체인 케로신을 이용한 시험은 총 60회가 수행되었으며 사용된 시편의 개수는 4종 14개이다. 각 시험은 정상상태로 종료되었을 경우 10분 정도의 가열시간 동안 시험이 진행되었으며, 마지막 70번 시험에서는 20분 동안 가열시험이 진행되었다.

시험을 통해 코킹현상을 간접적으로 확인하기 위해 케로신의 출구온도 변화와 시편의 10개 위치에서 측정된 구리외피온도에 관심을 기울였다. 이러한 이유는 코킹현상이 발생하면 냉각 채널에 해당하는 구리합금 내부에 침착물에 의한 특정 두께의 코팅막을 형성하게 됨으로써 케로신으로의 열전달을 감소시켜 케로신 출구온도 감소와 구리외피 온도 증가현상을 발생시키기 때문이다.

감소시키는 코킹현상이 발생하면 쉽게 확인이 가능할 것임을 짐작할 수 있다.

Figure 7은 전체 60회 시험에서 측정된 온도를 표시하였다. 구리외피 온도에서 원형 기호로 표시된 것은 평균온도를 나타내고 상하막대는 측정된 온도의 최대, 최소값을 나타낸다. 구리외피 온도의 평균값은 시험조건을 표시한 Fig. 4의 값과 일치한다. 그리고 삼각형 기호는 각 시험번호에서의 케로신 출구온도로서 정상상태 구간에서의 평균값이다. 구리외피 온도측정은 많은 시행착오를 거치면서 이루어진 것으로 다수의 유효한 값을 획득한 경우도 있지만 고전류를 사용하는 시험장치, 가늘고 긴 시편, 시험장치 오작동 등에 의한 이유로 유효한 값을 획득하지 못한 시험도 있는데, 각 시험번호에 값이 존재하지 않는 경우가 그에 해당한다(Fig. 7).

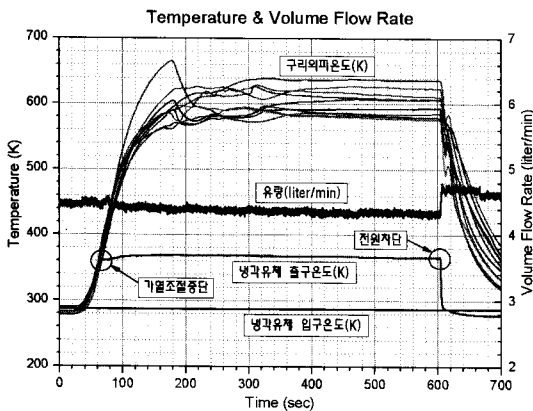


Fig. 6 Typical Time Traces of All of Temperatures and Coolant Flow Rate

Figure 6은 시험결과를 나타내는 대표적인 그래프로서 시간에 따른 온도와 유량 변화를 보여주고 있다. 시간축(x-축)에서 확인할 수 있는 바와 같이 700초의 시험시간 동안 150초의 천이구간과 400초의 정상구간을 유지하였다. 전원 공급과 차단에 따라 케로신 출구온도는 급격하게 변화하는 것을 확인할 수 있었고, 구리외피 온도 역시 빠른 변화를 나타내었다. 이러한 빠른 온도 변화를 통해 시편과 케로신 사이에 열전달량을

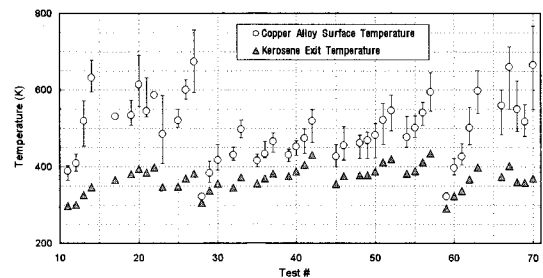


Fig. 7 Test Results - Outer Surface Temperature of Inside Tube made of Cooper Alloy

현재 개발 중인 재생냉각 연소기 열해석에서 노즐목부근에서의 유속, 재생냉각 채널 벽면온도 및 케로신 온도상승이 각각 30~33 m/s, 500~570 K, 80~100 K의 범위에 있기 때문에 수행된 케로신 가열시험들이 연소기 개발에 적용되고 있는 구리합금과 연료의 적합성에 대해 논의하기에 충분한 조건을 만족하였다.

5. 시험결과 분석

앞서 언급한 바와 같이 코킹현상이 발생하여 가장 문제가 되는 것은 생성된 침착물이 연료에

의한 냉각성능을 떨어뜨려 연소기 내벽이 손상되는 것이다. 따라서 적합성을 논의하기 위해서는 냉각성능 감소를 정량화 시켜야 한다.

정량화는 시험 후 시편을 절단하여 내부를 연소시키면서 발생하는 연소가스를 분석하여 침착물 양을 계산하는 방법[2], 벽면온도의 변화율로 표시하는 방법[1], 단위 열유속에 대한 벽면온도 증가량을 나타내는 열저항으로 나타내는 방법[1, 2] 등을 통해 이루어지고 있다.

시편 일부를 절단하여 침착물을 연소시켜 연소가스를 분석하는 방법으로 침착물 생성율을 확인한 참고문헌의 결과[2]는 Fig. 8과 같다. 그래프에서 나타나듯이 벽면온도와 침착물 생성율은 특별한 상관관계가 없으며 600~650 K 부근에서 수행된 고압 조건에서의 시험결과도 생성율에 큰 차이를 나타내지는 않는다. 또한 연료 차이에 의한 생성율 변화 역시 크지 않다. 하지만 일반적으로 알려진 것처럼 코킹현상 억제를 위해 니켈 코팅한 시편의 시험에서는 상대적으로 낮은 생성율을 나타내는 것이 확인되었다. 이 방법의 생성율 계산을 참고문헌에서 주어진 정보를 이용하여 역으로 추산하면 전체 시편에 생성된 양은 0.6~2.1 mg에 해당하고 양을 검사하기 위해 사용된 시편 크기를 고려하면 침전된 양은 0.1~0.3 mg의 아주 적은 양이다.

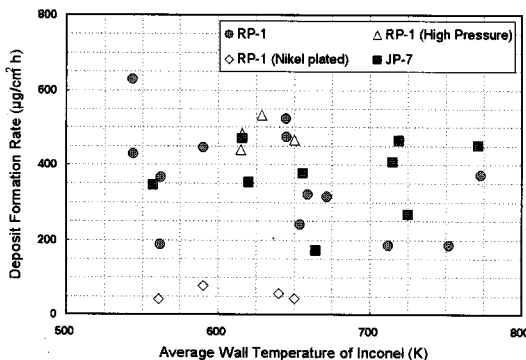


Fig. 8 Deposit Formation Rates[2]

이와 같은 연소방법을 통해 확인하기 위한 측정방법이 확립되지 않은 상태이며, 정밀도에 대

한 확신도 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 측정된 온도의 변화를 이용하는 간접적인 방법을 통해 참고문헌들에서 제시한 값들과 비교하는 방식을 채택하였다. 또한 실제 연소기에서의 상황을 고려하면 생성되는 침착물에 의해 채널의 단면적이 급격하게 감소하여 유량과 차압에 영향을 줄 정도가 아니라면 침착물의 절대적인 양보다는 냉각유체로서의 케로신 역할을 나타내는 열전달량(온도변화)의 변화가 더욱 중요한 요소이기 때문에 온도변화를 통해 적합성을 논의하는 것이 더욱 타당성 있는 방향으로 판단된다.

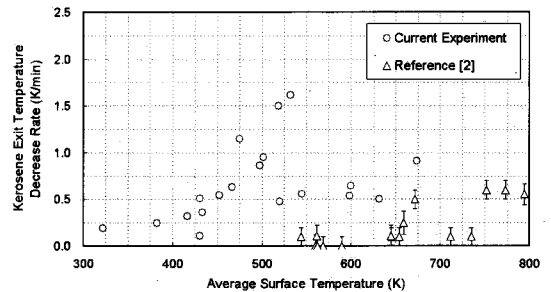


Fig. 9 Kerosene Exit Temperature Decrease Rate (K/min) with Average Surface Temperature (K)

열전달량의 변화를 직접 확인할 수 있는 케로신 출구온도의 변화율을 비교한 그래프가 Fig. 9이다. 그래프에 표시된 수치는 본 연구에서 진행된 시험 중에서 항공유(Jet A-1)를 이용하고 정상상태가 3분 이상 지속된 시험에 대해서만 표시하였다. 참고문헌[2]의 값을 본 실험과 비교하기 위해 표시하면서 자료에 기록된 측정온도의 유효숫자에 의해 발생할 수 있는 오차도 함께 나타내었다. 참고문헌의 결과와 비교하면 현 시험에서 케로신 출구온도 감소가 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 황 성분 함유량이 낮을수록 침착물 생성이 줄어들기 때문에 발생한 결과로서 시편 제작에 사용된 금속 재질(순동과 구리합금)의 영향도 있으나 가장 큰 차이는 사용된 연료에 의해 나타난 결과로 판단된다[8]. 이것은 본 실험에서 사용된 항공유(Jet A-1)와 비교하여 참고문헌[2] 실험에 사용된 로켓엔진 전용 연료인 RP-1의 상대 우수성을 보여주는 결과

이기도 하다.

RP-1의 황 성분 함유량에 따른 침착물 생성량 변화 특성을 Jet A-1의 경우에서 확인하기 위해 F-1 연료(Jet A-1에 첨가제를 추가하여 만들어진 JP-8을 탈황 처리한 연료)를 추가로 실험하였고, 고밀도 연료 개발을 위해 만들어진 F-2 연료도 같은 방법으로 실험하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 RP-1의 황 함유량은 Jet A-1의 20%이며 F-1은 황 성분이 거의 존재하지 않도록 정제된 상태이다.

Table 2. Properties of Hydrocarbon Fuels

Item	Jet A-1	F-1	F-2	RP-1
Density@15°C (kg/m ³)	795.2	807.7	820.4	801
Sulfur (wt%)	0.0577	0.0001	0.0477	0.014
Aromatics (mass %)	7.7	4.7	11.6	3.9

2종의 추가 연료로 시험을 수행하여 동일하게 출구온도 변화를 나타낸 것이 Fig. 10이다. 하지만 Jet A-1을 기본으로 하여 황 성분만 제거한 F-1과 Jet A-1은 큰 차이를 보이지 않았는데 이것은 앞선 연구결과 통과한 상반된 것으로 현재로서 원인을 설명할 수는 없는 상태이다. F-2 역시 같은 온도 영역에서 Jet A-1과 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았다.

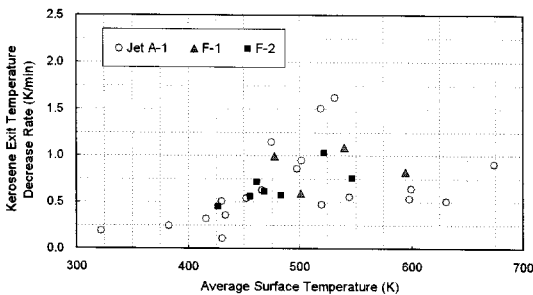


Fig. 10 Kerosene Exit Temperature Decrease Rate (K/min) of three kinds of fuel

Figure 9, 10의 결과를 통해 표면온도에 따른

케로신의 열전달률(온도) 감소는 0.1~1.7 K/min 범위의 값을 가지고, 표면온도 증가에 따라 서서히 증가하며 연료의 밀도와 황 성분 함유량에 따른 뚜렷한 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 계산된 정량적 값이 2 K/min 보다 작은 값으로 나타나고 보통 5분 이상 수행된 시험들과 마지막으로 15분 이상 가열된 시험에서 안정적인 열전달 특성을 보이기 때문에 개발목표인 120 초 연소시간을 고려할 때 Jet A-1과 구리합금을 이용한 연소기 개발은 충분한 타당성을 지닌다. 즉, 재생냉각 연소기의 연료 및 냉각유체로서 Jet A-1을 사용하는 문제에 대한 많은 우려에도 불구하고 실제 구리합금과 반응하여 발생하는 코킹현상에 의한 냉각성능 감소는 크지 않다는 것을 확인한 것이다. 만약 코킹현상에 의한 열전달 감소현상이 문제가 될 경우에 채널 벽면을 니켈 등으로 코팅하여 코킹현상을 줄이는 대안을 적용할 수 있기 때문에 Jet A-1 사용이 연소기 개발의 큰 문제로 작용하지는 않을 것이다. 위의 실험 결과는 현재 누적시간 120 초 이상의 시험을 수행한 재생냉각 연소기를 통해서도 사실이 증명되고 있다.

하지만 개발 중인 연소기에서 벽면 코팅방식의 변화, 연소압력, O/F 비 증가에 따라 연소실에서 내벽으로 전달되는 열유속이 증가하여 현재 실험된 결과보다 높은 벽면온도를 요구하거나 재사용 엔진과 같이 수명이 증가한다면 추가적인 실험을 수행하여 안정성에 대해서 검증하여야 한다. 즉, 재사용 엔진에 대한 RP-1의 적합성을 확인하기 위해 3가지 다른 황 함유량의 연료를 이용하여 20 분, 1 시간, 5 시간 실험을 수행한 방식 등의 적용이 필요하다[8].

6. 결 론

탄화수소계 연료인 Jet A-1을 사용한 연소기를 개발하고 있는 상황에서 앞선 연구결과들에서 제시하고 있는 코킹현상은 큰 문제로 대두되었고, 이에 대한 정량적 평가와 그 결과에 따른 후

속 조치가 조속히 필요한 상황이었다. 이러한 목적으로 연료가열실험이 수행되었고 그 결과를 토대로 탄화수소계 연료와 구리합금의 적합성에 대해서 검토하였다.

- 1) 연료 공급 및 가열시험 장치는 연소기의 냉각 채널을 모사할 수 있도록 가압식 추진제 공급 설비를 이용하였으면 전체 시편의 고온 가열을 위해서 전기 가열장치로 구성되었다.
- 2) 물을 이용한 10회, 케로신을 이용한 60회의 시험을 통해 구리외피온도, 냉각유체 입출구 압력과 온도, 시편 양단의 전압 등을 측정하여 코킹현상에 대한 간접적인 평가가 가능하였다.
- 4) 코킹현상에 대한 정량적인 평가는 연소기 냉각성능 변화를 나타내는 냉각수 출구온도 감소율을 이용하였으며, 0.1~1.7 K/min 범위의 값이 나타내었다. 타 문헌의 결과와 비교하면 감소율이 높은 값을 나타내어 Jet A-1의 코킹 안정성이 RP-1보다 못하다는 결과를 나타내었다. 이것은 Liang[1]의 시험결과에서도 aerokerosene과 rocket kerosene 사이의 차이로 나타난 바 있다.
- 5) 타 연료(RP-1)과 비교하여 Jet A-1이 높은 열전달 감소율을 나타내어 Stiegemeier[8]가 언급했던 100회 이상의 작동 수명을 요구하는 재사용 엔진의 경우에는 문제가 발생할 수 있으나 국내 개발 중인 연소기 규격에서는 충분한 타당성을 가지며 그 사실은 누적시간 120 초 이상의 연소시험을 수행한 재생냉각 연소기를 통해서도 확인되고 있다.

참 고 문 헌

1. 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
2. Roback, R., Szetela, E.J., and Spadaccini, L.J., "Deposit Formation in Hydrocarbon Rocket Fuels", NASA CR-165405
3. Rogenberg, S. D., Gage, M. L., Homer, G. D., and Franklin, J. E., "Hydrocarbon-Fuel/Copper Combustion Chamber Liner Compatibility, Corrosion Prevention and Refurbishment", Journal of Propulsion and Power, Vol. 8, No. 6, 1992
4. Linne, D. L. and Munsch, W. M., "Comparison of Coking and Heat Transfer Characteristics of Three Hydrocarbon Fuels in Heated Tubes", 32nd JANNAF Combustion Meeting, CPIA Publication 631, Vol. II, 1995, pp.95-101
5. 임병직, 김종규, 강동혁, 김홍집, 김희태, 한영민, "재생냉각 연소기용 구리합금과 연료 적합성 검증시험", 한국추진공학회 2006 춘계학술대회, 2006, pp.100-109
6. 임병직, 이광진, 김종규, 양승호, 김희태, 백선기, 강동혁, 김홍집, 한영민, "로켓엔진연소기의 재생냉각채널을 모사한 탄화수소계 연료 가열시험", 우주발사체심포지움, 2007, pp.61-64
7. 조원국, "재생냉각연소실의 열전달 해석", KARI-REG-TM-2004-001-v.1-rev.1, 2004
8. Stiegemeier, B. R., Meyer, M. L., and Driscoll, E. "RP-1 Thermal Stability and Copper Based Materials Compatibility Study", JANNAF 1st Liquid Propulsion Subcommittee Meeting, 2004