

技術論文

흡열연료를 이용한 고속비행체 냉각기술 동향

김중연* · 박선희** · 전병희** · 김성현**† · 정병훈*** · 한정식***

A Technical Review of Endothermic Fuel Use on High Speed Flight Cooling

Joongyeon Kim* · Sun Hee Park** · Byung-Hee Chun** · Sung Hyun Kim**† ·
Byung Hun Jeong*** · Jeong Sik Han***

ABSTRACT

As hypersonic flight speeds and engines efficiencies increase, heat loads on an aircraft and its engine increase. Because the temperature of the air flow is too high to cool the aircraft structure at hypersonic flight speeds, it is essential to use the aircraft fuel as the primary coolant. Endothermic fuels are liquid hydrocarbon aircraft fuels which are able to absorb the heat loads by undergoing endothermic reactions, such as thermal and catalytic cracking. The endothermic reactions are improved by catalysts which change the extent of reaction and product distribution. At high temperature, liquid hydrocarbons would lead to coke formation that can reduce the effectiveness of heat exchanger and cause rapid degradation of the catalyst, thus endothermic capacity of endothermic fuels is limited to the temperature at which coke doesn't form. In this study, the essential cooling technologies by applying endothermic fuels and the properties of the endothermic fuels are described.

초 록

극초음속 비행체의 속도증가와 엔진효율의 향상으로 비행체와 엔진의 열적부하가 증가하게 되었다. 극초음속 영역에서 공기흐름의 온도는 매우 높기 때문에 공냉방식을 이용한 냉각이 불가능하므로, 비행체 연료를 주 냉각제로써 이용하는 것은 필수적이다. 흡열연료(Endothermic fuels)는 열분해 또는 촉매분해와 같은 흡열반응(Endothermic reaction)을 통해 열을 흡수하는 액체 탄화수소 비행체 연료이다. 흡열반응은 촉매를 이용하여 전환율과 생성물 분포를 변화시킴으로써 개선될 수 있다. 고온의 액체 탄화수소는 코킹 생성을 유발하여 열교환기의 효율을 저하시키고 촉매 비활성을 촉진시킬 수 있기 때문에, 흡열연료의 흡열능력은 코킹생성(Coke formation)이 발생하기 전까지의 온도로 제한한다. 본 연구에서는 흡열연료를 적용한 주요 냉각기술동향과 흡열연료의 특성이 기술되었다.

Key Words: Heat load(열적부하), Endothermic fuels(흡열연료), Endothermic reaction(흡열반응),
Coke formation(코킹생성)

접수일 2010. 1. 12, 수정완료일 2010. 3. 20, 게재확정일 2010. 3. 28

* 학생회원, 고려대학교 화공생명공학과

** 정회원, 고려대학교 화공생명공학과

*** 국방과학연구소 1기술연구본부 5부

† 교신저자, E-mail: kimsh@korea.ac.kr

1. 서 론

극초음속 항공기의 비행속도와 엔진효율의 향

상은 시스템의 열적부하를 증가시킨다. 극초음속 비행체 냉각에 요구되는 흡열량은 Fig. 1과 같이 증가하게 되며 시스템의 냉각은 공냉방식의 냉각방법으로는 불가능하여 연료를 주요 냉각제로서 사용하게 된다[1]. 마하 8이상에서는 냉각능력이 우수한 극저온연료(액체수소, 메탄 등)를 사용하지만 극저온연료는 비중이 낮고, 저온보관을 필요로 하므로 운용성이 부족하다.

미국에서는 HyTech(Hypersonic Technology) 프로그램을 통해 탄화수소형 흡열연료를 이용한 비행체 냉각에 대한 연구도 이루어졌다. HyTech 프로그램은 액체탄화수소 스크램젯을 운용하는데 발생하는 기술적인 문제 해결 및 개선을 위해 1995년 미국에서 개설된 프로그램이다[2].

고온에서 열분해반응 또는 촉매분해 반응을 통해 열을 흡수하면서 분해가 되는 특성을 지닌 연료를 흡열연료라고 하며, 흡열연료로부터 얻을 수 있는 열 흡수원(Heat sink)은 물리적인 흡열과 화학적인 흡열에서 비롯된다. 물리적 흡열은 연료의 온도 상승에 수반되는 현열(Sensible heating)이고, 화학적 흡열은 연료의 분해반응에 수반되는 반응열로서 촉매에 의해 극대화 될 수 있다. 흡열연료가 열교환기 내에서 원활한 열 흡수를 하기 위해서는 기화되지 않아야 하기 때문에 가열된 연료는 열교환기 내에서 초임계 상태로 있어야 한다[3].

본 연구에서는 흡열연료를 적용한 주요 냉각 기술동향과 흡열연료의 특성이 기술되었다.

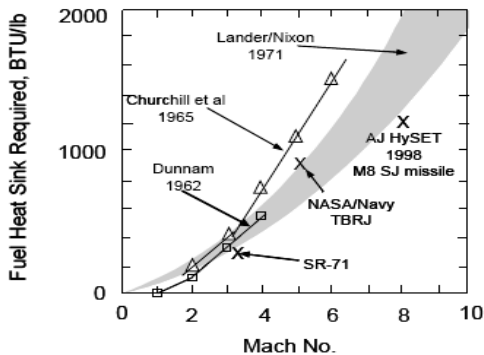


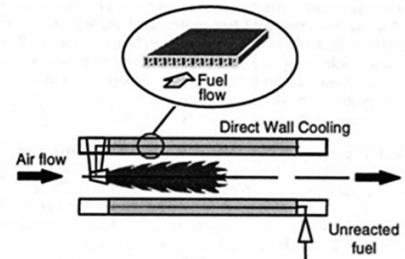
Fig. 1 Mach No. and fuel heat sink required[1]

2. 흡열연료의 열분해반응과 촉매분해반응

흡열연료를 이용한 냉각은 직접냉각(Direct cooling)과 간접냉각(Indirect cooling) 두 가지 방식이 있다[4]. 직접냉각은 연료가 연소되기 전 노즐벽면 내 유로를 흐르는 동안 가열된 시스템을 냉각하는 방식으로써 재생냉각방식(Regenerative cooling system)과 비슷하지만 상변화와 흡열반응을 수반한다는 점이 다르다. 간접냉각은 가열된 시스템 외부에 열교환기가 설치되어, 흡열연료는 열교환기 내에서 분해반응을 통해 시스템냉각을 위해 사용된 냉각제를 냉각시킨다.

촉매는 고온에서 발생하는 흡열연료의 분해반응 활성을 낮은 온도에서도 높일 수 있다. Fig. 3은 케로신연료의 흡열특성 모사를 위해 주로 이용되는 n-dodecane의 열분해반응과 촉매분해반응을 온도에 따른 전환율로 나타낸 그래프이다[5]. Fig. 3에서 HZSM-5 제올라이트 촉매를 적용할 경우 열분해반응에 비해 동일한 온도에서 전환율이 증가하였음을 확인할 수 있다. 또한 귀

(a) Direct cooling



(b) Indirect cooling

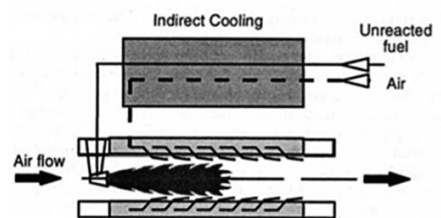


Fig. 2 Cooling system based on endothermic fuels[4]

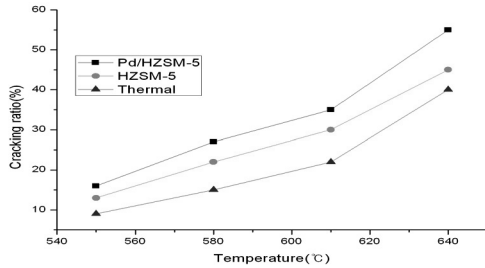


Fig. 3 Cracking ratio of n-dodecane[5]

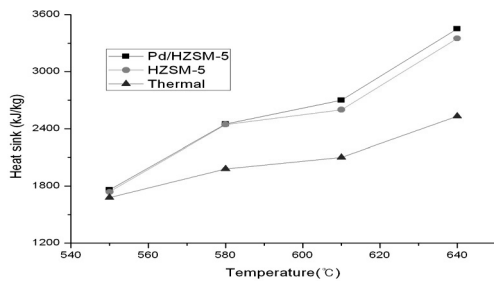


Fig. 4 Heat sink of n-dodecane[5]

금속 Pd을 담지시킨 Pd/HZSM-5 제올라이트는 금속기능과 산기능을 동시에 발현하여 가장 높은 분해반응 전환율을 나타내었다.

흡열량은 분해반응에 의한 연료의 전환율이 증가할수록 커진다. 따라서 Fig. 4와 같이 Pd/HZSM-5, HZSM-5, Thermal cracking 순으로 흡열량이 크게 나타난다[5].

촉매를 이용한 흡열반응에서는 분해반응 전환율이 증가될 뿐만 아니라 생성물의 조성도 바뀐다. 생성물과 반응물의 엔탈피 차이는 반응열과 같기 때문에 생성물분포가 달라지면 반응열이 달라진다. Table 1은 n-dodecane의 열분해반응과 촉매반응의 생성물조성 차이를 보여주고 있다[5].

Table 1. Composition of cracking product[5]

Catalyst	Composition%			
	CH ₄	C ₂	C ₃	C ₄ ~C ₅
No (Thermal)	5.57	26.32	37.99	30.12
HZSM-5	4.27	20.74	41.01	33.98
Pd/HZSM-5	3.34	19.77	43.87	33.02

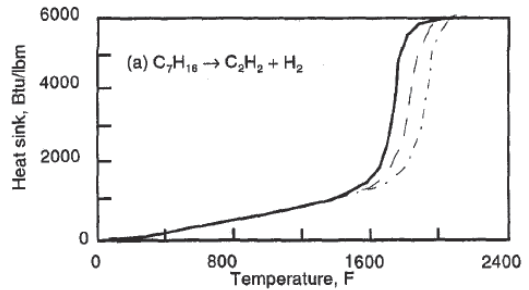


Fig. 5 Endothermic cracking of n-heptane with large endothermicity[4]

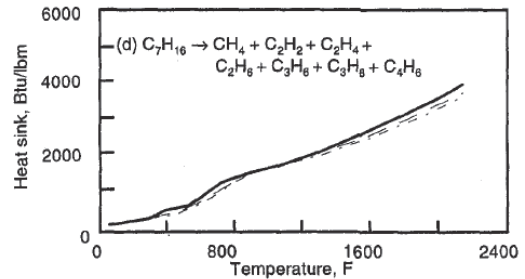


Fig. 6 Endothermic cracking of n-heptane with small endothermicity[4]

생성물조성의 차이가 흡열량에 어떠한 영향을 미치는지 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다[4].

두 그래프는 n-heptane 분해반응의 온도에 따른 흡열량을 나타낸 그래프이다. Fig. 5는 n-heptane이 분해되어 불포화탄화수소(에틸렌)와 수소가 생성될 때 온도에 따른 흡열량을 나타낸 것이고, Fig. 6은 n-heptane이 분해되어 불포화탄화수소뿐만 아니라 포화탄화수소도 생성될 때 온도에 따른 흡열량을 나타낸 것이다. 두 경우 온도에 따른 흡열량을 비교해보면 동일한 온도에서 불포화탄화수소만 생성되는 Fig. 5의 경우가 흡열량이 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 즉 연료의 흡열량은 불포화 탄화수소의 생성량이 증가할수록 커진다는 사실을 알 수 있다.

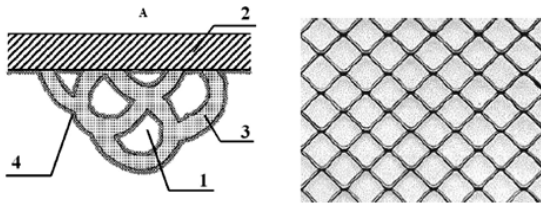
3. 촉매적용 기술동향

촉매를 이용한 흡열연료 연구는 1960년대 백

금/알루미나 촉매를 이용한 MCH(메틸사이클로헥산)의 탈수소화반응으로부터 시작되어 현재까지 진행되고 있다. 촉매는 Fig. 2의 노즐벽면 내유로 및 열교환기에 설치되어 분사되기 전 연료를 분해시키는데 이용된다.

초기 MCH 탈수소화반응 연구는 packed bed 반응기를 통해 수행되었는데, 반응기벽과 안쪽의 열전달 효율이 낮고 반응기 입구와 출구에서 압력강하가 크게 나타난다는 단점이 있다. 따라서 Fig. 7과 같이 열전도도가 좋고, 연료흐름에 대한 저항을 최소화할 수 있는 지지체에 촉매활성 물질을 코팅한 촉매 연구가 진행되었다[6, 7].

또한 지지체를 사용하지 않고 촉매를 반응기에 직접 코팅하는 연구도 진행되고 있다. Fig. 8은 제올라이트 촉매를 결합제 물질과 혼합한 슬러리형태로 만들어 반응기에 채운 후 비활성 가스를 가하여 슬러리를 밀어냄으로써 촉매를 코팅하는 기술을 나타낸 그림이다[8]. 촉매코팅 역시 반응기내에서 열전달 개선 및 압력강하 최소화를 위해 제안된 촉매 적용기술이라 할 수 있다.



1: cell, 2: reactor wall, 3: rib, 4: catalyst coating

Fig. 7 Catalyst support shape[6, 7]

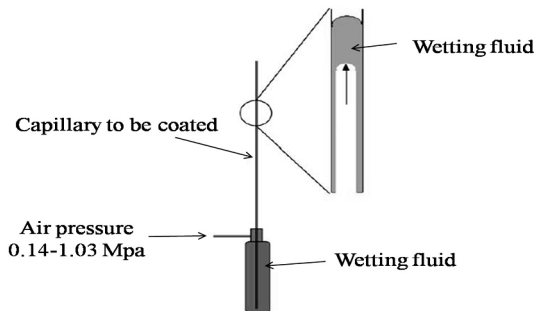


Fig. 8 Catalyst coating on the reactor wall[8]

4. 분해반응 개시제를 이용한 흡열량 향상 연구

분해반응 개시제(Initiator)역시 연료의 흡열반응이 실제 반응온도보다 낮은 온도에서 수행될 수 있도록 하기 때문에 흡열능력을 향상시킬 수 있다[9].

Figure 9는 JP-7에 분해반응 개시제를 첨가한 경우와 그렇지 않은 경우 흡열량 차이를 나타내 주는 그래프이다. 같은 온도에서 개시제를 첨가한 경우 그렇지 않은 경우보다 흡열량이 증가하였음을 확인할 수 있다.

분해반응 개시제는 분자 내에 흡열연료를 구성하는 C-C결합과 C-H결합보다 결합에너지가 작은 결합을 가지고 있다. 예를 들어 n-heptane의 분해반응에 이용된 Tributylamine(TBA)는 C-N결합을 가지고 있는 물질로써 C-N결합의 에너지는 C-C결합과 C-H결합의 에너지보다 작다[10]. 연료의 분해반응은 라디칼에 의한 연쇄적인 반응이다. 따라서 C-N결합은 연료의 분해온도보다 낮은 온도에서 해리되어 라디칼을 생성하므로 연료의 분해반응을 촉진시킬 수 있고 흡열량을 증가시킬 수 있다.

5. 코킹형성 억제기술 동향

저압에서와 마찬가지로 항공유가 쓰이는 고압의 조건(초임계)에서 연료 분해과정의 부산물로서 코킹생성이 발생한다. 코킹은 촉매 비활성을

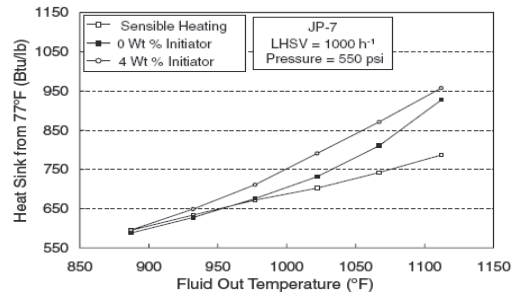


Fig. 9 Heat sink of JP-7 measured with initiator and without initiator[9]

촉진하여 수명을 단축시키고, 연료의 이동통로 혹은 흡열반응을 위한 열교환기 벽에 침적되어 시스템의 오작동을 일으킬 수 있다. 따라서 연료의 흡열특성을 이용하기 위해서는 코킹생성을 억제시키기 위한 연구가 반드시 필요하다. 연료 분해반응에 의해 생성되는 코킹은 크게 섬유상(Filamentous) 탄소 코킹과 무정형(Amorphous) 탄소 코킹으로 나눌 수 있으며 이들은 생성되는 원리가 다르다.

5.1 섬유상 코킹생성 억제기술 동향

섬유상 코킹은 금속 표면과 탄화수소의 상호작용에 의해 발생한다. 따라서 금속 혹은 합금의 선택, 코팅, 첨가제를 통해 섬유상 코킹생성을 조절할 수 있다.

Fe, Co, Ni로 구성된 합금은 섬유상 코킹을 생성하기 쉽지만 Ti, Al, Mn 등으로 구성된 합금은 섬유상 코킹 생성이 적은 편이다. Fe와 Ni과 같은 금속의 표면에는 연료의 분해반응 시 불안정한 금속 카바이드(Metal carbide)가 형성되고 이는 섬유상 코킹생성을 유발하는 결과를 낳는다. 반면 Ti금속의 표면에는 연료의 분해반응 시 매우 안정한 금속 카바이드가 형성되어 다른 금속에 비해 섬유상 코킹생성량이 매우 적다. 이러한 원인은 분해반응이 진행되면서 Ti 표면에 생성된 안정한 티타늄 카바이드가 표면에 대한 탄화수소물질의 흡착력을 감소시키며, 또한 티타늄과 흡착된 탄소의 강한 상호작용은 코킹의 성장을 감소시키기 때문이다[11].

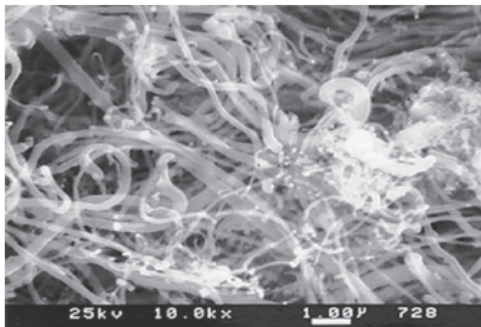


Fig. 10 Filamentous Coke formed at High Pressure[11]

섬유상 코킹은 탄화수소와 금속의 접촉에 의해 생성되는 것이므로, 비활성 물질인 실리카로 구성된 코팅 물질로 금속표면을 처리하면 코팅 물질이 금속표면과 탄화수소를 단절시키는 역할을 하여 섬유상 코킹생성을 억제할 수 있다. 또한 섬유상 코킹생성을 억제하기 위해 투입하는 첨가제는 금속 표면에서 매우 안정한 표면 물질을 생성하여 Fe, Ni에서와 같이 불안정한 카바이드가 표면에 생성되는 것을 억제함으로써 섬유상 코킹 형성을 방해한다.

5.2 무정형 코킹생성 억제기술 동향

무정형 코킹은 고온의 유체로부터 생성된 입자들이 침적되어 형성된다. 따라서 이러한 무정형 코킹은 침적이 되는 표면 조성에 영향을 받지 않는다. 하지만 표면이 매끄러울수록 일반적으로 무정형 코킹이 적게 형성된다.

HMP(High molecular weight product) 무정형 코킹침적과 관련이 있다는 보고에서 HMP농도는 열전달 표면 근처에서 감소하는데, 이는 HMP가 침적물로 전환되었기 때문이라고 설명하고 있다[11].

무정형 코킹침적을 PAH(Polycyclic aromatic hydrocarbon) 생성을 통해 설명하는 보고에서 PAH가 증가할수록 침적형성이 증가한다고 설명한다. PAH는 Diels-Alder-type cycloaddition을 통해 생성된다. Diels-Alder 반응은 Diene과 Dienophile이라고 불리는 Alkene이 반응하여 Cyclohexene을 생성하는 반응으로써 Fig. 12에 나타내었다[11].

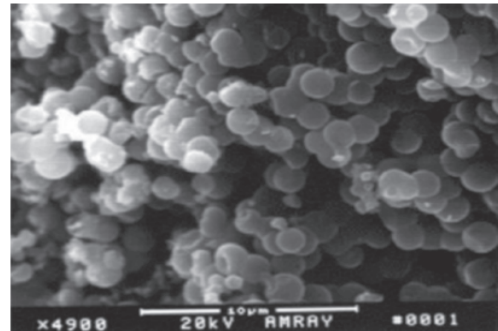


Fig. 11 Amorphous Coke formed at High Pressure[11]

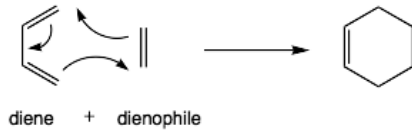


Fig. 12 Diels-Alder Reaction(Cycloaddition)

Figure 12에서 생성물인 Cyclohexene은 PAH 생성에 전구체 역할을 할 수 있으며, PAH가 수백 ppm 정도가 되면서 침적이 시작된다. PAH와 침적형성의 관계를 설명하기 위해 항공유 JP-7을 이용한 연구가 있었다. JP-7은 3 vol%의 Single-ring aromatic과 미량의 Two-ring aromatic를 함유한다. 하지만 열분해반응(727 °C) 이후에 Three-ring 이상의 Aromatics가 증가하였고, 이들은 무정형 코킹 침적물의 전구체로써 Methylcyclohexane(MCH)과 Toluene의 열분해반응에서 침적형성을 야기하였다. 따라서 Diels-Alder 반응을 억제하기 위해 반응 중에 생성되는 Butadiene과 반응성이 좋은 첨가제 연구가 진행 중이지만, 아직까지 큰 성과가 나타난 연구가 없었다[11].

무정형 코킹방지를 위한 연구로써 수소공여체(Hydrogen donor)에 관한 연구가 진행되어왔다. 무정형 코킹방지를 위해 주로 사용된 Tetralin, Tetrahydroquinoline (THQ), Benzyl alcohol, Decalin등은 좋은 효과를 나타내었고, 특히 JP-8+100이라는 항공유에 Decalin을 1% 첨가한 경우 Fig. 13과 같이 25~30% 침적을 억제하는 결과를 낳았다[12]. 하지만 현재까지는 무정형 코킹침적과 관련된 연구는 섬유상 코킹침적방지

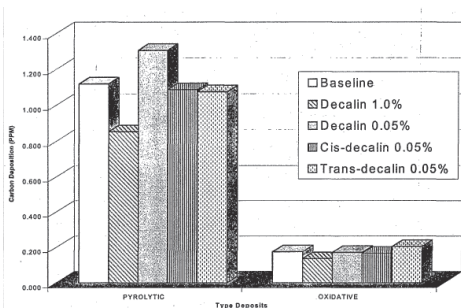


Fig. 13 Carbon deposits of JP-8+100[12]

를 위한 연구보다 성공적이지 않다.

코킹은 연료의 분해반응의 부산물이기 때문에 연료의 초기 조성에 따라 코킹이 형성되는 정도가 달라진다. 앞서 언급했듯이 연료의 코킹 생성은 방향족(Aromatic)탄화수소와 PAH의 생성과 관련이 된다.

Figure 14는 F-T(Fischer-Tropsch) 연료와 Jet A-1 연료의 온도에 따른 침적 형성량을 비교한 그래프이다[13]. F-T 연료는 Jet A-1 보다 동일한 온도에서 더 많은 코킹을 생성시킨다. F-T 연료는 n-파라핀과 iso-파라핀으로만 구성되어 있기 때문에 수소공여 능력(hydrogen-donor capacity)이 부족하다. 따라서 일단 연료의 분해반응이 시작되어 라디칼이 생성되면 라디칼은 오랫동안 없어지지 않고 남아 있게 된다. 따라서 고분자량의 물질(PAH)로 쉽게 성장하여 코킹을 형성하게 된다. 그렇기 때문에 F-T 연료와 같은 파라핀으로만 구성된 연료에는 소량의 수소공여능력이 좋은 물질인 Decalin이나 Tetralin등을 첨가하여 라디칼의 수명을 감소시킴으로써 코킹생성을 감소시킬 수 있다.

고온의 액체 탄화수소는 코킹 생성을 유발하는데 이는 열교환기 내벽에 침적되어 열전달 효율을 저하시킨다. 또한 촉매 비활성을 촉진시켜 흡열능력을 감소시키기 때문에, 일반적으로 흡열 연료의 흡열능력은 코킹생성이 발생하기 전까지의 온도로 제한되며, 코킹생성 온도와 생성량은 연료의 조성에 따라 다르다.

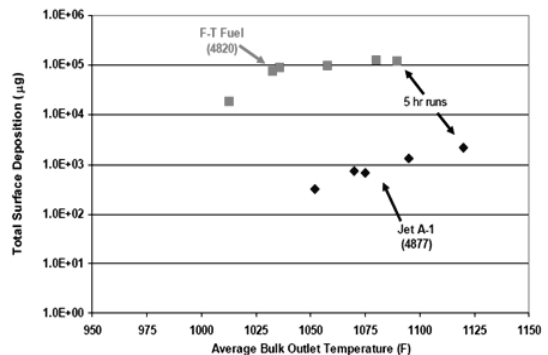


Fig. 14 Comparison of the total surface carbon deposition for Jet A-1 and F-T fuel[13]

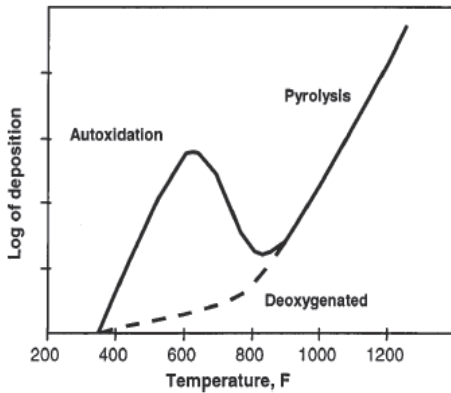


Fig. 15 Deposition rate for jet fuel[14]

Figure 15는 일반적인 제트연료의 온도에 따른 코킹침적 속도를 나타낸 것이다[14]. 연료의 열분해반응과 축매분해반응으로 생성되는 코킹은 Fig. 15의 pyrolysis영역에서 생성되는 코킹으로써 무정형 코킹이다.

6. 연료의 흡열량 시험평가 기술동향

최근 진행되고 있는 흡열연료의 흡열능력 평가 시험은 대부분 Fig. 16과 같은 장치를 이용하여 수행되고 있다. 이 실험장치의 반응기에 공급된 전력과 열 손실의 차이를 통해 연료의 온도

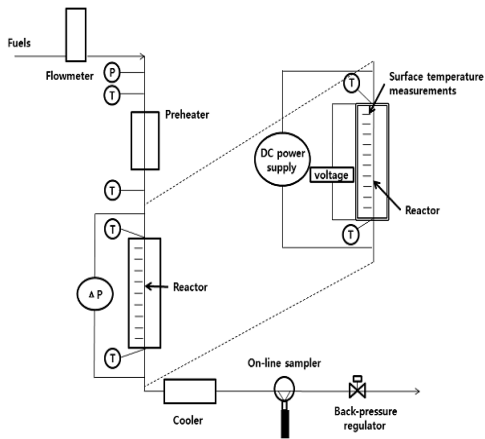


Fig. 16 Heat Sink Measurement Apparatus[15]

상승과 분해반응에 수반되는 흡열을 측정할 수 있다[15].

위와 같은 실험장치를 이용하면 공급된 전력량을 통해 연료의 흡열량을 직접 측정할 수 있는 장점이 있다. Fig. 16에 있는 실험장치를 통해 Fig. 17과 같은 실험데이터를 얻을 수 있고 이를 통해 연료별 온도에 따른 흡열량을 평가할 수 있다.

Figure 17은 JP-7이라는 비행체 연료의 온도에 따른 흡열량(세로축으 엔탈피) 그래프이다[11]. Fig. 17에서 비교적 낮은 온도구간(약 500℃ 이하)에서는 연료의 냉각효과가 물리적 흡열인 현열(sensible heating)에만 의존하지만, 분해가 시작되는 온도(약 500℃)부터는 현열과 화학적 분해반응에 의한 흡열이 동시에 작용하는 것을 확인할 수 있다. 물리적 흡열은 분해반응과 상관없이 연료의 비열과 온도상승에만 관여되는 양으로써 연료의 초기 조성을 이용하여 계산할 수 있다. 대부분의 연구에서 흡열연료의 현열은 NIST의 SUPERTRAPP 프로그램을 이용하여 계산한다[15].

Figure 16과 같은 직접적인 흡열량 측정장치를 이용하기 전에는 연료의 생성물조성을 이용하여 흡열량을 계산하였다. 열역학적 이론에 따르면 반응기의 입구와 출구에서 연료의 엔탈피 변화는 분해반응에 수반되는 흡열량을 의미한다. GC, GC/MS와 같은 분석 장비를 이용하여 생성

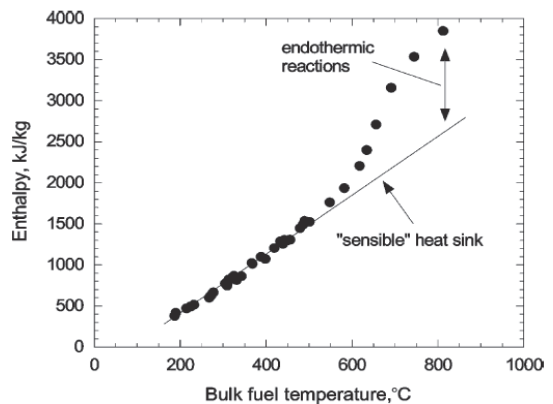


Fig. 17 Heat Sink from Endothermic reaction of JP-7[11]

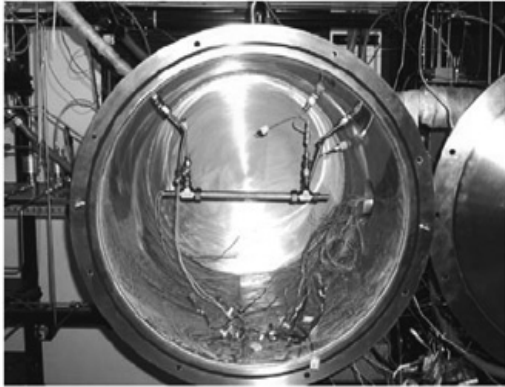


Fig. 18 Calorimetry test section installed in the vacuum chamber[9]

물의 조성을 알아낸 후, 생성물의 생성엔탈피에서 반응물의 생성엔탈피의 차를 구하면 분해반응에 수반되는 연료의 흡열량을 구할 수 있다. 하지만 연료의 분해반응 생성물은 너무 많기 때문에 모든 생성물의 생성엔탈피를 고려할 수 없어 이와 같이 열역학적 이론을 바탕으로 계산한 흡열량은 실제 흡열량과 큰 차이가 있을 수 있다.

Figure 16과 같은 직접적인 흡열량 측정장치에서 정확한 흡열량 측정을 위해서는 외부로의 열손실을 최소화하는 것이 중요하다.

외부로의 열손실을 줄이기 위해 여러 가지 방법들이 도입되었는데 Fig. 18과 같이 반응기를 진공 Chamber안에 도입하여 주위로의 열손실을 최소화하려는 노력이 있었다[9]. 또한 연료의 온도를 상승시킬 때 반응기 외부에서 열을 가하지 않고 반응기 내부에 히터봉을 삽입하여 반응기 내부에서 열을 가하는 방법도 이용되었다[9]. 이 경우 히터의 열이 외부로 손실되지 않고 연료에 직접적으로 전달될 수 있기 때문에 정확한 흡열량 측정에 도움이 된다.

7. 결 론

액체연료를 사용하는 극초음속 항공기의 열적부하를 처리하기 위해 탄화수소형 흡열연료를

주 냉각제로 이용하는 것은 필수적이다. 본 논문에서는 흡열연료를 냉각제로 이용할 때 나타나는 현상과 이 때 발생하는 문제점을 개선하기 위한 그동안의 기술적 내용에 관하여 분석하였다.

극초음속 항공기에서 흡열연료를 효과적으로 이용하기 위해서는 본 논문의 기술분석을 기초로 연료의 분해반응현상을 규명하고, 시스템에서 흡열량 증가와 연료흐름 압력강하를 감소시킬 수 있는 효과적인 촉매 및 이의 적용기술 개발에 대해 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. T. Edwards, M. L. Meyer "Propellant Requirements for Future Aerospace Propulsion Systems," AIAA2002-3870, 2002
2. O. A. Powell et al., "Development of Hydrocarbon-Fueled Scramjet Engines: The Hypersonic Technology(HyTech) Program," J. Propul. Power. vol.17 No.6 2001, pp.1170-1176
3. 노진현, 원수희, Bernard Parent, 최정열, 변종렬, 임진식, "X-51A 스크램제트 기술 실증기 개발 프로그램 핵심기술," 한국추진공학회지, 제12권, 제5호, 2008, pp.79-91
4. D. R. Sobel et al., "Hydrocarbon Fuel Cooling Technologies for Advanced Propulsion," J. Eng. Gas. Turb. Power. vol.119, 1997, pp.344-351
5. Z. Hai-long, et al., "Pd/HZSM-5 Coating Catalyst for Supercritical Cracking of Endothermic Fuel," J. Fuel. Chem. Tech., Vol.36 No.4, 2008, pp.462-467
6. A. V. Korabelnikov et al., "High-Temperature Conversion of Liquid Hydrocarbons," AIAA2006-1442, 2006
7. M. J. Castaldi et al., "Development of an Effective Endothermic Fuel Platform for Regeneratively Cooled Hypersonic Vehicles,"

- AIAA2006-4403, 2006
8. J. Bravo et al., "Wall Coating of a CuO/ZnO/Al₂O₃ Methanol Steam Reforming Catalyst for Micro-channel Reformers," Chem. Eng. J., Vol.101, 2004, pp.113-121
 9. D. T. Wickham et al., "Additives to Improve Fuel Heat Sink Capacity in Air/Fuel Heat Exchangers," J. Propul. Power. vol.24 No.1 2008, pp.55-63
 10. Z. Wang et al., "Tributylamine as an Initiator for Cracking of heptane," Energ. Convers. Manage. vol.49, 2008, pp1584-1594
 11. T. Edwards, "Cracking and Deposition Behavior of Supercritical Hydrocarbon Aviation Fuels," Combust. Sci. Tech. vol.178, 2006, pp.307-334
 12. E. Corporan et al., "Studies of Decalin as a Suppressor of Pyrolytic Deposits in JP-8+100," AIAA99-2213, 1999
 13. T. Edwards et al., "Fuel Composition Influence on Deposition in Endothermic Fuels," AIAA2006-7973, 2006
 14. L. J. Spadaccini et al., "Deposit Formation and Mitigation in Aircraft Fuels," J. Eng. Gas. Turb. Power. vol.123, 2001, pp.741-746
 15. H. Huang et al., "Fuel-Cooled Thermal Management for Advanced Aeroengines," J. Eng. Gas. Turb. Power. vol.126, pp.284-293, 2004