

## 고속비행체에서 흡열연료의 이용기술 동향

김중연 · 박선희 · 전병희 · 김성현<sup>†</sup> · 정병훈\* · 한정식\*

### A Technical Review of Endothermic Fuel Use on Supersonic Flight

Joongyeon Kim · Sun Hee Park · Byung-Hee Chun · Sung Hyun Kim<sup>†</sup> · Byung Hun Jeong\*  
Jeong Sik Han\*

#### ABSTRACT

Advances in high speed flight technologies and engine efficiencies increase heat load on the aircraft. As the temperature of air flow is too high to cool the structure at hypersonic flight speeds, it is necessary to utilize the aircraft fuel as the primary coolant. By undergoing endothermic reaction, such as thermal decomposition or catalytic decomposition, aircraft fuels have heat sink potential. These fuels are called endothermic fuels. The endothermic reaction can be improved by catalysts, but limited by coke deposition. In this study the essential technologies of endothermic fuels are described, and intended to be used for basic research.

#### 초 록

고속 비행기술의 발전과 엔진효율의 향상은 비행체와 엔진의 열적부하를 증가시킨다. 극초음속까지 비행체의 속도가 빨라지면 공기흐름을 이용한 냉각이 어렵기 때문에 항공유를 주요 냉각체로서 사용하게 된다. 연료가 열 흡수원(Heat sink)으로서 사용될 때 열분해반응 또는 촉매분해반응과 같은 흡열반응(Endothermic reaction)을 거쳐 분해가 되는데 이러한 특성을 지닌 연료를 흡열연료(Endothermic fuels)라고 한다. 흡열반응은 촉매를 통해 개선될 수 있지만, 코킹침적이 형성되기 이전까지의 온도로 제한된다. 본 연구에서는 흡열연료에 관련된 주요 기술을 조사하여 기초연구에 활용하고자 하였다.

Key Words: Heat load(열부하), Endothermic Reaction(흡열반응), Heat sink(열흡수원), Endothermic Fuels(흡열연료)

#### 1. 서 론

항공기, 로켓, 우주비행체 등에서 목표하는 극초음속의 비행속도와 엔진효율의 향상은 시스템의 열적부하를 증가시킨다. 비행체의 속도가 극초음속으로 증가하게 되면 요구되는 흡열량은 Fig. 1과 같이 증가하게 되며 시스템의 냉각은

고려대학교 화공생명공학과

\* 국방과학연구소

<sup>†</sup> 연락처, E-mail: kimsh@korea.ac.kr

공냉방식을 포함한 기존의 냉각방법으로 불가능하여 연료를 주요 냉각제로서 사용하게 된다[1]. 마하 8이상에서는 냉각능력이 우수한 극저온연료(액체수소, 메탄)를 사용하지만 극저온연료는 저비중, 저온보관을 필요로 하므로 운용성이 부족하다. 그리하여 미국에서는 1970년대 이후 진행되고 있는 HyTech 프로그램을 통해 촉매에 의한 흡열반응을 이용할 수 있는 탄화수소형 흡열연료를 중점적으로 연구하였다.

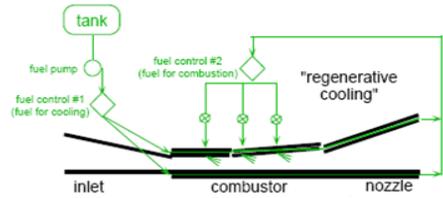


Fig. 2. Regenerative cooling system

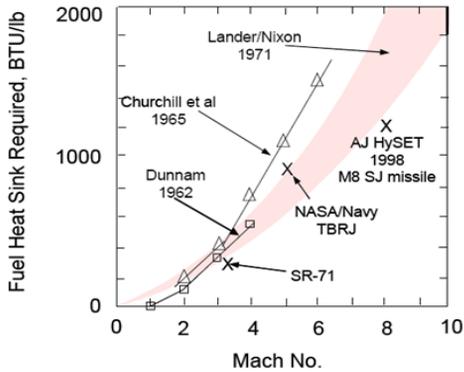


Fig. 1. Heat sink as a function of Mach No.

흡열연료는 고온에서 열분해반응 또는 촉매분해 반응을 통해 열을 흡수하면서 분해가 되는 특성을 지닌 연료를 의미하며, 흡열연료로부터 얻을 수 있는 열 흡수원은 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.

본 연구에서는 흡열연료 연구분야의 주요항목별로 최근 연구동향을 조사 및 분석하여 기초연구에 활용하고자 하였다.

## 2. 흡열연료의 열분해반응과 촉매분해반응

흡열연료를 이용한 냉각은 연료를 분사하기 전 Fig. 2와 같이 연소관과 노즐벽면내의 유로로 흘러보낸 후, 고온에서 열을 흡수하여 분해되도록 하는 재생냉각방식이 주로 적용되고 있으며, 최근에는 이를 개선한 방법도 연구되고 있다[2].

흡열연료의 분해반응은 고온에서 발생하는데 촉매를 이용하면 낮은 온도에서도 반응의 활성을 높일 수 있다. Fig. 3은 케로신연료의 흡열특성을 모사하기 위해 이용된 n-dodecane의 온도에 따른 전환율을 나타낸 그래프로써 열분해반응과 촉매분해반응을 비교하고 있다[3]. 같은 온도에서 제올라이트 촉매를 적용할 경우 선택적 분해반응 전환율이 증가하였음을 확인할 수 있다. 또한 제올라이트에 귀금속을 담지시킨 Pd/HZSM-5는 금속기능과 산기능을 동시에 발현하여 가장 높은 선택적 분해반응 전환율을 나타낸다.

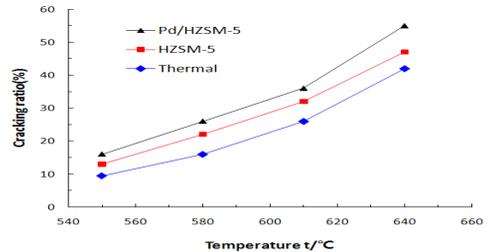


Fig. 3. Cracking ratio of n-dodecane

분해반응에 수반되는 흡열은 선택적 반응이 많이 진행되어 전환율이 증가할수록 커지므로, Fig. 4에서 Pd/HZSM-5, HZSM-5, Thermal cracking 순으로 흡열량이 크게 나타난다[3].

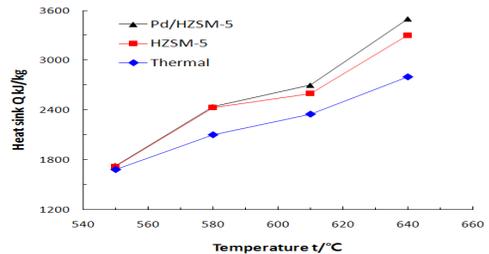


Fig. 4. Heat sink of n-dodecane

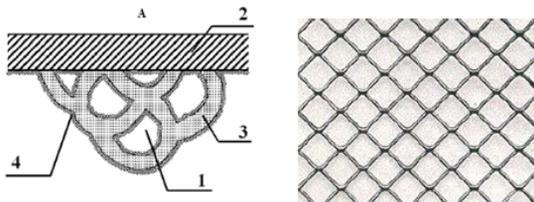
촉매의 사용은 분해반응의 전환율을 증가시킬 뿐만 아니라 분해반응 생성물의 조성도 변화시킨다. Table. 1은 n-dodecane에 대하여 제올라이트 촉매를 이용하였을 때 생성물조성의 변화를 보여주고 있다[3]. 반응열은 생성물과 반응물의 엔탈피 차이와 같기 때문에 생성물분포가 달라지면 반응열이 변화된다. 따라서 연료가 가질 수 있는 흡열량은 분해반응의 전환율 뿐만 아니라 생성물의 조성에도 영향을 받을 수 있다.

Table 1. Composition of cracking product

Catalyst	Composition%			
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> ~C <sub>5</sub>
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

### 3. 촉매적용 기술동향

촉매를 이용한 흡열연료 연구는 1960년대 백금/알루미나 촉매를 이용한 MCH(메틸사이클로헥산)의 탈수소화반응으로부터 시작되어 현재까지 진행되고 있다. 이 연구는 packed bed 반응기를 통해 수행되었는데, packed bed 반응기는 반응기벽과 안쪽의 열전달 효율이 낮고 반응기 입구와 출구에서 압력강하가 크게 나타난다. 그 결과 연료의 전환율과 흡열량이 감소하게 된다. 따라서 이를 개선하기 위해 Fig. 5와 같이 기존보다 열전도도가 좋고, 연료흐름에 대한 저항을 최소화할 수 있는 지지체에 촉매활성 물질을 코팅한 촉매의 적용방법이 제안되었다[4, 5].



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

Fig. 5. Catalyst support shape

또한 촉매지지체를 이용하지 않고 촉매를 반응기에 직접 코팅하는 기술도 제안되고 있다. Fig. 6은 제올라이트 촉매를 결합제 물질과 혼합한 슬러리형태로 만들어 반응기에 채운 후 비활성 가스를 가하여 슬러리를 밀어냄으로써 촉매를 코팅하는 방법을 나타낸 그림이다[6]. 촉매를 코팅하는 방법 역시 흡열량 향상을 목적으로 반응기내에서 열전달 개선 및 압력강하 최소화를 위해 제안된 촉매 적용방법이라고 할 수 있다.

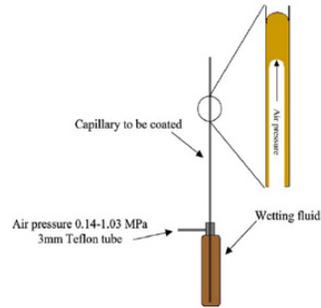


Fig. 6. Catalyst coating on the reactor wall

### 4. 코킹개선 기술동향

연료의 흡열능력은 코킹 침적이 발생하기 전까지의 온도로 제한된다. Fig. 7은 일반적인 제트연료의 온도에 따른 코킹침적 속도를 나타낸 것이다[7].

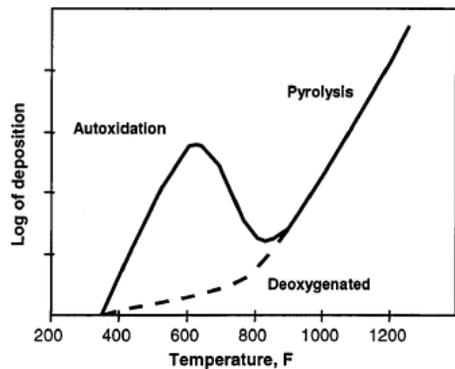


Fig. 7. Deposition rate for jet fuel

연료의 열분해반응과 촉매분해반응으로 생성되는 코킹은 Fig. 7의 pyrolysis영역에서 생성되

는 코킹이다. 이 영역에서는 탄화수소의 결합이 깨지면서 생성되는 라디칼들이 중합하여 고분자량의 물질들이 생성되어 코킹침적이 발생한다. Pyrolytic 코킹은 hydrogen-donor 첨가제를 연료에 첨가하여 감소시킬 수 있다. Fig. 8는 hydrogen-donor인 Decalin을 1.0% 첨가하였을 때 pyrolytic 코킹이 감소하였음을 보여준다[8].

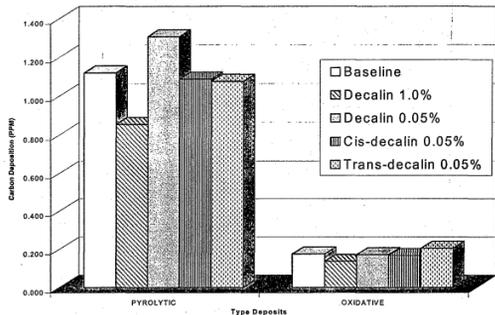


Fig. 8. Carbon deposits of JP-8+100

### 5. 연료의 흡열량 시험평가 기술동향

연료의 흡열량 측정을 위해 다양한 시도가 있었다. 약간의 차이점이 존재하지만 대부분의 연구자들은 Fig. 9와 같은 장치를 이용해 흡열량을 측정하였다. 이 실험장치는 연료의 온도상승과 분해반응에 수반되는 흡열을 공급된 전력량과 열 손실량의 차이를 통해 측정한다.

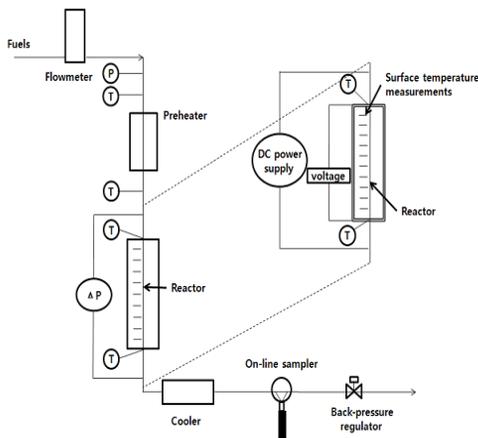


Fig. 9. Heat Sink Measurement Apparatus

### 6. 결 론

액체연료를 사용하는 극초음속 비행체는 열적부하를 처리하기 위해 탄화수소형 흡열연료를 주 냉각제로써 이용한다. 시스템에서 흡열량 증가와 연료흐름 압력강하를 감소시킬 수 있는 효과적인 촉매 및 이의 적용기술 개발이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. T. Edwards, "Cracking and Deposition Behavior of Supercritical Hydrocarbon Aviation Fuels," *Combust. Sci. and Tech.* vol.178, no.1, 2006, pp.307-334
2. Albert H. B., "Hypersonic Air-Breathing Propulsion Efforts in the Air Force Research Laboratory," AIAA2005-3255, 2005
3. 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
4. M. J. Castaldi et al., "Development of an Effective Endothermic Fuel Platform for Regeneratively Cooled Hypersonic Vehicles," AIAA2006-4403, 2006
5. A. V. Korabelnikov et al., "High-Temperature Conversion of Liquid Hydrocarbons," AIAA2006-1442, 2006
6. J. Bravo et al., "Wall Coating of a CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Methanol Steam Reforming Catalyst for Micro-channel Reformers," *Chem. Eng. J.*, Vol.101, 2004, pp.113-121
7. L. J. Spadaccini et al., "Deposit Formation and Mitigation in Aircraft Fuels," *J. Eng. Gas. Turb. Power.* vol.123, 2004, pp.284-293
8. E. Corporan et al., "Studies of Decalin as a Suppressor of Pyrolytic Deposits in JP-8+100," AIAA99-2213, 1999