

메탈폼 지지체를 이용한 액체연료 분해반응 촉매의 흡열특성

문정인 · 김나리 · 정병훈* · 정지훈†

경기대학교 화학공학과
16227 경기도 수원시 이의동 산 94-6
*국방과학연구소 4본부
34186 대전광역시 유성구 조치원길 462
(2021년 4월 16일 접수, 2021년 6월 3일 수정본 접수, 2021년 6월 15일 채택)

Endothermic Properties of Liquid Fuel Decomposition Catalyst Using Metal Foam Support

Jeongin Mun, Nari Kim, Byunghun Jeong* and Jihoon Jung†

Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, 154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16227, Korea

*Agency for Defense Development, 4th headquarters, 462 Jochiwon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34186, Korea

(Received 16 April 2021; Received in revised from 3 June 2021; Accepted 15 June 2021)

요 약

극초음속 비행체의 비행 중에 발생하는 열 문제를 해결하기 위해 탑재된 연료의 분해반응 시 나타나는 흡열효과를 이용하는 냉각기술이 개발되고 있다. 본 연구에서는 HZSM-5를 촉매로 사용하여 n-dodecane 연료의 분해반응을 수행하였으며, 촉매 분해반응의 흡열효과를 극대화하고 코크생성을 억제하기 위해 촉매를 메탈폼에 코팅하였다. 반응기는 외경 1.27 cm의 스테인리스 스틸 흐름형 반응기를 사용하였다. HZSM-5를 메탈폼에 코팅한 촉매를 사용한 촉매 분해반응 결과 흡열량은 최대 2887 kJ/kg, 기상전환율은 34%이었으며, 메탈폼의 코크생성량은 촉매를 코팅함에 따라 촉매를 코팅하지 않은 것에 비해 약 56% 감소하였다.

Abstract – In a hypersonic vehicle to solve the heat problem generated during flight, a cooling technology is being developed which uses the endothermic effect that appears during the decomposition reaction of the mounted fuel. In this study, the decomposition reaction of n-dodecane fuel was performed using HZSM-5 as a catalyst, and the catalyst was coated on metal foam to maximize the endothermic effect of the catalytic decomposition reaction and suppress coke formation. The reactor was a stainless steel flow reactor with a outer diameter of 1.27 cm, and the reaction temperature was 550 °C, the reaction pressure was 4 MPa, and the flow rate was 12 ml per minute. As a result of the catalytic decomposition reaction using a catalyst coated with HZSM-5 on the metal foam, the heat sink was 2887 kJ/kg as a maximum, the gas phase conversion rate was 34%, and the amount of coke produced on the metal foam decreased by about 56% as the catalyst was coated compared to the uncoated catalyst.

Key words: Endothermic Fuel, Heat sink, Zeolite, Washcoating, Metal Foam, Flow Reactor

1. 서 론

극초음속 엔진을 장착하여 높은 마하수(Mach number)로 비행하는 비행체는 공기와의 마찰열에 의해 비행체 표면의 온도가 2000 °C 이상으로 상승하게 되고 엔진에서는 더 높은 발열이 발생한다. 이는 자체 발열이 있는 전자장비의 정상작동과 구조물의 안정성 확보에

어려움을 야기한다[1]. 이러한 문제점을 해결하는 방안으로 연료를 냉각제로서 사용하는 방안이 있다. 이를 위해 수소, 메탄 등 낮은 분자량의 극저온 연료를 사용할 수도 있으나 낮은 에너지밀도 때문에 액체 탄화수소 연료를 적용하는 것이 보편적이다. 현재 미국과 같은 선진국에서도 연료의 냉각능력을 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 비행연료로 액체상태의 탄화수소계열 연료가 주로 고려되는데 액체 탄화수소는 저장성이 좋고 분해 반응 시 흡열 효과가 나타나는 것으로 알려져 있다[2-4]. 이러한 액체연료는 비행체 연소실 외벽의 냉각채널을 지나면서 분해반응이 진행된다. 이를 극대화하기 위해서 액체연료 분해반응용 촉매를 사용한다. 액체연료와 촉매의 효과적인 반응 및 열전달을 위해 다양한 방법들이 적용되고

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jhjung@kyonggi.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. Shin 등[5]은 메탈폼을 지지체로 이용하여 methylcyclohexane (MCH) 액체연료를 회분식 반응기로 온도에 따라 분해반응을 진행하였으며, 메탈폼을 지지체로 사용한 촉매가 펠렛형 HZSM-5 촉매보다 높은 액상전환율을 나타내었다고 보고하였다. Mun 등[6]은 HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼을 이용하여 MCH와 n-dodecane 액체연료에 대한 회분식 반응을 진행하였으며, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼의 전환율이 가장 높았고 저분자량 탄화수소로의 분해반응이 가장 많이 진행되었음을 확인하였다.

고정층 반응기에서 주로 사용되는 펠렛 타입의 촉매는 반응이 진행됨에 따른 코크의 생성으로 인해 반응기 출구에서 압력강하가 크게 나타난다. 이를 개선하기 위해 반응기 내벽에 촉매를 코팅하는 방법이 있으나 채널링과 촉매 담지량 등의 문제가 있어 연료흐름에 대한 저항을 최소화할 수 있는 다공성 지지체에 활성 물질을 코팅하는 방법이 제안되었다. 이러한 지지체중 하나가 0.5 mm~3 mm의 기공크기를 가지는 메탈폼으로 우수한 열전달과 압력강하 억제를 통한 효과적인 액체연료의 분해반응을 기대할 수 있다.

액체연료 분해반응 시 얻어지는 흡열량은 물리적인 흡열량과 화학적인 흡열량으로 나눌 수 있다. 물리적인 흡열량은 액체연료의 온도를 올리는데 흡수되는 현열(sensible heat)이다. 분해반응의 온도와 압력이 정해지면 물리적인 흡열량은 고정값이 된다. 화학적인 흡열량은 분해반응 시 수반되는 반응열(heat of reaction)이며 촉매를 통해서 향상시킬 수 있는 흡열량이다. 화학적인 흡열량은 촉매 분해반응과 탈수소반응으로 이루어져 있으며 낮은 분자량의 기상 화합물을 생성시킬수록 흡열량은 증가한다. 흡열량을 측정하기 위한 방법으로 대표적인 두 가지가 알려져 있다. 첫 번째는 미국표준기술연구소(NIST)에 개발한 SUPERTRAPP 프로그램을 이용한 계산법이다[7]. 해당 온도와 압력에서 반응물과 생성물의 엔탈피 값의 차이를 이용하여 흡열량을 산출하는 방법이다. 하지만 이 방법의 단점은 생성물이 정확하게 식별되어야 하고 또한 그 생성물이 데이터베이스에 포함되어 있을 때만 정확한 흡열량 산출이 가능하다.

따라서, 화학변화를 동반하지 않는 물리적 흡열량 측정에 주로 사용된다. 두 번째 방법은 흡열량을 직접 측정하는 방법으로 흡열반응에 의해 연료의 온도가 감소하면 반응 온도를 일정하게 제어하기 위해 출력되는 전력량을 측정하여 흡열량을 환산하는 것이다. 이 방법은 앞선 SUPERTRAPP 프로그램에서 분석할 수 없었던 생성물까지 측정할 수 있어 보다 정확한 흡열량을 산출할 수 있다.

액체연료를 분해시켜 낮은 분자량의 연료로 전환시키면서 열을 흡수하지만 반응 과정에서 부산물인 코크(coke)가 생성된다. 분해 생성물의 중합, 축합으로 코크가 생성되면 촉매의 표면을 막아 촉매의 활성을 저하시키며 동시에 연료의 유로를 막아 압력 강하를 높이며 단열재와 같은 역할을 하여 흡열성능을 감소시키는 다양한 문제를 일으킨다. 따라서 촉매의 활성을 높이면서 코크 등 비활성화를 최대한 억제하는 기술 개발이 요구된다.

극초음속 비행체의 반응기는 고온으로 유지되어 코크 발생에 의한 촉매 활성 저하 문제가 존재한다. 액체연료가 통과하는 냉각채널은 스테인리스 스틸과 메탈폼이기 때문에 표면에 Ni, Fe, Cr, Al 등의 금속이 존재한다. 해당 금속들은 filamentous coke 형성의 활성금속으로 알려져 있으며 Fig. 1에 filamentous coke 형성 매커니즘을 나타내었다[8]. 채널 내에 형성된 코크가 축적됨에 따라 연료유로의 막힘 현상이 발생할 수 있으며 filamentous coke는 냉각채널을 구성하는 금속 표면의 기계적 강도를 약화시키는 것으로 알려져 있다. 이를 해결하고자 메탈폼 표면에 제올라이트와 같은 세라믹 계열 소재를 코팅하여 filamentous coke 형성을 억제하고 메탈폼의 기계적 강도를 유지시키고자 한다. 금속 표면에 촉매 코팅을 통해 filamentous coke 형성 억제뿐만 아니라 열적 내구성 및 우수한 안정성을 가지는 반응시스템을 확보하고자 하였다.

본 실험의 목적은 메탈폼을 지지체로 한 흡열반응 촉매를 제조하여 흐름형 반응기에서 모델 액체연료의 촉매 분해반응 흡열량과 반응시스템 내 코크 생성량을 비교 평가하여 메탈폼 지지체 촉매의 반응특성을 파악 하고자 한다.

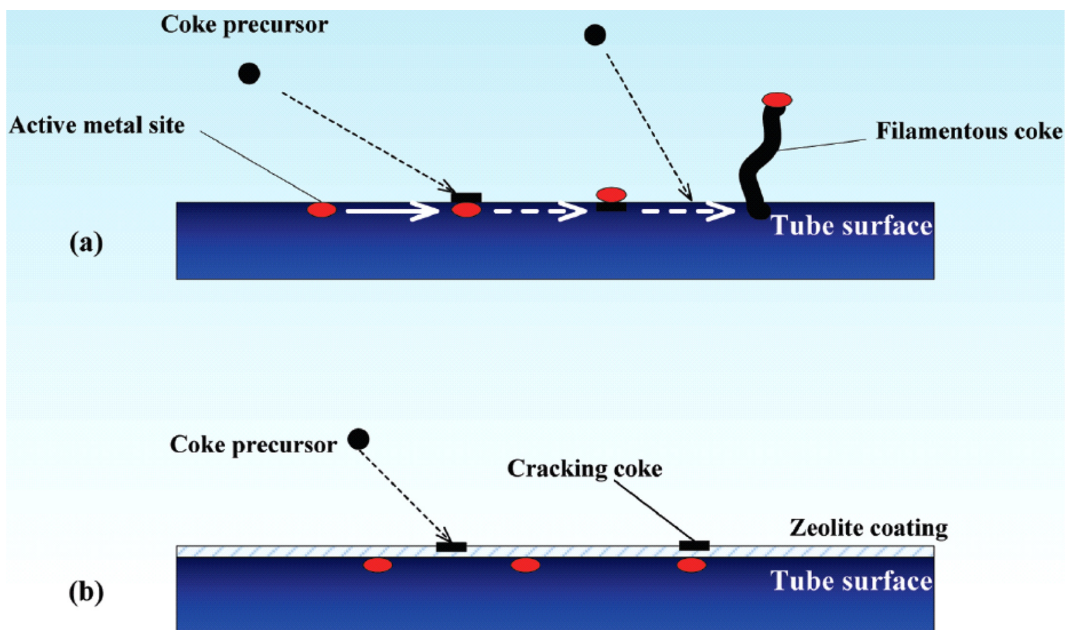


Fig. 1. Coke formation mechanism over bare tube surface and zeolite coated surface (a) Stainless steel tube, (b) Stainless steel tube coated zeolite [8].

2. 실험

2-1. 워시코팅

본 연구에서 연료 흡열분해반응을 위해 사용된 촉매는 Zeolyst에서 만든 ZSM-5(CBV2314)이며, 지지체로 사용된 메탈폼은 Alantum 제품으로 NiFeCrAl로 이루어진 합금이며 표면적이 6.9 m²/L이다. 촉매를 메탈폼에 코팅할 때 첨가되는 바인더로는 Sigma Aldrich의 LUDOX AS-30 colloidal silica를 사용하였다. 메탈폼에 촉매를 워시코팅하기 전에 메탈폼을 아세톤으로 15분간 초음파 세척을 진행하였다. 워시코팅 용액은 Binder 6 wt%, HZSM-5 12 wt%, water 82 wt%의 조성을 가지며 Table 1에 정리하였다. 실리카 바인더와 ZSM-5를 물 용매에 분산시켜 제조하고 이 용액에 메탈폼을 침지시켰다. 이후 플랫폼을 이용하여 메탈폼의 기공을 막고 있는 과량의 코팅용액을 압축공기로 제거한 후 150 °C 오븐에서 30 분 동안 건조시켰다. 원하는 담지량의 코팅층이 형성될 때까지 이 과정을 반복한 후 550 °C에서 5 시간 동안 소성시켜 촉매를 활성화시켰다.

2-2. 흡열반응 실험

액체연료로 사용된 n-dodecane은 사슬형 구조에 C₁₂H₂₆의 화학식을 가지는 물질로 물성은 Table 2에 나타내었으며[9], 액체연료 분해반응 실험을 위한 흐름형 반응기 구성은 Fig. 2에 나타내었다. 흡열연료 n-dodecane에 대한 분해반응은 촉매를 사용하지 않은 열분해반응, 메탈폼만 사용한 분해반응, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼을 사용한 촉매 분해반응으로 나누어 진행하였다. 반응기로는 외경 1.27 cm, 내경 1.09 cm, 길이 33 cm의 스테인리스 스틸튜브를 사용하였다. 메탈폼의 길이는 10 cm이며 메탈폼의 무게는 약 4 g, 메탈폼에 담지된 HZSM-5의 무게는 0.4 g 이었다. 분해반응 전 흐름형 반응기를 질소로 10 분 동안 퍼지 하였으며 이후 아세톤으로 세척하였다. 세척이 끝난 반응기에 촉매를 충전시켰으며, 질소를 이용하여 압력을 4 MPa로 맞추고 예열기와 반응기의 온도는 각각 400 °C 와 550 °C로 설정하였다. 반응온도와 압력은 n-dodecane의 초임계 조건 중에서 흡열량과 코크 발생량, 극초음속 비행체의 조건 등을 고려하여 선정하였다. 분해반응은 n-dodecane을 반응물로 사용하여 12 ml/min의 유량으로 30 분 동안 반응시켰다. 시료는 반응이 진행되는 동안 10분 간격으로 채취하였으며 시료는 1 분 동안 채취하였다.

기상전환율은 주입된 액체연료와 배출되는 액체연료의 무게차이로 계산하였다. 코크생성량은 반응 전후 반응기 튜브와 지지체의 무게 변화로 측정하였다. 생성물은 GC-MS (GC 7890N, MS 5975A, HP-5ms column)를 이용하여 40 °C에서 290 °C 까지 분당 10 °C 씩 온도를 상승시키면서 분석하였다.

2-3. 흡열량 측정

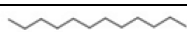
흡열량 측정을 위해 반응에 앞서 전력량계로 반응기 자체에서 소

Table 1. Composition of washcoat slurry

	Binder*	HZSM-5	Water
wt%	6	12	82

*Suspension of 30 wt% colloidal SiO₂ in H₂O

Table 2. Model endothermic fuel [9]

Fuel	Structure	Formula	Molecular structure	Critical point
n-dodecane	Linear	C ₁₂ H ₂₆		385 °C, 18.2 bar

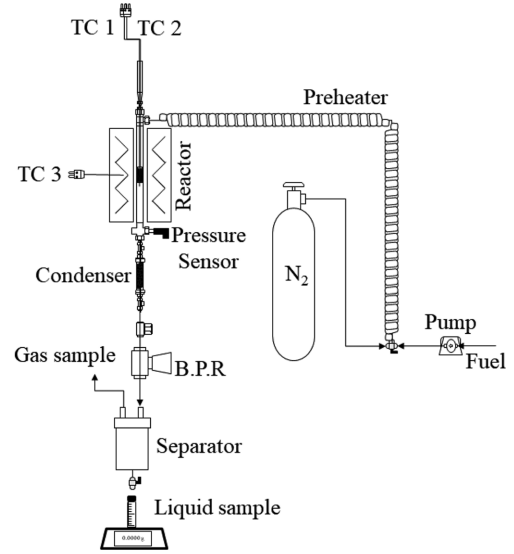


Fig. 2. Schematic diagram of flow reactor.

모되는 열 손실을 측정하였다. 이후 반응이 진행되면서 측정된 전력량에서 앞서 구한 반응기 자체에서 필요한 전력량을 빼주어 반응에 사용된 열량 즉 흡열량을 구했다. 아울러 NIST Supertrapp을 이용해서도 흡열량을 산출하여 전력량계로 측정한 값과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 열 손실 측정

흐름형 반응기에서 분해반응에 의한 흡열량을 측정하기 위해 반응기 자체에서 발생하는 열 손실을 측정하였다. 반응기 내부에 촉매와 연료를 넣지 않고 질소를 40 bar로 채운 후 400 °C, 500 °C, 600 °C 에서의 열 손실을 측정하였다. 설정온도에서 온도를 유지시키기 위해 가해진 전력량 즉 열손실을 Fig. 3에 나타내었다. 반응온

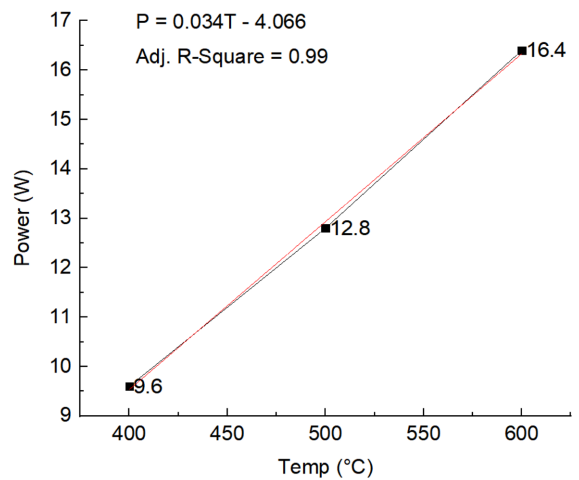


Fig. 3. Fitting graph of heat loss.

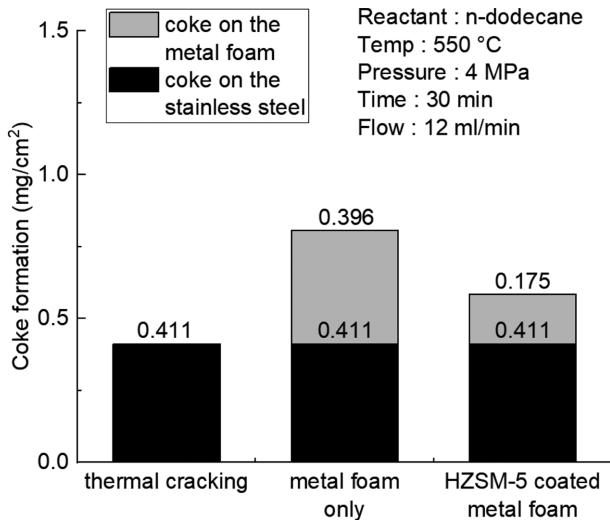


Fig. 4. Coke formation of endothermic reaction with catalyst.

도 550 °C에서의 열 손실은 14.6 W이며 흡열반응을 통해 측정되는 전력량에서 이 값을 빼주면 순수한 흡열량이 계산된다.

3-2. 코크 생성

열분해 반응, 메탈폼 반응, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼 반응에 대한 코크생성량을 Fig. 4에 나타내었다. 열분해 반응으로 생성된 코크의 양이 가장 적고 메탈폼만 사용하여 생성된 코크가 가장 많았다. HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼을 사용한 분해반응 결과 생성된 코크의 양은 메탈폼만 사용한 반응보다 적게 생성되었다. 이는

서론에서 언급한 바와 같이 메탈폼의 활성금속에 HZSM-5 촉매가 코팅되어 코크생성을 억제한 결과로 해석된다.

Fig. 5에 메탈폼만의 반응 전후, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼의 반응 전후 전자현미경 사진을 나타내었다. 메탈폼 사진 (a)와 촉매가 코팅된 사진 (c)로부터 HZSM-5 촉매가 메탈폼에 코팅되면서 기공의 크기가 줄어들지만 담지된 촉매로 인해 메탈폼의 기공이 완전히 막히지 않았음을 알 수 있다. 메탈폼의 반응후 사진 (b)와 HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼의 반응 후 사진 (d)를 보면 두 경우 모두 전형적인 amorphous coke가 형성되었다. 그러나 메탈폼만 반응시킨 후 생성된 코크가 촉매를 코팅한 메탈폼에서 생성된 코크보다 크기도 크고 더 조밀하게 표면을 덮고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Fig.4에서 보여준 메탈폼에 촉매를 코팅함에 따라 코크생성량이 감소한 결과와 일치한다.

3-3. 흡열반응

n-dodecane을 흡열연료로 하여 촉매를 사용하지 않은 열분해 반응, 메탈폼만 사용한 반응, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼을 사용한 반응에 대한 흡열량을 Fig. 6에 나타내었다. 반응이 시작된 후 10 분 간격으로 전력량의 평균값을 구하였다. 전체적으로 촉매가 코팅된 메탈폼의 흡열량이 다른 반응의 흡열량 보다 높은 값을 나타내었다. 열분해반응의 흡열량은 최대 2585 kJ/kg 이었으며, 메탈폼 지지체만을 이용한 분해반응의 흡열량은 2773 kJ/kg 이었고, 메탈폼에 HZSM-5를 코팅한 촉매를 이용한 촉매 분해반응의 흡열량은 2887 kJ/kg 이었다. 즉 HZSM-5를 코팅한 촉매를 사용한 촉매 분해반응의 흡열량이 열분해반응 흡열량보다 302 kJ/kg (11.7%) 높았다.

모든 반응에서 반응이 진행됨에 따라 흡열량이 감소되었으며, 감소율은 열분해가 22.7%, 메탈폼이 20.7%, 촉매가 코팅된 메탈폼이

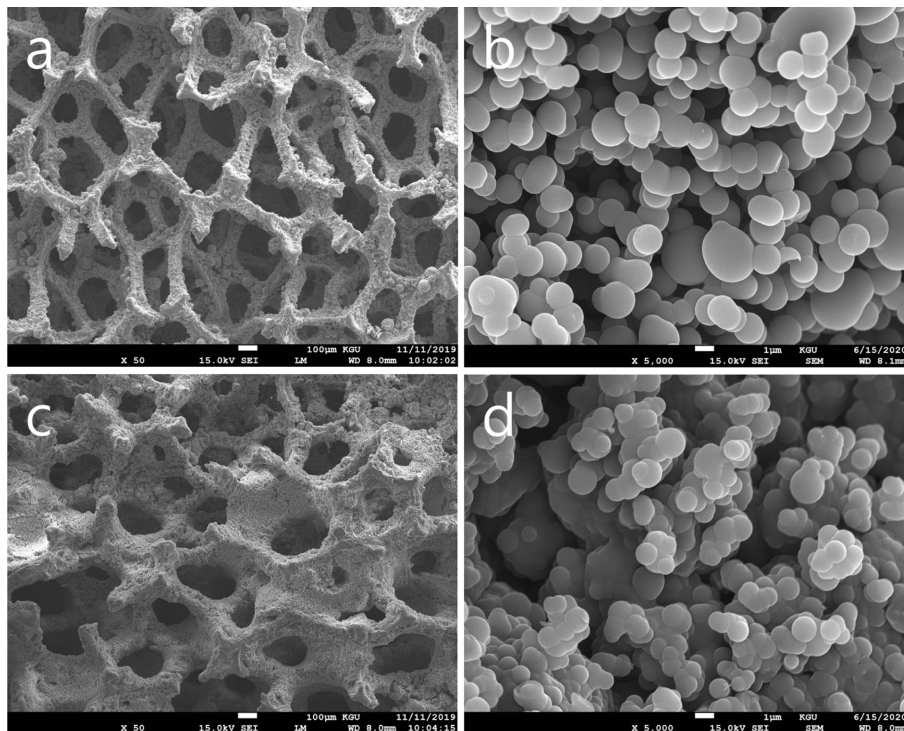


Fig. 5. SEM images of (a) metal foam only (before reaction) $\times 50$, (b) metal foam only (after reaction) $\times 5000$, (c) HZSM-5 coated metal foam (before reaction) $\times 50$ and (d) HZSM-5 coated metal foam (after reaction) $\times 5000$.

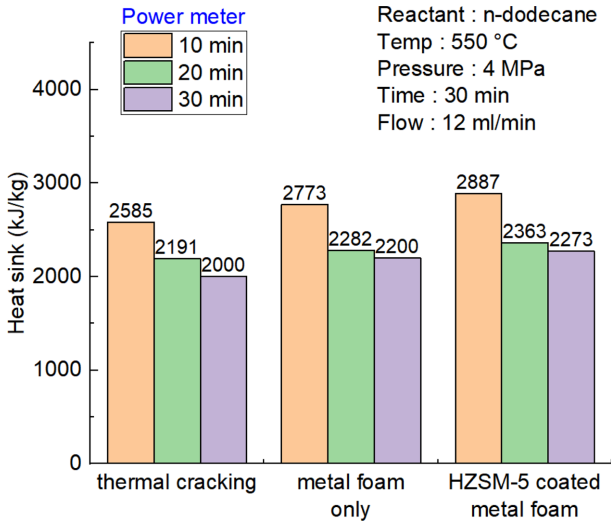


Fig. 6. Heat sink of endothermic reaction calculated by power meter.

21.3%로 거의 비슷했다. 시간에 따른 흡열량 감소는 반응이 진행됨에 따라 생성된 코크가 반응기와 메탈폼 표면에 침적되어 유체 흐름이 방해받고 촉매와 활성금속의 비활성화가 진행되기 때문이다. 특히 코크 생성에 따른 촉매와 활성금속의 비활성화가 흡열량 감소에는 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

메탈폼을 지지체로 사용한 HZSM-5 코팅촉매와 기존 문헌상의 HZSM-5 펠렛촉매를 사용한 흡열반응 결과를 비교해 보았다[10]. 펠렛형 촉매의 분해반응의 경우 반응 초기 최대흡열량이 2765 kJ/kg으로 보고된 반면, 메탈폼 지지체만을 이용한 분해반응의 최대 흡열량은 2773 kJ/kg, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼 촉매 분해반응의 최대 흡열량은 2887 kJ/kg으로 펠렛형 촉매에 비해 122 kJ/kg 높은 흡열량을 나타내었다. 문헌상의 기존 펠렛형 촉매의 담지량(1 g)에 비해 본 실험에서 사용된 촉매의 코팅양(0.4 g)이 작음에도 불구하고 높은 흡열량을 나타낸 이유는 메탈폼의 빠른 열전달과 물질전달 속도 때문으로 판단된다.

열분해 반응, 메탈폼만 반응, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼 반

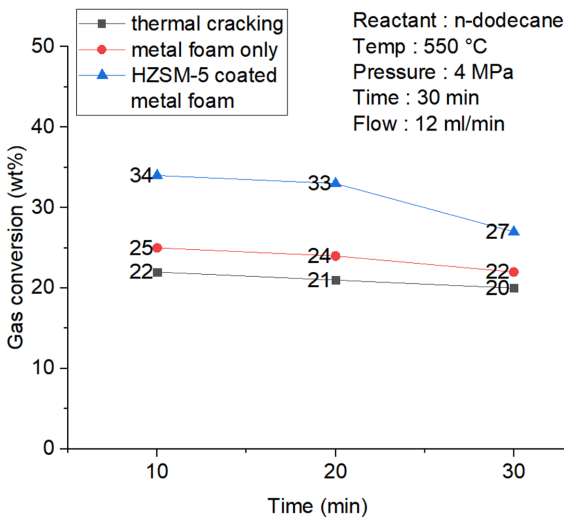


Fig. 7. Gas conversion of endothermic reaction.

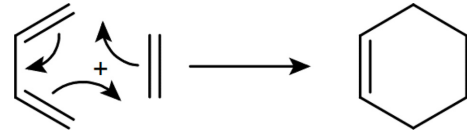


Fig. 8. Diels-Alder Reaction (Cycloaddition) [11].

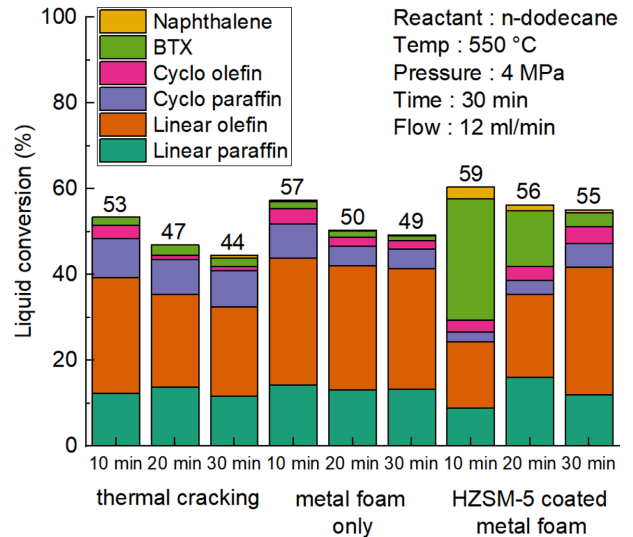


Fig. 9. Liquid conversion of n-dodecane at an interval of 10 min by endothermic reaction.

응에 대한 기상전환율을 Fig. 7에 나타내었다. 열분해 반응과 메탈폼만 사용한 반응의 경우 시간에 따라 기상전환율은 감소하지만 크게 변하지 않는다. 이는 스테인리스 스틸과 메탈폼 지지체가 활성금속으로서의 역할을 하면서 비활성화가 일정하게 진행되기 때문이다. 반면에 HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼의 반응은 초기에 높은 전환율을 유지하다가 30분에 급격히 감소하였다. HZSM-5 촉매는 높은 기상전환율을 나타내며, 기상생성물에 포함된 에틸렌, 프로필렌, 부텐과 같은 불포화 탄화수소는 높은 표준 생성 엔탈피 값을 가지고 있어 흡열능이 뛰어나다. 그러나 Fig. 8과 같은 매커니즘에 따라 기상생성물은 코크전구체를 형성하여 촉매의 비활성화를 촉진시키며 따라서 기상전환율이 상대적으로 크게 감소하였다[11].

Fig. 9는 액상생성물을 GC-MS로 분석하여 선형, 고리형, BTX, 나프탈렌으로 분류한 결과이다. 시간에 따라 전환율이 감소하는 이유는 활성금속과 촉매의 비활성화가 진행되었기 때문이며, 이는 시간에 따라 흡열량이 감소하는 Fig. 6 그래프와 일치한다[12]. 열분해 반응이나 메탈폼만 사용한 반응과 다르게 HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼 반응의 경우 BTX, 나프탈렌의 생성량이 증가하였는데, 이와 같은 방향족 화합물은 높은 표준 생성 엔탈피를 가져 흡열능이 뛰어난 물질이다. 반면 방향족 화합물은 코크 전구체 역할을 하여 중합, 축합으로 코크를 형성할 수 있다.

흡열량을 측정하는 두 번째 방법으로서 NIST Supertrapp을 이용하여 흡열량을 산출한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 전력량계로 흡열량을 측정된 Fig. 6과 비교하면 전체적으로 경향성은 같지만 낮은 흡열량을 나타낸다. 이는 실제로는 높은 흡열량을 가지나 NIST supertrapp으로는 분석하지 못하는 불포화 탄화수소 성분들로 인해

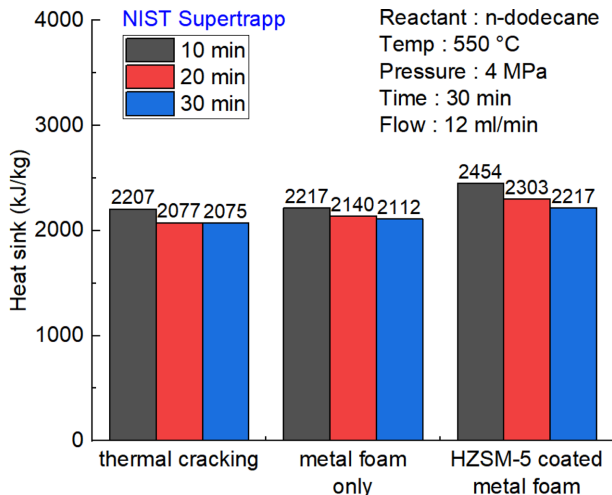


Fig. 10. Heat sink of endothermic reaction calculated by NIST supertrapp.

전력량계로 측정된 흡열량보다 낮게 나타난 것으로 생각된다. 특히 생성물에 상당량 포함된 고리형 불포화탄화수소는 흡열성능이 매우 높은 생성물이나 NIST supertrapp에는 이에 대한 데이터가 없어 흡열량 계산값을 낮추는 주요 원인이 된다.

4. 결 론

n-dodecane을 이용하여 흐름형 반응기에서 열분해 반응, 메탈폼만 사용한 반응, HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼을 사용한 반응을 비교한 결과 촉매가 코팅된 메탈폼의 최대 흡열량이 2887 kJ/kg으로 가장 높았으며 기상전환율도 34%로 가장 높았다. 또한 메탈폼의 코크생성량도 HZSM-5 촉매가 코팅된 메탈폼이 메탈폼만 사용한 경우보다 56% 감소하였다. 이와 같이 메탈폼을 지지체로 사용한 촉매분해반응의 시간에 따른 흡열량과 전환율 감소폭은 기존 펠렛 타입의 촉매에 비해 크게 감소하였다.

감 사

본 연구는 2021년 국방과학연구소의 기술개발사업 및 2021년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

- Sobel, D. R. and Spadaccini, L. J., "Hydrocarbon Fuel Cooling Technologies for Advanced Propulsion," *J. Eng. Gas Turbines. Power.*, **119**(2), 344-351(1997).
- Kang, S. B., "A Study on Thermal Decomposition Characteristics of exo-tetrahydrodicyclopentadiene with Variation of Flow Rate," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(6), 763-767(2019).
- Kang, S. B., "Analysis on Ignition Delay Characteristics of Bio Aviation Fuels Manufactured by HEFA Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(5), 620-627(2019).
- Lee, T. H., Kang, S. B. and Kim, S. H., "Study on the Fuel Decomposition Characteristics and Coke Formation by Type of Endothermic Fuel and Method of Catalyst Molding," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(5), 611-619(2019).
- Shin, M., Mun, J., Jung, J., Jeong, B. and Park J., "Decomposition Reaction of Methylcyclohexane Using HZSM-5 Supported on NiCrAl Metal Foam," *React. Kinet. Mech. Catal.*, **126**, 761-772(2019).
- Mun, J., Jeon, H., Jeong, B. and Jung, J., "Decomposition of Endothermic Fuel using Washcoated HZSM-5 on Metal Foam," *Catal. Today*, doi.org/10.1016/j.cattod.2020.02.013(2020).
- Huang, H., Spadaccini, L. J. and Sobel, D. R., "Fuel-Cooled Thermal Management for Advanced Aeroengines," *J. Eng. Gas Turbines. Power.*, **126**(2), 284-293(2004).
- Meng, F. X., Liu, G. Z., Qu, S. D., Wang, L., Zhang X. W. and Mi, Z. T., "Catalytic Cracking and Coking of Supercritical n-Dodecane in Microchannel Coated with HZSM-5 Zeolites," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **49**, 8977-8983(2010).
- Eric, W. L. and Marcia, L. H., "Thermodynamic Properties of n-Dodecane," *Energy Fuels*, **18**, 960-967(2004).
- Lee, T. H., Hyeon, D. H., Kim, S. H., Jeong, B. H. and Han, J. S., "Study on the Method of Measurement the Heat Sink of the Endothermic Catalytic Reaction in the Flow Reactor," *KSPE Spring Conference*, 991-994(2017).
- Kim, J. Y., Park, S. H., Chun, B. H., Kim, S. H., Jeong, B. H. and Han, J. S., "A Technical Review of Endothermic Fuel Use on High Speed Flight Cooling," *KSPE Journal*, **14**(2), 71-79(2010).
- Meng, F. X., Liu, G. Z., Wang, L., Qu, S. D., Zhang, X. W., and Mi, Z. T., "Effect of HZSM-5 Coating Thickness upon Catalytic Cracking of n-Dodecane under Supercritical Condition," *Energy Fuels Article*, **24**, 2848-2856(2010).