

## 열안정성 연료의 열분해 반응에서 반응기 재료 및 내부 코팅이 흡열 특성 및 코크 저감에 미치는 영향

박찬호 · 정지훈<sup>†</sup>

경기대학교 화학공학과  
16227 경기도 수원시 의왕동 산 94-6  
(2026년 5월 7일 접수, 2026년 7월 1일 수정본 접수, 2026년 8월 20일 채택)

## Effects of Reactor Materials and Internal Coating on Endothermic Properties and Coke Reduction in Thermal Cracking of Thermally Stable Fuel

Chanho Park and Jihoon Jung<sup>†</sup>

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

(Received 7 May 2026; Received in revised form 1 July 2026; Accepted 20 August 2026)

### 요 약

극초음속 비행체의 재생 냉각 시스템에서는 연료의 열분해를 통해 추가적인 흡열 성능을 확보할 수 있으나, 이 과정에서 생성되는 코크는 열전달 저하와 유로 막힘을 유발한다. 본 연구에서는 JP-7급 열안정성 연료를 대상으로 SS316, Inconel 600, Ti Grade 9 반응기 및 실리카 코팅 SS316 반응기에서 열분해 실험을 수행하여 반응기 재질 및 코팅이 흡열 특성과 코크 생성에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 분산제, 산화방지제, 금속 비활성화제를 적용하여 재질별 코크 저감 최적 첨가제 조합을 도출하였다. 실험 결과, 무첨가 조건에서 인코넬과 티타늄 반응기는 SS316 대비 코크 생성이 크게 감소하였고, 실리카 코팅 튜브 역시 유의미한 코크 저감 효과를 나타냈다. 첨가제는 반응기 재질에 따라 최적 조합이 다르게 나타났으며, 코크 저감과 화학적 흡열량 향상이 동시에 확인되었다. 이러한 결과는 반응기 표면 재질 및 코팅층의 화학적 특성이 코크 형성 경로와 첨가제 효과에 영향을 미침을 보여준다.

**Abstract** – In regenerative cooling systems for hypersonic vehicles, fuel pyrolysis provides additional endothermic cooling capacity; however, coke formation during this process can deteriorate heat transfer and block flow channels. In this study, pyrolysis experiments were conducted using a Synthetic JP-7 Surrogate in SS316, Inconel 600, Ti Grade 9, and silica-coated SS316 reactors to evaluate the effects of reactor material and internal coating on endothermic characteristics and coke formation. In addition, a dispersant, an antioxidant, and a metal deactivator were applied to determine the coke reduction optimal additive formulation for each reactor material. The results revealed that, in the absence of additives, the Inconel 600 and Ti Grade 9 reactors produced substantially less coke than SS316, and the silica-coated SS316 tube also effectively suppressed coke deposition. The most effective additive combination varied with the reactor material; nevertheless, the optimized formulations simultaneously reduced coke formation and increased the chemical heat sink. These findings suggest that the surface chemistry of the reactor wall and coating layer plays a critical role in determining the dominant coking pathway and additive performance.

**Key words:** Synthetic JP-7 surrogate, Regenerative cooling, Hypersonic vehicles, Coke reduction, Reactor materials, Silica-coated reactor, Dispersants, Antioxidants, Metal deactivators

### 1. 서 론

극초음속 비행체는 마하 5 이상의 고속 비행 시 공력 가열(aerodynamic heating)로 인해 기체 표면에 극심한 열부하를 받으며, 이에 따라 구조물 및 추진기관의 온도가 매우 높은 수준까지 상승하게 된다[1,2]. 이러한 고온 환경은 재료 열화, 엔진 성능 저하 및 장치 오작동 등 다양한 문제를 유발하므로, 효과적인 열관리 기술의 확보가

<sup>†</sup>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.

필수적이다. 이에 대한 유력한 대응 방안으로 연료를 냉각 매체로 활용하는 재생 냉각 기술이 주목받고 있다[3]. 재생 냉각 과정에서 연료는 냉각 채널을 따라 흐르며 고온·고압 조건에서 열분해되고, 이때 발생하는 화학적 흡열은 연료의 냉각 능력을 크게 증대시킨다[4,5]. 반면, 열분해 과정에서는 코크와 같은 탄소 침전물이 함께 생성될 수 있으며[6,7], 이는 채널 막힘과 열전달 저하를 초래하여 시스템의 안정적 운전을 방해하는 주요 요인으로 작용한다[8,9].

코크 형성은 연료의 종류뿐만 아니라 반응기 관벽의 재질에 의해서도 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 관벽을 구성하는 금속의 조성에 따라 형성되는 금속 산화물이 다르며, 이는 선형 코크 형성의 활성점(active site) 역할을 하여 코크 생성 경향을 결정짓는다[10,11]. 스테인리스 스틸의 경우 Fe와 Cr 성분의 산화물이 형성되어 선형 코크 형성을 촉진하는 반면, 인코넬은 Ni 성분이 주를 이루어 상대적으로 코크 생성이 억제된다는 연구 결과가 보고된 바 있다[12,13]. 관벽 코팅 기술 또한 코크 저감을 위한 효과적인 전략으로 주목받고 있다. 실리카 코팅은 관벽 표면의 금속 활성점을 차단하여 선형 코크 형성을 억제하는 것으로 보고되고 있다[14-16].

이와 같이 관벽 재질의 선택과 표면 코팅 처리는 코크 생성 경로의 근원적 억제를 목적으로 하는 반면, 연료 내 소량의 첨가제를 활용하는 방법은 코크 전구체의 생성 및 응집 단계 자체를 화학적으로 제어한다는 점에서 상호보완적인 접근법으로 함께 연구되어 왔다. 분산제(dispersants)는 열분해 과정에서 생성되는 코크 전구체 입자 간의 응집을 방해하여 관벽 침착을 억제하며[17,18], 산화방지제(antioxidants)는 자유 라디칼 연쇄반응을 차단함으로써 연료의 산화적 분해와 이에 수반되는 슬러지 및 코크 전구체의 생성을 억제한다[19]. 금속 비활성화제(metal deactivators)는 연료 내에 용존된 금속 이온과 킬레이트 착물을 형성하여 금속 촉매에 의한 열분해 반응을 효과적으로 억제함으로써 코크 생성을 저감한다[20-22]. 이처럼 각 첨가제는 코크 생성의 서로 다른 경로를 선택적으로 억제하며, 이들의 복합 적용 시 효과가 기대되므로 최적 첨가제 조합의 도출이 중요한 과제로 대두되고 있다[23].

본 연구에서는 JP-7급 열안정성 연료(이하 열안정성 연료)를 대상으로 스테인리스 스틸(SS316), 인코넬(Inconel 600), 티타늄(Ti Grade 9), 실리카 코팅 튜브를 사용하여 반응기 관 재질 및 코팅에 따른 열분해 특성과 코크 형성량을 평가하였다. 또한 각 반응기 재질 조건에서 분산제, 산화방지제, 금속 비활성화제 및 최적 첨가제 조합을 적용한 열분해 실험을 진행하여 흡열 특성 개선과 코크 저감에 대한 정량적 평가를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 열안정성 연료

본 연구에서는 열안정성 연료인 JP-7과 유사한 특성을 갖는 연료를 실험대상으로 선정하였다. 열안정성 연료는 높은 열안정성과 낮은 증기압을 가지며, 극초음속 비행체의 재생 냉각 시스템에 적합한 연료로 개발되었다[24]. 연료의 주요 조성은 선형 파라핀(Linear Paraffin), 선형 올레핀(Linear Olefin), 고리형 파라핀(Cyclo Paraffin), 고리형 올레핀(Cyclo Olefin), 방향족(Aromatic), 다환방향족(Diaromatic)으로 구분되며, 그 조성은 Table 1에 나타내었다.

### 2-2. 반응기 재질 선정

반응기 튜브 재질에 따른 열분해 특성 비교를 위해 SS316, Inconel 600, Ti Grade 9, 실리카 코팅 SS316 튜브 총 4종을 선정하였다. SS316은 Fe-Cr-Ni계 스테인리스 스틸로 고온·고압 화학공정 환경에서 우수한 기계적 강도와 내식성을 발휘하며 반응기 재질로 광범위하게 사용되는 대표적인 소재이다[25]. 다만, 표면에 형성되는  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  및  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  산화물이 선형 코크 형성의 촉매 활성점으로 작용할 수 있어 코크 침적 측면에서 불리하게 작용할 가능성이 존재한다[26,27]. Inconel 600은 Ni 함량이 72% 이상인 초내열합금으로, 고온 산화 환경에서 NiO 위주의 안정적인 산화물층을 형성하며[28], Fe 및 Cr 산화물에 비해 코크 전구체 물질과의 반응성이 낮아 금속 촉매 활성에 의한 코크 생성이 상대적으로 억제될 것으로 기대된다[29]. Ti Grade 9(Ti-3Al-2.5V)는 표면에 화학적으로 안정한  $\text{TiO}_2$  부동태층을 자발적으로 형성하는 합금으로, 이 산화물층은 탄화수소의 분해 반응에 대한 촉매 활성이 낮아 열분해 조건에서 코크 전구체와의 상호작용이 최소화될 것으로 예상된다[30, 31]. 실리카 코팅 튜브는 SS316 튜브 내벽에  $\text{SiO}_2$  계열의 코팅을 적용하여 금속 활성점을 물리적으로 차단함으로써 선형 코크 형성 억제 효과를 기대하였다[15]. 선정된 3종의 반응기 튜브의 재질별 특성을 Table 2에, SS316 내벽 코팅에 사용한 실리카 바인더의 물성을 Table 3에 나타내었다. 각 튜브는 외경 1/4 inch, 길이 500 mm로 채단하여 반응기로 사용하였다.

### 2-3. 액체연료 첨가제

코크 생성 억제를 위하여 분산제, 산화방지제 및 금속 비활성화제를 연료 첨가제로 사용하였다. 분산제는 평균 분자량이 약 600인 polyether amine(PEA) 계열 물질을 국내 업체에 의뢰하여 제조한 후 사용하였다. 산화방지제로는 페놀계 항산화제인 2,6-di-tert-butyl-4-

**Table 1. Composition of Synthetic JP-7 Surrogate**

|                 | Linear Paraffin | Linear Olefin | Cyclo paraffin | Cyclo Olefin | Aromatic | Diaromatic |
|-----------------|-----------------|---------------|----------------|--------------|----------|------------|
| Composition (%) | 80.1            | 3.7           | 7.6            | 0            | 0        | 8.6        |

**Table 2. Properties of Selected Reactor Materials**

| Materials   | Main component | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Thermal conductivity (W/m·K) | Specific heat (J/kg·K) | CTE (μm/m·K) |
|-------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------|
| SS316       | Fe-Cr-Ni-Mo    | 7.9                          | 16                           | 500                    | 16           |
| Inconel 600 | Ni-Cr-Fe       | 8.5                          | 15                           | 450                    | 13           |
| Ti Grade 9  | Ti-Al-V        | 4.5                          | 7                            | 520                    | 9            |

**Table 3. Properties of the Silica Binder Used for inner coating of the SS316 Tube**

| Materials | CAS       | Linear Formula | Molecular Weight (g/mol) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | pH  | Surface area (m <sup>2</sup> /g) | Concentration (wt%)      |
|-----------|-----------|----------------|--------------------------|------------------------------|-----|----------------------------------|--------------------------|
| AS-30     | 7631-86-9 | $\text{SiO}_2$ | 60.08                    | 1.2                          | 9.1 | 230                              | 30 (in H <sub>2</sub> O) |

methylphenol(Sigma-Aldrich,  $\geq 99.0\%$ , CAS No. 128-37-0)을, 금속 비활성화제로는  $N,N'$ -bis(salicylidene)-1,2-propanediamine(TCI,  $>98\%$ , CAS No. 94-91-7)을 각각 사용하였다. 첨가제의 투입 농도는 연료 대비 매우 낮기 때문에 혼합물 내 균일한 분산 상태를 확보하는 것이 중요하며, 이를 위해 연료와 첨가제를 혼합한 후 30분간 초음파 균질화를 수행하였다. 열안정성 연료를 대상으로 선정된 분산제, 산화 방지제, 금속 비활성화제의 최적 농도는 각각 2000 ppm, 1000 ppm, 40 ppm으로 설정하였다[32,33].

#### 2-4. 액체연료의 흡열반응 실험

액체연료의 흡열 반응 특성을 평가하기 위해 금속 튜브 기반의 흐름형 반응기를 제작하여 실험에 활용하였다(Fig. 1). 반응기는 1/4 inch 튜브로 구성하였으며, 실제 가열이 이루어지는 구간의 유효 길이는 300 mm로 설정하였다. 연료는 반응기 하부에서 주입되어 상부로 이동하도록 흐름 방향을 설계하였는데, 이는 실험 중 유동 안정성을 확보하고 반복 실험에서의 재현성을 높이기 위함이다. 반응 조건은 초임계 상태의 연료 거동과 극초음속 비행체의 열환경을 고려하여 설정하였다[34]. 반응기 내부 압력은 질소 퍼지 가스를 이용하여 4 MPa로 유지하였고, 반응기 전단의 예열부는 400 °C로 제어하여 반응 영역 진입 이전에 연료가 조기에 분해되는 현상을 방지하였다. 연료 주입 유량은 5 mL/min으로 고정하였으며, 이를 기준으로 계산한 공간속도는 LHSV 51.99 hr<sup>-1</sup>이었다. 반응기가 설정 온도인 600 °C에 도달하여 안정화된 후 총 30분 동안 열분해 반응을 수행하였다. 각 실험은 기본적으로 2회 반복 수행하였으며, 경향성 확인이 필요한 조건에 대해서는 최대 3회까지 반복 실험을 수행하였다. 그래프에는 각 조건에서 얻어진 결과값의 평균을 표시하였고, 반복 실험 간 변동성은 표준편차로 산출하여 Y축 error bar로 나타내었다.

코크 생성량은 열분해 전후의 질량 변화를 측정하여 정량하였다. 측정 대상은 반응이 일어나는 반응기 튜브 구간과, 반응기 출구 후단에 설치된 두 개의 라인 필터였다. 라인 필터의 여과 크기는 0.5  $\mu\text{m}$

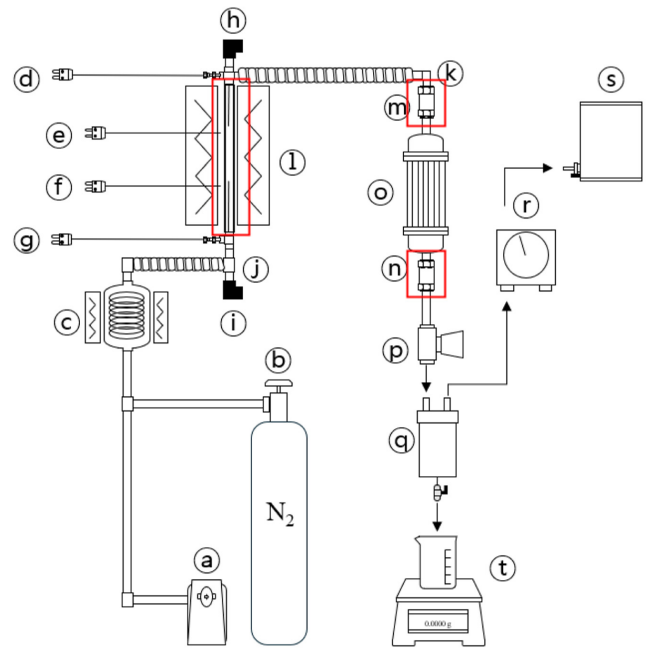


Fig. 1. Schematic diagram of the flow-type reactor: ① pump, ② gas, ③ preheater, ④, ⑤, ⑥ and ⑦ thermocouple, ⑧ and ⑨ pressure sensor, ⑩ and ⑪ line heater, ⑫ reactor, ⑬ and ⑭ filter, ⑮ condenser, ⑯ BPR, ⑰ separator, ⑱ gas meter, ⑲ Gas sample, ⑳ liquid sample (red-boxed area indicates reactor tube and filters).

로 반응 과정에서 발생한 고형 생성물을 효과적으로 포집하였다. 각 부품은 실험 전 충분히 건조한 후 초기 질량을 측정하였으며, 반응 종료 후 동일 조건에서 다시 질량을 측정하여 증가분으로부터 최종 코크 생성량을 산출하였다. 코크의 물리적인 특성 확인을 위해 주사 전자현미경(SEM) 촬영 및 에너지 분산형 분광법(EDS) 분석을 진행하였다. Fig. 2(a-c)는 관벽 표면에서 관찰된 선형 코크의 모습을 확인할 수 있으며, Fig. 2(c)는 해당 영역에 탄소(C)로 이뤄진 선형 코

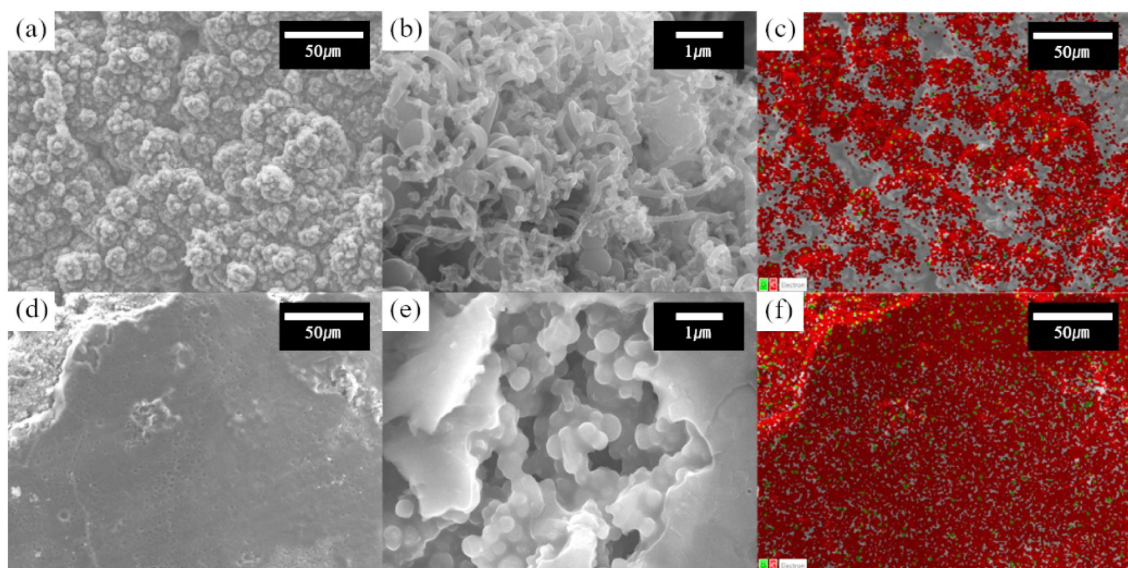


Fig. 2. SEM-EDS images of coke formed after pyrolysis of the thermally stable fuel: (a), (b) SEM images  $\times 500$ ,  $\times 15,000$ , (c) EDS image  $\times 500$  of filamentous coke deposited on the tube wall, (d), (e) SEM images  $\times 500$ ,  $\times 15,000$ , (f) EDS image  $\times 500$  of amorphous coke collected on the filter.

크가 발생하여 관벽 표면의 열전달 효율을 감소시킬 수 있음을 보여 준다. Fig. 2(d-f)는 유체내에서 형성된 무정형 코크가 필터에서 걸러져서 발견된 모습이다. Fig. 2(d-e)를 통해 유체내에서 발견되는 덩어리형의 코크는 연료의 열분해 과정에서 무정형 코크가 쌓여서 발생한다는 점을 확인할 수 있으며, Fig. 2(f)는 해당 코크의 덩어리가 탄소(C)의 응집체임을 보여준다. Fig. 2(b),(c)를 통해 선형 코크와 무정형 코크의 크기 차이를 직접적으로 확인할 수 있다. 무정형 코크의 덩어리 하나의 크기는 약  $0.52 \mu\text{m}$  정도임을 확인하였으며, 선형 코크의 굵기는 그보다 얇다는 것을 확인하였다.

흡열량 평가는 액체연료의 총 흡열 반응을 물리적 흡열과 화학적 흡열로 구분하여 측정하였다. 화학적 흡열량은 반응기 온도를 일정하게 유지하는 위해 소모된 전기 에너지로부터 산출하였으며, 이 과정에서 전기로의 열전달 효율을 반영하기 위해 별도의 보정식 (1)과 (2)를 적용하였다[35]. 이때 열전달 효율은 화학 반응이 발생하지 않는 조건에서 측정된 실제 흡열량과 이론적 흡열량으로부터 도출하였다 (Table 4). 한편, 물리적 흡열량은 연료가 설정된 압력 및 온도 조건까지 가열되는 과정에서 요구되는 엔탈피 변화량으로 정의하였다. 본 연구에서는 NIST Supertrapp 프로그램을 이용하여 열안정성 연료

조성, 4 MPa 및  $600^\circ\text{C}$  조건에서의 물리적 흡열량을 계산하였다.

$$\eta = \frac{\text{Flow rate (g/s)}}{W_{\text{reaction}} - W_{\text{basis}} \text{ (J/s)}} \times \Delta H_{\text{physical}} \quad (1)$$

$$\text{Heat sink} = \frac{W_{\text{reaction}} - W_{\text{basis}} \text{ (J/s)}}{\text{Flow rate (g/s)}} \times \eta = \Delta H_{\text{physical}} + \Delta H_{\text{chemical}} \quad (2)$$

열분해 생성물의 조성 변화는 액상 및 기상 생성물을 각각 분리 채취한 뒤 분석하였다. 생성물 시료는 반응 진행 중 10분 간격으로 1분씩 채취하여 시간 경과에 따른 생성물의 변화를 파악하였다. 액상 생성물은 GC-MS 분석을 통해 조성을 확인하였으며, 분석 결과는 선형 파라핀, 선형 올레핀, 고리형 파라핀, 고리형 올레핀, 방향족, 다환방향족의 여섯 계열로 구분하여 정리하였다. 기상 전환율은 반응기에 주입된 연료의 총 질량과 반응 후 회수된 액상 생성물의 질량 차이를 바탕으로 계산하였고, 반응기 출구에 연결된 가스미터 측정 값과 비교하여 결과의 신뢰성을 확인하였다. 분석장비의 분석조건은 기존 연구를 참고하였다[36,37].

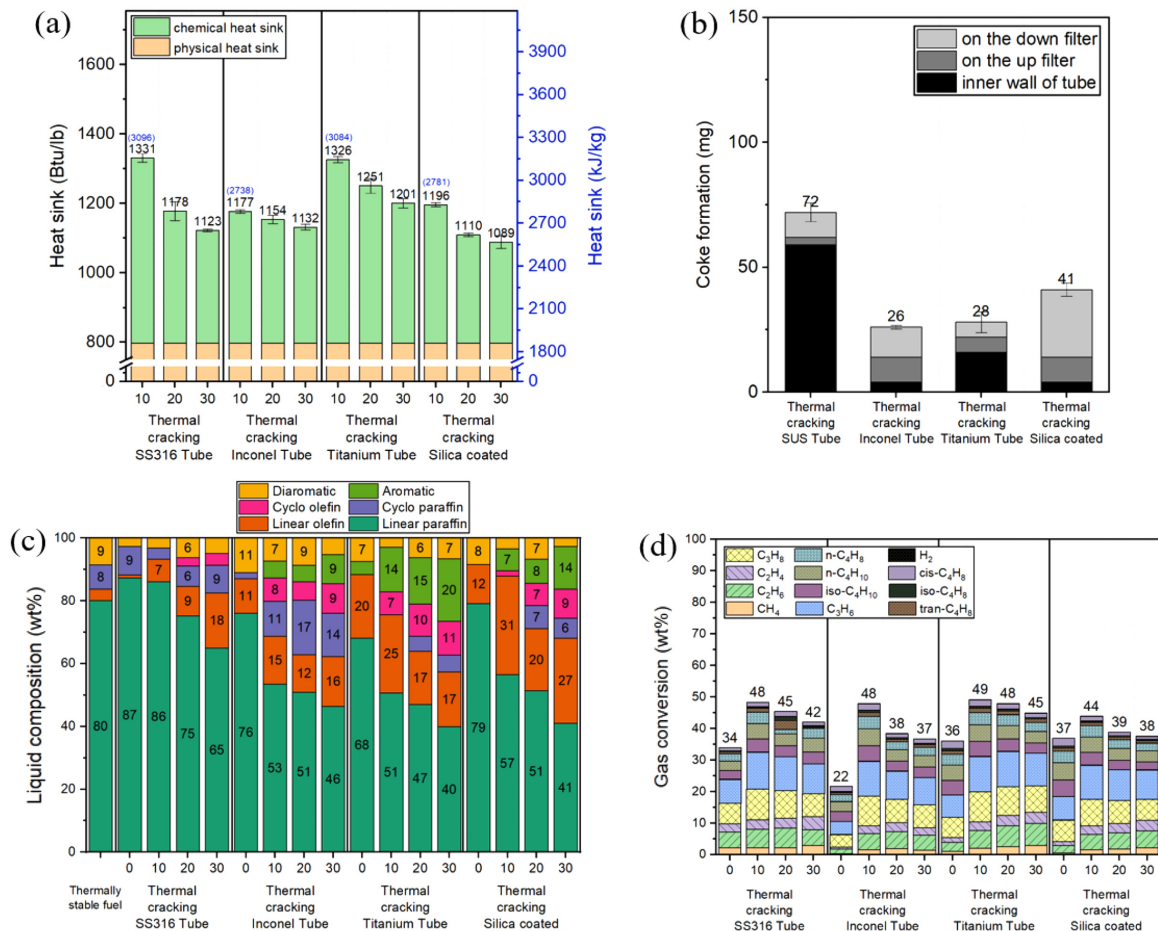
### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 반응기 재질과 내부 코팅에 따른 열안정성 연료의 열분해 특성

반응기 재질에 따른 흡열량과 코크 발생량 비교 결과를 Fig. 3(a)와 (b)에 나타내었다. 흡열량은 SS316 튜브 반응기에서 가장 높게 나타

**Table 4. Efficiency value for endothermic evaluation of Synthetic JP-7 Surrogate**

| Theoretical value | Experimental value | Efficiency value ( $\eta$ ) | Temperature control location |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 315               | 994                | 0.317                       | Reactor exit control         |



**Fig. 3. Endothermic properties of thermally stable fuel during thermal cracking in reactors with different materials and internal coating (a) Heat sink, (b) Quantification of coke formation, (c) Liquid composition, (d) Gas products selectivity.**

났으며, 티타늄 튜브 반응기에서 SS316과 유사한 값을 보였다. 반면 인코넬 튜브 반응기와 실리카 코팅 튜브는 SS316 튜브 대비 약 12%, 10% 낮은 흡열량을 나타내었다. 코크 발생량의 경우 SS316 튜브 반응기에서 72 mg으로 가장 많은 양이 생성되었으며, 인코넬 반응기에서 26 mg, 티타늄 반응기에서 28 mg, 실리카 코팅 튜브에서 41 mg으로 SS316 반응기에 비해 각각 64%, 61%, 43%의 코크 발생량이 감소하였다.

Fig. 3(c)는 반응기 재질별 열분해 액상 생성물의 조성 분석 결과이다. 미반응 열안정성 연료는 선형 파라핀이 약 80 wt%를 차지하며, 열분해 후에는 반응기 재질에 관계없이 공통적으로 선형 파라핀이 현저히 감소하고 고리형 파라핀, 고리형 올레핀, 방향족 및 다환방향족 성분의 비율이 증가하는 경향을 보였다. 30분 후 선형 파라핀 잔존율을 비교하면 SS316 65 wt%, 인코넬 46 wt%, 실리카 코팅 41 wt%, 티타늄 40 wt%으로 나타나, SS316 반응기에서 상대적으로 낮은 전환율이 나타났다. 이러한 차이는  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$  계 금속 산화물이 주를 이루는 SS316 관벽이 연료 내  $\beta$ -분열( $\beta$ -scission) 반응보다 선형 코크 형성 촉매 반응에 선택성을 보이기 때문으로 해석된다[8,12,26,27].

### 3-2. 스테인리스 스틸 반응기의 첨가제 투입에 따른 열분해 특성

스테인리스 스틸 반응기에서 분산제, 산화방지제, 금속 비활성화제 및 이들을 혼합한 최적 첨가제 조합을 각각 적용하여 열분해를 진행하였다. 최적 첨가제 실험 결과 흡열량이 약 2.1% 증가하였고, 코크 생성량은 무첨가 조건의 72 mg에서 분산제, 산화방지제 및 금속 비활성화제 단독 적용 시 각각 32, 31 및 24 mg으로 감소하였고, 최적 조합으로 혼합 적용 시 10 mg까지 저감되어 약 86%의 저감 효과를 나타냈다(Fig. 4(a), (b)).

액상 생성물 조성(Fig. 4(c))은 첨가제의 기능에 따라 상이한 변화 양상을 보였다. 산화방지제는 자유 라디칼 포획을 통해 라디칼 연쇄반응과 방향족화 경로를 억제하여 다환방향족 성분을 감소시켰고[19], 금속 비활성화제는 금속 이온 킬레이트화를 통해 금속 촉매 코크 생성(방향족화 및 탈수소화) 반응을 억제함으로써 방향족 및 다환방향족 성분을 모두 줄였다[21,38]. 반면 PEA600은 생성물 조성 변화가 제한적이었으며, 이는 열분해 반응 경로 변화보다 코크 전구체의 분산 및 응집 억제에 주로 작용하기 때문으로 판단된다. 기상 전환율(Fig. 4(d))은 첨가제별 코크 저감 기작 차이를 반영하였다. 금속 비활성화제는 금속 활성점 비활성화를 통해 금속 촉매성 분해 반응을 억제하여 기상 전환율을 점진적으로 낮춘 반면, 산화방지제는 전환율 변화 없

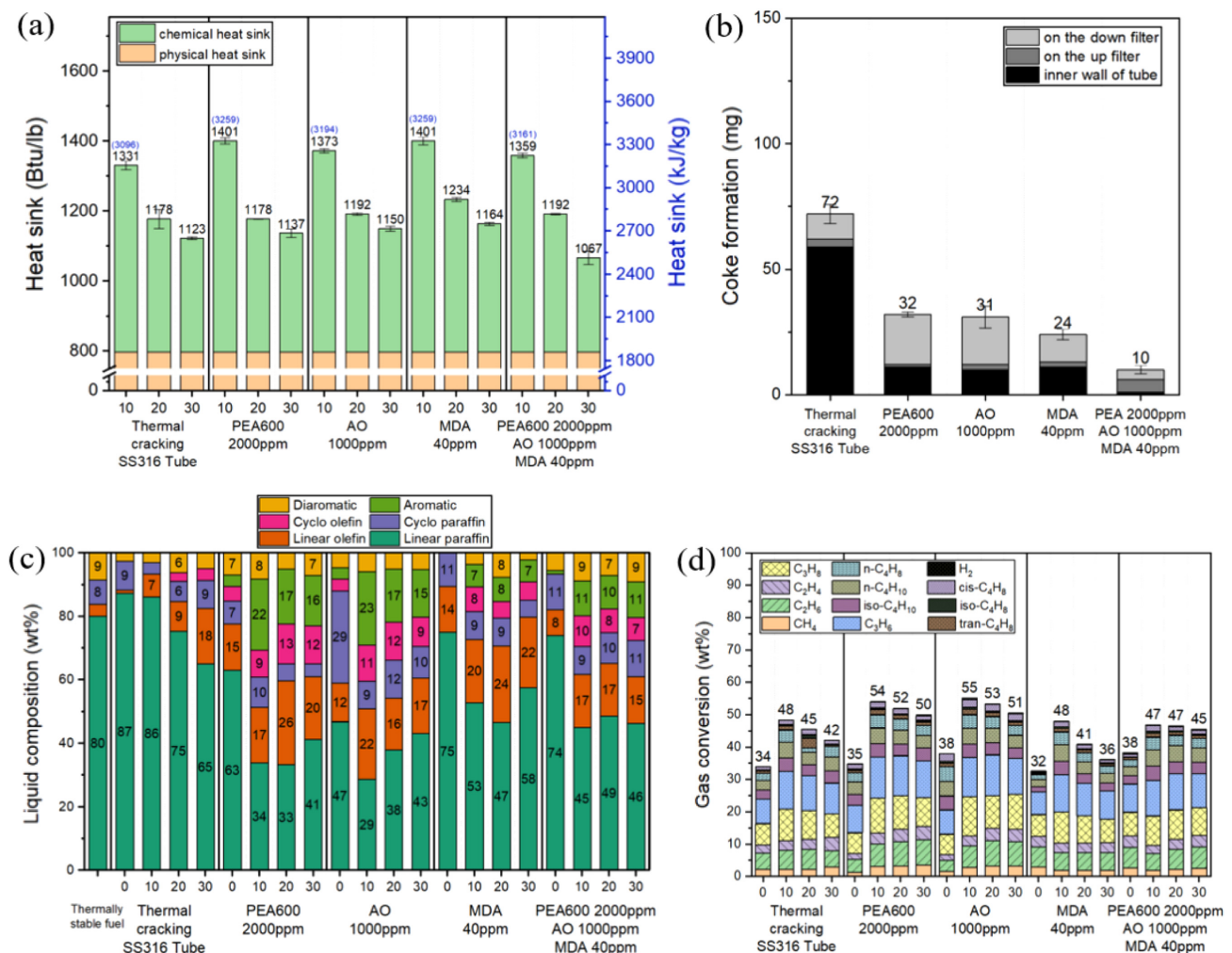


Fig. 4. Endothermic properties of thermally stable fuel during thermal cracking with additive on Stainless steel tube (a) Heat sink, (b) Quantification of coke formation, (c) Liquid composition, (d) Gas products selectivity.

이도 코크를 감소시켜 라디칼 성장 경로 억제 효과를 나타냈다. 최적 조합 조건에서는 가장 우수한 코크 저감 성능이 확인되었으며, 이는 각 첨가제의 기능이 상호보완적으로 작용한 결과로 해석된다[21,39,40].

### 3-3. 인코넬 튜브 반응기의 첨가제 투입에 따른 열분해 특성

인코넬 반응기에서 첨가제를 적용한 열분해 실험을 진행한 결과, 첨가제를 적용하지 않은 열분해 조건 대비 흡열량이 증가 혹은 유지되는 경향을 보였다(Fig. 5(a)). 첨가제 조합에서 분산제를 사용한 경우 흡열량이 증가하는 모습을 관찰할 수 있으며, PEA600 사용 시 2.89%, 삼중 조합 사용 시 4.84% 흡열량이 증가하였다. 또한 첨가제 종류에 따라 코크 저감 효과에 차이가 확인되었다(Fig. 5(b)). 무첨가 열분해 조건에서 인코넬 반응기의 총 코크 발생량은 26 mg으로, 동일 운전 조건에서의 스테인리스 스틸 반응기(72 mg) 대비 약 64% 낮은 수준을 나타냈다. 이는 인코넬 표면의 주 산화물인 NiO가  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ 에 비해 탄화수소와의 반응성이 낮고, 금속-탄소 결합 형성에 의한 촉매적 선형 코크 성장 메커니즘이 상대적으로 억제되기 때문이다[28,29].

코크 발생량을 첨가제 조건별로 비교하면, 분산제 단독 적용 시 21 mg(약 19% 저감), 산화방지제 단독 적용 시 16 mg(약 38% 저감)으로 나타나 각각의 저감 효과가 확인되었다. 주목할 점은 금속 비활성화제 단독 적용(40 ppm) 조건에서 코크 발생량이 42 mg으로 무첨가 대비 약 62% 증가하였다는 것이다. 이는 스테인리스 스틸 반응기에서 MDA가  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  이온을 킬레이트화하여 코크를 저감

하였던 것과 반대되는 거동으로, 금속 비활성화제가 인코넬 반응기 표면의 Ni계 산화물 또는 금속 이온과 상호작용하여 표면 산화층의 안정성 변화 가능성에 기인하는 것으로 추정된다[29,41]. 따라서 인코넬 반응기에서의 최적 첨가제 조합은 분산제와 산화방지제의 조합이며, 금속 비활성화제는 적용 반응기의 소재 특성을 고려하여 선택적으로 사용해야 함을 시사한다.

액상 생성물 조성(Fig. 5(c))의 경우, 산화방지제 적용 조건에서는 스테인리스 스틸과 마찬가지로 다환방향족(diaromatic) 성분 비율의 감소 경향이 확인되어, 폐놀계 산화방지제의 라디칼 사슬 종결에 의한 방향족화 경로 억제 효과가 인코넬 반응기에서도 유효함을 나타냈다. 반면 금속 비활성화제 단독 적용 조건에서는 방향족(aromatic) 성분의 비율이 다른 첨가제 조건 대비 증가하는 경향이 관찰되었으며, 이러한 결과는 금속 비활성화제 적용 시 인코넬 반응기 표면의 Ni계 활성점 또는 산화층과의 상호작용으로 인해 표면 반응성이 변화했을 가능성을 시사한다[42]. 기상 전환율(Fig. 5(d))에서는 인코넬 무첨가 기준값이 스테인리스 스틸 대비 낮은 수준을 유지하였으며, 금속 비활성화제 적용 조건에서는 반응 초기 기상 전환율이 다른 첨가제 조건에 비해 높게 나타나 코크 발생량 증가 경향과 일치하는 결과를 보였다. 분산제, 산화방지제 이중 조합 조건에서는 기상 전환율이 반응 전반에 걸쳐 안정적으로 유지되면서 코크 발생량이 최소화되어, 해당 조건이 인코넬 반응기에 대한 최적 첨가제 조합임을 확인하였다.

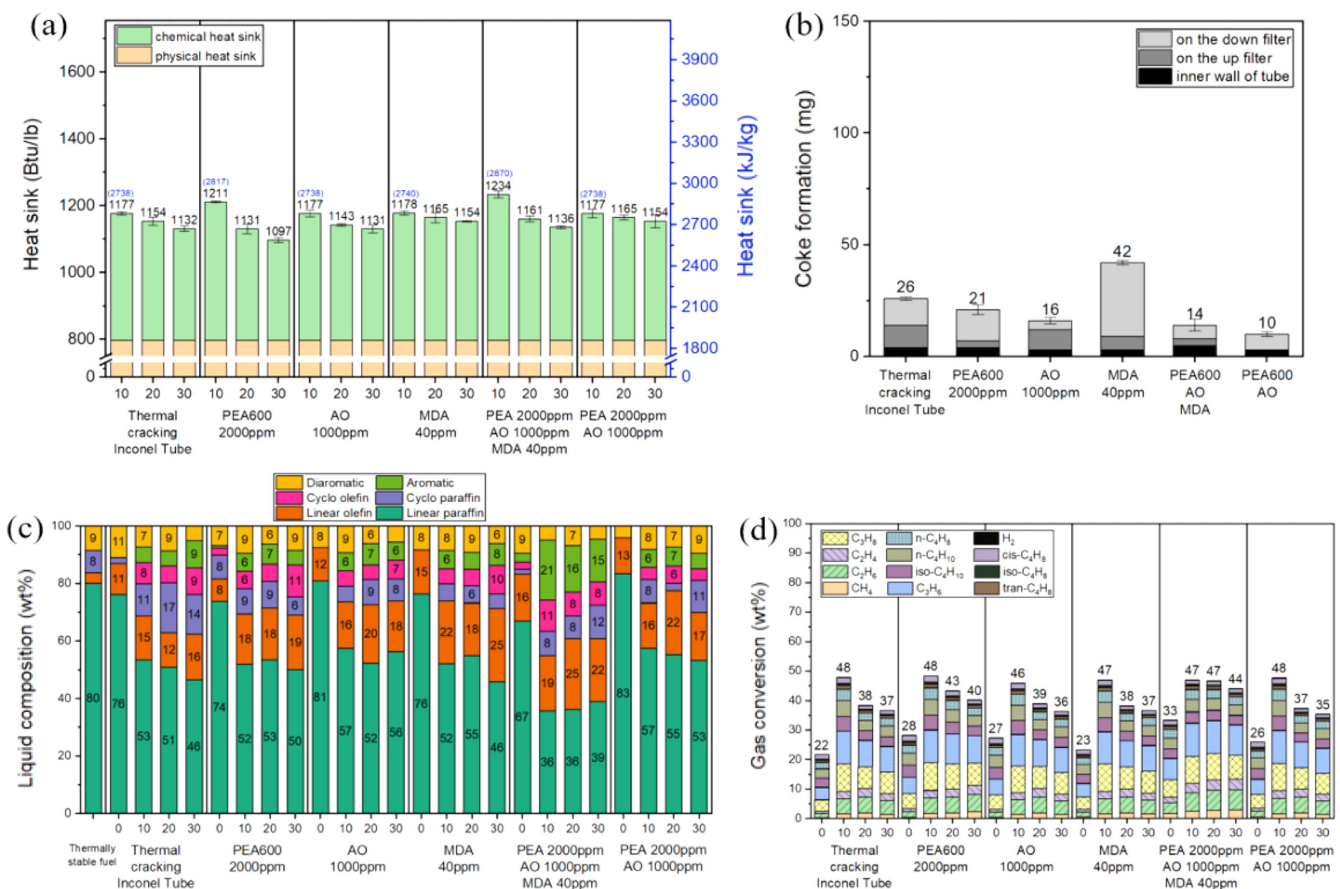


Fig. 5. Endothermic properties of thermally stable fuel during thermal cracking with additive on Inconel tube (a) Heat sink, (b) Quantification of coke formation, (c) Liquid composition, (d) Gas products selectivity.

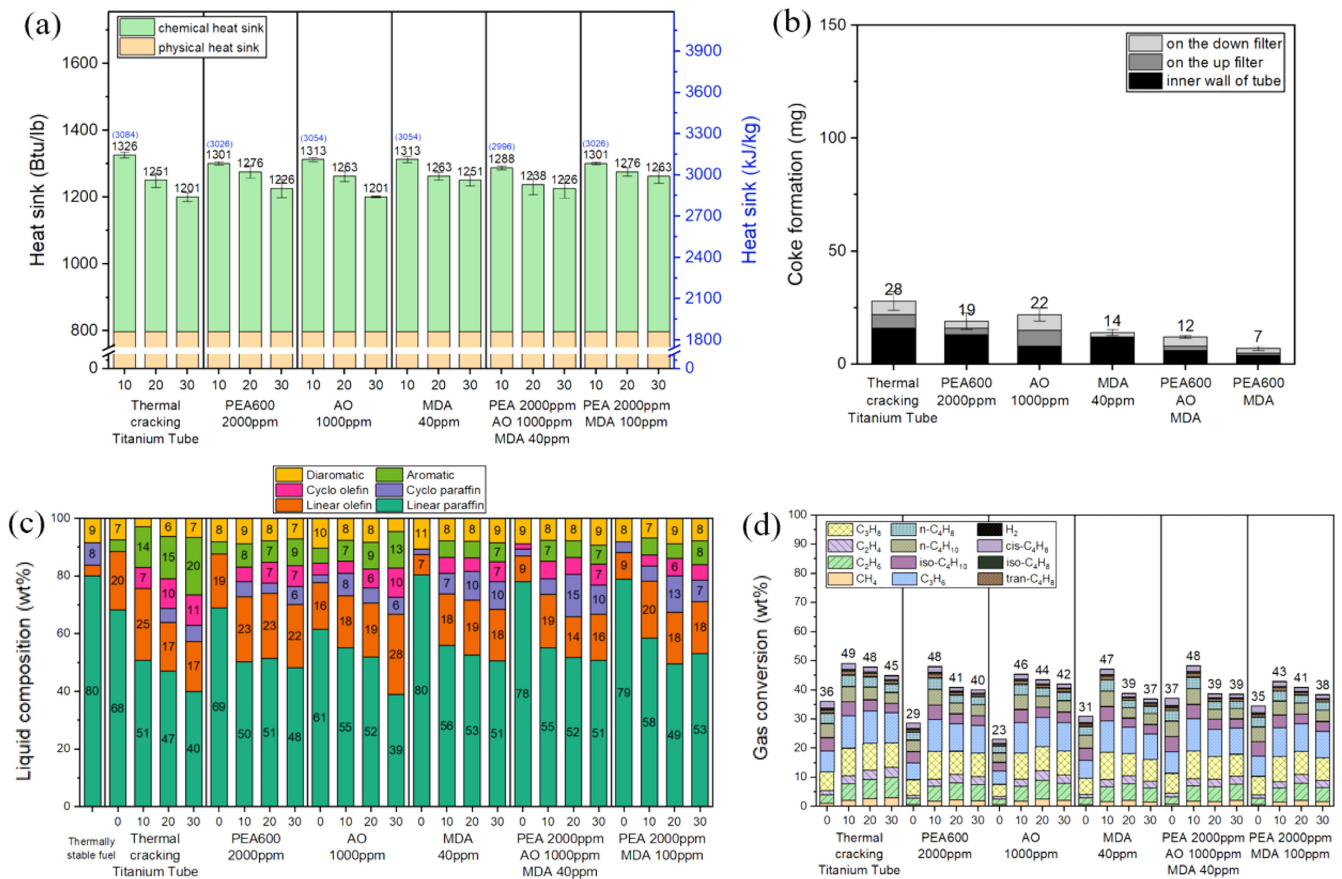


Fig. 6. Endothermic properties of thermally stable fuel during thermal cracking with additive on Titanium tube (a) Heat sink, (b) Quantification of coke formation, (c) Liquid composition, (d) Gas products selectivity.

### 3-4. 티타늄 튜브 반응기의 첨가제 투입에 따른 열분해 특성

티타늄 반응기에서 첨가제를 적용한 열분해 실험 결과, 첨가제를 적용하지 않은 열분해 조건 대비 흡열량이 전체적으로 소폭 감소하는 경향을 보였다(Fig. 6(a)). 각 첨가제 조건에 따라 코크 저장 효과에 차이가 나타났다(Fig. 6(b)) 열분해 조건에서 티타늄 반응기의 총 코크 발생량은 28 mg으로, 인코넬(26 mg)과 유사한 수준이며 스테인리스 스틸(72 mg) 대비 약 61% 낮게 나타났다. 티타늄 표면은 열산화 과정에서 화학적으로 안정한 TiO<sub>2</sub> 층을 형성하는데, TiO<sub>2</sub>는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>에 비해 탄화수소와의 직접적인 라디칼 반응 활성이 낮아 촉매적 선형 코크 성장 메커니즘이 억제된다[30,31]. 코크 발생량을 첨가제 조건별로 비교하면, 분산제 단독 적용 시 19 mg(약 32% 저감), 산화방지제 단독 적용 시 22 mg(약 21% 저감), 금속 비활성화제 단독 적용(40 ppm) 시 14 mg(약 50% 저감)으로, 티타늄 반응기에서는 금속 비활성화제의 코크 저감 효율이 다른 단독 첨가제 대비 가장 높게 나타났다. 이는 인코넬 반응기에서 금속 비활성화제 적용이 오히려 코크 발생량을 증가시켰던 결과와 대조적으로, 티타늄 표면의 Ti<sup>4+</sup> 이온이 킬레이트화 기작에 의해 선택적으로 불활성화됨으로써 방향족화 및 탈수소화 반응이 효과적으로 억제되기 때문이다[43,44]. 주목할 점은 산화방지제를 추가한 삼중 조합 조건에서는 12 mg(약 57% 저감)으로, 이중 조합(분산제, 금속 비활성화제)의 7 mg(약 75% 저감)에 비해 오히려 저감 효율이 낮아졌다는 것이다. 이는 폐놀계 산화방지제의 라디칼 사슬 종결 기작이 스테인리스 스틸 반응기와 달리 티타늄 반응기에서는 큰 비중으로 작용하지 못하

기 때문에 해석된다. 따라서 티타늄 반응기에서의 최적 첨가제 조합은 분산제 및 금속 비활성화제의 이중 조합임을 확인하였으며, 이는 반응기 소재에 따른 표면 산화물 특성이 지배적 코크 형성 경로를 결정하고, 그에 부합하는 첨가제 선택이 이루어져야 함을 보여주는 결과이다.

액상 생성물 조성(Fig. 6(c))을 분석하면, 금속 비활성화제 적용 조건에서 방향족(aromatic) 성분 비율이 감소하는 경향이 확인되어, Ti<sup>4+</sup> 킬레이트화에 의한 Lewis acid site 억제가 방향족화 경로를 효과적으로 차단함을 나타낸다[43,45-47]. 산화방지제 조건에서는 다환방향족(diaromatic) 성분의 소폭 감소만이 관찰되어, 라디칼 경로에 의한 방향족화 기여가 티타늄 시스템에서는 상대적으로 제한적임을 확인하였다.

기상 전환율(Fig. 6(d))에서는 이중 조합 조건에서 반응 전 구간에서 걸쳐 낮은 기상 전환율을 유지하면서 코크 발생량이 최소화되어, 해당 조건에서 Lewis acid 매개 촉매 활성이 효과적으로 억제되었음을 의미한다[48-50].

### 3-5. 실리카 코팅 튜브 반응기의 첨가제 투입에 따른 열분해 특성

실리카 코팅 튜브에서 첨가제를 적용한 열분해 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 흡열량 결과의 경우, 무첨가 열분해 조건 대비 PEA600 첨가 시 6.77%, 이중 조합 조건에서 8.7%의 흡열량 증가를 확인하였다(Fig. 7(a)). 무첨가 열분해 조건에서 실리카 코팅 튜브의 총 코크 발생량은 41 mg으로, 동일 조건의 비코팅 SS316 반응기(72 mg)

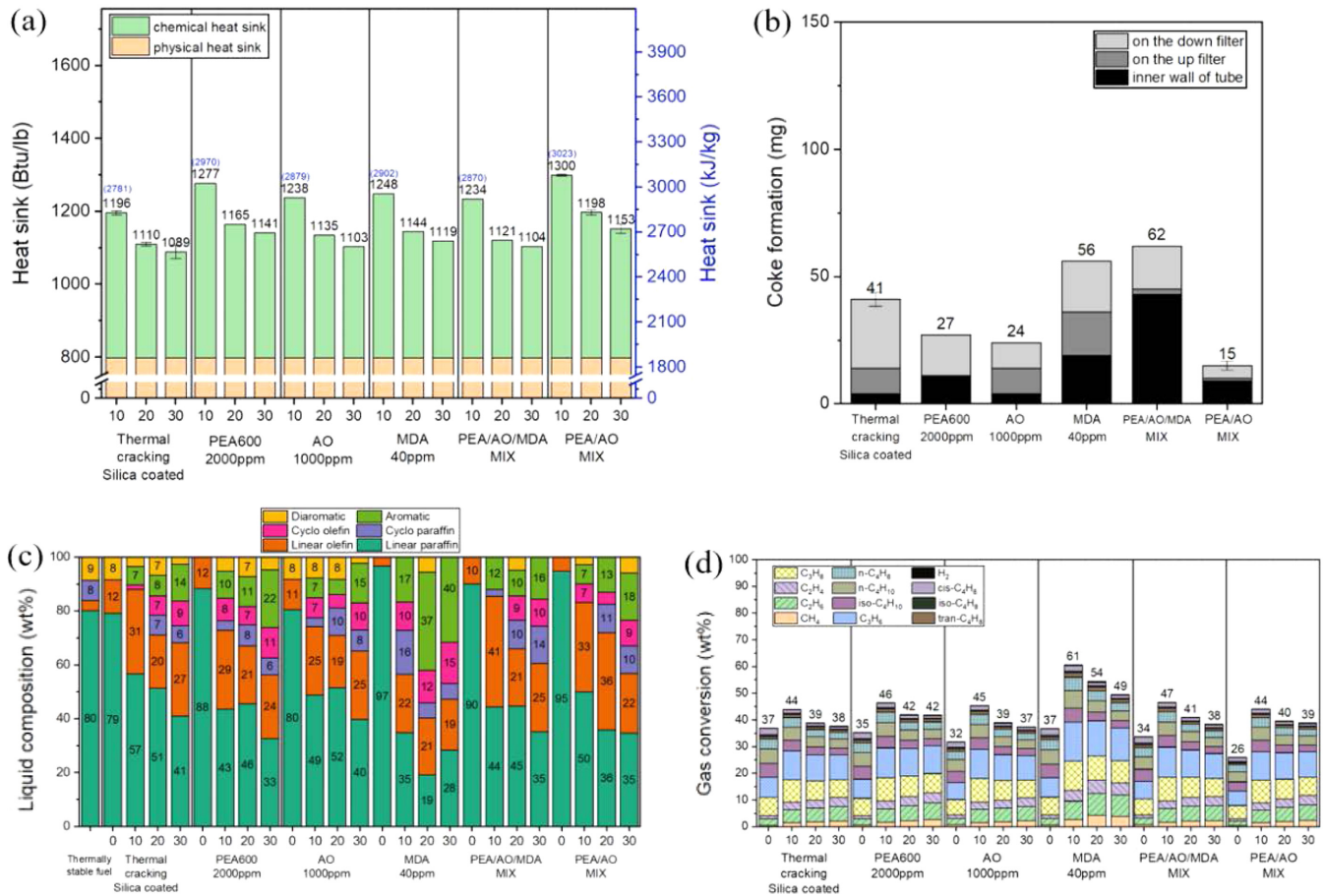


Fig. 7. Endothermic properties of thermally stable fuel during thermal cracking with additive on Silica binder coated Stainless steel tube (a) Heat sink, (b) Quantification of coke formation, (c) Liquid composition, (d) Gas products selectivity.

대비 약 43% 저감된 수준이다(Fig. 3(b), Fig. 7(b)). 이는 실리카 코팅이 SS316 관벽에 연속적인  $SiO_2$  장벽층을 형성함으로써  $Fe_2O_3/Cr_2O_3$  금속 활성점을 물리적으로 차단하고, 이를 통해 촉매적 선형 코크 성장이 억제된 결과이다[15]. 실제 실험 결과 실리카 코팅 후에도 생성되는 41 mg의 코크는 주로 자유 라디칼 반응 경로에 의한 유체내 무정형 코크로, 금속 활성점이 아닌 연료 내 라디칼 연쇄 반응에서 기인한다.

코크 발생량(Fig. 7(b))을 첨가제 조건별로 비교하면, 분산제 단독 적용 시 27 mg(약 34% 저감), 산화방지제 단독 적용 시 24 mg(약 41% 저감)으로 확인되었다. 주목할 점은 금속 비활성화제 단독 적용(40 ppm) 조건에서 코크 발생량이 56 mg으로 무첨가 대비 약 37% 증가하였으며, 삼중 조합 조건에서는 62 mg으로 오히려 모든 조건 중 가장 높은 코크 발생량을 나타냈다는 것이다. 이러한 역효과는 금속 비활성화제가 실리카 바인더 코팅 표면의 실라놀( $Si-OH$ ) 작용기 또는 코팅 결합부에서 금속 이온과 상호작용하여  $SiO_2$  장벽층의 안정성을 저해했기 때문으로 해석된다[51-53]. 즉, 금속 비활성화제에 의한 코팅 구조 교란으로 하부 SS316 금속 기저면의  $Fe_2O_3/Cr_2O_3$  활성점이 부분적으로 노출되어 오히려 코팅을 적용하지 않은 경우에 준하는 촉매적 코크 형성이 재활성화된 것으로 판단된다[38]. 이는 실제 실험 결과에서 금속 비활성화제 첨가 시 관벽 코크 형성량의 증가를 통해 확인되었다. 반면, 분산제와 산화방지제의 이중 조합 적용 시에는 코크 발생량이 15 mg으로 무첨가 대비 약 63% 저감되어

실리카 코팅 조건에서의 최적 첨가제 조합임이 확인되었다. 이 조건에서 산화방지제는 코팅에 의해 금속 활성점이 차단된 이후 지배적 코크 형성 경로로 남은 기상 라디칼 연쇄 반응을 종결시키고, 분산제는 생성된 미세 코크 입자의 응집을 물리적으로 분산시킴으로써 시너지 효과가 발현된다.

액상 생성물 조성(Fig. 7(c))을 살펴보면, 산화방지제 적용 조건에서는 다환방향족(diaromatic) 성분 비율의 감소가 뚜렷하게 관찰되어 기상 라디칼 경로에 의한 방향족화 반응이 효과적으로 억제됨을 나타냈다[53,54]. 반면 금속 비활성화제 적용 및 삼중 조합 조건에서는 방향족(aromatic) 성분 비율이 오히려 증가하였으며, 이는 금속 비활성화제에 의한  $SiO_2$  코팅 손상으로 금속 표면 촉매 활성이 회복되어 방향족화 경로가 재활성화되었음을 나타내는 결과로 해석된다[14,51]. 기상 전환율(Fig. 7(d))에서는 이중 조합 조건에서 반응 진행에 따른 기상 전환을 변화가 안정적으로 유지되면서 코크 발생량이 최소화된 반면, 금속 비활성화제 및 삼중 조합 조건에서는 에틸렌( $C_2H_4$ )을 포함한 경질 기상 성분의 비율이 상대적으로 높게 나타나 코팅 손상 부위에서의 촉매적 C-C 결합 분해가 병행되었음을 시사한다. 이와 같이 반응기 소재별로 최적 첨가제 조합이 상이하게 도출된 결과는 표면 금속 산화물의 화학적 특성이 코크 형성의 지배 메커니즘을 결정하며, 이에 최적화된 첨가제 전략의 수립이 코크 저감의 핵심임을 종합적으로 뒷받침한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 재생 냉각 시스템용 반응기의 관벽 재질 및 코팅 처리에 따른 코크 생성 경향성과 흡열 특성을 정량적으로 비교 분석하였다. 열안정성 연료를 SS316, 인코넬(Inconel 600), 티타늄(Ti grade 9), 실리카 코팅 튜브 4종의 반응기에서 열분해하고, 분산제, 산화방지제, 금속 비활성화제 및 이들의 조합을 각 반응기에 적용하여 흡열 특성 개선과 코크 저감 효과를 평가하였다. 특히, 반응기 소재별로 상이한 표면 금속 산화물의 화학적 특성이 코크 형성 경로와 첨가제 반응성에 미치는 영향을 메커니즘 수준에서 고찰하였다.

첨가제를 사용하지 않은 조건에서 인코넬 반응기는 스테인리스 스틸 반응기 대비 흡열량이 약 4.65% 감소하였지만, 관 재질 변경만으로 63.9%의 코크가 저감되었다. 티타늄 반응기에서는 스테인리스 스틸 대비 최대 4.02%의 흡열량 향상과 61.1%의 코크 저감 성능을 보였으며, 실리카 코팅 튜브는 43.1%의 코크 저감 효과를 나타내었다. 이는 인코넬 표면의 NiO 부동태층, 티타늄의 치밀한 TiO<sub>2</sub> 산화막, 그리고 실리카 코팅의 연속적 SiO<sub>2</sub> 장벽층이 SS316의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기반 촉매적 코크 성장을 각기 다른 기제로 억제한 것으로 판단된다. 최적 첨가제를 함께 사용한 경우 첨가제를 사용하지 않은 조건 대비 인코넬, 티타늄, 실리카 코팅 튜브 각각 61.5%, 75%, 63.4%의 추가적인 코크 저감 성능을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과는 반응기 재질 선정, 내부 코팅 처리 및 첨가제 전략을 복합적으로 고려하는 것이 연료 열분해 특성 개선과 코크 형성 억제에 효과적인 접근임을 보여준다. 다만, 본 연구의 열분해 실험은 30분 운전 조건에서 수행되었으므로, 실제 재생냉각 시스템의 장기 운전 환경을 완전히 대변하기에는 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 수백 시간 규모의 장기 내구성 평가를 통해 반응기 재질, 코팅층 및 첨가제 조합에 따른 코크 저감 성능과 흡열 특성의 장기 안정성을 검증할 필요가 있다. 이러한 후속 검증이 이루어진다면, 본 연구에서 제안한 재질, 코팅, 첨가제 복합 전략의 실제 적용 가능성을 보다 명확히 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감 사

이 논문은 2025학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음.

## Reference

- Peters, A. B., Zhang, D., Chen, S., Ott, C., Oses, C., Curtarolo, S., McCue, I., Pollock, T. M. and Eswarappa Prameela, S., "Materials Design for Hypersonics," *Nature Communications*, **15**(1), 3328 (2024).
- Blevins, R. D., Holehouse, I. and Wentz, K. R., "Thermoacoustic Loads and Fatigue of Hypersonic Vehicle Skin Panels," *J. Aircr.*, **30**(6), 971-978(1993).
- Qin, J., Bao, W., Zhang, S. and Zhou, W., "Comparison During a Scramjet Regenerative Cooling and Recooling Cycle," *J. Thermophys. Heat Transfer*, **26**(4), 612-618(2012).
- Jiang, R., Liu, G. and Zhang, X., "Thermal Cracking of Hydrocarbon Aviation Fuels in Regenerative Cooling Microchannels," *Energy Fuels*, **27**(5), 2563-2577(2013).
- Xu, K. and Meng, H., "Modeling and Simulation of Supercritical-Pressure Turbulent Heat Transfer of Aviation Kerosene with Detailed Pyrolytic Chemical Reactions," *Energy Fuels*, **29**(7), 4137-4149(2015).
- Pan, Y., Zhang, H., Zhang, C., Wang, H., Jing, K., Wang, L., Zhang, X. and Liu, G., "Supercritical Pyrolysis and Coking of JP-10 in Regenerative Cooling Channels," *Energy Fuels*, **34**(2), 1627-1638(2020).
- Tao, Z., Hu, X., Zhu, J. and Cheng Z., "Numerical Study of Flow and Heat Transfer of N-Decane with Pyrolysis and Pyrolytic Coking Under Supercritical Pressures," *Energy Fuels*, **31**(8), 8698-8707 (2017).
- Towfighi, J., Sadrameli, M. and Niaei, A., "Coke Formation Mechanisms and Coke Inhibiting Methods in Pyrolysis Furnaces," *J. Chem. Eng. Japan*, **35**(10), 923-937(2002).
- Edwards, T., "Cracking and Deposition Behavior of Supercritical Hydrocarbon Aviation Fuels," *Combustion Sci. Technol.*, **178**(1-3), 307-334(2006).
- Baker, R., Yates, D. and Dumesic, J. A., Filamentous carbon formation over iron surfaces, ACS Publications(1982).
- Muñoz Gandarillas, A. E., Van Geem, K. M., Reyniers, M. and Marin, G. B., "Influence of the Reactor Material Composition on Coke Formation During Ethane Steam Cracking," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**(15), 6358-6371(2014).
- Symoens, S. H., Olahova, N., Muñoz Gandarillas, A. E., Karimi, H., Djokic, M. R., Reyniers, M., Marin, G. B. and Van Geem, K. M., "State-of-the-Art of Coke Formation During Steam Cracking: Anti-Coking Surface Technologies," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **57**(48), 16117-16136(2018).
- Marek, J. C. and Albright, L. F., "Formation and Removal of Coke Deposited on Stainless Steel and Vycor Surfaces from Acetylene and Ethylene," ACS Publications(1982).
- Mahmoudi, E., Hafizi, A., Rahimpour, M. R., Bolhasani, A. and Shariati, A., "Inhibition Effect of CeO<sub>2</sub> Promoted SiO<sub>2</sub> Coating on Coke Growth During Steam Cracking of Ethane," *Chem. Eng. Res. Design*, **136**, 271-281(2018).
- Liu, J., Wang, X., Wang, H., Xu, H. and Yang, J., "Preparation and Anti-Coking Application of Sol-Gel SiO<sub>2</sub> Coating in a Delayed Coking Furnace," *RSC advances*, **11**(17), 9849-9855(2021).
- Zhou, J., Wang, Z., Luan, X. and Xu, H., "Anti-Coking Property of the SiO<sub>2</sub>/S Coating During Light Naphtha Steam Cracking in a Pilot Plant Setup," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **90**(1), 7-12(2011).
- Kim, Y., Kim, J., Hyeon, D. H., Han, J. S., Chun, B., Jeong, B. H. and Kim, S. H., "Development of PIBSI Type Dispersants for Carbon Deposit from Thermal Oxidative Decomposition of Jet A-1," *Fuel*, **158**, 91-97(2015).
- Dubois-Clochard, M., Durand, J., Delfort, B., Gateau, P., Barré, L., Blanchard, I., Chevalier, Y. and Gallo, R., "Adsorption of Polyisobutenylsuccinimide Derivatives at a Solid-Hydrocarbon Interface," *Langmuir*, **17**(19), 5901-5910(2001).
- Jia, T., Zhao, M., Pan, L., Deng, C., Zou, J. and Zhang, X., "Effect of Phenolic Antioxidants on the Thermal Oxidation Stability of High-Energy-Density Fuel," *Chemical Engineering Science*, **247**, 117056(2022).
- Morris, R. E., Hasan, M. T., Su, T. C., Wechter, M. A., Turner, N. H. and Schreifels, J. A., "Significance of Copper Complex Thermal Stability in the Use of Metal Deactivators at Elevated Temperatures," *Energy Fuels*, **12**(2), 371-378(1998).

21. Waynick, J. A., "The Development and Use of Metal Deactivators in the Petroleum Industry: A Review," *Energy Fuels*, **15**(6), 1325-1340(2001).
22. Loegel, T. N., Morris, R. E. and Leska, I., "Detection and Quantification of Metal Deactivator Additive in Jet and Diesel Fuel by Liquid Chromatography," *Energy Fuels*, **31**(4), 3629-3634(2017).
23. Jones, E. G. and Balster, L. M., "Impact of Additives on the Autoxidation of a Thermally Stable Aviation Fuel," *Energy Fuels*, **11**(3), 610-614(1997).
24. Gough, R. V., Widegren, J. A. and Bruno, T. J., "Thermal Decomposition Kinetics of the Thermally Stable Jet Fuels JP-7, JP-TS and JP-900," *Energy Fuels*, **28**(5), 3036-3042(2014).
25. Esmailian, M., "Corrosion Resistance of Welds in Type 316L Stainless Steel," *Mater. Perform.*, **56**(3), 58-61(2017).
26. Bonnet, F., Ropital, F., Berthier, Y. and Marcus, P., "Filamentous Carbon Formation Caused by Catalytic Metal Particles from Iron Oxide," *Materials and Corrosion*, **54**(11), 870-880(2003).
27. Wang, S., Cui, L., Wang, G., Zheng, Y., Wang, H. and Jia, J., "Properties of Oxide Films Grown on 25Cr20Ni Alloy in Air-H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Atmospheres," *Petroleum Science*, **11**(1), 147-154(2014).
28. Xiao, J., Prud'Homme, N., Li, N. and Ji, V., "Influence of Humidity on High Temperature Oxidation of Inconel 600 Alloy: Oxide Layers and Residual Stress Study," *Appl. Surf. Sci.*, **284**, 446-452(2013).
29. Altin, O. and Eser, S., "Pre-Oxidation of Inconel Alloys for Inhibition of Carbon Deposition from Heated Jet Fuel," *Oxidation Metals*, **65**(1), 75-99(2006).
30. Zhu, C., Ma, F., Dai, Z. and Ma, D., "Atomic Layer Deposition of TiO<sub>2</sub> Thin Films on the Inner Walls of Steel Tubes Increases Anti-Coking Properties," *ACS Omega*, **5**(49), 32102-32111(2020).
31. Tang, S., Liu, T., Duan, S., Guo, J. and Tang, A., "Comparison of Growth Characteristics and Properties of CVD TiN and TiO<sub>2</sub> Anti-Coking Coatings," *Processes*, **7**(9), 574(2019).
32. Park, C., Aum, H., Ji, S., Jeong, B., Choi, H., Park, D. and Jung, J., "Endothermic Properties and Coke Reduction of Thermally Stable Fuels Using Antioxidants and Metal Deactivators," *Korean Chemical Engineering Research*, **63**(1), 34-41(2025).
33. Park, C., Aum, H., Kim, D., Kim, Y., Jeong, B., Choi, H., Park, D. and Jung, J., "Endothermic Properties and Coke Reduction of exo-THDCPD Using Antioxidants and Metal Deactivators," *Korean Chemical Engineering Research*, **64**(1), 105147.1-105147.10(2026).
34. Linne, D., Meyer, M., Edwards, T. and Eitman, D., "Evaluation of Heat Transfer and Thermal Stability of Supercritical JP-7 Fuel," **33**, 3041(1997).
35. Wang, J., Jin, H., Gao, H. and Wen, D., "Cooling Capacity Optimization of Hydrocarbon Fuels for Regenerative Cooling," *Appl. Therm. Eng.*, **200**, 117661(2022).
36. Mun, J., Kim, N., Jeong, B. and Jung, J., "Endothermic Properties of Liquid Fuel Decomposition Catalyst Using Metal Foam Support," *Korean Chemical Engineering Research*, **59**(4), 481-486(2021).
37. Kim, N., Park, C., Cho, S., Jeong, B. and Jung, J., "Decomposition of Thermally Stable Fuel Using a Cerium-Modified Zeolite Catalyst and Endothermic Characteristics," *ACS Omega*, **8**(45), 43130-43138(2023).
38. Jones, E. G., Balster, W. J. and Balster, L. M., "Evaluation of the Effectiveness of a Metal Deactivator and Other Additives in Reducing Insolubles in Aviation Fuels," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **119**(4), 830-835(1997).
39. Balster, W. J. and Balster, L. M., "Use of MDA, BHT, and Dispersant Singly and in Combination as Jet-Fuel Additives," *OSTI*, (1996).
40. Zhi, H., Fu, Y., Gang, X., Zhang, L., Wang, J. and Xu, G., "Investigation on Thermal Oxidation Coking Inhibition of Aviation Kerosene RP-3 Using Additives and Surface Modification Method," *Fuel*, **406**, 136957(2026).
41. Altin, O. and Eser, S., "Characterization of Carbon Deposits from Jet Fuel on Inconel 600 and Inconel X Surfaces," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**(3), 642-645(2000).
42. Guo, X., Vanhaecke, E., Vullum, P. E., Ma, J., Gunawardana, P. D. S., Walmsley, J. C., Chen, D. and Venvik, H. J., "Effects of Metal Dusting Relevant Exposures of Alloy 601 Surfaces on Carbon Formation and Oxide Development," *Catalysis Today*, **369**, 48-61(2021).
43. Finkelstein-Shapiro, D., Davidowski, S. K., Lee, P. B., Guo, C., Holland, G. P., Rajh, T., Gray, K. A., Yarger, J. L. and Calatayud, M., "Direct Evidence of Chelated Geometry of Catechol on TiO<sub>2</sub> by a Combined Solid-State NMR and DFT Study," *The Journal of Physical Chemistry C*, **120**(41), 23625-23630(2016).
44. Sonström, A., Boldrini, B., Werner, D., Maichle-Mössner, C., Rebner, K., Casu, M. B. and Anwender, R., "Titanium (IV) Surface Complexes Bearing Chelating Catecholato Ligands for Enhanced Band-Gap Reduction," *Inorg. Chem.*, **62**(2), 715-729(2023).
45. Sudarsanam, P., Li, H. and Sagar, T. V., "TiO<sub>2</sub>-Based Water-Tolerant Acid Catalysis for Biomass-Based Fuels and Chemicals," *ACS Catalysis*, **10**(16), 9555-9584(2020).
46. Vicente, H., Liu, C., Gayubo, A. G., Castano, P. and Pidko, E. A., "Improving the Dehydrogenation Function and Stability of Zn-Modified ZSM-5 Catalyst in Methanol-to-Aromatics Reaction by Ca Addition," *Applied Catalysis A: General*, **683**, 119854(2024).
47. Tang, S., Wang, J., Zhu, Q., Chen, Y. and Li, X., "Preparation of Rutile TiO<sub>2</sub> Coating by Thermal Chemical Vapor Deposition for Anticoking Applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**(19), 17157-17165(2014).
48. Rane, N., Kersbulck, M., Van Santen, R. A. and Hensen, E., "Cracking of n-Heptane over Brønsted Acid Sites and Lewis Acid Ga Sites in ZSM-5 Zeolite," *Microporous and Mesoporous Materials*, **110**(2-3), 279-291(2008).
49. Liu, D., Cao, L., Zhang, G., Zhao, L., Gao, J. and Xu, C., "Catalytic Conversion of Light Alkanes to Aromatics by Metal-Containing HZSM-5 Zeolite Catalysts—A Review," *Fuel Process. Technol.*, **216**, 106770(2021).
50. Wang, H. and Shiju, N. R., "A Mini Review on Aromatization of n-Alkanes," *Reaction Chemistry & Engineering*, **10**(4), 768-776(2025).
51. Wang, Z., Ding, X., Guo, X., Dou, B., Zhou, J., Wang, B. and Wang, M., "Investigation into the Anticoking Performances of Sol-Gel-Derived SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> Coatings During Thermal Pyrolysis of Light Naphtha," *Energy Fuels*, **35**(3), 2562-2578(2021).
52. Okoye-Chine, C. G., Mbuya, C., Ntelane, T. S., Moyo, M. and Hildebrandt, D., "The Effect of Silanol Groups on the Metal-Support Interactions in Silica-Supported Cobalt Fischer-Tropsch Catalysts. A Temperature Programmed Surface Reaction," *Journal of Catalysis*, **381**, 121-129(2020).

53. Zhou, J., Wang, Z., Luan, X. and Xu, H., "Anti-Coking Property of the SiO<sub>2</sub>/S Coating During Light Naphtha Steam Cracking in a Pilot Plant Setup;" *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **90**(1), 7-12(2011).
54. Lemmens, A. K., Rap, D. B., Thunnissen, J. M., Willemsen, B. and Rijs, A. M., "Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Formation Chemistry in a Plasma Jet Revealed by IR-UV Action Spectroscopy;" *Nature Communications*, **11**(1), 269(2020).

#### Authors

**Chanho Park:** Grad student, Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea; chanho970220@kyonggi.ac.kr

**Jihoon Jung:** Professor, Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea; jhjung@kyonggi.ac.kr