

산화방지제와 금속 비활성화제를 이용한 열안정성 연료의 흡열특성과 코크저감에 대한 연구

박찬호* · 엄호선* · 지수연* · 정병훈** · 최호진** · 박동창** · 정지훈*†

*경기대학교 화학공학과
16227 경기도 수원시 이의동 산 94-6
**국방과학연구소 4본부
34186 대전광역시 유성구 조치원길 462
(2024년 8월 16일 접수, 2024년 10월 24일 수정본 접수, 2024년 10월 26일 채택)

Endothermic Properties and Coke Reduction of Thermally Stable Fuels using Antioxidants and Metal Deactivators

Chanho Park*, Hosun Aum*, Suyeon Ji*, Byunghun Jeong**, Hojin Choi**, Dongchang Park** 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 August 2024; Received in revised form 24 October 2024; Accepted 26 October 2024)

요 약

극초음속 비행체의 비행속도가 증가함에 따라 액체 탄화수소 연료의 열분해를 통한 재생 냉각 기술이 주목받고 있다. 그러나 액체 탄화수소 연료의 열분해 과정에서 탄소 침적물인 코크가 발생한다는 문제점이 있다. 코크 침적물은 비행체에 많은 문제점을 발생시키므로 소량의 첨가제를 투입하여 코크 발생을 억제하는 방법이 도입되었다. 본 연구에서는 흐름형 열분해 반응기에서 열안정성 연료를 대상으로 산화방지제와 금속 비활성화제를 첨가하여 연료의 흡열 특성과 코크 저감 특성 변화를 분석하였다. 최적 농도의 산화방지제와 금속 비활성화제를 첨가한 결과 첨가제를 사용하지 않은 경우에 비해 흡열량은 6.31% 증가하였고, 코크 발생량은 75% 감소하였다.

Abstract – As the flight speed of hypersonic aircraft increases, regenerative cooling system using pyrolysis of liquid hydrocarbon fuels is being discussed. However, the decomposition of liquid hydrocarbon fuels results in the coke formation, a carbon deposit, which can cause serious problems in the flow channels. To address this, a method of adding small amounts of additives to reduce coke formation has been proposed. In this study, we compared the endothermic characteristics and coke reduction of thermally stable fuel by adding antioxidants and metal deactivators in a flow type reactor. The results showed that use of optimal additives increased the heat sink 6.31%, coke formation reduced up to 75% compared to when no additives were used.

Key words: Endothermic fuel, Coke reduction, Additives, Anti-oxidants, Metal deactivators

1. 서 론

극초음속 비행체는 엔진 효율 향상과 기술 발전으로 인해 비행 속도가 증가하고 있다[1, 2]. 이러한 속도의 증가는 공기와의 마찰 열, 엔진 및 각종 다양한 전자장비의 가동으로 인해 비행체에 심각한 열적 부하를 야기한다[3-5]. 이는 비행체 표면의 온도를 2200 °C

이상 증가시킬 뿐 아니라 비행체의 오작동이나 엔진 정지와 같은 심각한 문제를 초래할 수 있다[4]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 추가적인 냉각제 혹은 단열체를 사용하는 방법이 고려될 수 있으나 이는 비행체 자체의 무게를 증가시켜 고속 비행에 어려움이 발생하기 때문에 새로운 재생 냉각 기술이 연구되고 있다[6].

액체연료는 비행체 연소실 외벽의 냉각채널을 지나면서 열분해 반응이 진행된다[7]. 고온에 의해 열분해반응이 진행되는 액체연료는 올레핀, 방향족 계열 탄화수소 등의 중합 및 축합 반응을 통해 코크(coke)가 생성될 수 있다[8]. 극초음속 비행체의 연료채널은 비행 중 고온에 노출되어 외벽에 코크 활성점들이 형성되고, 이는 촉매역할을 하여 선형 코크(filamentous coke)를 형성한다. 또한 액체연료가

† 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.

고온에 의해 분해되며 형성된 방향족 화합물은 중합 및 축합 반응에 의해 다환방향족탄화수소(PAHs, Polycyclic aromatic hydrocarbons)를 형성하고 이는 덩어리형태의 무정형 코크(Amorphous coke)로 성장된다[9]. 이러한 코크는 연료채널을 막고, 냉각채널 외벽의 기계적 강도를 약화시키며 열전달을 방해한다. 따라서 생성되는 코크를 억제하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며 그 중에서 가장 효과적인 방법이 첨가제를 사용하는 것이다[10].

연료의 분해반응 경로와 메커니즘에 따라 다양한 첨가제가 사용될 수 있다. 본 연구에서는 산화에 의해 생성되는 코크를 억제하는 산화방지제(AO, Antioxidants)와 연료채널 관벽의 코크 활성점을 억제하는 금속 비활성화제(MDA, Metal Deactivators)를 사용하였다[11-13]. 즉 이와 같은 산화방지제와 금속 비활성화제를 열안정성 연료에 단독 혹은 동시에 첨가했을 때 코크 저감 및 열분해 특성 변화를 분석하였으며, 최종적으로 최적 첨가제 농도를 파악하였다.

본 논문에서는 산화방지제와 금속 비활성화제를 액체연료에 첨가하여, 각각의 실험 조건에 최적화된 연료 대비 첨가제의 비율을 확인하고 이를 통해 흐름형 반응기에서 계산되는 흡열량과 코크 발생량을 비교 평가하여 합성 연료의 열분해 특성을 파악하고자 한다.

2. 실험

2-1. 열안정성 모사연료

본 연구에서는 열안정성 연료인 JP-7과 유사한 특성을 갖는 모사연료 1종을 고등기술연구원에서 공급받아 대상연료로 선정하였다. 본 연구에 사용된 열안정성 연료의 조성을 Table 1에 나타내었다. 흡열연료(Endothermic fuel)는 흡열반응인 화학적 분해 또는 개질 반응을 통해 주위의 열을 흡수하여 비행체를 냉각시킨다. 각 실험마다 흡열 열분해 반응으로 생성된 액체성분과 기체성분을 분석하여 열분해 특성을 파악하였다.

2-2. 열안정성 연료 첨가제

열안정성 연료의 코크 형성을 저감하기 위해 두 종류의 첨가제, 산화방지제와 금속 비활성화제를 사용하였다. 산화방지제는 2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol (Sigma-Aldrich, ≥ 99.0%, powder, USA, Cas no. 128-37-0)을 사용하였고, 금속 비활성화제는 N,N'-Bis(salicylidene)-1,2-propanediamine (TCI, >98%, powder, Japan, Cas no. 94-91-7)을 사용하였다. 첨가제는 연료에 비해 극소량이 첨가되므로 첨가제를 균일하게 혼합하기 위해 산화방지제와 금속 비활성화제를 첨가한 후 초음파를 사용하여 30분 동안 균질화 처리를 하였다.

2-3. 흡열반응 실험

Fig. 1은 액체연료 분해반응 실험을 위한 흐름형 반응기 모식도이다. 실험에 사용된 흐름형 반응기는 1/4" (외경 6.35 mm, 내경 4.57 mm, 길이 500 mm) 스테인리스 스틸 튜브(SS316)를 사용하였다. 오븐을 통해 반응기 튜브 500 mm 길이 중에서 300 mm만큼을 가열부로 설정했다. 액체연료의 흐름방향은 아래에서 위로 설정하여

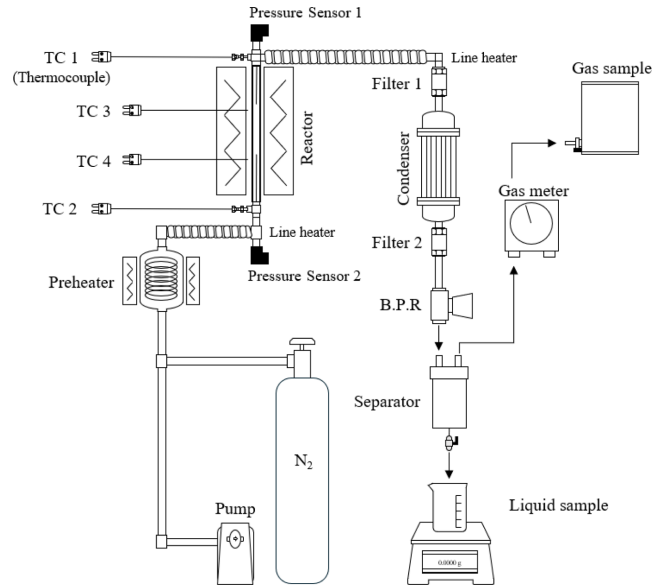


Fig. 1. Schematic diagram of flow reactor.

균일한 유량을 유지할 수 있도록 했다.

반응 온도와 압력은 열안정성 연료의 초임계 조건에서 흡열량, 코크 발생량, 극초음속 비행체의 조건 등을 고려하여 선정하였다. 반응기 내부압력은 질소를 이용해 4 MPa로 유지하였으며, 예열기는 액체연료의 열분해 반응이 일어나지 않는 온도인 400 °C로 설정하였다. 열안정성 연료의 유속은 5 ml/min (LHSV: 63.29hr⁻¹)로 총 30분 동안 흘러주며 열분해 반응을 진행하였다. 시료는 액상 생성물과 기상생성물을 반응이 진행되는 동안 10분 간격으로 1분동안 채취하였다.

2-4. 액상 및 기상 생성물 분석

액상 생성물은 GC-MS (GC 6890N, MS 5975B, HP-5ms column)를 이용하여 40 °C에서 290 °C까지 분당 10 °C씩 온도를 상승시키면서 분석하였다. 열분해 후 발생하는 탄화수소 화합물을 Linear paraffin, Linear olefin, Cyclo paraffin, Cyclo olefin, Aromatic, Diaromatic으로 분류하여 반응 조건 및 반응 시간에 따른 열분해 거동을 확인하였다. 기상 생성물은 GC-FID(GC 6890N, GS-Gas Pro column)를 이용하여 50 °C에서 3분 유지한 후 50 °C에서 120 °C까지 분당 20 °C씩 온도를 상승시키면서 분석하였다. 기상전환율은 주입된 액체연료와 배출되는 액체연료의 무게 차이를 이용하여 계산하였으며, 배출구에 가스미터(Shinagawa)를 설치하여 기상전환율을 검증하였다.

2-5. 코크 분석

코크 발생량은 반응로에 장착된 반응기와 콘텐서 전후에 장착된 두개의 라인필터를 이용하여 열분해 반응 전후 무게 차이를 통해 측정하였다. 라인필터의 여과망 크기는 0.5 μm 이며, 발생된 코크의 형태는 주사전자현미경(Jeol)을 이용하여 관찰하였다.

Table 1. Composition of Thermally stable fuel

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

2-6. 흡열량 측정

액체연료의 분해반응 시 발생하는 흡열량은 물질 자체의 온도 상승 및 상변화에 의한 물리적 흡열량과 흡열반응에 의한 화학적 흡열량으로 나눌 수 있다. 물리적 흡열량은 액체연료의 온도를 상승시키는 데 필요한 현열이며, 화학적 흡열량은 연료가 열분해 되는데 필요한 반응열이다. 전체 흡열량은 열분해 반응 중 낮아지는 연료의 온도를 유지하기 위해 추가적으로 들어가는 전력량을 측정하여 얻었으며, 물리적 흡열량은 NIST Supertrap을 통해 계산하였고, 두 값의 차이를 통해 화학적 흡열량을 산출하였다[14,15]. 실험에 사용된 전기로의 열효율(η) 값을 측정하여 화학적 흡열량 계산에 반영하였다. 열효율(η) 측정은 화학적 분해가 일어나지 않는 온도에서 측정된 흡열량과 이론적으로 계산한 물리적 흡열량 값으로부터 식 (1)을 이용하여 구했으며[16], 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 최종적인 흡열량은 실험으로 구한 흡열량에 식 (1)에서 구한 열효율(η)을 곱한 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

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

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

3. 결과 및 고찰

3-1. 코크 발생량 측정

채취 위치에 따라 코크를 크게 세 가지로 구분하였으며, 이들의 물리적 특성을 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 촬영 결과에 나타내었다. 관 벽에서는 선형 코크와 무정형 코크가 동시에 발생한다고 알려져 있다[17]. 본 열분해에서도 관벽의 활성점에서는 선형 코크(filament coke)가 형성되었고(Fig. 2(a)), 무정형 코크(amorphous coke)가 그 위로 침적되면서 튜브 중심에서는 무정형의 둥근 코크만 관찰 되었다(Fig. 2(b)). Fig. 2(c)와 Fig. 2(d)는 각각 위 아래에 장착된 필터에서 채취한 코크의 모습이며, 필터에서 채취된 코크는 연료에 포함된 코크(internal coke, bulk coke)로 역시 무정형의 둥근 형태를 띠고 있다. 상하 필터에서 채취한 코크의 대략적인 크기는 각각 약 2.7 μm 와 0.53 μm 였으며, 필터의 오프닝 사이즈 0.5 μm 보다 큰 것으로 확인되었다.

Table 2. Efficiency value of thermal stability fuel endothermic

Theoretical value	Experimental value	Efficiency value (η)
315	994	0.317

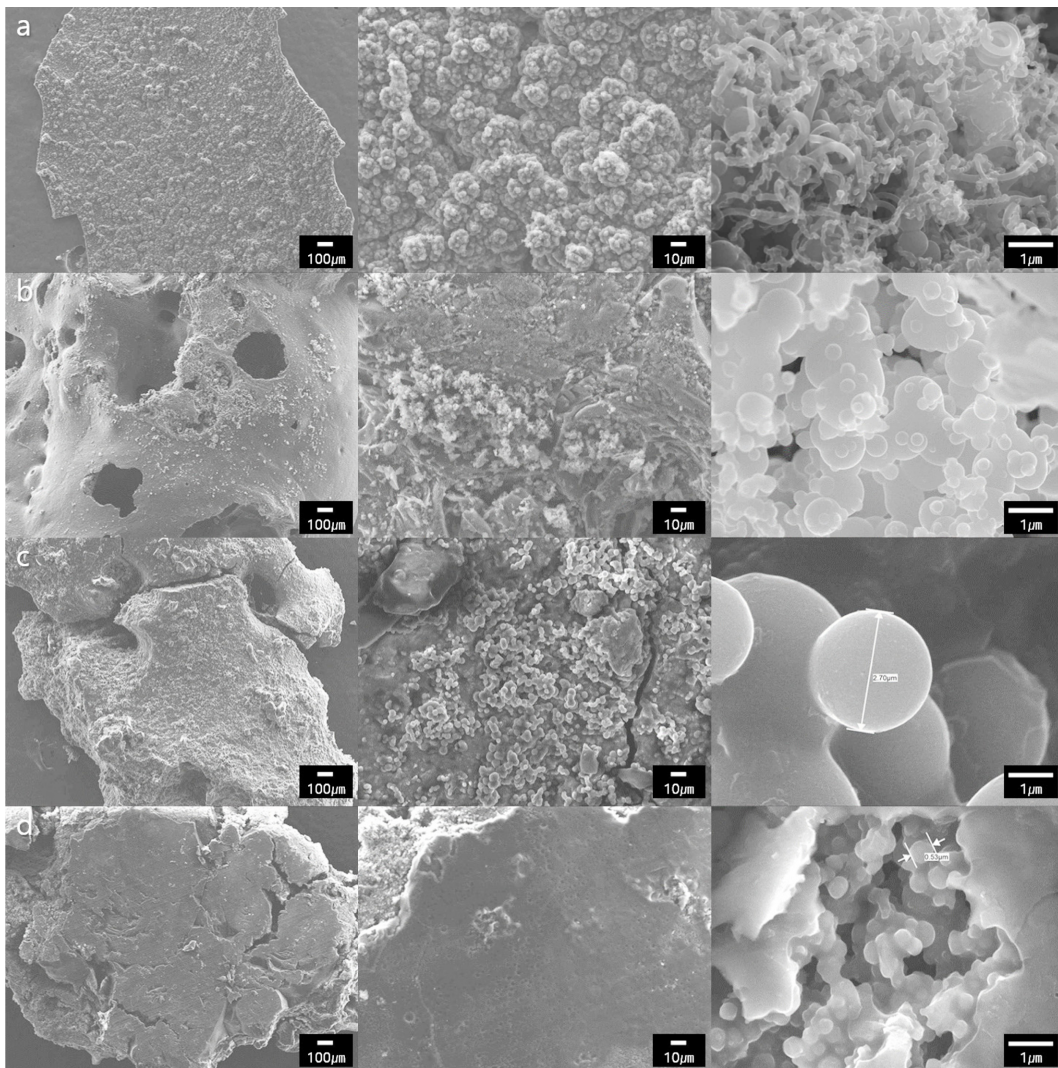


Fig. 2. SEM images of (a) tube wall coke , (b) tube center coke, (c) up filter coke, (d) down filter coke ($\times 50, \times 500, \times 15000$).

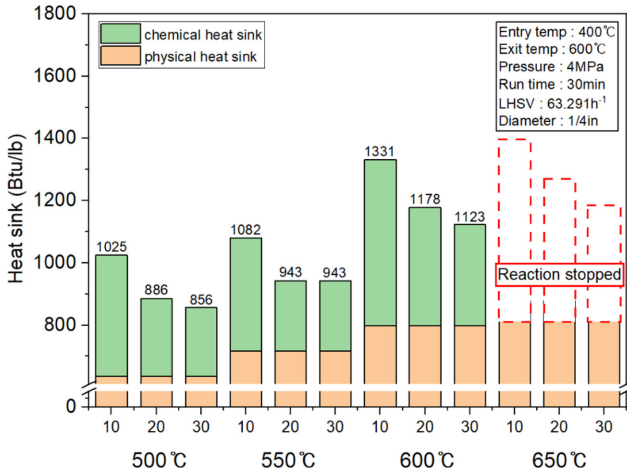


Fig. 3. Heatsink of endothermic reaction with no additive.

3-2. 첨가제를 사용하지 않은 연료의 열분해 반응

Fig. 3은 JP-7급 열안정성 연료를 압력 40 bar에서 온도를 변화시키며 열분해 반응을 진행하였을 경우 흡열량을 나타낸 것이다. 반응 온도를 500 °C, 550 °C, 600 °C, 650 °C 로 설정하였을 때 물리적 흡열량은 각각 635 btu/lb, 717 btu/lb, 798 btu/lb, 878 btu/lb이며, 총 흡열량은 초기 10분 기준으로 각각 1025 btu/lb, 1062 btu/lb, 1331 btu/lb 이었고 반응온도 650 °C에서는 코크 막힘으로 반응이 중단되어 측정하지 못하였다. 열분해 온도가 높아짐에 따라 물리적인 흡열량이 증가하고, 연료의 열분해가 더 많이 진행되면서 화학적 흡열량 또한 증가하였다[14].

Fig. 4는 각 실험 조건에서 코크 생성량을 측정한 결과이다. 500 °C 와 550 °C 반응조건에서는 관벽 코크는 거의 생성되지 않고 필터 코크의 양도 적었으나, 600 °C 이상에서 전체적인 코크가 크게 증가하였으며, 특히 650 °C 에서는 코크의 급격한 증가로 반응이 중단되어 정확한 코크 양을 측정하기 어려웠다. 따라서 모든 열분해 실험은 정상적인 반응이 가능한 최고온도인 600 °C 를 기준으로 수행되었다.

3-3. 산화방지제 첨가 연료의 열분해 반응

산화방지제를 열안정성 연료에 첨가하여 실험을 진행한 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 산화방지제를 열안정성 연료에

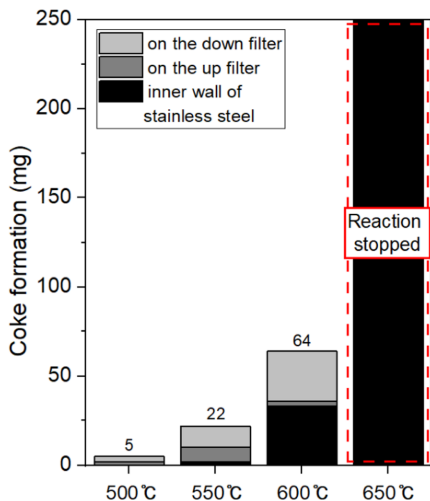


Fig. 4. Coke formation of endothermic reaction with no additive.

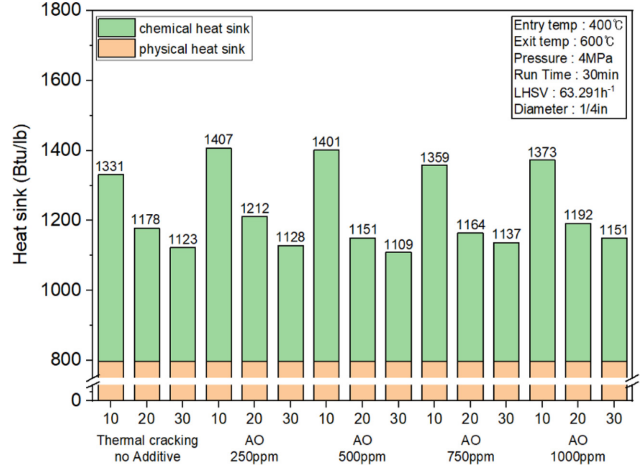


Fig. 5. Heatsink of endothermic reaction with Antioxidants.

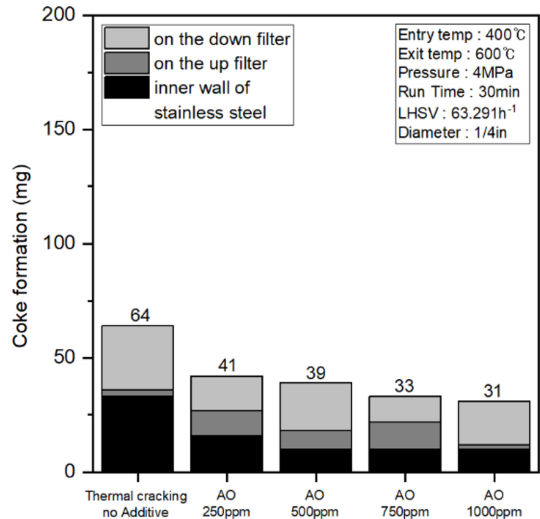


Fig. 6. Coke formation of endothermic reaction with Antioxidants.

첨가한 경우, 흡열량이 증가하면서 코크 발생량은 감소하였다. 즉 첨가제를 사용하지 않은 반응에서 흡열량은 1331 Btu/lb 이었으나, 산화방지제를 첨가한 경우 그 투입량에 따라 1359 Btu/lb에서 1407 Btu/lb를 나타내어 2.1~5.7%의 흡열량 증가를 보였다. 코크 발생량의 경우 첨가제를 사용하지 않았을 경우 64 mg였던 것에 비해 산화방지제 1000 ppm 첨가 후 31 mg으로 감소하여 약 51%의 코크 감소 효과를 나타내었다.

Fig. 7은 산화방지제를 첨가 전후 열안정성 연료의 반응 후 액상 생성물을 분석한 결과이다. 첨가제를 사용하지 않은 열분해 반응에 비해 첨가제 사용후 Aromatic과 Olefin의 생성량이 증가했다. 이들은 높은 표준 생성 엔탈피를 가지고 있어 흡열 성능이 뛰어난 물질이지만, 다환방향족탄화수소를 형성하며 코크 생성의 전구체 역할을 한다. 이때 산화방지제는 Aromatic과 Olefin의 추가적인 라디칼 연쇄 산화 반응을 억제하여 코크 형성을 방지하게 된다[18]. Fig. 8은 기상 생성물 분석 결과이며 기상 전환율과 조성을 확인할 수 있다. 산화방지제를 1000 ppm 사용한 결과 기상 전환율이 가장 높았으며, 이에 따라 액체 연료가 기상으로 많이 전환되면서 낮은 탄소수의 화합물을 형성하고 코크의 전구체가 줄어들어 전체적인 코크 생성량이 감소한 것으로 판단된다.

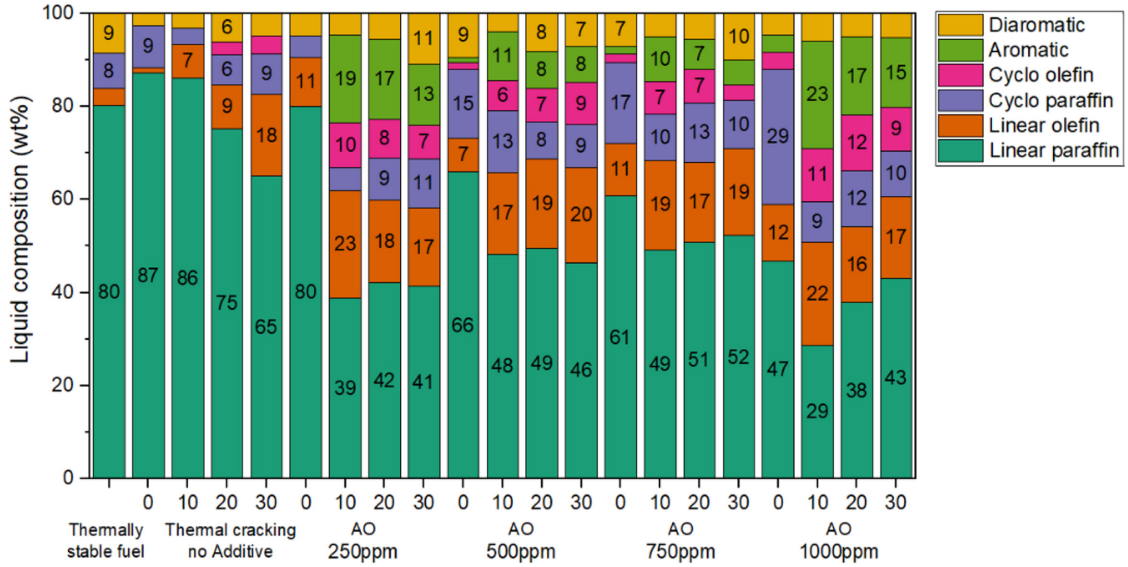


Fig. 7. Liquid composition of endothermic reaction with Antioxidants.

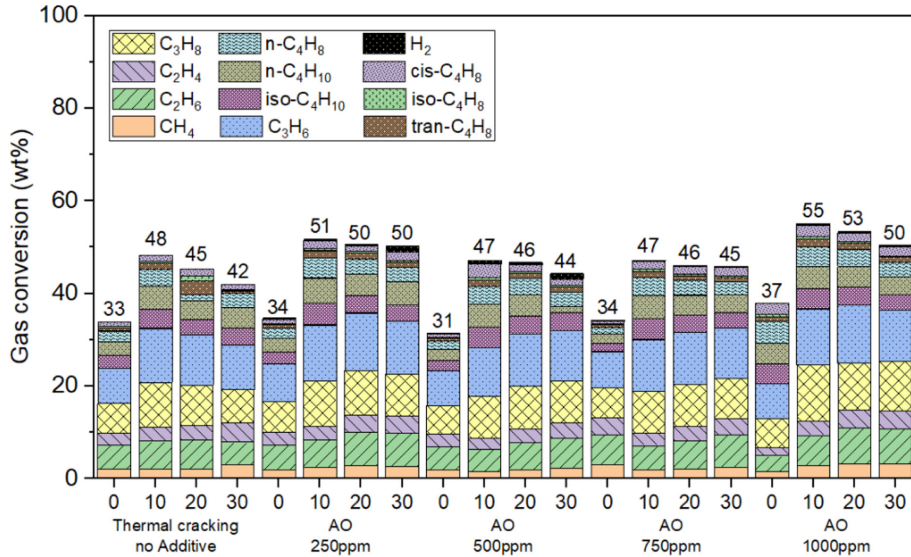


Fig. 8. Gas products selectivity of endothermic reaction with Antioxidants.

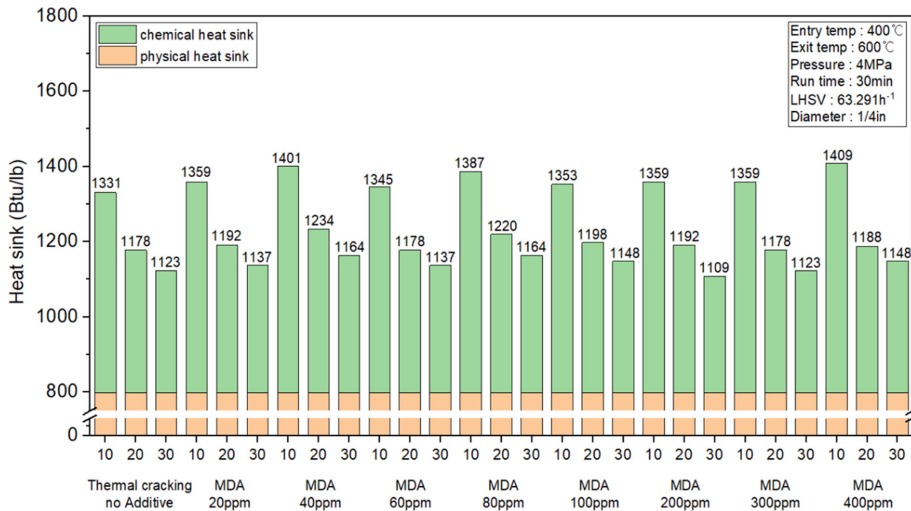


Fig. 9. Heatsink of endothermic reaction with Metal Deactivators.

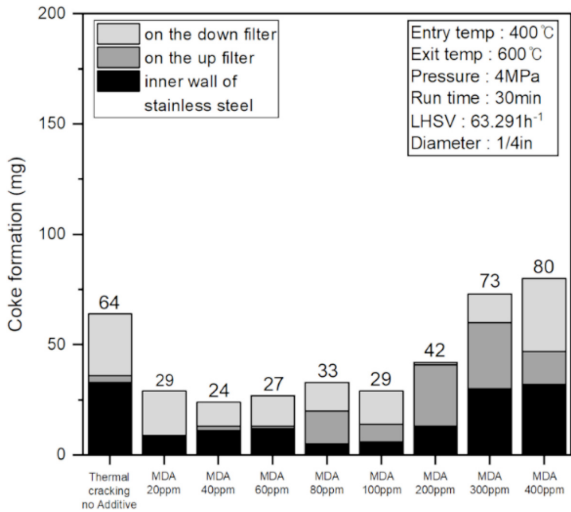


Fig. 10. Coke formation of endothermic reaction with Metal Deactivators.

3-4. 금속 비활성화제 첨가 연료의 열분해 반응

금속 비활성화제를 열안정성 연료에 첨가하여 최적화를 진행하였다. Fig. 9에 금속 비활성화제를 농도별로 첨가하여 열분해를 진행한 결과 흡열량이 1345 Btu/lb에서 1409 Btu/lb를 나타내어, 첨가제를 사용하지 않은 경우에 비해 최대 5.86%의 흡열량 증가를 보였다. Fig. 10에 나타난 금속 비활성화제를 첨가한 코크 발생량을 보면 금속 비활성화제 40 ppm 첨가에 의해 코크 발생량이 24 mg까지 낮아져 62.5%의 코크 감소 효과를 보였다. 금속 비활성화제는 산화방지제에 비해 비교적 적은 양으로도 코크 저감 효과를 보였으며, 300 ppm 이상의 농도를 첨가했을 때는 오히려 코크 발생량이 증가하였다. 필요 이상의 농도를 사용한 경우 반응 연료 내에 잔존해 있는 금속 비활성화제가 열분해 되어 반응과정에서의 불순물로서 작용하여 코크 발생량이 오히려 증가한 것으로 판단된다.

금속 비활성화제는 금속 표면을 얇은 막으로 코팅하며 금속 표면의 활성점을 차단한다[19]. 이러한 기전을 통해 관벽 선형 코크의 형성 메커니즘을 억제하면서 기상으로 전환되는 활성화 에너지를 높여

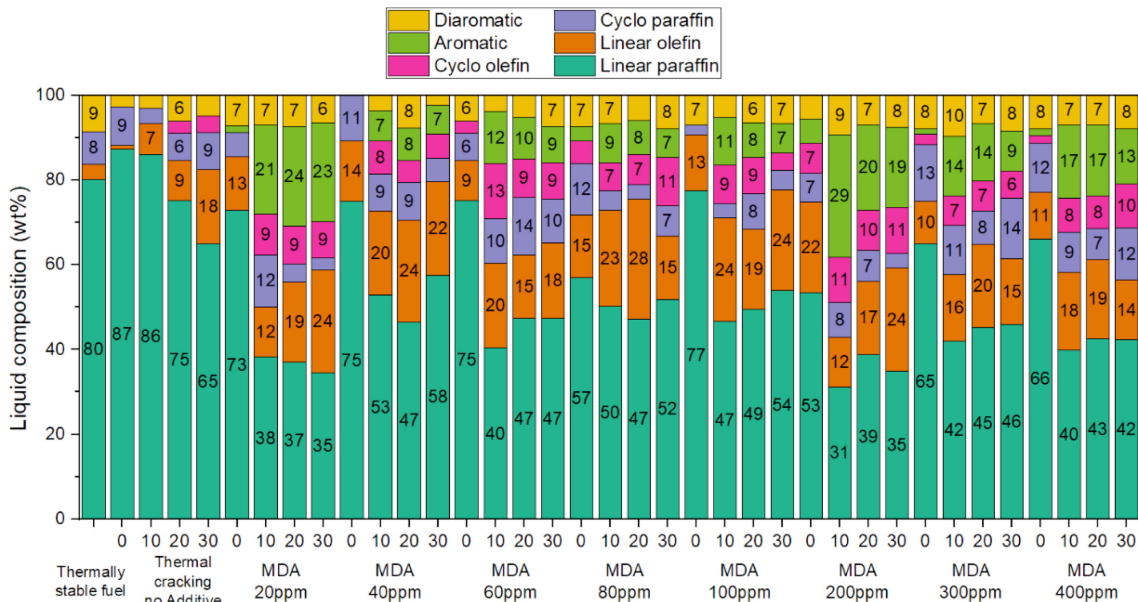


Fig. 11. Liquid composition of endothermic reaction with Metal Deactivators.

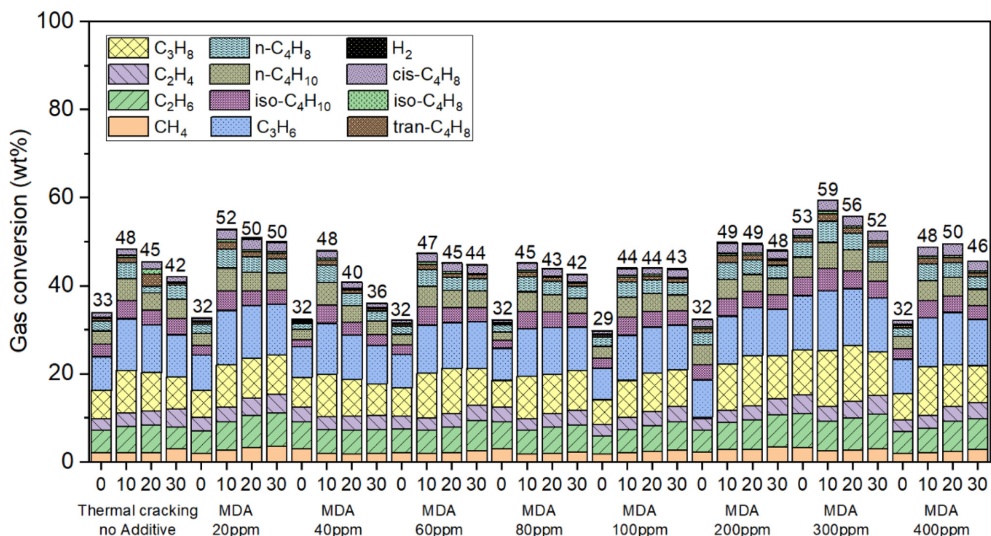


Fig. 12. Gas products selectivity of endothermic reaction with Metal Deactivators.

기상 전환을 억제하는 경향을 보인다. 따라서 Fig. 11의 액상 생성물 조성과 Fig. 12의 기상 전환을 및 기상 생성물 조성 결과를 보면, 금속비활성화제를 사용하여 코크 발생량이 낮아지는 경우 액상의 Aromatic 생성 비율이 감소함과 아울러 기상 생성물의 전환율이 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

3-5. 산화방지제와 금속비활성화제 혼합물 첨가 연료의 열분해 반응

열안정성 연료를 대상으로 앞의 산화방지제와 금속 비활성화제 실험결과를 통해 최적 첨가제 농도를 파악하였다. 이에 코크 저감 효과가 가장 좋았던 농도인 산화방지제 1000 ppm, 금속 비활성화제 40 ppm을 혼합한 경우의 열분해 특성을 살펴보았다. Fig. 13과 Fig. 14에 첨가제를 단일로 사용한 경우와 최적 첨가제 혼합물을 사용한 경우의 흡열량과 코크 발생량을 비교하였다. 최적 혼합물을 사용한 결과 흡열량은 1415 Btu/lb로 더욱 증가하였고 코크 발생량은

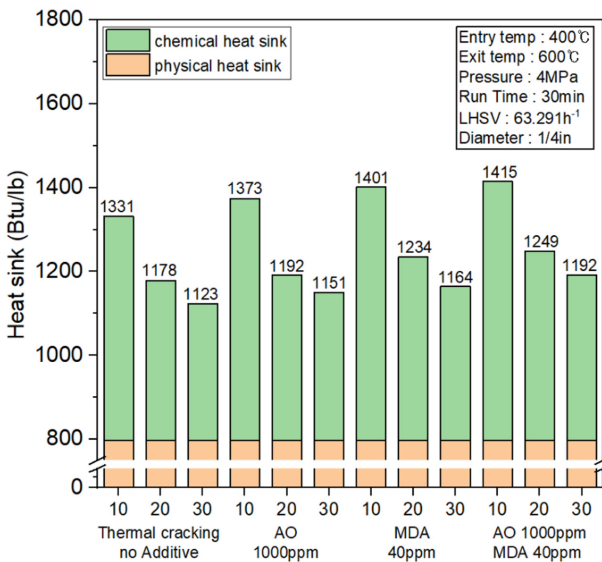


Fig. 13. Heatsink of endothermic reaction with optimized Additives.

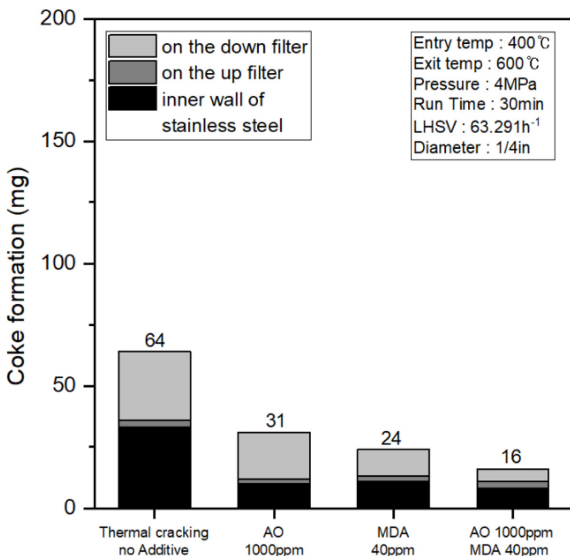


Fig. 14. Coke formation of endothermic reaction with Optimized Additives.

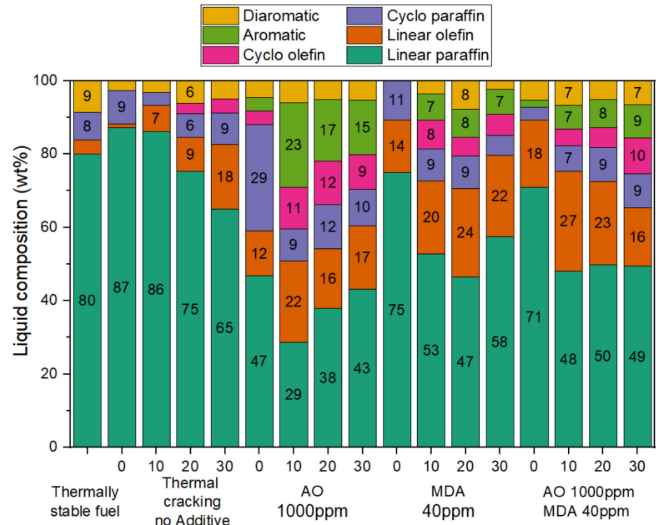


Fig. 15. Liquid composition of endothermic reaction with optimized Additives.

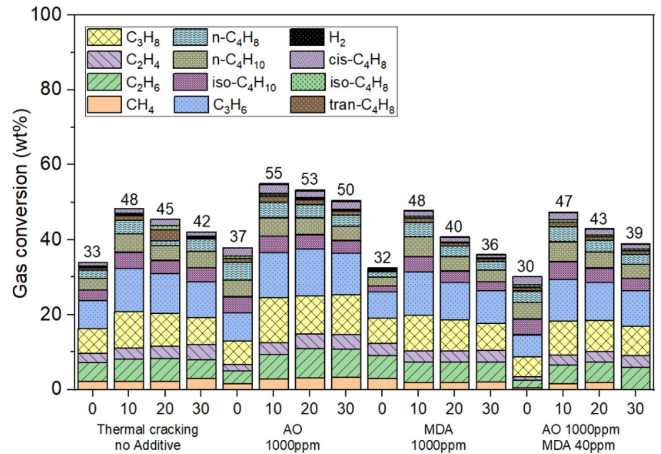


Fig. 16. Gas products selectivity of endothermic reaction with optimized Additives.

16 mg으로 크게 감소하였으며, 첨가제를 사용하지 않은 경우와 비교해 흡열량은 6.3% 증가하였고 코크 발생량은 75% 감소하였다. 즉 단일 첨가제 보다 첨가제를 혼합한 경우 흡열량 증가와 코크 감소에 더욱 효과적임을 확인하였다.

Fig. 15의 생성물의 액상조성 결과를 보면 최적 첨가제 혼합물 사용시 단독 첨가제 사용 대비 Aromatic과 Cyclo-Olefin의 조성이 감소하면서 코크 발생량도 감소했다. 반면 Linear Olefin의 조성은 증가하였으며 이는 높은 열용량을 가지고 있어 흡열량 증가로 이어진 것으로 판단된다. Fig. 16에서 생성물의 기상전환율 결과를 보면, 최적 첨가제 혼합물을 사용한 열분해의 기상전환율이 약간 감소하였으며 반응 초기 메탄과 에탄의 생성 비율이 감소하였다. 이는 관벽의 선형 코크 형성이 억제될 수 있음을 의미하며 코크 발생량 실험 결과 관벽 코크 발생량이 감소한 것과 일치하는 결과임을 알 수 있다.

4. 결 론

JP-7급 열안정성 연료를 사용하여 흐름형 반응기에서 열분해 반응을 수행하여 온도에 따른 흡열량과 코크 발생량을 확인하였으며,

흡열 특성을 유지하고 코크 발생량을 줄이기 위해 산화방지제와 금속 비활성화제를 첨가한 열분해 반응을 진행하였다. 첨가제를 사용하지 않은 열안정성 연료의 600 °C 열분해 반응에서 1331 Btu/lb의 흡열량과 64 mg의 코크 발생량이 측정된 반면, 산화방지제를 연료에 첨가한 경우 흡열량이 1407 Btu/lb, 코크 발생량이 31 mg로 측정되었고, 금속 비활성화제를 연료에 첨가한 경우 흡열량이 1409 Btu/lb, 코크 발생량이 24 mg로 측정되었다. 최적 농도의 산화방지제와 금속 비활성화제를 혼합한 첨가제를 사용한 경우 1415 Btu/lb의 흡열량과 16 mg의 코크 발생량이 측정되어, 흡열량은 6.3% 증가하였고 코크 발생량은 75% 감소하였다. 본 연구에서 첨가제를 통해 연료의 흡열 특성과 코크 발생 특성을 충분히 개선할 수 있음을 확인했고, 이들을 혼합해서 사용할 때 더욱 효과가 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 다양한 첨가제를 활용해 연료 열분해 특성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 2023년 국방과학연구소의 “액체연료 고온분해 및 점화특성 시험평가 연구”(과제번호 912969201)와 2024년 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의해 수행되었습니다.

Reference

- Heiser, W. H. and Pratt, D. T., *Hypersonic airbreathing propulsion*, Aiaa(1994).
- Heppenheimer, T. A., *Facing the Heat Barrier: A History of Hypersonics*, NASA(2006).
- Sobel, D. R. and Spadaccini, L. J., “Hydrocarbon Fuel Cooling Technologies for Advanced Propulsion,” (1997).
- Bouchez, M., “Scramjet Thermal Management,” *NATO*, (2010).
- Gulli, S., Maddalena, L. and Hosder, S., “Variable Transpiration Cooling: A New Solution for the Thermal Management of Hypersonic Vehicles,” 221(2012).
- Colwell, G. T. and Modlin, J. M., “Heat Pipe and Surface Mass Transfer Cooling of Hypersonic Vehicle Structures,” *J. Thermophys. Heat Transfer*, **6**(3), 492-499(1992).
- Li, Y., Sun, F., Xie, G. and Qin, J., “Improved Thermal Performance of Cooling Channels with Truncated Ribs for a Scramjet Combustor Fueled by Endothermic Hydrocarbon,” *Appl. Therm. Eng.*, **142**, 695-708(2018).
- Argyle, M. D. and Bartholomew, C. H., “Heterogeneous Catalyst Deactivation and Regeneration: A Review,” *Catalysts*, **5**(1), 145-269(2015).
- 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).
- Minami, I., “Molecular Science of Lubricant Additives,” *Applied Sciences*, **7**(5), 445(2017).
- Golubeva, I. A., Klinaeva, E. V. and Yakovlev, V. S., “Stabilization of Blended Diesel Fuels by Combinations of Antioxidants and Metal Deactivators,” *Chem. Technol. Fuels Oils*, **30**(3-4), (1994).
- Braun, J., “Additives,” *Lubricants and Lubrication*, 117-152(2017).
- Huang, H., Spadaccini, L. and Sobel, D., “Endothermic Heat-sink of Jet Fuels for Scramjet Cooling,” 3871(2002).
- 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).
- 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).
- Zhu, Y., Yu, C., Li, Z., Mi, Z. and Zhang, X., “Formation of Coke in Thermal Cracking of Jet Fuel Under Supercritical Conditions,” *Frontiers of Chemical Engineering in China*, **2**, 17-21 (2008).
- Li, H., Wang, Y., Wang, L., Zhang, X. and Liu, G., “Pyrolysis and Coke Deposition of JP-10 With Decalin in Regenerative Cooling Channels,” *Energy Fuels*, **36**(12), 6096-6108(2022).
- 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).

Authors

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

Hosun Aum: Graduate student, Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea; 201512491@kyonggi.ac.kr

Suyeon Ji: Undergraduate student, Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, Gyeonggi-do, 16227, Korea; suyeonji@kyonggi.ac.kr

Byunghun Jeong: Chief Researcher, 1st Division, Missile Research Center, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea; jbhun80@gmail.com

Hojin Choi: Principal Researcher, 1st Division, Missile Research Center, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea; 5genie@hanmail.net

Dongchang Park: Chief Researcher, 1st Division, Missile Research Center, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea; dcpark67@daum.net

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