

촉매 분해 에탄올을 연료로 사용하는 마이크로 가스터빈의 성능

최송이¹ · 구자예^{2,†} · 윤영빈²¹한국항공대학교 대학원²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부³서울대학교 기계항공공학부

Micro Gas Turbine Performance using Catalytic Cracked Ethanol as Fuel

Songyi Choi^{1,*}, Jaye Koo^{2,†} and Youngbin Yoon³¹Graduate School, Korea Aerospace University²School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University³School of Mechanical and Aeronautic Engineering, Seoul National University

Abstract

In order to verify the possibility of improving the combustion performance of ethanol using zeolite catalyst and the characteristics of nitrogen oxides and carbon monoxide emission, micro gas turbine experiments were performed using catalytic reaction products, ethanol and kerosene as fuels and the results were compared. The thrust of the catalytic reaction product was lower than that of kerosene, but it was improved by 5% on average compared with the use of ethanol. Nitrogen oxides and carbon monoxide emissions of the catalytic reaction products were measured to be very low overall compared to kerosene. As a result, when the ethanol was reformed using the zeolite catalyst, the engine performance could be improved while maintaining the environment friendliness of the ethanol.

초 록

제올라이트 촉매를 이용한 에탄올의 연소 성능 향상 가능성과 질소산화물 및 일산화탄소 배출 특성을 검증하기 위해 촉매 반응 생성물, 에탄올, 케로신을 연료로 사용하여 마이크로 가스터빈 엔진 구동 실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 촉매 반응 생성물의 추력은 케로신의 추력보다 낮았으나 에탄올을 사용했을 때에 비해 평균적으로 5% 정도 향상되었다. 촉매 반응 생성물의 질소산화물과 일산화탄소 배출량은 전반적으로 케로신에 비해 매우 낮게 측정되었다. 결론적으로 제올라이트 촉매를 이용하여 에탄올을 개질하는 경우, 에탄올의 친환경성을 유지하면서 엔진성능을 개선할 수 있는 가능성을 확인하였다.

Key Words : Zeolite ZSM-5(제올라이트 ZSM-5), Catalytic Dehydration(촉매 탈수), Ethanol Decomposition(에탄올 분해), Fuel Flexibility(연료 다변화)

1. 서 론

화석연료의 사용으로 인해 환경오염과 지구온난화 문제가 심화됨[1]에 따라 화석연료의 대체 연료에 대한 관심이 높아졌다. 재생 불가능한 화석연료와 달리

바이오매스로부터 생산이 가능한 재생 가능한 연료를 추진기관에 적용한 연구가 다수 수행되었다. 바이오에탄올은 바이오연료 중에서도 가장 잘 알려져 있다. 에탄올은 분자 내에 산소 원자를 포함하고 연소온도가 낮아 화석연료에 비해 질소산화물 배출량이 적지만 화석연료보다 윤활성이 낮고[2]발열량 등의 연소 성능이 낮다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 Gevo 社에서는 에탄올을 이소부틸알코올로 전환하여

Received: Jan 19, 2017 Revised: Apr 4, 2017 Accepted: Apr 20, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0116, E-mail: jykoo@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

케로신을 기반으로 하는 항공유의 블렌드스톡(blendstock)으로 사용되는 ATJ 연료(Alcohol-to-Jet fuel)를 생산하고 있다[3].

알루미늄노균산업 광물의 일종인 제올라이트 촉매는 석유 정제와 석유 화학 분야에서 중유 유출물의 수소화 분해, 이성질화를 통한 경휘발유의 옥탄가 강화 등을 위해 사용되며[4], 제올라이트 촉매의 한 종류인 제올라이트 ZSM-5는 에틸벤젠 합성, 크실렌의 이성질화, 톨루엔의 불균화반응, 메탄올 및 에탄올을 가솔린으로 전환하기 위한 목적의 촉매로 사용된다[5]. 제올라이트 ZSM-5는 에탄올에 탈수 작용을 하여 에틸렌과 물로 분해시킬 수 있다. 에탄올로부터 에틸렌과 물을 얻는 과정은 발효, 올리고머화, 수소첨가, 가열, 냉각 등의 공정을 거치는 ATJ 연료 생산 과정에 비해 매우 간단하다. 또한 생성물은 기체 상태로 존재하므로 에탄올을 에틸렌과 물로 분해하는 과정을 회박 예혼합 예증발 연소 시스템에 적용하면 예증발 과정이 별도로 필요하지 않다. 촉매 반응생성물의 발열량은 에탄올 보다 높으므로 발열량이 낮은 에탄올의 단점을 보완할 수 있으며 연료 공급 과정에서 촉매 탈수 과정을 거치면 연료를 액체 상태로 저장하는 것이 가능하다는 장점이 있다.

제올라이트 촉매를 이용하여 에탄올을 에틸렌과 물로 분해하는 연구는 다수 수행되었으나 대부분 제올라이트의 촉매 작용에 관한 학술적인 연구가 주된 내용이며, 이를 추진기관에 연료로 적용하기 위한 응용연구가 보고된 바는 미미하다[6-10].

이전 연구[11]에서 에탄올과 촉매 반응 생성물의 예혼합 시험을 통해 친환경성을 확인하였으며, 본 연구에서는 제올라이트 촉매작용으로 생성된 생성물과 케로신, 에탄올을 각각 연료로 사용했을 때의 추력, 질소산화물 및 일산화탄소 배출량을 측정하고 비교하여 촉매반응 생성물의 특성을 검증하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Figure 1은 마이크로 가스터빈 실험 장치의 개략도이다. 제올라이트 촉매 반응이 활발하게 일어나는 조건을 충족시키기 위해 카트리지 히터와 열교환 효율을

높이기 위한 구리 스프링, 제올라이트 촉매 반응로를 포함하는 열교환기를 구성하여 연료 공급 배관에 장치하였다.

Table 1에 실험에서 사용한 마이크로 가스터빈의 제원을 나타내었다. 마이크로 가스터빈은 Sophia precision 社의 J-850 터보제트 엔진으로 단일 원심식 압축기, 단일 반경류 터빈, 에놀러형 연소기가 장착되어 있고 최대 추력은 8 kgf, 최대 엔진 회전수 130000 rpm이다. 촉매 반응을 거쳐 기체 상태로 존재하는 연료를 이용하여 마이크로 가스터빈을 구동하기 위해 Fig. 2와 같이 기체 연료 인젝터를 설계하여 Fig. 3과 같이 장착하였다. 본래의 설계에 해당하는 액체 연료 노즐은 샤프트터널에 가공되어 있으며 외부 라이너(liner)의 반경 방향으로 연료가 분사된다. 기체 연료는 연료 도입관으로 유입되어 36° 간격으로 배열된 10개의 연료 노즐을 통해 축 방향으로 분사되도록 하였다. 원활한 점화를 위해 글로우 플러그 대신 11kV, 15 mJ의 스파크 플러그로 교체하여 실험을 수행하였다.

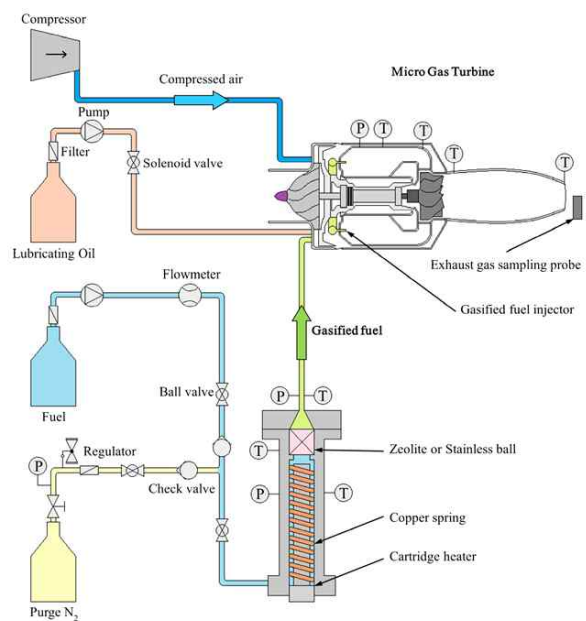


Fig. 1 Schematic of Experimental Set-up

Table 1 Specification of Micro Gas Turbine Engine

Compressor	Single Centrifugal
Turbine	Single Radial
Combustion Chamber	Annular
Maximum Thrust	8 kgf / 19.1 lbf
Maximum Rotor RPM	130,000
Maximum Air Flow	0.15 kg/sec
Compressor Ratio	2.70
Maximum EGT*	800°C
Full Throttle EGT	750°C
Maximum Fuel Consumption	270 ml/min
Ignition	Spark Plug
Fuel	JP-4 / Jet A-1

*Exhaust Gas Temperature

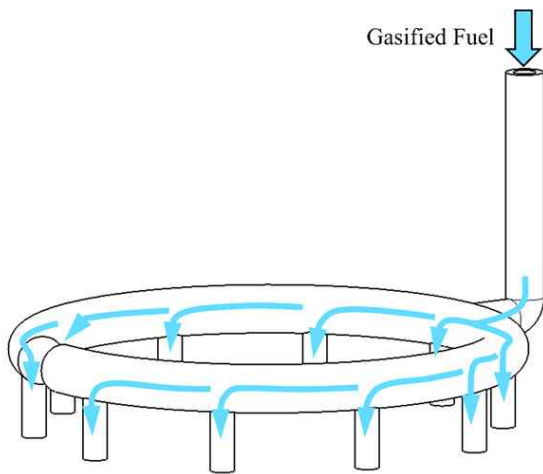


Fig. 2 Drawing of Gaseous Fuel Injector

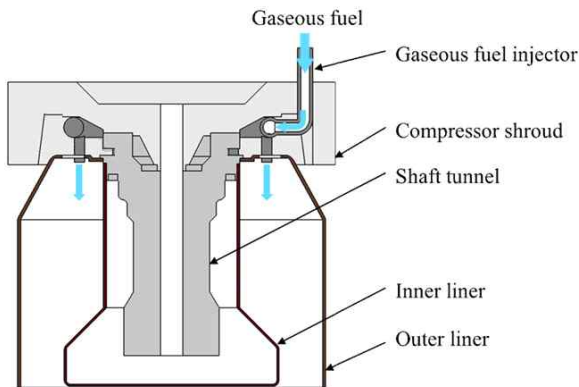


Fig. 3 Gaseous Fuel Injector Mounted in Micro Gas Turbine

2.2 실험 조건 및 방법

Inaba 등[8]의 실험 결과에 따르면 촉매 반응 온도가 400 °C일 때 제올라이트 H-ZSM-5의 에틸렌 선택성이 가장 높으며, 촉매 반응 생성물과 케로신, 에탄올의 연소 특성을 비교하기 위하여 모든 연료는 400 °C의 기체 상태로 공급하였다. 제올라이트 촉매는 AC material社에서 구입하였으며 SiO₂/Al₂O₃ 비가 300인 직경 3 mm의 구형(sphere)이다. 촉매는 실험에 사용하기 이전에 300 °C에서 2시간동안 소성(calcination) 과정을 거쳐 휘발물질을 제거하였다. 케로신과 에탄올을 연료로 사용할 때에는 동일한 열교환기를 사용하되, 촉매 반응으로는 제올라이트 촉매 대신 촉매와 동일한 직경을 가지는 스테인리스 볼 베어링을 충전하였다.

촉매 생성물, 케로신, 에탄올 연료는 펌프를 이용하여 열교환기로 공급하였고 나선형 유로를 통과하며 모두 400 °C로 가열되어 동일한 분사온도 조건에서 기체 상태로 연소기에 공급되었다. 연료의 공급 유량에 따라 추력, 엔진 회전수, 질소산화물 배출량과 일산화탄소 배출량을 측정하였으며, 질소산화물 배출량과 일산화탄소 배출량은 Testo社의 Testo 330-2 연소 가스 분석기로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 추력

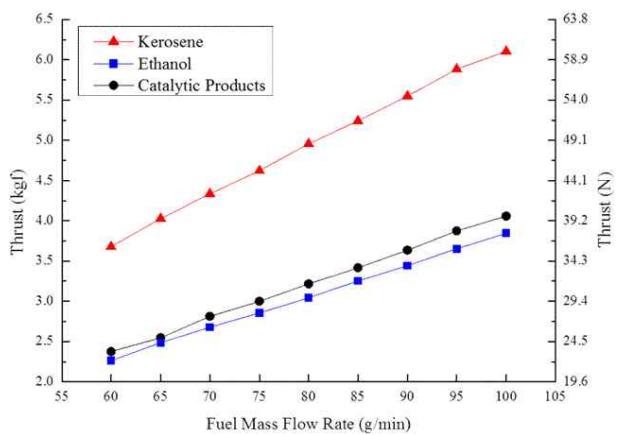


Fig. 4 Thrust with Various Fuel Mass Flow Rate

Figure 4는 케로신, 에탄올, 촉매 반응 생성물의 공급 유량에 따른 추력을 나타낸 그래프이다. 연료유량에 따라 추력이 선형적으로 증가하였으며 케로신을 연료로 사용했을 때의 추력이 가장 높았다. 촉매 반응 생성물을 연료로 사용했을 때는 케로신을 사용했을 때 추력의 62% 정도였고, 에탄올을 연료로 사용했을 때보다 평균 약 5% 추력이 높았다.

3.2 추력 당 연료 소모율(TSFC)

추력 당 연료소모율(Thrust Specific Fuel Consumption, TSFC)은 물리적으로 단위 추력을 얻기 위해 필요한 연료 유량이며 추력 당 연료 소모율이 낮을수록 같은 추력을 내기 위해 필요한 연료 소모량이 적음을 의미한다[12]. TSFC는 Eq. 1과 같이 표현되며 \dot{m}_f 는 연료의 질량유량, F 는 추력이다.

$$TSFC = \frac{\dot{m}_f}{F} \quad (1)$$

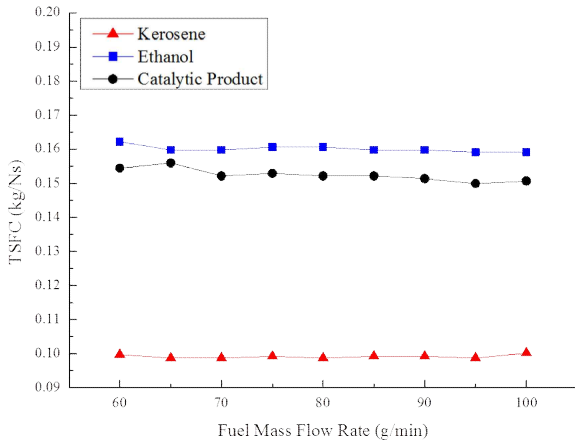


Fig. 5 Thrust Specific Fuel Consumption with Various Fuel Mass Flow Rate

Figure 5에 연료 공급유량에 따른 추력 당 연료 소모율을 도시하였다. 케로신, 촉매 반응 생성물, 에탄올의 순서로 추력 당 연료 소모율이 낮았다. Figure 4에서 연료 소모율 증가에 따라 추력이 선형적으로 증가함을 보였는데 이러한 영향으로 추력 당 연료 소모율은 연료의 공급량에 따라 거의 일정했다.

3.3 엔진회전수

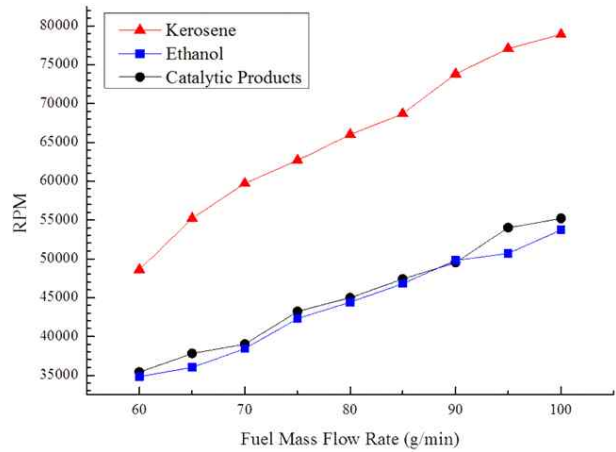


Fig. 6 Engine RPM with Various Fuel Mass Flow Rate

연료 유량에 따른 엔진 회전수를 Fig. 6에 그래프로 나타내었다. 엔진 회전수는 압축기를 통해 유입되는 공기 유량과 관련 있으며 회전수가 높을수록 유입되는 공기 유량이 높다. 연료 유량이 증가함에 따라 엔진 회전수도 선형적으로 증가하는 경향을 보였으며 케로신을 연료로 사용할 때 엔진 회전수가 가장 높았다. 대체적으로 연료 공급 유량이 촉매반응 생성물을 사용할 때의 엔진 회전수가 에탄올을 연료로 사용할 때보다 높았으나 일부 구간에서 Fig. 7과 같은 등가비변화로 오차가 발생하였다. 등가비는 제어시스템 및 인젝터 특성에 따라 다소 변화하는 경향을 보였으나 그 변화량은 매우 미미하였고 케로신의 경우 거의 일정했다.

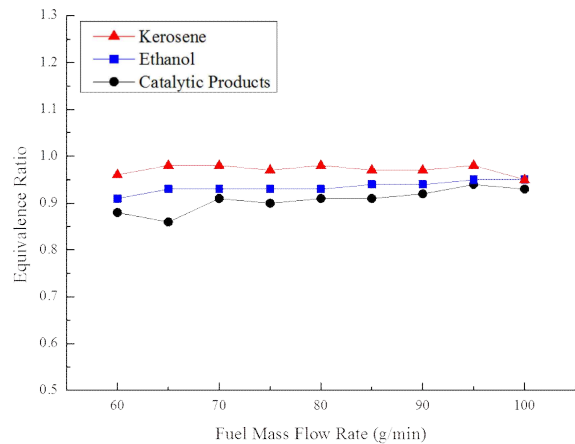


Fig. 7 Equivalence Ratio with Various Fuel Mass Flow Rate

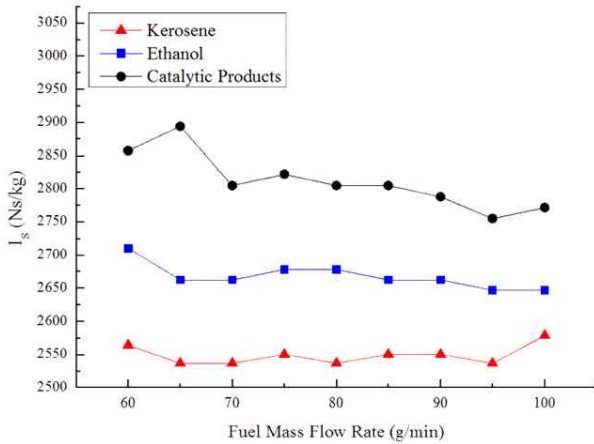


Fig. 8 Specific Thrust with Various Fuel Mass Flow Rate

3.4 비추력

비추력은 단위 공기 유량 당 추력을 의미하며 비추력이 높을수록 높은 추력 수준을 가진다. Equation 2는 비추력을 나타내는 식이다.

$$I_s = \frac{F}{\dot{m}_a} \quad (2)$$

Figure 8에 연료 유량에 따른 비추력을 그래프로 나타내었다. 비추력은 촉매 반응 생성물, 에탄올, 케로신의 순서로 높았다. 추력은 케로신을 연료로 사용할 때 가장 높았지만 Fig. 6에서 에탄올, 촉매 반응 생성물에 비해 케로신의 엔진 회전수가 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 케로신을 연료로 사용할 때 연료 소모량에 따라 증가한 공기 유량이 에탄올과 촉매 반응 생성물을 연료로 사용할 때 증가한 공기 유량에 비해 높기 때문에 비추력이 더 낮은 것으로 판단된다. 또한 65 g/min 조건에서의 촉매생성물의 순간적인 비추력의 증가는 Fig. 7에서와 같이 제어시스템 오차 또는 분사기 특성에 따른 당량비 감소가 원인으로 추정된다. 이는 약간 연료과농 상태로 운용되어 Fig. 5에서와 같이 연료소모량이 증가하는 것으로 부터도 추정할 수 있다.

3.5 질소산화물 및 일산화탄소 배출량

Figure 9와 Fig. 10은 각각 연료 유량에 따른 질소산화물 배출량과 일산화탄소 배출량을 15% 산소 수준에

서의 농도로 보정한 값을 나타낸 그래프이다. 케로신의 질소 산화물 배출량은 연료 공급 유량이 60 g/min일 때와 65 g/min일 때 0에 가까워 에탄올과 촉매 반응 생성물의 배출량에 비해 낮았으나 연료공급 유량이 증가함에 따라 높아지는 경향을 보였다. 에탄올과 촉매 반응 생성물의 질소 산화물 배출량은 연료 공급 유량이 60 g/min, 65 g/min일 때를 제외하고는 거의 0에 가까웠으며 60 g/min일 때보다 65 g/min일 때의 배출량이 더 낮았다. 또한 촉매 반응 생성물의 질소산화물 배출량이 에탄올보다 다소 높았다. 질소산화물 결과에서 저유량인 경우 케로신 연료는 거의 검출되지 않는데, 이와 같은 결과는 마이크로가스터빈을 사용하여 길이방향 연소영역이 매우 짧고 배기가스의 온도가 비교적 낮아 NOx 생성량 자체가 낮게 측정되고 있어 측정기기의 오차가 발생한 것으로 측정된다.

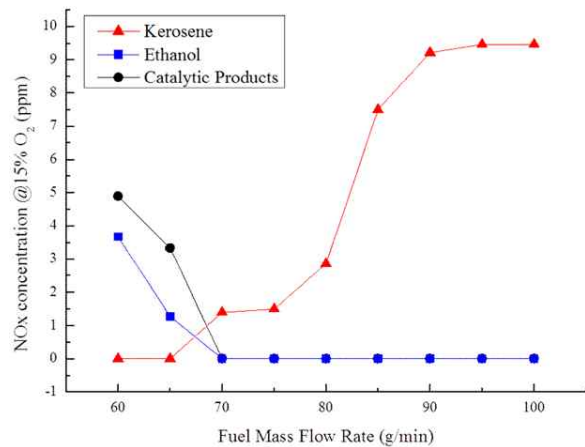


Fig. 9 NOx Concentration with Various Fuel Mass Flow Rate

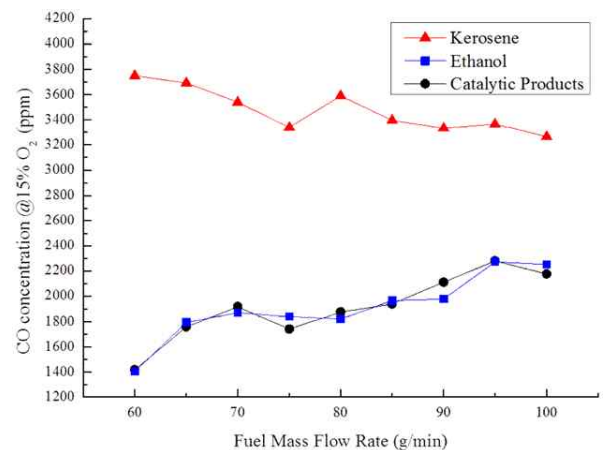


Fig. 10 CO Concentration with Various Fuel Mass Flow Rate

또한 유량 증가에 따른 인젝터의 구체적인 분무성능이 고려되지 않아 낮은 연료 유량에서의 질소산화물 발생량이 제대로 측정되지 않는 한계점이 있다.

일산화탄소 배출량은 대체적으로 당량비와 유사한 경향을 보이며 케로신을 연료로 사용할 때 가장 높았고 연료 공급 유량이 증가할수록 낮아지는 경향을 보였다. 80 g/min 이전에는 질소산화물 측정결과와 마찬가지로 분무성능 저하에 따라 다소 상이한 경향을 보이는 것으로 추정된다. 에탄올과 촉매 반응 생성물의 일산화탄소 배출량은 연료 공급 유량이 증가할수록 당량비가 다소 증가함에 따라 CO 발생량도 높아지는 경향을 보였으나 전체적으로 케로신보다 약 두배정도 낮은 수치를 보였다. 배출물의 경향성으로 보았을 때 촉매분해 생성물은 에탄올과 유사한 특성을 보이고 에탄올은 케로신보다 낮은 오염물질 배출량을 나타낸다고 볼 수 있다.

4. 결 론

바이오 에탄올의 친환경성을 기반으로 기존의 케로신 연료보다 낮은 열량을 가진 에탄올을 제올라이트 촉매를 이용해 연소 성능을 향상할 수 있는 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 촉매 반응 생성물, 케로신, 에탄올을 마이크로 가스터빈엔진의 연료로 사용하여 추력, 질소산화물 및 일산화탄소 배출량을 비교하였다. 촉매 반응 생성물을 사용했을 때의 추력은 케로신을 사용했을 때의 추력보다 낮았으나 에탄올을 사용했을 때에 비해 평균적으로 5% 정도 향상되었으며 추력당 연료소모율은 에탄올에 비해 낮았고 비추력은 에탄올에 비해 높았다. 질소산화물 배출량은 마이크로 가스터빈 장치 및 계측장치에 한계로 다소 오차를 보였으나 에탄올 및 촉매 반응 생성물이 대체적으로 훨씬 낮게 측정되었다. 또한 촉매 반응 생성물의 일산화탄소 배출량은 당량비 변화에 민감하게 반응하는 경향을 보였으며 전반적으로 케로신에 비해 매우 낮게 측정되었다. 결론적으로 제올라이트 촉매를 이용하여 에탄올을 개질하는 경우, 에탄올의 친환경성을 유지하면서 엔진성능을 개선할 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 항공우주부품기술개발사업의 지원(10067074) 및 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다.

References

- [1] A. Galadima and O. Muraza, "Zeolite catalysts in upgrading of bioethanol to fuels range hydrocarbons: A review," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 31, pp. 1-14, Nov. 2015.
- [2] J. F. Schornick, R. T. Farr, and J. K. DiCampli, "Liquid biofuels in the aeroderivative gas turbine," *General Electric Report*, Houston, Texas, U.S.A, 2010.
- [3] G. Johnston, "Alcohol to Jet (AtJ)," *Proc. of Contribution to Paris Air Show*, Jun. 2013.
- [4] J. Weitkamp, "Zeolites and catalysis," *Solid State Ionics*, vol. 131, no. 1, pp. 175-188, June 2000.
- [5] R. Le Van Mao, P. Levesque, G. McLaughlin, and L. Dao, "Ethylene from ethanol over zeolite catalysts," *Applied Catalysis*, vol. 34, pp. 163-179, April 1987.
- [6] C. B. Phillips and R. Datta, "Production of ethylene from hydrous ethanol on H-ZSM-5 under mild conditions," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 36, no. 11, pp. 4466-4475, Nov. 1997.
- [7] I. Takahara, M. Saito, M. Inaba, and K. Murata, "Dehydration of ethanol into ethylene over solid acid catalyst," *Catalysis Letters*, vol. 105, no. 3, pp. 249-252, Dec. 2005.
- [8] M. Inaba, K. Murata, M. Saito, and I. Takahara, "Ethanol conversion to aromatic hydrocarbons over several zeolite catalysts," *Reaction Kinetics and Catalysis Letters*, vol. 88, no. 1, pp. 135-141, June 2006.
- [9] X. Zhang, R. Wang, X. Yang, and F. Zhang,

- "Comparison of four catalysts in the catalytic dehydration of ethanol to ethylene," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 116, no. 1, pp. 210-215, Dec. 2008.
- [10] R. Johansson, S. L. Hruby, J. Rass-Hansen, and C. H. Christensen, "The hydrocarbon pool in ethanol-to-gasoline over HZSM-5 catalysts," *Catalysis Letters*, vol. 127, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2009.
- [11] Songyi Choi and Jaye Koo, "Improvement of Ethanol Combustion Performance by Catalytic Dehydration," *Proc. of 2016 SASE Fall Conference*, Nov. 2016.
- [12] W. Sirignan and F. Liu, "Performance increases for gas-turbine engines through combustion inside the turbine," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 15, no. 1, pp. 111-118. Jan. - Feb. 1999.