

고탄소알코올/경유 혼합유를 이용한 디젤엔진 성능 특성 비교

권재성 · 양정현 · 김범수[†]

경상국립대학교 기계시스템공학과

A Comparative Study on Diesel Engine Performance with Higher Alcohol-diesel Blends

JAESUNG KWON, JEONGHYEON YANG, BEOMSOO KIM[†]

Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University, 2 Tongyeonghaean-ro, Tongyeong 53064, Korea

[†]Corresponding author :
kimbs@gnu.ac.kr

Received 30 October, 2023
Revised 18 November, 2023
Accepted 24 November, 2023

Abstract >> In this study, combustion experiments were conducted at various engine speeds under full-load conditions using a single-cylinder diesel engine by blending butanol, pentanol, and octanol with diesel at a volume ratio of 10%. Experimental results revealed that higher alcohol-diesel blends resulted in lower brake torque and brake power than pure diesel due to the lower calorific value and the cooling effect during evaporation. An evident improvement in the brake thermal efficiency of the blended fuels was observed at engine speeds below 2,000 rpm, with the butanol blend exhibiting the highest thermal efficiency overall. Furthermore, the brake-specific fuel consumption of the higher alcohol-diesel blends was lower than that of pure diesel at speeds below 2,200 rpm. When using blended fuels, the exhaust gas temperature decreased under lean mixture conditions due to heat loss to the air and the cooling effect from fuel evaporation.

Key words : 1-butanol(1-부탄올), 1-pentanol(1-펜탄올), 1-octanol(1-옥탄올), Brake power(제동 출력), Brake thermal efficiency(열효율)

1. 서론

증가하는 전 세계 에너지 수요와 환경오염 문제를 해결하기 위해서는 지속 가능하고 깨끗한 대체 연료에 대한 연구가 필수적이다. 다양한 열기관 중에서도 디젤 엔진은 높은 효율성과 신뢰성을 바탕으로 수송 분야에서 널리 사용되고 있으나 환경과 인체에 유해

한 배기가스 배출 문제 때문에 연소 기술 최적화 및 소형화를 비롯하여 다양한 대체 연료의 적용 방안에 대해서도 지속적인 연구 활동이 이루어지고 있다¹⁻³⁾.

대체 연료 중에서도 알코올 기반 첨가제는 스모크를 포함한 유해물질 배출을 줄이는 데 효과적이며, 기반 산업이 형성되어 있어 연료에 대한 접근성이 높다는 장점이 있다. 알코올 연료 중에서는 저탄소알

코올로 분류할 수 있는 에탄올과 메탄올을 디젤 엔진에 적용한 연구가 다수 보고되었다^{4,6)}. 그러나 에탄올과 메탄올은 에너지 밀도가 낮기 때문에 디젤 엔진에 사용할 경우 성능 저하 우려가 있고, 디젤과 혼합하여 사용할 경우에도 상 분리 문제로 인해 혼합 비율에 한계가 있으며, 부식성으로 인해 연료 계통의 손상을 유발할 수 있다. 따라서 별도의 연료 혼합 장치나 이중 분사 방식을 채택해야 하므로 기존 디젤 엔진의 구조 변경이 요구되며, 연료 공급 시스템의 손상을 막기 위해서는 내식성이 좋은 재료를 사용하거나 코팅 처리를 통한 보완이 필요하다.

반면 부탄올, 펜탄올 등의 고탄소알코올은 에너지 밀도가 상대적으로 높고, 세탄가가 높아 압축 착화 방식의 디젤 엔진에 사용하기에 적합하며, 소수성을 나타내기 때문에 물과의 혼합이 억제되어 연료 계통의 부식이 발생하지 않는다. 또한 디젤 연료와의 혼합 후에도 상 분리 문제가 나타나지 않아 안정적인 혼합 상태가 유지되므로 저탄소알코올을 사용할 때와는 달리 기존의 디젤 엔진에 대한 추가 장치나 구조 변경이 요구되지 않는다는 장점이 있다⁷⁻⁹⁾.

과거에는 고탄소알코올의 생산 비용이 높았고 식품 산업에서의 수요가 많아 제한된 공급하에서 연료로의 사용이 어려웠다. 최근에는 미생물의 유전자 조작을 통한 알코올 합성 기술의 발달로 생산량 증가를 기대할 수 있으며, 바이오매스의 가스화를 통해 생산된 합성가스의 촉매 반응을 이용해 고탄소알코올을 생산할 수 있다^{10,11)}. 또한 이산화탄소로부터 고탄소알코올을 합성할 수 있어 온실가스 감축에 기여할 수 있고, 친환경적으로 내연 기관용 재생 연료를 생산할 수 있다. 따라서 고탄소알코올은 대체 연료로서의 잠재력이 높다고 평가할 수 있다¹²⁾.

본 연구에서는 소형 단기통 디젤 엔진을 대상으로 부탄올, 펜탄올, 옥탄올 3종의 고탄소알코올과 경유 혼합유를 사용하여 연소 실험을 수행하였으며, 다양한 엔진 속도의 전부하 조건에서 물리적 특성이 다른 고탄소알코올 첨가가 엔진 성능에 미치는 영향을 비교하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치에 대한 개요도이며, 주요 엔진 제원은 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용된 엔진은 자연 흡기 압축 착화 방식의 디젤 엔진이며 공랭식 냉각을 사용한다. 엔진에 흡입되는 공기량은 스로틀 밸브를 이용해 제어한다. 엔진 부하는 와전류 다이내모미터에 인가되는 전류량을 조절하여 제어하고, 배기가스 온도와 유량을 포함한 다양한 실험 데이터 수집을 위한 각종 센서류는 계기판에 연결된다. 수집된 측정 데이터를 기반으로 PC에 내장된 데이터 분석 프로그램(MT-502; ESSOM, Bangkok, Thailand)을 이용하여 열효율, 제동 출력, 공연비 등 엔진 성능과 관련된 변수를 계산하였다.

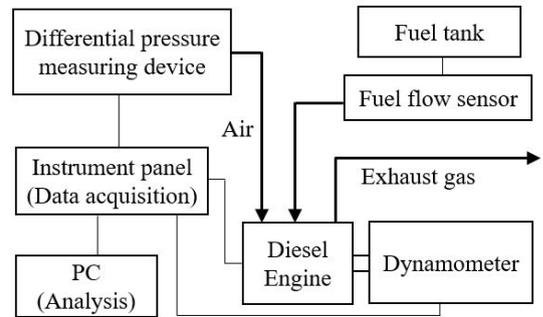


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1. Test engine parameters

Parameter	Specifications
Model	MIT-178F
Number of cylinder	1
Ignition	Compression ignition
Cooling system	Air-cooled
Rated power	5.22 kW @ 3,000 rpm
Swept volume	298.6 cm ³
Compression ratio	21.1

2.2 실험 방법

본 연구에서는 부탄올, 펜탄올, 옥탄올을 부피비 기준 각각 10%씩 경유에 혼합하였고, 혼합유를 차례대로 D90B10, D90P10, D90O10으로 명명하였다. 순수한 경유는 D100으로 명명하였다. Table 2는 실험에 사용된 연료의 물리화학적 특성을 나타내며, 이를 통해 알코올 연료의 경우 분자에 포함된 탄소 원자의 수가 많아질수록 저위발열량(lower heating value, LHV) 및 점도가 증가하고, 산소 함유율이 낮아짐을 알 수 있다.

상기 3종의 고탄소알코올과 경유 혼합유의 성능 특성 비교를 위해 전부하 조건에서 실험을 수행하였으며, 엔진 속도는 1,400-2,500 rpm 범위에서 100 rpm 간격으로 설정하여 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제동 토크(brake torque) 및 제동 출력(brake power)

Fig. 2는 4종의 연료를 사용하여 전부하 조건에서 연소 실험을 수행한 결과 측정된 제동 토크를 다양한 엔진 속도 범위에 대해 보여준다. D100의 제동 토크는 1,400 rpm에서 2,500 rpm에 도달하기까지 꾸준히 증가하며, 1,400-1,500 rpm의 저속 영역을 제외하면 4종의 연료 중 가장 높은 수치를 보여준다. 알코올/경유 혼합유 중에서는 D90O10의 제동 토크가 대

부분의 엔진 속도 범위에서 가장 높게 측정되었다. 알코올/경유 혼합유를 비교하면 2,300-2,400 rpm을 제외한 나머지 속도에서 옥탄올, 펜탄올, 부탄올 혼합유 순으로 제동 토크가 높게 나타난다. 이는 연료별 LHV를 고려할 때 예상에 부합되는 결과이며, 실험에 사용된 3종의 알코올 간 증발열의 차이는 크지 않으므로 연료 분사 초기 증발에 의한 점화 지연은 제동 토크에 큰 영향을 주지 않는 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 3은 전부하 조건에서의 제동 출력을 나타낸다. 모든 연료에 대해 주어진 엔진 속도 범위에서 제동 출력은 증가하는 경향을 보여준다. 알코올/경유 혼합유를 사용할 경우 저속 영역에서 D100 대비 높은 제동 출력이 발생하며, 엔진 속도가 증가할수록

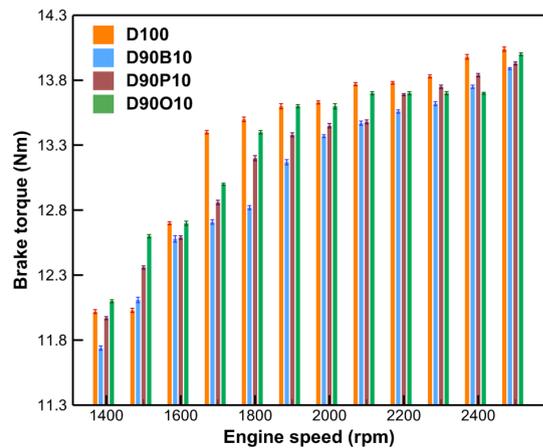


Fig. 2. Brake torque at different speeds at full load

Table 2. Properties of diesel in comparison with higher alcohols

Properties	1-Butanol	1-Pentanol	1-Octanol	Diesel
Lower heating value (MJ/kg)	33.1	34.7	37.6	42.9
Latent heat of vaporization (MJ/kg)	0.58	0.50	0.56	0.25
Cetane number	17	18.2	37	>52
Density (m ³ /kg)	814	800	820	840
Kinematic viscosity at 20°C (mm ² /s)	3.6	5.0	10.2	3.4
Oxygen (wt.%)	21.6	18.2	12.3	0
Stoichiometric A/F	11.16	11.73	12.7	14.9

D100 대비 출력 저하가 발생한다. 3종의 알코올 혼합유 중에서는 옥탄올 혼합유가 전반적으로 가장 높은 출력을 발생시키며, 펜탄올, 부탄올 혼합유 순으로 출력이 감소하는 경향을 보여준다.

3.2 열효율(brake thermal efficiency) 및 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption)

Fig. 4는 엔진 속도에 따른 열효율(brake thermal efficiency, BTE) 변화를 나타낸다. D100의 경우 2,200 rpm에서 최대 19.1%의 BTE를 보여주며, 알코올/경

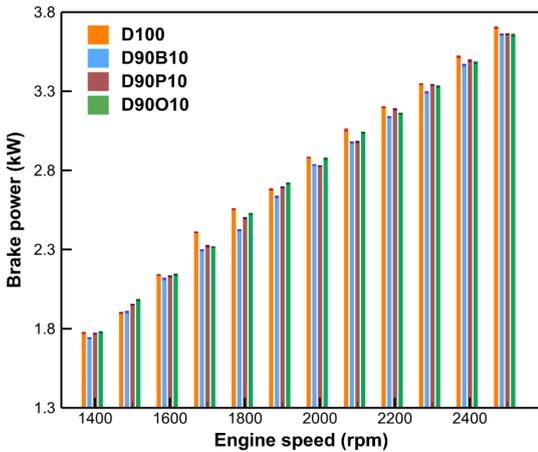


Fig. 3. Brake power at different speeds at full load

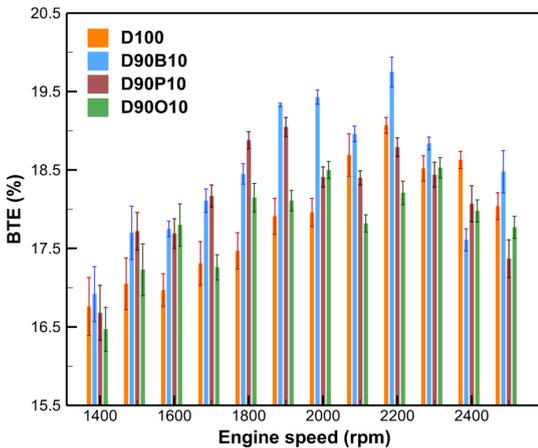


Fig. 4. Brake thermal efficiency at different speeds at full load

유 혼합유 중에서는 부탄올 혼합유의 효율이 전반적으로 가장 높게 관찰된다. 모든 연료유에 대해 2,200 rpm 부근에서 최대 BTE가 관찰되며, 알코올/경유 혼합유를 사용할 경우에는 2,000 rpm 이하에서 효율 개선이 뚜렷하게 나타난다. 이는 연료에 포함된 산소 성분의 영향으로 연소 효율이 향상되기 때문이며, 분자 내 산소 함유율과 BTE의 경향이 전반적으로 일치한다. 고탄소알코올은 저탄소알코올 대비 점도가 높아 연료의 미립화 과정이 지연되어 공기와의 혼합 과정에서 균일한 혼합기 형성에 불리한 측면이 있거나 낮은 증발열과 높은 세탄가로 인한 우수한 점화 특성이 이를 극복한 것으로 판단된다. 3종의 혼합유 중에서 옥탄올 혼합유의 경우 엔진 속도 2,200 rpm 이하에서 부탄올, 펜탄올 혼합유 대비 열등한 효율을 보여주지만 D100과 비교할 경우에는 상대적 우위에 있다.

Fig. 5는 엔진 속도에 따른 제동 연료 소비율(brake specific fuel consumption, BSFC)을 나타낸다. BSFC는 엔진이 생산하는 단위 출력당 소비되는 연료량을 의미하며, 연료의 경제성을 평가하는 지표로서 열효율과는 반대 경향을 나타낸다. 알코올/경유 혼합유는 순수한 디젤보다 LHV가 낮기 때문에 더 많은 연료를 사용해야만 디젤과 유사한 출력을 생산할 수 있을 것 같지만, 혼합유 사용 시 엔진의 열효율 개선으

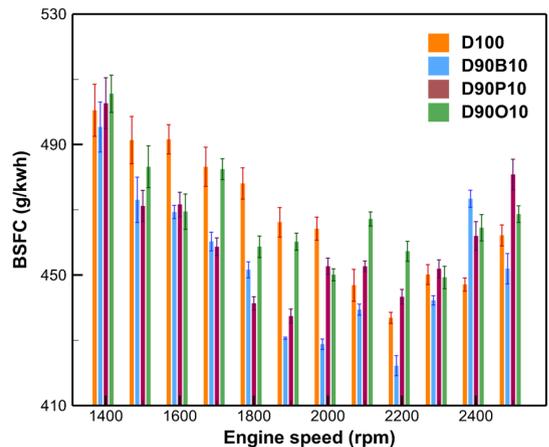


Fig. 5. Brake specific fuel consumption at different speeds at full load

로 인하여 2,200 rpm 이하에서는 순수한 디젤보다 BSFC가 감소하게 된다. 그러나 엔진 속도가 최대 열효율이 관찰되는 엔진 속도보다 높아지게 되면 혼합유의 BSFC가 D100보다 더 높아지는데, 이는 엔진 속도가 증가함에 따라 연료와 공기의 혼합기 형성 시간이 짧아짐과 동시에 혼합유의 높은 증발열로 인해 점화가 지연되면서 D100보다 열효율이 감소하기 때문이다. 이러한 문제는 연료의 분사 시기나 분사 압력 최적화를 통해 해결할 수 있을 것으로 기대되며, 이를 위한 후속 연구가 필요해 보인다.

3.3 배기가스 온도(exhaust gas temperature) 및 공연비(air-fuel ratio)

Fig. 6은 엔진 속도에 따른 배기가스 온도(exhaust gas temperature, EGT)의 변화를 나타낸다. 디젤 엔진의 EGT는 엔진의 연소 효율 및 성능을 이해하는데 중요한 변수로서 연료의 특성, 냉각기의 성능, 공연비(air-fuel ratio, A/F) 등에 의해 영향을 받는다. 모든 연료에 대해 엔진 속도가 증가하면 EGT는 증가한다. D90B10의 EGT가 전반적으로 가장 낮게 관찰되는데, 엔진 속도가 2,400 rpm 이상에서는 D100보다 높은 EGT를 보여준다. EGT는 터보 차저의 효율, 배기 물질 농도, 열관리 측면에서 중요한 변수이지만 본 실험에 사용된 장치는 자연 흡기 방식의 엔진이

므로 알코올/경유 혼합유 사용에 따라 연소 과정에서 냉각 효과로 인해 D100 대비 상대적으로 낮은 연소가 진행되었다. Fig. 7을 보면 A/F가 D100 대비 높은 1,900 rpm 이하에서 EGT 감소가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 알코올/경유 혼합유는 Table 2에 나타낸 바와 같이 연료에 함유된 산소 성분으로 인해 화학양론적 A/F가 디젤보다 낮다. 따라서 희박한 혼합기가 형성되는 엔진 속도에서는 초과 흡입된 산소로 인해 열손실이 발생하고, 알코올 혼합에 따른 증발열 증가로 냉각 효과가 더해지면서 희박 연소로 인한 연소 효율 증가를 상쇄하여 EGT가 감소하는 것으로 판단된다. 반면, 엔진 속도가 2,300 rpm 이상인 조건에서는 알코올/경유 혼합유를 사용한 경우의 EGT가 D100보다 높게 측정되었는데, 이는 연소실 내부에 농후한 혼합 기체가 형성되어 연료의 증발 과정에서 열손실이 감소하고, 부족한 산소로 인해 불완전 연소가 진행되거나 연소 반응이 지연되면서 연소실에서 배기가스가 배출되는 과정에서도 잔여 공기와 화학 반응이 진행되어 배기관에서 측정된 온도가 D100보다 높아졌기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부탄올, 펜탄올, 옥탄올을 부피비 10%로 디젤에 혼합하여 전부하 조건의 다양한 엔진

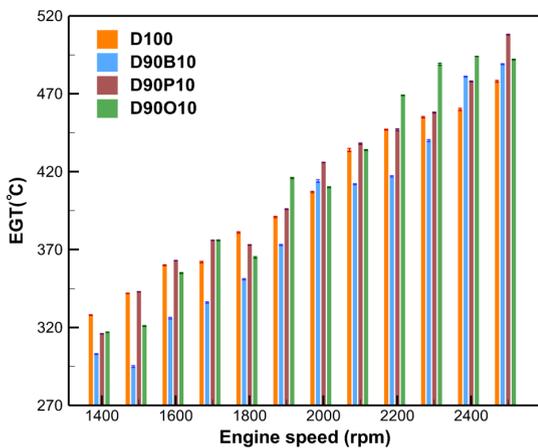


Fig. 6. Exhaust gas temperature at different speeds at full load

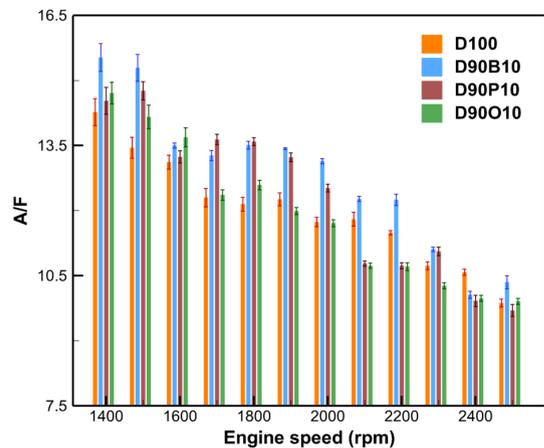


Fig. 7. Air-fuel ratio at different speeds at full load

속도에 대해서 연소 실험을 수행하였으며, 순수한 경유를 사용한 실험을 기준 조건으로 엔진의 성능 특성 변화를 관찰하고 고찰하였다.

1) 고탄소알코올은 에탄올이나 메탄올 대비 LHV가 높지만 순수한 디젤보다는 LHV가 낮고, 증발열에 의한 냉각 효과로 연소 반응이 억제되어 제동 토크와 제동 출력은 순수한 경유보다 낮게 측정되었다.

2) 알코올/경유 혼합유는 산소를 함유하고 있기 때문에 순수한 경유보다 연소 효율이 높아지는데, 실험에 사용된 3종의 알코올 중에서는 부탄올 혼합유의 BTE가 전반적으로 가장 높게 관찰되었고, 엔진 속도 2,000 rpm 이하에서 모든 알코올/경유 혼합유의 전반적인 BTE 개선이 나타난다.

3) 알코올/경유 혼합유를 사용하면 최대 열효율이 관찰되는 2,200 rpm 이하에서는 순수한 경유보다 BSFC가 낮으나 2,300 rpm 이상에서는 열효율이 감소하면서 BSFC가 증가한다.

4) 연소실 내부의 혼합기가 희박한 조건에서는 알코올/경유 혼합유 사용 시 증발열에 의한 냉각 효과와 초과 흡입된 공기에 의한 열손실로 인해 EGT가 감소하는 경향이 있으나 혼합기가 농후한 조건에서는 불완전 연소 및 점화 지연으로 인해 EGT가 높아진다.

References

1. A. Fayyazbakhsh and V. Pirouzfard, "Determining the optimum conditions for modified diesel fuel combustion considering its emission, properties and engine performance", *Energy Conversion and Management*, Vol. 113, 2016, pp. 209-219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.058>.
2. K. N. Balan, U. Yashvanth, P. B. Devi, T. Arvind, H. Nelson, and Y. Devarajan, "Investigation on emission characteristics of alcohol biodiesel blended diesel engine", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 41, No. 15, 2019, pp. 1879-1889, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549166>.
3. S. Kim, J. K. Kim, C. K. Park, and J. H. Ha, "Study on fuel characteristics depending on mixing ratio of bio-butanol and bio-ethanol", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 704-711, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.704>.
4. A. Bilgin, O. Durgun, and Z. Sahin, "The effects of diesel-ethanol blends on diesel engine performance", *Energy Sources*, Vol. 24, No. 5, 2002, pp. 431-440, doi: <https://doi.org/10.1080/00908310252889933>.
5. M. Lapuerta, O. Armas, and J. M. Herreros, "Emissions from a diesel-bioethanol blend in an automotive diesel engine", *Fuel*, Vol. 87, No. 1, 2008, pp. 25-31, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.007>.
6. Z. Huang, H. Lu, D. Jiang, K. Zeng, B. Liu, J. Zhang, and X. Wang, "Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles", *Bioresource Technology*, Vol. 95, No. 3, 2004, pp. 331-341, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.018>.
7. S. J. M. Algayyim, A. P. Wandel, T. Yusaf, and I. Hamawand, "The impact of n-butanol and iso-butanol as components of butanol-acetone (BA) mixture-diesel blend on spray, combustion characteristics, engine performance and emission in direct injection diesel engine", *Energy*, Vol. 140, Pt. 1, 2017, pp. 1074-1086, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.044>.
8. L. Li, J. Wang, Z. Wang, and H. Liu, "Combustion and emissions of compression ignition in a direct injection diesel engine fueled with pentanol", *Energy*, Vol. 80, 2015, pp. 575-581, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.013>.
9. Sidharth and N. Kumar, "Performance and emission studies of ternary fuel blends of diesel, biodiesel and octanol", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 42, No. 18, 2020, pp. 2277-2296, doi: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607940>.
10. W. Higashide, Y. Li, Y. Yang, and J. C. Liao, "Metabolic engineering of *Clostridium cellulolyticum* for production of isobutanol from cellulose", *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 77, No. 8, 2011, pp. 2727-2733, doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.02454-10>.
11. R. Andersson, M. Boutonnet, and S. Järås, "Higher alcohols from syngas using a K/Ni/MoS₂ catalyst: Trace sulfur in the product and effect of H₂S-containing feed", *Fuel*, Vol. 115, 2014, pp. 544-550, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.057>.
12. H. Li, P. H. Opgenorth, D. G. Wernick, S. Rogers, T. Y. Wu, W. Higashide, P. Malati, Y. X. Huo, K. M. Cho, and J. C. Liao, "Integrated electromicrobial conversion of CO₂ to higher alcohols", *Science*, Vol. 335, No. 6076, 2012, pp. 1596, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1217643>.