Check for updates
Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 3, 2022, pp. 255~260
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.3.255
KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

수소 직접 분사를 통한 2행정 소형 엔진의 성능 향상에 관한 연구

최지선 · 김용래† · 김선엽 · 박철웅 · 최 영

한국기계연구원 모빌리티동력연구실

Performance Improvement of a Small-Sized Two Stroke Engine by Hydrogen Direct Injection

JISEON CHOI, YONGRAE KIM†, SEONYOEB KIM, CHEOLWOONG PARK, YOUNG CHOI

Department of Mobility Power Research, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author : yrkim@kimm.re.kr

Received 11 May, 2022
Revised 20 June, 2022
Accepted 22 June, 2022

Abstract >> Hydrogen gas fuel was applied to a small-sized two stroke engine for a mobile power source instead of gasoline fuel. Port fuel supply showed a limitation in terms of power due to the back fire at the engine intake manifold. So in this study, hydrogen direct injection system was applied to overcome this drawback by using a low pressure direct gas injector. The result from this strategy showed that hydrogen direct injection improved fuel efficiency as well as torque and power comparing to the port fuel supply system.

Key words : Hydrogen(수소), Direct injection(직접 분사), Two-stroke (2행정), Small engine(소형 엔진), Fuel efficiency (연비)

1. 서 론

전 세계의 늘어나는 온실가스 배출량에 대비하기 위하여 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change)는 제48차 총회에서 최종 2050년경에 탄소중립을 달성하여야 한다는 경로를 제시하였다[1]. 이 외에도 많은 나라가 탄소중립을 위해 탄소에너지에서 수소에너지로의 전환에 힘쓰고 있으며 국내에서도 이미 수소에너지가 환경문제를 해결해줄 수 있는 대체 에너지라고 판단하고 있다. 이에 수소의 여러 분야에 대한 장, 단기 시나리오 분석을 해왔으며 국내 수소의 생산, 소비, 유통 등에 대한 통계를 통해 수소 정책 수립에 필요한 기초 자료를 제공해왔다[2-4].

수소는 디젤, 가솔린 등의 기존 화석 연료보다 가연한계 범위가 넓어 초희박연소가 가능하며, 높은 자가 점화 온도로 인해 압축비 설정이 자유롭다는 장점을 가지고 있다. 하지만 낮은 점화 에너지를 가지고 있어 실린더 내에 고온의 열점이 발생 시 이로 인한 역화 현상이 일어날 수 있는 단점이 있다[5].

수소를 연료로 사용하는 엔진 개발은 이전에도 많은 연구가 수행되어 왔으나, 본 연구에서는 소형 오토바이, 모형 비행기 및 드론 등에 주로 활용되고 있는 소형 엔진에 관심을 두고자 한다. 특히 항공 드론

2022 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

에는 배터리가 주로 동력원으로 사용되고 있는데, 사용이 간편한 장점을 가지고 있는 반면 짧은 비행시간의 단점이 있다. 그러나, 최근 드론의 운용 범위가 확대되며 비행시간의 증대 필요성이 증가되었고, 이를 극복하기 위해 배터리 대비 에너지 밀도가 큰 엔진 동력원 역시 필요로 하여 국내에서도 대한항공, 한국항공우주연구원 등에서 관련된 연구가 진행되고 있다[6]. 그러나, 여전히 가솔린 기반의 시스템으로 배출가스 문제가 존재하기 때문에 수소를 연료로 하는 소형 엔진 개발이 본 연구의 목표이다.

기존에 진행된 소형 수소 엔진 연구에서는 포트 공급 방식으로 인한 역화 발생으로 출력이 제한되는 결과를 보였다[7]. 이번에는 이를 극복하기 위하여 직접 분사 방식을 채택하였는데, 이는 출력뿐만 아니라 효율도 향상시킬 수 있다는 보고도 이루어지고 있다[8]. 직접 분사 방식은 포트 공급 방식 대비 흡기관과 크랭크실 내에서 역화 현상이 발생할 가능성이 매우 낮기 때문에 보다 높은 출력에서도 안정적인 연소가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 직접 분사 방식을 적용하여 수소를 연료로 하는 소형 엔진 실험을 수행하였으며 이를 바탕으로 기존에 수행하였던 포트 공급 방식을 적용한 결과와 비교하여 성능 향상에 대한 분석을 수행하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

수소를 연료로 하는 2행정 소형 엔진의 직접 분사 방식을 적용한 성능 실험을 진행하였으며 사용된 엔진의 제원은 Table 1에, 실험 장치 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 엔진 부하 및 속도를 제어하기 위해서 AC 동력계(HND Multilab, Seongnam, Korea)를 이용하여 엔진의 구동 및 모터링이 가능하도록 하였다. 출력 측정을 위하여 엔진 축에 토크 센서를 배치하였고, 수소 공급 라인의 온도와 압력, 실린더 헤드 온도, 배기 온도와 공연비를 측정하기 위한 센서들이 장착되었다. 본 연구에서 사용하는 엔진의 경우 적정한 윤활을 위해 가솔린과 윤활유를 일정 비율로 섞어 공급해야 하는데, 가스상의 수소 연료와 윤활유를 혼합하여 공급할 수 없으므로 별도의 윤활 공급 장치가 필요하다. 따라서 기존 2행정 가솔린 엔진의 윤활유 유량을 참고하여 수소 엔진에 알맞은 유량을 계산해 이를 시린지 펌프를 활용해 공급하였다. 수소 연료의 직접 분사 방식을 적용하기 위해 실린더 헤드에 인젝터를 체결할 수 있도록 설계를 수행하였으며 장착 모습과 인젝터 장착 시 단면은 Fig. 2와 같

Table 1. Specification of a test engine

Manufacturer	3W
No. of cylinders	2
Displacement volume (cc)	210
Bore (mm)	55
Stroke (mm)	44
Cycle	Two-stroke

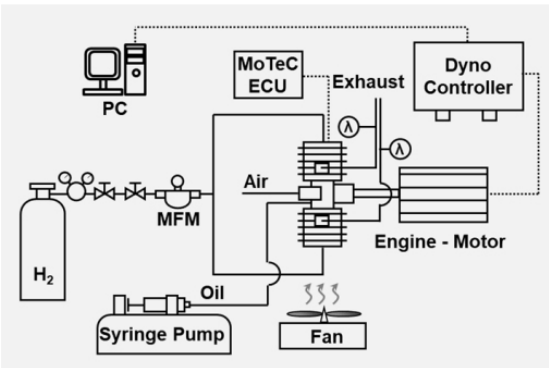

Fig. 1. Experimental schematic

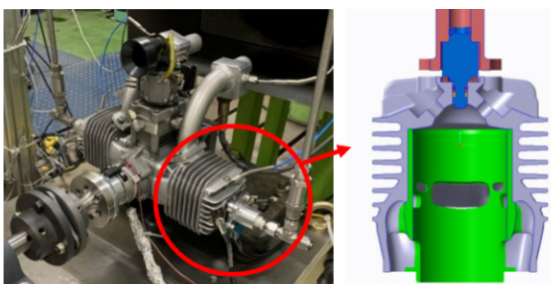

Fig. 2. Injector for direct injection (experimental set-up and cross section)

다. 인젝터는 Strata-Tech (Des Moines, IA, USA)의 인젝터를 사용하였으며 최대 작동 압력은 8 bar 수준이다. 연료 분사시기와 점화시기를 제어하기 위하여 MoTeC (Mooresville, NC, USA)의 M800 ECU를 사용하였으며, 수소 유량 측정은 코리올리 방식의 유량계(micromotion, CMFS010M)를 이용하여 측정하였다. 기존 엔진은 RC 항공 분야에서 사용하는 2행정 공랭식 엔진으로 큰 프로펠러가 장착되어 추진력을 얻으며 추가로 엔진 냉각의 기능을 가진다. 본 실험에서는 엔진의 축으로부터 직접 출력을 측정하기 때문에 프로펠러는 제외되었고, 따라서 강제 냉각을 위해 엔진 주변에 냉각팬을 설치하였다.

2.2 실험 방법

직접 분사 방식을 적용한 수소 엔진의 성능 변화를 확인하기 위하여 기존에 수행하였던 포트 공급 방식을 적용한 수소 엔진 실험 방법과 유사하게 진행하였다. 특히 속도에 따른 성능 확인을 위해 저속 구간과 고속 구간인 2,000 RPM과 4,000 RPM을 각각 대표 속도 조건으로 선정하여 실험하였으며 각 조건에서 성능인자들을 분석하여 비교하였다. 최대 부하 조건에 대한 성능이 주 관심 영역이기 때문에 전부하(wide open throttle) 조건에서 실험을 수행하였고, 최적 점화 시기(maximum brake torque) 조건으로 탐색하여 실험에 반영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연료 공급 방식에 따른 엔진 성능 결과

Figs. 3, 4는 저속과 고속 구간에서의 엔진 토크 및 출력을 연료 공급 방식에 따라 나타내었다. 4,000 RPM 조건에서 포트 공급 방식(port injection)에 비해 직접 분사 방식(direct injection)에서 출력이 약 113% 향상된 것을 확인할 수 있다. 포트 공급 방식은 엔진 흡기관으로 수소와 공기가 같이 공급되는 방식이므로 직접 분사 방식에 비해 수소가 공급되어 연소에 참여하는 양의 한계가 있기 때문에 출력이 직접 분사 방식에 비해 제한된다. 또한 포트 공급 방식은 압축 과정에서 엔진의 흡기 포트가 완전히 닫히기 전에 이전 사이클에서 남아있는 다양한 열원에 의하여 점화되어 연료 혼합기로 화염 및 압력파가 흡기 방향으로 전파되는 역화 현상이 일어난다. 특히 출력이 높아지는 농후한 조건에서 역화 발생이 쉽기 때문에 출력 증대가 제한된다[7]. 반면 연소실에 직접 연료를 분사하는 직접 분사 방식은 흡기 포트가 닫힌 이후에 연료가 분사되므로 역화를 피할 수 있기 때문에 보다 많은 연료의 공급이 가능해져서 토크와 출력을 상승시킬 수 있게 된다. 다만 속도가 증가함에 따라 동일한 크랭크 각에 해당하는 시간이 짧아지므로 전략적으로 고속에서는 저속보다 상대적으로 더 빠른 타이밍에 연료 분사를 수행해야 한다[9].

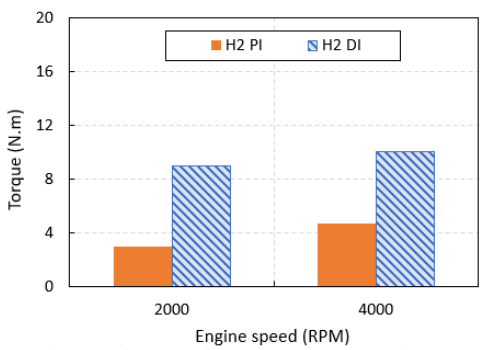

Fig. 3. Torque performance from the engine test

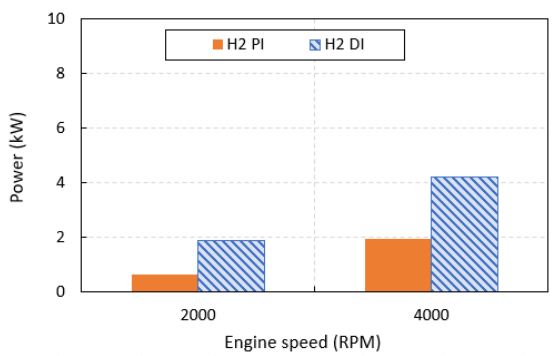

Fig. 4. Power performance from the engine test

3.2 주요 엔진 특성 변수 비교

주요 엔진 특성 변수를 비교하기 위해 공기 과잉율, 점화 타이밍과 배기온도를 속도와 분사방식에 따라 Figs. 5-7에 나타내었다. 포트 공급 방식의 공기 과잉율은 역화가 발생하지 않은 최대 출력 발생 조건을 유지한 결과이며, 결과적으로 2 정도의 수준으로 나타났다[7]. 직접 분사 방식의 공기 과잉율도 유사하게 2 정도의 수준에서 나타났는데, 이는 역화가 아닌 조기 점화 현상에 의해 제한된 결과이다. 조기 점화는 역화 현상과 유사하게 연소실 내의 핫 스팟, 잔여 배기가스, 점화플러그 방전 등의 원인으로 발생하며, 점화플러그에 의한 점화가 발생하기 이전에 점화가 이루어짐으로써 출력을 저하시키는 원인이 된다. 이는 역화와 마찬가지로 연료 공급량이 높은 농후한 조건일수록 높은 연소압력과 온도로 인하여 발생 확률이 높아지기 때문이다. Fig. 8은 직접 분사 방식 실험 중 조기 점화 현상을 보여주는 실린더 내 압력선도 그래프이다. 점화가 매우 빠른 시기에 발생하며 급격히 압력이 상승하는 비정상적인 압력 선도 그래프를 볼 수 있다. 또한 Figs. 3, 5에서 볼 수 있듯이 포트 공급 방식과 직접 분사 방식에서 공기 과잉율과 공급된 연료 유량은 비슷하지만 토크 및 출력의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 포트 공급 방식에서 연료의 일부분이 연소에 참여하지 못하고 배기로 소실되기 때문에 결과적으로 포트 공급 방식이 직접 분사 방식보다 출력이 낮은 것을 확인하였다.

직접 분사 방식은 실린더 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 국부적으로 농후한 구간에서 연소가 되어 포트 공급 방식보다 연소 속도가 빠르다. 따라서 점

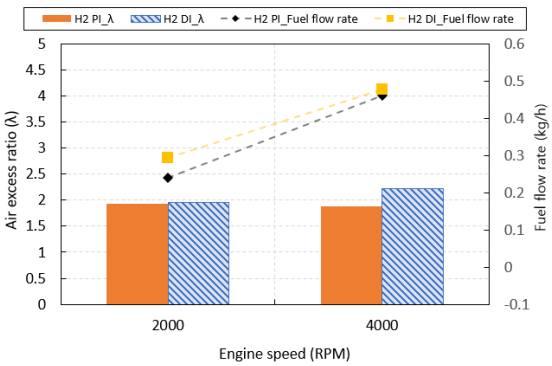

Fig. 5. Air excess ratio and fuel flow rate from the engine test

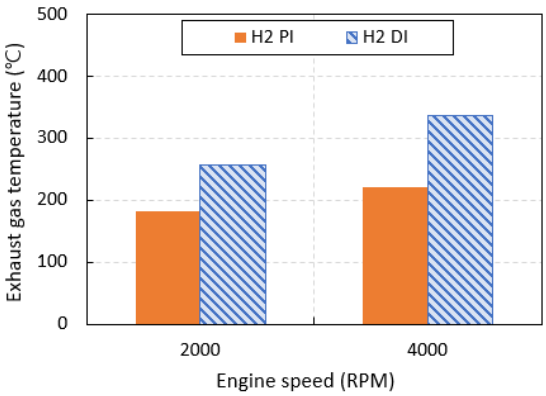

Fig. 7. Exhaust gas temperature from the engine test

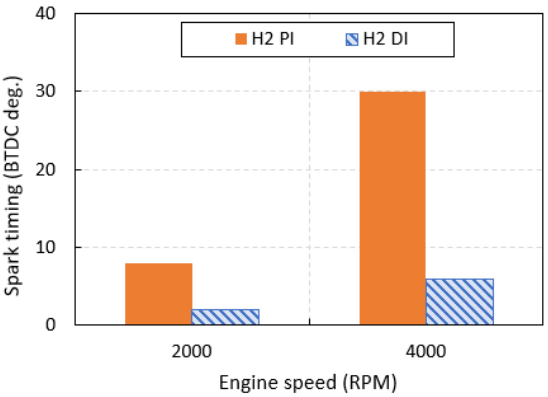

Fig. 6. Comparison of spark timing used at engine test

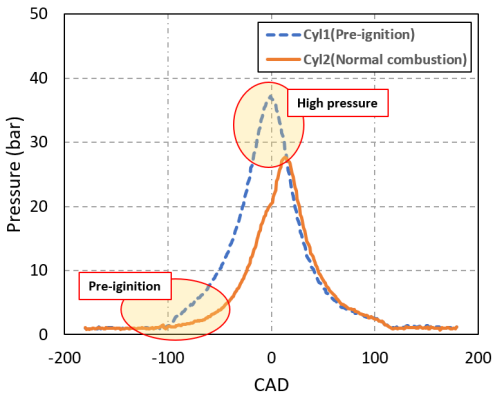

Fig. 8. In-cylinder pressure showing pre-ignition phenomena

화 타이밍을 포트 공급 방식보다 지각시켜도 동일 조건에서 배기포트가 열리기 전에 연소가 되므로 점화 시기 지각을 통해 성능 향상이 가능하다. 또한 포트 공급과 직접 분사 방식 모두 저속에 비해 고속에서 점화 시기의 진각이 이루어진 것을 확인할 수 있는데, 고속 영역에서 사이클 당 시간이 감소되어 점화시기를 저속 영역 대비 진각하여 운영한 결과이다. 한편 배기가스 온도는 동일 조건에서 출력이 증가함에 따라 높아지게 된다. 따라서 저속보다 고속 조건에서, 포트 공급 방식보다 직접 분사 방식에서 더 높은 결과를 보였으며 출력 증대분만큼의 차이를 가진다.

3.3 분사방식에 따른 연료 소비율과 효율 비교

마지막으로 연료 유량 측정 결과를 바탕으로 효율을 비교하였다. Figs. 9, 10은 속도 조건 및 분사 방식에 따라 연료 공급유량, 제동 연료소모율, 열효율 결과를 나타낸다. 동일 속도 조건에서 포트 공급과 직접 분사 방식이 비슷한 연료 유량을 가지지만 출력 차이가 크기 때문에 열효율은 직접 분사 방식이 약 105% 이상 높은 것을 볼 수 있다. 포트 공급 방식에서는 수소 공기 혼합물이 연소에 참여하지 못하고 소기(scavenging) 과정에 의해 배출되는 양이 많은 반면 직접 분사 방식은 흡배기 포트가 닫힌 상태에서 연료가 분사되어 배기로 버려지는 연료량이 극히 적기 때문에 열효율이 향상된 것으로 판단된다. 이에 따라 제동 연료소모율은 직접 분사 방식의 경우가 약 51% 이상 낮다. 이상의 결과를 통해 수소 연료를 직접 분사 방식으로 공급함으로써 출력이 증대되고 열효율 또한 향상시킬 수 있다는 결론을 도출할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 포트 공급 방식을 적용한 2행정 소형 수소 엔진의 성능 향상을 위하여 직접 분사 방식을 적용한 결과를 비교하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 포트 공급 방식에서 역화가 발생되는 문제로 출력을 향상시키는 데 어려움이 있었는데, 직접 분사 방식을 적용하여 이를 해결함으로써 4,000 RPM 조건에서 출력을 약 113% 향상시킬 수 있었다.

2) 두 분사 방식 모두 역화 및 조기 점화와 같은 이상 연소가 이루어지지 않은 조건은 공기과잉율이 약 2 정도의 수준이어야 함을 확인하였다. 따라서 안정적인 엔진 운전을 위하여 이 수준의 공기과잉율로 제어해야 함을 알 수 있다.

3) 본 연구에서 측정된 최대 출력 조건에서 측정된 두 연료 공급 방식의 수소 공급 유량은 거의 유사한 수준이었으며, 출력은 직접 분사 방식의 경우가 더 높기 때문에 열효율 또한 4,000 RPM 기준으로 약 105% 증가한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 기관고유사업으로부터 지원을 받아서 이루어졌습니다.

References

1. The Government of the Republic of Korea, “2050 carbon neutral strategy of the republic of Korea toward a sustainable and green society”, 2020. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/LTS1_RKorea.pdf.
2. H. D. Choi, M. K. Lee, and S. O. Park, “Long-term and short-term scenarios analysis for hydrogen techno-economic regime”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 16, No. 3, 2005, pp. 296-305. Retrieved from https://www.hydrogen.or.kr/upload/papers/KHNES.Vol.16,No.03-12.pdf.
3. B. J. Gim, J. W. Kim, and S. J. Choi, “The status of domestic hydrogen production, consumption, and distribution” Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 16, No. 4, 2005, pp. 391-399. Retrieved from https://www.hydrogen.or.kr/upload/papers/KHNES.Vol.16,No.04-12.pdf.
4. D. W. Yim, “Governance leadership for hydrogen economy revitalization”, Trans Korean Hydrogen New Energy Soc, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 265-275, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.265.
5. D. Choi, “Hydrogen internal combustion engine in USA”, Auto Journal : Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 49-51. Retrieved from

https://www.ksae.org/journal_list/search_index.php?mode=list&gubun=4&year=2004&month=2&issue=26&number=1&page_pre=4&kwon_title=.

6. B. H. Lee, P. M. Park, and K. B. Kim, "Operational control logic of series hybrid power system for the unmanned aerial vehicle", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 25, No. 1, 2021, pp. 68-76. Retrieved from https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO202122162111672.page.
7. Y. R. Kim, S. Y. Kim, S. C. Oh, C. W. Park, and Y. Choi, "A study on performance characteristics of a small-sized hydrogen-fuelled two-stroke engine", Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 24, No. 6, 2020, pp. 28-33, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2020.24.6.28.
8. H. L. Yip, A. Srna, A. C. Y. Yuen, S. H. Kook, R. A. Taylor, G. H. Yeoh, P. R. Medwell, and Q. N. Chan, "A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: towards carbon-free combustion", Appl. Sci., Vol. 9, No. 22, 2019, pp. 4842, doi: https://doi.org/10.3390/app9224842.
9. J. Duan, F. Liu, and B. Sun, "Backfire control and power enhancement of a hydrogen internal combustion engine", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 39, No. 9, 2014, pp. 4581-4589, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.175.