



수소 연료를 적용한 소형 2행정 엔진 성능 특성에 관한 연구

김용래·김선엽·오세철·박철웅·[†]최 영

한국기계연구원 그린동력연구실

(2020년 11월 17일 접수, 2020년 12월 16일 수정, 2020년 12월 17일 채택)

A Study on Performance Characteristics of a Small-Sized Hydrogen-Fuelled Two-Stroke Engine

Yongrae Kim · Seonyoeb Kim · Sechul Oh · Cheolwoong Park · [†]Young Choi

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea

(Received November 17, 2020; Revised December 16, 2020; Accepted December 17, 2020)

요 약

수소 연료를 적용한 2행정 기반의 소형 SI 엔진의 성능 특성에 관하여 살펴보았다. 이를 위하여 주로 모형 항공기 용으로 사용되는 210 cc급 엔진을 비롯하여 소형 동력계 및 수소연료와 엔진 오일 공급을 위한 장치를 포함한 실험을 구성하였다. 우선 가솔린 연료를 공급한 기본 상태의 엔진 출력과 토크를 측정해 보았으며, 최대 6 kW 수준의 출력을 확인하였다. 이후 수소 연료를 공급하면서 성능 시험을 수행하였는데, 수소의 경우에는 공기과잉율 기준 공연비가 낮아질수록 즉, 연료 공기 혼합기가 농후해 질수록 역화 현상이 발생하여 출력에 제한이 생길 뿐만 아니라 엔진 하드웨어에도 치명적인 영향을 줄을 확인하였다. 따라서 공기과잉율을 기준 수치 이상에서 엔진을 운전하며 안정적인 수준의 연소를 통하여 가솔린 성능의 절반 수준인 최대 3 kW의 출력 성능이 나옴을 최종 확인하였다.

Abstract - In this study the possibility of hydrogen as a fuel in a small-sized two-stroke SI (Spark ignition) engine was investigated. For this purpose, experimental setup including an engine, a dynamometer, equipments for hydrogen and lubricant oil supply was prepared. And then preliminary experiments for the hydrogen-fueled engine combustion were conducted. In the case of hydrogen-fueled engines comparing to gasoline backfire occurs when the excess air ratio is lower than a specific value. This can cause engine power reduction and damage to the engine parts. The engine was controlled to operate at lean conditions to prevent backfire. Through the control of excess air ratio, the maximum engine brake power output of 3 kW was achieved in a 210 cc engine, while it was 6 kW in case of gasoline fuel.

Key words : hydrogen, two-stroke, SI(Spark ignition) engine, backfire, excess air ratio

1. 서 론

최근 레저용 드론부터 농약 살포용 농업 드론, 물자 운반 드론 및 산업용 드론까지 멀티콥터 형태 드론의 쓰임처가 확대되면서 드론 시장이 점차 커지고 있다. 그러나 기존 드론의 경우 대부분 배터리를 전력원으로 이용하기 때문에 드론의 운용시간이 짧고 배터리

충전에 긴 시간이 소요된다는 단점이 있어 드론 이용에 불편함이 발생한다. 따라서 이를 극복하고자 배터리 대비 에너지 밀도가 우수한 연료를 사용하는 엔진을 활용해 장거리 전력원으로 사용이 가능할 것으로 보인다. 특히 수소를 액체 상태로 저장하게 되면 중량당 에너지 밀도가 전통적인 화석연료들보다도 높기 때문에 수소를 사용하는 엔진이 보다 장점을 가질 수 있다.[1] 액체 수소를 장기간 보관하는 것은 어렵지만, 충전후 바로 사용하는 경우에는 고압으로 인한 위험은 없기 때문에 안전성에도 크게 문제가 되지 않을 것

[†]Corresponding author: ychoi@kimm.re.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

으로 보인다. 이에 본 연구에서는 수소를 연료로 하는 소형 엔진 개발을 목표로 하고 있으며, 액체 수소를 직접 엔진 연소실로 공급하는 것은 불가능하므로 기체 상태로 연소시키는 엔진의 성능 및 연소 특성을 확인하고, 이를 기반으로 수소 엔진의 가능성을 알아보고자 한다.

II. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 수소 연료를 적용한 소형 엔진을 개발하기 위하여 모형 비행기 등에 주로 사용되는 소형 2행정 엔진을 사용하였다. 2행정 엔진은 한때 소형 오토바이와 같은 곳에 널리 사용되었으나 현재는 배출가스 문제로 인하여 거의 사용되고 있지 않은 상황이지만, 중량당 출력비율이 높고 구조가 간단하기 때문에 드론과 같은 항공용으로 사용하기에 적합한 조건을 가지고 있다. 2행정 엔진은 주로 흡배기 경로가 밸브와 같은 별도의 장치가 아닌 고정된 유로와 피스톤 운동의 조합에 의하여 이루어지는데, Fig. 1 과 같은 구조를 가지고 있다. 흡입 과정 동안 공기와 연료는 기화기를 통하여 정해진 비율로 흡입되어 압축 과정 동안 트랜스퍼 포트(transfer port)를 통하여 연소실 내부로 전달된 이후, 점화플러그에 의하여 연소가 일어나면 결국 배기 포트를 통하여 배출가스가 배출되는 방식으로 1 회전 동안 1 사이클이 이루어진다. 물론 이 과정에서 원하는 방향으로 유동이 이루어지도록 리드 밸브(reed valve) 라는 것이 흡기 포트 쪽에 장착이 되어 있으며, 이는 추후 엔진 이상 연소 현상과 관련이 있기 때문에 후반부에 별도로 언급하기로 한다.

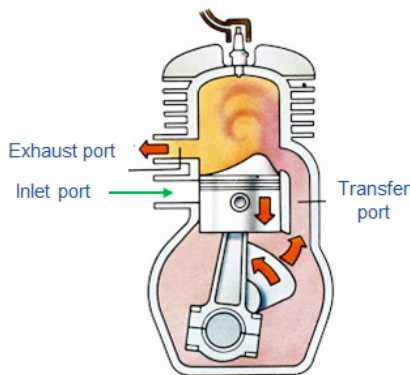


Fig. 1. Cross sectional views of a test 2-stroke engine.

Table 1 에는 실험에 사용된 2행정 엔진의 세부 사양들이 표기되어 있으며, 기본 엔진의 경우 가솔린 연료를 이용하는 것으로 별도의 윤활 장치가 없기 때문에 연료와 엔진오일을 50:1 의 비율로 미리 섞어서 사용한다. Fig. 2 에 엔진의 실제 사진과 동력계를 포함한 전체 실험장치의 모습을 나타내었다. 동력계는 AC 타입으로 엔진의 구동 및 모터링이 가능하도록 할 수 있으며, 엔진의 최대 회전 속도는 7,500 rpm 까지 구동이 가능한 것으로 되어 있으나 동력계는 6,000 rpm 이 한계 수준으로 작동된다. 엔진과 동력계 사이에는 엔진 출력 측정을 위하여 토크 센서가 장착되었고, 각종 주요 부위에 온도 및 압력을 측정하기 위한 센서들과 배기관에는 공연비를 측정하기 위한 램다 센서가 장착되었다. 엔진의 냉각 방식은 공랭식으로써 원래의 목적인 모형 비행기에서는 프로펠러를 축에 연결하여 사용하기도 하고 비행기 자체의 속도가 있기 때문에 일종의 강제 공랭식으로 구동이 되지만, 실험실

Table 1. Specifications of a test engine

Manufacturer	3W(210Xi)
No. of cylinders	2
Displacement volume (cc)	210
Bore (mm)	55
Stroke (mm)	44
Fuel delivery system	Carburetor
Gasoline-oil mixing ratio	50 : 1



Fig. 2. Photo of experimental equipments and a test engine.

환경에서는 강제 냉각을 위하여 별도의 700 W급 냉각팬을 설치하여 냉각이 이루어지도록 설정하였다. 엔진에서 제어가 가능한 유일한 부품인 쓰로틀은 별도의 쓰로틀 제어기를 통해서 작동이 되도록 구성하였고, 엔진과 함께 제공되는 엔진 제어기(ECU)를 사용하였기 때문에 임의로 점화 타이밍을 조절할 수는 없었고 회전 속도에 따라 점화 타이밍이 고정되어 있다. 실린더 내부의 연소 압력을 측정하기 위하여 스파크 플러그에 압력센서가 내장된 일체형 센서를 장착하고 연소해석기를 통하여 모니터링하도록 하였다.

수소 가스를 연료로 사용하기 위해서는 기존의 기화기를 사용할 수 없기 때문에 최대 100 LPM급 MFC(mass flow controller)를 가스 배관에 장착하여 수소 유량을 조절하면서 공급하는 방식을 사용하였다. 수소는 고압의 수소 봄베를 통하여 제공되므로 엔진에 공급되는 수소 가스의 온도는 상온과 같으며, 흡입 공기도 마찬가지이다. 가스가 공급되는 위치는 기화기와 리드 밸브의 사이로 정하였다. 그리고, 가스 연료를 사용하는 것이므로 기존의 가솔린 연료에 엔진 오일을 섞어서 사용하는 방식을 이용할 수 없기 때문에 수소 가스가 공급되는 위치에 동일하게 엔진 오일이 공급되는 튜브를 장착하고,[2] 실제 가솔린 연료가 적용되었을 때 사용되는 오일 유량과 동일한 수준으로 엔진 오일이 공급될 수 있도록 미세 조절이 가능한 시린지(syringe) 펌프를 적용하였다.

실험 방식은 우선 엔진의 기본 연료인 가솔린을 적용하여 출력이 어느 정도 수준인지 측정을 완료하고, 동일한 엔진 제어기를 사용한 조건에서 수소 가스 연료를 주입하여 최대한 얻을 수 있는 출력을 탐색하는 것으로 하였다.

III. 실험결과 및 분석

3.1. 가솔린 연료 적용 기본 엔진 성능 실험

우선 적용 대상 엔진의 기본 성능을 확인하기 위하여 가솔린 연료를 적용하여 테스트를 수행하였다. 앞에서 설명한 것과 같이 실제 엔진의 최대 회전수보다 낮은 6,000 rpm 까지 실험하였으며, Fig. 3 과 같은 결과를 얻었다. 전반적으로 중저속에 해당하는 영역에서 토크가 크게 유지되면서 속도가 증가할수록 출력이 커지는 경향을 보이지만, 고속 영역에서는 토크가 급격히 저감되면서 출력이 더 이상 증가하지 못하고 줄어드는 모습을 보이고 있다. 최대 출력은 4,000 rpm 부근에서 6 kW 수준으로 측정되었다. 실제 제조사의 사양과는 다소 차이

가 크게 나타났는데, 제조사 문의 결과 엔진의 원래 목적에 맞도록 프로펠러를 장착하고 다른 방식으로 출력을 측정한다는 답변을 받았기에 참고만 하였다. 2행정 엔진을 테스트한 다른 참고문헌을 통해서도 유사한 결과가 나옴을 확인하였다.[3]

기화기를 사용하여 연료가 공급되는 방식인 만큼 엔진 길들이기 과정에서 기화기의 미세 조절이 필요한데, 마찬가지로 이 과정에서도 동력계와 같은 구속장치가 연결되지 않고 프로펠러만을 장착하여 조정해야한다는 조건이 있었기에 이와 같은 세팅에서의 차이도 있었을 것으로 추측한다. Fig. 4 에는 사용된 엔진제어기를 통하여 엔진 회전속도에 따라 결정되고 있는 점화 타이밍을 측정하여 나타내었다. 3,000 ~ 4,000 rpm 부근의 중속 영역까지는 점화 타이밍이 진각되다가 그 이후의 고속 영역에서는 오히려 감소하다 어느 정도 수준에서 정체되는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 노킹이 억제되

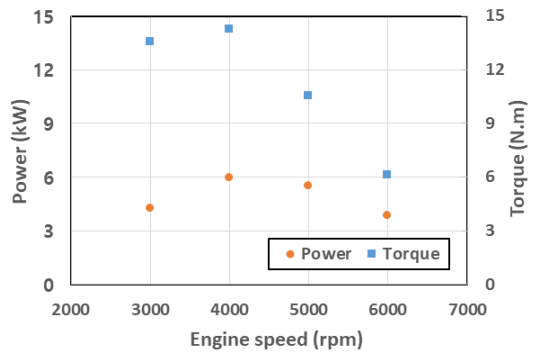


Fig. 3. Full load performance from gasoline fuel test.

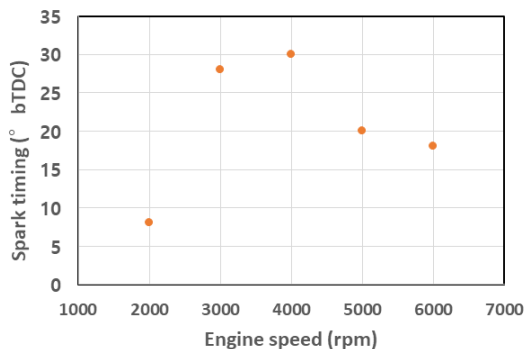


Fig. 4. Spark timing measurement according to the engine speed

는 수준에서 점화 타이밍이 진각될수록 토크가 증가하는 경향을 가지므로 엔진 최대 토크 측정 결과가 점화 타이밍의 패턴과 유사한 점이 설명될 수 있다. 고속 영역에서 점화 타이밍이 다소 지각되는 것은 공랭식 엔진의 특성상 고속에서 기계적 마찰 증가로 열부하가 급격하게 늘어나는 것이 부담이 되므로 연소로 인한 열발생을 억제하고자 하는 전략으로 판단된다.

3.2. 수소 연료 적용을 위한 기초 실험

앞부분에서 설명한 것과 같이 수소 가스를 연료로 사용하기 위해서는 윤활유가 별도로 공급될 수 있도록 해야만 했고, 이에 따라 적절한 수준의 윤활유 공급량을 사전에 결정해야 한다. 이를 위하여 앞에서 사용한 가솔린과 오일 혼합 연료의 엔진 속도에 따른 사용 유량을 기반으로 필요한 윤활유의 공급 유량을 유추하였으며, 시린지 펌프를 이용한 강제 윤활유 공급 상황에서 연소 과정 없이 엔진의 단독 모터링 테스트로 실제 엔진 작동에 이상이 있는 확인하면서 최종적으로 Fig. 5 와 같은 엔진 오일 유량을 선정하였다. 예상한 것과 같이 엔진의 회전 속도에 따라 필요한 엔진 오일량이 증가하는 패턴을 보였다.

실제로 수소 가스를 연료로 공급하는 실험을 여러 조건에서 수행하게 되면 출력을 높이기 위하여 연료와 공기의 혼합물이 농후한 조건이 되도록 진행하다가 Fig. 6 에서와 같이 특정 순간에 역화(backfire) 현상이 일어나는 것을 보게 된다. 역화현상은 비정상 연소의 일종으로 연료와 공기가 미리 혼합되어 연소실에 공급되는 엔진에서 연소실 이전 단계인 흡기관 내부에서 미리 연소가 발생하는 것으로 심한 경우에는 흡기관을 포함한 엔진의 하드웨어가 손상될 수도 있다. 특히 수소와 같이 점화에너지가 타 연료에 비하여 극히 낮은 경우에는 미세한 점화원에 의해서 연소가 일어나기 때문에 기존 문헌에서도 이와 같은 현상들이 보고되고 있으나, 발생할 수 있는 원인들로 여러 가지가 언급되고 있음에도 명확하게 해결이 되지 않고 있는 상황이다.[4]

Fig. 7 에는 2행정 엔진에서는 흡배기 밸브의 역할을 수행하는 리드 밸브 구조를 자세히 나타내었는데, 일반적으로 탄성을 가지는 탄소섬유 재질로 되어있어 역화 현상으로 인하여 파손되는 경우가 발생하였다. 뿐만 아니라 역화 현상은 출력 증대를 위하여 공기과잉율(λ)을 더 이상 낮출 수 없는 한계를 가져오며, 아직까지는 뚜렷하게 극복할 수 있는 방안이 강구되지 못한 상황이다.[5,6] 따라

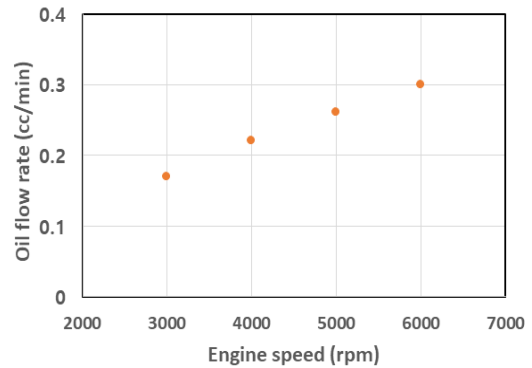


Fig. 5. Engine oil flow rate for the hydrogen operation.

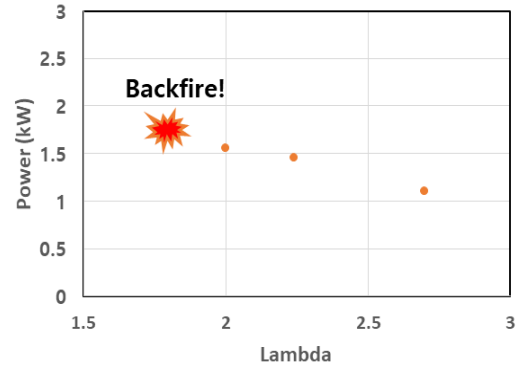


Fig. 6. Backfire occurrence according to the lambda level decrease (@3,000rpm).

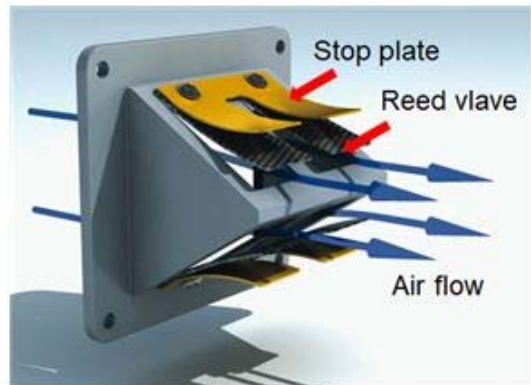


Fig. 7. Detail structure and modification of reed valve.

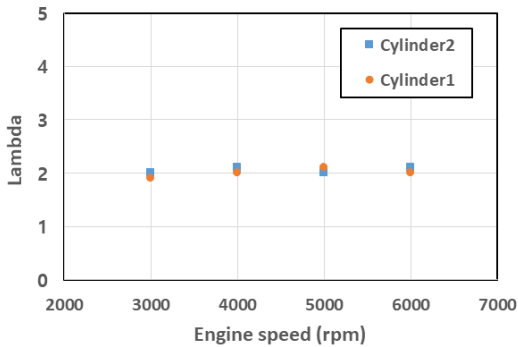


Fig. 8. Application of lambda level limitation.

서 여러 조건에서의 실험을 통하여 Fig. 8 에서와 같이 모든 엔진 회전 속도에서 공기과잉율 기준으로 2 보다 낮지 않는 수준까지만 운전되도록 하였을 경우에 역화 현상은 일어나지 않는 것으로 확인 되었으므로 이러한 조건 내에서만 실험을 수행하였다. 또한, 혹시 모를 역화 현상에 대비하기 위하여 리드 밸브 재질을 탄성이 보장되는 금속 재질의 박판으로 변경하여 약한 역화 현상에서는 리드 밸브가 파손되지 않는 수준으로 유지되도록 보장하였다.

3.3. 수소 연료 적용을 통한 최종 성능 실험

앞에서 언급한 바와 같이 공기과잉율이 2 보다 낮아지지 않는 조건에서 MFC를 이용하여 수소 연료량을 늘리면서 각 회전 속도 별로 토크 및 출력이 어느 수준까지 나올 수 있는지 확인해 보았으며, Fig. 9 와 같은 결과를 얻었다. 점화 타이밍을 임의로 변경할 수 없는 ECU를 그대로 사용하였기에 가솔린 연료를 사용한 경우와 각 회전속도별 점화 타이밍은 동일한 조건이다. 그래프를 살펴보면 가솔린 연료일 때와는 다르게 토크가 가장 낮은 회전 속도에서 가장 크고, 중속 영역에서 다소 낮아졌다가 다시 고속일수록 증가하는 경향을 보이고 있는데 전반적으로 가솔린 연료의 경우보다 큰 편차를 보이고 있지는 않다. 따라서 회전 속도가 증가하면서 출력이 꾸준히 증가하는 모습을 보이면서 6,000 rpm에서 최대 출력 3 kW를 달성하였다. 최대 출력 기준으로는 가솔린 연료 적용시보다 대략 절반의 수준을 보이고 있으며, 이는 일반적인 4행정 엔진의 경우와도 유사한 수준으로 판단된다.[1]

마지막으로 Fig. 10 에서는 연소실 내부의 압력을 측정된 결과를 두 연료 적용 시에 비교하여 살펴 보았으며, 엔진의 회전 속도는 중간 속도에 해당하는 3,000 rpm 인 경우이다. 흡배기 타이밍 자체는 엔진 하드웨어가 동일한 상태이므로 동일하게 보이고 있으며, 기

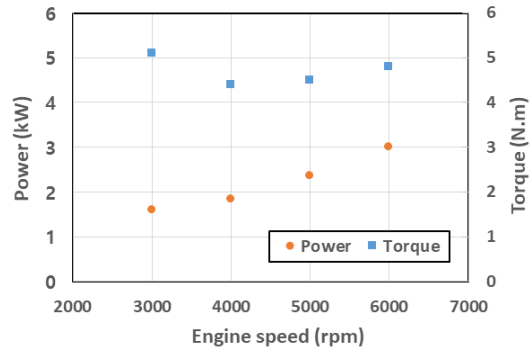


Fig. 9. Full load performance from hydrogen fuel test.

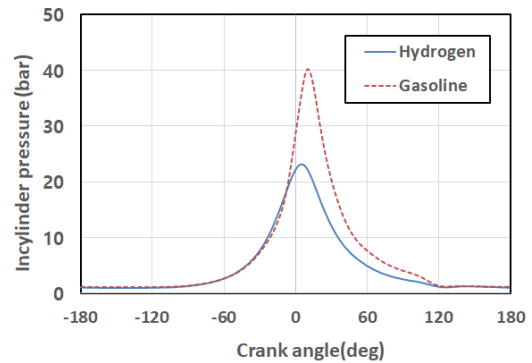


Fig. 10. In-cylinder pressure comparison between gasoline and hydrogen fuel operation (@3,000rpm).

본적인 토크 및 출력 차이는 최대 압력 수준 차이에서도 확인할 수 있다. 다만 Fig. 4 에서 측정된 점화 타이밍을 고려하면 대략 BTDC(before Top dead center) 28 CA(crank angle) 부근에서 점화가 시작되어야 하며, 점화 시작 및 초기 압력 증가율은 연소 반응성이 빠른 수소가 좀더 빠르고 급격한 것을 볼 수 있다. 수소는 밀도가 매우 낮은 연료이므로 기본적으로 가솔린 연료에 비하여 체적 효율이 낮을 수밖에 없으며 질량 단위로 연료 공급이 제한적이다. 출력 향상을 위해서는 추후 직분사와 같은 방법을 활용하여 연료 공급량을 늘릴 필요가 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 실제 엔진의 최대 회전속도인 7,500rpm까지는 실험장비의 한계로 인하여 측정이 이루어지지 못하였으며, 점화 타이밍을 각 연료 특성에 맞도록 최적화할 수 없었기 때문에 추후 실험장비를 보완하여 최적화된 조건에서의 데이터를 획득함으

로써 보충 연구를 진행하고자 한다.

IV. 결론

향후 장기 체공용 드론의 전력원으로써 수소 연료를 사용하는 소형 엔진의 개발을 위하여 기존 가솔린 엔진 기반의 210cc 급 2행정 엔진에 수소 연료를 적용한 연구를 수행하였으며, 기본적인 구동 및 연소 특성과 성능 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 기존의 가솔린 연료는 엔진 오일을 미리 혼합한 상태에서 연료가 공급되는 윤활 방식을 가지고 있으나, 수소 연료는 가스 상태이므로 별도로 엔진 오일을 필요한 유량으로 흡기관에 공급함으로써 성능 시험을 수행한 결과, 하드웨어 상의 큰 문제점을 발견하지 못했으므로 본 연구에서 수행된 엔진의 운전 조건 내에서는 유효한 방식으로 판단된다.

(2) 수소 연료를 흡기관에 공급하는 방식으로 엔진을 운전해본 결과, 대략 공기과잉을 기준으로 2 이하의 농후한 혼합기 조건에서 역화 발생의 위험이 따른다는 것을 확인하였다. 이는 6,000 rpm 까지의 운전 조건에서 공통적으로 나타나는 현상임을 발견하였고, 역화 현상으로 인한 엔진 손상을 방지하기 위해 공기과잉율을 제한하는 운전 전략을 도입하였다.

(3) 역화 발생으로 인한 공기과잉율 제한은 결과적으로 수소 연료 적용 엔진의 출력을 증대시키는데 장애가 되었으며, 최종적으로 3 kW 수준의 최대 출력을 확인하였는데 이는 가솔린 연료 적용 시의 6 kW 수준의 절반 정도에 해당한다.

수소 연료를 적용하는 엔진의 경우에는 위에서 언급한 바와 같이 역화와 같은 현상으로 한계를 가지므로 추후 직분사와 같은 방식을 적용함으로써 가솔린 연료 대비 부족한 출력을 최대한 증대시킬 수 있는 추가 연구가 필요할 것으로 보이며, 궁극적으로는 액체 수소 저장 시스템으로부터 수소 가

스를 공급받아야 하는 만큼 안정적인 수소 연료의 공급과 저온 상태의 수소에 대한 상세 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원의 기관고유사업으로부터 지원을 받아서 이루어졌습니다.

REFERENCES

- [1] Lee, E.H., Jang, H.J., Park, C.W., Kim, Y.R., and Choi, Y., "Characteristics of Combustion by Varying Different Coolant-temperature in a Hydrogen Engine for HALE UAV", *KIGAS*, 22(2), 59-66, (2018)
- [2] Oh, D., and Plante, J., "A Highly Efficient Small-displacement Marine Two-stroke H2DI Engine with Low Emissions", *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, 135, 082001-1~10, (2013)
- [3] Ausserer, J.K., Litke, P.J., Groenewegen, J., Rowton, A., Polanka, M., and Grinstead, K., "Development of Test Bench and Characterization of Performance in Small Internal Combustion Engines", *SAE Technical Paper*, No.2013-32-9036, (2013)
- [4] Lee, S.J., Yi, H.S., and Kim, E.S., "Combustion Characteristics of Intake Port Injection Type Hydrogen Fueled Engine", *Int. J. Hydrogen Energy*, 20(4), 317-322, (1995)
- [5] Yi, H.S., Min, K.D., and Kim, E.S., "The Optimized Mixture Formation for Hydrogen Fuelled Engines", *Int. J. Hydrogen Energy*, 25, 685-690, (2000)
- [6] Heywood, J. B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, New York, (1988)