



## 2 L급 수소 직접분사 전기점화 엔진의 워밍업 시 공기과잉률에 따른 질소산화물 배출 및 연료 소모율에 대한 실험적 분석

하 준 · 김용래\* · 박철웅\* · 최 영\* · †이정우\*\*

전북대학교 기계시스템공학과 석사과정, \*한국기계연구원 모빌리티동력연구실,

\*\*충남대학교 자율운항시스템공학과 교수

(2023년 6월 22일 접수, 2023년 7월 19일 수정, 2023년 7월 26일 채택)

## Effect of Varying Excessive Air Ratios on Nitrogen Oxides and Fuel Consumption Rate during Warm-up in a 2-L Hydrogen Direct Injection Spark Ignition Engine

Jun Ha · Yongrae Kim\* · Cheolwoong Park\* · Young Choi\* · †Jeongwoo Lee\*\*

Dept. of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

\*Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Republic of Korea

\*\*Dept. of Autonomous Vehicle System Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

(Received September 1, 2023; Revised September 24, 2023; Accepted September 24, 2023)

### 요약

지구 기상이변에 대해 탄소중립의 중요성이 대두됨에 따라 무탄소 연료인 수소의 에너지원으로서의 활용도 역시 증대되고 있다. 일반적으로 수소는 연료전지(FC, Fuel Cell)에 활용되고 있으나, 이는 연소를 기반으로 하는 내연기관(ICE, Internal Combustion Engine)에도 활용될 수 있다. 특히 연료전지만으로 수소 활용 및 인프라 확장이 어려운 때에 이미 생산 측면이나 공급 측면에서 인프라가 구축되어 있는 내연기관은 수소 에너지 저변 확대에 큰 도움을 줄 수 있다. 다만 수소를 연소기반으로 활용할 경우 고온에서 공기 중 질소가 산소와 반응하여 유해배기물인 질소산화물(NOx, Nitrogen Oxides)이 생성될 수 있는 단점은 존재한다. 특히 냉간(Cold Start) 운전 영역시 포함될 EURO-7 배기규제의 경우 워밍업(Warm-up) 과정에서 발생하는 배기배출물의 저감을 위한 노력도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 2 L급 수소 직접분사방식 전기점화(SI, Spark Ignition) 엔진을 활용하여 냉각수를 상온에서 88 °C로 워밍업하는 과정에서 질소산화물 및 연료소모율의 변화 특성을 살펴보았다. 특히 수소는 기존의 가솔린, 천연가스, 액화석유가스(LPG, Liquefied Petroleum Gas)와 달리 가연범위(Flammable range)가 넓기 때문에 공기과잉률(Excessive air ratio)을 희박하게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 워밍업하는 과정에 있어서 공기과잉률을 1.6/1.8/2.0으로 변화하여 그 결과를 분석하였다. 본 실험의 결과는 워밍업 시 공기과잉률이 희박해질수록 시간당 질소산화물의 배출이 적고, 열효율도 상대적으로 높으나 최종 온도까지 도달 시간이 길어짐에 따라 누적 배출량 및 연료소모율은 악화될 수도 있음을 시사한다.

**Abstract** - With the increasing awareness of the importance of carbon neutrality in response to global climate change, the utilization of hydrogen as a carbon-free fuel source is also growing. Hydrogen is commonly used in fuel cells (FC), but it can also be utilized in internal combustion engines (ICE) that are based on combustion. Particularly, ICEs that already have established infrastructure for production and supply can greatly contribute to the expansion of hydrogen energy utilization when it becomes difficult to rely solely on

†Corresponding author:jwoo@cnu.ac.kr

fuel cells or expand their infrastructure. However, a disadvantage of utilizing hydrogen through combustion is the potential generation of nitrogen oxides (NOx), which are harmful emissions formed when nitrogen in the air reacts with oxygen at high temperatures. In particular, for the EURO-7 exhaust regulation, which includes cold start operation, efforts to reduce exhaust emissions during the warm-up process are required. Therefore, in this study, the characteristics of nitrogen oxides and fuel consumption were investigated during the warm-up process of cooling water from room temperature to 88°C using a 2-liter direct injection spark ignition (SI) engine fueled with hydrogen. One advantage of hydrogen, compared to conventional fuels like gasoline, natural gas, and liquefied petroleum gas (LPG), is its wide flammable range, which allows for sparser control of the excessive air ratio. In this study, the excessive air ratio was varied as 1.6/1.8/2.0 during the warm-up process, and the results were analyzed. The experimental results show that as the excessive air ratio becomes sparser during warm-up, the emission of nitrogen oxides per unit time decreases, and the thermal efficiency relatively increases. However, as the time required to reach the final temperature becomes longer, the cumulative emissions and fuel consumption may worsen.

**Key words** : excessive air ratio, hydrogen), DI, Direct Injection, NOx, Nitrogen Oxides, fuel consumption rate, warm-up

## I. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)가 2018년 발표한 기후 변화보고서 ‘Global warming 1.5 °C’에 따르면 대기 중 온실가스(GHG, Green House Gas)를 저감하는 것이 현재 인류가 겪고 있는 기상이변을 막는 방법이라 제시하고 있다 [1]. 특히 대표적인 온실가스에는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>, Carbon dioxides)와 메탄(Methane, CH<sub>4</sub>) 등 탄소를 포함한 기체들이 많기 때문에 탄소를 포함한 에너지원의 활용을 줄이는 것이 가장 적극적인 대안으로 떠오르고 있다.

따라서 연료 자체에 탄소를 포함하지 않는 수소와 암모니아 등이 탄소중립(Carbon neutral)을 이루기 위한 현실적인 대체 연료로 급부상하고 있다. 특히 수소는 암모니아와 달리 독성이 없으며, 질량당 저위발열량이 높기 때문에 (암모니아 18 MJ/kg, 수소 120 MJ/kg) 무탄소 에너지원 경쟁에서 한발 앞서나간 한국이다 [2]. 물론 수소는 지구상에 단독으로 존재하는 경우는 거의 없기 때문에 이에 대한 생산성 문제나 액화가 어려워 저장성에 어려움을 겪고 있으나, 재생에너지를 활용한 수전해 기술이나 700 bar 이상의 고압 저장 탱크 기술 등을 활용하여 어느 정도 상용화가 가능한 실정이다.

이 때 일반적으로 수소는 연료전지 (FC, Fuel Cell)에 활용되는 경우가 많지만 연료전지는 촉매에 활용되는 귀금속의 수급 문제나 내구성 문제 등에 의해 저변 확대가 급격히 이루어지기 어려운 단점이 존재한

다. 다만 수소는 가스터빈에 활용을 계획할 정도로 연소에도 분명한 강점을 가지고 있는 연료이기에 기존의 내연기관 (ICE, Internal Combustion Engine)에 활용이 가능하다.

수소는 층류화염전파속도(Laminar Flame Speed)가 이론공연비에서 약 2.3 m/s 수준으로 기존의 화석연료들이 가지는 0.4~0.5 m/s에 비해 빠른 연소를 가능케 하며, 가연 범위(Flammable range) 역시 공기 중 부피 대비 4-75 % 사이이기에 타 화석연료들에 비해 넓은 장점을 가지고 있다 [3]. 따라서 수소는 내연기관에 적용 시 빠른 연소를 기반으로 한 노킹(Knocking) 문제를 해소할 수 있고, 희박 연소 (Lean combustion)에 기반하여 낮은 질소산화물(NOx, Nitrogen Oxides)의 배출과 열손실 (Heat transfer loss)의 저감을 기대할 수 있다 [4-7].

이에 해외에서는 1970년대 일본의 Furuhashi 등의 연구를 시작으로 2000년대 접어들어서까지 다양한 수소 내연기관 연구가 진행되고 있으며, 국내에서도 2000년대 초 성균관대학교와 서울대학교 등지에서 기본적인 수소 분사량에 따른 출력 및 효율에 대한 실험적 연구를 진행해 온 바 있다 [8-10]. 특히 한국기계연구원에서는 2010년대 들어서 수소의 희박연소 특성을 살피는 한편, 수소 직접분사기를 활용하여 운전영역을 넓히는 연구를 진행 중에 있다.

그 중 오세철 등의 연구에 따르면 시동성을 판가름하는 저속/저부하 운전조건에 있어서 일부구간 점화시기를 조절하여 역화(Back-fire)를 방지함과 동시에 수소 포트분사를 통해 이론공연비 연소를 구현하였

다. 다만 이론공연비 연소 시 질소산화물의 배출이 많아져, 희박연소가 필요하였으며, 희박연소 시 연소 안정성이 급격히 떨어지는 단점을 파악하였다 [11].

또한 이정우 등의 연구에 따르면 상대적으로 저부하 운전조건인 2,000 rpm/제동 토크 60 Nm에서 공기과잉률 (Excessive air ratio,  $\lambda$ ) 2.2까지 점화시기 조절에 따라 안정적인 연소가 가능함을 확인하였고, 다만 이보다 낮은 토크 조건과 냉간 (Cold start) 조건에서는 연소 안정성을 확보하기 어려웠다 [12].

관련하여 김용래 등의 연구에서는 수소 연료 자체를 냉각하거나 흡기 (Intake air)를 냉각하여 수소 내연기관의 성능을 평가하였는데, 이는 상대적으로 고부하 운전조건에서 역화를 방지하기 위한 평가였다. 즉, 저부하 운전조건에서 평가 결과를 확인하기 어려웠다 [13].

이와 같이 수소 내연기관의 고부하 운전 영역 확장도 중요하지만 냉간 및 저부하 운전 시의 성능 평가도 중요한다, 이는 향후 2025년부터 발표될 EURO-7 배기규제에서 냉간 운전 영역이 포함되기 때문이다.

특히 기존의 가솔린 전기점화 엔진은 냉간 워밍업 (Warm-up) 시 농후한 (Rich) 운전 조건을 채택하여 후단 배기 후처리 장치 (After-treatment system)의 빠른 워밍업을 목표로 하였기에, 이 구간에서 배출되는 유해 배기물질들(질소산화물 및 미연탄화수소) 과 연료소모율 악화라는 문제점이 존재하였다.

그러나 수소는 희박연소가 가능하기 때문에 워밍업 조건에서도 공기과잉률 조절에 따른 희박 연소가 가능하다. 덧붙여 수소 직접분사방식 (DI, Direct Injection) 기술이 발달함에 따라 역화를 우려하지 않고 저부하에서도 상대적으로 안정적인 운전이 가능한 상황이기 때문에 수소 직접분사방식 내연기관에서 공기과잉률에 따른 냉간 워밍업 특성에 대해 미리 파악해 둘 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 2L급 수소 직접분사방식 전기점화엔진에서 냉각수온도가 20℃에서 88℃로 워밍업하는 과정에 대해 공기과잉률 변화에 따른 질소산화물과 연료소모율 특성을 실험적으로 살펴보았다.

## II. 실험 장치 구성 및 방법

실험에 사용된 엔진은 2L급 자연흡기 직렬형 4기통 직접분사식 전기점화 엔진 (Hyundai Motor Company, Nu engine)이다. 해당 엔진의 자세한 제원은 Table 1.에 소개되어 있다.

해당 엔진은 250 kW급 동력계 (Dasan)에 장착되어 엔진 속도와 토크를 제어하였다. 수소는 레귤레이터를 통해 35 bar로 조절하여 엔진에 장착된 커먼레일에

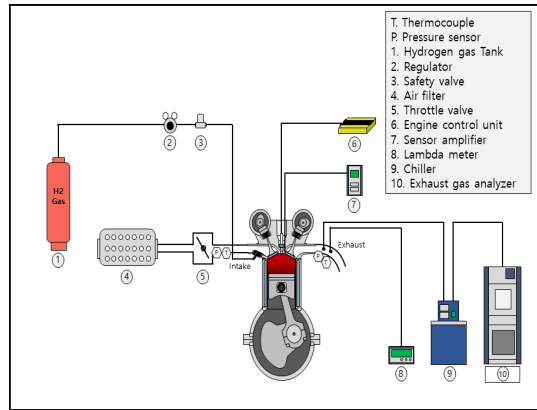


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

Table 1. Engine specifications.

Parameters	Specification
Cylinder number [-]	4
Displacement [L]	2
Bore x Stroke [mm]	81 x 97
Compression ratio [-]	10.5
The maximum power output [kW] (by diesel)	111 @ 6,000 rpm (w/ gasoline)
The maximum torque [Nm] (by diesel)	188 @ 5,000 rpm (w/ gasoline)

공급하였으며, 동일한 압력으로 직접 분사기를 이용하였다. 수소 연료 소모율의 측정은 기체 유량측정기 (MFM, Emerson)을 사용하였으며, 공연비의 확인에는 ETAS 社의 LA4 광대역 센서가 사용되었다. 질소산화물의 측정은 CLD 기반의 종합배기분석기 (AVL i60)를 사용하였다. 해당 배기 분석기의 측정 범위는 10,000 ppm까지이며 오차범위는 전체 스케일의 1% 내외 수준이다.

## III. 실험 조건

본 실험은 엔진 속도 1,500 rpm 조건에서 전체 수소 공급량은 0.78 kg/h로 고정하여 진행하였다. 공기과잉률은 1.6/1.8/2.0 세 가지 조건으로 조절하였으며, 공기과잉률의 조절을 위해 스톱 밸브 개도량을 바꾸었다. 공기과잉률 1.6 이하 조건에서 워밍업을 할 경우 상황에 따라 일부 노킹 등의 비정상 연소가 발생하기도 하였

으며, 반대로 공기과잉률 2.0 이상의 보다 희박한 조건에서 워밍업 시에는 실화(Mis-fire)가 발생하기도 하였다.

실험의 측정은 엔진으로부터 냉각수 토출 온도가 20 °C에서 88 °C가 될 때 까지 이루어졌으며, 점화시기는 최적 시기(MBT timing, The Maximum Brake Torque timing)이 되도록 약 4 °BTDC (Before Top Dead Center, 상사점 이전)에서 조절하였다. 본 실험은 실제 차량 실험이 아닌 대상 엔진 실험이기에 목표 온도인 88 °C는 일반적으로 정상상태(Steady-state) 실험을 진행할 때 평균적인 조건으로 상정하였다.

#### IV. 실험 결과 및 논의

##### 4.1 손실 및 효율 분석

Fig. 2는 공기과잉률 별 시간에 따른 엔진 냉각수의 출구 온도 그래프를 보여주고 있다. 상대적으로 공기과잉률이 농후하여 연소온도가 높은 1.6의 경우 88 °C 도달 시간이 약 2,100초로 가장 짧았으며, 그다음 공기과잉률 1.8 조건이 약 2,200초, 공기과잉률 2.0 조건이 약 2,500초로 가장 길게 나타났다.

결국 엔진 냉각수의 가열은 연소실에서 발생하는 발열량으로부터 엔진외부로 열전달되는 양에 비례하므로, 연소실 내부의 평균 온도가 높을수록 유리하다 [7]. 따라서 상대적으로 농후한 운전조건, 즉 스로틀 개도량이 낮은 상태에서 워밍업을 하는 것이 전체 시간축면에서 유리함을 알 수 있다.

워밍업 하는 기간동안 냉각수의 입/출구 온도의 차이를 통해 빠져나가는 누적 및 시간당 평균 열전달량을 계산한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 엔진 외부에 달린 냉각수 펌프의 유량이 23.6 m<sup>3</sup>/h로 고정되어 있

으며, 부동액과 물이 각각 절반 가량 섞여있는 냉각수의 비열이 3,140 J/kg·K 정도이다. 냉각수 펌프 유량에 따라 부동액의 밀도 1097 g/ml와 물과 부동액의 혼합비율이 1:1이므로 혼합물의 유량은 6.91kg/s이다. 이를 바탕으로  $\dot{M}C\Delta T$ 의 수식으로 계산하여 Fig.3의 결과를 도출 하였다 [14].

그 결과 시간당 평균 열전달량은 예상과 같이 희박 연소를 하는 경우 연소온도가 더 낮기 때문에 낮아짐을 알 수 있었다. 그러나 워밍업에 걸리는 시간이 길어짐에 따라 누적 열전달 손실량은 공기과잉률이 희박해질수록 커지는 결과도 확인할 수 있다.

Fig. 4에 따르면 워밍업 초반에 공기과잉률 2.0 조

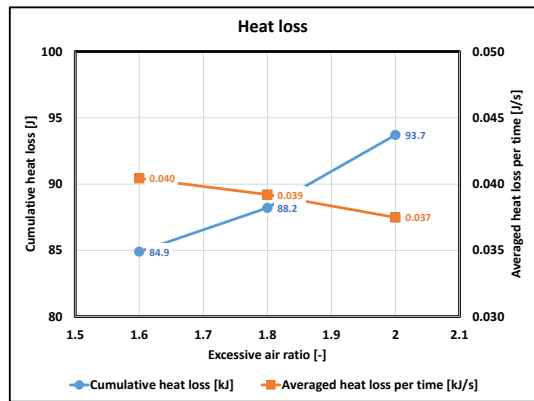


Fig. 3. Cumulative heat loss and averaged heat loss per time calculated from coolant temperature during warm-up as varying excessive air ratios.

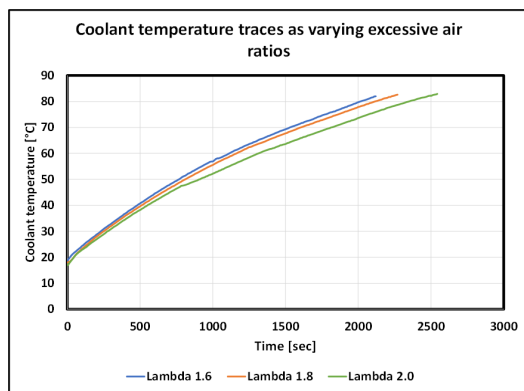


Fig. 2. Coolant out temperature traces as varying excessive air ratios.

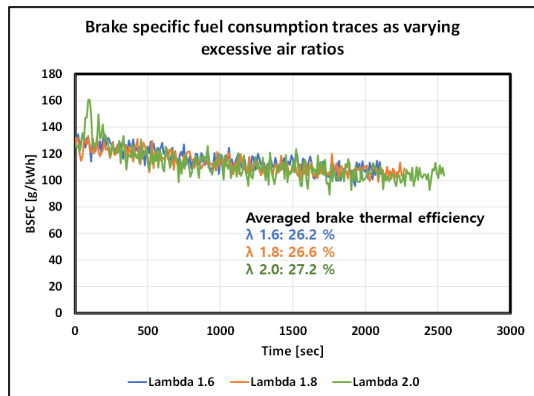


Fig. 4. Brake specific fuel consumption rate during warm-up as varying excessive air ratios.

전에서 제동출력당 연료소모율(BSFC, Brake Specific Fuel Consumption)이 다소 높아지는 순간이 있으나 전반적으로 시간이 지남에 따라 시간별로는 공기과잉률에 상관없이 유사한 경향성과 함께 개선되는 경향을 보였다. 이는 워밍업이 됨에 따라 수소 인젝터의 운할 및 열전달 손실로 빠져나가는 열량이 줄어들기 때문인 것으로 파악된다 [7, 14]. Fig. 4의 BSFC의 수치적인 평균은 공기과잉률 1.6, 1.8, 2.0 순서대로 115.92, 113.24, 111.44 (g/kWh)로 측정되어 희박한 조건일 수록 연비가 개선되는 것을 확인했다. 이에 따라 희박한 조건일수록 BTE가 높아지는 경향을 볼 수 있다[15].

다만 전체 기간에 대해 평균적인 제동열효율 (BTE, Brake Thermal Efficiency)는 희박 연소를 함에 따라 향상되어 열효율 측면에서는 분명 더욱 희박한 조건에서 워밍업을 하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

#### 4.2 배기 배출 및 연료소모 분석

Fig. 5는 워밍업 기간동안 공기과잉률에 따른 배기 중 질소산화물의 농도를 나타내는 그래프이다. 기본적으로 공기과잉률 1.8 및 2.0 조건에서는 매 순간 질소산화물의 농도가 20 ppm을 넘지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 공기과잉률 1.6 조건에서는 20 ppm 대 질소산화물 농도를 보이다가 워밍업 후반부에 약 100 ppm 대까지 상승하는 것을 확인할 수 있다.

이는 Fig. 6-(a)에서 공기과잉률 1.6 조건의 시간에 따른 공기 유량 및 실제 공기과잉률 추이를 보았을 때, 엔진이 워밍업에 따라 흡기부의 온도가 상승하여 체적효율 (Volumetric efficiency)가 낮아지기 때문인 것으로 파악된다 [7, 12].

실제 Fig.6-(b)를 보면 흡기온도는 초기 약 23 °C에서

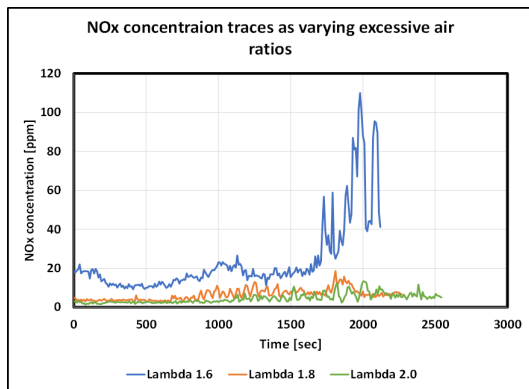
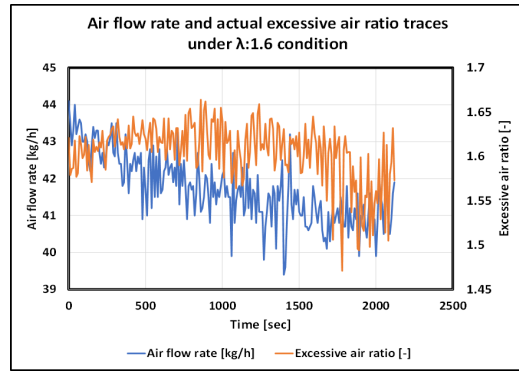
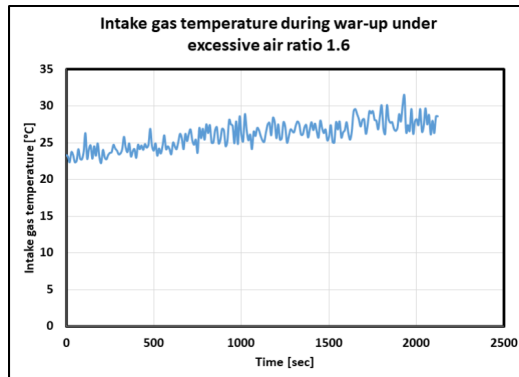


Fig. 5. NOx concentration in the exhaust gas during warm-up as varying excessive air ratios.



(a)



(b)

Fig. 6. Air flow rate, actual excessive air ratio (a) and intake gas temperature (b) traces during warm-up as varying excessive air ratios.

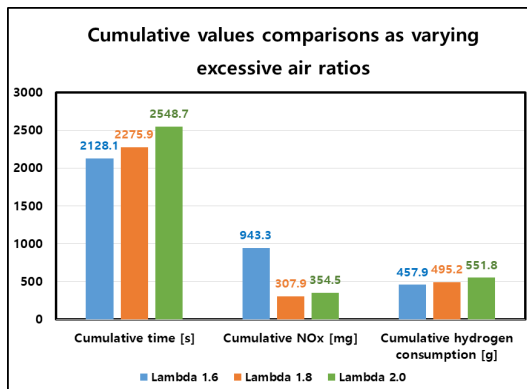


Fig. 7. Cumulative time, NOx and hydrogen consumption during warm-up as varying excessive air ratios.

워밍업이 끝날 무렵 약 30 °C 까지 상승한다. 따라서 동일한 스톱을 개도량에서 흡입 공기의 밀도가 낮아져 워밍업 후반부 유입 공기량이 줄어들고, 이에 따라 순간적으로 농후한 연소가 발생하여 질소산화물의 급상승이 발생하는 것으로 파악된다.

이를 종합하여 Fig. 7에 공기과잉률 별 워밍업 기간 동안 누적 시간과 누적 질소산화물 배출량, 누적 수소소모량을 나타내었다. 희박한 운전 조건을 상정하면 연소온도의 영향을 받는 질소산화물 배출 측면에서 유리할 수는 있으나, 목표한 워밍업 온도에도달 할 때까지 시간이 연장됨에 따라 누적 질소산화물은 오히려 공기과잉률 2.0 조건이 1.8 조건보다 많음을 알 수 있다.

또한 평균적인 제동열효율은 희박 연소 조건에서 유리함을 상기 Fig. 4에서 확인하였으나, 역시 워밍업 기간이 길어짐에 따라 총 연료소모량은 실험 조건 중 최적화 조건인 2.0에서 가장 많음을 알 수 있었다.

## V. 결론

1) 가연범위가 넓은 수소 연료를 내연기관에 활용 시 가솔린을 활용할 때와는 달리 희박 연소 조건에서도 워밍업이 가능하였다. 그러나 공기과잉률이 희박할수록 목표 온도에 도달하는 시간이 더욱 길어져, 공기과잉률 1.6 조건보다 2.0 조건에서 약 400 초 가량의 시간이 더 필요함을 확인하였다.

2) 공기과잉률이 희박해질수록 평균적인 제동열효율은 향상되었으나 (공기과잉률 1.6 시 26.2 %에서 2.0 시 27.2 %), 소요 시간의 증대에 따라 누적 연료소모율은 증가하였다.

3) 질소산화물 배출의 경우에도 희박연소가 평균적으로 시간에 따른 배출 농도는 공기과잉률 2.0에서 가장 낮았으나, 누적 배출량의 경우 1.8 조건에서 가장 낮은 결과를 보였다.

4) 따라서 냉간 영역이 포함되는 EURO-7 규제를 대응하기 위해, 공기과잉률이라는 변수가 추가된 수소 내연기관에 대하여 워밍업 시 질소산화물 배출과 연료소모율 및 소요 시간을 고려한 최적의 공기과잉률 조건이 존재할 수 있음을 본 실험 결과를 통해 제시하였으며, 추후 실제 수소 내연기관을 탑재한 차량 실험에서 기초 결과로 활용이 가능할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 주요사업 중 “수소 직분사 엔진 대상 평가 (IN8360)” 과제의 지원으로 수행되었으며, 한국연구재단 “수소 연료기반 초희박 SPCCI

엔진 운전 전략 및 하드웨어 개선 기술 개발 (NRF-2021R1G1A1004451)” 및 한국산업기술평가관리원 “무탄소 수소연료 기반 직접분사식 수소엔진 원천기술 개발 (No. 20018473)의 지원을 통해 작성되어 이에 감사함을 표합니다.

## REFERENCES

- [1] IPCC special report, Global Warming of 1.5 °C, <<https://www.ipcc.ch/sr15>>, (2018)
- [2] Zhenzhong, Y, Lijun, W, Manlou, H, Yongdi, C, “Research on optimal control to resolve the contradictions between restricting abnormal combustion and improving power output in hydrogen fueled engines” *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 774-82, (2012)
- [3] White, C., Steeper, R., Lutz, A., “The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review”, *International Journal of Hydrogen Energy* 31, 1292-1305, (2006)
- [4] Eichlseder, H, Wallner, T, Freymann, R, Ringler, J, “The Potential of Hydrogen Internal Combustion Engines in a Future Mobility Scenario”, *SAE Technical Paper* 2003-01-2267, (2003)
- [5] Park, C, Kim, Y, Oh, S, Oh, J, Choi, Y, Baek, H, Lee, S, Lee, K, “Effect of fuel injection timing and injection pressure on performance in a hydrogen direct injection engine”, *International Journal of Hydrogen Energy* 47 (50), 21552-21564, (2022)
- [6] Bao, L, Sun, B, Luo, Q, “Optimal control strategy of the turbocharged direct-injection hydrogen engine to achieve near-zero emissions with large power and high brake thermal efficiency”, *FUEL*, 325,124913, (2022)
- [7] Heywood, J., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, (1988)
- [8] Furuhashi, S., Hiruma, M., Enomoto, Y., “Development of a liquid hydrogen car”, *International Journal of Hydrogen Energy* 3, 61-81, (1978).
- [9] Kwon, B, Lee, J, Lee, J, Lee, S, “The effect of compression ratio on combustion and performance characteristics of direct injection spark ignition hydrogen fueled engine”, *Transaction of Korean Society of Automotive Engineering*, 1 (2), 17-26, (1993)
- [10] Lee, S, Yi, H, Kim, E, “Combustion characteristics of intake port injection type hydrogen

fueled engine”, *International Journal of Hydrogen Energy* 20 (4), 317-322, (1995)

- [11] Oh, S, Park, C, Nguyen, D, Kim, S, Kim, Y, Choi, Y, Lee, J, “Investigation on the operable range and idle condition of hydrogen-fueled spark ignition engine for unmanned aerial vehicle (UAV)”, *Energy*, 237, 121645, (2021)
- [12] Lee, J., Park, C., Kim, Y., Choi, Y., Bae, J., Lim, B., “Effect of turbocharger on performance and thermal efficiency of hydrogen-fueled spark ignition engine”, *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 4350-4360, (2019).
- [13] Kim, Y, Park, C, Choi, Y, Oh, S, Lee, J, “ Study on the Effects of Cooling Intake Gas Mixture Method on Enhancement of The Maximum Brake Power under Hydrogen Spark-ignition (SI) Combustion in a 2.4 L Engine”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, 25(5), 11-18, (2021)
- [14] Shudo, T., Nabetani, S., Nakajima, Y., “Analysis of the degree of constant volume and cooling loss in a spark ignition engine fuelled with hydrogen“, *International Journal of Engine Research* 2, 81-92, (2001).
- [15] Roopesh Kumar Mehra, Hao Duan, Sijie Luo, Anas Rao, Fanhua Ma, “Experimental and artificial neural network (ANN) study of hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) engine under various ignition timings and excess air ratios”, *Applied Energy*, 228, 736-754, (2018)