

수소 내연기관의 흡기 냉각 방법에 따른 최고 출력 향상에 관한 연구

김용래 · 박철웅 · 오세철 · 최 영 · †이정우*

한국기계연구원 환경시스템연구본부 그린동력연구실,

*전북대학교 공과대학 기계시스템공학부 교수

(2021년 8월 4일 접수, 2021년 10월 20일 수정, 2021년 10월 21일 채택)

Effects of Intake Gas Mixture Cooling on Enhancement of The Maximum Brake Power in a 2.4 L Hydrogen Spark-ignition Engine

Yongrae Kim · Cheolwoong Park · Sechul Oh · Young Choi · †Jeongwoo Lee*

Engine Research Team, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 34103, Korea

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

(Received August 4, 2021; Revised October 20, 2021; Accepted October 21, 2021)

요약

수소는 동일한 공연비(AF ratio, Air-to-fuel ratio)에서 가솔린에 비해 점화에너지가 현격히 낮기 때문에, 희박한 혼합기 조건에서도 안정적으로 연소할 수 있는 장점을 가지고 있어 연소를 기반으로 하는 내연기관에도 적용이 가능하다. 그러나 일부 연소조건에서 역화(Back-fire) 혹은 조기 점화(Pre-ignition)와 같은 이상 연소가 발생하기 쉬운 문제를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 엔진의 흡기(Intake gas mixture)를 구성하는 신기(Fresh air)와 수소 연료를 각각 냉각하여 공급함으로써, 역화를 최소화하여 최고 출력을 향상하는 연구를 진행하였다. 2.4 L급 전기점화(SI, Spark-ignition)엔진이 사용되었으며 수소는 포트분사 방식(PFI, Port Fuel Injection)으로 공급하였다. 신기의 온도는 터보차저가 장착된 상태에서 인터쿨러(Intercooler)를 이용하여 제어하였으며, 수소의 냉각은 칠러의 냉매와 열교환기를 통하여 직접 냉각 후 공급하였다. 그 결과 신기의 온도를 10~20 °C가량 냉각시킬 경우 최고출력이 약 6.5~8.6 % 가량 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 수소를 -6 °C까지 냉각하여 공급할 경우 마찬가지로 약 7.7 % 가량의 최고 출력을 향상할 수 있었다.

Abstract - Since hydrogen has the lower minimum ignition energy than that of gasoline, hydrogen could be also appropriate for the IC engine systems. However, due to the low ignition energy, there might be a 'back-fire' and 'pre-ignition' problems with hydrogen SI(Spark-ignition) combustion. In this research, cooling effects of intake gas mixture on the improvement of the maximum power output were evaluated in a 2.4 L SI engine. There were two ways to cool intake gas mixtures. The first one was cooling intake fresh air by adjusting inter-cooler system after turbocharger. The other one was cooling hydrogen fuel before supplying by using heat ex-changer. Cooling hydrogen was performed under natural aspired condition. The result showed that cooling fresh air from 40 °C to 20~30 °C improved the maximum brake power up to 6.5~8.6 % and cooling hydrogen fuel as -6 °C enhanced the maximum brake power likewise.

Key words : Back-fire, Brake power, Hydrogen, Intake gas mixture cooling, SI combustion

†Corresponding author:engine@jbnu.ac.kr

Copyright © 2021 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

한국을 비롯한 세계 주요 나라들이 지구의 이상 기온을 방지하기 위한 대응책으로 ‘탄소중립 (Carbon-neutral)’을 내세우고 있다. 이에 따라 2015년 선언된 파리 기후변화 대응협정 (Paris’ agreement)에서는 2030년까지 이산화탄소 (CO₂)의 배출 수준을 현행의 30 % 감소로 목표하고 있다 [1]. 이와 같은 상황에서 탄소 기반의 연료인 가솔린 및 디젤과 같은 화석 연료를 주로 사용하던 내연기관 (Internal combustion engine, IC engine)은 큰 변화를 맞이하고 있다. 더구나 2015년 불거진 폭스바겐 디젤 게이트 (Volkswagen diesel gate)로 인해 대기오염과 관련된 주범으로 지목되어, 내연기관에 대한 환경적인 신뢰도가 낮아진 상황이다 [2]. 따라서 열효율을 높여 탄소 배출을 줄이는 방안이나 연료 자체를 바꾸는 시도가 필요하다.

한편 수소는 탄소 자체를 포함하지 않고 있기에, 반응물에 탄소와 관련된 배기물질이 존재하지 않는다. 뿐만 아니라 질량당 저위발열량 (LHV, Low Heating Value)이 120 MJ/kg에 달해 기존의 가솔린, 디젤 연료의 저위발열량인 42~45 MJ/kg에 비해 2~3배 가량 높은 값을 가지고 있는 고밀도 에너지 원이다 [3]. 이에 현재 수소는 연료전지 (Fuel-cell) 시스템에 주로 적용되며 차세대 에너지원으로 각광 받고 있다. 그러나 수소는 전기화학반응 (Electro-chemistry reaction)에 기반한 연료전지뿐만 아니라, 최소 점화에너지가 가솔린에 비해 현저히 낮기 때문에 공기과잉률 (Excessive air ratio, λ)이 높은 희박 조건에서도 안정적으로 연소 할 수 있으므로 연소를 기반으로 하는 내연기관에도 적용하기 용이한 특성을 가지고 있다 [3]. 희박 연소 (Lean combustion)를 시행하면 연소 중 발생하는 질소산화물 (NO_x, Nitrogen Oxides)의 배출을 최소화 할 수 있을 뿐만 아니라, 연소실 벽면으로 전달되는 열손실양을 줄일 수 있어 열효율의 증대에도 큰 도움을 줄 수 있다 [4]. 따라서 내연기관에 수소를 적용하여 희박연소를 구현하는 것은 배출가스 저감 뿐만 아니라 열효율 측면에서도 개선을 이룰 수 있는 효과적인 대응책이 될 수 있다.

그러나 한정된 흡입공기량 상황에서 출력을 높일 경우, 연소실 내 공기와 연료의 공연비 (AFR, Air-to fuel ratio)가 농후해질 수 밖에 없는데, 이론 공연비 (Stoichiometric condition) 부근에서 수소의 최소 점화에너지는 가솔린의 1/10에 불과하므로 역화 (Back-fire)나 조기점화 (Pre-ignition)와 같은 이상연소 (Abnormal combustion)가 발생할 가능성이 존

재한다 [5-7]. 역화는 흡기포트에서 신기(Fresh air)와 혼합되어 실린더 내로 들어가는 수소가 정상적인 점화장치에 의해 착화되기 전에 아직 남아있는 고온의 잔류 가스 (Residual gas) 혹은 열점 (Hot spot)으로 인해 착화되는 현상을 일컫는다 [6]. 조기점화는 흡기 밸브가 닫힌 시점 이후 위와 비슷한 이유로 미리 자발화 (Auto-ignition)하는 현상을 말한다. 이러한 두 이상 연소 반응은 수소 연소를 기반으로 하는 내연기관의 출력 향상을 저해하는 요인으로 작용한다 [7].

이에 수소와 신기의 혼합물인 흡기 (Intake gas mixture)의 온도를 낮춤으로써, 이상연소를 방지하는 연구들이 일부 진행되어 왔다. Furuhashi 등은 이론적 계산을 통해 공급되는 수소의 온도가 -150 °C일 경우, 가솔린을 사용하는 내연기관의 최고 출력과 동일한 결과를 얻을 수 있을 것이라 추론하였다 [8]. 이후 Wallner의 연구에서 -60 °C로 흡기를 낮추는 방법을 통해 액상 수소를 이용할 시 최고 출력을 가솔린 포트 분사 방식(PFI, Port Fuel Injection)에 비해 약 15 % 가량 향상시키는 결과를 실험적으로 확인하였다 [9]. 그러나 회전속도가 빠른 내연기관의 동작 상황에 최고 출력 시 공급되는 신기와 수소의 양이 많기 때문에, 냉각을 시키는 데 있어서 어려움이 존재하므로 많은 선행 연구가 진행되지는 못하였다. 하지만 상기 소개한 두 연구 결과에서와 같이 열역학적 관점에서 볼 때 초기 흡기 온도를 낮출 경우 역화 및 조기점화와 같은 이상연소를 억제할 수 있는 가능성은 확실히 존재함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 2.4 L 전기점화 (SI, Spark-ignition) 엔진에 수소를 전소(全燒) 할 시 흡기를 두 가지 조건으로 냉각하여 최고 출력 (The maximum brake power)을 향상하는 방법에 대해 실험적으로 접근하여 논의한다. 흡기를 냉각하는 과정은 신기를 인터쿨러 (Inter-cooler)를 이용하여 냉각하는 방법과 수소 연료를 열교환기를 이용하여 냉각하는 방법으로 나눈다.

II. 실험 장치 구성 및 방법

2.1. 실험 장치 구성

실험에 사용된 엔진은 2.4 L급 직렬형 4기통 자연흡기 포트분사식 전기점화 엔진 (Hyundai Motor Company, Theta engine)이다. 해당 엔진의 자세한 제원은 Table 1.에 소개되어 있다.

해당 엔진은 Fig. 1에서와 같이 250 kW급 동력계 (Dasan)에 장착되어 엔진 속도와 토크를 제어하

였다. 수소는 레귤레이터를 통해 0.7 MPa의 압력으로 공급하였고, 이는 다중분사방식 (MPI, Multi Point Injection)을 사용한 인젝터로 각 실린더에 분사된다. 수소 연료 유량을 측정하기 위하여 질량유량계(MFM, Emerson)를 사용하였으며, 공연비의 확인에는 ETAS社의 LA4 광대역 센서가 이용되었다.

냉각수 온도는 80 °C로 유지하였고, 터보차저 (K03-2075, Borgwaner)를 통해 과급된 흡기는 상온의 냉각수를 사용하는 인터쿨러를 이용하여 온도를 제어하였다. 수소연료 온도 냉각을 위해서는 Fig. 2에서와 같이 대용량 칠러를 이용하여 냉매의 온도를 약 -20 °C로 낮추고, 70,000 Kcal/h 용량의 판형 열

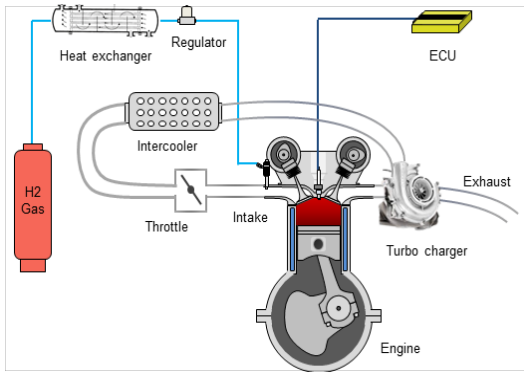


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

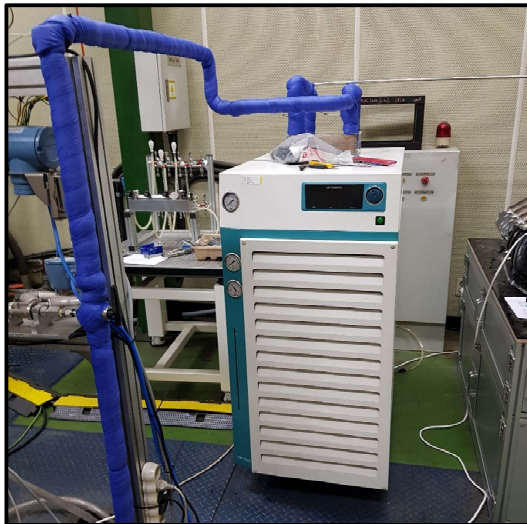


Fig. 2. Heat ex-changer setup for cooling hydrogen.

교환기를 사용함으로써 수소를 냉각하였다. 수소 연료의 최종 온도는 인젝터 전단의 연료 레일 기준이다. 연소압력의 경우 Kistler의 6052 센서를 장착하여 측정하였으며, 이를 이용한 연소해석에는 Dewetron의 DE500을 사용하였다.

2.2. 실험 방법

실험은 크게 두 가지로 나누어진다. 첫 번째는 신기 온도 냉각을 수행한 실험과 두 번째로 수소 연료를 냉각시켜 공급한 실험이다.

Table 1. Engine specifications

Parameters	Specification
Cylinder number [-]	4
Displacement [L]	2.4
Bore x Stroke [mm]	88.0 x 97.0
Compression ratio [-]	10.5
The maximum power [kW]	130 @ 6,000 rpm
The maximum torque [Nm]	226 @ 4,000 rpm

Table 2. Experimental conditions

The 1 st experiment: Cooling fresh air		
Engine speed [rpm]	2,000	4,000
Intake pressure [MPa]	0.11 (Turbocharged)	0.13 (Turbocharged)
Ignition timing [CAD BTDC]	7	12
Hydrogen temp. [°C]	30	
Air temp. [°C]	40 (Base) 20 (Cooled)	40 (Base) 30 (Cooled)
The 2 nd experiment: Cooling hydrogen		
Engine speed [rpm]	2,000	
Intake pressure [MPa]	0.1 (Naturally aspired)	
Ignition timing [CAD BTDC]	0 (TDC)	
Air temp. [°C]	30	
Hydrogen temp. [°C]	30 (Base) / -6 (Cooled)	

첫 번째 신기 온도 제어 실험은 터보차저가 장착된 상태에서 수행되었으며, 엔진 속도 2,000과 4,000 rpm 두 조건에서 진행되었다. 스로틀 개도량은 최대치로 개방하였으며, 이때 터보차저의 성능도 최대치로 구동하였다. 인터쿨러를 지난 이후 신기의 온도는 기본 조건인 40 °C에서 2,000 rpm일 때 20 °C, 4,000 rpm일 때 30 °C로 추가 냉각하였다. 4,000 rpm인 경우 흡입 공기 유량도 많아서 20 °C까지 냉각하기가 어려웠기 때문에 안정적으로 냉각이 가능한 30 °C로 설정하였다. 기본 신기의 온도와 냉각된 온도에서 최고 출력 조건을 측정하여 비교 정리하였다.

두 번째 수소 연료 온도 제어 실험은 터보차저를 사용하지 않은 자연흡기 상태에서 수행되었다. 대용량 열교환기를 사용하였음에도 불구하고 수소 유량이 증가하면 충분히 냉각시키기 어려웠기 때문에, 온도를 최대한 안정적으로 낮게 유지할 수 있도록 2,000 rpm에서 자연흡기 상태의 최고 출력이 유지될 정도로만 실험을 수행한 것이다. 결과적으로 기본 연료 공급 온도 30 °C에서 최저치인 -6 °C까지 낮추어 최고 출력을 측정 및 비교 분석하였으며, 이를 Table 2에 정리하였다.

III. 실험 결과 및 논의

3.1. 신기 냉각에 따른 엔진 성능 영향

Fig. 3은 각각 2,000 및 4,000 rpm 속도에서 신기의 기본 온도 상태와 냉각 조건 시 최고 출력과 엔진 운전 지표들을 나타내고 있다. 신기와 수소 연료가 혼합된 흡기 혼합물(Intake gas mixture)의 온도는 수소의 공급 온도를 고려해야 하므로 실제로는 2,000 rpm에서 15 °C, 4,000 rpm에서 9 °C 정도의 차이가 발생함을 볼 수 있다. 이에 따라 두 엔진 속도 조건에서 모두 신기 냉각을 통해 역화를 억제할 수 있는 최고 토크는 각각 8.57, 6.48 % 향상되었다. 이에 따라 같은 엔진 속도 조건에서 최고 출력(Power) 역시 동일하게 향상시킬 수 있었다.

이러한 출력의 향상은 신기 냉각에 따른 역화 억제로 인하여 보다 많은 수소 연료를 공급할 수 있게 됨에 따른 것으로, 2,000 rpm에서 전체 공기과잉률을 나타내는 Lambda 값이 1.30에서 1.21로, 4,000 rpm에서는 1.46에서 1.40으로 혼합물의 농도가 농후해졌음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 신기 온도 변경에 따른 열효율을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 신기 냉각을 통해 각 엔진 속도 조건에서 열효율의 향상이 미소한 수준으로 이루어진 것을 확인할 수 있는데, 2,000 rpm

조건에서는 0.31 %p, 4,000 rpm에서는 0.58 %p가 향상되었다.

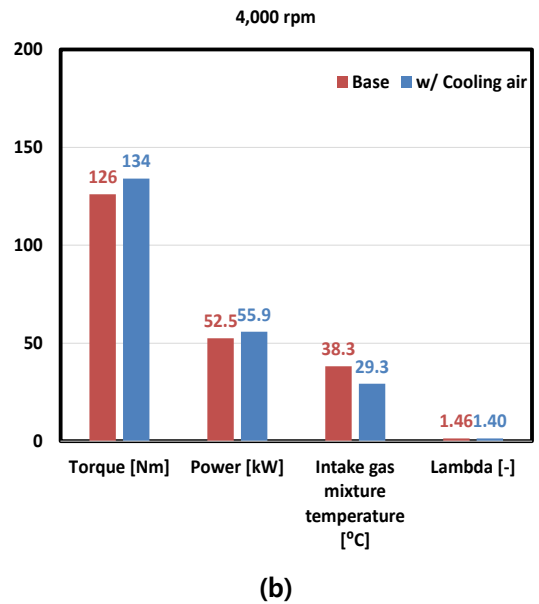
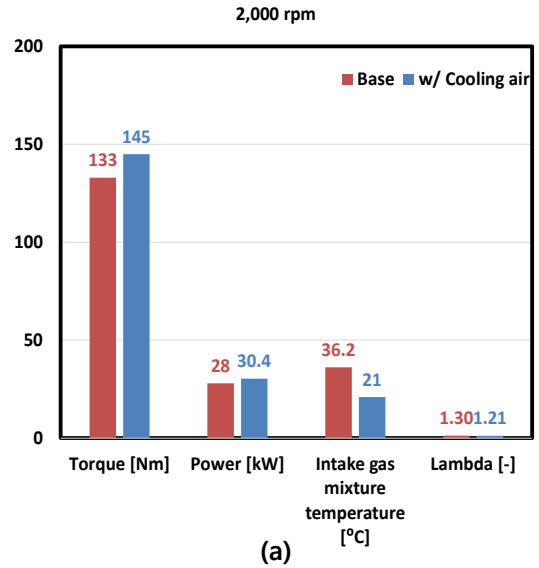


Fig. 3. Brake torque, power, intake gas mixture temperature (air+hydrogen) and lambda results between base and air cooling air conditions under 2,000 rpm (a) and 4,000 rpm (b).

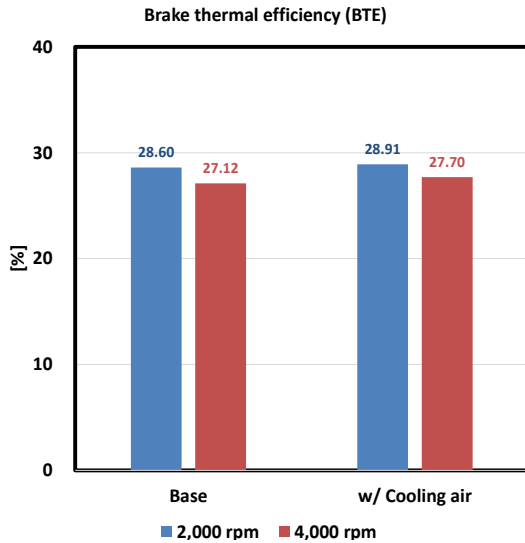


Fig. 4. Brake thermal efficiency (BTE) results between base and air cooling air conditions under 2,000 and 4,000 rpm cases.

열효율과 관련해서는 두 가지 사항을 논의해 볼 수 있는데, 첫 번째는 두 엔진 속도에서 수소 연료로 구동시 30 % 이하의 낮은 열효율을 보인다는 점이다. 이는 Fig. 5.에서 볼 수 있듯 연소상을 MBT(Maximum brake torque timing)에 두지 않고 그보다 지각시켰기 때문이다. 일반적으로 전부하(Full load)가 아닌 부분부하(Part load) 조건에서는 MBT로 점화시기가 설정된다해도 역화와 같은 이상 연소 현상이 발생하기에는 발열량 및 연소실 내 최고 온도가 낮아 문제가 생기지 않는다 [10]. 그런데 발열량이 많아지고, 연소실 내 연소 온도가 상승하는 전부하 조건에서는 이상 연소를 피하기 위해 점화시기를 지각하는 방식을 사용할 수 밖에 없다. 이는 가솔린 연료를 사용하는 전기점화 엔진에서도 사용되는 방식이다.

두 번째로 Fig. 5를 통해 논의할 사항은 수소 냉각에 따른 열효율 상승에 관한 것이다. 신기 냉각을 통해 역화를 방지하면서도 연료가 더 공급된 상황에서 점화 시기의 변화 없이 동등하게 설정한 것이 주요 원인으로 파악된다. 또한 전체적인 공기과잉률이 농후해짐에 따라 동일한 점화시기에서 연소 시작점이 빨라져서 가능해진 것으로 예상된다. 즉, 팽창과정 중에 일어나는 연소이기 때문에 연소상이 효율이 높은 포인트로 미소하게나마 이동된 점이 유효한 것으로 보인다.

마지막으로 Fig. 6을 통해 신기 냉각이 최고 출

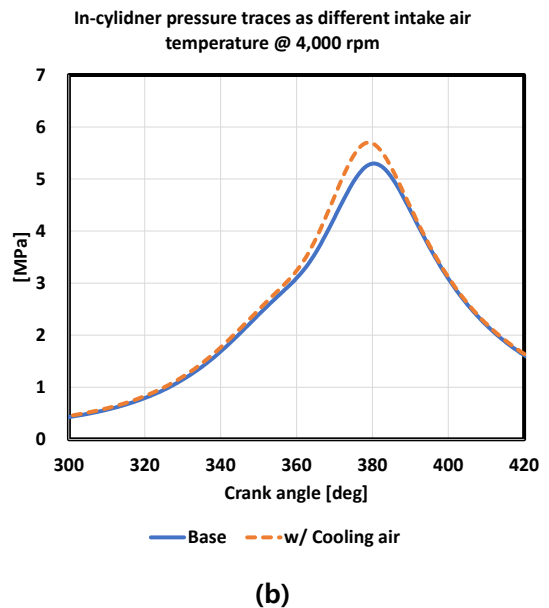
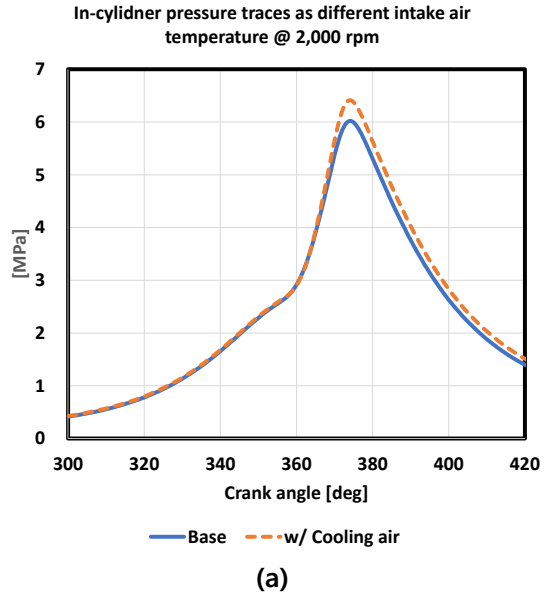


Fig. 5. In-cylinder pressure traces between base and air cooling air conditions under 2,000 rpm (a) and 4,000 rpm (b).

력 향상에 영향을 준 원인에 대해 간략하게 고찰해 볼 수 있다. 이론적인 출력 향상(Theoretical power increment)은 이상기체 방정식에 입각하여, 단순히

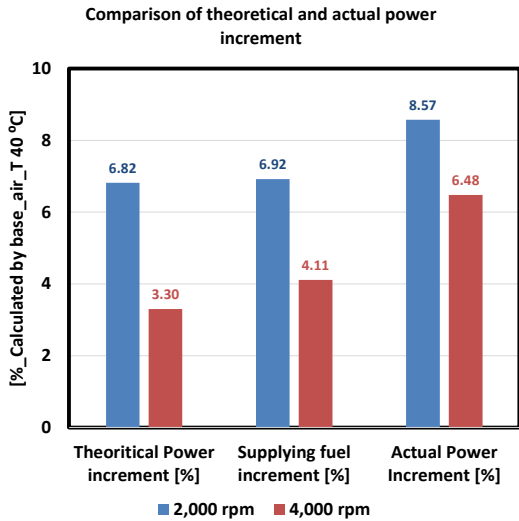


Fig. 6. Comparison of theoretical and actual power increment by cooling intake air temperature addition to supplying fuel increment. (※ All the calculations were comparing to results from base air temperature condition.)

신기의 온도가 저하되었을 때 공급되는 공기의 밀도 변화에 따른 출력 향상을 추정해 본 결과이다. 즉, 이상 연소를 고려하지 않고 열역학적 관점에서만 바라본 상태에서, 공기 밀도의 증가에 비례하여 최고 출력이 증가한다고 가정한 것이다 [11]. 이 경우 기본 신기 온도 40 °C에서 각각 20, 30 °C로 냉각시켰을 때, 공기의 밀도가 각각 6.82, 3.30 % 증가한다는 결론이 나온다. Fig. 6에 제시된 실제 공급된 수소 연료량의 증가량도 이와 유사한 수준으로 나타났다.

그러나 실제 출력 향상 정도를 보면 이보다 높은 8.57, 6.48 %의 향상을 보이고 있는데, 종합해보면 신기 냉각 시 Fig. 4~5에서 분석한 열효율 향상 영향과 더불어 공기 밀도 향상에 따른 연료 공급 상승이 함께 영향을 주어 높은 수준의 출력 향상을 보인 것으로 결론내려진다. 다만 일반적으로 표준 대기상태에서 수소의 자발화 온도는 580 °C 정도로 알려져 있으므로, 신기 냉각에 따른 자발화 시점에서의 연소실 내 혼합물의 온도 강하 역시 영향을 주었을 가능성이 크다. 또한 농후해진 공연비 상태에서 상승하였을 것으로 예상되는 연소실 내 최고 온도가 열역학적 효율에 긍정적인 영향을 주었을 수 있으므로 이는 추후 해석적 연구를 통한 규명이

필요하다.

3.2. 수소 냉각에 따른 엔진 성능 영향

두 번째 실험으로서 수소 연료 냉각 실험의 결과를 살펴보면, 터보차저를 사용하였던 실험과는 달리 수소 냉각 실험은 자연흡기 조건에서 수행되었기에 신기의 온도는 실험실 내부의 공조장치로 제어 가능한 30 °C 내외의 수준으로 조절하여 공급되었다. 수소 연료의 온도도 마찬가지로 기본 조건은 30 °C이고 칠러에 의해 냉각 시 -6 °C까지 저감시킨 후 공급하였다. 결과적으로 인젝터 후단 즉 흡기 포트 내부에서 측정된 흡기 혼합물의 온도는 기본 조건에서 약 32 °C이었고 냉각된 수소 공급 시에는 27 °C 정도로 약 5 °C 정도가 낮아졌다. 이는 흡기 포트 내부가 엔진 헤드로부터의 열전달로 인해 공기 및 수소 연료의 온도도 상승한 결과이다. 다만, 냉각 수소연료 공급 시 흡기 혼합물의 온도는 신기 온도에 비해 감소폭이 매우 작게 나타났다. 이는 수소의 이론 공연비가 34.5 정도로 공기의 공급 유량이 수소보다 35~40배 가량 많기 때문에 수소 연료 자체의 냉각이 흡기 혼합물의 냉각에 미치는 영향은 신기 냉각보다 작을 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 7에는 수소연료 냉각에 따른 토크, 출력 등의 엔진 성능관련 인자 결과들 (a)과 연소 기간 (Burn duration), 최고 연소 압력 등을 보여주는 연소 관련 인자 결과들(b)을 정리하였다. 연소기간은 열발생률 계산 상의 10 % 연소 지점부터 90 % 연소 지점까지로 정의하였다. Fig. 7(a)의 결과를 요약하면, 냉각된 수소연료 공급에 따라 역화를 억제 한 최고 출력 조건에서 공기과잉률은 1.23에서 1.09로 상당량 낮출 수 있었으며, 이에 따라 한정된 신기 공급량 수준에서 최고 출력을 23.66에서 25.47 kW로 증가시킬 수 있었다. 이때 수소연료 공급량의 증가율은 11.4 %였으며, 최고 출력 증가율은 7.65 %였다. 이는 공급 연료 증가율에 비해 출력 상승률이 더 높았던 신기 냉각 시 보다 낮은 결과인데, 앞에서 설명하였듯 수소 냉각에 따른 혼합기의 온도 감소가 비교적 작은 수준이었으므로, 본 출력의 상승은 대부분 연료량의 증대에서 기인한 것으로 보이며, 열효율 측면에서의 긍정적인 영향은 없었던 것으로 파악된다. 특히 열효율은 30.72 %에서 수소 냉각 시 28.76 %로 약 2%p가 감소한 것을 볼 수 있으므로 오히려 열효율의 감소가 최고 출력 상승에는 악영향을 준 것이라 볼 수 있다.

첫 번째 실험에서 공기과잉률이 1.2~1.5 수준으로 희박한 상태임에 비하여, 이번 실험에서는 한정

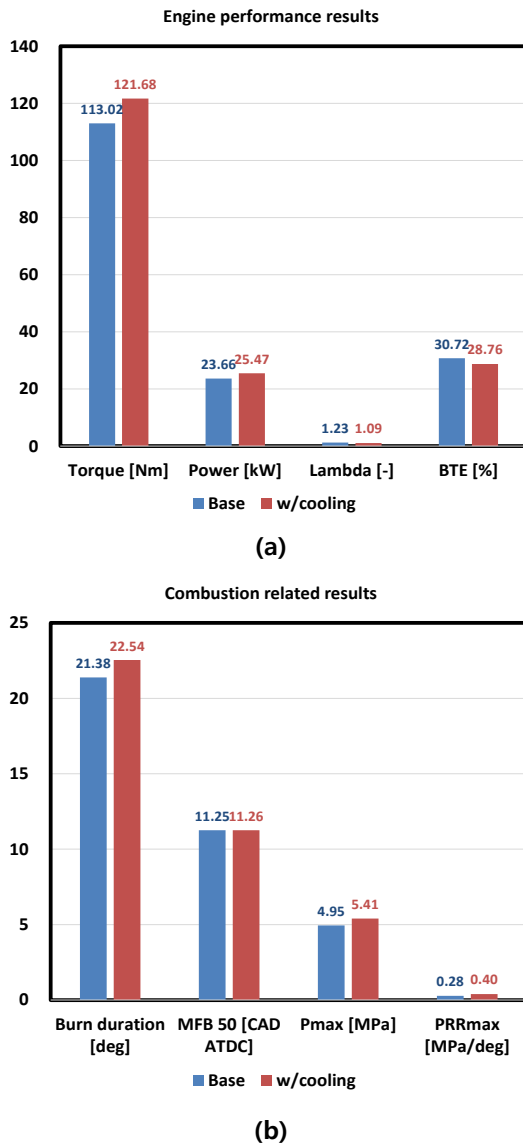


Fig. 7. Engine performance (a) and combustion related results (b) under 2,000 rpm between base and hydrogen cooling conditions.

된 신기 유입 상황에서 수소 냉각에 따라 이론 공연비에 가까운 조건에서 연소되었으므로, 높아진 연소 온도에 따라 연소실 벽면으로의 열전달 손실이 높아졌을 가능성이 존재한다. 특히 수소는 분자량이 작아 기체 확산도가 열적 확산도보다 현격히

높아 Lewis number ($Le=a/D$)가 0.3 수준에 불과하므로 단일화염온도보다 연소 온도가 높을 가능성이 존재한다 [12]. 즉, 수소는 한정된 공기량 조건에서 이론공연비에 가까운 조건으로 농후하게 연소하는 것이 출력향상에 유리하지만 열전달 손실 관점에서는 희박하게 연소하는 것이 유리한 것으로도 유추할 수 있다.

연소와 관련된 Fig. 7-(b)의 결과들을 보면 공급된 연료량이 11.4 % 가량 증가했음에도 불구하고, 주 연소기간은 21.38에서 22.54 deg로 약 1 deg 정도만 증가했음을 알 수 있다. 이는 이론공연비에 가까운 상황에서 증가한 층류 화염전파속도로 인해 연소에 참여한 연료량 증가에도 불구하고 연소 기간에서 큰 차이를 보이지 않은 것으로 파악된다. 또한 연소 중앙지점 (MFB 50, Mass fraction burned 50 %)은 동등하게 유지되었으며, 이에 따라 연소실 내 최고 압력 (Pmax)가 약 10 % 가량 상승한 것을 확인 할 수 있다. 마지막으로 연소실 내 최고 압력 상승률 (PRRmax, The maximum in-cylinder pressure rise rate)은 수소 냉각 시에 기본 조건보다 농후해진 연소 조건에 따라 더 높게 형성된 것으로 보인다.

수소 연료 냉각에 의한 효과를 보다 극적으로 확인하기 위해서는 보다 큰 용량의 냉각기나 액화 수소를 이용한 실험을 통하여 이상 연소 방지 및 최고 출력 향상 정도를 이론적인 수준까지 확인할 수 있을 것으로 기대한다.

IV. 결론

본 연구에서는 2.4 L 전기점화식 엔진에 수소 전소 시, 엔진에 공급되는 흡기 혼합물 중 신기와 수소를 각각 냉각할 경우 최고 출력 향상에 미치는 영향에 대해 실험적으로 분석하고 논의하였다.

1) 신기의 온도를 2,000 rpm에서는 20 °C, 4,000 rpm에서는 30 °C로 냉각하여 공급한 경우, 엔진 최고 출력의 향상은 2,000 rpm에서 8.57 %, 4,000 rpm에서 6.48 % 이루어짐을 확인할 수 있었다. 이는 열효율(BTE)의 일부 상승과 더불어 증가한 공기밀도의 영향으로 이상 연소 발생없이 보다 많은 수소 연료 공급이 가능하였기 때문인 것으로 파악된다.

2) 수소 연료 자체를 -6 °C까지 냉각한 경우 7.65 %의 최고 출력 향상을 확인할 수 있었다. 특히, 수소 냉각에 따라 이상 연소를 피하는 상황에서 거의 이론공연비에 가까운 연소 조건 ($\lambda = 1.09$)을 확보

할 수 있었다. 다만 이론 공연비에 가까운 연소 조건과 자연흡기 상황에서 한정된 공기량 조건에서는 열손실 증가로 인하여 열효율은 감소하는 경향을 보였으며, 다만 이상 연소를 피하는 상황에서 보다 많은 수소 연료를 연소에 참여시킬 수 있다는 점에서 의의를 갖는다.

3) 흡입 공기 및 수소 연료 냉각에 따른 최고 출력 향상을 목표로 수행한 실험에서, 냉각용량에 대한 현실적인 제한으로 인해 다양한 운전 조건에서 실험을 수행하지는 못하였으나 역화와 같은 이상 연소를 억제하여 최고 출력을 일부 향상할 수 있음을 실험적으로 규명하였다.

감사의 글

본 연구는 한국기계연구원의 주요사업과 전북대학교 연구 및 산학협력영역의 학술트랙 지원 그리고 한국연구재단 “수소 연료기반 초회박 SPCCI 엔진 운전 전략 및 하드웨어 개선 기술 개발 (NRF-2021 R1G1A1004451)”의 지원을 통해 작성되어 이에 감사 표합니다.

REFERENCES

- [1] “The Paris Agreement”, United Nations Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>, (2015)
- [2] “Diesel gate”. Journalism for the energy transition, “Dieselgate” - a timeline of the car emissions fraud scandal in Germany | Clean Energy Wire, (2015).
- [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] 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).
- [5] Lewis, B., Elbe, G., Combustion, Flames, and Explosions of Gases, Academic Press, Orlando, (1987).
- [6] Kondo, T., Lio, S., Hiruma, M., “A Study on the Mechanism of Backfire in External Mixture Formation Hydrogen Engines - About Backfire Occurred by Cause of the Spark Plug”, SAE Technical paper 971704, (1997).
- [7] Li, H., Karim, G., “Knock in spark ignition hydrogen engines”, International Journal of Hydrogen Energy 29, 859-865, (2004).
- [8] Furuhashi, S., Hiruma, M., Enomoto, Y., “Development of a liquid hydrogen car”, International Journal of Hydrogen Energy 3, 61-81, (1978).
- [9] Wallner, T., Wimmer, A., Gerbig, F., Fickel, H., The hydrogen combustion engine: a basic concept study, Springer-Verlag, Berlin, (2004).
- [10] 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).
- [11] Heywood, J., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, (1988)
- [12] Gelfand, B., Silnikov, M., Medvedev, S., Khomik, S., Thermo-Gas Dynamics of Hydrogen Combustion and Explosion, Springer-Verlag, Berlin, (2012).