

Atkinson 사이클이 적용된 대형 천연가스 엔진에서 수소 혼입 검증

박현욱^{*1)} · 이준순¹⁾ · 오승묵¹⁾ · 김창업¹⁾
한국기계연구원 친환경모빌리티연구실¹⁾

Verification of Hydrogen Mixing in a Heavy-Duty Natural Gas Engine with Atkinson Cycle

Hyunwook Park^{*1)} · Junsun Lee¹⁾ · Seungmook Oh¹⁾ · Changup Kim¹⁾

^{*1)} Department of Eco-friendly Mobility Power, Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Republic of Korea

Abstract : Attempts are being made to mix hydrogen into existing natural gas networks to reduce carbon dioxide emissions from industrial and residential end uses. In Korea, the government is also trying to contribute to 2.6% of its greenhouse gas reduction target by mixing 20% hydrogen into city gas pipeline. The effects of up to 40% hydrogen mixing were verified in a heavy-duty natural gas engine. The engine is designed for quadruple power generation in buildings and rooftop greenhouses, and is equipped with an Atkinson cycle and high compression ratio for high-efficiency operation. In this presentation, the feasibility of hydrogen mixing is evaluated without any hardware changes in the engine under stoichiometric combustion modes. The performance and emissions under lean combustion modes are also evaluated during wide open throttle operations.

Key words : Natural gas(천연가스), Hydrogen mixing(수소 혼입), Heavy duty(대형), Atkinson cycle(애킨슨 사이클), Knocking(노킹), Excess air ratio(공기과잉률)

1. 서 론

세계적으로 산업과 가정 부문에서 발생하는 이산화탄소를 저감하기 위해 기존 천연가스 네트워크에 수소를 혼입하기 위한 움직임을 보이고 있다. 영국에서는 2017년부터 HyDeploy 과제를 통해 수소 혼입에 대한 실증을 진행하고 있다.¹⁾ Phase 1에서는 Keele 대학의 100가구 30개 건물을 대상으로 수소 20% 혼입을 시험하였으며, Phase 2에서는 Winlaton 지역으로 확장하여 수소 혼입 실증을 진행하였다. 미국에서는 2020년부터 HyBlend 과제를 통해 천연가스 파이프 시스템의 수소 혼입 위험성 평가, 수소 혼입 비용 및 기대효과 등을 전반적으로 평가하고 있다.²⁾ 국내에서도 2026년까지 도시가스 배관에 수소 20% 혼입을 목표로 실증을 점차적으로 확대 중에 있다. 국내의 도시가스 사용량 기준으로, 수소 20% 혼입시 연간 약 765만톤의 이산화탄소 감축이 예상되며 이는 정부 온실가스 감축 목표량의 2.63%에 해당한다.³⁾

대형 천연가스 엔진은 수송 및 발전 부문에서

주로 활용되고 있으며, 수소 혼입에 따른 동력 성능 및 배출가스 특성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 대형 천연가스 엔진에서 주로 채택하고 있는 이론공연비 연소에 수소 혼입 비율이 증가할 경우, 연소 온도 및 배기가스 온도가 증가하므로 하드웨어 선정에 대한 고려가 필요하다.⁴⁾ 수소의 넓은 희박가연한계 및 우수한 연소 특성으로, 수소 혼입에 따라 희박 연소 적용으로 열효율 향상을 도모할 수 있다. 선행연구에서 엔진에서 실화를 부하 변동계수 10%로 정의한 경우, 전부하 조건에서 희박 연소 한계는 수소 10% 혼입시 1.8, 수소 30% 혼입시 2.1까지 확장되는 것으로 보고하였다.⁵⁾

본 연구에서는 Atkinson 사이클이 적용된 대형 천연가스 엔진에서 수소 혼입 최대 40%를 적용하여, 베이스 엔진에서 별도의 하드웨어 변경없이 이론공연비 연소와 희박 연소 모드에서 수소 혼입의 활용가능성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

본 연구는 11L급 6기통 대형 스파크점화 엔진에서 진행되었다. 구체적인 엔진의 제원은 Table 1에 나타내었다. 본 엔진은 향후 하이브리드 흡수식 냉난방 시스템과 연동되어 건물과 옥상온실에 냉방, 난방, 전기 및 탄산시비를 제공한다. 따라서 고효율 발전을 구현하기 위해 Atkinson 사이클과 고압축비가 적용되었다. Fig. 1은 본 연구의 실험장치 구성도를 나타낸 것이다. 천연가스와 수소의 혼입 비율은 질량유량 제어기를 통해 최대 40%까지 적용하였다.

Table 1 Engine specifications

Engine type	6-cylinders, heavy-duty, spark-ignition
Displacement [L]	11.05
Bore x Stroke [m]	0.123 x 0.155
Compression ratio	13:1
Number of valves	1 intake & 1 exhaust
Injection type	Single-point injection

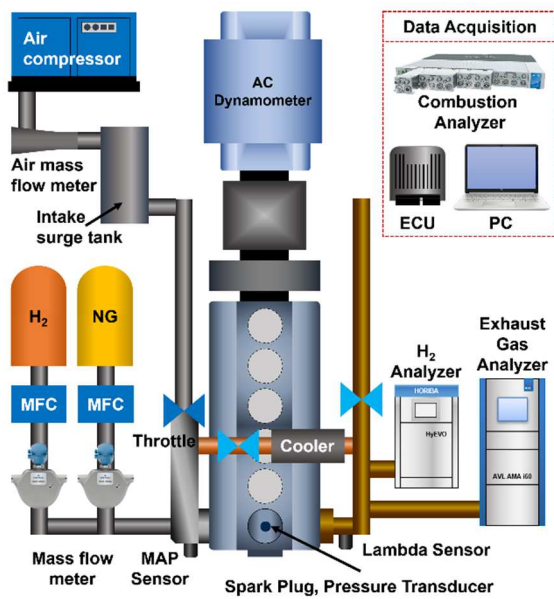


Fig. 1 Schematic of natural gas-hydrogen engine setup

2.2 실험조건

본 엔진은 발전용으로 제작되었으므로, 엔진속

도는 1,800 rpm으로 구동하였다. 이론공연비 연소 모드에서는 100 kW로 부하를 고정하면서 수소 혼입을 최대 40%까지 적용하였으며, 희박 연소 모드에서는 wide open throttle 운전에서 실화가 발생할 때까지 공기과잉률을 증가하였다. 엔진에서 발생하는 노킹 판별을 위해 4kHz high-pass filter를 적용하였으며, 300 사이클 중에서 한 사이클의 노킹 세기가 1 bar보다 높은 경우를 노킹으로 정의하였다.

3. 실험결과 및 토론

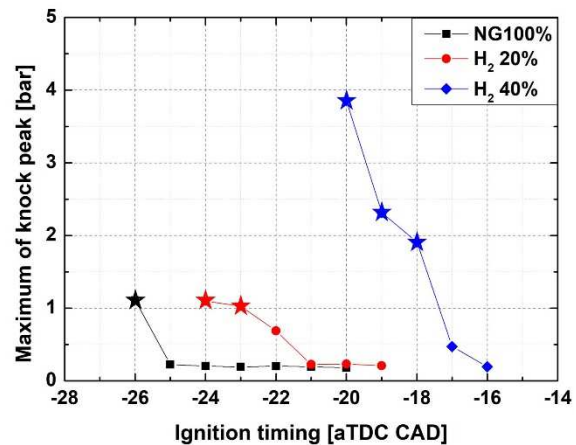


Fig. 2 Maximum knock peak according to hydrogen mixing

Fig. 2는 대형 천연가스 엔진의 이론공연비 연소 모드에서 수소 혼입 비율에 따른 노킹 세기를 나타낸 것이다. 천연가스 엔진 운전에서는 최고 열효율을 위한 최적 연소상까지 점화시기 운용이 가능하였다. 그러나 수소 20%와 수소 40% 혼입에서는 노킹 억제를 위해 점화시기를 지연하였으며, 이로 인해 열효율이 감소되었다. 특히, 수소 40% 혼입에서는 진각된 점화시기에서 다수의 노킹이 발생하였으며, 이로 인해 상당히 좁은 점화시기 운용 영역을 기록하였다. 동일 연소상에서 수소 혼입 비율 증가 시 질소산화물은 증가한 반면, 총 탄화수소, 일산화탄소 및 이산화탄소 배출은 감소하였다. 이산화탄소 배출은 수소 혼입 20%에서 5.2%, 수소 혼입 40%에서 11.8% 저감되었다. Single-point 분사 방식의 스파크점화 엔진에서 수소 혼입 40%까지는 역화 및 조기점화는 발생되지 않았다.

희박 연소 모드의 wide-open throttle 운전에서

천연가스 엔진은 공기과잉률 1.5 수준까지 운전이 가능하였다. 수소 혼입 20%에서는 공기과잉률이 1.7 수준까지 확장되었으며, 수소 혼입 40%에서는 희박 가연한계가 1.9까지 확장되었다. 그러나 공기과잉률 증가에 따라 출력이 감소하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 Atkinson 사이클이 적용된 대형 천연가스 엔진에서 수소 혼입을 최대 40%까지 적용하여, 별도의 하드웨어 변경없이 수소 혼입의 활용 가능성을 평가하였다.

이론공연비 연소 모드에서 수소 혼입 비율 증가에 따라 열효율이 소폭 감소한 반면, 이산화탄소 감축 효과는 우수하였다. 수소 혼입 20% 수준까지는 현재의 천연가스 엔진시스템으로 대응 가능한 반면, 수소 혼입 40% 수준에서는 노킹 발생으로 이론공연비 연소 운전영역이 상당히 감소되었다.

희박 연소 모드에서는 수소 혼입 비율 증가에 따라 희박 가연한계가 확장되었다. 그러나 공기과잉률 증가에 따라 출력이 감소되므로, 희박 연소 모드에서는 체적효율의 극대화에 초점을 맞춘 하드웨어 설계가 필요하였다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부의 제원으로 에너지수요관리 핵심기술개발 사업 “다중 분산발전 기반의 옥상온실형 스마트 그린빌딩 융복합 시스템 개발 및 실증” 과제(20212020800050)의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) Tommy Isaac, "HyDeploy: The UK's first hydrogen blending deployment project", Clean Energy, Vol. 3, No. 2, pp. 114-125, 2019.
- 2) Erdener, Burcin Cakir, Brian Sergi, Omar J. Guerra, Aurelio Lazaro Chueca, Kwabena Pambour, Carlo Brancucci, and Bri-Mathias Hodge, "A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in

natural gas pipelines", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, No. 14, pp. 5595-5617, 2023.

- 3) "도시가스에 수소 혼입, 연구 시작한다", 산업통상자원부 보도자료, 2023.
- 4) Junsun Lee, Hyunwook Park, Seungmook Oh, Changup Kim, Yonggyu Lee, and Kernyong Kang, "Performance and exhaust emissions of heavy-duty engines fueled with natural gas and hydrogen in part-load operation", Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 32, No. 4, pp. 349-355, 2024.
- 5) Sijie Luo, Fanhua Ma, Roopesh Kumar Mehra, and Zuohua Huang. "Deep insights of HCNG engine research in China", Fuel, Vol. 263, 116612, 2020.