

0D simulation 기반 고압축비 SI 엔진 운전 조건에서의 e-gasoline 연료 설

계에 따른 점화지연 특성 및 detonation-driven knock 경향 분석

오 세 철^{1)*}·위 재 호¹⁾·김 나 연¹⁾·유 호 진¹⁾

부산대학교 기계공학부¹⁾

Investigation on Ignition Delay Characteristics of E-gasoline and its Knock Propensity Driven by Detonation under Modern SI Engine with High Compression Ratio based on 0D Simulation

Sechul Oh^{1)*} · Jaeho Wi¹⁾ · Nayeon Kim¹⁾ · Hojin Yoo¹⁾

Pusan National University¹⁾

Key words : Ignition delay(점화지연), e-gasoline(e-가솔린), Knock(노킹), Autoignition(자발화), Chemical kinetics(화학반응론)

*교신저자, E-mail: sechuloh@pusan.ac.kr

최근 고효율 내연기관 개발을 위한 고압축비 SI 엔진 기술이 주목받고 있으며, 이 과정에서 노킹(knock) 제어는 핵심적인 기술적 과제로 대두되고 있다. 기존의 RON 및 MON 기반 연료 평가는 현대 엔진의 고온·고압 및 빠른 화염전파 조건에서 발생하는 노킹 현상을 충분히 설명하지 못하는 한계를 가진다는 점이 보고되었으며 [1], 점화지연(ignition delay) 및 자발화(autoignition) 특성과 같은 화학반응론적 변수의 중요성이 점차 강조되고 있다. 또한 주요 운전 영역에서의 점화지연의 gradient 에 따른 자발화의 전파 속도가 노킹 강도와 직결된다는 detonation-driven knock 이론을 고려하였을 때 [2], 탄소중립적인 파워트레인 기술에 필요한 e-gasoline 연료 설계와 그에 따른 자발화 특성에 대한 연구가 필요하다. 관련된 기존 연구들이 존재하나 대부분 원유 기반의 연료나 상용 연료에 대한 논의가 지배적이었으며 [3], e-gasoline 에 대한 설계 관점에서의 연구는 아직 부족하다.

본 연구에서는 e-gasoline 개념을 기반으로 화학 조성이 상이한 4종의 surrogate 연료를 구성하고, 0D detailed chemical kinetics 해석을 통해 점화지연 특성을 비교하였다. 기준 연료는 PRF90 (iso-octane 0.9 / n-heptane 0.1)으로 설정하였으며, 이를 기반으로 (1) ethanol 약 40%가 포함된 oxygenated 연료 (iso-octane 0.448 / n-heptane 0.144 / ethanol 0.407), (2) toluene 약 40%가 포함된 aromatic 연료 (iso-octane 0.491 / n-heptane 0.111 / toluene 0.398), (3) ethanol 0.627과 toluene 0.102가 혼합된 복합 연료를 추가적으로 구성하였다. 모든 연료는 유사한 옥탄가 수준을 유지하도록 설계하였다. 점화지연 해석 결과, 동일 또는 유사한 RON 조건에서도 연료 조성에 따라 점화지연 특성이 크게 달라지는 것이 확인되었다. 대표적으로 800-900 K의 중온 영역(약 20-40 bar 조건)에서 ethanol이 포함된 연료는 기준 PRF 대비 약 1.5-2배 수준의 점화지연 증가를 보였으며, 이는 높은 증발 잠열에 따른 charge cooling 효과와 저온 반응 억제에 기인한다. 반면, toluene이 포함된 aromatic 연료는 동일 조건에서 약 2-3배 이상의 점화지연 증가를 나타내며, 전 온도 영역에 걸쳐 라디칼 생성 억제에 따른 반응성 감소가 두드러졌다. 특히 NTC (Negative Temperature Coefficient) 영역에서의 반응성 저하가 크게 나타나, autoignition 민감도가 현저히 감소하는 특성을 보였다. 또한 ethanol과 toluene이 동시에 포함된 복합 연료의 경우, 저온 영역에서는 ethanol의 열적 효과에 의해 점화지연이 증가하는 경향을 보이나, 중온 이상에서는 aromatic 성분의 화학적 억제 효과가 추가적으로 작용하여 비선형적인 점화 특성을 나타냈다. 이 결과는 단순한 선형 혼합 규칙으로는 예측이 어려운 연료 간 상호작용이 존재함을 시사한다. 이러한 결과는 동일한 옥탄가를 가지는 연료라도 실제 엔진 운전에서의 autoignition 특성은 크게 상이할 수 있음을 보여주며, 점화지연 기반의 연료 특성 평가가 노킹 예측 및 제어에 있어 핵심적인 역할을 할 수 있음을 시사한다. 특히 aromatic 성분은 화학반응 억제를 통해, oxygenate 성분은 열역학적 효과를 통해 서로 다른 방식으로 노킹 억제에 기여함

이 확인되었다.

참고문헌

- [1] MacDonald, James, et al. "A chemical kinetic analysis of knock propensity of methanol-to-gasoline fuel." Fuel 382 (2025): 133787.
- [2] Bradley, D., and Gautam T. Kalghatgi. "Influence of autoignition delay time characteristics of different fuels on pressure waves and knock in reciprocating engines." Combustion and flame 156.12 (2009): 2307–2318.
- [3] Cho, Jaeyoung, and Han Ho Song. "Understanding the effect of inhomogeneous fuel-air mixing on knocking characteristics of various ethanol reference fuels with RON 100 using rapid compression machine." Proceedings of the Combustion Institute 37.4 (2019): 4911–4919.

사사표기

본 초록에서 제안된 연구 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2025-02221821).