

희박 성층연소 조건에서 가솔린과 n-butane의 연소 및 배기 특성

정진영* · 박상재* · 배충식*†

Combustion and Emission Characteristics of gasoline and n-butane under Lean Stratified Combustion Conditions

Jinyoung Jung*, Sangjae Park*, Choongsik Bae*†

강해지는 연비 및 배기 규제를 만족하기 위해 전기점화엔진에 다양한 기술이 적용되고 있다. 많은 기술 중 연료를 연소실내에 직접 분사하는 직접분사 기술이 대표적이며 기존 포트분사식 전기점화엔진 대비 연비 및 성능 향상이 가능해졌다 [1-2]. 연소실 내에 분사된 연료가 기화되면서 연소실 온도가 낮아져 전기점화엔진의 대표적인 이상연소인 노킹에 대한 저항성이 증가하고 그 결과 추가적인 압축비 향상 또는 연소상 진각을 통해 연료 소모량을 감소시킬 수 있기 때문이다. 하지만 기존 포트분사방식 엔진 대비 주어진 혼합기 형성 시간이 짧아 국부적 농후 혼합기가 형성에 의한 불완전 연소가 발생, 입자상 물질 배출이 증가하게 된다. 또한 현재 대부분의 직접분사식 전기점화 엔진은 기존 포트 분사방식 엔진과 마찬가지로 이론 공연비로 운전되어 저부하 조건에서 쓰로틀링에 의해 펌핑손실이 발생한다. 반면 압축착화 엔진의 경우 흡기량을 제한하지 않아 펌핑 손실 측면에서 유리하다.

전기점화 엔진에서 압축착화엔진과 같은 희박연소를 구현하기 위해 많은 시도가 있었는데 연료를 압축행정 말기에 분사하여 점화 가능한 혼합기를 점화 플러그에 형성하여 연소하는 성층연소 방식이 대표적이다. 하지만 초기 성층연소가 제안되었을 당시 상대적으로 낮은 분사압력 등 연료 공급 계통 기술이 발전도가 낮았고 성층 혼합기를 분무 운동량과 연소실 내 유동을 이용해 형성하였기 때문에 극히 제한적인 조건에서만 성층연소를 구현할 수 있었다 [1-2]. 이후 고압분사 등 연료 공급 계통 기술이 발전하여 분무 운동량만으로 성층혼합기를 형성하는 2세대 성층연소 컨셉의 분무 유도식 직접분사 엔진이 개발되어 보다 넓은 영역에서 안정적인 성층 연소를 구현하였다. 또한 1세대와 다르게 피스톤 및 연소실 벽면 연료 침적에 대해 보다 자유로워 배기 특성이 우수하다 [3-5]. 하지만 기존 포트분사엔진은 물론 이론 공연비 운전 직접분사엔진 대비 혼합

기 형성시간이 매우 짧아 국부적으로 농후한 혼합기가 형성되어 입자상 물질 배출량이 많고 공간적으로 좁은 영역에서 연소가 진행되어 연소실 온도가 높아 질소 산화물 생성이 많다는 단점이 있다 [6-7]. 또한 희박 배기 조성에 의해 기존 삼원촉매장치의 질소 산화물 환원 효율이 낮아 질소 산화물 최종 배출량은 더욱 증가하게 되어 규제 만족을 위해 추가적인 후처리 장치가 요구되는 상황이다.

이와 별도로 연비 및 배기 규제를 만족시키기 위해 액화석유가스나 에탄올 등 전기점화 엔진용 대체연료가 연구되고 있다. 두 연료 모두 가솔린 대비 분자 내 수소 대 탄소 비율이 낮아 입자상 물질 측면에서 유리하며 특히 액화석유가스는 동일 온도에서 증기압력이 높아 가솔린 대비 짧은 시간에 기화되어 균질한 혼합기를 형성 할 수 있다는 장점이 있다. 상대적으로 혼합기 형성시간이 짧아 높은 입자상 물질 배출량이 높은 성층연소엔진에 액화석유가스를 적용하면 기 적용된 균질연소 엔진과 마찬가지로 입자상 물질 배출량이 감소할 것으로 판단된다. 하지만 성층연소 엔진에서는 분무 특성에 의해 안정 운전 조건이 결정되기 때문에 성층연소 조건에서 액화석유가스의 분무특성 파악이 필요한 상황이다. 하지만 관련 선행연구가 진행되지 않아 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 안정 성층연소 운전을 위해 가솔린과 액화석유가스의 주요 성분인 n-butane을 대상으로 정적연소챔버에서 성층연소 조건을 모사한 조건에서 분무 특성을 비교, 분석하고 이를 토대로 각 연료의 안정 성층연소 운전 영역을 단기통 엔진에서 실험하여 선정하였다. 마지막으로 안정 성층연소 조건에서 두 연료의 연소 및 배기 특성을 비교하였다.

모사 성층연소 조건에서 가솔린 및 n-butane의 분무 특성을 살펴보기 위해서 정적연소챔버에서 분무 가시화 실험을 진행하였다. 챔버 내에 아세틸렌, 수소, 산소, 그리고 질소를 혼합하여 공급한 후 예혼합 연소를 시킴으로써 분사시기에 따른 성층연소 조건을 구현하였다. 각 연료의 액상

* 한국과학기술원 기계공학과

† 연락처, csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3063 FAX : (042)350-5023

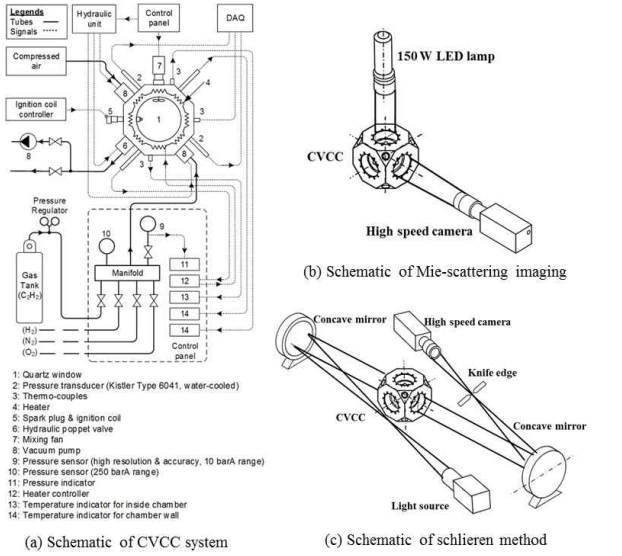


Fig. 1 Schematic diagram of (a) CVCC, (b) Mie-scattering and (c) schlieren imaging

Table 1 Experimental condition for spray visualization test

Fuels	gasoline, n-butane	
Injection pressure [MPa]	5, 7 (only for n-butane), 10, 15, 20 (both fuels)	
Injection quantity [mg]	11 mg (gasoline) and 10.5 mg (n-butane)	
Ambient conditions	Pressure [MPa]	Temperature [K]
Condition 1	0.70	426
Condition 2	1.10	465

및 기상 특성을 분석하기 위해 Mie 산란법과 schlieren 가시화 기법을 사용하였다. 그림 1과 표 1은 정적연소챔버 개략도 및 분무 가시화 실험 조건을 나타낸다. 분무 실험 결과를 토대로 연료간 연소 및 배기 특성을 비교하기 위해 분무 유도식 직접분사 단기통 엔진에서 연소 실험을 진행하였다. 그림 2는 단기통 엔진의 개략도 및 실험 조건을 나타낸다. 우선 두 연료의 안정연소 조건을 위해 분사시기 및 점화시기를 선정하였으며 안정연소 조건에서 두 연료의 연소 및 배기 특성을 비교 하였다.

그림 3은 정적연소챔버에서 취득한 두 연료의 Mie 산란법 이미지를 나타낸다. 가솔린과 다르게 n-butane은 높은 기화특성에 의해 분사종료 이후 비교적 이른 시기에 모두 기화되는 것을 확인하였고, 분무구조가 수축되어 가솔린 대비 좁은

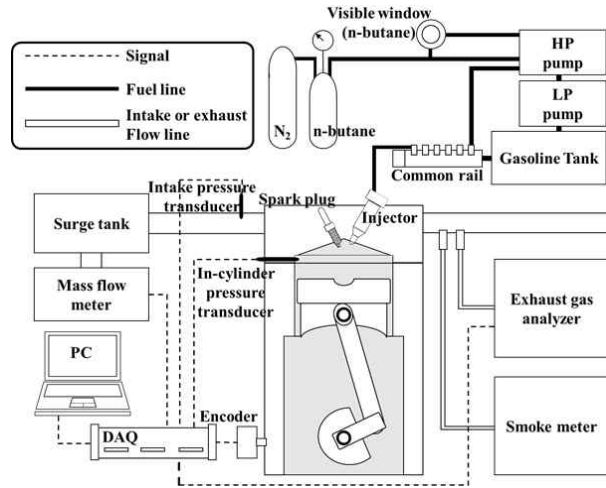


Fig. 2 Schematic diagram of a single cylinder engine

Table 2 Experimental conditions for engine test

Fuel	Gasoline	n-butane
Engine speed [rpm]	1,300	
Injection quantity [mg/cycle]	11	10.5
Injection pressure [MPa]	10, 15, 20	5, 7
Injection timing [CAD bTDC]	40 ~ 28	46 ~ 38
Ignition timing [CAD after SOI]	8 ~ 20	4 ~ 12

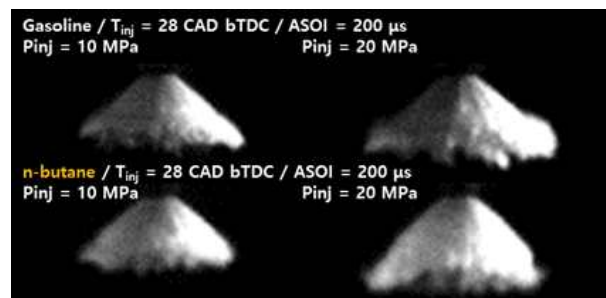


Fig. 3 Mie-scattering images of gasoline and n-butane at 200 μs after SOI

재순환영역과 좁은 분무각을 가지는 분무 형상을 보였다. 비록 해당 가시화 기법이 hollow cone spray 내부까지 분석하기에는 적합하지 않아 실제 와류 영역이 좁은지는 판단할 수 없지만 형성 위

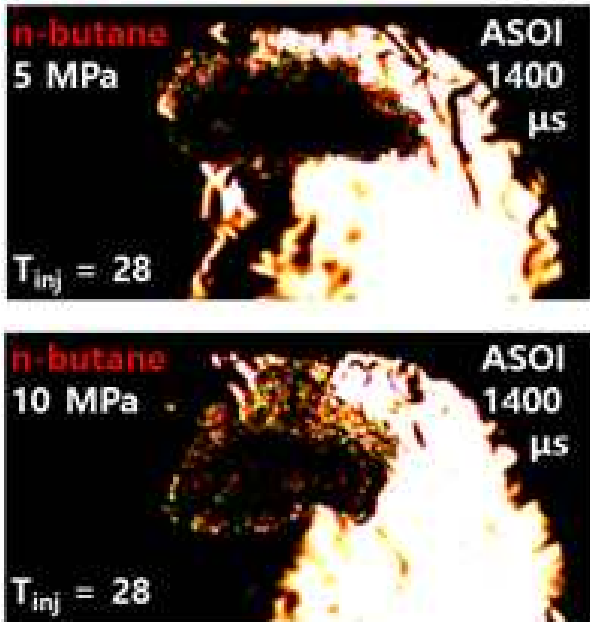


Fig. 13 Schlieren images at replicated ambient condition of injection timing at 1,400 μs after SOI

치가 다르기 때문에 점화 안정성에 영향을 미칠 것으로 판단된다. n-butane 분무 구조가 수축된 이유는 가솔린 대비 기화특성이 높아 기화에 의해 동일시기에 액적의 크기가 작고 주변 공기와 의 운동량 교환이 활발하여 결과적으로 hollow cone spray 내부 압력이 더 낮아졌기 때문이다 [8-9]. 결과적으로 점화 플러그 위치 변경없이 n-butane의 안정된 점화를 구현하기 위해서는 미립화 특성을 감소시킬 필요가 있다고 판단하여 분사압력을 낮추어 n-butane을 분사하여 분무구조를 평가하였다. 그림 6은 schlieren 가시화 기법을 통해 n-butane을 10 MPa과 5 MPa의 분사압력으로 분사하였을 때 동일 aSOI 에 취득한 분무의 기상 이미지이다. 분사압력 5 MPa 으로 n-butane을 분사하였을 때 10 MPa 으로 분사하였을 때보다 가솔린과 비슷한 분무 형상을 보였다. 점화 안정성 측면에서 n-butane을 상대적으로 낮은 압력으로 분사하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

분무가시화 실험에서 예측하였듯이 n-butane을 10 MPa 이상의 분사압력으로 분사하였을 때는 대부분의 분사시기에 대해 안정된 연소를 구현하지 못하였다. 하지만 분사압력을 7 MPa으로 낮추어 분사하였을 경우 안정적인 성층연소를 구현할 수 있었다. 안정 성층연소 조건에서 두 연료의 분사시기와 점화시기를 비교해보면 가솔린의 경우 상대적으로 지각된 분사시기에서 더 긴 성층 혼합기 형성 기간이 주어지야만 안정적인 연소가 구현되었다. 반면 n-butane의 경우 분

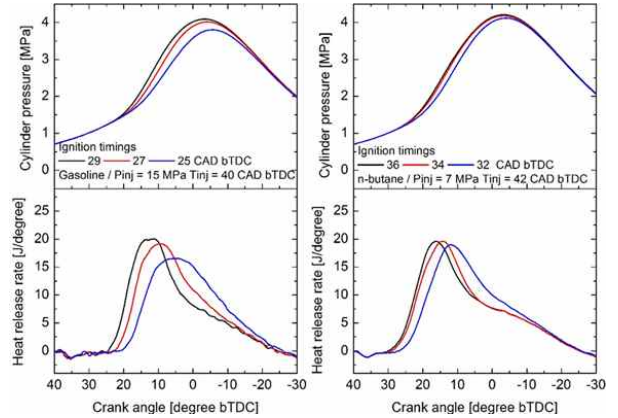


Fig. 7 In-cylinder pressure, heat release rate of gasoline and n-butane

위기 압력이 낮은 분사시기가 진각된 조건에서 안정적으로 연소가 가능했고 점화시기도 상대적으로 분사시기와 근접하는 등 더 짧은 혼합기 형성시간이 요구되었다. 이는 n-butane이 가솔린 대비 기화특성이 우수하여 주변 공기와 혼합이 빠르게 일어났기 때문이다. 하지만 점화시기가 지각될 경우 높은 기화 특성에 의해 과도 혼합이 발생하여 점화 안정성이 감소한 것으로 판단된다. 그림 7은 가솔린과 n-butane을 분사하였을 때 취득한 연소실 압력 및 열방출률을 나타낸다. n-butane 의 경우 동일한 분사시기에서 점화시기에 따른 열방출률 특성이 크게 변하지 않았지만 가솔린의 경우 점화시기 지각에 따라 최대 열방출률 감소폭이 크고 기울기도 작아지는 것을 확인하였다. 이는 가솔린과 n-butane이 각각 다 성분 연료와 단성분 연료이기 때문이라 판단된다. 가솔린의 경우 특정한 분사시기 기준으로 점화시기 지각에 따라 가벼운 성분부터 무거운 성분까지 순차적으로 기화가 진행되어 주변 공기와 혼합된다. 상대적으로 분사시기와 점화시기간 간격이 좁을 경우 가벼운 성분이 주변 공기와 혼합되어 점화 가능한 혼합기 형성에 기여할 것이고 반대의 경우 무거운 성분이 적합한 혼합기 형성에 기여할 것이다. 반면 n-butane은 가솔린 대비 가벼운 단 성분 연료이기에 가벼운 성분에 적합한 혼합기 형성시간이 주어지면 혼합기 균질도가 가솔린 대비 높아 많은 연료가 연소에 참여할 수 있을 것이다. 그 결과 보다 높은 최대 열방출률 및 짧은 연소기간을 보였다. 반면 보다 더 긴 시간이 주어진 경우, 과혼합이 발생하여 안정 점화에 실패하였다. 하지만 안정된 연소 범위를 확보하기 위해서는 분사시기와 점화시기가 모두 가솔린 대비 진각되어야 하기 때문에 음의 일이 발생하여 높은 최대열방출률 및 짧은 연소기간에도 불구하고 IMEP가 가솔린과 비슷하였다.

그림 8은 두 연료를 분사하였을 때 질소 산화

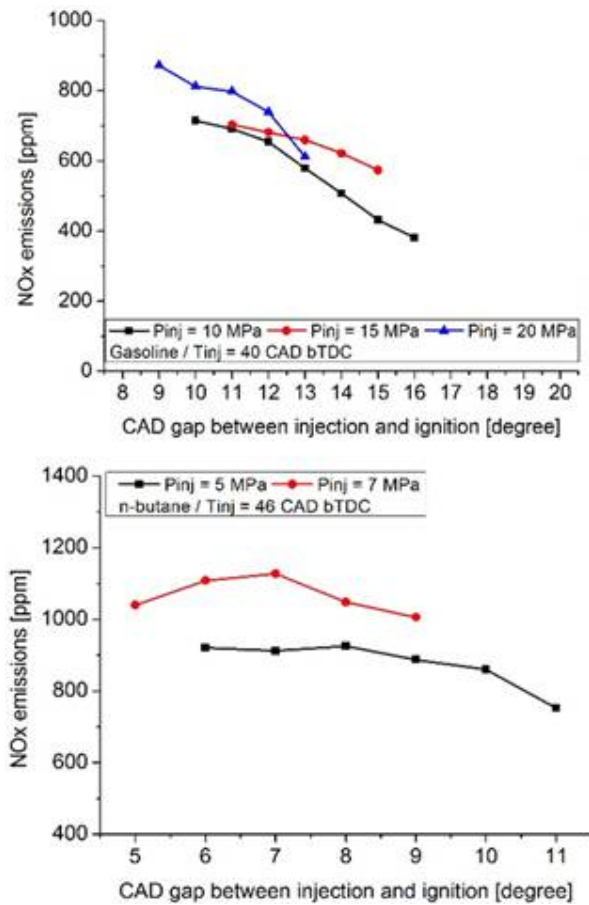


Fig. 8 NOx emissions of gasoline and n-butane at various injection and ignition timings

물 배출 특성을 나타낸다. 입자상 물질의 경우 n-butane 은 연료의 높은 기화특성에 의해 거의 배출되지 않았으나 질소 산화물은 가솔린 대비 높은 배출 특성을 보였다. 이는 높은 최대 열방출률 및 짧은 연소기간으로 고온의 환경이 형성되고, 연소상이 진각되어 연소가스가 고온의 연소실 조건에 노출되는 기간이 길어 질소산화물의 생성반응이 촉진되었기 때문이다 [10].

참고 문헌

- [1] Basshuysen, R., Gasoline engine with direct injection: processes, systems, development, potential, Wiesbaden: Vieweg + Teubner (2009)
- [2] Zhao, F., Lai, M.-C., Harrington, D.L., "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines," Progress in Energy and Combustion Science, 25(5), pp. 437-562, (1999)
- [3] Schwarz, C., Schünemann, E., Durst, B., Fischer, J. et al., "Potentials of the Spray-Guided BMW DI Combustion System," SAE Technical Paper, 2006-01-1265, (2006)

[4] Luttermann, C. and Mährle, W., "BMW High Precision Fuel Injection in Conjunction with Twin-Turbo Technology: a Combination for Maximum Dynamic and High Fuel Efficiency," SAE Technical Paper, 2007-01-1560, (2007)

[5] Schaupp, U., Waltner, A., Murwald, M., and Weller, R., "Blue-Direct Engine with Lean Stratified Combustion for High Efficient Performance," 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2014, pp. 1-20, (2014)

[6] Price, P., Stone, R., Collier, T., and Davies, M., "Particulate Matter and Hydrocarbon Emissions Measurements: Comparing First and Second Generation DISI with PFI in Single Cylinder Optical Engines," SAE Technical Paper, 2006-01-1263, (2006)

[7] Hemdal, S., Andersson, M., Dahlander, P., Ochoterena, R., and Denbratt, I., "In-cylinder soot imaging and emissions of stratified combustion in a spark-ignited spray-guided direct-injection gasoline engine," Int. J. Engine Res, 12(6), pp. 549-563, (2011)

[8] Hermann, A., Kruger, Ch., Schaupp, U., Arndt, S., Gartung, K., Hubel, M., and Spicher, U., "Numerical and Diagnostic Analysis of Spray Propagation and Vortex Formation of Piezo-A-Injectors and their Sensitivity to the Internal Nozzle Flow," 8th International Symposium on Combustion Diagnostics 2008, pp. 471-486, (2008)

[9] Zigan, L., Schmitz, I., Flugel, A., Wensing, M., and Leipertz, A., "Structure of evaporating single - and multicomponent fuel sprays for 2nd generation gasoline direct injection," Fuel, 90, pp. 348-363, (2011)

[10] Heywood, J., Internal Combustion Engine Fundamental, Singapore: McGraw-Hill, (1988)