저온산화반응 제어가 DME-가솔린 혼합연료의 HCCI 연소에 미치는 영향

박 영 진¹⁾ · 임 옥 택^{*2)}

울산대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 울산대학교 기계공학부²⁾

The Effect of Control of Low Temperature Oxidation using DME-gasoline Fuel Mixture on the HCCI Combustion

Youngjin Park¹⁾ · Ocktaeck Lim^{*2)}

¹⁾Graduate of Mechanical Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

(Received 15 July 2013 / Revised 26 August 2013 / Accepted 27 August 2013)

Abstract : The main purpose of the study is to investigate the ideal manner and ratio to inject gasoline and DME simultaneously into intake port, and moreover to confirm the characteristics of combustion and emission of engine. Experimental conditions are 1200 rpm, compression ratio 8.5, intake air temperature (383 K). Internal cylinder pressure was collected to confirm the characteristics of combustion in order to calculate the heat release rate in the cylinder. In addition, HORIBA (MEXA 7100) which was possible analyzing emissions (NO_x, CO, HC) was used. Vanguard gasoline engine (23HP386447) was used in this experiment. The result show that fuel design (DME-Gasoline) leads to the decrease of low temperature heat release, which is a benefit for higher-load on the HCCI engine. Also, IMEP and the indicated thermal efficiency increase with combustion-phasing retard, and these observations can be explained by considering the control of low temperature oxidation of DME.

Key words : Low temperature oxidation(저온산화반응), Dimethyl ether(디메틸에테르), Gasoline(가솔린), Homogeneous charge compression ignition(예혼합 압축착화)

1. 서 론

예혼합 압축착화(Homogeneous charge compression ignition) 엔진은 압축을 통해 균질한 혼합물을 착화시키는 방식이다. 이 엔진은 질소산화물 및 입자성 물질의 배출을 감소시키는 반면 효율은 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 예혼합 압축착화 엔진은 고효율 및 낮은 배출물질 측면에서 SI(Spark ignition) 및 CI(Compression ignition)엔진을 대체 할 수 있다. 그러나 기존의 내연기관과는 달리 연료의 화학반응 및 실린더내의 온도상태에 따라 연소특성이 쉽게 변화하기 때문에 제어의 어려움이 있다. 특

히 고부하로 갈 경우 단기간에 급격한 열 발생으로 인하여 노킹을 유발하는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 온도성층화, 연료성층화, EGR 및 연료디자인 같은 방법들이 연구되어지고 있다.

연료디자인은 서로 성질이 다른 연료를 혼합하는 방법으로 고 옥탄가 연료와 고 세탄가 연료를 이용한다. 고 세탄가 연료로는 DME(Dimethyl ether), 고 옥탄가 연료로는 메탄, 에탄올 및 가솔린을 이용할 수 있다.¹⁻⁴⁾

DME-메탄 혼합연료 결과는 다음과 같다. DME 당량비가 일정할 때 메탄의 당량비를 증가시키면 연소시작 시점이 지연되고 고온산화반응이 팽창행정에서 발생함에 따라 노킹없이 IMEP가 증가하는

*Corresponding author, E-mail: otlim@ulsan.ac.kr

Fig. 1 Experimental apparatus

것을 확인할 수 있다.³⁾

DME-에탄올 혼합연료 결과는 다음과 같다. 에탄올은 저온산화반응을 억제하는 효과가 있으며 DME는 저온산화반응을 일으키는 역할을 한다. 따라서 DME와 에탄올의 혼합을 이용하여 고온산화반응의 연소시점을 제어할 수 있으며 에탄올의 혼합비율이 증가함에 따라 연소시점이 지연되는 것을 확인할 수 있다.⁴⁾

이전 연구들에서는 디젤엔진 혹은 HCCI 엔진 조건에서 대체연료를 이용한 HCCI 연소 제어를 연구하였다. 본 연구에서는 가솔린엔진에서 DME-가솔린 혼합연료를 이용하여 HCCI 연소를 제어하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 엔진은 벵가드 가솔린 엔진이며, 자세한 엔진 제원은 Table 1에 나타내었다.

혼합연료가 충분히 공기와 섞일 수 있도록 흡기 밸브로부터 약 300 mm 떨어진 곳에 연료 공급 장치를 설치하였다. DME와 가솔린 분사위치는 동일하며 DME는 가스유량계를 통해 제어된 유량이 공급되고 가솔린은 인젝터를 통해 제어된 유량이 공급되어진다. 압축비 8.4에서 얻을 수 있는 실린더내의 온도는 약 500~600 K이다. 따라서 DME 착화시 필

Table 1 Engine specification

Displacement [liters]	0.313
Bore×Stroke [mm]	75.5×70
Connecting Rod Length	105
Compression ratio	8.4
Number of valves	1 intake, 1 exhaust
IVO	bTDC 44
IVC	aBDC 82
EVO	bBDC 96.5
EVC	aTDC 64.5
Fueling system	Fully Premixed
Engine speed [rpm]	1200

요한 온도(약 750~800 K)를 보상하기 위해 흡기온도를 383 K까지 올려주었다.

엔진 운전속도 및 부하조건 제어는 엔진의 크랭크축과 연결된 인버터형 동력계(ABB Co.; ASC800)를 이용하였다. 연소실 내 압력측정을 위해서 Piezo electric형의 압력센서(Kistler; 6056A)를 실린더헤드의 중심부에 장착하여 0.1 CA 간격으로 데이터를 취득하였다. 배기가스 분석장치(HORIBA; MEXA-7100 DEGR)를 이용하여 CO, THC, NOx를 측정하였다. 배기데이터의 모든 값은 각 조건에서의 정상일 때 1분 동안 측정하여 얻은 데이터를 평균한 값이다.

2.2 실험방법

DME, 가솔린 및 혼합연료에 대해 흡기온도 383

Fig. 2 Injection strategy

Table 2 Fuel properties

	DME	Gasoline
Cetane number	>> 55	-
Octane number	-	92
Low heating value [MJ/kg]	28.8	44.4
Boiling point [K, 1atm]	249	358

K, 1200 rpm, 압축비 8.4의 운전조건으로 당량비 변화에 따른 HCCI 연소 및 배기특성에 대해 실험하였다. 가솔린엔진에서의 HCCI 연소의 적용을 확인하기 위해 낮은 압축비를 선정하였다. 단, 혼합연료의 경우 Fig. 2와 같이 DME의 당량비는 0.191로 동일한 상태에서 가솔린의 혼합비율을 증가시키며 실험을 진행하였다. DME의 분사량은 가스유량계(Corea flow co.; HSP-2-II)를 사용하여 일정하게 흡기포트로 흘려주었고 가솔린은 인젝터를 사용하여 흡기포트로 분사하였다. 수치해석은 CHEMKIN-PRO를 사용하여 가솔린이 DME 저온산화반응에 미치는 영향에 대해 해석하였다. DME와 가솔린 연료특성은 Table 2에 설명되어져 있다.

3. 실험결과

연소 해석은 열발생율, CA50, IMEP의 COV 및 Ringing intensity를 이용하였다.⁵⁾ CA50는 Combustion phase를 정의하는 것으로 연소가 50% 진행된 지점을 의미한다. 열발생율의 누적값을 이용하여 찾을 수 있다. IMEP의 COV는 연소의 안정성을 평가하는 항목으로 식 (1)으로 계산하며 5% 이내를 안정적인 연소로 인정한다.⁶⁾

$$COV \text{ of } IMEP [\%]$$

$$= \left[\frac{Std. Dev. IMEP}{(IMEP_{fired} - IMEP_{motored})} \right] \times 100 \quad (1)$$

Ringing intensity는 노킹을 평가하는 항목으로 식 (2)를 이용하여 계산하며 2.5 MW/m² 이상을 노킹으로 정의한다.⁷⁾

$$Ringing \ intensity [MW/m^2] \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{2\gamma} \frac{\left(\beta \frac{dP}{dt}_{max} \right)^2}{P_{max}} \sqrt{\gamma R T_{max}}$$

r : the ratio of specific heats (cp/cv)

R : the gas constant

(dP/dt)_{max} : the maximum values of cylinder pressure rise rate

P_{max} : cylinder pressure

T_{max} : charge temperature

3.1 DME HCCI 결과

Fig. 3은 DME 당량비 변화에 따른 실린더내의 압력, 실린더내의 가스 온도, 열발생율 및 연소기간을 나타낸다. 당량비의 증가에 따라 압력곡선이 상승하였고 연소기간이 짧아지고 연소 시작점이 전각되어 TDC(360 °CA)이전에 연소가 종료되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4에서는 앞서 확인한 연소특성의 변화에 따른 IMEP, 열효율 및 운전영역을 나타낸다. 당량비의 증가에 따라 투입열량은 증가하지만 IMEP 값은 거의 변화가 없었고 열효율은 최대 15.03%에서 최소 9.65%까지 감소하였다. CA50 값은 당량비가 증가함에 따라 최대 343.6 °CA 만큼 전각 하였다. 따라서 열효율이 감소한 이유는 연소가 압축행정에서 이루어지기 때문이다. COV of IMEP (5% 이내)와 Ringing intensity (2.5 MW/m² 이하)값 사이에서 불완전연소와 노킹 없는 구간이라 정의한다. 이 구간 안에서의 IMEP 최대값은 약 2.64 bar 이고 열효율의 최대 값은 약 14.7%이다.

연소 후 배출 물질인 THC와 CO는 당량비가 증가함에 따라 감소하고 NOx는 증가한다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에 나타나 있다.

Fig. 3 Cylinder pressure traces, in-cylinder gas temperature traces, heat release rate and combustion duration for various equivalence ratios of DME

Fig. 4 IMEP, indicated thermal efficiency, cumulative LTHR, total HR CA 50, COV of IMEP and ringing intensity for various equivalence ratios of DME

Fig. 5 THC, CO, NOx and exhaust gas temperature for various equivalence ratios of DME

3.2 가솔린 HCCI 결과

엔진의 모터링한 결과에 따르면 실린더 내의 최대 온도가 714 K이다. 가솔린의 자착화 온도 범위는 약 915-950 K이므로 연소가 일어나지 않았다. 그 결과로 위의 Fig. 6에서 압력, 온도 및 열발생율 곡선이 모터링 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.¹⁰⁾

3.3 DME-가솔린 HCCI 결과

Fig. 7은 혼합연료의 연소특성에 대해 설명한다.

혼합되어지는 연료인 가솔린의 당량비가 증가할 때 압력, 실린더내의 가스온도 및 열 발생량이 증가한다. 저온산화반응 및 고온산화반응의 시작점은 지연되고 연소기간은 짧아진다. Fig. 7의 e. 는 저온산화반응을 나타낸 것으로 가솔린의 혼합이 많아질수록 발생량이 줄어들었다. 또한 가솔린의 당량비

Fig. 6 Cylinder pressure traces, in-cylinder gas temperature traces and heat release rate for various equivalence ratios of gasoline

가 0.164 이상이 될 경우 연소가 진각되었다.

Fig. 8에서 IMEP는 최대 3.74 bar, 열효율은 최대 24.3%까지 증가한다. 또한 CA50는 365 ± 1 °CA 내에서 유지되며 저온산화반응의 열발생량 값은 줄어든다. 저온산화반응의 열발생량 값이 줄어든 결과로 인하여 고온산화반응의 시작시점이 지연되어 연소기간이 짧아짐에도 불구하고 CA50 값이 360-370 °CA에 머물렀다. 따라서 투입되는 열량은 증가하지만 연소시작점이 지연됨으로 인해 노킹없이 IMEP 및 열효율의 상승효과를 얻을 수 있다.^{1,8,9)} DME HCCI 결과와 비교했을 때 IMEP는 약 1.1 bar, 열효율은 약 9.6% 상승하였다.

Sato의 논문에서 투입열량을 기준으로 비교하였을 때, 메탄의 당량비 0.25에서의 열효율 값이 본 연구에서의 결과값과 비슷한 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻어진 열효율 값이 다소 낮긴 하지만 타당한 결과라는 것을 알 수 있다.⁴⁾

연소 후 배출 물질인 THC와 CO는 당량비가 증가함에 따라 감소하고 NOx는 증가한다. 이와 같은 결과는 Fig. 9에 나타나 있다. DME HCCI 연소와 동일

Fig. 7 Cylinder pressure traces, in-cylinder gas temperature traces, heat release rate and combustion duration for various equivalence ratios of gasoline at the constant equivalence ratio of DME (0.191)

한 경향을 띄었고 THC의 배출량만 혼합연료에서 더 많이 배출하였다.

4. 수치해석결과

수치해석을 통하여 혼합연료에 의한 저온산화 반

Fig. 8 IMEP, indicated thermal efficiency, cumulative LTHR, total HR CA50, COV of IMEP and ringing intensity for various equivalence ratios of gasoline at the constant euivalence ratio of DME (0.191)

응 제어에 OH Radical이 미치는 영향에 대해 알아보 고자 하였다. OH Radical은 DME의 저온산화반응을 가속화시키는 역할을 한다. 따라서 가솔린이 OH Radical을 공유한다면 DME의 저온산화반응을 제어 할 수 있을 것이다. 선행연구의 결과를 바탕으로 한 위 의 가정을 확인하고자 OH Radical에 따른 Iso-octane 의 연소특성에 대해 수치해석 하였다. 수치해석 프로 그램은Chemkin-PRO를 이용하였고curan의 Iso-octane 모델을 이용하였다.

4.1 IC₈H₁₈(Iso-octane)-OH Radical 결과

Fig. 10에서는 IC₈H₁₈, DME 및 OH Radical 투입한 IC₈H₁₈의 연소 특성을 나타내었다. IC₈H₁₈의 연소는 위의 실험조건에서 발생하지 않았다. Fig. 10의 d. 그 래프를 보면 투입된 IC₈H₁₈이 소비되지 않은 것으로

Fig. 9 THC, CO, NOx and exhaust gas temperature for various equivalence ratios of gasoline at the constant euivalence ratio of DME (0.191)

연소가 일어나지 않았음을 확인할 수 있다.

따라서 열발생, OH 및 H₂O₂ 값이 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다.

DME의 경우 d. 그래프를 통해 완전연소하였음을 확인할 수 있으며 c. 그래프에서 저온산화반응 특성 도 확인할 수 있다. 따라서 DME의 연소를 통해 발 생하는 OH Radical의 총량을 구하면 0.015 mol/mol 임을 알 수 있다. DME 연소를 통해 얻어진 OH Radical을 IC₈H₁₈에 투입하였다. 그 결과 d. 그래프에 서 소비되지 않던 IC₈H₁₈이 OH Radical에 의해 급격 히 소비된 후 완전히 소비되는 것을 확인할 수 있다. 또한 c. 그래프에서 OH Radical에 의해 IC₈H₁₈이 2단 계에 걸쳐 연소가 발생하는 것을 확인할 수 있다.^{10,11)}

따라서 가솔린을 DME에 혼합할 경우 OH Radical 이 공유되어 DME의 저온산화반응이 억제되는 효 과를 얻을 수 있다. 이러한 결과를 이용하여 가솔린 혼합비율을 조절하면 DME의 저온산화반응을 제어 할 수 있다.

5. 결 론

- 1) DME 단일연료의 투입열량을 증가시켰을 때, CA50가 진각하고 IMEP 및 열효율이 감소한다. 가솔린 단일연료는 연소가 발생하지 않는다.

Fig. 10 Cylinder pressure traces, in-cylinder gas temperature traces, heat release rate and mol fractions of IC_8H_{18} , OH and H_2O_2 for various equivalence ratios of OH radical at the constant equivalence ratio of mol fraction of IC_8H_{18} (0.164)

- 가솔린의 혼합비율이 증가할수록 IMEP와 열효율이 증가하였으며, 최대 21.04%까지 혼합이 가능하다. 단일연료에 비해 IMEP는 약 1.1 bar, 열효율은 약 9.6% 상승하였다.
- IMEP 및 열효율의 증가는 연소지각으로 인해 팽창초기영역(360-370 °CA)에서 주된 연소가 진행되어 일의 이득을 얻기 때문이다.

- 혼합비율의 증가에 따른 저온산화반응의 발생 열량 감소로 노킹을 억제가능하다. 그 이유는 가솔린이 저온산화반응을 일으키는 OH Radical을 공유하기 때문이다.
- 혼합비율이 증가함에 따라 THC와 CO 배출량은 감소하며 NO_x 배출량은 증가하는 경향을 보인다. 열효율 및 IMEP가 상승 할 때 NO_x 배출량이 증가하지만 Euro6 기준 0.5 g/kWh 이하이다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)(20122020100270), 한국가스공사 연구개발원의 친환경 DME 연료 실증보급을 위한 기술개발과 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업과 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

- Y. Tsutsumi, A. Iijima, K. Yoshida, H. Shoji and J. T. Lee, "HCCI Combustion Characteristics during Operation on DME and Methane Fuels," Int. J. Automotive Technology, Vol.10, No.6, pp.645-652, 2009.
- G. Shibata, K. Oyama, T. Urushihara and T. Nakano, "Correlation of Low Temperature Heat Release with Fuel Composition and HCCI Engine Combustion," SAE 2005-01-0138, 2005.
- Y. Ishikawa, A. Iijima, K. Yoshida and H. Shoji, "Analysis of Combustion Characteristics and Efficiency Improvement of a Supercharged HCCI Engine Achieved by Using the Different Ignition Characteristics of Gaseous Fuels," SAE 2012-32-0075, 2012.
- S. Sato, D. S. Jun, S. P. Kweon, D. Yamashita and N. Iida, "Basic Research on the Suitable Fuel for HCCI Engine from the Viewpoint of Chemical Reaction," SAE 2005-01-0149, 2005.
- G. Shibata and H. Ogawa, "HCCI Combustion Control by DME-Ethanol Binary Fuel and EGR," SAE 2012-01-1577, 2012.

- 6) M. Sjöberg, J. E. Dec, A. Babajimopoulos and D. Assanis, "Comparing Enhanced Natural Thermal Stratification against Retarded Combustion Phasing for Smoothing of HCCI Heat-Release Rates," SAE 2004-01-2994, 2004.
- 7) Y. Yang, J. E. Dec and N. Dronniou, "Boosted HCCI Combustion Using Low-Octane Gasoline with Fully Premixed and Partially Stratified Charges," SAE 2012-01-1120, 2012.
- 8) K. Hashimoto, M. Koshi, A. Miyoshi, Y. Murakami, T. Oguchi, Y. Sakai, H. Ando and K. Tsuchiya, "Development of Gasoline Combustion Reaction Model," SAE 2013-01-0887, 2013.
- 9) C. Huang, V. Golovitchev and A. Lipatnikov, "Chemical Model of Gasoline-Ethanol Blends for Internal Combustion Engine Applications," SAE 2010-01-0543, 2010.
- 10) X. He, S. M. Walton, B. T. Zigler, M. S. Wooldridge and A. Atreya, "Experimental Investigation of the Intermediates of Isooctane during Ignition," Int. J. Chemical Kinetics, Vol.39, Issue 9, pp.498-517, 2007.
- 11) H. J. Curran, P. Gaffuri, W. J. Pitz and C. K. Westbrook, "A Comprehensive Modeling Study of iso-Octane Oxidation," Combustion and Flame, Vol.129, Issue 3, pp.253-280, 2002.