

가솔린기관의 공회전에서 운전조건에 따른 연소안정성에 관한 실험적 연구

한성빈[†] · 김성모^{*}

[†]인덕대학, ^{*}현대자동차

(2009년 6월 4일 접수, 2009년 7월 21일 수정, 2009년 7월 21일 채택)

An experimental study for combustion stability by operating conditions in a gasoline engine at idle

Sung Bin Han[†], Sung Mo Kim^{*}

[†]Department of Mechanical & Automotive Engineering, Induk Institute of Technology, Seoul, Korea

^{*}Service Quality Information Team, Hyundai Motor Company

(Received 4 June 2009, Revised 21 July 2009, Accepted 21 July 2009)

요 약

자동차 공회전은 운전자의 운전 만족도에 여러 영향을 미친다. 또한 보다 높은 연료 경제성의 요구가 고조됨에 따라, 자동차 생산자들은 계속적으로 보다 나은 운전조건의 혜택에 관심을 갖는다. 스파크 점화기관의 공회전에서 기관의 안정성은 연소변동에 의해 좌우되며, 기관의 안정성은 연료분사시기, 점화시기, 그리고 공기연료비 등의 요소들에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 공회전에서 연료분사시기, 점화시기 그리고 공기연료비 등에 따라, 연소의 안정성과 변동율에 미치는 영향을 조사하였다.

주요어 : 무부하, 연소안정성, 가솔린기관, 공기연료비

Abstract— Vehicle idle has become an increasing quality concern for automobile manufacturers because of its impact on customer satisfaction. As demand for better fuel economy increases, automobile manufacturers are continuously looking for any benefits from different driving conditions. Combustion variability in spark ignition engines was recognized that the stability of engine at idle is affected by the factors of fuel injection timing, ignition timing and air-fuel ratio. Therefore in this research, the results will be shown the effects of stability and the variations at idle according to fuel injection timing, ignition timing and air-fuel ratio as the basic parameters.

Key words : idle, combustion stability, gasoline engine, air-fuel ratio

1. 서 론

급증하는 자동차의 수요에 따른 대도시 교통의 혼잡은 날이 갈수록 심각하며, 이로 인해 도로에서의 차량 정체 시간 증가로 공회전 시간이 늘어남에 따라 공회전 상태에서 자동차 기관의 안정성은 운전자에게 매우 중요하고

차량의 신뢰성에도 영향을 미치고 있다. 특히 무부하 공회전 상태에서의 사이클 변동은 잔류가스를 증대시키며, 미연의 탄화수소와 일산화탄소를 증가시키는 주요 원인이 된다. 따라서, 가솔린 자동차의 무부하에서의 연소변동을 줄여서 연소의 안정성을 확보하기 위해서는 안정된 화염핵을 짧은 시간에 형성하여 초기화염성장기간을 안정시키고, 단축시켜야 한다는 많은 보고가 있다.^(1,2)

스파크 점화기관에 있어서 연소의 안정성은 오래 전부터 중요한 연구의 과제로서 많은 연구자들에 의하여 연구가 되어왔다. 이러한 연소의 안정성은 최적의 자동차 설계에 중요하며, 연료의 경제성과 배출가스 저감차원에

[†]To whom correspondence should be addressed
Department of Mechanical & Automotive Engineering,
Induk Institute of Technology, San 76 Wolgye-dong,
Nowon-gu, Seoul 139-747, Korea
E-mail : sungbinhan@induk.ac.kr

서도 연소의 안정성은 절대적으로 필요한 연구라고 할 수 있다.⁽³⁻⁵⁾

이러한 연소의 안정성 관련 문제는 자동차가 신차 일 때는 큰 문제가 없지만, 자동차가 노후 되면 자동차가 무부하 공회전 상태가 불안정하여 냉시동 또는 무부하에서 연료소비율은 증가되며, 배출가스도 현저하게 증가하게 된다.^(6,7)

가솔린 기관의 연소 안정성에 관한 문제는 엔진의 연소실 및 유동장 등의 설계인자에 따라 좌우될 수도 있지만, 유동장의 불안정 및 흡기계통의 불균일 또는 분사시기와 유동장의 불일치로 공연비가 불균일하게 변동하고 있기 때문에 공회전 시 불안정성이 나타날 수 있다. 공회전수를 줄이려면 이러한 연소의 불안정성이 어떠한 원인으로 야기되는가를 알아야 한다. 현재 가장 큰 원인으로 흡기계통의 불균일 또한 분사시기와 공연비가 불균일하게 변동하고 있고 이런 이유 때문에 신차인 경우에도 공회전의 불안정이 있다. 공회전수를 줄일 수만 있다면 연료소비 저감의 효과는 물론이고, 배기가스의 저감의 효과도 크다.⁽⁸⁾

연소의 안정성에 영향을 줄 수 있는 인자로는 운전 공기연료비와 혼합기 조성의 변동, 혼합기 중의 연료, 공기, 흡입유동 및 잔류가스의 혼합, 점화 지연 등을 생각해 볼 수 있다.^(9,10)

본 연구에서는 연료분사시기, 점화시기, 공기연료비 등의 운전조건이 가솔린 기관의 공회전 상태에서 연소의 안정성에 어떠한 영향을 미치는 가를 파악한다. 이러한 자료는 자동차 기관 설계에 기초 자료로 이용될 수 있다.

2. 실험장치 및 실험방법

Table 1은 본 연구에 사용한 엔진의 제원이다. 또한 Fig. 1은 실험장치의 사진이다. 전자제어 연료분사 가솔린 기관은 최고 150마력을 제어할 수 있는 와전류식 동력계에 직결 되어 있다. 엔진 ECU를 제어할 수 있는 엔진제어시스템(IC 5460, Intelligent Controls Inc.)을 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 ECU의 대략적인 역할을 나타내고 있다. 기관의 스톱클레드는 컴퓨터에서 자동 제어할 수 있도록 모터와 제어기로 구성되었다. 공기연료비의 측정엔 배기관에 4개의 광역산소센서 (NGK, TL-7111-W1)를 삽입하여 각 실린더별로 순간 공기연료비를 측정할 수 있도록 하였고 데이터의 기록은 AD 변환기(DT-2831G, 250kHz)를 이용하여 실시간으로 기록하였으며, 실린더별로 약 500사이클을 취득하였다. 연소실내의 연소압력은 압력센서(Kistler 6061B)를 4번 실린더에 삽입하여 50사이클씩 측정하였고, 흡기관 압력은 절대압센서(Kistler 4045A2)를 4번 흡기관에 삽입하여

Table 1. Specification of engine used.

Item	Specification
Engine Type	Water cooled, MPI gasoline
Displacement(cc)	1468
Bore×Stroke	75.5 × 82.0
Number of Cylinder	4
Firing order	1-3-4-2
Injection type	Sequential
Compression Ratio	9.4
Intake Valve Open(deg)	18.5°BTDC
Intake Valve Close(deg)	51.5°ABDC
Exhaust Valve Open(deg)	51.5°BBDC

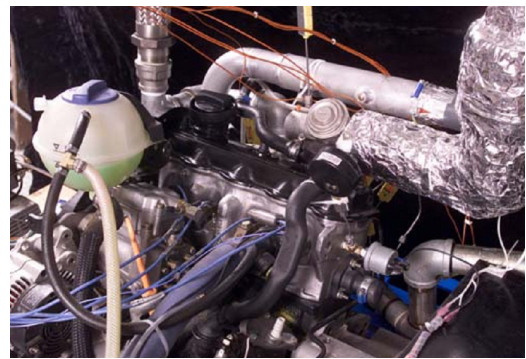


Fig. 1. Photo of experimental setup.

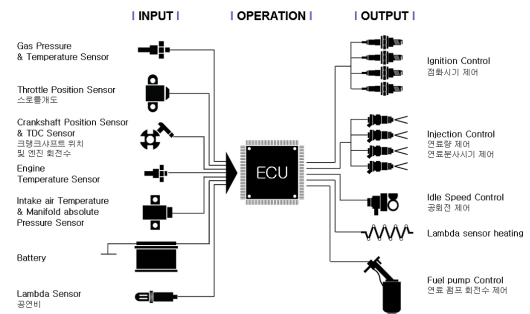


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

50사이클씩 측정하였다. 그 외에 배기가스 농도 및 연료소비량, 배기가스 온도 등을 측정하였다.

대표적인 실험변수로는 공회전(800rpm) 상태에서 연료분사변화, 공기연료비의 변화, 점화시기의 변화에 대한 기관 안정성 및 공기연료비 변동을 실험 분석하였다. 엔진 냉각수 온도는 기관을 충분히 예비 운전하여 80℃로 일정하게 조정하였다. 연료분사시기의 변화에 대한

공회전 안정성 및 공기연료비의 변화를 해석하기 위하여 기본 점화시기는 10°BTDC로 고정하였으며, 분사시기는 흡입시작 상사점전(BTDC) 180°, 90°, 0° 그리고 상사점 후(ATDC) 45°, 90°, 135°, 180°로 변화시키면서 공회전 변동 및 공기연료비의 변동을 측정하였다. 이때 기관 회전수의 변동은 1분 동안에 나타나는 최고 회전수와 최저 회전수 및 평균 회전수를 측정하였다. 공회전 중에 점화시기의 변화가 공회전 안정성 및 공연비 변동을 해석하기 위하여 점화시기 (상용 점화시기 10°BTDC)를 압축 끝 상사점에서 0°, 10°, 20°, 30°, 40°BTDC로 진각 시키면서 측정하였다. 이때 연료분사는 상용 분사시기인 흡입 과정 상사점전 100°BTDC에서 일정한 시기에 분사되도록 하였다. 공기연료비의 변화가 공회전 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각각의 연료 분사시기 및 점화시기의 변화 실험에서 공기연료비를 12:1, 13:1, 14:1로 변화시키면서 공회전의 변동율을 측정하였다. 공기연료비를 농후한 영역에서 실험한 이유는 무부하에서의 공기연료비는 이론공기연료비 보다 진한 영역이기 때문이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 공회전 상태에서 분사시기의 변화에 따른 공회전 안정성 및 공기연료비 변동을 조사하기 위한 실험 조건은 점화시기를 0°, 10°, 20°, 30°, 40°BTDC로 진각 시키면서 측정하였다. 이때 연료분사는 상용 분사시기인 흡입 과정 상사점전 100°BTDC에서 일정한 시기에 분사되도록 하였다. 공기연료비의 변화가 공회전 안정성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 각각의 연료 분사시기 및 점화시기의 변화 실험에서 공기연료비를 12:1, 13:1, 14:1로 변화시키면서 공회전의 변동율을 측정하였다. 그림에서 점화시기를 진각시켜 나감에 따라 각 공기연료비에 대해서 최고 압력값이 크게 나타남을

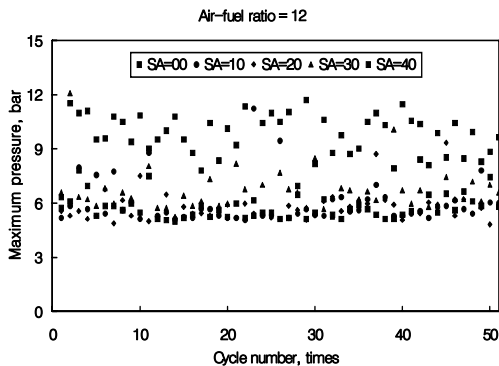


Fig. 3. Maximum pressure vs. cycle number at air-fuel ratio 12.

알 수 있지만, 압력값이 40°BTDC에서 크게 나타난다고 최적의 분사시기가 40°BTDC라고 할 수는 없다.

Fig. 6은 각각의 연료 분사시기에서 1분 동안에 나타나는 최고 회전수와 최저 회전수를 측정하여 공회전을 기준으로 하여 백분율로 나타낸 실험결과이다. 그림에서 각각의 공기연료비에서 가장 안정적인 회전수를 나타내

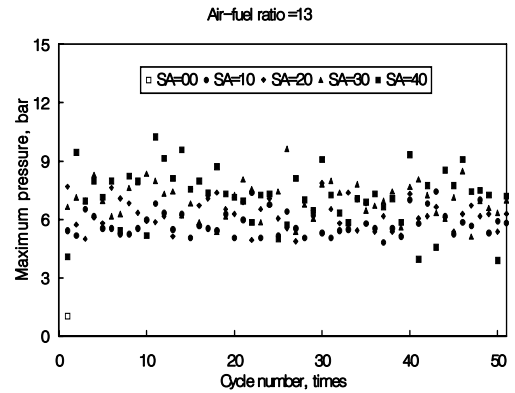


Fig. 4. Maximum pressure vs. cycle number at air-fuel ratio 13.

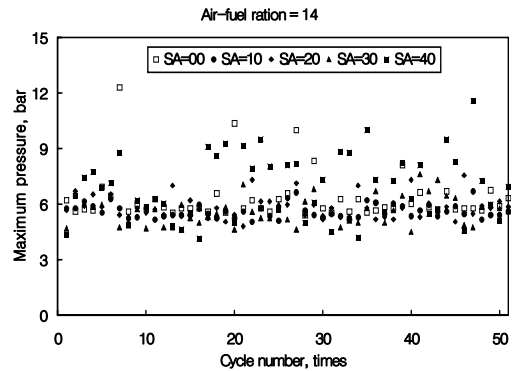


Fig. 5. Maximum pressure vs. cycle number at air-fuel ratio 14.

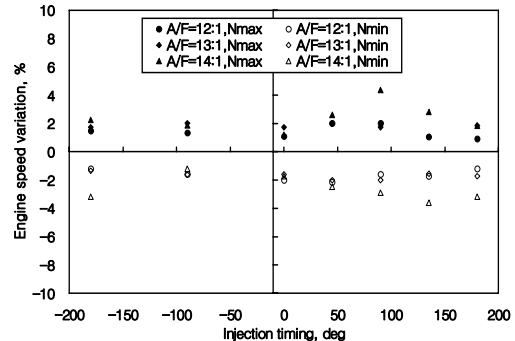


Fig. 6. Effect of injection timing on the engine speed variation.

는 분사시기는 흡입과정 초기 상사점전 90°BTDC 근처에서 연료를 분사하는 것이다. 이때 최고 회전수와 최저 회전수의 변동폭이 각각의 공기연료비에서 ±2% 정도로 가장 작다. 이것은 공회전 상태에서 흡기밸브가 열리기 직전에 연료를 분사하는 것이 기관 공회전 안정성에 도움이 되며 흡입 과정 전에 너무 일찍 연료를 분사해도 그림에 나타나는 바와 같이 오히려 회전수 변동 폭이 약간 증가한다. 또한 흡입 과정 후기 및 흡입 밸브가 닫힌 후에 분사를 하는 것은 그림에서 보는바와 같이 기관의 최고 회전수와 최저 회전수의 변동율이 비교적 크게 증가하게 되어 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 특히 공기연료비 14:1에서는 흡입 과정 후기에 분사를 하게 될 경우에 기관 회전수 변동율이 비교적 크게 증가하고 있으며, 이것은 공기연료비가 희박하게 되면 분사시기 변화의 영향에 대한 기관 회전수 변동율이 증가한다는 것을 의미한다.

Fig. 7는 점화시기 변화에 따른 공회전 회전수의 변동폭을 나타낸 결과이다. 점화시기가 점차 진각 됨에 따라 최고 회전수의 변동율이 점차 증가하고 최저 회전수의 변동율도 점차 증가하는데, 최고 회전수 변동율의 증가보다 최소 회전수 변동의 증가율이 더 증가하여 결국 엔진은 정지하게 된다. 이와 같은 결과에서 공회전 안정성으로 보면 점화시기 30°BTDC 이상의 영역에서는 정상적인 공회전 운전이 불가능한 것을 나타낸다. 또한 공기연료비 12:1에서는 점화시기가 점차 진각 되어도 기관 회전수 변동율은 큰 변화를 보이지는 않지만, 공기연료비 14:1로 점차 희박해짐에 따라 점화시기의 변화에 따른 기관 회전수의 변동율은 큰 영향을 받는다. 이와 같은 실험 결과에서 보면 점화시기의 변화에 대하여 공회전 회전수의 변동율과 공기연료비의 변화를 고려하여 보면 약 10 - 20°BTDC의 영역에서 비교적 안정된 공회전 회전수를 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 점화시기의 변화에 대한 실린더내 최고 압력값의 변화를 표준편차로 나타낸 결과이다. 점화시기의 변화에 대하여 전체적으로 약 1%에서 2% 정도까지 표준편차가 나타나고 있다. 최고연소압력 값의 변동에 대한 표준편차 값도 점화시기 약 10 - 20°BTDC의 영역에서 약 1% 정도로서 가장 안정된 상태를 나타내므로 안정된 공회전 상태를 유지하기 위하여 점화시기는 약 10-20°BTDC의 영역에서 조정하는 것이 유리하며 이와 같은 실린더내 최고 압력의 표준편차의 변화가 기관회전수 변동의 원인으로 판단된다.

Fig. 9는 4번 실린더에서 나타나는 점화시기 변화에 대한 공기연료비의 최고값과 최소값을 나타낸 것이다. 실험결과에서 점화시기의 변화에 대한 공기연료비의 최고값과 최소값은 평균 공기연료비에 대하여 약 3% 정도

를 나타내고 있으며, 점화시기가 0°BTDC에서 40°BTDC로 점차 증가함에 따라 공기연료비의 변동율이 약간 감소하다 30°BTDC 이상에서 다시 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 공기연료비가 12:1에서 14:1로 증가함에 따라 최고 공연비와 최소 공연비의 변동 폭이 약간 증가하고 있다.

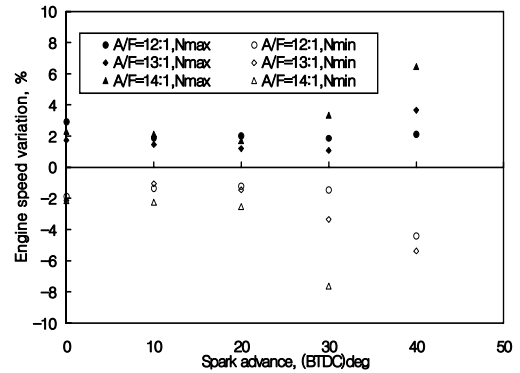


Fig. 7. Effect of spark advance on the engine speed variation.

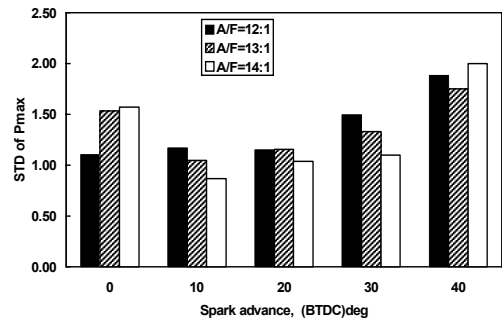


Fig. 8. Effect of spark advance on the standard deviation of Pmax.

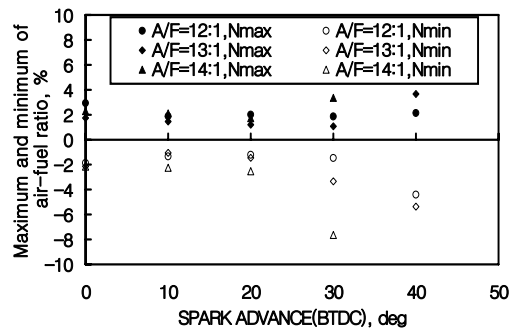


Fig. 9. Effect of spark advance on the maximum and minimum of air-fuel ratio.

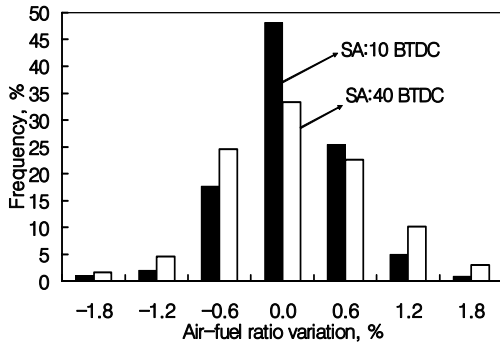


Fig. 10. Effect of frequency polygon of air-fuel ratio variation on the spark advance.

Fig. 10은 공기연료비 13:1에서 점화시기가 10°BTDC와 40°BTDC에 대한 뒫수분포표를 나타낸다. 점화시기를 10°BTDC로 하는 경우에 공기연료비13:1을 기준으로 하여 $\pm 0.3\%$ 이내에 들어갈 확률이 46%이며, 점화시기를 40°BTDC로 하는 경우에는 $\pm 0.3\%$ 이내에 들어갈 확률이 33%이다. 이것으로 보아 점화시기를 10°BTDC로 하는 것이 40°BTDC로 하는 것보다 약 40%정도 공기연료비가 안정되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유에 의하여 기관운전시 점화시기를 점차 진각 시킴에 따라 기관의 공회전 안정성이 감소한다.

4. 결 론

- (1) 안정된 공회전을 얻기 위한 최적의 연료분사시기는 흡입 시작 상사점 전 90°BTDC 근처에서 연료를 분사하는 것이 유리하다. 흡입과정 전에서 연료를 분사하는 경우가 145°ATDC에서 연료를 분사하는 것보다 공기연료비의 변동이 감소하여 결과적으로 공회전 안정성이 증가한다. 공기연료비 변동을 고려한 안정적인 공회전을 나타내는 점화시기는 10°BTDC이다.
- (2) 점화시기를 지나치게 진각 시키면 연소 상태가 불량

하게 되어 공기연료비의 변동율이 증가하게 되는데 공기연료비의 변동율에 대한 뒫수분포가 나빠지며, 기관 회전수의 변동율이 증가하고 공회전 안정성이 나빠지게 된다.

참고문헌

1. Cheng, H. M. and Heywood, J. B., 1993, "Evaluation of a One-Zone Burn-Rate Analysis Procedure Using Production SI Engine Pressure Data", SAE Paper 932749.
2. Teng, C., 2005, "Engine Idle Combustion Stability Evaluation Using Calibration Parameters", SAE Paper 2005-01-2461.
3. Hoard, J. and Reagen, L., 1997, "Relating Subjective Idle Quality to Engine Combustion", SAE Paper 970035.
4. Meyer, R., Kubesh, J. T. and Shahed, S. M., 1993, "Simultaneous Application of Optic Spark Plug Probe and Head Gasket Ionization Probe to a Production Engine", SAE Paper 930464.
5. Heywood, J. B., 1988, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGRAW - HILL International Editions.
6. Kerns, J. M. and Sumilla, G., 2006, "Fuel Assisted Idle Speed Control for Lean Burn Gasoline Engines", SAE Paper 2006-32-0009.
7. Sztenderowicz, M. L. and Heywood, J. B., 1990, "Cycle-to-Cycle IMEP Fluctuations in a Stoichiometrically-Fueled S.I. Engine at Low Speed and Load", SAE Paper 902143.
8. Ozdor, N., Dulger, M. and Sher, E., 1994, "Cyclic Variability in Spark Ignition Engines A Literature Survey," SAE Paper 940987.
9. Shen, H., Hinze, P. C. and Heywood, J. B., 1994, "A Model for Flame Initiation and Early Development in SI Engine and its Application to Cycle-to-Cycle Variations", SAE Paper 942049.
10. Deur J., Ivanovic, V., Pavkovic, D. and Jansz, M., 2005, "Identification and Speed Control of SI Engine for Idle Operating Mode", SAE Paper 2004-01-0898.