

수소 혼합 천연가스 연료 엔진의 아이들 연비에 관한 연구

이선엽[†] · 김영민 · 이장희

한국기계연구원

(2010년 8월 1일 접수, 2010년 9월 15일 수정, 2010년 9월 15일 채택)

The Study for Idle Fuel Consumption of a Hydrogen-Blended Natural Gas Engine

Sunyoup Lee[†], Youngmin Kim, Janghee Lee

Korea Institute of Machinery & Materials

(Received 1 August 2010, Revised 15 September 2010, Accepted 15 September 2010)

요 약

천연가스-수소 혼합가스를 엔진 연료로 사용하는 방법은 배기가스 저감뿐만 아니라 다가올 수소에너지 시대를 대비하여 수소 인프라를 구축하는 데도 의의가 있다. 또한 수소 혼합 천연가스 연료 엔진은 천연가스 엔진 보다 더 높은 열효율 확보할 수 있어 에너지의 효율적 사용에 있어서도 매우 우수한 연료이다. 본 연구에서는 시내버스가 가장 많이 운전되는 조건인 아이들 조건을 대상으로 수소 혼합 천연가스 연료가 연료소모량과 배기가스 저감에 미치는 영향을 파악하였다. 실험 결과 수소 혼합 천연가스 연료는 천연가스에 비해 아이들 조건에서 연료소비율이 20%이상 저감되었으며 유해 배출가스인 THC, NOx를 근본적으로 저감시킴을 확인할 수 있었다.

주요어 : 천연가스, 수소, 아이들, 연료소모량, 배출가스, 연소안정성

Abstract — Using a hydrogen blended compressed natural gas (HCNG) as a fuel for IC engines has a significant meaning in terms of achieving a reduction of automotive exhaust emissions as well as preparing for an upcoming hydrogen economy by constructing hydrogen infrastructure. In addition, a HCNG engine has higher thermal efficiency than a CNG engine, which is another advantage that makes HCNG fuel considered as a future alternative for natural gas. Therefore, in this study, idling operation of a 11 litre HCNG bus engine was investigated in terms of fuel consumption rate and emissions characteristics. The results show that fuel consumption rate was decreased more than 20% by use of HCNG and all the emissions were significantly reduced in idling condition.

Key words : CNG, Hydrogen, Idle, Fuel consumption, Emissions, Combustion Stability

1. 서 론

국내에서 2000년 이후 대도시를 중심으로 보급이 이루어진 천연가스 버스는 현재 2만 여대를 넘어섰으

며 저공해 자동차로서 도심의 대기질 개선에 많은 공헌을 하였다. 그러나 희박연소기법을 사용하는 현재의 국내 천연가스 엔진 기술로는 2014년 적용 예정인 EURO-VI 배기규제의 NOx 허용기준치를 만족시킬 수 없어 이를 극복할 수 있는 여러 가지 방법에 대해 논의가 이루어지고 있다.

천연가스에 수소를 일정량 첨가한 수소 혼합 천연

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Institute of Machinery & Materials
104 Sinseongno, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea
Tel : 042-868-7025, E-mail : sunylee@kimm.re.kr

가스 연료(HCNG, Hydrogen blended compressed natural gas) 엔진은 그 중 하나이며 수소의 빠른 연소 속도와 넓은 가연범위의 특성을 이용하여 천연가스가 가지고 있는 연소 한계를 극복하는 방식이다 [1]. 수소 혼합 천연가스 연료(이하 HCNG)를 사용하고자 하는 배경에는 미래의 궁극적 연료인 수소를 본격적으로 사용하기에 앞서 사회적 그리고 기술적 가교역할을 HCNG가 담당할 것이라는 전망이 자리 잡고 있다. 주로 북미와 유럽을 중심으로 이 기술이 소개되었지만 늦게 기술을 도입한 인도와 중국은 더 빠른 행보를 보여 이미 상업화단계에 이른 것으로 보고되고 있다.

천연가스와 수소를 혼합하는 이유는 첫째, H/C 비율이 높은 천연가스를 개질하여 수소를 생산하기가 유리하고, 둘째, 천연가스와 수소의 혼합이 용이할 뿐만 아니라 천연가스 충전 인프라와 천연가스 자동차의 연료시스템을 최대한 활용할 수 있으며, 셋째, 수소의 빠른 화염속도와 넓은 가연범위 특성을 이용하여 초회박 연소기법을 도입함으로써 후처리장치 없이 EURO-VI의 NO_x 허용기준치를 만족시킬 수 있으며, 넷째, 수소의 높은 옥탄가와 안정된 연소특성을 이용할 경우 연료소모량을 천연가스보다 더 줄일 수 있기 때문이다 [2-4].

천연가스 버스는 운행 특성상 아이들 상태, 즉 버스가 정지한 상태에서 엔진만 운전되는 상태가 가장 빈번하기 때문에 아이들 연료소모량이 전체 연료소모량에서 차지하는 비중이 매우 높다. 최근에는 연료소모량을 줄이기 위하여 아이들 상태에서 엔진을 정지하였다가 출발할 때 다시 시동이 자동적으로 켜지는 ISG(Idle Stop & Go)가 천연가스 버스에 장착되고 있다. 비록 전체 아이들 운전조건에서 작동하지 않고, 시동 시에 다소 많은 연료가 소모되더라도 불구하고 ISG를 장착하여 전체 연료소모량의 5%를 줄일 수 있을 만큼 시내버스는 아이들에서 소모되는 연료량이 많다. 그러나 ISG는 빈번한 엔진의 정지와 시동에 의해 유해가스가 다소 증가하는 단점이 있어 EURO-VI와 같이 transient mode를 사용하는 배기규제에는 불리할 수 있다 [5].

HCNG 연료는 연소 안정성이 천연가스보다 우수하여 아이들 연료소모량을 근원적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 시동성이 우수하고 아이들에서 배출되는 배기가스양이 작아 ISG와 함께 사용하면 ISG가 가지는 문제점을 일부 보완할 수 있다. 본 연구에서는 시

Table 1. Engine Specifications.

Item	Specifications
Bore (mm)	123
Stroke (mm)	155
Compression ratio	10.5
Displacement (cc)	11,050
Idle speed (rpm)	600 ± 50
Max. power (kW)	213 @ 2,200 rpm
Max. torque (Nm)	1,226 @ 1,260 rpm

내버스가 가장 많이 운전되는 아이들 운전조건을 대상으로 HCNG (천연가스 70%, 수소 30%) 연료의 연료소비율 특성과 유해배기가스 배출 특성을 평가하였으며 천연가스 연료를 사용한 경우와 비교하여 HCNG 연료가 가지는 우수성을 확인하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

실험에 사용된 엔진은 현재 시내버스에 장착되는 6기통 CNG 엔진이며 자세한 제원을 Table 1에 나타내었다. 엔진실험을 위해 엔진을 EC동력계에 장착하였고 수소혼합 천연가스 연료를 공급하기 위해 별도의 수소 연료공급 장치가 설치되었다. 유해배기가스는 분석기(MEXA 7000, HORIBA)를 통해 측정하여 PC에 저장되도록 하였으며 개발 전용 ECU를 사용하여 엔진을 제어하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

실험조건은 600 rpm 아이들, 점화시기 BTDC(Before Top Dead Center) 7° 조건이며 천연가스와 HCNG연료 각각에 대하여 공기과잉율(Excess Air Ratio, λ) 조건을 한계범위까지 변화시켜 특성을 평가하였다. 측정된 파라미터는 천연가스 및 HCNG 연료 각각에 대해 엔진의 운전안정성을 나타내는 COV_{rpm}와 연료소모량, 배기가스(NO_x, THC) 배출농도, 공기과잉율, 그리고 각 부위의 압력 및 온도 등이다. 실험실 온도는 25 ± 3°C이며 엔진냉각수 온도는 80°C를 유지하였다.

본 연구에서 사용된 HCNG 연료의 조성은 천연가스 70%, 수소 30%로서, 이와 같이 선정된 이유는 EURO-V 배기규제를 만족하는 천연가스엔진이 HCNG 연료를 사용하여 EURO-VI를 만족시키기 위해서는 최소한 수소의 첨가율이 30%가 되어야 하기 때문이다 [1]. 이보다 낮은 수소 첨가율은 NO_x 규제를 만족시킬 수

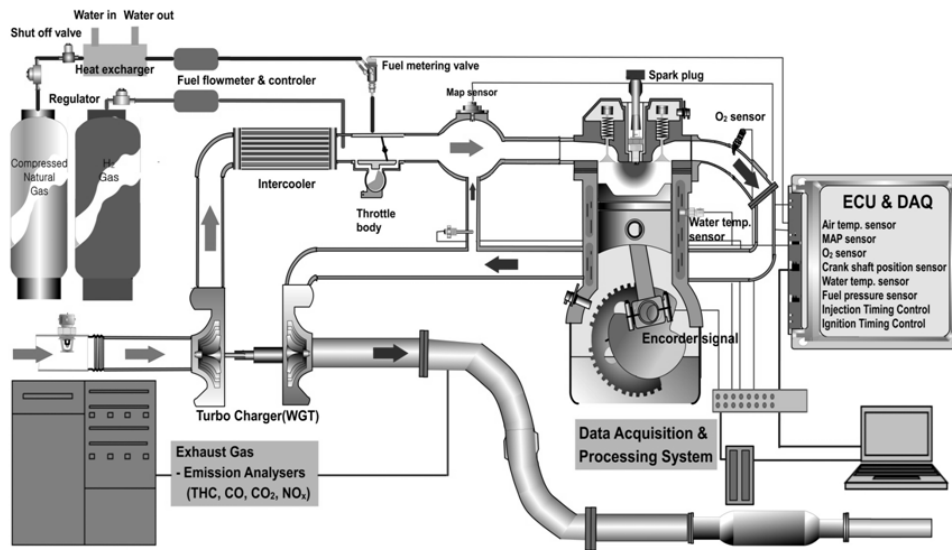


Fig. 1. schematic diagram of the experimental engine setup.

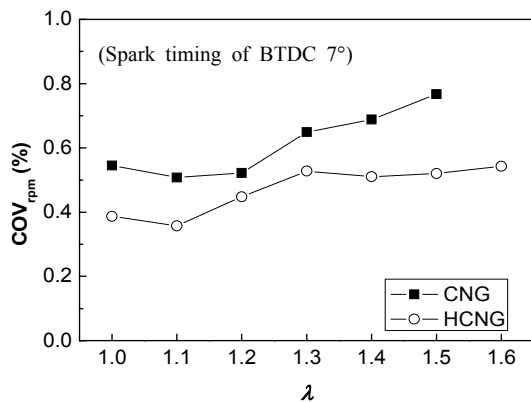


Fig. 2. COV_{rpm} comparison of CNG and HCNG engine operations.

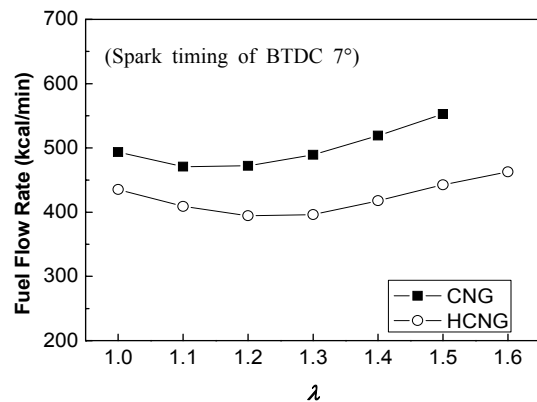


Fig. 3. Fuel consumption rate comparison of CNG and HCNG engine operations.

없으며, 더 높은 첨가율은 1회 충전에 따른 이동가능 거리가 너무 짧아지는 문제점을 가지고 있다.

3. 실험결과

아이들 조건에서는 엔진의 연소상태가 운전자에게 가장 잘 전달됨에 따라 운전안정성, 즉 엔진회전속도의 안정성이 매우 중요하다. 본 연구에서는 운전안정성을 평가하기 위해 엔진회전속도의 변동성을 나타내는 COV_{rpm}를 사용하였으며 천연가스(CNG로 표기) 및 HCNG를 사용한 경우에 대한 실험결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 모든 공기과잉율에 대해 HCNG가 CNG보다 COV_{rpm}이 낮아 운전안정성

이 우수하며 특히 희박한 조건으로 갈수록 그 격차가 확대되는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 COV_{rpm} 차이는 COV_{rpm}값에 대한 엔진 관성의 영향을 고려하더라도 상당히 큰 것으로 현재의 천연가스 버스가 점화시기 BTDC 7°, $\lambda=1.1$ 정도에서 아이들링 되는 것을 감안하면 HCNG 연료는 $\lambda=1.6$ 까지 운전이 가능해 희박한 공기과잉율 조건에서도 안정된 연소를 할 수 있음을 의미한다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 측정된 CNG와 HCNG의 연료유량으로서 아이들 회전속도 600rpm을 유지하는데 필요한 연료소모량을 나타낸다. 각각의 연료가 단위부피당 또는 단위 질량당 발열량이 다르기 때문에 에너지 사용의 효율성을 비교하기 위해

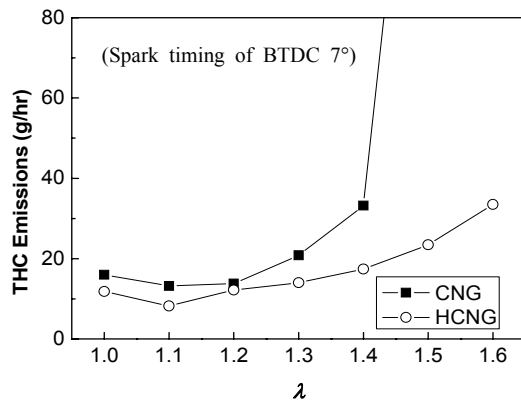


Fig. 4. THC emission comparison of CNG and HCNG engine operations.

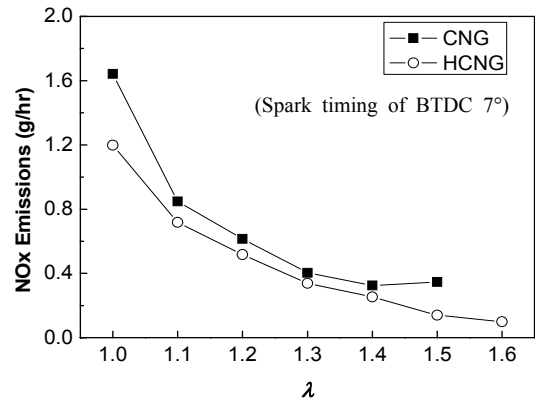


Fig. 5. NOx emission comparison of CNG and HCNG engine operations.

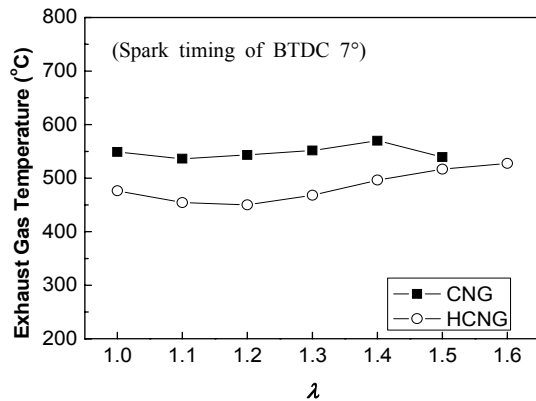


Fig. 6. Exhaust gas temperature comparison of CNG and HCNG engines.

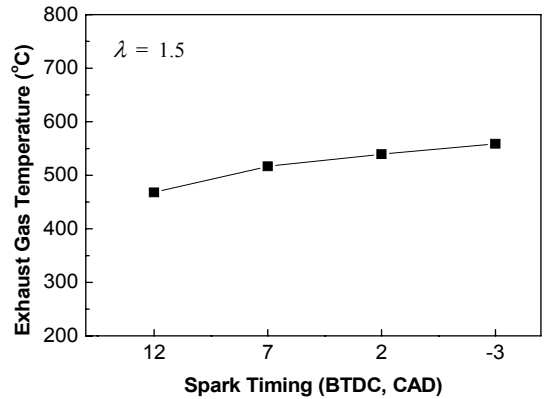


Fig. 7. Exhaust gas temperature vs. spark timing in HCNG engine operations.

kcal/min으로 표현하였다. 결과를 살펴보면 HCNG는 CNG에 비해 모든 공기과잉율 조건에서 연료소모량이 낮게 나타났으며 전체적으로 20% 전후로 연료가 작게 소모되는 것을 알 수 있다. 이와 같이 아이들 조건에서 HCNG가 CNG보다 연료소모량이 낮게 나타나는 것은 수소의 첨가에 의해 연소속도가 빠르고 연소의 사이클 변동성이 작아 매 사이클마다 화학적 에너지가 효율적으로 운동에너지로 변환되기 때문으로 분석된다.

Fig. 4와 Fig. 5의 유해배기가스의 배출량에 있어서도 HCNG 연료의 우수성을 확인할 수 있다. EURO-VI 배기규제에서 가장 만족시키기 어려운 배기물질은 NOx와 THC이며 결과에 나타난 바와 같이 모든 공연비에서 HCNG 연료가 적게 배출되었다. 특히 HCNG 연료가 더욱 희박한 공기과잉율 조건에서 안정적인 운전이 가능함에 따라 THC의 과도한 증가 없이 NOx를 거의 배출하지 않을 정도로 저감시킬 수

있음을 확인할 수 있다. 비록 본 논문에 제시하지는 않았지만 탄소(C)의 성분이 작은 HCNG 연료의 특성상 CO와 CO₂를 근원적으로 줄일 수 있는 장점도 가지고 있다.

한편, Transient mode가 적용되는 EURO-VI 배기규제에서는 냉간시동 시 배기후처리 촉매의 활성화기간을 앞당길 수 있도록 배기가스 온도를 높이는 것이 중요하지만, Fig. 6을 보면 HCNG 연료가 천연가스에 비해 전체적으로 온도가 낮아 촉매 활성화기간을 단축시키는데 불리함을 알 수 있다. 이와 같은 문제점은 점화시기 지각을 통해서 해결할 수 있는데 통상적으로 점화시기를 지각시키면 연소가 불안정해 질 수 있으나 HCNG 연료의 경우 안정된 연소를 기반으로 점화시기를 지각시킬 수 있다.

Fig. 7은 공기과잉율 1.5를 기준으로 점화시기를 지각시킴으로써 해서 얻을 수 있는 HCNG 연료의 배기가스 온도이다. 배기가스 온도는 점화시기 지각을 통

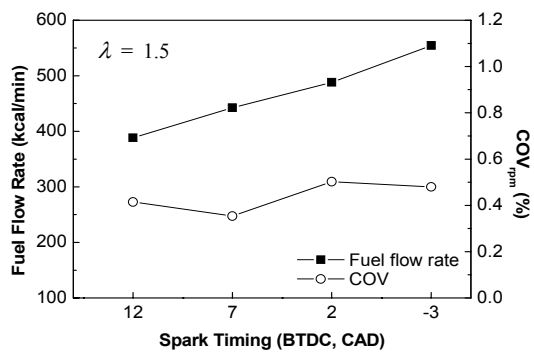


Fig. 8. Fuel consumption rate vs. spark timing in HCNG engine operations.

해 지속적으로 상승하여 현재의 천연가스 버스의 배기가스 온도인 536°(과잉공기를 1.1. 점화시기 BTDC 7°) 보다 더욱 상승시킬 수 있는데, 이와 같은 특성을 이용하면 냉간시동 상황에서 촉매활성화 시간을 상당히 줄일 수 있다. 점화시기를 지각시키더라도 Fig. 8과 같이 연소안정성을 나타내는 COV_{rpm} 가 악화되지는 않고 더 지각시켜 배기가스 온도를 더 높일 수 있는 여지가 남아 있음을 알 수 있다. 단지 Fig. 8에 함께 나타낸 연료소모율이 점화시기를 지각시킴에 따라 증가하는 문제점을 가지고 있지만 냉간시동 조건에서 촉매를 활성화 시키는 시간이 30초 밖에 되지 않기 때문에 전체적인 연료소모율에 미치는 영향은 무시할 정도로 작다.

점화시기 지각에 따라 유해배기가스 배출량은 Fig. 9와 같이 변화가 없거나 오히려 줄어드는데 THC가 저감되는 이유는 점화시기 지각에 따라 연소기간이 배기밸브가 열리는 시점까지 이루어지고 이때 피스톤과 실린더 라이너 사이의 간극체적에 축적되었던 미연소된 연료가 연소실로 되돌아오면서 후연소가 발생하여 HC가 소진되기 때문으로 판단된다.

아이들 운전조건은 도심을 운행하는 시내버스가 가장 빈번하게 운전되는 조건으로서 운전안정성과 연료소모율이 매우 중요하다. 그러나 배기규제가 점차 Transient mode에서 실시됨에 따라 아이들에서의 유해배기가스 배출량뿐만 아니라 촉매활성화 기간과 관련 있는 배기가스 온도 또한 중요하게 되었다. HCNG 연료는 이러한 모든 조건에서 천연가스에 비해 우수하다는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었지만 HCNG 연료를 보급하기 위해서는 무엇보다 충전시설에 대한 국내규정이 뒷받침되어야 한다. 천연가스를 개질하여 수소를 생산하고 이를 혼합하여 HCNG

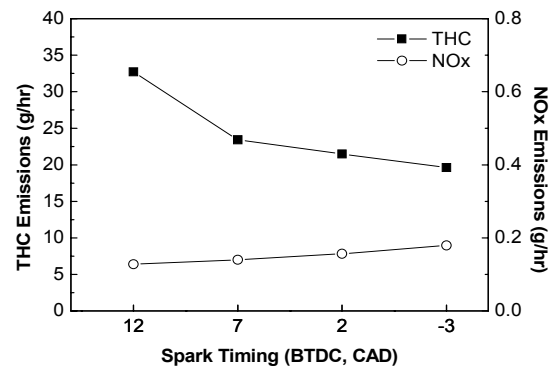


Fig. 9. Emission variations of a HCNG engine as a function of spark timing.

연료로서 충전하는 방법이 가장 현실적이나 현재는 국내 기준이 제정되어 있지 않아 보급에 걸림돌이 되고 있다. 따라서 미래의 수소에너지 시대를 대비해서라도 HCNG 연료가 천연가스 충전소를 활용하여 공급될 수 있도록 빠른 시일 내에 그 기준을 확립하는 것이 필요하리라 여겨진다.

4. 결론

천연가스에 수소를 혼합한 HCNG 연료를 사용하여 시내버스 엔진이 가장 많이 운전되는 조건인 아이들 조건을 대상으로 연료소모율과 연소안정성, 그리고 유해배기가스 배출 특성 등을 평가하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 아이들 운전안정성을 나타내는 COV_{rpm} 가 전 공연비조건에서 HCNG 연료가 CNG 경우 보다 우수했으며 희박운전조건에서도 안정된 운전 성능을 보임을 확인할 수 있었다.
- (2) 아이들 운전을 유지하는데 필요한 연료소모량은 HCNG 연료가 천연가스에 비해 약 20% 정도 저감되어 에너지 사용의 효율성에 있어서 매우 유리한 것으로 나타났다.
- (3) HCNG 연료의 안정된 희박연소 특성으로 희박조건이 확장되었을 뿐만 아니라 유해배기가스 배출물인 NOx와 THC를 동시에 저감시킬 수 있어 천연가스보다 더 친환경적임을 확인할 수 있었다.
- (4) Transient mode에서 실시되는 EURO-VI 배기규제에서는 HCNG의 낮은 배기가스온도가 촉매활성화 기간을 단축시키는데 불리하지만 안

정된 연소 특성을 바탕으로 점화시기를 지각시킴으로써 충분히 배기가스 온도를 높일 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Collier, K., Mulligan, N., Shin, D. and Brandon, S. Emission results from the new development of a dedicated hydrogen-enriched natural gas heavy duty engine. SAE technical paper, 2005, SAE 2005-01-0235.
2. Fanhua, M., Yu, W., Haiquan, L., Yong, L., Junjun, W. and Shuli, Z. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2007, 32, 5067-5075.
3. S.Orhan, A., Zafer, D., Nafiz, K. and T.Nejat, V. Internal combustion engines fueled by natural gas-hydrogen mixture. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 2004, 29(14), 1527-1539.
4. Thipse, S., Rairikar, D., Kavathekar, P. and Chitnis, P. Development of a six cylinder HCNG engine using an optimized lean burn concept. SAE technical paper, 2009, SAE 2009-26-031.
5. Kazuhiro T., Kji K. Yoshitsugu Y. Study on intelligent idling stop system. FISITA World Automotive Congress, 2000, F20001392.