

흡기관 분사식 수소 SI기관의 희박과급 적용에 관한 연구

이광주¹ · 이종구¹ · 이종태^{2†}

¹성균관대학교 대학원, ²성균관대학교 기계공학부

A Study on the Application of the Lean Boosting in a Hydrogen-fueled Engine with the SI and the External Mixture

KWANGJU LEE¹, JONGGOO LEE¹, JONGTAI LEE^{2†}

¹Grad. School of Sungkyunkwan Univ.

²School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ. 300,
Chunchun-dong Janan-gu, Suwon-Si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

Abstract >> In order to achieve simultaneously the ultra-low NO_x, the high power and the high efficiency in a hydrogen-fueled engine with SI and the external mixture, the effects of low temperature combustion, performance and exhaust are compared and analyzed by the application of the lean boosting. As the results, the decrease rate of the high temperature in the hydrogen is less decreased than the other fuels by high constant-volume specific heat. However, when the conditions of 1.7bar and $\Phi=0.33$ are reached by the lean boosting, the maximum gas temperature of hydrogen is decreased under the temperature of NO_x formation and it is possible to stabilize combustion below 2% of COV_{mep}. Also, at that condition, it is feasible to achieve simultaneously NO_x-free and the power of gasoline level. Therefore, it is found that the lean boosting is useful in the hydrogen-fueled engine.

Key words : Hydrogen-fueled engine(수소기관), External mixture(흡기관 분사식), Lean boosting(희박과급), Low temperature combustion(저온연소), NO_x-free(질소산화물 무배출)

1. 서 론

희박과급법은 희박혼합기의 과급에 의한 혼합기의 질량증가와 동일 열량 공급에 의해 저온연소 효과와 동시에 고출력, 고효율을 도모하는 방법이다¹⁾. 무탄소 배출과 고효율의 수소기관이 상대적으로 저평가되는 것은 유일하게 배출되는 NO_x와 수소연료의 큰 비체적에 따른 저출력에 기인한다. 실용화 가능성이 가장 큰 흡기관 분사식 수소기관에 희박과급

법을 적용하면 NO_x 제로화와 고출력을 달성할 수 있을 것이지만 높은 공급열량에 의해 역화발생이 우려된다. 역화는 수소기관 자동차의 상용화를 막는 주요한 관건이므로 본 연구실에서는 역화억제에 관한 다양한 방법을 검토한 바 있다. 그 결과, 역화는 농후한 영역에서 모종의 점화원 또는 피스톤 틈새체적으로부터 실린더 내로 나와 느리게 연소하는 화염이 밸브 오버랩기간 중 흡기관 내로 역류하는데 기인하는 것을 확인하였다. 이 관점을 바탕으로 밸브 오버랩기간에 관여하는 흡기밸브 열림시기를 지각시켜 화염원의 역류시점을 제어한 바 농후한 영역에서 역화가 억제되어 흡기밸브 열림시기가 역화억제에 효

[†] Corresponding author : jtlee@skku.edu

[접수일 : 2013.4.10 수정일 : 2013.4.17 게재확정일 : 2013.4.26]

Copyright © 2013 KHNES

Table 1 Specification of test engine

Valve mechanism	DOHC
Bore × Stroke	86mm × 86mm
Compression ratio	10.5
Displacement volume	499.6 cc
I/O / I/V	TDC / 77°CA ABDC
E/O / E/V	34°CA BBDC / 10°CA ATDC

과적임을 밝힌 바 있다^{2,4)}.

따라서 고부하 시의 역화억제가 가능하여 고출력을 도모할 수 있다. 그러나 단열화염온도가 높은 수소연료의 특성에 희박과급의 영향이 타연료와 어떠한 차이가 있는지, 얼마나 희박해야 NOx 생성 열해리 온도 이하로 가능하며, 또한 그 조건에서의 연소안정성이 어떠한지는 아직 미지이다.

본 연구에서는 흡기관 분사식 수소 SI기관의 가솔린기관 수준의 출력 및 NOx 제로화의 동시 달성을 위하여 희박과급 적용에 따른 저온연소 효과, 성능 및 연소특성 등을 비교, 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 수소기관은 발화운전 중 흡·배기 밸브의 개폐시기를 연속적으로 가변시키는 밸브타이밍 시스템, MCVVT(Mechanical Continuous Variable Valve Timing) 가 장착된 연구용 단기통기관이며, 수소기관의 주요제원은 Table 1에 나타내었으며, 실험 장치의 개략도를 나타낸 것이 Fig. 1이다³⁾. 실험 장치는 전술한 수소기관, 동력측정계통, 수소공급계통, 흡배기계통, 냉각계통, 데이터 취득부 및 과급기로 구성된다. 수소연료는 150bar로 충전된 고압가스 봄베로부터 1, 2차 감압을 거쳐 축압기(accumulator)를 통해 3bar의 일정한 압력으로 기관에 공급된다. 과급은 외부 과급방식으로 링블로워(Dongbu, DBR-1002)를 사용하였다. 과급압을 제어하기 위해 링블로워 출구 쪽과 서지탱크 입구 쪽에 bypass밸브를 각각 부착

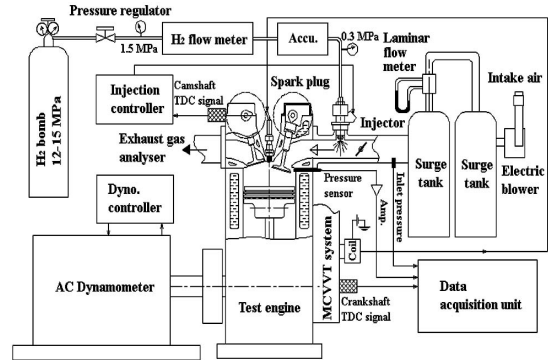


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

하였다. 그리고 수냉식 인터쿨러를 사용하여 과급온도를 제어하였다. 과급에 의한 맥동을 감소시키기 위해 기관 흡기관과 인터쿨러 출구사이에 2개의 서지탱크를 사용하였으며 서지탱크 사이에 공기유량계를 설치하였다.

2.2 실험방법

주요 실험변수는 연료-공기 당량비(추후 당량비라 칭함) 및 과급압이다. 가솔린연료 전환 시, $\Phi=1.0$ 수준의 출력을 달성하는 과급압과 당량비를 파악한 후 희박과급을 위한 동일 공급열량 하에서 과급압은 NOx 0ppm이 가능한 1.7bar까지 0.1bar씩 단계적으로 증가시켰다. 상기의 경우 흡기밸브 열림시기는 고부하 시 역화 억제를 위하여 TDC에 고정시켰다. 배기밸브 닫힘시기는 역화발생과의 관련성이 적으므로 배기효율이 높은 ATDC10°CA에 고정시켰다⁴⁾. 기관 회전수는 1600rpm, 점화시기는 MBT로 고정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소기관의 고출력 달성 영역

전술한 바와 같이 수소기관에서 고부하시 발생하는 역화는 흡기밸브 열림시기의 지각으로 억제가 가능함을 확인하였다. 따라서 수소기관의 출력이 어떠한 조건에서 가솔린기관의 출력을 달성시키는지 파

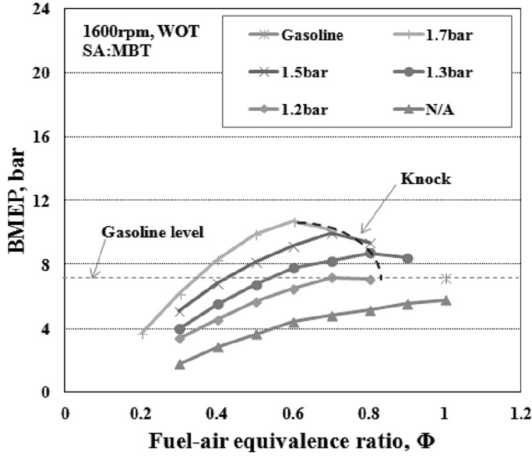


Fig. 2 BMEP versus fuel-air equivalence ratios at each boosting pressure

악하고자 당량비와 과급압 변화에 대한 정미 평균 유효압력, BMEP를 나타낸 것이 Fig. 2이다. 흡기밸브 열림시기를 지각시켜 정상운전이 당량비가 $\Phi=1.0$ 까지 가능하더라도 BMEP의 최고치는 가솔린기관의 약 81.2% 수준에 머문다. 그러나 과급한 경우에는 농후한 영역에서 공급열량 증가에 의한 노크가 발생하였을 뿐 역화 발생없이 가솔린기관 수준 이상의 출력이 가능한 것을 나타낸다. 본 실험조건 하에서 가솔린기관 수준의 출력이 발생하는 최소의 과급압 및 당량비는 1.2bar 및 $\Phi=0.7$ 부근이다. 이보다 과급압을 높이면 더 희박한 혼합비라도 가솔린기관수준의 출력달성이 가능하다.

3.2 수소기관의 희박과급 영향성 해석

수소연료의 물성치는 탄화수소계 연료와 큰 차이가 있으므로 수소의 희박과급 효과를 가솔린 및 천연가스 연료의 경우와 비교하기 위하여 희박과급압 즉, 동일 공급열량 하에 과급할 경우의 희박당량비를 갖는 과급압 변화에 따른 최고가스온도 감소율을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 여기서 각 연료에 대한 공급열량은 모두 자연흡입상태, 이론 공기연료비 하에서 측정된 값으로 고정시켰다. 가솔린 및 천연가스의 성분은 C_8H_{18} 및 CH_4 의 물성치를 사용하였다. 최고가스

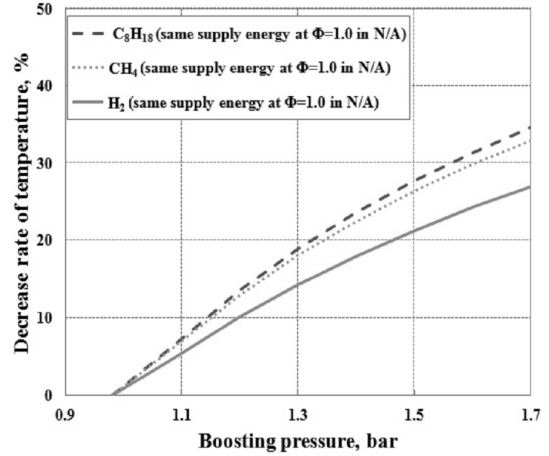


Fig. 3 Decrease rate of temperature versus boosting pressure about each fuel with same supply energy at $\Phi=1.0$ in natural aspirated condition

온도 감소율은 자연흡입상태를 기준으로 희박과급압 증가에 따른 온도감소량을 백분율로 나타낸 것이다.

최고가스온도(T_g)는 식 (1)과 같이 공급열량(Q)에 비례하고 압축초기의 실린더 내 가스 질량(m) 및 정적비열(C_v)에 반비례한다.

$$T_g = T_i \epsilon^{n-1} + Q \left(m \sum_{x=1}^n \frac{m_x}{m} C_{v_x} \right)^{-1} \quad (1)$$

여기서 T_i 는 압축초기온도, ϵ 는 압축비, n 은 폴리트로픽 지수, 아래첨자 x 는 공기, 연료 및 잔류가스에 해당한다.

상식에 나타난 바와 같이 희박과급은 공급열량을 동일하게 공급하고 흡입공기량을 다량 공급하여 최고가스온도를 감소시키는 전략이다. 따라서 최고가스온도 감소율은 희박과급압 증가에 따른 신기질량의 증가에 의해 제시된 연료 모두에서 증가하는 경향이다. 그러나 가솔린 및 천연가스 연료의 절대치는 유사한데 반하여 수소의 경우는 상대적으로 낮은 것을 나타낸다. 또한 희박과급에 따른 수소의 최고가스온도 감소율은 타연료에 비해 점차 감소됨을 알 수 있다. 일례로 희박과급압 1.7bar에서 수소의 최고가스온도 감소율은 가솔린 연료에 비하여 약 22%정도

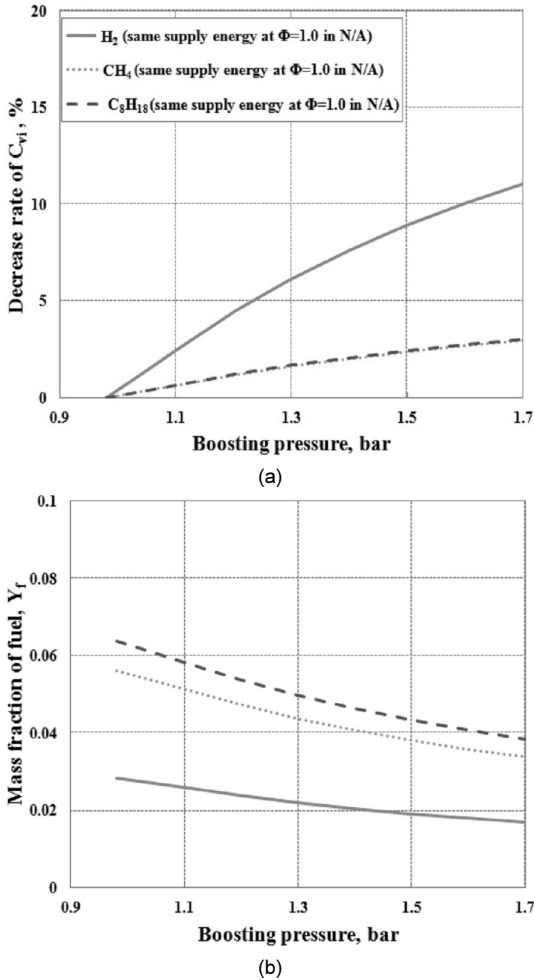


Fig. 4 (a) Decrease rate of constant-volume specific heat in intake mixture mass (b) mass fraction of fuel versus boosting pressure about each fuel with same supply energy at $\Phi=1.0$ in natural aspirated condition

적은 것을 보인다. 최고가스온도는 정적비열에 반비례하며, 희박과급에 따른 각 연료의 정적비열 변화로 최고가스온도 감소율의 차이가 발생할 수 있다. 이를 파악하기 위하여 희박과급에 따른 각 연료혼합기의 정적비열 감소율(a)과 연료질량분율(b)을 나타낸 것이 Fig. 4이다. 여기서 조건은 Fig. 3과 동일하며, 정적비열 감소율 또한 자연흡입상태를 기준으로 희박과급 증가에 따른 정적비열 감소량을 백분율로 나타낸 것이다.

전술한 바와 같이 공급열량은 고정이며, 희박과급

압 변화에 대한 신기질량은 각 연료의 질량에 따른 차이가 있더라도 대체로 과급압에 비례한다. 수소의 정적비열은 300K에서 약 10.183kJ/kg·K로써 가솔린(1.639kJ/kg·K)이나 천연가스(1.736kJ/kg·K)에 비해 약 6.2배 정도 크다. 이로 인해 수소-공기 혼합기의 정적비열은 타연료에 비해 현저히 크다. 하지만 Fig. 4 (a)에 나타난 바와 같이 수소의 정적비열 감소율은 희박과급압이 증가될수록 증가하는 경향이다. 이는 수소의 큰 정적비열에도 불구하고 Fig. 4 (b)의 희박과급에 의한 수소 질량분율 감소에 의해 수소의 정적비열 감소율이 증가한 것이다. 상기 요인들에 의해 희박과급에 따른 수소의 최고가스온도 감소율은 타연료에 비해 저하됨을 알 수 있다. 또한 수소의 가스온도 감소율이 작고 단열화염온도가 높으므로 NO_x의 열해리온도이하까지 수소의 최고가스온도를 낮추기 위해서는 탄화수소계 연료보다 더 희박혼합기를 사용하여야 한다는 것을 나타낸다.

3.3 희박과급에 의한 연소특성 및 NO_x-free 가능성

전술한 바와 같이 희박과급은 동일 공급열량 하에서 과급에 의한 신기질량 증가로 저온연소 효과와 동시에 고출력을 도모하는 것이다. 따라서 가솔린기관 수준의 출력 달성($\Phi=1.0$)이 가능한 공급열량으로 동일하게 공급하고 희박과급을 한 경우의 당량비와 최고 가스온도를 나타낸 것이 Fig. 5 및 Fig. 6이다. 여기서 최고가스온도는 측정된 실린더 내 가스압력과 이상기체 상태방정식으로부터 구한 것이다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 가솔린기관 수준의 출력 달성이 가능한 최소과급압 및 최소당량비는 과급압 1.2bar, 당량비 $\Phi=0.7$ 정도이다. 이를 희박과급하여 1.7bar가 될 경우, 당량비는 약 $\Phi=0.33$ 정도로 초희박혼합기가 된다.

Thermal NO_x의 생성은 Zeldovich NO 반응에 의해 이론적으로 화염온도가 1850K 이상일 때 생성된다. 실험적인 결과로는 화염온도 2200K 이상에서 NO_x가 생성된다고 보고된 바 있다⁵⁻⁷⁾.

상기의 희박과급에 따른 저온연소화에 의해 예상

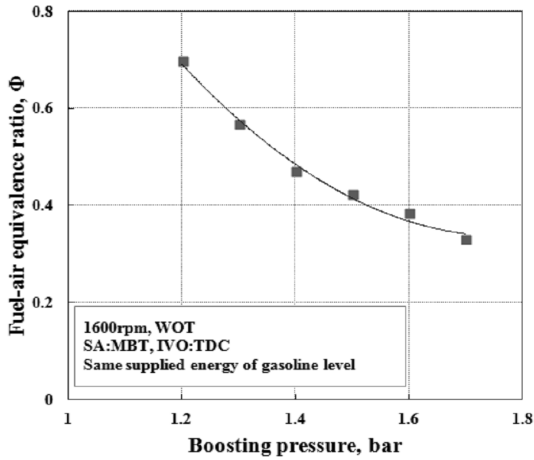


Fig. 5 Fuel-air equivalence ratio versus boosting pressure with using lean boosting in same supplied energy of gasoline level

대로 Fig. 6에서 보는 바와 같이 희박과급압 1.7bar가 되면 최고가스온도는 1.2bar에 비해 약 37%정도 감소로 2090K에 달하며, NOx의 열해리온도 이하까지 가능함을 보인다. 따라서 NOx억제를 위한 저온연소 효과를 실현시키기 위해서는 상기조건 하에서 안정된 연소가 선결되어야 한다.

Fig. 7은 희박과급에 따른 사이클 변동계수, COV_{imep} 를 나타낸 것이다. 여기서 COV_{imep} 는 도시평균유효

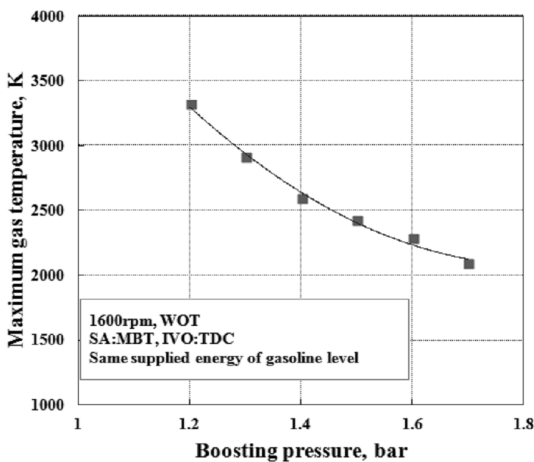


Fig. 6 Maximum gas temperature versus boosting pressure with using lean boosting in same supplied energy of gasoline level

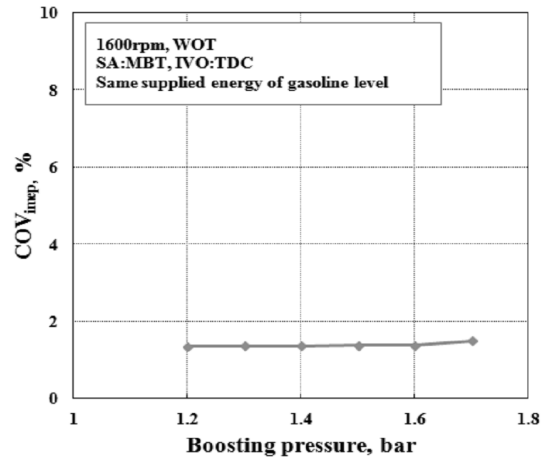


Fig. 7 COV_{imep} versus lean boosting pressure in same supplied energy of gasoline level

압력의 RMS(Root Mean Square)이며, 100cycle의 데이터를 앙상블 평균한 값이다. 사이클 변동계수는 기관운전 안정성을 나타내는 지표로서 일반적으로 5% 미만이면 연소가 안정된 것으로 평가한다.

일반적으로 가솔린기관의 희박한계는 자연흡입상태에서 당량비 약 $\Phi=0.7$ 정도이므로 이보다 희박하게 저온연소시키면 NOx가 감소되더라도 CO나 HC가 증가되어 다시 배기가스 문제가 야기된다. 이에 반해 수소기관의 경우는 희박과급압이 증가할수록 초희박 혼합기 사용에 의해 미미하게 증가되지만 당량비 $\Phi=0.33$ 인 희박과급압 1.7bar에서도 약 2% 미만의 값을 보여 전반적으로 안정된 연소가 가능함을 보인다.

희박과급에 따른 NOx 배출량을 나타낸 것이 Fig. 8이다. NOx 배출량은 희박과급압이 증가할수록 저온연소효과에 의해 전반적으로 감소하는 경향이다. 희박과급압 1.2bar, 당량비 $\Phi=0.7$ 에서의 NOx는 약 1477ppm 정도 배출되었으나 NOx 열해리 온도 미만이 되는 희박과급압 1.7bar의 경우, NOx 배출량은 0ppm의 무공해 수준이 되는 것을 보인다. 이 같은 결과는 수소기관에서 희박과급에 의한 저온연소법을 사용하면 고부하시라도 NOx를 거의 무공해 수준까지 억제 가능하다는 것을 보이는 것이다. 상기의 결과들로 인해 수소기관에 희박과급의 유용성이 크다는 것을 알

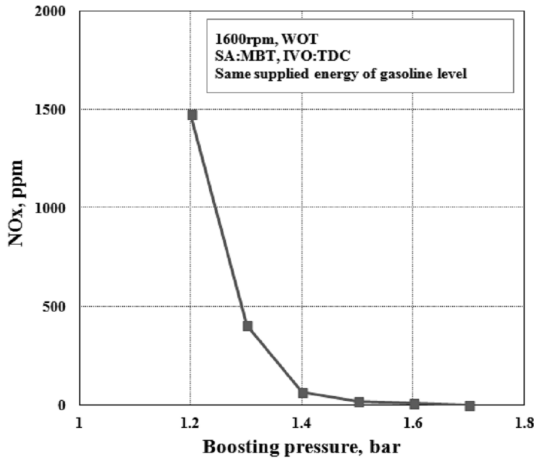


Fig. 8 NOx versus lean boosting pressure in same supplied energy of gasoline level

수 있으며, 희박과급에 따른 저온연소화로 NOx 제로화와 가솔린기관 수준의 고효율을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 확인하였다.

4. 결 론

흡기관 분사식 수소 SI기관을 대상으로 가솔린기관 수준의 출력 및 NOx 제로화의 동시 달성을 위하여 희박과급 적용에 따른 성능특성, 저온연소 효과, 연소특성 및 배기특성 등을 비교, 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

수소의 높은 정적비열에 의해 희박과급에 따른 수소의 최고온도 감소율은 타연료에 비해 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

하지만 가솔린기관 수준의 출력달성이 가능한 공급열량으로 희박과급하여 희박과급압 1.7bar, $\Phi=0.33$ 이 되면, 수소의 최고가스온도는 NOx 생성 온도 이하까지 감소되며, 사이클 변동계수 COVimep는 2% 미만으로 안정된 연소가 가능하였다.

또한 상기조건에서 NOx 제로화와 동시에 가솔린기관 출력 달성이 가능하여 흡기관 분사식 수소 SI기관에 희박과급이 유용한 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0002341).

참 고 문 헌

1. J. Stokes, T. H. Lake, R. J. Osborne “A Gasoline Engine Concept for Improved Fuel Economy-The Lean Boost System”, SAE 2000-01-2902.
2. J. T. Lee, Y. Y. Kim, C. Y. Lee, J. A. Caton, “An Investigation of a Cause of Backfire and Its Control due to Crevice Volumes in a Hydrogen Fueled Engine”, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 123, pp. 204-210, 2001.
3. K. J. Lee, T. C. Huynh, J. T. Lee, “A Study on Realization of High Performance without Backfire in a Hydrogen-fueled Engine with External Mixture”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, pp. 13078-13087, 2010.
4. K. J. Lee, J. K. Kang, T. C. Huynh, K. C. Noh, J. T. Lee, “Characteristics of Performance and Backfire for External Mixture Hydrogen Fueled Engine without Valve Overlap Period”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 18, No. 4, pp. 374-381, 2007
5. Kazuhiro A, Yoshiki T, Kazuhisa I, Shizuo S, Anthony MD, “Mechanism of the Smokeless Rich Diesel Combustion by Reducing Temperature”, SAE 2001-01-0655
6. Johnson T, “Diesel Engine Emissions and Their Control”, Platinum Metals Review, Vol. 52, pp. 23-37, 2008
7. Takaaki K, Takayuki I, Yasutaka K, Masato U, Jiro S, Hajime F, “Soot Kinetic Modeling and Empirical Validation on Smokeless Diesel Combustion with Oxygenated Fuels”, SAE 2003-01-1789