



## 고고도 무인기용 수소 엔진의 시동성 및 공회전 연소 특성

김용래 · †최 영 · 이장희

한국기계연구원 그린동력연구실

(2015년 12월 4일 접수, 2015년 12월 23일 수정, 2015년 12월 24일 채택)

## Start and Idle Combustion Characteristics of Hydrogen Engine for the HALE UAV

Yong-Rae Kim · †Young Choi · Janghee Lee

Dept. of Engine Research, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea

(Received December 4, 2015; Revised December 23, 2015; Accepted December 24, 2015)

### 요약

최근 고고도 장기체공 무인기의 개발이 활발하게 진행되고 있는 가운데, 중량당 에너지 밀도가 높아서 왕복동 엔진의 연료로서 적합한 수소 연료를 적용하는 것이 경제성과 기술성 측면에서 유리한 것으로 검토되었다. 본 연구에서는 2.4리터급 왕복동 가솔린엔진을 수소엔진으로 개조하기 위하여 수소연료를 공급하기 위한 실험장치를 구축하고 수소연료 공급이 가능한 인젝터를 장착하였으며 범용 엔진제어기를 이용하여 엔진을 구동시킴으로써 시동 및 공회전 시의 연소 특성을 파악하였다. 안전하게 엔진 시동성을 확보하였고 공회전 상태를 유지할 수 있는 조건을 탐색하였다. 또한 공회전 상태에서 공연비와 점화 타이밍을 변경해보면서 연소 안정성을 비롯한 기본적인 연소 특성을 살펴봄으로써 향후 수소엔진을 활용한 무인기의 동력원을 개발하기 위한 기초를 마련하였다.

**Abstract** - Hydrogen features highest energy density per mass and is expected to be desirable as a fuel of HALE(High altitude long endurance) UAV(Unmanned aerial vehicle). A reciprocating internal combustion engine is known to be a reliable and economic power source for this kind of UAV. Therefore, the combination of hydrogen and engine is worth of doing research. Test bench with 2.4L Spark-Ignited engine was prepared for the experiment in which start and combustion characteristics at idle condition were examined in this study. Stable hydrogen supply system and a universal ECU(Engine control unit) were also utilized for the test engine. Equivalence ratio and spark timings at idle operation were investigated and compared to the data of gasoline engine. The results will be a starting point for full-scale research of hydrogen engine for HALE UAV.

**Key words** : hydrogen, spark ignition engine, idle, start, combustion

### 1. 서 론

최근 항공업계를 중심으로 무인기기에 대한 관심이 가파르게 증가하고 있으며 이에 따라 정찰이나 통신용 무인기에 대한 연구개발 수요가 늘어나고 있다. 높은 고도에서 오랜 기간 동안 머무르면서 정찰이나 통신중계 업무를 수행할 수 있는 고고도 장기 체공 무인항공기의 개발 또한 이 범주에 포함되는데

무인기용 동력원의 개발은 이와 같은 무인기의 구현을 위해 선행되어야만 하는 가장 중요한 기술개발 항목이라 할 수 있다. 고고도에서 장기체공을 위해서는 에너지 밀도가 높은 연료의 사용이 반드시 필요하며 이를 구현할 수 있는 연료로 가장 주목받는 것은 액체수소이다.

수소연료는 단위 무게당 에너지비가 약 120MJ/kg[1]으로서 약 45MJ/kg인 일반적인 탄화수소 계열 액체연료에 비해 매우 높으며 연료자체에 탄소를 포함하고 있기 않기 때문에 어떠한 형태로든 반응 후 온실가스를 배출하지 않는 연료로서의 가치가 있다.

†Corresponding author:ychoi@kimm.re.kr

Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

수소는 가연한계가 매우 넓으며 점화에너지가 매우 낮기 때문에 폭발이나 취급에 안전을 요하는 연료로서 인식되어져 왔으나, 신재생에너지의 중요성이 부각되고 연료전지와 같은 새로운 동력 시스템의 대두로 인해 수소연료를 안정적으로 사용할 수 있는 기술들이 개발되어 최근에는 수소연료 사용에 대한 안전 문제보다는 수소 생산과 저장에 따른 전체 시스템 경제성을 확보하는 데 많은 관심과 연구가 수행되어지고 있다.[2] 하지만 수소연료를 기존의 연소기에 적용하기 위해서는 여전히 수소의 높은 반응성에 기인한 연소 기술적 문제점들을 극복해야만 하는 것이 현실이며 이를 해결하기 위한 다양한 분야에서 연구개발이 시도되어지고 있다.[3~8] 이 중에서도 수소연료를 자동차용 엔진에 적용하는 연구개발은 오래전부터 진행되어 왔는데, 일반적으로 가스엔진에 유리한 불꽃점화 엔진에서부터 예혼합압축화연소에 이르기까지 다양한 방식의 연구들이 수행되어졌다.[9~12] 독일의 BMW사는 1970년대부터 수소를 자동차용 연료로서 사용하는 수소차량을 개발하여 왔고[13] 미국의 Ford사 또한 자사의 가솔린 엔진을 개조하여 수소엔진을 개발하여 왔으나[14], 아직까지 대중적으로 상용화되지는 못하였다. 국내에서도 일부 연구가 진행되었으나 여러 가지 환경적인 제약으로 인하여 기초 연구 수준에 머물러 있는 현실이다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 고고도 장기체공 무인기의 경우에 기술적인 안정성과 경제성을 확보하기 위해서는 에너지 밀도가 가장 높은 수소를 연료로 사용하고 왕복동 내연기관을 동력원으로서 이용하는 것이 가장 타당하고 현실적이라고 판단된다. 이에 수소연료를 왕복동 내연기관에 적용하는 연구를 추진하고자 하며, 목표로 하는 무인기의 무게와 크기, 적재 중량과 같은 기본적인 요구 사양에 부합하는 베이스 엔진을 선정하고 안정적 수소공급을 위한 수소 연료공급시스템과 인젝터, 범용 ECU(Engine Control Unit) 등을 준비하였다.

특히 상용화 수준의 수소 엔진을 개발하기 위하여 안정적인 수소 공급 장치의 선정에 주안점을 두었으며, 본 연구에서는 시동성을 비롯한 공회전 상태에서의 특성 파악에 대한 범위를 다루고자 하며 이를 기반으로 향후 안정적인 수소 연소를 통한 부하 및 속도의 확장에 대한 연구를 진행하고자 한다.

## II. 실험장치 및 방법

우선 실험대상 엔진을 선정하였는데 무인기의 요구 성능 구현을 위해 최소 150마력 이상의 출력을 기대

할 수 있으면서 수소연료공급이 용이한 흡기포트분사방식의 2.4리터급 가솔린엔진을 선정하였다. 아래 표에는 실험대상 엔진의 가솔린 연료 기반에서의 구체적인 제원을 나타내었다.

기본적으로 이 실험대상 엔진은 테스트 벤치 내에 엔진동력계와 연계하여 설치되었으며 분사량 및 점화 타이밍 등의 엔진 제어를 위해서는 범용 ECU(M800, Motec)를 사용하여 시스템을 구성하였다.

수소 연료를 엔진에 공급하는 시스템의 구성의 시작은 가스안전법에 따라 실험실로부터 일정한 유격거리에 있는 수소 저장소에 100bar급의 수소가스 탱크에 의해 저장되었다가 엔진실험실까지 연결된 수소연료 라인을 통하여 실험실 내부로 유입되고 레귤레이터에 의해 감압되어 엔진으로 공급되게 된다. 엔진 실린더별로 흡기 매니폴드에 기존의 가솔린 연료 인젝터와 동일한 위치에 가스연료용 인젝터로 교체하여 장착을 하였다. 아직까지는 세계적으로 수소 연료용으로 완벽하게 상용화가 이루어진 인젝터가 존재하지 않기 때문에 이 실험에서는 약 7bar의 분사압력으로 작동이 가능한 승용차 엔진용 천연가스 인젝터(NGI2, Bosch)를 사용하였으며, 실링을 위한 오링 등의 부품에서 수소 연료와 장시간 접촉이 지속될 경우 리크가 발생할 여지가 있기 때문에 실험의 전후에 항상 점검을 수행하였다. Fig. 1은 사용된 가스 인젝터의 외형 사진이다. 그 밖의 수소 연료 누출에 대한 대비를 위하여 가스 누출 감지기와 자동 가스 배관 차단 장치를 구축하였다.

각각의 엔진 운전 조건에서 엔진 주요 부위의 각종 온도와 압력 데이터를 실시간으로 받아 볼 수 있

Table 1. Specifications of the test engine

Model	Hyundai Theta II
No. of cylinder	4
Intake Air	Naturally Aspirated
Fuel injection	MPI(Multi-Port Injection)
Displacement	2,359cc
Bore	88mm
Stroke	97mm
Compression ratio	10.5
Max. Power	178ps/6,000rpm
Max. Torque	23.3kgm/4,000rpm
Emission level	SULEV

도록 온도 및 압력센서를 설치하였으며, 특히 연소실 압력을 측정하여 연소 해석을 수행하기 위해 스파크플러그 일체형 압력센서(6118BFD35, Kistler)를 설치하였고 엔코더와 동기화하여 연소실 압력 데이터에 기반한 연소해석기(DEWE-800-CA, Dewetron)를 통해 연소압력 및 연소안정성 등의 데이터를 취득하였다. 공연비의 경우에는 기존의 공연비 센서로 측정이 불가하여, 연료의 유량과 공기의 흡입유량을 각각 측정함으로써 질량으로 환산하여 계산하는 방식을 사용하였다.

본 연구에서는 기존 가솔린엔진에서 수소연료로 대체하였을 경우에 발생하는 연소 특성을 살펴보고자 하며, 우선 시동성을 확보하고 공회전 상태에서 안정적인 운전이 가능하도록 제어를 수행한 뒤에 공연비와 점화타이밍 등의 변화를 통하여 어떠한 연소 특성 변화가 있는지를 살펴보고자 한다.



Fig. 1. Gas injector for hydrogen gas.

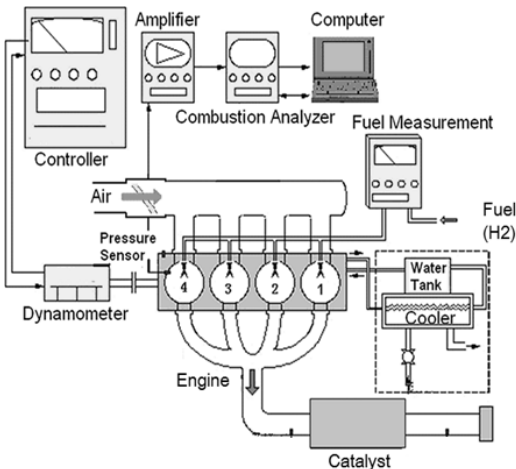


Fig. 2. Hydrogen engine experimental setup.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 초기 시동성

본 연구에서는 EC 동력계를 사용하였기 때문에 엔진의 시동은 시동 모터에 의해 작동되므로 엔진 제어 변수에 대한 초기 매핑이 필요하다. 준비된 범용 ECU를 통하여 가솔린 엔진 상태에서 우선 매핑을 통한 시동성을 확인한 뒤에, 수소 연료에 대한 매핑도 추가로 실시하였다. 수소 연료의 공급 압력은 최종적으로 3bar 수준으로 설정되었고, 시동모터에 의한 크랭킹 회전속도가 250rpm 수준에서 유지되므로 초반에는 강한 폭발을 위하여 많은 양의 연료가 공급될 수 있도록 설정하고 이후 안정적인 회전속도가 유지될 수 있도록 공연비를 모니터링하면서 연료량에 대한 매핑을 진행하였다.

결과적으로 수소 연료에 의한 시동이 만족되었으며, 시간 경과에 따른 엔진 회전 속도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 실제 냉간시에서도 시동은 무리없이 가능하였으며, 그래프에 나타난 결과의 측정조건은 가솔린의 경우와 동일하게 비교하기 위하여 워업된 상태에서 측정된 것이다. 크랭킹 이후의 속도 증가 기울기가 가솔린과 수소 엔진의 차이가 거의 없음을 확인할 수 있으며, 다만 두 연료의 연소 속도 및 공연비 조건 차이에 따른 최종 공회전 속도의 차이만 있을 뿐이다. 다음 절에서 구체적으로 보이지만, 수소 연료를 적용한 경우에는 공연비 조건에 따라서 공회전 회전 속도의 변화가 크며 Fig. 3에 나타난 것과 같이 공기과잉률 ( $\lambda$ )기준으로 1.0 조건에서 운전되는 일반적인 가솔린 엔진에 비하여 공회전 회전수가 높은 특성을 가진다. 이는 화염 전파 속도가 빠른 수소 연료의 특성에 기인하는 것이며, 그림에 표기된 결과는 공기과잉률 기준으로 약 1.5 인 조건에서 측정된 것이다.

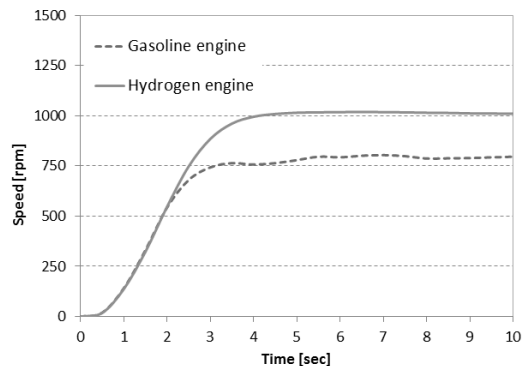


Fig. 3. Engine speed from cranking to idle.

### 3.2. 공연비 변화에 따른 공회전 특성

앞에서 언급하였듯이 수소 연료를 적용한 엔진의 공회전 속도는 공연비 조건에 따라 변화가 있었기 때문에 이에 대한 실험을 추가로 진행하였다. 모든 조건에서 공연비는 공기과잉률로 표기하였으며 본 연구의 실험 조건에서는 가연한계가 약 2.0 수준까지인 것

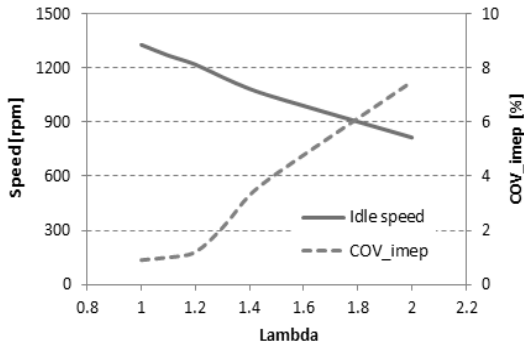


Fig. 4. Engine idle speed and COV with variation of lambda.

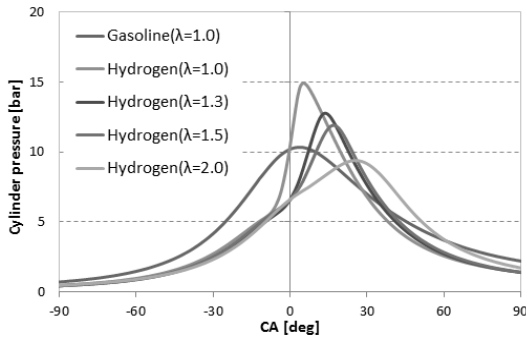


Fig. 5. Cylinder pressure with variation of lambda.

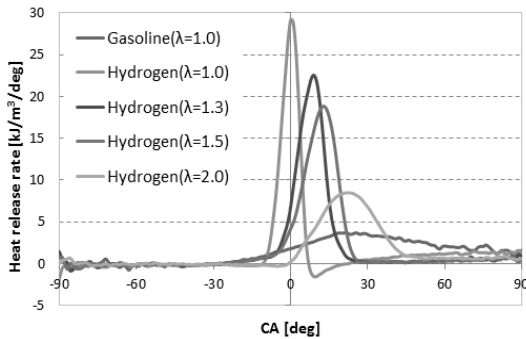


Fig. 6. Heat release rate with variation of lambda.

으로 나타났다. 그러나 이는 연소의 안정성을 나타내는 지표인 COV(Coefficient of variation)를 기준으로 약 8% 수준에 해당되는 조건이므로 실제 엔진에서 적용하기는 어려울 것으로 보이며, Fig. 4에 공기과잉률에 따른 공회전 엔진 속도와 COV의 결과를 표기하였다. 참고로 본 연구에서의 COV는 IMEP(Indicated mean effective pressure)를 기준으로 계산되었다. 가솔린과 동일한 조건인 공기과잉률 1.0에서 운전 시에는 약 1300rpm 이 넘는 공회전 회전 속도를 보이고 있으며, 희박한 조건으로 연료를 공급할수록 회전 속도가 낮아지지만 COV는 증가한다.

공기과잉률에 따른 연소실 내부의 압력선도와 열발생률을 각각 Fig. 5와 6에 나타내었으며, 가솔린 엔진과 비교해 보면 전반적으로 급격한 열발생률로 인한 압력 증가를 확인할 수 있다. 수소 엔진의 경우에는 가솔린 연료 대비 빠른 연소 속도로 인하여 점화 타이밍을 지각하여 제어를 하고 있기 때문에 연소가 시작되는 시점은 늦지만, 점화가 이루어진 뒤에 연소의 시작은 매우 빠른 편이다. 가솔린 엔진의 경우에는 공기과잉률 1.0 인 조건에 빠른 점화 타이밍으로 운전되고 있음에도 불구하고 연소의 시작이 늦고 길게 이루어지며 열발생률 자체도 매우 낮은 수준이다.

수소 엔진의 경우에 공기과잉률이 증가함에 따라 최대 연소 압력은 낮아지고 열발생률도 감소하는 경향을 잘 확인할 수 있으며, 동일한 점화타이밍에도 연소의 시작과 종료 역시 지각되는 경향을 보이고 있다. 이는 희박연소의 일반적인 경향과 일치한다고 볼 수 있다. 점화가 이루어지기 전인 압축과정에 있어서 가솔린 엔진의 압력이 더 높게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 수소 연료의 경우에 가솔린 연료와 달리 가스 상태로 공급이 되기 때문에 체적효율 면에서 불리하여 엔진이 압축되는 시점에서의 압력 조건이 더 낮기 때문이다.

### 3.3. 점화 타이밍에 따른 공회전 동특성

다음으로는 공기과잉률을 1.2로 일정하게 유지한 조건에서 점화타이밍을 변경하면 어떠한 영향이 있는지를 살펴보았다. 점화타이밍은 BTDC 기준으로 20 CA(Crank angle) ~ 0 CA 의 범위에서 5 CA 간격으로 변경하였으며, 앞 절과 동일하게 공회전 회전 속도의 변화와 COV 값을 모니터링하여 Fig. 7에 나타내었다. 또한 연소실 압력 곡선과 열발생률 역시 각각 Fig. 8과 9에 나타내었다.

점화타이밍을 전각시킴에 따라 공회전 회전 속도는 낮아지는 경향을 보이고 있으나 전반적으로 COV의 값은 큰 영향없이 2% 아래의 매우 안정적인 연소를 유지함을 볼 수 있다. 열발생률의 경우에는 점화타

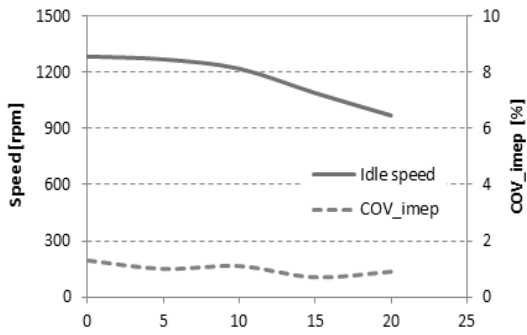


Fig. 7. Engine idle speed and COV with variation of spark timing.

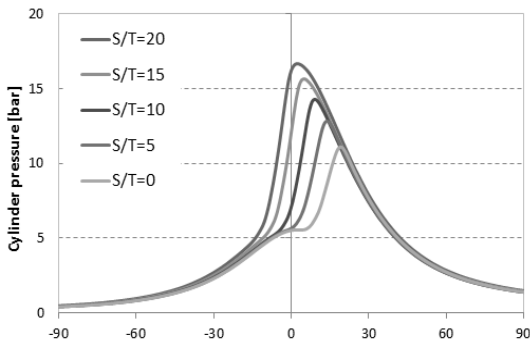


Fig. 8. Cylinder pressure with variation of spark timing

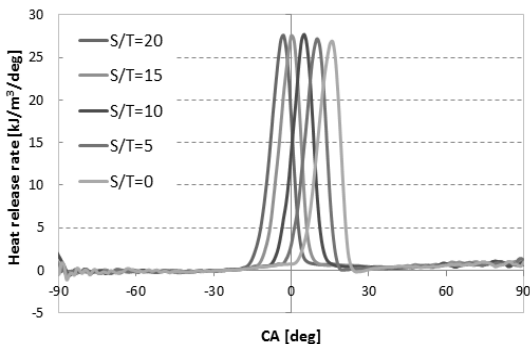


Fig. 9. Heat release rate with variation of spark timing

이밍의 변경에 따른 연소의 시작과 종료 시점 차이가 그대로 반영되어 나타나지만, 연소 과정 중에는 모든 경우에 동일한 패턴과 최대값을 보이고 있다. 그러나, 연소 압력의 관점으로는 점화타이밍 변경에

따른 연소 시작점의 차이도 있지만 최대 압력도 동시에 영향을 받고 있으며, 점화 타이밍이 진각될수록 증가하는 모습을 보이고 있다.

위와 같이 점화 타이밍의 변경도 공회전시의 엔진 회전 속도를 제어할 수 있는 인자임을 확인할 수 있으나, 공연비보다는 그 영향이 덜하다는 결론을 내릴 수 있다. 본 연구에서 사용한 천연가스용 인젝터의 경우 전 실험과정에서 있어서는 특별한 문제점을 보이지는 않았으나 향후 계속 모니터링할 계획이며, 공회전 운전에서는 문제가 없었으나 부하 운전을 실시할 경우 발생하는 역화 등의 문제점을 보완하여 실용적인 활용이 가능하도록 추가 연구를 진행하고자 한다.

#### IV. 결론

2.4리터급 가솔린 엔진에 100% 수소연료를 적용하여 시동성을 확인하고 공회전 상태에서의 기본적인 연소 성능 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수소의 높은 반응성과 희박 가연한계의 확장으로 인하여 가솔린의 경우보다 희박한 공연비에서 엔진 시동 및 공회전 운전이 안정적으로 가능하였으며 공기과잉률 기준으로 2.0 수준까지 유지할 수 있다.
- (2) 수소 엔진의 시동 초기 엔진 회전 속도의 증가는 가솔린 엔진의 경우와 거의 동일하며 안정적인 운전을 위한 공회전 회전 속도의 차이는 존재한다.
- (3) 수소 엔진의 공기과잉률이 증가함에 따라 공회전 속도가 감소하는 경향을 보였으며, 가솔린 엔진에 비하여 급격한 열발생률과 짧은 연소 기간의 특성을 가진다.
- (4) 수소 엔진의 점화타이밍을 진각함에 따라 공회전 속도는 감소하는 경향을 보이며, 열발생률은 시작 시점을 제외하고는 동일한 값을 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 협동연구사업 및 한국기계연구원의 자체사업 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

[1] Drell, I. L. and Belles, F. E., "Survey of hydrogen combustion properties", National Advisory committee for aeronautics, Report 1383, (1958)

- [2] Lewis B., "Combustion, flames, and explosions of gases", Academic Press in Orlando, (1987)
- [3] Swain, M. R., "Hydrogen-fueled automotive engine experimental testing to provide an initial design-data base", SAE paper 810350, (1981)
- [4] Das, L. M., "Exhaust emission characterization of hydrogen-operated engine system: Nature of pollutants and their control techniques", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 16, No. 11, pp. 765-775, (1991)
- [5] Dunn, S., "Hydrogen futures: towards a sustainable energy system", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 27, pp. 235-264, (2002)
- [6] Eichlseder, H., "The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario", SAE paper 2003-01-2267, (2003)
- [7] Berckmuller M., "Potentials of a charged SI-hydrogen engine", SAE paper 2003-01-3210, (2003)
- [8] Verhelst, S., Sierens, R., and Verstraeten, S., "A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines", SAE Paper 2006-01-0430, (2006)
- [9] White, C. M., "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 31, pp. 1292-1305, (2006)
- [10] Choi, Y., "A study on the improvement of combustion and emission performance in an EGR-assisted gasoline engine in dual-fueled with hydrogen", KSAE 30th anniversary conference, (2008)
- [11] Verhelst, S. and Wallner, T., "Hydrogen-fueled internal combustion engines", Prog Energy Combust Sci, Vol. 35, No. 6, pp. 490~527, (2009)
- [12] Lim, G. H., Lee, S. W., Park, C. W., Choi, Y. and Kim C. G., "Effect of ignition timing retard strategy on NOx reduction in hydrogen-compressed natural gas blend engine with increased compression ratio", Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 39, pp. 2399-2408, (2014)
- [13] Metz, N. (BMW Group), "Hydrogen - The Alternative Fuel for Future Powertrain", FISITA 2002, World Automotive Congress, Helsinki, June 4, (2002)
- [14] Tang, X., "Ford P2000 hydrogen engine dynamometer development", SAE paper 2002-01-0242, (2002)