Transactions of KSAE, Vol. 16, No. 4, pp.56-62 (2008)

Copyright Ⓒ 2008 KSAE
1225-6382/2008/094-08

배기관에서의 합성가스 연소에 따른 배기가스 온도 및 농도 변화에 관한 실험적 연구

조 용 석[*1)] · 이 성 욱[1)] · 양 승 일[2)] · 송 춘 섭[2)] · 박 영 준[2)]

국민대학교 기계자동차공학부[1)] · 국민대학교 자동차공학전문대학원[2)]

An Experimental Study on Variations of Exhaust Gas Temperature and Concentration with Synthetic Gas Combustion in Exhaust Manifold

Yong-Seok Cho[*1)] • Seang Wock Lee[1)] • Seung-Il Yang[2)] • Chun-Sub Song[2)] • Young-Joon Park[2)]

[1)]Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
[2)]Graduated School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
(Received 20 August 2007 / Accepted 5 December 2007)

Abstract : A synthetic gas reformed from hydrocarbon-based fuels consists of H_2, CO and N_2. Hydrogen contained in the synthetic gas is a very useful species in chemical processes, due to its wide flammability range and fast burning speed. The ESGI (Exhaust Synthetic Gas Injection) technology is developed to shorten the light-off time of three way catalysts through combustion of the synthetic gas in the exhaust manifold during the cold start period of SI engines. Before the ESGI technology is applied to the test engine, the authors set a test rig that consists of gas temperature and composition controllers, an exhaust pulse generator and an exhaust manifold with a visualization window, in order to optimize the point and conditions of injection of the synthetic gas. Through measuring burned gas temperatures and taking photographs of synthetic gas combustion at the outlet of the exhaust manifold, the authors tried to find the optimal injection point and conditions. Analysis of burned gas composition has been performed for various O_2 concentrations. As a result, when the synthetic gas is injected at the port outlet of the cylinder No. 4 and O_2 concentration exceeds 4%, combustion of the synthetic gas is strong and effective in the exhaust manifold.

Key words : ESGI(Exhaust Synthetic Gas Injection), Synthetic gas(합성가스), Hydrogen combustion(수소연소), Exhaust gas temperature(배기가스 온도)

1. 서 론

가솔린기관에서 발생하는 대표적인 유해배출물인 CO, THC, NO_x는 삼원촉매의 이용으로 대폭적으로 저감이 가능해졌다. 하지만 삼원촉매가 활성화되기 이전의 냉간시동 조건에서는 낮은 촉매효율로 인해 다량의 유해배출물이 그대로 배출되어 사회적인 문제로 대두되고 있다. 현재 전 세계적으로 가솔린기관의 전·후처리 기술의 개발을 통해 많은 개선이 이루어졌지만 강화되어가는 환경규제에 만족하기 위해서는 보다 효과적인 기술의 개발이 필수적이다. 냉간시동 조건에서 가장 대표적인 유해배출물 저감기술은 가솔린기관의 후처리기술의 일환으로 배기관에서 배기가스를 재연소 시켜 발생하는 높은 배기가스 온도로 촉매의 활성화 기간을 단축하고 불완전연소가스의 산화과정을 유도하여 다량의 유해배출물을 저감시키는 방법이다.[1)] 그러나 가

[*]Corresponding author, E-mail: yscho@kookmin.ac.kr

솔린기관의 배기가스는 낮은 산소농도와 배기관에서의 불규칙한 유동에 의해 연소조건 형성이 매우 어렵다. 따라서 배기관에서 연소가 용이한 새로운 물질의 첨가가 필수적이며 대표적인 첨가물로 수소의 이용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2] 수소는 연소과정에서 이론적으로 물(H_2O) 이외에는 생성하지 않고 빠른 연소속도, 넓은 가연 한계 범위, 중량대비 높은 발열량을 나타내기 때문에 배기관에서 연소를 일으키기 위한 첨가물로 매우 활용도가 높다.[3]

본 연구에서는 수소 대신 가솔린을 개질하여 발생하는 합성가스를 첨가물로 사용하였으며 실제 기관에 직접 배기분사기술을 적용하기에 앞서 실제 배기관과 유사한 리그장치를 제작하여 합성가스의 연소효과를 파악하였다. 합성가스는 수소를 일정부분 포함하고 있기 때문에 수소의 연료적 특성에 의해 배기관에서 연소가 용이하고, 이를 통해 촉매의 빠른 활성화로 냉간시동 조건에서 발생하는 유해배출물의 효과적인 저감이 가능하다.[4] 또한, 가솔린의 개질을 통한 수소의 생산은 수소의 공급과 저장 과정에서 발생하는 많은 문제점을 해결할 수 있기 때문에 개질장치의 발달과 더불어 점차 내연기관뿐만 아니라 많은 동력 발생 기관에서도 활용도가 증가할 것으로 예상된다.[5]

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 실험에서는 2000 cc 급 가솔린기관에서 사용하는 배기관을 직접 사용하였으며, 촉매의 위치에 실제 촉매 입구의 내경과 같은 62 mm로 제작한 가시화장치를 설치하였다. 배기관에서 배기가스의 불규칙한 유동현상을 구현하기 위해 chopper disk를 사용하였다.

Chopper disk는 기관의 연소 순서인 1-3-4-2의 순서로 각각의 분지관에 연결되어 있으며 180° 간격으로 두 개의 슬롯이 고정디스크를 통해 배기가스를 공급한다. 따라서 고정디스크가 1회전 할 때 각각의 밸브가 2회씩 개폐과정을 거치게 되어 실제 기관의 4회전과 같은 결과를 얻을 수 있다.[6]

합성가스는 직경 1.2 mm의 분사노즐에 의해 배기관에 분사하였으며 전자식 솔레노이드 밸브에 의해 개폐를 조정하였다. 배기관에 분사된 합성가스의 연소를 위해 전원공급 후 4초 이내에 800°C에 도달하는 SRM 타입의 글로플러그를 이용하였다. 합성가스와 글로플러그에 의한 배기관에서의 연소특성을 파악하기 위하여 Photoron FASTCAM(Ultima 512)을 이용하여 화염형상을 가시화하였으며, 글로플러그를 통한 합성가스 연소 후 배기가스의 온도변화를 측정하기 위해 실제 기관의 촉매 위치에 온도 센서를 설치하였다. 또한, 촉매 후단에서 배기가스 성분 분석기(MEXA-554JK)를 통하여 배출되는 CO_2와 O_2의 농도변화를 측정하였다.

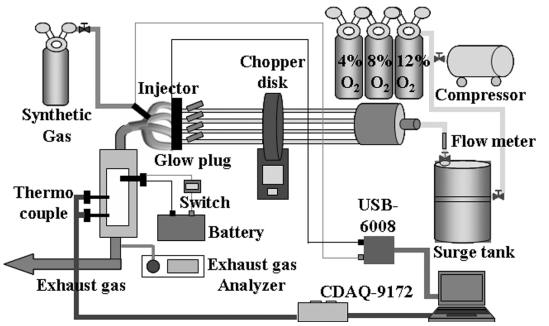

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 실험방법

리그장치에서 실제 기관의 배기관에 배출되는 배기가스의 성분특성을 구현하기 위하여 산소농도를 4%, 6%, 8%, 12%, 20%(N_2 balance)로 조절하였다.

일반적으로 가솔린기관에서는 크랭킹 기간을 제외하고는 4% 이상의 산소농도를 갖기 힘들지만 본 실험에서는 합성가스를 가솔린 연료에 일정량 첨가하여 이용할 경우 안정적인 희박연소가 가능하다는 연구보고를 바탕으로 산소농도를 높여 실험하였다.[7] 각각의 산소농도를 가지는 배기가스의 안정적인 유량 공급을 위하여 200 ℓ의 서지탱크를 설치하였으며 chopper disk를 이용하여 실제 기관과 유사하게 배기가스의 불규칙한 유동현상을 구현하였다. 배기관으로 공급되는 배기가스의 유량은 2000 cc 급 가솔린기관이 크랭킹 기간에 200 rpm으로 작동하였을 때의 배기가스 유량과 동일한 200 ℓ/min로 일정하게 공급하였다.

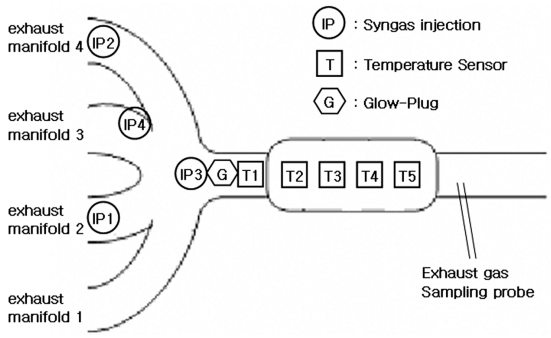

Fig. 2 Injection and thermocouple point

Fig. 2에서와 같이 합성가스가 분사된 배기가스의 점화원으로 이용된 글로플러그는 각각의 배기분지관이 모이는 부분인 촉매입구에 설치하였으며 최적의 합성가스 분사위치 선정을 위하여 2번 분지관(IP1), 4번 분지관(IP2), 배기관 중심(IP3)과 3번 분지관 우측 하단(IP4)에서 합성가스를 분사하였고 온도센서를 이용하여 T1~T5의 위치에서 배기가스의 온도를 측정하였다. 배기관에 분사하는 합성가스는 편의를 위해 실제 개질장치를 통해 생산되는 합성가스를 사용하지 않고 $H_2/CO/N_2$의 성분(체적)비가 26.8/22.8/50.4인 가솔린 개질시 발생되는 합성가스와 성분비가 유사한 모사가스를 사용하였으며, 미세압력 조절장치를 통하여 0.4~2.0 bar 까지 0.4 bar 단위로 합성가스의 분사압력을 조절하였다. 또한, 주변 환경에 의한 실험 오차를 줄이기 위해 실험 전 실내 온도를 20°C로 일정하게 유지하였으며 글로플러그의 작동 특성에 의해 5초간의 예열기간 이후에 산소를 포함한 배기가스를 공급하였다. 이후 합성가스를 분사하여 배기가스의 온도변화를 30초간 측정하였고 고속카메라를 이용하여 화염을 가시화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분사위치에 따른 배기가스의 온도변화

촉매의 빠른 활성화를 위해서는 합성가스의 연소가 활발하게 이루어지는 최적의 합성가스 분사위치의 선정이 필수적이다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 4개의 위치에서 2 bar의 압력으로 합성가스를 분사하였으며, 분사위치에 따른 배기가스의 온도변화를 확인하기 위해 5개의 위치에서 온도를 측정하였다.

Fig. 3 ~ 6은 20%의 산소농도 조건에서 합성가스의 분사위치에 따른 배기가스의 온도변화를 나타낸다. 그 결과 합성가스의 점화원인 글로플러그에서 제일 멀리 위치한 IP2에서 합성가스를 분사할 경우 가장 빠르게 온도가 상승해 합성가스 분사 이후 30초에서는 400°C 이상의 온도를 형성하였다. 이와 반대로 가장 가까이 위치한 IP3에서는 합성가스 분사 이후 30초에서 최대 100°C를 나타내었다. 이는 합성가스가 연소하기 위해서는 배기가스에 포함되어 있는 산소와 충분히 혼합할 수 있는 일정 기간을 필요로 하기 때문이며, 이러한 이유로 IP2와 IP3에서 각각 다른 온도 상승률을 보이는 것으로 판단된다. 따라서 빠른 촉매 활성화를 위해서는 합성가스와 산소가 충분히 혼합할 수 있는 시간을 가지는 IP2가 가장 좋은 합성가스 분사위치로 판단된다.

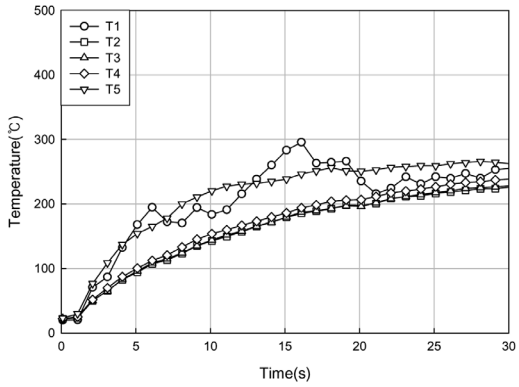

Fig. 3 Variations of exhaust gas temperature (IP1)

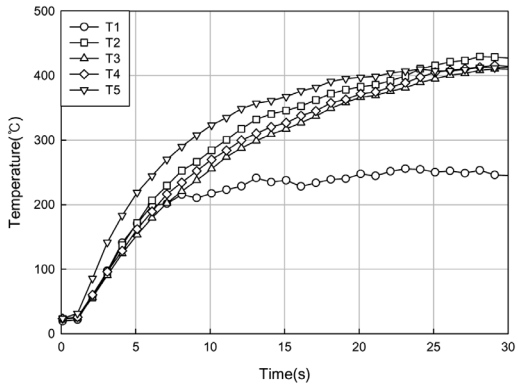

Fig. 4 Variations of exhaust gas temperature (IP2)

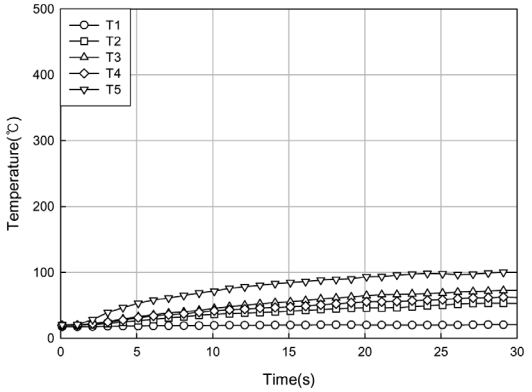

Fig. 5 Variations of exhaust gas temperature (IP3)

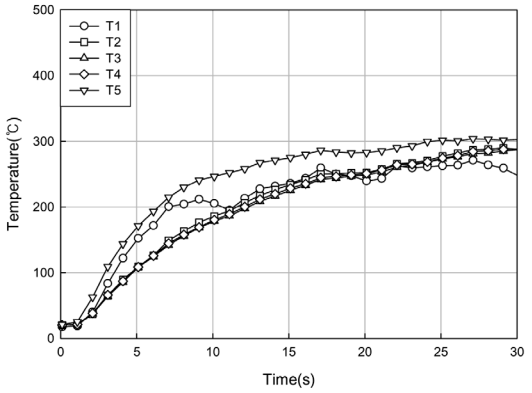

Fig. 6 Variations of exhaust gas temperature (IP4)

3.2 분사압력에 따른 배기가스의 온도변화

가솔린을 수소를 포함한 합성가스로 개질하기 위해서는 개질장치의 예열시간이 필요하다. 그래서 향후 냉간시동 조건에서 배기관에 합성가스를 분사하기 위해서는 합성가스를 일정량 저장할 필요성이 있다. 따라서 냉간시동 조건에서 배기관에 분사하는 합성가스의 분사압력은 합성가스를 저장하는 공간의 크기에 영향을 미치는 중요한 변수로 작용하게 된다. Fig. 7은 합성가스 분사위치 IP2에서 배기가스의 산소농도를 20%로 유지하였을 때 합성가스의 분사압력에 따른 배기가스의 온도변화를 나타낸다. 그 결과 합성가스의 분사압력이 증가할수록 배기가스에 포함되어 있는 일정량의 산소와 반응하는 합성가스가 증가하여 배기가스의 온도가 더욱 빠르게 상승하는 것을 확인하였다. 이러한 온도 상승은 냉간시동 조건에서 촉매를 빠르게 활성화 할 수 있

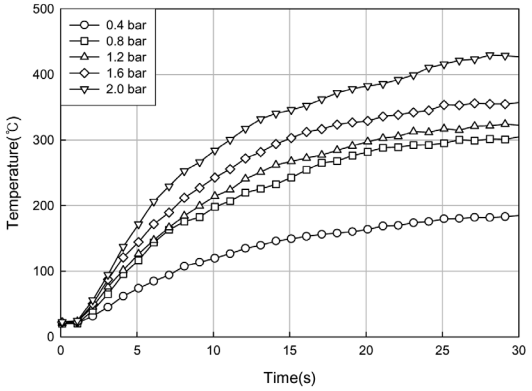

Fig. 7 Variations of exhaust gas temperature with changes in injection pressure

지만, 냉간시동 조건에서 사용되는 다량의 합성가스는 개질장치의 활성화 이전에 공급되므로 합성가스의 저장 공간 문제를 초래할 수 있다. 또한, 산소농도가 20%인 기관의 운전영역은 크랭킹 기간을 제외하고 존재하지 않기 때문에 실제 기관에 ESGI 기술을 적용하기 위해서는 산소농도와 촉매의 활성화를 위해 배기관에 분사하는 합성가스의 분사압력에 대한 적절한 조절이 필수적이다.

3.3 산소농도에 따른 배기가스의 온도변화

배기관에 분사한 합성가스의 연소특성은 배기가스에 존재하는 산소농도에 의해 결정된다. Fig. 8은 IP2 위치에서 2 bar의 압력으로 합성가스를 분사하였을 때 산소농도에 따른 배기가스의 온도변화를 나타낸다. 그 결과 산소농도가 가장 낮은 4% 조건에서는 배기관에 분사한 합성가스가 연소하기 위해 필요한 최소한의 산소량이 형성되지 않기 때문에 온도 상승은 없는 것으로 나타났다. 4% 산소농도를 제외한 6%, 8%, 12% 그리고 20%의 산소농도에서는 배기관에 분사한 합성가스의 연소를 위한 산소농도가 형성되어 합성가스의 연소에 의한 온도 상승효과를 얻을 수 있다. Fig. 8에서는 6%, 8%, 12%로 산소농도가 증가함에 따라서 반응하는 합성가스의 증가로 온도가 상승하지만 12%와 20%의 산소농도에서는 온도의 변화가 크게 나타나지 않는다. 이는 2 bar로 분사되는 합성가스와 반응할 수 있는 산소량이 산소농도 12%에서 충분히 형성되기 때문이다.

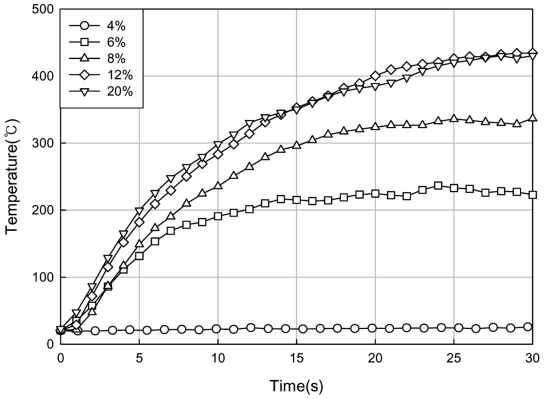

Fig. 8 Variations of exhaust gas temperature with changes in O_2 volume fraction (%)

결론적으로 배기관에 분사되는 합성가스의 연소를 위해서는 배기가스에 존재하는 산소의 농도가 중요한 변수로 작용하게 된다. 그래서 ESGI 기술을 실제 기관의 냉간시동 조건에 적용하기 위해서는 안정적인 희박연소를 통해 높은 산소농도를 형성하는 것이 중요하다.

3.4 배기가스 농도변화

합성가스를 기관의 연료로 이용하면 합성가스의 연료적 특성으로 인해 냉간시동 조건에서 배출되는 유해배출물을 다량으로 저감시킬 수 있지만 THC와 NO_x에 비해 CO의 저감률은 상대적으로 작다.[8] 그래서 추가적인 CO의 저감 방법이 필수적이다. 본 연구에서는 ESGI 기술을 통해 촉매의 빠른 활성화뿐만 아니라 CO를 추가적으로 저감시키고자 하였다.

Fig. 9는 산소농도 20%에서 합성가스의 분사위치 변경에 따른 CO_2와 O_2의 농도변화를 나타낸다. 그 결과 Fig. 3 ~ 6에서 나타난 온도변화와 마찬가지로 합성가스와 산소의 혼합이 가장 활발한 IP2 위치에서 CO_2의 발생량이 가장 크게 나타났으며 이에 따른 O_2의 감소량도 가장 크게 나타났다. 그리고 합성가스에 포함되어 있는 수소의 연소에 의해 CO_2 발생량에 비해 O_2의 감소량이 크게 나타났다.

Fig. 10은 합성가스와 산소의 혼합기간이 가장 긴 IP2의 위치에서 배기관으로 공급되는 산소농도의 변화에 의한 CO_2와 O_2의 농도변화를 나타낸다. 산소농도가 6, 8, 12, 20%로 증가하면 합성가스와 반응

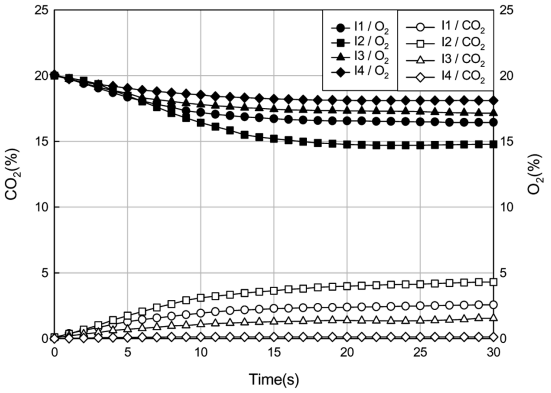

Fig. 9 Variations of CO_2 and O_2 concentration with changes in injection point

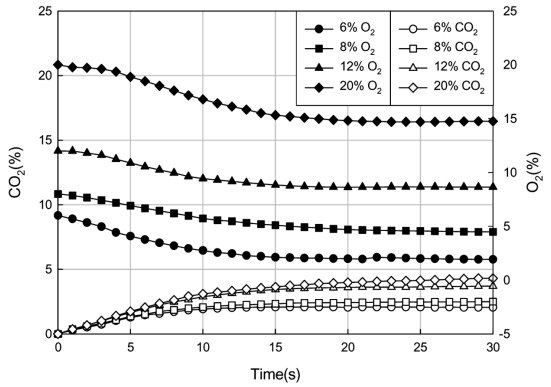

Fig. 10 Variations of CO_2 and O_2 concentration with O_2 volume fraction (%)

하는 O_2량의 증가로 인해 원활한 화학반응이 이루어져 CO_2의 발생량은 증가하고 잔류하는 산소량은 감소하게 된다. Fig. 9의 결과와 마찬가지로 CO에 비해 가연성이 좋은 H_2와의 연소과정으로 인해 CO_2의 발생량보다 O_2의 농도가 더 크게 감소한다.

3.5 합성가스 연소 가시화

각각의 제어변수에 의한 합성가스의 연소특성을 파악하기 위하여 실제 기관의 촉매위치에 유리면으로 제작된 가시화장치를 설치하여 합성가스의 연소화염형상을 가시화하였다. Photo. 1은 산소농도 20%에서 합성가스의 분사압력과 분사위치의 변경에 따른 연소형상을 가시화하여 나타내었다. 동일한 분사위치에서 합성가스를 분사하면 합성가스의 분사압력이 높아질수록 화염의 강도가 강하게 나타

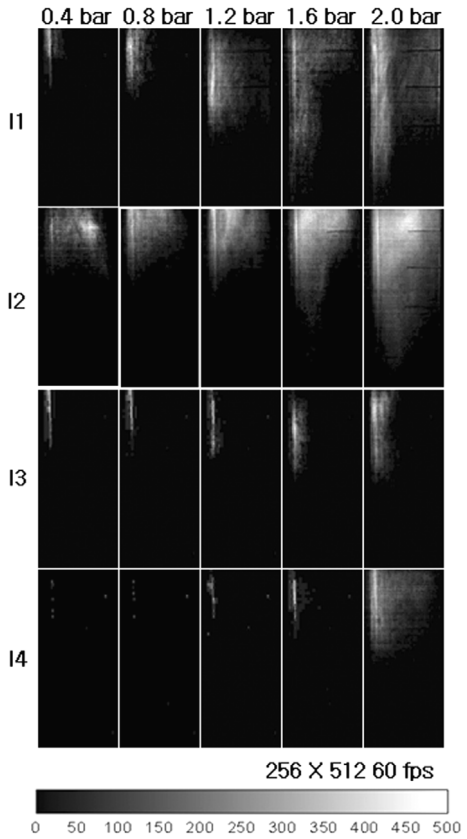

Photo. 1 Thermo intensity images of synthetic gas combustion in exhaust manifold (20% O_2)

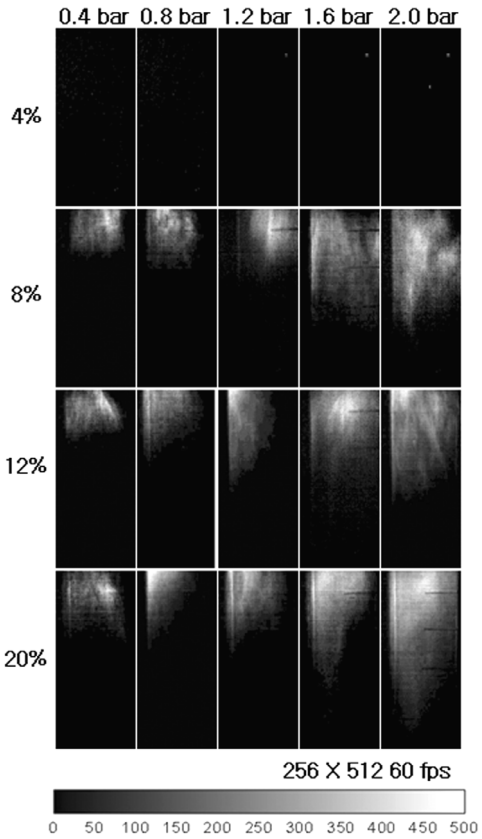

Photo. 2 Thermo intensity images of synthetic gas combustion in exhaust manifold (IP2)

나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 7에 나타난 온도 결과와 동일한 합성가스의 연소특성으로 합성가스의 분사압력이 증가함에 따라 연소에 이용되는 합성가스의 양이 증가해 높은 화염강도를 나타내는 것이다. 또한, 동일한 분사압력 조건에서 합성가스의 분사위치에 따라 화염이 형성되는 위치는 합성가스와 산소가 충분히 혼합할 수 있는 IP2에서 가장 먼저 화염이 형성되며 합성가스와 산소가 혼합할 수 있는 기간이 짧은 IP3에서는 화염이 늦게 형성된다. 실제 기관에서는 리그장치가 아닌 촉매가 위치하고 있기 때문에 열화작용을 막기 위해서는 촉매 바로 전단에서 화염이 형성되는 것이 좋다. 그래서 Fig. 3 ~ 6에 나타난 합성가스의 분사위치에 따른 온도 상승 결과와 더불어 빠른 촉매의 활성화를 위해서는 IP2에서 합성가스를 분사하는 것이 가장 효율적임을 보여준다.

Photo. 2는 합성가스 분사위치 IP2에서 산소량과 합성가스의 분사압력의 변경에 따른 연소형상을 가시화하여 나타낸 것으로 합성가스의 분사압력이 2 bar로 동일한 조건에서 산소농도가 12%와 20%일 때 비슷한 화염강도를 나타내고 있다. 이는 Fig. 8에서 나타난 온도 상승 결과와 더불어 ESGI 기술을 통한 빠른 촉매의 활성화를 실현하기 위해서는 일정량의 산소가 필요하다는 것을 나타낸다.

4. 결 론

리그장치를 통해 유동이 존재하는 배기관에서 합성가스의 연소효과를 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 합성가스와 산소의 혼합이 가장 용이한 IP2에서 합성가스를 분사할 경우 가장 빠르고 높은 배기

가스 온도를 형성하며, 산소농도와 합성가스 분사 압력에 대한 적절한 제어가 필수적이다.

2) 가솔린기관에서 4%의 산소농도를 형성하는 λ=1에서는 합성가스의 연소가 이루어지지 않기 때문에 실제 기관에서 합성가스를 이용한 빠른 촉매의 활성화를 실현하기 위해서는 공연비 제어가 필수적이다.
3) 합성가스와 산소의 혼합이 가장 용이한 IP2에서 적절한 산소농도와 합성가스 분사압력의 제어를 통해 합성가스에 포함되어 있는 CO를 CO_2로 산화시켜 CO를 추가적으로 저감시킬 수 있다.
4) 연소형상의 가시화를 통해 합성가스 분사위치와 산소농도에 따른 화염 형성위치와 화염강도를 파악하여 합성가스와 산소의 혼합이 가장 용이한 최적의 분사위치 IP2에 대해 검증하였다.
5) 리그 실험을 통해 실제 기관의 냉간시동 조건에서 합성가스의 연소를 통한 배기가스 온도 상승으로 촉매의 빠른 활성화를 예측하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지자원 기술개발 "중소형 LPG 상용차 개발" 사업 및 교내 우수연구센터의 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1) L. Bromberg, D. R. Cohn, A. Rabinovich and N. Alexeev, "Experimental Evalution of SI Engine Operation Supplemented by Hydrogen Rich Gas from a Compact Plasma Boosted Reformer," SAE 2000-01-2206, 2000.
2) S. Dunn, "Hydrogen Futures: Towards a Sustainable Energy System," Int. J. of Hydrogen Energy, Vol.27, pp.235- 264, 2002.
3) J. Scott MacDonald, "Evaluation of the Hydrogen Supplement Fuel Concept with Experimental Multicylinder Engine," SAE 760101, 1976.
4) J. E. Kirwan, A. A. Quader and M. J. Grieve, "Fast Start-Up On-Board Gasoline Reformer for Near Zero Emissions in Spark-Ignition Engines," SAE 2001-01-1011, 2001.
5) N. Metz(BMW Group), "Hydrogen- The Alternative Fuel for Future Powertrain," FISITA, World Automotive Congress, 2002.
6) D. S. Kim, C. R. Kim, Y. S. Lee, J. Y. Joo, M. S.Han and Y. S. Cho, "Measurement and Numerical Analysis of Flow distribution in a Close-Coupled Catalyst Converter," Spring Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.415-421, 1997.
7) T. H. Cho, C. H. Kim and J. T. Lee, "A Realization of Lean Burn by Hydrogen Supplement in Spark Ignition Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.169-174, 1993.
8) C. G. Kim, K. Y. Kang, C. S. Song and Y. S. Cho, "An Experimental Study on Reductions of Idle Emissions with the Syngas Assist in an SI Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.3, pp.174-182, 2007.