

연료 분사 특성이 가솔린 엔진 HC 배출특성에 미치는 영향

우영민* · 배충식* · 이용표**

Effects of Port Fuel Injection Characteristics upon HC Emission in SI Engines

Youngmin Woo, Choongsik Bae and Yongpyo Lee

Key Words : HC(탄화수소); Wall wetting(벽면 점착); Cold start(냉시동); Spray pattern(분무 구조); Port fuel injection(포트 연료 분사)

Abstract

During cold operation period, fuel injection system directly contributes the unburned hydrocarbon formation in spark ignition engines. The relationship between injection parameters and HC emission behavior was investigated through a series of experiments. Spray behavior of port fuel injectors was characterized through a quantitative evaluation of mass concentration of liquid fuel by a patternator and PDA. 6-hole injector was found to produce finer spray than single hole one. Using a purpose-built test rig, the wall wetting fuel was measured, which was mostly affected by wall temperature. Varying coolant temperature(20~80°C), HC emissions were measured in a production engine. With respect to the different types of injectors, HC emission was also measured. In the 6-hole injector application, the engine produced less HC emission in low coolant temperature region. Though it produces much more amount of wetting fuel, it has the advantages of finer atomization quality. In high coolant temperature region, there was little effect between different types of injectors. The control schemes to reduce HC emissions during cold start could be suggested from the findings that the amount of fuel supply and HC emission could be reduced by utilizing fine spray and high intake wall temperature.

1. 서론

냉시동은 자동차 배기가스 규제에 대처하기 위해 HC 배출량을 중심으로 면밀히 검토되고 있는 중요한 연구분야가 되었다. 촉매기술의 발전으로 엔진 HC 배출량 저감이 상당한 성과를 거두고 있으나, 두 가지 측면으로 보여지는 기술상의 난점이 여전히 존재한다. 우선, 촉매의 활성화 온도는 약 300°C로서 냉시동시에 도달하기 힘든 영역이 된다. 또한 냉시동시에는 흡기포트와 밸브, 실린더 온도가 낮기 때문에 연료 기화에 불리하다. 이를 극복하여 안정된 연소를 얻고 우수한 운전성을 보장하기 위해 농후한 혼합기를 사용하게 된다. 분사된 연료는 아주 작은 양만 증발하고 대부분이 액막을 형성하여 흡입공기 유동을 따라 실린더 내

로 이동하게 된다. 이렇게 형성된 연료액막은 연소실 내에서 불균질한 혼합기 형성을 조장하게 되고 정확한 공연비 제어를 어렵게 하는 요인으로 작용하게 된다^{1)~9)}.

현재 자동차에 적용되고 있는 연료계가 포트연료분사를 채택하고 있으므로 연료분사가 이루어질 때에 포트나 밸브의 연료증발 분위기는 혼합기 형성에 직접적인 영향을 준다⁴⁾. 따라서, 분무 액적의 크기와 분포 타겟팅 정확도 등의 연료분사특성이 엔진운전에서 HC 배출에 미치는 영향을 한국자동차공학회 학술대회에 발표한 바 있다¹⁰⁾.

앞서 행한 HC 배출 연구에서 Wetting Rig를 통한 wetting 량 결과를 실엔진에서 이루어지고 있는 wetting 현상과 매우 유사하다는 가정을 하였다. 그러나, 1 hole 분사기에 비해 2 hole 분사기는 포트 wall targeting이 되어서 원래 분사기가 갖고 있는 분무특성을 잘 살리지 못하는 난점이 있다. 이에 본 연구에서는 SOHC 엔진 전용 분사기 중에서 분무특성이 뚜렷이 대별되는 1 hole 과 6 hole 분사기

* 한국과학기술원 기계공학과

** 현대자동차㈜ 성능시험팀

를 적용하여 분무패턴 측정, PDA 를 이용한 액적 입경 및 속도 측정을 통하여 분무특성을 각각 규명하였다. 그리고나서 항온충돌판 분무실험을 통한 분사기별 wetting 특성을 파악하였으며, 이 결과를 엔진 배기가스를 측정데이터에 적용하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 분무특성 파악 실험 장치

분사된 연료의 공간 분포를 정량적으로 파악하기 위하여 Fig. 1 과 같은 패턴네이터를 사용하였다¹¹⁾. 상판 연료수부는 4×4mm 크기의 셀이 20×20 개로 이루어져 있으며 셀에 포집된 연료는 이송관을 통하여 계량용기까지 이송한 다음 연료 무게를 계량하였다.

PDA 는 입자 크기, 속도, 수 밀도(number density), 그리고 볼륨 유동(Volume flux)의 동적인 측량이 가능하다. Fig. 2 는 TSI 사의 APV(Adaptive phase/doppler velocimetry) 시스템을 나타낸 그림이다. 이 시스템은 0.5~10,000 μm(spherical)의 입자 크기를 측정할 수 있고 300 m/s를 넘는 입자의 속도까지 측정 가능하다. 입경측정은 분사기 선단에서 70mm 후방에서 측정하였다.

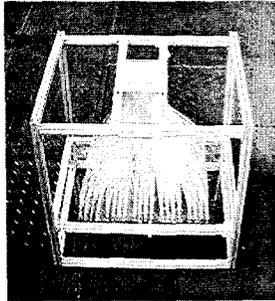


Fig. 1 Patternator

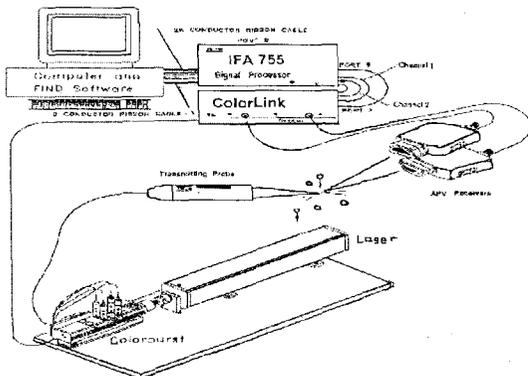


Fig. 2 APV System by TSI Corporation

2.2 Wetting 측정 실험 장치

포트분사식 엔진에서 분사된 연료는 대부분 흡기밸브 후면에 벽면 충돌을 한다. 특히 냉시동시에는 주위온도가 낮아 흡기유동과 더불어 액막류 형태로 실린더로 이동하게 된다. 따라서, 분무형태에 따라 형성되는 액막류의 정량적 평가를 하기 위해 Fig. 3 과 같은 wetting 측정 실험 장치를 구성하였다.

Wetting 량에 가장 큰 영향을 주는 인자는 벽면 온도이다. Fig. 3 과 같은 항온충돌판에 연료를 분사하고 벽면 온도를 변화시키면서 wetting 량을 측정하였다.

2.3 엔진 실험 장치

실험에 사용된 엔진은 3 기통 800cc SOHC 가솔린 엔진이며 냉시동 조건을 모사하기 위하여 냉각수 온도를 30~80℃로 변화시키면서 실험하였다. 1 hole 분사기와 6 hole 분사기의 경우에 같은 조건의 연료량을 맞추기 위하여 delay generator 와 분사기 구동회로를 Fig. 4 와 같이 구성하였다.

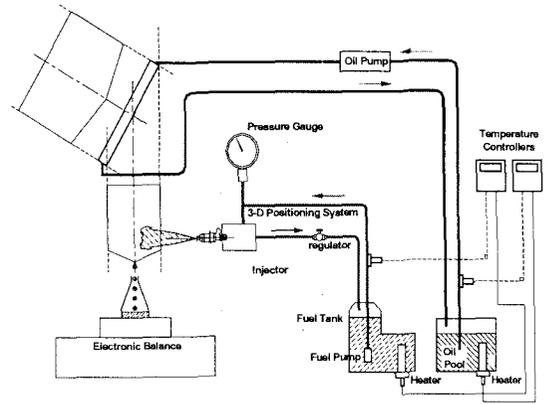


Fig. 3 Apparatus for wetting measurement

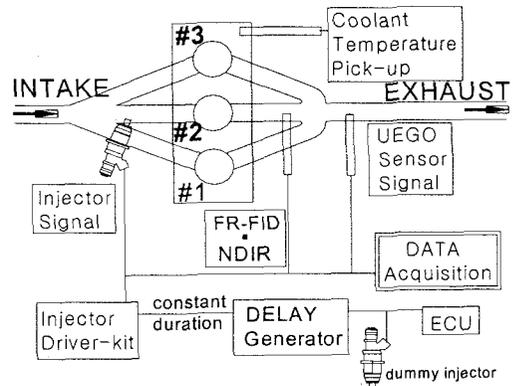


Fig. 4 HC measurement system

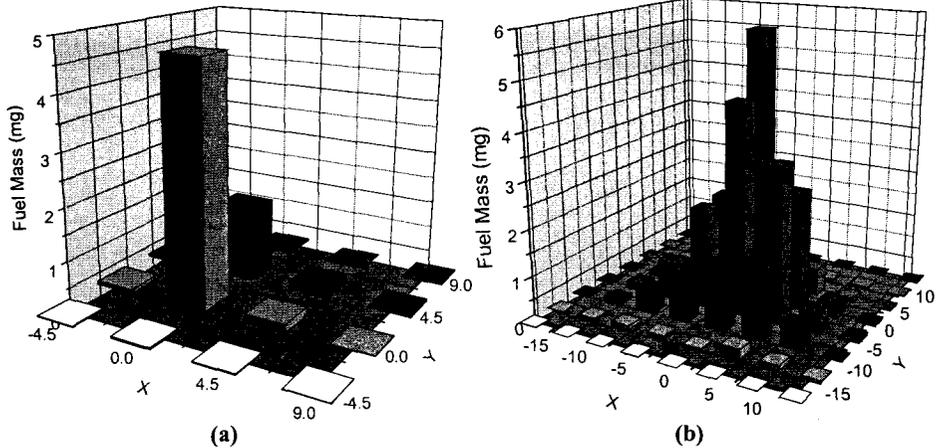


Fig. 5 Fuel mass concentration from (a) 1 hole, (b) 6 hole injectors

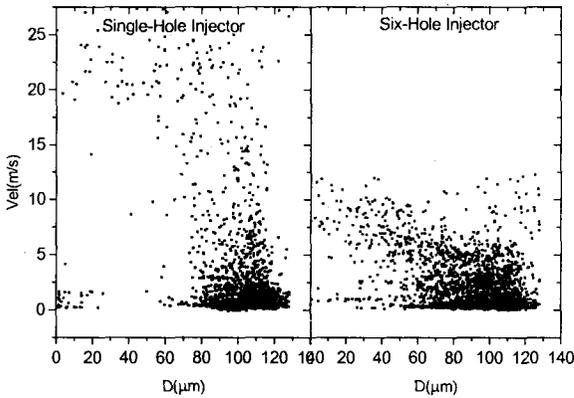


Fig. 6 Size and velocity of fuel droplets

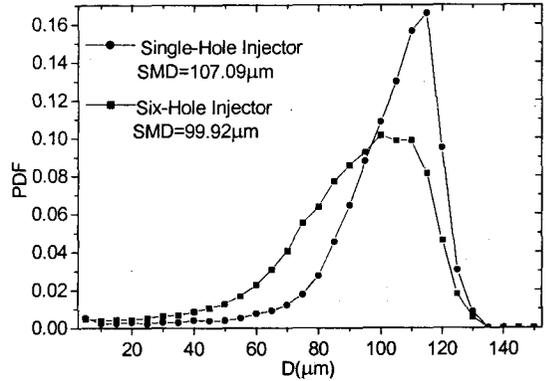


Fig. 7 PDF with respect to droplet size

3. 실험결과 및 해석

3.1 분무 특성

분무패턴 파악을 통한 1 hole 과 6 hole 분사기 분무특성 실험결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 1 hole 의 경우는 연료는 두개의 셀에 집중되어 있고 6 hole 의 경우는 5×5 의 25 개 셀이 넓게 분포하고 있다. 6 hole 의 패턴 결과는 액주특성의 1 hole 과 상당히 대별되는 결과를 보여준다. 즉, 1 hole 의 경우에는 미립화 성능은 별로 고려되지 않고 밸브 타겟팅을 우선적으로 고려한 것으로 볼 수 있다. 이에 반하여 6 hole 분사기가 미립화 성능이 더 우수하다고 예측할 수 있다.

Fig. 6 과 7 에는 PDA 를 사용하여 측정된 입경, 속도 데이터와 입경별 확률밀도함수분포를 나타내었다. 확률밀도값은 측정되는 입경 데이터를 모두 더해서 각각의 입경이 전체에서 얼마나

존재하는지를 파악하는 확률분포이다. 1 hole 의 경우 100-120 마이크로에 집중하고 있고 6 hole 은 80-120 의 좀더 넓은 분포를 가진다. 평균입경 SMD 를 보면 각각 107.09, 99.92 마이크로이다. SMD 가 작다는 것은 그만큼 열 및 물질 전달에 유리함을 나타내는데 즉, 1 hole 분사기의 경우 6 hole 분사기보다 증발하는데 더 불리하게 작용할 것으로 보인다. 물론, Wetting 이 실제 존재하는 경우에 있어서는 SMD 가 작다는 사실이 Wetting 에 불리한 것으로 나타나 있다. 이것은 접촉면적의 증가를 초래하기 때문이다. 그럼에도 불구하고, CVI 에서 SMD 가 작다는 것이 HC 저감에 이득이 없다고 볼 수 있는가는 더 면밀한 검토가 필요하다.

3.2 Wetting 특성

분무된 액적의 wetting 특성이 HC 배출에 직접적인 영향이 있다는 가정하에서는 Wetting 량의 결과는 실험결과 분석에서 엔진 HC 배출량 결과를 대

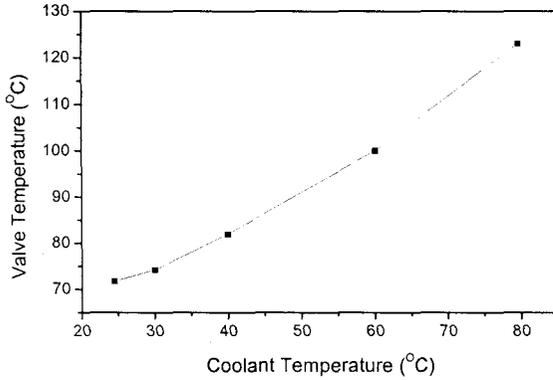


Fig. 8 Valve back surface temperature according to coolant temperature

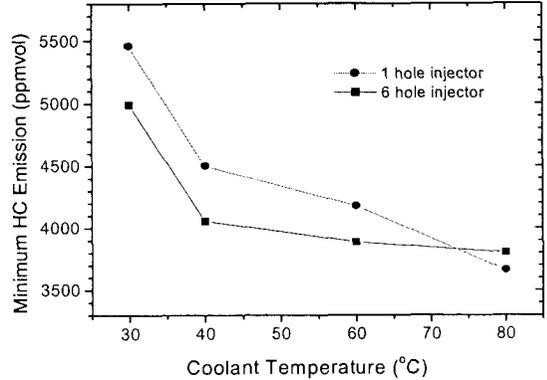


Fig. 10 Wetted fuel mass with respect to the injection amount with varying the wall temperature

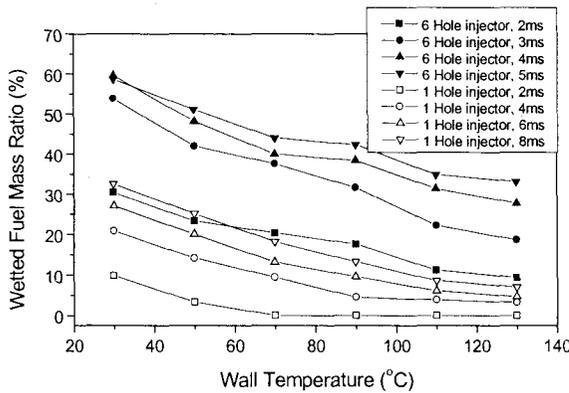


Fig. 9 Wetted fuel mass with respect to the injection amount with varying the wall temperature

변하게 된다. 따라서, Wetting 양 분석의 개선은 필수적이며 특히, 냉각수 온도와 밸브후면의 온도 사이에 존재하는 괴리는 치명적인 약점으로 남는다. 따라서, 밸브후면온도를 측정하고 Wetting 량을 측정하는데 벽면온도로 사용하였다.

Fig. 8 에 냉각수 온도에 따른 밸브후면 온도를 측정된 결과를 나타내었다. 냉각수 온도 25~80°C 에 대하여 70~125°C 의 분포를 갖는 것으로 나타났다. 벽면온도를 냉각수 온도라고 가정한다면 40~50°C 정도의 온도차이가 존재하게 될 것이다. 이 온도 범위를 포함하는 벽면온도에 대하여 분사량을 바꾸어가며 Wetting 량을 측정하였다. 이는 분사량이 달라질 경우 분사량에 대한 전체 점착효과를 내삽하여 정확하게 구하기 위해서이다. 그 결과를 Fig. 9 에 나타내었다.

Fig. 9 에서 결과를 보면 6 hole 분사기의 경우가 1 hole 에 비하여 두 배 정도 점착량이 증가하였음을 알 수 있다. 이것은 앞서 PDA 를 통한 분무액적의 특성을 가지고 설명할 수 있다. 1 hole

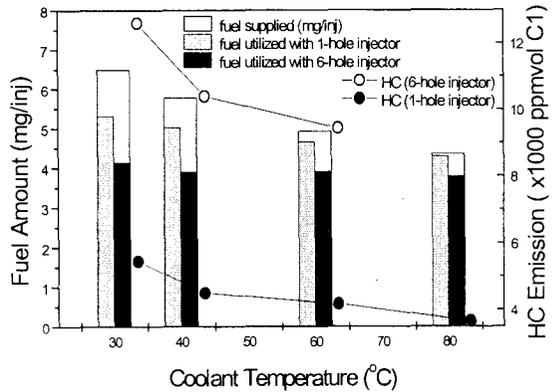


Fig. 11 Injection amount and estimated wetted fuel and HC emission with respect to coolant temperature in the application of 1 hole and 6 hole injectors respectively

분사기의 경우 액적의 크기가 크고 동시에 액적의 속도도 큰 것으로 나타났다. 즉, 크기가 작거나 속도가 작기 때문에 운동량이 크지 않아 점착량이 더 증가할 수 있다는 것을 의미한다. 충돌후에 다시 반발할 만큼 운동량이 충분히 큰 경우가 그렇지 않은 경우보다 점착량이 줄어드는 이유이다. 이러한 연료점착량의 증가는 HC 배출량 저감에도 나쁜 영향을 끼치게 된다.

3.3 Engine HC 배출특성

분사기에 따른 분무특성은 흡기계 내에서 공연비가 연소실 내에서 어떻게 달라지는가에 대한 평가에 영향을 준다. 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있는 실제 실험 스코프는 다음과 같다. 우선 1) 일정량의 연료를 각각의 분사기에 적용하는 경우와 2) 일정한 공연비를 적용하는 경우이다. 1) 번 실험의 경우 공연비 결과로부터 흡기계와 연소실

에서 공연비 변화를 파악하여 어떠한 분무특성이 더 적은 HC 를 배출하는데 유리한지를 파악할 수 있다. 그리고, 2)번 실험으로 가장 적은 HC 를 두 가지 분사기에 대하여 측정함으로써 실험엔진에서 유리한 결과를 도출해낼 수 있다. 이러한 실험은 냉각수 전 영역에 대하여 수행하여 각각의 온도 조건에 따라 이러한 결과들의 변화를 구하는 방법으로 진행되었다.

우선, 2)번 실험에 대한 결과가 Fig. 10 에 나와있다. 6 hole 분사기가 30, 40, 60°C에서 500ppm 정도 배기가스에 더 유리하게 나타났다. 그러나, 80°C에서는 상황이 역전되어 200ppm 정도 증가하여 1 hole 분사기가 더 유리함을 보여준다. 즉, 연소실 내에서 일정한 공연비가 된다는 가정을 하면 고온 영역에서는 분무특성의 영향이 없으나 저온에서는 상대적인 분무특성 영향이 나타난다는 사실을 알 수 있다.

1)번 실험에서는 연소실내에서 단일한 공연비를 얻을 수 없다. 같은 양의 연료를 강제함으로써 분무특성에 따라 연소실내 공연비가 영향을 받는다는 것은 자명하다. Fig. 11 의 결과를 보면 HC 배출량은 6 hole 의 경우 1 hole 의 경우보다 5000ppm 이상 더 많이 배출되었고 각 온도조건에서 6 hole 의 경우가 두배 이상 HC 배출이 증가하였음을 의미한다. 이결과 자체는 2)번 실험과 엄청난 값으로 대비되는 결과이다. 즉, 분무특성이 연소실내에서 공연비 조성에 이러한 영향을 끼치고 있다는 것을 말하고 있으며, 전 온도 영역에 대하여 6 hole 분사기가 같은 양의 연료로도 훨씬 농후한 혼합기를 만들어 낸다는 것을 알 수 있다. 분사량을 6 hole 에 맞추었을 경우에는 더 적은 HC 배출량을 기대할 수 있을 것이다.

HC 배출량 분석과 동시에 행하여진 분석방법은 각 온도 조건에서 분사량과 wetting 량 상호관계를 가지고 분사된 연료량 가운데 역으로 wetting 량을 거꾸로 추론하는 방법이 있다. Fig. 11 의 막대그래프에서 흰색부분은 wetting 량을 나타낸다. 이 방법에서 나타난 결과는 이미 앞장에서 기술하였듯이 6 hole 의 경우가 훨씬 큰 양의 wetting 량을 보여준다. 그 결과를 적용한 결과는 자명하다. 엔진 실험의 경우 먼저 2)번 실험을 주목해보자. Fig. 10 의 결과에서 6 hole 분사기의 경우가 80°C를 제외한 나머지 영역에서 더 적은 HC 를 배출하였다. 그러나, Wetting 량은 두 배이상 많다.

그러하다면, HC 배출량은 Wetting 량과는 직접적인 상관관계가 없다고 할 수 있다. Wetting 량이 많다고 해서 연소실내 공연비가 희박해진다는 것은 아니다. 1)번 실험결과에서 Wetting 량이 많은 6 hole 이 공연비가 더 농후하다. Wetting 이 많더라도 실린더로 직접 들어가기까지 시간적 여유가 존재하며 결과적으로 증발율 향상이 이루어지면서 정

상상태에서는 공연비를 더 농후하게 만드는 것이다.

요약하면 혼합기 형성에 있어서 저온의 엔진상태에서는 미립화가 더 우수한 분사기가 더 유리하고, 고온상태에서는 그다지 차이가 없다. 저온영역의 증발 분위기 조건을 고려한다면, 미립화로 인한 wetting 량 증가는 시간적인 여유 증가로 증발율 향상의 이득이 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SI 엔진에서 포트연료분사특성이 HC 배출에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 분무특성과 wetting 특성 그리고 HC 배출가스를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PDA 장비를 이용하여 연료 액적의 입경분포와 속도분포를 획득하여 분사기로부터의 분무특성을 파악할 수 있다.
- 2) 6 hole 분사기의 경우 1 hole 의 경우보다 미립화 성능이 뛰어났으며 엔진에 적용할 경우 저온분위기에서 배출 HC 가스량이 더 적었다.
- 3) 냉시동과 같은 저온분위기에서는 타겟팅 성능과 미립화 성능을 함께 고려하는 것이 HC 배출가스 저감에 유리하다.

후 기

본 연구는 한국산업자원부 청정생산기술사업 과제의 지원과 한국이엠에스(주)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Imatake, N., Saito, K., Morishima, S., Kudo, S., Ohhata, A., 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Behavior in Port-Injection Gasoline Engines," SAE Paper 971639
- (2) Saito, K., Sekiguchi, K., Imatake, N., Takeda, K., Yaegashi, T., 1995, "A New Method to Analyze Fuel Behavior in a Spark Ignition Engine," SAE Paper 950044
- (3) Takeda, K., Yaegashi, T., Sekiguchi, K., Saito, K., Imatake, N., 1995, "Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-Valve Engine with Port Fuel Injection During Cold Starting and Warm-up," SAE Paper 950074
- (4) Zhao, F., Lai, M., Harrington, D.L., 1995, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection-A Critical Review," SAE Paper 950506

- (5) Horie, K., Takahasi, H., Akazaki, S., 1995, "Emissions Reduction During Warm-Up Period by Incorporating a Wall-Wetting Fuel Model on the Fuel Injection Strategy During Engine Starting," SAE paper 952478
- (6) Kaiser, E.W., Siegl, W.O., Lawson, G.P., Connolly, F.T., Cramer, C.F., Dobbins, K.L., Roth, P.W., Smokovitz, M., 1996, "Effect of Fuel Preparation on Cold-Start Hydrocarbon Emissions from a Spark-Ignited Engine," SAE paper 961957
- (7) Yoon, G.J., 1998 "Developing Trend on the Gasoline ULEV Technology," Journal of KSAE vol. 20 no. 2 p.p. 26~35
- (8) Nuglish, H.J. and S. Nally, 1997, "Atomization versus Targeting for Port Fuel Injectors: A unresolvable Conflict", 7th ICLASS, Seoul
- (9) Zimmermann, F., Bright, J., Ren, W., Imohl, B., 1999, "An Internally Heated Tip Injector to Reduce HC Emissions During Cold-Start", SAE paper 1999-01-0792
- (10) 우영민, 이용표, 배충식, 1999, "냉시동시 연료 분사 특성이 HC 배출에 미치는 영향에 대한 실험적 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집 volume I, pp. 22~27, KSAE 99380133
- (11) Evers, L.W., Tampas, P.M., Whipple, R.L., Fried, M.W., 1996, "An Automated Patternator for Fuel Injector Sprays," SAE paper 960108