

다공스로틀밸브가 혼합기 유동과 연료 분무의 2차 미립화에 미치는 영향

Effects of Perforated Throttle Valve on the Mixture Flow and Secondary Atomization of Fuel Spray

조 병 옥,* 조 행 옥,** 이 창 식***
B. O. Cho, H. M. Cho, C. S. Lee

ABSTRACT

Finely atomized fuel droplet and good mixed mixture plays very important role in improving combustion efficiency in an spark ignition engine. And combustion efficiency has influence directly on the engine power, fuel consumption rate and pollutant emission.

In this study, perforated throttle valve which has relatively low value of PR has been developed and studied for the purpose of improving those aims. As a result of this study, it has been verified that the perforated throttle valve makes droplet more finely, and also proved that has a function of contributing to form good mixed mixture, especially in mixture preparation system of carburetor or SPI type spark ignition engine.

주요기술용어 : Secondary atomization(2차 미립화), Mixture formation(혼합기 형성), Perforated throttle valve(다공스로틀밸브), Perforate ratio(구멍비), Valve loss coefficient(밸브손실계수)

1. 서 론

최근 가솔린기관의 고성능, 고출력화와 함께 저연비로서 공해물질 배출의 저감화를 실현하기 위한 연구와 노력이 활발하게 추진되고 있다. 특히, 연료분사식 가솔린기관의 연소효율을 향상하기 위해서는 짧은 연소기간 동안 완전한 연소가 이루어지도록 연료 액적의 충분한 미립화 및 미립화된 액적과 공기와의 혼합기가 연소실에 고른 분포로유입되는 과정이 우선적으로 요구되며, 이러한 문제에 대한 여러 가지 개선방법과 장치 등이 제안되고 있다. 연료 분무의 미립화 방법과 특성에 대하여는

Namiyama 등¹⁾의 초음파 무화방식, Harada 등²⁾의 공기보조식 2유체 무화방식 및 Noki 등³⁾에 의한 증돌무화방식 등의 연구가 있으며, 다점분사(MPI)식 기관의 흡기관이나 연소실과 같이 구조적 측면에 대해서도 다수의 연구결과가 발표되고 있다. Tindal 등⁴⁾과 Zhao 등⁵⁾은 흡기관을 나선형으로 설계하여 혼합을 향상시키는 방법을 연구하였고, Arcoumanis 등⁶⁾과 Kent 등⁷⁾은 실린더내에 형성되는 혼합기의 유동장을 개선하는 방법으로 텀블과 스퀴시를 연구하였다.

한편, 기화기식 및 일점분사(SPI)식 기관에서의 흡기시스템은 연료 인젝터로부터 기관 흡기구까지의 거리가 길기 때문에 분무액적의 관벽

* 정회원, 산본공업고등학교

** 정회원, 상지전문대학 자동차과

*** 정회원, 한양대학교 기계공학과

부착 현상이 심화되고, 부착 연료량의 정도에 따라 각 실린더로의 혼합기 균등 분배가 어려워지며, 기관 운전성의 악화, 연료소비율 및 탄화수소와 같은 배출물 증대 등의 원인이 되므로 이에 대한 대책도 함께 마련하여야 한다.

본 연구에서는 인젝터 후방에 설치되어 있는 스톱밸브에 지름이 작은 구멍을 수 개 가공한 다공스톱밸브(perforated throttle valve)를 개발하고, 이를 장착하였을 때의 혼합기 유동 특성과 2차 미립화 효과를 공기 유량과 구멍비에 따라 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 다공스톱밸브

기화기식 및 일점분사식 기관에서 혼합기의 양과 유속을 조절하는 스톱밸브는 인젝터 후류에 설치되므로 밸브면에 연료 액적이 부착되기 쉽고, 또한 밸브후류에 형성되는 재순환영역은 그 영역내에 존재해야 할 액적들의 운동 에너지를 잃게 하여 부착 유량을 가중시키는 부정적인 영향을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 다공스톱밸브를 설계 제작하여 일점분사기관에 적용한 결과, 대부분의 실험항목에서 실용성이 있음을 확인한 바 있다.^{8,9)}

다공스톱밸브의 기능은 크게 나누어 2차 미립화 효과와 혼합기의 혼합도 향상 효과로 구분되며, 다공스톱밸브에 의한 연료 분무의 2차 미립화 과정은 Fig. 1과 같이 도식적으로 나타낼 수 있다.

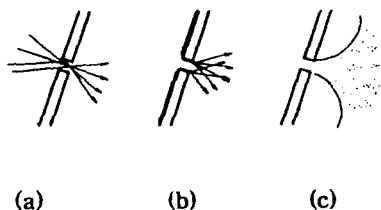


Fig. 1 Structure of secondary spray formation through the perforate

Fig. 1의 (a)는 밸브면 중의 구멍으로 분무액적이 흡입공기와 함께 관통하는 것을 나타내고,

(b)는 밸브면에 부착된 액막이 액상으로 구멍을 통하여 흘러 들어가 그 끝 부분에서 분열이 일어나는 경우를 나타낸다. 이것은 스톱밸브 개도가 작을 때, 관 벽과 밸브의 외주가 이루는 작은 통로에서 비교적 큰 입경의 액적이 고속 기류에 편승하여 작은 입경의 액적으로 2차 미립화되는 상황과 유사한 현상으로 판단된다. (a)와 (b)의 과정에서 생성된 액적은 (c)와 같이 밸브 외주에서 발생한 액적들과 함께 밸브 후류에 형성되는 경계층 밖에서 혼합되어 연소실로 유입한다.

다공스톱밸브의 혼합도 향상 효과는 재순환영역의 크기로 판단이 가능하다. 재순환영역은 밸브 개도가 작을수록 커지며, 이 때에는 벽면부착 유량도 증가한다. 밸브가 거의 닫혀 있을 만큼 개도가 작은 경우에는 재순환영역이 최대의 크기로 되고, 분무액적으로써 이동되는 연료량보다 액막류로써 이동되는 연료량이 더 지배적이다. 이와 같은 현상은 인젝터에서 분사된 일정량의 연료(m_{inj})가 흡기관을 따라 비행하는 액적으로서 이동되는 양($m_{airborne}$), 벽면이나 밸브면에 부착되어 액막류로서 이동되는 양(m_{film}) 및 비행 액적과 액막으로부터 증발된 연료증기로서 이동되는 양(m_{evap})의 합인 $m_{inj} = m_{airborne} + m_{film} + m_{evap}$ 와 같으므로, 액막류로서의 유동하는 비중이 증가하면 액적으로서의 전달비중을 상대적으로 감소시키는 결과가 초래된다.

연료 액적과 공기와의 혼합이 이루어지는 혼합구역도 밸브 후류의 재순환영역의 크기와 밀접한 관계를 갖는다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 무공스톱밸브의 경우에는 하나의 커다란 경계층으로 재순환영역이 형성되지만 다공스톱밸브의 경우에는 밸브 외주와는 물론 인접 구멍간에 경계층이 형성되므로 재순환영역의 크기가 작아지고, 크기가 작아지는 만큼 혼합 구역은 증대되는 효과를 갖는다. 그러나 스톱밸브 개도가 큰 경우에는 다공스톱밸브에 설치된 구멍의 효과가 상쇄되고 재순환영역의 크기도 무공스톱밸브에서의 크기와 거의 같아지므로 다공스톱밸브의 2차 미립화 및 혼합도 향상 효과는 어느 범위이상에서는 한계성이 있

는 특성임을 알 수 있다.

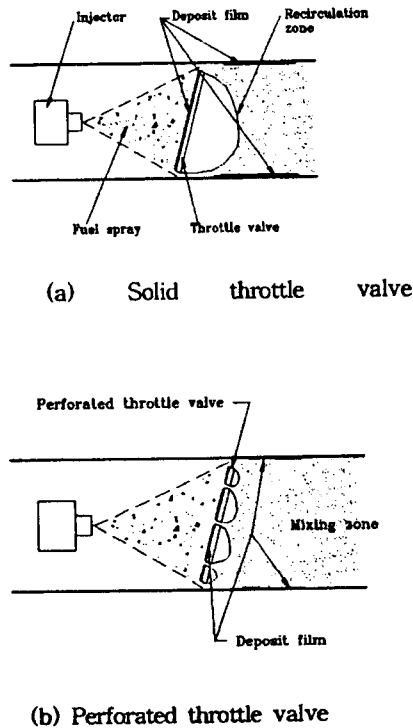


Fig. 2 Effect of throttle valve on mixing zone and deposit film

본 연구에서 적용한 다공스토펙밸브의 다공 정도를 나타내는 파라미터로서 밸브면의 면적에 대한 구멍 면적의 비를 구멍비(Perforate Ratio ; PR)라고 정의하면, 구멍의 면적과 밸브의 면적을 각각 A_p 와 A_v 라고 할 때, $PR = A_p/A_v$ 로 표시된다.

또한 구멍비는 구멍이 차지하는 비중을 면적 비로 나타낸 값이므로 구멍 지름이 크거나 그 수가 많을수록 큰 값을 가지며, 구멍비가 큰 밸브일수록 구멍의 영향을 많이 받는다. PR 의 식에서 구멍의 지름이 같고 구멍수만 변수로 하면, $PR=n(d/D)^2$ 로 표시된다. 여기서, n 은 구멍수이고, D 와 d 는 각각 밸브와 구멍의 지름이다.

한편, 스토펙밸브와 같은 버티플라이 밸브의 특성은 다음과 같이 무차원수인 밸브손실계수 $K_v=2\Delta P/\rho_0 V^2$ 로 나타낸다. 여기서, ΔP 는 밸브

브 전후의 압력차이고, ρ_0 와 V 는 각각 공기의 밀도와 속도이다. 동일한 조건에서 구멍비가 큰 다공스토펙밸브를 이용하면 압력차가 작아지므로 밸브손실계수를 작게 할 수 있으나, 유량조절 기능은 저하한다.

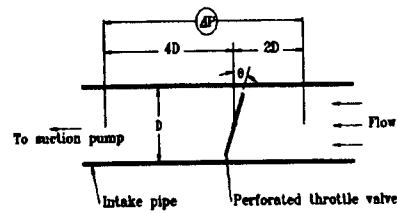


Fig. 3 Measur of pressure difference in intake pipe

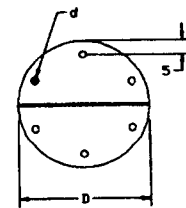


Fig. 4 Geometry of perforated throttle valve

2.2 흡기관 유동실험

스토펙밸브가 설치된 흡기관의 유동특성을 관찰하기 위하여 Fig. 3과 같이 압력차 측정장치를 구성하였다. 흡기관의 내경은 34mm이고, 스토펙밸브의 지름을 33mm로 하여 개폐비(Blockage Ratio; BR)가 94.2%이다. 여기서 정의한 개폐비는 흡기관 단면적(A_d)에 대한 스토펙밸브 면적(A_v)의 비로서, $BR=A_v/A_d$ 이다. 일반적으로 개폐비는 흡기관 내경과 스토펙밸브의 면적이 같으므로 별도로 다루어지는 경우는 거의 없으나, 본 실험에서는 스토펙밸브에 의한 미립화 특성도 함께 관찰하고자 미립화 효과가 보다 향상되도록 약간의 개폐비를 주었다. 예비 실험과정에서 개폐비를 변화시켜 본 결과, 개폐비가 작을수록 미립화 효과는 향상되는 것으로 나타났다.

다공스토펙밸브의 구멍은 Fig. 4와 같이 6개의 대칭구조로 가공하고, 구멍비의 변화에 따

큰 유동특성을 비교하기 위하여 구멍지름을 1.3mm와 1.7mm로 드릴링 하였다. Table 1은 실험에서 사용한 밸브의 주요 치수와 구멍비이다.

Table 1 Blockage and perforate ratio of test valves

Valve	D(mm)	d(mm)	BR(%)	PR(%)
1	33.0	-	94.2	-
2	33.0	1.3	94.2	0.95
3	33.0	1.7	94.2	1.60

스로틀밸브 전후의 압력차는 수력구배의 영향을 받지 않도록 밸브위치에서 전방 2D지점과 후방 4D지점을 각각 고압측과 저압측으로 하여 측정하였다. 흡입측에 설치된 다단 진공 펌프로 조절되는 공기 유량의 범위는 100~600L/min정도이고, 스로틀 개도는 0부터 50° 사이를 10° 간격으로 변화시켰다.

2.3 미립화 실험

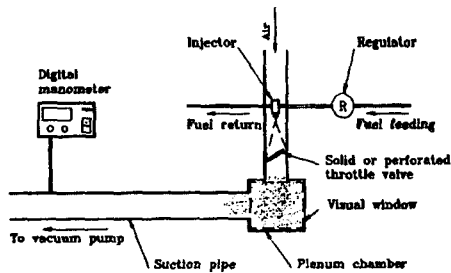


Fig. 5 Configuration of injection and mixture flow system

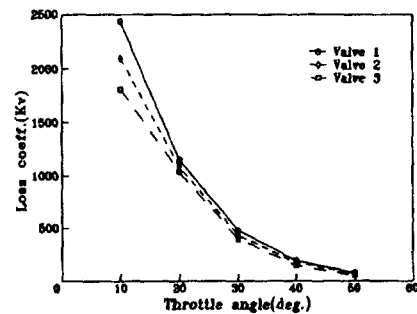
스로틀밸브에 의한 2차 미립화 특성을 관찰하기 위하여 Fig. 5와 같이 실험장치를 구성하였다. 이 장치는 크게 연료분사계와 분무계측기로 구분되고, 인젝터의 분사압력은 압력조절기에 의해 3.9bar로 일정하게 유지되며, 이 때의 분사시간과 분사 유량은 각각 8ms와 0.25L/min이다. 전후부에 관찰창이 마련되어 있는 공기실의 크기는 50×50×120mm이고, Pyrex재로 제작하였다. 관찰창 전면에는 방전 광원용, 대향하는 관찰창에는 CCD카메라를 각각 설치하고 카메라에서 얻은 이미지로부터 입

지운동해석장치(PMAS)를 이용하여 측정점의 분무 입경과 입수 등을 계측하였다.

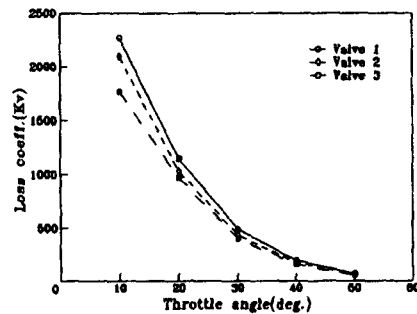
광학계에 의해 결정되는 CCD카메라의 관찰 영역은 4.5(H)×4.5(V)×2mm(Depth)이고, 입경 10~200μm 범위의 액적을 획득, 처리할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

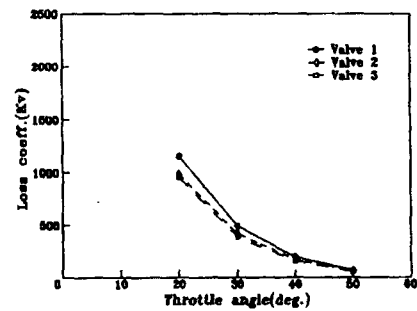
3.1 흡기관 유동특성



(a) Re=9000



(b) Re=15500



(c) Re=22100

Fig. 6 Variation of valve loss coefficient with throttle valve

Fig. 6은 흡기관내의 공기 유 속의 변화에 따른 Re 수와 손실 계수 사이의 관계를 밸브의 종류에 대하여 비교한 것이다.

흡기관내의 공기량은 인버터로 조절되는 진공펌프로 흡인하고, 흡기관 출구측에서의 유량을 200L/min, 350L/min 및 500L/min으로 일정하게 유지하였다. 이 때, 체적 유량에 대한 Re 는 각각 9000, 15500 및 22100이다. 또한, 흡기관 입구에서의 평균유속은 체적 유량이 각각 200, 350, 500L/min일 때, 3.671, 6.425, 9.178m/s이다.

일정한 Re 로 유지한 상태에서 스로틀 개도의 변화에 따른 밸브손실계수를 Fig. 6에 나타내었다. 동일한 크기의 단면을 갖는 관에서 유량이 증가할수록 속도가 증가하고, Re 도 증가하므로 밸브손실계수는 감소한다. 전체 측정영역에서 무공스로틀밸브(밸브1)가 가장 손실계수가 크고, 구멍비가 0.95%인 다공스로틀밸브(밸브2), 그리고 구멍비가 1.6%인 다공스로틀밸브(밸브3)의 순서로 작은 값을 가진다. 이것은 다공스로틀밸브가 동일한 운동량의 공기 유량을 제어할 때, 무공스로틀밸브보다 더 작은 유체저항으로 제어가 가능함을 의미한다.

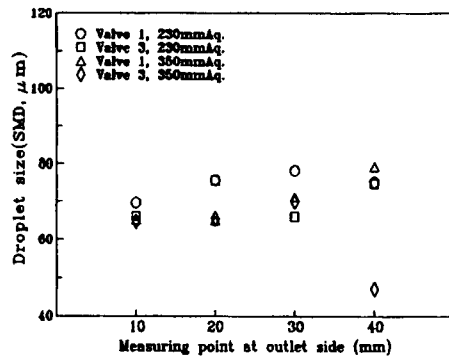
그리고, 스로틀 개도에 대해서는 개도각이 클수록 유체가 받는 저항이 작아지므로 손실계수도 급속히 작아지며, 50° 이상 개도시에는 스로틀밸브의 종류와 관계없이 거의 일정한 값으로 감소하므로써 어느 범위 이상의 개도에서는 다공스로틀밸브의 손실계수 감소효과도 상쇄되는 것으로 나타났다.

3.2 미립화 및 혼합특성

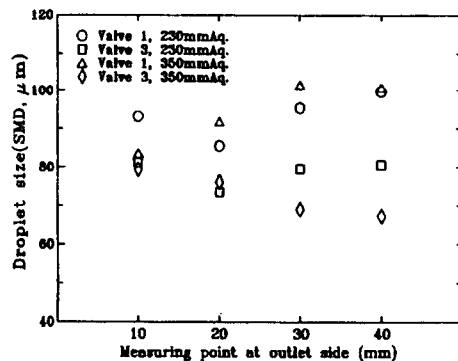
연료 분무액적을 보다 작은 입경으로 미립화하고 질 좋은 혼합기를 생성하는 것은 다공스로틀밸브의 중요한 기대효과 중의 하나이다.

먼저 관찰창내의 측정 위치별 액적 크기를 계속한 결과 유량과 차압이 클수록, 그리고 스로틀 개도가 작을수록 미립화가 비교적 잘 이루어지며, 무공스로틀밸브보다는 다공스로틀밸브의 경우에서 약 10 μ m정도 작은 크기의 액적 분포를 얻을 수 있었다. 이러한 현상은 특

히 공기실의 출구측에서 현저하게 나타났다. Fig. 7은 공기실 출구단으로부터 10mm 안쪽에서 상부 덮개를 기준으로 하향 10, 20, 30, 40mm 지점을 측정점으로 하여 스로틀 개도 20° 와 35° 에 대한 평균입경을 구한 것이다.



(a) 20° open throttle



(b) 35° open throttle

Fig. 7 Comparison of SMD at outlet side on test valves

전반적으로 평균입경은 다공스로틀밸브(밸브 3)가 무공스로틀밸브(밸브1)보다 작은 크기의 액적을 생성하는 것으로 나타났다. 다공스로틀밸브의 무화축진 기능은 밸브 주위를 통과하는 공기 유속과 밸브에 뚫어진 구멍을 관통하는 유속의 차로 생긴 전단력이 입자를 더 작게 분열시키거나, 또는 무공스로틀밸브의 경우에는 밸브면에 도포된 연료가 지속적으로 정체되는 반면에 다공스로틀밸브의 경우에는 이 연료가 구멍을 관통하는 공기에 편승하여 2차적인 분

열이 이루어지므로써 더 작은 크기의 액적을 생성할 수 있었던 것으로 사료된다.

한편, 측정점의 위치에 대하여는 상부측이 하부측보다 더 작은 액적 분포를 보였는데, 이것은 액적이 클수록 질량도 증가하여 중력의 영향을 많이 받아 바닥쪽으로 분포되기 때문인 것으로 판단된다. 스톱 개도에 대하여는 35° 개도시 보다 20° 개도시 더 규칙성 있는 경향을 보이는데, 개도가 증가하면 스톱밸브를 통하여 거의 직류로 혼합기가 공기실에 유입되어 공기실내의 난동을 가중시키는 결과를 가져오기 때문이다.

3.3 총 생성 액적수

무공스로틀밸브의 경우, 액적들이 공기실 출구측에서 주로 관찰되고, 그 외의 측정점에서는 액적이 존재하지 않거나 있더라도 데이터로 처리할 만큼 충분하지 않았다. 그러나 다공스로틀밸브를 장착한 경우에는 밸브 후류측 전반에 걸쳐 액적이 상당수 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 관벽에 부착되었던 액막이 스톱밸브에 가공된 구멍으로부터 분출되는 공기 제트의 영향으로 탈착, 분열되므로써 2차 무화가 이루어지고, 밸브 후류에 형성되는 재순환영역이 줄어들어 혼잡구역이 넓어져서 혼합이 촉진되었기 때문이라고 생각된다. 또한, 이 경우에는 식 (1)이 의미하는 바와 같이 벽면부착 유량의 감소가 상대적으로 비행 액적과 연료중기로서의 연료 공급량을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

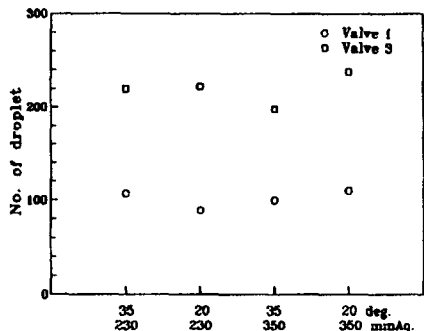


Fig 9 Comparison of total droplet number
Fig. 9는 무공스로틀밸브(밸브1)와 구멍비

1.6%인 다공스로틀밸브(밸브3)에 대하여 공기실내에 생성된 액적의 총 수를 나타낸 것이다. 스톱 개도와 유량 등, 모든 조건에서 다공스로틀밸브에서 생성된 액적의 수가 약 2배 가량 많았다. 스톱 개도에 따른 액적수 생성은 35° 일 때보다 20° 일 때, 더 많은 항상 쪽을 보였다. 이와 같은 결과는 스톱 개도가 작을수록 다공스로틀밸브의 2차 미립화 기능이 향상되고, 벽면부착 유량을 탈착하여 재분열을 도모하리라고 가정했던 전술의 기대효과가 실제적으로 충분히 가능함을 뒷받침한다.

4. 결 론

인젝터 후방에 설치된 스톱밸브에 작은 구멍을 가공한 다공스로틀밸브를 설계·제작하여 분무의 미립화 및 혼합기 유동 특성을 규명한 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 다공스로틀밸브의 흡기관 내의 유동 특성을 실험한 결과 다공스로틀밸브의 경우가 무공스로틀밸브보다 유체저항을 저감시킬 수 있으며 적은 밸브손실계수로 유량조절이 가능하다.
- (2) 흡기관 유동장에 다공스로틀밸브를 적용하면 밸브후류에 형성되는 정제층영역을 작게 하여 벽면부착 유량이 감소하고, 상대적으로 혼합구역을 확대하여 분무 액적의 균일한 분포의 혼합기 형성에 효과가 있다.

(3) 다공스로틀밸브는 무공스로틀밸브의 경우보다 약 10 μ m정도 작은 액적을 생성하고, 생성 액적의 수도 두 배 가량 많아져 2차 미립화 기능이 충분히 있는 것으로 판단된다.

(4) 다공스로틀밸브의 효과는 스톱 개도가 작을 때에 더 현저하게 나타나며 같은 다공스로틀밸브라 할지라도 구멍비가 큰 밸브일수록 더 작은 입자로 분열된다. 그러나, 구멍의 크기가 어느 한도 이상으로 커지면 유량조절 기능이 상쇄되므로 최적의 구멍지름, 구멍수, 구멍

의 배열 및 이에 따른 구멍비 결정에 관한 후속적 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. K. Namiyama, H. Nakamura, K. Kokubo, and D. Hosokai, "Development of Ultrasonic Atomizer and its Applications to S.I. Engines", SAE 890430, 1989.
2. K. Harada, R. Shimizu, K. Kurita, M. Muramatsu, T. Makimura, and M. Ohashi, "Development of Air-Assisted Injector System", SAE 920294, 1992.
3. T. Noki, Y. Ohyama, and M. Fujieda, "Study on the Intermittent Impinging Atomization of Fuel Injector for Gasoline Engine", Trans. of the JSME, Vol. 58, No. 552, pp. 2607-2611, 1992.
4. M. J. Tindal, R. S. Cheung, and M. Yianneskis, "Velocity Characteristics of Steady Flows through Engine Inlet Ports and Cylinder", SAE 880383, 1988.
5. F. Q. Zhao, M. C. Lai and D. L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection-A Critical Review", SAE 950506, 1995.
6. C. Arcoumanis, A. F. Bicen, and J. H. Whitelaw, "Squish and Swirl-Squish Interaction in Motored Model Engines", Trans. of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 105, pp. 105-112, 1983.
7. J. C. Kent, A. Mikulec, L. Rimai, A. A. Adamczyk and S. R. Mueller, "Observations on the Effects of Intake-Generated Swirl and Tumble on Combustion Duration", SAE 892096, 1989.
8. 이창식, 이기형, 조병욱, 서영호, "연료 분사 장치의 혼합기 형성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제11호, pp. 2690-2698, 1995.
9. 이창식, 조병욱, "흡기관내의 혼합기 유동 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제1호, pp.218~228, 1996.