〈논문〉 SAE NO. 99370247

흡기 유동 조건의 변화가 실린더 내 가스 유동 패턴에 미치는 영향

Influence of Flow Conditions of Intake Air on Gas Flow Patterns in Engine Cylinder

이 창식*, 전 문수**, 김 우경*, 최 수천***
Chang-sik Lee, Mun-soo Chon, Woo-kyoung Kim, Soo-chun Choi

ABSTRACT

This paper presents the characteristics of the gas flow in the engine cylinder under various intake flow conditions. The particle tracking velocimetry(PTV) was used to analyze the gas flow pattern and flow field in the cylinder. Effects of tumble intensifying valve(TIV), swirl intensifying valve(SIV), and one-valve deactivated condition on in-cylinder flow patterns were compared with the baseline engine under 600rpm motoring condition. In addition, tumble ratio was estimated with results of in-cylinder flow fields. Base on experimental results, the tumble ratio of in-cylinder flow field has the maximum value at the bottom dead center for the different four inlet conditions. In TIV condition, the tumble ratio is 1.35 times larger than that of baseline engine and 1 intake valve deactivated condition is effective to improve in-cylinder swirl motion.

주요기술용어 : Flow pattern(유동 형태), Tumble intensifying valve(텀블 강화 밸브), Swirl intensifying valve(스월강화밸브), PTV(입자 추적 유속계)

1. 서 론

자동차 엔진 내부에서 형성되는 유동장의 해석은 연료의 분무 특성과 더불어 기관의 흡기 포트 및 연소실 형상 설계에서 가장 중요하게 취급되는 설계 인자 중의 하나이다. 최근에는 자동차 배출 가스에 의한 환경 오염 문제가 더욱 심각하게 대두됨에 따라 저공해 엔진의 관점에서 직분식 가솔린 엔진이나 초희박 기관에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 직분식 가솔린 엔진이나 초희박 엔진의 경우 연소실 내의 혼합기 형성을 촉진시킴과 동시에 압축 말기에 난류 강도를 증대 시키는 수단으로 텀블 및 스월 유동 효과를 적절히 이용하고 있다[1~3]. 그러나 실린

* 정회원, 한양대학교 기계공학과
** 정회원, 대우자동차(주)
*** 정회원, 동서울대학 기계설계과

더 내의 가스 유동장은 크랭크 각 변위에 따라 유동 패턴이 특이한 비정상 유동이기 때문에 실린더 내의 스월 및 텀블 현상이 명확히 해명되어 있지 않으며, 특히 스월 및 텀블의 세기는 희박 연소 유동에서 매우 중요한 인자가 되고 있다.

따라서 흡입 초기에 형성되는 텀블 유동의 공간 속도 분포 및 압축 과정에서 발생되는 난류 생성 과정을 정량적으로 분석하여 이를 흡기 포트 및 연소실 형상 설계의 자료로 이용하여, 연소 효율을 높이려는 시도가 여러 연구자들에 의하여 이루어지고 있다[4~7].

따라서 본 연구에서는 엔진의 연소 및 배출물 특성에 영향을 미치는 가솔린 엔진의 흡기 유동 조건을 해석하기 위하여 실린더 내의 스월 및 텀블을 고려한 유동 조건을 변화시킨 경우의 실린더 내의 가스 유동 특성을 실험적으로 구하였다. 실린더 내의 가스 유동장은 단일 입자 추적법을 적용하여 크랭크 회전각 변화에 따라 구하였으며, 그 결과를 여러 가지 흡기 조건에 대하여 비교 검토 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1는 실린더 내의 가스 유동 특성을 해석하기 위한 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험 장치는 단기통 가시화 엔진, 엔진 구동용 전동 장치, 가스 유동의 측정에 사용되는 Ar-ion 레이저 광원과 광학 장치, 그리고 데이터 처리 시스템 등으로 구성하였다. 실험에 사용된 단기통 엔진은 실린더 내경과 직경이 각각 85mm, 88mm이며, 연소실 체적과 압축비는 각각 499cc, 7이다. 또한 흡기 포트는 사이아미즈(siamese) 형상을 가진 좌우 대칭 포트이며, 연소실은 펜트루프(pent-roof) 형상의 것을 사용하였다. 이와 같은 단기통 엔진의 실린더 내의 가스 유동을 가시화하기 위하여 엔진 블록과 실린더 헤드 사이에 내경 85mm, 높이 135mm, 두께 10mm인 투명한 석영 라이너와 신장 피스톤을 설치하였다. 광학 측정 장치는 레이저 광원과 초퍼, 화상 취득용 카메라로 구성하였다. 한편 데이터 처리 장치는 엔진의 회전 속도 검출을 위한 신호 처리 장치와 유동 화상을 디지털 신호로 입력하기 위한 필름 스캐너 및 이들 결과를 분석하기 위한 컴퓨터 시스템으로 구성하였다.

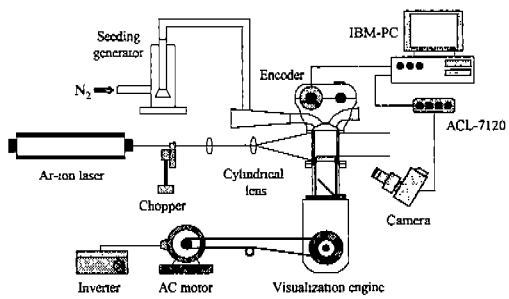


Fig. 1 Schematic diagram to measure in-cylinder gas flow

2.2 실험 방법

엔진의 구동은 3상 교류 모터(11kW)로 구동하였으며 모터의 속도는 인버터를 사용하여 실험 회전 속도가 되도록 제어하였다. 유동 속도 측정용 광원으로는 수냉식 5W Ar-ion 레이저를 사용하였으며, 원통형 렌즈 및 초점 렌즈를 사용하여 약 0.5mm의 두께를 갖는 평면광을 투명 실린더 중심축에 조사시켰다. 산란 입자로는 약 20~40mm의 평균 직경을 갖는 플라스틱 마이크로벌룬(plastic microballon)을 사용하였으며, 입자를 균일하게 공기 흐름에 부유시켜 실린더 내로 유입될 수 있도록 고압 질소 가스 및 입자 공급 장치를 사용하였다.

유동 화상은 35mm 카메라를 사용하여 촬영하였으며, 크랭크 각 센서 위치에 설치된 로터리 엔코더로부터 검출된 크랭크각 신호를 카메라와 동기 시켜, 실린더 내부 유동장의 정지 화상을 취득할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 한편 실험에 사용된 엔진의 흡기 포트 형상 및 연소실의

형상을 Fig. 2에 나타내었다. 실린더 내의 가스 유동의 측정에는 단일 프레임 입자 추적법 (single frame particle image velocimetry)을 적용하였으며, 엔진의 회전 속도를 600rpm으로 일정하게 유지하면서 BBDC 60° 에서 60° 간격으로 ABDC 120° 크랭크 각도까지 4개 지점에서 수행하였다.

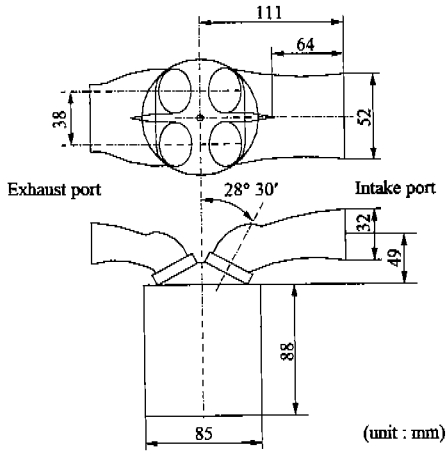


Fig. 2 Configuration of intake port of test engine

기관의 흡기 유동 조건은 흡기 포트를 통과하는 주 유동이 포트의 상단부나 측면을 통과하게 하여 실린더 내 텀블 및 스월 유동이 강화될 수 있도록 개구율이 30%인 버터플라이 형상의 텀블 강화 밸브(tumble intensifying valve, TIV)와 스월 강화 밸브(swirl intensifying valve, SIV)밸브를 제작하여 장착하였다. 또한 흡기 2 밸브 중에 1개의 밸브만을 작동시켜 실린더 내의 스월 유동이 강화될 수 있도록 하였다. 이상과 같은 흡기 유동 조건의 제어 방법의 경우를 Fig. 3에 도시하였다.

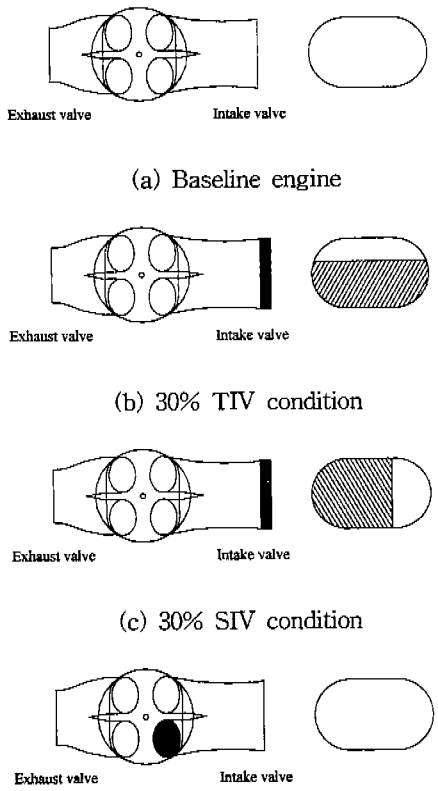


Fig. 3 Schematic diagram of intake flow conditions

Fig. 4는 정상 유동 실험을 통하여 Fig. 3에 나타낸 4가지 흡기 유동 조건의 변화에 따른 흡입 유량을 밸브 리프트에 대하여 도시한 것이다.

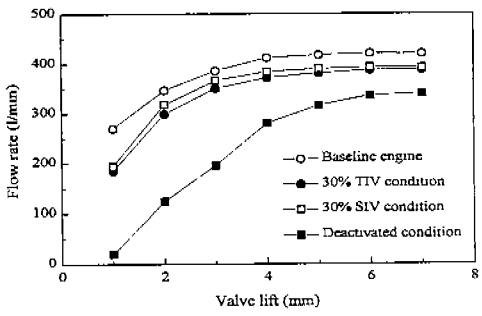


Fig. 4 Effect of intake flow conditions on the flow rate

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 흡입 유량 특성

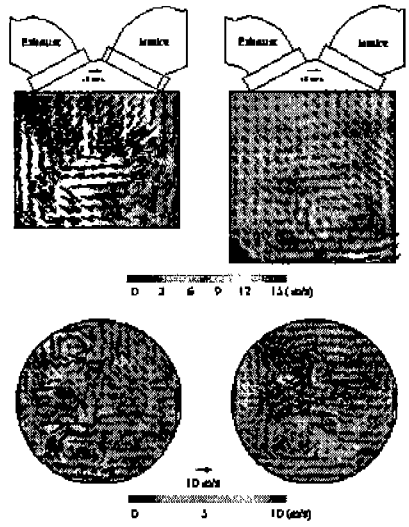
실험 결과 2밸브가 모두 개방되는 기본 엔진의 흡입 유량이 가장 크게 나타났으며, 스월 강화 밸브를 설치한 경우와 텀블 강화 밸브를 설치한 경우 순으로 나타났다. 2밸브중 1밸브만을 작동시킨 경우에는 밸브 리프트의 변화에 따른 흡입 유량의 변화 경향은 대체로 비슷하나 다른 조건의 경우에 비하여 다소 감소하는 결과를 나타내었다. 밸브 리프트가 증가함에 따라 유량은 증가하는 경향을 보였으나 1밸브 개구인 경우를 제외하면 리프트가 4mm이상인 경우에는 유량은 리프트가 증가하여도 큰 변화 없이 거의 일정한 값을 나타내었다.

3.2 실린더 내의 가스 유동 특성

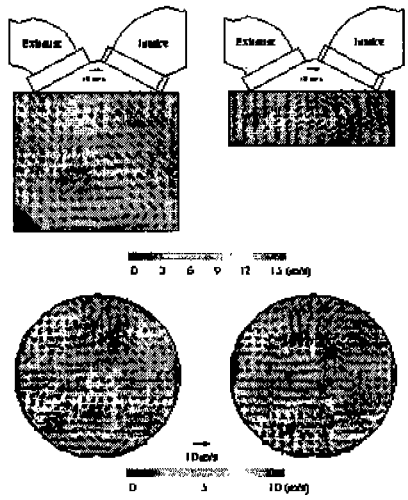
Fig. 5는 흡입 2밸브 작동 조건에서 입자 추적 유속계를 사용하여 계측한 실린더 내 순간 유동장의 텀블 유동과 스월 유동을 4가지 크랭크 축각 변위에 따라 도시한 것이다.

BDC 전 60° CA에 나타낸 바와 같이 실린더 내 가스 유동은 반시계 방향의 회전 유동이 주유동인 형태로 유입되고 있으며, 이러한 텀블 유동은 하사점에서 흡기 밸브 까지 회전하는 주텀블 유동으로 형성되는 것으로 나타났다. 또한 하사점 후 60° CA의 경우에는 피스톤의 상승 작용으로 주 텀블 유동의 반경은 감소하고 있으나 회전 유동은 유지되며, 하사점 후 120° 인 압축 말기까지도 어느 정도 회전 유동이 존재하고 있는 것으로 나타났다.

한편 기본 엔진과 동일 조건에서 텀블 유동 강화 수단으로 텀블 강화 밸브(TIV)를 장착한 후, 실험을 수행하여 얻은 유동장 형상을 Fig. 6에 도시하였다. 장착에 따른 운동 에너지 증가는 하사점까지 비교적 큰 모멘텀을 가지고 흡기 과정이 이루어지도록 작용하고 있는 것으로 나타났다. 또한 하사점 후 120° CA에서는 피스톤의 상승으로 인한 압축 압력이 작용하고 있으나 압축되는 가스는 상당한 운동 에너지를 가지고 주유동의 운동 방향을 유지하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 Fig. 5의 경우에 비하여 텀블에 의한 유동이 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

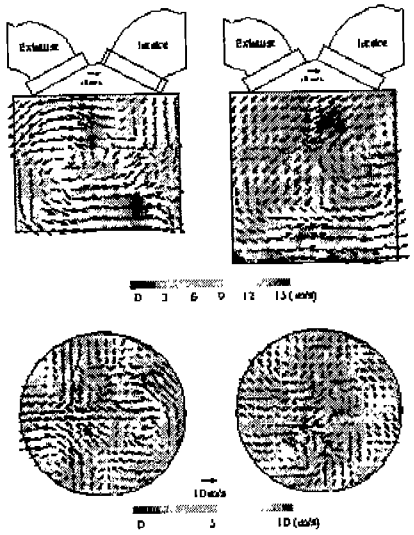


(a) BBDC 60° CA (b) BDC

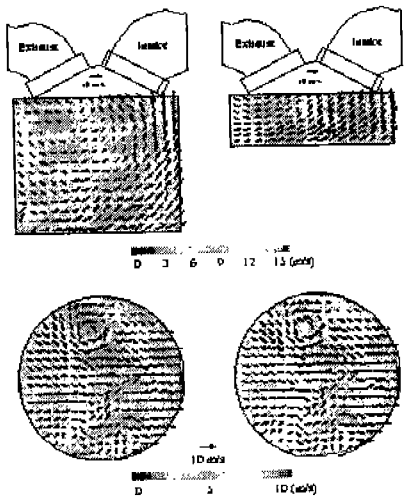


(c) ABDC 60° CA (d) ABDC 120° CA

Fig. 5 Flow pattern in cylinder of baseline engine



(a) BBDC 60° CA (b) BDC

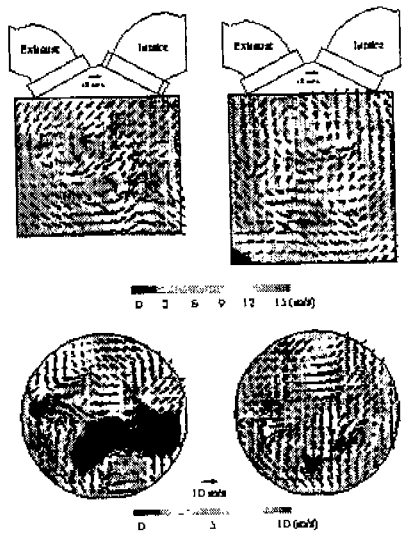


(c) ABDC 60° CA (d) ABDC 120° CA

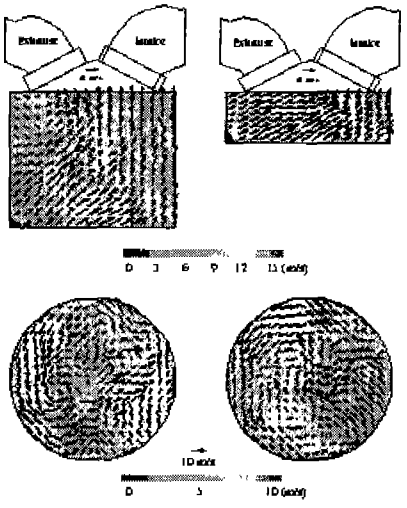
Fig. 6 Flow field in cylinder under TIV condition

Fig. 7에는 흡입 스월의 세기를 증가시키기 위하여 스월 강화 밸브(SIV)를 장착한 경우의 유동 변화를 도시한 것이다. 전체적인 유동의 변화 과정을 살펴보면 하사점까지는 어느 정도 주유동의 형성을 유지하고 있지만 압축 과정이 진행되면서 Fig. 7(c)에서 보는 바와 같이 유동 방향이 피스톤의 방향과 거의 일치하는 것으로 보아 주유동 흐름이 소멸되고 있음을 알 수 있다. 하사점 후 120CA지점에서는 압축 작용에 의하여 방향이 바뀌고 있는 것으로 볼 수 있다. 반경 방향의 유동장을 살펴보면 기본 엔진보다 회전 유동에 의한 효과가 더욱 증진되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에는 기본 엔진에서 흡기 밸브 한 개만을 작동한 경우의 유동 형상을 나타낸 것이다. 유동 형태가 실린더 축과 직각인 가로 방향으로 많이 형성되어 있는 것으로 보아 SIV를 장착한 경우보다 가로 방향의 유동 형성에 효과적으로 나타났으며, SIV를 장착한 경우와 같이 압축 행정에서는 주유동의 방향은 피스톤의 운동 방향쪽으로 상승하는 경향을 나타내었다. 또한 반경 방향 단면의 유동 특성은 앞의 3가지 경우보다 현저하게 스월 유동이 강화된 구조를 갖는 것으로 나타났다.



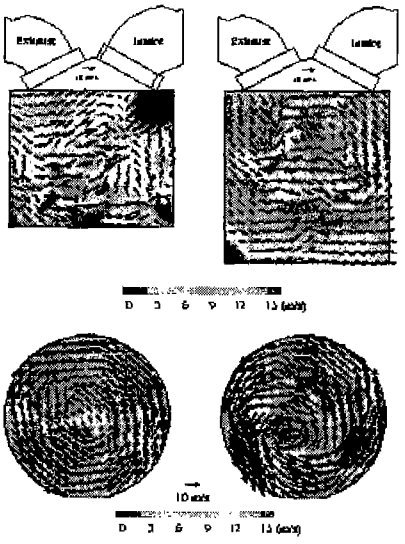
(a) BBDC 60° CA (b) BDC



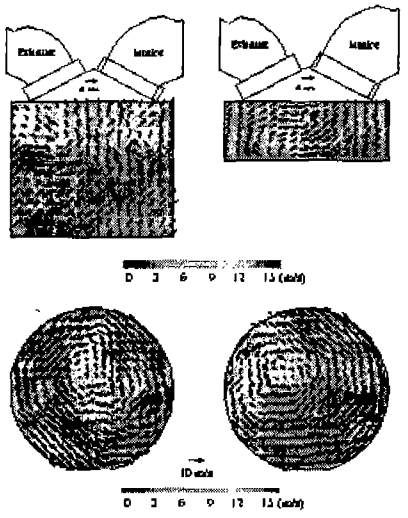
(c) ABDC 60° CA (d) ABDC 120° CA

Fig. 7 Flow field in cylinder under SIV condition

이와 같은 흡기 조건의 변화에 따른 실린더 내의 유동측정 결과로부터 텀블비를 구하여 비교한 것이 Table 2이다. 텀블비는 4가지 조건 모두 하사점에서 가장 큰 것으로 나타났으며 압축이 진행되면서 감소하였다.



(a) BBDC 60° CA (b) BDC



(c) ABDC 60° CA (d) ABDC 120° CA

Fig. 8 Flow field in cylinder under 1 valve deactivated condition

또한 텀블 강화 밸브를 장착한 경우의 텀블비는 기본 엔진보다 평균 35% 가량 증가되어 TIV는 실린더 내의 텀블 유동 강화에 효과적인 것으로 확인되었다. SIV를 장착한 경우와 흡입 1밸브 작동 조건의 경우에는 기본 엔진보다 텀블비가 낮은 것으로 나타나 상대적으로 스월 유동이 강화된 것으로 판단되며, 따라서 펜트루프 형상을 가진 4밸브 가솔린 엔진은 특별한 텀블 강화 수단이 없어도 어느 정도의 텀블비를 가지는 유동을 형성시킨다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 하사점 후 120° CA(실린더의 가로와 세로의 형상비가 약 0.32)에서는 텀블비가 최대로 나타나는 하사점에 비하여 약 22%로 감소되어 주 텀블 유동의 소멸되는 과정에 있음을 알 수 있었다. 텀블비는 TIV를 장착한 경우 가장 높게 나타나 압축 말기까지 상대적으로 큰 모멘텀을 가지는 텀블 회전 유동이 유지되고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of tumble ratio

Case	Crank angle (ATDC, deg)			
	120	180	240	300
Baseline	2.37	2.99	2.26	0.83
30% TIV	3.24	3.77	2.80	1.29
30% SIV	2.10	3.30	1.71	0.77
Deactivated	1.42	3.53	1.00	0.13

4. 결 론

자동차용 가솔린 엔진의 흡기 유동 조건이 실린더내의 가스 유동 특성에 미치는 영향을 실험한 본 연구의 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 실린더 내로 흡입되는 가스 유량은 밸브 리프트의 증가에 따라 증가하며 밸브 리프트가 4mm 이상에서는 흡기 유량이 거의 일정한 경향을 나타내었다.

(2) 텀블 강화 밸브(TIV)를 장착한 경우의 텀블비는 기본 엔진보다 실린더 내의 텀블 유동 강화에 효과적인 것으로 확인되었다.

(3) 흡입 1밸브 작동 조건과 스월 강화 밸브(SIV)를 장착한 조건의 경우는 기본 엔진보다 텀블비가 낮은 것으로 나타나 상대적으로 스월 유동이 강화된 것으로 판단된다. 반경 방향 단면의 경우 유동은 1밸브작동의 경우가 다른 어느 경우보다 강력한 스월이 형성되는 것이 확인되었다.

(4) 하사점에서 텀블비는 최대로 되며 하사점후 120° 크랭크각에서는 하사점의 경우보다 약 22%가량 감소 되었다.

참 고 문 헌

1. H. J. Neuber, L. Spiegel, and J. Ganser, " Particle Tracking Velocimetry - A Powerful Tool to Shape the In-Cylinder Flow of Modern Multi-Valve Engine Concepts ", SAE SP-1090, Engine Combustion & Flow Diagnostics, SAE Paper 950102, pp.17~31, 1995.
2. J. H. Lee, and P. V. Farrell, " Intake Valve Measurements of an IC Engine Using Particle Image Velocimetry ", SAE Paper 930480, 1993.
3. 이창식, 이기형, 전문수, 임경수, " 단일 프레임 입자 추적법을 이용한 흡입 2밸브 가솔린 기관의 실린더 내 정상 유동 해석 ", 대한기계학회논문집(B), 제21권, 제5호, pp.650~658, 1997.
4. C. Arcoumanis, Z. Hu, C. Vafidis, and J. H. Whitelaw, " Tumbling Motion:A Mechanism For Turbulence Enhancement In Spark-Ignition Engines ", SAE Paper 90006, 1990.
5. B. Khalighi and M. S. Huebler, " A Transient Water Analogue of a Dual Intake-Valve Engine for Intake Flow Visualization and Full-Field Velocity Measurements ", SAE Paper 950201, 1995.
6. A. W. Newman, N. S. Girgis, S. F. Benjamin, and P. Baker, " Barrel Swirl Behavior in a Four-Valve Engine with Pentroof Chamber ", SAE Paper 950730, 1995.
7. M. Tabata, M. Kataoka, M. Fujimoto, and Y. Noh, " In-Cylinder Fuel Distribution, Flow Field, and Combustion Characteristics of a Mixture Injected SI Engine ", SAE SP-1090, Engine Combustion & Flow Diagnostics, SAE Paper 950104, pp.33~49, 1995.