

이륜차용 SI엔진의 운전 조건에 따른 맥동 특성

이 기 형¹⁾ · 남 호 성²⁾ · 김 용 래³⁾ · 배 재 일⁴⁾

한양대학교 기계공학과¹⁾ · 현대자동차²⁾ · 한양대학교 대학원³⁾ · 케피코⁴⁾

The Characteristics of Pressure Pulsation according to Operating Condition of a S.I. Engine for Motorcycle

Kihyung Lee¹⁾ · Hosung Nam²⁾ · Yonglae Kim³⁾ · Jaeil Bae⁴⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

²⁾Hyundai Motor Company, 772-1 Jangduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

⁴⁾Kefico Corporation, 410 Dangjung-dong, Kunpo-si, Gyeonggi 435-716, Korea

(Received 28 July 2004 / Accepted 22 March 2004)

Abstract : Recently, the international regulations about the exhaust emissions of the motorcycle have been strengthened. The electrically controlled fuel injection type motorcycle has been emphasized to meet with this regulation. However, since the pulsation phenomenon happens in the intake port of the motorcycle because of the characteristic of high speed and the smaller layout than the passenger car, there are many difficulties to select the factor about control parameters needed to develop the ECU system. In this paper, the pulsation values measured from the engine test were compared with the calculated one by WAVE, and it was analyzed the pulsation characteristic according to the driving condition and estimated the mass flow rate. This research showed that the lowest point of the pressure gets low in the low load and

the pulsation of pressure were increased in the high load. Also, the simulation program was verified by showing good prediction of the pulsation and air mass flow rate.

Key words : Motorcycle(오토바이), ECU(Electronic Control Unit), Pulsation(맥동), Air cleaner(공기청정기), Mass flow rate(질량 유동율), Bend loss(곡률 손실)

1. 서 론

최근 사용이 편리한 이동 및 운송 도구로서 보급이 증가되고 있는 이륜차에 대한 배기ガス 규제가 한층 강화되고 있다. 이륜차용 엔진과 같은 고속 단기통 엔진은 구조가 간단하고 부품수가 작으며, 가격이 싸고 가벼운 특징을 가진 2행정 엔진이 주로 사용되어 왔으나, 향후 강화될 배기ガ스 규제 대비

와 연료소비율 향상을 위하여 일본에서는 이륜차용 4행정 엔진 개발에 박차를 가하고 있다.¹⁾ 국내에서도 최근에는 이륜차의 기존 기화기방식 엔진 대비 5% 이상의 연비 향상과 Euro2 배기규제를 만족할 수 있는 전자제어 엔진 시스템에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 이륜차용 단기통 엔진은 높은 회전수의 운전영역과 승용차보다 작은 레이아웃의 특성으로 대용량의 플레넘 챔버(Plenum chamber)를 장착할 수 없기 때문에 흡기관내에서 고주파수의 심한 맥동이 발생하게 된다. 따라서 전자제어를 수

*To whom correspondence should be addressed.
hylee@hanyang.ac.kr

행하기 위한 기초 자료인 흡입 공기량 판단과 또 이를 수행하기 위한 인자선정에 많은 어려움이 따르게 된다. 이에 본 연구에서는 흡입 공기량 판단의 제어 인자 및 제어 로직 선정의 기초 자료를 획득하고자 실제 이륜차용 단기통 엔진의 흡기관에 절대압력 센서를 장착하여 부하조건 및 회전수에 따른 흡기관내의 압력 변화를 측정하였다.

또한 실험과 병행하여 상용 1차원 엔진해석 프로그램(WAVE, Ricardo)을 사용하여 실험 엔진을 모델링 하였으며 흡기관내 맥동을 계산하고 그 결과를 실험값과 비교하여 신뢰도를 확보함과 동시에 운전 조건에 따른 흡입 유량 산출 알고리즘을 개발하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 이륜차용 고속 단기통 엔진 시스템

본 연구에 사용한 엔진 제원 및 실험 장치의 개략도를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 사용한 엔진은 4밸브-SOHC(Daelim, VL125) - 4stroke이며, 흡기관내의 압력을 절대압 센서(Kistler, 4045A5)를 별도로 제작한 스로틀 보디에 장착하여 부하조건 및 회전수에 따라 측정하였다. 압력 센서의 부착위치는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 스로틀 보디와 인젝터의 어댑터 사이에 엔진으로부터 65mm 위치이며 흡입시 공기 저항을 최소화하기 위하여 압력센서가 스로틀 보디의 벽면에 일치하도록 가공하였다. 또한 압력 데이터는 A/D 보드(NI, 6602)와 전용 언어(NI,

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	Single cyl., SOHC 4-valve, oil/air cool. 4 stroke
Bore × Stroke	56.5 mm × 49.5 mm
Displacement volume	125cc
Compression ratio	11.5:1

LabView)를 사용하여 PC에 저장하였으며, 크랭크축에 연결된 엔코더의 A상을 이용하여 회전수에 상관없이 크랭크 각 신호와 동기시켜 압력데이터를 취득하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

실험 조건은 Table 2와 같이 Throttle 개도를 각 부하별로 수동으로 조절하여 고정시켜 놓고 그에 따른 각 엔진 회전수를 6000 rpm에서 10000 rpm까지 1000 rpm 단위로 변화시키면서 100사이클 정도의 흡기관 압력을 측정하였다.

Table 2 Engine test conditions

Injection timing	BTDC 8°
Ignition timing	TDC
Enginespeed (rpm)	6000,7000,8000,9000,10000
Load	1/4, 2/4, 3/4, Full

3. 모델링 방법 및 조건

3.1 엔진 모델링

Fig. 2는 계산을 위하여 간략화한 스로틀을 포함한 엔진 전체의 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같

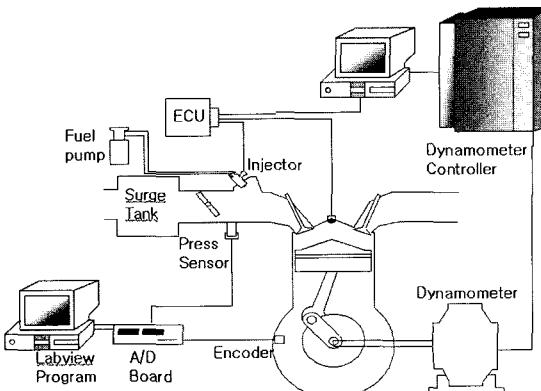


Fig. 1 Schematic diagram of high speed single cylinder engine system

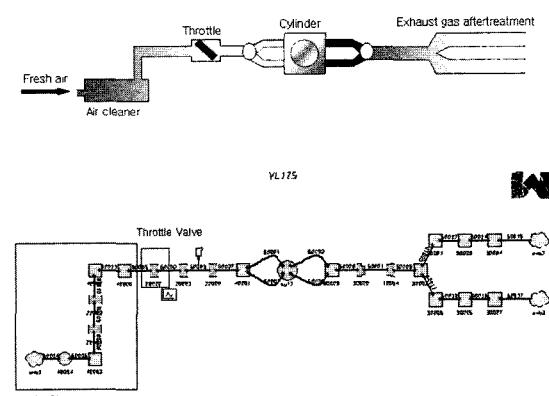


Fig. 2 Schematic and wave model of the test engine

이 전술한 시험 엔진(Daelim)을 기준으로 모델링하였다.²⁾

3.2 흡기계 모델링

흡기계를 나타낸 Fig. 3에서 보는 바와 같이 흡기관내 백동에 대해 크게 영향을 미치는 공기청정기의 모델링은 필터에 의해 구분되어지는 2개의 체적 영역과 공기 흡입측 두개의 영역으로 나누고 모든 영역은 실제 공기청정기의 각 부와 동일한 체적을 가지는 원통형으로 가정하여 모델링하였다. 흡기 조건은 초기 압력 1.0 bar, 초기 온도 300 K로 설정하였고 공기청정기를 포함한 흡기관의 벽면 마찰 계수는 밸브 유량 계수(C_p) 설정시 포함시켰으므로 그 값을 고려하지 않았으며 열전달(h_g)값은 단열조건으로 하였다. 필터는 공기가 통과하는 Cell이 포함된 전체단면적 중 가로 x 세로 10mm 내에 들어 있는 Cell의 개수와 면적을 계산한 뒤 전체면적으로 환산하여 Filter duct를 모델링하였다.

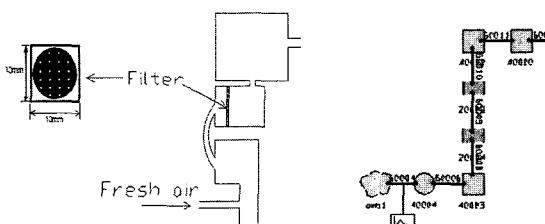


Fig. 3 Wave model of the filter and air cleaner

시뮬레이션에 사용한 모델에서는 연소 모델은 적용하지 않았다. 그러므로 스로틀 개도의 조절은 배기쪽 센서와 스로틀 액츄에이터의 모델링으로 조절되는 PID control을 포함시키지 않았으며, 원하는 값으로 Duct를 연결하는 Junction의 직경을 24mm로 설계한 후 공기가 통과하는 최대 단면적 조건에서 전부하조건(WOT)으로 가정하였다.

그리고 Junction의 단면적은 각 회전수에 해당하는 스로틀 밸브 개도에서의 단면적에서 직경을 구하여 Constants table에 있는 스로틀 Parameter 값에 설정하였다.

또한 Fig. 4에서와 같이 엔진 연소실 전의 큰 곡률을 가지는 흡기관에서의 곡률에 의한 압력 및 유량

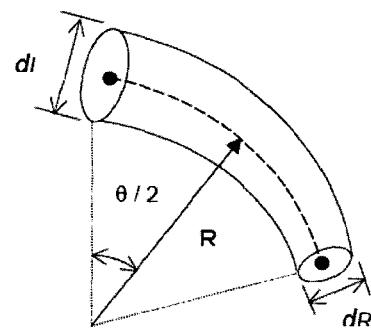


Fig. 4 Design parameters of the intake port

손실비를 설정함에 있어 압력 손실계수(C_p)를 계산하는 관계식을 이용하여 구하였다.³⁾

$$\begin{aligned} C_p &= d p / \left(\frac{1}{2} \right) p v^2 \\ &= C_{p_A} * C_{p_B} \end{aligned} \quad (1)$$

where,

$$C_{p_A} = 0.21 \left(\frac{R}{D} \right)^{-2.5} \frac{R}{D} \leq 1 \quad (2)$$

$$= 0.21 \left(\frac{R}{D} \right)^{-0.25} \frac{R}{D} > 1 \quad (3)$$

where,

$$D = \frac{(dl + dr)}{2}$$

$$\begin{aligned} C_{p_B} &= C_{p_B} 0.9 \sin \theta \\ &= C_{p_B} \left(\frac{100 - \theta}{30} \right) + C_{p_B} \left(\frac{\theta - 70}{30} \right) \\ &= C_{p_B} = 0.7 + 0.35\theta/90 \end{aligned} \quad (4)$$

3.3 밸브계 모델링

실험에서 사용된 엔진 밸브의 작동조건은 Table 3에서 보는 바와 같으며 밸브는 General valve type으로 설정하여 엔진 Poppet valve의 Discharge coefficients 이론 계산식으로 L/D 별 (L: lift, D: valve dia.) coefficient를 설정해 주었다.⁴⁾ 이론 질량 유량 (m_{th})은 다음과 같이 주어진다.

Table 3 Specification of valve

	Int. V/V	Exh. V/V
OPEN	7° BTDC	16° BBDC
CLOSE	24° ABDC	4° BTDC
V/V clearance	0.12 ± 0.02mm	0.21 ± 0.02mm

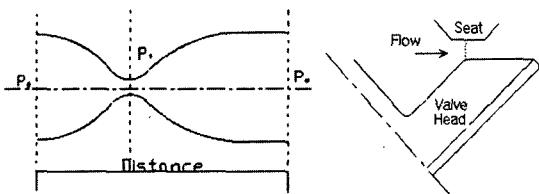


Fig. 5 Schematic of the venturi tube and the slightly opened poppet valve

$$m_{th} = \frac{P_0 A_t}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\frac{P_t}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P_t}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (5)$$

실제 질량유량 (m)은 $C_d m_{th}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, m 은 정상류 실험을 통하여 밸브 리프트별로 그 값을 구하였다.⁵⁾

$$C_d = \frac{m}{m_{th}} = \frac{A_e}{A_t} \quad (6)$$

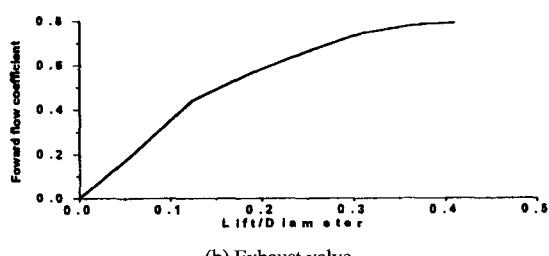
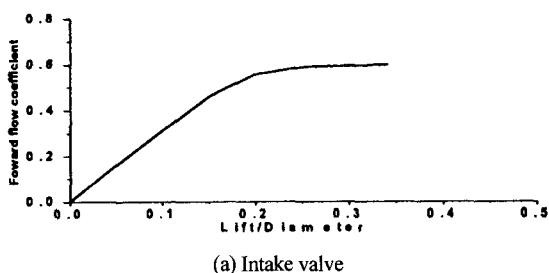


Fig. 6 Graph of the valve discharge coefficients according to lift

Fig. 6은 각 밸브 리프트별 C_d 를 계산한 것을 그래프로 나타낸 것이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 운전조건별 압력 및 맥동 측정 결과

Fig. 7에 3000, 6000, 7000, 10000 rpm 시 각각의 부하 조건에 따른 흡기관내 압력을 나타내었다. 네가지 엔진 회전영역 모두 저부하로 갈수록 흡기 행정시 압력 최저점이 낮아지고, 고부하로 갈수록 맥동이 증가하는 경향을 보였다. 특히 이러한 경향은 회전수가 증가할수록 뚜렷해져서 10000 rpm 조건에서 최대부하의 경우에는 진폭이 최대 0.4bar 이상이 되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8에 나타난 결과는 WOT 개도에서 회전수 변화에 따른 압력의 변화를 비교한 것이다. Fig. 7 결과로부터 예상되었던 것처럼 최저압력이 3000rpm의 경우 0.95bar에서 엔진 회전수가 증가할수록 낮아져서 10000rpm의 경우 최저 0.83bar 까지 감소되는 경향을 보였다. 또한 회전수가 증가할수록 맥동의 진폭은 증가하는 반면, 주파수는 낮아지는 경향을 보였다. 이러한 현상은 회전수가 증가할수록 흡입공기의 유속이 증가하여 동일한 스로틀 개도시 압력 저하가 크게 발생하고 또한 흡입유량이 증가하여 관성이 증가했기 때문으로 사료된다.

4.2 엔진 시뮬레이션을 이용한 계산 결과와 실험결과의 비교

Fig. 9는 WOT 상태에서 10000 rpm 까지 회전수별로 흡기관내 압력변화를 시뮬레이션을 이용하여 계산한 결과와 실험결과의 비교를 나타낸다. 6000rpm과 7000rpm 영역에서 맥동시 약간의 진폭의 차이가 있지만 최저 압력값과 흡기관에서 발생하는 맥동의 주파수와 진폭의 경향이 실험치와 계산치가 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 또한 각 회전수별로 흡기포트가 열리기 시작하는 시점(CA 713°)에서의 흡기관내 압력값이 서로 다른 것을 알 수 있었는데 흡기관내 압력이 흡기행정시에 충전효율에 미치는 영향이 클것으로 예상되므로 본 연구에서 사용된 일차원 엔진 성능 시뮬레이션을 이용하여 대상 회전수별로 최적의 충전 효율을 얻을 수 있도록 흡기관

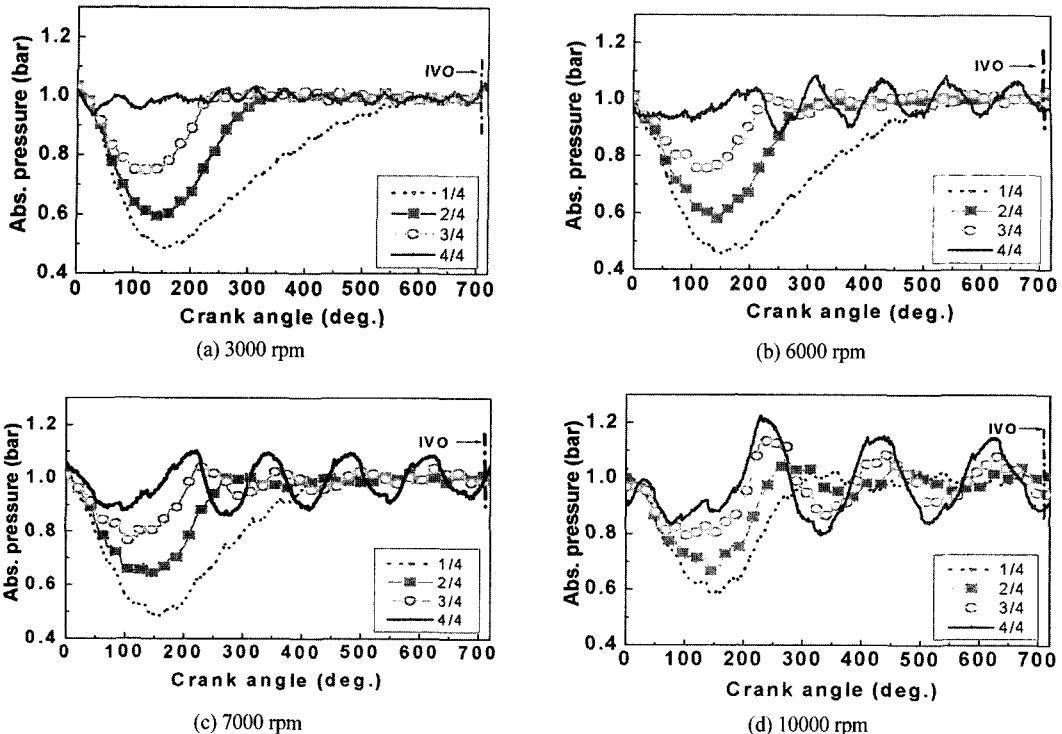


Fig. 7 Comparison of intake pressure according to engine condition

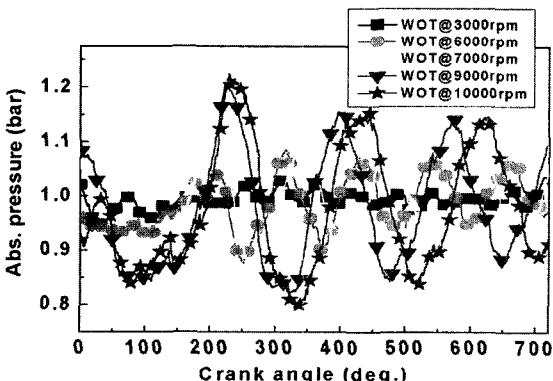


Fig. 8 Comparison of intake pressure with engine speed at WOT condition

의 길이 및 직경 최적화 설계에 유동하게 이용할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3 엔진 시뮬레이션을 이용한 흡입유량 예측

Fig. 9의 결과로부터 본 연구에서 사용된 일차원 엔진 성능 해석 프로그램이 신뢰성을 확보하였다고 판단하여 실제 엔진에서 흡입유량을 측정하기 이전

에 크랭크 각도별 질량 유동율을 예측하여 Fig. 10에 나타내었다. 그라프에서 나타내었듯이 최대 질량 유동율은 7000rpm의 경우 약 60g/s에서 엔진 회전수가 증가할수록 서서히 증가하여 10000rpm의 경우 최대 약 70g/s까지 증가하였다. 또한 질량 유동율 피크점은 최저 압력 피크점보다 크랭크 각도 기준으로 조금씩 뒤로 밀려서 나타나는 경향을 보였고 그 변동 역시 압력의 맥동과 같은 형태로 감소하는 경향을 나타내었다.⁶⁾ 한편, 흡기 밸브가 열리는 구간 동안 질량 유동율의 형태는 회전수 별로 조금씩 차이가 나지만 대체적으로 IVO부터 CA 20~50°까지는 오히려 감소하다가 그 이후로 증가하기 시작하여 CA100~150°에서 최고치를 나타내었다. 특히 IVO에서 흡기관의 압력이 대기압보다 높았던 7000, 9000 rpm의 경우 흡기 행정초기에 질량 유동율이 음의 값을 나타내었고, IVO에서는 흡기관의 압력이 대기압보다 저압이지만 어느 정도 밸브가 열렸다고 예상되는 시기인 CA 30~50°에서 대기압보다 흡기관내 압력이 높았던 10000 rpm 조건에서는 질량 유동율이 양의 값을 나타내었다.

이륜차용 SI엔진의 운전 조건에 따른 백동 특성

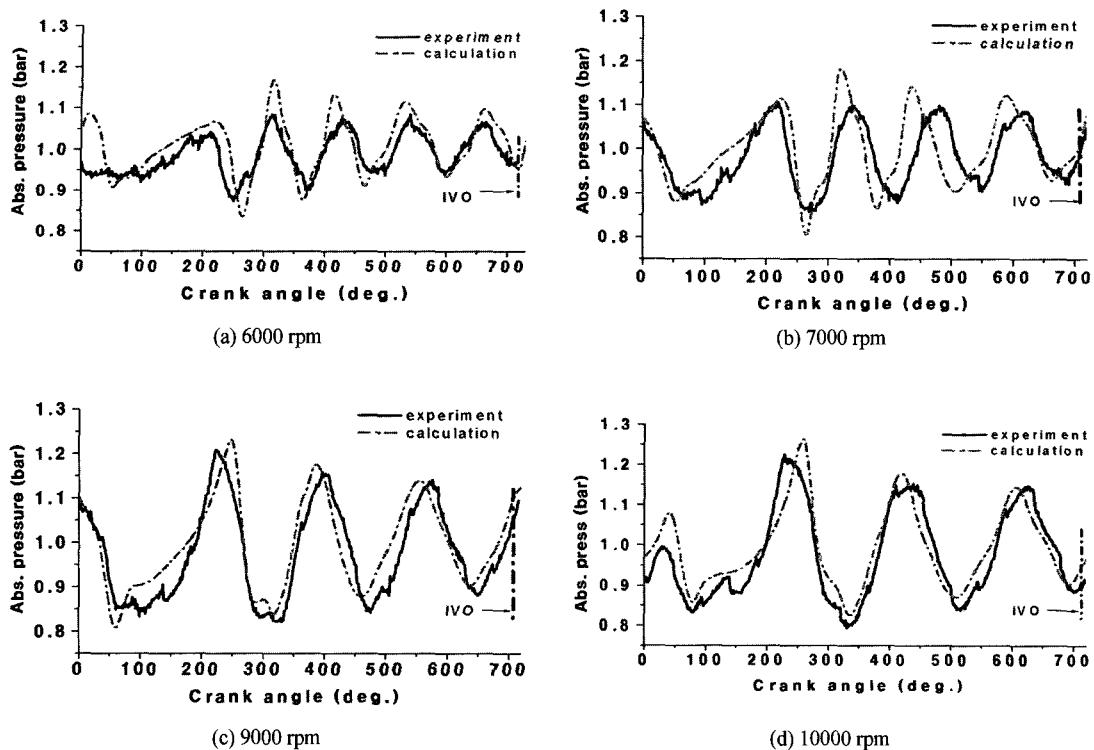


Fig. 9 Comparison of experimental results with simulation results 8

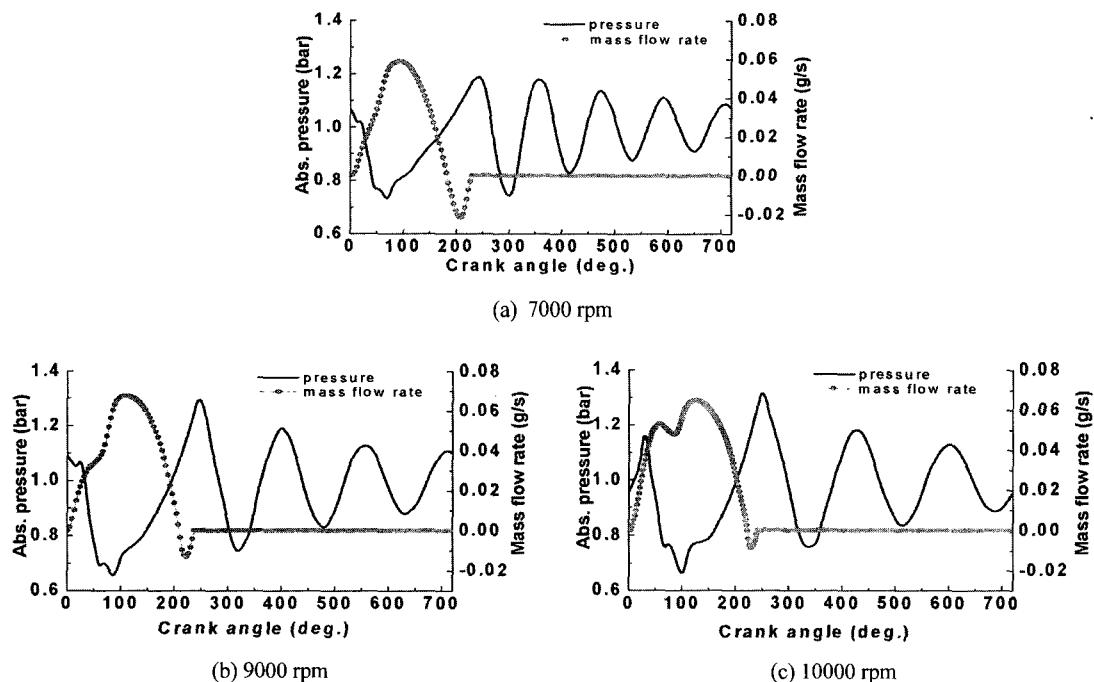


Fig. 10 Mass flow rate according to engine condition

5. 결 론

고속 단기통 SI 엔진에 있어서 흡기관내 압력과 맥동을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 저부하로 갈수록 흡기 행정시 압력 최저점이 낮아졌으나 고부하로 갈수록 압력의 맥동이 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 시뮬레이션을 이용하여 계산 및 실험값과 비교하여 본 결과 각 회전속도영역에서 흡기행정 과정 중 최저 압력값 및 압력파의 맥동 크기와 위상 모두 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.
- 3) 시뮬레이션을 이용하여 흡입 유량을 예측한 결과 충전효율을 극대화하기 위하여 압력의 맥동파형이 IVO시기가 아닌 흡기 밸브가 어느 정도 열린 시기에 정압이 걸리도록 하는 것이 유리할 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 ‘청정생산기술개발보급 사업’의 지원으로 수행되었으며, 관계기관에 감사드립니다.

References

- 1) M. Kato, “Present Situations and Future Prospects for Motorcycles,” Review of Automotive Engineering, Vol.57, No.1, JASE 20034035, 2003.
- 2) J. J. Silvestri, T. Morel, M. Costello, “Study of Intake System Wave Dynamics and Acoustics by Simulation and Experiment,” SAE940206, 1994.
- 3) I. E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd ed., Boca Raton, FL : CRC Press, c1994.
- 4) R. N. Noyes, “Analytical Prediction of Discharge Coefficients for Engine Poppet Valve,” General Motors Research Publication, July 21, 1980.
- 5) K. H. Lee, “Development of Evaluation Method for Intake Flow Characteristics in a Gasoline Engine,” Journal of the Research Institute of Industrial Sciences, Vol.40, pp.241-251, 1995.
- 6) K. S. Park, S. G. Go, S. T. Ro, J. W. Lee, “Characteristics of the Air Flow Variation by Throttle Step Change in a Gasoline Engine,” Transactions of the KSAE, Vol.4, No.3, pp.92-101, KSAE 96370053, 1996.