

〈논 문〉 SAE NO. 96370053

스로틀 개폐에 따른 가솔린 엔진의 비정상상태 유량변화 특성

Characteristics of the Air Flow Variation by Throttle Step Change in a Gasoline Engine

박 경 석,* 고 상 근,** 노 승 탁,** 이 종 화***
K. S. Park, S. G. Go, S. T. Ro, J. W. Lee

ABSTRACT

In a gasoline engine, the characteristics of air flow is very important not only for the design of the intake system geometry but also for the accurate measurement of the induction air mass. In this study, an air flow rate measurement was conducted by using the hot wire flow meter at the upstream of the intake port and the throttle. At the upstream of the throttle, the overshoot phenomena of the air flow rate by fast throttle opening were analyzed with choked flow. At the upstream of the intake port, the cylinder variation of the air flow rate and the difference between fast throttle opening and closing were showed during the unsteady state by the throttle step change. The results of this study can be used for the design of the throttle valve geometry and cylinder by cylinder control.

주요기술용어 : Unsteady State(비정상상태), Air Flow Rate(흡기유량), Cylinder Variation(실린더별 차이), Hot Wire Flow Meter(열선유량계), Choked Flow(초크유동), Throttle(스로틀)

1. 서 론

자동차의 유해배출물은 대기 오염의 주요 원인 중의 하나로서 규제가 더욱 강화되고 있는 실정이다. 가솔린엔진에서는 이러한 유해 배출물 저

감을 위해 시스템 개선이 많이 이루어져 왔는데, 현 단계에서는 각 실린더마다 연료인젝터를 사용하여 제어하는 MPI(Multi Point Injection)방식을 대부분 채택하고 있다. MPI방식의 연료량제어에 있어서 가장 중요한 센서는 바로 공기유량계와 산소센서이다. 엔진이 정상상태에 있을 때에는 흡입공기량의 실린더별 차이가 그리 크지 않을 것이라 예상할 수 있고, 실린더별제어는 아니더라도 산소센서 피드백 제어에 의해 전체적

* 정회원, 서울대 대학원
** 정회원, 서울대 기계공학과
*** 정회원, 아주대 기계공학과

인 공연비를 비교적 정확하게 제어할 수 있다. 그러나 엔진이 비정상상태에 있는 경우에는, 엔진의 시간지연 특성과 산소센서의 비정량적 특성으로 인해 피드백제어가 거의 불가능하므로, 유량계에 의해서만 연료량 제어가 이루어져야 한다. 그런데 현 MPI방식에서 사용되는 공기유량계는 각 실린더마다 부착되어 있지 않고 스로틀 밸브 상류의 한 곳에만 부착되어 있기 때문에, 엔진이 비정상상태일 때, 현재의 흡기량 측정위치에서 각각의 실린더로 유입되는 공기량을 정확히 산정하기에는 다소 어려운 점이 있다.

이러한 문제를 개선하기 위해 실린더마다 별도의 유량계를 부착할 수도 있겠지만, 그럴 경우, 센서의 크기와 내구성 등에 따른 유량계 자체의 문제가 있을 뿐만 아니라 흡기관 내의 유동형태가 복잡하기 때문에 전자제어장치가 유량을 실시간으로 측정하여 계산하기에는 힘든 문제에 부딪히게 된다. 따라서 현 MPI방식에서는, 가속이나 감속 등의 비정상상태시, 스로틀 상류에서 측정된 유량으로서 각 실린더로 유입되는 공기량을 추정하여 연료량을 제어하고 있으며, 이를 위해서는 실린더별 흡기량을 추정하기 위한 단순모델

을 바탕으로하여 각 조건별로 많은 실험을 통해 교정값을 구하는 작업을 수행하고 있다. 그러나 측정상의 어려움 등으로 인하여 이와 관련되는 흡기관 내에서의 유동에 관한 연구 결과는 많지 않은 실정이다. 최근의 연구를 보면, 진공펌프에 흡기매니폴드만을 사용하여 모사실험을 수행한 경우¹⁾도 있으나, 맥동, 역방향 유동 등을 포함한 실제의 복잡한 유동과는 차이가 있다.

따라서 본 연구에서는 엔진의 비정상상태시 스로틀 상류와 흡기포트 상류에 대해 직접 유량을 측정하고, 그 특성에 대해 살펴보았다. 엔진의 비정상상태는 외부부하의 변동에 의해서도 일어나지만 주된 요인은 바로 스로틀의 개폐에 의한 것이므로, 실험은 크게 스로틀 열림과 닫힘으로 나누어 각각의 개폐속도와 개폐정도를 바꾸어 가면서 수행하였다.

2. 실험장치

본 연구에서 사용하는 유량측정상의 가정은 일차원유동이다. 즉, 흡기관 내의 유속분포는 고려하지 않고, 흡기관 직경에 대해서 평균적인 유량

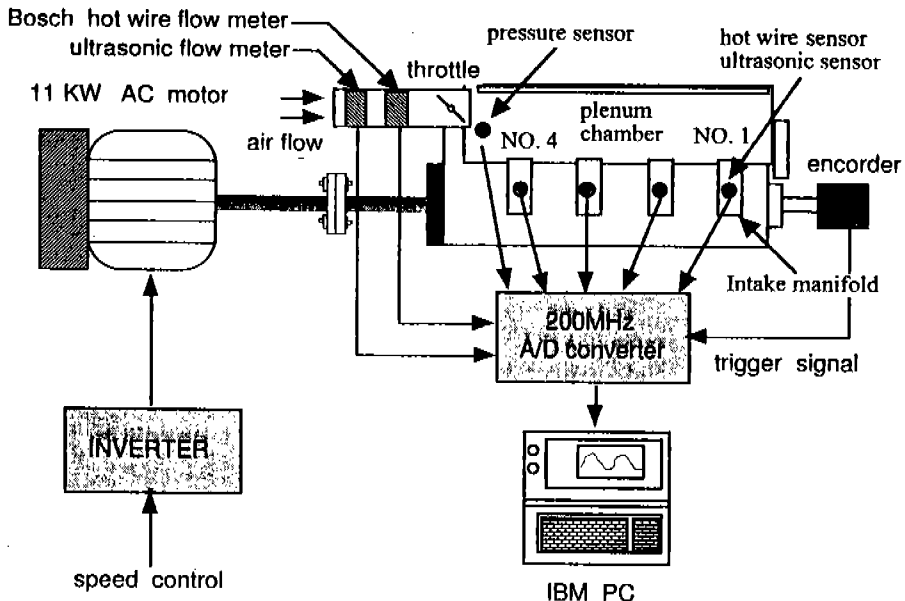


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

을 측정한다. 따라서 유속분포를 전체 관단면에 대해서 측정한 경우와는 오차가 있을 수 있으나, 유속분포의 변화가 크게 바뀌지는 않으므로 그 영향은 무시한다^{2),3)}. 유속분포를 고려할 경우에는 LDV와 같은 국소유동 측정장치를 사용해야 하는데, 본 연구의 목적상 비정상상태에서의 유량을 측정하기에는 적합하지 않다. 본 연구에서 사용한 엔진은 1500cc MPI엔진이고, 15마력 모터와 인버터를 사용하여 엔진을 일정한 속도로 모터링하였다. 스로틀 개폐의 위치 및 속도의 재현성과 정확성을 위하여 스로틀밸브 축에 스테핑모터를 부착하였으며, 스테핑모터의 고속회전을 위해 정전류구동방식으로 제어하였다.

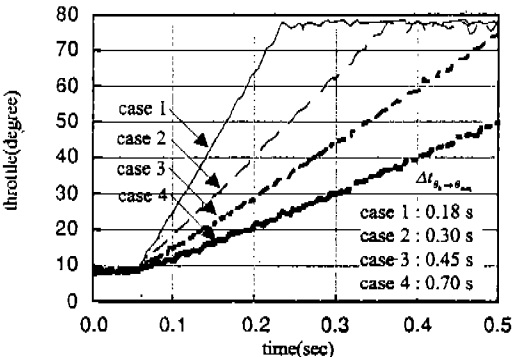
Fig.1은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 유량 측정 위치는 Fig.1에서 보이는 바와 같이 스로틀 상류와 흡기포트 상류의 두 곳이다. 본 연구에서는 정량적인 해석을 위해 열선유량계를 사용하였고, 역방향유동을 포함한 유동형태의 정성적 파악을 위해서 초음파유량계를 사용하였다^{4),5)}. 스로틀 상류 위치는 현재 대부분의 ECU가 엔진의 제어를 위해 유량을 측정하고 있는 장소이다. 스로틀 상류에서는 Bosch사의 자동차용 열선유량계⁶⁾를 사용하였으나, 흡기포트 상류에서는 일반적으로 사용되는 열선유량계가 없으므로 자체 제작하여 사용하였다. 초음파유량계도 역시 자체 제작하여 사용하였다. 흡기관내의 압력은 Kistler사의 piezo-resistive형 절대압

센서를 사용하였고, 실린더내의 압력은 상대압센서를 사용하였는데, 흡기관의 절대압센서로서 기준을 정하였다. 본 실험에서 사용한 유량계들은 충류유량계를 사용하여 보정실험을 하였다.

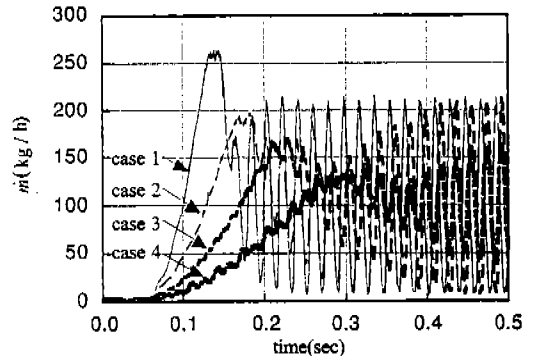
3. 스로틀 상류에서의 유량특성

스로틀 상류 위치에서 스로틀 개방속도에 따른 유량변화를 측정된 것이 Fig.2이다. 여기서 Fig. 2(a)는 스로틀의 개방속도를 다르게 한 네 경우를 나타낸 것이고, Fig.2(b)는 Fig.2(a)의 각 조건에 따른 열선유량계의 출력 변화를 보여준다. 개방의 최대 속도는 스로틀 최소열림에서 최대열림까지 약 0.18초인데, 이는 운전자가 발로써 악셀레이터를 최대한 빨리 밟았을 때와 거의 비슷한 정도이다.

유량 변화를 보면, 네 경우 모두 오우버슈트가 존재하는데, 개방 속도가 클 수록 오우버슈트가 커짐을 볼 수 있다. 오우버슈트 이후에는 스로틀의 개방속도에 관계없이 정상상태의 특징인 맥동 유동이 나타난다. 네 경우에 대해 스로틀각도와 유량의 관계는 Fig.3(a)로 나타나며, 플레넘 챔버의 압력은 Fig.3(b)로 나타난다. 이렇게 놓고 보면, 유량변화가 시간에 관계없이 스로틀각에만 의존하는 구간이 있음을 볼 수 있다. 즉 Fig.3에서 스로틀 각 약 25° 이전까지는 개방 속도에 관계없이 유량 변화가 모두 일치하는데, 이 부분을

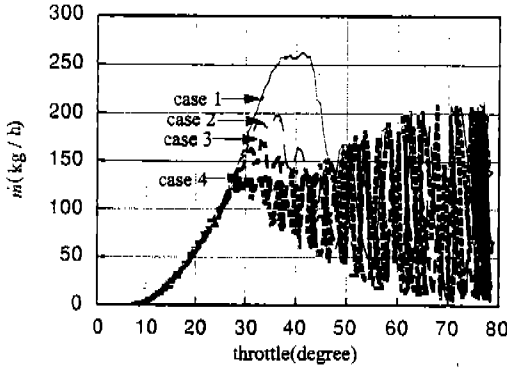


(a) variation of throttle

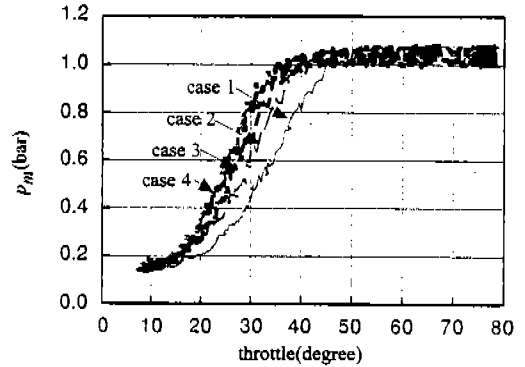


(b) variation of air flow rate

Fig.2 Variation of the air flow rate at throttle by fast throttle opening



(a) air flow rate



(b) manifold pressure

Fig.3 Air flow rate and manifold pressure with respect to the throttle angle (represented by converting the Fig.2 without the time axis)

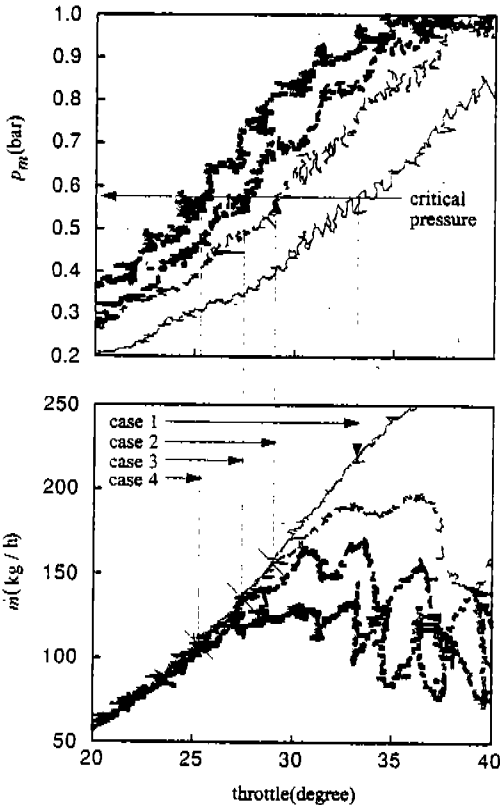


Fig.4 Choke characteristics of the air flow rate in Fig.3(zoom of the overlapping region)

자세히 나타내면 Fig.4와 같다. 유량라인이 일치하는 부분이 생기는 이유는 플레넘챔버의 압력변화를 보면 알 수가 있는데, 그것은 바로 유량라인이 겹치는 부분의 압력은 대략 0.56기압 이하라는 점이다. 스로틀 상류는 대기압이고, 플레넘챔버의 압력이 0.56기압 정도이면, 압력비로 볼 때, 초크가 발생하는 압력비(0.528)와 거의 같다. 따라서 초기에 플레넘챔버의 압력이 초크압력비보다 낮은 상태에서 스로틀밸브가 급격히 열리는 경우, 플레넘챔버의 압력이 초크비보다 높아질 때 까지는 초크에 의한 유동이 발생한다는 것을 알 수 있다. 열림 속도가 빠를수록 초크영역이 오랫동안 지속되는데, 이는 스로틀의 유효면적이 플레넘챔버의 압력상승률보다 더욱 빨리 증가되기 때문이다. 가장 빨리 개방한 경우를 제외 한 나머지 세 경우는 모두 초크 유량 라인 중간에서 이탈한다.

이 결과를 이용하면, 스로틀각에 따른 초크곡선을 실험적으로 쉽게 구할 수 있다. 또한 초크라인은 스로틀각도에 따른 사실상 최대 유량을 의미하므로, 스로틀 설계에 대한 실험적 평가를 할 수 있다. Fig.5는 스로틀 급개방으로 구한 초크라인과 정상상태 실험에서 스로틀각에 따른 유량과 비교한 것이다. 3000rpm의 정상상태에서는 초크가 약 24° 정도에 끝나므로, 그 이후의 스로틀각에서는 최대유량라인을 구할 수가 없으

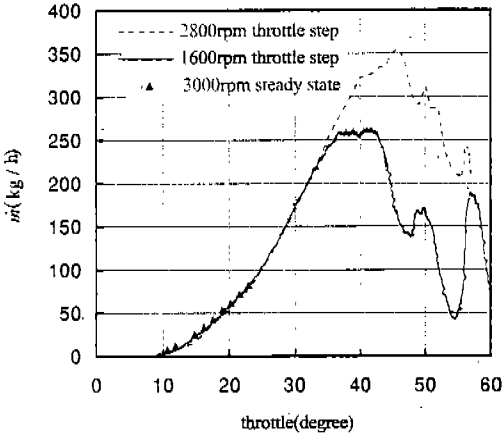
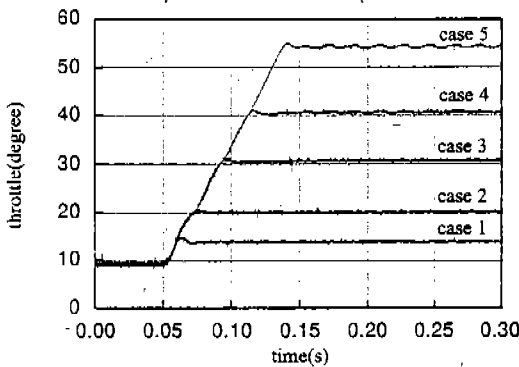


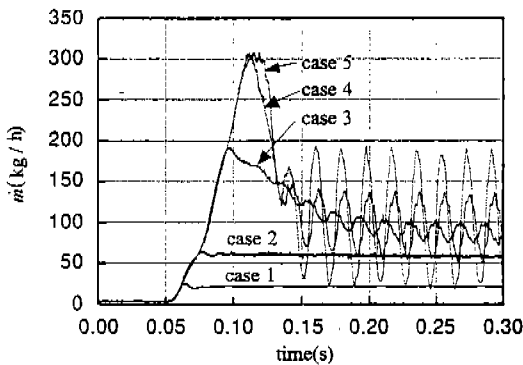
Fig.5 Choke lines obtained by steady and unsteady tests

나, 스로틀 각도 24° 이하의 영역에서는 급개방 방법으로 구한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 1600rpm에서 스로틀을 급격히 열면 초크가 약 30° 까지 유지가 됨을 볼 수 있으며, 2800rpm일 경우에는 거의 40° 까지 유지됨을 볼 수 있는데, 이는 플레넘챔버의 압력상승이 스로틀 개방에 비해 상대적으로 늦기 때문이다.

스로틀의 개방속도를 일정하게 하고 최대열림의 정도에 따른 유량 변화를 알아 본 것이 Fig.6이다. Fig.6(a)은 스로틀 열림조건을 나타내고, Fig.6(b)는 각 조건에서의 유량변화이다. 최종 스로틀각이 15°, 20° 인 경우에는 오버슈트가 전혀 보이지 않는데, 이는 최종 스로틀각이 모두 초크영역에 있기 때문이다. 따라서 항상 최대유

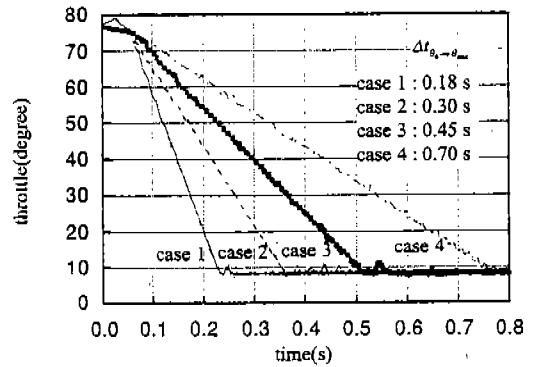


(a) variation of throttle

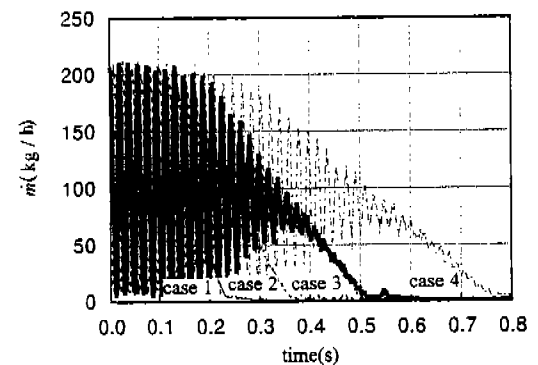


(b) variation of air flow rate

Fig.6 Variation of air flow rate with respect to throttle opening magnitude(the same opening speed)



(a) variation of throttle



(b) variation of air flow rate

Fig.7 Variation of air flow rate at throttle by fast throttle closing

량을 유지한다. 최종 스로틀각이 40°, 50°인 경우를 보면, 오우버슈트의 크기는 거의 같으나 정상상태시 맥동의 진폭이 다르므로 여기에 맞춰 천이한다. 이 경우 다른점은 맥동진폭의 크기 뿐임을 알 수 있다. 이에 반해 최종 스로틀각이 30°인 경우에는 중간크기의 오우버슈트와 작은 정상상태 맥동을 보인다.

가속과 마찬가지로 감속에 대해서 스로틀 폐쇄 속도를 달리하여 측정해 본 것이 Fig.7이다. 스로틀폐쇄시에는 개발과는 달리 오우버슈트나 언더슈트가 없는 유동형태를 보여준다. Fig.7의 결과로부터 시간축을 제외하고 스로틀각에 따른 유량을 다시 나타내면 Fig.8(a)가 되고, 이 때의 플레넘챔버 압력과 스로틀각의 관계는 Fig.8(b)

로 된다. 스로틀 개방시와는 달리 폐쇄시에는 폐쇄속도와는 거의 무관하게 모두 동일한 유량변화를 보여준다. 이 결과는 스로틀폐쇄시의 스로틀 유량은 거의 스로틀각에 의해서만 결정됨을 보여준다. 정상상태시와 비교해 보면, 유량은 거의 같은 형태로 줄어드는 반면, 압력은 정상상태보다 높게 유지됨을 볼 수 있다. 이 이유는 플레넘 챔버와 매니폴드내 체적이 실린더 흡기체적보다 비교적 크기 때문에 압력이 정상상태와 같아지기 위해서는 다소 시간이 필요함을 의미한다. 동일한 스로틀 폐쇄속도에서 폐쇄각도에 의한 영향을 살펴 보면 스로틀 개방시와 같은 특이한 현상은 보이지 않는다.

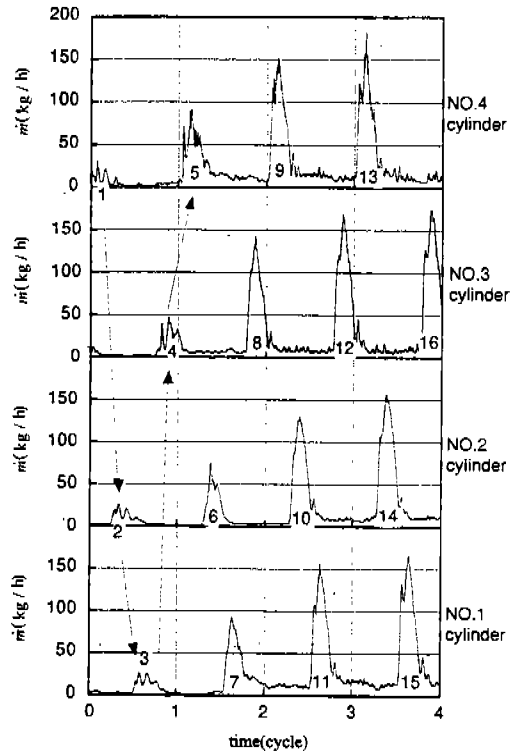
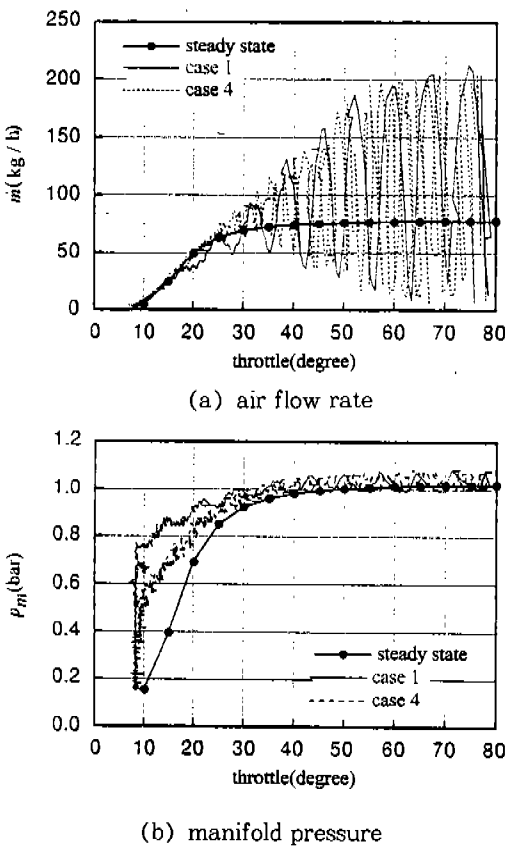
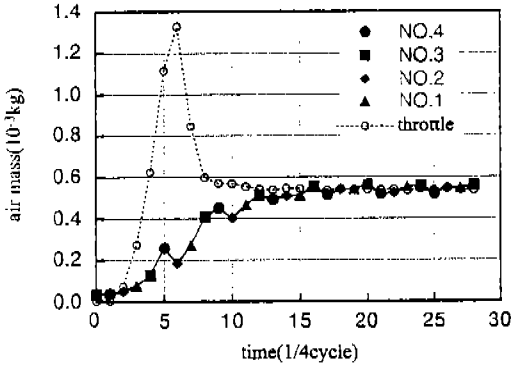
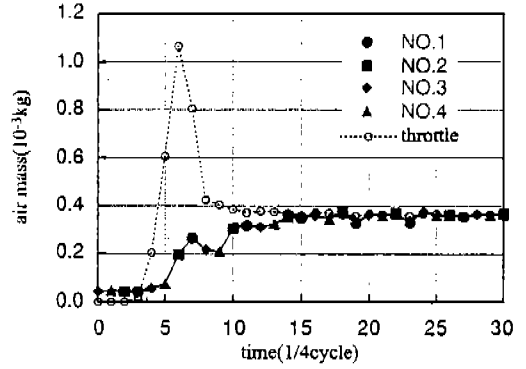


Fig.8 Air flow rate and manifold pressure with respect to the throttle angle (represented by converting the Fig.7 with-out the time axis)

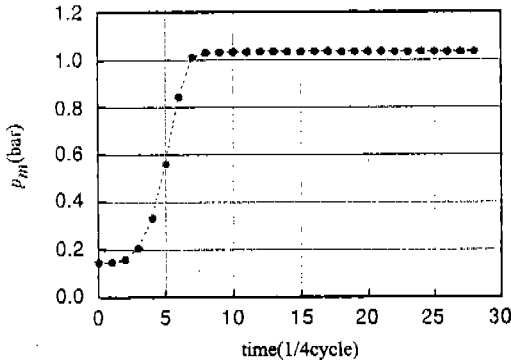
Fig.9 Variation of air flow rate at the upstream of the port by throttle fast opening (case 1 in Fig.2)



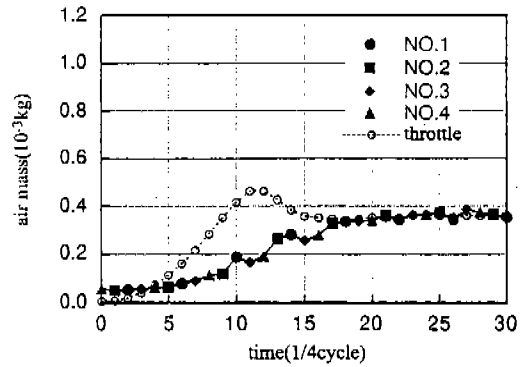
(a) induction mass



(a) $\Delta t_{\theta_s - \theta_{max}} = 0.18 \text{ (s)}$



(b) manifold pressure



(b) $\Delta t_{\theta_s - \theta_{max}} = 0.7 \text{ (s)}$

Fig.10 Variation of the inducted air mass per stroke and manifold pressure by the throttle opening(case 1 in Fig.2)

Fig.11 Variation of air flow per stroke by throttle opening with changed air passage(when the throttle is located near No.1 cylinder)

4. 흡기포트 상류에서의 유량특성

엔진의 비정상상태시, 즉, 스로틀 급개폐시에 각각의 실린더로 유입되는 공기량을 알아보기 위하여 흡기포트 상류에 역시 유량계를 설치하여 측정하였다.

개방의 속도가 스로틀 최소열림에서 최대열림까지 약 0.18초인 경우(Fig.2에서 case 1), 흡기포트 상류에서의 유량을 측정하여 Fig.9에 나타내었다. 여기서 실린더별 흡기순서는 실린더 점화순서와 동일하게 1-3-4-2 실린더 순이며, 시간에 따라 각 실린더로 유입되는 유량이 어떻게 변하는 지를 알 수 있다. 그림에서 유입되는 순

서에 따라 번호를 부여하였는데, 가속 바로 직후의 1, 2, 3과 같은 유동형태와 마지막 15, 16과 같은 유동 형태는 정상상태에서와 동일한 유동 형태를 갖는다. 그러나 4에서 14사이의 유동 형태는 정상상태일 때에는 다소 상이한 유동 형태를 보이고 있다. 정상상태의 경우에는 두개의 피크가 확실히 보이지만, 비정상상태일 때에는 하나의 피크만 뚜렷하다.

정량적인 해석을 위하여 각 흡기행정 동안의 순간유량을 적분하여 각 흡기행정 단위로 나타낸 것이 Fig.10이다. 스로틀 상류에서 측정한 유량도 각 실린더 흡기행정 타이밍에 맞춰 같은 방법으로 적분하여 그래프상에 나타내었다. Fig.10

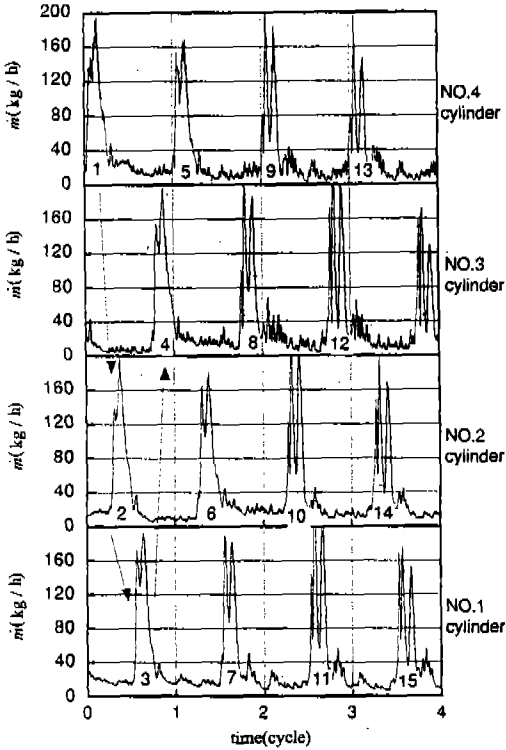
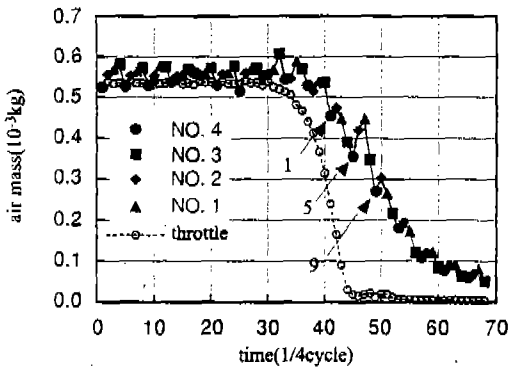


Fig.12 Variation of the air flow rate at the upstream of the intake port by fast throttle closing(case 1 in Fig.7)

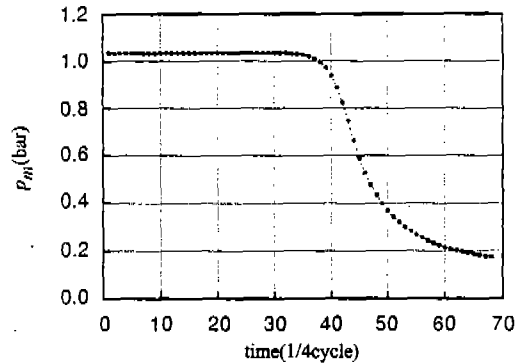
에서 시간은 Fig.9의 일련번호와 동일한 흡기행정을 나타낸다. 먼저 스로틀 상류와 흡기포트 상류를 비교해 보면, 앞서 예상했던 대로 유량 피크치인 5번에서 약 6배이상의 유량차이를 보이고 있고, 흡기포트 유량은 약간의 시간상수를 가지면서 정상상태로 접근해 간다.

실린더별 유량을 비교했을 때 특이하게 나타나는 점이 있는데, 그것은 4번 실린더의 유량 증가가 다른 실린더보다 좀 빠르다는 것이다. 그 다음은 3번 실린더이고, 1, 2번 실린더는 거의 비슷하다. 본 연구에서 사용한 실린더의 배치가 Fig.1에서 볼 수 있듯이 4번이 스로틀에 가장 가깝고, 1번이 스로틀에서 가장 멀리 떨어져 있는데, 이 현상으로부터 실린더의 위치가 스로틀에 가까울수록 유량증가가 빠르다는 것을 알 수 있다. 이것에 대한 검증으로서 스로틀의 위치가 1번 실린더에 가장 가깝도록 플래넘챔버를 뒤집어 부착하고 측정해 보았는데, 그 결과를 보면 Fig. 11과 같다. 이번에는 1번 실린더 쪽의 유량증가가 비교적 빠름을 볼 수 있다. 이 결과 역시 스로틀에 가까울수록 유량의 증가가 빠름을 보여주는 결과이다. 물론 유량계의 특성을 확인하기 위해서 1번과 4번 열선유량계를 바꾸어 보았으나 역시 동일한 결과를 얻었다.

스로틀의 급폐쇄에 따른 흡기포트 상류의 유동

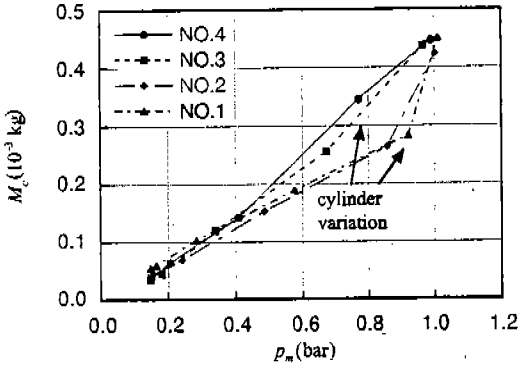


(a) induction mass

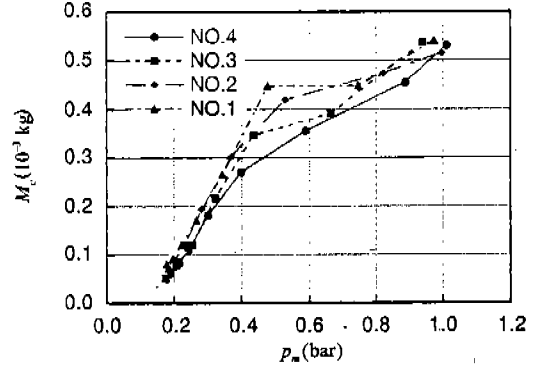


(b) manifold pressure

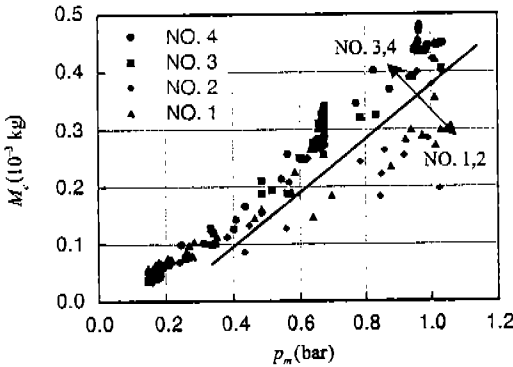
Fig.13 Variation of the inducted air mass per stroke and manifold pressure by throttle fast closing(case 1 in Fig.7)



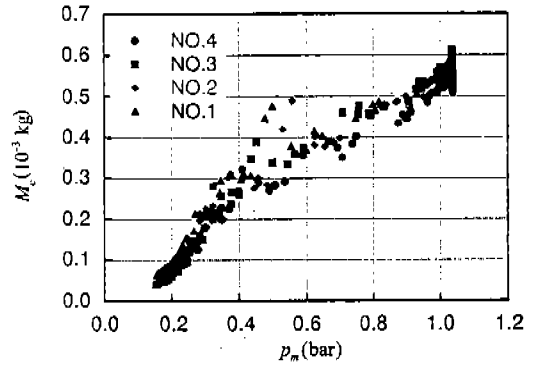
(a) case 4 in Fig.2



(a) case 4 in Fig.7



(b) 8 cases



(b) 8 cases

Fig.14 Cylinder variation of the inducted air mass per cylinder with manifold pressure by fast throttle opening

Fig.15 Cylinder variation of the inducted air mass per cylinder with manifold pressure by fast throttle closing

을 폐쇄속도가 스로틀 최대열림에서 최소열림까지 약 0.18초인 경우에 대해 Fig.12에 나타내었다. 스로틀 급개방시의 마찬가지로 정량적 해석을 위한 각 흡기행정별 유량을 Fig.13에 나타내었고, Fig.12, Fig.13에도 앞에서와 동일한 일련번호를 부여하였다.

Fig.12에서 유동형태를 보면, Fig.9의 가속과는 매우 다른 유동 형태를 보인다. 가장 다른 점은 유량의 피크가 매우 뚜렷하게 만들어지는 것이고, 흡기행정동안 전체적으로 매우 고르게 감소함을 볼 수 있다. 이는 가속시 하나의 피크가 지배적인 경우와는 매우 다르다. Fig.13에서 각 실린더로 유입되는 유량을 보면, 4번 실린더의

유량감소가 1번 실린더의 유량 감소보다 크다는 것을 볼 수 있다. 이것을 스로틀 급개방시와 연관지어 생각해 볼 때, 역시 4번 실린더가 스로틀에 가까운 위치에 있기 때문이라고 판단할 수 있다.

비정상상태에서 플레넘챔버의 압력과 실린더 흡기량의 관계를 보면 Fig.14, Fig.15와 같다. 여기서 Fig.14는 스로틀 급개방시의 결과이고, Fig.15는 스로틀 급폐쇄시의 경우이다. 이 때 Fig.14(a), Fig.15(a)는 1회의 가속의 경우에 대해 살펴본 것이고, Fig.14(b), Fig.15(b)는 스로틀의 개폐키와 개폐시간을 여러 경우에 대해서 실험한 것이다. 실험결과로부터 공통된 문

제점을 볼 수 있는데, 그것은 바로 스로틀밸브의 위치에 기인한 실린더별 유입량의 차이이다. 즉, 동일한 플레넘챔버의 압력에 대해서 흡기량이 스로틀 급개방시에는 1번측 실린더의 값이 4번측 실린더 보다 낮게, 스로틀 급폐쇄시에는 높게 나타나게 된다는 것이다.

6. 결 론

스로틀의 급개폐에 따른 유량변화 특성은 엔진의 제어에 있어 중요한 파라미터이다. 따라서 본 연구에서는 스로틀 상류와 각 실린더 흡기포트 상류의 위치에서 유량계를 사용하여 정량적인 해석을 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 스로틀을 급격하게 열 경우, 매니폴드압력이 초킹압력보다 낮을 때에는 스로틀 상류에서 초킹이 발생한다. 스로틀 상류에서 유량을 측정할 때 관찰되는 오우버슈트현상은 스로틀에서의 초킹대문에 나타나게 된다.
- 2) 스로틀 급개방과 급폐쇄시에 흡기관내에서의 유동형태는 정상상태와 다르고, 급개방과 급폐쇄시의 유동형태 또한 서로 매우 다르다.
- 3) 스로틀 급개방시에는 스로틀에 가까운 실린더일수록 유량증가가 빠르고 스로틀에서 멀수록 유량증가가 느리다. 이와 반대로 스로틀 급폐쇄시에는 스로틀에 가까운 실린더일수록 유량감소가 빠르고 스로틀에서 멀수록 유량감소가 느리다. 따라서 스로틀에 가까울수록 스로틀의 변화에 영향을 빨리 받고, 스로틀에서 멀수록 영향이 상대적으로 느리다.
- 4) 동일한 플레넘챔버 압력에 대해 스로틀 급개방시보다 스로틀 급폐쇄시의 흡기량이 상대적으로 많다.

따라서 결론적으로 볼 때, 스로틀 밸브의 위치

등 흡기계의 비대칭적인 기하학적형상은 비정상상태시에 실린더별 차이를 가져오므로 기하학적형상 설계시에 감안되어야 한다. 즉 각각의 실린더에서 스로틀 밸브까지의 유효거리가 같게 설계되어야 한다. 또한 연료량제어시에도 공연비의 변동을 줄이기 위해서는, 위에서 요약한 비정상상태에서의 유량변화 특성을 고려하여야 할 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 터보동력기계연구센터의 지원에 의해서 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Mikio Furuyama, Zhang Jie, and Hodeyuki Konishi, "Air Flow diostribution on the Transient Condition of SI Engine", SAE Paper 941882, 1994.
2. David M. Eckmann and James B. Grotberg, "Experiments on transition to turbulence in oscillatory pipe flow", J. Fluid Mech., Vol. 222, pp. 329~350, 1991.
3. Kyung H. Ahn and Mounir B. Ilbrahim, "Laminar/turbulent oscillating flow in circular pipes", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 4, 1992.
4. 박경석, 김종일, 고상근, 이종화, "엔진 흡기관내 비정상 유량 측정", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, 1994.
5. 박경석, 김종일, 고상근, 이종화, "초음파센서를 이용한 흡기관내의 유속측정", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 1994.
6. Jaihind S. Sumel and Rudolf Sauer, "Bosch Mass Air Flow Meter: Status and Further Aspects", SEA paper 840137, 1984.