

적분형 초음파 유량계를 이용한 MPI엔진의 비정상상태 공연비 제어

A/F Control of an MPI Engine on Transient Conditions with an Integration type
Ultrasonic Flow Meter

김중일*, 장준석*, 고상근**

Jungil Kim, Junseok Chang, Sangken Kauh

ABSTRACT

Three-way catalyst converter, cleaning up the exhaust gas contamination of SI engine, has the best efficiency when A/F ratio is near the stoichiometry. The feedback control using oxygen sensors in the exhaust manifold has limits caused by the system delays. So the accurate measurement of air flow rate to an engine is essential to control the fuel injection rate especially on transient condition like the rapid throttle opening and closing. To measure the rapid change of flow rates, the air flow meter for the engine requires quick response, flow reversal detection, and linearity. The proposed integration type air flow meter (IFM), composed of an ultrasonic flow meter with an integration circuit, has significantly improved the measurement accuracy of air mass inducted through the throttle body. The proposed control method estimates the air mass at the cylinder port using the measured air mass at the throttle. For the fuel dynamic model, the two constant fuel model is introduced. The control parameters from air and fuel dynamics are tuned to minimize the excursion of the air fuel ratio. As a result A/F ratio excursion can be reduced within 5% when throttle rapidly opens and closes at the various engine conditions.

주요기술용어 : 적분형 초음파 유량계(Integration type Ultrasonic Flow Meter), 비정상상태(Transient Condition), 공연비(Air Fuel Ratio), PC-ECU

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

1. 서론

현재 상용화되고 있는 가솔린 엔진의 경우, 배기가스의 정화를 위하여 삼원 촉매장치의 사용이 불가피 하며, 이 촉매의 효율을 극대화시키기 위해 전자제어장치(ECU, electric control unit)를 사용하여 연료분사량을 정밀 제어하고 있다. 이를 위해 ECU는 실린더로 들어가는 공기량 정보를 필요로 하며, 스로틀 상류에 공기유량계를 부착하여 이곳을 통과하는 유량을 측정하는 방법과 MAP(manifold absolute pressure)센서로 매니폴드 압력을 측정하고 TPS(throttle position sensor)로 스로틀 각도를 측정하여 공기량을 예측하는 speed-density 방법이 주로 사용되고 있다. 회전수와 부하가 일정한 정상상태의 경우는 배기 매니폴드에 설치된 산소센서를 이용한 피드백 제어로 공연비제어가 가능하나, 엔진의 상태가 급격히 변하는 비정상상태에서는 연료분사와 배기가스 측정 사이의 시간지연에 의해 산소센서를 이용한 피드백 제어에 많은 어려움이 있다. 비정상 상태에서는 실린더로 유입되는 공기량을 정확히 예측하여 open loop제어가 수행되고 있다.[1-8]

정상 상태에서도 엔진 흡기관 내에는 엔진의 흡기행정에 동기된 맥동유동이 존재하고,[9-11] 스로틀이 급격히 열릴 때에는 흡기 매니폴드 내의 압력이 급격히 증가함에 따라 스로틀 통과 유량의 overshoot현상이 나타난다[9]. 그러나, 현재 제어용으로 사용되는 유량계는 대부분 순간 유량을 출력하고, ECU는 제어를 위해 한 사이클에 몇 번의 샘플링만으로 평균 유량을 계산하므로 샘플링에 의한 오차가 발생할 수 있다.[1] 이러한 샘플링 오차를 줄이기 위해서 샘플링 주기와 시기를 조절하는 방법이 시도되

고 있으나 엔진 운전 조건에 따라 측정시기와 주기를 달리해야 하는 문제점이 있다. 이 측정 오차를 줄이기 위해 주어진 시간동안 흡입공기량을 연속적으로 적분하여 그 값을 출력하는 유량계를 적분형 유량계라 하며, 이 적분형 유량계를 사용함으로써 유량 측정시기와 횟수에 관계없이 항상 주어진 시간동안의 적분된 유량을 측정할 수 있다.[9]

비정상 상태 시에는 스로틀을 통과하는 공기량과 실린더를 통과하는 공기량이 일치하지 않으며 그 차이는 흡기 매니폴드에 저장되는 공기량이다. 스로틀을 통과하는 유량과 실린더로 유입되는 유량사이의 관계를 filling and emptying 모델로 모사 하면 복잡한 mapping이나 부가적인 실험 없이 스로틀 통과 유량을 이용하여 실린더 유입 공기량을 계산할 수 있다.[12] 흡기 밸브가 닫혀 있는 동안 연료를 분사하는 시스템에서는 연료분사 시점과 혼합기가 실린더로 유입되는 시점사이의 시간 차이가 발생하며, 이를 one stroke cycle delay라하며, 4행정 4실린더 엔진의 경우 대략 1/4 사이클 정도의 시간이다.[1] 따라서 연료분사시점에서 이 one stroke cycle delay 이후의 실린더 흡입 공기량의 예측이 필요하며, 이를 고려할 경우 급가감속시의 공연비의 희박-과농 피크를 감소시킬 수 있다. 비정상 상태 시에는 분사되는 연료량이 변하고 이에 따라 흡기관 벽에 퇴적되는 연료의 량도 변하게 된다. 이러한 연료저동은 연료 액막 모델로 모사되어 연료 퇴적율과 기화시상수의 두 개의 변수로 표현될 수 있다.

본 연구에서는 적분형 초음파 유량계를 이용하여 측정 시기와 주기에 관계없이 스로틀을 통과하는 공기량의 일정기간동안의 적분량을 측정하고, filling and emptying 모델과 one stroke cycle delay를 고려하여 실린더 혼합기가 유입되는 시점의 실린

더 유입공기량을 예측하였으며, 2변수 모델을 적용하여 벽면에 흡착되고 기화되는 연료의 거동을 고려하여 스로틀 밸브가 급격히 열리고 닫힐 때의 일정 공연비 제어를 일정한 엔진회전수 조건에서 수행하였다.

2. 흡입 공기량 및 연료 모델링

2.1 스로틀 통과 유량의 측정과 흡입 모델링

엔진은 주기적으로 공기를 흡입하므로 흡기관내에는 맥동 유동(pulsating flow)과 역방향 유동(reverse flow)이 존재한다. 이 맥동의 진폭은 평균유량과 비교하여 매우 큰 값을 가지므로 측정하는 시점에 따라 측정값이 평균값과 많은 차이가 발생할 수 있다. 이를 개선하기 위해서는 측정 주기를 짧게 하고 그 평균값을 취하는 방법이 사용되고 있으나 측정과 평균값 계산에 많은 시간이 소요되어 측정주기 선정에 많은 제약이 따른다. 이를 개선하기 위해 개발된 적분 유량계는 주어진 시간동안 하드웨어로 적분을 수행하므로 측정주기선정의 문제를 해결할 수 있다. 이와 관련하여 적분 유량계를 구성하기 위한 공기유량계가 갖추어야 할 조건은 다음과 같다. 첫째, 유량 변화에 대한 빠른 응답성이다. 열선형 유량계는 시간상수가 약 4~7 msec 정도로 엔진 흡기관 내의 맥동을 측정하여 제어에 응용할 경우에는 이 시간지연을 보상하기 위해 digital lead filter의 사용이 연구되고 있으나,[1] 이는 흡기관 압력이 높은 경우에 발생하는 맥동유동을 증폭시키는 단점이 있다. 그러나 본 연구에서 사용된 전달시간차식 초음파 유량계의 시간상수는 0.85msec로 열선형 유량계보다 빠른 응답성을 가지므로 별도의 필터 없이 제어에 이용될 수 있다.[10] 둘째, 유동의 방향을

측정할 수 있어야 한다. 스로틀이 완전히 열린 경우 맥동유동의 진폭이 크게 증가한다. 이때 맥동유동과 흡기관의 공진점이 일치할 경우 맥동의 진폭이 더욱 커져 스로틀 밸브에서 공기 청정기 쪽으로의 역방향 유동이 발생하게 된다. 그러나 유동의 방향을 측정하지 못할 경우 실제로 유입되는 공기량보다 더 많은 공기량이 유입되는 것으로 측정되므로 오차의 원인이 된다. 셋째, 유량계 출력의 선형성이다. 적분형 유량계로 사용하기 위해서는 유량과 유량계의 출력이 선형이어야 한다. 이를 종합하여 볼 때 유동에 대한 빠른 응답성과 역방향 유동을 감지할 수 있는 방향성, 그리고 유량에 대한 유량계 출력의 선형성을 가진 유량계로서 초음파 유량계가 엔진 제어에 이용하기 위한 적분형 유량계를 구성하기에 가장 적합하다.

공기량 모델에서는 한 번의 흡기행정 동안에 실린더로 흡입되는 공기량을 예측하여야 하므로, 이를 위하여 이 흡기행정동안에 스로틀을 통과하는 시간에 대한 적분 공기량을 적분형 유량계를 이용하여 측정한다. 식 (1)은 스로틀 밸브와 흡기 밸브 사이의 흡기 매니폴드를 검사체적으로 설정하여 구성한 질량 보존 식이다.

$$\frac{dM_m}{dt} = \dot{m}_{th} - \dot{m}_c \quad (1)$$

이 식은 흡기 매니폴드내의 공기 질량을 이상기체 상태방정식을 이용하여 매니폴드 체적, 공기 온도, 그리고 압력으로 표현하고, 1/4 사이클동안 적분하면 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{V_m}{RT_m} \int_t^{t+\Delta t} \frac{dp_m}{dt} dt = \int_t^{t+\Delta t} (\dot{m}_{th} - \dot{m}_c) dt$$

$$\frac{V_m}{RT_m} (p_{m,n} - p_{m,n-1}) = M_{th,n} - M_{c,n} \quad (2)$$

식 (2)에서의 $M_{th,n}$ 은 n-1에서 n시간까지의 스토를 통과 유량의 시간에 대한 적분값으로서 초음파 유량계의 출력력을 1/4 사이클 동안 적분기를 이용하여 측정된다. 이를 위한 적분기는 Fig. 1과 같이 구성된다. 초음파 유량계의 출력(V_s)과 공기유량에 선형적으로 비례하므로, 적분형 초음파 유량계의 출력전압(V_i)은 유량계를 지나는 공기의 적분량(M_{th})은 식 (3)과 같이 선형적으로 비례하며 비례상수는 Fig. 1에서의 적분 비례상수와 유량계의 출력과 공기 유량사이의 비례상수를 조합한 값이다.

$$M_{th} = K_M V_i \quad (3)$$

식 (3)으로부터 구해진 M_{th} 를 식 (2)에 대입해 실린더 유입공기량($M_{c,n}$)을 구하기 위해서는 흡기 매니폴드 압력 값이 필요하다. 그러나, 이 압력 값은 맥동 유동에 의해 크게 변동하므로, 1/4 사이클마다 정확한 평균압력을 구하기에 많은 어려움이 있다. 그러나 이 흡기 매니폴드 압력은 실린더 유입공기량과 식 (4)와 같이 밀접한 관계가 있으므로, 식 (4)를 이용하여 식 (2)의 압력 항을 소거할 수 있다.

$$M_{c,n} = \frac{(\dot{p}_{m,n} - \dot{p}_r / \eta_m) V_d}{RT_m} \eta_{ch} \quad (4)$$

$$\eta_{ch} = \eta_m \frac{\gamma_c}{\gamma_c - 1}$$

$$\dot{p}_{cm} = \eta_m \dot{p}_m$$

$$\dot{p}_r = \frac{\dot{p}_e}{\gamma_c}$$

\dot{p}_{cm} : 흡기행정 말기 실린더 내 압력 (bar)

\dot{p}_m : 흡기관 압력 (bar)

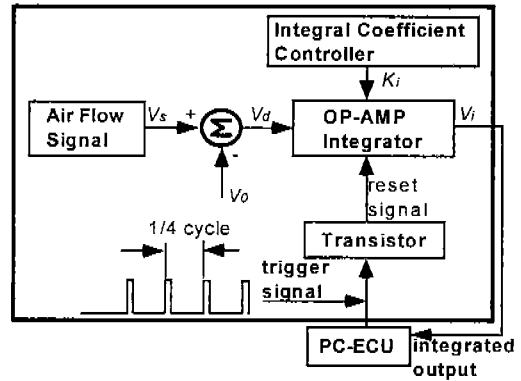


Fig. 1 Schematic diagram of the integration type flow meter(IFM)

\dot{p}_e : 배기 압력 (bar)

γ_c : 압축비

여기서 η_m 은 흡기 압력비로 흡기 시 매니폴드압력이 실린더 압력에 미치는 정도를 의미하는데, 이것은 여러 기하학적 형상, 운전상태 등에 의해 나타나는 차이를 하나의 파라미터로 나타내기 위해 도입된 것이다.

η_{ch} 은 흡기효율로 정의한다. 흡기효율(η_{ch})은 체적효율(η_v)과 거의 같은 개념이지만, 체적효율은 정의상 대기압과 대기온도를 기준으로 하는 것이고 흡기효율은 매니폴드 온도와 압력을 기준으로 하는 것이다. 식 (4)를 이용하여 식 (2)의 압력 항을 소거하면, 식 (5)와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$M_{c,n} = K M_{c,n-1} + (1 - K) M_{th,n} \quad (5)$$

$$K = \frac{V_m}{V_m + V_d \eta_{ch}}$$

위 식으로부터, 현시점(n)에 실린더로 흡입되는 공기량($M_{c,n}$)은 스토를 통과하는 공기량($M_{th,n}$)과 이전 시점(n-1)에서의 실린더로 흡입된 공기량($M_{c,n-1}$)으로 나타낼 수 있다. 실린더로 흡입되는 공기

량은 매니폴드 챔버의 부피(V_m)와 행정체적(V_d), 그리고 흡기효율(η_{ch})의 3가지 값에 따라 달라진다. 식 (5)에서 V_m 과 V_d 는 엔진의 기하학적 형상에 의해 결정되는 값이나, η_{ch} 값은 엔진의 운전조건에 의해 달라질 수 있는 값이다. 그러나, 이 값을 결정하기 위해서는 실린더로 유입되는 공기량의 정확한 측정이 필요하며 이는 특히 비정상 상태 시에 매우 어려운 일이다. 그러나 이 값은 흡기행정 말기의 흡기관 압력과 실린더 내부 압력의 비로 결정되고, 이를 엔진 조건에 따라 10%정도의 편차를 가진다고 가정할 경우 식 (5)의 K 값은 1.4%의 편차를 가지므로 이 K 값의 변화를 무시하고 상수로 가정하고 제어를 수행하였다.

2.2 One stroke cycle delay의 보상

Fig. 2는 본 연구에 사용된 엔진의 한 사이클 동안 밸브 타이밍과 연료 분사시점, 혼합기 흡입시기를 실린더 내 압력 변화와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 압력이 최고

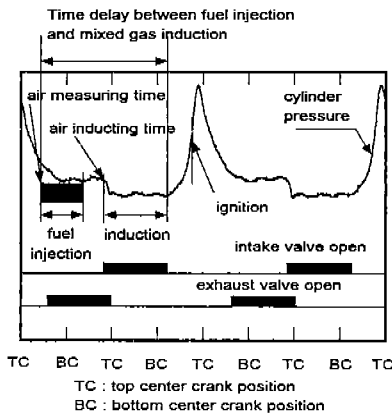


Fig. 2 Dead time between air measuring time & air inducting time

에 이른 후 팽창이 진행 되면서 BDC 52°에서 배기 밸브가 열린다. 연료 분사량 계산을 위한 공기량 측정은 배기 밸브가 열리는 시점에 수행되고, 연료량 계산 직후 연료를 분사하며, 연료 분사가 끝나는 시점이 흡기 밸브가 열리는 시점보다 앞서도록 하는 closed valve injection을 한다. 이는 흡기 밸브가 열려 있는 동안 분사를 할 경우 발생할 수 있는 연소 이상 현상을 방지하기 위함이다. 따라서 연료량 계산 시점과 혼합기 유입시점 사이에는 시간차가 존재하며 이를 one stroke cycle delay라 한다.[1] 따라서 현 시점(n)에서 연료량을 계산하기 위해서는 분사된 연료가 실제 실린더로 유입될 시점(n+1)에서의 흡입 공기량을 알아야 한다. 이 one stroke cycle delay는 엔진이 정상 상태일 경우에는 실린더 유입공기량이 시간에 따라 변하지 않으므로 오차를 유발하지 않으나, 수 사이클 내에 흡입공기량이 급격히 변하는 경우에는 연료량 계산 시점의 실린더 흡입 공기량과 실제 실린더로 흡입될 때의 흡입 공기량이 달라지게 되므로 이를 반드시 고려해야 한다. 이 one stroke cycle delay를 고려하기 위한 방법을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 스로틀을 급격히 열 때

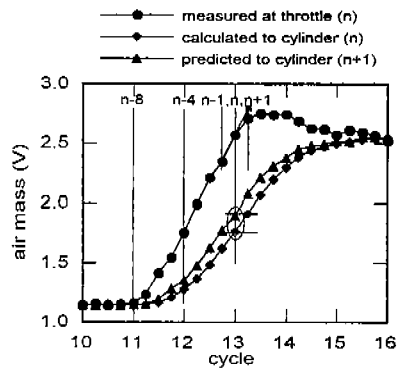


Fig. 3 Inducing air prediction before 1/4 cycle at rapid throttle opening

스로틀에서 측정된 공기량, 공기량 모델을 통해 계산된 실린더로 유입되는 공기량, 그리고 one stroke cycle delay (1/4 사이클)이 후의 예측된 공기량을 나타낸다. 현 시점(n)에서 실린더로 유입되는 공기량은 스톱 상류에서의 측정된 공기량과 그전 시점(n-1)의 실린더 유입 공기량으로부터 계산된다. 현시점(n)과 이전 시점(n-1)에서의 스톱 통과 유량으로부터 다음 스텝(n+1)에서의 스톱 통과 유량을 Taylor series expansion을 사용하고, 2차 이상의 항을 계산의 단순화를 위하여 무시하면 식 (6)과 같이 예측할 수 있다.

$$M_{th, n+1, p} = 2M_{th, n} - M_{th, n-1} \quad (6)$$

식(6)에서 구한 (n+1) 시점에서의 스톱 통과 예측 공기량($M_{th, n+1, p}$)과 식 (5)을 통해 계산된 현시점(n)에서 실린더로 들어가는 공기량($M_{c, n}$)을 이용해 식 (5)을 한 번 더 사용하면 식 (7)과 같이 다음 시점(n+1)에서 실린더로 유입되는 공기량이 계산된다. 이 식에서 $M_{c, n+1, p}$ 는 다음 시점(n+1)에서 실린더로 들어가는 예측 공기량이며, Fig. 3에서 보듯이 예측된 값($M_{c, n+1, p}$)은 실제 다음 시점(n+1)에서 실린더로 유입되는 공기량($M_{c, n+1}$)과 잘 일치한다.

$$M_{c, n+1, p} = KM_{c, n} + (1-K)M_{th, n+1, p}$$

$$M_{c, n+1, p} = K^2M_{c, n-1} + (2-K-K^2)M_{th, n} + (K-1)M_{th, n-1} \quad (7)$$

현시점 (n)에서 연료량 계산을 위해서는 이전 시점(n-1)에서의 실린더 유입공기량($M_{c, n-1}$), 스톱 통과 유량($M_{th, n-1}$), 그리고 현시점에서의 스톱 통과 유량($M_{th, n}$)이 필요하다. 각 시점에서의 스톱 통과 유량은 적분형 유량계를 이용하여 측정되고 실린더 유입 공기량은 적당한 초기

치로부터 매 시점마다 계산된다.

2.3 연료량 모델링

연료 분사노즐에서 분사된 연료는 그 일부가 벽면에 젖어 연료 액막(fuel film)을 형성하고, 이 액막에서 증발에 의해 실린더로 들어가는 연료량과 벽면에 흡착되지 않고 액적 형태로 증발하여 실린더로 유입되는 연료량, 그리고 연료 액막에서 실린더로 흘러 들어가는 연료량 등으로 나눌 수 있다. 현 MPI엔진과 같은 PFI(port fuel injection)에 해당하는 연료모델 중에서 가장 일반적으로 쓰이고 있는 예는 Fig. 4에서 볼 때, 매 흡기 시 실린더로 들어가는 연료량(m_{fi})는 식 (8)과 같이 분사된 연료량(m_i)중 벽면에 흡착되지 않고 직접 실린더로 들어가는 연료량($c_i m_i$)과 벽면에 액막 형태로 존재하는 연료(m_f) 중에 흡기 밸브가 닫혀 있는 동안 증발하여 실린더로 유입되는 연료량(m_v)의 합과 같다는 것이

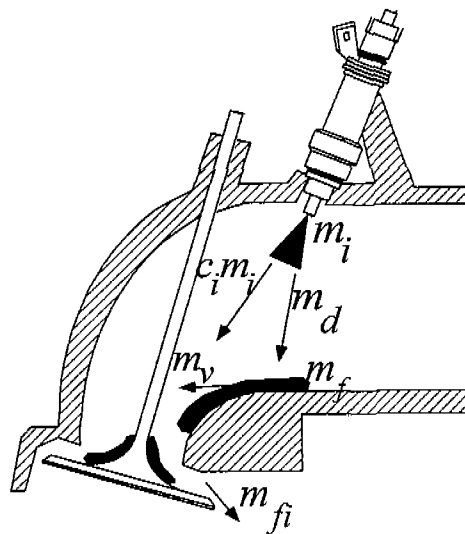


Fig. 4 A model of the MPI fuel system

다. 여기서 c_i 는 분사된 연료량 중 직접 액적형태로 증발하여 실린더로 바로 들어가는 분율을 나타낸다.

$$m_{fi} = c_i m_i + m_v \quad (8)$$

벽면에 젖어 있는 연료 액막(fuel film)을 검사체적으로 연료의 질량 균형을 고려하면 식 (9)와 같다. 식 (9)에서 m_f 는 흡기포트나 벽면에 유막형태로 젖어 있는 연료량(fuel film mass), \dot{m}_d 는 인젝터에서 분사된 연료 중 벽면에 흡착되는 연료량, 그리고 \dot{m}_v 는 젖어 있는 연료 액막 중 증발되는 연료량을 의미한다. 즉, 벽면에 젖어 있는 연료 액막의 변화량은 벽면에 흡착되는 연료량과 젖어 있는 연료 액막에서 증발되는 연료량의 차이와 같다.

$$\frac{dm_f}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_v \quad (9)$$

식 (9)를 Δt (1 cycle)시간 간격으로 적분하면 식 (10)이 된다. 이 적분은 4기통 엔진의 각각의 실린더에 따라 적용된 것으로 n 시간 스텝과 $n-4$ 시간 스텝에서의 엔진의 상태는 같다. 즉 1번 실린더가 $n-4$ 시간 스텝에서 흡기 과정이었다면 n 시간 스텝에서도 흡기 과정이다. 그리고 흡기관 벽면에 젖어 있는 연료량 중 증발되는 연료량 역시 각각의 실린더를 구별하여 계산되어야 하므로 식 (9)는 식 (10)과 같이 적분된다.

$$m_{f,n} = m_{f,n-4} + m_{d,n} - \frac{\Delta t}{\tau_v} m_{f,n-4} \quad (10)$$

$$m_{d,n} = (1 - c_i) m_{i,n} \quad (11)$$

이때 1사이클 동안 연료 유막으로부터 증발된 연료량은 흡기관 벽면에 흡착되어 있는 연료량에 비례한다고 가정하고 그 비례 상수를 $\Delta t/\tau_v$ 라 한다. 이때 τ_v 는 연료 기화

시상수이다. 식 (7)로부터 예측된 실린더 유입 공기량에 해당하는 실린더 유입 연료량은 목표로 하는 당량비에 의해 계산된다. 이 계산된 연료량(m_{fi})이 실린더로 유입되기 위해서 분사되어야 할 연료량(m_i)은 식 (8), (9), (10)으로부터 계산된다.

3. 실험장치 및 방법

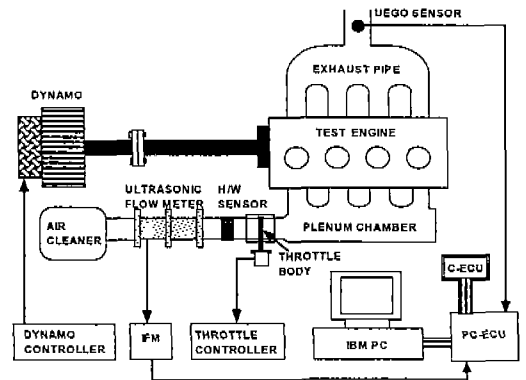


Fig. 5 Experimental setup

Fig. 5는 실험장치의 개략도이다. 실험 엔진은 4 실린더, 4 밸브, 1499 cc의 수냉식 MPI 엔진이며 엔진의 부하와 회전수 조절을 위해 회전축에 EC 동력계가 연결되어 있다. 엔진의 연료 분사와 공회전, 점화시기 제어를 위해 PC-ECU를 제작하여 IBM-PC를 이용하여 엔진을 제어하였다. 스토틀 상류에 초음파 유량계를 장착하여 이로부터 나오는 유량신호를 적분기(IFM, Integral type Flow Meter)로 적분한다. 적분구간은 PC-ECU의 digital out으로 트리거 신호를 1/4 사이클 마다 보내어 적분유량을 샘플링한 직후 적분기를 초기화시킨다. 스토틀을 급개폐의 비정상 조건을 만들기 위해 스토틀에 스텝 모터를 직결하고 개폐속도와 각도를 제어하였다. 배기가스의 공연비를 측정하기 위하여 배기구에 광역산소센서

(UEGO sensor)를 설치하여 공연비를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

엔진의 회전수가 일정하게 유지되고, 스로틀 밸브가 급격히 열리는 비정상 상태에서 1/4사이클동안 스로틀 밸브를 통과하는 공기량을 적분형 초음파 유량계를 이용하여 측정하고 one stroke cycle delay, 흡입 공기량 모델을 고려하여 혼합기가 실린더로 유입될 시점의 실린더 유입 공기량을 예측하고, 연료 액막 모델을 적용하여 분사될 연료량을 계산하여 실험을 수행하였다. 엔진의 회전수는 1500, 2000, 2500 rpm으로 고정하고 흡기관 압력이 0.4 ~ 1.0 bar 사이에서 변화도록 스로틀 밸브를 개폐시켰다. Fig. 6은 실험이 진행되는 동안의 스로틀 개도와 흡기관 압력의 변화를 엔진 회전속도가 2000rpm인 경우를 나타낸 것이다. 스로틀 개도는 스텝모터를 이용하여 시간에 따라 선형적으로 변화시킨다. 흡기관 압력은 스로틀 밸브가 열린 후 시간지연을 갖고 증가하며, 밸브가 열리는 6 사이클 이내에 비정상 상태가 종

결된다. 그러나, 스로틀 밸브가 닫히는 경우에는 상대적으로 긴 시간동안 비정상 상태가 지속된 후 정상상태에 도달한다. 이것은 흡기 다기관에 filling될 때에는 스로틀 밸브를 지나는 공기 유량의 overshoot에 의해 빠른 시간 안에 filling이 끝나기 때문이고, emptying 될 때에는 실린더로 유입되는 공기량에 의해 emptying되기 때문에 정상상태에 도달하는데 많은 시간이 소요되기 때문이다.

Fig. 7에는 스로틀이 급격히 열릴 때 스로틀을 통과하는 공기량과 분사된 연료량, 실린더로 유입되는 연료량, 흡기관 벽면에 유막 형태로 존재하는 연료량을 나타내었다. 스로틀을 통과하는 공기량은 흡기 매니폴드의 filling을 위해서 overshoot가 발생한다. 이 측정된 공기량으로부터 흡입 공기량 모델과 one stroke cycle delay를 고려하여 공연비 제어를 위해서 실린더로 유입되어야 하는 연료량이 계산된다. 이렇게 계산된 연료량이 Fig. 7의 점선으로 표시되어 있고, 실린더로 유입되는 공기량에 비례하는 값이므로 overshoot는 발생하지 않는다. 분사된 연료는 일정 부분만 실린더로 유입되고 나

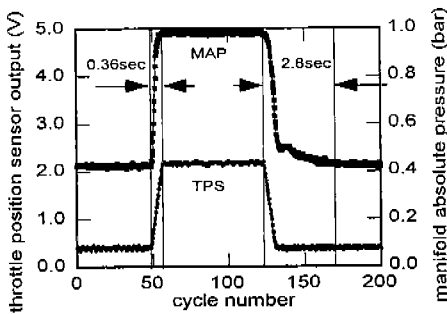


Fig. 6 Throttle position sensor output and manifold absolute pressure during the throttle valve opening and closing at the speed of 2000 rpm

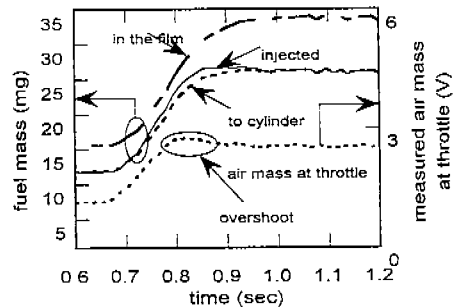


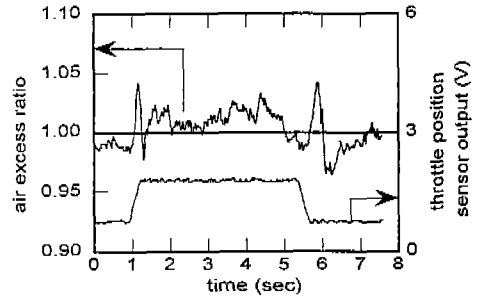
Fig. 7 Measured air mass at throttle and fuel mass into cylinder, injected and in the fuel film during rapid throttle opening at 2000 rpm

머지 부분은 시간지연을 갖고 유입되므로 실제 분사되는 연료량은 실린더로 유입되는 연료량보다 많다. 그리고 분사된 연료량과 실린더로 유입되는 연료량의 차이는 흡기관 벽면에 퇴적된다. 흡기관 벽에 퇴적된 연료량은 분사된 연료량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 분사된 연료 중 일정부분은 벽면에 퇴적되기 때문이다.

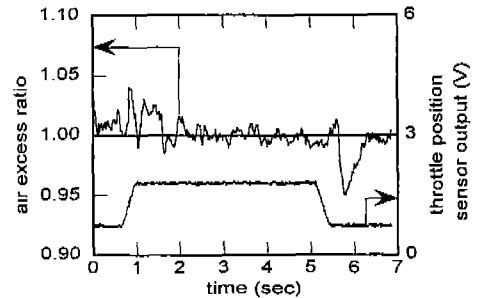
Fig. 8은 스로틀 밸브가 닫히고 스로틀을 통과하는 공기량이 급격히 감소하는 경우를 나타낸 것이다. 스로틀이 열릴 때와는 다르게 분사되는 연료량이 실린더로 유입되는 연료량보다 적으며 그 차이만큼이 연료 유막에서 보충되므로 연료 유막에 있는 연료량은 이 과정 중에 감소한다.

Fig. 9는 엔진의 회전수가 1500, 2000, 2500 rpm에서 비정상 상태 공연비 제어를 수행하고, 배기관에 설치된 UEGO센서로부터 측정된 공연비의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과는 공연비 피크 오차가 가장 적게 되도록 K , c_i , τ_v 의 세 가지 변수 값을 조정 한 후 실험한 결과이다. 세 가지 경우에 스로틀이 열리는 속도는 일정하게 유지하였으므로, 엔진 회전수가 빠를수록 스로틀이

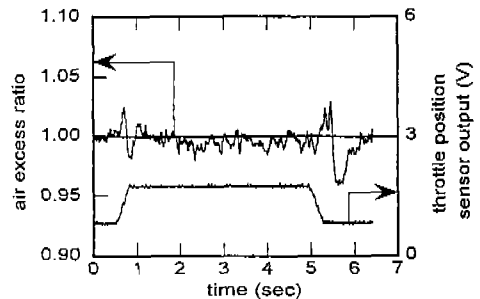
열리는 데 더 많은 엔진 사이클이 소요된다. 따라서 엔진의 회전수가 빠를수록 유량 샘플링 속도와 제어 수행 횟수가 증가하기 때문에 비정상 상태 제어가 더 잘 수행된다.



(a) 1500 RPM



(b) 2000 RPM



(c) 2500 RPM

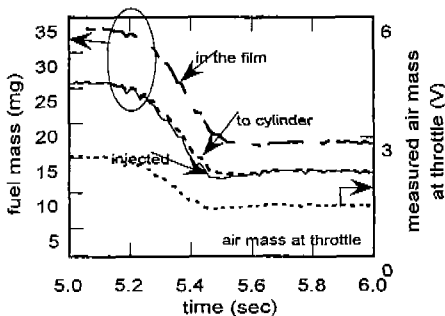


Fig. 8 Measured air mass at throttle and fuel mass into cylinder, injected and in the fuel film during rapid throttle closing at 2000 rpm

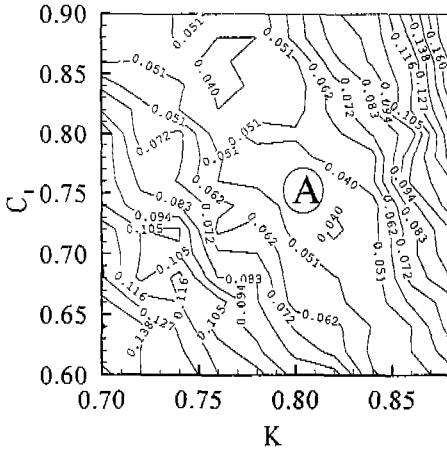
Fig. 9 Air excess ratio excursion during throttle valve opening and closing at the speed of 1500, 2000, 2500 RPM

이는 Fig. 9의 결과로도 알 수 있듯이 엔진 회전수가 높을수록 비정상 상태시 발생하는 오차가 줄어든다.

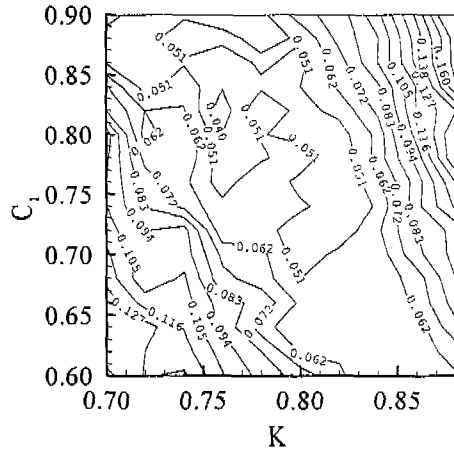
이 세 변수 값에 따라 오차가 발생하며, 각 변수에 따른 피크 오차를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서와 같이 오차가 최소가

되는 영역이 존재하며 위 실험이 수행된 영역은 그림에 표시된 A 영역이다.

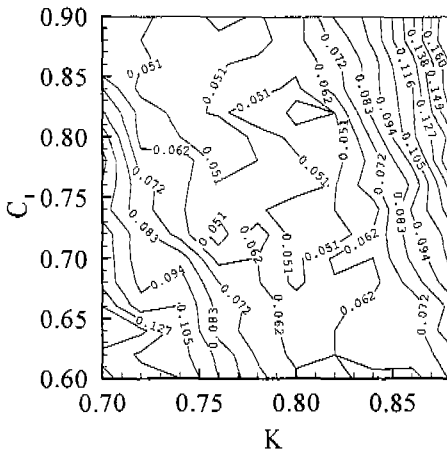
흡입 공기량 모델인 K 는 엔진의 기하학적 형상과 흡기 효율에 의해 결정되는 값이다. 그러나, 실린더로 유입되는 공기량을 측정하기가 어려우므로 흡기 효율을 측정하기



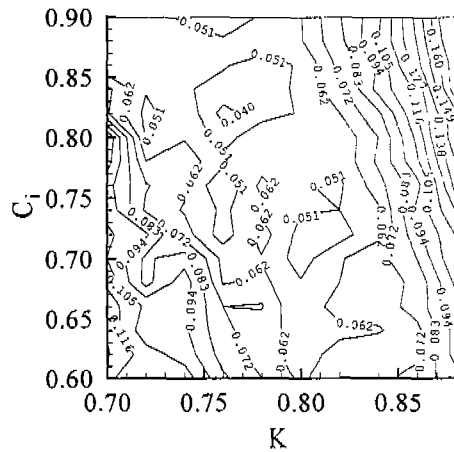
(a) 0.35



(b) 0.5



(c) 0.65



(d) 0.8

Fig. 10 Maximum peak error of air fuel ratio excursions with various control variables at the engine speed of 2000 rpm (a) $\Delta t / \tau_v = 0.35$, (b) $\Delta t / \tau_v = 0.5$, (c) $\Delta t / \tau_v = 0.65$, (d) $\Delta t / \tau_v = 0.8$

는 매우 어려우므로 그 값을 1로 가정하였다. 이러한 가정을 통하여 얻어진 K 값과 실제 공연비 피크 오차가 최소가 되는 K 값은 거의 유사하다. 분사된 연료 중 실린더로 직접 유입되는 비율인 c_i 는 엔진 상태에 따라 변화가 적은 반면, 연료 기화 시상수 τ_v 는 엔진의 냉각수온과 엔진 회전수에 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 엔진이 완전히 워업된 이후에 실험을 수행하였으므로 냉각수 온도에 따른 두 변수 값의 변화를 무시한다면, τ_v 는 엔진회전수의 역수에 비례하며, τ_v 를 1사이클 동안의 시간(Δt)으로 나눈 값은 엔진의 회전수에 따라 그 값이 거의 변화가 없다. 따라서 엔진 회전수에 따른 제어를 수행할 경우에 K , c_i , $\tau_v/\Delta t$ 값을 일정한 값을 사용하여 수행한 결과 엔진 회전수에 대한 비슷한 오차 수준에서 제어를 수행할 수 있었다.

스토틀이 급격히 열리는 구간에서는 정상 상태보다 공연비가 희박한 영역이 나타나며, 스토틀이 급격히 닫히는 경우에는 농후한 공연비 피크가 발생한다. 이 영역은 공기량 센서의 시간지연, 분사된 연료의 벽면 흡착에 의한 시간지연, one stroke cycle delay 등에 의해 발생한다. 이러한 희박 피크를 줄이기 위해서는 보다 정확한 연료 거동 모델과 one stroke cycle delay 이후의 실린더 유입 공기량에 대한 예측이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 적분형 초음파 유량계를 이용하여 스토틀 밸브를 통과하는 공기량을 1회의 흡기행정인 1/4사이클동안의 적분값으로 측정하고, injection dead time과 흡입 공기량 모델을 고려하여 실린더 유입 공기량을 예측하고, 연료 액막을 고려한 연료량 제

어를 통하여 엔진 일정회전시 스토틀 밸브의 개도변화에 따른 비정상 상태시의 공연비 제어를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스토틀 밸브를 통과하는 공기량의 적분량 측정은 실린더 유입 공기량이 변하는 비정상 상태시에 매우 중요하며, 이 값을 이용하여 실린더 유입공기량을 비교적 간단한 filling and emptying 모델을 통하여 유추할 수 있었다.
- 2) 흡기관 모델 중 연료 분사시점과 혼합기 유입시점 사이의 시간차인 one stroke cycle delay가 비정상 상태 시 매우 큰 오차를 유하다.
- 3) 비정상 상태시 공연비 피크에러를 최소가 되게 하는 연료 액막 모델에서 사용된 두 변수, 즉 분사된 연료 중 실린더로 직접 유입되는 비율인 c_i 와 연료 기화 시상수를 1사이클 시간으로 나눈 $\tau_v/\Delta t$ 는 엔진이 워업된 후에 엔진의 회전수와 부하에 따라 큰 변화가 없다.

참 고 문 헌

1. Teruji Sekozawa, Shimnsuke Takahashi, Makoto Shioya, Toshio Ishii, and Seiji Asano, "Development of a highly accurate air-fuel ratio control method based on internal state estimation," SAE 920290.
2. Sasayasu Ueno, Norio Ichikawa, Seiko Suzuki, and Kazuyoshi Terakado, "Wide-range air-fuel ratio sensor", SAE 860409.
3. Isao Komoriya, Shusuke Akazaki, Yusuke Jasegawa, Hidetaka Maki, Youichi Nishimura, and Toshiaki Hirota,

- "Application of fluid dynamics model to estimate cylinder intake volume", SAE 960075.
4. Goran Almqvist and Soren Eriksson, "An analysis of air to fuel ratio response in a multi point fuel injected engine under transient conditions", SAE 932753.
 5. N.P. Fekete, U. Nester and I. Gruden J.D. Powell, "Model-based air-fuel ratio control of a lean multi-cylinder engine", SAE 950846.
 6. A D Pilley, C D de Boer, "Dynamic engine modelling for improved transient control".
 7. Raymond C. Turin and Hans P. Geering, "Model-based adaptive fuel control in an SI engine," SAE 940374.
 8. P. J. Shayler and M. S. Goodman, "Transient air/fuel ratio control of an SI engine using neural networks," SAE 960326.
 9. K Park, J Kim, S K Kauh, S T Ro and J Lee, "Measurement of air flow rate by using an integration type ultrasonic flow meter applicable for spark ignition engine control," Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 211 Part D J. I.
 10. 황재석, 김중일, 고상근, "온도 보상을 고려한 전달 시간차 방식 초음파 공기 유량계의 개발," 대한기계학회 논문집 B권, 제 22권 제 10호, pp. 1359-1367, 1998.
 11. 박경석, 고상근, 노승탁, 이종화, "SI엔진의 정상상태 유량 특성에 관한 실험적 연구," 한국 자동차공학회 논문집 제5권 제 6호 1997.
 12. 박경석, 고상근, 노승탁, 이종화, "스로틀 개폐에 따른 가솔린 엔진의 비정상상태 유량변화 특성," 한국자동차공학회논문집 Vol. 4, No. 3 1996.