

비분산 적외선 흡수법을 이용한 고속응답 CO₂ 분석기의 제작 및 엔진 적용에 관한 연구

이 재 영 · 민 경 덕*

서울대학교 기계항공공학부

Development of a Fast-Response CO₂ Analyzer using NDIR Technique and Its Application to SI Engine

Jaeyoung Lee · Kyoungdoug Min*

School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received 11 April 2007 / Accepted 25 May 2007)

Abstract : A fast response CO₂ (fCO₂) analyzer for real-time measurement of carbon dioxide concentration during transient states of internal combustion engines has been developed. This analyzer uses non-dispersive infrared absorption (NDIR) technique for measuring CO₂ concentration and Kalman filter for removing noise components from output signals. The analyzer has good linearity, repeatability and drift with a response time of 11 ms; it is sufficiently fast to detect CO₂ concentration during transient states of internal combustion engines. The fCO₂ analyzer was used to measure transient CO₂ concentration of exhaust gas of the SI engine with a standard gas analyzer, and the signal of the fCO₂ analyzer was compared to that of the standard gas analyzer. The two concentrations were well matched during the steady state, and the fCO₂ analyzer could measure the variations of CO₂ concentration during the transient state.

Key words : Transient-state(과도상태), Fast-response(고속응답), CO₂ concentration(이산화탄소 농도), Kalman filter(칼만 필터), Non-dispersive infrared absorption(비분산 적외선 흡수법)

Nomenclature

- fCO₂ : fast-response CO₂
- NDIR : non-dispersive infrared absorption
- EGR : exhaust gas recirculation
- FS : full scale
- bmep : brake mean effective pressure

1. 서론

세계적으로 한층 강화되고 있는 배기가스 규제를 만족시키기 위해 EGR(exhaust gas recirculation)

은 NO_x 배출량을 줄이는 기술로써 널리 사용되어 왔다. NO_x 배출량은 연소 시 연소가스의 최고 온도에 직접적으로 의존하는데, EGR을 적용할 경우 실린더내부 가스의 산소농도는 감소하고 열용량은 증가하여 연소 최고 온도를 낮추게 되고 그로 인해 NO_x 배출량은 감소하게 된다. 지금까지 EGR 제어는 보통 엔진의 배기관에서 흡기관으로 전달되는 배기가스의 양을 제어하는 것으로 이루어 졌다. 그리고 일반적인 저속 배기가스 분석기를 이용하여 배기관과 흡기관에서 CO₂ 가스의 농도를 측정함으로써 실린더로 유입되는 EGR 양을 측정하였다.

하지만 이런 방법으로는 엔진의 운전상태가 급격

*Corresponding author, E-mail: kadmin@snu.ac.kr

하게 변하는 과도상태에서 실린더로 유입되는 EGR 양을 정확하게 측정하지 못하게 되고, EGR 양의 부정확한 측정은 곧바로 미연탄화수소와 PM(particulate matters) 또는 NO_x 배출량의 증가로 이어지게 된다. 즉, EGR 양이 실제 필요한 것보다 많을 경우 연소 불량을 일으켜 미연탄화수소와 PM 배출량이 급격히 증가하고, EGR 양이 적을 경우 NO_x 배출량을 원하는 수준으로 감소시키지 못하게 되므로 결과적으로 NO_x 배출량이 급격하게 증가하는 결과를 낳게 된다. 그러므로 추후 개발될 엔진에서는 한층 강화되고 있는 배기가스 규제를 만족시키기 위해 EGR 양을 사이클 별로 제어하는 것이 반드시 필요하며, 이를 위해서는 CO₂ 가스의 농도를 사이클 별로 측정하는 기술의 개발이 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 서울대학교에서 제작한 고속응답 CO₂ 분석기(이하 fCO₂ 분석기)의 기본 성능 실험을 수행하였다. 그리고 기본 성능 실험을 거친 fCO₂ 분석기가 과도상태에서 CO₂ 가스의 농도를 실시간으로 측정할 수 있는지 확인하기 위해, 가솔린 엔진의 배기관에 fCO₂ 분석기와 일반적인 가스 분석기인 HORIBA의 MEXA7100DEGR을 함께 설치하고 두 분석기를 이용하여 초기점화 시 발생하는 CO₂ 농도를 측정·비교 하였다.

2. 고속응답 CO₂ 분석기의 제작

2.1 농도 측정 원리

특정 파장을 가지는 적외선이 농도를 측정하고자 하는 샘플가스를 통과할 때 샘플가스에 존재하는 가스 성분들은 각각 특정 파장에 해당하는 적외선을 선택적으로 흡수한다. 이를 이용하여 가스의 농도를 측정하는 방법을 비분산 적외선 흡수법(Non-Dispersive Infrared Absorption, 이하 NDIR)이라고 하는데, CO₂ 가스의 경우 약 4.3 μ m에 해당하는 적외선을 흡수하는 것으로 알려져 있다. NDIR은 CO₂ 농도 측정에 대한 자동차 산업의 표준기술로 채택되어 있다.¹⁾

이번에 제작한 fCO₂ 분석기에서도 CO₂ 농도를 측정하기 위해 NDIR을 사용하였으며, 이를 위해 Fig. 1, 2와 같은 광학특성을 가진 한 쌍의 광학센서가 사용되었다. 발광부의 경우 CO₂ 가스가 흡수하는 파

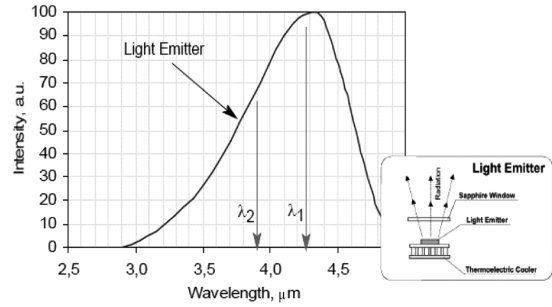


Fig. 1 Spectral response of light emitter²⁾

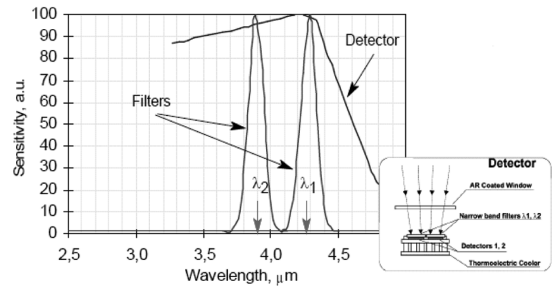


Fig. 2 Spectral response of photodetector with narrow-band filters²⁾

장인 4.3 μ m 부근의 파장에서 발광강도가 가장 강한 것을 알 수 있으며, 수광부의 경우 CO₂ 가스가 흡수하는 파장인 4.3 μ m 부근에서 측정감도가 가장 좋은 것을 알 수 있다. 또 수광부에는 두 개의 narrow-band pass filter가 설치되어 있는데, 이 중 하나는 CO₂ 가스가 주로 흡수하는 4.3 μ m 파장에 해당하는 빛을 통과시키는 필터(측정 채널)이며, 다른 하나는 우리가 관심을 가지고 있는 파장에서 멀리 떨어진 파장의 빛을 통과시키는 필터(기준 채널)이다. 기준 채널에서는 측정하고자 하는 가스의 농도에 상관없이 기준 채널로 들어오는 빛의 양은 일정하므로 일정한 전압을 출력하게 되고, 측정 채널에서는 측정하고자 하는 가스의 농도가 증가할 경우 측정 채널로 들어오는 빛의 양이 감소하게 되고 그로 인해 측정 채널에서 출력되는 전압은 감소하게 된다. 그러므로 두 채널에서 출력되는 전압을 비교함으로써 수광부와 발광부 사이를 흐르는 가스의 농도를 측정하게 된다. 수광부와 발광부 사이에는 적외선을 약 85% 정도 통과시킬 수 있는 사파이어 윈도우(sapphire window)를 설치하여 농도를 측정하고자 하는 샘플가스와 광학센서가 직접 접촉하는 것을 막는다.¹⁾

2.2 분석기의 구성

Fig. 3은 이번에 제작한 fCO₂ 분석기의 구성도이다. 농도를 측정하고자 하는 샘플가스는 솔레노이드 밸브, PM 필터를 지나 fCO₂ 분석기로 유입되어 CO₂ 농도가 측정되게 된다. 농도가 측정된 샘플가스는 진공펌프의 압력맥동을 없애기 위한 리저버 탱크를 지나 진공펌프로 흘러 들어가게 된다. 이 때 샘플가스에 존재하는 수분이 분석기 내부에서 응축되면 정확한 CO₂ 농도 측정이 불가능해지므로 수분의 응축을 방지하기 위해서 분석기에 열선을 감고 온도 컨트롤러를 이용하여 열선의 온도를 120°C로 유지하였다.

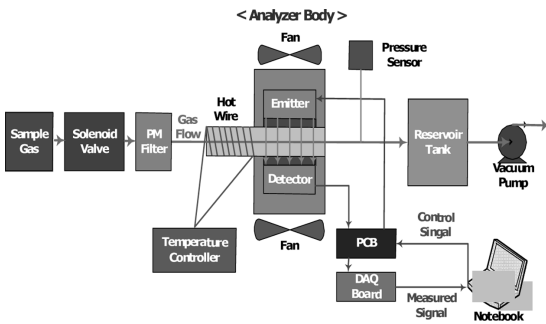


Fig. 3 Schematic of the fCO₂ analyzer

2.3 신호 처리

이와 같이 제작한 fCO₂ 분석기를 이용하여 샘플가스의 CO₂ 농도를 측정할 경우 기본 측정신호(raw signal)에는 많은 잡음(noise)이 존재한다. 이번에 제작한 fCO₂ 분석기에서는 기본 측정신호로부터 잡음을 제거하기 위해 칼만 필터를 사용하였다. R.E. Kalman이 발명한 칼만 필터는 최소자승법(least-square method)를 사용해서 한 시스템의 시간에 따른 변화를 적절하게 예측할 수 있도록, 잡음을 가지는 측정값으로부터 시스템의 상태변수를 찾아내기 위해 사용된다.³⁾

Fig. 4는 기본 측정신호에 칼만 필터를 적용한 예를 보여준다. Fig. 4를 보면 12초에서 14초 사이에 측정된 신호에 대해 기본 측정신호와 필터를 적용한 신호의 평균은 모두 1.0072V(CO₂ 농도로 환산하면 3.5270%)가 나왔지만 표준편차는 기본 측정신호와 필터를 적용한 신호가 각각 0.0744V와 0.0262V로써

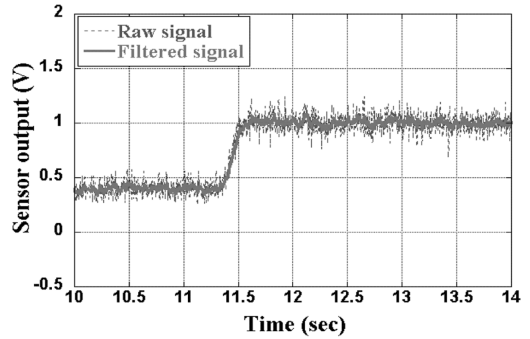


Fig. 4 Application of the Kalman filter

약 2.84배 감소한 것을 알 수 있었다. 이와 같이 기본 측정신호에 칼만 필터를 적용하여 잡음을 크게 줄일 수 있었다.

3. 기본 성능 실험

3.1 응답시간 측정

이번에 제작한 fCO₂ 분석기에서는 제로(zero)가스로 N₂ 가스를 사용하였고, 표준가스로 농도가 15.758% 인 CO₂ 가스를 사용하였다. 응답시간은 표준가스를 분석기에 순간적으로 흘려주었을 때, 분석기가 전체 가스농도의 10 ~ 90%를 인식하는데 걸리는 시간으로 정의하였으며, 이를 위해 분석기 입구에 솔레노이드 밸브를 설치하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 fCO₂ 분석기의 응답시간은 약 11ms로 측정되었다. 6000rpm 조건에서 한 사이클 당 소요 시간이 20ms임을 고려할 때, 이러한 응답시간은 엔진에서 발생하는 CO₂의 농도를 사이클 별로 측정하는데 충분히 빠르다고 할 수 있다.

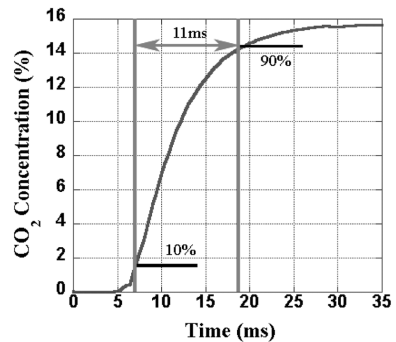


Fig. 5 Response time of the fCO₂ analyzer

3.2 선형성 측정

선형성이란 가스 분석기에 공급되는 가스의 실제 농도와 분석기에 의해서 측정되는 가스의 농도 사이에 얼마나 선형적인 관계를 가지고 있는지 나타내는 지표이다. 선형성을 측정하기 위해서 HORIBA의 SGD-710C 가스 디바이더를 이용하여 표준가스의 농도를 10단계로 나눈 후 fCO₂ 분석기에 각각 20초 동안 공급하고 그 때 fCO₂ 분석기에 의해서 측정되는 가스 농도의 평균값을 계산하였다. 이를 이용하여 Fig. 6과 같이 선형성을 계산해 보았고 그 결과, 분석기가 측정할 수 있는 전체 농도인 15.758%의 $\pm 2.54\%$ 에 해당하는 $\pm 0.40\%$ 의 농도 측정오차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

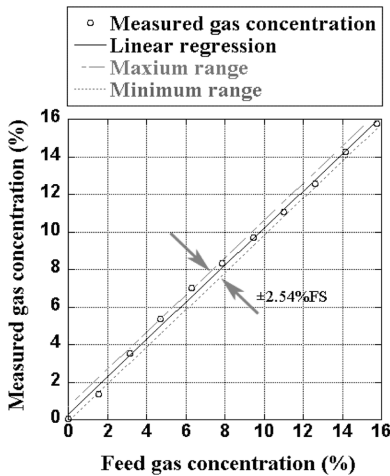


Fig. 6 Linearity of the fCO₂ analyzer

3.3 반복성 측정

반복성이란 일정한 농도의 CO₂ 가스를 가스 분석기에 흘려주면서 가스 농도를 측정할 때, 측정 농도의 범위가 어느 정도인지를 나타내는 지표이다. 이번에 제작한 고속응답 CO₂ 분석기의 반복성을 측정하기 위해서 농도가 12.08%인 CO₂ 가스를 고속응답 CO₂ 분석기에 흘려주면서 50초 동안 1초 간격으로 농도를 측정하였다. 표준가스의 농도인 15.758%보다 더 높은 농도는 모두 15.758%로 측정되기 때문에(표준가스가 최대 측정 범위를 결정), 농도가 15.758%인 표준가스를 이용하여 반복성을 측정할 경우 15.758%보다 높게 측정되는 값에 대해서는 측

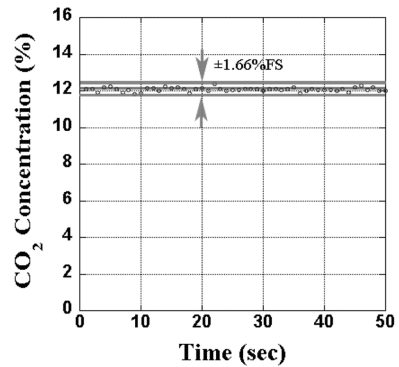


Fig. 7 Repeatability of the fCO₂ analyzer

정값을 알 수가 없으므로 정확한 반복성을 측정할 수가 없었다. 이러한 이유로 농도가 12.08%인 CO₂ 가스를 사용하여 반복성을 측정하였으며, 측정 결과는 Fig. 7에 나타났다. 반복성을 계산해 본 결과 이번에 제작한 고속응답 CO₂ 분석기는 분석기가 측정할 수 있는 전체 농도인 15.758%의 $\pm 1.66\%$ 에 해당하는 $\pm 0.26\%$ 의 농도 측정 오차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

3.4 드리프트 측정

일반적으로 가스 분석기를 장시간 사용하게 될 경우 광학센서의 온도 변화, 분석기 내부 압력 변화, 샘플가스에 존재하는 수분과 PM에 의해 발광부에서 수광부에 이르는 광 경로의 오염 등으로 인해 측정신호의 드리프트가 발생하게 된다. 이번에 제작한 fCO₂ 분석기의 드리프트 특성을 알아보기 위해서 초기에 0%와 12.08% 농도를 가지는 CO₂ 가스를 fCO₂ 분석기에 흘려주면서 가스농도를 측정하였다. 그리고 나서 농도가 12.08%인 CO₂ 가스를 Fig. 8과 같이 각각 2분 간격으로 분석기에 유입·차단시켰다. 이런 과정을 30분간 반복한 후, 0%와 12.08% 농도를 가지는 CO₂ 가스를 다시 분석기에 흘려주면서 가스농도를 측정하였다. 여기서 측정된 가스농도를 초기 측정농도와 비교함으로써 드리프트 특성을 조사하였다.

측정 결과 0% CO₂ 가스의 경우 드리프트가 발생하지 않았으며, 12.08% CO₂ 가스의 경우 분석기가 측정할 수 있는 전체 농도인 15.758%의 1.13%에 해당하는 0.18%의 드리프트가 발생하는 것을 알 수 있었다.

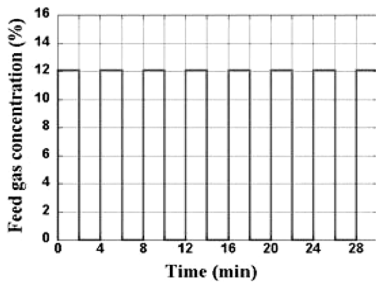


Fig. 8 Drift test

3.5 요약 및 검토

응답시간은 11ms로 6000rpm에서도 CO₂ 농도의 사이클 별 변화를 측정하기에 충분히 빠르고, 선형성 및 반복성은 NDIR을 이용한 다른 일반적인 배기 가스 분석기와 비슷한 수준의 정밀도임을 알 수 있다. 드리프트의 경우 일반적으로 고속응답 가스 분석기는 오랜 시간 동안 가스를 샘플링해서 분석하는 것이 아니라 초기 점화나 농도의 사이클 별 변화 측정과 같은 과도상태에서 짧은 시간 동안 가스 농도를 분석하는데 사용되므로, fCO₂ 분석기의 드리프트 특성을 보았을 때 fCO₂ 분석기를 엔진에 설치하여 CO₂ 농도를 측정하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

4. SI 엔진 적용

4.1 실험 장치 구성 및 실험 방법

앞서 기본 성능 테스트를 마친 fCO₂ 분석기를 가솔린 단기통 엔진의 배기관에 설치하였다. 그리고 일반적인 저속 가스 분석기와 측정신호를 비교하기 위해 HORIBA의 MEXA7100DEGR을 fCO₂ 분석기와 함께 설치하였다. 또한 배기밸브의 개폐시기를 판단하기 위하여 절대압센서인 KISTLER의 4045A를 배기관에 설치하였다. 실험에 사용한 가솔린 단기통 엔진의 사양은 Table 1에 나타내었다.

가솔린 단기통 엔진의 배기 밸브에서 약 10cm 떨어진 지점에 fCO₂ 분석기와 MEXA7100DEGR을 설치하였다. 그리고 엔진을 1500rpm으로 회전시키고, bmep(brake mean effective pressure)는 3bar, λ(relative air/fuel ratio)는 1에 해당하는 연료를 엔진에 분사하기 시작하여 초기 점화가 일어날 때 엔진에서 배출되는 CO₂ 가스의 농도를 fCO₂ 분석기와 MEXA

Table 1 Specification of the engine

Engine model	Four-Stroke single cylinder SI engine
Bore (mm) × Stroke (mm)	86 × 86
Displacement (cc)	500
Compression ratio	10.3

7100DEGR을 이용하여 측정 · 비교하였다.

4.2 결과 및 검토

Fig. 9는 연료를 분사하기 시작했을 때 엔진에서 배출되는 CO₂ 가스의 농도를 fCO₂ 분석기와 MEXA 7100DEGR을 이용하여 측정한 결과이다. fCO₂ 분석기와 MEXA7100DEGR은 엔진에서 배출된 CO₂ 가스의 농도를 인식하는데 걸리는 시간이 각각 다르므로, MEXA7100DEGR을 이용하여 측정한 결과를 이동시켜 두 분석기가 CO₂ 농도의 변화를 인식하기 시작하는 시점을 일치시켰다. 그리고 MEXA7100 DEGR의 경우 샘플가스에서 수증기를 제거하고 CO₂ 농도를 측정하기 때문에 그렇지 않은 fCO₂ 분석기의 측정결과보다 농도가 높게 측정되므로, 두 신호의 비교를 용이하게 하기 위해서 MEXA7100 DEGR의 측정농도를 수증기를 포함하고 있는 상태에서의 농도로 변환한 후 Fig.9에 함께 나타내었다.⁴⁾ Fig. 9를 보았을 때 fCO₂ 분석기와 MEXA7100DEGR을 이용하여 측정한 CO₂ 농도는 모두 약 13%까지 증가하는 것을 알 수 있다. 다만 fCO₂ 분석기는 MEXA7100DEGR과 달리 연료분사 초기(약 7.5초)

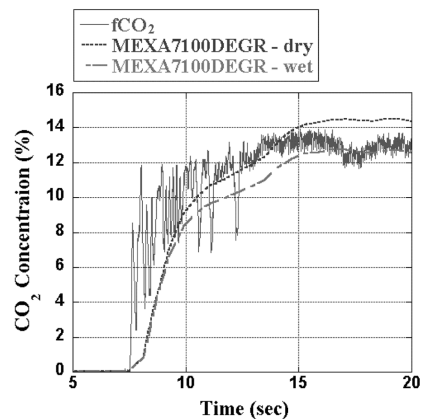


Fig. 9 Real-time measurement of CO₂ concentration when the engine started to inject fuel

에 발생하는 CO₂ 농도를 약 0.1초 이내에 감지하기 시작하며, 또 fCO₂ 분석기로 측정된 CO₂ 농도가 연료분사 초기(약 7.5~12초)에 크게 변하는 것을 보았을 때 연료분사 초기에 연소가 불안정하게 일어난다고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 MEXA7100DEGR을 이용하여 측정한 CO₂ 농도에는 나타나지 않은 것으로, fCO₂ 분석기가 초기점화와 같은 과도상태에서의 배기가스 분석에 유용하게 사용될 수 있음을 알려주는 것이다.

5. 결론

본 연구에서 제작한 고속응답CO₂(fCO₂) 분석기는 CO₂ 농도 분석에 일반적으로 사용되는 비분산 적외선 흡수법을 사용하고 있다. fCO₂ 분석기에 의해 측정된 신호는 많은 잡음이 포함되어 있기 때문에 칼만 필터를 사용하여 잡음을 제거하였다. 이렇게 제작된 fCO₂ 분석기가 과도상태에서 CO₂ 농도를 측정하는데 사용될 수 있는지 확인하기 위해서 정상상태에서 기본 성능 실험을 수행하였고, 그 결과는 아래와 같았다.

- u 응답시간(T_{10-90%}): 11ms
- u 선형성: ±2.54%FS
- u 반복성: ±1.66%FS
- u 드리프트: 1.13%FS/30min(FS = 15.758%CO₂)

응답시간은 11ms로 6000rpm에서도 사이클 별 농도 변화를 측정하는데 이용될 수 있을 만큼 충분히

빠르며, 선형성 및 반복성과 드리프트는 일반적인 배기가스 분석기와 비슷한 수준임을 알 수 있었다.

제작된 fCO₂ 분석기를 가솔린 단기통 엔진의 배기관에 일반 배기가스 분석기와 함께 설치하고 초기 점화 시 엔진에서 배출되는 CO₂ 가스의 농도를 측정하였다. 그 결과 fCO₂ 분석기가 초기점화와 같은 과도상태에서의 배기가스 분석에 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 서울대학교 정밀기계설계공동연구소의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 포함합니다.

References

- 1) W.-S. Kim, A Study on Design of Fast Response CO₂ Concentration Analyzer and Its Application to Automotive Engine, Ph. D. Dissertation, Ajou University, pp.1-12, 2004.
- 2) RMT Ltd, Data Sheets for OPR2-4239 TE Cooled Optopairs(carbon dioxide), 2005.
- 3) Patrick Y. C. Hwang and R. G. Brown, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering; with MATLAB Exercises and Solutions, John Wiley & Sons, 3rd edn, New York, pp.190-232, 1997.
- 4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, New York, pp.145-154, 1988.