

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.2.133

# 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기의 제작 및 이를 이용한 SI엔진에서의 실시간 배기가스 분석에 관한 연구

송현수\* · 박경석\*\* · 박동선\*\*\* · 민경덕†

(2008년 12월 26일 접수, 2009년 1월 5일 수정, 2009년 1월 8일 심사완료)

## Development of Fast-Response CO<sub>2</sub> Analyzer and Analysis of Engine-out Emission during Cold Start of SI Engine

Hyunsoo Song , Kyoungseok Park, Dong Sun Park and Kyoungdoug Min

**Key Words :** Fast-response(고속응답), NDIR(비분산 적외선법), Response Time(응답 시간), Cold Start(냉 시동), Cycle by Cycle Analysis(사이클 별 분석)

### Abstract

A fast-response CO<sub>2</sub> analyzer has been developed for measuring the CO<sub>2</sub> concentration during transient condition of a SI engine. The analyzer consists of the non-dispersive infrared absorption method, electrical chopping system and water cooling system. The analyzer has good repeatability, linearity and permissible drift characteristic. Besides, it showed 18ms of a response to measure the CO<sub>2</sub> concentration. The fast-response CO<sub>2</sub> analyzer was applied to a single cylinder SI engine and the CO<sub>2</sub> emission was examined during engine start. Simultaneously, the standard exhaust gas analyzer, which has slow response time, was used for confirming the accuracy of the exhaust gas analysis using the fast-response CO<sub>2</sub> analyzer. The developed analyzer showed much faster responsive characteristic than that of a standard analyzer and made cycle by cycle exhaust gas analysis possible. The transient engine operating characteristics will be estimated from the CO<sub>2</sub> concentration of engine-out emissions and engine operating variables.

### 기호설명

DPF : 디젤 입자상 물질 필터  
(diesel particulate filter)

SCR : selective catalytic reduction

EGR : 배기가스 재순환(exhaust gas recirculation)

HC : 미연탄화수소(unburned hydrocarbon)

CO : 일산화탄소(carbon monoxide)

CO<sub>2</sub> : 이산화탄소(carbon dioxide)

NO<sub>x</sub> : 질소산화물(Nitric oxides)

NDIR : 비분산 적외선법  
(Non Dispersive Infa-Red)

FFID : fast-response flame ionization detector

l : 길이(length)

d : 직경(diameter)

CG : 카트리지(cartridge)

N<sub>2</sub> : 질소 (nitrogen)

rpm : 분당 회전수(revolution per minute)

PCB : 인쇄회로기판(printed circuit board)

FS : 전체측정범위(full scale = 15.758%)

BMEP : 제동평균유효압력  
(brake mean effective pressure) [bar]

gIMEP : 총선도유효압력  
(gross indicated mean effective pressure) [bar]

SI : 전기점화(spark ignition)

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : kadmin@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1661 FAX : (02)883-0179

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 국립금오공과대학교 기계공학부

\*\*\* (주) EplusT

CVVT : continuous variable valve timing  
 C : 몰농도(mole concentration [ $\text{mole}/\text{m}^3$ ])  
 m : number of H of a fuel  
 n : number of C of a fuel  
 K : 평형상수(equilibrium constant)  
 COV : coefficient of variation

#### 그리스문자

$\lambda$  : 공연비(relative air/fuel ratio)  
 $\phi$  : 당량비(equivalence ratio)

#### 하첨자

i : 종(species)  
 $\text{H}_2\text{O}$  : 물 또는 수증기(water)  
 $\text{H}_2$  : 수소 (hydrogen)  
 $\text{CO}$  : 일산화탄소 (carbon monoxide)  
 $\text{CO}_2$  : 이산화탄소 (carbon dioxide)

#### 상첨자

\* : 건농도 (dry concentration)

## 1. 서론

자동차 산업의 배기규제는 점점 강화되고 있다. 이를 만족시키기 위하여 삼원 촉매, DPF, SCR 등의 후처리 시스템을 이용하여 대기로 배출되는 유해 배기가스를 저감시키는 연구와 EGR 과 연소의 분사전략 등을 통해 유해 배기가스의 생성을 억제하는 연구가 진행되고 있다. 유해 배기가스의 생성을 억제하는 경우 EGR 과 연소의 분사 등과 같은 변수를 정밀하게 제어하지 못하게 되면, 연소의 불안정성이 증가하여 유해 배기가스의 배출량은 증가한다. 연소의 불안정성은 엔진의 운전상태가 급변하는 과도상태에서 더 심각한 문제이다.

과도상태에서 엔진의 운전전략에 대한 제어의 필요성이 증가하면서, 가스농도의 변화를 수 ms 이내에 측정할 수 있는 고속응답 가스 분석기의 중요성이 대두되기 시작하였다. 현재 HC, CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  등의 기체 성분들의 농도를 실시간으로 측정할 수 있는 고속응답 가스 분석기가 개발되어 상용화되어 있다. 고속응답 가스 분석기를 이용할 경우 기본적으로 엔진의 과도상태에서 실시간 배기가스 분석이 가능해지며, 이를 통해 엔진제어 변수도 실시간으로 분석할 수 있다. 특히 고속응답  $\text{CO}_2$  분석기를 이용하게 될 경우 엔진에 적용하여  $\text{CO}_2$ 의 농도를 실시간으로 측정할 수 있을 뿐 아니라, 실린더 내에서 혼합기체를 직접 추출하여 잔류가스율을 측정하고,<sup>(1)</sup> 엔진에서 배출되는 배기가스 중의  $\text{CO}_2$ 의 농도와 실린더로 들어가는 신기의  $\text{CO}_2$ 의 농도를 사이클 별로 측정하여 EGR을 실시간으로 예측할 수 있다.<sup>(2)</sup>

현재 상용화되어 있는 고속응답  $\text{CO}_2$  분석기로는 Cambustion사의 NDIR 500 과 Horiba사의 MEXA 1300FR 이 있다. 두 장비 모두 10 만\$ 이상의 고가의 장비로 NDIR 500 의 경우 응답시간 측면에서 우수한 성능을 나타내고, MEXA 1300FR의 경우 반복성, 선형성 그리고 드리프트 특성에서 우수한 성능을 나타낸다.

본 논문에서는 본 연구진이 개발한 고속응답  $\text{CO}_2$  분석기 (이하  $\text{fCO}_2$  분석기)를 설명하고, 기본성능 실험을 수행하여 상용화된 고속응답  $\text{CO}_2$  분석기와 비교하였고, 엔진의 과도상태 특성 연구의 가능성을 확인하였다. 그리고  $\text{fCO}_2$  분석기와 MEXA-7100 DEGR을 이용하여 가솔린 엔진의 시동시 배출되는 배기가스 중의  $\text{CO}_2$ 의 농도를 비교 분석하였다. 또한  $\text{fCO}_2$  분석기를 이용하여 엔진 시동시 발생하는  $\text{CO}_2$ 의 농도를 사이클 별로 측정하였다. 사이클 별로 분석한  $\text{CO}_2$ 의 농도는 연소압력곡선을 통해서 구한 gIMEP와 비교 분석하였고 이를 통해 사이클 별 연소상태를 예측할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 고속응답 $\text{CO}_2$ 분석기

### 2.1 $\text{CO}_2$ 측정 원리

#### 2.1.1 비분산 적외선법

특정 파장을 가지는 적외선이 샘플가스를 통과할 때 각 기체 분자들은 특정 파장에 해당하는 적외선을 흡수한다.  $\text{CO}_2$ 의 경우 약  $4.3 \mu\text{m}$ 에 해당하는 파장의 적외선을 흡수하는 것으로 알려져 있다. 이처럼 기체 분자들이 특정 파장의 빛을 선택적으로 흡수하는 성질을 이용하여 가스의 농도를 측정하는 것을 비분산 적외선법 (NDIR)이라고 한다. NDIR은 CO와  $\text{CO}_2$  농도 측정에 대한 자동차 산업의 표준기술로 채택되어 있다.<sup>(3)</sup> Fig. 1 은 NDIR을 사용하여 만들어진  $\text{fCO}_2$  분석기의 개략적인 모형이다.

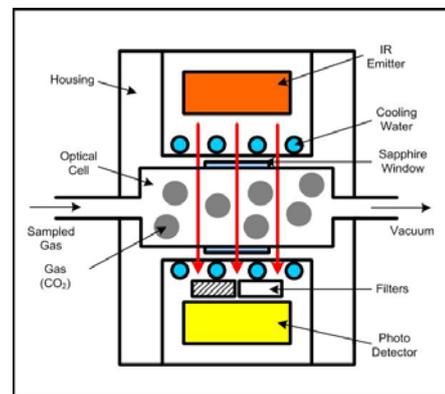


Fig. 1 Schematic diagram of  $\text{fCO}_2$  analyzer using NDIR

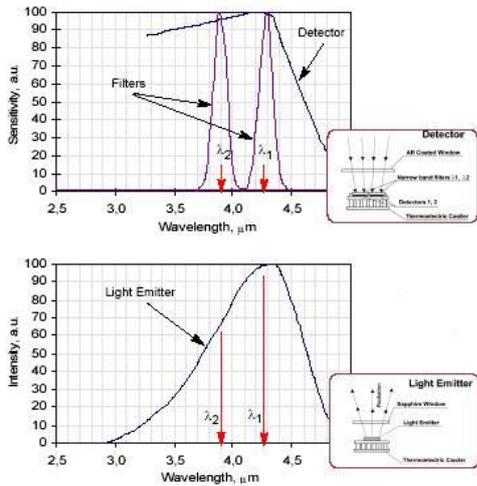


Fig. 2 Spectral response of photodetector with narrow-band filters and light emitter<sup>(4)</sup>

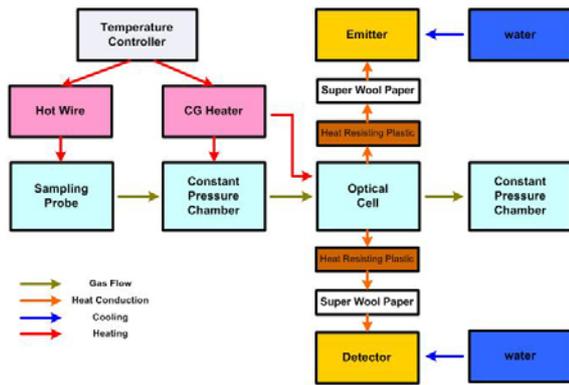


Fig. 3 Newly designed temperature controlling system

2.1.2 전기적인 광단속

비분산 적외선법을 사용하는 fCO<sub>2</sub> 분석기는 적외선에 의한 광학센서의 열 변형을 이용하여 공기 중의 CO<sub>2</sub>의 농도를 측정한다. 따라서, 장시간 fCO<sub>2</sub> 분석기를 이용할 경우 적외선 신호를 받아들이는 수광부에서 열 변형의 누적현상으로 인하여 신호의 드리프트 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상을 해결하기 위하여 발광부에서 방출하는 적외선을 주기적으로 단속하는 방식을 사용한다. 현재 널리 사용되는 광단속 방법으로는 전기적인 신호에 의하여 발광부의 on/off를 제어하는 전기적인 광단속 (electrical chopping)과 모터에 의해서 회전하는 광단속 원반을 사용하여 발광부에서 방출되는 적외선을 제어하는 기계적인 광단속 (mechanical chopping)이 있다. 이번에 제작된 fCO<sub>2</sub> 분석기는 Fig. 1 과 같이 전기적인 광단속을 사용하였다.

전기적인 광단속 및 적외선의 방출과 측정 신호의 동기화를 위해 Fig. 2 와 같은 한 쌍의 광학센서를 사용하였다. 발광부 (emitter)와 수광부 (detector)의 경우 CO<sub>2</sub>가 흡수하는 파장인 4.3 μm 부근의 파장에서 감도가 가장 좋은 것을 알 수 있다. 수광부에 설치된 두 개의 narrow-band filter는 측정하고자 하는 파장대의 적외선을 통과시키는 역할을 한다. narrow-band filter는 CO<sub>2</sub>가 주로 흡수하는 약 4.3 μm 파장에 해당하는 빛을 통과시키는 필터 (base channel)와 약 3.9 μm 파장에 해당하는 빛을 통과시키는 필터 (reference channel)로 구성된다. Reference channel에서는 측정하고자 하는 CO<sub>2</sub>의 농도에 관계없이 들어오는 적외선의 강도가 일정하므로 출력전압이 일정하고, base channel에서는 CO<sub>2</sub>의 농도에 따라 들어오는 적외선의 강도가 변화하므로 출력전압이 변화한다.<sup>(3)</sup> 따라서 CO<sub>2</sub>가 광학 셀을 통과할 경우 두 channel에서의 출력 전압을 비교하여 CO<sub>2</sub> 가스의 농도를 측정할 수 있다.

2.2 내부구조 및 시스템

제작된 fCO<sub>2</sub> 분석기의 내부구조는 배기가스 중의 HC를 실시간으로 측정하기 위해 Combustion사에서 개발한FFID와 Cheng의 논문을 참고하여 설계하였다. 분석 기체를 샘플링시 발생하는 압력 변화의 영향을 줄이기 위해서는 샘플링 프로브는 L/d>200, 팽창 튜브는 L/d>30, 광학 튜브는 L/d>200, 정압 챔버의 용량은 100~cm<sup>3</sup> 유지해야 한다고 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

광학 셀에서의 갑작스런 부피 팽창에 의한 저장과 셀 내부에 고이는 체적을 효율적으로 해결할 수 있는 구조를 도입하였고, 사파이어 윈도우의 오염 문제를 용이하게 해결하기 위하여 광학 셀을 모듈화하였다.

광학 셀에서의 수분응축은 CO<sub>2</sub>의 농도를 왜곡하고, 분석기의 작동시간을 제한한다. 수분응축을 해결하기 위하여 Fig. 3 과 같은 온도조절 시스템을 구성하였다. 열선, 카트리지 히터 그리고 온도 컨트롤러를 이용하여 샘플링 라인을 가열하여 수분응축을 방지하였다. 분석기에서 발생한 열이 센서로 전달되어 센서의 온도가 상승할 경우 센서의 감도는 감소하게 된다. 따라서, 내열 플라스틱과 단열재를 이용하여 열전도를 낮추었고, 냉각방식을 공냉식에서 수냉식으로 변경하여 냉각효율을 향상시켰다.

3. 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기의 기본성능

3.1 실험장치의 구성

fCO<sub>2</sub> 분석기의 기본성능과 calibration을 수행하

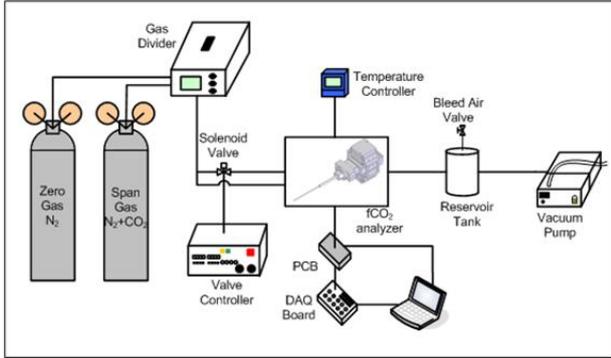


Fig. 4 Schematic diagram of test equipment for fundamental performance of fCO<sub>2</sub> analyzer

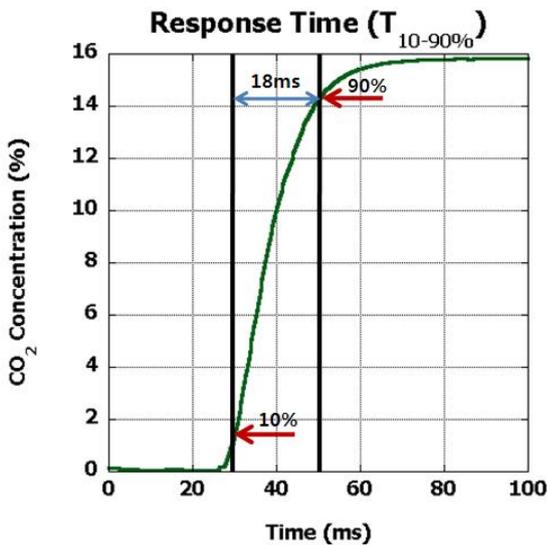


Fig. 5 Response time of the fCO<sub>2</sub> analyzer

기 위하여 Fig. 4 와 같이 실험장치를 구성하였다. Zero 가스로 N<sub>2</sub>가스를, span 가스로 15.758%의 CO<sub>2</sub>가스를 사용하였다. 가스 디바이더를 사용하여 fCO<sub>2</sub> 분석기를 통과하는 가스의 농도를 조절하였다. fCO<sub>2</sub> 분석기의 샘플링 튜브 전단에는 솔레노이드 밸브를 사용하여 분석기로의 가스 유입을 조절하였다. 솔레노이드 밸브와 샘플링 튜브를 바로 연결시켜 가스의 fCO<sub>2</sub> 분석기로의 이송시간을 최소화하였다. fCO<sub>2</sub> 분석기의 후단에는 진공 펌프를 연결하여 압력 차이를 유도하였고, 이를 통해 샘플 가스의 흐름을 원활하게 만들었다. 온도에 민감한 센서의 감도를 유지하기 위하여 물을 이용하여 센서를 냉각하였다. 센서의 작동과 신호 처리는 PCB회로를 통하여 조절하였다. 저장된 데이터는 칼만 필터를 이용하여 노이즈를 제거하였다.

fCO<sub>2</sub> 분석기의 calibration은 가스 디바이더를 이용하여 스펠가스를 10 단계로 나누어 총 11 단계

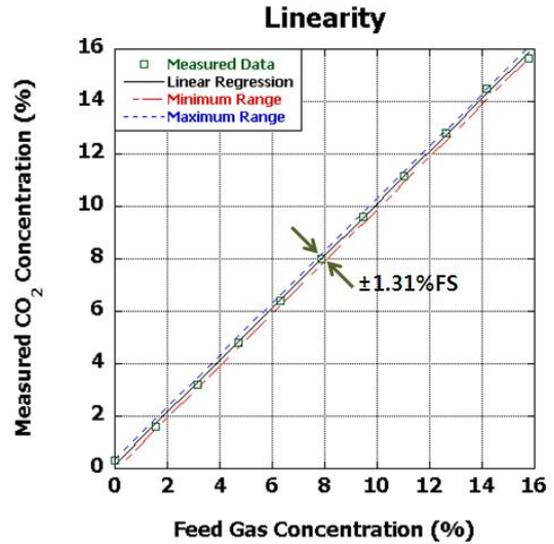


Fig. 6 Linearity of the fCO<sub>2</sub> analyzer

의 가스 조성을 가지고 실시하였다. Calibration 은 모든 실험 전에 실시하였고, 샘플가스의 주입압력은 엔진의 배기 상태와 비슷하게 유지시키기 위하여 약 1.2bar 로 유지하였다.

### 3.2 기본성능

#### 3.2.1 응답시간

응답시간은 fCO<sub>2</sub> 분석기에 15.758 % 농도를 가지는 CO<sub>2</sub>를 흘려주었을 때, 분석기가 전체 가스농도의 10 ~ 90 %를 인식하는데 걸리는 시간을 의미한다.<sup>(6)</sup> 응답시간을 측정하기 위해서 분석기의 프로브 전단에 솔레노이드 밸브를 연결하여 CO<sub>2</sub>가 순간적으로 fCO<sub>2</sub> 분석기로 흘러갈 수 있도록 조절하였다. 실험을 통해서 얻은 fCO<sub>2</sub> 분석기의 응답시간은 Fig. 5 와 같이 18 ms이다. 엔진의 일반적인 작동상태인 2000~3000 rpm의 한 사이클이 40~60 ms인 것을 고려할 때, CO<sub>2</sub> 농도의 사이클 별 변화량을 측정하기에 충분함을 확인할 수 있다.

#### 3.2.2 선형성

선형성은 가스 분석기에 공급되는 가스의 실제 농도와 분석기에 의해서 측정되는 가스의 농도 사이에 나타나는 선형적인 관계를 의미한다.<sup>(6)</sup> 선형성을 측정하기 위해서 가스 디바이더를 이용하여 스펠가스의 농도를 10 단계로 나눈 후 fCO<sub>2</sub> 분석기에 각각 30 초 동안 공급하였다. 그 때 fCO<sub>2</sub> 분석기에 의해서 측정되는 가스 농도의 평균값을 계산하였고, 결과는 Fig. 6 과 같다. 선형성을 계산해본 결과 ±1.31 %FS의 정밀도를 얻을 수 있었다.

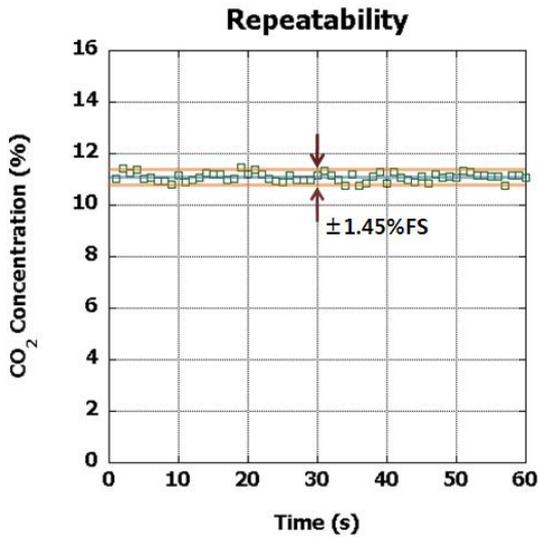


Fig. 7 Repeatability of the fCO<sub>2</sub> analyzer

3.2.3 반복성

반복성이란 일정한 농도의 CO<sub>2</sub>를 가스 분석기에 흘려주면서 가스 농도를 측정할 때, 측정 농도의 범위가 어느 정도인지를 나타내는 지표이다.<sup>6)</sup> 반복성을 측정하기 위해서 농도가 11.03 %인 CO<sub>2</sub>를 fCO<sub>2</sub> 분석기에 흘려주면서 50 초 동안 1 초 간격으로 농도를 측정하였다. 반복성을 계산해 본 결과 Fig. 7 에서 보는 바와 같이 ±1.45 %FS 정도의 정밀도를 얻을 수 있었다.

3.2.4 드리프트

드리프트는 가스 분석기를 장시간 사용하게 될 경우 발생하는 신호의 이동현상이다. 드리프트의 원인으로서는 광학센서의 온도 변화, 분석기 내부의 압력 변화, 샘플가스에 존재하는 수분과 HC에 의해 발생하는 광 경로의 오염 등이 있다.<sup>6)</sup> fCO<sub>2</sub> 분석기의 드리프트 특성을 알아보기 위해서 농도가 0 %와 11.03 %인 CO<sub>2</sub>를 각각 2 분 간격으로 30 분 간 분석기에 유입시켰다. 그 후 농도가 0 %와 11.03 %인 CO<sub>2</sub>를 다시 분석기에 흘려주면서 가스 농도를 측정하였고, 이 때 측정된 가스농도를 초기 측정농도와 비교하여 드리프트를 확인하였다. 측정 결과는 Table 1 과 같다.

일반적으로 고속응답 배기가스 분석기는 초기 점화나 운전상태가 급격히 변하는 과도상태에서 짧은 시간 동안에 사용하므로 드리프트 특성을 보았을 때 fCO<sub>2</sub> 분석기를 엔진에 설치하여 CO<sub>2</sub>농도를 과도상태에서 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1 Drift characteristic of the fCO<sub>2</sub> analyzer

Feed gas concentration (%)	Initial state (%)	Final state (%)	Drift (%FS/30min)
0	0.26	0.34	0.51
11.03	11.24	11.43	1.20

Table 2 Comparison of the fast-response CO<sub>2</sub> analyzer

	fCO <sub>2</sub>	NDIR 500	MEXA 1300FR
응답시간 (ms)	18	8	<30
선형성 (±%FS)	1.31	2	1
반복성 (±%FS)	1.45	X	1
드리프트 (%FS/hr)	2.40	2	1

(X: 측정하지 않음)

3.3 기본성능 비교 평가

상용화된 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기와 비교 평가를 통해 fCO<sub>2</sub> 분석기의 성능과 엔진적용 가능성을 확인하였다. 응답시간은 NDIR 500 과 MEXA 1300FR의 중간에 해당하는 값을 나타냈고, 선형성, 반복성에서 상용 분석기와 비슷한 수준인 ± 1~2 %FS을 나타냈고, 드리프트도 상용화된 고속응답 CO<sub>2</sub>분석기와 비슷한 수준이었다.

기본성능 테스트를 통하여 본 연구진이 제작한 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기를 이용하여 엔진의 과도상태 특성을 연구할 수 있음을 간접적으로 확인하였다. 따라서, 제작한 fCO<sub>2</sub> 분석기를 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도의 실시간 분석뿐 아니라, 잔류가스율과 EGR 등의 측정을 통해 엔진의 작동상태를 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

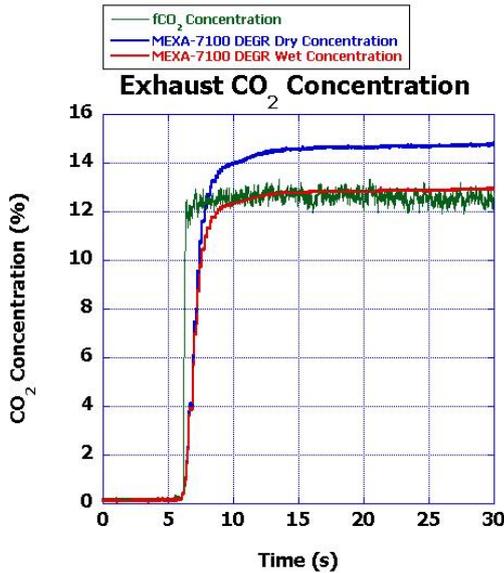
4. 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기와 이를 이용한 엔진의 작동상태 연구

4.1 실험장치 및 실험방법

가솔린 단기통 엔진의 배기관에 fCO<sub>2</sub> 분석기와 상용 배기 분석기인 MEXA-7100 DEGR을 설치하고 배기가스 중의 CO<sub>2</sub>농도를 측정하였다. 실험에 사용한 가솔린 단기통 엔진의 사양은 Table 3 과

**Table 3** Specifications of the SI engine with single cylinder

Engine Model	Four-Stroke Single cylinder SI Engine
Bore (mm) × Stroke (mm)	86 × 86
Displacement Volume (cc)	500
Compression Ratio	10.3
Valve Timing System	Dual CVVT

**Fig. 8** Exhaust gas analysis when engine started using fCO<sub>2</sub> and MEXA-7100 DEGR

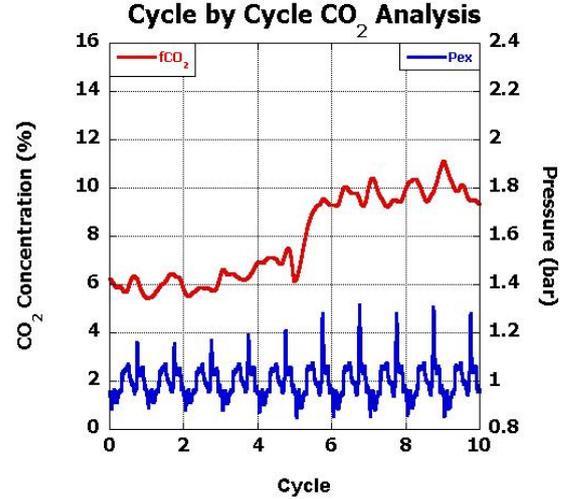
같다. 엔진은 모터링 상태에서 회전수 1500rpm, BMEP 3bar,  $\lambda = 1$  인 조건으로 작동시켰다. 엔진의 냉 시동부터 정상상태로 도달할 때까지의 CO<sub>2</sub> 농도를 분석하였다. 이에 더해 배기가스 중의 CO<sub>2</sub> 농도를 사이클 별로 측정하였고, 연소압력을 통해서 계산한 gIMEP값을 통하여 연소안정성을 확인하였다.

#### 4.2 배기가스 분석

##### 4.2.1 냉 시동시 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기를 이용한 배기가스 분석

엔진의 냉 시동시에 배출되는 CO<sub>2</sub> 농도를 고속 응답 배기분석기인 fCO<sub>2</sub> 분석기와 일반 배기분석기인 MEXA-7100 DEGR을 이용하여 동시 측정하였다. MEXA-7100 DEGR을 사용하여 측정하는 데이터는 수증기를 제외한 건공기 상태에서의 값으로 fCO<sub>2</sub> 분석기와 비교분석을 수행하기 위하여 아래의 수식을 이용하여 습공기 상태에서의 값으로 환산하였다.<sup>(7)</sup>

$$C_i = (1 - C_{H_2O}) \cdot C_i^* \quad (1)$$

**Fig. 9** Cycle by cycle CO<sub>2</sub> concentration when the injected fuel is varied at 1500rpm, 40% load

$$C_{H_2O} = \frac{m}{2n} \cdot \frac{C_{CO}^* + C_{CO_2}^*}{1 + \frac{C_{CO}^*}{K \cdot C_{CO_2}^*} + \frac{m}{2n} \cdot (C_{CO}^* + C_{CO_2}^*)} \quad (2)$$

$$K = \frac{C_{CO} \cdot C_{H_2O}}{C_{CO_2} \cdot C_{H_2}} \approx 3.5, \quad \frac{m}{n} = 1.87 (\text{for gasoline})$$

그리고 응답 시간이 느린 MEXA-7100 DEGR의 농도 상승시점을 일치시켜 비교 분석하였다. 그 결과는 Fig. 8 과 같다. 두 분석기의 신호가 안정화된 정상상태에서는 fCO<sub>2</sub> 분석기의 평균값과 MEXA-7100 DEGR의 측정값이 모두 약 12.6~12.8 %에 해당하는 CO<sub>2</sub> 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이에 더해 fCO<sub>2</sub> 분석기의 경우 빠른 응답시간을 보이기 때문에 엔진 시동과 동시에 CO<sub>2</sub> 농도를 분석하며, CO<sub>2</sub> 농도의 변화를 감지하는 시간도 0.1 초 내로 굉장히 짧음을 확인할 수 있다.

##### 4.2.2 냉 시동시 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기를 이용한 사이클 별 배기가스 분석

엔진의 작동상태를 파악하기 위하여 실린더와 흡배기 압력을 CO<sub>2</sub> 농도와 같이 측정하였고, 사이클 별 변화를 확인하기 위해서 1 CA 간격으로 데이터를 저장하였다. 사이클 별 변화의 측정가능성을 확인하기 위하여 1500 rpm, 부하 40 % 조건에서 연료의 분사량을 변화시켜 실린더 내부 혼합기체의 조성을 변화시켰다. Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 fCO<sub>2</sub> 분석기를 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도가 약 6 % ( $\phi=0.45$ )에서 약 10 % ( $\phi=0.8$ )로 변화하는 것을 측정할 수 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 엔진

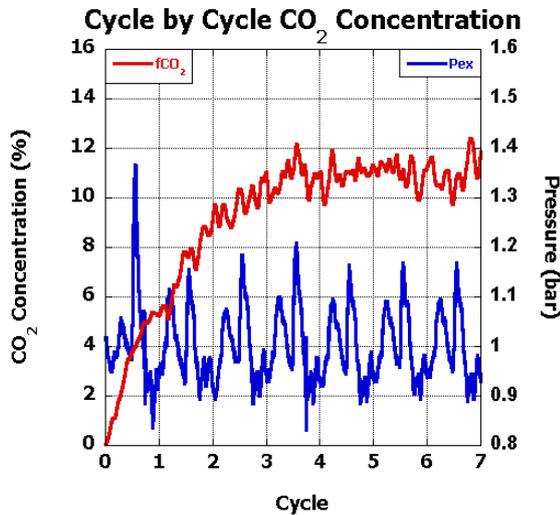


Fig. 10 Cycle by cycle CO<sub>2</sub> concentration with exhaust pressure at the cold start

의 작동상태의 변화를 사이클 별로 확인할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 10 은 fCO<sub>2</sub> 분석기를 이용하여 엔진 모터링 상태에서 시동을 걸어 정상상태에 도달할 때까지 배기가스 중의 CO<sub>2</sub>농도의 변화를 사이클 별로 분석한 것이다. 측정된 CO<sub>2</sub> 농도는 Fig. 11 에 제시된 엔진의 실린더 압력과의 비교를 통해 연소상태를 파악하는데 사용하였다.

Fig. 10 을 보면 알 수 있듯이, 모터링 상태에서는 CO<sub>2</sub>농도가 거의 0 %이고, 연소가 시작되면서부터 CO<sub>2</sub>농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 측정된 CO<sub>2</sub> 농도는 연소가 시작되면서 배기관에 차 있던 공기의 영향으로 서서히 증가하고, 냉 시동시 정상상태에 도달하기까지는 약 6~7 사이클이 소요되는 것을 알 수 있다. 냉 시동 초기 배기가스 중의 CO<sub>2</sub> 농도는 연소가 안정된 사이클에 비해 낮으며, 연소가 안정화된 이후 CO<sub>2</sub> 농도는 12~13 %정도의 값을 갖는다. 냉 시동 초기의 연소 불안정성은 연소압력을 통해서 구한 압력선도와 gIMEP와의 비교를 통해서 분석할 수 있다. Fig. 11 은 냉 시동 초기 사이클의 연소압력 곡선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 압력 선도가 일정하지 않으며, gIMEP가 정상상태의 평균값과 유사한 값을 갖기 위하여 약 7 사이클 정도가 소요되는 것을 확인할 수 있다. 냉 시동 초기의 사이클 별 gIMEP는 연소의 불안정성에 의한 사이클 별 편차로 인하여 변화가 심한 것을 볼 수 있다. 또한, Table 4 에서 볼 수 있듯이 냉 시동시 gIMEP의 평균값이 정상상태에서의 값과 차이가 존재하며, 사이클 별 변화를 나타내는 COV도 정상상태에서 계산되는 값의 3 배 이상임을 알 수 있다. 이를 통해 냉 시동 초기 연소의 불안정을 확인할 수 있고, fCO<sub>2</sub> 분석기를 이용하여 엔진의 연소 불안정성을 확인할 수

있음을 알 수 있다.

Table 4 gIMEP at the cold start and steady state

gIMEP(bar)	Cold Start	Steady State
Average	3.30	3.53
Deviation	0.19	0.06
COV(%)	5.70	1.74

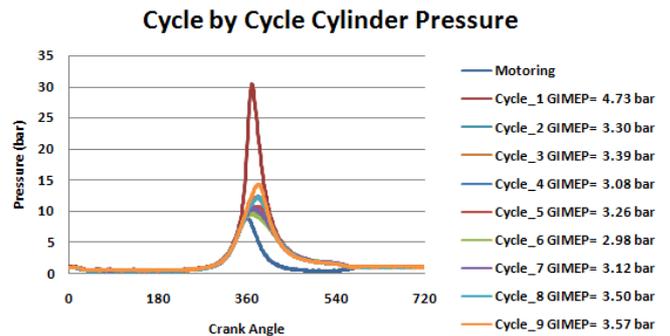


Fig. 11 Cycle by cycle cylinder pressure with gIMEP during cold start

## 5. 결론

CO<sub>2</sub> 농도 분석에 표준방법으로 사용되는 비분산 적외선법과 전기적인 광단속을 이용하여 CO<sub>2</sub> 농도를 실시간으로 측정할 수 있는 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기를 제작하였다. 수분응축을 방지하기 위하여 온도조절시스템을 적용하였고, 외부 조건의 변화에 상관없이 광학 셀을 통과하는 유량을 일정하게 유지할 수 있도록 내부 구조를 설계하였다. 기본성능 실험 결과 제작한 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기의 응답시간은 18 ms이며, 선형성은 ±1.31 %FS이었고, 반복성은 ±1.45 %FS이었다. 마지막으로 30 분에 1.20 %FS의 드리프트가 발생하였다. 기본성능 실험을 통해 상용화된 고가의 고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기에 뒤처지지 않는 것을 확인하였다.

고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기와 엔진 실험에 광범위하게 사용되는 MEXA-7100 DEGR을 가솔린 단기통 엔진의 배기관에 설치하고 동시에 배기가스 중의 CO<sub>2</sub>의 농도를 측정된 결과 엔진의 연소가 안정화된 정상상태에서 배기가스 중의 CO<sub>2</sub> 농도를 정확하게 측정하는 것을 확인할 수 있었다.

고속응답 CO<sub>2</sub> 분석기를 이용하여 크랭크 각을 기준으로 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 1 CA 간격으로 측정된 결과 CO<sub>2</sub> 농도의 사이클 별 변화를 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 냉 시동 초기에 측정된 사이클 별 CO<sub>2</sub> 농도의 변화량과 연소압력

데이터를 통해서 구한 압력선도, gIMEP값의 비교를 통하여 연소 불안정성을 확인하였다.

### 참고문헌

- (1) Karagiorgis, S., Collings, N., Glover, K., Coghlan, N., Petridis, A., 2006, "Residual Gas Fraction Measurement and Estimation on a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Utilizing the Negative Valve Overlap Strategy," *SAE Technical Paper Series*, 2006-01-3276, pp. 4~6.
- (2) Sutela, C., Collings, N., Hands, T., 2000, "Real Time CO<sub>2</sub> Measurements to Determine Transient Intake Gas Composition under EGR Conditions," *SAE Technical Paper Series*, 2000-01-2953, pp. 4~8.
- (3) Kim, W. S., 2004, "A Study on Design of Fast Response CO<sub>2</sub> Concentration Analyzer and its Application to Automotive Engine," *Ajou University*, PhD Thesis, pp. 1~12.
- (4) RMT Ltd., "Components for Gas Analysis," 2005, *New Millennium Products*, pp. 11~19.
- (5) Cheng, W. K., Summers, T., Collings, N., 1998, "The Fast-Response Flame Ionization Detector," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.24, pp. 93~102.
- (6) Lee, J. Y., 2007, "Development of a Fast-Response CO<sub>2</sub> Analyzer Using NDIR Technique and its Application to SI Engine," *Seoul National University*, master thesis, pp. 24~32.
- (7) Heywood, J. B., 1998, "Internal Combustion Engine Fundamentals," *McGraw-Hill*, pp. 145~154.