

비분산 적외선 분광법을 이용한 CO₂ 농도 고속 분석기의 Sampling Module 특성에 관한 실험적 연구

김우석[†], 손덕영*, 박영무**, 유재석**, 이종화**

(2002년 10월 31일 접수, 2003년 1월 16일 심사완료)

An Experimental Investigation into the Characteristics of Sampling Module for Fast-Response CO₂ Concentration Analyzer with NDIR

Wooseok Kim, Deokyoung Sohn, Youngmoo Park, Jaisuk Yoo and Jonghwa Lee

Key Words : NDIR(비분산 적외선 분광법), FRNDIR(고속 응답 비분산 적외선 분광법), Capillary(모세관), Transit Time(이송시간), Time Constant(시상수)

Abstract

A fast response analyzer for measuring carbon dioxide concentration has been developed for transient characteristic and researches tested on internal combustion engine. The analyzer uses the well known NDIR(Non-Dispersive Infrared) method with miniaturized detection system, giving a time constant of approximately 30 microsecond, and sampling module consists of capillary tube. Since the transit time and the time constant of the sampling system depend on the sampling conditions, it is necessary to investigate the characteristics of sampling system before applied to exhaust gas measurement in engine. A unique method was designed to study the influence of the diameter of transfer sample line and operating conditions of the FRNDIR on transit time and time constant. A database of transit time and time constant was built up for different measured and simulated pressure conditions. The database can be used for correcting eventual CO₂ concentration measurement.

τ : 10 ~ 90% 농도를 측정하는데 걸리는 시간

기호설명

- c : 측정 가스 농도
- I₀ : 시료가스에 조사되는 적외선 광도
- k : 난류운동에너지
- L : 샘플 셀 길이
- r : 반경방향
- T_t : 시료가스가 측정부까지 이동하는 시간
- u : 축방향 속도
- v : 반경방향 속도
- x : 축방향
- α : 특정 파장에서 가스의 적외선 흡수율 상수
- ϵ : 소산율

1. 서론

지난 수년 동안 엔진의 유해 배출물에 대한 규제가 강화되면서, 과도상태에서의 엔진 성능 향상 및 유해가스 배출특성 파악에 고속 응답 농도 분석기를 적용한 광범위한 연구가 수행되고 있다. 또한, 엔진에의 적용이 가능한 배출가스 농도 고속 분석기의 개발은 미연탄화수소(uHC), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 등의 농도를 사이클별 실시간 측정이 가능하도록 하였다.⁽¹⁻³⁾

비분산 적외선 분광법(NDIR)은 적외선 투과율이 거리에 비례한다는 Beer's law와 농도에 비례한다는 Lambert's law를 이용한 특정 가스 농도 측정법으로, 일산화탄소와 이산화탄소 농도 측정

[†] 아주대학교 대학원

E-mail : heli7@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2351 FAX : (031)213-7108

* 아주대학교 대학원 기계공학과

** 아주대학교 기계 및 산업공학부

에 주로 이용된다. 일반적으로 배기가스 분석기에서 이산화탄소 농도 측정은 NDIR 방식의 측정에 광음향(photo-acoustic) 효과를 이용한 detector를 사용하였으므로 엔진의 사이클별 CO₂ 측정은 기구적인 한계에 부딪혔으나, 반도체 제조 공정의 발달은 고속 측정이 가능한 광도전소자(Photo-conductor)의 개발로 이어져 CO₂ 농도 고속 분석이 가능하게 되었다.

엔진의 과도 운전 시 배기 배출물 특성 연구를 위한 실시간 농도 측정은 엔진의 사이클과 사이클 간 농도 변화 측정이 가능해야 하는데, 이를 위해 고속 응답 농도 분석기는 샘플가스를 detector까지 이송하는데 걸리는 시간(transit time, T_i)과 detector가 10~90%까지 농도를 측정하는데 요구되는 시간(time constant, τ₁₀₋₉₀)을 최소로 하는 Sampling Module 설계가 이루어져야 한다.^(4,5)

또한, Sampling Module의 특성은 농도 분석 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 T.summers와 N.collings는 고속응답 FID의 sampling probe 설계를 위해 이송시간에 관한 모델링을 수행하였고, L.Haifeng와 J.S.Wallace는 FRFID의 in-cylinder sampling 시 Sampling Module의 특성이 분석 결과에 미치는 영향에 대한 모델링과 실험적 연구를 수행하였다.^(6,7)

C.Sutela와 N.Collings 그리고 T.Hands는 고속 응답 CO₂ 분석기를 개발하여 엔진의 공기연료비와 흡입축매 전후의 농도 변화를 실시간으로 관찰 하였고, EGR 상황에서 흡기 포트내부의 과도 상태 농도 분석을 수행하였다.^(3,5) 그러나 이산화탄소 고속 농도 분석기의 Sampling Module 특성에 관한 연구 결과는 분석기의 핵심 기술로서 특허와 기밀 문제로 인해 배일에 가려져 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 NDIR을 이용한 이산화탄소 농도 고속 분석기의 Sampling Module 설계에 필요한 기초 자료 확보를 위한 연구를 실험과 모델링을 통해 수행하고자 한다.

2. CO₂ 농도 고속 분석 장치 설명

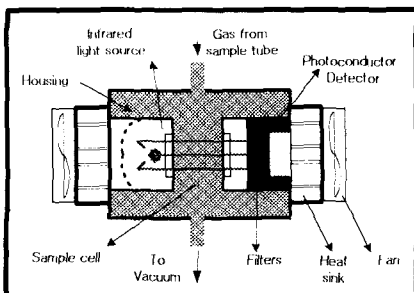


Fig. 1 Schematic diagram of the FRNDIR analyzer

엔진의 사이클 간 배출가스 중 CO₂ 농도 고속 분석을 위한 고속 응답 CO₂ 농도 분석기(FRNDIR; Fast-response Non-Dispersive Infrared)를 Fig.1과 같이 개발하였다.

2.1 농도 측정부

2.1.1 비분산 적외선 분광 흡수법

CO₂ 농도 분석에는 일반적으로 비분산 적외선 분광법(NDIR)이 이용되고 있다. NDIR 방식은 적외선을 시료 가스에 조사하여 가스 중에 포함된 쌍극자 분자(CO₂, CO, C_xH_y, NO_x, 그리고 H₂O)가 흡수하는 특정 파장에서 적외선이 흡수되어 가스를 통과한 적외선의 에너지가 특정파장에서는 낮게 검출되는 방법을 이용한다.

NDIR 흡광법에 이용되는 Lambert-Beer's Law를 정리하면 다음과 같다.

$$I = I_0 \times e^{-\alpha \times c \times l} \quad (1)$$

그러므로 농도의 미소한 차이에 대한 적외선 감도 차이는 식 (2)와 같이 정리 된다.

$$\frac{dI/I}{dc/c} = -\alpha \times c \times l \quad (2)$$

따라서, Detector에 조사된 적외선 광도(light intensity)의 차이는 시료가스 중의 CO₂ 농도 차이에 의해 발생하는 것이므로 광도 차에 의한 detector 전압 변화로부터 농도 측정이 가능하다.

2.1.2 광원 및 Detector

Sample cell과 교차되는 광경로 양단에는 적외선 광원과 detector가 설치되어 있다.

NDIR에 의한 농도 분석은 CO₂ 농도 변화에 대한 detector의 미세한 전압 변화를 이용하게 되므로, 전기적인 노이즈와 온도 차이에 의한 drift에 주의하여야 한다.

일반적으로 분석기의 S/N비를 높이기 위해 특정 주파수에서 기구적인 광단속(mechanical chopping)을 하게 되는데, 본 연구에서 적외선 광원은 고속 응답 속도 확보를 위해 1ms의 주기로 전기적인 광단속이 가능한 반도체 Laser를 사용하였고, detector는 Fig. 2와 같이 CO₂ 가스가 반응하는 적외선 흡수 파장(4.28μm) 부근에서 빠른 응답 속도(<30μsec)와 감도(D*, 1.2~1.6*10⁻⁸)를 확보할 수 있는 PbSe type 광도전소자를 사용하였으며, 광학 기구부의 온도 변화에 의한 drift를 최소화 하기 위해 TE-cooler와 thermistor를 광원과 detector에 각각 설치하여 -40~20±0.01°C범위에서 온도 설정이 가능 하도록 하였다.

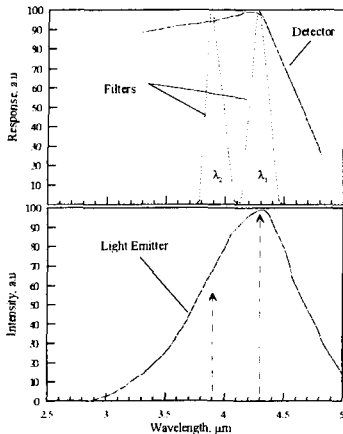


Fig. 2 Spectral responses of photodetector with narrow-band pass filters and light emitter

Table 1 ID of capillary used for this study

ID of probe	ID of outlet pipe		
	0.56mm	0.99mm	1.77mm
0.56mm	A1	A2	A3
0.99mm	B1	B2	B3
1.77mm	C1	C2	C3

2.2 Sampling module

고속 응답 농도 분석기의 Sampling module은 엔진으로부터 배기가스를 인출하는 sampling probe, 농도를 측정하는 sample cell, 그리고 분석기 출구의 진공 압력을 일정하게 제어하기 위한 정압 제어부로 나누어 진다.

2.2.1 Sampling probe

Sampling probe는 샘플가스를 sample cell까지 이송하기 위한 경로로서 probe내부 유동은 난류이고, 질량 유량의 한계는 pipe 직경에 의해 결정된다. 따라서, FRNDIR에서 이송시간(T)과 시상수(τ)를 줄이고, sensor의 감도를 극대화 시킬 수 있는 적절한 유량 설정을 위한 probe 직경의 선택이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 Table 1과 같이 probe의 직경과 분석기 출구의 직경을 9단계로 달리하여 각각에 대한 분석기 출력 값을 비교하여 입출구 직경 변화와 이송시간 및 시상수의 관계를 알아 본다.

2.2.2 Sample cell

FRNDIR에서 sample cell은 광원부와 측정부가 장착되어 있고, 광경로를 가로질러 샘플가스가 통과하게 된다. 이때 고속 농도 분석을 위해서는 식(1)로부터 크기는 작게, 광경로는 짧도록, 그리고 내부 적외선 난반사를 줄이기 위해 cell 조도는 2μm이하로 설계하여야 한다.

측정 가스의 농도 변화에 대한 detector의 감도 (sensitivity)는 cell 입출구의 압력차에 의해 달라지게 되는데, 이는 광경로를 통과하는 샘플가스의 분자수가 가스의 밀도에 비례하게 되어, cell 압력이 높아지면 감도 또한 증가하기 때문이다.

2.2.3 정압 제어부

분석기 양단은 진공 펌프에 의해 -0.9barg 이하의 음압을 형성하여 엔진으로부터 사이클별 배출가스 고속 인출이 가능하여야 고속 분석기로의 의미를 가질 수 있다. 분석기 내부에서의 압력 변동은 샘플가스의 밀도 차이로 이어져 농도 분석 오차 증가 요인으로 작용할 수 있다.

분석기 입출구의 안정적인 압력 조절과 유지를 위해 출구에는 constant pressure chamber를 두어 일정 배압을 유지할 수 있도록 하고, 압력 변화에 따른 영향 파악을 위해서 입구의 압력을 설정할 수 있도록 설계하였다.

3. Sampling module 수치해석

Sampling module 내의 가스 유동 해석은 실험 장치의 구조적인 제약으로 인해 측정을 통한 방법에는 다소 어려움이 수반된다.

특히, 3부분으로 구성된 sampling module 내의 속도와 밀도 분포에 대한 해석으로부터 농도 측정부에서의 detector 감도 예측과 sampling module 전반에 걸친 속도 분포 예측이 가능하므로, 본 연구에서는 sampling module 유동 해석을 완전한 구조에서의 속도 예측과 단순 모세관에 대한 속도 예측을 수행하여, 측정부의 적정 감도를 유지하면서 이송시간과 시상수를 단축 시킬 수 있는 sampling module 설계에 필요한 기초 데이터를 확보하고자 한다.

수치해석은 FLUENT 코드를 이용하여 수행하였다. 본 계산에서는 24 × 80의 격자가 사용되었으며, 압축성, 정상상태, 난류, 2차원 축대칭(2D-axisymmetric), 이상기체를 가정하였고, 이에 따른 지배 방정식은 다음과 같이 정리 된다.

* The mass conservation equation

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v) + \frac{\rho u}{r} = 0$$

* Energy equation

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v h) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right]$$

여기서, $\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r}$

*** Momentum conservation equation**

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho u u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v u)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v v)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right]$$

$$- 2 \mu \frac{v}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v})$$

*** 난류모델**

난류점성계수를 구하기 위하여 사용한 모델은 표준 k-ε 모델로서, k(난류운동에너지)와 ε(난동소산율)에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{u_i}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

여기서 계수 C_{1ε}, C_{2ε}, C_μ, σ_k, σ_ε는 경험상수이며, G_k는 난류 운동에너지의 생성량이다. C_{1ε}=1.44, C_{2ε}=1.92, C_μ=0.09, σ_k=1.0, σ_ε=1.3

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

*** 경계조건**

입구면: 일정한압력(P_{total}=1atm), 일정한온도(T_{in}=300K)

출구면: 일정한압력(P_{static}=P_{exit}), 일정한온도(T_{in}=300K)

벽면: 점착조건(u = v = 0), 단열조건($\frac{\partial T}{\partial n} = 0$)

축대칭면: 축대칭조건($\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = 0$)

4. 실험 방법 및 장치 구성

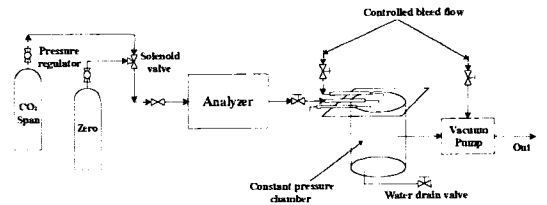


Fig. 3 Schematic of experiment setup

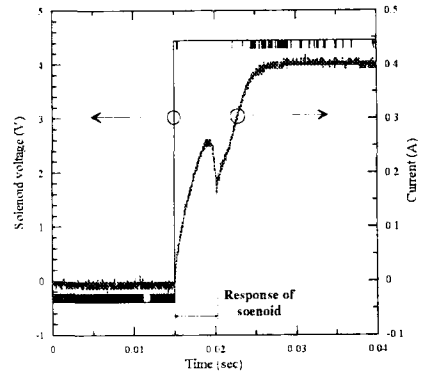


Fig. 4 Measurement of the response time of the solenoid valve

FRNDIR에서 probe 직경과 입출구 압력 변화에 대한 sampling module의 특성 파악 실험은 Table 1에 나타낸 파이프 직경 변화 조건에서 분석기 입출구의 압력을 변화 시키면서 실험조건을 설정 하였다. Fig. 3에 연구를 위해 구성된 실험장치를 간단히 나타내었다.

실험에서 span 가스와 zero 가스 전환을 위해 사용한 솔레노이드 밸브는 Fig. 4와 같이 밸브 작동 전압 인가 시점으로부터 약 6ms 경과 후 전류가 완전히 포화되고, 작동 gas의 압력 변화(0.1~0.4barg)에 따른 솔레노이드 밸브의 구동 지연 시간에 대한 영향이 1/100ms 정도로 미약하여 실험에서는 솔레노이드 밸브 구동 지연 시간은 약 6ms로 간주 하였다. 따라서 실험으로부터 측정된 분석기 출력 신호 중의 이송시간에는 약 6ms의 솔레노이드 밸브 작동 지연 시간이 항상 포함되어 있다.

Fig. 5에는 분석기 신호로부터 이송시간과 이상수에 대한 정의를 나타내었다. 실험초기에 분석기 입구에는 span(CO₂, 20%) 가스를 공급한다. 분석기 출력이 span가스에 대하여 일정한 값을 표시할 때 솔레노이드 밸브를 이용하여 가스 공급을 zero(N₂, 99.999%) 가스로 전환하고, 솔레노이드 작동 시점부터 솔레노이드 밸브가 완전히 포화되는 6ms 이후부터 detector의 출력이 변화되기 시작할 때까지 소요되는 시간을 이송시간이라 하고, 출력 값이 완전히 zero 가스에

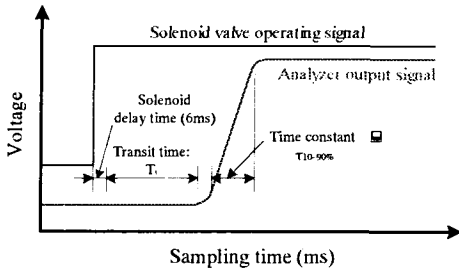


Fig. 5 Definition of characteristic transit time and time constant with the FRNDIR

대하여 포화(10~90%) 될 때까지 소요되는 시간을 시상수로 정의하였다.

5. 결과 및 검토

5.1 분석기 입출구 압력 변동 실험

Fig. 6과 Fig. 7은 분석기 입구 probe 직경과 출구 직경이 동일한 B2 조건에서 입구의 압력 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 barg 각각에 대하여, 출구의 압력을 -0.9 ~ -0.6 barg 까지 0.1bar 간격으로 증가 시켰을 때 detector 출력 신호를 나타낸 것이다.

출구 압력이 높아 질수록 span 가스에 대한 sensor의 감도(sensitivity)는 낮게 나타났고, 이송 시간과 시상수는 점차 증가 되어 나타났다.

이러한 결과는 분석기 출구 압력의 증가는 sampling module 전반에 걸쳐 입구와 출구의 압력차(ΔP)를 낮추어 sampling module을 통과하는 span가스의 속도는 낮아지고 이송시간은 길어지게 된다. 또한, 측정부에서의 압력 증가로 인한 가스 밀도 증가는 detector에 도달하는 광도의 감소로 이어져 span 가스 농도 변화에 대한 detector의 최대 출력변화 즉, 감도는 출구의 압력과 비례하여 증가하는 것이다.

이상의 결과로부터 sampling module에서 질량 유량은 근사적으로 양단의 압력차(ΔP)의 제곱근에 비례하므로 이송시간(T_t)은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, sampling cell을 시료가스가 잘 혼합되는 반응기로 간주할 때 시상수(τ)가 시료가스의 밀도(ρ)와 질량유량(\dot{m})의 비에 비례 관계로 나타낼 수 있으므로 식 (4)와 같이 정리될 수 있다.

$$T_t \propto \frac{1}{\sqrt{P_{inlet} - P_{outlet}}} \quad (3)$$

$$\tau \propto \frac{P_{outlet}}{\sqrt{P_{inlet} - P_{outlet}}} \quad (4)$$

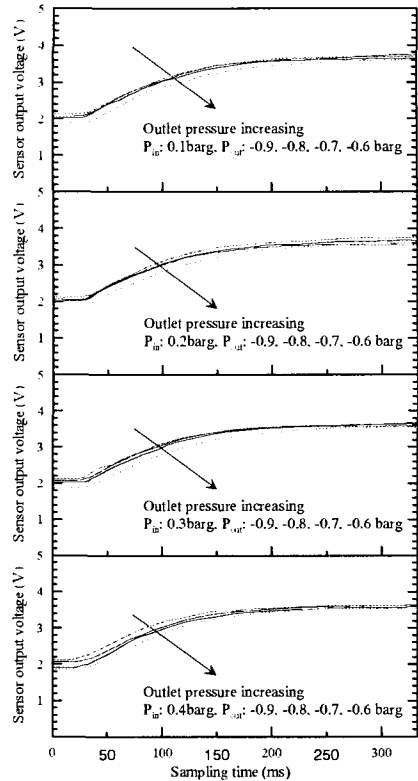


Fig. 6 Measured output voltage of the FRNDIR for different outlet pressure, with at the constant inlet pressure (ID of probe and outlet pipe =0.99mm, length of probe and outlet pipe =300mm; 40mm)

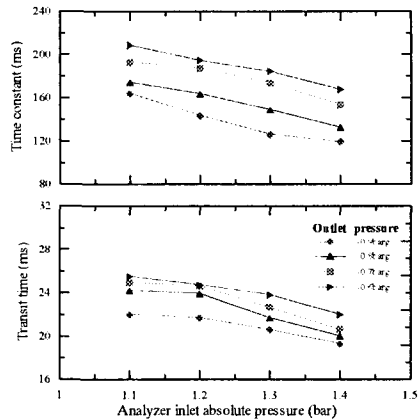


Fig. 7 Comparison of transit time and time constant as a function of the pressure, at condition B2

5.2 분석기 입출구의 직경변화 실험

Fig. 8과 Fig. 9는 A2, B2, C2 조건에 대하여 분석기 입구의 샘플가스 압력 0.1barg, 출구 압력 -0.9barg에서 측정된 분석기 출력을 나타내었다.

분석기 입구 sample probe의 직경이 증가 할수록 측정부의 감도는 증가하고, 이송시간은

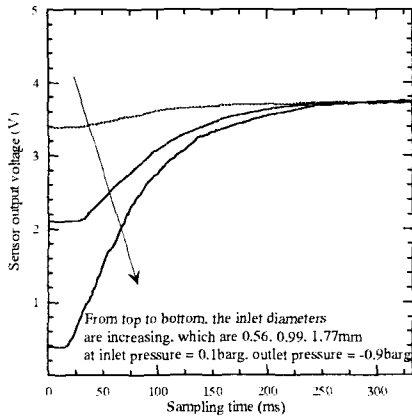


Fig. 8 Measured output voltage of the FRNDIR for different ID of inlet pipe with at the constant ID of outlet pipe (inlet pressure=0.1barg, outlet pressure=-0.9barg)

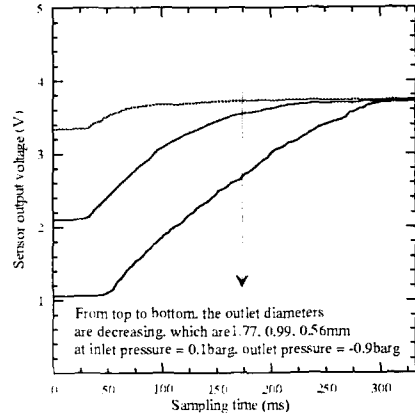


Fig. 10 Measured output voltage of the FRNDIR for different ID of outlet pipe with at the constant ID of sampling probe (inlet pressure=0.1barg, outlet pressure=-0.9barg)

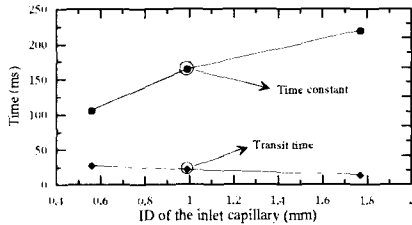


Fig. 9 Comparison of transit time and time constant as a function of inlet diameter(inlet pressure =0.1barg, outlet pressure=-0.9barg)

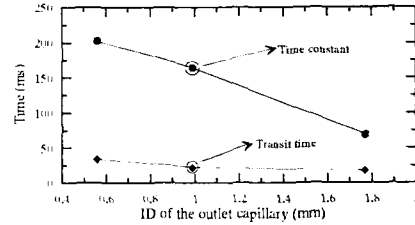


Fig. 11 Comparison of transit time and time constant as a function of outlet diameter(inlet pressure =0.1barg, outlet pressure=-0.9barg)

단축되지만, 시상수는 증가하여 나타났다. 이러한 결과는 sample probe 직경이 증가 할수록 분석기 입구의 저항 감소로 인해 sampling module로 유입되는 샘플가스의 질량유량이 증가 되는 반면, 출구로의 배출이 원활하지 못하여 sample cell 내의 가스 압력이 증가 되고 span 가스가 zero 가스로 완전히 전환하는데 걸리는 시간이 증가되기 때문이다.

Fig.10과 Fig.11은 B1, B2, B3 조건에 대하여 span 가스와 분석기 입출구의 압력을 각각 0.1barg, -0.9barg로 설정 하였을 때 detector 출력 신호, 이송시간, 그리고 시상수 결과이다.

Sample probe의 직경이 일정한 상태에서 출구 직경 감소는 분석기의 감도, 이송시간, 그리고 시상수 모두를 증가 시키는 결과를 나타내었다.

분석기의 측정부는 시료가스의 밀도 변화에 민감하게 반응하는데, 출구의 직경이 감소하게 되면 후류의 유동저항 증가로 인해 분석기로 유입된 샘플가스의 유출이 원활하지 못하여 cell 내의 span 가스를 zero 가스로 전환하는데 걸리는 시간과 이송시간이 증가되어 나타나는 것이다.

Table 2 Summary of test conditions

	The condition of experiments
Case 1	B2, outlet pressure = -0.9barg, inlet pressure= 0.1, 0.2, 0.3, 0.4barg
Case 2	B2, inlet pressure = 0.1barg, outlet pressure=-0.9~-0.6barg
Case 3	A2, B2, C2, Inlet pressure=0.1barg, outlet pressure=-0.9barg
Case 4	B1, B2, B3, Inlet pressure= 0.1barg, outlet pressure=-0.9barg

이러한 결과로부터 입구와 출구의 직경변화와 분석기의 이송시간 및 시상수의 관계를 정리 하던 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$T_i \propto \frac{1}{D_{inlet} * D_{outlet}} \quad (5)$$

$$\tau \propto \frac{D_{inlet}}{D_{outlet}} \quad (6)$$

이상의 실험을 통해 얻은 결과로부터 Table2에 나타낸 각각의 실험조건이 detector 감도, 이송시간, 그리고 시상수에 미치는 최대 변화 정도를 백분율로 나타내면 Fig.12와 같다.

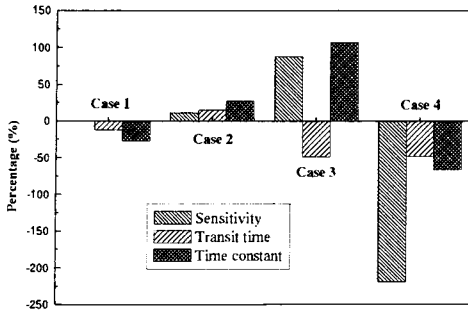


Fig. 12 Effect of the experimental parameter on the FRNDR compared to the initial condition

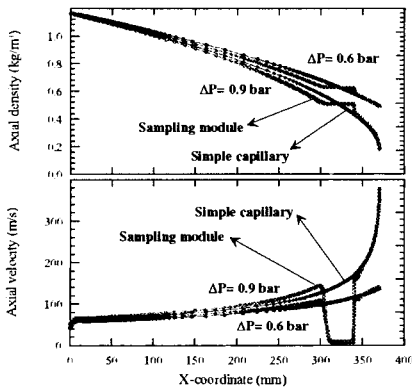


Fig. 13 Comparison of velocity and density between sampling module and simple capillary pipe

5.3 수치해석 결과

Sampling module 해석을 위한 모델링은 측정부의 직경이 입출구의 직경과 동일한(simple capillary) 경우와 실제 분석기에 적용된 module에 대하여 수행하였다.

Fig.13의 측정부의 직경을 달리한 경우와 단순 모세관을 해석한 결과로부터 측정부가 존재하는 300mm부터 340mm사이에서 속도와 밀도가 다소 차이를 보이고 있으나, 최종 출구에서의 속도와 밀도는 동일하게 나타났다. 그러므로 sampling module의 측정부를 제외한 부분의 해석은 단순 모세관의 해석으로도 가능하다 하겠다.

Fig.14는 직경을 0.56, 0.99, 1.77mm로 하는 모세관에 입출구의 압력차를 0.9bar로 하여 해석한 결과이다. 직경이 증가 할 수록 입출구에서의 속도는 증가하고, 밀도차는 감소하였다. 이러한 현상은 모세관 내의 유동저항 감소로 인해 모세관을 흐르는 기체의 유량이 증가 하였기 때문이다.

Fig.15와 Fig.16은 0.99mm의 단순 모세관에서 입출구의 압력차를 변화시켰을 때 입출구의 속도와 밀도를 비교하여 나타낸 것이다.

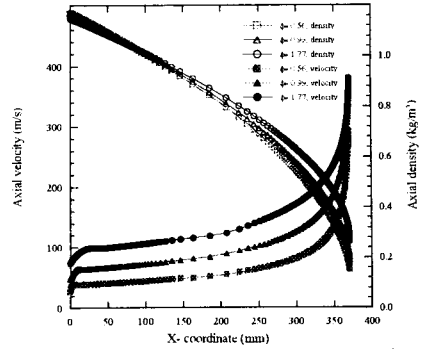


Fig. 14 Comparison of axial velocity and density as a function of inside diameter with capillary pipe

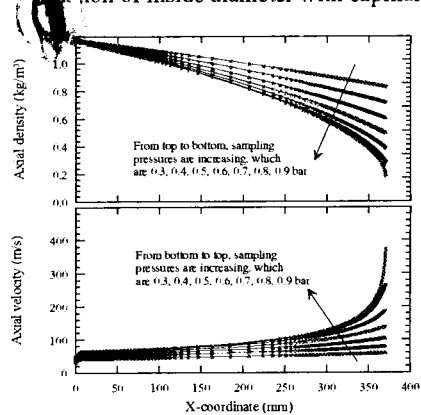


Fig. 15 Comparison of velocity and density with pressure drop increasing from 0.3bar to 0.9bar, at the ID of pipe=0.99mm

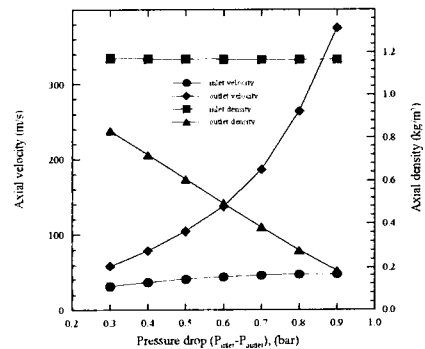


Fig. 16 Effect of pressure drop increasing from 0.3bar to 0.9bar, at the ID of pipe=0.99mm

Fig.17은 sampling module 내부 유동 해석 결과로서 유선 및 축방향 속도와 밀도 분포를 나타내었다. 이러한 modeling 결과로부터 sampling module 내에서의 안정적인 농도 측정 위치 선정과 가스 밀도와 속도 분포 해석을 통해 분석기의 설계에 필요한 기초 데이터 확보 및 선행 예측이 가능함을 알 수 있다.

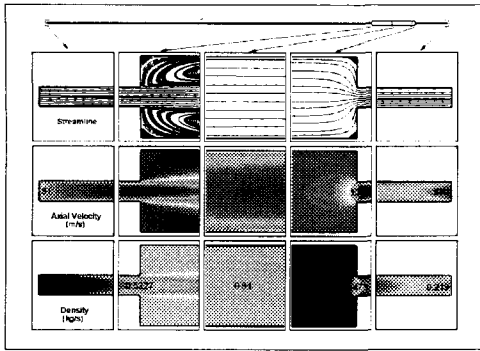


Fig. 17 Streamline, velocity, and density simulated contours with sampling module on FRNDIR

6. 결 론

환경오염의 주범이 되고 있는 자동차용 엔진의 과도 운전상태에서 실시간 배기 배출물 측정이 가능한 CO₂ 농도 고속 분석기 개발과 이에 따른 sampling module의 특성이 FRNDIR 분석기에 미치는 영향을 파악 하고자 수행한 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약 된다.

(1) 고속 광단속(<1ms)이 가능한 반도체 laser와 dual type photoconductor 반도체 소자를 이용하여 엔진에의 적용이 용이한 CO₂ 농도 고속 분석기를 설계 및 제작 하였다.

(2) FRNDIR 분석기의 이송시간과 시상수를 Sampling module의 전 후단 압력에 관하여 정리 할 수 있었다.

$$T_i \propto \frac{1}{\sqrt{P_{inlet} - P_{outlet}}}, \quad \tau \propto \frac{P_{outlet}}{\sqrt{P_{inlet} - P_{outlet}}}$$

(3) 고속분석기의 입구와 출구의 직경변화에 따른 이송시간과 시상수를 입출구 직경에 관하여 정리 할 수 있었다.

$$T_i \propto \frac{1}{D_{inlet} * D_{outlet}}, \quad \tau \propto \frac{D_{inlet}}{D_{outlet}}$$

(4) 고속 응답 농도 분석기 엔진에의 적용에서 엔진 운전 조건 변화에 따른 분석기 입출구 압력 변동은 농도 분석 결과에 직접적인 영향을 미치므로, 이에 따른 보정이 반드시 요구된다.

(5) 실험조건 변화가 detector의 감도, 이송시간, 그리고 시상수에 미치는 영향 분석을 통해,

분석기 입구의 직경보다 출구 직경 증가가 이송 시간 단축과 빠른 응답 속도 확보에 유리하다.

(6) Sampling module 수치해석을 통해 입출구의 속도와 밀도 분포는 단순 모세관의 해석 결과와 유사함을 알 수 있었고, 분석기내부 가스의 속도와 밀도에 관한 예측이 가능 하게 되었으며, 측정부의 적정 위치 선정에 유용한 기초 자료를 확보 하였다.

후 기

본 연구는 “한국과학기술기획평가원(국가지정 연구실사업(NRL))”의 지원 아래 수행 되었으며, 이에 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Sergei, S. and Collings, N., Hands, T., Peckham, M. and Burrell, J., 1998, “Fast Response NO/HC Measurements in the cylinder and Exhaust Port of a DI Diesel Engine,”SAE980788.
- (2) Robert M. Green, 2000, “Measuring the Cylinder-to-Cylinder EGR Distribution in the intake of Diesel Engine During Transient Operation,”SAE 2000-01-2866.
- (3) Cory Sutela and Nick Collings, Tim Hands, 2000, “Real Time CO₂ Measurement to Determine Transient Intake Gas Composition under EGR Conditions,”SAE 2000-01-2953.
- (4) Haifeng Liu and James S. Wallace, 1999, “An Experimental Investigation into the Characteristics of a Fast-response Flame Ionization Detector for In-cylinder Sampling,”SAE 1999-01-3538.
- (5) Cory Sutela and Nick Collings, Tim Hands, 1999, “Fast Response CO₂ Sensor for Automotive Exhaust Gas Analysis,”SAE 1999-01-3477.
- (6) Summers, T. and Collings, N., 1995, “Modelling the Transit Time of a Fast Response Flame Ionisation Detector During In-Cylinder Sampling,”SAE 950160.
- (7) Liu, H. and Wallace, James S., 1999, “An Experimental Investigation into the Characteristics of a Fast-Response Flame Ionization Detector for In-Cylinder Sampling,”SAE1999-01-3538.
- (8) Kmllo Mlyatake, Kozo Ishida, and Hiroji Kohsaka, Neal Harvey, 1990, “Fast Response NDIR for RealTime Exhaust Measurement,”SAE 900501.
- (9) Chan, S. H., 1996, “Measurement of concentrations of transient gases using a conventional NDIR analyzer,”Meas. Sci. Technol.
- (10) Robert M.Green, 2000, “Measuring the Cylinder-to-Cylinder EGR Distribution in the Intake of a Diesel Engine During Transient Operation,”SAE2000-01-2866.