

자동차 배출가스 측정을 위한 Photoacoustic Spectroscopy Cell의 3차원 유동장 해석

김 현 철^{*1)} · 박 종 호²⁾

자동차부품연구원 동력시스템실^{*1)} · 충남대학교 기계공학과²⁾

Three-Dimensional Fluid Flow Analysis of Photoacoustic Spectroscopy Cell for Measurement of Automotive Exhaust Gas

Hyunchul Kim^{*1)} · Jongho Park²⁾

^{*1)}Powertrain System Lab. of Korea Automotive Technology Institute, 74 Youngjung-Ri, Pungse-Myun, Cheonan 330-912, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 16 July 2002 / Accepted 6 January 2003)

Abstract : Recently, environmental damage to urban area becomes serious problem due to the exhaust emissions by increasing the number of vehicle. Especially, exhaust emission from diesel vehicles are known to be harmful to human health and environment. Photoacoustic Spectroscopy system is very useful technology for simultaneous and continuous measurement of the various components of the automotive exhaust gas. In this study, in order to reduce emission gases from automobile, we tried to develop the measurement system of Photoacoustic Spectroscopy. To improve performance of high sensitive Photoacoustic Spectroscopy system for automotive exhaust emissions, the shape of Photoacoustic Spectroscopy cell was optimized to use the flow analysis. And Exhaust emission data of the 1,500cc gasoline engine was fixed the working fluid. The characteristics of fluid flow for cell were analyzed by various conditions in detail.

Key words : Photoacoustic spectroscopy cell(광음향 분광기), Light source(광원), Detector (감지기), Reference cell (레퍼런스 셀), Measurement cell(메이저먼트 셀), Chopper(초퍼), Optical filter(광학필터), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

Nomenclature

V : velocity, m/s
T : temperature, °C
h : emissivity
LSE : light source energy, W
A : area, m²
t : thickness, mm
 η : viscosity, N · s/m²
 λ : thermal conductivity, W/m · K

Subscripts

in : inlet
surf : surface
LS : light source
PAS : photoacoustic spectroscopy

1. 서론

산업이 발전함에 따라 각종 산업 현장에서 발생 하는 배출가스량이 급증하고 있으며, 이로 인하여 대기오염이 날로 심화됨에 따라 심각한 환경파괴

*To whom correspondence should be addressed.
hckim@katech.re.kr

현상이 나타나고 있다. 대기환경 오염원의 80% 이상을 차지하고 있는 자동차의 경우에는 선진국을 중심으로 제작차에 대한 배출가스 규제 강화뿐만 아니라 운행차에 대한 배출가스 규제를 통하여 환경 무역장벽을 형성하며 적극적으로 환경보호 정책을 추진하고 있다. 따라서 전 세계의 고감도 배출가스 측정용 센서시장은 날로 확대될 전망이다. 국내에서도 대기환경 보전법에 의거 연도용 고감도 배출가스 측정 센서 및 원격감시(TMS)¹⁾체계의 설치가 2001년 12월 31일부터 의무화되어 2001년 이후 그 시장규모가 4배 이상으로 확대될 전망이다. 현재, 자동차 배출가스 저감을 위해서 정부 관련부처 및 시민단체와 환경전문가들이 제작차에 대한 배출가스 규제강화를 추진하고 있으며, 운행차에 대한 실질적인 배출가스 규제를 위하여 검사항목 추가(NOx) 및 부하검사 시행을 위한 1차 시범사업(1999.6.~2000.1.) 수행을 완료하여 자동차에 의한 대기오염 저감대책 수립을 시행하고 있는 상태이다. 이러한 주변 여건을 적극 반영하여 차세대 광음향 센서를 개발하면 향후, 가스센서 시장의 주도적인 위치를 확보하는 것이 가능해질 것이다. 본 연구에서는 자동차의 배출가스를 정확하게 측정하기 위한 광음향 분광 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 1,500cc 가솔린 엔진의 배출가스 데이터를 작동유체로 사용하고 light source에서 발생하는 복사 에너지를 고려한 유동해석을 실시하여 광음향 분광 시스템(Photoacoustic Spectroscopy)의 핵심부품인 셀(cell)의 형상을 최적화하였다.

2. PAS 시스템

자동차에서 발생하는 배출가스를 정밀하게 측정하기 위한 PAS 시스템은 Fig. 1에서 보듯이 NDIR (Non-Dispersive Infra-Red) 및 광음향분광기(PAS : Photoacoustic Spectroscopy), 콘덴서(condenser), 레퍼런스 및 메이저먼트 셀(reference & measurement cell), micro-phone type의 감지기(detector), 에너지를 공급하여 주는 광원(light source), 광원에서 발생한 광선을 단속하여 주는 초퍼(chopper), 광학필터(optical filter), 광선을 각각의 셀로 입사시켜주는 창(window) 등으로 구성되어 있다.

이러한 광음향 분광 시스템은 차량의 종류 및 크기에 상관없이 가솔린을 비롯하여 중·대형 디젤차량에 사용할 수 있으며 연도용으로도 적용할 수 있다. 이같은 프로세서에서 발생하는 시그널을 span gas(2,000ppm)와 zero gas(N₂)로 분류하여 나타낸 것이 Fig. 2에 있으며, PAS 시스템의 신호처리 과정은 Fig. 3과 같다.

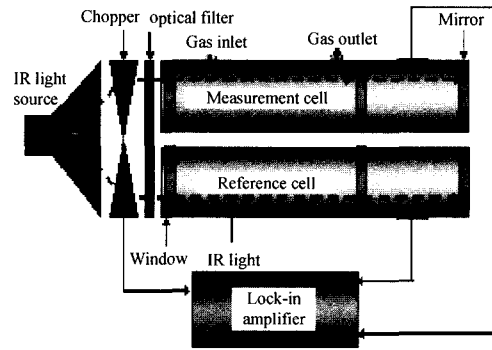


Fig. 1 Photoacoustic spectroscopy system

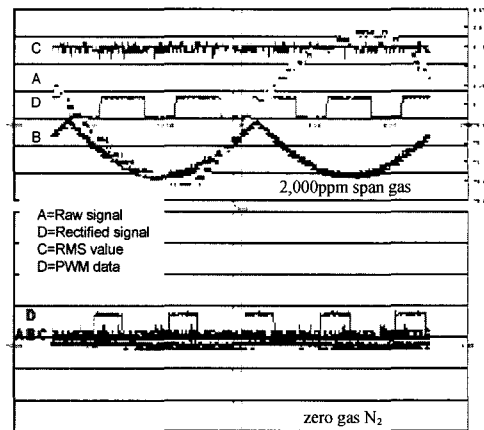


Fig. 2 Signal of span and zero gas

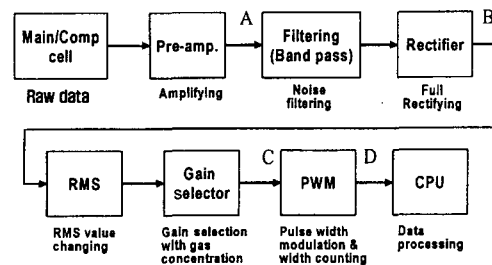


Fig. 3 Signal processing procedure

3. 해석모델

3.1 이론해석

PAS cell은 자동차에서 발생하는 배출가스를 측정하는 장치이므로 cell 내부를 통과하는 유체는 엔진 연소실에서 발생한 가스이다. 그러므로 본 유동 해석에서는 1,500cc 가솔린 엔진을 엔진동력계에 장착하여 배출가스 측정 실험을 수행한 후 여기에서 획득한 데이터를 이용하여 CFD에 적용시키기 위한 작동유체를 Table 1과 같이 설정하였다.

이중에서 수분과 미소한 양의 O₂ 및 HC를 제외한 CO₂, N₂, CO의 함량을 적용하고, 본 연구의 수치해석²⁾에서 사용한 작동유체를 생성하기 위하여 Cp, Cv, η, λ 등의 물성치를 polynomial equation으로 만들어 적용하였다. 한편, 경계조건을 살펴보면 Table 2와 같다. 모델 입구는 Re=243이며, 해석을 위한 지배방정식³⁾을 보면 다음과 같다.

• Continuity Equation:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Table 1 Exhaust gas data of gasoline engine

배출가스성분	함량(%)	
	2500rpm*	CFD
CO ₂	11.8	13.0
H ₂ O	8.0	-
O ₂	0.7	-
N ₂	73.7	81.0
HC	0.4	-
CO	5.4	6.0

* 실험데이터

Table 2 Boundary condition of PAS

경계조건	입력값
V _{in}	1.348m/sec
T _{in}	5 °C
T _{surf}	55 °C
h _{PAScell}	0.03
LSE _{in}	5W
A _{L, Sin}	0.00036598m ²
h _{glass}	0.9
t _{glass}	0.5mm

• Momentum Conservation Equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I]$$

p=static pressure, $\bar{\tau}$ =stress tensor

$\rho \vec{g}$ =gravitational body force

μ =molecular viscosity, I=unit tensor

• Energy Conservation Equation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot ((\bar{\tau} \cdot \vec{v}) - \sum_j h_j \vec{J}_j) + S_h \quad (3)$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT$$

$$S_h = -\sum_j \left(\frac{h_j^0}{M_j} + \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \right) R_j$$

h=enthalpy, T_{ref}=298.15K

\vec{J}_j =diffusion flux of species j

Y_j=mass fraction of species j

h_j=enthalpy of formation of species j

R_j=volumetric rate of creation of species j

PAS Cell의 수치해석을 실제와 가장 유사하도록 하기 위하여 light source에서 발생하는 복사에너지를 고려한 3차원 유동장을 해석하였다. 본 연구에서 사용한 복사모델은 Discrete Ordinate Radiation Model^{4,5)}이다. 이 모델의 특징은 특정복사가 표면에서 표면으로 변화하는 문제를 해결할 수 있으며, 반투명 매질에 적용이 가능하고, 계산속도가 빠른 장점이 있다. 흡수, 방사, 산란하는 매질에 적용이 가능한 DO 모델의 RTE(Radiative Transfer Equation)는 다음과 같다.

• Radiative Transfer Equation:

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \quad (4)$$

$$an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega'$$

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta \lambda_k$$

$$\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') = 2f \delta(\vec{s} \cdot \vec{s}') + (1-f)(1 + \vec{C} \vec{s} \cdot \vec{s}')$$

- \vec{r} = position vector, \vec{s} = direction vector
- \vec{s} = scattering direction vector
- T = local temperature
- σ = Stefan-Boltzmann constant ($5.672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)
- σ_s = scattering coefficient
- I = total radiation intensity
- $(a + \sigma_s)_s$ = the optical thickness
- $\Phi(\vec{s} \cdot \vec{s})$ = Delta Eddington function
- f = forward scattering factor
- $\delta(\vec{s} \cdot \vec{s})$ = Dirac delta function
- C = asymmetry factor

본 연구에서 유동해석을 수행하기 위하여 사용한 시스템을 살펴보면 CPU는 펜티엄4 2GHz, RAM은 1Gbytes, VGA는 ELSA Gloria II를 사용하였으며, 모델링은 Solid Works, 격자생성⁶⁾은 ICEMCFD, solver는 Fluent V60을 사용하여 해석하였다. 유동장은 정상상태, 비압축성으로 가정하였고, 유동해석 할 때 계산의 정확성을 증대시키고 수렴시간을 단축하기 위하여 계산 영역 전반에 걸쳐 hexa mesh를 적용하였다. 실제 1회 계산시간은 4시간 20분 정도가 소요되었고, 양질의 격자를 생성하여 적용하였으므로 두드러진 수렴특성이 없이 전반적으로 수렴은 잘 되었다.

광음향 분광 시스템의 Measurement cell 성능을 향상시키기 위한 유동해석에 적용하기 위하여 light source로부터 cell로 입사되는 에너지를 분석하여 그 강도를 살펴보면 Fig. 4와 같다. 특히, $\lambda = 5.25 \sim$

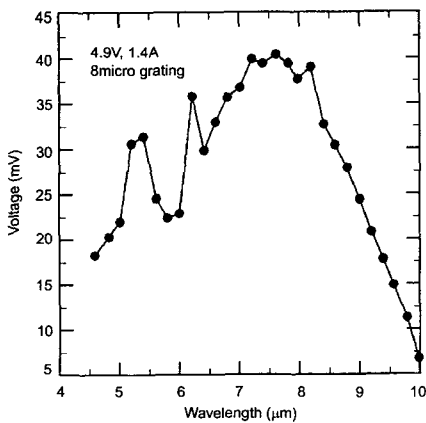


Fig. 4 Intensity of light source

6.5 μm 부근에서 fluctuation이 발생하고 있는데 이것은 본 연구에 적용한 sample(8V, 1.2A 및 12V, 1.3A) 뿐만 아니라 Horiba Mexa 7000(6V, 1.6A)에서도 동일하게 나타나는 현상으로 보아 광원 측정 시 여러 곳에서 발생하는 peak는 광원의 특성이라고 판단된다.

3.2 PAS Cell 모델링

본 연구에서는 기존 PAS cell의 도면을 기초로 하여 수치해석에 필요한 모델링 및 계산격자를 Fig. 5와 Fig. 6같이 생성하였다. Fig. 5를 보면 기존 모델과 개량모델을 비교하기 쉽게 도시하였는데 가장 큰 차이는 cell로 입사하는 광원입사부와 가열파이프 부분이라는 것을 알 수 있다.

또한, Fig. 6에 개량 PAS cell의 hexa mesh를 나타내었으며, 여기에서 개량 PAS cell의 격자생성(mesh generation)에 관한 정보를 알 수 있다. 기존 모델의 총 element는 238,691이고 node는 221,062이었으나 16회에 걸친 유동해석을 통하여 형상이 최적화된 개량 모델을 생성하였으며, 이 모델의 총 element는 205,632이고, node는 189,695로서 격자가 대폭 감소하여 계산시간을 줄일 수 있었다.

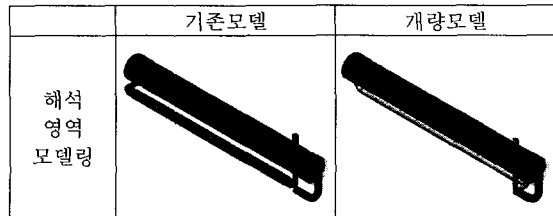


Fig. 5 Comparison of the existing and the modified PAS cell

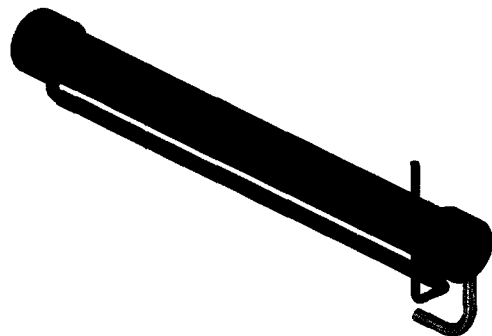


Fig. 6 Mesh generation of the modified PAS cell

4. 결과 및 고찰

4.1 PAS Cell 유동특성

PAS cell의 유동특성을 파악하고자 유동을 3차원 정상상태의 비압축성 층류유동으로 가정하였다. 광원(light source)에서 입사되는 복사에너지로 인한 cell 내부의 밀도변화가 크지 않으므로(10% 이내) 비압축성 유동으로 가정하여 해석을 시도하였다. 전산해석을 위한 모델의 격자 생성은 CFD (Computational Fluid Dynamics)의 해를 구하는데 있어서 그 정확성을 가늠하는 중요한 인자가 되므로 신중하게 선택하여 hexa-hedral mesh를 적용하였다. 기존모델 및 개량모델 유동해석 결과를 Fig. 7~Fig. 12에 나타내었다. 먼저 Horiba의 Mexa 7000을 기존모델로 하여 Table 1의 르망 배출가스를 작동유체로 하고, Table 2의 경계조건을 주어 CFD 해석을 실시한 후, 이 결과와 요구된 시작품의 원시설계 데이터를 적용하여 detector에서 배출가스 구성 성분의 함량을 정확하게 감지할 수 있도록 모델을 수정하였다. 광원에서 발생하는 복사에너지를 고려한 수정모델의 CFD 해석을 다시 수행하여 그 결과를 detector의 감

지기능을 향상시키도록 변형된 여러 종류의 설계 데이터와 접목시켜 유동해석을 재수행하는 절차를 반복해서 최종적으로 얻어진 결과가 개량모델이다. Fig. 7을 보면 유동해석의 결과로 얻어진 압력과 온도분포를 나타내었다. 이것은 제일 처음 해석을 시도한 기존 모델과 최적화된 후의 개량모델을 비교한 것이며, 여기에서 (a)는 기존모델의 압력분포(최고압력=1.019e6Pa)를, (b)는 개량모델의 압력분포(최고압력=1.257e6Pa)를 나타내고 있다. 기존모델과 개량모델의 압력분포는 유사한 경향을 보이고 있다. 형상 변경으로 인하여 개량모델의 최고압력이 기존 모델보다 0.238e6Pa 높게 나타났지만 cell의 제작 및 측정에는 문제가 없었다. (c)는 기존모델의 온도분포(최고온도=335.1K)를 (d)는 개량모델의 온도분포(최고온도=335.5K)를 나타내고 있다. 최고온도가 발생하는 광원입사부에서의 두 모델 간 온도차이는 관찰되지 않았다. Fig. 8에는 광원으로부터 유입되는 복사에너지와 가열파이프로부터 유입되는 배출가스의 속도벡터를 나타내었다. Fig 8에서 (a)는 기존 모델의 복사에너지(최고값=1.284e4 W/m²)를, (b)는 개량모델의 복사에너지(최고값

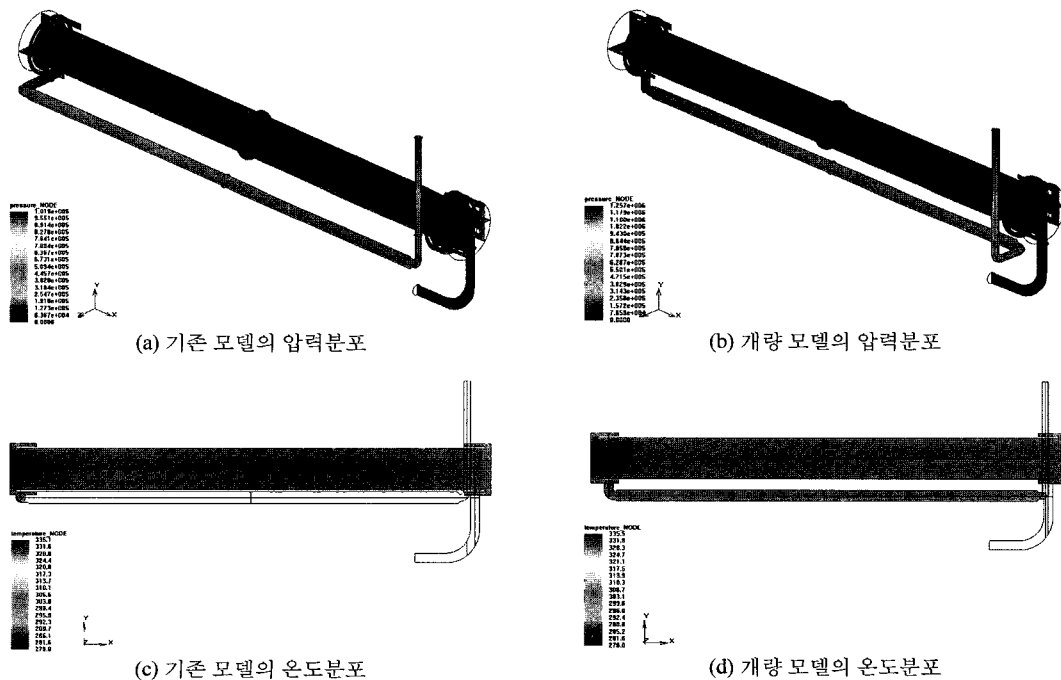


Fig. 7 CFD results of the existing and the modified model-distribution of pressure and temperature

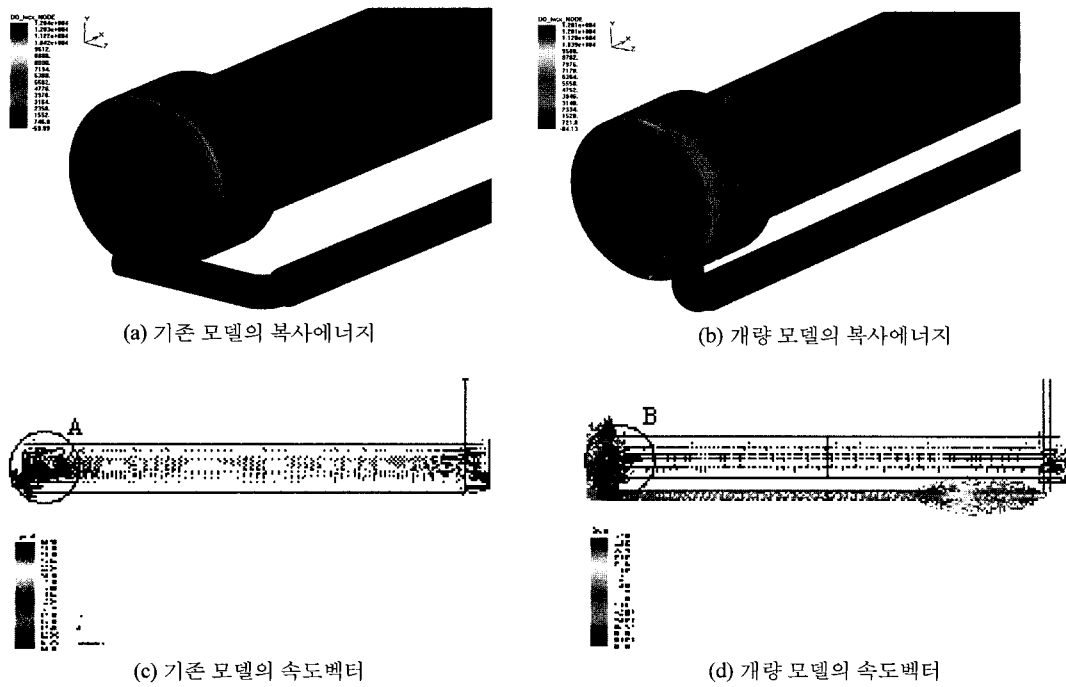


Fig. 8 CFD results of the existing and the modified model-distribution of radiation energy and velocity vector

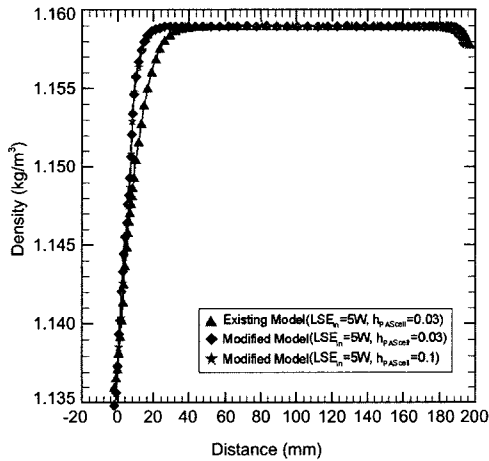


Fig. 9 Density comparison of the existing and the modified model

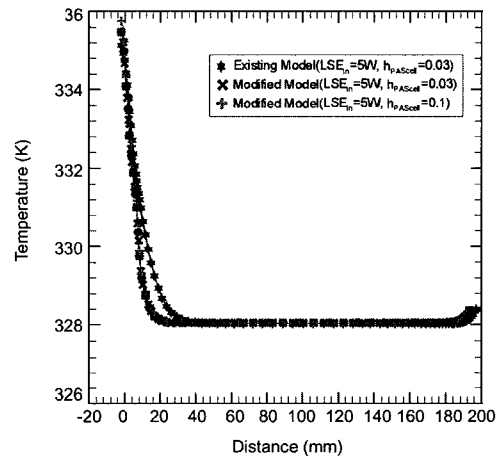


Fig. 10 Temperature comparison of the existing and the modified model

$=1.281e4W/m^2$)를 나타내고 있다. 이때 최고값은 광원으로부터 발생하는 에너지가 입사되는 광원입사부에서 나타나므로 기존모델과 개량모델의 차이는 미미하지만 cell 내부로 진행할수록 온도와 더불어 모델간의 차이는 나타나고 있다. (c)에는 기존 모델

의 속도벡터(최고속도=3.04m/sec)를 나타내었으며 (d)에서는 개량모델의 속도벡터(최고속도=3.058m/sec)를 볼 수 있다. (c)의 경우 가열파이프에서 cell 내부로 유입될 때 주어진 형상으로 인하여(Fig. 8의 (a) 형상 참조) 원 A 영역에서 와류가 발생하여 배출가

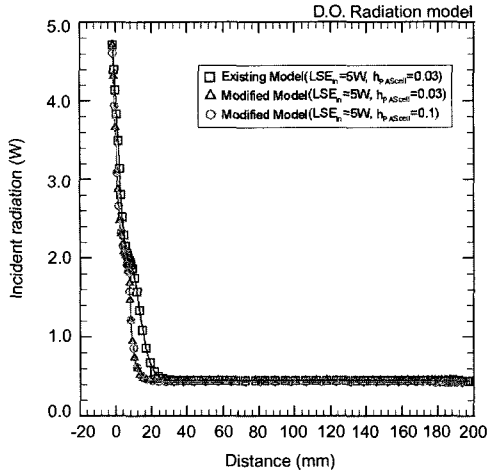


Fig. 11 Radiation energy comparison of the existing and the modified model

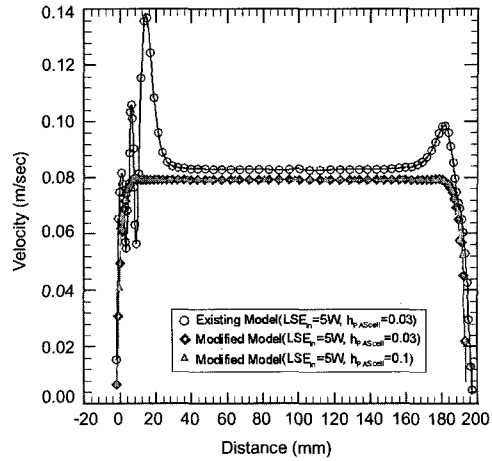


Fig. 12 Velocity comparison of the existing and the modified model

스 정밀측정에 좋지 않은 영향을 주게 된다. (d)의 경우 가열파이프에서 cell 내부로 유입될 때 주어진 형상으로 인하여(Fig. 8의 (b) 형상 참조) 원 B 영역에서, (c)의 원 A에서 발생한 현상과는 달리, 균일한 유동장이 형성되어 배출가스 정밀측정에 도움을 주게 된다. PAS cell 내부 중앙을 지나는 수평단면, 수직단면의 교점을 잇는 직선에 대한 x-y plot을 Fig. 9~12에 도시하였다. x축은 PAS cell 중앙선의 거리를 나타내고 있으며 y축은 각각 밀도, 온도, 복사에너지, 속도의 물리량을 나타내고 있다. 적색 그래프는 기존모델의 데이터이며 청녹색 그래프는 개량모델의 데이터이다. Fig. 9~12를 분석하여 보면 PAS cell 입구부분(light source가 입사되는 부분)에서 기존모델과 개량모델의 차이가 두드러지는데 이것은 기존모델의 가열파이프 쪽에서 PAS cell로 유입되는 유체가 PAS cell과 가열파이프의 연결 형상으로 인하여 PAS cell 내부로 유입되며 와류를 일으키는 것에 원인이 있기 때문이다. 이 부분을 통과하면 유동은 안정을 되찾아 개량모델과 비슷한 결과를 보이고 있다. 이런 현상은 Fig. 12의 기존모델과 개량모델 속도 비교를 통하여 자세히 알 수 있다. Fig. 9~12의 CFD 결과에서 기존모델보다는 개량모델이 PAS cell 내부에서의 유동이 안정적이라는 것을 알 수 있으므로 cell의 형상을 개량모델로 선정하는 것이 광음향분광 시스템의 성능을 향상시키는 것이라 생각된다.

5. 결론

본 연구는 자동차 및 연도의 배출가스를 정밀하게 측정하기 위한 장비인 PAS (Photoacoustic Spectroscopy) 시스템의 cell 성능을 향상시키기 위하여 cell의 형상을 최적화하는데 목적이 있다. 이것을 위하여 적용 PAS cell의 모델링 및 양질의 hexa 격자생성을 수행하여, 대상 PAS cell에서 light source의 복사에너지를 고려한 유동특성을 3차원으로 수치해석 하였다. 16회에 걸친 형상 변경으로 이루어진 유동해석을 기반으로 하여 도출된 결과를 PAS cell에 적용하여 유동해석을 실시함으로써 성능이 향상된 새로운 PAS cell의 형상을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 자동차 및 연도 배출가스 측정용 광음향센서인 PAS 시스템의 cell 형상을 최적화하였다.
- 2) 개량 PAS cell은 전 영역에서 안정된 유동장을 형성하였으며, 기존 모델보다 복사에너지의 흡수가 6% 정도 향상되었다.
- 3) light source에서 입사되는 에너지는 CO₂ 농도 13%의 영향을 받아 대부분이 PAS cell 총길이의 15% 영역인 광원입사부에서 흡수되었으며, 이후부터 급격히 감소함을 알 수 있었다.
- 4) 유량 및 모델을 다변화한 CFD를 수행함으로써 그 결과를 개량모델과 비교하여 신뢰성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 부품소재 기술 개발사업에 의해 (주) 다산알앤디와 자동차부품연구원이 공동으로 연구개발한 내용으로 연구비를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) K. W. Lee, K. H. Cho, Development of Stack Gas Analysis System for TMS, Korea Standard Research Institute, 1989.
- 2) Suhas, V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid, Hemisphere, New York, 1980.
- 3) P. M. Gerhart, R. J. Gross, Fundamentals of Fluid Mechanics, Addison Wesley, 1996.
- 4) E. H. Chui, G. D. Raithby, "Computation of Radiant Heat Transfer on a Non-Orthogonal Mesh Using Finite-Volume Method," Numerical Heat Transfer, Vol.23, pp.269-288, 1993.
- 5) G. D. Raithby, E. H. Chui, "Finite Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media," J. Heat Transfer, Vol.112, pp.415-423, 1990.
- 6) A. J. Przekwas, Y. Jiang, Z. Tan, "Unstructured Adaptive Grid Solution Methodology for Automotive Aerodynamics," SAE 970142, 1997.
- 7) W. I. Chung, M. H. Kim, "A Study on the Flow characteristics of Steady State and Pressure Variation inside the Muffler with the Inflow of Pulsating Exhaust Gas," KSAE 99370262, 1999.
- 8) S. K. Oh, D. S. Baik, Y. C. Han, "Performance and Exhaust Gas Characteristics on Diesel Particulate Filter Trap," International Journal of Automotive Technology, Vol.3, No.3, pp.111-115, 2002.