

## 디젤입자상물질필터의 기하학적 형상변화가 재생과정 중 활성화 특성 및 비정상 온도거동에 미치는 영향에 관한 수치적 연구

정수진<sup>1)</sup> · 이상진<sup>2)</sup> · 김우승<sup>\*3)</sup> · 이춘범<sup>1)</sup>

자동차부품연구원<sup>1)</sup> · 한양대학교 대학원<sup>2)</sup> · 한양대학교 기계공학과<sup>3)</sup>

### Numerical Study on the Effect of Changes of Geometric Shape of Diesel Particulate Filter on Light-Off Characteristics and Transient Thermal Behavior during Regeneration

Soo-Jin Jeong<sup>1)</sup> · Sang-Jin Lee<sup>2)</sup> · Woo-Seung Kim<sup>\*3)</sup> · Chun-Beom Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi 425-791, Korea

(Received 10 November 2005 / Accepted 9 December 2005)

**Abstract :** The minimization of maximum DPF wall temperature and the fast Light-off during regeneration are the targets for the high durability of the DPF system and the high efficiency of regeneration. In order to predict transient thermal response of DPF, one-channel numerical modeling has been adopted. The effect of the ratio of length to diameter (L/D), cell density, the amount of soot loading on temporal thermal response and regeneration characteristics has been numerically investigated under two different running conditions: city driving mode and high speed mode. The results indicate that the maximum wall temperature of DPF increase with increasing 'L/D' in 'High speed mode'. For 'City driving mode', the maximum wall temperature decreases with increasing 'L/D' in the range of 'L/D ≥ 0.6'. The maximum temperature decreases with increasing cell density because heat conduction and heat capacity are increased. It is also found that the effect of amount of soot loading on light-off time is negligible.

**Key words :** DPF(디젤입자상물질필터), Regeneration(재생), Soot(탄소미립자), Light-Off(활성화)

#### Nomenclature

$A_{cell}$	: cross sectional area of the soot layer, $m^2$	$E_f$	: parameter in equation (5)
$a$	: total channel surface area, $m^2/m^3$	$E_A$	: activation energy, kJ/kmole
$a_c$	: channel width	$f_{co}$	: CO selectivity
$c_p$	: specific heat, J/kgK	$h$	: enthalpy, J/kg
$c$	: molar concentration, mole/ $m^3$	$\Delta h$	: reaction enthalpy, J/mole
$D$	: diameter of monolith, m	$k$	: permeability, $m^2$
$D_{eff}$	: effective diffusion coefficient, $m^2/s$	$K_I$	: pre-defined frequency factor
		$k_f$	: parameter in equation (5)
		$m_{soot}$	: local soot mass
		$MG$	: molar mass, kg/mole

\*Corresponding author, E-mail: wskim@hanyang.ac.kr

- $p$  : pressure, (Pa)
- $q$  : parameter in equation (5)
- $R$  : universal gas constant, J/molK
- $R_{dep}$  : rate of soot deposition, kg/s
- $R_{reg}$  : rate of soot regeneration, kg/s
- $t$  : time, sec
- $T$  : temperature, K
- $U$  : gas velocity in the soot layer, m/s
- $V$  : velocity of exhaust gas, m/s
- $V_{cell}$  : volume of the given calculation cell,  $m^3$
- $w$  : mass fraction
- $x$  : soot hight direction distance, m
- $y$  : mole fraction
- $z$  : axial distance, m

**Greek letters**

- $\alpha$  : heat transfer coefficient,  $W/m^2K$
- $\varepsilon$  : open frontal area
- $\varepsilon_L$  : soot layer porosity,  $m^3/m^3$
- $\lambda$  : heat conductivity,  $W/mK$
- $\nu$  : stoichiometric coefficient
- $\mu$  : dynamic viscosity, Pas
- $\rho$  : density,  $kg/m^3$

**Subscripts and superscripts**

- $i$  : inlet channel ( $i=1$ ), outlet channel ( $i=2$ )
- $j$  : species index
- $k$  : reaction index
- $g$  : gas
- $L$  : solid face layer
- $s$  : solid
- $w$  : wall

**1. 서론**

디젤차량은 연료효율이 우수하여 에너지절약에 큰 기여를 하며, 가솔린차량에 비하여 이산화탄소의 배출량을 약 10~20% 감소시킬 수 있어 환경친화적 차량이므로 그 관심이 급격히 증가하는 추세이다. 그러나 디젤차량은 스모그의 원인이 되고 폐암

의 원인이 될 수 있는 매연을 다량으로 배출하므로 대기오염의 주범으로도 간주되고 있다. EU에서는 ‘EURO-IV’ 및 ‘EURO-V’ 등의 한층 강화된 배출가스 규제를 단계적으로 시행 중이며 주요 디젤차량 제작사들은 이 규제를 만족시키기 위해 보다 효율적인 관련기술개발에 사활을 걸고 있다.

매연은 주로 탄소미립자(Soot) 및 질소산화물(NOx)로 구성되어있다. 이 탄소미립자를 포집하기 위한 대표적인 장치가 DPF(Diesel Particulate filters)다. DPF에 탄소미립자가 포집이 될수록 엔진의 배압이 상승하기 때문에 이 배압의 지나친 상승을 막기 위하여 포집된 탄소미립자를 적절한 시점에서 제거 시켜주어야 하는데 이를 재생(Regeneration)이라 한다. 재생 시에는 탄소미립자의 포집 형태에 따라 고온의 열이 발생하고 국부적으로 급격한 온도구배가 나타날 수 있으므로 DPF의 수명에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 열적 충격을 최소화 할 수 있는 제어기술이 요구된다. 재생과정을 제어하기 위해서는 초기온도, 배기가스의 유량 및 산소농도의 영향 뿐만 아니라 DPF의 형상, 다공성 필터의 구조 및 내부에서 일어나는 여러가지 물리적 현상에 대한 명확한 이해가 필수적이다.

따라서 국내외적으로 DPF 재생에 관한 수치적 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>1-4)</sup> 본 연구에서는 실차의 도심주행 및 고속주행 시의 운전조건에 대하여 재생 시 다양한 설계변수들이 DPF의 성능 및 내구성과 밀접한 관계가 있는 비정상적 열적거동 및 활성화 패턴을 수치적인 방법으로 연구하였다.

**2. 수치해석**

**2.1 해석모델**

Fig. 1은 일반적인 벽유동(Wall-flow) DPF의 단면도 및 본 연구에서 사용한 단일 채널의 개략도를 나타낸 것이다. 1차원 해석을 위한 모델은 입구 및 출구 채널 그리고 두 채널을 분리시키는 고체벽으로 구성되어 있다. 본 연구의 해석 대상은 현재 기생산 중인 DPF(EX-80, Corning Ltd.)이며 채널의 종횡비, 셀 밀도 및 포집량을 변경하여 이러한 설계변수들이 재생효율 및 DPF 성능에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

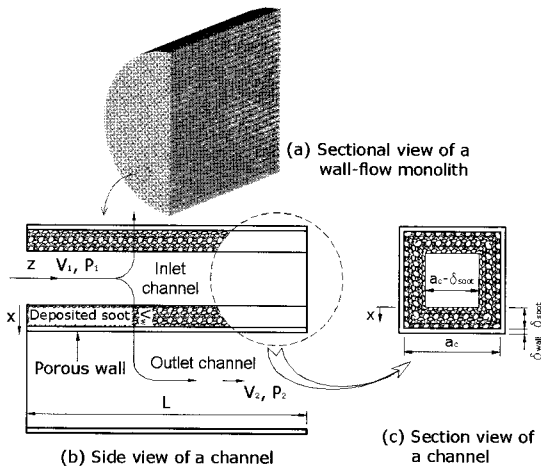


Fig. 1 Schematic diagram of single inlet and outlet channels with the porous wall and the deposited soot layer

### 2.2 지배방정식

DPF 모노리스 내부의 열유동 현상과 화학반응의 해석을 위해 실질적인 현상을 기술하는 지배방정식을 다음과 같은 가정을 도입하여 단순화 하였다.

- ① DPF로 유입되는 배기가스의 물성치는 모노리스 전면부에 대하여 공간적인 균일도를 유지한다.
- ② DPF의 반경방향 최 외곽 벽은 완전 단열이다.
- ③ DPF의 반경방향으로는 전도가 지배적이다.
- ④ 탄소미립자는 축방향으로 균일한 두께로 쌓인다.

DPF 채널 내부의 유동은 반경방향에 비하여 축방향의 속도가 지배적이므로 1차원 층류 유동으로 간주할 수 있으며, 배기가스가 다공성 고체벽을 통과할 때의 내부 유동은 고체벽 두께에 대한 길이의 비가 월등히 크므로 길이방향의 속도는 무시하여 두께방향 1차원 유동으로 간주할 수 있다. 시스템 해석에 사용된 질량보존, 운동량 및 에너지방정식은 Peters<sup>2)</sup>의 가정과 동일하다.

디젤차량으로부터 배출되는 그을음은 흑연, 황산염, SOF(Soluble Organic Fraction) 등의 혼합물이지만 본 연구에서는 탄소미립자를 그 주된 성분으로 단순화하여 다음과 같이 열에 의한 탄소의 연소 반응을 고려하였다.



반응식 R1과 R2에 상응하는 반응속도식은 식 (3), (4)과 같으며 관련된 반응속도 관련 파라미터들은 기존연구결과<sup>3)</sup>를 이용하였다. 또한 식 (3), (4)에 포함되어 있는 활성화에너지,  $E_A$ 와 빈도인자,  $K_1$ 은 탄소미립자의 연소패턴을 좌우하는 중요한 인자이다. 따라서 본 연구에서는 연료첨가제의 첨가량에 대한 효과를 반응속도와 관련 지어 실험값<sup>3)</sup>과 보정된 활성화에너지 및 빈도인자를 사용하여 나타내었다.

$$r_1 = f_{CO} \cdot K_1 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \cdot y_{O_2} \quad (3)$$

$$r_2 = (1 - f_{CO}) \cdot K_1 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \cdot y_{O_2} \quad (4)$$

여기서,  $f_{CO}$ 는 식 (5)와 같이 표현되어진다.

$$f_{CO} = \frac{1}{1 + k_f y^a e^{E_f/RT}} \quad (5)$$

배기가스의 농도방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_g \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g w_{j,g}) &= -\epsilon_g \frac{\partial}{\partial z} (\rho_g w_{j,g} V_g) + \\ \epsilon_g \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho_g D_{eff} \frac{\partial w_{j,g}}{\partial z} \right) &+ MG_j \sum_k^R v_{k,j} r_k(c_j^L, T_s) \end{aligned} \quad (6)$$

채널 내 각 지점에 대한 탄소미립자의 질량 보존식은 다음과 같이 표현 된다.

$$\frac{\partial m_{soot}}{\partial t} = R_{dep} - R_{reg} \quad (7)$$

재생과정의 계산을 위한 탄소미립자층에서의 연속방정식 및 각 화학종에 대한 전달 방정식을 식 (8), (9)에 나타내었고, 그에 대한 생성항은 식 (10), (11)에 나타내었다.

$$\epsilon_L U_g \frac{d\rho_g}{dx} = S_{tot} \quad (8)$$

$$\epsilon_L U_g \rho_g \frac{dw_{j,g}}{dx} = S_j - w_{j,g} S_{tot} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} S_j &= \left[ (U_g \rho_g A_{cell} w_{j,g}) \right]_{x=\delta_{soot}} - \\ &\left[ (U_g \rho_g A_{cell} w_{j,g}) \right]_{x=0} / V_{cell}, \quad j = 1 \dots J \end{aligned} \quad (10)$$

$$S_{tot} = \sum_{j=1}^J S_j, \quad j = 1 \dots J \quad (11)$$

여기서,  $S_j$ 는 탄소미립자의 불균질 재생반응들에 의한 화학종  $j$ 의 생성항을 나타내며,  $S_{tot}$ 은 모든 불균질 재생반응들에 대한 생성항의 총합을 나타낸다. 탄소미립자의 재생율은 다음과 같이 계산 된다.

$$R_{reg} = (U_g \rho_g A_{cell}) \Big|_{x=\delta_{soot}} - (U_g \rho_g A_{cell}) \Big|_{x=0} \quad (12)$$

여기서, 'x=0'는 탄소미립자층과 고체벽의 경계면을 나타내고 'x= $\delta_{soot}$ '는 탄소미립자층과 배기가스의 경계면을 나타낸다. 고체벽과 그 위에 포집되어 있는 탄소미립자층은 서로 다른 두 개의 다공성 매체로 간주 할 수 있으며 압력강하는 Darcy's 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_1 - p_2 = \left( \frac{\mu w_w}{k_w} + \frac{\mu w_{soot}}{k_{soot}} \right) V_w \quad (13)$$

입구채널 및 출구채널의 경계조건은 다음과 같다.

$$z = 0: \quad V_1(0) = V_{in} \quad (14)$$

$$V_2(0) = 0 \quad (15)$$

$$p_1(0) = p_{in} \quad (16)$$

$$z = L: \quad p_2(L) = p_{atm} \quad (17)$$

본 연구에서는 대표적인 고속주행모드 및 도심주행모드 조건<sup>4)</sup> 하에서 해석을 수행하였다. 재생 시 운전조건은  $t = 30\text{sec}$ 까지 선형적으로 로드(Load)를 증가시키다가 그 이후에 고속주행모드의 경우 100% 로드, 1900 rpm을 유지시켰으며 도심주행모드의 경우는 급감속을 가정하여 0% 로드, 750 rpm의 상태를 유지시켰다.<sup>4)</sup> DPF로 유입되는 배기가스의 입구 초기온도, 질량유량 그리고 산소의 농도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서는 구리 계열의 연료첨가제(Cu-based fuel additive)인 Lubrizol을 고속주행모드 및 도심주행모드에서 각각 33 ppm과 66 ppm씩 사용한 경우를 고려하였다. 본 연구의 경계조건으로 사용되는 배기가스 입구온도는 최대 약 460°C를 넘지 않는다. 따라서, 재생을 위한 연료첨가제를 사용한 본 연구에서는 대부분의 화학반응이 촉매산화(Catalytic Oxidation)반응에 의한 것이므로 순수

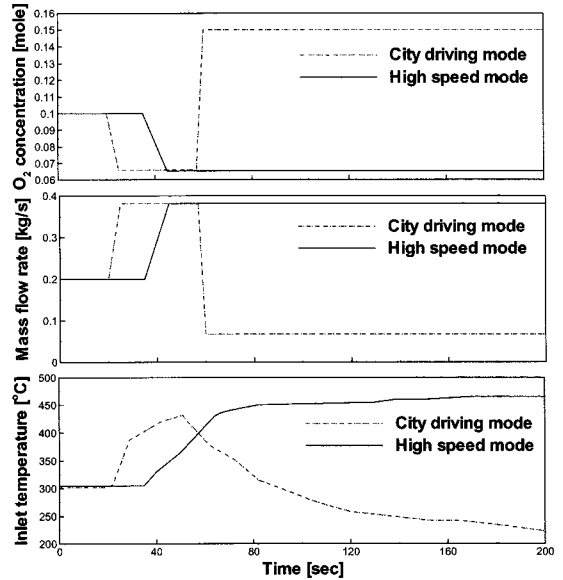


Fig. 2 City driving and high speed mode scenario employed in this study. Inlet exhaust gas temperature, mass flow rate and O<sub>2</sub> concentration as functions of time<sup>5)</sup>

열에 의한 산화반응(Thermal Oxidation)은 무시하였다. 본 연구에서는 수치해석을 위하여 상용프로그램인 AVL에서 개발한 Boost<sup>6)</sup>코드를 사용하였고 보정된 관련 화학 반응식을 계산하기 위해 사용자 프로그램을 작성하였다.

### 2.3 타당성 검증

본 해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 Tan et al.의 실험 결과<sup>4)</sup>와 본 연구의 해석결과를 비교하였다. Fig. 3은 탄소미립자의 포집량이 107g 일 때 도심주행모드 재생 시 다공성 고체벽의 온도변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 얻은 해석 결과는 채널의 5 cm 및 31 cm 지점에서 고체벽의 온도가 실험 결과와 비교하여 각각 약 0.2% 및 1.8% 과대평가를 하였고, 채널의 18 cm 지점에서는 실험 결과보다 약 20%의 과대평가를 하였다. 이는 계산 시 가스의 유속균일도를 고려하지 않았고 포집된 탄소미립자의 두께를 균일하게 고려하였기 때문이다. 또한 DPF 모노리스 표면의 단열치리로 인한 모노리스 표면에서 외부로의 대류열전달 효과가 고려되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 4는 재생 시간에 따른 탄소미립자의 두께 변화를 나타낸 것이다. 그

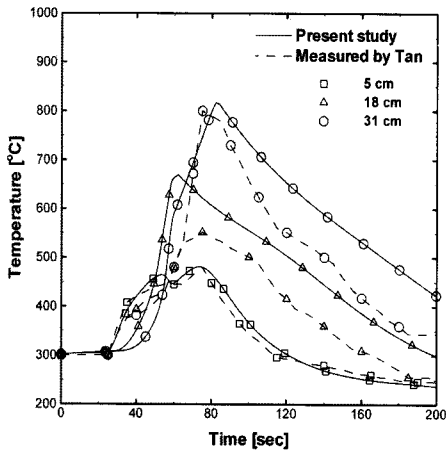


Fig. 3 Transient behavior of wall temperature under city driving mode for 107 g of soot loading

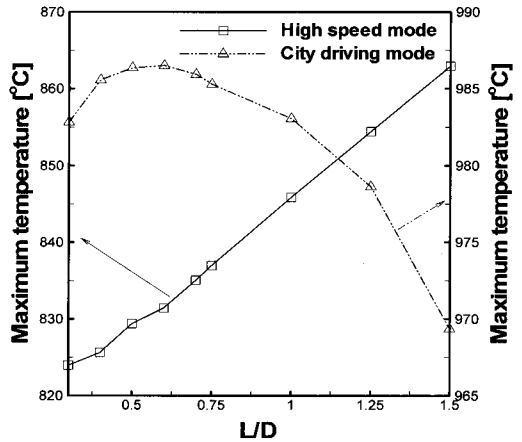


Fig. 5 Maximum wall temperature under city driving mode and high speed mode with various 'L/D' ratios

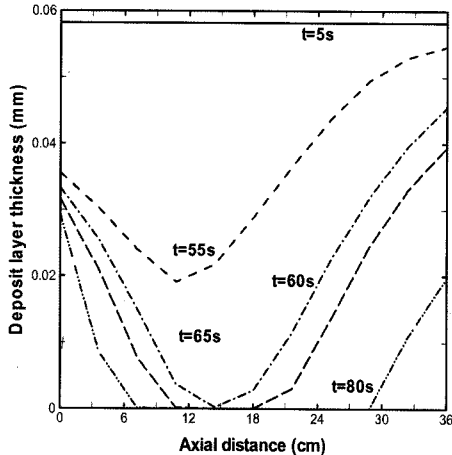


Fig. 4 Evolution of soot layer thickness under city driving mode for 107 g of soot loading

림에서 볼 수 있듯이 채널 축방향 길이의 중심부에서 재생이 시작되고 있으며, 따라서 이 영역에서 채널 전반부 및 후반부 보다 탄소미립자층이 급격하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 최고온도 및 활성화 시점 등은 Tan et al.의 실험 결과<sup>6)</sup>와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 시간이 지날수록 상하류로의 전도열전달에 의한 재생으로 인하여 포집된 탄소층이 점차 감소하고 있음을 볼 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 '길이/직경(L/D)'에 대한 영향

Fig. 5는 모노리스의 '길이/직경(L/D)' 변화에 따

라 재생과정 중에 발생하는 최대 채널 벽 온도 변화를 고속주행 및 도심주행모드인 경우에 대하여 나타낸 것이다. 고속주행모드인 운전조건에서는 워업(Warm-up) 이후부터 배기가스의 산소농도가 감소하게 되고 질량유량 및 온도가 증가하여 재생에 필요한 충분한 열량이 공급 될 수 있다. 따라서 빠른 워업을 기대할 수 있으며 대류열유속에 의한 열전달과 화학반응열이 채널 하류로 전도와 대류열전달에 의하여 축적되게 되어 재생 시 L/D가 증가할수록 최고온도는 상승하게 된다. 따라서, 고속주행모드에서는 동일체적의 DPF에서 L/D가 증가할수록 채널내의 최고온도는 상승하게 된다. 반면, 도심주행모드인 운전조건일 때 'L/D<0.6'인 경우에는 고속주행모드와 유사하게 L/D가 증가함에 따라 최고온도도 증가하였으나 'L/D≥0.6'인 경우에는 고속주행모드와 상반되는 결과, 즉, L/D가 증가할수록 최고온도가 감소하는 경향을 나타내었다. 기존의 논문에서는 L/D가 증가할수록 모노리스의 최고온도도 증가하는 것<sup>7)</sup>으로 나타났으나 이는 고속주행모드에서 연구된 결과였다. 도심주행모드 시는 상이한 운전조건에 따라 모노리스의 최고온도 변화가 정반대의 양상으로 나타날 수 있음을 Fig. 5에서 알 수 있다. 이는 도심주행모드의 'L/D≥0.6'인 경우 활성화 이후에 질량유량 및 배기가스의 온도가 급감하지만 또한 'L/D'의 증가로 인한 채널수의 감소가 각 채널로 유입되는 배기가스의 질량유량을 과도하게 증가

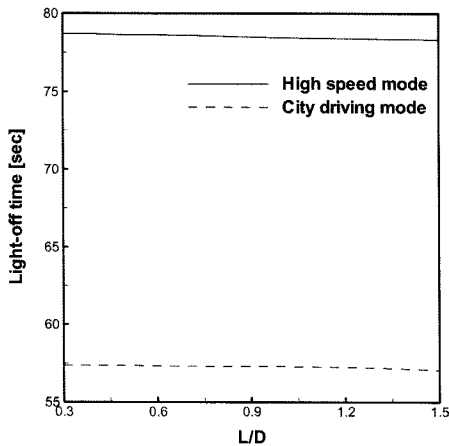


Fig. 6 Light-Off time under various 'L/D' ratios

시켜 채널 내의 대류냉각의 효과가 지배적이 되기 때문이다. 본 연구의 결과로부터 모노리스의 열적 신뢰성 확보를 위해서는 다양한 운전조건에 대한 DPF의 온도거동 및 활성화 특성 파악이 반드시 수반되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 6은 재생과정 시 모노리스의 '길이/직경' 변화에 따른 활성화 시점을 나타낸 것이다. 고속주행 및 도심주행모드 모두에서 L/D가 증가할수록 채널 내로 유입되는 질량유속이 증가하고 대류열유속 양이 증가하여 재생 초기에 빠른 워밍업을 기대할 수 있어 활성화 시점이 빨라지게 되나 그 변화율은 미미한 것으로 나타났다.

### 3.2 모노리스 셀 밀도에 대한 영향

Fig. 7은 셀 밀도 변화에 따라 재생과정 중에 발생하는 최대 채널 벽 온도 변화를 나타낸 것이다. Table 1에 셀 밀도 변화에 따른 채널의 길이, 개구율 및 GSA 그리고 계산에 사용된 DPF의 물성치를 나타내었다. 본 연구는 채널벽의 두께를 0.43 mm로 고

Table 1 Summary of simulation cases and material properties

Case No.	Cell density (cps)	Wall thickness (mm)	Channel height (mm)	Open frontal area (%)	GSA (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
C_1	100	0.43	2.110	34.50	1308
C_2	150		1.644	31.42	1529
C_3	200		1.366	28.92	1694
C_4	250		1.176	26.82	1823
C_5	300		1.036	24.98	1928

Volume: 27.8ℓ, Density: 1400 (kg/m<sup>3</sup>), Specific heat: 1120 (J/kgK)  
Thermal conductivity: 0.85 (W/mK)

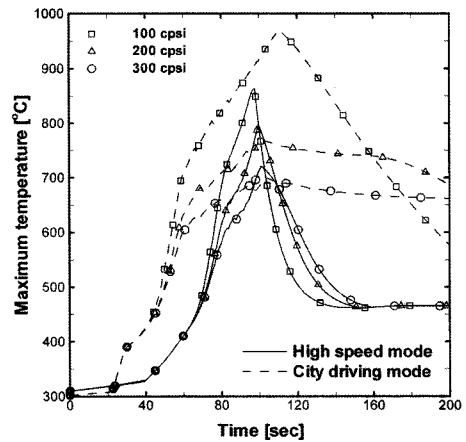


Fig. 7 Transient behavior of maximum wall temperature under city driving mode and high speed mode with various cell densities

정시키고 셀밀도를 100 cpsi에서 400 cpsi로 증가시켜 필터의 최고온도 변화가 활성화시점에 미치는 영향을 예측하였다. 도심주행모드인 경우 200 cpsi, 300 cpsi의 셀 밀도에서는 각각 100 cpsi인 경우에 비해 약 21% 및 28%의 최고온도 감소율을 나타냈다.

이는 셀 밀도가 증가할수록 채널을 통과하는 유입가스의 유량이 감소하며 DPF 모노리스의 개구율이 낮아짐에 따른 열용량 및 열전도율이 더욱 커지기 때문이다. 고속주행모드인 경우에는 셀 밀도가 200 cpsi, 300 cpsi로 증가함에 따라 각각 100 cpsi에 비해 약 7.6%와 16.5%의 최고온도 감소율을 나타냈다. 도심주행모드에서는 재생 시작 후 약 25 sec 후에 모노리스 상류의 온도가 재생온도인 350°C에 도달하게 되나 질량유량 및 배기가스의 온도는 약 60 sec까지 상승하게 되어 초기재생 시는 대류열전달에 의한 모노리스의 온도 상승이 일어나며 그 이후에는 질량유량이 현저히 감소하여 채널로 유입되는 가스의 속도가 감소하게 되어 배기가스와 모노리스 벽면과의 접촉시간이 증가하게 된다. 따라서, t = 60 sec 이후에 산소농도의 급격한 증가로 인한 화학반응이 촉진되어 모노리스의 열용량이 온도상승에 지배적인 영향을 미치게 된다. 고속주행모드에서는 도심 주행모드보다 늦은 약 t = 45 sec에서 재생온도인 350°C에 도달하게 되고 그 이후에 산소의 농도는 감소하나 질량유량 및 배기가스의 온도가 급상승한

다. 따라서, 재생초기에는 열용량이 작은 낮은 셀 밀도의 DPF일수록 빠른 온도상승 기울기를 가지나 재생이 시작된 이후에는 충분한 열량의 대류열유속이 공급되므로 셀 밀도 변화에 따른 채널 내의 최고온도 및 비정상적 온도 거동에 미치는 영향이 도심주행 조건에 비해 미미하다. 결국, 도심주행모드의 경우는 재생 개시 후 배기가스의 잔류시간 및 산소농도의 증가로 인해 최고온도 상승률이 고속주행모드보다 높게 나타났으며 재생완료 이후(약 100 sec)에도 배기가스의 감소된 유량으로 인하여 대류냉각효과가 미미하여 고속주행모드에 비하여 높은 온도를 유지하는 특징을 나타내었다.

Fig. 8은 재생과정 시 모노리스 셀 밀도 변화에 따른 활성화시간을 나타낸 것이다. 여기서, 활성화 시간은 포집된 탄소미립자 총량의 50%가 재생되는데 걸리는 시간을 의미한다. 도심 및 고속주행모드 모두에서 셀 밀도가 증가할수록 활성화 시간이 증가함을 알 수 있고 그 변화 양상도 유사함을 알 수 있다. 그러나 급가감속 운전조건인 도심주행모드의 재생 과정이 보다 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 재생과정 시 셀 밀도 변화에 따른 탄소미립자의 질량변화를 나타낸 것이다. 셀 밀도가 증가하면 단위 면적당 탄소미립자의 포집량이 감소하고 대류열유속량 및 벽유동 속도의 감소로 인한 활성화 시점의 지연으로 재생 시 탄소미립자의 감소 기울기가 셀 밀도 증가에 따라 감소됨을 볼 수 있다.

또한, 최고온도 상승률이 높은 도심주행모드의

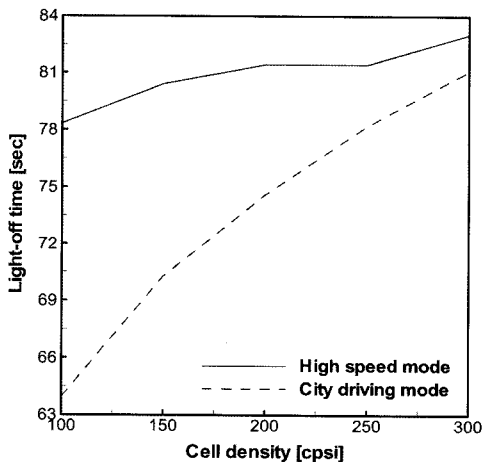


Fig. 8 Light-Off time under various cell densities

경우가 탄소미립자의 재생이 더욱 빠르게 진행됨을 알 수 있다.

Table 2에 셀 밀도와 벽두께 변화에 따른 채널의 길이, 개구율 및 GSA를 나타내었다. 본 연구는 모노리스의 셀 밀도 100 cpsi 및 200 cpsi에 대하여 채널의 벽 두께를 0.3 mm에서 0.5 mm로 증가 시켜 가며 필터의 최고온도 및 활성화시점에 미치는 영향을 예측하였다. Fig. 10은 모노리스 벽 두께 변화에 따른 재생과정 중에 발생하는 최대 채널 벽 온도 변화를 나타낸 것이다. 동일 셀 밀도인 경우 벽 두께가 증가할수록 채널의 크기 및 개구율이 감소하므로 열용량은 증가하고, GSA는 감소하게 된다. 모노리스의 벽 두께가 0.3 mm에서 0.5 mm로 증가할 때 셀

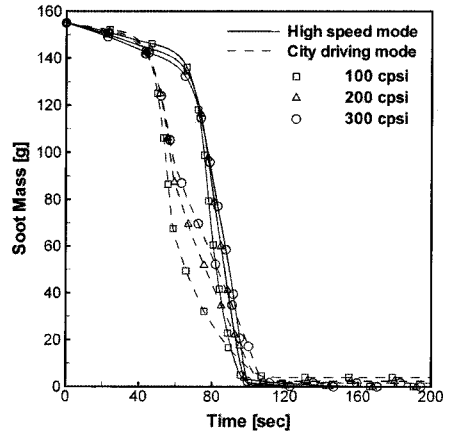


Fig. 9 Total soot mass evolution with various cell densities

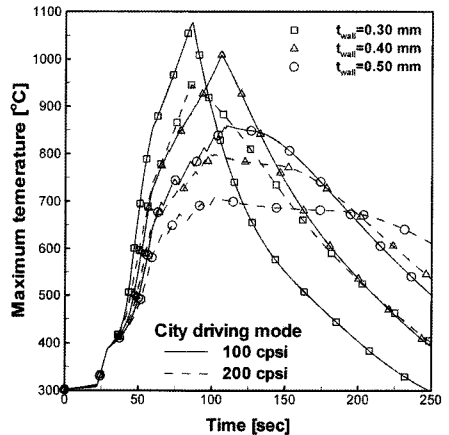


Fig. 10 Transient behavior of maximum wall temperature under city driving mode with various wall thicknesses

Table 2 Summary of simulation cases with various wall thicknesses

Case No.	Cell density (cps)	Wall thickness (mm)	Cannel height (mm)	Open frontal area (%)	GSA ( $m^2/m^2$ )
E_1	100	0.30	2.240	38.89	1389
E_2		0.40	2.140	35.49	1327
E_3		0.50	2.040	32.25	1265
F_1	200	0.30	1.496	34.69	1855
F_2		0.40	1.396	30.21	1731
F_3		0.50	1.296	26.04	1607

밀도 200 cps 인 경우가 100 cps 인 경우에 비해 개구율의 감소율이 1.46 배로 나타났음을 Table 2에서 알 수 있다. 이는 모노리스의 셀 두께가 증가할수록 셀 밀도 200 cps 인 경우가 셀 밀도 100 cps 인 경우 보다 열용량이 더 큰 비율로 증가하여 최대온도는 더 낮아지게 됨을 의미한다. 따라서 셀 밀도가 100 cps 일 때 모노리스의 벽 두께가 0.4 mm, 0.5 mm 인 경우는 벽 두께가 0.3 mm 인 경우에 비해 약 6.3% 및 20.2%의 최고온도 감소율을 나타냈고, 셀 밀도 200 cps 에서는 모노리스의 벽 두께 0.4 mm, 0.5 mm 인 경우가 벽 두께 0.3 mm 인 경우에 비해 약 15.6% 및 25%의 최고온도 감소율을 나타내어 200 cps 의 경우가 100 cps 인 경우보다 벽 두께가 0.3 mm 에서 0.4 mm 로 증가할 때 약 2.5배의 온도 감소를 나타냈다. 결국, 채널 벽 두께가 증가할수록 재생 시의 최고온도 및 온도상승율이 저감함을 알 수 있었고, 도심주행모드 운전 시 200 cps 의 경

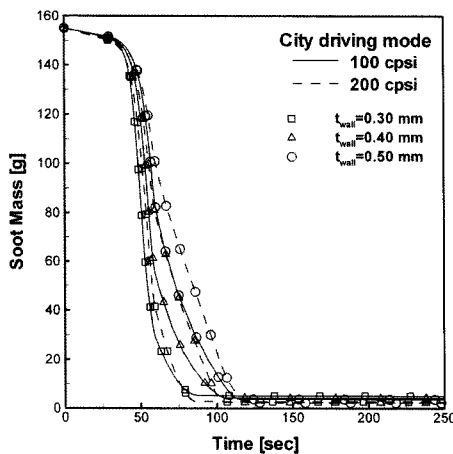


Fig. 11 Total soot mass evolution with various wall thicknesses

우 100 cps 보다 최고온도 및 온도상승율이 낮게 형성됨을 알 수 있었다.

Fig. 11은 재생과정 시 채널 벽 두께 변화에 따른 탄소 미립자의 질량 변화를 나타낸 것이다. 셀 밀도 100 cps 및 200 cps 모두에서 채널 벽 두께가 증가함에 따른 열용량의 증가로 인하여 탄소미립자의 재생율이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한, 셀 밀도 200 cps 인 경우가 채널의 벽 두께 증가 시 열용량의 증가에 따른 열적 관성이 더욱 커지므로 모노리스 벽면을 워밍 시키는데 더 많은 시간이 요구되어 100 cps 에 보다 벽 두께 변화에 따른 활성화 시간이 더욱 지연되고 있음을 알 수 있다.

### 3.3 탄소미립자의 포집량에 대한 영향

Fig. 12는 탄소미립자의 포집량 변화에 따른 재생과정 중에 발생하는 최대 채널 벽 온도 변화를 나타낸 것이다. 도심주행모드의 경우가 고속주행모드에 비하여 포집량 증가에 따른 온도 상승률이 더욱 큰 것으로 나타났다. 이는 셀 밀도 변화에 대한 최고온도 변화를 나타내는 Fig. 7과 유사한 경향을 나타내는 것으로 포집된 탄소미립자의 양이 증가할수록 생성열도 함께 증가하게 되어 필터의 최고온도가 상승되기 때문이다. 또한 도심주행모드의 경우 활성화 이후에 배기가스의 산소농도가 급상승하여 포집량 155 g에서 약  $t = 90$  sec 일 때  $900^{\circ}C$ 를 넘어 최고

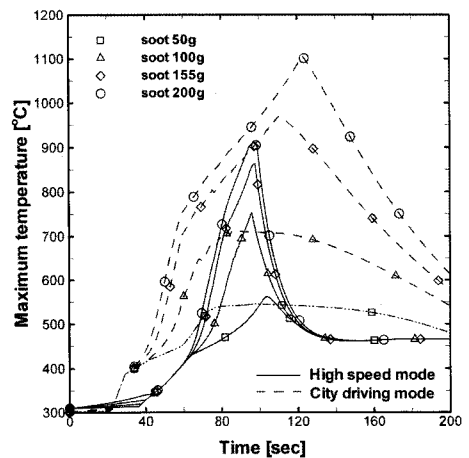


Fig. 12 Transient behavior of maximum wall temperature under city driving mode and high speed mode with various amount of soot loading



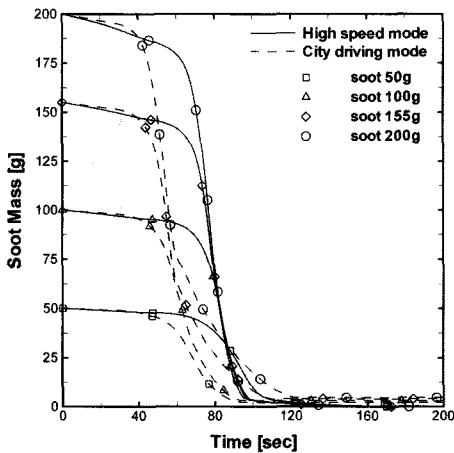


Fig. 13 Total soot mass evolution with various amount of soot loading

온도 969°C를 기록하여 필터의 손상을 유발시킬 가능성이 있는 것으로 나타났다. 반면, 고속주행모드의 경우는 포집량이 200 g일 때 최고온도 약 905°C를 기록하여 도심주행모드에 비해 상대적으로 안전한 것으로 나타났다. Fig. 13은 포집량 변화에 따른 재생과정 중 탄소미립자의 시간에 따른 질량변화를 나타낸 것이다. 고속주행 및 도심주행모드 모두에서 포집량이 변하여도 재생효율 및 재생 개시 시간은 큰 차이를 보이지 않았다.

#### 4. 결론

- 1) 27.8 ℓ 급 DPF에서 탄소미립자를 재생한 결과, 고속주행모드에서는 L/D가 증가할수록 필터의 최고온도가 증가한 반면, 도심주행모드에서는 'L/D ≥ 0.6'인 영역에서는 L/D가 증가할수록 최고온도는 감소하는 경향을 나타냈다.
- 2) 셀 밀도 변화에 따른 재생 효율을 살펴보기 위하여 셀 밀도를 100 cpsi에서 300 cpsi로 증가 시킨 결과 셀 밀도가 증가할수록 DPF 열용량 및 열전도율이 상승하므로 DPF의 최대온도가 감소하는 경향을 나타내었고 도심주행모드에서는 그 감소폭이 더욱 큰 것으로 나타났다.
- 3) 탄소미립자의 포집량이 DPF 재생 성능에 미치는 영향을 분석한 결과 도심주행모드의 재생에서는 활성화 이후 급감속 시 배기가스 중 산소 농

도가 급상승하여 탄소미립자의 연소를 촉진시키고 이로 인한 과도한 발열 때문에 고속주행모드에 비해 필터의 결함 발생 가능성이 훨씬 더 높은 것으로 나타났다.

- 4) 탄소미립자의 포집량 변화가 재생개시 시간에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 지원으로 시행되는 중기 거점/차세대 신기술 개발사업의 2차년도 연구결과 의 일부임을 밝힙니다.

#### References

- 1) H. U. Kim, H. Cho, J. U. Kim and E. S. Kim, "The Analysis of Regeneration Process Through 2-Dimensional Model in DPF," Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.162-177, 1999.
- 2) B. J. Peters, R. J. Wanker, A. Munzer and J. C. Wurzenberger, "Intergrated 1D to 3D Simulation Workflow of Exhaust Aftertreatment Devices," SAE 2004-01-1132, 2004.
- 3) A. C. Konstandopoulos and M. Kostoglou, "Reciprocation Flow Regeneration of Soot Filters," Combustion and Flame, Vol.121, pp.488-500, 2000.
- 4) J. C. Tan, C. N. Opris, K. J. Baumgard and J. H. Johnson, "A Study of the Regeneration Process in Diesel Particulate Traps Using a Copper Fuel Additive," SAE 960136, 1996.
- 5) G. C. Koltsakis and A. M. Stamatelos, "Modes of Catalytic Regeneration in Diesel Particulate Filters," Ind. Eng. Chem. Res., Vol.36, pp.4155-4165, 1997.
- 6) AVL Boost Ver.4.05, Manual, AVL LIST GMBH, 2004.
- 7) S. Yamaguchi, S. Fujii, R. Kai, M. Miyazaki, Y. Miyairi and S. Miwa, "Design Optimization of Wall Flow Type Catalyzed Cordierite Particulate Filter for Heavy Duty Diesel," SAE 2005-01-0666, 2005.