

총괄 변수 모델을 이용한 DPF 재생 성능에 관한 연구

전문수^{*1)}

충주대학교 에너지시스템공학과¹⁾

A Study on the Regeneration Performance of DPF using Lumped Parameter Model

Mun Soo Chon^{*1)}

**1)Department of Energy System Engineering, Chungju National University, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea*

(2011. 04. 11 Received / 2011. 05. 07 Accepted)

Abstract : With the world-wide demand on the emission minimization, the needs on the diesel aftertreatment devices with high efficiency are also increasing. In order to effectively develop or design a high-performance diesel particulate filter, a clear understanding on the deposition and regeneration mechanism is required. In the present study, a theory on the lumped parameter model for wall-flow type diesel particulate filters is described focusing on the deposition efficiency, pressure drop inside the filter. The fourth order explicit Runge-Kutta method is utilized for the mass flow rate computation. Engine operation modes with controlled and uncontrolled regeneration options are selected. The computational lumped parameter model is validated by comparing the computed results with the measured data.

Key words : Aftertreatment(후처리), Diesel particulate filter(DPF, 매연 저감장치), Lumped parameter mode(총괄 변수 모델), Regeneration(재생)

1. 서론

디젤 엔진은 열효율이 높아 CO₂ 저감이 유리하기 때문에 유럽을 중심으로 시장이 급속히 확대되고 있으나, 연소 특성상 입자상 물질(PM, Particulate matter)이 다량으로 배출된다는 단점을 갖고 있다. 이러한 문제는 연소 시스템의 개선 노력만으로는 부족하며, 국내는 물론 세계 여러 나라에서 강화되는 배출 가스 규제를 만족시키기 위해서는 DPF (Diesel Particulate Filter) 등과 같은 후처리 기술이 필요하다. 이러한 이유로 DPF를 장착한 디젤 자동차의 출시는 현재에도 꾸준히 증가되고 있으며, 가까

운 장래에는 모든 디젤 자동차에 DPF 기술이 적용될 것으로 예측된다.

디젤 자동차용 DPF 기술은 개념 정립 단계, 실증화 단계 및 기업화 단계를 넘어 현재에는 최적화 및 Cost 저감 단계로 진행 중이다. 현재 주로 적용되고 있는 DPF는 단위 부피당 표면적이 크고 포집 효율이 높은 Wall-Flow 형태의 세라믹 벌집 구조의 필터이며, 필터의 재질은 모노리스 타입의 Silicon Carbide와 Cordierite 등으로 각각 Heavy-Duty 디젤 엔진과 Light-Duty 디젤엔진을 장착하는 차량에 주로 적용되고 있다. 그러나 세라믹은 재료 특성상 내구성이 낮기 때문에 높은 온도 구배를 갖는 필터의 재료로는 여러 가지 문제점을 갖고 있으며, 따라서 세라믹 재질에 비해 기계적인 강도 및 열적 특성이

^{*} Corresponding author. E-mail: mschon@cju.ac.kr.

우수하고, 제조 특성상 경제적으로 유리한 Metal Foam이나 Wire Mesh 등과 같은 금속 재질의 필터에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다.

이러한 디젤 자동차용 메탈 DPF를 효과적으로 개발하기 위해서는 필터의 포집 및 재생 과정에 대한 이론 해석 기술의 확보하고, 이를 통한 메탈 DPF의 필터 형상을 설계하는 기술이 필요하다. 또한 개발된 필터의 성능 향상 및 내구성을 확보하기 위해서는 필터 내의 온도 및 포집되는 입자상 물질 분포를 균일하게 유지시키기 위한 유동 제어 기술이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 메탈 DPF 필터 설계에 필요한 포집량, 온도 분포 및 압력 강하 등과 같은 이론 해석 결과를 제공하기 위하여 필터의 포집 및 재생 과정에 대한 이론 해석 기술을 확보하였으며, 확보된 이론 해석 결과를 기 발표된 논문의 실험 데이터와 비교하여 검증하였다.

2. 메탈 DPF 필터 모델링

2.1 포집(Filtration) 모델

필터의 포집 성능을 해석하기 위하여 본 연구에서는 Konstandopoulos 등이 제안한 총괄 변수(Lumped Parameter) 모델¹⁾을 적용하여 계산하였다. 총괄 변수 모델은 포집 모델, 압력 강하 모델 및 재생 모델로 구성되며, 필터의 입자상 물질 포집에 대한 물리적 메커니즘은 'unit collector' 포집 이론으로 요약할 수 있다. 이는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 필터 벽면을 여러 층으로 나눈 후, 필터 벽면의 각 층에 'unit collector' 포집 이론을 적용하여 다공도(porosity), 투과성(permeability) 등과 같은 국부적인 물성치의 변화량을 추적하여 계산하는 모델이다.

따라서 메탈 DPF 내의 필터에 'unit collector' 포집 이론을 적용하여 계산한 입자상 물질의 포집을 \bar{m}_d 와 총 포집 효율 E 와의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\bar{m}_d = E \bar{m}_{in} = Q C_0 E \quad (1)$$

여기서 Q 는 배기 가스의 체적 유량, C_0 는 DPF로 유입되는 입자상 물질의 초기 농도이며, 총 포집 효율 E 는 다음 식으로 계산한다¹⁾.

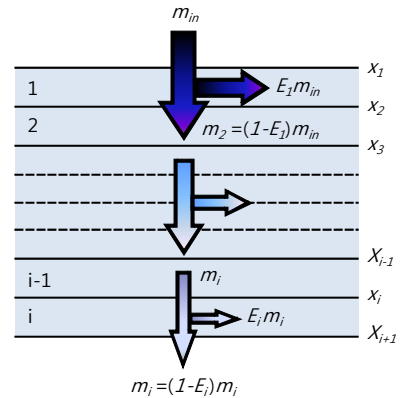


Fig. 1 Schematic of the filter wall discretized into slabs of unit collectors

$$E = 1 - \frac{C}{C_0} = 1 - \exp\left[-\frac{3\eta(1-\varepsilon_0)w_s}{2\varepsilon_0 d_{c0}}\right] \quad (2)$$

여기서 ε_0 와 w_s 는 초기 필터 다공도 및 벽면의 두께이며, d_{c0} 는 단위 포집자(unit collector)의 초기 직경으로 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다¹⁾.

$$d_{c0} = \frac{3}{2} \frac{(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0} d_{pore} \quad (3)$$

한편, 식 (2)에 나타난 η 는 단위 포집자의 단위 길이당 포집 효율로 정의되며, 포집 효율은 입자상 물질은 확산(Brownian diffusion) 효율과 차단(direct interception collection) 효율에 의해 포집된다는 가정 하 식 (4)로 주어진다²⁾.

$$\eta = \eta_D + \eta_R - \eta_D \cdot \eta_R \quad (4)$$

$$\eta_D = 3.5g(\varepsilon)Pe^{-2/3} \quad (5)$$

$$\eta_R = 1.5N_R^{\frac{2}{3}} \frac{g(\varepsilon)^3}{(1+N_R)^{\frac{3-2\varepsilon}{3}}} \quad (6)$$

식 (5)에 나타나는 $g(\varepsilon)$ 는 Kuwabara 'unit cell' 모델의 기하학적 함수이며, Pe 는 Peclet 수로 유체 속도와 단위 포집자 직경을 이용하여 구할 수 있으며, 식 (6)에 N_R 은 차단을 수이다²⁾.

2.2 압력 강하(Pressure drop) 모델

Konstandopoulos의 총괄 변수 모델에 의하면, 배기가스가 필터를 지나면서 발생하는 압력 강하는 4영역인 필터 벽면, soot 경계층 및 필터의 입구와 출구에서 발생하며, 따라서 이 모델에 의한 필터 내의 압력 강하는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다³⁾.

$$\Delta P = \frac{\mu Q}{2V_{trap}} (\alpha + \omega_s)^2 \left[\frac{\omega_s}{k_0 \alpha} + \frac{1}{2k_{soot}} \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 2\omega} \right) + \frac{4FL_f^2}{3} \left(\frac{1}{(\alpha - 2\omega)^4} + \frac{1}{\alpha^4} \right) \right] \quad (7)$$

여기서 α , ω_s , L_f 는 각각 셀 채널의 두께, 폭, 길이이며, k_0 와 k_{soot} 은 각각 필터와 포집된 입자 경계층의 투과성(permeability)이다. 또한, F 는 마찰력 상수(=28.454)이며, V_{trap} 과 ω 는 각각 필터의 총 부피와 입자 경계층의 두께로 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_{trap} = \frac{\pi D_f^2}{4} L_f \quad (8)$$

$$\omega = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \frac{m_c}{N_{cells} L_f \rho_{soot, c}}}}{2} \quad (9)$$

위 식에 나타난 D_f 는 필터의 직경, m_c 는 포집된 입자 경계층의 총 입자 질량, N_{cells} 는 필터 내의 셀 수, $\rho_{soot, c}$ 는 입자 경계층에 포집된 입자의 밀도이다.

2.3 재생(Regeneration) 모델

Konstandopoulos 등은 총괄 시스템(lumped system)에 대해 질량 보존식과 에너지 보존식을 적용하여 재생 모델을 제안한 하였으며⁴⁾, Fig. 2에 도시한 총괄 시스템에 대한 질량 보존식은 식 (10)으로 정의된다.

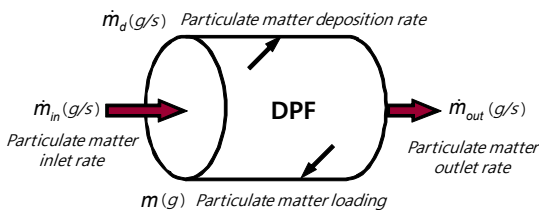


Fig. 2 Mass balance schematic for the filter

$$\frac{dm}{dt} = -K_R m + \dot{m}_d \quad (10)$$

여기서 \dot{m}_d 는 식 (1)에서 정의한 입자상 물질의 포집율이며, K_R 은 식 (11)에 나타난 총괄 반응에 의해 필터 내부에서 연소 또는 촉매 반응에 의해 산화되는 입자상 물질의 질량 감소율 또는 산화 반응 속도이다.

$$C(s) + \left(1 - \frac{1}{2} f_{CO}\right) O_2 \xrightarrow{K_R} f_{CO} CO + (1 - f_{CO}) CO_2 \quad (11)$$

위 식에서 f_{CO} 는 연소 또는 촉매 반응에 대한 선택도(selectivity)이다. 한편, 필터 내부에 포집된 입자상 물질은 연소 반응과 촉매 반응에 의해 산화되므로, 식 (12)에 나타난 바와 같이 질량 감소율은 두 반응 속도로 나누어 고려해야 된다⁵⁾.

$$K_R = K_{thermal} + K_{catalytic} = A_p y_{O_2} T \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right) + A_a y_{O_2} T \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (12)$$

여기서, y_{O_2} 는 배기가스 중 산소의 몰분율이며, E_p 와 E_a 는 연소 및 촉매 반응의 활성화 에너지, A_p 와 A_a 는 연소 및 촉매 반응의 빈도수(frequency factor)로 그 값을 Table 1.에 나타내었다.

Table 1 Filtration parameters for the lumped parameter model

Reaction parameters		Case 1	Case 2
Activation energy (kJ/mol)	Thermal (E_p)	150	150
	Catalytic (E_a)	80	80
Frequency factor (1/K·s)	Thermal (A_p)	1.0×10^3	1.0×10^3
	Catalytic (A_a)	5.0×10^2	4.0×10^2

따라서 식 (10)에 나타난 총괄 변수 모델에 의한 필터의 입자상 물질 포집율과 연소 및 촉매 반응에 의한 입자상 물질 질량 감소율에 대한 질량 보존식은 식 (13)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = -(K_{thermal} + K_{catalytic}) m + Q C_0 E \quad (13)$$

한편, 식 (12) 나타낸 반응에 의한 입자상 물질의 질량 감소율은 온도의 함수이며, Fig. 3에 나타낸 총괄 시스템에 대해 에너지 보존식을 고려하면 식 (14)와 같이 정리할 수 있다.

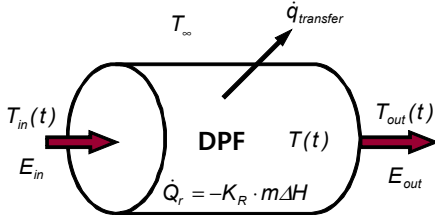


Fig. 3 Energy balance schematic for the filter

$$(mC_{p,soot} + \rho_{filter}C_{p,filter}V_w)\frac{dT}{dt} = \dot{Q}_r - \dot{m}_g(h_{out} - h_{in}) - \dot{q}_{transfer} \quad (14)$$

여기서 $C_{p,soot}$ 은 입자상 물질의 정압 비열, ρ_{filter} , $C_{p,filter}$, V_w 는 각각 필터의 밀도, 정압 비열 및 필터 벽면의 체적이다. 또한, \dot{m}_g 는 배기 가스의 질량 유량, $\Delta h (= h_{out} - h_{in})$ 은 입출구의 엔탈피 변화량, $\dot{q}_{transfer}$ 는 필터 외부로의 대류 열 전달량, \dot{Q}_r 은 입자상 물질의 산화에 열 생성량으로 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\dot{Q}_r = -K_R m (\Delta H_{thermal} + \Delta H_{catalytic}) \quad (15)$$

여기서, ΔH 는 연소 및 촉매 반응에 의한 반응 엔탈피로 본 연구에서는 Chemkin Code⁶⁾의 값을 이용하여 각 화학 종에 대한 생성 엔탈피를 계산하였으며, CO 선택도다음 식을 이용하여 계산하였으며, 식에 나타나는 상수값은 Table 2에 나타내었다⁷⁾.

$$(f_{CO})_{thermal} = \frac{1}{1 + k_{fy}^q \exp(E_{fj}/RT)} \quad (16)$$

$$(f_{CO})_{catalytic} = \frac{1}{1 + k'_{fy}^q \exp(E'_{fj}/RT)} \quad (17)$$

Table 2 Filtration parameters for the lumped parameter model

E_{fj}/R	E'_{fj}/R	k_{fy}	k'_{fy}	q	q'
3,000K	2,575K	0.02	3.57	0.21	0.21

2.4 해석 프로그램

총괄 변수 모델을 적용한 DPF 필터 내부의 포집 및 재생되는 입자상 물질의 질량과 에너지 보존식은 식 (13)과 식 (14)와 같이 1차원 연립 미분 방정식의 형태로 나타나며, 본 연구에서는 이를 계산하기 위하여 4th order Explicit Runge-Kutta Method를 이용하여 시간 변화에 따른 압력, 온도 등과 같은 물리량들의 변화값을 계산하였다. 계산된 결과는 참고 문헌⁵⁾의 실험 결과와 비교하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

2.5 메탈 DPF 필터의 성능 해석을 위한 엔진 운전 모드 선정

필터에 포집된 입자상 물질이 재생되면서 필터 내부에서는 연소 또는 촉매 반응이 일어나고, 이는 필터의 온도를 필요 이상으로 높이는 결과를 초래하여 필터 재질에 손상을 가져올 수 있다. 따라서 재생 과정을 효과적으로 재현하여 필터 내부의 온도 변화와 압력 강하량 변화를 예측하기 위해서는 이상적인 재생 환경과 열악한 재생 환경의 두 과정으로 나누어 고려해야 한다⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 Tan이 고려한 이상적인 재생 환경인 ‘Controlled regeneration’과 열악한 재생 환경인 ‘Uncontrolled regeneration’에 대해 필터에 포집된 입자상 물질에 대해 모델링 결과를 적용하여 두 재생 과정에 대한 필터 내부의 온도 및 압력 강하 변화량에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

‘Controlled regeneration’ 운전 모드는 엔진에 일정한 부하를 주어 입자상 물질이 어느 정도 포집된 상태에서 급격하게 엔진을 배기 가스 온도가 최대로 되는 전부하 조건으로 운전하여 필터의 압력 강하가 초기 상태가 될 때까지 가장 이상적으로 입자상 물질을 재생시키는 운전 조건으로 EPA mode 11으로 엔진을 60초 동안 운전하다 15초 내에 엔진을 전부하 조건으로 변화시켜 운전하는 모드이다. ‘Uncontrolled regeneration’ 운전 모드는 일정한 엔진 부하인 엔진을 EPA mode 11로 20초 동안 운전하다 20초 내에 엔진을 전부하 조건으로 변화시킨 다음, 15초 동안 전부하 운전 조건을 유지시킨 후, 10초 내에 엔진을 아이들 상태로 떨어뜨리는 운전 조건으로

로 실제 현장에서 일어날 수 있는 가장 열악한 재생 환경이다. 이 모드는 엔진이 전부하 상태로 운전되면서 재생 조건이 만들어지고 필터 내부에서 반응이 일어나지만, 엔진이 갑자기 아이들 상태가 되면서 배기가스 유량과 에너지가 현격하게 감소하지만 필터 내부의 온도 상승으로 인하여 반응이 유지되어 필터 재질의 온도가 상승하는 필터 측면에서 가장 열악한 운전 조건이 되는 경우이다.

Table 3 Exhaust gas input data for regeneration process

Exhaust gas data	Idle	Mode 11	Full load
Flow rate (m ³ /s)	0.0503	0.1647	0.3037
Particulate mass concentration (kg/sm ³)	6.5×10 ⁻⁶	21.3×10 ⁻⁶	39.2×10 ⁻⁶
Oxygen mole fraction	0.19	0.14	0.11

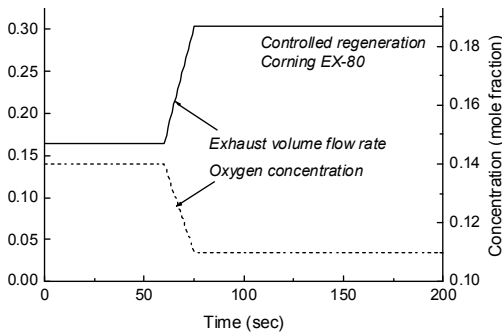


Fig. 4 Exhaust volume flow rate and oxygen concentration vs. time for controlled regeneration

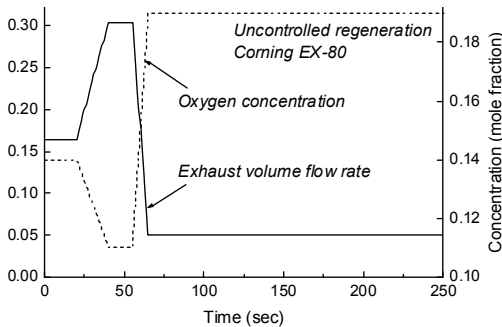


Fig. 5 Exhaust volume flow rate and oxygen concentration vs. time for uncontrolled regeneration

이상의 ‘Controlled regeneration’ 운전 모드와 ‘Uncontrolled regeneration’ 운전 모드에 대한 배기가스 유량, 공연비 계산을 위한 배기가스 중 산소의 물분율 및 입자상 물질의 초기 농도를 Table 3, Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었으며, 메탈 DPF의 필터의 재생 과정을 모사하기 위한 필터의 주요 제원은 Table 4에 나타내었다⁵⁾.

Table 4 Filter specifications

Specifications	Corning EX-80	Corning EX-47
Diameter (cm)	28.5755	28.575
Length (cm)	35.56	35.56
Wall thickness (mm)	0.4318	0.4318
Cell density (cell/cm ²)	15.5	15.5
Porosity (%)	48	50
Mean pore size (μm)	12.5	13.4
Volume (m ³)	22.8× ⁻³	22.8×10 ⁻³
Bulk density (kg/m ³)	1,400	1,350
Specific heat (J/kg·K)	1,120	1,120
Fuel additive	Cu/33 or 66	Cu/66

3. 결과 및 고찰

Fig. 6은 ‘Controlled regeneration’ 운전 모드에 대한 메탈 DPF 필터의 재생 성능을 나타낸 그림이다. 엔진을 일정한 부하 조건으로 60초 동안 운전하다가 갑자기 전부하 조건으로 변화시키면 메탈 DPF 내에 포집된 입자상 물질의 재생 과정이 시작되면서 필터 내에 포집된 입자상 물질의 질량은 급격하게 감소되어 약 105초를 지나면서 필터 내에 포집된 입자상 물질의 재생이 완료되는 것으로 나타났다.

또한 재생 과정 초기에는 엔진이 전부하 조건으로 운전되면서 배기가스의 급격한 유량 증가로 인하여 필터 내의 압력 강하가 증가하는 것으로 나타나지만, 재생 과정이 계속 진행되면서 전부하 운전이 시작된 후 약 23초인 83초를 지나면서 입자상 물질의 재생으로 인한 질량의 감소로 압력 강하의 감소가 시작되고 약 105초를 지나면서 필터를 지나는 배기가스의 압력 강하는 초기 상태가 되어 이후 거

의 일정한 상태로 유지되고 있음을 알 수 있다. 따라서 DPF 필터 내에 포집된 입자상 물질의 재생은 전부하 조건으로 엔진을 운전하면서 약 45초 내에 재생 과정이 완료되었음을 알 수 있으며, 이는 참고문헌에 발표한 결과(약 50초)와도 유사한 경향을 나타내어 본 연구에서 수행한 메탈 DPF 필터의 성능 해석 모델링 결과가 타당함을 확인할 수 있다.

이 운전 조건에서의 DPF 필터 입구 및 필터 내의 온도 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 필터 내의 온도는 엔진이 전부하 조건으로 운전되면서 급격히 증가하다 재생이 완료되는 시점인 약 105초에서 최대값인 867K을 나타내었으며, 이후 재생 과정의 완료로 필터내의 온도의 감소가 시작되어 약 160초를 지나면서 필터 입구의 온도와 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다.

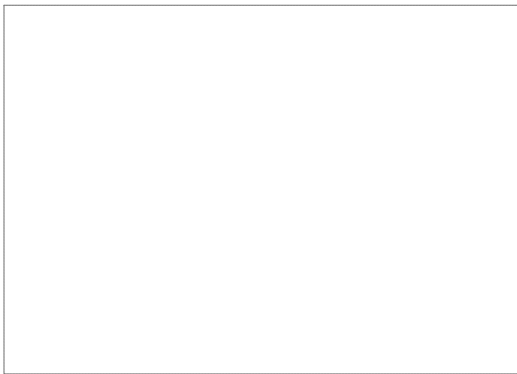


Fig. 6 Filter pressure drop and mass retained vs. time for controlled regeneration

한편, ‘Uncontrolled regeneration’ 운전 모드에 대한 메탈 DPF 필터의 재생 성능은 Fig. 8에 나타내었다. 일정 부하 조건에서 20초 동안 운전하다 갑자기 엔진을 전부하 조건으로 변화시키면 필터 내부에 포집되어 있던 입자상 물질의 재생 과정이 시작되어 입자상 물질의 질량은 급격히 감소하고 있으며, 재생 과정이 시작된 후 약 45초인 운전 모드 시작 후 약 65초를 지나면서 필터 내부에 포집된 질량이 거의 없음을 나타내고 있다. 또한 엔진이 전부하 조건으로 운전되면서 유량의 급격한 증가로 필터 내의 압력 강하가 증가하나 전부하 운전이 시작된 후 약 20초를 지나면서 재생으로 인한 질량의 감소로 압력 강하의 감소가 시작되고 약 65초를 지나면서 필터를 지나는 배기가스의 압력 강하는 초기 상태가 되는 것을 알 수 있다.

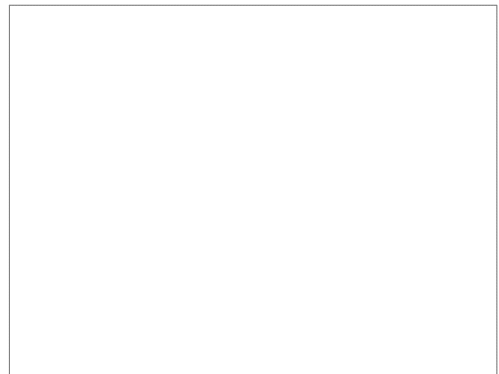


Fig. 8 Filter pressure drop and mass retained vs. time for uncontrolled regeneration

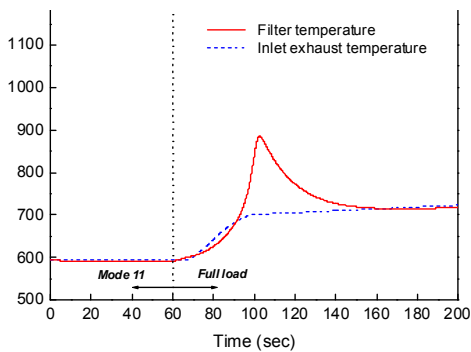


Fig. 7 Filter and inlet exhaust temperature vs. time for controlled regeneration

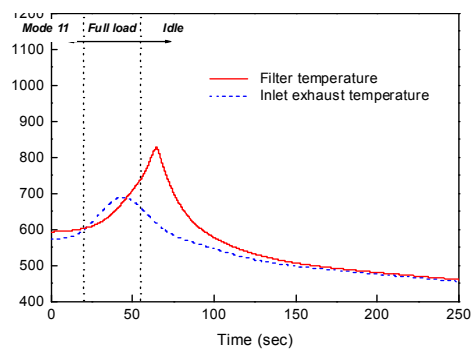


Fig. 9 Filter and inlet exhaust temperature vs. time for uncontrolled regeneration

또한 전부하 조건에서 아이들 상태로 변환 이후에도 재생 과정이 계속 진행되고 있음을 알 수 있으며, 'Controlled regeneration' 운전 모드와 동일하게 약 45초에 종료되었음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 참고문헌에 나타난 이론 및 실험 결과와도 동일하여 본 연구에서 수행한 모델링 및 해석 결과의 타당성을 다시 한 번 검증되었음을 알 수 있다.

한편, 이 운전 조건에서 필터 내의 온도 변화는 Fig. 8에 나타내었다. 필터 내의 온도는 엔진이 전부하 조건으로 운전되면서 'Controlled regeneration' 운전 모드와 유사하게 급격히 증가하다 재생 과정이 완료되는 시점인 약 65초에서 최대값인 829K을 나타낸 이후 온도의 감소가 시작되어 약 190초를 지나면서 필터 입구의 온도와 5도 이내의 유사한 온도를 나타내는 것으로 나타났다.

그러나 'Uncontrolled regeneration' 운전 모드에서는 재생 과정이 완료된 후 약 125초 만에 필터 내부의 온도가 필터 입구 온도와 동일한 수준으로 되어 필터의 냉각 시간이 'Controlled regeneration' 운전 모드에서의 55초 보다 2배 이상 길어진 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 'Uncontrolled regeneration' 운전 모드의 경우 'Controlled regeneration' 운전 모드와는 달리 엔진이 전부하 조건에서 아이들 상태로 변화하면서 배기가스 유량이 감소하여 필터 내부의 냉각 효과가 저하되기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

메탈 DPF 필터 설계에 필요한 포집 및 재생 과정에 대한 물리적 메커니즘을 규명하고 이론적으로 고찰하기 위하여 본 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 총괄 변수(Lumped Parameter) 모델을 적용하여 DPF 필터의 포집, 압력 강하 및 재생 과정에 대한 물리적 과정을 이론적으로 해석하기 위한 수학적 모델을 선정하였다.
- (2) DPF 필터의 성능을 해석하기 위해 선정된 수학적 모델을 적용하여 4th order Explicit Runge-Kutta Method를 이용한 해석 프로그램을 구축하였다.

- (3) DPF 필터의 성능 해석 모델링 결과 분석을 위한 'Controlled regeneration' 및 'Uncontrolled regeneration'로 구성된 엔진 운전 모드 선정하였으며, 기 발표된 이론 및 실험 결과와 비교하여 본 연구에서 구축한 해석 프로그램의 타당성 검증을 완료하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

References

- (1) A. G. Konstandopoulos, and J. H. Johnson, "Wall-flow Diesel Particulate Filters - Their Pressure Drop and Collection Efficiency", SAE Paper No. 890405, 1989.
- (2) K. W. Lee, and J. A. Gieseke, "Collection of Aerosol Particles by Packed Beds", Env. Sci. Tech. 13 (4), p.1761, 1978.
- (3) A. G. Konstandopoulos, and M. Kostoglou, "Periodically reversed flow regeneration of diesel particulate traps", SAE Paper No. 1999-01-0469, 1999.
- (4) A. G. Konstandopoulos, and M. Kostoglou, "Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filters", Combustion and Flame 121:488-500, 2000.
- (5) Evdoxia A. Kladopoulou et. al, "A Study Describing the Performance of Diesel Particulate Filters during Loading and Regeneration - A Lumped Parameter Model for Control Applications", SAE Paper No. 2003-01-0842, 2003.
- (6) R. J. Kee, F. M. Rupley, and J. A. Miller, "Chemkin-II: A Fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics", SAND89-8009, Sandia National Lab., Livermore, CA, Sep. 1989.
- (7) A. G. Konstandopoulos, and M. Kostoglou, "Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filters", Combustion and Flame 121:488-500, 2000.
- (8) J. C. Tan, "A Study of the Regeneration Process in Diesel Particulate Traps Using a Copper Fuel Additive", M. S. Thesis, Michigan Tech. Univ., Houghton, MI, 1995.