

# 배기의 유속분포가 CDPF의 재생 시 비정상적 열적 거동에 미치는 영향

정수진<sup>1)</sup> · 이점주<sup>2)</sup> · 최창호<sup>3)</sup>

자동차부품연구원 동력시스템연구센터<sup>1)</sup> · 우신공업 기술연구소<sup>2)</sup> · 웅진기업<sup>3)</sup>

## The Effect of Flow Distribution on Transient Thermal Behaviour of CDPF during Regeneration

Soo-Jin Jeong<sup>\*1)</sup> · Jeom-Joo Lee<sup>2)</sup> · Chang-Ho Choi<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup>Research & Development Center, Wooshin Industrial Co, Ltd., 417-3 3Ma Block, Jeongwang-dong, Siheung-si, Gyeonggi 429-854, Korea

<sup>3)</sup>Yungjin Enterprise Co., Ltd., 608-2 Seongkok-dong, Danwon-gu, Ansan-si, Gyeonggi 425-833, Korea

(Received 31 December 2007 / Accepted 6 December 2008)

**Abstract** : The working of diesel particulate filters(DPF) needs to periodically burn soot that has been accumulated during loading of the DPF. The prediction of the relation between an uniformity of gas velocity and soot regeneration efficiency with simulations helps to make design decisions and to shorten the development process. This work presents a comprehensive combined 'DOC+CDPF' model approach. All relevant behaviors of flow fluid are studied in a 3D model. The obtained flow fields in the front of DPF is used for 1D simulation for the prediction of the thermal behavior and regeneration efficiency of CDPF. Validation of the present simulation are performed for the axial and radial direction temperature profile and shows goods agreement with experimental data. The coupled simulation of 3D and 1D shows their impact on the overall regeneration efficiency. It is found that the flow non-uniformity may cause severe radial temperature gradient, resulting in degrading regeneration efficiency.

**Key words** : CDPF(Catalyzed Diesel Particulate Filter), Regeneration(재생), One channel model(단일관 모델), Computational fluid dynamics(CFD: 전산유체역학), Flow distribution(유속균일도)

### 1. 서론

필터에 포집된 PM은 가능하면 빠른 시간 내에 태워서 필터가 다시 PM을 포집할 수 있도록 하는 과정을 재생(regeneration)이라고 하며, 재생 시 필터가 과열되어 과손되지 않도록 하는 제어기술이 필요하다. 그러나 도심을 주행하는 차량의 경우는 배출가스의 온도가 낮아 PM의 점화온도(550°C~600°C)에 도달하지 못하므로 연료에 첨가제를 공급하거나 촉

매코팅을 통하여 재생온도를 낮추는 방법을 사용하고 있다. 현재 EURO-IV 규제에 대응하기 위하여 촉매방식 DPF(CDPF: Catalyzed Diesel Particulate Filter)를 적극적으로 사용하고 있으며, 그 이유는 필터 내에서 연속재생이 일어나므로 필터에 포집된 PM의 양이 적어 엔진의 배압을 낮은 수준으로 유지함으로써 타장치에 비해 연비악화와 엔진의 성능저하가 적기 때문이다. CDPF 전단에는 백금산화촉매를 설치하여 산화반응을 통한 배기가스의 온도상승 및 NO<sub>2</sub>-assisted 재생효과를 얻고 있다. 최근에는

\*Corresponding author, E-mail: sjjeong@katech.re.kr

DOC와 CDPF를 하나로 캐닝하고 있으며 이러한 촉매의 정상적인 작동을 위해서는 배출가스가 275°C 이상이어야 작동이 확실하다. 이러한 일체형 DOC+CDPF의 설계에 있어서 성능 및 신뢰성 관점에서 중요한 것은 재생과정 시의 모노리스 내에서의 열적 거동 및 온도구배를 예측 분석하는 것이다. 왜냐하면 재생 시에는 탄소미립자의 포집 형태에 따라 고온의 열이 발생하고 국부적으로 급격한 온도구배가 나타날 수 있으므로 DPF의 수명에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 결국, 열적 충격을 최소화 할 수 있는 제어기술이 요구되는데 이를 위해서는 DPF에서 일어나는 여러 가지 물리적 현상에 대한 이해가 필수적이다. 따라서 국내외적으로 DPF의 재생에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>2,8-11)</sup>

본 연구에서는 2.7 liter 디젤엔진에 장착된 CDPF를 대상으로 하여 재생 시 유속균일도가 DPF 모노리스 내의 비정상 열적거동에 미치는 영향을 실험 및 수치적으로 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 해석대상 CDPF

본 해석대상인 DPF는 아래 Fig. 1과 같으며 CDPF 앞에 DOC가 설치되어 있으며, 양 모노리스 사이에 공기간극이 존재한다. 본 연구에 사용된 DOC 및 CDPF의 제원은 Table 1에 자세히 나타내었다.

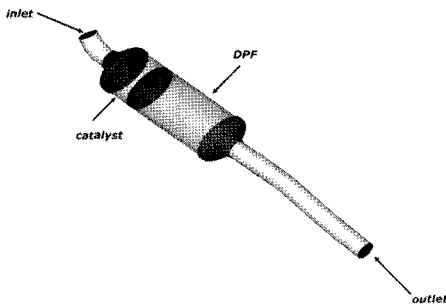


Fig. 1 Schematic diagram of exhaust system

Table 1 Specification of DOC and CDPF

| Monolith | Material   | Length (m) | Volume (ℓ) | Cell density (CPSI) | Pt loading (g/ft <sup>3</sup> ) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Thermal conductivity (W/mK) | Specific heat (J/kgK) |
|----------|------------|------------|------------|---------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| DOC      | Cordierite | 0.0780     | 1.2        | 400                 | 110.0                           | 440.0                        | 1.255                       | 836.8                 |
| DPF      | SiC        | 0.2540     | 3.9        | 180                 | 18.0                            | 2700.0                       | 13.000                      | 1800.0                |

### 2.2 자유재생(Uncontrolled Regeneration) 과정

본 연구에서 사용한 자유재생과정은 1500rpm 20% 부하조건으로 2분 동안 정속주행한 후 3500rpm 100% 하중으로 DPF 출구의 온도가 630°C에 도달할 때 까지 운전한다. 이후 아이들 상태로 6분 동안 주행한다. CDPF로 유입되는 배기가스의 유입온도, 질량유량 및 각화화종의 농도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 연구에서 모사한 자유재생과정은 도시주행 시 빈번하게 발생하는 가속과 감속을 반복하는 주행모드를 나타내고 있다.

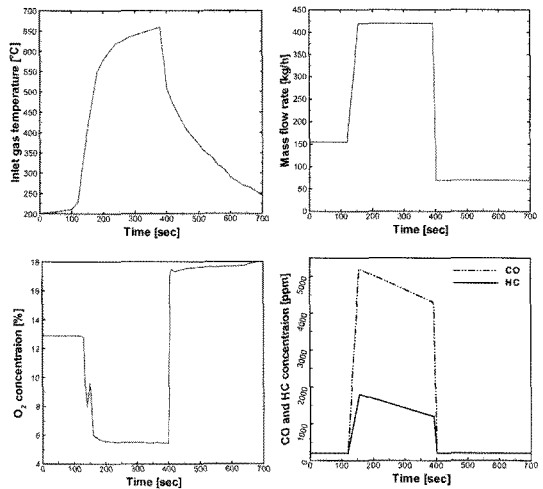


Fig. 2 Uncontrolled regeneration scenario employed in this study

### 2.3 3차원 유동해석

DOC와 DPF가 일체형으로 캐닝되어 있는 CDPF 시스템의 내부 유동특성을 분석하기 위하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 유동은 비압축성 난류유동으로 고려하였으며, 모노리스는 다공성물질로 고려하였다. 해석에 사용된 격자는 500,000개이며 유입유량은 Fig. 2에 나타낸 3500rpm 100%하중의 경우 (420kg/hr)와 아이들 운전조건인 경우(70kg/hr)의 2가

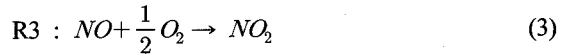
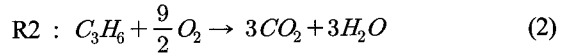
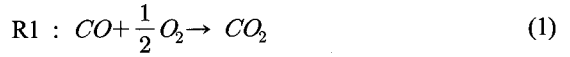
지로 고려하였다. 난류해석을 위하여 RNG k-ε 난류 모델을 사용하였으며 속도와 압력의 연계를 위하여 SIMPLE 을 이용하였고 대류항 차분을 위하여 2차 정도를 가지는 MARS 차분법을 사용하였다. 계산은 상용 CFD 코드인 STAR-CD<sup>1)</sup>를 사용하여 수행하였으며 3차원 격자생성을 위하여 pro-am이 사용되었다.

2.4 DOC 및 CDPF의 열적 거동 해석

본 연구에서는 재생 시 화학반응 및 열적 거동 해석을 위하여 1차원 단일관 모델을 사용하였으며 Fig. 3과 같이 모델링 하였다. 1차원 수치해석을 통하여 CDPF 모노리스 전단부에서의 배출가스 유속균일도가 PM의 재생효율에 미치는 영향을 예측하고자 한다. 본 연구에 사용된 DOC 및 CDPF의 모노리스 내부 열유동 현상과 화학반응의 해석을 위한 기본적인 가정들은 Triana의 가정<sup>2)</sup>과 동일하다. DOC 시스템 해석에 사용된 기체상의 질량 및 에너지보존방정식과 촉매표면에서의 화학종보존방정식 및 고체상의 에너지보존방정식은 참고문헌<sup>3)</sup>에 자세히 언급되어 있다. 모노리스 채널의 압력강하는 Darcy's law<sup>4)</sup>를 적용하여 계산하였다. 배출가스와 채널 고체벽 사이의 열 및 물질전달을 결정하는 각각의 계수들은 Sieder-Tate approach<sup>5)</sup>를 적용하여 Nu 와 Sh의 관계로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 완전발달된 층류 유동에 대한 Nu와 Sh의 해석해를 얻었고 이를 Table 2에 요약하여 나타내었다. Table 2의 λ<sub>g</sub>, D<sub>k,g</sub>는 각각 배출가스의 열전도도, 화학종 k의 확산계수, d<sub>hyd</sub> 채널의 수력직경, l 채널길이를 나타낸다. 배출가스의 밀도변화는 이상기체상태방정식으로부터 계산하였으며 점도, 확산계수, 열전도도는 Verein Deutscher Ingenieure<sup>6)</sup>와 Reid<sup>7)</sup>의 연구에서 사용된 정보 및 방법에 따라 온도, 압력 그리고 배출가스의 조성비를 고려하여 계산하였다. 열역학적 물성치들은 배출가스의 조성 및 온도의 함수로 계산하였다. 본 연구에서는 DOC 촉매 표면에서 발생하는 3개의 주요 산화 반응, 식 (1)~(3)을 다음과 같이 고려하였다.

Table 2 Heat and mass transfer coefficients

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| $k_h = Nu \cdot \lambda_g / d_{hyd}$ | $k_{k,m} = Sh \cdot D_{k,g} / d_{hyd}$ |
| $Nu = 1.86 \times (Gz_{heat})^{1/3}$ | $Sh = 1.86 \times (Gz_{mass})^{1/3}$   |
| $Gz_{heat} = Re \cdot Pr \cdot d/l$  | $Gz_{mass} = Re \cdot Sc \cdot d/l$    |



반응식 R1 ~ R3에 대한 반응율은 Jeong et al.<sup>8)</sup>에 의해 사용된 Langmuir-Hinshelwood 형식을 사용하였으며 이를 식 (4)에 나타내었다.

$$r_i(c_{s,i}, T_s) = \frac{k_i c_{g,i} c_{g,O_2}}{G} \quad (4)$$

$$G = T(1 + K_1 c_{CO} + K_2 c_{C_3H_6})^2 \times (1 + K_3 c_{CO}^2 c_{C_3H_6}^2)(1 + K_4 c_{NO}^{0.7}) \quad (5)$$

여기서, i=1(CO), 2(C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), 3(NO)를 나타낸다. 흡착을 나타내는 식 (5)의 G는 각 화학종 CO, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, NO의 억제효과를 의미한다. 본 연구에서는 식 (4)와 (5)에 각각 포함되어 있는 반응상수, k<sub>i</sub>, 와 흡착평형상수, K<sub>i</sub>, 를 각각 Arrhenius 형식으로 가정하여 식 (6)과 (7)에 나타냈으며 식 (1)~(3)의 반응열과 함께 참고문헌<sup>2)</sup>과 동일한 값을 사용하였다.

$$k_i = A_r \exp(-E_r / RT_s) \quad (6)$$

$$K_j = A_j \exp(-E_j / RT_s) \quad (7)$$

본 연구에 고려된 DPF 내의 열에 의한 PM의 연소 반응은 식 (8)~(9)과 같이 나타낼 수 있다.



반응식 R4 ~ R6에 대한 반응율은 수정된 Arrhenius 형식을 사용하였으며, 식 (10)~(11)에 나타내었다.

$$r_4 = f_{CO} K_4 \exp(-E_4 / RT_s) c_{O_2} \quad (10)$$

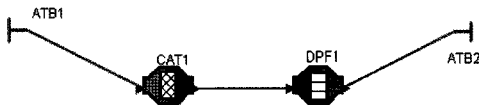


Fig. 3 Combined DOC (400 cps) +DPF (180 cps) model

$$r_5 = (1 - f_{CO})K_5 \exp(-E_5/RT_5)c_{O_2} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)의 PM 산화반응에 대한 열적 CO 선택선택성을 나타내는  $f_{CO}^{th}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{CO}^{th} = [1 + k_f y^q \exp(E_f/RT)]^{-1} \quad (12)$$

가스상의 질량, 운동량보존식에 대한 가정들은 Peters의 가정<sup>9)</sup>과 동일하다. 본 연구의 CDPF 시스템 해석을 위한 기체상 및 고체상에 대한 에너지 및 화학종보존방정식은 기존방법<sup>10,11)</sup>과 동일하다.

본 연구에 사용된 PM의 포집과정에 대한 설명은 참고문헌<sup>9)</sup>에 자세히 나타나 있다. 재생과정의 계산을 위한 PM 층에서의 연속방정식 및 각 화학종에 대한 전달 방정식 그리고 그에 대한 생성항 역시 참고문헌<sup>9)</sup>에 자세히 언급되어 있다. 고체벽과 그 위에 포집되어 있는 PM층은 서로 다른 두 개의 다공성 매체로 간주 수 있으며, 압력강하는 Darcy's law<sup>4)</sup>에 의해 계산하였다.

본 연구에서는 DOC 및 CDPF의 해석을 위하여 상용프로그램인 AVL 사의 Boost<sup>12)</sup> 코드를 사용하였고 DOC에서의 Pt 촉매분포함수의 계산 및 식 (10) ~ (11)의 kinetic reaction rate,  $K_{4-6}$ , 계산을 위해 Fortran 사용자 프로그램을 작성하여 해석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 3차원 유동해석결과

본 연구에서는 대상 CDPF의 내부 유동장을 계산하여 DOC 및 CDPF를 통과하는 유속분포가 재생 시 열적거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 3차원 정상상태 유동장해석을 수행하였다. 그 결과, 중앙 단면에서의 속도장을 Fig. 4에 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 확대부 상하에 한쌍의 와류가 형성되어져 있으며, 이로인하여 유속이 중앙부에 집중되어져 있음을 볼 수 있다. 또한 주의깊게 보아야 할 것은 공기간극으로 인하여 상류의 DOC를 통과한 유속이 활발하게 재분배되고 있다는 것이다. 이는 DOC 보다 CDPF에서의 유속균일도를 향상시키는 원인이 된다고 생각되어진다.

Fig. 5에 DOC 및 CDPF의 모노리스 입구단면에서

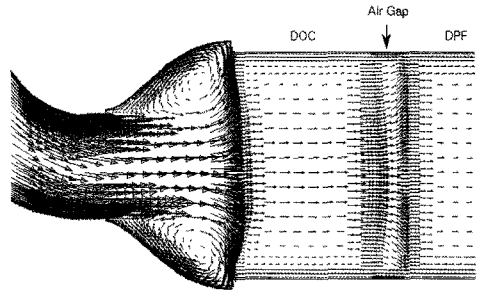


Fig. 4 Flow distribution within CDPF exhaust system

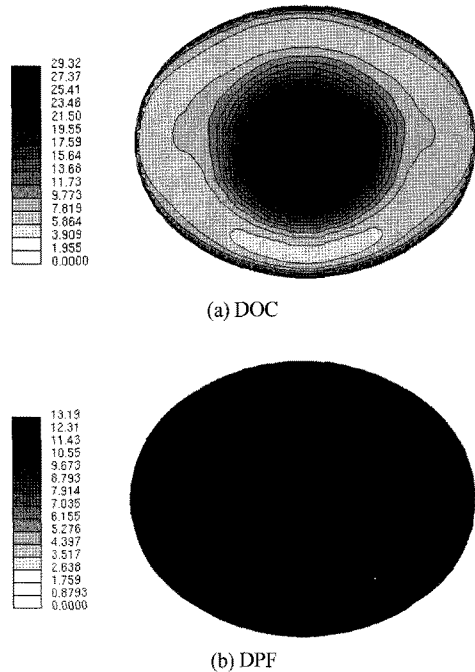


Fig. 5 Flow distribution(m/s) at the face of monolith of DOC and DPF

Table 3 Flow uniformities of DOC and CDPF

| Flow uniformity | High load | Idling |
|-----------------|-----------|--------|
| DOC             | 0.763     | 0.872  |
| CDPF            | 0.989     | 0.998  |

의 속도분포를 각각 나타내었다. 고하중운전 시와 아이들 운전 시의 DOC 및 CDPF 유입면에서의 유속 균일도<sup>13)</sup>를 Table 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 고부하의 경우 통과유량(420kg/hr)이 아이들의 경우(70kg/hr)보다 크므로 높은 속도구배로 인하여 낮은 유속균일도가 분포하고 아이들 구간에서는

보다 높은 유속균일도가 분포한다. 주목할 점은 어느 운전조건에서나 CDPF의 유입면에서의 유속균일도 공간간극에서의 유속재분배로 인하여 높은 균일도를 유지할 수 있다는 점이다.

본 연구에서는 3차원 CFD 해석 결과로부터 구한 유속분포는 일차원 단일관 모델의 유입 조건으로 사용하여 유속분포가 재생 시 열적 거동에 미치는 영향을 연구하였다.

### 3.2 재생 시의 CDPF에서의 열적거동

Fig. 6은 재생 시 CDPF의 온도변화를 측정하기 위한 열전대의 장착 위치를 나타낸 것이다. 열전대의 장착위치는 재생 시 모노리스의 축방향 온도변화 뿐만 아니라 반경방향의 온도구배를 동시에 측정하기 위하여 Fig. 6의 그림과 같은 위치를 선정하였다. 본 연구에서는 1차원 통합 ‘DOC+CDPF’ 모델을 이용하여 재생 시 CDPF의 열적거동을 예측하고 이를 실험과 비교하여 그 타당성을 입증한 후 이를 배출가스 유속균일도에 대한 PM 재생효율 예측에 이용하고자 한다.

Fig. 7은 재생과정 중 CDPF의 전후 압력 강하에 대한 실험 및 본 연구의 1차원 수치해석 결과 비교를 나타낸 것이다. 실험에 사용된 운전조건은 급가감속 운전을 반복적으로 실시하는 도심주행모드를 기본으로 하였다. 실험에서는 배출가스의 질량유량이 상승하는 약  $t = 120 \text{ sec}$ 에서 CDPF의 전후 압력

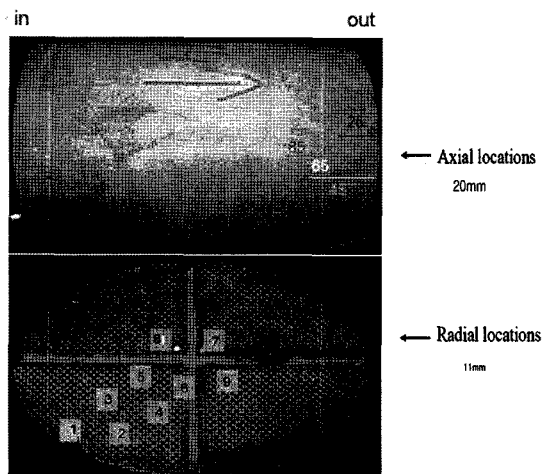


Fig. 6 Locations of thermocouples in DPF

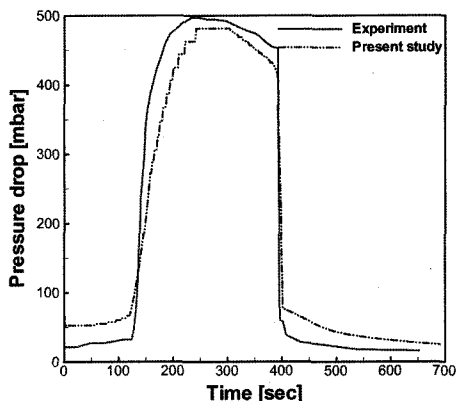
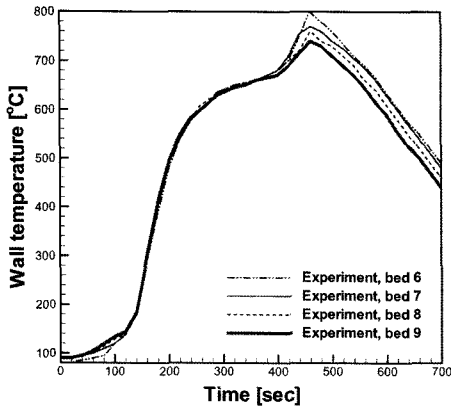


Fig. 7 Pressure drop across CDPF with  $8.4 \text{ g/l}$  of soot loading during regeneration

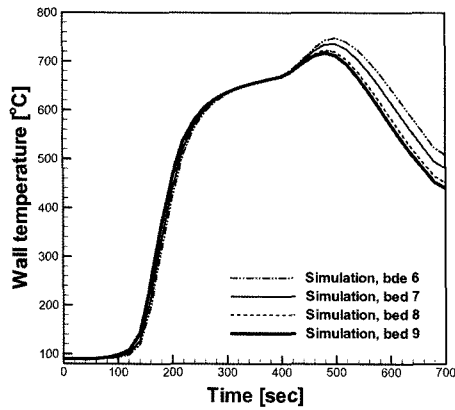
강하가 급격하게 발생되며 이후 고온 배출가스로부터 전달된 열에너지에 의해서 급상승된 CDPF 고체벽의 온도에 의해 재생과정이 시작된다. 재생의 개시와 함께 압력강하는 서서히 감소경향을 나타냈으며 약  $t = 400 \text{ sec}$  이후 아이들 상태에서는 배출가스 질량유량의 급감으로 인하여 압력강하도 급감하였다. 본 연구의 수치해석 결과는 이러한 과정을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 PM의 재생과정 중에 발생하는 CDPF 축방향 고체벽의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다.

약  $t = 120 \text{ sec}$ 에서부터 유입되는 배출가스의 온도가 급상승함에 따라 CDPF 고체벽의 온도도 동반 상승한다. 약  $t = 400 \text{ sec}$  이후 아이들 상태에서는 질량유량의 급감으로 고온의 배출가스의 잔류시간이 증가하고 유입되는 산소의 농도도 순간 급증하기 때문에 PM의 산화속도가 급증하게 되어 모노리스의 Light-off 이 발생하게 된다. PM의 산화속도가 급증하는 Light-off 구간은 예측하기 위하여 CDPF에 해당하는 Kinetic parameter를 일부 수정하여 계산을 수행하였다. CDPF의 최고 온도는 약  $t = 400 \sim 500 \text{ sec}$  사이에서 발생하였고 본 연구의 예측결과는 실험과 비교하여 약  $50^\circ\text{C}$  정도의 온도 차이를 나타내었다. 이는 DPF의 물성치와 다공율 및 배기가스 중의 화학종의 농도 등에 대한 불확실한 정보로부터 기인하는 것으로 사료된다. 그러나 재생중 CDPF의 축방향 온도변화 양상은 실험과 거의 일치함을 알

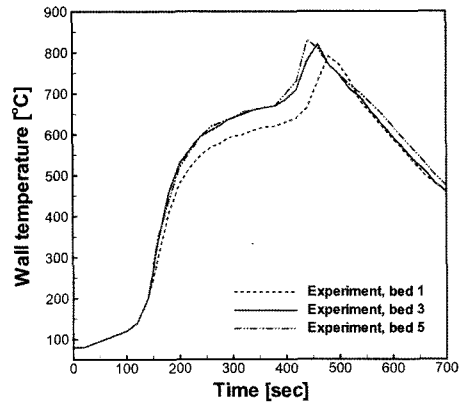


(a) Experiment

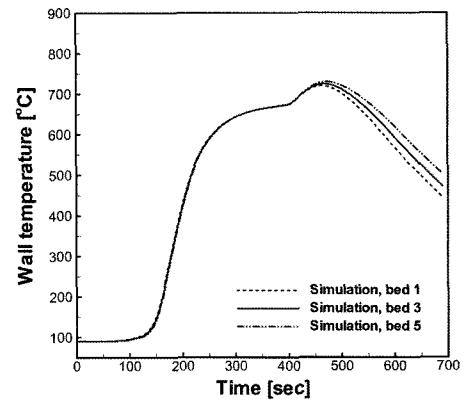


(b) Computation

Fig. 8 Transient profiles of axial wall temperature with 8.4 g/l of soot loading



(a) Experiment



(b) Computation

Fig. 9 Transient behavior of radial wall temperature with 8.4 g/l of soot loading

수 있다. 또한 본 연구에서는 CDPF 반경방향 고체 벽온도 변화를 예측하기 위하여 CDPF 전단으로 유입되는 배출가스의 반경 방향 국부유속을 계산하기 위하여 3차원 유동해석 하였으며 이를 1차원 ‘DOC+CDPF’ 모델의 초기 조건으로 사용하여 계산을 수행하였다.

Fig. 9는 PM의 재생과정 중에 발생하는 CDPF 반경방향 고체벽의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 실험 결과의 경우에는 모노리스 가장자리 (bed 1) 보다 중앙부분 (bed 3,5)의 온도가 약 10 ~ 50 °C정도 높게 측정되었다.

이는 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 유속이 집중되는 중앙부에 높은 대류열유속이 집중되기 때문이다. 또한 최고 온도발생 시간도 외곽부위 (bed 1)가 지연되고 있는데 이 역시 가스의 잔류시간 증가와 대류

냉각의 약화로 기인하는 것이다.

### 3.3 유속균일도에 따른 CDPF의 재생효율

Fig. 10은 CDPF로 유입되는 배출가스의 유속균일도에 따른 재생효율의 예측을 위한 각 경우의 유속분포도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 배출가스의 유속균일도를 Table 3과 같이 70 ~ 100%로 변경하여 그에 따른 PM의 재생효율을 예측하였다. 각 Case 별로 다섯 지점에서 변화되는 유속에 따라 유입되는 질량유량을 Fig. 11에 자세히 나타내었다. 이때, 모든 Case에 대하여 CDPF 전면부로 유입되는 배출가스의 산술평균유속은 항상 동일하도록 가정하였다. 기타의 경계조건들은 Fig. 2와 동일하게 사용하였다. Fig. 12는 배출가스의 국부유속에 따른 CDPF의 최대벽온도 및 재생효율을 나타낸 것이다.

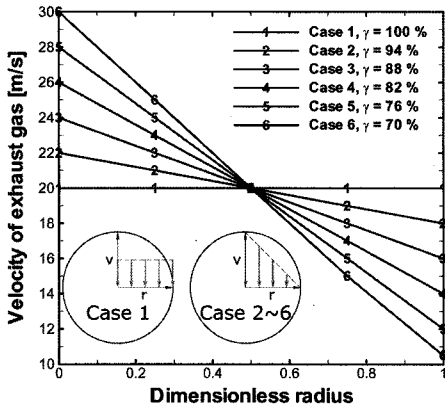


Fig. 10 Radial direction of flow distribution within monolith for various flow uniformities

Table 3. Flow uniformities of cases used in this study

| Case no.            | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
|---------------------|-----|----|----|----|----|----|
| Flow uniformity [%] | 100 | 94 | 88 | 82 | 76 | 70 |

배출가스의 유속이 증가할수록 고온 배출가스의 채널 내에 잔류시간이 감소하고 대류냉각효과가 증가하여 DPF의 재생효율은 감소하는 것으로 나타났다. 이때, Re가 약 715 정도까지는 재생효율이 급격히 감소하다가 약 938 정도까지는 감소율이 서서히 감소

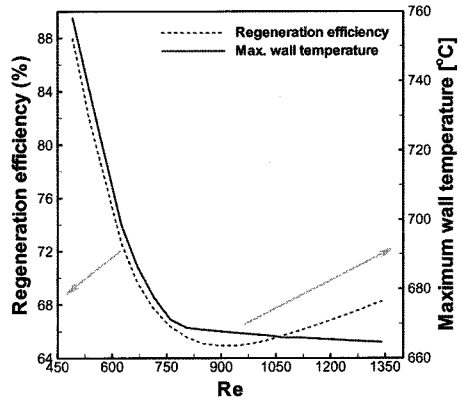


Fig. 12 Regeneration efficiency as a function of gas velocity uniformity

하였으며 그 이후에는 재생효율이 선형적으로 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. CDPF 모노리스의 최고 온도는 Re가 491~760의 구간에서는 약 13.6%의 감소율을 보였으나 Re가 760~1340의 구간에서는 약 0.9%의 미미한 변동만 보이고 있다. 이는 이 영역에서 빠른 배기가스의 유동으로 인하여 채널 내의 대류냉각 효과가 PM의 산화로 인한 발열보다 지배적이기 때문이다. Fig. 13은 각 Case의 CDPF 모노리스 반경방향으로 유입되는 유속의 속도구배에

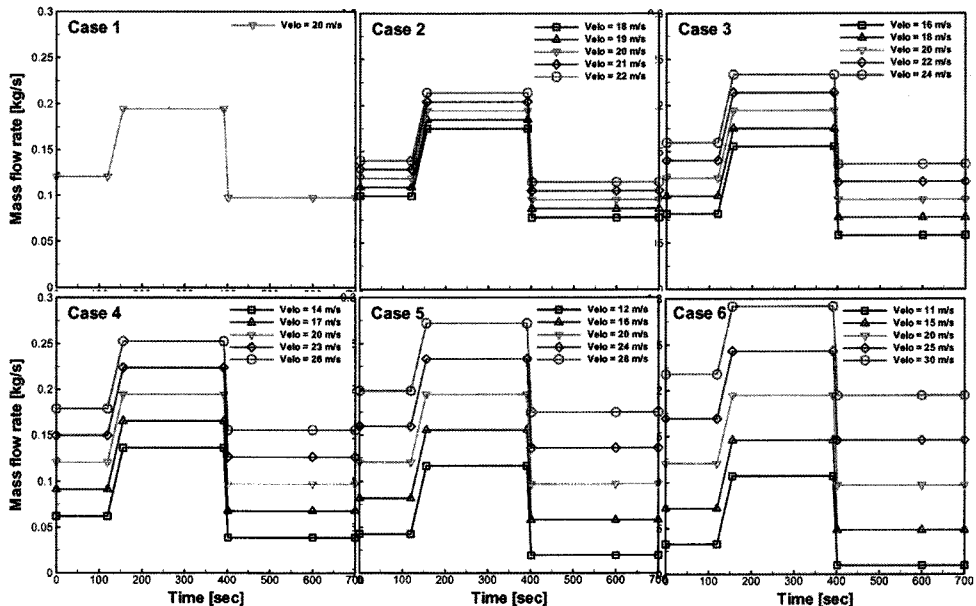


Fig. 11 Mass flow rates inflowing through 5 points of cases

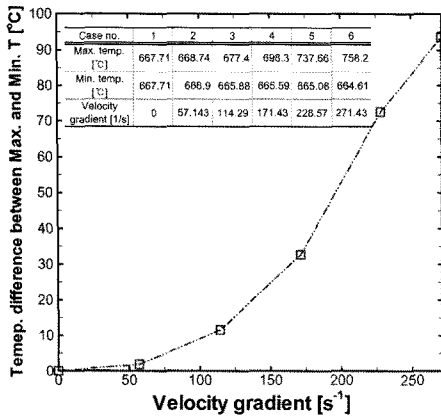


Fig. 13 Temperature difference between Max. and Min. temperature as a function of velocity gradient

따른 재생과정 완료 후 모노리스 최고온도와 최소 온도의 차에 대한 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 13은 CDPF 반경방향으로의 속도구배가 비교적 낮은 경우에는 모노리스의 최고온도와 최소 온도차가 크게 나지 않는 반면 속도구배가 비교적 높은 경우에는 두 온도차가 상대적으로 크게 나타나는 지수함수형태를 띄고 있음을 알 수 있다. 따라서 재생 시 CDPF의 최대 및 최소 온도차를 최소화 하여 열적안정성을 확보하기 위해서는 모노리스로 유입되는 유속균일도를 증가시키는 것이 효과적임을 알 수 있다. Fig.14는 모노리스 채널로 유입되는 배출가스의 Re가 각각 536과 1252인 Case에 대한 시간에 따른 모노리스의 축방향 온도 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 12에서 나타난 바와 같이 Re=536인 경우에는 재생효율 및 최대온도가 급격히 변하므로 Fig. 14의 축방향 온도변화도 모노리스의 후반부로 갈수록 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 가스의 잔류시간 증가 및 대류냉각효과의 감소 때문이다. 반면 Re=1252인 경우에는 재생효율 및 최대온도의 변화가 완만하게 변하였고, 따라서 모노리스 축방향의 온도 변화도 상대적으로 크게 나타나지 않았다. 이는 모노리스 전면부로 유입되는 유속이 균일하지 않을 경우 국부적인 재생효율을 불균형 뿐만 아니라 축방향의 재생효율에도 큰 영향을 미치고 있음을 나타내는 것이다.

한편, Fig. 15에 실험적으로 구한 비제어(uncontro-

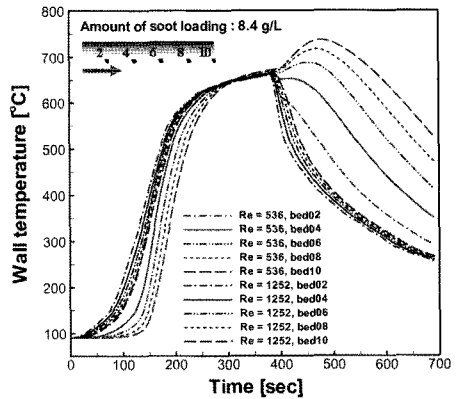


Fig. 14 Wall temperature profiles as a function of time for Cases of two different gas velocity with 'V=12 m/s' and 'V=29 m/s'

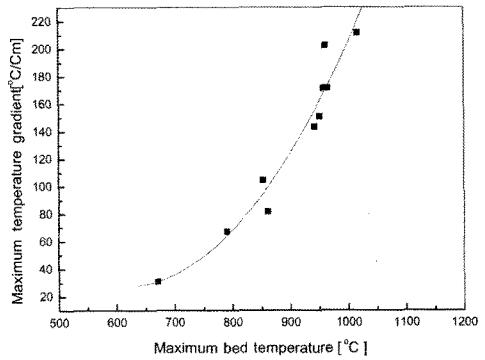


Fig. 15 The experiment result of maximum thermal gradient within filter vs. maximum bed temperature

lled) 재생과정 중 CDPF 채널 내의 최고온도와 최대 온도구배를 나타내었다. 실험결과로부터 알 수 있듯이 재생 시 최대온도가 높을수록 CDPF 모노리스 내의 온도구배는 지수함수적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며, 따라서 재생 시의 발생하는 최대온도는 CDPF의 수명 및 제품신뢰도를 나타내는 주요 설계인자임을 알 수 있다.

Fig. 16은 각 Case 별 유속균일도에 따른 CDPF 모노리스 반경방향으로의 재생효율 변화를 나타낸 것이다. 유속이 느린 부분에서 고온 배출가스의 채널 내 잔류시간이 증가하여 PM의 산화반응이 활발하게 발생되므로 모노리스의 반경방향으로의 재생효율 변화를 확인할 수 있다.

유속이 느린 부분에서 고온 배출가스의 채널 내 잔류시간이 증가하여 대류열전달에 의한 PM의 산



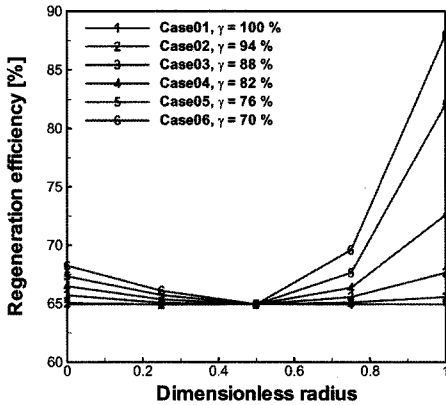


Fig. 16 Regional regeneration efficiency according to different gas flow uniformity

화반응이 활발하게 발생되므로 모노리의 반경방향 가장자리 부분에서 재생효율이 높고 중앙부에서는 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 유속균일도가 100%인 Case 1의 경우 직경반향 전반에 걸쳐 재생효율이 동일한 반면 유속균일도가 감소하는 경우에는 중앙 부분과 가장자리 부분에서 재생효율이 더 큰 폭으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, 유속균일도가 70%인 Case 6의 경우 직경반향 재생효율의 차가 발생하여 중앙과 가장자리의 재생효율 차는 약 25% 정도로 나타났다. 이러한 불균형 재생은 DPF의 열적충격을 반복적으로 증가시켜 제품의 내구성을 크게 저해하는 원인이 되므로, CDPF의 균일한 재생효율을 위해서는 후처리시스템의 초기 설계시 유속균일도에 대한 고려가 필수적임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가스의 유속분포가 CDPF의 재생시 열적거동에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하기 위하여 3차원 유동해석을 수행하여 유속분포 예측을 위한 정상상태 유동장해석을 수행하였으며 1차원 모델을 이용하여 CDPF 재생시 열적거동 및 재생효율에 관한 예측을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 3차원 유동해석을 통하여 유속분포 예측한 결과 공기 간극으로 인하여 상류의 DOC를 통과한 유속이 활발하게 재분배되어 CDPF 내의 유속균일

도가 향상됨을 알 수 있었다.

- 2) 차원 모델을 이용하여 CDPF의 재생과정을 예측한 결과, 축방향 온도구배를 최대오차 약 0.7% 이내로 정확하게 예측할 수 있었다.
- 3) 재생시 CDPF의 온도구배는 유속분포와 매우 밀접한 관계가 있음을 확인하였으며, 본 연구의 경우, 유속균일도가 70%인 경우에 직경반향 재생효율의 차가 발생하여 중앙과 가장자리의 재생효율 차는 약 25% 정도로 나타났다.
- 4) 유속불균일로 인한 속도구배의 증가는 재생시 CDPF 내의 온도편차를 지수함수적으로 증가시켰다. 따라서 유속균일도는 CDPF의 수명 및 제품신뢰도를 나타내는 주요 설계인자임을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 ECO-STAR project(무·저공해 자동차 사업단) 및 지식경제부(자동차기반기술개발사업, 과제번호: 10029808)로부터 연구비를 지원받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) STAR-CD Ver.3.15 Manual, Computational Fluid Dynamics Ltd., 2001.
- 2) A. P. Triana, Development of Models to Study the Emissions, Flow, Kinetic Characteristics form a Diesel Oxidation Catalyst and Particulate Filter, Ph. D. Dissertation, Michigan Technological University, 2005.
- 3) C. W. Johann and J. P. Bernhard, "Catalytic Converters in a 1D Cycle Simulation Code Considering 3D Behavior," SAE 2003-01-1002, 2003.
- 4) M. Kaviani, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Mechanical Engineering Series, Springer, Berlin Heidelberg, New York, 1991.
- 5) R. Perry and D. Green, Perry's Chemical Engineer's Handbook, McGraw Hill, 6th Edn, 1984.
- 6) D. I. Verein, Editor, VDI-Warme-atlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag, Dusseldorf, 6th Edn, 1991.

- 7) R. Reid and J. M. Prausnitz, *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw Hill, 4th Edn, 1987.
- 8) S. J. Jeong and W. S. Kim, "A Study on the Optimal Monolith Combination for Improving Flow Uniformity and Warm-up Performance of an Auto-catalyst," *Chemical Engineering and Processing*, Vol.42, pp.879-895, 2003.
- 9) B. J. Peters, R. J. Wanker, A. Munzer and J. C. Wurzenberger, "Integrated 1D to 3D Simulation Workflow of Exhaust Aftertreatment Devices," SAE 2004-01-1132, 2004.
- 10) S. J. Jeong, S. J. Lee, W. S. Kim and C. B. Lee, "Numerical Study on the Effect of Changes of Geometric Shape of Diesel Particulate Filter on Light-Off Characteristics and Transient Thermal Behavior during Regeneration," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.4, pp.68-76, 2006.
- 11) S. J. Jeong, S. J. Lee, W. S. Kim and C. B. Lee, "Numerical Study on Light-Off Characteristics and Thermal Behavior of Diesel Particulate Filters during Regeneration," *Fall Conference Proceedings*, No.1, KSAE, pp.381-388, 2005.
- 12) AVL Boost Ver.4.05, Manual, AVL LIST GMBH, 2004.
- 13) H. Weltens, H. Bressler, F. Terres, H. Neumaier, and D. Rammoser, "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Distribution," SAE 930780, 1993.