

Off-road 엔진의 EGR율에 따른 촉매코팅 DPF의 자연재생을 예측

신재식^{*†} · 강정호^{*} · 하형수^{*} · 정학섭^{**} · 표수강^{**}

^{*}자동차부품연구원 배기연비성능연구센터 · ^{**}국제종합기계

Predicting the Oxidation Amount in the Catalyzed DPF according to the EGR Rate for the Off-road Engine

Jaesik Shin^{*}, Jungho Kang^{*}, Hyrengsoo Ha^{*}, Haksup Jung^{**} and Sukang Pyo^{**}

^{*}Korea Automotive Technology Institute

^{**}Department of R&D Center, Kukje Machinery Company

(Received 28 March 2016, Received in revised form 10 August 2016, Accepted 30 August 2016)

ABSTRACT

This paper aims to predict oxidation amounts of catalyst and heat produced through passive regeneration on DPF according to different EGR rates and loads of off-road engines. Soot oxidation model and parameter assumption model were used for the test. Engine data were measured with 25%, 50% and 75% of 1600 RPM loads and with 0% and 30% of EGR rates in order to estimate parameters. Oxygen levels calculated on the DPF downstream and oxygen levels measured were compared through all of the experimental conditions for validating the model. Oxidation rates on DPF according to different EGR rates and oxygen levels on the DPF downstream were estimated successfully, which can be applied for off-road vehicles.

Key Words : EGR, cDPF, Oxidation, Activation energy, Particulate matter

기 호 설 명

w : Wall thickness
 ρ_w : Gas density at the wall respectively
 E_{th} : Activation energy of thermal PM oxidation
 E_{cat} : Activation energy of catalytic PM oxidation

k : Frequency factor of O₂
 f_{co} : CO selectivity of PM oxidation by thermal means
 f'_{co} : CO selectivity of PM oxidation by catalytic means

1. 서론

전 세계적으로 강화되는 환경 및 연비규제로 인해 on-road용 엔진뿐만 아니라 off-road용 엔진의 배기 규제도 더욱 엄격해지고 있다. 국내에서는 off-road용 엔진의 배출허용 기준이 현재 Tier-4 기준으로 강화되어 적용되고 있다. Tier-4 규제는 off-road용 엔

진의 배기 수준을 기존 PM(입자상 물질) 배출에 대하여 약 95% 저감, NOx는 약 90% 저감을 요구하기에 연소 환경 최적화만으로는 배기규제 만족에 한계가 있어 후처리 시스템의 적용이 필수적이다[1,2].

디젤엔진에서 배출되는 입자상물질인 PM을 효율적으로 포집하는 DPF(배기가스 후처리장치, Diesel Particulate Filter)는 상당한 양의 PM을 짧은 시간 안에 포집해야 하지만, 동시에 필터의 채널에 PM이 축적됨에 따라 압력강하가 발생한다. DPF와 차량엔진을 적절히 운영하려면 DPF의 포집효율을 유지해야하므로, 포집된 PM을 고온에서 주기적으로 태우는 재생과정을 반복해야 한다. 이러한 필터재생과정에서 포집된 PM의 양과 직접적으로 관련된 차압 및

† Corresponding Author, jsshin@katech.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

산화량은 필터를 설계할 때 중요한 변수 중의 하나이다. 따라서 DPF 내에 PM의 축적량과 재생을 통한 산화량의 정확한 예측을 위한 모델개발이 DPF 산업과 디젤배기제어 연구그룹의 중요한 목표 중 하나이다. 이러한 이유로 지난 30년 동안 DPF의 포집 및 재생과정에 관한 수학적 모델이 꾸준히 개발 되어 왔으나 대부분 일반적인 승용 및 상용디젤엔진에서의 연구가 주를 이룬다[3].

본 연구에서는 기존의 승용 및 상용 디젤엔진과 달리 엔진운전조건이 상이한 off-road엔진에서 EGR (배기가스 재순환 : Exhaust Gas Recirculation) 및 엔진부하의 변화에 따라 DPF에서 열적 및 촉매에 의해 발생하는 자연재생에 의한 산화율을 예측하여 DPF 설계 및 재생제어에 이용하기 위해 수행된 시험내용 및 분석 결과를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1. 실험장치

2.1.1. 실험엔진 및 분석장치

Fig. 1은 본 연구의 실험 장치에 대한 개략이며 엔진, 동력계, 압력, 온도센서, 배기가스분석기, smoke meter 등으로 구성하였다. 본 연구에 사용된 실험용 엔진은 EGR system, 과급장치가 적용된 배기량 3,600 cc off-road용 CRDI 엔진으로 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다. 엔진동력계는 AVL사의 240 kW급 엔진동력계를 사용하였고, 배기가스 분석계는 Horiba사의 MEXA-9100DEGR을 사용하였다.

Table 1 . Engine Specification

Description	Specification
Cylinder [-]	4
Displacement [cc]	3,621
Bore [mm]	98
Stroke [mm]	120
Type of Fuel Injection	CRDI

2.1.2. 후처리 시스템

Fig. 2에 후처리 시스템 및 센서위치에 대해 개략도로 나타내었으며, 본 실험에 사용된 DPF의 자세한 제원은 Table 2에 나타내었다.

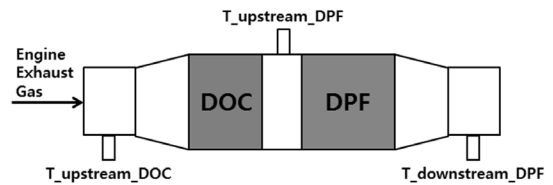


Fig. 2. Schematic diagram of DPF systems (DOC+DPF).

Table 2. Specifications of DPF

Description	Specification
Diameter/Length [inch]	6.7/8.0
Catalyst material [-]	Pt-based
Wall thickness [mil]	13
Cell density [cps]	300
Number of cells [-]	10500

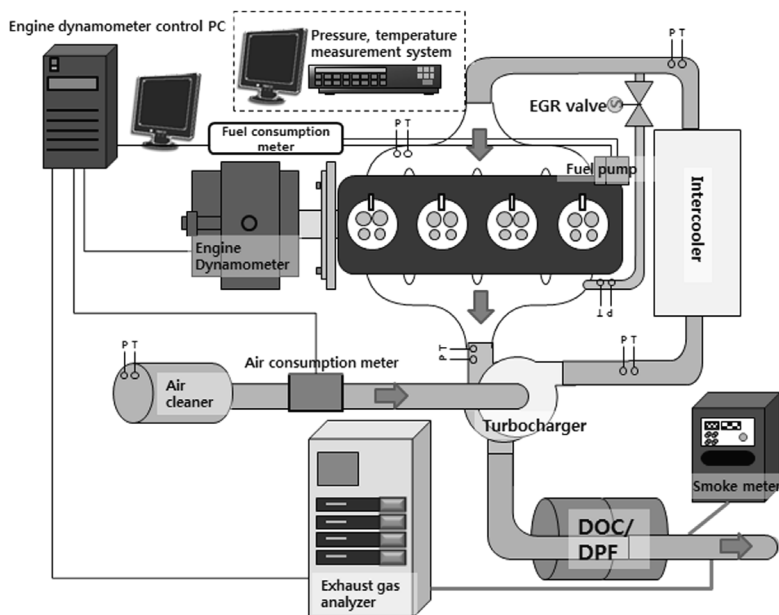


Fig. 1. Experiment schematic diagram systems.

2.2. 실험조건

Off-road용 엔진에서 EGR 및 엔진부하의 변화에 따라 DPF내에서 발생하는 자연재생을 예측하고 검증하기 위해 매연이 퇴적되지 않은 DPF 상태에서 Fig. 3과 같이 1600 RPM 25%, 50%, 75% load에서 EGR량을 변화시켜가며 시험을 진행하였고, 실험 영역별로 매연이 퇴적되지 않은 DPF상태를 유지하기 위하여 데이터를 취득하기 전에 강제재생을 실시하였다. 실험 진행 중 실내온도는 $25\pm 5^{\circ}\text{C}$, 냉각수 온도는 $80\pm 5^{\circ}\text{C}$, 연료온도는 $38\pm 5^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다. 본 실험에서 지정한 변수 외에는 모든 조건들은 고정하였으며, 자세한 내용은 Table 3에 나타내었다.

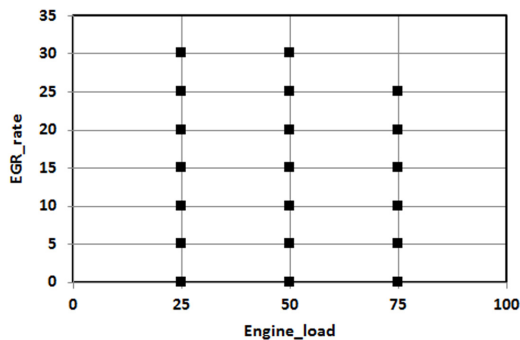


Fig. 3. Experimental conditions according to EGR rate and engine load.

Table 3. Experimental conditions

Test #	Load	EGR rate(%)	T DPF in(°C)	O ₂ in(%)
1	25%	0	214	15.3
2	25%	5	214	15.1
3	25%	10	219	14.4
4	25%	15	222	13.9
5	25%	20	225	13.2
6	25%	25	240	12.7
7	25%	30	269	11.3
8	50%	0	299	11.9
9	50%	5	305	11.6
10	50%	10	319	10.8
11	50%	15	319	10.0
12	50%	20	335	8.8
13	50%	25	345	7.9
14	50%	30	356	7.4
15	75%	0	411	8.1
16	75%	5	437	7.7
17	75%	10	454	6.9
18	75%	15	460	5.7
19	75%	20	470	4.7
20	75%	25	480	3.6

3. 산화량 추정 모델링

Fig. 4는 본 논문에서 수행한 DPF의 자연재생에 의한 산화량 추정 모델링의 과정을 나타낸 흐름도이다. 엔진 시험을 통해 각종 센서 정보를 취득한 후, 센서 정보를 이용하여 모델링을 수행하였으며, 최종적으로 DPF내의 촉매에 의한 산화량의 추정과 검증을 실시하였다. 모델의 상수 및 변수를 결정하기 위하여 Test # 1,7,8,14,15,20에서 실시한 실험데이터를 이용하여 모델 변수 및 상수 값을 추정하였다.

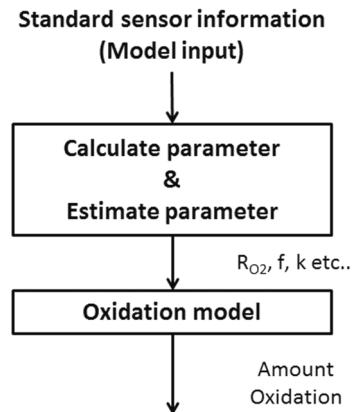
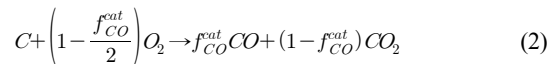
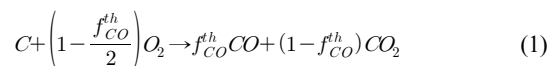


Fig. 4. Flow chart of DPF model during DPF regeneration.

3.1. 지배방정식

DPF내부의 필터 벽면에서 일어나는 PM의 열적반응과 촉매에 의해 일어나는 PM의 산화반응식은 각각 다음과 같다.

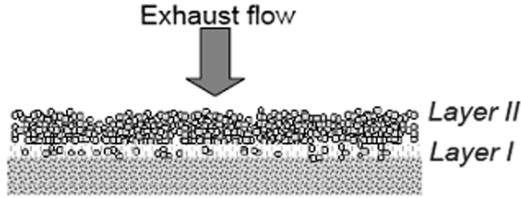


매연이 퇴적되지 않은 상태의 DPF는 필터 벽면에서는 열적산화와 촉매에 의한 산화반응만 일어나며, 산화반응은 O₂에 의해서만 일어난다고 가정하였으며, 가정은 M. R. Khan 일등[3]에 의해 수행된 연구를 통해 타당성을 입증하였다.

여기서, f_{CO}^{th} 와 f_{CO}^{cat} 는 각각 열적 산화반응과 촉매 반응에 의한 CO의 생성반응 특성이며, 온도에 대한 함수로 결정된다[3]. f_{CO}^{th} 와 f_{CO}^{cat} 는 일반적으로 0.5에서 1사이의 값을 가지며, 이는 실험적으로 추정하여야 한다. 본 논문에서는 다음의 식을 이용하여 f_{CO}^{th} 와 f_{CO}^{cat} 을 계산하였다.

Table 4. Values of kinetic parameters used in simulations

E_f/R	3000 K
E'_f/R	2575 K
k_f	0.02
k'_f	3.57
q, q'	0.21

**Fig. 5.** Schematic diagram of the Total particulate layer.

$$f_{CO}^{th} = \frac{1}{1 + k_f X_{O_2}^q \exp(E_f/RT)} \quad (3)$$

$$f_{CO}^{cat} = \frac{1}{1 + k'_f X_{O_2}^{q'} \exp(E'_f/RT)} \quad (4)$$

위 식에서 k_f , q , E_f 의 값은 참고문헌을 통해 결정하였으며, 그 값은 Table 4에 나타내었다[4].

소개한 재생반응을 모델에 적용하기 위해 Fig. 5와 같이 DPF포집 및 재생모델링에 관하여 일반적으로 가장 잘 알려진 MTU에서 개발한 2-Layer 모델을 이용하였다[5].

PM은 각 Layer에서 산화반응을 통해 재생하고, 산화반응을 거치면서 O_2 의 농도는 낮아진다. DPF의 채널로 들어오는 O_2 는 기체상에서 반응하지 않고, DPF 채널에서 PM에 의해서만 반응하며, 입구채널에서 필터벽면까지의 O_2 의 농도는 변하지 않는다고 가정하였다. 아래의 식은 Layer2와 Layer1에서의 화학종 보존방정식이다[5].

$$\frac{\partial}{\partial y}(\rho_w v_w Y_{O_2}^{II}) = -S_p \rho_w Y_{O_2}^{II} k_{th} \left(1 - \frac{f_{CO}^{th}}{2}\right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y}(\rho_w v_w Y_{O_2}^I) = & -S_p (1-\beta) \rho_w Y_{O_2}^I k_{th} \left(1 - \frac{f_{CO}^{th}}{2}\right) \\ & - \beta S_p \rho_w Y_{O_2}^I k_{cat} \left(1 - \frac{f_{CO}^{cat}}{2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 S_p 는 PM의 비체적으로 다음과 같이 주어지며, 참고문헌에 의하면 PM의 평균 표면적(A_p)은 $100000 m^2/kg$ 으로 알려져 있다[6].

$$S_p = A_p \rho_p \quad (7)$$

그리고 β 는 촉매와 PM의 접촉율을 의미하며, 촉매에 의한 산화반응의 양을 나타낸다. Layer1에서 β 의 값은 0.45로 가정하였으며, Layer2에서는 촉매의 접촉이 없으므로 0이다.

화학종 보존방정식을 적분하여 다음과 같이 각 Layer에서의 O_2 의 소모율을 계산할 수 있다. 여기서 $Y_{O_2}^{II}$ 는 Layer2로 유입되는 O_2 의 질량분율이다.

$$R_{O_2}^{II} = \rho_w v_w Y_{O_2}^{II} \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-S_p k_{th} \left(1 - \frac{f_{CO}}{2}\right) w_2}{v_w} \right] \right\} \quad (8)$$

Layer1에서는 열적반응과 촉매에 의한 반응이 함께 일어나기 때문에 각각의 반응에 대한 O_2 의 소모율을 계산해야한다. Layer1에서의 O_2 소모율은 다음과 같다.

$$R_{O_2}^I = R_{O_2}^{th,I} + R_{O_2}^{cat} \quad (9)$$

$$R_{O_2}^{th,I} = \rho_w v_w Y_{O_2}^I \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-S_p (1-\beta) k_{th} \left(1 - \frac{f_{CO}}{2}\right) w_1}{v_w} \right] \right\} \quad (10)$$

$$R_{O_2}^{cat,I} = \rho_w v_w Y_{O_2}^I \times \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-S_p \beta k_{cat} \left(1 - \frac{f_{CO}}{2}\right) w_1}{v_w} \right] \right\} \quad (11)$$

여기서 $Y_{O_2}^I$ 은 Layer 2에서 소모되고 빠져나와 Layer1로 들어가는 O_2 의 질량분율이며, Y_{O_2} 는 DPF를 빠져나가는 O_2 의 질량분율이다. 이는 식 (8)과 식 (10), (11)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다[7].

$$Y_{O_2}^I = Y_{O_2}^{II} \exp \left\{ \frac{-S_p k_{th} \left(1 - \frac{f_{CO}^{th}}{2}\right) w_2}{v_w} \right\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Y_{O_2} = & Y_{O_2}^I \exp \left\{ \frac{-S_p (1-\beta) k_{th} \left(1 - \frac{f_{CO}^{th}}{2}\right) w_1}{v_w} \right\} \\ & \times \exp \left\{ \frac{-S_p \beta k_{cat} \left(1 - \frac{f_{CO}^{cat}}{2}\right) w_1}{v_w} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

그리고 w_1, w_2 는 각각 필터벽면의 두께와 PM 층의 두께를 의미하며, 매연이 퇴적되지 않은 DPF 상에서의 w_2 의 값은 0이다. k 는 각 반응들의 반응속도를 나타내며 다음과 같이 Arrhenius방정식의 형태로 가정하였으며, 온도에 대한 함수로 나타낼 수 있다[7].

$$k_{th}(T) = k_0^{th} T \exp\left(-\frac{E_{th}}{RT}\right) \quad (14)$$

$$k_{cat}(T) = k_0^{cat} T \exp\left(-\frac{E_{cat}}{RT}\right) \quad (15)$$

여기서 E_{th} 는 참고문헌에[3] 따라 상수로 가정하였으며, 이 논문에서는 E_{cat} 을 온도와 산소의 값에 대한 변수로 나타내었다. 그리고 k_0^{th} 와 k_0^{cat} 값은 상수로 가정하였으며, 그 값은 각각 1.23 m/s K, 2.7 m/s K이다.

3.2. 모델 결과 및 검증

3.1에서 소개한 지배방정식을 통하여 매연이 퇴적되지 않은 상태의 DPF의 자연재생률 추정 모델링을 실시하였다. 지배방정식을 유도한 결과 최종적으로 온도와 산소의 값에 대한 변수인 E_{cat} 에 대한 방정식으로 축소될 수 있으며, 엔진 실험 결과를 이용하여 fitting을 통해 이 값을 추정하고, 추정된 파라미터를 통하여 자연재생률을 예측하였다.

Fig. 6은 실제 엔진실험을 통하여 1600 RPM Load 25%, 50%, 75% EGR rate 0%, 30%에서 DPF온도와 O_2 의 데이터를 이용해 E_{cat} 을 fitting한 결과 그래프이며, R-square는 0.997이다.

Table 5는 fitting을 통해 계산된 E_{cat} 을 이용하여 모든 실험영역에서 3.1절의 수식을 적용하여 결과도출

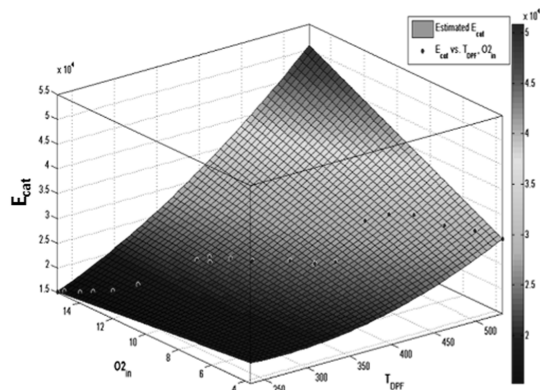


Fig. 6. Surface fitting for the activation energy of the catalyst.

Table 5. Calculation result of CO selectivity and Frequency factor

test #	f_{CO}^{th}	f_{CO}^{cat}	k_{th}	k_{cat}
1	0.513	0.908	0.000	0.008
2	0.513	0.908	0.000	0.007
3	0.513	0.906	0.000	0.007
4	0.513	0.905	0.000	0.007
5	0.513	0.904	0.000	0.007
6	0.512	0.901	0.000	0.007
7	0.511	0.895	0.001	0.009
8	0.511	0.896	0.001	0.009
9	0.511	0.895	0.001	0.009
10	0.511	0.893	0.001	0.010
11	0.511	0.891	0.001	0.011
12	0.510	0.887	0.002	0.014
13	0.510	0.885	0.003	0.017
14	0.510	0.883	0.003	0.019
15	0.509	0.882	0.009	0.014
16	0.509	0.879	0.012	0.015
17	0.509	0.877	0.015	0.018
18	0.509	0.872	0.018	0.027
19	0.508	0.867	0.023	0.037
20	0.508	0.862	0.028	0.053

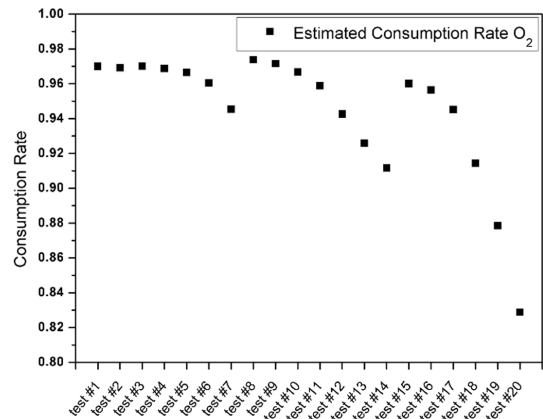


Fig. 7. Estimates for the O_2 consumption rate.

중 CO의 생성반응 특성과 반응속도를 나타내었다.

Fig. 7은 지배방정식을 이용하여 모든 실험영역에서 O_2 의 소모율을 추정한 결과이다. 소모율이 1에 가까울수록 O_2 의 소모가 없음을 의미하며, 같은 부하 조건일 때 EGR율이 높을수록 O_2 의 소모율 또한 높아지는데 이는 EGR율이 높아질수록 DPF의 inlet 온도가 상승함에 따라 산화반응이 더 잘 일어나게 되고

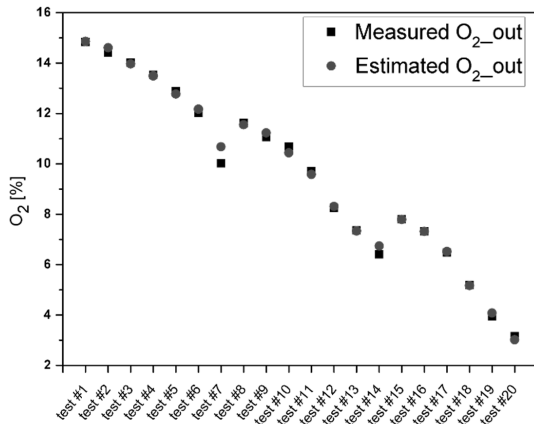


Fig. 8. Verification through comparison of calculated O_2 against measured O_2 at DPF downstream.

그에 따라 O_2 의 소모율이 상승하기 때문이다.

Fig. 8은 모델에 의해 계산된 O_2 의 소모율을 이용하여 실제 O_2 의 입구조건의 값과 곱하여 최종적으로 소모된 O_2 의 측정값과 모델을 통해 계산 값을 비교한 그래프이다. 그 결과 전체적으로 비슷한 경향과 값이 나타났으며, 최고오차는 test #7에서 6% 정도로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 3600 cc off-road 엔진에서 EGR 및 엔진부하의 변화에 따라 DPF에서 열적 및 촉매에 의해 발생하는 자연재생에 의한 산화율을 예측하고 소모된 O_2 의 양을 통해 검증은 실시하였으며, 본 연구에서 도출한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 엔진 시험을 통해 각종 센서 정보를 취득한 후, 센서 정보를 이용하여 모델링을 수행하였으며, 최종적으로 DPF내의 촉매에 의한 산화량의 추정과 검증을 실시하였다.

2) 1600 RPM Load 25%, 50%, 75% EGR rate 0%, 30%에서 DPF온도와 O_2 의 양을 이용해 E_{cat} 을 fitting하였으며, 측정된 O_2 를 이용하여 E_{cat} 을 계산한 값과 fitting한 값의 R-square은 0.997이다.

3) 실험영역에서 열적산화율과 촉매에 의한 산화율에 대한 반응속도를 추정된 결과 PM의 퇴적이 없는 DPF에서는 PM의 직접적인 열적산화보다 코팅된 촉매에 의한 산화가 더 많이 일어나는 것을 알 수 있었다.

4) 산화율은 MTU에서 개발한 2-Layer모델을 이용하여 매연이 퇴적되지 않은 상태의 DPF에서 열적산화와 촉매에 의한 산화의 양을 추정하였으며, 추정결

과 실제 측정된 결과와 비슷한 경향을 나타내었다.

5) 본 연구의 결과를 통하여 DPF에서 열적 및 촉매에 의해 발생하는 자연재생에 의한 산화율을 예측할 수 있으며, 실제 엔진실험을 하지 않고 BTP 및 온도에 따른 PM의 재생량을 추정할 수 있어 DPF 설계 및 재생제어에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 환경부 Global-Top Project 친환경자동차기술개발사업단의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Youngjin Cho, Junhee Won, Sangho Kim, Dongin Lee et al., "Development of DPF system for Tier4 diesel engine," KSAE Spring Conference Proceedings 2012.5, 336-340
- [2] McCarthy Jr, J., Yue, Y., Mahakul, B., Gui, X. et al., "Meeting Nonroad Final Tier 4 Emissions on a 404 John Deere Engine Using A Fuel Reformer and LNT System with An Optional SCR Showing Transparent Vehicle Operation, Vehicle Packaging and Compliance to End-of-Life Emissions," SAE Int. J. Engines 4(3):2699-2717, 2011.
- [3] Khan, M. R. and Shamim, T., 2008, "A Numerical Investigation of the Regeneration Characteristics of Diesel Particulate Filters under Simulated Transient Exhaust Conditions," Proc. IMechE Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 222, No. 12, pp. 2469~2485.
- [4] Premchand, K., Johnson, J., Yang, S., Triana, A., et al., 2007, "A Study of the Filtration and Oxidation Characteristics of a Diesel Oxidation Catalyst and a Catalyzed Particulate Filter," SAE Technical Paper Series, 2007-01-1123.
- [5] Konstandopoulos, A., Kostoglou, M., Skaperdas, E., Papaioannou, E., et al., 2000, "Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration and Aging," SAE Technical Paper Series, 2000-01-1016.
- [6] Dabhoiwala, R., Johnson, J., Naber, J. and Bagley, S., 2008, "A Methodology to Estimate the Mass of Particulate Matter Retained in a Catalyzed Particulate Filter as Applied to Active Regeneration and On-Board Diagnostics to Detect Filter

- Failures,” SAE Technical Paper Series, 2008-01-0764.
- [7] Mohammed, H., Triana, A., Yang, S. and Johnson, J., 2006, “An Advanced 1D 2-Layer Catalyzed Diesel Particulate Filter Model to Simulate: Filtration by the Wall and Particulate Cake, Oxidation in the Wall and Particulate Cake by NO_2 and O_2 , and Regeneration by Heat Addition,” SAE Technical Paper Series, 2006-01-0467.
- [8] Konstandopoulos, A., Kostoglou, M., Vlachos, N. and Kladopoulou, E., 2005, “Progress in Diesel Particulate Filter Simulation,” SAE Technical Paper Series, 2005-01-0946.