

# 디젤기관에서 전기 히터 재생 여과 트랩의 특성에 관한 연구

류규현\*, 박만재\*\*

## A Study on Characteristics of Electric Heater Regeneration Filter Trap in Diesel Engine

Kyu-Hyun Ryu\*, Man-Jae Park\*\*

### Abstract

Urgent increasing of the vehicles influence air pollution and the damage of the plants and animals. Particularly, exhausting particulate of diesel vehicles give serious effect to human life. Therefore, this study aim to reduce amount of particulate and to contribute developing after-treatment in diesel engine. Through the experimental and theoretical study about characteristics of the electric heat regeneration, various results are obtained.

**Key Words :** after-treatment(후처리 장치), ceramic filter trap(세라믹 필터 트랩), electric heater regeneration(전기히터식 재생), particulate matter(입자상 물질)

### 1. 서론

디젤 자동차는 가솔린 자동차에 비하여 높은 연소효율, 고출력 및 내구성이 우수하기 때문에 사용 대수가 점점 증가하고 있는 추세이다. 그러나 가솔린자동차에 비하여 기관의 연소 특성상 일산화탄소(Carbon Monoxide : CO)와 탄화수소(Hydro Carbon: HC)의 배출량은 적으나 반면에 입자상 물질(Particulate Matter : PM)과 질소산화물(Nitrogen Oxides : NOx)의 배출량은 다량이기 때문에 대기환경 오염차원에서 크게 문제되고 있다. 따라서 디젤기

관의 경우는 NOx와 PM 저감에 중점을 두어 그 저감기술에 대한 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있으며, 그 일환으로 후처리 장치에 관한 연구가 계속되고 있다. 디젤기관의 후처리 기술 중에서 PM을 중점적으로 저감시킬 수 있는 방법으로 세라믹 필터 트랩이 각광을 받고 있으며, 따라서 본 연구에서는 세라믹 필터 트랩에 대하여 그 재생 특성과 재생에 미치는 인자들을 수치적, 실험적으로 비교, 고찰해 봄으로써 향후 우리나라 실정에 적합한 후처리장치의 개발에 기여함과 동시에 입자상물질 저감대책에 일익을 담당하는데 그 목적이 있다.

\* 시립인천전문대학 기계설계과(khryu@icc.ac.kr)

\*\* 국민대학교 대학원

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 디젤 입자상 물질 필터트랩의 재생기술<sup>(1,3)</sup>

디젤엔진에서의 매연발생과정은 디젤엔진의 연소시 연료가 연소실에 고압으로 분사되어 압축공기와 혼합되나 이 기간이 아주 짧기 때문에 혼합비가 일정하지 않으며 이때 농후한 혼합비 영역에서 매연이 다량 발생한다. 디젤 입자상 물질 필터트랩(Diesel Particulate Filter : DPF)은 디젤엔진에서 배출되는 입자상 물질(PM)을 포집하여 태우는 기술로서 매연 저감 성능면에서는 아주 우수하나 가격이 높고 내구성이 아직은 부족한 것이 실용화에 장애요인이 되고 있다. 또한 필터에 PM이 포집됨에 따라 엔진에 배압이 걸리며 이것에 의하여 출력과 연료소비율이 다소 저하되나 기관의 성능에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 알려져 있다. 재생방식에서 포집된 PM은 가능하면 빠른 시간 내에 태워서 필터가 다시 PM을 포집할 수 있도록 하는 재생과정을 마치며 이때 재생에 의해 필터가 과열되어 파손되지 않도록 하는 제거기술이 중요하다. 재생과정은 착화 온도, 공급되는 산소농도, 산소유량, PM의 포집량에 따라 적절하게 조절하여야 한다. 재생방식에는 크게 두 가지 방법으로 나누어지며, 첫 번째는 포집된 PM을 매연 점화온도 550-600℃까지 가열하는 방법으로 이를 위해서는 전기히터, 버너, 트로틀링 등이 사용된다. 두 번째는 촉매를 이용하여 매연 점화온도를 원래보다 250℃정도까지 낮추어 엔진 배출가스로 점화시키는 방법으로, 필터트랩의 촉매코팅, 연료에 첨가제를 공급, 트랩 전방에서 분사시키는 방법 등이 사용된다.

### 2.2 열재생에 관한 수치해석<sup>(4,5,6,7)</sup>

입자상물질층과 재질층에서 일어나는 반응, 산소소모, 열축적 등은 벽체계의 각 국부점에 걸쳐서 수행되었다. 본 모델은 시간-종축으로 단일 공간 변수만을 가지고 필터의 전면에서 유입되는 가스의 상태값 등이 균일하다고 가정하고 필터벽은 완전히 단열되어 있다고 가정하였고, 단일 입구 채널과 단일 출구채널로 이루어져 있으며 입,출구 채널과 벽체계의 개괄도는 Fig. 1에 나타내었다.

채널하류에 대한 거리는 z로서 측정되고 x는 벽을 통한 거리이며, 나머지 독립변수는 시간 t이다.  $\rho_w, v_w, T_w$ 는 채널 단면에 대하여 평균된 1차원 채널 유동변수이고 여기서 첨자 1, 2는 각각 채널의 입구와 출구를 나타낸다. 또한 본 열재생에 관한 수치해석에 사용된 방정식들은 다음과 같다.

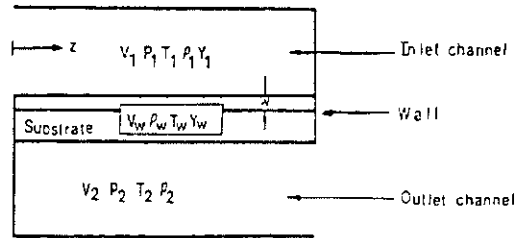


Fig. 1 Schematic diagram of single inlet and outlet channels with bordering wall

① 상태 방정식

$$p_{am} = R_{pi} T_i$$

$$p_{am} = R_{pw} T_w$$

② 채널가스의 질량보존의 법칙

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho_i v_i) = (-1)^i (4/D) \rho_w v_w$$

③ 채널가스의 Z-방향 운동량 보존의 법칙

$$\frac{\partial p_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_i v_i^2) = -a_3 \mu(T_i) v_i / D^2$$

④ 채널가스의 에너지 보존의 법칙

$$C_{pg} \rho_i v_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = (4/D)[h_i + (-1)^i C_{pg} \rho_w v_w](T_w - T_i)$$

⑤ 채널가스에서 산소 보존의 법칙

$$Y_1 = (z, t) = Y_1(0, t)$$

⑥ 입자상 물질 균형

좌측 항은 단위 벽면적에 대한 국부적인 입자상 물질 층 두께의 소모율이다. 오른쪽 항은 위치 z에서 입자상 물질 층 두께에 걸친 전체 반응율에 비례한다.

$$\rho_p = \frac{dw}{dt} = -(M_c / M_{ox}) Y_1(0, t) \rho_w v_w [1 - \exp(-S_p k(T_w) w / v_w)]$$

⑦ 벽에서 에너지 균형

열축적율은 채널 1에서 전달된 열율에서 채널 2로 빼앗기는 열율을 빼고 반응에 의한 열율을 보낸 뒤 전도에 의한 열율을 뺀다. 서로 마주보는 벽들의 온도는 거의 같기 때문에 복사 열전달은 무시하였다.

$$H_{ACCUM} = H_{CHAN1} - H_{CHAN2} + H_{REACT} - H_{COND}$$

⑧ 압력 강화

이 식은 연속적인 다공성 매질을 지날 때 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p_1 - p_2 = (\alpha\mu(T_w)v_w + \beta\rho_w v_w^2)(w_s + \phi(w))$$

$$\phi(w) = (2\omega_2 - \omega_3)(w/\omega_1) - (\omega_2 - \omega_3)(w/\omega_1)^2, w < \omega_1$$

$$\omega_2 + \omega(w/\omega_1 - 1), w \geq \omega_1$$

⑨ 경계 조건, 초기 조건 및 그 외의 식

채널입구의 경계조건은  $T_1(0,t) = T_f(t)$ ,  $\rho_1(0,t) v_1(0,t) = T_f(t)$ 이고 출구조건은  $\rho_1(L,t)v_1(L,t) = 0$ ,  $\rho_1$

$(0,t)v_2(0,t) = 0$ ,  $T_2(0,t) = T_w(0,t)$ ,  $\rho_2(L,t) = p_{atm}$ 이고 채널 전면이나 후면에서 고체로부터 국부 열손실은 다음과 같이  $\frac{\partial T_w}{\partial z}(0,t) = 0$ ,  $\frac{\partial T_w}{\partial z}(L,t) = 0$  적용하였으며, 벽온도는 일정하다고 가정하였고, 입자상물질층 두께는  $T_w(z,t) = T_{b,w}(z,0) = w_b(z)$ 로 주어 계산하였고 Table 1은 경계조건과 초기조건에 들어가는 함수들을, 전체적인 알고리즘은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1 Input functions for model

Function	Description	Value	Units
$T_f(t)$	inlet gas temperature	600 at t=0 950 for t>0	K
$G_f(t)$	inlet mass velocity	0.272	g/(cm <sup>2</sup> · s)
$Y_f(t)$	inlet oxygen concentration	5, 10, 15	%
$w_b(z)$	initial deposit mass	80	g

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치<sup>(1,2)</sup>

디젤기관의 재생특성, 기관성능 및 배기가스를 측정하기 위한 전체적인 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었고 기관동력계는 전기식 동력계(Nishishiba Co. 제품 : NECD-14H type)이고 최대출력은 220kW이고 회전수 범위는 300~2,500rpm이다. 또한 전기히터식 재생여과 장치의 구성<sup>(6)</sup>에서 여과장치는 두 개의 트랩을 사용하여 첫 번째 트랩의 재생이 일어나는 동안 바이패스(Bypass)된 배기가스를 다른 트랩을 사용하여 여과시키는 이중트랩(Dual trap)장치로 되어 있고 장치의 개략도는 Fig. 4에 나타내었고 본 실험에 사용된 세라믹 필터트랩의 재원은 Table 2와 같으며, 매연을 측정하기 위하여 사용된 매연측

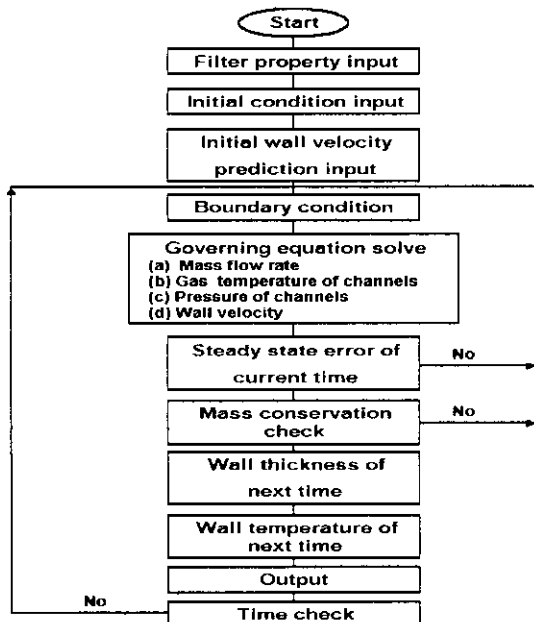
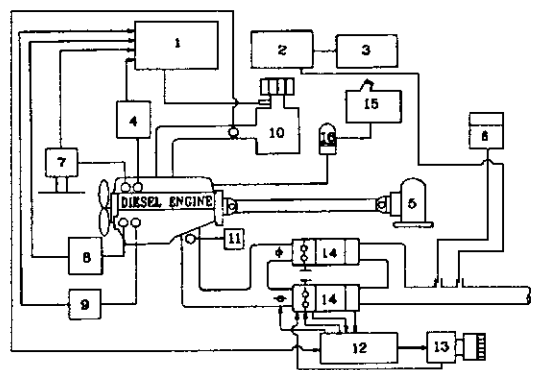


Fig. 2 Numerical analysis algorithm



- 1. Dynamometer control desk
- 2. Exhaust gas analyzer
- 3. Recorder
- 4. Diesel fuel tank
- 5. Engine dynamometer
- 6. Smoke meter
- 7. Throttle actuator
- 8. Oil temperature
- 9. Cooling water temperature
- 10. Air surge tank
- 11. Thermometer
- 12. Electric control unit (ECU)
- 13. Blower
- 14. Electric regeneration particulate filter trap
- 15. Fuel tank
- 16. Fuel detector

Fig. 3 Schematic diagram of diesel emission measuring apparatus

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 수치적 결과

필터의 용량에 맞추어 초기입력값들을 설정하였고 축적량을 80g으로 일정하게 놓고 산소농도를 5, 10 및 15%로 각각 설정하면서 실행하였으며, 먼저 필터내의 입구, 중앙, 출구 부분에서 산소농도 변화와 시간에 따른 필터벽의 온도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 산소농도의 증가는 입자상물질의 산화를 촉진시켜 재생시간을 단축시키고 필터트랩 내의 벽온도 상승에 영향을 미치는 요인인 것을 알 수 있었으며, 산소농도가 5%일 때 약 6분 후에 재생이 완료되었고 시간의 흐름에 따라 벽온도의 분포는 필터입구에서 출구 쪽으로 입자상물질의 재생이 이루어짐을 알 수 있다.

또한 Fig. 6은 열재생이 진행되는 동안 5, 10 및 15%의 산소농도에서 시간에 따른 압력강화변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 산소농도가 높을수록 느린 재생과 재생시 최고 압력이 낮은 것을 알 수 있다. 15%에서는 약 40초에서 급격한 재생이 일어난 반면 5%에서는 약 95초에서 급격한 재생이 일어남을 알 수 있었고 이 두 조건의 산소농도에서 압력차는 약 0.6kPa을 나타내었다. 산소농도가 5%일 때 재생초기 압력이 약 2.65kPa에서 약 3.6kPa까지 증가하다가 급격하게 연소가 진행되면서 압력은 점차 감소하여 약 340초후에 정상적인 배기압으로 되었다.

재생시 필터내의 축적량 변화를 Fig. 7에 보여주고 있으며, 초기축적량이 80g일 때 5, 10 및 15% 산소농도에서 시간에 따른 축적량의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 15%의 산소농도에서는 약 170초에서 완전

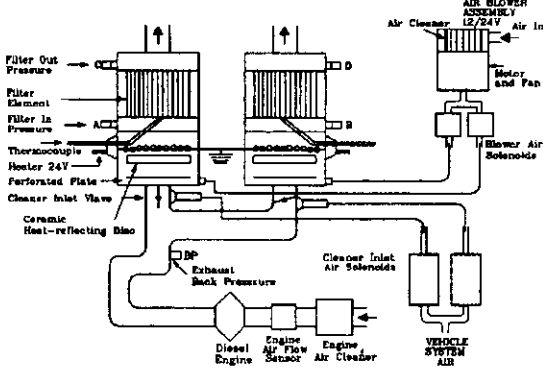


Fig. 4 Electric regeneration system

Table 2 Specification of ceramic filter trap

Diameter (cm)	28.6
Length (cm)	30.5
Cell density	100
Wall thickness (cm)	0.043
Composition	DHC-221
Volume (L)	19.5
Specific capacity (g/L)	4
Carbon load capacity (g)	80
Mean pore diameter(μm)	15

정기는 오스트리아 제품으로 여지 광반사식의 측정방법을 채택한 것이며, 농도지시는 디지털 방식으로 지시하고 매연채취 측정결과 표시가 완전자동인 (AVL 407)측정기이며 측정범위는 0~100%이다.

### 3.2 실험방법

전기히터 재생 여과장치의 실험실적 장치의 재생특성, 기관성능 및 배출가스 저감율을 측정하고자 누적모드에 의해 필터트랩내 입자상 물질을 축적시킨 후 전기히터에 의해 연소 시켰을 경우 전자제어 장치의 작동과 부품의 작동상태를 확인하는 재생 성능시험을 실시하였다. 또한 전기히터 재생 여과장치의 장착전과 장착후의 기관성능 고찰과 입자상 물질을 저감효율을 측정하고자 100%이하로 1000rpm에서 2200rpm까지 각 200rpm씩 증가시키면서 매회 입자상 물질 측정과 기관의 성능을 측정하였다.

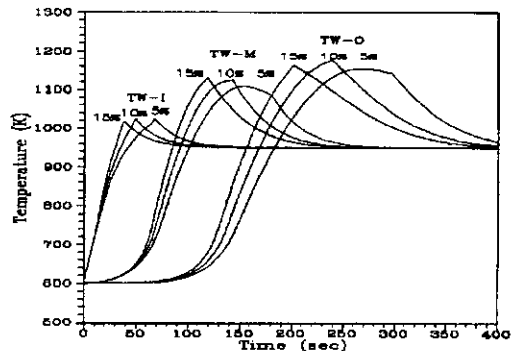


Fig. 5 Profile of wall temperature during regeneration

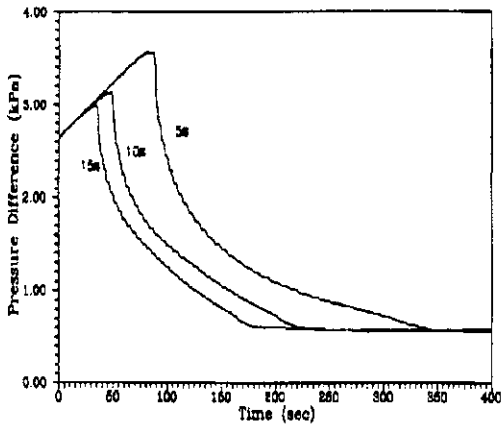


Fig. 6 Time dependence of pressure drop across monolith

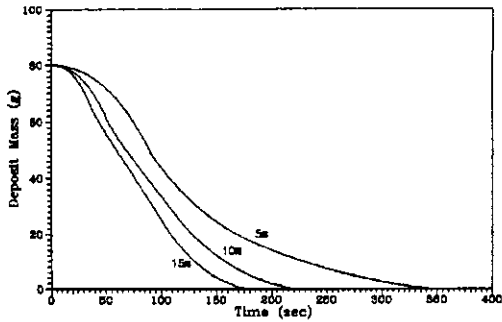


Fig. 7 Time dependence of deposit mass reduction

연소가 되었고, 5%의 산소농도에서는 약 340초에서 완전 연소를 이루어 15%의 산소농도 보다 약 2배의 재생시간이 길어짐을 알 수 있었다.

#### 4.2 실험적 결과

Fig. 8은 재생시 필터내의 벽온도와 압력강하 분포를 나타낸 것으로 전기히터 재생 여과장치에서 입자상물질 재생시 압력강하 분포와 필터트랩의 입구, 중앙, 출구부분에서 벽온도의 분포를 나타내고 있다. 세라믹 필터의 용량에 맞게 80g의 입자상물질이 축적 되었을 때 재생이 시작하여 재생이 끝나는데 약 20분 정도의 시간이 소요 되었다. 필터 입구에서 340℃의 배기가스 온도에 약 160A의 전원이 약 7분간 공급되어 히터가 켜지면서 필터입구의 온도는 약 900℃가까이 상승하였다. 이때 열원은 입구쪽에 축적되어 있는 입자상물질에 전달되어 재생을 일으키면

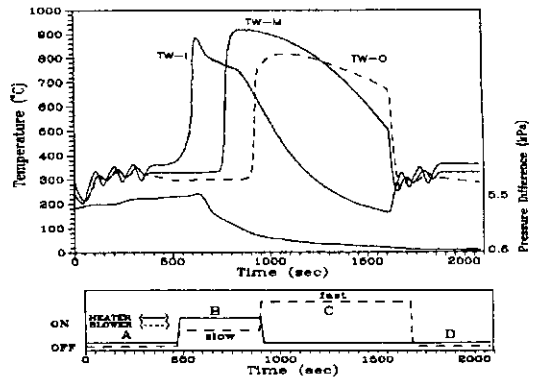


Fig. 8 Transient behavior of a absolute value of wall temperature gradient

Table 3 Reduction efficiency of with and without trap

Load rate (100%)	D2366 Engine (11051cc)		
	Without trap(%)	With trap(%)	Reduction efficiency(%)
1000rpm	21	1	95
1200rpm	20	2	90
1400rpm	24	3	88
1600rpm	29	4	86
1800rpm	27	3	89
2000rpm	26	4	85
2200rpm	28	4	86
Average	-	-	88

서 최고온도의 분포는 필터입구쪽에서 출구쪽으로 진행되는 것을 알 수 있었고 필터트랩의 중앙부분에서 벽온도가 가장 높은 것은 입자상물질의 축적량이 중앙부분으로 집중된 이유로 판단된다. 재생시 압력강하는 4.3kPa에서 서서히 압력이 증가하여 재생초기에는 최고 5.5kPa까지 증가하다가 급격히 감소하여 약 18분후에 재생이 완전히 끝남을 알 수 있었다.

또한 입자상물질 저감율을 파악하기 위해 기관의 최대 부하로 1000rpm에서 2200rpm까지 각 200rpm씩 증가시키면서 여과장치의 장착전과 장착 후에 입자상 물질 저감효율과 기관의 성능을 측정하였다. Table 3에서 보여주듯이 여과장치 장착에 따라 배출되는 입자상물질은 평균 88% 저감되어 매우 높은 여과 효율을 유지하였으며 이는 전기히터식 재생여과장치가 후처리장치로서 효과가 탁월

함을 재 확인하였다.

수치적 결과와 실제 실험결과를 비교해 보면, 벽온도의 분포는 실제 실험에서 최고 벽온도는 약 930℃로 중앙부분이 높고 수치적으로는 약 880℃로 출구 부분에서 높아 실험결과와는 다소 차이가 있는 것으로 나타났으나 시간에 따라 트랩의 길이 방향으로 확산되어가는 경향은 비슷하게 나타남을 알 수 있었고 압력분포는 수치결과에서는 80g의 입자상물질의 축적량과 5%의 산소농도일 때 최고 약 3.55kPa의 압력차를 나타내었다. 즉 약 2kPa의 압력이 수치적 결과보다 실제 실험에서 높게 나타났다. 수치적 결과는 가정조건이 간단하여 실제 실험과의 차이가 난 것으로 판단된다. 또한 수치적 결과에서는 재생이 완전히 끝나는데 약 6분이 걸렸지만 실제 실험에서는 재생이 끝나는데 약 20분이 걸려 수치적 결과와 실제 실험이 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 프로그램상에서 히터의 작동시간에 모든 재생이 끝나는 것으로 가정하였으나 실제 실험에서는 히터 작동은 재생의 중간 부분에서 멈추고 나머지 부분에 대한 재생은 대류 열전달과 연소공기에 의해 연속 재생되는 것을 고려하지 못한 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

디젤기관에서 전기히터 재생여과장치에 대한 특성을 파악하기 위하여 수치해석과 실제 실험을 통하여 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

- (1) 필터내에서 축적된 입자상 물질의 재생은 필터의 입구 부분에서 출구부분으로 진행됨을 확인 할 수 있었다.
- (2) 열재생시 산소농도가 높을수록 재생시간이 길고 최고 압력은 떨어짐을 알 수 있었다.
- (3) 전기히터식 재생장치는 약 88%의 높은 입자상물질 저감효율을 나타내었으며 후처리 장치로서 효과가 탁월함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 조강래 외 "디젤자동차 입자상물질 여과장치 개발 (I, II)", 국립환경연구원, 1991, 1992.
- (2) 한영출 외, "디젤기관의 성능과 배기관 특성에 의한 필터트랩의 열재생에 관한 실험적 연구", 한국공작기계학회지, 제 8권 제 2호, 1999.
- (3) 한영출외 1인, "신편 내연기관", 1997.
- (4) J. Wollin and S. F. Benjamin "A Study of the flow performance of ceramic contoured substrates for automotive exhaust catalyst systems", SAE 1999-01-3626.
- (5) J. D. Duke and V. R. Vadari, "An investigation of radiated noise characteristics of catalytic converters", SAE 981415.
- (6) Imad S. Abdul-Khalek외 2인, "Diesel trap performance: particle size measurements and trends", SAE 982599.
- (7) "Production Experience of a Ceramic Wall Flow Electric Regeneration Diesel Particulate Trap", SAE 930129.