

전기히터식 DPF장치의 재생성능에 관한 실험적 연구

황 의 상¹⁾, 최 재 성²⁾

An Experimental Study on the Regeneration Performance of an Electrical Heater Type DPF System

Hwang, Eui-Sang, Choi, Jae-Sung



Abstract

In this study, we made an experimental apparatus using a vehicle diesel engine, an electrical heater type DPF system, and a controller to investigate the filter regeneration performance in the variation of component actuating time and air flow rate for regeneration process.

Based on the experimental results, it is suggested to be the most acceptable regeneration condition as 5 minutes heater-on, 6 minutes heater-on & slow-blow, 15 minutes fast-blow of timing control, while supplying regeneration air of 130 ℓ/min in slow-blow, and 270 ℓ/min in fast-blow.

Key words : aftertreatment device(후처리 장치), DPF System(필터트랩장치), particulate(입자상물질), regeneration(재생)

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 주기관전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 교수

1. 서론

디젤엔진은 현재 사용되는 열기관중 열효율이 가장 높고 다양한 연료를 사용할 수 있어 중·대부하용으로 적합하며 현재 자동차, 선박 및 고정형 발전기등의 동력원으로 널리 사용되고 있다. 선진 외국에서는 디젤엔진 배기가스중 문제로 되어 있는 입자상 물질(Particulate)과 질소산화물(NO_x)의 동시 저감을 위하여 엔진 연소실 및 관련 연료 분사계통의 개선에 관한 연구와 후처리 장치(Aftertreatment Device)개발에 관한 연구를 진행시켜 왔다.

디젤엔진의 배출가스중 입자상 물질을 다공성 세라믹 필터(Porous Ceramic Monolith Filter)에 의해 걸러내고, 일정 퇴적량을 강제로 연소시키는 DPF 장치는 선진외국에서 이미 십여년 전부터 개발에 착수하여 일부는 실차시험(Fleet Test)중에 있어 그 실용화가 임박해 있다. DPF 장치에서 가장 큰 문제로 되어 있는 것은 열응력에 의한 세라믹 필터의 파손으로 장치의 성능 및 내구성에 결정적인 영향을 미친다.

본 연구에서는 차량용, 산업용 및 해상용 디젤엔진으로 부터 배출되는 입자상 물질 성분을 90%이상 저감 시킬 수 있는 전기히터방식 DPF 장치를 실험실적으로 설치하여 장치의 신뢰성 및 내구성에 크게 영향을 미치는 재생과정 중의 필터 내부 온도 변화를 위치별로 측정한다. 이를 위하여 모노리스필터 내부에 설치할 수 있는 시드 열전대(Sheathed Thermocouple)를 채택하고, 재생과정에 영향을 미치는 인자중 하나인 재생공기 공급조건을 변화시키며 장치에 사용되는 세라믹필터의 열충격에 의한 파손을 방지할 수 있는 재생공기 공급조건을 제안한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2.1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 실험장치는 크게 엔진관련부분, DPF 장치 및 데이터 처리 장치로 구성되며, 다음의 Table 2.1에 본 실험에 사용된 엔진의 사양을 나타내었다. 또한 이 엔진을 구동하고 엔진의 주요 운전성능인자를 측정하는 동력계는 직류타입(D.C. Type Dynamometer)로서 최대 150Kw의 동력을 흡수 할 수 있는 독일 Schenck사 장비이며, 최대 회

신속도는 2500rpm, 최대흡수 토크는 1790N.m의 사양을 가지고 있다.

DPF장치는 세라믹 모노리스필터(Wall Flow Type Ceramic Monolith Filter), 캔(Canister), 전기히터, 송풍기(Blower) 및 차단밸브(Shut-off Valve)등으로 구성된다. 세라믹필터는 Corning사의 EX-47 코디어라이트(Cordierite, $2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$)필터이다.

필터는 재생시의 열손실을 방지하고 임차상물질의 90%이상 여과효율을 유지시키기 위하여 3M사의 매트(INTERAM Mat)로써 필터를 감은후에 캔에 장착되게 된다. 본 실험에 사용된 매트는 약 $300^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 매트의 구성 성분이 연소하여 부피가 팽창하게 되는데 이러한 효과가 캔과 필터의 기밀성을 유지시켜 주고, 자체의 탄성을 가지게 되어 엔진의 진동등에 의한 필터의 파손도 방지하여 주게 된다.

본 실험에서 사용되는 엔진대는 배관에 오염되는 것을 방지하기 위하여 필터의 배기출구 쪽으로부터 필터의 모노리스 채널(Monolith Channel)에 삽입시켜 위치에 따라 설치하였다. 약 1.5mm의 정사각형 채널내부에 엔진대를 설치하여야 하므로 직경 1.2mm정도의 sheathed type 엔진대를 특수제작하여 Fig. 2.2에서 보여주는 위치에 삽입 설치 하였다. 세라믹 필터는 다공성 물질이므로 대기중의 수분을 흡수하여 습도나 온도에 따라 무게가 변한다. 필터내에 퇴적되는 미립자의 양을 정확히 측정하기 위하여 먼저 세라믹 필터를 건조로(Furnace)에서 $100^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 의 상태로 약 1시간 건조한 후 전자저울로 무게를 측정하여 기준무게로 정함으로서 수분 흡수로 인한 무게 변화의 오차를 최소화하였다. 전자저울은 측정정도가 0.1g의 상능을 나타내므로 본 실험에서 초기미립자 퇴적량을 60g 정도로 하여 퇴적량 초기 재생상태를 확인하는데 있어서는 무게의 오차가 거의 없다고 사료된다. 본 실험의 재생을 위한 초기 미립자 퇴적량 수 회의 실험 및 외국제품의 자료를 통하여 되었으며, 필터의 내구성 및 재생시 착화에 충족되는 조건으로 생각된다.

건조된 필터로 필터 무게를 측정하고, 필터를 캔에 장착하여 엔진을 일정조건(1500rpm , $450\text{N}\cdot\text{m}$)으로 운전시켜 실험에 요구되는 양의 임차상 물질을 포집한

전속도는 2500rpm, 최대흡수 토크는 1790N.m의 사양을 가지고 있다.

DPF장치는 세라믹 모노리스필터(Wall Flow Type Ceramic Monolith Filter), 캔(Canister), 전기히터, 송풍기(Blower) 및 차단밸브(Shut-off Valve)등으로 구성된다. 세라믹필터는 Corning사의 EX-47 코디어라이트(Cordierite, $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$)필터이다.

필터는 재생시의 열손실을 방지하고 입자상물질의 90%이상 여과효율을 유지시키기 위하여 3M사의 매트(INTERAM Mat)로서 필터를 감은후에 캔에 장착되게 된다. 본 실험에 사용된 매트는 약 $300^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 매트의 구성 성분이 인소하여 부피가 팽창하게 되는데 이러한 효과가 캔과 필터의 기밀성을 유지시켜 주고, 자체의 탄성을 가지게 되어 엔진의 진동등에 의한 필터의 파손도 방지하여 주게 된다.

본 실험에서 사용되는 엔진대는 배원에 오염되는 것을 방지하기 위하여 필터의 배기출구 쪽으로부터 필터의 모노리스 채널(Monolith Channel)에 삽입시켜 위치에 따라 설치하였다. 약 1.5mm의 정사각형 채널내부에 엔진대를 설치하여야 하므로 직경 1.2mm정도의 sheathed type 엔진대를 특수제작하여 Fig. 2.2에서 보여주는 위치에 삽입 설치 하였다. 세라믹 필터는 다공성 물질이므로 대기중의 수분을 흡수하여 습도나 온도에 따라 무게가 변한다. 필터내에 퇴적되는 미립자의 양을 정확히 측정하기 위하여 먼저 세라믹 필터를 건조로(Furnace)에서 $100^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 의 상태로 약 1시간 건조한 후 전자저울로 무게를 측정하여 기준무게로 정함으로써 수분 흡수로 인한 무게 변화의 오차를 최소화하였다. 전자저울은 측정정도가 0.1g의 성능을 나타내므로 본 실험에서 초기미립자 퇴적량을 60g 정도로 하여 퇴적량 초기 재생상태를 확인하는데 있어서는 무게의 오차가 거의 없다고 사료된다. 본 실험의 재생을 위한 초기 미립자 퇴적량 수 회의 실험 및 외국제품의 자료를 통하여 되었으며, 필터의 내구성 및 재생시 착화에 충족되는 조건으로 생각된다.

건조된 필터로 필터 무게를 측정하고, 필터를 캔에 장착하여 엔진을 일정조건(1500rpm, 450N·m)으로 운전시켜 실험에 요구되는 양의 입자상 물질을 포집한다. 몇 회의 반복실험에 의해 배압 및 운전시간으로, 실험에 요구되는 퇴적량 조건이 되었는가를 결정할 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 본 실험에서는 포집량 65g을 목표로 하여 배회 중량을 측정해본 결과 약 +8g의 오차가 발생하였으나, 본 실험의 수행에는 큰 영향을 미치지 않는다고 사료된다. 포집량이 측정된 필터를 캔에 다시 장착한 후, 반복실험에 의해 얻은 재생에 요구되는 적합한 전기히터

의 가열시간, 초기의 저속 블로워 동작시간, 및 후기의 고속블로워동작시간을 고정시키고 블로워 송풍량을 변화시켜 재생실험을 수행하였다. 재생이 완료되면 분해하여, 재생후 잔류하는 미립자퇴적량을 전자저울로 측정한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재생공기 공급시간

Fig. 3.1과 Fig. 3.2에서의 결과와 같이 저속 공기 공급 시간을 길게 하였을 경우는 필터 입구측에서 착화되어 퇴적 미립자가 필터 출구측으로의 연소진행 시간이 길어져서, 필터 입구측의 퇴적 미립자가 이 기간 중에 모두 연소되어 연속적인 연소진행에 지장을 줄 것으로 예측된다. 이는 필터의 축방향에서 중간 위치의 초기 온도에도 영향을 주며, 연소상태도 좌우하는 것으로 생각된다. 여기서 필터의 축방향으로 중간 부근 온도는 3분과 9분의 경우, 약 100℃정도 다른 경우에 비해 차이가 나므로 이 기간의 제어시간을 5~7분으로 하는 것이 좋을 것으로 생각되며, 히터가 동작될때 약 100A정도의 많은 전력이 사용되며, 이는 약 6~7Ps의 엔진 동력이 발전기(Alternator)가 축전지를 충전시키는데 요구되는 것을 의미한다. 엔진의 열효율을 고려 할 때 히터의 동작시간을 최소로 줄이는 것이 바람직하므로 히터가동시간을 5분으로 하면 착화에 요구되는 초기 온도조건까지 열량을 공급할 수 있고, 실험결과에 의해 저속 공기 공급시간을 6분정도로 하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

특히, Fig. 3.1. 및 Fig. 3.3에서와 같이 필터의 축방향에서 중간부분 및 필터 출구 부분의 온도가 급격히 떨어지지 않고 퇴적 미립자가 연소할 수 있는 상태인 약 500℃ 이상의 온도가 유지될 때, 미립자의 미연소잔류량이 현격히 작아짐을 알 수 있었다. 또한, 필터 입구로부터 축방향의 중간부분까지 연소가 진행되는 데는 약 6분 정도의 시간이 걸리므로, 전체적으로 약 12분~14분정도로 충분한 연소가 이루어질 수 있을 것으로 예측된다.

3-2 재생공기량의 변화

본 실험의 결과에서 필터의 재생을 위하여서는 초기 미립자 퇴적량이 실험 실험 정값인 65g에 비해 작은 50g 미만일 경우 일반적으로 재생상태가 불량한 것으로 나타났고, 이는 필터내부의 온도상승이 이루어지지 않아 필터 내부에 미연소 미립자가 많이 남기 때문이다. 이 결과로 보아 본 연구에서 실험한 재생 초기 미립자량은 65+8g 정도가 적정할 것으로 판단된다.

Fig. 3.1와 필터의 반경방향으로 중심의, 축방향으로 입구에서 출구측의 재생 최고 온도를 나타내었다. 필터의 입구측보다 출구측에서의 온도가 더 높게 나타나는 것으로 보아 출구측에 더 많은 양의 미립자가 포집되는 것으로 생각되며, 원주측보다는 중심측으로 미립자의 퇴적이 많은 것으로 추정된다. Fig. 3.1의 중심측의 최고 온도는 약 750~950°C의 분포를 나타내며 필터 제작사의 필터 사용조건인 용융점 1400°C, 허용최고온도가 800°C임을 고려하여 볼때, 고속공기공급조건 270 l/min 이상일 때가 가장 적합한 것으로 나타났다.

Fig. 3.5와 Fig. 3.6은 저속공기공급조건이 110 및 130 l/min 일때 필터 내부의 위치별 최고온도 발생시점부터 재생이 진행중이라고 생각되는 550°C 까지 온도가 떨어지는 시점까지의 시간을 나타내었다. Fig. 3.5의 저속공기공급량이 110l/min 일 경우가 Fig. 3.6의 저속공기공급량이 130l/min 의 경우보다 필터 단면의 원주측의 연소시간이 긴 것으로 나타났다. 고속공기공급량의 측면에서 보면 필터 전반부에 걸쳐 연소시간이 긴 조건이 250l/min 이상일 때이고 Fig. 3.5 에서 270l/min 일 경우 연소시간이 필터내부 전위차에 걸쳐 고르게 나타나 퇴적 미립자의 연소상태가 양호 할 것으로 추정된다. 고속공기공급량이 될 수록 이 시간이 짧아지고 필터의 원주측보다는 중심측에서, 필터 입구 보다 필터 출구측에 더 많은 미립자가 퇴적됨을 알수 있다. 필터내의 열응력 및 용융에 의한 파손 방지와 재생시간 단축에 의한 미립자 배출량의 저감을 고려하여, 실험결과에 의해 히터 작동시간은 5분, 히터와 저속공기공급을 동시에 수행하는 시간을 6분, 고속공기공급시간은 15분으로 결정하고, 저속공기 공급량을 130 l/min, 고속공기공급량은 270l/min으로 하면 필터의 내구성을 보장할 수 있는 재생조건이라 생각되며, Fig. 3.7의 공기공급 조건별 퇴적잔류량에서 보는 바와 같이 퇴적잔류량 측면에서도 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 DPF장치에서 신뢰성 및 내구성에 크게 영향을 미치는 재생과정 중 재생 성능에 영향을 미치는 여러가지 인자를 예측하여 조건을 변경시키며, 실험적으로 어느 인자의 영향이 지대한가를 고찰하였다. 이를 위하여 진기히터 방식의 세라믹 모노리스 필터를 사용하는 Single Type DPF 장치를 시내버스 엔진에 설치하였으며, 디젤엔진으로 부터 배출되는 배기 가스중의 매연이 본 장치에 의해 90%이상 저감될 수 있는 장치로 확인되었다. 본 실험 연구에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 실험에서 사용한 엔진의 배기량과 필터의 사이즈의 경우 재생초기의 미립자 퇴적량 $65 \pm 8g$ 은 필터의 열충격에 의한 파손방지와 재생불량을 방지할 수 있는 적정량이었다.
2. 재생시의 공기공급을 2단으로 하는 방법은 재생초기의 양호한 착화와 착화후의 효과적인 계속 연소를 가능케 하는 재생방법이라고 생각된다.
3. 재생시간은 히터 동작시간 5분, 히터 및 저속블로워 동작시간 6분, 고속블로워 동작시간 15분으로 결정함으로써 엔진의 동력손실에 의한 연료소비율 악화를 방지할 수 있었다.
4. 2단 블로워 송풍량을 저속시는 130 l/min, 고속시는 270 l/min으로 공급하면, 급속연소로 발생하는 용융에 의한 필터 파손을 방지 할 수 있었고, 또한 재생시간의 최적화가 이루어졌다.

참고문헌

- (1) M. P. Walsh, "Diesel Particulate Control Around the World", SAE Paper 910130
- (2) B. E. Enga et al, "Catalytic Control of Diesel Particulate", SAE Paper 820184
- (3) H. O. Hardenberg et al, "Experiences in the Development of Ceramic

- Fiber Coil Particulate Traps”, SAE Paper 870015
- (4) J. P. Norbye, “Truck Industry Meeting Diesel Emissions Challenge”.
High speed Diesels & Drives, July-August, P.22
- (5) R. Hellerich et al, “Regeneration Performance of a Catalyzed
Versus a Non-Catalyzed Ceramic Membrane Diesel Particulate Trap”,
SAE Paper 91032
- (6) J. P. Gabathuler et al, “New Development of Ceramic Foam as a
Diesel Particulate Filter”. SAE Paper 910325
- (7) T. Mihara et al, “Diesel Particulate Trap of Corrugated
Honeycomb Fabricated with Mullite Fiber Ceramics”,
SAE Paper 860010
- (8) K. Takesa et al, “Development of Particulate Trap System with Cross
Flow Ceramic Filter and Reverse Clening Regeneration”,
SAE Paper 910326

Table 2.1 Specification of Experimental Engine

Content	Model	D1116
Type		Vertical Inline 4 Stroke
Combustion Chamber		Toroidal Chamber
Injection Type		Direct Injection
Cylinder x Bore x Stroke		6 x 111 x 139
Displacement Volume		8071 cc
Compression Ratio		17.6 : 1
Maximum Power		187 ps / 2500 rpm
Maximum Torque		58.5 kgm / 1600 rpm
Alternator		24V 100A

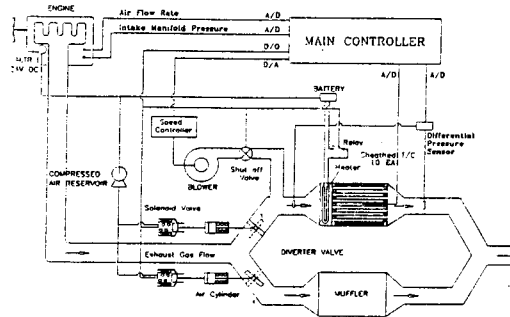


Fig. 2.1 Layout of DPF System

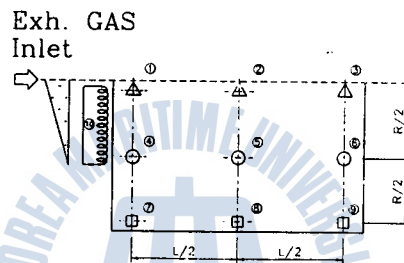


Fig. 2.2 Thermocouple Locations inside of Filter

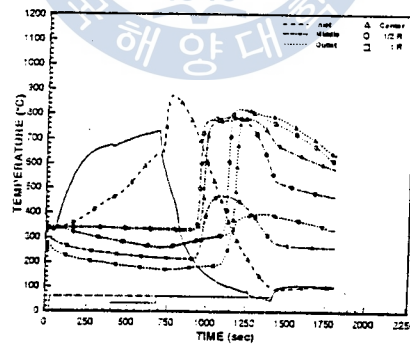


Fig. 3.1 Temperature Distribution inside of Filter

Heater on	=	6 min.
Heater on & Slow Blow	=	5 min.
Heater off & Fast Blow	=	12 min.
Flow rate at Slow Blow	=	107 l/min.
Flow rate at Fast Blow	=	235 l/min.
Initial accumulated soot	=	67 g
Remaining soot	=	7 g

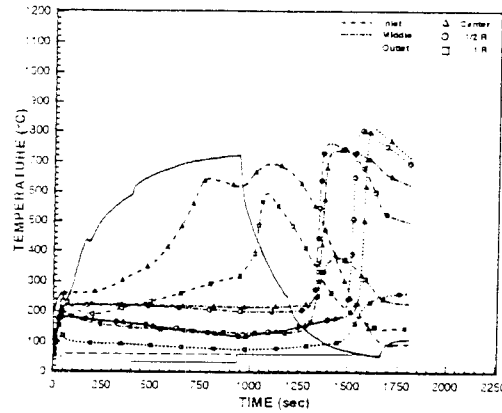


Fig. 3.2 Temperature Distribution inside of Filter

(Heater on 6 min.
 Heater on & Slow Blow 9 min
 Heater off & Fast Blow 12 min
 Flow rate at Slow Blow 107 l/min
 Flow rate at Fast Blow 235 l/min
 Initial accumulated soot 72 g
 Remaining soot 16 g)

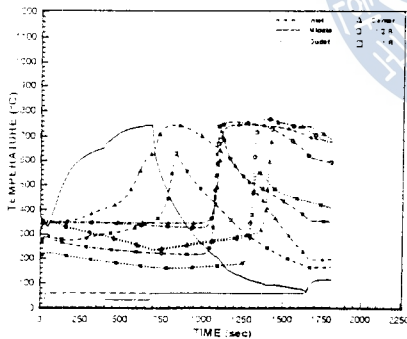


Fig. 3.3 Temperature Distribution inside of Filter

(Heater on 6 min.
 Heater on & Slow Blow 5 min.
 Heater off & Fast Blow 16 min.
 Flow rate at Slow Blow 107 l/min.
 Flow rate at Fast Blow 235 l/min.
 Initial accumulated soot 71 g
 Remaining soot 2 g)

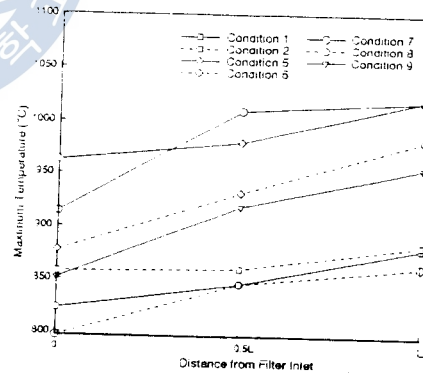


Fig. 3.4 Maximum Temperatures on Center Part in Axial Direction

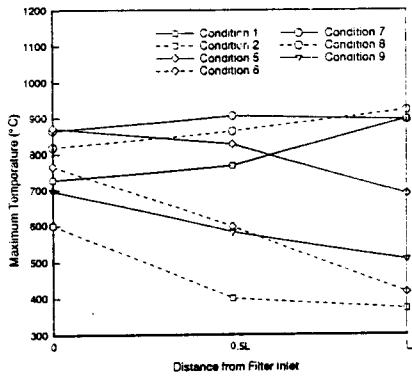


Fig. 3.5 Maximum Temperatures on Center Part in Axial Direction

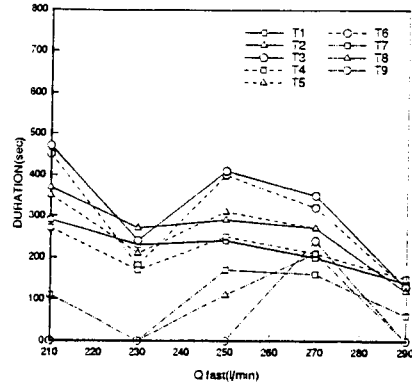


Fig. 3.6 Duration between Maximum Temperature and 550°C (110 l/min of Slow Blow)

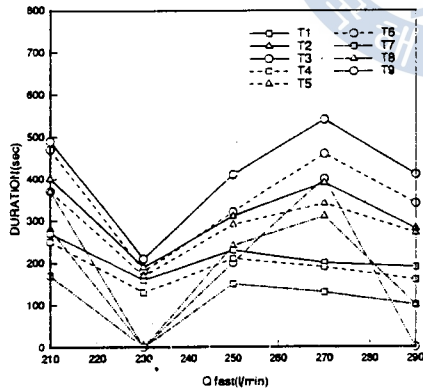


Fig. 3.7 Duration between Maximum Temperature and 550°C (110 l/min of Slow Blow)

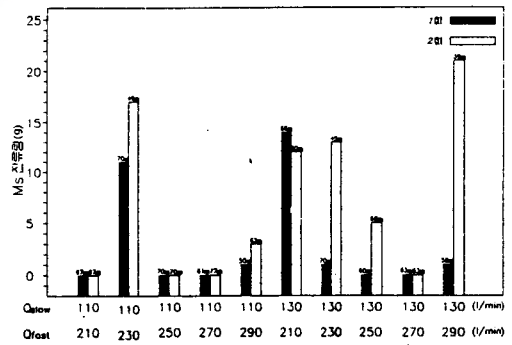


Fig. 3.8 Remaining Soot mass under Various Air Flow Rate Conditions.

