

DPF 성능 평가를 위한 Dump Combustor의 활용

남연우* · 이원남**† · 오광철* · 이춘범*

The Application of Dump Combustor for Evaluation of DPF(Diesel Particulate Filter) System

Youn Woo Nam, Wonnam Lee, Kwang Chul Oh and Chun Beom Lee

ABSTRACT

The number of vehicles employing diesel engines is rapidly rising. Accompanying this trend, application of an after-treatment system is strictly required as a result of reinforced exhaust regulations. The Diesel Particulate Filter (DPF) system is considered as the most efficient method to reduce particulate matter (PM), but the improvement of a regeneration performance at any engine operation point presents a considerable challenge by itself. Temperature, gas composition and flow rate of exhaust gas are important parameters in DPF evaluation, especially regeneration process. Engine dynamometer and degment tester are generally used in DPF evaluation so far. But these test method couldn't reveal the effect of various parameters on real DPF, such as O₂ concentration, amount of soot and exhaust gas temperature. This research has studied the possibility using dump combustor that used to take an approach lean premixed combustion in gas turbine for a DPF power and optimized. It is possible that utilize the system as DOC (Diesel Oxidation Catalyst) and SCR(Selective Catalytic Reduction) assessments test as well as DPF evaluation

Key Words : DPF(Diesel Particulate Filter), Dump Combustor

1. 서 론

유럽 시장을 중심으로 가솔린차량보다 열효율이 좋고, 출력이 좋은 디젤 차량이 주목을 받고 있다. 더욱이 최근에는 지구 온난화 등 환경에 대한 관심이 증가하고 있는 시점에서 연비측면에서의 장점은 더욱 부각되고 있는 실정이다. 그러나 이러한 디젤 엔진은 과잉공기 조건에서 연소가 진행되기 때문에 배기가스 중에 산소가 다량 존재하여 가솔린 엔진의 3원 촉매를 사용할 수 없다. 따라서 많은 자동차 회사들은 강화되는 배기규제를 만족시키기 위한 디젤엔진의 배기저감을 위한 기술 개발을 앞 다투어 진행하고 있다

디젤엔진은 확산 연소 형태의 연소특성 때문에 질소산화물(NOx) 생성뿐만 아니라 부분적 과농지역에서는 매연이 다량 생성되는 문제를 근본적으로 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고압분사등과 같은 분사 전략의 향상과 유동에 의한 혼합의 조절 등으로 많은 배출 가스의 저감을 이루었지만 현재 강화되는 배출 규제를 만족시키기 위해서는 후처리 장치의 개발은 필수적이다. 그리고 최근 들어 미세 입자의 유해성[1]이 대두되면서 입자상물질(대부분 매연 입자)에 대한 관심이 늘어나고 있다.

현재 입자상 물질의 저감기술로는 매연 여과 장치(DPF ; Diesel Particulate Filter)가 가장 효과적이며, 시판 차량 및 기존 차량(retrofit)에까지 장착을 의무화하도록 하고 있다. 그림 1은 DPF의 구조를 보여준다. 입구와 출구의 채널이 서로 엇갈리게 막혀있어서 배기가스중의 입자는 공극

* 자동차부품연구원

** 단국대학교 기계공학과

† 연락처자, E-mail : wlee@dku.edu

이 있는 벽에 의해 걸러지고 가스는 통과되어 배기관으로 나가는 구조를 하고 있다. 이렇게 쌓여진 입자상 물질은 적절한 산화 조건에서 주기적으로 없애게 된다(재생과정). 이러한 과정에서 포집된 입자상물질의 양이나 산화조건(산소농도, 배기가스 온도, NO₂ 농도)에 따라서 DPF 내부의 발열량이 달라지고 이로 인하여 DPF의 과열 및 온도 분포 또한 변화한다. 현재 DPF 시스템의 핵심부품인 필터소재로는 다공질의 세라믹 모놀리스, 세라믹 파이버, 금속파이버 및 폼, 세라믹이나 금속 분말로 제작된 펠렛타입 등을 이용하고 있고 이러한 재료들은 열적인 특성이 각기 다르다. 그중에서도 세라믹 필터는 다른 재료에 비해 녹는점이 높아(코디어라이트 1,450°C, SiC 1,600°C 이상) 주로 사용되고 있으나 상대적으로 금속에 비해 열충격에 취약한 단점을 가지고 있다. 따라서 필터 개발 후 필터의 내열특성(열 충격, 열적내구) 평가는 매우 중요한 항목 중의 하나이다. 이를 평가하기 위한 장치로서 실차이용하거나 엔진 동력계 및 세그먼트(DPF의 일부)를 이용한 rig 실험을 통하여 DPF의 매연 포집, 압력 강하 및 재생 실험을 하고 있다. 하지만 위와 같은 방법은 배기가스 온도, 산소 농도, 매연 포집과 NO_x 농도 등을 일정한 조건을 유지시키면서 DPF의 정량적 분석을 하는 데에는 많은 어려움과 비용이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 DPF 필터를 평가할 수 있는 엔진 모사 평가 장치의 구성에 관해 연구되었다.

본 연구에 사용된 연소기는 금속 확대면(덤프면)을 갖는 연소기(dump combustor)이다. 덤프 연소기를 이용하여, 연료-공기의 혼합과 적절한 제어 방법을 이용하면 낮은 농도의 NO_x를 유지하면서 일산화 탄소(CO)와 총탄화수소(THC)를 조절할 수 있다. 하지만 이와 같은 회박 예혼합 연소를 이용하는 연소기의 경우에는 연소실 내의 압력과 열 방출율에 따라서 연소 불안정성이 발생하기 쉽다는 단점[2]이 있고 이를 해결하기 위해 연소기의 형상을 바꾸거나[3] 연소실내 압력 및 열원을 추가하여 안정화 시키는 연구가 선행되었다[4, 5].

본 연구에서는 디젤엔진의 후처리 장치인 DPF의 성능 평가를 위하여 온도, 유량, 산소 농도, 총 탄화수소 등의 파라미터가 제어 가능한 연소기를 구성하였다. 또한 이를 바탕으로 DPF의 재생 특성, 온도, 배압 등의 성능을 분석할 수 있는 장치를 구성하였다.

2. 실험 장치 및 방법

일반적으로 DPF의 성능을 평가하기 위하여 엔진 동력계를 이용하거나 실차량 주행을 통하여 얻은 데이터를 분석하였다. 이와 같은 시스템을 이용할 경우 정량적 분석이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 또한 DPF의 세그먼트만을 따로 분리

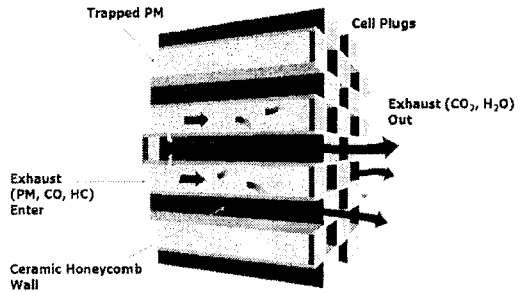


Fig. 1 DPF 구조

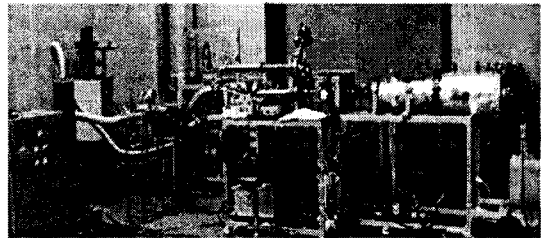


Fig. 2. 흡입 형태의 DPF 평가 시스템

하여 rig 테스트기에서 분석하는 방법이 있으나 이는 DPF의 국부적인 요소를 분석하는 방법으로 이를 이용하여 DPF 전체의 성능 평가를 내리는 것에는 무리가 있다. 따라서 DPF의 평가를 위하여 엔진과 유사한 배기 유량을 모사할 수 있는 평가 장치를 제작하였다.

Figure 2은 경유 버너를 이용하여, 흡입 방식의 DPF 평가를 위한 시스템이다. DPF를 평가하기 위한 기존 장치는 상용 경유 버너를 이용하였고, 흡입 공기 유량이 1~3.5 Nm³/min이며, 온도 조절 범위가 약 250°C~700°C이다. DPF의 평가 실험을 위해서는 유량, 배기가스의 온도조절 및 총탄화수소(THC) 및 매연 등의 조절이 필수인 부분이다. 기존의 유량은 suction 블로워에서 흡입된 공기량을 가지고 측정하였고, 온도는 수냉식 쿨러를 장착하여 조절하였다. 배기가스와 유사한 조건을 만들어주기 위하여 총탄화수소, 매연 등을 질량 조절 장치(MFC)와 매연 공급기를 이용하여 일정량을 공급하였다.

경유 버너를 사용하는 위 장치의 경우 초기 점화의 어려움, 화염의 불안정성과 버너 자체만으로 좁은 온도 범위가 문제점으로 지적되었다.

2.1 덤프 연소기를 이용한 DPF 평가 장치

본 연구에서 사용된 연소기는 금속 확대형 연소기(backward facing dump combustor)이다. 연소 시스템은 Fig. 3의 구성 개념도에서 보는 바와 같이 연료 노즐, 스왈러, 연소캔, 1, 2차 공기

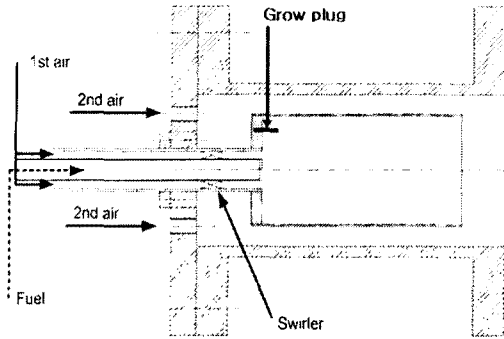


Fig. 3 연소기 개념도

공급 장치 및 글로우 플러그로 구성되어 있다. 넓은 온도 조절 영역을 가질 수 있는 연소기를 만들기 위해서는 화염의 불안정성을 제거하는 것이 중요하다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 연소기 내부에서 확산화염과 예혼합 화염이 동시에 존재할 수 있도록 설계하였다. 또한 덤프 연소기에서 화염의 넓은 안정화 영역을 찾기 위하여 연료가 공급되는 튜브의 특정 위치에 연료 구멍(fuel hole)을 설치하였다. 홀의 위치는 연소실을 기준으로 5 mm, 36 mm, 200 mm 위치에 설치하였고, 실험할 조합을 결정하였다. DPF 성능 평가를 위해 제작한 연소기는 연료가 공급되는 튜브의 외경 19.05 mm이고 노즐 직경은 1.0 mm 일정한 각도를 가지고 5개를 배열하였다. 연료가 공급되는 노즐의 사이즈 및 개수를 초킹 조건에 근접하게 맞추기 위해 노즐의 분사 속도는 음속(340 m/s)으로 가정 후 설정하였다. 연소기 내에서 확산화염 영역이 생성될 수 있도록 덤프 베인으로부터 5 mm 위치에 1차 노즐을 배열하였고, 예혼합 화염을 만들어 주기 위하여 1차 노즐에서 31 mm 위치에 2차 노즐을 배열하였다. 2차 노즐은 스윙 효과를 이용하여 짧은 시간 안에 연료와 공기가 완전 혼합이 될 수 있도록 스윙러 하류에 위치하도록 하였다. 3차 노즐은 기준 위치로부터 200 mm 거리에 설치하였다. 스윙러는 6개의 날개와 45° 각도를 가지도록 설계하였다. 공기와 연료가 혼합된 가스가 공급되는 노즐은 내경 36 mm이고, 연소기 캔의 내경은 108.3 mm이고 길이는 200 mm로서 확장비(expansion ratio)가 12.56을 유지함으로써 급격한 팽창으로 인한 완전 연소를 유지할 수 있도록 하였다. 고온에 노출된 부분의 재질은 스테인레스 316을 사용하여 고온에서의 산화를 방지할 수 있도록 하였다. DPF 평가를 위한 덤프 연소기는 고온의 화염에 노출이 되는 연소기 캔의 온도를 낮추고, 배기가스의 온도 및 산소의 농도 등을 조절하기 위하여

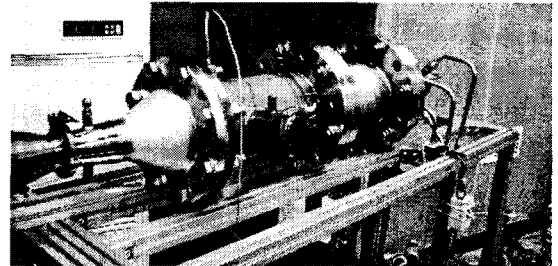
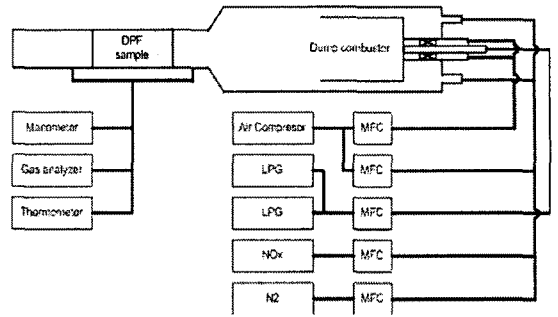


Fig. 4 가압 방식의 DPF 평가 시스템 구성도 및 실물 사진

2차 공기 또는 질소를 공급할 수 있는 중 구조로 설계하였다. 2차 공기는 연소기 캔 바깥쪽으로 흐르도록 하였고, 1/2" 튜브를 통해 모두 네 곳에서 공급되도록 하였다. 1, 2차 공기 및 상용 프로판(LPG)은 각각 1500 slpm(MKS), 2500 slpm(Brooks), 150 slpm(brooks)를 제어할 수 있는 질량유량 콘트롤러를 사용하였다. 연료는 LPG를 사용하였고, 두 개의 실린더를 병렬로 연결하여 많은 연료의 과사용에 따른 LPG 증발 속도를 유지할 수 있도록 하였다. 글로우 플러그를 1차 노즐 부근에 설치하여 점화 및 화염의 안정될 수 있도록 하였다.

평가를 위한 DPF의 전후단에 압력계(manometer), 배기가스 분석계(Gas analyzer, GreenLine 9000) 및 열전대 모니터를 설치하여 DPF의 정량적 평가할 수 있도록 하였다.

2.3 실험방법

덤프면으로 공급되는 공기의 유량을 400 l/min으로 고정시키고, 연료의 유량을 변화시키면서 화염의 안정성 여부를 확인하였다. 또한 연료 노즐의 위치를 변화시키면서 당량비에 따른 화염의 안정성을 조사하였다. 이와 동시에 배기가스의 온도를 측정하였다. 노즐 위치에 따른 배기가스의 연소 여부를 확인하기 위하여 배기가스 분석계를 통하여 O₂, CO₂ 및 THC 등의 농도를 확인하였다. 노즐의 위치 변화 조건은 Table 1에 정리하였다.

Table 3 노즐의 개폐 여부

	5 mm	36 mm	200 mm
Case I	Open	Closed	Closed
Case II	Open	Open	Closed
Case III	Closed	Open	Closed
Case IV	Open	Closed	Open
Case V	Closed	Closed	Open

3. 고찰

3.1 화염의 안정화 영역

Table 1의 노즐 개폐 조건을 가지고, 공급되는 공기량을 고정하고, 연료량을 변화에 따른 화염의 안정화 영역과 온도 영역을 관찰하였다. Fig. 5에서는 노즐 개폐 조건에 따른 가연 한계와 최고 온도를 나타내었다. 모든 노즐 조건에서 배기 최고 온도는 거의 동일한 값을 가졌다. 위 시스템에서 사용된 당량비는 예혼합 영역에서만 존재하는 당량비가 아니라 연소기로 공급된 전체 공기와 연료에 따른 전체 평균 당량비이다. Case I의 경우 당량비 0.48에서 까지 화염이 안정하게 유지 되었다. 반면에 Case II는 당량비 0.48에서 소멸되지는 않았지만 소음이 발생하는 특성을 나타내었다. 홀의 위치가 200 mm인 지점만 열두어 공기와 예혼합만 시켜 연소시켰을 경우(Case V)에는 낮은 당량비에서 초기 점화의 어려움과 연소 불안정 현상이 발생하였다. Fig. 6에서는 노즐 조건에 따른 가연 한계 위치에서의 화염의 모

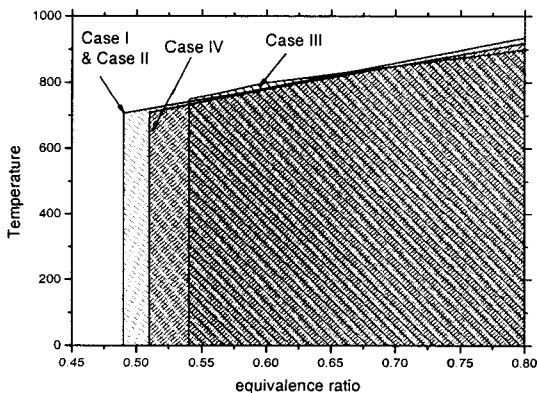
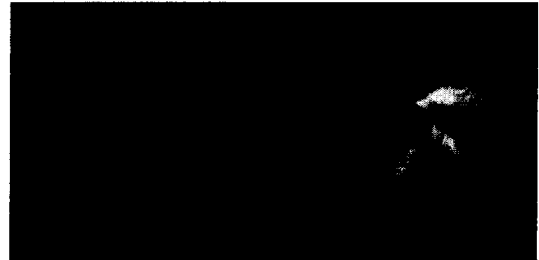


Fig. 5 노즐 위치 변화에 따른 화염의 안정화 영역 및 배기 온도



Case I(eq=0.49) Case II(eq=0.49)

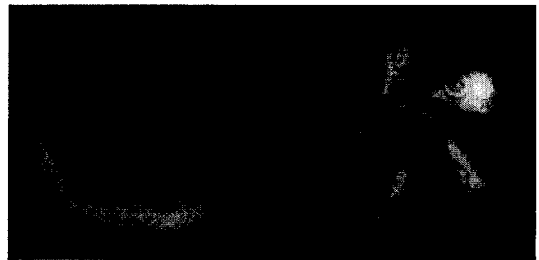


Case III(eq=0.54) Case IV(eq=0.51)

Fig. 6 노즐 조건에 따른 가연 한계의 화염 모습



Case I(eq=0.77) Case II(eq=0.77)



Case III(eq=0.77) Case IV(eq=0.77)

Fig. 7 노즐 조건에 따른 당량비 0.77에서의 화염 모습

습을 나타내었다. Case III의 화염의 모습이 다른 조건의 화염들에 비해 매우 불안정한 상태를 보이고 있다.

Fig 7에서는 당량비 0.77에서의 노즐 조건에 따른 화염의 모습을 나타낸 그림이다. 덤프 베인에 가까운 노즐이 열려있을수록 화염이 노즐을 중심으로 더 안정성 있게 붙어 있는 모습을 관찰할 수 있다. 또한 Case IV와 같이 혼합 영역의

길이가 길어질수록 화염의 형성 영역이 연소기 내부에 고르게 분포함을 볼 수있다. Case II의 경우 전체적으로 화염은 매우 안정되어 보이나 화염이 연소기 내부 표면과 크게 충돌함으로써 연소기의 적열 현상이 가속된다. 또한 충전화수소의 급격한 증가도 연소기 내부의 적열 및 화염의 충돌과 무관하지 않은 것으로 생각된다.

DPF평가를 위해서 배기가스 온도, O₂, CO₂ 및 THC의 농도를 조절하기 위하여 희석 공기를 공급하였다. 공급된 희석 공기는 화염에 영향을 미치지 않고 연소된 공기와 혼합되었다. 이 때 배기가스 온도 및 산소의 농도는 공급된 희석 공기 및 질소의 양에 따라서 조절이 가능하다. 희석 공기(1000 L/min)만 공급하였을 경우에는 전체 산소의 농도가 약 16 % 선을 유지할 수 있고, 질소를 추가적으로 공급할 경우 약 4 %선의 농도를 조절하여 12~16 %선으로 산소의 농도를 조절할 수 있었다. THC의 농도를 추가적으로 조절하기 위하여 LPG 또는 기타 연료를 희석 공기와 같이 공급할 경우 가능하리라고 본다.

노즐의 설정 조건 중에서 Case IV의 경우 화염이 가장 안정적이면서 배기가스 온도, O₂, CO₂ 및 THC의 농도가 낮아 추가적인 농도 조절이 쉬울 것으로 판단되며, 그러므로 디젤 차량의 배기가스 성분과 유사하게 모사가 가능하며 이를 이용하여 DPF의 성능을 정량적으로 평가하는데 가장 유리할 것으로 생각된다.

3.2 평가 장치의 활용

Figure 8에서는 suction blow 타입에서 DPF의 재생 특성 및 열충격의 특성을 알아보기 위한 온도 구간 및 필터 재생시 변화하는 온도를 나타내었다. 초기에는 배기가스의 온도를 bypass 유로를 통하여 일정 온도까지 증가시킨 후, 설정 온도(약 620℃)에 도달하였을 경우, 평가할 DPF가 있는 경로로 고온의 배기가스를 공급하였다. 이때 매연이 로딩되어 있는 필터의 온도는 재생이 시작되어 급격한 상승이 이루어졌고 재생이 완료된 후 초기 배기가스 온도를 나타내었다. Fig.9는 위의 과정을 통해서 DPF 필터의 O₂ 및 CO₂ 농도의 변화, 필터내 온도 변화와 필터 전후단의 압력의 변화를 나타내었다. 재생 시의 산소 농도는 매연의 산화의 영향으로 2%정도 감소하게 되고, 그림에서 보이는 것처럼 대부분 이산화탄소로 배출되게 된다. 매연이 많이 포집되어 있을 것으로 예상되는 후단(C30 mm)의 경우 재생이 시작되면서 온도의 급격한 상승을 관찰할 수 있었고, 상대적으로 PM의 양이 적은 DPF 전단(C 210 mm)은 필터 재생 특성이 작았다. 재생이 시작되면서 필터 양단의 압력은 감소하기 시작한다. 새로 설계된

가압 형식의 장치 역시 지금까지 평가해온 형식의 모드를 충분히 수행할 수 있을 것으로 예상된다.

3.3 HC 및 CO 전환율 측정

덤프연소기를 이용한 평가 장치를 통해 DPF 촉매 성능 평가를 우선적으로 실험하였다. 촉매의 산화 성능의 평가를 위하여 DPF 전단의 가스 농도조건을 다음과 같이 설정하였다.

HC: 4700ppm C, CO: 200ppm, NOx:20ppm

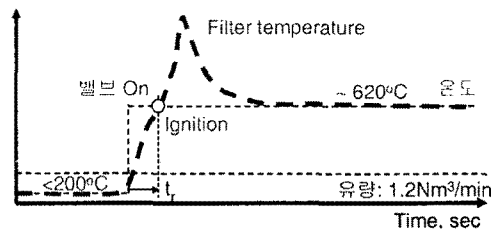


그림 8. DPF 평가를 위한 실험조건의 제어

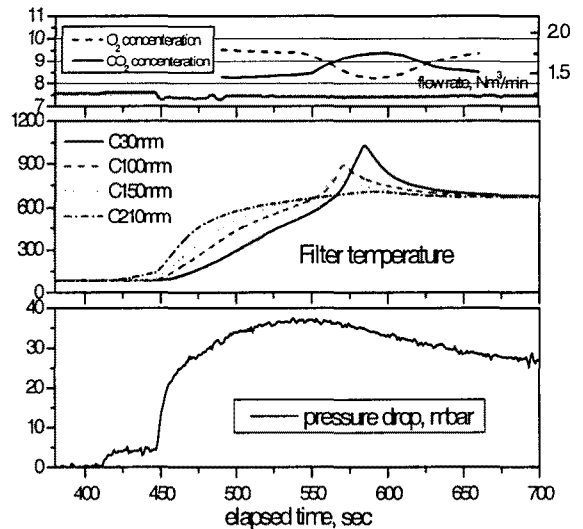


Fig. 9 재생시 O₂, CO₂ 농도, 필터내부 온도 및 필터의 차압변화

전체 배기가스 유량을 2050 l/min(S.V.=49,000 h⁻¹)으로 고정하고 배기가스온도를 200℃~450℃까지 변화시키면서 DPF전단과 후단의 농도로부터 전환율을 측정하였다. 실험 장치는 Fig. 10과 같다.

Figure 11은 DPF 샘플의 전환율을 비교한 결과이다. HC 전환율을 비교하면 DPF 1(T50% $C=385^{\circ}C$)이 제일 성능이 좋고 다음은 DPF 2(T50% $C=405^{\circ}C$), DPF 3(T50% $C=460^{\circ}C$)의 순서의 성능을 보인다. 백금의 고착률은 DPF1 > DPF2 > DPF 3이었고, 이는 백금이 HC 전환율에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

가압 타입의 DPF 평가 장치를 이용하여 넓은 범위의 안정된 유량과 온도를 유지할 수 있었고, CO, HC와 같은 파라미터의 제어가 용이하였다.

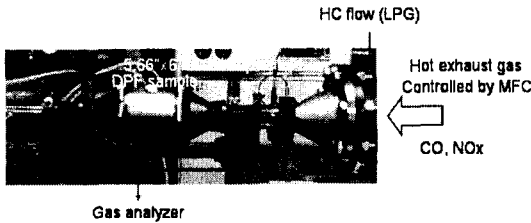


Fig 10. HC 및 CO 전환율 측정을 위한 실험 장치

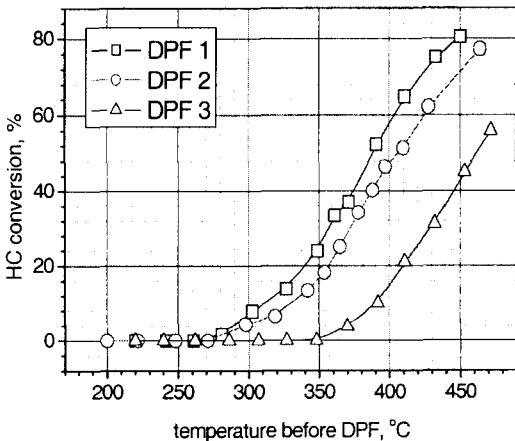


Fig. 11. 샘플 DPF의 CO 및 HC 전환율

4. 결론

본 연구에서는 DPF의 성능평가를 위하여 배기 가스 온도, O_2 , CO_2 및 THC 등의 파라미터가 조절이 용이하도록 덤프 연소기를 활용하는 방안을 제시하였다.

1) DPF 평가를 위한 넓은 범위의 온도 조절을 위해서는 화염의 안정화가 중요하다. 덤프 연소

기 내의 노즐의 위치에 따라서 화염의 안정화 영역의 차이를 관찰할 수 있었다. 노즐의 위치는 덤프 베인으로부터 5 mm와 200 mm에 위치한 Case IV 조건이 가장 적합할 것으로 판단된다.

2) 덤프 연소기를 이용하여 배기가스의 온도 및 기타 파라미터들의 조절이 매우 용이하였으며, 이를 DPF의 평가 뿐만 아니라 DOC(Diesel Oxidation Catalyst) 및 SCR(Selective Catalytic Reduction)의 평가에도 충분히 활용이 가능할 것으로 생각합니다.

3) 향후 현재 글로벌 당량비가 아닌 연료 노즐의 성층화를 통하여 확산 영역과 예혼합 영역을 별도로 제어함으로써 화염의 안정화와 운전 온도 영역을 넓힘으로서 DPF와 같은 후처리 장치의 정량적 평가를 할 예정이다.

참고문헌

- [1] 홍정구, 이민철, 이은도, 오광철, 신현동, "혼합기 공급방식에 따른 덤프연소기의 연소 불안정성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 논문집 B 권, 제 29권, 8호, pp. 963-970, 2005
- [2] "Health effects, measurement and filtration of solid particle emitted from diesel engine," GRPE-PMP report, April, 2001.
- [3] 신명철, 김세원, 문민욱, "저 NOx 선단 예혼합 연소기의 화염 및 NOx 배출 특성 연구," 한국연소학회지, Vol. 10, No.2, pp.22-29, 2006.
- [4] K. C., Schadow and E., Gutmark, "Combustion instability related to vortex shedding in dump combustors and their passive control," Energy Combustion Sci., Vol. 18, pp. 117-132, 1992.
- [5] J. G., Lee, K. W., Kim and D. A., Santavica, "Effect of injection location on the effectiveness of an active control system using secondary fuel injection," Proceeding combustion institute, Vol. 28, pp. 739-746, 2000.