

DPF 테스트 리그를 이용한 SiC DPF의 이상연소 특성

오 광 철^{*1)} · 이 천 환¹⁾ · 조 택 동²⁾

자동차부품연구원¹⁾ · 충남대학교 기계설계공학과²⁾

Uncontrolled Regeneration Characteristics of SiC DPFs using DPF Test Rig

Kwang Chul Oh^{*1)} · Chunhwan Lee¹⁾ · Taikdong Cho²⁾

¹⁾Environmental Parts R & D Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾Department of Mechanical Design Engineering, Cheungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 30 May 2007 / Accepted 14 September 2007)

Abstract : Uncontrolled regeneration characteristics of two different type SiC DPFs(diesel particulate filters) were investigated by DPF test rig devised to facilitate DPF evaluation, especially for regeneration and MSL(maximum soot loading) test similar to engine dynamometer test. In order to estimate the limits of maximum filter temperature and temperature gradient causing filter fracture, such as crack or whitening, the temperature distributions inside the filter were measured by thermocouples. The maximum filter temperature was observed near the rear plane of central filter region due to heat accumulation by exothermic reaction of PM but the maximum temperature gradient occurred at the boundary of high filter temperature. These two parameters induced the different SiC DPFs to fracture with different modes, whitening and crack.

Key words : Uncontrolled regeneration(이상연소), SiC DPF(SiC 디젤 매연 여과 장치), MSL(최대 매연 로딩), Whitening(백화현상), DPF test rig(DPF 평가장치), Maximum filter temperature(최대 필터온도)

1. 서 론

디젤엔진은 확산 연소 형태의 특성 때문에 질소 산화물(NOx) 생성뿐만 아니라 부분적 과농 지역에서는 매연이 다량 생성되는 문제를 근본적으로 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고압분사 등과 같은 분사 전략의 향상과 유동에 의한 혼합의 조절 등으로 많은 배출 가스의 저감을 이루었지만 현재 강화되는 배출 규제를 만족시키기 위해서는 후처리 장치의 개발은 필수적이다.

현재 입자상물질의 제거기술로 DPF(Diesel Parti-

culate filter)가 가장 효과적인 기술^{1,2)}로 인식되고 있다. 따라서 최근에는 운행차 보급(retrofit)시장 뿐만 아니라 대부분의 제작사(OEM)에서도 필수적인 시스템으로 고려되고 있고 이러한 시스템의 최적화에 많은 시간을 할애하고 있다. DPF는 입자상물질인 PM을 필터방식으로 포집하고 재생하는 기술이다. 재생방식은 촉매에 의한 자연재생식과 전열장치나 버너에 의한 강제재생방식이 있으며, 최근에는 저온에서의 재생효율을 증대시키기 위해 자연재생방식과 강제재생방식이 병합된 복합재생방식이 활발히 연구되어 적용^{3,4)}되고 있다. DPF 시스템의 핵심 부품인 필터소재로는 다공질의 세라믹 모놀리스,

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

세라믹 파이버, 금속파이버 및 폼, 세라믹이나 금속 분말로 제작된 펠렛 타입 등이 있다. 그중에서 촉매의 코팅특성이 우수하고 제조공정이 다른 기술에 비해 상대적으로 발달되어 가장 많이 사용되고 있는 소재가 세라믹이며 그중에서 현재 코디어라이트와 SiC가 주로 사용되고 있다. 특히 세라믹 필터는 다른 재료에 비해 녹는점이 높아(코디어라이트 1,450°C, SiC 1,600°C 이상) DPF에 적용하기 용이하나 재료의 열팽창계수가 커서 상대적으로 금속에 비해 열충격에 취약한 단점을 가지고 있다.

세라믹 재료의 높은 열적 안정성에도 불구하고 이상연소(unconditional regeneration)등과 같은 예기치 못한 PM재생에 의한 국부적인 고온 및 온도 구배에 의해 녹음 및 크랙등과 같은 필터파손이 발생하기도 한다. 따라서 필터 개발 후 필터의 내열특성(열 충격, 열적내구) 평가는 매우 중요한 항목 중의 하나이다. 이를 평가하기 위한 장치로서 실차를 이용하거나 엔진 동력계 및 세그먼트(DPF의 일부)를 이용한 rig 실험⁵⁾을 통하여 DPF의 매연 포집, 압력 강하 및 재생 실험을 하고 있다. 하지만 엔진을 이용한 방법은 배기유량, 온도 및 산소농도가 운전 조건에 따라 의존적으로 변화하기 때문에 각각의 영향을 평가하기에는 적합하지 못하고 또한 비용이 많이 드는 단점이 있다. 그리고 segment 실험과 같은 작은 부분의 실험은 DPF 형상의 변화에 따른 부분(온도 분포에 따른 파손)을 평가할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 엔진운전조건을 모사할 수 있는 DPF 테스트 리그를 개발하여 2종의 SiC 필터에 대한 이상연소 특성(최대 필터온도 및 필터 내부 온도 구배)을 평가하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2종의 SiC DPF의 이상연소 특성을 살펴보기 위해서 다음과 같은 테스트 리그를 구성하였다.

2.1 DPF 테스트 리그

DPF 테스트 리그는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 고온의 배기가스 생성을 위한 버너 부분, 매연 로딩을 위한 부분 그리고 필터가 장착되는 테스트 부분으로 나눌 수 있다.

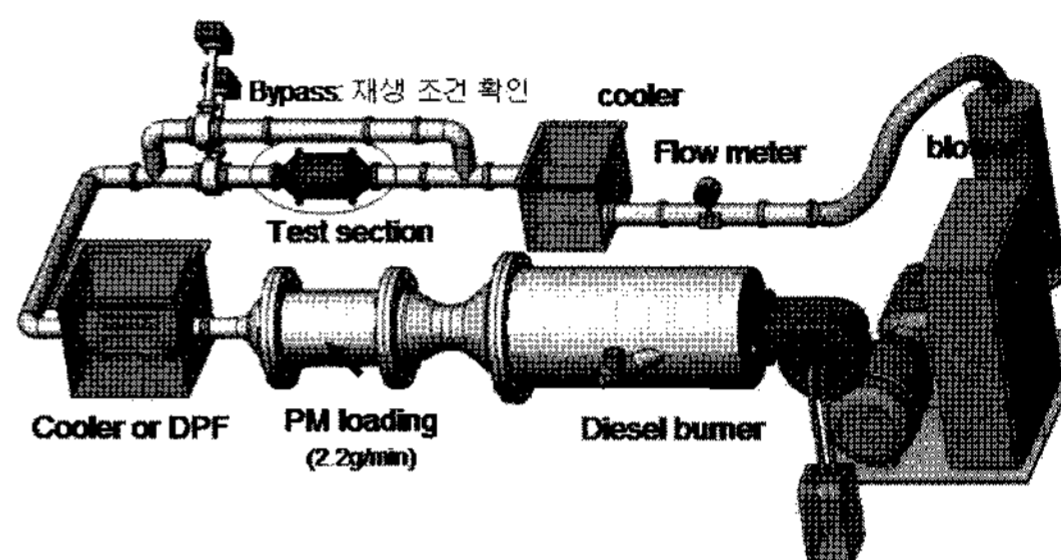
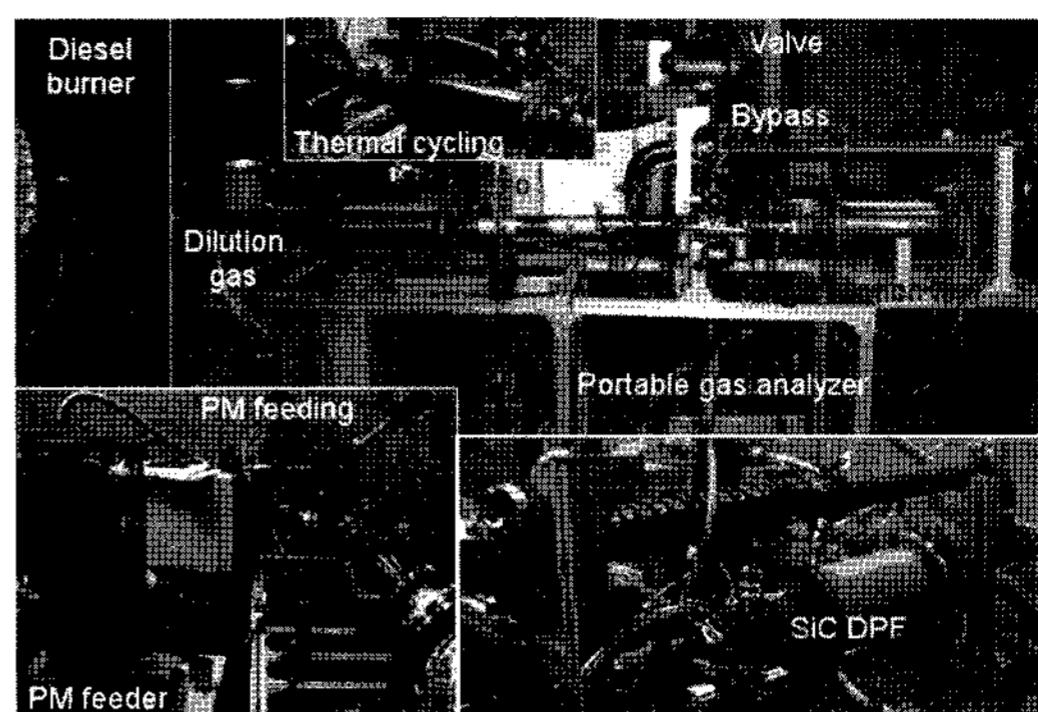


Fig. 1 Experimental setup (Photographs and schematic)

버너는 엔진의 배출가스와 동일한 조건을 맞추기 위해 경유 버너를 사용하였다. DPF의 재생 시 온도(BPT)에서부터 이상연소 온도(620°C)까지 안정되게 온도를 조절할 수 있다. 매연의 로딩은 회전 타입의 피더를 사용하였고 실험에서 사용된 피딩율은 2.2g/min (배기가스 유량: 2.0Nm³/min, 상온)으로 일정하게 유지하였다. 그리고 테스트 부분은 그림에서 보는 바와 같이 바이 패스 부분을 두어 배기가스 온도뿐만 아니라 배기가스 농도들을 맞춘 후에 밸브를 이용하여 DPF가 장착된 유로로 갑작스럽게 고온의 가스를 흘려보냈다. 이렇게 갑작스런 배기가스 온도의 변화는 DPF내의 매연의 점화를 일으키고 산화를 통한 발열에 의해 필터의 온도를 갑작스럽게 높이는 역할을 한다. 이러한 과정에서 실험의 두 가지 변수 즉, 온도 증가율, 산소농도에 따라 필터내부의 온도분포 및 최대 온도가 달라진다.

온도 증가율의 감소는 매연의 주 연소이전에 온도 증가의 과정에서 일부 산화가 진행되므로 필터 온도의 감소의 결과를 보이게 되고 산소 농도의 감소는 매연의 산화율을 결정하는 중요한 변수이다.

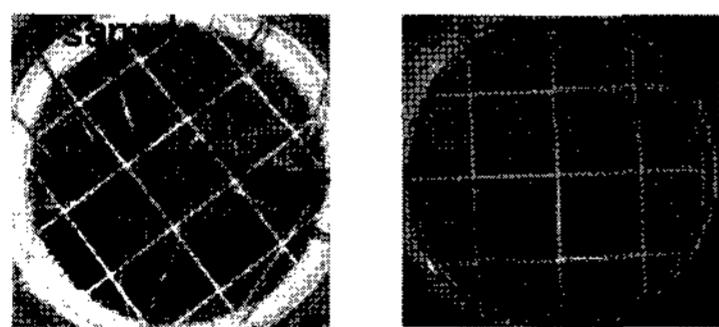
엔진동력계를 이용한 이상연소 실험과정을 보면 로딩 후 DPF에 갑작스런 온도를 주기위하여 엔진에서 후 분사⁶⁾를 이용하거나 풀 부하⁷⁾ 운전을 한다. 그런 다음 DPF전단의 온도가 지정된 온도에 다다르면 갑자기 아이들(idle)상태로 운전 상태를 변화 시키게 되고 이때 매연의 산화에 의해 갑작스런 온도 증가가 일어난다. 이 과정에서 포집된 매연의 점화전 DPF의 온도 증가율은 이상연소 시 발열량과 밀접한 관계가 있기 때문에 실험 시에 이러한 조건을 맞춰 줄 필요가 있다. 엔진 내 후 분사의 경우 목표 온도 (~620°C)까지 50초정도의 시간이 걸리고 풀 부하조건의 경우 100초정도의 시간이 걸림을 알 수 있고 이러한 조건은 본 장치의 온도 증가율(Fig. 3)과 비슷한 수치임을 알 수 있다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 SiC 알갱이의 결합 물질이 다른 2종의 SiC 필터가 사용되었다. 필터의 상세 정보 및 재생 조건은 Table 1과 같다.

재생조건을 보면 알 수 있듯이 필터의 측면에서는 큰 열충격을 받는 조건임을 알 수 있다. 매연이 로딩된 상태에서 충분한 산소 농도의 조건(10%이상의 농도: 필터온도의 변화 적음⁸⁾)에서 갑작스런 점화가 발생하고, 유량은 아이들(idle) 운전상태 정

Table 1 Specification of DPF samples and regeneration conditions



sample	A	B
D(mm)*L(mm)	144*280	144*280
Porosity	50%	~50%
Cell size	200cpi	300cpi
Volume	3.9liter	3.9liter
Bonding	oxide	Si
DPF inlet temperature	620°C	
O ₂	10%±1%	
Flow rate	1.2Nm ³ /min	
Soot loading	5g/l ~ 14g/l	

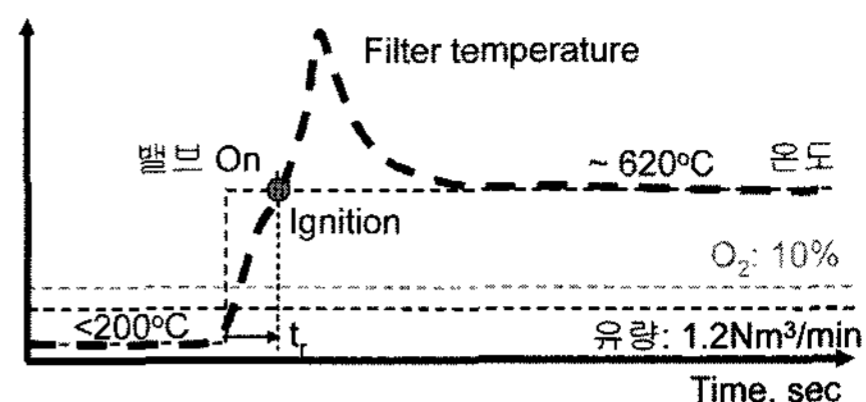


Fig. 2 Schematic test procedure

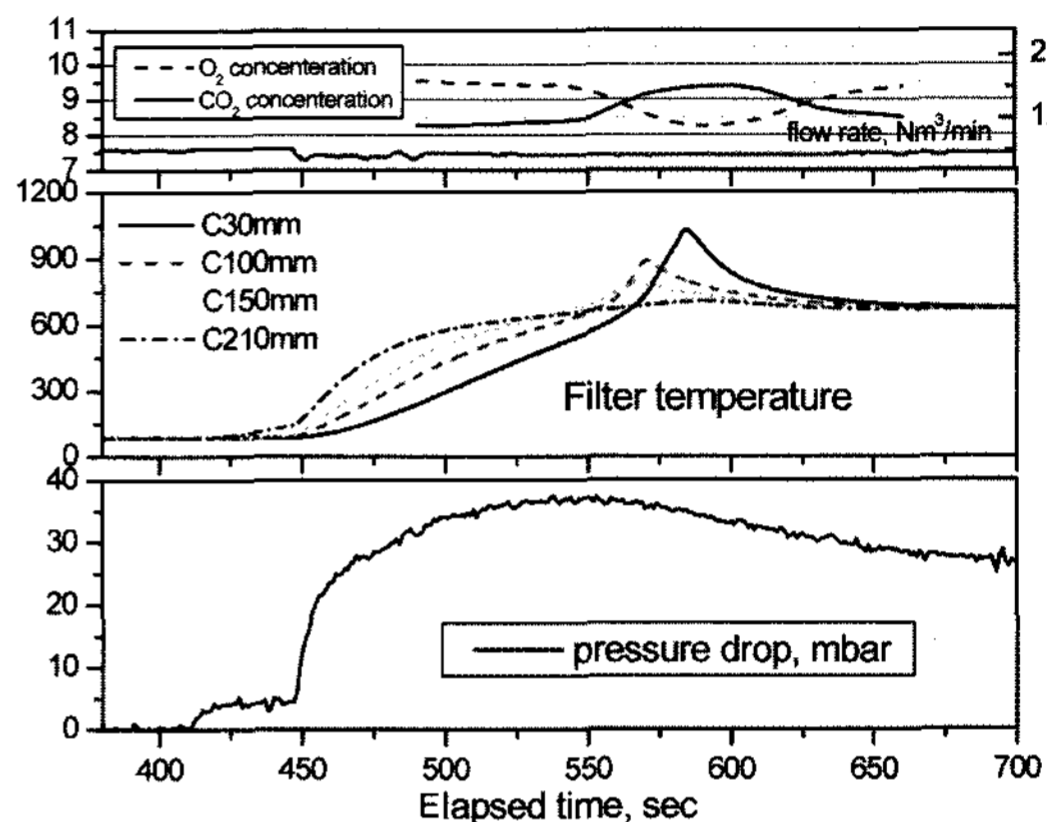


Fig. 3 Gas concentration, filter temperature and pressure difference in unconditional regeneration

도의 유량으로 작아서 매연 산화에 의한 고열이 배기가스를 통해 외부로 빨리 전달되지 못하고 필터 담체에 가해짐으로써 높은 열에 의해 필터가 깨지거나 녹는 등의 파손현상이 발생할 수 있는 조건이다. 이러한 과정을 시간 경과에 따라서 간략하게 정리하면 Fig. 2와 같다.

Fig. 3은 Fig. 2의 과정을 가지고 재생 실험을 수행한 예이다. 그림에서 알 수 있듯이 재생 시에는 로딩된 매연이 급격히 산화하여 필터의 온도가 상승하고 필터 양단의 압력은 감소하기 시작한다. 재생 시의 산소 농도는 매연의 산화의 영향으로 2%정도 감소하게 되고, 그림에서 보는 것처럼 대부분 이산화탄소로 배출되게 된다.

Fig. 4는 이상연소 시에 발생하는 최고 필터온도와 최고필터온도 구배의 측정을 위한 열전대(직경 0.5mm, K type)들의 위치를 보여준다. 축방향의 온도 구배를 보기위해 중앙에서 5곳(30, 60, 100, 150, 210mm)에 열전대를 위치시켰다. 축방향의 온도는 배기가스의 유동을 따르는 방향으로 경향이 잘 알려져 있고 예측이 가능하다. 그러나 반경방향의 구

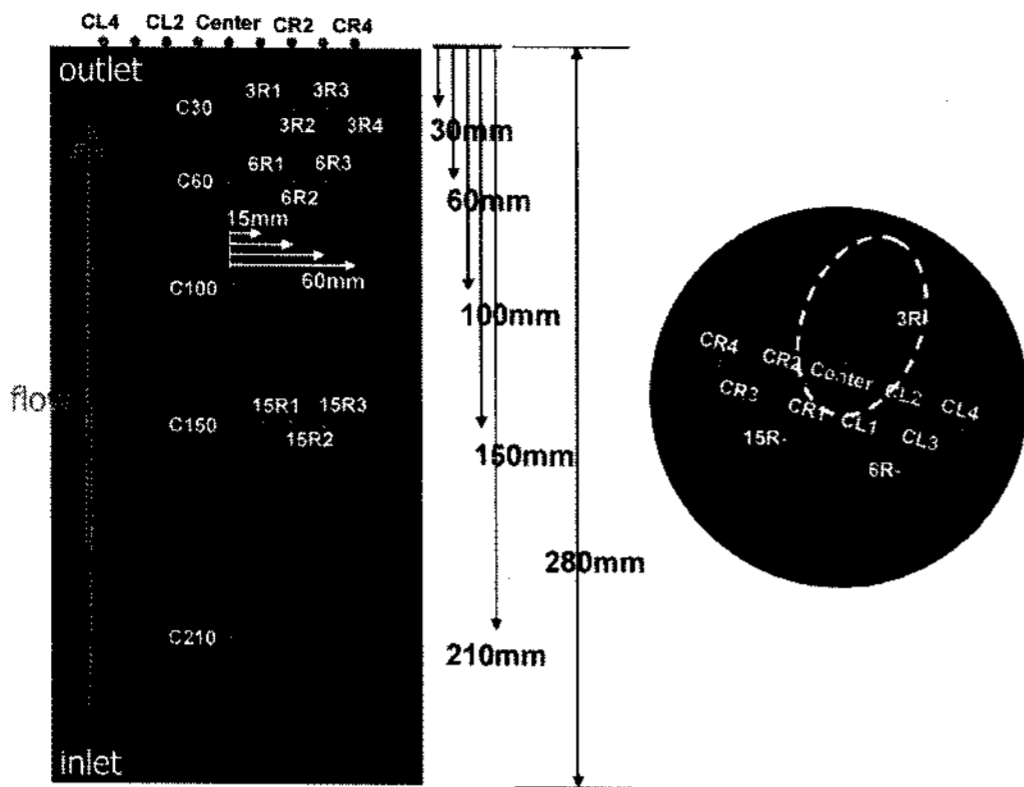


Fig. 4 Thermocouple positions

배는 세그먼트의 접합부의 위치나 매연의 로딩 형태 그리고 유동장의 형태에 따라 달라진다. 따라서 반경방향의 온도 구배의 측정을 위해선 축방향보다 열전대 사이의 간격이 작아야하고, 본 연구에서는 4개의 오픈 셀(open cell, 15mm)마다 열전대를 위치시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Thermal cycling 테스트

이상연소 실험을 수행하기 전에 필터 담체내의 온도 분포 형태를 파악하기 위해 매연을 로딩하지 않은 상태에서 반복적으로 DPF 입구온도를 200°C/900°C로 변화시켰다(Fig. 5). 이때의 DPF 입구의 온도 구배는 초당 87°C로 급격한 온도 변화를 겪는다.

Fig. 6은 담체의 깊이에 따른 반경방향의 온도 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 담체 입구에서는 비교적 균일한 온도의 증가를 보여주고 있지만 출구 쪽으로 갈수록 반경방향의 온도 구배가 크게 나타남을 알 수 있다.

반경방향의 온도 구배가 가장 큰 출구 쪽 30mm 위치에서 반경 방향 온도 구배와 축 방향 온도구배는 Fig. 7과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 축방향의 온도 구배는 위치에 따라서 큰 차이를 보이지 않고, 크기 (~50°C/cm) 또한 반경 방향의 온도 구배(~140°C/cm)에 비해 작음을 알 수 있다. 이러한 온도 구배를 주기적으로 반복하였을 때 두 샘플 모두 성능(crack 유무, 포집효율)에 큰 변화는 없었다.

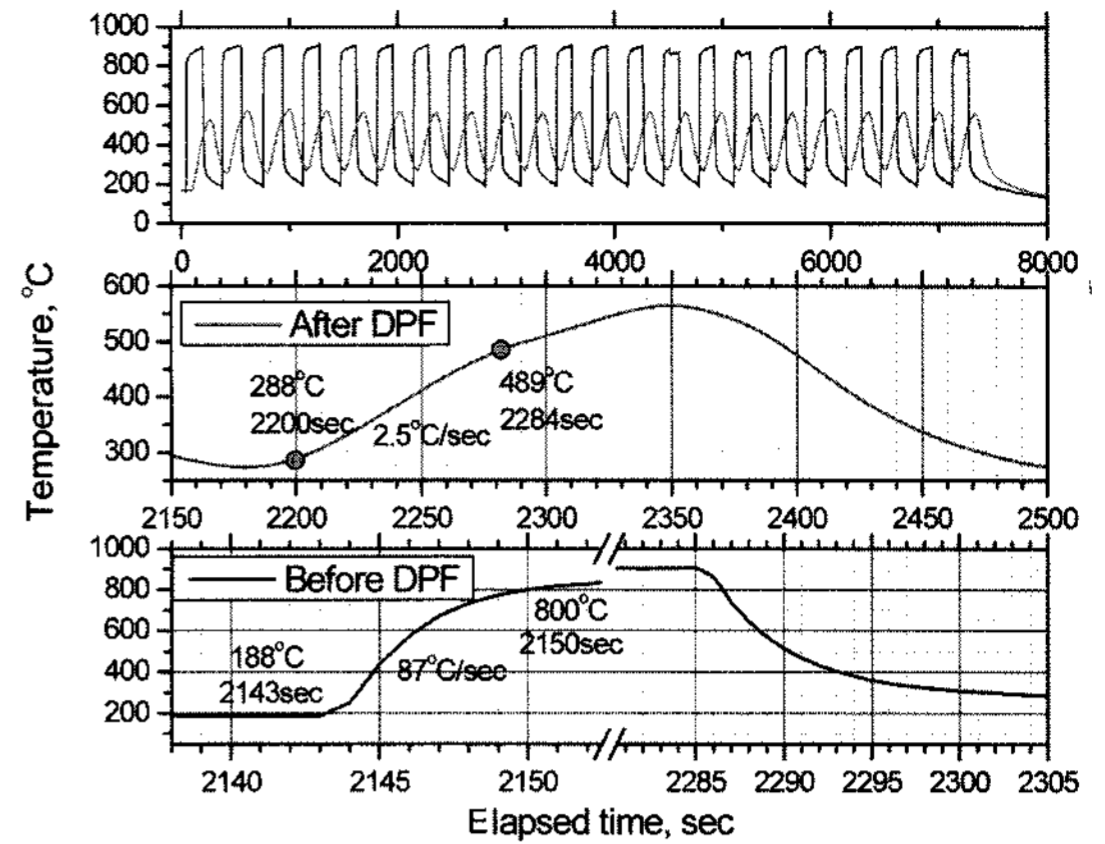


Fig. 5 Thermal cycling test

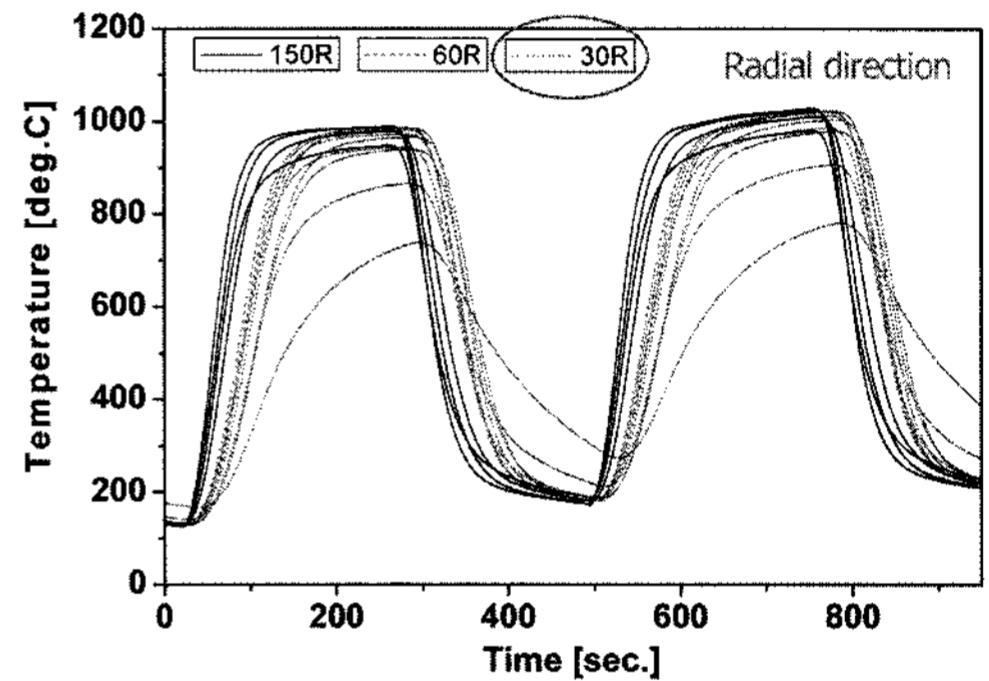


Fig. 6 Temperature distribution in DPF filter

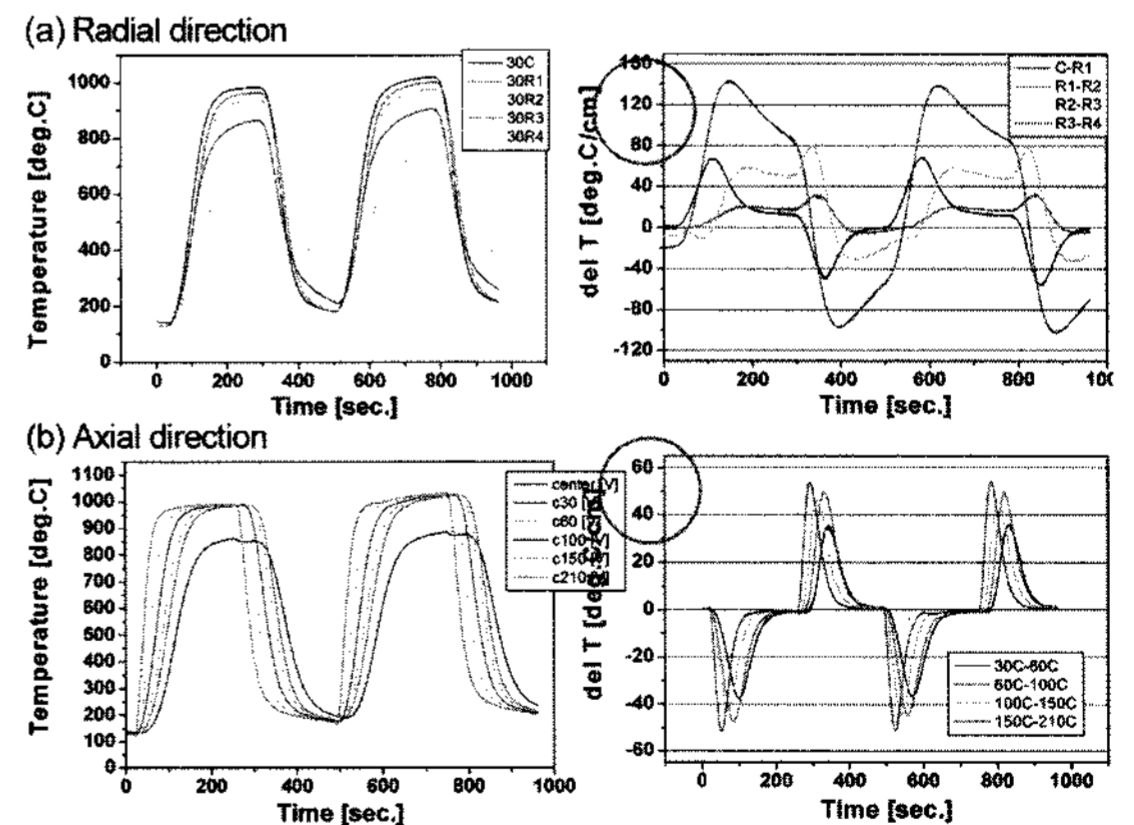


Fig. 7 Axial and radial temperature gradient at 30mm depth

3.2 최대 필터 온도

필터에 PM을 로딩한 후 Fig. 2와 같이 이상연소를 시켰을 때 필터 내부의 온도의 변화는 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 배기가스 온도를 갑자기

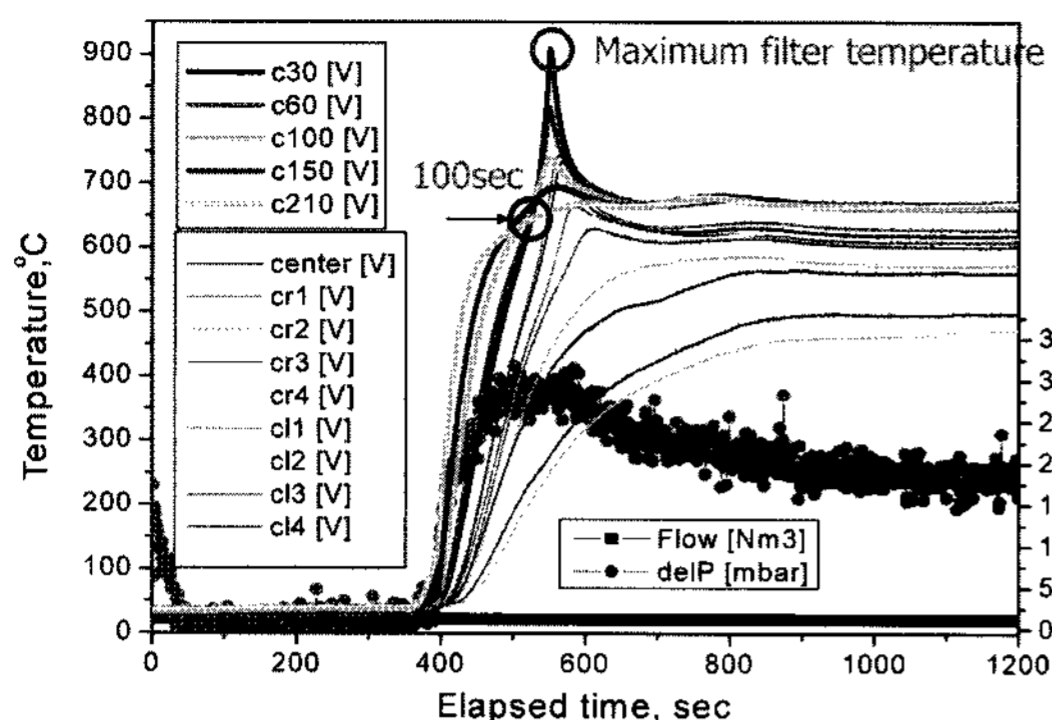


Fig. 8 Temperature and pressure drop profiles during unconditional regeneration (PM loading=8g/l)

620°C로 올리면 필터 내부온도가 급격히 상승하고 온도가 600°C 근처에서 PM의 점화에 의한 발열이 시작되어 온도 증가곡선에서 변곡이 발생한다. 이러한 점화는 필터의 입구 측에서부터 후단으로 전파하기 시작하고, 발열이 누적되기 때문에 필터 내부의 온도는 필터 후단으로 갈수록 온도가 급격히 증가한다. PM의 급격한 발열에 의해 필터의 후단 근처에서 최대 필터온도가 얻어지고 반경방향의 온도 분포로부터 최대 온도 구배를 얻을 수 있다.

Fig. 9는 A 샘플의 PM 로딩에 따른 최대 필터 온도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 PM 로딩량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 로딩량이 작은 경우(<5g/l), 큰 온도 증가가 보이지 않지만 그 이상의 로딩에선 급격한 온도 증가가 관찰되었다. A 샘플의 경우 12g/l 로딩 양에 대해서 1100°C 정도의 필터온도가 측정되었고, 이상연소 후에도 필터의 파손(crack 혹은 melting)이 발생하지

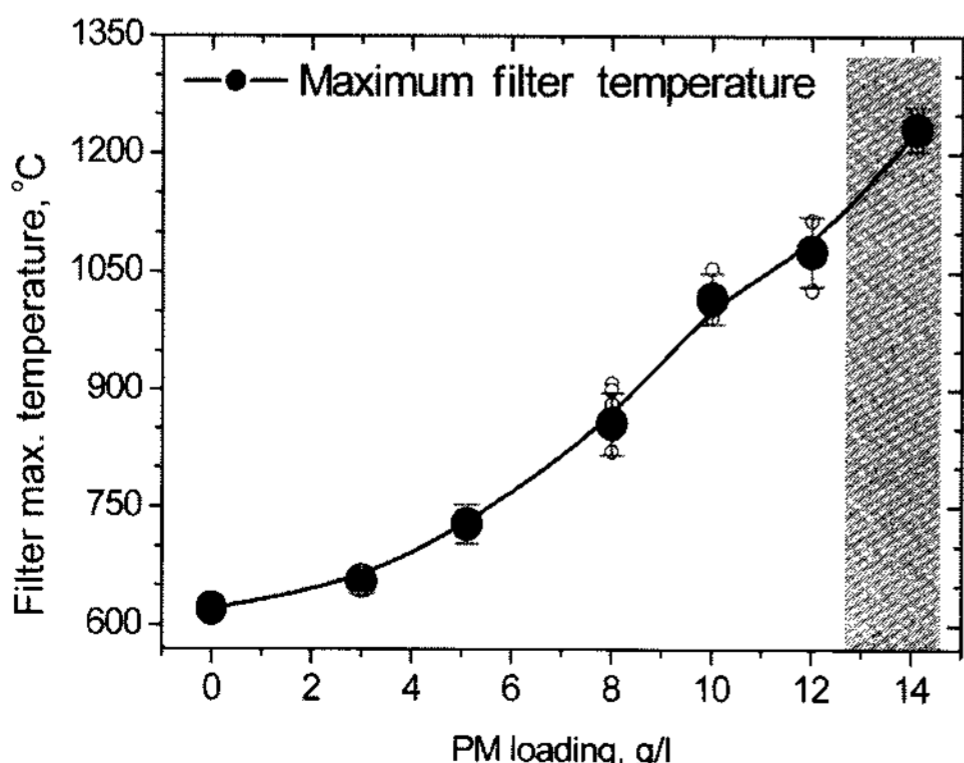


Fig. 9 Maximum filter temperature according to PM loading

않았다. 그러나 로딩량이 14g/l의 경우, 이상연소 후에 DPF 후단에 작은 크랙이 발생하였다.

3.3 이상연소에 의한 필터 파손

A 샘플의 경우, 14g/l에서 필터의 파손이 발생하였다. 필터 파손의 양상은 DPF 후단의 작은 크랙의 형태로 발생하였다. 크랙이 생기기 전 즉 12g/l의 로딩에서 필터의 반경방향의 온도는 Fig. 10과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 필터의 전단보다는 후단에서 반경방향의 온도 구배가 크게 나타나고 후단의 가장자리 부근에서 가장 큰 온도 구배가 발생한다. 이런 온도 구배에 의해 “ring off” 크랙⁶⁾과 같은 DPF 외각의 크랙이 발생하기도하고 세그먼트 내부의 크랙이 발생하는 큰 원인이기도 하다. Fig. 11은 후단 30mm 깊이에서의 반경방향 온도구배와 축 방향 온도구배를 보여준다. 이상연소 시의 축 방향 온도구

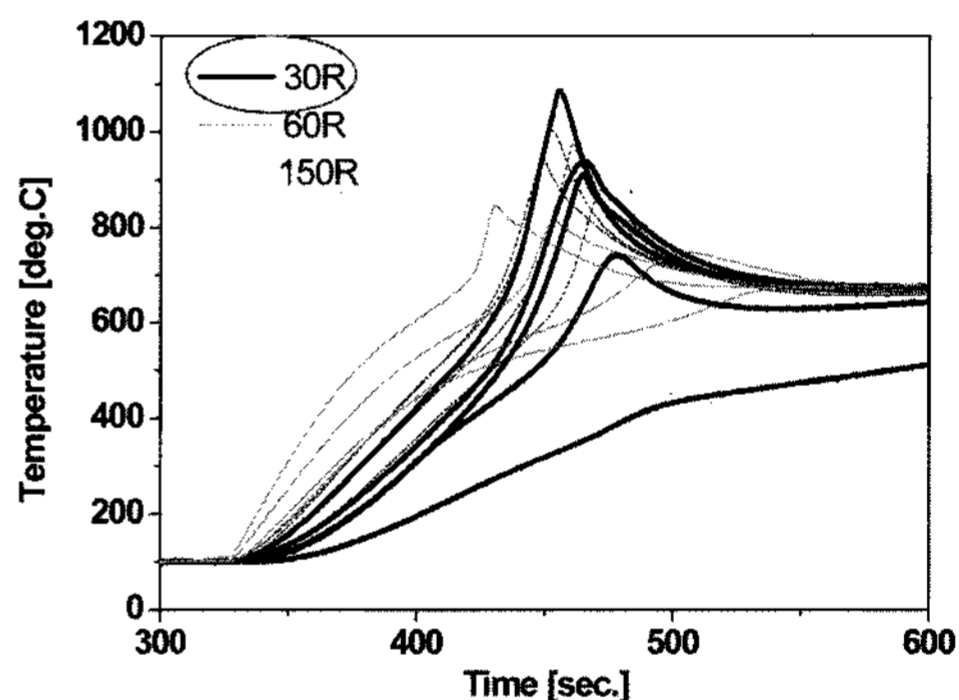


Fig. 10 Radial temperature distribution in DPF filter

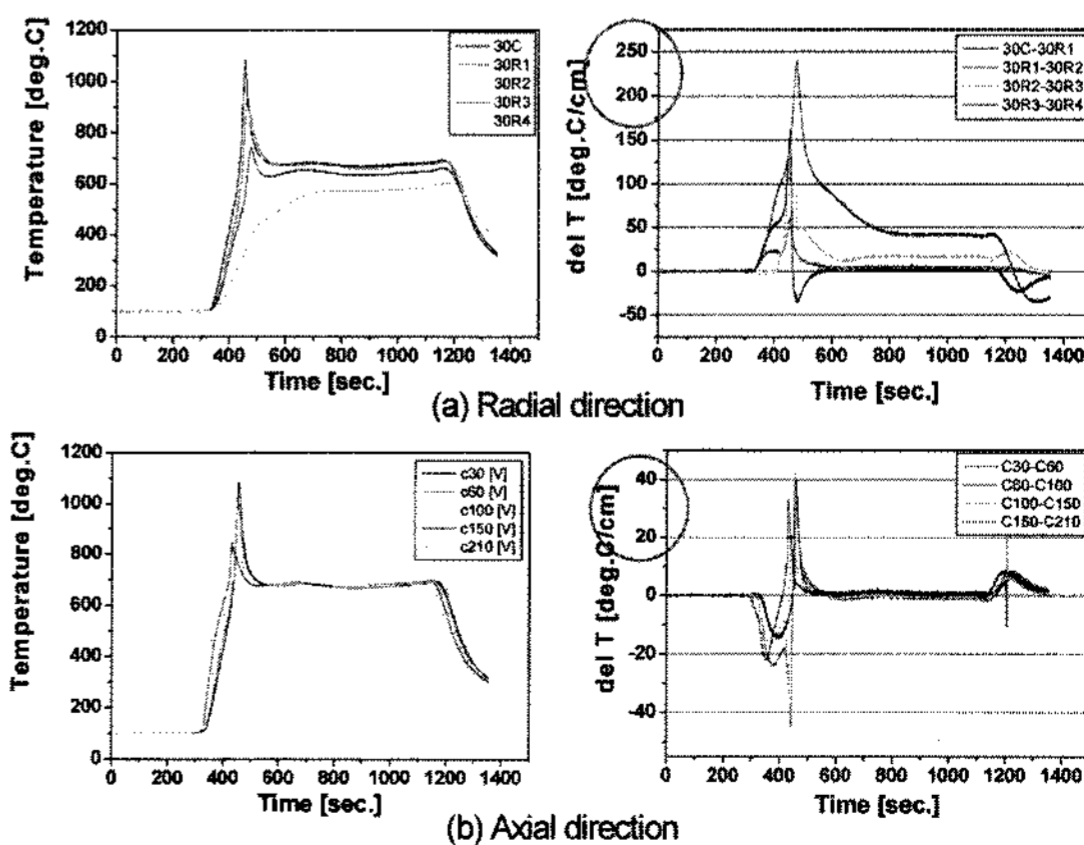


Fig. 11 Axial and radial temperature gradient at 30mm depth (PM loading=12g/l)

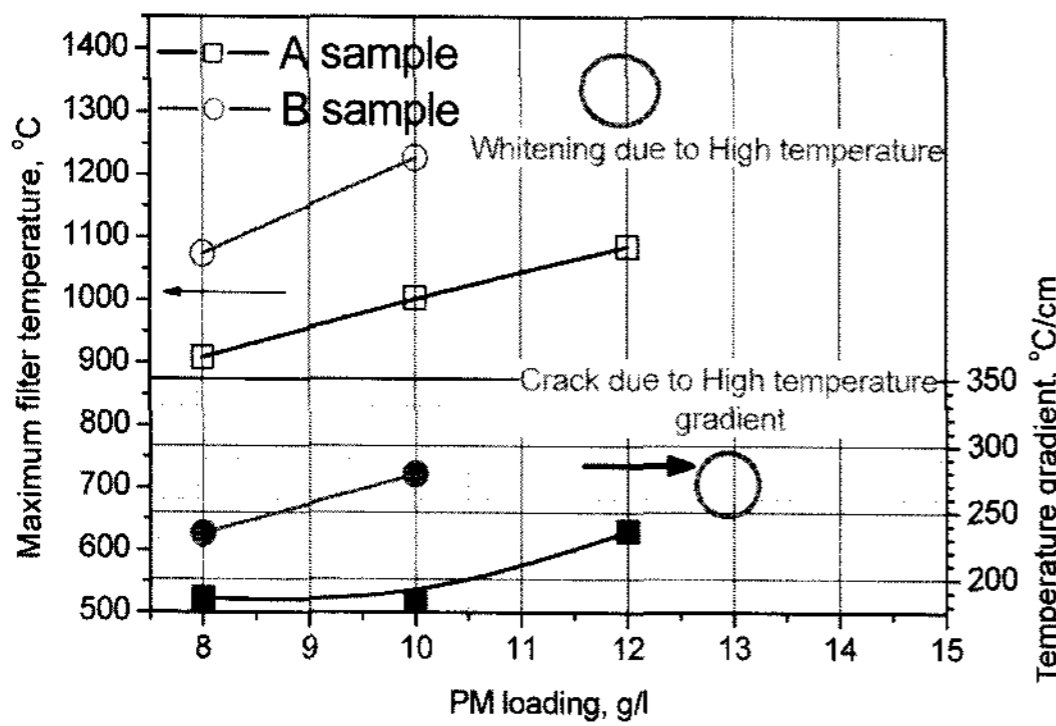


Fig. 12 Maximum filter temperature and radial temperature gradient according to PM loading

배는 thermal cycling 실험과 비슷하게 반경방향 온도 구배에 비해 작음을 알 수 있다. 그러나 반경방향 온도 구배는 PM의 갑작스런 발열에 의해 PM 로딩 양이 증가 할수록 증가하고 12g/l를 로딩 했을 때는 그림에서 보는 바와 같이 DPF 가장자리에서 250°C/cm 정도의 온도구배를 보여준다. 이런 반경방향의 온도 구배에 의한 열응력에 의해 14g/l 로딩 시에 세그먼트의 크랙이 발생하였다.

Fig. 12는 A와 B 샘플의 최대 필터온도와 최대 반경방향의 온도 구배를 나타낸다. A와 B 샘플은 동일한 SiC 필터지만 SiC 알갱이(grain)을 결합하는 물질이 서로 다르다. A 샘플은 산화물에 의해 결합되어 있어서 PM의 이상연소와 같은 고온 산화 환경에 강한 저항성을 갖는다. 그러나 B 샘플은 SiC 알갱이들이 Si에 의해 결합돼있고 그 위를 얇은 산화막에 의해 코팅⁹⁾이 되어있어서 산화 막 코팅이 손실된 부분에서부터 Si의 산화가 발생하기 시작한다. 그리고 Si의 결합에 의해 형성된 SiC 필터는 산화물에 결합된 필터에 비해 낮은 열전도도를 갖는다. 따라서 최대 필터온도 뿐만 아니라 최대반경방향 온도 구배 또한 B 샘플이 A에 비해 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 그리고 B 샘플의 경우 고온의 산화 반응(~1300°C에서 급격한 반응)에 의한 백화(whitening) 현상⁹⁾(식 (1))이 발생(PM loading=12g/l)하여 필터의 셀의 구조가 무너지는 결과를 보였다. 그에 반해 A 샘플의 경우에는 앞서 언급했듯이 반경방향의 온도 구배(~250°C/cm)에 의한 세그먼트의 크랙이 필터 파손의 주된 원인이었다.

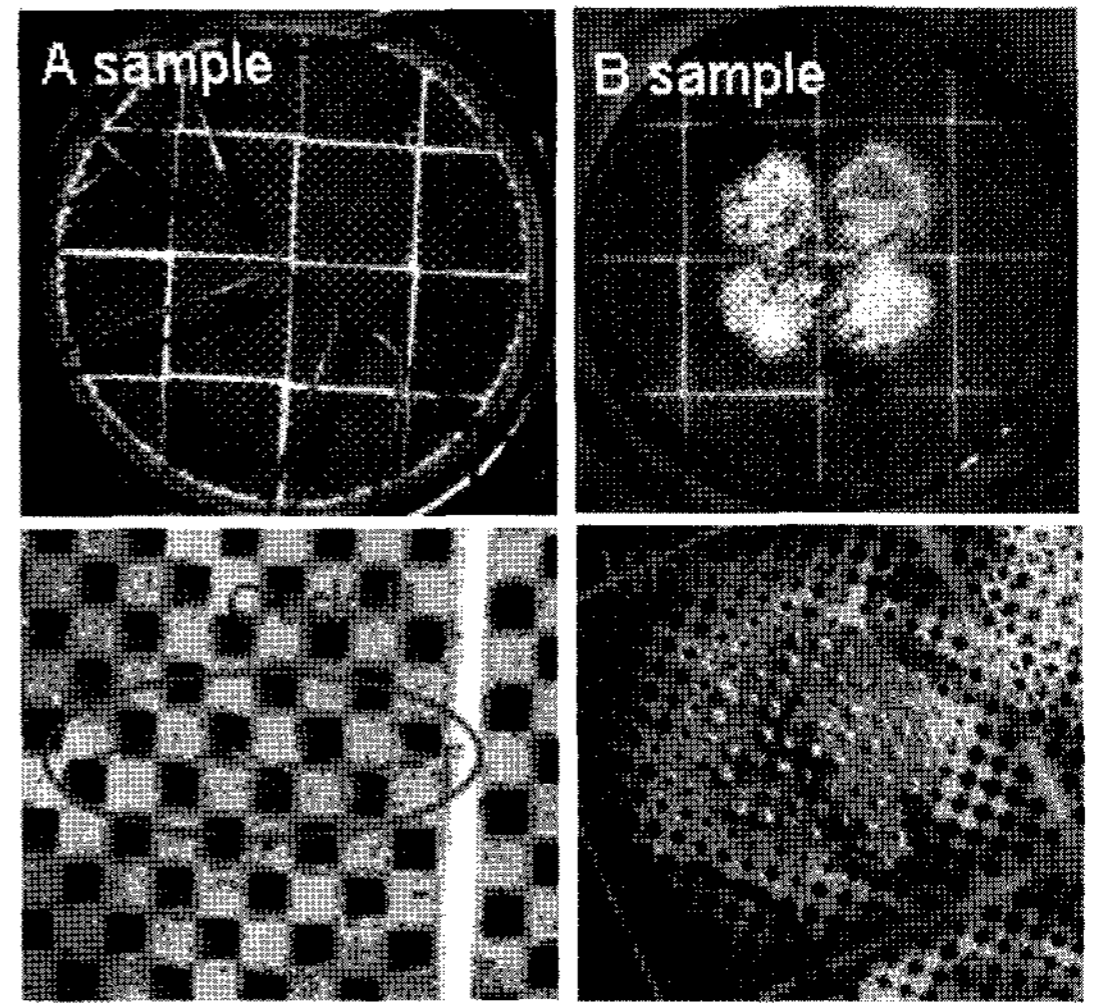


Fig. 13 Different fracture modes in samples(crack and whitening)

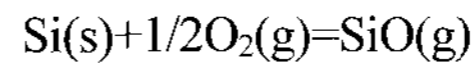
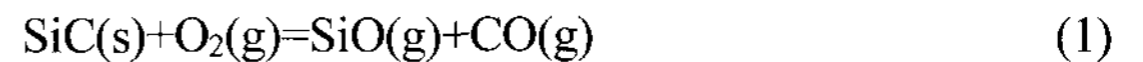


Fig. 13의 사진은 두 샘플의 서로 다른 파손 형태를 보여준다. 앞에서 언급하였듯이 A 샘플의 경우 필터의 외각부근에서 발생하는 큰 온도 구배에 의해 세그먼트 크랙 및 ring crack이 발생하였고, B 샘플의 경우 SiC 결합물질의 산화에 의한 파손의 양상을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 DPF 평가를 위한 엔진 모사 실험 장치를 구성하고 결합물이 다른(산화물, Si+산화막) SiC DPF의 재생(이상연소) 및 열적 특성에 대해 알아보았다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 디젤 엔진의 배기가스 모사를 위해 일반 경유버너를 이용한 DPF 평가 시스템을 구성하였고, 화염 안정화 영역을 넓힘으로써 다양한 DPF 평가를 수행할 수 있다.
- 2) 2종의 SiC DPF의 열적 cycling 실험(200°C/900°C)의 결과 DPF 가장자리에서 반경방향의 온도구배(~140°C/cm)가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 본 실험에 사용된 SiC 필터는 이와 같은 반경방향의 온도 구배에 대해서는 10시간의 반복 실험에서도 필터 파손이 발생하지 않았다.

- 3) PM로딩에 따른 최대 필터온도를 보면, 중심부의 세그먼트에서 발생하고, 로딩양이 작은 경우 (<5g/l) 최대 필터온도가 크게 변화하지 않지만 그 이상의 로딩양에선 큰 온도 증가를 보인다. 반면에 최대 반경방향의 온도 구배는 중심부의 고온 영역의 외각 경계부근에서 관찰되었다.
- 4) PM 로딩을 증가하면 최대 필터온도 뿐만 아니라 반경 방향의 온도 구배 또한 증가하게 되고 산화물 결합에 의한 SiC 필터의 경우 반경방향의 온도 구배(PM loading~13g/l, 반경방향 온도구배~250°C/cm)에 의해 세그먼트에 크랙이 발생하였다. 반면에 Si 결합에 의한 SiC 필터는 고온(PM loading~12g/l, 최대 필터온도~1300°C)에 의한 결합물의 산화에 의해 셀 구조가 무너짐을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 LG 화학 SiC-DPF 평가 결과의 일부로서 LG 화학의 적극적인 지원에 감사드립니다.

References

- 1) M. W. Vincent, P. J. Richards and T. J. Rogers, "Effective Particulates Reduction in Diesel Engines through the use of Fuel Catalyzed particulate Filter," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.3, No.1, pp.1-8, 2002.
- 2) A. G. Konstandopoulos and M. Kostoglou, "Reciprocating Flow Regeneration of Soot Filter," *Combustion and Flame*, Vol.121, pp. 488-500, 2000.
- 3) Y. Y. Ham, D. H. Kim and K. W. Kim, "A Study on the PM Oxidation Characteristics of Electrical Heater DPF System," *Transactions of KSAE*, Vol.14, No.1, pp.183-190, 2006.
- 4) J. W. Lee, G. B. Cho, H. S. Kim and Y. I. Jeong, "A Study on PM Regeneration Characteristics of Diesel Passenger Vehicle with Passive Regeneration DPF System," *T. KSME B*, Vol.31, No.2, pp.188-194, 2007.
- 5) K. Ohno, K. Yamayose, H. Sato and K. Ogyu, "Futher Durability Enhancement of Re-crystallized SiC-DPF," SAE 2004-01-0954, 2004.
- 6) T. Mizutani, M. Ito, N. Masukawa, S. Ichikawa, K. Yuuki, H. Kurachi, T. Toyoshima, T. Ito and I. Lappas, A. Schaefer-Sindlinger and C. D. Vogt, "The Study for Structural Design of the Segmented SiC-DPF," SAE 2006-01-1527, 2006.
- 7) S. Hiranuma, Y. Takeda, T. Kawatani, R. Doumeki, K. Nagasaki and T. Ikeda, "Development of DPF System for Commercial Vehicle-basic Characteristic and Active Regenerating Performance-," SAE 2003-01-3182, 2003.
- 8) K. Ohno, K. Shimato, N. Taoka, H. Santae, T. Ninomiya, T. Komori and O. Salvat, "Characterization of SiC-DPF for Passenger Car," SAE 2000-01-0185, 2000.
- 9) S. Ichikawa, Y. Uchida, A. Kaneda and T. Hamanaka, "Durability Study on Si-SiC Material for DPF(2)," SAE 2004-01-0951, 2004.