

Microwave Regenerated Filters

金萬永, 선임연구원乙, 崔圭勳, 수석연구원, 디젤엔진시험팀, 譯
W. Addy Majewski, PhD, President of Ecopoint Inc., <http://www.dieselnet.com/tg.html>, 著

Abstract

디젤의 그을음(soot)은 극초단파(microwave)를 흡수(adsorption)하는 성질을 가지고 있다. 그을음(soot)의 이러한 성질을 이용하여, 매연여과장치(diesel particulate filter)의 재생(regeneration) 장치에 극초단파(microwave)를 주사(irradiation)함으로써 그을음(soot)을 가열(heating)시킬 수 있다. 만일 이러한 방법이 극초단파(microwave)를 투과시키는 매질로 구성된 필터담체(substrate)와 함께 사용된다면 입자상물질을 선택적으로 가열시킬 수 있다. 한편, 만일 필터의 재질(filter material)이 극초단파의 에너지(microwave power)를 흡수하지 않고 통과시키는 매질일 경우, 극초단파 주사(microwave irradiation)는 그을음(soot)과 필터를 모두 가열시키는 데에 사용될 수 있다.

1. Microwave Heating

1.1 Process Principle

일반적으로 라디오파(radio frequency, RF, wave)로 알려진 극초단파(microwave)는 500 MHz ~ 100 GHz 범위의 주파수를 갖는 전자기파(electromagnetic wave)로서, 전자통신 분야에 주로 사용되고 있다. 한편, 고주파 극초단파(high frequency microwave)를 효율적으로 생성시키는 전자관(電磁管, magnetron)이 발명된 이후, 1960년대 후반 극초단파 오븐(microwave oven)이 시장에 출시되면서 극초단파(microwave)는 가열(heating) 용으로 그 사용이 점점 증가하고 있다.

극초단파 가열(microwave heating)은 유전체(誘電體, dielectric material)에 의한 RF 에너지의 흡수(absorption) 현상에 기초를 두고 있다. 즉, “수용체(susceptor)”라고 부르는 극성(polar component)을 갖는 분자들이 전자기장에 놓이면 진동을 하는데, 이러한 진동은 분자의 운동에너지(kinetic energy)를 증가시키고, 이 운동에너지는 최종적으로 열로 소산된다. 한편, 물질의 유전체(dielectric)의 특성은 그 자체의 복소(complex)유전율(誘電率, permittivity), ϵ 으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (1)$$

여기에서 실수부(real part), ϵ' 는 유전상수(誘電常數, dielectric constant)를 나타내고 허수부(imaginary part), ϵ'' 은 유전손실계수(dielectric loss factor)를 나타낸다. 유전상수(dielectric constant)는 전기장

(electric field)의 형태로 물질에 저장되는 에너지의 양을 나타내고, 유전손실계수(dielectric loss factor)는 물질이 얼마나 많은 에너지를 열로 소산시키는지 나타내는 척도로 사용된다.

한편, 물질이 극초단파 주사(microwave irradiation)에 의해 가열되는 경우, 수용체(susceptor)의 단위체적당 열로 변환되는 RF 에너지의 양은 다음과 같은 식으로 표현되는 전기장의 주파수(electric field frequency), 강도(intensity), 그리고 유전손실계수(dielectric loss factor)의 함수이다.

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (2)$$

where,

P : power, W/m³

f : field frequency, Hz

ϵ_0 : absolute permittivity, 8.854×10^{-12} F/m

ϵ'' : dielectric loss factor, dimensionless

E : electric field density, V/m

페라이트(ferrite)와 같이 자성(magnetic)을 띠고 있는 물질들은 전자기장(electromagnetic field)의 전기 성분, E, 그리고 자기 성분, H 모두에 의해 가열될 수 있다. 한편, 위 식 (2)에서 유전손실계수(dielectric loss factor), ϵ'' 와 전기장의 세기(electric field intensity), E를 자기장 손실계수(magnetic loss factor), μ'' 와 자기장의 세기(magnetic field intensity), H로 각각 치환하여 자기장, H와 관련된 RF 에너지 관계식을 얻을 수 있다.

극초단파 가열(microwave heating)은 일반적인 가열(conventional heating)과 상당히 다르다. 즉, 금속의 일반적인 가열(conventional heating)의 경우, 먼저 대류와 복사열 전달에 의해 열이 표면으로 전달되고, 그 후, 매질의 내부는 표면으로부터의 전도열 전달에 의하여 가열된다. 하지만 극초단파 가열(microwave heating)의 경우 에너지는 가열하고자 하는 물질 그 자체에 집중되어 매질의 내부가 먼저 가열되고 나서 내부에서 외부로 열이 전달되어 표면이 가열된다.

극초단파 가열(microwave heating)의 또 다른 특징으로는 이의 선택성(selectivity)을 들 수 있다. 일부 물질은 RF 에너지의 강한 흡수체(absorber)이지만 일부 물질은 전혀 그렇지 않다. 일반적으로, 유전상수(dielectric constant)와 유전손실계수(dielectric loss factor)가 큰 물질들은 극초단파(microwave)에 의해 효과적으로 가열되는 물질이다. 이러한 물질로는, 물(water), 카본 블랙(carbon black), 그리고 디젤의 그을음(diesel soot) 등이 있다. 하지만, 유전상수(dielectric constant)와 유전손실계수(dielectric loss factor)가 작은 대부분의 세라믹 물질들은 RF 에너지를 흡수하지 않고 거의 투과시켜 버린다. 이러한 물질의 예로는, 코디어라이트(cordierite), 그리고 일부 매연여과장치(diesel particulate filter)의 담체(substrate)로 사용되는 세라믹 등을 들 수 있다. 이 물질들은 실질적으로 극초단파(microwave)를 투과시킨다. 한편, 금속은 극초단파 에너지(microwave energy)의 완벽한 반사체(reflector)이다. 따라서, 금속 덕트(metal duct)는 RF 에너지의 도파관(導波管, waveguide)으로 사용될 수 있다.

복소(complex)유전율(誘電率, permittivity), ϵ 에 관한 데이터는 문헌상에서 찾기가 쉽지 않

다. 어렵게 구한 데이터들도 종종 불완전한 경우가 대부분이다. 또한, 서로 다른 저자에 의한 서로 다른 측정기술과 매개변수로 인하여 데이터가 서로 일치하지 않는 경우가 대부분이다. 디젤의 그을음(diesel soot)을 포함한 일부 물질의 유전체 물성치(dielectric property)가 아래의 Table 1에 나와 있다. 이 데이터들은 비록 서로 약간의 차이가 있기는 하지만, 디젤의 입자상물질은 RF 에너지의 흡수체(absorber)이고, 코디어라이트(cordierite)는 그렇지 않음을 확실히 알 수 있다. (이러한 특성은 극초단파를 이용한 세라믹 매연여과장치의 그을음 부착량의 측정에 이용될 수 있다. (Walton, 1992))

Table 1 Dielectric Properties of Selected Materials

Material	Dielectric constant, ϵ'	Dielectric loss factor, ϵ''	Reference
Diesel soot 1	10.695	3.561	(Ma, 1997)
Diesel soot 2	9.578	2.854	
Diesel soot 3	8.6	7.4	(Babu, 1995)
Cordierite 1	2.873	0.138	(Ma, 1997)
Cordierite 2	1.0	0.00006	(Babu, 1995)
Gamma- Al_2O_3	3.006	0.170	(Ma, 1997)
SiO_2	3.066	0.215	
TiO_2	7.020	0.430	
ZrO_2	4.214	0.186	

가열 매질내 극초단파 에너지(microwave energy)의 퇴적(deposition)은 간혹 RF 공동(cavity)이라고 불리는 매질의 형상(medium geometry)에 따라 달라진다. 매연여과장치의 경우 공동(cavity)은 금속필터(metallic filter)의 용기(container)에 의해 정의된다. 한편, 금속 도파관(導波管, waveguide)에 도달한 RF 에너지가 금속의 벽에 부딪히면, 에너지는 벽에서 반사되어 전기장(E-field) 및 자기장(H-field)의 정상파(定常波, standing wave)의 형태를 띤다. 극초단파 오븐(microwave oven) 안에서 전기장(E-field)의 분포는 전기장의 강도가 높은(high electrical field intensity) 산(peak) 및 강도가 낮은(low intensity) 골(valley)로 이루어진 2차원 배열로 표현될 수 있다. 한편, 유전체 손실 물성치(dielectric loss property)를 갖는 물질의 경우 전기장 정상파의 산(E-field standing wave peak)에 놓여 있을 때에만 가열이 되고 골(valley)에 놓여 있을 때에는 가열이 되지 않는다. 가정용 극초단파 오븐(microwave oven)을 생산하는 업체들은 이러한 불균일한 가열(uneven heating)을 피하기 위하여 전지장(electrical field) 내의 음식을 회전판에 올려 회전시키거나 그리고/또는 금속베인(metal vane)을 이용하여 전기장을 주기적으로 재분포시키는 방법을 사용하고 있다.

1.2 Energy Efficiency

전기에너지를 RF 피열물(load), 즉, 음식의 열에너지로 바꾸는 가정용 극초단파 오븐(microwave oven)의 효율은 약 50%이다. 가정용 오븐(consumer oven)은 넓은 범위의 크기와 종류를 처리할 수 있어야 하기 때문에 부하(load)와 RF 에너지원(power source)의 파라미터를 일치시키기가

쉽지 않다. 단일물질을 가열하는 특별한 시스템의 경우 60 ~ 70 %의 높은 효율도 가능하다.

1.3 Commercial Components and Costs

역사적인 변천과 전자기 스펙트럼(electromagnetic spectrum)의 사용을 검토하는 국제위원회의 승인을 거쳐서 극초단파 가열(microwave heating)에 사용되는 전자기장의 주파수(electromagnetic field frequency)가 결정된다. 일반적으로, 산업용에 이용되는 주파수는 915, 2,450, 및 3,000 MHz인데, 이 중에서 2,450 MHz의 주파수가 가정용 오븐(consumer oven)에 가장 많이 사용된다.

폭 넓은 연구개발과 이에 따른 양산이 진행됨에 따라 각 구성요소의 가격은 상대적으로 낮아지고 있다. 예를 들어, 일반적인 650 W의 전자관(電磁管, magnetron)의 제조가격은 약 \$15에 불과할 뿐만 아니라 전력공급장치(power supply unit)를 포함하여도 \$20 ~ \$40에 지나지 않는다. (Walton, 1990) 한편, 650 W 전자관(magnetron)의 평균수명은 약 5,000 시간이다.

2. Diesel Filter Experience

2.1 Microwave Filter systems

매연여과장치(diesel filter)에서 극초단파를 이용한 재생(microwave regeneration)에는 다음과 같은 두가지 방법이 주로 사용된다. 즉,

- heating of the soot accumulated in the filter by microwaves, and
- heating of soot and the microwave-absorbing filter material.

위의 두가지 방법 중 두번째 방법의 경우 다음과 같은 사항을 필요로 한다. 즉, (1) 극초단파 수용체(microwave susceptor)를 필터담체(substrate)에 혼합시키거나 혹은 담체(substrate)의 표면에 코팅하고, 또는 (2) 필터의 담체(substrate) 그 자체를 RF를 흡수하는 재질로 만드는 것이다.

1990년에 Walton은 벽유동형 필터(wall-flow filter) 채널의 막음 물질(channel plug material) 속에 페라이트 수용체(ferrite susceptor)를 혼합하는 방법을 제안하였다. 그는 코디어라이트 모노리스(cordierite monolith) 본래의 채널 막음(plug) 재료를 페라이트(ferrite)를 함유한 막음(plug) 재료로 교환하여 실험을 수행하였다. 페라이트(ferrite)는 자성물질(magnetic material)로서 RF 열복사(radiation)의 전기 및 자기 성분 모두를 흡수할 수 있는 성능이 좋은 극초단파 수용체(microwave susceptor)이다. 하지만, 페라이트(ferrite)는 필터의 담체 재질과 융합(compatibility)이 되지 않는다는 단점을 가지고 있다. 이에 따른 열팽창계수(thermal expansion coefficient) 및 다른 물성치들의 불일치(disparity)로 인하여 많은 기계적 그리고 열적 내구문제가 발생할 수 있다.

한편, 탄화규소(silicon carbide, SiC)는 디젤필터의 담체(substrate)로 많이 사용되는 또 다른 물질로서, 하지만 코디어라이트(cordierite)와는 달리, RF의 흡수능력을 가지고 있을 뿐만 아니라 극초단파(microwave)에 의한 가열(heating)이 가능한 물질이다. 극초단파를 재생에 이용하는 탄화규

소 필터(microwave-regenerated SiC filter)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있지만 아쉽게도 아직까지 발표된 데이터는 거의 없는 실정이다. 발표된 연구의 대부분은 비수용체(non-susceptor) 필터담체(substrate)에 부착되는 그을음(soot)의 극초단파(microwave heating)에 관한 연구들이다.

디젤필터의 극초단파 재생(microwave regeneration)에 관한 연구는 주로 RF 열복사(radiation)와 관련된 수학적 모델링, 재질, 그리고 그을음(soot)의 특성화 및 시험실에서의 재생(regeneration) 실험 등에 초점이 맞추어져 왔다. 하지만 극초단파(microwave) 필터 시스템을 디젤차량에 최적화하기 위한 시도는 거의 이루어지지 않았다. 한편, 문헌상에 발표된 이러한 시스템의 실차시험(field test) 결과를 살펴보면, 낮은 재생효율(low regeneration efficiency)에서 시작하여 필터의 용융(melting)에 이르기까지 다양한 문제들이 있는 것으로 알려지고 있다.

시험실에서 실험을 위해 만들어진 필터시스템은 주로 오프라인 재생(off-line regeneration), 즉, 재생(regeneration)이 일어나고 있는 동안에 배기가스는 필터를 지나지 않고 우회(bypass)하도록 설계되어 있다. 이와 같은 일반적인 시스템 구성도가 아래의 Figure 1에 나와 있다.

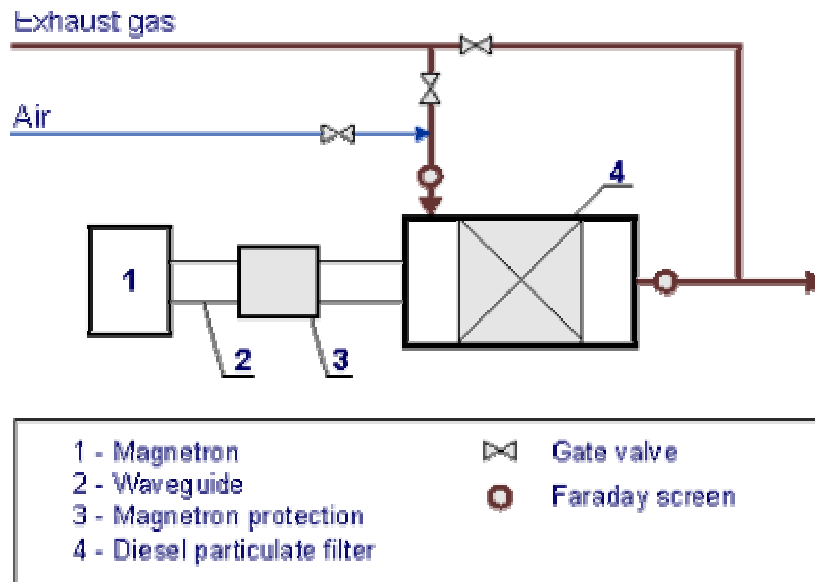


Figure 1 Schematic of a Microwave Regeneration Setup

전기에너지와 연결되어 있는 전자관(電磁管, magnetron)에서 생성된 극초단파(microwave)는 도파관(導波管, waveguide)을 거쳐 필터담체(substrate)로 들어간다. 도파관(waveguide)은 단순한 덕트(duct) 또는 파이프(pipe)로서 열복사(radiation)를 전달하는 기능을 담당한다. 이 관은 극초단파(microwave)를 반사시키고 극초단파 에너지(microwave energy)의 새어나감(leak)을 방지하기 위하여 금속(metal)으로 만들어진다. 이와 함께, 전자관(magnetron)을 고온 및 배기가스와의 직접 접촉을 방지하기 위한 많은 특별한 장치들이 필요하다. 전자관의 보호 시스템(magnetron protection system)으로는 수냉식 열교환기, 기계적 밸브, 그리고 수정유리창(quartz glass window) 등이 사용된다. (Gautam, 1999; Ning, 1999) 한편, 시스템에서 극초단파(microwave)의 새어나감(leakage)을 방지하기 위하여 배기가스의 입구와 출구 부분에 패러데이 스크린(Faraday screen)을 설치한다.

발표된 실험연구의 대부분은 2단계 재생(two phase regeneration) 방법을 채택하고 있다. 즉, 먼저, 극초단파(microwave)를 이용하여 그을음(soot)을 가열시킨다. 이 때 배기가스는 필터를 통과하지 않도록 한다. 이러한 예열(preheating) 과정을 거친 후, 그을음(soot)의 산화를 종결시키기 위하여 미리 입력되어 있는 일정한 양의 공기가 필터를 통과하도록 한다. 이러한 재생(regeneration) 방법을 적용시키는 경우, 공기가 유입되는 순간 상대적으로 빠른 시간 안에 입자상물질의 급속한 산화가 일어난다. 이에 대한 자세한 그림이 아래의 Figure 2에 나와 있다. 여기에서, 공기의 분사 후 급속한 연소가 일어나서 아주 짧은 시간에 그을음(soot) 연소생성물의 피크(peak)가 발생하고 있음을 알 수 있다. (Gautam, 1999) 한편, 필터가 수용할 수 있는 그을음(soot)의 최대 부착량(maximum load)을 초과하여 그을음(soot)이 부착되면 필터담체(substrate)의 열적 손상(thermal damage)이 발생할 수도 있다. 실제로 일부 연구에서는 필터담체(substrate)의 용융(melting) 그리고/또는 크래킹(cracking)이 보고된 바 있다.

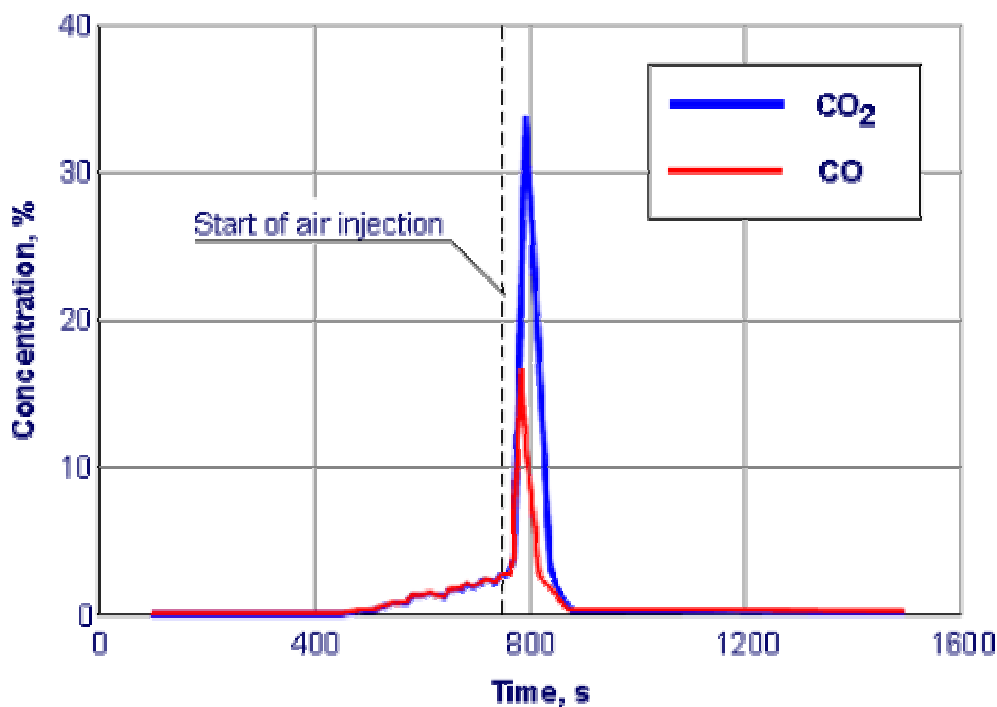


Figure 2 CO/CO₂ Traces During Microwave Regeneration

2.2 Advantages and Drawbacks of Microwave Regeneration

극초단파 가열(microwave heating)의 가장 큰 장점은 필터 공간내에 포집되어 있는 디젤 입자상물질에 에너지를 직접 전달할 수 있다는 것이다. 이러한 현상은, 재생공기(regeneration air)와 함께 열이 공급되어 그을음이 부착된 필터(soot-laden filter)의 입구영역부터 가열(heating)이 시작되는 전기재생(electric regeneration) 또는 연료버너 재생(fuel burner regeneration) 방법과 완전히 다른 개념이다. 만일 RF 에너지의 흡수를 자유롭게 제어할 수 있다면 극초단파 재생(microwave regeneration)은 전기(electric) 및 버너(burner) 재생(regeneration) 시스템보다 재생법(regeneration strategy)의 설계

및 제어에 있어서 훨씬 많은 유연성(flexibility)을 제공할 수 있다.

한편, 일부의 연구결과에 따르면, 극초단파(microwave)를 이용하는 경우 재생(regeneration) 성능의 향상 효과가 있는 것으로 밝혀지고 있다. (Ma, 1997) 극초단파(microwave)를 이용하는 경우 그을음의 연소온도(soot burn-off temperature)는 전기가열(electric heating)에 의한 경우보다 약 200 °C 정도 낮는데, 이는 디젤의 그을음(diesel soot)은 극초단파에 의한 재생(microwave-assisted incineration)에 특히 적합함을 가리키는 것이다. 하지만, 이를 검증하기 위한 보다 많은 연구가 요구되고 있다.

극초단파 재생 필터(microwave regenerated filter)의 가장 큰 문제점은 RF 에너지의 균일한 조사(irradiation)/흡수가 어렵다는 것이다. 결과적으로 필터에 불균일한 재생(uneven regeneration), 즉, 불완전 재생(incomplete regeneration), 또는 담체(substrate)의 손상을 가져올 수 있는 과도한 열방출(excessive exothermal heat release)을 초래할 위험이 있다.

일부 연구에서는 극초단파의 새어나감(microwave leakage) 현상이 관측되었다. 극초단파 에너지(microwave energy)의 새어나감(leak) 현상은 외부의 전기회로와 간섭을 일으켜 열효율(thermal efficiency)을 떨어뜨릴 수 있다. 이러한 극초단파의 새어나감(microwave leak)을 방지하기 위하여 실험장치의 주변에 패러데이 장막(Faraday cage)을 설치한다.

참 고 문 헌

- 1 Babu, V. S., Farinash, L., and Seehra, M. S., 1995, "Carbon in Diesel Particulate Matter : Structure, Microwave Absorption, and Oxidation," J. Mater Res., 10(5), pg. 1075-1078.
- 2 Gautam, M., Popuri, S., Rankin, B., and Seehra, M., 1999, "Development of A Microwave Assisted Regeneration System for A Ceramic Diesel Particulate System," SAE 1999-01-3565.
- 3 Ma, J., Fang, M., Li, P., Zhu, B., Lu, X., and Lau, N. T., 1997, "Microwave-Assisted Catalytic Combustion of Diesel Soot," Appl. Catal. A, 159, pg. 211-228.
- 4 Meredith, R., 1998, "Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating," IEE, ISBN #0852969163.
- 5 Ning, Z., and He, Y., 1999, "Experimental Study on Microwave Regeneration Characteristics of Diesel Particulate After-Treatment Systems," SAE 1999-01-1470.
- 6 Walton, F. B., Hayward, P. J., and Wren, D. J., 1990, "Controlled Energy Deposition in diesel Particulate Filters During Regeneration by Means of Microwave Irradiation," SAE 900327.
- 7 Walton, F. B., et al., 1992, "On-line Measurement of Diesel Particulate Loading in Ceramic Filters," SAE 920564.