

Wall-Flow Monoliths

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

벽유동형 모노리스(wall-flow monolith)는 가장 널리 사용되는 디젤필터(diesel filter)로서, 유입된 배기가스는 출구가 막혀있기 때문에 필터로 작용하는 다공질벽(porous wall)을 통과하여 옆통로(channel)의 출구로 빠져나갈 수 있는 구조, 즉, 통로(channel)의 입구와 끝이 교대로 막혀 있는 관통형(flow-through) 촉매지지체(catalyst support)로 구성된다. 벽유동형 모노리스(wall-flow monolith)는 코디어라이트(cordierite)와 같은 특별한 세라믹 재질로 만들어진다. 서로 다른 크기의 필터가 개발되어 상업화되어 있다.

1. Monolith Construction

촉매변환기(catalytic converter)로 사용되는 관통형 지지체(flow-through support)로 구성되는 세라믹 벽유동형 모노리스(ceramic wall-flow monolith)는 가장 널리 사용되는 디젤필터로서, 다른 디젤필터와는 달리 단위체적당 높은 표면적 및 높은 여과효율(filtration efficiency)을 자랑한다. 모노리스 디젤필터(monolithic diesel filter)는 수많은 통로(channel)들이 축방향으로 서로 평행하게 배열되어 있는 구조를 가지고 있다. 디젤필터 모노리스(monolith)는, 아래의 Figure 1과 2에 나와 있듯이, 통로(channel)의 입구와 출구가 교대로 막혀 있는 “관통형 모노리스(flow-through monolith)” 형태로 되어 있다. 이웃하는 채널(channel)의 입구와 출구가 교대로 막혀 있어서 디젤 배기가스는 기계적 필터(mechanical filter)로 작용하는 다공질의 담체(porous substrate) 벽면을 통과하게 되며 이때 입자상물질은 유입된 통로(channel)에 포집된다. 모노리스 벽유동형 디젤필터(monolith wall-flow diesel filter)는 코디어라이트(cordierite) 또는 탄화규소(silicon carbide, SiC)로 만들 수 있다.

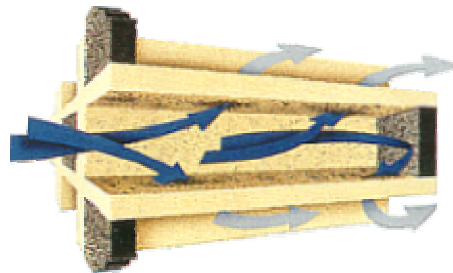


Figure 1 Gas Flow in a Monolith Filter (Courtesy of Corning Inc.)

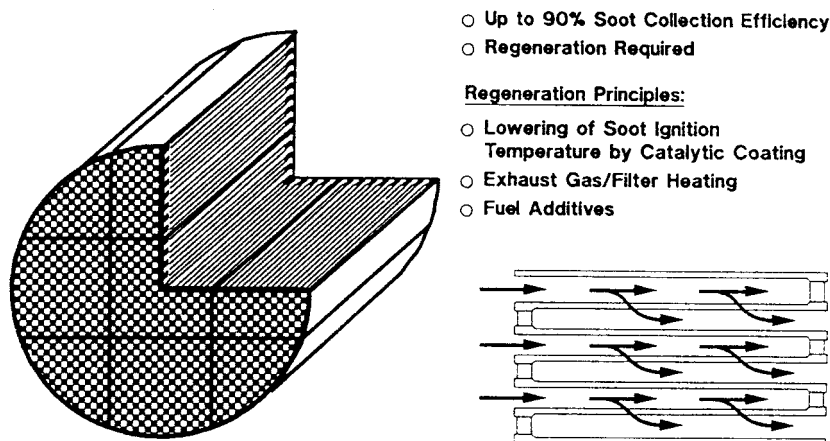


Figure 2 Operation Principle of the Ceramic Wall Flow Diesel Particulate Filter

다공질 필터벽(porous filter wall)은 미세하게 분포된 세공(細孔, pore)을 가지고 있는데, 이 세공(pore)은 제조공정 중에 주의깊게 조절되어야 한다. 일반적인 세공(pore)의 크기는 약 10~15 μm 정도이다. 이전에 사용되었던 재료의 경우 세공(pore)의 지름은 약 35 μm 정도였는데, 현재는 폐기되어 사용되지 않는다. 한편, 모노리스 벽유동형 필터(monolith wall-flow filter)의 여과(filtration) 메커니즘은 “표면여과(cake filtration)” 및 “내부여과(depth filtration)”의 조합으로 구성된다. “내부여과(depth filtration)”는 깨끗한 필터(clean filter)에서 우세한 메커니즘으로서 입자상물질은 세공(pore)의 안쪽에 부착된다. 하지만, 그을음의 부착(soot load)이 증가함에 따라, 입구통로(inlet channel)의 벽에 입자상물질의 층(layer)이 성장하여 “표면여과(cake filtration)”가 주요 메커니즘이 된다. 한편, 모노리스(monolith) 필터의 여과효율(filtration efficiency)은 약 70~95% 정도로 알려져 있다. 표면여과층(filtration cake)이 잘 성장한 상태에서 그을음의 부착이 많은 경우(higher soot load) 높은 여과효율이 관측된다. 하지만 필터에 그을음이 많이 부착되어(higher soot load) 있더라도 엔진 고부하 조건에서는 종종 여과효율(filtration efficiency)이 낮은 경우가 많은데, 이는 기계적 필터(mechanical filter)는 단지 입자상물질의 고체부분(solid fraction)만을 효율적으로 포집하기 때문으로 풀이된다. 다시 말하면, 필터는 고온에서는 기체상태가 되는 황산염(sulfate)과 SOF는 “포집하지 못하는(transparent)” 특성을 가지고 있다. 한편, 자기재생(self-regeneration) 능력을 부여하기 위하여 촉매를 담지한 필터(catalyzed filter)의 경우 고온에서 황산염 입자상물질(sulfate particulate)을 생성시켜 여과효율(filtration efficiency)의 감소를 초래할 수도 있다.

2. Sizing and Pressure Drop

디젤필터의 크기는 엔진의 크기와 필터의 재생(regeneration) 방법에 따라 달라진다. 일반적으로, 같은 크기의 엔진일지라도 디젤 모노리스 필터(monolithic filter)는 촉매보다 그 크기가 훨씬 크다. 디

젤산화촉매(diesel oxidation catalyst)의 전형적인 크기(즉, 부피)는 엔진의 배기량과 같거나 혹은 약간 작은 것이 사용된다. 한편, 디젤 벽유동형 필터(wall-flow filter)의 대부분은 엔진정격출력(engine rated power output) 1 kW 당 0.1~0.2 ℓ의 필터 모노리스(filter monolith)를 필요로 한다. 자연흡기식 디젤 엔진의 경우 이 크기는 엔진배기량 1ℓ 당 약 1~2ℓ의 필터부피에 해당한다. 한편, 과급/중간냉각 엔진(turbocharged and aftercooled engine)의 경우 더욱 많은 필터부피를 요구한다.

한편, 대용량의 필터 표면적(즉, 체적)을 사용할수록 배기가스의 압력강하(pressure drop)를 최소화시킬 수 있고, 그리고/또는, 재생 시간간격(regeneration frequency)을 길게 유지할 수 있다. 한편, 필터에 부착되는 그을음의 양(filter soot load)이 증가할수록 압력강하(pressure drop)는 커지는데, 벽유동형 필터(wall-flow filter)의 여과효율(filtration efficiency)을 높이기 위해서는 압력강하(pressure drop)를 상대적으로 높게 유지해야 한다는 희생을 감수해야 한다. 한편, 모노리스 벽(monolith wall)에서의 압력강하는 다음과 같이 Darcy 식을 이용하여 구할 수 있다. 즉,

$$\Delta P_{\text{wall}} = (\mu/k_w)V_w W_w \quad (1)$$

where,

k_w : permeability of filter material, m^2

μ : dynamic viscosity of exhaust gas, $Pa \cdot s$

V_w : wall velocity of gas (exhaust flow per unit of filtration area), m/s

W_w : wall thickness, m

여기에서 필터의 투과율(filter permeability), k_w , 그리고 벽의 두께, W_w 는 포집된 입자상물질의 층(layer)과 관련되어 있는 압력강하에 대한 위와 비슷한 식을 얻기 위하여 입자상물질의 투과율(particulate permeability), k_p 와 입자상물질 층(layer)의 두께, W_p 로 대신할 수 있다. 필터에 의한 전체 압력강하는 아래의 식 (2)와 같이 필터의 벽(filter wall)과 입자상물질의 층(particulate layer)에 대한 압력손실의 합으로 표현된다. 즉,

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{wall}} + \Delta P_{\text{particulate}} \quad (2)$$

그을음(soot)이 부착되지 않은 깨끗한 필터(clean filter)에서 배기가스의 압력강하, ΔP_{wall} 는 매우 정확하게 계산될 수 있다. 대부분의 경우에 있어서, 비록 필터의 크기에 따라 다르기는 하지만, ΔP_{wall} 은 단지 1~2 kPa에 지나지 않는다. 한편, 그을음(soot)의 투과율(permeability)은 코디어라이트(cordierite)의 투과율(permeability)의 약 1/10 정도인데, 이 사실은, 실제 운전 중에 나타나는 필터 압력손실의 대부분은 필터의 벽(filter wall)과는 별로 관련이 없으며 오히려 디젤 입자상물질의 부착(deposit)과 관련이 있음을 반증하는 것이다. 한편, 그을음의 부착량(soot load)은 실제의 운전형태와 재생(regeneration) 방법에 따라 변하기 때문에 디젤필터의 압력강하를 수학적으로 계산하는 것은 매우 복잡하고 어려운 일이다.

3. Cordierite Monoliths

코디어라이트(cordierite)는 벽유동형 디젤필터 모노리스(wall-flow diesel filter monolith)에 가장 많이 사용되는 물질이다. 코디어라이트(cordierite)는 원래 승용차의 관통형 촉매담체(automotive flow-through catalyst substrate)에 사용하기 위하여 개발된 것으로서 화학식이 $2MgO-2Al_2O_3-5SiO_2$ 인 세라믹 합성물이다. 벽유동형 트랩(wall-flow trap) 기술은 승용차 담체(substrate) 기술이 확장된 것으로서 트랩과 담체 모두에 비슷한 물질이 사용된다. 여기에서, 디젤필터 기술에서의 세공 구조의 제어(pore structure control)에 보다 많은 관심이 요구되고 있다. 한편, 코디어라이트(cordierite)는 열에 양호한 물성치(favorable thermal property)를 가지고 있어서 디젤필터에 매우 적합하기 때문에 많이 사용되고 있다. 이 재질은 내열성과 기계적 강도가 높을 뿐만 아니라 용융온도(melting temperature)도 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 이상으로 비교적 높은 편이다. 또한 열팽창계수(thermal expansion coefficient)가 매우 낮기 때문에 극한적인 열사이클(thermal cycling)에도 견딜 수 있다. 코디어라이트(cordierite)에 대한 보다 자세한 사항은 본 시리즈의 “Ceramic Catalyst Substrates”를 참고하기 바란다.

디젤필터로 사용하기 위한 코디어라이트(cordierite)의 화학조성(formulation)은 열적 내구성과 피로파괴로 인한 깨짐(cracking)에 견딜 수 있도록 최적화된 것이다. EX-80 은 디젤 벽유동형 모노리스 필터(wall-flow monolithic filter)에 사용하기 위해 Corning 社에서 개발한 코디어라이트(cordierite)로서. (Corning, 1997) 이전의 EX-47, EX-54, 그리고 EX-66 을 개선한 것이다. 아래의 Table 1에 위의 네가지 코디어라이트(cordierite)의 물성치를 표시하였다.

Table 1 Physical Properties of Cordierite Diesel Filter Materials(10.5" diameter x 12", 100/17 configuration)

Properties	Materials	Composition			
		EX-47	EX-54	EX-66	EX-80
CTE (25 ~ 800 °C) × 10 ⁻⁷ /°C		8.8	8.7	10.5	5.0
MOR, psi		365	320	418	350
kg/cm ²		25.6	22.5	29.4	24.6
E-MOD × 106 psi		0.81	0.83	1.06	1.0
× 104 kg/cm ²		5.69	5.83	7.45	7.03
Thermal Shock Parameter (TSP)		516	459	383	1440
Initial Efficiency, %		84	70	55	87
Final Efficiency, %		90	90	90	91
Pressure drop @ 40 g soot, in. Hg		2.9	3.7	3.7	2.9
A-axis strength, psi		1539	1350	1642	1434
kg/cm ²		108.2	94.9	115.4	100.8
Porosity, %		50	50	50	48
Total Raw Penetration, cm ³ /g		0.418	0.421	0.410	0.388
Mean Pore Size, μm		13.4	24.4	34.1	12.0

CTE - coefficient of thermal expansion

MOR - modulus of rupture

$TSP = MOR / (CTE \times E - MOD)$

필터 모노리스(filter monolith)는 2단계 공정으로 제조된다. 우선, 양단이 열려있는 채널(channel)로 되어 있는 모노리스(monolith)를 압출하고 가마(oven)에서 굽는다. 다음, 채널의 양단을 교대로 세라믹(코디어라이트)으로 막고서 다시 굽는다. 압출가공이 가능한 지름의 최대크기는 약 300 mm 이다. 큰 모노리스(monolith)는 여러 개의 사각 단면을 갖는 블록을 세라믹 시멘트(ceramic cement)로 접착시켜 서로 연결하여 조립(assembly)한다. 접착 후에 채널의 양단을 교대로 막고서 굽는 과정을 거친 후, 조립된 제품을 기계가공하여 원통형모양으로 만들고 코디어라이트 시멘트(air-setting cordierite cement)로 원통의 바깥 표면을 만든다. 아래의 Figure 3에 코디어라이트 벽유동형 필터(cordierite wall-flow filter)가 나와 있다. 확대된 그림에서 채널의 양단이 교대로 막혀 있는 모습을 확인할 수 있다.



Figure 3 Cordierite Wall Flow Filter

벽유동형 모노리스(wall-flow monolith)의 재질과 셀(cell)의 구조를 정의하는데 가장 널리 사용되는 표현방법은 “(formulation)/(cell density)/(wall thickness)”이다. 디젤필터의 표준 셀밀도(cell density)는 100 cpsi (cells per square inch)이고, 표준 벽두께(wall thickness)는 17 mil (0.017" = 0.43 mm)이다. 만일 EX-80 코디어라이트 조성(cordierite formulation)이 사용될 경우 이 재질은 EX-80/100/17로

나타낼 수 있다. 한편, 아래의 Table 2는 Corning 社에서 제공하고 있는 표준 모노리스(standard monolith)의 사양을 나타낸 것이다.

Table 2 Diesel Filter Sizes (Corning, EX – 80/100/17)

Size, diameter x length		Filter Volume	Surface Area	Max. Soot Load
In	mm	liter	m ²	g
One-Piece Extrusions				
5.66×6	143.8×152.4	2.5	1.66	15
7.5×8	190.5×203.8	5.8	3.83	35
9.0×12	228.6×304.8	12.5	8.27	75
10.5×12	266.7×304.8	17.0	11.26	100
11.25 12	285.8×304.8	19.6	12.93	120
11.25×14	285.8×355.6	22.8	15.08	140
Assemblies				
15×15	381.0×381.0	43.4	28.73	250
20×15	508.0×381.0	77.2	51.08	460

4. Silicon Carbide Monoliths

탄화규소(silicon carbide, SiC)는 또 다른 디젤필터 재질이다. SiC 벽유동형 필터(wall-flow filter)는 셸구조(cell structure)와 다공성(porosity)이 코디어라이트(cordierite)의 그것과 비슷한 압출물(extrusion)이다. SiC가 코디어라이트(cordierite)와 구분되는 가장 큰 차이점은 SiC의 열적 안정성(thermal stability)이 높다는 것이다. SiC는 코디어라이트(cordierite)의 경우보다 훨씬 높은 1800 °C 이상의 온도에서 녹지는 않는 대신 분해된다. 또한 SiC의 열전도도(thermal conductivity)는 코디어라이트(cordierite)의 그것보다 10배 정도 높기 때문에 필터의 재생(regeneration) 과정에서 발생하는 열응력(thermal stress)을 빠른 시간에 소산(消散, dissipation)시킬 수 있다. 또한 SiC는 코디어라이트(cordierite)보다 강도(strength)와 내부식성(corrosion resistance)이 강한 것으로 알려져 있다. 하지만, Table 1과 Table 3을 비교해 보면 알 수 있듯이, SiC의 경우 열팽창계수(thermal expansion coefficient)가 높기 때문에 열충격 매개변수(thermal shock parameter, TSP)는 코디어라이트(cordierite)의 그것보다 높지 않다.

탄화규소(silicon carbide, SiC) 필터는 코디어라이트 모노리스(cordierite monolith)보다 훨씬 비싸다. SiC 필터는 또한 압력강하(pressure drop)가 작기 때문에 코디어라이트(cordierite)와 비교하였을 때 작은 체적이 작아도 가능하다. 하지만 실제 응용 데이터가 많이 없기 때문에 이러한 주장을 입증하기는 쉽지 않은 상태이다.

한편, SiC 필터는 지름 286 mm 까지 사용할 수 있지만, 단일 압출물(one-piece extrusion)일

경우 이보다 적은 약 125 mm 의 지름만이 이용 가능하다. 큰 필터의 경우 하나의 강철통(steel canister)에 4개 또는 7개가 서로 연결되어 있는 구조로 되어 있다. 한편, 아래의 Table 3에 SiC 의 물성치가 정리되어 있다. (NoTox, 1995)

Table 3 Properties of SiC Diesel Filters

Material	Grain SiC
Mean Pore Size	5 ~ 25 μm
Open Porosity	45 %
Maximum safe soot load	6 ~ 10 g/ ℓ substrate
Thermal Conductivity @ 25 °C	11 W/m·K
Thermal Conductivity @ 630 °C	7 W/m·K
Specific Heat @ 25 °C	750 J/kg
Specific Heat @ 800 °C	1250 J/kg
Thermal expansion @ 25 °C – radial	4.2×10^{-6} mm/mm °C
Thermal expansion @ 650 °C – axial	3.9×10^{-6} mm/mm °C
Decomposing / Melting Temperature	> 1800 °C
Thermal Shock Parameter (TSP)	85 ~ 1400

SiC 필터의 재생(regeneration) 방법으로는 전기적 재생(electrical regeneration)이 주로 추천되고 있다. 탄화규소(silicon carbide, SiC)는 열적 안정성(thermal stability)이 우수하기 때문에, 필터 안에 전기히터(electric heater)를 직접 설치할 수 있다.

5. Canning

디젤 벽유동형 필터 모노리스(diesel wall-flow filter monolith)는 스테인레스강(stainless steel)으로 된 하우징(housing) 안에 장착되어 있다. 하우징(housing) 재질로는 열팽창계수(thermal expansion coefficient)가 작은 페라이트계 스테인레스강(ferritic stainless steel) AISA 400 시리즈, 특히 AISA 409가 주로 사용된다. 패키징(packaging) 방법으로는 촉매변환기(catalytic converter)에 사용되는 그것과 매우 유사하며, 특히 토니켓(tourniquet) 방법이 주로 추천된다. 한편, 필터의 크기가 클 뿐만 아니라 높은 압력강하로 인한 추가의 힘이 작용하기 때문에, 축방향으로 움직이지 않도록 모노리스(monolith)를 잡아주는 지지링(supporting ring)을 하우징(housing) 안에 일반적으로 설치한다.

모노리스 필터(monolithic filter)는 차량에 수평 혹은 수직으로 설치할 수 있다. 수평으로 설치하면, 특히 크기가 크고 무거운 필터의 경우, 필터시스템의 기계적 내구성을 보다 향상시킬 수 있다. 수직으로 설치한 모노리스(monolith)는 하우징(housing) 안에서 아래로 움직이려는 경향이 있다. 이 필터 대부분의 무게는 바닥링(bottom ring)에 의해 지지되는데, 이 링(ring)은 차량의 진동과

배기가스의 압력이 전달됨에 따라 세라믹을 맞비벼서 모노리스를 점차 강력하게 지지하게 된다.

상대적으로 무거운 필터를 안전하게 붙잡고 체결압력(canning pressure)을 고르게 분포시키기 위하여 무거운 패키징 매트(packaging mat)를 사용해야만 한다. 매트(mat)의 체결간극밀도(mounting gap density)는 일반적으로 촉매변환기(catalytic converter)에 사용되는 것보다 약간 작다. 예를 들어, 만일 Interam 6200 g/m^2 매트(mat)를 사용하는 경우 권장되는 간극밀도(gap density)는 0.9 g/cm^3 이다. 한편, 팽창매트(intumescent mat)를 사용하는 경우 외곽틀 가공(canning)을 마친 후 매트(mat)를 팽창시키기 위하여 가열시켜야 하는데, 그 이유는, 대부분의 경우 디젤엔진의 정상작동에서 배출되는 배기가스의 온도는 너무 낮아서 매트(mat)를 충분히 팽창시킬 수 없기 때문이다.

참 고 문 헌

1. Corning, 1997, "Corning Diesel Products," Corning Incorporated.
2. NoTox Corporation, 1995, "NoTox Silicon Carbide Diesel Particulate Wall Flow Filter," Technical Product Information, 4th Edition, 17 August 1995.