

# Cellular Monolith Substrates

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

세포형 모노리스(cellular monolith)는 펠릿형의 촉매 지지체(pellet shaped catalyst support)를 대신하여 배출물질 저감 촉매장치의 표준 담체(substrate)가 되었다. 모노리스는 세라믹 돌기(ceramic extrusion) 혹은 물결모양의 금속박(箔) 조립품(corrugated metal foil assembly)으로 되어 있다. 각 타입은 일반적으로 촉매의 접촉반응(catalysis)에 필요한 표면적을 넓게 하기기 위하여 지지체(washcoat)로 불리는 무기산화물(inorganic oxide)의 중간층(intermediate layer)이 코팅되어 있다. 기하학적 표면적, 입구의 개(開)면적(open frontal area), 그리고 수력직경(hydraulic diameter)과 같은 모노리스(monolith) 세포의 물성치(cellular property)에 대한 정의는 본문에서 자세히 설명되어 있는데, 이들은 셀의 형상(cell geometry)과 관련이 된다. 담체의 형상(substrate geometry)이 촉매의 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였고, 촉매담체의 압력강하(catalyst substrate pressure drop)를 계산하는 공식을 소개하였다.

## 1. Catalyst Substrates

엔진 제조업자들이 가장 고민하는 것은 배기가스에 촉매를 어떻게 집어 넣을까 하는 것이었다. 1970 년 대에 도입되기 시작한 초기의 자동차 촉매변환기(catalytic converter)의 대부분은 펠릿(pellet, 둥글게 뭉친 것)이나 구슬모양(bead-shape)의 지지체(support)를 사용하였다. 직경 2.5 ~ 5 mm 의  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (gamma-alumina)로 만든 수많은 구형의 입자(즉, 펠릿)가 강철외피(steel shell)로 이루어져 있는 용기 안에 있는 두 개의 막(screen) 사이에 놓여져 촉매변환기(catalytic converter)를 이루었다. 한편, 귀금속촉매(noble metal catalyst)와 안정제(stabilizer)는 펠릿(pellet)에 혼합되어 사용된다. 이러한 촉매의 설계는 화학산업(chemical processing industry)에서 널리 사용되는 촉매반응기(catalyst reactor)에서 출발하였다. 하지만 이러한 펠릿형의 촉매(pelleted catalyst)는 압력강하(pressure drop)가 높을 뿐만 아니라 촉매변환기(catalytic converter)의 운행 중 발생하는 여러 가지 기계적 응력(stress)에 따른 마멸(磨滅, attrition)로 인하여 점진적인 촉매의 손실이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 한편, 펠릿형 지지체(pelleted support)의 이러한 단점을 보완하기 위하여 개발된 벌집모양(honeycomb)의 모노리스(monolith)는 현재 자동차, 디젤, 그리고 이 밖의 오염물질을 제어하는 촉매가 적용되는 응용분야에서 표준 담체(standard substrate)로 자리를 잡아가고 있다.

아래의 Figure 1 은 초기의 산화촉매(oxidation catalyst)로 사용되었던 반응기(reactor)의 한 예를 보여주고 있다.

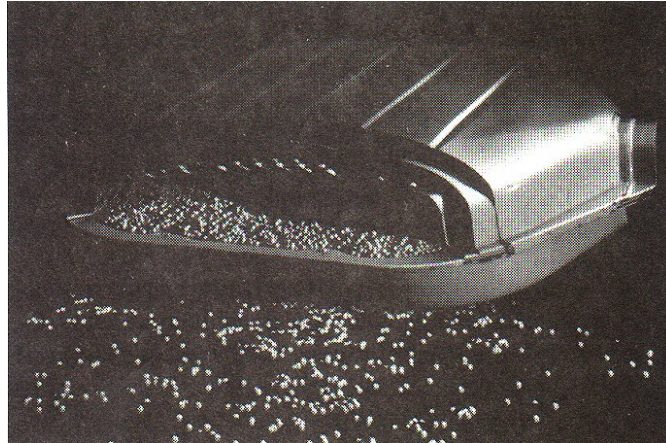


Figure 1 Bead bed reactor design. Reprinted courtesy of Marcel Dekker Inc. (Farrauto and Heck, 1992)

모노리스 촉매 지지체(monolithic catalyst support)는 작은 삼각형이나 사각형 혹은 여러 기하학적 형태의 통로(channel)가 벌집모양(honeycomb)으로 배열되어 축방향으로 늘어서 있는 구조로 되어 있는데, 이들은 간혹 “관통형(flow-through)” 담체(substrate)으로 불리기도 한다. 각 단면은 일반적으로 원형이나 타원형으로 되어 있지만 나선모양의 형상과 같은 비대칭적 구조로 되어 있기도 하다. 통로(channel)를 따라 흐르는 배기가스는 통로의 벽(channel wall)에 부착되어 있는 촉매와 직접 접촉을 한다. 이러한 모노리스 지지체(monolithic support)의 장점으로서는 단위체적당 높은 표면적(즉, 치밀한 구조)과 넓은 입구의 개(開)면적(open frontal area)(즉, 낮은 압력강하), 그리고 뛰어난 내마멸성(耐摩滅性, attrition resistance) 등을 들 수 있다.

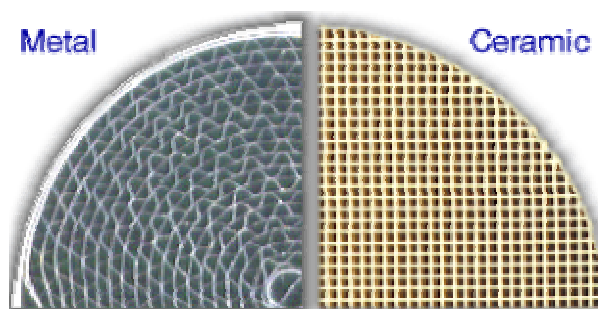


Figure 2. Monolithic Catalyst Substrates

위의 Figure 2 에 나와 있는 모노리스 촉매 담체(monolithic catalyst substrate)는 세라믹(ceramic)이나 금속(metal)로 만들어진다. 세라믹 담체(ceramic substrate)는 일반적으로 사각형의 셀(square cell) 형태를 하고 있으며 대부분의 금속 담체(metallic substrate)는 물결모양의 통로(sinusoidal channel) 형태로

되어 있다. 이 밖의 다른 단면 형상, 즉, 삼각형, 육각형, 사다리꼴, 또는 둥근 형태의 통로(channel)도 존재한다. 제곱인치당 셀의 개수(cells per square inch, cpsi)는 일반적으로 10 ~ 600 cpsi 이다. 한편, 셀밀도(cell density)가 1200 cpsi 나 되는 담체(substrate)가 현재 개발되고 있다. (Kikuchi, 1999) 내연기관 용으로 시판되고 있는 담체(substrate)의 셀밀도(cell density)는 일반적으로 200 ~ 400 cpsi 이지 만, 가솔린 엔진의 경우 촉매변환기(catalytic converter)에 600 cpsi 담체(substrate)의 사용이 점점 증가하고 있다.

촉매작용(catalysis)에 사용되는 물질들과 비교할 때, 세라믹 다공질(ceramic honeycomb)의 벽에는 많은 세공(微孔, pore)이 있어서 비표면적(specific surface area)이  $0.3 \text{ m}^2/\text{g}$  정도로 매우 낮다. 금속 담체(metal substrate)에 사용되는 금속박(箔)에는 다공성(多孔性, porosity)이 없다. 촉매에는 표면적이 매우 넓은 운반체(carrier)가 요구되기 때문에, 통로 벽(channel wall)의 표면적이 넓어지도록 코팅을 부착시켜야 한다. 지지체(washcoat)로 불리는 이러한 코팅은  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (gamma-alumina)와 같은 표면적이 넓은 다공성(porous) 무기산화물(inorganic oxide)로 이루어져 있다. 촉매 지지체(catalyst washcoat) 물질의 비표면적(specific surface area)은 일반적으로  $100 \text{ m}^2/\text{g}$  이상이다. 백금(platinum, Pt)과 같은 귀금속 촉매는 지지체(washcoat)의 표면과 세공(pore) 내에 부착된다. 촉매변환기(catalytic converter) 내부를 흘러 가는 배기가스는 지지체의 세공 구조(washcoat pore structure)를 지나서 촉매 반응이 일어나는 촉매활성점(catalytic site)까지 확산된다.

금속박(箔)(metallic foil)과 세라믹 담체(ceramic substrate) 위에 형성되는 지지체 층(washcoat layer)을 아래의 Figure 3 에 도시하였다. 지지체 층(washcoat layer)의 두께는  $20 \sim 40 \mu\text{m}$  이다. 특히 금속 담체(metallic substrate)의 사인과 형태의 통로(sinusoidal channel)의 구석에는 “필렛(fillet)”이라고 하는 두꺼운 지지체 퇴적물(washcoat deposit)이 생긴다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 벌집모양(honeycomb)의 구조를 만들기 전에 금속박(箔)(metallic foil)에 미리 지지체를 입히는(washcoated) 기술이 개발되어 필렛(fillet)이 전혀 없는 깨끗한 통로(channel)를 만들 수 있게 되었지만 이 경우 담체(substrate)의 기계적 강도와 내구성의 손실이 발생한다.

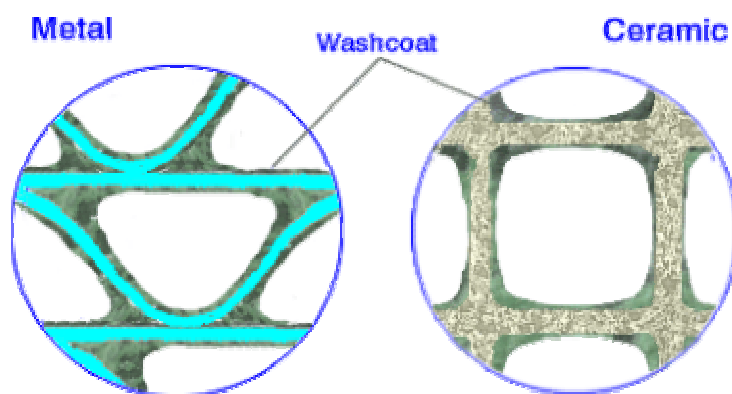


Figure 3. Catalyst Washcoat

한편, 촉매로 사용하기 위한 비세포형 모노리스 담체(non-cellular monolithic substrate)에 대한 연구가 진행되고 있다. 코디어라이트(cordierite, 堇青石, 강한 2 색성(色性)을 나타내는 청색의 광물, 마그네

습/알루미늄/철의 규산염, synthetic cordierite 은 magnesia ( $2\text{MgO}$ )/silica ( $5\text{SiO}_2$ )/alumina ( $2\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 로 구성되는 세라믹이다.), 탄화규소(silicon carbide, SiC, 매우 단단한 비(非)수용성인 결정 화합물, 연마제(研磨劑) 또는 고온용 전기로의 발열체(發熱體)로 사용된다.), 또는 금속(metal)로 이루어진 여러 가지의 경화 기포(rigid foam)가 주로 사용된다. (Jatkar, 1997) 벌집모양(honeycomb) 모노리스와 비교하면, 이들은 표면적이 작고/또는 압력강하가 높다. 세라믹 기포(ceramic foam)은 촉매로 거의 사용되지 않았다.

## 2. Cellular Properties of Monoliths

세포형 모노리스(cellular monolith)의 기하학적, 기계적, 열전달, 그리고 수력학적 물성치를 나타내기 위하여 많은 용어들이 정의되어 사용되고 있다. 이러한 모든 용어들은 담체(substrate)의 셀 구조(cell geometry)와 관련이 되어 있다. 세라믹 모노리스(ceramic monolith)의 일반적 형태인 사각형 모양의 셀 구조가 아래의 Figure 4에 나와 있다. 대부분의 세포형 모노리스(cellular monolith)의 물성치는 반복거리(repeat distance),  $s$  와 벽두께,  $w$  에서 유도될 뿐만 아니라 이의 함수로 표현될 수 있다.

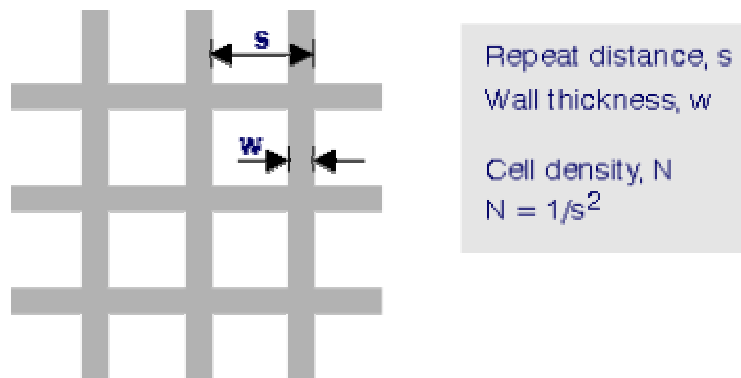


Figure 4. Cell Geometry

셀밀도(cell density),  $N$  은 단위 단면적당 통로(channel)의 개수로 정의된다. 위의 Figure 4와 같이 셀의 구조가 사각형인 경우 셀밀도(cell density)는 아래의 식 (1)에 주어진 것과 같이 셀의 반복거리(repeat distance),  $s$  의 단순한 함수로 나타낼 수 있다. 셀밀도(cell density)의 단위는 제곱인치당 셀의 개수(cells per square inch, cpsi) 또는 제곱센티미터당 셀의 개수( $1/\text{cm}^2$ )가 사용된다.

$$N = 1/s^2 \quad (1)$$

비표면적(specific geometric surface area, GSA),  $a_g$  는 담체(substrate)의 단위체적당 통로(channel)의 전체 표면적을 나타낸다. 이는 촉매담체(catalyst substrate)의 중요한 매개변수로서 제조업자들은 항상 이를 명시한다. 사각형 셀의 경우, 다음과 같이 셀의 형태로부터 이를 계산할 수 있다.

$$a_g = 4(s-w)/s^2 = 4(1-w/s)/N^{0.5} \quad (2)$$

전면 개(開)면적(open frontal area, OFA),  $A_F$  는 배기가스의 유동에 이용될 수 있는 담체(substrate)의 전체 단면적의 일부이다. OFA는 흔히 담체(substrate)의 전체 단면적에 대한 백분율로 나타내는데, 간혹 담체(substrate)의 공율(空率,void fraction)이라고도 하는 것으로서, 세포형 제품(cellular product)의 사양서에 항상 포함되는 중요한 매개변수이다. 사각형 셀 구조인 경우 통로(channel)의 개(開)면적(open area)과 전체 단면적과의 비,  $A_F/A$  는 아래의 식 (3)으로 정의된다.

$$A_F/A = (s-w)^2/s^2 = (1-w/s)^2 \quad (3)$$

담체통로(substrate channel)의 수력직경(hydraulic diameter),  $d_h$  는 모든 수력학(hydraulics), 물질전달(mass transfer), 그리고 열전달 계산에서 비원형 통로(non-circular channel)의 크기를 나타내는 척도로 사용된다. 수력직경(hydraulic diameter)의 정의는 아래의 식 (4)에 나와 있는데, 이 정의에 따르면 둥그런 단면적 통로(round cross-section channel)의 수력직경(hydraulic diameter)은 지름과 동일하다.

$$d_h = 4A_{ch}/O_{ch} \quad (4)$$

여기에서,

$A_{ch}$  : 단면적(channel open area)

$O_{ch}$  : 接水길이(channel wetted perimeter)

세포형 촉매 담체(cellular catalyst substrate)의 경우에 수력직경(hydraulic diameter)에 대한 위의 정의는 간편하게 전면 개(開)면적(open frontal area, OFA),  $A_F$  와 비표면적(specific geometric surface area, GSA),  $a_g$  의 비로 나타낼 수 있다. 즉,

$$d_h = 4(A_F/A)/a_g \quad (5)$$

윗 식 (5)는 직선통로(straight channel)를 가진 모든 세포형 제품(cellular product) 뿐만 아니라 금속담체(metallic substrate)의 사인파 형태의 통로(sinusoidal channel)와 같은 셀 구조에도 적용할 수 있다.

GSA, OFA, 그리고 수력직경(hydraulic diameter)은 코팅된 담체(coated substrate)와 그렇지 않은 담체(substrate)에서 서로 다르다. 촉매 코팅은 담체(substrate)의 겉보기(apparent) 벽두께 뿐만 아니라 통로(channel) 구석의 지지체 필렛(washcoat fillet) 형상을 변경시킴으로서 셀의 형태도 변화시킨다. 담체(substrate) 제조업체에 의해 제공되는 기하학적 수치들은 일반적으로 코팅되지 않은 담체(uncoated substrate)에 수치를 나타낸다. 촉매의 성능을 모델링할 때 정확도를 높이기 위해서는 코팅된 담체(substrate)의 매개변수를 계산하여 사용해야 한다.

촉매담체(catalyst substrate)의 체적밀도(bulk density),  $\rho_b$  는 아래의 식 (6)으로 표현된다.

$$\rho_b = \rho_m(1-P)(1-A_F/A) \quad (6)$$

여기에서,

$\rho_m$  : 재료의 밀도(material density),  $\text{kg/m}^3$

$P$  : 재료의 다공성(多孔性, porosity), 무차원 매개변수

전체 표면적(total surface area),  $A_T$  는 촉매의 체적,  $V$  와 비표면적(specific geometric surface area, GSA),  $a_g$  의 곱이다. 즉,

$$A_T = Va_g \quad (7)$$

촉매담체(catalyst substrate)의 열용량(heat capacity),  $C$  는 아래의 식 (8)로 계산할 수 있다.

$$C = c_p \rho_b V \quad (8)$$

여기에서,  $c_p$  는 담체(substrate)재료의 비열(specific heat capacity)을 나타낸다.

### 3. Substrate Configuration and Performance

담체(substrate)의 배열과 형상은 다음과 같은 촉매의 성능과 관련된 모든 면에서 영향을 미치기 때문에 특정한 목적으로 촉매를 이용하고자 할 때 주의 깊게 선택해야 한다.

- 촉매의 변환효율
- 촉매의 “light-off” 온도(변환효율이 50% 가 될 때의 촉매온도)
- 압력강하
- 파울링(fouling)에 대한 저항성(resistance)

배출가스 제어 촉매는 배기가스의 온도가 높을 때는 물질전달에 의해 지배되는 영역(mass transfer controlled regime)에서 작동된다. 따라서, 담체(substrate)의 체적이 일정하다면 물질전달(mass transfer) 조건의 향상 또는 물질전달 표면적의 증가를 유도하는 임의의 변화를 통하여 촉매의 변환효율을 증가시킬 수 있다. 특히, 셀밀도(cell density)를 증가시키면 촉매의 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 셀밀도(cell density)의 증가는 담체(substrate)의 제조기술, 촉매의 코팅기술, 그리고 셀의 크기가 작아 질수록 증가하는 촉매의 압력강하로 인하여 실제적인 제한을 받는다.

가솔린엔진 분야에서는 “light-off” 성능에 대한 촉매담체(substrate)의 최적화 작업이 수행되



었다. 비록 디젤엔진은 가솔린엔진보다 냉시동 배출가스(cold start emission)가 적게 나오지만 “light-off” 성능은 유럽의 디젤승용차 분야에서는 매우 중요한 성질이다. 담체(substrate)의 구성이나 형상이 촉매의 “light-off”에 미치는 영향은 담체벽면(substrate wall)이 따뜻해지는데 걸리는 시간(warm-up time)과 관련이 있다. “Light-off” 기간 동안 촉매는 반응동역학이 지배하는 구간(reaction kinetics controlled regime), 즉, 물질전달(mass transfer)은 충분히 빠르게 진행되기 때문에 반응은 촉매의 화학반응(catalyst chemistry)에 의존하여 작동하게 된다. 주어진 촉매에서의 반응율은 촉매의 온도에 의존한다. 촉매는 엔진의 시동시에는 차가운 상태인 담체(substrate)의 벽에 담지되어 있기 때문에 뜨거운 배기가스가 담체(substrate) 벽면의 온도를 촉매반응이 일어날 수 있는 충분한 온도까지 올리는 데는 일정 시간이 필요하다. 담체(substrate)의 구성이나 형상을 변경하여 열전달 조건 또는 전열 표면적을 증가시키면 촉매가 따뜻해지는데 걸리는 시간(warm-up time)을 단축시켜 냉시동(cold start) 성능을 향상시킬 수 있다. 한편, 촉매 지지체(washcoat)의 영향, 즉, 담체(substrate)의 열용량(heat capacity)을 증가시키는 것은 냉시동 성능에 특히 중요하다고 알려져 있다. (Day, 1997) 지지체(washcoat)는 코팅되지 않은 지지체(uncoated support)와 비교하였을 때 촉매의 가열시간(heating time)을 약 40% 정도 증가시킨다.

촉매담체(substrate)의 체적이 일정할 때 배기가스의 압력강하는 셀밀도(cell density), 전면개(開)면적(open frontal area, OFA), 그리고 담체(substrate)의 단면(즉, 종횡비)에 따라 달라진다. 셀밀도(cell density)를 증가시키거나 OFA를 감소시키면 압력강하는 증가한다. 따라서 담체(substrate)의 벽을 얇게 하여 OFA를 증가시키는 것은 촉매의 압력강하를 최소화하는 데에 효과적이다. 압력강하는 또한 촉매의 길이를 짧게 하거나 단면의 표면적을 증가시킴으로서 최소화할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 유동의 분포, 공간적 제한, 그리고 모노리스(monolith)의 제조 등에 미치는 부정적 영향 때문에 한계가 있다.

그을음(soot)에 의해 모노리스 통로(monolith channel)에 생기는 파울링(fouling)은 디젤촉매의 압력강하를 증가시키는 또다른 원인이다. 배기의 온도가 높은 대형 디젤엔진에서 파울링(fouling)은 잘 발생하지 않는다. 고온에서 생긴 입자상물질은 “건조(dry)”하기 때문에 담체(substrate)의 벽면에 잘 달라붙지 않는다. 하지만 저온에서 생성된 “습(wet)”한 그을음(soot)은 통로(channel)에서 성장하여 압력강하를 증가시킬 뿐만 아니라 변환효율을 떨어뜨린다. 파울링(fouling) 위험은 셀밀도(cell density)가 높을수록 크다. 배출물이 적은 신형식의 엔진에서는 일반적으로 300 cpsi 와 400 cpsi 의 담체(substrate)가 사용된다. 한편, 구형엔진을 보완(retrofit)하는 경우 그을음(soot)에 의한 담체통로(substrate channel)의 막힘현상을 방지하기 위하여 일반적으로 200 cpsi 또는 300 cpsi 의 낮은 셀밀도(cell density)를 갖는 담체(substrate)가 사용된다.

#### 4. Catalyst Pressure Drop

촉매담체(substrate) 전후의 총압력강하(total pressure drop)는 다음의 세가지 성분, 즉, (1) 통로(channel)에서의 압력강하,  $\Delta P_{ch}$ , (2) 통로입구(channel entrance)에서의 압력손실,  $\Delta P_{in}$ , 그리고 통로출구

(channel exit)에서의 압력손실,  $\Delta P_{out}$ 의 합으로 표현된다. 즉,

$$\Delta P = \Delta P_{ch} + \Delta P_{in} + \Delta P_{out} \quad (9)$$

통로(channel)의 입구와 출구에서의 손실은 각각 촉매입구 및 출구 표면(inlet and outlet catalyst face)에서의 배기가스의 수축(contraction) 및 팽창(expansion)과 연관되어 있다. 하지만 이들은 배기관의 지름과 접속부분의 형상에 의존하는 촉매변환기(catalytic converter)의 입구 및 출구 접속부분(inlet and outlet header)에서의 압력손실과는 서로 다르다. 이 논문에서는 접속부분(header)에서의 압력강하는 다루지 않는다. 통로(channel)의 압력강하는 촉매담체(substrate)의 전체 압력강하 중에서 가장 중요한 부분이다. 입구와 출구의 압력강하는 대부분의 경우 전체 압력강하의 10% 미만으로 알려져 있다. 한편, 통로(channel)의 압력강하는 배기가스의 유량에 직접 비례하고, 입구와 출구의 압력강하는 유량의 제곱에 비례한다.

담체통로(substrate channel)에서 배기가스의 압력강하량은 Darcy 식을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 즉,

$$\Delta P_{ch} = 4f(L/d_{ch})(\rho v^2/2) \quad (10)$$

여기에서,

$f$  : Fanning friction factor, dimensionless

$L$  : substrate length, m

$d_{ch}$  : channel diameter, m

$\rho$  : gas density,  $kg/m^3$

$v$  : linear velocity of gas in channel, m/s

$\Delta P$  : pressure drop, Pa

통로(channel)의 단면적이 원형이 아닌 경우  $d_{ch}$  대신 수력직경(hydraulic diameter),  $d_h$ 를 사용한다.

한편, 배기가스의 속도,  $v$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$v = W/(\rho A_F) \quad (11)$$

여기에서,

$W$  : total mass flow rate, kg/s

$A_F$  : substrate open frontal area,  $m^2$

유체역학에서는 유동의 영역을 구분하는 기준으로 무차원 레이놀즈 수,  $N_{Re}$ 를 사용한다. 파이프와 통로(channel) 유동의 경우  $N_{Re} < 2100$ 이면 층류흐름이다. 실제의 모든 경우에 있어서 모노리스 촉매담체(monolithic catalyst substrate)는 층류흐름 영역에서 작동된다. 한편, 레이놀즈 수는 다음과



같이 정의된다.

$$N_{Re} = v d_{ch} \rho / \mu \tag{12}$$

여기에서  $\mu$  는 배기가스의 동점성(dynamic viscosity)이고 단위는  $kg/(m \cdot s)$ 이다.

한편, 층류흐름에서의 “Fanning” 마찰계수(friction factor)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$f = K/N_{Re} \tag{13}$$

여기에서 K의 크기는 아래의 Table 1에 나타내었듯이 통로(channel)의 단면에 따라 달라진다.

Table 1 Fanning Friction Factor

Channel Cross Section	$K = (f \cdot N_{RE})$
Round	16.00
Square	14.23
Equilateral Triangle	13.33
Sinusoidal*	10.96
* - duct open height to open width ratio 0.425	

위의 마찰계수는 다른 문헌을 참조하였다. (Perry, 1984; Rohsenow, 1993) Table 1의 수치를 시험실에서 사각형의 셀(square cell)을 갖는 세라믹 모노리스(ceramic monolith)와 사인파 형태 셀(sinusoidal cell)의 금속 모노리스(metal monolith)에 대하여 평가해 본 결과 매우 만족할 만한 상관관계를 얻을 수 있었다. (Day, 1997)

담체(substrate)의 입구와 출구에서의 압력손실은 촉매 전체의 압력손실에 비해서 상대적으로 작기 때문에 특별히 촉매담체(catalyst substrate)과 연관시킨 실험데이터는 거의 존재하지 않는다. 또한, 입구와 출구의 압력손실은 시험장비의 영향을 많이 받기 때문에 실험적으로 이를 평가하는 것은 매우 어렵다. 한편, 통로(channel)에서는 항상 층류였던 배기가스는 촉매담체(catalyst substrate)를 빠져 나오면 난류 혹은 천이(transient) 유동으로 변하기도 한다.

한편, 입구와 출구에서의 압력강하는 윗 식(10)과 비슷한 구조의 공식으로 표현하면 편리하다. 즉,

$$\Delta P_{in/out} = K_{in/out} (\rho v^2 / 2) \tag{14}$$

마찰계수,  $K_{in}$  과  $K_{out}$  은 배기가스의 수축(contraction)과 팽창(expansion)에 의한 압력손실을 계산하는 잘 알려진 식을 이용하여 계산할 수 있다. 수축(contraction)일 때  $K_{in}$  은 담체(substrate)의 전면 개(開)면적(open frontal area, OFA)으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$K_{in} = -0.415 A_F/A + 1.08 \quad (15)$$

윗 식 (15)는 문헌에 나와 있는 층류흐름 데이터로부터 계산할 수 있다. (VDI, 1992) 한편, 일부 경우에 압력강하는 과대평가될 수 있다. 난류흐름의 계수  $K_{in}$  은 윗 식 (15) 보다 약 50% 정도 작다. 천이(transition) 영역에서의 마찰손실은 층류와 난류에서의 손실 사이이다.

난류흐름에서 배기가스의 팽창(expansion)에 따른 마찰계수는 아래와 같은 간단한 Borda-Carnot 식으로 계산될 수 있다. 즉,

$$K_{out} = (1 - A_F/A)^2 \quad (16)$$

식 (9)에 식 (10)과 (14)를 결합시키면 촉매담체(catalyst substrate)에서의 전체 압력강하는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P = [4f(L/d_{ch}) + K_{in} + K_{out}] (\rho v^2 / 2) \quad (17)$$

## 참 고 문 헌

1. Day, J. P., 1997, "Substrate Design for Cold Start," SAE Advancements in Automotive Catalyst Technology TOPTEC, Dearborn, MI.
2. Day, J. P., 1997, "Substrate Effects on Light-Off ? Part II: Cell Shape Contributions," SAE 971024.
3. Farrauto, R., and Heck, R., 1992, "Precious Metal Catalysis," Encyclopedia of Chemical Processing and Design, Ed. J. McKetta, New York, Marcel Dekker, pp. 218-274.
4. Jatkar, A. D., 1997, "A New Catalyst Support Structure for Automotive Catalytic Converters," SAE 971032.
5. Kikuchi, S., et al., 1999, "High Cell Density and Thin Wall Substrate for Higher Conversion Ratio Catalyst," SAE 1999-01-0268.
6. Perry, 1984, "Perry Chemical Engineers' Handbook," 6th edition, McGraw-Hill.
7. Rohsenow, W. M. et al (Editors), 1993, "Handbook of Heat Transfer Fundamentals," 2nd edition, McGraw Hill, New York.
8. VDI, 1992, "VDI-Waermeatlas, 6. Aufl.," VDI-Verlag Duesseldorf.