

Catalytic Coating and Materials

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

배기가스 정화용 촉매(emission control catalyst)는 일반적으로 촉매지지체(catalyst support) 위에 담층(washcoat)을 적용하여 만든다. 담층이 코팅된(washcoated) 부위에 귀금속 촉매가 담지 된다. 담층(washcoat)은 다공질(porous)의 비(卑)산화금속층(base metal oxide layer)으로 구성 되어 있다. 한편, 이 층(layer)은 산성화된 수성(水成)슬러리(acidified aqueous slurry) 형태로 담체(substrate)에 적용된 후 건조(drying) 및 하소처리(煨燒, calcination) 공정을 거쳐서 완성된다. 담층(washcoat)의 재료로 가장 많이 사용되는 것은 산화알루미늄(aluminum oxide, Al_2O_3)이다. 한편, 촉매운반체(catalyst carrier) 또는 증진제(promoter)와 안정제(stabilizer)로도 사용되는 다른 재료에는 이산화 규소(silicon oxide, SiO_2), 산화세륨(cerium dioxide, CeO_2), 이산화티타늄(titanium, TiO_2), 산화 지르코늄(zirconium oxide, ZrO_2), 그리고 제올라이트(zeolite) 등이 있다.

1. Catalyst Washcoat

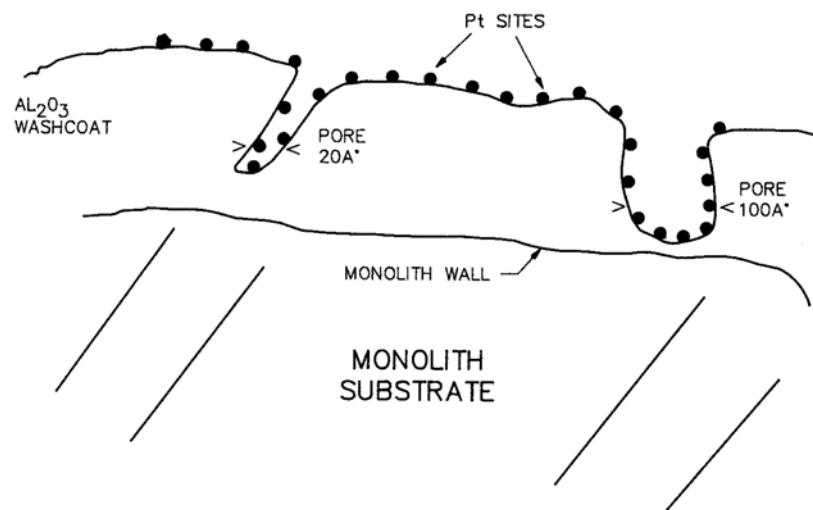


Figure 1 Conceptual model for catalytic sites dispersed on a high surface area Al_2O_3 carrier bonded to a monolith (Heck and Farrauto, 1995)

앞의 Figure 1은 촉매(catalyst)의 구성을 개략적으로 나타낸 그림이다. 즉, 촉매(catalyst)는 모노리스 담체(monolithic substrate) 위에 담층(washcoat)이 덮혀 있는데, 이 담층(washcoat)의 표면과 세공(pore)에 활성촉매(active catalyst)가 담지되어 촉매활성점(catalytic active site)이 형성된다. 여기서, 모노리스 담체(monolithic substrate)는 담층(washcoat)의 지지 기능을 수행하고 있기 때문에 촉매지지체(catalyst support)라고도 한다. 한편, 담층(washcoat)은 그 자체가 촉매운반체(catalyst carrier)로 사용되며 여기에 증진제(promoter) 또는 안정제(stabilizer) 기능을 하는 산화무기물(inorganic oxide)이 첨가되기도 한다. 즉, 촉매운반체(catalyst carrier), 증진제(promoter), 그리고 안정제(stabilizer)는 담층(washcoat)을 이루는 구성요소이다. 한편, 담층(washcoat)의 표면이나 세공(pore)에 귀금속 촉매(noble metal catalyst)가 담지된 것을 촉매화 담층(catalyzed washcoat) 이라고 한다. 증진제는 촉매에 첨가되어 촉매의 활성과 선택성을 높여주거나 촉매의 수명을 늘려주는 물질을 증진제 또는 조촉매라고 한다. (譯註)

최근의 배출물질 제어 촉매(emission control catalyst)는 표면적이 넓은 무기산화물과 귀금속이 코팅된 모노리스 관통형 지지체(monolithic flow-through support)를 주로 이용한다. 촉매의 코팅은 일반적으로 다음의 두 단계로 이루어진다. 즉, (1) 담층을 코팅하고(washcoating), (2) 귀금속을 담지(impregnation)한다.

담층(washcoat)은 지지체(support)의 표면에 붙어 있는 표면적이 넓은 다공질 층(layer)이다. 담층(washcoat)의 정확한 기능은 확실히 매우 복잡하여 정확히 이해되거나 설명이 되지 않는다. 한편, 담층(washcoat)의 주요 기능은 활성물질(catalytic metal)의 분산(dispersion) 담지에 필요한 매우 넓은 표면적을 제공하는 것이다. 이와 함께 담층(washcoat)은 구성요소들을 물리적으로 분리시켜서 복잡한 촉매 시스템 구성요소 사이의 원하지 않는 일부 반응을 방지하는 기능도 가지고 있다

담층(washcoat)의 재료에는 Al_2O_3 (aluminum oxide, alumina), SiO_2 , TiO_2 , CeO_2 , ZrO_2 , V_2O_5 , La_2O_3 , 그리고 제올라이트(zeolite) 등 무기물 비(卑)금속산화물(inorganic base metal oxide)이 사용된다. 이 중의 일부는 촉매운반체(catalyst carrier)로 사용되고, 일부는 증진제(promoter)나 안정제(stabilizer)로 담층(washcoat)에 첨가되고, 일부는 그 자신이 촉매활성(catalytic activity)를 가지고 있기도 하다. 좋은 담층(washcoat) 재료는 비표면적(specific surface area) 및 열적 안정성(thermal stability)이 큰 재료이다. 비표면적은 질소흡착측정법(nitrogen adsorption measurement technique)과 함께 BET(Brunauer, Emmet, and Teller)법으로 알려진 수학적 모델링으로 계산하고, 열적 안정성(thermal stability)은 일반적으로 산소와 수증기가 제어되는 고온의 대기중에 고려하고 있는 대상물질의 견본(sample)을 노출시켜서 평가한다. BET 표면적은 시험중에 서로 다른 시간간격으로 재측정되는데, BET 표면적의 감소는 시험대상 물질의 열적 악화(deterioration)의 정도를 나타낸다.

담층(washcoat)은 물을 탄 슬러리(water based slurry) 형태로 촉매지지체(catalyst support)에 적용된다. 젖어 있는 담층(wet washcoated)은 이후 고온에서 건조(drying) 및 하소처리(煨燒, calcination) 공정을 거쳐서 최종 형태로 만들어진다

일반적으로 귀금속 촉매는 주입(impregnation)이라고 하는 두번째 공정에서 담지된다. 담지(impregnation) 과정 중, 담층이 덮힌 모노리스(washcoated monolith)는 촉매 지지자(catalytic precursor)를 함유하고 있는 수용액(water-based solution)에 노출된다. 담층(washcoat)에 지지된 촉매는 건조(drying) 및 하소처리(煨燒, calcination) 공정을 거쳐서 완성된다. 하소처리(煨燒, calcination) 공정 중에

촉매 지시자(catalyst precursor)는 분해되어 일반적으로 금속 또는 산화금속 형태인 최종촉매를 형성한다. 가장 널리 사용되는 촉매로는 백금(platinum, Pt), 팔라듐(palladium, Pd), 그리고 로듐 (rhodium, Rh)과 같은 귀금속이 이용된다.

한편, V_2O_5 또는 CeO_2 와 같은 많은 비(卑)금속산화물(base metal oxide) 또한 촉매활성(catalytic activity)을 가지고 있다. Ce 과 같은 일부 비(卑)금속촉매(base metal catalyst)는 담층을 만드는 공정(washcoating process)에서 적용되고, 예를 들어 V 와 같은 다른 것은 그 자체 지시자(precursor)의 수용액(aqueous solution) 형태로 주입(impregnation)된다.

1.1 Washcoating Process

촉매담층(washcoat)의 질(quality)은 완성된 촉매의 성능과 내구성에 큰 영향을 미친다. 담층이 형성된 부위(washcoated part)에 주입(impregnation) 공정을 통하여 귀금속이 연속적으로 담지되기 때문에, 즉, 촉매 용액으로 담층(washcoat)의 표면과 세공(pore)을 “적시기(soaking)” 때문에, 담층의 부착(washcoat loading)은 완성품에서 귀금속 촉매의 부착에 영향을 미친다. 따라서, 담층을 바르는 공정(washcoating process)은 매우 균일할 뿐만 아니라 표면이나 세공(pore)의 구조가 연속적으로 이루어지는 담층(washcoat)을 생산할 수 있어야 한다. 담층을 바르는 공정(washcoating process)과 이의 매개변수의 자세한 사항들은 촉매 제조업자들의 기업비밀로 보호되고 있다.

촉매담층(catalyst washcoat)은 수성(水成)슬러리(aqueous slurry) 형태로 담체(substrate)에 적용된다. 알루미나(alumina, Al_2O_3) 분말 그리고/또는 다른 담층(washcoat) 산화물은 요구되는 입자의 크기에 맞도록 미세분말로 만들어진다. 담층(washcoat) 미세분말의 입자크기 분포는 완성된 담층(washcoat)의 기계적 강도 및 담체(substrate)에 부착되는 정도 뿐만 아니라 담층을 바르는 공정(washcoating process) 동안의 유동학적 성질 등에 영향을 미친다. 알루미나(alumina, Al_2O_3)는 매우 단단한 물질로서 일반적으로 공기제트(air-jet) 또는 볼분쇄기(ball mill)을 이용하여 미세분말로 만들어진다

다음 공정은 전단혼합기(shear mixer)를 이용하여 이 물질들을 산성수(acidified water)에 분산시키는 것이다. 슬러리(slurry)의 고체 함유량은 일반적으로 30 ~ 50 % 이다. 충분히 혼합되면 알루미나(alumina, Al_2O_3) 현탁(懸濁)액(suspension)은 안정된 콜로이드 시스템(colloidal system)이 된다.

담체(substrate)에 부착되는 담층(washcoat)의 양은 슬러리의 유동학적 물성치(즉, 점도)에 의존할 뿐만 아니라 이에 의해 조절될 수 있다. 산화알루미늄 슬러리는 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)로서 점도는 시간 및 시스템에 공급되는 기계적에너지(전단율, shear rate)의 양에 따라 변한다. 전단율이 일정할 경우 슬러리의 점도는 pH의 함수이다. 따라서, 점도는 pH의 조정을 통하여 제어할 수 있다. 하지만 점도를 정확히 제어하는 것은 알루미나 시스템의 비뉴턴 특성으로 인하여 담층 부착 공정(washcoating process)에서 가장 어려운 일이다.

담층 슬러리(washcoat slurry)는 특별한 코팅 장비에서 담층이 부착될 부위를 슬러리로 적시거나 슬러리를 쏟아 붓는 방법으로 담체(substrate)에 적용된다. 남은 슬러리는 압축공기를 이용하여 통로(channel)에서 제거된다. 이 후 모노리스(monolith) 벽에 담층(washcoat)을 부착시키기 위하여 모노리스(monolith)를 건조(drying) 및 하소처리(煨燒, calcination)시킨다. 상용 디젤산화촉매(diesel

oxidation catalyst)의 담층(washcoat) 표면의 전자현미경 사진이 아래의 Figure 2에 나와 있다.

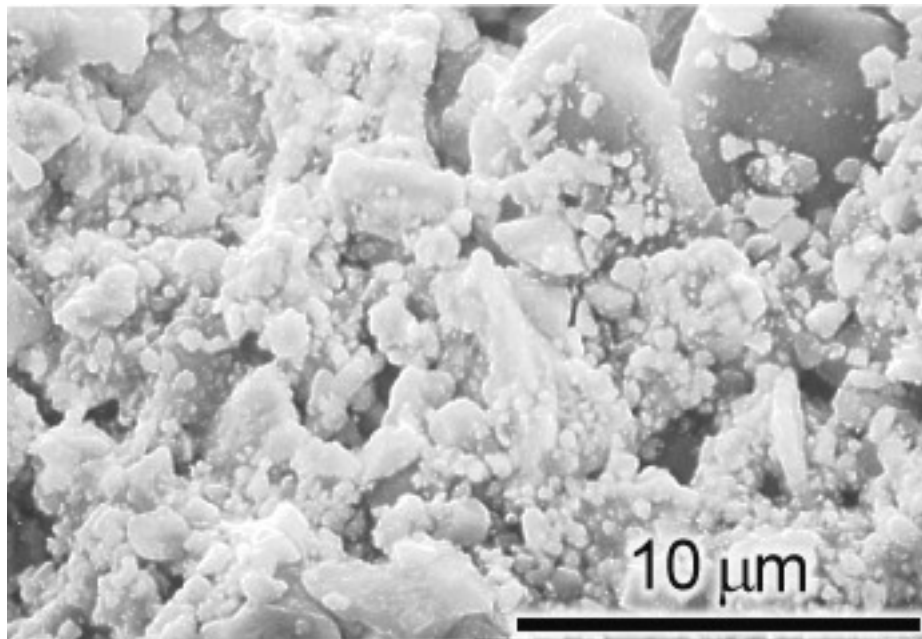


Figure 2. Catalyst Washcoat

담층(washcoat)은 하나, 둘, 또는 그 이상의 층(layer)으로 구성될 수 있다. 밑에 있는 층은 다음 층이 공정되기 전에 건조 및 하소처리(煏燒, calcination)시킨다. 다층(multi-layer) 담층(washcoat)을 사용하는 이유는, (1) 각 층마다 서로 다른 촉매구성(formulation)이 필요한 경우, 그리고 (2) 코팅/공정 장비의 제약, 즉, 한번의 공정으로는 점도가 매우 높은 슬러리를 이용하여 두꺼운 담층(washcoat)을 제조할 수 없는 경우 등이다.

담층(washcoat)의 일반적인 두께는 20 ~ 40 μm 이다. 이 수치는 200 cpsi 의 담체(substrate)의 경우 100 g/l 에서 400 cpsi 의 담체(substrate)의 경우 200 g/l 에 이르는 담층의 부착(washcoat loading)에 해당한다. 담체(substrate)의 비표면적(specific surface area)은 일반적으로 100 ~ 200 m^2/g 이다.

1.2 Segregated Washcoat Technology

복잡한 촉매시스템에서 귀금속은 서로 반응하거나, 담층(washcoat)의 구성물질, 또는 지지체(support)의 물질과 반응할 수도 있는데, 이 경우 촉매로는 사용할 수 없는 원하지 않는 화합물이 생성된다. 만일 이러한 반응이 주어진 촉매시스템에서 일어나면, 이는 일반적인 담층(washcoat) 기술로는 해결하는 것이 어렵다. 촉매물질은 마무리 칠이 끝난 담층(finished washcoat layer) 위에 담지되기 때문에 반응물질 간의 접촉은 피할 수 없다.

분리담층기술(segreated washcoat technology)은, 아래의 Figure 3에 나와 있는 것처럼, 담층(washcoat)을 담체(substrate)에 바르기 전에 담층(washcoat)의 특별한 비(卑)산화금속(base metal oxide) 위에 귀금속을 고정시켜서 귀금속을 물리적으로 서로 격리시키기 위하여 개발되었다. 담층(washcoat)

layer)에 서로 다른 산화물 그리고/또는 귀금속을 사용함으로써 촉매시스템의 구성요소들을 서로 격리시킬 수 있다. 이러한 기술의 장점은 귀금속/비(卑)금속(noble metal/base metal)의 구성비(比)를 확실히 제어할 수 있을 뿐만 아니라 귀금속의 분산도(dispersion)를 향상시킬 수 있다는 것이다.

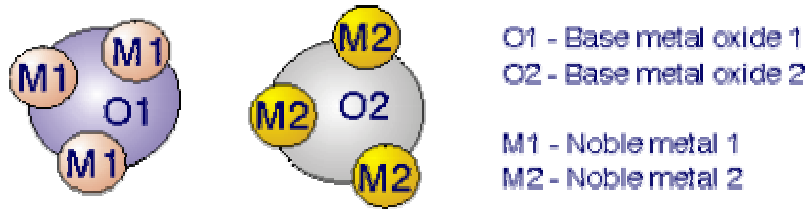


Figure 3. Segregated Washcoat Schematic

분리담층(segreated washcoat)는 승용차의 삼원촉매에 처음 사용되었다. 이러한 촉매의 예로는 백금(platinum, Pt), 팔라듐(palladium, Pd), 그리고 로듐(rhodium, Rh)의 세가지 금속을 사용하는 시스템 들 수 있다. (Steger, 1995) 촉매의 첫번째 층은 Pd/Al₂O₃ 로 구성되어 있고, 두번째(즉, 표면) 층은 Rh/Pt/Ce-Zr 로 이루어져 있다. 이러한 디자인은 촉매의 활성저하(deactivation)을 일으키는 Pd-Rh 합금의 생성을 방지한다.

2. Aluminum Oxide

산화알루미늄(aluminum oxide, alumina, Al₂O₃)은 배기저감촉매의 담층(washcoat)에 사용되는 기본적인 물질이다. 촉매의 응용에는 표면적이 넓은 γ -결정구조(γ -Al₂O₃)가 주로 쓰인다. 모든 촉매 물질들이 그러하듯이, 이 물질 역시 순도(purite)가 매우 높다. 산화알루미늄의 단점은 유황(sulfur)과의 반응성(reactiveness)이다. 아래의 표는 Al₂O₃의 물성치를 나타낸 것이다.

Name	Aluminum Oxide
Formula	Al ₂ O ₃
Formula Weight	101.94
Appearance	White powder
Density	4 g/cc
Melting Point	1999 to 2032 °C
Suppliers	LaRoche, Condea-Vista, Alcoa, W.R. Grace

γ -Al₂O₃를 준비하는 첫째 단계는 “boehmite(譯註 : 뷔믹, AlO(OH), 알루미늄 원광 보오크사이트의 하나, 독일과학자의 이름에서 유래)”로 불리는 일수화물(一水化物, 譯註 : 물 1분자를 가지고 있는 화합물) 알루미늄나 화합물(monohydrate alumina compound, Al₂O₃H₂O)을 만드는 것이다. 약

550 ~ 850 °C 의 하소처리(煨燒, calcination) 공정중에 “Boehmite” 지시자(precursor)의 상변화가 일어난다. 이러한 공정으로 표면적이 가장 높은 알루미나(Al_2O_3)의 형태인 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 가 생성된다. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 의 일반적인 BET 표면적은 $100 \sim 200 \text{ m}^2/\text{g}$ 이다. 촉매의 담층(washcoat) 용으로 현재 판매되고 있는 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 제원의 한 예를 아래의 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Example Specifications of Commercial Gamma- Al_2O_3

Test	Specification	Typical
Chemical Composition		
Al_2O_3 content1, wt.%	97.5 min	98
Total ignition loss1, wt.%	2.5 max	2
Residual boehmite, wt.%	2.0 max	Nil
SiO_2 , wt.%	0.030 max	0.02
Fe_2O_3 , wt.%	0.015 max	0.01
Na_2O , wt.%	0.015 max	0.01
Physical Properties		
Crystal structure	-	gamma
Surface Area, m^2/g	130-200	150
Crystallite size, Å	-	55
Loose bulk density, g/dm^3	600-800	650
Particle size		
- below $45 \mu\text{m}$, wt.%	30 min	45
- above $90 \mu\text{m}$, wt.%	-	15
- average size, μm	-	60
Pore size distribution		
- below 65 Å , %	3-20	10
- below 80 Å , %	20-60	50
- below 100 Å , %	60-90	80
Total pore volume, cm^3/g	0.30 min	0.42
1 - pre-dried at 250 °C for 30 minutes		

아래의 Figure 4는 윗 표에 있는 알루미나 세공(細孔, pore)의 누적체적(cumulative volume)을 세공(pore) 크기의 함수로 나타낸 것이다.

한편, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 를 연속 가열시키면 표면의 수산기(水酸基, hydroxyl) 그룹의 손실과 소결현상(sintering)이 나타난다. 약 1150 °C 에서 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 는 실제 표면적이 가장 작은 구조인 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 으로 변환된다. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 세공(pore)의 전형적인 지름은 $1,000 \text{ Å}$ 이고 표면적은 $1 \sim 1.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 이다.

Al_2O_3 에 어떤 원소가 존재하게 되면 Al_2O_3 의 부정적 또는 긍정적으로 열적 안정성

(thermal stability)에 매우 큰 영향을 미친다. 예를 들어, Al_2O_3 에 적은 양의 Na_2O 가 존재하더라도 이는 용제(溶劑, flux)로 작용을 하여 알루미나(Al_2O_3)의 소결(sintering)을 촉진시키게 된다. 이와 반대로, La_2O_3 , SiO_2 , BaO , 그리고 CeO_2 등과 같은 일부 산화금속은 알루미나(Al_2O_3) 표면에서 안정제(stabilizer)의 기능을 수행하여 소결율(sintering rate)을 감소시킨다. 일부 제조업체에서는 이와 같은 안정제가 첨가된 알루미나(stabilized alumina)를 판매하고 있다.

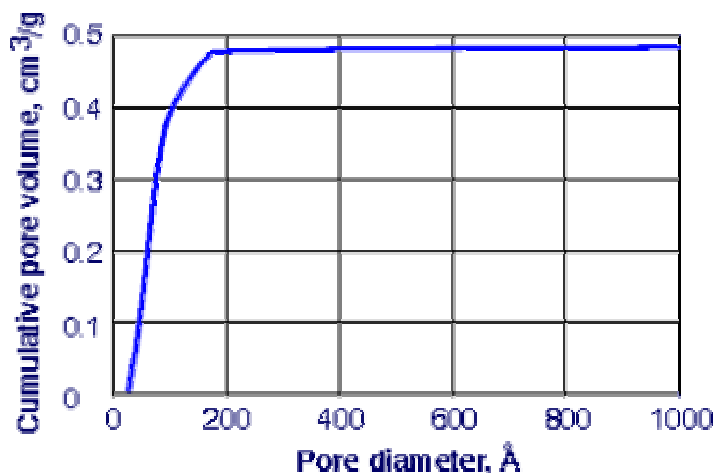


Figure 4. Pore Distribution of a Commercial Gamma-Alumina

3. Silicon Oxide

산화규소(silicon oxide, silica, SiO_2)는 배기가스에 있는 유황(sulfur)을 함유한 화합물과의 반응활성(activity)이 낮기 때문에 일부 디젤촉매(diesel catalyst)의 적절한 촉매운반체(catalyst carrier)로 사용된다. 표면적이 넓은 SiO_2 의 BET 표면적은 매우 높아서 약 $300 \sim 400 \text{ m}^2/\text{g}$ 정도이다. 이 물질은 화학결합이 되어 있는 수분(water)의 함유량이 적기 때문에 표면 산도(酸度, acidity)가 높다.

Name	Silicon dioxide
Formula	SiO_2
Formula Weight	60.06
Appearance	White powder

실리카(silica, SiO_2)는 촉매운반체(catalyst carrier) 또는 알루미나(Al_2O_3)의 안정제(stabilizer)로 사용될 수 있다. 알루미나(Al_2O_3)와 비교하였을 때 순수 실리카(SiO_2)는 고온에서의 열적 안정성(thermal stability)이 떨어지기 때문에 가솔린엔진의 촉매와 같이 고온에서 작동되는 촉매의 운반체(carrier)로서는 성능이 떨어진다.

4. Cerium Dioxide

산화세륨(cerium dioxide, ceria, CeO_2)는 승용차 삼원촉매 담층(washcoat)의 표준요소로서 성능을 25% 까지 향상시킨다. 세리아(ceria, CeO_2)는 승용차의 배출가스 제어 촉매에서 가장 중요한 증진제(promotor)이다. 삼원촉매에서 세리아(CeO_2)의 가장 중요한 기능은 산소저장(oxygen storage) 작용으로서, 이 작용은 Ce^{4+} 와 Ce^{3+} 사이의 순환작용(cycling)을 통하여 가능하다. 세리아(CeO_2)의 다른 효과로는 (1) 알루미나(Al_2O_3)의 안정화, (2) 증기개질반응(steam reforming reaction)의 촉진, (3) 귀금속 분산도(dispersion)의 촉진, 그리고 (4) 귀금속 사용저감의 촉진 등이 있다.

Name	Cerium dioxide, ceric oxide
Formula	CeO_2
Formula Weight	172.1
Appearance	light-brown to pale-yellow powder
Density	7.28 g/cc
Melting Point	~ 2500 °C
Suppliers	Rhone-Poulenc, Molycorp, W.R. Grace

일부 디젤산화촉매(diesel oxidation catalyst)는 많은 양의 세리아(CeO_2)를 부착하여 제조하기도 한다. 이 경우 세리아(CeO_2)의 기능은 디젤 입자상물질 중 SOF 성분의 촉매산화(catalytic oxidation)/열분해(cracking)이다.

한편, 세륨 화합물의 하소처리(煨燒, calcination) 공정으로 표면적이 넓은 산화세륨(cerium oxide)을 만든다. 세리아(CeO_2)의 BET 표면적은 $270 \text{ m}^2/\text{g}$ 정도까지 높일 수 있지만 승용차의 삼원촉매에 사용되는 세리아(CeO_2)의 BET 표면적은 약 $150 \text{ m}^2/\text{g}$ 이다. 약 $900 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 고온에서도 견딜 수 있는 변종(變種, variety)의 표면적은 $6 \sim 60 \text{ m}^2/\text{g}$ 정도이다.

종종, 열적 안정성(thermal stability)을 증가시키기 위하여 세리아(CeO_2)에 산화지르코늄(zirconium oxide, ZrO_2)가 첨가된다.

5. Titanium Dioxide

Name	Titanium dioxide
Formula	TiO_2
Formula Weight	79.9
Density	3.84 g/cc (anatase), 4.26 g/cc (rutile)

이산화티타늄(titanium dioxide, TiO_2)은 일부 디젤촉매에서 반응성이 없는(inert), 질산염을 생성하지

않는(non-sulfating) 운반체(carrier)로 사용된다. 이산화티타늄(titanium dioxide)의 중요한 결정구조에는 “anatase(譯註:예추광(銳錐鑛) TiO_2)”와 “rutile(譯註:금홍석(金紅石) TiO_2)”이 있다. 이 중에서 “anatase” 형태는 촉매분야에서 중요한 것으로서, 최고 표면적은 $50 \sim 120 \text{ m}^2/\text{g}$ 이고 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지는 열적으로 안정하다. “Rutile” 구조의 표면적은 매우 낮아서 약 $10 \text{ m}^2/\text{g}$ 정도이다. 한편, 약 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도에서 “anatase”에서 “rutile”로의 변환이 일어나서 촉매 활성저하(deactivation)를 초래한다.

6. Zirconium Oxide

Name	Zirconium dioxide
Formula	ZrO_2
Formula Weight	123.22
Suppliers	Magnesium Elektron, Rhone-Poulenc

산화지르코늄(zirconium oxide, ZrO_2)은 승용차 삼원촉매에서 세리아(CeO_2)의 열적 안정제(thermal stabilizer) 그리고 증진제(promoter)로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 디젤산화촉매(diesel oxidation catalyst)에서 담층(washcoat)의 질산염을 생성하지 않는(non-sulfating) 구성요소로도 사용될 수 있다. 산화지르코늄(ZrO_2)의 BET 표면적은 $100 \sim 150 \text{ m}^2/\text{g}$ 이지만, $500 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 표면적이 급격히 손실된다. La, Si, Ce, 그리고 Y 등 넓은 범위의 도펀트(dopant, 譯註:도핑을 위해 반도체에 첨가하는 소량의 화학적 불순물)를 사용하여 열적 안정성(thermal stability)를 향상시킬 수 있다.

7. Zeolites

제올라이트(zeolite)는 모양이 분명한 결정 구조와 세공(pore) 크기를 가지고 있는 알루미늄(alumina)-규산염(silicate)에서 자연적으로 또는 인공적으로 합성할 수 있는 물질이다. 제올라이트(zeolite) 세공(pore)의 치수는 $3 \sim 8 \text{ \AA}$ 으로서 분자크기의 범위에 속한다. 단면적이 큰 분자들은 제올라이트(zeolite) 구조의 통로(channel)에 들어갈 수 없다. 이러한 분자크기에 따른 분리효과를 강조하여 제올라이트(zeolite)는 종종 분자체(molecular sieve)라고도 한다. ZSM-5, A, 모더나이트(mordenite), Y, 그리고 β 와 같이 상업용으로 판매되는 물질을 포함하여 많은 타입의 제올라이트(zeolite)가 존재한다.

Name	Zeolites, molecular sieves
Formula	$x \text{ SiO}_2 \cdot y \text{ Al}_2\text{O}_3$
Suppliers	GSA, UOP, Degussa, Zeolyst, Zeochem

제올라이트(zeolite)의 중요한 특성은 세공(pore)의 뼈대를 이루는 실리카(silica, $\text{SiO}_{4/2}$)와 알루미나(alumina, $\text{AlO}_{4/2}$) 4면체(T-units) 결정구조에 근거를 두고 있다. Si/Al 의 구성비(比)는 제올라이트(zeolite)의 물리적 그리고 화학적 물성치를 반영할 뿐만 아니라 제올라이트(zeolite)의 전하(電荷, electron charge)와 극성(極性, polarity)의 정도를 나타내는 척도이다. 다음은 세공(pore) 크기의 관점에서 흔히 사용되는 제올라이트(zeolite)의 구조적 분류이다. (Leyrer, 1996)

- Large pore zeolites : 12 T-units form the pore opening (e.g. ZSM - 12)
- Medium pore zeolites : 10 T-units form the pore opening (e.g. ZSM - 5)
- Small pore zeolites : 8 T-units form the pore opening (e.g. ZSM - 58)

제올라이트(zeolite)의 특징은 비표면적(specific surface area)이 크다는 것이다. 예를 들어, ZSM-5 제올라이트(zeolite)의 표면적은 $\sim 400 \text{ m}^2/\text{g}$ 이고, 제올라이트 모더나이트(zeolite mordenite)의 표면적은 $400 \sim 500 \text{ m}^2/\text{g}$ 이다. 대부분의 제올라이트(zeolite)는 500°C 까지 열적으로 안정하다.

촉매에 사용되는 제올라이트(zeolite)는 금속양이온(metal cation)과 교환된 이온이다. 먼저, 산(酸, acid) 형태의 제올라이트(즉, HZ)는 암모니아 교환 제올라이트(ammonium exchanged zeolite), NH_4^+Z^- 를 만들기 위해 $\text{NH}_4^+(\text{NH}_4\text{NO}_3)$ 를 함유하고 있는 수용액(aqueous solution)으로 처리된다. 이후, 촉매양이온(catalytic cation)을 함유하고 있는 염(鹽)용액(salt solution)으로 처리되어 금속 교환 제올라이트(metal exchanged zeolite)(즉, MZ)가 생성된다.

제올라이트(zeolite)는 세공(pore)의 구조가 명확할 뿐만 아니라 세공(pore) 크기의 제한으로 인하여 분자크기에 따라 선택적으로 흡착되기 때문에 좋은 흡착물질(adsorption material)이다. 이들은 건조(drying), 정화(purification), 그리고 분리(separation) 등 수많은 분야에서 흡착제(adsorbent)로 사용되고 있다. 합성 제올라이트(synthetic zeolite)는 또한 석유화학 공정에서 촉매로도 사용된다.

최근, 제올라이트(zeolite)는 디젤 배출물질의 제어기술, 즉, 촉매(SCR, lean NO_x 촉매, 등)와 흡착제(디젤산화촉매의 HC 트랩, 등) 분야에서 그 사용이 날로 증가하고 있다.

참 고 문 헌

1. Alcoa Industrial Chemicals, 1998, "HiQ?7000 Series Alumina," Product Specification.
2. Heck, R. M., and Farrauto, R. J., 1995, "Catalytic Air Pollution Control : Commercial Technology," International Thomson Publishing, Inc., New York, p. 6
3. Leyrer, J., et al., 1996, "Advanced Studies on Diesel Aftertreatment Catalysts for Passenger Cars," SAE 960133.
4. Steger, J., 1995, "Advances in Emission Control Technology," SAE Catalysts, Emission Control and Catalytic Combustion TOPTEC, Costa Mesa, CA, October 1995.