

## 고다공성 카본 에어로젤(C-Aerogel) 표면 특성

김지혜<sup>a,b</sup>, 이창래<sup>a\*</sup>, 정용수<sup>a</sup>, 김양도<sup>b</sup>, 김인배<sup>b</sup>

<sup>a</sup>재료연구소 표면기술연구부 연료전지소재연구그룹, <sup>b</sup>부산대학교 공과대학 재료공학과

### Surface Properties of the High Porous Carbon Aerogels

Ji-Hye Kim<sup>a,b</sup>, Chang Rae Lee<sup>a\*</sup>, Youngsoo Jeong<sup>a</sup>, Yangdo Kim<sup>b</sup>, In-Bae Kim<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Korea Institute of Materials Science (KIMS), Dept. Surface Technology, Changwon 641-831, Korea

<sup>b</sup>Pusan National University, School of Materials Science & Engineering, Pusan 609-735, Korea

(Received April 28, 2008 ; revised June 26, 2008 ; accepted June 29, 2008)

#### Abstract

The pyrolyzed carbon xerogel and aerogels were prepared from the sol-gel polymerization of resorcinol-formaldehyde(RF) followed by the dry process under ambient pressure and supercritical carbon dioxide condition respectively. The thermal behaviour of RF polymer xerogel was investigated with TGA analyzer to correspond with the pyrolysis process. The surface properties such as particle size, morphology and the point of zero charge of the pyrolyzed porous carbon aerogels were studied for the precious metal catalyst supported media. It was found that the volume of the polymer aerogel decreased because of the significant linear shrinkage and weight loss of polymer gel during the carbonization. The point of zero charge of the carbon aerogel pyrolyzed at 1050°C under inert gas flow was about 10.

*Keywords: Carbon aerogel, Porous materials, Catalyst supported media, Point of zero charge (PZC)*

## 1. 서 론

에어로젤(aerogel) 소재는 초경량, 저밀도 및 나노 기공구조 특성을 가진 초다공성 소재로 현재까지 개발된 재료 중에서 가장 작은 밀도를 갖는 신소재이다. 이는 2-5 nm 크기의 구형 입자가 3차원 네트워크를 형성하면서 만들어지는 100 nm 이하의 기공 내부에 공기분자가 전체 부피의 98-99.8%까지 채워질 수 있는 다공성 구조형태로 되어 있어 얻어진 이름이다. 에어로젤은 고체와 같은 응축상 내부에 기체가 분산된 형태로 기체상 내부에 액체나 고체입자가 분산된 형태인 에어로솔(aerosol)과는 구별된다. 에어로젤 형태의 소재는 구조적으로 나노 입자들이 3D 네트워크로 결합되어 있는 연속적인 단일구조체(monolithic) 형태를 이루기 때문에 2 nm 이하의 나노 기공을 갖는 micropores 및 2 nm < d < 50 nm 범위의 mesopores 기공과 큰 비표면적(400-

1200 m<sup>2</sup>/g)을 얻을 수 있다. 이러한 독특한 화학적, 구조적 특성을 가진 다공성의 에어로젤은 연속적인 단일구조체(monolithic) 뿐만 아니라 구슬(beads), 분말(powder) 또는 박막(thin film) 등의 다양한 형태로도 제조할 수 있다.

일반적으로 잘 알려진 SiO<sub>2</sub> 에어로젤과 달리 전기전도성을 갖는 고다공성 카본 에어로젤(C-aerogel)은 흡착체, 이차전지, 전기이중층 캐패시터(electrochemical double layer capacitor, EDLC, supercapacitor)<sup>1)</sup>, 전기이중층 이온제거(capacitive deionization, CDI)<sup>2)</sup>, 촉매 담지체<sup>3)</sup> 등의 전기화학 분야에서 다양한 응용<sup>4)</sup>이 기대되고 있다. 미국의 LLNL(Lawrence Livermore Nation Lab)의 Pekala 등<sup>5-7)</sup>에 의해서 처음으로 제조된 전도성의 카본 에어로젤은 전형적으로 수용액내에서 resorcinol-formaldehyde계의 졸-겔(sol-gel) 공정에 의한 폴리머 젤 합성, 액체 CO<sub>2</sub> 초임계 건조 및 고온의 불활성 분위기에서 탄화공정(pyrolysis)으로 제조된다.

지금까지 카본 에어로젤에 대한 제조공정 및 그

\*Corresponding author. E-mail : changlee@kims.re.kr

특성에 대한 다양한 연구<sup>8)</sup>가 수행되었지만 실제 고분자형 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC) 분야 등에서 전극촉매 담지체, 가스확산층 소재로 적용할 경우에는 카본의 젖음성, 친소수성 등 표면의 화학적 물성에 대한 다양한 정보가 요구된다. 본 연구에서는 카본 에어로젤의 제조공정에 따른 입도, 표면 형상 등의 물리적 특성과 수용액 내에서 다공성 카본 에어로젤의 PZC(point of zero charge)와 같은 화학적 특성에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 폴리머 하이드로젤(hydrogel) 합성

카본의 전구체(precursor)인 폴리머 젤은 resorcinol과 formaldehyde 혼합 수용액에 합성 촉매로 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 소량 첨가하여 그림 1과 같은 sol-gel 공정으로 합성되었다<sup>5)</sup>. RF-하이드로젤 합성의 기본 조성으로 formaldehyde에 대한 resorcinol의 몰비 R/F = 0.5로 하여 첨가되는 촉매 농도 및 물의 양을 변화시켰다. 카본 에어로젤의 기공구조 및 물성변화가 미치는 영향을 조사하기 위하여 경우에 따라서는 소량의 계면활성제가 첨가되었다. 혼합용액은 몰드에 넣고 밀폐한 상태로 80°C 오븐 내에서 24시간 동안 보존하여 하이드로젤을 제조하였다.

### 2.2 초임계 CO<sub>2</sub> 건조공정

Sol-gel 공정으로 제조된 하이드로젤의 내부 기공에는 합성공정에서 첨가된 물이 채워져 있으므로

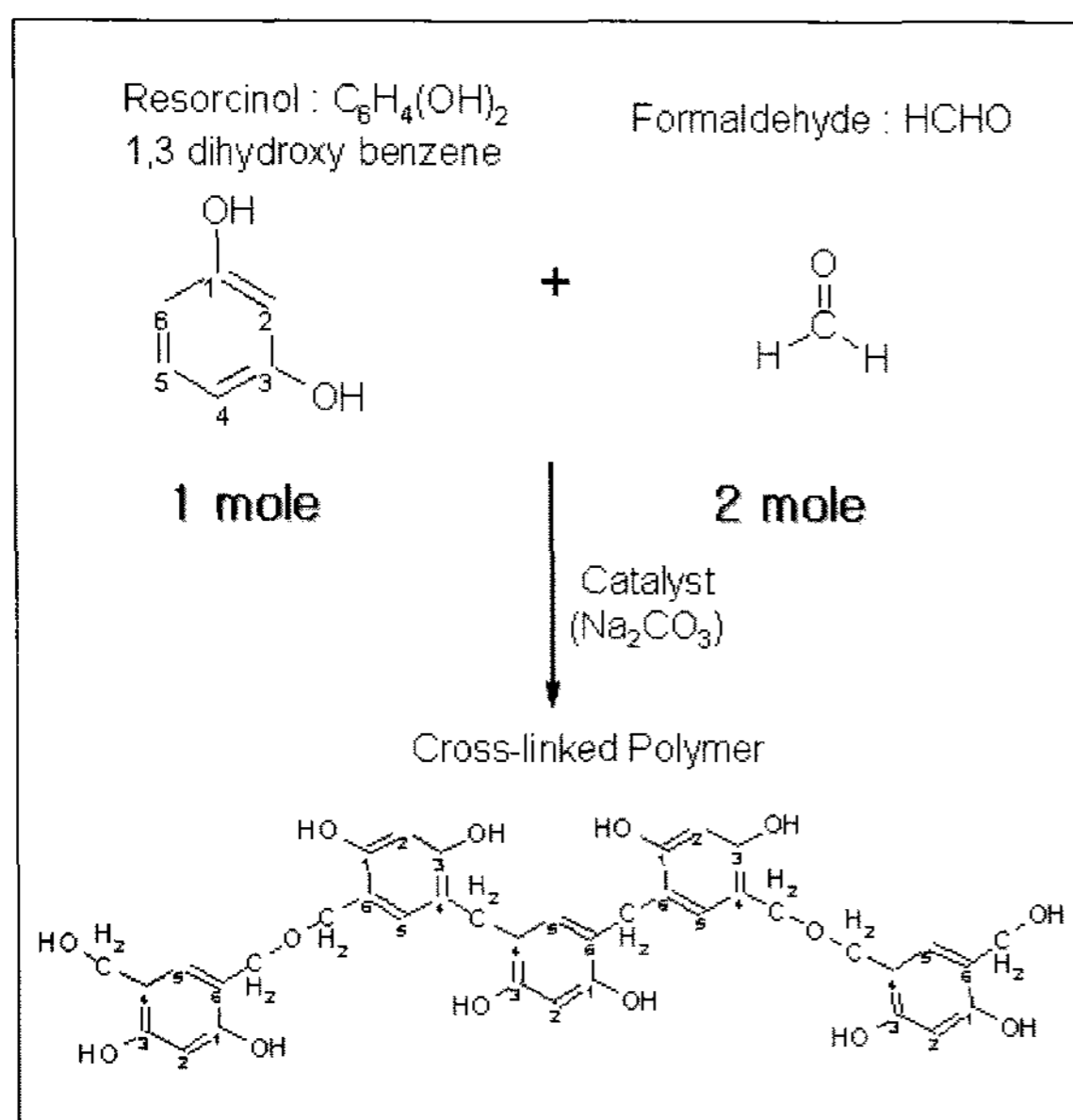


Fig. 1. The synthesis of resorcinol-formaldehyde hydrogel (RF-hydrogel) by sol-gel process.

대기 중 건조과정에서 물의 표면장력(72.8 mN/m @ 20°C)으로 인해 기공 벽면에 압축응력이 인가되고 결국 기공구조의 파괴와 큰 수축을 유발한다. 대기 중 건조 공정에서 수축을 수반하는 지어로젤(xerogel) 다공체 형성을 방지하기 위하여 건조공정에서 기공 벽면에 작용하는 액체의 표면장력을 가능한 낮출 필요가 있다. 일반적으로 고체표면에서 액체의 표면장력은 초임계 유체영역에서는 액체와 고체의 구분이 없어 0이 된다. 따라서 초임계 조건에서 건조공정을 실시할 경우 부피수축이나 기공파괴가 없는 다공체 구조인 에어로젤(aerogel)을 얻을 수 있다.

제조된 폴리머 하이드로젤을 몰드용기에서 꺼내어 절대 에탄올(HPLC grade, Ethanol absolute)에서 5~10시간 정도 침적하여 기공 내부에 존재하는 물이 알코올로 완전히 치환되도록 용매치환공정을 최소 3~5회 정도 반복하였다. 초임계 CO<sub>2</sub> 건조공정에서 사용되는 액체 CO<sub>2</sub>가 알코올과는 혼합되지만 물과는 혼합되지 않기 때문에 반드시 필요한 공정이다. 이 단계에서 젤 기공 내부에 존재하는 물이 알코올 성분으로 완전히 치환되지 않을 경우 기공 내부에 존재하는 물로 인하여 부분적인 부피 수축이 수반된다. 초임계 건조공정 단계는 하이드로젤 다공체내의 용매인 물이 알코올로 치환되고 다시 액체 CO<sub>2</sub>로 치환된 후 표면장력이 없는 초임계 CO<sub>2</sub> 단계를 거친 후 바로 가스 상태의 CO<sub>2</sub>로 되기 때문에 부피수축이 없는 고다공성의 폴리머 에어로젤을 얻을 수 있다. 알코올 용매의 치환이 이루어진

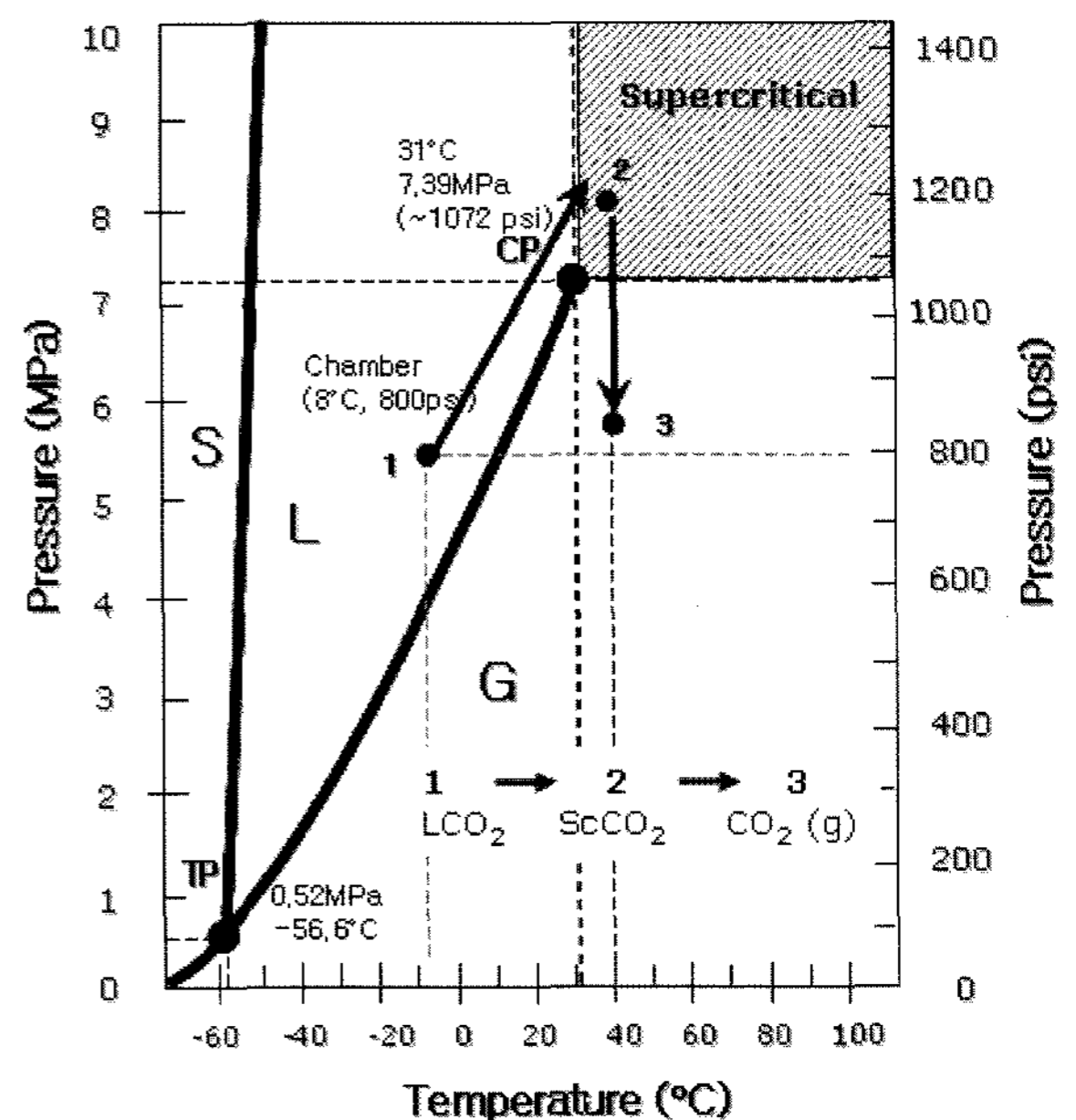


Fig. 2. The drying processing step for the porous aerogel material under the supercritical CO<sub>2</sub> condition.

폴리머 젤은 초임계 CO<sub>2</sub> 건조기(Automegasamdri-916B, tousimis)에 넣어서 액체 CO<sub>2</sub>가 폴리머 하이드로젤 내부의 에탄올과 완전히 치환 되도록 한 후 그림 2의 나타낸 경로를 거쳐 초임계 건조를 실시하였다.

**2.3 탄화공정(pyrolysis)**

건조된 RF 폴리머 젤은 불활성가스 분위기의 박스로(Sinter All, Lindberg)에서 탄화처리 되었다. 질소가스 분위기 조건에서 60°C/h로 가열하여 300°C에서 3시간 유지하여 흡착된 수분이나 휘발성 성분을 제거한 후 동일한 승온속도로 1050°C까지 가열하였다. 최종 온도에 도달 후에 가스분위기를 CO<sub>2</sub> 가스로 전환하여 2시간동안 유지하면서 탄화공정과 동시에 비표면적 극대화를 위한 부분산화처리를 실시하였다. 최종 탄화처리 후 다시 질소가스 분위기 하에서 동일한 감온속도로 50°C까지 냉각하였다.

**2.4 카본 에어로젤의 표면특성 분석**

폴리머 젤의 탄화공정 조건 및 열적 거동을 조사하기 위하여 열중량분석(Thermogravimetric analyzer, TGA)을 TGA 7(Perkin Elmer)을 이용하여 실시하였다. 이는 폴리머 젤의 탄화공정 조건에 대응할 수 있도록 질소가스 분위기에서 5°C/min 승온속도로 850°C까지 중량감소를 측정하였다. 또한 탄화공정으로 얻어진 카본 에어로젤의 입자크기 및 표면 형상을 확인하기 위하여 FE-SEM(JEOL JSM-6700F) 분석을 실시하였다.

측매 담지체로서 카본 에어로젤 적용시 중요한 카본 표면의 PZC(point of zero charge,  $pH_{pzc}$ )는 pH를 이미 알고 있는 일정 용량의 초기 용액에 카본을 첨가 후 일정시간 동안 교반한 후 최종 용액의 pH를 측정하여 계산하였다. 최종 pH 값은 용액과 카본 표면의 기능기와의 반응에 기인하므로 용액의 초기 pH와 최종 pH 관계 곡선에서 나타나는 일정한 pH plateau 영역이 PZC에 해당된다. PZC 측정을 위하여 1N HCl과 NaOH로 pH 1~13까지 조

정한 50 ml 용액을 13개 준비하였다. 각 용기에 공기 중의 CO<sub>2</sub>가 용해되어 pH가 변하지 않도록 질소가스 분위기에서 덮개로 밀봉하였다. 카본 표면에 접촉하는 용액의 량(surface loading)을 일정하게 하기 위하여 50 ml 용액에 첨가되는 카본의 량은 다음 식 (1)으로 결정하였다<sup>9)</sup>.

$$M_{carbon}(g) = \frac{Surface\ loading(m^2/L) \times Solution\ Volume(L)}{Surface\ Area\ of\ Carbon(m^2/g)} \quad (1)$$

**3. 실험결과 및 고찰**

카본 에어로젤의 다공성 구조 및 특성은 RF 폴리머 젤의 다공성 구조와 성질을 그대로 반영하게 된다. RF 폴리머 젤의 다공성 구조 및 입자의 크기는 합성 공정변수인 sol-gel 용액의 R/F비, R/C 및 R/W비에 의해 결정된다. 또한 폴리머 젤의 기공구조는 건조공정에 따라 큰 차이를 보인다. 그림 3은 대기 중에 건조된 지어로젤(xerogel) 형태의 폴리머 젤과 초임계 CO<sub>2</sub> 조건에서 건조한 에어로젤(aerogel)을 나타낸 것으로 대기 중에 건조 시에는 기공 내부에 존재하는 물의 표면장력에 기인한 캐필러리 포스 압축응력 성분으로 60-90% 정도의 부

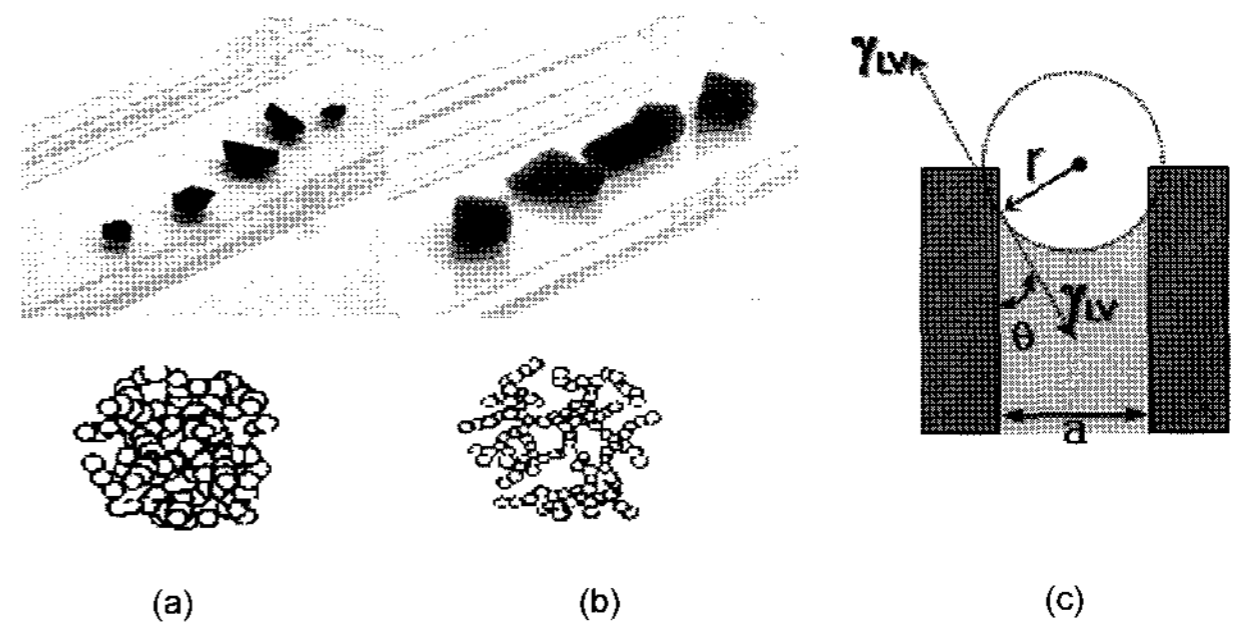


Fig. 3. The shrinkage behavior of the polymer hydrogel according to the drying condition. (a) RF-xerogel dried under air, (b) RF-aerogel dried under supercritical CO<sub>2</sub>, (c) Capillary force in pore of hydrogel.

Table 1. The shrinkage and weight loss of the RF-polymer aerogel (R/C = 180-200, R/W = 0.23) after pyrolysis @ 1050°C under inert gas flow

Properties	RF-aerogel*	Carbon aerogel	Remarks
Linear shrinkage(%)		20-22	after pyrolysis (1050°C)
Volume shrinkage (%)		50-53	after pyrolysis (1050°C)
Weight loss (%)		54-56	by measuring weight
		60-70	by TGA
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.17-0.4	0.20-0.30	R/W = 0.14-0.23

\*R/C (resorcinol/catalyst, g/g) = 180-200.  
\*R/W (resorcinol/water, g/g) = 0.23.

피 수축이 수반되었다. 이러한 부피수축은 첨가된 물의 함량이 높을수록 증가하는 경향을 보였다. RF 폴리머 젤(R/F = 0.5, R/C = 200, R/W = 0.05 합성조건)의 선형 수축비율은 대기 중 건조에서 50%, 탄화공정에서 10% 정도의 부피 수축을 수반하였다. 지어로젤 형태의 폴리머 젤의 부피수축은 대부분 건조단계에서 일어나는 것을 알 수 있었다. 그러나 에어로젤 형태의 폴리머 젤은 초임계 CO<sub>2</sub> 건조공정에서는 부피수축이 수반되지 때문에 대부분의 부피 수축과 중량 감소는 고온의 탄화공정에서 발생한다. 표 1은 탄화공정에서 에어로젤의 선형수축, 중량감소 및 밀도 등의 물성변화를 나타낸 것이다.

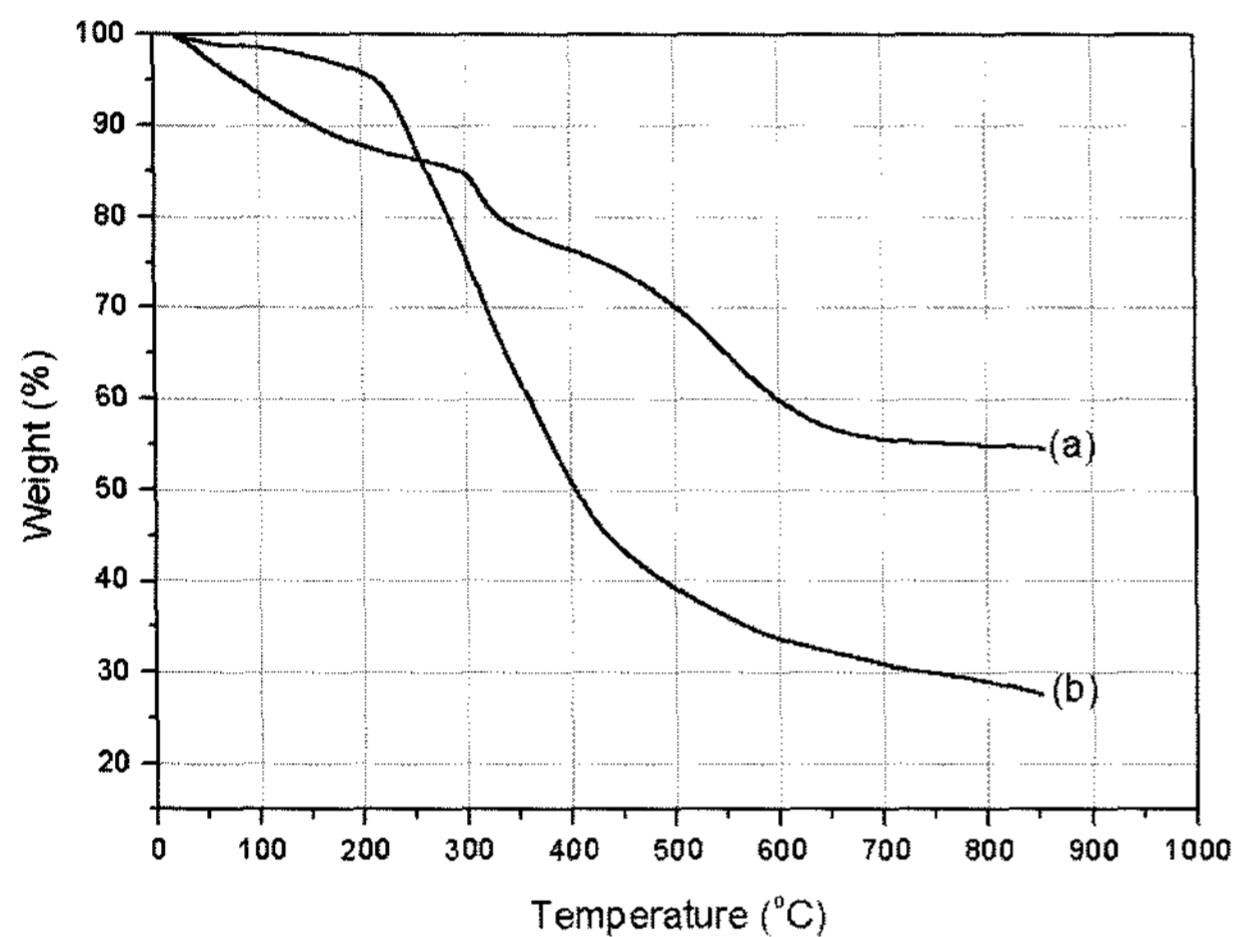


Fig. 4. The TGA behaviour of RF-xerogel dried under the ambient air pressure. (a) RF-xerogel without surfactant, (b) RF-xerogel with surfactant.

초임계 건조공정으로 제조된 에어로젤(R/F = 0.5, R/C = 180-200, R/W = 0.23)의 경우 탄화공정에서 50-60% 이상의 중량감소와 더불어 약 20% 이상의 선형수축이 수반되었다.

카본 에어로젤 제조를 위한 탄화공정 조건을 찾기 위하여 탄화공정의 조건에 대응할 수 있는 열중량분석을 실시하였다. 그림 4는 RF-지어로젤(R/F = 0.5, R/C = 200, R/W = 0.1)의 TGA 결과를 나타낸 것으로 합성공정에서 기공구조 제어를 위하여 소량의 계면활성제가 첨가된 경우에는 800°C 이상에서 70% 이상의 중량 감소가 수반되었지만 첨가되지 않은 샘플의 경우 45% 정도의 중량감소가 발생하였다. RF 폴리머 젤의 TGA 곡선에서 온도에 따른 크게 3가지 변곡점을 확인할 수 있었다. 250~300°C 범위이상에서 급격한 중량감소가 발생하고, 350°C 온도영역에서 2차 중량 감소 후 550°C 영역에서 3차 중량 감소가 일어난 후 700°C 이상의 온도에서는 일정한 중량을 나타내었다. Lin 등<sup>10</sup>에 따르면 이러한 중량 감소는 250°C 온도 근방에서 다공체내에 흡착된 수분이나 잔류 휘발성 유기물의 증발과 그 이상의 온도에서의 폴리머 자체의 열분해 반응에 기인한다. 열분해 과정에서는 약 350°C 및 550°C 온도 근방에서 C-O 결합과 C-H 결합의 분해가 각각 일어나면서 C-C 결합의 탄화공정이 진행되는 것으로 보고하였다.

제조한 RF-에어로젤(R/F = 0.5, R/W = 0.23) 합성시 촉매량(R/C비)이 입자크기에 미치는 영향은 합

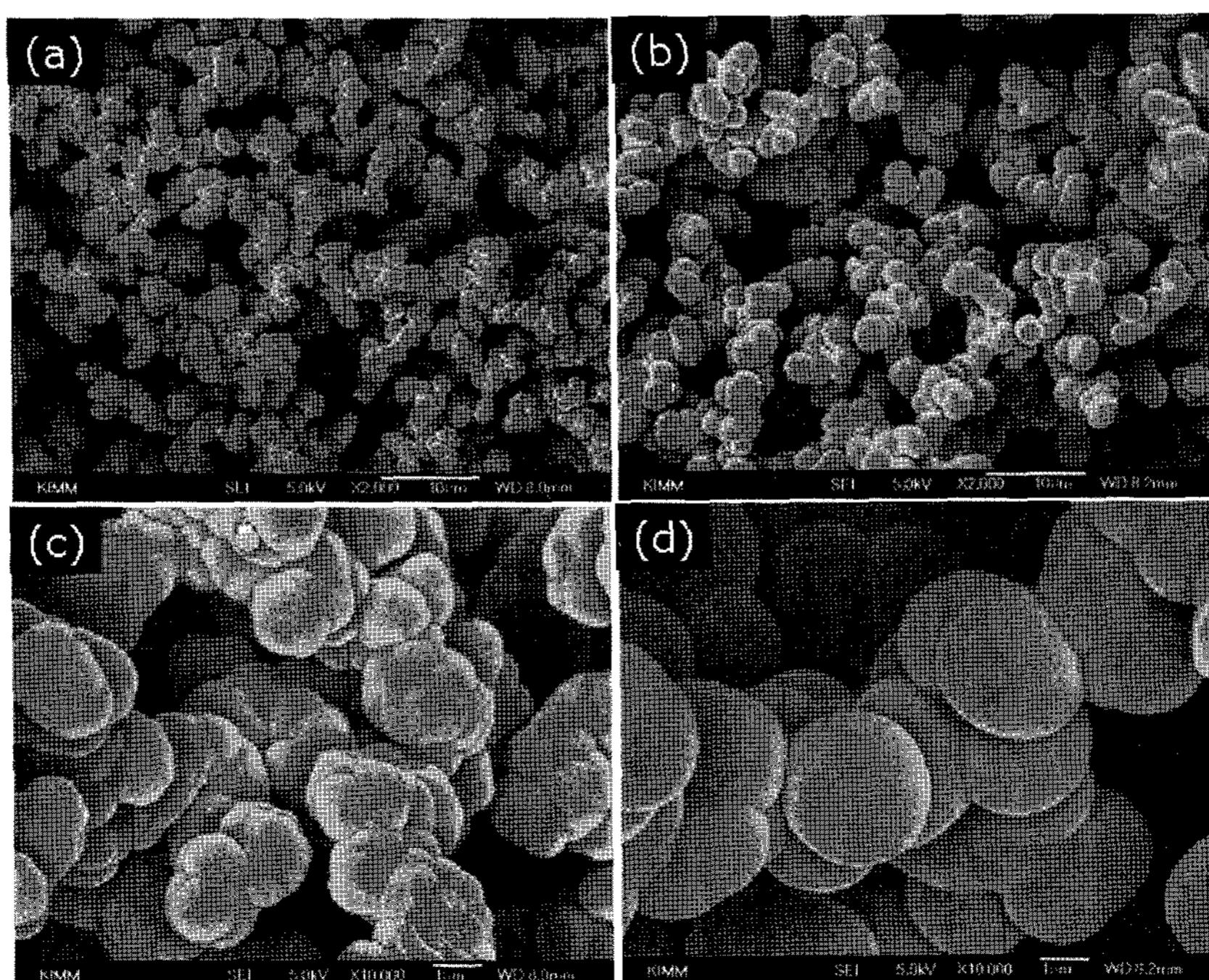


Fig. 5. The surface morphology of the carbon aerogel pyrolyzed from the RF aerogel at 1050°C under nitrogen gas flow. (a) and (c) carbon aerogel (R/C = 180), (b) and (d) carbon aerogel (R/C = 200).

성한 RF-에어로젤로부터 탄화공정으로 제조한 카본 에어로젤의 표면형상을 SEM으로 분석하여 조사하였다. 카본 에어로젤의 입자 및 기공구조는 합성된 폴리머 젤의 입자 및 기공구조를 그대로 반영하기 때문에 카본 에어로젤의 표면 형상, 입도, 기공구조에 미치는 영향을 젤 합성 공정 변수로부터 제어할 수 있다. 그림 5는 R/C = 180-200 조건에서 제조한 RF-에어로젤에서 얻어진 카본 에어로젤의 FE-SEM 이미지이다. 폴리머 에어로젤의 합성공정에서 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 촉매 농도가 낮을수록 형성된 에어로젤의 입자의 크기가 증가하였다. 이것은 sol-gel 공정에서 sol 입자의 핵생성속도와 성장속도에 미치는 촉매량의 관계를 설명할 수 있다. 촉매의 농도가 높은 경우(낮은 R/C비) 빠른 sol 핵생성속도를 보이기 때문이다. 따라서 낮은 R/C비(고농도 촉매)에서 합성된 폴리머 젤은 입도가 작고 치밀한 기공구조를 나타내며 R/C비가 증가할수록 큰 입자로 구성된 다공성의 젤 구조를 가진다.

Pt/C 촉매 준비 단계에서 카본 담지체의 PZC에 대한 정보는 중요한 요소이며 PZC는 촉매 담지체인 카본 표면이 용액과 반응하여 표면 전하가 중성이 되는 용액의 pH로 정의할 수 있다<sup>9)</sup>. 카본 표면의 전하나 젖음성 및 친소수성 등의 물성은 제조공정이나 표면 활성화 처리 과정에서 생성된 다양한 기능기들에 의하여 결정된다. 용액 내에서 촉매의 담지체로 카본 소재를 적용하기 위해서는 촉매의 제조공정에 사용되는 Pt 화학종의 이온 전하 특성과 카본의 표면 화학특성을 고려한 제조공정의 선택이 필요하다<sup>11)</sup>. 촉매 담지체 표면의 중성 전하 pH 값 PZC는 제타전위 측정기를 이용하여 pH에 따른 담지체의 제타전위가 0이 되는 pH 값을 측정<sup>12,13)</sup>하

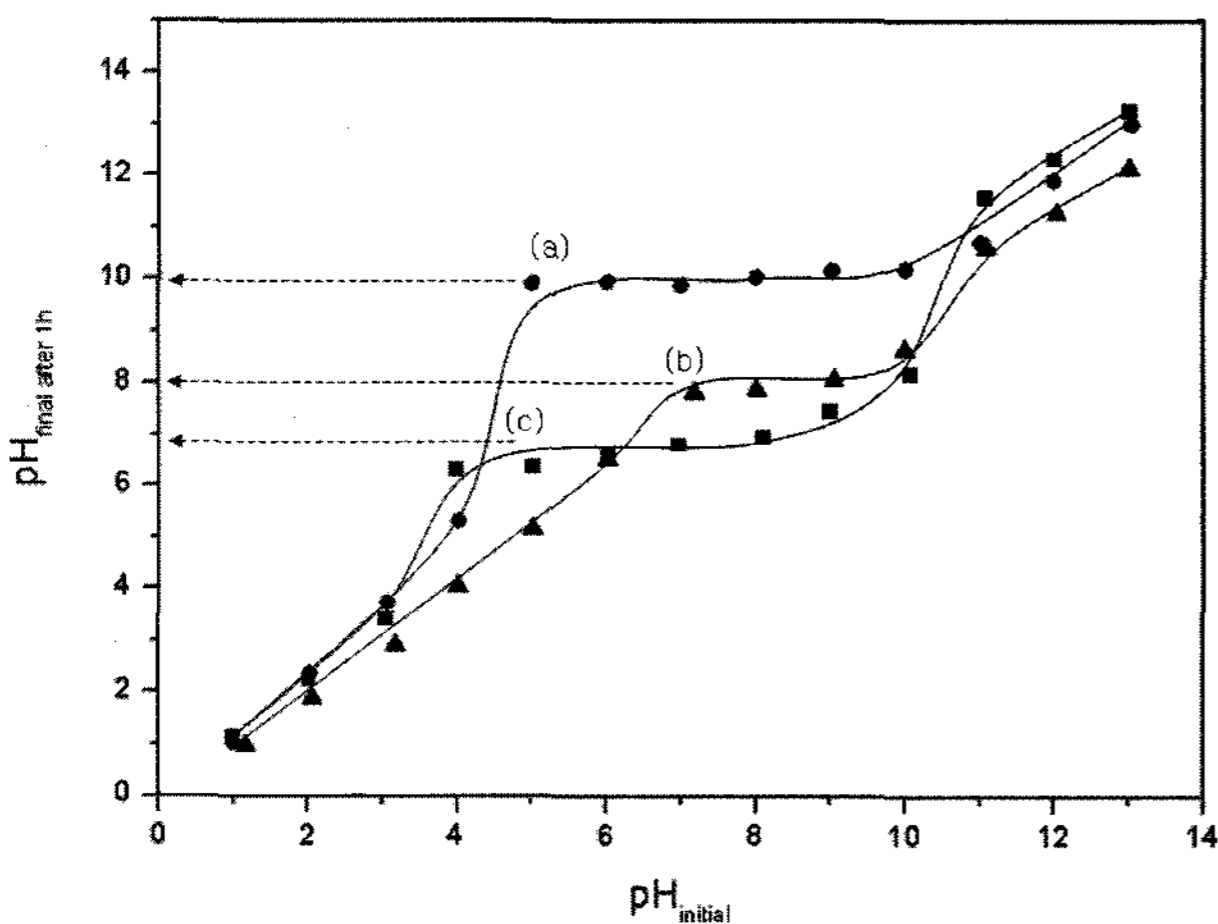


Fig. 6. The equilibrium pH of the surface of the supported carbon medias. (a) Carbon aerogel (R/C = 150, R/W = 0.232) (b) Vulcan XC72 (as received), (c) Vulcan XC72 (CO<sub>2</sub> activated).

거나 간단히 여러 pH 용액내에서 촉매 담지체 카본 분말을 일정 시간 교반한 후 평형 pH를 측정하여 그림 6과 같이 pH plateau를 나타내는 평형 pH 값을 측정하는 방법이 있다. 고온 탄화공정과 동시에 CO<sub>2</sub>가스 활성화 처리된 카본 에어로젤(R/F=0.5, R/C = 150, R/W = 0.23)의 PZC는 약 10이었으며 일반적으로 촉매 담지체로 많이 이용되고 있는 Vulcan XC 72 카본 블랙의 경우에는 약 8정도의 PZC 값을 보였지만 동일한 온도에서 CO<sub>2</sub> 활성화 처리를 할 경우 PZC는 약 7정도였다.

카본 표면에는 제조공정 조건이나 표면산화 등의 다양한 후처리 공정에 따라 H 또는 O를 포함하는 다양한 복합 기능기 그룹(complex functional group)들이 존재하고 있다. 그림 7은 카본 표면에 존재하는 대표적인 표면 기능그룹을 나타낸 것이다. O와 결합한 C-O 기능기들은 산화성 가스(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 등) 분위기 열처리 공정이나 화학적 산화제(KMnO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, KClO<sub>3</sub> 등)를 이용한 표면처리 공정에서 카본의 산화물로 생성될 수 있다. 카본 표면에 존재하는 carboxyl 기능기(-COOH)와 phenolic 기능기(-OH)는 활성 H를 포함하고 있기 때문에 수용액 내에서 물과 반응하여 식 (2), (3)과 같이 이온화되면서 H<sup>+</sup> 이온을 방출할 수 있기 때문에 산성의 화학 기능기이다. 표 2는 용액 내에 H<sup>+</sup> 이온을 방출할 수 있는 카본 표면에 존재하는 산성의 기능기 그룹(acidic functional group)들이다. carboxyl, quinone, lactone 기능기들이 존재하는 카본은 용액 내에서 강산성을 띠므로 낮은 pH 값을 나타내지만 phenolic hydroxyl, ketone, ether 등의 기능기는 약 산성이나 중성을 나타낸다. 또한 카본 basal 표면은

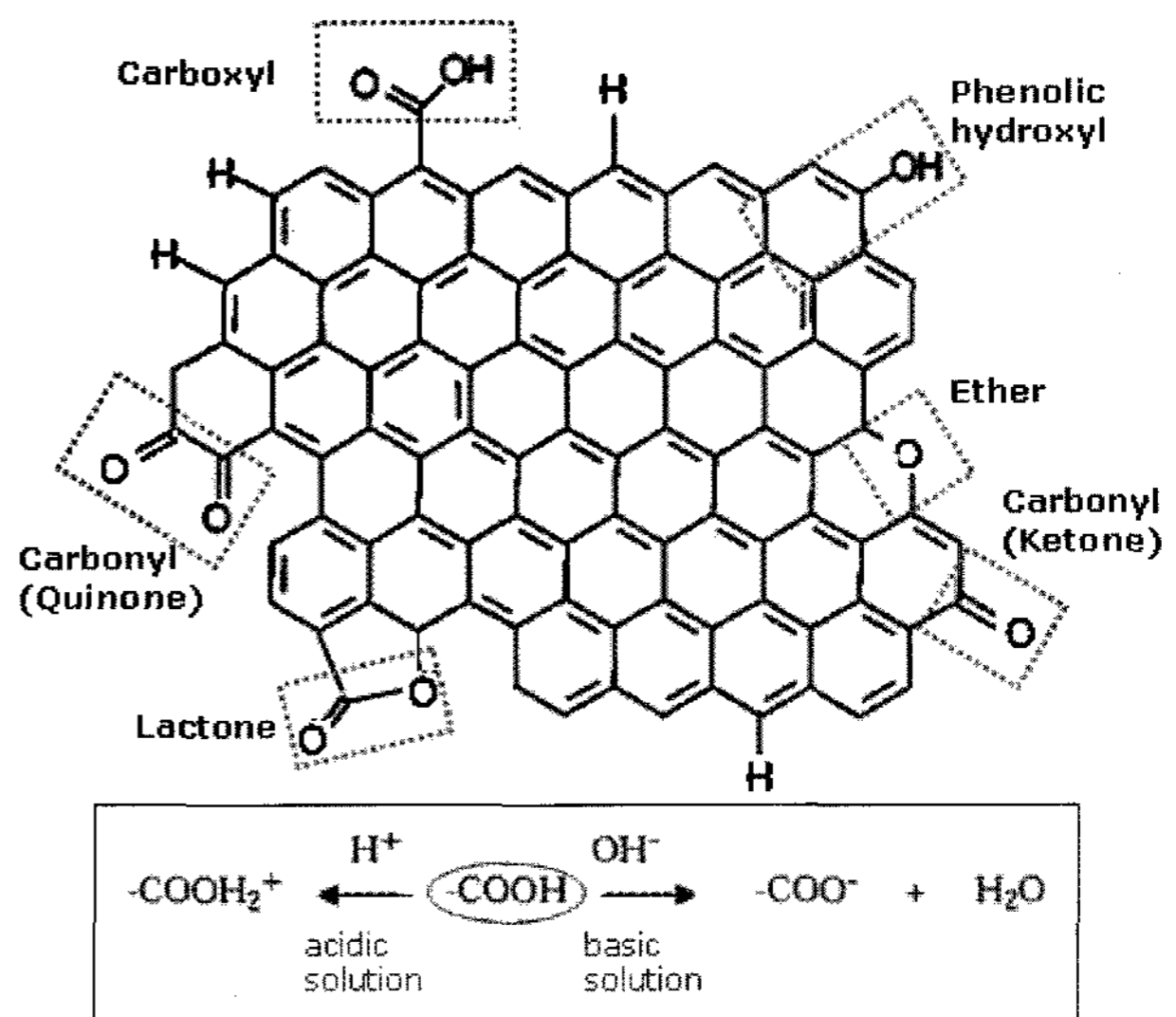
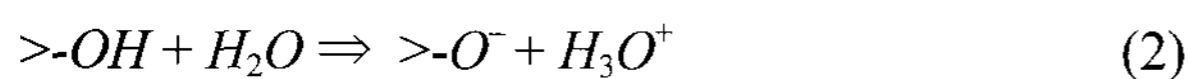


Fig. 7. The common type of oxygen functional groups presented on the carbon surface.

Table 2. The acidic oxygen functional groups of the surface of carbon black

Acidic functional group		Weakly acidic - Neutral function group	
Carboxyl	>COOH	Phenolic hydroxyl	>OH
Carbonyl (quinone type)	2>C=O	Carbonyl (ketone type)	>C=O
Lactone	>CO <sub>2</sub>	Carbonyl (Ether type)	-C-O-C-

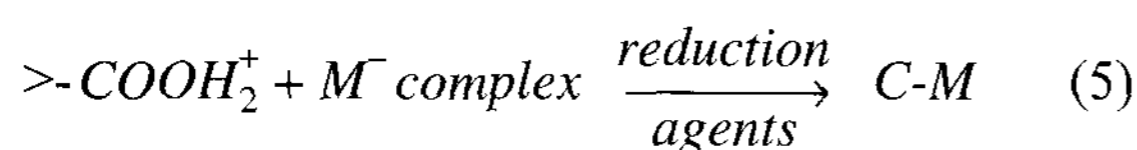
식 (4)와 같은 반응에 의하여 염기성을 나타낸다.



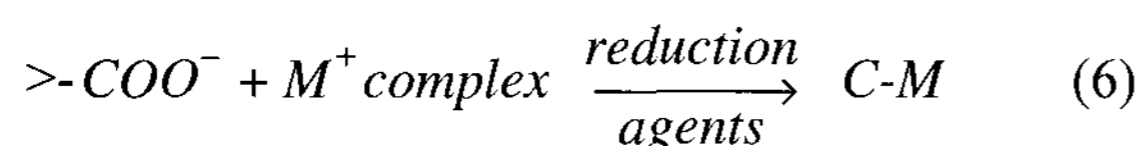
카본을 진공이나 불활성가스 분위기에서 열처리 할 경우 표면에 존재하는 산성의 C-O 결합의 기능기들이 CO 또는 CO<sub>2</sub> 가스 형태로 제거되기 때문에 안정한 염기성 표면을 나타내는 것으로 알려져 있다. carboxyl과 lactone 기능기 그룹들은 250°C 근방에서 분해되고 phenolic 기능기나 quinone 기능기 그룹들은 500-900°C 온도범위에서 완전하게 분해되는 것으로 보고되고 있다<sup>14)</sup>.

카본 표면에 존재하는 이러한 기능기들은 젖음성 등 다양한 물리화학적인 물성에 영향을 미치기 때문에 습식의 화학공정으로 Pt/C 촉매 제조시 사용되는 카본의 PZC 값은 중요한 요소이다. -COOH와 같은 산성의 기능성 그룹들은 쉽게 물을 흡수하여 양호한 젖음성을 나타내기 때문에 카본의 보관 또는 운송 등의 과정에서 쉽게 습기를 흡수하므로 제조 후 가능한 안정한 염기성 표면을 만들어 준다. 이러한 카본은 촉매 제조와 같은 습식공정에 이용할 경우 다시 산성의 화학 기능기를 만들어 줄 필요가 있다. CNT의 경우 큰 소수(hydrophobic) 특성을 보이기 때문에 다양한 습식 공정에 적용시에는 가스 산화처리나 습식 화학처리로 표면에 산성의 기능기 그룹을 만들어 줄 필요가 있다.

(acidic solution)



(basic solution)



Pt/C 촉매 제조 공정에서는 [PtCl<sub>6</sub>]<sup>2-</sup> 음이온이나 [Pt(NH<sub>3</sub>)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup> 양이온 등의 다양한 Pt complex 이온들이 이용되고 있다. Pt 나노 입자를 균일하게 분산시키기 위해서 촉매 담지체인 카본 표면에는 전기적으로 용액 내에 존재하는 금속 complex 이온과 반대 전하를 띠는 기능기를 갖는 흡착 장소가

균일하게 존재할 필요가 있다. 수용액내에서 카본 표면의 전하는 기능기들의 이온 특성에 따라 산성 수용액(pH < p*H*<sub>pzc</sub>)에서는 양전하를 띠고 알칼리성 수용액(pH > p*H*<sub>pzc</sub>)에서는 음전하를 띠게 된다<sup>15)</sup>. 금속 이온의 흡착장소 역할을 하는 기능기들의 전하 부호는 용액의 pH 조건에 의해 결정되므로 고분산성의 Pt/C 촉매를 제조하기 위해서는 카본 표면에 금속 complex 이온의 흡착 반응식 (5), (6)이 일어날 수 있도록 사용하는 카본 담지체의 PZC 값, Pt complex 이온의 전하 부호를 고려하여 촉매 제조에 적합한 용액의 pH 조건을 결정하여야 한다.

## 4. 결 론

1. 고다공성의 카본 다공체가 resorcinol-formaldehyde (RF)의 하이드로젤 합성공정과 건조공정 및 1050°C의 불활성가스 분위기에서 탄화공정으로 제조되었다. 제조된 RF-하이드로젤(R/F = 0.5, R/C = 200, R/W = 0.05 합성조건)의 부피수축은 대기 중 건조조건에서 대부분 발생하였다. 대기 중 공정에서 50% 정도의 선형 수축이 일어났으며 탄화공정에서 10% 정도의 추가적인 수축을 수반하였다.

2. 탄화공정에 대응하기 위한 열중량분석(TGA) 결과 800°C의 온도에서 폴리머 지어로젤은 45% 이상의 중량이 감소하였으며 하이드로젤의 합성조건에 따라 70% 이상의 중량 감소도 관찰되었다. 탄화공정 과정에서 중량 감소는 C-C 결합의 탄화에 선행하여 폴리머를 구성하는 C-H, C-O 결합들의 열분해 반응이 진행되기 때문이었다.

3. 초임계 CO<sub>2</sub> 건조공정에서 제조된 카본 에어로젤(R/F = 0.5, R/C = 180-200, R/W = 0.23)은 탄화공정에서 50~60% 정도의 중량감소와 더불어 20% 정도의 선형수축을 수반하였다. 젤 합성 촉매(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 농도가 증가(R/C비가 감소)할수록 카본 에어로젤 다공체를 형성하고 있는 입자의 크기는 작고 상대적으로 치밀한 기공구조를 보였다.

4. 연료전지용 Pt/C 촉매 담지체로 주로 사용되는 Vulcan XC 72 카본블랙 분말의 p*H*<sub>pzc</sub>는 8에서 CO<sub>2</sub> 가스 활성화 처리 후 7정도로 감소하였다. 탄화공정과 동시에 CO<sub>2</sub> 활성화 처리된 카본 에어로젤(R/F = 0.5, R/C = 150, R/W = 0.23)의 p*H*<sub>pzc</sub>는 10이었다.

## 참고문헌

1. R. Saliger, U. Fischer, C. Herta, J. Fricke, *J. Non-Cryst. Solids*, 225(1) (1998) 81.
2. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. V. Mack, R. W. Pekala, J. F. Poco, *J. Electrochem. Soc.*, 143(1) (1996) 159.
3. Wendy S. Baker, Jeffrey W. Long, Rhonda M. Stroud, Debra R. Rolison, *J. Non-Cryst. Solids*, 350(1) (2004) 80.
4. L. W. Hrubesh, *J. Non-Cryst. Solids*, 225(1) (1998) 335.
5. R. W. Pekala, *J. Mater. Sci.*, 24(9) (1989) 3221.
6. R. W. Pekala, US patent, 4873218, (1989).
7. R. W. Pekal, *J. Non-Crystal. Solids*, 145(1) (1992) 90.
8. S. A. Al-Muhtaseb, J. A. Ritter, *Adv. Mater.*, 15(2) (2003) 101.
9. John R. Regalbuto, *Catalyst Preparation : Science and Engineering*, John R. Regalbuto (ed), CRC Press, (2007) 297.
10. C. Lin, J. A. Ritter, *Carbon*, 35(9) (1997) 1271.
11. F. Rodriguez-Reinoso, *Carbon*, 36(3) (1998) 159.
12. A. Bismarck, C. Wuertz, *J. Springer, Carbon*, 37(7) (1999) 1019.
13. Y.-H. Li, S. Wang, Z. Luan, J. Ding, C. Xu, D. Wu, *Carbon*, 41(5) (2003) 1057.
14. K. Kinoshita, *Carbon : Electrochemical and Physicochemical Properties*, K. Kinoshita (ed), John Wiley & Sons, N.Y. (1998) 86.
15. C. A. Leon, L. R. Radovic, *Chemistry and Physics of Carbon*, Vol. 24, P. A. Thrower (ed), Marcel Dekker, NY. (1994) 213.