HWAHAK KONGHAK Vol. 40, No. 6, December, 2002, pp. 664-668

전해 구리 도금된 활성탄소섬유에 의한 NO의 촉매 환원반응 메커니즘 연구

박수진† · 장유신 · J. Kawasaki*

한국화학연구원 화학소재연구부
*동경공업대학 화학공학과
(2002년 6월 17일 접수, 2002년 9월 23일 채택)

NO Adsorption and Catalytic Reduction Mechanism of Electrolytically Copper-plated Activated Carbon Fibers

Soo-Jin Park†, Yu-Sin Jang and Junjiro Kawasaki*

Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology, Daejeon 305-600, Korea
**Department of Chemical Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 152-8852, Japan*
(Received 17 June 2002; accepted 23 September 2002)

요 약

본 연구에서는 전해 도금되어진 활성탄소섬유(activated carbon fibers; ACFs)가 NO 환원거동에 미치는 영향에 대하여 고찰해보았다. 전해도금 시간이 증가함에 따라 탄소표면의 구리의 양은 점차 증가하였으나, 활성탄소섬유의 흡착 특성인 잘 발달된 비표면적 등의 기공구조는 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 본 실험 결과, ACFs 및 ACFs/Cu 촉매 표면에서 500 °C로 NO를 반응시켰을 때 NO가 N_2 및 O_2로 환원되는 것을 확인하였다. 특히, ACFs/Cu 촉매를 사용한 반응에서는 촉매반응 중 발생하는 산소를 촉매표면에서 잡아주는 역할을 하는 것으로 관찰되었다. 이는 NO환원에 있어서 ACFs와 ACFs/Cu 촉매 사이에 다른 기작이 있다는 것을 보여주는 것으로 생각되어진다.

Abstract – In this work, the catalytic reduction mechanisms of NO over ACFs/copper prepared by electrolytic copper plating has been studied. It was found that copper content on carbon surfaces increased with increasing the plating time. However, a slightly gradual decrease of adsorption properties, such as, BET specific surface area, was observed in increasing the plating times within the range of well-developed micropore structures. As experimental results, nitric oxide was converted into the nitrogen and oxygen on ACFs and ACFs/copper catalyst surfaces at 500 °C. Especially, the surfaces of ACFs/copper catalyst were found to scavenge the oxygen released by catalytic reduction of NO, which could be explained by the presence of another nitric oxide reduction mechanism between ACFs and ACFs/copper catalysts.

Key words: Activated Carbon Fibers, Copper-Plating, Surface Properties, NO Reduction, Adsorption

1. 서 론

최근 산업사회에서 크게 문제되는 것은 수질오염과 대기오염을 들 수 있는데, 대기오염의 여러 형태로는 석탄재와 같은 입자성 방출, SO_2 및 SO_3 등의 황화합물(SO_x), 오존, 이산화탄소, 휘발성 탄화수소화합물, 그리고 NO와 NO_2의 질소화합물(NO_x) 등이 있다. 이들이 대기로 방출될 때, 공기오염은 의학적으로 폐와 간에 악영향을 미치며 산성비의 원인이 되는 것으로 알려져 있다[1-4].

한편, 환경 기능소재로서 알려진 활성탄소(activated carbons; ACs)는 고도의 산업발전으로 발생되는 환경오염에 따라 그 중요성이 더욱 확대되고 있다. 활성탄소는 많은 기공과 표면 관능기의 특성에 의하여 가스분리 · 정제 및 제거, 농축, 유기용제 회수, 중금속 회수 및 제거, 탈취 등과 같은 응용분야에 광범위하게 사용되고 있다[5]. 활성탄소는 일반적으로 원료, 제조과정, 제조방법 및 후 처리에 따라 표면 관능기, 기공크기, 그리고 미세기공 분포가 변화되어 그 특성이 변하게 된다. 또한 다양한 표면처리를 통하여 표면특성을 변화시킬 수 있으며[6-9], 특히 금속의 첨가에 따라 그 기능성이 향상되어 진다고 알려져 있다[3, 10-16].

이러한 금속촉매 중 NO_x 제거에 가장 효과적인 금속으로 Cu가 알려져 있는데, Cu를 탄소에 첨가하는 방법으로는 Cu의 전구체, 즉 copper nitrates 또는 copper sulfates를 수용액 중에서 탄소에 침적 또는 침전방법을 이용하여 첨가하는 방법이 있다[12-16]. 이러한 처리들은 금속을 첨가한 후에는 비활성 기체 또는 공기 중에 열처리하여 촉매를 제조한다. 그러나 이 방법은 탄소표면의 관능기(금속의 anchoring sites) 및 처리방법(진공장치 또는 용액의 처리 조건)에 따라 크게 영향을 받을 뿐만 아니라 처리에 장시간을 요구하며, 특히 열처리 과정에서 NO_x 및

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: psjin@krict.re.kr

SO_x가 발생하는 문제가 있다. 따라서 단시간에 효과적으로 Cu를 탄소에 첨가하는 방법 및 활성탄소섬유 표면에 도입된 Cu에 의한 NO제거 반응 메커니즘에 대하여 연구되어야 할 필요가 있다.

한편, 전해 도금은 외부전원으로부터 운반되는 전자가 음극(cathode)면 위에서 금속이온으로 전이하여 소위 음극반응에 의해 음극표면에 금속피막이 형성되는 것으로 알려져 있다[11, 17]. 현재까지 탄소재료 중 활성탄소섬유에 이용된 예는 없는 것으로 알려져 있다.

본 연구는 NO를 감소시키는데 가장 효과적인 금속으로 알려진 Cu를 활성탄소섬유에 첨가하는 새로운 활성탄소의 표면처리 방법의 제시에 목적이 있다. 즉 전해 동 도금(electrolytic copper-plating)방법을 이용하여 활성탄소섬유를 표면처리하면서, 전해 동 도금에 의한 활성탄소섬유의 표면 및 기공특성 변화, 그리고 이를 이용한 NO의 촉매 환원 반응 메커니즘에 대하여 고찰해 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 시료 및 시약

본 실험에서 사용한 활성탄소섬유(ACFs)는 비표면적이 2,100 $m^2 \cdot g^{-1}$인 다공성의 흡착제로 Taiwan Carbon에서 제조한 polyacrylonitrile(PAN)계 AW2001을 사용하였으며, 물성은 Table 1에 나타내었다. 먼저 처리하지 않은 활성탄소섬유를 증류수에서 2-3차례 세척한 후 약 80 °C oven에서 24시간 이상 건조하여 준비하였으며, 이를 표면분석, 전해 구리도금, 그리고 NO제거 시험에 각각 사용하였다. NO제거 시험은 300 및 1,000 ppm NO/He 가스를 이용하여 수행하였다.

2-2. 전해 구리도금

활성탄소섬유의 구리도금은 양극과 음극에 함인동판과 활성탄소섬유를 각각 사용하였으며, 시간을 0, 5, 그리고 10 sec로 변화시키면서 전해도금 시켰다. 도금액 및 조건은 Table 2에 나타낸 조성 및 조건을 이용하였으며, 전류밀도는 60 A $\cdot m^{-2}$로 고정시켜 처리하였다. 이렇게 전해도금 처리된 활성탄소섬유는 세척수의 pH가 변하지 않을 때까지 증류수에서 여러 차례 세척하여 150 °C 진공건조기에서 완전히 건조 시킨 후, 표면 분석 및 NO 제거 시험에 사용하였다. 5초 및 10초 동안 처리된 활성탄소섬유의 표면에 도금된 구리의 양은 원자흡수분광기(atomic absorption spectrophotometry, AAS)를 사용하여 확인하였고, 이들을 각각 ACF/Cu5와 ACF/Cu10이라 명명하였다.

Table 1. Characteristics of the activated carbon fibers studied

Characteristics	
Precursor	Polyacrylonitrile(PAN)
Type	Fabric
Specific surface area($m^2 \cdot g^{-1}$)	2,121
Total pore volume($m^3 \cdot g^{-1}$)	1.216
Micropore volume($m^3 \cdot g^{-1}$)	1.145
Average pore diameter(Å)	12.7
Weight($g \cdot m^{-2}$)	45±5
Thickness(mm)	0.3

Table 2. Composition and operating conditions of copper electroplating bath

Composition	$CuSO_4$	10 g/l
	H_2SO_4	20 ml/l
Conditions	pH	1.0
	Temperature	25±1°C
	Current density	60 A $\cdot m^{-2}$

2-3. 표면 분석

전해 구리도금 처리된 활성탄소섬유 및 NO제거 반응 후 시료의 표면 결정화도와 표면성분 원소의 변화를 관찰하기 위한 wide angle X-선 회절분석(XRD)을 하였으며, source로 CuKα를 장착한 Rigaku Model D/MAX-III B 분석 장비를 이용하여 측정하였다.

2-4. 활성탄소섬유의 기공구조

각 시료들은 573 K에서 잔류 압력을 10^{-3} torr이하로 유지한 상태로 약 5-6시간 동안 탈기시킨 후, ASAP 2010(Micromeritics Co.)을 이용하여 77 K에서 상대압력(P/P_0)에 따른 N_2 기체의 흡착량을 측정하였다. 비표면적은 BET식을 이용하여 등온흡착으로부터 계산하였다[18].

2-5. NO 촉매 환원반응 측정

NO 환원반응 메커니즘은 반응로의 온도를 500 °C로 하여 0-200 min까지 측정하여 살펴보았다. 반응관은 석영관(I.D. Φ=9 mm)을 사용하였고, NO 가스 유량은 질량유속조절기(mass flow rate controller, MFC)로 10 $ml.min^{-1}$로 조절하였다. 반응 전후의 반응물과 생성물의 분석은 가스 크로마토그래프(GC; Donam Instrument Inc.)를 이용하여 분석하였으며, 검출기는 열 포획검출기(thermal conductivity detector, TCD)를 이용하였다. 분석 전 각 시료들은 반응로에서 반응온도로 1시간 동안 헬륨으로 퍼징하여 수분을 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. ACFs/Cu 촉매 제조

전해 구리도금은 외부전원으로부터 운반되는 전자가 활성탄소섬유가 부착되어있는 음극(cathode)면 위에서 구리이온으로 전이하여 활성탄소섬유표면에 구리피막을 형성시키는 것으로 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

양극산화반응: $Cu \rightarrow Cu^{++} + 2e^-$ (1)

음극반응: $Cu^{++} + 2e^- \rightarrow Cu$ (2)

활성탄소섬유는 60 A·m^{-2}의 전류밀도로 0, 5, 그리고 10초 동안 도금처리 하였으며, Fig. 1에 도금 시간에 따른 활성탄소섬유에 도입된 구리의 양을 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 구리도금은 처리 시간이 길어짐에 따라 점점 증가하는 경향을 보였으며, 10초 동안 처리한 활성탄소섬유에서는 구리와 활성탄소섬유의 무게비가 약 1:2까지 증가하였다.

전해 구리도금 처리한 활성탄소섬유의 비표면적 변화를 살펴보기 위

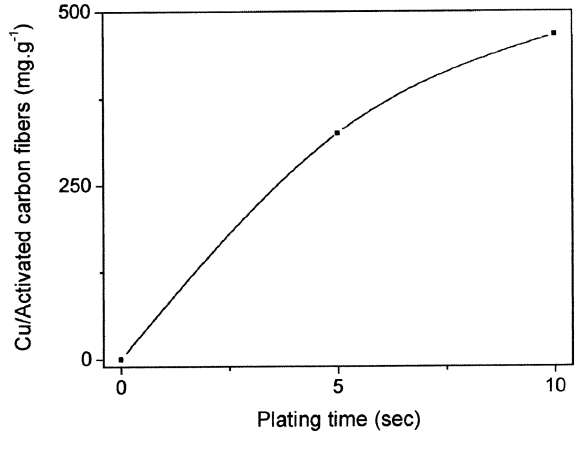

Fig. 1. Copper quantification of the electrolytic Cu-plated activated carbon fibers measured by AAS.

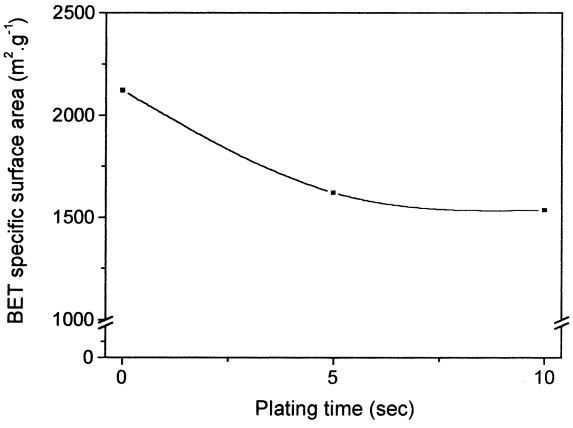

Fig. 2. BET's specific surface area of ACFs/Cu catalysts produced by copper electroplating.

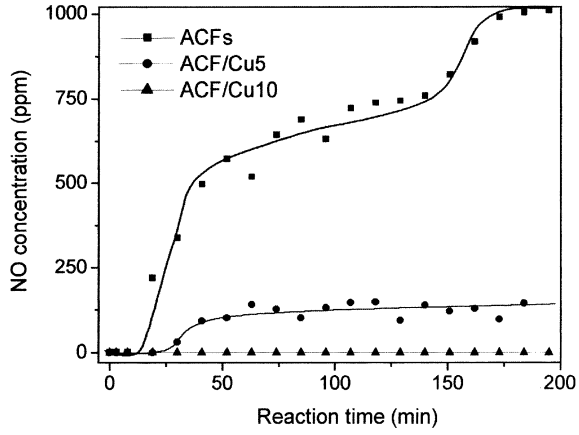

Fig. 3. Time dependence of the NO conversion on the the ACFs/Cu Catalysts by copper electroplating(reaction temp.: 500 °C).

하여 10^{-6}-10^{0}의 상대압력에서 N_2 흡착량을 측정하여 흡착등온선을 구하였으며, 이로부터 BET식을 이용하여 비표면적을 구하였다. Fig. 2는 도금시간에 따른 활성탄소섬유의 비표면적의 변화를 나타낸다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 도금 시간이 길어질수록 활성탄소섬유의 비표면적이 약간씩 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 전해 구리도금으로 인하여 BET 비표면적이 2,000 $m^2 \cdot g^{-1}$ 이상으로 잘 발달되어 있던 활성탄소섬유의 기공이 점차 구리가 도금됨에 따라 채워지거나 또는 막히는 현상이 발생했기 때문인 것으로 사료 되어진다[10].

3-2. 전해 구리 도금된 활성탄소섬유 촉매를 이용한 NO 환원반응 메커니즘

탄소재료가 환원능력을 가지고 있다는 사실은 이미 잘 알려져 있다[5, 19]. 이러한 탄소재료의 환원력에 의해서 수용액에 존재하는 높은 표준전위의 이온에 전자를 공급하여 이온의 원자가를 낮추어 주거나, 금속 이온의 경우에는 이온이 아닌 원소금속으로 환원시켜 주는 것으로 알려져 있다[5, 19]. NO는 활성탄소 등과 같은 촉매에 의해서 질소와 산소로 환원될 수 있으며, 반응생성물로 N_2, CO, 그리고 CO_2 등의 부산물을 발생시킨다. 그리고 Chen 등[20]은 다음과 같은 NO와 탄소와의 반응을 제안한 바 있다.

$$NO+ACF\text{-}C \rightarrow ACF\text{-}CO+1/2\ N_2 \quad (3)$$

$$CO+ACF\text{-}CO \rightarrow CO_2+ACF\text{-}C \quad (4)$$

$$ACF\text{-}CO \rightarrow CO \quad (5)$$

여기서, ACF-C와 ACF-CO는 각각 활성탄소섬유 표면의 탄소와 산소관능기를 나타낸다.

본 연구에서는 500 °C에서 NO를 ACFs/Cu 촉매와 접촉시켜 발생하는 반응생성물의 종류 및 농도와 전환되지 않은 NO의 농도를 측정하여 촉매들의 환원 특징들을 고찰해 보았으며, Fig. 3-5에 그 결과를 나타내었다. 촉매에 따라 검출된 반응생성물의 종류 및 반응 후 환원되지 않은 NO 농도가 다르게 나타났다. ACFs에서는 CO_2, N_2, 그리고 반응 후 남은 NO가 검출되었으며, ACFs/Cu5에서는 N_2와 NO가, ACFs/Cu10에서는 N_2만이 검출되었다. 이는 NO가 활성탄소섬유 및 ACFs/Cu 촉매와 접촉 시 NO가 N_2 및 CO_2로 전환된다는 것을 보여주며, 처리하지 않은 활성탄소섬유와 ACFs/Cu 촉매 사이에는 다른 메커니즘이 존재하는 것을 보여준다. 또한, 500 °C에서 반응시 촉매의 열분해가 발생하는지 확인을 위하여 TGA분석을 하였다. TGA 분석 결과 500 °C에서의 열분해에 의한 weight 손실은 모든 시편에서 5% 이하로 반응에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

Fig. 3은 500 °C에서 NO를 촉매와 접촉시킨 후 반응시간에 따라 잔류하는 NO의 농도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 ACFs에 비하여 ACFs/Cu 촉매를 이용한 반응에서 잔류 NO의 농도가 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. ACFs는 초기 약 20분까지는 대부분의 NO를 전환시킬 수 있었으나, 그 이후부터 점차 처리 성능의 급격한 감소를 보였으며, 약 160-180분경 이상에서는 더 이상의 환원능력을 나타내지 못하였다. 이는 일반적인 활성탄소가 지니고 있는 환원능력이 연속적으로 지속되지 못하기 때문인 것으로 사료된다. 반면, 전해 동 도금한 ACFs/Cu5의 경우는, 초기 반응시간 50분까지는 대부분이 전환되었으나 전환되지 않은 NO의 농도가 약간씩 증가하다가, 50분 이후에는 초기농도의 12% 수준의 환원되지 않은 NO가 연속적으로 발생하였다. 하지만, ACFs/Cu10의 경우는 반응 초기부터 NO 전량이 연속적으로 반응생성물로 전환되었기 때문에 전 반응기간을 통하여 NO가 검출되지 않았다. 이는 구리 도금 양에 따른 동 도금된 활성탄소섬유의 촉매환원 역할이 변화되었다는 것을 보여주며, 일정량 이상의 Cu의 농도에서는 계속적인 NO환원 반응을 기대할 수 있을 것으로 사료되어진다.

Fig. 4는 500 °C에서 ACFs 및 ACFs/Cu를 이용한 시간에 따른 NO 환원촉매 반응에서 발생한 N_2의 양을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, ACFs/Cu10에서 반응시간 동안 계속 높은 수준의 N_2가 발생하였으며, ACFs/Cu5에서는 ACFs/Cu10과 같이 높은 수준으로 발생하던 N_2가 반응시간 약 50분까지 약간씩 감소한 뒤, 그 수준을 계속 유지하였다. 반면, ACFs에서는 N_2 발생량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 이미 Fig. 3에 나타낸 NO의 발생량과도 잘 일치하는 것으로써, NO

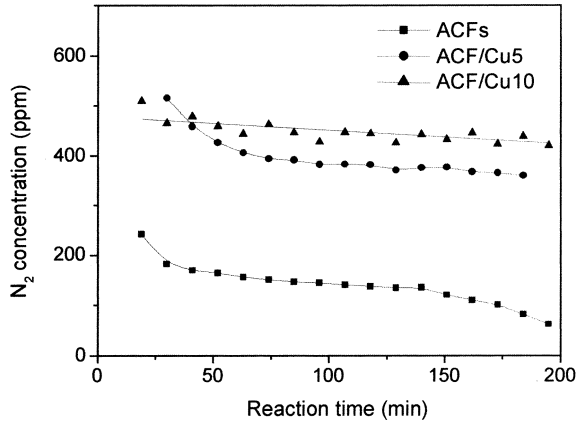

Fig. 4. Time dependence of the N_2 released on the ACFs/Cu Catalysts by copper electroplating (reaction temp.: 500 °C).

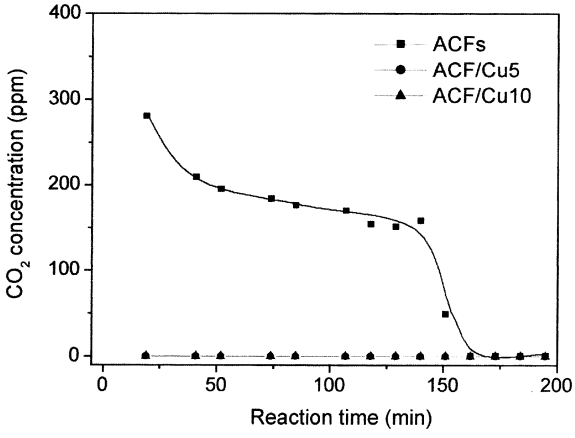

Fig. 5. Time dependence of the CO_2 released on the ACFs/Cu Catalysts by copper electroplating (reaction temp.: 500 °C).

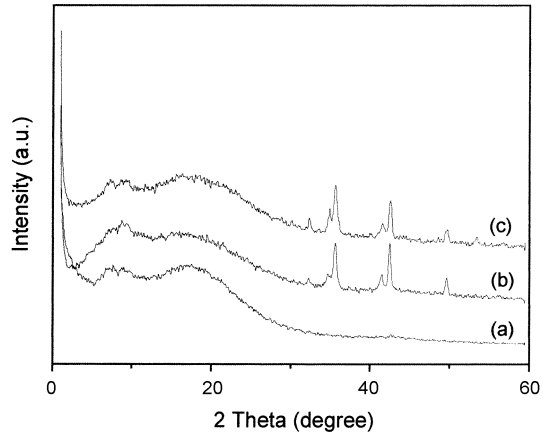

Fig. 7. X-ray diffraction profiles after the NO-ACFs/Cu catalysts reaction at 500 °C: (a) ACFs, (b) ACFs/Cu5 and (c) ACFs/Cu10.

가 ACFs나 ACFs/Cu표면에서 환원됨에 따라 반응생성물로 N_2가 발생하며, NO의 농도는 감소하고 N_2의 농도는 증가하기 때문인 것으로 생각되어 진다.

Fig. 5는 500 °C에서 전해 동 도금 처리한 활성탄소섬유의 NO 환원 촉매 반응에서 발생한 CO_2의 발생량을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, CO_2는 전해구리 도금 처리한 ACFs/Cu에서는 전혀 발생하지 않으나, ACFs에서는 NO가 활성탄소섬유 표면에서 환원반응이 일어나는 동안 300-60 ppm 수준으로 발생하다가 NO 환원 능력을 상실하는 시점에서부터 검출되지 않았다. 이는 활성탄소섬유 표면에 도입된 Cu가 NO의 환원반응 촉매 역할을 수행함에 있어 이 촉매환원과정에서 발생하는 산소를 잡아주는 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 3, 4, 그리고 5로부터 500 °C에서 ACFs와 ACFs/Cu에 의한 NO의 촉매환원 반응에서 발생하는 생성물들의 수준은 상호 밀접한 관계가 있는 것으로 사료되며, 전해도금으로 Cu가 도입된 활성탄소섬유(ACFs/Cu)와 Cu가 도입되지 않은 활성탄소섬유(ACFs) 사이에는 서로 다른 반응 메커니즘이 존재하는 것으로 생각되어 진다.

이미 식 (4)와 (5)에 나타난 바와 같이 활성탄소와의 반응에서는 CO_2나 CO의 발생이 예측되며, Fig. 5에서 CO_2가 발생하는 것을 확인 한 바 있다. 전해 구리 도금된 ACFs/Cu 촉매의 경우에는 CO_2가 발생하지 않는 것으로 볼 때, ACFs 뿐만 아니라 Cu도 어느 정도 산화되는 기작을 가질 것으로 생각되어 진다.

ACFs/Cu와 NO의 반응기작을 고찰하기 위하여 XRD 측정을 통하여

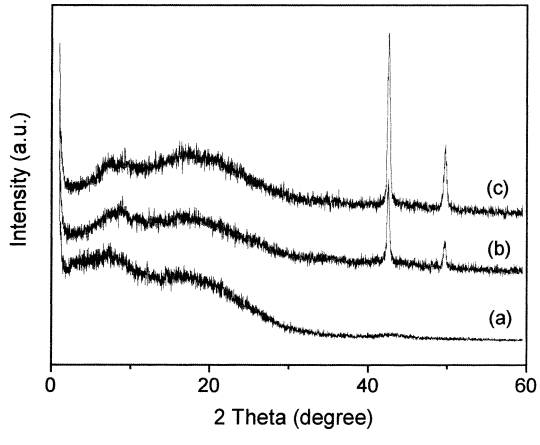

Fig. 6. X-ray diffraction profiles of the ACFs/Cu catalysts by electrolytic copper plating: (a) ACFs, (b) ACFs/Cu5 and (c) ACFs/Cu10.

표면 변화를 살펴보았다. Fig. 6은 ACFs 및 Cu 전해도금 양에 따른 ACFs/Cu의 X-선 회절 경향을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 ACFs는 2θ=20 부근에 탄소 특성의 피크를 나타내는 무정형 피크가 나타났으며, ACFs/Cu에서는 무정형의 피크와 함께 2θ=43과 50 부근에 Cu를 나타내는 결정성 피크가 관찰되었다. 이는 활성탄소섬유 표면에 금속의 구리가 존재하는 것을 보여주는 것으로, 전해 동 도금을 통하여 얻어진 활성탄소섬유 표면에 도입된 구리의 형태는 순수한 금속 Cu임을 알 수 있었다.

Fig. 7은 NO-ACFs 또는 NO-ACFs/Cu 환원촉매반응 후 ACFs 및 ACFs/Cu 시료들의 X-선 회절 경향을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 ACFs의 X-선 경향은 NO환원 반응전과 비교해볼 때 유의한 변화가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 반면, ACFs/Cu의 경우는 2θ=43과 50 부근에 Cu를 나타내는 결정성 피크가 상당량 감소함과 동시에 2θ=36과 42부근에 Cu_2O를 나타내는 결정성 피크가 새롭게 형성되었다. 이는 활성탄소섬유에 도입되었던 Cu가 500 °C에서 NO를 환원시킬 때, 발생하는 산소를 잡아 주는 역할을 하기 때문인 것으로 사료되어진다.

NO와 반응 시 시간이 점점 길어질수록 NO와 반응한 Cu가 더욱 더 산화되는 지를 살펴보기 위해서 200분 동안의 촉매 환원반응에 이어 ACFs/Cu10을 24시간 동안 추가 촉매반응 시키면서 반응생성물의 농도를 정량하였으며, 24시간 후의 X-선 경향을 살펴보았다. 24시간 후, 반응 생성물의 농도는 200분에서 발생한 반응생성물과 유의한 차이 없이 계속 그 수준을 유지하였다. 즉, NO, CO_2, O_2의 검출은 없었으며 N_2만 검출되었다.

Fig. 8은 ACFs/Cu10의 24시간 NO촉매환원 반응 후의 표면 X-선 경향을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 무정형의 피크와 함께 2θ=43과 50 부근에 Cu를 나타내는 결정성 피크가 관찰되었다. 이는 ACFs/Cu10 표면에 있는 구리의 형태는 NO 촉매환원 반응 전의 것과 동일한 금속 Cu의 형태로 존재하는 것을 보여 준다고 하겠다. 따라서 ACFs/Cu10에 의한 NO촉매환원 반응에 있어서 발생하는 산소의 흐름은 N(O)→ACF/Cu_2(O)→ACF-C(O)인 것으로 생각되어 진다. 그리고 고온에서 산소 농도가 낮을 경우 NO가 탄소에 흡착된 후 N_2의 방출과 함께 탄소표면에 산화물을 생성시키는 것으로 알려져 있다[20, 21]. 본 연구 결과 및 다른 연구[20, 21]의 결과를 고려해 볼 때, 전해 구리도금을 통하여 형성된 ACFs/Cu 촉매는 활성탄소나 침적 및 무전해 도금처리에 의한 촉매보다 더 높은 환원력을 가지며, 다음과 같은 환원 메커니즘을 가지는 것으로 사료되어진다.

$$NO+ACF\text{-}Cu \rightarrow ACF\text{-}Cu_2O+1/2N_2 \quad (6)$$

$$ACF\text{-}Cu_2O \rightarrow ACF\text{-}Cu+ACF\text{-}CO+ACF\text{-}CO_2 \quad (7)$$

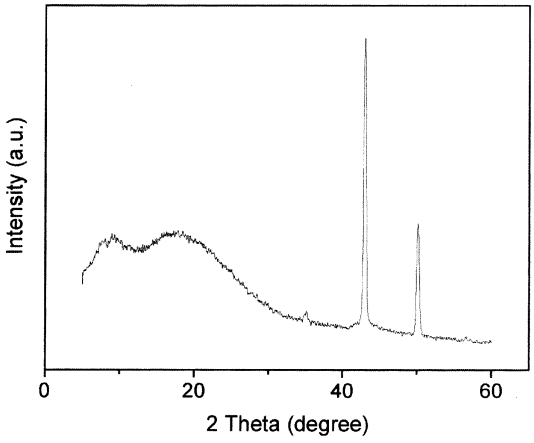

Fig. 8. X-ray diffraction profiles after the NO-ACFs/Cu10 catalysts reaction at 500 °C in 24 h.

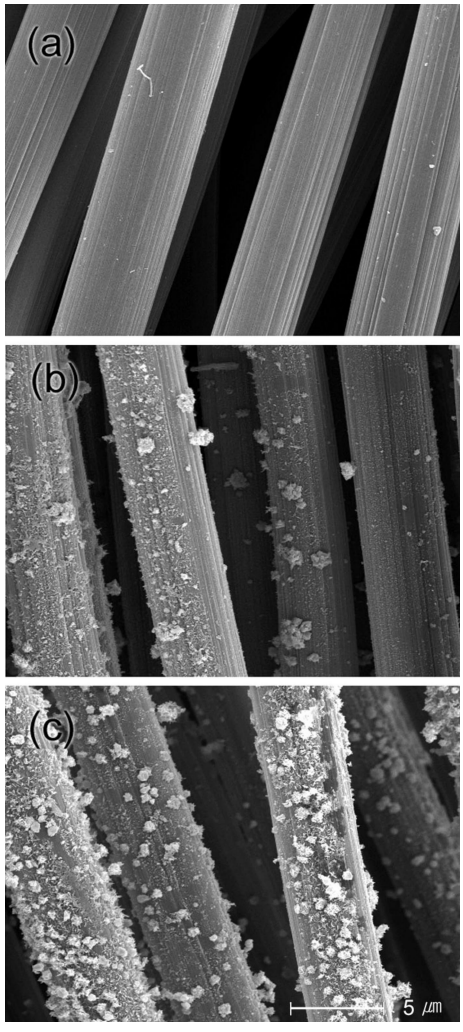

Fig. 9. SEM micrographs of ACFs and ACFs/Cu(×4,000): (a) ACFs, (b) ACFs/Cu5 and (c) ACFs/Cu10.

Fig. 9는 ACFs/Cu의 표면 형태를 보여주는 SEM 사진이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 구리도금은 처리 시간이 길어짐에 따라 점점 증가하는 경향을 보였으며, 이는 도금 처리 시간을 달리하여 ACFs에 도입되는 Cu의 양을 조절할 수 있음을 보여준다. 또한, ACF 표면에 도입된 Cu에 의해서 기공이 상당부분 막힘 현상을 나타낼 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 전해 도금을 통하여 ACFs/Cu 촉매를 제조하였으며, 이를 이용하여 NO 흡착 및 환원거동에 미치는 영향에 대하여 고찰해 보았다. 전해도금 시간이 증가함에 따라 탄소표면의 구리의 양은 점차 증가하였으나, 활성탄소섬유의 흡착 특성인 잘 발달된 비표면적 등의 기공구조는 약간씩 감소하는 경향을 보였다. 활성탄소섬유 및 활성탄소섬유/Cu 촉매 표면에서 500 °C로 NO를 반응시켰을 때 NO가 N_2 및 O_2로 환원되는 것을 확인하였다. 특히, 활성탄소섬유/Cu 촉매를 사용한 반응에서는 촉매반응 중 발생하는 산소를 촉매표면에서 잡아주는 것으로 나타났다. 이는 본 연구 결과를 고려해 볼 때, 전해 구리도금을 통하여 형성된 ACFs/Cu 촉매는 활성탄소나 침적 및 무전해 도금에 의한 촉매보다 더 높은 환원력을 가지며 이들과는 다른 환원 메커니즘을 가지는 것으로 사료되어진다.

감 사

본 연구는 과학기술부의 과학기술국제화사업(M1-0105-00-0059)의 지원에 의하여 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Calvert, S. and Englund, H. M.: "Handbook of Air Pollution Technology," John Wiley & Sons, New York(1984).
2. Noll, K. E., Gounaris, V. and Hou, W. S.: "Adsorption Technology for Air Water Pollution Control," Lewis, Michigan(1992).
3. Park, B. J., Park, S. J. and Ryu, S. K.: *J. Colloid Interface Sci.*, **217**, 142(1999).
4. Moon, S. H., Jeon, S. G., Shin, D. H., Kim, K. H. and Oh, C. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **40**, 133(2002).
5. Bansal, R. C., Donnet, J. B. and Stoeckli, F.: "Active Carbon," Marcel Dekker, New York(1998).
6. Park, S. J.: "Interfacial Forces and Fields: Theory and Applications," Marcel Dekker, New York(1999).
7. Lowell, S. and Shields, J. E.: "Power Surface Area and Porosity," Chapman & Hall, London(1993).
8. Park, S. J. and Donnet, J. B.: *J. Colloid Interface Sci.*, **200**, 46(1998).
9. Park, S. J. and Jang, Y. S.: *J. Colloid Interface Sci.*, **249**, 458(2002).
10. Li, C. Y., Wan, Y. Z., Wang, J., Wang, Y. L., Jiang, X. Q. and Han, L. M.: *Carbon*, **36**, 61(1998).
11. Park, S. J. and Jang, Y. S.: *J. Colloid Interface Sci.*, **237**, 91(2001).
12. Zhu, Z. H., Radovic, L. R. and Lu, G. Q.: *Carbon*, **38**, 451(2000).
13. Zhu, Z., Liu, Z., Liu, S. and Niu, H.: *Appl. Catal., B: Environmental*, **29**, 263(2001).
14. Hu, Y. and Ruckenstein, E.: *J. Catal.*, **172**, 110(1997).
15. Ruckenstein, E. and Hu, Y.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **36**, 2533(1997).
16. Denton, P., Giroir-Fendler, A., Schuurman, Y., Praliand, H., Mirodatos, C. and Primet, M.: *Appl. Catal., A: General*, **220**, 141(2001).
17. Lynch, E. T. and Kershaw, J. P.: "Metal Matrix Composites," CRC, Cleveland(1972).
18. Brunauer, S., Emmett, P. H. and Teller, E.: *J. Am. Chem. Soc.*, **60**, 309(1938).
19. Donnet, J. B. and Bansal, R. C.: "Carbon Fibers," 3rd ed., Marcel Dekker, New York(1998).
20. Chen, Z., Mu Lin, Ignowski, J., Kelly, B., Linjewile, T. M. and Agarwal, P. K.: *Fuel*, **80**, 1259(2001).
21. Tomita, A.: *Fuel Process. Technol.*, **71**, 53(2001).