

공기 중 톨루엔에 의한 고분자전해질연료전지의 성능감소

이 호 · 송진훈 · 김기중 · 김세훈* · 안병기* · 임태원* · 박권필†

순천대학교 화학공학과
540-742 전남 순천시 매곡동 315
*현대자동차 환경기술연구소
446-912 경기도 용인시 기흥구 마북동 104
(2010년 7월 31일 접수, 2010년 8월 25일 채택)

Decrease of PEMFC Performance by Toluene in Air

Ho Lee, Jinhoon Song, Kijoong Kim, Saehoon Kim*, Byungki Ahn*, Taewon Lim* and Kwonpil Park†

Department of Chemical Engineering, Suncheon National University, 315 Maegok-dong, Suncheon-si, Jeonnam 540-742, Korea

*HMC Eco Technology Research Institute, 104 Mabuk-dong, Giheung-gu, Youngin-si, Gyeonggi 446-912, Korea

(Received 31 July 2010; accepted 25 August 2010)

요 약

고분자전해질 연료전지에 유입되는 공기가 톨루엔에 오염되었을 때 전지 성능에 미치는 영향을 여러 톨루엔 농도와 운전 조건에서 연구하였다. 그리고 청정한 공기에 의한 전지 성능 회복과 활성탄 흡착에 의한 공기 중 톨루엔의 제거에 대해서도 연구하였다. 본 연구에서 실험한 톨루엔의 농도 범위는 0.1~5.0 ppm이었고 전지 성능감소와 회복은 일정 전류에서 전압변화 측정법과 전기화학적 임피던스 측정법(EIS)에 의해 측정하였다. KOH 침착활성탄의 톨루엔 흡착용량은 등온흡착곡선으로 구했다. 톨루엔 농도가 증가할수록, 전류밀도가 증가할수록, 공기유량이 증가할수록 톨루엔 오염에 의한 성능감소가 심했다. 그러나 상대습도가 증가할수록 톨루엔 오염에 의한 성능감소는 작았다. 가습된 청정 공기 중의 산소와 수분에 의한 톨루엔의 산화에 의해 전지의 성능이 회복되었다. 톨루엔의 백금 표면 흡착에 의한 전하 전달 저항 증가가 전지 성능을 주로 감소시킴을 EIS가 보였다. 침착활성탄의 톨루엔 흡착 용량은 KOH 침착량이 증가할수록 감소하였다.

Abstract – The contamination effect of toluene in the airstream on PEM fuel cell performance was studied with various toluene concentration under different operation conditions. And the recovery of the cell performance by applying clean air and the removal of toluene in the air by adsorption of active carbon were investigated. The toluene concentration range used in the experiments was from 0.1 ppm to 5.0 ppm. The performance degradation and recovery were measured by constant-current discharging and electrochemical impedance spectroscopy(EIS). Toluene adsorption capacity of KOH impregnated active carbon was obtained from the adsorption isotherm curve. The severity of the contamination increased with increasing toluene concentration, current density and air stoichiometry, but decrease with increasing relative humidity. The cell performance was recovered by toluene oxidation with oxygen and water in humidified neat air. EIS showed that the increase of charge transfer resistance due to toluene adsorption on Pt surface mainly reduced the performance of PEMFC. Toluene adsorption capacity of active carbon decreased as KOH weight increased in KOH impregnated active carbon.

Key words: PEMFC, Toluene, Contamination, Degradation, Adsorption, Performance Recovery

1. 서 론

상용화에 근접해 있는 고분자전해질 연료전지는 목표 수명 시간까지 실제 운전조건에서 제 성능을 유지할 수 있는 신뢰성(reliability) 확보가 중요하다. PEMFC cathode의 산소 공급원인 공기 중에 SO_x , NO_x , VOCs(volatile organic compounds) 등이 존재하면 MEA 기능

을 저하시켜 PEMFC 스택 성능을 감소시킨다. 공기 중의 이들 오염 물질들이 보통의 공기 오염정도에서는 PEMFC 운전에서 별 문제가 되지 않지만 환기가 잘 되지 않고 차량 운행량이 많은 터널, 지하주차장 등 오염도가 높은 곳에서는 PEMFC 스택 성능이 감소될 수 있다.

공기 중 SO_x , NO_x 가 PEMFC에 미치는 영향에 대해서는 비교적 많은 연구[1~7]가 있었으나 벤젠, 톨루엔, 에틸렌 등을 포함한 VOC에 의한 PEMFC 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 미미한 수준이다. 공장, 차량 배기가스, 용매, 농산물 처리과정, 생물 공정 등에서 발생

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: parkkp@sunchon.ac.kr

하는 VOC는 환경오염원일 뿐만 아니라 연료전지 성능에 심각한 영향을 주는데 예를 들면 50 ppm의 벤젠이 주입되면 15분안에 0.2 A/cm²에서 전압이 160 mV 감소한 것으로 그 영향을 알 수 있다[2].

VOC가 PEMFC의 성능을 저하시키는 경로는 1) 톨루엔이 촉매에 흡착하여 반응속도를 감소시킴 2) 촉매층과 가스확산층의 구조와 소수성을 톨루엔이 변화시켜 물질전달 저항을 증가시킴 3) 막과 이온노머의 이온전도성을 감소시킴 등 세 가지를 들 수 있다[8]. 본 연구에서는 톨루엔을 PEMFC cathode에 유입해 성능저하되는 과정과 청정공기에 의해 PEMFC 성능이 회복되는 과정을 분석해서 촉매활성저하, 이온전도도 감소 그리고 물질전달 감소 중 톨루엔이 어느 경로에 많은 영향을 주는지 검토하고자 한다. 그리고 cathode 오염물질들이 농도가 높은 가속 운전조건에서 실시되었는데 본 연구에서는 농도가 낮은 실환경 조건에서 실험해 어느 농도 수준 이하의 VOC (toluene)가 cathode에 유입되어야 하는지 그 기준을 제시하고자 한다. 공기 중의 톨루엔농도를 기준으로 하로 제거하기 위해서 공기 필터가 필요한데 이 공기 필터에 들어가는 활성탄 및 알칼리 첨착 활성탄이 톨루엔 흡착에 얼마나 효과적인지 실험하였다.

2. 실험

톨루엔에 의한 PEMFC의 성능저하는 Fig. 1처럼 톨루엔 함유 공기를 전지에 공급하면서 성능변화를 측정하였다. 전극크기 25 cm² 전지에 막과 전극합체(MEA, HMC)와 테플론 가스킷을 넣고 100토크로 체결하여 실험하였다. 전지 온도는 70 °C, anode와 cathode의 상대습도는 50%, H₂ 117 ml/min, Air 370 ml/min을 각각 상압에서 공급하였다. 10A의 일정 전류에서 톨루엔 유입에 따른 전압 변화를 측정하거나, 같은 조건에서 상대습도, cathode 유량, 전류밀도, 셀 온도의 각 조건이 달라짐에 따른 성능 변화를 측정하였다. 톨루엔 유입 전후의 전지 성능 변화는 I-V 분극곡선 측정(Unicorn, SL-300) 및 임피던스 분석(Solatron, SI 1287)을 통하여 확인하였다.

톨루엔 농도 100~500 ppb, 1~5 ppm의 공기를 cathode에 유입하였는데, 가스 농도는 구입한 톨루엔 봄베(9.6 ppm, 104 ppm Toluene, He base)의 가스를 공기와 혼합해 희석하여 조절하였다. 톨루엔 봄베로부터 MFC(KOFLOC, 8300series)를 거친 톨루엔가스가 가습기를 통과한 공기와 혼합기에서 혼합되어 cathode에 공급되었다.

KOH 첨착활성탄의 톨루엔 흡착특성을 알아보기 위한 고정층 흡착시스템은 이송부, 흡착반응부, 분석부로 구성하였다. 고정층 흡착 컬럼은 sus u-type으로 내경 1/4in 크기를 사용하였고, 컬럼 안에는 0.01 g의 첨착활성탄과 흡착제를 지지하고 channeling 현상을 최소화

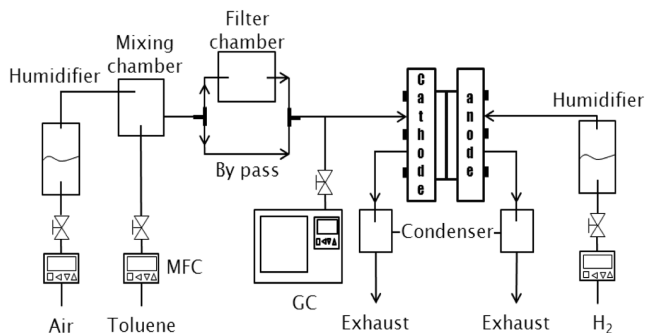


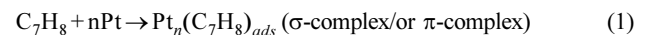
Fig. 1. Experimental apparatus for effect of toluene on PEMFC performance.

하기 위해서 흡착제 상·하부에 유리솜을 충전하였다. 컬럼 외벽에 위치한 전기로에 의해 200 °C로 가열한 후 He gas를 흘려보내 purging line과 반응기 내의 오염가스를 제거하였다. 컬럼의 온도를 일정하게 유지한 상태에서 He, Toluene(104 ppm, He base)을 MFC를 이용하여 40 ml/min으로 일정하게 주입하면서 Bypass line과 반응기로부터 빠져나가는 Toluene 농도를 시간에 따라 GC(Hewlett Packard, 5890 seriesII)로 측정하여 등온흡착곡선을 작성하였다. GC의 detector로 FID(Flame Ionization Detector)를 사용하고 Oven 온도 150 °C, detector 온도 250 °C 조건에서 분석하였다. 첨착활성탄의 표면과 비표면적은 전개방사형 주사전자현미경(SEM EDX, Hicachi, S-4800)과 미세기공 표면적 측정기(Micromeritics, ASAP 2010)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 톨루엔에 의한 성능 감소 및 회복

일정 전류 0.4 A/cm²에서 톨루엔을 주입했을 때 전압 변화를 Fig. 2에 나타냈다. 주입된 톨루엔 농도가 증가할수록 전압 감소가 심해짐을 보이고 있다. 톨루엔은 온도와 농도에 따라 백금에 수직방향(σ -complex)과 수평방향(π -complex)으로 식 (1)과 같이 흡착한다고 하였는데[9], 본 실험에서도 톨루엔이 cathode의 Pt에 흡착됨으로써 산소환원반응속도(ORR)가 감소해 전압이 낮아진 것이라 본다.



Hui Li 등[10]의 연구결과는 10 ppm 이하의 농도로 톨루엔을 유입시 전압이 감소하다 1 시간 내에 일정한 값에 도달하였으나 본 실험 결과는 10시간이 지나도 일정해 지지 않고 계속 감소하는 경향을 나타내고 있다. 같은 운전조건이라 하더라도 사용한 MEA와 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL), 그리고 유로의 차이에 의해 톨루엔의 확산, 흡착/탈착 등이 차이가 있기 때문이라 판단된다.

톨루엔 주입을 멈추고 순수한 공기만 주입했을 때 전압이 빠르게

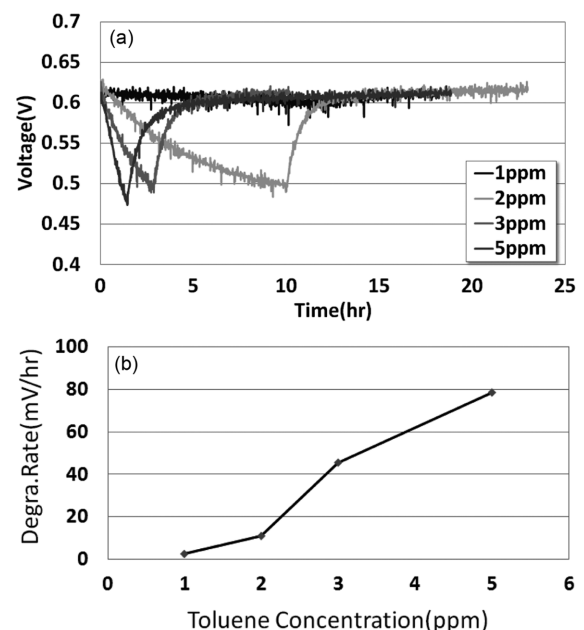
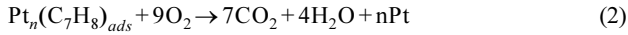


Fig. 2. Effect of toluene with different concentration on the cell potential at 10 A (a) voltage change with time (b) degradation rate.

회복됨을 보이고 있다. PEM 연료전지 운전조건에서는 과잉 산소가 톨루엔과 화학적 산화를 통해 반응 2)처럼 CO_2 를 생성할 수 있고 결과적으로 Pt를 탈착시켜 ORR 반응을 할 수 있게 한다[9]. 톨루엔 흡착 후에 깨끗한 공기 유입에 의해서 성능 회복이 가능함을 Fig. 2에서 확인하였다.



그리고 Fig. 2(a)에 보이는 것처럼 flooding 현상을 반영하는 스파이크(negative cell voltage spike)가 있다. 이와 같은 현상은 서론에서 언급하였듯이 톨루엔이 촉매층과 GDL 구조를 변화시켜 물질전달 저항이 커졌기 때문이다. 깨끗한 공기에 의한 성능 회복 후에도 이 스파이크는 없어지지 않았다. 이것은 톨루엔 오염에 의해서 촉매층과 GDL의 변화된 구조가 톨루엔이 제거되더라도 복구되지 않기 때문이라 여겨진다.

Fig. 3에 톨루엔 주입 전과 후 그리고 순수 공기에 의한 성능 회복 후 MEA의 임피던스 측정 결과를 나타냈다. 막 저항 변화는 거의 없으나 톨루엔이 주입됨에 따라 전하전달저항(charge transfer resistance)이 증가했고 톨루엔 주입을 중단하고 공기만 주입했을 때 전하전달 저항이 감소하였다. 톨루엔이 전극 촉매 Pt에 흡착해서 전하전달 저항을 증가시켰다가 순수 공기에 의해 Pt에 흡착된 톨루엔이 탈착되면서 전하전달저항이 감소한 것이다. 이 임피던스 측정을 통해 톨루엔에 의한 성능저하 주요 원인이 톨루엔의 Pt 흡착임을 확인하였다.

자동차 배기구에서 톨루엔의 농도를 측정할 결과 769 ppb였고, 오염도가 높은 터널에서 톨루엔의 농도가 3 ppm까지 측정되었다. 그러나 대부분의 도로에서는 100 ppb 이하의 낮은 농도를 나타내므로 이런 낮은 톨루엔 농도는 PEMFC 성능에 얼마나 영향을 주나 확인

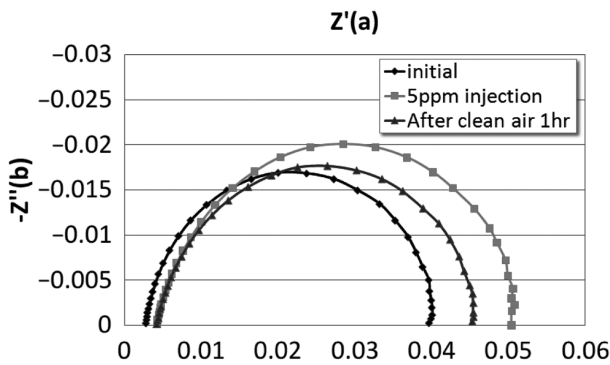


Fig. 3. Nyquist plots measured before and after 5.0 ppm toluene injection and after recovery with clean air.

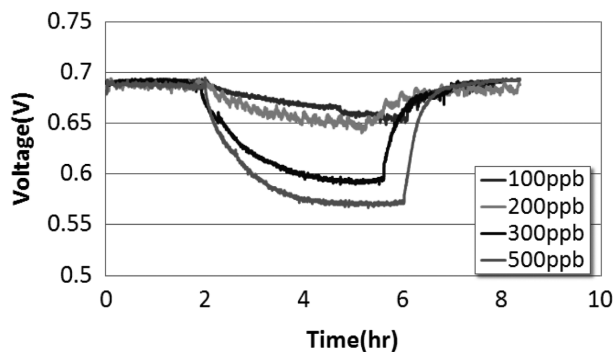


Fig. 4. Effect of toluene with different concentration, under 1.0 ppm, on the cell potential at 10 A.

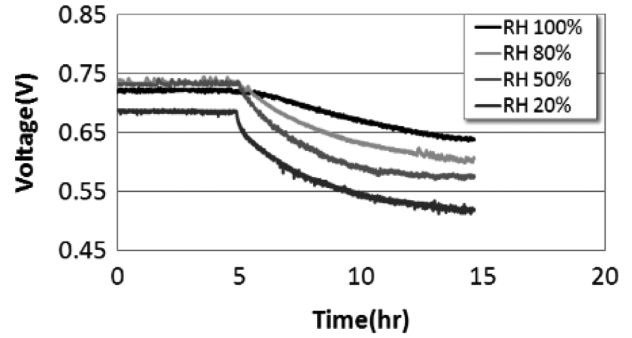
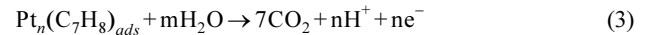


Fig. 5. Cell voltage change with 3.0 ppm toluene at various RHs.

하기 위해 낮은 톨루엔 농도에서 측정할 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 100 ppb의 농도에서도 5시간 만에 약 50 mV의 전압감소가 있어 공기필터에 의한 톨루엔 제거가 필요함을 보였다.

3-2. 상대습도와 공기량의 영향

Fig. 5에 나타난 것처럼 톨루엔 주입 시 공기의 상대습도가 높을수록 전압 감소가 작다. 상대습도가 높아져 물이 많아지면 톨루엔이 촉매층이나 가스확산층에 접근하기 힘들기 때문에 톨루엔의 영향을 덜 받게 된 것이고, 또 하나는 흡착된 톨루엔이 물과 결합해 CO_2 를 발생하면서 반응 3)처럼 산화되는데[9], 상대습도가 높을수록 이 반응이 유리한 점도 있다.



공기 공급량을 증가시키기에 따라 성능이 더 감소하는 경향을 Fig. 6에 나타냈다. 이것은 두 가지로 설명할 수 있는데 첫째는 톨루엔 3 ppm 농도를 맞추기 위해 공기량이 증가한 만큼 톨루엔 공급 유량도 증가하므로 유입된 톨루엔 절대량이 증가하여 톨루엔 흡착면적이 더 넓어지기 때문이다. 또 하나는 Hui Li 등[10]의 논문에서 보였듯이 공기 유량이 커짐에 압력강하가 커져 물의 제거율이 높아지기 때문이다. 앞서서도 언급했듯이 물의 제거가 잘 되면 톨루엔이 촉매층이나 가스확산층에 접근하기 쉽기 때문에 톨루엔의 영향을 많이 받게 된 것이다.

3-3. 전류밀도와 온도의 영향

같은 톨루엔 농도에서 전류밀도가 증가함에 따라 성능이 더 감소함을 보이고 있다(Fig. 7). 일반적으로 전류밀도가 증가할수록 물질전달의 영향이 커진다. 그러므로 전류밀도가 클수록 톨루엔 영향이

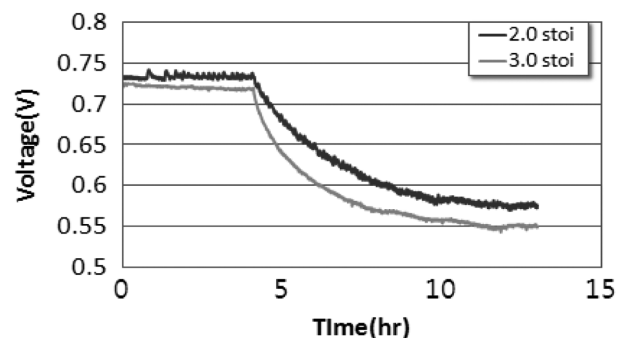


Fig. 6. Comparison of cell voltage changes with 2.0 and 3.0 stoichiometry of air at 3.0 ppm toluene injection.

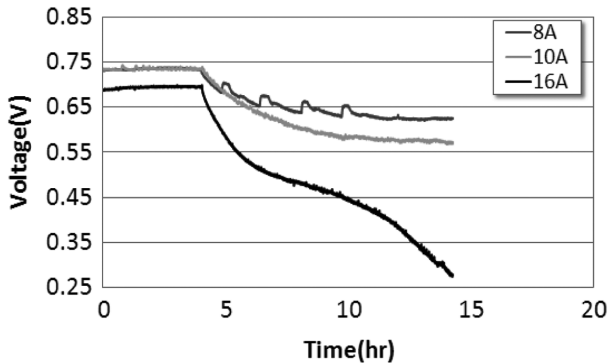


Fig. 7. Comparison of cell voltage changes at various current density with 3.0 ppm toluene injection.

커졌다는 것은 톨루엔이 물질전달에 많은 영향을 준다는 것, 즉 톨루엔이 MEA 내에서 물, 가스의 전달을 방해한다는 것을 의미한다. 유기용매인 톨루엔이 MEA에 포함된 PTFE와 같은 유기물들을 용해시켜 촉매층과 가스확산층의 구조를 변형시킴으로써 물질전달을 방해한 것이다. 물 제거가 원활하지 못할 때 나타나는 촉매층에서 flooding 현상이[11] Fig. 2에 보이는 것을 보더라도 이를 알 수 있다.

또 전류밀도가 낮을 때 전극에 흡착된 톨루엔이 전기화학적으로 산화되어 제거됨으로써 낮은 전류밀도에서 톨루엔에 의한 전기 성능 저하가 감소될 수 있다. 톨루엔의 전기화학적 산화는 0.8~1.1 V 전위 범위에서 진행되는데[12], 이 전위에 해당되는 낮은 전류밀도 (0~0.4 A/cm²)에서 PEMFC가 운전될 때 흡착된 톨루엔이 전기화학

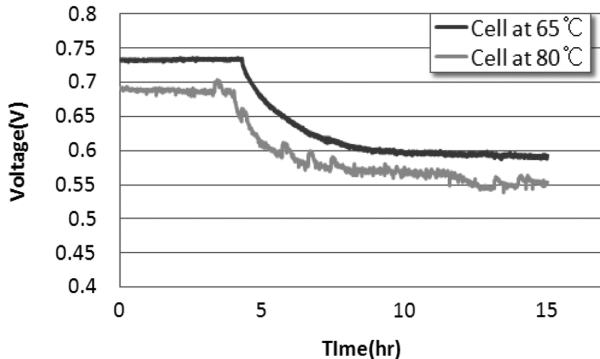


Fig. 8. Comparison of cell voltage changes at 65 °C and 80 °C with 3.0 ppm toluene injection.

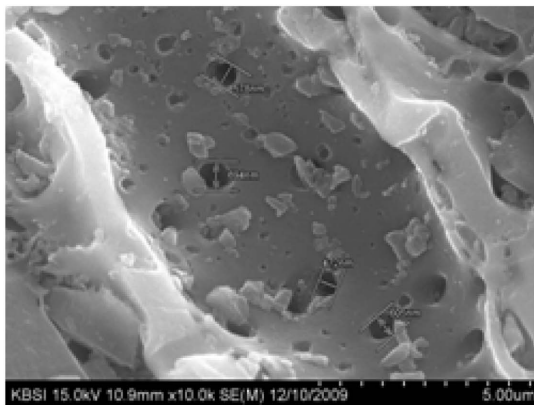


Fig. 9. SEM EDX of 10 wt.% KOH impregnated active carbon.

적으로 산화되어 톨루엔 오염에 의한 성능저하가 감소한 결과라고 본다.

톨루엔이 주입될 때 PEMFC 온도를 달리하면서 전압을 측정한 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 전압감소에 미치는 온도의 영향은 크지 않았다. 톨루엔의 Pt 전극 상의 흡착을 연구한 Hui 등의 결과[13]에서는, 25~80 °C 온도범위에서 Langmuir type 흡착이 흡착등온선(adsorption isotherm)에 잘 맞음을 보였고, 낮은 농도와 낮은 온도에서는 σ -complex (vertical orientation)를 높은 농도와 높은 온도에서는 π -complex가 우세함을 보인다고 하였는데, 본 실험결과 PEMFC 운전 온도범위인 65~80 °C에서 온도가 전압감소량에 별 영향을 보이지 않았다. 그러나 flooding에 의한 전압변화가 심함을 높은 온도인 80 °C에서 보였다.

3-4. 공기필터에 의한 톨루엔 흡착

PEMFC용 공기필터에 알칼리를 첨착한 활성탄이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서도 활성탄에 KOH를 첨착하여 톨루엔 흡착특성을 측정하였다. Fig. 9는 활성탄에 KOH 5 wt% 흡착한 활성탄의 SEM-EDS 사진으로 활성탄 표면에 KOH 입자가 첨착되어 있음을 확인하였다.

KOH를 0, 2, 5, 10 wt% 첨착한 활성탄의 흡착 등온곡선을 Fig. 10에 나타냈다. 그리고 Table 1에 흡착 등온 곡선에서 구한 첨착 활성탄 무게 당 톨루엔 흡착량과 BET로 측정한 첨착활성탄의 표면 특성들을 정리하였다. KOH 첨착량이 증가할수록 톨루엔 흡착량이 감소하였다. PEMFC용 공기필터에 알칼리 첨착 활성탄을 사용하는 이유는 공기 중 오염물질인 SO_x, NO_x가 산성이어서 이들을 제거하는

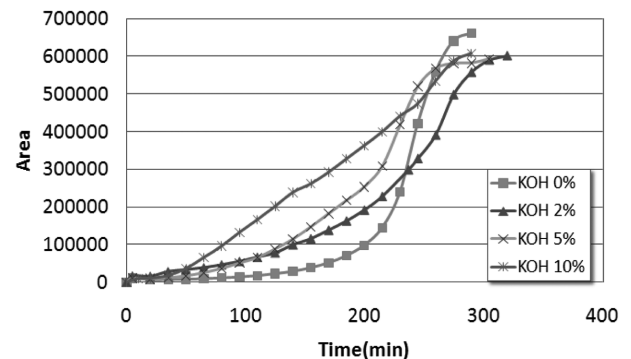


Fig. 10. Adsorption isotherm curves of KOH impregnated active carbons.

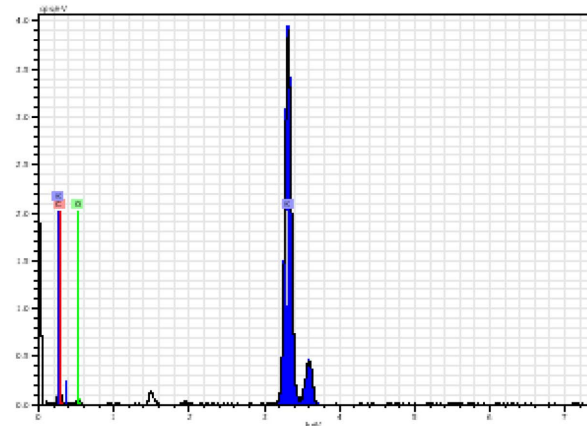
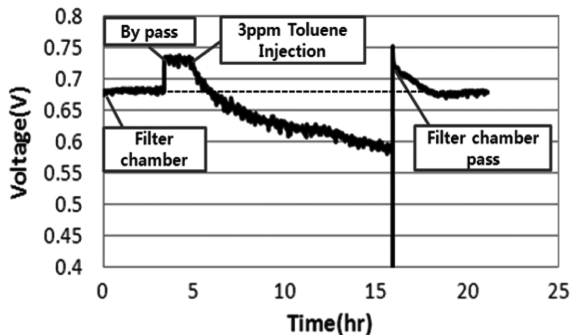


Table 1. Characteristics of KOH impregnated active carbons and their toluene adsorption capacities

KOH weight (%)	Toluene adsorption (mmol/g)	BET specific surface area(m ² /g)	Micropore area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)
0	229.7	1021	84 6	0.484
2	215.5	972	798	0.465
5	191.9	813	757	0.438
10	166.6	785	654	0.374

**Fig. 11. Cell voltage change with 3.0 toluene injection before and after KOH impregnated active carbon air filter.**

효율을 높이기 위해 알칼리를 첨착한 것이다. 톨루엔과 같은 VOC는 활성탄만으로 흡착을 잘 하기 때문에 KOH 첨착이 필요없다. KOH를 첨착함으로써 Table 1에서 보인 것처럼 미세 기공과 BET 표면적을 감소시켜 톨루엔 흡착량을 감소시켰다. VOC 제거에 중점을 둔 공기필터라면 KOH 첨착량이 작은 PEMFC용 공기 필터가 적합함을 보였다.

PEMFC 공기 유입 라인에 공기필터를 고정시킨 필터 chamber를 설치하고 공기필터의 톨루엔 제거 효과를 PEMFC 전압을 측정해 확인하였다. Fig. 11에 전압 변화를 보이고 있는 데, 처음 4시간까지는 순수 공기를 필터 chamber를 통과시켰고 다음에 필터를 통과하지 않게 바이패스 라인으로 순수공기를 유입하자 공기압 차이에 의해 전압이 상승하였다. 이 바이패스 라인에 3 ppm의 톨루엔을 주입하기 시작하자 전압이 감소하기 시작했고 16시 경에 바이패스 라인을 잠그고 필터 chamber를 통과시키자 전압이 상승해 20시 경에 전압이 순수 공기가 필터 chamber를 통과할 때와 같은 전압이 되었다. 3 ppm 톨루엔이 공기필터를 통과했을 때 공기 중 톨루엔이 제거되어 순수한 공기를 주입했을 때와 같은 PEMFC의 전압이 나타났다.

4. 결 론

Cathode 유입 공기 중에 VOC가 존재시 PEMFC에 미치는 영향을 파악하기 위해 VOC를 대표하여 톨루엔을 PEMFC에 유입해 성능저하 및 성능회복에 대하여 실험하고 그리고 공기 중 톨루엔 제거에 대하여 연구하였다.

톨루엔 농도가 증가할수록 전지 성능 감소속도는 증가하였으며 공기 오염도가 높은 도로 상의 톨루엔 농도인 100 ppb에서 5시간 만에 약 50 mV의 전압감소가 있었다. 톨루엔 유입에 의한 성능 감소는 임피던스 분석 결과 톨루엔이 Pt 전극측면에 흡착되어 전하전달 저항이 증가하는 것이 주 원인이었다. 흡착된 톨루엔에 순수 공기를 유입하면 성능이 회복되었다. 공기 중의 산소와 수분에 의해 톨루엔이 산화되어 제거되기 때문으로 알려져 있는데, 같은 톨루엔 농도라도 상대 습도가 높을수록 톨루엔에 의한 성능감소가 작은 경향을 통해

서도 이를 확인할 수 있었다. 전류밀도가 낮을 때 전극에 흡착된 톨루엔이 전기화학적으로 산화되어 제거됨으로써 낮은 전류밀도에서 같은 톨루엔 농도라도 전지 성능감소가 작았다. 그리고 톨루엔이 촉매층과 공기확산층의 구조 및 물성을 변형시켜 원활한 물질전달을 방해함으로써 성능 저하와 flooding 현상을 초래하였다.

KOH를 첨착한 활성탄의 톨루엔 등온흡착실험을 하였는데 KOH 첨착량이 증가할수록 톨루엔 흡착량이 감소하였다. 3 ppm 톨루엔 함유 공기를 2% KOH 첨착 활성탄의 공기필터를 통과시켜 PEMFC에 공급하였을 때 정상적인 성능이 나와 활성탄이 PEMFC 공기필터 재료로 적합함을 확인하였다.

감 사

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2008 NFC12J0233102009)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Mohtadi, R., Lee, W. K. and Van Zee, J. W., "Assessing Durability of Cathodes Exposed to Common Air Impurities," *J. Power Sources*, **138**, 216-225(2004).
- Moore, J. M., Adcock, P. L., Lakeman, J. B. and Mepsted, G. O., "The Effects of Battlefield Contaminants on PEMFC Performance," *J. Power Sources*, **85**, 254-260(2000).
- Nagahara, Y., Sugawara, S. and Shinohara, K., "The Impact of Air Contaminants on PEMFC Performance and Durability," *J. Power Sources*, **182**, 422-428(2008).
- Jing, F., Hou, M., Shi, W., Fu, J., Yu, H., Ming, P. and Yi, B., "The Effect of Ambient Contamination on PEMFC Performance," *J. Power Sources*, **166**, 172-176(2007).
- Uribe, F., Smith, W., Wilson, M., Valerio, J., Rockward, T., Garzon, F. and Havrilla, G., "Electrodes for Polymer Membrane Operation on Hydrogen/Air and Reformate/Air," Hydrogen Fuel Cells and Infrastructure Technologies, FY 2003 Progress Report.
- Gould, B. D., Baturina, O. A. and Swider-Lyons, K. E., "Deactivation of Pt/VC Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cathodes by SO₂, H₂S and COS," *J. Power Sources*, **188**, 89-95(2009).
- Loučka, T., "Adsorption and Oxidation of Sulphur and of Sulphur Dioxide at the Platinum Electrode," *J. Electroanal. Chem.*, **31**, 319-332(1971).
- Li, H., Zhang, J., Faith, K., Wang, Z., Tang, Y., Shi, Z., Wu, S., Song, D., Zhang, J., Jia, N., Wessel, S., Abouatallah, R. and Joos, N., "Polymer electrolyte membrane fuel cell contamination: Testing and diagnosis of toluene-induced cathode degradation," *J. of Power Sources*, **185**, 272-279(2008).
- Anderson, L. M., Daniel, J. B., Daniel, A. F. and John, L. G., "In-Situ Soft X-ray Studies of Toluene Catalytic Oxidation on the Pt(111)

- Surface," *J. Phys. Chem. B* **2004**, 108, 605-611.
10. Li, H., Zhang, J., Shi, Z., Song, D., Faith, K., Wu, S., Wang, H., Zhang, J., Tang, Y., Jia, N., Wessel, S., Abouatallah, R. and Joos, N., "PEM Fuel Cell Contamination: Effects of Operating Conditions on Toluene-induced Cathode Degradation," *J. of Electrochem. Soc.*, **156**(2), B252-257(2009).
 11. Li, H., Tang, Y., Wang, Z., Shi, Z., Wu, S., Song, D., Zhang, J., Faith, K., Zhang, J., Wang, H., Liu, Z. and Mazza, A., "A Review of Water Flooding Issues in the Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *J. of Power Sources*, **178**, 103-117(2008).
 12. Shi, Z., Song, D., Li, H., Fatih, K., Tang, Y., Zhang, J., Wang, Z., Wu, S., Liu, Z. S., Wang, H. and Zhang, J., "A General Model for Air-side Proton Exchange Membrane Fuel Cell Contamination," *J. of Power Sources*, **186**, 435-445(2009).
 13. Lia, H., Gazzarria, J., Tsaya, K., Wua, S., Wanga, H., Zhanga, J., Wesselb, S., Abouatallahc, R., Joosc, N. and Schrootend, J., "PEM Fuel Cell Cathode Contamination in the Presence of Cobalt ion (Co^{2+})," *Electrochimica Acta*, **55**(20), 5823-5830(2010).