한국부식학회지
J. Corros. Sci. Soc. of Korea
Vol. 18 No. 3 Sept, 1989
〈研究論文〉

승압하 인산연료전지 운전조건하에서 아세틸렌 블랙 탄소전극의 부식특성

辛鎭敎 · 尹勝烈
한양대학교 공과대학 재료공학과

Corrosion Behavior of Acetylene Black under Phosphoric Acid Fuel Cell Conditions at Elevated Pressure

Jingyo Shin and S. R. Yoon
Dep't of Materials Eng., College of Eng., Hanyang University

Corrosion behavior of acetylene black binded with polytetrafluoroethylene at a weight ratio of 4 to 1 has been studied under phosphoric acid fuel cell conditions in a Teflon lined autoclave at elevated pressure using electrochemical polarization techniques. Corrosion currents were mainly measured potentiostatically at given potentials as a function of time. Experimental results showed that corrosion currents decreased as the pressure increased and at a given potential they increased with increasing temperature. Arrhenius plots of the corrosion currents measured at 0.9V vs. SCE displayed that the activation energy was 46.0 kJ/mole at H_3PO_4 concentrations of 100% and above whereas 36.4 kJ/mole at acid concentrations of 93% and below, indicating corrosion mechanism is changed with acid concentration. Corrosion current was also found to depend on water vapor pressure: it showed zero-order dependence above 97% H_3PO_4, then approximately first-order below 93%. There were also some experimental evidences on the existence of two anodic processes occurred in the corrosion of acetylene black.

1. 서 론

인산연료전지 (PAFC)는 수소가스의 연소를 인산 전해질을 사용하는 전지내에서 일으키므로써, $H_2(g) + O_2(g) = H_2O(g)$ 연소반응에 관련된 화학에너지를 소위 Carnot 엔진에서의 열손실 없이 직접 전기에너지로 바꿔도록하는 고 효율 발전방식을 말한다.[1, 2]

모든 연료전지가 그러하듯이 PAFC에서도 단위전지를 적층해 나가면 원하는 용량의 발전시설을 원하는 장소에 설치할 수 있기 때문에, 송배전시설이 필요 없고 공해문제가 전혀 없으며 또 열병합발전이 가능한 것 등 여러가지 이점이 많아서, 일본 미국에서는 60년대말부터 PAFC에 대한 실용화연구가 이루어져 왔고 이제는 거의 상품화단계에 와 있다.[3] 현재, 시설용량이 1~5 MW인 PAFC 경우, 단지전위 기준으로 0.7 V, 200~220 mA/cm², 190 ℃, 4 bars 이하인 저압방법이 적합하다고 하며 100 MW 이상인 PAFC 경우에는 같은 전압, 전류밀도 205 ℃, 7~8 bars의 승압방법이 경제적이라 한다.[3]

PAFC 전극판은, 카아본 블랙 분말을 합성수지로 결합하여 다공성 기판을 만든 뒤, 여기에 백금을 담

지시켜 전해촉매층을 형성하여 만드는데, 이 다공성 탄소전극재료에 부식이 발생하면 인접 백금촉매 입자가 流失되거나 Pt/C 접촉이 불량하게 되어 전지의 성능을 저하시키는 요인으로 부각되고 있다.[4, 5]

前報[6]에서 우리는 상압하 PAFC 운전조건하에서 각종 탄소재료의 전기화학적 분극특성을 연구하면서, 인산용액 내에 침지된 탄소재료의 양분극 전위영역은 PAFC 음극판 전위영역에 해당되며, 전위의 존성 및 시간의존성인 탄소의 부식전류는 식 (1)의 CO_2 발생반응과 밀접한 관계가 있고 또 카아본 블랙 제조시 도입된 어떤 표면흡착물질에도 일부 관련됨을 알았다.

$$C + H_2O = CO_2 + 4H^+ + 4e \quad (1)$$

식 (1)을 보면 탄소의 산화는 H_2O의 분압과 H^+의 농도 즉 인산의 농도에 크게 좌우될 것이 예상된다. 그런데 PAFC 운전온도는 200 ℃ 내외이므로 특히 수증기 분압을 제어하려면 상압하보다는 고압용기 내에서 실험하는 것이 바람직하다.

고압실험장치는 상압장치에 비하여 다루기가 힘들지만 위에 말한 바와 같이 수증기압의 제어가 용이하고 또 대단위 전력용 연료전지에서는 7~8 bars의 승압하에서 운전되므로 실제 연료전지 조건에 가까운 상황에서 탄소전극의 부식거동을 연구할 수 있는 장점이 있다.

본 연구는 이러한 배경하에서 前報[6]의 계속연구로 승압하 PAFC 운전조건하에서 아세틸렌 블랙으로 만든 탄소전극의 부식특성을 알아보고자 수행한 것이다.

2. 실 험

2. 1 아세틸렌 블랙 탄소전극의 제작

다공성 탄소전극의 제법은 前報[6]에 자세히 설명되어 있다. 아세틸렌 블랙은 일본 Denki Kagaku Kogyo Co. 제품(BET면적 65 m^2/g)을 사용하였다. 일정양의 이 카아본 블랙 분말을 isopropanol + H_2O 1 : 3 용액에 넣어 적신다음 여기에 60% PTFE 乳狀液(Asahi Fluoropolymers Co., Ltd. 제품)을, 카아본 블랙/PTFE 중량비 80/20으로, 혼합하여 반죽한후 원통형 틀에 넣어 성형하고, 150 ℃에서 60분간 건조, 200 kg/cm^2의 하중을 가하여 압연, 320 ℃로 유지된 muffle로 내에서 소결하여 두께 3 mm정도 되는 전극을 일단 만들었다. 이 납작한 원통형 전극을 면도날로 얇게 자르고 흑연봉으로 다시 압연하여 두께 0.2 mm, 탄소함량 20 mg의 최종탄소전극을 만들었는데 이 전극을 앞으로 "E전극"이라 부르겠다. "E전극"의 두께 0.2 mm는 PAFC 실용전극의 촉매층두께와 비슷한 것이다.

2. 2 승압하 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 고압용기의 개략도이다. 용기와 덮개는 304 스테인리스강으로 만들었

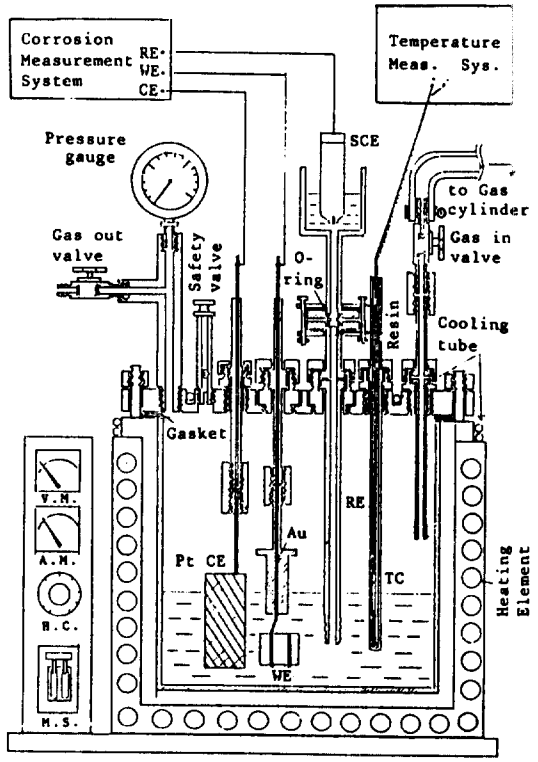

Fig. 1. Experimental set-up for electrochemical measurements at high pressure.

고, 용기부분은 자동온도조절기로 작동되는 가열장치 속에 완전히 장입되도록 하였으며 용기 내부에는 Teflon 컵을 끼워 넣어 실험용액이 컵 내에 담기도록 하였다. 용기내의 실험용액의 온도는 Teflon 관 속에 든 Chromel-Alumel 열전대로 측정하여 원하는 실험온도가 ±1℃ 오차 범위 내에서 유지되는지 확인하였고 용기 내부의 압력은 kg/cm² 단위로 표시해주는 압력계로 읽었다.

안쪽에 Teflon lining을 한 용기의 덮개에는 여러 개의 통로를 만들어 탄소전극(WE), 백금망대극(CE), 상온하의 포화감홍전극(SCE), CA열전대(TC), 가스 실린더로 연결된 gas-in관, 압력계와 gas-out valve로 구성된 gas-out관, 그리고 승압시킬 때의 안전을 고려한 safety valve 등을 모두 gas-tight하게 되도록 설치하였다.

고압용기 제작시에 가장 난점으로 등장했던 기준전극 통로부분은, 용기 내부의 고압을 1 atm으로 감압시키면서 용액에 의한 이온전도를 가능케하는 고안이 필요하였었는데 그림에서 보듯이 특수 수지와 O-ring을 사용하여 원하던 목표를 달성할 수 있었다. 이때 기준전극 통로중 수지 밑부분은 용기 내에서 올라온 인산용액으로 채워지고, 수지 윗부분은 용기 외부의 SCE가 담기는 작은 Teflon 컵에서 나온 인산용액으로 채워지게 되며 후자는 항상 상온으로 유지되어 기준전극의 전위가 용기 내부의 실험온도 변화에도 흔들리지 않도록하였다. 앞으로 나오는 전위값은 모두 이 상압하에 놓인 SCE에 대하여 읽은 것이다.

이밖에, 반응용기 상부와 덮개에는 구리 냉각관을 감아 냉각수를 통과시키므로서 기준전극 통로의 수지를 보호하고 실험중 용기를 손으로 만질 때 지나치게 뜨겁지 않도록 하였다.

"E전극" 내부의 기공으로 인산을 미리 진공함침시킨후 "E전극"은 Fig. 1에 보인 바와 같이 W자 모양으로 구부린 직경 0.5 mm의 99.99% Au lead선에 끼워 넣어 인산액 속으로 침지시켰다. 용기내에 담기는 인산의 양은 약 250 ml 이었다.

기타 인산용액의 농도조절방법, gas train 제반사항, 전기화학적 분극측정 방법들은 前報[6]에서 설명한 바와 같다.

단, 승압하 실험에서는 기준전극 회로에 저항이 큰 탓인지 분극특성 측정에 noise가 개입될 때도 있었다. 이런 때에는 Pt선을 고압용기 내의 인산용액에 접촉시키고 이 Pt선과 SCE사이에 10 nF 내외의 capacitor를 연결시켜 사용하였드니 noise가 발생치 않았다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 200℃, 100% H_3PO_4, 불활성 N_2분위기하에서 용기내 계기압력을 1~10 kg/cm² 사이에서 변화시켜 가면서 "E전극"의 정전위(0.9V SCE) 양분극 거동을 측정하고 각 분극시간에서의 부식전류값을 각각 대수눈금으로 나타낸 것이다. 각 압력하에서 시간(t)에 따르는 양분극 전류값(i)의 변화는 前報[6]에서 보인 상압하에서의 거동과 마찬가지로 logi 대 log t 대수좌표에서 기울기 -0.65의 직선관계

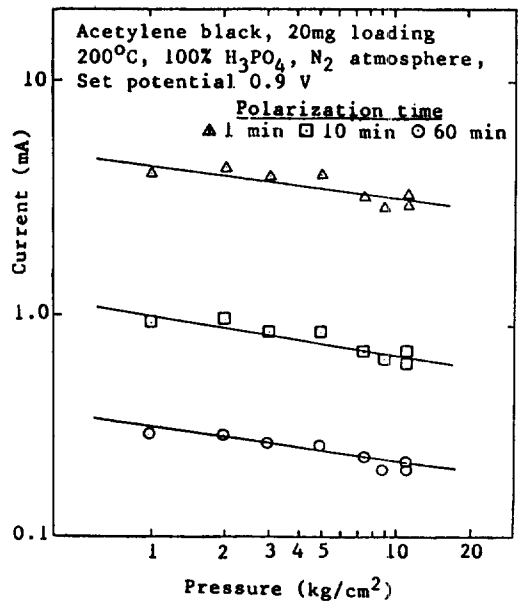

Fig. 2. Effect of pressure on the corrosion currents of acetylene black at conditions given in the figure.

를 나타내었었다.

Fig. 2를 보면 N_2압력이 증가함에 따라 "E전극"의 분극전류 값은 약 30% 내외 감소하는 경향을 나타내고 있다. 식 (1)의 탄소부식속도는 반응생성물이 기체이므로 계의 압력이 높아지면 줄어들 것이 예상된다. 따라서 가압효과는 탄소부식 메카니즘이 식 (1)을 따를 때 현저해지며 부식반응 생성물이 표면산화물인 경우 그 효과가 뚜렷하지 않을 것이라 생각되었다. 따라서 Fig. 2의 가압효과가 나타난 것은 승압하 0.9 V 정전위 실험조건에서 탄소의 부식이 식 (1)에 관련되어 있음을 알려주는 것이라 생각되었다.

Fig. 3은 200 °C, 100% H_3PO_4, 계기압력 8 kg/cm² 의 해당 기체분위기하에서 "E전극"의 동전위 양분극곡선을 측정한 결과이다. 분극측정은 각 실험조건에서 열린회로전위(Eoc)가 안정된 후 수행하였고 전위주사속도는 1mV/sec이었다.

Eoc는 N_2분위기하와 O_2분위기하에서 각각 0.240 V 및 0.668 V이었고, 그림에 "air"로 표시된 20% O_2+80% N_2 분위기하와 CO_2 분위기하에서는 각각 0.420과 0.440 V이었다. O_2와 CO_2가 포함된 기체분위기하에서 탄소전극의 Eoc값이 상승하는 것은 식 (1)과 (2)로 보인 반쪽전지의 영향이 나타난 것으로 해석되었다. 식 (1), (2)의 반쪽전지전위는 CO_2와 O_2의 분압이 증가함에 따라 증가함을 주목하기 바란다.

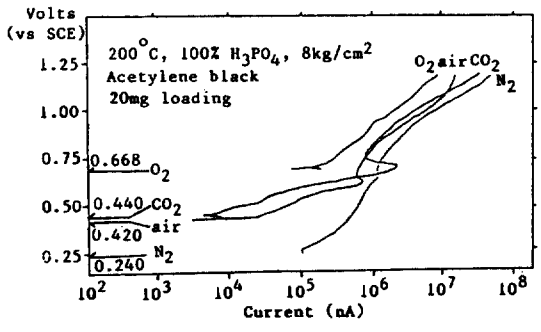

Fig. 3. Effect of gas atmosphere on the petentiodynamic polarization behavior of acetylene black in 200°C, 100% H_3PO_4 under 8 kg/cm² pressure.

$$C + H_2O = CO_2 + 4H^+ + 4e \quad (1)$$

$$E_{rev} = E_o - \frac{RT}{4F} \ln \frac{a_c a_{H2O}}{P_{CO2} a_{H^+}^4}$$

$$H_2O = O_2 + 4H^+ + 4e \quad (2)$$

$$E_{rev} = E_o - \frac{RT}{4F} \ln \frac{a_{H2O}}{P_{O2} a_{H^+}^4}$$

식 (1), (2)에서 E_{rev}은 가역전위값, E_o는 표준상태에서의 가역전위값, a_i는 해당성분의 활동도, P_i는 해당 성분의 분압을 표시한 것이다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 또 하나의 특징은 전위값이 600~700 mV 범위에서 전류 피이크가 나타나 있는 것인데 이 전류 피이크는 아세틸렌 블랙에서 특히 뚜렷하게 나타나는[6] 활성태-부동태 전이현상이라 생각되었으며, 산소 분위기하에서는 Eoc 값이 전류 피이크에서의 전위(E_{pp})보다 높기 때문에 나타나지 않은 것으로 판단되었다.

탄산가스 분위기하에서 위의 전류 피이크가 뚜렷한 것은 흥미 있는 현상으로서 CO_2가 탄소전극 표면산화물 생성과 관련있는 화학종이 아닌가 생각되었으며 그 메카니즘은 더 이상 알아보지 않았다.

E_{pp}보다 높은 전위범위에서 탄소전극의 부식전류값이 산소분위기하에서 가장 작은 것은 이 전위 범위에서 식 (2)에 의한 산소의 환원이 탄소전극에서 발생하기 때문에 그만큼 양전류 값이 줄어든 것으로 해석되었다. 또 공기의 경우에서도 마찬가지 해석이 적용되었다. 탄산가스의 경우 각 전위에서의 부식전류값이 N_2분위기에서보다 적은 것은 식 (1)의 산화반응이 탄산가스 존재로 억제되었기 때문인 것으로 판단되었다.

그러나 E_{pp}이하의 전위에서 N_2분위기하의 부식전류가 다른 기체분위기하에서보다 대폭 증가된 것은 예상 밖의 결과이었는데 현재 그 이유는 확실히 밝혀진 것은 아니나 낮은 전위에서는 탄소부식반응이 식 (1)보다는 표면산화물 생성에 관련된 반응이 우세해져서 나타나게 된 현상이라 추정되었다. 즉, O_2, 공기와 같은 산화분위기가 아닌 불활성 N_2 분위기 때문에 표면산화물의 생성반응이 촉진되지 않았나 추정되었다.

Fig. 4는 계기압력 8 kg/cm²의 N_2분위기하, 각 실험 온도에서 104% 인산 내에 침지한 "E전극"의 정전위(0.9 V) 분극전류-시간 거동을 보인 것이다. 분극전류 대 시간의 대수도표는 앞서 상압하 경우[6]에서도 보인 바와 같이 거의 일정한 기울기 −0.63~−0.72의 직선관계를 나타내고 있으며 온도가 떨어짐에 따라 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

이러한 특징은 인산농도가 달라져도 분극전류값의 크기만 변할 뿐 아래 식 (3)의 직선 관계는 항상 나타났다. 식 (3)에서 a와 n은 분극전위와 탄소종류에 따르는 상수이다.

$$\log i = \log a - n \log t \ ; \ i = at^{-n} \qquad (3)$$

Table 1에는 8 kg/cm² N_2 분위기하, 정전위분극전위 0.9 V, 기타 각 실험조건에서 얻은 식 (3)의 상수 a및 n의 값과 정전위분극 60분후의 전류값(i_{60})을 모아 놓았다. n의 값들이 거의 일정함을 주목하기 바란다.

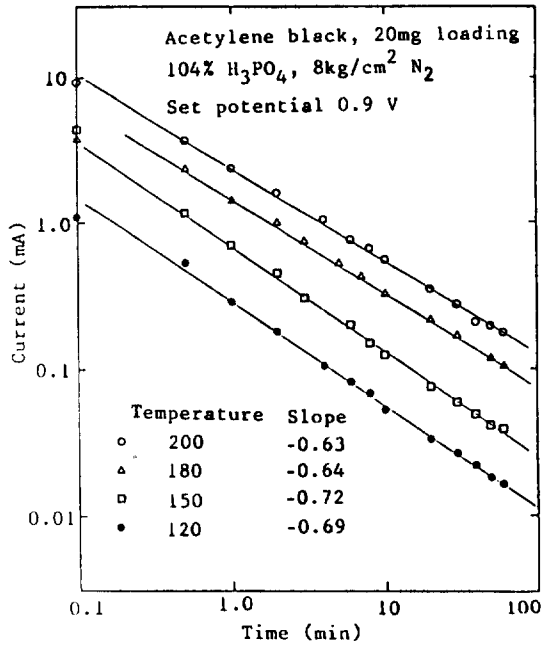

Fig. 4. Current vs. time plot observed during potentiostatic polarization of acetylene black under given experimental conditions.

Table 1. Constant values in equation, $i=at^{-n}$ at each experimental condition observed for "E electrode" under 8 kg/cm² N_2 atmosphere and at set-potential 0.9V.

Conc of H_3PO_4 (%)	Temp. (°C)	Constants a	Constants n	i_{60} (amp)
85	150	2.00×10^{-2}	0.62	1.25×10^{-4}
	120	1.39×10^{-2}	0.68	5.30×10^{-5}
	100	8.39×10^{-3}	0.68	3.41×10^{-5}
	80	5.70×10^{-3}	0.72	1.58×10^{-5}
93	180	3.63×10^{-2}	0.66	1.63×10^{-4}
	150	1.79×10^{-2}	0.70	5.80×10^{-5}
	120	1.09×10^{-2}	0.72	3.01×10^{-5}
	100	5.86×10^{-3}	0.71	1.75×10^{-5}
100	200	3.78×10^{-2}	0.64	2.00×10^{-4}
	180	3.75×10^{-2}	0.68	1.43×10^{-4}
	150	1.93×10^{-2}	0.74	4.50×10^{-5}
	120	6.36×10^{-3}	0.71	1.90×10^{-5}
104	200	3.13×10^{-2}	0.63	1.80×10^{-4}
	180	1.98×10^{-2}	0.64	1.05×10^{-4}
	150	1.45×10^{-2}	0.72	4.00×10^{-5}
	120	1.88×10^{-2}	0.69	6.61×10^{-5}

Fig. 5는 Table 1의 i_{60}을 갖고 Arrhenius plot한 결과이다. Fig. 5에서 직선들은 data point들을 가장 잘 지나가도록 그려 넣은 것인데 104, 100% 인산의 경우와 93, 85% 인산의 경우 기울기가, 그 크기는 작지만, 뚜렷히 다른 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 기울기로부터 활성화에너지를 구하여 본 결과 104, 100% 인산의 경우는 각각 46.5, 45.7 kJ/mole로 나타났고 93%, 85% 인산의 경우는 36.2, 36.6 kJ/mole이어서 인산농도에 따라 부식메카니즘이 다름을 알 수 있었다. 이것은 상온, 상압하에서 인산농도가 96% 이상이 되면 식 (4)에 보인 바와 같이 그 형태가 ortho 인산에서 pyro 인산으로 바뀌는데[7,8] 고온 승압하에서도 이러한 인산상태의 변

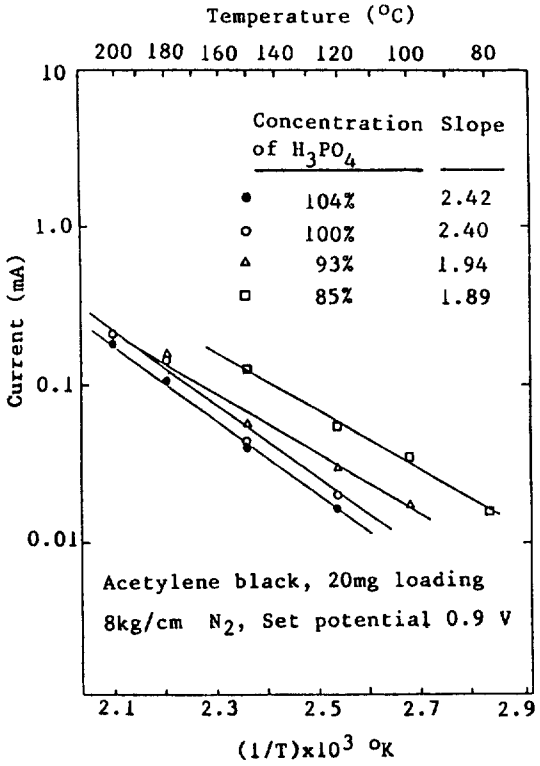

Fig. 5. Arrhenius plots of the anodic currents of acetylene black electrode at the given potentiostatic conditions.

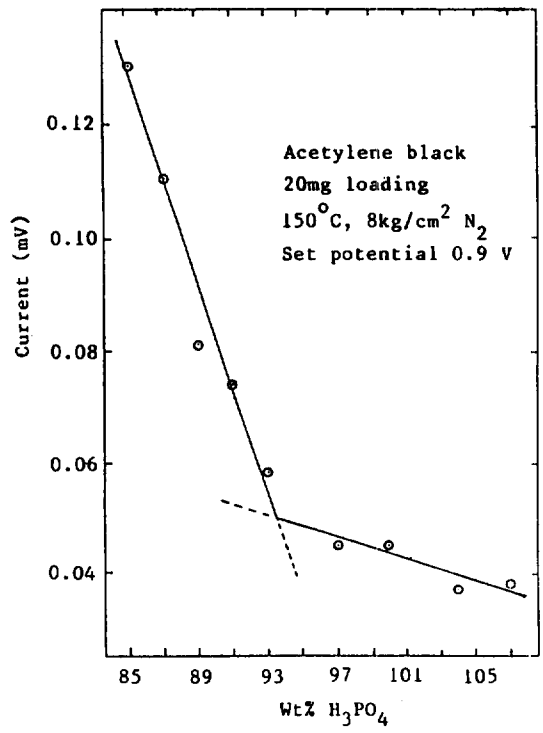

Fig. 6. Effect of the concentration of H_3PO_4 on the corrosion rate of acetylene black at 150°C and 0.9 V under 8 kg/cm^2 N_2.

화때문에 부식메카니즘 변화가 나타난 것으로 해석할 수 있다.

$$2\,H_3PO_4 = H_2O + H_4P_2O_7 \qquad (4)$$

(ortho-) (pyro-)

식 (1)을 보면 알 수 있듯이 탄소전극의 부식에 미치는 H_2O의 영향은 아주 중요한데 인산의 농도와 수증기압은 독립적으로 변화시키기가 불가능하다. Fig. 6은 150 ℃, 계기압력 8 kg/cm^2 N_2분위기하에서 인산 농도를 변화시키는 방법으로 수증기압을 조절하면서 "E전극"의 정전위(0.9V) 분극 60분후의 부식전류 값(i_{60})을 인산농도에 따라 도시한 것이다. 예상하였던대로 부식전류의 인산농도 의존성은 93~97% 전후하여 뚜렷히 다름을 알 수 있었고, 부식전류의 수증기압 의존성도 약 100~200 mmHg를 전후하여 유사한 경향을 보였다 (Fig. 7). Fig. 7에서 수증기압은 계기압력이 8 kg/cm^{2}로 늘어났지만 압력증가에 의한 수증기압의 변화가 크지 않다고 가정하고 해당 인산농도, 온도에서의 상압하 평형수증기압값을 취하였다.

Fig. 7에서 인산농도가 97% 이상일 때의(수증기압이 100 mmHg 이하일 때) 부식전류는 수증기압의 0.05승에 비례하는 관계를 나타내고 있고 인산농도 93% 이하일 때(수증기압이 대략 200 mmHg이상일 때)에는 수증기압의 0.80승에 비례하는 관계를 나타내고 있다. 이와 같이 pyro인산 영역에서(식 (4)참조) 반응차수에 현격한 변화가 있는 것은 아마도 pyro인산 영역에서의 H_2O 활동도계수가 현저히 감소하기 때문이 아닌가 생각되었다.

최근 가압하에서, 치밀하고 미세한 입자들로 구성된 흑연제품(UCAR Grade CGW)의 부식에 대한

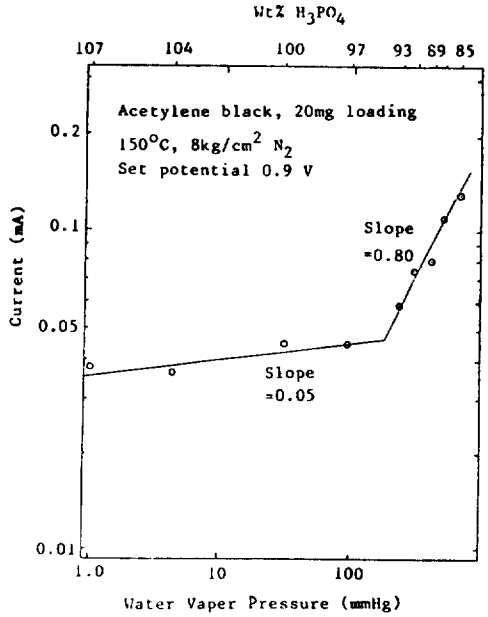

Fig. 7 Effect of water vapor pressure on the corrosion rate of acetylene black at 150°C and 0.9 V.

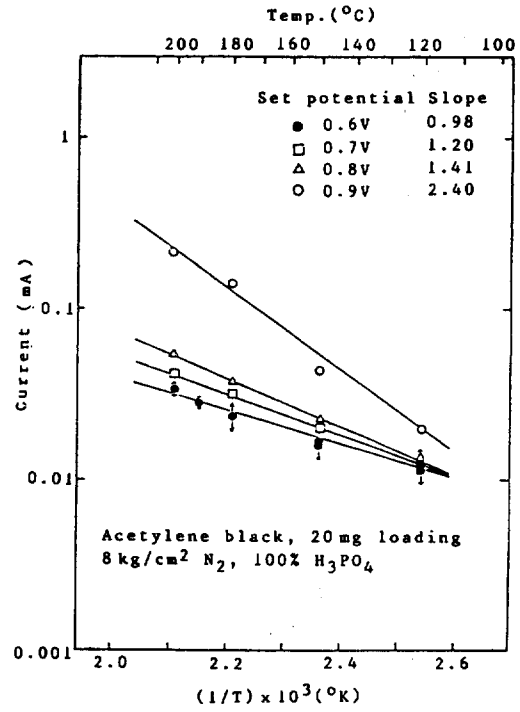

Fig. 8. Arrhenius plots of the anodic currents of acetylene black at the given potentiostatic conditions.

수증기압의 영향을 본 Ross[9]의 data를 참조하면 수증기압 100mmHg를 기준으로 하여 수증기압이 이보다 높을 때 부식전류는 수증기압에 대하여 1차반응을 나타내며 100 mmHg 이하일 때는 0차반응을 나타내어 본 연구에서와 유사한 경향을 보였었다.

Fig. 8은 계기압력 8 kg/cm²의 N_2분위기하 각 실험온도에서 인산의 농도를 100%로 고정하고 "E전극"의 정전위 분극전위에 따른 i_{60}(정전위 분극 60분 경과후의 전류값)을 Arrhenius plot한 것이다. 각 분극전위에서의 기울기로부터 활성화에너지 값을 구한 결과 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 V의 순서대로 45.7, 26.5, 22.9, 18.4 kJ/mole로서 전위에 따라 부식메카니즘이 다르게 나타났다. 우리의 경험에[10] 의하면 상압하 "E전극"의 정전위 분극시 CO_2발생 전류효율은 분극전위가 낮아짐에 따라 낮아지는 경향이 있었다. 이러한 현상은 탄소의 부식전류가 식 (1)의 CO_2 발생반응에 관련된 전류와 카아본 블랙 표면물질의 산화반응에 관련된 전류의 합이라고 생각할 때 각 전류가 전위에 따라 전체 부식전류에 기여하는 분율이 달라진다면 설명이 가능하다. 따라서 Fig. 8에서 각 분극전위별로 활성화 에너지가 다르게 나타난 것은 분극전위에 따라 위의 두 산화반응이 전체 부식전류에 기여하는 정도가 달랐기 때문에 나타난 현상이라 생각되었다.

4. 결 론

승압하 PAFC운전조건하에서 PTFE로 결합된 아세틸렌 블랙 탄소전극("E전극", 1 × 1 × 0.02 cm, 탄소량 20mg)의 부식속도를 정전위 양분극 전류값을 측정하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 200 °C, 100% 인산용액 내에서 "E전극"의 부식속도는 압력이 1→10kg/cm²로 증가함에 따라 약 30% 감소하는 경향을 나타내었다.

2) 0.9 V SCE 일정 전위에서 얻은 "E전극"의 부식속도를 Arrhenius plot한 결과 100%이상의 인산용액에서는 활성화에너지가 46.0 kJ/mole이었고, 93% 이하의 인산용액에서는 36.4 kJ/mole이어서 인산농도에 따라 부식 메카니즘이 다름을 알 수 있었다. 이것은 인산의 주성분이 낮은 농도일 때의 ortho인산에서 높은 농도일 때의 pyro인산 형태로 바뀌기 때문인 것으로 해석되었다.

3) "E전극"의 부식속도는 수증기압 100~200mmHg (인산농도 93~97%)를 전후해서 수증기압에 대한 반응차수가 크게 달랐다. 수증기압이 낮을 때에는 0 차반응을 나타내었고 높을 때에는 대략 1차반응을 나타내었다.

4) 100% 인산용액내에서 "E전극"의 부식속도를 분극전위에 따라 Arrhenius plot한 결과 활성화에너지는 분극전위가 높아짐에 따라 커지는 경향을 나타내었다. 이것은 "E전극"의 부식이 전위에 따라 그 속도가 달라지는 2가지 반응에 의하여 발생되기 때문에 나타나는 현상으로 해석되었다. 하나는 C/CO_2 산화반응이고 또 하나는 어떤 표면산화물의 생성반응으로 추정되었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 '86 목적기초 연구비로 수행된 것이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) A. McDougall, Fuel Cells, The Macmillan Press Ltd. , London, 1976.

2) A. J. Appleby, Fuel Cells : Trends in Research and Applications, Hemisphere Publishing Corp. Washington, 1987.

3) S. S. Penner, Assessment of Research Needs for Advanced Fuel Cells, DOE AFCWG Report, U.S.A. , 1885.

4) P. Stonehart and J. P. MacDonald, Stability of Acid Fuel Cell Cathode Materials, EPRI EM -1664 Interim Report, January 1981.

5) P. Stonehart, J. Electrochem. Soc. , **22**, 423 (1984).

6) 辛鎭敎, 鄭道陽, 尹勝烈, 本誌, **18(3)** 인쇄중.

7) N. N. Greenwood and A. Earnshaw, Chemistry of the Elements, Pergamon Press, 1984, p 546.

8) Kirk-Othemer, Encyclopedia Chemical Technology, 3rd ed. , Vol. 17, Wiley, 1982. p 426.

9) P. N. Ross, Jr. , Abstract No. 40, Extended Abstracts, Volume 85-2, Fall Meeting, Electrochem. Soc. , 1985, p 63.

10) 辛鎭敎, 인산연료전지 탄소전극재료의 분극거동, 석사학위논문, 한양대학교 재료공학과, 1988. 12.