

論文96-33A-12-1

Ni 전극 계면에서 전기화학적 Spike 발진

(Electrochemical Spike Oscillations at the Ni Electrode Interface)

千 長 鎬 *, 孫 光 哲 *, 羅 克 煥 *

(Jang Ho Chun, Kwang Chul Son, and Keuk Hwan Ra)

요 약

니켈 (Ni) 전극과 0.05M $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$ 완충용액 (pH 9) 계면에서 전기화학적 스파이크 발진현상을 전압전류, 정전위 전해 방법을 사용하여 연구조사하였다. 주기적인 음극전류 스파이크의 본질은 수소발생 반응에 기인한 활성화 지배전류이며 흡착된 수소중간체의 표면피복을 또는 음전위에 따른다. 2종류의 음극전류 스파이크 발진에 상응하는 2종류의 음극전류 스파이크 파형이 있다. 음극전류 스파이크 폭, 주기, 진폭은 각각 4 ms 또는 5 ms, 151 ms 또는 302 ms, < 30 mA 또는 < 275 mA 이다. 급행 방전 및 재결합 반응단계는 완행 방전 및 재결합 반응단계 보다 각각 1.5배와 2배 빠르다. 급행 및 완행 방전과 재결합반응은 Ni 음극의 급행 및 완행 흡착부위에 상응한다.

Abstract

The electrochemical spike oscillations at the nickel (Ni) electrode/(0.05M $\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$) buffer solution (pH 9) interface have been studied using voltammetric and chronoamperometric methods. The nature of the periodic cathodic current spikes is the activation controlled currents due to the hydrogen evolution reaction and depends on the fractional surface coverage of the adsorbed hydrogen intermediate or the cathodic potential. There is two kinds of the waveforms corresponding to two kinds of the cathodic current spike oscillations. The widths, periods, and amplitudes of the cathodic current spikes are 4 ms or 5 ms, 151 ms or 302 ms, and < 30 mA or < 275 mA, respectively. The fast discharge and recombination reaction steps are 1.5 times and twice faster than the slow discharge and recombination reaction steps. The fast and slow discharge and recombination reactions corresponding to the fast and slow adsorption sites at the Ni cathode.

I. 서 론

일정한 전류 또는 전압이 전기화학적 폐회로가 구성된 전극-전해질 계면에 인가되면 전압 또는 전류밀도의 주기적인 변동, 즉 주기적인 전압 또는 전류 발진현상이 나타난다.^{1) 5)} 일반적으로, 정전위 조건하에서 전류밀도의 주기적 변화는 전극 계면의 활성화 과정과

부동태화 과정 사이의 주기적인 변환과 관계가 있다. 대부분의 전기화학적 발진현상은 양극과정에 기인하나 음극과정에 기인한 전기화학적 발진현상도 보고되고 있으며 지금까지 제안된 모형도 수정 또는 보완되고 있다.^{6,7)} 그러나, 천이금속 또는 백금족 금속 전극과 약산성, 약염기성 완충용액 또는 무관계 수성전해질 계면에서 관측된 주기적인 음극전류 스파이크 (spike) 발진현상에 관한 연구보고는 거의 없었다고 사료된다.^{17,9)}

화석에너지의 사용과 고갈에 따른 환경오염과 무공해 대체에너지 개발에 관한 연구내용은 학제간 연구과제로서 그 중요성이 커져왔다. 전자공학적 관점에서 pn

* 正會員, 光云大學校 新技術研究所 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Inst. of New Tech., Kwangwoon Univ.)

接受日字:1995年4月24日, 수정완료일:1996年12月6日

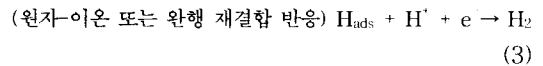
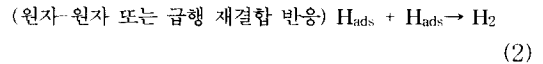
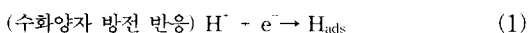
접합 반도체를 이용한 태양전지 (solar cell) 분야에 유사하게 전기화학적 관점에서 반도체-전해질 광에너지 변환과 전기촉매 전극을 이용한 수소 연료전지 (fuel cell) 분야에 관한 연구관심이 높아져 왔다.¹¹⁰⁻¹³¹

백금족 전극 계면에서 관측된 음극전류 스파이크 발진현상은¹⁸¹ 전기화학적 관점에서 전기촉매 전극의 수소발생 메커니즘을 밝혀줄 수 있는 계기가 될 뿐만 아니라 전자공학적 관점에서 새로운 스파이크 발진 모형과 장치를 제시하고 있다고 사료된다. 그러나, 백금족 전극재료가 고가인 귀금속임을 고려하면 저가의 전기촉매 전극재료인 천이금속에 관한 조사는 충분한 연구의 의미가 있다고 판단된다. Fe, Co, Ni 등은 대표적인 천이금속으로서 중요한 자성체 전자재료로 사용되어 왔다. 특히, Ni과 Ni 합금은 전극 부식작용에 강한 내구성과 우수한 전기촉매 특성 때문에 천이금속중 수소 연료전지 전극에 가장 적합한 전극재료로 평가된다. 천이금속과 백금족 전극에서 일어나는 수소의 확산, 방전, 흡착, 재결합, H₂ 발생과정등은 참고문헌에 상세히 서술되어 있다.^{14,151}

본 논문은 대표적인 천이금속인 Ni 전극과 약염기성 완충용액 계면에서 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상을 연구조사하는 데 있다. 금속-전공 계면현상을 응용한 전자관과 반도체-반도체 계면현상을 응용한 접합소자 뿐만 아니라 반도체 또는 금속-전해질 계면현상을 응용한 감지소자, 표시소자, 능동소자, 생체 감지소자, 광에너지 변환장치, 연료전지와 같은 전기화학적 소자 또는 장치도 전자공학적 측면에서 중요한 학제간 연구분야가 될 것으로 판단된다.¹¹⁶⁻¹⁸¹ 본 논문에서 연구조사하려는 음극전류 스파이크 발진현상은 새로운 전기화학적 발진장치 고안, 수소중간체 해석, 연료전지 또는 스파이크 발생에 의한 전기화학적 고에너지 변환 등에 이용될 수 있기를 기대한다.

II. 전기물리화학적 해석

수성전해질이 담긴 전해조 내에 전기화학적 폐회로를 구성한 후, 전기촉매 일전극에 음전위 ($E < 0$)가 인가되면, 즉 음극에는 다음과 같은 수화양자 (H^+) 방전반응에 의한 전하 이동과정과 흡착된 수소원자 (H)의 재결합반응에 의한 H₂ 발생과정이 있게 된다.^{14,15,191}



여기서, H^+ 는 수화양자, e^- 는 전자, H_{ads} 는 음극 표면에 흡착된 수소원자로서 중간체 작용을 한다. 따라서, 식 (1)과 (2) 또는 (3)으로 표시된 반응단계가 순차적으로 반복 진행되면 음극 표면에는 H^+ 농도의 주기적인 변화가 있게 되므로 이에 상응하는 음극전류 밀도의 주기적인 변화가 나타난다. 전류-전압 관계식과 관련된 전기물리화학적 특성 해석은 참고문헌에 서술되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다.¹⁸¹

III. 실험

1. 전극과 전해질 준비

Ni 금속은 천이금속중 최적의 전기촉매로서 음극전류 스파이크 발진현상 연구에 가장 실용적인 전극재료이다.^{14,151} 일전극 (WE: Working Electrode)으로 사용된 Ni 시편 (크기: 0.5x16x21 mm, 순도: 99.994%)은 미국 Johnson Matthey사 제품이며 실험전 silicon carbide연마지와 alumina분말을 사용하여 시편표면을 연마한 후, 초음파세척기 내에서 증류수와 acetone-용매를 사용하여 세척하였다. 기준전극 (RE: Reference Electrode)으로는 미국 Fisher사 제품인 SCE (Saturated Calomel Electrode)를 사용하였으며 상대전극 (CE: Counter Electrode)으로는 미국 Johnson Matthey사 제품인 Pt선(직경: 1.5 mm, 순도: 99.9%)을 사용하였다. 본 실험에서 일전극과 상대전극은 각각 음극과 양극작용을 한다. H₂ 발생에 기인한 음극 표면에서 H^+ 농도 감소효과를 최소화시켜 최적상태의 음극전류 스파이크 발진현상을 관측하기 위하여 영국 BDH사 제품인 0.05M KHC₈H₄O₄ 완충용액 (pH 9)을 사용하였다.

2. 측정방법

전해조 내의 표준 3-전극, 즉 기준전극 (RE), 일전극 (WE), 상대전극 (CE) 배치와 기본 측정장비, 즉 전위계/전류계 (Potentiostat/Galvanostat), 개인용 컴퓨터, 인쇄기 구성은 그림 1과 같다. 반복 재현될 수 있는 정상상태 (steady state)의 음극전류 스파이크 발진현상을 관측 및 해석하기 위하여

먼저 Ni 일전극에 주사전위 (0 V - -0.7 V vs. SCE)를 순환 (10 mV/s)시켜 정상상태의 순환 전압전류도 (5번째 순환)를 얻은 후, 선형소인 (linear sweep) 전압전류 방법을 사용하여 Ni 음극 계면의 I-E 특성곡선과 NDR (Negative Differential Resistance) 특성을 조사하였다. 수소중간체 반응에 기인한 음극과정 및 전류를 관측하기 위하여 정전위 전해 방법을 사용하였다.

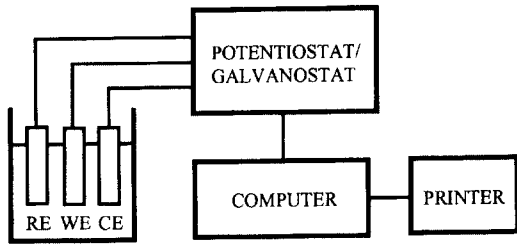


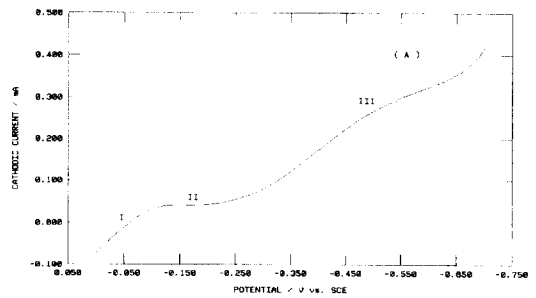
그림 1. 표준 3-전극 배치와 측정장비 구성도
Fig. 1. The standard 3-electrode configuration and block diagram of the measurement apparatus.

순환 전압전류, 선형소인 전압전류, 정전위 전해 특성등의 측정은 미국 EG&G PAR Model 273A 전위계/전류계를 사용하여 PAR Model 270 소프트웨어 패키지로 수행하였다. 소프트웨어 패키지 수행, 실험자료 정리, 해석, 도시는 IBM 35SX 개인용 컴퓨터를 사용하였다. 모든 실험 준비 및 측정은 동일한 조건과 절차에 따라 실온에서 수행하였다. 실험결과들은 미국 전류극성 선택방식에 따라 음극전류를 양(+)방향으로 정의하여 도시하였다.

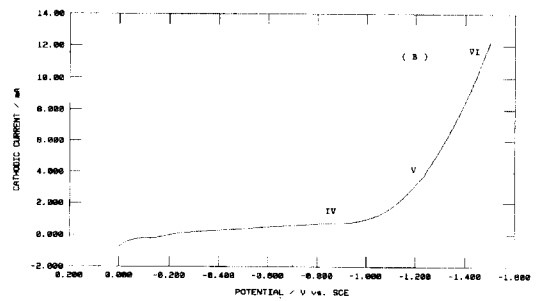
IV. 결과 및 고찰

1. 전류 전위 (I-E) 특성

그림 2(A)와 2(B)는 Ni 전극과 0.05M KHC₈H₄O₄ 완충용액 (pH 9) 계면에서 전형적인 선형소인 전압전류도를 보여준다. 그림 2(A)는 I-E 특성곡선에 기울기 변화가 거의 없는 영역 II (-0.1 V ~ -0.2 V vs. SCE)가 있으며 백금족 전극과는 달리 NDR 특성이 없음을 보여준다. 환언하면, 식 (1)에 표시된 H⁺ 방전 반응의 전하이동에 비하여 상대적으로 느린 H⁺ 수송한계에 기인하여 I-E 특성곡선에 기울기 변화가 거의 없는 (dl/dE ≈ 0) 영역 II가 나타난다.



(a)



(b)

그림 2. Ni/0.05M KHC₈H₄O₄ 완충용액 (pH 9) 계면에서 선형소인 전압전류도. 주사율 : 10 mV/s, 초기전위 : 0 V vs. SCE, 최종전위 : (A) -0.7 V (B) -1.5 V vs. SCE

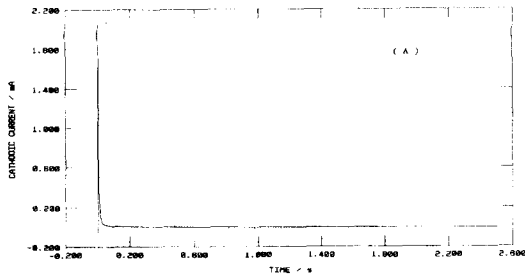
Fig. 2. The linear sweep voltammograms at the Ni/(0.05M KHC₈H₄O₄) buffer solution (pH 9) interface. Scan rate : 10 mV/s, Initial potential : 0 V vs. SCE, Final potential : (A) -0.7 V (B) -1.5 V vs. SCE.

따라서, 그림 3에 보여주는 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상은 NDR 특성에 기인한 불안정한 정상상태에 기인한다기 보다는 Ni 음극에서 식 (1)-(3)에 표시된 H₂ 발생반응에 상응하는 주기적인 H⁺의 농도변화, 즉 음극전류의 주기적인 변화라고 해석할 수 있다. 환언하면, NDR 특성은 Ni 음극에서 주기적인 스파이크 발진에 관한 충분조건이 되지 못함을 의미한다.

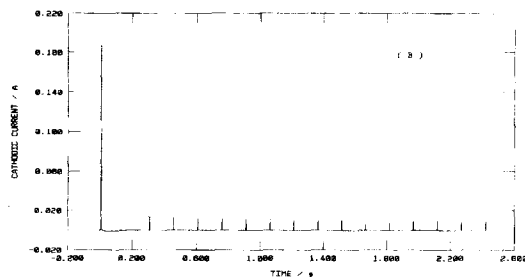
2. 전기화학적 스파이크 (spike) 발진

그림 3은 그림 2의 I-E 특성곡선에 표시된 영역 I-V에 상응하는 다양한 전류-시간 과도도 (transient)를 보여준다. 그림 3(A)는 영역 I에서 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상이 없음을 보여준다. 그림 3(B)와 3(C)는 영역 II III에서 폭과 주기가 각각 4 ms와 151 ms인 음극전류 스파이크 발진현상이 있음을 보여준다. 그림 3(B)와 3(C)에 보여주는 음극전류 스파이크의 평

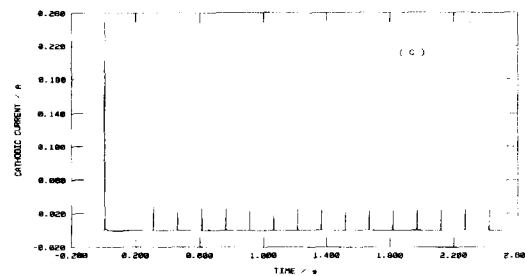
균진폭은 각각 10.8 mA와 26.8 mA 이다. 그림 3(D)는 영역 III에서 폭, 주기, 평균진폭이 각각 5 ms에서 4 ms로, 302 ms에서 151 ms로, 36.5 mA에서 29 mA로 변하는 2종류의 음극전류 스파이크 발진현상이 있음을 보여준다. 그림 3(E)-3(G)는 영역 III-V에서 폭과 주기가 각각 5 ms와 302 ms인 음극전류 스파이크 발진현상이 있음을 보여준다. 그림 3(E)-3(G)에 보여주는 음극전류 스파이크의 평균진폭은 각각 40.8 mA, 150.6 mA, 230.3 mA이다. 그림 3(H)와 3(I)는 영역 VI에서 폭과 주기가 각각 5 ms와 302 ms인 음극전류 스파이크 발진현상에 결함이 나타나고 있음을 보여준다. 그림 3(H)와 3(I)에 보여주는 음극전류 스파이크의 평균진폭은 각각 256.5 mA와 272 mA 이다. 그림 3(J)는 영역 VI에서 영역 I의 그림 3(A)같이 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상이 없음을 보여준다.



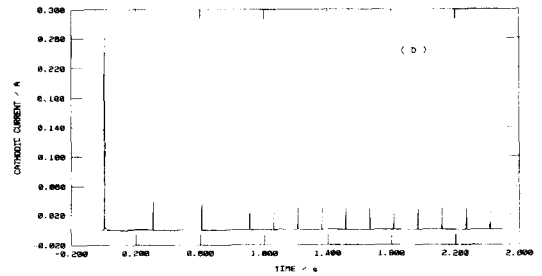
(a)



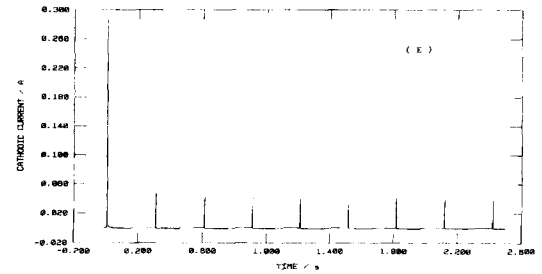
(b)



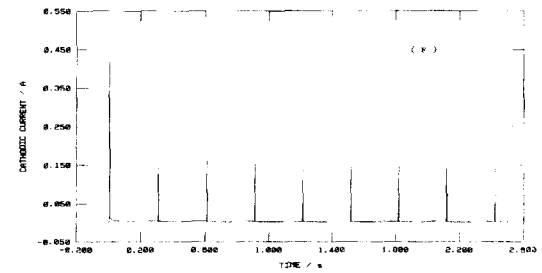
(c)



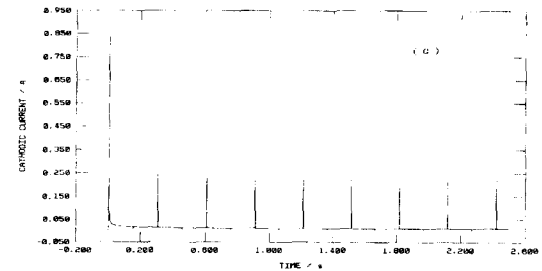
(d)



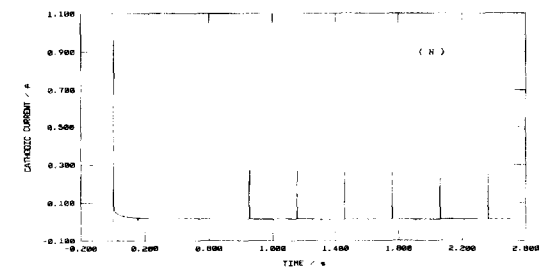
(e)



(f)



(g)



(h)

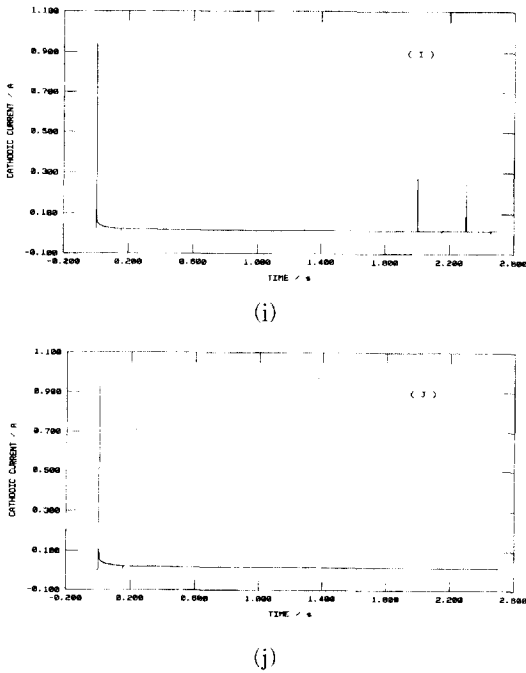


그림 3. Ni/0.05M KHC₈H₄O₄ 완충용액 (pH 9) 계면에서 전류-시간 과도도. 시간계단 : 2.5 s, 전위계단 : 0 V to (A) -0.05 V (B) -0.2 V (C) -0.45 V (D) -0.5 V (E) -0.55 V (F) -0.9 V (G) -1.2 V (H) -1.43 V (I) -1.44 V (J) -1.45 V vs. SCE

Fig. 3. The current-time transients at the Ni/(0.05M KHC₈H₄O₄) buffer solution (pH 9) interface. Time step : 2.5 s, Potential step : 0 V to (A) -0.05 V (B) -0.2 V (C) -0.45 V (D) -0.5 V (E) -0.55 V (F) -0.9 V (G) -1.2 V (H) -1.43 V (I) -1.44 V (J) -1.45 V vs. SCE.

그림 3에 보여주는 2종류의 음극전류 스파이크 발진현상은 Ni 음극에서 식 (1)과 (2) 또는 식 (1)과 (3)에 상응하는 수소발생 과정이 순차적으로, 주기적으로 진행되고 있음을 의미한다. 2종류의 음극전류 스파이크 발진현상은 Ni 음극 표면에 상응하는 2종류의 흡착부위가 있음을 의미한다.^[20]

그림 3(A)는 I-E 특성곡선의 영역 I에서 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상이 없음을 의미한다. 앞에서 언급한 영역 II의 기울기 변화 (dI/dE ≠ 0)를 고려하면 이러한 현상은 H⁺의 수송 제한과정, 즉 H⁺의 확산 제한과정에 기인된다고 해석할 수 있다. 환언하면 식 (1)-(3)에 표시된 H⁺의 활성화 과정에 기인한 음극전류 스파이크 발진현상은 발생되지 않는다.

그림 3(B)-3(E)는 음전위 (E < 0)가 증가하기 시작하면 I-E 특성곡선의 영역 II와 III에서 식 (1)과 (2)에 표시된 H⁺의 활성화 과정에 기인한 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상이 있음을 보여준다. 음극전류 스파이크 진폭은 인가된 음전위 또는 흡착된 H⁺의 표면피복율 (θ_H)에 의하여 주어진다.^[8] 그림 3(B)와 3(C)는 낮은 음전위에서, 즉 θ_H < 1 일때, 음극전류 스파이크 진폭 (< 14.3 mA, < 28 mA)이 상대적으로 작음을 보여준다. 반면에, H⁺의 활성화 과정은 급행 흡착부위에서 먼저 진행되므로 음극전류 스파이크 주기 (151 ms)는 완행 흡착부위 (302 ms) 보다 짧다. 그림 3(D)와 3(E)는 음전위 증가에 따라 θ_H도 증가하게 (θ_H < 1) 되면 음극전류 스파이크 진폭 (< 39 mA, < 47 mA)이 증가됨은 물론, 식 (1)과 (2)로 표시된 급행 재결합 반응단계에서 식 (1)과 (3)으로 표시된 완행 재결합 반응단계로 천이되는 현상을 보여준다. 환언하면, H⁺의 방전과정은 음전위 증가에 따라 급행 흡착부위에서 완행 흡착부위로 천이되며 음극전류 스파이크 폭과 주기는 각각 4 ms에서 5 ms로, 151 ms에서 302 ms로 변한다.

그림 3(F)와 3(G)는 음전위 증가에 따라 θ_H도 증가하게 (θ_H ≅ 1) 되면 I-E 특성곡선의 영역 IV와 V에서 식 (1)과 (3)에 표시된 H⁺의 방전 및 재결합과정에 기인하여 음극전류 스파이크 진폭 (< 164 mA, < 265 mA)이 계속 증가됨을 보여준다.

그림 3(H)-3(J)는 I-E 특성곡선의 영역 VI에서 식 (1)과 (3)에 표시된 H⁺의 방전 및 재결합과정에서 음극전류 스파이크 발진현상에 결함이 나타나고 있음을 보여준다. 동일한 조건하에서 음극전류 스파이크 진폭은 시간에 따라 감소한다. 따라서, 그림 3(H)와 3(I)에서 보여주는 모든 결번된 음극전류 스파이크 진폭은 결번 다음부터 시작되는 음극전류 스파이크 진폭 (268 mA, 272 mA) 보다 크다고 해석할 수 있다. 결국, 계속 증가된 H⁺의 활성화 지배전류가 물질수송 제한전류 보다 더 크게 되어 그림 3(J) 같이 주기적인 음극전류 스파이크 발진현상은 더 이상 나타나지 않는다.^[8] 그림 3(B)-3(I)에서 모든 첫번째 스파이크 진폭은 전기 이중층 충전전류 성분이 중첩되어 다른 스파이크 진폭에 비하여 크며 스파이크 평균진폭 계산시 제외하였다. 수소발생의 가역전위가 pH의 함수임을 고려하면 음극전류 스파이크 진폭은 pH의 영향을 받는다고 해석할 수 있다.^[21]

결론적으로 음전위 증가에 따라 음극전류 스파이크 폭, 주기, 진폭은 각각 4 ms에서 5 ms로, 151 ms에서 302 ms로 < 30 mA에서 < 275 mA로 변한다. 식 (1)-(3)으로 표시되는 H_2 재결합 반응은 낮은 음전위 또는 $\theta_H < 1$ 일때 식 (2)에 표시된 급행 재결합 반응단계에서 높은 음전위 또는 $\theta_H \approx 1$ 일때 식 (3)에 표시된 완행 재결합 반응단계로 천이된다고 해석할 수 있다.

그림 4는 이상의 결과고찰을 기초로 하여 제안된 H^+ 의 방전단계도를 보여준다. 급행 흡착부위 및 완행 흡착부위에서 진행되는 방전과정은 각각 경로 (A)와 (C), 경로 (B)와 (C)에 상응하며 급행 방전단계와 완행 방전단계의 경로차는 1 ms이다.

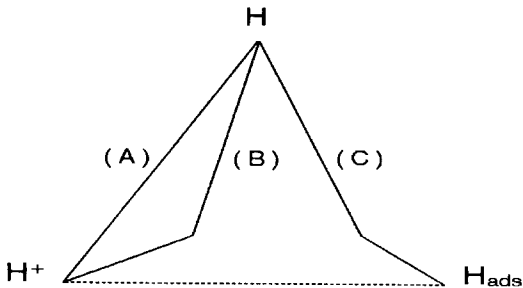


그림 4. 수화양자 (H^+) 방전단계의 2경로. (A) H^+ 의 급행 방전과정: 2 ms (B) H^+ 의 완행 방전과정: 3 ms (C) 수소 흡착과정: 2 ms

Fig. 4. The two pathways for the proton discharge steps. (A) Fast discharge process of the H^+ : 2 ms (B) Slow discharge process of the H^+ : 3 ms (C) Hydrogen (H) adsorption process: 2 ms.

IV. 결 론

주기적인 음극전류 스파이크의 본질은 H_2 발생 반응 시 전하 이동과정에 기인한 활성화 지배전류이며 스파이크 폭, 주기, 진폭은 H^+ 의 음극 표면피복율 (θ_H) 또는 음전위에 의하여 결정된다. 주기적 음극전류 스파이크 발진 메카니즘은 H_2 발생과정에서 H^+ 의 방전 및 흡착된 H 원자 재결합반응과 관련있다. H^+ 의 활성화 지배과정일때 주기적 음극전류 스파이크 발진은 지속된다. 급행 재결합반응시 음극전류 스파이크의 폭, 주기, 진폭은 각각 4 ms, 151 ms, < 30 mA 이다. 완행 재결합반응시 음극전류 스파이크의 폭, 주기, 진폭은 각각 5 ms, 302 ms, < 275 mA 이다. 급행 방전 및 재

결합반응은 완행 방전 및 재결합반응보다 빠르게 진행되며 흡착부위의 활성화도에 상응한다. Ni 음극과정은 전기화학적 발진, 전기화학적 고에너지 변환, 스파이크 발생, 수소중간체 해석등에 유용될 수 있다.

감사의 글

※ 본 실험 기자재 (EG&G PAR Model 273A 및 관련 전기물리화학 시스템)를 구입할 수 있게 재정지원을 하여 주신 광운대학교 조무성 전총장님과 연구지원을 하여준 스페이스콤사에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. J. Vetter, *Electrochemical Kinetics*, pp. 786-789, Academic Press, New York, 1967.
- [2] J. Wojtowicz, *Oscillatory Behavior in Electrochemical Systems*, in *Modern Aspects of Electrochemistry*, J. O'M. Bockris and B. E. Conway Ed., no. 8, pp. 47-120, Plenum, New York, 1972.
- [3] R. J. Field and M. Burger Ed., *Oscillations and Traveling Waves in Chemical Systems*, Wiley, New York, 1985.
- [4] P. Gray and S. K. Scott, *Chemical Oscillations and Instabilities*, Oxford Univ. Press, Oxford, 1990.
- [5] A. L. Buchachenko and E. L. Frankevich, *Chemical Generation and Reception of Radio- and Microwaves*, VCH, New York, 1993.
- [6] K. T. M. Koper and J. H. Sluyters, "Electrochemical Oscillators", *J. Electroanal. Chem.*, 303 (1991) 73.
- [7] J. L. Hudson and T. T. Tsotsis, "Electrochemical Reaction Dynamics", *Chem. Eng. Sci.*, 49 (1994) 1493.
- [8] 천장호, 손광철, 나극환, "백금족 전극 계면에서 전기화학적 Impulse 발진", 전자공학회 논문지, 제32권 A편, 제3호, p. 143, 1995.
- [9] B.E. Conway and G. Jerkiewicz (Ed.), *Electrochemistry and Materials Science of Cathodic Hydrogen Absorption and Adsorption*, The Electrochem. Soc. Inc., Pennington, NJ, 1995.

- [10] B. O. Seraphin Ed., *Solar Energy Conversion*, Topics in Applied Physics, vol. 31, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- [11] F. Cardon, W. P. Gomes, and W. Dekeyser Ed., *Photovoltaic and Photoelectrochemical Solar Energy Conversion*, Plenum, New York, 1981.
- [12] Y. V. Pleskov and Y. Y. Gurevich, *Semiconductor Photoelectrochemistry*, Plenum, New York, 1986.
- [13] J. A. G. Drake Ed., *Electrochemistry and Clean Energy*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 1994.
- [14] H. Wendt Ed., *Electrochemical Hydrogen Technologies*, Elsevier, Amsterdam, 1990.
- [15] H. Gerischer and C. W. Tobias Ed., *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, vol. 2, pp. 1-85, VCH, New York, 1992.
- [16] K. S. Goto, *Solid State Electrochemistry and Its Applications to Sensors and Electronic Devices*, Elsevier, Amsterdam, 1988.
- [17] Y. V. Pleskov, *Solar Energy Conversion*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [18] J. McHardy and F. Ludwig Ed., *Electrochemistry of Semiconductors and Electronics*, Noyes, NJ, 1992.
- [19] R. E. Dickerson, H. B. Gray, and G. P. Haight, Jr., *Chemical Principles*, 3rd Ed., p. 176, Benjamin/Cummings, Menlo Park, CA., 1979.
- [20] E. Gileadi, *Electrode Kinetics*, p.262, VCH, New York, 1993.
- [21] 逢坂 哲彌, 小山 昇, 大坂 武男 著, 電氣化學法 (基礎測定マニュアル), p. 9, 講談社, 1993.

 저 자 소 개

千 長 鎭(正會員) 第 32卷 A編 第 3號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과 교수

孫 光 哲(正會員) 第 32卷 A編 第 3號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과 박사
 과정

羅 京 煥(正會員) 第 32卷 A編 第 3號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과 교수