

Glassy Carbon 섬유 다발체 전극에서 질산의 전기화학적 산화/환원 거동 연구

김광욱[†] · 이일희 · 최인규 · 유재형 · 박현수

한국원자력연구소

(1999년 7월 14일 접수, 1999년 12월 26일 채택)

A Study on Electrochemical Redox Behavior of Nitric Acid by Using a Glassy Carbon Fiber Column Electrode System

Kwang-Wook Kim[†], Eil-Hee Lee, In-Kyu Choi, Jae-Hyung Yoo and Hyun-Soo Park

Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon 305-350, Korea

(Received 14 July 1999; accepted 26 December 1999)

요 약

Glassy Carbon 섬유 다발체 전극을 이용한 질산의 전기화학적 산화/환원 거동 연구를 수행하였으며, 질산의 분해 반응 기구를 고찰하였다. 질산농도가 2.0 M이하에서는 질산의 전기화학적 산화/환원이 일어나지 않고 질산 농도 2.0 M이상에는 질산의 환원반응이 느려, 질산 용액이 전극과 환원전위에서 충분한 접촉이 이루어진 후에 아질산이 생성되었다. 질산 농도 2.0 M이상에서 생성된 아질산은 환원 전위에서 급격한 자동촉매 반응에 의한 대단히 빠른 환원분해 반응을 통해 NO_x 으로 환원되었다. 아질산은 sulfamic acid에 의해 효과적으로 분해되었고 질산 3.5 M에서는 전해 환원반응에 의해 생성된 아질산의 완전한 분해를 위해 sulfamic acid 농도가 최소한 0.05 M이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

Abstract – Electrochemical redox behaviors of nitric acid were studied by using a glassy carbon fiber column electrode system, and its reaction mechanism was analyzed in several ways. The electrochemical reaction in less than 2.0 M nitric acid was not observed, but in more than 2.0 M nitric acid, the reduction rate of nitric acid to produce nitrous acid was slow so that the nitric acid solution had to be contacted enough with electrode in order to observe a apparent reduction current of nitric acid to nitrous acid. The nitrous acid generated in more than 2.0 M nitric acid was rapidly and easily reduced to NO_x through an auto-catalytic reaction. Sulfamic acid was confirmed to be effective to destroy the nitrous acid. The sulfamic acid of at least 0.05 M was necessary to remove the nitrous acid generated in 3.5 M nitric acid.

Key words: Electrochemical, Nitric Acid, Nitrous Acid, Oxidation, Glassy Carbon

1. 서 론

최근 환경문제에 대한 관심 고조로 일반 산업 및 원자력 산업 등에서 생성되는 폐액 중에 함유된 유해 중금속의 제거나 부식성 음이온의 제거, 그리고 유기 금속의 정제 및 고순도 분리/회수, 방사성 폐기물의 처리 등에 관심이 증대되어, 이에 대한 분리 정제 기술이 절실히 요구되고 있다[1, 2]. 이를 위한 방법으로는 전해적인 방법이 동반되어 분리도를 증진시키는 방법이 연구되고 있다[3-6]. 금속이온은 산화가 상태에 따라 유기 추출제에 대한 추출능이 크게 변화하므로 연속식 추출 또는 역추출 공정시 계에 이물질이 첨가하지 않고 금속이온의 산화가 상태를 전해 반응에 의해 연속적으로 변화시킴으로써 분리효율을 증진시킬 수 있다. 이러한 전해 용매추출(또는 전해 역추출)을 효과적으로 수행하기 위해서는 동일 공간 내에서 큰 액-액 접촉면적을 크게 발생시키면서, 빠른 전해 반응이 일어나게 할 수 있는 큰 전극면적을 갖는 전해 시스템이 필요하다[7-10]. 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 전해계로서는

고밀집 GC 섬유(glassy carbon fiber) 다발체 전극 전해계가 될 수 있다[7-10]. 여기서 사용되는 고밀집 GC fiber 자체는 전극의 목적으로 사용될 뿐만 아니라 본 연구팀에 의해 기 개발 소개된 고밀집 섬유체를 이용한 정적 액-액 접촉장치에서와 같이 각 상이 밀집된 섬유체가 닥사이로 모세관 현상에 의해 극히 얇은 박막으로 퍼지며 흐르게 하여 대단히 큰 액-액 접촉 면적을 발생시키는 지지체 역할을 한다[6, 8-10].

고준위 방사성 폐기물은 주로 질산 분위기로[11, 12] 질산 중의 특정 대상 금속이온의 전해 특성을 정확히 이해하기 위해서는 먼저 질산의 산화/환원 연구가 선행되어야 한다. 그러나 질산의 전기화학적 산화/환원반응은 대단히 복잡하고, 현재까지 3 M 이상의 고농도 질산 영역에서의 전해 반응에 관한 자료가 거의 발표되지 않은 상태이다[13-15].

따라서 본 연구팀에서는 현재 수행하고 있는 군분리 공정을 개선하기 위해, 즉 Np의 전기화학적 산화가 조정을 통한 TBP에 의한 Np의 추출능을 증진시키는[1, 16] 연구에 앞서 먼저 Np(V)가 Np(VI)로 산화되기 위한 전위 영역에서 GC 섬유 다발체 전극을 이용한 질산농도 0.5-5.5 M 범위에서 질산의 산화/환원 거동과 이때 동반되어 발생하는 아질산의 거동에 관한 연구를 수행하였다.

[†]E-mail: nkwwkim@nanum.kaeri.re.kr

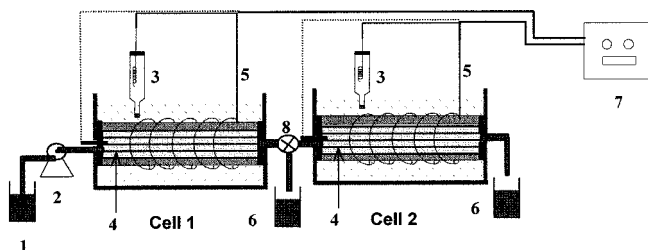


Fig. 1. Schematic diagram of the electrolytic system with two glassy carbon fiber column electrodes.

- | | |
|------------------------------|---|
| 1. Nitric acid reservoir | 6. Product reservoir |
| 2. Solvent delivery pump | 7. Computer-controlled multi-channel potentiostat |
| 3. SSE reference electrode | 8. Three-way valve |
| 4. GC fiber column electrode | |
| 5. Pt counter electrode | |

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에는 질산의 산화/환원 거동을 보기 위한 두 개의 고밀집 GC 섬유 다발체 전극 전해 장치가 나타나 있다. 작용전극으로 사용되는 GC fiber 다발체는 분리막으로 사용되는 길이 7.0 cm, 내경 8.8 mm 다공성 튜브 내에 허용될 수 있는 충분한 GC fiber 가닥 수로 채워 만들었으며, 여기에 직경 3 mm GC 봉(rod)을 삽입하여 전류 공급 터미널과 연결되도록 하였다. 다공성 튜브의 외부는 대응전극으로 사용되는 백금선으로 충분히 둘러 쌓여져 있고, 기준전극으로 사용되는 Ag/AgCl (Silver/Silver Chloride Electrode: SSE) 전극이 가깝게 위치하게 하였다. GC 섬유 다발체 내로 주입되는 수용액상의 유속은 전해반응 및 산화/환원 한계전류 등에 큰 영향을 미치므로 정량 미량 급액 펌프와 유량계에 의해 정밀하게 제어되었다. 전해 반응 전후의 용액의 산도는 자동 산도 측정기(Kyoto Electronics, Model AT-400)를 통해 측정하였으며, 질산의 전해 반응 후 생성된 아질산은 비색분석에 의해 547 nm에서 UV-spectrophotometer(Shimadzu, Model UV-160A)에 의해 분석하였다. 여기서 아질산은 sulfanilic acid와 반응하여 diazonium 염을 형성하여 α -naphthylamine과 붉은 색의 착물을 형성한다. 표준 용액은 sodium nitrite 을 이용해 만들었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 Cell 1에 여러 농도의 질산이 주입되고 있는 상태에서 산화전위 방향으로 전위를 주사시 측정된 voltammogram이 나타나 있다. 질산 농도 2.0 M 이하에서는 약 +1.05 V부터 발생하는 산소 발생 전류 이외에는 +0.7~+1.25 V 주사 영역에서 어떠한 전류도 관찰되지 않았다. 그러나 2.5 M 이상부터는 질산농도에 따라 0.7 V 부근에서 상당히 큰 환원전류 피크와 이후에 작은 산화피크가 관찰된다. Fig. 3에서는 Cell 1에 +1.02 V의 일정전위가 공급되는 상태에서, Cell 2에 환원 전위 방향으로 전위가 주사될 때의 voltammogram이 나타나 있다. Fig. 2와 유사한 거동을 보이나 산화 전류 피크가 관찰되지 않았다. Fig. 2에서 산화 방향으로 주사되는 과정에서 환원피크가 관찰되는 것은 특이한 현상으로 Fig. 2와 3의 정보만으로는 해석이 곤란하므로 질산의 산소발생과 수소발생 사이 전위영역에서 질산농도에 따라 cyclic voltammogram이 측정되었고, 그 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 질산농도가 2.0 M까지는 약 -0.45 V와 +1.05 V 근처에서 각각 수소발생 전류와 산소발생 전류 이외에는 관찰되지 않았지만 2.5 M에서는 산화 주사 방향의 경우 약 +0.67 V에서 환원피크와 이를 지나서 약간의 산화피크가 관찰되었으며, 환원 방향으로 주사되는 경우는 약 +0.4 V 전위에서 매우 큰 환원피크가 관찰되었다. 질산 3.0 M 이상에서는 산화 주사 방향에서

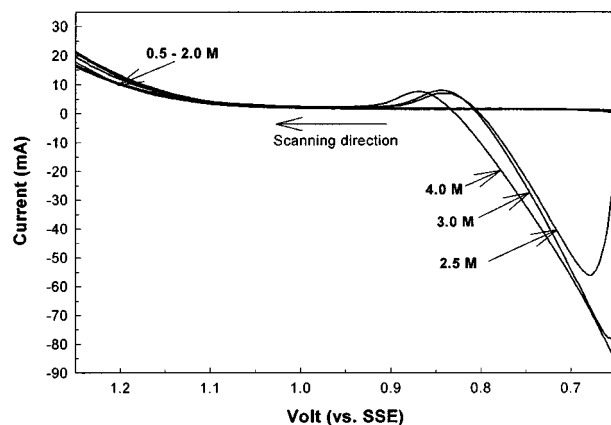


Fig. 2. Voltammograms of several nitric acid concentrations at cell 1. Scan rate: 0.5 mV/sec, Scan rate: 0.65 ml/min

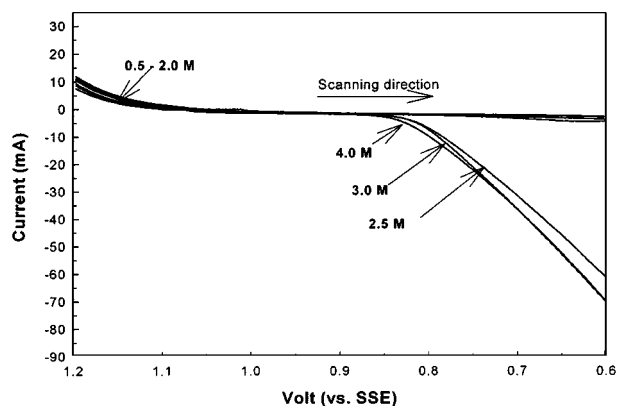


Fig. 3. Voltammograms of several nitric acid concentrations at cell 2. Scan rate: 0.5 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

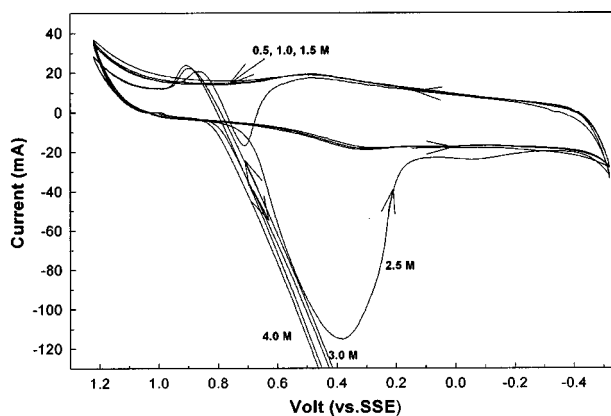


Fig. 4. Cyclic voltammograms of several nitric acid concentrations at cell 1.

Scan rate: 1.0 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

의 환원피크가 더욱 발달해 관찰 영역을 넘어 보이질 않고 산화 영역인 +0.9 V 근처에서 보다 커진 산화피크가 관찰되며 또한 환원주사 영역에서도 2.5 M 질산보다 더욱 큰 환원전류를 보인다. Fig. 5에는 Cell 1에서 +1.02 V의 일정전위가 공급되는 상태에서 Cell 2에서의 cyclic voltammogram이 나타나 있다. 질산 농도 2.0 M까지는 Fig. 4와 동일하지만 질산 2.5 M 이상에서는 산화, 환원 주사 방향의 환원전류 크기가 더 커졌음을 볼 수 있다. Fig. 4와 5의 voltammogram의 형태는 일반적인

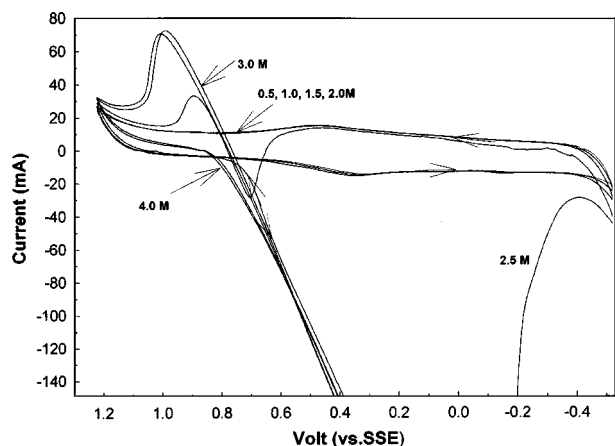


Fig. 5. Cyclic voltammograms of several nitric acid concentrations at cell 2.

Scan rate: 1.0 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

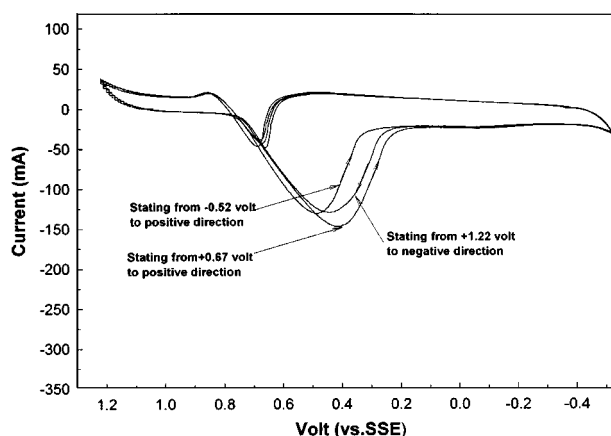


Fig. 6. Second cyclic voltammograms with different scan starting points at 2.5 N nitric acid.

Scan rate: 1.0 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

cyclic voltammogram의 형태와는 다르다. 보통 산화종과 환원종이 가역반응인 경우 산화 주사 방향으로 산화피크가 보이고 환원주사 방향으로 환원피크가 관찰된다. 그러나 본 연구의 경우는 양 주사 방향으로 모두 환원 전류만이 관찰된다.

Fig. 4와 5의 특이한 전류 피크가 전해 반응이 처음 시작되는 조건에 따라 어떻게 달라지는가를 보기 위해 주사를 다른 위치에서 시작한 cyclic voltammogram이 Fig. 6에 나타나 있다. 수소 발생이 일어나는 -0.52 V에서 산화방향으로 주사한 결과와 산소가 발생되는 +1.22 V에서 환원방향으로 주사한 결과와 Fig. 4에서 환원피크가 보이는 +0.74 V에서 산화방향으로 주사한 결과가 거의 동일함을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4에서 보이는 환원피크 전류는 주사가 시작되는 조건에는 무관하게, 그 전위 위치에서 고유하게 일어나는 것임을 알 수 있다. 따라서 이 결과는 Fig. 4에서 보이는 질산 환원전류가 질산 농도가 2.0 M 이상일 때 발생하는 질산의 고유 전해 반응으로 생각될 수 있다. Fig. 4와 5에 나타난 전류는 전해계에 다른 이물질이 없다면 질산의 산화 상태는 가장 높은 산화 상태이므로 질산의 환원 과정에서 생기는 여러 가지 중간생성물의 전해반응에 의해 생성된 전류로 생각된다. 질산의 전해 반응은 다양한 형태로 매우 복잡하게 일어나나 이와 관련한 문헌에 나타난 가장 가능성있는 반응은 다음과 같다[13-15].

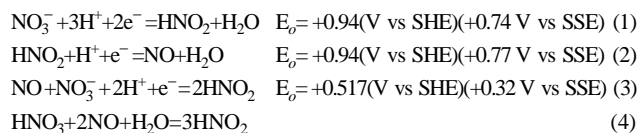


Fig. 2와 4에 나타난 산화주사 방향의 피크는 식 (1)로 생각될 수 있고 환원주사 방향의 피크나 환원전류는 아질산이 분해되는 식 (2)-(4)과정을 통해 분해되는 과정으로 생각할 수 있다. 식 (1)의 질산이 아질산으로 환원되는 반응은 SSE전극 기준으로 +0.74 V로 Fig. 4에서 +0.74 V 보다 낮은 전위영역에서 식 (1)에 의한 질산 환원전류가 보아야 하나 +0.74 V 전위에서만 환원피크를 보이고 있고 그보다 낮은 음전위에서는 어떠한 전류도 관찰되지 않는다. 이는 다른 원인에 의해 전해계에 아질산이 생성되었다고 생각할 수 있다. 그러한 가능성으로는 질산 농도가 높을 경우 본 연구에서 사용된 GC 전극의 탄소와 질산이 반응하여 아질산이 다음과 같은 반응식으로 발생할 수 있다[13].



본 연구계에서 식 (5), (6)의 가능성을 확인하기 위하여 GC 고정전극과 Pt 고정전극을 사용하여 Fig. 4에서 산화주사 방향으로 환원피크를 보이지 않은 1.0 M 질산과 환원피크를 보이는 3.0 M 질산에서 cyclic voltammogram 측정을 하여 보았고 그 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 질산 3.0 M일 경우는 Pt 고정전극에서도 GC 고정전극에서와 유사한 산화 주사방향으로 약 +0.6 V에서 환원피크가 나타났으며 또한 환원 주사방향으로 더 큰 환원피크가 나타남을 볼 수 있다. 그러나 질산 농도가 1.0 M에서는 Pt, GC 전극 모두에서 어떠한 환원전류도 보이지 않는다. 이 결과로부터 Fig. 4의 환원전류는 식 (5), (6)의 탄소 전극으로부터 발생한 아질산의 분해 과정이라고 생각되기 보다 2.0 M 이상의 질산 전해반응의 특성으로 생각될 수 있다.

Fig. 8에는 2.5 M 질산농도에서 주사속도 변화에 따른 cyclic voltammogram의 변화가 나타나 있다. 주사속도가 1-3 mV/sec에서는 주사속도가 증가할수록 산화방향의 주사에서 환원피크는 크기가 줄면서 양의 방향으로 이동을 하며, 환원방향의 주사에서 피크가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 주사속도가 5 mV/sec일 경우는 양방향의 피크가 없어져 Fig. 4에서 질산 농도 2.0 M 이하에서의 cyclic voltammogram의 형태를 보인다. 이 결과는 Fig. 4의 질산 산화/환원 거동을 해석하기 위한 매우 중요한 단서를 보이는 결과로 생각되며, Fig. 2-7까지의 결과와 함께 고려할 때 2.0 M 이상의 고농도 질산의 전해적 산화 반응기구를 다음과 같이 제시할 수 있게 한다. 즉, 산화방향의 피크와 환원방향의 피크

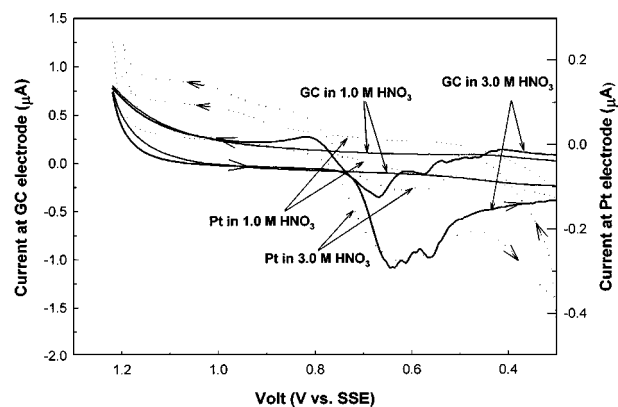


Fig. 7. Cyclic voltammograms in nitric acid at stationary GC and Pt electrode.

GC electrode diameter: 3 mm, GC electrode diameter: 3 mm, Scan rate: 1 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

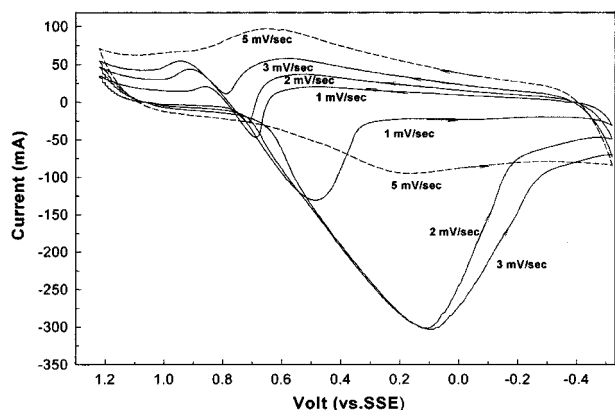
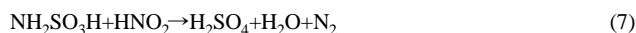


Fig. 8. Cyclic voltammograms in several scan rate at 2.5 N nitric acid.
Flow rate: 0.65 ml/min

는 기본적으로 다른 형태의 반응으로 생각된다. 앞서 언급한 것과 같이 일반적으로 가역 산화/환원 반응의 경우는 주사 방향에 따라 피크의 방향이 반대로 나타난다. 그러나 2.0 M 이상 질산농도에서는 Fig. 4와 같이 환원피크만이 보인다. 이의 원인은 다음과 같이 해석될 수 있다. 질산농도가 2.0 M 이상에서 산화 주사방향의 피크는 식 (1) 반응에 의해 일어난 것으로 추정된다. 하지만 +0.6 V 이전의 음전위에서는 식 (1)에 의한 환원 전류가 보이지 않는데 이는 전극에서 식 (1) 반응이 일어나기 위한 과전압이 매우 크거나 전극에서 반응속도가 매우 느린 것으로 생각된다[15]. 따라서 질산이 전극과 접촉하는 시간이 일정 기간 경과하는 경우만 충분한 양의 아질산이 생성되어 Fig. 4에서처럼 +0.6 V 근처부터 이의 환원 전류가 나타나고, 주사전위가 바로 식 (1)의 산화영역으로 진입하면서 환원피크가 사라진다. 이렇게 생성된 아질산은 산화영역에서 약간의 산화피크로 나타나는 것으로 추정된다. 이를 간접적으로 확인할 수 있는 결과가 Fig. 7의 주사 속도에 따른 cyclic voltammogram 형태가 바뀌는 것을 통해 알 수 있다. 주사 속도가 낮을수록 충분히 아질산이 생성되어 산화 방향의 피크가 커지고 음전위 방향으로 이동됨을 볼 수 있다. 그러나 주사속도가 증가하다 5 mV/sec 이상에서는 오히려 산화, 환원 방향의 피크가 없어지는 것을 볼 수 있는데 이는 앞서 말한 것처럼 아질산이 충분히 생성되기 전에 전극에 공급되는 전위가 식 (1)의 산화 영역으로 이동하였기 때문으로 생각된다. 충분히 낮은 주사 속도에서 산화 방향의 주사 과정 중에 생성된 아질산은 주사 방향이 환원 방향으로 될 때 자동촉매 반응 형태를 보이는 식 (2)-(4)의 반응에 의해 산화 방향의 피크 보다 더 큰 환원피크가 나타나는 것으로 생각된다. 또한 산도가 높을수록 식 (4)는 정반응으로 진행하여 더 많은 아질산을 생산하고 Fig. 4와 5에서처럼 더 큰 아질산 환원 전류를 보인다.

Fig. 9에는 일정한 +1.1 V의 산화전위가 공급되는 Cell 1과 일정한 +0.68 V의 환원전위가 공급되는 Cell 2에서 나온 용액의 산도와 아질산의 농도가 나타나 있다. Cell 1에서는 산도의 감소나 아질산의 생성이 거의 없음을 볼 수 있다. 그러나 Cell 2에서는 질산농도 약 2.0 M 이상의 경우 질산의 감소와 아질산의 급격한 증가를 관찰할 수 있다. 질산농도 2.0 M 이상에서 Cell 2로부터 많은 가스발생을 관찰할 수 있었고 이 가스 색은 붉은 색으로 NO_x 추정되는 가스가 관찰되었다. 이 결과는 앞서의 결과에서 환원 주사 방향의 전류는 질산으로부터 발생하는 자동촉매 반응의 아질산의 환원반응에 의한 것임을 알 수 있다.

아질산은 sulfamic acid에 의해 다음과 같은 반응을 통해 빠르고 쉽게 분해되는 것으로 알려져 있다[17].



따라서 sulfamic acid가 질산 용액 중에 함유된다면 근본적으로 Fig. 4에

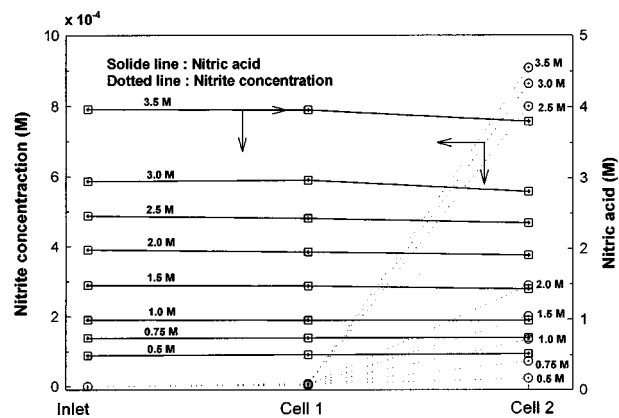


Fig. 9. Nitrite and nitric acid concentrations after cell 1 of 1.1 V and cell 2 of 0.68 V with a change of feeding nitric acid.
Flow rate: 0.6 ml/min

서 질산 농도 2.0 M 이상에서 나타났던 산화주사 방향에서 아질산이 존재하지 않게 되어, 환원 주사 방향으로의 아질산의 분해 반응이 일어나지 않게 되어 어떠한 아질산 환원 전류도 관찰되지 않아야 한다.

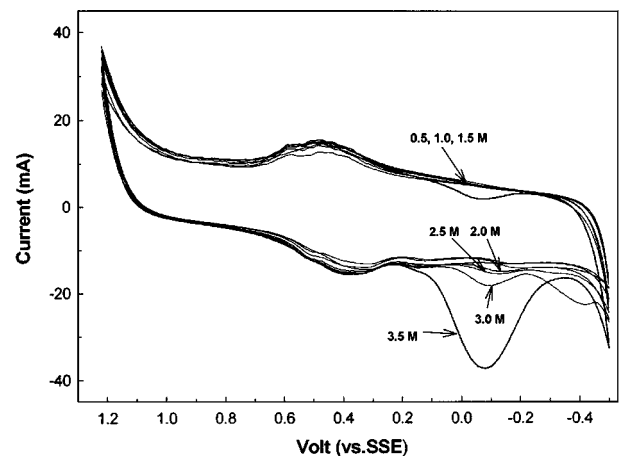


Fig. 10. Cyclic voltammograms of several nitric acid concentrations with 0.05 M sulfamic acid.

Scan rate: 1.0 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

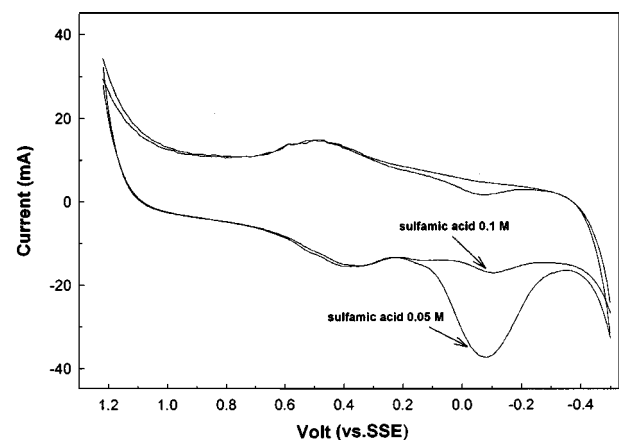


Fig. 11. Cyclic voltammograms in 3.5 N nitric acid concentrations with 0.05 M and 0.1 M sulfamic acid.

Scan rate: 1.0 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

Fig. 10에는 sulfamic acid 0.05 M을 함유한 질산의 cyclic voltammogram이 나타나 있다. Fig. 4에서 보였던 질산 2.0 M 이상에서 산화 주사 방향으로의 어떠한 피크도 관찰되지 않는다. 그러나 질산 농도가 3.5 M에서는 환원 주사 방향으로 약간의 아질산의 환원 반응 전류가 남아 있다. 이것은 sulfamic acid 0.05 M이 질산 농도 3.5 M에서는 아질산을 충분히 빨리 분해시키지 못하는 것으로 생각된다. 하지만 sulfamic acid 0.1 M에서는 충분히 아질산이 분해되어 어떠한 아질산의 분해 전류가 보이지 않음을 Fig. 11에서 확인할 수 있다. 이러한 결과는 질산의 농도에 따라 발생하는 아질산이 효과적으로 분해하기 위해서는 일정한 sulfamic acid 농도가 필요함을 알 수 있다.

아질산이 생성되지 않는 질산농도 2.0 M 이하에서 아질산 염을 넣을 경우 산도가 낮더라도 Fig. 4에서 보이는 아질산의 산화피크가 보일 것으로 기대된다. Fig. 12에는 아질산 나트륨(NaNO_2) 0.002 M과 0.01 M을 갖는 1.0 M 질산용액에서의 cyclic voltammogram이 나타나 있다. 질산 1.0 M에서는 어떠한 질산 분해 전류가 관찰이 되지 않으나, 아질산이 0.002 M이 존재하는 경우 약간의 아질산의 산화피크가 관찰이 되지만 나트륨 이온에 의한 식 (3), (4)의 자동촉매 반응이[13-15] 이루어지지 않아 Fig. 4의 질산 2.5 M에서 보이는 것과 환원주사 방향에서 보이는 것과 같은 높은 아질산의 환원반응이 일어나지 않아 전류가 크게 발달하지 않음을 볼 수 있다. 아질산 나트륨 0.01 M에서는 보다 큰 아질산 환원 분해전류를 볼 수 있다.

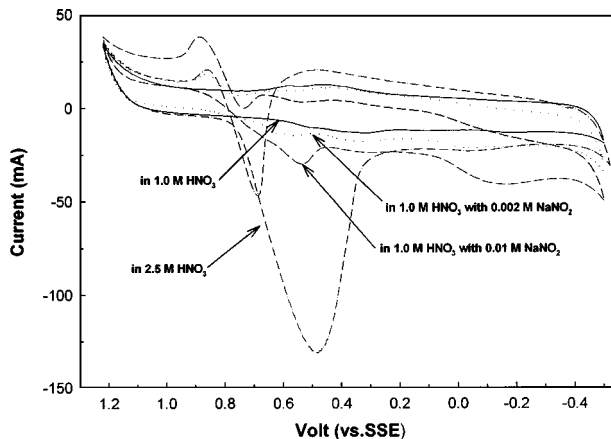


Fig. 12. Cyclic voltammograms in nitric acid concentrations with several sodium nitrite concentrations.

Scan rate: 1.0 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

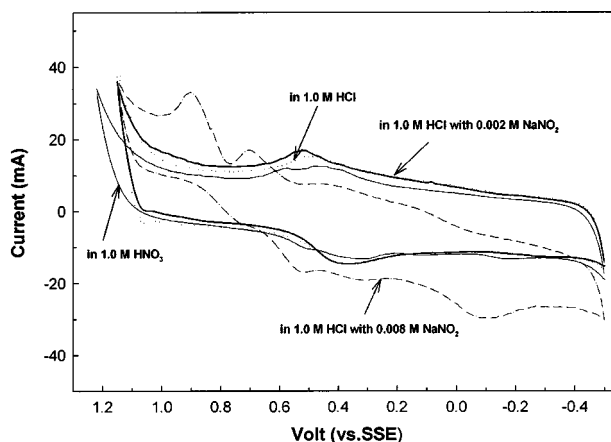


Fig. 13. Cyclic voltammograms in 1.0 M HCl with 0.002 N and 0.01 N sodium nitrate.

Scan rate: 1 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

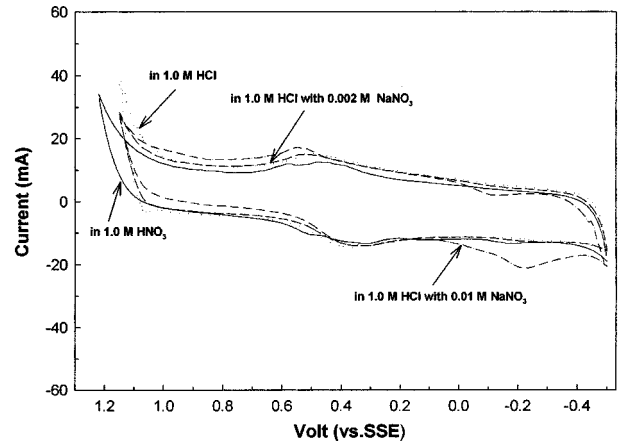


Fig. 14. Cyclic voltammograms in 1.0 M HCl with 0.002 N and 0.01 N sodium nitrate.

Scan rate: 1 mV/sec, Flow rate: 0.65 ml/min

Fig. 13에는 질산염을 갖지 않는 염산에 0.002 M과 0.008 M의 아질산 나트륨을 갖는 용액에 대한 cyclic voltammogram이 나타나 있다. Fig. 12에서처럼 아질산의 뚜렷한 산화피크를 볼 수 있고 식 (4)의 질산염이 없어 아질산을 자동촉매 반응에 의해 급격히 생성할 수 없어 아질산 환원 분해 반응 전류가 잘 발달되지 않음을 볼 수 있다. Fig. 14에는 1.0 M 염산에 0.01 M 질산 나트륨을 갖는 용액에 대한 cyclic voltammogram이 나타나 있다. 여기서는 질산 1.0 M의 경우처럼 어떠한 질산의 환원 및 아질산의 환원 분해 반응이 일어나지 않음을 볼 수 있다.

4. 결 론

이상의 실험으로부터 질산의 산화/환원 전해 반응에 대해 다음과 같이 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 질산농도가 2.0 M이하에서는 질산의 전기화학적 산화/환원이 일어나지 않고, 질산 농도 2.0 M이상에는 질산의 환원반응이 느려 환원전위에서 용액이 전극과 충분한 접촉이 이루어진 후에야 아질산이 생성된다.
- (2) 질산 농도 2.0 M이상에서 생성된 아질산은 환원 전위에서 급격한 자동촉매 반응에 의해 대단히 높은 아질산 환원 분해 반응을 보이면서 NO_x 로 환원된다.
- (3) 아질산은 sulfamic acid에 의해 효과적으로 분해되며 질산 3.5 M에서는 아질산의 완전한 분해를 위해 sulfamic acid 농도가 최소한 0.05 M 이상이 되어야 한다.

감 사

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Yoshida, Z. and Tachikawa, E.: *Nuclear Engineering(Japanese)*, **38**, 48 (1992).
2. Couper, A. M., Pletcher, D. and Walsh, F. C.: *Chem. Rev.*, **90**, 837 (1990).
3. Stock, J. T. and Oma, M. V.: "Electrochemistry, Past and Present," ACS Symposium series 390, American Chemical Society, Washington DC

- (1989).
4. Petrich, G., Galla, U., Goldacker, H. and Schmieder, H.: *Chem. Eng. Sci.*, **41**(4), 981(1986).
 5. Feess, H. and Wendt, H.: *Chemie Ingenieur, Technik*, **53**(10), 808 (1981).
 6. Kim, K. W., Lee, E. H. and Yoo, J. H.: *Sep. Sci. Tech.*, **43**(13), 1999 to be printed.
 7. Kihara, S., Yoshida, Z. and Aoyagi, H.: *Bunseki kagaku*, **40**, 309(1991).
 8. Kim, K. W., Byeon, K. H., Lee, E. H., Yoo, J. H. and Park, H. S.: *J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry*, **7**(4), 743(1996).
 9. Kim, K. W. Lee, E. H., Yoo, J. H. and Park, H. S.: U.S. patent 5,904,849 (1999).
 10. Kim, K. W., Byeon, K. H., Lee, E. H., Yoo, J. H. and Park, H. S.: *J. of Korean Ind. & Eng. Chemistry*, **8**(3), 416(1997).
 11. Schulz, W. W., Navratil, J. D. and Talbot, A. E.: "Science and Technology of Tributyl Phosphate," Vol. I, Vol. III, CRC Press Inc., Florida(1984).
 12. Benedit, M., Pigford, T. H. and Levi, H. W.: "Nuclear Chemical Engineering," Second Ed., McGraw-Hill Book Co.(1981).
 13. Epstein, J. A., Levin, I. and Raviv, S.: "Proceedings of Third United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy," **8**, 436(Paper No. 818), (1964).
 14. Vetter, K. J. Z.: *Phys. Chem.*, **194**, 199(1960).
 15. Bard, A. J., Parsons, R. and Jordan, J.: "Standard Potentials in Aqueous Solution," Marcel Dekker Inc. N. Y., 127(1985).
 16. Lee, E. H., Kim, K. W., Lim, J. G., Kwon, S. G. and Yoo, J. H.: *J. Korean Ind. & Eng. Chem.*, **9**(2), 232(1998).
 17. Thompson, G.H. and Thompson, M. C.: U.S. Report DP-1452(1977).