

역삼투막 공정을 이용한 봉산수 중의 실리카 제거에 관한 연구

구본문·임지원*·이태원·박길웅

한전기술연구원 전력연구실 수화학연구팀

*한남대학교 공과대학 화학공학과

(1995년 8월 7일 접수, 1995년 12월 7일 채택)

Studies on the Removal of Silica from the Boric Acid Solution by Reverse Osmosis Membrane Process

Bon-Moon Ku, Ji-Won Rhim*, Tae-Won Lee, and Gil-Woong Park

Korea Electric Power Corporation (KEPCO), Water Chemistry Team
Yusung-Ku, Munji-Dong 103-16 Taejeon, 305-380 Korea

*Department of Chemical Engineering, Hannam University

Daedeog-Ku, Ojung-Dong 133 Taejeon, 300-791 Korea

(Received August 7, 1995, Accepted December 7, 1995)

요 약 : Hydranautics사의 셀룰로오즈 아세테이트 재질로 된 RO S/W 4040을 이용하여 2성분계의 봉산수용액 및 봉산수에 함유된 실리카의 3성분계 수용액에 대하여 조업온도, 운전압력 및 공급유량 변화가 투과량, 봉산회수율, 실리카 배제율에 미치는 영향에 대한 실험을 수행하였다. 봉산수용액의 경우 35℃, 20atm 및 원액의 유속이 2.82ℓ/min에서 봉산회수율 및 투과도는 각각 58.7% 및 2.82ℓ/min, 35℃, 10atm에서는 68.1% 및 1.56ℓ/min이었다. 또한 실리카 및 봉산이 함께 함유된 용액의 경우 35℃, 3.2atm에서 봉산회수율 69.7%, 실리카 배제율 97.5% 및 투과도 0.47ℓ/min의 결과를 보여 주었으며, 35℃, 20atm에서 원액의 유속이 2.92ℓ/min의 경우 봉산회수율 56.4%, 실리카 배제율 96.1% 및 투과도 2.72ℓ/min의 결과를 보여 주었다.

Abstract: This studies concern the separation of aqueous boric acid solution and same solution containing silica using cellulose acetate RO S/W 4040 module manufactured by Hydranautics Co. The operating conditions of the applied pressures, temperatures, and feed flow rate are also investigated to characterize the permeabilities, boric acid recovery, and silica rejection, so that the optimum operating conditions would be found out. In the case where the operating conditions are the temperature 35℃, the pressure 20atm, and the feed flow rate 2.82ℓ/min, for the boric acid aqueous solution, the boric acid recovery 58.7% and the permeation rate 2.82ℓ/min were obtained. And also the results showed the boric acid recovery 68.1% and the permeation rate 1.56ℓ/min at the operating conditions, 35℃ and 10atm. For the boric acid solution containing silica, when the feed solution are at the conditions of 35℃ and 3.2atm, the boric acid recovery 69.7%, the silica rejection 97.5% and the permeation rate 0.47ℓ/min were obtained. And the operating conditions were at 35℃, 20atm and the feed flow rate 2.92ℓ/min, the results showed the boric acid recovery 56.4%, the silica rejection 96.1% and the permeation rate 2.72ℓ/min.

1. 서 론

실리카는 알루미늄, 칼슘, 마그네슘과 더불어 1차 반응기의 냉각 계통의 주요 오염물질이며, 또한 일반 대기 조건에서 공정의 환경 또는 공정 자체에는 영향을 주지 않는 물질이다. 알루미늄 등은 일반적으로 상용화되어 있는 무기물제거 장치로 효과적으로 잘 제거되나, 붕산수 내에 함유되어 있는 실리카 성분은 제거 되지 않는 것이 특징이다[1]. 붕산(H_2BO_3)은 borax로부터 얻어지며, 백색이며 바늘같은 결정 구조로 되어 있다. 붕산은 수소결합으로 인해 서로 결합되어 있고, 거의 6각형 대칭의 무한층을 형성한다[2]. 또한 붕산은 매우 약한 산이며 이의 해리도는 $25^\circ C$ 에서 6×10^{-10} 이다. 또한 붕산은 물에 잘 녹는 편이며, 온도 증가에 따라 용해도는 급증가하며, 약간의 휘발성 성질을 지니고 있다[3]. 붕산수에서 형성되는 주요 화학종은 $B(OH)_3$, $B(OH)_4^-$, B_3O_3 , $B_3O_6^{3-}$ 및 $B_4O_7^{2-}$ 등이며, 붕소는 산도 5 이하에서 붕산으로서 용액에 존재하며, 용액의 산도를 증가시키면 붕산은 가수분해되고 음이온 종으로 전환하게 된다[4].

가압경수로형(Pressurized Water Reactor; PWR) 원자력발전소에서는 원자로 출력조절을 위한 중성자 흡수재로 붕산을 사용하며, 핵연료를 교체하여 잉여 반응도가 높은 노심 초기의 붕소 농도는 1,200ppm 수준에서 3~5ppm으로 감소시키면서 약 1년간 정격 출력으로 운전하여 50ppm에 도달하면 핵연료를 교체한다. 원자로 출력조절용으로 사용된 붕산은 붕산회수 탱크에 임시 저장되고 증발기로 농축(7,000ppm)하여 붕산저장탱크에 회수한 후 재사용하므로, 보충수 공급, 핵연료 교체 작업 중에 유입되는 불순물들이 농축되는 것을 방지하기 위하여 이온교환수지로 수질정화하고 있다. 그러나, 붕산으로 포화운전되는 이온교환수지에서 붕산보다 이온선택도가 낮은 실리카는 제거되지 않으므로 원자력발전소의 운전년수 경과에 따라 1차계통수(원자로 냉각재)인 붕산수중의 실리카 농도가 증가하게 된다. 실리카는 고온, 고압 운전조건에서 양이온 불순물과 결합하여 핵연료피복재에 열전달을 방해하는 규석(Zeolite) 층을 형성함으로써 국부가열(Hot spot)에 의한 핵연료 손상을 일으킬 수 있다[5].

현재까지 붕산수중의 실리카를 선택적으로 분리 및 제거하는 기술이 부족하여 Feed & Bleed 방법으로 수질정화함으로써 다량의 폐수발생 및 붕산보충이 요구되어 역삼투막을 이용한 선택적 이온제거 방법이 대체 공정으로서 제안되었다[5]. 한편, 원자력발전소의 붕산수 수질정화는 본 논문의 연구목적과 같은 계통수 중의 실리카 제거와 방사성 폐액처리 기술분야로 구분된다. 붕산 계통수 수질정화는 실리카외 불순물이 거의 없고 수질조건이 일정(붕산농도: 2,000ppm, $pH < 5$)하여 붕산과 실리카의 최적분리, 회수조건을 연구하여 붕산저장 용량이 큰 Spent Fuel Pool(SFP) 및 Refueling Water Storage Tank(RWST)의 수질정화에 적용한다. 방사성 폐액으로부터 붕산을 회수 및 재사용하는 기술은 불순물이 많고 수질조건도 다양하게 변화하여 pH, 불순물 조성별, 조업조건 등 많은 실험이 요구되며, 세탁배수, 기기 및 바닥배수의 폐수발생 저감에 적용하고 있다.

Hilmer와 Swindlehurst[6]는 Associated Technologies Incorporated(ATI)사로부터 제공된 역삼투 공정 및 중공사막을 이용하여 미국 Palo Verde의 원자력발전소에 응용하였다. 응용 결과, 3개의 Total Dissolved Solids(TDS) 탱크로부터 1,055ppm을 함유하는 붕소가 역삼투 공정을 거쳐 최종적으로 2,722ppm을 나타내었다. 또한 Kniazewycz와 Markind[7]는 셀룰로오스 아세테이트 나린형 및 중공사형 역삼투 모듈과 KLM Technologies사에서 제공된 역삼투공정과 한외여과공정을 결합한 Pilot 장치를 이용하여 붕산수를 처리하였다. 이 경우 붕산에 대한 배제율은 40%이었으며, 그외 다른 이온화 오염물질인 Cl, Li, F 및 실리카에 대한 배제율은 70~90%이었다. Westinghouse R&D 센터의 Bansal[8]은 나린형 및 중공사형 역삼투 모듈을 이용하여 붕산회수율, 투과도 등에 관하여 실험을 수행하였다. 수행 결과, 원액의 농도에 따라 붕산배제율은 거의 변함이 없었으며, 원액의 산도가 4~7의 범위에서는 붕산배제율이 약간 증가하였으나, 산도가 8~9 범위에서는 많이 증가하였다. 또한 붕산배제율은 운전압력을 증가시키기에 따라 증가하였다. 나린형 역삼투 모듈을 사용했을 경우의 대표적인 배제율은 압력이 193~195psig에서 20.0~26.4%를, 388~395psig에서는 31.5~36.2%를 나타내었다. 미쯔비시사는 역시 마찬가지로 붕산을 회수하기 위하

여 tubular형 역삼투 모듈과 이온 교환 수지를 사용하였는데, 원액의 산도가 6~7이었을때 봉산배제율은 40%이었으며, 원액의 85%가 투과액에서 회수되었다[9]. 또한 이외에도 일본에서는 미쓰비시 중공업에서 한외여과 및 이온교환 공정을 이용하여 봉산수를 회수하고자 하였다[10]. Lee 등[11]은 폐액을 줄이고, 봉산을 회수하는데 역시 역삼투 공정을 이용하였다. 셀룰로오스 아세테이트 tubular 역삼투 모듈을 사용하여 85%의 봉소와 원액으로부터 95%의 물을 회수할 수 있었다. 역삼투막의 봉산배제율과 투과도에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 원액의 산도라고 보고하고 있다. 따라서 산도가 7 이상인 봉소를 포함하는 음이온 종들의 용액은 산도를 증가함에 따라 투과도 및 봉소 회수율을 감소시키며, 반면에 산도가 7 이하인 용액에 대해서는 높은 투과도와 봉산 회수율을 얻을 수 있다. 따라서 원액의 상태를 산성으로 유지하는 것이 바람직하다고 설명하고 있다.

용해물질에 대한 막의 배제 효과는 이온화된 염보다는 산에 대해 좋지 않다. 봉산은 다른 음이온 종에 비해 훨씬 쉽게 막을 통해 투과하여 다른 이온화된 오염물질로부터 선택적으로 분리해야 한다. 따라서 본 논문에서는 계통수 중의 실리카를 제거하기 위한 목적으로 원액의 봉산과 실리카의 농도를 각각 1500~1800ppm, 910ppb에 대하여 온도 15, 25, 35℃, 운전압력 2~40atm, 공급유량의 속도 1~30ℓ/min 별로 실험을 수행하여 사용 막모듈에 대한 실험 최적 조건을 선정하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시료

본 실험에 사용한 역삼투막모듈은 Hydranautic사의 셀룰로오스 재질로 이루어진 RO S/W CA 4040의 나권형모듈을 사용하였다. 또한 봉소 및 실리카는 각각 일본 Kanto Chemical사 및 Junsei Chemical사의 특급 시약과 물은 2차 증류수를 사용하였다.

2.2. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 역삼투막 장치는 선경인더스트리사의 SUPERANE MSTR을 사용하였으며 이를 Fig. 1에 도시하였다. 이 장치는 2개의 역삼투막 모듈이 사용 가능하며 전원 제어기 기록계, 고압펌프, 보조

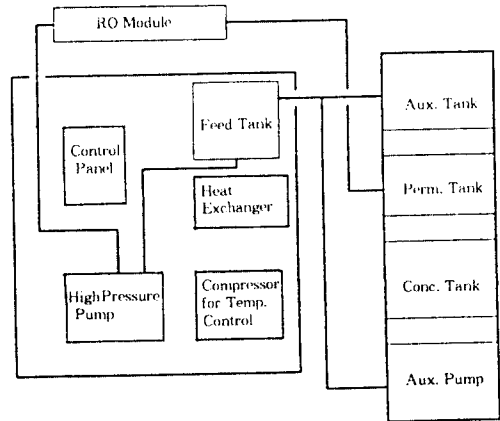


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus used in this study.

펌프, 열교환기, 온도조절용 컴프레서, 공급탱크, 보조급수탱크 등으로 구성되어 있다. 조업온도 및 운전압력에 따른 투과량, 봉소회수율 및 실리카 배제율 변화에 대한 시험은 온도를 일정하게 유지시키면서 장치의 출구측 밸브를 조절하여 운전압력을 2~40atm 범위에서 실험을 수행하였으며, 공급유량속도에 대한 실험은 유량을 단계적으로 1~30ℓ/min로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

2.3. 결과분석 방법

원액 및 투과액의 봉소농도는 0.1N NaOH 표준시약으로 적정하는 Titration-Mannitol 방법 및 실리카 농도는 UV 흡광법을 이용하여 분석하였다. 현 분석 방법은 국내외 원자력발전소에서 분석절차서로 사용되고 있는 Westinghouse Guidelines(SGTD-S.1.1-4468)[12]에 따른 것으로 ASTM 표준분석법[12] 사용이 편리하도록 정리한 분석방법이다.

또한 봉산회수율 및 실리카 배제율은 다음의 식들로부터 구하였다.

$$\text{봉소회수율} = \frac{C_{F,B}}{C_{I,B}} \times 100$$

$$\text{실리카 배제율} = \frac{C_{F,S} - C_{P,S}}{C_{I,S}} \times 100$$

여기서 하첨자 중 F는 원액(Feed), P는 투과액(Permeate)을 의미하며, 또한 B는 봉산을, S는 실리카를 나타낸다.

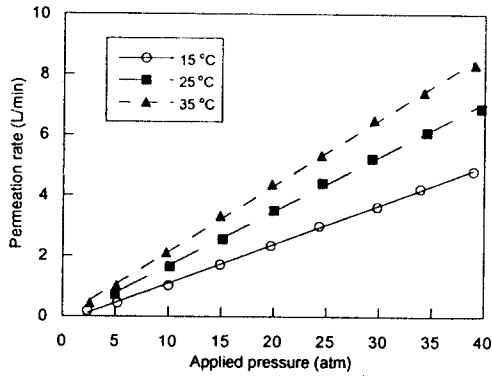


Fig. 2. Effect of the Applied Pressure and the Operating Temperatures on the Flux.

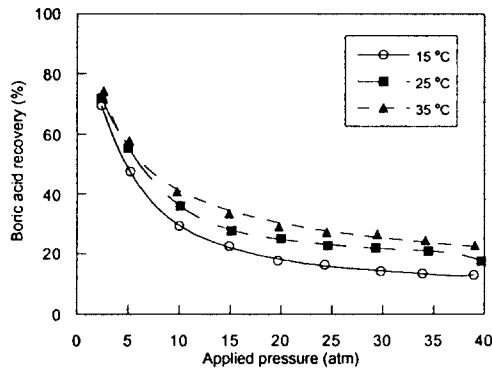


Fig. 3. Effect of the Applied Pressure and the Operating Temperatures on the Boric Acid Recovery.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조업온도 및 운전압력 효과

조업온도 15, 25, 35°C에서 운전압력에 따른 투과량 및 붕산회수율에 대한 실험 결과를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 이때 사용한 원액의 붕산의 농도는 1763ppm이었으며, 원액공급 속도는 조업온도에 따라 약간은 다르나 운전압력을 2~40atm으로 변화시켜 주기 위하여 평균 21~28ℓ/min으로 조절하였다. Fig. 2에는 운전압력에 대한 투과량을 나타내었는데 온도가 증가할수록 자유부피도가 증가하여 투과량 역시 증가함을 보여 주고 있다. 이는 역삼투막 공정의 이동 메카니즘이 투과량은 압력차에 비례하게 되어 운전압력이 증가할수록 투과량이 증가하는데 기인한다. Fig. 3에는 붕산회수율을 나타내고 있는데 예상한 바와 같이 조업온도가 낮을수록 투과액의 붕산농

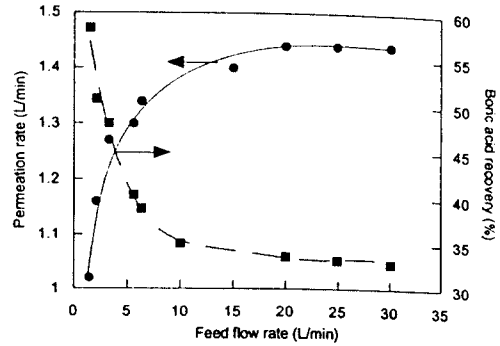


Fig. 4. Effect of the Feed flow Rate on the Flux and the Boric Acid Recovery (25°C, 10atm)

도는 적어지고, 높을수록 많아져 붕산회수율이 온도가 높을수록 높아지게 된다. 이는 온도가 증가할수록 막내의 자유부피가 증가하게 되어 붕산이 높은 온도에서 보다 더 쉽게 투과하게 된다. 그리고 조업온도가 일정하고 운전압력이 증가 할수록 붕산회수율은 감소하는데 이는 주로 압력상승으로 인한 막 뒷면에서의 붕산의 농도 감소에 기인하는 것으로 사료된다. 조업온도가 35°C, 10~15atm에서 붕산회수율은 40%, 투과도는 2~3.3ℓ/min의 결과를 보여주고 있다.

3.2. 공급유량 효과

Fig. 4는 일정 압력(10atm), 일정온도(25°C)에서의 공급유량을 1~30ℓ/min로 변화시키면서 이에 대한 붕산회수율 및 투과도를 나타내고 있다. 공급유속이 증가함에 따라 투과도도 증가하며, 붕산회수율은 낮아짐을 보여주고 있다. 투과도의 경우 공급유속이 1.48ℓ/min일 때 1.02ℓ/min를, 그리고 유속이 30ℓ/min일 때 1.44ℓ/min를 보여주어 공급유속에 대한 영향이 매우 크지 않음을 시사하고 있으나, 이와 반면에 붕산회수율은 58.3%로부터 33.9%로 낮아져 유속에 대한 영향이 비교적 큰 것을 알 수 있다. Fig. 5에는 위의 경우와 같이 조업온도는 일정하게 하고 압력을 10atm에서 20atm으로 올렸을 경우의 붕산회수율 및 투과도를 나타내고 있다. 압력이 증가함에 따라 투과도는 2~2.8ℓ/min로 증가하고 붕산회수율은 47.8~22.7%로 낮아짐을 보여 주고 있다. 이 결과는 앞서의 온도에 따른 운전압력 효과의 결과와 잘 일치하고 있다.

다음으로는 조업온도 35°C, 운전압력 10atm에서 공급유량 변화에 따른 붕산회수율과 투과도에 대한

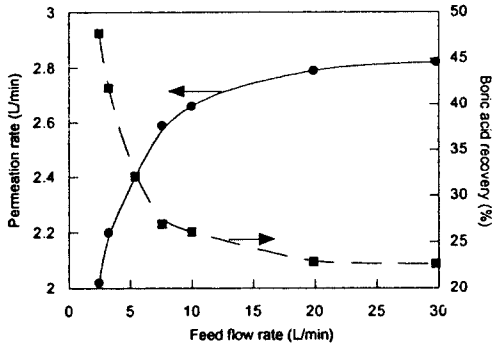


Fig. 5. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux and the Boric Acid Recovery (25°C, 20atm)

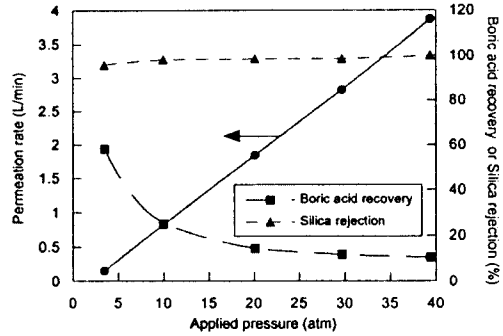


Fig. 8. Effect of the Pressure on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection at 15°C.

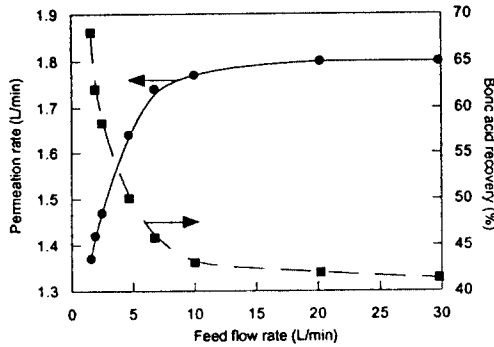


Fig. 6. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux and the Boric Acid Recovery (35°C, 10atm)

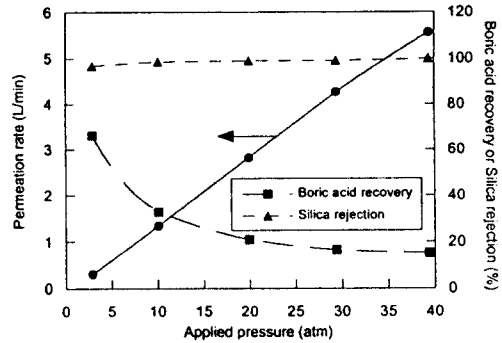


Fig. 9. Effect of the Pressure on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection at 25°C.

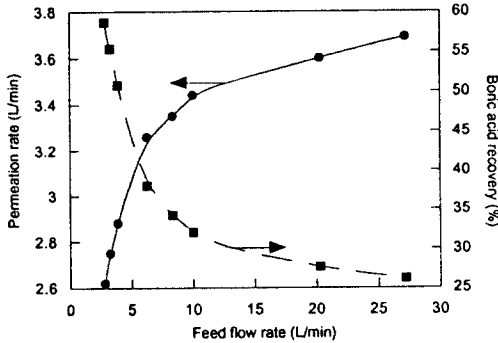


Fig. 7. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux and the Boric Acid Recovery (35°C, 20atm)

영향을 Fig. 6에 나타내고 있다. 이 경우 투과도는 1.37~1.8ℓ/min, 봉산회수율 68.1~41.4%를 나타내어 위의 두 경우와 비교했을 때 실험조건이 25°C, 10atm의 경우보다는 좋고, 25°C, 20atm일 때 투과도는 떨어지나 봉산회수율은 많이 향상됨을 보여주고

있다. 따라서 실험조건을 35°C, 20atm으로 하여 수행된 실험결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이 경우 투과도는 2.62~3.69ℓ/min로 증가하였으나, 봉산회수율은 58.7~26.2%로 감소하였다.

다음에는 봉산수에 실리카 성분이 함유되어 있을 경우에 대한 실험결과에 대하여 토의하기로 하겠다. 이 경우 앞서의 봉산수에 대한 실험조건을 토대로 조업온도에 따른 운전압력 효과, 공급유량 효과에 대한 결과를 논의하고자 한다. 이 때 봉산의 농도는 1619ppm, 실리카는 910ppm이었다.

3.3. 조업온도 및 운전압력에 따른 봉산회수율 및 실리카 배제율에의 영향

본 실험에서는 조업온도를 15, 25, 35°C, 운전압력을 2~40atm으로 변화시키면서 봉산회수율 및 실리카 배제율에 실험을 수행하였다. 이에 대한 각각의

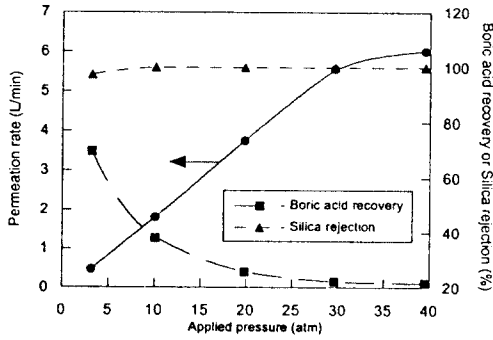


Fig. 10. Effect of the Pressure on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection at 35°C.

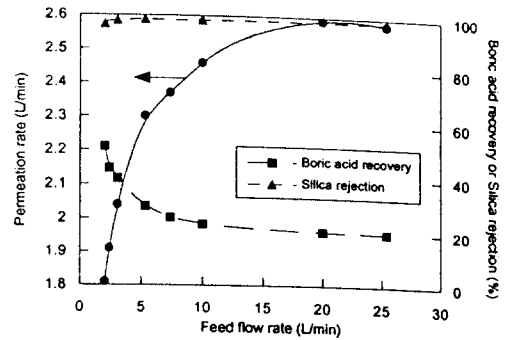


Fig. 12. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection (25°C, 20atm)

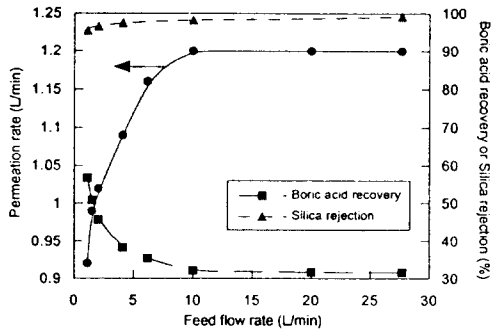


Fig. 11. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection (25°C, 10atm)

온도에 대한 실험 결과를 Figs. 8~10에 나타내었다. 조업온도가 15°C에서 붕산만이 용질로서 존재할 경우에 (Figs. 2 및 3 참조) 붕산회수율은 69.6~13%, 투과도는 0.18~4.8ℓ/min이었는데 반하여 실리카가 존재할 경우 붕산회수율은 58.1~10.5%, 투과도는 0.15~3.97ℓ/min로 낮아졌다. 이는 원액 내에 실리카의 존재로 인한 것으로 사료된다. 또한 이 경우 실리카 배제율은 95.9~100%를 나타내고 있다. 그리고 조업온도가 25°C에서는 붕산회수율은 72~17.6%, 투과도는 0.71~6.88ℓ/min이었는데 반하여 이 경우 붕산회수율은 66.3~15.2%, 투과도는 0.3~5.56ℓ/min로 15°C의 경우에서와 같은 경향을 보이고 있다. 이 경우 실리카의 배제율은 96.7~100%를 나타내었다. 조업온도가 35°C의 경우 붕산회수율은 74.4~22.8%, 투과도는 0.43~8.34ℓ/min이었는데 여기서는 붕산회수율이 69.7~21.6%, 투과도는 0.47~6.01ℓ/min

min로 되어 역시 15, 25°C의 경우와 같은 경향을 보여주고 있다. 또한 이 경우 실리카 배제율은 97.4~100%로 운전압력이 10atm부터 배제율이 100%를 보이고 있으며, 15, 25°C의 경우 40atm에서 배제율이 100%를 나타내고 있다. 이로부터 온도가 높을수록 낮은 운전압력의 조건에서도 실리카에 대한 배제는 완전히 이루어진다는 것을 알 수 있었다.

3. 4. 공급유량에 따른 붕산회수율 및 실리카 배제율에의 영향

다음으로 조업온도 25°C, 운전압력 10atm에서 공급유량에 대한 투과도, 붕산회수율, 실리카 배제율이 Fig. 11에 나타나 있다. 붕산만이 원액에 존재하는 Fig. 4의 결과와 비교하여 투과도 0.92~1.2ℓ/min, 붕산회수율 56.8~31.6%로 약간 감소하였고, 실리카에 대해서는 95.3~99.1%의 배제율을 보여 주고 있다. 또한 같은 조업온도에서 운전압력을 20atm으로 증가시켰을 경우(Fig. 12 참조) 투과도 1.81~2.58ℓ/min, 붕산회수율 51.2~19.9%로 붕산만이 존재할 경우와 비교하여 투과도 및 붕산회수율이 감소하였으나, 실리카 배제율은 96.7~98.2%로 10atm의 경우와 큰 차이가 없었다. 다음에는 조업온도를 증가시켜 조업온도 35°C, 운전압력 10atm에서 공급유량에 따른 투과도, 붕산회수율 및 실리카 배제율이 Fig. 13에 나타나 있다. 앞의 Fig. 6의 결과와 비교하여 투과도는 1.47~1.8ℓ/min로 유량이 낮은 범위에서는 약간의 증가가 관찰되었으나, 유량이 높을 경우 투과도가 같은 경향을 보여 주고 있다. 반면에 붕산회수율의 경우 59~37.9%로 붕산만이 존재할 경우인 68.1

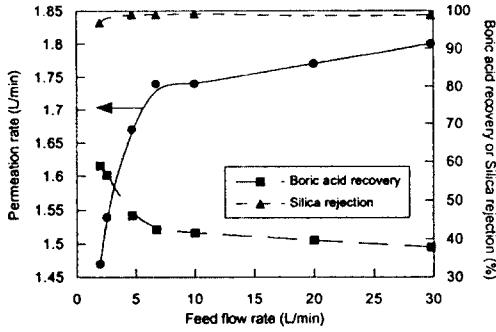


Fig. 13. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection (35°C, 10atm)

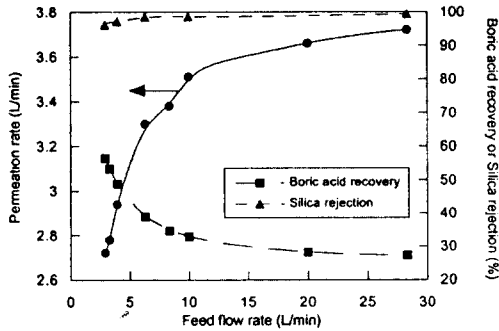


Fig. 14. Effect of the Feed Flow Rate on the Flux, the Boric Acid Recovery, and the Silica Rejection (35°C, 20atm)

~41.4% 결과보다 낮아짐을 보여주고 있다. 또한 실리카 배제율은 96.9~98.9%를 나타내고 있다. Fig. 14는 운전압력을 20atm으로 증가했을 경우의 결과이다. 비슷한 유량의 조건에서 봉산회수율은 낮은 유량에서는 앞의 10atm 조건에 비해 약간 낮으나, 유량이 많아질수록 이 경우 최대 회수율이 27.3%로 앞의 경우의 37.9%보다 많이 낮아졌다. 이 경우 실리카의 배제율은 96.1~99.4%로 전자보다 약간 증가하였다.

4. 결론

셀룰로오스 아세테이트 역삼투막을(Hydranautics 사 RO S/W 4040) 이용하여 2성분계의 봉산수용액 및 봉산수에 함유된 실리카의 3성분계 수용액에 대하여 조업온도, 운전압력, 공급유량에 대한 실험을

수행하여 이에 대하여 봉산회수율, 실리카 배제율, 투과량으로 나타내어 실험 최적조건을 선정하고자 하였다. 봉산수용액의 2성분 용액의 경우 조업온도 35°C, 운전압력 20atm, 원액의 유속이 2.82ℓ/min에서 봉산회수율 58.7%와 투과도 2.82ℓ/min의 결과와 운전조건이 35°C, 10atm에서 봉산회수율 68.1%와 투과도 1.56ℓ/min의 결과를 각각 얻었다. 또한 실리카와 봉산이 함께 용해된 3성분 용액의 경우 운전조건이 35°C, 3.2atm에서 봉산회수율 69.7%, 실리카 배제율 97.5% 및 투과도 0.47ℓ/min의 결과를 나타냈으며, 35°C, 20atm 및 원액의 유속이 2.92ℓ/min의 경우 봉산회수율 56.4%, 실리카 배제율 96.1% 및 투과도 2.72ℓ/min의 결과를 얻었다. Hydranautics 사 RO 막은 봉산회수율은 낮으나 실리카 배제율이 높아 2단처리용 RO막으로는 적합할 것으로 사료되며, 봉산회수율을 보다 더 높이기 위하여 이에 대한 보충 실험이 현재 진행 중에 있다.

참고문헌

1. D. B. Malkmus, International Water Conference '91, pp. 85-87.
2. F. A. Cotton and G. Wilkinson, "Advanced Inorganic Chemistry", John Wiley & Sons, pp. 297-299, 1980.
3. P. J. Durrant and B. Durrant, "Introduction to Advanced Inorganic Chemistry", Longman, pp. 533-537, 1970.
4. H. Kakihana et al., *Bul. Chem. Soc. Japan*, **50**(1) (1977), 158-163.
5. J. Glenn, Nuclear Engineering, April 1991, p. 43.
6. T. P. Hilmer and D. P. Swindlehurst, Waste Management Conference '83, pp. 323-325.
7. B. G. Kniazewycz and J. Markind, Waste Management Conference '86, pp. 291-294.
8. I. K. Bansal, *Industrial Wastes*, **26**(6) (1981), 12-31.
9. Anon, 'Radioactive waste treatment system based on reverse osmosis membranes', Mitsubishi Genshiryoku Giho, **17** (1979), 17-20.
10. Mitsubishi Heavy Ind., 'Boric acid recovery system', Japanese Patent 54-158598, 1979.

11. K. W. Lee, V. T. Le and G. J. McConeghy, 'Volume reduction of borated liquid wastes and recovery of boric acid by reverse osmosis', CRNL-4105, Atomic Energy of Canada Limited, 1987.
12. ASTM Standard D859, Standard Test Methods for Silica in Water (Part 31)
13. Westinghouse Guidelines for Secondary Water Chemistry (SGTD-S.1.1-4468)