

전기적 흡·탈착법을 이용한 폐수처리용 탄소막 시스템 연구

이 용 환 · 제갈종건^{*,†} · 정 재 윤

한양대학교 응용화학생명공학부, *한국화학연구원 신화학연구단
(2008년 4월 15일 접수, 2008년 5월 15일 수정, 2008년 5월 16일 채택)

Study on the Carbon Membrane System for the Wastewater Treatment Via the Electric Adsorption and Desorption Process

Yong Hwan Lee, Jonggeon Jegal^{*,†}, and Jae Yun Jaung

Department of Fiber and Polymer Engineering, Hanyang University

*Division of New Chemistry, Korea Research Institute of Chemical Technology

(Received April 15, 2008, Revised May 15, 2008, Accepted May 16, 2008)

요 약: 전도성 활성탄소와 폴리비닐리덴플로라이드(PVDF)를 이용하여 제조된 탄소막을 이용하여 폐수의 Total dissolved Solid (TDS)를 제거할 수 있는 탄소막 시스템을 제조하였다. 100 ppm의 NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂, MgSO₄ 수용액을 이용하여 탄소막의 기본 특성을 알아보았으며, (주)경인양행의 실제폐수인 염료폐수로부터 TDS를 제거하는 실험을 위하여 가로 × 세로가 각각 20 cm인 탄소막 240장으로 구성된 Pilot 규모의 탄소막 시스템을 구성하였다. 원폐수를 초순수로 적절히 희석하여 제조된 6가지의 TDS (941, 2050, 2810, 3830, 4960, 6030 ppm)를 지닌 실제폐수를 이용하여 제조된 Pilot 규모의 탄소막 시스템의 TDS 제거성능을 알아보았으며, 여러 운전조건에 따른 탄소막 시스템의 분리특성을 알아보았다.

Abstract: To remove total dissolved solid (TDS) from wastewater, a carbon membrane system was prepared, using carbon membranes made from conductive activated carbon and poly(vinylidene fluoride) (PVDF). Using 100 ppm aqueous solutions of NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂, MgSO₄, the basic properties of the carbon membranes used were studied. For the treatment of the real dye wastewater supplied from Kyungin Corp., a pilot scale carbon membrane system was also prepared, which was consisted of 240 plies of carbon membranes of 20 cm × 20 cm (length × width). Using the real wastewater with different TDS such as 941, 2050, 2810, 3830, 4960, 6030 ppm, prepared by the dilution of the original wastewater with pure water, the performance of the pilot scale carbon membrane system was studied. The effect of the operational conditions was studied.

Keywords: carbon membranes, total dissolved solid, electric adsorption, water reuse, wastewater

1. 서 론

산업의 발전과 함께 전 세계적으로 국가적 물 부족 현상은 날이 갈수록 심해지는 상황이다. 전 지구의 40%에 해당되는 숫자의 인구가 현재 먹는 물이 부족하여 고생하는 실정이다. UN에 따르면 현재 한국에서 사용가능한 물의 양은 약 660억 m³ 정도이며, 일인당은 약 1472 m³ 정도이다[1]. 1950년대의 일인당 사용가능

물의 양이 3247 m³이었던 것을 감안하면, 현재 한국은 물 부족 국가로 구분될 수 있다. 이를 볼 때 물 부족 현상에 대한 한국에서의 정부적 대책이 시급한 상황이며, 이를 대처하는 한 방법으로 폐수를 재활용하는 기술을 개발하는 것이다.

현재 이를 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중 하나가 분리막을 이용한 폐수 재활용 기술이다. 일반적으로 분리막 법이 폐수를 처리하는 데 매우 효과적으로 알려져 있으며, 특히 역삼투막 및 나노복합막을 이용한 재활용수의 제조 기술은 매우 가능성이 높은 기술로 업

[†]주저자(e-mail : jggegal@kriict.re.kr)

계에서 받아들여지고 있는 상황이다[3-12]. 하지만 이들 분리막을 이용한 재활용수 제조에 있어 해결되어야 할 문제 중 하나는 폐수에 존재하는 다량의 Total Dissolved Solid (TDS)를 효과적으로 제거해 줄 수 있는 기술의 개발이다. 폐수 내에 TDS가 다량 존재하게 되면 역삼투막을 사용할 시 분리막에 걸리는 삼투압이 올라가게 되고, 따라서 분리막의 운전 압력이 증가하여 운전비용이 증가하고 폐수의 재활용률이 떨어질 수밖에 없는 것이다.

이를 해결할 수 있는 한 가지 방법이 전기적 흡·탈착 원리를 이용한 TDS 제거 시스템이다. 본 연구에서는 이 기술을 실현하기 위해서 탄소막을 이용한 전기적 흡탈착 방식을 이용한 TDS 제거 시스템을 제조하고 이에 대한 연구를 진행하였다.

2. 실험

2.1. 탄소막 시스템 구성

2.1.1. 탄소막

본 연구에서 사용된 탄소막은 (주)C&D 환경으로부터 공급되었으며, 그 제조 방법을 간단히 소개하면 다음과 같다: 먼저 탄소와 폴리비닐리덴플로라이드(PVDF)를 무게비로 95 대 5가 되게 잘 섞는다. 이때 소량의 물과 이소프로판올이 함께 사용될 수 있다. 준비된 탄소-PVDF 혼합물을 알루미늄 박판 사이에 골고루 일정한 두께로 깎는다. 이후 일정 온도로(60~100도 사이) 가열되고, 일정한 간격을 지닌 두 개의 스테인레스 롤러 사이에 준비된 알루미늄 판을 끼운 다음 롤러를 회전시킨다. 이러한 방법을 수차례 적용하여 5% 정도 들어간 PVDF가 95%의 탄소알갱이들을 서로 잘 붙들어 탄소막을 형성할 수 있게 한다. 이때 롤러의 온도와 롤러 간격은 최적의 조건으로 조절되어야 한다. 이렇게 하여 제조된 탄소막 탄소막 시스템 제조에 사용된다.

2.1.2. 탄소막 셀 구성

전기적 흡착과 탈착 방법으로 수용액에 포함된 이온 성분을 제거하는 데 적합한 탄소막 셀을 구성하기 위하여 아래 Fig. 1에 나타난 방법으로 탄소막 셀을 구성하였다. 본 셀을 구성하기 위하여, 양이온 교환막과 음이온 교환막, 그래파이트, 스페이서 등을 함께 사용하였다.

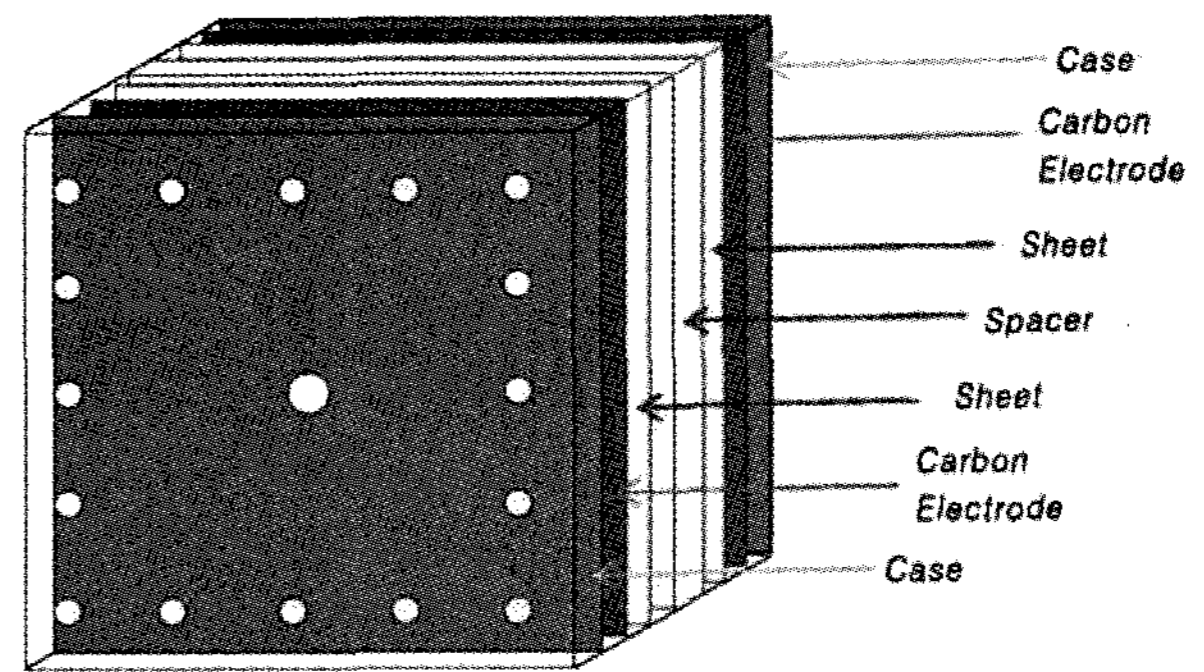


Fig. 1. Schematic draw of the carbon membrane cell.

2.1.3. 탄소막 시스템 구성

탄소막 시스템은 아래 Fig. 2와 같이 구성되었으며 위에서 설명된 탄소막 셀 이외에 사용된 각 부분의 자세한 설명은 다음과 같다. 물 저장 용기로는 100 L 크기의 폴리에틸렌 물통을 사용하였고, 마이크로 필터로 신양필터에서 구입한 5 mm 기공을 지닌 폴리프로필렌 마이크로필터를 사용하였다. 시스템에 공급된 전압 및 전류를 조절하기 위해서는 JIE 회사에서 구입한 Power supplier를 이용하였다. 원 폐수와 처리된 폐수의 Total dissolved solid (TDS)를 측정하기 위해서 ISTE C 회사의 TDS meter (모델: 460 CP, USA)를 이용하였다.

2.2. 탄소막 시스템을 이용한 염 제거

2.2.1. 기본적인 염 제거 실험

제조된 탄소막 시스템의 염 제거 기본 성능을 알아보기 위하여 가로, 세로가 각각 10 cm인 막 4장을 겹쳐서 구성된 셀을 이용한 탄소막 시스템을 이용하였다. 이때 사용된 공급액으로는 60 ppm의 TDS를 지닌 수돗물(H₂O)과 100 ppm의 NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂, MgSO₄ 수용액을 이용하였다. 유입수의 농도와 처리수 농도를 TDS로 측정하여 제거효율을 살펴보았으며, DC power supply를 이용하여 전극에 공급된 전압을 1.0 V, 1.2 V, 1.5 V로 조절하였으며, 이 때 탄소막의 염 제거 효율 및 탄소막에 걸리는 전류의 상태를 살펴보았다.

2.2.2. Pilot 규모의 탄소막 시스템을 이용한 염 제거

실제 폐수처리에 탄소막을 이용한 폐수처리 시스템의 활용가능성을 알아보기 위하여 보다 큰 용량의 폐수처리 시스템을 구성하였다. 탄소막의 크기를 가로, 세로 길이가 20 cm가 되게 하고, 막의 수를 240장으로 늘려 대형 탄소막 셀을 형성하였다. 실험에 사용한 폐수는 (주)경인양행의 실제 염료폐수이었으며, 6030 ppm의 폐

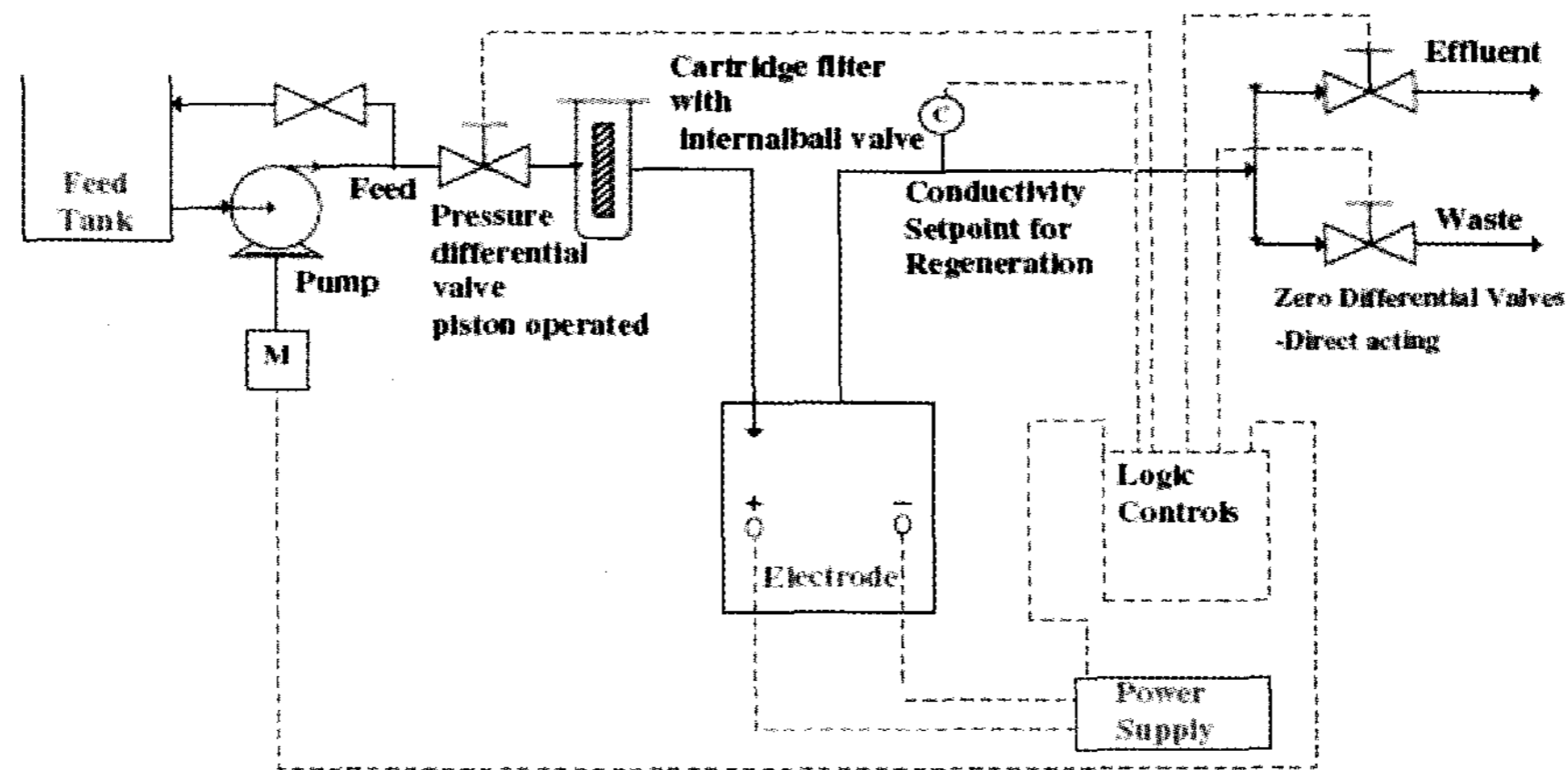


Fig. 2. Schematic draw of the wastewater treatment system using carbon membranes.

수 원수를 초순수로 희석하여 여러 가지 TDS를 지닌 폐수로 제조하여 본 실험의 공급액으로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 공급액의 TDS는 다음과 같다: 941, 2050, 2810, 3830, 4960, 그리고 6030 ppm.

장치의 운전 조건은 제 1 정지시간, 역쇄시간, 제 2 정지시간, 그리고 운전시간으로 이루어져 있다. 제 1 정지시간 및 제 2 정지시간을 고정하고, 세척시간과 운전시간을 각각 조절하여 운전하였으며, 유입수와 처리수의 TDS 농도 변화를 통하여 전극의 TDS 처리 효율을 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탄소막 시스템 제조 및 성능 분석

3.1.1. 탄소막 시스템의 운전 방법

탄소막 시스템의 폐수처리 활용 가능성을 알아보기 위하여, 위의 실험 편에서 설명된 바와 같이 제조된 실험실 규모의 탄소막 시스템을 구성하여 실험을 진행하였다. 사용된 막의 크기는 10 cm × 10 cm (가로 × 세로)이었으며, 탄소막 셀의 구성도는 위의 Fig. 1과 동일하다. 탄소막 셀을 구성하는 데 사용된 양이온 교환막과 음이온 교환막은 탄소막의 효율을 높이고 폐수 속에 포함된 유기물에 의한 탄소막의 오염을 방지하고자 사용되었다.

탄소막 시스템을 폐수처리에 활용한 목적은 폐수의 높은 TDS가 분리막 적용에 어려움을 주어, 일반적인 막 분리법을 이용한 폐수처리효율을 감소시키므로 이를 해결하는 한 방법으로 폐수의 TDS를 감소시키기 위하여 본 탄소막 시스템을 연구하게 된 것이다. 아래 Fig. 1

과 같이 스페이서를 중심으로 양쪽에 위치한 탄소막에 그라파이트 전극을 통하여 직류전류를 흘리게 되면 한 쪽의 탄소막에는 양이온하전을, 다른 쪽 탄소막에는 음이온 하전이 형성되게 된다. 이렇게 함으로써 스페이서를 통하여 공급된 폐수 중 양이온 성분은 음이온을 띤 탄소막으로 끌려가게 되고, 음이온 성분은 반대편의 양이온 하전을 띤 탄소막으로 끌려가서 흡착되게 된다. 이렇게 함으로써 폐수 속에 포함된 이온성분들은 탄소막에 의해서 제거되고 나머지 물들은 처리수가 되어 탄소막 셀을 빠져나가게 된다. 이렇게 하여 폐수에 포함된 이온성분들을 제거할 수 있으며 폐수의 TDS를 효과적으로 감소시킬 수 있다.

일정시간 동안 운전하여 탄소막에 흡착된 이온의 양이 증가하여, TDS 제거효율이 감소하게 되면, 일정시간 동안 운전을 멈춘 후, 양 전극의 극성을 서로 바꾸어 탄소막에 흡착된 이온성분들을 탈착하는 과정을 거치게 되며 이러한 세척과정을 통하여 사용된 탄소막은 다시 처음의 상태로 돌아오게 된다. 이러한 흡착과 탈착의 과정을 번갈아 가면서 탄소막 시스템을 운전함으로써 폐수의 TDS를 효과적으로 제거할 수 있다.

3.1.2. 전압에 따른 TDS 제거 효율

제조된 탄소막 시스템의 TDS 제거성능을 알아보기 위하여 60 ppm TDS를 지닌 수돗물(H₂O)과 100 ppm의 NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂, MgSO₄ 수용액을 공급액으로 이용하여 TDS 제거효율을 알아보았다. Figs. 3~5는 운전 전압 1.0 V, 1.2 V, 1.5 V에서 공급액의 흐름속도(Flow rate)를 100 mL/min으로 했을 때 시간에 따른 TDS 제거율을 나타내고 있다. 운전 전압을 1.5 V까지로 한

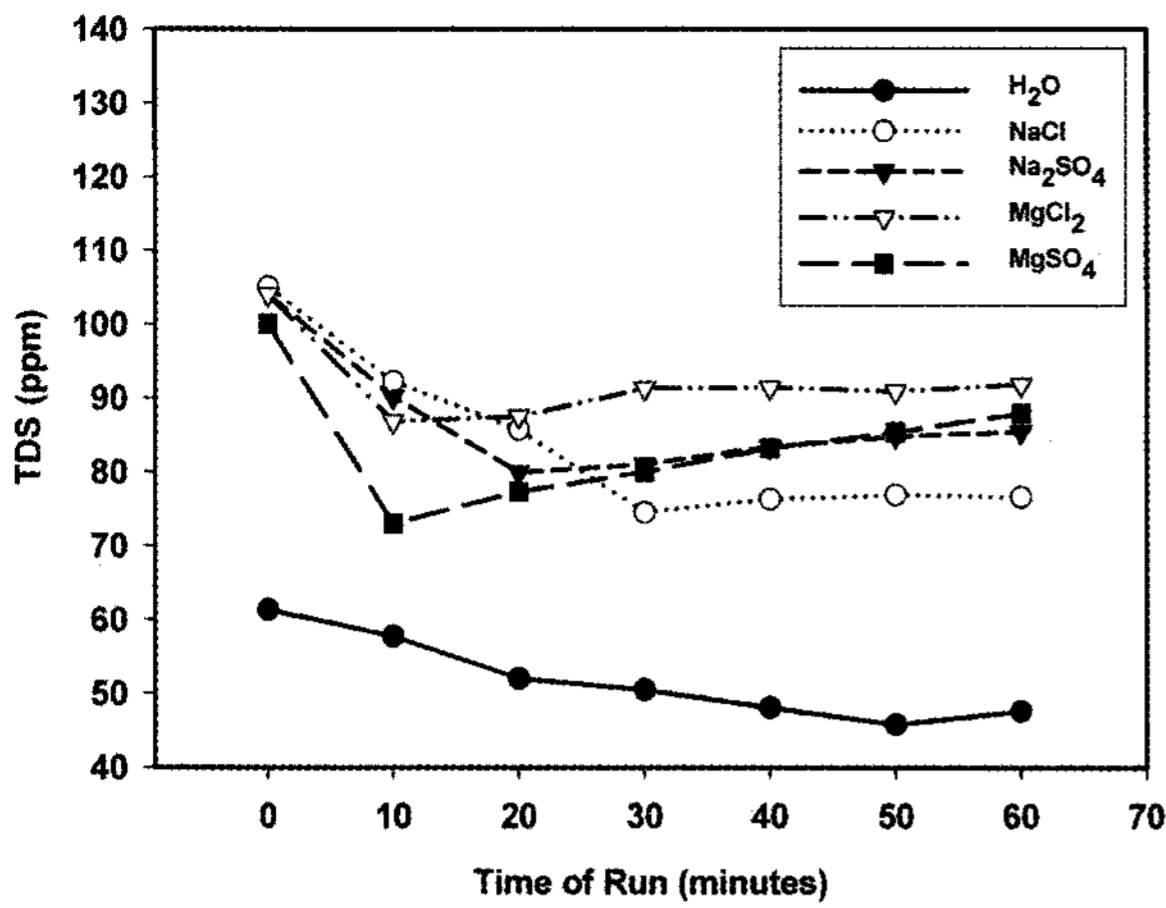


Fig. 3. TDS behaviors of the treated water when the voltage applied to the system was 1.0 volt.

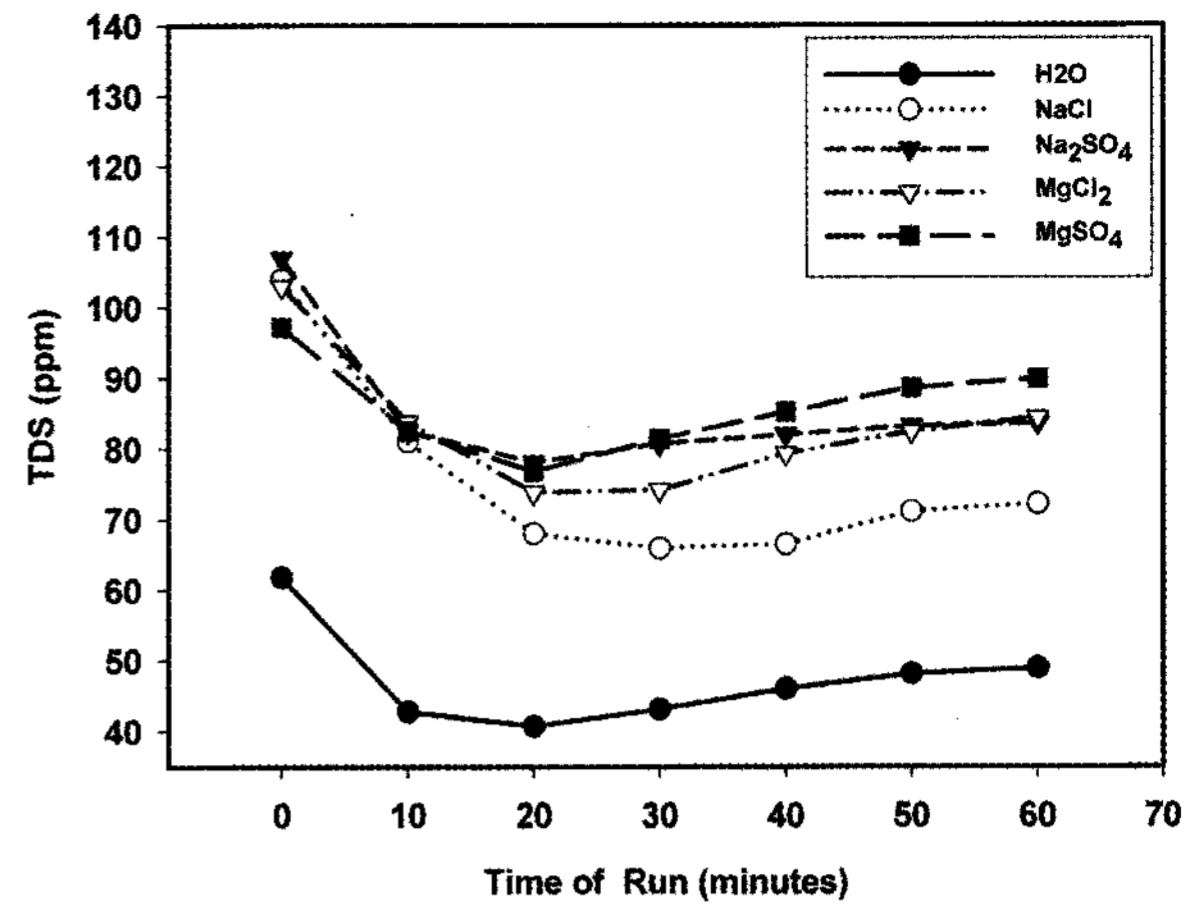


Fig. 5. TDS behaviors of the treated water when the voltage applied to the system was 1.5 volt.

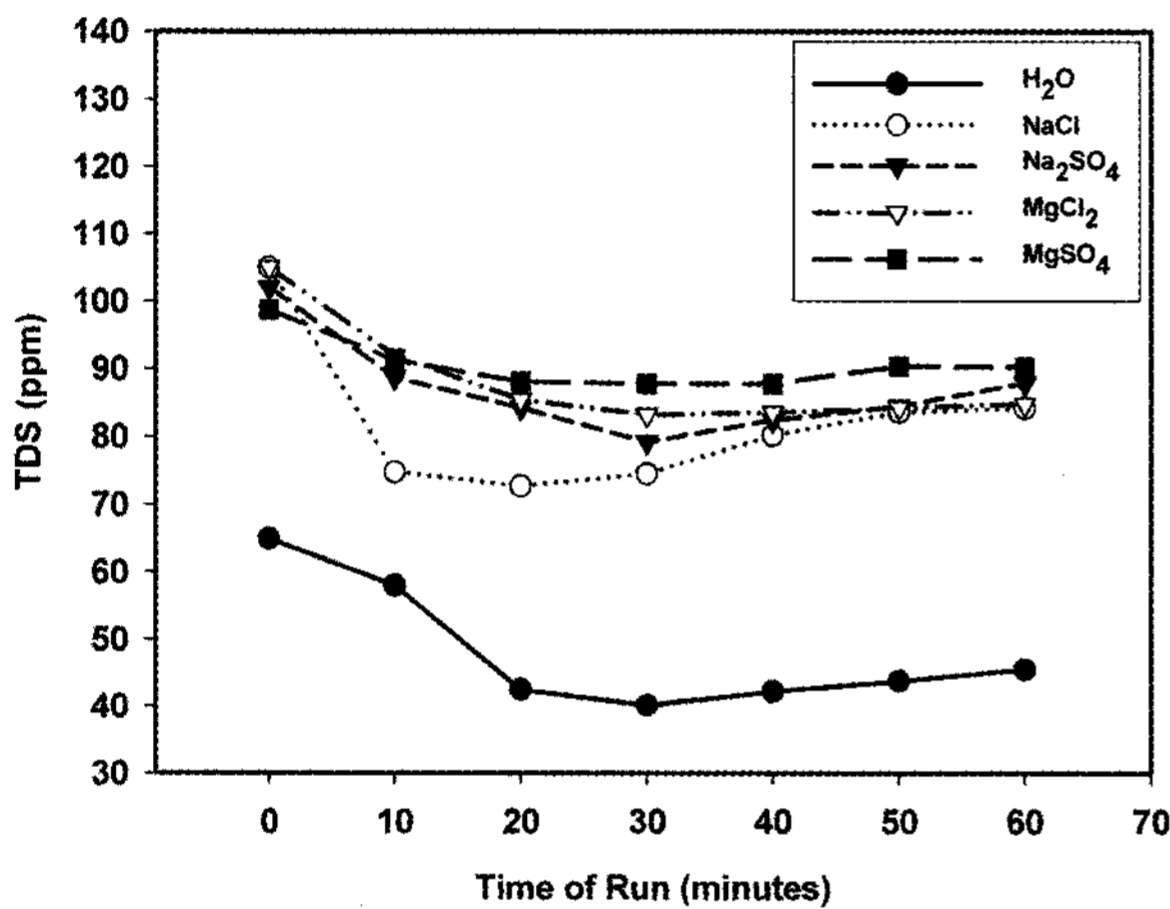


Fig. 4. TDS behaviors of the treated water when the voltage applied to the system was 1.2 volt.

것은 물의 전기분해가 일어나지 않는 전압에서 실험하기 위함이었다.

Figs. 3~5를 볼 때, TDS 제거율이 가해진 전압에 따라 다소 증가하는 현상을 보이고 있다. 이는 옴(Ohm)의 법칙($V=IR$)에서 저항 값이 일정할 때 전류의 양이 전압에 비례하기 때문이다. 이온성분들을 흡착하기 전의 탄소막의 저항(R)은 일정하므로 전압(V)이 증가할수록 탄소막에 걸리는 전류(I)의 양은 증가하게 되는 것이다. 탄소막에 걸리는 전류의 양이 증가할수록 탄소막의 이온성분 흡착 능력은 증가하게 된다. 따라서 전압이 1.0에서 1.5까지 증가함에 따라 탄소막의 TDS 성분 제거율이 증가하게 되었다. 하지만 본 연구에서 사용된 전압의 범위가 그다지 크지 않아서 TDS 제거율의 차이가 현격하지는 않았다. 대체로 운전 시간 10분에서 30분

사이에 최대 TDS 제거효율을 나타내었으며, 이 후에는 다시 처리수 내의 TDS 농도가 증가하거나 변화가 없는 것을 볼 수 있었다. 이로 볼 때, 운전을 시작하자마자 탄소막은 하전을 띠게 되고, 폐수 속의 이온 성분은 이온교환막을 거쳐 탄소막의 기공으로 들어가 쌓이게 되어 처리수의 TDS는 감소하게 되며, 운전 시간 10~30분 사이에, 폐수로부터 이온성분 제거 효율이 최대가 된다. 이 후에는 탄소막에 이미 쌓인 이온성분들 때문에 탄소막의 이온 흡착 능력이 떨어지게 되어 폐수로부터 이온성분 제거효율이 감소하게 되어 처리수 내의 TDS 농도가 증가하게 되는 것이다.

사용된 공급액 성분의 효과를 살펴보면 사용된 염들간에 특별한 상관관계가 형성된다고는 보기가 힘들었다. 대체로 1가 이온으로 구성된 NaCl의 제거율이 가장 좋은 것으로 나타났으나, 이외에 2가 이온을 포함한 세가지, Na₂SO₄, MgCl₂, MgSO₄ 사이에는 그다지 특별한 경향이 없었다. 대체로 TDS 제거율은 20%에서 30% 정도 사이로 나타났다.

이러한 현상은 아래 Figs. 6~8에 나타난 운전 시간에 따른 탄소막의 전류량으로 설명될 수 있다. 운전 시간이 증가함에 따라 탄소막에 흡착되는 폐수의 이온 성분들의 양이 증가하게 되어 탄소막의 저항값이 증가하게 된다. 탄소막의 저항값이 증가함으로써 옴(Ohm)의 법칙에 의해서 탄소막에 걸리는 전류의 양이 감소하게 되어 탄소막의 이온 성분들을 흡착하는 능력이 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서 운전 시간이 증가함으로써 폐수로부터 TDS 제거율은 감소하게 되는 것이다. 그리고 탄소막에 걸리는 전류의 값이 매우 유사하며 특히 10분

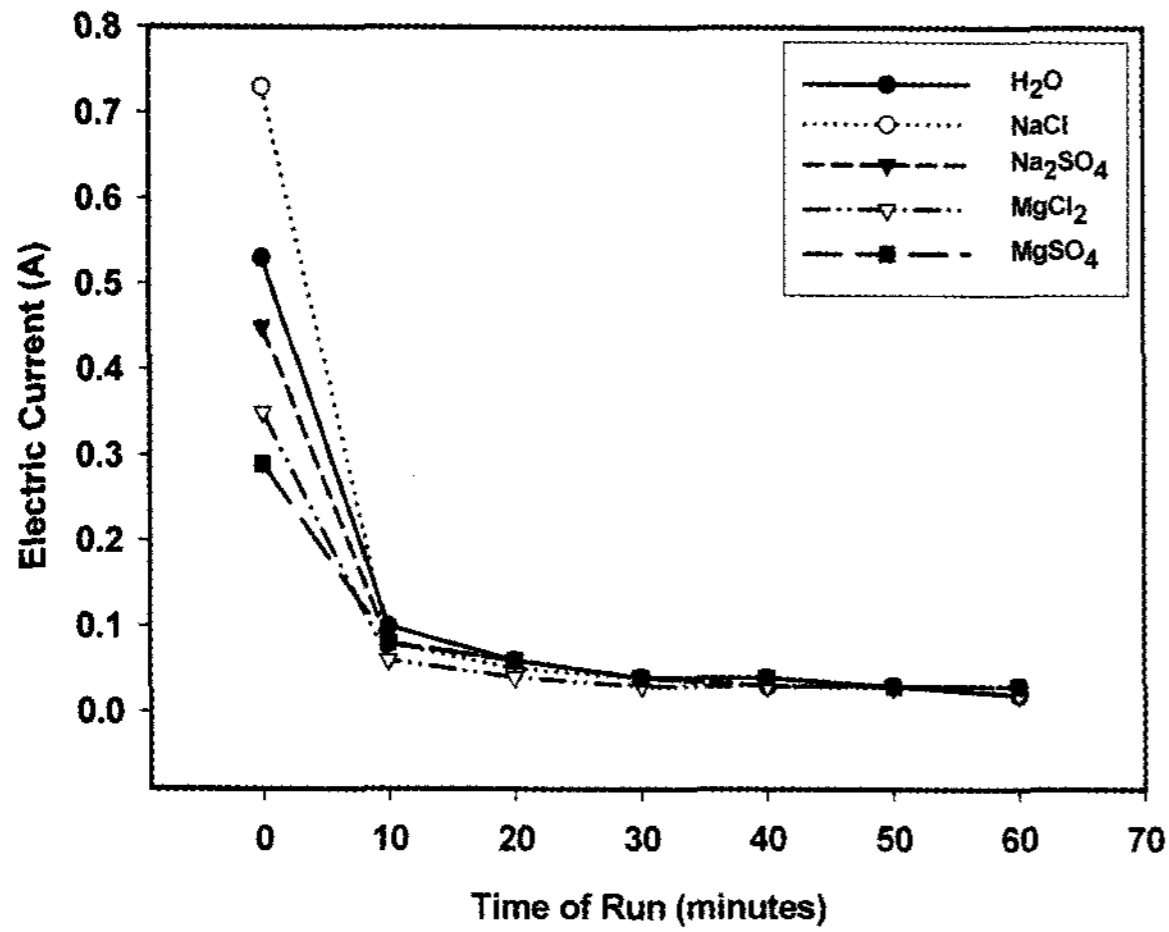


Fig. 6. Behaviors of the electric current of the carbon membranes as a function of operation time as the applied voltage was 1.0 volt.

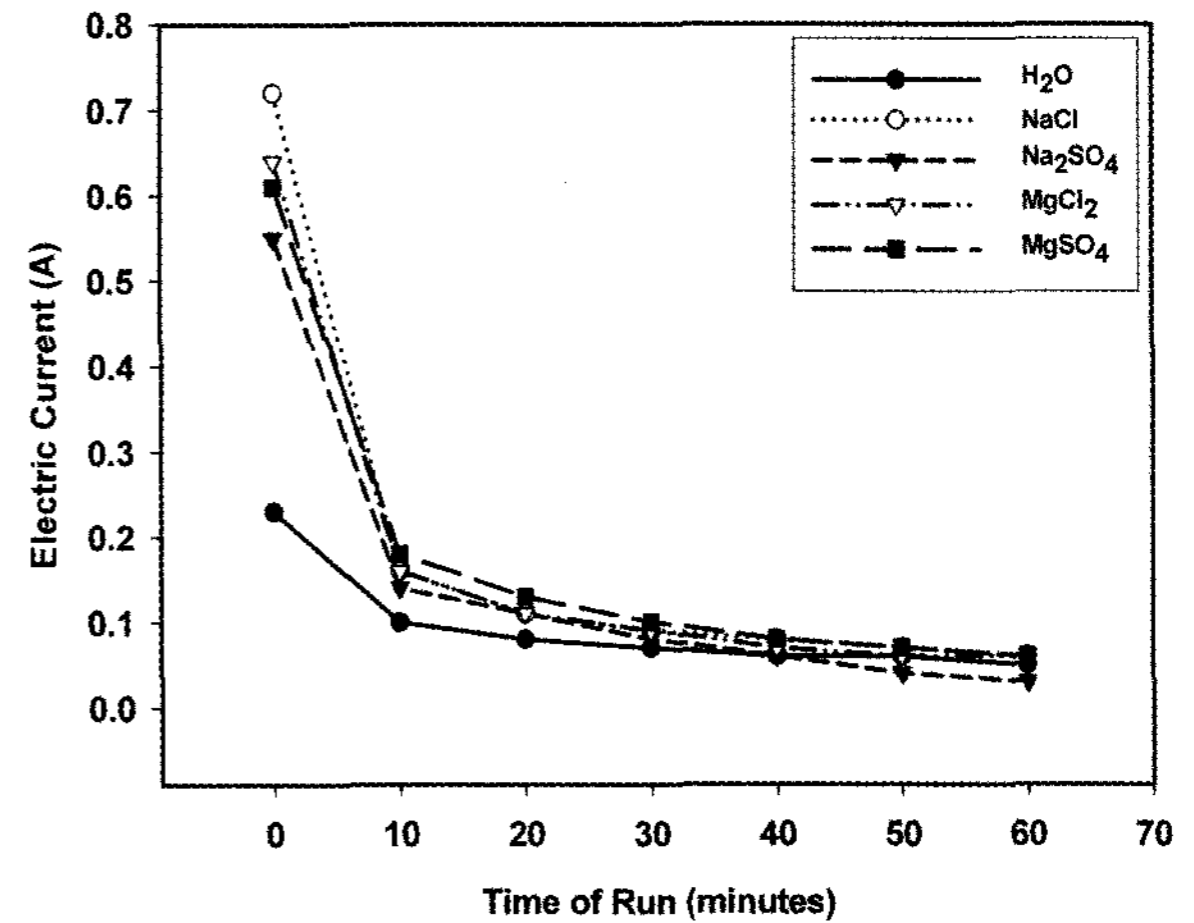


Fig. 8. Behaviors of the electric current of the carbon membranes as a function of operation time as the applied voltage was 1.5 volt.

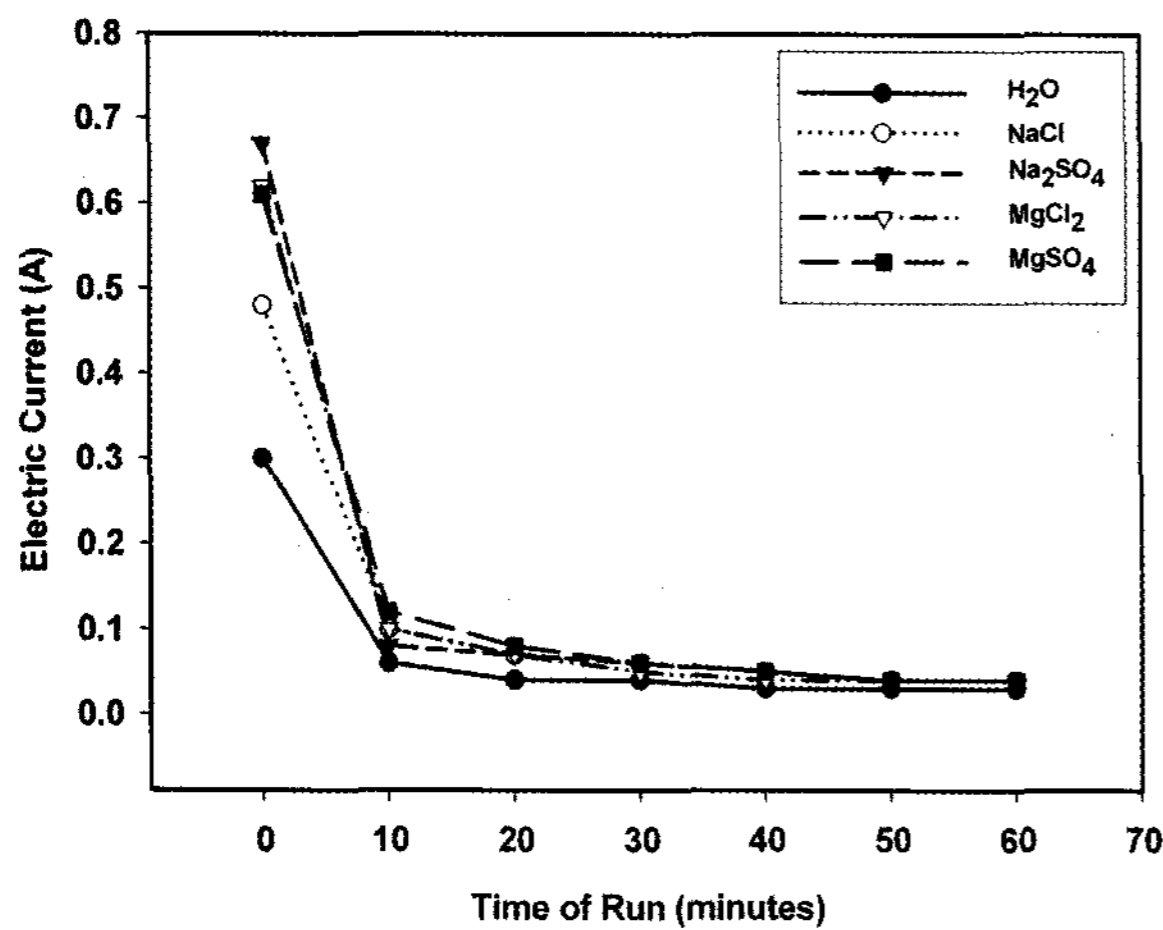


Fig. 7. Behaviors of the electric current of the carbon membranes as a function of operation time as the applied voltage was 1.2 volt.

동안의 운전 후에는 거의 동일해짐을 알 수 있고, 이렇게 됨으로써 TDS의 제거효율이 이온들의 전하수와 밀접한 관계를 가지지 않게 됨을 알 수 있다.

이상의 결과들을 살펴보면 전체적으로 탄소막에 의한 TDS 제거효율이 약 40% 미만 정도였다. 이러한 결과에 미치는 요인으로, 공급액의 흐름속도와 사용된 탄소막의 크기를 들 수 있을 것이며, 위의 내용에서처럼 면적 100 cm²인 탄소막 4장으로 구성된 탄소막 셀의 TDS 제거효율은 그다지 높지 않음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 이를 극복해 보고자 탄소막의 면적을 400 cm²로 넓히고 막의 수를 24장으로 증가하여 대용량의 탄소막 셀을 제작하였으며 이를 이용하여 실제 폐

수인 (주)경인양행의 염료폐수를 처리하였으며 그 내용은 다음과 같다.

3.2. Pilot 규모의 탄소막 시스템 제조 및 성능 분석

탄소막의 크기를 가로 × 세로 길이를 각 20 cm로 하여 실험실규모보다 4배 더 크게 하고, 탄소막의 수를 240장으로 그 양을 더 늘려 탄소막 셀을 형성하였다. 시스템 운전의 한 사이클을 제 1정지시간, 세척시간, 제 2정지시간과 운전시간으로 구성하여 연속적으로 탄소막 시스템을 이용하여 염료폐수의 TDS 제거효율을 알아보았다.

탄소막 시스템 사용에 있어서 사용된 탄소막의 세척이 중요한 한 부분이므로 본 실험에서는 세척시간에 따른 탄소막의 TDS 제거 효율에 대하여 살펴보았다. 사용한 염료폐수의 TDS 농도는 940 ppm이었고, 세척시간을 15초에서 3분까지 변화시키면서 TDS 제거효율을 알아보았다. 전극에 공급되는 전압은 1.2 V이었으며, 공급되는 유입수의 유량은 2 liter/min (LPM)으로 고정하였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 세척시간이 15초인 경우, 운전 초기에는 약 96%에 달하는 높은 TDS 제거율을 보이지만 운전-세척 주기가 거듭될수록 탄소막의 TDS 제거능력은 급격히 감소됨을 알 수 있다. 하지만 세척시간을 1분 이상으로 하여 실험할 경우에는, 초기의 98% 정도의 TDS 제거효율이 상당 시간 유지됨을 알 수 있으며 3번의 운전 주기(12분 운전)를 지났을 때에도 약 93%의 TDS 제거율을 나타내었다.

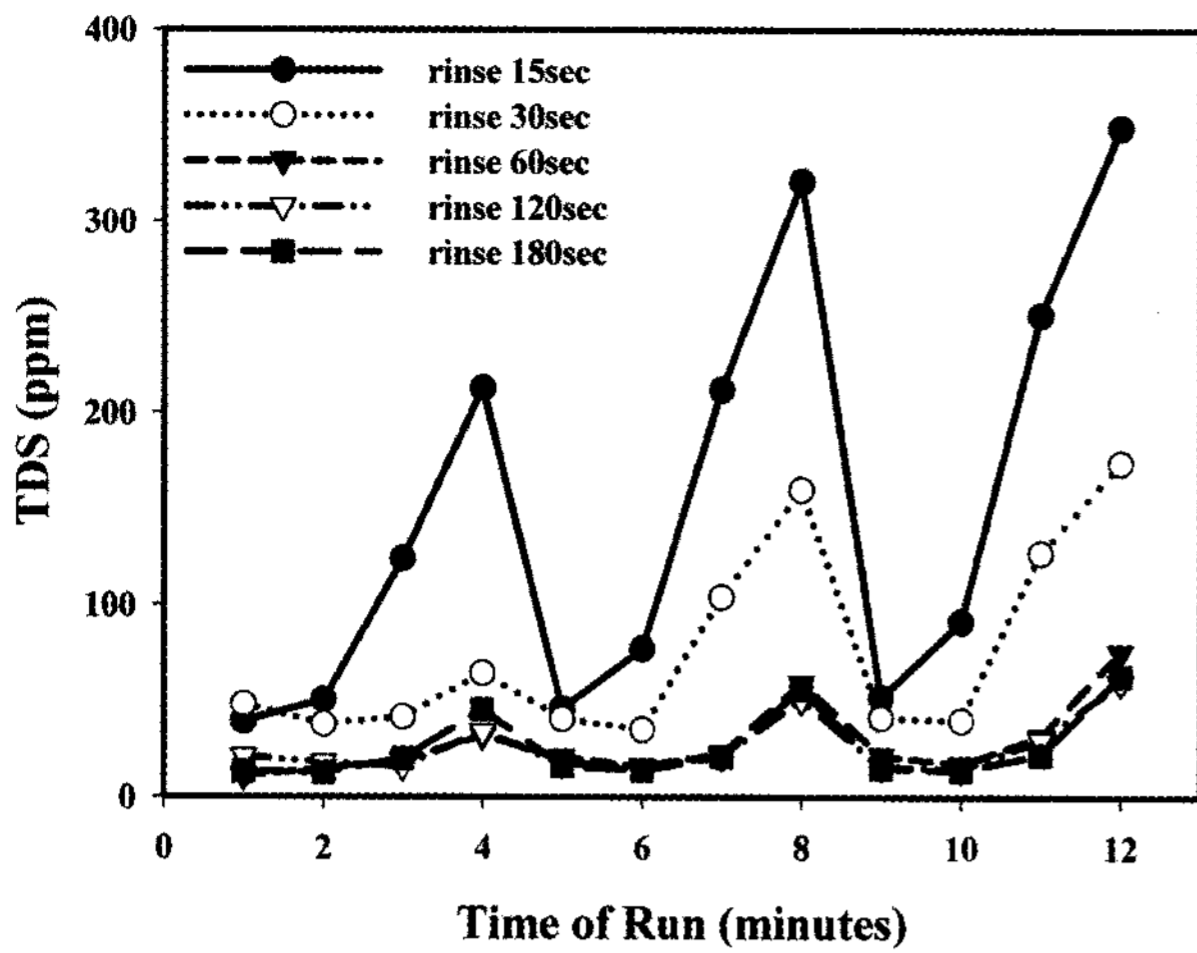


Fig. 9. TDS of the treated water as a function of rinse time when dye wastewater with TDS of 941 ppm was used as a feed solution (* Operating conditions : After 4 minutes' of operation, the system was stopped for 1 min, and then rinsed for a given time and stopped again for 15 sec, and then restarted the system to operate).

이러한 결과는 탄소막의 세척이 탄소막을 이용한 TDS 제거공정에 매우 중요한 단계임을 알게 해 주고 있다. 충분히 세척된 탄소막은 제 기능을 충분히 나타내지만 그렇지 않을 경우는 제 성능을 나타내지 못함을 나타낸다. 본 연구의 결과로 보면 흡착된 이온성분들을 충분히 제거하는 데는 약 1분 정도 이상의 세척시간이 필요한 것을 알 수 있다. 즉 1분간 이상 반대전하를 각 탄소막에 흘려줌으로써 탄소막에 흡착된 이온들을 충분히 탈착시킬 수 있고, 따라서 전극의 저항을 감소시켜 TDS 제거효율을 유지할 수 있는 것으로 판단되었다.

이상의 결과에 근거하여 세척시간을 2분으로 하여 다음과 같은 6가지 TDS 농도 941, 2050, 2810, 3830, 4960, 6030 ppm의 염료폐수로부터 TDS 제거효율을 알아보았다. Fig. 10에 이들 염료폐수의 농도에 따른 TDS 제거율이 나타나 있다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, TDS가 941 ppm인 경우에는 약 98% 이상의 제거율을 보였으나 TDS가 올라갈수록 제거율은 점점 떨어지고, 6030 ppm인 경우는 제거율이 약 10% 미만으로 떨어졌음을 알 수 있다. 폐수의 TDS 농도가 증가할수록 처리 효율이 급격히 떨어지는 이유는, 단위시간 당 탄소막에 흡착되는 이온의 수가 너무 많기 때문이다.

이상의 결과로 볼 때 본 연구에서 제조된 탄소막 시스템은 2000 ppm 정도의 TDS를 지닌 염료폐수를 처리하는데 적절할 것으로 생각되며, 6030 ppm과 같이 높

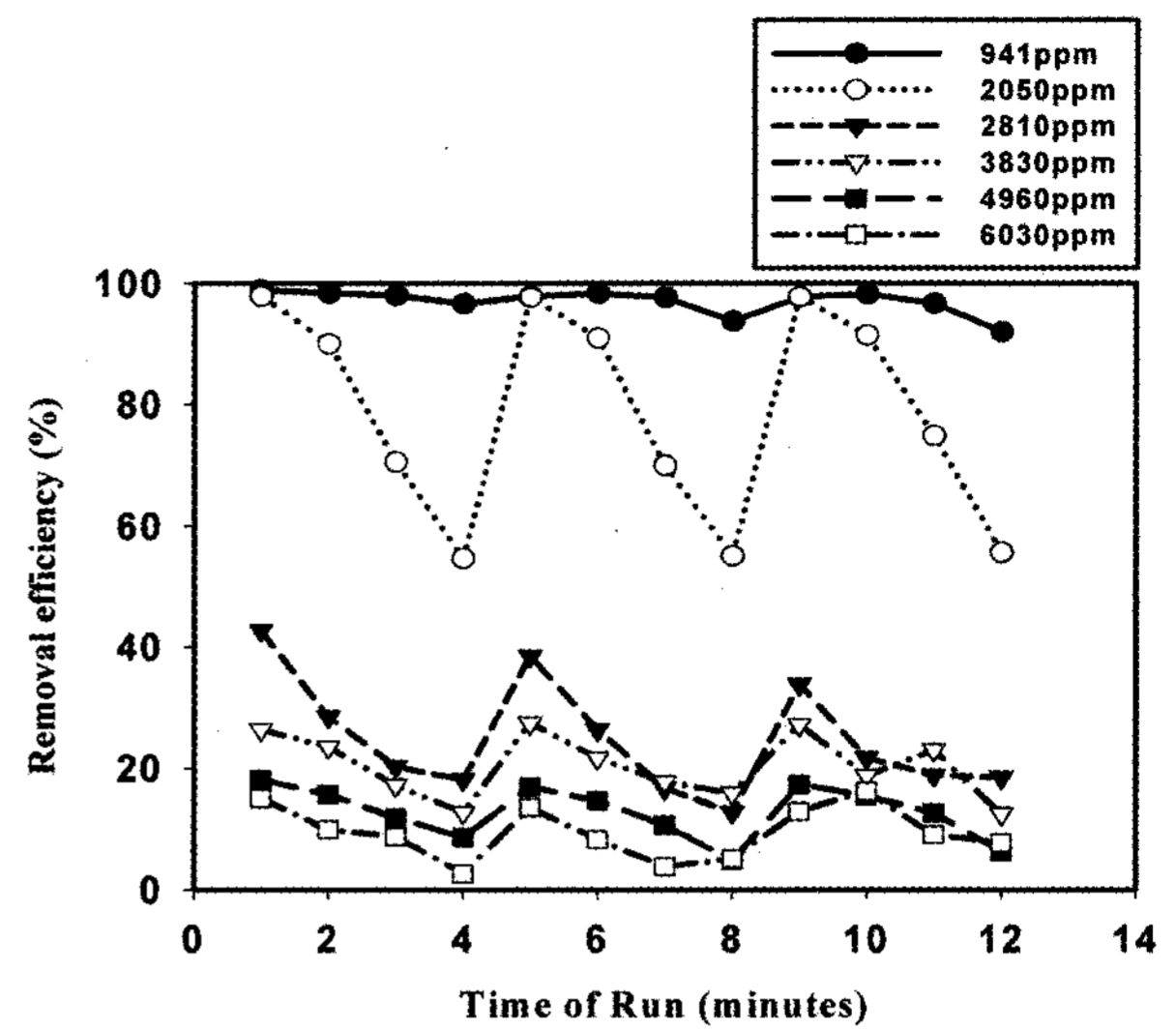


Fig. 10. TDS removal efficiency of the carbon membrane system as a function of the TDS of the feed solutions (* Operating conditions : After 4 minutes' of operation, the system was stopped for 1 min, and then rinsed for 2 minutes and stopped again for 15 sec, and then restarted the system to operate).

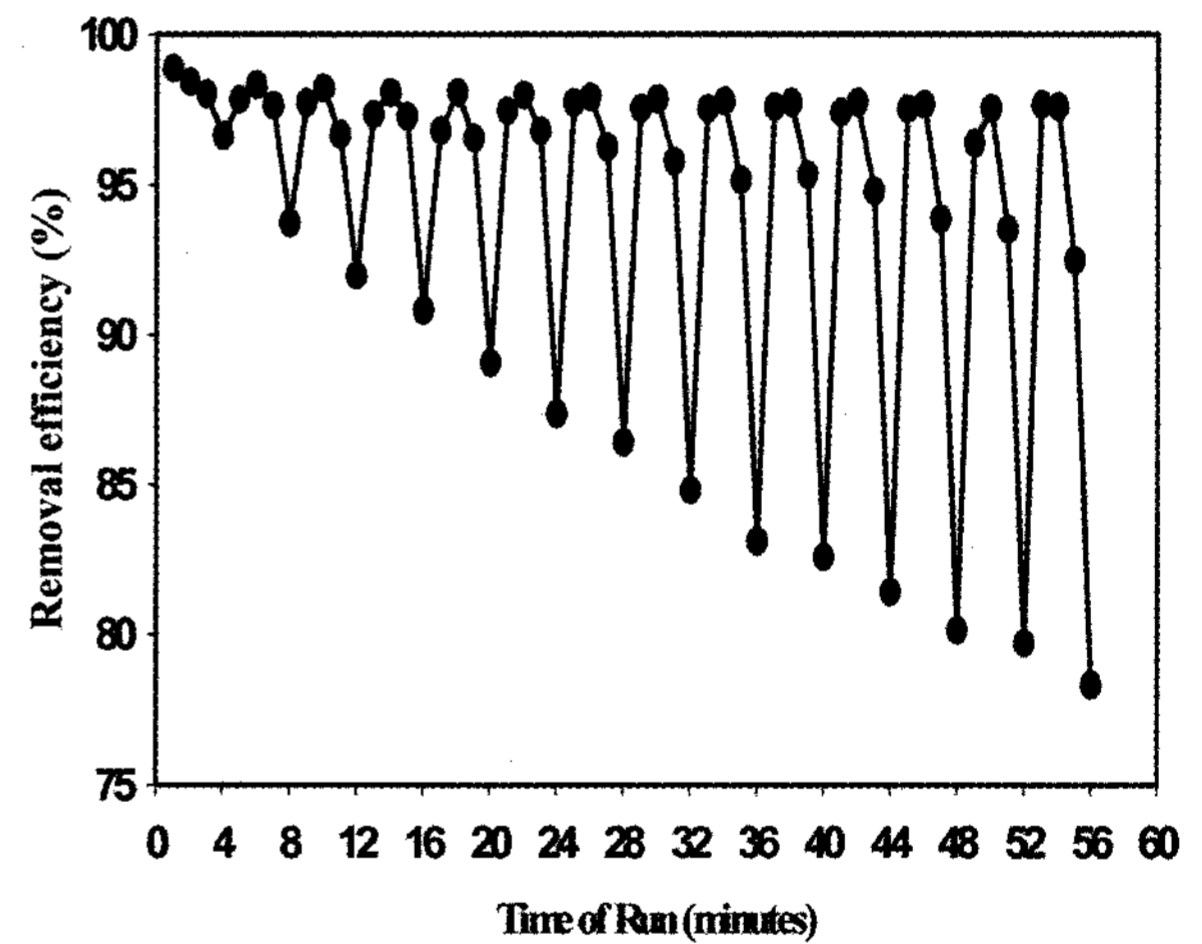


Fig. 11. TDS removal efficiency of the carbon membrane system along the run time (* Operating conditions : After 4 minutes' of operation, the system was stopped for 1 min, and then rinsed for a given time and stopped again for 15 sec, and then restarted the system to operate. * TDS of the feed solution : 941 ppm).

은 TDS를 지닌 폐수를 효과적으로 처리하기에는 본 연구에서 사용된 탄소막의 크기가 충분치 않음을 알 수 있었다. 이렇게 높은 TDS를 지닌 폐수를 적절히 처리하기 위해서는 보다 큰 탄소막 시스템이 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 11은 TDS가 941 ppm인 염료폐수를 이용하여 여러 사이클 동안 운전하였을 때의 TDS 제거율을 나타내고 있다. 이는 Fig. 10에서도 알 수 있었듯이, 시스템의 운전 사이클이 늘어남에 따라 탄소막에 흡착된 이온들이 탄소막에서 완전히 탈착되지 않고 흡착된 상태로 남아있는 부분이 있어 탄소막의 저항이 커지게 되며 따라서 시간이 지남에 따라 TDS 제거율이 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

이상의 연구결과들로 볼 때 탄소막 시스템은 폐수로부터 TDS를 제거하는 데 효과적이나, 탄소막의 크기가 충분히 크고, 많은 양의 탄소막을 사용할 때 효과적인 TDS 제거를 할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 제 3차년도 세계 물포럼 결과보고서(International year of fresh water 2003) (2003).
2. H. D. Kim, S. T. Kim, T. J. Kim, and Y. S. Kim, "Development of bipolar pulse conductometric detector for environmental monitoring and electrochemical experiments", *Anal. Sci. & Tech.*, **5(2)**, 79 (1992).
3. P. C. Vandevivere, R. Bianchi, and W. Verstraete, "Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: Review of emerging technologies", *J. of Chem. Tech. & Biotech.*, **72(4)**, 289 (1998).
4. M. Marcucci, G. Nosenzo, G. Capannelli, I. Ciabatti, D. Corrieri, and G. Ciardelli, "Treatment and reuse of textile effluents based on new ultrafiltration and other membrane technologies", *Desalination*, **138(1-3)**, 75 (2001).
5. K. Treffry-Goatley, C. A. Buckley, and G. R. Groves, "Reverse osmosis treatment and reuse of textile dyehouse effluents", *Desalination*, **47(1-3)**, 313 (1983).
6. J. Jegal, N.-W. Oh, D.-S. Park, and K. H. Lee, "Characteristics of the nanofiltration composite membranes based on PVA and sodium alginate", *J. Appl. Polym. Sci.*, **79(13)**, 2471 (2001).
7. N.-W. Oh, J. Jegal, and K.-H. Lee, "Preparation and characterization of nanofiltration composite membranes using polyacrylonitrile (PAN). II. Preparation and characterization of polyamide composite membranes", *J. Appl. Polym. Sci.*, **80(14)**, 2729 (2001).
8. J. Jegal, K.-S. Baek, and K.-H. Lee, "Nanofiltration of Dye solutions through polyamide composite membranes", *Korean Membr. J.*, **4(1)**, 12 (2002).
9. J. Mo, J. E. Hwang, J. Jegal, and J. Kim, "Pretreatment of a dyeing wastewater using chemical coagulants", *Dyes and Pigments*, **72**, 240 (2007).
10. 김노원, "역삼투 분리막 표면특성의 내오염성 상관관계 연구", *멤브레인*, **12**, 28 (2002).
11. 김영길, 김노원, 이용택, "역삼투분리막 표면개질을 통한 내염소성 향상에 관한 연구", *멤브레인*, **15**, 320 (2005).
12. 김노원, "내오염성 나노여과막의 제조 및 특성", *멤브레인*, **17(1)**, 44 (2007).