

## 연속식 전기탈이온 장치의 원리와 기술 동향

송 정 훈 · 문 승 현<sup>†</sup>

광주과학기술원 환경공학과  
(2006년 7월 20일 접수, 2006년 8월 22일 채택)

### Principles and Current Technologies of Continuous Electrodeionization

Jung-Hoon Song and Seung-Hyeon Moon<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Gwangju Institute of science & Technology (GIST),

1 Oryong-dong, Buk-gu, Gwangju, 500-712, Republic of Korea

(Received July 20, 2006, Accepted August 22, 2006)

**요 약:** 전기탈이온 시스템은 전기투석과 이온교환수지법의 혼합 공정으로서 외부전기장 하에서의 이온교환매개체를 통해 이온이 제거되어 고순수를 제조할 수 있도록 고안된 장치이다. 전기탈이온 장치는 이온의 제거 메커니즘과 이온교환매개체의 전기적 재생 메커니즘으로 설명되며 이를 이용하여 회석조의 성능을 최적화 하는 것이 시스템의 효과적인 사용을 위해서 필요하다. 또한 전기탈이온 장치의 다양한 분야에서의 적용을 위해서는 스택구성을 다양하게 변경하여 적용가능성을 판단하는 것이 필요하다. 이를 효과적으로 달성하기 위해서는 기존에 제시되었던 다양한 시스템 특성분석법과 이동현상 관련 수식들을 이해하여 전기탈이온 스택구성에 적용하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 총설에서는 전기탈이온 장치의 최적화를 위해 필요한 기초 이론들과 방법들에 대해서 살펴보고 현재의 연구동향에 대해서 고찰하여 분리공정으로서의 이해를 높이고자 하였다.

**Abstract:** Continuous Electrodeionization (CEDI) is a hybrid separation process of electrodialysis and ion exchange to produce high purity water under electric field. CEDI system is generally explained with two regimes, ionic removal and electroregeneration. The performance optimization and modification of stack configuration is required for the effective utilization and various applications of a CEDI system. Understanding on various system characterization method and ion transport equation is thus necessary to utilize the CEDI system more effectively. This article provides a general review of continuous electrodeionization, including the basic principles and current stage of technologies of a CEDI system.

**Keywords:** continuous electrodeionization, ultrapure water, CEDI, deionization

#### 1. 서 론

최근 반도체, 식품, 의료, 에너지 사업 등의 발달로 인해 초순수의 요구량이 매년 급격히 증가하고 있으며 이에 대한 연구가 다양한 부분에서 이루어지고 있다. 현재 초순수를 제조할 수 있는 방법으로는 증류법과 이온교환수지법이 있으며, 이중 이온교환수지법은 작업이 간단하고 높은 수질의 물을 생산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 이온교환수지법은 강산과 강염기를 통해 화학적 재생이 필요로 되고 폐이온교환수지가 발

생되어 이차 환경오염이라는 단점을 가지고 있어 초순수 제조를 위해서 보다 환경친화적인 대체공정의 보급이 매우 절실하게 되었다[1].

전기탈이온법은 기존의 이온교환수지법의 대체공정으로서 초순수의 제조나 저농도의 유입수내의 이온성 물질의 제거를 위한 공정으로서 각광을 받고 있는 신공정기술이다. 전기탈이온 시스템은 전기투석법의 회석실에 이온교환수지와 같이 이온전도성 물질을 충전함으로써 유입수의 농도가 매우 저농도에서 일어나는 전기투석 내에서의 저항의 증가 및 전류효율의 급격한 감소 등을 원리적으로 보완할 수 있다. 전기탈이온법은 미

<sup>†</sup>주저자(e-mail : shmoon@gist.ac.kr)

국 Argonne 국립연구소의 Walters 등에 의해서 1955년에 최초로 제시되었으며 이후 1980년대까지의 Matejka 와 Korngold, Kedem 등에 의해서 전기탈이온 장치에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 저농도의 이온성 물질의 제거를 통한 초순수 제조에 효과성이 입증되었다 [2-6]. 뿐만 아니라 최근 이온교환막의 가격 하락과 친환경적인 분리공정의 필요성이 대두됨에 따라 전기탈이온 시스템 연구에 대한 관심이 고조되고 있으며 비용 면에서도 타당성이 입증되고 있다[7]. 현재 전기탈이온 공정은 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서 이온교환수지 공정의 대체공정으로 실 플랜트 공정에 적용되어 사용되어 효과성이 입증되어 있으나 국내의 경우 전기탈이온 장치의 도입이 거의 이루어져 있지 않고 기초적인 연구만이 수행되고 있는 상태다.

이에 본 연구에서는 현재 청정기술의 하나로써 각광을 받고 있는 전기탈이온 장치에서의 원리 및 기초 이론들을 기존의 실험결과를 정리하고 국내외의 연구동향을 고찰하여 차세대 청정분리기술의 하나인 전기탈이온 장치에 대한 이해를 높이고자 한다.

## 2. 전기탈이온 장치의 이동현상

전기탈이온 장치는 이온의 이동이 고분자전해질을 통해서 양극과 음극으로 이동하는 원리를 이용한다. 이때 사용되는 고분자전해질을 “이온교환매개체(Ion conducting media)”라고 하며 이온교환수지가 가장 널리 사용되고 있다. 전기탈이온 장치의 기본원리가 Fig. 1에 제시되어 있다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 전기탈이온 장치는 크게 회석조(D)와 농축조(C) 및 전극조(E)의 세 부분으로 나뉘어져 있다. 양단에 전극이 배열되어있으며 전극사이에는 양이온 교환막과 음이온 교환막이 병렬로 나열되어 있다. 유입수는 회석조(D)로 유입되게 되고 양단에 전기적인 포텐셜이 가해지게 되면 양이온은 양이온 교환막을 통해서 Cathode(-)극쪽으로 이동하며 음이온은 음이온 교환막을 통해서 Anode(+ )극쪽으로 이동하게 된다. 이때, 회석조에 충전된 이온교환매개체는 용액중의 이온을 용액으로부터 이온교환매개체로 흡착시켜 이동시키는 역할을 하게 된다[8]. 전기탈이온 장치의 양끝단에 존재하는 전극조에서는 산화 및 환원 반응이 일어나기 때문에 부반응 없이 물분해 반응만이 일어나도록 하는 황산나트륨 용액이 전극액으로 가장 널리 사용된다. Cathode와 Anode에서의 전극반응은

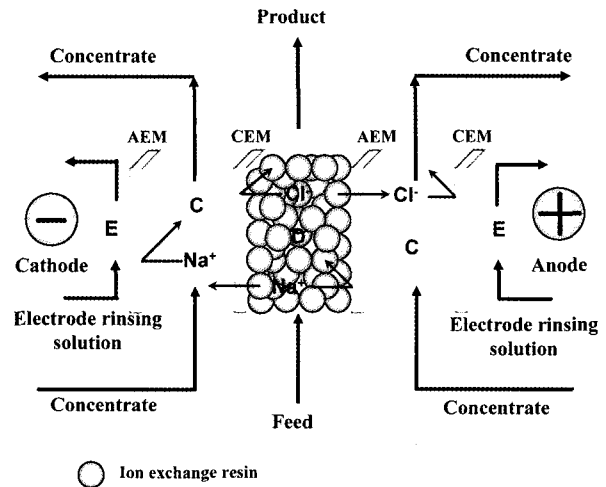
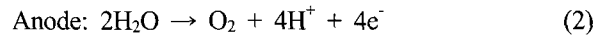
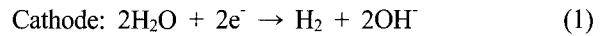


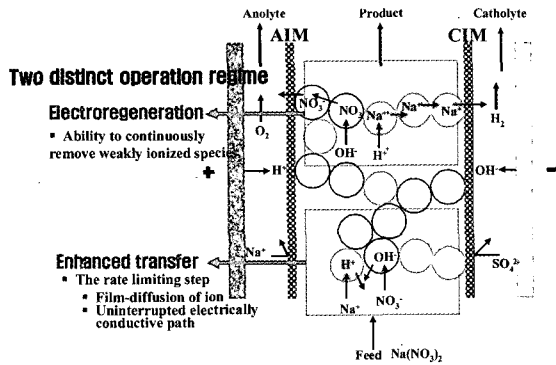
Fig. 1. 전기탈이온 장치의 기본 원리(AEM: 음이온 교환막, CEM: 양이온 교환막, D: 회석조, C: 농축조, E: 전극조, Na<sup>+</sup> 및 Cl<sup>-</sup>: 대표 전해질)[15].

각각 식 (1)과 (2)와 같다.



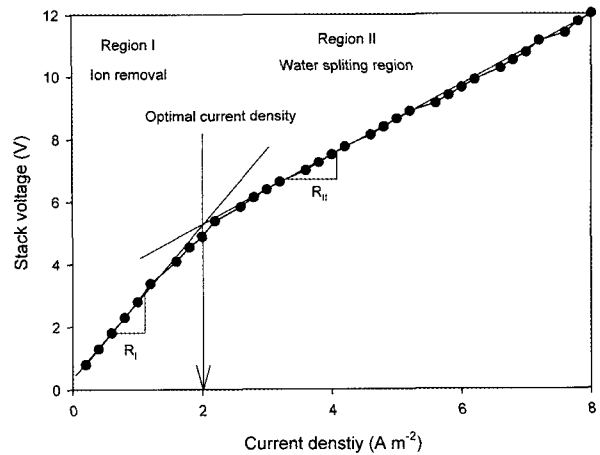
식 (1) 및 (2)에 제시된 바와 같이 전극조의 Cathode (-)극에는 수산화 이온(OH<sup>-</sup>)이 생성되기 때문에 Cathodic compartment의 pH는 염기성 조건이 되며 Anode (+)극에는 수소이온(H<sup>+</sup>)이 생성되기 때문에 Anodic compartment는 산성조건을 띄게 된다. 이러한 이유로 전극조에 사용되는 전극은 혹독한 조건에서도 견딜 수 있는 적절한 전극선택이 필요하게 된다. 음극으로 사용되는 전극은 환원조건이 되기 때문에 일반적인 금속인 스테인레스 스틸이나 니켈 등의 금속 전극을 사용할 수 있으며 양극의 경우에는 산에 의한 부식문제가 있기 때문에 이를 막기 위한 방법으로 백금이나 이리듐과 같은 귀금속 코팅 전극이 사용된다.

Fig. 2는 현재까지 알려진 전기탈이온 장치에서의 이온의 제거와 물분해 현상의 주된 메커니즘을 설명해 주고 있다. 전기탈이온 장치에서의 이온의 제거와 물분해 현상은 주로 Two Distinct Operation Regime에 기초하여 설명된다. Two Distinct Operation Regime은 전기탈이온 장치의 윗부분과 아랫부분에 존재하는 영역을 지칭하는 것으로서 윗부분을 전기적 재생영역(Electroregeneration regime), 아랫부분을 이온의 이동영역(En-



**Fig. 2.** 전기탈이온 장치에서의 two distinct regime (AIM: 음이온 교환막, CIM: 양이온교환막, Anolyte 및 catholyte: 전극액, Na<sup>+</sup> 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 대표 전해질, H<sup>+</sup> 및 Cl<sup>-</sup>: 재생 전해질) [15].

hanced transfer regime)으로 표시한다. 저농도의 이온을 포함하는 유입수가 전기탈이온 장치에 유입되면 이온의 이동영역에서는 이온의 이온교환매개체로의 흡착현상이 필름 확산에 의해 일어나게 되며 흡착된 이온은 전기장하에서의 양쪽 전극쪽으로 이온교환매개체를 통하여 이동 한다[9-11]. 이때, 이온 제거는 이온교환수지를 통해서 생성되는 통과영역이 얼마나 잘 형성되어 있는가 (Actively Conducting Pathway)에 의해 크게 결정되므로 이를 잘 형성시킬 수 있는 이온교환매개체의 형성이나 충전 방법이 중요한 인자로 작용하게 된다. 반면, 윗부분은 아랫부분에서의 이온의 제거로 인해서 용액내의 이온 농도가 급격히 감소하기 때문에 시스템내의 저항이 증가하게 되고 일정 전류하에서 높은 전압강하를 일으키게 되어 물분해 현상이 일어난다. 물분해가 일어나는 영역은 1) 이온교환매개체의 표면과 용액 사이 2) 반대되는 이온교환 매개체사이의 두 가지 영역으로 나눌 수 있으며 특히 후자의 경우 반대되는 전하에 의해서 큰 전기장이 형성되기 때문에 전자에 비해 더 쉽게 물분해가 일어나게 된다. 전기적 재생영역에서 일어나는 물분해로 인해 수소 및 수산화 이온이 생성되고 생성된 이온들은 이온교환매개체를 자동으로 재생시킨다. 전기탈이온 시스템에서의 물분해 현상은 제거율과 매우 밀접한 관련이 있는데 과도한 물분해는 전류효율의 급격한 감소를 일으켜 전력소모량을 급격하게 증가시키며 부족한 물분해 현상은 높은 전류효율을 가져오지만 이온제거율의 감소를 유발하게 된다. 따라서 적절한 물분해 현상이 에너지 비용과 제거율의 측면에서 매우 중요한 인자가 되며 일반적인 전기탈이온 스택의 전류



**Fig. 3.** 전기탈이온 장치에서의 전류-전압 곡선[16].

효율은 약 30% 미만으로 알려져 있다[12]. 이밖에도 전기탈이온 장치에서의 물분해 현상은 탄산이나 붕산, 실리카산과 같은 약이온종의 제거현상과 매우 밀접한 관련을 가진다. 음이온 교환수지 표면이 수산화 이온으로 재생될때 표면에서의 pH가 높아지는 현상으로 인해 약이온종이 이온화되며 수산화 이온의 높은 전도도로 인해서 높은 전류가 흐르게 되어 이온화된 약 이온종이 제거되게 된다[13,14].

전기탈이온 시스템에서의 적절한 물분해 현상은 전기탈이온 장치에서의 전기적 재생영역이 최소화 되었을 때 얻어질 수 있다[15]. 전기탈이온 장치에서의 전기적 재생영역을 최소화하기 위한 방법으로는 전류-전압 곡선을 통한 연구를 이용하거나 임피던스와 같은 전기화학적 분석방법을 이용할 수 있다[16]. Fig. 3은 전기탈이온 장치 내에서의 전류-전압곡선의 적용 예를 나타낸다. 전기탈이온 장치에서의 전류-전압 곡선을 측정하였을 때 전류-전압 곡선은 바이폴라막에서의 전류-전압 곡선과 매우 유사하며 Region I에 해당하는 영역은 이온의 이동영역이 주된 메커니즘으로 해석되며 Region II에 해당하는 영역은 물분해 영역이 주된 메커니즘으로 해석된다. 따라서 두지점이 만나는 지점에서 최적의 물분해 현상이 나타나며 전기적 재생영역이 최소화 된다. 전기적 재생영역의 최소화는 임피던스 스펙트로스코피를 통해서도 확인될 수 있다.

전기탈이온 장치에서의 이온 제거 및 수지 재생 메커니즘은 Two Distinct Operation Regime을 이용하여 매우 효과적으로 설명된다. 그러나 전기탈이온 장치에 실용적으로 적용이 가능한 모델식은 시스템내의 복잡성으

**Table 1.** 전기탈이온 장치를 제조하는 회사 및 상표이름[15]

Company	Product	Flow ranges
Christ Ltd	SEPTRON	1 gpm and greater
Electropure Inc.	Electropure	5 gpm or greater
Elga Ltd.	Elet (labs) Excell (process apps)	0.1~10 gpm
Glegg Water Conditioning	E-Cell	12.5~600 gpm
General Electric (G.E)	GE EDI system	30 gpm or more. Most installed are in 50~700 gpm
Millipore Inc.	Elix	0.02 to 0.05 gpm
U.S Filter Corp.	CDITM	0.5~768 gpm
OMEXELL	OMEXELL 210	10~450 gpm
HAJI	HJM	5~30 gpm

Several modules can be put together to increase flows. Manufacturers can meet a particular flow need by combining modules with varying capacities

1 gpm = 1 gallon per minute (= 220 L/hr)

로 인해 거의 개발되어 있지 않다[8,12]. 전기탈이온 장치에서의 모델식을 개발하기 위해서는 이온교환매개체와 용액, 이온교환매개체 사이의 특성을 파악해야 하며 용액에서의 평형 및 이동현상을 이해해야 한다. 따라서 위의 지식들을 하나로 통합하여 일어나는 현상을 수식화 하는 것은 상당히 어려우며 기초적인 수식만이 몇몇의 연구자들에 의해서 제시되었다. Rosenberg와 Tirrell은 정상상태 모델을 전기탈이온 장치에서 개발하였으나 이온교환매개체를 통한 이온의 이동속도와 확산계수를 측정해야 하기 때문에 다성분이 존재하는 전기탈이온 장치에 적용하는데 한계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다[17]. Spoor 등에 의해서 개발된 모델은 전기탈이온 장치의 개념적인 부분과 모델의 측면에서 많은 발전을 가져오게 되었다[18-21]. Spoor 등은 전기탈이온 장치를 black box로 가정하여 단순화한 모델을 이용하여 전기탈이온 장치에 효과적으로 적용이 가능한 모델을 개발하였다. 이를 통해 이온교환수지내에서의 니켈 이온의 이동을 거시적으로 밝혔으며 시스템에 대한 효과적인 이해를 제시해주었다. 그러나 제시된 모델은 낮은 농도의 유입수에만 적용될 수 있다는 한계를 가지고 있다. 이러한 부분을 극복하기 위해서 최근의 모델은 기존의 연속반응기(CSTR)에서의 이론을 적용하여 전기탈이온 장치를 모델링 하는 연구가 수행되었으며 Monzie 등에 의해서 개발되었다[22]. 그러나 물질 전달계수 및 각각의 실험인자를 개별적으로 구해서 얻어진 결과이기 때문에 다성분이 존재하는 일반적인 시

스템의 적용은 매우 어렵다. 따라서 향후 일반적으로 적용이 가능한 전기탈이온 모델은 전기투석과 이온교환수지법을 설명하는 모델들을 상호 보완하여 개발될 것으로 판단된다.

### 3. 전기탈이온 공정연구

전기탈이온 공정은 1987년 Millipore Co.에 의해서 최초로 상용화되었다. 이후 전기탈이온 공정은 General Electric (구 Ionics), U.S. Filter, Electropure 등에 의해서도 개발되었으며 Table 1은 현재 전기탈이온 장치를 생산하고 있는 회사와 품명 및 처리 유량범위를 나타내 주고 있다. Table 1에서 보여지는 바와 같이 현재의 전기탈이온 기술은 분당 2,000 gpm까지의 초순수 제조가 가능하다. 따라서 대량의 초순수를 요구하는 화력발전소의 보충수나 반도체공정의 세정수로서 직접적인 사용이 가능한 단계에 접근하고 있다. 일반적으로 상용 전기탈이온 장치의 구조는 일반적인 막분리 공정과 같이 두 가지 형태인 Plate-frame 형태와 Spiral wound 형태로 나뉜다. Plate-frame 형태의 경우 양 끝단에 전극이 배치되어 있다. Fig. 1에 설명된 바와 같이 이온교환막이 전극사이에 직사각형으로 충전되어 있으며 Spiral wound 형태의 경우 전극이 원통의 중앙부분(Anode)과 바깥부분(Cathode)에 나열되어 있어 Fig. 4와 같은 형태를 지니고 있다.

전기탈이온 장치는 일반적으로 초순수 제조를 위해

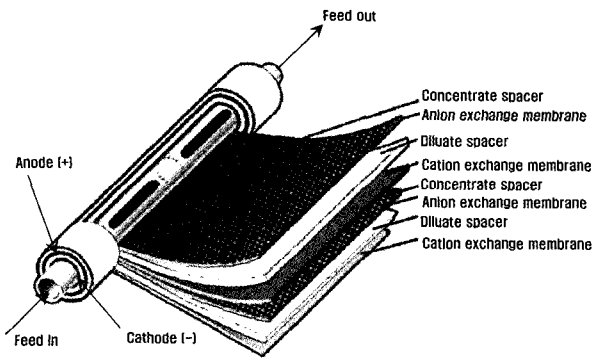


Fig. 4. 원통형 전기탈이온 장치의 구조도[51].

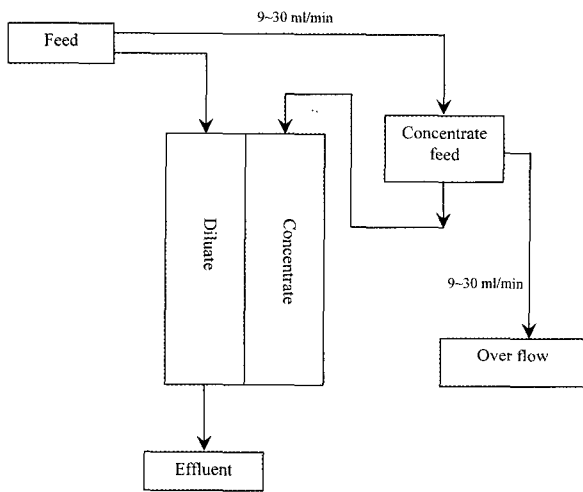


Fig. 5. 초순수제조를 위한 일반적인 전기탈이온 장치의 공정도[26].

서 사용되고 있다. 현재까지의 연구 결과는 상용 전기탈이온 장치를 이용하여 15 MΩ cm 이상의 초순수를 제조할 수 있는 것으로 알려져 있다[23]. 초순수 제조 공정을 위한 전기탈이온 장치의 공정도의 한 예를 Fig. 5에 나타내었다. 역삼투공정(RO)로 처리된 용액(Feed)은 농축조와 희석조에 동시에 유입되게 되며 이때 농축조의 유출수는 RO의 유입수보다 높은 수질을 보유하기 때문에 RO 시스템으로 재처리되어 전기탈이온 장치의 유입수로서 다시 사용된다. 초순수 제조를 위한 전기탈이온 장치에서의 운전조건은 농축인자(Concentrate factor)를 통해 결정되며 식 (3)과 같이 정의 된다.

$$CF=100/(100-R) \tag{3}$$

이때 R은 회수율이며 전체 시스템에 유입되는 유입

량에 대한 희석조에서의 유출량의 비율로 정의된다. 전기탈이온 장치가 초순수 제조를 위해서 사용될 경우 CF는 일반적으로 100에서 300 사이에서 결정된다[12].

#### 4. 전기탈이온 성능향상 연구

전기탈이온 장치에서의 성능향상을 위한 연구는 크게 세 가지 부분에 나뉘어서 수행된다. 1) 이온교환물질 을 통해서 성능을 향상시키는 방법 2) 시스템의 구조를 변경하여 성능을 향상시키는 방법 3) 스케일의 제거를 통해 성능을 향상시키는 방법이 있다.

##### 4.1. 이온교환물질의 성능향상

전기탈이온 장치에서의 이온교환물질은 이온교환막과 이온교환수지의 크게 두 부분으로 나뉜다. 이온교환막은 전기탈이온 장치에서 이온의 이동을 선택적으로 이루도록 해주며 농축조에서 희석조로의 역확산에 의한 coion의 투과를 막을 수 있도록 제작되어야 한다. 만약 농축조에서 희석조로 이온의 이동이 이루어지게 되면 희석조의 수질이 급격히 저하된다. 전기탈이온 장치의 수질 악화의 일반적인 원인은 농축조에서 희석조로의 이온의 이동에 기인하며 이는 이온교환막의 permselectivity의 저하나 이온교환막 자체의 결함(defect)에 의한 용액의 투과에 기인한다. 이 중 이온교환막의 permselectivity 저하에 의한 영향은 저농도의 유입수 처리시(ex. 초순수 제조공정) 무시될 수 있기 때문에 물리적인 결함이 장치의 성능저하의 직접적인 요인으로 알려져 있다[10]. 따라서 전기탈이온 장치에 사용되는 이온교환막은 물에 대한 투과계수가 낮아야 한다.

전기탈이온 장치에 사용되는 이온교환수지의 균질한 크기 분포도 전기탈이온 장치의 성능에 매우 큰 영향을 끼칠 수 있다. 일반적으로 전기탈이온 장치에 사용되는 이온교환매개체는 균질한 크기 분포를 가져야 하는데 균질한 이온교환수지가 균질하지 않은 크기의 이온교환수지에 비해 더 높은 이온전도영역(Actively Conducting Pathway)을 형성시켜 이온의 제거에 효과적이기 때문이다[10]. 뿐만 아니라 전기탈이온 장치에 사용되는 이온교환수지는 높은 기계적 강도와 화학적 안정성을 가지며 이온의 이동을 촉진시켜야 한다. 이를 달성하기 위해서 적절한 가교도의 이온교환수지가 사용된다[10, 24]. 이온교환수지는 강산성이나 강염기성으로 선택되어야 한다. 약이온 교환수지가 사용될 경우 이온교환

롭이 완전 해리가 일어나지 않아 전류의 흐름이 어렵게 되어 유출수의 수질을 저하시키게 때문이다[3]. 이외에도 이온교환수지를 전기탈이온 장치에 충전할 때는 양이온 교환수지와 음이온 교환수지를 당량비로 혼합해야 exchange zone layer가 분산되지 않아 높은 제거율을 얻을 수 있다[3].

4.2. 시스템의 성능 향상

시스템의 성능향상은 근본적으로 시스템내의 농축조나 희석조의 전도도를 높여주는 방안이 강구되어진다.

전기탈이온 장치에서의 희석조의 전기전도도 증가를 위해서는 직접적으로 높은 전도성의 이온교환매개체를 희석조에 충전한다. 그러나 현재 일반적으로 사용되는 이온교환수지는 높은 이온교환용량으로 자체 전도도가 매우 뛰어나지만 충전이 어려우며 수리학적으로 높은 저항을 보이기 때문에 이온교환매개체를 monolith형으로 제조하여 Actively Conducting Pathway를 증가시키거나 충전의 어려움 및 수리학적 저항 등을 효과적으로 극복하는 방안이 연구되고 있다[1,25]. 전기탈이온 장치에서의 전도를 증가시키기 위한 또 다른 방법은 희석조의 두께를 얇게 설계하는 것으로 높은 제거율을 얻을 수 있다. 그러나 희석조의 두께가 과도하게 얇아질 경우 처리유량의 한계 및 전류효율의 감소가 나타나기 때문에 높은 전류효율을 가지며 재생영역을 최소화 할 수 있는 두께로 설계되어야 한다[8]. 전기탈이온 장치를 이용하여 초순수를 제조하기 위해서는 희석조의 두께가 얇아야 하며 고농도의 금속이온의 제거를 위해서는 희석조의 두께가 두꺼워야 한다[15]. 전기탈이온 장치의 높이 또한 시스템에서 이온의 제거율에 영향을 미치는 중요 인자로 알려져 있다. 희석조의 높이가 높을수록 Ion exchange zone의 분산을 최소화 되어 높은 제거율을 가지지만 펌프압의 증가로 인한 소비전력이 증가하기 때문에 이를 고려한 스택 높이 구성이 필요하다[15].

농축조에서의 전도도의 증가는 전력소모량의 감소를 위해 반드시 필요하며 장치 운전시 발생하는 문제점을 극복하기 위해서도 매우 중요하다. 예를 들어 탄산과 같은 약이온 종이 유입수에 다량으로 함유되어 있을 때는 희석조의 음이온 교환매개체 표면에서 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>으로 변형되어 농축조로 이동하여 제거되지만 농축조에서 다시 CO<sub>2</sub> 기체로 바뀌어 농축조의 저항이 급격히 증가하게 된다. 따라서 농축조의 저항의 감소는 운전 중에 매우 큰 영향을 주게 되며 이를 극복하기 위한 방법으

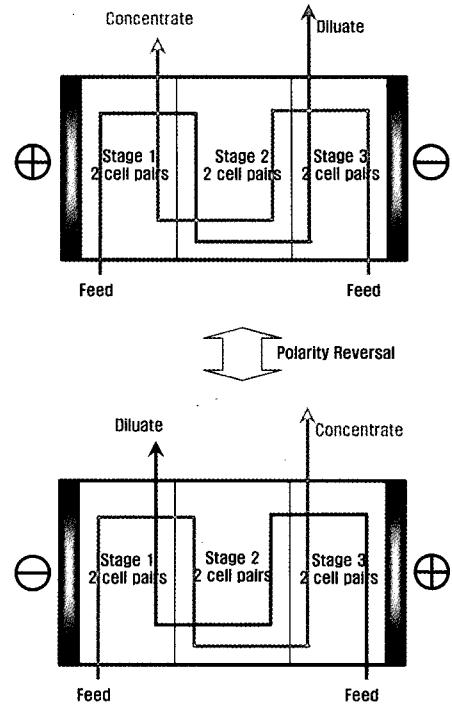


Fig. 6. 역전위 전기탈이온 장치의 구조도[29].

로 3가지의 방법이 가장 널리 사용된다[9,10,26]. 우선적으로 NaCl과 같은 전해질 물질을 농축조에 직접 투입하여 농축조에서의 저항을 감소시키는 방안이다. 그러나 이 경우 역확산의 문제 및 실제적으로 공정이 복잡해지는 단점을 가지고 있어서 실질적인 적용이 불가능하다. 두 번째 방법으로는 전기탈이온 장치에서의 희석율을 높게 설정하여 상대적으로 농축조의 농도를 높이는 역할을 하는 것으로 feed-and-bleed 구성을 이루는 것이다. 세 번째의 경우에는 실제적으로 가장 널리 사용되는 방법으로 이온교환수지 자체를 농축조에 충전하여 운전하는 것이다. 이온교환수지를 농축조에 충전함으로써 전기저항을 줄이게 되며 농도분극현상을 막게 되어 효과적으로 초순수를 제조할 수 있게 된다.

4.3. 스케일 형성 억제

전기탈이온 장치의 유입수에 스케일을 일으킬 수 있는 물질인 칼슘이나 마그네슘이 존재하게 되며 이온교환막 표면에서의 스케일의 위험이 있다[27]. 스케일형성은 마그네슘이나 칼슘의 농도를 줄이거나 산 처리를 통해서 감소시킬 수 있다. 또 다른 방법으로는 전기탈이온 장치에 반대되는 전압을 걸어 스케일을 제어할 수 있는 방법이 있다[28]. Fig. 6은 역전위 전기탈이온 장

치의 구조도를 보여주고 있다[29]. 전극이 역전되기 전에는 유입수는 stage 1로 유입되어 유출되지만 역전 전 위하에서는 유입수가 stage 3으로 유입되어 유출되게 된다. 결국 전위의 역전과 동시에 희석조와 농축조가 뒤바뀌게 되어 희석조에 끼어있던 스케일링 물질이 다시 빠져나오게 됨으로서 전기탈이온 장치에서의 스케일 형성을 억제할 수 있다[30,31]. 본 방법을 통해서 전기탈이온 장치의 경우 약 150 ppm 농도의 스케일 물질에까지 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.

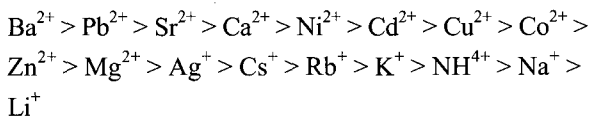
### 5. 전기탈이온 시스템의 이해를 위한 이론적 연구 방법

본 절에는 전기탈이온 장치에서 적용이 가능한 중요 이론들을 방법론적으로 제시하였다.

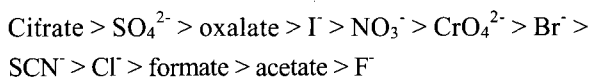
#### 5.1. 평형(equilibrium)

일반적으로 전기화학시스템에서의 이온교환매개체와 용액사이에서의 전기화학적 평형은 Donnan 평형을 이용하여 설명된다. 따라서 전기탈이온 장치에서의 평형 조건은 용액에서의 활동도와 삼투압 등의 조건, 외부 전기장의 조건 등에 영향을 받게 된다. 그러나 공정한 전이 진행됨에 따라 시스템의 평형 조건이 달라지게 되고 직접적으로 평형에 대한 해석을 하기 어렵게 된다. 따라서, 전기탈이온 장치의 평형의 문제는 외부 전기장이 없는 상태에서의 실험을 통한 선택도를 이용하여 주로 설명된다.

SO<sub>3</sub><sup>-</sup> group을 포함하고 있는 강산성 양이온 교환매개체에서의 일반적인 선택도는 다음과 같다[32].



4차 아민그룹을 포함하고 있는 음이온 교환매개체의 경우에는 다음과 같은 선택도의 순서를 가지고 있다.



따라서 이온교환매개체에서의 이온의 선택도는 수화된 이온 사이즈가 작고 높은 valence를 가지고 있을 때

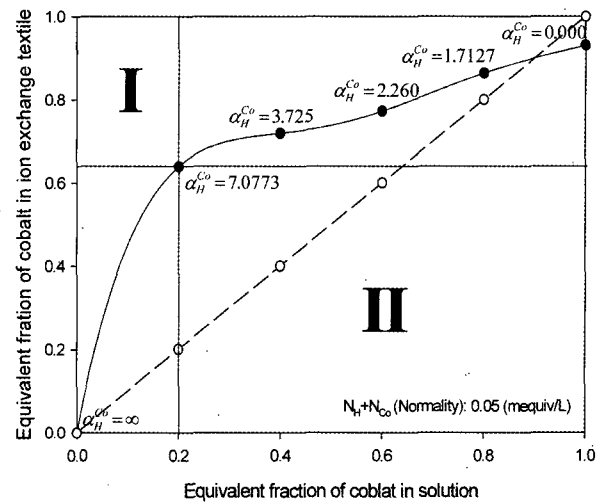


Fig. 7. 수소이온에 대한 코발트 이온의 분리계수( $\alpha$ 는 그래프상의 검은점에서의 영역 I의 면적에 대한 영역 II의 면적의 비를 나타냄)[33].

높으며 높은 분극도를 가지고 있으며 이온교환매개체의 구조체에 쉽게 친화도와 콤플렉스를 쉽게 형성할 수 있는 물질이 더 높은 선택도를 가지게 되어 쉽게 제거될 수 있다[32].

선택도를 정량적으로 나타내기 위해서 일반적으로 분리계수(Separation factor)라는 개념을 이용하여 표현하기도 한다. 전기탈이온 장치에서 일어나는 이온흡착 현상은 물분해로 일어나는 수소와 제거하고자 하는 이온들과의 경쟁 흡착에 기인하기 때문에 수소에 대한 선택도를 통해서 표현된다[32]. Fig. 7은 이온교환섬유에서 수소이온에 대한 코발트 이온의 분리계수를 나타내 준다. 분리계수는 Fig. 7에서 보여지는 영역 I에 대한 II의 비율로 표현된다. 예를 들어 전기탈이온 장치에서의 유입수의 코발트 분율이 0.2일 때 Fig. 7에 보여지는 바와 같이 수소이온에 비해 코발트이온의 선택도가 약 7배 더 크음을 알 수 있다[33]. 이외에도 평형에 관련된 시스템을 해석하기 위한 방법으로는 흡착식을 이용하거나 평형상수 등을 이용하여 pH에 따른 이온의 성분 등을 예측하는 방법들이 적용될 수 있다.

#### 5.2. 이동해석

전기탈이온 장치에서의 이온의 이동해석을 위해서는 전기 전도도를 이용한 Porous plug model 해석법이 가장 널리 사용된다. 이온교환매개체의 전기 전도도는 플로우셀(flow cell)을 이용하여 직류 및 교류 상태의 가

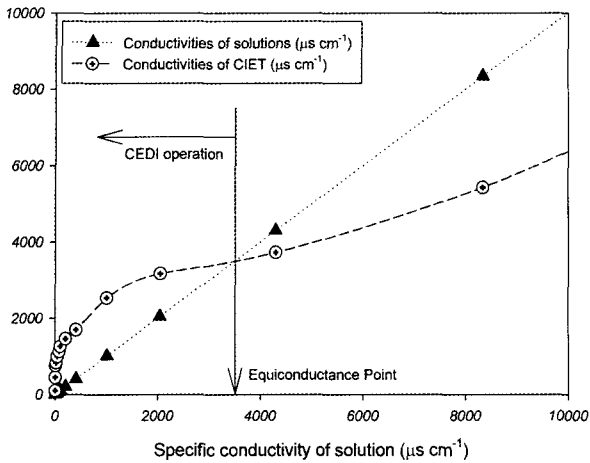


Fig. 8. 양이온 교환섬유에서의 니켈이온의 전도도[15].

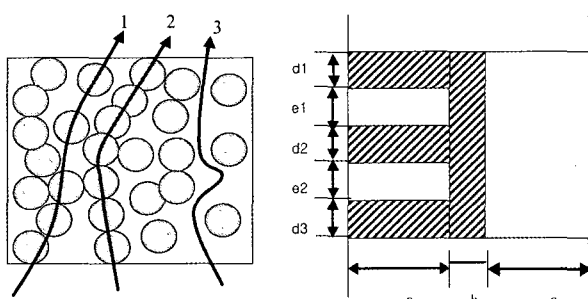


Fig. 9. Porous-plug 모델(왼쪽: 이온의 3 가지 다른 이동 경로; 오른쪽: 3가지 이동경로를 단순화한 모델, 1 및 a: 용액과 이온교환매개체를 번갈아가며 이동한 영역, 2 및 b: 이온교환매개체만을 통해서 이동한 영역, 3 및 c: 용액만을 통해서 이동한 영역).

해주는 신호에 의해 측정된다. 이온교환수지의 전도도를 측정하게 되면 Fig. 8과 같은 유입수의 농도에 따른 전기전도도의 관계를 얻을 수 있으며 이를 통해 전기탈이온 장치의 운전이 가능한 영역을 알 수 있다. Song 등은 전기전도도의 결과를 통해서 전기탈이온 공정이 적용되는 영역을 등전전도도 이하에서 이루어진다고 제시했다[16]. Fig. 8에서의 경우에는 약 3700 μs/cm 미만에서 전기탈이온 시스템의 운전이 가능하다. 전기전도도의 분석을 통해 이온교환매개체에서의 전기적 특성을 Porous plug model을 이용하여 분석할 수 있다. Fig 9에서 보여지는 바와 같이 Porous plug model은 전기장하에서 이온의 이동경로가 3가지의 방향으로 흐른다는 가정하에서 출발한 것으로 이를 구조적인 파라미터를 이용하여 이동경로를 예측하게 된다. 이를 통해 이온교환매개체의 구조적인 현상을 이해할 수 있고 적

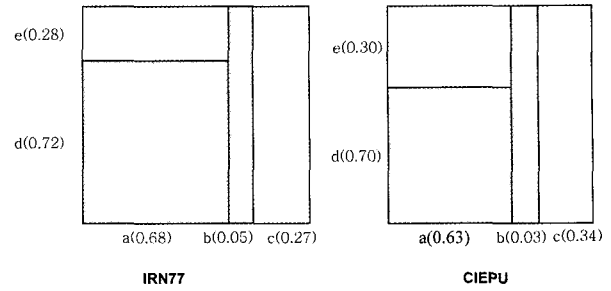
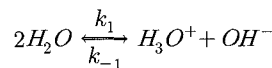


Fig. 10. Porous plug model을 적용한 강산성 양이온 교환수지(좌) 및 이온교환폴리우레탄(우)[35].

합한 이온교환매개체를 선정할 수 있다[34]. Porous plug model을 이용하여 전기전도도를 해석할 경우 Fig. 10과 같이 이온의 세 가지 이동경로를 기하학적으로 표현할 수 있다. 이온의 세 가지 이동 경로를 강산성 이온교환수지인 IRN 77 (Rhom and Hass Co., France)과 이온교환폴리우레탄에 대해서 Fig. 10에 나타내었다[35]. Fig. 10에 보여지는 바와 같이 IRN 77의 경우 용액과 이온교환매개체를 통해서 약 0.68만큼의 전류 분율이 이동하며 이온교환매개체만을 통해서 0.05, 용액만을 통해서 0.27만큼이 이동했음을 알 수 있다. 또한, 구조적으로 전기탈이온 시스템에서의 이온의 이동은 대부분 이온교환매개체의 연속적인 접촉으로 이루어지는 Actively Conducting Pathway를 통해서 이동하게 되는데, 이러한 경로는 Porous plug model에서의 b의 크기라고 생각될 수 있다. 따라서 b의 크기를 크게 할 수 있는 이온교환매개체가 전기탈이온 장치에서 매우 중요한 매개체이다. 현재 b의 영역을 증가시키기 위한 방법으로 모노리스형 이온교환매개체를 이온교환섬유나 폴리우레탄, 이온교환스펀지 등을 통해서 제조할 수 있다 [1,25,36,37].

5.3. 물분해 현상

전기탈이온 장치에서의 물 분해 연구를 위해서 기존의 이온교환막 공정에 적용되는 물분해 이론들을 적용할 수 있다. 일반적으로 전기탈이온 장치에서의 물분해는 이온교환막과 용액사이의 다음과 같은 반응 메커니즘에 의해서 한계전류밀도 이상에서 일어나게 된다.



물분해 현상은 일반적인 반응 속도 상수를 통해서



설명되어질 수 없기 때문에 여러 가지 이론들이 적용되어 설명되어지고 있다. 가장 널리 알려진 이론으로는 Second Wien Effect나 Chemical reaction model이다 [38-42].

Second Wien Effect는 바이폴라막에서 사용되어지는 이론중의 하나이다. 양이온 교환매개체와 음이온 교환매개체가 접촉하게 되면 접촉부분의 Transition layer는 강한 전기장 하에 놓이게 되며 이때 강한 전기장에 의해서 약 이온종으로 간주될 수 있는 물이 해리상수의 증가로 인해서 쉽게 해리될 수 있다는 이론이다. Second Wien Effect를 통해 일반적으로 물분해가 바이폴라막에서 더 쉽게 일어나는 이유가 설명될 수 있다[42]. 그러나 Second Wien Effect는 일반적으로 음이온교환막에서의 더 높은 물분해 현상을 설명할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 음이온 교환막에서의 더 높은 물분해 현상을 설명하기 위해 Chemical reaction model이 적용된다[40,42]. Chemical reaction model은 음이온 교환막의 표면에서의 3차 아민 그룹이 존재하게 될 경우 전기장 하에서 protonation과 deprotonation을 일으킴으로서 물분해를 더 가속화 시킨다는 이론이다. 전기탈이온 장치에서의 물분해 현상도 Second Wien Effect와 Chemical reaction model의 두 가지 이론을 모두 적용하여 해석될 수 있다.

## 6. 전기탈이온 기술개발을 위한 기술동향

일반적으로 전기탈이온 연구 방법을 크게 1) 이온교환매개체의 개발 2) 전기탈이온 스택 개발 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 이온교환매개체는 monolith 형으로 개발하는 것에 대부분의 연구가 진행되어 지고 있으며 공정기술의 경우 기업체를 중심으로 효율적인 제작 및 설치에 대한 연구가 이루어지고 있다.

### 6.1. 이온전도성 스페이서의 개발

1987년 Milipore에 의해 Ionpure CDI 라는 전기탈이온 장치가 처음으로 상업화된 이래 현재까지도 이온교환수지가 이온전도성 스페이서로 주로 사용되고 있다. 약 100년의 역사를 가지고 있는 이온교환수지는 현장 기술자들에게 경험이 풍부하고 화학적·기계적 물성이 매우 좋으며 높은 이온교환용량을 포함하고 있다. 이온교환수지의 장점에도 불구하고 전기탈이온 장치에 충전되어 있을 때 몇 가지 문제점이 유발된다. 이온교환

수지는 전기탈이온 공정에 충전되어 있을 때 매우 작은 구슬(bead) 모양으로 되어 있어 취급이 용이하지 않으며 운전 중 중력에 인한 쓸림 문제 및 마찰로 인한 운전중 분쇄 등에 의해 유속이 감소하는 문제 및 유효반응면적의 감소 등에 인한 문제점을 나타내게 된다. 따라서 현재의 이온전도성 스페이서의 연구는 스택 내에 충전이 쉽고 흘러내리지 않는 모노리스 형태의 매개체를 개발하는 것에 초점이 맞추어져 있다. 현재 까지 개발된 모노리스 형태 중 전기탈이온 장치에 효과적으로 적용될 수 있는 매개체로는 크게 3가지 방법이 제시되고 있다. 우선적으로 고분자 구조체에 이온교환수지를 고정화하는 방법을 이용한 이온교환폴리우레탄이다. 이온교환폴리우레탄은 전기탈이온 장치 장착시 높은 기계적 물성과 화학적 안정성, 높은 여과계수를 가지는 것으로 알려져 있다[37]. 그러나 이온교환폴리우레탄은 낮은 이온교환용량으로 인해서 실제적인 적용시 높은 전압강하가 일어나 기존의 이온교환수지에 비해서 전력소모량이 더 증가하게 되는 단점을 가지고 있다. 두 번째로 알려진 방법은 이온교환섬유의 기질에 광원을 조사하여 고분자 중합반응을 이용하여 이온교환스페이서를 제조하는 방법으로 UV, 플라즈마,  $\gamma$ -ray 그래프트 이온교환섬유 등이 있다[43-45]. 이중 UV 그래프트 이온교환섬유는 기존의 이온교환수지에 비해서 기계적 화학적 물성은 물론 반응속도론 및 열역학적 측면에서도 전기탈이온 장치에 사용시 매우 우수한 것으로 알려져 있다[33]. 세 번째로 최근 개발된 물질로서는 에멀전 중합을 이용하여 폴리머 매트릭스 사이에 기공을 형성시키는 이온교환스폰지이다[25]. 이온교환스폰지의 경우 이온교환수지에 비해서 낮은 밀도로 인해서 부피가 크지만 유입수가 저농도일수록 전기전도도의 향상이 일어나 이온 교환수지에 비해서 매우 효과적이다. 이외에도 이온교환매개체를 만들기 위한 방법으로 기존의 이온교환스페이서 표면에 이온교환기를 코팅하거나 분균질 분말 가루를 스페이서에 부착하는 방법 등이 사용될 수 있다[46,47]. Fig. 11은 Yeon 등에 의해서 개발된 UV-그래프트 이온교환섬유의 제조법을 간략하게 나타내었다[33]. 광개시제로 코팅된 이온교환섬유를 자외선 조사를 통해서 라디컬을 형성시키고 이온교환기를 열중합을 통해서 효과적으로 부착함으로써 고성능의 이온교환매개체를 제조할 수 있다. Table 2는 UV그래프트 이온교환섬유의 제조시 반응조건을 나타내고 있다.

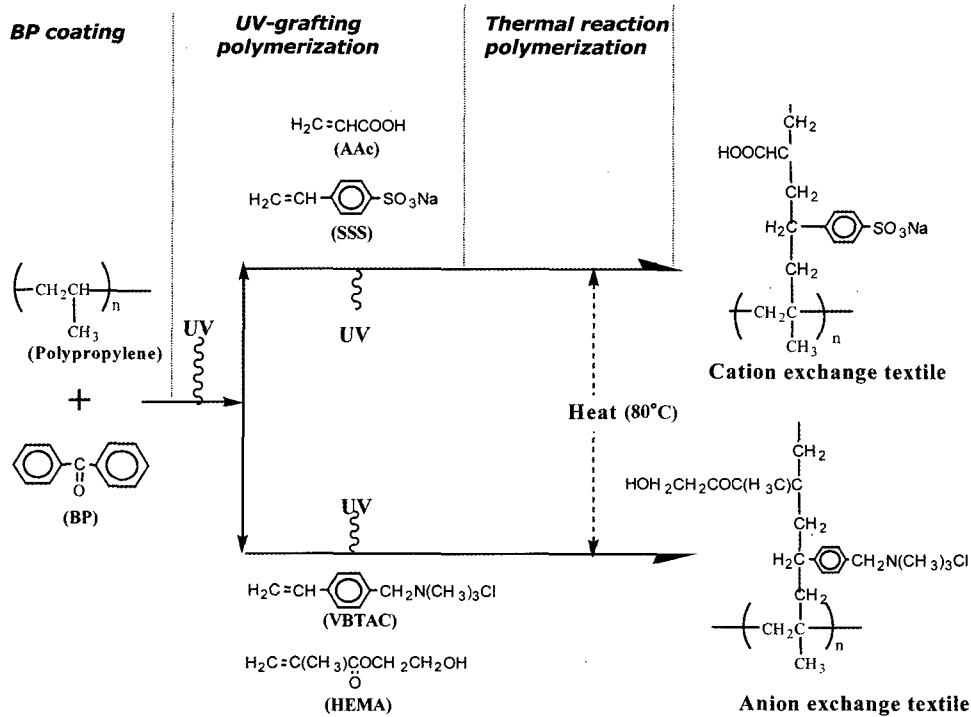


Fig. 11. UV를 이용한 이온교환섬유의 합성[33].

Table 2. UV 이온교환섬유 반응조건[33]

	CIET	AIET
Photo initiator	3 wt.% BP	5 wt.% BP
Monomer Concentration	10 wt.% AAc, 5~25 wt.% SSS	30 wt.% HEMA, 25 wt.% VBTMC
Solvent	Distilled water	Methanol/DMF (50:50 vol%)
Temperature (°C)	80	
Reaction time	4 hr	6hr

Abbreviations: BP = Benzophenone, AAc = Acrylic acid, SSS = Sodium styrenesulfonate, HEMA = 2-Hydroxyethyl methacrylate, VBTAC = vinylbenzyl trimethyl ammonium chloride, DMF = Dimethylformamide

6.2. 전기탈이온 시스템의 스택개발

1955년 Walter, Weiser, Marek에 의해 Argonne 국립 연구소에서 처음으로 방사선펙종을 분리하기 위해 전기탈이온 시스템에 대한 논문이 발표된 이래 다양한 스택 구성도가 제시되어 오고 있다[2]. 전기탈이온 스택개발은 크게 두 가지 목적으로 이루어지고 있다. 우선적으로 1) 전기탈이온 장치를 이용하여 제조되는 초순수의 수질을 더 높이기 위한 방법으로 개발되고 있으며 2) 금속이온과 같은 유해물질을 선택적으로 제거하여 전기탈이온 적용영역을 확대하기 위해서 이다. 일반적

인 개념의 전기탈이온 공정은 앞서 제시된 Fig. 1에서와 같이 양이온과 음이온을 혼합한 Mixed bed 형태의 이온교환수지를 충전한 시스템을 이용하고 있다. 그러나 Mixed bed 형태의 경우 전극에서 생성되는 수소와 수산화 이온을 효과적으로 이용할 수 없는 한계를 가지고 있기 때문에 Separation bed 전기탈이온 시스템이 개발되었다(Fig. 12). Separation bed 형태의 전기탈이온 장치는 양단에서 생성되는 수소와 수산화 이온이 이온교환수지를 효과적으로 재생하게 된다. 전기장하에 유입수가양이온교환수지와 음이온 교환수지를 순차적으로

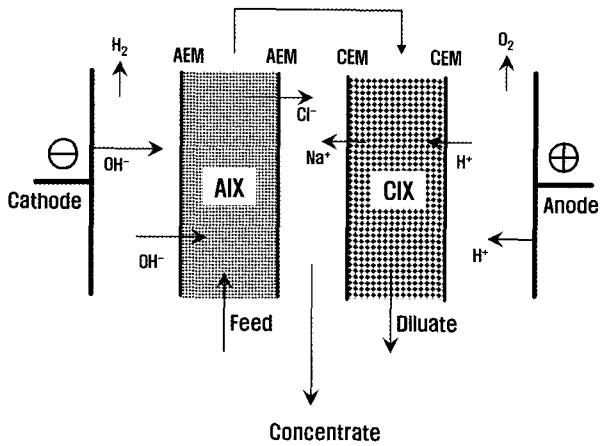


Fig. 12. 전기탈이온 시스템에서의 Separation bed 개념을 통한 시스템(AEM: 음이온 교환막, CEM: 양이온 교환막, AIX: 음이온 교환수지, CIX: 양이온 교환수지, Na<sup>+</sup> 및 Cl<sup>-</sup>: 대표 전해질[12].

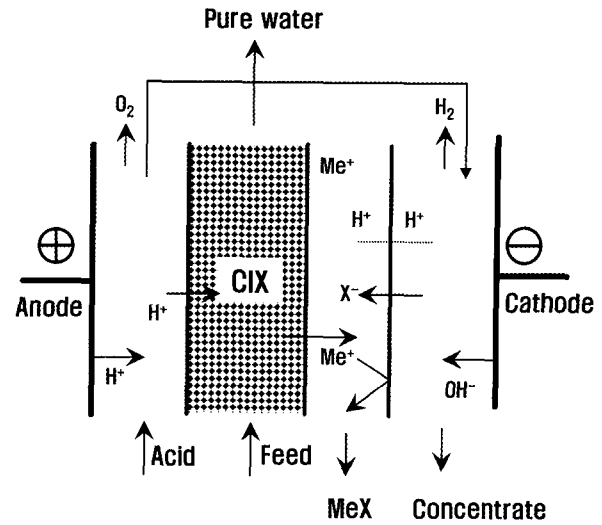


Fig. 14. 폐수로부터 중금속을 제거하기 위한 전기탈이온 공정[12].

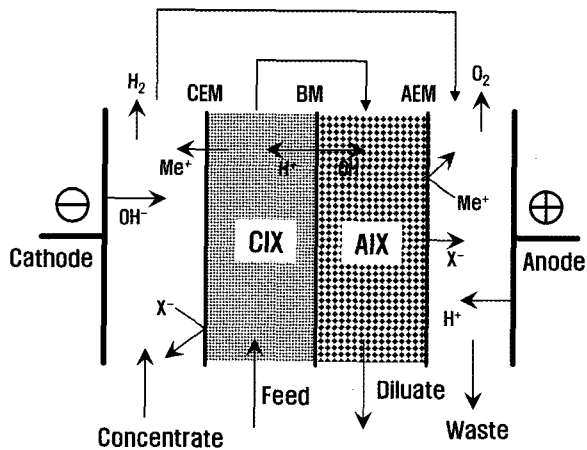


Fig. 13. Bipolar membrane을 이용하여 폐수로부터 중금속을 제거하기 위한 전기탈이온 공정(BM: 바이폴라막)[12].

통과하게 되어 양이온과 음이온을 순차적으로 제거하며 중앙부분에서 농축액이 형성된다[48]. 독일 Institut für Chemische Verfahrens technik의 Eignberger 교수팀은 도금폐수로부터 중금속 제거 및 회수를 위해 새로운 스택구성을 제시하였다. Fig. 13은 Bipolar membrane을 이용하여 중금속을 제거하는 전기탈이온 공정을 나타낸 것으로 Separation bed에서의 전기적 재생 역할을 바이폴라막에서 담당하도록 하였다. 바이폴라막에서 형성되는 수소와 수산화 이온이 이온교환수지를 전기적으로 재생하도록 하여 전기적 재생효과를 높이고 높은 전도도로 인하여 회석조의 저항증가를 감소시킨다. 이를 통해 중금속을 효과적으로 제거할 수 있게 된다. Fig.

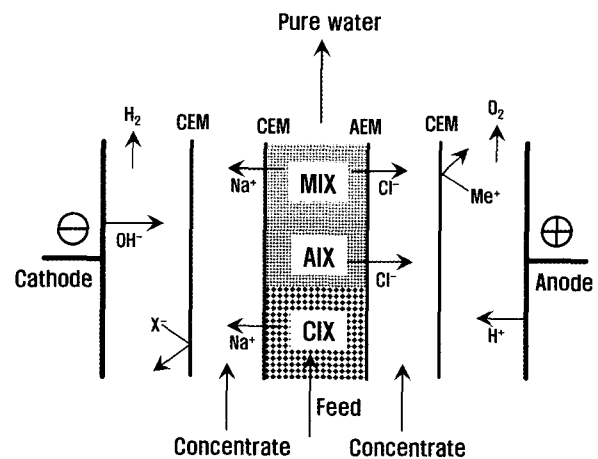


Fig. 15. 다층식 충전방법에 의한 전기탈이온 시스템 (Layered bed-CEDI system)[36].

14는 탈염용 이온교환막을 이용하여 중금속을 제거하는 전기탈이온 공정을 나타낸 것이다[49]. 중금속을 제거하기 위해서는 양이온 교환막과 양이온 교환수지만이 사용되며 농축액으로 유입되는 산용액의 확산현상과 전기이동현상을 이용하여 금속이온을 효과적으로 제거할 수 있도록 회석조를 구성하였다.

국내의 경우 광주과학기술원에서 원자로 일차냉각수 중의 중금속을 제거하기 위한 전기탈이온 스택개발이 이루어졌다(Fig. 15). 일차냉각수와 같이 금속이온들이 포함된 유입수의 경우 기존의 상업화된 전기탈이온 장치를 적용시 스택 내에서 물의 전리로 발생한 수산화이

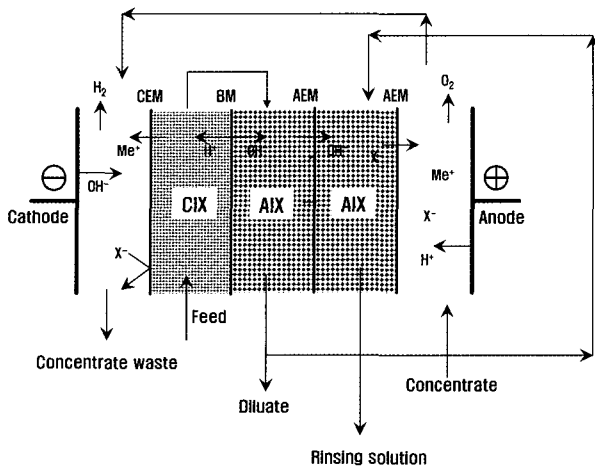


Fig. 16. Protection chamber를 이용한 전기탈이온 장치의 스택구성[50].

온과 금속이온들이 반응하여 수산화착물이 형성되기 때문에 그림에서 보여지는 바와 같이 다층식 충전방법 (Layered bed-CEDI system)에 의한 전기탈이온 시스템을 개발하여 하나의 스택 안에서 중금속을 제거할 수 있는 공정을 개발하였다[36]. 시스템 구성은 Fig. 15에서 보듯이 양이온교환수지(CIX): 음이온교환수지(AIX): 혼합이온교환수지(MIX)의 비율을 1:1:1로 충전되어 양이온교환수지에서 금속이온이 제거되고 음이온교환수지에서 음이온이 제거되며 윗층에서는 희석실의 pH를 조절하는 역할을 나타내게 된다[16].

최근에는 전기탈이온 공정을 이용해 이론 순수에 가까운 초순수를 제조할 수 있는 스택이 개발되었다. 스택 구성은 Fig. 16에서 보여지는 바와 같이 Protection compartment를 희석조 양단에 설치하여 농축조에서 희석조로의 역 확산을 원천적으로 차단하는 구성을 가지고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 유입수가 양이온 교환수지를 충전한 컴파트먼트에 유입되게 되고 양이온 교환수지를 충전한 셀을 통과한 유출수는 다시 옆단에 있는 음이온 교환수지가 충전된 컴파트먼트로 유입되게 된다. 이때 음이온 교환수지가 충전된 compartment 옆단에는 역확산을 근본적으로 차단할 수 있는 compartment가 하나 더 설치되게 되며 이로 인해서 유출되는 유출수는 이론 순수에 가깝게 된다. 이때 제조된 유출수의 일부를 Protection compartment에 일부 재순환 시키게 된다[50].

### 7. 결 론

본 총설을 통해서 기존의 전기탈이온 이론 및 현재의 기술동향을 전체적으로 살펴보았다. 전기탈이온 공정에 대한 연구는 효과적인 이온교환매개체의 개발 및 새로운 스택구조의 시스템을 개발하는 것이 주로 연구되어지고 있다. 다양한 부분에 적용이 가능하기 때문에 전기탈이온 공정기술에 대한 기초이해를 통해 수처리 공정에 효과적인 적용이 가능할 것으로 판단된다. 전기탈이온 장치는 환경 친화적인 공정으로 반도체 및 원자력 발전소에서 실 플랜트에 효과적으로 적용되고 있으며, 이외의 다양한 산업에서도 타당성을 입증 받고 있다. 전기탈이온 장치에 대한 수요 증가는 우선적으로 1) 이온교환수지와 비교했을 때 경제성을 입증받았다는 점과 2) 시스템 사이즈를 이온교환수지법에 비해서 반으로 줄일 수 있다는 점 3) 약이온종의 제거능력으로 인해서 기존 이온교환수지 공정에 비해 약이온종 제거 공정이 필요하지 않다는 점 4) 박테리아 등의 증식이 억제된다는 점 5) 산이나 염기와 같은 재생액이 필요하지 않다는 점 등의 다양한 장점에 기인한다. 향후 금속의 회수나 정제 등의 초순수 제조이외의 부분에도 다양하게 적용이 가능할 것으로 판단되며 대부분의 수처리 공정에 역삼투-전기탈이온 응용공정이 적용 가능할 것으로 판단된다.

### · 감 사

본 연구는 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-216-D00248)이며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. K. H. Yeon, "Preparation and characterization of ion-conducting spacers in continuous electrodeionization and their application in a nuclear power plant", Ph.D Dissertation, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), South Korea (2003).
2. W. R. Walters, D. W. Weiser, and L. J. Marek, "Concentration of Radioactive Aqueous Wastes", *Ind. and Eng. Chem.*, **47(1)**, 61 (1955).

3. Z. Matejka, "Continuous Production of High-Purity Water by Electro-deionization", *J. Appl. Chem. Biotechnol.*, **21**, 117 (1971).
4. E. Korngold, "Electrodialysis processes using ion exchange resins between membranes", *Desalination*, **16(2)**, 225 (1975).
5. O. Kedem, "Reduction of polarization in electro-dialysis by ion-conducting spacers", *Desalination*, **16**, 105 (1975).
6. O. Kedem, I. Rubinstein, and L. A. Segel, "Reduction of polarization in electro-dialysis by ion-conducting spacers: theoretical evaluation of a model system", *Desalination*, **27**, 143 (1978).
7. C. Edmonds and E. Salem, "An economic comparison between EDI and mixed-bed ion exchange", *Ultrapure water*, **November**, 43 (1998).
8. J. H. Song, K. H. Yeon, and S. H. Moon, "Transport characteristics of  $\text{Co}^{2+}$  through an ion exchange textile in a continuous electrodeionization (CEDI) system under electro-regeneration", *Sep. Sci. and Tech.*, **39(15)**, 3601 (2004).
9. G. C. Ganzi, "Electrodeionization for high purity water production", *AIChE Symp. Series*, **84(261)**, 73 (1988).
10. G. C. Ganzi, J. H. Wood, and C. S. Griffin, "Water purification and recycling using the CDI process", *Environmental progress*, **11(1)**, 49 (1992).
11. G. C. Ganzi, A. C. Jha, and J. H. Wood, "Theory and practice of continuous electrodeionization", *Ultrapure water*, **14(6)**, 64 (1997).
12. H. Strathmann, "Ion-exchange membrane separation processes", pp. 211-215 and pp. 279-282, Elsevier, Amsterdam (2004).
13. K. H. Yeon, J. H. Seong, S. Rengaraj, and S. H. Moon, "Electrochemical characterization of ion-exchange resin beads and removal of cobalt by electrodeionization for high purity water production", *Sep. Sci. and Tech.*, **38(2)**, 443 (2003).
14. D. Darbouret and I. Kano, "Ultrapure water blank for boron trace analysis", *J. Anal. At. Spectrom.*, **15**, 1395 (2000).
15. J. H. Song, "Transport phenomena of metal ions in a continuous electrodeionization system and applications in water treatment processes", Ph.D thesis, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), South Korea (2006).
16. J. H. Song, M. C. Song, K. H. Yeon, J. B. Kim, K. J. Lee, and S. H. Moon, "Purification of a primary coolant in a nuclear power plant using a magnetic filter - electrodeionization hybrid separation system", *J. Radioanalytical and Nuclear Chem.*, **262**, 725 (2004a).
17. N. W. Rosenberg and C. E. Tirrell, "Limiting currents in membrane cells", *Ind. and Eng. Chem.*, **49(4)**, 780 (1957).
18. P. B. Spoor, W. R. ter Veen, and L. J. J. Janssen, "Electrodeionization 1: Migration of nickel ions absorbed in a rigid macroporous cation-exchange resin", *J. Appl. Electrochem.*, **31**, 523 (2001a).
19. P. B. Spoor, W. R. ter Veen, and L. J. J. Janssen, "Electrodeionization 2: The migration of nickel ions absorbed in a flexible ion-exchange resin", *J. Appl. Electrochem.*, **31**, 1071 (2001b).
20. P. B. Spoor, L. Koene, W. R. ter Veen, and L. J. J. Janssen, "Electrodeionization 3: The removal of nickel ions from dilute solutions", *J. Appl. Electrochem.*, **32**, 1 (2002b).
21. P. B. Spoor, L. Grabovska, L. Koene, L. J. J. Janssen, and W. R. Ter Veen, "Pilot Scale Deionization of a galvanic nickel solution using a hybrid ion-exchange/electrodialysis system", *Chem. Eng. J.*, **89**, 193 (2002a).
22. I. Monzie, L. Muhr, F. Lapique, and G. Grevillot, "Mass transfer investigations in electrodeionization processes using the microcolumn technique", *Chem. Eng. Sci.*, **60**, 1389 (2005).
23. J. H. Song, K. H. Yeon, J. Cho, and S. H. Moon, "Effect of operating parameters on the reverse osmosis - electrodeionization performance in the production of high purity water", *Kor. J. Chem. Eng.*, **22(1)**, 108 (2005).
24. J. H. Wood, G. C. Ganzi, and P. A. Springthorpe, "Continuous electrodeionization: module design considerations for the production of high purity

- water”, *Ion exchange at the millennium*, Eds. J. A. Greig, Imperial college press, Singapore (2000).
25. H. Inoue, K. Yamanaka, A. Yoshida, T. Aoki, M. Teraguchi, and T. Kaneko, “Synthesis and cation exchange properties of a new porous cation exchange resin having an open-called monolith structure”, *Polymer*, **45**, 3 (2004).
  26. M. J. Semmens, C. D. Dillon, and C. Riley, “An Evaluation of Continuous Electrodeionization as an In-Line Process for Plating Rinsewater Recovery”, *Environ. Prog.*, **20**(4), 251 (2001).
  27. R. A. Pisigan, Jr. Singley, and J. E. Singley, “Evaluation of water corrosively using the Langelier Index and relative corrosion rate models”, *Material performance*, **24**(4), 26 (1985).
  28. Y. Oren, and Y. Egozy, “Studies on polarity reversal with continuous deionization”, *Desalination*, **86**, 155 (1992).
  29. J. S. Park, “A study on removal of hardness materials from tap water and ground water using EDR and EDIR processes”, M.S. thesis, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), South Korea (2005).
  30. A. J. Giuffrida and E. J. Parsi, “Method for preventing scale buildup during electro dialysis operation”, U.S Patent, 3,341,441 (1967).
  31. W. A. Katz, “The electro dialysis reversal”, *Desalination*, **28**, 31 (1979).
  32. H. Helfferich, “Ion Exchange”, pp. 151-200, McGraw Hill, NewYork, NY (1962).
  33. K. H. Yeon, J. H. Song, J. B. Kim, and S. H. Moon, “Preparation and characterization of UV-grafted ion-exchange textiles in continuous electrodeionization”, *J. Chem. Tech. and Biotech.*, **79**, 1395 (2004a).
  34. K. S. Spiegler, R. L. Yoest, and M. R. J. Wyllie, “Electrical potentials across porous plugs and membranes, ion exchange resin-solution system”, *Discussions Faraday Soc.*, **21**, 174 (1956).
  35. K. H. Yeon and S. H. Moon, A study on removal of cobalt from a primary coolant by continuous electrodeionization with various conducting spacers, *Sep. Sci. and Tech.*, **38**(10), 2347-2371 (2003).
  36. K. H. Yeon, J. H. Song, and S. H. Moon, “A study on stack configuration of continuous electrodeionization for removal of heavy metal ions from the primary coolant of a nuclear power plant”, *Water Res.*, **38**, 1911 (2004).
  37. K. H. Yeon, J. H. Song, and S. H. Moon, “Preparation and characterization of immobilized ion exchange polyurethanes (IEPU) and their applications for continuous electrodeionization (CEDI)”, *Kor. J. Chem. Eng.*, **21**(4), 867 (2004b).
  38. P. Ramirez, V. M. Aguilera, J. A. Manzanarees, and S. Mafe, “Effect of temperature and ion transport on water splitting in bipolar membranes”, *J. Membr. Sci.*, **73**, 191 (1992a).
  39. P. Ramirez, H. J. Rapp, S. Reichle, H. Strathmann, and S. Mafe, “Current voltage curves of bipolar membranes”, *J. Appl. Phys.*, **72**, 259 (1992b).
  40. R. Simons, “Strong electric field effects on proton transfer between membrane bound amines and water”, *Nature*, **280**, 824 (1979).
  41. R. Simons, “Preparation of high performance bipolar membrane”, *J. Mem. Sci.*, **78**, 13 (1993).
  42. H. Strathmann, J. J. Krol, H. J. Rapp, and G. Eigenberger, “Limiting current density and water dissociation in bipolar membranes”, *J. Membr. Sci.*, **125**, 123 (1997).
  43. E. Laktionov, E. Dejean, J. Sandeaux, R. Sandeaux, and C. Gavach, “Production of High Resistivity water by Electro dialysis. Influence of Ion-exchange Textiles as Conducting spacers”, *Sep. Sci. Tech.*, **34**(1), 69 (1999).
  44. E. Dejean, E. Laktionov, J. Sandeaux, R. Sandeaux, G. Pourcelly, and C. Gavach, “Electrodeionization with ion-exchange textile for the production of high resistivity water: Influence of the nature of the textile”, *Desalination*, **114**, 165 (1997).
  45. E. Dejean, J. Sandeaux, R. Sandeaux, and C. Gavach, “Water Demineralization by Electrodeionization with Ion-exchange Textile. Comparison with Conventional electro dialysis”, *Sep. Sci. Tech.*, **33**(6), 801 (1998).

46. R. Messalem, Y. Mirsky, N. Daltrophe, G. Saveliev, and O. Kedem, "Novel ion-exchange spacer for improving electro dialysis, II. Coated spacer", *J. Membr. Sci.*, **138**, 171 (1998).
47. E. Korngold, L. Aronov, and O. Kedem, "Novel ion-exchange spacer for improving electro dialysis, I. Reacted spacer", *J. Membr. Sci.*, **138**, 165 (1998).
48. S. Thate, "Untersuchung der electrochemischen de-ionisation zur reinstwasserherstellung", Ph.D dissertation, University of Stuttgart, Germany (2002).
49. S. Thate, N. Specogna, and G. Eigenberger, "A comparison of differential EDI concepts used for the production of high-purity water", *Ultrapure water*, **16**(October(8)), 42 (1999).
50. A. Grabowski, G. Zhang, H. Strathmann, and G. Eigenberger, "The production of high purity water by continuous electrodeionization with bipolar membranes: Influence of the anion-exchange membrane permselectivity", *J. Membr. Sci.*, **281**, 297 (2006).
51. <http://www.omexell.com>, January 18 (2006).