CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 16, No. 2, June 2010, pp. 145~152

다공성 흡수매체에 대한 정전삼투 탈수효과

박선미, 박미정, 하지수,† 장혁상*

영남대학교 환경공학과
712-749 경북경산시 대동 214-1

†계명대학교 에너지환경공학과
704-701 대구광역시 달서구 달구벌대로 2800

(2010년 5월 29일 접수; 2010년 6월 25일 수정본 접수; 2010년 6월 26일 채택)

Electroosmotic Water Removal in Wet Porous Materials

Seonmi Park, Mijung Park, Jisoo Ha,† and Hyuksang Chang*

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University
214-1 Dae-dong, Gyeongsan, Gyeongbuk 712-749, Korea

†Department of Energy and Environmental Science, Keimyung University
2800 Dalgubeoldaero, Dalseo-gu, Daegu 704-701, Korea

(Received for review May 29, 2010; Revision received June 25, 2010; Accepted June 26, 2010)

요 약

함수매체에 대한 효율적 탈수를 위해 에너지 효율적인 여러 탈수공정이 적용되고 있다. 본 연구에서는 탈수공정에서 에너지 소모를 줄이기 위한 방법으로 적용되고 있는 정전삼투효과를 연구하였다. 정전삼투공정을 연구하기 위한 실험용 정전삼투반응기가 구성되었고 공정변수인 전기장의 형태, 흡수매체의 성질 등의 영향이 조사연구 되었다. 정전삼투공정을 위해 매체에 인가된 전기장은 최대전압 100 V/cm 및 최고주파수 10 kHz 범위를 가진 3가지 파형의 직류전압이 사용되었으며 실험용 흡수매체는 직경 0.18 mm, 0.35 mm, 1.2 mm 유리비드로 충진된 모사형 흡수매체를 사용하였다. 운전조건에 따라 차이가 있으나 정전삼투에 의해 최대 6%의 함수제거율을 획득하였으며 제습에 소요전력은 조건에 따라 다르나 약 330 ~ 490 cal/g-water의 값을 유지하였다.

주제어 : 정전삼투, 탈수공정, 공극구조

Abatract : Various technical methods are applied for removing water from the water-retaining media, and the energy efficiency is the main concern in those methods. The electroosmotic process is studied as an efficient way for dewatering. An experimental electroosmotic reactor is designed and used for evaluating the effects of operational variables. The operational variables such as the electrical fields and the structure of water-retaining medias were studied. Three different shapes of polarized electric fields in ranges of 0-100 V/cm and 0-10 kHz are used as the source of electric voltage. The effect of electroosmotic process with respect to the structural variation is estimated by filling the electroosmotic reactor with the glass beads in 0.18 mm, 0.35 mm and 1.2 mm in diameters. 6% of water removal is obtained in the simulating electroosmotic reactor of glass beads. The estimated energy consumption in the simulating electroosmotic was 330 ~ 490 cal/g-water.

Keywords : Electroosmosis, Dewatering processes, Porous structure

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hschang@yu.ac.kr

1. 서 론

금속광물산업, 비금속광물산업, 펄프산업 등 다양한 산업공정에서 발생되는 함수슬러지의 수분제거를 위해 여러 가지 형태의 탈수공정이 적용되며 이러한 공정을 통해 적정수준 이하의 수분이 함유된 슬러지는 재사용 되거나 폐기된다. 함수슬러지의 탈수공정에는 보통 여과 혹은 원심분리 등의 기계적 탈수법이 1차적으로 적용되며 이후 탈수도를 높이기 위한 열적건조법 등이 추가로 적용되는 공정상을 이루는 데 이러한 공정의 특성으로 인해 함수슬러지에 대한 탈수량은 공정에 투입된 에너지 사용량에 비례하여 증가하게 되며 부적절한 탈수시스템은 경제적인 부담으로 작용한다. 그리고 최근에 개인의 거주공간 및 생활환경 개선에 대한 관심증가로 실내공기의 적정습도 유지기술이 연구되고 그에 따른 제습장치들이 상용화되고 있다. 이러한 제습장치들은 제어대상공기의 습도를 일정값 이하로 유지하는 것을 목적으로 하는 것이다.

장치에서의 제습과정은 수분이 함유된 처리대상 실내공기를 건조된 함수가능매체에 통과 흡수시킴으로서 수분을 제거시키고 이 과정에서 흡습된 매체를 열적 가열하여 수분을 건조시킨 후 재생된 매체를 또다시 수분이 함유된 공기와 접촉시키는 과정을 반복함으로써 제습시스템이 연속적인 건조기능을 발휘하도록 하는 것 이다. 이러한 제습시스템의 경제적 운용효과는 함수가능매체 즉 제습제에 대한 열적재생과정에서 소요되는 에너지를 최소화하는 데 크게 좌우된다고 할 수 있다. 이렇게 여러 가지 형태의 제습을 필요로 하는 상황에서 공통적으로 요구되는 것이 탈수공정에 투여되는 에너지를 절감하여 운영 측면에서 경제성을 얻는 것이고 이에 대해 여러 가지 방법들이 모색되고 있는데 정전삼투(electro-osmosis) 기법이 그 중에 하나이다[1].

몇몇 선행 연구에서 정전삼투를 이용한 다양한 매체에서의 탈수에 관한 실험이 이루어졌다. Chen 등은 정전삼투를 이용하여 식물성 슬러지와 광물 찌꺼기 내의 수분을 제거하는 실험을 수행하였고, 현탁액 내 물질의 입자크기, pH, 제타 포텐셜 등이 탈수에 중요한 역할을 한다는 것을 발견하였다[2]. Man과 Guohua는 회전전극을 이용한 미세 벤토나이트 입자 현탁액에서의 정전삼투에 의한 탈수 연구를 통하여, 일반적인 정전삼투와 비교하여 70% 이상 고형물이 증가하는 것을 발견하였다[3].

Figure 1에 간략히 비교설명된 것처럼 함수매체가 슬러지의 경우 기계적 탈수공정에서는 적용대상 함수 슬러지에 탈수를 위한 역학적 외력이 가해지면 함수 슬러지의 전체부피가 작아짐과 동시에 각 공극에 갇혀있던 수분이 슬러지 모체로 밀려 빠져나가면서 슬러지가 건조되는 단순한 과정이 이루어진다. 이러한 슬러지 압축공정이 지속되면 수분이 함유된 슬러지 내 공극의 크기는 더욱 작아지게 되어 추가적인 탈수효과를 얻기 위해 인가되는 역학적 에너지를 그에 상응하게 증가시켜야 한다는 문제점을 가지고 있다. 반면 정전삼투를 적용한 탈수 방법에서는 탈수과정 중에 매체가 가지는 공극구조의 변화 없이 공극에 갇혀있는 수분자체에 전기적 영동력을 인가하여 탈수를 진행시키므로 주어진 전기적 조건에 따라 일정률의 탈수효과가 얻어지게 되고 함수매체에 대한 초기 탈수의 경우 기계적 탈수에 비해 상대적으로 에너지 소모가 적은 장점이 있다[4].

에너지 소모율에 대한 상대적인 장점 이외에 정전삼투 기법은 열에 민감하여 열을 이용하여 건조할 수 없는 매체나 기계적 탈수만으로 탈수가 어려운 수분을 함유한 매체에 적용이 가능하며[5] 매질의 탈수율을 전기장의 세기를 변화 시키는 간단한 조작만으로 가능하다는 장점이 있다. 그리고 기계적 탈수와 함께 사용될 경우 기계적 시스템의 탈수 부담을 경감시킬 수 있다는 장점이 있는 것으로 알려져 있다[2].

고형물이 액체 내에서 자유롭게 이동 가능한 현탁액에 전기장이 인가되었을 경우 전기화학적 이중층은 고형물에 대한 전기영동과 물에 대해 정전삼투를 일으키는데, 이러한 현상은 현탁액 내의 고체입자를 양극(anode)으로 움직이게 하는 반면, 물을 반대방향인 음극(cathode)으로 움직이게 한다[6]. 이 때 고형물이 모이는 양극에서는 단위 부피당 수분의 양이 작아지는 효과를 가지므로 초기상태의 현탁액 기준으로 보면 양극에서 단위 부피당 함수율이 낮은 고형물 즉 슬러지를 얻게 되는 것이다. 하지만 현탁액과 달리 함수슬러지의 경우 동일한 전기적 조건이 구성됨에도 불구하고 전기영동에 의한 고형물의 상대적 이동이 불가능하기 때문에 고형물에 대한 전기영동은 없고 정전삼투에 의한 수분의 이동만이 제한적으로 이루어진다. 그러므로 이러한 제한적인 정점삼투에 있어 수분의 이동은 매질의 자체의 전기화학적 특성과 전극에 인가되는 전기적 특성에 지배적인 영향과 아울러 매체의 공극구조 및 매체의 함수도 등에 크게 영향을 받을 수 있다 [7].

본 연구에서는 정전삼투 공정을 적용할 때 공정의 효율에 영

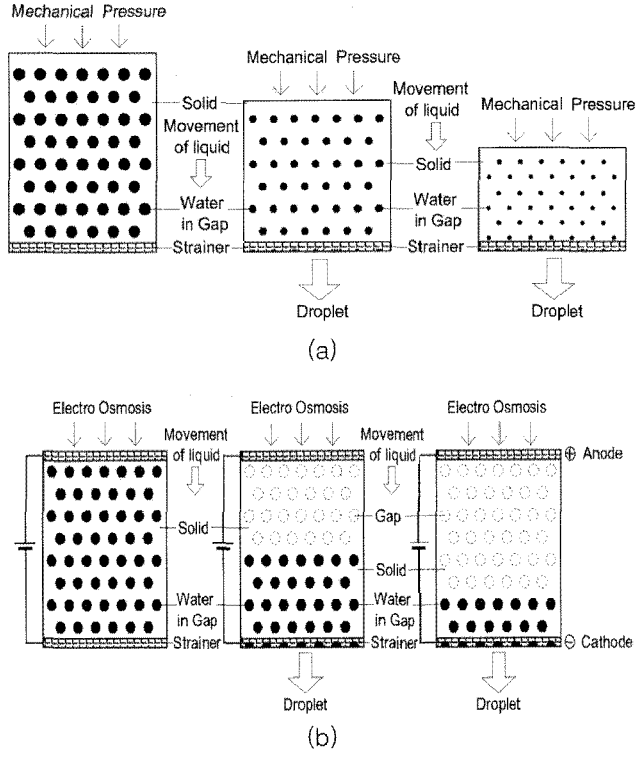


Figure 1. Schematic of water removal in a) mechanical pressure system and b) electro-osmotic system.

향을 주는 여러 인자 중 탈수 대상 매질에 가해지는 전기의 성질과 전기장 세기에 따른 수분 제거 효과를 평가 분석하였으며 매질의 공극 구조에 따른 수분 제거 효율을 분석하였다.

2. 실 험

2.1. 전기영동(electrophoresis)과 정전삼투(electroosmosis)

전기영동과 정전삼투는 슬러지, 침전물, 현탁액 등에서 고형분과 수분의 이동을 도모하여 궁극적으로 함수매체의 탈수를 도모하는 기본 기작이다. 전기영동은 용액 중에 분산되어 있는 고체 입자들이 전기적으로 대전되어 정전력에 의해 역학적으로 이동하는 현상을 나타내는 것으로 용액 내에서 (-)전하를 띠며 분산되어 있다가 전기장에 의해 대전되어 (+)극 주위로 이동하는 현상이다. 이러한 전기영동에 의해 용액 내에서 입자가 이동하는 과정은 Helmholtz-Smoluchowski (H-S)식, 즉,

$$V_{ev} = -\frac{D\epsilon_0 \zeta}{\eta} E_x \qquad (1)$$

로 설명된다[8-10]. 식(1)에서 V_{ev}는 전기영동에 의해 이루어지는 용액 내에서의 입자의 평균속도를 나타내며 이 입자의 평균속도는 식 (1)의 관계에 의해 전기장 E_x, 제타포텐셜 ζ, 그리고 절연상수 D에 비례하고, 점도 η에 반비례한다. 이 때 ϵ_0는 진공유전율 ($8.85\times10^{-12}\ C/V-m$)을 나타내는 데 절연상수와 점도는 입자 사이의 공극을 채우는 유체의 특성을 나타내는 성질이 된다. 이러한 전기영동과 함께 용액 내의 액체는 정전삼투에 의해 이동하는데 이는 매질 내 고형입자와 물 사이에 형성된 전기화학적 이중층의 정전기적 효과를 이용하여 물을 전극방향으로 이동시키는 현상을 나타낸다. 정전삼투에 의한 물의 이동속도 U_{eo}는 식 (2)와 같이 나타내진다[8,9].

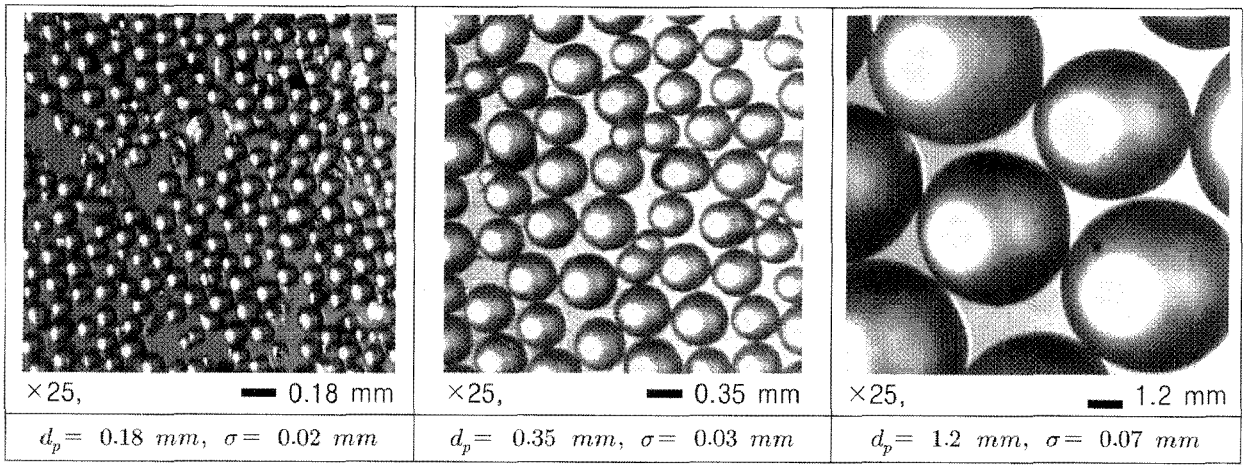
$$U_{eo} = -\frac{\epsilon_o \zeta}{\eta} \qquad (2)$$

정전 삼투에 의한 물의 유속은 식(2)와 같이 제타포텐셜에 비례하고 점도에 반비례한다. 현탁액의 경우 고형물을 용액으로부터 분리하기 위해서는 식(1)에 설명된 전기영동과 식(2)에서 설명된 정전삼투가 적용된다. 하지만 슬러지나 제습제 같은 함수매체의 건조과정에는 고형매체가 구조물로서 고정되어 있는 상황이기 때문에 식(2)에 설명된 전기삼투 효과가 제한적으로 적용된다.

2.2. 실험장치

본 연구에서는 정전삼투를 적용하여 함수매체에 대한 탈수과정을 연구하기 위한 실험장치가 구성되었으며 함수매체를 이루는 고형매질의 구조적 특성에 따른 영향과 정전삼투를 위해 인가된 전기적 특성의 영향을 평가하는 실험을 수행하였다. 정전삼투 실험의 대상이 되는 함수매체는 하·폐수 슬러지, 금속광물, 혹은 제습제 등의 형태로 존재하며 구성상으로 다양한 물리화학적 특성을 가지고 있기 때문에 실험변수가 제어된 동일한 조건에서의 삼투현상을 연구하기 위해서는 현장에서 실제 배출되는 함수매체를 실험재료로 채택하는 것은 부적절하다. 함수매체의 구조에 따른 정전삼투의 영향을 알아보기 위해서는 실험과정에서 구조상 동일한 조건을 구성하는 매질을 선택하고 그에 따른 탈수현상을 관찰하는 것이 필요하게 된다.

이러한 이유로 본 실험에서는 흡수매체의 공극구조를 모사하면서도 매체의 구조특성을 제어할 수 있는 방법을 모색하게 되었는데 충전제, 연마 광택제로 사용되는 여러 크기의 유리비드(glass bead)를 선택하였다. 흡수매체의 공극구조를 모사하기 위해 일정크기로 분류된 유리비드를 사용하였는데 실험에 사용된 유리비드는 Figure 2에 나타낸 것처럼 평균입경 0.18 mm (입경표준편차 0.02 mm), 평균입경 0.35 mm(입경표준편차 0.03 mm), 평균입경 1.2 mm(입경표준편차 0.07 mm) 3가지 종류였으며 Figure 3의 정전삼투반응기(electroosmotic reactor)에 있는 부피 110 mm(L) X 70 mm(W) X 10 mm(H) 공간에 채워 넣어 모사실험을 수행하였다[10,11]. 유리가 채워진 이 공간의 상하단에는 전극이 연결되어 유리비드 속에 함유된 수분의 정전



$d_p = 0.18\ mm,\ \sigma = 0.02\ mm$	$d_p = 0.35\ mm,\ \sigma = 0.03\ mm$	$d_p = 1.2\ mm,\ \sigma = 0.07\ mm$

Figure 2. Photographs of glass beads in different diameter.

Table 1. Experimental conditions for the electroosmotic water removal

Glass beads	Compositions (wt%)	SiO_2(72), Na_2O(13.8), CaO(9), MgO(4), Others(2.5)
	Diameters (mm)	0.18, 0.35, 1.2
Electricity	Wave form	Sine wave, Square wave, Triangle wave
	Frequency (kHz)	0.01, 0.1, 1, 10
	Voltage range (V)	0 - 100 DC

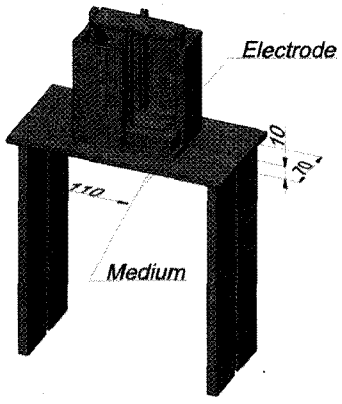


Figure 3. Electroosmotic reactor.

삼투현상을 일으키는 기전력을 일으키게 된다. 사용된 유리의 화학적 조성은 전기적 특성을 같게 하기 위해 동일한 재료를 사용하였다.

전기장 인가에 의한 정전삼투효과를 보기 위한 실험장치를 Figure 4에 나타내었다. 실험장치는 흡수매체에 대해 정량적으로 수분을 공급하기 위한 주사기펌프(syringe pump, KD Scientific, Model KDS100), 직류전원공급장치(DC Power Supply, Sejin Power, Model SJ300), 파형발생기(Function Generator, Hewlett Packard, Model 3314A), 파형발생기에서 발생된 여러 형태의 전압을 증폭시키는 전압증폭기(Power Amplifier, AT, Model AT-5000), 정전삼투반응에 의해 떨어지는 수분을 정량하기 위한 디지털 저울(Digital Mass Balance, AND, FX-2200i) 그리고 디지털 저울로부터 측정된 신호를 RS-232C를 통해 전달 받아 실시간으로 자료를 처리하는 PC(Windows XP)로 구성하였다.

정전삼투반응기는 전기적 절연을 위해 아크릴 재질로 제작되었으며, 실험매체 상하에 평판형 전극을 설치하여 전극사이에 위치한 실험 매체에 대해 정전삼투가 일어나도록 하였다. 전극은 스테인레스 격자망(#120)을 사용하였는데 이는 정전삼투를 위한 전기를 공급함과 동시에 삼투현상에 의해 이동한 수분이 전극사이를 쉽게 빠져나가도록 하기 위함이다. 전극은 중력방향에 대해 반응기 위쪽을 양극(+), 아래쪽을 음극(−)으로 배치하였다. 직류전원 공급장치는 전압범위 0 - 300 V, 전류 범위 0 - 1 A를 가지며 출력 안정도는 0.02%+2 mV 이하, 0.02%+2.5 mA 이하로 비교적 우수한 안정도를 가지고 있다. 그리고 Figure 3에 보인 것처럼 평판 전극사이의 거리는 10 mm이기 때문에 실험하는 동안 최대 300 V/cm 크기의 전기장이 형성될 수 있다.

본 연구에서는 정전압 형태의 직류전압이 인가된 상태 외에도 여러 형태의 파형으로 이루어진 전압이 인가되었을 때 정전삼투의 효과도 비교 연구하였는데, 이를 위해 여러 가지 파형을 발생시키는 파형발생기를 전압증폭기에 연결하여 여러 가지 형태의 전기장을 인가하여 실험하였다. 파형발생기는 일정범위의 전압폭에 대해 여러 가지 주파수의 사인파(sine wave), 삼각파(triangle wave), 사각파(square wave)를 생성하는 역할을 하며 여기에 연결된 전압증폭기는 파형발생기에서 인가된 전압을 증

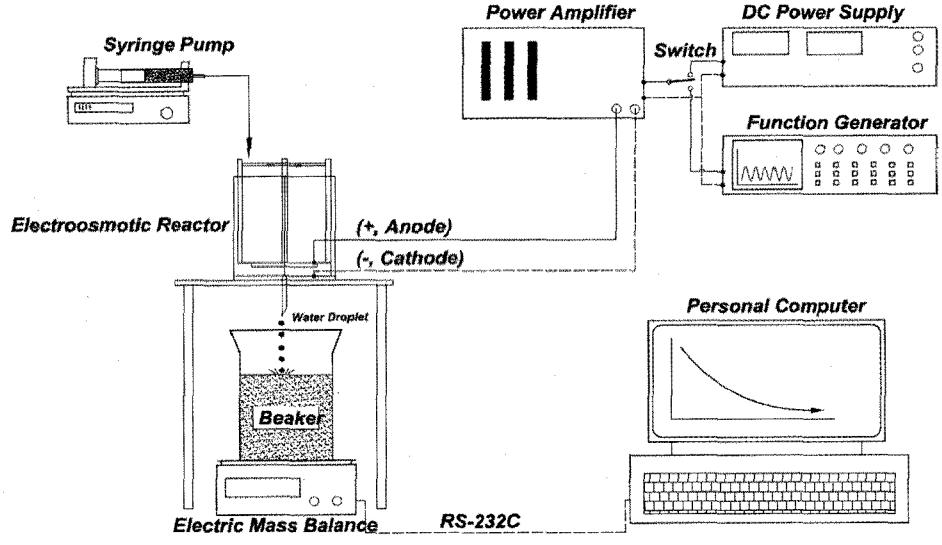


Figure 4. Schematic of the experimental setup.

폭하여 정전삼투반응기에 공급하게 된다. 실험에 사용된 파형 발생기의 주파수 범위 0.01 Hz - 20 MHz이다. 실험시 반응기의 전극에 인가된 전압은 전기적 가열의 원인이 되는 데 이렇게 되면 실험매체 내부에 열적가열로 인한 기포발생이 이루어져 수분의 균일한 이동을 방해하기 때문에 정확한 정전삼투현상 파악이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 실험이 이루어지는 동안 온도 변화 여부를 감시하여 매체가 일정온도를 유지하도록 관리하였으며 이를 위해 정도가 높은 디지털 온도계를 장착하여 실험이 진행되는 동안 실험매체 내부의 온도를 감시하였다.

2.3. 실험방법

전기적 성질이 표준화된 매질을 이용하여 매질의 공극구조에 따른 정전삼투효과를 모사실험하기 위해 Figure 3의 정전삼투반응기 내의 전극 사이에 Figure 2의 분포를 가진 유리비드를 채워 넣었고 전극이 직접 접촉된 상태에서 실린지 펌프를 이용하여 흡수매체에 일정유량의 물을 계속 공급하였다. 흡수매체의 상단에 공급되는 물의 양을 변경하면서 흡수매체의 상단으로 물이 넘치지(over flow) 않도록 유지하였다. 중력에 대해 수직으로 놓인 함수매체에 함유된 물은 별도의 조치를 취하지 않더라도 중력에 의해 일정유량으로 저절로 낙하하기 때문에 정전삼투에 의한 수분의 이동량을 분리 해석하는 것은 용이하지 않다.

본 연구에서는 정전삼투를 실험하는 표준 함수매체를 준비하기 위해 상단에 실린지로 공급되는 물의 유량과 아래로 떨어지는 물의 유량이 같아지는 정상상태의 조건에서 함수매체에 대한 흡습상태가 안정화 되면 실린지 펌프를 멈추어 공급되는 물을 중단 시켜 중력에 의해 저절로 물이 탈수 된 후 일정시간 기다려 더 이상 제거되는 물이 없을 때의 매체를 기준 흡습매체로 채택하였는데, 이 상태에서 전기장을 인가하여 순수하게 정전삼투에 의해서만 제거되는 수분량을 선택적으로 관찰하였다. 정전삼투 실험과정에서 제거되는 수분은 Figure 4에 보인 것처럼 디지털 저울에 얹힌 용기에 담기며 용기에 담기는 수분의 양을 실시간으로 측정하여 실험조건에 따른 수분 제거량이 분석된다. 실험이 진행되는 동안 물이 떨어지는 곳을 제외한 나머지 부분을 밀폐 시켜 공기 중으로 증발해 발생하는 수분손실의 영향을 배제시켰다. 정전삼투 실험을 위한 유리비드의 입경과 인가전압특성이 Table 1에 요약되어 있다.

매질에 인가되는 전기장 세기 및 형태에 따른 정전삼투 효과를 파악하기 위해 1차적으로 직류전압이 인가된 상태에서 전기장 세기를 조정하여 전기장 변화에 따른 정전삼투효과를 평가하였다. 그리고 인가되는 전압의 파형에 따라 변할 수 있는 전기적 진동에 의한 물리적 영향파악을 위해 파형별 정전삼투효과를 평가하였다. 전극 간에 인가된 전압의 크기는 10 V에서 100 V까지 10 V 단위로 변경하였는데 평판으로 이루어진 전극 간 거리가 1 cm을 유지하였으므로 정전삼투가 일어나는 영역에서 전기장의 크기는 10 V/cm에서 100 V/cm의 범위로 인가되는 것이 된다.

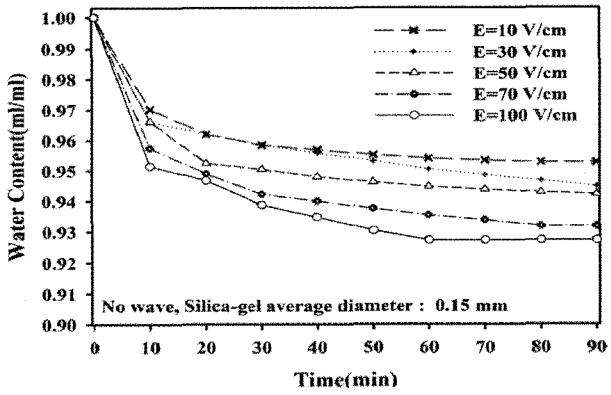


Figure 5. Variation of water contents in silica gel on different electric field strengths.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전기장에 따른 정전삼투 특성

흡습매체에 대한 정전삼투의 효과를 실험하기 위해 상용 실리카겔(silica gel)을 사용하여 정전삼투의 효과를 검증하였다. Figure 5는 정전삼투 반응기에 채워진 실리카겔에 대해 단순 전기장의 세기를 변화시켜 실리카겔 매체로부터 제거되는 수분 제거량을 나타낸 것이다. 실리카겔의 경우 본 실험에서 흡습매체 대용으로 사용하려는 유리비드와는 다르게 미세한 내부 공극을 가지고 있기 때문에 유리비드와 다른 함수특성을 가지고 있으나 모든 전기장 세기에서 정전삼투가 이루어짐을 보이고 있다. 실리카겔 매체에 대해 10 V/cm 크기의 전기장을 인가했을 때 정전삼투효과의 기능이 완료되는 시점에서 초기함수율 대비 약 4.7%의 함수율 감소를 나타내었는데 전기장의 크기를 100 V/cm로 증가시켰을 시 함수율의 감소는 7.3%까지 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 실리카겔의 경우 매체의 미세한 내부공극에 있는 물이 정전삼투에 의해 추가적으로 계속 제거되는 과정이 일어나 함수율은 계속 낮아진다. 하지만 정전삼투의 경우 조건에 따라 차이가 있으나 대부분 초기시간(본 실험

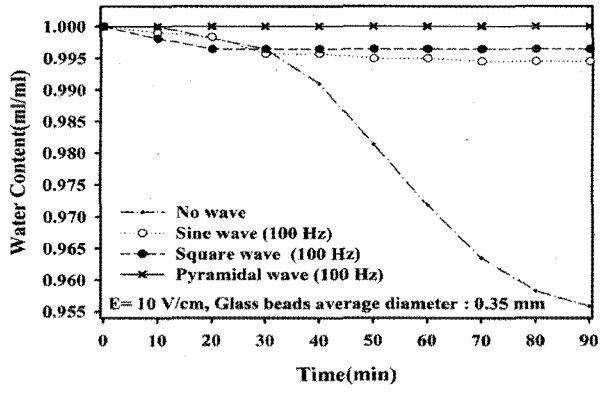


Figure 6. Variation of water contents in glass media on different types of electric waves.

에서는 90분정도)에서 탈수가 완료되기 때문에 장시간 전압을 인가시켜 정전삼투를 유도할 필요가 없다. 그리고 본 실험에 대해 한정된 경우이기도 하지만 50 V/cm 이상의 전기장을 인가하였을 때 전극과 흡습매체인 실리카겔이 하나의 전기적 저항체를 형성하여 전기적 가열이 일어나고 이로 인해 매체를 손상하는 상황이 발생되었는데 매체가 다른 일반적인 상황에서도 동일한 상황이 일어날 수 있으므로 공정조건에 따라 적정 범위의 전기적 조건을 형성해주는 것이 필요하게 된다.

매질에 적용되는 전기적 파형에 따른 정전삼투 효과를 평가하였다. Figure 6은 평균입경 0.35 mm의 유리비드로 채워진 정전삼투반응기에 대해 전기장의 세기와 주파수를 각각 10 V/cm와 100 Hz의 조건으로 고정시킨 다음 사인파, 삼각파, 사각파 그리고 파형을 주지 않았을 때를 서로 비교하여 실험한 결과를 나타내었다. 결과를 보면 파형별로 큰 차이를 보이지는 않았으나 사인파의 경우 상대적으로 개선된 제습효과를 나타내었다. 그렇지만 이렇게 상대적으로 개선된 제습효과는 파형을 주지 않았을 때와 비교해보면 미미하기 때문에 파형의 인가에 의한 효과는 무시할 수 있다는 판단을 할 수 있다. 그러므로 실제적인 응용 면에서 파형을 인가한 전압의 인가는 상대적인 장점을 가지지 않는다. 하지만 매체에 인가되는 전기적 특성에 의한 정전삼투의 기본적인 현상을 이해하는 측면에서 실험이 수행될 필요가 있는데 제습효과 면에서 상대적인 장점을 가진 사인파형 전기장에 대해 매체의 구조와 주파수에 따른 제습효과를 평가하였다. 다음으로 매질에 적용된 주파수와 매질의 입경 크기에 대한 정전삼투 효과를 Figure 7에 나타내었다.

주파수를 10 Hz, 100 Hz, 1000 Hz, 10 kHz로 변화시키면서 정전삼투반응기에서 채워진 유리비드의 입경별 최적 주파수를 알아본 결과 입경 크기에 상관없이 100 Hz에서 사인파를 인가하였을 경우 정전삼투 효과가 가장 크게 나타나는 독특한 현상을 나타냄을 알 수 있고 입경 1.2 mm의 유리비드의 경우 100 Hz를 제외한 나머지 주파수에서는 정전 삼투 효과가 나타나지 않는다. 0.35 mm, 0.18 mm의 경우는 위의 주파수에 따른 정전삼투 효과 실험 결과와 같이 10 kHz, 10 Hz, 1000 Hz, 100 Hz 순으로 정전 삼투 효과가 커짐을 알 수 있다. 그러므로 이러한 실험결과는 흡수매체의 구조적 특성에 따라 적절한 전기적

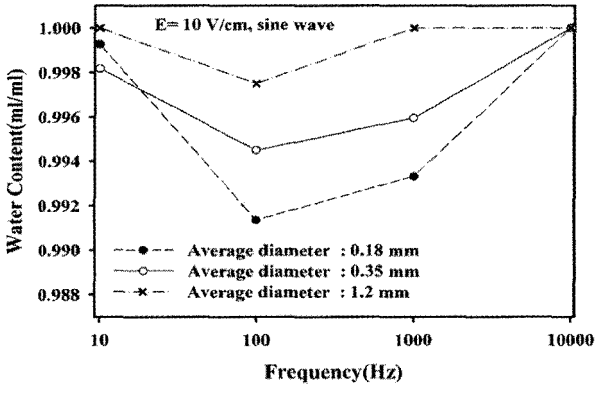


Figure 7. Variation of water contents on different electric frequencies and bead diameters in glass media.

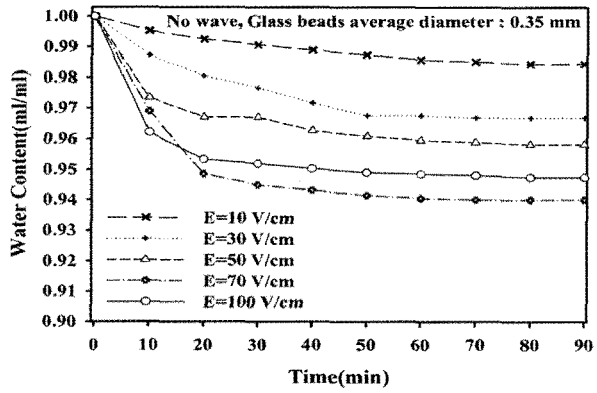


Figure 8. Variation of water contents on different electric field strengths.

특성을 인가하여 최적의 정전삼투 효과를 얻어야 할 필요가 있음을 나타낸다.

3.2. 매체의 구조특성에 따른 정전삼투 특성

Figure 8은 실험에서 사용한 유리비드 중 입경 0.35 mm의 입자로 채워진 정전삼투반응기에 여러 가지 전기장을 인가한 결과를 나타낸 것이다. Figure 8의 결과를 보면 10 V/cm의 전기장 인가 시 물의 함수율이 초기 함수율 대비 약 2% 감소하고 전기장을 증가시켜 70 V/cm로 하면 약 6% 이상 감소하는 결과를 보인다. 하지만 더 높은 전기장인 100 V/cm의 조건을 유지하면 함수율 감소가 오히려 감소되어 약 5%를 유지 하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 매체에 전기장이 인가되면 매체가 구성하는 전기적 저항에 의해 매체 자체가 전기적으로 가열되어 매체 내의 수분에서 기포가 발생하고 부력변화가 발생한 결과에 기인한다.

Figure 9의 결과에서 보면 인가조건 50 V/cm 까지는 무시할 정도이나 70 V/cm 부근부터는 전기적 가열이 무시할 수 없을 정도가 된다. 전기적 가열이 이루어지면 매체 내에 생성된 기포는 물리적으로 매질 사이의 공극을 채우게 되고 아울러 전기적 절연상태를 만들어 물에 인가된 전기장 효과를 방해하는 역할

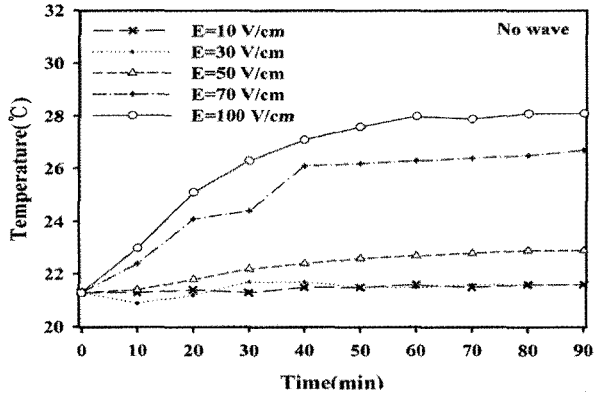


Figure 9. Variation of temperature in the electroosmotic reactor on different electric field strengths.

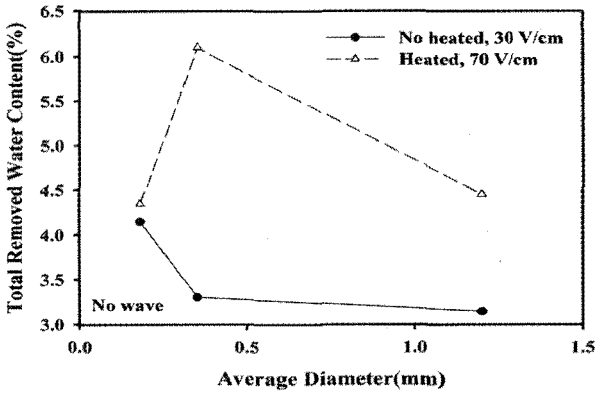


Figure 10. Water removal in electroosmotic reactor on different structure of the media and electric condition.

을 한다. 전기적 가열에 의해 기포가 생성되기 시작하는 조건에서는 정전삼투에 의한 수분이동이 기포에 의해 방해를 받는 상태가 되어 총체적으로는 정전삼투작용의 역할이 감소되는 상태가 된다. 여기에다 구조적인 관점과 연계해서 상황을 판단해보면 반응기를 채우는 매질 공극의 크기에 따라 총체적 정전삼투현상이 영향을 받는 데 매체단위 부피당 발생되는 기포의 양이 같을 경우 일정하게 분포되어있는 공극의 크기가 작을수록 기포는 상대적 분포가 넓어지기 때문에 물의 이동이 더 방해 받게 되어 물의 제거 효과에 큰 영향을 주게 된다. 실험에서 전기장을 70 V/cm로 유지한 상태에서 입경 0.35 mm의 유리비드로 채워진 반응기에서는 발생한 기포가 매체 내 공극을 모두 채울 수 없어 물의 이동을 방해하지 못하지만 0.18 mm에서는 0.35 mm에 비해 좁은 공극을 기포가 채워 물의 이동을 방해하여 전기장에 의한 물 제거 효과가 낮게 나타는 것이 확인되었다.

하지만 Figure 10에 보인 것처럼 전기적 가열이 없는 30 V/cm의 인가 조건에서는 매체의 공극이 조밀 할수록 정전삼투에 의한 수분 제거량이 증가함이 나타난다. 이는 정전삼투공정에 과정에서 공극이 조밀할수록 매체의 단위부피당 수분의 함량이 높아 정전 삼투효과가 상대적으로 오래 지속되기 때문으로 판단된다. 따라서 일반적인 관점 매체에 대한 가열이 없으면 매체의 공극이 조밀할수록 정전삼투의 효과가 증가되는 경향이 나타난다고 판단할 수 있다.

이러한 여러 가지 상황을 고려해보면 실제 공정에 이러한 정전삼투기법을 적용하여 흡습매체로부터 수분을 제거하려면 앞에서 고려된 전기적 조건, 전기적 가열상태 및 매체의 공극구조 등이 고려된 운전조건이 구성되어야 하며 공정 중에 운전변수로서 사용되는 전기장의 조건이 변동하는 과정에서 나타나는 제습율의 비정상적 상황을 파악하는 데 종합적 상황이 평가되어야 한다고 판단된다. 정전삼투를 이용하여 수분을 제거하는 데 있어 대부분 전기장을 인가한 후 초기 10분 내에 매체로부터 제거되는 수분총량의 50% 이상이 제거되는 것으로 나타나므로 경제적인 관점에서 정전삼투공정의 운전시간을 결정할 필요가 있다.

본 연구에서 최종적으로 평가한 것은 수분제거에 소요되는 전기적 에너지 즉 전력을 평가하였다. 앞에서 언급된 여러 가지 전기장이 인가될 경우 매체를 통과하는 전류 값은 전압에 따라 변경되는 데 전류의 변동범위는 최대 0.03 A에서 최소 0.02 A까지였다. 그러므로 실험에서 최대로 사용한 100 V/cm의 전기장을 인가하기 위해 100 V의 전압을 기준으로 보면 소요 전력은 2 - 3 W가 된다. 실험과정에서 최대 함수제거 효율인 6%의 조건에서 초기 44 g의 수분량 기준으로 30분의 시간에 약 2.6 g의 물이 제거되는 데 이를 기준으로 보면 소요 에너지는 330 ~ 490 cal/g-water가 된다고 볼 수 있다. 그러므로 대략적인 비교 측면에서 물의 증발 잠열에너지 기준으로 열적가열 방법에 비해 1 g의 물을 제거하는 데 에너지 적인 측면에서 효용성이 있다고 볼 수 있다.

4. 결 론

흡수매질에 대한 제습을 위해 정전삼투기법을 적용하기 위하여 정전삼투 공정과정에서 인가되는 전기장의 형태 및 매질의 구조에 따른 영향을 실험을 통하여 파악하였다. 유리비드를 사용하여 구성된 흡습매체에 적용된 파형별 정전삼투 실험의 결과 인가전기장의 파형이 있는 경우와 없는 경우를 비교하면 파형을 구성하여 인가된 전기장에 의한 정전삼투 효과는 크게 나타나지 않았으며 주어진 전기장 인가 시간에 대해 전기장의 세기 증가에 따라 정전삼투에 의한 제습효과가 증가되었다. 하지만 인가전압이 파형으로 이루어지면 함수매체의 구조에 관계없이 사인파의 파형과 약 100 Hz의 주파수에서 상대적으로 가장 높은 제습효율을 가지는 것으로 나타났다.

그리고 정전삼투에 의한 제습효과는 전기장의 세기에 따라 계속 증가 될 수 있으나 인가 전기장 세기의 증가에 따른 전기적 가열이 이루어지고 이로 인해 매질 내 수분의 증발에 의한 기포발생으로 인해 일정 전기장 값 이상에서는 총괄적인 정전삼투효과가 나타나지 않았다. 실제 공정에 정전삼투기법을 적용할 경우 인가 전기장의 전기적 조건, 매체에 대한 가열상태 및 매체의 공극구조 등이 고려된 운전조건이 구성되어야 한다. 정전삼투를 이용하여 수분을 제거하는 과정에서 매체의 절대적인 함습도가 정전삼투효과의 지속여부를 결정하기 때문에 전기장을 인가한 후 매체로부터 제거되는 수분총량의 50% 이상이 제거되는 시점을 기준으로 공정지속 시간을 결정할 필요가 있다. 흡습매체의 공극구조가 미세할수록 정전삼투효과가 오래 지속되고 그로 인해 총괄적인 제습효과가 상대적으로 높게 나타난다.

참고문헌

1. Zhou, J., Zheng, L., Peng S., and Fuxing, D., "Water Removal from Sludge in a Hrizontal Eectric Field," *Dry. Technol.*, **19**(3,4), 627-638 (2001).
2. Chen, H., Mujumdar, A., and Raghavan, G., "Laboratory Experiments on Electroosmotic Dewatering of Vegetable Sludge and Mine Tailings," *Dry. Technol.*, **14**(10), 2435-2445

(1996).
3. Man, Y., and Guohua, C., "Enhanced Electroosmotic Dewatering of Fine Particle Suspension Using a Rotating Electrode," The 12th International Drying Symposium(IDS 2000), August 28-31, Noordwijerhou, The Netherlands, 2000.
4. Yoshida, H., "Practical Aspects of Dewatering Enhanced by Electro-osmosis," *Dry. Technol.*, **11**(4), 787-814 (1993).
5. Vijh, A. K., "Salient Experimental Observations on the Electroosmotic Dewatering(EOD) of Clays and Sludge and Their Interpretation," *Dry. Technol.*, **17**(1), 575-584 (1999).
6. Vijh, A. K., "Electro-osmotic Dewatering(EOD) of Clays and Suspension: Components of Voltage in Electroosmotic Cell," *Dry. Technol.*, **17**(3), 565-574 (1999).
7. Bertolini, L., Coppola, L., Gastaldi, M., and Redaelli, E., "Electroosmotic Transport in Porous Construction Materials and Dehumidification of Masonry," *Constr. Build. Mater.*, **23**(1), 254-263 (2009).
8. Mitchell, J. K., Fundamentals of soil behavior, 3ed ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
9. Eykholt, G. R., and Daniel, D. E, "Impact of System Chemistry on Electroosmosis in Contaminated Soil," *J. Geotech. Eng.*., **120**(5), 797-815 (1994).
10. Reddy, R. K., Urbanek, A., and Khodadoust, A. P., "Electroosmotic Dewatering of Dredged Sediments: Bench-scale Investigation," *J. Environ. Manage.*, **78**(2), 200-208 (2006).
11. A-Asheh, S., Jumah, R., Banat, F., and Al-Zou'Bi, "Direct Current Electroosmosis Dewatering of Tomato Paste Suspension," *Food Bioprod. Process.*, **82**(3), 193-200 (2004).