



# 고전압 임펄스 공정의 전계와 접촉시간이 $\text{Ca}^{2+}$ 농도 저감에 미치는 영향의 속도론 연구

## Kinetic study about the effect of electric field and contact time of high voltage impulse on reduction of $\text{Ca}^{2+}$ concentration

김담하·장인성\*

Dam-Ha Kim·In-Soung Chang\*

호서대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Hoseo University

pp. 113-120

pp. 121-133

pp. 135-142

pp. 143-152

pp. 153-162

pp. 163-174

### ABSTRACT

High voltage impulse (HVI) has been gained attention as an alternative technique that could control the  $\text{CaCO}_3$  scale problems encountered in water main, pipe, cooling tower and heat exchanger vessels. The aim of this study was to investigate the effect of electric field (E) and contact time (t) of HVI on reduction of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration at two different temperatures of 25°C and 60°C. A kinetic model on the effect of E and t was investigated too. As the E and t increased, the  $\text{Ca}^{2+}$  concentration decreased more than that of the control (= no HVI). The  $\text{Ca}^{2+}$  concentration decreased up to 81% at 15 kV/cm at 60°C, which was nearly 2 times greater than the control. With these experimental data-set of reduction of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration under different E and t, the kinetic model was developed. The relationship between E and t required to reduce the concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  by 30% was modeled at each temperature. The empirical model equations were;  $E^{0.83} \cdot t = 60.3$  at 25°C and  $E^{0.08} \cdot t = 1.1$  at 60°C. These equations state the products of  $E^n$  and t is always constant, which means that the required contact time can be reduced in accordance with the increment of E and vice versa.

**Key words:** High voltage impulse, Scale, Electric fields, Contact time,  $\text{CaCO}_3$

**주제어:** 고전압 임펄스, 스케일, 전계, 접촉시간, 탄산칼슘

Received 31 December 2020, revised 26 January 2021, accepted 1 February 2021.

\*Corresponding author: In-Soung Chang (E-mail: [cis@hoseo.edu](mailto:cis@hoseo.edu))

• 김담하 (석사과정) / Dam-Ha Kim (Master Student)

충남 아산시 배방읍 호서로 79번길, 31499

Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea

• 장인성 (교수) / In-Soung Chang (Professor)

충남 아산시 배방읍 호서로 79번길, 31499

Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do 31499, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

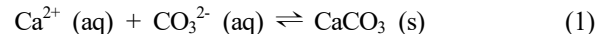
상수관로, 용수처리 시설, 열교환기 및 냉각탑의 배관에서 발생하는 스케일 형성은 배관의 통수능력 및 열전달 효율을 감소시켜 경제적인 손실로 직결된다. 이런 스케일 문제를 해결하기 위해 다양한 물리/화학적 수처리 공정이 시행되고 있다 (Fathi et al., 2006; Hasson et al., 1998; Murrer et al., 1998; Radler and Ousko-Oberhoffer, 2005; Souza et al., 2019; Zuo et al., 2020). 그러나 나노여과, 역삼투, 전기투석, 초음파조사, 자기장과 같은 물리적 처리공정은 에너지 소비가 큰 단점이 있으며, 석회소다 연수화, 이온교환과 같은 화학 공정은 슬러지와 같은 2차 부산물이 발생하여 이를 적절히 처리/처분하여야 하는 부담이 발생한다. 더군다나 화학약품의 운송, 보관, 사용에 관련된 안전 규제가 강화되는 추세이어서 수처리에 화학약품을 사용하는 것은 가급적 지양해야 할 해결책으로 인식되고 있다. 따라서 위에서 언급한 전통적인 탈염 공정의 단점을 보완할 수 있는 대체 탈염 공정의 개발이 꾸준히 요구되고 있다.

고전압 임펄스(high voltage impulse, 이하 HVI) 기술은 수십 kV 단위의 고전압을  $10^{-6}$  초 이하의 짧은 시간에 방전시켜 고전압 펄스 전기장을 발생시키는 기술이다. HVI 기술은 핵물리, 레이저, 군사기술 및 항공 우주 산업에 응용되다가, 1990년대 중반에 펄스전기장(PEF, pulsed electric field) 기술이라는 이름으로 널리 알려지기 시작하였다. 특히 PEF는 식품의 단백질, 세포 및 영양성분 등이 열에 의해 변성되는 것을 막기 위해 식품산업에서 비열살균(non-thermal sterilization) 기술로 널리 사용되어왔다 (Barbosa-Canovas and Zhang, 2001; Lelieveld et al., 2007; Pothakamury et al., 1995; Son and Kim, 2008).

최근 HVI는 수처리 공정, 소독 및 탈염 공정 연구에 활용되어 그 가능성을 주목받고 있는 기술이다 (Cho et al., 2017; Kim and Chang, 2019; Korachi et al., 2009; Lee et al., 2012; Yang et al., 2010a; Yang et al., 2010b). 본 연구에서는 경수 중의 칼슘이온( $\text{Ca}^{2+}$ )을 탄산칼슘( $\text{CaCO}_3$ )으로 석출시켜 제거하는 대체 탈염 공정의 일환으로 HVI를 활용하는 연구를 수행하였다. 배관 및 열교환기의 스케일 형성은 탄산칼슘 이외에도 황산칼슘( $\text{CaSO}_4$ ), 수산화마그네슘( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), 실리카( $\text{SiO}_2$ ) 등에 의해 스케일 문제가 발생할 수 있지만,

용해도곱상수( $K_{sp}$ ) 값이 매우 작은 탄산칼슘에 의한 스케일 형성이 가장 일반적이다. 본 연구에서는 다양한 스케일 발생 원인 중에서  $\text{CaCO}_3$ 에 의한 스케일 형성 반응만을 대상으로 하였다.

식 (1)과 같은  $\text{CaCO}_3$  형성반응의 표준엔탈피,  $\Delta H^\circ = 12.36 \text{ kJ/mol}$ 이고, 표준깁스자유에너지,  $\Delta G^\circ = -47.70 \text{ kJ/mol}$ 이다. 이는  $\text{CaCO}_3$  침전반응이 자발적 흡열반응(spontaneous endothermic reaction)임을 나타낸다 (Yang et al., 2010a). 식 (1)의  $\text{CaCO}_3$ 의 용해도곱 상수,  $K_{sp}$ 는  $25^\circ\text{C}$ 에서  $4.57 \times 10^{-9} \text{ mol}^2/\text{L}^2$ 이지만,  $60^\circ\text{C}$ 에서는  $1.82 \times 10^{-11} \text{ mol}^2/\text{L}^2$ 로 크게 감소한다 (Tchobanoglous and Schroeder, 1985). 이는  $\text{CaCO}_3$ 의 침전반응이 온도의 영향을 크게 받으며 온도가 높아질수록  $\text{CaCO}_3$  스케일 석출이 용이하다는 것을 의미이다.



본 연구에서는 HVI 공정의 가장 중요한 운전 인자인 전계(electric fields, 이하 E)와 접촉시간(contact time, 이하 t)에 따라  $\text{Ca}^{2+}$  이온 농도가 감소하는 정도를 상온( $25^\circ\text{C}$ )과 고온( $60^\circ\text{C}$ )에서 각각 관찰하였고, 이를 HVI를 인가하지 않은 대조군의  $\text{Ca}^{2+}$  이온 농도 감소와 비교하였다. 또한, HVI에 의해 감소한  $\text{Ca}^{2+}$  농도 자료를 반응속도론(reaction kinetics)에 기초하여  $\text{Ca}^{2+}$ 의 농도 감소에 필요한 전계(E) 세기와 접촉시간(t)의 상관관계식으로 표현하고자 하였다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 HVI 시스템

본 연구에 사용된 HVI 시스템은 세 가지 부분으로 구성되었다. 즉, i) 고전압 임펄스를 발생시키는 HVI 발생기(pulse generator), ii) 펄스의 파형을 관찰하는 오실로스코프(oscilloscope)와 iii) 발생한 고전압 임펄스를 시료에 전달하는 HVI 반응기(HVI reactor), iv) 시료 온도를 일정하게 유지하는 항온조(water bath)와 펌프(pump)로 구성되었다 (Fig. 1).

HVI 발생기는 인입 전압 220 V를 내부에서 30 kV 까지 승압할 수 있게 제작되었다. 원하는 전압으로 변압된 후 HVI 발생기 내부의 반도체 회로 스위치를 통하여 스퀘어(square) 형태의 펄스가 생성된다. 발생 펄스의 길이는 4~40  $\mu\text{s}$ , 주파수는 100~300 Hz로 조절

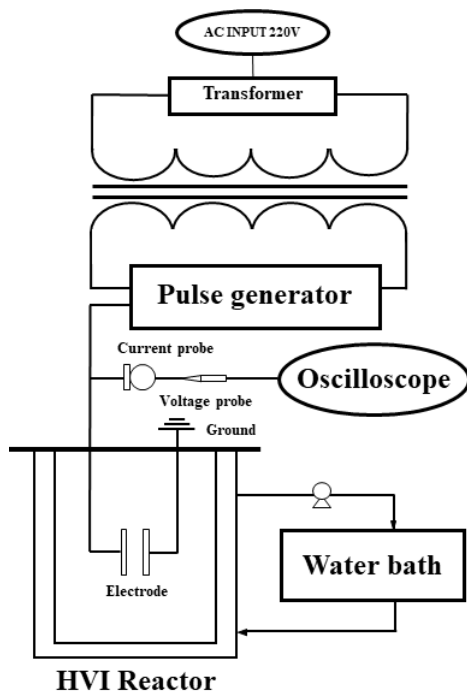


Fig. 1. Schematic diagram of the HVI system.

가능토록 설계 제작되었다. HVI 시스템에서 발생한 펄스를 시료에 인가하기 위해 제작된 HVI 반응기 내부의 전극에 연결하여 수중에 전계를 형성시킨다. 전압프로브(PVM-6 1000:1, North star, USA)와 전류프로브(CP150, LeCroy current probe, Teledyne LeCroy Inc., USA)를 오실로스코프(104xi-A, Teledyne LeCroy Inc., USA)에 연결하여 발생 펄스의 전압과 전류를 관찰할 수 있게 하였다.

HVI 반응기의 외부는 항온조에서 일정한 온도로 조절된 물이 펌프를 통하여 순환할 수 있도록 제작되었다. HVI 반응기의 직경은 150 mm, 높이는 250 mm이며 최대 용량은 3 L이다. 반응기 내부의 전극은 판 대 판(plate to plate)의 형식으로 설치되었으며 전극 판 사이의 간격은 10~30 mm로 조절이 가능하지만, 본 연구에서는 10 mm로 고정하고 실험을 진행하였다.

## 2.2 HVI 인가 조건

HVI 인가전압을 0, 5, 10, 15 kV로 증가시켜가며  $Ca^{2+}$ 의 농도 변화를 관찰하였다. 0 kV는 HVI를 인가하지 않은 대조군(control)이다. 항온조를 이용하여 시료 온도를 25°C와 60°C로 조절하고 HVI 인가실험을 두

온도에서 각각 수행하였다. HVI를 인가하는 동안 일정 시간마다 시료를 채취하여  $Ca^{2+}$ 의 농도를 측정하였다. 반응기 내부의 시료 용량은 2 L이다.

인가된 고전압 펄스의 길이는 4  $\mu$ s이고 주파수는 100 Hz로 고정하였다. 전극의 지름은 35 mm이고, 전극 간격은 10 mm이었다. 인가된 전계의 크기, E는 인가된 전압(V)에 비례하고 전극 거리(d)에 반비례한다. 즉,  $E = V/d$ 이다. 따라서 본 연구에서는 전극 거리를 10 mm로 고정하였으므로 만약 15 kV의 전압을 인가하였을 경우의 전계,  $E = 15$  kV/cm이다.

## 2.3 시료 조제와 $Ca^{2+}$ 이온 농도 분석

$CaCl_2$ 와  $NaHCO_3$ 를 초순수(18.3 M $\Omega$ )에 용해하여  $Ca^{2+}$ 과  $HCO_3^-$  각각 2.5 mM의 농도를 갖는 인공시료를 제조하였다. 조제된 시료의  $Ca^{2+}$  초기농도 2.5 mM은 250 mg/L as  $CaCO_3$ 로 환산된다. 이는 일반적 경도 분류에 따르면 경수(hard water)에 해당한다. 따라서  $CaCO_3$  침전이 잘 일어날 수 있도록  $Ca^{2+}$ 의 초기농도를 2.5 mM로 설정하였으며,  $Ca^{2+}$ 과  $HCO_3^-$ 는 1:1로 반응하므로  $HCO_3^-$ 의 초기농도 역시 2.5 mM로 설정하였다. 조제된 인공시료의 전기전도도는 1,200  $\mu$ S/cm이었다.

시료의  $Ca^{2+}$  이온 농도를 정성 및 정량분석하기 위해 이온크로마토그래피(881 Compact IC Pro., Metrohm Inc., Switzerland)를 사용하였다. 시료 중  $Ca^{2+}$ 를 분석하기 위해서 양이온 전용 컬럼(Metrosepp C4, Metrohm Inc., Switzerland)을 사용하였으며, 이동상은 Nitric acid 34mM과 Dipicolinic acid 14mM(Sigma Aldrich Inc.)을 초순수에 20배 희석하여 사용하였다. 이온크로마토그래피는 전도도 검출기(conductivity detector)가 내장되어 있으며, 양이온 표준용액(Multi element IC cation Std, Metrohm Inc., Switzerland)을 이용하여 검량선 작성 후  $Ca^{2+}$  이온 농도를 정량분석하였다.

## 2.4 HVI에 의한 $Ca^{2+}$ 농도 감소의 속도론 해석

HVI 공정의 중요한 운전 인자는 전계(E)와 접촉시간(t)이다. HVI 인가를 통해 감소하는  $Ca^{2+}$  농도의 감소속도를 속도론 관점에서 해석하여 전계(E)와 접촉시간(t)의 관계식으로 표현하고자 하였다. 수중  $Ca^{2+}$  농도가 감소하는 속도(=  $dC_{Ca^{2+}}/dt$ )를 1차반응(1st order reaction)으로 놓으면 식 (2)를 얻는다.

pp. 113-120

pp. 121-133

pp. 135-142

pp. 143-152

pp. 153-162

pp. 163-174

$$\frac{dC_{Ca^{2+}}}{dt} = -k' C_{Ca^{2+}} \quad (2)$$

k': temporary reaction rate constant, h<sup>-1</sup>

Ca<sup>2+</sup> 농도 감소속도에 영향을 미치는 전계(E)에 의한 영향을 고려하기 위해 임시반응속도상수, k'는 다음 식 (3)과 같이 반응속도상수 k와 E<sup>n</sup>에 비례하는 것으로 식을 바꿀 수 있다.

$$k' = kE^n \quad (3)$$

k': temporary reaction rate constant, h<sup>-1</sup>

k: reaction rate constant, h<sup>-1</sup>

E: electric field, kV/cm

n: experimental constant related with electric field

식 (3)을 식 (2)에 대입하면 식 (4)를 얻는다.

$$\frac{dC_{Ca^{2+}}}{dt} = -kE^n C_{Ca^{2+}} \quad (4)$$

C<sub>Ca<sup>2+</sup></sub> : 반응물질인 Ca<sup>2+</sup> 이온의 농도

식 (4)를 변수 분리하고 적분하여 정리하면 식 (7)을 얻는다.

$$dC_{Ca^{2+}} = -(kE^n t) dt \quad (5)$$

$$\int_{C_{Ca^{2+},0}}^{C_{Ca^{2+},t}} dC_{Ca^{2+}} = -(kE^n t) \int_0^t dt \quad (6)$$

$$\ln\left(\frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}}\right) = -kE^n t \quad (7)$$

C<sub>Ca<sup>2+</sup>,0</sub>: t = 0에서의 Ca<sup>2+</sup>의 초기농도

C<sub>Ca<sup>2+</sup>,t</sub>: 임의의 시간 t에서의 Ca<sup>2+</sup>의 농도

식 (7)의 양변에 로그를 취하고 lnE에 관하여 식을 정리하면 식 (8)이 된다.

$$\ln E = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} \right) \right] \quad (8)$$

식 (8)의 좌변 즉, ln(E)를 y축으로 놓고 x축은 ln(t)로 하여 실험자료를 그래프에 도시하여 직선을 얻는

다면 직선의 기울기와 y-절편값을 읽음으로써 상수 n과 k를 구할 수 있다. 직선의 기울기는 -1/n이고 y-절편값은  $\frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} \right) \right]$ 이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 HVI 시스템 발생 펄스의 관찰

HVI 시스템에서 발생하는 5 kV/cm 전계 펄스의 전압과 전류 파형을 Fig. 2에 제시하였다. 전압은 인가됨과 동시에 빠르게 상승하여 최대값, 5 kV에 도달한 후 약 4 μs 지속된 이후, 지수적으로 서서히 감소하여 25 μs 이전에 0 V에 도달하였다. 전류는 전압이 인가된 순간 서지 전류로 인해 빠르게 상승하였다가 곧바로 0으로 감소한다. 전계 크기가 10 kV/cm와 15 kV/cm에서 발생하는 펄스의 전압과 전류 파형도 5 kV/cm에서 발생하는 파형과 같은 형태를 보였다.

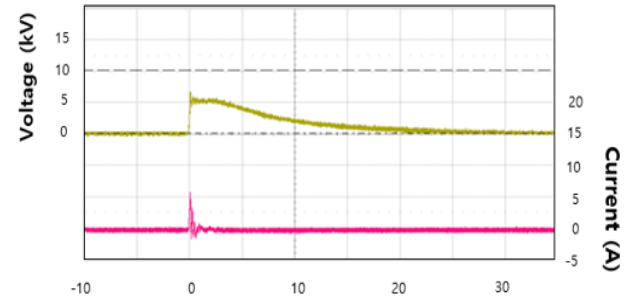


Fig. 2. Captured image of voltage and current waveforms generated by HVI.

#### 3.2 HVI에 의한 Ca<sup>2+</sup> 농도의 저감

HVI의 인가전압을 0, 5, 10, 15 kV로 변화시켜가며 시간 경과에 따라 측정된 Ca<sup>2+</sup>의 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. HVI를 인가하는 실험은 25°C와 60°C에서 각각 수행되었다.

HVI를 인가한 경우에 Ca<sup>2+</sup> 농도의 감소속도가 HVI를 인가하지 않은 대조군보다 빠름을 알 수 있다. 즉, HVI를 인가함에 따라 CaCO<sub>3</sub> 침전반응이 더욱 빨리 유도되고 있음을 시사하고 있다. 그리고 HVI 전계의 크기가 5 kV/cm에서 15 kV/cm로 증가할수록 Ca<sup>2+</sup> 농도의 감소 폭이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 25°C에서 HVI를 인가하지 않은 대조군의 Ca<sup>2+</sup> 농도는 21시간

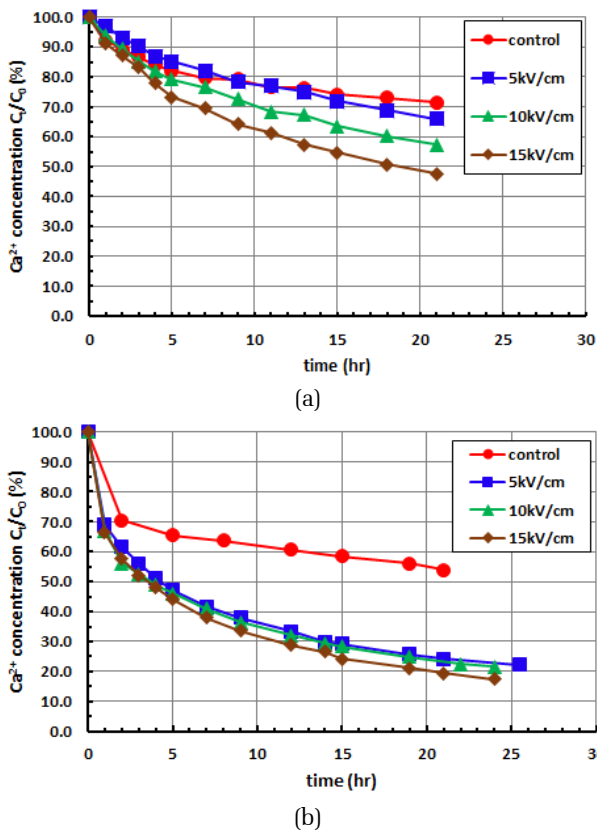


Fig. 3. Reduction of  $Ca^{2+}$  concentration as a function of contact time under different electric field at 25°C (a) and 60°C (b).

후 초기농도 대비 29% 감소한 것에 반해, 5 kV/cm 에서는 34%, 10 kV/cm에서는 43%, 15 kV/cm에서는 52%로 감소하였다. 반면에 온도가 60°C로 증가한 경우에는  $Ca^{2+}$  농도가 더욱 큰 폭으로 감소하였다. 이를 테면 대조군의  $Ca^{2+}$ 은 초기농도 대비 46% 감소하였지만, 5 kV/cm에서는 76%, 10 kV/cm에서는 78%, 15 kV/cm에서는 81%까지 감소하였다.

그러나 시료 온도가 60°C인 경우에는 HVI의 전계 (E)가 5 kV/cm에서 15 kV/cm로 상승하여도  $Ca^{2+}$  농도 감소 폭이 25°C의 경우보다는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는  $CaCO_3$  침전반응이 흡열반응이기 때문에 전계 (E)에 의한 침전 효과보다 온도에 의한 침전 효과가 더욱 크게 작용하고 있는 것으로 판단된다.

### 3.3 HVI 운전 인자가 칼슘농도 감소속도에 미치는 영향의 모델링

HVI의 전계(E)와 접촉시간(t)이  $Ca^{2+}$  농도 감소에

미치는 영향을 속도론 관점에서 해석하였다. 2.4절에서 살펴본 속도론 해석과 같이  $\ln(E)$  vs.  $\ln(t)$  플롯을 하기 위한 첫 번째 단계로 식 (8)의 우변에 있는 로그 안의  $\frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}}$  값에 대한 기준을 정할 필요가 있다. 즉, 칼슘의 초기농도에 대비 일정 시간 경과 후의 칼슘농도 비율이다. 본 연구에서는 25°C에서 5 kV/cm의 전계를 인가하였을 경우 가장 낮은 감소율인 34%를 보였던 사실에 기초하여, 칼슘 초기농도의 30%가 감소하였을 때를 기준으로 삼았다. 즉,  $\frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} = 0.7$ 을 기준으로 하여  $\ln(E)$  vs.  $\ln(t)$  플롯을 하였다.

Fig. 4에  $\frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} = 0.7$ 이 되는데 필요한 접촉시간을 얻기 위해 y축의 70% 지점에서 직선을 그은 후, 만나는 지점의 x축값 즉, 접촉시간 t를 읽었다. 이렇게 얻은

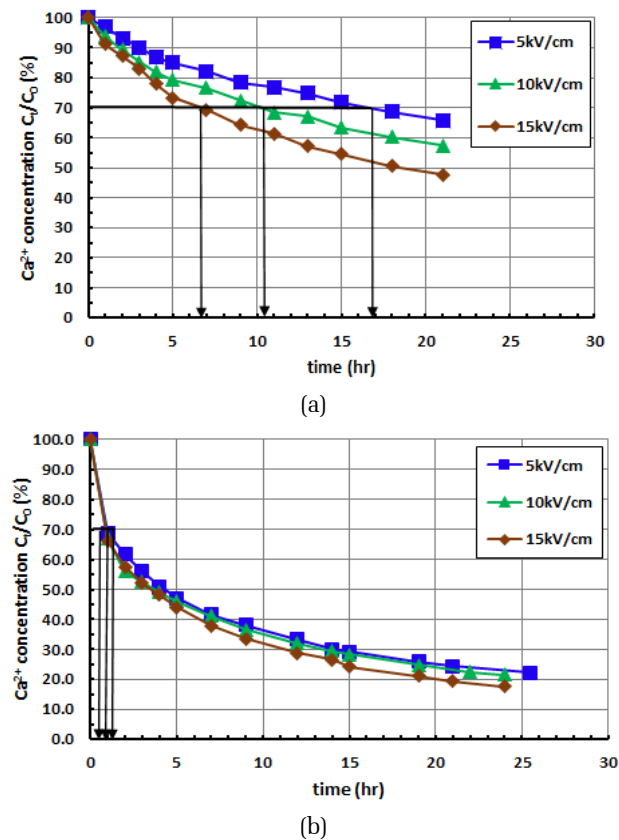


Fig. 4. Acquisition of the time needed to achieve 30% reduction of  $Ca^{2+}$  concentration under different electric field condition at 25°C (a) and 60°C (b).

접촉시간(t)과 전계(E)를 온도별로 정리하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1의 전계(E)와 접촉시간(t) 자료를 이용하여, 식 (8)처럼 전계 ln(E)를 y축으로, 접촉시간 ln(t)는 x축으로 놓고 그래프를 도시하였다. 즉, 25°C와 60°C에서 각각 ln(E) vs. ln(t) 플롯을 하여 Fig. 5에 나타내었다.

우선 25°C 조건에서 식 (8)를 이용하여 Fig. 5의 직선의 기울기를 구하여 상수 n을 구하면 다음과 같다. 시간인 x축 좌표가 2와 11일 경우, 그에 해당하는 y축 좌표는 66.4와 8.6에 해당한다.

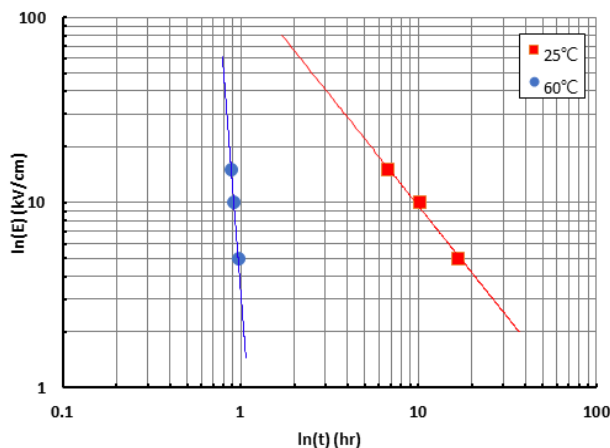
$$\ln E = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} \right) \right]$$

$$slope = -\frac{1}{n} = -\frac{\ln 66.4 - \ln 8.6}{\ln 11 - \ln 2} = -1.2$$

$$\therefore n = 0.83 \tag{9}$$

**Table 1.** Pairs of electric field(E) and contact time(t) required to achieve 30% reduction of Ca<sup>2+</sup> concentration at different temperature

Electric field (E)	Contact time needed to reach 30% reduction of Ca <sup>2+</sup> concentration (hr)	
	25°C	6°C
5 (kV/cm)	16.8	0.97
10 (kV/cm)	10.2	0.91
15 (kV/cm)	6.7	0.89



**Fig. 5.** ln(E) vs. ln(t) plots for 30% of reduction of Ca<sup>2+</sup> concentration at two different temperature.

상수 k를 구하기 위하여 x축 값이 1일 때의 y축 값 152.6을 대입하면

$$\ln 152.6 = \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} \right) \right]$$

$$n(\ln 152.6) = \ln \left[ \frac{1}{k} (-\ln 0.7) \right]$$

$$0.83(5.0) = \ln \left( \frac{0.36}{k} \right)$$

$$\therefore k = 0.006 \tag{10}$$

위에서 구한 상수 n과 k값을 식 (8)에 대입하여 정리하면

$$\ln E = -\frac{1}{n} \ln t + \frac{1}{n} \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} \right) \right]$$

$$n \ln E + \ln t = \ln \left[ \frac{1}{k} \left( -\ln \frac{C_{Ca^{2+},t}}{C_{Ca^{2+},0}} \right) \right]$$

$$0.83 \ln E + \ln t = \ln \left[ \frac{1}{0.006} (-\ln 0.7) \right]$$

$$0.83 \ln E + \ln t = 4.1$$

$$\ln (E^{0.83} \cdot t) = 4.1$$

따라서,  $E^{0.83} \cdot t = 60.3$  (11)

마찬가지 방법으로 60°C 조건에서 n과 k를 구하면 n = 0.08, k = 0.33을 얻는다. 이를 식 (8)에 대입하여 정리하면 식 (12)를 얻는다.

$$0.08 \ln E + \ln t = \ln \left[ \frac{1}{0.33} (-\ln 0.7) \right]$$

$$0.08 \ln E + \ln t = 0.08$$

$$\ln (E^{0.08} \cdot t) = 0.08$$

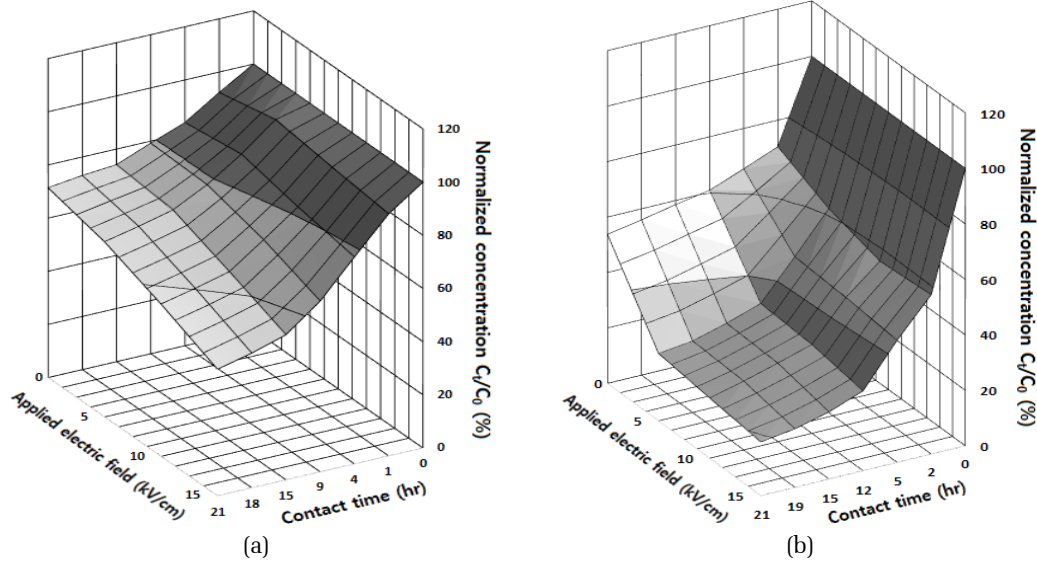
$$E^{0.08} \cdot t = 1.1 \tag{12}$$

결론적으로 HVI의 전계(E)와 접촉시간(t) 간의 상관관계식을 온도별로 정리하면 다음과 같다.

$$E^{0.83} \cdot t = 60.3 \text{ at } 25^\circ\text{C}$$

$$E^{0.08} \cdot t = 1.1 \text{ at } 60^\circ\text{C}$$

위 모델식은 특정 온도에서 Ca<sup>2+</sup>의 농도가 30% 감소하는데 요구되는 전계(E)와 접촉시간(t) 간의 상관관계를 나타낸다. 즉, Ca<sup>2+</sup> 농도가 30% 감소하는데 요



**Fig. 6.** 3D plots showing how the  $Ca^{2+}$  concentration reduces under different electric field(E) and contact time(t) at 25°C (a) and 60°C (b).

구되는 전계의 세기가 증가하면 접촉시간이 그만큼 감소하고, 반대로 접촉시간이 증가하면 전계가 감소하는 정도를 정량적으로 표현한 식이다.

식 (11)과 (12)에서 온도 60°C에서의  $n$ 값(=0.08)이 25°C일 때의 값(=0.83)보다 작음을 주목할 필요가 있다. 즉, 60°C에서 전계(E)의 크기가  $Ca^{2+}$  농도 감소에 미치는 영향이 25°C일 때보다 작음을 의미한다. 앞 절 (3.2)의 실험결과를 설명하는 부분에서 밝혔듯이,  $CaCO_3$  침전반응이 흡열반응이기 때문에 고온(60°C)에서는 온도에 의한 침전 효과가 전계(E)에 의한 침전유도 효과보다 더욱 크게 작용하고 있다고 지적한 부분과 부합하고 있음을 두 식은 정량적으로 말해주고 있다.

위 모델식을 이용하여 Fig. 6에 25°C와 60°C에서의 전계와 접촉시간이  $Ca^{2+}$  농도 감소에 미치는 영향을 입체적으로 볼 수 있도록 그래프로 나타내었다. x축은 접촉시간, y축은 전계이고 z축은  $Ca^{2+}$  농도 감소 (%)로 나타내었다. 즉, 상온(25°C)과 고온(60°C)에서 HVI의 중요한 운전 인자인 전계(E)와 접촉시간(t)이 증가할수록  $Ca^{2+}$  농도가 감소하는 경향을 입체적으로 볼 수 있게 하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 HVI 기술을 활용하여 수중  $Ca^{2+}$ 를  $CaCO_3$  형태로 석출시켜 탈염하는 공정에 관한 연구이다. 특히, HVI 공정을 운영하는데 중요한 운전변수

인 전계(E)와 접촉시간(t)의 영향을 상온(25°C)과 고온(60°C)에서 각각 살펴보았으며 도출된 결과를 다음과 같이 요약하였다.

1) HVI를 인가하면 대조군보다  $Ca^{2+}$  농도가 더욱 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 대조군의  $Ca^{2+}$ 은 초기농도 대비 46%까지 감소하였지만, 15 kV/cm의 HVI 인가조건에서는 동일한 시간에 81%까지 감소하였다. 즉, HVI 인가에 의해  $CaCO_3$  침전반응이 더욱 빠른 속도로 유도되고 있음을 확인하였다.

2) HVI 인가 여부와 관계없이 상온인 25°C에서보다 60°C에서  $Ca^{2+}$  농도가 더욱 많이 감소하였다. 이는  $CaCO_3$  석출 반응이 흡열반응이기 때문이며, HVI의 전계(E)와 접촉시간(t)이 증가할수록  $Ca^{2+}$  농도는 더욱 큰 폭으로 감소하였다.

3)  $Ca^{2+}$  이온 농도를 감소시키기 위해 요구되는 HVI의 전계(E)와 접촉시간(t) 사이의 상관관계식을 도출하였다. 25°C에서는  $E^{0.83} \cdot t = 60.3$ 이었고, 60°C에서는  $E^{0.08} \cdot t = 1.1$ 이었다. 위 식의 의미는 특정 온도에서  $Ca^{2+}$  농도가 30% 감소하는데 요구되는 전계의 세기가 증가하면 접촉시간이 그만큼 감소하고, 접촉시간이 증가하면 전계가 감소하는 정도를 정량적으로 표현하고 있다.

## 사 사

본 연구는 한국연구재단의 연구비 지원으로 수행되

있습니다. 이에 감사드립니다. (과제번호: 2019R1F1A1042061).

## References

- Barbosa-Canovas, G.V. and Zhang, Q.H. (2001). Pulsed electric fields in food processing, fundamental aspects and applications, Technomic publishing company, Inc., USA, 45-56.
- Cho, S.Y., Kim, T.H., Chang, I.S., Hong, W.K. and Lee, J.H. (2017). Effect of initial volume of hard water and contact time on the reduction of calcium ion concentration using high voltage impulse technique, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, 66(7), 1066-1071.
- Fathi, A., Mohamed, T., Claude, G., Maurin, G. and Mohamed, B.A. (2006). Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate, *Water Res.*, 40, 1941-1950.
- Hasson, D., Semiat, R., Bramson, D., Busch, M. and Limoni-Relis, B. (1998). Suppression of  $\text{CaCO}_3$  scale deposition by anti-scalants, *Desalination*, 118(1-3), 285-296.
- Kim, J.H. and Chang, I.S. (2019). Effect of the applied voltage of pulsed electric fields and temperature on the reduction of calcium ion concentration, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 33(2), 95-101.
- Korachi, M., Turan, Z., Şentürk, K., Sahin, F. and Aslan, N. (2009). An investigation into the biocidal effect of high voltage AC/DC atmospheric corona discharges on bacteria, yeasts, fungi and algae, *J. Electrostat.*, 67(4), 678-685.
- Lee, H.D., Kim, J.O., Kim, H.K. and Chung J.W. (2012). Degradation of methyl orange by pulsed corona discharges in aqueous solution, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 26(1), 69-76.
- Lelieveld, H.L.M., Notermans, S. and de Haan, S.W.H. (2007). Food preservation by pulsed electric fields, Woodhead Publishing, England, 1-8.
- Murrer, J. and Rosberg, R. (1998), Desalting of seawater using UF and RO - results of a pilot study, *Desalination*, 118(1-3), 1-4.
- Pothakamury, Usha R., Monsalve-Gonzalez, A., Barbosa-Canovas, Gustavo V. and Swanson, Barry H. (1995). Inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in model foods by pulsed electric field technology, *Food Res. Int.*, 28(2), 167-171.
- Radler, S. and Ousko-Oberhoffer, U. (2005). "Optimized heat exchanger management-achieving financial and environmental targets", *Sixth international conference on heat exchanger fouling and cleaning*, Kloster Irsee, Germany, 327-331.
- Son, S.M. and Shin, J.K. (2008). The effect of environmental factors on inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* by high voltage pulsed electric fields, *Food Eng. Prog.*, 12(3), 154-162.
- Souza, A.V.A., Rosário, F. and Cajaiba, J. (2019). Evaluation of calcium carbonate inhibitors using sintered metal filter in a pressurized dynamic system, *Materials*, 12(11), 1849-1861.
- Tchobanoglous, G. and Schroeder, E.D. (1985). *Water quality, characteristics, modeling, modification*. Pearson Education Inc., USA, 257-259.
- Yang, Y., Fridman, A. and Cho, Y.I. (2010a). Plasma discharge in water, *Adv. Heat Transf.*, 42, 179-292.
- Yang, Y., Kim, H., Starikovskiy A., Fridman A. and Cho Y.I. (2010b). Application of pulsed spark discharge for calcium carbonate precipitation in hard water, *Water Res.*, 44, 3659-3668.
- Zuo, Z., Yang, W., Zhang, K., Chen, Y., Li, M., Zuo, Y., Yin, X and Liu, Y. (2020). Effect of scale inhibitors on the structure and morphology of  $\text{CaCO}_3$  crystal electrochemically deposited on TA1 alloy, *J. Colloid Interface Sci.*, 562, 558-566.