

고전압 임펄스에 의한 스케일 제어

양선희¹, 장인성^{1*}
¹호서대학교 환경공학과

Control of scale formation using high voltage impulse

Seon-Hee Yang¹, In-Soung Chang^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Hoseo University

요약 본 연구에서는 산업용수의 처리 및 운용 과정에서 중요한 문제점으로 지목되고 있는 탄산칼슘에 의한 스케일 형성을 제어하기 위해 고전압 임펄스 (High Voltage Impulse, HVI) 기술의 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 전원부, 고전압발생부, 축전기, 스위치 및 임펄스발생기로 구성된 HVI를 제작하여 17kV의 고전압 펄스를 생성시켰다. 반응조에 Ca^{2+} 를 포함하고 있는 인공 시료를 투입한 후 HVI를 인가하였다. HVI 접촉시간 5분 후에는 Ca^{2+} 초기값의 3.0% 가량만 감소하였으나, 접촉시간 60분 후에는 약 13.7% 가량 감소하였다. HVI 인가로 인해 용액의 온도와 pH는 증가하였고 전기전도도는 탄산칼슘 석출로 인해 감소하는 것을 확인하였다. 칼슘 이온의 감소가 충분하지는 않았지만 전계의 세기 및 접촉시간에 따른 제거율에 관한 구체적인 정보가 얻어진다면, HVI 기술을 적용하여 Ca^{2+} 이온을 탄산칼슘으로 미리 석출시켜 제거하는 연수화 (softening) 공정이나 탈염 기술로 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

Abstract The aim of this study was to evaluate the feasibility of application of the high voltage impulse (HVI) technique to the control of scale formation by calcium carbonate, which is pointed out as an important issue in industrial water treatment. The HVI system consisted of the power supply, high voltage generator, capacitors, switch and impulse generator was designed and made in laboratory scale, which can make 17kV impulse. HVI was introduced to the reactor that was filled with synthetic water containing Ca^{2+} ion. The concentration of calcium ion decreased only 3.0% after 5 minutes of contact time. However, it decreased up to 13.7% after 60 minutes of HVI contact time. Temperature and pH increased but conductivity decreased due to precipitation of the calcium carbonate. Although the decrease in concentration of calcium ion was not sufficient, it was verified that the HVI technique could be applicable for the softening and desalting processes.

Key Words : Calcium carbonate, Desalting, High voltage impulse, Scale formation, Softening

1. 서론

다양한 분야의 산업 생산시설 및 공정에서 산업용수가 사용되고 있다. 산업용수 중에서도 특히 보일러 용수와 같이 열전달 (heat transfer)을 수행하는 공정에 사용되는 산업용수는 스케일 (scale) 생성이 큰 문제점으로 지목되고 있다. 용수 중의 용존 물질이 배관 및 밸브 등

에 침전 (precipitation) 및 침착 (deposit)되어 스케일을 형성하면 열전달 효율이 저하되어 경제성이 떨어진다. 따라서 배관의 스케일 형성은 공정 운영의 중요한 관심사 중의 하나이다. 스케일 형성은 수중의 칼슘이온 (Ca^{++}) 또는 마그네슘이온 (Mg^{++})의 농도가 높은 즉, 경도 (hardness)가 높은 용수를 사용할 때 발생하며, 이 때 생성되는 침전물질은 주로 용해도곱상수 (K_{sp}) 값이 작은

본 연구는 한국연구재단의 연구과제 (NRF-2012R1A2A2A04045299)로 수행되었음.

*Corresponding Author : In-Soung Chang(Hoseo University)

Tel: +82-41-540-5744 email:cis@hoseo.edu

Received December 2, 2014

Revised (1st February 26, 2015, 2nd March 9, 2015)

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

탄산칼슘 (CaCO₃)인 경우가 대부분이다. 즉 주로 탄산칼슘이 관벽에 부착하고 결정으로 성장하여 스케일을 형성하는 주요 메커니즘이다 [1].

배관 등에 발생한 스케일을 제거하는 방법은 물리적 방법과 화학적 방법으로 구분할 수 있다. 물리적 방법으로는 배관의 내경보다 큰 볼이나 브러쉬, 스크러프 (scruff)를 강제로 삽입시켜 내부를 청소하는 방법, 배관 내에 고압의 물을 분사시켜 스케일을 제거하는 고압수 분사 세관법, 고압의 공기, 압축공기, 또는 물을 이용하여 모래를 고속으로 분사시켜 그 충격력에 의해 스케일을 제거하는 샌드블라스트법 등이 있으나, 관벽의 마모나 부식에 의한 배관설비의 수명단축과 작업 시 가동을 중지하여야 하는 문제점이 있다 [2, 3].

화학적 방법은 오존 (O₃)과 과산화수소 (H₂O₂)와 같은 산화제 또는 염산과 같이 스케일에 대해 용해력이 강한 화학 약품을 이용하는 것이다. 그러나 이들 화학적 방법은 위험한 화합물의 이송, 보관, 취급과정에 소요되는 안전 비용의 증가, 사용 시 유독 가스 발생 또는 냄새를 유발하는 등 많은 문제점을 가지고 있다 [4].

따라서 발생한 스케일을 제거하기보다는 스케일이 발생하기 이전에 적절한 전처리 공정을 통하여 용수의 경도유발 물질을 제거하는 탈염공정 (demineralization)을 거쳐 산업용수로 사용하는 것이 일반적이다. 이온교환 (ion exchange) 공정 또는 역삼투 (reverse osmosis) 공정 등이 대표적인 탈염공정으로 사용되고 있다. 그러나 이온교환 공정은 이온교환 수지의 비용이 부담스러우며, 이온교환 수지의 재생을 위해 고농도의 염 용액이 필요하여 위에서 언급한 화학약품의 사용에서 오는 불편함을 피할 수 없다. 역삼투 공정은 그 특성상 삼투압 이상의 압력을 가해 주어야 하기 때문에 막대한 에너지 비용이 유지관리비로 전가되는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 탈염공정이 가지고 있는 이런 문제점들을 해결하기 위한 대체 탈염 (alternative desalting) 공정을 개발하기 위해서 HVI (High Voltage Impulse) 기술을 활용하고자 하였다. HVI 기술은 식품산업에서는 PEF (Pulsed Electric Fields)라고 알려져 있으며, 식품의 비열살균 (non-thermal sterilization) 목적으로 개발되어 활용되고 있다. 보통 5-80kV/cm의 고전압 전계 하에서 발생하는 고전압 펄스가 적게는 수십 나노초 (nano-seconds)에서 길게는 수백 마이크로초 (micro-seconds) 동안 미생물의 세포막 (또는

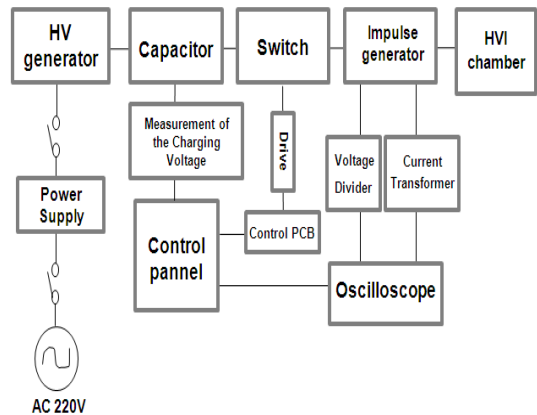
세포벽)에 인가되면 세포막에 구멍이 생기는 기작 (electro-poration)으로 미생물이 사멸하여 멸균 된다.

이러한 HVI 기술을 이용하면 수중 방전 (aqua discharge)이 발생하며 이로 인해 수중의 이온들이 국지적인 화학침전 반응이 발생하여 탈염을 유도할 수 있는 가능성이 있는 것으로 알려져 있다 [5]. 따라서 본 연구의 목적은 HVI 기술을 활용하여 수중의 칼슘 이온을 탄산칼슘으로 침전 유도하는 대체 탈염기술의 가능성을 파악하는 데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

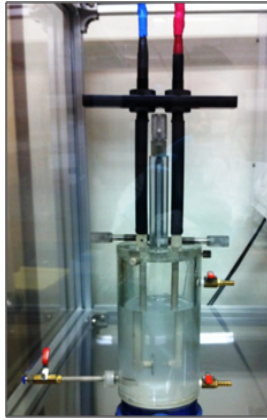
Fig. 1에 도시된 HVI 시스템은 전원 (power supply), 고전압발생기 (high voltage generator), 축전기 (capacitor bank), switch, 펄스발생기 (impulse generator), HVI 반응기 (HVI chamber)로 구성되어 있다. 교류전원은 고전압 발생기에서 승압된 후 축전기에 저장된 후 스위치 작동에 의해 임펄스 발생기에 의해 HVI가 만들어진다. 만들어진 HVI는 반응기에 연결된 전극으로 보내져 필요한 반응을 유도한다. HVI 시스템과 연결된 전압분배기와 전류변환기를 오실로스코프 (oscilloscope, TDS 2022B, Tektronix, USA)와 연결하여 반응기 내에서 측정되는 고전압 펄스의 전압과 전류 파형을 확인할 수 있도록 하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of the HVI system

Fig. 2에 고전압 펄스가 가해지는 고전압 반응기 (HVI

chamber)의 외관 사진을 제시하였다. 반응기는 아크릴 재질로 제작하였다. 반응기의 직경과 길이는 각각 90 mm과 200mm이다. 전극은 평판형 (plate type)과 침형 (needle type) 각각을 제작하여 반응기 내부 중간에 위치하게끔 하였다. 전극의 재질은 stainless steel (SUS 306) 이었고, 평판전극의 직경은 70mm이고 침전극의 직경은 5mm이었다. 전극 간의 거리는 1~30mm의 범위에서 나사를 이용하여 간극을 조절할 수 있도록 제작하였다.



[Fig. 2] Photograph of the HVI chamber

2.2 분석 항목 및 방법

본 연구에서는 산업용수에서 발생 가능한 모든 스케일 일을 대상으로 하지 않았고, 가장 중요한 침전물인 탄산칼슘 침전물을 대상으로 삼았다. 따라서 수중의 Ca^{2+} 농도만 측정하였다. 칼슘이온만을 포함하는 인공시료를 준비하고 Ca^{2+} 농도는 Standard Methods (APHA, 1995)에 준하여 측정하였다 [6]. 전기전도도와 pH는 conductivity meter와 pH meter를 사용하였으며, 각 항목의 분석방법 및 장치는 Table 1에 나타내었다.

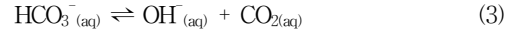
[Table 1] Analytical methods and apparatus

Items	Methods and Apparatus
Conductivity	Conductivity meter (Hach HQ14d)
pH	pH meter (Hach DQ11d)
Ca	EDTA titration, Standard Method

3. 스케일 형성의 이론적 고찰

산업용수에서 중요한 스케일 형성은 탄산칼슘

($CaCO_3$)의 침전 생성 반응이다. 수중의 칼슘이온은 침전에 관련된 다음 식 (1) - (3)과 같은 화학반응을 통해 탄산칼슘으로 생성되는 것으로 알려져 있다 [7, 8].



탄산칼슘의 침전반응이 유도되기 위해서는 식 (1)과 같이 수중의 칼슘이온이 탄산염 이온 (CO_3^{2-})과 반응하여야만 한다. 그러나 자연수의 pH 범위에서는 탄산염 이온보다는 중탄산 이온 (HCO_3^{-})으로 존재하는 비율이 높기 때문에 침전반응이 일어나기 위해서는 반응식 (2)처럼 중탄산 이온이 탄산염 이온으로 전환되어야 한다. 중탄산 이온이 탄산염 이온으로 원활하게 전환하기 위해서는 (식 2의 정반응 방향) pH가 증가되어야 한다.

한편, 반응식 (3)은 중탄산 이온의 농도가 적어질 수 있는 또 다른 반응이다. 즉, pH가 감소 (OH^{-} 의 농도가 감소)할수록 (3) 반응식은 정방향으로 진행하게 된다. 수중의 이산화탄소, $CO_{2(aq)}$ 는 주변의 온도가 증가하면 수중에서 기화하여 $CO_{2(g)}$ 로 날아가 버리게 된다. 이렇게 되면 중탄산 이온의 농도가 적어지게 되고 결국 탄산칼슘으로 침전반응이 발생하기 어렵게 된다. 즉, 칼슘이온과 침전되어야 하는 탄산염 이온이 모자라기 때문에 탄산칼슘 침전은 발생하지 않고 결국, 칼슘 이온은 수중에 그대로 남게 된다. 즉, 충분히 침전을 유도하여 수중의 칼슘이온 농도를 감소시키는 것이 목적이므로 가급적 (3) 반응이 발생하지 않게 하는 것이 중요하다.

궁극적으로는 (4) 식과 같이 용수 중의 중탄산 이온이 모두 탄산염 이온으로 변환되고 이렇게 변환된 탄산염 이온이 칼슘과 침전반응을 일으키도록 하는 것이다 [9, 10].

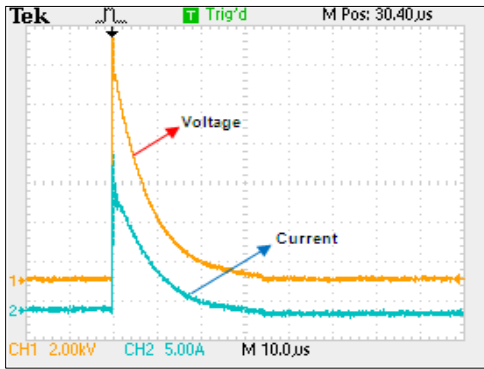


따라서 본 연구에서는 HVI 방전을 이용하여 수중의 Ca^{2+} 이온을 $CaCO_3$ 로 침전 유도하여 제거함으로써 스케일 제어 공정으로의 가능성을 평가하고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 HVI 발생 특성

탄산칼슘 침전을 유도하기 위해서 제작된 HVI 시스템을 이용하여 생성된 펄스의 정보를 오실로스코프를 이용하여 수집 및 기록하였다. 발생한 펄스의 전형적인 전압 및 전류의 파형을 Fig. 3에 나타내었다.

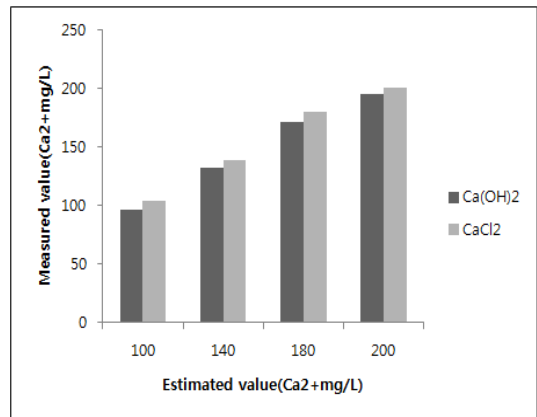


[Fig. 3] Typical voltage and current waveform of the pulse

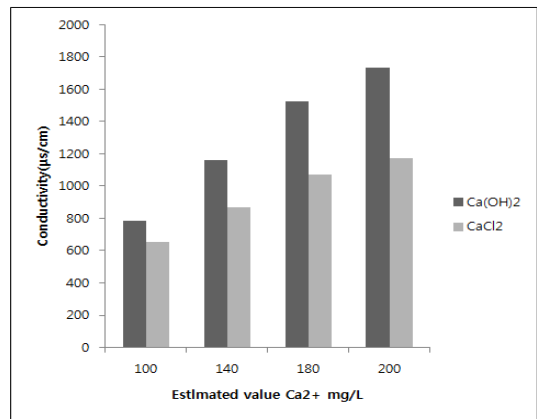
HVI 시스템에서 발생한 펄스의 전압은 처음에 급격하게 상승하여 최고치 (peak voltage)까지 도달한다. 이후 지수적으로 감소 (exponential decay)한다. 본 연구에서 생성된 펄스의 전압 범위는 약 0 - 30 kV이다. 펄스가 지속되는 시간 (pulse width)은 펄스가 만들어진 조건에 따라 다르지만, 0 - 400 microsecond 범위에 있다. 전류 역시 전압과 유사한 파형을 보이고 있다.

4.2 칼슘 시료의 전기전도도에 관한 고찰

두 가지 화학제, Ca(OH)₂와 CaCl₂를 사용하여 일정 농도의 Ca²⁺이 존재하는 인공시료를 조제하였다. EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid)를 이용한 적정법으로 측정할 수 있는 적정 Ca²⁺ 농도는 100 ~ 200 Ca²⁺ mg/L이다. 따라서 Ca(OH)₂와 CaCl₂를 Ca²⁺농도가 약 100 ~ 200 Ca²⁺ mg/L가 되도록 조제한 뒤 각각의 Ca²⁺농도를 EDTA 적정법으로 측정하였다 (Fig. 4). 두 가지 시약 모두 EDTA에 의해 측정된 Ca²⁺이온의 농도는 조제한 농도와 거의 유사한 값이 측정되었다. 따라서 본 연구에서는 조제된 인공시료의 Ca²⁺이온 농도를 EDTA로 적정하여 측정하는데 큰 무리가 없다고 사료되었다.



[Fig. 4] Comparison of Ca²⁺ ion concentration between estimated and measured values



[Fig. 5] Correlation of the estimated Ca²⁺ ion concentration and the electrical conductivity

인공시료는 Ca²⁺이온을 포함한 한 종류의 염으로만 조제되었기 때문에 시료의 농도를 간편한 전기전도도 (electrical conductivity) 측정으로 가능할 것으로 판단되어 전기전도도를 측정하였다 (Fig. 5). 그런데 Ca(OH)₂로 제조한 시료의 전기전도도가 CaCl₂로 제조한 시료의 전기전도도보다 높게 측정되었다. 그 이유는 시약을 구성하는 각 성분 이온들의 전기전도도 특성의 차이 때문으로 이해할 수 있다. 전기전도도란 용액이 전하를 운반할 수 있는 척도이기 때문에 저항 (resistance)의 역수이다. 따라서 전기전도도의 단위는 siemens/m나 1/Ωm 등을 사용한다.

용액의 전도성 (conductance), G는 전극의 면적 A에 비례하고 전극간의 거리 L에 반비례한다. 비례상수 k를 이용하면 다음과 같은 식이 성립된다.

$$G = k \left(\frac{A}{L} \right) \quad (5)$$

이 식에서 비례상수, k를 전도도 (conductivity)라고 한다 (좀 더 정확하게는 specific conductivity 라고 한다). 단위 농도에 따른 전도도를 equivalent conductivity라고 하며, 다음 식처럼 Λ 로 나타낸다.

$$\Lambda = 0.001k/\text{concentration} \quad (6)$$

용질의 농도가 묽어지면 (0으로 수렴) Λ 는 일정한 값으로 되며, Λ° 로 표시된다. Λ° 는 각 이온 종마다 다른 값을 가지고 있으며 대표적인 몇 가지 이온들의 값을 Table 2에 제시하였다.

[Table 2] Equivalent conductances, Λ° and Λ° (mho-cm²/equivalent) for ions in water at 25.0°C [11]

Cation	Λ°	Anion	Λ°
H ⁺	350	OH ⁻	198.6
1/2 Ca ²⁺	59.5	HCO ₃ ⁻	44.5
1/2 Mg ²⁺	53.1	1/2 CO ₃ ²⁻	72
Na ⁺	50.1	1/2 SO ₄ ²⁻	80.0
K ⁺	73.5	Cl ⁻	76.4
NH ₄ ⁺	73.5	Ac ⁻	40.9
1/2 Fe ²⁺	54	F ⁻	54.4
1/3 Fe ³⁺	68	NO ₃ ⁻	71.4
		H ₂ PO ₄ ⁻	33
		1/2 HPO ₄ ²⁻	57

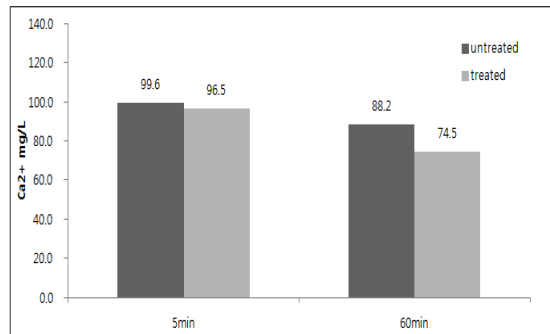
본 연구에서 칼슘을 포함한 인공시료를 만들기 위해 사용한 두 종류의 화학제, Ca(OH)₂와 CaCl₂은 공히 칼슘 이온을 포함하고 있으나 음이온이 서로 다르다. Table 2에 의하면 수산이온 (OH⁻)의 Λ° 값은 198.6 mho-cm²/equivalent이고, 염화이온 (Cl⁻)의 Λ° 값은 76.4mho-cm²/equivalent임을 알 수 있다. 수산이온의 Λ° 값이 염화이온보다 매우 크기 때문에 Fig. 5에서처럼 Ca(OH)₂의 전기전도도 값이 CaCl₂보다 높게 측정되었던 것이다.

4.3 HVI 인가에 의한 물리화학적 성상변화

탄산칼슘 침전반응을 유도하기 위하여 CaCl₂와 NaHCO₃를 혼합하여 Ca²⁺의 초기농도가 약 100mg/L 정도가 되는 인공시료를 제조하여 HVI 반응기에 투입한

후 HVI를 인가하면서 용액의 물리화학적 성상변화를 관찰하였다. 이 때 HVI 시스템의 충전전압은 용액의 전도도에 따라 인가할 수 있는 전압의 크기가 제한되는데 본 실험에서는 전압을 약 17kV로 조절하여 HVI를 인가하였다. HVI 인가에 따른 시료 성상의 변화를 관찰하기 위하여 처리시간 5분과 60분에 시료를 채취한 후 분석하였다.

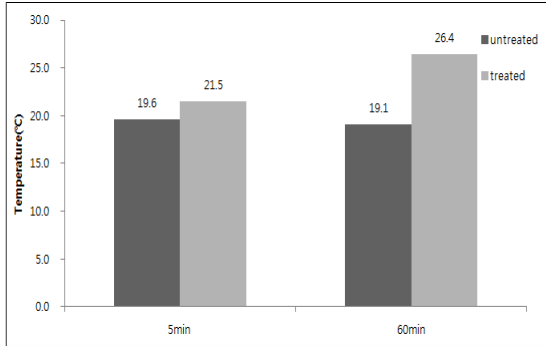
HVI 처리 전/후의 시료의 Ca²⁺농도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 인가시간을 60분 이상으로 증가시킬 경우 본 연구에 사용된 고전압 장치에 기계적인 무리가 발생되어 인가시간을 60분으로 제한하였다. Ca²⁺농도는 HVI의 접촉시간 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, Ca²⁺농도는 접촉시간 5분에서는 초기값 100mg/L에서 97mg/L로 감소하였으나 접촉시간 60분이 경과한 후에는 75 mg/L로 약 25% 가량 감소하였다.



[Fig. 6] Change in the concentration of Ca²⁺ according to the HVI contact time

한편 HVI로 처리하지 않은 시료 (Fig. 6에서 untreated로 표시)의 Ca²⁺농도도 시간 경과에 따라 감소하고 있다. 즉 시료 중 Ca²⁺과 탄산염 이온의 침전반응이 발생하여 수중의 Ca²⁺ 농도가 감소한 것이다. 따라서 이와 같이 자연적으로 발생하는 침전반응에 의한 Ca²⁺ 농도 감소를 감안한다면 순수하게 HVI 처리에 의한 Ca²⁺ 농도 감소 효과는 수정되어야 한다. 즉, 60분후에 Ca²⁺ 농도는 25% 가 감소된 것이 아니라 약 13.7% (= 88.2 - 74.5) 가량 감소된 것으로 제평가 되어야 한다. 자연적인 침전반응에 의한 칼슘이온의 농도 감소를 감안하더라도 HVI에 의하여 약 14% 가량의 농도가 감소한 것은 HVI가 침전반응을 촉진시킬 수 있는 환경을 조성한 것으로 판단된다. 고전압에 의해 전극 주변에 국지적인 온도상승에 의한 침전반응이 촉진되었을 것으로 판단되나 그 정확한 메커니즘에 관한 구체적인 증거는 없다. 추후에

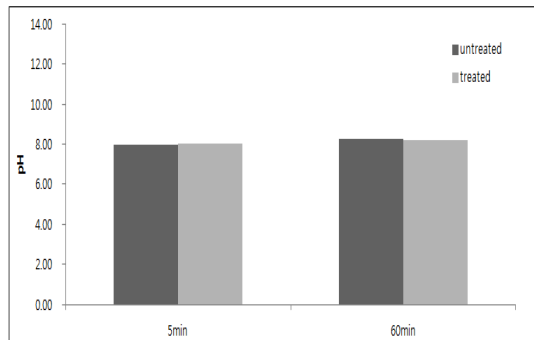
메카니즘을 밝히기 위한 보완 연구가 필요한 것으로 판단된다.



[Fig. 7] Temperature change according to the HVI contact time

Fig. 7에 HVI 처리 전/후의 온도 변화를 나타내었다. HVI 접촉시간이 증가할수록 온도의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 시료의 온도는 HVI 접촉시간 5분 후에 초기 온도 19.6°C에서 21.5°C로 증가하였고, 접촉시간 60분 후에는 26.4°C로 증가하였다.

고전압 방전에 의해 생성되는 플라즈마 영역에서 높은 에너지의 전자들이 물 분자와 충돌하여 라디칼, 과산화수소 등 다양한 반응성 물질들이 생성될 수 있으며 자외선 및 충격파 (shock waves)와 같은 물리적 현상들도 발생하는 것으로 알려져 있다 [5]. 따라서 이러한 현상들에 의해서 HVI 접촉시간이 증가함에 따라서 온도가 증가하는 것으로 이해할 수 있다.



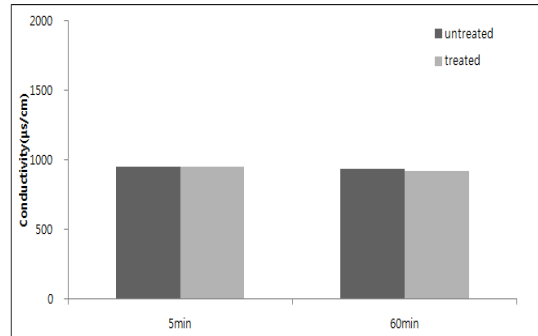
[Fig. 8] Change in the pH according to the HVI contact time

시료의 HVI 처리 전 후의 pH 변화를 Fig. 8에 나타내었다. HVI 접촉 전후에 전체적으로 pH가 약간 증가하였

지만 그 변화폭은 크지 않았다. HVI 접촉시간 5분 후에는 초기값 7.96에서 8.25로 약간 증가하였다가 60분 후에는 다시 8.22가 되었다.

그러나 이 결과는 이론적 고찰에서 논의한 바와 상반된다. 식 (4)에서 기술한 바와 같이 중탄산 이온이 탄산염 이온으로 변환되고 다시 탄산칼슘으로 석출되면 pH가 감소하여야 하지만 본 연구에서는 비록 변화폭이 크지 않지만 pH가 약간 증가한 것으로 나타났다. 이는 수중의 중탄산 이온이 반응식 (3)과 같이 $CO_{2(aq)}$ 로 변화되었고, HVI에 의해 증가된 온도로 인해 $CO_{2(aq)}$ 는 다시 $CO_{2(g)}$ 상태로 휘발되었기 때문에 pH가 증가한 것으로 추정된다. 따라서 수중의 중탄산 이온은 식 (2)와 같이 모두 탄산염 이온으로 변환되지 않았고, 그 결과 수중에 존재하는 모든 칼슘이온을 탄산칼슘으로 석출되게 할 만큼의 탄산염 이온이 부족하므로 Fig. 6에서처럼 칼슘이온의 농도가 13.7% 가량만 감소한 것으로 이해할 수 있다.

HVI 처리 전후의 전기전도도 변화를 Fig. 9에 나타내었다. HVI 접촉 이후 전기전도도 변화폭은 크지 않았다. 전기전도도는 처리시간 5분에서 초기값 972 $\mu S/cm$ 에서 처리 후 966 $\mu S/cm$ 로 큰 변화가 없었고, 처리시간 60분에서 922 $\mu S/cm$ 로 약 6% 가량 감소한 정도이다. HVI 처리에 의해 탄산칼슘 석출로 인한 수중 Ca^{2+} 농도가 감소함에 따라 전기전도도가 감소한 것으로 이해할 수 있지만 칼슘이온 농도의 감소폭만큼 크지는 않았다.



[Fig. 9] Change in the conductivity according to the HVI contact time

5. 결론

본 연구에서는 식품산업에서 비열살균 기술로 사용되고 있는 고전압임펄스 (HVI) 기술을 이용하여 수중의 탄

산칼슘 (CaCO₃) 석출에 의한 스케일 제어 가능성을 확인하는 연구를 수행하였다. 본 연구에 사용된 HVI 장치의 제한점으로 인해 다양한 범위의 전압세기와 인가시간을 주면서 칼슘이온 농도의 감소를 관찰하지 못한 점이 아쉬운 점으로 남는다.

HVI를 이용하여 17kV의 충전 전압 펄스를 가하여 Ca²⁺을 포함하고 있는 인공시료를 처리한 결과, 접촉시간 60분 후에 Ca²⁺는 약 13.7% 가량 감소하였다. 또한 방전에 의해 생성되는 에너지에 의해 온도는 7℃ 가량 증가하였다. 전기전도도는 약간 감소하였고 pH는 약간 증가하였다. 그러나 전기전도도와 pH 변화는 Ca²⁺의 감소를 설명할 수 있을 만큼 감소하거나 증가하지는 않았다.

따라서 HVI를 이용한 본 연구의 결과에 기초하여 경수의 연수화 (softening) 공정 및 탈염 공정으로 활용할 수 있는 가능성을 확인한 것이 본 연구의 중요한 성과라고 평가할 수 있다.

References

- [1] S. P. Choi, J. O. Kim, "Application of Pulsed Electric Field Treatment for Scaling Prevention", *Journal of the Korean Geoenvironmental society*, 12th(10), pp.51-56, 2011
- [2] J. J. Kim, Y. Y. Kim, H. S. Kim, Y. D. Jang, "Removal and Restraint Effects by Mg Metal on Scale in Water Pipe", *J. Miner. Soc. Korea*, 19(2), pp.111-121, 2006
- [3] B. C. Pak, S. D. Kim, B. J. Baek, D. H. Lee, "A Study of Efficacy of Physical Water Treatment Devices for Mineral Fouling Mitigation Using Artificial Hard Water", *Transactions of the Korean society of mechanical engineers*, 29(11), pp.1129-1238, 2005
- [4] H. D. Lee, C. H. Bae, J. H. Park, H. J. Shin, C. S. Cho, "Old Service Pipe Cleaning of Air-Pulse Wave and Cleaning Chemicals", *Journal of Korean Society on Water Quality*, 17(6), pp.727-736, 2001
- [5] Y. I. Cho, J. Lane, W. T. Kim, "Pulsed-power treatment for physical water treatment", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, pp.861-871, 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.033>
- [6] APHA, AWWA, WEF, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 19th edition, USA 1995
- [7] H. Muller-Steinhagen, "Cooling water fouling in heat exchangers", *Adv. Heat Transf.*, 33, pp.415-496, 1999
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70307-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70307-1)
- [8] S. A. Parsons, S. J. Judd, T. Stephenson, S. Udol and B-L. Wang, "Magnetically augmented water treatment", *Trans IChemE*, 75, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1205/095758297528869>
- [9] Y. Yang, H. S. Kim, A. Starikovskiy, A. Fridman, Y. I. Cho, "Application of pulsed spark discharge for calcium carbonate precipitation in hard water" *Water Research*, 44, pp.3659-3668, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.024>
- [10] A. Fathi, T. Mohamed, G. Claude, G. Maurin, B. A. Mohamed, "Effect of a magnetic water treatment on homogeneous and heterogeneous precipitation of calcium carbonate", *Water Research*, 40, pp.1941-1950, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2006.03.013>
- [11] J. A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", 13th ed. McGraw-Hill Book Co., New York, 1985

장 인 성(In-Soung Chang)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공업과학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공업과학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 공업과학과 (공학박사)
- 1997년 2월 ~ 현재 : 호서대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, MBR, 상하수도, 청정기술, 반도체 공정기술, 반도체산업 폐수처리

양 선 희(Seon-Hee Yang)

[정회원]



- 2011년 2월 : 호서대학교 환경공학과 (환경공학 학사)
- 2013년 2월 : 호서대학교 BK 21대 학원 반도체디스플레이공학과 환경공학전공 (환경공학 석사)

<관심분야>

수처리, 수질오염, 분리막, 상하수도, 청정기술