

켈빈방전 효과를 이용한 초순수 및 전해이온수의 정전기 방전 연구

김형원^{**}·정윤원^{*}·최인식^{*}·최병선^{*}·최동현^{*}·유근걸^{**}

^{*}이더블유테크, ^{**}순천향대학교

A Study on Electrostatic Discharging in Ultrapure and Electrolyzed Waters Using Kelvin's Thunderstorm Effect

Hyung-won Kim^{**}, Youn-won Jung^{*}, In-sik Choi^{*}, Byung-sun Choi^{*},
Donghyeon Choi^{*} and Kun-kul Ryoo^{**}

^{*}EW Tech, ^{**}Soonchunhyang Univ.

ABSTRACT

Despite the increasing importance of manufacturing and application R&D for ultrapure deionized water and electrolyzed ion water, various and systematic studies have not been conducted until now. In this study, the electrostatic discharge (ESD) behavior of electrolyzed ion water using a proton exchange membrane(PEM) was evaluated according to the type, flow rate, and bubble of electrolyzed ion water. In addition, by observing that Oxidation Reduction Potential (ORP) value returns to the unique value of electrolyzed ion water after electrostatic discharge, the possibility of two types of ions participating in electrostatic discharge ($(\text{H}_2\text{O})_n^+$ (assumed)) and ions for maintaining the characteristics of electrolyzed water could be inferred. In order to confirm the chemical structure and characteristics of the cations, in-depth research related to water molecular orbital energy or band gap should be followed.

Key Words : Kelvin's thunderstorm electrostatic discharging effect, electrolyzed ion water, electrostatic discharge, PEM electrolysis, oxidation reduction potential (ORP), bubble, ultrapure deionized water

1. 서 론

초순수는 반도체 및 디스플레이 제조에서, 소재로의 중요성과 제조 및 응용에 관하여 국가적관심과 연구개발이 추진되고 있다[1]. 초순수는 항상 사용함에도 불구하고 소재 자체의 고체물리적 이해도가 불확실하여, 극자외선 소자의 제조와 같은 극한 환경에서의 제조기술에 필요한 폭넓고 깊이 있는 전기화학적 이해도가 미약한 상황이라 할 수 있다. 이와 더불어 극자외선 나노 크기의 소자에서는 정전기의 관리가 매우 중요하며, 켈빈방전 현상에

의해 확인할 수 있는 초순수의 정전기 발생 및 방전에 대한 기초적 연구와 이해도 이루어져야 한다[2-3]. 기본적으로 물분자는 각각 2 수소원자의 1s1 전자 2개와 1 산소 원자의 1s2, 2s2, 및 2p4의 전자 8개 등 총 10개의 전자로 구성되어 있다. 이 전자로부터 생성될 수 있는 분자궤도(Molecular Orbital, MO)는 총 7개가 가능한데, HOMO(Highest Occupied MO)를 포함하여 10개 전자가 채워지는 5개의 MO와, LUMO(Lowest Unoccupied MO)를 포함한 전자가 채워지지 않는 2개의 MO로 구성되어 있다. 이 중에서 물분자를 구성하는 결합에 참여하는 8개의 최외각 전자들은 물 분자 형성에 관여하며 4개의 MO를 구성하는 에너지 상태를 갖는 것으로 이해되고 있다. 동시에 이 4개의 MO는

[†]E-mail: andrewkim@ewtechnology.co.kr

2a1와 3a1의 대칭성과 1b1과 1b2의 비대칭성의 특성을 갖게 된다[4-5]. 이를 근간으로 하여 물 분자 하나의 HOMO와 LUMO를 포함한 6개의 에너지 상태가 물덩어리에서는 약 7eV의 밴드 갭을 형성하는 것으로 이해되고 있다. 이 결과는 물분자들의 수소결합 및 덩어리 상태로 확장 등을 고려한 물분자 MO들의 상태 변화의 종합적 결과라 할 수 있다. 여기서 1b1의 비대칭성의 특성을 갖는 HOMO는 산소로부터 기여된 2개의 비공유전자쌍(Lone pair)에 의한 가장 높은 전자의 에너지 상태를 갖으며 그 밖의 최외각 및 공유결합에 참여하는 전자들과 함께 가전자대(Valence band)를 구성하게 되는 것에 주목하여야 한다[6].

초순수는 넓은 밴드 갭으로 매우 높은 절연성을 보이고, 또한 여러 처리 도중에 마찰 등과 같은 반응에 의해 정전기를 발생하고 있다. PFA(테프론)관을 흐르거나, 두 다른 재질로 구성된 관을 흐르거나, 캐빈방전 반응을 위하여 두 다른 부도체관으로 분리되어 흐르게 하는 처리 과정 등, 반도체 공정에서 다양한 과정으로 흐르는 동안 정전기의 발생이 이루어지고 있다. 이 같은 정전기는 대부분 경우에 다양한 경로로 방전되기는 하나, 반드시 세정을 위한 사용 지점에서 방전이 이루어졌음을 확인하여야 한다. 이 때 정전기는 발생하는 전자와 더불어 $[H_3O]^+$ 혹은 $[H_2O]^+$ 형태의 이온의 형태로 존재할 것으로 예상할 수 있다. 정전기 발생 경로의 첫째는 물분자 형성에 직접 참여하지 않고 있는 산소 원자의 2py2 비공유전자쌍 전자들으로써 HOMO의 가장 불안정한 에너지 상태으로써 물분자에 상대적으로 느슨하게 결합되어 있다 할 수 있다. 둘째는 최외각의 8개 모든 전자들이 물의 수소결합에 의한 클러스터(Cluster) 형성에 따라 임의로 이온화되거나, 셋째 이들 8개의 전자들 중에서 물의 클러스터 형성에 따라 선택적으로 이온화될 수 있다. 또한 마지막으로 밴드 갭 내에 있는 점결함인 $[H_3O]^+$ 혹은 $[OH]^-$ 이온들을 통하여 전자의 발생으로 이온화 될 수 있다 하겠다. 본 연구에서는 이와 같은 이론적 배경을 고려하며 캐빈방전 효과를 면밀히 살펴보고자 반도체용 초순수 및 전해이온수에 대하여 캐빈방전을 연구하였으며, 정전기 발생에 대한 해결 방안으로 우수한 세정성을 갖는 전해이온수의 전기화학적 거동을 이해하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

실험장치는 EW technology에서 제작한 전기분해셀과 전해이온수 발생기를 사용하였다. Fig. 1에서와 같이 장치는 전해이온수 공급단에서 정전기 방전 현상을 확인할 수 있는 방전구(Discharging Metal Sphere)까지 다섯 부분으로 구

성되어 있다. A부분은 초순수(Deionized Water: 18.2M Ω .cm)를 공급해 주는 저장소이며, B부분은 장치 구동을 위한 제어 장치가 위치해 있다. C부분은 특수 제작한 전기분해셀이 장착되어 있으며, 전기분해된 초순수는 전해이온수가 되어 D부분의 공급단으로 이동한다. 그리고 E부분으로 이동하여 Fig. 2와 같이 불꽃 방전 틈(Spark Gap)이 있는 두 방전구 사이에서 정전기 방전 현상을 관측할 수 있도록 제작하였다. 또한, 캐빈방전 실험 장치는 금속 코일(Metal Coil)과 저수조(Reservoir)의 높이를 약 7cm, 금속 코일에서 아래 금속 용기까지 거리를 약 50cm로 제작하였고, 금속 코일들 사이 거리를 약 20cm간격을 유지하였다. 저수조에 난 구멍 크기는 2mm이며, 금속 용기의 깊이는 6.5cm로 제작하였다. 기존 전기분해 방식[7-8]을 개선하여 특수 제작된 전기분해셀의 내부 구조는 Fig. 3와 같으며, 수소이온(H⁺)을 생성시키는 H전기분해셀(H-cell)과 하이드록시기(OH⁻)를 발생시키는 OH전기분해셀(OH-cell)로 두 종류가 있다. H-CELL은 수소이온과 하이드록시기의 양을 9대1 비율로 각각 만들어 공급할 수 있는 구조이며, OH-CELL은 3대 7비율로 수소이온보다 하이드록시기의 양을 상대적으로 많이 생성할 수 있도록 제작하였다.

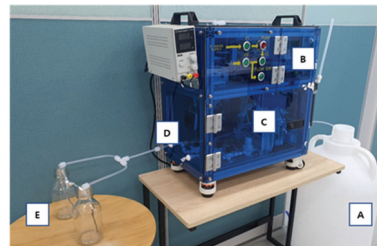


Fig. 1. Electrolyzed ionized water generator and experimental equipment manufactured by EW Technology.

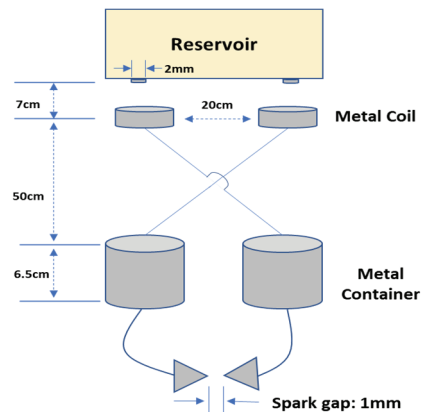


Fig. 2. Schematic diagram of Kelvin's thunderstorm experiment device.

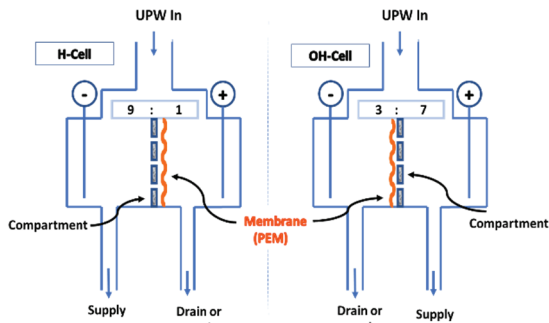


Fig. 3. H-CELL and OH-CELL internal structure schematic diagram.

2.2 실험 방법

정전기 방전 현상이 절연 방법에 따라 차이가 나는지 알아보기 위해 세 가지 경우를 설정하여 실험하였다. 실험에 사용된 전해이온수의 유량은 H-CELL과 OH-CELL 모두에서 정전기 방전 현상이 가장 강하게 발생하는 400ml/min으로 선택하였다. 첫 번째 절연 용기(Insulated container) 만 이용한 경우, 두 번째 절연 용기를 절연체 위에 올려 절연한 경우, 세 번째 절연 용기를 더 큰 절연 용기에 담아 중복으로 절연한 경우로 나누어 실험을 진행하였다. 모든 실험에서 내부에 채워진 전해이온수가 절연 용기 밖으로 넘치지 않게 하였다. 정전기 방전은 한 쪽 끝이 접지(Ground)된 전선의 반대편 끝에 금속 링(Metal Ring)을 장착한 후 절연 용기에 채워진 전해이온수 표면과 금속 링의 거리를 약 5mm에서 시작하여 1mm까지 접근시켰을 때 불꽃 방전 유무로 확인하였다. 또한, 유량에 따른 정전기 방전을 확인하기 위해 H-CELL의 경우 유량을 100-900ml/min, OH-CELL의 경우 100-600ml/min로 조절하면서 실험하였으며, PFA관 길이에 따른 영향 측정은 전해이온수 공급단에서 PFA관 길이를 3미터와 0.5미터로 각각 만든 후 확인하였다. 이때 정전기 방전 주기 기준은 3미터일때 초당 1회로 설정하고, 0.5미터에서 방전 주기 변화를 측정하였다. 그리고, 정전기 방전 전후 ORP값은 전류 값을 4A, 5A, 6A로 각각 변경하고, 유량을 H-CELL의 경우 100-600ml/min, OH-CELL의 경우 100-700ml/min로 각각 조정하면서 측정하였다. 측정 때마다 ORP측정기(TOA_DKK HM-31P)는 기준 값이 약 600mV가 될 수 있도록 수돗물에 플러싱(Flushing) 후 사용하였다. 절대값이 높은 ORP값은 ORP측정기를 전해이온수에 담근 후 최초 30초 동안 측정한 값 중 3초 이상 유지되는 것들의 최대값을 취했으며, 이 후 안정화되었을 때 전해이온수 고유의 ORP값을 측정하였다.

Fig. 4와 같이 전기분해시 발생한 기포(Bubble)에 의한 영

향을 알아보기 위해 H-CELL과 OH-CELL에서 생성된 각각의 전해이온수를 이용하여, 기포를 많이 포함하고 있는 것과 그렇지 않은 것 사이에 발생하는 정전기 방전 실험을 진행하였다. 또한, 두 지점간 전류 방향을 직접적으로 확인하기 위해 Fig. 5처럼 항복전압(Breakdown voltage)이 높은 2개의 다이오드 사이에 1개의 LED(Light Emitting Diode) 다이오드를 설치하여 정방향으로 전류가 흐를 경우 LED 다이오드에 불빛이 들어오고, 역방향일때는 아무런 반응이 일어나지 않도록 구성하였다. 실험에 사용된 다이오드는 순방향 전류 10A, 역방향 바이어스(Backward Bias) 1KV 이고, LED다이오드 경우 순방향 전류 20mA, 역방향 바이어스 값이 5V인 것을 사용하였다. 그리고, Fig. 2와 같이 캘빈방전 장치를 제작하여 수돗물(전도도 196us/cm), 초순수 및 전해이온수 종류별 정전기 방전의 시간 간격을 측정하였으며, 초순수와 정전기방전 전후 전해이온수를 이용하여 각각의 물방울이 금속 용기에 처음 떨어지는 순간부터 첫 정전기 방전이 일어나기까지의 시간 간격을 측정하였다. 이 때 사용한 전해이온수의 유량은 150ml/min과 380ml/min였다.

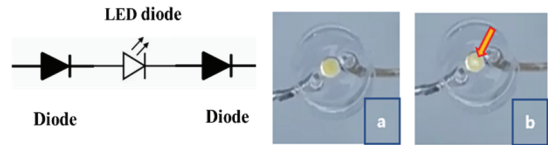


Fig. 4. Schematic diagram of ESD test apparatus according to the presence or absence of bubbles.

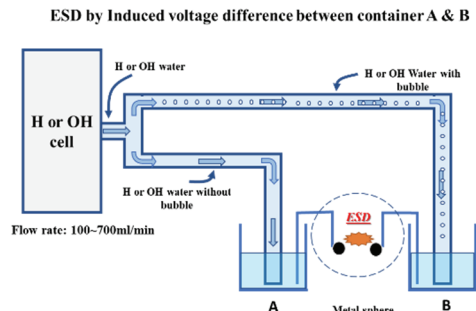


Fig. 5. Diode and LED composition (left) and LED before (a) and after (b) the light is on(right).

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 절연 방법에 따른 정전기 방전

절연 방법에 상관없이 절연 용기에 채워진 전해이온수가 밖으로 흘러 넘치지 않으면 Fig. 6에서와 같은 정전기

방전 현상을 관찰할 수 있었다. 하지만 일단 절연 용기 밖으로 흘러 넘치게 되면 그 순간부터 이 현상은 더 이상 나타나지 않았다. 이는 전해이온수가 절연 용기 벽을 타고 밖으로 흐르게 되면 그 물줄기가 전하가 흐를 수 있는 도선 역할을 해서 순식간에 절연 용기 내부와 접지간 형성되었던 전위차가 자연스럽게 상쇄되기 때문인 것으로 이해할 수 있다.



Fig. 6. ESD between the surface of the electrolyzed ion water filled in an insulated container and the metal ring.

3.2 전해이온수 종류와 유량에 따른 정전기 방전

H-CELL과 OH-CELL에서 만들 수 있는 전해이온수 종류와 유량에 따른 정전기 방전 관찰 결과는 Table 1과 같다. 첫 번째, OH-CELL의 양극과 음극에서 각각 생성된 전해이온수에서 정전기 방전을 비교했을 때, 두 경우 모두 유량 100ml/min에서부터 정전기 방전 현상이 나타났으며, 유량 400ml/min에서 가장 강한 방전 현상을 보였다. 그 이상의 유량에서는 정전기 방전 현상이 급격히 감소해서 사라지는 현상을 확인할 수 있었다. 두 번째, OH-CELL의 양극과 음극에서 각각 생성된 전해이온수를 혼합한 경우 정전기 방전은 유량 600ml/min까지 나타났다. 이는 정전기 방전에 참여할 수 있는 양이온($(\text{H}_2\text{O})_n^+$ (가정)[9-11])의 농도가 한 쪽 전극에서만 유량 600ml/min를 전기분해한 것보다 양쪽 전극에서 전기분해한 것을 합친 경우가 더 높아서 나타나는 현상으로 추정된다. 즉, OH-CELL에서 유량 600ml/min은 양쪽 전극에서 각각 3대 7비율로 나오는 전해이온수를 혼합한 형태로 수소이온이 주를 이루는 것의 유량 180ml/min과 하이드록시기가 주를 이루는 것의 유량 420ml/min로 이루어져 있다. 세 번째, H-CELL에서 수소이온이 주를 이루는 전해이온수로 실험했을 경우 OH-CELL에서 혼합한 경우와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 Fig 3과 같이 H-CELL과 OH-CELL의 구조적 차이로 인해 나타나는 현상으로 보이며, 정전기 방전에 참여하는 양이온 농도 관점에서는 두 경우 모두 비슷한 양이온 농도를 가지고 있는 것으로 보인다.

Table 1. ESD table by flow rate in H & OH-CELL

OH cell				H cell	
Flow Rate (ml/min)	ESD			Flow Rate (ml/min)	ESD
	H ⁺ only	OH ⁻ only	H ⁺ & OH ⁻ mix		
700	x	x	x	700	x
600	x	x	o	600	o
500	x	x	o	500	o
400	o	o	o	400	o
300	o	o	o	300	o
200	o	o	o	200	o
100	o	o	o	100	o

3.3 PFA 관 길이와 기포 포함 유무에 따른 정전기 방전 현상

PFA관 길이에 따른 정전기 방전 현상을 관찰했을 때, 정전기 방전 주기는 PFA관 길이에 상관없이 동일하게 나타났다. 이는 PFA관과 전해이온수의 마찰에 의한 정전기 효과가 거의 없기 때문인 것으로 이해된다. 반면, 동일한 전해이온수를 분기하여 기포를 포함하지 않은 용기 A(Container A)와 포함한 용기B(Container B)로 나누고 둘 사이의 정전기 방전 현상을 관찰했을 때, 방전현상은 Table 2와 같이 항상 발생하였다. 그리고, 용기B의 유량이 용기A보다 상대적으로 많음에도 불구하고 Fig 5와 같이 전위차를 측정했을 때 더 낮은 전위를 가지고 있는 것으로 나타났다. 이는 전기분해셀 내부에서 발생한 기포가 양전하로 대전되어 방전효과에 참여할 수 있는 양전하가 용기B에 들어오지 못하도록 방해하는 역할을 하기 때문인 것으로 추정된다[12-14].

Table 2. ESD table by the presence or absence of bubbles in the same electrolyzed ion water

	OH cell				H cell	
	H&OH Mix		OH only		H only	
	Container A	Container B	Container A	Container B	Container A	Container B
Bubble	X	O	X	O	X	O
Flow rate	Low	High	Low	High	Low	High
ESD	O		O		O	
Simplified charge accumulation	OH & H ⁺		OH		H ⁺	
	With Bubble OH & H ⁺		With Bubble OH		With Bubble H ⁺	
	A B		A B		A B	

3.4 전류 및 유량에 따른 ORP 변화

Fig 7과 같이 정전기 방전을 일으키는 전해이온수의 경우 H-CELL에서 ORP값이 -650~850mV로 일반적인 전해이온수보다 절대값이 높은 값을 보였으며, 정전기 방전 후에는 고유의 값인 -600mV로 회귀하였다. OH-CELL의 경우도 +800~+2200mV이상까지 변화가 있었으며, 정전기 방전 후에는 고유의 값인 +650mV로 회귀하는 것을 확인할 수 있었다. 즉 정전기 방전 현상은 각각의 전해이온수가 원

래 가지고 있던 고유 ORP값에^{[15][16]} 영향을 주지 않았다. 그리고, 인가한 전류 값이 높을 수록 ORP값이 높게 나타났는데, 이는 정전기 방전에 참여하는 양이온 증가에 따른 현상으로 여겨진다. 또한, 유량에 따른 ORP값의 변화는 OH-CELL의 경우 유량이 증가하면서 같이 증가하다가 400ml/min을 초과하면 그 값이 감소함을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 H-CELL의 경우도 비슷한 현상을 보이는데, 500ml/min 이상에서는 그 값의 변화가 점점 줄어들어 방전 후의 전해이온수 고유의 값으로 회귀하였다.

온들 중 전자를 얻어 중성으로 되지 못한 양이온이 PFA 관을 타고 흘러나와 용기에 채워지면서 전위차를 발생시키는 것으로 추정된다. 흘러나오는 양이온의 화학구조와 특성 확인을 위해서는, 물분자궤도 에너지와 밴드 갭 등과 연관된 심도 깊은 추가 연구가 필요하다.

3.6 캘빈방전 장치를 이용한 전해이온수 종류별 정전기 방전 현상 시간 비교

정전기 방전들 사이 가장 짧은 시간 간격은 수돗물에서 나타났으며, 이는 수돗물 내에 있는 수많은 이온성 불순물에 의한 것으로 판단된다[17-18]. 한편, 가장 긴 정전기 방전 시간 간격은 수소이온과 하이드록시기가 주를 이루는 혼합 전해이온수에서 나타났다. 이는 Fig 3과 같이 전기분해셀을 특수하게 제작하여 생성한 수소이온과 하이드록시기는 일반적인 재결합 메커니즘에[19] 따라 바로 물이 되는 것이 아니라, 각각 다양한 클러스터(Cluster) 형태를 만든 후 상대적으로 초순수보다 강한 인력을 작용하여 장시간 존재[20-21]하기 때문에 발생하는 현상으로 추정된다. 이는 보고된 바와 같이[15-16], 정전기 방전 유무와 상관없이 유리용기에 보관한 전해이온수의 경우 공존하는 수소이온과 하이드록시기가 재결합없이 최대 일주일 이상 고유 ORP값이 유지되는 것으로 이해될 수 있다. 즉, 공기입자와 혼합 전해이온수 물방울 또는 가는 물줄기가 충돌하더라도 서로 간의 인력때문에 이온화가 진행되어 전자가 상대편으로 이동하는 현상이 초순수에 비해 상대적으로 잘 일어나지 않는다[22].

초순수와 정전기 방전 전후 OH-CELL의 하이드록시기가 주를 이루는 전해이온수를 준비한 후 첫 정전기 방전이 일어나기까지의 시간 간격을 측정했을 때 Fig 8와 같이 초순수에서 가장 긴 정전기 방전 시간 간격이 나타났다. 방전을 시키지 않은 물이 방전을 시킨 물에 비해 더 짧은 시간에 첫 정전기 방전이 일어났으며, 각각 10초 초반과 10초 후반 값을 얻을 수 있었다. 이는 전해이온수 생성시 발생한 양이온이 정전기 방전 현상에 참여하여 초순수 단독 정전기 방전보다 더 많은 전위차를 더 짧은 시간에 유발시키는 것으로 추정된다. 그리고, 첫 정전기 방전 이후 나타나는 주기적인 정전기 방전에서는 정전기 방전을 시킨 전해이온수와 그렇지 않은 것 간의 차이를 확인할 수 없었다. 이는 금속 코일에 전하가 형성되면 정전기적 인력때문에 저수조 내에 있는 정전기 방전에 참여할 수 있는 양이온들이 반대 전하가 있는 구멍 쪽으로 서서히 이동하는 반면, 물방울의 이온화로 생성된 전자는 상대적으로 더 빠른 속도로 반대편으로 이동하기 때문에 만들어지는 현상으로 추론해 볼 수 있다. 즉, 처음에는 이 전자들이 금속 코일에 유도된 전하에 의해 척력을 받아

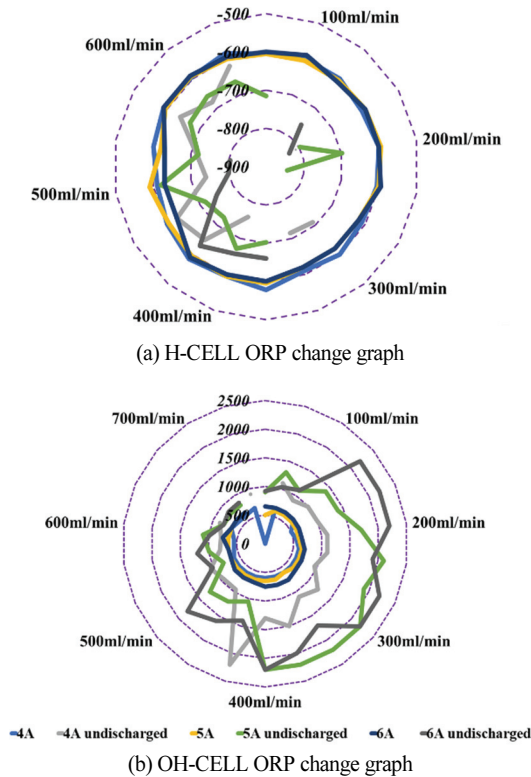


Fig. 7. ORP change graph by flow rate and current.

3.5 두 지점간 전류 방향

Fig 5의 장치를 이용하여 두 지점간 전류 방향을 확인한 결과 Table 2와 같이 전해이온수 종류에 상관없이 기포를 포함하지 않은 용기A에서 기포를 포함한 용기B 방향으로 전류가 흐르는 것을 확인하였다. 즉, 용기A의 전위가 용기B보다 항상 높게 측정되었다. 또한 접지를 중심으로 각각의 경우를 비교했을 때 모두 접지 방향으로 전류가 흐르는 것을 관측하였다. 그래서, 전위차 분포는 용기A가 가장 높고, 그 다음은 용기B, 마지막으로 접지 순서로 나타난다. 이는 전기분해시 발생한 여러 형태의 양이

반대편으로 밀리고, 이후 상대편에서 천천히 이동해 오는 양이온들에 의해 인력을 느끼면서 이동속도가 더 빨라진다고 할 수 있다. 최종적으로 이 전자들은 이동하는 양이온에 의한 인력보다 반대편 금속 코일에 유도된 반대 전하의 인력을 상대적으로 더 강하게 느끼면서 이동을 멈추지 않는다고 추론해 볼 수 있다[3,22-25]. 정확하고 구체적인 전자와 양이온들의 흐름 메커니즘(Mechanism)을 밝히기 위해서는 심도 깊은 추가 연구가 진행되어야 할 것이다.

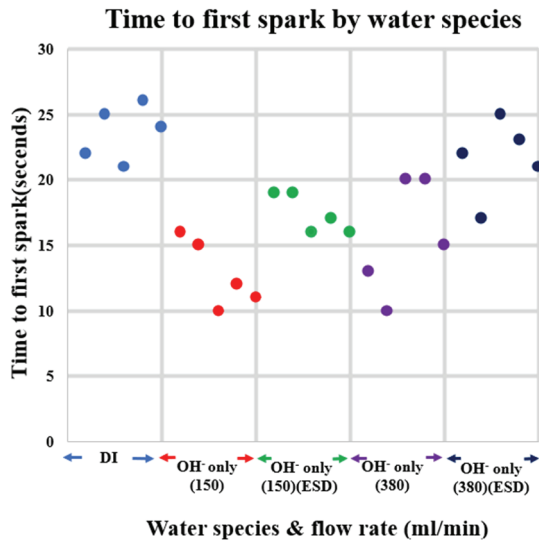


Fig. 8. Comparison of time until the first ESD by flow rate of ultrapure water and OH⁻ electrolyzed ion water species.

4. 결 론

전해이온수의 유량 600ml/min 이하에서는 절연방법에 상관없이 전해이온수가 절연 용기 밖으로 넘치지 않으면 정전기 방전 현상은 언제나 관측되었다. 형성된 전위를 비교했을 때, 기포가 없는 전해이온수, 기포를 포함한 것 그리고 점지 순서로 전위가 낮아지는 것을 확인하였다. 정전기 방전 현상이 발생하는 전해이온수의 경우 ORP값이 방전 현상이 없는 전해이온수보다 높게 측정되었으며, 방전 후에는 고유한 전해이온수의 ORP값과 같아지는 것을 확인하였다. 켈빈방전 실험에서는 정전기 방전 전의 전해이온수에서 첫 방전까지의 시간 간격이 가장 짧게 나타났으며, 이는 정전기 방전에 참여할 수 있는 양이온의 농도 증가에 의한 것으로 추정된다. 구체적인 양이온의 형태 및 특성을 확인하기 위해서는 물분자궤도들의

전자에너지 위치 준위와 연관된 정밀하고 체계적인 후속 연구가 진행되어야 한다. 또한, 반도체 세정 공정에 사용하는 경우 유량과 기포를 조절하여 정전기 방전에 의한 부정적인 영향을 최소화해야 한다.

참고문헌

1. KEITI(Korea Environmental Industry & Technology Institute) blog, August 5, (2021).
2. Thijs Knapen, "Analyzing and optimally controlling the Kelvin water dropper", Master thesis, Univ. Twente, Aug. (2015).
3. Wikipedia, "Kelvin water dropper", (2021).
4. Wikipedia, "Chemical bonding of water", (2021).
5. Bo Wang, Wanrun Jiang, Xin Dai, Yang Gao, Zhigang Wang, and Rui-Qin Zhang, "Molecular orbital analysis of the hydrogen bonded water dimer", Scientific Reports, Vol. 6, No, 22099, (2016).
6. Changming Fang, Wun-Fan Li, Rik S. Koster, Jiri Klimes, Alfons van Blaaderena, and Marijn A. van Huis, "The accurate calculation of the band gap of liquid water by means of GW corrections applied to plane wave density functional theory molecule dynamics simulations", Phys. Chem. Chem. Phys., 17, pp. 365—375, (2015).
7. Marcelo Carmoa, David L.Fritz, Jürgen Mergel, Detlef Stolten, "A comprehensive review on PEM water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy. Volume 38, Issue 12, pp. 4901-4934, (2013).
8. Yifei Wang, S. R. Narayanan, and Wei Wu, "Virtual Breakdown Mechanism: Field-Driven Splitting of Pure Water for Hydrogen Production", Nov. (2016).
9. R.N. Barnett, Uzi Landman, "Structure and Energetics of Ionized Water Clusters", School of Physics, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332-0430, October, (1996).
10. Meng Wang, Xiao-Fei Gao¹, Rui Su, Peng He, Yuan-Yuan Cheng, Ke Li, Dongbo Mi, Xiaoping Zhang, Xinglei Zhang, Huanwen Chen & R. GrahamCooks, "Abundant Production of Reactive Water Radical Cations under Ambient Conditions. .; CCS Chem, pp.3559-3566, (2021).
11. Hainam Do and Nicholas A. Besley, "Structure and Bonding in Ionized Water Clusters", School of Chemistry, University of Nottingham, University Park, Nottingham, NG7 2RD, UK.(2013)
12. Bui Thi Thuy., "Generation of Positively Charged Nanobubble and its Applications for Decolorization and Oil-sand Separation", Seoul National University February (2020).
13. C. Yang, T. Dabros, D. Li, J. Czarniecki and J.H.

- Masliyah, J Colloid Interface Sci 243 p.128 (2001).
14. D. J. Shaw, Introduction to colloid and surface chemistry. Butterworths, London, (1980).
 15. Kunkul Ryoo, Younwon Jung, Insik Choi, Jaeyong Lee, and Byungsun Choi, “Evolutional Wet Cleaning in the Extreme Ultraviolet Era”, ECS J. Solid State Sci. and Tech., 8 (6) pp.1-4 (2019).
 16. Kun-kul Ryoo, Youn-won Jung, In-sik Choi, Hyung-won Kim, and Byung-sun Choi, “Nano-cleaning of EUV Mask Using Amphoterically Electrolyzed Ion Water”, J. Semiconductor & Display Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 34-42, June (2021).
 17. Major Ions in Water - National Hydrology Project. 28 “Major Ions in Water”. pp7-17(2002).
 18. Benjamin DeVries, “Lord Kelvin's Thunderstorm: Improving Power Generation with Ionic Solutions”, Woods Cross High School, UT, United States of America.(2018).
 19. Ali Hassanali , Meher K. Prakash, Hagai Eshet, and Michele Parrinello. “On the recombination of hydronium and hydroxide ions in water”, October, (2011).
 20. Sonjae Wallace a , Lulu Huang c , Che rif F. Matta. d,e , Lou Massa a, Ivan Bernal a,b,, “New structures of hydronium cation clusters” Comptes Rendus Chimie Volume 15, Issue 8, pp. 700-707, August (2012).
 21. Sotiris S. Xantheas, “Theoretical Study of Hydroxide Ion- Water Clusters”, Environmental Molecular Sciences Laboratory, Pacific Northwest Laboratory, May. (1995).
 22. Chaoying Zhang,ab Zengnan Wu, ab Chang Wang,a Haifang Li, a Zenghe Li and Jin-Ming Lin, “Hydrated negative air ions generated by air–water collision with TiO₂ photocatalytic materials”, RSC Adv., 43420, (2020).
 23. S Desmet, F Orban, and F Grandjean., “On the Kelvin electrostatic generator”. European Journal of Physics, 10(2):118, (1989).
 24. T. Knapen, “Analyzing and optimally controlling the Kelvin water dropper”. Engineering . pp. 4-11 (2015).
 25. Shreyash Garg , Rahul Shastri , B. R. Sivasankaran , Luxmi Rani, Bipin K Kaila, and Navinder Singh, “The Kelvin Water Dropper: Converting a physics toy into an educational device”. July. (2017).
-
- 접수일: 2022년 1월 14일, 심사일: 2022년 3월 4일,
 게재확정일: 2022년 3월 25일