

## 고분자 표면의 전자빔 조사에 따른 젖음특성 고찰

### Investigation of Wetting Characteristics of Polymer Surfaces according to Electron Beam Irradiation

이현중<sup>1</sup>, 박근<sup>1,✉</sup>, 김병남<sup>2</sup>  
Hyun Joong Lee<sup>1</sup>, Keun Park<sup>1,✉</sup>, and Byung Nam Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

<sup>2</sup> 한국원자력연구원 방사선기기연구부 (Division of Radiation Instrumentation Research, Korea Atomic Energy Research Institute)

✉ Corresponding author: kpark@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6358

Manuscript received: 2015.10.5. / Accepted: 2015.12.1.

*The present study uses an electron beam (e-beam) to modify the wetting characteristics of thermoplastic polymer surfaces. A high energy e-beam irradiated various polymer surfaces (PET, PMMA, and PC), with variations in irradiation time and applied current. The water contact angles were measured on the e-beam irradiated surfaces in order to investigate the changes in the surface energy and the relevant wettability. Furthermore, XPS analyses were performed to investigate the chemical composition change in the e-beam irradiated surfaces; the results showed that the hydrophilic groups (C-O) increased after the electron beam irradiation. Also, water collection tests were performed for various polymer samples in order to investigate the effect of the surface energy on the ability of water collection, from which it can be seen that the irradiated surfaces revealed better water-collecting capability than pure polymer surfaces.*

KEYWORDS: Thermoplastic polymer (열가소성 고분자), Electron beam (전자빔), Hydrophilic surface (친수성 표면), Contact angle (접촉각), Water collection (수분포집)

#### 1. 서론

최근 자연의 최적화된 표면을 모사하여 자기세정, 반사방지, 김서림 방지 등의 기능을 갖는 기능성 표면(Functional surface)을 제작하기 위한 생체모방기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 기능성 표면은 주로 고분자 소재의 표면을 개질하여 제작되고 있으며, 표면에너지(Surface energy)를 변화시킴으로써 젖음특성(Wetting characteristics)을 변화시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

대표적인 예로 자기세정 기능 구현을 위한 초소수성(Super-hydrophobic) 표면과 김서림방지 기능 구현을 위한 초친수성(Super-hydrophilic) 표면 개발에 관한 연구가 진행되었다.<sup>1,2</sup>

고분자의 표면을 개질하여 젖음특성을 변화시키기 위해 박막코팅, 광(光)조사, 리소그래피 등의 공정이 사용되어 왔으며,<sup>3-6</sup> 이러한 표면의 젖음특성 변화를 통해 수분을 포집하기 위한 연구도 수행되었다.<sup>7</sup> 최근에는 마이크로급 복합구조물을 제작하여 초소수성 표면을 구현하기 위한 연구가 진

행되었으며,<sup>8</sup> 자외선, 이온빔, 전자빔 등과 같은 광 조사 공정을 통해 표면에너지를 높여 친수성을 증가시키기 위한 방법이 시도되었다.<sup>9-11</sup> 이중 전자빔을 사용한 표면개질은 공정이 비교적 간단하고 넓은 영역에 대해 짧은 시간으로 조사가 가능한 장점이 있어 전자빔 조사를 통한 소재의 열분해온도 및 접착각 변화를 고찰하거나,<sup>12</sup> 조사된 시편에 추가적인 전/후처리를 통해 작용기를 유도하여 표면의 젖음특성을 개질한 연구가 수행되었다.<sup>13</sup>

최근에는 본 연구자의 선행연구로서 소수성 특성을 갖는 폴리카보네이트(Polycarbonate) 필름에 전자빔을 조사하여 친수성으로 개질한 연구가 수행되었다.<sup>14</sup> 본 연구에서는 선행 연구내용을 바탕으로 다양한 고분자 필름에 전자빔을 조사하여 젖음 특성 및 수분포집 특성의 변화를 고찰하고자 한다. 특히 소재에 따라 세분화된 전자빔의 조사조건을 확립하고 조사된 시편의 화학적 분석을 통해 젖음 특성 변화를 고찰하고자 하며, 이를 바탕으로 다양한 시편의 전자빔 조사에 따른 수분포집 특성의 변화를 평가하고자 한다.

## 2. 실험 및 분석

### 2.1 실험재료

본 연구에서는 전자빔을 조사하기 위해 열가소성 고분자 재료인 Polyethylene terephthalate (PET, P1AS61000, Toray Chemical), Polymethyl methacrylate (PMMA, V021C, Arkema), Polycarbonate (PC, GP-1000L, LG Chemical) 필름을 60 x 60 mm<sup>2</sup> 의 크기로 절단하여 사용하였다. Table 1에 3가지 필름의 두께와 기본적인 물성, 접착각 측정 결과를 비교하였다.

### 2.2 실험방법

실험에 사용한 전자빔 가속기는 한국원자력연구원(대전)의 소형 정전가속기를 사용하였으며, Fig. 1에 전자빔 조사 실험장치의 기본 구성을 도시하였다. 해당 장비는 0.2 MeV의 에너지로 조사되며 인가전류는 0.1-5.0 mA 이내에서 조절이 가능하다. 상기 장비를 사용하여 전술한 3가지 열가소성 고분자 필름에 전자빔 조사를 실시하였으며, 소재의 변형이 생기지 않는 범위 내에 조사시간(5, 50, 100, 150 s)과 인가전류(0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mA)를 변화시켜 조사를 실시하였다.

Table 1 Material property of various thermoplastic films

Polymer	PET	PMMA	PC
Thickness (μm)	300	800	300
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.34	1.18	1.21
Glass transition temp. (°C)	76	105	150
Contact angle (°)	71.1	82.5	87.6

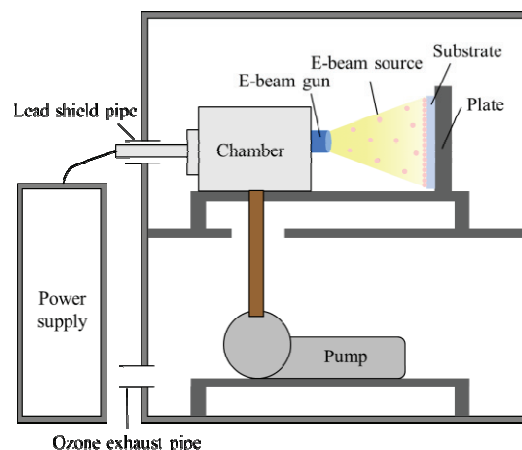


Fig. 1 Experimental setup for electron beam irradiation

또한 시편의 표면에너지 차이에 따른 공기 중의 수분이 포집되는 현상을 고찰하기 위해 간이 수분포집 장치를 Fig. 2와 같이 제작하였다. 수분포집 장치는 아크릴 챔버(Acrylic chamber)에 수증기를 발생시키기 위한 가습장치(Humidifier, FG-001, Neotizen Co. Ltd)와 온습도계(Thermohygrometer, O-237WT, Dretec Co.)를 배치하여 온도와 습도를 조절할 수 있도록 제작하였다. 이때 시편은 순수 시편(Pure sample)과 전자빔이 조사된 시편(Irradiated sample)을 사용하였으며, 장치 내에 시편의 체류시간(Dwell time)을 5분에서 15분까지 5분 간격으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 수분포집 실험시 온도와 습도는 각각 25°C와 99%로 설정하였다.

### 2.3 분석방법

전자빔 조사에 따른 시편의 젖음특성을 고찰하기 위해 접착각 측정기(Contact angle goniometer, KSV, CAM-200)를 사용하였으며, 3 μL의 증류수를 시료에 투하하여 접착각을 측정함으로써 전자빔의 조사조건에 따른 표면에너지 변화를 비교하였다. 이때 접착각 측정은 시편별로 10회씩 측정하여 평균치와 표준편차를 비교하였다.

접착각 측정 결과를 통해 표면개질된 시편의

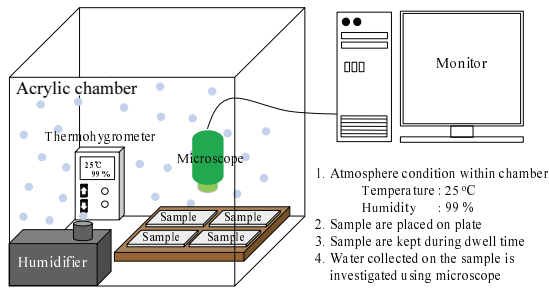


Fig. 2 Configuration of the experimental setup for water collection on polymer surface

화학적 성분 변화를 살펴보기 위해 X선 광전자 분광기(X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS, Multilab, ESCA 2000)를 사용하였으며, 표면에너지 변화가 큰 조건에서의 시편을 대상으로 각각 8 x 8 mm<sup>2</sup>의 영역에서 XPS 분석을 수행하였다.

또한 표면에너지 차이에 따른 시편의 수분포집 특성을 분석하기 위해 광학현미경(Dino Lite Pro AM-413T, AnMo Electronics Corporation)을 사용하여 체류시간 동안 시편에 응결된 물방울의 상태와 질량변화를 고찰하였다.

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 소재별 조사조건에 따른 접촉각 분석

Fig. 3(a)에 소재별 전자빔의 조사시간에 따른 접촉각 측정 결과를 도시하였다. 전반적으로 전자빔의 조사시간이 증가할수록 접촉각이 감소하는 경향을 보였으나, PET의 경우 순수 시편 대비 전자빔 조사 시편(5초)의 접촉각이 증가하였고, 이후 조사시간의 증가에 따라 서서히 감소됨을 확인하였다. 이는 전자빔의 조사에 의해 5 μm 이하의 미세한 표면조도 변화가 발생하여 접촉각이 상승한 것으로 판단되며,<sup>14</sup> 조사시간이 증가할수록 접촉각이 감소하는 것은 조사시간이 증가됨에 따라 전자빔 조사에 의해 표면에너지가 점차적으로 증가되기 때문으로 분석된다. 한편 접촉각 감소가 가장 크게 나타난 조사시간 150초의 경우 PET, PMMA, PC의 접촉각이 각각 62.9°, 70.1°, 67.5°로 순수 접촉각 대비 8.2°, 12.4°, 20.1°가 감소한 결과를 보였다.

상기 결과를 바탕으로 조사시간을 150초로 고정된 상태에서 소재별 인가전류를 변화시키며 전자빔 조사를 실시하였고, 이에 대한 접촉각 측정 결과를 Fig. 3(b)에 도시하였다. 전반적으로 인가전

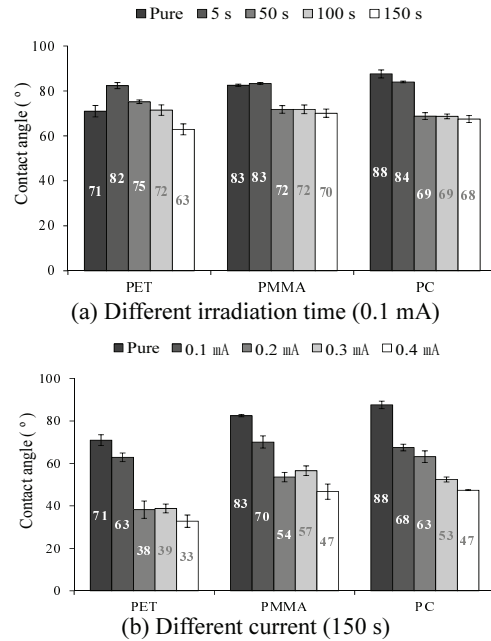


Fig. 3 Comparison of contact angles on various polymers

류증가에 따른 접촉각의 감소량이 조사시간 증가의 경우에 비해 훨씬 크게 나타나 보다 민감한 변화를 보였다. 인가전류가 가장 높은 0.4 mA인 경우 PET, PMMA, PC의 접촉각이 각각 32.8°, 46.7°, 47.4°로 나타나 원소재 대비 38.3°, 35.8°, 40.2°만큼 감소함을 알 수 있었으며, 전자빔 조사 후의 접촉각은 PET가 가장 낮게 나타난 반면(32.8°) 순수시편 대비 접촉각의 감소량은 PC가 가장 두드러짐(40.2°)을 확인할 수 있었다.

조사시간과 인가전류를 추가적으로 변화시켜가며 전자빔 조사를 수행하였고, 각각의 소재에 대한 접촉각 측정결과를 Tables 2(a)-2(c)에 요약하였다. 전반적으로 조사시간과 인가전류가 증가할수록 시편의 접촉각이 감소하는 경향을 확인하였는데, 이러한 경향은 전자빔 조사시 가속에너지, 조사시간과 인가전류가 증가함에 따라 조사량(Dose)이 증가한다는 이론<sup>15</sup>과 일치함을 확인하였다. 다만 상기 조건 이상으로 조사시간이나 인가전류를 증가시켰을 때는 고분자 표면이 국부적으로 손상되는 현상이 발생하여 실험 대상에서 제외하였다.

상기 조건 중 소재별 접촉각의 변화가 가장 큰 조건(0.4 mA, 150 s)으로 조사된 시편에서의 물방울 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 모든 결과에서 전자빔 조사 후 접촉각이 크게 감소되어 고분자 표면이

Table 2 Comparison of contact angles for various irradiation conditions; (a) PET, (b) PMMA, (c) PC

(a)				
Irradiation time (s)	Current (mA)			
	0.1	0.2	0.3	0.4
5	82.4±2.8	79.4±1.7	75.5±2.2	68.0±1.3
50	75.2±1.3	74.0±2.2	68.5±3.3	60.7±3.3
100	71.5±1.8	66.4±2.4	50.2±2.8	31.7±1.6
150	62.9±2.0	38.2±4.0	38.8±2.1	32.8±2.9

(b)				
Irradiation time (s)	Current (mA)			
	0.1	0.2	0.3	0.4
5	83.3±2.0	83.6±1.2	77.5±1.0	68.5±3.9
50	71.8±0.7	69.2±2.4	69.3±3.3	58.8±1.6
100	71.8±2.0	66.4±2.2	60.3±2.1	47.9±1.2
150	70.1±2.9	53.6±2.2	56.6±2.2	46.7±3.6

(c)				
Irradiation time (s)	Current (mA)			
	0.1	0.2	0.3	0.4
5	84.0±0.8	74.6±3.4	71.3±2.6	67.5±3.0
50	68.8±3.0	58.8±4.6	61.4±4.1	63.2±5.4
100	68.7±2.1	64.1±6.4	62.3±2.2	52.2±2.3
150	67.5±3.0	64.3±5.9	52.7±2.6	47.4±0.5

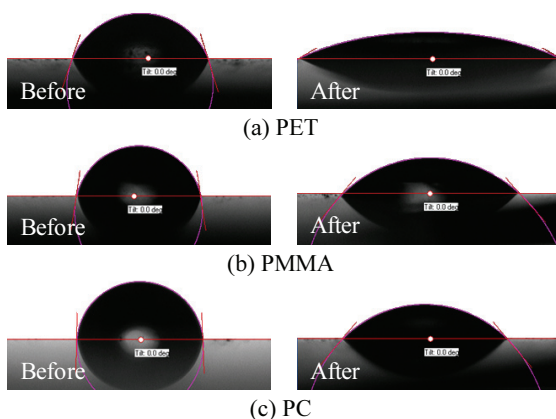


Fig. 4 Comparison of droplet shape changes according to the e-beam irradiation (0.4 mA, 150 s)

친수화된 것을 확인할 수 있었다. 접촉각 변화를 정량적으로 비교하면 PET의 경우 71.0°에서 32.8°로 38.2° (53.8%) 감소하였고 PMMA의 경우 82.5°에서 46.7°로 35.8° (43.4%), PC의 경우 87.6°에서 47.4°로 40.2° (45.9%)가 감소하여 전반적으로 40% 이상의 감소를 보임을 확인하였다.

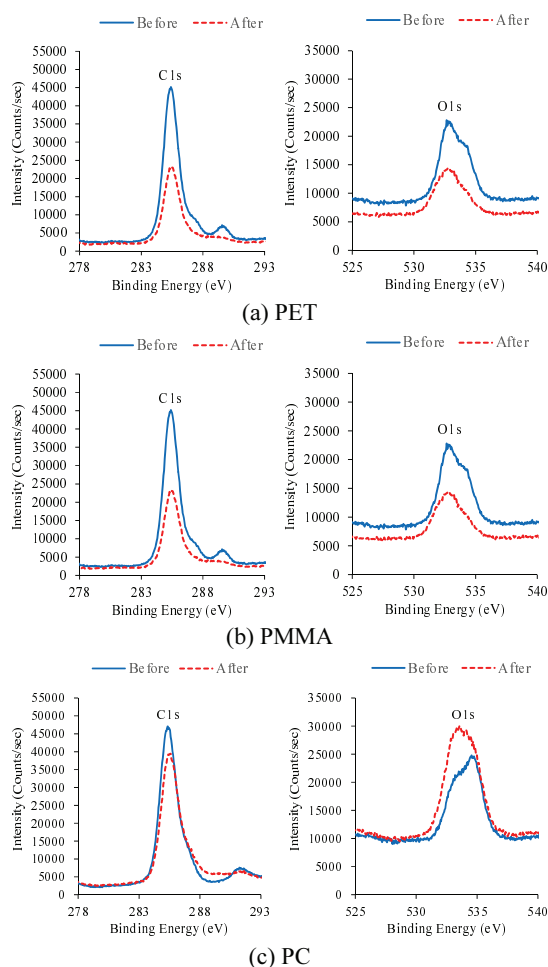


Fig. 5 Comparison of X-ray photoelectron spectra of various specimens (before and after e-beam irradiation)

### 3.2 XPS 분석

Fig. 5에 전자빔 조사 전후의 시편에 대해 XPS 분석으로 검출된 그래프를 도시하였다. 모든 시편에 대해 탄소(C1s)와 산소(O1s)의 피크가 285.35 eV 과 534.55 eV부근에서 동일하게 발생하였음을 알 수 있다. 이때 C1s와 O1s 피크값의 상대적인 비율을 살펴보면 PET의 경우 조사 전 1:0.5056(C1s:O1s)에서 조사 후 1:0.6377로 산소의 비율이 26.1% 정도 증가함을 알 수 있다. PMMA의 경우에도 조사 전 1:0.4321에서 조사 후 1:0.5224로 산소의 비율이 20.9% 정도 증가하였으며, PC의 경우에는 조사 전 1:0.5337에서 조사 후 1:0.7625로 산소의 비율이 42.9% 정도 증가함을 알 수 있었다.

Table 3 Comparison of atomic percentage of various polymer specimens (before and after irradiation)

Material	Element	Before	After	Deviation
PET	Carbon	83.57	78.24	-5.33
	Oxygen	14.48	15.40	+0.92
	Silicon	1.95	2.10	+0.15
	Nitrogen	-	1.51	+1.51
	Natrium	-	0.98	+0.98
	Chlorine	-	0.67	+0.67
	Calcium	-	1.10	+1.10
PMMA	Carbon	85.13	80.20	-4.93
	Oxygen	12.41	14.74	+2.33
	Silicon	2.46	1.98	-0.48
	Nitrogen	-	1.49	+1.49
	Natrium	-	1.35	+1.35
	Chlorine	-	0.24	+0.24
PC	Carbon	84.07	76.00	-8.07
	Oxygen	15.93	21.79	+5.86
	Nitrogen	-	2.20	+2.2

상기 결과는 PC, PET, PMMA 순으로 산소함량 비율이 큰 것으로 나타나 소재별 접촉각이 감소한 크기의 순서와 동일한 경향을 보였으며, 전자빔 조사에 의한 고분자 표면의 친수기 도입이 접촉각 감소의 직접적인 원인으로 작용함을 확인할 수 있었다.

Table 3에 XPS 분석을 통해 얻어진 전자빔 조사 전후의 원소별 함량 변화를 요약하였다. 전자빔이 조사된 경우 PET, PMMA, PC의 탄소 함량이 각각 5.33%, 4.93%, 8.07%가 감소하여 순수 시편 대비 탄소의 강도가 상대적으로 감소함을 알 수 있다. 반면 산소함량은 각각 0.92%, 2.33% 5.86%가 증가하였는데, 이는 전자빔 조사를 통해 C-C 결합이 제거되어 산소를 함유한 친수기가 도입된 것으로 판단된다. 한편 전자빔 조사 전의 원소 대비 조사 후에 질소, 나트륨, 염소, 칼슘이 검출된 것은 전자빔 조사가 공기 중에서 실시되는 과정에서 해당 원소가 결합되었기 때문으로 추정된다.

### 3.3 수분포집 특성 비교

고분자 표면에 응결되는 물방울의 상태를 살펴보기 위해 순수 시편과 전자빔이 조사된 시편을 수분포집 장치(Fig. 2 참조)내에 위치시켜 체류시간에 따른 수분포집 현상을 정성적으로 관찰하고, 시편의 질량측정을 통해 수분포집 특성을 정량적으로 비교하였다.

Fig. 6에 소재별 순수 시편을 대상으로 체류시

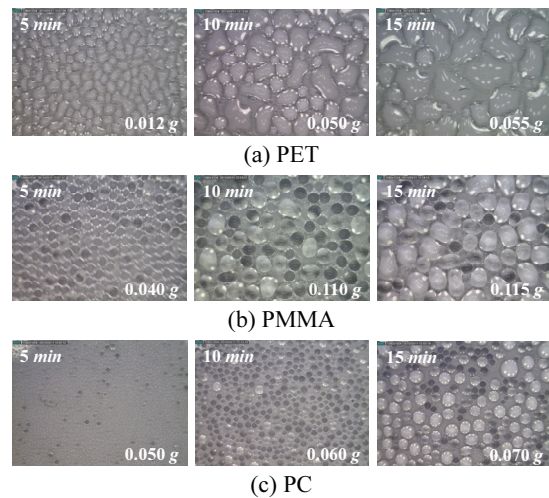


Fig. 6 Comparison of the water collection characteristics on different polymer films (pure sample)

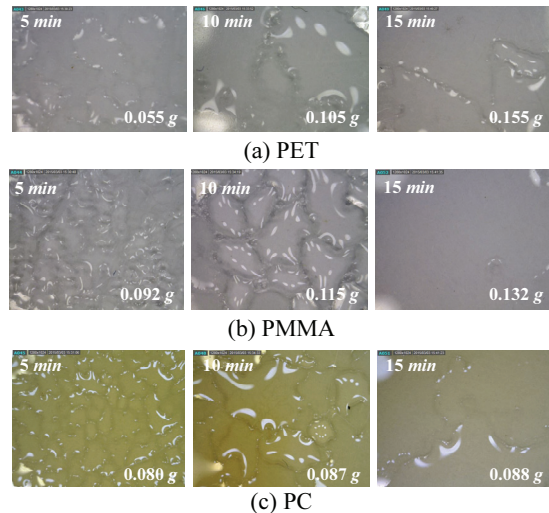


Fig. 7 Comparison of the water collection characteristics on different polymer films (irradiated sample)

간(5, 10, 15 min)에 따라 응결된 물방울의 질량과 상태변화를 도시하였다. 전반적으로 체류시간이 증가할수록 시편의 표면에 응결된 물방울의 크기가 증가하는 경향은 유사하게 나타났다. 일반적으로 물의 응축과정은 표면에 물방울의 응축이 시작되는 응축핵 생성(Nucleation) 단계, 응축된 물방울이 제자리에서 커지는 부동응축(Immobile coalescence) 단계, 물방울의 크기가 커져 합쳐지는 동적응축(Mobile coalescence) 단계를 거쳐 표면에 생성된

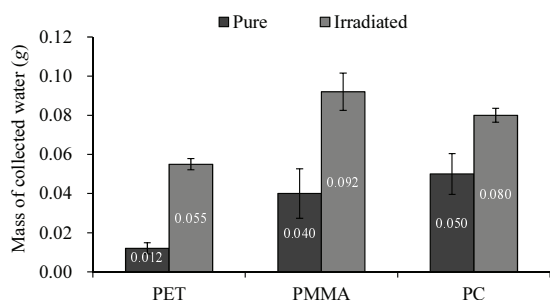


Fig. 8 Comparison of the weight of collected water for electron irradiation (5 min)

다.<sup>16</sup> 따라서 본 실험결과에서도 응축핵 생성 후 체류시간이 증가할수록 부동응축 단계를 거쳐 동적응축이 이루어짐으로써 물방울의 크기가 증가한 것으로 판단된다.

한편 시편에 응결된 물방울의 질량은 PET의 경우 0.012, 0.050, 0.055 g 순서로 증가하였으며, PMMA와 PC의 경우에는 0.040, 0.110, 0.115 g과 0.050, 0.060, 0.070 g 순서로 질량이 증가하였다. 이는 공기중에 있는 수증기가 체류시간에 따라 시편에 많이 응결된 것을 의미하며, 일정 시간 경과 시는 질량증가가 포화되는 경향을 확인할 수 있다.

상기 결과를 바탕으로 전자빔 조사된 시편을 대상으로 동일한 조건에서 실험을 실시하였다. Fig. 7에 수분포집 결과를 도시하였는데, 전반적으로 체류시간에 따른 물방울의 크기와 질량변화가 순수 시편과 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 한편 전자빔 조사된 시편에 응결된 물방울의 질량은 PET의 경우 0.055, 0.105, 0.155 g 순서로 증가하였으며, PMMA와 PC의 경우에는 0.092, 0.115, 0.132 g과 0.080, 0.087, 0.088 g 순서로 질량이 증가하였다. 이때 체류시간이 10분을 초과할 경우 수막이 표면을 덮는 막상응축(Filmwise condensation) 현상이 발생하였으며, 막상응축 발생시 수막의 형성으로 인해 추가적인 수분포집 어려워져 결과적으로 포집된 수분의 질량 증가가 완화되는 것으로 판단된다.

Fig. 8에 각각의 경우 5분 경과시의 시편에 대해 응결된 물방울의 질량을 정량적으로 비교하였다. PET의 경우 순수 시편 대비 전자빔 조사된 시편에 응결된 물방울의 질량이 0.012 g에서 0.055 g으로 4.58배 증가하였다. PMMA의 경우 응결된 수분의 질량이 0.040 g에서 0.092 g으로 2.30배 증가하였으며, PC의 경우에는 0.050 g에서 0.080 g으로 1.60배 증가하였다. 상기 결과를 종합하였을 때

전자빔 조사 후 가장 낮은 접촉각(32.8°)을 보인 PET의 경우 수분질량의 증가가 가장 크게(4.58배) 발생한 반면, 전자빔 조사 후의 접촉각이 가장 크게 나타난 PC의 경우(47.4°) 수분질량의 증가가 가장 적게 발생하여(1.60배), 결과적으로 접촉각의 감소량과 수분포집 능력간의 상관관계를 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다양한 고분자 필름(PET, PMMA, PC) 표면에 전자빔을 조사하여 친수성을 높이기 위한 연구를 수행하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 전자빔의 조사조건을 세분화하여 조사시간과 인가전류에 따른 접촉각 변화를 관찰한 결과 전반적으로 조사시간 150초, 인가전류 0.4 mA의 경우 PET, PMMA, PC의 접촉각이 38.3°, 35.8°, 39.5°가 감소하여 가장 큰 변화를 확인하였다.

(2) 전자빔 조사된 시편의 XPS 분석을 실시한 결과 PET, PMMA, PC의 탄소 함량은 각각 5.33%, 4.93%, 8.07%가 감소하고 산소 함량이 0.92%, 2.33%, 5.86%가 증가하여 산소를 함유한 친수기가 도입된 것을 확인하였다.

(3) 수분포집 장치를 제작하여 전자빔 조사 유무 시편 표면의 수분포집 특성을 살펴보았을 때 동일한 체류시간(5 min) 조건에서 전자빔 조사된 PET, PMMA, PC 시편에 응결된 물방울의 질량이 각각 4.58, 2.30, 1.60 배가 증가하여 표면에너지가 높을수록 공기중의 수분을 포집하는데 유리한 것을 확인하였다.

따라서 상기 연구결과에 의한 전자빔 조사기술을 향후 고분자 표면의 제습효과나 김서림 방지 등의 기능성에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2A10004709)의 지원으로 수행된 결과임.

#### REFERENCES

1. Li, X. M., David, R., and Mercedes, C. C., "What Do We Need for a Superhydrophobic Surface? A Review

- on the Recent Progress in the Preparation of Superhydrophobic Surfaces,” *Chemical Society Reviews*, Vol. 36, No. 8, pp. 1350-1368, 2007.
2. Drelich, J., Chibowski, E., Meng, D. D., and Terpilowski, K., “Hydrophilic and Superhydrophilic Surfaces and Materials,” *Soft Matter*, Vol. 7, No. 21, pp. 9804-9828, 2011.
  3. Nuzzo, R. G. and Allara, D. L., “Adsorption of Bifunctional Organic Disulfides on Gold Surfaces,” *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 105, No. 13, pp. 4481-4483, 1983.
  4. Vourdas, N., Tserepi, A., and Gogolides, E., “Nanotextured Super-Hydrophobic Transparent Poly (methyl methacrylate) Surfaces Using High-Density Plasma Processing,” *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 12, Paper No. 125304, 2007.
  5. Pozzato, A., Zilio, S. D., Fois, G., Vendramin, D., Mistura, G., et al., “Superhydrophobic Surface Fabricated by Nanoimprint Lithography,” *Microelectronic Engineering*, Vol. 83, No. 4, pp. 884-888, 2006.
  6. Yu, D. I., Doh, S. W., Kwak, H. J., Ahn, H. S., Kim, M. H., et al., “Apparent Contact Angle on the Hydrophilic/Hydrophobic Surfaces with Micro-Pillars,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 2, pp. 171-1784, 2014.
  7. Garrod, R. P., Harris, L. G., Schofield, W. C. E., McFetrick, J., and Ward, L. J., “Mimicking a Stenocara Beetle’s Back for Microcondensation Using Plasma-chemical Patterned Superhydrophobic-Superhydrophilic Surfaces,” *Langmuir*, Vol. 23, No. 2, pp. 689-693, 2007.
  8. Cho, Y. H., Seo, Y. S., Moon, I. Y., Kim, B. H., and Park, K., “Facile Fabrication of Superhydrophobic Poly(methyl methacrylate) Substrates Using Ultrasonic Imprinting,” *Journal of Micromechanics and Micro-engineering*, Vol. 23, No. 5, Paper No. 055019, 2013.
  9. Koo, G. H. and Jang, J. H., “Hydrophilic Modification of Poly(ethylene oxide) by UV Irradiation,” *Journal of the Korean Society of Dyers and Finishers*, Vol. 21, No. 5, pp. 16-20, 2009.
  10. Cho, J., Choi, S. C., Yoon, K. H., and Koh, S. K., “Hydrophilic Surface Formation of Polymer Treated by Ion Assisted Reaction and Its Applications,” *Journal of the Korean Vacuum Society*, Vol. 8, No. 3(2), pp. 262-268, 1999.
  11. Choi, Y. J., Lee, S. W., Seo, B. K., and Kim, M., “Hydrophilic Modification of Porous Polyvinylidene Fluoride Membrane by Pre-Irradiation”, *Journal of Membrane*, Vol. 21, No. 2, pp. 118-126, 2011.
  12. Kang, D. W., Kuk, I. S., Jung, C. H., Hwang, I. T., Choi, J. H., et al., “Electron Beam-Induced Modification of Poly(dimethyl siloxane),” *Polymer (Korea)*, Vol. 35, No. 2, pp. 157-160, 2011.
  13. Lee, E. J., Lee, H. M., Li, Y., Hong, L. Y., Kim, D. P., et al., “Hierarchical Pore Structures Fabricated by Electron Irradiation of Silicone Grease and Their Applications to Superhydrophobic and Superhydrophilic Film,” *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 28, No. 3, pp. 246-251, 2007.
  14. Lee, H. J., Kim, B. N., and Park, K., “Hydrophilic Modification of Polycarbonate Surface by Electron Beam Irradiation,” *Polymer(Korea)*, Vol. 39, No. 4, pp. 559-569, 2015.
  15. Makuuchi, K. and Cheng, S., “Radiation Processing of Polymer Materials and Its Industrial Applications,” *John Wiley & Sons*, pp. 6-11, 2012.
  16. Ji, S. M., Kim, I. Y., Kim, E. H., Jung, J. E., Kim, W. D., et al., “Fabrication of a Hybrid Superhydrophobic/Superhydrophilic Surface for Water Collection: Gravure Offset Printing & Colloidal Lithography,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 29, No. 1, pp. 19-24, 2012.