

## 전자빔 조사에 의한 폴리카보네이트 표면의 친수성 개질

이현중 · 박 근<sup>†</sup> · 김병남\*

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, \*한국원자력연구원 방사선기기연구부  
(2014년 11월 7일 접수, 2014년 12월 23일 수정, 2014년 12월 24일 채택)

## Hydrophilic Modification of Polycarbonate Surface by Electron Beam Irradiation

Hyun-Joong Lee, Keun Park<sup>†</sup>, and Byung-Nam Kim\*

Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

\*Division of Radiation Instrumentation Research, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received November 7, 2014; Revised December 23, 2014; Accepted December 24, 2014)

**초록:** 최근 기능성 표면의 구현을 위해 고분자 표면의 접촉에너지를 변화시켜 소수성 혹은 친수성으로 변화시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 폴리카보네이트 고분자 필름에 전자빔을 조사하여 친수성으로 개질하기 위한 연구를 진행하였다. 이를 위해 다양한 조사조건(전자빔 에너지, 조사시간, 인가전류) 변화에 따른 전자빔 조사 실험을 수행하고, 조사된 시편의 접촉각 변화를 관찰하였다. 전자빔 조사에 따른 표면에너지 변화의 원인을 고찰하기 위해 X선 광전자분석기(XPS)를 이용하여 미세구조를 분석하였으며, 전자빔 조사에 의한 친수성 증가로 인해 접촉각이 감소함을 확인하였다. 또한 표면개질에 의한 기계적 성질 변화를 확인하기 위해 나노 압입시험을 실시하였으며, 전자빔 조사 결과 표면의 경도와 탄성계수가 증가하여 기능적 성질을 부여할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract:** Recently, many researches have been performed to modify polymer surfaces for hydrophobic or hydrophilic properties. The present study proposed a hydrophilic surface modification of polycarbonate surfaces by irradiating electron beam (E-beam). E-beam irradiations were performed under various irradiation conditions (beam energy, irradiation time, and induced current), and the relevant contact angle changes were investigated. The surface energy change due to E-beam irradiation was investigated by XPS analysis, from which it was found that hydrophilic group was introduced due to E-beam irradiation so as to reduce the contact angle. Nano-indentation tests were also performed to investigate the change in mechanical properties, which showed that surface hardness as well as rigidity were improved due to the E-beam irradiation effect.

**Keywords:** polycarbonate, electron beam, hydrophilic surface, contact angle.

## 서 론

최근 고분자는 다양한 기능성 제품의 소재로 사용되며, 전기·전자, 자동차, 의료, 정보기술 등의 많은 산업으로 확대되고 있다. 특히 제품의 외관부품으로 널리 사용되며, 이에 따른 기능적인 표면특성이 요구되는 경우가 많다. 대표적인 기능적 특성으로 고분자의 표면에너지를 변화시켜 젖음성(wettability)을 변화시키기 위한 연구가 진행되고 있는데, 예를 들어 소수성(hydrophobic) 고분자 표면을 초소수성(superhydrophobic) 표면으로 개질하거나<sup>1</sup> 친수성(hydrophilic) 표면을 초친수성(superhydrophilic) 표면으로 개질하기 위한

연구가 진행되고 있다.<sup>2</sup>

고분자 표면의 에너지를 낮춰 소수성을 높이기 위해서는 소수성 재료 코팅,<sup>3</sup> 플라즈마 처리,<sup>4</sup> 리소그래피<sup>5</sup> 등의 공정이 사용되고 있다. 최근에는 마이크로/나노스케일 복합구조물의 제작을 통해 초소수성 표면을 구현하기 위한 연구가 진행되었다.<sup>6</sup>

고분자 표면의 에너지를 높여 친수성을 높이기 위해서는 플라즈마,<sup>7</sup> 자외선,<sup>8</sup> 이온빔,<sup>9</sup> 전자빔<sup>10</sup> 등을 조사하는 방법이 시도되었다. 이중 전자빔을 이용한 표면개질은 공정이 비교적 간단하고 편리하며, 조사 가능한 영역이 넓은 장점을 가지고 있다. 최근에는 표면개질을 위한 소재를 열경화법을 통해 제조하여 전자빔 조사에 따른 소재의 팽윤도, 열분해온도 및 접촉각 변화를 고찰하거나,<sup>11</sup> 박막코팅 및 표면처리와 같은 전처리 후 전자빔을 조사하여 친수성으로 표면을 개질한 사례가 있다.<sup>12</sup> 그러나 상기 연구는 소재에 다양한 전/후처리

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kpark@snut.ac.kr

©2015 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

기법을 사용하여 친수성 작용기 유도한 결과로 보다 간편한 공정이 요구된다.

본 연구에서는 코팅이나 표면처리 같은 별도의 전처리공정 없이 순수한 폴리카보네이트(polycarbonate, PC) 필름에 전자빔을 조사하였을 때 접촉각의 변화를 고찰하고자 한다. 특히 전자빔의 에너지 크기에 따른 접촉각의 변화를 분석하고, 조사조건을 세분화하여 조사시간과 전류 변화에 따른 접촉각 측정을 통해 조사조건을 확립하고자 한다. 이를 바탕으로 전자빔 조사에 의해 표면개질된 고분자 필름의 화학적, 기계적 물성변화를 분석하여 고분자 표면의 기능적 특성을 평가하고자 한다.

### 실 험

**재료.** 본 연구에서는 LG Chemical사(한국)에서 제작한 두께 0.3 mm의 PC 필름(GP-1000L)을 사용하였다. 상기 소재의 밀도는 1.21 g/cm<sup>3</sup>이며, 유리전이 온도(glass transition temperature)와 열변형 온도(heat deflection temperature)는 각각 150, 130 °C이다. 전자빔 조사를 위해 상기 필름재료를 13×2 cm<sup>2</sup>의 크기로 절단하여 사용하였다.

**전자빔 조사실험.** 전자빔 가속기는 한국원자력연구원(대전)에서 보유하고 있는 소형 정전가속기와 대형 고주파 선형가속기를 사용하였다. 소형 정전가속기에서는 0.2 MeV의 에너지로 전자빔 조사가 가능하며, 인가전류를 0.1~5.0 mA 범위에서 조절이 가능하다. 대형 고주파 선형가속기는 0.3~2.0 MeV의 에너지로 전자빔 조사가 가능하며, 0.01~10.0 mA 범위에서 인가전류의 조절이 가능하다. 본 연구에서는 상온 대기 중에서 전자빔 조사를 실시하였으며, Table 1에 요약된 바와 같이 조사에너지, 전류 및 조사시간을 변화시켜가며 실험을 진행하였다.

**전자빔의 침투 깊이.** 고분자 소재에 전자빔이 조사될 경우 전자빔의 침투 깊이(penetration depth,  $\delta$ )는 식 (1)로부터 계산된다.<sup>13</sup>

$$\delta = (0.524 \cdot E - 0.1337) / \rho \tag{1}$$

여기서,  $E$ 는 전자빔의 조사에너지(단위: MeV),  $\rho$ 는 소재의 밀도(단위: g/cm<sup>3</sup>)를 의미한다. 식 (1)을 사용하여 0.3 mm 두께의 PC 소재에 대한 임계 조사에너지는 0.324 MeV로 계산

**Table 1. Electron Beam Irradiation Conditions**

Polymer	Polycarbonate (thickness: 0.3 mm)
Energy (MeV)	0.2 / 1.0
Time (s)	5 / 12 / 50 / 100 / 150
Current (mA)	0.1 / 0.2 / 0.3 / 0.4 / 0.5

된다. 이를 바탕으로 조사에너지를 임계에너지보다 낮은 0.2 MeV와 임계 조사에너지보다 큰 1.0 MeV의 2가지 조건으로 변화시켜가며 조사실험을 실시하였다.

**접촉각 측정.** 전자빔 조사에 의한 고분자 표면의 젖음특성을 고찰하기 위해 접촉각 측정기(KSV, CAM-200, 한국)를 사용하여 접촉각을 측정하였다. 이때 접촉각은 3  $\mu$ L의 증류수 방울을 전자빔이 조사된 고분자 표면에 떨어뜨려 측정하였으며, 시료별 10회씩 측정 후 평균값을 산정하여 비교하였다.

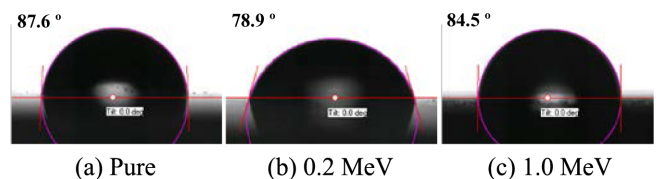
**조사된 시편의 미세구조 분석(XPS).** 전자빔 조사에 의해 개질된 고분자시편의 필름의 화학적 특성 변화를 살펴보기 위해 X선 광전자 분광기(X-ray photoelectron spectroscopy, multilab, ESCA 2000, 영국)를 사용하였다. 이때 XPS 분석은 Mg K $\alpha$ (0.7 eV)와 Al K $\alpha$ (0.85 eV) X-ray 광원을 사용하여 0~3 kV의 에너지 범위에서 실시하였으며, 전자빔 조사 전·후의 필름에 대해 8×8 mm<sup>2</sup>의 영역에서 분석을 수행하였다.

**나노 압입시험(Nano Indentation).** 전자빔 조사 전후의 기계적 성질변화를 측정하기 위해 나노 압입시험기(nano test NTX, Micro Materials Ltd, 영국)를 사용하여 압입시험을 실시하였다. 이때 사용된 압자는 중심에서의 각도가 65.3°인 Berkovich 형태 압자를 사용하였으며, 하중을 30 mN으로 고정된 상태에서 6회씩 반복실험을 실시하였다. 나노 압입시험은 전자빔 조사면(front face)과 후면(back face)에 대해 각각 실시하였다.

**열중량 분석(Thermogravimetric Analysis).** 전자빔 조사에 따른 열안정성을 평가하기 위해 열중량 분석기(Q500, TA Instrument, 미국)를 사용하였다. 이때 사용된 시료는 조사 전후의 필름에서 각각 13.0±0.5 mg을 채취하여 산화를 방지하기 위해 질소분위기에서 5 °C/min의 승온 속도로 온도를 상승시켰으며, 0부터 800 °C까지의 TGA 곡선을 구하였다.

### 결과 및 토론

**조사에너지의 영향 분석.** 조사에너지를 0.2와 1.0 MeV의 2가지로 변화시켜가며 전자빔 조사를 실시하였다. 이때 전자빔의 조사시간과 전류는 각각 12초와 0.5 mA로 설정하였다. Figure 1에 전자빔의 에너지 변화에 따라 조사된 시편 표면의 접촉각 변화를 도시하였다. 원소재의 경우 87.6°의 접촉각을 보인 반면, 0.2 MeV 전자빔 조사시는 78.9°로 8.7° 감소하



**Figure 1.** Droplet shape on polymer films with different irradiation energy (0.5 mA, 12 s irradiation).

였음을 알 수 있다. 한편, 1.0 MeV 전자빔 조사시는 접촉각이 84.5°로 측정되어 소폭(3.1°) 감소함을 알 수 있다. 전반적으로 전자빔 조사에 의해 시편의 표면에너지가 증가하여 접촉각이 감소된 것으로 판단된다.

상기 결과에서 전자빔 에너지가 0.2 MeV로 낮은 경우 1.0 MeV보다 낮은 접촉각으로 변화된 각이 높은 것을 확인할 수 있는데, 이에 대한 분석을 위해 전자빔 조사에너지에 따른 시편의 표면상태를 Figure 2에 비교하였다. Figure 2(a)와 (b)는 각각 조사 전의 PC 시편의 표면과 0.2 MeV 조사시편의 표면의 사진으로 큰 차이가 없는 것으로 판명되었다. 반면, Figure 2(c)와 같이 전자빔의 에너지가 높을 경우(1.0 MeV), 고분자 필름의 표면이 높은 열로 인해 손상되어 표면에 결함이 발생한 것으로 관찰되었으며, 이러한 표면결함이 결과적으로 표면조도를 저하시켜 표면에너지를 낮춘 것으로 판단된다. 상기 결과로부터 고분자 표면을 손상시키지 않으면서도 표면에너지를 증가시킬 수 있는 0.2 MeV로 조사에너지를 설정하는게 바람직한 것으로 판단된다.

Figure 3에 전자빔 조사 전·후의 PC 시편을 비교하였다. 전자빔이 조사되었을 경우 기존에 무색이었던 시편이 황색으로 변색된 것을 확인할 수 있었다. 특히 조사에너지가 1.0 MeV인 경우(Figure 3(c))가 0.2 MeV인 경우(Figure 3(b))에 비해 변색이 더 심하게 발생한 점을 확인할 수 있다. 이와 같은 변색은 전자빔에 의해 벤젠고리끼리 서로 결합(conjugation)되어 발생하는 것으로 판단되며, 전자빔의 에너지가 큰 경우 더 심화되는 것으로 볼 수 있다. 상기 결과를 종합해볼 때 전자빔 조사시 시료에 손상을 발생시키지 않으면서도 친수성을 증가시킬 수 있도록 저에너지의 가속기 사용이 더욱 효과적

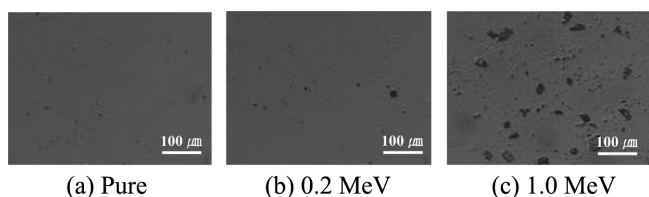


Figure 2. Surface comparison of the PC films with different irradiation energy (0.5 mA, 12 s irradiation).

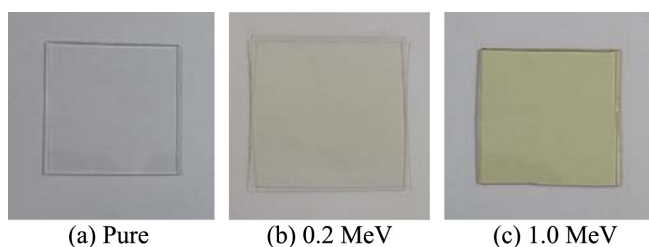


Figure 3. Color changes of polymer films with various electron beam irradiation energy (0.5 mA, 12 s irradiation).

인 것으로 판단되며, 향후 실험시 해당 가속기를 사용하여 0.2 MeV의 에너지로 조사를 실시하였다.

**조사시간의 영향 분석.** 상기 결과를 토대로 전자빔의 에너지를 0.2 MeV, 전류를 0.1 mA로 고정된 상태에서 조사시간을 변화시켜가며 전자빔 조사실험을 실시하였다. 이때 조사시간 증가로 인해 시편이 과열되는 현상을 방지하기 위해 전류의 세기는 0.1 mA로 감소시켰으며, 조사시간을 5초에서 150초까지 다양하게 변화시켜가며 조사실험을 실시하였다. Figure 4에 조사시간 변화(5, 50, 100, 150초)에 따른 접촉각 측정형상과 고분자 필름의 색상 변화를 도시하였다. 전반적으로 전자빔의 조사시간이 증가할수록 접촉각이 감소하는 현상을 확인할 수 있으며, 특히 150초 조사시편의 경우 접촉각이 65.9°로 측정되어 조사 전 시료의 측정결과(87.6°)에 비해 21.7° 만큼 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 전자빔 조사시 조사시간이 증가할수록 표면에너지가 증가하여 조사면 표면의 친수성 특성이 강화됨을 확인할 수 있었다. 또한 조사시간이 증가할수록 조사된 시편의 변색농도가 짙어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 PC 내에 페놀류(phenols) 또는 자유 라디칼과 전자의 함유상태가 전자빔의 영향으로 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 이때 페놀류는 벤젠고리에 하이드록시기(-OH)가 결합된 화합물로서 강한 산성을 나타내는데, 전자빔의 조사에 의해 하이드록시기와 산소가 증가함으로써 친수성이 증가한 것으로 판단된다.

**인가전류의 영향 분석.** 인가전류의 영향 분석을 위해 전자빔의 에너지를 0.2 MeV, 조사시간을 150초로 고정된 상태에서 인가전류의 크기를 변화(0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mA)시켜 가며 전자빔 조사실험을 실시하였다. Figure 5에 인가전류의 변화에 따른 접촉각 측정결과와 고분자 시편의 색상 변화를 비교하였다. 역시 인가전류의 크기가 증가할수록 접촉각이 감소함을 확인할 수 있으며, 특히 인가전류가 가장 큰 0.4 mA 조

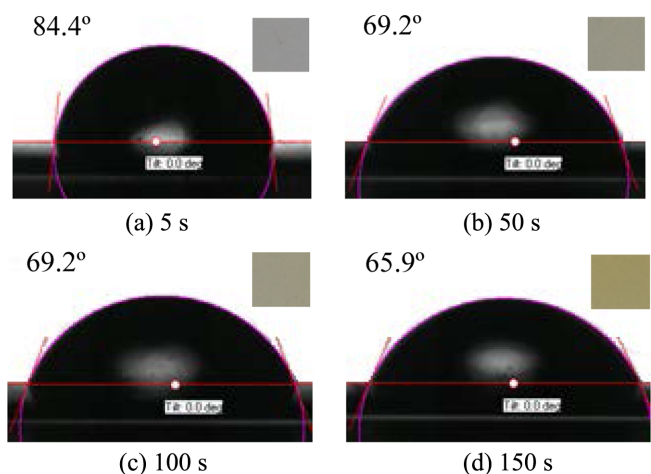
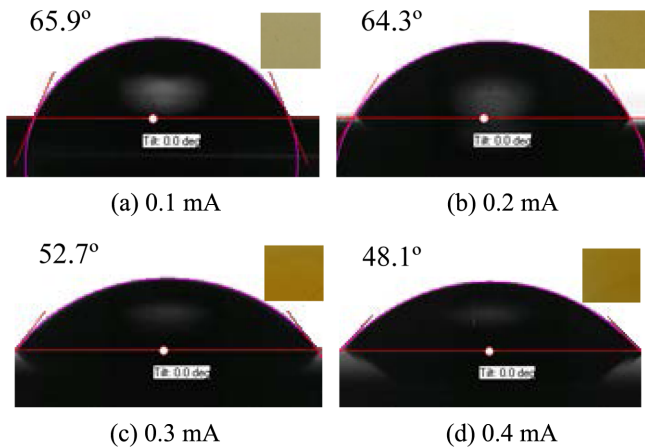


Figure 4. Comparison of droplet shapes and surface colors with different electron irradiation time.



**Figure 5.** Comparison of droplet shapes and surface colors with different current (0.2 MeV, 150 s irradiation).

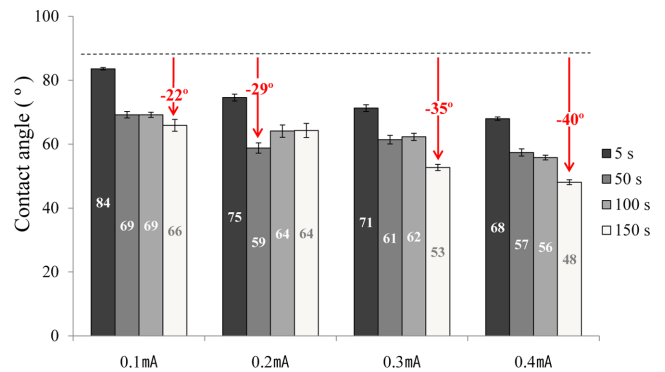
사시편의 경우 접촉각이 48.1°로 측정되어 조사전 시편 대비 39.5° 만큼 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 큰 전류가 인가될수록 역시 조사선량(dose)이 증가되는 효과가 있어 친수성 표면개질이 강화됨을 확인할 수 있었다.

Table 2에 조사시간과 전류변화에 따른 접촉각 측정결과를 요약하였다. 이때 조사시간은 5, 50, 100, 150초로 설정하였으며, 전류를 0.1부터 0.4 mA까지 0.1 mA의 간격으로 변화하여 실시하였다. 그 결과 각각의 전류크기에서 조사시간이 증가할수록 대부분의 접촉각이 감소하는 경향을 확인하였다.

**Table 2. Comparison of Contact Angles with Different Electron Beam Irradiation Conditions**

Current (mA)	Time (s)	Contact angle (°)
0.1	5	84.4±1.1
	50	69.2±3.0
	100	69.2±2.4
	150	65.9±5.2
0.2	5	74.6±3.4
	50	58.8±4.6
	100	64.1±6.4
	150	64.3±5.9
0.3	5	71.3±2.6
	50	61.4±4.1
	100	62.3±2.2
	150	52.7±2.6
0.4	5	68.0±1.5
	50	57.4±2.9
	100	55.8±2.1
	150	48.1±1.7

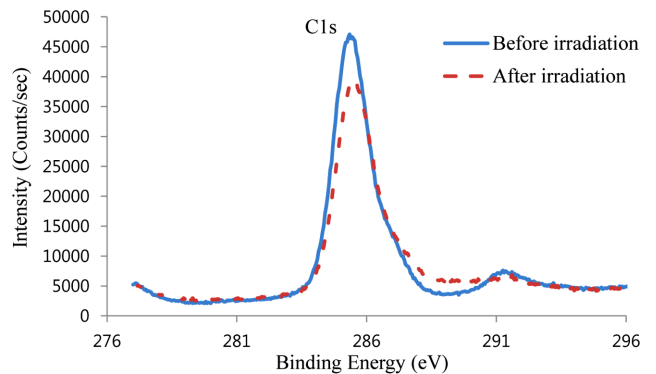
\*Contact angle of pure film : 87.6±3.5°.



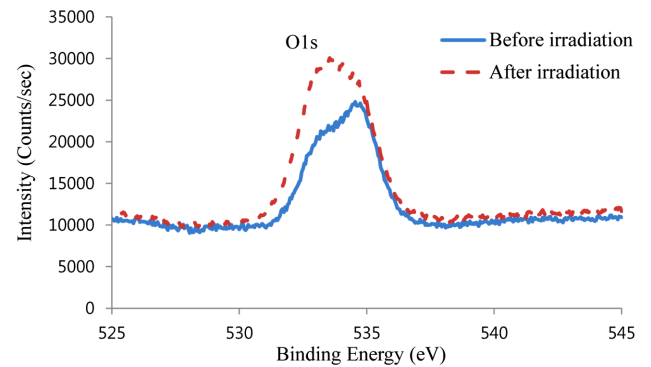
**Figure 6.** Comparison of contact angles with different electron irradiation time and currents.

상기 결과를 Figure 6과 같이 그래프로 표현하였다. 전반적으로 조사시간보다는 인가전류 변화의 영향이 더욱 주요한 것으로 나타났으며, 이는 전류세기와 조사시간의 곱이 조사선량과 비례하는 점을 감안할 때 동일한 조사선량에서도 조사 속도(dose rate)가 큰 경우 친수기의 도입이 보다 유리한 것으로 판단할 수 있다.

**XPS를 사용한 화학적 변화 분석.** 전자빔 조사를 통해 친수성으로 표면개질된 PC 시료에 대해 XPS를 사용하여 화학



(a) The core level C1s spectra



(b) The core level O1s spectra

**Figure 7.** X-ray photoelectron spectra of PC specimens (before and after E-beam irradiation).

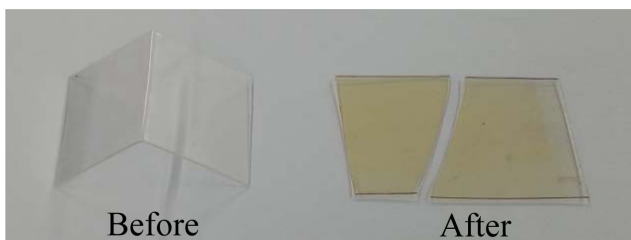
**Table 3. Comparison of Atomic Percentage of PC Specimens (Before and After Irradiation)**

Elemental components	Before irradiation	After irradiation
Carbon (%)	84.07	76.00
Oxygen (%)	15.93	21.79
Nitrogen (%)	-	2.20

적 물성 변화를 분석하였다. 시료는 접촉각 감소가 가장 크게 나타난 조사조건(빔에너지 0.2 MeV, 인가전류 0.4 mA, 조사시간 150초)에서 조사된 시편을 대상으로 사용하였다. Figure 7에 전자빔 조사 전후의 PC 시료에 대해 XPS 분석을 실시하여 검출된 그래프를 도시하였다. Figure 7(a)와 같이 C1s가 검출되는 영역으로 285.35 eV 부근에서 피크가 발생하였으며, Figure 7(b)와 같이 O1s가 검출되는 영역으로 534.55 eV 부근에서 피크가 발생하였다. 전자빔 조사 전후의 결과를 살펴보면 전자빔 조사에 의해 C1s 피크의 높이가 감소한 반면 O1s가 검출된 피크의 높이는 증가한 것을 확인할 수 있었다.

Table 3에 XPS 분석을 통해 얻어진 전자빔 조사 전후의 원소별 함량 변화를 요약하였다. 전자빔이 조사된 필름의 경우 탄소의 함량이 84.07에서 76.00%로 약 8.07%가 감소하여 기존 필름 대비 C1s의 강도가 상대적으로 낮아진 것을 확인할 수가 있었는데, 이는 전자빔 조사에 의해 C-C 결합이 감소한 것으로 판단된다. 반면, 산소 함량은 15.93에서 21.79%로 약 5.86%가 증가하여 전자빔 조사에 의해 C-C 결합이 제거되고 산소를 함유한 친수기가 도입되어 친수성이 증가한 것으로 판단된다. 이때 미소한 질소의 함량증가는 공기 중에서 조사하였기 때문에 랜덤으로 결합하여 발생된 것으로 판단된다.

**나노 압입시험에 의한 기계적 물성 분석.** 전자빔이 조사된 시편을 취급하는 과정에서 전자빔이 조사된 시편은 취성이 증가되어 파단이 쉽게 발생함을 알 수 있었다. Figure 8에 전자빔 조사 전후의 시편에 굽힘하중을 인가한 경우의 결과를 비교하였다. 전자빔 조사 전의 시편은 연성이 강해 소성 변형이 발생한 반면 전자빔이 조사된 필름은 동일한 하중이 인가된 경우 파단이 발생함을 확인하였다. 이러한 결과로 보아 전자빔 조사에 의해 PC 소재의 취성이 강해진 것으로 판단된다. 본 연구에서는 조사된 고분자 필름의 기계적 물성 변

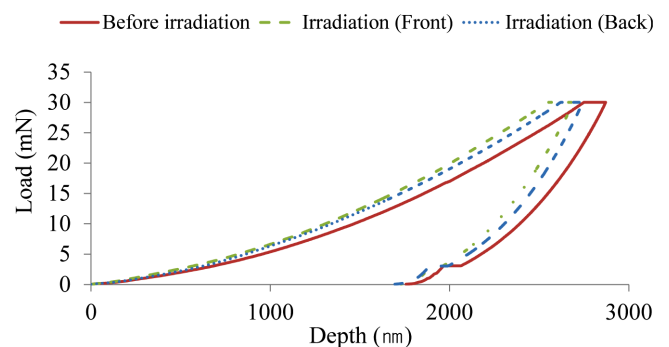


**Figure 8.** Comparison of bending test for PC specimens (before and after E-beam irradiation).

화를 확인하기 위해 나노 압입시험을 상온에서 실시하였다. 이때 압입시험은 접촉각 감소가 가장 크게 나타난 조사조건(빔에너지 0.2 MeV, 인가전류 0.4 mA, 조사시간 150초)에서 조사된 시편을 대상으로 전자빔 조사면(front face)과 반대면(back face)에 대해 실시하여 전자빔 조사 전의 시편의 결과와 비교하였다.

Figure 9에 각각의 경우에 대한 압입 깊이별 하중변화 그래프를 도시하였다. 전자빔 조사 전의 압입 깊이에 비해 전자빔이 조사된 표면의 압입 깊이가 감소하여 경도가 증가됨을 확인하였으며, 특히 조사면의 압입 깊이가 반대면보다 더 작게 나타나 상대적으로 경도증가가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. Table 4에 3가지 시편에 대한 나노 압입시험의 결과(압입깊이, 경도, 탄성계수)를 정량적으로 비교하였다. 전자빔 조사 전의 시편은 2870.3 nm의 깊이가 압입된 반면 전자빔이 조사된 시편의 경우는 조사면이 2690.1 nm, 반대면이 2764.1 nm의 깊이로 압입되어 각각 6.3%와 3.7%의 감소를 보였다. 경도는 전자빔 조사 전 시편이 0.210 GPa로 측정된 반면, 조사된 시편의 경우 조사면이 0.237 GPa(12.9% 증가), 반대면이 0.227 GPa(8.1% 증가)로 나타나 역시 조사면에서의 경도증가가 두드러짐을 확인할 수 있었다. 탄성계수는 조사 전 시편이 3.614 GPa로 측정된 반면, 조사면의 경우 4.576 GPa로 26.6%가 증가되었고 반대면의 경우 4.085 GPa로 13.0%가 증가되었다.

상기 결과로 볼 때 전자빔이 PC 시료를 부분적으로 투과함에 따라 반대면에도 경도가 증가한 것으로 판단된다. 일반적으로 고분자 재료에 전자빔이 조사될 때 고분자의 종류에



**Figure 9.** Comparison of load-depth graphs for nano-indentation test.

**Table 4. Comparison of the Mechanical Properties**

Properties	Before irradiation	After irradiation	
		Front	Back
Depth (nm)	2780.3	2690.1	2764.1
Hardness (GPa)	0.210	0.237	0.227
Young's modulus (GPa)	3.614	4.576	4.085

따라 가교(crosslinking)가 발생하거나 분해(chain scission)가 일어나는 것으로 알려져 있으며,<sup>13</sup> PC의 경우 전자빔 조사시 경도는 증가하나 연신율이 감소하고 인장강도 역시 감소하는 것으로 알려져 있다.<sup>14,15</sup> 따라서 본 연구에서의 실험결과도 경도는 증가하나 연신율이 감소하는 것으로 나타난 점을 감안할 때, 전자빔 조사에 의해 고분자 사슬 분해가 발생한 것으로 판단된다.

**열중량 분석시험에 의한 열안정성 평가.** 앞절에서 기술한 전자빔 조사시 고분자사슬 분해가 나타나는 현상을 뒷받침하기 위해 열중량 분석(thermogravimetric analysis, TGA)을 통해 전자빔 조사 전후의 PC 시편의 열적 안정성 변화를 고찰하였다. Figure 10에 전자빔 조사 전후의 시편에 온도를 증가시킨 경우의 결과를 비교하였다. 전반적으로 400~500 °C 사이에서 중량이 급감하는 경향을 확인할 수 있었으며, 전자빔이 조사된 시편의 경우 조사 전의 시편 대비 빠른 중량변화를 보여 열분해가 먼저 발생하는 것을 알 수 있었다.

Table 5에 TGA 분석을 통해 얻어진 전자빔 조사 전후의 열분해 온도 변화를 정량적으로 비교하였다. 조사 전 시편의 경우 10, 20%의 중량 감소가 각각 487.2와 502.6°C에서 발생한 반면 전자빔이 조사된 시편의 경우 10, 20%의 중량 감소가 각각 453.7와 481.3 °C에서 발생하였다. 따라서 전자빔 조사시의 10% 중량감소 시점이 33.5 °C 앞당겨지고 20% 중량감소 시점이 21.4 °C 앞당겨져 시편의 열안정성이 감소한 것으로 판단된다. 상기 결과를 바탕으로 전자빔 조사에 의해 시료의 열안정성이 감소되었음을 알 수 있으며, 결과적으로 전자빔 조사에 의해 분해반응이 발생됨을 확인하였다.

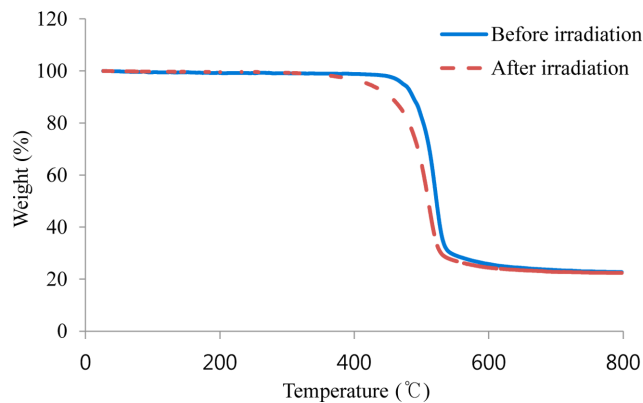


Figure 10. Comparison of TGA curves for PC specimens.

Table 5. Comparison of Thermal Decomposition Temperature

Weight reduction (%)	10	20
Before irradiation (°C)	487.2	502.6
After irradiation (°C)	453.7	481.3
Deviation (°C)	33.5	21.4

## 결론

본 연구에서는 전자빔 조사를 통해 PC 표면의 친수성을 증가시키기 위한 연구를 수행하였다. 다양한 전자빔 조사조건(빔에너지, 조사시간, 인가전류) 변화에 따른 전자빔 조사실험을 수행하여 접촉각 변화를 관찰한 결과 빔에너지는 PC 표면이 손상되지 않도록 낮은 범위로 설정하고, 조사시간과 인가전류를 증가시켜 조사선량을 늘려주는 방향으로 조건을 설정하는 것이 친수성 증가에 유리함을 확인하였다. 특히 빔에너지 0.2 MeV, 조사시간 150초, 인가전류 0.4 mA인 경우 접촉각이 40° 정도 감소되어 친수성 개질이 성공적임을 확인하였다. 또한 전자빔 조사 시료의 XPS 분석을 실시한 결과 전자빔 조사 전후의 산소 함유량이 각각 15.93%에서 21.79%로 증가하여 친수성이 증가된 것을 확인하였다. 반면, 나노압입시험을 실시한 결과 경도가 12.9% 정도 증가되는 것으로 나타났으나, 취성이 강해져 인장특성은 오히려 저하됨을 확인하였다. 이러한 현상을 고찰하기 위해 열중량 분석을 실시한 결과 전자빔 조사시 열분해가 7% 정도 빠르게 발생하여 재료의 열안정성이 감소하는 결과를 확인할 수 있었으며, 이러한 결과를 바탕으로 전자빔 조사에 의해 PC 시편에서 분해반응이 발생됨을 확인하였다.

상기 연구결과를 활용하여 향후 고분자 표면에 전자빔을 조사함으로써 자가세정이나 김서림방지 등과 같이 기능성을 부여할 수 있을 것으로 기대되며, 특히 원하는 특성을 얻기 위한 조사조건을 확립하는데 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

**감사의 글:** 본 연구는 미래창조과학부와 한국연구재단의 원자력 연구개발사업(NRF-2013M2B2A4040973)의 지원으로 수행된 결과임.

## 참고 문헌

1. X. M. Li, D. Reinhoudt, and M. Crego-Calama, *Chem. Soc. Rev.*, **36**, 1350 (2007).
2. J. Drelich, E. Chibowski, D. D. Meng, and K. Terpilowski, *Soft Matter*, **7**, 9804 (2011).
3. R. G. Nuzzo and D. L. Allara, *J. Am. Chem. Soc.*, **105**, 4481 (1983).
4. N. Vourdas, A. Tserepi, and E. Gogolides, *Nanotechnology*, **18**, 125304 (2007).
5. A. Pozzato, S. D. Zilio, G. Fois, D. Vendramin, G. Mistura, M. Belotti, Y. Chen, and M. Natali, *Microelec. Eng.*, **83**, 884 (2006).
6. Y. H. Cho, Y. S. Seo, I. M. Moon, B. H. Kim, and K. Park, *J. Micromech. Microeng.*, **23**, 055019 (2013).
7. S. J. Park, J. S. Hwang, W. K. Choi, H. K. Lee, and K. M. Huh, *Polym. Korea*, **38**, 205 (2014).
8. G. H. Koo and J. H. Jang, *J. Korean Soc. Dyers & Finishers*, **21**, 16 (2009).

9. J. Cho, S. C. Choi, and S. K. Koh, *J. Kor. Vac. Soc.*, **8**, 262 (1999).
10. Y. J. Choi, S. W. Lee, B. K. Seo, and M. Kim, *J. Membr.*, **21**, 118 (2011).
11. D. W. Kang, I. S. Kuk, C. H. Jung, I. T. Hwang, J. H. Choi, Y. C. Nho, S. Y. Mun, and Y. M. Lee, *Polym. Korea*, **35**, 157 (2011).
12. E. J. Lee, H. M. Lee, Y. Li, L. Y. Hong, D. P. Kim, and S. O. Cho, *Macromol. Rapid Commun.*, **28**, 246 (2007).
13. K. Makuuchi and S. Cheng, *Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2012.
14. T. Seguchi, T. Yagi, S. Ishikawa, and Y. Sano, *Radiat. Phys. Chem.*, **63**, 35 (2002).
15. K. Hareesh, C. Ranganathaiah, P. Rama, R. Bhargavi, G. G. Nair, Sangappa, and G. Sanjeev, *J. Appl. Polym. Sci.*, **127**, 2010 (2013).