

전자빔가속기의 산업적 활용 및 연구동향

김홍제

한국염색기술연구소 기업지원팀

1. 서 론

현재 방사선은 많은 위험성에도 불구하고 다양한 활용가치로 인하여 의료, 환경, 합성수지, 섬유 분야 등 산업 전 분야에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있다. 일반적으로 방사선이라 함은 물질을 투과할 수 있는 능력을 가진 고에너지 광선으로 들뜬 상태에 있는 원자가 바닥상태로 가면서 방출하는 입자 또는 전자파 형태의 에너지 흐름을 말한다. 방사선은 에너지에 따라 자외선, 가시광선, 적외선, 초단파, 단파, 중파와 같은 비전리성 방사선과 입자형태인 중하전입자(알파, 양성자, 핵분열 생성물), 베타, 중성자와 전자파 형태인 X선과 γ 선을 포함하는 전리성 방사선으로 구분된다. 이와 같은 여러 형태의 방사선들 중 섬유를 포함하는 고분자 및 합성수지 분야에 있어서는 자외선, 감마선, 플라즈마, 전자빔 등이 주로 그래프트 공중합을 통한 개질 및 코팅, 경화 등의 분야에서 연구 및 생산목적으로 활용되고 있다. 이중 전자빔 유도장치인 전자빔가속기는 Table 1과 같이 다른 방사선원에 비하여 투과력, 에너지 효율, 작업공정의 자동화 및 에너지 조절의 용이성 등으로 인하여 현재 이에 대한 학술적 연구 및 산업적 활용이 점차적으로 크게 증가하고 있다. 국내에는 1970년대 후반부터 학술적 연구 목적으로 소개되기 시작하였으며 현재 Wire 및 Cable의 절연체 생산과 같은 고분자 개질 및 의료, 식품분야에서의 살균과 환경분야 등에서 산업적 활용이 확대되고 있다. 2006년 현재 약 30기 정도의 전자빔가속기가 국내에 보급되어 활용되고 있으며 대학 및 전문연구기관의 산업적 활용가치에 대한 유용성 및 기술적 연구가 꾸준히 이루어지고 있으며 향후 이에 대한 산업적 활용 및 보급은 크게 확대될 것으로 전망된다.

본 고에서는 먼저 전자빔가속기의 개요와 전자빔가속기 활용에 있어 필요한 기초적인 선량측정 방법 및 전자빔과 물질간의 상호작용, 전자빔 조사를 통한 그래프트 공중합방법과 함께 전자빔가속기의 광범위한 산업적 활용분야와 연구동향에 관하여 간단히 살펴보고자 한다.

Table 1. Comparison of electron beam and other activation methods

	Electron beam	γ -ray	Ultraviolet light	Low temp. plasma
Radiation source	Accelerator	⁶⁰ Co	Lamp	Frequency
Energy (keV)	100 ~ 12,000	1,330 ~ 1,170	3~6	3~10
Penetration	Low	High	Very low	Very low
Energy efficiency	High (ca.85%)	Low (ca.30%)	15%	-
Treatment period	Short	Long	Middle	Middle
Strength	Constant	Gradual loss	Constant	Constant
On/off control	Possible	Impossible	Possible	Possible

2. 전자빔 가속기의 개요

전자는 전압에 의해 형성된 전기장을 통과할 때 가속되게 되며 전압에 의한 가속은 거의 선형적으로 증가하게 된다. 가속기는 이를 이용하여 특정한 경로를 따라 이온의 흐름을 생성할 수 있도록 고안된 장치로서, 먼저 이온을 발생한 후 이온의 에너지를 증가시키기 위해 높은 전위차를 부여해야 한다. 이온이 전위차를 통과할 동안 높은 에너지의 이온빔이 표적(Target)으로 향할 수 있도록 일련의 전자석이 설치되어 있다. 이온빔이 표적과 충돌 시 여러 용도로 사용될 방사선이 방출되게 된다. 따

라서 가속기는 고전압원, 진공시스템, 전자석이 설치된 빔 경로, 표적, 차폐체 그리고 이온발생원 등으로 구성된다. 전자빔가속기는 여러 종류의 가속기가 사용되고 있지만 최근에는 고전압전자빔 가속기가 널리 보급되고 있다. 발생된 전자를 가속시키기 위해서는 수백에서 수천 kV의 전압이 사용되게 되며 가속된 전자는 금속 foil의 인출창을 통해서 대기 중으로 조사되게 된다.

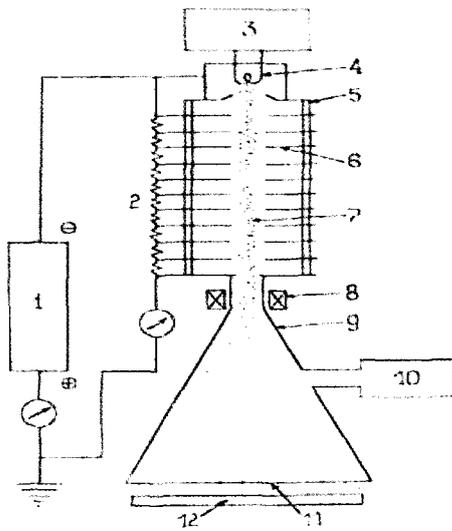


Fig. 1. Electron beam accelerator.
(1. D.C. power supply, 2. column resistor, 3. filament power supply, 4. cathode, 5. acceleration tube, 6. accelerating electrode, 7. electron beam, 8. scanning coil, 9. scanner chamber, 10. vacuum pump, 11. exit window, 12. irradiated material.)

Table 2. Classification of electron beam accelerator¹⁾.

Classification	Types (Accelerator)
Method of energy transfer	a) Direct action accelerator b) Indirect action accelerator
Geometry of electron trajectory (For indirect action accelerator)	a) Linear accelerator b) Cyclic accelerator
Time relationship of beam current	a) Low energy (less than 300KeV) b) Medium energy (from 300KeV to 4MeV) c) High energy (higher than 4MeV)
Field of application	a) Research accelerator b) Industrial accelerator

2.1 가속기의 종류

가속기는 이온발생원과 표적사이에 인가되는 고전압의 인가형태에 따라 그 종류가 구분되는데 가장 일반적인 형태는 “라이네”(Linacs)으로 부르는 선형가속기이다. 이 선형가속기는 에너지에 따라 고에너지와 저에너지형 가속기로 구분된다. 그리고 또 다른 형태로는 이온빔이 원형의 경로를 따라 가속되는 싸이클로트론(Cyclotron) 이 있다. Table 2는 여러 형태의 가속기 종류를 나타내고 있다.

3. 방사선량 및 단위

3.1 조사선량 (Irradiation dose)

조사선량(X)은 3MeV 이하 광자(X-선 또는 감마선)에 의해 공기의 단위질량당 생성된 전하의 양으로 정의되며 전통적인 단위는 뢰트겐(Roentgen, R)이고 SI 단위는 C/kg이다.

$$X = dQ/dm, [C/kg, R], 1R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$$

3.2 흡수선량 (Absorbed dose)

흡수선량(D)은 물질의 단위질량당 흡수된 방사선의 에너지로 정의되며 전통적인 단위는 라드(Roentgen Absorbed Dose, rad)이고 SI 단위는 그레이(Gray, Gy)이다.

$$D = dE/dm, [Gy, rad],$$

$$1 \text{ rad} = 100\text{erg/g}, 1\text{Gy} = 1\text{J/kg} = 100\text{rad}$$

조사선량은 광자가 공기에 입사되는 경우에만 적용 가능하지만 흡수선량은 모든 종류의 방사선이 인체조직을 포함하는 모든 물질에 입사되는 경우에도 적용 가능하다. 조사선량 1R은 공기 중에서 광자에 의한 흡수량 0.876 rad와 증가하고, 방사선방호 목적, 즉 인체조직에서의 광자에 의한 흡수선량 0.95rad(대략1 rad)와 증가하다.

4. 전자빔의 선량 측정

감마선 혹은 전자빔과 같은 방사선 조사에 의하여 발생하는 물질의 물리, 화학적인 변화 및 그 응용에 관한 연구는 방사선 조사에 의해 물질에 전달되는 에너지의 양을 정량화하는 것을 기초 지식으로 하게 된다. 이와 같이 방사선이 표적 물질에 조사될 때 표적물질에 흡수되는 방사선량을 측정, 예측, 평가하고 제어하는 기술은 이를

학술적인 연구 및 공업적으로 이용하는데 있어 선행되어야 할 매우 중요하며 필수적인 기술이라 할 수 있다. 방사선의 선량을 측정^{2,3)}하는 선량 측정시스템은 크게 1차 선량계와 2차 선량계로 분류되며 1차 선량계는 calorimeter 또는 ionization chamber와 같이 흡수선량의 정의에 관계되는 현상을 직접 측정하는데 근거를 두고 있으며, 2차 선량계는 방사선 조사에 의해 유도되는 조사물질의 화학적 또는 물리적 변화를 측정하는 선량측정 방법이라 할 수 있다. 2차 선량계의 흡수선량은 1차 표준선량계 혹은 다른 보정된 2차 표준 선량계의 보정에 의해 측정되게 된다. 1차 또는 2차 선량계 중에서 양호한 특성을 갖는 선량계는 표준선량계로 사용되며 표준 선량계로 사용되지 않는 2차 선량계는 실용선량계로 불리워지고 있다.

일반적으로 전자빔 가속기의 선량 측정에는 CTA(cellulose triacetate) film을 이용하는 실용선량계가 가장 많이 사용되고 있다. 이 CTA 선량계는 일본원자력연구소와 프랑스로원자력청과의 공동연구에 의해 개발되어 이를 근간으로 시판되어 사용하고 있는 film 실용 선량계로 triphenyl phosphate를 첨가한 cellulose triacetate film으로 파장이 280nm에서 자외선의 흡광도가 흡수선량에 대하여 직선적으로 증가하는 것을 이용한 선량계이다. 실제 선량측정에 있어서는 먼저, CTA film에 조사된 선량을 측정 후 이를 섬유에 조사된 선량으로 보정하는 과정을 거치게 되며 다음과 같은 방법이 적용되게 된다.

① CTA film의 흡수선량 측정

전자빔 조사 전, 후 CTA film의 흡광도 변화를 측정하기 위해서 spectrophotometer를 사용하여 280nm의 파장에서 흡광도 변화를 얻은 다음, 아래의 식으로 CTA film의 흡수선량을 계산한다.

CTA film의 흡수선량

$$D_{CTA} = \frac{\Delta OD}{K} \times \frac{0.125}{t} [Mrad]^{13)}$$

D_{CTA} : Absorbed dose of CTA film [Mrad]

ΔOD : Change of the absorbance

t : Thickness of CTA film [mm]

K : Change of the absorbance per dose

② 선량 보정 및 섬유의 흡수선량

섬유소재에 조사된 선량은 앞서 측정된 CTA

film의 흡수선량 값으로부터 다음 식을 통하여 계산한다.

$$D = D_{CTA} \times \frac{(S/\rho)}{(S/\rho)_{CTA}} [Mrad]^{11)}$$

D : Absorbed dose of sample [Mrad]

D_{CTA} : Absorbed dose of CTA film [Mrad]

(S/ρ) : Stopping power of sample [$MeV cm^2 g^{-1}$]

$(S/\rho)_{CTA}$: Stopping power of CTA film [$MeV cm^2 g^{-1}$]

윗 식에서 stopping power(저지능)는 양성자, 전자 등의 하전입자가 물질 속을 통과할 때 단위 거리를 나아갈 때마다 소실되는 평균에너지를 나타내는 것으로 각 원소의 조사조건에 따른 저지능은 알려져 있다⁴⁾. 섬유소재의 stopping power는 각 구성원소의 stopping power에 대한 중량비 만큼의 비로 구성되며 그들의 합으로 대체할 수 있다²⁾.

5. 조사조건에 따른 흡수선량 및 심도선량 특성

Fig. 2는 한국염색기술연구소가 활용하고 있는 섬유 조사용 전자빔가속기로 전자빔 인출장으로부터 전자빔이 조사되며 이때 섬유가 왕복이동하며 전자빔이 조사되게 된다. 전자빔가속기를 사용해서 섬유에 전자선을 조사할 때 섬유에 전달되는 섬유의 선량 측정을 위하여 기본적으로 가속 전압, 전류, 조사 시 시료의 이동속도 및 반복조사 횟수 등에 관한 조사 인자 값을 결정하여야 한다. 가속전압을 결정하는 기본 조건은 피조사물의 원자조성과 두께이며 전류값과 시료의 이동속도를 결정하는 조건은 피조사물에 필요한 흡수선량 값이라 할 수 있다. 이상의 기본이 되는 조사 인자를 설정함으로써 흡수선량의 개략치를 예측할 수 있으며 역으로 대략의 흡수선량 값에 의해 기본이 되는 조사 인자 값을 설정, 제어하는 것이 가능하게 된다. 그러나 어느 정도의 정확성($\pm 20\%$ 이내)을 실증하는 선량치가 요구될 경우 선량측정이 요구됨은 물론 선량과 조사 인자 사이의 치밀하고 정량적인 관계가 요구되게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 전자빔 조사를 통한 섬유개질에 있어 필요로 하는 선량 및 투과깊이의 조절은 시료의 원하는 개질을 위해 반드시 고려해야 할 중요한 인자로 작용하게 되며 이는 조사조건을 조절함으로써 가능하게 된다.

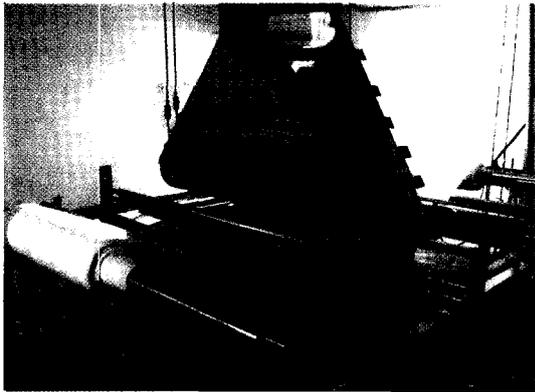


Fig. 2. Electron beam accelerator.

Fig. 3~5는 CTA 필름선량계를 사용하여 폴리프로필렌 섬유에 조사조건에 따른 흡수선량 및 침도선량 측정결과를 나타낸 것으로 시료에 전달되는 선량은 인가되는 전류 값 및 반복 조사하는 횟수의 증가에 따라 직선적으로 증가하게 되며 투과깊이는 투과 깊이에 따른 흡수선량 값으로 나타내게 되는데 선량조절 인자인 전류 값이나 조사 횟수와는 무관하며 가속전압의 세기에만 의존하게 된다. 위의 결과는 소재에 따른 구성성분의 차이 따라 서로 다른 흡수선량 값을 갖게 되나 모두 동일한 경향을 얻게 된다.

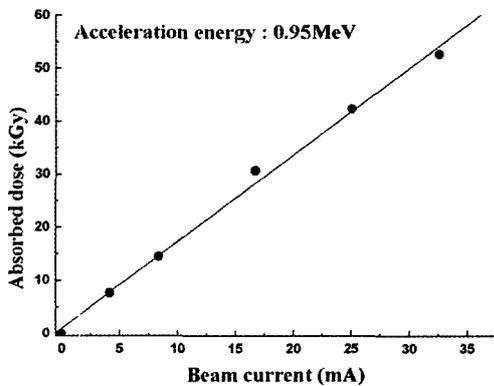


Fig. 3. Relationship between beam current and absorbed dose.

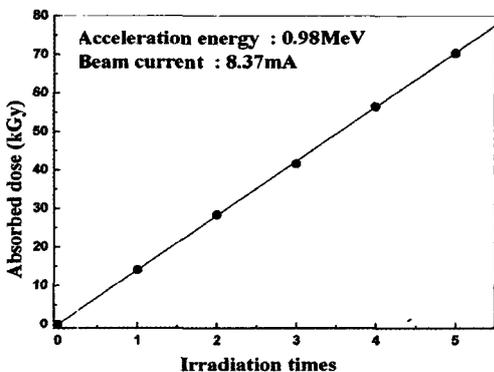


Fig. 4. Relationship between irradiation times and absorbed dose.

6. 방사선과 물질의 상호작용

방사선 화학(radiation chemistry)이란 방사선이 물질에 미치는 화학적 영향을 연구하는 학문으로 통상의 물리화학의 일부분으로 취급된다. 여기서 방사선이라 함은 고에너지의 전리성 방사선 즉, α 선, β 선, γ 선, X선 등을 말한다⁵⁾. 방사선화학은 보통 가시광선이나 자외선에 의한 광화학(photochemistry)과 밀접한 관계를 갖는데, 이들 광은 그 에너지 측면에서 피조사물 분자의 이온화를 일으키기에는 부족하며 단지 여기상태로 만들어 주어 그 결과 화학반응을 일으키게 되며 따라서 일종의 저에너지 방사선으로 생각할 수 있다. 이때 반응의 중간 생성체로서 ionic species가 생성되지 않는 점이 방사선과 다른점이라 할 수 있다⁵⁾. 이와 같이 방사선이 물질에 조사될 때 방사선은 물질과의 상호작용에 의해 그 에너지를 잃게 되며 그 결과로 분자는 전자여기나 이온화가 일어나게 된다. 분자의 여기와 이온화는 아래와 같이 나타낼 수 있다⁵⁾.

M^+ 는 이온, M^* 는 여기분자, e 는 전자를 나타내며 이들 여기된 분자 중 일부는 다른 분자와 충돌하여 에너지를 잃고 열을 방출하면서 기저상태로 돌아가며 일부는 분해하여 라디칼을 생성시키게 된다. 이렇게

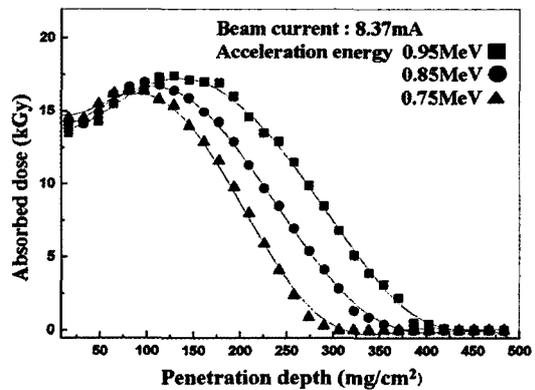
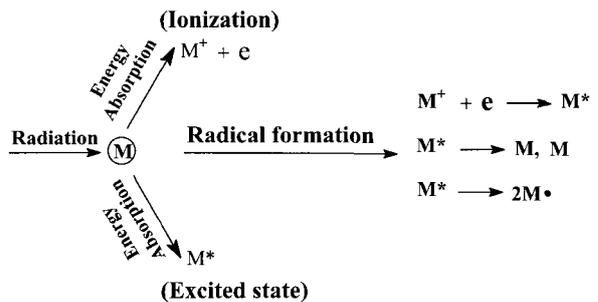


Fig. 5. Relationship between acceleration energy and penetration depth.



형성된 이온이나 라디칼 등은 2차적으로 분자쇄에 가교(crosslinking)나 붕괴(degradation) 또는 불포화를 유발하고, 때로는 가스를 발생하게 된다⁵⁾. 이는 섬유고분자의 물리적 특성 및 열적성질 등 여러 가지 변화를 일으키게 된다. 또한 전자빔과 같은 방사선 조사 시 고분자는 그 분자구조에 따라 서로 다른 내방사능력을 나타내게 되며 산화방지제와 같은 첨가제에 따라서도 서로 다른 내방사능력을 나타내는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

7. 전자빔조사에 의한 라디칼 생성 및 전이

전자빔과 같은 고에너지의 방사선을 고분자에 조사하면 여러 형태의 라디칼들이 생성되며 이들 중 일부는 장시간 보관하여도 소멸되지 않고 생존하는 포착(trapped) 라디칼이 존재하는 것으로 알려져 있다^{8,9)}. 이와 같은 포착 라디칼의 생성은 고분자를 구성하는 재료의 결정화도, 분자량 분포 및 고분자 주쇄의 이동성 등과 같은 물리적 상태에 영향을 받게 된다. 방사선 조사에 의해 포착된 라디칼의 수명은 라디칼의 이동성에 영향을 미치는 온도에 크게 의존하게 되고 따라서 방사선이 조사된 고분자를 낮은 온도에서 보관할 경우 포착 라디칼의 활성을 계속 유지시키는 것이 가능하다고 할 수 있다^{8,9)}. 이러한 포착 라디칼은 그래프트 공중합을 수행하는데 있어 개시점으로 유용하게 사용될 수 있으며 단량체와의 접촉을 통해 연속적인 그래프트 공중합이 진행되게 된다. 한편 산소가 존재할 경우 생성된 라디칼의 안정성은 현저히 감소하게 되며 라디칼들은 산소와의 반응을 통해 Peroxy 라디칼로 전환되게 된다⁷⁻⁹⁾. 이 Peroxy 라디칼은 주변 고분자의 수소 원자를 떼어내어 라디칼 전이를 일으키게 되며 고분자의 구조적 특징에 따라 Hydroperoxide기나 Diperoxide기로 전환되게 된다. 이와 같이 생성된 Peroxide기는 특정 온도 이상에서 Peroxy 라디칼로 분해되며 분해된 Peroxy 라디칼에 단량체가 도입되면 이를 기점으로 하여 그래프트 반응이 진행되게 된다^{8,9)}.

8. 전자선 조사에 의한 방사선 그래프트 공중합

그래프트 공중합은 오래전부터 연구되어온 분야로 일반적으로 화학개시제 첨가법, 광개시법, 방

사선조사법 등이 사용되고 있으나 빛이나 자외선에 비하여 에너지가 매우 높고 화학적으로 안정한 소재에 대해서도 라디칼의 생성이 용이하며 개시제와 같은 첨가제의 사용이 불필요하므로 고순도의 제품을 생산할 수 있는 장점이 있는 방사선조사에 의한 그래프트 공중합연구가 오래 전부터 관심을 끌고 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 여러 방사선원 중에서 전자빔가속기가 산업적 활용이 가장 용이한 방사선원으로 이에 대한 관심과 연구가 학계를 중심으로 진행되고 있다.

일반적으로 방사선조사에 의한 그래프트 공중합 방법은 고분자에 단량체를 침적시킨 후 방사선을 조사하는 동시조사법(Direct method) 과 고분자에 방사선을 먼저 조사한 후 이를 단량체에 침적시켜 반응을 진행시키는 전조사법(preirradiation method)으로 크게 나눌 수 있는데 이들을 세분하면 다음과 같다.⁵⁾

① 동시조사법

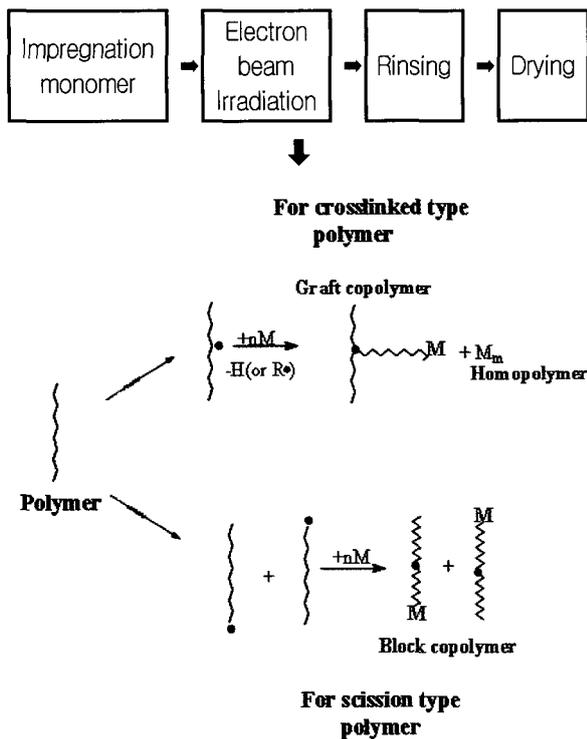
(a) 용액법 (b) 침지법 (c) 팽윤법

② 전조사법

(a) 공기 중 조사법 (Peroxide 법)
(b) 진공 조사법 (동결 radical 법)

8.1 동시조사법(Direct method)

고분자를 단량체와 함께 조사하여 그래프트 반응을 진행시키는 방법으로, 비교적 조작성이 간단하면서 생성된 라디칼을 그대로 이용하기 때문에 적은 조사량으로도 높은 수율을 기대할 수 있는 등의 장점이 있는 반면, 단량체도 동시에 조사되기 때문에 단량체 자체의 반응에 의하여 단일 중합체가 다량 생성되므로 별도의 정제과정을 거쳐 이들을 제거하여야 하는 문제점이 발생할 수 있다. 특정 고분자-단량체 조사시, 생성되는 단일중합체의 양을 최소화하기 위해서는 단량체의 농도를 낮게 유지하는 것이 중요하다. 그러므로 고분자를 과량의 단량체에 용해시키는 것보다 고분자가 단량체에 의한 단지 팽윤될 정도의 적정량이 유지될 때 오히려 높은 수율을 얻을 수 있으며, 단량체를 증발시켜 기체상의 단량체로 고분자를 팽윤시키는 것도 높은 수율을 얻는데 좋은 방법 가운데 하나이다. 단량체 농도를 변화시킴으로써 반응매체의 점도, 연쇄반응의 속도 및 그래프트 가지의 길이 등 반응에 내포된 다양한 인자의 조절이 가능하다.

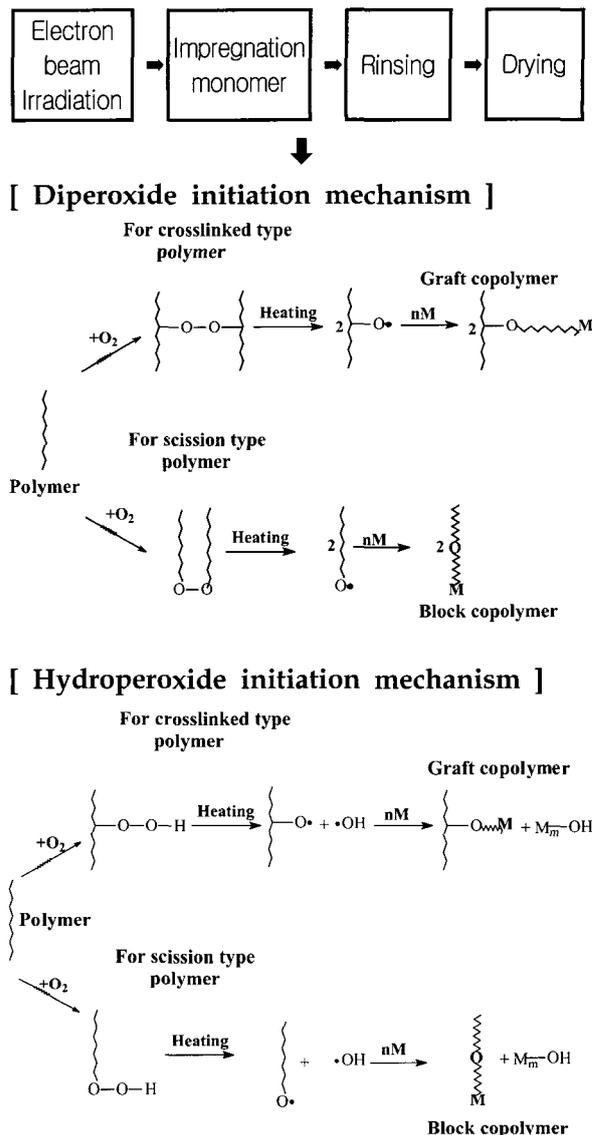


Scheme 1. Direct method of radiation induced graft polymerization

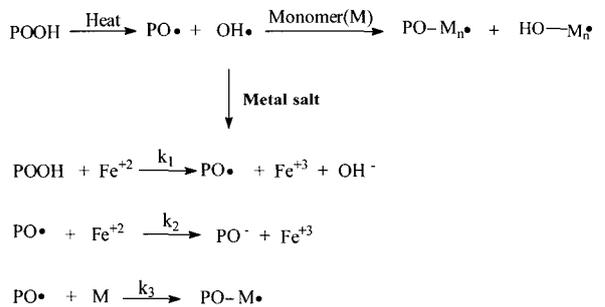
8.2 전조사법(Preirradiation method)

과산화물 생성분해법이라고도 하며 산소존재 하에서 고분자를 방사선 조사하면 공기 중의 산소와 반응하여 다량의 Peroxide기가 고분자내에 생성된다. 이러한 Peroxide기들은 높은 온도에서 단량체와 접촉시키면 생성된 과산화물이 분해되면서 이를 기점으로 중합반응이 진행되어 공중합체를 형성하게 되는데, 고분자내에 Diperoxide가 생성될 것인지 아니면 Hydroperoxide가 생성될 것인지에 따라 두 종류의 반응으로 구별되어 진다. 여기서 고분자가 가교형인지 아니면 분해형인지에 따라 각각 가지형 또는 블록형의 공중합체가 형성된다.

Hydroperoxide기의 열분해에 의한 공중합은 동일한 수의 가지형 공중합체와 단일중합체를 생성시키게 되는데, 이러한 단일중합체는 고분자 라디칼의 연쇄이동 또는 Hydroperoxide기의 분해로 생성된 Hydroxy 라디칼의 단량체 개시반응에 의해 생성된다. 이때 적당한 금속염과 산을 첨가함으로써 반응시의 단일중합체 생성을 상당량 줄일 수 있는데 이러한 산화·환원반응의 메카니즘은 다음과 같다⁸⁻¹⁰⁾.



Scheme 2. Preirradiation method of radiation induced graft polymerization



Scheme 3. Redox mechanism of grafting polymerization

9. 방사선 그래프트중합 활용분야

전자빔을 비롯한 방사선 그래프트 공중합은 여러 분야에서 널리 활용이 가능하나 섬유분야를

비롯해 현재 널리 활용되거나 연구되고 있는 분야를 정리 하면 다음과 같다.

Table 3. Radiation induced graftpolymerization.

Fields	Applications
Polymeic membrane	<ul style="list-style-type: none"> Hydrophilic membranes Membranes with controlled permeability Cation & anion exchange membranes
Medical polymers with haemocompatible properties	
Textile and polymeric fibers	<ul style="list-style-type: none"> Fire resistance Wear resistance Moisture absorbance Improvement of dyeability Antimicrobial properties
Other applications	<ul style="list-style-type: none"> Sorbents for sorption of transition metal ions from aqueous solutions. Polymers with catalytic active centers. Modification of leathers, rubbers, inorganic substances, celluloses, etc.

10. 전자빔가속기의 산업적 활용

전자빔가속기는 전자빔이 갖는 여러 가지 특성으로, 물질을 투과할 수 있는 능력, 전리·핵반응·여기·산란 등 원자단위의 반응능력, 유전자변이 등 생물학적 작용능력, 민감한 검출성, 화학작용의 능력과 같은 다양한 특성으로 고분자분야, 신소재 개발분야, 식품의약품분야, 반도체분야, 항공우주분야, 희소물질검출 및 비파괴분야 등 거의 전 산업분야에 걸쳐 광범위하게 활용이 되고 있다. 현재 세계적으로 선진국인 미국, 일본, 러시아, 캐나다 등을 중심으로 약 1,500기의 전자빔가속기가 산업용 및 학술용으로 설치되어 활용되고 있으며 국내에서도 약 30기 정도가 설치되어 주로 열수축 튜브, 전선가공, 발포 플라스틱, 타이어가공 및 폐수처리와 연구개발용으로 사용되고 있다. 현재 섬유산업 분야에서 전자빔가속기를 이용한 염색폐수 처리부부분이나 폴리프로필렌 섬유와 같은 난염성 섬유에 대한 염색성 향상 및 여러 가지 기능성 가공 등에 대한 연구가 진행되고 있다. 주된 연구 분야로 방사선 가공기술을 이용한 면을 비롯한 천연섬유의 주름방지 가공 및 항공가공, 무기 나노입자 도입을 통한 합성섬유의 흡습성 향상 및 염색성 개선 등을 들 수 있다. 이외에도 섬유의 solvent-free 코팅, 섬유강화 복합물질, 고내구성 발수코팅 등에 대한 연구가 진행되고 있으며 일부는 기초연구 단계를 넘어 초기 상용화를 위한 시스템 및 공정 등에 대한 연구가 진행되고 있는 실정이다. Table 4와 5는 해외 전자

빔가속기 설치 및 활용 분야와 함께 현재 국내 전자빔가속기의 선진국 대비 산업적 활용현황을 나타낸 것으로 고분자 합성수지분야 이외에는 활용이 부족한 상황으로 향후 전개될 방사선 사용기술에 대한 국가 간 경쟁우위 확보 측면에 있어서도 향후 많은 연구와 투자가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

Table 4. Electron beam accelerator and its application in other countries¹¹⁾.

국 가	회 사	Services/ Products
미국	Radiation Dynamics	전자빔 조사장비
	RPC Technologies	식품살균, 폐수처리
	E-beam Services Inc.	살균, 플라스틱, 전선·케이블, 합성물경화, 반도체, 사슬절단, 식품품
	Surebeam Corporation	식품살균
	Biosterile Technology Inc.	의료기기, 식품품, 전염성 폐기물, 플라스틱·폴리머
	Iowa State University	전자빔 선형가속기
	E-beam Technologies Inc.	전선, conduit system
일본	Mitsubishi Heavy Industries	전자빔살균장치
	Sumitomo Heavy Industries, LTD.	
	Nisson Electric Co.	전자빔 조사장비
	JAEA	섬유가공연구
캐나다	Acision Industries	골프공
	Iotron Technologies Inc.	의료기, 식품품, 플라스틱, 사슬절단, 반도체, 합성물경화
러시아	BINP ILU Type	원자력 분야
	BINP ELV Type	
	Kurchatov Institute	
독일	Ristron E-beam Service	
폴란드	Institute of Nuclear Chemistry and Technology	식품품
인도네시아	Center for Applications of Isotope and Radiation	
프랑스	Aerial, Centre de Ressources Technologiques	전자빔 조사장비
이탈리아	Bioster	살균

Table 5. Application field of electron beam accelerator¹⁾.

활용 분야	활용 기술			에너지 (MeV)	활용 현황		
					국내	선진국	
고분자 합성수지 분야	Grafting Polymerization Copolymerization	천연성 전선 제조 열수축 튜브 제조 인조가죽 타이어, 고무 경화		0.3 - 2	◎ ◎ ○ ◎	◎ ◎ ◎ ◎	
섬유 분야	Grafting Polymerization Crosslinking	천연 섬유	면, 모, 실크 등	항균, 방취, 방추 등	1 이하	◇	○ (일본)
		합성 섬유	폴리에스테르 나일론, 아크릴 폴리프로필렌 등	기능성 코팅 난염섬유 염색성 개선 흡습성, 대전방지가공 등 섬유강화 복합물질 등			
환경 분야	Radical reaction	배기가스 정화 (SOx, NOx, VOC) 폐수처리(화학, 매립지 침출수) 폐수 슬러지 처리 폐수중 중금속 추출 염색폐수 색도제거		1 - 10	◇ ◇ - - ◇	○ ○ ○ ○ ○	
의료 식품 분야	곡물 살충 식료품 멸균처리 의료용품 멸균처리 종자의 발아억제 화훼의 살충 및 생육억제			1 - 10	- ◇ ◇ ◇ -	◎ ◎ ◎ ◎ ○	
반도체 분야	전력반도체 스위칭 특성 개선 NTD 웨이퍼 제작			2 - 10	◇ -	◎ ○	
원자력 연구개발	핵자료 생산 원자로 재료 방사선 손상 연구 내방사선 센서 개발 사용후 핵연료 특성변화 조사 자유전자레이저 개발 저에너지 양전자빔 발생 X-ray 및 γ-ray 발생			1 - 30	- - - - ◇ - -	◎ ◎ ○ ○ ○ ○ ○	

◎ ; 상용화/실용화 단계 ○ ; 실용화 초기단계 ◇ ; 연구개발 단계 - ; No activity

11. 맺음말

이상에서는 전자빔가속기의 개요 및 이를 활용하는데 있어 필요한 기초적인 내용들에 대해서 간략히 살펴보았으며 섬유산업에 있어 새롭게 적용 가능한 응용분야로 이에 대한 보다 활발한 연구가 진행되기를 기대하며 본 글을 정리해 보았다. 최근의 섬유제품은 고기능성, 첨단 기술이 융합된 제품들이 요구되고 있으며 이에 대한 기술적 우위가 세계 섬유시장을 주도할 수 있는 중요한 수단이 되어가고 있다. 또한 이러한 기술적인 측면과 함께 섬유산업, 특히 염색가공은 많은 에너지를 필요로 하는 분야로 에너지 효율 제고, 공정단축 등을 통한 원가절감 및 염색폐수 및 기존의 환경적 측면에서의 문제점을 개선하기 위한 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각한다. 이러한 기술적, 경제적, 환경적인 측면을 고려한 향후 연구방향을 설정함에 있어 본 장에서 열거한 방사선이 갖는 많은 장점들을 활용할 경우 보다 효과적인 방법 제시가 가능할 수 있을 것이다. 특히 전자빔가속기는 다른 방사선원에 비해 품질관리를 위한 에너지조절 및 공정 control이 비교적 용이하며 또한 기존공정에 설치 가능하고 자동화 및 고품질의 대량생산이 가능한 장점들이 있으므로 다른 고에너지 방사선원에 비해 섬유산업에 적용하기 보다 적합한 설비라 할 수 있으며 향후 지속적인 활용 및 연구가 수행된다면 섬유산업의 기술적 발전에 많은 도움이 될 수 있을 것으로 전망된다.

참고문헌

1. V. S. Ivanov, "Radiation Chemistry of Polymer", VSP, p.13-15 (1992).
2. Robert J. Woods and Alexei K. Pikaev, "Applied Radiation Chemistry : Radiation Processing", John Wiley & Sons, Inc., p.90-119(1993).
3. V. S. Ivanov, "Radiation Chemistry of Polymers", VSP, pp.29-42(1992).
4. 한국사전연구소, "이화학사전" p.1063(1997).
5. 馬錫一, "放射線 graft에 의한 合成纖維의 難燃化", J. Korean Fiber Soc., **16**, 55-65(1990)
6. 김봉흡, "합성수지에 대한 방사선 조사효과", 전기학회지, **23**, 27-29(1974).
7. Robert J. Woods and Alexei K. Pikaev, "Applied Radiation Chemistry : Radiation Processing", John Wiley & Sons, Inc., pp.341-368(1993).
8. Jie Chen, Young-Chang Nho, Jong-Shin Park, Grafting Polymerization of Acrylic acid onto Preirradiated Polypropylene Fabric, Radiat. Phys. Chem., **52**, 202-203(1998).
9. Chen Daitao, Shi Nai, Xu Duanfu, Study of Electron Beam Preirradiation Induced Graft Copolymerization of Acrylic Acid onto Powdered Isotactic Polypropylene, J. Appl. Polym. Sci., **73**, 1357-1359(1999).
10. Shaozao Tan, GuanGji, Jiarui Shen, Study of Modified Polypropylene Nonwoven Cloth. I. Graft Copolymerization of 4-Vinylpyridine onto Polypropylene Nonwoven Cloth by Preirradiation Method, J. Appl. Polym. Sci., **77**, 1861-1868(2000).
11. <http://www.kaeri.re.kr/ebeam/main1.htm>.

저자소개



김 홍 제

1995 인하대학교 섬유공학과 졸업
 1997 인하대학교 섬유공학과(석사)
 2004 경북대학교 섬유시스템공학과(박사)
 현재 한국염색기술연구소 기업지원팀 책임연구원

Tel. : 053-350-3876; Fax. : 053-350-3836

E-mail : dockim@dyetec.or.kr