

MC방법에 의한 다층매질을 투과하는 전자묶음의 에너지 및 공간분포특성

우영남, 김혁

섬유의 성능을 변화시키고 방직제품의 친수성, 항정전기성, 항연소성, 항구김성과 같은 특성을 개선하며 중합물전기케블의 가교, 의료기구들을 멸균, 소독하는데 화학적인 방법의 의거하지 않으면서 환경보호에 유리하고 그 특성이 우월한 전자묶음조임에 의한 방법들이 광범히 리용되고있다.[1, 2, 5]

인출창문과 연속적으로 린접해있는 기체속을 통과하는 전자들의 에너지와 공간분포 특성을 밝혀내는것은 적합한 전자묶음조임에너지와 조임선량을 결정하고 전자묶음조임 처리체계에 대한 최량화설계를 진행하는데서 매우 중요한 문제로 제기된다.

우리는 몽떼카를로코드인 GEANT4와 MCNP5를 리용하여 에너지가 100~300keV인 저에너지전자묶음이 전자가속기의 전자총의 가속공동의 진공매질을 비행하여 인출창문에 도달한 다음 다층매질(고체매질+기체매질)을 통과하여 조임제품까지 도달할 때까지의 전자 묶음의 에너지와 공간분포특성을 연구하였다.

1. 모의계산실험의 이론적기초

저에너지전자묶음이 일정한 두께의 얇은 박막을 투과하면서 잃는 에너지는 적지 않으며 제품조임의 질에 많은 영향을 준다. 또한 인출된 저에너지전자묶음의 대기속에서의 에너지손실도 작지 않다. 이것을 정확히 고려하여야 인출창문으로부터 조임제품까지의 거리를 정확히 확정할수 있으며 제품조임의 질을 높이고 에너지리용률을 효과적으로 높일 수 있다.

전자가 물질속을 지나갈 때 그것의 에너지가 0.5MeV이하일 때에는 주로 물질속의 원자들을 이온화 또는 려기시키면서 에너지를 잃는다.

다른 하나의 에너지손실은 전자가 매질원자핵의 끌롱마당의 작용을 받아 제동되면서 일부 혹은 전체 에너지를 연속적인 전자기복사를 발생시키면서 잃는 손실이며 이것을 제동복사에너지라고 부른다.

이온화작용과 제동복사에 의한 에너지의 손실비는 다음의 식으로 계산한다.

$$\frac{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{복사}}}{\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{이온화}}} \approx \frac{E_e Z}{800} \quad (1)$$

전자들의 에너지가 수십keV보다 작을 때에는 단위길이당 이온화 및 려기에 의하여 손실되는 에너지는 무거운 대전립자에 대응하는 식을 그대로 리용하여 고찰할수 있

으며 그것은 다음과 같이 표시된다.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{이온화}} = \frac{2\pi e^4}{m_e v^2} N Z \ln \frac{m_e v^2}{I} \quad (2)$$

전자의 에너기가 수십keV이상일 때에는 상대론적효과를 고려하여야 하며 웃식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{이온화}} = \frac{2\pi e^4}{m_e v^2} N Z \left[\ln \frac{m_e v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - \ln 2 \left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right) + 1 - \beta^2 \right] \quad (3)$$

여기서 E , m_e , v , N , Z 는 각각 전자의 에너지와 질량 및 속도, 계통물질의 단위체적당 원자개수와 원자번호이다.

식에서 보는바와 같이 단위길이당 이온화손실에너지는 전자의 에너지가 커짐에 따라 처음에는 작아지다가 $2m_e c^2$ 정도의 에너지에서 최소로 되며 에너지가 더 커지면 다시 천천히 커진다.

NZ 가 ρ 에 비례한다는것을 고려하여 물질의 두께를 질량두께로 표시할 때 비이온화손실은 물질의 종류에 거의 관계되지 않는다.

물질의 종류에 따라 Z 에 비례하는 양인 평균이온화에너지 I 가 달라지지만 이것은 \ln 항속에 들어있으므로 $dE/d(\rho x)$ 에는 큰 변화를 주지 않는다.

선행연구[3]에서는 몽떼카를로방법을 리용하여 진공속에서의 자유충돌과 고체매질과 기체매질에서 전자와 물질의 호상작용을 호상 독립적으로 고찰하였다.

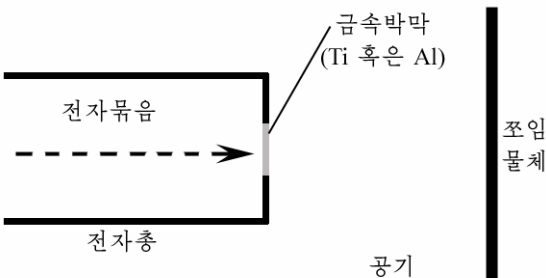


그림 1. MC모의를 위한 모형화원리도

우리는 얇은 금속창문을 뚫고 공기속으로 들어가 표적에 입사하는 전자들의 에너지분포와 공간분포특성을 고체매질과 기체매질에서 따로따로 고찰한것이 아니라 전자뭉음이 다층매질(고체매질+기체매질)을 연속적으로 통과하는 련관된 과정으로 고찰하였으며 모의계산에는 몽떼카를로모의코드인 GEANT4와 MCNP5를 리용하였다.

MC모의를 위한 모형화원리도는 그림 1과 같다.

2. MC모의결과와 분석

우리는 전자뭉음가속기에서 인출창문재료로 많이 리용되고있는 Al, Ti재질의 두께가 $5 \sim 35 \mu\text{m}$ 인 금속박막에서 전자뭉음의 에너지손실과 공간자리길분포, 투과 및 역산란에너지, 주행거리와 투과률에 대한 모의를 진행하고 선행연구결과와 대비적으로 고찰하였다.

또한 고체매질과 기체매질효과를 개별적으로 그리고 동시에 고려하였을 때의 에너지흡수와 역산란특성을 고찰하였다.

전자는 질량이 작으므로 매질원자와 다중산란을 세계 일으키며 실제로 지나간 자리길의 길이는 인출창문의 두께보다 훨씬 크다. 그리고 인출창문의 두께가 두꺼울수록, 전자의 에너지가 작을수록 더 크다.

공기층의 두께가 일정하고 Al박막의 두께가 각이할 때 전자의 입사에너지에 따르는 Al박막에서의 에너지손실특성은 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 입사전자의 에너지가 커짐에 따라 손실에너지는 처음에는 급격히 증가하다가 일정한 값에 이르면 거의 변하지 않으며 Al박막의 두께가 두꺼울수록 손실에너지는 더 증가한다는것을 알수 있다. 또한 박막의 두께가 두꺼울수록 손실에너지의 봉우리가 오른쪽으로 이동한다는것, 다시말하여 박막의 두께가 두꺼울수록 최대손실에너지에 해당하는 입사전자의 에너지가 더 크다는것을 알수 있다. 이것은 매질의 두께가 주어졌을 때 대응하는 최대손실에너지가 존재한다는것을 보여주며 따라서 입사전자의 에너지는 최대손실에너지보다 크게 선택해야 한다는것을 말해준다.

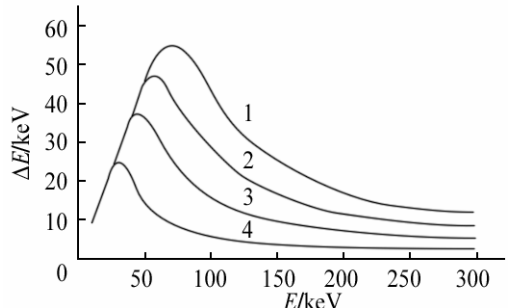


그림 2. 전자의 입사에너지에 따르는 Al박막에서의 에너지손실
1-4는 Al의 두께가 20, 15, 10, 5 μ m일 때, 공기매질의 두께 5cm

공기매질의 두께가 5cm이고 Al박막의 두께가 각이할 때 입사전자의 에너지에 따르는 공기속에서의 에너지손실특성은 그림 3과 같다.

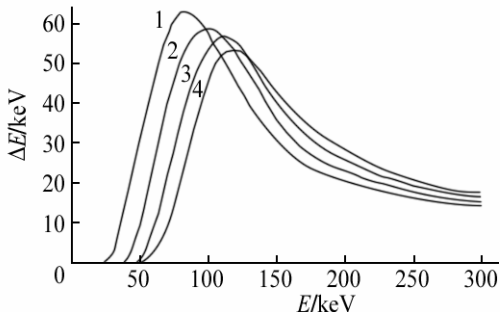


그림 3. Al박막의 두께가 변할 때 입사전자의 에너지에 따르는 공기매질속에서 전자의 에너지손실
1-4는 Al의 두께가 5, 10, 15, 20 μ m일 때

의 두께가 얇을수록 공기매질속에서 비탄성충돌이 심하게 일어나기때문이다.

또한 Al박막의 두께가 두꺼울수록 최대손실에너지봉우리가 오른쪽으로 이동한다는것을 알수 있다. 이것은 조임제품의 위치를 고정(공기층두께 일정)하였을 때 금속박막의 두께는 보다 얇은것으로 선택해야 하며 입사전자의 에너지는 최대손실에너지보다 크게 선택해야 한다는것을 의미한다.

그림 3으로부터 공기층의 두께를 5cm로 하였을 때 입사전자의 에너지는 200keV이상으로 선택하는것이 에너지손실의 견지에서 합리적이라는것을 알수 있다.

다음으로 우리는 다층매질에서 전자의 투과에너지와 역산란에너지, 투과률을 결정하고 실험값[3]과 비교하였으며 그 결과는 표 1과 같다. 여기서 투과에너지와 역산란에너지는 모두 평균값을 나타내며 투과률은 입사전자묶음에 대한 투과전자묶음의 비이다.[4]

표 1에서 보는바와 같이 100keV에서 모의값과 실험값은 잘 일치하며 100, 200, 300keV에서 모의값 1과 모의값 2도 거의나 일치하는데 이것은 모의계산값의 정확도와 믿음성이 매우 높다는것을 의미한다.

표 1. Ti매질에서 전자의 에너지에 따르는 투과 및 역산란에너지

입사에너지 /keV	투과에너지/keV			역산란에너지/keV			투과률/%		
	모의값 1	모의값 2	실험값[4]	1	2	3	1	2	3
100	90.3	90.32	90.0	77.4	77.2	77.0	93.0	93.1	90.0
200	180.4	180.3		152.4	151.9		92.4	92.2	
300	270.7	270.3		213.4	213.6		94.4	93.8	

모의값 1: GEANT4, 모의값 2: MCNP5(Ti박막두께 5 μ m)

다층매질에서 전자의 투과에너지와 전자의 에너지투과률은 각각 표 2, 3과 같다.

표 2. 다층매질에서 전자의 투과에너지(keV)

입사에너지 /keV	Al박막의 두께/ μ m					Ti박막의 두께/ μ m				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
100	36.65	25.38	17.42	12.04	8.82	29.15	19.37	14.16	12.95	12.11
150	115.5	104.4	93.22	82.19	71.03	105.6	86.51	70.29	55.52	43.63
200	176.2	170.1	162.9	154.9	146.7	171.0	157.2	142.5	127.4	113.0
250	230.7	226.4	221.6	216.3	210.8	227.3	218.4	207.3	195.1	182.9
300	282.7	279.4	275.6	271.8	267.3	280.4	273.7	265.8	256.9	247.2

공기층두께 5cm

표 3. 다층매질에서 전자의 에너지투과률(%)

입사에너지 /keV	Al박막의 두께/ μ m					Ti박막의 두께/ μ m				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
100	36.65	25.38	17.42	12.04	8.82	29.15	19.37	14.16	12.95	12.11
150	77.00	69.58	62.15	54.79	47.35	70.37	57.67	46.86	37.01	29.09
200	88.08	85.03	81.48	77.42	73.33	85.49	78.59	71.24	63.72	56.49
250	92.26	90.56	88.62	86.52	84.34	90.93	87.36	82.91	78.05	73.15
300	94.24	93.13	91.88	90.58	89.11	93.45	91.22	88.60	85.62	82.38

공기층두께 5cm

표 2, 3에서 보는바와 같이 박막의 두께가 일정할 때 입사전자의 에너지가 커짐에 따라 그것의 투과에너지와 투과률이 증가한다. 또한 같은 두께의 Al 및 Ti박막에 대하여 입사전자의 에너지가 같을 때 Al박막의 경우보다 Ti박막의 경우에 투과에너지와 투과률이 더 작다는것을 알수 있다. 그리고 입사에너지가 같다고 해도 박막의 두께가 두꺼울수록 투과에너지와 투과률이 작아진다.

입사전자의 에너지가 100keV일 때 Ti매질에서 10^5 개의 전자를 가지고 MC모의한 전자의 구체적인 공간자리길분포를 보면 그림 4와 같다.

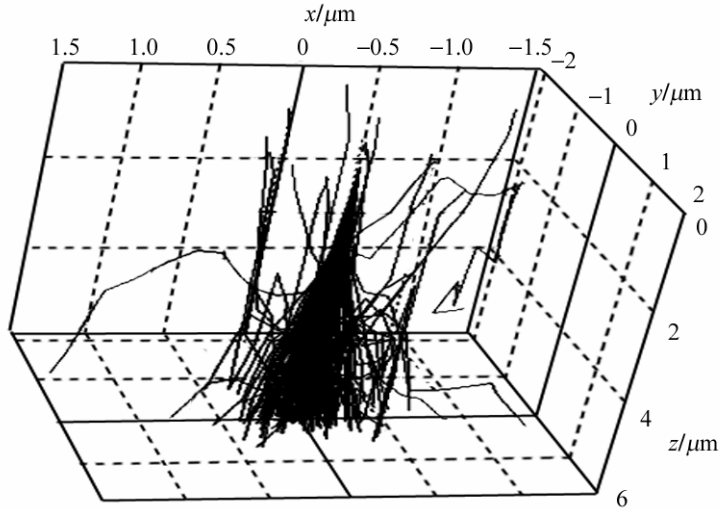


그림 4. 두께가 $5\mu\text{m}$ 인 Ti매질에서
전자의 에너지가 100keV 일 때
전자의 공간자리길 분포

전자는 금속매질속에서 매우 복잡한 운동자리길을 그리면서 매질을 투과하며 일부는 흡수되고 일부는 역산란된다. 두께가 일정할 때 입사전자의 에너지가 클수록 전방산란의 각도는 더욱 커진다. 그것은 얇은 금속박막속에서 한번 산란되어 방향을 바꾼 에너지가 보다 큰 전자들은 에너지가 큰것만큼 꺾인 산란각도를 가지고 보다 많은 거리를 비행하여 유한한 두께의 박막을 리탈할수 있기때문이다. 전자의 입사에너지가 일정하고 박막의 두께가 증가하면 보다 예리한 전방산란경향성을 가진다.

Al, Ti인출창문의 두께가 일정할 때 공기층의 두께에 따르는 전자의 에너지손실률은 표 4, 5와 같다.

표 4. Al인출창문두께가 $5\mu\text{m}$ 일 때 공기층의
두께에 따르는 전자의 에너지손실률(%)

입사에너지 /keV	공기층의 두께/cm				
	9	7	5	3	1
100	—	—	63.26	35.55	11.85
200	—	—	11.88	7.06	3.20

표 5. Ti인출창문두께가 $5\mu\text{m}$ 일 때 공기층의
두께에 따르는 전자의 에너지손실률(%)

입사에너지 /keV	공기층의 두께/cm				
	9	7	5	3	1
100	—	—	70.50	46.42	20.83
200	—	—	14.62	9.02	4.41

표 4, 5에서 보는바와 같이 전자의 에너지손실률을 10%정도로 보장하려고 하는 경우 입사전자의 에너지가 100keV 일 때 인출창문의 종류에 관계없이 인출창문으로부터 조임체품까지의 거리를 1cm 이하로, 입사전자의 에너지가 200keV 일 때 Al, Ti인출창문에 대하여 조임체품까지의 거리를 각각 $5, 3\text{cm}$ 정도로, 입사에너지가 300keV 일 때에는 모두 9cm 정도로 유지하는것이 합리적이라는것을 알수 있다.

우리는 또한 입사전자의 에너지가 100, 200, 300keV 일 때 그것의 에너지가 10%정도 손실되는 Al, Ti박막의 두께는 각각 9, 26, $46\mu\text{m}$ 와 5, 15, $27\mu\text{m}$ 라는것을 10^5 개의 전자를 가지고 모의실험하여 확정하였다.

공기매질이 없을 때와 있을 때 각이한 두께를 가진 Ti박막에서 에너지손신효과를 계산한 결과는 표 6과 같다.

표 6. 공기매질이 없을 때와 있을 때 각이한 두께를 가진
Ti박막에서 에네르기손실효과(keV)

입사에너지/keV	공기매질이 없을 때			공기매질이 있을 때(5cm)		
	박막두께/ μm			박막두께/ μm		
	5	15	25	5	15	25
100	9.93	-	-	13.12	-	-
200	-	19.82	-	-	24.35	-
300	-	-	26.39	-	-	29.98

표 6에서 보는바와 같이 입사전자의 에네르기가 100keV이고 Ti박막의 두께가 5 μm 일 때 손실에네르기는 공기매질이 없을 때와 있을 때 각각 9.93, 13.12keV로서 무시할수 없는 차이를 가지는데 이것은 입사전자의 에네르기가 200, 300keV인 경우에도 마찬가지이다. 따라서 에네르기손실을 계산할 때에는 반드시 린접매질의 영향을 고려하여야 한다.

다음으로 몇가지 매질에 대하여 300keV 전자묶음의 최대침투깊이를 모의계산한 결과는 표 7과 같다.

표 7. 몇가지 매질에서 전자묶음의 최대침투깊이(μm)

폴리염화비닐수지	폴리에틸렌수지	듀랄루민	석고
939.8	856.6	349.5	407.3

표 7에서 보는바와 같이 얇거나 두꺼운 재료들의 변성에 전자속조임을 리용할수 있다.

맺는 말

다층매질을 통과하는 전자묶음운동에 대한 모의계산은 전자의 운동을 개별적인 매질속에서 독립적인 운동으로서가 아니라 린접한 매질속에서의 투과, 반사, 흡수의 영향을 고려한 호상련관된 운동으로 보고 진행하여야 한다.

우리는 입사전자묶음의 에네르기가 100~300keV일 때 Al과 Ti금속매질의 가장 적합한 인출창문두께, 인출창문과 조임제품사이의 최적배치거리, 몇가지 수지 및 금속재료에서의 최대침투깊이를 결정하였다.

이러한 모의계산결과들은 전자가속기에서 전자묶음의 공간 및 에네르기분포, 전자묶음의 모양, 금속박막의 두께와 구조의 최량화와 조임제품의 종류를 결정할수 있게 한다.

참고 문헌

- [1] R. C. Sethi; Electron Beam Technology for Industrial Accelerators, 1, 1, 2016.
- [2] Zhan Wenlong; Research and Application of Electron Accelerator in China, 13, 21, 2002.
- [3] P. R. Chalise et al.; IEEE Transaction on Plasma Science, 32, 4, 1532, 2004.
- [4] D. H. Wriht; Geant4.9.5 Physics Reference Manual, 12, 1, 2011.
- [5] 张珊艳; 现代纺织技术, 5, 56, 2012.

**Electron Beam's Energy and Spatial Distribution
Characteristics through Multilayer Materials
by Monte-Carlo Simulation**

U Yong Nam, Kim Hyok

The optimum thickness of elicit window made of Al and Ti thin metal layer, the optimum configuration interval between elicit window and irradiation product, maximum penetration depth of several plastic and metal materials were determined when energy of incidental electron beams was 100~300keV.

Such simulation results permit spatial and energy distribution of electron beam, shapes of electron beam, the optimization of thickness and structure of foil metal and the kind of irradiation products be determined in electron beam accelerator.

Key words: electron accelerator, Monte Carlo simulation, Geant4, electron gun