

트리튬 붕괴에 따른 야광유리관 매질내에 에너지 Flux변화의 Simulation

Simulation of Energy Flux Variations within a Self-Luminous Glass Vial due to Tritium Decay

유호규, 김현대, 박경석, 염충섭
고등기술연구원

경기도 용인시 백암면 고안리 633-2

요약

총기류 야간조준용 발광유리관의 원자 및 핵물리적 관점에서 이론적 수명을 평가하기 위하여 입자수송이론 컴퓨터코드 MCNP를 사용하여 자발 전자원인 트리튬으로부터 베타입자가 방출될 때 유리관내에서 전자와 물질의 상호작용을 simulation하였다. 트리튬붕괴에 따른 매질 구성성분을 변화시켜가면서 simulation한 결과를 보면 형광물질영역에서 에너지 flux는 6년후에 초기값의 약 67%가 되고 초기값의 절반으로 떨어지는데 걸리는 시간은 약 11년으로 나타났다. 이는 예상과는 달리 유리관광기에 비례하는 에너지 flux가 트리튬붕괴로 인한 Helium-3 생성 축적과 트리튬량 감소로 인한 매질변화의 영향을 크게 받지 않고 주로 트리튬 베타선원 강도에 의존한다는 것을 의미한다.

Abstract

This paper presents the results of simulation of interaction phenomena between beta particles from a self-emitting electron source, tritium and the materials within a tritium filled self-luminous glass vial for night time front sight using a particle transport theory computer code, MCNP, in order to evaluate theoretical life of the glass vial in a point of atomic & nuclear physics. The result from simulations by a way to give variation in the medium composition following the tritium decay shows that electron energy flux in the phosphor layer is reduced to 67% of its initial value after 6 years and then to about a half after 11 years. This reveals that the medium variation (helium-3 accumulation) gives unexpectedly no large effect to energy flux, which the brightness of glass vial is proportional to, but the residual tritium beta strength gives major effect to.

1. 서론

총기류의 야간조준용 광원은 발광유리관에 의해 조명된다. 발광유리관은 우리가 일상에

서 사용하는 형광등과 같이 내벽에 인화합물로 도포된 밀봉 유리튜브이다. 발광유리관의 발광원리는 형광등과 크게 다르지 않다. 다만 전기적으로 이온화된 기체가 아닌 방사선 기체인 트리튬을 사용한다. 트리튬은 저준위의 베타(전자)입자를 방출하여 Phosphor를 폭격하여 여기(Excitation)시켜 빛을 발하게 된다. 방출된 전자군은 에너지가 낮기 때문에 트리튬을 사용하는 야광유리관은 어두운 곳 혹은 밤에만 그 빛을 볼 수 있는 특징을 가지고 있다.

트리튬은 전자에너지 스펙트럼 즉 베타입자를 자발적으로 방출하고 헬륨원자로 변환하게 된다. 이 베타입자가 Borosilicate Glass내벽에 도포된 형광물질에 부딪칠 때 가시광선 즉 빛을 발하게 된다. 이 빛의 밝기 (휘도)는 형광물질영역에 도달된 전자수에 비례한다. 따라서 시간이 경과됨에 따라 트리튬원자는 감소하고 헬륨원자는 증가하여 베타입자가 통과되는 매질의 구성비는 달라지게 되며 형광물질영역에 도달되는 전자의 수도 달라지게 된다.

전자와의 매질의 상호작용에 관한 현상과 매질내에서 전자의 수송현상을 simulation하는 코드가 MCNP/4B [1]이다. 베타입자는 투과하는 매질의 원자내에 전자와 충돌하여 서로 작용한다. 각 충돌에서 베타입자는 수 eV의 에너지를 잃고 매질원자를 여기시키거나 이온화시킨다. 또한 고에너지 베타의 경우 충돌하여 Bremsstrahlung radiation을 방출시킨다. [2-3] 정상적으로 베타입자는 수많은 이온화와 여기에 의하여 그 에너지를 잃는다. 최종적으로 전자는 thermalized되고 양이온과 결합한다. 이러한 전자와 물질과의 상호작용에 대해 물리적 접근을 함으로서 유리관내부 및 유리관자체 각 지역에서 전자 에너지 flux를 추정할 수 있다. 일반적으로 저에너지 베타의 경우는 비탄성산란에 의한 여기/이온화에 의하여 그 에너지를 손실하고 고에너지 베타의 경우 Bremsstrahlung radiation방출에 의하여 그 에너지를 손실한다.

본 연구에서는 야광유리관의 원자 및 핵물리적 관점에서 이론적 수명을 평가하기 위하여 컴퓨터코드 MCNP를 사용하여 자발 전자원인 트리튬으로부터 베타입자가 방출될 때 유리관내에서 전자와 물질의 상호작용을 simulation한 결과를 보여주는 것이다.

2. 발광 원리

트리튬 전자선원에 의한 발광유리관의 자체발광반응의 원리를 원자식으로 나타내면 다음과 같다.



트리튬 원자핵은 수소의 방사성 동위원소로서 그 자체는 핵적으로 불안정하여 베타입자를 방출하고 안정된 Helium-3 원자핵으로 변한다. 다른 대부분의 방사성동위원소와는 달리 트리튬은 감마입자를 동반 방출하지 않고 순수 베타입자만을 방출한다. 식 (1)에서 $\bar{\nu}$ 는 반중성미자(anti-neutrino)방출을 나타낸다. 알려진 방사성동위원소중에서 가장 낮은 에너지의 베타입자를 붕괴하는 트리튬은 그 최대방출에너지가 18.6 KeV이고 에너지분포 스펙트럼 모드는 3.0 KeV이며 평균 방출에너지는 5.68KeV이다. 반감기는 12.3년이다. 이 베타입자의 비정거리 (Range) 즉 입자가 입사되어 물질을 통과하여 그 물질에 의하여 정지될 때까지 직선거리는 트리튬 기체내에서, 5.7 KeV 베타에 대해 0.26cm이고 18.6 KeV에 대

해 3.2cm이다.[4] 트리튬은 방사성동위원소 중에서 가장 낮은 에너지의 베타입자를 방출하기 때문에 쉽게 차폐될 수 있어서 방사선 안전관점에서 어느 다른 원소보다 다루기에 유리하다. 한 개의 트리튬분자는 붕괴하여 2개의 Helium-3 원자로 변환하기 때문에 저장용기에 압력이 계속적으로 증가하게 된다.

유리관 내벽에 형광물질에 도달하게 되면 형광물질의 외곽전자를 여기시키거나 이온화시킨다. 베타입자에 의하여 여기된 원자는 광자를 방출하여 빛을 발하게 된다. 따라서 최종적으로 인화합물에 도달된 전자만이 발광하는데 그 역할을 하게 된다. 유리관의 밝기는 유리관내벽에서 전자의 에너지 flux에 비례한다. 이 에너지 flux는 tritium의 잔존 방사능, 전자를 흡수하는 Helium의 농도 증가 및 헬륨생성으로 인한 유리관 압력증가, 유리관내부 configuration 등의 복합함수이다. 일반적으로 유리관내에 압력증가는 유리관내벽에서 전자에너지 flux를 약화시킨다고 알려져 있다.[5] 따라서 매질을 통한 전자의 수송이론적 접근은 야광유리관의 설계 및 유리관의 밝기를 결정하는 주요 역할을 한다.

3. 전자 (베타)의 매질을 통한 감쇄 (Attenuation)

방출된 베타선이 매질을 통과하여 이동할 때 매질내에 원자와 4가지 방법에 의하여 반응하게 된다. 첫째 물질원자의 궤도전자와 비탄성충돌 (Coulomb 반응)을 하는 경우이다. 이 반응을 통하여 전자의 운동에너지가 물질원자에 부분적으로 전수되는데 가장 많이 일어나는 반응으로서 두가지 형태로 나타난다. 즉 여기(excitation)와 이온화(Ionization)반응이 그것이다. 외부 입사전자와 충돌에 의하여 하나 이상의 궤도전자가 여기상태로 되거나 불구속상태 즉 이온화상태로 되는 반응이다. 충돌에 의하여 에너지를 잃어버린 입사전자는 반사되어 쪼개 나간다.

두번째 입사전자의 에너지가 큰 경우 핵자와 비탄성충돌 반응을 한다. 전자기파(Bremsstrahlung)의 방출에 의하여 에너지를 잃게 된다. 이 반응은 무거운 원자로 구성된 매질에서 전자가 통과할 경우 더 많은 전자가파를 방출한다. 전자 정지질량아래의 운동에너지를 가진 전자는 그 에너지를 원칙적으로 원자 혹은 분자를 이온화 및 여기시키는 동안 잃는다. 또한 매우 적은 비율로 Bremsstrahlung 및 Fluorescence에 의하여 그 에너지를 잃기도 한다. Bremsstrahlung은 전자가 원자핵의 Coulomb장에 의하여 감속될 때 연속 X-ray 스펙트럼을 방출하는 현상이고 Fluorescence는 원자준위를 낮추는 내곽전자의 이온화에 의하여 특정 광자를 방출하는 현상이다. 10 eV의 낮은 에너지 전자는 매질 분자의 분리 및 진동 또는 회전과 같은 여기에 의하여 그 에너지를 잃는다.

셋째 궤도전자와 탄성충돌을 하여 반사되는 경우이다. 에너지와 운동량이 보존된다. 에너지 전수는 거의 무시될 수 있다. 입사전자에너지가 100eV이하일 때에만 현저하게 일어난다.

넷째 핵자와 탄성충돌을 하는 경우이다. 입사전자는 반사되지만 방사선을 방출하지도 않고 핵자를 여기시키지도 않는다.

이론적 접근의 어려움은 트리튬으로부터 베타입자 에너지는 비교적 낮다는 점과 베타입자가 통과하는 매질은 가장 가벼운 원소로 구성되어 있다는 점이다. 왜냐하면 전자의 이론적 접근은 보통 100KeV이하로 제한되어 있고 가벼운 원소의 매질에서 전자의 반응을 이론적으로 해석하는 경우 오차가 상당히 크기 때문이다. 이러한 상황에서 유효한 결과를 얻을 수 있는 경우는 실험에 의존하는 수밖에 없다.

4. 전자 수송이론

MCNP/4B 컴퓨터코드는 확률론적 Monte Carlo 수치해석방법에 의하여 중성자, 광자, 전자 및 이들의 연계반응에 대한 수송이론을 simulation 코드이다. 전자수송을 위하여 사용된 이론은 Continuous Slowing Down Model [6-7]이며 자발전자장 및 외부전자장 효과를 고려하지 않는다. 중성입자의 수송 simulation은 비교적 그 수가 많지 않고 서로 연계되지 않은 충돌반응 (충돌사이에 단순한 자유거동)에 의하여 특징지을 수 있는 반면, 전자의 거동은 long-range Coulomb장에 지배를 받기 때문에 수많은 작은 반응의 집합으로 이루어진다. 이 때문에 복잡한 다중 산란이론 Monte Carlo 방법에 의하여 전자거동을 simulation해야 한다. 따라서 코드는 하전입자의 수송 simulation을 위하여 다중산란이론을 도입한다. 이 이론은 하전입자 기본 반응단면적을 이용하면서 에너지손실, 각회절과 같은 중요 물리량의 결정을 위한 확률분포를 예측하기 위하여 입자수송현상의 통계적 성질을 이용하는 이론이다. 이 이론은 주어진 step의 거동 segment에서 많은 반응현상의 총체적 효과에 대한 simulation을 수행한다. 사용된 대표적 부분 이론 [1]은 각회절을 위한 Goudsmit-Saunderson이론, 에너지손실 fluctuations을 위한 Landau 이론 및 이 이론의 Blunck-Leisegang 개선 등이다. 이러한 이론들은 여러 가정에 근거하기 때문에 그들의 응용에 제한을 받는다. 그래서 모든 분야 전자수송 simulation에 적용할 수는 없다. 특히 여기서 도입된 이론들은 전자의 운동에너지에 비해 전자에너지손실이 작다는 가정에 기초한다.

연속 events쌍 사이에 전자의 궤적은 step으로서 지칭되는 직선마디이다. 감지할 만한 에너지손실을 수반하는 전자의 거동을 simulation하기 위하여 많은 step 속으로 전자의 path를 나누어야 할 필요가 있다. 이러한 steps들은 수많은 충돌현상을 포함하도록 충분히 길게 (다중산란이론이 유용하도록), 또한 어느 한 step에서 평균에너지손실이 적도록 충분히 짧게 (다중산란이론을 위하여 필요한 가정이 만족되도록) 선택되어야 한다.

전자의 condensed random walk simulation을 위한 에너지 및 path length의 결정은 다음과 같이 이루어진다.

$$E_{x-1} - E_x = - \int_{s_{x-1}}^{s_x} \frac{dE}{ds} ds \quad (3)$$

여기서 $-\frac{dE}{ds}$ 는 단위길이당 에너지에서의 총 정지능을 의미한다. 따라서 Path length $s = s_x - s_{x-1}$ 를 가진 전자 steps는 뒀식에 의하여 결정된다. 또한 fluctuation 현상에 기인한 각회절의 정확도를 높이기 위하여 한 step내에서 많은 작은 substep으로 나누어 계산한다.

에너지 step이 선정되면 각 step동안 전자의 에너지손실과 각회절이 적당한 다중산란이론에 근거한 확률분포로부터 추출된다. 단일 steps속으로 확률적으로 추출되어지는 많은 개개의 충돌현상에 대한 효과에 관한 이러한 논리가 Condensed Random Walk 방법이다.

전자수송 simulation의 시작단계에서 모든 적당한 자료는 미리 계산되거나 전자 자료와 일로부터 채택된다. 이러한 자료는 전자에너지 grid, 정지능, 전자 비정거리, 에너지 단계법 위, substep 길이, 각회절 확률분포 및 2차 입자발생 확률분포 등이다. 각 simulation단계 시작에서 충돌에 의한 에너지손실율이 추출된다. 충돌로부터 단위 path length 당 에너지손실은 Berger [6]가 개발한 제한적 전자충돌 정지능에 의하여 계산된다. 에너지 straggling

이 없을 때 이것은 단순히 비 방사정지능의 평균값이다. 그러나 에너지손실율에서 fluctuation이 일어날 때는 sub-step이 결정되고 fluctuation영향을 고려한다. 에너지 step은 수많은 개개의 무작위 충돌사건의 축적효과를 나타내지만 실제로 에너지손실율값에서 fluctuation이 일어난다. 이와같이 에너지손실은 단순평균값이 아니라 길이 s의 step에 대한 에너지손실이 추출되어질 수 있는 확률분포이다. Landau[1,7]에 의한 에너지손실 분포가 사용된다.

각회절을 결정하기 위하여 Goudsmit-Saunderson이론이 사용된다. 이 이론이 전자 진행방향을 변화시키기 위하여 각 substep에서 사용된다. 현 에너지 손실율과 substep 길이를 기반으로 substep 끝에서 전자의 투사(projected) 에너지가 계산된다. 마지막으로 2차입자의 생성을 위하여 적당한 확률분포가 선택된다. 이것은 전자에 의한 형광 X-ray, 전자충격 이온화로부터 knock-on 전자 및 Bremsstrahlung 광자를 포함한다.

각 전자 substep에서 코드는 knock-on 2차전자가 생성되는지 아닌지 무작위로 결정하기 위하여 확률반응단면적을 사용한다. 만약 생성된다면 2차전자의 에너지가 분포로부터 추출된다. 일단 에너지가 추출되면 1차전자 거동방향과 새로이 생성된 2차전자의 방향 사이에 각회절이 운동량보존원칙에 의하여 결정된다. 이 각회절은 결과하는 2차전자의 거동을 위하여 사용된다. 1차전자의 에너지손실이나 각회절을 simulation하는데 다중산란이론을 이용하기 때문에 2차입자의 추출 때문에 1차전자의 방향이나 에너지가 영향을 받지 않는다.

각 전자 substep에서 Bremsstrahlung광자의 추출을 위하여 MCNP는 Bethe-Heitler Born 가정 [1,7]을 주로 이용한다. 기본자료는 Bremsstrahlung생성확률, 생성된 광자 에너지 및 각회절분포를 포함한다. 생성확률자료는 Bremsstrahlung광자가 생성될 것인지 아닌지를 결정하는데 사용된다. 만약 생성된다면 새로운 광자에너지가 에너지분포로부터 추출되고 진행방향 각회절 또한 추출된다. 이때 전자의 진행방향은 광자의 생성에 의하여 영향을 받지 않는다.

5. 야광유리관 Dimension 및 입력자료

그림 1은 MCNP simulation에서 사용된 야광유리관 구성과 dimension을 나타낸다. 유리관 원통의 외경은 0.07cm이고 길이는 0.65cm이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 유리관 내부에 9 mCi 방사능을 가진 트리튬개스가 94% 채워져 있고, 유리관내벽에는 형광물질이 도포되어 있다. 본 유리관의 파괴시험결과 유리관 두께는 0.23mm로 측정되었으며 형광물질도두께는 0.014mm로 측정되었다. 따라서 이 결과가 simulation에 입력된다.

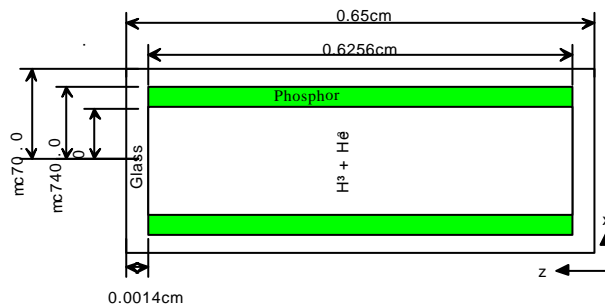


그림 1. 원통형 자체발광유리관의 구성도

트리튬원자수, N_0 와 초기 방사능, C_0 와의 관계식, $C_0 = \lambda N_0$ 로부터 초기 트리튬 원자수는 계산된다. 계산된 트리튬의 초기밀도와 사용된 형광물질 및 유리의 밀도는 다음과 같다. 형광물질 경우 실측된 0.014mm두께와 최적무게 4.3 mg/cm²을 가정하였다.

- $\rho(\text{H3+H1})_2 = 2.175827 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^3$
- $\rho(\text{ZnS:Cu}) = 3.07 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$
- $\rho(\text{Borosilicate Glass}) = 2.23 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

표 1은 사용된 Borosilicate Glass 즉 Pyrex Glass의 구성성분비를 나타낸다.

표 1. Borosilicate Glass의 성분비

B(5)	$7,045 \times 10^{-2}$
O(8)	$6,411 \times 10^{-1}$
Na(11)	$2,331 \times 10^{-2}$
Al(13)	$8,204 \times 10^{-3}$
S(14)	$2,553 \times 10^{-1}$
K(19)	$1,615 \times 10^{-3}$
Total	1,0

표 2는 사용된 P-2 Phosphor의 구성성분비를 나타낸다. 계산에서 접촉제 MgCl₂과 NaCl은 주 관심사가 아니고 소량이기 때문에 무시하였다.

표 2. 형광물질의 성분비

Compound	ZnS	CuS	MgCl ₂	NaCl
Mol. Ratio	0,985	0,015	3% ¹	2% ¹
Assay	0,995	0,995		
Grams	96,46	1,441	2,938	1,958
Lb/Lb	0,938	0,014	0,0286	0,019

¹ % by Weight of sulfides

트리튬 베타에너지 스펙트럼의 Histogram 입력자료는 표3에서와 같이 0에서 18KeV로 방사선원 영역에서 골고루 분포한다. 이 베타선원의 초기방사능은 9mCi (94% T₂ + 6% H₂)로 가정하였다.

표 3. 트리튬베타 붕괴에너지 스펙트럼 Histogram

Energy Kev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
%	9,62	10,50	10,71	10,50	9,85	9,08	8,00	7,15	6,17	5,08	4,22	3,37	2,47	1,73	0,96	0,43	0,11	0,05

6. 트리튬붕괴에 따른 베타수송 Simulation 결과

이 계산은 MCNP4B를 이용하여 트리튬이 있는 방사선원 영역(cell 1)과 형광물질 영역(cell 2)에 대하여 수행하였다. 그림 2는 트리튬영역과 형광물질영역에서 시간에 따르는 전자 flux변화를 보여주고 있다. 이 결과는 트리튬가스영역 즉 베타선원영역과 형광물질영역 용적 각각에 대해 평균한 값이다. 이 결과는 트리튬붕괴로 인한 매질 구성성분변화(트리튬 대 Helium-3) 및 베타선 방출량감소의 복합적 영향을 반영한 것이다. 베타선원영역에서 flux는 예상한 바와 같이 형광물질 영역에서보다 월등히 크다. 전자 flux는 그림 2에서 보여주는 바와 같이 semi-log 그림에서 선형적으로 감소된다.

그림 3은 트리튬영역과 형광물질영역에서 시간에 따르는 총에너지축적량 변화를 보여주고 있다. 유리관 내벽에 형광물질에 도달하게 되면 형광물질의 외곽전자를 여기시키거나 이온화시킨다. 베타입자에 의하여 여기된 원자는 광자를 방출하여 빛을 발하게 된다. 따라서 최종적으로 인화합물에 도달된 전자만이 발광하는데 그 역할을 하게 된다. 형광물질영역에서 6년후에 총 에너지축적량은 초기값의 약 69%로 나타나고 베타선원영역에서 약 80%로 나타난다. 총 에너지 축적량이 초기값에 절반으로 떨어지는데 걸리는 시간은 형광물질영역의 경우 11.3년, 베타선원영역의 경우 16년으로 나타났다. 이 경우는 flux에 대한 거동과는 정반대로 베타선에 의한 매질내에 총 에너지 축적량은 형광물질영역에서 전반적으로 크게 나타난다. 이것은 우리가 바라는 바와 같이 베타에너지 축적은 주로 형광물질영역에서 일어남을 보여주는 것이다.

그림 4는 트리튬영역과 형광물질영역에서 시간에 따르는 단위면적당 에너지축적량 변화 즉, 에너지 flux 변화를 보여주고 있다. 이 결과는 트리튬영역과 형광물질영역 각각에 대해 평균한 값이다. 6년후에 에너지 flux는 형광물질영역과 트리튬영역 모두 초기값에 약 67%가 됨을 보여주고 있다. 에너지 flux가 초기값에 절반으로 떨어지는데 걸리는 시간은 11.4년으로 나타났다. 그림 5에 에너지 flux 거동은 그림 3에 전자 flux 거동과 같이 베타선원영역에서 에너지 flux는 형광물질 영역에서보다 크다. 그러나 두 영역에서 크기의 차이는 감소되는 경향을 보여주고 있다. 이것은 에너지 flux의 정의가 전자 flux 곱하기 에너지 축적의 의미를 갖고 있기 때문에 그림 3에서 보는 바와 같이 총 에너지축적의 경우는 형광물질영역이 더 크기 때문에 두 영역에서 거동이 서로 상쇄효과를 일으켜 나타난 결과이다.

그림 5는 트리튬영역과 형광물질영역에서 시간에 따르는 총 하전량 변화를 보여주고 있다. 6년후에 하전량변화를 관찰해 보면 형광물질영역의 경우 초기값에 약 68%, 트리튬영역에 경우 78%로 나타난다. 총 하전량이 초기값에 절반으로 떨어지는데 걸리는 시간은 형광물질영역의 경우 11.2년, 베타선원영역의 경우 16년으로 나타났다. 형광물질 영역에서 하전량은 트리튬가스영역에서 하전량보다 높게 나타난다. 이는 예상한 바와 같이 형광물질영역에서 전자 축적이 더 많다는 것을 의미한다.

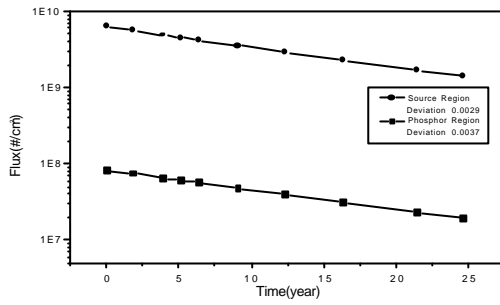


그림 2. β 및 형광물질영역에서 트리튬붕괴시간에 따른 Flux 변화

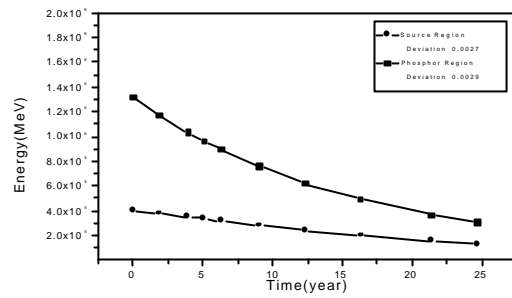


그림 3. β 및 형광물질영역에서 트리튬붕괴시간에 따른 총 에너지축적량 변화

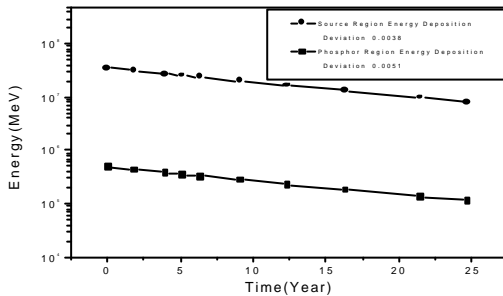


그림 4. β 및 형광물질영역에서 트리튬붕괴시간에 따른 에너지 Flux 변화

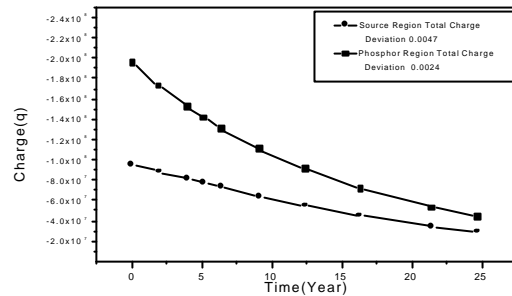


그림 5. β 및 형광물질영역에서 트리튬 붕괴시간에 따른 총 하전량 변화

그림 6 은 붕괴에 따라 트리튬량이 줄어들 때 트리튬 기체가 들어있는 영역 즉 베타방사선원 영역에서 영역에 대해 평균한 에너지별 전자 flux분포를 보여주고 있다. 이것은 트리튬량이 감소되고 동반하여 베타붕괴로 인한 Helium-3가 트리튬량 감소만큼 생성된 매질에서 전자 flux 분포이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 트리튬이 감소되고 반대로 Helium-3가 증가됨에 따라 전자 flux가 같은 에너지 분포를 가지고 감소됨을 알 수 있다. 이는 Helium-3 생성 매질에서 전자흡수효가가 증가됨을 의미한다. 그림 10은 트리튬량이 감소될 때 형광물질영역에서 에너지별 전자 flux변화를 보여주고 있다. 마찬가지로 트리튬량이 줄어들 때 전자 flux는 감소하는 경향이 있다. 이는 Helium-3 축적의 증가로 인하여 트리튬매질을 통과하여 형광물질영역에 도달되는 전자수가 줄어든다는 것을 의미한다.

그림 7는 트리튬 및 헬륨량 변화에 따른 베타선원영역에서 총 에너지축적변화를 보여준다. 베타입자는 물질의 원자물내에 주로 궤도전자와 충돌함으로써 물질과 반응한다. 각 충돌에서 베타입자는 매질원자에 궤도전자를 이탈시키거나 (Ionization) 궤도전자를 여기 (Excitation)시킴으로써 에너지를 잃는다. LET 즉, 단위거리 가는 동안 전자의 에너지손실율을 나타내는 것으로서 베타입자의 속도가 느릴 때 증가된다. 매질내에 에너지 축적은 이들 전자에 의하여 잃어버린 에너지의 매질내에 축적을 의미한다. 그림 11은 형광물질영역내에 총에너지축적 변화를 보여주고 있다. 총에너지 축적량 및 에너지 flux는 모두 감소된다. 즉 이것은 매질에서 트리튬이 감소되고 반대로 Helium-3가 증가되어 구성성분비가 달

라질 때 발광률이 줄어든다는 것을 의미한다.

그림 8, 12는 베타선원영역 단위면적당 에너지축적량 변화 즉 에너지 flux변화 결과를 보여주고 있다. 이 경우는 Helium-3에 비하여 트리튬 비율이 감소될 때 에너지 flux는 감소되는 경향을 보이고 있다.

그림 9, 그림 13은 베타선원 영역과 형광물질영역에서 총하전량변화를 보여주고 있다. 트리튬대 Helium-3구성비가 변할 때 베타선원영역에 하전량은 증가되나 형광물질영역에서 하전량은 감소됨을 보여주고 있다. 이는 Helium-3에서 전자흡수효가가 트리튬보다 크다는 것을 의미한다.

결과를 종합하면 전자의 매질 구성성분변화와 트리튬붕괴로 인한 베타선방출률 감소로 인한 형광물질영역에서 발광유리관의 밝기에 비례하는 에너지 flux는 6년후에 초기값의 약 67%이고 초기값의 절반으로 떨어지는데 걸리는 시간은 약 11년으로 나타났다.

표 4. 베타선원영역 매질 구성비

	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10
Tritium	100%	90%	80%	75%	70%	60%	50%	40%	30%	25%
Helium-3	0%	10%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%

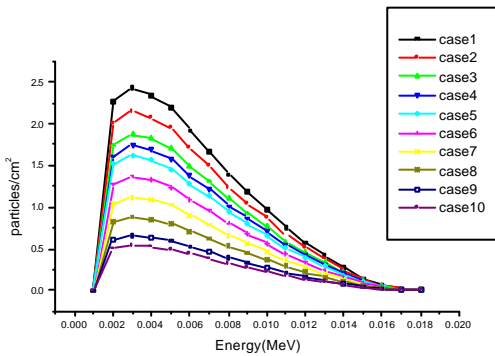


그림 6 Flux average over cell 1

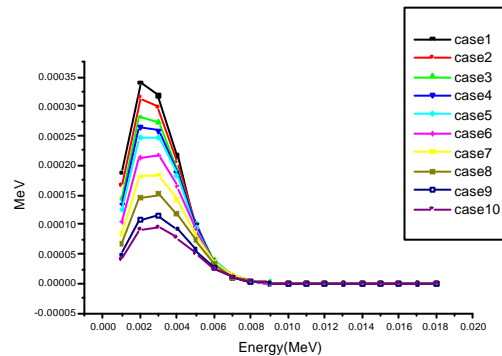


그림 7 Energy deposition over cell 1

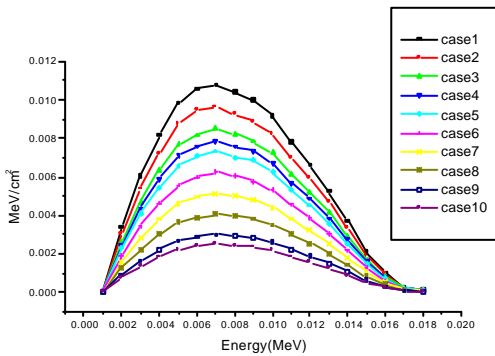


그림 8 Energy averaged over a cell 1

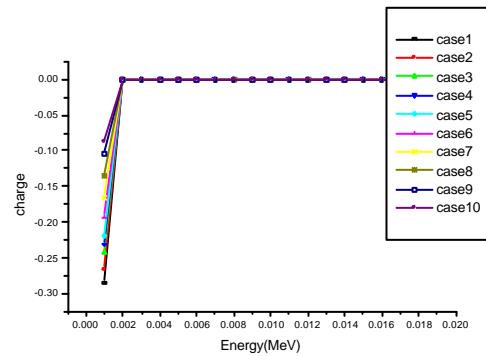


그림 9 charge deposition over cell 1

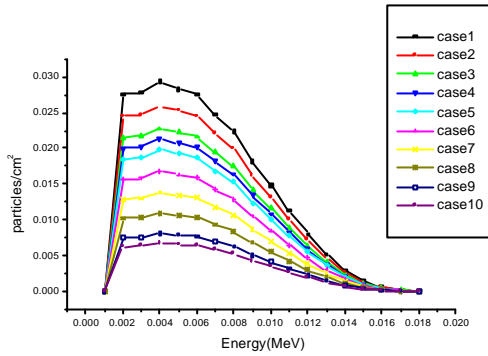


그림 10 Flux average over cell 2

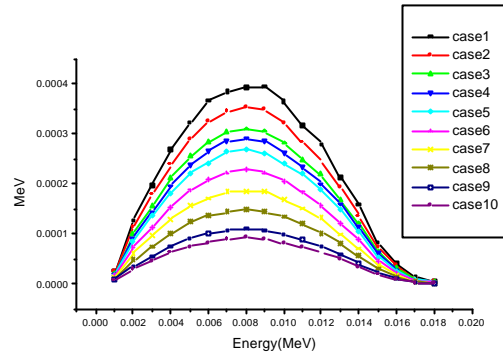


그림 11 Energy deposition over cell 2

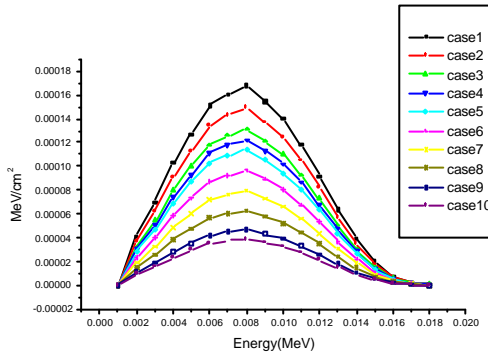


그림 12 Energy averaged over a cell 2

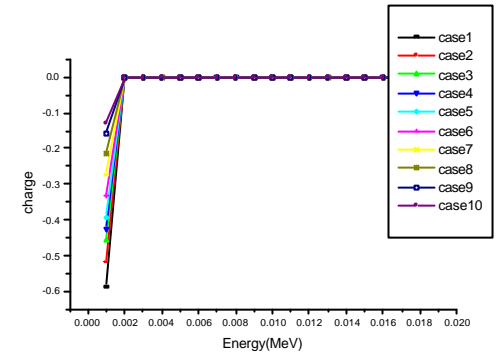


그림 13 charge deposition over cell 2

7. 결론

트리튬으로부터 방출된 베타입자가 매질을 통해 이동하여 형광물질영역에 도달되어 그 에너지를 형광물질에 축적시키면 가시광선이 방출되어 빛을 발하게 된다. 트리튬 베타입자는 유리관내에 트리튬 개스와 트리튬의 베타붕괴로 인하여 생성된 He-3 개스 매질을 통하여 이동할 때 트리튬이나 He-3 원자에 의해 흡수되거나 충돌을 통하여 에너지를 잃고 최종적으로 유리관내벽에 인화합물에 도달하게 된다. 유리관의 밝기는 유리관내벽에서 전자의 에너지 flux에 비례한다. 이 에너지 flux는 tritium의 잔존 방사능, 전자를 흡수하는 He의 농도 증가 및 헬륨생성으로 인한 유리관 압력증가, 유리관내부 구조 등의 복합함수이다. 따라서 매질을 통한 전자의 수송이론적 접근은 야광유리관의 설계 및 유리관의 밝기를 결정하는 주요 역할을 한다.

트리튬만감기인 6년후에 형광물질영역에서 flux는 초기값에 약 69%가 된다. 이 결과는 트리튬붕괴로 인한 매질 구성성분변화 (트리튬대 He-3) 및 베타선 방출량감소의 복합적 영향을 반영한 것이다. 베타선원영역에서 flux는 예상한 바와 같이 형광물질 영역에서보다 월등히 크다. 형광물질영역에서 6년후에 총 에너지축적량은 초기값의 약 69%로 나타난다. 이 경우는 flux에 대한 거동과는 정 반대로 베타선에 의한 매질내에 총 에너지 축적량은 형광물질영역에서 전반적으로 크게 나타난다. 이것은 우리가 바라는 바와 같이 베타에너지 축

적은 주로 형광물질 영역에서 많이 일어남을 보여주는 것이다. 6년후에 에너지 flux는 형광물질영역과 트리튬영역 모두 초기값에 약 67%가 되고 초기값의 절반으로 떨어지는데 걸리는 시간은 트리튬 반감기가 12.3년인데 비하여 약 11년으로 나타났다. 베타선원영역에서 에너지 flux는 형광물질 영역에서보다 크다. 6년후에 하전량변화를 관찰해 보면 형광물질영역의 경우 초기값에 약 68%로 나타난다. 형광물질 영역에서 하전량은 트리튬개스영역에서 하전량보다 높게 나타난다. 이는 예상한 바와 같이 형광물질영역에서 전자 축적이 더 많다는 것을 의미한다. 종합해보면 예상과는 달리 유리관광기에 비례하는 에너지 flux가 트리튬붕괴로 인한 Helium-3 생성 축적과 트리튬량 감소로 인한 매질변화의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] J. F. Briesmeister, et al., "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, 1997.
- [2] N. Tsoulfanidis, "Measurement and Detection of Radiation," Hemisphere Pub. Co, 1983.
- [3] G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement," John Wiley & Sons, 1979.
- [4] E. A. Evans, Tritium and its Compounds, Butterworths, London, 1966
- [5] A. Korin, et al., "Parameters Affecting the Intensity of Light Sources Powered by Tritium," Nucl. Instr. Meth., Vol 130, pp. 231, 1975.
- [6] M. J. Berger, "Monte Carlo Calculation of the Penetration and Diffusion of Fast Charged Particles," in Methods in Computational Physics, Vol. 1, edited by B. Alder, et al., Academic Press, 1963, 135.
- [7] S. M. Seltzer, "Electron-Photon Monte Carlo Calculations: The ETRAN Code," Appl. Rad. Isot., Vol. 42, pp.917, 1991.