creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000371028

2021년 2월

박사학위 논문

감마선 및 엑스선의 차폐 계산을 위한 방사선량률 평가 프로그램의 개발

조선대학교 대학원

원자력공학과

윤 선 영

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감마선 및 엑스선의 차폐 계산을 위한 방사선량률 평가 프로그램의 개발

Development of a Radiation Dose Rate Evaluation Program for the Calculation of Shielding of Gamma-ray and X-ray

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

윤 선 영

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감마선 및 엑스선의 차폐 계산을 위한 방사선량률 평가 프로그램의 개발

지도교수 정 운 관

이 논문을 원자력공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

윤 선 영

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

윤선영의 박사학위논문을 인준함

위원장	전주대학교	교 수	최지원 (인)
위 원	조선대학교	교 수	이경진 (인)
위 원	조선대학교	교 수	송종순 (인)
위 원	동강대학교	교 수	류영환 (인)
위 원	조선대학교	교 수	정운관 (인)

2020년 12월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

List of Figures ····· iii
List of Tables ····· v
ABSTRACT ····· vi
제1장 서론 ····· 1
제2장 연구목적 ····· 2
제3장 이론적 배경 ····· 3
제1절 광자의 물질과의 상호작용 ····· 3
1. 고전산란 ····· 3
2. 광전효과 ····· 3
3. 콤프턴산란 ····· 4
4. 전자쌍생성 ····· 6
5. 광핵반응 ····· 7
제2절 감마선의 차폐 ····· 7
제3절 엑스선의 차폐 ····· 9
제4절 LabVIEW ····· 12
제4장 연구대상 및 방법 ····· 14
제1절 감마선의 차폐 계산 ····· 14
1. 차폐 대상 ····· 14
2. 차폐 설계 목표 ····· 14
3. 감마선의 차폐 계산 식 ····· 15
4. 주요 인자의 적용 ····· 16

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가. 유효선량률 ····· 16
나. 선형감쇠계수 ····· 16
다. 축적인자 ····· 19
라. 점유도 ····· 24
제2절 엑스선의 차폐 계산 ····· 25
1. 차폐 대상 ····· 25
2. 차폐 설계 목표 ····· 25
3. 엑스선의 차폐 계산 식 ····· 26
4. 주요 인자의 적용 ····· 27
가. 투과계수 ····· 27
나. 산란인자 ····· 29
다. 가동률 ····· 30
라. 가동인자 ····· 30
제3절 프로그램의 설계 ····· 30
제5장 결과 ····· 35
제1절 프로그램의 구성 ····· 35
제2절 프로그램의 실행 ····· 52
제3절 프로그램의 검증 ····· 53
제6장 고찰 ····· 63
제7장 결론 ····· 67
참고문헌 ····· 68

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Figures

Figure 1. Mechanism of photoelectric effect. ····· 4
Figure 2. Mechanism of compton effect. ····· 5
Figure 3. Mechanism of pair production. ····· 6
Figure 4. The relative importance of the major type of gamma-ray interaction. ····· 8
Figure 5. Shielding design model of X-ray room. ····· 10
Figure 6. Front panel of LabVEIW. ····· 13
Figure 7. Block diagram of LabVEIW. ····· 13
Figure 8. Data flow of mass attenuation coefficients. ····· 18
Figure 9. Data flow of lead buildup factor. ····· 21
Figure 10. Data flow of iron buildup factor. ····· 22
Figure 11. Data flow of concrete buildup factor. ····· 23
Figure 12. Processing process of input and output according to the design of gamma-ray shielding program. ····· 32
Figure 13. Processing process of input and output according to the design of X-ray shielding program. ····· 34
Figure 14. Radioisotope tab. ····· 36
Figure 15. Mass attenuation coefficients tab. ····· 37
Figure 16. Buildup factor tab. ····· 38
Figure 17. Reference tab of gamma-ray. ····· 39
Figure 18. Calculation tab of gamma-ray. ····· 41
Figure 19. Database source code of gamma-ray. ····· 42
Figure 20. Calculation source code of gamma-ray. ····· 43
Figure 21. X-ray database tab. ····· 45
Figure 22. Reference tab of X-ray. ····· 46
Figure 23. Primary barrier calculation tab. ····· 48
Figure 24. Secondary barrier calculation tab. ····· 49

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 25. Database source code of X-ray. ····· 50
Figure 26. Calculation source code of X-ray. ····· 51
Figure 27. Calculation of lead shielding for ^{60}Co. ····· 54
Figure 28. Calculation of iron shielding for ^{60}Co. ····· 55
Figure 29. Primary barrier lead shielding calculation. ····· 58
Figure 30. Primary barrier concrete shielding calculation. ····· 59
Figure 31. Secondary barrier lead shielding calculation. ····· 60
Figure 32. Secondary barrier concrete shielding calculation. ····· 61

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

List of Tables

Table 1. Mass attenuation coefficients ····· 17
Table 2. Buildup factor of lead ····· 20
Tabel 3. Buildup factor of iron ····· 21
Table 4. Buildup factor of concrete ····· 22
Table 5. Occupancy factor ····· 24
Tabel 6. The correction value of the regression coefficient for lead ····· 27
Tabel 7. The correction value of the regression coefficient for concrete 27
Table 8. Scattering factor ····· 29
Table 9. Use factor ····· 30
Table 10. Operation button function ····· 52
Table 11. Shielding calculation conditions for ^{60}Co ····· 53
Table 12. Comparison of calculation results ····· 56
Table 13. Minimum shielding requirements for 300 kV therapy installations ·· 57
Table 14. Shielding calculation conditions for X-ray ····· 57
Table 15. Comparison of NCRP 49 minimum shielding thickness and program result
····· 62

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Development of a Radiation Dose Rate Evaluation Program for the Calculation of Shielding of Gamma-ray and X-ray

Yoon, Sun-Young

Advisor : Prof. Chung , Woon-kwan, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

In accordance with the Nuclear Safety Act, domestic nuclear facilities should be equipped with shielding facilities so as not to exceed the dose limit. Therefore, in this study, the mathematical algorithm according to the radiation shielding theory was summarized and supplemented, and a gamma-ray and X-ray shielding calculation program was developed based on LabVIEW in a graphical user interface (GUI) method.

In the gamma-ray shielding and radiation dose rate calculation program, the mass attenuation factor corrected by exponential interpolation considering the flow of data and the linear attenuation factor according to the mass attenuation factor, which is a major factor in the calculation of gamma-ray shielding, was applied. Another major factor, the build-up factor, was applied to the shielding calculation by variously correcting the range of energy and energy depending on the shielding thickness input by the user through linear interpolation considering the flow of data. The X-ray shielding and radiation dose rate calculation program was calculated using

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

the functional equation of the attenuation curve. At this time, since the regression coefficient is only provided according to the specific energy, the corrected value for the regression coefficient at various energies was used.

Using the gamma-ray shielding and radiation dose rate calculation program, the shielding thickness of the lead and concrete half-layer thickness and the radiation dose rate after shielding were calculated. The calculation result using the program was 49.0% for lead and 50.9% for iron, which was close to the half-gauge. Shielding calculations in 300 therapeutic equipment were performed using X-ray shielding and radiation dose rate calculation programs. As a result of comparing the result value of NCRP with the result value according to the program, it was found that lead showed a difference in the range of 0 ~ 0.5 mm and concrete showed a difference in the range of 0 ~ 0.74 cm, showing a relatively slight difference.

In this study, the accuracy was improved so that values in a wider range of values could be calculated by supplementing and correcting equations and users can easily perform shielding calculations in nuclear facilities with a relatively uncomplicated geometric structure.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장. 서론

국내 원자력이용시설은 산업, 의료, 교육, 연구 등의 다양한 목적으로 운영되고 있으며, 이러한 시설은 원자력안전법에 따라 선량한도를 초과하지 않도록 차폐 설비를 갖추어야 한다. 원자력안전법은 원자력이용시설의 최초 허가 시 사람이 상시 출입하는 장소에서의 방사선량 또는 사업소의 경계에 인접하는 구역에서의 방사선량이 선량한도가 이하가 되도록 하는 차폐벽 또는 차폐물을 설치하도록 규정하고 있다. 또한 허가사항의 변경으로 인해 차폐 설비의 보강이 요구되는 경우에도 변경된 변수가 적용된 차폐 설비를 갖추어야 한다.

이때 차폐 설계를 통하여 방사선의 피폭을 방지함은 물론 차폐 시공비용을 최적화할 수 있다. 차폐 설계 시 사용되는 차폐 계산 방법은 몬테카를로법(Monte-Carlo Method)을 적용한 전산모사 방법과 수(手)계산을 통한 고전적인 방법 등이 있다. 이러한 차폐 계산을 통해 원자력이용시설의 주요 지점에 대한 방사선량률을 예측하고, 적합한 차폐 두께를 결정 및 시공하게 된다. MCNP는 중성자, 광자 등의 입자 수송을 계산할 수 있는 프로그램으로 방사선 조사시설의 및 원자력 시설의 방사선 방호를 위한 차폐체 설계에 사용되는 코드이다[1]. MCNP 코드를 구조가 복잡한 방사선 조사시설에 적용하여 조사시설 내 방사선량을 예측 할 수 있고, 조사하고자 하는 시료에 대한 선량을 계산할 수 있다[2]. 이렇듯 기하학적 구조가 복잡한 원자력이용시설에서는 MCNP와 같은 전산모사 방법에 의존하는 것이 일반적이나 컴퓨터 계산 시의 과다한 비용과 사용자 전문성의 문제가 있다. 비교적 기하학적 구조가 복잡하지 않고 단순한 구조의 원자력이용시설 또는 최초 인허가 시 수행하였던 차폐 설계 이후에 허가받은 사항의 변경으로 인한 차폐 변경이 발생한 중□□규모의 원자력이용시설에서 MCNP를 이용하여 차폐계산을 하는 것에는 큰 비용 및 긴 소요시간, 사용자 전문성의 문제가 존재한다.

또 다른 차폐 계산 방법으로 차폐 계산 공식을 이용한 수(手)계산을 통한 고전적인 방법이 있다. 차폐 계산 공식을 이용한 수(手)계산 방법은 전산모사 방법을 사용하기 이전부터 적용해온 방법이지만 복잡한 계산 시 휴먼에러의 발생 가능성을 배제하지 않을 수 없다. 차폐 두께에 영향을 주는 인자가 다수이거나 방사성핵종이 두 종류 이상 존재하는 복합 방사성핵종인 경우 계산이 복잡해지게 되므로 계산 시 오류가 발생할 수 있다. 또한 차폐 계산 시 적용하는 실험적인 데이터 및 계산식이나 그래프를 적용하는 데 있어 착오가 발생하여 오류가 발생하거나 수행자에 따라서 계산 결과가 상이

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

할 가능성이 있다.

따라서 전산모사 방법과 수(手)계산 방법의 장단점을 보완하여 방사선 차폐 이론에 따른 수학적인 알고리즘을 정리하고 이를 프로그램화하여 자동으로 계산을 가능하게 한다면, 비교적 기하학적 구조가 단순한 원자력이용시설에서 계산 시의 오류를 최소화하면서도 사용자의 전문성에 관계없이 실무자가 보다 쉽게 접근할 수 있는 차폐 계산 프로그램이 될 것이다.

본 연구에서는 방사선 중에서도 산업, 의료 등 여러 분야에서 널리 이용되고 있으며 외부피폭의 원인인 감마선 및 엑스선의 차폐 계산 프로그램을 구축하고자 한다. LabVIEW는 GUI(Geaphical User Interface) 방식으로서 그래픽 형태로 간단하게 프로그램을 구성할 수 있으며, 설치 형태로 구축하면 LabVIEW 프로그램이 없는 사용자도 사용이 가능하다. 따라서 LabVIEW를 기반으로 한 감마선 및 엑스선의 차폐 계산 소프트웨어로서, 기존의 차폐 계산 방법에 비해 소요 시간 및 비용이 적고 사용 방법이 간단한 프로그램을 개발하고자 한다.

제2장. 연구 목적

본 연구는 감마선 및 엑스선의 방사선 차폐 이론에 따른 수학적인 알고리즘을 정리하고 보완하여 LabVIEW를 기반으로 한 차폐 계산 프로그램을 구축하고자 한다. 따라서 차폐 이론을 프로그램화 시 적용되는 공식 및 데이터를 보완하여 계산 시 오류를 최소화하고 정확도를 높이며, 소요 시간 및 비용이 적고 사용 방법이 간단하여 사용자의 편의성을 고려한 프로그램을 개발하는 데 목적이 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장. 이론적 배경

제1절. 광자의 물질과의 상호작용

빛을 입자의 성질로 볼 때 '광자'라 하며, 엑스선과 감마선이 여기에 해당한다. 이러한 광자의 물질과의 상호작용에는 고전 산란, 광전효과, 컴프턴 산란, 전자쌍생성 등이 있다.

1. 고전산란

고전산란이란 광자가 원자에 부딪혀 궤도전자가 입사광자와 동일한 에너지로 진동하게 되며 이와 같은 에너지의 전자기파를 다른 진행 방향으로 방출하는 현상을 말한다. 고전산란의 경우 진행방향만 변하고 에너지 감소가 없는 탄성산란으로 간섭성 산란 혹은 Thomson 산란이라 하며, 에너지의 감소가 없으므로 전리 또한 발생하지 않는다[3]. 고전산란은 전자들이 떨어져 나갈 만큼 충분한 에너지를 갖지 못할 때 발생하며, 원자번호가 높은 원자에서 발생하기 쉽다.

2. 광전효과

광전효과란 원자핵 주위의 궤도전자가 광자 에너지를 흡수하여 고속으로 튀어나오는 현상을 말한다. 광전효과가 발생할 경우 산란은 없고 모든 에너지가 물질에 흡수되어 입사광자는 소멸하게 된다. 궤도전자가 광자로부터 일함수 이상의 에너지를 받아 궤도 밖으로 전리된 것을 광전자(photoelectron)라고 하며(Fig 1), 광전효과는 광자의 에너지가 낮고 물질의 원자번호가 높을수록 일어나기 쉽다. 광전효과가 일어날 때의 X-선의 에너지는 전자의 결합에너지보다 큰 에너지를 가져야 한다. 광전효과는 원자핵 가까이에서 잘 일어나며, 모든 광전효과의 80% 이상이 최내각 전자와 작용하게 되는 공명현상이 일어난다[4]. 광전효과가 일어나게 되면 원자 공동에서 특성 X선이 발생하고, 광전자가 주변 물질과 제동복사를 일으켜 제동복사선이 발생한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

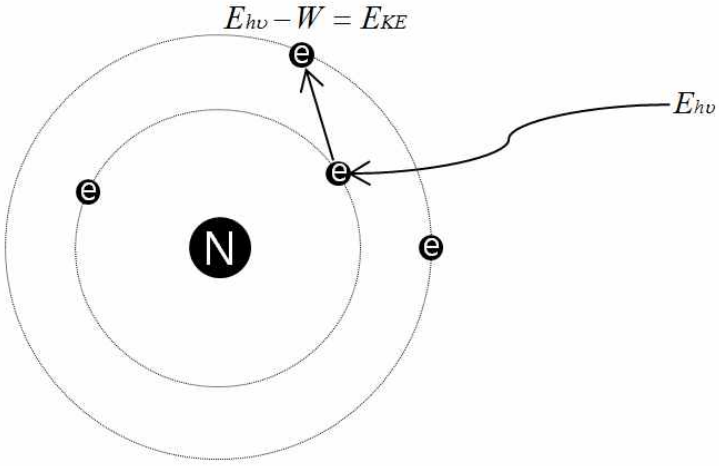


Figure 1. Mechanism of photoelectric effect.

3. 콤프턴산란

콤프턴산란이란 광자가 물질 중의 외곽전자나 자유전자와 충돌하여 입사에너지의 일부를 전달하여 밖으로 튀어나오게 하고, 자신은 에너지가 감소하여 산란광자의 형태로 소멸되는 현상을 말한다. 충돌 전후 입사광자와 자유전자는 에너지와 운동량 보존의 법칙에 의해 입사광자의 에너지는 산란된 광자에너지와 반도전자의 에너지가 된다[5]. 이 때 원자핵의 외부로 튀어나온 전자를 반도전자, 산란된 광자를 산란광자라 한다. 산란광자의 에너지는 정지하고 있는 전자 m_0의 에너지가 $h\upsilon$, 운동량이 $h\upsilon/c$의 광자가 충돌한 결과 전자는 반도각 ϕ의 방향으로 에너지 m_0c^2, 운동량 p로 튀어나가며 산란각 θ의 방향으로 광자가 에너지 $h\upsilon'$, 운동량 $h\upsilon'/c$로 산란된다(Fig 2).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

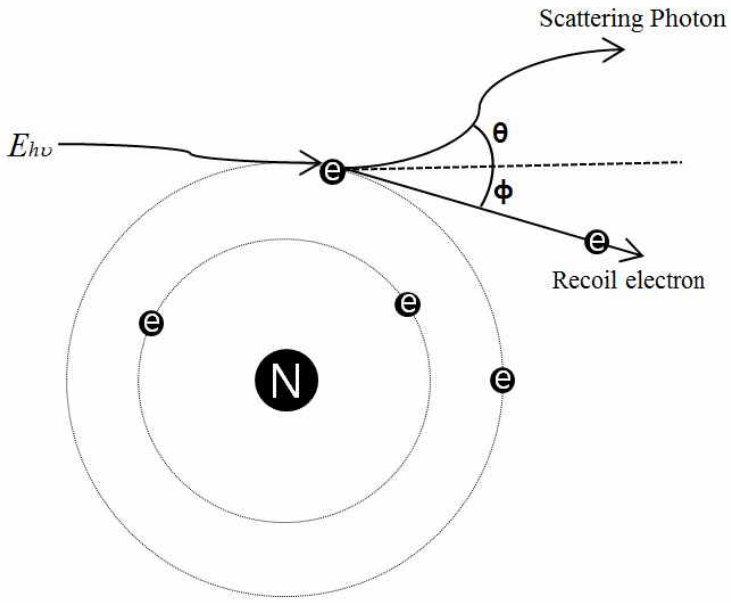


Figure 2. Mechanism of compton effect.

따라서 충돌 전후의 에너지와 운동량은 보존되므로 (1.1)식이 성립하며, (1.1)식으로부터 (1.2)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{h\upsilon}{c}=\frac{h\upsilon'}{c}cos\theta+pcos\phi \tag{1.1}$$

$$\tan\phi=\frac{1}{1+\frac{h\upsilon}{m_0c^2}}cot\frac{\theta}{2} \tag{1.2}$$

(1.2)식을 통해 산란광자의 에너지가 입사광자의 에너지 뿐 만 아니라 산락각도에도 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한 콤프턴 산란의 발생확률과 각도분포는 입사광자의 에너지에 반비례하고 원자번호에 비례하여 증가한다[6].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4. 전자쌍생성

전자쌍생성이란 광자가 원자핵의 가까운 곳을 지날 때 핵의 강한 전자기장의 영향으로 한 쌍의 양전자와 음전자를 생성시키는 현상으로서 광자가 전자와 양전자 쌍으로 전환되는 과정이며 광자의 에너지가 물질로 변환되는 현상이다(Fig 3).

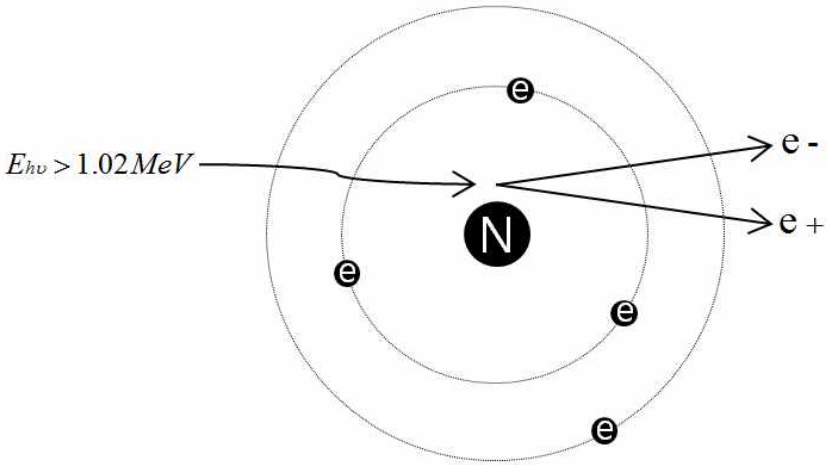


Figure 3. Mechanism of pair production.

입사 광자에 의해 생성된 두 전자의 운동에너지를 각각 E_+, E_-라고 하면 에너지와 질량의 보존법칙에 따라 (1.3)식이 성립된다[7].

$$E_+ + E_- = h\upsilon - 2m_0c^2 \qquad (1.3)$$

따라서 전자쌍생성이 일어나기 위해서는 입사광자의 에너지가 2개의 전자 정지질량에 해당하는 에너지 1.02 MeV보다 커야 한다. 전자와 양전자는 전리 및 여기를 반복하며 물질 내에서 점차 에너지를 잃고 가까운 전자와 결합하여 소멸하게 되며, 에너지가 0.51 MeV인 소멸 방사선 2개를 각각 반대 방향으로 방출한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5. 광핵반응

광핵반응이란 높은 에너지의 광자와 원자핵과의 상호작용이며 광자의 에너지를 원자핵에 주어 소멸되고 원자핵에서는 중성자, 양자, α입자 등이 방출되는데 높은 에너지의 광자가 원자핵에 흡수되어 입자를 방출하는 현상이다. 광자의 에너지는 질량을 가지고 있지 않기 때문에 광자의 운동에너지만을 핵반응에 공급하므로, 광자의 에너지는 방출될 입자의 결합에너지보다 커야 한다.

제2절. 감마선의 차폐

감마선이 물질을 투과 시 투과 강도는 지수법칙에 따라 감소하는데 이는 좁은 평행선속이거나 흡수체가 얇은 경우에 적용된다[8]. 따라서 감마선 투과 강도 I는 (1.4)식과 같은 지수감쇠식으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1.4}$$

여기서 I는 감마선의 초기 강도, $e^{-\mu x}$는 광자가 두께가 x인 물질을 아무런 상호작용을 일으키지 않고 통과하는 확률이며, μ는 감쇠계수를 나타낸다. 감마선이 물질 속에 들어가서 물질의 원자와 상호작용을 하여 에너지를 잃는 과정은 주로 고전산란, 광전효과, 컴프턴 효과 및 쌍생성, 광핵반응 등이 나타나는데 이 과정들은 서로 독립적으로 일어나며 따라서 감쇠계수 μ는 각 과정의 감쇠 성분들의 합으로 주어진다[9]. 이때 고전산란은 원자번호가 낮은 물질에 있어서 저에너지를 제외하고는 기여하는 바가 상대적으로 작기 때문에 일반적으로 무시할 수 있으며, 광핵반응 또한 한정된 범위의 에너지 현상이므로 전체 감쇠계수에 차지하는 비율은 극히 작다. 감마선이 핵붕괴 시 보통 MeV 영역의 에너지가 방출되는데 이 에너지 영역에서는 광전효과, 콤프턴효과 및 전자쌍생성이 주로 일어난다. 따라서 감쇠계수 μ는 (1.5)식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \tau + \sigma + \pi \tag{1.5}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서 τ는 광전효과에 따른 감쇠계수, σ는 콤프턴효과에 따른 감쇠계수, π는 전자쌍생성에 의한 감쇠계수이다. 이 때 광전효과, 콤프턴효과 및 전자쌍생성이 지배적으로 나타나는 감마선 에너지 영역은 다음과 같은 그림으로 나타낼 수 있으며(Fig 4)[10], 광전효과는 0.1 ~ 0.5 MeV에서, 컴프턴 효과는 0.1 ~ 10 MeV, 전자쌍생성은 1.02 MeV에서 주로 나타난다는 것을 알 수 있다.

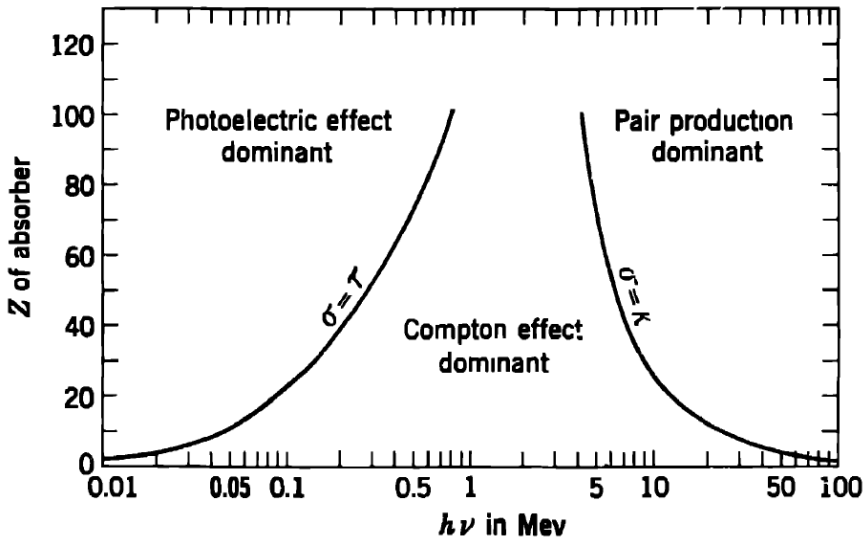


Figure 4. The relative importance of the major type of gamma-ray interaction[10].

감마선의 투과력은 일반적으로 광자의 에너지에 따라 증가되지만 높은 에너지에서 전자쌍생성이 주작용을 하면 오히려 투과력은 감소되며, 물질의 원자번호에는 비례한다. 즉 감쇠계수는 감마선의 에너지, 물질의 밀도, 원자번호, g당 전자 수에 따라 결정되며, 감마선의 에너지가 증가하면 감쇠계수는 감소하고 동일한 에너지에서는 물질의 밀도, 원자번호, g당 전자 수에 따른다.

이와 같은 감쇠계수에 있어서 물질의 두께를 cm 단위로 측정하면 μ는 cm^{-1} 단위가 되며, 이것을 선형흡수계수(linear absorption coefficient) μ 이라고 한다. 또한 선형흡수계수를 물체의 밀도로 나눈 μ/ρ를 질량흡수계수(mass absorption coefficient)라 하며, cm^2/g 단위로 나타낸다. 이것은 cm^2/g의 두께의 물질의 층에 의하여 감마선이 감쇠되는 비율이며, 방사선의 감쇠는 물질과의 상호작용에 의한 것이므로 물질 고

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유의 값을 갖는다. 질량감쇠계수는 물질의 상태와 관계없이 물질에서 이루어지는 감쇠량이며, 시료물질의 밀도에는 영향을 받지 않는다[11]. 또한 콤프턴효과가 주로 작용하는 광자에너지 범위에서 대부분의 물질의 질량감쇠계수는 거의 같은 값을 나타내는데, 이는 콤프턴효과가 g당 전자 수에 의존하기 때문이다.

만일 차폐체가 두껍거나 넓은 선속일 때에는 차폐체 내에서 산란선이 많이 발생하여 추가로 측정기에 도달되므로 지수법칙에 따른 값보다 많이 지시하게 된다[12]. 그러므로 차폐체가 두껍거나 넓은 선속에서는 산란선을 고려하여 축적인자 B를 (1.6)식과 같이 보정하여야 한다.

$$I = BI_0e^{-\mu x} \tag{1.6}$$

축적인자 B는 방사선의 에너지, 통과한 매질, 선원과 매질의 기하학적 배치에 관계된다[13]. 축적인자는 방사선의 에너지와 매질의 두께와 선형감쇠계수의 곱인 μx의 표로 주어지며, (1.7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{\text{한 점에서 총 광자수에 관련된 양}}{\text{동일한 점에서 비산란 광자만이 관련된 양}} \tag{1.7}$$

일반적으로 선원과 검출기 표면사이의 거리가 짧을 때나 콜리메이터를 사용할 때 발생되는 산란선이 축적인자에 영향을 줄 수 있다. 또한 축적인자는 낮은 에너지에서는 작고 에너지와 함께 증대되지만 어느 에너지에서 최대치에 도달하며 그 이상 에너지가 증가하면 다시 감소한다[14].

제3절. 엑스선의 차폐

엑스선의 물질과의 상호작용 또한 감마선의 물질과의 상호작용과 동일하나, 감마선원에서 방출되는 감마선은 그 에너지 분포를 알 수 있으나 X선 발생장치에서 발생되는 X선은 그 에너지 분포를 정확하게 분석하기가 매우 어렵다[15]. 이는 다양한 에너지를 포함하는 연속 엑스선의 물질과의 상호작용이 감마선과 같은 단일 에너지 광자의 감약

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

과는 달리 복잡하기 때문이다. 일반적으로 연속 엑스선은 최대에너지의 1/2~1/3에 상응하는 평균에너지를 갖게 되며, 물질을 통과하면서 선질 및 선량의 변화를 일으킨다. 연속 엑스선도 물질과의 상호작용을 통해 흡수나 산란을 일으키며 감약되지만 일정하지 않고, 저에너지 광자가 보다 급격한 감소를 보이므로 선질에 있어 변화가 발생한다. 따라서 엑스선은 그 에너지 스펙트럼이 연속적이므로 감마선의 경우처럼 지수감쇠식에 의하여 감쇠현상을 평가하기가 어려우므로, 일반적으로 NCRP Report No. 49에서 제시하는 투과계수와 경험적인 실험 자료로 이루어진 감쇠곡선을 이용하여 엑스선의 물질과의 상호작용과 감쇠현상을 설명하고 차폐 계산을 수행하게 된다.

NCRP Report No. 49에서는 비관심지점은 차폐하여 관심지점만을 향하는 방사선인 일차선 (Primary beam)과 일차선이 물체와 상호작용하여 산란되어 영향을 미치는 방사선인 산란선 및 차폐체로부터 누설되어 영향을 미치는 방사선인 누설선을 일컫는 이차선(Secondary beam)으로 구분하여 투과계수를 제시하고 있다. 따라서 엑스선에 대한 차폐는 일차선을 차폐하기 위한 일차 방벽과 산란선 및 누설선과 같은 이차선을 차폐하기 위한 이차 방벽으로 구분된다[Fig 5].

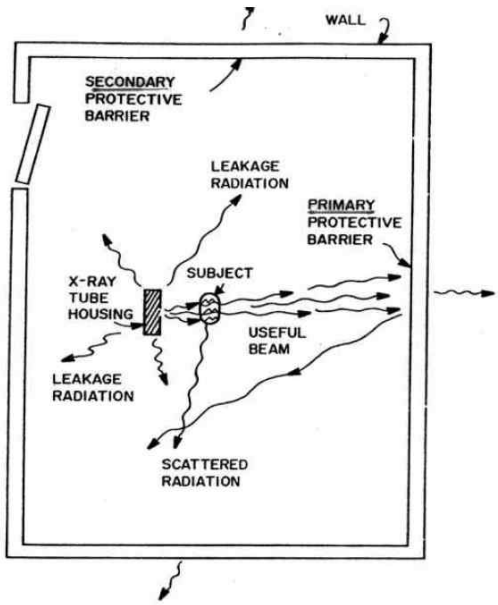


Figure 5. Shielding design model of X-ray room[16].

투과계수 K 란 물질을 통과하기 전의 방사선과 물질을 통과하고 난 후의 방사선의 비율을 말한다. 일차선의 투과계수 K_{ux}는 (1.8)식과 같이 나타낼 수 있다[16].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$K_{ux} = \frac{d^2 P}{WUT} \tag{1.8}$$

(1.8)식에서 d는 선원-관심지점의 거리(m), P는 허용선량률($rem/week$), W는 이용부하 ($mA-\min/week$), U는 가동률, T는 점유도이다.

누설선의 투과계수 B_{LX} 는 (1.9)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{LX} = \frac{1000\, P\, (d_{\sec})^2}{WT} \tag{1.9}$$

(1.9)식은 500 kV 이상의 치료용 장비에 해당되며, P는 허용선량률($rem/week$), $d_{\sec}$는 선원-관심지점의 거리(m), W는 이용부하($mA-\min/week$), T는 점유도이다.

$$B_{LX} = \frac{P\, (d_{\sec})^2 60\, I}{WT} \tag{1.10}$$

(1.10)식은 500 kV 이하의 치료용 장비에 해당되며, P는 허용선량률($rem/week$), $d_{\sec}$는 선원-관심지점의 거리(m), I는 전류(mA), W는 이용부하($mA-\min/week$), T는 점유도이다.

$$B_{LX} = \frac{P\, (d_{\sec})^2 600\, I}{WT} \tag{1.11}$$

(1.11)식은 진단용 장비에 해당되며, P는 허용선량률($rem/week$), $d_{\sec}$는 선원-관심지점의 거리(m), I는 전류(mA), W는 이용부하 ($mA-\min/week$), T는 점유도이다.

또한 산란선의 투과계수 B_{SX} 는 (1.12)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{SX} = \frac{P\, (d_{\sec})^2\, (d_{sca})^2 400}{a\, WTF} \tag{1.12}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(1.12)식에서 P는 허용선량률 ($rem/week$), $d_{\sec}$는 선원-물체의 거리 (m), d_{sca}는 물체-관심지점의 거리 (m), P는 허용선량률 ($rem/week$), a는 산란인자, W는 이용부하 ($mA-\min/week$), T는 점유도, F는 조사야 (cm^2) 이다. 산란인자 a는 엑스선 전압과 산란각에 따른 실험적인 값으로서 NCRP Report No. 49에서 제공한다.

위의 식으로 구한 일차선의 투과계수 K_{ux}는 NCRP Report No. 49의 감쇠곡선을 해석하여 차폐 두께를 구할 수 있으며, 누설선의 투과계수 B_{LX} 및 산란선의 투과계수 B_{SX}는 각 해당 그래프를 해석하여 차폐 두께를 구한 후 최대 두께를 결정한다.

제4절. LabVIEW

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)는 내셔널 인스트루먼츠의 시각 프로그래밍 언어를 위한 시스템 디자인 플랫폼이자 개발 환경이며, 그래픽 언어는 "G"로 명명되어 있으며, G-code와는 구별된다[17]. 내셔널 인스트루먼츠사는 1986년 매킨토시를 기반으로 LabVIEW 1.0을 출시한 이래 기술의 발달과 다양한 DAQ (Data acquisition) 보드를 개발하며 현재까지 다양한 분야의 많은 유저를 확보하고 있다[18]. LabVIEW는 1986년 출시된 이래로 유닉스, 리눅스, 마이크로소프트 윈도우, MacOS를 포함하는 여러 가지 운영 체제의 인스트루먼트 컨트롤, 산업 자동화에 사용되고 있다.

랩뷰는 단수VI (Virtual Instruments)를 통해서 프로그래밍이 완성되며, 실질적으로 구형하는 파일의 확장자도 VI이다[19]. 랩뷰의 구성은 프런트 패널(Front Panel)과 블록 다이어그램(Block diagram)으로서, 프런트 패털은 다양한 형태의 컨트롤(control)과 인디케이터(indicator)를 제공하고 있다(Fig 6). 컨트롤을 통해 데이터를 입력할 수 있으며, 입력한 데이터를 인디케이터를 통해 결과값을 확인할 수 있다. 사용자는 이러한 컨트롤과 인디케이터를 이용하여 데이터를 처리할 수 있다. 블록 다이어그램은 함수를 이용하여 알고리즘을 작성하는 부분으로서, 다양한 함수(VI)들이 존재하여 기본적인 사칙연산부터 데이터를 불러들이는 경로 함수, 필요한 만큼 반복할 수 있는 반복문, 조건에 따라 처리를 다르게 하는 조건문, 신호의 스펙트럼을 분석할 수 있는 함수까지 다양한 함수를 제공하고 있다(Fig 7). 또한 필요할 경우 기본 제공 함수를 조

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

합하여 사용자 정의 함수로 만들어 사용할 수 있으며, 이러한 기본적인 기능을 내장 함수(built-in function)로 제공하고 있어서 프로그래밍이 용이하다.

무엇보다도 랩뷰는 그래픽 기반 프로그래밍 언어이기 때문에 비교적 간단하게 버튼(button), 그래프, 경고창 등 그래픽 화면을 만들고 수정할 수 있다[20]. 따라서 시각적 요소 제작에 필요한 기본 틀을 제공하는 랩뷰를 이용하면 보다 빠르고 간단하게 프로그래밍을 할 수 있으며, 사용자가 사용하기에 용이하도록 화면을 구성할 수 있다.

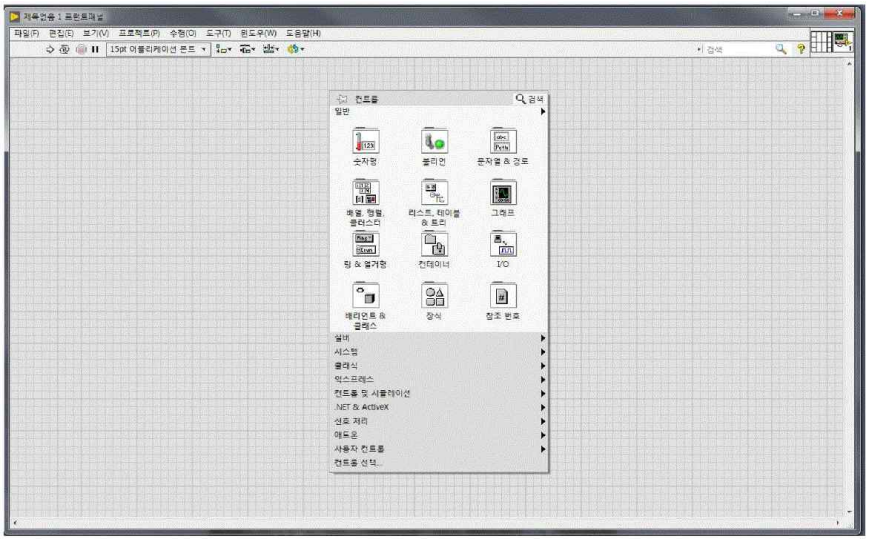


Figure 6. Front panel of LabVEIW.

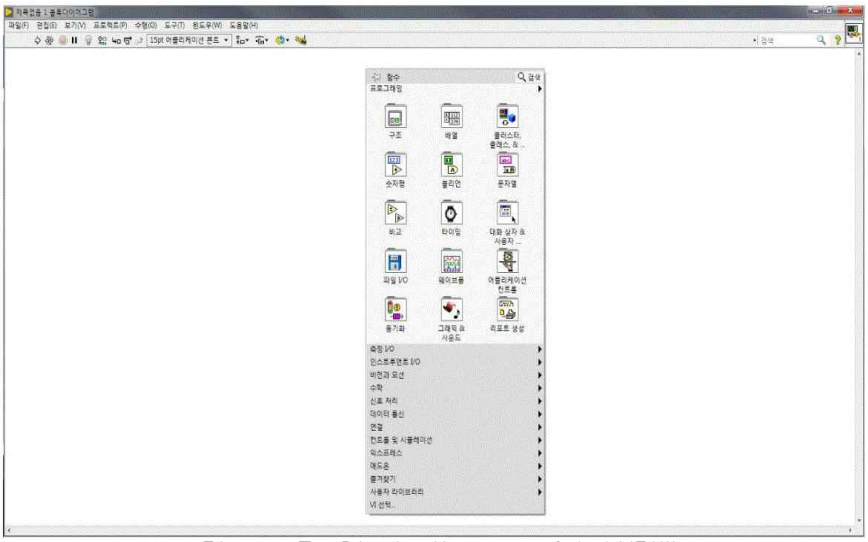


Figure 7. Block diagram of LabVEIW.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장. 연구대상 및 방법

제1절. 감마선의 차폐 계산

1. 차폐 대상

감마선원은 산업, 의료 등에서 가장 많이 사용하는 선원으로서, 본 연구에서는 감마선원을 차폐 대상으로 하였다. 또한 단일 핵종 감마선원 뿐만 아니라 다수의 감마선원으로 구성된 복합 감마선원을 포함하였으며, 차폐 계산 시 감마 선원은 점선원으로 가정하였다.

2. 차폐 설계 목표

차폐 설계 목표는 오늘날의 원자력안전법을 만족 하는 차폐 설계기준 방사선량에 따라 결정하였다. 원자력안전위원회 고시 방사선 방호 등에 따른 기준 제13호에는 차폐물에 따른 설계기준이 다음과 같이 명시되어 있다[21].

1. 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소는 연간 방사선량이 20 mSv를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 1 mSv를 초과하지 아니 하여야 한다.

2. 사용시설 등의 경계에 인접하여 사람이 거주하는 구역은 연간 방사선량이 1 mSv를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 0.1 mSv를 초과하지 아니하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 방사선관리구역에 해당하는 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소를 기준으로, 방사선작업종사자의 선량한도인 20 mSv/y에 연간 작업 시간인 50주를 고려하여 차폐 설계기준을 만족 하는 주간 방사선량률을 0.4 $mSv/week$ 로 적용하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 감마선의 차폐 계산식

프로그램에 적용하는 차폐 계산식은 감마선의 지수감쇠식을 이용하였다. 감마선에 대한 차폐 두께를 계산하기 위해서 먼저 관심지점에 대하여 차폐체가 없는 경우의 예상 방사선량률을 구한 다음, 차폐체에 따른 차폐 두께를 적용한 후의 예상 방사선량률이 차폐 설계 목표를 만족하는 적절한 차폐 두께를 구하도록 하였다.

차폐체가 없는 경우 관심 지점에서의 예상 방사선량률은 (2.1)식과 같다[22].

$$I_0 = \Gamma \frac{Q}{d^2} \tag{2.1}$$

(2.1)식에서 I_0는 차폐체가 없는 경우 관심지점에서의 예상 방사선량률(mSv/h), Γ는 유효선량률 상수($mSv \cdot m^2/MBq \cdot hr$), Q는 감마선원의 사용량(MBq), d는 선원-관심지점의 거리이다.

차폐체의 종류에 따른 축적인자 B 는 선형보간법에 따라 보정한 후, 각각의 축적인자를 곱하여 최종 축적인자를 구하였다. 또한 차폐체의 종류에 따른 선형감쇠계수는 지수보간법에 따라 보정한 후 합산하였다. 이러한 축적인자와 선형감쇠계수를 적용한 차폐 후의 방사선량률은 (2.2)식과 같다.

$$I = B I_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3)} \tag{2.2}$$

(2.2)식에서 I는 차폐 후의 방사선량률(mSv/h), B는 각 차폐체의 축적인자의 곱, I_0는 차폐체가 없는 경우 관심 지점에서의 예상 방사선량률(mSv/h), $\mu_1 x_1$은 납의 선형감쇠계수와 차폐 두께의 곱, $\mu_2 x_2$은 철의 선형감쇠계수와 차폐 두께의 곱, $\mu_3 x_3$은 콘크리트의 선형감쇠계수와 차폐 두께의 곱이다. 또한 차폐 후의 방사선량률이 차폐 설계 목표를 만족하는지 평가하기 위해 주간 예상 방사선량률을 구하였다. 주간 예상 방사선량률에는 차폐 후의 방사선량률에 주간작업시간과 점유도를 고려하여 계산하도록 하였다. 이러한 차폐 후의 주간 예상 방사선량률은 (2.3)식과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$P = I \times W \times T \quad (2.3)$$

(2.3)식에서 P는 차폐 후의 주간 예상 방사선량률($mSv/week$), I는 차폐 후의 방사선량률(mSv/h), W는 감마선원의 주간사용시간($h/week$), T는 점유도이다.

4. 주요 인자의 적용

가. 유효선량률

유효선량률이란 방사성동위원소의 감마선원에 대한 세기를 나타내는 상수로서 1 Ci의 점선원으로부터 공기 중에 1 m 떨어진 점에 대한 조사선량률을 R/h로 표시한 값이다. 이를 SI 단위를 사용하여 1 MBq의 점선원으로부터 공기 중에 1m 떨어진 점에 대한 조사선량률을 mSv/h로 표시한다.

본 연구에서의 감마선원의 차폐 계산식에서는 30 cm거리에서의 점선원의 외부선량률을 적용하였다[23]. 제공되는 외부선량률은 30 cm거리에서의 조사선량률이므로 1 m거리에서의 조사선량률로 환산하여 차폐 계산식에 적용하였다.

나. 선형감쇠계수

질량감쇠계수는 1 g/cm의 두께의 물질의 층에 의하여 감마선이 감쇠되는 비율이며 선형감쇠계수는 이 질량감쇠계수와 차폐체의 밀도를 곱한 값이다. 본 연구에서는 Table 1과 같은 납, 철 및 콘크리트의 질량감쇠계수를 적용하였다[22]. 질량감쇠계수표는 MeV 단위의 에너지에 따라 나타나 있으며, 차폐체에 따라 납, 철, 콘크리트 각각의 질량감쇠계수로 구성되어 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1. Mass attenuation coefficients[22]

Material	Energy (MeV)																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
Lead	5.29	1.84	0.896	0.356	0.208	0.145	0.114	0.0836	0.0684	0.0569	0.0512	0.0457	0.0421	0.0420	0.0426	0.0436	0.0459	0.0489
Iron	0.344	0.183	0.138	0.106	0.0919	0.0828	0.0762	0.0664	0.0595	0.0531	0.0485	0.0424	0.0361	0.0330	0.0313	0.0304	0.0295	0.0294
Concrete	0.169	0.139	0.124	0.107	0.0954	0.0870	0.0804	0.0706	0.0635	0.0567	0.0517	0.0445	0.0363	0.0317	0.0287	0.0268	0.0243	0.0229

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1에는 특정 에너지에 대해서만 그에 따른 질량감쇠계수가 제공되어 있으므로 보다 정확한 차폐 계산을 위해서는 표에서 제공된 에너지 외의 질량감쇠계수를 산출해야 할 필요성이 있다. 그러므로 본 연구에서는 보간법을 이용하여 차폐 계산하고자 하는 핵종의 다양한 에너지에 부합하는 질량감쇠계수를 산출하였다. 보간법에는 여러 가지 방법이 있는데 일반적으로 선형보간법과 지수보간법 등이 사용된다. 선형보간법은 2차원 그래프 상의 양 끝 값만 주어졌을 때 그 사이에 위치한 임의의 값을 직선거리에 따라 선형적으로 계산하는 것이다[24]. 지수 보간법은 함수 형태가 직선이 아닌 로그함수의 형태일 경우로서 원래의 함수를 변형시켜 직선의 함수로 전환한 뒤 선형보간법을 적용하는 방법이다. 본 연구에서는 납, 철, 콘크리트의 질량감쇠계수의 데이터의 흐름을 그래프로 나타낸 후 그래프의 형상을 통해 적절한 보간법을 찾고자 하였다(Fig 8).

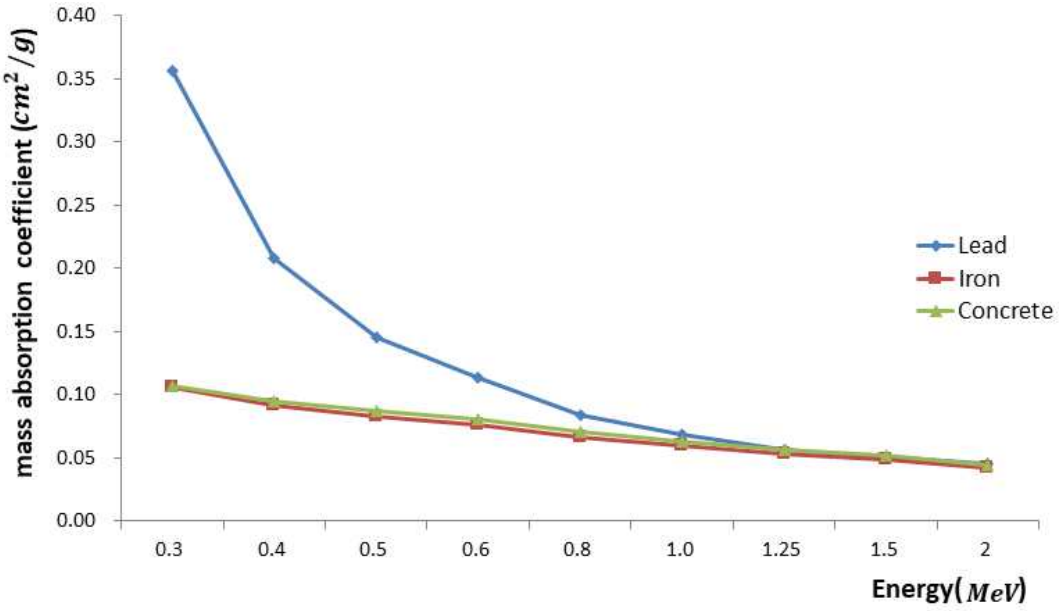


Figure 8. Data flow of mass attenuation coefficients.

그래프의 형상은 곡선 형태로서 특히 납의 경우 로그함수 그래프의 형태를 나타내고 있다. 따라서 질량감쇠계수는 지수보간법을 이용하여 구하고자 하는 에너지의 질량감쇠계수를 구하였다. 질량감쇠계수의 에너지를 보정하는데 적용한 지수보간법의 (2.4) 식은 다음과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$y_f = \left(y_1 e^{\left(-\frac{\ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{x_2 - x_1} \cdot x_1\right)} \right) \cdot e^{\left(\frac{\ln\left(\frac{y_2}{y_1}\right)}{x_2 - x_1} \cdot x_f\right)} \quad (2.4)$$

y_f은 구하고자 하는 μ/ρ값, y_1은 x_1에 해당하는 μ/ρ값, y_2는 x_2에 해당하는 μ/ρ값, x_1은 x_1의 에너지, x_2는 x_2의 에너지, x_f는 구하고자 하는 에너지이다. (2.4)식으로 보정한 감마선원의 에너지에 따른 질량감쇠계수에 납, 철, 콘크리트의 밀도를 각각 곱하여 선형감쇠계수를 구하였다.

다. 축적인자

감마선의 지수감쇠식은 좁은 선속 또는 좋은 기하학적 구조에서의 측정에 의한 것이므로 넓은 선속에서는 차폐체가 두껍거나 넓은 선속에서는 산란선의 영향을 고려한 축적인자를 보정해야 한다. 그러나 보통 실제적인 측정은 감마선에 대한 엄격한 콜리메이션이 어려우며 다양한 기하학적 구조 하에서 이루어지는 경우가 많다[25]. 따라서 대부분의 상황에서 축적인자를 고려할 필요가 있으므로 본 연구에서는 축적인자를 고려한 차폐계산을 수행하였다.

축적인자는 지금까지 많은 연구자들에 의해 여러 가지 실험식이 발표되었다. 이 중 Taylor 근사식은 차폐 실험에 의한 결과나 수송 방적식에 Monte carlo 또는 각분할법에 의한 비교적 정밀한 계산에 의하여 얻어진 것이다[26]. 본 연구에서는 Table 2 ~ Table 4와 같이 실험값으로 제공하는 납, 철, 콘크리트의 축적인자를 적용하였다[27]. 축적인자 표는 감마선원의 에너지에 따른 μx값으로 이루어져 있으며 μx값은 선형감쇠계수와 차폐체 두께의 곱을 말한다. 즉 차폐할 차폐체의 두께 변화에 따라 축적인자가 결정된다. 그러나 축적인자 표에서는 모든 에너지와 μx값에 대한 축적인자를 제공하지 않으므로, 계산하고자 하는 감마선원의 에너지와 사용자가 선택하는 차폐 두께에 따른 μx값을 만족하는 축적인자를 구하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 선형감쇠계수와 마찬가지로 보간법을 이용하여 특정 에너지와 μx값에 해당하는 축적인자를 구하고자 하였다.

본 연구에서는 축적인자 데이터의 흐름을 그래프로 나타내어 제공된 에너지 외에 알고자 하는 특정 에너지와 μx값에 해당하는 축적인자를 구하는데 적절한 보간법을

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

찾고자 하였다. Figure 9 ~ Figure 11 은 에너지와 μx값에 따른 납, 철, 콘크리트의 축적인자를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 2. Buildup factor of lead[27]

μx	Energy (MeV)									
	0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.5	1.51	1.14	1.2	1.21	1.23	1.21	1.25	1.26	1.3	1.28
1.0	2.04	1.24	1.38	1.4	1.4	1.36	1.41	1.42	1.51	1.51
2.0	3.39	1.39	1.68	1.76	1.73	1.67	1.71	1.73	1.9	2.01
3.0	5.6	1.52	1.95	2.14	2.1	2.02	2.05	2.08	2.36	2.63
4.0	9.59	1.62	2.19	2.52	2.5	2.4	2.44	2.49	2.91	3.42
5.0	17	1.71	2.43	2.91	2.93	2.82	2.88	2.96	3.59	4.45
6.0	30.6	1.8	2.66	3.32	0.4	3.28	3.38	3.51	4.41	5.73
7.0	54.9	1.88	2.89	3.74	3.89	3.79	3.93	4.13	5.39	7.37
8.0	94.7	1.95	3.1	4.17	4.41	4.35	4.56	4.84	6.58	9.44
10.0	294	2.1	3.51	5.07	5.56	5.61	6.03	6.61	9.73	15.4
15.0	5800	2.39	4.45	7.44	8.91	9.73	11.4	13.7	25.1	50.8
20.0	1.330 E+05	2.64	5.27	9.98	12.9	15.4	19.9	26.6	62	161
25.0	3.340 E+06	2.85	5.98	12.6	17.5	23	32.9	49.6	148	495
30.0	8.870 E+07	3.02	6.64	15.4	22.5	32.6	52.2	88.9	344	1470

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

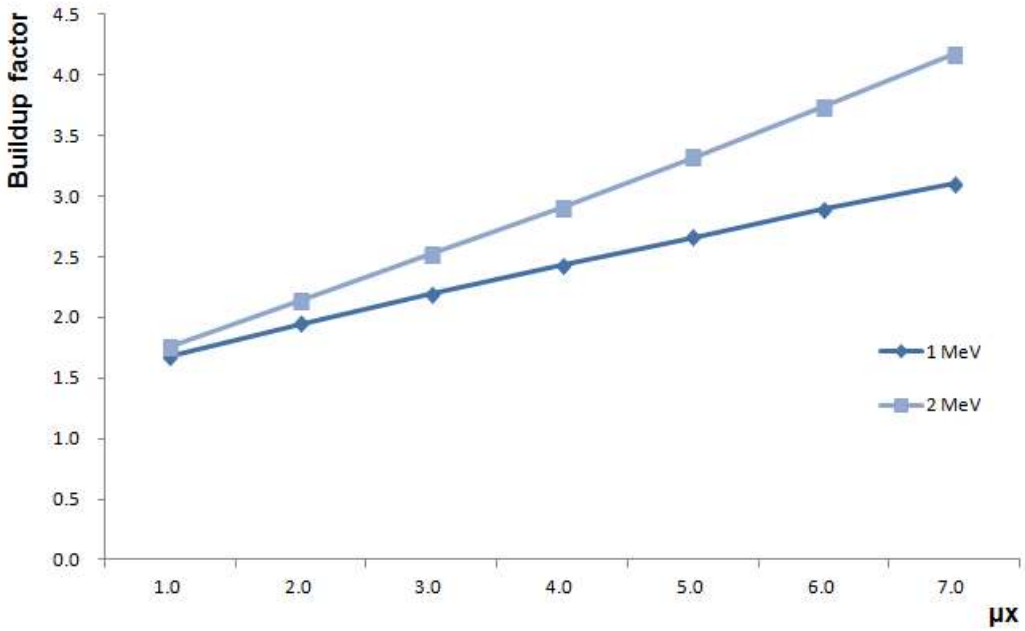


Figure 9. Data flow of lead buildup factor.

Table 3. Buildup factor of iron[27]

μx	Energy (MeV)									
	0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.5	1.26	1.48	1.41	1.26	1.32	1.3	1.27	1.25	1.22	1.19
1.0	1.4	1.99	1.85	1.71	1.64	1.57	1.51	1.47	1.39	1.33
2.0	1.61	3.12	2.85	2.49	2.28	2.12	1.97	1.87	1.71	1.59
3.0	1.78	4.44	4	3.34	2.96	2.68	2.46	2.3	2.04	1.86
4.0	1.94	5.96	5.3	4.25	3.68	3.29	2.98	2.76	2.41	2.16
5.0	2.07	7.68	6.74	5.22	4.45	3.93	3.53	3.25	2.81	2.5
6.0	2.2	9.58	8.31	6.26	5.25	4.6	4.11	3.78	3.24	2.87
7.0	2.31	11.7	10	7.33	6.09	5.31	4.73	4.33	3.71	3.27
8.0	2.41	14	11.8	8.45	6.96	6.05	5.38	4.92	4.2	3.71
10.0	2.61	19.1	15.8	10.8	8.8	7.6	6.75	6.18	5.3	4.69
15.0	3.01	35.1	27.5	17.4	13.8	11.9	10.7	9.85	8.64	7.88
20.0	3.33	55.4	41.3	24.6	19.4	16.8	15.2	14.2	12.9	12.3

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

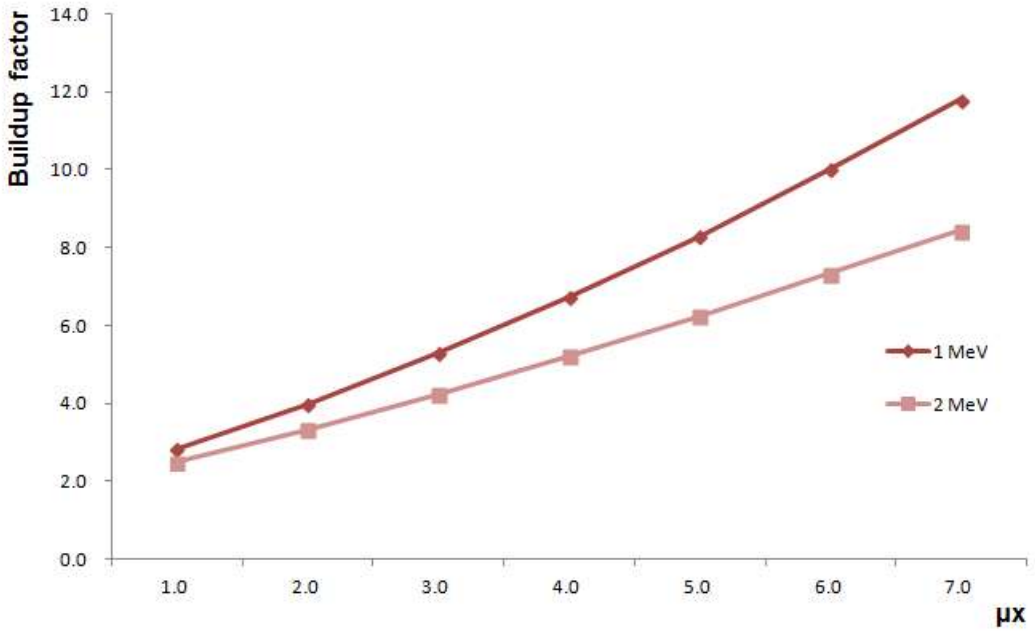


Figure 10. Data flow of iron buildup factor.

Table 4. Buildup factor of concrete[27]

μx	Energy (MeV)									
	0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.5	1.89	1.57	1.45	1.37	1.33	1.31	1.27	1.26	1.22	1.19
1.0	2.78	2.27	1.98	1.77	1.67	1.61	1.53	1.49	1.41	1.35
2.0	6.43	4.03	3.24	2.65	2.18	2.18	2.04	1.93	1.76	1.64
3.0	6.63	6.26	4.72	3.6	2.77	2.77	2.53	2.37	2.11	1.93
4.0	8.8	8.97	6.42	4.61	3.37	3.37	3.03	2.8	2.45	2.22
5.0	11.1	12.2	8.33	5.68	4.61	3.98	3.54	3.25	2.81	2.51
6.0	13.6	15.9	10.4	6.8	5.4	4.6	4.05	3.69	3.16	2.8
7.0	16.3	20.2	12.7	7.97	6.2	5.23	4.57	4.14	3.51	3.1
8.0	19.2	25	15.7	9.18	7.03	5.86	5.09	4.6	3.87	3.4
10.0	25.6	36.4	20.7	11.7	8.71	7.15	6.15	5.52	4.59	4.01
15.0	44.9	75.6	37.2	18.6	13.1	10.5	8.85	7.86	6.43	5.57
20.0	69.1	131	57.1	26	17.7	13.9	11.6	10.2	8.31	7.19
25.0	97.9	203	80.1	33.9	22.5	17.4	14.4	12.7	10.2	8.86
30.0	131.0	290	106	42.2	27.4	20.9	17.3	15.2	12.2	10.6

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

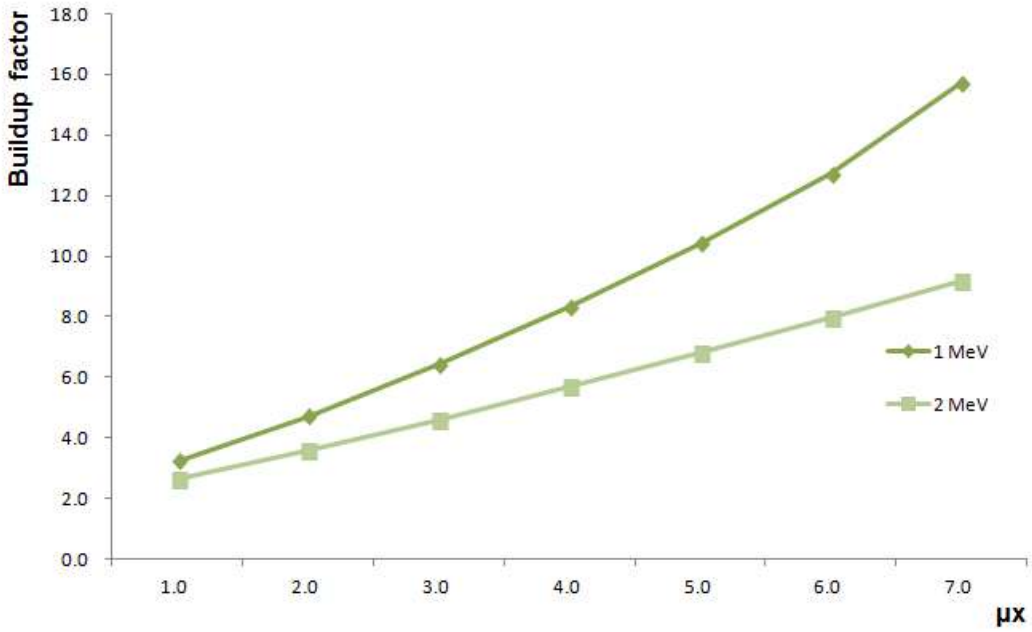


Figure 11. Data flow of concrete buildup factor.

그래프의 형상은 직선 형태로서 선형함수 그래프의 형태를 나타내고 있으므로, 선형보간법을 이용하여 구하고자 하는 에너지와 μx값의 축적인자를 구하였다. 축적인자표는 방사선원의 에너지와 μx값 각각에 보간법으로 보정하여야 하기 때문에 에너지를 보정 후 μx값의 보정을 해주는 방식으로 선형보간법을 적용하였다. 축적인자의 에너지와 μx값을 보정하는데 적용한 선형보간법은 (2.5)식으로 나타낼 수 있다.

$$y_f = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x_f - x_1) \tag{2.5}$$

y_f은 구하고자 하는 축적인자, y_1은 x_1에 해당하는 축적인자, y_2는 x_2에 해당하는 축적인자, x_1은 x_1의 에너지, x_2는 x_2의 에너지, x_f는 구하고자 하는 에너지이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

라. 점유도

점유도란 방사선원을 사용하는 동안 최대한으로 피폭되는 사람이 존재하는 시간의 평균 분율을 말한다. 본 연구에서는 감마선 및 엑스선 차폐 계산 시 Table 5과 같은 NCRP Report No. 151의 점유도를 적용하였으며[28], 프로그램 사용 시 사용자가 적절한 점유도를 선택할 수 있도록 참고자료로 제공하였다. NCRP Report No. 151에서는 방사선원의 사용이 근무주간 동안 비교적 균일하게 분포되는 것으로 가정하면 점유율은 그 사람이 구역을 점유하는 일주일간 근무시간의 분율이라고 정의하였다. 점유율은 상시 머무르지 않는 사람들이 점유하는 시간의 분율이 아닌 상시 머무르는 사람이 점유하는 시간의 분율이다. 대기실은 영업일 동안 항상 점유될 수 있지만 단 한 사람이 연간 50 시간 이상 머무를 가능성은 낮으므로 대기실의 점유율은 매우 낮으며, 비관리구역의 점유율은 대개 1의 값으로 지정된다[29].

Tabel 5. Occupancy factor[28]

장소	점유율 (T)
완전점유구역(어떤 한 사람이 전체시간 점유하는 구역), 행정사무실, 치료관리실, 간호사실, 접수실, 유인대기실, 인근 건물 내 점유 공간	1
인접 치료실, 차폐실 인접 진단실	1/2
복도, 직원라운지, 휴게실	1/5
치료실 도어	1/8
공중화장실, 매점, 저장실, 좌석이 있는 옥외구역	1/20
일시적인 보행자 또는 차량 통행만 있는 옥외구역, 무인주차장, 일시정차구역, 계단, 무인승강기	1/40

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절. 엑스선의 차폐 계산

1. 차폐 대상

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램의 차폐 계산은 진단용 엑스선 발생장치 및 치료용 장치로서 10 MV이하의 장치를 대상으로 하였다.

2. 차폐 설계 목표

차폐 설계 목표가 되는 투과계수 식의 허용선량률 P는 최대허용선량으로서 법적인 규제에 의해 결정된다. 본 연구에서는 사용자가 차폐 기준 선량을 보다 쉽게 인지할 수 있도록 허용선량률을 mSv단위로 나타내었으며, 오늘날의 원자력안전법을 만족하는 차폐 설계기준 방사선량에 따라 허용선량률을 적용하였다. 원자력안전위원회 고시 방사선 방호 등에 따른 기준 제13호에는 차폐물에 따른 설계기준이 다음과 같이 명시되어 있다[21].

1. 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소는 연간 방사선량이 20 mSv를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 1 mSv를 초과하지 아니 하여야 한다.

2. 사용시설 등의 경계에 인접하여 사람이 거주하는 구역은 연간 방사선량이 1 mSv를 초과하지 아니 하여야 하고 1주당 방사선량은 0.1 mSv를 초과하지 아니하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 방사선관리구역에 해당하는 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소를 기준으로, 방사선작업종사의 선량한도인 20 mSv/y에 연간 작업시간인 50주를 고려하여 허용선량률을 0.4 $mSv/week$로 적용하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 엑스선의 차폐 계산식

NCRP Report No. 49에 따르면 사용하고자 하는 방향으로 방출되는 방사선을 일차선이라 하며, 그 밖에 산란 및 누설로 인한 방사선은 이차선으로 구분할 수 있다[16]. 즉 엑스선이 방출되는 방향의 지점은 일차 방벽 설계를 하여야 하며, 엑스선이 물체나 벽으로부터 산란되는 산란선 및 엑스선 튜브로부터 누설된 누설선이 향하는 지점은 이차 방벽 설계를 하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 엑스선의 차폐 계산을 일차 방벽과 이차 방벽으로 구분하여 계산하였다.

NCRP Report No. 49에 따른 엑스선의 차폐이론은 일차선 및 이차선에 따른 투과계수를 구한 후 NCRP Report No. 49에서 제공하는 에너지와 차폐물질에 따른 감쇠곡선에 따라 차폐 두께를 구하는 것이다. 그러나 감쇠곡선에 의하여 구하는 방법은 감쇠곡선을 해석하는 것에 어려움이 있으며, 해석하는 사람에 따라 오차가 발생할 수 있다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 (2.6)식과 같이 감쇠곡선을 함수식으로 나타낸 계산식을 이용하여 엑스선의 차폐 계산을 수행하였다[30]. A. C. Chamberlain과 W. J. Strydom의 식은 투과계수와 회귀계수로 이루어져 있으며, Table 6 및 Table 7과 같이 납과 콘크리트에 대한 회귀계수를 제공하고 있다. 이 때 회귀계수가 특정 에너지에 따른 값만 제공되어 있어 다양한 에너지에 적용이 어려우므로 본 연구에서는 보간법을 이용하여 납과 콘크리트에 대해 다양한 에너지에서의 회귀계수가 산출될 수 있도록 하였다.

$$X = \frac{a + b\log_{10} K_{UX}}{1 + c\log_{10} K_{UX} + \dfrac{d}{\log_{10} K_{UX}}} \tag{2.6}$$

(2.6)식에서 X는 차폐 두께, K_{UX}는 투과계수이며 a, b, c, d는 납과 콘크리트에 대한 회귀계수이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6. The correction value of the regression coefficient for lead[30]

	Voltage [kVp]							
	50	70	100	125	150	200	250	300
a	-0.1120	-0.0979	-0.3006	-0.4334	-0.5065	-0.7429	1.6927	4.5882
b	-0.0018	0.1779	-0.3416	-0.4693	-0.5324	-0.8495	-3.4446	-6.6726
c	0.0840	0.0909	0.0769	0.0595	0.0523	0.0465	0.0245	0.0246
d	3.8378	6.2257	0.7113	0.7473	0.8736	0.7321	-4.6073	9.5457
r^2	0.9992	0.9997	0.995	0.992	0.995	0.986	0.9997	0.997

Table 7. The correction value of the regression coefficient for concrete[30]

	Voltage [kVp]							
	50	70	100	125	150	200	250	300
a	-0.3699	6.1676	6.4109	5.2112	4.9678	3.9415	4.4617	4.8671
b	-0.5097	-7.4992	-16.3647	-11.5130	-9.5179	-8.3822	-9.429	-10.354
c	0.0867	-0.0306	-0.1936	-0.0603	-0.0148	0.0083	-0.0010	-0.0027
d	0.6000	-10.9595	-9.9517	-4.6038	-2.7060	-0.7994	0-0.5260	-0.3514
r^2	0.995	0.991	0.9997	0.9997	0.997	0.9998	0.9997	0.9999

4. 주요 인자의 적용

가. 투과계수

투과계수는 차폐체를 통과하기 전의 방사선과 차폐체를 통과한 후의 방사선의 비율을 말한다. 일차선의 차폐계산을 위한 투과계수 K_{ux}는 다음과 같은 (2.7)식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 NCRP Report No. 49에서 제공하는 일차선의 투과계수 식에 차폐 설계 목표에 따른 허용선량률인 0.4 $mSv/week$를 적용하였다.

$$K_{ux} = \frac{d^2\, 0.4P}{WUT} \tag{2.7}$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(2.7)식에서 K_{ux}는 일차선의 투과계수, d는 선원-관심지점의 거리(m), W는 이용부하($mA-\min/week$), U는 가동률, T는 점유도이다.

이차선 차폐계산을 위한 산란선의 투과계수 B_{SX}는 다음과 같은 (2.8)식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 NCRP Report No. 49에서 제공하는 산란선의 투과계수 식에 차폐 설계 목표에 따른 허용선량률인 0.4 $mSv/week$를 적용하였다.

$$B_{SX}=\frac{0.4P\,(d_{\sec})^2\,(d_{sca})^2\,400}{aWTF} \tag{2.8}$$

(2.8)식에서 B_{SX}는 산란선의 투과계수, $d_{\sec}$는 선원-물체의 거리 (m), d_{sca}는 물체-관심지점의 거리 (m), a는 산란인자, W는 이용부하 ($mA-\min/week$), T는 점유도, F는 조사야 (cm^2) 이다.

이차선 차폐계산을 위한 누설선의 투과계수 B_{LX}는 다음과 같은 (2.9)식으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 NCRP Report No. 49에서 제공하는 산란선의 투과계수 식에 차폐 설계 목표에 따른 허용선량률인 0.4 $mSv/week$를 적용하였다.

$$B_{LX}=\frac{1000\ 0.4P\,(d_{\sec})^2}{WT} \tag{2.9}$$

(2.9)식은 500 kV이상의 치료용 장비에 해당되며, $d_{\sec}$는 선원-관심지점의 거리 (m), W는 이용부하($mA-\min/week$), T는 점유도이다.

$$B_{LX}=\frac{0.4P\,(d_{\sec})^2 60I}{WT} \tag{2.10}$$

(2.10)식은 500 kV이하의 치료용 장비에 해당되며, $d_{\sec}$는 선원-관심지점의 거리 (m), I는 전류(mA), W는 이용부하 ($mA-\min/week$), T는 점유도이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$B_{LX} = \frac{0.4P\,(d_{\sec})^2 600\,I}{WT} \tag{2.11}$$

(2.11)식은 진단용 장비에 해당되며, $d_{\sec}$는 선원-관심지점의 거리(m), I는 전류(mA), W는 이용부하 ($mA-\min/week$), T는 점유도이다.

위의 식으로 구한 일차선 및 이차선의 투과계수는 엑스선의 에너지와 계산하고자 하는 차폐체에 해당하는 회귀계수를 (2.6)식에 대입하여 각 차폐 두께를 구할 수 있으며, 산란선과 누설선의 차폐 두께의 경우 각각의 차폐 두께를 고려하여 더 큰 값을 차폐 두께로 결정할 수 있다.

나. 산란인자

이차방벽의 투과계수 계산 시 Table 8과 같은 NCRP Report No. 49에서 제공하는 실험값에 의한 산란인자를 적용한다. 이 때 제공되는 산란인자의 에너지와 산란각이 일부만 제공되기 때문에 다양한 에너지 및 산란각에 따른 차폐 계산에 적용할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 (2.5)식의 선형보간법을 이용해 에너지와 산란각을 보정하여 다양한 에너지 및 산란각에서의 산란인자가 산출될 수 있도록 하였다.

Tabel 8. Scattering factor[16]

Voltage (kVp)	Scattering Angle					
	30	45	60	90	120	135
50	0.00500	0.00020	0.00025	0.00035	0.00080	0.00100
70	0.00065	0.00035	0.00035	0.00050	0.00100	0.00130
100	0.00150	0.00120	0.00120	0.00130	0.00200	0.00220
125	0.00180	0.00150	0.00150	0.00150	0.00230	0.00250
150	0.00200	0.00160	0.00160	0.00160	0.00240	0.00260
200	0.00240	0.00200	0.00190	0.00190	0.00270	0.00280
250	0.00250	0.00200	0.00190	0.00190	0.00270	0.00280
300	0.00260	0.00210	0.00200	0.00190	0.00260	0.00280

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 가동률

가동률(U)은 빔이 관심지점으로 향하는 비율로서 방사선기기의 종류와 빔의 방향에 따라 달라지며, 사용자의 사용 형태에 따라서 정하여야 한다. 본 연구에서는 Table 9와 같이 NCRP Report No. 49에서 제공하는 가동률을 참고자료로서 제공한다.

Tabel 9. Use factor[16]

	Radiographic Installations	Therapy Installation
Floor	1	1
Walls	1/4	1/4

라. 가동인자

가동인자란 엑스선 발생장치의 주당 가동 시간으로서, NCRP Report No. 49에서는 전류계가 달린 기기의 경우 사용하는 전류와 주당사용시간을 곱하여 나타내며, MeV 단위의 기기나 감마선원을 사용하는 기기는 1 m거리에서의 $R/week$ 값을 나타낸다[16]. 본 연구에서는 전류와 주당사용시간의 곱으로 가동인자를 계산하였다.

제3절. 프로그램의 설계

감마선 및 엑스선의 차폐 계산을 수행하기 위하여 감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램과 엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 설계하였다. 각 프로그램은 계산에 필요한 인자 및 정보가 저장되어 있는 데이터베이스와 계산을 수행하는 계산화면으로 구성되어 있으며 계산 수행 시 데이터베이스의 정보가 연동되도록 하였다[31][32]. 계산에 필요한 여러 인자들은 데이터베이스에 저장하여 계산화면에 나타나지 않도록 하여 계산화면을 사용 조건의 입력창과 결과 출력창으로 간략하게 구성함으로써, 사용자가 차폐 계산을 수행하는데 용이하도록 하였다. 랩뷰(LabVIEW) 프로그래

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

밍을 통해 간단한 이미지로 화면을 구성하여 사용자가 한눈에 프로그램을 파악하기 쉽도록 입력창 및 출력창을 배열하여 설계하였다.

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램의 설계의 경우 계산하고자 하는 감마핵종을 입력하는 입력창을 5개까지 입력할 수 있도록 하여 단일 감마핵종 뿐만 아니라 여러 감마핵종으로 구성된 복합 감마핵종의 차폐 계산이 가능하도록 설계하였다. 사용자가 차폐 조건에 따라 감마선원의 사용량, 거리, 주간 사용시간, 점유도를 입력할 수 있도록 입력창을 설계하였으며, 복합 감마핵종의 경우 각각의 감마핵종의 거리, 주간 사용시간, 점유도는 동일하므로 다른 입력란과 별도로 배열하고 값이 고정되도록 설계하였다. 또한 사용자가 납, 철, 콘크리트의 차폐체에 대한 차폐 두께를 입력할 수 있도록 입력창을 설계하였다.

위와 같이 사용자가 입력한 사용 조건과 차폐 두께에 따라 차폐 후의 예상 방사선량률이 $mSv/week$ 단위로 계산되어 출력창에 나타나도록 하였다. 출력창에 나타나는 차폐 후의 주간 예상 방사선량률은 사용자가 입력한 감마핵종의 에너지와 차폐 두께에 따른 축적인자를 고려하여 계산된 결과이다. 이러한 차폐 후의 주간 예상 방사선량률이 차폐 기준 선량을 초과하지 않음으로써 차폐 설계 목표를 만족하는지에 대한 여부를 색깔로 나타나도록 하여 사용자가 한눈에 차폐 기준 선량을 만족하는지 알 수 있도록 하였다.

만일 사용자가 입력한 차폐 두께가 차폐 기준 선량을 만족하지 않는다면 사용자는 차폐 기준 선량을 만족할 때까지 차폐 두께를 추가 입력하여 적합한 차폐 두께를 구할 수 있다. 감마선의 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램의 설계에 따른 입력과 출력의 처리 과정을 다음과 같은 흐름도로 나타낼 수 있다(Fig 12).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

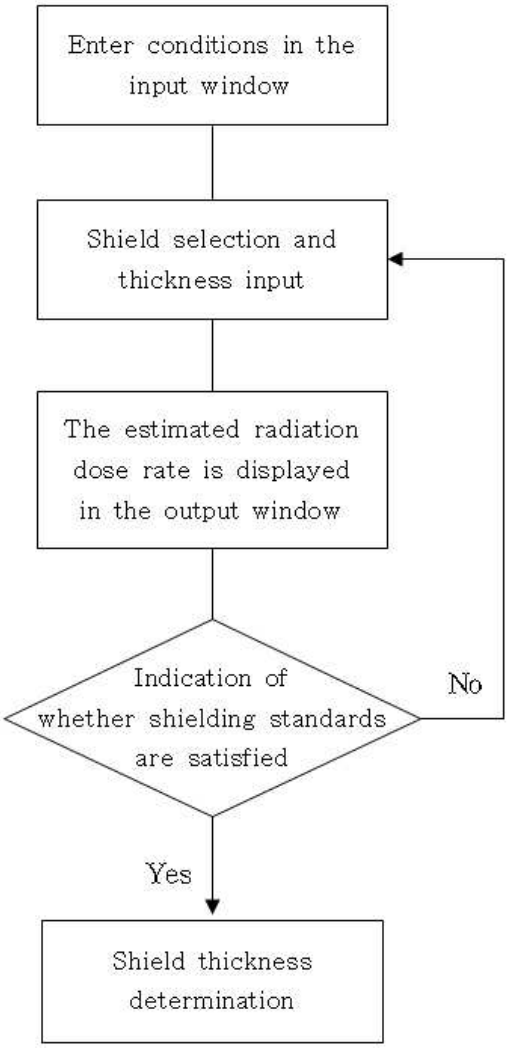


Figure 12. Processing process of input and output according to the design of gamma-ray shielding program.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램의 설계의 경우 사용자가 차폐 계산을 수행하고자 하는 관심 지점에 따라 일차방벽 또는 이차방벽에 의한 계산을 수행할 수 있도록 일차방벽 탭과 이차방벽 탭으로 구분하여 설계하였다. 일차방벽 탭을 선택 시, 사용 조건을 입력할 수 있는 입력창은 전압, 전류, 거리, 주간 사용시간, 가동률, 점유도로 구성되어 있으며 차폐 물질은 납과 콘크리트를 선택할 수 있도록 하였다. 출력창은 차폐 두께와 차폐 후의 예상 방사선량률로 구성되어 있으며 입력창에 입력에 따라 자동 계산되어 출력창에 결과값이 나타나도록 하였다.

이차방벽 탭을 선택 시, 사용 조건을 입력할 수 있는 입력창은 전압, 전류, 선원-관심지점의 거리, 선원-물체의 거리, 물체-관심지점의 거리, 주간 사용시간, 가동률, 점유도, 조사야, 산란각으로 구성되어 있으며 차폐 물질은 납과 콘크리트를 선택할 수 있도록 하였다. 출력창은 차폐 두께와 차폐 후의 예상 방사선량률로 구성되어 있으며 입력창에 입력에 따라 자동 계산되어 출력창에 결과값이 나타나도록 하였다.

또한 일차방벽 및 이차방벽의 차폐 후의 주간 예상 방사선량률이 차폐 기준 선량을 초과하지 않음으로써 차폐 설계 목표를 만족하는지에 대한 여부를 색깔로 나타나도록 하여 사용자가 한눈에 차폐 기준 선량을 만족하는지 알 수 있도록 하였다. 엑스선 차폐 및 방사선량률 평가 프로그램의 설계에 따른 입력과 출력의 처리 과정을 다음과 같은 흐름도로 나타낼 수 있다(Fig 13).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

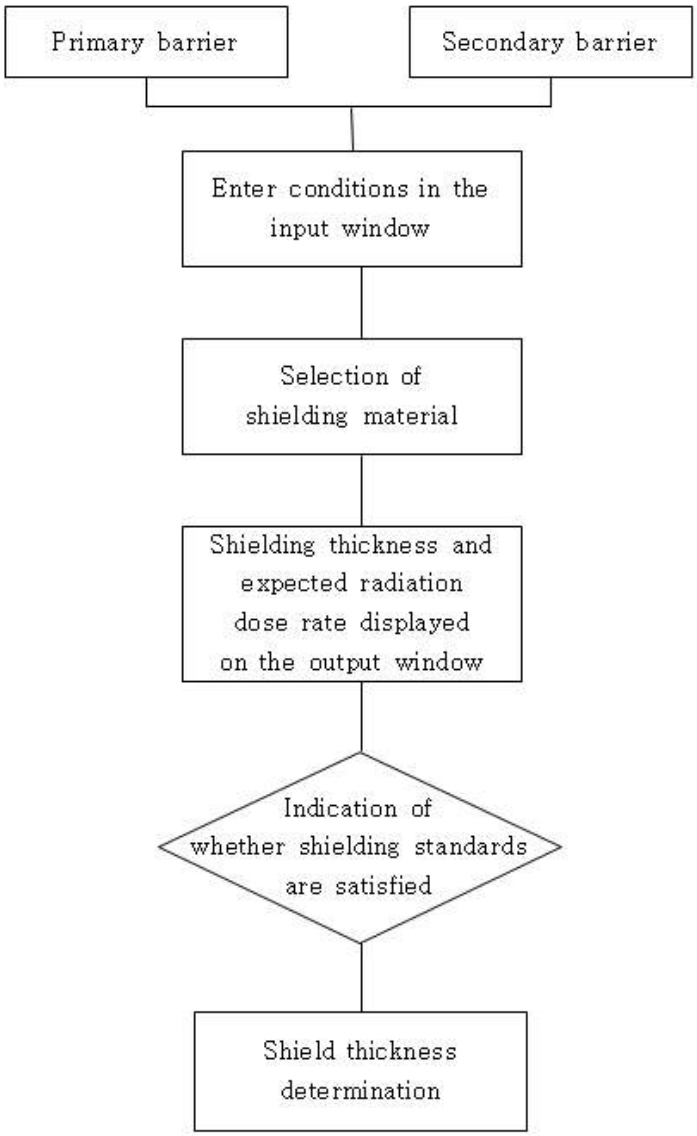


Figure 13. Processing process of input and output according to the design of X-ray shielding program.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장. 결과

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램과 엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 랩뷰 프로그래밍을 이용하여 구축하였으며, 설치 형태로 제공되므로 고가의 랩뷰 프로그램이 없는 사용자도 설치가 가능하다. 프로그램은 각각 데이터베이스와 계산화면으로 구성되어 있으며, 데이터베이스에 저장되어있는 데이터가 계산화면에 연동되어 차폐 계산 시 필요한 데이터를 자동 입력 후 계산되도록 하였다. 데이터베이스에는 데이터 뿐 만 아니라 차폐 계산 시 사용된 표 및 수식이 저장되어있어 사용자가 차폐 계산 시 참고자료로 활용할 수 있도록 하였다.

제1절. 프로그램의 구성

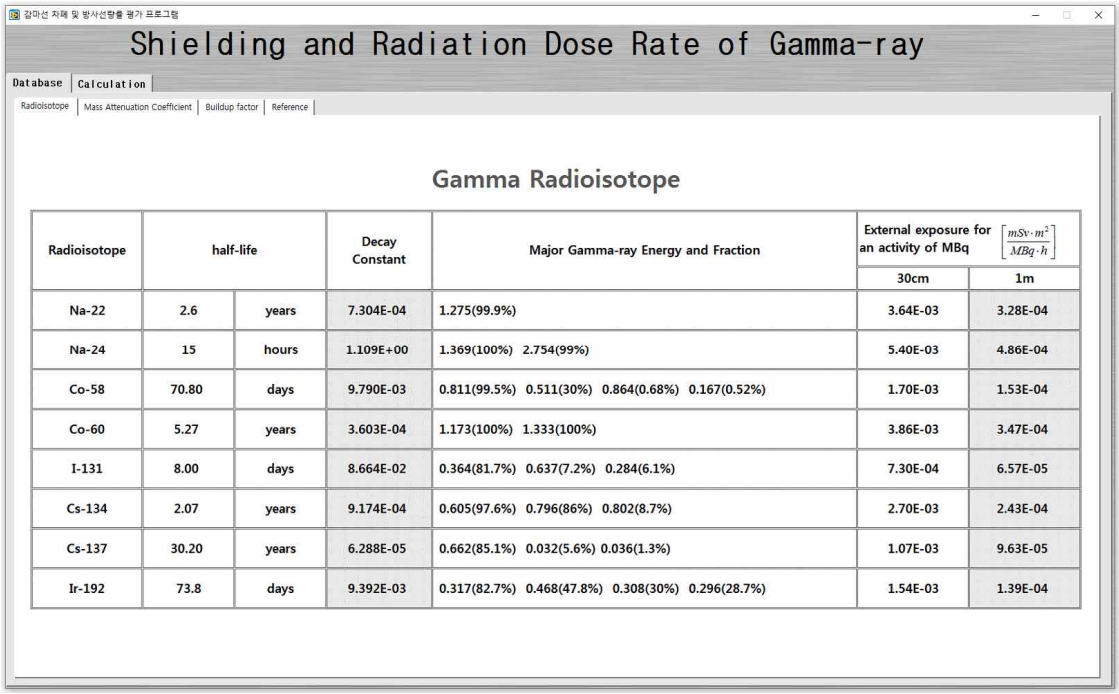
감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 데이터베이스와 계산화면으로 구성하였다. 데이터베이스는 핵종 정보 탭, 질량감쇠계수 탭, 축적인자 탭, 참고자료 탭으로 구성되어 있다.

핵종 정보 탭에는 주로 사용되는 감마핵종의 반감기, 붕괴상수, 에너지, 외부선량율과 같은 핵종 정보가 저장되어 있다(Fig 14). 이 핵종 정보는 계산화면에서 차폐 계산 시 사용자가 입력하지 않아도 자동으로 연동되어있으며 사용자가 추가 가능 하다.

질량감쇠계수 탭에는 계산에 활용된 납, 철, 콘크리트의 질량감쇠계수의 표가 저장되어 있으며 사용자가 참고할 수 있도록 하였다(Fig 15). 축적인자 탭에는 계산에 활용된 납, 철, 콘크리트의 축적인자 표가 저장되어있다(Fig 16).

참고자료 탭에는 그밖에 사용자가 프로그램을 사용할 때 참고할 자료들이 저장되어 있어 프로그램 사용이 보다 용이하도록 하였다(Fig 17). 데이터베이스 탭의 자료들은 차폐 계산 뿐 만 아니라 차폐 교육에도 유용한 자료로 쓰일 수 있도록 하였다.

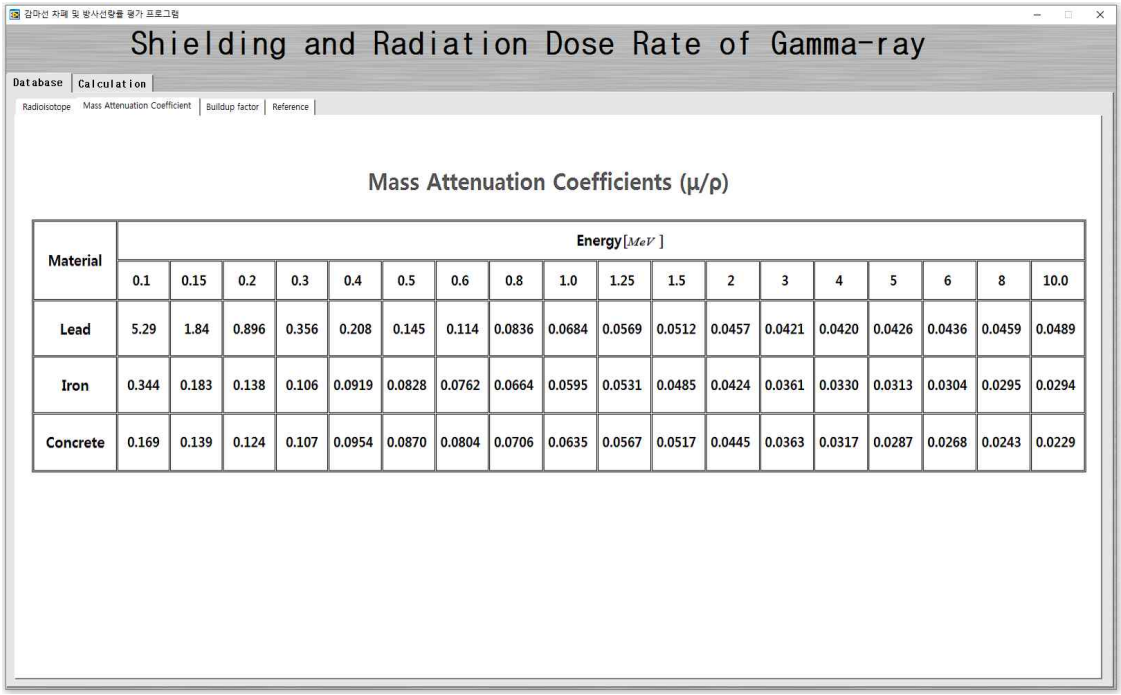
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



Radioisotope	half-life		Decay Constant	Major Gamma-ray Energy and Fraction	External exposure for an activity of MBq $\left[\frac{mSv \cdot m^2}{MBq \cdot h}\right]$	
					30cm	1m
Na-22	2.6	years	7.304E-04	1.275(99.9%)	3.64E-03	3.28E-04
Na-24	15	hours	1.109E+00	1.369(100%) 2.754(99%)	5.40E-03	4.86E-04
Co-58	70.80	days	9.790E-03	0.811(99.5%) 0.511(30%) 0.864(0.68%) 0.167(0.52%)	1.70E-03	1.53E-04
Co-60	5.27	years	3.603E-04	1.173(100%) 1.333(100%)	3.86E-03	3.47E-04
I-131	8.00	days	8.664E-02	0.364(81.7%) 0.637(7.2%) 0.284(6.1%)	7.30E-04	6.57E-05
Cs-134	2.07	years	9.174E-04	0.605(97.6%) 0.796(86%) 0.802(8.7%)	2.70E-03	2.43E-04
Cs-137	30.20	years	6.288E-05	0.662(85.1%) 0.032(5.6%) 0.036(1.3%)	1.07E-03	9.63E-05
Ir-192	73.8	days	9.392E-03	0.317(82.7%) 0.468(47.8%) 0.308(30%) 0.296(28.7%)	1.54E-03	1.39E-04

Figure 14. Radioisotope tab.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



Material	Energy[MeV]																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10.0
Lead	5.29	1.84	0.896	0.356	0.208	0.145	0.114	0.0836	0.0684	0.0569	0.0512	0.0457	0.0421	0.0420	0.0426	0.0436	0.0459	0.0489
Iron	0.344	0.183	0.138	0.106	0.0919	0.0828	0.0762	0.0664	0.0595	0.0531	0.0485	0.0424	0.0361	0.0330	0.0313	0.0304	0.0295	0.0294
Concrete	0.169	0.139	0.124	0.107	0.0954	0.0870	0.0804	0.0706	0.0635	0.0567	0.0517	0.0445	0.0363	0.0317	0.0287	0.0268	0.0243	0.0229

Figure 15. Mass attenuation coefficients tab.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

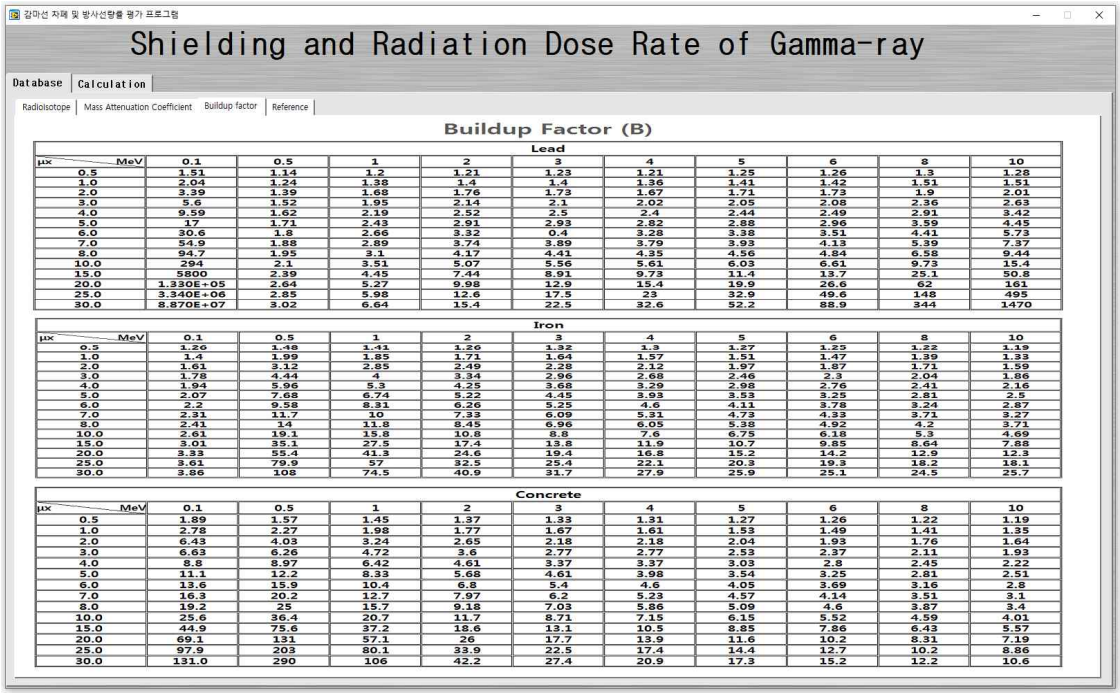


Figure 16. Buildup factor tab.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

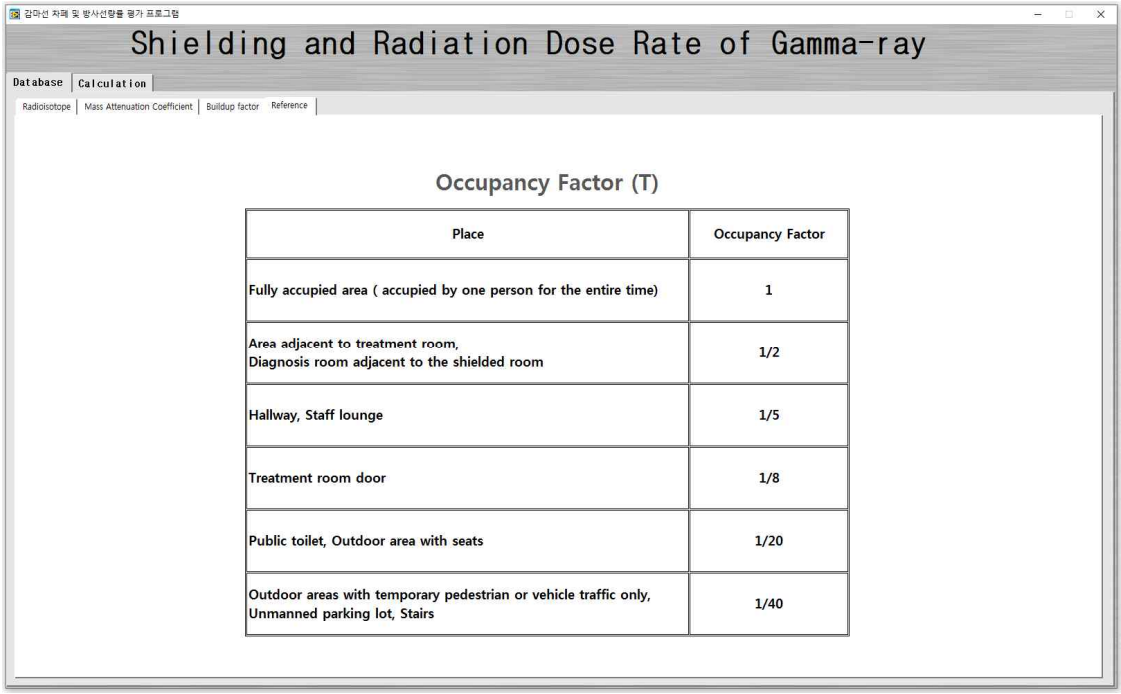


Figure 17. Reference tab of gamma-ray.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

계산화면 탭에서 사용자의 입력을 필요로 하는 입력란은 크게 세 부분으로서 차폐 계산을 수행하고자 하는 감마핵종명과 사용량의 입력 부분, 거리, 주간 사용시간 및 점유도의 입력 부분과 납, 철 콘크리트별 차폐 두께의 입력 부분으로 이루어져 있다. 핵종의 입력란은 최대 5개로 복합 감마핵종의 계산이 가능하도록 하였으며, 이 때 거리, 주간 사용시간 및 점유도는 복합 감마핵종의 동일한 입력 값이므로 별도의 입력 부분으로 구분하고 값을 고정하여 중복 입력이 필요하지 않도록 하였다.

사용자가 차폐 계산을 수행하고자 하는 핵종명을 입력하면 데이터베이스 탭에서 감마상수, 선형감쇠계수 등 해당 핵종의 핵종정보가 계산화면 탭에 연동되어 각 핵종에 따른 차폐 후의 주간 예상 방사선량률이 자동 계산된다. 이 값이 차폐 기준 선량을 만족하는 경우 초록색창, 만족하지 않는 경우 빨간색 창으로 표시되어 사용자가 식별이 용이하도록 하였다. 또한 하단에 차폐 후의 주간 예상 방사선량률을 표시하도록 하여 복합 감마핵종일 경우 방사선량률의 합계를 나타내었다(Fig 18). 또한 데이터베이스(Fig 19) 및 계산화면(Fig 20)의 소스코드는 다음과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

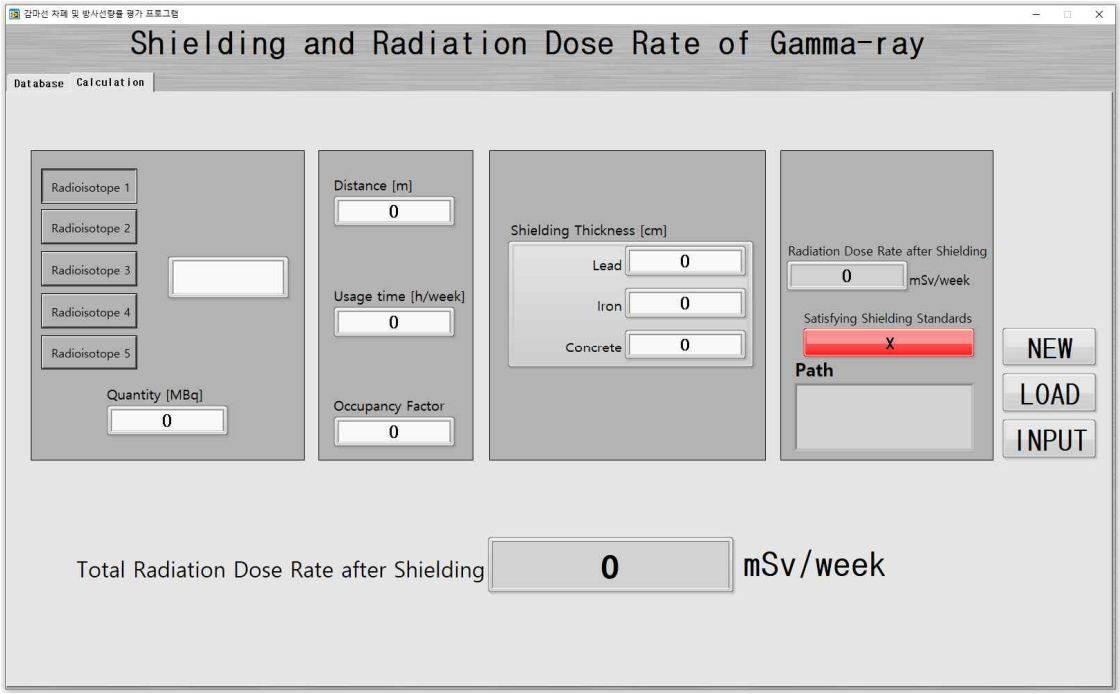


Figure 18. Calculation tab of gamma-ray.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

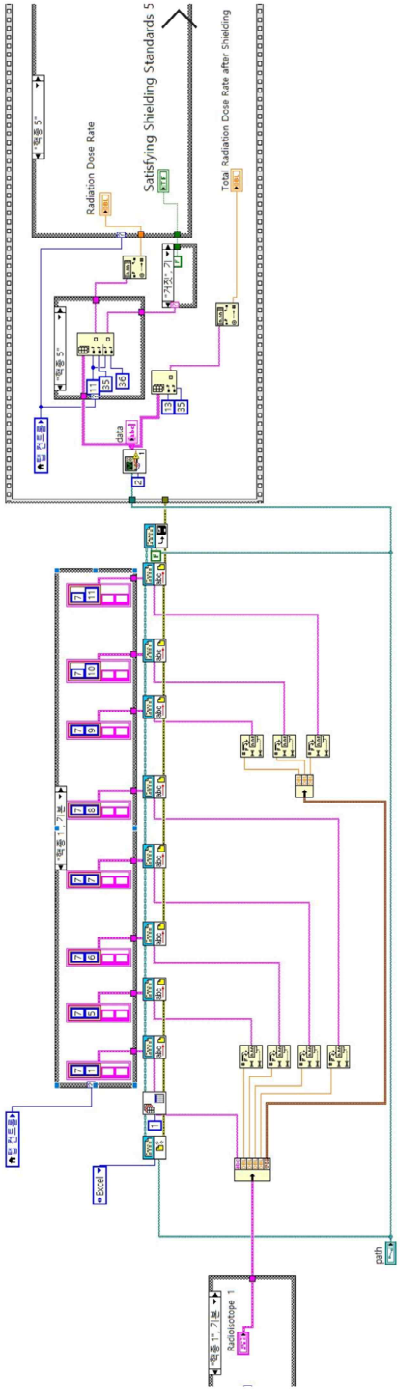


Figure 19. Database source code of gamma-ray.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

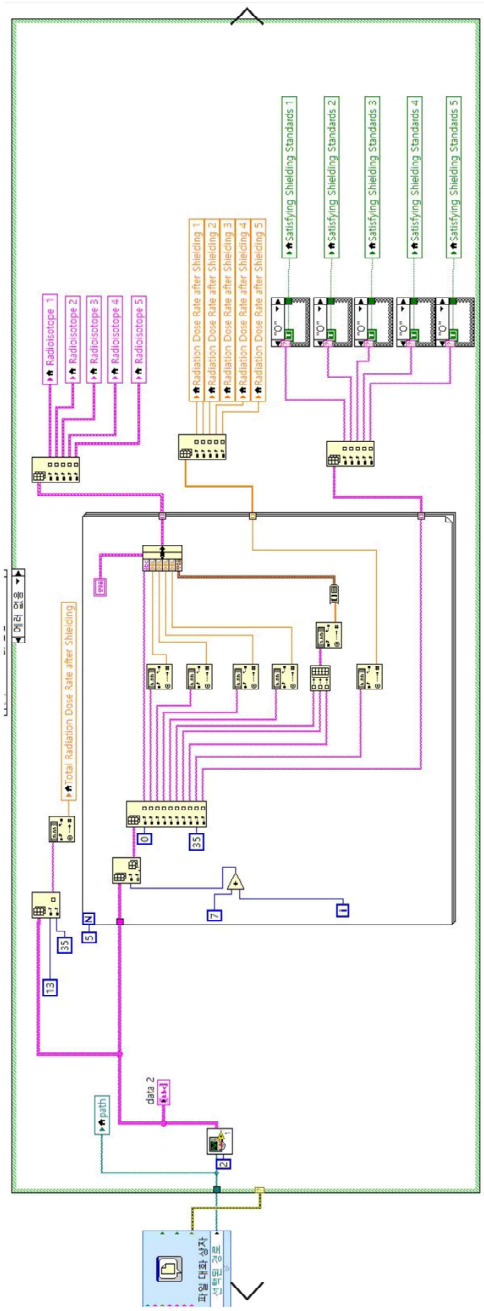


Figure 20. Calculation source code of gamma-ray.

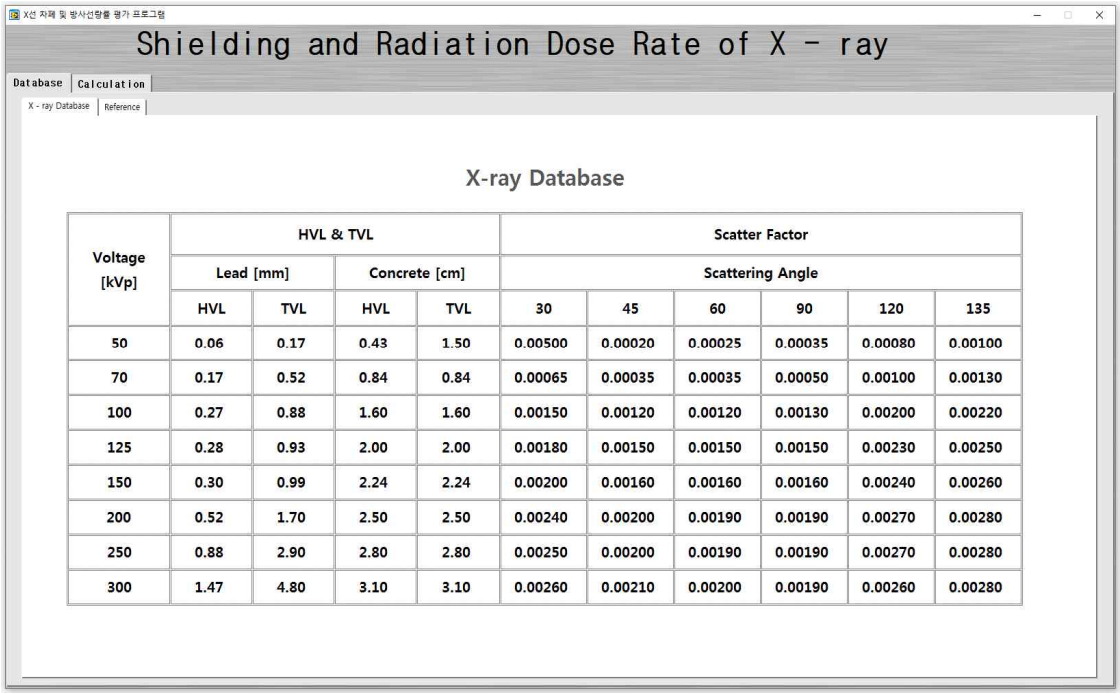
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 데이터베이스와 계산화면으로 구성되어 있으며, 데이터베이스는 엑스선 데이터베이스 탭, 참고자료 탭으로 이루어져 있다.

엑스선 데이터베이스 탭에는 엑스선의 전압에 따른 납과 콘크리트의 반가층 및 십가층, 엑스선의 전압과 산란각도에 따른 산란인자가 저장되어 있다(Fig 21). 이러한 반가층, 십가층 및 산란인자는 계산화면에서 차폐 계산 시 사용자가 전압 및 산란각도를 입력 시 해당 반가층, 십가층 및 산란인자가 자동으로 연동되어 계산이 가능하다.

참고자료 탭에는 그 밖에 사용자가 프로그램을 사용할 때 참고할 자료들이 저장되어 있어 프로그램 사용이 보다 용이하도록 하였다(Fig 22).

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



Voltage [kVp]	HVL & TVL				Scatter Factor					
	Lead [mm]		Concrete [cm]		Scattering Angle					
	HVL	TVL	HVL	TVL	30	45	60	90	120	135
50	0.06	0.17	0.43	1.50	0.00500	0.00020	0.00025	0.00035	0.00080	0.00100
70	0.17	0.52	0.84	0.84	0.00065	0.00035	0.00035	0.00050	0.00100	0.00130
100	0.27	0.88	1.60	1.60	0.00150	0.00120	0.00120	0.00130	0.00200	0.00220
125	0.28	0.93	2.00	2.00	0.00180	0.00150	0.00150	0.00150	0.00230	0.00250
150	0.30	0.99	2.24	2.24	0.00200	0.00160	0.00160	0.00160	0.00240	0.00260
200	0.52	1.70	2.50	2.50	0.00240	0.00200	0.00190	0.00190	0.00270	0.00280
250	0.88	2.90	2.80	2.80	0.00250	0.00200	0.00190	0.00190	0.00270	0.00280
300	1.47	4.80	3.10	3.10	0.00260	0.00210	0.00200	0.00190	0.00260	0.00280

Figure 21. X-ray database tab.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

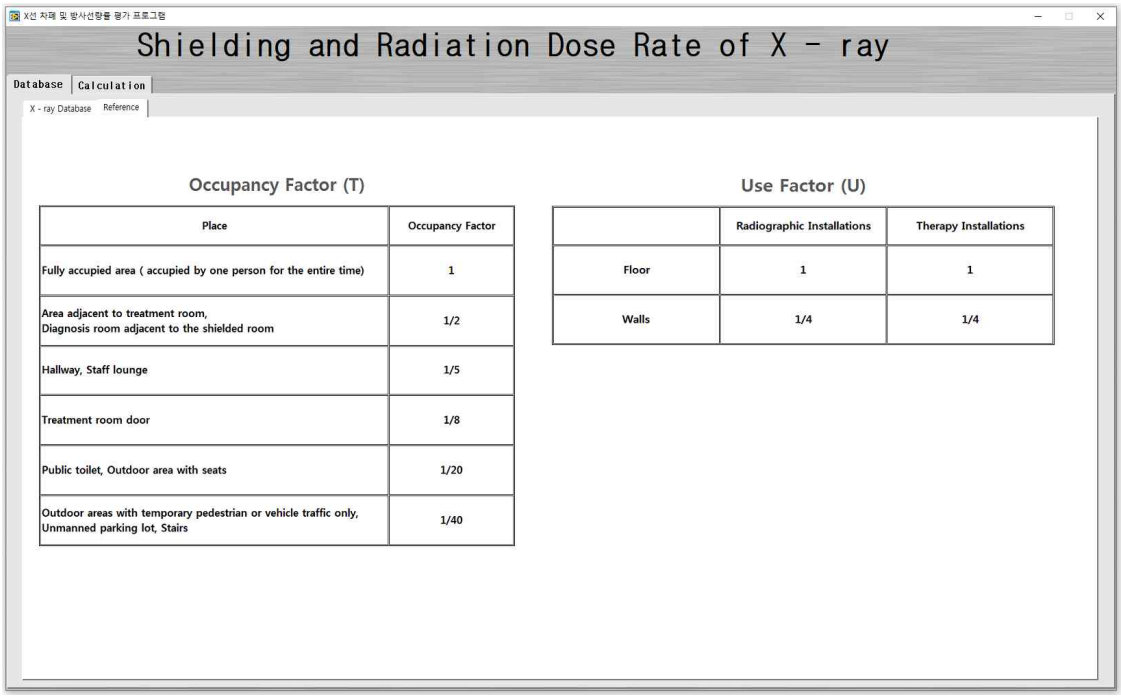


Figure 22. Reference tab of X-ray.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

계산화면 탭은 일차방벽 탭과 이차방벽 탭으로 구성되어 있으며, 일차방벽 탭에서 사용자의 입력을 필요로 하는 입력란은 전압, 전류, 거리, 주간 사용시간, 가동률, 점유도, 차폐물질의 입력란으로 이루어져 있다(Fig 23). 사용자가 차폐 조건에 따라 입력란에 입력하면 데이터베이스 탭에서 반가층 및 십가층이 계산화면에 연동되어 차폐 두께 및 차폐 후의 방사선량률이 자동 계산된다. 이 값이 차폐 기준 선량을 만족하는 경우 초록색창, 만족하지 않는 경우 빨간색 창으로 표시되어 사용자가 식별이 용이하도록 하였다.

이차방벽 탭에서 사용자의 입력을 필요로 하는 입력란은 전압, 전류, 선원-차폐체의 거리, 선원-물체의 거리, 물체-차폐체의 거리, 주간 사용시간, 가동률, 점유도, 조사야, 산란각, 차폐물질의 입력란으로 이루어져 있다(Fig 24). 사용자가 차폐 조건에 따라 입력란에 입력하면 데이터베이스 탭에서 반가층 및 십가층, 산란인자가 계산화면에 연동되어 차폐 두께 및 차폐 후의 방사선량률이 자동 계산된다. 이 값이 차폐 기준 선량을 만족하는 경우 초록색창, 만족하지 않는 경우 빨간색 창으로 표시되어 사용자가 식별이 용이하도록 하였다. 또한 데이터베이스(Fig 25) 및 계산화면(Fig 26)의 소스코드는 다음과 같다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

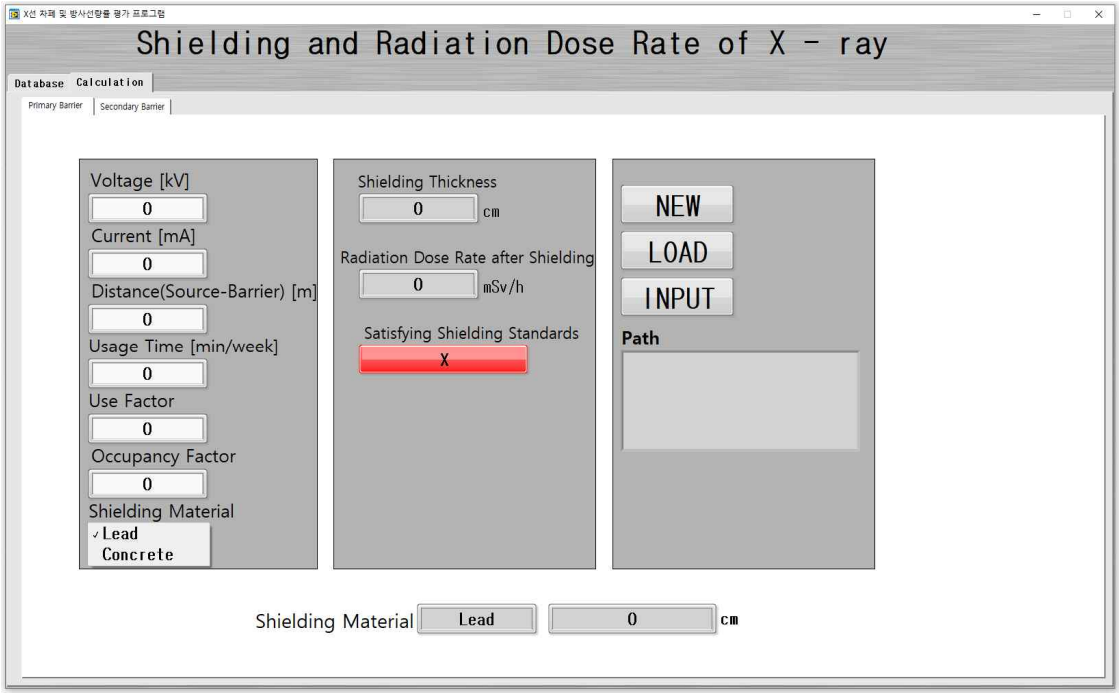


Figure 23. Primary barrier calculation tab.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

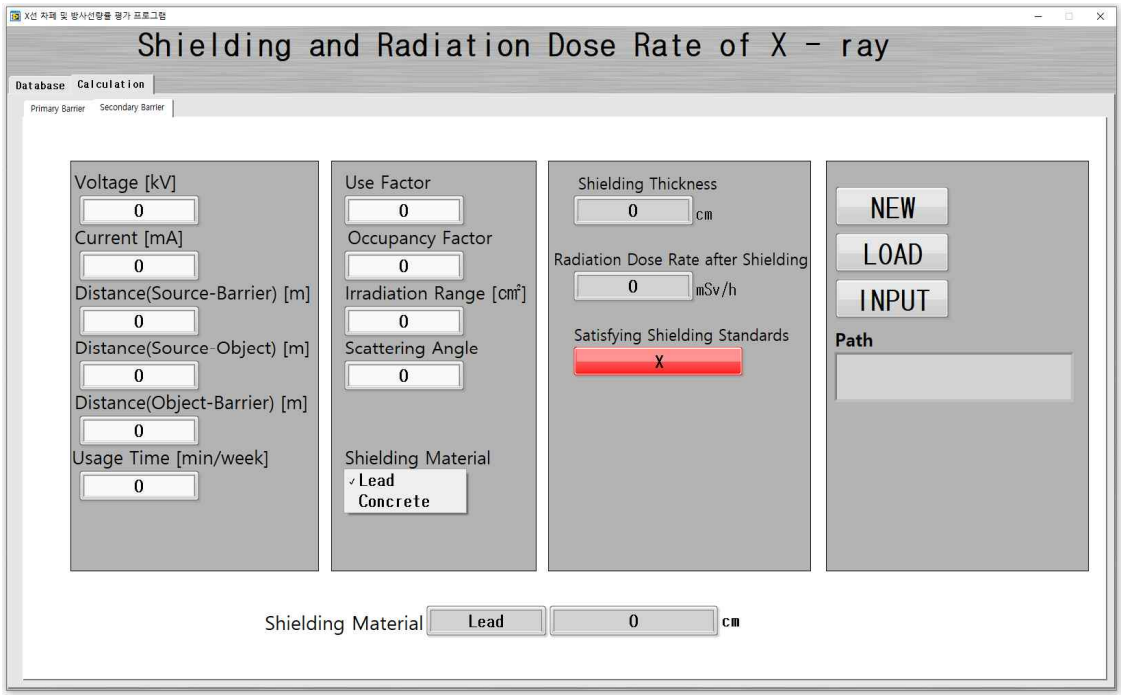


Figure 24. Secondary barrier calculation tab.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

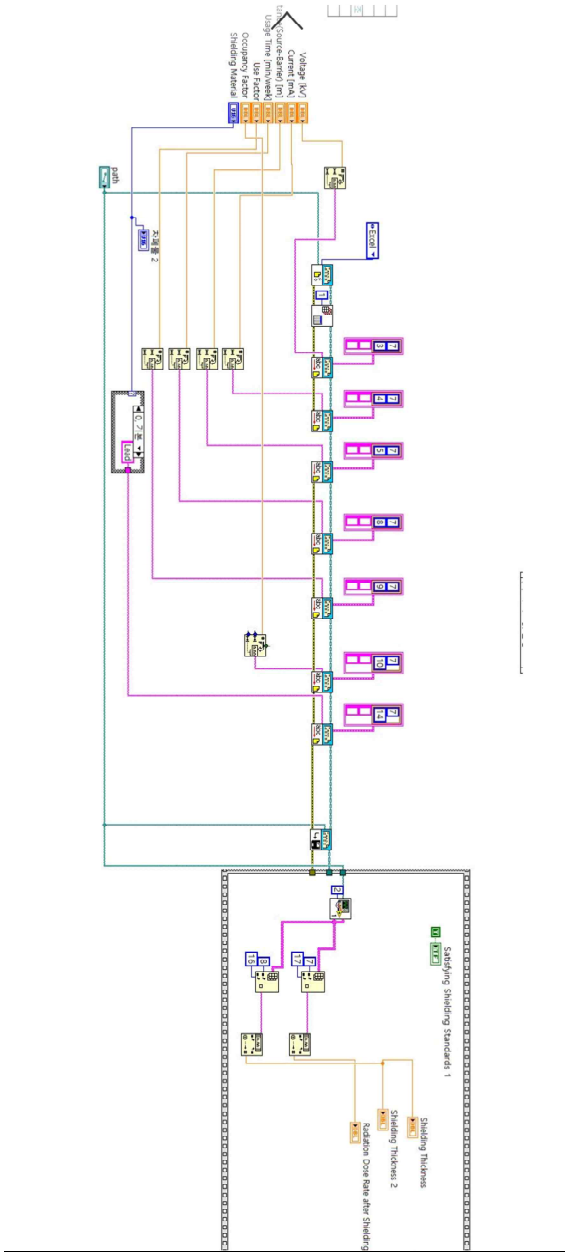


Figure 25. Database source code of X-ray.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

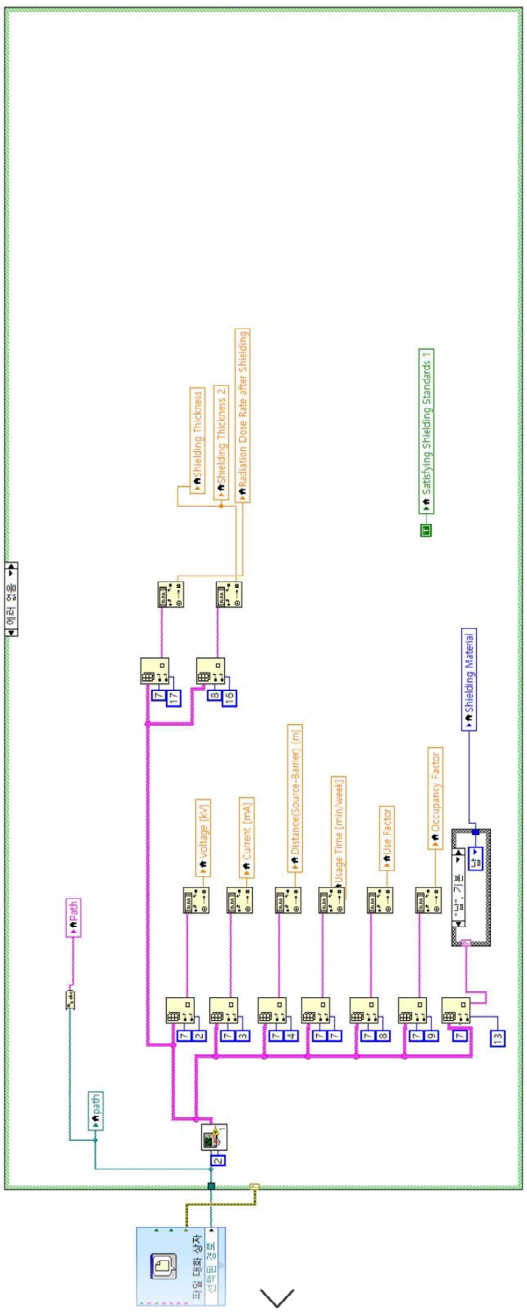


Figure 26. Calculation source code of X-ray.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2절. 프로그램의 실행

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램의 실행을 위해 먼저 NEW 버튼을 눌러 파일이 저장될 폴더를 선택하고 새 파일을 만들면 새 파일이 저장된 경로가 Path에 나타난다. 데이터베이스에 있는 감마핵종명을 입력한 후 사용량, 거리, 주간 사용시간, 점유도를 입력한다. 납, 철, 콘크리트에 따른 차폐 두께를 입력한 후 INPUT 버튼을 누르면 차폐 후 주간 예상 방사선량률 출력란에 계산결과가 입력된다. 감마핵종은 Radioisotope 1부터 Radioisotope 5까지 입력할 수 있으며 각 번호를 선택하면 입력했던 사용 조건에 따른 계산 결과를 볼 수 있으며, 하단에는 각 감마핵종의 방사선량률을 합계가 입력된다. 계산 결과는 처음 지정했던 경로에 엑셀 파일로 저장되어 ROAD 버튼을 눌러 저장된 파일을 불러올 수 있다.

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램의 실행을 위해 먼저 계산하고자 하는 관심지점의 특성에 따라 일차방벽 탭 또는 이차방벽 탭을 선택한다. 일차방벽의 차폐 계산 시 일차방벽 탭을 선택하고 NEW 버튼을 눌러 파일이 저장될 폴더를 선택하고 새 파일을 만들면 새 파일이 저장된 경로가 Path에 나타난다. 전압, 전류, 선원-평가지점의 거리, 주당사용시간, 가동률, 점유도를 입력한 후 차폐물질을 선택하고 INPUT 버튼을 누르면 출력창에 차폐 두께 창과 차폐 후 방사선량률 창에 계산결과가 출력된다. 계산결과에 따라 차폐 기준 선량을 만족하는 경우 초록색창으로 표시되며, 하단에는 차폐물질과 차폐두께가 표시된다. 계산 결과는 처음 지정했던 경로에 엑셀 파일로 저장되어 ROAD 버튼을 눌러 저장된 파일을 불러올 수 있다. Table 10은 조작버튼의 기능을 나타낸 표이다.

Table 10. Operation button function

	조작버튼	기능
1	NEW	새로운 파일 생성
2	ROAD	불러오기
3	INPUT	입력 완료
4	Path	저장경로

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3절. 프로그램의 검증

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 이용하여 ^{60}Co의 차폐 두께와 차폐 후의 방사선량률 계산을 수행하였다. 또한 프로그램을 이용한 계산 결과를 반가층에 따른 계산 결과, MCNP를 이용한 계산 결과와 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다. 반가층에 따른 계산 결과와 사용 조건을 동일하게 하기 위하여 Table 11 과 같이 사용량은 1 MBq, 거리는 1 m, 주당작업시간은 1 시간, 점유도는 1로 가정하였으며, ^{60}Co의 납 반가층인 1.6 cm, 철 반가층인 3.6 cm를 차폐 두께로 선택했을 때의 각각의 차폐 후 예상 방사선량률에 대한 값을 구하였다. Fig 27, Fig 28은 프로그램을 이용하여 납 및 철의 차폐 계산을 수행하는 화면이며, ^{60}Co의 납과 철의 반가층에 따른 계산결과, 프로그램을 이용한 계산결과, MCNP를 이용한 계산결과를 비교하여 Table 12에 나타내었다.

Table 11. Shielding calculation conditions for ^{60}Co

Quantity (MBq)	Distance (m)	Usage time ($h/week$)	Occupancy Factor	Shielding Material	Shielding thickness (cm)
1	1	1	1	Lead / Iron	1.6 / 3.6

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

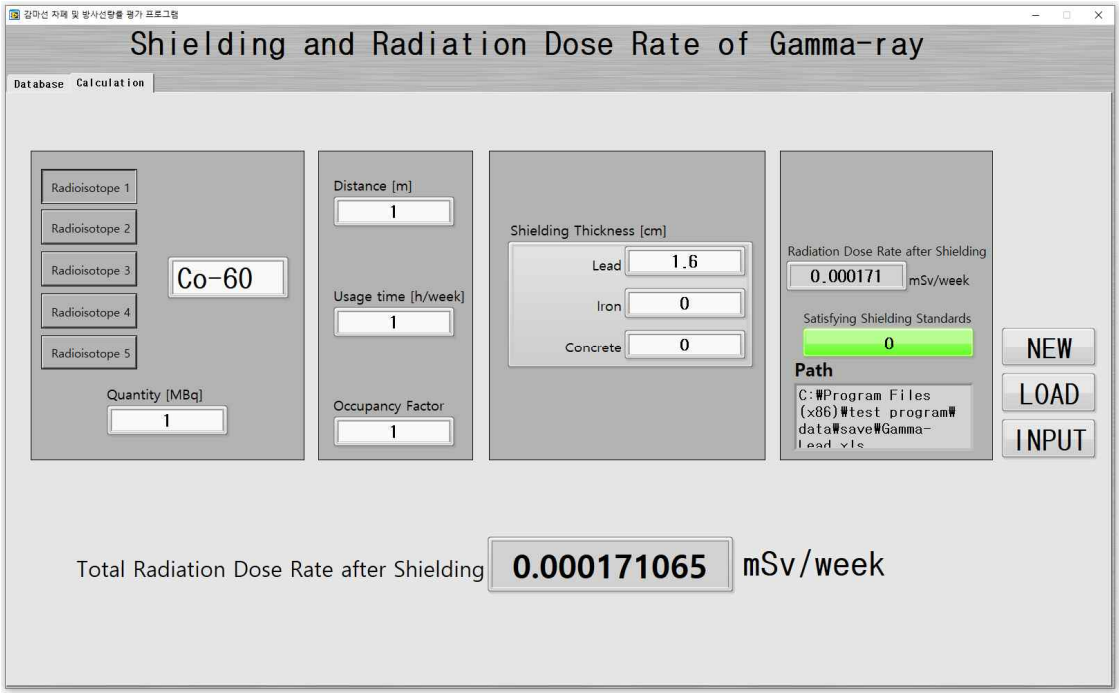


Figure 27. Calculation of lead shielding for ^{60}Co.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

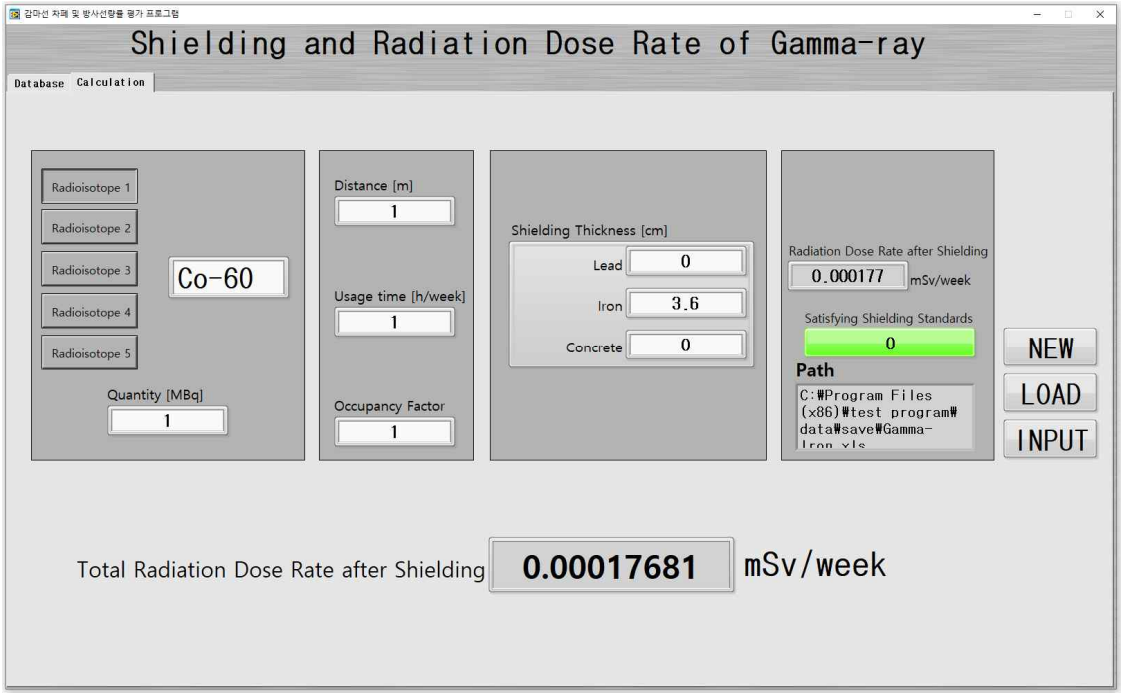


Figure 28. Calculation of iron shielding for ^{60}Co.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 12. Comparison of calculation results

구분	차폐 전 방사선량률 (mSv/h)	차폐 후 예상 방사선량률 (mSv/h)	차폐율 (%)
반가층에 따른 계산결과	3.47×10^{-4}	1.74×10^{-4}	50.0
MCNP를 이용한 납 차폐 시 계산결과	3.46×10^{-4}	1.81×10^{-4}	47.8
프로그램을 이용한 납 차폐 시 계산결과	3.47×10^{-4}	1.71×10^{-4}	49.0
프로그램을 이용한 철 차폐 시 계산결과	3.47×10^{-4}	1.77×10^{-4}	50.9

반가층에 따른 차폐 후의 예상 방사선량률은 $1.74\times10^{-4}\ mSv/h$이며 차폐율은 50.0 %이다. MCNP를 이용한 계산 결과 납 차폐 후의 예상 방사선량률은 $1.81\times10^{-4}\ mSv/h$이며 차폐율은 47.8 %로 나타났다. 프로그램을 이용하여 계산한 결과 반가층 두께의 납 차폐 후의 예상 방사선량률은 $1.71\times10^{-4}\ mSv/h$이며 차폐율은 49.0 %로 나타났다. 또한 반가층 두께의 철 차폐 후의 예상 방사선량률은 $1.77\times10^{-4}\ mSv/h$이며 차폐율은 50.9 %로 나타났다.

프로그램을 이용한 계산 결과는 납의 경우 49.0 %, 철의 경우 50.9 %로 반가층에 근접한 계산로 나타났다. 또한 MCNP를 이용한 계산결과와도 약 1 %의 근소한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 이용한 계산 결과와 NCRP Report No. 49의 최소 차폐 두께 계산 결과를 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다. NCRP Report No. 49의 300 kV 치료용 장비에서의 최소 차폐 두께의 계산 결과는 Table 13과 같다. 이 값은 Table 14와 같은 NCRP Report No. 49의 사용 조건에 따라 계산된 값이며, 엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램에서도 NCRP Report No. 49의 설정값에 따라 허용선량률을 1 $mSv/week$로 설정하여 계산 결과 값을 비교하고자 하였다. WUT가 10000 ~ 40000일 때 1.5 m, 2.1 m, 3.0 m, 4.2 m, 6.1 m 거리에서 일차방벽의 납의 차폐 계산(Fig 29) 및 콘크리트의 차폐 계산(Fig 30)을 각각 수행하였으며, 동일한 조건에서 이차방벽의 납의 차폐 계산(Fig 31) 및 콘크리트의 차폐 계산(Fig 32)을 각각 수행하였다. 또한 프로그램을 이용한 차폐 계산 결과와 NCRP Report No. 49의 최소 차폐 두께 계산 결과를 비교하여 Table 15에 나타내었다.

Table 13. Minimum shielding requirements for 300 kV therapy installations[16]

WUT	Distance (m)									
40000	1.5	2.1	3.0	4.2	6.1	8.4	12.2			
20000		1.5	2.1	3.0	4.2	6.1	8.4	12.2		
10000			1.5	2.1	3.0	4.2	6.1	8.4	12.2	
5000				1.5	2.1	3.0	4.2	6.1	8.4	12.2
	Primary protective barrier thickness (mm)									
Lead	17.65	16.25	14.85	13.45	12.05	10.75	9.4	8.2	6.9	5.8
Concrete	55	51.5	48.5	45	42	39	36	33.5	30	27
	Secondary protective barrier thickness (cm)									
Lead	12.0	10.55	9.05	7.6	6.1	4.65	3.55	2.95	2.5	2.1
Concrete	33	30	27	24	21	18	14.5	11.5	9	6

Table 14. Shielding calculation conditions for X-ray

Weekly design exposure rate ($mSv/week$)	Voltage (kV)	Current (mA)	Scattering angle	Irradiation range (cm^2)	Use Factor	Occupancy Factor
1	300	20	90	400	1	1

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

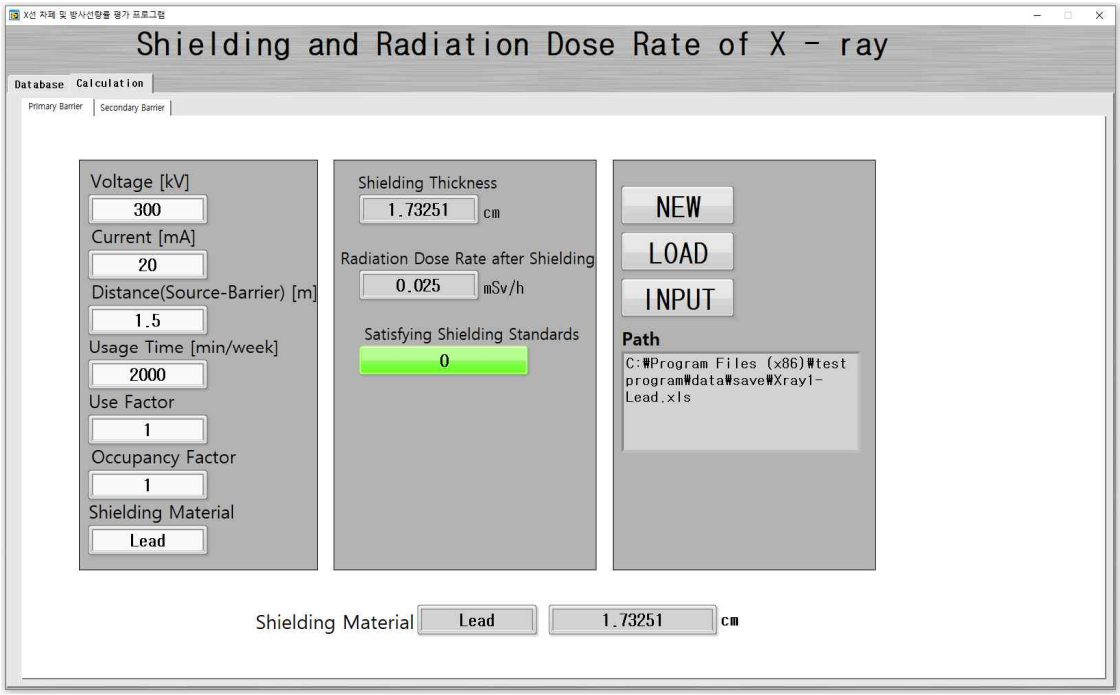


Figure 29. Primary barrier lead shielding calculation.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

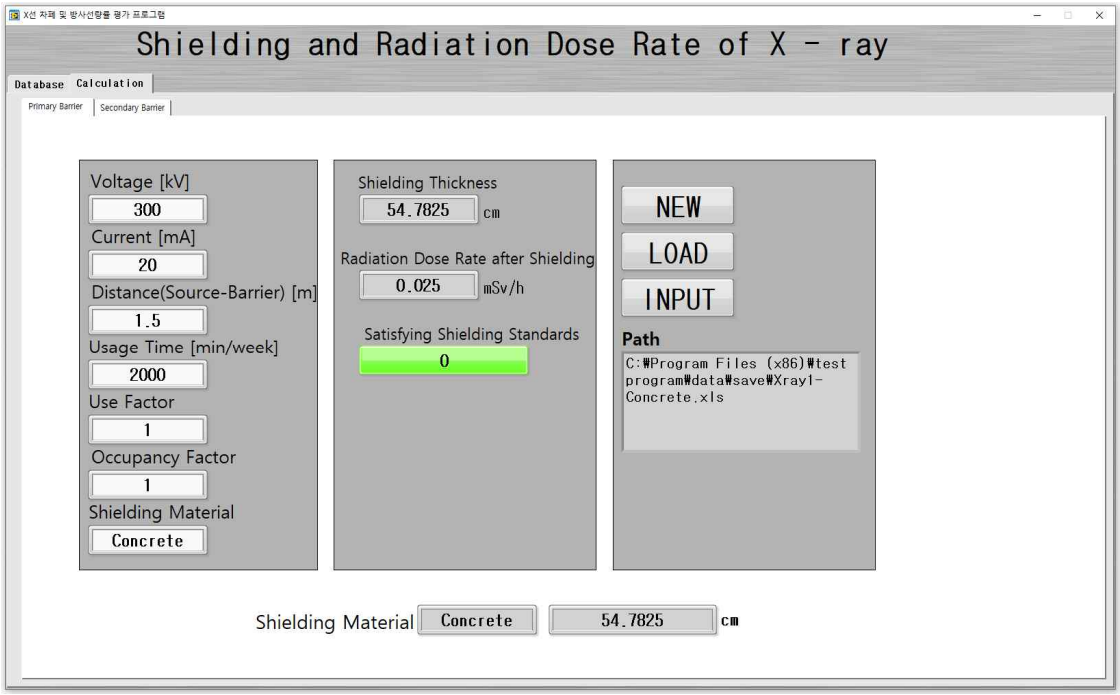


Figure 30. Primary barrier concrete shielding calculation.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

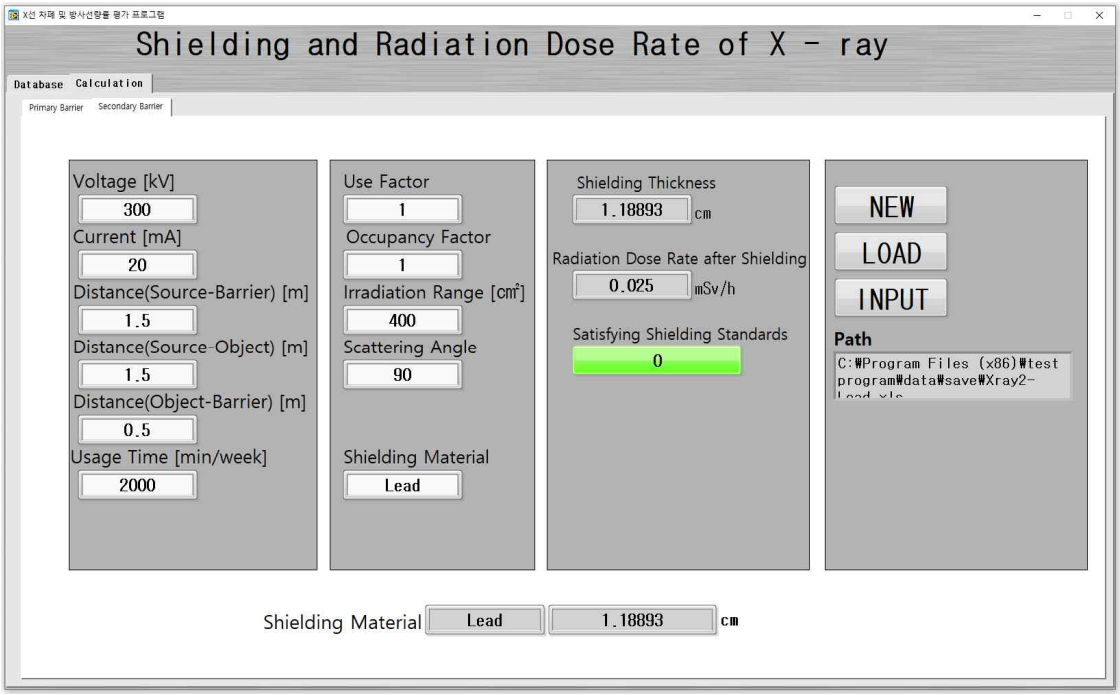


Figure 31. Secondary barrier lead shielding calculation.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

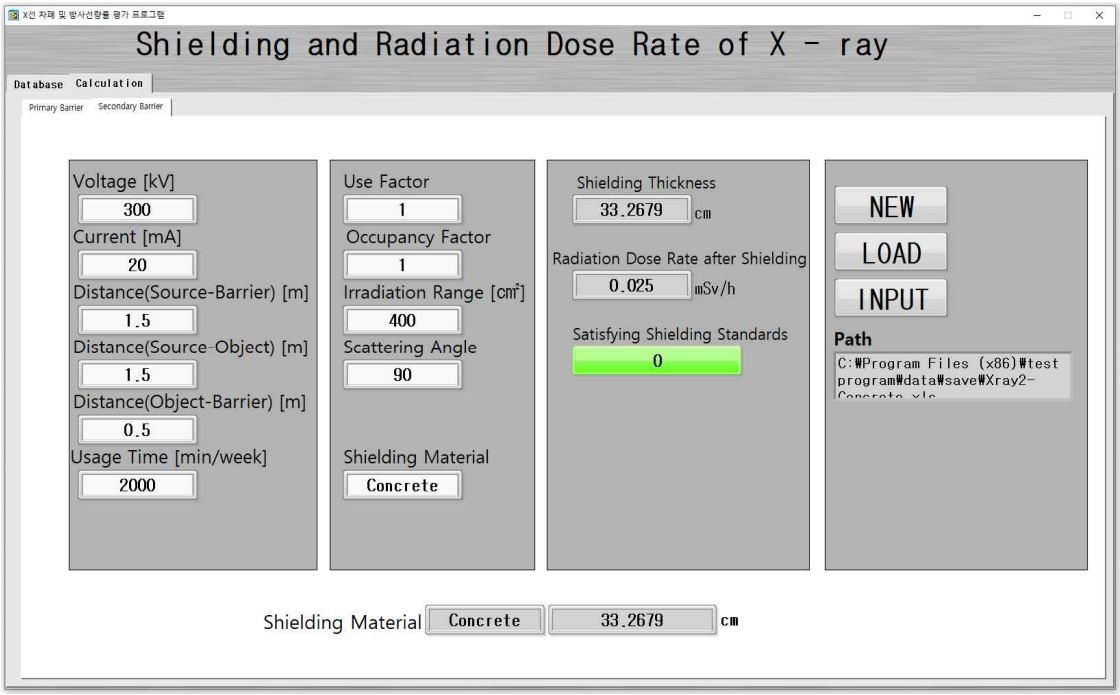


Figure 32. Secondary barrier concrete shielding calculation.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 15. Comparison of NCRP 49 minimum shielding thickness and program result

	WUT		Distance (m)				
			1.5	2.1	3.0	4.2	6.1
Primary protective barrier thickness							
Lead (mm)	40000	NCRP	17.65	16.25	14.85	13.45	12.05
		Calculation	17.33	15.85	14.35	12.98	11.51
	20000	NCRP	16.25	14.85	13.45	12.05	10.75
		Calculation	15.81	14.39	12.94	11.62	10.21
	10000	NCRP	14.85	13.45	12.05	10.75	9.4
		Calculation	14.35	12.98	11.58	10.31	8.91
Concrete (cm)	40000	NCRP	55	51.5	48.5	45	42
		Calculation	54.78	51.83	48.70	45.74	42.45
	20000	NCRP	51.5	48.5	45	42	39
		Calculation	51.74	48.79	45.65	42.68	39.39
	10000	NCRP	48.5	45	42	39	36
		Calculation	48.70	45.74	42.59	39.62	36.32
Secondary protective barrier thickness							
Lead (mm)	40000	NCRP	12.0	10.55	9.05	7.6	6.1
		Calculation	11.89	10.49	9.00	7.60	6.04
	20000	NCRP	10.55	9.05	7.6	6.1	4.65
		Calculation	10.44	9.04	7.55	6.15	4.60
	10000	NCRP	9.05	7.6	6.1	4.65	3.55
		Calculation	9.00	7.60	6.11	4.71	3.45
Concrete (cm)	40000	NCRP	33	30	27	24	21
		Calculation	33.27	30.28	27.10	24.09	20.75
	20000	NCRP	30	27	24	21	18
		Calculation	30.19	27.19	24.00	20.99	17.63
	10000	NCRP	27	24	21	18	14.5
		Calculation	27.10	24.09	20.90	17.87	14.49

NCRP의 동일한 조건에서 계산을 수행했을 때 NCRP의 결과값과 프로그램에 따른 결과값의 비교 결과, 납의 경우 0 ~ 0.5 mm범위로 차이를 보였으며 콘크리트의 경우 0 ~ 0.74 cm범위로 차이를 보여 비교적 근소한 차이를 보임을 알 수 있었다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제6장. 고찰

원자력이용시설의 차폐 설계 시 사용되는 차폐 계산 방법은 몬테카를로법(Monte-Carlo Method)을 적용한 전산모사 방법과 수(手)계산을 통한 고전적인 방법 등이 있다. 이러한 차폐 계산을 통해 원자력이용시설의 주요지점에 대한 방사선량률을 예측하고, 적합한 차폐 두께를 결정 및 시공하게 된다. 비교적 기하학적 구조가 복잡하지 않고 단순한 구조의 원자력이용시설 또는 최초 인허가 시 수행하였던 차폐 설계 이후에 허가받은 사항의 변경으로 인한 차폐 변경이 발생한 중·소규모의 원자력이용시설에서 MCNP를 이용하여 차폐계산을 하는 것에는 큰 비용 및 긴 소요시간, 사용자 전문성의 문제가 존재한다. 또 다른 차폐 계산 방법으로 차폐 계산 공식을 이용한 수(手)계산 방법은 전산모사 방법을 사용하기 이전부터 적용해온 방법이지만 복잡한 계산 시 휴먼에러의 발생 가능성을 배제하지 않을 수 없다. 따라서 본 연구에서는 방사선 차폐 이론에 따른 수학적인 알고리즘을 정리하고 보완하여, GUI(Geaphical User Interface) 방식의 LabVIEW를 기반으로 한 감마선 및 엑스선의 차폐 계산 프로그램을 개발하였다. 또한 감마선 및 엑스선의 차폐 계산 프로그램은 감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램과 엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 별도의 프로그램으로 제작하여 사용자의 사용 목적에 따라 선택할 수 있도록 하였다.

차폐 설계의 목표가 되는 차폐 기준 선량은 오늘날의 법적 기준을 만족할 수 있도록 원자력안전위원회 고시 방사선방호 등에 따른 기준 제13호 차폐물에 따른 설계기준에 의하여, 방사선관리구역에 해당하는 사용시설 등의 내부에 사람이 상시 출입하는 장소를 기준으로 방사선작업종사자의 연간 작업 시간을 고려하여 허용선량률을 0.4 $mSv/week$로 적용하였다.

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 지수감쇠식을 이용하여 차폐체가 없는 경우를 가정하여 차폐 두께를 계산하고자 하는 관심 지점에서의 방사선량률을 구한 다음, 차폐체의 종류를 정하고 차폐 두께를 결정하여 차폐 두께를 적용한 후의 방사선량률이 차폐 기준 선량을 만족할 때까지 차폐 두께를 증가시켜 적절한 차폐 두께를 구하도록 하였다. 이 때 감마선 차폐 계산의 주요 인자인 질량감쇠계수는 특정 에너지에 대해서만 그에 따른 질량감쇠계수가 제공되어 있으므로, 본 연구에서는 데이터의 흐름을 고려하여 지수보간법으로 보정한 질량감쇠계수 및 그에 따른 선형감쇠계수를 적용

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하였다. 또 다른 주요인자인 축적인자(Build-up factor)는 차폐 두께와 선형감쇠계수의 곱인 μx와 에너지에 따른 값으로서 마찬가지로 특정 값에 대한 축적인자만 제공되고 있기 때문에, 데이터의 흐름을 고려한 선형보간법을 통해 사용자가 입력하는 차폐 두께에 따라 달라지는 μx와 에너지의 범위를 다양하게 보정하여 차폐 계산에 적용하였다.

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 NCRP Report No. 49의 차폐 이론을 이용하여 일차방벽과 이차방벽으로 차폐 계산을 구분하였다. NCRP Report No. 49의 차폐 이론은 투과계수를 구한 후 실험적인 결과로 얻어진 감쇠곡선을 읽어 차폐 두께를 구하는 방식이므로 이로 인해 발생할 수 있는 오류를 해소하고 감쇠곡선을 프로그램에 적용하기 위한 방법으로써 감쇠곡선을 함수식으로 나타낸 A. C. Chamberlain과 W. J. Strydom의 식을 이용하여 계산을 수행하였다. 이 때 회귀계수가 특정 에너지에 따른 값만 제공되어 있어 본 연구에서는 다양한 에너지에서의 회귀계수를 보정한 값을 사용하였다. 또한 이차방벽 계산 시 요구되는 산란인자 및 반가층, 십가층에 있어 다양한 에너지의 값을 보정하였다.

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 데이터베이스 및 계산화면으로 구성되어 있어 사용자가 계산화면에 핵종명을 입력하면 계산 시 필요한 핵종 정보가 데이터베이스에서 계산화면으로 자동으로 연동되어 계산이 이루어지도록 하였다. 또한 데이터베이스에는 핵종 정보 외에도 사용자가 참고할 수 있는 질량감쇠계수, 축적인자, 점유도 등의 참고자료를 추가하였다. 사용자가 계산화면에 핵종명 및 사용조건을 입력한 후 차폐 후의 예상 방사선량률이 허용선량률인 0.4 $mSv/week$ 이내가 될 때까지 차폐 두께를 추가하여 차폐 설계 목표를 만족하는 차폐두께를 구할 수 있다.

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 데이터베이스 및 계산화면으로 구성되어 있어 사용자가 계산화면에 전압을 입력하면 계산 시 필요한 해당 전압에 따른 정보가 데이터베이스에서 계산화면으로 자동으로 연동되어 계산이 이루어지도록 하였다. 또한 데이터베이스에는 핵종 정보 외에도 사용자가 참고할 수 있는 사용계수, 점유도 등의 참고자료를 추가하였다. 엑스선의 차폐 계산화면은 일차방벽 탭과 이차방벽 탭으로 구성되어 있어 사용자의 차폐 관심지점에 따라 선택하여 차폐 계산을 수행 가능하도록 하였다.

감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 이용하여 ^{60}Co의 납 및 콘크리트 반가층 두께의 차폐 두께와 차폐 후의 방사선량률 계산을 수행하고, 반가층에 따른 계산

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

결과, MCNP를 이용한 계산 결과와 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다. 반가층에 따른 계산 결과와 사용 조건을 동일하게 하기 위하여 사용량은 1 MBq, 거리는 1 m, 주간 사용시간은 1시간, 점유도를 1로 가정하였으며, ^{60}Co의 납 반가층인 1.6 cm, 철 반가층인 3.6 cm를 각각 차폐 두께로 선택했을 때 프로그램을 이용하여 계산한 결과 반가층 두께의 납 차폐 후의 예상 방사선량률은 1.71×10^{-4} mSv/h이며 차폐율은 49.0 %로 나타났다. 또한 반가층 두께의 철 차폐 후의 예상 방사선량률은 1.77×10^{-4} mSv/h이며 차폐율은 50.9 %로 나타났다. 프로그램을 이용한 계산 결과는 납의 경우 49.0%, 철의 경우 50.9 %로 반가층에 근접한 계산로 나타났다. 또한 MCNP를 이용한 계산결과와도 약 1 %의 근소한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 선형감쇠계수와 축적인자의 보정이 잘 이루어져 차폐 계산에 적용되었음을 알 수 있었으며, 차폐 계산 시 입력하는 차폐 두께에 따라 즉각적으로 μx값과 감마핵종의 에너지에 대응하는 축적인자가 계산에 적용됨을 확인할 수 있었다.

엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 이용하여 일차방벽과 이차방벽의 계산을 수행하고, NCRP Report No. 49의 300 kV 치료용 장비에서의 최소 차폐 두께 계산 결과를 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다. NCRP Report No. 49의 사용 조건과 동일하게 설정하기 위해 허용선량률을 1 $mSv/week$로 설정하였으며, WUT가 10000, 20000, 40000 일 때 1.5 m, 2.1 m, 3.0 m, 4.2 m, 6.1 m 거리에서의 일차방벽과 이차방벽의 납 및 콘크리트의 차폐 두께를 계산하였다. NCRP의 결과값과 프로그램에 따른 결과값의 비교 결과, 납의 경우 0 ~ 0.5 mm범위로 차이를 보였으며 콘크리트의 경우 0 ~ 0.74 cm범위로 차이를 보여 비교적 근소한 차이를 보임을 알 수 있었다. 다만 이 결과값은 비교를 위해 허용선량률을 NCRP Report No. 49의 조건과 같은 1 $mSv/week$로 조정하였을 때의 값이므로, 본 프로그램에서 적용한 허용선량률 0.4 $mSv/week$으로 설정하였을 때 보다 높은 값이 계산됨을 확인하였으며 이는 허용선량률의 조정으로 인한 것으로 판단된다. 또한 감마선 및 엑스선의 차폐 및 방사선량률 프로그램의 검증에서는 비교를 위해 간단한 사용 조건을 적용하였으나, 비교적 근소한 차이로 거의 일치함을 확인한 후 다양한 조건을 적용하였을 때에도 주요 인자의 보정된 값에 의하여 결과값이 출력됨을 확인하였다.

본 연구에서는 방사선 차폐 이론에 따른 수학적인 알고리즘을 정리하고 보완하여, GUI(Geaphical User Interface) 방식의 LabVIEW를 기반으로 한 감마선 및 엑스선의 차폐 계산 프로그램으로써, 별도의 프로그램 설치가 필요하지 않고 시각적으로 간단 명

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

확하여 사용자가 사용하기 쉬우며 즉각적으로 결과값을 출력할 수 있는 프로그램을 개발하고자 하였다. 따라서 수식 및 주요 인자를 보완하고 보정하여 보다 다양한 범위에서의 값이 산출될 수 있도록 정확도를 높였으며, 설치형태로 제공하므로 고가의 LabVIEW 프로그램의 설치를 필요로 하지 않고, 사용자가 실제로 사용하는 화면은 필수적인 요소만으로 간단하게 표현하여 사용이 용이하도록 하였다.

감마선 차폐계산을 위한 방사선량률 평가 프로그램의 경우, 사용자가 차폐 기준 선량을 만족하는 차폐 두께를 입력하는 방식에서 향후 추가 연구를 통해 차폐 조건 입력 후 차폐 두께가 산출되는 방식을 적용한다면 사용자의 편의성이 보다 증대될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 감마선 및 엑스선 프로그램 모두 차폐 기준 선량을 법적 기준에 따른 0.4 $mSv/week$로 설정하여 차폐 후의 방사선량률 및 차폐 두께가 법적 기준 이내의 최대값으로 계산되지만, 이는 최대가동조건에서의 차폐 계산 후 거리, 주간 사용시간, 차폐복 등 적절한 방사선 방호방법을 이용한 목표 선량의 조정을 통해 보수성을 조정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

본 프로그램은 비교적 기하학적 구조가 복잡하지 않은 원자력이용시설에서 적은 비용과 소요시간으로 간단하게 차폐 계산이 가능하다. 또한 차폐 계산을 위해 필요한 다양한 자료가 데이터베이스에 저장되어 있으므로 차폐 교육으로도 활용할 수 있을 것이다. 나아가 보다 여러 형태의 기하학적 구조에서 차폐 계산이 가능하도록 추가개발을 통해 다양한 원자력이용시설에서 이용할 수 있도록 해야 할 것이다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제7장. 결론

본 연구에서는 전산모사 방법과 수(手)계산의 장·단점을 보완하여 감마선 및 엑스선의 방사선 차폐 이론에 따른 수학적인 알고리즘을 정리 및 보정한 LabVIEW 기반의 차폐 계산 프로그램을 구축하고자 하였다. 감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 단일 방사성 핵종 뿐만 아니라 복합 방사성 핵종의 차폐 계산이 가능하도록 하였으며, 질량감쇠계수 및 축적인자를 데이터의 흐름을 고려한 보간법을 이용하여 보정하였다. 엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램은 NCRP Report No. 49의 차폐 이론을 적용하였으며 감쇠곡선의 함수식을 이용하였다. 함수식의 회귀계수, 산란인자, 반가층, 십가층은 다양한 에너지에 따른 값을 보정하였다. 감마선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 이용하여 ^{60}Co의 납 및 콘크리트 반가층 두께의 차폐 두께와 차폐 후의 방사선량률 계산을 수행하고, 반가층에 따른 계산 결과, MCNP를 이용한 계산 결과와 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다. 프로그램을 이용한 계산 결과는 납의 경우 49.0 %, 철의 경우 50.9 %로 반가층에 근접한 계산로 나타났으며, MCNP를 이용한 계산결과와 약 1 %의 근소한 차이를 보였다. 엑스선 차폐 및 방사선량률 계산 프로그램을 이용하여 일차방벽과 이차방벽의 계산을 수행하고, NCRP Report No. 49의 300 kV 치료용 장비에서의 최소 차폐 두께 계산 결과를 비교하여 프로그램의 유효성을 검증하고자 하였다. NCRP의 결과값과 프로그램에 따른 결과값의 비교 결과, 납의 경우 0 ~ 0.5 mm범위로 차이를 보였으며 콘크리트의 경우 0 ~ 0.74 cm범위로 차이를 보여 근소한 차이를 보였다. 본 프로그램은 데이터베이스를 별도로 구성하고 필수 입력사항으로만 설계하여 복잡한 절차 없이 단일 화면만으로 사용자가 차폐 계산을 수행할 수 있도록 시각적으로 간소화하여 사용자의 편의성을 고려하였다. 또한 프로그램에 적용되는 공식 및 데이터를 보정하여 계산 시 오류를 최소화하고 정확도를 높였다. 따라서 본 프로그램을 통해 차폐 계산 시 소요시간, 비용, 사용자 전문성 등의 문제 및 휴먼에러의 문제를 해결할 수 있으며, 차폐 계산을 위해 필요한 다양한 자료가 데이터베이스에 저장되어 있으므로 차폐 교육으로 활용이 가능하다. 본 프로그램을 이용한 여러 가지 변수에 따른 즉각적인 차폐 계산을 통해 최적화된 방사선 차폐 기법을 적용하여 방사선 관리구역 출입에 따른 방사선작업종사자의 방사선 피폭 관리에 기여할 수 있을 것이라고 사료된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] Pelowitz and Denise B, “MCNPXTM-USER'S MANUAL version 2.5.0”, 2005.

[2] M. Sohrabpour, M. Hassanzadeh, M. Shahriari, M. Sharifzadeh, “Gamma irradiator dose mappong simulation using the MCNP code and benchmarking with dosimetry”, Applied Radiation and Isotopes, Vol.57, No.2, pp.537-579, 2002.

[3] Hong Hyeon Seung, A study on comparison of resolution according to filter material and calculation of the radiation dose of X-ray generator using MCNPX, Myongji University, 2015.

[4] Kim Ik Hyun, A study of X-ray shielding design of dual imaging container inspection facility using monte carlo computer simulation method, Chungnam National University, 2019.

[5] Han Sang Hyun, Performance evaluation of gamma-ray shielding to produce a nuclear medicine exclusive apron, Cheongbuk National University, 2017.

[6] Korean Association for Radiation Application, 방사선 이론과 실제, 2015.

[7] Cho Young In, A study on the design method of radiation shielding device using 3D printing material, Catholic University of Pusan, 2019.

[8] N. A. El-Farmawy and F. I. El-Hosiny, “The effect of the autoclaving process and addition of silica fume on portland cement in shielding gamma radiation”, Radiation Measurements, Vol.29, No.6, pp.619-624, 1998.

[9] R. M Cunha e Silva, C. R Appoloni, P. S Parreira, F. R Espinoza-Quiñones, M.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

M Coimbra, P. H. A Aragão, “Two media method for gamma ray attenuation coefficient measurement of archaeological ceramic samples”, Applied Radiation and Isotopes, Vol.53, No.6, pp.1011-1016, 2002.

[10] R. D. Evans, The Atomic Nucleus, the McGraw-Hill Publishing Company, 1955.

[11] L. M. chaudhari and M. T. Teli, “Linear attenuation (or absorption) coefficient of gamma radiation for dilute solutions of potassium chloride”, Applied Radiation and Isotopes, Vol.47, No.3, pp.365-367, 1996.

[12] H. A. Jahagirdar, B. Hanumaiah and S. R. Thontadarya, “International journal of radiation applications and instrumentation. Part A”, Applied Radiation and Isotopes, Vol.43, No.12, pp.1511-1514, 1992.

[13] Bojorquez Eduardo, “Angular exposure build up factors for combined energy photons emitted from a line geometry radioactive source”, Annals of Nuclear Energy, Vol.26, No.17, pp.1593-1599, 1999.

[14] Chung Won Chung, A study on measurement of mass attenuation coefficient of gamma-ray, Dong-A University, 2000.

[15] Kwon Seog Guen, Choi Ho Sin, Moon Philip S, Yook Jong Chul, “Radiation shielding analysis for the X-ray facility”, Journal of Radiation Protection and Research, Vol.12, No.1, pp.34-39, 1987.

[16] National Council for Radiological Protection and Measurement, Structural shielding design and evaluation for medical use of X-rays and gamma rays of energies up to 10 MeV; NCRP Report No.49, Bethesda, 1976.

[17] Lee Dong Pil, A study on the noise monitoring system of metal material manufacturing plant, Wonkwang University, 2020.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[18] 곽두영, 컴퓨터 기반의 제어와 계측 LabVIEW, Ohm, 2007.

[19] Kim Byeong Su, The development of data analysis program using LabVIEW and its application, Pukyong National University, 2020.

[20] Gwak Pil jun, Slow control and monitoring program developed by LabVIEW at JSNS2 experiment, Chonnam National University, 2020.

[21] Nuclear Safety And Security Commission, 방사선 방호 등에 관한 기준, 2019.

[22] Herman Cember and Thomas E. Johnson, Introduction To Health Physics, McGraw-Hill Education, 2008.

[23] Korean Association for Radiation Application, 방사성동위원소 핵종 정보, 2010.

[24] 방성완, 제대로 배우는 Matlab, 한빛 아카데미, 2019.

[25] Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley and Sons Inc, 1989.

[26] R. G. Jaeger , E. P. Blizard t, A. B. Chilton, M. Grotenhuis, A. Honig, Th. A. Jaeger, H. H. Eisenlohr, Engineering compendium on radiation shielding Vol.1, Springer-verlag, NewYork, 1968.

[27] James E. Martin, Physics for radiation protection a handbook, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. kGaA, 2006.

[28] National Council for Radiological Protection and Measurement, Structural shielding design and evaluation for mega voltage X-ray and gamma-ray radiotherapy facilities; NCRP Report No.151, Bethesda, 2005.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[29] Korea Institute of Newclear Safety, Structural shielding design and evaluation for megavoltage X-ray and gamma-ray radiotherapy facilities: NCRP Report No.151, 2011.

[30] A. C. Chamberlain and W. J. Strydom, “A computerized implementation of a non-linear equation to predict barrier shielding requirements.”, Health Phys, Vol.72, No.4, pp.568-573, 1997.

[31] Yoon Sun Young, Chung Woon Kwan, Park Byeong Mok, Yeo Hwa Yeon, “Development of a complex radionuclide radiation dose rate assessment program”, Journal of Radiation Industry, Vol.13, No.4, pp.351-355, 2019.

[32] Yoon Sun Young, Chung Woon Kwan, Park Byeong Mok, Yeo Hwa Yeon, “Development of a X-ray shielding and radiation dose rate assessment program”, Journal of Radiation Industry, Vol.14, No.1, pp.83-87, 2020.