

# 중성자 및 감마선에 대한 선량률 환산인자 계산

權奭根 · 李秀容 · 陸鍾澈\*

漢陽大學校 工科學 原子力工學科

## Calculation of Neutron and Gamma-Ray Flux-to-Dose-Rate Conversion Factors

Kwon, Seog-Guen, Lee, Soo-Yong and Yook, Chong-Chul

Dept. of Nuclear Engr., College of Engr., Hanyang University Seoul, Korea

### Abstract

This paper presents flux-to-dose-rate conversion factors for neutrons and gamma rays based on the American National Standard Institute(ANSI) N666. These data are used to calculate the dose rate distribution of neutron and gamma ray in radiation fields.

Neutron flux-to-dose-rate conversion factors for energies from  $2.5 \times 10^{-8}$  to 20 MeV are presented; the corresponding energy range for gamma rays is 0.01 to 15 MeV.

Flux-to-dose-rate conversion factors were calculated, under the assumption that radiation energy distribution has nonlinearity in the phantom, have different meaning from those values obtained by monoenergetic radiation. Especially, these values were determined with the cross section library.

The flux-to-dose-rate conversion factors obtained in this work were in a good agreement to the values presented by ANSI.

Those data will be a useful for the radiation shielding analysis and the radiation dosimetry in the case of continuous energy distributions.

### 1. 序 論

중성자 및 감마선 선량률 환산인자 계산하는 데 사용되는 선량률 환산인자(flux-to-dose-rate conversion factors)는 1975년 ANSI-N666(American National Standard-Institute)<sup>1)</sup>에 의해 발표되었으며 이를 인용하여 이제까지 여러사람<sup>2-8)</sup>에 의해 계산된 선량률 환산인자로 인한 선량률 분포값 사이에 상호간의 불일치를 해소하게 되었다.

1957년 Snyder-Neufeld<sup>2)</sup>가 최대흡수선량 개념을 도입하여 어느 특정 에너지의 중성자 선량률 환산인자를 구하였다. 감마선에 대해서는 1959년 Henderson<sup>3)</sup>이 공기 Kerma 또는 인체조직 Kerma 개념을 이용하여 계산하였는데 이 개념은 물질내에서 다중충돌을 고려하지 않았기 때문에 인체가 피폭된 최대선량 보다 작은값을 나타내게 되고, 또한 Snyder-Neufeld가 중성자에 대해서 적용한 최대흡수선량 개념과도 일치되지 않았다. 1964년 Jones<sup>4)</sup>는 인체조직의 여러부분을 대상으로 에너지 범

\* 國際放射線防禦學會(IRPA)常任委員

위가 0.027~1.25Mor인 감마선에 대한 吸收線量을 측정하였으며 그는 기기 교정시 교정인자로 이들 값을 사용하도록 권고하였다<sup>6)</sup>. 1970년 Claiborne과 Trubey<sup>6)</sup>는 최대흡수선량 개념을 도입하여 30cm두께의 평판형 유사인체 조직(Slab phantom) 내에서 單一 에너지의 감마선에 대한 흡수선량 분포를 角分割코드(Discrete-ordinates code, Sn-Code)인 ANSIN코드(One dimensional code)<sup>9)</sup>와 몬테 카를로-코드(Monte Carlo Code)인 OGRE<sup>10)</sup>를 이용하여 계산하였다.

現在 에너지源으로 原子力發電에 置重하게 되며 屢연적으로 수반되는 방사선 피폭에 대한 피폭선량을 측정 해석하기 위하여 放射線場에서 선량의 분포를 계산하는데 표준이 되는 방법 및 자료가 切實히 要求되고 있다.

ANSI-N666에 발표된 선량을 환산인자는 1971년 NCRP(National Council on Radiation Protection and Measurement)에 의해서 선량을 환산인자로 사용하도록 권고되었다. 그러나 이 값은 단일 에너지로 不連續的이고 에너지 분포가 一次元的일때의 값으로 이를 방사선 선속이 에너지의 함수로 分布되는 非 조사체에 적용시키는 것은 不當한 결과를 가져오게 될 것으로 예측된다.

그러므로 본 연구에서는 ANSI N666에 발표된 이들을 근거로 하여 에너지 分布가 連續的인 放射線場에 대한 線量率 換算因子 값을 계산하였고 이 계산에 인용한 核定數資料(Cross section library)들은 DLC-23(CA-SK, 22 Neutrons+18 Gammas)<sup>11)</sup>, DLC-27(104 Neutrons+22 Gammas)<sup>12)</sup> DLC-31(37Neutrons+21 Gammas)<sup>13)</sup>, DLC-35(100 Neutrons+20 Gammas)<sup>14)</sup>, ORNL-51 Neutrons+25 Grmmas<sup>15)</sup>, LASL-39 Neutrons+12 Gammas<sup>16)</sup>, QAD-19 Gammas<sup>17)</sup> 등이며 계산된 이들 선량을 환산인자는 방사선 차폐해석 및 방사선방어 기술에 사용되어야 한다.

## 2. 中性子에 대한 線量率 換算因子 計算

Irving<sup>7)</sup>은 유사인체 조직내에서 에너지 범위가 0.5~60MeV인 중성자에 대한 선량을 分布를 몬테 카를로 방식(Monte Carlo Method)을 이용하여 구하였고 ANSI에 의한 계산은 에너지가  $2.5 \times 10^{-8} \sim 400$ MeV인 중성자에 대해서 NCRP<sup>18, 19)</sup>와 ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements)<sup>20)</sup>에 있는 최대 흡수선량 개념을 기초로 한 것이다.

NCRP에 依하면 어떤 특정된 中性子 에너지에서 최대 등가선량이  $10^{-2}$  Sievert Sv/40hr(100mrem/40hr)

Table 1. Neutron Flux-to-Dose-Rate Conversion Factors and Mean Quality Factors (QF)

Neutron Energy (MeV)	QF*	(Rem/h)/(Neut/cm <sup>2</sup> ·s)
2.5—08 <sup>+</sup>	2	3.67—06
1.0—07	2	3.67—06
1.0—06	2	4.46—06
1.0—05	2	4.54—06
1.0—04	2	4.18—06
1.0—03	2	3.76—06
1.0—02	2.5	3.56—06
1.0—01	7.5	2.17—05
5.0—01	11	9.26—06
1.0	11	1.32—04
2.5	9	1.25—04
5.0	8	1.56—04
7.0	7	1.47—04
10.0	6.5	1.47—04
14.0	7.5	2.08—04
20.0	8	2.27—04

\* Maximum value of QF in a 30-cm phantom.  
+ Read as  $2.5 \times 10^{-8}$ .

이 되는 線束密度의 값으로 나타내고 있으며 여기에서 사용한 유사인체조직체는 원주형이나 평판형이고 이 조직체 내의 흡수선량과 등가선량이 깊이의 함수로 표현된다는 것이고 선속밀도는 몬테 카를로(Monte Carlo) 방식이나 角分割法에 의해서 計算된 單位 中性子 후루언스(fluence)에 해당되는 最大等價線量의 값을 사용하여 求하였다.

본 研究에서는 中性子の 에너지 범위가  $2.5 \times 10^{-8} \sim 20$ MeV에 대한 선량을 환산인자(Rem/hr/Neutron/cm<sup>2</sup>·sec)값만 계산되었고, 이 에너지 범위에 대하여 ANSI에서 발표된 선량을 환산인자의 값이 표 1에 나와 있으며 이는 어떤 특정 에너지에 대한 값들이고 以外에 細分化된 선량을 환산인자 값들은 표 1에 나와 있지 않으며 이 상세한 값을 求하기 위하여 아래에 있는 方程式을 利用하였다.

또한 이 方程式을 이용하여 어떤 中性子の 平均 에너지 分布에 대한 線量率 分布값도 計算할 수 있다.

표 1에서 中性子 에너지가  $10^{-7} \sim 10^{-2}$ MeV에 대한 선량을 환산인자의 오차는  $\pm 3\%$  정도이며 以外의 다른 에너지 범위에 대해서는 각 에너지군에 있어서 에너지 分布가 直線的이라는 가정하에서 계산되어 있으나 본 연구에서는 각 에너지군에 있어서 에너지 분포는 직선

Table 2. Polynomial Coefficients for Neutron Flux-To-Dose-Rate Conversion Factors.

Neutron Energy (MeV)		A	B	C	D
2.5 -08	to 1.0 -07	-1.2514+01			
1.0 -07	to 1.0 -02	-1.2210+01	1.7165-01	2.6034-02	1.0273-03
0.01	to 0.1	-8.9302	7.8440-01		
0.1	to 0.5	-8.6632	9.0037-01		
0.5	to 1.0	-8.9359	5.0696-01		
1.0	to 2.5	-8.9359	-5.5979-02		
2.5	to 5.0	-9.2822	3.2193-01		
5.0	to 7.0	-8.4741	-1.8018-01		
7.0	to 10.0	-8.8247			
10.0	to 14.0	-1.1208+01	1.0352		
14.0	to 20.0	-9.1202	2.4395-01		

적이 아니라 가정하여 計算하였다.

ANSI에서 발표된 中性子에 대한 선량률 환산인자 값을 계산하는 一般의인 方程式은 다음과 같다.

$$I_n DF_n = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 \quad (1)$$

式 (1)에서

$DF_n$  = 中性子에 대한 선량률 환산인자 [(rem/hr/n/cm<sup>2</sup>·sec.)]

$$x = I_n E_n$$

$E_n$  = 中性子에너지 (MeV)이다.

(1)式的 상수값 A, B, C, D는 표 2<sup>1)</sup>에 나타나 있고 표 2에서 에너지 범위가  $2.5 \times 10^{-8}$  Mev에서 14 Mev에 대한 선량률의 計算은 다음 式<sup>1)</sup>을 利用하여 求할 수 있다. 즉,

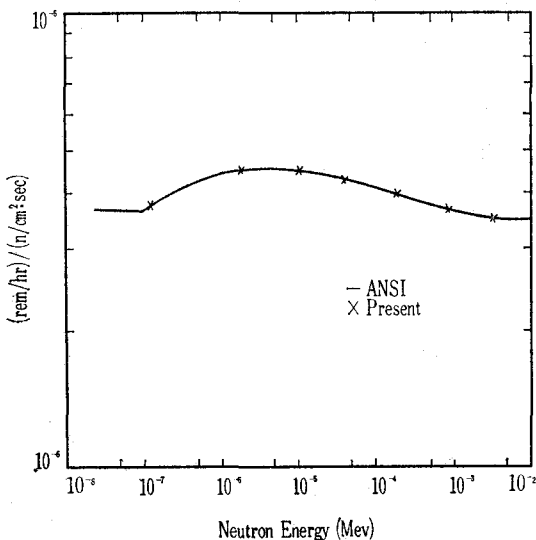


Fig. 1. Neutron flux to dose rate factors.

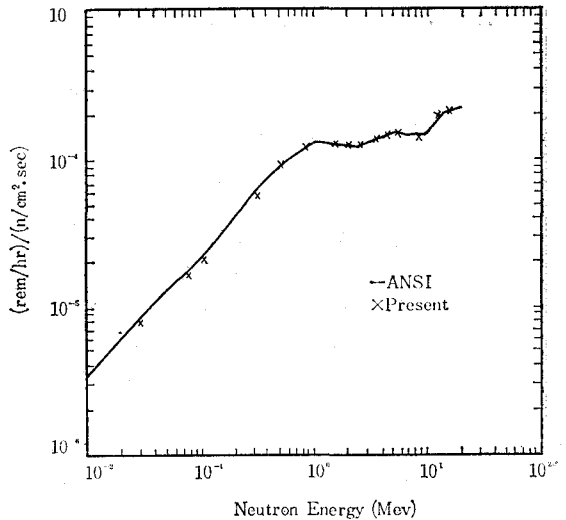


Fig. 2. Neutron flux-to-dose-rate factors.

$$\begin{aligned} \text{線量率} = & \int_{E_n^L}^{E_n^U} DF_n(E) \phi(E) dE \\ & + \int_{E_n^I}^{E_n^U} DF_n(E) \phi(E) dE \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2)에서

$E_n^L$  = 中性子の 낮은 에너지 경계

$E_n^U$  = 中性子の 높은 에너지 경계

$E_n^I$  = 中性子の 공통 에너지 경계

이다. 따라서 에너지 경계점을 여러개로 나누어 계산하고자 할때나 나누어야 할 필요가 있을때는 위의 식 (2)를 응용하면 될 것이다. 本研究에서는 식 (1)을 이용하여 序論에서 記述된 各種 核定數 資料들을 利用하-

여 계산된 中性자의 線量率 換算因子的 값들이 그림 1과 그림 2에 표시 되었으며 ANSI에 의한 값과 本研究에 의한 값이 잘 一致함을 보여주고 있다.

### 3. 감마線에 대한 線量率換算 因子 計算

본 研究에서 적용한 감마線 에너지 0.03~15MeV의 각 에너지에 대한 감마線 선량을 환산인자는 Claiborne과 Trubey<sup>3)</sup>에 의해서 遂行된 計算에 근거를 두고 있으며 그들에 의한 계산 절차는 다음과 같다.

多重 에너지군을 해석함에 사용되는 角分割法인 ANISN코드 및 몬테 카를로 방식을 사용하여 30cm 두께의 평판형 유사인체조직에 入射되는 감마線 에너지 0.02~16MeV에 대한 조직내의 선량 分布를 계산하고 이 결과에서 여러종류의 入射감마線에 대한 空間 線量率 分布와 감마線의 最大吸收線量을 求하였으며 모든 경우에 있어서 감마線의 최대 흡수선량은 조직내 표면에서 2cm두께에서 일어난다고 發表하였다. 따라서 이 값들은 원자로의 차폐계산이나 설계 및 다른 放射線場의 방사선량 分布·解析에 사용되는 감마線 線量率 換算因자를 計算하는 基本概念이 되었다.

한편 Wells와 Liversay<sup>4)</sup>에 의해서 계산된 유사인체 조직 Kerma 因자를 사용하여 X線 에너지 0.02~0.01 MeV에 대한 線量率 換算因자를 求하였으나 이와같이 낮은 에너지에서는 유사인체 조직내 최대 흡수선량과 조직 Kerma因子 사이의 차이는 無視할 정도임이 판명되었다.

본 研究에서 적용한 ANSI에 의한 여러 光子 에너지에 대한 선량을 환산인자는 표 3<sup>1)</sup>과 같고 표 4는 ANSI와 Claiborne-Trubey(OGRE)에 의해서 계산된 값들이다.

표 3, 표 4에 있는 선량을 환산들은 본 研究의 結果와 비교되며(그림 3, 4) ANISN의 값과 Claiborne-Trubey에 의해서 계산된 값들과 비교하면 그 오차의 범위가 ±3%이내임을 알 수 있고 특히 0.5MeV 이상의 에너지에 대해서는 ±1% 이내의 오차였다.

ANSI에서 제시된 光子의 선량을 환산인자를 계산하는 방정식은 다음과 같이 식 (1)과 같은 형식이 된다. 즉,

$$I_n DF_p = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 \quad (3)$$

식 (3)에서  $DF_p$  = 光子에 대한 선량을 환산인자 [(rem/hr)/(photon/cm<sup>2</sup>·sec)]

$$x = I_n E_p, \quad E_p = \text{光子의 에너지 (MeV)}$$

이다. 식 (3)의 상수값 A, B, C, D는 표 5<sup>1)</sup>에 표시되어 있다. 표 5에서와 같은 光子의 에너지 범위에 대한

Table 3. Gamma-Ray Flux-To-Dose Conversion Factors

Photon Energy (MeV)	(rem/h)/(Photon/cm <sup>2</sup> ·sec.)	mrem/hr/(MeV/cm <sup>2</sup> ·sec.)
0.01	3.96-06	3.96-1
0.03	5.82-07	1.94-2
0.05	2.90-07	5.80-3
0.07	2.58-07	3.69-3
0.1	2.83-07	2.83-3
0.15	3.79-07	2.53-3
0.2	5.01-07	2.51-3
0.25	6.31-07	2.52-3
0.3	7.59-07	2.53-3
0.35	8.78-07	2.51-3
0.4	9.85-07	2.46-3
0.45	1.08-06	2.40-3
0.5	1.17-06	2.34-3
0.55	1.27-06	2.31-3
0.6	1.36-06	2.27-3
0.65	1.44-06	2.22-3
0.7	1.52-06	2.17-3
0.8	1.68-06	2.10-3
1.0	1.98-06	1.98-3
1.4	2.51-06	1.79-3
1.8	2.99-06	1.66-3
2.2	3.42-06	1.55-3
2.6	3.83-06	1.47-3
2.8	4.01-06	1.43-3
3.25	4.41-06	1.36-3
3.75	4.83-06	1.29-3
4.25	5.23-06	1.23-3
4.75	5.60-06	1.18-3
5.0	5.80-06	1.16-3
5.25	6.01-06	1.14-3
5.75	6.38-06	1.11-3
6.25	6.74-06	1.08-3
6.75	7.11-05	1.05-3
7.5	7.66-06	1.02-3
9.0	8.77-06	9.74-4
11.0	1.03-05	9.36-4
13.0	1.18-05	9.08-4
15.0	1.33-05	8.87-4

선량률의 계산은 식 (2)와 같은 방법으로 구할 수 있고 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{線量率} = & \int_{E_p^L}^{E_p^U} DF_p(E)\phi(E)dE \\ & + \int_{E_p^L}^{E_p^U} DF_p(E)\phi(E)dE \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서

$E_p^L$  = 낮은 에너지 경계

$E_p^U$  = 높은 에너지 경계

$E_p^L$  = 공통 에너지 경계이다.

중성자의 경우에서와 마찬가지로 [식 (2)] 光자의 에너지 경계점을 여러개로 나누어 계산할때나 계산하여야 될 경우는 식 (4)를 응용하면 된다. 그림 3은 식 (3)을 이용하고 표 5의 값을 적용하여 나타낸 그림이고 이는 本 研究에서 식 (3) 및 식 (4)를 인용하고 이에 각종 核定數 資料<sup>11-17)</sup>들을 代入하여 계산된 光자의 선량률 환산인자들의 값과 잘 一致함을 보여 주며 그림 4는 감마선에 대한 선량률 환산인자 값을 ANSI 및 本 研究, GRIDS, GRASS, LSD-2<sup>21</sup>, QAD 등에서 사용된 값들을 상호비교하여 나타낸 것이다.

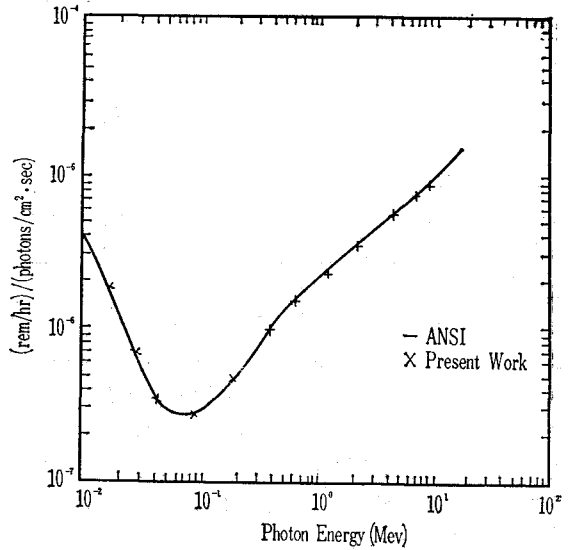


Fig. 3. Photon flux to dose rate factors

Table 4. Maximum Gamma-Ray Dose Rates in the Dose-Rate Distribution in a Slab Phantom\*

Group No	Group Energy Range (MeV)	Dose Rates for Normally Incident Flux (rad/h)/γ/(cm² sec)		ANISN Dose Rates for Isotropically Incident Flux (rad/h)/γ/(cm²·sec)
		ANISN	OGRE	
High-Energy Structure				
1	14 - 16	1.326-5	1.317-0(0.029)+	1.331-5
2	12 - 14	1.171-5		1.178-5
3	10 - 12	1.021-5		1.024-5
4	8 - 10	8.734-6	9.458-6(0.037)	8.760-6
5	7 - 8	7.625-6		7.660-6
6	6.5 - 7	7.074-6		7.112-6
7	6.0 - 6.5	6.710-6		6.750-6
8	5.5 - 6.0	6.339-6		6.379-6
9	5.0 - 5.5	5.961-6	5.938-6(0.34)	6.003-6
10	4.5 - 5.0	5.579-6		5.620-6
11	4.0 - 4.5	5.190-6		5.230-6
12	3.5 - 4.0	4.785-6		4.822-6
13	3.0 - 3.5	4.365-6		4.398-6
14	2.6 - 3.0	3.969-6		3.996-6
15	2.2 - 2.6	3.596-6		3.616-6
16	1.8 - 2.2	3.200-6	3.143-6(0.42)	3.210-6
17	1.35 - 1.8	2.727-6		2.721-6
18	0.9 - 1.35	2.141-6		2.109-6

Group No	Group Energy Range (MeV)	Dose Rates for Normally Incident Flux (rad/h)/ $\gamma$ /(cm <sup>2</sup> sec)		ANISN Dose Rates for Isotropically Incident Flux (rad/h)/ $\gamma$ /(cm <sup>2</sup> -sec)
		ANISN	OGRE	
High-Energy Structure				
19	0.6 — 0.9	1.581—5		1.516—6
20	0.4 — 0.6	1.173—6	1.140—6(1.5 )	1.077—6
21	0.2 — 0.4	7.208—7	7.363—7(1.9 )	6.088—7
22	0.1 — 0.2	4.506—7		

Table 4. (Cont.)

Low Energy Structure				
1	2.48—2.72	3.789—6		3.815—6
2	1.92—2.48	3.399—6		3.418—6
3	1.68—1.92	2.999—6		3.003—6
4	1.12—1.68	2.505—6		2.494—6
5	0.88—1.12	1.995—6		1.961—6
6	0.72—0.88	1.692—6		1.643—6
7	0.68—0.72	1.534—6	1.500—6(1.1 )	1.478—6
8	0.62—0.68	1.445—6		1.385—6
9	0.58—0.62	1.357—6		1.292—6
10	0.52—0.58	1.264—6		1.196—6
11	0.48—0.52	1.173—6	1.140—6(1.5 )	1.102—6
12	0.42—0.48	1.074—9		9.991—7
13	0.38—0.42	9.769—7		8.991—7
14	0.32—0.38	8.663—7		7.859—7
15	0.28—0.32	7.565—7	7.363—7(1.9 )	6.762—7
16	0.22—0.28	6.196—7		5.371—7
17	0.18—0.22	5.185—7		4.367—7
18	0.12—0.18	3.826—7		3.026—7
19	0.08—0.12	2.765—7		1.989—7
20	0.06—0.08	2.661—7		2.019—7
21	0.04—0.06	2.821—7		
22	0.02—0.04	5.867—7		

\* Infinite slab 30-cm thick- 11-element standard man composition; density, 1g/cm<sup>3</sup>.

+Parentheses include the estimate standard deviation in %

Table 5. Polynomial Coefficients for Gamm-Ray Flux-To-Dose-Rate Conversion Factors.

Photon Energy (MeV)	A	B	C	D
0.01 to 0.03	-2.0477+01	-1.7454		
0.03 to 0.5	-1.3626+01	-5.7117—01	-1.0954	-2.4897—01
0.5 to 5.0	-1.3133+01	7.2008—01	-3.3603—02	
5.0 to 15.0	-1.2791+01	2.8309—01	1.0873—01	

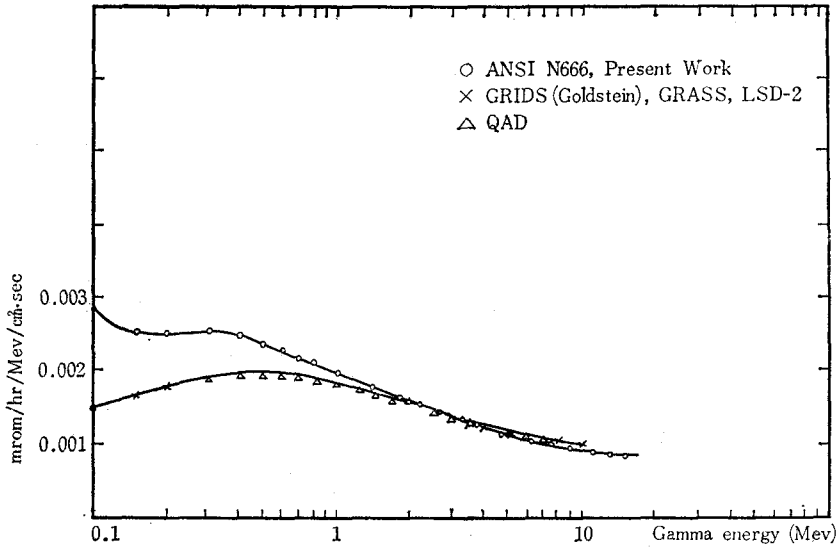


Fig. 4. Gamma-ray dose rate conversion factors

4. 放射線 線束 分布가 에너지 函數일때의 線量率 換算因子 計算

本 研究에 적용된 근본 개념은 最大吸收線量 개념이고 計算節次는 다음과 같다. 즉 각 에너지군에서 線束 스펙트럼(spectrum)이 0.414eV 이상의 中性子 에너지에 대해서는  $\frac{1}{E}$ 에 비례한다고 가정하고, 0.414eV 이상의 中性子와 감마선에 대해서는 直線의이라고 가정하여 式 (2)와 (4)를 結合하고 각 에너지 群(Energy group,  $E_{\epsilon}$ )에 대한 中性子와 감마선에 대한 線量率은 다음과 같이 表現된다.

$$\text{線量率} = \int_{E_{\epsilon,n,p}} DF_{\epsilon,n,p}(E) \phi(E) dE \quad (5)$$

식 (5)에서

$$DF_{\epsilon,n,p}(E) = \exp(A + Bx + Cx^2 + Dx^3)$$

$$x = l_n E_{\epsilon,n,p}$$

A, B, C, D = 상수 (표 2, 5 참조)이다.

식 (5)를 이용함에 있어 中性子の 에너지가 0.414eV 以上일때와 그 以下일때 및 全體 에너지일때로 區分하여 計算하면 다음과 같다.

1) 中性子の 에너지가 0.414eV 이상 일 때 :

$$\phi_{(E)} \propto \frac{1}{E} (E_{\epsilon,n}^L \sim E_{\epsilon,n}^U) \quad (6)$$

$$\text{線量率} = \sum_{\epsilon,n} DF_{\epsilon,n} \cdot \phi_{\epsilon,n} \quad (7)$$

식 (7)에서

$$DF_{\epsilon,n} = \int_{E_{\epsilon,n}} DF_{(E)} \cdot \frac{1}{E} dE / \int_{E_{\epsilon,n}} \frac{1}{E} dE$$

$$= \left[ \ln \left( \frac{E_{\epsilon,n}^U}{E_{\epsilon,n}^L} \right) \right]^{-1} \int_{E_{\epsilon,n}} DF_{(E)} \frac{1}{E} dE \quad (8)$$

2) 中性子の 에너지가 0.414eV 以下 일때와 감마선의 全體 에너지 일때 :

$$\text{線量率} = \sum_{\epsilon,n,p} DF_{\epsilon,n,p} \cdot \phi_{\epsilon,n,p} \quad (9)$$

식 (9)에서

$$DF_{\epsilon,n,p} = \int_{E_{\epsilon,n,p}} DF_{(E)} dE \quad (10)$$

위의 식 (8)의 해를 구하는데 수치적분법을 적용하기 위하여 다음과 같이 한다.

$$I_{\epsilon,n} = \int_{E_{\epsilon,n}} DF_{(E)} \frac{1}{E} dE$$

$$= \int_{E_{\epsilon,n}} \exp(A + Bx + Cx^2 + Cx^3) \times \frac{1}{E} dE$$

$$= \int_{x_{\epsilon,n}^L}^{x_{\epsilon,n}^U} \exp(A + Bx + Cx^2 + Cx^3) dx \quad (11)$$

식 (11)의 解를 求하기 위하여 다음과 같이 한다. 즉,

C = D = 0 이고, B ≠ 0 때 :

$$I_{\epsilon,n} = \exp A \cdot \frac{1}{B} [\exp(Bx_{\epsilon,n}^U) - \exp(Bx_{\epsilon,n}^L)] \quad (12)$$

B = 0 때 :

$$I_{e,n} = \exp A(x_{e,n}^v - x_{e,n}^l) \quad (13)$$

식 (11)에서  $C \approx 0$ ,  $D \approx 0$  때는 Simpson의 공식을 적용하면 다음과 같다. 즉  $x_{e,n}$ 를  $N$ (우수)개로 분할하면  $I_{e,n}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$I_{e,n} = \frac{h}{3}(f_0 + 4f_1 + 2f_3 + 4f_4 + \dots + \dots + 2f_{N-3} + 4f_{N-1} + f_2) \quad (14)$$

식 (14)에서  $f = \text{integrand}$ ,  $h = x_{e,n}/N$ 이다.

또한 식 (14)에서

$$\text{even} = f_2 + f_4 + \dots + f_{N-2}$$

$$\text{Odd} = f_1 + f_3 + \dots + f_{N-1} \text{ 이라고 두면}$$

$$I_{e,n} = \frac{h}{3}(f_0 + f_N + 2 \cdot \text{even} + 4 \cdot \text{Odd}) \quad (15)$$

$x_{e,n}$ 를  $2N$ 개로 분할하고 Simpson의 공식을 다시 적용하면.

$$I'_{e,n} = \frac{h'}{3}(f'_0 + 4f'_1 + 2f'_2 + \dots + 4f'_{N-1} + 2f'_{2N-2} + f'_{2N}) = \frac{h'}{3}(f'_0 + f'_{2N} + 2 \cdot \text{even}' + 4 \cdot \text{Odd}') \quad (16)$$

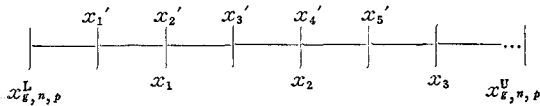
단 식 (16)에서

$$h' = \frac{1}{2}h, \quad f'_0 = f_0, \quad f'_{2N} = f_N$$

$$\text{even}' = f'_2 + f'_4 + \dots + f'_{2N-2} = f_1 + f_3 + f_5 + \dots + f_{N-1} = (\text{even}) + (\text{Odd})$$

$$\text{Odd}' = f'_1 + f'_3 + f'_5 + \dots + f'_{2N-1} \text{ 이다.}$$

분할 방법을 간단히 그림으로 표시하면 다음과 같다.



식 (15), (16)에서  $I_{e,n}/I'_{e,n}$ 를 비교 검토하여 수렴 여부를 조사한 후 만약 수렴하지 않으면  $x_{e,n}$ 를  $4N$ 개로 분할하여 계산 검토하며. 이와같은 과정을 수렴이 될 때까지 반복 계산 하였다. 감마선에 대하여서는 식(10)을 이용하여 다음과 같이 전개되며 중성자 때와 같은 위의 방법을 사용하여 계산하였다. 즉,

$$I_{e,p} = \int_{E_{e,p}} DF_{(E)} dE = \int_{E_{e,p}} \exp(A+Bx+Cx^2 + Dx^3) \times \exp(x) \cdot dx = \int_{E_{e,p}} \exp(A+Bx^1+Cx^2+Dx^3) \cdot dx \quad (17)$$

단,  $B' = B + 1$ 이다

위와 같은 수식의 계산은 본 연구에서는 전자계산기 (IBM-370)를 사용하여 수행하였으며 중성자와 감마선의 각 에너지群에 대한 선량률 환산因子的 계산 결과는 표 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12와 같으며 표 6~표 11

은 中性子 및 감마線에 대한 값들이고 표 12는 감마線 19群단의 값들이다. 이들 結果值를 그림 1, 2, 3, 4에 표시하였으며 그림에서 알 수 있는 바와같이 이本 研究의 計算값이 ANSI에서發表된 값과 잘 一致하고 있음을 알 수 있고, 표 11 및 표 12에서 LASL 및 QAD에 의한 값도 本 研究의 結果值와 比較하기 위하여 並記하였다.

Table 6. The Group Dose Rate Conversion Factors Based on ANSI-N666 for CASK-22 Group Neutron+18 Group Gamma (ELC-23) Structure

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit-Flux)
1	1.490 E 01	1.220 E 01	1.991 E -04
2	1.220 E 01	1.000 E 01	1.633 E -04
3	1.000 E 01	8.180 E 00	1.471 E -04
4	8.180 E 00	6.360 E 00	1.475 E -04
5	6.360 E 00	4.960 E 00	1.530 E -04
6	4.960 E 00	4.060 E 00	1.509 E -04
7	4.060 E 00	3.010 E 00	1.393 E -04
8	3.010 E 00	2.460 E 00	1.285 E -04
9	2.460 E 00	2.350 E 00	1.253 E -04
10	2.350 E 00	1.830 E 00	1.263 E -04
11	1.830 E 00	1.110 E 00	1.290 E -04
12	1.110 E 00	5.500 E -01	1.161 E -04
13	5.500 E -01	1.110 E -01	5.334 E -05
14	1.110 E -01	3.350 E -03	8.412 E -06
15	3.350 E -03	5.830 E -04	3.713 E -06
16	5.830 E -04	1.010 E -04	4.009 E -06
17	1.010 E -04	2.900 E -05	4.295 E -06
18	2.900 E -05	1.010 E -05	4.476 E -06
19	1.010 E -06	3.060 E -06	4.567 E -06
20	3.060 E -06	1.120 E -06	4.535 E -06
21	1.120 E -06	4.140 E -07	4.370 E -06
22	4.140 E -07	1.000 E -08	3.961 E -06
23	1.000 E 01	8.000 E 00	8.772 E -06
24	8.000 E 00	6.500 E 00	7.478 E -06
25	6.500 E 00	5.000 E 00	6.375 E -06
26	5.000 E 00	4.000 E 00	5.414 E -06
27	4.000 E 00	3.000 E 00	4.622 E -06
28	3.000 E 00	2.500 E 00	3.960 E -06
29	2.500 E 00	2.000 E 00	3.469 E -06
30	2.000 E 00	1.660 E 00	3.019 E -06



Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit-Flux)
31	1.660E 00	1.330E 00	2.628E-06
32	1.330E 00	1.000E 00	2.205E-06
33	1.000E 00	8.000E-01	1.833E-06
34	8.000E-01	6.000E-01	1.523E-06
35	6.000E-01	4.000E-01	1.185E-06
36	4.000E-01	3.000E-01	9.11E-07
37	3.000E-01	2.000E-01	6.757E-07
38	2.000E-01	1.000E-01	4.364E-07
39	1.000E-01	5.000E-02	3.418E-07
40	5.000E-02	1.000E-02	1.025E-06

**Table 7.** The Group Dose Rate Conversion Factors Based on ANSI-N666 for DLC-27, 104 Group Neutron+22Group Gamma Structure

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit-Flux)
1	1.500E 01	1.350E 01	2.082E-04
2	1.350E 01	1.221E 01	1.906E-04
3	1.221E 01	1.105E 01	1.718E-04
4	1.105E 01	1.000E 01	1.550E-04
5	1.000E 01	9.048E 00	1.471E-04
6	9.048E 00	8.187E 00	1.471E-04
7	8.187E 00	7.408E 00	1.471E-04
8	7.408E 00	7.000E 00	1.471E-04
9	7.000E 00	6.708E 00	1.476E-04
10	6.708E 00	6.360E 00	1.489E-04
11	6.360E 00	6.065E 00	1.503E-04
12	6.065E 00	5.488E 00	1.523E-04
13	5.488E 00	4.966E 00	1.550E-04
14	4.966E 00	4.750E 00	1.548E-04
15	4.750E 00	4.493E 00	1.523E-04
16	4.493E 00	4.066E 00	1.486E-04
17	4.066E 00	3.679E 00	1.439E-04
18	3.679E 00	3.329E 00	1.393E-04
19	3.329E 00	3.012E 00	1.349E-04
20	3.012E 00	2.725E 00	1.306E-04
21	2.725E 00	2.466E 00	1.265E-04
22	2.466E 00	2.350E 00	1.253E-04

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
23	2.350E 00	2.231E 00	1.256E-04
24	2.231E 00	2.019E 00	1.262E-04
25	2.019E 00	1.827E 00	1.269E-04
26	1.827E 00	1.653E 00	1.276E-04
27	1.653E 00	1.496E 00	1.283E-04
28	1.496E 00	1.353E 00	1.290E-04
29	1.353E 00	1.225E 00	1.297E-04
30	1.225E 00	1.108E 00	1.305E-04
31	1.108E 00	1.003E 00	1.312E-04
32	1.003E 00	9.072E-01	1.285E-04
33	9.072E-01	8.209E-01	1.221E-04
34	8.209E-01	7.427E-01	1.161E-04
35	7.427E-01	6.721E-01	1.103E-04
36	6.721E-01	6.081E-01	1.049E-04
37	6.081E-01	5.502E-01	9.970E-05
38	5.502E-01	4.979E-01	9.477E-05
39	4.979E-01	4.505E-01	8.821E-05
41	4.076E-01	3.688E-01	7.367E-05
42	3.688E-01	3.337E-01	6.732E-05
43	3.337E-01	3.020E-01	6.153E-05
44	3.020E-01	2.732E-01	5.623E-05
45	2.732E-01	2.472E-01	5.139E-05
46	2.472E-01	2.237E-01	4.696E-05
47	2.237E-01	2.024E-01	4.292E-05
48	2.024E-01	1.832E-01	3.923E-05
49	1.832E-01	1.657E-01	3.585E-05
50	1.657E-01	1.500E-01	3.277E-05
51	1.500E-01	1.357E-01	2.995E-05
52	1.357E-01	1.228E-01	2.737E-05
53	1.228E-01	1.111E-01	2.501E-05
54	1.111E-01	8.652E-02	2.150E-05
55	8.652E-02	6.738E-02	1.762E-05
56	6.738E-02	5.248E-02	1.448E-05
57	5.248E-02	4.087E-02	1.191E-05
58	4.087E-02	3.183E-02	9.785E-06
59	3.183E-02	2.479E-02	8.043E-06
60	2.479E-02	1.930E-02	6.610E-06
61	1.930E-02	1.503E-02	5.432E-06
62	1.503E-02	1.171E-02	4.465E-06
63	1.171E-02	9.119E-03	3.709E-06

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)	Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
64	9.119E-03	7.102E-03	3.554E-06	105	1.000E 01	8.000E 00	8.772E-06
65	7.102E-03	5.531E-03	3.563E-06	106	8.000E 00	6.500E 00	7.478E-06
66	5.531E-03	4.307E-03	3.577E-06	107	6.500E 00	5.000E 00	6.375E-06
67	4.307E-03	3.355E-03	3.596E-06	108	5.000E 00	4.000E 00	5.414E-06
68	3.355E-03	2.613E-03	3.618E-06	109	4.000E 00	3.000E 00	4.622E-06
69	2.613E-03	2.035E-03	3.644E-06	110	3.000E 00	2.500E 00	3.960E-06
70	2.035E-03	1.585E-03	3.674E-06	111	2.500E 00	2.000E 00	3.469E-06
71	1.585E-03	1.234E-03	3.707E-06	112	2.000E 00	1.660E 00	3.019E-06
72	1.234E-03	9.611E-04	3.743E-06	113	1.660E 00	1.330E 00	2.628E-06
73	9.611E-04	7.485E-04	3.782E-06	114	1.330E 00	1.000E 00	2.250E-06
74	7.485E-04	5.829E-04	3.824E-06	115	1.000E 00	8.000E-01	1.833E-06
75	5.829E-04	4.540E-04	3.867E-06	116	8.000E-01	6.000E-01	1.523E-06
76	4.540E-04	3.536E-04	3.912E-06	117	6.000E-01	5.200E-01	1.289E-06
77	3.536E-04	2.754E-04	3.959E-06	118	5.200E-01	5.000E-01	1.200E-06
78	2.754E-04	2.145E-04	4.007E-06	119	5.000E-01	4.000E-01	1.099E-06
79	2.145E-04	1.670E-04	4.055E-06	120	4.000E-01	3.000E-01	9.114E-07
80	1.670E-04	1.301E-04	4.104E-06	121	3.000E-01	2.600E-01	7.507E-07
81	1.301E-04	1.013E-04	4.153E-06	122	2.600E-01	2.500E-01	6.887E-07
82	1.013E-04	7.889E-05	4.202E-06	123	2.500E-01	2.000E-01	6.131E-07
83	7.889E-05	6.144E-05	4.250E-06	124	2.000E-01	1.000E-01	4.364E-07
84	6.144E-05	4.785E-05	4.296E-06	125	1.000E-01	5.000E-02	3.418E-07
85	4.785E-05	3.727E-05	4.341E-06	126	5.000E-02	2.000E-02	6.516E-07
86	3.727E-05	2.902E-05	4.383E-06				
87	2.902E-05	2.260E-05	4.422E-06				
88	2.260E-05	1.760E-05	4.459E-06				
89	1.760E-05	1.371E-05	4.491E-06				
90	1.371E-05	1.068E-05	4.519E-06				
91	1.068E-05	8.315E-06	4.542E-06				
92	8.315E-06	6.476E-06	4.560E-06				
93	6.476E-06	5.043E-06	4.572E-06				
94	5.043E-06	3.928E-06	4.578E-06				
95	3.928E-06	3.059E-06	4.577E-06				
96	3.059E-06	2.382E-06	4.568E-06				
97	2.382E-06	1.855E-06	4.552E-06				
98	1.855E-06	1.445E-06	4.528E-06				
99	1.445E-06	1.125E-06	4.495E-06				
100	1.125E-06	8.864E-07	4.455E-06				
101	8.864E-07	6.826E-07	4.406E-06				
102	6.826E-07	5.316E-07	4.346E-06				
103	5.316E-07	4.140E-07	4.278E-06				
104	4.140E-07	1.000E-10	3.954E-06				

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)
1	1.960E 01	1.690E 01	2.221E-04
2	1.690E 01	1.490E 01	2.148E-04
3	1.490E 01	1.420E 01	2.103E-04
4	1.420E 01	1.380E 01	2.078E-04
5	1.380E 01	1.280E 01	1.975E-04
6	1.280E 01	1.220E 01	1.853E-04
7	1.220E 01	1.110E 01	1.722E-04
8	1.110E 01	1.000E 01	1.553E-04
9	1.000E 01	9.050E 00	1.471E-04
10	9.050E 00	8.190E 00	1.471E-04
11	8.190E 00	7.410E 00	1.471E-04

Table 8. The Group Dose Rate Conversion Factors Based on ANSI-N666 for DLC-31, 37 Group Neutron-21 Group Gamma Structure

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
12	7.410E 00	6.380E 00	1.478E-04
13	6.380E 00	4.970E 00	1.529E-00
14	4.970E 00	4.720E 00	1.547E-04
15	4.720E 00	4.070E 00	1.497E-04
16	4.070E 00	3.010E 00	1.394E-04
17	6.010E 00	2.390E 00	1.281E-04
18	2.390E 00	2.310E 00	1.254E-04
19	2.310E 00	1.830E 00	1.264E-04
20	1.830E 00	1.110E 00	1.290E-04
21	1.110E 00	5.500E-01	1.161E-04
22	5.500E-01	1.580E-01	6.047E-05
23	1.580E-01	1.110E-01	2.181E-05
24	1.110E-01	5.250E-02	1.786E-05
25	5.250E-02	2.480E-02	9.914E-06
26	2.480E-02	2.190E-02	6.938E-06
27	2.190E-02	1.030E-02	4.986E-06
28	1.030E-02	3.350E-03	3.572E-06
39	3.350E-03	1.230E-03	3.661E-06
30	1.230E-03	5.830E-04	3.783E-06
31	5.830E-04	1.010E-04	4.009E-06
32	1.010E-04	2.900E-05	4.295E-06
33	2.900E-05	1.070E-05	4.473E-06
34	1.070E-05	3.060E-06	4.566E-06
35	3.060E-06	1.130E-06	4.536E-06
36	1.130E-06	4.140E-07	4.371E-06
37	4.140E-07	1.000E-11	3.954E-06
38	1.400E 01	1.000E 01	1.102E-05
39	1.000E 01	8.000E 00	8.772E-06
40	8.000E 00	7.000E 00	7.663E-06
41	7.000E 00	6.000E 00	6.926E-06
42	6.000E 00	5.000E 00	6.191E-06
43	5.000E 00	4.000E 00	5.414E-06
44	4.000E 00	3.000E 00	4.622E-06
45	3.000E 00	2.500E 00	3.960E-06
46	2.500E 00	2.000E 00	3.469E-06
47	2.000E 00	1.500E 00	2.927E-06
48	1.500E 00	1.000E-01	2.316E-06
49	1.000E 00	7.000E-01	1.756E-06
50	7.000E-01	4.500E-01	1.313E-06
51	4.500E-01	3.000E-01	9.609E-07
52	3.000E-01	1.500E-01	1.137E-07

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
53	1.500E-01	1.000E-02	3.829E-07
54	1.000E-01	7.000E-02	3.319E-07
55	7.000E-02	4.500E-02	3.699E-07
56	4.500E-02	3.000E-02	6.112E-07
57	3.000E-02	2.000E-02	8.267E-07
58	2.000E-02	1.000E-02	2.144E-06

Table 9. The Group Dose Rate Conversion Factors Based on ANSI-N666 for EURLIB (DLC-35), 100 Group Neutron+20 Group Gamma Group Structure

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)
1	1.492E 01	1.350E 01	2.080E-04
2	1.350E 01	1.221E 01	1.906E-04
3	1.221E 01	1.105E 01	1.718E-04
4	1.105E 01	1.000E 01	1.550E-04
5	1.000E 01	9.048E 00	1.471E-04
6	9.048E 00	8.187E 00	1.471E-04
7	8.187E 00	7.408E 00	1.471E-04
8	7.408E 00	7.047E 00	1.471E-04
9	7.047E 00	6.703E 00	1.476E-04
10	6.703E 00	6.376E 00	1.489E-04
11	6.376E 00	6.065E 00	1.502E-04
12	6.065E 00	5.488E 00	1.523E-04
13	5.488E 00	4.966E 00	1.550E-04
14	4.966E 00	4.724E 00	1.547E-04
15	4.724E 00	4.493E 00	1.522E-04
16	4.493E 00	4.066E 00	1.486E-04
17	4.066E 00	3.679E 00	1.439E-04
18	3.679E 00	3.329E 00	1.393E-04
19	3.329E 00	3.011E 00	1.349E-04
20	3.011E 00	2.725E 00	1.306E-04
21	2.725E 00	2.466E 00	1.265E-04
22	2.466E 00	2.346E 00	1.253E-04
23	2.346E 00	2.231E 00	1.256E-04
24	2.231E 00	2.019E 00	1.262E-04
25	2.019E 00	1.827E 00	1.269E-04
26	1.827E 00	1.653E 00	1.276E-04

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)	Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
27	1.653E 00	1.496E 00	1.283E -04	68	7.102E -03	5.531E -03	3.563E -06
28	1.496E 00	1.353E 00	1.290E -04	69	5.531E -03	4.307E -03	3.577E -06
29	1.353E 00	1.225E 00	1.297E -04	70	4.307E -03	3.355E -03	3.596E -06
30	1.225E 00	1.108E 00	1.305E -04	71	3.355E -03	2.613E -03	3.618E -06
31	1.108E 00	1.003E 00	1.312E -04	72	2.613E -03	2.035E -03	3.644E -06
32	1.003E 00	9.072E -01	1.285E -04	73	2.035E -03	1.585E -03	33.674E -06
33	9.072E -01	8.209E -01	1.221E -04	74	1.585E -03	1.234E -03	3.707E -06
34	8.209E -01	7.427E -01	1.161E -04	75	1.234E -03	9.611E -04	3.743E -06
35	7.427E -01	6.721E -01	1.103E -04	76	9.611E -04	7.485E -04	3.782E -06
36	6.721E -01	6.081E -01	1.049E -04	77	7.485E -04	5.830E -04	3.824E -06
37	6.081E -01	5.502E -01	9.970E -05	78	5.830E -04	4.540E -04	3.867E -06
38	5.502E -01	4.979E -01	9.477E -05	79	4.540E -04	3.536E -04	3.912E -06
39	4.979E -01	4.505E -01	8.821E -05	80	3.536E -04	2.754E -04	3.959E -06
40	4.505E -01	4.076E -01	8.061E -05	81	3.754E -04	2.145E -04	4.007E -06
41	4.076E -01	3.688E -01	7.367E -05	82	2.145E -04	1.670E -04	4.055E -06
42	3.688E -01	3.337E -01	6.732E -05	83	1.670E -04	1.301E -04	4.104E -06
43	3.337E -01	3.020E -01	6.153E -05	84	1.301E -04	1.013E -04	4.153E -06
44	3.020E -01	2.732E -01	5.623E -05	85	1.013E -04	7.889E -05	4.202E -06
45	2.732E -01	2.472E -01	5.139E -05	86	7.889E -05	6.144E -05	4.250E -06
46	2.472E -01	2.237E -01	4.696E -05	87	6.144E -05	4.785E -05	4.296E -06
47	2.237E -01	2.024E -01	4.292E -05	88	4.785E -05	3.727E -05	4.341E -06
48	2.024E -01	1.832E -01	3.923E -05	89	3.727E -05	2.902E -05	4.383E -06
49	1.832E -01	1.657E -01	3.585E -05	90	2.902E -05	2.260E -05	4.422E -06
50	1.657E -01	1.500E -01	3.277E -05	91	2.260E -05	1.760E -05	4.459E -06
51	1.500E -01	1.357E -01	2.995E -05	92	1.760E -05	1.068E -05	4.505E -06
52	1.357E -01	1.228E -01	2.737E -05	93	1.068E -05	8.315E -06	4.542E -06
53	1.228E -01	1.111E -01	2.501E -05	94	8.315E -06	5.044E -06	4.566E -06
54	1.111E -01	8.652E -02	2.150E -05	95	5.044E -06	3.059E -06	4.577E -06
55	8.652E -02	6.738E -02	1.762E -05	96	3.059E -06	1.855E -06	4.560E -06
56	6.738E -02	5.248E -02	1.448E -05	97	1.855E -06	1.125E -06	4.511E -06
57	5.248E -02	4.087E -02	1.191E -05	98	1.125E -06	6.250E -07	4.420E -06
58	4.087E -02	3.183E -02	9.785E -06	99	6.250E -07	4.140E -07	4.300E -06
59	3.183E -02	2.605E -02	8.196E -06	100	4.140E -07	1.000E -09	3.955E -06
60	2.605E -02	2.479E -02	7.423E -06	101	1.400E 01	1.200E 01	1.178E -05
61	2.479E -02	2.357E -02	7.138E -06	102	1.200E 01	1.000E 01	1.026E -05
62	2.357E -02	2.187E -02	6.796E -06	103	1.000E 01	8.000E 00	8.772E -06
63	2.187E -02	1.931E -02	6.287E -06	104	8.000E 00	6.500E 00	7.478E -06
64	1.931E -02	1.503E -02	5.433E -06	105	6.500E 00	5.000E 00	6.375E -06
65	1.503E -02	1.171E -02	4.465E -06	106	5.000E 00	4.000E 00	5.414E -06
66	1.171E -02	9.119E -03	3.709E -06	107	4.000E 00	3.000E 00	4.622E -06
67	9.119E -03	7.102E -03	3.554E -06	108	3.000E 00	2.500E 00	3.960E -06

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)	Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
109	2.500E 00	2.000E 00	3.469E-06	22	2.237E-01	1.832E-01	4.108E-05
110	2.000E 00	1.660E 00	3.019E-06	23	1.832E-01	1.500E-01	3.431E-05
111	1.660E 00	1.330E 00	2.618E-06	24	1.500E-01	1.228E-01	2.865E-05
112	1.330E 00	1.000E 00	2.205E-06	25	1.228E-01	8.652E-02	2.250E-05
113	1.000E 00	8.000E-01	1.833E-06	26	8.652E-02	5.247E-02	1.605E-05
114	8.000E-01	6.000E-01	1.523E-06	27	5.247E-02	4.087E-02	1.190E-05
115	6.000E-01	4.000E-01	1.185E-06	28	4.087E-02	3.183E-02	9.785E-06
116	4.000E-01	3.000E-01	6.541E-07	29	3.183E-02	2.479E-02	8.042E-06
117	3.000E-01	2.000E-01	6.717E-07	30	2.479E-02	1.930E-02	6.610E-06
118	2.000E-01	1.000E-01	4.364E-07	31	1.930E-02	1.503E-02	5.433E-06
119	1.000E-01	5.000E-02	3.418E-07	32	1.503E-02	1.102E-03	3.909E-06
120	5.000E-02	2.000E-02	6.516E-07	33	1.102E-03	4.307E-03	3.570E-06
				34	4.307E-03	3.355E-03	3.596E-06
				35	3.355E-03	2.613E-03	3.618E-06
				36	2.613E-03	2.035E-03	3.644E-06
				37	2.035E-03	1.585E-03	3.674E-06
				38	1.585E-03	1.234E-03	3.707E-06
				39	1.234E-03	9.611E-04	3.743E-06
				40	9.611E-04	4.540E-04	3.824E-06
				41	4.540E-04	2.144E-04	3.959E-06
				42	2.144E-04	1.013E-04	4.104E-06
				43	1.013E-04	4.785E-05	4.249E-06
				44	4.785E-05	2.260E-05	4.382E-06
				45	2.260E-05	1.068E-05	4.490E-06
				46	1.068E-05	5.043E-06	4.558E-06
				47	5.043E-06	2.382E-06	4.574E-06
				48	2.382E-06	1.125E-06	4.525E-06
				49	1.125E-06	4.140E-07	4.371E-06
				50	4.140E-07	1.000E-07	4.043E-06
				51	1.000E-07	3.000E-08	3.675E-06
				52	1.300E 01	1.020E 01	1.072E-05
				53	1.020E 01	8.000E 00	8.846E-06
				54	8.000E 00	6.270E 00	7.394E-06
				55	6.270E 00	4.920E 00	6.258E-06
				56	4.920E 00	3.860E 00	5.331E-06
				57	3.860E 00	3.030E 00	4.577E-06
				58	3.030E 00	2.360E 00	3.906E-06
				59	2.360E 00	1.860E 00	3.323E-06
				60	1.860E 00	1.460E 00	2.824E-06
				61	1.460E 00	1.150E 00	2.390E-06
				62	1.150E 00	8.990E-01	2.012E-06

Table 10. The Group Dose Rare Conversion Factors Based on ANSI-N666 for ORNL-51 Group Neutron+25 Group Gamma Structure

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)
1	1.492E 01	1.221E 01	1.993E-04
2	1.221E 01	1.000E 01	1.634E-04
3	1.000E 01	8.187E 00	1.471E-04
4	8.187E 00	6.703E 00	1.472E-04
5	6.703E 00	5.488E 00	1.509E-04
6	5.488E 00	4.493E 00	1.542E-04
7	4.493E 00	3.679E 00	1.462E-04
8	3.679E 00	3.012E 00	1.371E-04
9	3.012E 00	2.466E 00	1.286E-04
10	2.466E 00	2.019E 00	1.258E-04
11	2.019E 00	1.653E 00	1.272E-04
12	1.653E 00	1.353E 00	1.286E-04
13	1.353E 00	1.108E 00	1.301E-04
14	1.108E 00	9.072E-01	1.298E-04
15	9.072E-01	7.427E-01	1.191E-04
16	7.427E-01	6.081E-01	1.076E-04
17	6.081E-01	4.979E-01	9.724E-05
18	4.979E-01	4.076E-01	8.441E-05
19	4.076E-01	3.337E-01	7.050E-05
20	3.337E-01	2.732E-01	5.888E-05
21	2.732E-01	2.237E-01	4.918E-05

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)	Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion factors(rem/hr/Unit Flux)
63	8.990E-01	7.050E-01	1.684E-06	70	1.640E-01	1.290E-01	4.248E-07
64	7.050E-01	5.530E-01	1.406E-06	71	1.290E-01	1.010E-01	3.643E-07
65	5.530E-01	4.340E-01	1.172E-06	72	1.010E-01	2.790E-02	3.335E-07
66	4.340E-01	3.400E-01	9.879E-07	73	7.920E-02	6.220E-02	3.334E-07
67	3.400E-01	2.670E-01	8.069E-07	74	6.220E-02	4.880E-02	3.719E-07
68	2.670E-01	2.090E-01	6.458E-07	75	4.880E-02	3.820E-02	4.738E-07
69	2.090E-01	1.640E-01	5.173E-07	76	3.820E-02	3.000E-02	7.041E-07

Table 11. The Group Dose Rate Conversion Factors Based on ANSI-N666 for LASL-30 Group Neutron+21 Group Gamma Structure

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)	(LASL* Values)
1	1.700E 01	1.500E 01	2.151E-04	2.15 E-04
2	1.500E 01	1.350E 01	2.082E-04	2.08 E-04
3	1.350E 01	1.200E 01	1.889E-04	1.89 E-04
4	1.200E 01	1.000E 01	1.619E-04	1.62 E-04
5	1.000E 01	7.790E 00	1.471E-04	1.47 E-04
6	7.790E 00	6.070E 00	1.481E-04	1.48 E-04
7	6.070E 00	3.680E 00	1.506E-04	1.51 E-04
8	3.680E 00	2.865E 00	1.360E-04	1.36 E-04
9	2.865E 00	2.232E 00	1.267E-04	1.27 E-04
10	2.232E 00	1.738E 00	1.267E-04	1.27 E-04
11	1.738E 00	1.353E 00	1.825E-04	1.28 E-04
12	1.353E 00	8.230E-01	1.284E-04	1.29 E-04
13	8.230E-01	5.000E-01	1.053E-04	1.06 E-04
14	5.000E-01	3.030E-01	7.453E-05	7.59 E-05
15	3.030E-01	1.840E-01	4.752E-05	4.84 E-05
16	1.840E-01	6.760E-02	2.496E-05	2.67 E-05
17	6.760E-02	2.480E-02	1.107E-05	1.18 E-05
18	2.480E-02	9.120E-03	5.056E-06	5.38 E-06
19	9.120E-03	3.350E-03	3.572E-06	3.57 E-06
20	3.350E-03	1.235E-03	3.661E-06	3.65 E-06
21	1.235E-03	4.540E-04	3.804E-06	3.79 E-06
22	4.540E-04	1.670E-04	3.983E-06	3.97 E-06
23	1.670E-04	6.140E-05	4.177E-06	4.16 E-06
24	6.140E-05	2.260E-06	4.361E-06	4.35 E-06
25	2.260E-05	8.320E-06	4.503E-06	4.49 E-06
26	8.320E-06	3.060E-06	4.572E-06	4.57 E-06
27	3.060E-06	1.130E-06	4.536E-06	4.54 E-06
28	1.130E-06	4.140E-07	4.371E-06	4.39 E-06

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)	LASL* (Values)
29	4.140E-07	1.520E-07	4.096E-06	4.10 E-06
30	1.520E-07	1.000E-09	3.710E-06	3.67 E-06
31	1.000E 01	9.000E-00	9.142E-06	9.15 E-06
32	9.000E 00	8.000E 00	8.401E-06	8.41 E-06
33	8.000E 00	7.000E 00	7.663E-06	7.67 E-06
34	7.000E 00	6.000E 00	6.926E-06	6.93 E-06
35	6.000E 00	5.000E 00	6.191E-06	6.20 E-06
36	5.000E 00	4.000E 00	5.414E-06	5.41 E-06
37	4.000E 00	3.000E 00	4.622E-06	4.62 E-06
38	3.000E 00	2.000E 00	3.714E-06	3.71 E-06
39	2.000E 00	1.000E 00	2.621E-06	2.62 E-06
40	1.000E 00	5.000E-01	1.596E-06	1.60 E-06
41	5.000E-01	1.000E-01	7.806E-07	7.42 E-07
42	1.000E-01		6.453E-07	65.4 E-07

\* See Battat & Dudziak, LASL-INS-Report T-1-75-1304 "Shielding Calculations for the Intense Neutron Source Facility-I" (Also based on ANSI N666)

Table 12. The Group Dose Rate Conversion Factors Based on ANSI-N666, QAD Gamma-Ray Group Structure-19 Groups

Group	Upper Energy (MeV)	Lower Energy (MeV)	Conversion Factors (rem/hr/Unit Flux)	QAD Values
1	8.000E 00	6.500E 00	7.478E-06	7.53-6
2	6.500E 00	5.500E 00	6.559E-06	6.61-6
3	5.500E 00	4.750E 00	5.902E-06	5.95-6
4	4.750E 00	4.250E 00	5.416E-06	5.39-5
5	4.250E 00	3.750E 00	5.033E-06	4.98-6
6	3.750E 00	3.250E 00	4.626E-06	4.54-6
7	3.250E 00	2.760E 00	4.195E-06	
8	2.760E 00	2.260E 00	3.729E-06	3.57-6
9	2.260E 00	1.860E 00	3.270E-06	3.19-6
10	1.860E 00	1.560E 00	2.883E-06	2.71-6
11	1.560E 00	1.360E 00	2.586E-06	2.41-6
12	1.360E 00	1.160E 00	2.332E-06	2.16-6
13	1.160E 00	9.100E-01	2.027E-06	1.80-6
14	9.100E-00	7.600E-01	1.735E-06	1.54-6
15	7.600E-01	6.600E-01	1.540E-06	1.32-6
16	6.600E-01	5.600E-01	1.374E-06	1.14-6
17	5.600E-01	4.600E-01	1.200E-06	9.55-7
18	4.600E-01	3.600E-01	1.031E-06	7.62-7
19	3.600E-01	2.600E-01	8.214E-07	5.57-7

## 5. 結 論

本 研究에서 기술된 線量率 換算因子는 NCRP에서 권고된 最近 자료인 ANSI N666을 근거로 하여 계산하였다.

어떤 放射線施設物的 차폐체를 부과하는 방사선 線束密度 分布는 放射線 輸送理論을 도입하여 계산함으로써 더욱 精密한 결과를 얻을 수 있고 線量率 分布는 이 線束密度 값에 本 研究의 結果인 線量率 換算因子들을 적용시키면 얻을 수 있다.

但 ANSI와 本 研究에서의 線量率 換算因子 값에 대한 근거와 차이점은 다음과 같다. 즉

1) ANSI에서는 유사인체조직 내에서 방사선의 에너지 分布가 全體에너지에 대해서 直線的이라고 가정하여 계산하였고,

2) 本 研究에서는 두 경우로 구분하여 계산하였다. 즉,

① 中性子の 에너지가 0.414eV 이상일 때는 中性子の 線束이  $\frac{1}{E}$ 에 比例하고,

② 0.414eV 이하의 中性子와  $\gamma$ -線에 대해서는 방사선의 線束分布가 直線的이라고 가정하여 計算하였다.

本 研究에서 계산된 線量率 換算因子 값과 ANSI에서 발표된 값이 잘 一致됨을 보여 주었다. (그림 1, 2, 3, 4 참조)

따라서 本 研究의 結果는 中性子와  $\gamma$ -線에 대한 線量率 換算因子 計算에 適合함을 立證한다고 하겠으며 방사선 차폐 해석이나 방사선 防禦技術에 있어서 重要한 資料가 될 것이다.

## 참 고 문 헌

- 1) American National Standard Institute N666 (ANSI-666), Neutron and Gamma-ray Flux-to-Dose-Rate Factors (1975).
- 2) W.S. Snyder and J. Neufeld, On the Passage of Heavy Particles through Tissue, Radiation Res, 6, 67 (1967). Also in NBS Handbook 63.
- 3) B. J. Henderson, Conversion of Neutron or Gamma-Ray Flux to Absorbed Dose Rate, XDC 59-8-179, General Electric Co. (1959).
- 4) A.R. Jones, Measurement of the Dose Absorbed in Various Organs as a Function of the External Gamma-Ray Exposure, AECL-2240,

Atomic Energy of Canada, Ltd. (1964).

- 5) A.R. Jones, Proposed Factors for Various Dosimeters at Different Energies, *Health Physics*, 12, 663. (1966).
- 6) H.C. Claiborne and D.K. Trubey, Dose Rates in a Slab Phantom from Monoenergetic Gamma Rays, *Nucl. Appl. Tech*, 8, 450. (1970).
- 7) D.C. Irving, R. G Alsmiller, Jr. and H.S. Moran, Tissue Current-to-Dose conversion Factors for Neutrons with Energies from 0.5 to 61 MeV, *Nucl. Inst; Methods* 51, 129 (1967) also as ORNL-4302 (Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, (1967).
- 8) M.B. Wells and R.B. Livesay, Calculation of Tissue Kerma Factors for Monoenergetic X-Rays between 0.1 KeV, Radiation Research Associates, Inc. Research Note RRA-N7216, August 1, (1972).
- 9) W.W. Engle, Jr. A User's Manual for ANISN, A One Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering, K-1693, Union Carbide Corporation, Nuclear Division (1967).
- 10) S.K. Denny, D.K. Trubey, and M.B. Emmett, OGRE, A Monte Carlo system for Gamma-Ray Transport Studies, Including an Example (OGR: E-P1) for Transmissions Through Laminated Slabs, ORNL-3805, *Oak Ridge National Laboratory* (1966).
- 11) Group coupled Neutron and Gamma-Ray Cross-Section Data, DLC-23, *Oak Ridge National Laboratory* (1975).
- 12) 126 Group Coupled Neutron and Gamma-Ray Transport Cross-Section Data Generated by AMPX, DLC-27, *Oak Ridge National Laboratory* (1973).
- 13) D.E. Bartine, J.R. Knight, J.V. Pace and R. Rousin, Production and Testing of the ONA. Few-Group Coupled Neutron-Gamma Cross-Section Library, DLC-31 (ORNL/TM-4840), *Oak Ridge National Laboratory* (1977).
- 14) 120 Group Coupled Neutron and Gamma-Ray (Cross-Section Library, DLC-35, *Oak Ridge National Laboratory* (1976).
- 15) 76 Group coupled Neutron and Gamma-Ray



- Cross-section Data, *Oak Ridge National Laboratory* (1975).
- 16) 51 Group Coupled Neutron and Gamma-Ray Cross-Section Library, *Los Alamos Scientific Laboratory* (1973).
- 17) E. Solomito and J.R. Stockton, Modification of the point Kernel code QAD-P5A: Conversion to the IBM-360 computer and Incorporation of Additional Geometry Routines, USAEC Report ORNL-4181, *Oak Ridge National Laboratory* (1968).
- 18) Protection Against Neutron Radiation, NCRP-38, National Council on Radiation Protection and Measurements, *Washington D.C.* (1971).
- 19) Basic Radiation Protection Criteria, NCRP-39, National Council on Radiation and Measurements, *Washing, D.C.* (1971).
- 20) Radiation Quantities and Units, ICRU-19, International commission on Radiation Units and Measurements, *Washington, D.C.* (1971).
- 21) C. Hess, A User's Manual for LSD-2, Calculation of Gamma-Ray Dose Rates from Cylindrical sources, Burns and Roe, Incorporation, *New Jersey, U.S.A.* (1976).