

## 개인선량계 교정을 위한 환산인자 계산

이원구, 이태영, 하정우

한국원자력연구소

### 요 약

MCNP 코드를 사용하여 IAEA에서 권고하고 있는 물팬텀과 미국내 선량계 성능시험 프로그램에서 규정하고 있는 PMMA 팬텀내 0.07mm 및 10mm 깊이에서의 환산인자  $H(d)/K_a$ 를 계산하였다. 계산은 팬텀의 한면에 수직으로 입사하는 단일에너지 광자의 확장정 열법에 대해 수행하였다. 결과는 팬텀내에서 정의되는 선량당량으로 선량계를 교정할 때 환산인자로 사용될 수 있다.

Key words : 선량계, 환산인자, 물팬텀, PMMA팬텀, MCNP코드.

### 서 론

개인모니터링에서 종래의 관행은 광자조사  
의 경우 조사선량, 흡수선량 및 선량당량을 동일하게  
간주하여 왔다. 이는 자유공기중의 조사선량은  
선량당량과 동일하며, 그리고 인체에 의한 방사  
선의 흡수 및 산란효과를 무시하고 있음을 시사  
하고 있다. 그러나 신개념(1)에 바탕을 둔 피폭  
선량평가 및 절차는 대상물리량을 정확하게 나  
타내도록 요구하고 있다. 이와 관련하여 국제방  
사선단위 및 측정위원회(ICRU)는 그 보고서에(2)  
개인모니터링 목적으로 심부선량당량  $H_p(10)$ 과  
표층선량당량  $H_s(0.07)$ 을 정의하였는데,  $H_p(10)$ 과  
 $H_s(0.07)$ 는 조사방향깊이 10mm와 0.07mm에서  
인체조직이 받는 선량당량으로 각각 정의된다.  
따라서 이에 따른 기술적 대응으로서 주요관심  
사는 개인선량계로  $H_p(10)$ 과  $H_s(0.07)$ 을 어떻게  
측정할 것인가에 초점이 모아지고 있다.

이에 대한 문제 해결방법으로는 3가지 방안이  
제시될 수 있다(3). 첫째로는 ICRU 구 팬텀과  
ICRU 구 팬텀에서 정의되는 교정량을 선량계의  
교정에 적용하는 것이다. 이 경우 교정량은 기준  
측정량과 환산인자로 부터 얻어지는데, 환산인자

의 산출을 위해서는 ICRU 구내 평가지점에서의  
선량당량 값을 필요로 한다. 이 값은 실험적인  
방법으로도 결정될 수 있으나 측정상의 어려움과  
에너지범위의 제한성을 지니고 있어 거의 계산에  
의존한다. 따라서 이와 관련된 계산이 여러 연구자  
(4, 5, 6)에 의해 수행되었으며, 국제방사선방어위  
원회(ICRP)와 미국국립표준기술연구소(NIST)는  
지금까지의 연구결과를 토대로 ICRP Publ. 51(7)  
과 개인피폭선량 평가지침(ANSI N 13.11)(8)에  
필요한 환산인자를 각각 제시하고 있다.

그러나 ICRU 구를 선량계의 교정용 팬텀으로  
사용할 경우 기하학적 구조와 조성성분에 따른  
제작상의 문제로 실제교정 절차에는 적합하지  
못한 실정이다. 두번째 해결방안은 평판형 혹은  
입방체 팬텀과 ICRU 구 팬텀에서 정의되는 교정  
량을 선량계의 교정에 적용하는 것이다. 이 경우  
교정에 사용되는 팬텀과 ICRU 구와의 기하학적  
구조의 차이로 그에 따른 효과의 보정이 요구된다.  
이는 보정인자 도입이라는 측면에서 볼때 부가  
적으로 또 다른 불확실성을 초래할 수 있다는  
단점을 지니고 있다. 세번째 방안은 교정용 팬텀  
에서 직접적으로 정의되어지는 교정량으로 선량  
계의 교정을 수행하는 것이다. 이 경우 사용 팬텀의

재질 및 크기에 관해 국제적으로 합의된 사항이 없음에도 불구하고 NVLAP(National Voluntary Laboratory Accreditation Program)와 DOELAP(Department of Energy Laboratory Accreditation Program)에서는 개인선량계의 인증시험을 위해 팬텀물질로는 밀도가  $1.19\text{g}/\text{cm}^3$ 이고, 수소 8.05%, 탄소 59.98% 및 산소 31.96%의 질량조성을 지닌 PMMA(Polymethylmethacrylate)을, 그리고 이의 크기는 광자의 경우  $30\text{cm} \times 30\text{cm}$  단면적과 15cm 두께로 규정하고 있다. 또한 IAEA에서는 선량계 성능에 관한 국제상호 비교를 위해  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 의 물 팬텀의 사용을 제안하고 있다(9). 그러나 이들 팬텀에서 정의되어지는 선량당량을 토대로 하여 얻어지는 환산인자는 거의 정확하게 알려져 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 현실적인 요구에 따라 광자의 경우에 대해 PMMA 및 물 팬텀내 관심있는 깊이에서 선량당량을 계산하여 환산인자를 도출하는데 목적을 두고 있으며, 계산에는 몬테칼로 증성자 및 광자 수송 코드인 MCNP를 이용하였다.

### 환산인자 계산

$H_p(10)$ 과  $H_s(0.07)$ 의 측정에 필요한 환산인자  $H(d)/K_s$ 는 팬텀 깊이 d지점에서의 선량당량과 자유공간중에서 단위 공기흡수선량과의 비로 정의된다. 본 연구에서는 환산인자 계산을 위해 LANL(Los Alamos National Lab.)에서 개발한 몬테칼로 증성자 및 광자수송 코드인 MCNP(10)와 Storm 및 Israel의 핵자료를 기초로 하여 편집한 MCPLIB2 라이브러리를 사용하였다. MCNP 코드에서는 콤프톤 산란, Coherent 산란, 광전흡수에 따른 형광 방사선의 방출과 쌍전자 생성등을 고려하고 있다. 또한 광자가 쌍전자 생성과정을 일으킬 경우 MCNP에서는 양전자는 그의 생성지점에서 소멸되는 것으로 처리하고 있으며, 그리고 소멸과 동시에 2배의 입사광자 웨이트를 지닌 단일광자를 방출시키고 그의 수송을 계속한다. 그러나 이 코드에서는 전자의 수송과 제동복사선의 생성을 포함시키지 않고 있다. 그러므로 본 연구의

모든 결과는 선량당량 대신 커마값으로 주어지게 되나, 커머근사는 ICRU구의 경우 이전의 타 연구자의(5, 6) 연구결과에 비추어 볼때 신뢰할 수 있는 것으로 입증되었다. 본 연구에서 고려된 광자의 에너지 범위는  $10\text{keV} \sim 1\text{MeV}$ 이며, 이 범위는 미국국립표준기술연구소(NIST) 빔 코드를 모두 망라하고 있다.

팬텀내 d지점에서의 선량당량  $H(d)$ 의 계산을 위해 선속밀도 계산식과 체적에너지부여 계산식이 MCNP코드에서 사용되었다. MCNP코드에서 선속밀도 계산식은 다음과 같이 주어진다.

$$H(d) = A^{-1} \int \left( \frac{dn}{dt} \right) (E/\cos\theta) (\mu_{en}(E)/\rho) \text{ medium } dE \quad (1)$$

여기서, A는 팬텀내 깊이 d에서 빔 입사방향에 대해 수직으로 놓여진 표면을 나타내며, 이 표면의 중심은 입사 빔의 중심과 동일하며 그 면적은  $25\text{cm}^2(5\text{cm} \times 5\text{cm})$ 로 하였다.  $\theta$ 는 입자의 궤적과 표면 법선 사이의 각이며, E는 입자의 에너지,  $(\mu_{en}/\rho)$ 는 질량에너지 흡수계수, 그리고  $(dn/dE)$  dE는  $E \sim E+dE$ 사이의 에너지를 가지고 면적 A를 통과하는 입자수를 나타낸다. 또한 MCNP 코드에서 체적 에너지부여 계산식은 다음과 같이 표시된다.

$$H(d) = \frac{\rho_a}{\rho_t} \int H(E) \phi(d, E) dE \quad (2)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 원자밀도(atoms/barn.cm)를,  $\rho_t$ 는 팬텀의 밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )를,  $\phi(d, E)$ 는 궤적길이 산정법에 기초를 두어 계산된 입자선속(particles/ $\text{cm}^2$ )을, 그리고 H(E)는 충돌당 매질에 부여된 에너지(MeV/collision)를 나타낸다. H(E)의 계산은 전자에 전달된 모든 에너지는 그의 생성지점에서 모두 흡수되어 진다는 가정에 기반을 두고 있으며, 그 식은 다시 다음과 같이 표시된다.

$$H(E) = \sigma_T(E) \sum_{n=1}^{\infty} P_n(E) (E - E_{min}) \quad (3)$$

여기서  $\sigma_r(E)$ 는 전핵단면적(barns),  $P_i(E)$ 는 반응  $i$ 를 경험할 확률,  $E$ 는 검출기 영역으로 들어가는 광자의 초기에너지(MeV),  $E_{out}$ 는 반응  $i$ 를 경험한 광자가 검출기 영역을 떠날 때 가지고 나가는 에너지를 나타낸다. 그리고 반응형태로서  $i=1$ 은 콤프턴 산란을,  $i=2$ 는 쌍전자 생성을 나타내며, 이때  $E_{out}$ 는  $2m_0C^2$ 의 값을 갖는다. 그리고  $i=3$ 은 광전효과를 나타낸다. 체적 에너지부여 계산식에 있어  $H(0.07)$ 의 계산에 사용되는 검출기 체적의 두께는 빔의 입사 방향을 축으로 할 때 입사방향으로 부터 팬텀 깊이 0.002cm 부터 0.012cm까지로 하였다. 그리고  $H(10)$  경우는 0.95cm 부터 1.05cm 까지로 하였다. 이들 검출기 체적의 중심은 입사 빔의 중심과 같으며, 입사 방향에 대해 수직으로 놓여진 면의 면적은  $25\text{cm}^2(5\text{cm} \times 5\text{cm})$ 로 하였다.

계산은 모든 단일에너지에 대해  $10^5$ 개의 입자 이력수를 가지고 수행하였으며, 입자의 이력은 입자의 에너지가 1keV이하로 떨어질 경우 종료 되는 것으로 하였다. 또한 환산인자 계산에 필요한 자유공간중에서 단위공기흡수선량은 Hubbell [11]의 광자 단면적으로 부터 얻어진 값을 사용하였다.

## 결과 및 토의

물 팬텀에 대해 선속밀도 계산식과 체적 에너지부여 계산식을 사용하여 계산된 환산인자  $H(d)/K_a$ 는 표1과 같다. 두가지 형태의 계산식으로부터 얻어진  $H(0.07)/K_a$ 의 값들을 서로 비교한 결과, 10keV부터 에너지가 증가함에 따라 두 결과 사이의 차는 서서히 증가하면서 30keV에서 8.9% 정도의 최대 차를 보이면서 다시 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 100keV 이상의 에너지 범위에 있어서는 두 결과가 서로 비슷하게 나타났다. 이러한 경향은  $H(10)/K_a$ 의 값들에서도 동일하게 나타났다. 계산결과의 검증용 위하여 표1에 주어진  $H(0.07)/K_a$ 와  $H(10)/K_a$ 을 커마근사법에 기초를 둔 Grosswendt [9]의 계산결과와 함께 그림 1과 그림2에 도시하였다. 그림1에서 환산인자  $H(0.07)/K_a$ 의 Grosswendt 결과에 대한 선속밀도 계

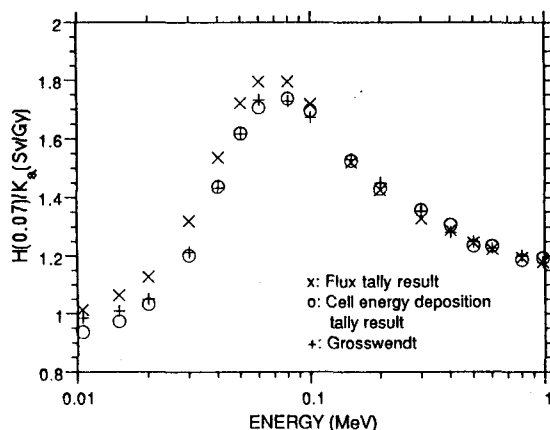


Fig. 1. Energy dependence of the ratio of the dose equivalent  $H(d)$  at a depth  $d=0.07\text{mm}$  on the centre line of a broad beam of photons energy  $E$  perpendicularly incident on the IAEA cube phantom to the air collision kerma  $K_a$  in free air. X symbol, flux tally result of MCNP calculation : O symbol, cell energy deposition tally result of MCNP calculation : + symbol, Grosswendt result.

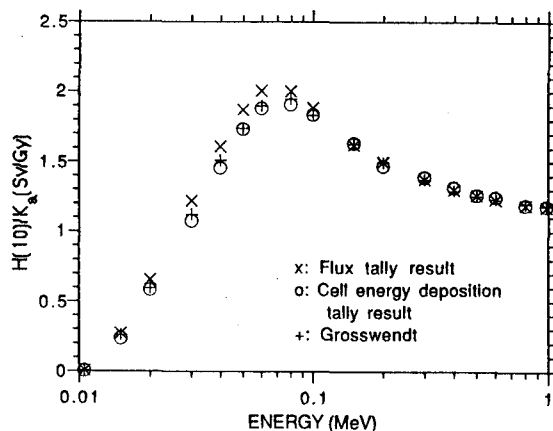


Fig. 2. Energy dependence of the ratio of the dose equivalent  $H(d)$  at a depth  $d=10\text{mm}$  on the centre line of a broad beam of photons energy  $E$  perpendicularly incident on the IAEA cube phantom to the air collision kerma  $K_a$  in free air. X symbol, flux tally result of MCNP calculation : O symbol, cell energy deposition tally result of MCNP calculation : + symbol, Grosswendt result.

Table 1. Conversion factor  $H(d)/K_a$  at the depths of 0.07 and 10mm within a 30cm×30cm×30 cm water cube phantom on the centre line of an expanded parallel beam of monoenergetic photons of energy E perpendicularly incident on one of the cube side faces.

Photon energy (keV)	Cell energy deposition tally result		flux tally result	
	$H(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$H(10)/K_a$ (Sv/Gy)	$H(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$H(10)/K_a$ (Sv/Gy)
10	0.986(0.84%) <sup>a</sup>	0.009(8.73%)	1.014(0.79%)	0.0069(9.84%)
15	1.010(0.81%)	0.259(1.64%)	1.065(0.84%)	0.271(1.74%)
20	1.051(0.90%)	0.597(1.25%)	1.128(0.88%)	0.656(1.34%)
30	1.213(0.98%)	1.121(1.24%)	1.321(0.99%)	1.220(1.27%)
40	1.435(0.98%)	1.512(1.22%)	1.537(0.23%)	1.612(1.24%)
50	1.617(1.09%)	1.740(1.15%)	1.722(1.02%)	1.874(1.25%)
60	1.733(1.49%)	1.901(1.14%)	1.796(0.97%)	2.008(1.17%)
80	1.729(0.91%)	1.950(1.06%)	1.796(0.94%)	2.005(1.11%)
100	1.673(0.88%)	1.835(0.95%)	1.718(0.88%)	1.887(1.01%)
150	1.531(0.94%)	1.631(0.88%)	1.520(0.80%)	1.623(0.91%)
200	1.451(1.12%)	1.497(0.85%)	1.427(0.77%)	1.500(0.89%)
300	1.354(1.00%)	1.374(0.81%)	1.329(0.75%)	1.375(0.84%)
400	1.282(0.77%)	1.293(0.76%)	1.289(0.75%)	1.300(0.81%)
500	1.249(0.73%)	1.255(0.77%)	1.246(0.74%)	1.260(0.80%)
600	1.226(0.73%)	1.232(0.77%)	1.223(0.74%)	1.230(0.78%)
800	1.201(0.79%)	1.201(0.76%)	1.194(0.74%)	1.189(0.96%)
1000	1.179(0.73%)	1.184(0.77%)	1.179(0.74%)	1.174(0.76%)

a) Estimated statistical error.

산식 결과의 비는 100keV 이하의 에너지 범위에서 1.013에서 1.093까지의 분포를 보이고 있으며, 비의 평균은 1.066으로 선속밀도 계산식을 이용한 우리의 결과가 6.6% 높게 나타났다. 그러나 100keV 이상의 에너지 범위에서 두 결과의 비는 0.978에서 1.009까지의 분포를 보이고 있으며, 비의 평균은 0.994로 Grosswendt 결과와 잘 일치하였다. 또한, 그림1에서  $H(0.07)/K_a$ 의 Grosswendt 결과에 대한 체적에너지 부여 계산식 결과의 비는 100keV 이하의 에너지 범위에서 0.986부터 1.053까지의 분포를 나타내고 있으며, 비의 평균은 1.007로 체적에너지부여 계산식 결과는 Grosswendt 결과와

거의 일치하고 있다. 그리고 100keV 이상의 에너지 범위에 있어서도 두 결과의 비는 0.980에서 1.011까지의 분포를 보이고 있으며, 비의 평균은 1.0으로 두 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그림2에서 나타내고 있는  $H(10)/K_a$ 의 값을 Grosswendt의 값과 비교하면 선속밀도 계산식 및 체적에너지부여 계산식의 결과는 전 에너지에 걸쳐  $H(0.07)/K_a$ 와 거의 동일한 경향을 보이고 있다. 계산식 형태에 따른 결과의 검증결과 체적에너지부여 계산식의 결과는 20keV와 30keV을 제외하고는 전 에너지 영역에 걸쳐 Grosswendt 결과와 2% 이내의 차이를 보이고 있는데, 이 차는 사용된

Table 2. Conversion factor  $H(d)/K_a$  and the corresponding statistical deviation  $\sigma$  at the depths of 0.07 and 10mm within a 30cm×30cm×15cm PMMA phantom on the centre line of an expanded parallel beam of monoenergetic photons of energy E perpendicularly incident on one of the phantom faces.

Photon energy (keV)	$H(0.07)/K_a$ (Sv/Gy)	$\sigma$ (%)	$H(10)/K_a$ (Sv/Gy)	$\sigma$ (%)
10	0.603	0.77	0.018	4.61
15	0.621	0.86	0.233	1.44
20	0.655	0.89	0.453	1.20
30	0.811	1.01	0.806	1.22
40	1.030	1.06	1.126	1.21
50	1.252	1.10	1.384	1.15
60	1.404	1.39	1.555	1.07
80	1.542	1.00	1.688	0.97
100	1.564	0.93	1.706	0.94
150	1.459	0.77	1.584	0.86
200	1.407	1.30	1.454	0.86
300	1.310	0.78	1.331	0.79
400	1.251	0.77	1.271	0.79
500	1.214	0.74	1.223	0.79
600	1.195	0.75	1.198	0.78
800	1.169	0.74	1.163	0.75
1000	1.158	0.74	1.160	0.74

광자 핵단면적에 기인된 것으로 판단된다. 또한 체적 에너지부여 계산식은 선속밀도 계산식보다  $H(d)/K_a$ 의 계산에 더욱 더 적합한 것으로 본 계산에서 나타났다.

다음 단계로는 체적 에너지부여 계산식을 사용하여 PMMA 팬텀에 대한 환산인자  $H(d)/K_a$ 를 계산하였다. 결과는 계산통계오차와 함께 표2에 나타내었다. 팬텀의 재질 및 모형에 따른 환산인자 값들의 비교를 위해 표2에 주어진 결과를 표1의 체적에너지 부여 계산식의 결과 및 ICRP Publ. 51에 제시된 ICRU구의 값과 함께 그림3과 그림4에 도시하였다. 그림3에서  $H(0.07)/K_a$ 에 대한 ICRU구의 값은 80keV 이상의 에너지 범위에서

PMMA의 값과 최대 5% 정도의 차이를 보이고 있는 반면, 저 에너지영역에 있어서는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 물팬텀의 값은 30keV의 에너지를 제외한 전 에너지 영역에 걸쳐 ICRU구의 값보다 다소 높게 나타났다. 이러한 경향은 그림4의  $H(10)/K_a$ 에 있어서도 동일하였다.

이에 따라 ICRU 구 대신 다른 매질이나 형상이 다른 팬텀을 선량계의 교정용 팬텀으로 사용할 경우 그에 따른 차이를 반드시 보정해 주어야 한다. 본 계산결과는 널리 사용되고 있는 팬텀에서 직접적으로 정의되는 선량당량으로 선량계를 교정할 때 환산인자로 사용될 수 있을 것이다.

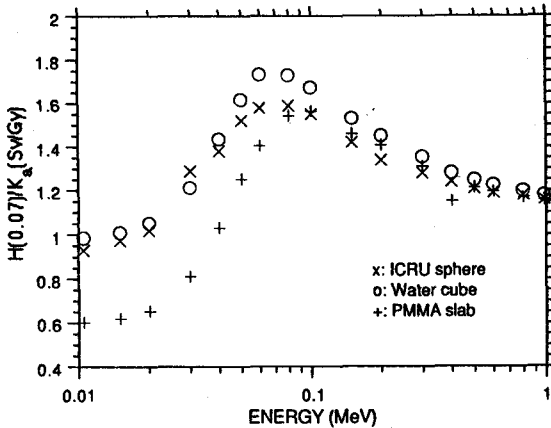


Fig. 3. Comparison of  $H(0.07)/K_a$ . X symbol,  $H(0.007)/K_a$  for the ICRU sphere according to the ICRP[7] : O symbol,  $H(0.007)/K_a$  for the IAEA water cube phantom according to the present calculation : + symbol,  $H(0.007)/K_a$  for the PMMA slab phantom according to the present calculation.

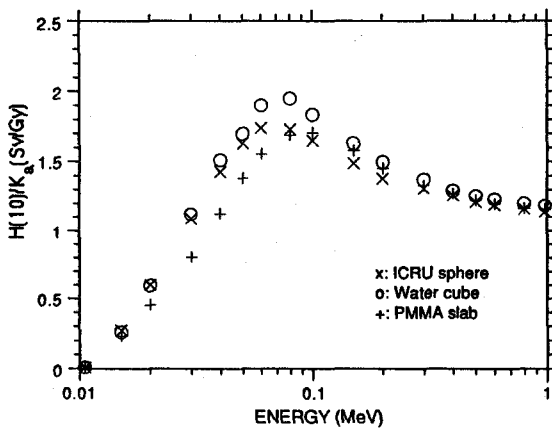


Fig. 4. Comparison of  $H(10)/K_a$ . X symbol,  $H(10)/K_a$  for the ICRU sphere according to the ICRP[7] : O symbol,  $H(10)/K_a$  for the IAEA water cube phantom according to the present calculation : + symbol,  $H(10)/K_a$  for the PMMA slab phantom according to the present calculation.

## 참고문헌

1. ICRU, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRU Publ. 26(Oxford : Pergamon), Annals of the ICRP 1(3)(1977).
2. ICRU, *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*, ICRU Report 39(Bethesda, MD : International Commission on Radiation Units and Measurements)(1985).
3. D. T. Barlett, T. M. Francis and P. J. Dimbylow, "Methodology for the calibration of photon personal dosimeters : calculations of phantom backscatter and depth dose distribution", *Radiat. Prot. Dosim.* 27(4), 231-244 (1989).
4. P. J. Dimbylow and T. M. Francis, *A Calculation of the Photon Depth-Dose Distributions in the ICRU Sphere for a Broad Parallel Beam, a Point Source and Isotropic Field*, National Radiological Protection Board, Report NRPB-R92(1979).
5. G. Williams, *Calculation and Analysis of Photon Dose Equivalent Distributions in the ICRU Sphere*, GSF Bericht S-958(1983).
6. A. B. Chilton and R. F. Nelson, *Low-Energy Photon Dose Deposition in Tissue Slab and Spherical Phantoms*, Report NUREG/CR-3425 (Washington, DC : US Nuclear Regulatory Commission) (1983).
7. ICRU, *Data for Use in Protection Against External Radiation*, ICRP Publ. 51(Oxford : Pergamon), Annals of the ICRP 17(2/3)(1987).
8. ANSI, *American National Standard for Dosimetry—Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing*, ANSI N13.11-1983(New York, NY : American National Standards Institute) (1983).

9. B. Grosswendt, "Conversion factors for the IAEA cube phantom for external photon irradiation", *Radiat. Prot. Dosim.* 29(3), 177-182 (1989).
10. Los Alamos Radiation Transport Group X-10, *MCNP Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code*, CCC-200(Oak Ridge, TN : Computer Code Collection, Radiation Shielding Information Center, ORNL)(1983).
11. J. H. Hubbell, "Mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 keV", *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 33, 1269-1290(1982).

## Conversion Factors for Calibration of Personnel Dosimeters

Won-Koo Lee, Tae-Young Lee, Chung-Woo Ha  
*Korea Atomic Energy Research Institute*

### ABSTRACT

MCNP code was used to calculate conversion factor  $H(d)/K_a$  at the depths of 0.07 and 10mm within a water phantom recommended by IAEA and within a PMMA phantom required by the US dosimeter proficiency testing programmes. The calculations were performed for an expanded parallel beam of monoenergetic photons of perpendicular incidence on one faces of the phantom. The results can be used as conversion factor in calibrating individual dosimeters in terms of the dose equivalent quantities defined directly in the phantom.

*Key words* : Dosimeter, Conversion factor, Water phantom, PMMA phantom. MCNP code.