

KAERI 폐 카운터를 이용한 LLNL 팬텀과 JAERI 팬텀과의 비교

이종일, 이태영, 김종수, 장시영

한국원자력연구소

요약

체내방사능 측정시스템의 교정인자는 측정결과에 주요한 요인으로 작용한다. 교정인자는 특정 집단으로부터 표준체위와 표준장기를 도출, 이를 기초로 하여 제작한 팬텀으로부터 구하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 팬텀의 기하학적 구조 및 내부장기의 형상은 특정 집단에 따라 다르므로 이로 인한 측정오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 북아메리카 성인남성의 표준자료에 근거하여 제작된 LLNL 팬텀과 일본 성인 남성의 표준자료에 근거하여 제작된 JAERI 팬텀을 한국원자력연구소 폐 카운터를 이용하여 상호 비교·분석하였다. 이와 함께 LLNL 팬텀으로 교정된 폐 카운터의 성능시험을 JAERI 팬텀으로 DOELAP 성능시험범주 I, II, III 및 IV에 대해 수행하여 팬텀의 구조 및 형상으로부터 발생하는 측정오차를 분석하였다. 비교·분석결과 1.7 cm ~ 3.7 cm 근육두께 가슴벽두께 범위내에서 JAERI 팬텀에 의한 교정인자가 전반적으로 LLNL 팬텀의 것보다 다소 높은 수치를 보였으나 허용수준이었고, 성능시험결과 상대편중은 DOELAP 성능 용인 기준을 만족하였다. 결국 두 팬텀간의 측정오차는 측정 및 체내피폭선량 평가시 수반되는 오차와 비교해 보면 그다지 크지 않은 것으로 결론지을 수 있다. 따라서 LLNL 팬텀으로부터 구한 교정인자를 국내 성인남성의 일상 모니터링에 사용할 경우 측정결과가 다소 과대평가되기는 하나 허용수준으로서 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

1. 서론

개인에 대한 내부방사선 모니터링은 *in vivo*법, *in vitro*법 및 작업환경의 공기중방사성물질농도로 부티의 산출법 등으로 수행하고 있다. 이들중 광자 방출핵종을 모니터링하고자 할 경우에는 측정결과의 정확도가 제일 높은 *in vivo*법이 주로 사용된다. 그러나 *in vivo*법으로 체내방사능을 측정하기 위해서는 *in vivo* 측정 시스템의 교정이 선행되어야 한다. *in vivo* 측정 시스템의 교정은 측정대상이 사람이므로 측정대상자에 대해 직접 수행하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 이는 현실적으로 불가능하기 때문에 여러 사람에 대한 체위검사 자료와 인체 해부학적 자료의 통계분석으로부터 표준을 도출, 이를 근거로 제작한 팬텀으로 측정시스템의 교정을 수행하는 것이 일반적인 방법이다.

미국에서는 ^{239}Pu , ^{241}Am 및 초우란 방사성핵종 등의 폐 침착량 측정에 사용되는 팬텀을 개발하기 위해 장기간동안 막대한 연구개발비를 들여 자국민의 체형과 유사한 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory) 팬텀[1]을 개발하여 현재 폐 카운터의 교정에 이를 사용하고 있다. 그러나 한국의 경우 구조와 형상이 표준 한국남성의 것보다 다소 큰 LLNL 팬텀을 미국으로부터 도입하여 이를 국내 폐 카운터의 교정인자 생성에 활용하고 있으며, 또한 이로부터 생성된 교정인자가 일상 모니터링에 사용되고 있는 실정이다.

그러므로 이 팬텀으로 교정된 폐 카운터로 한국남성을 측정할 경우 결과의 정확도 저하가 우려된다.

따라서 본 연구에서는 LLNL 팬텀이 한국인을 측정할 때 적합한 것인지를 살펴보기 위해 LLNL 팬텀과 최근 일본에서 일본 성인 남성의 표준자료에 근거하여 제작한 JAERI 팬텀[2]을 한국원자력연구소 폐 카운터를 사용하여 상호 비교·분석하였다. 또한 JAERI 팬텀을 성능시험용 팬텀으로 선정하여 이에 대한 측정을 수행하였으며, 그 결과를 상대편중으로 평가하여 팬텀의 기하학적 구조 및 형상으로부터 발생하는 측정오차를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

한국원자력연구소에서 보유하고 있는 폐 카운터는 폐에 침착된 저에너지 광자 방출핵종 측정장치(이하 “폐 카운터”라함)와 전신 및 특정 장기에 침착된 고에너지 광자 방출핵종 측정장치로 구성되어 있다. 137 cm(높이) x 213 cm(폭) x 91 cm(깊이)의 실내 공간을 갖는 모니터링 실의 모든 면은 검출기의 자연계수치를 낮추기 위해 10 cm의 철벽으로 되어 있다. 폐 카운터의 검출 시스템은 모두 4개(왼쪽 폐용 2개, 오른쪽 폐용 2개)의 LEGe(Low Energy Germanium) 검출기로 구성되어 있고, 각 검출기의 면적, 두께 및 직경은 각각 2000 mm², 20 mm, 50 mm이다. 또한 입사창의 재질은 Be이며, 이의 두께는 0.5 mm이다. 검출기 측면은 인체내 ⁴⁰K로부터 방출되는 광자에 의한 산란 감마선의 차폐를 위해 검출기 측면으로부터 0.32 cm의 구리, 1.0 cm의 납으로 구성된 차폐체로 에워 싸여져 있다. 검출기 흥부최적위치의 설정은 모니터링 실내에 설치된 수직 높이 조절 메커니즘, 좌우 조절 메커니즘 및 검출기 측면 조절 메커니즘으로 행하도록 되어 있다. LEGe 검출기의 회로구성 요소로는 고전압전원, 전치증폭기, 주 증폭기 및 다중과도분석기가 있다. LEGe 검출기는 서로 독립된 회로구성 요소를 갖고 있기 때문에 개개의 스펙트럼 또는 이의 합을 저장하거나 분석할 수가 있다. 스펙트럼 해석 및 시스템 운영 관련 소프트웨어는 미국 Canberra사에서 제공한 AbacosGPC를 사용하고 있다.

본 연구에서는 한국원자력연구소 폐 카운터를 이용하여 LLNL 팬텀과 JAERI 팬텀에 의한 교정인자를 구하고 상호 비교·분석하였다. 이를 위하여 한국원자력연구소가 보유하고 있는 LLNL 팬텀과 캐나다 HML(Human Monitoring Laboratory)로부터 교정인자 비교·분석을 위해 제공받은 JAERI 팬텀을 사용하였다.

한국원자력연구소가 보유하고 있는 LLNL 팬텀은 폐에 침착된 Pu, Am 및 기타 초우란 방사성핵종 등의 측정에 사용되는 폐 카운터의 교정에 사용하고 있다. 이 팬텀은 북아메리카 성인남성에 대한 체위검사 자료와 인체 해부학적 자료에 근거하여 제작된 것이며, 그림 1에서 보여주는 바와 같이 몸통(torso), 몸통 플레이트(torso plate) 및 덮개(overlays)로 구성되어 있다. 몸통과 몸통 플레이트는 근육등가물질로 되어 있으며, 덮개는 근육 87% 지방 13%(A series), 근육 50% 지방 50%(B series), 근육 100%(C series)등 이의 구성성분에 따라 3가지 종류의 덮개가 있다. 현재 한국원자력연구소에서는 B series만을 보유하고 있으며, 이의 사양은 표 1과 같다.

캐나다 HML로부터 제공받은 JAERI(Japan Atomic Energy Research Institute) 팬텀은 일본 성인남성에 대한 체위검사 자료와 인체 해부학적 자료에 근거하여 제작된 것으로서 LLNL 팬텀과 같이 몸통(torso), 몸통 플레이트(torso plate) 및 덮개(overlays)로 구성되어 있으며, 몸통은 LLNL 팬텀과 같이 근육등가물질로 되어 있으나, 몸통 플레이트의 구성성분은 근육 90% 지방 10%로 되어 있다. 덮개는 근육 90% 지방 10%(CZ1 Series), 근육 80% 지방 20%(CZ2 Series), 근육 70% 지방 30%(CZ3 Series)등 3가지 종류가 있다. 이의 모양은 그림 2와 같으며, 이의 사양은 표 2와 같다.

LLNL 팬텀과 JAERI 팬텀과의 비교는 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 폐 카운터의 교정인자를 두

팬텀에 의해 구한 다음, 이를 상호 비교·분석하는 방법으로 수행하였다. 교정용 선원은 $^{241}\text{Am}/^{152}\text{Eu}$ 을 사용하였고, 교정용 스펙트럼을 얻기 위한 측정은 가슴벽두께에 따라 18,000초 ~ 36,000초 동안 수행하였다.

각 팬텀으로 부터 직접 구한 교정인자는 가슴벽두께의 함수로 주어진다. 그러나 두께별 교정인자를 얻기 위해 몸통 플레이트에 덮개를 얹어 놓으면, 몸통 플레이트와 덮개의 사양에서 서로 차이가 있기 때문에 같은 두께라 할지라도 가슴벽내 지방질량분율이 서로 다르게 나타난다. 이점은 직접 구한 교정인자의 상호 비교를 복잡하고 어렵게 만든다. 따라서 가슴벽내 지방질량분율의 영향을 제거하기 위해 가슴벽두께를 다음 식에 따라 근육동가 가슴벽두께(Muscle Equivalent-Chest Wall Thickness, MEQ-CWT)로 환산하였다[3].

$$\text{MEQ-CWT} = \frac{\text{CWT}}{\mu_{\text{msc}}} \left[\mu_{\text{adp}} \frac{\text{AMF}}{100} + \mu_{\text{msc}} \left(1 - \frac{\text{AMF}}{100} \right) \right]$$

여기서, CWT는 가슴벽두께(cm), AMF는 가슴벽내 지방질량분율(%), μ_{adp} 는 주어진 에너지에서의 지방조직에 대한 선형흡수계수(cm^{-1}), μ_{msc} 는 주어진 에너지에서의 근육조직에 대한 선형흡수계수(cm^{-1})이다.

그 다음 각 팬텀의 CWT에서 직접 얻은 교정인자와 CWT와 동가한 MEQ-CWT간의 관계식으로부터 교정인자를 다시 구하였으며, 이를 서로 비교·분석함으로써 두 팬텀간의 차이점을 분석하고자 하였다.

교정인자에 의한 차이점 분석과 더불어 성능시험에 의해서도 두 팬텀간의 차이점을 분석하고자 하였다. 성능시험은 한국원자력연구소 폐 카운터를 이용하여 LLNL 팬텀으로부터 구한 교정인자를 JAERI 시험팬텀에 대한 측정에 적용하여 DOELAP(Department of Energy Laboratory Accreditation Program)에서 제시한 성능시험범주 I, II, III 및 IV에 대해 실시하였다[4]. 이를 위해 시험팬텀으로 선정한 JAERI 팬텀과 각 시험범주에 해당되는 시험방사성핵종은 IAEA로부터 제공받았다. 측정은 모든 시험범주에 대해 1800초 동안 수행하였고, 측정결과를 다음식에 따라 상대편중으로 나타내어 측정오차를 분석하였다.

$$B_{ni} = \frac{A_i - A_{ai}}{A_{ai}}$$

여기서 B_{ni} 는 동일 시험범주에 대해 i 번째 측정의 상대편중, A_i 는 i 번째 측정으로부터 얻은 값, A_{ai} 는 i 번째 측정시 팬텀의 폐부위에 삽입된 방사능을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

교정인자에 의한 LLNL 팬텀과 JAERI 팬텀과의 비교결과, JAERI 팬텀으로 구한 교정인자는 그림 3 ~ 그림 7에서 보여주는 바와 같이 LLNL 팬텀보다 다소 높은 것으로 나타났다. 17 keV의 경우 JAERI 팬텀의 교정인자는 LLNL 팬텀을 100%로 보았을 때 1.7 cm ~ 3.7 cm 근육동가 가슴벽두께 범위내에서 112% ~ 116%, 56 keV는 116% ~ 120%, 121.8 keV는 111% ~ 114%, 344 keV는 107% ~ 110% 정도로 평가되었다. 이러한 차는 측정 및 체내피폭선량 평가시 수반되는 전체적인 오차와 비교해 보면 거의 문제가 되지 않는 것으로 간주된다[5].

JAERI 팬텀의 교정인자가 LLNL 팬텀보다 다소 높게 나타난 이유는 팬텀의 외관 및 내부 장치의 형상이 서로 다르므로 해서 검출기 창면내에 투영되는 폐부위의 면적과 갈비뼈 부분의 면적에서의 차가 이러한 결과에 주요 역할을 했다고 볼 수 있다. 그러므로 측정의 정확도를 좀더 높이려면 한국인 팬텀을 개발하든지 또는 한국인 체형과 비슷한 JAERI 팬텀을 사용하는 쪽으로 전환하여야 할 것이다. 그러나 이를 위해서는 한

국인 팬텀개발에 장기간동안 막대한 연구개발비의 투자 또는 약 7,000만원 정도로 추산되는 JAERI 팬텀 도입에 따른 경비가 지출되어야 하므로, 경제적인 측면에서 비용과 정확도 향상에 관한 논의가 충분히 이루어져야 할 것이다.

DOELAP 시험범주 I, II, III 및 IV에 대한 성능시험 수행결과, 각 시험범주별 상대편중은 그림 8과 같이 나타났으며, DOELAP 성능 용인기준($-25\% \leq \text{상대편중} \leq 50\%$)과 비교해 보면 얻어진 값들은 어느 정도 용인할 수 있는 수준으로 나타났다. 다만 성능시험범주 I에서 ^{238}Pu 의 방사능 양이 40840 Bq인 경우 측정 시스템의 검출능력으로 인해 비교적 두께가 두꺼운 CZ11577(3.36 cm)과 CZ21559(3.22 cm)에서는 방사능을 검출하지 못하였다.

성능시험에서 얻은 각 시험범주별 상대편중은 LLNL 팬텀 교정인자를 시험팬텀인 JAERI 팬텀의 측정치에 적용하여 폐내 시험 방사성핵종의 방사능량을 산출한 값으로부터 얻은 수치이다. 본 연구에서 수행한 성능시험결과에 따르면 LLNL 팬텀 교정인자를 국내 성인남성의 일상 모니터링에 사용할 경우 측정결과가 다소 과대평가되기는 하나 허용수준으로서 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

폐에 침착된 방사능량을 평가하기 위해서는 피검자의 측정치에 교정인자를 적용하여 침착량을 산출하기 때문에 폐 카운터의 교정인자가 정확하게 구해져야 한다. 교정은 일반적으로 팬텀을 가지고 수행하고 있으나, 특히 저에너지의 경우 팬텀의 외관과 내부장기의 형상은 교정인자에 커다란 영향을 준다. 본 연구에서는 한국 성인남성을 측정할 때 현재 사용중인 LLNL 팬텀의 적합성 여부를 살펴보기 위해 JAERI 팬텀과 LLNL 팬텀을 한국원자력연구소 폐 카운터로 상호 비교·분석하였다.

연구결과 두 팬텀간의 측정오차는 측정 및 체내피폭선량 평가시 수반되는 오차와 비교해 볼 때 허용 수준인 것으로 결론지을 수 있다. 따라서 LLNL 팬텀으로부터 구한 교정인자를 국내 성인남성의 일상 모니터링에 사용할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 앞으로 *in vivo* 측정 시스템에 대한 국내 성능시험지침 개발에 필요한 귀중한 자료가 될 것이다.

참고문헌

1. R.V. Griffith, P. N. Dean, A. L. Anderson, J. C. Fisher, "Fabrication of a tissue-equivalent torso phantom for intercalibration of *in vivo* transuranic-nuclide counting facilities," in : *Proc. IAEA international symposium on advances in radiation protection monitoring*, IAEA-SM-229/56, 493-504, IAEA, Vienna(1978).
2. T. Shirotani, "Realistic torso phantom for calibration of *in vivo* transuranic-nuclide counting facilities," *J. Nucl. Sci. Tec.* 25, 875-883(1988).
3. D. Newton, A. C. Wells, S. Mizushita, R. E. Toohey et al. "The Livermore phantom as calibration standard in the assessment of plutonium in lungs," in : *Proc. Assessment of radioactive contamination in man*, IAEA, 183-199, Vienna(1985).
4. DOE Technical Standard, Laboratory Accreditation Program for Radiobioassay, U. S. Department of Energy(1996).
5. R. Toohey, E. Palmer, L. Anderson, C. Berger, N. Cohen et al. "Current status of whole-body counting as a means to detect and quantify previous exposure to radioactive materials," *Health Phys.*60(Suppl. 1), 7-42(1991).

표 1. LLNL 팬텀의 몸통 플레이트 및 덮개 사양

Configuration	AMF(%)	CWT(cm)
Torso plate(TP)	0	1.77
TP+B1	12.8	2.40
TP+B2	20.4	3.05
TP+B3	24.3	3.53
TP+B4	27.4	4.05

표 2. JAERI 팬텀의 몸통 플레이트 및 덮개 사양

Configuration	AMF(%)	CWT(cm)
Torso plate(TP)	10	1.96
TP+CZ10879	10	2.81
TP+CZ11577	10	3.49
TP+CZ20853	20	2.81
TP+CZ21559	20	3.47
TP+CZ30826	30	2.78
TP+CZ31541	30	3.47

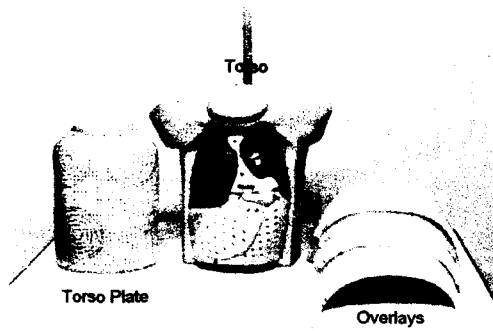


그림 1. LLNL 팬텀.

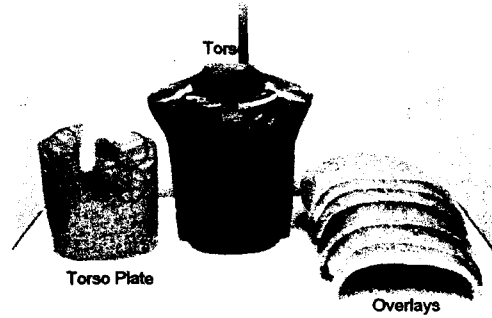


그림 2. JAERI 팬텀.

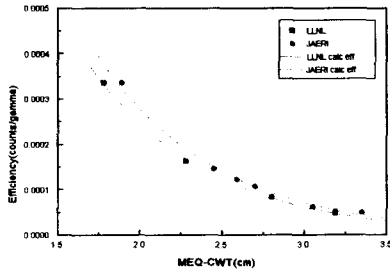


그림 3. 17.7 keV에서의 계측효율.

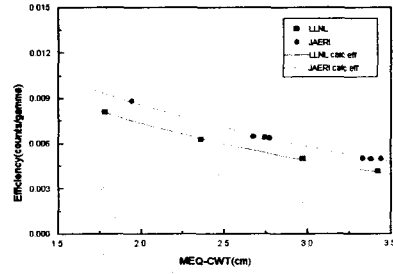


그림 4. 59.5 keV에서의 계측효율.

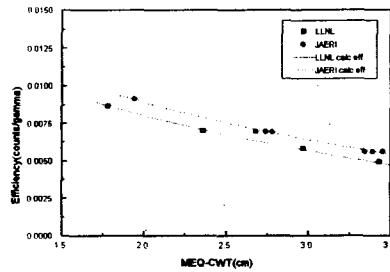


그림 5. 121.8 keV에서의 계측효율.

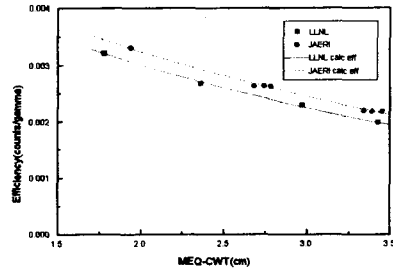


그림 6. 344 keV에서의 계측효율.

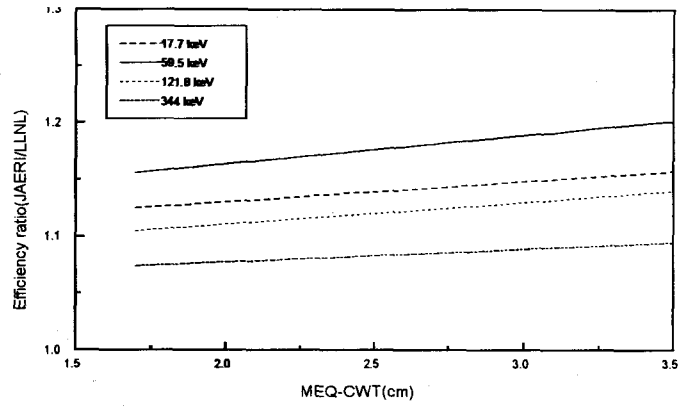


그림 7. 계측효율의 비(JAERI/LLNL).

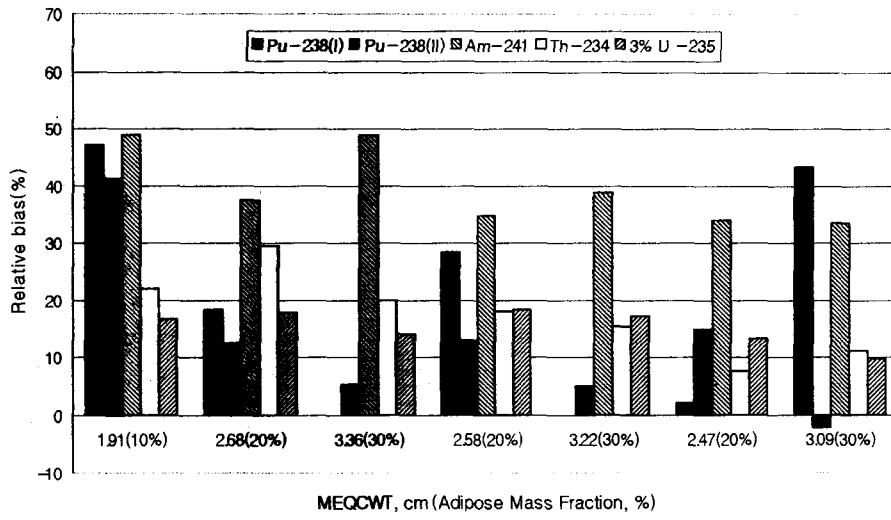


그림 8. 성능시험편주 I, II, III 및 IV에 대한 성능시험 결과에 따른 상대편중.