

팬텀 입문 (1)

城谷 孝

(Takashi Shinotani)

일본원자력연구소 동해 연구소

보건물리부 주임연구원

팬텀은 방사선 의학과 보건물리의 분야에서 방사선 측정기의 교정과 체내 선량분포의 측정 등에 널리 사용되고 있다. 팬텀이란 무엇인가? 팬텀의 정의를 논하고 광자를 대상으로 하는 팬텀의 종류와 형태를 소개하며, 또한 역사적 개발의 흐름 등에 대해 기술한다.

이 글을 읽는 독자의 대부분은 방사선 관리에 관계하는 전문가이므로 새삼 "팬텀 입문"이라는 것은 필요 없을 지도 모릅니다. 그러나 막상 팬텀에 대한 여러가지 질문을 받으면 정확하게 답하는 것이 생각보다 어렵다는 사실을 알게 될 것입니다. 그러므로 광자 (X, γ 선)를 대상으로 하는 팬텀에 관한 일반적인 이야기를 알기 쉽게 2회에 걸쳐 논하기로 하였습니다. 제1회는 팬텀의 정의, 목적, 종류, 그리고 개발의 역사를 간단히 논하기로 하고 다음 회에는 팬텀 설계의 기본적인 사고방식을 논하고 필요한 데이터도 게재할 예정입니다.

을 만드는 원자와 상호작용을 하여 광자의 에너지에 응하여 光電흡수, 콤프턴 散亂, 전자 双生成 등의 현상을 일으켜 체내에 흡수되거나 散亂되기도 하여 그 에너지의 전부 또는 일부를 인체에 제공합니다. 방사선에 의한 진단이나 치료에서는 이러한 상호작용이 효과를 발휘하게 됩니다만, 인체의 에너지 흡수는 건전한 조직에 대해서는 방사선 피폭이 되는 것이기 때문에 의료에 의한 조사선량은 언제나 필요 최소한이어야 합니다.

의료에 사용되는 방사선의 양을 필요 최소한으로 제한하여 그것을 목표치 이하로 억제하기 위해서는 인체에서의 후방 散亂線을 포함한 신체표면에 있는 공기중의 흡수 선량(入射 표면선량)을 측정할 필요가 있습니다만, 그러기 위해서는 인체를 대신하여 후방 散亂이 파악될 수 있는 模擬 물체가 필요합니다. 그와같은 적절한 형태의 물체를 사용하여 지정된 照射 조건하에 체내 선량분포를 실험에 의해 결정하지 않으면 안 됩니다. 또한 필름뱃지 등 신체표면에 장착한 개인 선량계에 의한 개인의 선량 계측으

1. 팬텀의 정의와 그 종류

인체에 광자를 照射하면 광자는 인체조직

로는 표면에서 1cm, 3mm, $70\mu\text{m}$ 깊이의 각 선량당량을 측정하도록 법령으로 정해져 있습니다. 이 측정에도 선량계에 직접 入射하는 방사선 뿐만 아니라 인체에서의 후반散亂도 신체표면에 장착한 선량계의 指示値에 포함됩니다. 이런 얇은 값에서 1cm 선량당량 등을 산출하기 때문에 선량계의 指示値와 1cm 선량당량 등과의 관계를 미리 구해놓는 필요가 있습니다만, 이 경우도 후방散亂을 模擬할 수 있는 물체가 필요하게 됩니다.

한편, 체내에 沈着한 방사성동위원소(RI)에서 방출되는 광자를 신체표면에 근접한 검출기에 의해 검출하여 定量을 구하는 전신 계측장치로는, 인체내에 흡수·산란되어 體外로 透過한 광자를 계측하기 때문에 역시 인체내에서의 흡수·산란을 模擬할 수 있는 물체가 전신 계측장치의 校正에 필요하게 됩니다.

이상의 목적을 충족하는 形狀의 물체를 팬텀(phantom, 방사선용 인체 모형)이라 부릅니다. 따라서 팬텀은 방사선과의 상호작용이 인체조직과 같게 되도록 인체조직의 주요 원소를 거의 같은 비율로 포함하는 물질에 의해 만들어지고, 같은 形狀임이 바람직한 일입니다. 그러므로 팬텀이란 「방사선과 인체의 상호작용이 模擬될 수 있고 또한 용이하게 再現될 수 있는 素材로 만들어지고, 인체 형상 또는 그것과 等價의 형상을 가진 물체」이다 라는 정의를 내릴 수가 있습니다. 이와 같은 팬텀을 인체 팬텀(human phantom), 신체 팬텀(body phantom) 내지 테스트 팬텀(test phantom) 등으로 부르고 있습니다.

이 인체 팬텀에는 簡易形狀의 것으로부터 정밀한 것에 이르기까지 여러가지 있습니다만, 大別하면 a) 정밀 팬텀, b) 간이형상 팬텀 및 블록 팬텀이 됩니다. a)의 정밀 팬텀은 방사선 상호작용이 인체와 정확하게 일치하는 팬텀材로 만들어지고, 또한 정확한 인체의 외형 및 각종 장기와 골격을 가진

팬텀이며, 특별히 개발된 정밀한 소재가 사용되어¹⁾ 數keV에서 100keV 정도까지의 광전흡수가 문제가 되는 低에너지 광자용으로 개발된 것입니다. 폐에 沈着한 Pu, Am등을 측정하는 폐 모니터의 校正, 신체에 분포하는 일반의 RI 계측용 전신 계측장치(whole body counter)의 校正, 低에너지 X선 照射

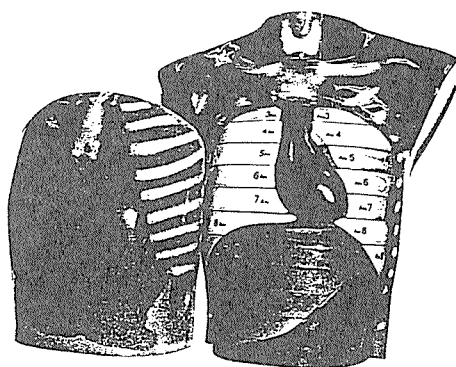


Fig. 1 Pu肺 모니터 校正용의 흉부 정밀팬텀(JAERI-Phantom)²⁾ (肋軟骨을 포함한 토르소커버(좌)를 벗겨 내장을 보여준 사진(우))

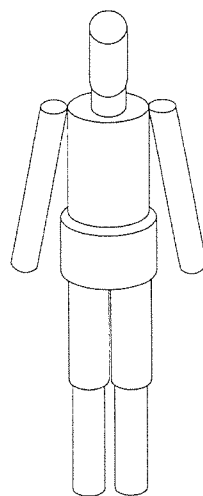


Fig. 2(a) 폴리에틸렌 円筒용기를 조립한 간이 팬텀의 예³⁾ 신장 169.5cm(성인 남성용)

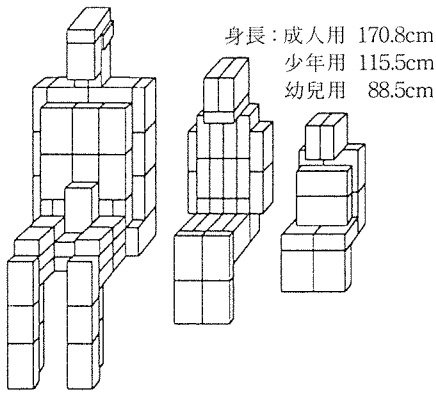


Fig. 2(b) 폴리에틸렌製 直方體 블록을 조립한 팬텀의 예³⁾

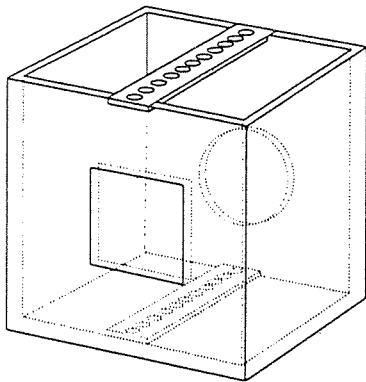


Fig. 3(a) IAEA 표준 도시메트리/교정용 팬텀이며 아크릴 입방체 형상의 예 30cm×30cm×30cm

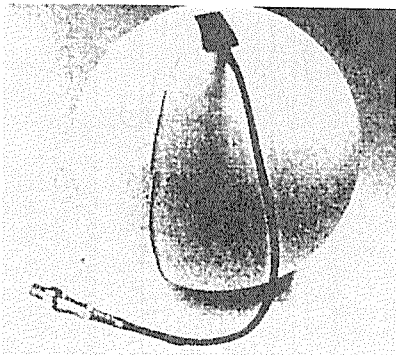


Fig. 3(b) 球狀 표준 팬텀의 예³⁾ (ICRU 球數學 팬텀을 폴리에틸렌을 바탕으로 한 素材로 제작) 직경:30cm

중의 체내 선량분포의 측정 등에 사용되고 있습니다. Fig. 1에 그 한 예를 듭니다.²⁾ b)의 간이형상 팬텀은 보다 단순화된 인체형상 (통상 필요한 장구나 골격을 포함)의 것에서 円筒·楕円柱를 조립하여 만드는 팬텀 등 (Fig. 2(a))³⁾이 있고, c)의 블록 팬텀은 그것을 한층 簡略化하여 입방체, 直方體의 블록을 조립한 팬텀입니다.

b), c)의 간략화한 팬텀은 얇은 루사이트 등으로 만든 容器狀의 것이 많으며, 속에 물을 넣어 인체조직과 근사하게 하여 전신 계측장치의 교정, 외부 照射에 의한 체내 선량 분포의 측정 등에 사용합니다. 구체적으로 말해 팬텀 容器에는 외부 조사실험에서는 물(조직等價水溶液을 사용하는 경우도 있음)을 넣고, 체내 RI 오염을 模擬하는 실험에서는 전사 또는 특정의 장기용기에 방사성 물질의 水溶液을 넣어 사용합니다.

한편, 방사선이 인체를 透過할 때의 흡수 내지 후방산란만을 정확하게 재현하는 팬텀을 필요하는 경우도 많아, 이 경우에는 반드시 인체형상이야할 필요는 없습니다만, 대개의 경우 인체형상과 等價인 것이 필요하게 됩니다. 이를테면 γ 선의 인체내 흡수를 模擬하기 위해 사각의 상자에 물을 넣어 선량계를 삽입하여 실험하는 경우가 있지만, 상자는 한 변이 30cm 정도의 胴體 길이에 가까운 입방체(直方體)의 크기로 하여, γ 선 통과거리가 문제가 되는 인체 동체부의 크기와 거의 같은 것으로 합니다. 이와 같이 특정의 물리현상만을 측정평가하기 위한 팬텀은 테스트 오브젝트(test object)라고도 합니다.

구체적인 예를 들면 광자용 개인 선량계의 교정에는 후방산란을 模擬할 수 있는 팬텀으로서 JIS에서는 한 변이 40cm의 정방형으로 15cm 부피를 가진 직방체의 아크릴 樹脂製의 것이 정해져 있습니다. 또한 IAEA의 腹部用인 표준선량 평가용 팬텀(Fig.3(a))³⁾, 또는 인체와 더욱 근사하게 한 직경 30cm의 球體인 ICRU球 팬텀(Fig.3(b))³⁾등이 있습니다.

다. 이 밖에 뼈의 진단에 사용되는 骨密度 측정용 교정 팬텀, 유암 진단용의 유방 팬텀, 치과용 팬텀, 핵의학에서 사용되는 γ 카메라의 화상 품질검정·교정용 등 여러가지 화상용 팬텀 또한 테스트 오브젝트입니다. 또한 이미징 팬텀(imaging phantom)라고도 부릅니다.

이와 같이 여러가지 종류의 팬텀이 인체 대신에 널리 사용되고 있습니다만, 표면에 나타나는 일은 없습니다. 그러나 뒷면에서 매우 중요한 역할을 담당하는 필요불가결한 도구입니다.

2. 팬텀 개발의 역사

19세기말 무렵에 X선이 발견된 이래, 그것의 인체영향이나 의학적 이용의 연구가 진전됨에 따라 팬텀의 필요성이 높아져 수많은 연구개발이 이루어져 왔습니다. 더욱이 X선 CT나 γ 카메라의 진보와 더불어 진단이나 치료의 종류에 부응하여 보다 많은 종류의 팬텀이 필요하게 되어 오늘날까지 많은 개발이 계속되고 있습니다.⁴⁾ 전후 원자력 이용시대에 접어들어, 보건물리·방사선 관리영역에도 팬텀이 사용되기 시작하여, 그 목적에 따른 각종 팬텀이 개발되기에 이르렀습니다.

팬텀 개발사는 팬텀材 개발사이기도 하여 옛 20세기 초두까지 거슬러 올라가 Kienbock(1906)의 연구가 그 최초라 하겠습니다. 그 후 Christen(1913), Szilard(1914), Baumeister(1923) 등의 연구가 있습니다만, 1910~20년대의 팬텀材는 밀도나 원소조성이 인체에 가까운 것이라고 하여 물과 왁스를 주로 사용하고 있었습니다.

당시 팬텀用 왁스로서 paraffin wax, beeswax 그 밖에 unit density wax, Columbia wax 등으로 불리워진 것, 또는 이러한 혼합물이나 톱밥이 섞인 것 등이 사용되고 있었습니다. 그 후 1930년대에는

talc, bolus alba, rice, dough and water과 같은 곡물의 분말, 연토, 물 등을 원료로 하는 팬텀材가 개발이 되어 이런 것들로 된 팬텀이 사용되고 있었습니다. 그러나 Mayneord(1933)이 왁스 류의 X선 질량 감약계수는 20keV 정도의 低에너지에 있어 인체 軟組織과 비교하여 50% 가까운 차이가 있다는 것을 지적하여 문제가 되었습니다.

그 후 Ott(1937), Jones 등(1949)이 paraffin wax에 높은 원자번호의 첨가제를 덧붙여 개선된다는 것을 보였습니다. 현재에도 널리 사용되고 있는 Jones의 유명한 Mix D라고 하는 팬텀材는 paraffin wax 60.8%, MgO 6.4%, TiO₂ 2.4% 및 polyethylene 30.4%로 되어 있습니다. 또한 bolus도 설탕에 첨가제를 넣어 개량된 Lincolnshire bolus라는 微小球狀의 것이 발표되어, Speight(1964)는 이것을 사용한 정밀 팬텀을 개발했습니다. 왁스 이외로는 Failla(1937)가 제안한 목재를 가공한 소재로 일시 널리 사용되었습니다.

주목해야 할 것은, 1960년대의 Stacey(1961) 등이 개발한 Temex-system라고 하는 牛고무를 원료로 한 軟組織材와 人骨로 만든 팬텀, Alderson등(1962)의 Rando-system라고 한 軟組織材와 그것을 發泡시킨 肺材 및 人骨을 사용하여 만든 랜드 팬텀입니다. 이런 것들은 매우 현실적이고 방사선 특성에 뛰어나다고 하여 의학분야 뿐 아니라 원자력분야에서도 오늘날 널리 사용되고 있습니다.

1970년대에 들어와 White(1977)는 팬텀材 개발에 신품을 불러 일으켰습니다. 이때까지의 팬텀材는 밀도, 원소조직, 양자밀도 등에 중점을 두어왔지만, White는 밀도 뿐 아니라 방사선과 물질의 상호작용(질량減弱係數) $[1/(g/cm^2)]$, 에너지 흡수계수 $[1/g/cm^2]$, 질량 阻止能 $[MeV/(g/cm^2)]$, 質量角散亂能 $[(라이안)^2/(g/cm^2)]$ 을 보다 중요시하는 설계 방침을 내세워 에폭시 樹脂에 탄산 칼슘을 더한 팬텀材를 개발하여 정밀 팬텀을 제작

했습니다 뿐만 아니라 Griffith (1979)는 폴리우레탄을 사용하여 실용성이 높은 정밀 팬텀을 완성했습니다. 필자도 (1987, 1988) 폴리우레탄을 사용하여 일본인 체격의 정밀 팬텀을 발표하였습니다.(Fig.1)²⁾.

또한 중성자용으로는 수소 함유량이 인체 조직에 가까운 물에 여러가지 첨가제를 더한 水溶液 팬텀材⁵⁾가 제작되어 있습니다. 한편 전자 계산기의 진보는 선량평가의 정밀한 예측을 가능하게 하여, 일반적으로 수학 팬텀이라 불리워지고 있는 선량평가용 모델(Computational model, mathematical model)³⁾의 연구개발이 1960년대부터 시작되어 시뮬레이션에 의한 팬텀 실험도 또한 시작되었습니다.

이상 팬텀과 그 역사를 개관하였습니다. 다만, 상세한 내용은 文獻 1), 3)을 의료용 팬텀의 구체적 사항은 文獻 4)를, 본문중의 각 연구자의 논문개요에 대해서는 文獻 5)를 참조해 주십시오.

— 文 獻 —

- 1) ICRU Report 44 (1989)
- 2) T.Shirovani. J. Nucl. Sci. Technol., Vol.25. No.11. pp.875-883 (1988)
- 3) ICRU Report 48 (1992)
- 4) Radiation Protection Dosimetry. Vol. 49. Nos. 1/3 (1993)
- 5) 城谷 孝; 日本原子力學會誌, Vol. 28. No. 11. pp.1015-1020 (1986)

