

유리선량계를 이용한 저선량 방사선의 마우스 피폭선량 연구

노성진^{*,†}, 김효진^{*,†}, 김 현^{*,†}, 정동혁^{*}, 손태진^{*}, 김정기^{*}, 양광모^{*}, 남상희[†], 강영록^{*}

^{*}동남권원자력의학원, [†]인제대학교 의용공학과, [‡]동아대학교 물리학과

2015년 7월 29일 접수 / 2015년 11월 4일 1차 수정 / 2015년 11월 10일 채택

저선량 조사는 낮은 선량을 지속적으로 장기간 조사시키기 때문에 조사되는 마우스들에 대한 선량분포를 정확히 알고 있어야 한다. 본 연구는 저선량 방사선에 대한 생물학적 영향평가를 위하여 동남권원자력의학원 연구센터에 설치된 ¹³⁷Cs 조사장치에 대하여 마우스조사 실험 시 마우스에 원하고자 하는 선량을 전달하기 위한 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 마우스에 원하고자 하는 정확한 선량을 전달하기 위하여 선원에 대하여 동일한 위치에 마우스 케이지 45개를 설치할 수 있는 아파트를 자체 개발하였으며, 개발된 마우스 아파트 시스템에 대한 선량평가를 하기 위하여 유리선량계(glass dosimeter)를 실험용 마우스 머리와 배에 삽입한 후 기존 조사 시스템과 자체 개발한 마우스 아파트 시스템에 대해 비교 선량평가를 수행하였다. 기존시스템의 조사방식에서 최대 42%의 선량차이를 보였으며 개발한 마우스 아파트 시스템은 6% 이내의 선량차이를 보였다.

본 연구를 통해 개발된 마우스 아파트를 활용한 저선량 방사선에 대한 생물학적 영향평가 연구는 전달하고자 하는 선량을 보다 정확하게 제공할 수 있으며, 생물학적 분석결과에 신뢰성을 확보할 수 있다.

중심어 : 저선량 조사, 정도관리, 마우스 아파트, 선량평가, 유리선량계

1. 서론

방사능에 대한 막연한 공포심과 저항감으로 인해 저선량의 방사능마저도 위협한 것으로 인식되고 있으나, 저선량 방사선에 의해 그 이후의 고선량 방사선에 저항이 생기는 유익한 반응을 보인다는 방사선 적응반응이라는 현상이 알려지면서[1, 2] 저선량 방사선을 인체에 유익하게 이용하려는 시도로 이루어지고 있다. 그러나, 저선량 방사선이 어떤 기작에 의해 이런 반응을 일으키는지에 대해서는 아직 명확하지 않다. 이에 따라 저선량에 대한 평가를 하기 위하여 여러 동물실험들이 진행 중에 있으며 대표적으로 마우스를 이용하여 저선량에 대한 생물학적 평가 및 영향에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 저선량 조사시설을 이용한 실험 시 가장 중요한 것은 조사위치에서의 실험동물의 흡수선량을 정확히 이해하는 것이다 [3, 4]. 마우스와 같은 실험동물은 방사선 방호의 대상이 아니기 때문에 마우스 조사 실험은 공기커마를 기준으로 이루어져 왔으나, 호르메시스 현상과 같은 확률적 접근이 필요한 연구에는 무엇보다도 동일한 조건에 대한 실험체의 관찰이 중요하다. 특히 조사실과 같이 제한된 공간에서 형성되는 방사선장은 위치마다 에너지 스펙트럼이 다르게 나타나므로 같은 공기커

마라 할지라도 동물체 안에서의 흡수선량 형성은 다르게 나타날 수 있다.

본 연구는 동남권원자력의학원 연구센터(DIRAMS)에 설치된 저선량조사기(Gamma Irradiator, Chiyoda Technol Co., Japan)를 대상으로 하여 마우스 조사 실험 시 조사하고자 하는 정확한 선량을 전달하는 시스템을 구축하는 것이 목적이다. 이러한 목적을 위하여 저선량 방사선에 대한 품질보증(quality assurance: QA)을 확립할 수 있는 정밀시스템을 개발하여 평가하였다 [5]. 개발된 마우스 아파트 시스템의 저선량에 대한 품질보증을 확립하기 위하여 유리선량계를 사용하여 조사장비를 중심으로 거리마다 표시된 위치에 선반을 배치하여 마우스에 방사선을 조사하는 기존 방법(Fig. 1)과 자체 개발한 마우스 아파트 시스템(Fig. 3 & 4)에 대해 선량 평가 및 비교 분석을 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 방사선 조사 장치 및 시설

저선량조사기(Gamma Irradiator, Chiyoda Technol Co., Japan)는 8W × 6.5L × 3H m³의 규모에 60 cm 두께의 철근콘크리트 차폐 벽, 40 cm 두께의 천정, 120 cm 두께의 바닥으로 구축되어 있는 방에 차폐 벽으로써

책임저자 : 강영록, yeongrok@dirams.re.kr
부산광역시 기장군 장안읍 좌동길 40



Fig. 1. Conventional irradiation method. (a) A shelf of irradiation apparatus: 420W × 205L × 185H mm. (b) Standard laboratory mouse cage: 200W × 260L × 130H mm (polycarbonate cage)

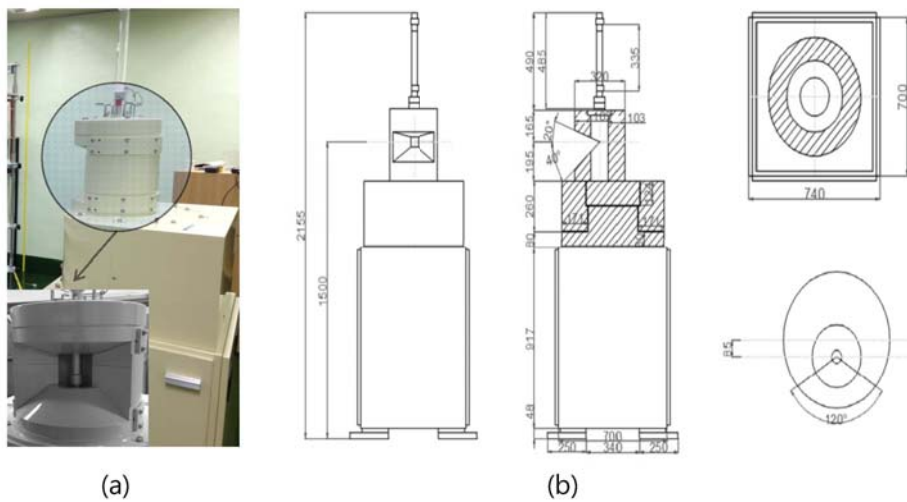


Fig. 2. Photograph of ^{137}Cs gamma ray radiography equipment (Chiyoda Technol Co, Japan). (a) Collimator open hole of gamma ray radiography equipment (horizontal irradiation angle: 60° , top and bottom irradiation angle: 20° and 40°). (b) CAD drawing of gamma ray radiography equipment.

터 약 1.2 m 거리에 차폐 벽으로부터 동일한 거리가 되는 중심에 설치되어 있다. Fig. 2와 같이 방사선 조사영역은 피라미드 모양의 빔 콜리메이터에 의해 방향과 크기를 결정하며 빔 콜리메이터의 입구는 빔 중심축으로부터 수평 조사 각이 각각 60° , 상하 조사 각이 각각 20° 및 40° 의 장방형 구조로 되어 다량의 세포 배양 용기나 소 동물 케이지를 배치할 수 있다. 이장치는 선원으로서 세슘(^{137}Cs) 또는 코발트(^{60}Co)를 사용할 수 있으며, 선원의 방사능 세기와 선원과의 거리에 따라 실험용 시료에 수 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 에서 최대 수십 $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 까지의 선량을 조사할 수 있도록 제작되어 있다. 그리고 선원 콘테이너에는 3개의 선원을 보관할 수 있으며 조사 시 하나를 선택하여 조사 위치에 장전할 수 있도록 되어 있다. 본 연구에서는 직경 1.27 cm, 높이 1.91 cm 에 원통형 구조인 370 GBq (10 Ci)의 ^{137}Cs 선원을 사용하였으며, 2 m 거리에서 15시간 11분 58 초 동안 0.1 Gy 방사선을 조사하였다.

2.2 마우스 방사선 조사 시스템

저선량 방사선의 생체영향연구 수행 시 저선량 조사를 활용하여 실험동물이나 세포에 방사선을 전달할 경우 세포 배양 용기의 크기와 구조, 조사대상의 위치에 의하여 실제 전달 하고자 하는 선량에 비해 35% 이상 차이가 나는 것으로 보고되어 있으며 [6] Fig. 1과 같이 방사선에 민감한 실험동물 종인 BALB/c mouse의 경우 하나의 마우스 케이지(polycarbonate 사육 상자) 안에 3~5 마리를 넣어 방사선 조사를 수행하므로 실험 대상들간에 중첩(overlapping)이 발생하여 전달되는 선량이 정확하지 않게 된다. 또한 조사장치의 콜리메이터의 특성에 따라 선원의 조사각도 및 개별 조사대상의 거리 등 기하학적인 요인으로 인하여 실험대상에 정확한 선량이 전달되지 않게 된다. 따라서 마우스에 대한 저선량 방사선 조사에 있어 위와 같은 문제점을 해결하고자 독립적으로 방사선 조사가 가능한 개별 케이지 및 선원과 거리에 따라 동일한 방사선량이 조사될 수 있는 시스템을 개발하였다 [5].

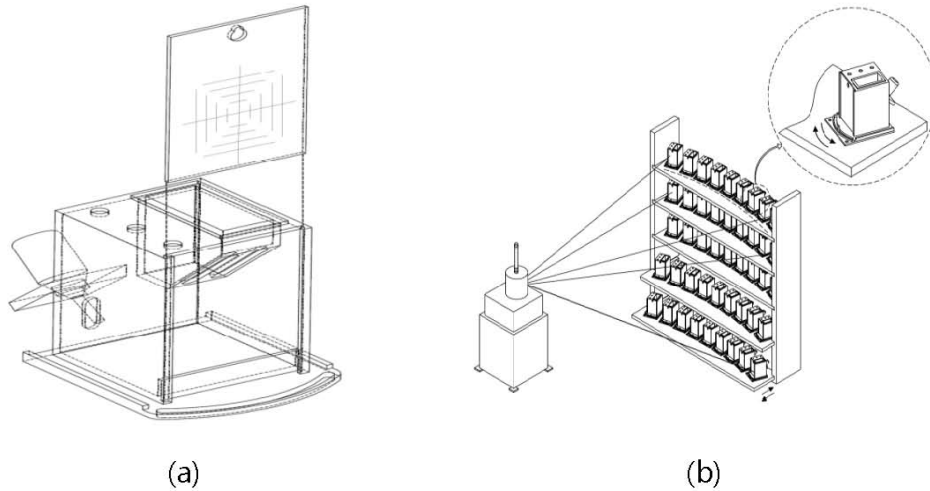


Fig. 3. (a) Possible independent of irradiation newly developed mouse cage (120W × 120L × 130H mm). (b) Mouse cage with distance adjustment function and angle adjustment of the radiation beam angle.

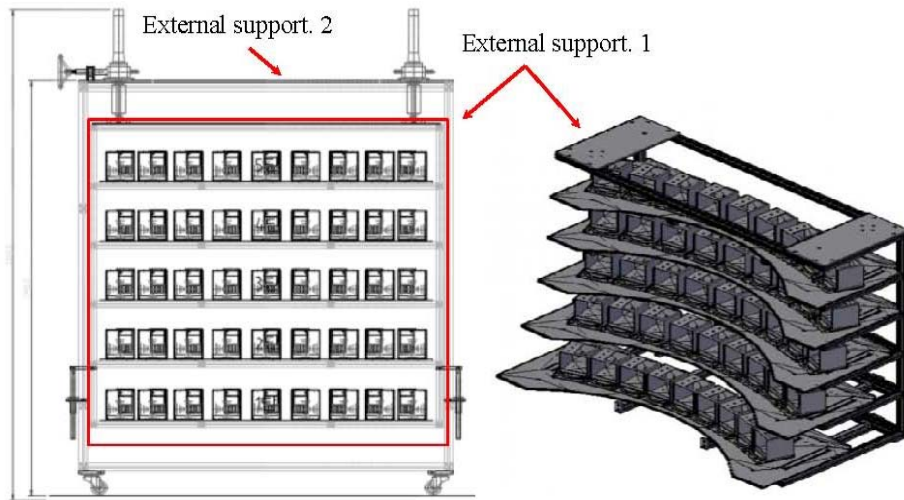


Fig. 4. Mouse apartment manufactured by of dual structure.

2.2.1 마우스 케이지

기존에 사용된 마우스 케이지(Fig. 1)는 다량 조사 시 마우스 개체 간 방사선 선원에 대해 중첩 될 확률이 크며, 한 마리씩 조사 하더라도 케이지의 큰 부피로 인해 마우스에 활동반경이 넓어짐에 따라 요구되는 조사거리에 대해 오차가 발생한다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 Fig. 3과 같이 독립적으로 방사선 조사가 가능한 개별 케이지를 제작하였으며 제작된 마우스 케이지는 유리 이상의 투명도가 있고 성형가공이 쉬운 아크릴 소재를 사용하여 120W × 120L × 130H mm³ 로 설계 되었다. 내부에 마우스 사육에 필요한 일정한 공간을 갖는 박스, 각도조절 표시 및 장치가 부착된 판, 케이지의 거리 조정 및 마우스 아파트와 고정을 위한 하부 판으로 구성된다. 박스 전면부는 상하 개폐가 가능한 형태로 마우스를 넣을 때 용이하게 제작되었고 방사선 조사 시 레이저를 이용해 초점 및 수평 수직에 대한 검증이 용이 할 수 있도록 격자를 표시하였다. 상부와 후면부에 기존 기술을 도입하여 외부로부터 결합되는 사료통과 물통을 장착 가

능하게 함으로써 케이지의 외부로부터 밀폐형 구조로 설계 하였으며, 탈부착이 가능할 수 있도록 제작하였다. 마우스 케이지의 각도 조절은 장치가 부착된 판의 중심 으로부터 ±40°까지 각도 조절이 가능하며, 케이지 하부 는 각도 조절 표시 및 마우스 아파트의 외부지지대와 결합시켜 고정 및 선원에 따른 미세 거리 조정이 가능하도록 설계하였다 [5].

2.2.2 마우스 아파트(Mouse Apartment)

선원과 일정거리에서 마우스에 동일한 선량을 전달하기 위하여 Fig. 4와 같이 2중 구조의 외부지지대를 제작 하였다. 케이지가 배치된 외부지지대 1은 1560W × 550L × 1400H mm³ 로 5층의 선반으로 설계되었으며, 각 선반 마다 9개의 케이지를 배치 할 수 있다. 방사선 조사 시 층간 간섭현상 및 산란에 대한 오류를 최소화 하기 위해 두께 5 mm 알루미늄 판 위에 두께 5 mm, MC 나이론(mono cast nylon) 판을 설치하였으며, 선반 사이 간격은 245 mm로 설계하였다.

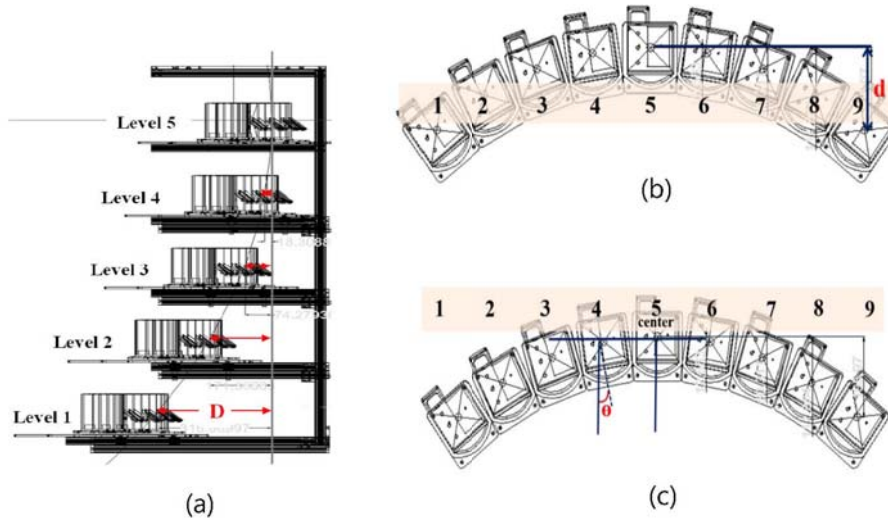


Fig. 5. Calculate the position of at a fixed distance from the radiation source center. (a) Adjustment of the distance of each level with mouse apartment. (b), (c) Adjustment of the angle and distance of the mouse cage in accordance with the irradiation.

Table 1. The Level Determination of the Mouse Apartment According to the Distance between the ¹³⁷Cs Irradiator and the Irradiation Apparatus (D': 1m, 2m, 3m, 4m, and 5m).

Distance(D')	Level (supporting plate for mouse cage), Unit: mm(d)				
	1	2	3	4	5
1 m	-	-	158.34	37.14	
2 m	316.67	171.37	74.28	18.31	
3 m	201.14	111.42	49.00	12.17	center
4 m	148.56	82.87	36.62	9.12	
5 m	118.03	66.05	29.25	7.30	

선반은 마우스 케이지 하부 기판과 연결되어 각도(최대 80° 조정) 및 거리 조정이 가능하도록 하기 위해 케이지 위치마다 흡과 거리표시 장치를 부착 하였으며, 케이지 개별 위치 조정뿐만 아니라 각 층별로 전후 위치 조정 가능하도록 설계 하였다. 5층으로 구성된 외부지지대 1의 고정 및 미세조정을 하기 위한 외부지지대 2는 1650W × 600L × 1900H mm³ 로 상부는 무게 중심을 고려하여 관이음 장치가 연결된 나사 잭이 양쪽으로 장착되어 케이지를 지지하는 외부지지대 1의 높이를 미세 조정할 수 있으며, 하단은 하중을 지지할 있는 장치가 장착되어 있고 거리 이동 시 용이하게 바퀴를 장착 하였다 [5].

2.2.3 방사선 조사각도 및 범위 계산

마우스 아파트 각층에 Fig. 5와 같이 9 개의 마우스 케이지가 5개 층의 선반에 배치하였으며, 좌측 마우스 케이지부터 1 ~ 9까지 번호를 부여하였다. 저선량 조사기의 방사선원은 한 점으로 시작하여 방사형으로 조사되는데, 일정한 거리에서 조사하고자 할 때 조사 각에 의한 방향뿐만 아니라 조사대상 마다 거리가 조정되어야 한다. 이를 위해 방사선 조사장치와 마우스 아파트의 거리를 다르게 하여 마우스 케이지의 이동거리와 각도를 측정하였다. 방사선 조사장치와 마우스 아파트의 거리 (D')는 1 m, 2 m, 3 m, 4 m 및 5 m로 설정하였으며 조

사 각과 거리(D')에 따라 마우스 아파트의 선반의 슬라이딩 거리(D), 마우스 케이지 거리(d), 마우스 케이지 각도(θ)가 계산되었다. Fig. 5(a)는 마우스 아파트의 각 층별 선반의 위치 조절을 나타내며, 각 층별로 슬라이딩되는 거리를 저선량 조사기와 마우스 아파트의 거리(D')별로 계산하였다(Table 1). 선반의 슬라이딩 거리(D)는 5 층의 가운데 마우스 케이지 바닥 중심을 기준으로 계산하였으며, 계산된 선반위치에 따라 마우스 케이지의 위치 및 각도를 계산하였다(Table 2). 위치의 경우, Fig. 5(b) 와 같이 각 층별 5번 케이지 중심점을 지나는 평행선분과 동일한 층에 있는 각 수용 케이스의 중심점을 지나는 평행선분의 사이 길이(d)를 계산하였으며, 각도의 경우 Fig. 5(c)와 같이 저선량 조사기의 선원을 중심점으로 하여, 선원 중심점과 각 마우스 케이지의 중심점을 연결한 선분에 대해 각각의 마우스 케이지들의 방향이 수직이 되었을 때, 조사 각에 따른 각각의 마우스 케이지들의 각도를 계산하였다 [5].

2.3 실험동물

실험동물은 7주령의 수컷과 암컷 BALB/c 마우스(중앙 실험동물, 서울)를 사용하였다. 실험동물은 온도 (23 ± 2)°C, 상대습도 (50 ± 5)%, 조명시간은 12 시간 (오전8시 점등-오후 8시 소등), 공기 순화는 시간당 13-18번 순환, 조도 (200~300) lux 로 설정된

Table 2. The Mouse Cage Distance(d) and Angle(θ) Calculation According to the Irradiation Angle and the Distance between the Irradiator and the Cage (D').

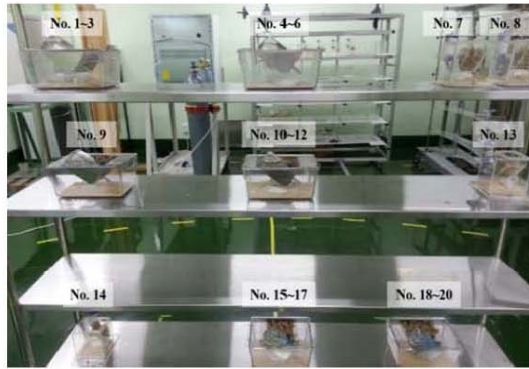
Distance (D)	Level	Mouse cage position, Unit: mm(d), ° (θ)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 m	5	203.53	116.27	52.25	13.15		13.15	52.25	116.27	203.53
	4	195.97	111.95	50.31	12.66		12.66	50.31	111.95	195.97
	3	171.30	97.86	43.98	11.07		11.07	43.98	97.86	171.30
	Angle	37.20	27.90	18.60	9.30		9.30	18.60	27.90	37.20
2 m	5	117.10	66.16	29.50	7.39		7.39	29.50	66.16	117.10
	4	116.03	65.55	29.22	7.32		7.32	29.22	65.55	116.03
	3	112.75	63.70	28.40	7.11		7.11	28.40	63.70	112.75
	2	107.07	60.49	26.97	6.76		6.76	26.97	60.49	107.07
	1	98.56	55.68	24.83	6.22		6.22	24.83	55.68	98.56
Angle	19.70	14.78	9.85	4.93		4.93	9.85	14.78	19.70	
3 m	5	79.12	44.60	19.85	5.02		5.02	19.85	44.60	79.12
	4	78.80	44.41	19.77	4.95		4.95	19.77	44.41	78.80
	3	77.83	43.87	19.52	4.89		4.89	19.52	43.87	77.83
	2	76.19	42.94	19.11	4.78		4.78	19.11	42.94	76.19
	1	73.82	41.61	18.52	4.68	Center	4.68	18.52	41.61	73.82
Angle	13.19	9.90	6.59	3.30		3.30	6.59	9.90	13.19	
4 m	5	59.30	33.39	14.85	3.72		3.72	14.85	33.39	59.30
	4	59.17	33.32	14.82	3.71		3.71	14.82	33.32	59.17
	3	58.76	33.09	14.72	3.68		3.68	14.72	33.09	58.76
	2	58.07	32.70	14.55	3.64		3.64	14.55	32.70	58.07
	1	57.10	32.15	14.30	3.58		3.58	14.30	32.15	57.10
Angle	9.88	7.41	4.94	2.47		2.47	4.94	7.49	9.88	
5 m	5	47.31	26.63	11.84	2.96		2.96	11.84	26.63	47.31
	4	47.24	26.59	11.83	2.96		2.96	11.83	26.59	47.24
	3	47.04	26.48	11.77	2.95		2.95	11.77	26.48	47.04
	2	46.69	26.28	11.69	2.92		2.92	11.69	26.28	46.69
	1	46.20	26.00	11.56	2.90		2.90	11.56	26.00	46.20
Angle	7.89	5.92	3.94	1.97		1.97	3.94	5.92	7.89	

시설에서 수행하였다. 실험동물용 고히사료(중앙실험동물, 서울)와 정수 장치를 통과한 수도수를 이용하여 자유 급식하게 하였다. 모든 동물실험은 Institute of Laboratory Animal Resource 의 Guide for the Care and Use of Laboratory Animal (1996, USA)에 준하여 취급하였으며 동물실험은 동남권원자력의학원 동물실험 윤리위원회(Institutional Animal Care and Use Committee)의 승인 하에 수행하였다.

2.4 선량평가

개발된 마우스 케이지 및 아파트에 대한 정확성 평가를 위해 실험용 마우스에 유리선량계를 삽입하여 흡수선량을 측정 하였으며, 동시에 조사부위별 흡수선량에 대한 차이를 검증하기 위하여 머리와 몸 부위에 각각 1 개씩 유리선량계(총 86EA)를 삽입하여 선량을 검증하였다. 실험에 사용된 유리선량계(GD-302M, Asahi Techno Glass Corporation, Shizuoka, Japan)는 보호 캡으로 둘러싸인 원통형이고, 소자식별이 가능하며, 직경은 1.5 mm, 길이는 1.2 mm 이다. 성분은 P 31.55%, O 51.16%, Al 6.12%, Na 11.0% 그리고 Ag 0.17%로 구성되어 있다 [7, 8]. 선량 측정범위는 10 μ Gy ~ 500 Gy까지로 넓은 선량 영역에서의 측정이 가능하며 3% 이내의 에너지 특성과 5% 이내의 방향 특성을 나타낸다 [9]. 그

리고 방사선에 조사된 유리소자가 자외선에 의한 여기(excitation)로 주황색 형광을 발하는 현상(radio-photo luminescence, RPL)을 이용한 고체 선량계이며, 방사선 조사로 만들어진 RPL 중심은 관독조작 등으로 소멸되지 않고 축적되므로 선량의 측정은 사용 전후의 측정치의 차로 구해진다 [10]. 이로 인해 열형광 선량계와 달리 반복관독이 가능한 장점을 가진다. 유리선량계의 관독은 FGD-1000 관독기(Asahi Techno Glass Corporation, Shizuoka, Japan)를 사용하였다. 관독 시 사용하는 저선량 매거진(magazine)의 측정범위는 10 μ Gy~10 Gy(Sv) 이고, 고선량 매거진을 사용할 경우 500 Gy까지 관독이 가능하다. 한번에 20개의 유리선량계를 매거진에 장착하여 관독할 수 있으며, 최대 10번까지 반복 관독하여 평균값을 나타내게 된다. 유리선량계를 관독하기 위해서는 관독기 내부에서 펄스화된 질소 기체의 세기를 조절하는 기준 유리선량계(reference GRD)와 표준기관에서 교정을 받은 표준유리선량계(standard GRD)가 필요하다. 본 연구에서는 일본의 2차 표준기관인 방사선계측협회(Institute of Radiation Measurement, Japan)에서 ¹³⁷Cs 에 대하여 교정을 받은 표준유리선량계(standard GRD)를 사용하였으며, ¹³⁷Cs감마선의 선량에 대해 정확성을 확보하기 위하여 동남권원자력의학원 연구센터의 ¹³⁷Cs 조사기에 대한 기준선량을 한국 표준과학연구원(KRISS)



(a)



(b)

Fig. 6. Mice were placed in a cage on shelves located 2 m from the source representing 0.1 Gy exposure. (a) Absorbed dose measurement from conventional irradiation method. (b) Absorbed dose measurement from newly developed system.

에서 공기커마와 물 흡수선량에 대하여 교정 받은 표준 측정 장비인 이온 전리함(TM30012, TM30011, PTW, Germany) 과 전기계(6517B, KEITHLEY, USA)로 측정하여 측정결과와 신뢰성을 검증하였다.

본 연구에서는 새로 개발된 마우스 케이지 및 아파트에 대한 정도 확립을 위하여 Fig. 6(a)와 같이 기존 조사 시스템과 Fig. 6(b)와 같이 자체 개발한 마우스 아파트 시스템을 이용하여 마우스에 전달된 흡수선량을 비교 분석하였다. 선량 판독 시 케이지에 배치된 마우스마다 기존 조사 시스템(Fig. 6(a))의 경우 No.1 ~ 20, 새로 개발된 조사 시스템(Fig. 6(b))의 경우는 No.1 ~ 23까지 임의에 번호를 부여 하였다. Fig. 6(a)의 기존 조사방법의 경우 마우스들 간의 중첩을 확인하고 이에 따른 흡수선량 차이를 확인하기 위하여 No.1 ~ 3, No.4 ~ 6, No.10 ~ 12, No.15 ~ 17, No.18 ~ 20에 대해서는 종전에 사용된 마우스 케이지에 각각 3마리 씩 수용 하였으며, No.7, No.8, No.13, No.14에 대해서는 새로 제작된 마우스 케이지에는 각각 1 마리씩 수용 하였다. 또한 No.9는 기존 마우스 케이지에 1 마리를 수용 함으로써 제작된 마우스 케이지와의 흡수 선량 차이를 비교 하였다. Fig. 6(b)의 새로 개발된 마우스 케이지 및 아파트는 방사선원을 중심으로 거리마다 계산된 Table 1, Table 2를 참조하여 2 m 거리에서 케이지의 각도와 거리 및 아파트의 거리를 배치하여 케이지마다 1 마리씩 수용하였다.

3 결과와 논의

본 연구는 저선량 방사선에 대한 생물학적 영향평가를 위하여 ¹³⁷Cs 조사기에 대하여 마우스조사 실험 시 마우스에 원하고자 하는 방사선 선량을 정확히 전달하기 위한 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 선원에 대하여 동일한 위치에 장착할 수 있는 마우스 케이지 및 마우스 아파트를 개발하여 장치에 대한 검증을 위해 선량 평가를 수행하였다.

유리선량계를 실험용 마우스 머리와 배에 삽입한 후

기존 조사 시스템과 자체 개발한 마우스 아파트 시스템 각각에 대하여 선량평가를 수행하였으며 기존조사 시스템에 대한 결과에서 Fig. 7(a)는 층별 흡수선량을 나타낸 것으로 4층(No.1 ~ 8): 0.0961 Gy, 3층(No.9 ~ 13): 0.0972 Gy, 1층(No.14 ~ 20): 0.066 Gy로 측정하였다. 이는 층별 오차범위가 상당히 큰 것으로 보였으며, 특히 1층에 위치에 있는 마우스들은 상대적으로 적은 선량이 흡수된 것으로 확인하였다. 특히 독립적으로 방사선 조사가 가능한 개별 케이지에 수용된 마우스(No.7, No.8, No.13, No.14)의 조사부위별(head, body) 흡수선량 차이가 (0 ~ 3.3)% 미만에 비해 하나의 케이지에 3 마리씩 수용된 마우스들(No.1 ~ 3, No.4 ~ 6, No.10 ~ 12, No.15 ~ 17, No.18 ~ 20)의 차이가 (2.80 ~ 22.81)%로 확인하였다(Fig. 7e). 이 결과는 하나의 수용 케이지 내에 있는 마우스들이 서로 중첩되기 때문에 상대적으로 뒤쪽에 있는 마우스가 흡수한 선량이 적은 것으로 보였다. 조사하고자 하는 선량(0.1 Gy)에 대한 마우스들 흡수선량은 (1 ~ 42)% 적게 조사되었으며, 전체 마우스 평균선량 대비 마우스별 평균선량의 범위는 ±(0 ~ 34)% 미만으로 큰 오차범위를 보였다.

자체 개발한 마우스 아파트 시스템의 결과에서 Fig. 7(b)는 층별 평균 흡수선량을 나타내며, 5층(No.1 ~ 5): 0.0959 Gy, 4층(No.6 ~ 10): 0.0958 Gy, 3층(No. 11 ~ 15): 0.0969 Gy, 2층(No.16 ~ 20): 0.0971 Gy, 1층(No.21 ~ 23): 0.097 Gy이 측정되었으며, 이는 층별 평균선량의 차이는 크지 않는 것으로 확인하였다. 마우스의 조사부위별 흡수선량 차이는 (0 ~ 3.09)% 미만이며, 조사하고자 하는 선량(0.1 Gy)에 대한 마우스들 흡수선량은 최대 6% 적게 보이며(fig. 7f), 전체 마우스 케이지의 평균 선량 대비 각 마우스 케이지 평균 선량의 오차 범위는 ±(0 ~ 3)% 미만이며 층별 또는 마우스의 부위별 흡수선량은 크게 차이가 없이 일정량의 선량이 흡수된 것으로 확인하였다.

일부 ¹³⁷Cs 조사기 사용하여 선량평가에 대한 논의를 하고 있으나, 유리선량계 검출특성 평가 [10, 11, 12], 및 생물학적 영향평가를 [13, 14] 위한 연구목적으로써, 본

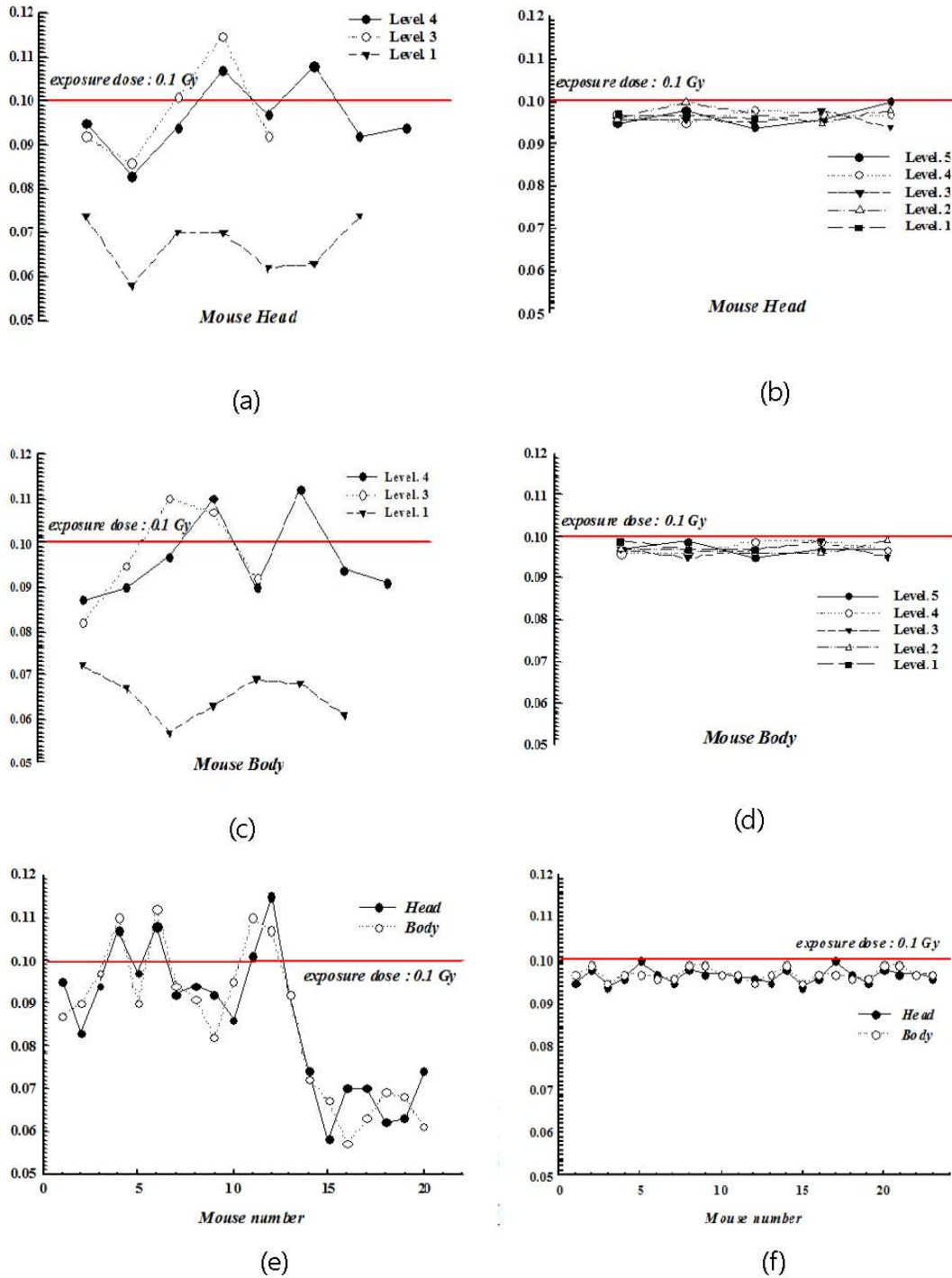


Fig. 7. Evaluation of the mice absorbed dose: (a), (b) Absorbed dose to each level from the conventional irradiation method. (c), (d) Absorbed dose to each level from the self-developed mouse apartment system. (e) Absorbed dose to the mice in different part from the conventional irradiation method. (f) Absorbed dose to the mice in different part from the self-developed mouse apartment system.

연구내용인 방사선 조사 시 조사하고자 하는 선량과 실제 조사되는 선량에 대한 차이를 줄이기 위한 조사시스템 개발과 이를 확인하기 선량평가 및 검증과는 차별성이 있다고 사료된다. 기존 방법은 조사장치를 중심으로 해서 조사실 바닥에 표시된 일정한 거리에 선반을 위치시켜 마우스에 방사선을 조사하는 방식으로 다량의 마우스를 한번에 방사선 조사 시 선원과 마우스간에 거리 및 위치에 대한 오차, 마우스들 간에 중첩으로 인해

원하고자 하는 선량에 대해 측정된 흡수선량은 큰 오차를 보였다. 반면에 개별적으로 방사선 조사가 가능한 마우스 케이지 및 마우스 케이지 위치를 선원과 동일한 위치로 조정 가능한 마우스 아파트는 원하고자 하는 선량에 대해 측정된 흡수선량은 적은 오차범위를 보였으며, 이는 개발된 시스템에 대한 적용이 가능할 것으로 판단되며, 위의 결과를 토대로 저선량에 대한 생물학적 평가 시, 극미량의 선량 및 조사영역이 매우 작으므로 환경에

대해 구체적인 설정이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 저선량 방사선에 대한 생물학적 영향평가에 이용되고 있는 동남권원자력의학원에 구축된 저선량 방사선 조사시설을 이용하여 저선량 조사기에 대해 조사 대상에 대하여 실험자가 원하고자 하는 선량을 조사할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 선량 검증을 통해 시스템에 대한 정밀성을 확보하였다.

기존 방사선 조사 방법에서 level별 평균 흡수선량이 (0.0972 ~ 0.066)Gy이며 조사선량(0.1 Gy)에 대해 40% 이상 큰 오차를 가지는 것을 확인하였으며, 이 결과는 조사 시 시간과 거리에 의해 선량이 계산되어 방사선이 조사되는데 조사대상들의 위치가 방사선원과 일정한 거리에 위치하지 않음을 보여준다. 또한 하나의 케이지에 3 마리씩 수용된 마우스들의 조사부위별 흡수선량 차이가 22% 이상 큰 오차가 확인되었으며, 이 결과는 마우스들이 서로 중첩되기 때문인 것으로 판단된다.

개발된 마우스 아파트 시스템은 저선량 조사기의 선 원으로부터 일정한 거리에서 동일한 선량이 전달되도록 제작되었으며, 독립 조사가 가능한 마우스 케이지는 중첩이 없으므로 마우스의 조사부위별 흡수선량이 거의 동일한 결과를 가진다. 개발된 시스템을 이용하여 흡수선량 측정 시, 층별 평균 흡수선량은 0.0971 Gy ~ 0.0958 Gy로 층별 평균선량의 차이는 크지 않은 것으로 확인 되었으며, 조사선량에 대해 6% 이하 적은 오차를 가지는 것을 확인하였다. 또한 마우스의 부위별 흡수선량은 최대 3% 이하로 방사선 조사장치에서 방사선이 단위 선반에 마련된 각 마우스에 동일 내지 유사하게 조사되는 것을 확인하였을 뿐만 아니라 기존 방사선 조사방법에서 조사부위별 오차율이 상당히 감소하였음을 확인하였다.

기존 방사선 조사방법은 앞에서 언급한 바와 같이 선 원으로부터 일정한 거리와 조사각도에 대하여 실험대상이 정밀하게 조정되지 않아 전달하고자 하는 선량과 실제 조사되는 선량에 약 40% 이상의 차이가 발생하였다. 본 연구를 통하여 저선량 방사선에 대한 생물학적 영향평가 연구 시 분석결과와 신뢰성을 확보하여 결과의 정도를 확립할 수 있다.

감사의 글

This research was supported by National R&D Program through the Dong-nam Institute of Radiological & Medical Sciences(DIRAMS) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning(50496-2015, 50490-2015)

REFERENCES

1. Olivieri G, Bodycote J, Wolff S. Adaptive response of human lymphocytes to low concentrations of radioactive thymidine. *Science*. 1984;

- 223:594-7.
2. Sankaranarayanan K, Dyn AV, Loos M, J, Natarajan A. T. Adaptive response of human lymphocytes to low-level radiation from radioisotope or X-rays. *Mutat Res*. 1989;211: 7-12.
3. Di Chen. Measurement of depth doses in rat and mouse phantoms exposed to ²⁵²Cf mixed neutron and gamma radiation, *J Radiat Res*. 1988;29(1): 119-129.
4. Zoetelief J. Recent EULEP dosimetry intercomparisons for whole body irradiation of mice. European Late Effects Project group, *Int J Radi Biol*. 1997;72(5): 627-632.
5. Yeong-Rok Kang, Tae Gen Son, Kwangmo Yang, Dong Hyeok Jeong, Manwoo Lee, Sung Jin Noh. A Shelf of Irradiation Apparatus, Korea parent application number KR 10-2014-0109827.
6. Jennie Treleaven, Andrew Gennery, Judith Marsh, Derek Norfolk, Lizanne Page, Anne Parker, Frank Saran, Jim Thurston, David Webb. Guidelines on the use of irradiated blood components prepared by the British Committee for Standards in Haematology blood transfusion task force, 2011;152:35-51. *British Journal of Haematology*.
7. Piesch E, Burgkhardt B, Vilgis M. Photoluminescence dosimetry: Progress and present state of art, *Radiat Prot Dosim*. 1990;33:215-216.
8. Tsuda M. A few remarks on photoluminescence dosimetry with high energy x-ray, *Jpn J Med*. 2000;20:131-139.
9. Technical Report. Explanation material of RPL glass dosimeter. Small element system, Asahi Techno Glass Corporation, Tokyo, Japan. 2000.
10. Hoshi Y, Nomura T, Oda T, Iwasaki T, Fujita K, Ishikawa T, Kato A, Ikegami T, Sakai K, Tanooka H, Yamada T. Application of a newly developed photoluminescence glass dosimeter for measuring the absorbed dose in individual mice exposed to low-dose rate ¹³⁷Cs γ -rays, *J Radiat Res*. 2000;41: 129-137.
11. Zhuo W, Liu W, Huang G, Zhu G, Ma, G. Comparison of dosimetric properties between GD-300 series of radiophotoluminescent glass detectors and GR-200 series of thermoluminescent detectors, *Nucl. Sci. Tech*. 2007;18:362-365.
12. Shih-Ming Hsu, Hsi-Wen Yang, Tien-Chi Yeh, Wei-Lin Hsu, Chin-Hui Wu, Chin- Chang Lu, Wei-Li Chen, David Y.C. Huang. Synthesis and physical characteristics of rad photoluminescent dosimeters, *Radiat. Meas*. 2007;42:621-624.

13. Kazuo Sakai, Takaharu Nomura, Yasuhiro Ina. Dose Rate Irradiation Accompanied by Immune Enhancement of bio-protective functions by low dose/dose-rate radiation, Dose-Response. 2006; 4(4):327-332. Dose Rate Irradiation Accompanied by Immune Activation in C57BL/6 Mice, Radiation Research. 2005;163:153-158.
14. Yasuhiro Ina, Hiroshi Tanooka. Suppression of Thymic Lymphoma Induction by Life-Long Low-

A Study on Mice Exposure Dose for Low-dose Gamma-irradiation Using Glass Dosimeter.

Sung Jin Noh^{*,†}, Hyo Jin Kim^{*,‡}, Hyun Kim^{*,‡}, Dong Hyeok Jeong^{*}, Tae Gen Son^{*}, Jung Ki Kim^{*}, Kwangmo Yang^{*}, Sang-Hee Nam[†], and Yeong-Rok Kang^{*}

^{*}Research Center, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences, Busan, Republic of Korea

[†]Department of Biomedical Engineering, Inje University, Gimhae, Gyeongnam, Republic of Korea

[‡]Department of Physics, Dong-A University, Busan, Republic of Korea

Abstract - The low dose radiation is done for a long period, thus researchers have to know the exact dose distribution for the irradiated mouse. This research has been conducted in order to find out methods in transmitting an exact dose to mouse in a mouse irradiation experiment carried out using ¹³⁷Cs irradiation equipment installed in the DIRAMS (Dongnam Institution of Radiological & Medical Sciences) research center. We developed a single mouse housing cage and shelf with adjustable geometric factors such as distance and angle from collimator. The measurement of irradiated dose showed a maximal 42% difference of absorbed dose from the desired dose in the conventional irradiation system, whereas only 6% difference of the absorbed dose was measured in the self-developed mouse apartment system. In addition, multi mice housing showed much difference of the absorbed dose in between head and body, compared to single mouse housing in the conventional irradiation system. This research may allow further research about biological effect assessment for the low dose irradiation using the self-developed mouse apartment to provide more exact doses which it tries to transmit, and to have more reliability for the biological analysis results.

Keywords : Low dose irradiation, Quality assurance, Self-developed mouse apartment system, Dose assessment, Glass dosimeter