

# 사이클로트론실에서의 중성자계측기 선량 측정비교 연구

## Comparative study on Measured Radiation by Neutron Surveymeters in a Cyclotron Room

지남준\*, 안성민\*\*

제주한라병원 핵의학과\*, 가천대학교 방사선학과\*\*

Nam-Joon Ji(artistji@naver.com)\*, Sung-Min Ahn(sman@gachon.ac.kr)\*\*

### 요약

사이클로트론 가동 시 발생하는 중성자 선량을 고정형계측기와 휴대용계측기를 이용하여 비교 평가 하고, 계측기 간의 선량의 측정치가 차이가 있는지 알아보하고자 이 연구를 진행하게 되었다. 실험 기간 중 휴대형 계측기의 교정은 3회 실시하였으며 각 회별 12회, 총 36회의 측정값을 2012년 6월부터 2014년 2월까지 2주에 1회씩 고정형과 휴대형을 이용하여 선량을 측정 비교 하였다. 휴대형과 고정형 계측기의 각 회차에서 측정 결과 통계치가 각 0.186, 0.511, 0.057로 통계적으로 유의하지 않다는 결과를 얻었다. 휴대형 계측기의 교정주기에 맞춰 고정형계측기의 편차가 없다면 고정형계측기는 굳이 교정을 받지 않아도 된다는 결론을 얻었다. 또한 고비용이 드는 중성자계측기를 설치하는 것 보다 상대적으로 저비용인 Alarm meter를 설치하여 관심준위이상 계측이 되었을 때 휴대형계측기로 측정을 한다면 사회적 비용의 절감되는 효과도 있으리라 판단된다.

■ 중심어 : | 중성자 | 사이클로트론 | 중성자계측기 |

### Abstract

By comparing and evaluating the neutron dose when running cyclotron in fixed type measuring machine and portable type measuring machine, we performed this study to see if there is any difference between the doses in both measuring devices. We performed correction 3 times for the portable type during the experiment. We measured the values 12 times for each correction, so total 36 times by using the fixed type and portable type once every 2 weeks from June 2012 to February 2014. The statistics for the portable type and fixed type for each experiment showed 0.186, 0.511, and 0.057, which are not statistically significant. Therefore, we have come to the conclusion that unless there is deviation based on the correction period of the portable type, correction of fixed type wouldn't be necessary. Also, reduction of social costs may be achieved if we install an alarm meter, which is relatively low priced compared to the high cost neutron measuring machine, when detecting higher level than the interested standard level.

■ keyword : | Neutron | Cycrotron | Neutron Measuring Machine |

## I. 서론

세계적으로 인구의 고령화로 각종 암을 비롯하여 뇌혈관질환, 심장질환 등 난치성 질병들이 증가하는 추세이다. 인간의 삶의 질을 높이기 위해 각종 질환의 조기 진단 및 치료가 필요하며 날로 발전해가는 의료 영상장비들 중에도 방사성동위원소를 이용한 장비인 양전자전산화단층촬영장치(PET-CT, Positron Emission Tomography - Computed Tomography)가 주목을 받고 있다. 방사성동위원소 표지화합물을 이용하여 질병의 조기진단을 비침습적인 방법으로 가능하여 널리 이용되고 있다. 양전자전산화단층촬영장치는 사이클로트론(Cyclotron)에서 생산되는 방사성동위원소를 이용하여 질병의 진단 및 치료에 활용하여 인류에 향상된 의료혜택을 주고자 노력하고 있다[2][3].

최근 사이클로트론 기술은 기존의 물리적 이용개념에서 벗어나 의료장비의 개념으로 방향전환이 이루어지고 있으며 대형병원을 중심으로 사이클로트론을 설치하고 있는 추세이다. 1984년 10월 원자력병원에 사이클로트론 Mc-50 (Scanditronix)을 시작으로 2012년 12월 현재 국내에 37개의 기관에서 방사성동위원소 생산허가를 받아 가동 중에 있다[4].

암(cancer)의 진단용으로 개발되어 사용되고 있는 PET는 그 효율가치가 우수하여 PET-CT의 핵의학 진단 수요가 급증하고 있으며 방사성동위원소의 생산시설인 사이클로트론가동시설이 추가 될 수밖에 없다. PET-CT 검사에 사용하는 방사성동위원소는 인간의 포도당 대사를 이용한  $^{18}\text{F}$ -FDG(Fluorodeoxyglucose)를 가장 많이 사용하고 있다. FDG는  $^{18}\text{O}$ 을 농축하여 만든 물에 양성자빔을 조사하여 (p, n)반응을 통해 생산된  $^{18}\text{F}$ 를 포도당에 표지하여 만들어진다[8]. 이 경우 표적체에서 다량의 중성자가 생성되기 때문에 중성자에 대한 차폐를 고려하여야 한다. 사이클로트론실 외부로 방출되는 선량을 최소화 하여 작업종사자 및 일반인들을 방사선으로부터 보호해야 한다. 이를 위해서는 사이클로트론 가동 시 중성자에 대한 모니터링이 필수적으로 필요하다. 누설 방사선을 정확히 모니터링 하기 위하여 계측기의 검교정 또한 필수적이다. 사이클로트론을 가

동하고 있는 각 기관에서는 중성자 모니터링을 위하여 휴대형계측기와 고정형계측기를 이용하여 사이클로트론의 중성자 모니터링을 실시하고 있다. 이 계측기들은 원자력안전법에 의거하여 교정주기를 설정하여 계측기의 검교정을 실시하여야 한다[9].

휴대형 계측기는 교정주기에 따라 교정을 실시하고 있지만 고정형계측기에 대해서는 현재 출장교정이 가능하도록 인증을 받은 업체가 국내에 없는 실정이다. 고정형계측기는 동작여부는 확인이 가능하나 측정값의 평가는 알 수 없어 지속적으로 교정을 받아 승인된 휴대형계측기를 이용하여 고정형 방사선계측기의 정도를 평가하여 적정성 여부를 평가하고자 이 연구를 진행하게 되었다.

## II. 실험장치 및 방법

### 1. 실험장치

#### 1.1 사이클로트론

사이클로트론은 7.5 MeV로 H를 가속시켜 일정한 에너지로 가속시켜주는 가속기이며, 70 uA까지의 양성자 beam 전류를 추출할 수 있다. 3개의 target과 다양한 화학시스템을 갖추고 있어  $^{18}\text{F}$ 를 만들 수 있다.

표 1. 사이클로트론 사양

가속입자	에너지	추출 Beam 전류	Beam port
H <sup>+</sup>	양성자 7.5 Mev	양성자 70 $\mu$ A	Single beam 3port



그림 1. 사이클로트론

#### 1.2 중성자계측기(휴대형)

휴대형계측기는  $^3\text{He}$ 가스와 제논(Xe)가스를 충전한 기체충전형 비례계수관이며,  $^3\text{He}$ 와 중성자의 반응으로

생성된 양성자선을 계측하여 중성자를 측정한다. 측정 범위는 1 nSv/h ~ 100 mSv/h, 에너지 범위는 25 meV ~ 5 GeV 측정이 가능하다.



그림 2. 중성자계측기(휴대형)

1.3 중성자계측기(고정형)

고정형계측기는 <sup>3</sup>He가스와 제논(Xe)가스를 충전한 기체충전형 비례계수관이며, 방사선량을 준위가 상승하게 되면 본체에서 경고등과 알람이 울리도록 되어있다. 측정범위는 0.1 nSv/h ~ 0.4 sv/h 가능하며 에너지는 50 meV ~ 19 Mev 측정이 가능하다.



그림 3. 중성자계측기(고정형)

1.4 중성자계측기의 교정

방사선 계측기의 교정 목적은 정확한 측정값을 얻기 위함이다. 교정 시기는 계측기 신규 구입, 고장 수리 시, 물리적 충격, 사용자가 필요시, 교정시기 도래에 실시하게 된다. 원자력안전법에 의거하여 교정주기에 맞게 교정을 받고 있다. 본 연구 기간 중 3회 교정을 받았으며 휴대형 중성자계측기 교정인자의 평균값은 0.98 이며 편차는 2%이다[표 2].

표 2. 휴대형중성자계측기 교정( $\mu$  Sv/h)

교정차수	1차	2차	3차	평균	편차
교정인자	0.98	1.00	0.96	0.98	2.0%

2. 실험방법

중성자 계측기의 각 교정 이후 매일 2회 모니터링을 실시하여 휴대형 계측기와 고정형계측기의 측정 지지 값을 얻어 휴대형계측기를 기준으로 고정형계측기의 계수치의 변화 유무를 확인 하였다. 사이클로트론실 출입구 안쪽 벽 2 m 높이에 고정형계측기의 검출기부분이 고정 되어 있다. 휴대형 계측기는 검출기 일체형으로 고정형계측기와 같은 위치인 사이클로트론 본체에서 2 m 떨어진 곳에 위치하도록 고정대를 설치하여 측정 하였다. 휴대형 계측기의 계수창은 내장형이며 사이클로트론 가동 중에는 피폭의 우려로 실험자가 직접 사이클로트론실 내로 들어가 선량을 확인 할 수가 없었다. 휴대형 계측기의 선량을 읽기 위해 동영상 전용 카메라(모델: SONY HDR-AS15)를 설치하여 가동 시 선량의 변화를 동영상으로 기록하여 선량을 확인하였다. 고정형계측기의 계수창은 사이클로트론실 외부에 설치되어 있어 실험자가 사이클로트론 가동 시작부터 15분, 30분, 45분에 선량을 확인한 평균값을 기록하였다. 휴대형계측기의 경우 사이클로트론 가동이 끝난 후 카메라를 확인하여 고정형계측기와 마찬가지로 15분, 30분, 45분에 선량을 확인 후 평균값을 기록 하였다[표 3].

선량측정은 12회씩 3차에 걸쳐 실시하였다. 자료 분석은 SPSS ver 21.0 통계 프로그램을 이용하여 유의 값을 계산 하였다. 1차, 2차, 3차 중성자 방사선량을 측정에 대한 분석으로는 검정변수에 중성자방사선량을, 집단변수에 고정형과 휴대형 서베이메타로 설정하여 독립표본 t 검정으로 평균 비교 분석하였다. 사이클로트론 가동 조건에 따른 분석으로는 1, 2, 3차 측정자료 모두에 대하여 검정변수에 중성자방사선량을, 집단변수에 빔전류로 설정하여 독립표본 t 검정으로 평균 비교 분석하였다.



그림 4. 측정 장면

표 3. 중성자선량 계측치( $\mu$  Sv/h)

횟수	고정형				휴대형			
	15분	30분	45분	평균	15분	30분	45분	평균
1	20.94	21.47	20.12	20.84	20.8	22.7	21.9	21.8
2	20.35	19.51	21.83	20.56	21.6	22.6	22.7	22.3
3	24.56	23.62	25.51	24.56	27.2	27.8	28.7	27.9
4	19.23	18.98	18.94	19.05	20.8	22.3	21.1	21.4
5	19.94	18.13	18.75	18.94	19.9	21.5	20.4	20.6
6	18.81	19.21	19.71	19.24	21.5	21.3	22.6	21.8
7	19.45	18.45	19.26	19.05	21.5	20.5	21.9	21.3
8	22.29	24.28	23.28	23.28	24.8	26.8	25.8	25.8
9	22.21	20.87	21.31	21.46	24.3	23.7	24.9	24.3
10	21.58	22.89	22.69	22.39	25.8	27.8	26.8	26.8
11	21.69	22.19	21.99	21.96	22.3	24.2	23.1	23.2
12	24.12	23.42	24.97	24.17	26.8	27.9	27.8	27.5
13	21.64	22.91	23.65	22.73	23.5	24.3	24.8	24.2
14	18.45	19.84	21.56	19.95	21.1	22.3	21.4	21.6
15	18.82	19.25	19.31	19.13	19.7	20.6	20.9	20.4
16	19.45	20.76	21.23	20.48	22.1	22.6	22.8	22.5
17	20.47	21.71	22.21	21.46	21.4	23.2	23.8	22.8
18	18.11	19.62	19.13	18.95	19.8	20.4	21.9	20.7
19	19.10	20.11	19.64	19.62	20.1	20.7	20.1	20.3
20	19.86	20.82	21.78	20.82	20.2	20.8	22.6	21.2
21	22.19	24.19	23.99	23.46	24.8	27.9	26.2	26.3
22	19.57	20.21	20.86	20.21	20.6	21.4	22.8	21.6
23	19.88	20.58	20.97	20.48	21.6	22.3	22.7	22.2
24	18.85	19.64	19.21	19.23	19.2	20.4	21.3	20.3
25	19.64	21.43	20.25	20.44	19.5	22.1	20.5	20.7
26	22.14	23.24	22.64	22.67	24.6	26.4	25.8	25.6
27	18.21	19.44	19.54	19.06	19.9	21.9	20.9	20.9
28	20.18	22.58	23.38	22.05	24.5	25.7	25.1	25.1
29	20.39	24.24	23.79	22.81	23.9	24.5	25.4	24.6
30	21.61	22.51	23.16	22.43	25.4	26.1	24.4	25.3
31	18.96	19.17	19.12	19.08	21.4	22.3	23.2	22.3
32	23.28	24.75	25.81	24.61	25.8	26.9	27.7	26.8
33	20.84	23.78	23.35	22.66	24.9	27.7	24.8	25.8
34	19.49	21.48	23.21	21.39	20.3	21.8	22.7	21.6
35	18.22	19.62	19.34	19.06	19.2	20.5	20.9	20.2
36	19.81	20.43	20.13	20.12	20.4	21.7	22.4	21.5

III. 결 과

이번 실험에서는 중성자 계측기를 교정 받은 후 2012년 6월부터 2014년 2월까지 2주에 1회씩(총36회) 측정하였다. 중성자 계측기(FH40G-X/FHT762)의 교정은 전문기관에 의뢰하여 교정을 받았으며 교정 조건은 표준 방식을 따랐다. 교정 환경은 온도 22.0±0.5℃, 습도 42±2% R.H. 로 중성자 계측기의 교정지침서(TCI-RC-03)에 따라 국가측정표준대표기관(KRISS)

으로부터 소급성이 유지된 선원인 <sup>252</sup>Cf를 가지고 평균 교정인자 0.96으로 합격 판정을 받은 장비이다. 이는 측정 불확도(신뢰수준 약 95%, k=2)는 9.2% 이다. 교정인자는 기기 지시 값(보정된 값)을 기준 선량율로 나눈 값을 말한다. 교정기준은 공기산란 1.20%/m이며 실내산란은 11.5%/m<sup>2</sup>을 기준으로 교정 하였으며 slow response의 조건으로 중성자 계측기가 안정될 때까지 충분한 시간(최소 5분)이 경과한 뒤 측정된 값을 읽은 것이다. 실험을 위한 1차 측정 시 사이클로트론의 가동조건은 55 ~ 60  $\mu$ A, 가동시간은 50분에서 70분까지 다양하였다. 2012년 6월부터 12월까지 수집된 자료는 Window용 SPSS ver 21.0 통계 프로그램을 이용하여 유의확률 신뢰도 95%수준으로 설정하여 분석하였다. 고정형 계측기의 평균은 21.29  $\mu$ Sv/h 이며 휴대형 계측기의 평균은 23.73  $\mu$ Sv/h 이다. 유의확률은 0.186으로 통계적으로 유의한 차이는 없다[표 5].

표 4. 사이클로트론가동조건(2012년 6월~12월)

개념 횟수	가동조건		중성자방사선량율( $\mu$ Sv/h)		
	$\mu$ A	min	고정형	휴대형	상대인자
1	55	55	20.84	21.8	0.956
2	55	50	20.35	22.3	0.913
3	60	70	24.56	27.9	0.880
4	55	50	19.05	21.4	0.890
5	55	50	18.94	20.6	0.919
6	55	50	19.24	21.8	0.883
7	55	50	19.05	21.3	0.894
8	60	65	23.28	25.8	0.902
9	55	70	21.46	24.3	0.883
10	60	60	22.39	26.8	0.835
11	60	55	21.96	23.2	0.947
12	60	60	24.17	27.5	0.875

표 5. 분석결과( $\mu$  Sv/h)(2012년 6월~12월)

서베이메타종류		N	평균	표준편차	평균표준오차	유의확률
중성자 방사선량율	고정형	12	21.29	2.026	0.585	
	휴대형	12	23.73	2.638	0.761	

2차 중성자 계측기의 교정환경은 온도 22.0±0.5℃, 습도 39±2% R.H. 로 중성자 계측기의 교정지침서에 따라

국가측정표준대표기관으로 부터 소급성이 유지된 선원인 <sup>252</sup>Cf를 가지고 평균 교정인자 1.0 으로 합격 판정을 받은 장비이다. 이는 측정 불확도(신뢰수준 약 95%,k=2)는 9.1%이다. 교정기준은 공기산란 1.20%/m이며 실내산란은 7.8%/m<sup>2</sup>을 기준으로 교정하였다. 실험을 위한 2차 측정 시 사이클로트론의 가동조건은 55 ~ 60  $\mu$ A, 가동시간은 50분에서 70분까지 다양하였다. 2013년 1월부터 7월까지 측정된 측정값을 분석한 결과 고정형 계측기의 평균은 20.54  $\mu$ Sv/h 이며 휴대형 계측기의 평균은 22.01  $\mu$ Sv/h 이다. 유의 확률은 0.511 로 통계적으로 유의 한 차이는 없다[표 7].

표 6. 사이클로트론가동조건(2013년 1월~7월)

개념	가동조건		중성자방사선량율( $\mu$ Sv/h)		
	$\mu$ A	min	고정형	휴대형	상대인자
1	60	50	22.73	24.2	0.939
2	55	50	19.95	21.6	0.924
3	55	50	19.13	20.4	0.938
4	55	50	20.48	22.5	0.910
5	55	50	21.46	22.8	0.941
6	55	50	18.95	20.7	0.915
7	55	50	19.62	20.3	0.967
8	55	50	20.82	21.2	0.982
9	60	70	23.46	26.3	0.892
10	55	50	20.21	21.6	0.936
11	60	50	20.48	22.2	0.923
12	55	50	19.23	20.3	0.947

표 7. 분석결과( $\mu$  Sv/h)(2013년1월~7월)

서베이메타종류		N	평균	표준 편차	평균표 준오차	유의 확률
중성자 방사선량율	고정형	12	20.54	1.407	0.406	0.511
	휴대형	12	22.01	1.790	0.517	

3차 중성자 계측기의 교정환경은 온도 22.0 $\pm$ 0.5 $^{\circ}$ C, 습도 49 $\pm$ 2% R.H. 로 중성자 계측기의 교정지침서에 따라 국가측정표준대표기관으로부터 소급성이 유지된 선원인 <sup>252</sup>Cf를 가지고 평균 교정인자 0.98 으로 합격 판정을 받은 장비이다. 이는 측정 불확도(신뢰수준 약 95%, k=2)는 8.6%이다. 교정기준은 공기산란 1.20%/m이며

실내산란은 7.72%/m<sup>2</sup>을 기준으로 교정하였다. 실험을 위한 3차 측정 시 사이클로트론의 가동조건은 55 ~ 60  $\mu$ A, 가동시간은 50분에서 70분까지 다양하였다. 2013년 8월부터 2014년 2월까지 측정된 측정값을 분석한 결과 고정형 계측기의 평균은 21.37  $\mu$ Sv/h 이며 휴대형 계측기의 평균은 23.37  $\mu$ Sv/h 이다. 유의 확률은 0.057 로 통계적으로 유의 한 차이는 없다[표 9].

표 8. 사이클로트론가동조건(2013년 8월~2014년 2월)

개념	가동조건		중성자방사선량율( $\mu$ Sv/h)		
	$\mu$ A	min	고정형	휴대형	상대인자
1	60	55	22.44	20.7	0.987
2	60	60	22.67	25.6	0.886
3	55	50	19.06	20.9	0.912
4	55	60	22.05	25.1	0.878
5	60	50	22.81	24.6	0.927
6	60	60	22.43	25.3	0.887
7	55	50	19.08	22.3	0.856
8	55	60	24.61	26.8	0.918
9	60	60	22.66	25.8	0.878
10	55	60	21.36	21.6	0.990
11	55	50	19.06	20.2	0.944
12	55	50	20.12	21.5	0.936

표 9. 분석결과( $\mu$  Sv/h)(2013년8월~2014년2월)

서베이메타종류		N	평균	표준 편차	평균표 준오차	유의 확률
중성자 방사선량율	고정형	12	21.37	1.805	0.521	0.057
	휴대형	12	23.37	2.373	0.685	

#### IV. 고 찰

본 연구와 같은 조건에서 실행 한 연구나 결과가 없어 비교 할 수 있는 방법이 없었다. 선행 논문들은 전자선 치료실에서의 중성자 누설선량을 비교하는 연구는 있었으나 계측기의 선량비교는 없었다. 그러나 이번 연구에서 고정형 계측기와 휴대형 계측기의 계수치가 서로 일정한 범위에 있어 방사성동위원소 생산시설에서 휴대형계측기의 관리가 철저 하고 계측기에 문제가 없

다면 방사선 안전관리나 종사자 피폭선량 경감에 많이 기여 하리라 생각 된다. 하지만 이번 연구는 교정을 받고 있는 휴대형 계측기를 신뢰한다는 조건에서의 결과이므로 차후 다른 연구 결과와 차이가 있을 지도 모른다. 또한 계측기 마다 계수 특징이 있어 이에 따른 영향도 있을 수도 있다. 임상에서 직접 장비를 가동하면서 규제기관으로부터 매년 감사를 받고 있다. 매년 거론은 되지만 현실적으로 해결 할 수 있는 방법은 계측기의 출장 교정기관이 있다면 이는 해결이 된다. 본 실험에서는 자체 차폐형 사이클로트론을 한 대만 가지고하였으며 다양한 종류의 사이클로트론의 가동 중 선량과 비교를 하지 못 하였다. 국내에 open형 사이클로트론도 운영 중인 곳이 있는데 차기 연구자들은 다양한 방법으로 실험 해보는 것도 좋을 것 같다.

## V. 결론

계측기 교정의 목적은 사용목적에 따라 계측기가 적절하게 반응하는지 확인하고 기준 조건에서 기준량을 정확히 측정하여 측정치를 나타내며 정확도 향상을 위한 기기동작 조건이 결정되는지를 확인 하고자 하는 것이다. 사이클로트론 가동 시 고정형 계측기의 보정계수를 산출하여 계측 값의 신뢰도를 확보하고 고정형 계측기의 동작유무 및 측정값을 주기적으로 확인함으로써 고정형 방사선 계측기의 정도관리를 할 수 있는 계기가 되었다. 또한 고 에너지 방사선을 이용하는 사용자로서 방사선감시기의 기능이 유효하다는 것을 확인하였다. 방사성동위원소 생산시설의 경우는 매 1년에 1회 규제기관의 정기검사를 받고 있다. 고정형계측기의 교정유무를 확인하고 있지만 현실적으로 교정 업체가 없어 관리 사각지대에 놓여 있다. 하지만 이번 실험을 통해 방사선 안전관리장비의 관리 및 평가에 이점으로 작용 할 것으로 예상된다. 현재 방사성동위원소 생산시설 허가 기준에 방사선측정기, 방사능 측정기를 구입하도록 하고 있다[9].

휴대형과 Alarm meter를 구비하여도 문제가 없다고 판단이 되지만 규제기관에서는 고정형을 설치하여 안

전관리에 철저를 기하도록 권고 하고 있다. 그러나 현재 고정식계측기의 설치는 보다 더 방사선안전관리의 철저를 기하기 위한 방법이지만 국내 생산시설에는 당연시하게 설치되어 있다. 하지만 계측기 가격이 비싸 생산시설에서는 비용에 많은 부담이 되고 있다.

휴대형계측기를 교정주기에 맞춰 교정이 이루어지도록 하고, 교정된 휴대형계측기와의 편차를 확인하여, 이를 기준으로 고정식 계측기를 운영 하여도 고정식의 계수치를 신뢰 할 수 있다. 이번 실험 결과를 미루어 고정형 계측기가 특별한 고장이 없다면, 고정식계측기의 계수치는 신뢰 할 수 있었다. 고정식 계측기를 교정을 받기위해 분리하다 오히려 계측기에 이상이 발생 할 수 있을 것으로 여겨지며 고정식의 경우 교정을 받지 않아도 휴대형과 병행하여 그 오차가 없다면 방사선안전관리에 이상이 없다고 여겨진다. 신규 사이클로트론을 설치하여 생산허가를 받을 시에는 고정식 중성자 계측기를 구입하는 대신 상대적으로 저비용인 Alarm meter를 설치하여 모니터링을 한 후, 만약에 선량지시치가 규정 값 이상이 발생하였을 때 휴대용계측기를 이용하여 모니터링을 한다면 많은 비용이 절감 될 것으로 판단되며, 원자력안전법에서 요구하는 종사자나 일반인의 피폭방지도도 적합할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- [1] 강보선, 김성철, 신귀순, 이원호, 이후민, 천권수, *방사선계측학*, 신광출판사, 2012.
- [2] 정지혜, 한은옥, 김쌍태, “의료용 Cyclotron 의 방사선안전관리 행위 예측모형”, 대한방사선방어학회 학술발표논문, Vol.33, No.2, pp.1-9, 2008.
- [3] 채중서, “KOTRON-13 과 상용 PET 사이클로트론의 최근기술 동향”, 대한핵의학회지, 제39권, 제1호, pp.1-8, 2005.
- [4] *2012년 방사선이용통계*, 한국방사선진흥협회, 2013
- [5] *사이클로트론 설계개념과 방사선안전관리*, 한국방사선진흥협회, 2012.

- [6] 바로 알고 바로 쓰는 방사선, 한국방사선진흥협회, 2011.
- [7] 시험기관 및 교정기관의 자격에 대한 일반 요구 사항, 지식경제부기술표준원, 2006.
- [8] 서규석, 김찬형, “MCNPX 코드를 이용한 의료용 방사성동위원소 생산을 위한 가속기 시설의 방사선차폐 및 선량계산”, 의학물리학회지 제15권, 제4호 pp.210-214, 2004.
- [9] 원자력안전법, 원자력안전법 시행령, 2014.
- [10] 조용귀, 김성철, 안성민, “양전자단층촬영(PET) 시 환자의 특성에 따른 외부 방사선량을 측정”, 한국콘텐츠학회논문지, 제13권 제12호, pp.860-868, 2013.
- [11] 양원석, 최준혁, 신운재, 민병인, “방사선누설선량 조사를 통한 방어시설과 누설선량 평가방법에 대한 문제점 연구”, 한국콘텐츠학회논문지, 제13권, 제11호, pp.768-777, 2013.

저 자 소 개

지 남 준(Nam-Joon Ji)

정회원



- 2014년 8월 : 가천대학교보건대학원 방사선학과(방사선학석사)
- 1999년 7월 ~ 현재 : 제주한라병원 핵의학과

<관심분야> : 핵의학, 방사선방어

안 성 민(Sung-Min Ahn)

정회원



- 2010년 2월 : 한서대학교 화학과 (이학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 방사선학과 교수

<관심분야> : 핵의학, 방사선관리