

이온 챔버 설계 제작 및 활용 기술 개발

Ion Chamber Design and Fabrication in KAERI

김용균, 박세환, 김한수, 김정복, 강상묵, 이우교, 정종은, 홍석봉, 하장호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김종경, 김재천
한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

요 약

이온 챔버는 방사선 계측을 위하여 가장 널리 쓰이고 있는 검출 장비 중 하나이다. 따라서 다양한 사용 환경에 적합한 설계와 제작이 이루어져야 한다. 수집 부피가 약 15 cc, 1500 cc인 이온 챔버를 전도성 플라스틱, 알루미늄을 이용하여 제작하였다. 가드 전극 설계를 이용하여 누설 전류를 10 fA 이하로 하였으며, 선량 전환 상수, 검출 효율의 등방성을 측정하고 안정적인 설계 조건을 결정하였다. 가속기 빔 진단을 위한 Beam Loss Monitor (BLM) 용 이온 챔버를 설계, 제작하였으며 수집 전극의 지름에 따른 포화 곡선의 변화를 측정하고 이를 통하여 최적의 수집전극 지름을 결정하였다. Radiation Monitoring System (RMS)를 위한 이온 챔버도 설계 제작하였다.

Abstract

An ion chamber is widely used for radiation monitoring. The ion chamber has to be designed and fabricated for specific purposes. Ion chambers with collecting volume of about 15, and 1500 cc were made with the conductive plastic and aluminum. The leakage current of the ion chamber was measured to be less than 10 fA, and it had stayed stable. The conversion factor of radiation dose and the isotropy of the detection efficiency were measured. An ion chamber for Beam Loss Monitoring (BLM) system was designed and fabricated. The saturation curves for the ion chambers with various anode diameters were measured, from which we can

determined the adequate diameter of the anode electrode of the BLM ion chamber. An ion chamber for Radiation Monitoring System (RMS) was also designed and fabricated.

1. 서 론

최근 방사선 선량 측정을 위한 여러 방법들이 시도되고 있지만 여전히 이온 챔버는 선량 측정을 위한 대표적 방사선 계측기이다. 측정이 행해지는 조건에 따라 다양한 구조의 이온 챔버를 필요로 하고 있다. 따라서 이러한 구조의 이온 챔버를 설계, 제작 할 수 있는 기반 연구의 필요성이 계속적으로 제기되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 요구에 부합하기 위하여 다양한 구조의 이온 챔버를 설계, 제작하였으며 그 성능을 평가하였다. 특수한 환경 아래에서 사용될 수 있는 이온 챔버로는 고선량 가속기 빔의 시간적 변화를 측정하기 위한 BLM용 이온 챔버, 원자력 시설의 방사선 준위 측정을 위한 RMS용 대형 이온 챔버 등을 설계, 제작하였다.

2. 이온 챔버 제작 및 성능 평가

a. 설계 및 제작

수집 부피가 14.4 cc인 소형 이온 챔버와 1,563 cc인 중형 이온 챔버 두 종류를 제작하였다. 이온 챔버의 기하학적 구조는 일반적으로 평판형, 원통형, 원형 등이 있는데, 원통형 이온 챔버를 설계, 제작하였다. 원통형 이온 챔버는 외부 전극, 내부 전극, 보호 전극, 절연체로 구성된다. 외부 전극과 내부 전극 사이의 수집 영역에는 공기를 두어서 입사하는 방사선량을 결정토록 하였다. 방사선이 전극내 물질과 반응하여 수집 영역으로 입사하는 전자의 수와 방사선이 수집 영역 내에서 반응하여 전극으로 입사하는 전자 수의 평형¹⁾을 위하여 공기 등가 물질을 선택하여 전극을 제작하였다. 공기 등가물질로는 전도성 PVDF와 알루미늄을 선택하였다. 소형 이온 챔버는 PVDF로 제작하였고 중형 이온 챔버는 알루미늄으로 제작하였다. 전자 평형을 이루기 위한 전극의 두께는 물에서 전자의 비정에 근거하여 결정하였다.²⁾ 저에너지 입사 감마선 선량 측정을 위하여 알루미늄 1 mm, PVDF 1 mm 두께로 제작을 하였으며 ⁶⁰Co에서 발생하는 높은 에너지 감마선 선량을 측정하기 위하여 2.5 mm 두께의 build-up cap을 소형 이온 챔버를 위하여 PVDF로 제작하였다. 방사선 입사 방향에 대한 검출 효율의 등방성 개선을 위하여 소형 이온 챔버의 외부전극을 3가지 형태로 제작하였다. 각각의 자세한 형태는 아래의 이온 챔버 등방성 측정에서 다시 설명한다. 보호전극은 수집 영역에 최대한 영향을 끼치지 않도록 설계하였다. 각 전극 사이의 절연체는 Teflon으로 제작하였다. 그림 1은 제작된 소형 이온 챔버를 보여주고 있다. 이온 챔버의 각 전극은 삼상 동축선에 연결되어 있도록 제작되었다. 두 중

류의 이온 챔버에 대한 설계 상수는 표 1에 정리하였다.



그림 1 제작된 소형 이온 챔버. 반응 영역의 부피는 14.4 cc.

	소형 이온 챔버	중형 이온 챔버
전극 물질	PVDF	알루미늄
절연 물질	Teflon	Teflon
수집 영역 부피	14.4 cc	1563 cc
보호 전극	PVDF	Copper
⁶⁰ Co buildup cap	○	□

표 1 이온 챔버 설계

b. 누설 전류

이온 챔버로부터 전류는 Keithley 사의 6517A Electrometer를 이용하여 측정하였다. 우선, 방사선원이 없는 상태에서 외부 전극에 고전압을 인가하면서 내부 전극을 통하여 누설 전류를 측정하였다. 그림 2는 소형 이온 챔버의 시간에 따른 누설 전류 변화 측정 결과를 보여준다. 이 때 인가 전압은 외부 전극에 -50 V에서 -500 V 까지 변화시키면서 측정을 행하였다. -2 fA 이하의 누설 전류가 측정되었으며 시간에 따라 큰 변화를 보이지는 않았다. 같은 방식으로 중형 이온 챔버의 누설 전류를 측정하였다. 이 경우 약 10 분 정도의 시간이 지난 후 누설전류가 안정되었으며 누설 전류는 -50 V에서 -1000V까지의 전압을 인가한 경우 -10 fA 이하로 측정되었다.

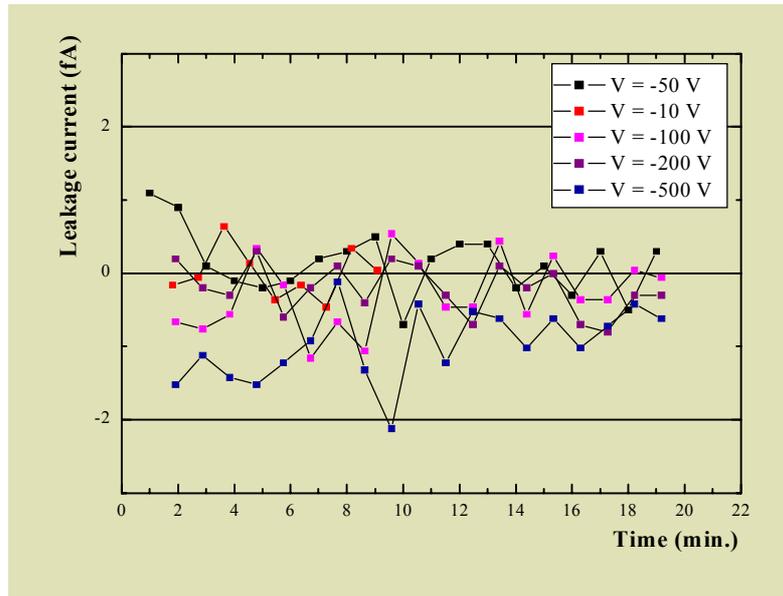


그림 2 소형 이온 챔버의 시간에 따른 누설 전류 변화

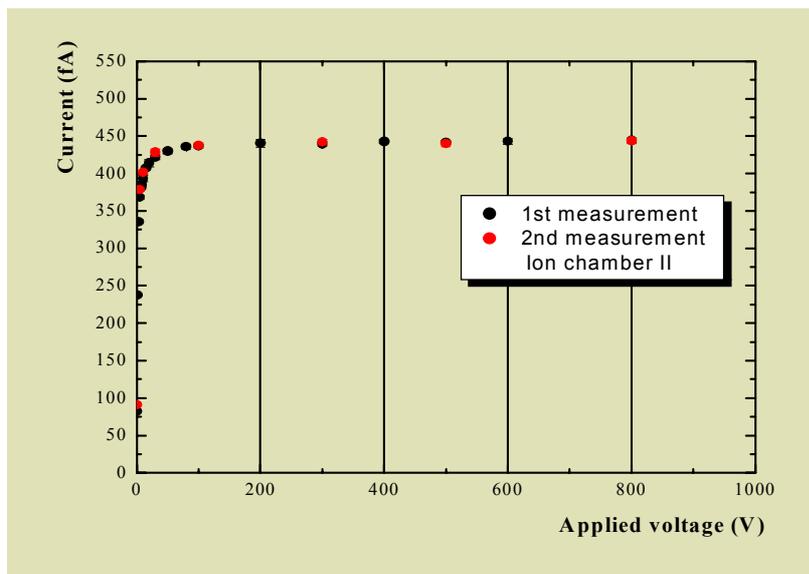


그림 3 소형 이온 챔버의 ^{241}Am 방사선원에 대한 포화 곡선. 편의상 전압과 전류의 극성을 반대로 표시하였다.

c. 포화 곡선

이온 챔버의 방사선에 대한 반응은 ^{241}Am 과 ^{137}Cs 으로부터 발생하는 감마선을 이용하여 측정하였다. 25 mCi의 ^{241}Am 방사선원을 이온 챔버의 중심에서 약 5 cm 위치에 두고 외부 전극에 고전압 크기를 변화시키면서 측정 전류의 변화를 측정하는 포화 곡선을 구하

였다. 그림 3은 측정된 소형 이온 챔버의 포화 곡선을 나타낸다. 같은 측정을 2회 반복하였으며 안정적으로 이온 챔버가 반응함을 알 수 있었다. 포화 곡선으로부터 수집 효율이 99 %에 도달하는 지점의 인가 전압을 구하였는데, 소형 이온 챔버의 경우 102 V, 중형 이온 챔버의 경우 273 V 이었다.

d. 검출 효율의 방향성

입사 방사선원의 방향에 따른 측정 효율의 등방성을 소형 이온 챔버에 대하여 측정하였다. 비등방성 개선을 위하여 3종류의 외부 전극을 제작하였다. 첫 번째 형태는 외부 전극의 끝이 평평한 형태이며(KAERI-F), 두 번째 형태는 내부 전극 실린더의 끝 지점에서 외부전극의 각지점이 등거리를 유지하도록 한 형태이고(KAERI-SR), 세 번째 형태는 KAERI-F 형에 KAERI-SR의 반구형을 더한 형태이다(KAERI-LR). 그림 4는 제작된 3가지 종류의 이온 챔버의 개념도이다. ^{241}Am 과 ^{132}Cs 방사선원을 고정하고 소형 이온 챔버를 챔버의 중심에 대하여 회전시키면서 측정 전류의 변화를 측정하였다. 측정시 방사선원과 이온 챔버 외부 전극의 앞면과의 사이 간격을 5 cm, 10 cm, 15 cm로 변화시켰다. 그림 5는 측정 결과를 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 측정 효율은 KAERI-LR를 제외하고 방사선원의 입사 방향에 대하여 10 % 이내에서 등방적임을 알 수 있다.

e. 선량 보정 상수

소형 이온 챔버의 선량보정 상수를 결정하였다. 상용의 방사선 선량계인 ESM Eberline사의 Model FH 40F2를 소형 이온 챔버와 동일한 위치에 두고 선량을 측정하여 선량보정상수가 0.169 R/nC임을 결정하였다.

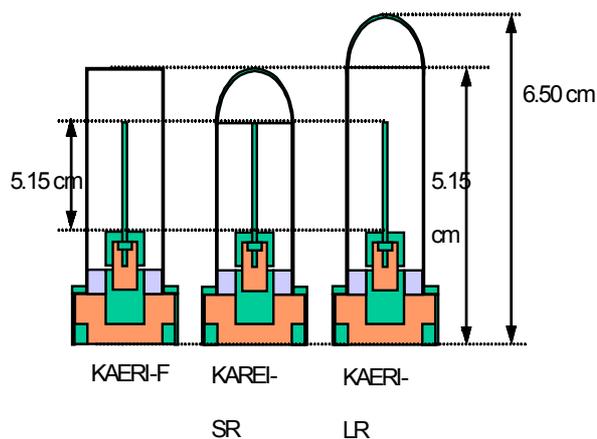


그림 4 검출효율의 비등방성 개선을 위하여 제작된 3종류의 외부 전극

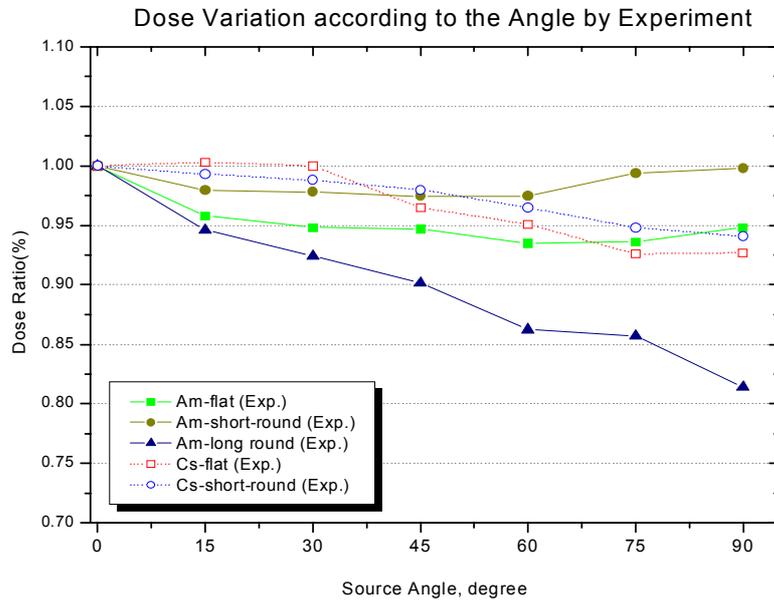


그림 5 측정된 소형 이온 챔버 검출 효율의 등방성. ^{241}Am 과 ^{137}Cs 방사선원을 이용하여 3가지 형태의 외부 전극에 대하여 측정.

f. 안정성

이온 챔버의 시간에 대한 안정성을 측정하였다. ^{241}Am 방사선원과 소형 이온 챔버의 위치를 고정시키고 2주간 측정 전류의 변화를 기록하였다. 1 % 미만에서 안정적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

g. 인가전압 극성

인가 전압의 극성에 따른 이온 챔버의 반응을 측정하였다. 일반적으로 이온 챔버의 외부 전극에 음극 고전압을 걸어주고 내부 전극을 이용하여 전자에 의한 전류를 측정하게 된다. 이와는 반대로 외부 전극에 양극 고전압을 인가할 경우 발생하는 전류를 측정하고 음극 고전압 인가시와 비교하였다. 두 경우의 전류의 크기는 2 % 미만의 차이를 보였다.

4. BLM용 이온 챔버 제작

위의 이온 챔버 제작 및 성능 평가 경험을 바탕으로 다양한 이온 챔버를 설계하고 시제품을 제작하였다.

고출력의 가속기를 운용하기 위해서는 가속빔의 튜닝과 주변 시설의 불필요한 손상을

막기 위해서 BLM(Beam Loss Monitoring) 장치를 필요로 한다. 이 때 BLM 장치를 위한 방사선 검출기는 시간에 대해서 출력 신호가 안정적이어야 하며 장치의 각 부분이 내방사성을 가져야 한다. 그리고, 만약 검출기를 새로운 것으로 교체할 경우 검출기의 증폭을 손쉽게 보정할 수 있어야 한다. 이온 챔버는 이러한 조건을 쉽게 만족할 수 있다.

이온 챔버내에서 입사 방사선에 의하여 발생한 전류의 측정 효율은 다음과 같이 표현된다.³⁾

$$f = \frac{1}{1 + \xi^2}$$

이 때

$$\xi^2 = \left(\frac{\alpha}{6ek_1k_2} \right) \left(\frac{d^4}{V^2} \right) \left(\frac{Q}{\Delta} \right) \text{ 이다.}$$

α 는 Townsend 재결합 상수이고, e 는 전하, k_1 은 전자 mobility, k_2 는 이온 mobility, d 는 등가 간격, Q_∞ 는 생성 전하, Δ 는 이온 챔버내의 수집 영역 부피이다. 등가 간격 d 는 실린더형 이온 챔버의 경우

$$d = (a - b) \left(\frac{a + b}{a - b} \frac{\ln(a/b)}{2} \right)^{1/2}$$

로 표시된다. 이 때 a 는 외부 전극의 반경이고 b 는 내부 전극의 반경이다. 따라서 동일 인가전압 하에서 외부 전극과 내부 전극 사이 간격이 가까울수록 높은 수집효율을 얻을 수 있다. 또한 전극 간격이 가까울수록 챔버 내에서 전하수집 시간이 짧아져서 선량 변화에 대한 시간 반응성을 향상할 수 있다. 지름이 다른 3가지의 내부 전극을 제작하여 이를 실험적으로 검증하고 가장 적합한 내부 전극의 지름을 결정하였다.

이온 챔버는 길이 210 mm, 두께 2 mm인 알루미늄 실린더형으로 제작하였다. 외부 전극은 외경 38 mm로 제작하였으며 3 가지 종류의 지름을 가진 내부 전극을 제작하였다. 즉, 외경 6 mm, 16 mm, 25 mm의 내부 전극을 제작하였다. 내부 전극과 외부 전극 사이에는 공기를 채워 두었다. 절연체로는 Teflon을 사용하였다. 내부 전극과 외부 전극사이에는 구리로 만든 보호 전극을 두어서 누설 전류를 최소화하도록 하였다. 이온 챔버는 2 mm 두께의 알루미늄 실린더안에 위치하도록 설계하였다. 두개의 MHV connector를 두어서 고전압인가와 신호 수집을 하도록 하였다. 그림 6은 제작된 BLM용 이온 챔버를 나타낸다.

측정된 포화 곡선은 그림 7에 나타내었다. 수집 효율이 99.9 % 에 이르는 인가 전압을 3가지 이온 챔버에 대하여 결정하였다. Inverse voltage 방법, Two voltage 방법, 이론적 예상 곡선과의 fitting을 통하여 인가전압을 결정하였다.³⁾ 그림 8는 결과를 나타낸다. Inverse voltage 방법에 의한 결과가 내부 전극의 지름이 5 mm인 경우 다른 두 방법의 결과와 차이를 보이지만 일반적으로 내부 전극의 지름이 커질수록 낮은 인가전압에서도 수집 전하의 포화가 쉽게 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 내부 전극과 외부 전극의 간격이 너무 가까울 경우 두 전극 사이에 고전압을 인가하면 전기장이 불안정해질 것을 고려

하여 내부 전극의 지름이 16 mm 인 경우가 가장 적합할 것으로 결정하였다.

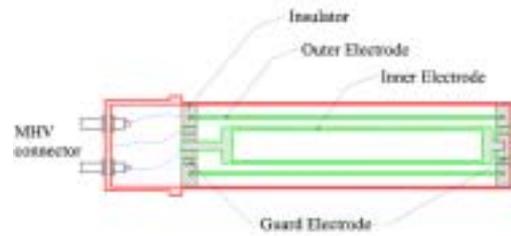


그림 6 BLM용 이온 챔버.

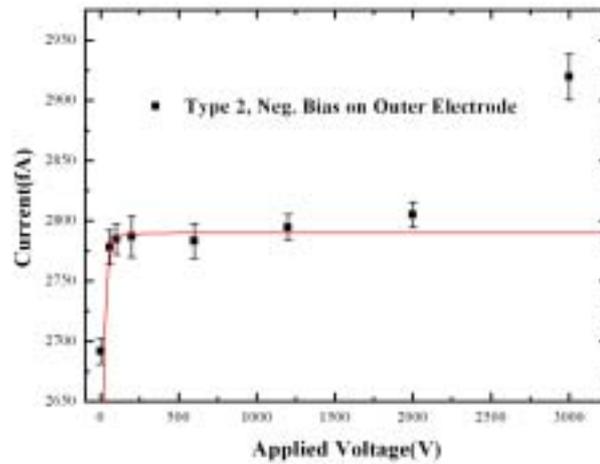


그림 7 BLM용 이온 챔버의 포화 곡선. 내부 전극의 지름이 16 mm인 경우 측정. 사각형은 실험적 측정치이며, 붉은색선은 이론에 의한 곡선. 2000 V 이상에서 전하 증폭을 보인다.

5. RMS용 이온 챔버 제작

원자력 시설의 방사선 준위를 감시하기 위한 RMS(Radiation Monitoring System)용 이온 챔버를 설계, 제작하였다. 외부 전극과 내부 전극은 Polyethylene과 Stainless Steel 두

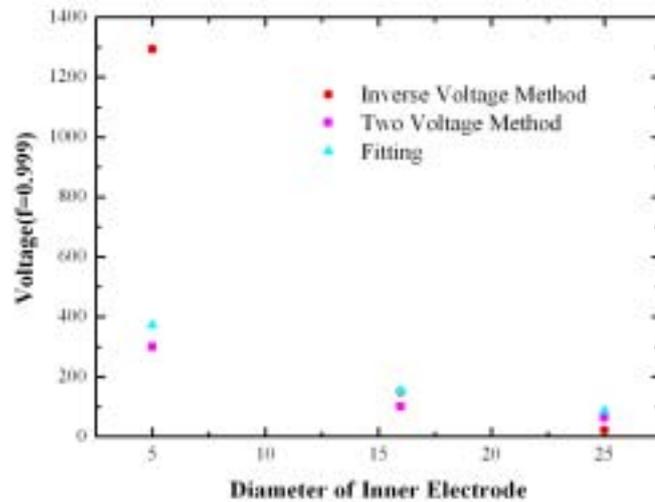


그림 8 수집 전하가 생성 전하의 99.9 %에 이르는 인가 전압. 측정된 포화곡선으로부터 3가지 방법에 의하여 인가 전압 결정.

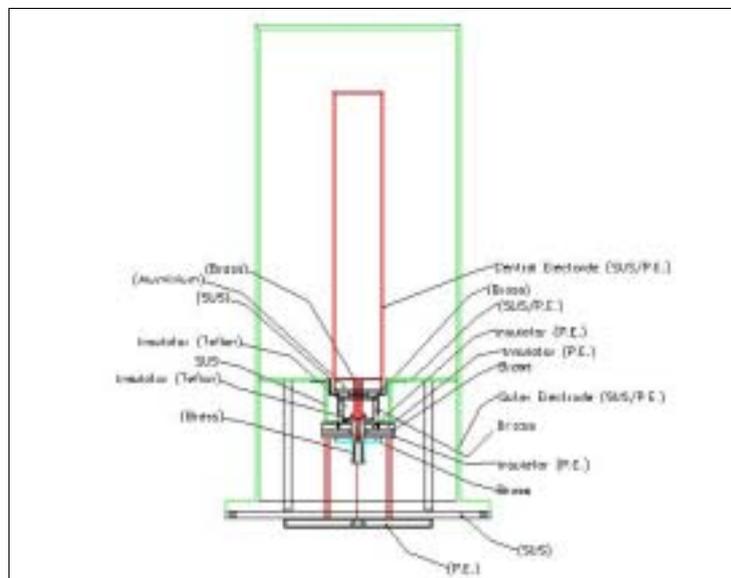


그림 9 RMS용 이온 챔버 설계

종류로 제작하였다. 1 MeV 감마선에 대하여 전자 평형과 방사선이 전극 통과 시 전극 물질에 의한 간섭 효과 최소화를 고려하여 전극 물질의 두께를 결정하였다. 챔버는 아르

곤 등 불활성 기체 밀봉형으로 설계 제작하였다. BNC, SHV connector를 두어서 시그널의 출력과 고전압 인가를 하도록 제작하였다. 절연 물질로는 Polyethylene을 사용하였다. 그림 9는 RMS 용 이온 챔버 설계이다.

6. 결론

이온 챔버는 방사선 계측을 위하여 여러 방면에서 널리 쓰이고 있는 검출기이다. 따라서 다양한 구조의 이온 챔버를 요구하고 있다. 본 연구를 통하여 이를 위한 이온 챔버를 설계와 그 제작 기반을 마련하였다. 전도성 PVDF와 알루미늄을 이용하여 10 cc, 1000 cc 수집 부피를 가진 이온 챔버를 제작하고 이온 챔버의 누설 전류, 포화 곡선, 안정성, 검출 효율의 등방성, 인가 전압 극성의 영향, 선량 교정 상수 등을 측정하였다. 또한 고선량 가속기를 위한 BLM용 이온 챔버를 제작하였다. 고 선량을 빠른 시간안에 계측하기 위하여 알맞은 내부 전극의 반경을 실험을 통하여 결정하였다. 원자력 발전소 등에서 쓰일 수 있는 RMS용 이온 챔버를 설계, 제작하였으며 현재 그 성능을 평가하고 개선하고 있다. 이러한 연구를 통하여 다양한 구조의 이온 챔버 설계 기술을 확보하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, Inc., 1989.
2. ICRU Report #20(1971).
3. J.W. Boag, The dosimetry of ionization radiation, vol II, Academic Press Inc., 1987.