

Design and Construction of Multi-wire Proportional Counter and Preamplifier for Measurement of Charged Particle

Jong-Soo Kim and Suk-Chull Yoon

Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 2 April 1996; Accepted 1 October 1996)

하전입자의 측정을 위한 다중선 비례계수기와 전치증폭기의 설계 · 제작

김종수 · 윤석철

한국원자력연구소

Abstract - A multi-wire proportional counter with large sensitive area was designed and constructed considering diameter of anode wire, its material and space. A preamplifier connecting detector to main amplifier or counter was also designed and constructed for measurement output pulse from multi-wire proportional counter. The preamplifier was composed of charge-sensitive differential circuit, clipping circuit and amplification circuit. To test the performance of this equipment, terminal output pulse from the preamplifier was measured and compared with noise. For these tests ^{239}Pu (360 Bq) and $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (250 Bq) were used as radiation sources. The noise ingredient contributing to the maximum amplitude(180mV from ^{239}Pu and 200 mV from $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) was found to be very small(8 mV). Piled up pulse occurring at the output pulse of charge-sensitive differential circuit was measured as an independent pulse since this affected the amplification in the clipping circuit and amplification circuit. This information can be used to improve the loss of measurement due to piled up pulse.

Key words : Multi-wire proportional counter, Preamplifier, Time constant, Charge-sensitive differential circuit, Clipping circuit.

요약 - 본 연구에서는 방사선/능의 측정을 위하여 감응 면적이 큰 다중선 비례계수기를 양극선의 지름과 재질 그리고 선공간을 고려하여 설계 · 제작하였다. 또한 비례계수기에서 출력하는 펄스를 측정하기 위하여 검출기와 주증폭기 또는 카운터 사이에 연결하는 전치증폭기를 설계 · 제작 하였다. 본 전치증폭기는 전하감응 미분회로, 클리핑회로 그리고 증폭회로로 구성하였다. 이들에 대한 성능시험을 위하여 ^{239}Pu (360Bq)와 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (250 Bq)의 방사선원을 사용하여 동작전압을 결정한 다음 전치증폭기로부터의 최종 출력펄스 $V_2(t)$ 를 측정하여 출력펄스에 포함되어 계수시에 영향을 미치는 잡음성분과 비교하였다. 잡음성분은 8 mV로 조사선원 각각에 의한 출력펄스 180 mV와 200 mV 보다 상당히 작아 계수시 이에 대한 영향은 없었다. 전하감응 미분회로의 출력펄스에서 발생된 중첩펄스는 클리

평 회로와 증폭회로에서 시정수와 증폭도를 변화시키므로서 독립된 펄스로 측정하였으며, 이로 인한 측정손실을 개선할 수 있었다.

중심단어 : 다중선 비례검출기, 전치증폭기, 시정수, 전하감용 미분회로, 클리핑회로.

서 론

원자력시설 및 이와 관련된 주변 환경에서 방사선/능의 정밀·정확한 측정은 이러한 시설들을 운영함에 있어서 중요한 사실이다. 따라서 측정행위에 수반될 수 있는 여러 요인들을 고려하여 좀 더 측정의 신뢰도를 높이고자 많은 연구들이 수행되어 지고 있다.

비례계수기는 공간 분해능과 에너지 선형성이 좋고, 검출 면적을 임의의 형태로 제작이 가능하여 방사성 물질의 방사선/능 측정에 널리 사용되지만 [1,2], 많은 양의 방사선이 계수기로의 유입은 중첩 펄스 즉, 펄스의 하강시간 이전에 새로운 펄스가 발생하게 된다. 이러한 중첩펄스를 계수장치로 측정시 적절한 시간간격으로 이들 펄스를 끈어 주지 않는다면 계수효율에 영향을 미치게 된다[3,4,5].

따라서 본 연구에서는 이러한 관점에서 다중선 비례계수기의 성능시험을 수행한 후, 여기로부터 출력하는 전자 펄스들 사이에서 중첩펄스들을 각각의 독립펄스가 되게하므로써 계수효율의 개선을 위한 전치증폭기를 설계·제작하였다. 본 전치증폭기는 비례계수기의 감응영역에서 생성된 이온쌍의 흐름인 전류펄스를 전압펄스로 변환시키기 위하여 전하감용 미분회로와 고 계수율의 측정시 중첩펄스로 인한 계수손실을 줄이기 위한 크리핑 회로 그리고 이의 펄스를 증폭하는 증폭회로로 구성하였다[6,7].

비례계수기의 설계 및 제작

본 연구의 비례계수기는 그림1 (a)에서 보는바와 같이 입사창을 통하여 방사선/능을 측정하는 방법으로, 비례계수기의 감응영역 내부에 방사성물질을 위치시켜 측정하는 방법 보다 입사창의 두께에 의한 방사선감쇄효과 및 선원으로부터 감응영역까지의 거리효과로 인하여 저에너지의 낮은 투과방사선[8] 측정시에는 상대적으로 검출효율이 낮다. 그러나 방사선방어 측면에서 방사선작업자의 손, 발, 옷등과 방사선구역등의 바닥 및 장구류의 표면등 내부에 위치시킬 수 없는 경우에 적합하다. Ar 90%와 CH₄ 10%의 혼합가스가 고르게 분포되도록 입구와 출구

를 대각선 방향으로 위치되게 하였다. 비례계수기의 감응영역내에서 전기장은 선의 반경을 r 이라할 때 $1/r$ 에 대한 함수이므로 같은 전장을 유지하기 위하여 선의 반경을 줄인다면 동작전압은 감소시킬 수 있게 되어 선전하에 의한 잡음성분을 줄일 수 있으나 감응영역의 길이가 긴 경우에 선의 장력으로 인하여 비대칭 전장이 형성된다[9,10]. 또한 선 지름이 작고, 선 공간이 좁다면 검출기 캐패시턴스(Cd)의 감소로 고전압에 의한 선전하가 수반되어 선 공간이 매우 밀접할 때 반경도의 비례영역에 도달되기도 전에 브레이크다운이 발생한다. 또한 선 공간이 넓다면 생성된 이온쌍이 각각의 전극으로 이동하면서 손실율이 증가되거나, 이로 인한 손실을 줄이기 위하여 상대적으로 높게 고전압을 인가하면 선전하에 의한 잡음성분이 증가된다[9,11].

본 다중선 비례계수기의 크기는 390 mm x 150 mm x 22 mm로 제작하였다. 감응영역에서 일정한 전장의 형성을 위한 양극 선은 텅스텐선 보다 우수한 스테인레스틸선으로 지름 0.05 mm를 사용하였으며, 총 6 개의 선을 길이 360 mm, 간격 24 mm로 감응영역의 중심에 위치시켰다. 외함은 전기적 접지로서 장시간 사용에도 변형이 적은 두께 3 mm의 스테인레스틸을 사용하였다.

에노우드는 금도금한 재질을 사용하였다. 선과 외함의 절연체로는 고전압과 장시간의 사용에도 변형이 적고 전기절연도가 우수한 백크라이트를 사용하였다. 그림1 (b)에서 보는바와 같이 검출기의 한 쪽면은 입사창으로 마일라 필름을 사용하여 이 입사창을 통과한 방사선을 측정하도록 설계하였다. 그림 1의 (c)는 전체 모양의 사진이다.

전치증폭기 설계

비례계수기는 자체의 캐패시턴스 C_D 를 갖고 있으며, 병렬로 저항 R_D (10 k Ω)를 연결한 등가회로로 해석된다. C_D 는 감응영역의 기하학적 형태와 검출매체의 종류에 따라 다르며, 검출기가 완성되면 이들은 고정된 값을 갖게 된다.

그림2에서 보는바와 같이 전치증폭기는 Op-Amp A₁에 C₂, R₁를 병렬로 연결한 전하감용 미분

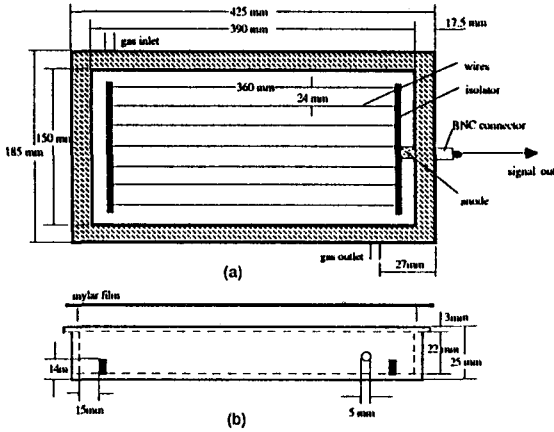


Fig. 1. Detail Drawing and Photographic of Multi-wire Proportional Counter
 (a) Front View (b) Side View
 (c) Photographic

회로와 R_2 과 C_3 의 병렬회로에 R_3 을 직렬로 연결한 클리핑회로(9) 및 A_2 와 R_4 , R_5 의 증폭회로로 구성된다.

Op-Amp A_1 의 C_2 와 R_1 로 구성된 회로 그림2의 $V_1(t)$ 는 식(1)과 같다.

$$V_1(t) = -\frac{Q}{C_2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right), t \geq 0 = 0 \dots\dots\dots(1)$$

여기서, τ_1 : 캐패시턴스 C_2 와 저항 R_1 의 곱으로 전하감응 미분회로 시정수

Q : 감응영역에서 방사선에 의하여 생성된 전하
 Q/C_2 : $t=0$ 에서 최대진폭 값이다.

$V_1(t)$ 는 C_3 와 R_2 의 병렬회로에 R_3 가 직렬로 연결된 클리핑 회로를 통하여 Op-Amp A_2 의 증폭회로를 거쳐 $V_2(t)$ 로 출력하게 된다.

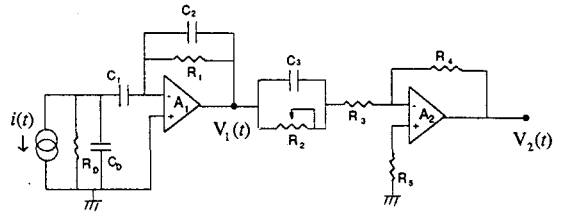


Fig. 2. The Circuit of Preamplifier

$V_2(t)$ 를 라플라스 변환식으로 표현하면 식(2)과 같이 표현된다.

$$V_2(s) = -\frac{R_4}{R_2+R_3} \times \frac{1+sR_2C_3}{1+s\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}C_3} \times \frac{QR_1}{1+sR_1C_2} \dots\dots(2)$$

Pole-Zero의 개선을 위해 R_2 를 변화하여 $R_1C_2=R_2C_3$ 의 조건이 되게 하고, 역라플라스 변환하면 결국 식(2)는 식(3)와 같이 표시된다.

$$V_2(t) = -\frac{Q}{C_2} \cdot \frac{R_4}{R_3} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \dots\dots\dots(4)$$

여기서, $\tau_1 : \frac{R_2R_3}{R_2+R_3} \cdot C_3$ 또는 $R_1 \frac{C_2}{1+R_2/R_3}$

클리핑회로와 증폭회로를 통한 $V_2(t)$ 의 시정수

$\frac{Q}{C_2} \cdot \frac{R_4}{R_3}$: $R_4 > R_3$ 의 조건으로 할 때 $t=0$ 에서 최대진폭이다.

전치증폭기에서 첫번째단의 전하감응 미분회로는 비교적 높은 방사선에 감응영역에 조사될 경우 signal-ended 보다 큰 신호대 잡음비 개선을 위한 고역통과필터의 역할을 한다(12). 비례계수기로부터의 출력 $i(t)$ 가 가상접지를 통하여 전하감응 미분회로 A_1 의 C_2 에 충전되며, 식(1)의 $V_1(t)$ 와 같이 출력한다. 둘째단의 클리핑 및 증폭회로는 초당 수천개의 많은 펄스 측정시 연속펄스로 인한 펄스의 하강시간 전에 새로운 펄스와 중첩으로 일그러짐의 발생을 비례계수기에서 출력하는 펄스의 시간 간격과 비교하여 좀 더 짧게 끊어 주기 위하여 시정수와 진폭을 변화시키며, 식(2)의 $V_2(t)$ 와 같이 출력한다. R_2 는 Pole-Zero를 개선하기 위하여 사용한다.

결과 및 고찰

본 연구에서 제작한 다중선 비례계수기의 성능시

험을 위하여 5 l/min.의 유속으로 Ar 90%와 CH₄ 10%의 혼합 가스를 주입하고, ²³⁹Pu(360 Bq) 알파선원과 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y(250 Bq) 베타선원을 다중선 비례계수기의 입사창에 조사하였다. 인가전압에 따른 계수율로 정해지는 플래토우 곡선으로부터 각각 880 volts(알파선원)와 1150 volts(베타선원)에 동작전압을 결정하였다.

두 선원에 대한 전치증폭기에서의 출력펄스 V₂(t)는 각각 180 mV와 200 mV로 측정되었다. 공급전압에 의한 감응영역에서의 선전하와 전치증폭기에서 기인된 잡음성분은 8mV 정도로 측정되었다. 따라서 두 선원의 출력펄스와 비교하였을 때 잡음성분은 작았으며 계수시 이로 인한 측정상의 영향은 없었다. 식(1)의 V₂(t)는 시간 t=0에서 최대진폭 Q/C₂와 시정수 τ₁을 갖고 지수함수적으로 감소하는 전압펄스 형태로 출력한다. 식(4)의 V₂(t)는 R₄/R₃의 조건이 되게 설계하므로써 R₄/R₃의 비율 만큼 V₁(t)의 첨두진폭 보다 커지게 하였으며, C₃와 R₂ 병렬회로에 R₃를 직렬로 연결한 클리핑회로를 설계하여 V₁(t)의 시정수 보다 짧게 하였다. 따라서 전치증폭기의 최종 출력 V₂(t)는 시간 t=0에서 최대진폭 Q/C₂ · R₄/R₃을 갖고, 시간 t에 따라 지수함수적으로 감소하는 전압파형으로 τ₁과 τ₂ 사이에서 펄스 중첩이 발생한다면 τ₂의 시정수로 짧게 끊으므로써 중첩펄스에 의한 측정손실을 개선하였으며, V₁(t)의 첨두진폭 보다 R₄/R₃ 비율 만큼 첨두진폭 V₂(t)의 증폭은 전리작용에 의하여 생성된 펄스가 잡음성분에 기인한 전압준위와의 구분을 분명하게 하였다.

그림3과 그림4의 V₁(t)와 V₂(t)는 ²³⁹Pu 선원을 조사하였을 때, 출력 펄스를 오실로스코프로 측정한 전치증폭기에서의 전압파형으로 그림3의 V₁(t)에서

중첩된 펄스는 클리핑회로와 Op-Amp A₂를 통하여 시정수와 증폭도를 변화시키므로써 그림4의 V₂(t)에 나타낸 바와 같이 독립된 펄스로 측정되어 측정손실을 개선하였으며, V₁(t)와 V₂(t) 두 전압펄스의 증폭도는 1.6으로 잡음성분과 완전히 구분되어 방사선 에너지를 구별하기 위한 파고선별기를 사용할 때, 진폭이 낮은 펄스의 측정시에도 사용될 수 있다.

지름 0.05 mm 스테인레스선과 24 mm의 선공 간으로 다중선 비례계수기내의 감응영역에서 전장분포가 형성되게 하였을 때, 브레이크다운 현상이 발생되지 않았으며, 절연대로 사용한 베크라이트는 3000 volts의 공급전압을 인가하여 수십일 동안 사용에도 절연파괴 현상은 발생되지 않으므로 적합한 절연체인 것으로 사료된다.

결론

방사선방어 측면에서 방사선작업자의 손, 발, 옷 그리고 방사선작업의 바닥 및 장구류등 넓은 면적의 방사선/능의 측정을 위하여 본 연구에서 설계, 제작한 다중선 비례계수기는 하전입자의 측정을 위한 검출기로 이용될 수 있다.

전하감응 미분회로와 클리핑회로 그리고 증폭회로로 구성된 전치증폭기는 제작한 비례계수기에서 출력하는 펄스를 측정하는데 이용될 수 있으며, 또한 펄스의 중첩으로 발생하는 측정손실을 개선할 수 있다.

결론적으로 본 연구에서 설계·제작한 비례계수기와 전치증폭기는 방사선/능을 측정하기 위한 방사선 계측기로 사용할 수 있다.

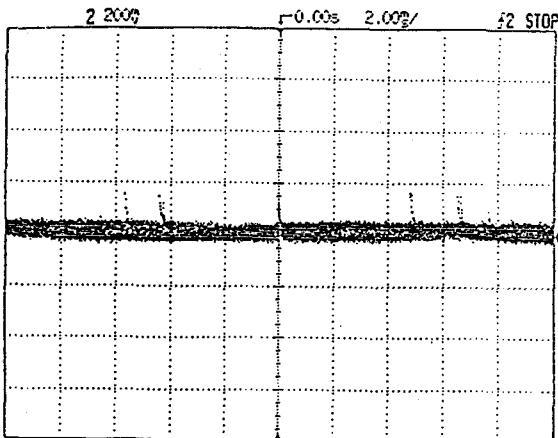


Fig. 3. Pulse amplitudes of V₁(t)

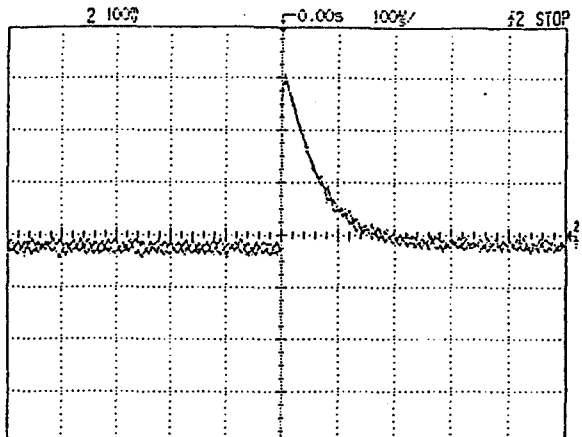


Fig. 4. Pulse amplitude of V₂(t)

참고문헌

1. R.J. Semper, C.R. Guarnieri and J.C. Walker, "A High Count Rate Multi-wire Proportional Counter", *Nuclear Instruments and Methods*, **129**, 447-450, 1975.
2. J. Windish and G.C. Phillips, "A Multi-wire Proportional Counter System for Use in Low, Medium and High Energy Physics", *Nuclear Instruments and Methods*, 159-172(1972).
3. N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, Hemisphere Pub. Corp., pp.165-191(1979).
4. G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 2nd ed pp.157-172, John Willy & Sons, New York(1979)
5. J.B. Birks, *The Theory and Practics of Gas-filled Detection Counting*, Pergamon Press, New York(1979).
6. International Commission on Radiation Units and Measurement(ICRU), *Determination of Dose Equivalent Resulting from External Radiation Sources*, ICRU Reoprt 39(1985).
7. W.B. Mann, R.L. Ayres and S.B. Garfinkel, *Radioactivity and its Measurement*, Pergamon Press, Oxford New York(1980).
8. A.S. Sedra, K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*, Saunders Collage Pub., Third Edition, pp.762-805(1990).
9. G.Charpak, D.Pahm and H.Steiner, "Some Developments in the Operation of Multi-wire Proportional Chambers," *Nuclear Instruments and Methods* **80**, 13-34 (1970)
10. P. Schilly, P. Steffen, J. Steinberger, T. Trippe, F. Vannucci and H. Wahl, "Construction and Performance of Large Multiwire *Proportional Chambers*", *Nuclear Instruments and Methods* **91**, 221-230(1971).
11. A.W. Stetz, V. Perez-Mendez, J. Geaga and H. Spinka, "*Characteristics of Multi-wire Proportional Counters with Delay-line Readout for Minimum-ionizing Particles*", *Nuclear Instruments and Methods* **120**, 17-22(1974).
12. D.E. Johnson, *Introduction to Filter Theory*, Prentice-hall Inc., pp.69-82(1976).