

## 원전 계측용 광범위 미세전류모듈의 개발 및 성능평가

# Development and Performance Estimation of Wide-ranged Fine Current Module for NPP Instrumentation

김종호 · 장흥기 · 최규식\*

(주)우진엔텍 기술연구소

Jong-ho Kim · Hong-ki Chang · Gyu-shik Che\*

R&D Center of Woojinntec Inc, Gyeonggi-do 18481, Korea

### [요 약]

방사선 환경에서 광섬유형광체를 이용하면 감마선을 광다이오드로 검출할 수 있다. 이와 같이 감지된 전류를 전압으로 변환하여 신호 처리하는 장치를 전류모듈 또는 TIA라 하며, 선형적으로 변환시키는 것이 아주 중요하다. 본 연구에서는 변환선형성이 우수하고 잡음이나 오프셋 전압을 최소화하는 미세전류모듈을 연구하여 제품을 개발하였다. 또한 본 논문에서는 전류-전압 변환기인 미세전류모듈을 개발 및 제작함에 있어서 정밀도와 정확도를 요하는 전류모듈을 연구, 개발, 제작하는 과정에 많은 노력을 기울였다. 미세전류모듈의 이론을 정립한 후 회로를 개발하고 그 전류모듈을 테스트한 결과 전류-전압 변환의 선형성이 기존의 문헌에 제시된 제품들과 비교하여 광범위에 걸쳐서 크게 향상되었음을 확인하였다. 관계기관의 입회 하에 본 제품을 실제 감마선 존재 환경에서 테스트 및 적용해본 결과 관련 요건에 적합함을 인정받았다.

### [Abstract]

Detection of gamma ray can be available using optical fiber scintillator under radiation environment. It monitors the transfer energies of these ions by photodiodes and then convertes into currents. The module which converts those currents into voltages and processes signals is named fine current module TIA, and it is essentially important to convert currents into voltages with high linearity. We have studied and developed the TIA, improving converting linearity and minimizing noises and off-set voltages. Also, we have made efforts to develop precise and accurate current module in compliance with concerned requirements. First of all, we established developing theory, developed related circuits, and then made the current module. And, we confirmed its stability and linearity to be more excellent than any other equipment proposed by other references. We tested the developed fine current modules in the real radiation environment under authorized supervising, confirmed them to meet related requirements.

**Key word** : Direct current off-set voltage, Current module, Current-to-voltage converter, Instrument amplifier, Trans-impedance amplifier.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.5.482>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 10 August 2016; Revised 28 September 2016

Accepted (Publication) 17 October 2016 (30 October 2016)

\*Corresponding Author; Gyu-Shik Che

Tel: +82-31-379-3629

E-mail: che@konyang.ac.kr

## I. 서 론

모든 계측제어 시스템에서 신호처리 모듈은 측정된 정보를 정확히 전달하는 부분이기 때문에 중요한 역할을 담당하게 된다. 우리나라의 주요 에너지발전원 중의 하나인 원자력발전소에는 수많은 계측제어 시스템이 있으며, 그 중 민감한 방사선을 측정하여 제어하는 것은 매우 중요한 사항이다. 여기서 방사선을 감지하는 계측기란 방사선과 검출기를 구성하고 있는 물질과의 상호작용 즉 전리, 발광, 감광 현상 등으로 인해 측정이 가능한 전기신호로 변환되는 기기를 의미하며 크게 섬광체의 발광을 이용하는 섬광 검출기 (scintillation detector), 고체의 전리를 이용하는 반도체 검출기 (semiconductor detector), 기체의 전리를 이용하는 가스 검출기 (gas detector) 등으로 나누어진다.

특히 방사선 계측기 중, 에너지를 구별할 수 있어서 가장 중요하게 이용되는 섬광검출기는 발생한 광자를 전기신호로 변환하는 광센서가 필수적으로 사용된다. 일반적으로 이 계측기에는 광센서로 광전자증배관 (PMT: photo multiplier tube)이 사용되는데, 이 광전자증배관은 방사선 에너지에 해당되는 광자를 입력받아 그 크기만큼의 전류신호를 출력하게 된다. 이렇게 변환된 전류를 다시 전압으로 변환하여 신호 처리하는 장치를 전류모듈이라 하며, 이 때 입력되는 광범위한 미세 전류신호를 선형적으로 변환하는 것은 매우 중요한 기술이다.

이처럼 검출된 광 신호는 광센서에 의해 전류신호로 변환되고, 이 전류 값을 전류-전압 변환기 또는 전달임피던스 증폭기 (TIA; transimpedance amplifier)라 불리는 미세 전류모듈에 의해 전압으로 변환되어 신호 처리된 후 ADC (analog to digital converter)를 거쳐서 디지털신호로 만들어진다 [1],[2]. 디지털 신호처리부에서는 이 신호를 가공하여 제어하거나 디스플레이에 표시 또는 기록을 하게 된다.

그런데 이 때 광센서를 거친 전류의 범위가 작게는 수백 pA ( $10^{-10}$  A)에서 시작하여 크게는 수십  $\mu$ A ( $10^{-5}$  A)로 그 측정범위가 너무 넓어서 옴의 법칙에 따른 전류-전압 변환의 선형성을 유지하기가 어려울 뿐더러 변환의 안정성에도 문제가 될 수 있다. 이를 개선하기 위한 그동안의 연구결과들 [3]-[5]이 있으나 아직도 불완전한 상태이다.

따라서 이 논문에서는 광센서에서 출력되는 미세 전류를 측정하는 모듈로서 특히 정밀도와 정확도가 우수한 광범위 전류모듈 (wide range current module)을 연구, 개발하는 과정에서 발생하는 학문적인, 그리고 기술적인 사항들에 대한 내용을 취급하였다.

2항에서는 광센서 모듈에 의한 미세 전류측정법을, 3항에서는 전류를 전압으로 변환시키는 원리를, 4항에서는 전류-전압변환의 문제점을 설명하였다. 5항에서는 새로이 개발하여 제안한 TIA 모듈을 소개하고 6항에서는 그 동작원리를 전개하였다. 7항에서는 공통모드를 향상시키는 방법에 대해서 논하고 8항에서는 시뮬레이션을 통하여 개발된 모듈의 성능평가를 하였다. 마지막으로 9항에서는 본 제품의 개발 경과 및

결과를 기술하고 앞으로 해결해야 할 문제점을 거론하였다.

## II. 광 센서 모듈에 의한 미세 전류 측정

이 개발에 사용된 광센서는 진공상태에서 입력된 광자로 기인된 전자를 증폭하여 전류형태로 출력하는 광전자증배관을 사용하였다. 이 광센서는 일본 하마마쯔 (Hamamatsu, 일본)사의 제품 (모델 H107 시리즈)으로 원통형이며 반응창의 직경은 8 mm이고, 입사창의 재질은 Borosilicate glass를 사용하고 있다. 동작전압은 5 VDC이며 양극(Anode)의 출력 값은 수백 pA ~ 100  $\mu$ A 이다. 입력되는 광자의 파장은 200 ~ 700 nm이며, 약 400 nm에서 가장 민감한 반응도를 나타낸다.

광센서(PMT)의 광자입력과 전류 출력에 대한 간단한 원리는 그림 1과 같다. 광자를 입력받은 광센서는 전류신호를 생성하게 되고 이 신호를 전압으로 변환하여 신호처리하게 되는데, 이러한 신호처리 장치를 전류-전압 변환기 또는 전달임피던스 증폭기(TIA)라 한다.

## III. 전류-전압 변환의 원리

입력전류를 전압으로 변환시키기 위한 일반적인 TIA 회로는 다음 그림 2와 같다. 즉 TIA는 전류제어 전압원으로서 이의 출력 전압  $V_{out}$ 는

$$V_{out} = -I_{in}R_f \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서,  $R_f$ 는 연산증폭기의 귀환저항이며,  $I_{in}$ 은 측정하고자 하는 입력전류로서 항상 음(-)의 값을 갖는다.

고도의 정밀도를 요하지 않는 간단한 시스템인 경우 그림 3과 같은 하나의 IC칩으로 이러한 기능을 수행할 수도 있다[2]. 그러나 이처럼 하나의 칩으로 TIA 회로를 구성하면 전류증폭은 귀환저항(그림 3의 OPT101의 경우는 1 M $\Omega$ )에 의하여 결정되어 출력의 용통성이 없어질 뿐더러 미세하고도 광범위한 전류의 측정범위를 폭넓게 취급할 수가 없다.

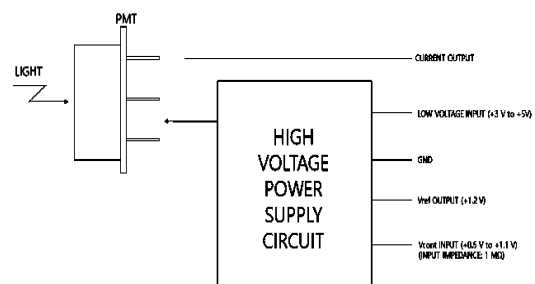


그림 1. 광센서(PMT)의 구성도  
Fig. 1. Configuration of PMT.

실제 현장에서는 측정하고자 하는 전류의 범위가 수백 pA에서 수십 μA에 이르기 때문에 이러한 단순한 시스템으로 적용할 수가 없다. 예로서 TIA의 출력 쪽에 접속된 ADC(Analog - to - Digital Converter)의 입력범위가 0 ~ 5 V일 때 그림 3의 회로를 적용하려면 방정식(1)에 의하여

$$I_{\in} = -\frac{V_{out}}{R_f} = -\frac{5}{10^6} = -5\mu A$$

이하의 입력전류만을 측정할 수 있을 뿐이다. 실제로는 최대 -17μA의 범위까지도 전압으로 변환할 수 있어야 한다. 그러므로 좀 더 넓은 범위의 검출 전류를 취급할 수 있는 TIA의 설계 및 제작이 필요하다.

#### IV. TIA 전류모듈의 문제점

전류모듈을 개발할 때 가장 문제가 되는 것은 DC 오프셋 전압과 잡음이다. 이 시스템은 검출기에서 출력되는 극히 미세한 전류신호를 전압신호로 변환하여 처리해야 하기 때문에 어느 다른 시스템과 달리 DC 오프셋 전압과 잡음이 출력에 상당한 영향을 끼칠 수가 있어서 이에 대한 세심한 주의가 필요하다. 이 시스템에서 유의해야 할 오프셋 전압과 잡음은 다음과 같은 세 가지로 분류할 수 있다[4].

##### 4-1 연산증폭기의 DC 오프셋 전압

연산증폭기의 입력이 없는 경우에도 극히 적은 양이지만 입력 쪽으로 전류가 흘러들어가기 때문에 오프셋 전압이 생긴다. 이상적인 연산증폭기라면 입력이 없을 경우 두 입력전류가 모두 0이어야 하나 실제로는 입력저항이 2 MΩ 이상으로서 매우 크지만, 무한대는 아니기 때문에 적은 양의 전류가 흐르게 되는 것이다. 이 전류가 수 pA 정도로 매우 적지만 부귀환에 의해서 (1 + R1/ R2)배만큼 커지게 되어 문제가 될 수 있다. 여기서 R1과 R2는 출력 측의 분압저항들이다.

##### 4-2 광센서의 DC 오프셋 전압

다이오드와 마찬가지로 광센서도 적기는 하지만 역전류를 가지게 된다. 광센서의 경우 이 전류를 “흑암전류”라 하며 본 시스템의 경우 그 값이 약 200 pA이다[4]. 이 전류는 nA나 uA 단위의 전류를 측정할 때는 측정대상의 값에 비하여 그 값이 측정오차보다 훨씬 작으므로 문제가 없으나 수백 pA를 측정할 때는 그 값이 비교적 커서 문제를 일으킬 수 있다.

##### 4-3 연산증폭기의 잡음

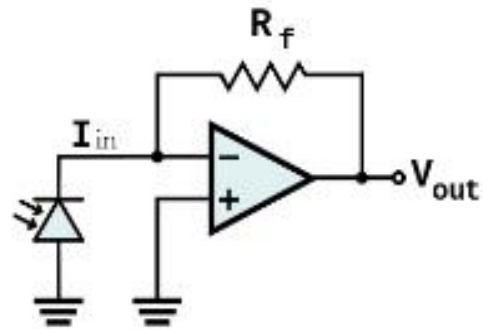


그림 2. TIA 회로  
Fig. 2. TIA circuit.

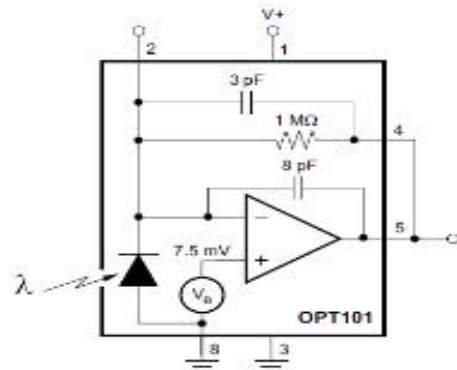


그림 3. OPT101[2]  
Fig. 3. OPT101[2].

귀환회로의 저항의 내부발진에 의한 잡음을 가지게 된다. 소위 백색잡음(white noise)으로서 이는 차동증폭기 회로나 필터 회로에 의해서 어느 정도 저감시킬 수는 있으나 근본적으로 제거할 수는 없다.

##### 4-4 잡음에 의한 출력전압의 영향

상기 4-1~4-3 항의 잡음을 합한 종합잡음은 약 44 μV에 이르게 된다. 출력전압이 5 V이면 이 잡음의 영향은 0.00088%밖에 되지 않기 때문에 측정 계기오차보다도 훨씬 작아서 문제가 되지 않으나, 출력전압이 50 μV일 경우에는 잡음의 영향이 88%나 되어서 이 범위에서는 사용할 수 없게 된다. 실제 예로서 아래 그림 4에서 보는 바와 같이 실선이 전류-전압 변환곡선으로서 I=2.0 nA 이하에서는 선형성이 현저하게 훼손되어 사용할 수 없게 된다. 즉 점선과 같은 선형성이 보장되지 않는다.

기존의 상용제품[4]과 비교해보면 그림 5에서 보는 것처럼 입력전류가 20 μA에 이르기 전에 포화현상을 나타내고 있다. 그리고 입력전류가 60 nA 이하에서 시스템을 불안정하게 만드는 폴(Pole)이 존재하여 선형성을 상실한다.

이러한 비선형 현상이 생기는 이유는 TIA용 연산증폭기의 귀환저항과 광센서의 기생저항 및 커패시턴스가 존재하여 시

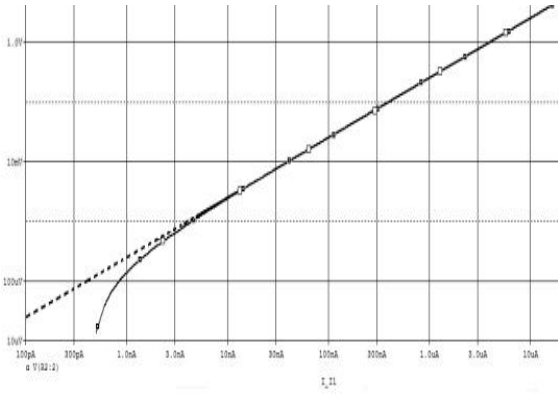


그림 4. 전류-전압 변환 특성 곡선  
Fig. 4. TIA curve.

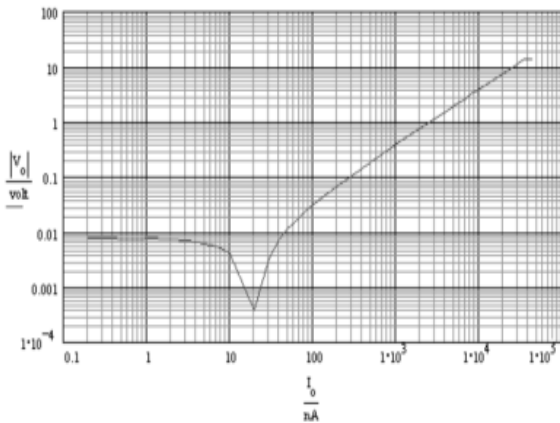


그림 5. TIA의 입출력 곡선[4]  
Fig. 5. Input-output curve of TIA[4].

시스템을 불안정하게 만드는 폴(pole)을 형성하기 때문이다[6].

### V. 선형성이 우수한 미세전류모듈 개발

그림 6의 블록도 중에서 점선부분이 제안된 개발 부분이다. 입력신호는 광다이오드에서 나오는 DC 전류이다. TIA 앞단에는 광다이오드에 의한 잡음을 제거하기 위한 저주파필터를 추가하고 TIA 뒷단에는 연산증폭기의 잡음을 제거하기 위한 저주파필터를 추가하였다. 그리고 그 이후에는 연산증폭기의 입력 오프셋 전압을 상쇄하는 보상회로, 그리고 공통 모드 제거비를 향상시키는 계측증폭기와 출력전압 조정용 조정회로를 설계하여 부착하였다.

그림 6에서 보인 블록도의 상세 회로도도 그림 7, 8과 같다. 그림 7에서  $I_1$ 은 광다이오드에서 빛에 반응하여 나오는 DC 전류이다. 연산증폭기 U1은 측정하고자 하는 입력전류  $I_1$ 에 상응하는 전압으로 변환시켜 출력시키는 전류-전압 변환기(TIA; transimpedance amplifier)이다.

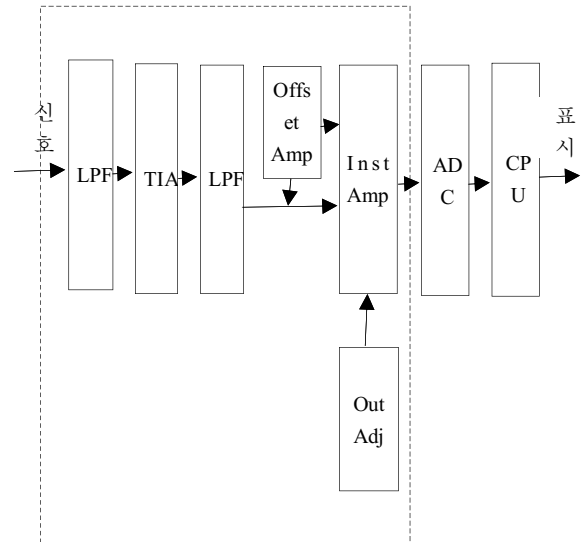


그림 6. 개발모듈의 블록도  
Fig. 6. Block diagram of developed module.

$R_i$ 와  $C_i$ 로 이루어진 회로는 입력전류에 포함된 잡음전류를 제거하는 저주파필터(LPF; low pass filter)이다.

$C_f$ 는 입력측의 광다이오드와 연산증폭기 U1의 불안정성을 제거하기 위한 귀환커패시터이다.  $C_o$ 와  $R_o$ 로 이루어진 회로는 연산증폭기 U1의 입력전압에 의한 잡음과, 입력측의 광다이오드에 의한 잡음 및 연산증폭기 자체의 잡음을 제거하기 위한 저주파필터(LPF)이다.

그림 8에서 보인 TIA 후단의 U2, U3, U4로 이루어진 증폭기는 공통 모드 제거비(CMRR; common mode rejection ratio)와 입력임피던스를 크게 하는 반면, 입력 오프셋 전압과 온도에 의한 드리프트 현상을 최소화하기 위한 계측증폭기 회로(instrumentation circuit)이다. 이 증폭기의 전단에 있는 U2와 U3는 버퍼증폭기로서 U1의 오프셋 전압을 상쇄하기 위해 흑암상태(Dark State) 즉, 입력이 없는 경우에 U1의 출력전압과 U2의 비반전 입력전압이 같아지도록 조정하여 U4의 출력전압이 0이 되도록 한 것이다. U4는 차동증폭기로서 공통모드는 제거하고 차동모드는 증폭시켜 출력을 안정시키도록 한다. 공통 모드 제거비를 향상시키기 위해 U4의 비반전 입력측의 저항 R16을 가변저항으로 하였다. 이러한 상황에서 U1의 출력이 곧 U4의 출력이 되어 ADC(analog-to-digital converter)로 전달된다.

### VI. 개발 모듈의 동작 원리

그림 7의 점선부분에서 볼 수 있는 바와같이 연산증폭기 U1의 입력부에  $R_i$ 를 병렬로, 반전입력과 출력 사이에 회로의 안정을 위한 귀환 커패시터  $C_f$ 를 직렬로 연결하고, 또한 출력부에는  $R_o$ 를 출력회로에 직렬로 연결하였다. 그림에서 보인  $C_i$ 는  $C_f$ 의

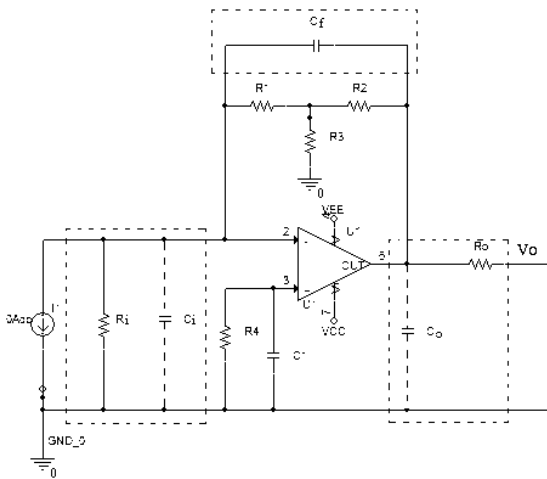


그림 7. TIA의 상세회로도  
Fig. 7. Detailed circuit of TIA.

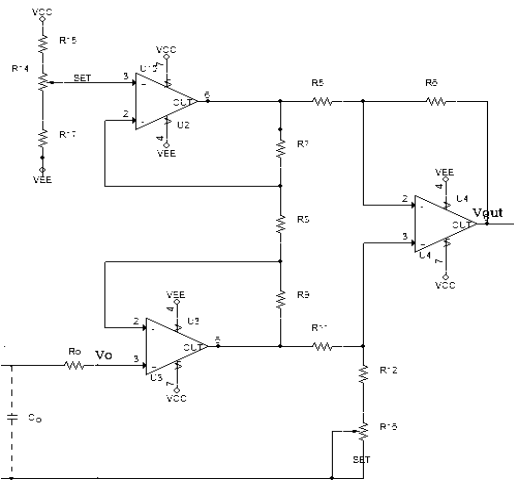


그림 8. 계측증폭기의 회로도  
Fig. 8. Detailed circuit of instrumentation amplifier.

밀러(Miller) 정리에 의한 입력측 등가 커패시턴스이고, Co는 밀러(Miller) 정리에 의한 출력측 등가 커패시턴스이다. 연산증폭기 U1에서 좌측 입력측을 바라본 회로는 전류원 I와 저항 Ri로 이루어진 노튼 회로(Norton's circuit)로서 그림 9와 같은 테브낭 등가 회로(Thevenin's equivalent circuit)로 변환할 수 있으므로 이 회로는 LPF 회로를 형성한다. 따라서 고주파 잡음을 차단하는 차단주파수 fci는

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi R_i C_i} \quad (2)$$

로 표현되며 이 이상의 주파수는 차단되어 처리된 후 연산증폭기에 입력된다. 입력은 음(-)의 직류(DC) 전류이고, 여기에 파생되는 잡음주파수는 보통 10 kHz 이상의 백색잡음이므로 본 필터를 통해서 차단할 수 있다.

연산증폭기(U1)를 안정적인 영역에서 동작시키기 위해서 반전입력과 출력 사이에 연결한 Cf는 주파수 보상용 귀환 커패시터로서의 식에 의하여 결정된다[6]. 여기서 Csh는 광다이오드의 분기 커패시턴스, Ca는 연산증폭기의 입력 커패시턴스, R1, R2는 귀환저항, fu는 연산증폭기의 이득이 1이 되는 주파수이다.

$$C_f = \sqrt{\frac{C_{sh} + C_a}{2\pi(R_1 + R_2)f_u}} \quad (3)$$

연산증폭기의 주파수에 따른 증폭률을 A라 하면 밀러(Miller)의 정리에 의하여 입력등가커패시턴스 Ci는

$$C_i \approx C_f(A+1) \quad (4)$$

과 같이 되어 A>1이므로 Cf보다 훨씬 큰 커패시턴스값을 가지게 된다. 또한 연산증폭기 U1을 작동시킬 때 발생하는 입력전압에 의한 잡음, 입력전류에 의한 잡음, 연산증폭기 자체의 잡음을 제거하기 위해 U1의 출력단에 Ro와 Co로 이루어진 저주파필터를 거치게 되면 잡음이 차단된다. 그 차단주파수 fco는

$$f_{co} = \frac{1}{2\pi R_o C_o} \quad (5)$$

로 표시된다. 여기서 Co는 밀러의 출력등가 커패시턴스로서

$$C_o \approx C_f \quad (6)$$

와 같다. 이 때 TIA 회로에서의 출력전압은

$$V = -(R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}) I = -Z_t I \quad (7)$$

이다. 여기서 I는 측정대상인 입력전류, R1, R2, R3은 그림 7의 TIA 부분 저항이고 Zt는 전달임피던스(transimpedance)이다.

TIA 출력단의 전압 Vo를 ADC 쪽으로 보내기 위해서 공통모드의 잡음은 제거하고 차동모드의 전압은 증폭시켜야 하므

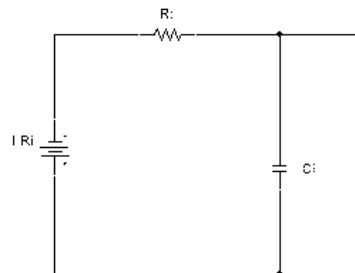


그림 9. 전류원의 테브낭 등가회로  
Fig. 9. Thevenin equivalent circuit of current source



로 이러한 목적으로 연산증폭기를 차동모드(U4)로 구성하였다. 그리고 입력임피던스를 높이기 위해 차동증폭기의 전단에 두 개의 증폭기(U2, U3)를 두어서 계측증폭기의 회로를 구성하였다. U2와 U3는 버퍼증폭기로서 U1의 옴세트전압을 상쇄하기 위해 흑암상태 (dark state) 즉, 입력이 없는 경우에 U1의 출력전압과 U2의 비반전입력전압이 같아지도록 가변저항 R14를 조정하여 U4의 출력전압이 0이 되도록 한다. 차동증폭기(U4) 회로에서 최종 출력전압 Vout는 아래와 같다.

$$V_{out} = (1 + \frac{R_7}{R_8} + \frac{R_9}{R_8}) (\frac{R_{12} + R_{16}}{R_{11}} V - \frac{R_6}{R_5} V_{set}) \quad (8)$$

여기서, Vset은 입력신호 I가 없을 때 두 버퍼의 입력이 같아지도록 가변저항 R14로 조정할 전압이다. 이제 R7=R9, R5=R6=R11=R12+R16로 하면

$$V_{out} = (1 + \frac{2R_7}{R_8}) (V - V_{set}) \quad (9)$$

이다.

### VII. 공통모드 제거비 향상

앞서 언급한 것처럼 TIA의 후단에 계측증폭기를 두어서 흑암상태에서 출력전압을 0(zero)로 맞추고 또한 공통모드 제거비를 높이도록 하였다. 이상적으로는 계측증폭기의 CMRR가 무한대인 것으로 할 수 있으나 실제적으로는 저항의 부정합으로 인하여 한계가 있다. 이러한 부정합 현상을 해소하기 위해 그림 6의 하단에서 보는 것처럼 가변저항 R16을 두어 계측증폭기의 부정합을 해소하도록 하였다. 즉, 계측증폭기의 차동증폭 부분에서 R5=R11, R6=R12+R16이 되도록 선정하여 정합시켰다. 그 저항 값들이 정확하게 정합된다면 입력이 없을 때 TIA의 출력전압이 가변저항 조정전압과 동일할 경우 계측증폭기의 출력 전압은 Vout=0이어야 한다. 이 때 CMRR은 무한대가 된다. 그러나 사용한 전자부품들이 약간의 오차가 존재하므로 완전히 정합되지는 않는다. 개발 회로에서는 R12=91 kΩ으로 하고 R16=20 kΩ인 가변저항을 직렬로 연결하여 입력이 없을 경우 출력이 0 V로 되도록 조정하였다.

그런데 상기 회로의 경우 저항의 오차가 1 %라 하면 ε =0.04[4]이 된다. 입력이 없을 때 출력 값이 나타나면 문제가 있는 것이므로 이를 줄여주려면 R6의 값을 증가시키거나 R12의 값을 감소시켜야 한다. 차동모드증폭률은

$$A_d = \frac{R_6}{R_5} (1 - \frac{R_5 + 2R_6}{R_5 + R_6} \epsilon) \quad (10)$$

이고 공통모드 증폭률은

$$A_c = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \epsilon \quad (11)$$

이다. 그러므로 공통모드 제거비 CMRR은

$$CMRR_{db} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 20 \log \left\{ \frac{R_5 + R_6}{R_5 \epsilon} \left( 1 - \frac{R_5 + 2R_6}{R_5 + R_6} \frac{\epsilon}{2} \right) \right\} \quad (12)$$

로 표현된다. 여기서 ε은 부정합비이다.

### VIII. 성능 평가

그림 7, 8 회로의 성능을 시뮬레이션하기 위해 회로의 각 소자에 다음 표 1의 값들을 적용하였다. 이 연구에서 채택한 출력전압을 수용할 ADC는 Texas Instruments사의 ADS1115로서 이의 적정 전압범위가 -0.3 V ~ +5.5 V이므로 출력의 최소전압을 0 V, 최대전압을 +5 V로 하였다. TIA의 입력전류 범위가 0.2 nA ~ 17 μA이므로 여유를 두어 입력전류의 최대치가 20 μA일 때 출력이 5 V가 되도록 회로를 구성하였다. 이러한 구성에서 방정식(8)을 적용하면 Iin = -0.2 nA일 때,

$$V = - (4.7 + 5.11 + \frac{4.7 \cdot 5.11}{0.1}) \cdot 10^3 \cdot (-0.2 \cdot 10^{-9}) = 50 \mu V$$

이고, Iin = -20 μA일 때,

$$V = - (4.7 + 5.11 + \frac{4.7 \cdot 5.11}{0.1}) \cdot 10^3 \cdot (20 \cdot 10^{-6}) = 5.0 V$$

이다. 이것을 시뮬레이션한 결과는 그림 10과 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 30 μA에 이르는 광범위에 걸쳐서 선형성이 우수하게 나타났다. 기존의 연구결과로 나온 그림 3의 고이득 TIA[2]의 경우 7.5 μA 이상의 입력전류에 대해서는 선형성이 현저하게 상실되는 것에 비해 본 개발 제품의 선형성이 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

이미 언급한 바와 같이 본 전류변환기를 개발함에 있어서 극히 미세한 전류를 전압으로 변환시킬 때 선형성이 어느 정도로 유지될 수 있을까가 최대의 관심사이므로 이것을 검토하기 위해 상기 그림 10의 대수좌표 그림을 log-log 척도의 좌표로 변환하여 그린 결과가 그림 11의 곡선이다. 이 그림에서 보듯 앞에서 문제되었던 2.0 nA 이하 뿐만 아니라 10 pA 이하에서도 완전

표 1. 부품의 회로 적용 값

Table 1. Part values of circuit.

components	values	components	values
VCC	+15V	R7	1K
VEE	-15V	R8	10M
U9	LT1125AM	R9	1K
U10	LT1125AM	R11	100K
U11	LT1125AM	R12	91K
U12	LT1125AM	R14	500
R1	4.7K	R15	100K
R2	5.11K	R16	20K(POT)
R3	100	R17	100K
R4	4.7K	C1	10nF
R5	100K	C2	1nF
R6	100K	Cf	14.4pF
Ri	160K	Ro	100

한 선형성을 유지하는 것을 볼 수 있다.

그리고 전달임피던스  $Z_t$ 는

$$Z_t = \frac{V}{I_{\epsilon}} = \frac{5V}{20\mu A} = 0.25V/\mu A$$

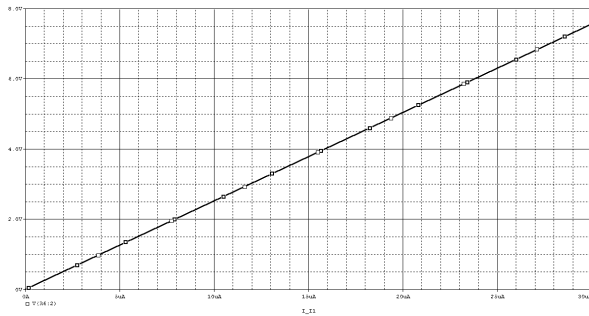


그림 10. TIA의 시뮬레이션 입출력곡선

Fig. 10. Input-output curve of TIA simulation.

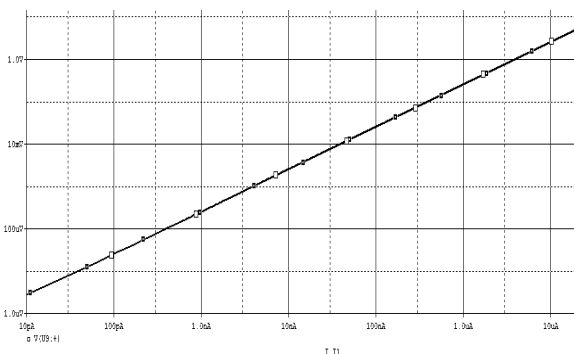


그림 11. log-log scale 입출력 곡선

Fig. 11. Input-output curve of log-log scale.

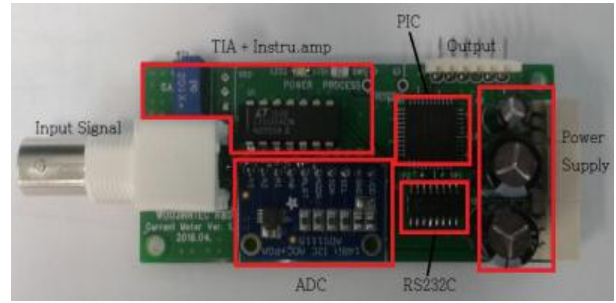


그림 12. 개발한 광범위 미세전류모듈(사진)

Fig. 12. Fine current module covering wide current range.

이고 계측증폭기의 증폭률 A는

$$A = 1 + \frac{2 \times 1 \times 10^3}{10 \times 10^6} = 1.0002$$

의 우수한 증폭기가 된다. 계측증폭기의 모든 저항은 오차가  $\pm 0.1\%$ 인 값을 채용하였으므로 부정합률  $\epsilon = 0.004$ 가 된다. 이 때

$$CMRR_{db} = 20 \log \left\{ \frac{100 + 100}{100 \times 0.004} \left( 1 - \frac{100 + 200 \times 0.004}{100 + 100} \right) \right\} = 54dB$$

가 된다. 그림 12는 개발한 광범위 미세전류측정모듈의 전체 모습을 사진으로 나타내었다.

### IX. 결론 및 추후 과제

모든 계측제어 시스템에서 신호처리 모듈은 측정된 정보를 정확히 전달하는 부분이기 때문에 중요한 역할을 감당하게 된다. 이 연구에서는 광자를 입력하여 미세전류를 출력하는 광센서(PMT)에 적합한 광범위 미세전류 측정모듈을 개발하여 특성을 확인하였다.

광센서에서 출력하는 전류는 0.2 nA ~ 17 μA(최소치와 최대치의 차이는 10의 5승 범위)로서 그 취급 범위가 일반 계측장비의 측정 가능범위를 상당히 초과한다. 본 논문에서는 광범위 미세전류모듈을 개발하여 정밀도와 정확도를 요하는 전류모듈을 연구 개발하는 과정에서 발생하는 학문적인, 그리고 기술적인 사항들에 대한 내용을 취급하려 하였다.

개발 모듈에 도입한 회로는 연산증폭기를 이용하여 TIA의 전후에 저주파필터를 적용하여 극한적인 미세전류 범위에서도 선형성을 완벽하게 유지하도록 하였다. 이와 같은 방법으로 백색잡음에 의한 전류의 불안정성을 개선시키는 한편, 20 μA(최대치) 부근에서 전압이 포화되는 현상을 해소하였다. 또한 연산증폭기의 DC 오프셋전압을 감소시킬 수 있도록 입력 오프셋 전압이 극히 적은 연산증폭기를 적용하는 한편, 계측증폭기의 입력단에서 이를 상쇄하도록 하였다. 잡음과 공통모드를 제거

하기 위해 공통모드 제거비를 높이는 방법으로서 TIA의 후단에 계측증폭기를 적용하였다.

광범위 미세전류 측정모듈을 개발하고, 그 성능을 평가한 결과 전류-전압 변환의 선형성이 기존 상용 제품들과 비교하여 광범위에 걸쳐서 크게 향상되었음을 확인하였다. 이 연구 개발 과정을 통하여 성능을 현저하게 향상시켰지만, 극미세전류 범위는 백색잡음과 부품의 특성 및 상호배치, 그리고 부품의 오차 등으로 인하여 전류의 Jittering 현상이 발생할 수 있기 때문에 이를 해소하는 연구가 계속되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신/에너지기술개발/원자력핵심기술개발사업/원전 제어계측 카드의 전자부품 열화 평가시스템 개발 과제에의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] IAEA, "Optical fiber radiation probe system for spent fuel verification (OFPS)," *Reference Manual*, pp.1-35, Aug. 2007.
- [2] G. S. Cho, "Gamma-ray detectors for nuclear medical imaging instruments," *The Korean Society of Nuclear Medicine*, Vol. 42, No. 2, pp. 88-97, April 2008.
- [3] Texas Instrument, "OPT101 monolithic photodiode and single-supply trans-impedance amplifier," TI datasheet SBBS002A, October, 2003.
- [4] J. M. Becker, "Current to voltage converter for polymer electronics laboratory," *Polymer Electronics Laboratory*, April 29, 1999.
- [5] P. T. Patil, G. K. Mukherjee, A. K. Sharma, and R. R. Mudholkar, "High -gain transimpedance amplifier (TIA) for night airglow photometer," *International Journal of Electronic Engineering Research*, Vol. 1, No.2. pp109-116, Research India Publications, 2009.
- [6] L. Orozco, "Programmable-gain transimpedance amplifiers maximize dynamic range in spectroscopy systems," *Analog Dialogue*, Vol. 47-05, pp. 1-5, May, 2013.



### 김 종 호 (Jong-ho Kim)

1990년:명지대학교 자연과학대학 물리학과 (이학사),  
1999년:명지대학교 자연과학대학 대학원 물리학과 (이학박사),  
2000년 ~ 2005년 (주)세영엔디씨 부설연구소 연구소장,  
2009년 ~ 현재 (주)우진엔텍 부설연구소 연구소장  
※관심분야 : 제어계측, 원자력

1992년:명지대학교 자연과학대학 대학원 물리학과 (이학석사)  
1997년 ~ 2000년:삼성전자 삼성생명과학연구소 연구원  
2005년 ~ 2009년 한국방사선기술(주) 부설연구소 연구소장



### 장 홍 기(Hong-ki Chang)

1997년 가천대학교 공과대학 전기공학과 (공학사),  
2000년 ~ 2009년 한국에질런트테크놀로지스 책임 연구원,  
2013년 ~ 현재 (주)우진엔텍 책임 연구원  
※관심분야 : 제어계측, 원자력

1997년 ~ 2000년 한화정보통신 연구원  
2010년 ~ 2013년 세종기업(주) 책임 연구원



### 최 규 식 (Gyu-shik Che)

1973년 서울대학교 공과대학 전기공학과 (공학사),  
1993년 명지대학교 전기공학과 (공학박사),  
1993년 ~ 2014 건양대학교 의공학과 교수,  
2015~현재 (주)우진엔텍 고문  
※관심분야 : 전자회로, 원자력

1983년 뉴욕공과대학 전기공학과 (공학석사)  
1978년 ~1993년 한국전력기술 중앙연구소 책임연구원  
2014~2015 맥스파워 연구소장