

# 에널로그 및 디지털計測의

## 基礎概念과 應用(I)

高 明 三

<서울대학교 制御計測工學科 教授>

■ 이 강좌는 본 학회주최 1984년도 精密計測技術 講習會에서 에널로그계측 및 디지털계측의 원리 및 최근 동향에 관하여 筆者가 강의한 내용을 수정보완한 것임을 밝힌다.

### 1. 서 론

計測은 과거 산업용 전자기기중의 한 업종으로 취급하여 왔으나 최근의 기술발전과 더불어 산업공정, 로봇工學, 자동차공학, 의료전자공학 및 가정전자공학등 거의 모든 공학분야에서 필수적이고 기초적인 지식으로 등장하게 되었으며 특히 1970년대 후반에 성숙된 마이크로 프로세서 응용기술로 인하여 계측공학이 여러 工學分野에서 차지하는 비중이 점점 더 증가하였다.

예를 들면 보일러에서의  $O_2$  센서에 의한 연소효율의 증가, 로봇매니퓰레이터(manipulater)의 終端의 위치, 속도, 더 나아가서는 자동차전자학에서의 휘발유의 효율적인 연소제어를 위한 가스온도계측, 압력계측 그리고 의료전자학에서 초음파에 의한 각종 진단이라던가, 압력센서에 의한 혈압측정과 온도센서에 의한 체온측정등... 그 응용은 무수히 많다.

계측공학은 점차로 전기, 기계적 분야로부터 전자공학적인 분야로 변천되고 있고, 측정기법 역시 에널로그로부터 디지털계측쪽으로 기울어지고 있다. 특히 반도체공학에서의 LSI 및 VLSI 기법에 의한 마이크로 프로세서 칩 및 IC 메모

리소자의 出現으로 80년대의 計測은 그 상당한 부분이 디지털化 내지 지능化 될 것이 틀림없다.

앞으로 이 강좌에서는 確定的 계측신호에 국한시키며 현장 혹은 연구실에 종사하고 있는 기계기술자에게 필요로 하는 에널로그계측과 디지털계측의 특성과 계측시스템의 구성, 연산증폭기(Op. Amp)의 원리 및 응용, 측정신호의 선형화, 마이크로 프로세서의 원리 A/D, D/A 변환기의 원리 및 응용, 자료처리시스템, 센서의 원리 및 응용, 디지털계측시스템의 최근동향등 메카트로닉스시대에 있어서 요청되는 計測工學의 주요과제에 대하여 기술한다.

### 2. 에널로그계측과 디지털계측

1960년대까지의 계측시스템은 주로 에널로그 계측이 그 主流를 이루고 있었으나 1970년대에서의 계산기 응용기술의 트착화 내지 마이크로 프로세서의 출현으로 인하여 소위 디지털계측이 서서히 싹트기 시작하였다. 한편 IC 및 LSI에 관한 반도체 제조기술의 신뢰성과 제조가격의 저렴성 때문에 1980년대에 들어와서는 특수한 에널로그 계측분야를 제외하고는 점차 디지털 계측시스템으로 급속히 변천하고 있다. 여기서는 우선 에널로그계측 및 디지털계측시스템의 특성과 그 구성의 特殊性에 대하여 간단히 설명한다.

2.1. 애널로그 계측기의 특성

일반적으로 계측기의 특성을 논할 때 시스템과 같이 우리들은 靜特性和 動特性이란 표현을 자주 사용한다. 靜特性이란 측정량이 일정치로 주어지거나, 계측기의 시정수에 비하여 무시할 정도로 천천히 측정량이 변동시의 계측시스템 특성은 여기에 속한다. 반면 측정치가 비교적 빨리 변동시에는 소위 動特性을 고려하게 된다.

계측기의 靜特性에는 感度, 直線性 및 히스테리시스(hysteresis) 오차등이 포함되고 動特性은 入出力信號가 변동시 계측기의 出力信號의 특성에 관계되며 시간영역에서의 과도응답과 주파수 응답으로 구분된다.

(1) 靜特性

(가) 感度

감도에는 다음 두가지 정의가 있다.

$$(i) \text{ 감도} = \frac{\text{出力信號의 變化}}{\text{入出力信號의 變化}}$$

이 정의는 전달함수의 특수한 경우라고도 볼 수 있다.

(ii) 계측시스템(혹은 그 요소)이 검지할 수 있는 최소의 량 혹은 최소의 변화량을 감도라 한다.

(나) 直線性

出力信號( $S_o$ )와 入出力信號( $S_i$ )의 靜特性이 그림 1과 같이 주어지는 경우 만일 이상적이라면 원점을 지나는 직선으로 주어질 것이지만 실제인 경우 點線과 같은 곡선이 된다. 실지사용에서는 近似적인 직선으로 볼 수 있는 부분만을 사용하거나 혹은 直線으로 볼 수 있도록 補正하는 것이 상례이다. 직선성의 크기를 나타내는

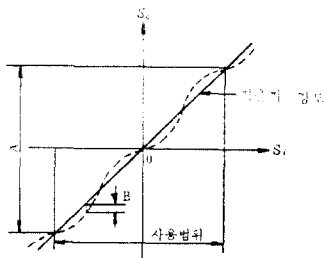


그림 1 入出力의 靜特性곡선

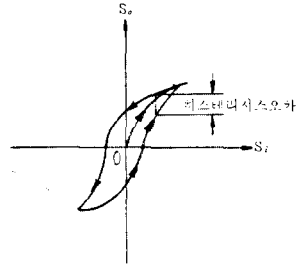


그림 2 히스테리시스 오차

直線度는 그림 1인 경우 직선도 =  $\frac{B}{A} \times 100\%$

로 주어진다. 여기서  $B$ 는 주어진 사용범위내에서  $S_o$ 축 방향으로 가장 큰 편차 값을 나타낸다.

(다) 히스테리시스오차

入出力信號를 서서히 증가시켰을 때와 감소시켰을 때 동일 入出力信號值에 대하여 그림 2와 같이 값이 다른 出力信號가 나타내는 경우가 많다. 이와같이 측정의 이력으로 생기는 同一 入出力信號에 대한 出力信號의 差를 히스테리시스오차라 하며 이의 發生原因은 측정기 내부의 마찰, 백래시, 기계재료 및 전기재료등의 히스테리시스 특성등에 기인한다.

(2) 動特性

일반적으로 動特性은 과도응답과 주파수 응답 입장에서 해석한다. 이때 과도응답의 시험신호에는 보통 단위임펄스신호  $\delta(t)$ 와 단위계단함수  $1(t)$ 신호의 두가지가 주로 이용된다. 그 이유는 주지하다시피 시간영역에서 特異성을 지니고 있거나, 가장 심한 크기의 변화를 이르는 신호이기 때문이다. 한편 주파수응답을 위한 시험신호에는 정현파 신호를 사용한다.

(가) 과도응답

일반적으로 광범위하게 사용되는 애널로그계측기의 數學的 模型은 1階 또는 2階微分方程式으로 주어진다. 水銀온도계는 1階微分方程式으로, 直流電壓計, 電流計로 많이 사용되는 永久磁石可動 코일형 計器는 2階微分方程式으로 그들의 入出力관계를 近似化시킬 수 있다. 여기서는 주로 단위단계신호에 의한 계기들의 과도 특성에 대하여 간단히 고찰한다.

(i) 1階계측기의 스텝응답

水銀溫度計는 1階微分방정식으로 그 동특성이 주어지는 전형적인 계기의 하나이다. 즉 被測定온도를  $\theta_i$ , 指示온도를  $\theta_0$ , 온도被測定體의 열용량을  $C$ , 熱流에 대한 抵抗을  $R$ 라 하면

$$\frac{\theta_0}{\theta_i} = \frac{1}{\tau D + 1} \quad (1)$$

단  $D$ 는 미분연산자  $\frac{d}{dt}$ ,

$\tau = RC$ 이며, 시정수임

로 주어진다. 지금  $\theta_i = T_0 1(t)$ 라 하면

$$(\tau D + 1)\theta_0 = T_0 1(t), \theta_0(0) = 0^\circ C$$

윗 식을 풀면 온도계의 지시치는

$$\theta_0 = T_0(1 - e^{-t/\tau})$$

로 주어진다. 즉 온도계는 시정수  $\tau = RC$ 의 값에 따라서 그 지시속도가 달라짐을 알 수 있다. 시정수의 약 4 배의 시간이 경과하면 실제온도의 약 98%에 해당하는 온도를 지시함을 알 수 있다.

(ii) 2階계측기의 스텝응답

永久磁石可動 코일型 電流計 혹은 電壓計는 2階微分方程式으로 그 入出力관계식이 주어지는 典型的인 電氣計器의 1種이다.

이 계기의 可動部의 운동방정식은 다음과 같은 2階微分方程式으로 주어진다.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + S\theta = K_i i(t) \quad (2)$$

단  $J$ : 가동체의 관성능률

$D$ : 粘性계수

$S$ : 스프링의 상수

$K_i$ : 계기상수

$i(t)$ : 가동코일에 흐르는 被測定전류

$\theta$ : 가동코일 즉 계기의 指針의 회전角

식 (2)의 入出力인  $I-\theta$  관계를 구하면

$$\frac{\theta}{i} = \frac{K\omega_n^2}{D^2 + 2\rho\omega_n D + \omega_n^2}$$

단  $\rho = \frac{D}{2\sqrt{JS}}$ ,  $\omega_n = \sqrt{\frac{S}{J}}$ ,  $K = \frac{K_i}{S}$

$$D \triangleq \frac{d}{dt}$$

지금  $i(t) = I_0 1(t)$ 인 스텝적인 직류전류를 전

류계에 인가시 전류계의 指針이 지시하는 값은 감쇠비  $\rho \approx 1$ 의 값에 따라서 세가지 형태로 나타난다. 不足制動인  $\rho < 1$ 인 경우만을 고려한다면, 이때의 지시치는

$$\theta = KI_0 \left\{ 1 - \frac{e^{-\rho\omega_n t}}{\sqrt{1-\rho^2}} \sin(\sqrt{1-\rho^2}\omega_n t + \phi) \right\}$$

단,  $\phi = \sin^{-1} \sqrt{1-\rho^2}$

로 주어진다. 그런데 대부분의 계기에서는  $\rho$ 의 값을 0.6~0.8이 되도록 설계한다. 그 이유는 마멸내지 먼지등으로 인한 誤動作을 쉽게 알 수 있도록 하는데 있다.

(나) 주파수응답

계측기에  $x_i = A \cos \omega t$ 인 신호 즉 정현파적으로 변화하는 水槽溫度를 수은온도계로 측정한다거나, 여러 주파수 대역의 신호전류를 전류계로 측정하는 경우 이론적인 出力信號 즉 지시치의 정상상태에서의 모양은 대체로

$$x_0 = B \cos(\omega t + \phi)$$

로 주어진다.

주파수응답이란 入力信號의 振幅인  $A$ 를 일정하게 유지하고  $\omega$ 의 변화에 따른 振幅比  $B/A$ 와 位相  $\phi$ 의 변화를 의미한다.

(i) 1階計測器의 주파수응답

그림 3과 같이 1階計測器에 複素同波數  $x_i = A e^{j\omega t}$ 인 入出力을 인가시 주파수응답을 구하면 다음과 같다.

$$x_i = A e^{j\omega t} \longrightarrow \boxed{\frac{1}{\tau D + 1}} \longrightarrow x_0 = B e^{j(\omega t + \phi)}$$

그림 3 1階시스템

$$\frac{x_0}{x_i} = \frac{1}{\tau D + 1}$$

지금  $x_i = A e^{j\omega t}$ 을 윗식에 대입하여 계산하면

$$\frac{B}{A} e^{j\phi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \angle -\tan^{-1} \omega \tau$$

즉 振幅比  $\frac{B}{A}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$

位相  $\phi = -\tan^{-1} \omega \tau$

로 주어진다. 수은온도계로 온도를 측정하면 位相差 및 振幅比는 주파수의 함수가 되어 실제온도와 지시치 간에는 경우에 따라서는 상당한 오

차가 내포될 수 있음을 알 수 있다.

(ii) 2階計測器의 周波數應答

2階計測器의 入出力 동특성 관계식은

$$\frac{x_0}{x_i} = \frac{\omega_n^2}{D^2 + 2\rho\omega_n D + \omega_n^2}$$

로 주어진다 가정하면, 이의 周波數傳達函數는

$$\begin{aligned} \frac{x_0}{x_i}(j\omega) &= \frac{\omega_n^2}{-\omega^2 + j^2\rho\omega_n\omega + \omega_n^2} \\ &= \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j2\rho\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)} \end{aligned}$$

로 주어진다. 따라서 振幅比  $\left| \frac{x_0}{x_i}(j\omega) \right|$  및 位相  $\phi$ 는 각각

$$\begin{aligned} \left| \frac{x_0}{x_i}(j\omega) \right| &\triangleq \frac{B}{A} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\rho\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right\}^2}} \\ \phi &= \tan^{-1} \frac{2\rho\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \end{aligned}$$

로 주어진다.

**예제 1.** 영구자석可動 코일형 계기의 고유진동수는 보통 1~2초 정도로 설계되어 있다. 따라서 주파수가 1~2Hz인 正弦波電流를 흘리면 (+)方向으로 指針이 서서히 움직이면서 半振動的인 운동을 하지만 이 正弦波電流의 주파수를 증가시키면 電流計 혹은 電壓計의 指針은 움직이지 않은 零位置를 그대로 지시하게 된다. 그 이유는 永久磁石可動 코일형 계기의 구동회전력(driving torque)은 피측정신호의 평균치에 比例함과 동시에 계기자체의 고유진동수와 入力信號의 주파수와와의 상대적인 大小관계에도 좌우되기 때문이다.

즉 10A의 직류전류계에 60Hz의 교류정현파 전류 10A를 인가하면 전류계의 가동코일에는 10A의 전류가 흐르고 있음에도 불구하고 이 전류계의 지시치는 零이다. 그러나 1Hz 10A의 전류를 흘리면 이때 직류전류계의 지침은 0부터 10A사이를 매 0.5초마다 왕복하는 연속적인 운

동을 하게 된다.

**예제 2.** 하중변환기는 보통 2계 시스템으로 취급하는데 지금 이 변환기의 고유진동수를 800 Hz, 감쇄비  $\zeta=0.4$ 라 할 경우 400Hz의 정현파 하중을 측정시 진폭 및 位相오차를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{B}{A} &= \left| \frac{x_0}{x_i}(j\omega) \right| \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{(1-0.5^2)^2 + (2 \times 0.4 \times 0.5)^2}} = 1.18 \\ \phi &= -\tan^{-1} \frac{2\zeta\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \\ &= -\tan^{-1} \frac{2 \times 0.4 \times 0.5}{1 - 0.5^2} = -28^\circ \end{aligned}$$

즉 진폭에 있어서 18%의 오차가 생기며 位相은 28° 늦음을 알 수 있다.

### 2.2. 디지털계측기의 특성

디지털계측기에는 可動部가 없고, 일명 자료처리시스템으로 그 기능의 일부를 특성짓게 된다. 애널로그계측기에서 볼 수 있는 소위 1계 시스템 혹은 2계시스템이라기보다 1계 혹은 2계차분식형식으로 나타나게 되고, 수학적 도구 역시 애널로그신호인 경우 주로 라플라스 변환 및 프리에 변환기법을 활용하였으나 디지털신호 해석에서는 Z-變換기법이 주로 사용되며 애널로그시스템에서 볼 수 없는 새로운 문제들이 나타나게 된다. 즉 디지털로 코딩(coding)시킨 단어(word)의 길이라던가 量子化誤差와 같은 문제들을 이론적으로 다루어야 하고 이를 하드웨어 구성에서 고려하여야 한다.

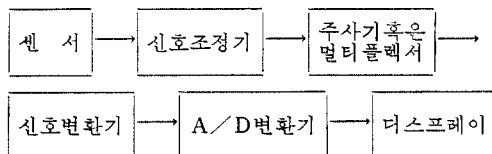


그림 4 디지털자료처리시스템

그림 4는 개념적인 디지털자료처리시스템을 나타내는 블록 선도이다.

### 2.3. 계측시스템의 구성

계측시스템은 그것이 애널로그형 또는 디지털형 어느 경우를 불문하고 대체로 그림 5와 같은 구성이 된다.

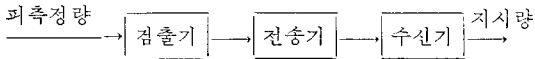


그림 5 계측시스템의 구성

#### 예제 1. 애널로그계측시스템의 구성

그림 6은 열전대로 온도측정시 가장 간단한 개방루프(open loop)계측시스템의 일례이다.

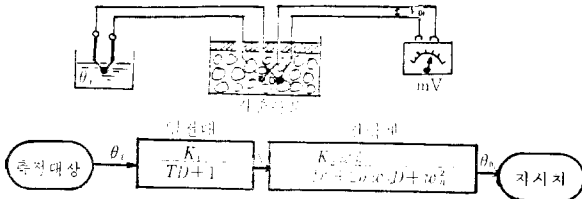


그림 6 온도측정법

여기서 열전대는 검출기, 전압계는 수신기 역할을 각각 수행하며 열전대와 전압계간의 연결 도선은 전송기 역할을 담당하게 된다.

#### 예제 2. 디지털계측시스템의 구성

디지털계측시스템의 구성은 측정대상과 측정치의 정확도에 따라서 그 구성에서 다소의 차이가 있으나 마이크로 프로세서를 사용한 계측시스템의 개념도는 대체로 그림 7과 같다.

이의 고유특성으로는 비트의 갯수, 엔코딩, 디코딩, 量子化 誤差, 버스시스템등 애널로그

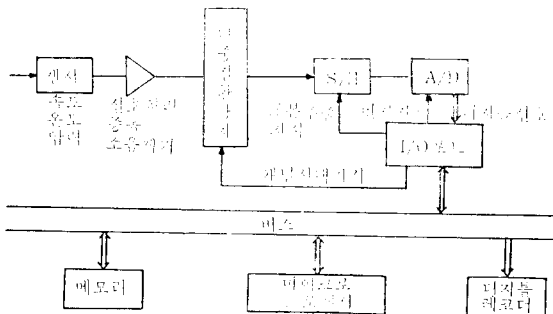


그림 7 마이크로 프로세서를 사용한 계측시스템

계측시스템에는 없는 새로운 개념의 소프트웨어가 요구된다.

### 3. 연산증폭기의 원리 및 응용

연산용 증폭기(Op. Amp., Operational Amplifier)는 트랜지스터, 저항  $R$  및 콘덴서  $C$ 로 구성된 전자회로이며 테베난 入力抵抗이 매우 크고, 테베난 出力抵抗이 매우 적은 IC소자이다. 즉 연산증폭기는 고이득선형 전압증폭기로서 동작하며, 계측회로설계시 매우 다양한 역할을 하게 된다. 즉 디지털계측시스템으로 어떤 신호를 처리 하더라도 센서로부터의 신호를 그대로 이용할 수 없으며 일단 증폭, 소음제거등 여러가지 회로적인 기능을 수행하는 계측회로를 연산증폭기를 이용하여 설계 제작하는 경우가 많다. 따라서 이 연산증폭기에 관한 지식은 메카트로닉스의 기초가 되므로 기계 기술자들이 이에 관심을 갖는다는 것은 매우 중요하다고 본다. 관심있는 독자는 筆者가 제시한 실험회로를 실지로 구성하여 연산증폭기의 사용법에 익숙해지기를 바란다(청계천 장사동시장에서 500원 정도로 연산증폭기를 구입할 수 있음).

#### 3.1. 연산증폭기의 기호와 기본 전달특성

그림 8은 연산증폭기의 기호이며 두개의 入力단자가 있다. 이중 (-)단자는 여기에 인가된 신호의 極性和 반대되는 極性을 가진 出力신호가 나타나게 되는 단자로서 소위 變換입력단자(inverting input terminal)라고 부르고 (+)단자는 同一극성의 入-出力신호를 얻게되는 소위 비變換입력단자(noninverting terminal)라 한다.

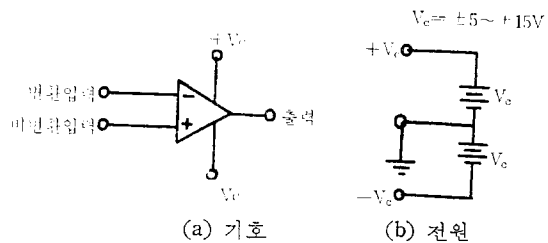


그림 8 연산증폭기의 기호와 전원

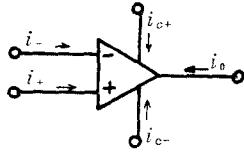


그림 9 연산증폭기에서의 전류분포

그림 9는 연산증폭기를 한개의 노드(node)로 보았을 때의 전류분포이며, KCL 방정식을 적용하면 식 (3)을 얻는다.

$$i_- + i_+ + i_{c+} + i_{c-} + i_o = 0 \quad (3)$$

실지로  $i_-, i_+ \ll 1$  이므로

$$i_{c+} + i_{c-} = -i_o \quad (4)$$

이상적인 연산증폭기란 다음 조건을 만족하는 것을 의미한다.

입력저항 :  $\infty \rightarrow i_+ = i_- = 0$

출력저항 :  $0 \rightarrow$  종속電壓源

개방루프이득 :  $\infty$

대역폭 :  $\infty$

입력電壓 = 0  $\Rightarrow$  출력電壓 = 0

(零의 오프셋)

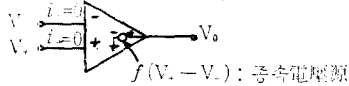


그림 10은 전형적인 연산증폭기의 전달특성이다.

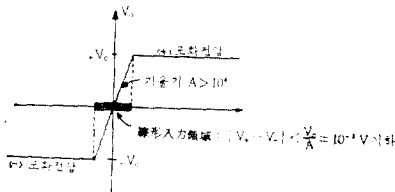


그림 10 전형적인 연산증폭기의 전달특성

즉 연산증폭기의 동작영역은 선형領域과 포화 영역의 두가지로 구성된다. 선형영역에서의  $V_o$ 는 전원전압  $\pm V_c$ 이내의 값이된다. 그러나 선형영역에서의 電壓利得  $A \geq 10^4$ 이고 出力電壓 영역 역시 有界이기 때문에 入力電壓差는 매우 적다.

선형동작영역에서

$$|V_o| < |V_c| \text{ 및 } V_o = A(V_+ - V_-)$$

이므로

$$|V_+ - V_-| < \left| \frac{V_c}{A} \right| \quad (5)$$

$A$ 는 보통  $10^4 \sim 10^6$ 이고  $V_c$ 는  $\pm 5 \sim \pm 15V$ 이므로 선형동작영역幅은  $1mV$ 이하가 된다. 특히  $A=10^6$ 인 경우 入力電壓差는  $1\mu V$ 내외이다.

즉 선형入力영역인 경우 :

① 入力電流는 零임

② 入力電壓  $V_+, V_-$ 는 거의 같다. ( $1mV$ 이하) 포화영역 동작인 경우 :

$$V_+ - V_- > 1mV \text{ 이면 } V_o = +V_c$$

$$V_- - V_+ > 1mV \text{ 이면 } V_o = -V_c$$

出力단자를 (-)단자에 되먹임(feedback)시키면 선형영역에서의 동작이 되지만, 되먹임이 없거나 (+)에 되먹임시키면  $\pm V_c$ 로 포화된다. 이에 대한 것을 다음절에서 자세히 설명한다.

### 3.2. 기본회로

#### (1) 변환증폭기

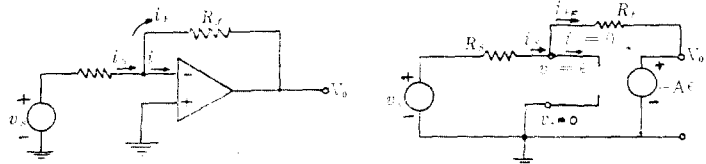


그림 11 변환증폭기

그림 11에서  $v_s > 0$ 로 증가함에 따라서  $v_- > 0$ 가 되면  $V_o < 0$ , 그런데  $R_F$  때문에  $V_o$ 의 감소 ( $< 0$ )는 반대로  $v_-$ 를 零쪽으로 끌어올린다. 그리하여  $V_o$ 가 0에 가까운 값을 유지하도록  $v_-$ 는 0+에 가까운 값을 유지하면서 소위 평형을 유지하게 된다. 즉  $A \gg 1$ 이면 평형점은  $v_s$ 가 비교적 큰 전압일지라도 0+에 가까운 電壓值  $v_-$ 에서 발생하게 된다. 이상의 논의를 해석적으로 풀이하던 다음과 같다.

$$i_s = \frac{v_s - \epsilon}{R_s} \approx \frac{v_s}{R_s}, \quad |v_s| \gg |\epsilon|$$

한편  $i_- = 0$ 이므로

$$i_F = i_s$$

$$\therefore V_o = \epsilon - i_F R_F = -i_F R_F \quad (6)$$

$$\therefore V_o = -i_s R_F$$

$$\text{즉 } V_o = -\left(\frac{R_F}{R_s}\right)v_s \quad (7)$$

즉 선형동작과  $\epsilon \ll 1$ 인 가정이 정당하다고 하

■ 講 座

면 그림 11의 회로는 식 (7)로 주어지는 선형 소자로 볼 수 있다. 마치  $R, L, C$  와 같은 소자로서 연산증폭기를 생각해도 무리가 아님을 알 수 있다.

지금,  $v_+ = 0, v_- = \epsilon$  라 하면

$$V_0 = -A\epsilon \quad (8)$$

$A \gg 1$  임으로 식 (6)에서  $\epsilon = 0$  로 볼 수 있다.

$\epsilon \neq 0$  라 보고  $\frac{\epsilon_i}{v_s}$  을 구하면

$$\frac{\epsilon}{v_s} = \left( \frac{R_F}{AR_s} \right) \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{A} + \frac{R_F}{AR_s}} \right) \quad (9)$$

따라서  $A \gg \frac{R_F}{R_s}$  인 조건에서는  $\frac{\epsilon}{v_s} \ll 1$  즉  $\epsilon \approx 0$

$\frac{R_F}{R_s}$  를 폐쇄루프이득이라 한다. 즉

개방루프이득  $\gg$  폐쇄루프이득

이면  $\epsilon \ll 1$  즉  $v_s$  에 비하여  $\epsilon \approx 0$  로 볼 수 있다.

선형영역에서  $|V_0| < |v_c|$  인 관계가 성립함으로  $R_F, R_s$  및  $v_s$  의 값에 제한을 주게 된다. 즉

$$|v_s| < \frac{|V_c|}{(R_F/R_s)} \quad (10)$$

되먹임 효과를 열거하면 다음과 같다.

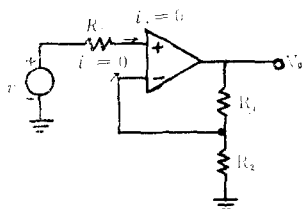
- (i) 전체이득의 감소
- (ii) 보다 큰  $v_s$
- (iii) 수동의부소자  $R_F, R_s$  에 의존하는 변환

폐쇄루프이득  $\frac{R_F}{R_s}$

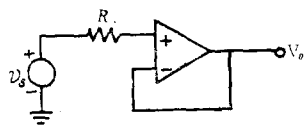
실지로 개방루프이득  $A$  는 온도에 매우 예민하고 개개의 연산증폭기에 따라서 그 값이 달라진다.

(2) 비변환 증폭기 및 추적기 (followers)

그림 12는 비변환 증폭기의 전압추적기를 나



(a) 비변환증폭기



(b) 전압추적기

그림 12 비변환증폭기와 전압추적기

타낸다.

$$i_+ = 0 \text{ 이므로 } v_+ = v_s$$

$$\text{한편 } i_- = 0 \text{ 이므로 } v_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0$$

그런데 폐쇄루프조건인 경우  $v_+ = v_-$  이므로

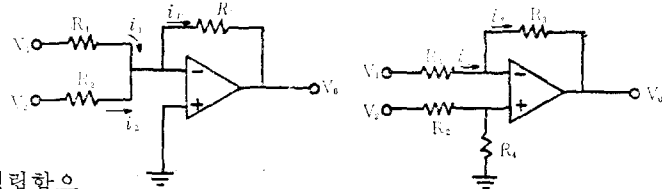
$$v_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_0 \quad (11)$$

$$\therefore V_0 = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) v_s$$

식 (11)에서  $R_2 \rightarrow \infty, R_1 \rightarrow 0$  이면  $V_0 = v_s$  이 되어 즉 전압추적기가 된다. 전압추적기의 목적은 전압원  $v_s$  의 내부임피던스 레벨의 변환에 있다.

(3) 애널로그 덧셈 및 뺄셈

그림 13은 ±연산회로이다.



(a) (+)연산회로

(b) (-)연산회로

그림 13 (+), (-)연산회로

(a)인 경우

$$i_1 = \frac{V_1 - v_-}{R_1} \doteq \frac{V_1}{R_1}, \quad i_2 = \frac{V_2 - v_-}{R_2} \doteq \frac{V_2}{R_2},$$

$$i_F = i_1 + i_2$$

$$V_0 = - \left( \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 \right) \quad (12)$$

(b)인 경우  $v_+ = \frac{R_4}{R_2 + R_4} V_2$

선형동작 영역에서는  $v_- = v_+$  이므로

$$i_1 = \frac{V_1 - v_-}{R_1} = \frac{V_1 - v_+}{R_1}$$

한편  $i_- = 0, \therefore i_3 = i_1$

$$\therefore V_0 = v_+ - \left( \frac{V_1 - v_+}{R_1} \right) R_3$$

$$\therefore V_0 = \left( \frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) \left( \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) V_2 - \left( \frac{R_3}{R_1} \right) V_1$$

만일  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$  이면

$$V_0 = V_2 - V_1 \quad (13)$$

<다음호에 계속>