

트랜지스터 差動增幅器의 標動 極少化에 關한 研究

(A Study on the Drift-minimization in the Transistor Differential Amplifier)

* 金 宗 相
(Kim, Chong Sang)

要 約

트랜지스터 差動增幅器의 解析은 二分 定理의 應用으로 간단히 되며 溫度 및 電源電壓의 變化에 依한 drift는 自體補償回路에 依해서 減少시킬수 있다.

베이스-에미터電壓을 같게 하는 基本自體補償回路과 이電壓의 溫度係數를 같게 하는 溫度自體補償回路를 써서 實驗하여 良好한 結果를 얻었으며 이回路의 調節은 理論值과 잘 一致함을 確認하였다.

ABSTRACT

The analysis of differential amplifier is simplified by the extension of bisection theorem.

In order to reduce the thermal and power drifts, a self compensating circuit is employed. The optimum conditions of the self compensating circuit are: the base-emitter voltage of one transistor should be equal to the other's base-emitter voltage for basic self compensating circuit, the temperature coefficients of base-emitter voltage of one transistor equal to the others for thermal compensation.

By regarding the thermal and power drifts the experiments were performed and the numerical results were consistent with the measured values.

1. 序 論

差動增幅器에서의 問題點은 아래 세가지 條件을 만족하는데 있다. 即

첫째 周圍溫度 特히 溫度에 依한 낮은 drift.

두째 電源變化에 依한 낮은 drift.

세째 큰 CMR이다.

만약 回路가 完全히 平衡이던 即트랜지스터의 對稱回路 素子가 같으면 위 세가지 要求는 充足될것이나 實際로는 達成될수 없다. 特히 트랜지스터의 特性이 꼭 같을수는 없으므로 不平衡을 避할수 없다. 따라서 受動性 回路素子인 抵抗의 值을 不平衡케 하여 全體의 回路가 平衡되도록 하여야 한다. 本論文에서는 트랜지스터 差動增幅器를 解析하여 CM, DM 信號에 依한 性質을

究明하고 溫度와 電源變化에 依한 drift를 最少로 減少시키는 自體補償方法과 解析을 主要 取扱하였다.

2. 差動增幅器의 解析

가장 一般의 差動增幅器는 그림 1과 같이 表示되며 等價回路에서 kirchhoff의 法則을 써서 計算하면

$$\begin{aligned}
v_{oa} - v_{ob} = & \frac{(\alpha_a R_{1a} + \alpha_b R_{1b}) \{ (\tau_{ib} - \tau_{ia}) \\
& + (V_{be1} - V_{be2}) + (R_{2b} I_{c1b} - R_{2a} I_{c1a}) \}}{\Delta} \\
& + \frac{\alpha_b R_{1b} \left(R_{3a} + \frac{R_{2a}}{1 + \beta_a} \right) \left(v_{ib} + \frac{R_{2b} I_{c1b} - V_{be2} + E_2}{R_1} \right)}{\Delta} \\
& - \frac{\alpha_a R_{1a} \left(R_{3b} + \frac{R_{2b}}{1 + \beta_b} \right) \left(v_{ia} + \frac{R_{2a} I_{c1a} - V_{be1} + E_1}{R_1} \right)}{\Delta} \\
& + I_{c1b} R_{1b} - I_{c1a} R_{1a} \dots \dots \dots (1)
\end{aligned}$$

*嶺南大學校 電氣工學科
Dept of Electrical Eng, Young Nam Univ.
接受日字 1967年12月5日

여기서

$$\Delta = R_{3a} + R_{3b} + \frac{R_{3a}R_{3b}}{R_1} + \frac{R_{2a}}{1 + \beta_a} + \frac{R_{2b}}{1 + \beta_b} + \frac{R_{2a}R_{3b}}{(1 + \beta_a)R_4} + \frac{R_{2b}R_{3a}}{(1 + \beta_b)R_4} + \frac{R_{2a}R_{2b}}{(1 + \beta_a)(1 + \beta_b)R_4}$$

式(1)로 부터 對稱回路素子가 같지 않을때는 drift가 생기며 CM出力成分도 나타남을 알수있다.

二等分定理를 應用하여 아래의 같이 解析할수 있다. 그림 1를 그림 2의 같은 等價回路로 代置할수 있으며 그림 2의 各 出力電壓은 아래의 같은 모양으로 것이다.

$$v_{oc} = -A_{cc}(v_{ic} + \frac{1}{H_2}v_{ia} + V_{ci} + \frac{1}{A_1}E_1$$

$$+ \frac{1}{A_2}E_2) \dots \dots \dots (2)$$

$$v_{oi} = -A_{di}(v_{ic} + \frac{1}{H_c}v_{ic} + V_{ci} + \frac{1}{H_1}E_1 + \frac{1}{H_2}E_2) \dots \dots \dots (3)$$

여기서 Acc, Add는 各各 CM 및 DM利得을, Hd, Hc는 各各 DMR 및 CMR을 表示한다. 또한 H1, H2는 電源 rejection factor이며 Vci와 Vdi는 内部的 drift源泉에 依한 CM 및 DM 等價入力電壓을 나타낸다. 그림 2에서 v_{oc}, v_{od}를 求하여 式(2), (3)과 比較하면 다음과 같이 된다.

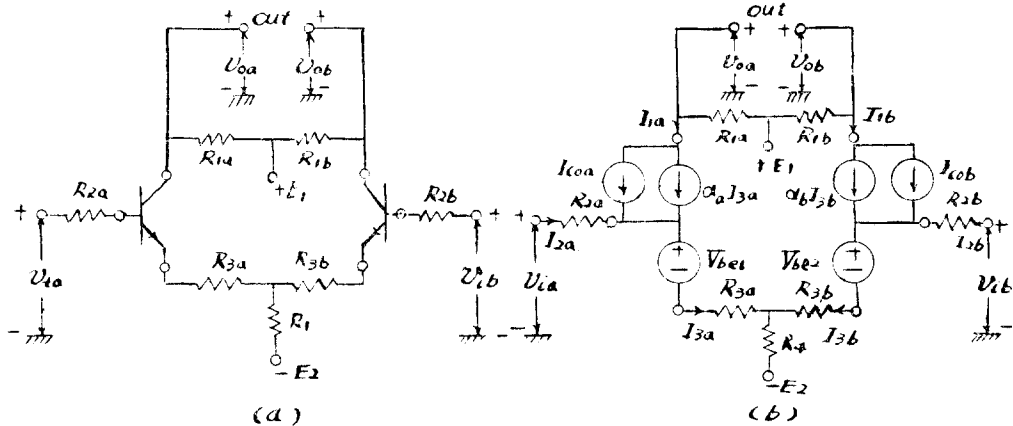


그림 1 差動增幅器와 等價回路
Fig 1. Differential Amplifier and its equivalent Circuit

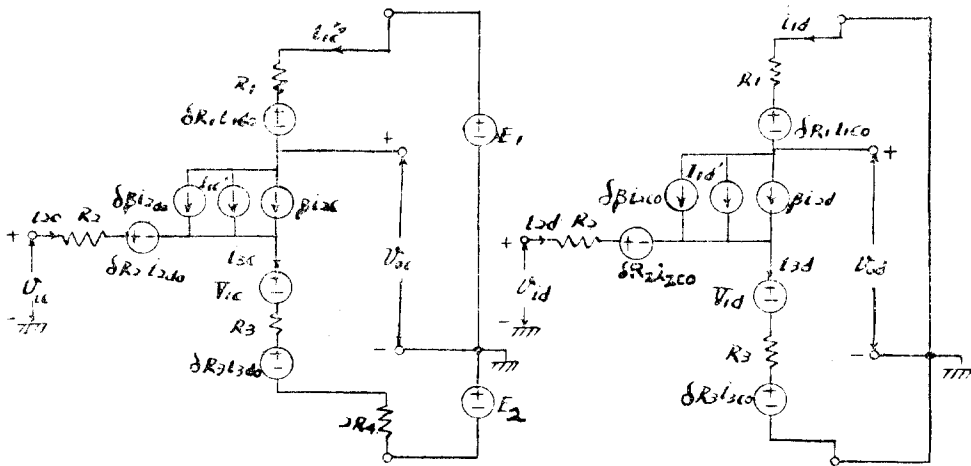


그림 2 不等對稱素子 差動增幅器의 CM 및 DM等價半回路
Fig 2. Unbalanced differential Amplifier's CM and DM equivalent half circuit.

$$A_{cc} = \frac{\alpha R_1}{R_3 + 2R_1 + \frac{R_2}{1+\beta}} \dots\dots\dots (4)$$

$$A_{dd} = \frac{\alpha R_1}{R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{1}{H_d} = \frac{1}{R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\partial R_1}{R_1} (R_3 + 2R_1 + \frac{R_2}{1+\beta}) - \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} - \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \frac{\partial \beta}{\beta} \frac{R_2 + R_3 + 2R_1}{1+\beta} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{1}{H_c} = \frac{1}{R_3 + 2R_1 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\partial R_1}{R_1} (R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}) - \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} - \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \frac{\partial \beta}{\beta} \frac{R_2 + R_3}{1+\beta} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{1}{A_1} = -\frac{R_3 + 2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta}}{\alpha R_1} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{1}{A_2} = 1 \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{1}{H_1} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{1}{H_2} = \frac{1}{H_c} \dots\dots\dots (11)$$

$$V_{ci} = -V_{1c} + \frac{I'_{1c}}{\beta} (R_2 + R_3 + 2R_1) - \frac{1}{R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\partial R_1}{R_1} (R_3 + 2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta}) - \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} - \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \frac{\partial \beta}{\beta} \frac{R_2 + R_3 + 2R_4}{1+\beta} \right\} V_{1d} + \frac{1}{(1+\beta)(R_3 + \frac{R_2}{1+\beta})} \left\{ \frac{\partial R_1}{R_1} \frac{1}{\alpha} (R_2 + R_3) (R_3 + 2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta}) + R_2 R_3 \left(\frac{\partial R_2}{R_2} - \frac{\partial R_3}{R_3} \right) - \frac{\partial \beta}{\beta} R_3 (R_2 + R_3 + 2R_4) \right\} I'_{1d} \dots\dots\dots (12)$$

$$V_{di} = -V_{1d} + \frac{R_2 + R_3}{\beta} I'_{1d} - \frac{1}{R_3 + 2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\partial R_1}{R_1} (R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}) - \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} - \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \frac{\partial \beta}{\beta} \frac{R_2 + R_3}{1+\beta} \right\} V_{1c} + \frac{1}{(R_3 + 2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta})(1+\beta)} \left\{ \frac{\partial R_1}{R_1} \frac{1}{\alpha} (R_2 + R_3 + 2R_4) (R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}) \right.$$

$$\left. + \frac{\partial R_2}{R_2} R_2 (R_3 + 2R_4) - \frac{\partial R_3}{R_3} R_2 R_3 - \frac{\partial \beta}{\beta} (R_3 + 2R_4) (R_2 + R_3) \right\} I'_{1c} \dots\dots\dots (13)$$

또한 任意的 信號電源으로부터 增幅器를 驅動시켜야 되므로 差動增幅器의 入力特性을 알 必要가 있다.

그림 2에서

$$i_{2c} = y_{cc} v_{1c} + y_{cd} v_{1d} + I_c \dots\dots\dots (14)$$

$$i_{2d} = y_{dc} v_{1c} + y_{dd} v_{1d} + I_d \dots\dots\dots (15)$$

여기서 y_{cc}, y_{cd} 는 各各 CM 및 DM 入力 admittance이며 y_{dc}, y_{dd} 는 各各 DM to CM 및 CM to DM transfer admittance이다. 또한 I_c, I_d 는 CM 및 DM 入力信號인 v_{1c}, v_{1d} 以外的 다른 源泉으로부터 오는 CM 및 DM 入力電流로서 다음과 같이 나타낸다.

$$I_c = I_{ci} + I_{ce} \dots\dots\dots (16)$$

$$I_d = I_{di} + I_{de} \dots\dots\dots (17)$$

여기서 添字 i, e 는 各各 内部的 源泉과 外部的 源泉에 依한것임을 나타낸다. 그림 2에서 i_{2c}, i_{2d} 를 求하여 式(14), (15), (16), (17)과 比較하면 아래結果를 얻는다.

$$y_{cc} = \frac{1}{(1+\beta)(R_3 + 2R_1) + R_2} \dots\dots\dots (18)$$

$$y_{dd} = \frac{1}{R_2 + (1+\beta)R_3} \dots\dots\dots (19)$$

$$y_{cd} = \frac{-1}{\{(1+\beta)(R_3 + 2R_4) + R_2\} (R_3 + \frac{R_2}{1+\beta})} \left\{ \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} + \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \alpha \frac{\partial \beta}{\beta} (R_3 + 2R_4) \right\} \dots\dots\dots (20)$$

$$y_{dc} = \frac{-1}{\{(1+\beta)R_3 + R_2\} (R_3 + 2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta})} \left\{ \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} + \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \alpha \frac{\partial \beta}{\beta} R_3 \right\} \dots\dots\dots (21)$$

$$I_{cc} = y_{cc} E_2 \dots\dots\dots (22)$$

$$I_{dc} = y_{dc} E_2 \dots\dots\dots (23)$$

$$I_{ci} = \frac{1}{(1+\beta)(R_3 + 2R_4) + R_2} \left[-V_{1c} - (R_3 + 2R_4) I'_{1c} + \frac{1}{R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\partial R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} + \frac{\partial R_3}{R_3} R_3 + \alpha \frac{\partial \beta}{\beta} (R_3 + 2R_4) \right\} V_{1d} \right.$$

$$+ \alpha \frac{\delta\beta}{\beta} \frac{R_3(R_3+2R_4)}{R_3 + \frac{R_2}{1+\beta}} I'_{1c} \dots\dots\dots (24)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{(1+\beta)R_3+R_2} \{-V_{1d} - R_3 I'_{1c} + \frac{1}{R_3+2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\delta R_2}{R_2} \frac{R_2}{1+\beta} + \frac{\delta R_3}{R_3} R_3 \right\} V_{1c} + \frac{1}{R_3+2R_4 + \frac{R_2}{1+\beta}} \left\{ \frac{\delta R_2}{R_2} \frac{R_2(R_3+R_4)}{1+\beta} - \frac{\delta R_3}{R_3} \frac{R_2 R_3}{1+\beta} \right\} + \alpha \frac{\delta\beta}{\beta} R_3 (R_3+2R_4) \} I'_{1c} \dots\dots\dots (25)$$

그런데 差動增幅器에서 가장 一般의인 回路素子の 數値 및 溫度係數를 式(18)에 代入하면 V_{dc} 는 V_{1d} 에 依하여 左右됨을 알 수 있다. 故로 drift를 減少시키기 위해서는 base-emitter 電壓을 같게 하여야 하며, 또 $\frac{\partial V_{dc}}{\partial T}$ 는 $\frac{\partial V_{1d}}{\partial T}$ 에 依해서 크게 變하므로 thermal drift를 減少시키기 위해서는 base-emitter 電壓의 溫度係數를 같게 하여 $\frac{\partial V_{1d}}{\partial T}$ 에 依한 影響을 없게 하여야 한다.

3. 自體補償 差動增幅器의 解析

(a) 基本自體補償回路

이 回路는 溫度와 電源變化에 依한 drift를 제거할 수 있으나 CMR이 적어지는 缺點이 있다. 이 CMR는 다른 方法에 依해서 크게 할 수 있으므로 drift와는 別個의 問題로 drift만 取扱키로 한다. 그림 3의 動作原理은 入力側 短絡時(入力信號電壓 零) 및 開放時(入力信號電流 零), 各各 可變抵抗器 R_A, R_B 로서 出力電壓이 零이 되게 한다. 이 過程을 두서너번 되풀이 하면 兩 트랜지스터는 同一한 base 電壓을 갖게 되며 內部 base 및 emitter 抵抗을 無視하면 같은 base-emitter 電壓을 갖게 되므로 drift는 減少된다.

式(1)은 I_c 를 無視하면 아래처럼 된다.

$$v_{oa} - v_{ob} = \frac{\alpha_a R_{1b} \left(\frac{R_{2a}}{1+\beta_a} \right) \left(\frac{V_{bc2} + E_2}{R_4} \right) - \alpha_a R_{1a} \left(\frac{R_{2b}}{1+\beta_b} \right) \left(\frac{-V_{bc1} + E_2}{R_4} \right)}{\Delta} = 0 \dots\dots\dots (26)$$

그런데 $V_{bc1} = V_{bc2} = V_{bc}$ 이므로

$$v_{oa} - v_{ob} = \frac{\left(\frac{E_2 - V_{bc}}{R_4} \right) \left(\alpha_a R_{1b} \frac{R_{2a}}{1+\beta_a} - \alpha_a R_{1a} \frac{R_{2b}}{1+\beta_b} \right)}{\Delta} = 0 \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{故로 } \frac{R_{2a}}{R_{2b}} = \frac{\alpha_a R_{1a} (1-\alpha_b)}{\alpha_b R_{1b} (1-\alpha_a)} = \frac{(1-\alpha_b) I_{3b}}{(1-\alpha_a) I_{3a}} \dots\dots\dots (28)$$

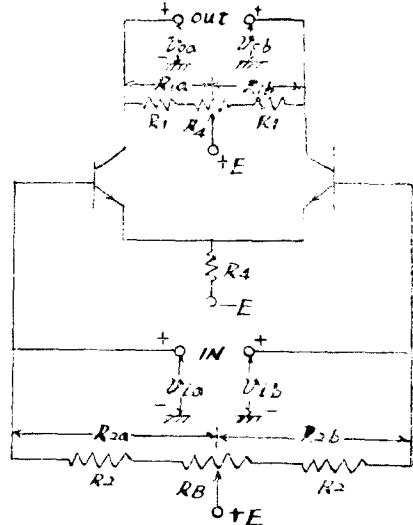


그림3 基本自體補償 差動增幅器
Fig 3. Basic self-compensating differential Amplifier.

트랜지스터의 內部 base 및 emitter 抵抗을 無視하지 않았을 때는 式(28)은 아래와 같이 된다.

$$\frac{R_{2a} + r_{e1} + r_{e1}(1+\beta_a)}{R_{2b} + r_{e2} + r_{e2}(1+\beta_b)} = \frac{(1-\alpha_b) I_{3b}}{(1-\alpha_a) I_{3a}} \dots\dots\dots (29)$$

(b) 溫度自體補償回路

溫度에 依한 drift를 最少로 하려면 base-emitter 電壓의 溫度係數를 같게 하여야 한다. 그러나 보통 base-emitter 電壓을 같게 하여도 그의 溫度係數는 同一하지 않고 약간의 差가 있다. 故로 그림4와 같이 可變抵抗器 R_c 를 넣어서 溫度係數가 같아지도록 調節한다. R_c 의 調節로서 出力電壓이 나타나면 R_A, R_B 의 再調節로서 出力電壓이 零이 되도록 한다.

단각 同一한 base-emitter 電壓에서의 溫度係數의 差를 아래와 같다고 假定하면

$$\Delta V_{bc} = \frac{\Delta V_{bc1}}{\Delta T} - \frac{\Delta V_{bc2}}{\Delta T} \dots\dots\dots (30)$$

R_{c1}, R_{c2} 는 아래와 같이 된다.

$$R_{c1} I_{3a} = R_{c2} - \Delta V_{bc} \dots\dots\dots (31)$$

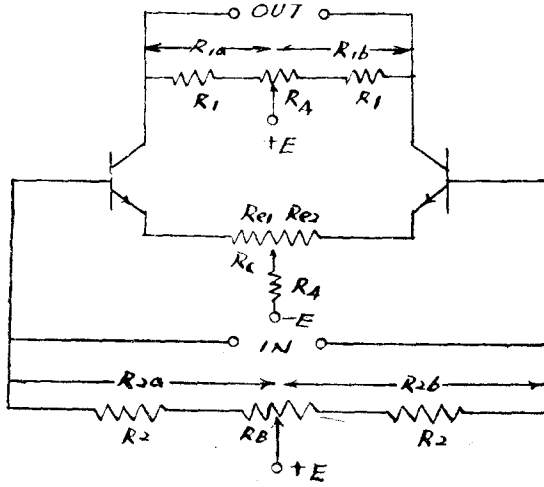


그림4 温度補償回路

Fig 4. Temperature compensating circuit.

$$R_c = R_{e1} + R_{e2} \dots\dots\dots (32)$$

式(31), (32)에서 R_{e1}, R_{e2} 를 求할 수 있다.

$$R_{e1} = \frac{R_c I_{3b} - \Delta V_{be}}{I_{3a} + I_{3b}} \dots\dots\dots (33)$$

$$R_{e2} = \frac{R_c I_{3a} + \Delta V_{be}}{I_{3a} + I_{3b}} \dots\dots\dots (34)$$

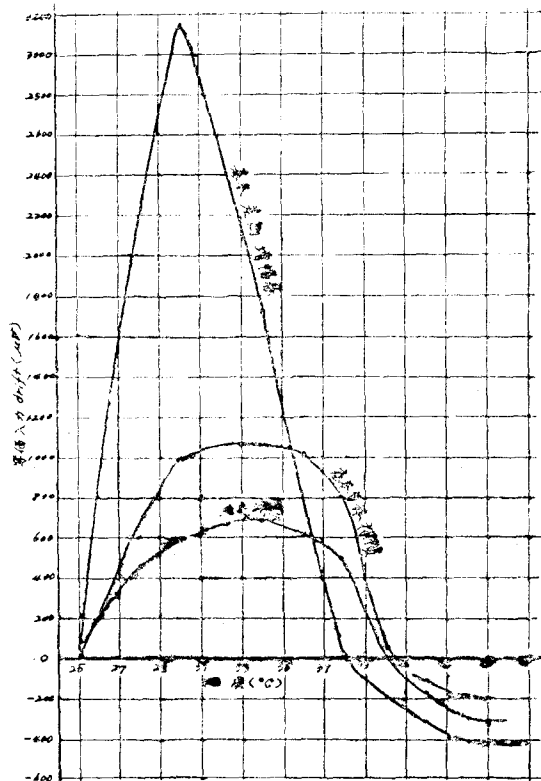


그림5 OC71을 쓴 差動增幅器의 thermal drift.
Fig 5. Thermal drift of differential Amplifier with OC71

4. 實驗 結果

Ge 트랜지스터 OC71를 使用했을 경우 그림4에서 $R_1=10k\Omega$, $R_2=1.5M\Omega$, $R_4=10k\Omega$, $R_A=1k\Omega$, $R_B=500k\Omega$, $R_c=10\Omega$, $E=22.5V$ 로 하여 實驗을 行하였고 Si 트랜지스터 2N706을 使用했을 경우는 $R_1=10k\Omega$, $R_2=1M\Omega$, $R_4=10k\Omega$, $R_A=1k\Omega$, $R_B=500k\Omega$, $R_c=10\Omega$, $E=7.8V$ 로

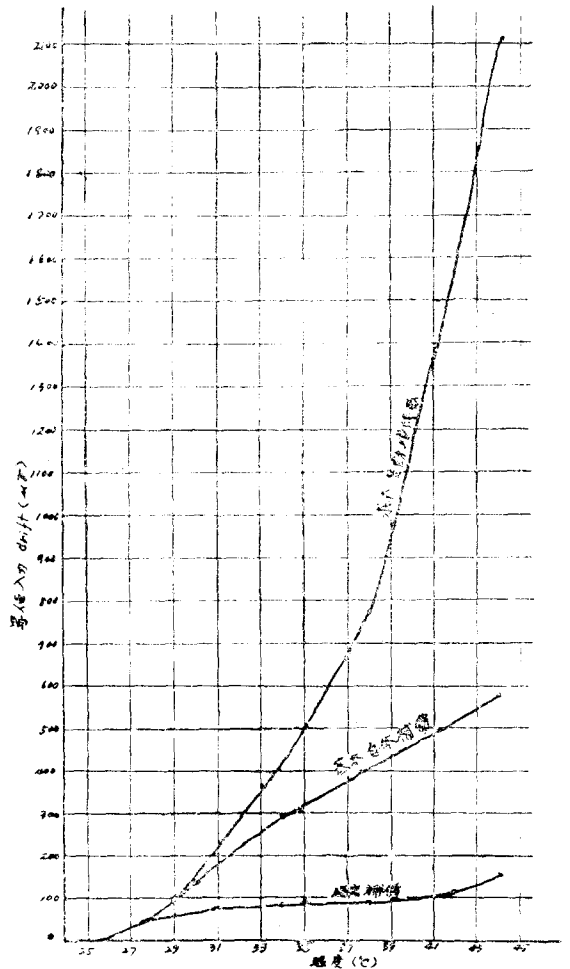


그림6 2N706을 쓴 差動增幅器의 thermal drift.
Fig 6. Thermal drift of differential Amplifier with 2N706

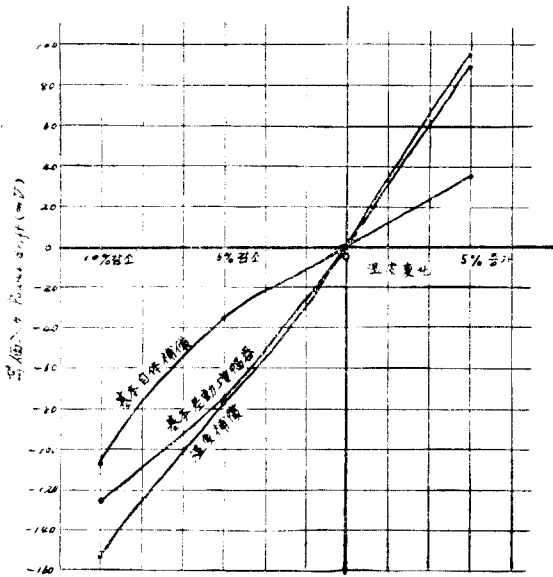


그림7 OC71을 사용한 差動增幅器의 Power drift.
Fig 7. Powe drift of drifferential Amplifier with OC71

하여서 實驗을 行하였다. R_A, R_B, R_C 의 調節은 理論值인 式(28), (33), (34)에 依한 計算值와 일치 一致하였다. 基本, 基本自體補償, 溫度自體補償 差動增幅器 各各에 對한 thermal drift와 power drift를 測定한 結果는 그림 5, 6, 7, 8과 같이 되어 自體補償할수 있음을 알수있다.

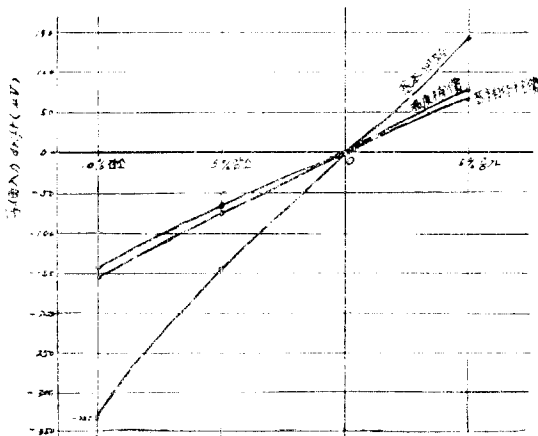


그림8 2N706을 쓴 差動增幅器의 Power drift.
Fig 8. Power drift of differential Amplifier with 2N706

5. 結 論

두 트랜지스터의 base-emitter 電壓을 같게 하여 drift를 減少시킬수 있으며 특히 thermal drift를 더 減少시키려면 溫度自體補償回路를 써서 base-emitter電壓의 溫度係數를 같게 하면 되나 power drift가 약간 커진다. 이러한 缺點을 補 充하려면 collector 回路에 可變抵抗器를 삽입하 여 電源變化에 依한 drift를 相殺할수 있으나 可 變抵抗器의 數가 많아져 調節이 곤란하므로 電 源으로서 電池를 使用하면 power drift가 큰 問 題가 안됨으로 溫度自體補償 差動增幅器로서 drift를 最少限 減少시킬수 있다.

參 考 文 獻

1. Middle brook "Differential Amplifier" John wiley & sons 1963.
2. A. H. Hoffait and R. D. Thornton "Limitations of Transistor D.C Amplifier" I.E.E.E Feb. 1964.
3. A. H. Hoffait and R. D. Thornton "Nanovolt Transistor DC Amp" I.E.E.E. Aug. 1963.
4. Robert H Okada "Stable Transistor wide Band DC Amplifer" A. I. E. E. Mar. 1960.