

# Switched-Capacitor를 이용한 3次低域通過 能動濾波器的 실현에 관한 연구

論 文  
33~12~2

## A Study on the Realization of 3rd Order Active Low-pass Filter using Switched-Capacitor

柳 喆 魯\* · 金 圭 煥\*\*  
(Chul-Ro Yu · Gyu-Hwan Kim)

### Abstract

In order to realize the simple and economic 3rd order LPF using switched-capacitor(SC), we proposed the 3rd order RC LPF using a OP amplifier and realized the 3rd order SC LPF by replacing all the resistors in the RC LPF to SC.

The frequency response of SC LPF was compared with the that of RC LPF.

As a result, it was found that the response of realized SC LPF is almost similar to that of RC LPF.

### 1. 緒 論

能動濾波기를 IC化 하려는 試圖가 繼續되고 있으나 能動RC 濾波기를 MOS 集積技術로 완전히 IC化 하지 못하는 理由는 抵抗R - 容量C의 積 (RC Product)을 정확히 維持하기 어려울뿐 아니라 특히 擴散法에 의해 製造된 抵抗은 溫度 및 線形特性이 좋지 못하며 silicon面積을 크게 차지하는等 MOS集積化에 적합치 않지만 capacitor는 RC積에 該當하는 것이 capacitor 比로 되어 정확히 그值을 維持하기 쉽고 silicon面積을 적게 차지하기 때문에 抵抗을 switch와 capacitor의 組合으로 代替하므로서 MOS集積化的 難點을 해결할 수 있을 것이다.

switched-capacitor (SC)회로는 capacitor, MOS switch 및 演算增幅器로 構成되며 安定도가 높고 高精度의 실현이 가능하고 Dynamic Range도 넓은 性質을 가지고 있으므로 최근 switch-capacitor Filter (SCF)의 設計에<sup>1)~3)</sup> 應用되고 있다.

SCF의 構成法은 大部分 能動 RC Filter (RCF)

를 設計하여 그의 等價 能動 SCF회로로 실현하고<sup>4),5)</sup> 있기 때문에 能動RCF의 理想的 構成이 중요하다.

그러나 能動RCF의 設計는 일반적으로 周波數特性, Q의 개선을 위해서 演算增幅器가 많이 所要되는 각종 高次 濾波器가 提案되고 있지만 부피와 經費를 줄이기 위해서 演算增幅器의 數가 적고, 低素子感度이고, 回路의 總容量을 적게 하는等 考慮하지 않으면 않된다.

本 論文에서는 從來에 發表된 2次 低域通過 濾波器회로에<sup>6)~8)</sup> 1次RC회로를 縱續接續하여 單一增幅器에 의한 3次 低域通過 RCF를 提案하였고 이를 G. C. Temes 등이 提案한 SC回路<sup>2)</sup>를 이용하여 3次 SCF를 실현하였으며 實驗을 통해서 특성을 比較 考察하였다.

### 2. 3次低域通過能動濾波器的 실현

提案회로는 그림 1에 나타났다.

$V_2$ 에서  $V_0$ 까지의 傳達特性은 2次低域通過濾波器 特性이며<sup>6)~8)</sup>  $R_1, C_1$ 을 縱續接續 하므로서 Chebyshev 特性을 갖는 3次 低域通過能動濾波기를 실현할 수 있었으며 傳達函數와 實驗結果는 다음과 같다.

\*正 會 員 : 全北大 工大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\*正 會 員 : 群山水産專門大學 通信科 助教授  
接受日字 : 1984年 5月 16日

演算增幅器의 電圧利得을 無限大로 하였을때 傳達函數를  $T(S)$  라 하면

$$T(S) = \frac{V_0}{V_1} = \frac{R_b (R_3 + R_4)}{R_4 (R_{ab} + R_1)} \cdot \frac{N(S)}{D(S)} \quad (1)$$

$$N(S) = S^2 C_2 C_3 R_2 R + S [R_2 (C_2 + C_3) - C_3 R/K] + 1 \quad (2)$$

$$D(S) = S^3 C_1 C_2 C_3 \hat{R}_1 R_2 R_3 + S^2 [C_2 C_3 R_2 R_3 + (C_2 + C_3) C_1 \hat{R}_1 R_2 + \frac{C_2 C_3 \hat{R}_1 R_3}{K+1}] + S [C_1 \hat{R}_1 + (C_2 + C_3) R_2 + \frac{(C_2 + C_3) \hat{R}_1 - KC_2 \hat{R}_1 R_3 / R_4}{K+1}] + 1 \quad (3)$$

$$R_{ab} = R_a + R_b, K = R_b / R_a, R = R_3 / R_4, \hat{R}_1 = R_1 // R_{ab}$$

以上の 傳達函數에서 素子値를 決定하기 위하여  $C_1 = 2 [F], C_2 = C_3 = 1 [F]$  로 할 경우  $N(S), D(S)$ 는 각각 다음과 같이 된다.

$$N(S) = S^2 R_2 R + S(2R_2 - R/K) + 1 \quad (4)$$

$$D(S) = 2S^3 \hat{R}_1 R_2 R_3 + S^2 (R_2 R_3 + 4\hat{R}_1 R_2 + \frac{\hat{R}_1 R_3}{K+1}) + S(2\hat{R}_1 + 2R_2 + \frac{2\hat{R}_1 - K\hat{R}_1 R_3 / R_4}{K+1}) + 1 \quad (5)$$

또한  $R_3 // R_4 = R$  이므로

$$R_3 = \frac{R}{x}, R_4 = \frac{R}{1-x} \text{ 이다.}$$

基本 傳達函數를 다음과 같이 나타내면

$$T(S) = \frac{S^2 / \omega^2 + 1}{a_1 S^3 + a_2 S^2 + a_3 S + 1} \quad (6)$$

式 (4)와 式 (6)의 分子에서

$$R_2 R = \frac{1}{\omega^2} \quad R = 2KR_2 \quad (7) (8)$$

이 얻어진다.

그리고  $R_2, K$ 를  $R, \omega^2$ 로 나타내고 式 (5)와 式 (6)의 分母를 똑같이 놓으면

$$\hat{R}_1 = \frac{a_1 \omega^2}{2} x \quad (9)$$

$$x = \frac{1}{a_1 \omega^2} \times \frac{a_3 - R + 0.25 R^2 \omega^2 (a_1 \omega^2 + 2a_3) - 2/R \omega^2}{4 + 1.5 R^2 \omega^2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\omega^2 x} \times \frac{2a_1 x}{R} + \frac{0.5 a_1 R \omega^2}{1 + 0.5 R^2 \omega^2} = a_2 \quad (11)$$

式(10), 式(11)로 부터  $x, R$ 을 구할 수 있다.

또 式(1), (6)에서

$$R_1 = \frac{K \hat{R}_1}{x (K+1)} \quad (12)$$

$$R_a = \frac{K \hat{R}_1}{(K+1) [K - (K+1)x]} \quad (13)$$

이 된다.

上記 計算式으로 부터 抵抗値를 구할 수 있으며  $C_2 = 15.9 nF$ 로 하면  $C_1 = 31.8 nF, C_3 = 15.9 nF$ 임을 알 수 있으므로 式(4~13)에서 抵抗値를 구하면 표 1과 같다.

따라서 傳達函數(式 1)의 周波數應答特性은 computer simulation에 의한 graphic plotting 한 結果(부록참조)그림 6(a)와 같은 3次Chebyshev 低域通過 濾波器의 周波數應答特性(理論値)을 얻었다.

한편 實驗을 위해서 各素子와 演算增幅器(IC 741)를 사용한 實驗回路(사진 1A)를 構成하여  $V_1$ 의 兩端間에 Audio generator를 連結하여 振幅이 一定한 正弦波周波數를 20 [Hz]로 부터 10 [kHz]까지 變化시켜가면서 入力電壓으로 가하고 出力側  $V_0$ 에 나타나는 波形的 振幅과의 比를 檢討한 結果 周波數應答特性은 그림 6(b)와 같이 나타났으며 理論値와 比較하면 거의 비슷하나 다만 實驗値의 周波數特性이 약간 넓어졌음을 알 수 있었다.

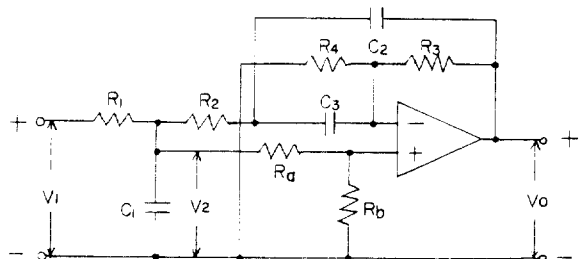


그림 1. 3次 低域通過能動濾波器

Fig. 1. 3rd order low-pass active filter

### 3. 3次SC低域通過能動濾波器的 실현

S CF의 設計는 能動RCF의 素子中에서 抵抗을 Analog switch와 Capacitor로 代替하여 等價回路로 設計할 수 있다.

抵抗의 SC 變換은 그림 2 (a)에서 2個의 MOS 스위치에 의하여 1과 2 端子間을 交代로 容量C에 接續시켜 電荷量傳達로 等價抵抗을 실현시키는 single - pole double - throw (SPDT) switch, 그림 2(b)와 같이 4個의 MOS 스위치에 의하여 等價抵抗을 실현하는 Double - pole double - throw (DPDT) Switch 方法<sup>1)</sup> 등이 있으나 本 論文에서는 S CF를

設計하기 위하여 G. C. Temes (1978) 등이 提案한 抵抗의 等價 SC 回路 [그림 2 (c)] 를 적용하였다.

그림 2 (c) 는 回路構成이 容易하고 能動 RCF 의 모든 抵抗을 等價SC 로 代替시키고자 하는 回路이며  $C_K$ 의 값은 다음과 같다.

$$C_K = \frac{1}{4 f_c R_K} \quad (14)$$

以上的 SC 回路를 利用하여 實現한 S CF 回路는 그림 3과 같이 式(14)에서 switching frequency ( $f_c$ )를 50 [kHz]로 定했을 때의 各 等價抵抗을 求하면 容量值  $C_K$ 는 表 1과 같다.

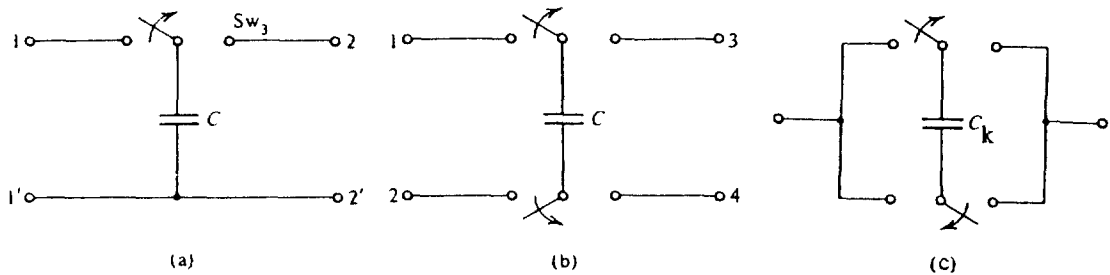


그림 2. 抵抗의 等價 SC 回路

Fig. 2. SC equivalent circuit of a resistor

표 1. 抵抗 ( $R_K$ )와 容量 ( $C_K$ )의 素子值

Table 1. values of  $R_K$  &  $C_K$

Resistors ( $R_K$ )		Capacitors ( $C_K$ )	
$R_1$	82.27 K $\Omega$	$C_{R1}$	60.77 pF
$R_2$	0.53 K $\Omega$	$C_{R2}$	9437 pF
$R_3$	52.56 K $\Omega$	$C_{R3}$	95.13 pF
$R_4$	34.88 K $\Omega$	$C_{R4}$	143.35 pF
$R_a$	2.856 K $\Omega$	$C_{Ra}$	1750.7 pF
$R_b$	56.47 K $\Omega$	$C_{Rb}$	88.54 pF

$C_1 = 31.8 \text{ nF}, \quad C_2 = C_3 = 15.9 \text{ nF}$

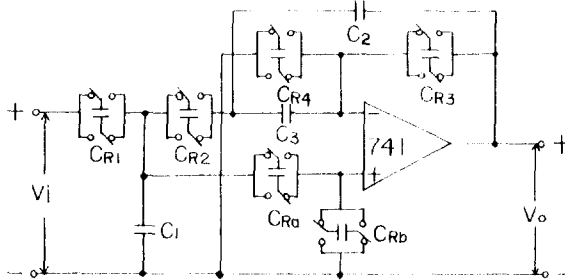


그림 3. 3次 Switched - capacitor 低域通過能動濾波器

Fig. 3. 3rd order switched - capacitor low-pass active filter

### 4. 實驗方法

3次能動 S CF의 實驗回路는 그림 5와 같이 Analog switching 用 IC (MC 14016) 6個와 演算增幅器 (IC 741) 1個 및 capacitor 9個를 使用하여 Breadboard 板에 組立하였다.

그림 5에 보인 S CF의 特性을 測定하기 위한 實

驗系統回路는 그림 4와 같이 實驗裝置는 사진 1과 같다.

S CF를 動作시키기 위하여 Analog switch (IC 14016)의 switching 動作周波數는 pulse 發生器 (사진 1 B)에서 200 [kHz]를 引出하여 sample and hold circuit (사진 1 C)의 sampling 用과 Logic circuit (사진 1 D)의 入力에 供給하였다.

그런데 SC 積分器를 構成하는 경우 switch와 接地 사이에 stray capacitor가 存在하여 出力端子에 影響이 미치므로<sup>1), 9)</sup> 이를 제거하기 위하여 analog

input signal 을 S/H 회로에서 sampling 하여 SCF 회로에 入力 하였으며, 制御周波數  $f_c$  는 入力信號 遮斷周波數에 比하여 적어도 10倍 ( $f_c > 10f_0$ ) 以上の信號를 사용하여야 하고<sup>10)</sup> 2個의 clock pulse 는 duty cycle 이 50%인 경우 overlap 이 없어야 理想的이나 약간의 overlap 이 될 경우 傳達信號에 歪曲이 발생 할 것이다.

그러므로 본 實驗에서는 50 [kHz] 矩形波의 12.5%의 duty cycle 이 전연없는 clock pulse (사진 2)를 만들어서 그림 5의 各 IC 14016의 6번 13번 단자에  $\phi$ , 5번 12번 단자에  $\bar{\phi}$ 를 入力시켜 switching 을 하도록 하였다.

SCF의 實驗은 以上の 回路의 繪合으로 構成한 實驗系統回路(그림 4)를 能動RCF의 實驗方法(2節 實驗參照)과 同一한 方法으로 遂行하였다.

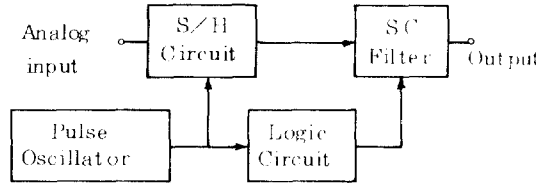


그림 4. 實驗系統圖

Fig. 4. Block diagram of experiment.

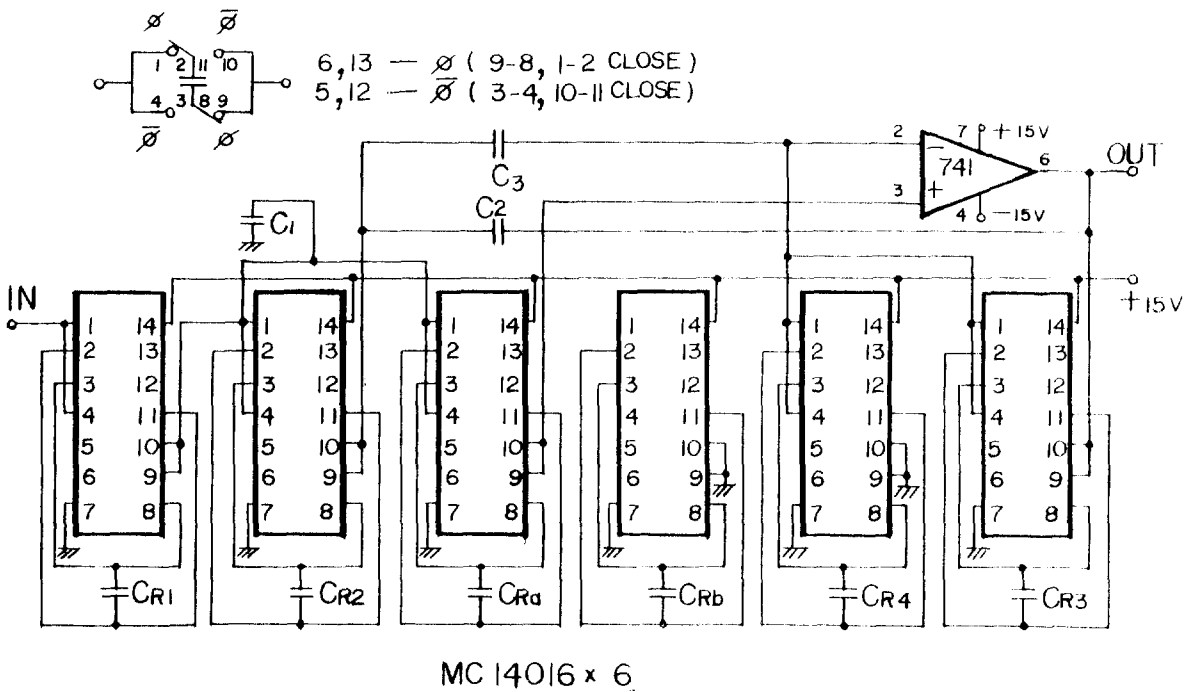


그림 5. 3次 SC LPF 實驗回路

Fig. 5. Experimental circuit of a 3rd order SC LPF

### 5. 實驗結果 및 考察

3次 RC LPF(그림 1)의 周波數應答曲線은 그림 6(a)의 RC LPF와 等價 SC LPF의 實驗結果는 各各 그림 6(b), 그림 6(c)와 같으며 S/H 회로의 入出力 波形은 사진 3에, SC LPF의 入出力 波形은 사진 4, 5와 같이 나타났다.

그림 6에서 SC LPF의 周波數振幅特性을 檢討하면 RC LPF와 SC LPF의 實驗値는 거의 一致하고 理論値에 接近하고 있어 減衰特性이 良好한 3

次 Chebyshev 能動低域通過濾波器 特性을 나타내고 있음을 확인하였다.

RC LPF와 SC LPF의 實驗値가 理論値에 各各 완전히 一致하지 않고 있는 原因中 가장 큰 것은 實驗回路의 素子를 抵抗과 容量을 許容偏差 ±5%인 것을 사용하였고 또한 IC素子로 結合構成 되어 phase delay 등의 영향 때문이라 생각된다.

앞으로 素子를 定格値에 精確하게 實驗을 實施하거나 SCF全體를 MOS IC化 한다면 보다 좋은 特性이 求해질 것으로 期待된다.

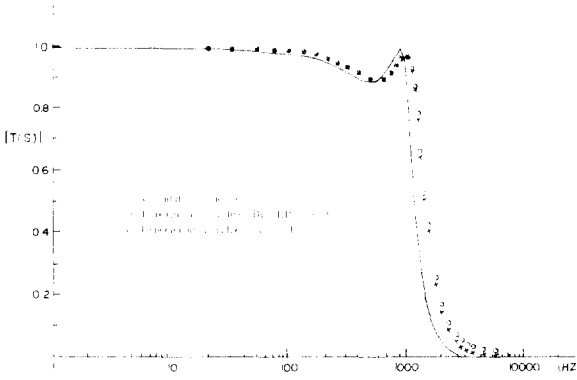
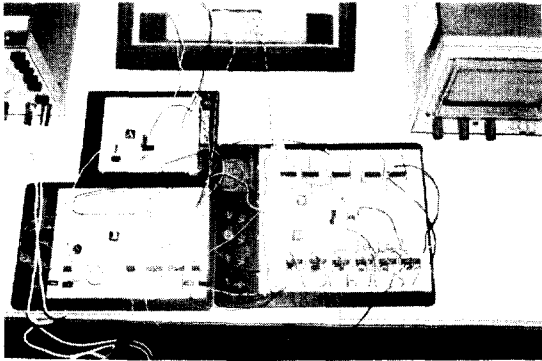


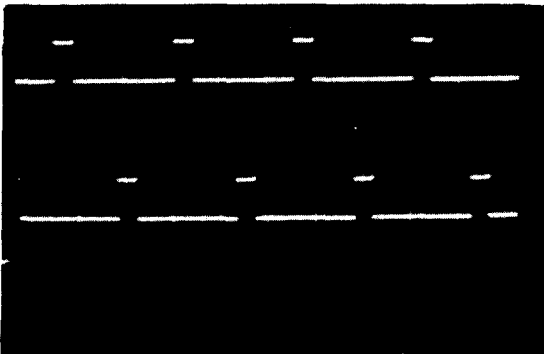
그림 6. RC LPF와 SC LPF 周波数応答測定値의 比較

Fig. 6. Comparison of the measured values for the RC LPF & SC LPF



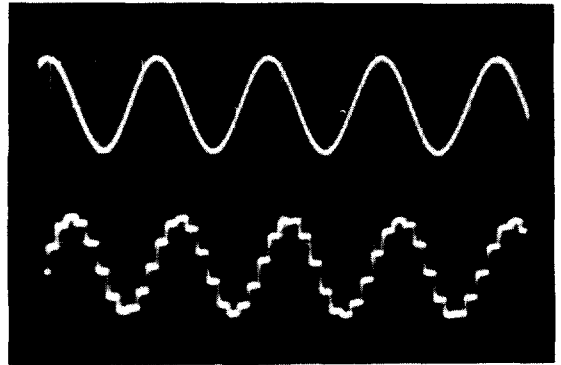
사 진 1. 全實驗裝置

Photo. 1. photograph of the whole experimental set (A:RC LPF, B:pulse osc., C:S/H, D:logic circuit, E: SC LPF)



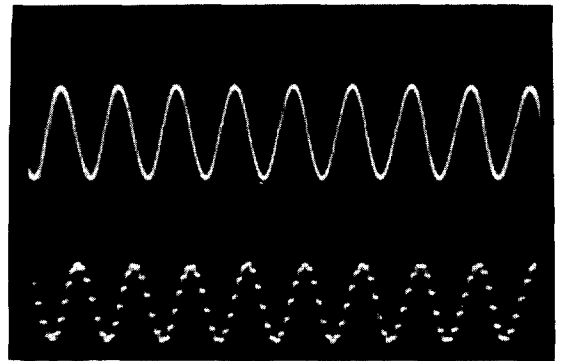
사 진 2. SC 스위치용 클럭펄스

Photo. 2. Clockpulse(50 kHz, top:  $\phi$  & bottom:  $\bar{\phi}$ ) for SC switching, 0.5v/Div, 10  $\mu$ s



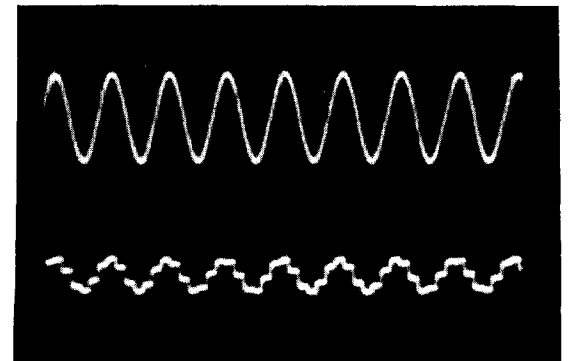
사 진 3. 샘플홀드 입출력 파형 ( 900Hz )

Photo. 3. 3. input (top) & output (bottom) of S/H, 900 Hz, 0.5mv/Div, 0.5ms



사 진 4. 스위치드-캐패시터 저역통과필터의 입출력파형 ( 780Hz )

Photo. 4. 4. analog input (bottom) of SC LPF. 780Hz, 20mv/Div, 1ms



사 진 5. 스위치드-캐패시터 저역통과 필터의 입출력파형 ( 1560Hz )

Photo. 5. analog input (top) & output (bottom) of SC LPF. 1560 Hz, 20mv/Div, 0.5ms

## 6. 結 論

單一增幅器의 3次 RC LPF의 回路를 提案하고 SC回路를 適用하여 等價 3次 SC LPF를 實現하여 RC LPF特性和 比較考察하였다.

實驗을 通해서 檢討한 結果는 다음과 같다.

- 1) RC LPF가 等價 SC LPF로 實現可能함을 確認하였다.
- 2) RC LPF와 等價 SC LPF의 入出力周波數 應答特性은 實驗結果 거의 一致하고 있다.
- 3) SC LPF全體를 MOS IC化 한다면 더욱 좋은 特性이 얻어질 것으로 기대된다. SC의 特性때문에 RC LPF보다 制御回路가 더 必要하지만 LSI化 한다면 별 問題는 없을 것으로 생각된다.

### 參考文獻

- 1) Bedrich J. Hosticka, Robert w. Brodersen, and paul R. Gray; "Mos Sampled data recursive filters using switched capacitor integrators," IEEE J. solid state circuits, Vol. SC-12, pp. 600-608, 1977.
- 2) Gaborc C. Temes, H. J. Orchard, and Masoo D. Jahanbegloo; "Switched-capacitor filter design using the bilinear Z-Transform," IEEE Trans. on circuits and systems, Vol. CAS-25, No. 12, pp. 1039-1043, 1978.
- 3) David J. Allstot, Robert w. Brodersen, and

- paul R. Gray; "Mos Switched capacitor ladder filters," IEEE J. solid state circuits, Vol. SC-13, No. 6, pp. 259-266, 1978.
- 4) William C. Black, Jr., David J. Allstot, and Ray A. Reed; "A High performance low power CMOS channel filter," IEEE Journal of solid state circuits, Vol. SC-15 No. 6, pp. 929-936, 1980.
- 5) Kenmartin; "Improved circuits for the realization of switched capacitor filters," IEEE Transactions on circuits and system, Vol. CAS-27, No. 4, pp. 237-244, 1980.
- 6) Paul E. Fleischer; "Sensitivity Minimization in a single amplifier biquad circuit," IEEE Trans. on circuits and systems, Vol. CAS-23, No. 1, pp. 45-55, 1976.
- 7) Joseph J. Friend, Cliff A. Harris and Dan Hilberman; "Star an active biquadratic filter section," IEEE Trans. circuits and syst. Vol. CAS-22(2), pp. 115-121, 1975.
- 8) 金炯甲; "回路網合成論과 필터設計," 大韓電氣協會, pp. 293. 1983.
- 9) Robert w. Brodersen, paul R. Gray and David A. Hodges; "Mos Switched-Capacitor Filters," proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 1, pp. 212-226, 1979.
- 10) M. E. Van vakenburg, B. K. kinariwala; "Linear circuits," prentice-hall, INC. pp. 404-417. 1982.

### Appendix

FILTR T=00004 IS ON CR00017 USING 00009 BLKS R=0000

```

0001 FTH4X,L
0002 PROGRAM FILTR
0003 REAL K,TABS(0:200),TDB(0:200)
0004 COMPLEX NUM,DEN,S,T
0005 DATA C1,C2,C3/31.8E-9, 15.9E-9, 15.9E-9/
0006 DATA R1,R2,R3,R4/ 82.27E3, 0.53E3, 52.56E3, 34.88E3/
0007 DATA RA,RB/ 2.856E3, 56.47E3/
0008 C
0009 WRITE(1,222)
0010 222 FORMAT(1X,"IF NTYPE IS 1, THEN TABS IS PLOTTED.",/,
0011 # 1X,"IF NTYPE IS 2, THEN TDB IS PLOTTED.",/,
0012 # 1X,"WHAT IS YOUR NTYPE NUMBER? NTYPE = _")
0013 READ(1,*) NTYPE
0014 WRITE(1,333)
0015 333 FORMAT(1X,"THE LU NUMBER OF GRAPHIC DISPLAY IS 59",/,
0016 # 1X,"THE LU NUMBER OF PLOTTER IS 60",/
    
```

```

0017      #          IX,"WHAT IS THE LU NUMBER ? (LU = _)"
0018      READ(1,+) LU
0019  C
0020      PI=4.0*ATAN(1.0)
0021      RAB=RA+RB
0022      K=RB/RA
0023      R=R3*R4/(R3+R4)
0024      RR1=R1*(RA+RB)/(R1+RA+RB)
0025      WRITE(6,444)
0026  444  FORMAT(7X,"NUMBER",5X,"FREQUENCY",4X,"AMPLITUDE",
0027      #          4X,"AMPLITUDE(DB)",/)
0028  C
0029      DO 1000 I=0,200
0030      F=10.0**((I/40.0)
0031      SS=2.0*PI*F
0032      S=CHPLX(0.0,SS)
0033      NUM=S**2*C2*C3*R2+R+S*(R2+(C2+C3)-C3*R/K)+I
0034      DEN=S**3+C1*C2*C3*RR1*R2*R3+S**2*(C2+C3*R2*R3+(C2+C3)*C1+RR1*R2
0035      #          +C2+C3*RR1*R3/(K+1))+9*(C1*RR1+(C2+C3)*R2
0036      #          +((C2+C3)*RR1-K*C2*RR1*R3/R4)/(K+1))+1
0037      T=RB*(R3+R4)/(R4+(RAB+R1))+NUM/DEN
0038      TABS(I)=SQRT(REAL(T)**2+AIMAG(T)**2)
0039      TDB(I)=20.0*ALOG10(TABS(I))
0040      WRITE(6,111) I,F,TABS(I),TDB(I)
0041  111  FORMAT(5X,I6,F15.2,2E15.6)
0042  1000 CONTINUE
0043      IF(NTYPE .EQ. 1) CALL PLOT(TABS,NTYPE,LU)
0044      IF(NTYPE .EQ. 2) CALL PLOT(TDB,NTYPE,LU)
0045      STOP
0046      END
0047  C
0048      SUBROUTINE PLOT(F,NTYPE,LU)
0049      DIMENSION F(0:200)
0050      CALL ZBEGN
0051      CALL ZDINT(LU,1,IER)
0052      IF(IER .NE. 0) GOTO 9999
0053      CALL ZWIND(-200.0, 200.0,-400.0, 400.0)
0054      X0=-100.0      $ Y0=-100.0
0055      X1=-100.0      $ Y1= 100.0
0056      X2=-100.0      $ Y2= 110.0
0057      X3= 110.0      $ Y3=-100.0
0058      CALL ZMOVE(X2,Y2)
0059      CALL ZDRAW(X0,Y0)
0060      CALL ZDRAW(X3,Y3)
0061      DO 1000 I=10,0,-1
0062      X=(X3-X0)/11.0*I+X0
0063      CALL ZMOVE(X,Y0)
0064  1000 CALL ZMARK(2)
0065      DO 2000 I=1,10
0066      Y=(Y1-Y0)/10.0*I+Y0
0067      CALL ZMOVE(X0,Y)
0068  2000 CALL ZMARK(2)
0069      CALL ZMOVE(X1,Y1)
0070      DO 3000 I=0,200
0071      X=I-100.0
0072      IF(NTYPE .EQ. 1) Y=(F(I)-0.5)*200.0
0073      IF(NTYPE .EQ. 2) Y=(F(I)+50.0)*2.0
0074      CALL ZDRAW(X,Y)
0075  3000 CONTINUE
0076      CALL ZDEND
0077      CALL ZEND
0078      RETURN
0079  9999 WRITE(1,111) IER
0080  111  FORMAT(5X," ERROR IS ENCOUNTED !!!      ERROR NUMBER IS ",I5)

```

```
0081 CALL ZEND  
0082 RETURN  
0083 END
```

