

# 스위치드 커패시터 필터

## Switched Capacitor Filter

朴 敏 植

全北大學校 大學院 電氣工學科

本稿는 1983年初에 實施된 本協會 國內獎學生으로 選拔되어 現在 全北大學校 大學院 電氣工學科에 在學中인 朴敏植氏의 論文이다. 同 論文은 同校 金東龍 教授의 指導아래 이루어진 것으로서 金教授亦是 本協會 獎學金으로 캐나다 미네소타州立大學에서 2年余 修學한바 있는데 濾波回路理論은 同教授가 I. E. E. E 國際學術發表會에서 發表한 것으로서 本誌 82年 4, 5月號에 「濾波回路 理論과 設計」를 掲載 한바 있다. (註 編輯者)

### 1. 序 言

오늘날 濾波回路理論은 眞正한 意味의 回路理論으로 말해도 無妨할 程度로 비약적인 發展을 거듭해 왔다. 濾波回路란 入力信號를 特別히 定해진 出力信號로 變化시키는 裝置를 말한다.

電氣·電子 濾波回路에 사용되는 Elements는 Resistors, Capacitors, Inductors 그리고 電子部品인 Operational Amplifiers 등이 사용되며 特定한 濾波回路에는 Mechanical, Crystal과 Switching Device 까지 使用해서 設計된다.

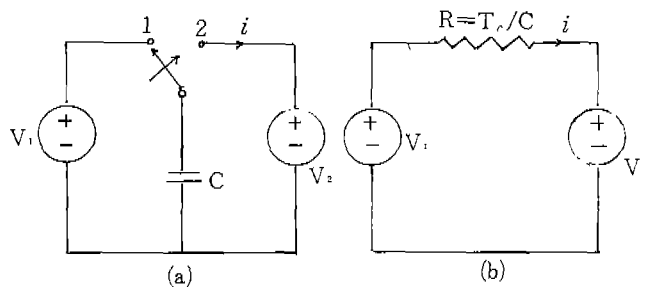
1970年代 후반과 1980年代에 접어들면서 Resistor 素子도 그 容量이 너무 多樣해지고, IC(Integrated Circuit)로 된 抵抗R과 커패시터C의 値를 正確하게 維持하기가 어렵고, 抵抗은 커패시터보다 칩(Chip)面積을 一般의으로 더 차지하며, 過度變化에 敏感하기 때문에 全集積化(Full integration)를 爲해서 抵抗을 다른 素子로 代置하면 바람직하게 됨을 알게 되었다. 그래서 LSI(Large Scale Integration) Technology에 不便을 招來하는 이것을 使用하지 않고 Switched-Capacitor와 Operational Amplifier를 利用한 MOS(Metal-Oxide Semiconductor) Switched Capacitor Filter가 登場하게 되었다.

### II. 스위치드 커패시터의 基本理論

스위치드 커패시터의 基本理論 몇 가지를 살펴보기 前에 Resistance Simulation이란 무엇인가를 알아보자.

Resistance Simulation이란 스위치와 커패시터가 結合하여 基本素子가 되어 抵抗처럼 動作하는 것을 말한다.

그림 1에서는 스위치가 初期에는 位置 1에 있어 커패시터C가 電壓 $V_1$ 으로 充電되었다고 할 때 스위치가 位置 2로 넘어가게 되면 커패시터C는  $V_2$ 로 充電되기 爲하여 電荷를 더 받아들이거나 放電되기도 하는데 이때 電壓源 $V_2$ 로 되기위해서 C가 放電 또



(그림-1) Resistance Simulation

는 충전하는 일은  $C(V_1 - V_2)$ 로서 周期를  $T$ 秒라하면 電壓源  $V_2$ 로 흘러들어가는 電流는

$$i = \frac{C \Delta V}{\Delta T} = \frac{C(V_1 - V_2)}{Tc - 0} = \frac{C(V_1 - V_2)}{Tc} \quad (1)$$

이 된다.

그리하여 그림 1 (b)에서와 같이 抵抗  $Tc/C[\Omega]$ 이  $V_1$ 과  $V_2$  사이에 걸려있는 것과 흡사하며 이러한 狀態下的 커패시터를 스위치드 커패시터라 부른다. 스위치드 커패시터의 한 가지 有利한 點은 能動RC 回路의 RC積이 커패시턴스에 比例한다는 것이다.

式(1)에서의  $R = Tc/C$ 를 利用하면

$$RC = Tc/Cc \cdot C = Tc \frac{C}{Cc} = \frac{1}{fc} \frac{C}{Cc} \quad (2)$$

$fc$ 는  $1/Tc$ 로서 스위칭 率이다.

能動RC回路에 있어 時定數RC를 正確하게 維持하는 것은 特別 IC로 할 때는 어렵지만 MOS 技術을 利用하여 커패시터比를 正確하게 하는 것은 容易이다.

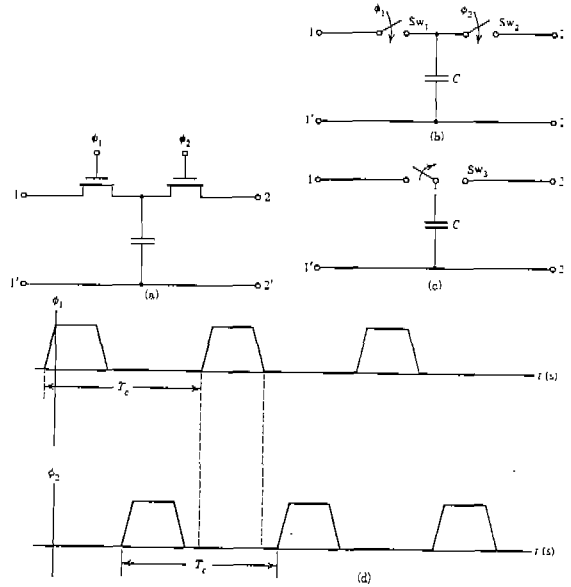
### 1. MOS 스위치드 커패시터

스위치드 커패시터를 實現하는 方法을 그림 2에 보였는데 이는 두개의 MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)가 스위칭 作用을 하며 2位相非重疊클럭 (Two-Phase Nonoverlapping Clock)  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는 클럭 周波數  $f_c$ 로서 MOSFET에 걸려 있다.  $\phi_1$ 의 電壓이 높을 때는  $C$ 가  $V_1$ 에 連結되고  $\phi_2$ 가 높을 때는  $C$ 가  $V_2$ 에 連結된다.  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 가 모두 낮을 때  $C$ 는 아무 곳에도 연결이 안된 狀態이다.

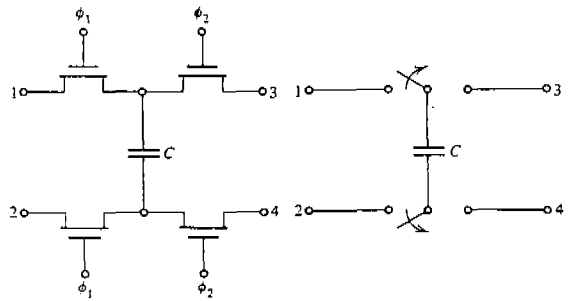
그림 2 (b)를 SPST (Single-pole Single Throw) 스위치라 하며 스위치  $Sw_1$ 은 클럭  $\phi_1$ 에 의해서  $Sw_2$ 는 클럭  $\phi_2$ 에 의해서 驅動된다. 그래서  $Sw_1$ 이 열리면  $Sw_2$ 는 닫히게 되며 그 逆도 成立한다.

다음은 溫度에 對해 커패시터比가 거의 不變한 MOS스위치 4개를 써서 만든 回路이다. 그러므로 MOS技術을 쓰면 MOS 커패시터는 抵抗에 비해 그 特性이 安定的이기 때문에 從前의 能動RC回路를 完全集積할 수 있음을 알 수 있다.

2位相非重疊 클럭  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ 가 그림 3과 같이 연결될 때 DPDT (Double-Pole Double Throw) 역할을 한다.



〈그림- 2〉 MOSFET를 써서 스위치드 커패시터를 實現하는 方法



〈그림- 3〉 MOS 스위치 4개를 사용한 回路

### 2. 스위치드 커패시터 증폭기 (amplifier)

反轉增幅器 (Inverting amplifier)를 考察해 보면 그림 4와 같이된 抗素子가 2개 있다. 이를 스위치드 커패시터 증폭기로 實現하기 爲해서는 抵抗대신 2개의 스위치와 2개의 커패시터를 必要로 한다.

反轉增幅器에 키르히호프法則을 適用하면

$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} = 0$$

인 式을 얻게되며 이를 定理하면

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

인 傳達函數를 얻게 된다.

抵抗  $R_1$ ,  $R_2$ 대신에 式(2)에서 알 수 있는 커패시터 等價値

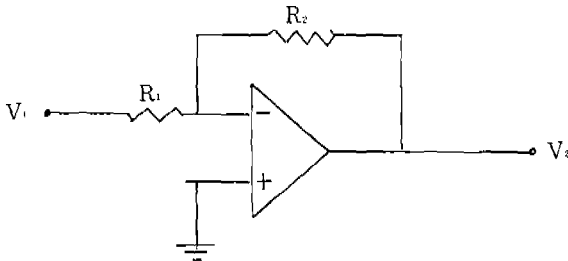
$$R_1 = \frac{1}{f_c} \frac{1}{C_1}$$

$$R_2 = \frac{1}{f_c} \frac{1}{C_2}$$

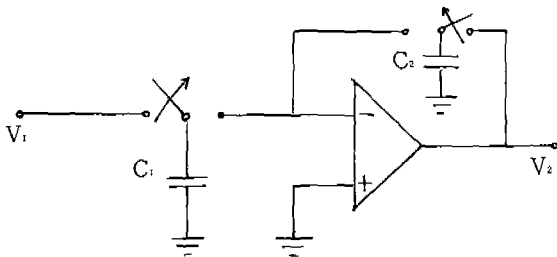
를 식(3)에 각각을代入하면

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{C_1}{C_2}$$

를 얻어서 그림 4 (b)의 스위치드 커패시터 증폭기의 전달函數가 된다.



(a) 反轉增幅器



(b) 스위치드 커패시터 증폭기  
(그림-4)

### 3. 스위치드 커패시터 積分器 (Integrator)

먼저 그림 5 (a) 積分器의 전달函數를 求하기 爲하여 積分器에 키르히호프法則을 適用하면

$$\frac{V_1}{R_1} + SC_2 V_2 = 0$$

인 式을 얻는데 이를 풀어서 整理하면

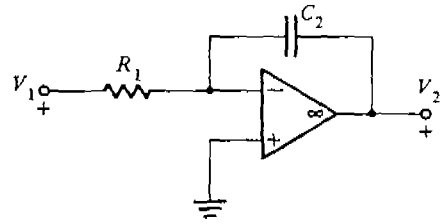
$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{1}{R_1 C_2 S}$$

抵抗R1을 스위치드 커패시터 等價値로 式(4)에代入하면

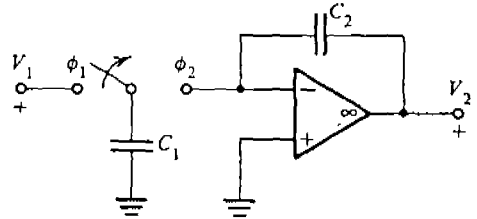
$$\frac{V_2}{V_1} = -f_c \left(\frac{C_1}{C_2}\right) \frac{1}{S}$$

를 얻어 그림 5 (b)의 전달函數가 된다.

### 4. 스위치드 커패시터 差電壓積分器 (Differential Integrator)



(a) 反轉積分器



(b) 等價스위치드 커패시터 回路

(그림-5)

이는 두 個의 Op-amp를 使用하여 V1과 V2의 差를 積分해 주는 回路이다.

그림 6 (b)도 (a)와 같은 作用을 한다.

差電壓積分器에 앞서와 같은 方法을 適用하면

$$V_2 = \frac{1}{R_1 C_2} \frac{1}{S} (V_1 - V_0) \quad (5)$$

인 式을 얻게 된다.

式(5)의 抵抗R1을 스위치드 커패시터의 等價値로 代置하면

$$V_2 = f_c \left(\frac{C_1}{C_2}\right) \frac{1}{S} (V_1 - V_0)$$

### 5. 스위치드 커패시터 有損失積分器 (Lossy Integrator)

有損失積分器에서 抵抗R1과 R2가 스위치드 커패시터로 代置되어 있다. 스위치의 位相이 확실표로 表示되었고 스위치의 하나는 入力端에 또 하나는 出力端에 連結되어 있는데 다음瞬間에는 두 個의 스위치가 Op-amp의 負入力端에 連結된다.

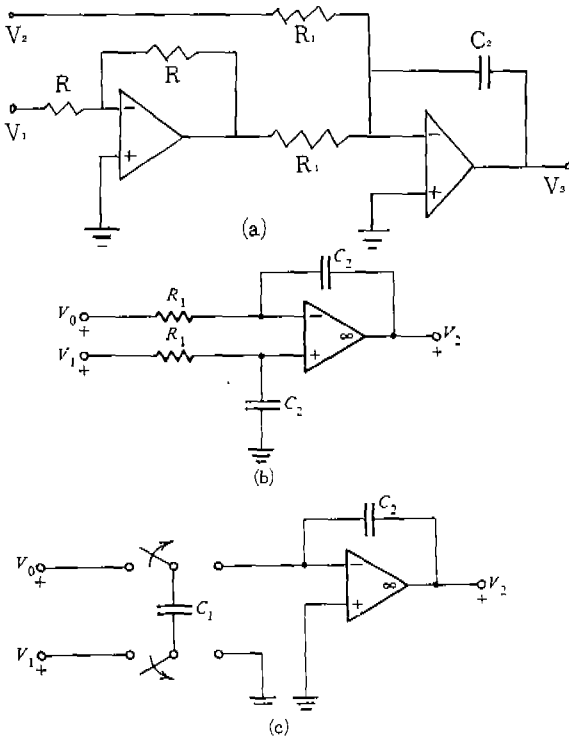
有損失積分器에 앞서와 같은 方法을 適用하면

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-1/R_1 C_2}{S + 1/R_2 C_2} \quad (6)$$

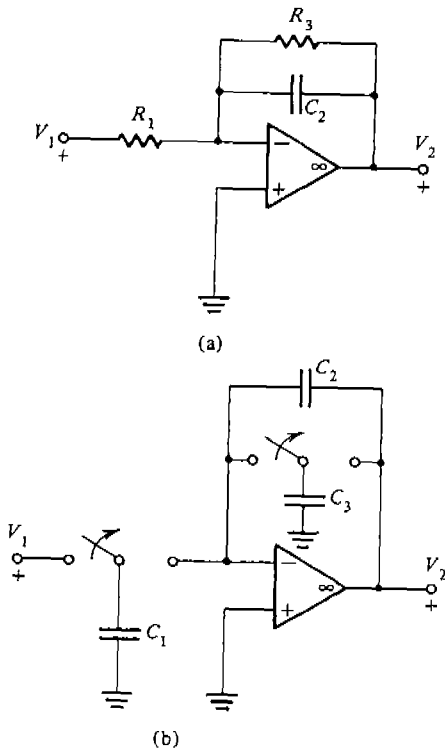
인 傳達函數를 얻게 된다. 式(6)의 抵抗을 스위치드 커패시터의 等價値로 代置하면

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-f_c (C_1/C_2)}{S + f_c (C_1/C_2)}$$

가 된다.



(그림-6) 差電壓積分器(a) (b)와 等價스위치드 커패시터 회로



(그림-7) 有損失積分器(a)와 그의 等價회로(b)

## 6. 簡單한 스위치드 커패시터필터

高次函數의 縱續連結 合成時에 部分回路로 쓰이는 1次 低域通過回路를 살펴보자

그림 8 (a)에 키르히호프法則을 適用하면

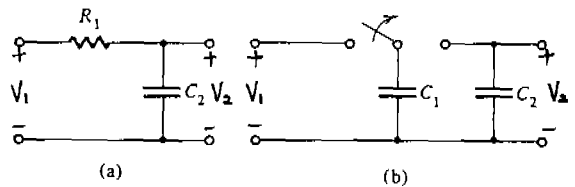
$$i = \frac{V_1}{R + 1/SC_2}$$

$$V_2 = i \times \frac{1}{SC_1} = \frac{V_1}{1 + SC_2 R}$$

즉 傳達函數는

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1/R_1 C_2}{S + \frac{1}{R_1 C_1}} \quad (7)$$

이 된다.



(그림-8) 1次 低域通過回路(a)와 그의 等價회로(b)

式(7)에 抵抗R1에 해당하는 스위치드 커패시터의 等價値

$$R_1 = \frac{1}{f_c C_1}$$

을 代入하면

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{f_c (C_1 / C_2)}{S + f_c (C_1 / C_2)}$$

인 스위치드 커패시터 1次 低域通過回路의 傳達函數가 된다.

式(8)로부터 半電力周波數(half-power frequency)는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$Wh_p = f_c \left( \frac{C_1}{C_2} \right)$$

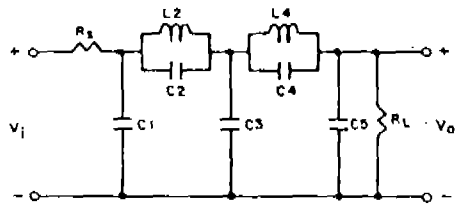
즉, 半電力周波數는 클럭周波數 $f_c$ 나 커패시터스비  $C_1/C_2$ 로 調整할 수 있다.

## 7. 設計例

그림 9에서 보여준 5次 低域通過필터를 例로 들어보자.

素子値는 아래의 명세조건(Specification)과 같다.

Passband Edge	: 3.235kHz
Passband Max. Reflection Coefficient	: 12%
Loss Pole Frequencies	: 4.502,
	6.567 kHz

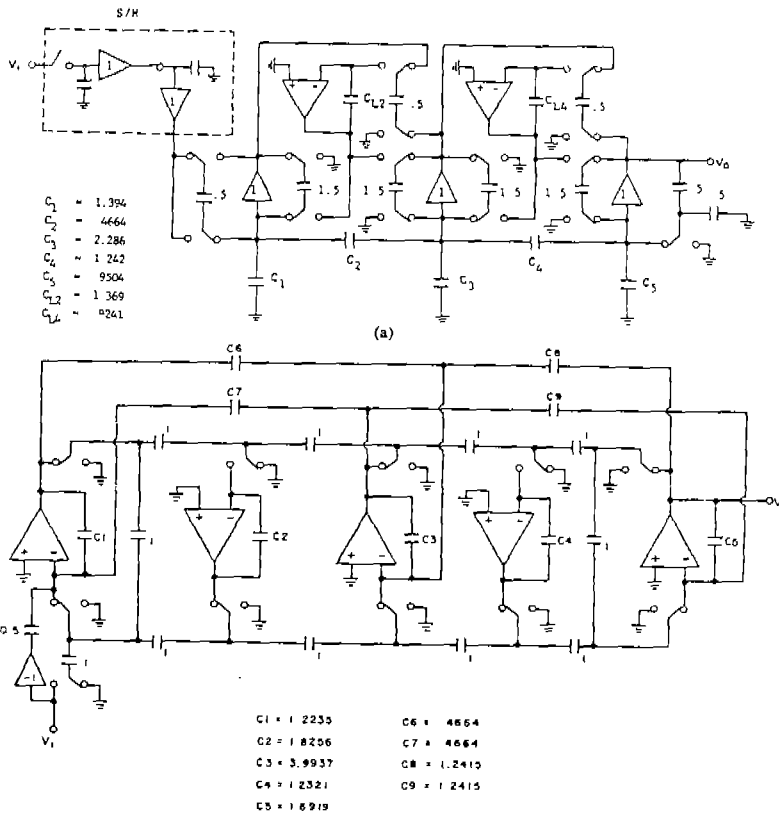


〈그림-9〉 5次 저역통과 Reference 필터

스위치드 커패시터필터의 設計는 32kHz 클럭周波數에 근거를 둔다.

인덕터는 인덕터와 並列인 커패시터를 가지기 때문에 Compensation은 回路形態 뿐만 아니라 素子 値도 變化시킨다.

Impedance Simulation方法과 Leap-frog Integrator方法에 對한 Resulting 스위치드 커패시터回路는



〈그림-10〉 (a) Impedance Simulation方法에 의한 그림9의 스위치드 커패시터 Realization

(b) Leap-frog Integrator方法에 의한 그림10의 스위치드 커패시터 Realization

각각 그림10(a)와 (b)에 보였다.

Leap-frog Realization에 對해 Source Integrator의 3개의 Input스위치드커패시터중 2개는 Source Resistor에 대응하기 때문에 Bilinear Integrator가 되도록 수정한다. 반면에 세번째 스위치드 커패시터는 이것이 인덕트에 대응하기 때문에 LDI (Lossless DiscreteIntgerator) Integrator로서 남는다. 유사한 Argument는 Load Integrator에도 適用된다.

### III. 結 言

스위치드 커패시터는 IC Technology에 있어 매우 重要的 回路素子이며 커패시터와 스위치가 抵抗素子의 役割을 代行할 수 있게 됨에 따라 MOS技術을 利用하여 從前의 能動RC回路를 完全集積할 수 있게 되었다.

요즘은 能動필터를 한 칩(Chip)에 만들 뿐 아니라 既往에 集積化된 디지털 필터와 더불어 兩立(Compatible)할 수 있게 되어가고 있다. 이 분야가 전자 산업분야에 시급히 응용되어 국내 산업발전에 보탬이 되었으면 한다.