

## 입력 신호범위가 넓은 아날로그 다중필터의 설계

최배근, 이광, 류승탁, 조규형  
한국과학기술원 / 회로 및 시스템 응용연구실

### Design of Wide Input Range Multiple Filter-Banks for Analog Cochlear Chip

B.K.Choi, K.Lee, S.T.Ryu, and G.H.Cho  
Circuits & System Application Lab. KAIST

**Abstract** - 청각시스템의 저전력 및 가격의 저렴화를 위해 달팽이관의 BM(Basilar Membrane)모델을 아날로그 VLSI 마이크로 파워 공정으로 구현하고 있다. 본 논문에서는 소리의 주파수 정보 추출기능을 하는 직렬 연결된 트리구조(TSFB:Tree-structured Cascaded Bandpass Filter)의 16채널의 아날로그 중간대역통과 필터회로를 CMOS VLSI 공정을 이용하여 설계하였다. 특히 큰 입력 신호에 대해서도 과형왜곡 없이 선형적인 특성을 가지는 트랜스 컨터터를 이용하여 필터를 구현하였다. 필터는 저대역통과필터와 출력이들의 감쇄를 줄이기 위해서 중간대역통과필터를 이용하여 전체 시스템을 설계했다. 본 논문에서 기존의 150mVp-p 입력신호 범위의 트랜스 컨터터를 Substrate 입력을 가지는 트랜스 컨터터를 이용하여 입력신호 범위를 1Vp-p 까지 늘렸다.

### 1. 서 론

귀를 통해 인식되기까지 소리는 여러 가지 형태로 변형이 된다. 음파는 외이(外耳)에서 모아지고 중이(中耳)의 고막에 붙어있는 작은 뼈에 의해 기계적인 진동으로 바뀌게되고, 내이(內耳)서는 액체로 채워진 달팽이관(cochlear)에 의해 기계적진동이 유체의 진동으로 다시 변형된다. 유체 진동압력을 달팽이관 내에 있는 평판모양의 막(BM:Basilar Membrane)의 변위를 유발하게 된다. 이러한 변위는 음파의 주파수에 대한 정보를 가지고 있다. 막의 변위에 따라 막에 붙어있는 수 천개의 머리 다발모양의 작은 셀(hair cells)들이 구부러지게 되고, 이 구부러짐은 신경세포를 자극하게 되어 중추 신경계와 연동 되고 뇌로 음성신호 정보를 전달하게 된다. 소리가 인식되기까지는 신호의 주파수 정보 추출과 추출된 주파수 정보로 음성을 인식하는 두 가지 과정으로 크게 분류 할 수 있다. 따라서, 음성인식에 있어서 주파수 정보의 추출은 아주 중요하다. 액체로 채워진 달팽이관의 주요 구성체인 BM(Basilar Membrane)에 의해 소리의 주파수 정보가 추출된다. 중심 주파수가 각기 다른 대역통과필터의 특성을 가지는 수 천개의 셀에 의해 소리의 주파수 정보가 추출된다. 이러한 시스템의 구현에서 수천 개의 셀을 모두 구현하지 않고 수십 ~ 수백 개의 채널로 모델링 하여 구현하고 있으며, 각 채널의 중심주파수가 지수함수적으로 분포하고 있는 대역 통과 필터로 모델링 된다.

약반전(Weak Inversion) CMOS 공정으로 구현된 아날로그 회로는 전력소모가 적고 일반적인 CMOS 공정을 사용할 수 있다는 장점이 있다. 보청기 또는 아날로그 청각칩 구현을 위한 아날로그 선형 필터는 약반전 CMOS로 설계 할 수 있는 분야 중의 하나이다. 왜냐하면 상기의 아날로그 필터는 그 동작 주파수가 가정 주파수 영역인 수kHz내 이므로 속도가 느린 약반전 CMOS로도 구현되며, 약반전 CMOS의 전류는 게이트 전압에 지수함수 적으로 변하는 특성(식1)을 가지고 있기 때문이다. 게이트 전압과 전류 사의 관계가 지수함수적이므

로 각 채널의 필터 중심주파수를 주파수 영역에서 지수 함수적으로 분포시키기 위해서는 Gm-C필터에서 제어전압을 선형적으로 인가하면 된다.(식2)

$$I_D = I_{D0} \cdot \frac{W}{L} \cdot \exp\left(\frac{qV_G}{nkT}\right) \left[ \exp\left(\frac{-qV_s}{kT}\right) - \exp\left(\frac{-qV_D}{kT}\right) \right] \\ \approx I_{D0} \cdot \frac{W}{L} \cdot \exp\left(\frac{qV_{GS}}{nkT}\right) \quad \leftarrow \frac{qV_D}{kT} \gg 1 \& V_s = 0 \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{gm}{C} \propto I_D \propto \exp\left(\frac{gV_{GS}}{nV_T}\right) \leftarrow V_{Const} = V_{GS} \quad (2)$$

### 2. 본 론

#### 2.1 다중필터 회로의 구조

본 논문에서는 달팽이관의 주요 구성체인 BM을 16 채널의 대역 통과필터로 구현한다. R.M. Kil[2]에 의해 제안된 지연시간이 동일하고 효과적으로 대역통과 특성을 얻을 수 있는 TSFB(Tree Structure Filter Bank)의 구조를 약반전 CMOS로 회로를 설계하였다.

그림1은 16채널 TSFB의 구조로 직렬 연결된 지역 필터와 고역필터로 구성되어 있다. 각 채널의 출력은 적어도 한번 이상의 저역과 고역필터를 통과하면서 대역통과필터 특성을 갖게 된다. 채널간의 지연시간이 동일할 뿐만 아니라 각 채널의 고역 및 저역 모두 급준한 감쇄 특성을 가지게 되어 고역부분에서만 급준하게 감쇄하는 우수한 대역통과특성을 갖는다.

#### 2.2 입력범위가 넓은 트랜스 컨터터의 설계

그림2는 Substrate 입력을 가지는 트랜스 컨터터의 회로도를 그린 그림이다. 보통의 트랜스 컨터터의 구조에서는 트랜지스터의 게이트로 입력신호가 들어가게 되는데 그때의 입력선형범위는 대개 아주 낮게 된다. 왜냐하면 약반전 CMOS의 경우 바이어스 전류가 거의 수에

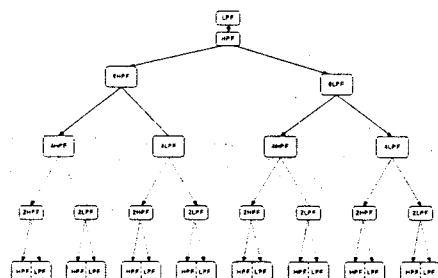


그림1. BM 모델의 TSFB 구조

서 수십 나노 암페어가 흐르기 때문에 입력선형 범위가 강반전 CMOS에 비해서 아주 낮다. 보통 100mVp-p 내외의 선형범위를 가지게 된다. 하지만 청각시스템의 신호는 노이즈의 영향을 줄이기 위해서 입력신호 크기가 크면 클수록 좋다고 할 수가 있다. 그래서 보다 넓은 입력 신호 범위를 가지는 트랜스 컨터터의 설계가 필수적이라고 할 수가 있다. 그래서 Substrate에 입력신호를 가하는 구조의 트랜스 컨터트를 설계하였다. 그리고 보다 조금 더 넓은 입력범위를 갖게 하기위해서 소스 degeneration 기법과 게이트 degeneration 기법을 응용하였다.

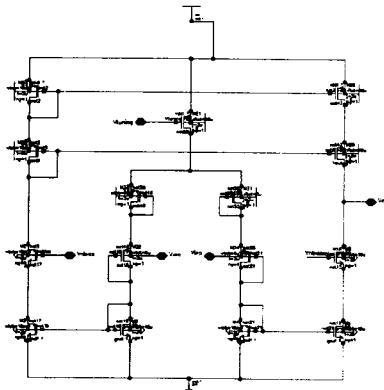


그림2. Substrate 입력 트랜스 컨터터

그림3은 Substrate 입력의 트랜스 컨터터의 V-I 특성을 모의 실험하여 얻은 결과이다. 입력범위가 약 1Vp-p 이상임을 확인할 수가 있다.

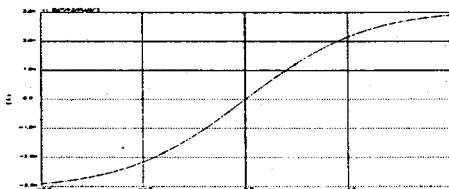


그림3. Substrate 입력 트랜스 컨터터 V-I 특성

### 2.3 TSFB의 저대역/고대역 통과필터의 설계

그림1의 TSBF는 저역필터와 고역필터로 구성되어 있다. 각 필터 블록은 앞서 언급한 바와 같이 약반전 CMOS Gm-C 필터로 설계하였다. 여기서 사용되는 모든 저역(고역)필터는 동일한 구조로 설계되었다.

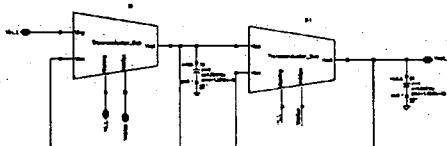


그림4. 2차 저대역 Gm-C 필터

그림4는 Gm-C 적분기로 구성된 2차 저대역 통과필터를 보여주고 있으며 전달특성은 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{1}{(s/\omega_o)^2 + (2/\omega_o)s + 1}$$

$$\text{where, } \omega_o = \frac{g_m}{c}, Q = 0.5 \quad (3)$$

직렬 연결된 시스템에서 각 불력의 동작점 및 작은 옵셋이 있을 경우 다음단에 계속 영향을 주게 되므로 중간의 한단만 오류가 발생하게 되면 뒷단은 동작되지 않을 수가 있다. 이런점을 감안해서 필터를 설계하여야 하고 DC 이득 또한 손실이 없는 1을 가지게 함으로서 16단 직역연결에서의 이득 손실을 방지할 수가 있다.

고대역 통과필터는 기생 캐패시터에 의해서 발생하는 이득 손실이 있게 된다. 한 단의 고대역필터의 이득손실이 1dB라고 하더라도 16단 직렬연결이 되면 16dB 이득손실을 가지게 된다. 그래서 다른 구조의 고대역 통과필터가 필요하게 된다. 그리고 하나의 poly 실리콘에 주어지는 공정으로도 구현할 수 있는 고대역 필터가 필요하게된다. 이런 모든 점을 중간 대역필터를 이용하여 구현 할 수가 있다.

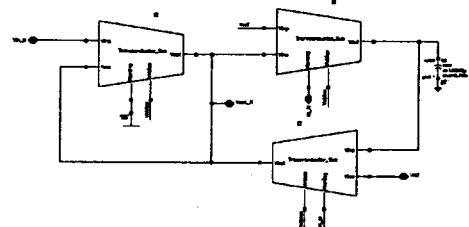


그림5. 2차 중간대역통과필터의 회로도이다. 중간 대역필터의 특성방정식은 아래와 같이 표현이 된다.

$$H(s) = \frac{(1/Q\omega_o)s}{(s/\omega_o)^2 + (1/Q\omega_o)s + 1}$$

$$\text{where, } \omega_o = \frac{g_m}{\sqrt{c_p c}}, Q = \frac{g_m}{g_{m1}} \sqrt{\frac{c_p}{c}} \quad (4)$$

$g_m$ 은 중심주파수에  $g_{m1}$ 은 Q에 영향을 준다.  $g_{m1}$ 을 가변 영역에서 가장 큰 값으로 고정하고  $g_m$ 을 변화시키면 대역통과필터의 중심주파수가 바뀌는 동시에 Q도 바뀌게 된다. (식4) 즉, Q는 중심주파수가 높아지면 그에 선형적으로 비례하면서 높아진다. 중심주파수가 가장 낮을 때의  $\omega_H$ 를 가정주파수보다 높게  $g_{m1}$ 을 충분히 큰 값으로 고정하면 등가적인 고역통과필터의 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 고역통과필터의 특성을 가지는 동시에 가정주파수대의 노이즈를 차단하는 역할도 동시에 하게 된다. 2차 대역필터로 등가적인 1차 고역통과필터를 구현하였으므로 감쇄특성은 플로팅 캐패시터를 사용하여 바로 구현한 2차 고역필터보다 주파수 감쇄특성은 줄어든다. 하지만 이러한 구조는 1-poly 디지털 CMOS 공정으로 구현이 가능하고 기생캐패시터의 영향을 무시할 수 있다는 장점이 있다.

그림6은 앞서 언급한 저대역과 고대역통과필터로 구성된 TSFB 전체회로를 보여주고 있다. 저역과 고역의 주파수 제어는 각각 직렬 연결된 저항으로 나누어진 선형적인 전압으로 하였다.

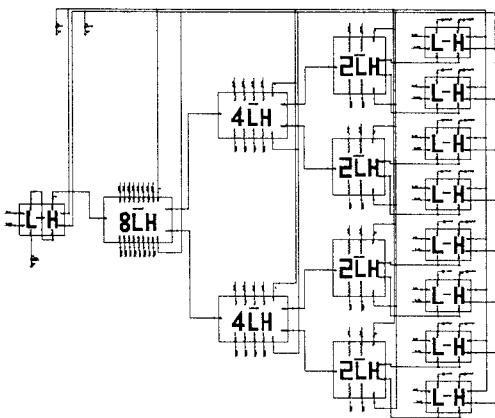


그림6. TSFB 전체 회로 블럭도

그림7과 그림8은 전체 회로의 주파수 응답과 과도 응답을 모의 실험한 결과들이다. 주파수 응답을 보면 16개의 채널이 주파수 별로 나누어 대역통과필터를 이루고 있음을 볼수가 있고 과도응답은 1.5kHz 단일 주파수의 입력에 대해서 각각의 채널에서 출력파형을 나타낸 것이다. 1.5kHz에서 중심주파수를 가지는 채널에서는 신호가 크게 나오고 1.5kHz보다 떨어져 있는 채널에서는 신호가 감쇄되어 나오는 것을 확인할 수가 있다.

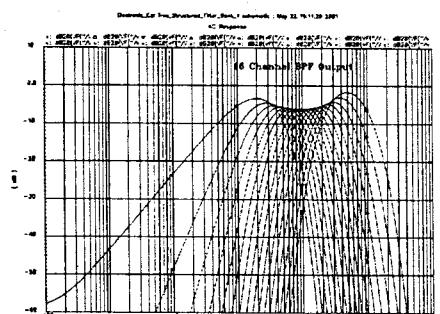


그림7. TSFB 회로의 주파수 응답

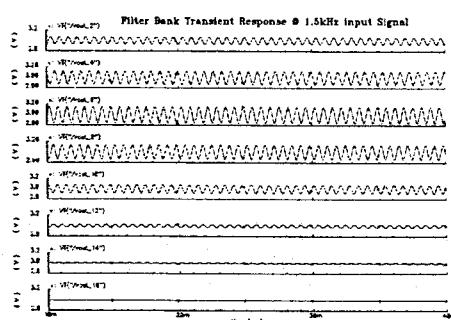


그림8. TSFB 회로의 과도응답

그림9는 AMS 5V 0.8 CMOS공정을 이용하여 TSFB회로를 Layout 한 그림이다. 전체 칩 사이즈는 2.6mm X 2.6mm 이다.

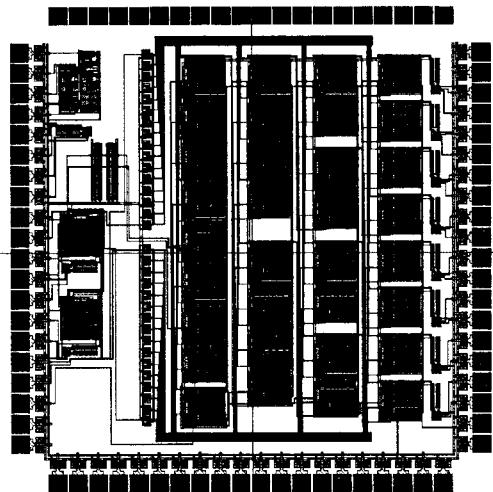


그림9. TSFB의 레이아웃

### 3. 결 론

인공 청각칩의 구현에 있어 달팽이관의 주요 구성체인 BM 모델을 자연시간이 동일하고 효과적으로 대역통과 특성을 얻을 수 있는 TSFB(Tree-Structured Filter-Banks)의 구조를 약반전 CMOS로 회로를 설계하였다.

그리고 보다 넓은 선형입력특성을 가지는 트랜스 컨터터를 Substrate 입력을 이용하여 구현하였다. 기존의 게이트에 입력을 가하는 트랜스 컨터터에 배해 약 8배 이상 넓은 선형 범위를 얻을 수가 있었다. 그리고 일반적인 소스 degeneration 기법뿐만 아니라 소스 degeneration과 개념이 거의 흡사하고 선형 범위를 넓혀줄 수 있는 게이트 degeneration 기법을 응용하여 보다 더 넓은 선형성을 가지는 트랜스 컨터트를 설계 할 수가 있게 되었다. 위의 트랜스 컨터터를 이용하여 고대역 및 저대역 통과 필터를 설계하였고 설계된 필터를 이용하여 전체 필터 링크를 구현하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] W.Liu, "An analog Cochlear Model: Signal Representation and VLSI Realization", PhD thesis, Johns Hopkins University, Baltimore, 1992
- [2] R.M. Kil, "Extraction of Noise-Robust Speech Feature Based on Tree-Structured Filter-Banks", 뇌연구 개발사업 제2회 인공 사청각 시스템 학제적 연구 과제 워크샵, PP.115-120, 2000
- [3] R.F.Lyon, T.Delbrück, and C.A.Mead, "Circuits for Wide Input Range Analog Rectification and Correlation", U.S. Patent 5,319,268, June 7th, 1994.
- [4] R.F.Lyon and C.A.Mead, "An analog electronic cochlea," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 36, pp. 1119-1134.
- [5] R.SARPESHKAR, R.F.Lyon, and C.Mead, "A Low-Power Wide-Linear Range Transconductance Amplifier," Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 1996.
- [6] L.Watt, D.A.Kerns, R.F.Lyon and C.A.Mead "Improved Implementation of the Silicon Cochlea" IEEE Journal of Solid-State Circuit, Vol. 27, No. 5, May, 1992.