

아날로그 달팽이관 칩을 위한 다중필터의 설계

이광, 우영진, 김재철, 조규형  
한국과학기술원

Design of Multiple Filter-Banks for Analog Cochlear Chip

K.Lee, Y.J.Woo, J.H.Kim, and G.H.Cho  
Korea Advanced Institute of Science & Technology

**Abstract** - 청각시스템의 저전력 및 가격의 저렴화를 위해 달팽이관의 BM(Basilar Membran)모델을 아날로그 VLSI 마이크로 파워 공정으로 구현하고 있다. Lyon and Mead는 실리콘 공정으로 달팽이관 모델을 효과적으로 구현하였다. 이는 단순 직렬 연결된 구조로 각 채널의 지연시간의 차이로 인해 인식율이 떨어질 수 있다. 본 논문에서는 소리의 주파수 정보 추출기능을 하는 직렬 연결된 트리구조(TSBF:Tree-structured Cascaded Bandpass Filter)의 16채널의 아날로그 중간대역통과 필터회로를 CMOS VLSI 공정을 이용하여 설계하였다. 직렬 연결된 저대역통과필터와 고대역통과필터로 각 채널의 중간대역통과 필터를 구현하였다. 이러한 구조에서는 각 채널의 지연시간이 동일하므로 인식율을 높일 수 있다. 그리고 고대역통과필터를 1-poly 디지털 공정으로 구현 가능하고 기생 캐패시터의 영향을 적게 받는 구조로 설계하였다.

전류 사의 관계가 지수함수적이므로 각 채널의 필터 중심주파수를 주파수 영역에서 지수함수적으로 분포시키기 위해서는 Gm-C필터에서 제어전압을 선형적으로 인가하면 된다.(식2)

$$i_D = \frac{W}{L} I_{DO} \exp\left(\frac{qV_G}{nkT}\right) \left[ \exp\left(\frac{-qV_S}{kT}\right) - \exp\left(\frac{-qV_D}{kT}\right) \right]$$

$$\approx \frac{W}{L} I_{DO} \exp\left(\frac{qV_{GS}}{nkT}\right) \quad \leftarrow \frac{qV_D}{kT} \gg 1 \& V_S = 0$$

$$\propto \exp\left(\frac{V_{GS}}{nU_T}\right), \text{ where } U_T = \frac{kT}{q} \quad (1)$$

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 바뀌게 되고, 내이(內耳)서는 액체로 채워진 달팽이관(cochlear)에 의해 기계적진동이 유체의 진동으로 다시 변형된다. 유체 진동압력은 달팽이관 내에 있는 평판 모양의 얇은막(BM:Basilar Membran)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 중추신경계와 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 Membran)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 대역통과 필터로 모델링 된다.

$$f_o = \frac{g_m}{c} \propto I_D \propto \exp\left(\frac{qV_{gs}}{\eta V_T}\right); V_{cont} = V_{gs} \quad (2)$$

2. 본 론

2.1 다중필터 회로의 구조

본 논문에서는 달팽이관의 주요 구성체인 BM을 16 채널의 대역 통과필터로 구현한다. Liu(1)는 그림1과 같이 약반전 CMOS를 이용하여 달팽이관 BM을 선형 필터로 구현하였다. 이는 달팽이관 1차원 유체역학적 모델의 모의실험을 통해 얻은 전달함수를 효과적으로 구현한 것이다.

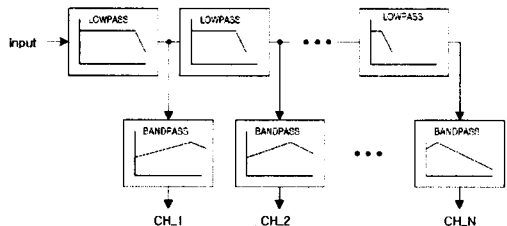


그림1. 1차원 유체역학 모델을 근거로한 다중필터 구조

Liu에 의해 제안된 구조는 저역통과필터가 직렬 연결되어 있어 각 채널의 대역통과필터의 고주파영역에서 보다 급준한 감쇄특성을 얻었다. 하지만 이러한 구조에서는 각 채널간의 신호 지연시간이 다르게 되어 소리의 인식을 저하의 요인이 된다.

약반전 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 설계할 수 있는 분야 중의 하나이다. 왜냐하면 상기의 아날로그 필터는 그 동작 주파수가 가청 주파수 영역인 수kHz내 이므로 속도가 느린 약반전 CMOS로도 구현되며, 약반전 CMOS의 전류는 게이트 전압에 지수함수적으로 변하는 특성(식1)을 가지고 있기 때문이다. 게이트 전압과

본 논문에서는 R.M. Kil[2]에 의해 제안된 지연시간이 동일하고 효과적으로 대역통과 특성을 얻을 수 있는 TSFB(Tree Structure Filter Bank)의 구조를 약

반전 CMOS로 회로를 설계하였다.

그림2는 16채널 TSBF의 구조로 직렬 연결된 저역 필터와 고역필터로 구성되어 있다. 각 채널의 출력은 적어도 한번 이상의 저역과 고역필터를 통과하면서 대역통과 필터 특성을 갖게 된다. 채널간의 지연시간이 동일할 뿐만 아니라 각 채널의 고역 및 저역 모두 급준한 감쇄 특성을 가지게 되어 고역부분에서만 급준하게 감쇄하는 그림1보다 우수한 대역통과특성을 갖는다.

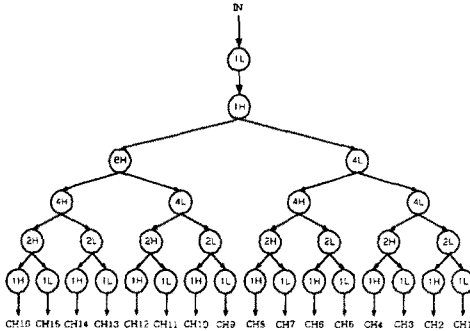


그림2. BM 모델의 TSBF 구조

## 2.2 TSFB 회로 설계

그림2의 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 -3dB 주파수 제어 전압만 다르게 인가 하면 된다.

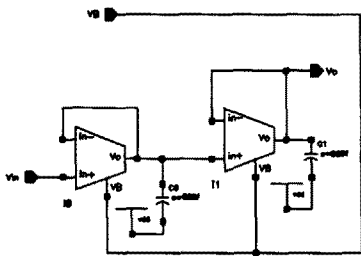


그림3. 2차 저대역통과필터

그림3은 Gm-C 적분기로 구성된 2차 저역통과필터를 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 블록의 동작점 및 작은 오프셋이 있을 경우 다음단에 계속 영향을 주게 되므로 중간중간의 한단만 오류가 발생하게 되면 뒷단은 동작되지 않는다. 따라서 직렬 연결된 다중필터에서는 각 블록의 동작점 안정화가 아주 중요하다. 적분기 형태의 저역필터는 Q가 0.5로 고정되어 가변할 수 없다는 단점이 있으나 동작점이 안정되고, 오프셋이 적분기의 높은 DC 이득으로 나누어지게 되므로 직렬연결시 보다 안정된 동작을 하게 된다.

고역통과필터는 Gm-C 필터 뿐만 아니라 어떠한 필터구현 방법을 사용하더라도 플로팅 캐패시터가 필요하

다. 이러한 캐패시터를 CMOS 공정으로 구현할 때는 2-poly 공정이 필요하다. 1-poly만 지원되는 공정으로도 이러한 플로팅 캐패시터를 만들 수 있으나 플로팅 캐패시터의 양단에 생성되는 기생캐패시터가 커지게 되어 회로에 영향을 주게 된다.

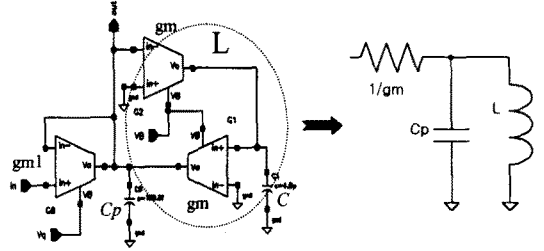


그림4. 고역통과필터 구조와 등가 회로

본 논문에서는 플로팅 캐패시터가 없는 일반적인 대역통과필터 구조(그림4)로 기생캐패시터의 영향 없이 1-poly 디지털 CMOS 공정으로 구현 가능한 고역통과필터를 설계하였다. 그림4는 2차 Gm-C 대역통과필터와 RLC 등가회로를 보여주고 있다. RLC 등가회로에서 Cp의 영향이 전혀 없다만 1차 고역통과필터로 동작함을 알 수 있다. Gm-C 대역통과필터의 전달특성은 식(4)와 같다.

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

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

회로 구현에 있어서 기생 캐패시터를 영향을 완전히 없앨 수는 없기에 회로 적으로 시계 캐패시터의 영향이 없는 것과 같이 동작하게 하여 고역필터를 설계하였다. 그림(4)에서 gm은 중심주파수에 gm1은 Q에 영향을 준다. gm1을 가변 영역에서 가장 큰 값으로 고정하고 gm을 변화시키면 대역통과필터의 중심주파수가 바뀌는 동시에 Q도 바뀌게 된다.(식4) 즉, Q는 중심주파수가 높아지면 그에 선형적으로 비례하면서 높아진다.

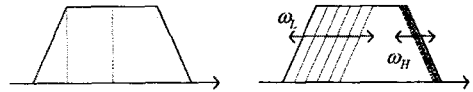


그림5. 등가적인 고역통과필터 특성

이러한 전달 특성의 보드선도는 그림5와 같이  $\omega_L$ 과  $\omega_H$ 의 분포를 보이게 된다. 중심주파수가 가장 낮을 때의  $\omega_H$ 를 가청주파수대보다 높게 gm1을 충분히 큰 값으로 고정하면 등가적인 고역통과필터의 특성을 보임을 알 수 있다. 이는 고역통과필터의 특성을 가지는 동시에 가청주파수대의 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 저역과 고역통과필터로 구성된

TSFB 전체회로를 보여주고 있다. 저역과 고역의 주파수 제어는 각각 직렬 연결된 저항으로 나누어진 선형적인 전압으로 하였다.

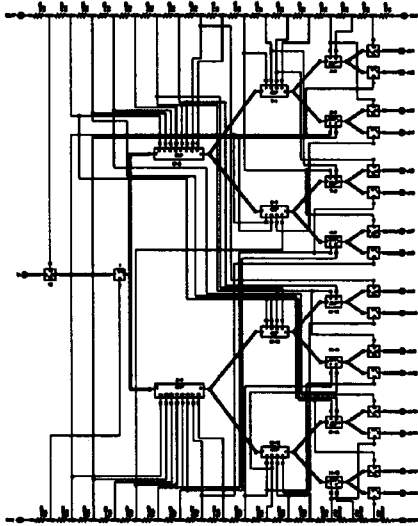


그림6. TSFB 전체 회로 블록도

그림7과 그림8에서는 0.6um CMOS 공정으로 설계된 TSFB 회로의 모의실험 파형과 레이아웃을 보여주고 있다.

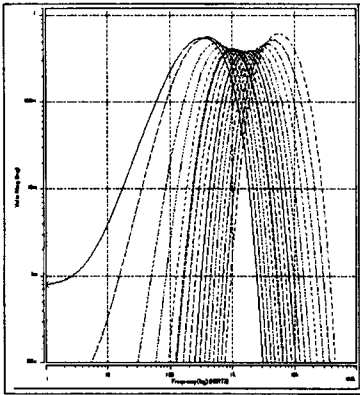


그림7. TSFB 전체 회로 블록도

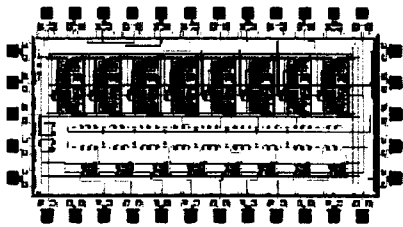


그림8. TSFB의 레이아웃

### 3. 결 론

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

TSFB의 기본 구성블럭인 고역통과필터를 플로팅 캐패시터가 없는 대역통과필터 구조로 하여 1-poly 디지털 CMOS 공정으로 구현이 가능하고 기생캐패시터의 영향을 무시할 수 있는 회로를 설계하였다.

### [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 시청각 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, July 1988.