

2026 VLSI Review

한국과학기술원 전기및전자공학부 박사과정 윤웅노

Session 10 Building Blocks for Multimodal Sensors

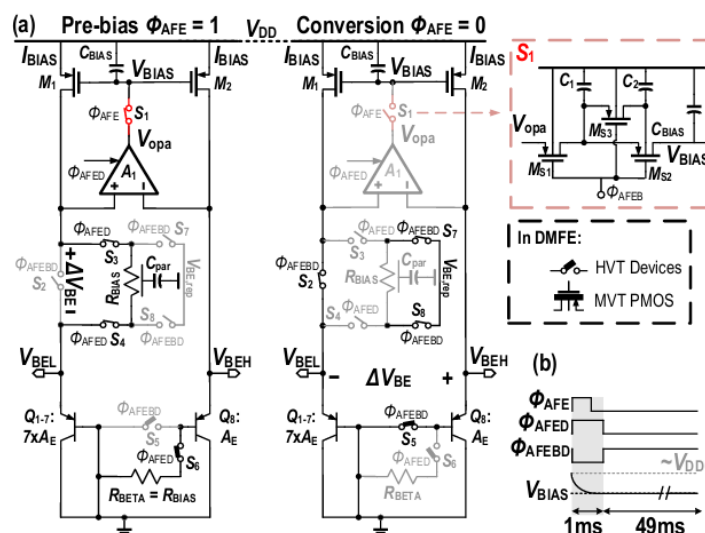
이번 2026 VLSI의 Session 10은 Sensors, Imagers, IoT, MEMS, Display Circuits 주제의 하위 분류로 총 5편의 논문이 발표되었다. 세부적으로는 온도 센서와 MEMS 타입의 멀티모달 센서를 $\Delta\Sigma$ 변조기로 디지털화하는 10.1, 10.2번 논문, coarse-fine 방식으로 강한 배경 조명 조건에서도 측정을 원활히 할 수 있도록 한 LiDAR 센서에 관한 10.3번 논문, 그리고 기업에서 PMIC를 위한 전류 센서(10.4)와 3D IC 내 국소 위치별 온도-전압 센싱을 다룬 연구(10.5)가 선정되었다.

본 리뷰에서는 이들 중 온도 센싱에 관하여 더 자세히 살펴보고자 한다. 온도 센서는 목표로 하는 어플리케이션에 따라 정확도, 분해능, 전력, 변환 시간, 그리고 양산 단계에서의 트리밍/캘리브레이션 비용 중 무엇을 우선할 것인지가 크게 달라지며, 그 선택이 곧 회로 구조와 테크닉을 결정한다. 따라서 각 논문이 어떤 지표를 확보하기 위해 무엇을 포기하였는지를 비교하며 읽어볼 만하다. 이에 always-on 어플리케이션을 겨냥하여 100nW 이하의 전력에서 정밀도를 확보한 10.1번 논문과 AI 시스템을 위한 연산기에서 온도와 전압을 짧은 시간 내에 센싱하는 10.5번 논문을 살펴본다.

#10-1 온도 센서는 센싱 소자에 따라 크게 BJT, MOS, 저항 기반으로 나뉜다. 이 중 BJT 기반 센서는 공정 산포에 의한 오차의 대부분을 1-point trim만으로 0.1°C 수준의 정확도로 보정할 수 있어, 오랜 기간 정밀 온도 센서의 표준으로 자리해 왔다 [1]. 다만 BJT를 바이어스하는 전류원과 이를 정의하는 앰프가 상시 동작하여야 하므로 소비 전력이 100nW를 넘는 것이 일반적이었고, 이는 배터리나 에너지 하베스팅으로 동작하는 어플리케이션에서의 채용을 어렵게 하는 요인이었다.

10.1번 논문은 BJT 기반 온도 센서로, always-on IoT와 바이오메디컬 어플리케이션을 겨냥하였다. 180nm 공정에서 1V 공급 전압으로 75nW만을 소모하면서 -40°C에서 85°C 범위에 대해 1-point trim 후 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (3σ)의 정확도를 달성하였는데, 이는 동급 정확도를 갖는 기존 정밀 BJT 기반 센서 대비 3배 낮은 전력이며 동시에 저전력 MOS 기반 센서 대비 2~3배 높은 정확도이다. 온도 범위로 정규화한 상대 부정확도(R-IA)로 보면 0.16%, sub- μW 영역에서 최고 수준에 해당한다.

논문에서 제안하는 핵심 아이디어는 dual-mode front-end (DMFE)로, 프론트엔드를 pre-bias phase와 conversion phase의 두 상태로 나누어 동작시키는 것이다. Pre-bias phase에서는 일반적인 BJT-기반 reference에서와 같이 앰프를 통해 저항 R_{BIAS} 양단의 ΔV_{BE} 를 강제하여 PTAT 전류 I_{BIAS} 를 생성하고, 프론트엔드가 정착한 뒤 M1,2의 게이트 전압 V_{BIAS} 를 5pF 크기의 cap에 저장한다. 이어지는 conversion phase에서는 A1을 완전히 꺼버리고, 프론트엔드를 CTAT 전압 V_{BEH} 와 PTAT 전압 ΔV_{BE} 를 생성하는 구성으로 재배치하여 $\Delta\Sigma$ 변조기가 이를 샘플링하도록 한다. 그림 1(b)의 타이밍에서 볼 수 있듯 pre-bias는 1ms, conversion은 49ms이므로 20nA를 소모하는 앰프가 켜져 있는 시간은 전체의 2%에 지나지 않는다. 커패시터에 바이어스 상태를 저장해 두고 전력 소모가 큰 블록을 꺼두는 duty cycling 자체는 초저전력 아날로그 회로에서 널리 쓰이는 테크닉이지만, 이를 0.1°C급 정밀 온도 센서의 프론트엔드에 적용하면서도 정확도를 잃지 않도록 만든 점이 본 논문의 기여라 할 수 있다.

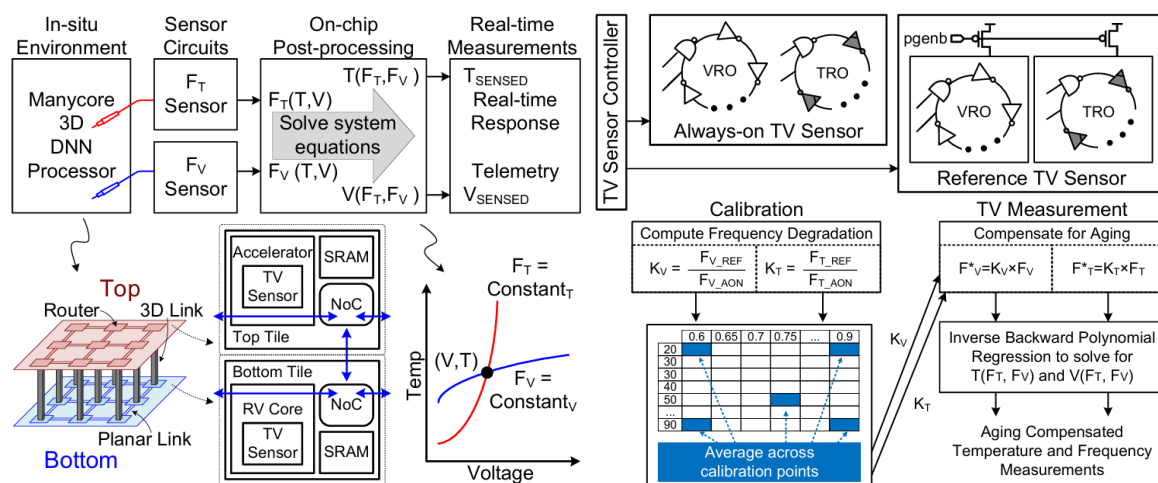


[그림 1] 제안된 PNP 기반 dual-mode front-end (DMFE)의 2-phase 동작 (a)과 해당 타이밍 다이어그램 (b) (원문 Fig. 1)

#10-5 AI 시스템에서는 집적된 디지털 회로의 동작에 따라 국소 면적의 온도와 전압이 크게 흔들리고, 이는 곧 연산 속도와 신뢰성에 영향을 준다. 따라서 온도-전압 센서를 칩 전면에 어레이로 배치하여 모니터링하면 핫스팟이 생긴 코어에만 선택적으로 주파수를 낮추는 동작이 가능해지고, 모든 코어를 최악 조건에 맞추어 묶어 두는 가드밴드 또한 줄일 수 있다. 이를 위해 센서는 (1) 어레이로 이용할 만큼 작고, (2) 워크로드에 따른 변동을 따라갈 만큼 빠르며, (3) 모니터링 대상 로직과 동일한 디지털 공급 전압에서 외부 기준 없이 동작하여야 한다. 위의 목적을 달성하기 위하여 standard 셀로 링 오실레이터를 구성하여 이를 센서로 이용하였다. 실제로 본 논문의 센서는 하이브리드 본딩된 3D

IC DNN 프로세서 [2]의 상·하부 다이에 216 μm 이하의 간격으로 배치되었으며, Intel 3와 Intel 18A 두 공정에 각각 구현되었다.

본 논문은 동일 그룹이 2025 ISSCC에서 발표한 연구를 공정을 옮기며 확장한 것이다 [3]. 선행 연구의 핵심 아이디어는 sensor fusion으로, 온도에만 혹은 전압에만 반응하는 이상적인 센서를 회로로 만들어 애쓰는 대신 두 변수 모두에 반응하되 감도가 서로 다른 두 개의 오실레이터를 두고, 그 주파수 쌍 (F_T , F_V)이 (T , V) 평면에서 단 하나의 점만을 지정한다는 성질을 이용하여 온도와 전압을 동시에 푸는 것이다 [그림 2]. 센서마다 다른 공정 산포는 회로가 아니라 센서별 역다항식 회귀 모델이 흡수하며, 소수의 캘리브레이션 포인트만으로 그 모델을 세우기 위해 계수 벡터가 저차원 부분 공간에 놓인다는 점을 이용한 주성분 분석(PCA)이 사용된다.



[그림 2] TV 센서의 동작 개요와 3D IC 내 배치 (좌, 원문 Fig. 2) Always-on 센서와 파워 게이팅된 reference 센서의 주파수 비를 이용한 노화 보상 방법 (우, 원문 Fig. 5)

본 논문이 여기에 더한 것은 크게 네 가지이다. 첫째, 서브 센서가 단순해졌다. 온도 센서용 오실레이터는 3T 기준 전압과 current-starved 구조를 쓰던 것에서 diode-connected pull-up을 포함한 지연 셀로, 전압 센서용 오실레이터는 standard 인버터만으로 구성되어 완전한 디지털 표준 셀 설계가 되었으며 면적도 줄었다. 둘째, 응답이 빨라져 온도는 2 μs , 전압은 100ns의 시간 분해능을 갖는다. 셋째, 계산의 위치가 바뀌었다. 측정이 끝나면 센서가 인터럽트로 RISC-V 코어를 깨우고, 코어가 역다항식을 계산하여 온도 맵을 만들거나 스로틀링 신호를 내보낸다. 넷째, 그리고 가장 눈여겨볼 부분으로 reference 센서를 이용한 노화(aging) 보상이 추가되었다. 상시 동작하는 always-on 센서와 평소 파워 게이팅되어 거의 열화되지 않은 reference 센서의 주파수 비를 캘리브레이션 포인트에서 평균하여 스케일 계수로 삼고, 측정된 카운트에 이를 곱한 값을 원래의 역다항식에 그대로 넣는다. 즉, 모델을 다시 세우는 대신 입력 자체를 보상하는 방식이다.

어플리케이션 측면에서의 성능으로는, 3D IC DNN 프로세서에서 실제 DNN 워크로드를 구동하며 상부 다이 56개 코어의 실시간 온도 맵을 얻었고, 이를 RISC-V 코어가 처리하여 목표 온도를 넘는 코어의 가속기에 스로틀링을 걸었다. 700MHz에서 스로틀링을 컨경우 최대 온도를 목표 이하로 유지하면서 정규화 지연은 0.76으로, 외부 주파수 스케일링 (400MHz 고정, 정규화 지연 1.0)과 비교하여 24% 낮은 지연과 더 낮은 최대 온도를 동시에 달성하였다.

결론적으로 본 논문은 센서 회로 자체의 정밀도를 끌어올리는 대신, 비이상적인 두 오실레이터의 정보를 계산으로 합치고 양산 캘리브레이션부터 수명 동안의 열화까지 흐름 전체를 설계한 연구로 읽힌다. 같은 세션의 10.1번 논문이 아날로그 회로 테크닉으로 오차를 제거하여 100ms의 변환 시간을 대가로 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 를 얻었다면, 10.5번 논문은 오차를 모델과 계산으로 흡수하여 수십 μm^2 의 면적과 μs 단위의 응답을 얻고 $^{\circ}\text{C}$ 단위의 정확도를 감수하는 트레이드오프를 취했다.

참고문헌

- [1] K. A. A. Makinwa, "Smart Temperature Sensor Survey," [Online].
- [2] P. Knag et al., ISSCC, 2026.
- [3] H. S. Ozturk et al., "A Dual VDD-Temperature Sensor Employing Sensor Fusion with 2.4°C , 9mV ($\pm 3\sigma$) Inaccuracy in 65nm CMOS," ISSCC, pp. 170-172, 2025.

저자정보



윤웅노 박사과정 대학원생

- 소속 : 한국과학기술원 전기및전자공학부
- 연구분야 : Sensor Interface ICs, Frequency Generation ICs
- 이메일 : voogi3925@kaist.ac.kr
- 홈페이지 : <https://impact.kaist.ac.kr/>