

CMOS Image Sensor 기술 동향

한건희(연세대학교)

I. 서론

반도체 촬상 소자로 Charge Coupled Device (CCD)가 1969년 발명된 이래로 40년간 독보적인 촬상 소자로 자리를 지켜왔으며 여러 기업에서 CCD를 생산하였으나 Sony를 중심으로 한 일본 기업이 40년간 거의 독보적으로 시장 및 기술을 선도해왔다. CMOS Image Sensor(CIS)는 CCD 보다 빠른 1967년 발명되었으나 여러 가지 기술적인 문제를 해결하지 못한 채로 1990년대 후반까지 상업적 생산이 이루어지지 않았다. 90년대 후반부터 카메라 폰을 중심으로 꾸준히 시장이 성장하여 현재에는 국내외 많은 반도체 회사가 시스템 반도체 분야에서 차기 추력제품 중의 하나로 꼽고 있다. 현재 전 세계 40여개 기업이 CIS분야에 설계 또는 파운드리 사업을 하고 있으며 현재까지는 절대강자가 없는 상황이나 최근 이들 기업 간의 기술격차가 벌어지고 있으며 기업 간의 전략적 통합 및 협력체계가 구축되어가고 있는 상황으로 향후 수년 이내에 소수 상위 기업 중심으로 시장지배력이 강화될 것으로 예측된다.

CIS는 CCD와 달리 회로를 수광 소자와 함께 구현될 수 있다는 특징 때문에 다양한 응용분야에

적용될 수 있으며 특히 고속, 고화소 센서는 CCD에 비하여 탁월한 경쟁력을 가지고 있다. 이러한 특징으로 인하여 CCD에 비하여 설계 기술비중이 매우 높은 분야이나 현재 국내에는 고급 CIS 설계인력이 매우 부족한 상황이다. 이에 반하여 일본의 경우 많은 대학에서 CIS 설계연구 및 인력양성이 이루어지고 있어 국내 기업이 외국 기업과의 기술경쟁에서 주도권을 확보하기 위해서는 설계인력양성이 매우시급한 상황이다.

본 고에서는 CIS 시장동향에 대하여 간략히 소개하고 CIS 기본 개념과 핵심 요소기술에 대하여 설명하고자 한다.

II. CIS 시장동향

이미지 센서 시장은 크게 휴대 기기용(Mobile), Digital Still Camera(DSC), Digital Video Camera(DVC), Digital Single Lens Reflex(DSLR)와 같은 기록용, CCTV, 도어폰 과 같은 보안감시용, 자동차용, 산업용 및 사무용 주변기기용, 의료용으로 구분할 수 있으며 각 응용 분야별 시장적 기술적 특징은 <표 1>과 같다.

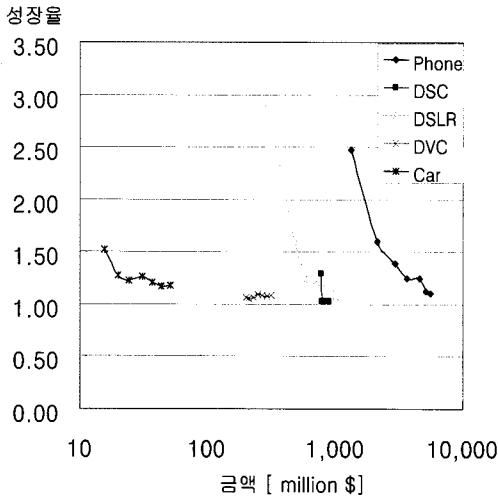
〈표 1〉 이미지 센서 응용분야별 특징

구분	응용분야	기술적 특징	시장적 특징
Mobile	휴대폰	극소형, 저전력, 고화소, 정지/동영상	급성장, 최대시장, 극심한 경쟁
	PDA	극소형, 저전력, 고화소, 정지/동영상	성장 부진
Camera	디지털 스틸 카메라	소형, 고화소, 정지영상/동영상	안정적, 지속적, 소수 경쟁
	DSLR 카메라	대형, 초고화소, 초고화질, 정지영상	독점적
DVC	캠코더	표준 화소수, 동영상	안정적, 지속적, 소수경쟁
	업무용 캠코더	표준 화소수, 고화질, 동영상	독점적
산업용	감시 카메라	표준 화소수, 동영상	안정적, 지속적, 다수경쟁
	TV 회의	표준 화소수, 동영상	안정적, 지속적, 다수경쟁
	산업용 카메라	고화소, 고화질	안정적, 지속적, 소수경쟁
자동차	자동차 탑재	고신뢰도, 고속, 저화소, 동영상	발전 가능성, 소수 경쟁
의료용	내시경	극소형, 고화질, 동영상	소량
	캡슐형 내시경	초극소형, 초저전력, 고화질, 동영상	소량
	XRay	고화질, 고화소	소량
사무용	프로젝터	저화소, 저화질	초저가, 소량
	개인인증	저화소, 저화질	소량
	PC 카메라	저화소, 저화질	저가, 대량
	마우스	초저화소, 초저화질, Smart sensor	저가, 대량
	스캐너	line 센서, 고화질	고가, 소량, 다수 경쟁
가정용	영상 도어폰	저화질, 저화소, 동영상	저가
	가정용 로봇	저화소, 동영상	발전 가능성

현재 휴대기기용의 경우 소형화 및 저전력화가 가능한 CIS가 대부분을 점유하고 있으며 DSC, DVC는 모두 CCD가 채용되고 있다. 이는 아직 CCD의 화질이 CIS에 비하여 우수할 뿐만 아니라 DSC, DVC는 크기 및 전력소모에 대한 제약이 휴대기기에 비하여 낮기 때문이다. CCD의 경우 CCD 셀 간의 전자 전송율의 한계로 화소수가 높을수록 성능열화가 심하여 DSLR과 같이 화소수가 높은 응용 분야에서는 CIS가 적용되고 있다. 산업용에서는 넓은 다이내믹 레인지나 고화질을 요구하는 분야에서는 CCD가 고속 촬영이 필요한 분야에서는 CIS가 적용되며 특히 초고속 카메라는 모두 CIS가 사용된다. 자동차용의 경우 많은 경우 높은 프레임 레이트와 다이내믹

레인지를 요구하여 CIS 적용이 확대되고 있는 상황이며 다른 응용분야에 비하여 온도 및 내구성 요구조건이 매우 높다. 사무용 주변기기의 경우 저가형으로 CIS가 대부분을 차지하고 있으며 보안 감시용의 경우 특별히 CCD 및 CIS의 장단점이 크게 부각되지 않는 분야로 CIS와 CCD가 공존할 수 있다. 의료용의 경우 고화질을 얻기 위하여 CCD가 주로 사용되고 있으나 캡슐형 내시경의 경우 저전력 소모를 위하여 CIS가 적용되고 있다.

<그림 1>은 최근 이미지 센서 시장동향으로 모든 분야가 지난 수년간 급속도로 시장이 성장하였으나 점차 안정적이며 지속적인 시장으로 변화 되어가고 있음을 보여 주고 있다. 수량적으로

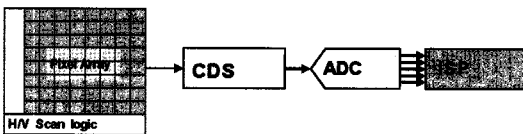


〈그림 1〉 이미지 센서 응용 분야별 시장동향

나 금액 적으로는 휴대폰 카메라용으로 사용되는 CIS의 시장 규모가 가장 크며 DSC, DVC, DSLR이 그 다음을 잇고 있다.

III. CIS 구조

CIS는 <그림 2>와 같이 픽셀, Correlated Double Sampling(CDS), Analog-Digital Converter(ADC), Image Signal Processor(ISP)로 구성된다.



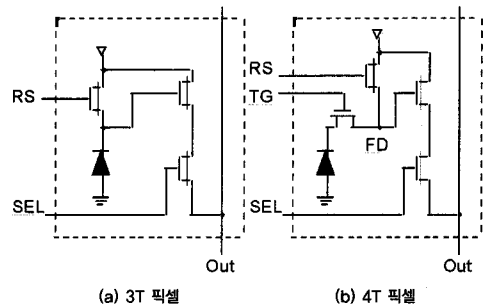
〈그림 2〉 CIS 구성 요소

1. Pixel

픽셀은 빛을 받아들여 전하를 생성하는 photo detector와 이 전하를 전압으로 변환하여 일거내기 위한 픽셀회로로 구성 된다. 이때 픽셀에 사용된 TR의 수에 따라 3T 구조와 4T 구조로 구분 된다.

3T 구조는 PN 접합다이오드로 구성된 PD를 VDD로 리셋 시킨 후 일정 시간 노출시킴에 따라 PD의 캐소우드에 전자가 누적되어 전압이 낮아지게 되며 이 전압을 소스 팔로우어를 통하여 읽어내는 방법이다. 4T 구조는 Pinned photo diode를 사용한다. Pinned PD는 전하 누적되지 않는 경우 항상 PD의 전위를 공정에 의하여 정하여진 pinning 전압으로 유지하는 photodiode로 일정 노출시간동안 PD를 빛에 노출시켜 빛에 의하여 발생된 전자를 축적하게 한다. 신호를 일거내기 위하여 Floating Diffusion(FD) 노드를 VDD로 리셋한 후 TG를 열어 PD에 축적되어있던 전하가 모두 FD로 이동하게 한 후 FD의 전압을 소스팔로우어를 통하여 읽어내는 방식이다.

3T 픽셀은 리셋 전압을 각 픽셀 별로 저장할 수 없어 노출시작 전 자신의 리셋이 아닌 다음 프



〈그림 3〉 CIS 픽셀

레이의 리셋을 읽어냄으로서 리셋 잡음이 높다는 단점이 있으나 4T 픽셀의 경우 리셋을 한 후 즉시 전하를 이동시켜 신호전압을 읽어내므로 리셋 잡음이 적다. 그러나 4T의 경우 PD에서 FD로 전하가 이동하는 시간이 고속 CIS에서 한계점이 돈다는 단점을 가지고 있다.

2. CDS

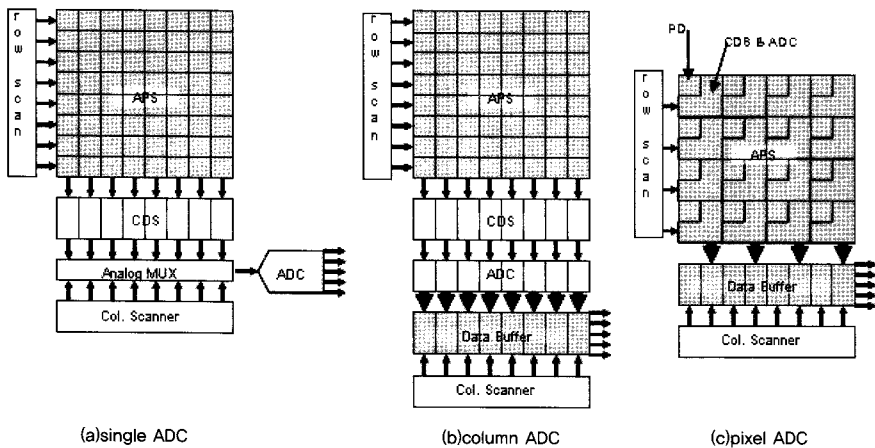
픽셀의 전압을 읽어낼 때 리셋 트랜지스터의 문턱전압이 동일하지 않으므로 각 픽셀의 리셋 전압 및 소스폴오어의 VGS전압이 각각 다르게 되어 읽어내 픽셀 전압에 각각 오프셋이 있게 되며 이는 영상에서 고정된 패턴이 나타나게 된다. 이를 Fixed Pattern Noise(FPN)라 하며 이를 제거하기 위하여 리셋 전압을 읽어내고 다시 빛에 의하여 발생된 전자에 따른 전압을 읽어내어 두 전압의 차이를 구함으로써 빛에 의하여 발생한 전자에 의한 전압만을 구할 수 있다. 이러한 역할을 하는 회로를 CDS 회로라 한다. CDS 회로는 두 개의 커패시터에 각각의 전압을 저장하여

Switched Capacitor 회로를 기반으로 하여 차이를 구하는 방법, 1개의 커패시터에 리셋 전압을 저장한 후 이를 신호 전압을 읽어낼 때 부호가 반대로 직렬 연결되게 하여 차에 해당하는 전압을 구하는 방법 및 리셋과 신호전압을 각각 AD 변환하여 디지털에서 차를 구하는 digital CDS 방법으로 분류된다.

3. ADC

CIS에서 ADC의 배치는 전체 구조를 결정하는 가장 중요한 요소로 <그림 4>와 같이 크게 single ADC, Column ADC, Pixel ADC로 구분되어진다.

Single ADC의 경우 1개의 ADC만을 사용하므로 설계가 쉽다는 장점이 있으나 고해상도 고속 CIS에서는 매우 높은 사양의 ADC가 요구되며 각 column별로 배치되어있는 CDS 회로의 아날로그 신호를 매우 긴 배선을 통하여 전달하여야 하므로 속도가 제한적이며 잡음에 취약하다는 단점을 가지고 있다. Single ADC CIS에서 주로 사용



<그림 4> CIS에서의 ADC 배치

되는 ADC는 Pipeline ADC가 주로 사용된다.

이와는 반대로 각 픽셀마다 ADC를 배치하여 모든 픽셀이 동시에 AD 변환을 수행하는 픽셀 ADC가 있으나 픽셀의 크기가 및 전력소모가 매우 커서 극히 제한적인 응용분야에만 적용할 수 있다.

Column ADC는 각 column 마다 CDS와 ADC를 구현하는 것으로 선택된 row의 모든 픽셀에 대하여 모든 column이 동시에 ADC를 수행한다. 이러한 구조는 매우 좁은 간격으로 ADC를 배치하여야 하므로 설계가 까다롭다는 단점이 있으나 속도, ADC 해상도, 전력소모를 고려할 때 적절한 타협점에 해당하는 구조로 가장 널리 사용된다. Column ADC 배치에 가장 널리 사용되는 ADC로는 single-slope ADC, Successive Approximation ADC, Cyclic ADC가 주로 사용된다. Single slope ADC는 설계가 용이하고 ADC 구조가 매우 단순하여 좁은 면적에 손쉽게 구현할 수 있어 휴대용 기기에 사용되는 CIS에 가장 널리 사용되는 ADC 이며, Cyclic ADC는 초당 수백 프레임 이상의 속도를 구현할 수 있어 고속 ADC에 흔히 사용된다.

4. ISP

AD 변환된 영상에 대하여 최종 디지털 영상을 내보내기 전 다양한 이미지 프로세싱이 이루어진다.

가장 우선적으로는 불량에 의하여 반응하지 않는 픽셀을 보정하는 dead pixel correction 과 렌즈 구경이 작은 경우 영상의 가장자리 부분이 어둡게 나타나는 shading 현상과 광각렌즈를 사용하는 경우 렌즈의 왜곡에 대한 보정을 하는 전처리 과정이 수행된다.

이후 각 픽셀의 색 성분을 보간법에 의하여 구해내는 color interpolation, RGB 색성분의 비율을 조정하는 white balance, 최대한 실제 색에 가까운 색 표현을 위한 color correction, RGB 포맷에서 YCbCr과 같은 다른 색 표현법으로 변환하는 color conversion과 같은 color processing이 이루어진다.

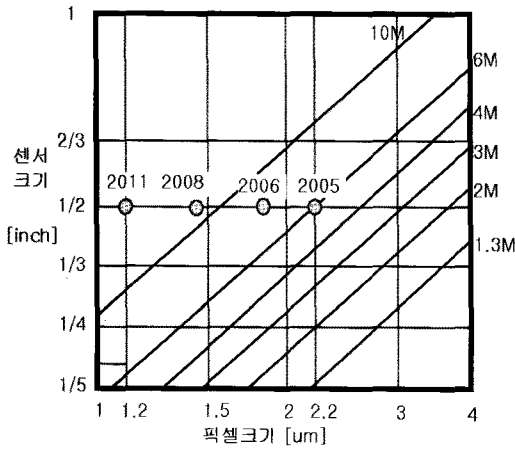
이와 함께 각 픽셀의 밝기 성분만을 추출하여 교류전원 조명의 flicker 현상을 제거하거나, 잡음제거, edge enhancement, 감마보정 등을 수행한다.

이후 보정된 밝기 성분과 색 성분을 조합하여 영상을 재합성하고 이를 최종 출력영상의 크기에 맞도록 decimation하는 scaler와 JPEG, MPEG과 같은 압축 프로세싱이 수행된 후 메모리에 저장되거나 출력된다.

IV. 기술동향

이미지 센서는 궁극적으로 공간해상도, 시간해상도 (frame rate) 및 밝기 해상도 (dynamic range) 3요소를 최대화하는 방향으로 기술개발이 이루어지고 있다.

이들 중 공간해상도는 광학계의 정밀도와 픽셀 크기에 의하여 결정되며 가시광선대의 파장이 400nm~750nm에 해당하는 것을 감안하면 픽셀의 크기는 대략 1.2um 내외가 물리적인 한계로 예상된다. <그림 5>는 픽셀 크기와 센서의 크기에 따른 픽셀 수를 나타낸 것으로 센서의 크기가 클수록 큰 상을 맺기 위하여 보다 큰 렌즈가 사용된다. 이미 픽셀의 크기는 1.4um 픽셀이 개발되었으며 수년이내에 물리적 한계인 1.2um 픽셀 크기에 도달할 것으로 예상된다.

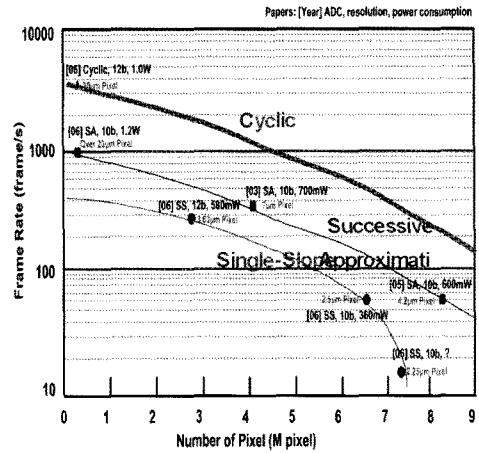


〈그림 5〉 픽셀 크기와 해상도 동향

시간 해상도를 결정 짓는 요소는 크게 PD의 감도(sensitivity)와 readout 및 ADC 회로의 속도로 구분되어질 수 있다. PD의 감도가 높은 경우 저조도 에서도 짧은 노출시간으로 촬영이 가능하다.

PD의 감도는 다시 PD의 크기에 의하여 결정되며 동일한 크기의 PD를 사용하는 경우 일반적으로 사용되는 PN 접합 기반의 PD의 감도는 수년간 크게 개선되지 않은 상태이다. 이와는 역으로 PD의 크기가 큰 경우 PD의 커패시턴스가 커서 반응 속도가 느려진다. Avalanche Photo Diode(APD)와 같이 광전자 증폭 효과를 갖는 수광 소자나 양자현상을 이용하여 높은 광전효율(quantum efficiency)을 갖는 소자의 경우 잡음, 균질성(uniformity) 및 신뢰성(reliability) 문제에 대한 해결책이 개발되지 않아 매우 특수한 목적의 센서에 적용되면 일반적인 영상을 획득하기 위한 이미지 센서에는 사용되지 못하고 있다.

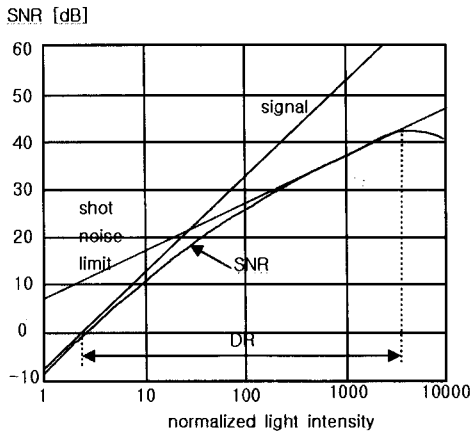
Readout 및 CDS 회로는 기술적 장벽이 존재하기보다는 속도, 전력소모, 샘플링 잡음을 고려



〈그림 6〉 ADC에 따른 CIS 속도

한 최적화 문제에 해당한다. 회로적인 속도를 제약하는 것은 ADC이며 <그림 6>은 해상도별 ADC 구조에 따른 CIS의 속도 동향을 보여 주고 있다. 앞서 설명한바와 같이 column ADC 배치가 고속 CIS에 적합한 구조이며 Single slope ADC는 전력소모가 낮다는 장점을 가지고 있으며 Cyclic ADC는 면적과 전력 소모가 Single slope ADC 보다는 크나 single slope ADC로는 구현이 불가능한 속도를 구현할 수 있다. Successive approximation ADC를 채용한 구조는 면적이 크다는 단점이 있다. 현재 상용제품에 적용되는 ADC 해상도는 대략 10bit급에 해당되며 보다 넓은 다이내믹 레인지와 ISP에서 영상처리 시에 양자화 잡음의 영향을 줄이기 위하여 12bit급 ADC가 요구되고 있다.

밝기에 대한 해상도는 크게 잡음대 신호비(SNR)과 다이내믹 레인지(DR)로 표현된다. 영상에서는 신호에 해당하는 성분을 따로 정의할 수 없으므로 일정한 조도에서 출력을 측정하여 출력의 평균을 신호로 출력의 분산을 잡음으로 간주하여 SNR을 m^2/σ 와 같이 정의하여 밝기를



〈그림 7〉 이미지 센서의 SNR 과 DR

바꾸어 가면 <그림 7>과 같은 그래프를 얻을 수 있다. 이때 SNR이 0dB가 되는 검출 가능한 가장 낮은 조도의 빛에서부터 회로 적으로 받아들일 수 있는 가장 강한 빛의 비율을 DR이라 하며 50~60dB 정도의 범위를 가지며 인간 시각의 DR 인 120dB에는 크게 못 미치는 상황이다.

이미지 센서에서 주요한 잡음 요소는 크게 암전류(dark current), 열잡음, 플리커(flicker) 잡음 및 샷(shot) 잡음으로 암전류는 동일 PD에서는 한정된 범위의 값을 가지나 각각의 PD가 예측 불가능한 다른 값을 가져 실제 픽셀 어레이 전체에서 사용가능한 DR을 제약하는 주요한 요소 중의 하나이며 열잡음과 플리커 잡음 또한 검출 가능한 가장 낮은 신호를 제약하는 요소가 된다. 회로의 플리커 잡음을 최소화하기 위해서는 1us 이내의 매우 짧은 시간 안에 CDS가 이루어져야 한다. PD의 플리커 잡음을 최소화하기 위해서 1us 이내의 노출 시간으로 촬영이 가능하여야 하나 이는 현재의 PD보다 대략 1000배 정도의 높은 감도를 갖는 수광 소자가 요구된다. 밝은 조도에서는 샷 잡음의 증가로 SNR 그래프의 기울기

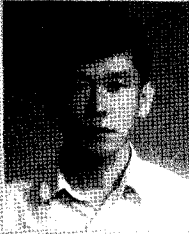
가 감소한다. 일반적인 신호에서는 신호가 매우 큰 상태이므로 이는 큰 문제가 되지 않지만 영상에서는 이러한 시간적인 샷 잡음의 영향이 픽셀마다 다른 공간적인 잡음으로 나타나 고조도에서 화질 열화를 일으키는 주요한 요인이 된다. 이러한 잡음에 의한 화질과 저조도 특성의 한계는 조금씩 개선되어 지고 있으나 주로 소자 공정 기술에 의존하며 그 발전 속도는 빠르지 않다고 할 수 있으며 readout회로에서의 잡음 개선은 비교적 빠른 속도로 이루어지고 있다.

사용가능한 최대 조도는 회로의 전원 전압에 의하여 제한되며 낮은 전압을 사용하는 CIS가 CCD에 비하여 갖는 가장 큰 단점이라 할 수 있다. 그러나 최근 저전압에서도 높은 조도의 영상을 받아들이기 위한 linear-log픽셀, 다중 노출(multiple-capture) 기법과 같이 회로 적으로 낮은 전압의 제약을 극복하는 기술들이 개발되고 있다. 특히 DR을 유지하기 위하여 0.13um 이하의 공정을 사용하더라도 픽셀 부분은 3.3V 전원을 사용하는 과거 0.35um 공정에 해당하는 공정을 적용함으로써 향후 발달된 공정 기술의 CIS에의 적용에 제약 요소가 되고 있다.

V. 결론

CMOS image Sensor의 응용 분야와 시장동향, 기술적 키워드와 기술동향에 대하여 간략하게 소개하였다. CIS는 향후 회로기술의 개발로 다양한 응용 분야에 적용되며 궁극적으로 이미지 센서의 주류를 이룰 것으로 예상된다.

저자소개



한건희

1990년 3월 연세대학교 전자공학과 학사
1998년 8월 Texas A&M University 박사
1997년 9월 ~ 1998년 6월 Texas A&M
University Visiting Professor
1998년 9월 ~ 현재 연세대학교 전자공학과 교수
주관심분야 : CMOS Image Sensor, Sigma-Delta ADC, High Speed Serial Interface