

탄소나노튜브를 활용한 나노 통신 시스템 연구

권태수* · 황경호**

Nano Communication Systems Using Carbon Nanotube

Tae-Soo Kwon* · Gyung-Ho Hwang**

요 약

나노 통신 시스템 기술은 통신기술과 나노기술의 융합 분야로서 밀리미터 수준의 통신 모듈 크기에 머물고 있는 현 기술수준을 뛰어넘어 수백 나노미터에서 수십 마이크로미터 이하 단위의 극소형 무선통신 시스템 구현을 가능케 하는 미래 핵심 기술 분야이다. 특히, 최근 제안된 탄소나노튜브의 전기적/기계적 속성을 활용한 신규 극소형 나노 무선 통신시스템 기술은 기존 송수신 구조를 단순히 소형화하는 것이 아니라 구조 자체를 바꾸는 새로운 접근 방식을 제시하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 활용한 극소형 나노 무선 송수신기 실현 관점에서의 연구현황을 살펴보고 나노 기술과 통신 기술의 융합을 위한 주요 핵심 연구이슈를 제시한다.

ABSTRACT

Nano communication system technologies are future core technologies that facilitate the implementation of tiny wireless communication systems with sizes in the range of hundreds of nanometers to tens of micrometers, which cannot be implemented by current wireless communication system technologies. In particular, novel nano communication system technology, which is based on electrical and mechanical resonance characteristics of carbon nanotube (CNT), does not simply miniaturize system modules, but suggests a new approach that changes system architectures. Therefore, this paper surveys the state of the art on CNT-based nano communication technologies in aspects of system implementation, and proposes important research issues for convergence of nano and communication technologies.

키워드

Nano Communication, Nano-Scale Communication, Carbon Nanotube, Nano Signal Processing
나노 통신, 나노스케일 통신, 탄소나노튜브, 나노 신호처리

1. 서 론

최근 나노기술과 생물학적/화학적 기술의 발전에 따라 미래에는 나노기술을 이용한 극소형 초정밀 시스템 제어나 체내 약물 전달 제어와 같은 새로운 기술의 적용이 가능한 시스템의 출현이 예상된다[1-2]. 또한 극소

형 시스템은 해당 시스템 자체 기능에 한정되지 않고 인접 시스템 또는 중앙제어 장치와의 상호 작용을 통해 단일 극소형 시스템 기능의 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 환경 적응적인 제어를 통해 그 기능을 극대화할 수 있다. 이와 같은 극소형 시스템에서 나노 무선 통신 기술은 가장 주요한 핵심 기술이 될 수 있다.

* 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과(tskwon@seoultech.ac.kr)

** 교신저자 : 한밭대학교 컴퓨터공학과

• 접수일 : 2016. 08. 29

• 수정완료일 : 2016. 09. 13

• 게재확정일 : 2016. 09. 24

• Received : Aug. 29, 2016, Revised : Sep. 13, 2016, Accepted : Sep. 24, 2016

• Corresponding Author : Gyung-Ho Hwang

Dept. of Computer Engineering, Hanbat National University

Email : gabriel@hanbat.ac.kr

극소형 시스템에서 무선 통신 부분은 크게 회로와 안테나 부분으로 구성될 수 있는데, 실리콘 기반 집적 기술의 발전으로 회로 부분은 이미 수십 마이크로미터 수준의 소형화가 가능한 반면, 안테나의 크기는 주요 무선통신 대역인 수백 MHz - 수 GHz에서 센티미터 단위의 크기를 요구하므로 통신 모듈의 소형화에 있어 극복해야할 주요 분야 중 하나이다 [3]. 일반적으로 안테나 기술은 주로 전자공진에 기반하고 있었으나, 2007년 탄소나노튜브(Carbon nanotube: CNT)의 기계적 공진 속성을 활용한 수백 나노미터 크기의 극소형 라디오가 시연됨으로써 극소형 무선 통신 시스템을 위한 CNT 기술의 활용 가능성이 입증된 바 있다 [4]. 이와 같은 CNT의 전기적/기계적 속성을 활용한 신규 극소형 나노 무선 통신 기술은 통신기술과 나노기술의 융합 분야로서 밀리미터 수준의 통신 모듈 크기에 머물고 있는 현 기술수준을 뛰어넘어 수 마이크로미터 혹은 수십에서 수백 나노미터 이하 단위의 나노 무선통신 시스템 구현을 가능케 하는 미래 핵심 기술 분야라 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 CNT를 활용한 극소형 나노 무선 송수신기 실현 관점에서의 연구현황을 살펴보고 나노 기술과 통신 기술의 융합을 위한 주요 연구이슈를 논의해보고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, II 장에서 통신 시스템의 소형화를 위한 연구결과들을 살펴보고 지금까지의 소형화 기술의 한계점을 논의한다. III 장에서는 무선 통신 시스템의 극소형화를 위한 핵심기술이 될 수 있는 CNT를 활용한 나노 통신 기술을 소개하고 최근 연구현황을 살펴봄으로써 나노 통신 시스템 실현의 개연성을 고찰한다. IV 장에서는 CNT를 활용한 나노 통신 시스템의 주요 연구 이슈를 제시하고 V 장에서 결론을 도출한다.

II. 극소형 무선 송수신기 기술 동향

나노 기술은 트랜지스터, 디스플레이 등 실리콘 기반의 전자소자의 획기적 성능 개선을 위한 미래 핵심 기술로 주목받고 있다 [8]. 최근에는 소자 수준의 응용을 넘어 약물 전달 제어, 바이오 복합 임플란트와 같은 극소형 의료 장비에서부터 식품, 수질, 공기 오염도 측정/제어를 위한 초정밀 나노센서에 이르기까

지 나노시스템으로의 그 응용 범위를 논의하는 단계에 이르고 있다. 극소형의 나노시스템은 제한된 연산 능력, 한정된 전원, 극소형 크기로 인한 물리적 한계 등으로 그 기능이 제한될 수 있는데, 이러한 극소형 나노 통신 시스템은 주변 나노 시스템이나 중앙제어 기능을 수행할 수 있는 인접 마이크로 시스템과 통신을 통해 그 기능을 극대화 할 수 있을 것이다.

최근 나노 시스템 간 혹은 초소형/극소형 시스템 간 통신에 대한 연구가 본격화되기 시작했다. 그림 1은 최근의 통신시스템 초소형화와 관련된 연구결과를 도식화하고 있는데 소형화에서 핵심기술은 주로 안테나의 소형화에 있음을 확인할 수 있다 [3],[5-7],[9],[10],[14]. Hitach [6]와 Michigan 대학 [7]에서는 기존 안테나 기술을 개선하여 수 밀리미터 또는 수백 마이크로미터 이하의 시스템 구현을 성공하였다. 또한, 현상용 무선통신시스템에서 활용되고 있는 수십 MHz - 수 GHz 대역에서의 안테나 소형화 한계문제의 극복을 위해 THz 대역에서의 통신 및 안테나 구현 가능성이 제시된 바 있다 [10]. 하지만 THz 대역 통신은 아직은 개념수준에 불과하며 또한 수십 MHz에서 수 GHz 주파수 범위에서 동작되는 현 무선통신시스템과의 호환이 어렵다는 문제점을 가지고 있다.

한편, 2007년 Berkeley 대학의 Zettl 교수 그룹에서는 CNT의 공진 속성을 이용하여 단 하나의 수백 나노미터 길이의 CNT를 이용한 라디오 구현을 성공하면서 새로운 구조의 극소형 통신시스템 구조를 제시하였다 [4]. 제한된 CNT의 기계적 공진 속성을 활용한 수백 나노미터 크기의 수신기는 기존 무선 수신기 모듈의 축소가 아닌 수신기 구조 자체를 새롭게 설계함으로써 나노 기술에 기반을 둔 극소형 모델 설계의 새로운 방향을 제시하고 있다.

III. CNT 기반 나노 통신 시스템

CNT는 1991년 최초로 발견된 이래 트랜지스터와 디스플레이 소자로서 그래핀과 함께 미래의 실리콘을 대체할 소자로 각광받고 있으며, 우수한 전기적/기계적 속성을 지니고 있다[11-12]. 특히, cantilever 형태의 CNT는 CNT의 기계적 고유 진동주파수와 동일한 주파수의 전기장이 가해질 경우 공진현상을 일으키게

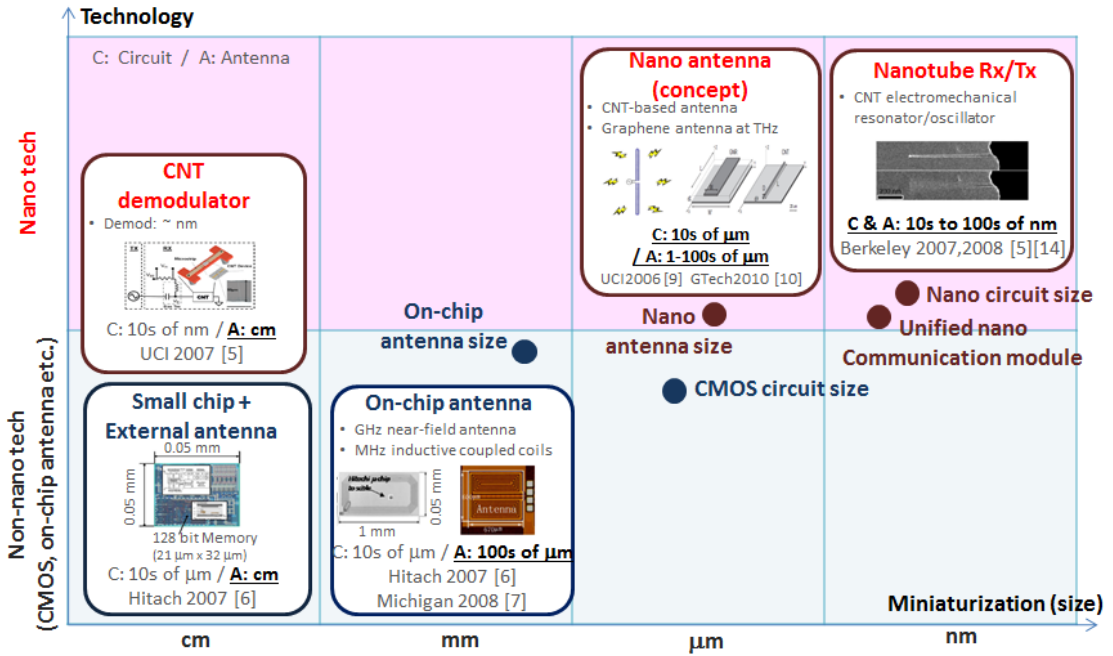


그림 1. 무선 송수신기의 극소형화 기술
 Fig. 1 Technologies for miniaturizing wireless transceivers

되며[12], 이와 같은 CNT 공진은 그림 2와 같은 Zettl 교수 그룹에서 제시한 CNT 라디오의 기본 원리가 된다. 매우 높은 탄성 계수를 가지는 바늘 모양의 뾰족한 CNT의 한쪽 끝에 마이너스 전극을 연결하고 다른 쪽은 진공상태의 공간에 플러스 전극을 위치시키면 CNT의 끝 쪽에 전자가 몰려 전기장이 형성되고 CNT에 적용된 직류 전압이 일정 수준 이상 가해질 경우 플러스 전극 방향의 CNT 가장자리에 몰려있던 전자가 방출되어 전계방출전류(Field Emission Current)가 흐르게 된다. 한편, 이러한 구조에서 CNT에 사인파 형태의 외부 전기장이 가해질 경우, 전하를 가지고 있는 CNT에 외부에서 가해진 전기장에 의한 전기력이 발생하게 되고 전기장의 주파수가 CNT의 기계적 공진 주파수와 일치하는 경우 CNT는 진동을 일으키게 된다. 이미 가해진 직류전압에 의한 CNT의 전계방출전류량은 CNT의 한쪽 끝과 플러스 전극간의 거리의 지수적인 관계를 가지게 되어 이와 같은 CNT의 진동은 전계방출전류의 변화를 감지할 수 있는 수준에 이르게 되고, 이러한 전류 변화의 감지를 통해 송신된 정보를 수신할 수 있게 된다.

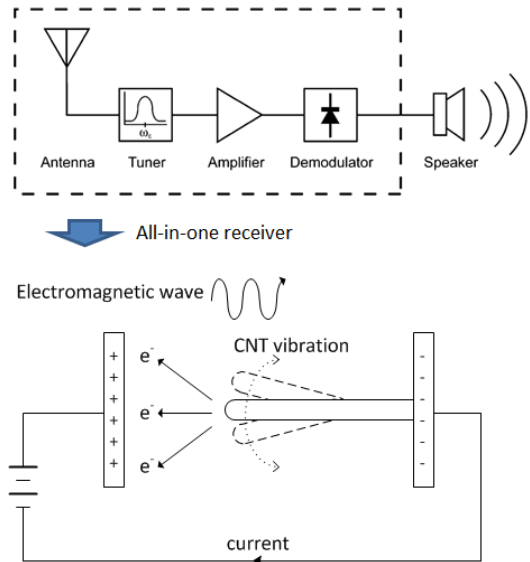


그림 2. CNT 활용 나노 수신기
 Fig. 2 Nano receiver using CNT

최초의 CNT 라디오는 CNT에 200 볼트 이상의 높은 직류 전압을 가해야하는 문제를 가지고 있으며 이러

한 문제에 대한 해결책으로 [13]에서는 양자역학적 원리에 기반한 터널링 효과를 활용하는 방안을 제시함으로써 수에서 수십 볼트 수준으로 필요 직류 전압을 낮출 수 있었다. 또한 CNT의 공진주파수는 cantilever의 기계적 진동원리를 이용하는 것으로 CNT의 길이에 의해 결정된다. 직류 전압에 의해 CNT에 가해지는 전기력에 의한 장력 변화를 통해 CNT의 공진 주파수를 변화시켜 수신 주파수를 20MHz 이상 변화시킬 수 있는 수신기 구조도 제시되었다.

한편, 이러한 동작을 역으로 적용함으로써 송신기 설계의 가능성도 생기게 되었다[14]. 외부 전기장에 의해 공진현상이 발생하는 수신기와는 달리 송신기는 자기 발진(Self Oscillation)을 일으켜야 한다. 그림 3의 송신기 구조와 같이 직류 전압만을 이용하여 CNT는 자기 발진을 일으킬 수 있다. 물리적 원리가 비교적 잘 알려져 있는 공진 현상과는 달리 자기 발진 현상은 실험적으로는 구현가능하나, 물리적 이해가 아직은 완벽하지 못한 상태이다. [15]에서는 다양한 실험적 결과를 통해 cantilever 형태의 CNT의 길이, 반경, 직류 전압에 따른 자기 발진 속성을 면밀히 분석하고 자기 발진의 제어를 위한 모델을 제시하고 있다.

따라서 CNT 공진/발진 속성을 활용한 무선통신시스템의 물리적 구현 방안과 기본 구조는 제시된 상태라 할 수 있으며, 앞으로 공학 관점에서의 응용 설계 및 연구가 요구되는 상황이다.

[16]에서는 Zettl 교수 그룹에서 제시한 CNT 라디오를 통신이론에 기반하여 수학적 모델을 제시하고 통신신호처리 관점에서의 그 성능 분석을 시도하고 있다. CNT 공진 기반 수신기는 기존 통신에서의 열

잡음뿐만 아니라 공진 시 기계적 잡음이 추가될 수 있는데 이러한 진동 잡음(Acoustic Noise)은 CNT 수신기 성능을 제한하는 주요 요인으로 작용될 수 있음을 보이고 있다. 단일 CNT의 수신성능 한계를 극복하기 위하여 [17]에서는 복수 개의 CNT를 활용하여 수신감도를 개선하는 방안을 제시하고 있다. 현 CNT 공정 상 일정한 길이를 갖는 CNT 생성의 어려움과 CNT 소자의 변형은 CNT 길이의 불균등성 문제를 일으킨다. 이는 CNT 길이의 확률적 모델을 필요로 하고 진동 잡음과 함께 CNT 수신기의 성능을 열화시킬 수 있는 또 다른 요인이 된다.

더 나아가 [18]에서는 신호처리 관점에서의 CNT

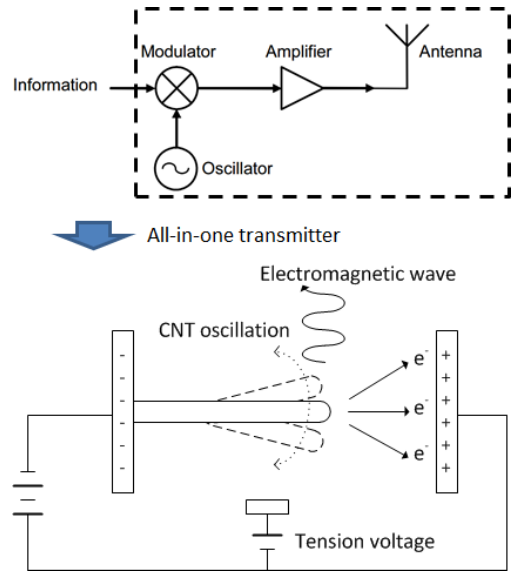


그림 3. CNT 활용 나노 송신기
Fig. 3 Nano transmitter using CNT

통신 연구뿐만 아니라 라우팅, 자원관리, 간섭제어와 같은 네트워크 관점에서의 다양한 이슈를 제시하고 있다. 이와 같은 결과들은 CNT 기반 통신에서의 나노 기술과 통신 기술의 융합연구에 대한 잠재성을 보이고 있으며, 아직은 그 연구 초기 단계로서 전송속도 관점에서의 성능 개선, 에너지 검출기 외의 보다 개선된 방식의 변복조 방식, 네트워크 관점의 성능 개선, 다양한 확률 변수에 대한 최적화, 채널 모델의 영향 등의 분석 및 해결되어야 할 다양한 연구 이슈가 존재한다.

CNT는 이미 물리적/화학적/생물학적 나노 현상들에 대한 센서로서의 많은 연구가 이루어졌다[19-20]. CNT 센서는 우수한 고감도 센싱 속성을 가지지만 센서 장치의 모든 부분을 CNT로 구성하기에는 고비용 및 낮은 재현성 문제로 실리콘 기반의 기존 CMOS의 완전대체가 아직은 쉽지 않다. 따라서 저비용의 신뢰성 있고 상업적으로 이용가능한 수준의 웨이퍼 상에서의 CNT 성장 공정은 이미 많은 연구자들의 관심 대상이었다. 2010년 11월 영국 Cambridge 대학에서 완전한 CMOS 공정 웨이퍼 기반에 CNT를 국부적으로 성장시킬 수 있는 기술을 선보인 바 있고 이는 향후 대량 생산의 가능성을 열어주고 있다[21]. 이러한 CNT와 CMOS의 결합은 CNT 기반의 front-end와

CMOS 기반의 기저대역 처리 구조를 가능케 하여 CNT 기반 통신을 에너지 검출기[16-17]와 같은 단순 구조에 한정하지 않고 통신품질과 전송속도의 개선을 위해 보다 최적화된 형태의 송수신 실현을 가능케 할 것이다. [22]에서는 CNT의 높은 Q factor 속성에 대한 통신에서의 활용을 시도하였고, 109 개/cm³의 밀도를 가진 0.5x0.5 cm² CNT 배열을 사용하여 Q factor 800의 1.446 GHz에서 동작하는 수신기를 구현한 바 있다.

또한 향후에는 CNT와 CMOS 기술이 결합된 형태를 뛰어넘어 CNT 무선통신 시스템의 모든 기능들이 나노 기술로 구현되어 수 마이크로미터 크기 수준의 나노 센서 디바이스의 출현도 가능할 것이다. 이러한 디바이스는 센서, 무선 송수신기, 안테나, 프로세서, 메모리, 액츄에이터, 배터리와 같은 각 부분의 기술 발전과 이들의 집적/공정 기술을 필요로 하고, 미래 나노센서 디바이스 출현 시 CNT 무선통신기술은 더욱 주요한 역할을 담당하게 될 것이다.

IV. 주요 연구 이슈

CNT 공진 기반 나노 무선통신 기술은 기본 개념 시연 수준의 기술로서 향후 통신 시스템에의 적용을 위해서는 다양한 이슈에 대한 연구가 필요하다. 따라서 잠재적 성능 분석 및 성능 개선 기술 개발을 위한 주요 연구 이슈는 다음과 같다.

첫째, CNT 공진 속성의 물리적 원리에 기반한 극소형통신 시스템을 위한 통신신호처리 기술 개발과 나노 통신 시스템의 잠재적 성능 분석 연구가 진행되어야 한다. 극소형 시스템은 크기, 연산능력, 배터리 측면의 한계로 인해 매우 단순한 구조에서 동작되어야 한다. 이와 같은 극소형 장치의 단순화를 위해 CNT 공진기(Resonator)에 단순히 캐피시터(Capacitor)와 스위치로 구현될 수 있는 에너지 검출기(Energy Detector)를 연결한 CNT 공진기 기반 수신기를 고려할 수 있다[16-17]. CNT 공진기를 front-end로 사용함에 따라 CNT 공진 속성에 따른 주파수 응답함수의 변화, 열잡음뿐만 아니라 진동 잡음의 존재, 다중 CNT 사용 시의 CNT 길이의 불균등성은 기존 통신신호처리와는 다른 신호 검출판단 기

준 및 비트오류를 속성을 보인다. 따라서 CNT 공진의 물리적 속성에 기반하여 채널 모델에 따른 성능 변화, 잡음모델 변화에 따른 성능 변화, CNT 길이 및 배치의 확률 속성에 따른 성능 변화, 다양한 중심주파수 및 Q factor의 변화에 따른 성능 변화 등 극소형 무선통신 시스템 성능을 결정할 수 있는 다양한 요인들의 영향 분석 및 최적 통신 시스템 설계 기술에 대한 연구가 필요하다.

둘째, CNT 공진 속성에 대한 물리적 원리에 기반하여 보다 복잡한 연산처리가 가능한 통신신호처리 구조에서 신호 품질 개선뿐만 아니라 전송률 증가를 위한 무선 통신 성능개선 방안에 대한 연구가 필요하다. CNT 공진기는 front-end의 극소형화 가능성과 기존 통신시스템 대비 100-1000배 이상의 Q factor 속성과 같은 기존 통신시스템 구조로는 달성하기 힘든 우수한 특징을 가지고 있다. 극소형 통신시스템 대비 보다 복잡한 연산을 허용하는 소형 또는 초소형 통신시스템의 경우, CNT 공진기를 활용한 초소형화와 동시에 다중 CNT를 활용한 신호 품질 개선뿐만 아니라 CNT 그룹별 다중화를 통한 전송률 개선을 꾀할 수 있을 것이다. CNT 공진기는 전자 발진기 기반의 기존 front-end 대비 위상제어가 어려워 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)와 같은 위상차를 활용한 변복조 기술 적용에 어려움이 있다. 따라서 다양한 길이를 갖는 CNT를 활용하여 FSK(Frequency Shift Keying)를 통해 데이터를 다중화 함으로써 전송률을 향상시킬 수 있을 것이다. CNT의 높은 Q factor 속성을 활용하면 기존 front end를 사용할 경우 대비 FSK를 위한 필요 주파수 양을 줄일 수 있다. 하지만 주파수 간격과 SNR 사이의 tradeoff 관계로 인해 통신시스템 설계 시 전송률 관점의 최적화가 필요하다. 뿐만 아니라 다중 CNT 활용 시의 안테나 어레이 이득과 같은 신호 증폭 이득을 통한 SNR 개선과 다중화를 통한 전송률 개선 사이의 최적화도 필요하다. CNT 길이의 확률 분포에 따른 전송률 제한 정도에 대한 연구도 필요하다. 한편 단순 에너지 검출기를 뛰어넘어 CNT 공진기 활용 통신시스템의 성능을 개선할 수 있는 보다 발전된 통신신호처리 방식에 대한 연구도 중요하다.

셋째, 극소형 장치 및 일반 무선통신 시스템에서의 응용 등 실제 응용시스템의 요구사항을 고려한 주

요 통신프로토콜 및 시스템 성능 개선 방안에 대한 연구가 필요하다. CNT 활용에 따른 통신시스템의 극소형화의 대표적 응용처의 예로 약물전달과 같은 마이크로미터 수준의 생물학적/화학적 물질 전달 제어를 고려할 수 있다. 마이크로 또는 나노 수준의 극소형 장치의 정밀제어를 위해 요구되는 동작주파수, 동작 SNR, 허용가능 동작 오류율, 필요 전송률, 통신거리 등은 CNT의 개수, 송신 전력, 수신기 구조 설계에 영향을 주게 된다. 따라서 이들 요구사항과 설계변수 간의 관계에 대한 고찰이 선행되어야 한다. 또한 CNT의 극소형화 속성, 길이에 따른 동작 주파수 변화, 높은 Q factor 속성은 다양한 동작 주파수에서 동작하는 작은 크기의 front-end의 설계를 가능하게 하며, 따라서 CNT 기반 통신을 초광대역 통신 시스템에도 적용할 수 있을 것이다. 특히 넓은 범위의 주파수에서의 동작을 요구하는 Cognitive Radio 시스템에 적용 가능한 CNT 기반 주파수 센싱과 통신시스템을 고려할 수 있다. 이와 같이 극소형 시스템에서 기존 통신시스템에 이르기까지 다양한 응용처에 대한 시스템 레벨 설계 시 고려할 요소 및 영향의 분석이 필요하다.

V. 결 론

본 논문에서는 CNT의 기계적/전기적 공진 속성을 이용한 나노 통신 시스템 실현의 잠재성을 수신기 구현 측면, 송신기 구현 측면, 나노 통신신호처리 및 시스템 성능 개선 측면, 실리콘 기반 시스템 기술과 나노 통신 기술의 결합 측면 및 나노 시스템 자체 설계 측면에서 살펴보았다. 비록 현재 각 기술은 실험실 수준의 검증 단계에 머물고 있으나, 해당 기술은 기존 통신 신호처리 기술 및 실리콘 기반 통신 시스템 기술과의 결합 연구를 통해 더욱 발전될 수 있고, 사물 내재 통신, 체내 약물 전달 제어 등 다양한 기술적 응용 범위를 가질 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2011-0011770)

References

- [1] I. Fkyildiz and J. Jornet, "Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks," *Nano Communication Networks (Elsevier)*, vol. 1, no. 1, Mar. 2010, pp. 3-19.
- [2] I. Akyildiz. and J. Jornet, "The Internet of Nano-Things," *IEEE Wireless Communications Mag.*, vol. 17, no. 6, Dec. 2010, pp. 58-63.
- [3] P. Burke and C. Rutherglen, "Towards a single-chip, implantable RFID system: is a single-cell radio possible?" *Biomed Microdevices*. vol. 12, no. 4, Aug. 2010, pp. 589-596.
- [4] K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl, "Nanotube Radio," *Nano Letters*, vol 7, no. 11, Oct. 2007, pp. 3508-3511.
- [5] C. Rutherglen and P. Burke, "Carbon Nanotube Radio," *Nano Letters*, vol. 7, no. 11, Oct. 2007, pp. 3296-3299.
- [6] M. Usami, H. Tanabe, A. Sato, I. Sakama, Y. Maki, T. Iwamatsu, T. Iposhi, and Y. Inoue "A 0.05x0.05 mm² RFID Chip with Easily Scaled-Down ID-Memory," *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)*, San Francisco, USA, Feb. 2007.
- [7] D. Shi, "A Fully Integrated CMOS Receiver," Ph.D's Thesis, *The University of Michigan*, 2008.
- [8] N. Mathur, "Beyond the silicon road map", *Nature*, vol. 419, Oct. 2002, pp. 573-575.
- [9] P. J. Burke, S. Li, and Z. Yu "Quantitative theory of nanowire and nanotube antenna performance," *IEEE Trans. Nanotechnology*, vol. 5, no. 4, July 2006, pp. 314-334.
- [10] J. Jornet and I. Akyildiz, "Graphene-based Nano-antennas for Electromagnetic Nanocommunications in the Terahertz Band," In *Proc. of European Conf. on Antennas and Propagation(EUCAP) 2010*, Barcelona, Spain, Apr. 2010.

- [11] W. Heer, A. Chatelain, and D. Ugarte, "Carbon Nanotube Field Emission Electron Source," *Science*, vol. 270, no. 5239, Nov. 1995, pp. 1179-1180.
- [12] P. Poncharal, Z. Wang, D. Ugarte, and W. Heer, "Electrostatic Deflections and Electromechanical Resonances of Carbon Nanotubes," *Science*, vol. 283, no. 5407, Mar. 1999, pp. 1513-1516.
- [13] D. Dragoman and M. Dragoman, "Tunneling Nanotube Radio," *J. of Applied Physics*, vol. 104, no. 7, Oct. 2008, pp. 074314.
- [14] J. Weldon, K. Jensenl, and A. Zettl, "Nanomechanical radio transmitter," *Physical Status Solidi*, vol. 245, no. 10, Oct. 2008, pp. 2323-2325.
- [15] J. Weldon, B. Aleman, A. Sussman, W. Gannett, and A. Zettl, "Sustained Mechanical Self-Oscillations in Carbon Nanotubes," *Nano Letters*, vol. 10, no. 5, Apr. 2010, pp. 1728-1733.
- [16] C. Koksall and E. Ekici, "A Nanoradio Architecture for Interacting Nanonetworking Tasks," *Nano Communication Networks(Elsevier) J.*, vol. 1, no. 1, Mar. 2010, pp. 63-75.
- [17] C. E. Koksall, E. Ekici, and S. Rajan, "Design and Analysis of Systems Based on RF Receivers with Multiple Carbon Nanotube Antennas," *Nano Communication Networks(Elsevier) J.*, vol. 1, no. 3, Sept. 2010, pp. 160-172.
- [18] B. Atakan and O. Akan, "Carbon Nanotube-Based Nanoscale Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Mag.*, vol. 48, no. 6, June 2010, pp. 129-135.
- [19] J. She and J. Yeow, "Nanotechnology-Enabled Wireless Sensor Networks: From a Device Perspective," *IEEE Sensors J.*, vol. 6, no. 5, Oct. 2006, pp. 1331-1339.
- [20] B. Atakan and O. Akan, "Carbon Nanotube Sensor Networks," *Proc. IEEE NanoCom'09*, San Francisco, USA, Aug. 2009.
- [21] S. Santra, S. Ali, P. Guha, G. Zhong, J. Robertson, J. Covington, W. Milne, J. Gardner, and F. Udrea, "Post-CMOS Wafer Level Growth of Carbon Nanotubes for Low-Cost Microsensors - a Proof of Concept," *Nanotechnology*, vol. 21, no. 48, Nov. 2010, pp. 485301.
- [22] M. Dragoman, D. Neculoiu, A. Cismaru, D. Dragoman, K. Grenier, S. Pacchini, L. Mazenq, and R. Plana, "High quality nanoelectromechanical microwave resonator based on a carbon nanotube array" *Applied Physics Letters*, vol. 92, Feb. 2008, pp. 063118.

저자 소개

권태수(Tae-Soo Kwon)



2001년 KAIST 전자전산학과 졸업
(공학사)

2003년 KAIST 전자전산학과 졸업
(공학석사)

2007년 KAIST 전자전산학과 졸업
(공학박사)

2007년~2011년 삼성종합기술원 전문연구원

2011년 Stanford University 박사후연구원

2011년~2012년 University of British Columbia 박사후
연구원

2013년~2015년 한국전자통신연구원 선임연구원

2015년~현재 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조
교수

※ 관심분야 : 무선네트워크, 확률기하, 최적화

황경호(Gyung-Ho Hwang)



1998년 KAIST 전기및전자공학과
(공학사)

2000년 KAIST 전자전산학과 (공학
석사)

2005년 KAIST 전자전산학과 (공학박사)

2005년~2007년 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2007년 ~현재 한밭대학교 컴퓨터공학과 부교수

※ 관심분야 : 이동통신 프로토콜, 무선 센서 네트워
크, 모바일 응용 프로그램

