

인쇄 기술과 RFID-기반 센서 기술을 이용한
무전력 무선 센서 기술

김 상 길

부산대학교

I. 서 론

수동 RFID 태그(Tag)는 물류 및 유통에 있어서 상당히 유용하고 널리 사용되는 기술이다^[1]. 근래에는 수동 RFID 태그에 센서 기능을 통합시키는 연구가 많이 이루어지고 있다. 나노 물질인 그래핀 옥사이드(Graphene oxide)와 탄소나노튜브(Carbon Nanotube: CNT)를 이용한 센서를 비롯하여 다양한 형태의 센서를 RFID 태그와 통합시킨 RFID-기반 무선 센서가 많이 연구되고 있다^{[2]~[4]}. 점점 더 많은 산업·연구 분야가 RFID-기반 센서의 가능성에 주목하면서 이 기술의 중요성이 증대되었다. RFID-기반 무선 센서의 동작 원리는 센서 소자를 이용해서 RFID 태그 안테나의 주파수 응답을 변조(modulation)시키는 것이다. RFID 기술은 송신기에서 발신된 무선 전력을 수확하고, 재전송하는 방식으로 동작한다. 재전송되는 신호를 RFID 태그 안테나에 통합된 센서를 이용해 변조하게 된다면, 배터리가 필요 없는 진정한 의미의 무전력 무선 센서가 될 것이다. RFID-기반 센서는 에너지 수확 및 후방산란 기술을 바탕으로 작동하기 때문에 통신 거리를 증가시키는 연구가 필수적이다.

한편, 인쇄 기술은 현대인들에게 널리 알려진 기술이자 매일같이 사용되는 기술이다^[5]. 전자공학 분야에서도 이미 인쇄 기술은 많은 분야에서 널리 사용되고 있다. 인쇄 기술의 특징인 효율적이고 간편한 적층식 공정은 박막형 능동/수동 소자들을 만들기에 적합하고, 인쇄 회로의 유연성(flexibility) 또한 큰 장점이다. 금속 나노 입자를 이용하여 전도성 박막을 인쇄하거나, 폴리머 잉크를 이용해서 다층 구조를 인쇄하는 기술에 관한 연구는 근래에 많은 관심을 끌었으며, 여러 잉크를 조합하여 RF 시스템을 인쇄하는 연구 또한 많이 진행되고 있다. 특히, RFID-기반 센서 태그와 인쇄 기술의 호환성이 좋아서 인쇄 기술을 이용한 RFID-기반 센서 분야는 많은 관심을 받고 있다^[6]. 특히나 RFID 안테나를 전자 잉크로 인쇄하는 기술은 상용화 단계에 올라와 있다. 하지

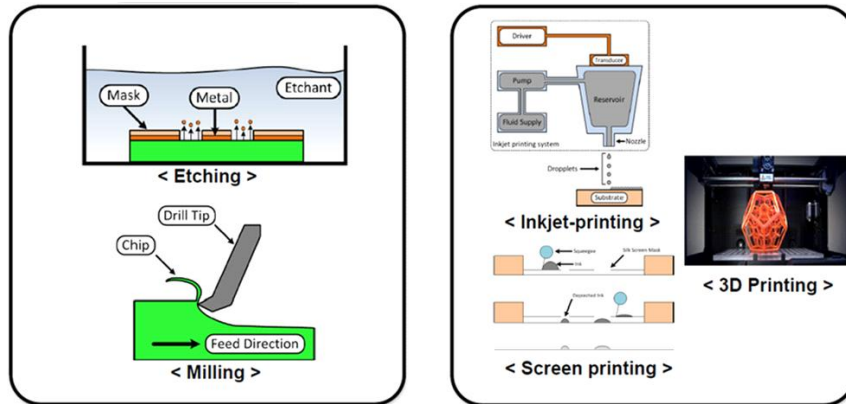
만, 나노 기술을 이용해서 센서 물질을 잉크로 만들어 인쇄하는 연구의 성과가 눈부시게 발전하고는 있지만, 앞으로 더욱 많은 연구가 필요한 부분이다. 앞서 이야기한 인쇄 기술과 RFID-기반 센서 기술이 융합된다면 효율적인 생산 기술과 최첨단 RF 센서 기술을 바탕으로 무전력 무선 센서 시스템 기술을 실현할 수 있을 것이다.

II. 인쇄전자 기술

인쇄 기술은 적층 가공(Additive Manufacturing: AM) 방식으로써, 절삭 가공(Subtractive Manufacturing: SM) 방식과는 확연히 구분된다. 이는 [그림 1]에 간략히 설명되어 있다. 밀링이나 에칭으로 대표되는 절삭 가공은 금속이나 유전체를 본래의 덩어리에서 잘라내면서 원하는 모양과 패턴을 만든다([그림 1-(a)]). 이와는 대조적으로 2D/3D 인쇄 기술은 원하는 위치에 필요한 만큼의 물질과 잉크를 적층해 가면서 모양과 패턴을 제작한다([그림 1-(b)]). 필요한 만큼만 잉크와 물질을 사용하기 때문에 원료의 낭비가 적고, 제작 후 환경과 인체에 해로운 부산물이 상대적으로 적게 발생한다. 이 때문에 인쇄 기술은 차세대 전자 소자를 만드는 생산 기술로써 많은 주목을 받아왔다. 대표적인 인쇄 기술의 종류와 특징은 <표 1>에 정리되어 있다. 금속을 인쇄하는 기술에는 많은 종류가 있지만, 은나노 입자(silver nano-particle: SNP)를 잉크젯 방식으로 직접 인쇄하는 방식과 PdCl₂ 촉매제 인쇄를 통해서 구리(Cu) 박막을 무전해 도금하는 방식이 많이 사용된다^{[7],[8]}.

2-1 은나노 입자 인쇄

순수한 은(Ag)은 전기 전도성(σ_{Ag})이 약 6.30×10^7 S/m로 구리의 전기 전도성($\sigma_{Cu} = 5.96 \times 10^7$ S/m)보다 높다. 또한, 구리보다 나노 입자로 가공하기 비교적 쉬우면서 낮은 녹는점을 가진다. 이러한 특성 때문에 은 나노 입자는 전도성 잉크와



(a) 절삭 공정

(b) 적층 공정

[그림 1] 절삭 가공 방식과 적층 가공 방식

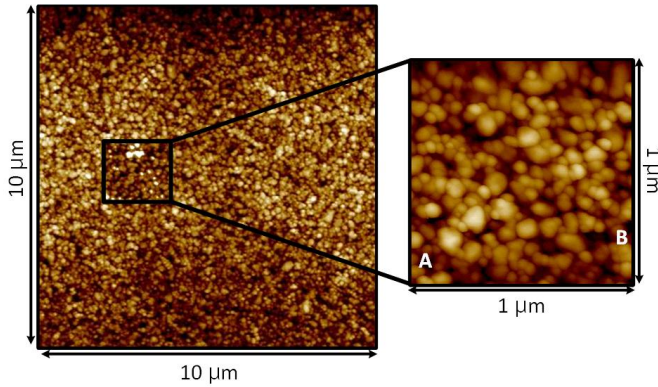
<표 1> 인쇄 기술 (Additive process) 비교

인쇄 방식	인쇄 물질	해상도(μm)	장점	단점	주요 기업체
물질 사출식 (Material extrusion)	열가소성수지 (Thermoplastic)	100~1,000	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 생산비용 • 기술 호환성 • 높은 적층률 	<ul style="list-style-type: none"> • 표면 거칠기 • 매질 이방성 	<ul style="list-style-type: none"> • Stratasys • 3D systems • Ultimaker
SLA 식 (Stereolithography)	감광성 수지 (Photo-polymer)	1~100	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 표면 거칠기 • 높은 해상도 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 생산비용 • 높은 고주파 손실 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialise • 3D systems
물질 분사식 (Material jetting)	감광성 수지 왁스 접착제	10~100	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 표면 거칠기 • 높은 해상도 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 생산비용 • 높은 고주파 손실 	<ul style="list-style-type: none"> • Objet • 3D systems
에어로졸 분사식 (Aerosol jetting)	은나노 입자 감광성 수지	10~100	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 표면 거칠기 • 높은 해상도 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 생산비용 • 낮은 적층률 	<ul style="list-style-type: none"> • Optomec
잉크 분사식 (Inkjet)	은나노 입자 감광성 수지	10~100	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 생산비용 • 잉크 다양성 	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 적층률 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimatix
주사기 펌프식 (Syringe pump)	은나노 입자 기타 점성 물질	100~1,000	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 생산비용 • 잉크 다양성 • 높은 적층률 	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 해상도 	<ul style="list-style-type: none"> • nScript

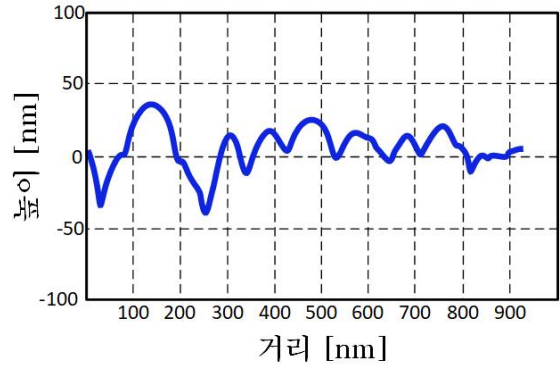
페이스트(Paste)의 원료로 많이 사용된다. 주로 잉크젯 방식이나 스크린 프린팅 방식으로 패턴을 인쇄하며, 은 입자의 농도가 낮을 경우는 잉크젯 방식을, 높을 때는 스크린 프린팅 기술을 사용한다. 잉크젯 방식으로 인쇄된 전도성 박막의 표면은 나노 입자가 충분히 작기 때문에 표면 거칠기가 매우 낮고, 반짝이는 박막 형태로 인쇄가 된다. [그림 2]는 잉크젯 방식으로 인쇄된 전도성 박막의 표면을 원자간력 현미경(Atomic Force Microscope: AFM)으로 살펴본 사진이다. [그림 2-(a)]는 10 μm²와 1 μm² 면적을 각각 AFM을 통해

살펴본 사진이며, [그림 2-(b)]는 선분 AB를 따라서 자른 단면을 나타내고 있다. 높고 낮음의 차이는 있지만 약 100 nm 보다 작은 값으로 표면의 높낮이가 변화하며, 은나노 입자의 크기가 표면 거칠기(surface roughness)에 직접 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

인쇄 기술을 이용해서 초고주파 소자를 제작하려면 금속의 전기 전도성과 표면 거칠기뿐만 아니라, 포피 효과(skin effect) 때문에 금속의 두께도 중요하다. 잉크젯 인쇄 기술에서 인쇄된 박막의 두께에 영향을 주는 요소는 다양하지



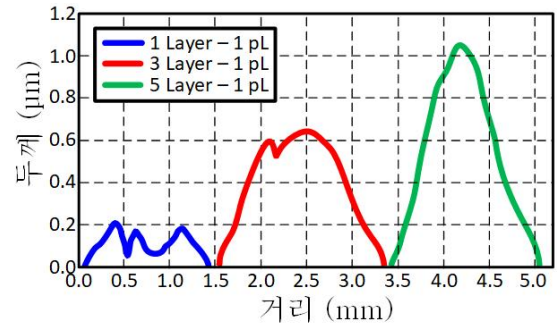
(a) AFM 사진



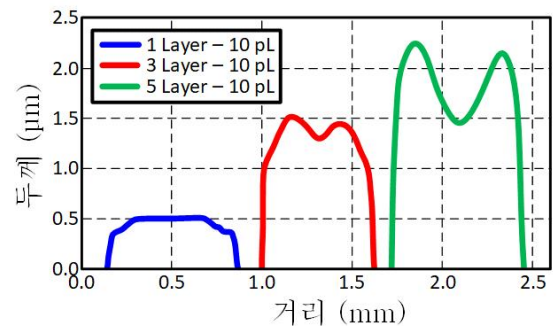
(b) 단면도

[그림 2] 인쇄된 은나노 입자 표면 AFM 스캔

만, 인쇄 기술 자체에서부터 오는 중요한 요소 중 하나는 바로 잉크 방울의 부피이다. 연구용으로는 주로 1 pL나 10 pL의 방울 크기를 사용하며, 상업용 일반 잉크젯 프린터는 약 80~150 pL의 잉크 방울을 사용한다. 인쇄된 후 잉크의 두께와 균일함은 잉크와 매질(substrate)의 표면 장력(surface tension) 혹은 표면 에너지(surface energy)에 의해 결정되며, 입자의 밀도와 용매의 건조 속도에 따라서도 변화한다. 많은 요소가 잉크젯 인쇄 기술에 영향을 미치기 때문에 모든 변수를 잘 통제해야만 균일한 두께에 표면이 매끈한 전도성 박막을 구현할 수 있다. [그림 3]은 1 pL과 10 pL의 잉크 방울을 사용하여 직사각형 박막 패턴을 유리 위에 인쇄한 단면을 나타낸다. 1 pL 잉크 방울을 사용하면 인쇄 횟수 당 약 0.5 μm씩 박막 두께가 증가하였으며, 10 pL의 잉크 방울 부피는 약 1.0 μm씩 증가하였다. 10 pL 잉크 방울을 사용하여 5회 인쇄한 패턴의 경우, 가운데가 움푹 들어간 M자 모양으로 나타난 것을 관찰할 수 있다. 이는 잉크 증발 속도의 차이 때문에 생기는 커피 고리 효과(coffee ring effect)이며, 가장자리로 입자가 모이는 현상이다⁹⁾. 잉크젯 방식으로 인쇄한 은나노 입자 잉크는 소결 공정(sintering process)을 통해서 전도성 나노 입자와 함께 인쇄된 용매와 불순물을 모두 증발시키거나 태워 버림으로써 비교적 높은 전기 전도성을 가지게 된다. 120~180°C에서 소결 공정을 거친 은나노 입자 박막의 전기 전도성은 약 $3 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6$ S/m이며, 이는 순수한 은의 전기 전도성보다 약 1/21~1/8배 낮은 전기 전도성 값이다([그림 4]). 이는 다른 금속들과 비교하면 높은 전기



(a) 1 pL 잉크 방울



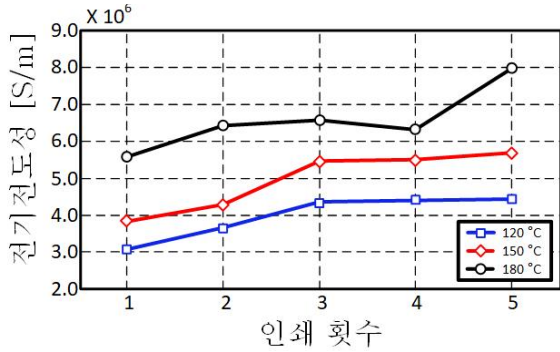
(b) 10 pL 잉크 방울

[그림 3] 잉크젯 방식으로 인쇄된 은나노 입자의 단면

전도성은 아니지만, 진행파(traveling wave)나 후방산란 RFID 안테나를 만드는 데에는 충분한 전기 전도성이다.

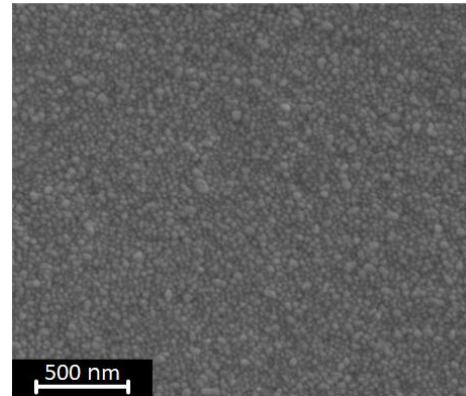
2-2 PdCl₂ 촉매제를 이용한 구리 박막 인쇄

은 나노 입자를 이용한 전도성 박막 인쇄는 비교적 높은

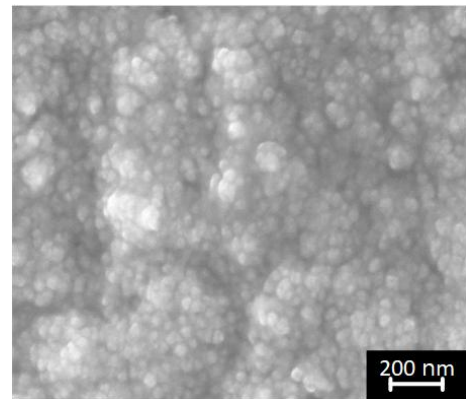


[그림 4] 인쇄된 은나노 입자 박막의 전기 전도성

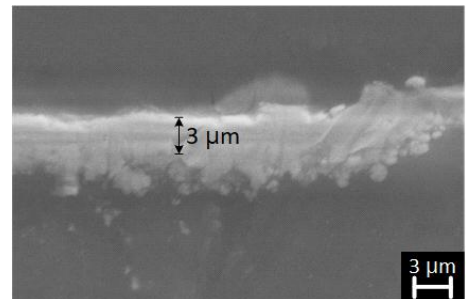
전기 전도성과 낮은 표면 거칠기를 가지는 장점이 있지만, 납땀 공정과는 호환성이 좋지 않다. 공정상의 한계점을 극복하기 위해서 PdCl₂ 촉매 잉크를 이용하여 간접적으로 구리 박막을 인쇄하는 기술이 개발되었다. 무전극 도금 방식이며, 황산구리(CuSO₄) 수용액 안에서 PdCl₂가 시드층(seed layer) 역할을 하여 구리 박막을 형성한다. 잉크젯 인쇄 기술을 이용한 무전극 구리 도금 공정은 [그림 5]에 간략히 나와 있다. 인쇄한 촉매 잉크를 자외선(UV)에 노출시키는 ②번 공정은 촉매제(PdCl₂)를 매질(substrate)에 더욱 견고하게 부착시키기 위한 공정이다. 이렇게 형성된 구리 박막의 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)사진은 [그림 6]에 나와 있다. 비교를 위해서 은나노 입자 잉크를 이용해 인쇄한 전도막 표면 사진을 [그림 6-(a)]에 담았다. [그림 6-(b)]는 PdCl₂ 촉매 잉크를 사용해서 인쇄한 구리 박막의 표면이며, 은나노 입자를 인쇄한 박막보다 거칠게 표면이 나타난 것을 쉽게 알 수 있다. 구리 수용액에서 50분간 성장시킨 구리 박막의 두께는 약 3 μm이며, [그림 6-(c)]에 잘 나타나 있다. 구리 박막은 납땀 공정과 호환성이 좋기 때문에 상업적



(a) 은나노 입자 SEM 사진

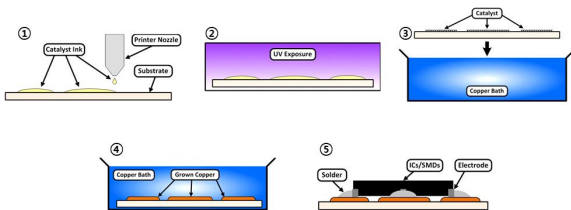


(b) 구리 박막 SEM 사진



(c) 구리 박막 단면 SEM 사진

[그림 6] PdCl₂ 촉매를 이용한 구리 박막 인쇄 공정



[그림 5] PdCl₂ 촉매를 이용한 구리 박막 인쇄 공정

가치가 높고, 표면 실장 기술(Surface Mounting Technology: SMT)을 이용해서 하이브리드 인쇄 전자 기술(Hybrid Printed Technology)을 가능하게 하는 매우 중요한 기술이다.

2-3 인쇄 회로 소자

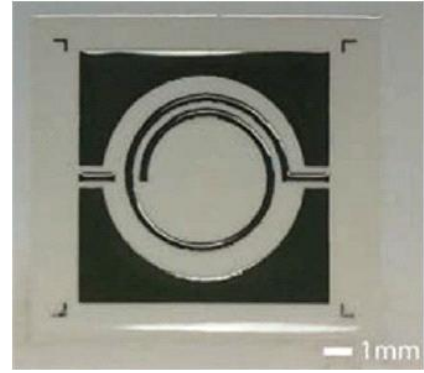
앞에서 소개된 전도성 박막 인쇄 기술을 이용하면, 손쉽

게 직류에서부터 GHz 대역까지 동작하는 기초적인 RLC 회로 소자를 구현할 수 있다. 인쇄 기술로 회로 소자를 만들기 위해서는 유전체 인쇄 기술이 필수적인데, Su-8과 PVP 같은 폴리머는 액체 상태에서 고체 상태로 변환이 용이하기 때문에 인쇄 전자 기술에서 많이 쓰이는 재료이다. 저항기(R)의 경우는 인쇄된 금속 입자의 소결 과정에서 소결 온도를 낮추거나, 잉크에 불순물을 첨가함으로써 저항값의 조절이 가능하다. 인덕터(L)와 커패시터(C)의 경우는 두 개의 금속층 거리를 일정하게 유지시키는 유전체 층이 필요하다. [그림 7-(a)]는 인쇄 기술로 구현한 정사각형 평행판 커패시터이다. 금속-유전체-금속(Metal-Insulator-Metal: MIM) 구조로 되어 있으며, 약 3 GHz 대역까지 동작하는 것을 확인하였다^[10]. 인덕터 또한 인쇄 기술만을 이용하여 구현되었으며, 약 1 GHz 대역까지 동작하는 것을 확인하였다([그림 7-(b)]^[11]). 평면 위에 나선형 인덕터를 인쇄하고, Su-8 폴리머를 이용하여 브릿지를 만들어서 나선형 인덕터의 안쪽과 바깥쪽을 연결하였다. 인쇄 기술과 전자 잉크(은나노 입자 잉크, 폴리머 잉크)를 이용해 제작한 전자 소자들은 기본적으로 유연성(flexibility)을 가지며, 필요한 부분만 인쇄하기 때문에 원치 않는 재료의 과다 사용이나 제작 후 부산물이 거의 발생하지 않는다.

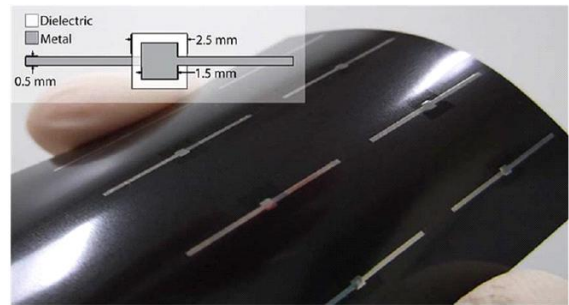
좀 더 복잡한 구조의 고주파 회로 및 시스템은 [그림 7-(c)]에 나타난 것과 같이 하이브리드 인쇄 기술을 통해서 만들 수 있다^[8]. [그림 7-(c)]는 하이브리드 인쇄 기술로 제작된 RF-DC 전력 변환기이다. Schottky 다이오드로 구성된 차지 펌프(charge pump)를 이용하여 정류 회로를 구성하고, DC-DC 변환기에 전력을 공급해서 4.7 kΩ 부하(load)에 0.9 V를 지속해서 공급하는 회로이다. [그림 7-(c)]에 나타난 하이브리드 인쇄 전자기기는 금속 패턴과 수동 소자를 인쇄 기술로 제작하고, 고성능 집적 회로를 표면 실장 기술을 이용해 RF-DC 변환기를 만들었다. 하이브리드 인쇄 기술로 제작된 회로라서 RF-DC 변환기 회로가 유연성(flexibility)을 가지며, 고성능 실리콘 기반의 소자들의 성능도 모두 사용할 수 있다.

III. 무전력 무선 센서 기술

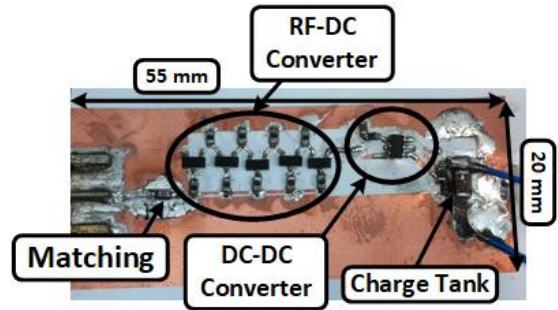
인쇄 기술은 전자공학에서 다양한 응용 분야가 있음



(a) 인쇄된 인덕터



(b) 인쇄된 커패시터



(c) 하이브리드 인쇄 기술: RF-DC 변환 회로

[그림 7] 인쇄 기술로 제작된 고주파 소자 및 회로

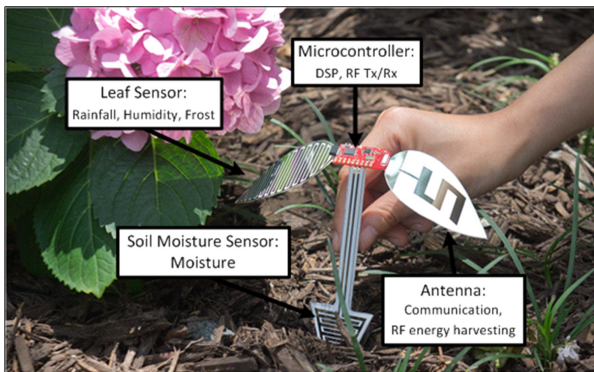
살펴보았다. 인쇄 기술을 통해 형성된 전도막은 주로 10 μm 이하의 얇은 두께를 가지며, 전기 전도성 또한 본래 금속의 도전율에 비교해서 약 1/10 정도로 낮게 나타나기 때문에 높은 전력이나 높은 Q-값(Q-factor)을 요구하는 공진기 설계에는 적합하지 않다. 하지만 후반 산란을 이용하는 RFID 기술은 인쇄 기술로 구현되는 박막으로 충분히 구현할 수 있으며, 센서와 같이 탐문 신호(interrogation signal)의 위상 변화나 공진 주파수의 변화를 감지해 내는 데에는 충분하다.

따라서 인쇄 기술을 RFID를 이용한 센서 기술과 융합한다면, 두 기술의 장점을 모두 갖춘 무선 센서 시스템을 설계할 수 있다.

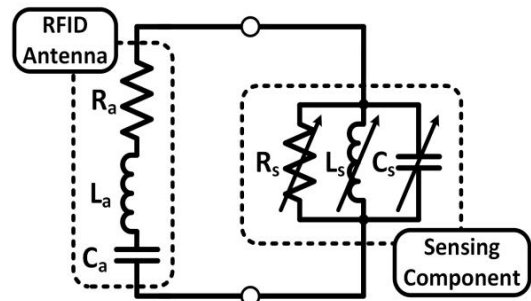
3-1 RFID-기반 센서 기술

RFID 기술의 특징 중 하나는 에너지 수확 기술이다. RFID 기술의 기본 동작 원리를 살펴보면, RFID 리더기의 무선 송신 신호에 담긴 전자기 에너지를 안테나를 통해 수확하고, 수확한 에너지를 이용하여 RFID 칩을 활성화한다. 활성화된 칩은 정보를 담은 전자기파를 다시 송출하여 RFID 리더기에 정보를 전달한다. 이처럼 RFID 태그는 외부에서 전력을 전달받으며, 자체 동력이 필요 없는 수동 태그인 경우가 대부분이다. 이때, 반송되는 신호에 위상의 변화나 안테나를 통해서 주파수 응답을 변화시킨다면 충분히 센서로써 작용을 할 수 있다. 이렇게 RFID 기반으로 설계된 무선 센서는 배터리와 같은 자체 전력이 필요 없으며, 외부의 전자기파 신호를 RFID 안테나에 연결된 센서를 이용해 변조 후 재방사(혹은 후방산란)하는 자율형 무선 센서로 이해할 수 있다. [그림 8]은 RFID-기반 무전력 자율형 센서의 개념도를 보여 주고 있다.

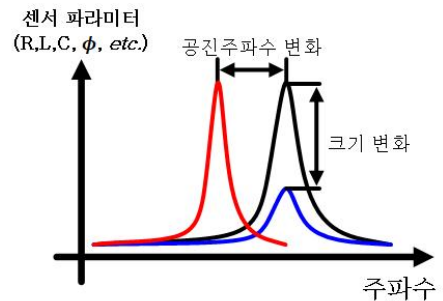
RFID-기반 센서 기술의 개념은 [그림 9]에 잘 나타나 있다. [그림 9(a)]와 같이 RFID 안테나와 센서가 연결된 RLC 등가 회로를 이용해 나타낼 수 있다. 리더기로부터 입사된 전자기파를 센서 소자를 이용해 변조 후 리더기로 반송하고, 반송파의 중심 주파수 및 위상을 계산하여 센서 정보를 읽어내는 방식이다([그림 9-(b),(c)]). 앞서 이야기한 바와 같이



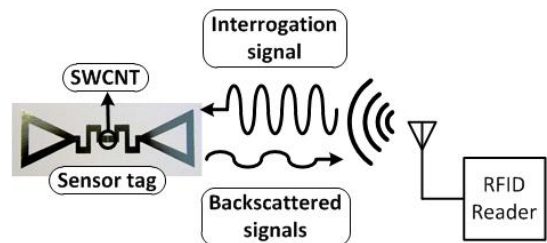
[그림 8] 무전력 자율형 무선 센서 개념도



(a) RFID-기반 센서 등가 회로



(b) RFID-기반 센서 작동 원리



(c) RFID-기반 센서 구조

[그림 9] RFID-기반 센서 기술 개념도

센서 태그는 자체 전력의 필요 없이 외부로부터 입사되는 전자기 에너지를 이용하여 동작한다. 이 원리를 이용하여 다양한 센서들(기체, 터치 센서 등)이 연구되었으며, 앞으로 도 많은 분야에 활용될 가능성이 매우 큰 기술이다.

3-2 후방산란 통신 기술

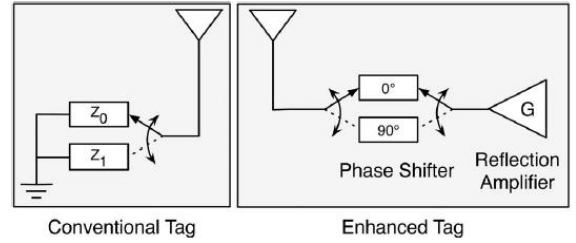
후방산란 기술을 이용하는 RFID 안테나의 성능 지표는 크게 두 가지가 있다. 하나는 통신 거리를 증가시키는 것이고, 다른 하나는 역지향성 안테나 배열(retrodirective antenna array)를 이용하여 방사 패턴을 개선하는 방식이다. [그림 10]은 Reflection UHF RFID 대역 고주파 증폭기를 이용하여

통신 거리를 획기적으로 증가시킨 RFID 태그 설계 기술을 보여준다^[12]. 반사파와 입사파 모두 증폭시키는 고주파 증폭기를 고주파 커플러를 이용하여 설계하였으며, 전력 소모를 최소한으로 줄여서 에너지 수확기술로 작동할 수 있도록 최적화 하였다. [그림 10-(a)]에서 묘사된 것과 같이 부하 변조 방식(load modulation)을 이용하여 후방산란 신호를 변조하도록 설계되었다^[13]. [그림 10-(b)]는 후방산란 태그의 동작 원리는 스미스 차트를 통해서 보여주고 있다. 저전력 Reflection 고주파 증폭기가 후방 산란 신호를 위상천이기(phase shifter)를 통해서 변조하는 원리를 도식화 하였다. 측정된 후방 산란 신호 주파수 응답은 [그림 10-(c)]에 나와 있다. 중심 주파수(carrier frequency)는 UHF RFID 대역인 915 MHz이고, 변조된 부반송파(modulated subcarrier)의 주파수는 250 kHz이다. 저전력 Reflection 고주파 증폭기로 인해서 약 9 dB 정도 수신 신호의 크기가 증가한 것을 관찰할 수 있다.

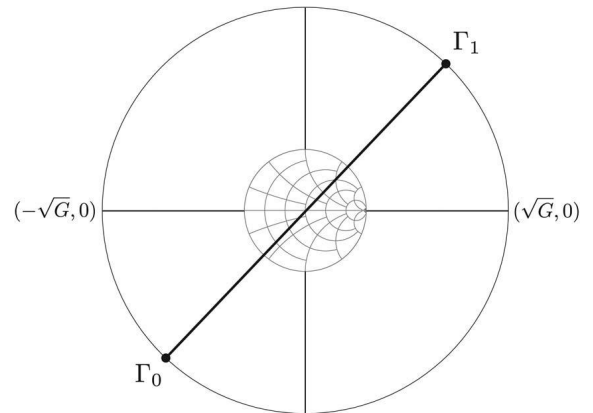
통신 거리를 증가시키는 것 이외에 RFID 태그의 가독성을 증가시키는 방법은 바로 역지향성 원리를 이용하는 것이다^[14]. 역지향성 원리에 따라 안테나를 배열함으로써, 반송파를 입사파와 똑같은 방향으로 후방 산란시킬 수 있기 때문에 주목받는 기술이다. 배열 안테나를 이용하기 때문에 안테나 크기가 작은 밀리미터파(Millimeter Wave: mmWave) 대역에서 많이 사용된다. 인쇄 기술을 이용하여 제작한 1×5 선형 배열 안테나와 Van-Atta 역지향성 배열 안테나는 [그림 11]에 나타나 있다^[15]. 30 GHz 대역에서 동작하는 후방산란 RFID-기반 센서를 위해 제작한 배열 안테나이며, 5×5 Van-Atta 배열 안테나의 경우 명함 하나 정도의 크기를 가진다. 역지향성 배열안테나의 특성 덕분에 RFID 안테나의 RCS 차이가 입사각 0~70° 사이에서(빔폭: 140°) 10 dB 가량 차이가 나는 것으로 확인되었다. 이처럼 통신 거리와 각도가 중요했던 후방산란 기술에 소개된 기술을 적용하여 성능을 더욱 개선할 수 있으며, 센서 기술과 통합되어 산란 신호를 변조한다면 무전력 센서 태그의 성능도 더욱 향상될 것이다.

IV. 결 론

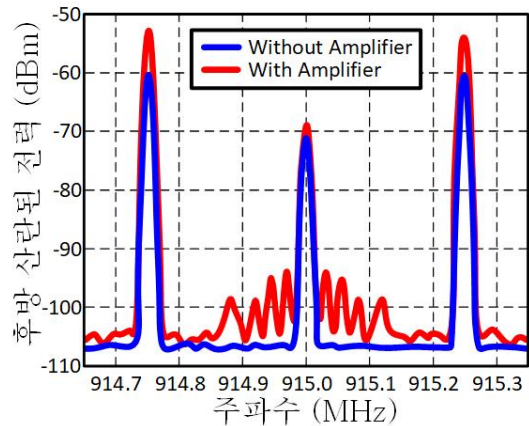
인쇄 기술은 익히 알려진 데로 경제적이고 친환경적인 공정이다. 이를 이용하여 간단한 회로부터 복잡한 고주파



(a) 부하 변조 방식



(b) 부하 변조 원리



(c) 후방산란 태그 주파수 응답

[그림 10] 부하 변조를 이용한 후방산란 통신 기술

시스템까지 구현한 연구가 많이 보고되었다. 나노 입자를 이용한 직접적인 전도막 인쇄 방식은 표면 거칠기가 낮고 비교적 전기 전도성이 높지만, 납땜 공정과의 호환성이 좋지 않아서 하이브리드 인쇄 기술이나 실리콘 기반의 집적 회로와의 통합성이 떨어진다. 하지만 촉매제를 이용한 무전극



(a) 인쇄된 1×5 역지향성 안테나



(b) 인쇄된 5×5 역지향성 안테나

[그림 11] Van-Atta 구조를 이용한 후방산란 기술

구리 도금법은 납땀과 공정 호환성이 좋아서 인쇄 기술과 실리콘 기술을 절충한 하이브리드 인쇄 기술에 적합한 공정이다. 한편, RFID 기술은 인쇄 기술과 호환성이 좋으므로 인쇄 기술을 적용하기 적절하며, 인쇄 센서 기술과 인쇄 RFID 기술을 융합하여 무전력 무선 센서 시스템을 효율적으로 설계할 수 있다. 또한, 역지향성 배열 안테나의 원리나 저전력 Reflection 고주파 증폭기를 이용한 RFID 태그 안테나 설계 기술은 후방산란 기술을 이용하는 무전력 센서 태그의 통신 거리를 증대시켜 줌으로써 전체적인 무선 센서 시스템 성능 개선에 지대한 기여를 할 수 있다. 앞으로 다가올 사물인터넷(IoT) 초연결 사회에서 무전력 자율형 센서 시스템의 중요성은 더욱 증대될 것으로 기대되며, 현재 많은 연구가 진행되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*, 3rd ed. New York, NY, 10158: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [2] L. Yang, Z. Rongwei, D. Staiculescu, C. P. Wong, and M. M. Tentzeris, "A novel conformal RFID-enabled module utilizing inkjet-printed antennas and carbon nanotubes for gas-detection applications", *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 653-656, 2009.
- [3] V. Lakafosis, A. Rida, R. Vyas, L. Yang, S. Nikolaou, and M. M. Tentzeris, "Progress towards the first wireless sensor networks consisting of inkjet-printed, paper-based RFID-enabled sensor tags", *Proc. IEEE*, vol. 98, no. 9, pp. 1601-609, Sep. 2010.
- [4] S. Kim, Y. Kawahara, A. Georgiadis, A. Collado, and M. M. Tentzeris, "Low-cost inkjet-printed fully passive RFID tags for calibration-free capacitive/haptic sensor applications", *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 6, pp. 3135-3145, Jun. 2015.
- [5] S. A. Nauroze, J. G. Hester, B. K. Tehrani, W. Su, J. Bito, R. Bahr, J. Kimionis, and M. M. Tentzeris, "Additively manufactured RF components and modules: Toward empowering the birth of cost-efficient dense and ubiquitous IoT implementations", *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 702-722, Apr. 2017.
- [6] E. M. Amin, M. S. Bhuiyan, N. C. Karmakar, and B. Winther-Jensen, "Development of a low cost printable chipless RFID humidity sensor", *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 1, pp. 140-149, Jan. 2014.
- [7] S. Kim, B. Cook, T. Le, J. Cooper, H. Lee, V. Lakafosis, R. Vyas, R. Moro, M. Bozzi, A. Georgiadis, A. Collado, and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed antennas, sensors and circuits on paper substrate", *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 7, no. 10, pp. 858-868, Jul. 2013.
- [8] S. Kim, S. Jeong, J. Bito, A. Georgiadis, and M. M. Tentzeris, "A flexible RF energy harvester using a hybrid

- printing technology for 'stand-alone' wireless sensor platforms", *IOP Flex. Printed Electron.*, vol.3 , no. 1, Jan. 2018.
- [9] B.-J. Gans, U. S. Schubert, "Inkjet printing of well-defined polymer dots and arrays", *Langmuir*, vol. 20, no. 18, pp. 7789-7793, Jul. 2004.
- [10] B. S. Cook, J. R. Cooper, and M. M. Tentzeris, "Multi-layer RF capacitors on flexible substrates utilizing inkjet printed dielectric polymers", *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 23, no. 7, pp. 353-355, Jul. 2013.
- [11] G. McKerricher, J. G. Perez, and A. Shamim, "Fully inkjet printed RF inductors and capacitors using polymer dielectric and silver conductive ink with through vias", *IEEE Trans. Electron. Devices*, vol. 62, no. 3, pp. 1002-1009, Mar. 2015.
- [12] J. Kimionis, A. Georgiadis, A. Collado, and M. M. Tentzeris, "Enhancement of RF tag backscatter efficiency with low-power reflection amplifiers", *IEEE Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 12, pp. 3562-3571, Dec. 2014.
- [13] S. Thomas, E. Wheeler, J. Teizer, and M. Reynolds, "Quadrature amplitude modulated backscatter in passive and semipassive UHF RFID systems", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 4, pp.1175-1182, Apr. 2012.
- [14] J. A. Vitaz, A. M. Buerkle, M. Sallin, and K. Sarabandi, "Enhanced detection of on-metal retro-reflective tags in cluttered environments using a polarimetric technique", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 8, pp. 3727-3735, Aug. 2012.
- [15] J. G. D. Hester, M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed flexible mm-Wave Van-Atta reflectarrays: A solution for ultralong-range dense multitag and multisensing chipless RFID Implementations for IoT Smart Skins", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 12, pp. 4763-4773, Dec. 2016.

≡ 필자소개 ≡

김 상 길



2010년 10월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2011년 12월: Georgia Institute of Technology (공학석사)

2014년 12월: Georgia Institute of Technology (공학박사)

2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc.

2018년 3월~: 부산대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 모바일 기기용 5G 안테나 및 모듈, RFID-기반 후방산란 자율형 무선 센서, RF 바이오 메디컬 센서