

# 강유전체의 Tunable RF 회로 및 시스템 응용

김 정 필  
 중앙대학교  
 전자전기공학부

## 요 약

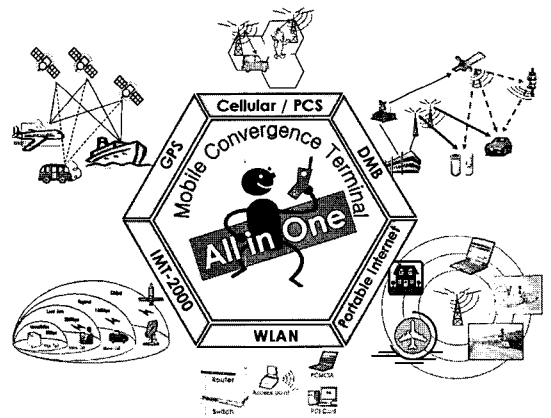
다양한 무선서비스를 기반으로 한 광대역 통합망(BcN: Broadband convergence Network) 네트워크 사회로의 진화와 더불어 증가하고 있는 Cognitive Radio 기술<sup>[3]</sup>에 요구는 모바일 컨버전스(융합) 단말기(Mobile Convergence Terminal) 개발을 필수적으로 요구하고 있고, 이를 위한 핵심 기술은 Tunable RF 회로 설계 기술이다. 이를 위해서는 고성능, 저가격의 Tunable 소자들의 개발이 급선무이다. 반도체 Varactor와 MEMS 스위치를 이용하는 기술이 보편화내지는 준성숙 단계로 접어들고 있는 상황이지만 강유전체(Ferroelectric)에는 기존 반도체 Varactor와 MEMS 스위치로 얻을 수 없는 특성들을 얻을 수 있다고 알려지면서 이에 대한 관심과 연구가 증대되고 있다. 본 논문에서는 강유전체의 개요와 특성, 연구 경향, Tunable 소자 및 회로, 더 나아가 시스템 응용에 대하여 살펴보고, 앞으로 해결해야 할 문제점들에 대하여 언급하고자 한다.

## I. 서 론

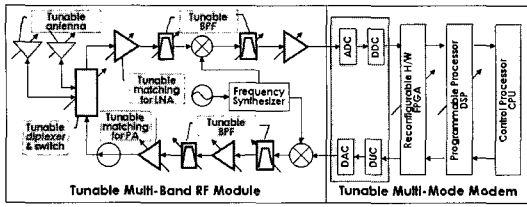
최근 수년 동안 무선이동통신 시장은 양적, 질적으로 대단한 급성장을 하고 있으며, 제 3세대 멀티미디어 이동통신 서비스 흐름까지 송수신 주파수와 데이터뿐만 아니라 서비스 내용도 크게 개선되어 왔다. 이에 더 나아가 최근 정보 통신 환경은 기존 휴대통신, DMB, 무선랜, 그리고 휴대인터넷 등 통신·방송·인터넷이 하나의 네트워크에 연결되는 광대

역 통합망(BcN: Broadband convergence Network) 기반 네트워크 사회로 빠르게 진화하고 있다<sup>[1][2]</sup>. 그리고 최근 들어 증가하고 있는 주파수 수요와 효율적인 주파수 관리 요구에 따라 적응형 주파수 선택 방법과 관련된 Cognitive Radio 기술<sup>[3]</sup>에 대한 관심도 급증하고 있다. 이와 같은 광대역 통합망 기반 유비쿼터스 컴퓨팅(Ubiquitous Computing) 환경을 실현하기 위해서는 부품, S/W, 시스템, 그리고 콘텐츠 등의 관련 산업 발전과 함께 모바일 컨버전스(융합) 단말기(Mobile Convergence Terminal) 개발이 필수적이다.

차세대 모바일 컨버전스 단말기란 하나의 단말기로 기존 이동통신에 PDA, MP3, 디지털 카메라, 캠코더 등의 단순 기능적 복합화뿐만 아니라 [그림 1]에 보인 것과 같이 GPS, 무선랜, DMB 방송 수신, 휴대 인터넷 등 서로 다른 주파수를 통해 제공되는 다양한 모바일 서비스를 주고받을 수 있는 신개념의 모바일 컨버전스(All in One) 기기를 말한다. 이러한



[그림 1] 모바일 컨버전스 단말기 개념



[그림 2] 모바일 컨버전스 단말기 transceiver용 tunable multi-band multi-mode transceiver

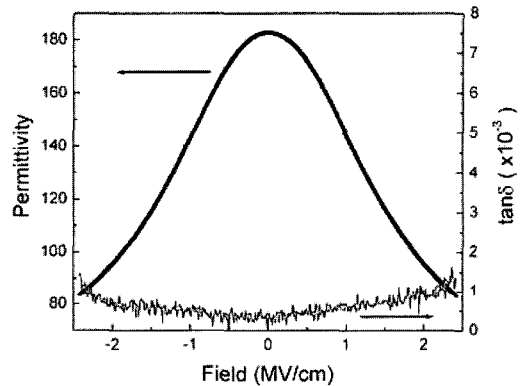
모바일 컨버전스 휴대단말기의 구현을 앞당기기 위해서는 [그림 2]에 보인 바와 같이 특히 안테나, 듀플렉서, 모뎀 등 단말기 transceiver 핵심 부품들의 소형화, 고성능화와 더불어 가변 특성의 다중 모드 (multi-mode), 다중 밴드(multi-band)화가 필수적이다.

본 논문에서는 이러한 모바일 컨버전스 휴대단말기 구현시 핵심 기술로 부상하고 있는 Tunable 회로 기술 중 하나인 Ferroelectric 관련 기술에 대하여 특성, 회로 응용, 향후 연구 방향 등에 대하여 살펴보고자 한다.

## II. 강유전체의 개요 및 특성

최근 미국과 영국 등 기술 선진국들 뿐만 아니라 국내에서도 GPS, 무선랜, DMB, 그리고 휴대 인터넷 등 무선 모바일 서비스 관련 기술적 컨버전스 부품에 대한 관심이 증대되고 있고, 특히 [그림 2]에 보인 것과 같이 모바일 컨버전스 단말기 transceiver 구성 핵심 부품인 Tunable multi-band 안테나, 듀플렉서 등의 RF 부품과 Multi-mode 모뎀에 대한 연구에 관심이 증대되고 있다.

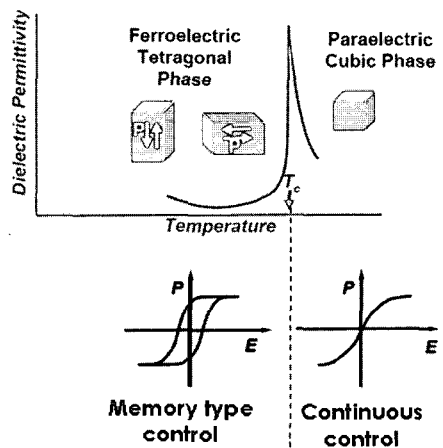
현재까지 Tunable RF 회로 구현에는 반도체 Vactor가 주로 이용되어 왔으며, 최근 들어서는 MEMS(Micro ElectroMechanical System) 스위치를 적용하는 연구도 많이 진척되고 있다. 그러나 이러한 기술들이 공정 비용과 전력 소모, 기타 성능 문제 등으로 대량 생산을 요하는 휴대단말 부품에 적용하기에



[그림 3] 강유전체의 인가 전기장 세기에 따른 유전율과 유전손실 특성

는 한계가 있다고 판단하여, 미국을 위시한 기술 선진국들에서 새로운 대안으로 강유전체(Ferroelectric 물질)에 대한 연구가 진행되어 왔다. BST( $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ : Barium Strontium Titanate)로 대표되는 강유전체는 [그림 3]에 보인 것처럼 인가 전압에 따라 유전율이 변하는 특성을 갖고 있고, 이 특성을 이용하여 회로의 동작 특성을 가변시킬 수 있음이 연구 결과로 증명되고 있다.

이러한 강유전체 물질은 일반적으로 서로 다른 종류의 세라믹 조성을 통하여 만들어지는데, [그림



[그림 4] 운용온도에 따른 강유전체의 상변화 특성

4]에서 보는 바와 같이 동작 온도가 Curie 온도(Tc)보다 작으면 Hysteresis 특성에 의한 메모리 특성을 갖는 강유전체가 되며, 크면 메모리 특성이 사라져서 상유전체(Para-electric)가 된다. 그러나 일반적으로 이러한 물질에 대해서 강유전체란 용어를 사용하고 있으나, 이 상태에서는 유전 손실이 상대적으로 많아 회로 응용은 상유전체를 대부분 사용하고 있다. 강유전체는 원래 군용 레이더용 위상배열 안테나의 중요 핵심 부품인 변위기의 제작 비용 절감과 소형, 경량화를 위해서 연구되었으나, 냉전시대의 종말에 따른 변위기 수요가 감소하게 되면서 관련 연구가 다소 정체되는 듯 했다. 그러나 최근 모바일 컨버전스 단말기 transceiver용 tunable 부품에 대한 필요성이 급부상함과 동시에 강유전체를 이용하면 <표 1>에 보인 바와 같이 소형화, 고속 스위칭, 낮은 제어 전압, High power handling, 그리고 매우 낮은 소비전력 등 기존 반도체 및 MEMS varactor로 얻을 수 없는 장점들을 갖고 있다고 알려지면서 이에 대한 연구가 다시 활발해지고 있다. <표 2>에 반도체, MEMS, 그리고 강유전체 Varactor 관련 기술을 비교하여 나타내었다. <표 2>에서 보듯이 현재 단계의 강유전체 Varactor는 손실 특성에서 해결해야 할 점이 있으나, 반도체 Varactor와 MEMS 기술 등을 상대로 조만간 경쟁력을 확보할 것으로 예측된다. 그리고 <표 3>에 강유전체 관련 소재와 회로 분야에서 세계적인 연구팀들의 연구 내용들을 정리하여 나타내었다.

<표 1> 강유전체의 고유 물질 특성과 회로응용시의 장점

Intrinsic Properties	Advantages for Circuit Application
High dielectric constant	Miniaturization
Field-dependent permittivity	Varactor replacement
Fast response	Fast switching speed
Low tuning voltage	IC driver compatibility
High breakdown field	High power handling
Low dielectric leakage	Low prime consumption

<표 2> RF varactor 구현 기술의 특성 비교

Items	Semiconductor	MEMS	Ferroelectric
Tunability	Good 5:1 typ.	~2:1 continuous >10:1 switched	Good 2-3:1 typ.
Power Handling	Limited	Good	Very good (freq. dependent)
Q (RF)	Fair	Fair	Good
Power Consumption	High	Low to High	Negligible
Control Voltage	-4 to -20V Doping dep.	± 40 V typ.	± 3 to 30V (freq. dependent)
RF Loss	Moderate	Low	Moderate
Tuning Speed	Very Fast	Slow	Very Fast
Reliability	Good well established	Vibration, shock sensitive	Good needs more data
Device Size	Very Small	Relatively Large	Very Small
Packaging / Environmental Sensitivity	Generally Hermetic	Hermetic/Vacuum	Non-hermetic Flip
Integration compatibility	Good, Si/GaAs Difficult passives	Good Si/GaAs Fair passives	Possible Si/GaAs Good passives
Cost	Medium	Medium	Low

<표 3> 모바일 컨버전스 단말기 transceiver용 RF 부품 연구 동향

국가	연구팀	주요 연구내용
미국	UC Santa Barbara, Argonne, National Lab/HRL Lab, Agile Materials & Technologies	varactor / phase shifter
	NASA University of Dayton	BPF / phase shifter
	Georgia Tech MicroCoating Technologies	varactor / phase shifter
	UCLA	filter / VCO / phase shifter
	Penn-State University, ATMI	Thick film phase shifter
	North Carolina State Univ. Paratek	phased array antenna
미국	MIT Lincoln Lab., DARPA	ferroelectric with ferrite
미국	University of Birmingham	tunable BPF

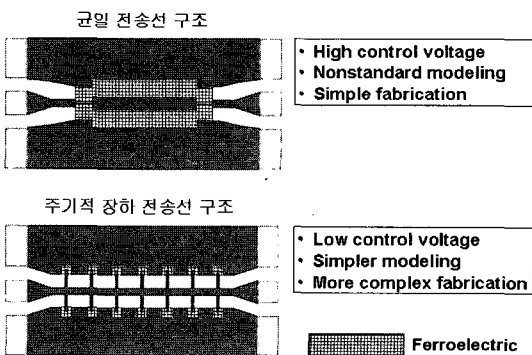
<표 3>에서 보듯이 기술 선진국들은 정부의 전략적 계획과 정책적 지원 아래 긴밀한 산학연 협력 체제를 형성하면서 모바일 컨버전스 단말기 transceiver 구성 핵심 부품인 tunable 안테나, 듀플렉서 등의 RF 부품 연구에 박차를 가하고 있다<sup>[3]~[9]</sup>.

### Ⅲ. 강유전체의 RF 회로 응용

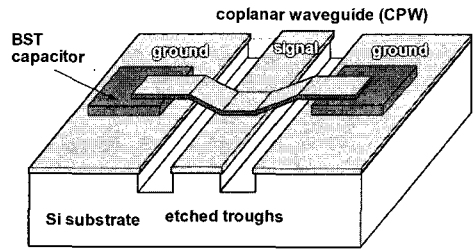
강유전체를 RF 회로에 응용하기 위해서는 먼저 재료와 회로 설계에 있어서 학제간 협력 연구가 필수적이다. 그러나 본 논문에서는 재료에 대한 기술적 언급은 가급적 자제하고 회로 설계 및 응용면에 초

점을 맞추어 살펴보기로 하겠다. RF 회로 분야에 있어서 강유전체를 이용한 초창기 연구는 주로 위상변위기에 국한되어 있었다. 이것은 앞에서도 언급한 바와 같이 군용 위상 배열 안테나에서 비용의 대부분을 차지하는 변위기의 비용 절감과 성능 향상에 대한 요구가 있었기 때문이었다. 그러나 초창기 강유전체 위상변위기에 대한 연구는 후막을 이용한 Microstrip 전송선 형태와 박막을 이용한 CPW 전송선 형태(그림 5)에 집중되었다. 그러나 연구 결과 전극 형성 문제에 의한 과다 손실로 FOM(Figure Of Merit: 전송손실당 위상변위량)이 좋지 않았고, 중심선과 접지선 사이의 간격이 넓어 제어전압이 실용에 문제가 될 정도로 매우 높다는 점이 문제점으로 대두되었다.

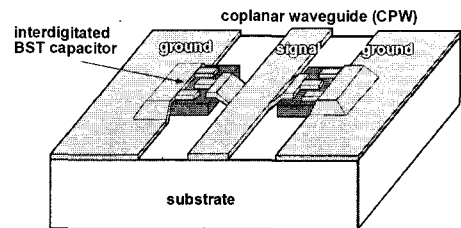
그 후 이러한 문제를 해결하기 위해 Santa Babara 대학과 Georgia Tech 등에서 [그림 6]과 같이 스테르블에 평행판 형태와 Interdigital 형태의 강유전체 Varactor를 형성시키고 이것을 주전송선에 주기적으로 연결하는 방법([그림 5])을 연구하게 되었다. 이렇게 함으로써 설계 구조는 다소 복잡해졌으나,  $\mu\text{m}$  이하로 강유전체 Varactor 양단 전극 간격을 만들 수 있어서 낮은 전압으로도 필요한 유전율의 변화를 얻을 수 있게 되었다. 그리고 회로 모델링이 간편해져 회로 설계에 많은 진전이 있게 되었다.



[그림 5] 강유전체를 이용한 위상변위기 회로 구조

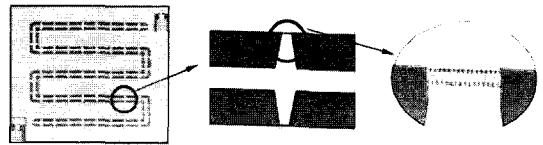


(a) 평행판 구조



(b) Interdigital 구조

[그림 6] 강유전체 varactor 구조



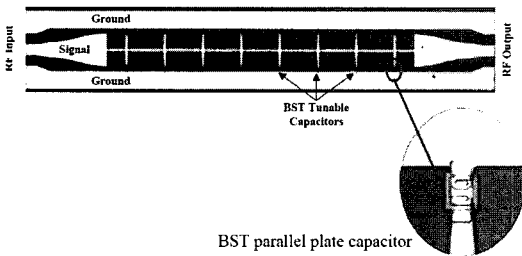
[그림 7] X-band 강유전체 위상변위기 설계, 제작 예

다음은 이러한 기본 강유전체 Varactor를 이용한 회로 응용에 대한 연구 결과들을 살펴보기로 하겠다. 먼저 위상변위기 회로 응용 예로 Interdigital 구조의 강유전체 Varactor를 이용한 X-band 위상변위기가 있다. [그림 7]과 <표 4>에 이 회로 구조와 특성을 정리하여 나타내었다. 주기적으로 장하된 Varactor 수는 98개이며, FOM은 73 도/dB로 매우 고무적인 결과 특성을 보이고 있다.

다음은 평행판 구조의 Varactor를 주기적으로 장하한 K-band 위상변위기 설계, 제작 예를 살펴보기로 한다. [그림 8]에서 보듯이 이 위상변위기는 8개의 강유전 Varactor를 장하시킨 구조로 이에 대한 설계, 측정 결과는 [그림 9]에 나타내었다. 그림에서 보

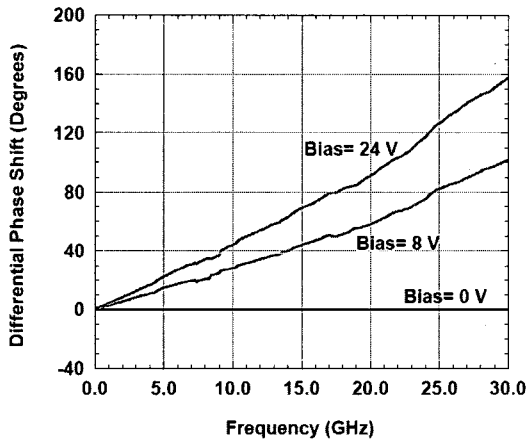
[표 4] Band 강유전체 위상변위기 특성 측정 결과

항목	결과 사양
frequency	X-band
# of varactors	98
Phase change	> 360 deg @ 8GHz
IL (dB)	< 5 dB
RL (dB)	> 10 dB
FOM	73 (deg/dB)



BST parallel plate capacitor

[그림 8] 평행판 구조의 강유전체 varactor를 이용한 K-band 위상변위기

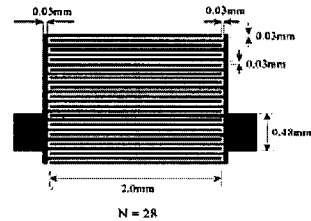


[그림 9] 평행판 구조의 강유전체 varactor를 이용한 K-band 위상변위기 특성

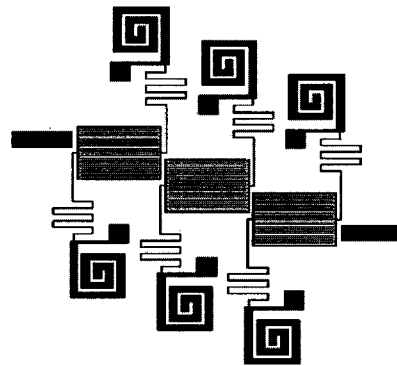
듯이 30 GHz에서 제어 전압을 24 V까지 바꿀 때 160도의 위상 변화를 보이고 있다.

또 다른 관심 있는 강유전체 RF 응용 회로로 Tunable Filter를 들 수 있다. 이에 대해서는 영국 Birmingham 대학에서 Tuning을 위한 여러 회로 구조에 대하여 많은 연구를 수행하고 있다. [그림 10(a)]는 강유전체 위에 Interdigital Capacitor 형태의 초전도체 패턴을 나타낸 것이며, (b)는 이 강유전체 Varactor, 분포소자 형태의 Inductor, 그리고 Bias 회로들로 이루어진 S-band Tunable Bandstop Filter를 보여주고 있다. 제어 전압을 통해 강유전체 영역에 전기장이 형성되고, 이에 따라 강유전체의 유전율이 변하므로 공진 주파수가 변한다.

이러한 강유전체 Tunable 회로 응용연구는 [그림 11]에 나타낸 것처럼 먼저 Tunable 전송선 또는 Varactor 소자 기술을 이용하여 위상변위기, 가변 필터, 가변 안테나, 가변 발진기 등의 회로 응용 단계

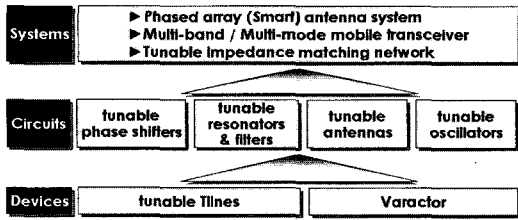


(a)



(b)

[그림 10] 강유전체와 초전도체를 이용한 interdigital 구조의 전극 패턴과 이 구조를 이용한 S-band tunable bandstop filter



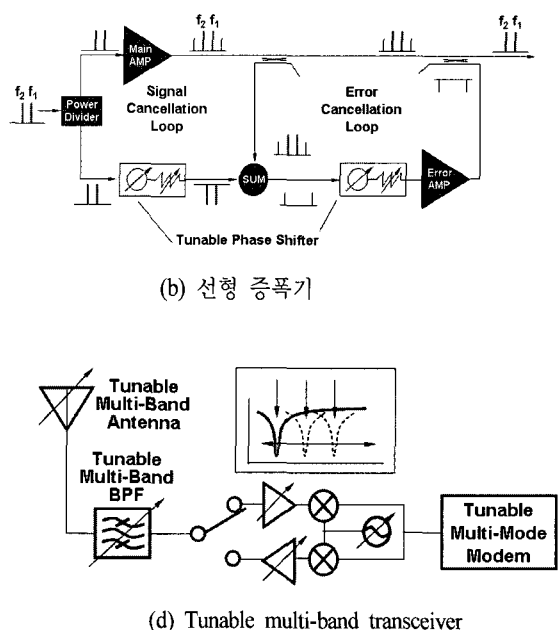
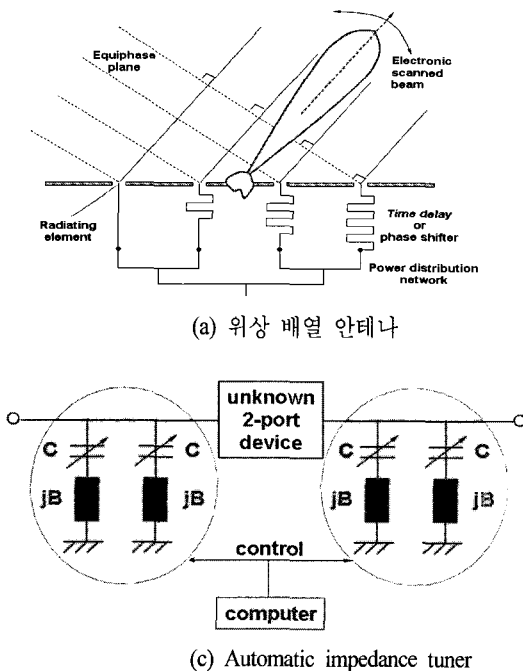
[그림 11] 강유전체의 회로 및 시스템 응용 단계

를 거치고 최종 System 및 Sub-system 응용으로 이어질 것이다. [그림 12]에 보인 바와 같이 저비용의 위상배열 안테나, 선형증폭기, 자동 임피던스 Tuner (Automatic Tuner), 그리고 Tunable Multi-band Transceiver 등이 유망한 응용분야일 것이다.

#### IV. 향후 연구 과제

앞에서 살펴본 것처럼 RF 회로를 구현하는 방법

으로 강유전체 응용 기술이 큰 경쟁력을 보일 것으로 판단되고 있으나, 여전히 연구하고 해결해야 할 문제점들이 남아 있다. 우선 RF 대역에서 강유전체의 Q 값을 향상시키는 연구가 필요하다. 이 문제를 해결하기 위해서는 강유전체 재료 자체의 조성 연구를 통한 새로운 물질 개발이 필요하며, 공정에서 문제가 될 수 있는 강유전체 성장 및 전극 형성 기술의 대한 연구가 병행되어야 할 것이다. 또한 원하는 요구 특성을 만족할 수 있도록 하는 RF 응용회로 구조 설계와 더불어 급증하는 무선 이동통신 시스템 및 부품에 적용하기 위한 저비용 패키징 기술 연구가 필요하다. 그리고 궁극적으로는 On-Chip 회로 기술과 기존 Si-SiGe/GaAs 등 RFIC 및 MMIC 공정과 양립할 수 있는 집적화 연구<sup>[10]</sup>가 필요하다고 보여진다. 이와는 별도로 강유전체를 사용하여 회로 특성을 변화시킬 때 임피던스 변화에 의한 임피던스 매칭 특성이 틀어지는 문제, 고출력 응용을 위해서는



[그림 12] 강유전체를 이용한 시스템 응용 예

RF 신호에 의해 강유전체 유전율이 변할 수도 있으므로 IMD 특성에 대한 해결 방안도 연구해야 할 것이다. 결국 이러한 연구들을 위해서는 재료와 RF 회로 설계 분야의 유기적 협력 연구가 필요하다고 판단된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 최근 Issue가 되고 있는 Tunable RF 회로 및 안테나 응용을 위한 강유전체 기술에 대한 개요, 회로 응용, 향후 연구 과제 등을 중심으로 살펴보았다. 세계적 연구 그룹들의 연구 결과들과 비교해볼 때 국내의 연구 결과들은 상대적으로 초기 단계라고 판단되며, 일부 대학 연구소와 국가 출연 연구소 등에서 일부 연구가 진행되고 있으나, 이 역시 군용 위상 배열 안테나에 주안점을 두고 있는 것이 다소 아쉽다. 그리고 무선 이동통신 분야에서도 PDA 폰, 카메라 폰, 그리고 MP3 폰 등 단순 기능적 컨버전스 부품에만 집중되어 있고, 진정 모바일 컨버전스를 위한 RF 관련 연구에 대한 정책 및 투자는 매우 미미한 상황이다. 지금부터라도 관련 연구자들이 뜻을 모아 연구에 매진할 필요가 있다고 보며, 이에 정부, 산업체에서도 적극적인 연구 지원이 필요하다 하겠다.

## 참 고 문 헌

- [1] 서홍석, 김정삼, 이재형, "광대역통합망 구축전략과 정책방향", *Telecommunications Review*, 14권 특집부록, pp. 3-19, 2004년 1월.
- [2] 김종진, "유무선 융합 서비스 현황", *정보통신정책(정보통신 정책 연구원)*, 15(23), 통권338호, pp. 44-50, 2003년 12월.
- [3] Workshop on Cognitive Radio Technologies, Office of Engineering and Technology, FCC, Washington, DC, May 2003.
- [4] F. D. Flaviis, N. G. Alexopoulos, and O. M. Staffsudd, "Planar microwave integrated phase-shifter design with high purity ferroelectric material", *IEEE Trans Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 6, pp. 963-969, Jun. 1997.
- [5] F. A. Miranda, "Design and development of ferroelectric tunable microwave components for Ku- and K-band satellite communication systems", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, no. 7, pp. 1181-1189, Jul. 2000.
- [6] H. T. Su, M. J. Lancaster, F. Huang, and F. Wellhofer, "Electrically tunable superconducting quasi-lumped element resonator using thin film ferroelectrics", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 155-158, Feb. 2000.
- [7] R. A. York, "Thin-film BST varactors for RF integrated circuits", *Workshop in IEEE International Microwave Symposium*, 2000.
- [8] B. Acikel, T. R. Taylor, P. J. Hansen, J. S. Speck, and R. A. York, "A new high performance phase shifter using  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  thin films", *IEEE Microwave Wireless Component Lett.*, vol. 12, no. 7, pp. 237-239, Jul. 2002.
- [9] D. Kim, Y. Choi, M. Ahn, M. G. Allen, J. Kenney, and P. Marry, "2.4 GHz continuously variable ferroelectric phase shifters using all-pass networks", *IEEE Microwave Wireless Component Lett.*, vol. 13, no. 10, pp. 434-436, Oct. 2003.
- [10] H. Kim, "Integration of microwave tunable (Ba, Sr)  $TiO_3$  based thin films with high-resistivity silicon substrates", *Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials*, vol. 1, pp. 193-194, 2005.

≡ 필자소개 ≡

김 정 필



1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학  
학과 (공학석사)

1998년 2월: 포항공과대학교 전자전기공  
학과 (공학박사)

1990년 1월~2001년 2월: LG 이노텍(주)

연구소

2001년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] Microwave 회로 및 안테나, RFIC, 무선통신 및  
Radar 시스템