

# 고온초전도체의 마이크로파 통신소자 연구 개발 현황

## — 고온초전도 필터를 중심으로 —



정동철

우석대

정보통신컴퓨터공학부 교수

### 1. 서론

초전도체를 마이크로파 및 밀리미터파 통신소자에 응용하려는 시도는 YBCO계나 BCCO계, 고온초전도 물질이 발견되기 이전부터 꾸준히 제기되어왔다. 이러한 시도는 초전도 물질을 이용한 통신소자의 개발이 기존의 구리나 금과 같은 일반 전도체를 기반으로 제작되는 마이크로파 통신소자에 비하여 낮은 저항손을 가지고 있기에 이를 통한 소자 내의 매우 작은 삽입 손실과 큰 이득을 구현할 수 있다는 사실에 기인한 것이다. 따라서 애초 초전도 물질의 통신소자 응용은 주로 니오븀이나 납 또는 이들의 합금으로 이루어진 저온초전도체를 기반으로 연구 개발되었다. 그러나 이러한 시도는 고가의 액체헬륨을 냉매로 이용해야 한다는 점과 대용량의 냉각 부대 시스템 부담으로 인해, 구현된 통신소자의 상업화의 전망이 그리 밝은 편은 아니었으며, 고도의 정밀성과 고효율성을 요구되는 항공우주분야나 군사무기체계 등과 같은 특수한 분야에서 그 가능성이 조심스럽게 점쳐진 바 있다[1]-[11].

현재까지 YBCO계 초전도 물질에 기반한 안테나, 대역통과필터, 통신용 믹서, 멀티플렉서 등과

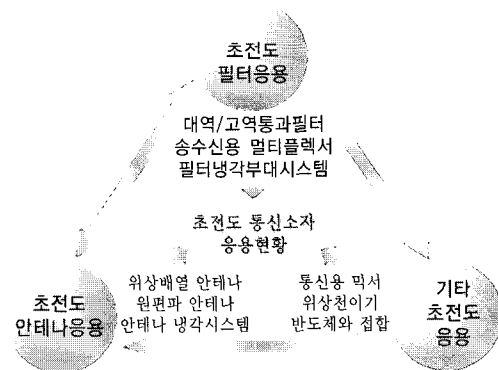


그림 1. 고온초전도 통신소자의 연구개발 분야.

같은 마이크로파 및 밀리미터파 대역 통신 소자들이 미국, 일본, 유럽 각국과 우리나라를 중심으로 활발하게 연구되고 개발된 바 있으며 그림 1에 개발분야를 개략적으로 도시하였다. 이러한 통신소자 개발분야를 전적으로 YBCO계 초전도 물질의 임계온도 상승과 대면적 박막화 기술의 발전에 기인한 것이다. 절대 온도 100 K를 능가하는 임계온도의 상승은 냉각비용 절감과 냉각 시스템의 경량화를 이룰 수 있었으며 고온초전도 박막기술의 대면적화는 단일 수동 소자의 개발 단계에서

탈피, 통신시스템 전단부 전체를 하나의 기판 상에 구현할 수 있는 수준에 까지 그 가능성을 열어 놓고 있다 [12]-[18].

1993년 미국 해군성을 중심으로 수행된 HTSSE-I (High Temperature Superconductivity Space Experiment) 과제는 고온초전도 물질을 이용해 마이크로파 통신소자들을 인공위성 등과 같은 항공우주용으로 이용하고자 시도한 첫 걸음이었다. 이후 HTSSE-I 과제의 성과를 바탕으로 1999년 HTSSE-II 과제를 통하여 기 개발된 초전도 통신소자를 Argos 위성에 탑재, 초전도 통신 소자의 우주 통신에의 가능성 연구(Feasibility Study)를 성공적으로 마감한 바 있다[19].

초기 미국 해군성을 중심으로 연구된 고온초전도체를 이용한 마이크로파 통신 소자 개발 경쟁은 이후 우리나라와 일본과 유럽, 미국의 각 대학과 연구소 중심으로 활발하게 전개된 바 있으며 초기 항공우주 산업 응용에서 탈피 이동통신 시스템과 위성방송 시스템 등으로 그 영역을 확대해나가고 있는 형편이다[20].

본고에서는 국내외적으로 활발히 진행되고 있는 고온초전도 마이크로파 통신 소자 개발 동향을 간략하게 소개하고 고온초전도 마이크로파 소자 중 현재 상업화가 진행 중이며 가장 먼저 산업화가 이루어질 것으로 전망되는 초전도 통신용 필터를 중심으로 그 연구 성과와 개략적인 연구 과정 등을 소개할 것이다.

## 2. 국내외 개발 환경 및 연구 동향

### 2.1 국내 연구 개발 동향

국내에서 수행 중인 고온초전도 마이크로파 수동 소자에 관한 연구 동향은 크게 대역통과 필터 분야와 고온초전도 믹서 및 능동 소자 분야 그리고 초전도 안테나 분야로 나눌 수 있다. 고온초전도 박막을 이용한 대역통과 필터 분야는 학계와 연구소를 중심으로 활발히 연구되고 있으며 전자통신연구원, LG 종합기술원, 연세대학교, 건국대학교, 인천대학교 등에서 활발한 연구 성과를 보이고 있다[21]-[23]. 특히 LG 종합기술원과 전자통

신연구원에서 발표한 대역통과 필터의 경우; 이동통신 대역에서 현 상태로 곧바로 기지국에 투입하여도 손실이 없을 만큼의 수준을 자랑하고 있으며 거의 무손실에 가까운 삽입 손실 특성과 수직에 가까운 주파수 선택성(Skirt Selectivity)을 가지고 있는 등 국제적인 연구 성과와 대등 또는 우월한 성능을 가지고 있는 것으로 판단된다.

고온초전도 믹서 분야 및 능동 소자 분야는 전자통신연구원, 한양대학교 등에서 활발하게 연구되고 있다. 특히 한양대학교의 경우 고유전율을 가지는 유전체를 초전도 도체 위에 증착시킴으로써 외부 전계에 의한 유전률의 변화를 유도, 통과 대역을 변화시키는 능동소자의 성격을 가지고 있다는 점에서 주목할 만하다.

고온초전도 안테나 개발은 여타 소자에 비해 다소 열악한 환경을 가지고 있지만 주된 연구성과로는 본 연구팀에 의해 소형화 초전도 안테나 및 원편파 배열 안테나, 안테나 대역폭의 광대역화가 이루어졌으며 전자통신연구원의 대수주기 구조에 Josephson 접합할 부가한 초전도 안테나, 한남대학교의 나선형 초전도 안테나 등이 주요한 연구 성과로 보고되고 있는 형편이다.

### 2.2 국제적 연구 개발 동향

전술하다시피 초기 초전도 통신소자의 개발을 선도한 바 있는 미국의 경우, 우주공간에서 초전도 통신소자의 가능성을 확인한 HTSSE-I (High Temperature Superconductivity Space Experiment Program; 1989-1993) 연구 과제를 거쳐 1999년 HTSSE-II를 통하여 기 개발된 초전도 통신소자를 Argos 위성 에 탑재, 초전도 통신 소자의 우주 통신에의 가능성 연구(Feasibility Study)를 성공적으로 마감한 바 있다. 현재 이러한 성과를 바탕으로 미국 항공우주국 (NASA)과 해군연구소 (Naval Research Center)을 중심으로 한 초전도 통신 소자 연구그룹은 군사 목적 및 상업 목적 (Military Goal and Civilian Goal)에 맞는 HTSSE-III 추진에 박차를 가하고 있는 형편이다. 미 해군 우주연구소 (SPAWAR)의 M. Nisenoff 박사의 보고에 따르면 HTSSE과제에서 개발된 통신소자들은 지상에서 5년을 포함 우주에서

1년 동안 특별한 변화 없이 우수한 성능을 유지하고 있다고 밝히고 있다[25].

한편, 유럽 연합을 기초로 하는 고온초전도 통신 소자 프로젝트 (HSCEUI)는 군사 목적과 위성체 간 통신에 초전도 통신소자의 목적을 둔 미국과는 달리 철저하게 상업용 통신 소자를 중심으로 연구되고 있으며 그 중심 국가 군에 영국과 프랑스, 이탈리아, 스웨덴 등이 활발하게 활약하고 있는 형편이다. 1999년 영국Birmingham 대학의 Lancaster 교수는 이미 자체 냉각 시스템이 장착된 초전도 통신소자를 선보인 바 있다. 이러한 추세로 볼 때 향후 통신 시장에서 초전도 통신소자가 차지하는 비율은 날로 증가할 것으로 전망되며 국내의 통신 시장에 향후 10년 안에 초전도 통신소자가 차지하는 비율이 괄목할 수준으로 증가할 것으로 기대된다[26].

### 3. 고온초전도 통신용 필터 및 부가 시스템

고온초전도체를 기반으로 개발되는 통신용 필터는 저손실, 높은 주파수 선택성과 이상적인 대역외 차단특성 등 우수한 특성을 보여주고 있어 고온초전도 마이크로파용 수동 소자 중 가장 먼저 상용화가 기대되는 분야이다. 특히 미국 통신 시장의 경우 이미 Conductus 사에 의해 1000 set 이상의 통신용 고온초전도 대역통과 필터가 이동통신 기지국에 장착되어 가동되고 있는 것으로 알려지고 있다[27].

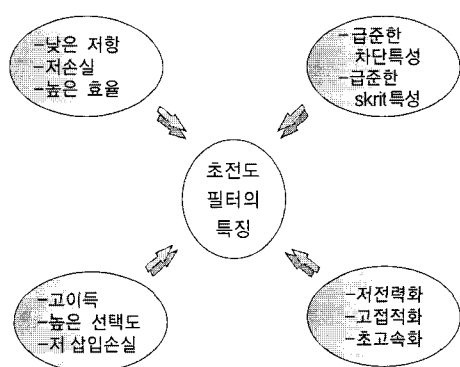


그림 2. 고온초전도 필터의 다양한 특징.

특히 특히, 폭발적인 이동통신 시장의 증가로 무선이동통신 부품과 휴대전화 단말기 수요가 획기적으로 증가되면서 이동통신 기지국의 대역분리와 잡음저감을 위한 초고성능 필터의 필요성이 제고되기 시작했고 여기에 발맞춰 고온초전도 마이크로파 필터 연구개발 동향은 군사목적이나 항공우주공학적인 응용 측면에서 점차 무선이동통신 기지국으로 옮겨지고 있는 형편이다. 그림 2는 이러한 초전도 필터의 특징을 개략적으로 표시한 것이다.

#### 3.1 고온초전도 필터의 설계 방식

근본적으로 통신용 초전도 필터의 설계는 회로망 합성 설계이론에서 크게 벗어나지 않으며 크게

- Chebyshev type
- Maximally flat type
- Elliptic type

으로 구분되며 주로 대역통과필터 설계 방식으로 Chebyshev 형식이 많이 사용되었다[28]-[30]. 고온초전도 필터를 설계할 경우 그림 3에 제시된 바와 같이 중심 주파수, (GHz)와 리플, (dB), 대역폭, BW(GHz)을 결정한 후 감쇄특성 B (dB), 대역외 차단특성, 등의 파라미터를 결정한 후, 원하는 필터의 L과 C로 집중 정수 등가회로를 설계한다. 이때

필터의 특성에서 직접 대역통과 필터를 설계하는 방식보다는 편의상 prototyp의 저역통과필터를 구현한 후 주어진 L과 C값을 이용해 대역 통과 필터로 변환하는 방식이 주로 사용된다.

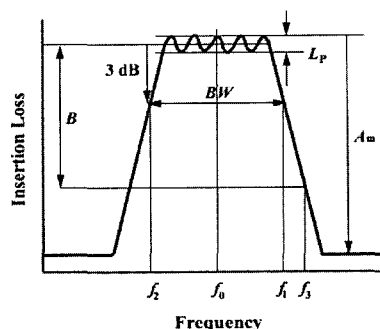


그림 3. 필터 설계와 관련된 다양한 파라미터.

#### 4. 고온초전도 필터 시스템의 연구 개발 동향

##### 가) 우리나라의 경우

전술한 바와 같이 우리 나라의 경우 고온초전도 필터 시스템 개발은 대학과 기업체, 연구소에서 산발적으로 진행되고 있지만, 주로 국가 출연 연구기관과 대기업 연구소가 괄목할 만한 성과를 보이고 있다. 특히 LG 종합기술원과 ETRI 경우 무선통신 기지국용 고온초전도 필터 시스템을 개발하기는 하였지만 이러한 초전도 특성을 보장해줄 소형 냉각기 기술이 이를 뒷받침해주지 못하는 형편이다. 그림 4에 LG에서 개발한 12극 comb-line 형 대역통과 필터를 제시하였다.

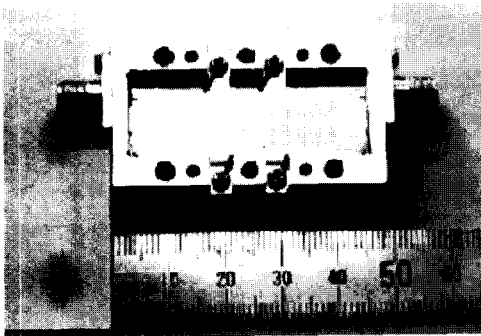
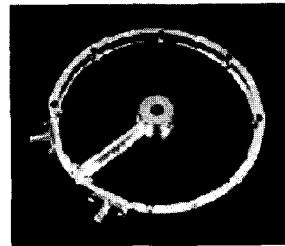


그림 4. LG에서 개발한 12극 comb-line형 고온초전도 대역통과필터.

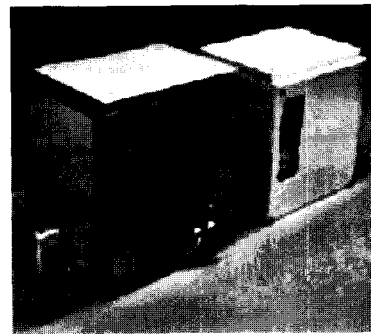
##### 나) 일본의 경우

일본의 경우 고온초전도 필터 시스템 개발을 주도하고 있는 주체는 우리나라와는 달리 주로 대기업(히타치, 도시바 등)이다. 일본의 연구 개발진들은 안테나 시스템에 장착하는 고출형과 무선통신 기지국에 장착되는 표준 랙형이 동시에 개발되고 있으며 아시아 시장을 선점하기 위해 오랜 준비를 해오고 있는 것으로 알려져 있다.

그림 5에 DENSO 그룹에서 개발돼 각광을 받았던 32극 대역통과필터와 표준 랙형 필터 시스템을



(a)



(b)

그림 5. 일본 DENSO(주)에서 개발한 32극 대역통과 필터와 (b)고온초전도 필터 시스템.

제시하였다. 이 필터군은 수직에 가까운 skirt 특성과 0 dB에 가까운 삽입손실을 보이는 것으로 알려져 있다.

##### 다) 미국의 경우

고온초전도 필터 시스템에 관한 한 미국은 이미 연구 개발 단계를 뛰어넘어 상용화 수준에 이른 것으로 파악된다. 이미 1000 set 이상의 고온초전도 필터 시스템이 북미 전역의 통신회사에 공급된 실제 무선 이동 통신 시스템에 장착된 것으로 보고된 바 있다. 최근 미국 내 강력한 경쟁 업체인 (주)STI사를 합병한 (주)Conductus 사는 무선이동통신 기지국용을 포함하여 직접위성방송 수신 시스템에 이르기까지 다양한 영역에 걸쳐 제품군을 개발 세계시장 공략을 서두르고 있다. 그림 6에 Conductus사에서 개발한 안테나 타워에 장착되는 (a)고출형 필터와 이동통신 기지국용으로 장착되는 (b)표준형 필터 시스템을 제시하고 있으며 이때

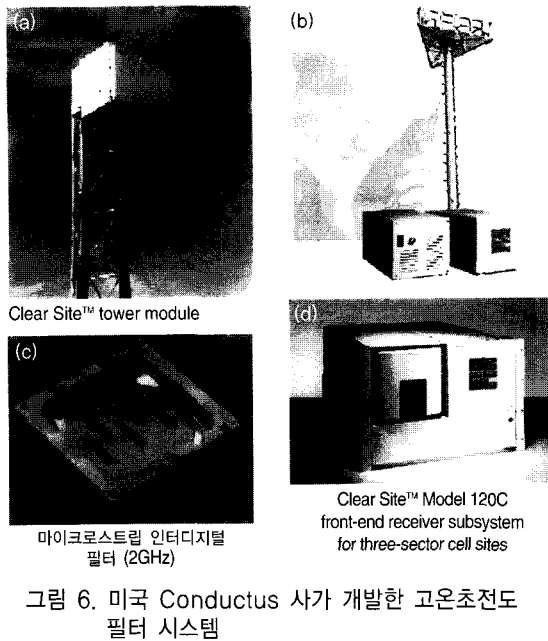


그림 6. 미국 Conductus 사가 개발한 고온초전도 필터 시스템

이 시스템에 장착된 (c) 인터 디지털 필터와 (d) 전체적인 시스템 개괄 또한 제시하였다.

#### 라) 유럽의 경우

유럽에서 고온초전도 필터 시스템 연구 및 개발의 가장 큰 특징은 다수의 국가들이 참여하는 공동 프로젝트를 이용해서 연구 개발을 수행한다는 것이다.

영국, 프랑스, 독일의 기업 및 대학이 참여하는 유럽 공동 연구프로젝트(SUCOMS)를 통해 이들 연구그룹은 공동으로 안테나 탑재 형식인 고출력 고온초전도 시스템 DCS 1800을 개발했으며 이에 탑재되는 고온초전도 대역통과필터 또한 공동으로 개발하여 발표한 바 있다.

그림 7의 (a)에 SUCOM이 공동으로 개발한 고온초전도 대역통과 필터를, 그림 7의 (b) 역시 공동으로 개발한 고온초전도 필터 시스템을 제시하였다.

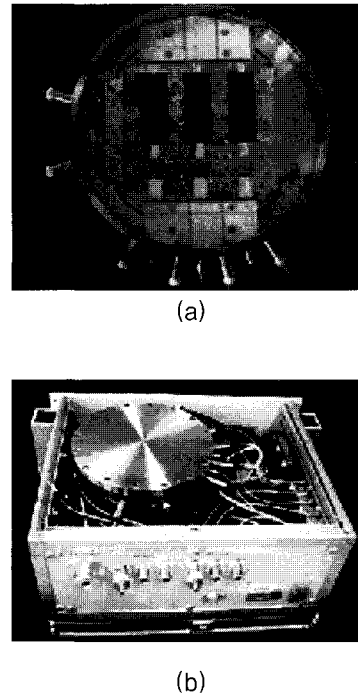


그림 7. 일본 DENSO(주)에서 개발한 32극 대역통과 필터와 (b)고온초전도 필터 시스템.

## 5. 결론

본고에서는 고온초전도체를 이용한 마이크로파 응용 현황을 개괄적으로 기술하였고 고온초전도 마이크로파 수동 소자 중 가장 먼저 상용화될 것으로 예상되는 고온초전도 필터 시스템 개발 연구 현황을 세계 각국의 연구 개발 동향을 통해 소개하였다. 고온초전도체를 이용한 마이크로파 수동 소자 개발 기술이 다루어야 할 기술적 범위는 이외에도 안테나와 믹서와 같은 수동 소자로 범위를 확장할 수 있으며 고온초전도 시스템에서 필수적인 저온 소형 냉각기 기술 또한 매우 중요하다. 따라서 다루어야 할 모든 기술적인 범위와 내용이 방대하여 모든 것을 기술하지는 못했지만 본고를 통해 고온초전도 마이크로파 통신 소자 기술을 이해하는데 도움이 되기를 바란다되고 있다.

이 논문은 우석대학교 연구지원을 받았다.

참고 문헌

- [1] M. J. Lancaster, *Passive Microwave Device Application of High Temperature Superconductors*, Cambridge University Press. Cambridge UK, 1997.
- [2] Jia-Sheng Hong and M. L. Lancaster, "Microstrip Filters for RF/Microwave Applications", Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang Series Editor, 2001
- [3] N. Klein, "High-frequency applications of high-temperature superconductor thin films", Rep. Prog. Phys. 65, p. 1387, 2002.
- [4] M. Nisenoff and W. J. Meyers, Editor of a special issue on the microwave and millimeter applications for high temperature superconductor, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-44, 1996.
- [5] J. M. Rowelp, M. R. Beasley, and R. W. Ralston, "WTEC Panel Report on Electronic Applications of Superconductivity in Japan", July 1998.
- [6] N. Sakakibara, "Compact high-temperature superconductor filter", Oyo Buturi 72(1), p. 21, 2003.
- [7] 전자공학회지, "IMT-2000 기술특집", 제27권 12호, 2000.
- [8] Special Issue on Microwave and Communication Applications at Low Temperature, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-48, No. 9 Part-II, p. 1171, 2000
- [9] M. H. Kwak, K. Y. Kang, C. K. Choi, and S. H. Kim, "High-temperature superconducting Lowpass filter for suppressed harmonics", Physica C, Vol. 372-376, p. 532, 2002.
- [10] S. Ohshima, "The principle of the superconducting filter", Oyo Buturi Vol. 72(2), p. 210, 2003.
- [11] I. Bahl and P. Bhartia, "Microwave Solid State Circuit Design" John Wiley and Sons, New York, p. 237, 1988.
- [12] E. G. Cristal and S. Frankel, "Hairpin-line and hybrid hairpin-line/half-wave parallel-coupled-line filters", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-20, No. 11, p. 719, 1972.
- [13] G. L. Mattaei, N. O. Fenzi, R. J. Forse, and S. M. Rohlfling, "Hairpin-comb filters for HTS and other narrow-band applications", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-45, No.8, p. 1266, 1997.
- [14] M. Sagawa, K. Takahashi and M. Makimoto, "Miniaturized hairpin resonator filters and their application to receiver front-end MIC's", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-37, No. 12, p. 1991, 1989.
- [15] M. Reppel and H.Chaloupka, "Novel approach for narrow band superconducting filters", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., p. 1563, 1999.
- [16] F. Rouchaud, V. Mandrangeas, M. Aubourg, P. Guillon, B. Theron, and M. Maignan, "New classes of microstrip resonators for HTS microwave filters applications", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., p. 1023, 1998.
- [17] X. Wu and I. Awai, "Numerical and experimental investigation on quality factors of coplanar waveguide resonator", IEICE Trans. Electron., E83-C, No. 12, p. 1923, 2000.
- [18] T. Tsujiguchi, H. Matsumoto, and T. Nishikawa, "A miniaturized end-coupled bandpass filter using 4-hairpin coplanar resonators", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., p. 829, 1998.
- [19] Ikuo Awai, X. Wu, and L. Zhan, "Coplanar stepped-impedance-resonator bandpass filter", China-Japan Joint Meeting on Microwaves Proceeding, p. 1, 2000.
- [20] T. Ishizaki, M. Fujita, H. Kagata, T. Uwano, and H. Miyake, "A very small dielectric planar filter for portable telephones", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-42, No. 11, p. 2017, 1994.
- [21] J. A. Curtis and S. J. Fiedziuszko, "Miniature dual mode microstrip filters", IEEE MTT-S Microwave Symp. Dig., p. 443, 1991.
- [22] I. Awai, "General theory of a circular dual-mode resonator and filter", IEICE Trans. Electron., E-81-C, No. 11, p. 1757, 1998.

- [23] Z. M. Hejazi, P. S. Excell, and Z. Jiang, "Compact dual-mode filters for HTS satellite communication systems", IEEE Microwave Guided Wave Lett., Vol. 8, No. 8, p. 275, 1998.
- [24] M. Makimoto and S. Yamashita, "Compact bandpass filters using stepped impedance resonators", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-67, No. 1, p. 16, 1979.
- [25] K. Wada and I. Awai, "A  $\lambda/2$  CPW resonator BPF with multiple attenuation poles and its miniaturization", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., p. 1139, 1999.
- [26] I. Wolff and V. K. Tripathi, "The microstrip opening resonator", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-32, No.1, p. 102, 1984.
- [27] 矢吹博幸, 遠藤晴良, 佐川守一, 牧本三夫, "Hairpin structure stripline split-ring resonators and its applications", 신학논지 J75-C-1, No. 11, p. 711, 1992.
- [28] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Microstrip slow-wave open-loop resonator filters", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., p. 713, 1997.
- [29] C. K. Ong, L. Chen, J. Lu, C. Y. Tan and B. T. G. Tan, "High-temperature superconducting bandpass spiral filter", IEEE Microwave and Guided Wave Lett., Vol. 9, No. 10, p. 407, 1999.
- [30] G. L. Hey-Shipton, "Efficient computer design of compact planar band-pass filters using electrically short multiple coupled lines", IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., p. 1547, 1999.

· 저 · 자 · 약 · 력 · . . . . .

성명: 정동철

❖ 학력

· 1999년 전북대 대학원 전기공학과 공학박사

❖ 경력

· 1999-2000년

전북대 Semiconductor Physics  
Research Center 연구원

· 2000-2001년

(주)모인테크 기술개발 이사

· 2000년-현재

우석대 정보통신컴퓨터공학부 교수

