

캐비티 필터를 이용한 5.8 GHz DR 듀플렉서의 연구

정희원 배창호*, 조평동*, 조병훈**, 김영성**, 장호성**

Study on 5.8 GHz DR Duplexer using Cavity Filter

Chang-ho Bae*, Pyong-dong Cho*, Byung-hoon Cho**, Young-sung Kim**, Ho-sung Chang**

Regular Members

요약

이 논문은 5.8 GHz 대역 DSRC에 응용되는 듀플렉서의 구현을 위한 설계와 제조방법을 제시하였다. BZT계 유전체 첨가물을 제어하여 $Q \times f_0 = 30,000$ 이상인 원통형 유전체 공진기(DR)를 개발하였으며, 송수신 각 4단의 캐비티 필터 구성에 의해 DSRC에서 요구되는 $f_0 \pm 10$ MHz의 대역폭에서 송신 40dB, 수신 50dB의 감쇠특성을 실현하였다. 시제품의 성능은 실측 결과 삽입손실이 다소 높은 것을 제외하고는 이론값에 잘 일치하였다.

ABSTRACT

This paper presents a design procedure and manufacturing techniques realizing of a 5.8 GHz duplexer based on cylindrical coaxial dielectric resonator. Upto $Q \times f_0 = 30,000$ cylindric coaxial dielectric resonator was developed control by addition of dielectric materials. This resonator shows attenuation characteristics -40 dB for transmitter and -50 dB for receiver by consisting of two sets of 4-stage cavity resonator within $f_0 \pm 10$ MHz bandwidth which was requirement of DSRC. Employing the measurement results, design procedure to characterize the transmission and reflection properties are presented.

1. 서론

DSRC(Dedicated Short Range Communication)는 지능형 교통체계(ITS)의 최적 통신링크를 구축하기 위한 방안으로 근거리 전용통신이란 개념으로 연구되고 있다. 이들 RF 통신기술은 양방향(Duplex) 통신과 근거리(Local Area 또는 Short Range) 통신에 의해 특징 지워지며 데이터 통신링크를 고속이고 소전력으로 구성하기 위한 기술동향을 보인다.

그러나 DSRC의 스펙트럼 및 채널 할당이 각국마다 다른 양상을 보이며 통신방식도 각각이다. 유럽의 DSRC는 수동방식을 채택하고 있고 미국 및 카나다는 현재 수동방식이나 향후 능동방식의 채택이 확실하며, 일본은 능동방식에 의해 실용중에 있다.

능동방식 DSRC는 전이중 양방향 통신을 하므로

송수신 전환에 T/R 스위치 또는 듀플렉서를 사용하나, 회로 구현이 간편하고 소형화가 가능한 듀플렉서 방식이 일반적으로 채용되고 있다.

표 1. 각국의 DSRC용 주파수 할당

지역	주파수 분배	대역폭	비고	
ITU-R	5.725 ~ 5.875 GHz	150 MHz	ISM Band	
유럽	(CEN)	5.795 ~ 5.815 GHz	20 MHz	5MHz × 4ch.
	(ERC/CEPT)	5.795 ~ 5.805 GHz	10 MHz	각국 광통
		5.805 ~ 5.815 GHz	10 MHz	각국 추가
미국 (FCC)	902 ~ 928 MHz	26 MHz	ISM Band	
	5.850 ~ 5.925 GHz	75 MHz	신청중	
일본 (MPT)	5.79 ~ 5.81 GHz(D)	20 MHz	ETC 용,	
	5.83 ~ 5.85 GHz(U)	20 MHz	ITS 계획	
한국 (MIC)	5.795 ~ 5.815 GHz	20 MHz	ETC 전용, Toll Gate	

* 한국전자통신연구원 기술기준팀(chbae@etri.re.kr, pdcho@etri.re.kr)

** 홍익대학교 전자전산공학과(yskim@wow.hongik.ac.kr, bhcho@wow.hongik.ac.kr, hosung@wow.hongik.ac.kr)

논문번호 : K01183-0817, 접수일자 : 2001년 8월 9일

표 1은 각국의 DSRC용 주파수 할당을 보인 것으로 듀플렉서의 중심 주파수와 대역폭을 산출하는 근거가 된다. 표를 고찰하면 대부분 국가에서 DSRC의 대역폭은 상하향 20 MHz가 필요하며 최소 10 MHz의 대역 분리가 요구되므로 매우 예민한 필터 특성이 요구됨을 알 수 있다^[1].

5.8 GHz 대역의 높은 주파수대에 응용되는 유전체 공진기(Dielectric Resonator, DR)는 주파수 특성상 유전재료의 특성 및 공진기의 물리적 조건이 성능을 결정하게 되므로 높은 Q값을 갖는 유전재료의 선정은 물론, 온도계수 및 Q값을 개선하는 소결기술, 공진기 및 필터 설계 등이 핵심 기술요소가 된다^{[2],[3]}.

본 연구에서는 SMN/BMN계 유전재료의 조성 및 소성특성을 연구하여 온도계수 ± 10 ppm 이하, $Q \times f_0 = 30,000$ 이상을 실현하는 마이크로파용 DR을 개발하였다. 또한, 송수신 각각 4단의 캐비티 공진기를 결합하여 송신주파수 대역이 5800 ± 10 MHz, 수신주파수 대역이 5810 ± 10 MHz인 듀플렉서를 개발하였다. 설계 툴로는 HP사의 MDS(Micro wave Design System)의 PC용 Super-star를 사용하였다.

개발 시제품은 성능측정 결과, $f_0 \pm 10$ MHz에서 차단역 감쇠율이 송신 40 dB, 수신 50 dB 이상의 양호한 특성을 얻었으며, 각 대역에서의 삽입손실이 송신부에서는 2.0 dB, 수신부에서는 2.5 dB로 설계 값에는 미치지 못했으나, 특성상 비교적 양호한 결과를 얻었다.

삽입손실 2 dB는 전력손실 20 %, 3 dB는 36 %에 해당되기 때문에 DSRC용 듀플렉서에서는 소형화와 더불어 삽입손실을 줄이는 것이 최우선 과제이다. 그러나 공진기를 작게 만들수록 부부하 Q가 낮아져 삽입손실이 더욱 커지는 기술적 난점이 발생하여 이를 개선하는 연구 또한 중요한 과제이다^{[4],[13]}.

한편, DSRC의 전기적 사양이 매우 예민하여 RX, TX의 분리도를 유지하는 문제가 대두된다. 현재의 재료로는 Q값의 한계 때문에 공진기의 부피가 커지는 단점을 수용해야 한다^{[5],[6]}.

삽입 손실과 유전체 Q의 한계는 재료 및 설계와 가공기술에 기인하는 것으로 평가되므로, 유전체 재료의 특성을 보다 세밀히 연구하여 소결성과 전기적 특성을 향상시키는 소성 조건을 구하고 온도관리를 정밀 제어함으로써 개선된 성능을 얻었다.

II. 듀플렉서 기술해석

1. 듀플렉서

듀플렉서는 어떤 송신주파수에서의 송신동작과 다른 주파수에서의 수신동작을 서로 다른 RF 신호에 대해 감쇠나 유도가 최소가 되도록 하여 하나의 공통 안테나를 공유하도록 허용하는 장치로 정의된다.

따라서 무선통신기에 있어 듀플렉서는 그림 1에 보인바와 같이 송.수신기와 안테나 사이에 위치하여 송신신호와 수신신호를 각각 분리하여 주는 기능을 갖는다.

이 기능은 중심주파수가 다른 두 개의 대역통과 필터(Band Pass Filter, BPF) 및 안테나와의 임피던스 정합부로 구성하여 구현할 수 있다^[4].

듀플렉서를 실현하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 일반적으로 통과대역 필터나 소거(Reject) 또는 노치(Notch) 필터를 사용하거나 하나의 디바이스 안에서 노치 필터와 통과대역 필터 양면의 특성을 갖도록 조합된 복합 필터를 사용하기도 한다^[7].

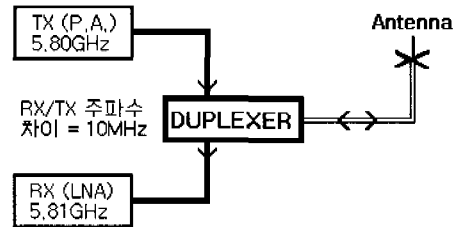


그림 1. 신호를 분리하는 듀플렉서

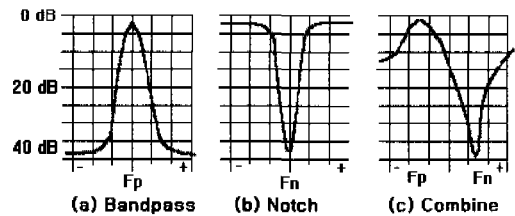


그림 2. 듀플렉서를 구성하는 필터의 특성

그림 2에 이들 필터의 응답특성을 보였다. 이들 필터는 일반적으로 원통형이나 정사각형의 공진기형 필터를 사용하나 때때로 혼합, 세라믹 등과 같은 다른 형태로도 제작된다.

캐비티형 필터는 성능의 간편성, 가격의 전체 조화에서 최고의 성능을 준다. 혼합 및 세라믹 필터는 높은 주파수에서 공간이나 크기의 장점이 있으나,

세라믹 필터는 전력 한계나 높은 가격이 문제가 된다. 일반적으로 사용되는 캐비티형 필터는 기본 원리가 듀플렉서에서 사용된 어떠한 필터에도 적용될 수 있다.

기존의 공진기를 DR로 대체하면 회로의 부피가 대폭 작아지며, 또 마이크로파 집적회로(Microwave Integrated Circuits, MICs)에서 DR로 결합구조가 간단하게 되어 회로와 서브시스템 집적의 자유도가 증대된다 또한, MIC 선형 공진기와 비교할 때 온도나 손실 양측면에서 회로 성능이 우수하며 적정 성능에 대한 전체 회로 가격의 경감효과를 들 수 있다.

2. 유전체 재료

초고조파 유전체 재료는 일반적으로 유전율이 30 이상, $Q \times f_0$ 값이 30,000 이상이고 공진 주파수의 온도계수가 $\pm 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 이하가 되어야 한다. 대표적인 재료는 BaTi_4O_9 , (Zn, Sn) TiO_4 등이 고려되나, 유전율, 수분흡수율, 온도계수 등 전기적 특성과 가격에서 실용상 많은 제약이 있다^{[8],[9]}.

이에 대해 $(\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x)(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ (SMN/BMN) 계 유전 재료는 가격이 저렴하고 Ba의 치환량을 증가시킴에 따라 유전율과 온도특성이 향상되는 특징이 있다^[10]. 따라서, 5.8GHz 대역의 초고조파 유전체로서의 응용 가능성을 확인할 수 있다.

SMN계 유전재료의 조성 및 소성 온도특성을 개발하여 untilted의 BMN 결정 구조로 변화되는 Ba의 치환량을 정밀 제어함으로써 유전율의 증가와 낮은 온도계수를 갖는 초고조파용 유전체 재료를 개발할 수 있다^[11].

3. DR의 기본 성질

DR 응용에 있어서 가장 중요한 재료 성질은 공진 주파수의 온도계수 τ_f , Unloaded-Q 정수 Q_u 및 유전율 ϵ_r 이다. 이론적으로 조사한 기하학적 구조 중에서 원통형태는 제조가 쉽고 Q 값이 높으며 임피던스 매칭이 간단하게 되는 등의 특성상 장점이 가장 많으므로 널리 사용되고 있다^[9].

1) 공진 주파수의 온도계수 τ_f

DR에는 4종류의 온도계수가 정의되어 있으며 이들 계수간에는 서로 상관관계가 있다. 따라서 하나의 계수는 다른 3개의 계수에 의존하여 정의된다.

공진 주파수의 온도계수 τ_f 는 3개의 독립 정수인 유전율의 온도계수 τ_ϵ , 재료의 열 팽창 α_L 및 공진기가 장착되어 있는 환경의 열 팽창 또는 캐비티

의 온도계수 τ_c 로 조합되어 다음 식으로 표현된다.

$$\tau_f = \int (A \tau_\epsilon + B \alpha_L + C \tau_c) \tag{1}$$

여기에서 $A \approx 1/2$, $B \approx 1$ 를 사용하며, C는 DR의 위치에 의존하여 캐비티 벽의 위 또는 아래 등에 관계되는 값이다. C를 위한 값의 일반적인 범위는 0.05~1.0을 사용한다. 각각의 온도계수들은 어느 것이나 일반적으로 $10^{-6}/^\circ\text{C}$ 또는 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 정도로 측정된다^[4].

한편, 고유한 재료 파라미터에만 기인하여 편이되는 공진 주파수는 다음 식으로 주어지는 온도계수에 관계된다.

$$\tau_f = -1/2 \tau_\epsilon - \alpha_L \tag{2}$$

2) Unloaded-Q 정수, Q_u

Q 정수(Quality factor)는 공진기의 성능이나 양호도를 수치적으로 표현하는 중요한 지수이다. Q는 내부손실을 포함하는 Unloaded-Q, Q_u 와 외부손실을 포함하는 External-Q, Q_e 및 내부와 외부의 모든 손실을 포함하는 Loaded-Q, Q_L 로 대별하여 해석한다.

일반적인 Q는 공진기에서 공급되는 전자계 내에 저장된 에너지에 대해 주기당의 에너지 소비나 손실의 비율로 측정되며 정의 상 다음 식으로 표현된다.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = 2\pi \times \frac{\text{저장된 최대 에너지}}{\text{소비된 평균 에너지/주기}} \tag{3}$$

$$Q = \frac{2\pi}{T} \frac{W_o}{P} \tag{4}$$

여기에서, $\tan \delta$ 는 유전체 물성중 loss tangent이고, W_o 는 저장된 에너지, P는 소비 전력, ω_o 는 공진기의 전기장 주파수, T는 주기를 나타낸다.

또한, 공진기의 대역폭은 Q 정수에 반비례하므로 높은 Q의 공진기는 좁은 대역폭을 갖는다. 대역폭 B_w 의 근사값은 다음 식으로 구할 수 있다^{[6],[8]}.

$$B_w = \Delta\omega = |\omega_1 - \omega_2| \approx \frac{\omega_o}{Q} \tag{5}$$

따라서 식 (5)에 의해 Q 정수는 다음 식으로 된다.

$$Q = \frac{\omega_o}{\Delta\omega} = \frac{f_o}{\Delta f} \tag{6}$$

여기에서 Δf 는 공진기를 통해 전송된 해당 전력

의 반전력점 대역폭이다.

그러나, 공진기가 에너지를 소비하는 마이크로파 회로 등 다른 시스템에 결합되었을 때는 손실을 고려해야 되므로 별도의 Q 로 정의된다.

유전체 내부의 전력 소비는 도체, 유전체 및 방사에 의해 발생한다. 이들 유전체 손실과 환경적 손실 등을 포함하여 Unloaded- Q , Q_u 는 다음 식으로 정의한다.

$$\frac{1}{Q_u} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r} \quad (7)$$

여기에서, Q_c 는 도체, Q_d 는 유전체, Q_r 은 방사 Q 정수를 각각 나타낸다.

또한, Loaded- Q , Q_L 은 다음 식으로 정의한다.

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_e} \quad (8)$$

한편, 공진기가 외부 회로에 결합되었을 때에 결합 정도(Coupling level)의 자유도를 나타내는 추가적인 지수로서 결합계수 k 가 도입된다. Q_L 과 Q_e 는 k 에 관계되어 다음 식으로 계산된다.

$$Q = (1 + k) Q_L = k Q_e \quad (9)$$

3) 유전율 ϵ_r

유전율은 유전체 재료의 유전능력을 공기에 대한 비율로 나타낸 지수이며 공진기의 부피를 결정하는 중요한 요소이다.

현재, 상용으로 이용이 가능한 온도 안정한 유전체 공진기 재료의 ϵ_r 은 약 25~40 정도이다.

4. DR의 설계 파라미터

동축(Coaxial) 전송선은 유전체 작용에 의해 매우 높은 Q 값을 갖는 인덕터로 사용이 가능하므로 캐비티와 조합으로 공진기를 구성할 수 있다. 유전체 캐비티의 전기적 특성은 유전체의 물리적 구조와 형상에 의해 결정된다^{[11],[12]}.

그림 3은 동축 전송선의 기호와 설계 파라미터를 보인 것이다. 그림에서 l 은 유전체 공진기의 길이이며, D_i 와 D_o 는 각각 유전체 내부도체의 지름과 외부 도체의 안쪽 지름을 나타낸 것으로 $D_o > D_i$ 의 관계에 있다. 또한, $\tan \delta$ (δ)는 유전 손실, ρ (ρ)는 도체의 고유저항이며 ϵ_r 은 유전체의 유전율로서 1보다 큰 값을 갖는다.

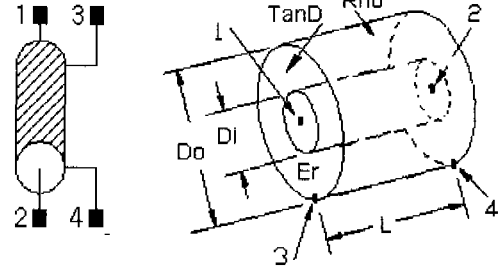


그림 3. 동축 전송선의 기호와 치수

1) 특성 임피던스 Z_0

동축 전송선이 외부에 도체를 형성하고 내부에 유전체로 채워져 있으면 설계 주파수 f_0 에서 입력측에서 요구되는 유도성 리액턴스는 다음 식으로 근사된다^[13].

$$Z_{in} = X_L = Z_0 \tan(\theta) \quad \lambda/4 \leq \lambda_g \leq 0 \quad (10)$$

여기에서, Z_{in} 은 전송선 단자의 입력 임피던스이고 Z_0 는 전송선의 특성 임피던스이다.

한편, 유전체 내부에서 전자장이 동축의 길이에 공진하므로 유전율 ϵ_r 인 전송선을 통해 주파수 f_0 의 전자파가 진행할 때 $\lambda_g/4$ 에 공진하는 전송선의 물리적 최소 길이 l 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$l = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{c}{4f_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하여 정리하면 전송선의 입력 임피던스 Z_{in} 은 다음 식으로 표현된다.

$$Z_{in} = Z_0 \left[\frac{\pi}{4} Q + j \tan\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f}{f_0}\right) \right] \quad (12)$$

따라서 그림 3에 보인 DR의 물리적 정수를 식 (12)에 도입하면 특성 임피던스 Z_0 및 Q 는 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(1.079 \frac{D_o}{D_i}\right) \quad (13)$$

$$Q = \epsilon_r \sqrt{f_0} \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{\left(\frac{1}{D_o} \cdot \frac{1}{D_i}\right)} \quad (14)$$

여기에서, η_0 는 자유공간의 고유한 임피던스이고 377 [Ω]의 값을 가진다. 이 식은 D_o , D_i 및 ϵ_r 의

변화에 따른 특성 임피던스의 효과를 보여주며 각 등가저 집중(lump) 정수는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$L = \frac{8Z_0 l \sqrt{\epsilon_r}}{\pi^2} c \quad (15)$$

$$C = \frac{l \sqrt{\epsilon_r}}{2cZ_0} \quad (16)$$

$$R = \frac{4Z_0 Q}{\pi} \quad (17)$$

2) 서셉턴스 슬로프 파라미터 β

공진기의 특성을 결정하는 다른 요소로서 리액턴스 α 또는 서셉턴스 β 슬로프(Slope) 파라미터가 있으며 다음 식으로 각각 정의된다.

$$\alpha = \frac{\omega_0}{2} \left. \frac{dX(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{\omega_0}{2} \left. \frac{dB(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (19)$$

슬로프 파라미터 α 와 β 는 다단의 공진기 필터에서 공진기 사이의 결합계수와 Q_u 에 영향을 주므로 공진기의 중요한 파라미터이다^{[5],[13]}.

대역통과 여파기를 설계하기 위해서는 다음 식으로 표현되는 슬로프 파라미터 β 가 결정되어야 한다.

$$\beta = \frac{\pi}{4 \cdot Z_0} = \sqrt{\epsilon_r} \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (20)$$

서셉턴스 슬로프 파라미터 β 와 공진기의 실효 L , C 값은 다음 식의 관계에 있다.

$$C_{cu} = \frac{\beta}{\omega_0} = \frac{\pi}{4\omega_0 \cdot Z_0} \quad (21)$$

$$L_{cu} = \frac{1}{\omega_0 \beta} = \frac{4 \cdot Z_0}{\pi \omega_0} \quad (22)$$

3) 자기공진 주파수 f_{SRF}

자기공진 주파수(Self Resonant Frequency, SRF)는 유전체의 물리적 정수로부터 DR의 길이를 정의하는 파라미터이며 다음 식으로 계산된다.

$$f_{SRF} = \frac{\lambda_g f_0}{4} \cdot \frac{1}{l} \quad [\text{MHz}] \quad (23)$$

$$f_{SRF} = \frac{c}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{MHz}] : \frac{\lambda_g}{4} \text{ short} \quad (24)$$

$$f_{SRF} = \frac{c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\text{MHz}] : \frac{\lambda_g}{2} \text{ open} \quad (25)$$

4) 삽입손실, I.L.

삽입 손실(Insertion loss, I.L.)은 희망 주파수에 있어서 신호가 필터를 통과하는 동안에 받는 손실의 최소 합이다. 삽입손실이 증가하면, 출력 레벨이 감소하지만, 높은 삽입손실은 일반적으로 캐비티 필터의 선택성을 증가시킨다. 그러나, 높은 삽입손실은 전력소모를 높여 필터의 온도를 상승시키므로 필터의 전력 용량을 감소시키는 결과가 된다.

특정주파수 f 에서의 I.L.은 다음 식으로 계산된다.

$$L(f) = -10 \log \left[\frac{1 + \left(2Q_1 \frac{f-f_0}{f_0} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{Q_u}{Q_u} \right) \right]^2} \right] \quad (26)$$

따라서, $f = f_0$ 에서는 다음 식과 같이 간략화 된다.

$$L(f) = -10 \log \left[\frac{1}{\left[1 - \left(\frac{Q_u}{Q_u} \right) \right]^2} \right] \quad (27)$$

여기에서 Q_u 를 구하면 다음 식이 된다.

$$Q_u = \left[\frac{Q_1}{1 - 10^{-\frac{L(f_0)}{20}}} \right] \quad (28)$$

또한, 감쇠량은 다음 식으로 된다.

$$A = a \frac{\beta}{2Q} = \frac{2\pi/\lambda_g}{2Q} = \frac{8.68\pi\sqrt{\epsilon_r}f_0}{cQ} \quad [\text{dB/inch}] \quad (29)$$

III. 설계 및 제작

DR 캐비티 필터를 이용하여 듀플렉서를 설계하는 경우에는 유전 재료에 따른 유전율과 물리적 구조와 정수에 따른 DR의 공진 특성을 각각 조사한 후 이를 설계 파라미터로하여 송신단과 수신단 캐비티의 기본 회로를 구성한다.

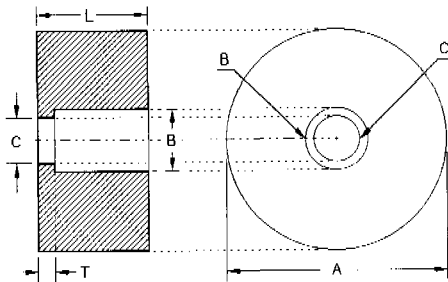
다음에는 입력과 출력을 정의하여 설계된 단위회로에 대한 시뮬레이션 및 최적화를 각각 수행하며 각 캐비티단의 손실값과 임피던스 정합을 고려하여 전체적인 듀플렉서를 설계한다.

듀플렉서에 사용하는 DR은 Q_u 가 5,000 이상 확

보되는 우수한 공진기로, 5.8 GHz 대역에 응용하기 위해 조성 및 소결 특성을 최적화한 원통형 공진기이다.

1. 원통형 DR

DR은 공진 주파수의 조정과 임피던스 정합을 고려하여 동축 내부에 SIR(Step Impedance Resonator) 특성을 갖도록 설계하였다. 그림 4는 5.8 GHz 대역으로 설계한 DR의 구조와 데이터를 보인 것으로 T는 스텝 길이를 나타낸 것이다. 그림 5에 개발된 시제품을 보였다.



	A	B	C	L	T
크기 [mm]	10.332	2.41	1.73	3.33	0.7
공차 [mm]	0.1	0.85	0.5	0.1	0.08

그림 4. 5.8 GHz용 원통형 동축 DR 설계

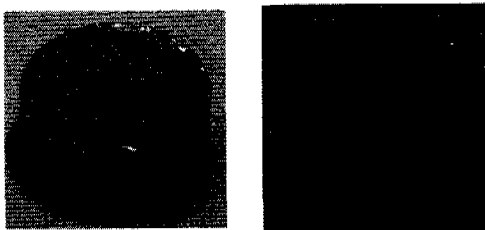


그림 5. BZT계 유전물질로 개발된 동축 공진기

유전물질의 조성은 BZT계 ($BaCO_3+ZnO+Ta_2O_5$)이며 Ga, Sr 물질을 첨가하면서 최적 전기적 특성을 도출하였다. 프레스 성형된 시료를 질소 가스 분위기에서 소성하였다. 소성 온도는 1550°C로 관리하여 1800°C에서 2차 소결을 수행하였다.

실험에서는 BZT물질 중 Ta_2O_5 물질에 의하여 $Q \times f_0$ 가 15,000까지 개선할 수 있어 기존 구현 목표치를 훨씬 초과하는 높은 특성을 보였다.

2. 동축 공진기 설계

캐비티는 여진된 RF 전자파를 공간적으로 수용하고 DR의 유전작용에 의해 캐비티 필터 기능을 수행한다. 그림 6은 단일 캐비티 공진기의 구조와 등가회로를 보인 것이며 등가회로에서 R_{sh} 는 공진기의 등가 손실을 나타낸 것이다.

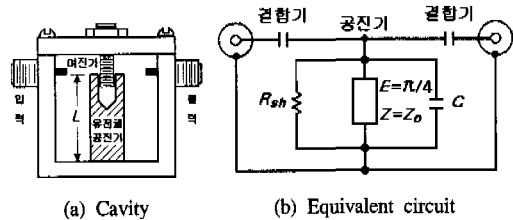


그림 6. 단일 캐비티 공진기 구조와 등가회로

실용상 캐비티 설계시에 공진기 손실 R_{sh} 를 포함시키며 최대의 Q_u 를 얻기 위해 DR의 표면은 은(Ag)으로 도금하여 접지 면적을 크게 한다.

공진기 손실을 고려한 Q_u 는 다음 식과 같다.

$$Q_u = \beta R_{sh} \tag{30}$$

여기에서 서셉턴스 슬로프 파라미터 β 는 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$\beta = \frac{Y_0}{2} [\cot(\theta_0) + \theta_0 \csc^2(\theta_0)] \tag{31}$$

캐비티는 통과대역에서 최대의 감쇠특성을 구현하기 위해 다단으로 결합하여 실현한다. 설계사양으로부터 고찰하면, DSRC TX 대역(5795~5805 MHz)은 최소 삽입손실(<1.5 dB)와 함께 요구되며, DSRC RX 대역(5805~5815 MHz)에서 최소 50 dB 이상의 필터 소거특성이 요구된다.

따라서 이들 필터 특성을 실현하는 캐비티의 수는 다음 식을 이용하여 직접 계산함으로써 간단히 검증할 수 있다.

$$n = \frac{\cosh^{-1} \left[\sqrt{\frac{10^{\frac{L(f_0)}{10}} - 1}{10^{\frac{r_{dB}}{10}} - 1}} \right]}{\cosh^{-1}(\Delta f_n)} \tag{32}$$

여기에서, $L(f_0)$ 는 특정주파수 f_0 에서 요구되는 감쇠량, r_{dB} 는 대역내 리플 정수이다. Δf_n 은 소거 주파수에서 정규화된 주파수를 나타내는 것으로 다음 식에 의해 계산된다.

$$\Delta f_n = \frac{2|f_a - f_o|}{\Delta f} \quad (33)$$

결합계수는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$k_{i,i+1} = \frac{\Delta f}{f_o} \cdot \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (34)$$

각 결합 공진기의 정확한 슬롯(slot) 폭을 결정하기 위하여 회기 다항식(polynomial regression) 분석이 가장 유효하다. 캐비티 면적은 공진기의 특성 임피던스를 약 60Ω 되게 하며 캐비티 필터의 회기 다항식은 슬롯 폭의 함수로서 결합계수 k_o 는 다음 식으로 구해진다.

$$k_c(w) = -0.02717 + 0.10865w - 0.03150w^2 \quad (35)$$

회기 다항식을 위한 상관 계수 R 은 1.00으로 한다. EM simulator는 다양한 슬롯 폭에 대해 자기 용량 C_o 와 상호 용량 C_m 을 결정하는데 사용할 수 있다.

그리고 상호 결합 용량은 다음 식으로 된다.

$$C_{i,i+1} = \frac{\beta \cdot K_{i,i+1}}{v_o} = \frac{C_k}{2} \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) K_{i,i+1} \quad (36)$$

3. 캐비티 필터를 이용한 듀플렉서

이상의 설계이론을 근거로 캐비티 DR의 개별 특성을 조정할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 다단 구성된 필터 특성을 결정할 수 있으므로 이를 기본으로 수신단과 송신단의 회로를 구성하였다.

그림 7에 설계된 듀플렉서의 제작 치수를 보였으며, 그림 8에 4단 2열로 구성된 캐비티 필터의 외관을 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 공진기는 같은 크기의 직경을 가지며 입력과 출력의 결합은 tap 또는 contact에 의해 직접 1번째와 4번째 공

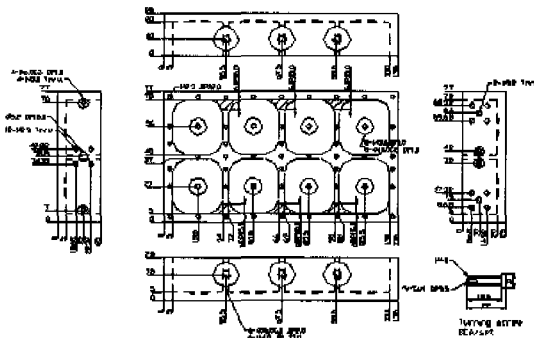
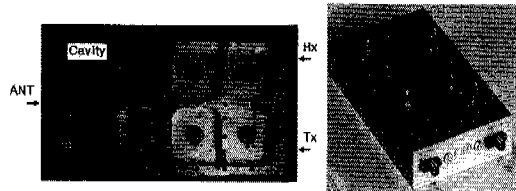


그림 7. 설계된 듀플렉서의 치수

진기의 최소 임피던스점에 접속된다.

그림 9에 캐비티 필터를 이용하여 최종 설계된 DSRC용 5.8 GHz용 듀플렉스 회로와 설계 정수를 보였다. 설계된 회로는 각종 시뮬레이션을 통해 개발 성능 사양을 만족하도록 정수를 조정하였으며 최종적으로 정수값을 고정했다.



(a) Cavity 구조 (b) 개발 시제품

그림 8. 4단 2열 필터 구조의 듀플렉서 캐비티

IV. 실험 및 고찰

1. 개발 공진기 특성

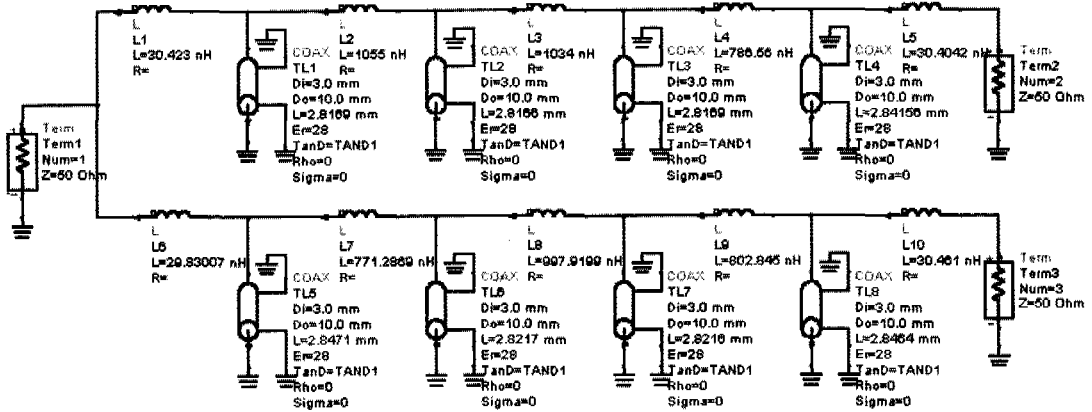
설계 제작한 공진기 및 듀플렉서 시제품의 성능을 평가하기 위하여 국제적으로 공인된 시험 및 평가 방법을 적용하였다. 동작온도, 환경, 신뢰성 등 환경 평가는 IEC-721을 준용하였고 통과 대역폭, 삽입 손실, 감쇠 특성 등 전기적 특성은 EN300 674를 준용하였다.

표 2. 개발 공진기의 전기적 특성

Tab. 2. Specification of Designed Resonator

ITEM	Spec	요구되는 사양
Center Frequency (f_c)		5,800±10 MHz
Dielectric Constant (ϵ_r)		28±1.5
Temp. Coeff. Tolerance (τ_f)		0±1.5 ppm/°C
Water Absorption (%)		Max. 0.01 %
Density (g/cm ³)		5 g/cm ³
Q Value (Q_L)		Min. 2,400
Operating Tem. Range		30 °C ~ +85 °C

물성시험은 기존 물성 측정장치를 이용했으며 전기적 특성은 표준신호 발생기와 네트워크 분석기를 사용하였다. 측정 장비는 HP8719A이다.



Inductor	L1	L2	L3	L4	L5	L7	L8	L9	L10	L11
[nH]	30.423	1055	1034	786.56	30.4042	29.83007	771.2869	997.9199	802.845	30.461
Coax	TL1 L	TL2 L	TL3 L	TL4 L	TL5 L	TL6 L	TL7 L	TL8 L		
[mm]	2.8169	2.8166	2.8169	2.84156	2.8471	2.8217	2.8216	2.8464		

그림 9. 5.8 GHz용 듀플렉서 회로도 및 DR 회로 정수

한편, 소결로는 Kanthal 히터에 의해 1550 °C를 6시간 소결한 후 자연 냉각하였다. DR 제작시 온도 관리에 따른 온도 계수의 변화와 Q값 및 전기적 특성을 측정된 결과 소결 시험의 유전상수는 28 ± 1 로 비교적 안정한 특성을 얻었다.

그러나, 온도계수 τ_f 는 소결 조건에 따라 $-3.80 \sim +2.65$ ppm 까지 비교적 넓은 분포를 보여 최적 온도계수를 얻기 위한 추가적인 연구가 필요하였다.

표 2에 5.8 GHz 대역 개발 공진기의 전기적 특성을 요약해 보였다.

2. 기본설계 듀플렉서 측정

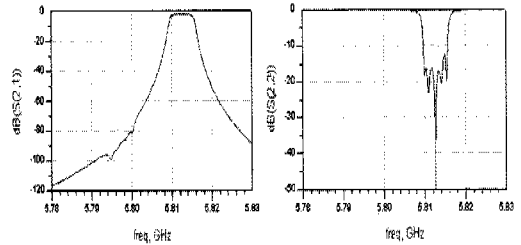
기본 설계한 듀플렉서에 대해 무부하 조건에서 송신 및 수신 주파수에 대한 전송 및 반사특성에 대한 시뮬레이션을 하였다.

그림 10은 시뮬레이션 결과를 보인 것으로 감쇠 특성(Att)을 개선하면 삽입손실(I.L.)이 증가하고 반대로 삽입손실 특성을 개선하면 감쇠가 둔화되는 서로 상반된 특성을 보여 설계값에 접근하기 위한 정수 조정이 필요하다.

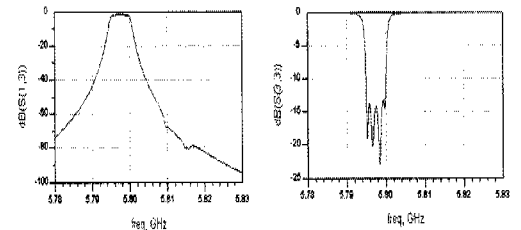
3. 조정

시뮬레이션의 결과에 따라 제작된 캐비티는 요구 특성에 접근하도록 각 캐비티의 정수를 튜닝(tuning) 하였다. 주요 개선항목은 삽입손실과 감쇠특성이며

네트워크 분석기를 사용하여 조정하였다.



(a) RX 단 ($f_0 = 5.81$ GHz)



(b) TX 단 ($f_0 = 5.80$ GHz)

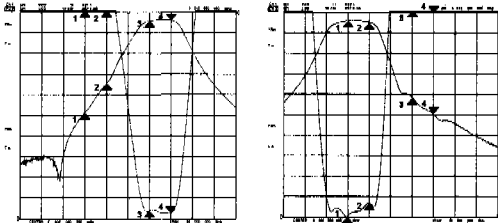
그림 10. 전송 및 반사특성의 시뮬레이션 결과

1) 삽입손실(I.L.)의 개선

삽입손실을 최소화하기 위해 물리적으로 공진기 사이의 결합계수를 증가시켰다. 결합계수는 초단에

서 효과가 컸으며 증가로 삽입손실은 감소하였으나, 대역폭이 증가되며 감쇠 특성이 불량해 졌다.

감쇠특성을 고려하지 않은 삽입손실의 최대성능은 TX -1.2 dB, RX -2.0 dB 이내로 실현할 수 있었다.



(a) RX ($f_0 = 5.81$ GHz) (b) TX ($f_0 = 5.80$ GHz)

그림 11. 삽입손실 특성의 개선

표 3. 그림 11의 측정 데이터

f_0 (Span 20 MHz)	Mark Point	Freq. [GHz]	Response Value	
			Transmission	Reflection
RX 5.81 GHz	M 1	5.795	-48.445 [dB]	24.703
	M 2	5.800	-34.310 [dB]	14.553
	M 3	5.810	-4.098 [dB]	1.387
	M 4	5.815	-3.930 [dB]	1.284
TX 5.80 GHz	M 1	5.795	-4.020 [dB]	1.058
	M 2	5.800	-4.849 [dB]	1.688
	M 3	5.810	-41.415 [dB]	46.314
	M 4	5.815	-49.426 [dB]	109.160

그림 11 및 표3은 삽입손실을 최소화하기 위해 밀결합했을 때의 송신 및 수신 특성을 보인 것이다.

2) 감쇠특성(Att)의 개선

감쇠특성의 부분 개선을 위해서 초단 결합계수를 감소시켰다. 결합계수의 감소로 감쇠특성을 예민하게 개선할 수 있었으나, 삽입손실이 증가되어 요구 특성을 얻기 곤란하였다.

삽입 손실을 고려하지 않은 감쇠특성의 최대성능은 TX 5.80 GHz±10 MHz에서 -50 dB, RX 5.81 GHz±10 MHz에서 -70dB의 양호한 결과를 보였다. 그림 12는 감쇠 특성을 최대화했을 때의 송신 및 수신 특성을 보인 것이다.

이와 같은 방법으로 개발 듀플렉서의 감쇠특성과

삽입손실이 설계사양을 만족하도록 회로 정수를 반복 조정하였다. 이 결과 최적 성능을 얻기 위해서는 삽입손실과 감쇠특성은 서로 상반된 특성을 보이므로 어느 한쪽의 특성을 희생하여야 한다.

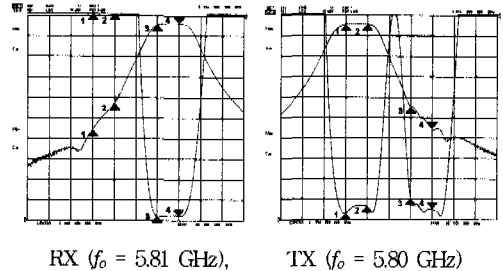


그림 12. 감쇠(Att) 특성의 개선

표 4. 그림 12의 측정값

f_0 (Span 20 MHz)	Mark Point	Freq. [GHz]	Response Value	
			Transmission	Reflection
RX 5.81 GHz	M 1	5.795	-55.380 [dB]	259.470
	M 2	5.800	-42.736 [dB]	59.930
	M 3	5.810	-4.423 [dB]	1.200
	M 4	5.815	-3.661 [dB]	1.214
TX 5.80 GHz	M 1	5.795	-4.348 [dB]	1.301
	M 2	5.800	-4.288 [dB]	1.637
	M 3	5.810	-44.299 [dB]	2.046
	M 4	5.815	-55.220 [dB]	1.506

그림 13에 개발 듀플렉스를 최적 튜닝하였을 경우의 특성과 주요 마크 포인트에서의 측정값을 보였다.

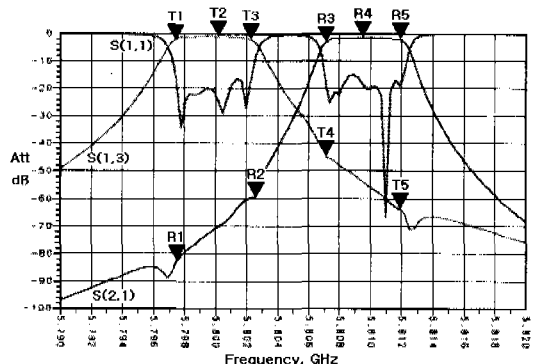


그림 13. 조정 완료된 5.8 GHz용 듀플렉서의 성능

표 4. 그림 13의 측정값

Mark Pnt.	TX		Mark Pnt.	RX	
	Freq. [GHz]	dB (S(1,3))		Freq. [GHz]	dB (S(2,1))
T1	5.7975	-2.06668	R1	5.7975	-82.7666
T2	5.8002	-1.23151	R2	5.8026	-59.2153
T3	5.8023	-2.18833	R3	5.8071	-3.1398
T4	5.8071	-45.32727	R4	5.8095	-1.6525
T5	5.8119	-63.41294	R5	5.8119	-2.4413

4. 결과 및 고찰

시제품으로 개발한 설계 직경 10 mm의 원통형 DR은 유전율 28 ± 1.5 , 온도계수 $\pm 1.5 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$ 의 설계 사양을 충분히 만족시키고 있어 듀플렉서에 응용이 가능함을 확인하였다. 그러나, 샘플간의 온도계수 편차가 다소 넓은 분포를 보이고 있어 양산 시 재현성을 유지하는데 어려움이 있을 것으로 예견된다.

이와 같은 온도계수의 편차는 유전재료의 오염과 소결 환경에 크게 의존한다고 추정되므로 재료의 순도유지와 소결 조건 등을 개선하는 방안이 연구되어야 한다.

한편, 듀플렉스의 성능 측정에서는 감쇠특성과 삽입손실이 서로 상보적인 관계를 보이고 있어 응용에 따라 캐비티의 결합계수를 조정하여 최적성능을 결정할 필요가 있다고 판단된다.

개발 듀플렉스의 종합특성은 비교적 설계값과 잘 일치하고 있으나, 삽입손실이 다소 높은 단점을 보인다. 이와 같은 결과는 캐비티와 DR의 매칭에 관련되는 것으로 개선방안으로는 DR의 $Q \times f_0$ 값을 높이는 재료적 문제와 캐비티의 결합과 설도를 향상시키는 기구적 문제의 해결에 있다고 판단된다.

V. 결론

최근 ITS, 무선 LAN 등의 주파수 스펙트럼이 마이크로파대로 전이되며 근거리 통신이 주류를 이루는 기술동향을 보인다. 이에 따라 2 GHz 이상의 초고주파 기술확보는 매우 시급하며 특히, 듀플렉서를 포함하는 DSRC 관련 기능부품의 연구와 개발은 수입대체, 주변기술의 파급효과 및 국내 통신산업 발전을 위해 절실히 필요하다.

본 논문은 5.8 GHz 대역 DSRC에 응용되는 듀플렉서를 대상으로 DR 및 캐비티의 설계와 제조 기법을 제안하였다. ITS의 DSRC는 10 MHz의 대역폭을 요구하므로 이를 실현하기 위한 DR의 전기적 특성과 캐비티의 필터 특성이 매우 중요하다.

실험에서는 BZT계 유전체의 첨가물을 제어하고 소결조건을 1550°C 에서 관리함으로써 $Q \times f_0 = 30,000$ 이상 실현하는 DR을 개발하였으며, 송수신 각 4단의 필터를 구성해 감쇠특성이 송신 40 dB, 수신 50 dB 이상이고 삽입손실이 송신 2.0 dB, 수신 2.5 dB 이하의 성능을 갖는 듀플렉서 시제품을 제작하였다.

성능 측정결과 시제품의 특성은 삽입손실이 다소 높은 것을 제외하고는 모두 설계값과 잘 일치하였으며 동작의 안정성도 충분히 확보할 수 있었다.

본 기술개발에서는 DSRC에서 요구되는 듀플렉서의 전기적 특성을 비교적 만족시키고 있으나, 향후 결합 기구 및 구조의 개선으로 결합도를 향상시키고 각 세그먼트의 누설 전장을 최소화하여 삽입 손실을 최소화하는 방안과 소형화, 제품화를 위한 기술 개발이 추가적으로 연구되어야 한다.

또한, DSRC용 이외의 응용에 제공될 수 있도록 다양한 주파수 특성과 감쇠 특성을 확보할 수 있는 기술 개발이 요구된다.

개발된 시제품의 상세한 전기적 특성은 표 5와 같이 측정되었다.

표 5. 5.8 GHz용 Duplexer의 전기적 특성

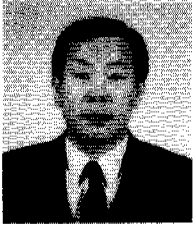
항 목	Duplexer 특성	
	TX	RX
중심 주파수(f_0)	5.80 GHz	5.81 GHz
대역폭	$f_0 \pm 10 \text{ MHz}$	
삽입손실	2.0 dB max	2.5 dB max
대역폭의 Ripple	3.0 dB max	
V.S.W.R.	1.8 : 1 max	
차단의 감쇠율	40 dB min	50 dB min
온도 계수	$\pm 10 \text{ ppm max}$	
동작 온도 범위	$-30 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C} (-22 \sim +140 \text{ }^\circ\text{F})$	

참고 문헌

[1] CEN TC 278 prENV 12253, "DSRC Physical Layer using Microwave at 5.8 GHz," CEN Brussels, December 1995.

장 호 성(Ho-sung Chang)

정회원



1971년 2월 : 홍익대학교

공업교육과 공학사

1977년 2월 : 한양대학교

동력통신과 공학석사

1981년 6월 : 미국 SIU

전자공학교수 연수

1991년 8월 : 단국대학교 전자공학과 공학박사

1992년 3월~현재 : 홍익대학교 과학기술대학 전자

전산컴퓨터공학부 교수

<주관심 분야> 전자공학, 정보통신, 유성인식, ITS