

마이크로 스트립라인 집중소자를 이용한 탄성표면파 듀플렉서 필터의 최적설계

이승희* · 이영진* · 노용래**

*경북대학교 센서공학과

**경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

Optimal Design of SAW Duplexers using Microstrip Line Lumped Elements

Seunghee Lee*, Youngjin Lee* and Yongrae Roh**

*Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

** Dept. of Sensor Eng./School of Elec. and Elec. Eng., Kyungpook National University

*leesh@aslab.knu.ac.kr, *yjlee@aslab.knu.ac.kr, **yryong@eeg.kyungpook.ac.kr

요약

기존의 탄성표면파 듀플렉서 필터는 1/4 파장 정합선로를 이용한 격리회로를 사용하기 때문에 패키지 상에 스트립라인을 구성하는 제작상의 어려움이 있다. 본 연구에서는 격리회로가 송신용, 수신용 필터와 함께 온칩상에 위치할 수 있는 새로운 형태의 탄성표면파 필터를 설계하였다. 그 과정으로 송수신 대역을 각각 담당하는 사다리형 필터를 설계하였고, 집중소자 즉, 인덕터와 캐패시터로 구성되는 탄성표면파 듀플렉서 필터의 격리회로를 구성하였으며, 우수한 성능을 가질 수 있도록 각각의 집중소자들의 값을 최적화하였다.

I. 서론

이동 통신 분야에서 핵심소자의 하나인 듀플렉서 필터(duplexer filter)는 전화기와 안테나의 송수신회로들 사이에 위치하여 송신과 수신사이에서 신호여파 및 진로를 결정해주는 역할을 하는 소자이다. 즉 수신용(Rx), 송신용(Tx) 2개의 대역통과 필터로 구성되어 송신, 수신 각각의 신호를 저손실로 통과시키고 이 밖의 신호는 감쇄시킨다. 탄성표면파 듀플렉서 필터는 종래의 세라믹 듀플렉서 필터들에 비해 많은 장점들을 가짐으로 인해, 현재 코드분할 다중접속(CDMA)용 뿐만 아니라 개인휴대통신(PCS), 주파수공용통신(TRS), 무선 가입자망(WLL), 유럽형 GMS 단말기용, 그리고 미래의 위성 개인 휴대 통신시스템인 UMTS, IMT-2000 등의 다양한 통신 규격에 사용되고 있다.

최근에 상용화된 탄성표면파 듀플렉서 필터의 격리회로는 분포소자인 1/4 파장 정합선로를 사용하기 때문에 패키지 상에 스트립라인을 구성하는 제작상의 어려움이 있다 [1]. 따라서 이러한 제작상의 번거로움을 해결하고 더 나은 성능의 듀플렉서 필터를 설계하기 위해서, 격리회로가 인덕터 및 캐패시터인 집중소자로 구성된 회로망의 형태이고, 하나의 기판 위에 격리회로가 송신용, 수신용 필터와 함께 위치하는 일체형 탄성표면파 필터를 설계하고자 한다. 그 과정으로 송수신 대역을 각각 담당하는 사다리형 탄성표면파 필터를 설계하였고, 듀플렉서 필터의 구조로 가능성 있는 L-회로망 구조인 송신용 및 수신용 사다리형 탄성표면파 필터의 연결구조 두 가지를 제시하였다. 그리고 이 두 가지 연결구조에 대해서 각각 집중소자 구성되

는 탄성표면파 듀플렉서 필터의 격리회로의 구조를 도출하였으며, 이 격리회로에서의 각각의 집중소자의 소자 값을 비선형 다차원 최적화 방법인 Powell 알고리즘을 이용하여 최적화하였다. 더불어 이를 적용한 탄성표면파 듀플렉서 필터의 성능이 기존의 상용제품 보다 우수함을 확인하였다.

II. 이론적 배경

2. 1. 사다리형 탄성표면파 필터의 원리

사다리형 탄성표면파 필터는 기본적으로 1-단자쌍 탄성표면파 공진기로 구성된다. 1-단자쌍 표면탄성파 공진기는 그림 1-(a)와 같은 형태로 구성되고, 그림 1-(b)와 같이 전형적인 공진기처럼 서로 이웃한 공진주파수와 반공진주파수를 가지는 리액턴스 특성을 가진다.

이러한 1-단자쌍 탄성표면파 공진기를 사다리형으로 접속하여 사다리형 탄성표면파 필터로 구성하며, 그 구성의 기본단위는 그림 2-(a)와 같다. 직렬 공진기의 공진주파수와 병렬 공진기의 반공진주파수를 일치시켜 그림 2-(b)와 같은 imittance 특성을 갖도록 배치하면 2-(c)와 같은 필터 전체의 전달특성을 가지게 된다. 이러한 구조를 가지는 사다리형 탄성표면파 필터는 직렬 및 병렬 공진기 각각의 구조 설계변수와 직렬 공진기와 병렬공진기의 공진주파수와 반공진주파수를 적절히 조절하여 원하는 전달특성을 구현하기가 용이하다는 장점을 가지고 있다.

2. 2. 듀플렉서 필터의 구성 원리와 격리회로의 역할

듀플렉서 필터는 이웃한 두 주파수의 대역통과 필터 두 개로 구성된다. 즉, 이웃한 두 주파수의 단품 사다리형 탄성표면파 필터 두 개를 좋은 성능이 가지게끔 구성하고, 이들을 그림 3과 같이 병렬 연결함으로써 듀플렉서 필터로서의 역할을 기대할 수 있다. 하지만 단순히 이러한 조합만으로는 각각의 필터의 입력단에 미치는 임피던스 조건이 다르기 때문에 개별 필터의 성능이 제대로 구현되기가 어렵다. 이를 해결하기 위해서 일반적으로 듀플렉서 필터 회로망 내부 또는 외부에 격리회로를 추가하는 방법을 사용하고 있다. 이미 상용화된 탄성표면파 듀플렉서 필터

는 Tx 필터를 T-회로망 형식으로, 그리고 Rx 필터를 π -회로망 형식으로 탄성표면과 공진기를 배열한 구조인 두 개 사다리형 필터로 듀플렉서를 구성하여 Tx 필터 통과대역특성의 왜곡을 미리 방지한 후에 그림 3과 같이 Tx 단 앞에 분포소자인 1/4 파장의 정합선로를 설치함으로써 Rx 필터 통과대역특성 왜곡을 최소화하는 방식을 취하고 있다[2].

서론에서도 언급하였듯이, 본 연구에서는 안테나 단, Tx 단, 또는 Rx 단 앞에 인덕터나 캐패시터인 집중소자를 포함하는 격리회로를 이용한 정합방법을 이용하고자 한다. 이때 격리회로의 구조는 Tx 및 Rx 사다리형 필터의 연결 구조에 따라 달라질 수 있다. 집중소자의 구현방법은 단일 압전기판 위에 온칩화라는 목적에 맞도록 마이크로 스트립라인(microstrip line) 집중소자를 이용하고자 한다[3]. 구체적으로, 인덕터는 meander line 인덕터 또는 spiral type 인덕터로, 캐패시터는 interdigital 캐패시터로 구현하는 것이 가장 용이하다. 또한, 향후에 마이크로 스트립라인을 이용한 집중소자를 구현하는 실험이 뒷받침되어야 할 것이다.

III. 탄성표면과 듀플렉서 필터 설계

3. 1. 단품 사다리형 탄성표면과 필터 설계

2절에서 설명한 개념에 기초를 두어, 먼저 사다리형 탄성표면과 필터 해석 프로그램을 작성하였다. 이 해석 프로그램은 Smith 등가회로 해석법과 전송선로 이론에 기초를 두고 있다. 그리고 이를 이용하여 탄성표면과 듀플렉서 필터의 구성 요소가 될 사다리형 탄성표면과 필터를 설계하였다. 구체적으로 본 연구에서는, CDMA Rx 및 Tx 용 필터 사양을 만족하도록 사다리형 탄성표면과 필터의 설계 변수를 최적화하였다. 이때 사용된 압전기판은 36° YX LiTaO₃ 이고, 직렬 및 병렬 공진기의 조합이 3 쌍인 사다리형 필터의 구조로 정하였다. 이러한 탄성표면과 필터를 해석하고, 성능을 최적화하는 구체적인 방법은 참고문헌 [4]에서 자세히 소개하고 있다.

3. 2. 사다리형 탄성표면과 필터의 듀플렉서 연결방법 결정

2. 1 절의 설명처럼 탄성표면과 공진기를 직렬과 병렬로 연결한 L-회로망 또는 이를 3 쌍 직렬 연결한 구조로 사다리형 필터를 구성하는데, 이러한 구조는 좌우 비대칭이므로, 듀플렉서 필터 구성 시에 Tx 및 Rx 각각의 연결 방향에 따라 듀플렉서 필터 전체 성능이 달라지고 구성할 격리회로와 구조도 달라진다. 그 이유는 L-회로망을 들여다보는 방향에 따라 임피던스 특성이 다르기 때문이다. 듀플렉서 필터의 연결구조는 그림 4와 같이 Tx 및 Rx 사다리형 필터 각각의 배열 방향에 따라 모두 4 가지의 조합이 있을 수 있는데, 그 중에서 듀플렉서 필터로 구성 시에 나타나는 성능열화에 대한 보상을 쉽게 할 수 있는 2 가지 형태인 Case 1과 Case 3을 채택하였다.

3. 3. 듀플렉서 필터용 격리회로의 구조 도출

탄성표면과 듀플렉서 필터의 격리회로 구조를 유도하기

위한 기초 경향을 파악하기 위하여, 그림 5와 같이 Tx와 Rx 필터와 미지의 격리회로망 A, B, C 세 부분을 두고, 각각의 격리회로망 A, B, C의 회로망 함수의 변화에 따른 Tx 및 Rx 통과대역에서의 전달함수 값의 경향을 조사하였다. 구체적으로 설명하면, Tx 필터 및 Rx 필터 외부단의 입력 임피던스(50Ω)가 주어졌을 때, 격리회로망 A, B, C 각각의 임피던스 파라미터($Z_{A11}, Z_{A12}, Z_{A22}, Z_{B11}, Z_{B12}, Z_{B22}, Z_{C11}, Z_{C12}, Z_{C22}$)를 미지수로 두고 각각을 변화시켜서 듀플렉서 필터 전달특성($S_{11}, S_{22}, S_{33}, S_{12}, S_{13}, S_{23}$)의 경향을 파악하였다. 이 때 주파수는 Tx 또는 Rx 통과대역 내에서의 특정 주파수로 고정하였고, 경향분석 시간을 단축시키기 위해서 탄성표면과 공진기의 해석 방법은 집중소자 등가회로(lumped element equivalent circuit) 해석법을 이용하였다.

이러한 경향파악을 기초로 하여, 그림 4의 Case 1을 대상으로 한 Tx 및 Rx 필터 각각의 통과대역 주파수에 대해서 격리회로망 A, B, C가 가지는 필요조건을 표 1과 같이 유도하였다. 그러나, 위에서 서로 독립적으로 구하여진 격리회로 A, B, C가 동시에 적용되어진다면, 듀플렉서 필터의 전달특성이 오히려 왜곡되는 현상이 나타난다. 그래서 다음과 같은 두 가지 논리를 통하여 격리회로망을 수정, 단순화하였다. 첫째, 격리회로망의 구조가 하나의 집중소자가 병렬 삽입된 구조($Z_{11} = Z_{12} = Z_{13}$)이면, 격리회로망 A, B, C 위치에 상관없이 등가이다. 둘째, 각각의 격리회로망의 임피던스 파라미터 값을 결정하는 문제에 있어서 $\text{Im}[Z_{11}], \text{Im}[Z_{22}], \text{Im}[Z_{12}]$ 가 모두 매우 크면, 소자가 포함되어 있지 않은 2-단자쌍 회로망이거나 직렬 연결된 소자가 포함된 2-단자쌍 회로망이다. 이러한 논리를 이용하여, Case 1의 경우에 결정된 격리회로망 A, B, C 각각의 최적 임피던스 파라미터 값은 표 2와 같은 조건을 가지는 것으로 파악되었다.

그런데, Tx와 Rx 통과대역 각각의 주파수에서의 격리회로망의 조건을 따로 유도하였으므로, 실제의 상황에 적용하려면 주파수에 의존하는 회로망의 형태로 바꾸어야 한다. 인덕터나 캐패시터를 이용하여 위에서 유도된 주파수에 따른 격리회로망의 임피던스 파라미터들간의 조건을 완전하게 만족하는 2-단자쌍 회로망 형태의 격리회로망을 합성한다는 것은 임피던스 파라미터들 간의 관계가 너무 복잡하기 때문에 사실상 불가능하다. 따라서 차수가 적은 버터워스(Butterworth) 필터나 체비세프(Chevishev) 필터와 같은 인덕터와 캐패시터로 구성되는 L-회로망이나 T-회로망, π -회로망, 또는 인덕터나 캐패시터의 간단한 조합으로 이루어진 임의의 2-단자쌍 회로망에서 격리회로망 조건을 가장 잘 만족하는 회로망의 형태를 찾는 방법으로 격리회로의 최종형태를 결정하였다.

이상과 같은 방법을 통하여 그림 4의 Case 1과 Case 3 형태의 듀플렉서 구조에 대해 유도한 격리회로의 구조를 그림 6에 나타내었다.

3. 4. Powell 알고리즘을 이용한 격리회로의 집중소자 값 최적화

이상의 방법을 통하여 유도된 격리회로는 Tx 및 Rx 필터의 세부적인 사양에 따라 격리회로내의 집중소자가 가지는 값이 달라진다. 듀플렉서 연결구조 Case 1과 Case 3에 대해서, 개별 필터의 사양에 따라 집중소자의 값을 최

적화하여야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 이러한 집중소자 값을 최적화하는 방법으로, 먼저 그림 7과 같이 듀플렉서 전달특성에서 Tx와 Rx 각각의 통과대역과 저지대역내의 특정주파수를 정하고, 각각의 주파수에 대해서 통과대역의 전달계수는 크게, 저지대역의 전달계수는 작게 하는 방향으로 최적화 목표 함수(cost function)를 설정하였다. 그리고 이 최적화 목표 함수를 비선형 다차원 최적화 기법인 Powell 알고리즘을 이용하여 각각의 집중소자 값들을 최적화하였다[5].

IV. 일체형 탄성표면과 듀플렉서 필터의 특성평가

이상의 방법들을 이용하여 CDMA 사양의 개별 사다리형 탄성표면과 필터를 설계하고, Case 1과 Case 3 구조에 대해 격리회로 집중소자 값을 최적화하였다. 이 집중소자를 적용하였을 때 나타나는 듀플렉서 필터의 전체성능을 시뮬레이션 한 결과를 그림 8에 나타내었다. 그리고 기존의 상용제품과 성능을 정량적으로 비교한 결과를 표 3에 나타내었다[6]. 그 결과 기존의 1/4 파장 정합선로를 이용한 탄성표면과 듀플렉서 필터에 비해 삽입손실은 약 0.3 ~ 1.0 dB, 통과대역내 리플은 약 0.8 dB 이상, VSWR (voltage standing wave ratio)은 0.35 ~ 0.45, 그리고 저지대역 감쇠도는 0.8 ~ 4.8 dB 정도의 성능향상을 이루었다.

V. 결론

본 연구에서는 집중소자를 포함하는 격리회로를 가지는 새로운 탄성표면과 듀플렉서 필터의 구조와 그 최적 설계법을 개발하였다. 또한 설계한 탄성표면과 듀플렉서 필터의 구조가 듀플렉서 필터를 구성함에 있어서 발생하게 되는 왜곡현상을 기존 상용제품 이상으로 개선할 수 있음을 확인함으로써, 그 격리회로 및 듀플렉서의 전체 구조가 타당함을 입증하였다. 향후 계획으로는 마이크로 스트립라인 집중소자를 실험적으로 구현하고, 특정 사양을 대상으로 한 탄성표면과 듀플렉서의 시작품을 제작하여 최적화된 격리회로를 적용하였을 때의 성능을 평가하여 본 연구 결과인 최적설계 기술의 타당성을 실험적으로 검증하고자 한다.

참고문헌

1. R. Weigel, K. Weigenthaler, R. Dill, and I. Schropp, "A 900 MHz Ladder-type SAW Filter Duplexer", IEEE MTT-S Digest, pp. 413-416, 1996.
2. O. Ikata, T. Nishihara, and Y. Satoh, "A Design of Antenna Duplexer Using Ladder type SAW Filters", IEEE Ultras. Symp. Proc., pp. 1-4, 1998.
3. S. Y. Liao, *Microwave Circuits Analysis and Amplifier Design*, Prentice-Hall Inc., 1987.
4. 노용래, "사다리형 SAW 필터의 최적 설계", 한국음향학회지, 18(1), 16-24, 1999.
5. W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C: the art of*

scientific computing, Cambridge University Press, 1992.

6. *Catalogue of Fujitsu*, Japan, 1999.

표 1. Case 1을 대상으로 한 격리회로망 A, B, C의 필요조건.

「At Tx-passband」	
Z _A	<ul style="list-style-type: none"> • $Z_{A11} \approx Z_{A22} \approx Z_{A12}$ and $Z_{A11} \geq Z_{A22}$ • $\text{Im}[Z_{A11}]$과 $\text{Im}[Z_{A22}]$가 동일 부호 • $\text{Im}[Z_{A11}] > 0, \text{Im}[Z_{A22}] > 0$
Z _B	<ul style="list-style-type: none"> • $Z_{B11} \approx Z_{B22} \approx Z_{B12}$ and $Z_{B11} \leq Z_{B22}$ • $\text{Im}[Z_{B11}]$과 $\text{Im}[Z_{B22}]$가 동일 부호 • $\text{Im}[Z_{B11}] > 0, \text{Im}[Z_{B22}] > 0$
Z _C	<ul style="list-style-type: none"> • $Z_{C12} \approx 0, \text{Im}[Z_{C11}] < 0, \text{Im}[Z_{C22}] < 0$
「At Rx-passband」	
Z _A	<ul style="list-style-type: none"> • $Z_{A11} \approx Z_{A22} \approx Z_{A12}$ and $Z_{A11} \geq Z_{A22}$ • $\text{Im}[Z_{A11}]$과 $\text{Im}[Z_{A22}]$가 동일 부호 • $\text{Im}[Z_{A11}] > 0, \text{Im}[Z_{A22}] > 0$
Z _B	<ul style="list-style-type: none"> • $Z_{B12} \approx 0, Z_{B11} < 0, Z_{B22} < 0$
Z _C	<ul style="list-style-type: none"> • $Z_{C11} \approx Z_{C22} \approx Z_{C12}$ and $Z_{C11} \leq Z_{C22}$ • $\text{Im}[Z_{C11}]$과 $\text{Im}[Z_{C22}]$가 동일 부호 • $\text{Im}[Z_{C11}] > 0, \text{Im}[Z_{C22}] > 0$

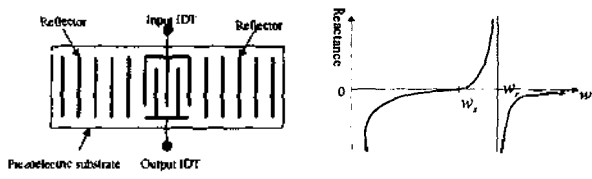
※ $\text{Im}[\]$ 은 허수부, 즉 리액턴스.

표 2. Case 1을 대상으로 한 격리회로망 A, B, C가 가지는 조건.

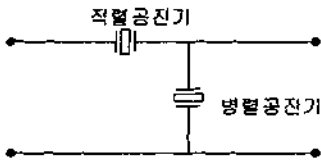
「At Tx-passband」	
<ul style="list-style-type: none"> • $\text{Im}[Z_{A11}] = \text{Im}[Z_{A22}] = \text{Im}[Z_{A12}] \approx 70$ • $\text{Im}[Z_{B11}] = \text{Im}[Z_{B22}] = \text{Im}[Z_{B12}] \approx \text{Infinite}$ • $\text{Im}[Z_{C11}] \approx -50$, and $\text{Im}[Z_{C22}] = \text{Im}[Z_{C12}] \approx 0$ 	
「At Rx-passband」	
<ul style="list-style-type: none"> • $\text{Im}[Z_{A11}] = \text{Im}[Z_{A22}] = \text{Im}[Z_{A12}] \approx \text{infinite}$ • $\text{Im}[Z_{B11}] \approx -300$, and $\text{Im}[Z_{B22}] = \text{Im}[Z_{B12}] \approx 0$ • $\text{Im}[Z_{C11}] = \text{Im}[Z_{C22}] = \text{Im}[Z_{C12}] \approx \text{Infinite}$ 	

표 3. 최적화된 탄성표면과 듀플렉서 필터와 상용 제품과의 성능비교.

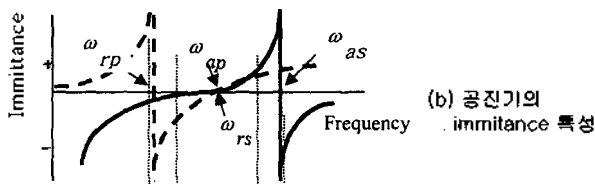
듀플렉서 필터 사양	삽입 손실 [dB]	중심 주파수 [MHz]	-3 dB BW [MHz]	리플 [dB]	저지대역 감쇠도 [dB]	VS WR	
Case 1.	Tx	-1.966	837.0	26	0.097	-43.5	1.60
	Rx	-2.078	881.0	26	0.423	-40.8	1.85
Case 3.	Tx	-1.873	836.0	28	0.124	-44.8	1.85
	Rx	-1.947	884.0	24	0.000	-42.1	1.86
상용 제품	Tx	-2.300	836.5	25	1.000	-40.0	1.90
	Rx	-3.000	881.5	25	1.500	-40.0	2.20



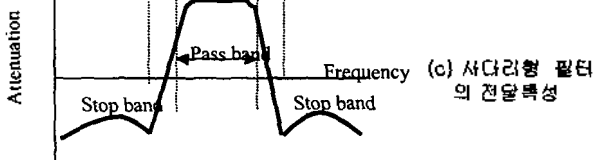
(a) 구조 (b) 리액턴스 특성
그림 1. 1-단자쌍 탄성표면파 공진기.



(a) 사다리형 필터의 구조



(b) 공진기의 임피던스 특성



(c) 사다리형 필터의 전달 특성

그림 2. 사다리형 필터의 구조 및 특성.

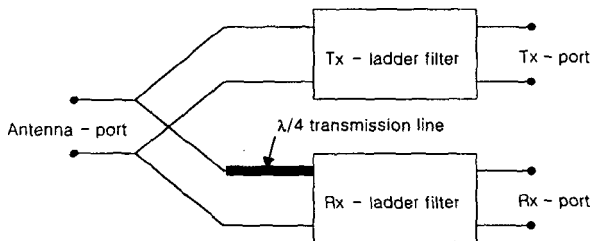


그림 3. 일반적인 듀플렉서 필터 구조

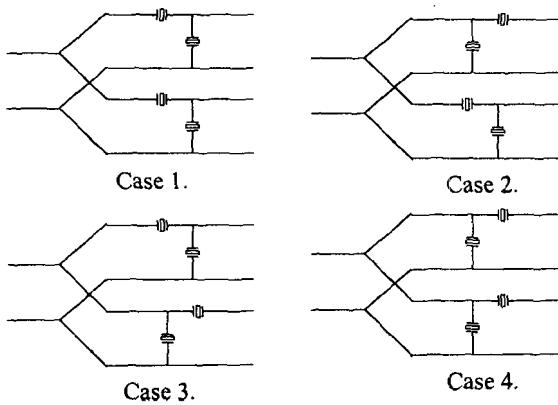


그림 4. 사다리형 필터의 연결방향에 따른 4가지의 듀플렉서 필터 구성방법.

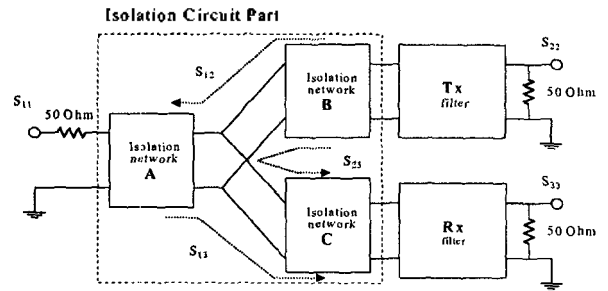
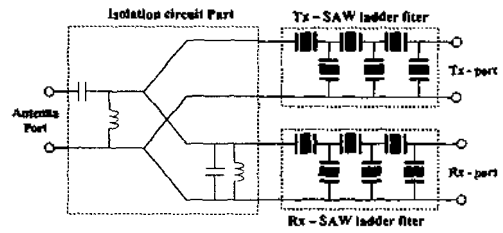
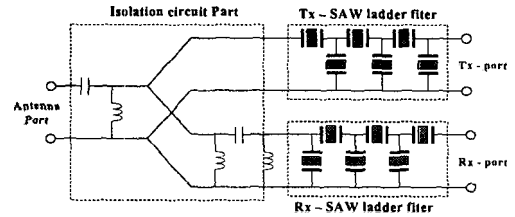


그림 5. 격리회로망 A, B, C를 포함한 듀플렉서 필터.

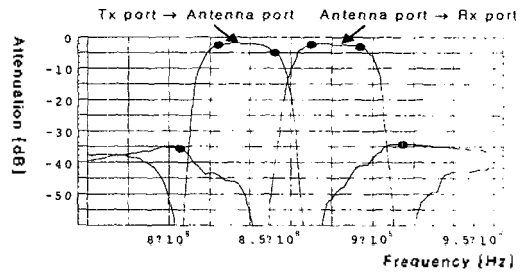


(a) Case 1.

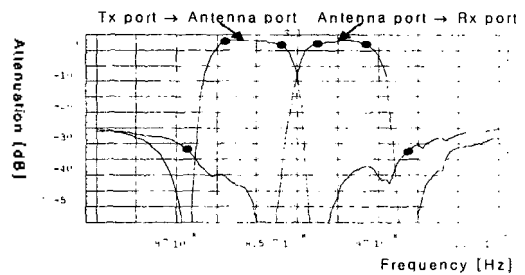


(b) Case 3.

그림 6. 본 연구에서 설계한 듀플렉서 필터 최적구조.



(a) Case 1.



(b) Case 3.

그림 7. 최적 설계된 탄성표면파 듀플렉서 필터의 성능.