

마이크로 스트립라인 집중소자를 이용한 일체형 SAW 듀플렉서의 최적설계 및 실험

Optimal Design and Experiment of One Chip Type SAW Duplexers using Micro_Strip Line Lumped Elements

이승희*, 노용래**

(Seunghee Lee* and Yongrae Roh**)

Abstract

Commonly used SAW duplexers have a difficulty on manufacture so that a transmission line is printed on the package or an LTCC multi-layer is needed because a quarter-wave transmission line which is a kind of an isolation network is applied to the SAW duplexers. In this study, new structures of one chip type SAW duplexers are proposed. In the proposed structure, Tx and Rx SAW ladder filters and isolation networks are located on a single 36LiTaO_3 piezoelectric substrate. The manufacture process is very simple than commonly used product. It is possible to improve the performance by means of optimizing the micro-strip line lumped elements. It is easy to integrate and modulate with other surrounding components. The optimal design techniques can be applied to other kind of multi-port devices.

Key Words : SAW duplexer, Micro-strip line, Isolation network, Optimal design

1. 서론

이동통신 단말기용 핵심소자의 하나인 SAW 듀플렉서(surface acoustic wave duplexer)는 안테나와 송수신회로 사이에 위치하여 신호의 여과 및 진로 결정을 담당하는 소자이다. 즉 송신용(Tx, transmitter) 및 수신용(Rx, receiver) 대역통과 필터로 구성되어 송신 및 수신 신호를 저손실로 통과시키고 이 밖의 신호는 감쇠시킨다. SAW 듀플렉서는 코드분할다중접속(CDMA), 미국형 아날로그 이동전화방식(AMPS), 개인휴대통신(PCS), 유

립형 디지털 이동전화 방식(GSM), 무선 가입자망(WLL), IMT-2000, 차세대 위성 개인통신서비스(UMTS) 등으로 매우 다양한 통신규격에 사용되고 있거나 개발, 적용 중에 있다[1-3].

이미 상용화된 SAW 듀플렉서는 그림 1과 같이 격리회로망(isolation network)으로 분포소자인 1/4 파장 전송선로를 이용하기 때문에 패키지 상에 전송선로를 구현하거나 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 다층막 제작기법을 이용하여 전송선로를 입체적인 형태로 별도의 칩에 구현해야 하는 제작상의 어려움이 있다[4-8].

본 연구에서는 기존의 SAW 듀플렉서가 가지는 제작상의 단점을 해결하고 더 나은 성능을 구현할 수 있는 새로운 구조의 일체형 SAW 듀플렉서를 개발하였다. 제안한 구조는 송신 및 수신용 사다리형 SAW 필터와 마이크로 스트립라인 집중소자들로 구성된 격리회로망이 36°LiTaO_3 단일 칩 위에 존재하는 구조를 가지고 있다. 따라서 단 한 차례

* : 경북대학교 센서공학과

** : 경북대학교 기계공학부

(대구광역시 북구 산격동 1370번지,

Fax: 053-950-6827

Corresponding : yryong@knu.ac.kr

2003년 1월 8일 접수, 2003년 2월 25일 1차 심사완료,

2003년 3월 24일 최종 심사완료

의 반도체 사진식각공정을 이용하기 때문에 기존의 SAW 듀플렉서에 비해서 제작공정이 매우 간단해지는 장점을 가지고, 제작단가를 획기적으로 절감시키는 효과를 기대할 수 있다. 그리고 격리회로망 내의 마이크로 스트립 라인 집중소자의 최적화를 통해서 듀플렉서 전체 성능을 기존 제품 이상으로 극대화시킬 수 있다는 장점을 가진다.

2. 일체형 SAW 듀플렉서의 구조설계 및 성능 최적화

2.1 송수신용 개별 사다리형 SAW 필터의 공진기 배열구조 결정

현재 상용화되어 사용중인 SAW 듀플렉서는 대부분 사다리형 SAW 필터를 조합한 구조를 가지고 있다. 사다리형 SAW 필터는 SAW 공진기의 전극 형상과 배열을 조절함으로써 전체 필터의 특성 조절이 용이하고 형상도가 우수하며 삽입손실이 작기 때문에 SAW 듀플렉서로 응용하기 적합하다.

본 연구에서는 먼저 듀플렉서의 구성을 위해 미리 설계한 송수신용 사다리형 SAW 필터의 3-단자쌍 회로망 배열구조를 결정하였다[9]. 사다리형 SAW 필터는 36° LiTaO₃ 압전 단결정 위에 L-회로망 구조의 직병렬 SAW 공진기가 통상 3쌍 반복된 구조를 가지고 있는데, 이러한 구조에서는 듀플렉서 구성 시에 송신 및 수신용 필터 각각의 공진기 배열 순서에 따라 듀플렉서 전체 성능이 달라지고 구성할 격리회로의 구조도 달라진다. 그 이유는 개별 사다리형 필터 회로망을 들여다보는 방향에 따라 입력 임피던스 특성이 다르기 때문이다. 따라서 듀플렉서의 격리회로망 설계에 앞서, 그림

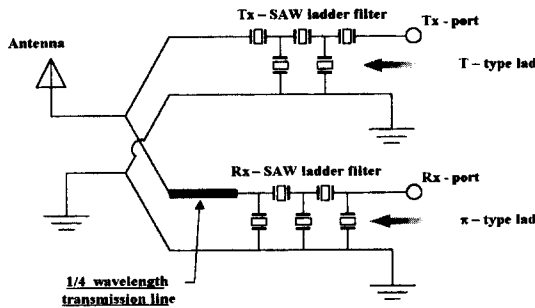


그림 1. 상용 SAW 듀플렉서의 구조.
Fig. 1. Structure of commercial SAW duplexers.

2와 같은 총 4가지 구조 중에서 성능왜곡에 대한 보상을 쉽게 할 수 있는 2가지의 구조인 case 1과 case 2를 듀플렉서 구조 설계대상으로 선정하였다.

2.2 SAW 듀플렉서용 격리회로망 구조 도출

SAW 듀플렉서 필터용 격리회로망 구조를 유도하기 위하여, 그림 3과 같은 3-단자쌍 회로망 연결 구조에서 미지의 격리회로망 A, B, C 세 부분을 두고, 각각의 격리회로망 A, B, C의 임피던스 파라미터 Z_{A11} , Z_{A12} , Z_{A22} , Z_{B11} , Z_{B12} , Z_{B22} , Z_{C11} , Z_{C12} , Z_{C22} 변화에 따른 듀플렉서 전달계수 및 반사계수인 S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{21} , S_{31} , S_{23} 의 변화를 조사하였다. 이 때 주파수는 송신 또는 수신 통과대역의 중심 주파수로 고정하였고, 경향 분석 시간을 단축시키기 위해서 집중소자 등가회로 해석법을 이용하여 SAW 공진기를 해석하였다. 그리고 실제로는 격리회로망용 집중소자는 순수한 리액턴스 성분만 갖는 소자만을 이용하기 때문에 격리회로망 자체가 저항성분을 가지지 않는다는 조건을 두어 임피던스 파라미터의 허수 성분값 변화에 따른 경향만을 파악하였다. 이렇게 조사한 경향을 기초로 하여, 송신 및 수신 필터 각각의 중심 주파수에서 바람직한 듀플렉서 성능을 가지기 위한 격리회로망 A, B, C의 임피던스 파라미터들의 충분조건을 공통부분을 case 1과 case 2 구조에 대하여 식 (1)~(4)와 같이 각각 유도하였다.

For case 1,

At Tx-passband,

$$\text{Im}[Z_{A11}] \approx \text{Im}[Z_{A22}] \approx \text{Im}[Z_{A12}] > Z_L$$

$$\text{Im}[Z_{B11}] \approx \text{Im}[Z_{B22}] \approx \text{Im}[Z_{B12}] \approx \infty$$

$$\text{Im}[Z_{C11}] \approx -Z_L \text{ \& \ } \text{Im}[Z_{C22}] \approx \text{Im}[Z_{C12}] \approx 0$$

(1)

At Rx-passband,

$$\text{Im}[Z_{A11}] \approx \text{Im}[Z_{A22}] \approx \text{Im}[Z_{A12}] \approx \infty$$

$$\text{Im}[Z_{B11}] \ll -Z_L \text{ \& \ } \text{Im}[Z_{B22}] \approx \text{Im}[Z_{B12}] \approx 0$$

$$\text{Im}[Z_{C11}] \approx \text{Im}[Z_{C22}] \approx \text{Im}[Z_{C12}] \approx \infty$$

(2)

For case 2,

At Tx-passband,

$$\text{Im}[Z_{A11}] > \text{Im}[Z_{A22}] \approx Z_L \text{ \& \ } |Z_{A11}| > |Z_{A12}| > Z_L$$

$$\text{Im}[Z_{B22}] > \text{Im}[Z_{B11}] \approx Z_L \text{ \& \ } |Z_{B22}| > |Z_{B12}| > Z_L$$

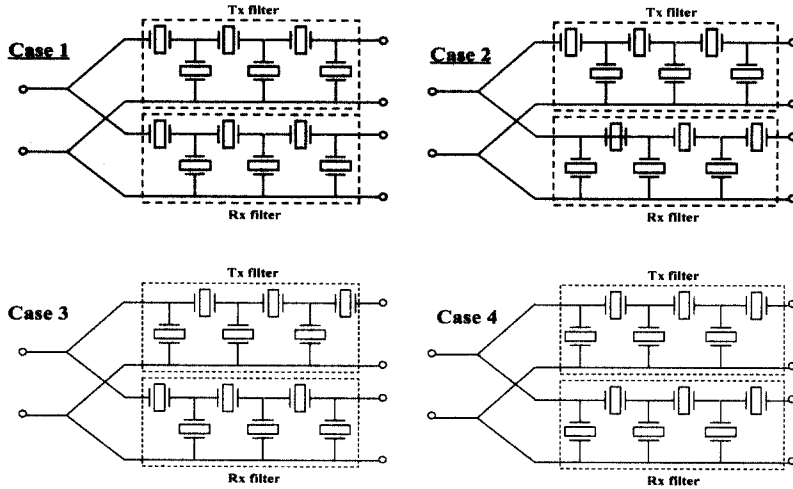


그림 2. SAW 공진기 배열에 따른 SAW 듀플렉서의 네 가지 구조.

Fig. 2. Four variations of the SAW duplexer structure with different arrangement of the SAW resonators.

$$\text{Im}[Z_{C11}] < -Z_L \ \& \ \text{Im}[Z_{C22}] \approx \text{Im}[Z_{C12}] \approx 0 \quad (3)$$

At Rx-passband,

$$\begin{aligned} \text{Im}[Z_{A11}] \approx \text{Im}[Z_{A22}] \approx \text{Im}[Z_{A12}] > Z_L \\ \text{Im}[Z_{B11}] > Z_L \ \& \ \text{Im}[Z_{B22}] \approx \text{Im}[Z_{B12}] \approx 0 \\ \text{Im}[Z_{C11}] \approx \text{Im}[Z_{C22}] \approx \text{Im}[Z_{C12}] > Z_L \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, Z_L 은 부하 임피던스이고, $\text{Im}[\]$ 은 허수부를 의미한다. 위와 같이 유도한 송신 및 수신 중심 주파수에서의 격리회로망 조건을 실제로 묘사하려면 주파수에 의존하는 소자인 인덕터와 커패시터로 구성된 회로망을 적절히 구성해야 한다. 따라서 낮은 차수의 버터워스 필터나 체비세프 필터와 같이 인덕터와 커패시터로 구성되는 L-회로망, T-회로망 또는 π -회로망을 적절히 조합하여 격리회로망 조건을 가장 잘 만족시키는 회로망 구조를 찾는 방법을 통하여 격리회로망의 최종형태를 결정하였다. 이렇게 하여 설계된 case 1과 case 2 듀플렉서의 전체 구조를 그림 4에 나타내었다.

2.3 Powell 알고리즘을 이용한 격리회로망 집중소자 값 최적화

이상의 방법을 통하여 유도된 격리회로망은 송신 및 수신 필터의 세부 사양에 따라 격리회로망

내의 집중소자가 가져야 할 값이 달라진다. 따라서 송수신 필터의 사양이 결정되면 듀플렉서로의 성능을 극대화하기 위해서 집중소자의 값을 최적화할 필요가 있다. 본 연구에서는 이 최적값을 결정하기 위해서, 먼저 그림 5와 같이 듀플렉서 전달특성을 결정하는 송신 및 수신 통과대역과 저지대역 내의 특정주파수를 정하고, 각각의 주파수에 대해서 통과대역의 전달계수 $H(f_{p1}), H(f_{p2}), H(f_{p3}), H(f_{p4})$ 는 최대화, 동시에 저지대역의 전달계수 $H(f_{r1}), H(f_{r2})$ 는 최소화하는 방향으로 최적화 목표 함수(Cost function)를 식 (5)와 같이 설정하였다. 이때 최적화 대상 변수는 격리회로망 집중소자의 인덕턴스 및 커패시턴스 값들이다.

$$\begin{aligned} \text{Cost function} \\ = \sum_{i=1}^4 \left| \frac{H(f_{pi}) - \text{Min}[H(f_{pi})]}{\text{Max}[H(f_{pi})] - \text{Min}[H(f_{pi})]} \right|^2 \quad (5) \\ + \sum_{j=1}^2 \left| \frac{H(f_{rj}) - \text{Min}[H(f_{rj})]}{\text{Max}[H(f_{rj})] - \text{Min}[H(f_{rj})]} \right|^2 \end{aligned}$$

여기서, $\text{Max}[H(f)]$ 와 $\text{Min}[H(f)]$ 는 격리회로망에 따라 전달계수가 가질 수 있는 최대값과 최소값을 각각 나타낸다. 식 (1)과 같이 구성된 최적화 목표함수를 비선형 다차원 최적화 기법인

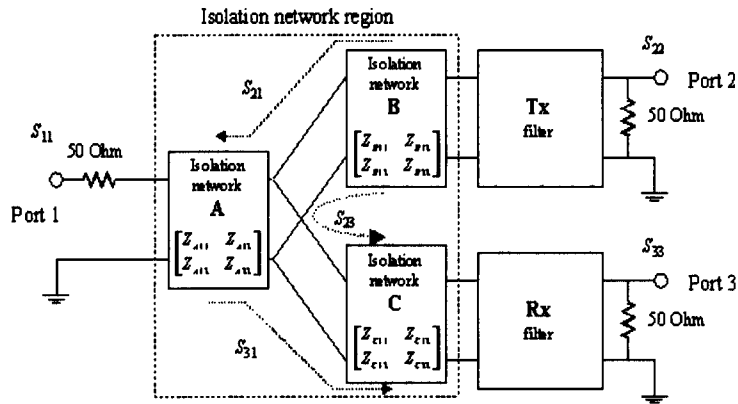
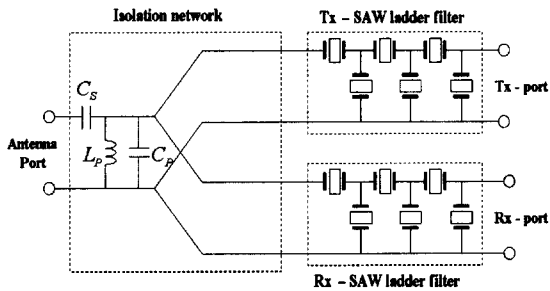
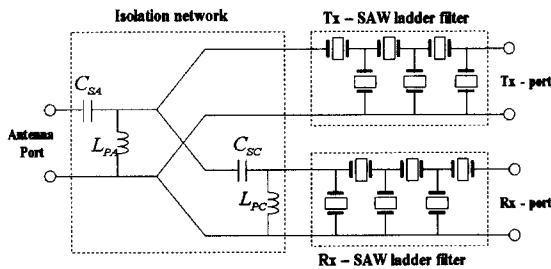


그림 3. 3-단자쌍 회로망 듀플렉서 해석 모델.

Fig. 3. Analysis model of a 3-port network duplexer.



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 4. 일체형 SAW 듀플렉서의 구조.

Fig. 4. Schematic structures of the one chip type SAW duplexers.

Powell 알고리즘을 이용하여 최소화함으로써, 전달 계수를 구성하는 집중소자 값들을 최적화하였다 [10,11]. 먼저, 기준 주파수에서의 전달계수의 최대, 최소값을 찾고, 이들을 최적화 목표함수에 대입하여 식을 완성한 뒤에 이를 대상으로 최적화를 실시함으로써 격리회로망 집중소자의 값을 결정하였다. 이상의 방법을 통하여 case 1 및 case 2 듀플렉서 구조에 대해 최적화된 격리회로망 집중소자 값들을 표 1에 나타내었다.

2.4 마이크로 스트립라인 집중소자 설계

SAW 듀플렉서용 격리회로망 집중소자는 2차원 평면상에서 마이크로 스트립라인으로 구현 가능하다. 구체적으로 인덕터는 단순한 선로 형태인 flat line 인덕터나 spiral line 인덕터로, 커패시터는 interdigital 커패시터로 구현 가능하다[12-16]. 이는 상용 SAW 듀플렉서의 격리회로인 1/4 파장 전송선로 보다 훨씬 작은 면적에 구현가능하기 때문에 일체형 SAW 듀플렉서에 적용하기에 매우 적절한 형태이다. 앞서 최적화된 격리회로망 집중소자의 값을 정확하게 묘사할 수 있도록 마이크로 스트립라인 인덕터 및 커패시터를 설계한 결과를 바탕으로[12], 수 nH 이하의 작은 인덕턴스는 flat line 인덕터로, 수~수십 nH의 비교적 큰 인덕턴스는 spiral line 인덕터로 구현하였다.

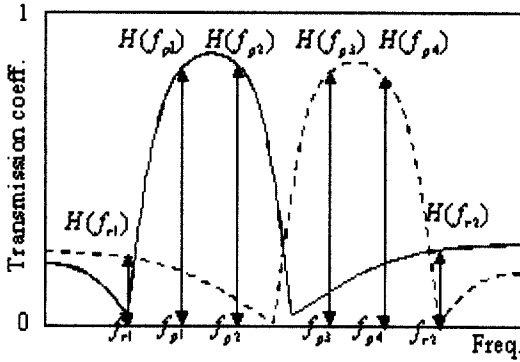


그림 5. 듀플렉서 최적화를 위한 성능변수.
 Fig. 5. Performance variables for the optimization of the duplexers.

표 1. 일체형 SAW 듀플렉서의 격리회로망 소자 최적값.

Table 1. Optimal values of the isolation network for the one chip type SAW duplexers.

Case1		Case2	
C_S	7.9 pF	C_{SA}	4.8 pF
L_P	0.73 nH	L_{PA}	6.9 nH
C_P	42.1 pF	C_{SC}	2.9 pF
		L_{PC}	15.2 nH

이 때 마이크로 스트립라인 인덕터 자체가 가지는 면적이 비교적 작으면서 동시에 저항이 너무 커지지 않도록 설계변수를 적절히 결정하였다. 커패시터는 interdigital 커패시터 형태로 구현하되 36° LiTaO₃ 기판의 압전효과로 인해 발생하게 될 공진 및 반공진 주파수 구간이 듀플렉서의 송신 및 수신 통과대역과 중첩되지 않도록 전극주기를 적절히 조정하였다. 이와 같은 과정을 통하여 표 1에서 보인 최적화된 격리회로망 집중소자값을 정확하게 묘사할 수 있는 마이크로 스트립라인 집중소자를 결정하였고, 그 설계결과는 표 2에 나타낸 바와 같다.

3. 일체형 SAW 듀플렉서 시작품 제작 및 성능평가

3.1 일체형 SAW 듀플렉서 시작품 제작

본 연구에서 제시한 일체형 SAW 듀플렉서 구

조의 구현 가능성 및 타당성을 확인하기 위하여, 이상의 과정을 거쳐 설계한 일체형 SAW 듀플렉서를 제작하였다. 이는 일체형이기 때문에 단 한번의 반도체 사진식각공정을 통하여 제작이 이루어졌다. 제작한 소자는 총 6 종류로, 그 각각은 (1) 송신용 단품 사다리형 SAW 필터, (2) 수신용 단품 사다리형 SAW 필터, (3) case 1 단순 연결 3-단자쌍 소자, (4) case 2 단순 연결 3-단자쌍 소자, (5) case 1 일체형 SAW 듀플렉서 (6) case 2 일체형 SAW 듀플렉서이다. 듀플렉서에는 송신 및 수신용 사다리형 SAW 필터와 격리회로망 집중소자를 가급적 작은 면적 내에 적절히 배치하여 구성하였고, interdigital 커패시터와 SAW 공진기간의 음향 간섭을 피하기 위해서 이들을 상하로 분리하여 배치하였다. 이렇게 제작된 일체형 SAW 듀플렉서의 확대사진을 그림 6에 나타내었다.

3.2 일체형 SAW 듀플렉서의 성능평가

제작된 사다리형 SAW 필터 및 일체형 SAW 듀플렉서의 전달특성을 네트워크 분석기 HP-8752C를 이용하여 측정하였다. 먼저 송신 및 수신용 단품 사다리형 SAW 필터의 측정결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 그림 7과 표 3에 나타내었다. 실험결과와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 8은 송신 및 수신 사다리형 SAW 필터를 격리회로망 없이 단순히 case 1과 case 2 형태의 3-단자쌍 회로망 구조로 연결한 소자의 전달특성이다. 실험결과와 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치하고 있으며, 이는 격리회로망을 적용하기 이전 단계이므로 통과대역의 성능이 그림 7의 개별 소자들에 비해 열화된 것을 알 수 있다. 마지막으로 본 연구의 최종 결과인 일체형 SAW 듀플렉서의 전달특성을 그림 9와 표 4에 나타내었다. 송신 및 수신 통과대역이 잘 분리된 특성을 보여주고 있으며, 그림 8의 단순연결형 3-단자쌍 회로망 소자에서 발생하는 성능열화현상이 극복되었음을 알 수 있다. 그리고 실험결과와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나, 본 연구에서 제시한 일체형 SAW 듀플렉서 구조가 실현 가능성 있고 타당함을 알 수 있다. 그림에서 나타난 시뮬레이션 결과와 측정결과 간의 오차는 패턴 구조가 단품필터에 비해 훨씬 복잡해짐으로 인해서 제작상의 실험오차가 누적되었기 때문이며, 이는 정확한 제작공정조건의 수립을 통하여 극복 가능한 문제이다.

표 2. 일체형 SAW 듀플렉서 격리회로용 마이크로 스트립라인 집중소자의 설계변수.

Table 2. Design variables of micro-strip line lumped elements for the isolation network in one chip type SAW duplexers.

Case 1						
Element type		Desired value	Design value		Designed structure	
			<i>L</i> or <i>C</i>	<i>R</i>		
C_S	Interdigital capacitor	7.9 pF	7.8 pF	0.04 Ω	Period	4.7 μm
					<i>W</i>	300 μm
					N_{finger}	121
					Length	1137 μm
L_P	Flat line inductor	0.73 nH	0.72 nH	2.07 Ω	Width	600 μm
					Length	1600 μm
C_P	Interdigital capacitor	42.1 pF	42.2 pF	0.13 Ω	Period	2.5 μm
					<i>W</i>	640 μm
					N_{finger}	305
					Length	1525 μm

Case 2						
Element type		Desired value	Design value		Designed structure	
			<i>L</i> or <i>C</i>	<i>R</i>		
C_{SA}	Interdigital capacitor	4.8 pF	4.8 pF	0.04 Ω	Period	4.7 μm
					<i>W</i>	200 μm
					N_{finger}	111
					Length	1043 μm
L_{PA}	Spiral line inductor	6.9 nH	6.9 nH	1.77 Ω	L_{ini}	1880 μm
					Width	400 μm
					n_t	1
					Size	2680 $\mu\text{m} \times 2680 \mu\text{m}$
C_{SC}	Interdigital capacitor	2.9 pF	2.9 pF	0.02 Ω	Period	4.7 μm
					<i>W</i>	130 μm
					N_{finger}	105
					Length	987 μm
L_{PC}	Spiral line inductor	15.2 nH	0.72 nH	2.90 Ω	L_{ini}	700 μm
					Width	420 μm
					n_t	2
					Size	3220 $\mu\text{m} \times 3220 \mu\text{m}$

- * *W* : aperture width of the interdigital capacitor
- N_{finger} : number of electrode fingers in the interdigital capacitor
- L_{ini} : inner loop length of the spiral line inductor
- n_t : number of turns in the spiral line inductor

4. 결론

본 연구에서는 기존 상용 SAW 듀플렉서의 단점을 보완할 수 있는 일체형 SAW 듀플렉서의 새로운 구조를 제안하였다. 제안한 구조는 송신용 및 수신용 사다리형 SAW 필터와 마이크로 스트립라인 집중소자로 구성된 격리회로망이 36° LiTaO₃ 단일 칩 위에 함께 구성되어 있다. 제안한 구조의 타당성 및 구현 가능성은 구조변수의 최적설계와 시작품 제작 실험을 통하여 검증하였다.

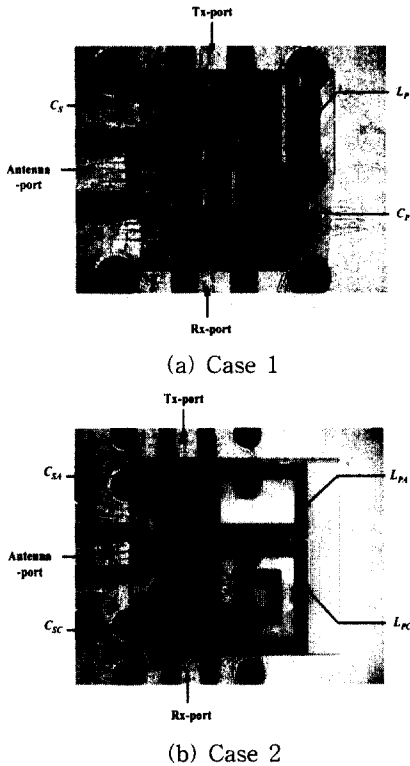
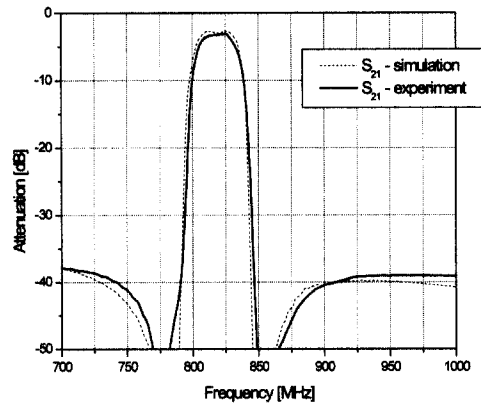


그림 6. 제작된 SAW 듀플렉서.
Fig. 6. Fabricated SAW duplexers.

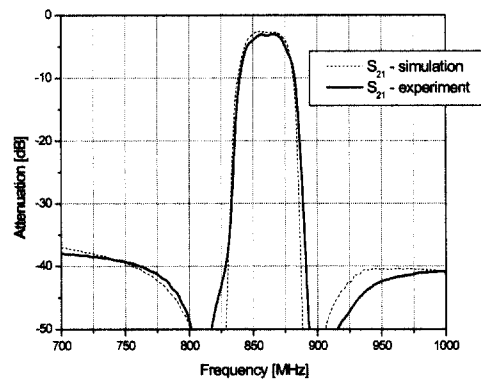
표 3. 단품 사다리형 SAW 필터의 성능.
Table 3. Performance of the single SAW ladder filters.

Performance	Tx filter		Rx filter	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
Insertion loss [dB]	2.71	3.10	2.58	3.02
Center frequency [MHz]	818.5	819.0	861.0	861.5
-3 dB bandwidth [MHz]	21	18	21	18
Passband ripple [dB]	0.39	0.09	0.21	0.23
Rejection band attenuation level [dB]	-41.1	-42.6	-47.2	-46.0
VSWR	2.0	2.1	1.8	2.3

* Tx rejection band : 859 ~ 884 MHz
Rx rejection band : 794 ~ 819 MHz

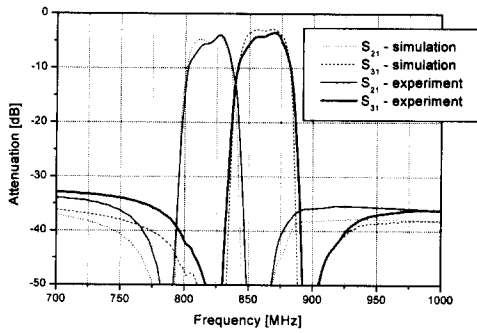


(a) Tx-filter

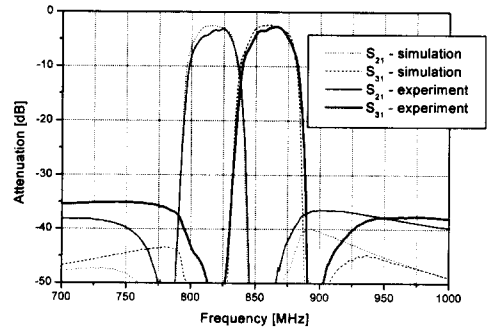


(b) Rx-filter

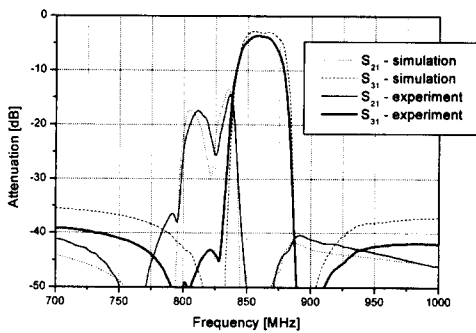
그림 7. 단품 사다리형 SAW 필터의 전달특성.
Fig. 7. Transmission coefficient of the single SAW ladder filters.



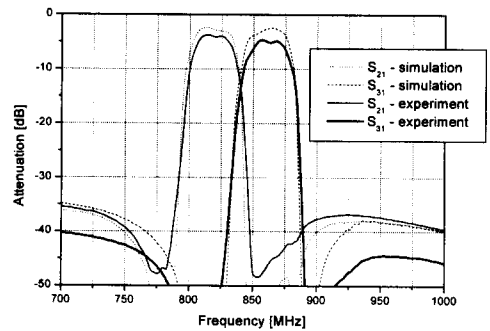
(a) Case 1



(a) Case 1



(b) Case 2



(b) Case 2

그림 8. 단순 연결 3-단자쌍 회로망 소자의 전달특성.

Fig. 8. Transmission coefficient of the simply connected 3-port devices.

그림 9. 일체형 SAW 듀플렉서의 전달특성.

Fig. 9. Transmission coefficient of the one chip type SAW duplexers.

표 4. 일체형 SAW 듀플렉서의 성능.

Table 4. Performance of the one chip type SAW duplexers.

Duplexer type Performance	Case 1				Case 2			
	Tx		Rx		Tx		Rx	
	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.
Insertion loss [dB]	2.56	3.07	2.40	2.70	2.38	3.74	2.46	4.65
Center frequency [MHz]	817.0	820.5	859.5	862.0	815.5	818.0	863.5	862.0
-3 dB bandwidth [MHz]	16	11	19	11	20	21	15	22
Passband ripple [dB]	0.05	1.29	0.07	0.80	0.49	0.40	0.00	0.48
Rejection band attenuation level [dB]	-40.3	-37.2	-48.2	-39.8	-48.4	-41.7	-53.3	-53.2
VSWR	1.8	2.3	2.1	2.2	2.1	2.4	2.3	2.7

* Tx rejection band : 859 ~ 884 MHz, Rx rejection band : 794 ~ 819 MHz

본 연구에서 제안한 일체형 SAW 듀플렉서는 상용 제품에 비해 제작 공정이 매우 간단하며, 격리회로망 내의 마이크로 스트립라인 집중소자의 최적화를 통하여 성능을 극대화 할 수 있으며, 다른 주변 부품들과의 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)화와 모듈화가 용이하고, 설계를 위해 개발된 최적설계 기법은 다른 종류의 다-단 자상 디바이스에 적용이 가능하다는 등의 장점들을 가진다. 또한 본 연구에서 제시한 듀플렉서의 구조 및 최적화 기법은 현재 널리 이용되고 있는 CDMA용 SAW 듀플렉서 설계에 곧바로 적용될 수 있을 것이며, 마이크로 스트립 라인 설계 및 해석방법 그리고 성능 최적화 기법 등은 다른 사양의 SAW 필터나 다른 종류의 고주파 부품을 설계하는데 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] N. Shibagaki, K. Sakiyama, and M. Hikita, "SAW antenna duplexer module using SAW-resonator-coupled filter for PCN system", IEEE Ultras. Symp. Proc., p. 13, 1998.
- [2] O. Ikata, Y. Satoh, H. Uchishiba, H. Taniguchi, N. Hirasawa, K. Hashimoto, and H. Ohmori, "Development of small antenna duplexer using SAW filter for handheld phones", IEEE Ultras. Symp. Proc., p. 111, 1993.
- [3] M. Hikita, N. Shibagaki, K. Asai, K. Sakiyama, and A. Sumioka, "1.5 GHz SAW miniature antenna duplexer used in personal digital cellular", IEICE Trans. Electron., E79-C-5, p. 664, 1996.
- [4] H. Fukushima, N. Hirasawa, M. Ueda, and H. Ohmori, "A study of SAW antenna duplexer for mobile application", IEEE Ultras. Symp. Proc., p. 9, 1998.
- [5] O. Ikata, Y. Satoh, N. Hirasawa, and H. Ohmori, "Duplexer package", US Patent, 5, 561,406, 1996.
- [6] O. Ikata and Y. Satoh, "Duplexer package", US Patent, 5, 859, 473, 1999.
- [7] R. Weigel, K. Weigenthaler, R. Dill, and I. Schropp, "A 900 MHz ladder-type SAW filter duplexer", IEEE MTT-S Digest., p. 413, 1996.
- [8] O. Ikata, T. Nishihara, and Y. Satoh, "A design of antenna duplexer using ladder type SAW filters", IEEE Ultras. Symp. Proc., p. 1, 1998.
- [9] Y. R. Roh, Y. J. Lee, and S. H. Lee, "Development of a new design technique for SAW ladder filters", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 40, No. 8, p. 142, 2001.
- [10] R. E. Miller, "Optimization : Foundations and Applications", Wiley, 2000.
- [11] 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, p. 394, 1992.
- [12] 이승희, 노용래, "탄성표면파 듀플렉서용 마이크로 스트립라인 집중소자 해석 및 실험", 전기전자재료학회논문지, 15권, 1호, p. 85, 2002.
- [13] S. Y. Liao, "Microwave Circuits Analysis and Amplifier Design", Prentice-Hall Inc., p. 225, 1987.
- [14] B. C. Wadell, "Transmission Line Design Handbook", Boston Artech House, p. 384, 1991.
- [15] 김현식, 송재성, 오영우, "습식 식각법으로 제조된 박막 인덕터의 임피던스 특성", 전자전자재료학회논문지, 10권, 8호, p. 813, 1997.
- [16] 박민, 현영철, 김천수, 유현규, 구진근, 남기수, 이성현, "고저항 실리콘 기판을 이용한 마이크로 웨이브 인덕터 제작", 한국전기전자재료학회 1996추계학술대회논문집, p. 291, 1996.