

고주파 SAW Simulation 기술

글 _ 이영진¹, 임종인² || ¹삼성전기 RF사업부 모바일연구그룹 SAW, ²요업(세라믹)기술원 시뮬레이션센터 yjlee88@paran.com

1. 서론

SAW(surface acoustic wave) 디바이스는 원래 군사적 용도로 개발되어, TV용 IF (intermediate frequency) 필터를 기점으로 민생용으로 상용화되기 시작한 이래, 현재는 대부분의 무선통신기기에 있어서 최소한 하나 이상의 수요를 차지할 만큼 그 시장범위가 확장, 다양화되어 있다.¹⁻⁵⁾ 특히 휴대용 단말기에 있어서 RF(radio frequency)단용 필터에 기존의 유전체 필터를 SAW 필터로 대체하기 시작한 것을 시점으로 IF단에서도 기존의 MCF (monolithic crystal filter) 및 세라믹 필터에 비해 고주파화, 광대역화, 통신기기의 소형, 경량, 박형, 저가격화로 인해 재현성과 양산성에서 뛰어난 SAW 필터로의 전환이 이미 이루어졌다.⁵⁻¹⁰⁾ 특히 근래에는 WCDMA, Wibro, Bluetooth 등의 이동통신시장의 괄목할만한 급속한 성장과 함께 SAW 디바이스의 성능은 점점 더 고주파화, 광대역화, 고선형화, 고선택도 등의 특성을 요구받고 있으며, 또한 업체에서 요구하는 SAW 디바이스의 사양 역시 더욱 급격한 속도로 까다로워지고 있다. 따라서 보다 정확하고 세밀한 설계가 요구되며, 공정능력 또한 미세선 폭의 세밀한 공정이 절실히 요구되는 현실이다.

따라서 본 기사에서는 고주파 대역의 SAW 시뮬레이션 기술에 대한 소개를 실시하고, 그 예를 간단히 들고자 한다.

2. SAW 등가회로 해석법

SAW 디바이스의 해석은 등가회로 해석법을 주로 이용하며 이는 Mason의 등가회로에서 기인한다. 크게 집

중소자 등가회로 해석법과 Smith 등가회로 해석법 및 COM 해석법 등을 들 수 있다. 집중소자 해석법은 Smith 파라미터로부터 유도되며, Fig. 1과 같이 SAW 공진기를 운동변수(motional parameter)를 묘사하는 R_1 , L_1 , C_1 의 세 개의 집중소자를 직렬 연결한 회로와, IDT내 전극쌍의 정전용량을 나타내는 C_T 를 병렬로 연결한 전체 등가회로를 이용하여 주파수 특성을 구한다. 집중소자 등가회로 해석법은 간단하고 빠르게 중심주파수 근처의 주파수 응답을 구할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 대표적인 선행 연구사례로서 W. R. Shreve,¹¹⁾ E. J. Staples,¹²⁾ W. H. Haydl¹³⁾ 등의 연구결과를 들 수 있다.

이에 비해 Smith 해석법은 입출력 임피던스뿐만 아니라 입출력 전극단에서 발생되고 수신되는 SAW의 방사 컨덕턴스 파라미터를 구할 수 있고 삽입손실 및 각 전극에서의 SAW 반사효과까지 고려할 수 있으며 또한 전극 하부의 에너지 집중을 표현할 수 있어 LSAW (Leaky-

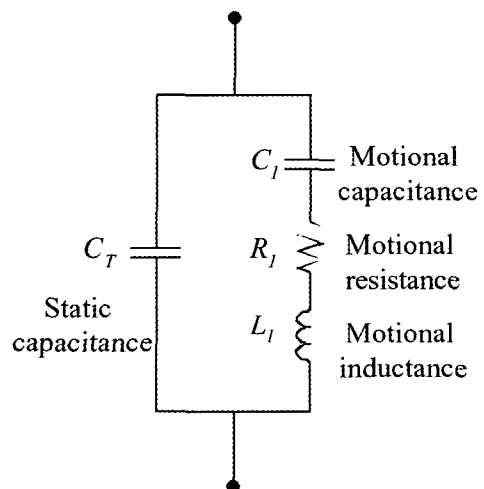


Fig. 1. 단일 SAW 공진기의 집중소자 등가회로

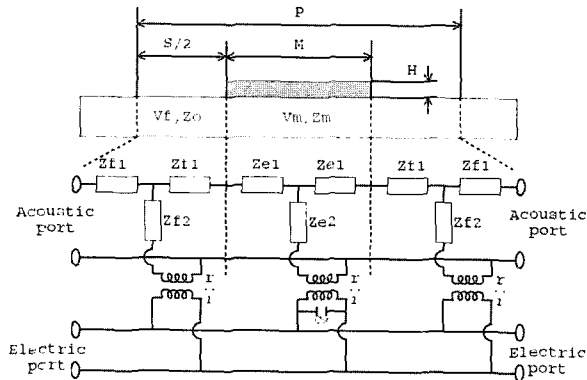


Fig. 2. Smith 등가회로

SAW) 등의 해석도 가능한 장점을 가지고 있다. 대표적인 연구사례로 W. R. Smith,¹⁴⁾ J. H. Collins 등의 연구 사례가 있다.¹⁵⁾

기판상에서의 속도 V_f 와 acoustic impedance Z_0 가 전극이 존재하는 부분에서 V_m , Z_m 으로 변화할 때의 변화량이 중요한 인자가 되며, 또한 acoustic-electric 변환을 위한 transformer ratio(γ) 과 capacitance (C_s) 를 주요변수로 볼 수 있다. 파수(wave number)를 $k = \omega/V(\omega = 2\pi f$: 각주파수)로 정의하고, α 를 전파손실(propagation loss)이다.

그러나 실제 고주파 대역의 SAW에 대한 등가모델을 적용하기 위해서는, 기판부분과 전극부분에서의 표면파 속도와 임피던스의 변화등을 정확히 예측하고 적용해야 하며, 실제 최근 광대역 RF 필터의 경우 파장대비 10 퍼센트 정도의 두꺼운 전극을 적용하고 있어, 등가회로 모델상의 변수를 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 따라서 위에서 소개한 기본적인 등가회로 모델을 개선한 COM(Coupling of Mode) 모델을 많이 사용하며, Fig. 3 과 같은 IDT(inter-digital transducer)의 경우 다음과 같은 결합 방정식 1~3을 가진다.

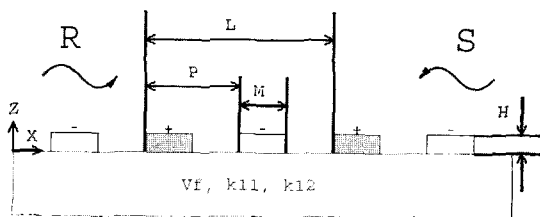


Fig. 3. SAW IDT 구조

$$\frac{dR(x)}{dx} = -j\kappa_{11}R(x) - j\kappa_{12}S(x)e^{j2\delta x} + j\zeta V e^{j\delta x} \quad (1)$$

$$\frac{dS(x)}{dx} = -j\kappa_{12}^*R(x)e^{-j2\delta x} + j\kappa_{11}S(x) - j\zeta^* V e^{-j\delta x} \quad (2)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -2j\zeta^* R(x)e^{-j\delta x} - 2j\zeta S(x)e^{j\delta x} + j\omega CV \quad (3)$$

$S(x)$ 는 순방향으로 진행하는 peak wave amplitude, $R(x)$ 는 역방향으로 진행하는 peak wave amplitude, $I(x)$ 는 peak current amplitude를 나타낸다. κ_{11} 은 self coupling coefficient로서 Bragg 주파수 f_0 에서 반사와 인가전압이 없을 때($\kappa_{12} = 0, V = 0$) 주기당 phase shift를 나타낸다. ζ 는 transduction coefficient로서 주기당 변환계수이며, δ 는 detuning parameter로 Bragg 조건으로부터의 phase mismatch를 나타낸다.

이상과 같이 COM 모델은 Smith 등가회로모델의 V_m , Z_m , γ 대신 κ_{11} , κ_{12} , ζ 등의 COM parameter로 표현된다.

Fig. 4는 1986년 Thorvaldsson에 의해 발표된 등가회로로 Fig. 3의 일반적인 COM 등가회로가 고려하지 못하는 여러가지 2차 효과에 대한 고려가 가능하다. 즉 energy storage effect를 고려하기 위하여 기존의 회로에서 susceptance를 추가하며, 전극부분의 경계를 명확히 하기 위해 acoustic impedance transformer를 추가한다.

전극부분의 임피던스는

$$Z_{e1} = jZ_0 \tan \frac{\theta_m}{2} \quad (4)$$

$$Z_{e2} = -jZ_0 \csc \theta_m \quad (5)$$

로 표현되며 θ_m 은 acoustic transit angle로서 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_m = k_m \cdot M \quad (6)$$

근래의 SAW 필터의 경우, ladder형과 DMS(double mode saw)형이 주류를 이루고 있으며, 이 모두가 기본적으로 SAW 공진기의 결합으로 이루어져 있다. 따라서 하나의 SAW 공진기에 대한 등가해석을 실시하고, 각각의 공진기를 회로해석을 통해 묶어 해석하는 방법을 일반적으로 사용하고 있다.

따라서 Fig. 4의 등가회로에서 다시 반사기부와 IDT부로 나누어 각각의 등가회로를 표현할 수 있으며, 반사기

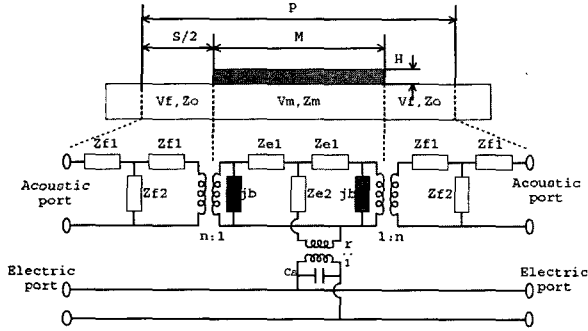


Fig. 4. Thorvaldsson 등가회로

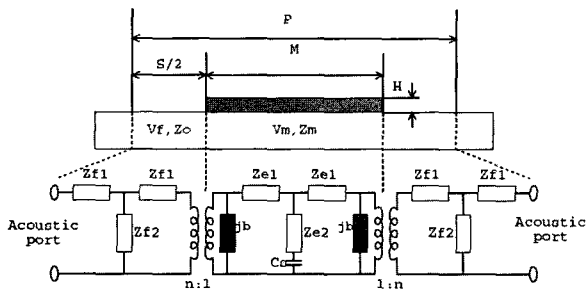


Fig. 5. Thorvaldsson 반사기 등가회로

의 경우 Fig. 5와 같이 표현된다.

Fig. 5의 경우, electric port를 포함하지 않기 때문에 비교적 간단히 해석이 될 수 있다. 그림상의 C_s 는 open/short를 표현하기 위해 추가되었으며, shorted grating의 경우 무시한다. 따라서 acoustic port 1, 2와 연결된 성분만으로 반사기의 전극수만큼 직렬 연결하면 반사기의 특성을 구현할 수 있다. 손실이 없는 경우 반사기의 중심 주파수에서의 최대반사계수는 다음과 같이 표현된다.

$$|\Gamma|_{\max} = \tanh(\pi \kappa_1 N_r) \quad (7)$$

N_r 은 반사기의 전극수로서 Fig. 6과 같은 특성을 가진다. 즉, 최대반사계수에 접근하는 전극수를 예측할 수 있다. Fig. 7은 LiTaO₃ 42도 기판에 대해서 전극수 변화에 따른 반사계수의 변화를 보여 주고 있다. 위 식에서 예측한 것과 같이 40개 이후 중심주파수쪽의 반사계수가 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

IDT부에 대한 해석은 위의 공진기와 기본적으로 같은 직렬연결방법을 취하나, 단 electrical port 부호를 포함하기 때문에 transformer ratio γ 의 부호를 연속적으로 바꾸

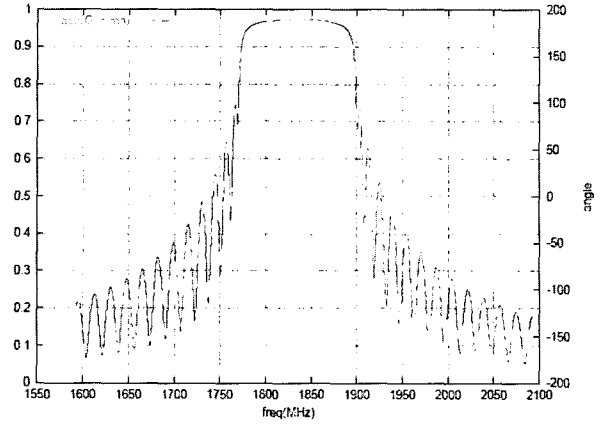


Fig. 6. 반사기의 특성.

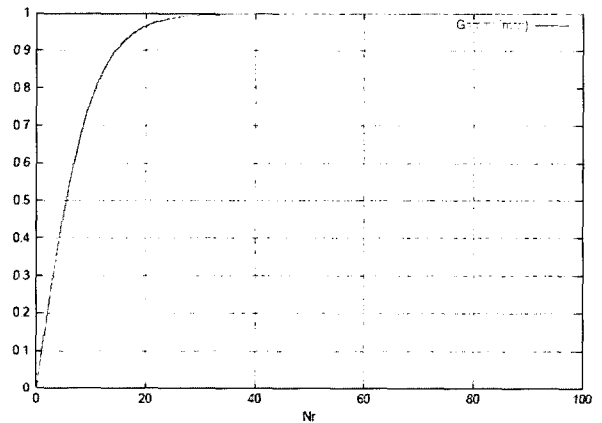


Fig. 7. 반사기 전극수에 따른 최대반사계수

면 된다.

$$\gamma = \sqrt{2f_0 C_s k^2 Z_0 (-1)^n} \quad (8)$$

공진기를 해석하기 위한 마지막 요소로서 IDT와 반사기 사이의 공간을 고려해야 하며, 이 공간의 길이를 l 이라고 하고 IDT 반주기를 P 라고 하면 Matrix는

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta \cdot \frac{l}{P}) & jZ_0 \sin(\theta \cdot \frac{l}{P}) \\ j \sin(\theta \cdot \frac{l}{P}) / Z_0 & \cos(\theta \cdot \frac{l}{P}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

와 같다.

전체 공진기는 앞에서의 해석을 모두 cascade한 Matrix로 표현되며, 4×4 행렬로 바꾼 후, 각 포트에 대한 경계 조건을 적용하고 최종적으로 electrical port의 특성을 계

산하면

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ I_1 \\ E_3 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & 0 \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_2 \\ I_2 \\ E_4 \\ I_4 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$Y = T_{43} - \frac{(T_{13} + T_{23}Z_0)(T_{42} + T_{41}Z_0)}{T_{11}Z_0 + T_{12} + T_{21}Z_0^2 + T_{22}Z_0} \quad (11)$$

과 같은 공진기의 임피던스를 구할 수 있다. Fig. 8은 계산된 공진기의 전기적 admittance 특성을 보여주고 있으며, 이를 통하여 SAW의 전기적 특성에 대한 simulation이 가능하다.

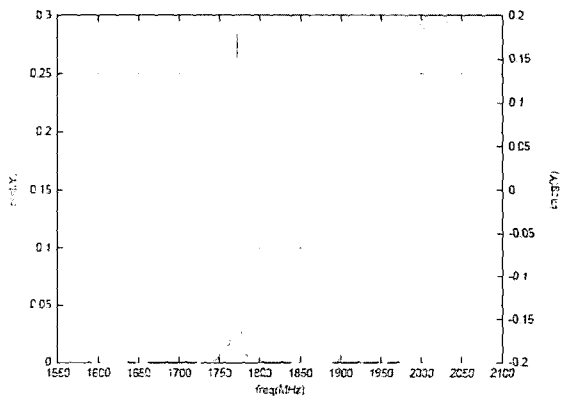


Fig. 8. 공진기의 임피던스

3. SAW 필터 해석

앞에서와 같은 단일 SAW 공진기에 등가회로를 바탕으로 공진기를 조합하여 필터 설계를 실시하며, RF 필터의 경우에 있어 현재 주류를 이루고 있는 필터는 크게 사다리형(ladder type)과 DMS형으로 구분할 수 있다.

Fig. 9와 같이 사다리형의 경우 직렬/병렬 공진기의 조합으로 필터 성능을 구현할 있으며, 주로 low loss형 필터에 적합하며 특히 정전기에 강한 특성을 가짐에 따라, 주로 CDMA 단말기의 듀플렉서 기종에서 널리 적용된다. 회로망 시뮬레이션 해석으로 전체 특성을 구할 수 있으며, Fig. 10에 CDMA Tx 기종에 대한 적용 결과를 나타내었다. 다소 결과가 다른 것은 패키지의 특성에 대한 고려가 제외되었기 때문이며, 이에 대한 효과는 다음 절

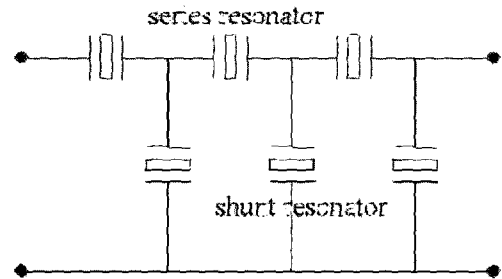


Fig. 9. 사다리형 SAW 필터.

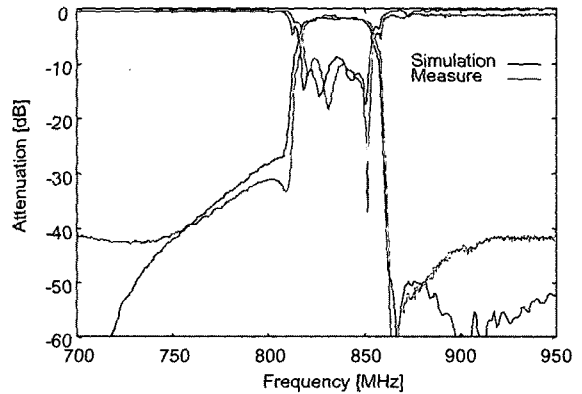


Fig. 10. 사다리형 필터의 해석 및 실험 결과.

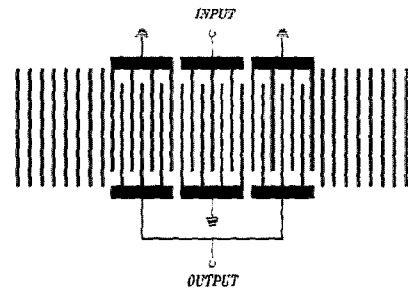


Fig. 11. DMS형 필터 구조

에서 소개한다.

DMS형 필터의 경우 상대적으로 광대역 필터에 적합하며, 최근 유행하고 이는 balance 특성을 구현함으로써 loss 특성도 우수한 장점을 가지고 있다. Fig. 11은 DMS형 필터의 한 대표적인 예로서 일반적인 SAW 공진기에서 변형된 모습을 가지고 있다. 즉, 단일 SAW 공진기의 경우 하나의 공진/반공진 점을 가지고 있으며 회로적으로 1-port 입에 반해, DMS형 공진기의 경우에는 2-port 시스템을 가지며, 2개 이상의 공진/반공진 점을 가질 수 있다.

Fig. 12에서는 DMS 구조를 적용하여 880 MHz 대역

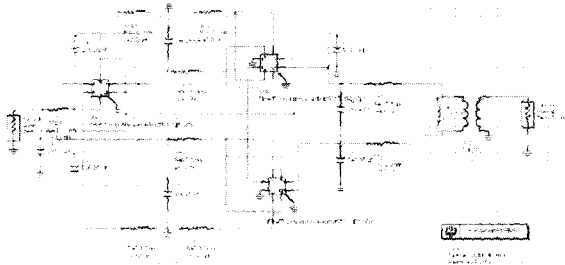


Fig. 12. DMS형 필터 회로망 해석.

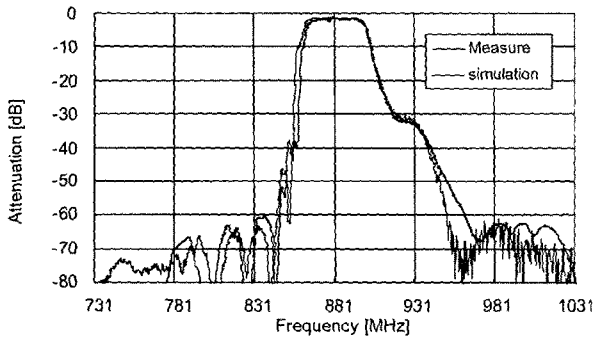


Fig. 13. DMS형 필터 해석 결과.

의 CDMA Rx 필터를 설계한 예로서 실제 전극간, 전극과 그라운드간에 존재하는 기생용량성분까지 고려하였으며, 사각형 박스로 표시된 3개의 DMS 공진기의 조합으로 전기적 특성을 simulation하며, Fig. 13에 그 결과를 나타내었다.

4. 패키지 해석

실제 SAW 제품의 전기적 특성은 지금까지 살펴본 압전물질 상에 구현된 IDT의 전기적 특성외에, SAW wafer를 담고 있는 패키지의 특성까지 고려되어야 한다. 특히 1.8GHz 이상의 PCS, DCS, WCDMA, Bluetooth, DMB 응용 필터의 경우에는 패키지의 특성이 매우 중요하다. 패키지 내부에 구현된 via 홀의 크기, 수와 위치, 접지면의 형태와 크기에 따라 전체 SAW 특성이 크게 변화한다. 근래에는 와이어 본딩형 패키지에서 벗어나 플립본딩이 적용된 2.0×1.4 mm 이하의 주 제품으로 적용되고 있으며, 05년 하반기부터는 1.4×1.1 mm의 패키지가 주가 될 전망이다.

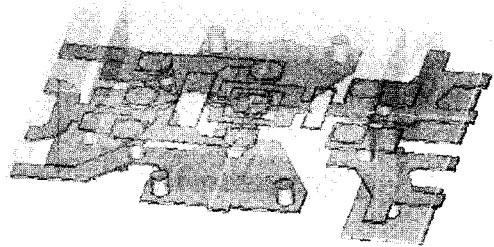


Fig. 14. 세라믹 패키지 모델링.

일반적으로 패키지 해석 및 설계에는 HFSS, CST Micro Wave Studio 등의 상용 전자장 해석툴을 주로 사용하며, 패키지의 전기적 전달특성을 해석하여 전체 SAW 필터의 특성을 평가한다.

Fig. 14에서는 현재 SAW 필터의 패키지로 널리 사용되는 2.0×1.4 mm 사이즈의 HTCC(high temperature co-fired ceramic) 플립칩 패키지에 대한 모델링으로, 주파수에 따른 입출력 단자간의 전달함수를 한다. Fig. 15에서는 패키지 효과까지 모두 고려한 US-PCS Rx SAW 필터의 특성을 예로 나타내었다.

5. 결론

지금까지 고주파용 SAW 필터의 simulation 기술에 관하여 간략하게 살펴보았다. 실제 현재의 simulation 기술은 급속히 진화하고 있으며, 앞에서 소개한 기술 외에도 유한요소 해석법을 적용한 simulation 기법이 적용되어 보다 더 정확한 simulation이 가능하다.

몇 년전 SAW 필터의 생존을 두고 많은 이야기가 있었다. 프로세서 속도의 발달로 인해 아날로그 필터가 완전히 사라질 것이라는 예측이 있었지만, SAW 필터는 오히려 더욱 진화하여 지금의 소형화 사이즈에 2.4GHz 대역까지의 그 특성을 충분히 소화하고 있다. 또한 발룬이라는 특성을 스스로 포함한 발란스(balanced) 기종으로 탈바꿈함으로써 오히려 더 많은 수요와 시장을 스스로 확보하고 있다.

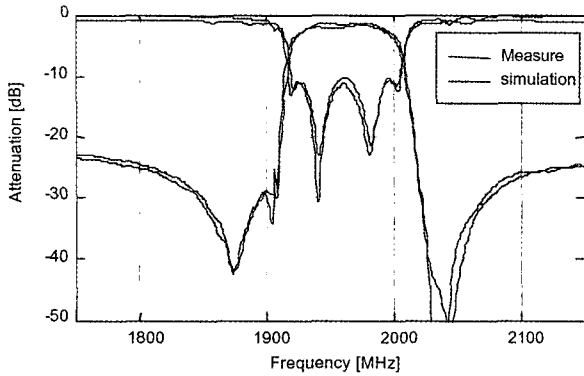
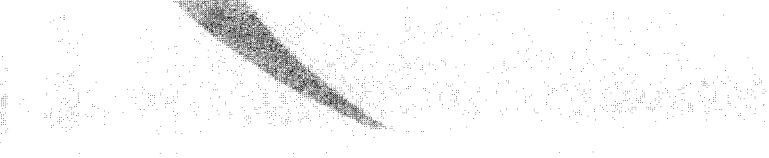


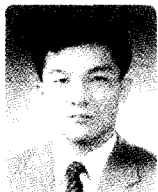
Fig. 15. 패키지 특성이 고려된 US-PCS SAW 필터의 simulation 결과.

참고문헌

1. D. P. Morgan, "History of SAW devices," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 439-460 (1998).
2. D. L. Ash, "SAW devices in wireless communication systems," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 115-124 (1993).
3. M. P. Cunha and S. A. Fagundes, "Investigation on recent quartz like materials for SAW applications," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 283-288. (1998).
4. L. Young, "Surface acoustic wave devices - Needs and opportunities," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 690-691 (1976).
5. C. W. Ruppel, R. D. A. Fischerauer, G. Fischerauer, W. Gawlik, J. Machui, F. Muller, L. Reindl, W. Ruile, G. Scholl, I. Schropp and K. Wagner, "SAW devices for consumer communication applications," IEEE Transactions on UFFC, 40(5), 438-452 (1993).
6. IEEE Transactions on UFFC, 40(5), 438-452 (1993).
7. S. Ichikawa, S. Mitobe, M. Kishino and Y. Ebata, "A low loss CDMA-IF filter based on RSPUDT on LBO

- substrate," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 351-356 (1999).
8. J. Tsutsumi, T. Matsuda, O. Ikata and Y. Satoh, "Reflector-filter using a SAW waveguide directional coupler for IF applications in CDMA system," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 932-935 (1999).
9. E. L. Adler, "Surface-Acoustic-Wave devices: Fundamentals, current status, and future trends," IEEE Transactions on UFFC, 40(4), 274 (1993).
10. J. P. Grubb, R. C. Bray, T. L. Bagwell, C. A. Johnsen, G. Pfeiffer and T. J. Miller, "The development of a surface mount hybrid IF section using low loss SAW filters," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 283-288 (1986).
11. K. Anemogiannis, J. Bauregger and G. Riha, "Cordless phone system architectures based on SAW Filters," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 85-88 (1993).
12. W. R. Shreve, "Surface-wave Two-Port resonator equivalent circuit," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 295 (1975).
13. E. J. Staples, J. S. Schoenwald, R. C. Rosenfeld and C. S. Hartmann, "UHF surface acoustic wave resonators," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 245-252 (1974).
14. W. H. Haydl, B. Dischler and P. Hiesenger, "Multi-mode SAW resonators - A method to study optimum resonator design," Proceedings of IEEE Ultrasonics symposium, 289-298 (1976).
15. W. R. Smith, J. H. Collins and L. Masotti, Computer-aided design of surface wave devices, Elsevier, New York. 25 (1976).
16. W. R. Smith, H. M. Gerard, J. H. Collis, T. M. Reeder and H. J. Shaw, "Analysis of interdigital surface wave transducers by use of an equivalent circuit model," IEEE Transactions on MTT, 17(11), 856-864 (1969).

이영진



- 1995년 경북대학교 전자공학과 공학사
- 1997년 동 센서공학과 공학석사
- 2001년 동 센서공학과 공학박사
- 2000-2002년 대구과학대학 정보통신계원 전임강사
- 2002년~ 삼성전기 RF사업부 SAW 개발팀 책임연구원

임종인



- 1986년 한양대학교 (학사)
- 1989년 KAIST (석사)
- 1999년 경북대학교 (박사)
- 2002년-현재 요업(세라믹)기술원 시물레이션센터 (센터장)
- 2002년-2003년 한양대학교 산업대학원 (겸임교수)
- 1991년 (미) Penn. State Univ. MRL (Visiting Researcher)
- 1989년-2002 포항산업과학연구원(RIST) 재료공정연구센터 (책임연구원)