

전기소자 개발을 위한 INVERSE ENGINEERING의 적용

안형근, 한득영
(건국대학교 공과대학 전기공학과 교수)

1. 서 언

소자의 물리적이거나 구조적인 변수를 가변하여서, 원하는 전기적 특성을 유도해 낼 수 있는 연관성을 수식적이거나 도표상으로 나타낼 수 있다면, 그 소자를 개발하는데 경제적이고 많은 시간적 이득을 얻을 수 있을 것이며, 또한 새로운 소자의 개발을 시도하는 측면에서도 소자 설계범위의 한계를 설정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 분석 및 개발 방법을 Inverse Engineering이라 말할 수 있다.

한 소자를 개발하는데 있어서, 이론적인 접근방법은 그 소자를 구성하는 재료의 구조적이고 물리적인 특성이 인식되는 한, AC/DC 및 Microwave 특성 등과 같은 소자의 전기적 특성을 예측 가능하게 한다. 이러한 일련의 분석기법은 기존의 연구체계 하에서 이루어져 오던 방법으로서 Forward Engineering이라 불리워진다. 이러한 기법은 최적의 소자구조 및 이를 제작할 수 있는 고도의 Technology를 필요로 하게되며, 따라서 Forward Engineering은 예를 들어서, 회로 Designer에게 위와같은 수많은 소자로 구성되는 회로의 출력을 얻고자 할때에 매우 유용하게 쓰이는 기법으로서 하나의 예가 Computer Aided Design이라 할 수 있다. 그 이유로서 CAD simulator에는 다양한 비선형소자를 포함하는 회로의 전기적 특성을 도출해 내는 Compact Model들이 있기 때문이다.

그러나 원하는 소자의 특성을 도출하기 위한 제조 방법이나, 필요로 하는 소자가 최적화 되지 못한 상황하에선, 실험을 통한 다양하고 반복적인 기법만이 원하는 소자의 특성을 향상시킬 수 있는 유일한 방법이다. 이렇게 미개발되었거나 개발중인 소자를 위해 본 연구에서 소개하는 Inverse Engineering의 기법이 필요로 하게된다. 소자개발에서의 Inverse Engineering이란, 소자의 AC/DC 또는 Microwave 특성 등과 같이, 필요로 하는 소자의 전기적 특성을 얻기 위하여 구조적이고 물리적인 소자의 Parameter를 결정하는 일련의 접근방법이라 할 수 있다. 분석기법 면에서 Forward Engineering과 Inverse Engineering

은 전기적인 네트워크를 분석한다는 면에서, 특히 회로의 요소가 주어지면 전달함수가 유도되고, 종합적인 면에서 이 전달함수를 만족시킬 수 있는 요소를 찾아내야한다는 측면에서 유사성이 있으나, 순서면에서 Inverse Engineering은 소자의 요소가 주어지면 전달함수로부터 회로의 전기적 특성을 얻는다는 점에서 그 차이점이 있다.

본 Inverse Engineering은 1990년대 초, 고 전자이동도 트랜지스터 (HEMT : High Electron Mobility Transistor)의 Microwave 특성인 소자의 Scattering 파라미터로부터 Gate Length와 Source 및 Drain 저항을 추출하는 데에서 시도되었으며[1], 최근들어서 DC 및 AC 특성으로부터 소자의 구조적이고 물리적인 특성을 결정할 수 있는 기법이 소개되기도 하였다[2, 3]. 이러한 기법은 소자의 구조 및 종류에 관계없이 현재 개발중이거나, 원하는 전기적 특성을 만족시킬 수 있는 실리콘과 화합물 반도체 및 압전세라믹 소자와 같은 차세대 소자 그리고 일반적인 구조분석용 기법으로써 유용 가치가 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 소자 Designer의 측면에서, 회로 Designer가 원하는 AC/DC 특성을 만족시키기 위한 HEMT의 구조 및 물리적 변수를 추출하고, 또한 압전세라믹 Transformer를 실제의 적용 예로 들어서 소자의 전기적 특성을 만족시킬 수 있는 세라믹 소재의 물리적 특성의 선택 방법 및 그 조건을 제시하고, 전기적 특성을 만족시킬 수 있는 압전세라믹 Transformer의 구조를 결정하는 분석차레 및 적용방법을 소개하고자 한다. 아울러 향후에 각 소자의 생산을 위한 Preproduction line에서의 효율적인 Inverse Engineering의 연구 및 그 이용 가능성에 대해 기술하고자 한다.

2. Inverse Engineering의 적용 예

본 장에서는 첫번째 사례로서, 원하는 트랜스컨덕턴스 (Transconductance)를 만족시킬 수 있는 HEMT의 구조 및 물리적 변수를 결정하는 데에 따른 Inverse Engineering의

적용에 대해서 논하고, 둘째로 LCD Backlight Inverter용 압전변압기를 예로 들어서 Inverse Engineering을 적용하여 그 개발에 따른 소자의 구조적이고 물리적인 접근 방법을 소개하고자 한다.

2.1 전달함수의 유도

전달함수란 소자의 구조변화를 변수로한 전기적 출력의 특성을 의미하며, 전달함수를 얻기위해서, 첫째로 DC/AC특성을 예측할 수 있는 Analytical 또는 Numerical 모델이 제시되어야 한다. 이는 이론적 바탕에서 Forward Modeling에 해당하는 기법이다. 예를 들어, 트랜지스터의 전류 및 트랜스컨덕턴스 특성은, 변화하는 소자의 구조 및 물리적 변수에 대해 각 구조에서의 전기적 특성을 나타내며, 극단적으로는, 모든 가능한 변수의 Matrix를 조합하여 이론적으로 가능한 구조의 최적치를 제시할 수 있다. 그러나 이러한 기법은 Forward Engineering의 연장선 상에서 시간적인 손실을 감수해야 하며, 소자의 구조선정 측면에서 Random한 "Try & Error"의 방법을 면할 수가 없다. 따라서 최소한의 실험과 최소한의 시간적 이득을 얻을 수 있는 방법은, 실험치를 예측할 수 있는 이론적 접근 방법에서, 소자의 구조 및 물리적 특성을 변수로 하는 시험적 변수를 선정하여 이론적 추정치를 유도한다. 참고적으로 시험적 변수의 종류 및 선정 범위의 기준은, 이론적으로 제 일차 특성 (HEMT인 경우에는 channel에 유가되는 전자의 수)에 따라 변수의 범위를 결정한다.

둘째로, 유도된 전기적 특성(트랜스컨덕턴스)은 도표상 소자의 물리적이고 구조적인 변수에 따라 나타내지게 되며, 참고적으로 실험치조건 대비 가변된 변수의 값이 클수록 이론치오차는 커질 것이다. 도표상에 나타난 이론적 특성의 경향은 일반적으로 일정한 함수관계를 가질 것이며, 그 관계는 각각의 변수조건에 따라 달라질 것이다. 이러한 관계는 충분한 변수의 범위를 설정하였다면, 매 변수 조건에 따른 이론적 추정치를 반복하지 않고도, 내삽법(Interpolation)으로 충분한 이론치를 예측할 수 있다. 따라서 이 기법을 이용하여 몇몇 특정 변수값에서의 모델값을 실제로 Simulation하여 추출한 후에는, 주어진 변수 범위에서, 임의의 변수조건을 표출해도 전기적 특성을 예측할 수 있다.

셋째, 실제로 소자의 Design에서는, Normalized된 전기적 특성을 사용함으로써, 소자의 크기를 결정하여 원하는 값을 유도한다.

그림 1은 고 전자이동도 트랜지스터의 구조를 나타내며 본 소개에서는 세가지의 물리적인 특성치, d_1 (Doped AlGaAs Thickness), d_2 (Undoped AlGaAs Thickness), N_D (Dopant Density)를 가변 요소로 사용하였다.

그림 2는 Inverse Engineering을 이용하여 소자의 물리적인 특성과 전기적 특성(Transconductance)을 나타내는 전달함수의 특성곡선을 나타내고 있다. 따라서 원하는 소자의 전기적 특성을 얻기 위하여 도표로부터 다양한 소자의 물리적인 특성조합을 선택할 수 있음을 나타낸다.

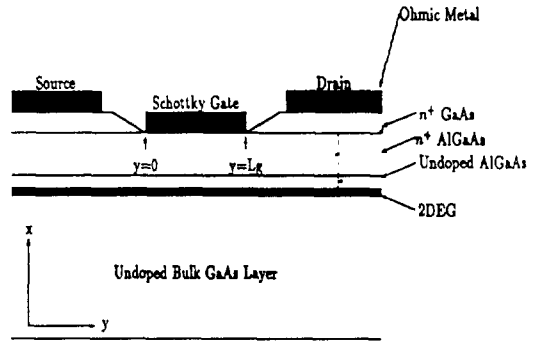


그림 1. 고 전자이동도 트랜지스터의 구조

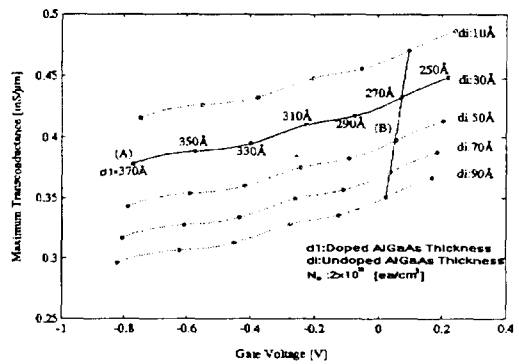


그림 2. Inverse Engineering을 이용한 소자의 물리적 특성과 전기적 특성

2.2 LCD Backlight Inverter용 압전변압기에의 Inverse Engineering 적용

최근 일본의 Tamura Corp.와 Rohm Corp.가 공동으로 개발한 LCD Backlight Inverter용 압전변압기는 기존의 코일형 변압기보다 효율이 10%정도 더 높은 80%에 이르며, 그 크기도 LCD용에 적합하게 2[W]인 경우, Inverter를 포함하여 16mm×105mm×4.5mm 로 작고, 또 방전초기에는 1200[V] 정도의 고전압이 필요하고 방전 후에는 전압이 그 1/3 정도로 낮아야 하며 전류는 5-6[mA]인 Backlight의 요구특성에도 적합하여 앞으로 휴대용 컴퓨터나 TV의 모니터용 LCD에 많이 적용되리라 예상된다[4]. 이러한 압전변압기에 관한 연구는 Rosen[5], Katz[6] 등에 의하여 연구가 시작되어 현재도 다양한 형태의 것이 연구되고 있다[7, 8, 9].

이 압전변압기에서 중요한 요구사항은 일반적으로 출력측에서 높은 전압을 얻는 것이며, 이를 위해서는 그 변압기의 재료, 전극의 형태, 그 공진주파수와 관련이 되는 두께 또는 길이 등을 고려해야 한다. 이와같이 요구되는 사양의

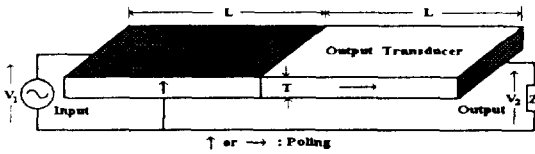


그림 3. 장방향 압전변압기.

압전변압기를 설계 또는 개발하기 위해 Inverse Engineering 개념을 적용하려면 이미 압전변압기에 관해 연구된 결과를 이용할 필요가 있다.

우선 그림 3과 같은 압전변압기의 최초의 Model이며 일본에서 LCD Backlight Inverter용으로 개발된 장방향의 압전변압기에 Inverse Engineering 개념을 적용하여 보기로 한다.

그림 3의 압전변압기에서 최고의 승압비를 나타내는 경우는 공진시 부하를 개방한 상태이며, 그때의 승압비 G는

$$G = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)_\infty = \frac{4}{\pi^2} Q_m k_{31} k_{33} \frac{L}{T}$$

로 표현된다. 위의 식에서 승압비를 크게 하려면 재료적인 측면에서는 기계적 품질계수인 Q_m 이 크고, 방향과 관련되는 전기-기계 결합계수인 k_{31} , k_{33} 이 커야 하며, 또 이 변압기의 두께 T에 대한 길이 L의 비도 커야 한다.

여기서 승압비를 높이기 위하여 압전재료의 물리적 상수인 Q_m , k_{31} , k_{33} 등은 임의로 크게 할 수 있는 것이 아니므로 주어진 압전재료를 이용하여 승압비를 크게 하려면 길이와 두께의 비인 L/T의 값을 크게 해야 할 것이다. 그러나 이것도 압전변압기를 불필요하게 길고 얇게 함으로써 기계적으로 약하게 할 뿐만 아니라 요구되는 공진주파수를 얻는데도 한계가 있다.

예를 들어서 현재 개발되어 있는 압전재료 중에서 압전변압기에 가장 적합한 재료는 PZT8로서 $Q_m=1000$, $k_{31}=0.3$, $k_{33}=0.64$ 이며, 이때 길이와 두께의 비를 L/T=10이라 할 때, 공진시 무부하 상태에서의 승압비는 위의 식에 의해 $G \approx 770$ 이 된다.

그러나 부하가 감소하면 이 승압비는 급격히 감소하고 또 공진주파수도 변하게 되어서 승압비는 더욱 감소하게 된다. 따라서 요구되는 승압비를 얻기 위하여 일본에서도 부득이 승압비가 10정도인 코일형 변압기를 압전변압기 전단에 연결하게 된 것이다. 결국 두께가 두껍고 효율도 떨어지는 코일형 변압기를 압전변압기로 대체하려 하였으나 그 승압비가 압전변압기 만으로는 낮아서 코일형 변압기를 병용하게 된 것이다.

이를 극복하려면 $Q_m \times k_{13} \times k_{33}$ 의 값이 큰 압전재료를 새로 개발하는 것이 바람직하지만 그러한 새로운 재료를 개발하는데는 그 재료특성의 재현성과 안정성 및 대량생산에서의 문제점을 해결하는데 많은 시간과 투자가 요구된다.

따라서 현재의 상태에서 $Q_m \times k_{13} \times k_{33}$ 의 값이 가장 큰 압전재료 중에서 재료를 선정하고, 공진주파수와 기계적 강도 및 설치공간 등을 고려하여 그 크기를 선정해야 할 것이며, 그래도 요구되는 승압비가 얻어지지 않으면 다른 형태의 압전변압기를 모색해야 할 것이다.

이러한 경우, 요구되는 재료의 특성이 개발되기 전에 Forward Engineering 기법으로 알려진 압전변압기의 동작원리를 다른 형태에 적용하여 요구하는 승압비를 얻을 수 있도록 하는 것이 Inverse Engineering의 한 기법이다. 즉, 입력측 압전진동자에 공진주파수의 전기적 입력을 인가하여 압전현상의 역효과를 이용하여 진동시키고, 그 진동에 공진하는 출력측 압전진동자를 입력측 압전진동자에 접착하여 압전현상의 정효과에 의하여 요구하는 높은 출력전압을 인출할 수 있으면 되는 것이다.

그 가능한 하나의 방법으로 그림 3과는 다른 형태인 적층형 압전변압기를 고려할 수 있다. 이는 그림 4와 같이 현재로서 가능한 범위내에서 $Q_m \times k_{13} \times k_{33}$ 의 값이 큰 압전재료를 선정하여 직경과 두께가 동일한 진동자를 제조하고 이들 세 진동자를 적층하여 접착한 후 그 중앙에 있는 진동자를 공진주파수의 전기적 입력을 인가하여 구동시킨다.

이때 재료의 물리적 특성과 두께 및 직경이 서로 동일하므로 공진주파수가 입력측 진동자와 동일한 출력측 진동자 2개가 입력측 진동자에서 발생한 진동으로 공진하여 공진주파수가 동일한 전압이 양측의 출력진동자에서 발생하고, 이 양측의 전압은 동위상이므로 이를 직렬연결하면 입력측 진동자의 한면을 이용한 경우보다 더 높은 출력전압을 얻을 수 있다[8].

이는 그림 3과 같은 형태에서 입력측 진동자의 자유단에서의 진동도 이용하여 출력전압을 인출하는 것으로서 출력측 진동자 1개에서보다 2개에서 출력전압을 인출하여 직렬연결함으로써 한면의 진동을 이용하는 경우의 승압비보다 거의 2배에 달하는 높은 전압을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 그림 3과 같은 형태에서처럼 분극과정도 어렵지 않고 출력전압을 높이기 위하여 L/T의 비가 너무 커서 기계적으로 약하지도 않는 장점이 있다. 다만 진동자를 접착함으로써 그 접착제에 의한 Capacitance에 의해 공진주파수가 변하는 것에 유의할 필요가 있다.

또다른 방법으로서 그림 5와 같이 적층형 압전변압기의 진동자에 도포된 전극을 등분할하고 그 각부분의 출력전압

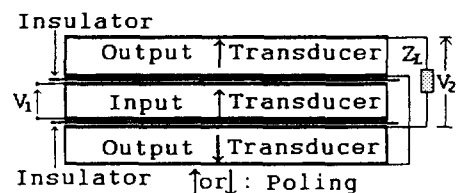


그림 4. 적층형 압전변압기

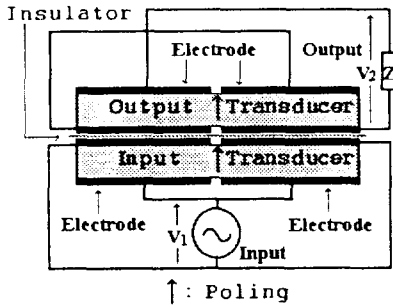


그림 5. 전극분할형 압전변압기

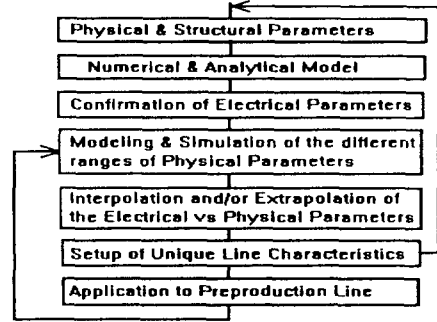


그림 6. Inverse Engineering의 Flow Chart

을 직렬연결하면 전극을 분할하지 않은 경우보다 역시 더 높은 출력전압을 얻을 수 있다.

예를 들어서 입력측 진동자와 출력측 진동자의 양면에 도포된 전극을 모두 2등분하고 이를 적층한 후 입력측에 공진주파수의 전압을 병렬로 인가하고 출력측 진동자의 각 부분에서 인출되는 출력을 직렬연결하면 역시 전극을 분할하지 않은 경우의 승압비보다 약 2배의 승압비를 얻을 수 있다[9].

이때 입력측 진동자의 전극을 출력측 진동자와 같이 2등분하는 것은 그렇게 함으로써 두 진동자의 조건을 동일하게 하여 공진조건을 맞추어 주기 위해서이다. 만일 전극을 4등분하면 승압비를 4배정도 높일 수 있다. 이때는 출력전압이 높아진 만큼 전류는 감소하며, 전극 분할에 의한 전극 사이의 간격과 접촉제에 의한 Capacitance로 인해서 공진주파수가 변하고, 전극분할의 수가 증가함에 따라 공진조건이 서로 약간씩 다르게 되면 그에 의해 승압비가 크게 감소되는 것에 유의해야 한다.

또 위의 적층형과 전극분할형을 조합하여 압전변압기를 만들거나 그림 3의 변압기에서 입력측과 출력측의 전극을 각각 적당히 등분함으로써 그들의 승압비는 더욱 높일 수 있을 것이다.

3. 결 언

본 연구에서는 HEMT와 LCD Backlight용 압전변압기의 개발을 예로 들어서 Inverse Engineering의 개념을 도입하였으며 이러한 개념은 새로운 소자의 개발이란 측면에서 상당히 경제적이고 시간적인 보상을 가져다 주리라 확신한다. 또한 기존의 Forward Engineering에 의한 개발 방향을 쉽게 응용하여 소자의 전기적 특성과 물리적 특성의 관계를 나타내는 전달함수를 유도함으로써 다양한 조합의 소자 설계가 가능할 것이다.

그림 6은 위에서 예시한 Inverse Engineering의 흐름도를 나타내며, 이와같은 특성은 각각의 실험조건이 상이한 조건 하에서는 별도의 고유한 Line Data를 필요로 할 것이다. 즉 소자제작시에 사용하려는 특수한 공정이나 일반화되지 않

은 순서 역시 본문에서 제시하는 Inverse Engineering의 기법으로 개발이 가능하다

이와같이 Forward Engineering기법에 의해 밝혀진 수식적 또는 도표적 관계를 이용하여, 요구되는 조건을 만족시키는 결과를 얻어내는 기법을 Inverse Engineering이라 하며, 이러한 기법은 여기서 살펴본 전기소자의 개발뿐만 아니라 특정한 기능이 강화된 재료의 개발, 보다 효율적인 생산공정, 기존의 Forward Engineering기법에 의한 어떤 한계의 극복 등 다른 산업분야에도 확대 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] P. Ladbrook, J. Bridge, and A. Hill, "CAD for GaAs MMIC Manufacture-ability," *IEEE GaAs IC Symp.*, pp. 335-338, 1990.
- [2] H. Ahn, and M. El Nokali, "Inverse Modeling and Its Application in the Design of High Electron Mobility Transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 42, No. 4, pp. 598-604, April, 1995.
- [3] H. Ahn, and D. Y. Han, "Inverse Engineering for the Design of High Electron Mobility Transistors(HEMTs)," *Int. Conf. Power Electronics*, pp. 209-212, 1995.
- [4] A. Mizutani, M. Fujisawa, et al, "New Transformer Shrinks LCD Backlight Inverter Thickness," *Nikkei Electronics Asia*, pp. 76-80, March, 1995.
- [5] C. A. Rosen, "Ceramic Transformers and Filters," *Proc Electronic Components Symp.*, pp. 205-211, 1957.
- [6] H. W. Katz, *Solid State Magnetic and Dielectric Devices*, John Wiley and Sons Inc., N.Y., pp. 35-197, 1959.
- [7] S. Hirose and H. Shimizu, "An Advanced Design of Piezoelectric Ceramic Transformer for High Voltage Sources," *IEEE Trans. Ultrasonics Symp. Proc.* vol I, pp. 471-475, 1989.
- [8] J. H. Kim, D. Y. Han, M. H. Nam, and S. M. Kang,

"Analysis of a Three-Layered Piezoelectric Ceramic Transformer and Filter," *IEEE Trans. Circuits and Systems I: Fund Theory & Application*, vol. 42, No. 6, pp. 307-313, June, 1995.

[9] 이용국, 이상철, 허두오, 한득영, "전극 분할적층형 압전변압기의 전기적 특성," '95 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1140-1142, 1995.

저 자 소 개



안형근(安亨根)

1959년 9월 26일생. 1983년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 University of Pittsburgh, Pittsburgh 전기공학과 졸업(공학박). 1986년 - 90년 LG반도체연구소 주임연구원. 1993년 - 95년 University of Pittsburgh Postdoctorate. 1995년 - 현재 건국대 공대 전기공학과 조교수. 관심분야 : Sub-micron 실리콘 소자의 Design 및 PI(Process Integration), Sensor의 Design 및 응용, HEMT, MESFET, HBT의 고주파 응용과 CAD Modeling, TFT Modeling과 Simulation.



한득영(韓得永)

1947년 7월 5일생. 1974년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1974년 - 76년 현대중공업 근무. 1982년 University of Texas, Austin 교환연구원. 1992년 University of Illinois, Urbana - Champaign 교환교수. 1981년 - 현재 건국대 공대 전기공학과 교수. 관심분야 : Piezoelectric Bimorph, Ultrasonic Motor, Piezoelectric Transformer, SAW Filter, Sensor 및 이의 Modeling과 Simulation.