

초음파 트랜스듀서용 압전 진동자의 품질계수 제어법 검토

고영인* 김무준** 하강열**

*부경대학교 대학원 음향진동공학과, **부경대학교 물리학과

Investigation on Quality Factor Control Method of Piezoelectric Vibrator for Ultrasonic Transducer

Young-In Ko* Moo-Joon Kim** Kang-Lyeol Ha**

*Dept. of Acous. & Vib. Eng. in Pukyong National University.

**Dept. of Phys. in Pukyong National University.

요 약

PZT 세라믹 트랜스듀서와 같은 압전 세라믹 진동자를 사용하는데 있어서 품질계수(quality factor)를 제어할 수 있다는 것은 전기-기계 결합계수나 삼입손실 등을 개선할 수 있으므로 매우 유용한 것이다. 본 연구에서는 압전 진동자의 품질계수를 제어하는 방법으로써 압전 진동자의 제동용량과 저항성분을 전기적으로 상쇄시킬 수 있는 부임피던스 변환회로(negative impedance converter circuit)를 적용하였다. 그 결과 부임피던스 변환회로를 적용하지 않은 경우에 비해 압전 진동자의 품질계수가 수십 배정도 까지 제어됨을 실험으로 확인하였다.

1. 서 론

압전 세라믹 진동자는 좋은 전기-기계 변환능률을 가지고 있기 때문에 현대 산업의 여러 분야에서 응용되고 있다. 그러나 사용 목적에 따라 압전 세라믹 진동자의 높은 품질계수가 요구되는 경우가 있다. 또한 구동 전원과의 임피던스 정합 등, 압전 세라믹 진동자의 전기적인 임피던스 제어가 요구 되는 경우가 있다. 이에 대해 喜川등이 연산증폭기로 구성된 부임피던스 변환회로(NIC))를 적용하여 압전 세라믹 진동자의 품질계수 제어법을 제안한바 있다.²⁾ 그러나 사용되는 압전 세라믹 진동자 및 연산증폭기의 특성에 따라 적용

범위가 제한되어 그 설계 방침에 대한 검토가 충분하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 범용 회로 해석 프로그램인 PSpice³⁾를 사용하여 전자회로인 부임피던스 변환회로와 기계회로인 압전 세라믹 진동자의 등가회로를 결합한 모델에 대한 해석 가능성을 검토 하였다.

2. 원 리

부임피던스 변환회로를 적용하기 위한 전극이 분할된 횡진동 모드의 압전 세라믹 진동자를 Fig. 1.에 나타내었다. 1-1'단은 구동 전원과 접속되는 입력단이며, 2-2'단은 부임피던스 변환회로와 접속되어 압전 세라믹 진동자의 품질계수를 제어하게 된다. 부임피던스 변환회로가 적용된 이 압전 세라믹 진동자의 등가회로는 Fig. 2.와 같다.

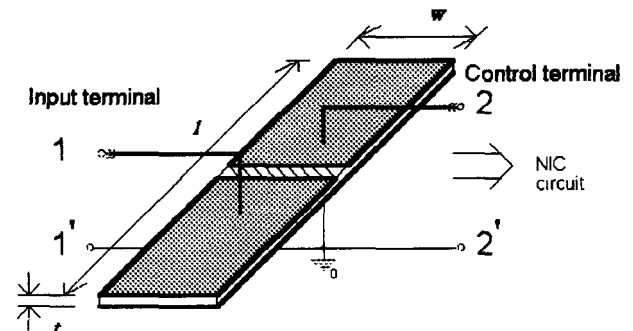


Fig. 1. Transverse mode vibrator with divided electrodes.

Fig. 2.(a)는 분할된 전극에 의해 압전 세라믹 진동자의 계동용량이 Cd1 및 Cd2의 병렬로 나타나고 부임피던스 변환회로(NIC)에 의해 음의 용량 $-Cd'$ 과 음의 저항 $-R'$ 이 병렬 접속된 상황을 나타내고 있다. 이 때 부임피던스 변환회로에서 만들어진 $-Cd'$ 에 의해 압전 세라믹 진동자의 계동용량 Cd2가 상쇄되면, Fig. 2.(b)와 같은 등가회로를 얻을 수 있다. 결과적으로 이 압전 세라믹 진동자의 품질계수는 다음과 같이 얻을 수 있다.⁴⁾

$$Q = \frac{\omega L}{R - R'}, \quad (1)$$

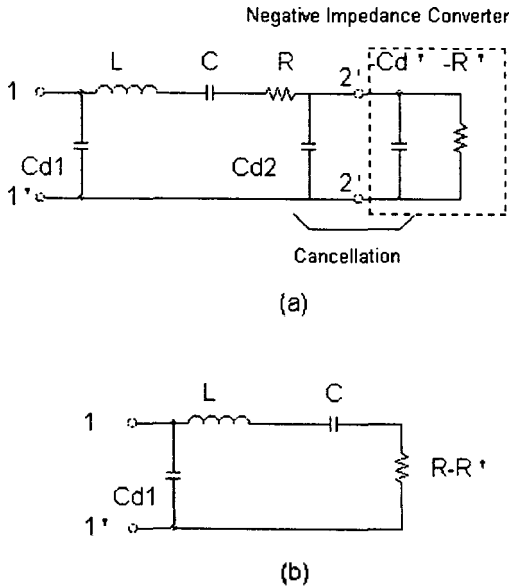


Fig. 2. Principle of quality factor control.

즉, R' 을 변화시킴으로써 압전 세라믹 진동자의 품질계수를 제어 할 수 있다.

Fig. 3.은 압전 세라믹 진동자의 2-2'단에 부임피던스 변환회로가 연결된 회로이다. R1과 R2를 같게 하여 R_s 와 동일한 부저항과 C_s 와 동일한 부용량이 만들어지며 이 때의 C_s 는 압전 세라믹 진동자의 Cd2와 같다. 이때 단자 2-2'에서 본 부임피던스 변환회로의 입력 어드미턴스는 다음과 같이 되어,

$$Y_{IN} = -\frac{R_1}{R_2} \left\{ j\omega C_s + \frac{1}{R_s} \right\}, \quad (2)$$

Fig. 2. (a)에서의 부용량 및 부저항을 구현 할 수 있게 된다.

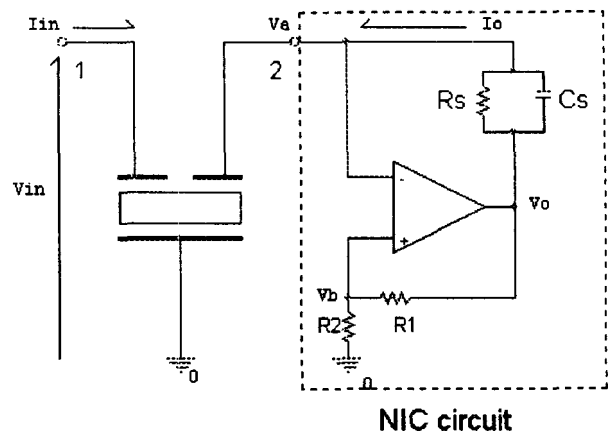


Fig. 3. Negative impedance converter circuit.

3. 시뮬레이션 및 실험

Fig. 4.는 Fig. 3.에서 나타낸 바와 같이 압전 세라믹 진동자와 부임피던스 변환회로가 병렬 연결된 형태를 PSpice 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하기 위한 회로이다.

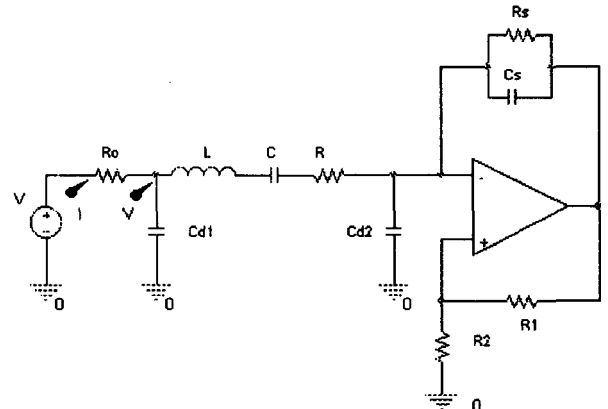


Fig. 4. PSpice simulation circuit with NIC.

전극이 분할된 압전 세라믹 진동자의 2-2'단에 Fig. 4.와 같이 부임피던스 변환회로를 병렬로 연결하였다. 구동 전원으로는 주파수가 55kHz에서 63kHz까지 변하고 전압이 1V인 교류 전원을 사용하였고, 전원과 압전 세라믹 진동자의 등가회로 사이에 전류 측정용 저항 ($R_o=50\Omega$)을 연결하고 R_o 의 양단에서 나타나는 전압과 전류의 비로써 입력 어드미턴스를 산출하였다. 이때, R1과 R2는 15k Ω 의 같은 값으로 두고, C_s 는 5.9nF으로 두었으며 R_s 를 변화시켜가면서 그 특성 변화를 관찰 하였다.

압전 세라믹 진동자의 등가회로 상수는 측정을 통하여 Table 1.과 같이 구했다.

Table 1. Equivalent circuit constants of the vibrator in Fig. 1.

Item	Values
Quality factor	23.2
Center frequency	60.233 kHz
Equivalent resistance R	139.665 Ω
Equivalent capacitance C	0.816 nF
Equivalent inductance L	8.555 mH
Damped capacitance Cd1+Cd2	10.11 nF

시뮬레이션 결과를 확인하기 위하여 Fig. 3의 단자 1-1'에서 부임피던스 변환회로의 R_s 를 바꿔가면서 R3754A 네트워크 어날라이저로 압전 세라믹 진동자의 입력 어드미턴스 로커스를 측정하였다.

4. 결 과

Fig. 4의 R_s 를 변화시켜가면서 시뮬레이션한, 압전 세라믹 진동자의 입력단에서 본 어드미턴스 특성을 Fig. 5. 및 Fig. 6.에 나타내었다.

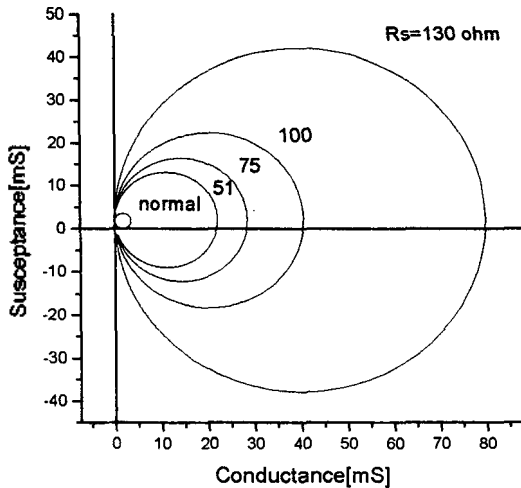


Fig. 5. Simulated admittance loci in R_s change.

식 (1)에서 나타낸바와 같이 $R_s=130\Omega$ 일 때, 압전 세라믹 진동자의 저항성분과 부임피던스 변환회로의 부 저항성분의 차, $R-R'$ 가 최소가 되어 어드미턴스 로커스가 최대가 됨을 알 수 있다. 이것은 압전 세라믹 진동자의 저항성분이 부임피던스 변환회로에 의해 감소

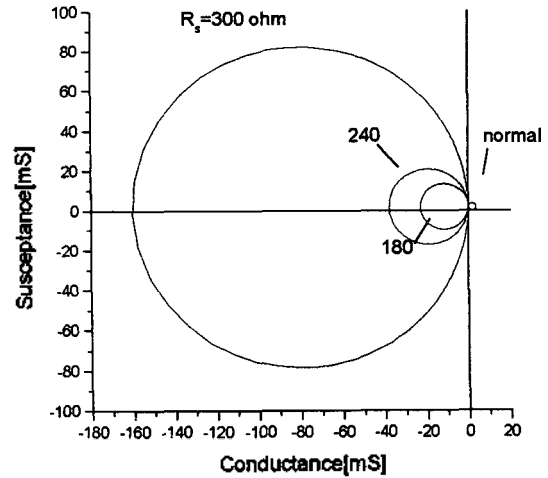


Fig. 6. Simulated admittance locuses in R_s change.

됨을 의미한다. 또한, 식 (2)에서 나타낸 바와 같이 R_s 의 값에 따라서 NIC회로의 어드미턴스가 큰 폭으로 제어되어 R_s 가 R 보다 커지는 경우, 즉, Fig. 2.에 나타낸 R' 이 R 보다 커지게 되는 경우에는 회로 전체에 음의 저항성분이 남게 되므로 어드미턴스의 콘덕턴스가 음의 영역으로 이동함을 알 수 있다.

이에 대한 실험 결과를 보면 Fig. 7. 및 Fig. 8.과 같다.

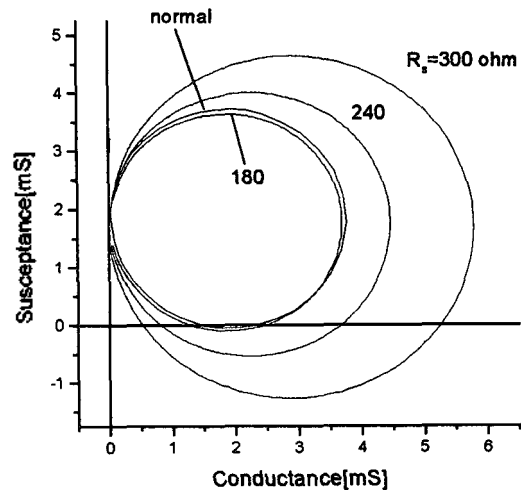


Fig. 7. Admittance loci in R_s change.

압전 세라믹 진동자의 입력단자 1-1'에서 측정된 어드미턴스 특성이 큰 범위에 걸쳐 변화됨을 확인 할 수 있다. 이것은 압전 세라믹 진동자의 저항성분이 부임피던스 변환회로에 의해 감소됨을 의미하며 $R_s=470\Omega$

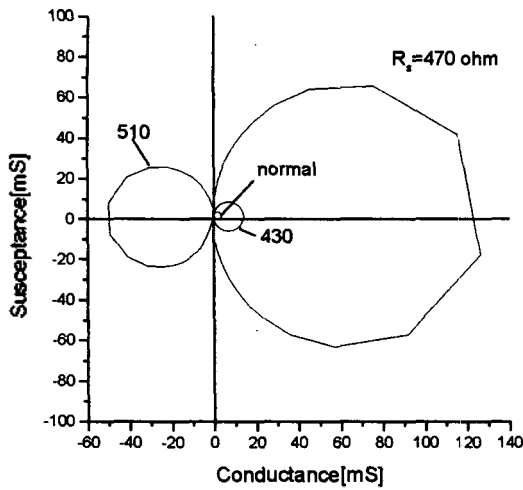


Fig. 8. Admittance loci in R_s change.

일 때 어드미턴스 로커스가 최대가 되었다. 그리고 $R_s=510\Omega$ 이 되면 시뮬레이션의 경향과 유사하게 어드미턴스의 콘덕터스가 음의 영역으로 이동함을 알 수 있다.

이론적으로는 압전 세라믹 진동자의 저항성분과 부임피던스 변환회로의 부저항성분의 차, $R-R'$ 가 최소가 될 때 품질계수가 가장 커져 압전 세라믹 진동자의 어드미턴스 로커스가 최대가 된다. 그런데 실제 실험에서는 $R_s=470\Omega$ 일 때 어드미턴스 로커스가 최대가 되었다. 이것은 실제 압전 세라믹 진동자와 이론적으로 계산한 압전 세라믹 진동자의 동가 상수와의 오차에 의해 압전 세라믹 진동자의 손실이 정확하게 고려되지 않았기 때문이라고 생각된다.

Table 2.에서는 실험 결과로부터, 부임피던스 변환회로를 적용하여 얻은 품질계수의 최대치와 부임피던스 변환회로를 적용하지 않은 경우의 품질계수를 나타내었다.

Table 2. Comparison of quality factor.

	Origin value (without NIC)	Maximum value (with NIC)
Quality factor	23.2	1961

5. 결론

본 연구에서는 부임피던스 변환회로를 사용한 압전

세라믹 진동자의 품질계수 제어법을 검토하기 위하여 PSpice 프로그램을 사용한 전기-기계 혼합회로의 시뮬레이션의 가능성을 확인하여 보았다. 그 결과, 시뮬레이션에 의해 부임피던스의 변화에 따라 제어되는 압전 세라믹 진동자의 품질계수의 경향이 실험 결과와 일치됨을 확인 하였고, 부임피던스 변환회로를 적용하지 않은 경우에 비해 압전 진동자의 품질계수가 수십 배 정도까지 제어됨을 실험으로 확인 하였다. 따라서, 향후에는 부임피던스를 구성하고 있는 연산증폭기 및 구동전원의 특성에 대한 연구를 통하여 좀 더 넓은 범위에서 다양한 주파수를 가진 압전 세라믹 진동자에 대해 안정적으로 적용할 수 있는 부임피던스 변환회로의 설계 방침이 시뮬레이션을 바탕으로 구현될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) 岡村 ; *OP 앰프회로의 설계*, CQ出版社, pp.198-202, 1995.
- 2) H. Tamura, Y. Tomikawa, C. Kusakabe, K. Sakurai, K. Ohnishi, "Basic Investigation on Achieving High Resonance Quality Factor of Piezoelectric Vibrator", *Jpn. J. Phys.* Vol. 36, pp. 3030-3033, 1997.
- 3) P. W. Tuinenga, "A Guide to Circuit Simulation and Analysis Using PSpice", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1992, 2nd ed.
- 4) 최세륜, 이태원 ; *交流理論*, 공학사, pp. 86-89, 1984.