

시뮬레이션 기법을 활용한 압전재료 응용부품 개발

글 _ 임종인¹, 김병익² || ¹요업(세라믹)기술원 시뮬레이션센터, ²세라믹전자재본부
jongin@kicet.re.kr

1. 서론

압전 물질이란 그에 가해지는 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로간에 변환시킬 수 있는 특성을 가진 재료를 말하며, 압전세라믹스 재료는 다양한 전자기적 부품 및 기계적 부품으로 응용되고 있고, 부품은 더욱 초소형화, 초정밀화, 고품질 복합기능화가 요구되고 있어 설계에서 개발 및 제조, 출시까지의 기간이 갈수록 단축되고 있다.

PZT계로 대표되는 압전재료는 가공성이나 제반 압전 특성이 우수하고 가격이 저렴하여 초음파 진동자, 필터, 레조네이터, 착화소자 및 센서 등에 가장 널리 응용되고 있다. 또한 PZT-고분자의 복합재료는 압전특성은 다소 낮지만 음향특성 및 가공성이 우수하여 각종 키보드나 수중 음향부품, 의료용 탐촉자 등에 주로 응용되고 있다. 압전단결정 재료는 탄성표면파(SAW : Surface Acoustic Wave) 필터로 응용되고 있고, 압전특성이 아주 우수한 PZT 및 PMN-PZT 세라믹 단결정은 1990년대 후반에 미래기술을 선도할 20대 핵심기술로 선정되어 많은 연구자들이 이 분야에 연구를 집중하고 있다. 다양한 압전재료 응용부품을 개발하기 위해서는 부품의 특성을 분석하여 압전재료를 선정하고, 그 최적 형상이 설계하여야 우수한 특성 및 대외 경쟁력이 있는 압전재료 응용부품을 개발할 수 있다.

본 논문에서는 압전재료의 특성 및 응용부품을 살펴보고, 이를 효율적으로 개발할 수 있는 시뮬레이션 기법인 등가회로법 및 유한요소법에 대한 대표적인 응용사례에 대하여 알아보하고자 한다.

2. 압전재료의 응용부품

압전재료는 외부에서 가해지는 기계적 에너지와 전기적 에너지를 상호 변환시킬 수 있는 특성을 가진 물질을 말하고, 재료에 응력(T)을 인가하면 분극(P)가 발생 (Positive Piezoelectric Effect)하며, 전기장(E)를 가하면 재료에 변형(S)이 발생(Negative Piezoelectric Effect)한다. 압전재료에 가해지는 응력(T), 전계(E), 변형(S), 전기적 변위(D)등 변수들을 이용하여 압전현상에 대한 구조 방정식(d 및 e형식)은 다음과 같이 표현된다.^{4,6,8)}

$$\begin{aligned} S &= s^E T + dE \\ D &= dT + \epsilon^T E \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} T &= c^E S - eE \\ D &= eS + \epsilon^S E \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 s는 탄성 유연 계수 (elastic compliance), c는 탄성 강성 계수 (elastic stiffness), ϵ 은 유전율 (permittivity), β 는 역유전율 (impermeability)이다. 윗첨자로 쓰여진 E, T, S, D는 각각 전계, 응력, 변형, 전기적 변위가 일정할 때의 값을 의미하는데, 예를 들어 s^E 는 전계가 일정할 때의 탄성 유연 계수를 나타낸다

압전특성은 재료내의 전기적인 쌍극자 (electric dipole) 들이 외부로부터의 전계나 응력에 의해 내부에 쌍극자 모멘텀 (dipole momentum)을 발생 시킴으로써 나타나고, 결정학적으로 이방성이며 비 중앙대칭(non-centrosymmetric)인 재료에서만 나타나게 된다. 그리고 압전

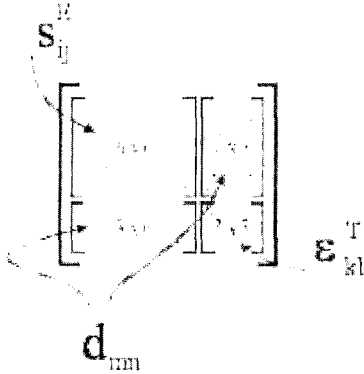


Fig. 1. 압전효과를 나타내는 압전재료의 물성 행렬(d형식).

재료의 특성은 Fig. 1과 같이 나타내어지고, 대칭성이 가장 적은 Triclinic계에서는 모든 상수들이 18개의 독립 상수를 가지다가, 대칭성이 증가함에 따라 점차 독립 상수의 개수가 줄어든다.⁴⁾

PZT로 대표되는 압전재료는 가공성이나 제반 압전특성이 우수하고 가격이 저렴하여 초음파 진동자, 필터, 레조네이터, 착화소자 및 센서 등에 가장 널리 응용되고 있다. 또한 PZT-고분자의 복합재료는 압전특성은 다소 낮지만 음향특성 및 가공성이 우수하여 각종 키보드나 수중 음향부품, 의료용 탐촉자 등에 주로 응용되고 있다. 압전재료의 응용 부품을 에너지의 변환형태에 따라 분류하면 표1과 같이 나타낼 수 있다.

압전재료를 사용하여 응용부품을 제조하기 위해서는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 용도에 맞도록 다양한 형상의 압전재료를 제조하고, 주위 구조물 및 외부 전기회로 등과 정합되도록 응용부품을 설계하고 제조하여야 한다.

Table 1. 압전재료의 응용부품

응용 분야			응용부품, 기기	
전기E(기계E(전기E			Resonator, Filter, Discriminator Delay Line, Piezoelectric Transformer	
Transducer	전기E (기계E	음파	음향	Buzzer, Speaker, Receiver
			초음파	액면계, 교통량계, 도난방지
			수중초음파	SONAR, 어군탐지기, 유량 및 유속계
			고체초음파	Hydrophone
			강력초음파	초음파 두께측정기
	의료용초음파	세척기, 가습기, 가공기		
Actuator			초음파진단장치, 초음파혈류계	
센서			압전모터, Ink Jet Printer, 미세변위제어기	
기계E→ 전기E			가속도센서, 충격센서, 입력센서, Knock 센서, 혈압계 pick up	
고전압발생기			Ignitor	

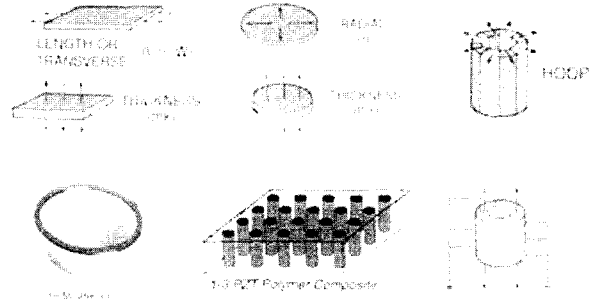


Fig. 2. 압전재료 응용부품에 사용되는 다양한 형상.

즉, 압전재료의 형상 및 분극방향 등을 고려하여 재료를 제조하고, 전기에너지 · 기계에너지 · 음향에너지 등에 대한 상호 변환특성이 극대화되도록 응용 디바이스를 설계하고 제조하여야 한다. 이들 응용부품의 설계에는 전자공학 및 기계공학에서 널리 쓰이고 있는 “등가회로법” 및 “유한요소법”이 사용되고 있고, 이에 대하여 자세하게 알아보고자 한다.

3. 등가회로를 이용한 압전부품 시뮬레이션

등가회로 설계법은 센서의 기계, 음향 매질을 유사한 특성을 가지는 전기부품으로 대체하여 센서 전체의 특성을 전기회로로 표시하여 비교적 간단한 방법으로 상당한 수준까지 정확한 결과를 구할 수 있도록 하는 기법이다. 압전체의 특성 해석에 사용되는 등가회로 해석법은 Mason 이후 많은 연구자들에 의해 개발되어져 왔고, 현재로는 Mason 모델, Redwood 모델, KLM 모델 등이 널리 사용되고 있다. Mason 모델은 가장 대표적인 등가회

로 해석법으로서 복잡한 음향 부하와 후면 임피던스 등의 영향을 쉽게 해석할 수 있어 다양한 음향정합 효과의 분석에 널리 이용되어져 왔다. Redwood 모델은 Mason 모델의 단점인 전기부의 커패시턴스 값을 음향부에 변환시켜 표현하고 있으며, KLM 모델은 높은 주파수의 센서, 다층 정합 센서의 해석에 우수한 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 이렇게 서로간에 세세한 차이를 가지고는 있으나, 그 동안 이루어진 많은 연구 결과에 의하면 이들 세 기법들에 의한 결과는 거의 대동소이하여, 어느 방법을 사용하더라도 상당 수준의 정확성을 확보할 수 있는 것으로 검증되어져 왔다.

기본적으로 이들 모든 등가회로 해석법들은 기계장의 변수들을 일정한 규칙에 의해 동일한 특성을 가지는 전기적 요소들로 변환한 다음, 기존의 전기 요소들과 합쳐서 하나의 전기적 회로를 구성하여 필요한 해석을 하고, 해석된 결과를 다시 정해진 규칙에 따라 역변환함으로써 기계-전기적 특성이 통합된 단일 특성을 쉽게 구할 수 있도록 하는 기법이다. 이때 사용되는 기계-전기적인 요소들 간의 변환 규칙에는 기계적인 힘과 속도를 전기적인 전위와 전류로 각각 환산할 때 이를 임피던스 변환법이라 칭하고, 역으로 전류와 전위로 환산할 때 이를 모빌리티 변환법이라 부른다. 어느 방법을 사용하더라도 무난하나, 일반적으로 임피던스 변환법이 보다 널리 사용되고 있으며, 아래의 Fig. 3에 그 변환 규칙을 도식적으로 나타내었다.

압전체를 impedance analogue에 의해 등가회로로 간단히 표시하면 Fig. 4와 같은데, 여기서 C_0 는 순수한 전기

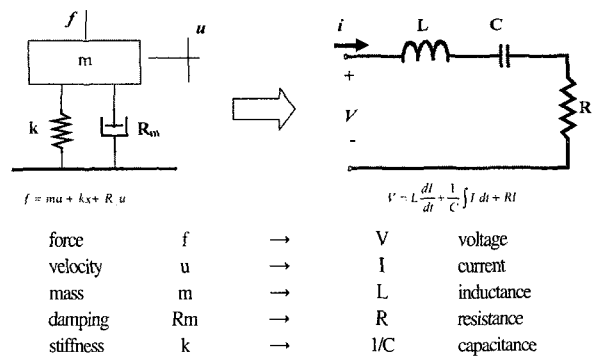


Fig. 3. 압전체의 Impedance Analogue 규칙.

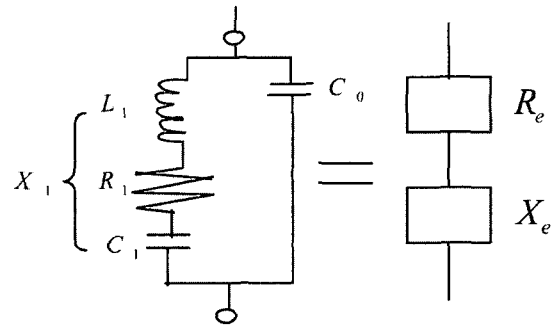


Fig. 4. Impedance analogue에 의한 압전 재료의 등가회로

적 static capacitance, 그리고 R_1, L_1, C_1 은 압전체의 기계적 특성을 나타내는 motional impedance 이다. R_1, L_1, C_1 의 구체적인 값들은 각 압전체가 나타내는 구체적인 진동 형태에 따라 달라진다. 즉 동일한 압전체라고 하더라도 압전체가 두께 진동모드, 길이 진동모드, 그리고 경방향 진동모드 중 어느 모드로 진동을 하느냐에 따라서 그 값이 달라지는 것으로서, 구체적인 값들은 압전체를 통과하는 파동의 운동 방정식 분석을 통해서 구해야 하는 값들이다. 이러한 과정들을 거쳐서 Fig. 4의 등가회로가 완성이 되면, 압전체의 진동 모드에서의 resonant frequency, anti-resonant frequency, bandwidth, Q-factor, damping factor 등의 여러 가지 특성을 쉽게 알아낼 수 있다.

압전체의 두께 진동은 압전체가 두께 방향으로 분극된 상태에서, 역시 두께 방향으로 외부에서 전기 신호가 입력되면, 그에 따라 압전체가 두께 방향으로만 진동하는 형태이다. 압전체의 두께 진동모드를 분석하기 위한 해석모델 및 등가회로는 Fig. 5와 같이 나타내어진다.

압전체(PZT5, 20L*20W*5T mm)의 등가회로를 이용하여 다양한 외부 방사매질에 따른 공진주파수, 반공진주파수 등의 특성을 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이 압전체의 특성뿐만 아니라 인접

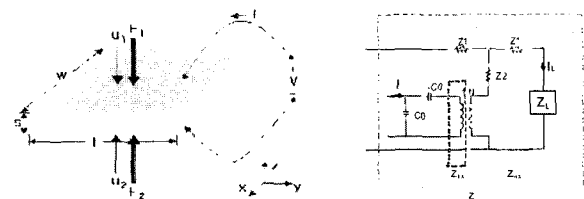


Fig. 5. 압전체 두께 진동모드의 해석모델 및 등가회로

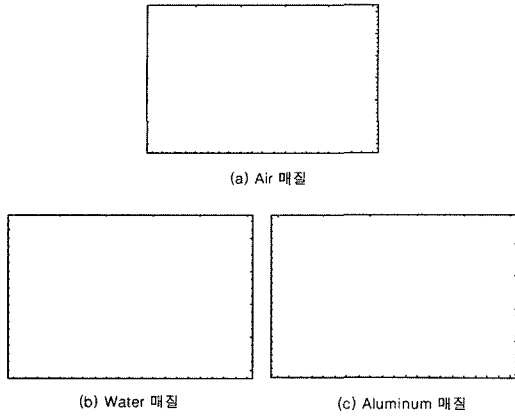


Fig. 6. 외부 방사매질 변화에 따른 두께 진동모드 압전체의 공진 주파수 분석결과.

매질의 물성에 따라서도 공진, 반공진 점이 많은 영향을 받을 수 있다. 또한 방사 Load 에 따른 공진주파수 및 반공진주파수 변화에 대한 분석결과로부터 bandwidth와 Q factor의 변화 경향도 도출할 수 있다.

4. 유한요소법을 이용한 압전부품 시뮬레이션

“유한요소법”³⁾은 어떤 계의 실제 현상을 이상화(idealization)함으로써 역학적 또는 물리적 모델을 구성하고, 이에 수학적 물리적 개념을 바탕으로 미분 방정식을 유도하여 그 계의 여러 성질을 수치적으로 푸는 근사해법이다. 이 방법은 응용부품의 형상을 3차원으로 모델링하고, 실제 사용조건 및 주위 환경을 고려하여 정밀하게 특성의 분석 및 부품을 설계하는 방법으로 경우에 따라서는 아주 많은 분석시간을 필요로 한다. 유한요소법은 그동안 주로 토목공학 및 기계공학 분야에서 이용되어 왔으나, 최근 보다 정밀한 전자 및 고주파 부품을 요구됨에 따라 전자기 특성분석 및 고주파 특성분석용 프로그램들이 급속하게 개발되고 있다. 압전재료의 응용부품 설계와 관련된 상용화된 유한요소 프로그램으로는 ANSYS, Atila, Pzflex 등이 있다. 이와 같은 상용화된 프로그램을 이용할 경우, 실제 형상에 압전 응용부품의 대한 임피던스 및 변형, 응력발생 상태, 음파의 송신, 수신특성, 지향특성 등 압전 디바이스의 특성분석이 가능하게 되어 보다 향상된 제품을 단시간내에 개발이 가능하게 된다.

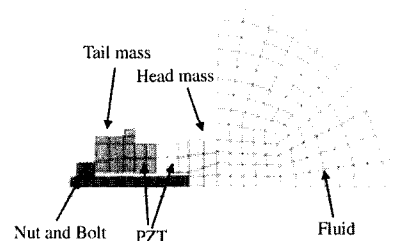


Fig. 7. 압전 Tonpilz 트랜스듀서의 해석 모델.

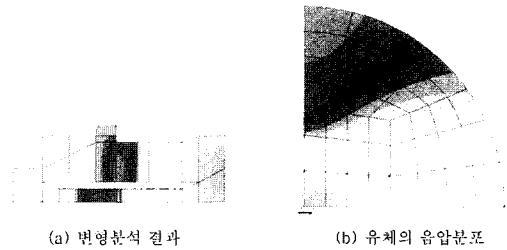


Fig. 8. 압전 Tonpilz 트랜스듀서의 변형 및 발생음압 분석.

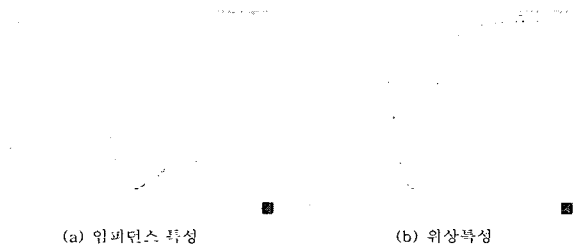


Fig. 9. 압전 Tonpilz 트랜스듀서의 임피던스 및 위상 분석.

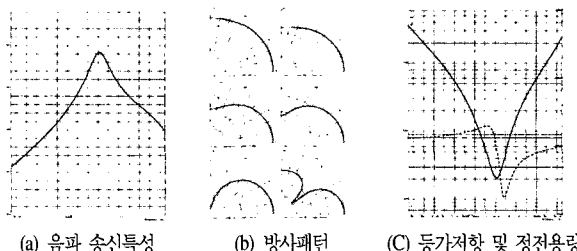


Fig. 10. 압전 Tonpilz 트랜스듀서의 주파수에 따른 특성.

압전 응용부품에 대한 시뮬레이션 사례를 아래에 보다 자세하게 언급하였다.

압전 Tonpilz 트랜스듀서를 분석하기 위해서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 전체 디바이스 및 외부 방사매질을 함께 해석 모델을 구성하여야 한다.

이와 같은 해석 모델을 이용하여 압전 디바이스의 변형 상태 및 유체 매질에서 발생한 음압의 분포, 주파수에

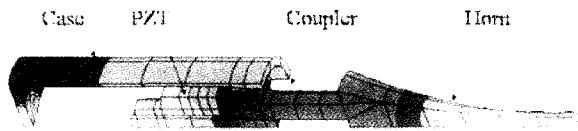


Fig. 11. 압전 초음파 용접기의 구성 및 형상.

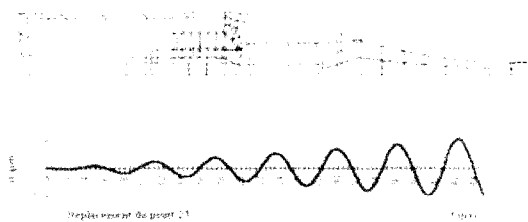


Fig. 12. 압전 초음파 용접기용 진동자의 변형 및 흔의 발생 진동.

다른 임피던스를 분석할 수 있고, 그 결과를 각각 Fig. 8 및 9에 나타내었다. 또한 압전 디바이스의 주파수에 따른 음파 발생성능(TVR) 및 방사특성, 등가저항 및 정전 용량 등을 분석할 수 있다(Fig. 10 참조).

압전재료의 다른 응용사례로 초음파 용접기, 초음파세척기, 액추에이터 등에 사용되는 압전진동자를 들 수 있다. 초음파 용접기용 압전진동자는 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 압전소자, 케이스, coupler, 혼 등으로 구성되고, 압전소자로부터 발생하여 혼에 전달된 진동에너지를 이용하여 용접을 하는 디바이스이다. 따라서 혼의 형상에 따라 전달되는 에너지가 변화하게 되므로 그 형상이 아주 중요하고, 혼의 끝단에서 발생한 진동을 해석하여 설계하여야 한다. 초음파 진동자의 혼 끝에서 발생한 진동을

분석하기 위해서는 시간 변화에 따른 진동발생 상태를 해석하여야 하고, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

5. 요약

지금까지 간략하게 압전세라믹스 재료의 응용부품 개발에 필수적인 분석사항 및 부품설계에 활용할 수 있는 시뮬레이션 기법에 대하여 소개하고, 응용 사례에 대하여 소개하였다. 여기서 언급한 바와 같이, 다양하게 응용되고 있는 압전재료 응용부품 개발에 활용할 수 있는 전자공학 및 기계공학의 시뮬레이션 기법으로는 “등가회로법” 및 “유한요소법”등 이다. 이들 시뮬레이션 기법을 활용할 경우, 보다 우수한 특성을 갖는 응용부품의 개발이 가능하고, 개발기간도 단축할 수 있다.

컴퓨터 시뮬레이션 기법을 다양한 세라믹스 응용부품 개발에 활용하는 방법으로는 재료 전공자가 시뮬레이션 기법을 직접 배워서 하는 방법과 관련분야의 전문가의 협조를 받아 활용하는 방법이 있다. 어느 방법이든 관련된 전공에 대한 의사소통 및 상호이해가 선행된 상태에서 세라믹스 재료기술과 기계-음향공학, 전기-전자공학, 고주파공학 등 관련 응용기술이 결합하게 되면, 우수한 특성을 갖는 세라믹스 응용부품 및 신제품 개발이 가능하게 되어 세라믹스 재료산업과 관련 부품산업이 상호 시너지 효과를 발휘하여 성장하고, 대외 경쟁력도 함께 향상될 것으로 판단된다.

●● 임종인



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

●● 김병익



- 한양대학교 요업공학과 (학사)
- 한양대학교 무기재료공학과 (석사, 박사)
- 현재 요업기술원 세라믹·전체본부 본부장