

Special
Thema

ATILA를 이용한 소형 압전 선형 모터의 설계

고 현필 박사과정
(고려대 대학원 전기공학과)
강 종윤 선임연구원
(KIST 박막재료연구센터)
윤 석진 센터장
(KIST 박막재료연구센터)

1. 서론

최근 공학 설계에 있어서 큰 변화중의 하나는 기계나 구조물의 부품에 대한 응력해석, 동역학적 해석이나, 열해석, 유체 기계에서는 유체 동역학적 해석이 설계의 일상적인 한 부분으로 자리잡게 되었다는 사실이다. 유한요소법의 역사는 비교적 오래 되었으나 사용방법이 난해하여 산업계 전반에서 전문적인 기술자들에 의한 해석이 주를 이루었다. 그러나 최근 들어, 유한요소해석을 쉽게 수행하도록 모델링을 도와주는 전처리기, 해석결과를 용이하게 효율적으로 보여주는 후처리기의 개발이 눈부시게 발전하고, 무엇보다도, 이전에는 중대형 컴퓨터로만 수행했던 유한요소 해석계산을 이제는 쉽게 PC를 이용해서 수행하게 되고, 이들 세 기능을 한 개의 소프트웨어로 통합시켜 일관성 있는 작업이 가능하게 만들어진 소프트웨어가 많이 출시 됨으로써 이제는 유한요소 해석을 설계업무에 보편적으로 적용하게 되었다[1-3]. 이와 같은 추이에 따라, 컴퓨터 시뮬레이션은 전기기계 트랜스듀서를 설계하고 해석하는데 매우 중요한 Tool로 사용되고 있다. 실제 FEA(Finite Element Analysis) 소프트웨어인 ANSYS, PZFLEX, ATILA는 공학용으로 상업화 되어 널리 사용되고 있다. 특히 ATILA Finite Element Code는 압전 디바이스 및 재료를 손쉽게 설계하고, 해석할 수 있는 대표적인 FEA 소프트웨어로 많은 압전 분야 전문가들에 의해 사용되고 있다. ATILA Finite Element Method의 소프트웨어를 이용하면, 압전 세라믹스와 탄성체의 재질과 크기 등을 변수로 하여 공진 주파수와 공진모드에 따른 변위량 등을 손쉽게 예측할 수 있고 이것은 향후 압전 모터를 최적화 하는데 시간 및 예산적인 측면에서 매우 유용하게 사용될 수 있다. 본 고에서는 ATILA Finite Element Code를 이용하여 소형 압전 액츄에이터를 설계하고 실제 소자를 도입한 구동원리에 일치하여 해석되는지 여부를 확인하여, 구동주파수와 최적화된 구성을 얻고 실험치 결과와 이론치 결과의 경향성을 비교분석할 것이다.

2. ATILA를 통한 유한요소 해석.

본 시뮬레이션에 적용할 압전액츄에이터는 그림1과 같은 요소로 구성

되며 구동원리는 다음과 같이 설명된다. 소형 압전 선형 액추에이터는 압전 세라믹의 Radial Vibration Mode를 Flexural Vibration Mode로 변환되는 원리와 압전 세라믹에 인가되는 Waveform의 형태에 따른 Transducer의 Vibration으로부터 발생하는 관성 현상을 이용하여 선형운동을 일으키게 된다.

일축 방향으로 Poling이 되어있는 압전 세라믹은 전계의 방향에 따라 수축과 팽창이 일어나게 된다. 이러한 변위형태를 보이고 있는 압전 세라믹에 부착

되어있는 탄성체는 압전세라믹의 수축과 팽창에 따라 굴곡 변위를 일으키게 된다. ATILA 유한 요소 해석은 그림2와 같은 순서로 이루어지고 분석은 크게 공진과 반공진 주파수, 전기기계 결합계수를 해석하는 Modal Analysis와 변위와 응력 분포 등을 해석하는 Harmonic Analysis가 있다. 본 고에서는 소형 압전 액추에이터에서 발생하는 진동을 확대시키는 구조의 설계와 변위 특성을 요소별 단 계적으로 해석하고자 3차원 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 앞서 언급된 구동원리와 일치되는 구조와 각 요소의 최적화된 사이즈를 찾아 실제 제작 시 시행착오를 줄이기 위해 실시 되었다. 본 시뮬레이션에서 사용된 물질 상수를 표1에 나타내었다.

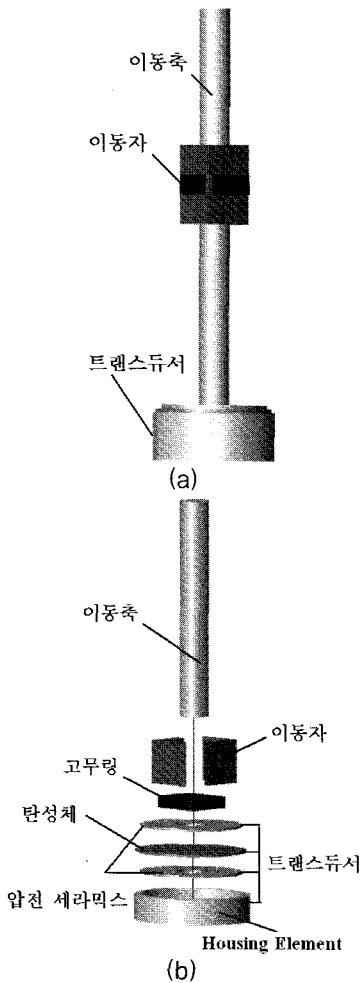


그림 1. 소형 압전 초음파 리니어 모터의 (a) 전체도, (b) 분해도.

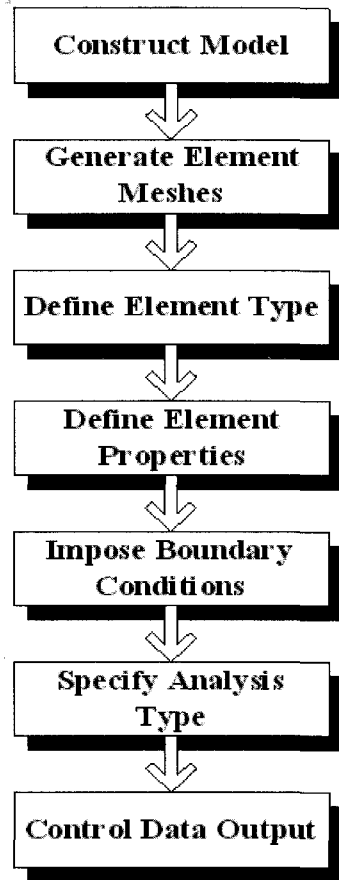


그림 2. 유한 요소법의 분석 순서도.

표 1. 압전 세라믹스와 탄성체의 물질 상수.
(Material Properties of Piezoelectric Ceramic and Elastic Material)

Material Property	Value	Unit	
Elastic Material	Density	8270	kg/m ³
	Possion's ratio	0.33	-
	Young's modulus	9.2 x 10 ¹⁰	N/m ²
Piezoelectric Ceramic	Density	7500	kg/m ³
	SE ₁₁	12.3 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	SE ₁₂	-4.05 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	SE ₁₃	-5.31 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	SE ₃₃	15.5 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	SE ₄₄	39.0 x 10 ⁻¹²	m ² /N
	d ₁₅	496 x 10 ⁻¹²	C/N
	d ₃₁	-123 x 10 ⁻¹²	C/N
	d ₃₃	287 x 10 ⁻¹²	C/N
	ε ₁₁ /ε ₀	762 x 10 ⁻¹²	-
ε ₃₃ /ε ₀	662 x 10 ⁻¹²	-	

2.1 압전 세라믹의 시뮬레이션.

구동 원리를 바탕으로 시뮬레이션의 경계조건인 전계(a)와 분극방향(b)은 그림3과 같으며 압전 세라믹은 실제 제작되는 액츄에이터의 사이즈와의 관계를 고려하여 표2와 같이 지름 3.5 mm, 두께 0.1 mm로 설정하였다. 압전세라믹스의 분극 방향은 두께방향(Thickness Direction)으로 하여 전계를 인가하였을 때 두께 방향으로 팽창이 일어나고 Possion's Ratio에 의해서 지름방향(Radial Ddirection)으로는 수축이 일어나게 되며 분극 방향과 전계 방향이 반대 가 될 때에는 압전 세라믹의 두께방향으로 수축이 일어나면서 지름방향으로는 팽창이 일어나게 설정하였다. 여기서 압전세라믹의 변위는 반드시 지름방향으로의 진동이 우세(Dominant)하게 설계되어야 한다. 경계조건의 설정이 끝난 뒤 Meshing을 실시한다. Meshing은 압전 세라믹의 형태가 원형인 것을 감안하여, Volume Structure Mesh를 하게 된다. 그림4에서와 같이 본 실험에서 실시한 Mesh는 Calculation되는 시간을 고려하여 Node와 Brick Element의 총개수를 각각 2839, 540으로 하였다. 본 시뮬레이션의 궁극적인 목적은 압전 액츄에이터가

설계되고 Calculation되었을 때 실제 압전액츄에이터의 주파수에 따른 동작 특성을 파악하고, 올바른 구동이 되는 주파수를 찾는 데 있다. 먼저 압전 세라믹의 동작 형태를 살펴보기 위한 첫번째 단계로, 압전 세라믹의 Modal Analysis를 실시하게 된다.

표3에는 압전세라믹의 경계조건에 따라 실시한 Modal Analysis의 결과를 나타내었다. 표3의 결과에 따르면, 550 kHz~700 kHz의 주파수 영역에서 전기

표 2. 압전 세라믹스의 시뮬레이션 조건.
(Simulation Condition of the Piezoelectric Ceramics)

Material Type	PZT4
Diameter (mm)	3.5
Thickness(mm)	0.1
Poling Direction	Thickness direction

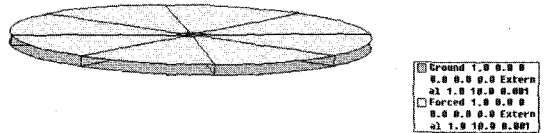


그림 3. 압전 세라믹의 시뮬레이션 경계조건표.

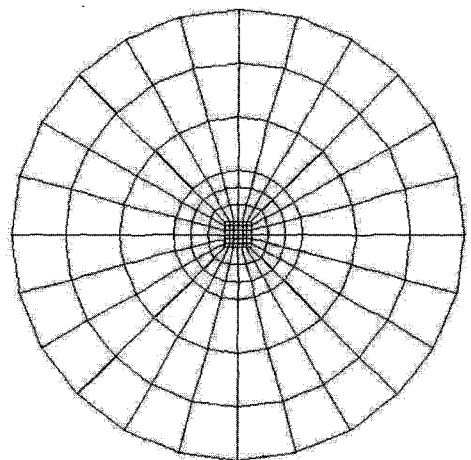


그림 4. 압전 세라믹의 3차원 Mesh.

기계결합 계수가 나타났으며 그 이하와 이후의 주파수에서는 모두 0%의 결합계수가 나타나 특정한 영역의 주파수에서만 압전세라믹의 전기기계적 에너지 변환이 효과적으로 일어나는 것을 알 수 있었다. 특히 693 kHz에서 전기기계결합 계수가 가장 우수하게 나타나고 있어 본 액추에이터에 쓰일 수 있는 압전 세라믹의 공진 주파수와 반공진 주파수는 각각 693 kHz와 759 kHz 라는 것을 Modal Analysis를 통해 예측할 수 있었다. Modal Analysis으로부터 얻은 최적의 주파수 정보는 이후에 실시될 Harmonic Analysis와 연계되어 압전 세라믹의 진동 모드와 응력분포 등의 정보를 얻을 수 있게 된다. Modal Analysis를 통해 얻어낸 공진 주파수 697 kHz에서의 Harmonic Analysis의 결과를 그림5에 나타내었다. 그림5(b)를 통해 알 수 있듯이 압전 세라믹은 지름방향(Radial Direction)을 가지고 움직이는 것을 확인할 수 있었다. Harmonic Analysis를 통해 얻어낸 압전세라믹에서 발생하는 총변위의 크기는 $1.38 \times 10^{-8}(m)$ 임을 확인할 수 있었다.

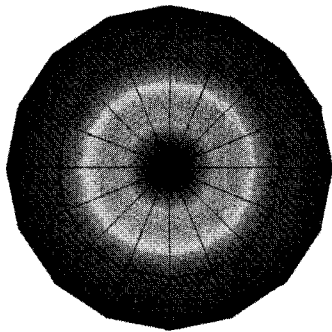
2.2 압전 트랜스듀서(Transducer)의 시뮬레이션

압전 세라믹에서 얻은 정보를 토대로 압전 세라믹과 탄성체를 결합시켜 트랜스 듀서의 시뮬레이션을 실시 하였다. 트랜스 듀서는 금속 탄성체에 압전 세라믹이 한면에만 붙어있는 Unimorph형태와 양쪽으로 붙어있는 Bimorph형태로 구분하여 시뮬레이션 하였다. 압전 세라믹에 전계가 인가되면 세라믹은 수축과 팽창이 일어나게 되고 동작횟수가 증가되고 시간이 지남에 따라 압전 세라믹에서 발생하는 피로도(Fatigue)는 증가할 것이다. 이러한 피로도의 증가로 인하여 압전 세라믹 내부에서는 Microcrack이 생성되고 결국 모터의 특성 저하를 가져오게 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 압전 세라믹에 금속탄성체를 결합시켜 내구성을 증가시키고 Microcrack의 원인이 되는 Stress 집중 현상을 감소시켜 주게 된다. 금속 탄성체의 역할은 압전 세라믹의 수명 감소 인자를 없애주고 압전 세라믹이 Radial 진동 모드를 Flexural 진동 모드로 바꾸어 주는 첫번째 인자이기도 하다. 그림6은 금속 탄성체의 한쪽 방향에 압전 세라믹을 붙인 형태의 Unimorph 형태의 트랜스 듀서를 나타내었다. Unimorph 트랜스듀서

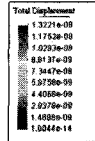
에 전계를 인가하면 압전세라믹과 금속 탄성체가 서로 다른 Young률을 가지고 있고 압전세라믹의 수축 또는 팽창하는 부분이 금속 탄성체와 결합되어 있기 때문에 굴곡 변위를 일으키게 된다. 하지만 이러한 굴곡 변위는 Noise와 같은 기생진동(Parasitic Vibration)을 동반하여 발생 시키기 때문에 본 연구에서는 트랜스듀서의 변부에 x, y, z Displacement Constraint를 설정하여 구동특성에 악영향을 미칠 수 있는 여러 가지 형태의 진동을 억제하고, 효과적인 굴곡 변위를 얻고자 하였다. 또한 압전 세라믹의 굴곡 응력을 줄이고 압전 액추에이터의 동작전압을 낮추어 진동모드의 효율을 극대화 시키기 위하여 금속탄성체의 두께를 0.1 mm로 선정하였다. 금속탄성체는 압전세라믹으로부터 제공되는 진동효율을 손실없이 굴곡 변위로 변환시켜주는 재질로 선택되었고 두께 또한 동작의 방해요소가 되지 않도록 얇게 선택되어야 한다. 하지만 그 두께가 너무 얇게 되면 트랜스듀서 부분의 진동모드가 바뀌어 나타날 수 있기 때문에 여러가지 요소들을 고려하여 사이즈를 결정해야 할 것이다. 표4은 Unimorph 트랜스 듀서의 시뮬레이션 조건을 나타내었으며, 표5에서는 Modal Analysis의 결과를 나타내었다. 본 시뮬레이션에서 사용된 0.1 mm의 탄성체 두께는 압전세라믹의 진동을 손실 없이 잘 전달하고 본 연구의 이론과 일치되는 운동을 일으키는 사이즈라는 것을 이후 Modal Analysis와 Harmonic Analysis 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있었다. Unimorph 트랜스듀서의 시뮬레이션 결과 114 kHz에서 전기기계결합계수가 29%으로 나타났으며 그 진동모드 또한 이론과 일치하는 굴곡 변위 모드인 것을 그림7를 통해 확인할 수 있었다. Bimorph 트랜스듀서는 Unimorph의 한쪽면에 같은 방향으로 본극된 압전 세라믹을 탑재하여 형성 시켰다. Bimorph 트랜스듀서는 Unimorph와 모두 같은 진동 모드와 메커니즘으로 이루어지지만 압전세라믹을 하나 더 붙여 상하 굴곡변위를 더욱 크게 일으키기 위해 고안되었다. 시뮬레이션 결과 128 kHz에서 전기기계 결합 계수가 43 %으로 나타났으며 그 동작 모드 또한 이론과 일치하는 상하 굴곡 진동 모드인 것을 그림8을 통해 확인할 수 있었다.

표 3. 압전 세라믹의 Modal Analysis.

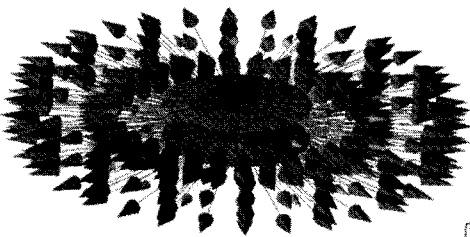
Resonance Frequency (Hz) × 10 ⁵	Anti-Resonance Frequency (Hz) × 10 ⁵	Coupling Coeff. (%)
1.321654	1.321654	0
1.339808	1.339862	0
2.402808	2.402808	0
2.930846	2.930846	0
3.567692	3.567692	0
3.568000	3.568000	0
4.278923	4.278923	0
4.312000	4.312000	0
4.584077	4.584077	0
5.590269	5.590308	0.369317
5.718092	5.719039	1.101370
6.318154	6.318154	0
6.651384	6.651769	30.72442
6.938192	7.560308	17.13559
7.915231	7.915846	1.247142
8.252000	8.249115	0
8.764231	8.766192	2.115538



Step 4 Contour Fill of Displacement, Total Displacement, Deformation (x1.0000e+00), Displacement of Harmonic-Magnitude, Step 4.



(a) 압전액추에이터의 총변위



Step 15 Contour Vector of Displacement, Total Displacement Factor 8.0000e+07, Deformation (x1.0000e+00), Displacement of Harmonic-Magnitude, Step 15.



(b) 압전세라믹의 Vector Analysis

그림 5. 압전 세라믹의 Harmonic Analysis.

표 4. Unimorph 트랜스 듀서의 시뮬레이션 조건표.

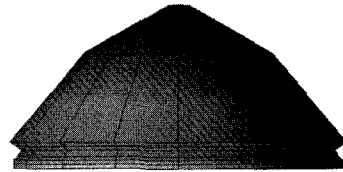
Material Type	Brass
Diameter (mm)	3.5
Thickness(mm)	0.1
Poling Direction	Thickness direction

Metal Disk

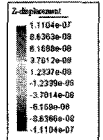


Piezoelectric Ceramic

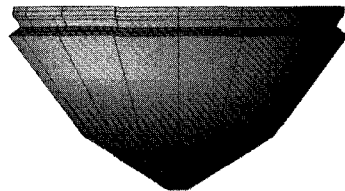
그림 6. 유니모프 트랜스듀서의 구조.



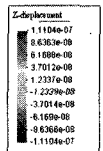
Step 15 Contour Fill of Displacement, Z-displacement, Deformation (x1.0000e+07), Displacement of Harmonic-Magnitude, step 15.



(a)



Step 6 Contour Fill of Displacement, Z-displacement, Deformation (x1.0000e+07), Displacement of Harmonic-Magnitude, step 6.



(b)

그림 7. 유니모프 트랜스듀서의 Harmonic Analysis (a) Up-motion (b) Down-motion.

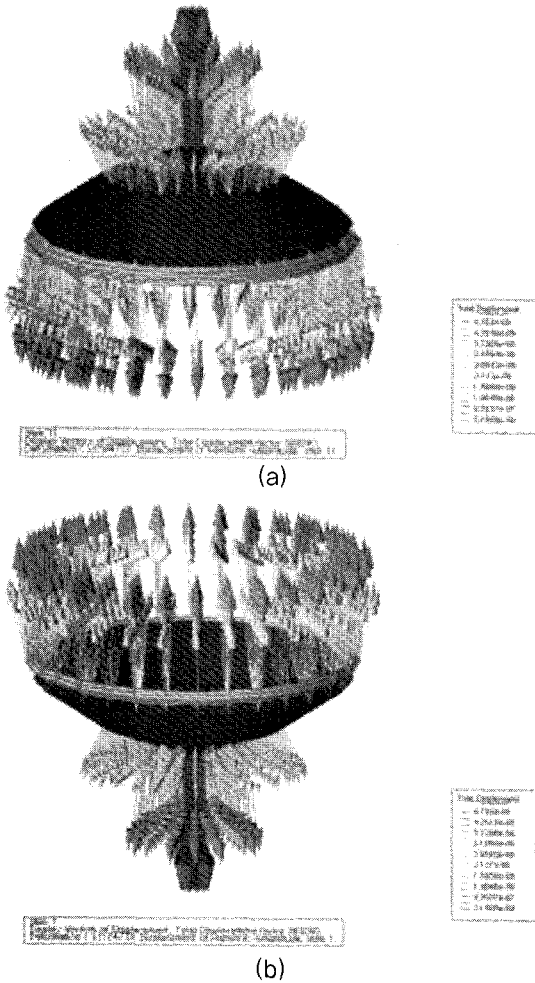


그림 8. 바이모프 트랜스듀서의 Harmonic Analysis (a) Up-motion (b) Down motion.

표 5. Unimorph 트랜스듀서의 Modal Analysis 결과표.

Resonance Frequency (HZ) × 10 ⁵	Anti-Resonance Frequency (HZ) × 10 ⁵	Coupling Coeff. (%)
0.57596	0.57596	0
0.50189	0.50189	0
1.14580	1.14580	29.474
1.14585	1.14585	0
1.98980	1.98980	0
2.00350	2.00350	0
3.06323	3.06323	0
3.37215	3.37215	0
3.88330	3.39285	15.130
5.59211	5.59211	0

표 6. Bimorph 트랜스듀서의 Modal Analysis 결과표.

Resonance Frequency (HZ) × 10 ⁵	Anti-Resonance Frequency (HZ) × 10 ⁵	Coupling Coeff. (%)
0.73463	0.73463	0
0.73509	0.73509	0
1.28026	1.28026	43.191
1.64396	1.64396	0
1.64400	1.64400	0
2.77696	2.77696	0
2.81438	2.81438	0
4.13788	4.13788	0
6.37203	6.37203	0
6.54869	6.54869	0

결국 Unimorph 보다 Bimorph 트랜스듀서의 전기 기계결합계수가 크게 나와 에너지 변환 효율이 Bimorph 트랜스듀서가 더 우수한 것을 확인할 수 있었으며 그 발생 변위 또한 Bimorph 트랜스듀서가 약 800 nm로 Unimorph 트랜스듀서의 변위가 약 220 nm인것에 반해 우수한 변위 특성을 보였다.

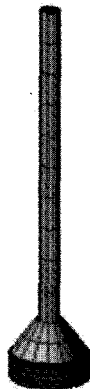
2.3 압전 액추에이터의 시뮬레이션

본 설계에서 제안된 압전 액추에이터는 압전세라믹과 탄성체, Housing Element 로 구성되는 트랜스듀서와 이동 축, 이동자로 구성된다. 압전 세라믹과 탄성체가 합체된 형태의 트랜스듀서는 에너지 변환 효율이 높은 Bimorph 형태를 사용하여 액추에이터를 구성하였다. 그림7은 압전 액추에이터의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 표7에서 나타난 것과 같이 압전액추에이터의 동작 주파수는 25 kHz였으며, 전기기계결합계수는 24 %인것을 Modal Analysis 를 통해 알 수 있었다. Bimorph 트랜스듀서와 비교해보면 전기기계 결합계수가 낮았지만 Actuator 로 구성되면서 이동축과 Housing Element가 더해진 형태라는 것을 감안한다면 최적화 된값으로 추정할 수 있었다. 그림9에서 볼 수 있듯이 압전 액추에이터의 동작은 상하굴곡 변위를 보이고 그 이외의 진동형태가 일어나지 않는 것을 Harmonic Analysis를 통해 알 수 있었다. 이와 같이 유한요소법(FEM)에 의한 압전 세라믹과 탄성체 그리고 축으로 구성될 경우에 대한 Modal Analysis 및 Harmonic Analysis를 통하여 얻어진 결과를 활용하여 실제 실험에 사용될 압전 선형 모터를 설계할 수 있었다.



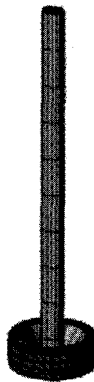
표 7. 압전 액츄에이터의 Modal Analysis 결과표.

Resonance Frequency (HZ) × 10 ⁵	Anti-Resonance Frequency (HZ) × 10 ⁵	Coupling Coeff. (%)
0.73463	0.73463	0
0.73509	0.73509	0
1.28026	1.28026	43.191
1.64396	1.64396	0
1.64400	1.64400	0
2.77696	2.77696	0
2.81438	2.81438	0
4.13788	4.13788	0
6.37203	6.37203	0
6.54869	6.54869	0



Information: C:\3DModel\01\Display\Output of Harmonic-Analysis_Plot_15

(UP)



Information: C:\3DModel\01\Display\Output of Harmonic-Analysis_Plot_15

(DOWN)

그림 9 압전 액츄에이터의 Harmonic Analysis.

3. 소형 압전 선형 액츄에이터

앞선 언급한 바와 같이 일반적으로 시뮬레이션은 실제 실험이전의 단계에서 시간과 비용 등의 소모를 줄이고 구동원리나 개념에 맞게 디바이스가 동작하는지를 예측하기 위해 실행한다. 하지만 여러 가지 단계에서 실험한 시뮬레이션 결과가 실제 실험결과와 판이하게 다르게 나왔을 때는 무의미한 연구단계로 인식될 것이다. 이러한 결과를 초래하지 않기 위해서는 시뮬레이션에 대입되는 재료 상수, Mesh, Analysis는 신중하게 고려되어야 한다. 본 Section에서는 여러 가지 조건에서의 액츄에이터의 간단한 시뮬레이션 결과와 실제 제작된 액츄에이터의 실험결과와 비교하여 상기 언급한 시뮬레이션 단계가 올바르게 이루어졌음을 확인하고, 이후의 시뮬레이션에서 신뢰성을 높여주는 계기를 마련하고자 한다.

그림10에서와 같이 압전액츄에이터의 이동축 길이를 변화시켜 시뮬레이션 결과와 제작 후 실험결과를 비교할 것이다. 이동축의 길이는 6, 10, 15, 18 mm로 하였으며 트랜스 듀서의 높이는 1.5 mm로 하였다. 그림11은 압전 액츄에이터의 공진 주파수에 대한 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 결과 이동축의 길이가 짧아질수록 그 주파수가 높아지는 것을 알 수 있었다. 실제 압전 액츄에이터의 공진주파수 측정 결과 이동축의 길이가 짧아질수록 그 공진 주파수가 역시 높아지는 것을 알 수 있었다. 하지만 실제 실험결과와 공진주파수가 3-5 kHz 정도 작게 나와 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 오차가 나는 것을 알 수 있었다. 이것은 시뮬레이션에서 Epoxy 층과 Wiring, Soldering에 대한 정보가 입력되지 않아 오차가 발생된 것이라 할 수 있다. 그림12는 압전액츄에이터의 변위를 시뮬레이션 결과와 실험결과와 비교한 그래프이다. 그림12에서 알 수 있듯이 이동축의 길이가 늘어날수록 변위가 줄어드는 것을 시뮬레이션 결과와 실험결과를 통해 알 수 있었다. 본 실험에서 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있는 정보는 압전체에서 나타나는 진동이 실제 트랜스듀서 이외의 다른 곳에 전달되어 기생진동(Parasitic Vibration)으로 작용하지 않는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 실제 설계가 잘 이루어

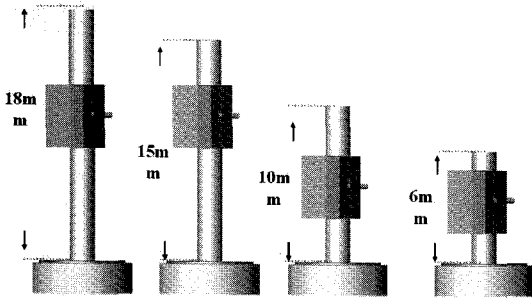


그림 10. 이동 축 길이에 따른 압전 액츄에이터.

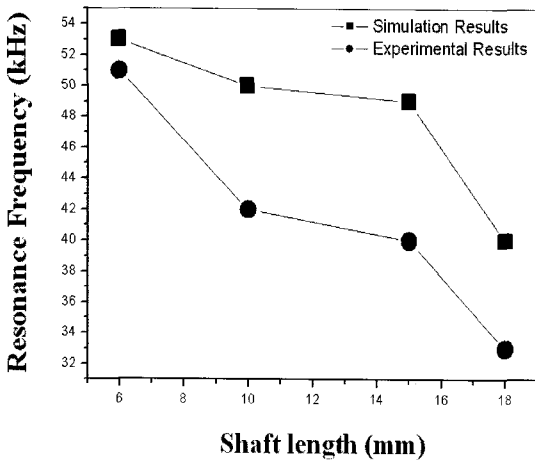


그림 11. 압전액츄에이터의 공진주파수.

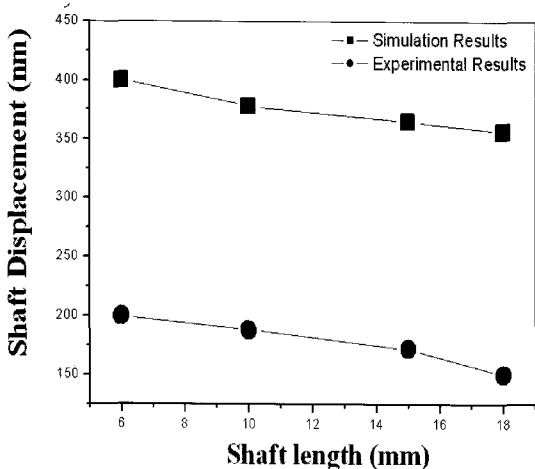


그림 12. 압전 액츄에이터의 발생변위.

저 트랜스듀서에서의 공진현상이 설계자의 의도대로 일어난다는 것을 의미한다. 그림12에서 알 수 있듯이 이동축의 길이가 늘어남에 따라 이동 축에서 진동이 발생하여 설계자의 의도와 다른 진동 모드가 일어나지 않고 이동 축은 일종의 강체로 인식되어 단순히 트랜스듀서에서 나오는 굴곡변위를 전달해주는 매개체로 작용한다는 것을 본 실험을 통해 알 수 있었다.

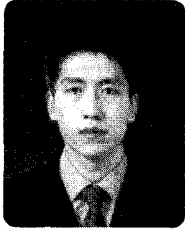
4. 결론

최근 압전액츄에이터는 세계적으로 많은 분야에 응용되고 있으며, 특히 소형화 산업에 있어서 각광을 받고 있다. 하지만 압전 액츄에이터는 아이디어, 재질의 선정, 인가되는 에너지 형태, 마찰거동의 4박자가 완벽하게 이루어져야 설계자의 의도대로 우수한 디바이스로 인정 받을 수 있다는 어려움이 있다. ATILA Software를 이용한 시뮬레이션은 이러한 조건 중에서 마찰거동을 제외하고는 실제 실험 이전에 선행되어 비교적 다른 Tool보다 쉽게 결과를 예측하고 분석할 수 있다는 장점이 있다. ATILA 시뮬레이터를 사용하는데 있어서 사용자에 따라 입력되는 재료상수, 설계 방법, 분석방법 등이 충분하고 신중하게 고려되어 진다면 실제 제작되는 디바이스에 대한 정보를 얻는데 보다 빠르고 쉽게 다가갈 수 있을 것이다.

참고 문헌

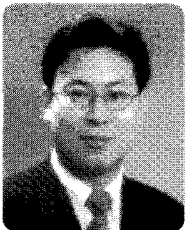
- [1] R.R. Smith, J.T. Hunt, and D.J Barach, "Finite element analysis of acoustically radiating structures with application to sonar transducer", J. Acousti. Soc. Amer., vol.54, pp.1277-1288, 1971.
- [2] Y.Kawaga and T.Yamabuchi, "Finite element approach for piezoelectric circular rod", IEEE Trans. Sonics Ultrason., vol.23, pp.379-385,1976.
- [3] D.F. Ostergaard and T.P. Pawalak, "Three-dimensional finite element for analyzing piezoelectric structure", in Proc. IEEE Ultrason.Symp.,1986, pp639-644.

저|자|약|력



성 명 : 고 현필

- ◆ 학 력
- 2000년 고려대 재료공학과 공학사
- 2002년 고려대 대학원 재료공학과 공학석사
- 2005년 고려대 대학원 전기공학과 박사과정



성 명 : 강 종운

- ◆ 학 력
- 1993년 연세대 전기공학과 공학사
- 1995년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
- 2000년 연세대 대학원 전기컴퓨터 공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 2000년 - 현 재 The Univ. of Birmingham, Post-doc.
- 2002년 - 2004년 KIST 박막재료연구센터 선임연구원



성 명 : 윤 석진

- ◆ 학 력
- 1983년 연세대 전기공학과 공학사
- 1985년 연세대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1992년 연세대 대학원 전기공학과 공학박사

- ◆ 경 력
- 1988년 - 현 재 KIST 박막재료연구센터 책임연구원
- 1995년 - 1996년 Pennsylvania State Univ., MRL, Post-doc.
- 2003년 - 현 재 KIST 박막재료연구센터 센터장

