

압전작동기로 구동 되는 원통형 Parts Feeder 의 모드 해석

최승복*, *이동호**, 김재환*, 정재천*

Modal Analysis of Bowl Parts Feeder Activated by Piezoactuators

S.B.Choi*, *D.H.Lee**, J.H.Kim*, C.C.Cheong*

ABSTRACT

This paper presents modal characteristics of bowl parts feeder featuring piezoelectric actuators. As well-known, the piezoelectric materials develop an electric charge proportional to a mechanical stress and vice versa. This generic phenomenon allows us to use the piezoelectric materials as sensors and actuators. Using the actuating property, we can device effective bowl parts feeder. The parts feeder activated by the piezoceramic actuators provides a large degree of freedom of controlling excitation magnitude and frequency, and thus accurate and fast feeding of various parts. As a first phase to demonstrate these advantages, a finite element model of the bowl parts feeder is constructed and analyzed using commercial software packages. In addition, the simulated modal characteristics are compared with the measured ones to validate the proposed model

1. 서론

파트피더란 진동수송의 원리에 의해서 부품을 급송하는 기기인 진동피더중 가장 일반화된 모델이다. 파트피더라는 명칭은 최초로 보울피더를 개발한 Syntron 사의 상품명으로써, 최근에는 진동호퍼피더는 모두 파트피더라고 생각해도 좋을 만큼 널리 사용되고 있다. 이러한 보울파트피더는 기계가공 라인이나 조립 라인에서 고장도 부품공급 시스템을 구성 하는 것이 가능하기 때문에 자동차, 전기 및 그 외 여러 분야에

서 응용되고 있다[1].

현재 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있는 파트피더의 작동기는 전자석(electromagnet)이다. 전자석 작동기에 의한 파트피더의 역사는 매우 오래되었지만 이에 대한 이론적 혹은 정량적 해석은 매우 드물다. 특히, 보울파트피더는 구조가 복잡하고 공급되는 부품의 수송원리가 정확히 규명되지 않아 해석과 응용에 있어 많은 어려움이 있다. 이러한 보울파트피더의 문제점으로서 직접적으로는 소음, 비선형 움직임의 발생등과 같은 것을 들 수 있으며, 간접적으로는 공급되는 부품에 대해서 능동적인 대처가 힘들어 사람의 수동적 조작이 필요하게 되어 자동화에 장애요인이 된다는 것이다.

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 기계공학과 대학원

최근 이러한 단점들을 보강하기 위해 여러 방향으로 연구가 진행되어 오고 있으며, 그 개선된 한 형태로 압전작동기로 구동되는 보울파트피더를 들 수 있다. 압전작동기란 구동부로 압전재료가 사용되는 작동기를 말하는데, 여기서 압전재료란 재료의 극전하 현상을 통해 기계적 변형을 일으키면 전압이 발생하고, 역으로 전기장이 부가되면 기계적 변형을 발생하는 압전효과를 가진 재료로서, 변형량은 적지만 큰 힘을 발생시키고, 응답속도가 매우 빠르며 넓은 주파수 대역과 감지 및 작동의 이중능력, 그리고 변위 분해능이 우수하여 nm 단위의 미동을 얻을 수 있어 정밀 위치제어나 진동제어등과 같은 제어에 우수한 성능을 발휘 할 수 있다[2].

본 연구에서는 압전작동기로 구동되는 보울파트피더의 가진 크기 및 주파수 제어등 최종연구 목적을 위해서 필요한 시스템의 동적모델을 구축하고자 한다. 이를 위하여 유한요소모델을 이용 고유주파수와 모드형상을 해석하고 모델의 타당성을 검증하기 위해서 모달특성실험을 수행한다.

2. 유한요소모델

이방성이고 탄성영역이 전기장에 영향을 받는 압전재료의 경우 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = C^E S - h^T E \quad (1-a)$$

$$D = hS + b^S E \quad (1-b)$$

여기서 T 는 응력 텐서(stress tensor), D 는 전기적변위(electric displacement), S 는 변형률텐서(strain tensor), h 는 압전 응력 상수(piezoelectric stress constant) 행렬, E 는 전기장, b^S 는 일정한 변형률 하에서의 절연상수(dielectric constant) 행

렬이고, C^E 는 일정한 전기장 상태에서 측정된 강성행렬이다. 덧붙여 T 는 전치행렬을 뜻한다.

이러한 압전재료의 구성지배방정식을 이용하여 압전재료와 연계된 유연구조물 시스템의 운동방정식은 최소 포텐셜 에너지 (minimum potential energy)원리를 사용하여 유도할 수 있으며, 그 일반적 형태는 다음과 같다[3][4].

$$[M_{uu}]\{\ddot{u}\} + [K_{uu}]\{u\} + [K_{u\phi}]\{\Phi\} = \{F\} \quad (2-a)$$

$$[K_{u\phi}^T]\{u\} + [K_{\phi\phi}]\{\Phi\} = \{Q\} \quad (2-b)$$

여기서, $[M_{uu}]$ 는 $\int \rho N_u^T N_u dV$ 으로 질량 행렬을 의미하며, $[K_{uu}]$ 는 $\int B_u^T C^E B_u dV$ 로 탄성 강성 행렬, $[K_{u\phi}]$ 는 $\int B_u^T h^T B_\phi dV$ 로 압전 coupling 행렬을, $[K_{\phi\phi}]$ 는 $\int B_\phi^T b^S B_\phi dV$ 로 절연 강성 행렬) $\{F\}$ 는 $\int_V N_b^T f_b dV + \int_{S_1} N_{S_1}^T f_S dS_1 + N_u^T f_c$, $\{Q\}$ 는 $-\int_{S_2} N_{S_2}^T q_s dS_2 - N_\phi^T q_c$ 로 각각 기계적 힘 과 전기적 전하를 의미한다. 이들 각 행렬에서, f_b 는 체적력(body force), f_S 는 표면력(surface force), f_c 는 절점력(concentrated force), q_s 는 표면전하(surface charge), q_c 는 점전하(point charge)이다. N_u, N_ϕ 는 변위 u 와 전기적 포텐셜 ϕ 에 대한 형상함수 행렬이며, B_u, B_ϕ 는 형상함수 행렬에 미분 행렬을 곱한 것이다. 따라서 식 (2)를 해석하기 위해서는 밀도, 압전 응력 상수 행렬, 절연상수 행렬, 강성 행렬 등이 필요함을 알 수 있다.

3. 유한요소해석

해석을 위해 기본 모델로 사용된 보울파트피더는 Fig.1에서 보여지고 있는데, 베이스에 장착된 4개의 지지대중 3곳에만 압전작동기가 부착되어 있는 형태이다. 먼저 유한요소법으로 해석하기 위해 SPARC station20에서 해석을 수행

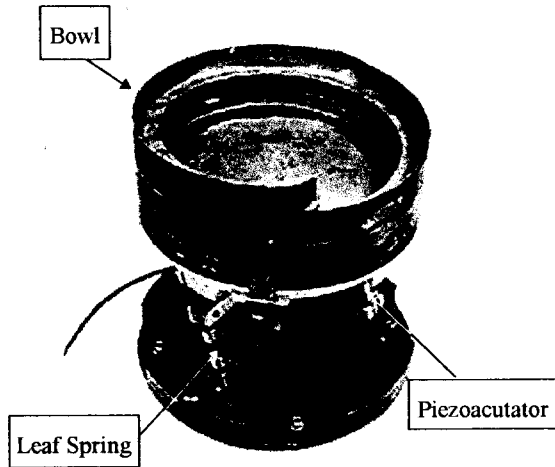


Fig. 1 The photograph of the proposed bowl parts feeder

하였고, 해석을 위한 전처리/후처리 프로그램으로는 PATRAN 을, 해석기로는 ANSYS 프로그램을 각각 이용하였다.

각 부분에 사용된 재질로는 보울부분은 SUS304, 판스프링부분은 강철, 전달부에는 알루미늄합금이 사용되었고, 작동기로 사용된 압전 재료는 PZT-5H 가 사용되었다. 각각의 재질에 대한 물성치는 SUS304 의 경우 탄성계수 200GN/m^2 , 프와송비 0.3, 밀도 7750kg/m^3 의 값이 사용되었으며, 강철의 경우는 탄성계수 210GN/m^2 , 프와송비 0.28, 밀도 7800kg/m^3 의 값이, 알루미늄합금의 경우 탄성계수 73GN/m^2 , 프와송비 0.33, 밀도 2700kg/m^3 의 값이 각각 해석에 이용되었다. 압전재료의 경우 밀도는 7600kg/m^3 의 값이 해석에 사용되었다. z 축 방향으로 압전재료를 극화(poling) 시켰다고 할 때, 압전 응력 상수로서의 인자로는 e_{x5} 는 17, e_{z1} 은 -6.5, e_{z3} 는 23.3 이 사용되고, 절연상수 행렬의 인자로는 $\epsilon_{xx}^S / \epsilon_0$ 은 1700 이, $\epsilon_{zz}^S / \epsilon_0$ 는 1470 의 값이, 강성 행렬에는 c_{11} 은 $12.6\text{E}10$, c_{33} 는

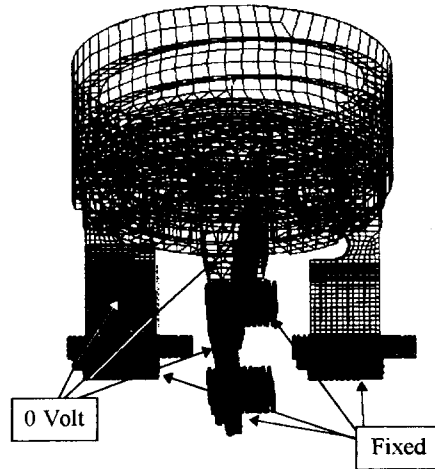


Fig. 2 The mesh generation of the model

$11.7\text{E}10$, c_{44} 는 $2.30\text{E}10$, c_{12} 는 $7.95\text{E}10$, c_{13} 는 $8.41\text{E}10$ 의 인자가 사용되었다. ϵ_0 는 진공에서의 절연상수로서 $8.854 \times 10^{-12} \text{farads/m}$ 이다.

각 부분에 사용된 요소로는 압전소자는 coupled-field 의 성질을 가지고 있으므로 이를 구현하기 위해 압전 고체요소가, 압전작동기가 부착된 부분의 판 스프링은 고체요소가, 그리고 나머지 부분을 크기에 비해 두께가 상대적으로 작기 때문에 판요소가 사용되었다.

Fig.2는 유한요소해석을 위해 만들어진 모델을 보여주고 있다. 사용된 경계조건으로는 기본 모델에서 하부베이스와 판스프링과 연결된 부위의 경계조건은 보울의 무게보다 하부베이스 부분의 무게가 상대적으로 크기 때문에 고정되었다고 보고, 판스프링의 하단부 8mm 정도의 범위 내에 있는 모든 절점에 대해 6 자유도 ($U_x, U_y, U_z, \text{ROT}_x, \text{ROT}_y, \text{ROT}_z$) 모두를 고정시켰으며, 압전재료의 양 전극에 입력되는 전압은 모두 0V를 입력하였다.

해석을 위해 총 6188 개의 절점과 4677 개의 요소들이 사용되었으며, 총 자유도의 수는

32520 이다. 이를 해석한 결과 중 모드 주파수결과들은 Table 1 에, 그에 상응하는 모드형상결과들은 Fig.3(a)에서 도시하고 있다.

4. 모달특성실험

실험적으로 모델의 모드해석을 수행하기 위해 FFT와 3축가속도계를 가지고 자료를 얻고, 이를 다시 모드해석프로그램인 STAR 프로그램에서 해석하여 최종 결과값을 얻는 과정을 거쳤다.

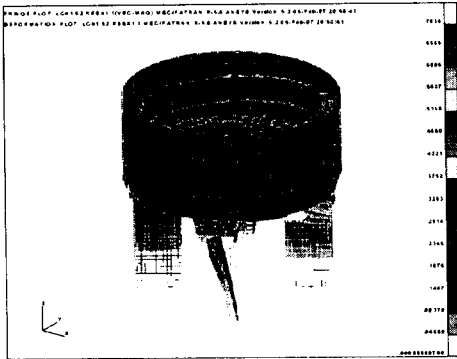
실험절차와 방법으로는 먼저 FFT(HP35665A)에서 0.5V_{peak}의 전압을 가지고 주파수는 0에서 3200 Hz까지 랜덤으로 가진 시킨 다음 100회의 평균화를 시켰다. 이 전압은 증폭기(Trek model 50/750)를 통해 100배 증폭된 다음, 압전 작동기에는 사인함수의 형태로 최대 50V의 전압이 입력되었는데, 전원부위에서 발생하는 노이즈의 영향을 줄이기 위해서 모든 전원 공급은 노이즈필터를 거쳐 입력되도록 하였다. 이 입력 신호로 구동된 보울파트피더를 3축 가속도계(Kistler type 8690C5)를 사용하여 보울부만을 중점적으로 측정하였다. 측정지점은 보울 외측면에서 70개, 내부 트랙에선 52개 그리고 내부 바닥부위에선 12개의 지점을 각각 선정하여, 총 134개의 측정점을 잡아 자료를 얻었다. 이렇게 얻은 자료들은 Coupler (Kistler type5134)를 통해 다시 FFT로 들어가 최종 자료(총 402개)들을 얻었다. 이 모든 자료들을 STAR 프로그램에서 해석을 수행하여 최종 결과를 얻었는데, Table 1에는 실험적으로 구한 모드주파수들의 결과를 정리하였으며, 그에 상응되는 모드 형상 결과는 Fig.3(b)에서 보여 주고 있다.

5. 결과 및 결론

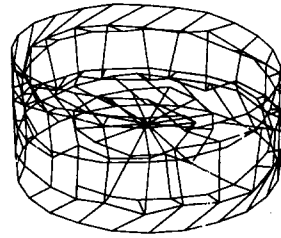
Table 1 The modal frequencies of the bowl parts feeder

unit : Hz		
Method Mode	F.E.M.	Experiment
1 st Mode	176.811	179.9
2 nd Mode	327.809	
3 rd Mode	337.219	
4 th Mode	596.374	576.40
5 th Mode	747.951	747.35
6 th Mode	822.628	
7 th Mode	882.685	

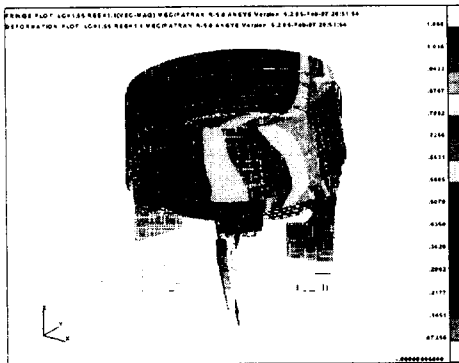
Fig.3 중 1st 모드는 보울이 좌우로 왕복 회전 운동을 하는 형상이며, 4th 모드는 보울이 시소처럼 한쪽이 올라가면 한쪽이 내려가는 운동을 보이고 있으며, 5th 모드는 보울의 외판이 Breathing 하는 것처럼 움직이는 것을 나타낸다. Table 1에서 유한요소방법으로 해석을 수행한 결과와 실험을 통한 모드해석 결과를 비교해 보면 실험에서는 나타나지 않고 있는 모드들이 해석에서는 나타나고 있는데, 우선 실험결과에서 2nd 모드와 3rd 모드가 나오는 이유는 실험상의 오차보다는 F.E.M 모델링에 있어 솔리드요소로 모델을 구성한 판 스프링과 셸요소로 구성된 보울 부분의 경계에서의 요소를 모델링함에 있어 오차로, 실제 모델에서는 이 부분이 상당히 높은 강성을 가지도록 설계되어 있으나 F.E.M 모델링의 경우 모델이 복잡해지는 것을 막기 위해서 이 부분의 모델링을 생략하였다. 따라서, 이 영향이 F.E.M 해석 두 번째, 세 번째 모드에서 발생하는 것으로 보여진다. 그리고, 높은 주파수 영역에서는



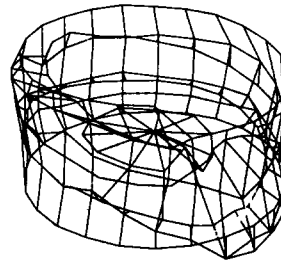
1st Mode



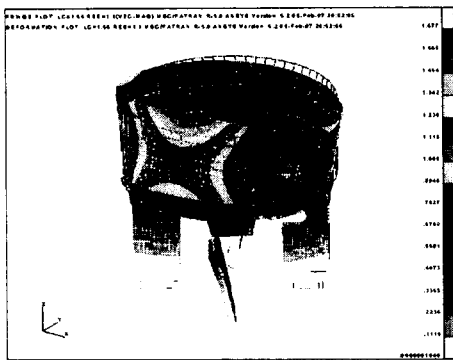
1st Mode



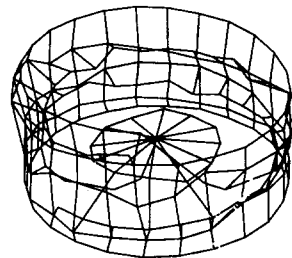
4th Mode



4th Mode



5th Mode



5th Mode

(a) simulation results

(b) experimental results

Fig.3 Comparison of mode shapes between simulated and measured results

실험상의 어려움으로 인해 나타나지 않는 모드들이 있었다. 그러나, 이 모드 값을 제외하고는 약간의 오차가 존재하지만 해당하는 모드에 대한 모드형상의 결과는 비교적 잘 맞고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 이 자료들을 통해 다른 모델을 제시 하여도 그 결과의 신뢰성을 가질 수 있을 것이다. 참고로 실제 보울파트피더에서 부품 공급을 위해 필요한 모드는 1st 모드이다.

결과에서 보면 알 수 있듯이 각 모드들의 값이 비교적 높은 주파수 영역에서 나타나고 있는데, 기존의 모델은 높은 주파수에서 반복된 작동으로 인해 시간이 지남에 따라 이음쇠 부분이 느슨해 지는 등 비선형성으로 인한 부품의 급송이 불규칙적으로 변하는 것을 막고, 급송에 사용된 모드가 일정하여 그 구조가 강체와 같이 견고하게 제작되는 것이 유리했다[5]. 이는 기존의 전자석을 사용한 보울파트피더의 경우 타당한 모델이었지만, 발생하는 모드들이 굉장히 높은 주파수 대역에서 발생하여 압전재료가 작동기로 사용될 경우 압전재료의 장점을 충분히 활용하는 데 오히려 방해하는 요인으로 작용될 수도 있다. 그리고, 모드 형상에서도 볼 수 있듯이 부품의 수송에 사용 가능할 것으로 보이는 모드 형상은 첫번째 모드를 제외한 나머지는 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

향후 연구과제로는 압전작동기의 장점을 보이기 위해 기존의 개루우프 시스템이 아닌, 외관과 공급되는 파트의 변화에도 능동적으로 대처할 수 있는 페루우프 시스템을 개발하고자 한다. 또한 기존의 보울파트피더에서 발생하는 소음문제를 해결할 수 있는 방안도 연구될 예정이다.

6. 참고 문헌

1. 심수섭, 1991, "자동조립기술", pp.227-270.
2. Choi, S.B. and Lee, C.H., 1997, "Force Tracking Control of a Flexible Gripper Driven by a Piezoceramic Actuator", ASME J. of Dynamic Systems, Measurements and Control, Vol.119, No.3, pp.439-446
3. Allik, J. and Hughes, T.Jr., 1970, "Finite Element Method for Piezoelectric Vibration", Int.J.Numer. Methods Eng.2, pp.151-157.
4. Kim, J.W., Varadan, V.V. and Varadan, V.K., 1995, "Finite Element-Optimization Methods for the Active Control of Radiated Sound From a Plate Structure", J. Smart Mater. Struc. pp.318-326.
5. Erdman, A.G., 1982, "Dynamics of Mechanisms : Advanced Concepts", Vol.2, pp.406-411.