

보 구조물의 응력 변화에 따른 구조역학적 임피던스의 특성 분석

Analysis of Electro-Mechanical Impedance Characteristics according to the change in stress of beam-type structures

이 포 영* · 박 재 형** · 왕 각 유이*** · 김 정 태****

Lee, Po-Young · Park, Jae-Hyung · Nguyen, Khac-Duy · Kim, Jeong-Tae

요 약

본 논문에서는 보 구조물의 응력 변화에 따른 구조역학적 임피던스의 특성을 분석하였다. 이를 위해 다음과 같은 연구가 수행되었다. 먼저 외팔보 형식의 알루미늄 보에 PZT 센서와 strain gage를 부착하고, 하중을 단계적으로 증가시키면서 임피던스를 측정하였다. 다음으로 strain gage에서 측정된 변형률과 PZT로부터 측정된 임피던스 사이의 관계를 분석하였다. 마지막으로 수치해석을 통해 변형률과 임피던스의 관계를 분석하여, 실험결과와 비교하였다.

keywords : PZT, 보구조물, 변형률, 구조역학적 임피던스, 변형률-임피던스 상관관계

1. 서 론

현재까지 구조물의 구조진성 모니터링을 위해 많은 기법들이 개발되고 있으며, 특히 최근에는 PZT 센서를 이용한 고주파수 대역 진동특성을 이용하는 구조역학적 임피던스를 이용한 기법이 각광받고 있다. 임피던스 기법은 초기손상 식별에 뛰어나며, 다른 국부적 기법들에 비해 경제성이 우수하다는 장점을 가진다 (Giurgiutiu 등, 1998). 일반적으로 임피던스 기법은 손상에 발생에 따른 임피던스의 변화를 감지하여 손상을 식별하기 되지만, Annamdas 등(2007)은 손상뿐만 아니라 구조물에 발생하는 하중 또한 임피던스의 특성을 변화시킬 수 있다고 하였다. 따라서 임피던스 기법을 이용하여 손상을 정확하게 식별하기 위해서는 구조물에 발생하는 변형률과 임피던스의 변화특성을 분석해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 보 구조물의 응력 변화에 따른 구조역학적 임피던스의 특성을 분석하였다. 이를 위해 다음과 같은 연구가 수행되었다. 먼저 외팔보 형식의 알루미늄 보에 PZT 센서와 strain gage를 부착하고, 하중을 단계적으로 증가시키면서 임피던스를 측정하였다. 다음으로 strain gage에서 측정된 변형률과 PZT로부터 측정된 임피던스 사이의 관계를 분석하였다. 마지막으로 수치해석을 통해 변형률과 임피던스의 관계를 분석하여, 실험결과와 비교하였다.

2. EMI 기법

구조물 시스템과 PZT 센서 간의 단자유도 모델은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 1에서와 같이 구조

* 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 석사과정 niceguy40@pknu.ac.kr

** 학생회원 · 부경대학교 해양공학과 박사 후 연구원 cross96@pknu.ac.kr

*** 부경대학교 해양공학과 박사과정 khacduy@nate.com

**** 부경대학교 해양공학과 교수 idis@pknu.ac.kr

물에 전압을 인가하면 PZT 센서에 변형이 발생하게 되고, 이는 구조물의 가진력이 된다. 이러한 가진력에 의해 구조물은 그 특성(질량 M , 감쇠계수 C , 강성 K)에 따라 공진이 발생하게 되며 이는 임피던스 특성에서 피크로 나타나게 된다. 구조물의 손상은 구조적 특성(특히, 강성 K)의 변화를 의미하고, 이는 곧 임피던스 특성(특히, 피크 주파수)의 변화를 야기한다. 이러한 변화를 정량화하기 위해 손상 전후 임피던스 특성의 RMSD(root-mean-square deviation)를 이용한다. 일반적으로 구조물의 손상 여부를 확인하는데 임피던스의 실수부를 이용하는 것이 가장 민감하다는 것으로 알려져 있다(Park 등, 2000). 그러나 구조물에는 외부 하중이 상시 작용되며 이러한 하중은 임피던스 특징 변화를 야기하게 된다. Annamdas 등(2007)은 하중에 따른 susceptance(admittance의 허수부)의 기울기 변화는 임피던스 보다 일정한 패턴을 가지고 변화한다고 하였다. 본 연구에서는 이들의 연구를 바탕으로 보 구조물에 작용하는 하중 변화에 따른 susceptance의 기울기를 주요 임피던스 특징으로 선정하였으며, 또한 임피던스 실수부의 피크 주파수 성분의 크기 또한 특징으로 선정하였다.

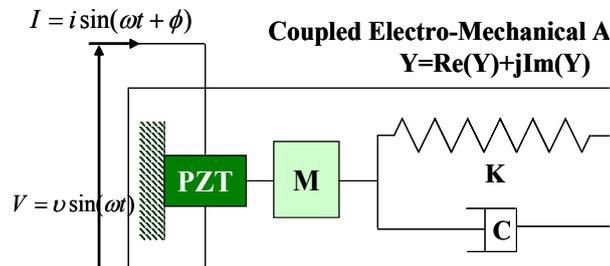


Fig. 1. 1-D Model of a PZT with its Host Structure.

3. 보 구조물에 작용하는 하중에 따른 임피던스 특징 변화 분석 - 실험

보 구조물에 작용하는 하중과 임피던스 특징을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 알루미늄 외팔보 (60x10x600 mm)를 설치하고, 자유단에서 350mm 떨어진 위치의 상부와 하부에 PZT 센서(각각 PZT 1, PZT 2)를 부착하였고, 각 PZT 센서 부착위치 옆에 strain gage를 부착(각각 strain gage 1, strain gage 2)하여 하중에 따른 실제 변형률을 측정하였다. 주어지는 하중은 자유단에서 50mm 위치에 가는 실과 바벨을 이용하여 하중을 추가하였다. 실험을 위해 주어진 하중은 9.8kN부터 49.0kN까지 9.8kN씩 증가시켰으며, 각각의 하중조건에 따른 변형률은 Table 1과 같다. 본 실험에서는 온도의 영향에 따른 불확실성을 배제하기 위하여, Table 1에서와 같이 온도를 일정하게 유지하였다.

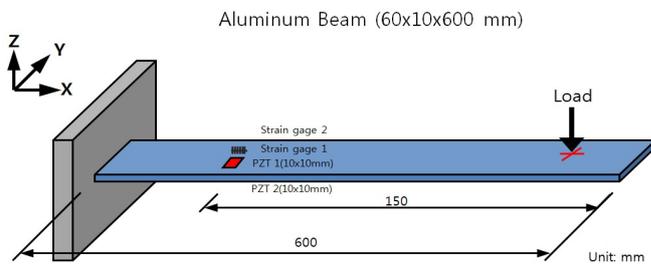


Fig. 2. Experimental Setup.

Table 1. Loading Scenarios

Load Case	Load (kN)	Strain gage 1 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Strain gage 2 ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
Case 1	0	-3.08	2.87	15.39
Case 2	9.8	46.34	-75.29	15.45
Case 3	19.6	121.55	-111.36	15.59
Case 4	29.4	163.16	-188.25	15.73
Case 5	39.2	241.43	-227.21	15.89
Case 6	49	285.92	-298.34	16.03

Fig. 3은 하중의 변화에 따라 알루미늄 외팔보로부터 측정된 임피던스의 실수부(Fig. 3(a))와 susceptance (Fig. 3(b))를 보여주며, 하중에 변화에 따라 임피던스의 특징이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 임피던스 특징의 변화를 보다 자세히 살펴보기 위하여 임피던스 실수부의 경우 임의의 피크 주파수 20.52 kHz를 선정하였다. Fig. 4(a)는 피크 주파수 20.52 kHz에서 하중 변화에 따른 임피던스 실수부의 변화를 보여준다. 그림에서와 같이 하중의 변화에 따라 주파수의 변화는 나타나지 않고, 피크의 크기만 변화하는 것을 알 수 있다. 이러한 피크의 크기 변화는 Fig. 4(b)에서와 같이 외팔보의 상/하부에 붙은 PZT 1, PZT 2 모두 비교적 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 다른 임의의 피크 주파수 62.92 kHz에 대한 크기는 Fig. 4(c)에서처럼 PZT 1, PZT 2 모두 오히려 피크의 크기가 증가하는 경향을 보였다.

Susceptance 기울기의 경우, Fig. 5(a)와 같이 먼저 susceptance 값을 선형 보간하여 그 기울기를 측정하였다. Fig. 5(b)는 하중의 변화에 따른 선형 보간한 susceptance의 기울기 변화를 보여준다. 그림에서와 같이 PZT 1에서 측정된 susceptance 기울기는 초기에는 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, PZT 2의 경우 비교적 일정하게 감소하는 경향을 보였다.

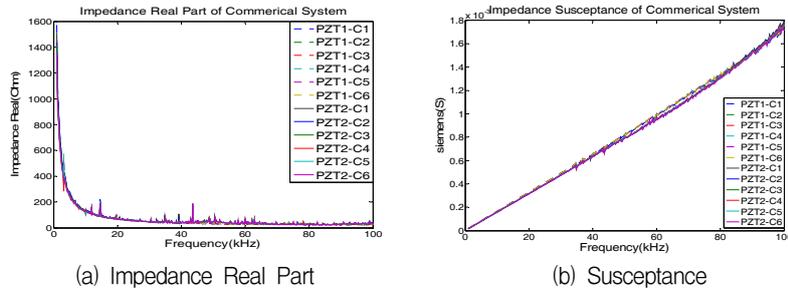


Fig. 3. Change in Impedance Features for Various Loading Conditions

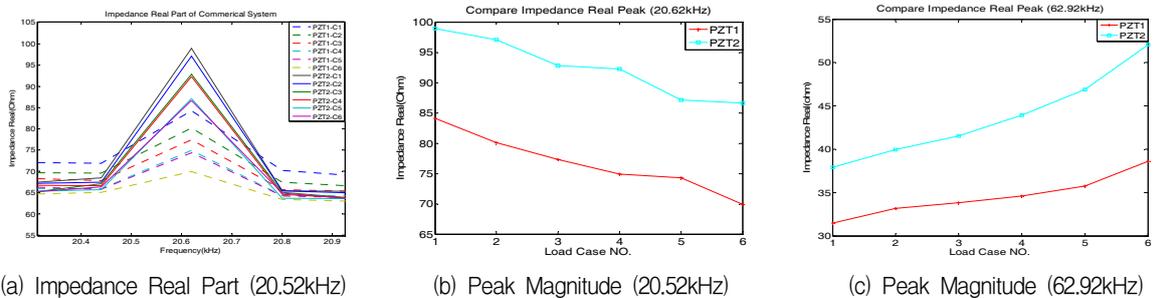


Fig. 4. Change in Peak Magnitudes of Real Impedance for Various Loading Conditions

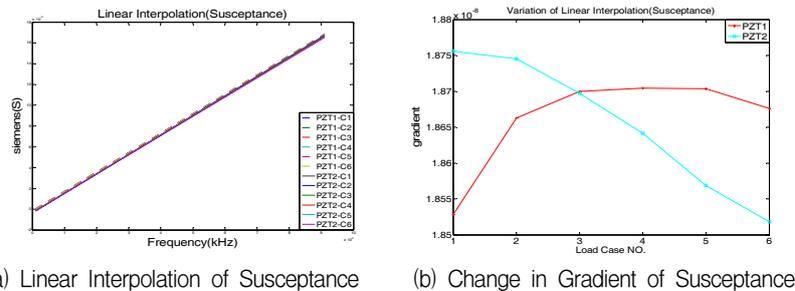


Fig 5. Change in Gradient of Susceptance for Various Loading Conditions (Experiments)

4. 보 구조물에 작용하는 하중에 따른 임피던스 특징 변화 분석 - 수치해석

보 구조물에 작용하는 하중에 따른 임피던스 특변 변화를 분석하기 위하여 COMSOL FE 유한요소해석 프로그램을 이용하여 실험과 동일한 조건에서의 임피던스 특징을 계산하였다. Fig. 6(a)는 PZT 1으로부터 계산된 susceptance를 선형보간하여 도시한 것이며, Fig. 6(b)는 선형보간한 Susceptance의 기울기 변화를 나타낸다. 수치해석 결과가 실험에 비해 susceptance의 기울기가 비교적 작으며, 하중에 따른 변화량 및 변화 패턴도 많이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

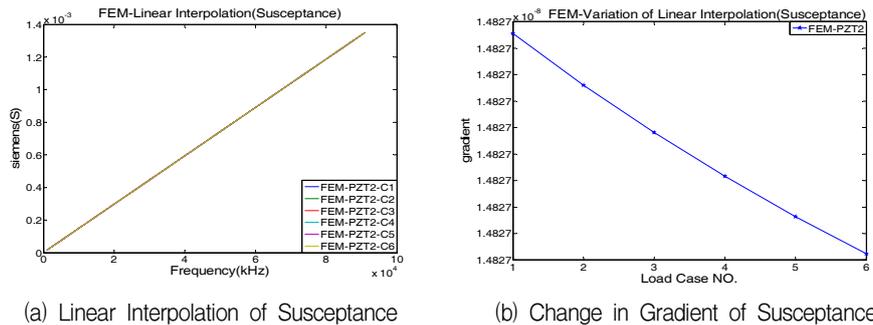


Fig. 6. Change in Gradient of Susceptance for Various Loading Conditions (FEM)

5. 결론

본 논문에서는 보 구조물의 응력 변화에 따른 구조역학적 임피던스의 특성을 분석하였다. 이를 위해 먼저, 외팔보 형식의 알루미늄 보의 상/하부에 PZT센서를 부착하고, 하중을 단계적으로 증가시키면서 하중과 PZT 임피던스 사이의 관계를 분석하였다. 또한, 수치해석을 통해 변형률과 임피던스의 관계를 분석하여, 실험결과와 비교하였다. 실험 결과, 임피던스 실수부의 피크 크기는 주파수 대역에 따라 다른 경향이 나타났다. Susceptance의 기울기의 경우에는 보의 상부에서 측정된 기울기는 증가하다가 감소하는 경향이 나타났으며, 하부에서는 지속적으로 감소하는 패턴을 나타냈다. 수치 결과에서는 실험결과와는 달리 상부에서의 susceptance 기울기가 지속적으로 감소하는 경향이 나타났으며, 실험에 비해 기울기가 작고, 하중에 따른 변화량도 작게 나타났다. 추후 이러한 오차가 발생하는 원인을 분석하여 해석모델을 개선해야 할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2010년도 부경대 기성회계 연구비 지원으로 이루어졌으며, 저자는 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

Annaldas V. G. M, Yang Y and Soh C. K (2007) "Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers ", Volume 16, Issue 5: 1888-1897, Smart Materials and Structures

Giurgiutiu, V., Rogers, C. A. (1998), "Recent Advancement in the Electro-Mechanical Impedance Method for Structural Health Monitoring and NDE", Proceedings of the SPIE's 5th International Symposium on Smart Structures and Materials, 1-5 March, pp. 536-547.

Park G, Cudney H. H, and Inman D. J. (2000), "Impedance-based health monitoring of civil structural components", Journal of Infrastructure System. Vol. 6, pp. 153-160.