

인버터 압축기의 강체 거동 해석

Dynamic Analysis of an Inverter Motor Driven Compressor

강정훈*·정정교*·김용태*·주재만*·서문희**·이성태**
J. H. Kang, J. K. Jeong, Y. T. Kim, J. M. Joo, H. Seomoon and S. T. Lee

Key Words : Compressor(압축기), Dynamic Analysis(동적 거동), Inverter Motor(인버터 모터), Weight Balancer(웨이트 밸런서) LDT(토출튜브), Grommet(그로메트), Mass Center(질량 중심)

ABSTRACT

In general, compressors for refrigerators are major noise source in home environment. The vibration originated from a pump of a compressor can make noise through suspension springs and a LDT(Line Discharge Tube). Especially for the inverter motor driven compressor, the vibration is more serious than it of the constant speed compressors. Because the operation frequency range of an inverter motor driven compressor is very wide from 1600 rpm to 4200 rpm. In this paper, we propose the numerical model to reduce vibration by designing weight balancers and grommets. Results for analytical investigations on the exciting force and moment at the pump mass center, weight balancers and exciting frequency variation are presented.

1. 서론

냉장고용 압축기는 구동 방식에 따라서 AC 압축기와 인버터 압축기, 리니어 압축기로 구분된다. 냉장고의 부하 조건 또는 사용 환경에 따라 냉동기의 능력을 가변하는 인버터 압축기는 회전속도의 가변을 통하여 냉동 능력을 조절한다. 인버터 압축기는 운전 주파수를 최소 1600 rpm 에서 최대 4200 rpm 까지 넓은 운전 범위를 사용하며, 이 대역에 흡, 토출 파이프나 방진계 등 기계 구조물의 공진이 존재하지 않도록 설계 하여야 한다.

냉장고에서 압축기 진동의 원인은 주로 펌프부에서 발생한 진동이 전달 경로를 통하여 전달되는 경우이다. 펌프부에서 발생한 진동은 서스펜션 스프링이나 토출튜브를 타고 압축기 셀로 전달되고, 이러한 진동은 토출 파이프, 흡입 파이프, 그로메트를 통하여 냉장고로 전달된다. 토출 파이프로 전달되는 진동은 보조 응축기를 울리게 하여 200~300 Hz 대역의 소음이 커지는 경우가 있고, 흡입 파이프를 통한 진동은 증발기를 가진하여 냉장고 내에 부밍 소음을 유발하기도 한다.

펌프부의 진동의 원인은 다양하지만 가장 기여도가 큰 주파수 대역은 로터의 회전 주파수와 동일한 성분이다. 이 주파수의 진동은 피스톤이 왕복 운동을 하면서 발생하는 것으로 이의 완화를 위하여 웨이트 밸런서와 서스펜션 스프링의 위치

에 대한 연구가 수행되어 왔다.¹⁾

본 논문에서는 압축기 펌프부와 셀 부의 운동을 기술할 수 있는 12 자유도계의 강체 모델을 세우고, 이를 수치적으로 해석하였다. 압축기 펌프부의 질량 중심에 가해지는 힘과 모멘트가 압축기 브라켓의 진동에 미치는 영향을 분석하였으며, 웨이트 밸런서와 가진 주파수의 변동에 따른 동특성을 기술하였다.

2. 압축기의 운동 방정식

2.1 운동 방정식의 유도

본 논문에서 수학적 모델링의 대상으로 한 압축기는 그림 1 과 같다. 그림 1 의 왕복동형 압축기는 셀과 펌프부, 그리고 두 부분을 연결하는 서스펜션 스프링과 토출 튜브, 또한 셀을 지지하는 방진 고무인 그로메트로 구성되어 있다. 그림 1 과 같은 왕복동 압축기에 대한 수학적 모델과 그 해법에 대하여는 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔다.^{2,3)} 그림 1 에서 펌프부와 셀의 무게 중심에 대하여 운동 방정식을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

식 (1)에서 M, C, K 는 각각 질량, 댐핑, 강성을 나타내는 행렬로서, 셀과 펌프부의 자유도를 고려한 12×12 크기의 행렬이다. K 는 4 개의

* 삼성전자 시스템가전사업부 요소기술그룹
E-mail : jhoon.kang@samsung.com
Tel : (031) 218-5043, Fax : (031) 218-5195

** 삼성광주전자 콤팩트개발그룹

서스펜션 스프링과 4 개의 그로메트 강성을 각 무게 중심의 좌표계에 변환한 강성행렬이며, 댐핑 행렬 C 는 강성 행렬 K 의 0.1%에 비례하도록 값을 설정하였다. 그리고, F 는 펌프부의 무게 중심에만 작용하는 행렬로, 작용하는 성분은 피스톤의 왕복운동과 로터의 회전 운동에 의하여 발생하는 각 방향의 힘과 모멘트이다.^{2,3)} 그림 2는 그림 1의 실제 모델을 수학적으로 모델링한 것이며 펌프부와 셀의 질량 중심에 각각 6 개의 자유도를 가지고 있다.

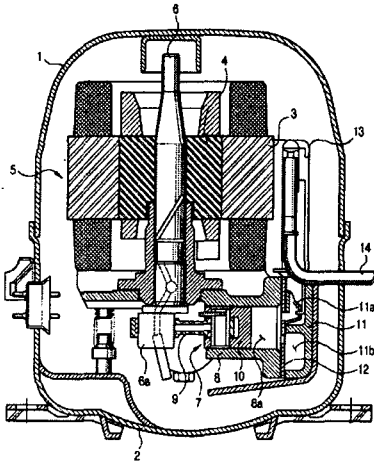


그림 1. 왕복동형 압축기 단면도

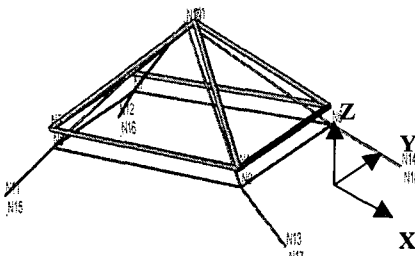


그림 2. 펌프부와 셀의 수학적 모델

식 (1)에서 질량 중심에 대하여 표현된 강성 행렬 K 를 얻기 위하여 좌표 변환 관계가 필요한데, 각 서스펜션 스프링과 그로메트에 정의되는 국부 좌표계 (x, y, z) 와 펌프부와 셀의 질량 중심에 정의되는 전역 좌표계 $(X, Y, Z, \theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 사이의 변환 행렬은 식 (2)와 같이 주어진다. 식 (2)에서 하첨자는 전역 좌표계에서 국부 좌표계의 원점

을 기술한 것이다.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & -y_i \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & x_i \\ 0 & 0 & 1 & y_i & -x_i & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)의 운동 방정식을 Central Difference Method⁴⁾ 나 Mode Superposition Method 를 사용하여 질량 중심에 대한 거동을 해석하고, 식 (2)의 좌표 관계를 이용하여 브라켓 위치나 셀 기타 부위의 변위를 계산할 수 있다.

2.2 물성치 추출

수학적 모델의 정확도 향상을 위하여 가장 많이 주의 하여야 할 부분이 물성치 추출이다. 질량과 각 연결점 부분은 CAD 모델에서 추출하였으며, 서스펜션 스프링과 그로메트 강성 부분은 각 단품의 고유 진동수 실험에 의거하여 역으로 강성을 추출하였고, 수평 방향의 강성은 수직 방향의 1/3 로 가정하였다. LDT의 강성은 서스펜션 스프링의 강성에 비하여 상당히 작은 값을 가지므로³⁾ 본 모델에서는 이를 무시하였다.

3. 해석 결과

3.1 가진력의 해석

압축기 셀 진동을 감소시키기 위해서는 펌프부에 가해지는 가진력을 감소시키는 방법이 가장 효과적이다. 하지만, 냉장고용 왕복동 압축기처럼 1 개의 피스톤이 왕복 운동하는 경우에는 피스톤의 질량 감소나 웨이트 밸런서를 사용하여 그 가진력을 최소화 시킬 수 있다. 본 모델에서 구한 가진력은 그림 3,4 와 같다.

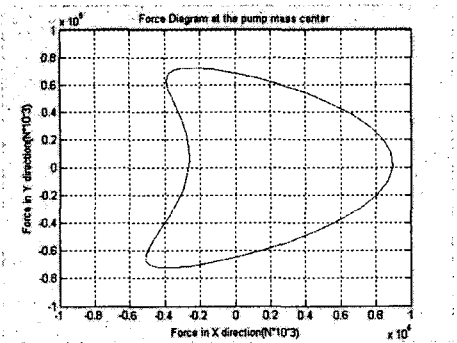


그림 3. 펌프부 질량 중심에 가해지는 힘

그림 3 에서 x 축은 피스톤이 움직이는 방향의 힘이며, y 축은 그에 대한 직각 방향의 힘을 나타낸다. 그림 4 는 마찬가지로 각 방향별 모멘트를 나타낸다.

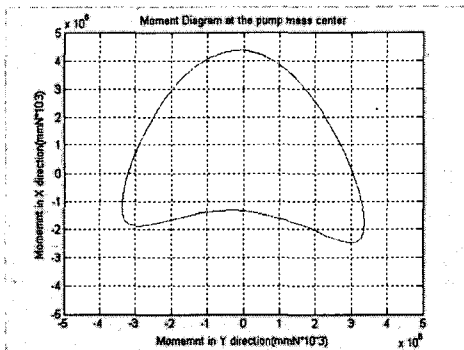


그림 4. 펌프부 질량 중심에 가해지는 모멘트

브라켓에서 펌프부 질량 중심에 가해지는 힘과 모멘트의 영향도를 알아보기 위하여, 각각을 펌프부의 무게 중심에 작용하여 브라켓에서 영향도를 보면 그림 5 와 같다. 그림 5 는 안정 상태에서 시간에 따른 브라켓 위치에서 상하 방향의 진동을 표현한 것인데, 펌프부의 질량 중심에 가해지는 모멘트가 힘에 비하여 그 영향이 더 클 수 있다. 수치 해석 결과를 통하여 압축기의 진후, 좌우 방향에 대하여도 같은 경향의 결과를 얻었다. 그림 5 에서 알 수 있는 바와 같이 브라켓 위치에서 진동을 감소시키기 위해서는 펌프부의 질량 중심에 가해지는 모멘트의 영향을 최소화 시키는 것이 브라켓 부위의 진동을 감소시키는 방안을 알 수 있다.

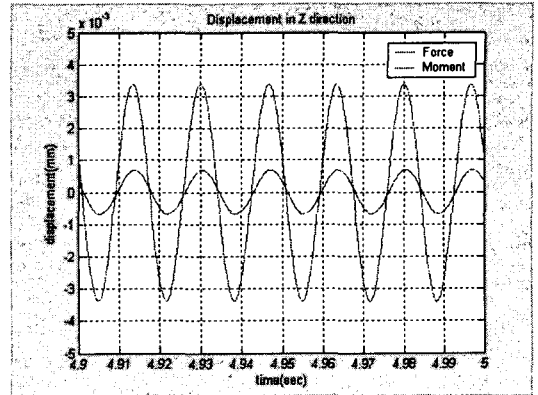


그림 5. 브라켓 위치에서 상하 방향의 변위

3.2 웨이트 밸런서의 영향

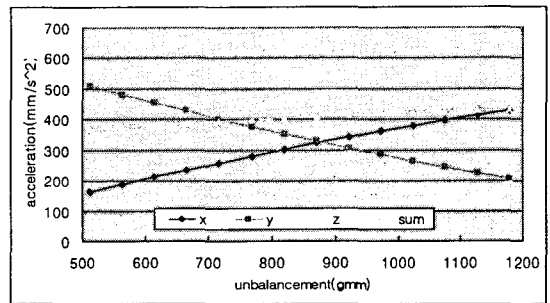


그림 6. 편심량에 따른 브라켓 위치에서의 가속도

그림 6 은 피스톤에 가까운 쪽의 웨이트 밸런서의 편심량을 변경하면서 브라켓 위치에서의 가속도를 계산한 결과이다. 본 연구에서는 X,Y 방향의 가속도의 크기가 같은 불평형량을 선정하였으며 그림 6 에서 보는 바와 같이 그 때의 가속도 벡터 합이 가장 작음을 알 수 있다.

3.3 가진 주파수의 영향

그림 6 에서 결정된 불평형량을 기준으로 가진 주파수를 변경하면서 브라켓 위치에서의 진동을 계산하여 그림 7 에 도시하였다.

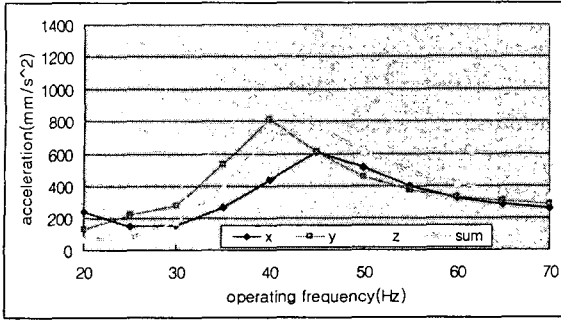


그림 7. 가진 주파수 변동시 브라켓 위치에서의 가속도

그림 7 에서 40, 45Hz 부근의 응답이 과도하게 올라가는 이유는 그 주파수 근처에 그로메트와 압축기 셸과의 공진 모드가 존재하기 때문이다. 본 시스템에서는 39 Hz 와 45 Hz 에 공진 모드가 존재하는데 이는 피스톤 운동에 대한 직각 방향의 회전모드와 피스톤 운동 방향의 회전모드로 압축기 전체의 운동에 영향을 크게 주는 모드이다. 인버터 압축기 적용시 공진을 회피하기 위하여 일반적으로 시스템의 공진 모드를 가진 주파수 이하 영역에 위치하도록 방진 고무 등을 설계 하여야 한다.

4. 결 론

본 논문에서는 냉장고에 사용되는 인버터 압축기의 강제 거동 해석을 위하여, 펌프부와 셸을 고려한 12 자유도계의 수학적 모델을 수립하였고 이를 수치적으로 해석하였다. 펌프부의 질량 중심에 가해지는 가진력 성분 중에서 모멘트가 힘보다 브라켓 위치에서의 진동에 그 기여도가 더 큼을 보였다. 본 수치해석을 통하여 웨이트 밸런서 선정하는 방법과 인버터 압축기와 같이 가진 주파수가 변동되는 경우 압축기의 거동이 그로메트와 관련된 강제 모드 성분의 제어가 중요함을 보였다.

참고문헌

- (1) Kjeldsen, K. and Madsen, P., 1978, "Reduction of Compressor Vibrations by Optimizing the Location of the Counterweight and the Internal Springs," Proceedings of International Compressor Engineering Conference, Vol 1, pp. 55-59.
- (2) Dufour R., Hagopian J. Der and Lalanne M., 1995, "Transient and Steady State Dynamic Behavior of Single Cylinder Compressors: Prediction and Experiments," Journal of Sound and Vibration, Vol 181, No 1, pp. 23-41.
- (3) 김태종, 2001, "가변속 왕복동형 압축기 본체의 동적 거동 해석", 한국소음진동공학회 논문집 제 11 권, 8 호, pp. 374-383.
- (4) Craig, R. R., Jr., 1981, Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Inc., New York.