

냉장고 진동 저감을 위한 그로멧의 유한요소모델링 Finite Element Modeling for rubber grommet to reduce vibration refrigerator

국정환*·Tran Ho Vinh Thuy*· 김정선*· 왕세명†· 이동현**

Junghwan Kook, Tran Ho Vinh Thuy, Jungseon Kim, Semyung Wang and Donghyun Lee

Key Words : FEM (유한요소 법), Rubber Grommet(고무 그로멧), Compressor(압축기), Refrigerator (냉장고), Modal Analysis(모드해석), spring element(스프링 요소)

ABSTRACT

In this study, vibration analysis of a refrigerator was carried out to reduce vibration by considering grommet. When the refrigerator machine room is modeled by finite element method, spring elements are added to constructions of the FE model for each component and update. To design the grommet of refrigerator, FE model must have vibration characteristics of each components such as baseplate, pipe and compressor it self. The modal analyses are conducted to validate suggested approach when the components of machine room are assembled together. And, in this study, optimal design of grommet is conducted to avoid the resonance at the operating frequency of refrigerator. The experimental and FEM result of suggested design showed good agreement and are presented here.

1. 서론

가전 제품의 소음, 진동의 발생은 주거환경의 쾌적함에 크게 저해되는 요인 중 하나이다. 냉장고는 실내에 위치하고 있고 항상 켜져 있기 때문에 가정에서 사용되는 다른 어떤 전자 제품보다 소음과 진동에 민감한 제품이다. 냉장고의 진동발생원으로는 Fig 1 과 같이 크게 송풍기 등에 의한 유체소음과 압축기 자체의 소음 및 그 구동에 의해 발생하는 기계적인 진동에 의한 소음으로 나누어진다.

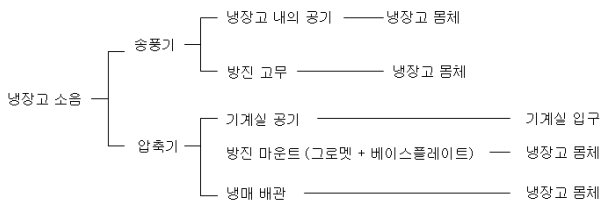


Fig 1 Noise and vibration path of Refrigerator

이 중 압축기 진동은 방진고무(이하 그로멧)를 거쳐 베이스 플레이트로 전달되며, 이 진동은 냉장고 몸체로 전달되어 진동음을 발생한다. 따라서

† 광주과학기술원 기전공학과 교수
E-mail : smwang@gist.ac.kr TEL : 82-62-970-2390,
FAX : 82-62-970-2384

* 광주과학기술원
** 삼성전자(주) 냉기개발팀

압축기의 진동전달을 1 차적으로 막을 수 있는 그로멧의 설계는 진동음 저감에 있어서 필수적인 것이다. 압축기 구동에 의해 발생하는 기계적 진동에 관한 연구는 최근의 국내 기업과 대학에서 그로멧과 베이스플레이트를 상대로 수행되어왔다. 그러나 이 연구 결과들은 2 자유도 진동시스템을 이용한 개략적인 경향과 부품들의 유한요소해석결과로서 진동특성만 확인하는데 그침으로서 그로멧과 같이 설계변경이 쉬운 부품의 변경에 따른 냉장고 기계실 시스템 전체의 고유진동수 변화와 공진여부와 같은 현상들을 파악하기는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 냉장고 압축기_파이프_그로멧_베이스플레이트의 모달실험과 유한요소해석을(FEM) 통해 냉장고의 시스템적 진동해석을 수행하였고, 이를 이용하여 시스템전체를 유한요소해석 시 발생하는 모델링과 계산시간의 문제를 해결하고 냉장고 압축기용 그로멧의 실제 설계에 적용할 수 있는 접근법을 제안하고자 한다.

2. 냉장고 기계실의 모달실험과 FE 모델

2.1 압축기+그로멧 시스템의 모달실험과 FE 모델

Fig 2 는 냉장고의 기계실 내부를 보여주고 있다. 냉매압축을 위하여 압축기가 있으며 그로멧을 통하여 베이스플레이트에 올려져 있고 이 베이스플레이트는 냉장고의 옆면과 연결 되어있다. 시스

템의 모드해석을 위해 압축기와 그로멧의 Impact 가진을 이용한 실험적 모드해석을 수행하였다. 압축기 내부의 모터와 압축장치, 스프링, 압축기 셸, 그로멧을 Fig 3 과 같이 2 자유도 질량-스프링 시스템으로 간주할 수 있다.

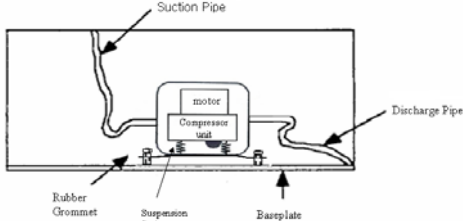


Fig 2 Refrigerator compressor room

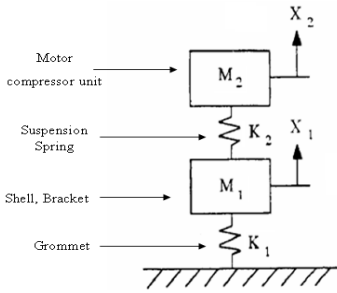


Fig 3 2-dof model of compressor unit and grommet

$$m_1 m_2 \lambda^2 - (k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2) \lambda + k_1 k_2 = 0 \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \frac{(k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2) + \sqrt{(k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2)^2 - 4 m_1 m_2 k_1 k_2}}{2 m_1 m_2}$$

$$\approx \frac{(k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2)}{m_1 m_2} \quad (2)$$

$$> \frac{k_1 + k_2}{m_1} > \frac{k_1}{m_1} \quad \text{where } k_1 > k_2$$

$$\lambda_2 = \frac{(k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2) - \sqrt{(k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2)^2 - 4 m_1 m_2 k_1 k_2}}{2 m_1 m_2}$$

$$\approx \frac{(k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2) - (k_2 m_1 + (k_1 + k_2) m_2)}{2 m_1 m_2}$$

$$= 0$$

식 (2)의 λ_1 에서 그로멧의 강성(k_1)이 서스펜션 스프링의 강성(k_2)보다 상당히 크므로 λ_1 은 k_1 과 m_1 로 표현된 시스템보다 높은 주파수를 가지게 된다. λ_2 의 경우 압축기의 운전 주파수 범위와 차이가 있으므로 무시할 수 있다. 실제 압축기와 그로멧의 질량과 강성을 고려하여 식(2)를 풀어보면 $\lambda_1=49.2\text{Hz}$, $\lambda_2=2.98\text{Hz}$ 가 계산되었

고, 모달실험에서는 $\lambda_1=43\text{Hz}$ 가 λ_2 는 보이지 않았다.

그로멧의 설계가 관심대상이므로 2 자유도 압축기-그로멧 모델의 주파수 λ_1 이 k_1 과 m_1 로 표현된 시스템보다 높은 주파수를 가지게 되려면, Fig 4 (b)와 같이 그로멧과 셸+브라켓의 질량에 스프링을 하나 추가하는 것과 같은 시스템으로 간주할 수 있다. Fig 5 는 단순화된 압축기 그로멧의 유한요소모델을 보여주고 있다. 그로멧의 경우 Hyperelastic material 을 고려 해야 하지만 압축기와 같은 비교적 작은 무게를 견디는 고무 그로멧의 경우 고무 그로멧이 대변형을 일으키지 않으므로 선형화된 물성치를 사용하였다. Table 1 은 실험과 FEM 결과를 보여주고 있다. 대부분의 모드에서 실험과 해석결과 전반적으로 서로 일치됨을 알 수 있다.

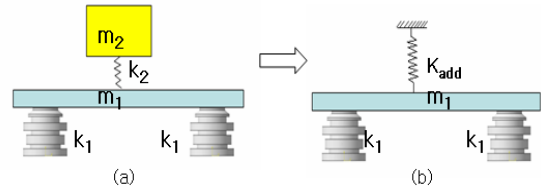


Fig 4 simplified compressor and grommet model

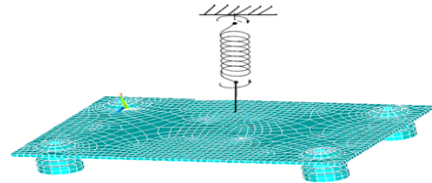


Fig 5 Compressor+grommet FEM model

Table 1. Modal analysis results comparison 1 (FEM model of simplified compressor and grommet model after adding spring)

Mode	Exp (Hz)	FEM result (Hz) (adding spring)	Error(%)
1	18	17.48	3
2	25	25.8	-3.2
3	32	31.99	0.03
4	60	60.9	-1.5
5	74	72.37	2.2

2.2 압축기+볼트+그로멧 시스템의 모달실험과 FE 모델

압축기와 그로멧을 베이스플레이트에 지지하기 위해 볼트를 사용하고 있고 볼트는 그로멧과 접촉하고 있다. 접촉문제는 FEM 상에서 접촉요소를 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 FEM 에서의 접

축이 있는 모달해석의 제약과 실제모델과 FE 모델의 업데이트를 고려할 때 접촉요소를 사용하는 것은 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 Fig 6 과 같이 그로멧과 볼트의 접촉면에 스프링요소를 사용하였다.

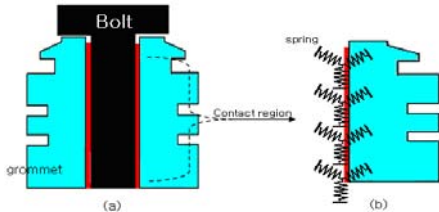


Fig 6 (a) contact region between bolt and grommet (b) contact region with spring element

볼트와 그로멧의 접촉부위의 스프링상수를 업데이트하면서 모달실험과 FE 모델의 등가를 이루었다. Table 2 는 방진판 위에 결합된 압축기+볼트+그로멧의 모달실험과 FEM 결과를 보여주고 있다. 대부분의 모드에서 실험과 해석결과가 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 2. Modal analysis results comparison 2 (FEmodel of simplified Compressor, Bolting and grommet model with spring element on the contact region)

Mode	Exp(Hz)	FEM result (Hz) (bolt, spring element)	Error(%)
1	19	18.5	2.63
2	29	27.92	3.72
3	33	32.6	1.20
4	60	61.23	-2.05
5	74	72.7	1.76

2.3 압축기+볼트+파이프+베이스플레이트+그로멧 시스템의 모달실험과 FE 모델

앞 절에서 방진 판 위의 압축기+볼트+그로멧 시스템의 모달실험과 FE 모델에 대해서 언급하였다. 하지만 실제 압축기는 Fig 7 과 같이 유연한 베이스플레이트 위에 장착되어 있고, 동시에 냉매의 유통경로인 파이프와 함께 연결되어 있다.

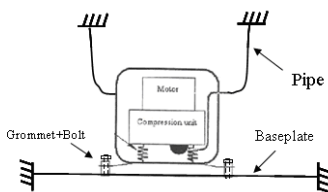


Fig 7 schematic figure of refrigerator compressor room

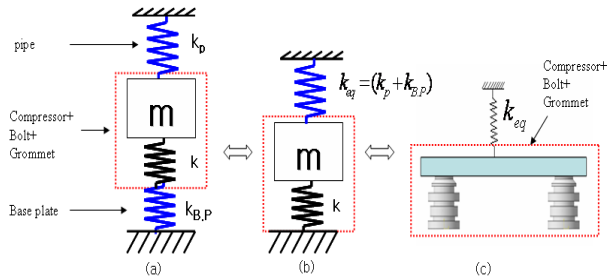


Fig 8 (a) 1-dof spring-mass system with pipe, baseplate, bolt and grommet (b) Equivalent spring-mass system of Refrigerator compressor room (c) simplified compressor refrigerator room model

압축기+볼트+그로멧 시스템에 파이프와 베이스플레이트가 연결된 시스템의 경우 Fig 8 (a)와 같이 1 자유도 스프링-질량시스템으로 모델링할 수 있다. 스프링시스템의 특성을 고려하여 $k_{B,P}$ 와 k_p 의 등가 스프링상수 k_{eq} 를 사용하면 Fig 8 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 위와 같은 시스템은 압축기+볼트+그로멧 시스템에 k_{eq} 만큼의 강성이 더해진 시스템으로 모델링할 수 있다. 앞 절에서 다루었던 압축기+볼트+그로멧의 시스템에 파이프와 베이스플레이트의 강성만큼의 스프링상수를 업데이트하여 그로멧 설계를 위한 냉장고 기계실의 FE 모델을 만들었다. Table 3 은 실제 냉장고 기계실 내에 장착되어 있는 압축기의 모달실험과 FEM 결과를 보여주고 있다. 대부분의 모드에서 실험과 해석결과 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

Table 3. Modal analysis results comparison 3 (FEmodel of simplified Refrigerator compressor room)

Mode	Exp (Hz)	FEM result (Hz) (refrigerator room)	Error(%)
1	19	18.5	2.63
2	26	27.69	6.50
3	44	43.9	0.28
4	61	61.33	-0.54
5	73	72.8	0.27

3. 그로멧 최적설계에 적용

3.1 냉장고 운전 주파수와의 공진회피를 위한 그로멧 설계

냉장고 기계실 전체의 진동특성이 고려 된 FE 모델을 실제 설계에 적용하여 실용성을 검증하였다. 냉장고 운전 주파수 중 하나인 60Hz 성분은

Table 3 에서 보여지는 것과 같이 4 차 모드와 공진을 일으킬 수 있다. 냉장고의 운전 주파수와 공진을 피하기 위해 그로멧의 형상제어를 통해 공진을 회피하는 설계를 제안하였다. Fig 9 는 그로멧의 형상 변화가 가능한 9 개의 위치를 설계변수로 선택한 것을 보여주고 있다. 4 차 모드의 공진회피를 위해 9 개의 디자인변수에 대해 FDM 을 이용한 설계 민감도 해석을 수행하였다.

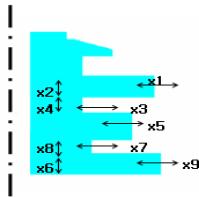


Fig 9 Design Variables for Grommet design

		Design variables								
mode	Initial model	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9
1	17.510	-0.370	-1.240	0.260	0.220	0.330	0.050	0.630	-0.230	1.140
2	25.692	-0.410	-0.770	0.140	0.020	0.070	0.020	0.250	-0.350	0.930
3	43.908	-1.180	-1.680	0.770	0.160	0.200	0.170	1.950	-0.050	0.730
4	61.334	-1.390	-1.970	0.900	0.180	0.230	0.190	2.240	-0.060	0.920
5	72.807	-1.460	-2.060	0.960	0.200	0.240	0.200	2.410	-0.060	0.890

Table 4 Design Sensitivity Analysis result

Table 4 는 4 차 모드에서 공진을 피하기 위한 각각의 설계 변수에 대한 민감도 값을 해석한 결과값이다. X3 과 X7 이 민감도 값이 높다는 것을 알 수 있다. X3 를 설계 변수로 선택하여 X3 의 길이를 변경하여 공진회피를 위한 디자인을 제안하였다. Table 5 는 설계변수 X3 의 길이를 변경하였을 때 그로멧을 포함한 냉장고 기계실의 진동 특성이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다.

mode	x3+1	x3+1.3	x3+1.5	x3+2
1	18.439	18.892	18.738	19.179
2	26.327	26.671	26.566	26.875
3	45.71	46.16	46.575	47.016
4	63.459	64.483	63.994	65.018
5	75.048	76.127	75.611	76.682

Table 5 Frequency change as change X3

X3 를 1.3mm 증가시킨 형상을 실제로 제작하여 모달실험을 실시하였다. Table 6 에 보여지는 것과 같이 4 차 모드의 경우 해석과 시험 값의 차이가 3%정도의 오차를 가지며, 1,2 차 모드 오차가 크게 나타나고 있지만 실제 해석과 실험의 차이는 크게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 실험결과와 같이 4 차 모드에서의 공진은 발생하지 않음을 알 수 있다.

mode	① FEM (X3 increased)	② Exp (real model)	Deviation (①-②)	Error(%)
1	18.92Hz	21Hz	-2Hz	9.5%
2	26.67Hz	32Hz	-5Hz	15%
3	46.16Hz	49Hz	-3Hz	6%
4	64.48 Hz	66Hz	-3Hz	3%
5	76.12Hz	.	.	.

Table 6 Comparison suggested design with test

4. 고찰 및 결론

냉장고 압축기_파이프_그로멧_베이스플레이트의 모달실험과 유한요소해석을 이용하여 냉장고의 시스템적 진동해석을 수행함으로써 시스템전체를 유한 요소 해석 시 발생하는 계산 시간의 문제와 어려움을 해결하고 냉장고 압축기용 그로멧의 실제 설계에 적용할 수 있는 접근법을 제안하였다. 본 연구를 통하여 제안된 FE 모델이 냉장고 압축기용 그로멧의 샘플 제작 이전에 진동특성을 만족하는 그로멧의 구조를 도출하는데 유용하게 활용될 수 있음을 보여주었다.

후 기

본 연구는 삼성전자의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 아낌없는 지원을 해주신 연구원 분들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- (1) 오재웅, 1991, "냉장고의 소음진동 제어", 한국소음진동공학회지, 제 1 권, 제 2 호, pp.95~101
- (2) 김석관 등, 1993, "부분구조합성법을 이용한 냉장고의 진동해석", 한국소음진동공학회지 제 3 권 제 3 호,, pp. 253~257.
- (3) 김태훈, 2006, "와인냉장고 소음 진동 저감을 위한 설계기술", 한국소음진동공학회 춘계 학술 대회
- (4) Ansys v9.0 User Manual
- (5) Klaus-Jurgen Bathe.,1996, Finite Element Procedures, Prentice-Hall Inc.