

로터리 콤프레셔의 소음 진동 연구

⁰박 종찬*, 왕 세명**

SOUND AND VIBRATION STUDY OF ROTARY COMPRESSOR

⁰J. Park*, S. Wang**

ABSTRACT

Noise reduction has become a major issue of the manufacturing industry. This paper describes the reduction of noise and vibration of rotary compressors. Empirical design for the present strap of the accumulator has been considered to be sufficient for the constraint of the accumulator resonance modes without thorough study. Recently, however, some researchers found out that the accumulator contributes considerably to the sound propagation.

In this paper, the contribution of accumulator to the noise propagation is investigated through sound measuring experiments by checking the directivity of the noise. And, experimental modal analysis results show that frequencies of some resonance modes of the accumulator coincide with the highest peaks on sound spectrum. To demonstrate the reason for those resonance modes, a finite element analysis is conducted. Normal mode analysis of the finite element model of the rotary compressor shows the mechanism of the accumulator resonance modes.

1. 서론

콤프레셔는 냉매를 고압으로 압축하는 격심한 압축과정을 수행하기 때문에 냉장고나 에어컨 등의 냉방기기의 주요한 소음 원이 된다. 더욱이, 콤프레셔는 압력맥동, 기지공명 그리고 구조물의 진동 등의 다양한 소음 원을 가지고 있다 [1]. 따라서 수많은 연구자들이 여러 가지 방법으로 콤프레셔의 소음 진동 저감에 대한 연구를 해왔다. 그러나 소음 원의 종류에 관계없이 소음전파 즉, 유체의 압력맥동은 다음과 같이 나타내어진다[2].

$$\nabla^2 p = \frac{\rho_0}{B} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서 ρ_0 는 유체의 밀도 그리고 B 는 유체의 단열 체적 팽창계수다.

식 (1) 은 유체의 압력맥동, $p(\vec{x}, t)$ 의 선형화된 제차 음파 파동 방정식으로 소음 전파의 매체가 되는 유체의 물성치와 압력맥동과의 관계를 나타낸다.

식 (1)을 만족하는 매질 내에서 속도 포텐셜, ϕ 와 유체의 속력, u 의 관계로부터 유체 속력과 유체의 압력맥동은 다음과 같이 유도 되어진다.

* 광주과학기술원 기전공학과 박사과정

**정회원, 광주과학기술원 기전공학과 교수

$$u = \nabla \phi = - \int \frac{1}{\rho_0} \bar{\nabla} p dt \quad (2)$$

식 (2)는 유체의 압력맥동이 진동하는 구조물에 의해서 야기된 유체의 속력에 비례한다는 것을 보여주고 있고, 결론적으로 구조물의 진동을 저감함으로써 소음을 저감할 수 있음을 보여준다. 위와 같은 이론적인 배경으로부터, 본 연구는 로터리 콤프레서의 진동 소음 저감에 대한 연구를 수행하였다.

Figure 1은 로터리 콤프레서를 보여주고 있다. Figure 1에서 어큐뮬레이터는 하단의 스탠드 파이프와 상부의 스트랩으로 콤프레서 본체에 고정되어 있다. 하단의 스탠드 파이프는 저압냉매가 압축실로 흘러 들어가는 통로가 되고, 상부의 스트랩은 어큐뮬레이터를 고정함으로써 어큐뮬레이터의 진동을 억제한다.

몇몇 연구자들은 콤프레서의 진동운동을 셸의 bending모드와 셸 자체의 bending이 없는 강체 운동으로 분류하였다[3]. 과거의 연구들은 그러한 분류에서 강체모드는 소음방사에 대해서 기여도가 작은 것으로 간주 해왔다. 그러나 소음방사의 방향성 측정을 통한 최근의 연구들에서 특정 주파수에서 어큐뮬레이터는 주요한 소음 원이 되는 것을 보여주었다[4].

본 연구에서는, 콤프레서로부터 방사되는 소음의 방향성을 측정하여 위의 연구결과 들을 확인하였다. Figure 2는 콤프레서 주위의 8점에서 측정한 소음 값을 나타낸 것이다. Figure 2에서 7번째 측정 점의 값들은 어큐뮬레이터 방향에서 측정된 소음 값을 1/3octave band로 나타낸 것들인데, 800Hz와 1600Hz의 중심주파수에 해당하는 값들이 어큐뮬레이터 방향에서 상대적으로 큰 것을 보여주고 있다.



Figure 1. Compressor assembly

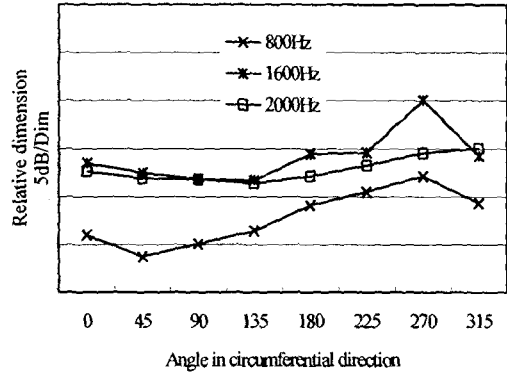


Figure 2. Sound levels around the compressor

Figure 3은 콤프레서에서 방사되는 소음의 주파수 분석결과를 나타내는데, 소음이 가장 격심한 주파수 대역은 600Hz부터 2kHz 대역이다. 따라서 위의 주파수 대역이 본 연구의 목적 주파수 영역으로 설정 되었고, 2kHz 미만에서 발생하는 구조 공진모드를 억제함으로써 소음레벨을 줄이기 위한 연구가 수행되었다.

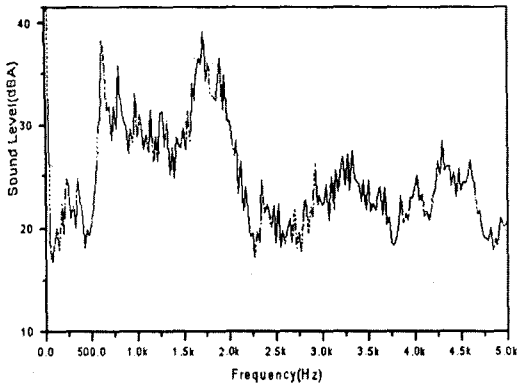


Figure 3. FRF of sound pressure level of the compressor

2. 구조 모달 실험

컴프레셔와 컴프레셔를 구성하는 모든 내부 부품들에 대해서 고유주파수 분석을 위하여 구조 모달 실험이 수행되었다.

수행된 모달 실험으로부터 어큐뮬레이터 셸 자체의 bending 모드는 3.3kHz에서부터 나타나는 것으로 밝혀졌다. 3.3kHz는 본 연구의 소음 진동 저감 목적 주파수인 600Hz~2kHz보다 높은 영역이 된다. 또한, 어큐뮬레이터 셸의 bending 모드에 대한 고유주파수 분석 결과는 2kHz보다 낮은 영역에서 발생하는 어큐뮬레이터 방향의 높은 소음 레벨이 셸의 공진 모드에 의한 것이 아니라 강제 모드에 의한 것임을 보여준다.

조립된 컴프레셔 완성품에 대해서 현재 스트랩의 효과를 검증하기 위해서 스트랩을 조립한 것과 스트랩을 조립하지 않은 두가지 경우에 대해서 각각 모달 실험이 수행되었다. 이들 실험에서 2kHz미만의 모드들은 모두 어큐뮬레이터의 강제 모드에 의한 것이었다. 모달 실험결과는 유한 요소해석 편에서 유한요소 해석 결과와 비교되어 있다. 스트랩을 설치하지 않은 실험의 결과 중, 908Hz와 1744Hz의 공진 모드가 Figure 4에 주어졌다. Figure 4에 나와 있는 두 가지 공진모드는

현재 스트랩의 위치를 회전 중심으로 하단부가 진동하는 모드인데 어큐뮬레이터의 공진모드를 억제하기 위한 스트랩을 회전 축으로 공진한다는 것은 실제 스트랩을 설치하더라도 제시된 두 공진모드는 억제 되지 않을 것이다. 실제로 위의 두 모드는 스트랩이 설치된 모델에 대해서도 주파수의 큰 변화 없이 그대로 나타난다. 또한 위의 두 모드는 Figure 1에서 소음 레벨이 높은 주파수 영역에 위치하고 있다.

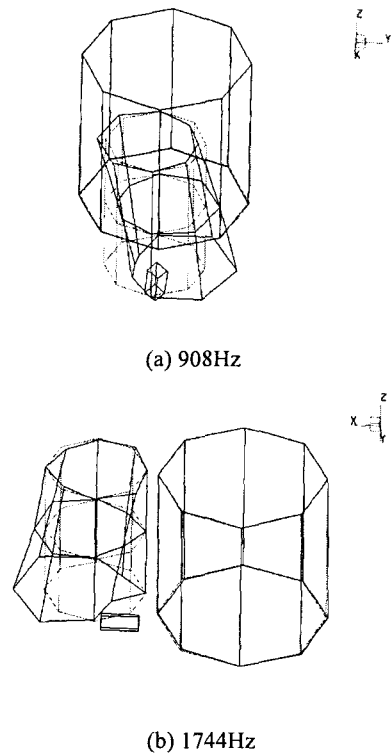


Figure 4. Mode shapes of the rigid body motion of the accumulator in modal test

3. 유한요소 해석

유한 요소 해석을 위해서 컴프레셔 내부의 축, 고정자, 회전자 그리고 베어링 등의 내부 부품품

들을 포함하는 유한요소모델이 만들어졌다.

Table 1 과 Table 2 는 각각 스트랩을 설치하지 않은 모델과 스트랩을 설치한 완성모델에 대한 모달 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교하고 있다. Table 1 과 Table 2 에 주어진 고유진동수를 비교해보면 스트랩의 설치로 저주파에서 나타나는 첫 번째 어큐물레이터의 강체 진동 모드는 42Hz 에서 231Hz로 옮겨진 것을 볼 수 있으나, Table 1 과 Table 2 에서 검게 나타내어진 공진주파수, 즉, 스트랩을 축으로 진동하는 모드는 스트랩의 설치로 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있다.

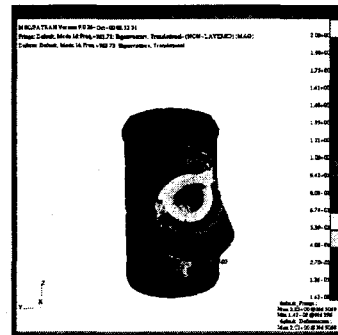
Figure 5 는 스트랩을 설치한 완성품의 모달 해석과 중, 963Hz 와 1742Hz 의 진동모드를 보여 주고 있다.

Table 1. Modal analysis comparison for the strap uninstalled model.

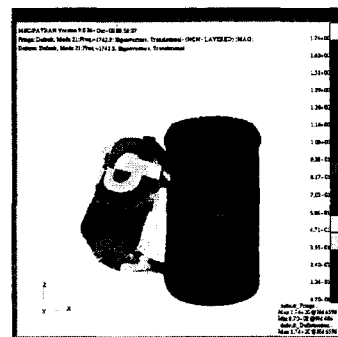
Strap uninstalled assembly			
Mode number	Test (Hz)	FE analysis (Hz)	Error (%)
1 st	42	43	2
2 nd	52	53	2
3 rd	379	361	5
4 th	390	397	2
5 th	426	406	7
6 th	472	471	1
7 th	528	484	8
8 th	908	933	2
9 th	1548	1553	1
10 th	1744	1702	2

Table 2. Modal analysis comparison for the strap installed model

Strap installed assembly			
Mode number	Test (Hz)	FE Analysis (Hz)	Error (%)
1 st	231	234	1
2 nd	390	375	4
3 rd	504	448	11
4 th	526	483	8
5 th	945	963	2
6 th	1428	1382	3
7 th	1558	1673	7
8 th	1746	1742	1



(a) 963 Hz

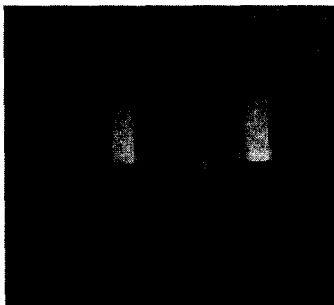


(b) 1742 Hz

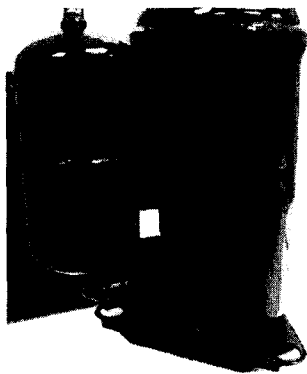
Figure 5. Mode shapes of the rigid body motion of the accumulator in FE analysis

Figure 4와 Figure 5에 나와 있는 공진모드의 모드형상과 주파수를 고려해보면, 스트랩의 설치가 이들 두 모드를 전혀 억제하지 못하고 있다는 것을 알 수 있다. 더욱이 이들 두 공진모드는 소음 주파수 분석에서 음압 레벨이 가장 높은 영역에 위치하고 있다. 본 연구와 함께 진행된 연구 [5]에서는 963Hz 와 1742Hz에서 발생하는 어큐플레이터 강제 운동모드를 억제하기 위해 어큐플레이터를 콤프레셔 본체에 고정시키는 최적 설계를 수행하였다.

Figure 6의 (a)는 최적 설계결과를 따라 제작한 블록 구조물이고 (b)는 블록구조물이 조립된 콤프레셔 이다.



(a) Block



(b) Block inserted model

Figure 6. Block and Block inserted compressor assembly

4. 실험을 통한 검증

최적 설계를 통해서 구해진 블록구조물의 효과를 검증하기 위해서 모달 실험과 소음실험이 수행되었다.

Figure 7은 원래 모델과 블록을 설치한 모델에 대한 모달 실험결과로서, 블록의 설치로 저주파 영역에서 공진주파수의 크기가 증가한 것을 보여주지만, 목적 했던 900Hz 와 1700Hz 대역의 공진 주파수가 사라진 것을 볼 수 있다.

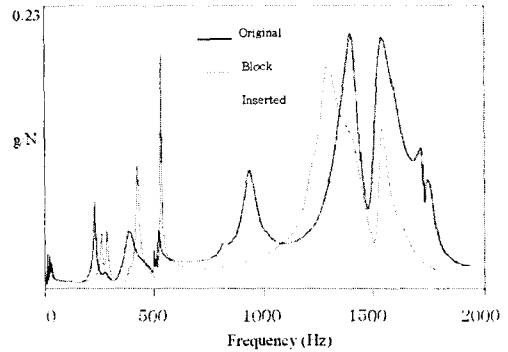
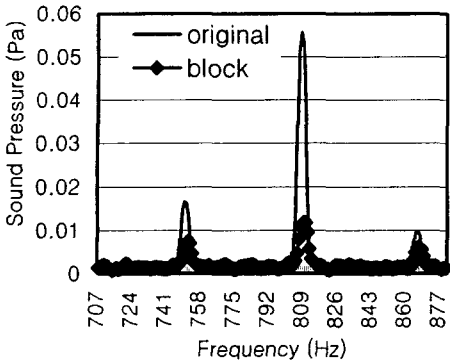
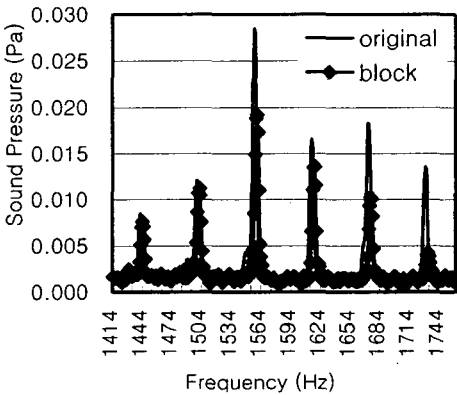


Figure 7. Comparison of the FRF of the modal test for original and block inserted model

Figure 8은 어큐플레이터 쪽에서 측정한 음압 값으로써 800Hz 와 1600Hz 를 중심으로 하는 1/3octave band에서의 값이다. 두 그림에서 음압 레벨이 블록의 설치로 감소한 것을 확인할 수 있다.



(a) 800Hz center frequency in 1/3octave band



(b) 1600Hz center frequency in 1/3octave band

Figure 8. Pressure comparisons according to the block installation

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 설계변경을 통한 로터리 콤프레셔의 소음 진동 저감에 대한 연구가 수행되었다. 소음 실험을 통하여 소음방사에서 소음이 높은 목적 주파수 영역이 설정되었으며, 어큐물레이터를 중요한 소음 원 인이 확인 되었다. 또한, 모달 실험을 통해서 소음 레벨이 높은 영역의 특정

모드가 소음 주파수분석결과에서 음압 레벨이 높은 주파수와 일치하는 것을 확인하였다.

내부 부품을 고려한 로터리 콤프레셔 완성품의 유한 요소모델이 만들어 졌고, 구조해석과 최적 설계에 이용되었다

위상 최적설계결과를 이용하여 어큐물레이터를 고정 시키기 위한 블록 구조물이 제안되었다. 제안된 모델에 대해서 구조 모달 실험과 소음실험은 목적했던 주파수 영역에서 진동 소음 저감 효과를 보여 주었다.

후기

본 연구는 캐리어주식회사와 고품질 전기전자 부품 및 시스템연구센터의 지원을 받았다.

REFERENCES

- [1] C. N. Johnson, „Noise Study of Practical Horsepower, Rotary vane, Refrigerant compressors”, Proceedings of the 1972 International Compressor Engineering Conference at Purdue, 74-82(1972)
- [2] M. P. Norton, *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineer*, (Cambridge University Press, 1951)
- [3] Jin dong Kim and Byung etc., „Noise reduction of A Rotary compressor Using structural Modification of the Accumulator”, Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, Vol. I, 355-360(1988)
- [4] Wei Zhou and Han-jun Kim, „Numerical Prediction of Radiated Noise Level From Suction Accumulators of Rotary Compressors”, Proceedings of the 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, Vol. I, 373-378(1988)
- [5] S. Wang, J. Park, „Sound reduction of rotary compressor using topology optimization”. (2001)