

왕복동식 압축기의 방사소음 저감 Reduction of Radiated Noise in a Reciprocating Compressor

김용태† · 이진우* · 주재만**
Yong Tae Kim, Jin Woo Lee and Jae Man Joo

Key Words : Radiated Noise(방사소음), Reciprocating Compressor(왕복동식 압축기), O.D.S.(Operational Deflection Shape)

ABSTRACT

Generally, noise in a reciprocating compressor is attributed to the driving force of a pump. However, close examination shows that the noise heard by customers finally results from radiation of a shell in a compressor, the noise caused by both transmission through a shell and resonance with the natural frequency of a shell. Therefore, the peak frequencies contributing to the overall level of a compressor's noise are closely concerned with vibration of a shell. That's why radiated noise by vibration can be reduced by changing the mode of a shell and by shifting the peak frequencies to other ranges, which are not globally related with the overall noise level. In this paper, the main peak frequencies are analyzed to reduce the radiated noise of a shell, and the vibration characteristics of a shell are examined through Frequency Response Function and Finite Element Analysis. Moreover, the Operational Deflection Shape for a shell is measured with consideration of real driving force of a pump. Finally, the optimum position on a shell, closely related to the main peak frequencies, is found, and the overall noise level caused by radiated noise of a shell is noticeably reduced by mass or stiffness modification of the position.

1. 서론

일반적으로 왕복동 압축기는 흡입 파이프로 유입된 냉매를 실린더 내에서 압축하여 토출 파이프로 내 보낸다. 그 과정에서 여러 가지 요인에 의해 발생하는 소음은 셸을 직접 투과하여 외부 소음으로 나타나거나, 셸의 고유 진동 모드에 의해 증폭되어 외부로 방사된다. 따라서, 전체 외부 소음에 크게 기여하는 피크 주파수는 셸의 진동과 연관성이 있는 성분과 그렇지 않은 성분으로 나눌 수 있고, 진동에 의한 방사 소음은 진동 모드의 형태 변화나 해당 주파수의 이동으로 그 양을 줄일 수 있다.

그러므로, 방사소음을 줄이기 위한 연구는 주요 피크 소음 성분의 분류로 시작된다. 또한, 임팩트 해머 실험과 유한 요소해석을 통하여 셸의 진동 특성을 파악한다. 그리고, 실제 가진력을 고려한 셸의 거동을 나타내는 O.D.S.를 측정하여, 주요 피크 주파수와 연관이 큰 진동을 억제할 최적의 위치를 찾는다. 이런 실험과 해석의 결과에서 선정된 위치에 질량이나 강성 변화를 통해 소음 저감 효과를 확인한다.

본 연구에서 사용되는 압축기는 냉매 R134a 를

사용하고, BLDC 모터에 의해 운전 속도가 변화되는 모델이다. 셸의 특성은 그림 1 과 같이 타원형 모양이고, 실린더 블록이 있는 쪽의 셸 부분이 그 반대 쪽에 비하여 높은 비대칭형이다.

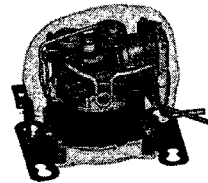


그림 1. 왕복동식 압축기의 형상

2. 왕복동식 압축기의 소음 분류

2.1 왕복동식 압축기의 소음 진동 측정

그림 2 에서 보이는 바와 같이, 운전 중인 압축기의 86 개 점의 가속도 신호(셸 표면에서 수직인 방향)를 순차적으로 측정하여, 그림 3 의 세 점(A 점, T 점, H 점)에서 측정된 소음 신호와 비교하였다. 먼저 소음을 측정할 각 점의 전체 소음 값에 크게 기여하는 피크 주파수를 측정점에 따라 표기하고, 진동 신호는 측정점의 위치에 따라 세 개의 구간(Top, Upper, Lower)으로 나누고, 각 구간은 그 면적에 따라 다시 분할 하여 주요 피크 주파수를 선정하였다. 표 1 은 주요 피크 소음 주파수를 중심으로, 상관관계가 큰 셸의 위치를 1/3 옥타브 밴드별로 분류하여 나타낸 것이다. 질은

† 삼성전자 가전연구소
E-mail : yt119.kim@samsung.com
Tel : (031) 218-5250, Fax : (031) 218-5196

* 삼성전자 가전연구소

** 삼성전자 가전연구소

회색은 진동과 상관 관계가 거의 없는 소음 성분이고, 연한 회색은 셸 표면에서 높은 진동을 나타내지만, 실제 소음에는 거의 기여하지 못하는 진동 주파수 성분이다. 상부 셸의 강한 진동으로 나타나는 방사소음은 분홍색으로, 하부 셸의 강한 진동으로 발생하는 방사소음은 하늘색으로 나타내었다. 상부와 하부 셸이 함께 방사 소음을 일으키는 주파수 성분은 황색으로 나타내었다.

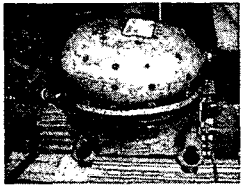


그림 2. 가속도 측정점

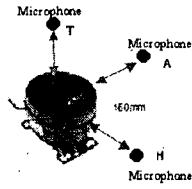


그림 3. 소음 측정점

2.2 소음 특성 분류

그림 4 는 T 점에서 측정한 소음 신호를 나타내며, 주요 피크 주파수에는 상관관계가 높은 셸의 위치를 나타내었다. (L: 셸의 하부, T: 셸의 상부, W: 셸의 상/하부, A: 진동과 관계 없는 피크 주파수 성분)

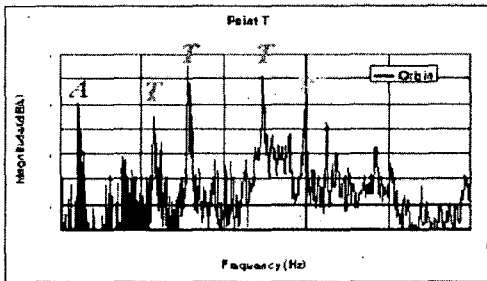


그림 4. 소음 신호 특성 (T점)

3. 셸의 진동 특성

3.1 셸의 진동 모달 시험

셸 자체의 진동 특성을 파악하기 위해서 진동이 거의 전달되지 않는 바닥 위에 압축기를 놓고, 임팩트 해머 실험을 실시하였다. 그림 5 에서처럼 가진 하는 지점을 고정하고 가속도계를 옮겨가며 주파수 응답함수 (FRF)를 측정하였다. 모두 86 개 지점에서 측정한 주파수 응답함수를 Pulse (B&K)의 Modal analysis 프로그램을 이용하여 고유 주파수와 고유 모드를 구하였다.

Impact (#3)

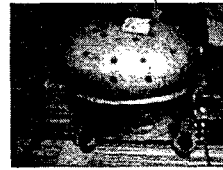


그림 5. FRF 가진점 및 측정점

그림 6 은 주요 고유 주파수와 해당하는 고유모드를 나타낸다. 여기서는 편의상 상하방향에 대한 결과만을 언급하겠다. 3144 Hz 에서는 셸의 상부 중앙점을 중심으로 윗면이 강하게 움직이는 모드가 발생하였다. 4945 Hz 의 모드는 A 점과 S 점을 잇는 가상의 선과 평행인 두 개의 노달 라인을 갖는다. 모달 실험은 가진점의 위치, 가진 방향과 측정점의 개수 등에 따라 실험 대상의 실제 고유 주파수를 파악하거나 정확한 모드 거동을 밝히기에 한계가 있으므로 유한 요소해석을 통해 보완되어야 한다.

3.2 셸의 진동 모달 해석

실험을 통한 구조물의 모달 특성 파악은 몇 가지 단점을 가진다. 한 점을 가진하기 때문에 일부 고유 모드가 누락될 수 있거나 근접한 주파수의 모드가 분리 되지 않고, 측정점의 부족으로 모드의 형태를 정확히 알 수 없는 경우도 발생한다. 따라서, 모달 실험 전후에 모달 해석을 통해 해당 모드의 형태를 비교해 보는 작업이 필수적이다. 물론, 셸의 유한 요소 모델은 많은 곡률을 가지는 요소로 구성되어 있으므로, 실제 셸의 특성을 정확히 나타내는데 한계가 있으므로, 계산된 고유 주파수는 어느 정도의 오차가 포함되어 있다는 것을 고려해야 한다.

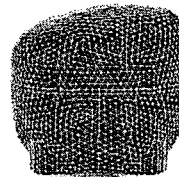


그림 6. 셸의 유한 요소 모델

그림 6 과 같은 40662 개의 노드(node)와 20367 개의 요소(element)로 구성된 유한 요소 모델을 사용하여 셸의 자유진동 해석을 수행하였다. 모델링과 해석을 모두 Ideas 에서 수행하였고, 해석에 사용한 물성치는 표 1 과 같다. 계산된 셸의 고유 주파수와 고유 모드 중 T 점과 관련된

주요 성분 2 개를 그림 7 에 나타내었다.

표 1. 해석에 사용한 물성치

Young's modulus	Poisson ratio	Density
200 Gpa	0.29	7820kg/m ³

셸의 진동 모드는 3141Hz 에 존재하는 모드는 상부 셸의 중심이 강하게 진동하는 모드로 방사소음에 크게 기여할 것으로 예상되고, 4935Hz 에 존재하는 모드 또한 T 점에 소음 기여도가 클 것으로 사료된다.

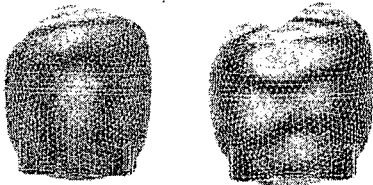


그림 7. 셸의 진동 모드(FEA)

3.3 셸의 O.D.S. 측정

앞서 수행한 모달 실험과 모달 해석은 정지해 있는 압축기 셸의 진동 특성을 나타내는 것으로 셸의 고유 특성이라고 할 수 있다. 그러나, 실제 운전 중인 압축기 셸의 진동은 가진력의 주파수 특성도 함께 나타난다. 즉, 소음의 피크 주파수는 가진력의 주파수 특성에 의해 결정되고 셸의 진동 거동은 근접한 고유모드의 중첩에 의해 나타난다고 할 수 있다. 따라서, 운전 중인 압축기 셸의 진동특성을 파악하는 것이 방사 소음 저감에 필수적인 연구 단계라고 할 수 있다.

2 개의 가속도계를 이용하여 O.D.S.(Operating Deflection Shape)을 측정하였다. 1 개는 1 번 지점에 고정하고, 나머지 한 개의 가속도계를 옮겨 가며 86 개점(그림 2 의 위치 참조)과 1 번 사이의 Cross-spectrum 을 측정하였다. B&K Pulse 를 이용하여, Cross-spectrum 의 주요 피크 주파수에서 O.D.S.를 계산하였다. 그림 9 는 O.D.S.의 측정 결과 중 편의상 T 점에 대한 것만을 나타낸 것이다.

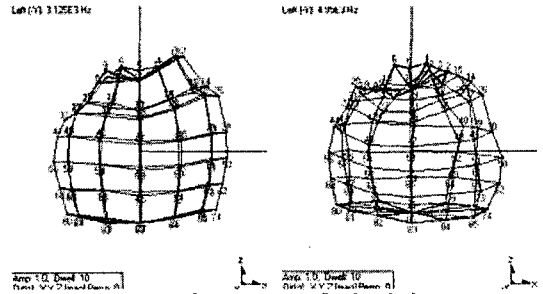


그림 9. O.D.S 측정 결과

3.4 Acoustic Camera 를 통한 방사소음 측정

Acoustic camera(그림 10 참조)를 이용하여 운전 중인 압축기의 방사소음 패턴을 살펴보았다. 그림 10 은 Acoustic camera 의 장치 구성도이다. 그림 10 의 오른쪽 그림에서 나타내었듯이, 두 지점(A 점과 T 점 방향으로 300mm)에서 Array microphone(32 개 마이크)을 이용하여 음압을 측정하여 방사 소음 지도(map)을 얻었다.

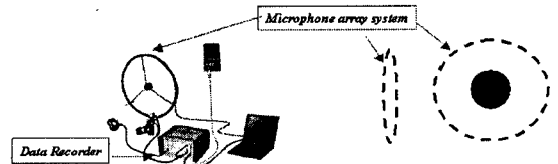


그림 10. Acoustic Camera 장치도

그림 11 은 주요 피크 주파수 주변에서 계산된 방사 소음 패턴을 도시한 것이다. 그림에서 빨간색이 방사 소음에 크게 기여하는 점을 나타낸다. 앞서 수행한 모달 해석과 ODS 측정에서 선정한 피크 주파수와 조금씩 차이가 있지만, 방사 소음에 크게 기여하는 지점을 좀 더 정확히 알 수 있었다. T 점 소음의 3150Hz 성분은 상부 셸의 정중앙 부분, 5000 Hz 성분은 상부 셸의 하단부의 진동 억제로 저감될 가능성을 발견할 수 있었다.

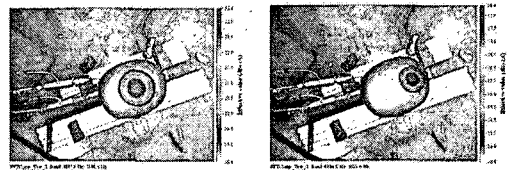


그림 11. Acoustic Camera 방사 소음 특성

4. 셸 방사소음 저감

4.1 질량 증가를 통한 셸 진동 억제

그림 12 와 같이 유한 요소 해석과 실험으로 구한 셸의 모달 특성, ODS, 방사 소음 패턴을 통해 진동 특성을 변화 시킬 6 개 지점(그림 12 에서 1 번, 20 번, 26 번, 71 번, 74 번, 86 번)을 선정하였다. 선정된 지점의 질량을 증가 시키기 위해 부틸 고무(butyl rubber)나 금속 재질의 집중 질량을 사용하였다.

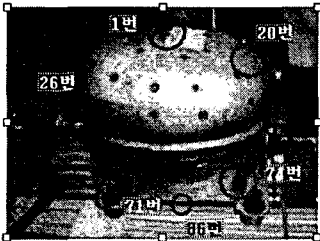


그림 12. 방사소음 저감을 위한 진동 억제점

이와 같은 방법으로 셸의 최적의 위치에 적절한 질량을 부가하여 그림 13(T 점 소음 결과)와 같이 방사 소음을 저감할 수 있었다.

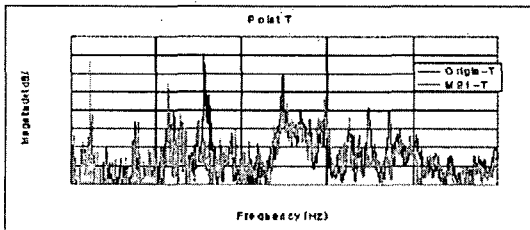


그림 13. 셸에 질량 부가 후 T점 소음 비교

4.2 강성 변화를 통한 셸 진동 억제

그림 14 와 같이 상부 셸의 강성을 강화하여 T 점의 방사 소음에 미치는 영향을 살펴보았다. 국소적인 강성 보강만으로도 특정주파수의 소음을 5dBA 이상 저감할 수 있었다.

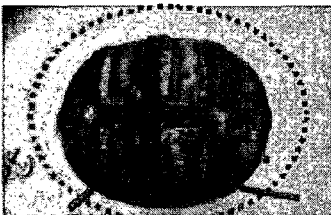


그림 14. 셸의 강성을 강화한 형상

앞서 유한 요소 해석과 실험으로 구한 셸의 모달 특성, ODS, 방사 소음 패턴을 통해 셸의 최적의 위치에 적절한 강성 변화를 통하여 그림 15 와 같이 방사 소음을 저감할 수 있었다.

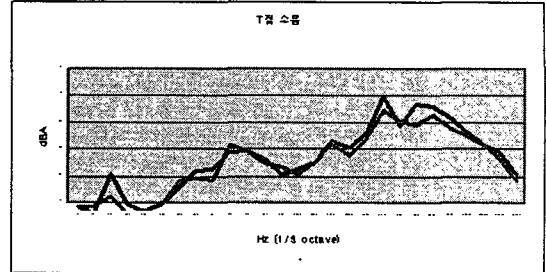


그림 15. 셸의 강성 변화 후 T점 소음 비교

5. 결론

본 연구에서는 운전 중인 왕복동식 압축기의 방사 소음을 줄이기 위해 셸의 진동 특성을 실험과 해석을 통하여 분석하였고, 이를 통하여 셸의 질량과 강성을 변화시킴으로써 방사 소음을 저감하였다.

압축기의 외부 소음과 셸 표면의 진동 신호를 측정하여, 진동과 연관이 강한 피크 소음 주파수를 주파수 대역별로 분류하였고, 다음으로 임팩트 해머 실험과 유한 요소 해석을 수행하여 셸의 진동 모달 특성을 파악하고, Cross-spectrum 을 측정하여 ODS(Operating Deflection Shape)를 구하였다. 셸 고유의 진동 특성을 나타내는 모달 해석 결과와 가진력을 포함한 셸의 거동을 나타내는 ODS 를 바탕으로 주요 주파수 대역별 방사 소음을 줄일 수 있는 최적 지점을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) 김상현 등, 1998, "내부 음향 가진된 폐공간의 유연한 평판을 통한 외부 방사 소음 저감", 대한 기계학 회논문집 A 제 22 권 6 호, pp.1097~1105
- (2) 박상영 등, 1999, "로터리 컴프에서 방사소음의 실험적 저감", 한국소음진동공학회지 제 9 권 제 1 호, pp. 189~196.
- (3) 김용태 등, 2003, "승용차 Dash 부의 구조 방사 소음 저감 방법 제안", 춘계학술대회논문집(2 호), 한국자동차공학회, pp522~526
- (4) Andrey Ricardo da Silva, 2004, "controlling the noise radiation of hermetic compressors by means of minimization of power flow through discharge pipes using genetic algorithms", Purdue Conference 2004, C096