

압축기 가진 스펙트럼 분석을 활용한 배관계 응력해석

Stress Analysis of a Piping System by Application to the Spectral Analysis of a Compressor Exciting Force

정두한† · 정우승* · 윤경종* · 모진용*

Duhan Jung, Wooseung Jung, Kyoungjong Yun and Jinyong Mo

1. 서론

소비자들이 요구하는 저비용의 고급 제품화 추세에 발맞추어 저소음·저진동 에어컨을 개발하기 위해서는 주요 가진원인 압축기의 동특성 및 운동 메커니즘을 이해하는 것이 필요하다. 이 중 압축기의 강체 운동은 배관 응력 및 제품 진동과 관련되는 가장 중요한 운동 특성 중 하나이다. 일반적으로 정속형 에어컨의 배관 고유진동수는 압축기의 가진 주파수와 중첩되지 않게 공진을 회피하여 설계한다. 그러나 최근 에너지 규제 강화 및 고효율 제품으로 주목을 받는 인버터 에어컨은 압축기 회전자에 영구자석을 채용한 BLDC 모터를 사용하여 운전속도를 가변하는 제어를 하기 때문에, 압축기 운전 주파수 범위 내에 배관의 고유진동수가 형성되지 않도록 설계하는 것은 어렵다. 따라서 압축기 진동 및 소음의 주요 전달경로에 있는 배관을 설계하기 위해서는 압축기 가진력의 크기, 방향과 주파수 특성 등을 분석하고 이를 토대로 한 배관 최적설계가 요구된다.

본 논문에서는 압축기 진동에 의하여 발생하는 에어컨 배관의 응력을 해석하기 위하여 압축기 진동 가속도를 측정하고, 그 결과를 분석하여 강체 운동에 필요한 가진력을 구하는 과정을 체계화하고자 한다. 그리고 주파수 영역에서 신호 분석한 압축기 가진력 스펙트럼을 활용하여 예측한 배관 응력과 실험을 통해 운전 중에 발생하는 배관 응력을 비교하여 제안하는 방법에 대한 타당성을 검증한다.

2. 압축기 가진력 분석

2.1 강체 운동 관계식

강체의 임의의 한 점 i 에 대한 3 자유도 병진 변

위 \mathbf{x}_i 는 한 점 c 의 병진 \mathbf{x}_c 및 회전 $\boldsymbol{\theta}_c$ 변위와 다음에 나타낸 벡터 관계식을 갖는다.

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_c + \boldsymbol{\theta}_c \times \mathbf{r}_{ci} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{r}_{ci} 는 점 c 에 대한 점 i 의 위치벡터이다. 이 관계식을 6×6 정방행렬식으로 확대하여 그 역행렬을 구하면 6개의 병진 변위로부터 강체 임의의 점에 대한 완전 6 자유도 변위를 구할 수 있게 된다. 그러나 임의의 두 점에 대한 병진 변위에 대한 식은 6×6 정방행렬로 표현할 수 있지만, 특이점을 갖기 때문에 행렬의 계수(rank)가 6보다 작아서 역행렬을 구할 수 없다⁽¹⁾. 따라서 임의의 점에 대한 6 자유도 변위를 구하기 위해서는 3점 이상에서 측정하고, 행렬의 계수가 6이 되는 관계식을 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 압축기의 질량 중심을 절대좌표계의 원점으로 하여 6 자유도 변위를 결정하기 위하여 그림 1에 나타낸 3개 지점에 각각 가속도계를 부착하였다. 이 경우 센서에서 측정한 병진 변위 $\{x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}, y_{s2}, z_{s2}, x_{s3}\}^T$ 와 압축기 질량 중심점의 병진 운동 $\{x_c, y_c, z_c\}$ 회전 운동 $\{\alpha, \beta, \gamma\}^T$ 은 다음 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_1 & -y_1 \\ 0 & 1 & 0 & -z_1 & 0 & x_1 \\ 0 & 0 & 1 & y_1 & -x_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -z_2 & 0 & x_2 \\ 0 & 0 & 1 & y_2 & -x_2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & z_3 & -y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} x_{s1} \\ y_{s1} \\ z_{s1} \\ y_{s2} \\ z_{s2} \\ x_{s3} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

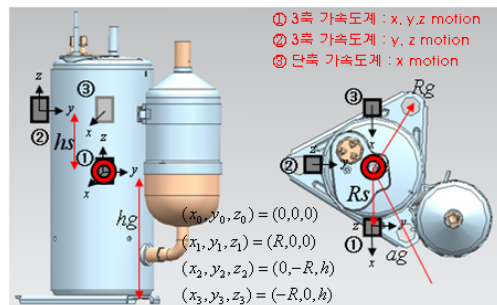


그림 1. 압축기 강체운동 측정 위치도

† 정두한; (주)삼성전자 공조전문기술

E-mail : duhan.jung@samsung.com

Tel : (031) 200-7285, Fax : (031) 200-6392

* (주)삼성전자 공조전문기술

2.2 가진력 스펙트럼 계산

강체 표면상의 운동을 가속도계를 이용하여 측정된 진동 신호를 시간영역에서 해석하여 운동을 해석하는 것보다, 주파수 영역에서 문제를 분석하는 것이 더욱 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 측정된 센서의 스펙트럼 값으로부터 다음 식을 활용하여 압축기 중심점의 3 방향 병진 힘과 3 방향 회전 모멘트 스펙트럼을 유도하였다.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{F}(\omega)_c \\ \mathbf{M}(\omega)_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{m}_c \ddot{\mathbf{x}}(\omega)_c \\ \mathbf{I}_c \ddot{\boldsymbol{\theta}}(\omega)_c \end{Bmatrix} + \sum \mathbf{k}_i \mathbf{x}(\omega)_i \quad (3)$$

$$\mathbf{x}(\omega)_i = \mathbf{x}(\omega)_c + \boldsymbol{\theta}(\omega)_c \times \mathbf{r}_{ci} \quad (4)$$

먼저, 식(3)으로 구성된 해석모델의 유용성을 검증하기 위하여 압축기와 그로벳을 질점과 스프링으로 구성하는 유한요소 모델을 이용하여, 측정 위치에서 구한 가속도 출력 스펙트럼과 측정 결과를 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 또한 배관의 연결이 해석 모델에 추가되더라도 가속도 응답의 변화가 미미하기 때문에 본 연구에서 제시한 방법으로 가진력을 유도하여 활용할 수 있음을 확인하였다.

다음으로 압축기 질점에서 구한 힘과 모멘트에 대한 RMS 값을 압축기 회전속도 별로 비교한 결과를 그림 2에 나타내었다. 예측한 대로 압축기의 회전방향 모멘트가 가장 크게 작용하고 있고, 상대적으로 부하가 높은 45Hz 운전속도에서 가진력이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

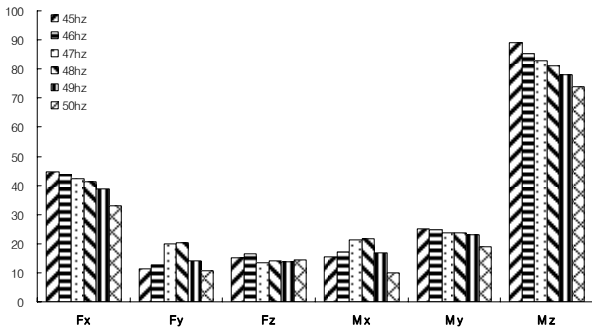


그림 2. 압축기 질량중심점의 가진력 계산 결과

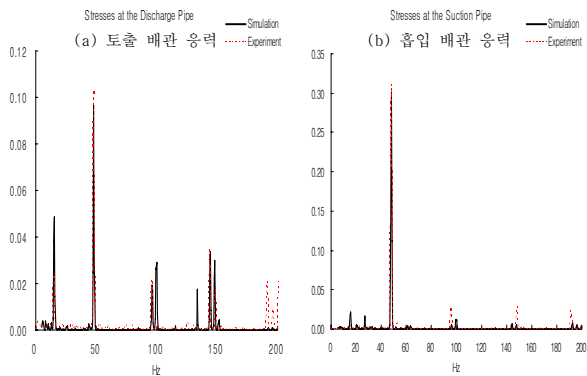


그림 3. 배관 응력 해석 및 시험 결과 비교

3. 배관 응력 해석

본 논문에서 유도한 질량중심점의 가진력을 모델링하여 CAE 해석으로부터 구한 토출(discharge) 및 흡입(suction) 배관의 응력 스펙트럼과 실험으로 측정된 동일 위치의 응력을 그림 3에 비교하였다. 그림 3의 (a), (b)는 각각 압축기가 48Hz로 운전될 때 토출 및 흡입 배관의 단축 스트레인게이지 응력을 나타낸다. 그림을 살펴보면 실험과 해석에서 모두 회전수와 동일한 48Hz에 대한 응력이 주요 성분으로 나타나며, 그 크기도 잘 일치하고 조화성분에 대한 응답들이 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로, 압축기 48Hz 운전에 대한 전체 배관계의 응력 분포를 구하여 그림 4에 나타내었다. 일반적으로 배관 신뢰성 검증을 위한 응력 계측 시에 배관 상부 굴곡부에 게이지를 부착하여 응력값을 측정하고 있지만, 해석 결과 배관 하단부에서도 큰 응력이 발생할 수 있음을 보여주고 있다. 또한 본 연구에서는 실제 압축기 가진 스펙트럼을 이용하였기 때문에 운전 중 발생하는 전체 배관계에서 최대 응력 지점은 물론 응력의 크기도 효과적으로 예측할 수 있기 때문에 배관의 설계 변경에 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 압축기 가진력에 대한 스펙트럼 분석을 이용한 에어컨 실외기 배관 응력 해석 방법을 제안하였다. 실제 가속도 측정 데이터를 활용하여 배관의 응력 값을 예측할 수 있는 기본 개념을 고찰하였고, 적용사례를 통하여 해석 결과의 유용성을 검증하였다. 연구 결과, 압축기 가진력은 회전방향 모멘트 성분이 가장 크게 작용하고 있으며, 배관 하단 굴곡부에도 높은 응력이 발생하고 있음을 살펴보았다. 향후 본 연구 결과를 바탕으로 배관 응력 저감, 압축기 전달력 해석 등으로 응용범위를 확대하여 실외기 배관 설계 및 전달력 분석 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

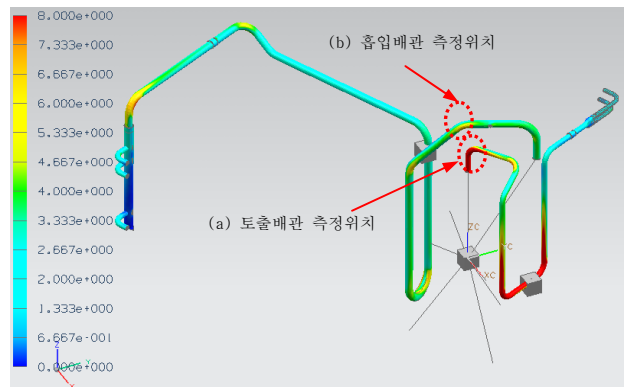


그림 4. 배관 응력 해석 결과 (48Hz 운전)