

# 싱글 로터리 컴프레셔의 온라인 부하 토크리플 보상기

구본관†

## Online Load Torque Ripple Compensator for Single Rolling Piston Compressor

Bon-Gwan Gu<sup>†</sup>

### Abstract

Given their low cost, single rolling piston compressors (SRPC) are utilized in low-power room air-conditioning systems. The SRPC cycle is composed of one compression and discharge process per mechanical rotation. The load torque is high during the compression process of the refrigerants and low during the discharge process of the refrigerants. This load torque variation induces a speed ripple and severe vibration, which cause fatigue failures in the pipes and compressor parts, particularly under low-speed conditions. To reduce the vibration, the compressor usually operates at a high-speed range, where the rotor and piston inertia reduce the vibration. At a low speed, a predefined feed-forward load torque compensator is used to minimize the speed ripple and vibration. However, given that the load torque varies with temperature, pressure, and speed, a predefined load torque table based on one operating condition is not appropriate. This study proposes an online load torque compensator for SRPC. The proposed method utilizes the speed ripple as a load torque ripple factor. The speed ripple is transformed into a frequency domain and compensates each frequency harmonic term in an independent feed-forward manner. Experimental results are presented to verify the proposed method.

**Key words:** Load torque compensation, PMSM motor, Rolling piston compressor

### 1. 서 론

가전기기에는 다양한 형태의 모터가 적용되어 주요 기계 움직임을 만드는데 활용되고 있다. 대표적으로 에어컨과 냉장고의 압축기(Compressor) 모터, 세탁기 모터, 청소기 모터 등이 있으며, 이들 모터의 속도를 응용에 맞추어 조절할 수 있도록 인버터가 많이 적용되고 있다. 인버터의 적용은 효율향상과 다양한 기능을 구현할 수 있는 장점과 반도체부품의 가격하락으로 빠르게 확대되고 있다. 가전기기 중에서도 특히 에어컨 압축기 모터의 가변속 제어에 인버터 적용이 날로 확대되고 있는데, 이는 에어컨 압축기 모터의 속도 조절을 통하여 압축량을 가변제어하게 되면, 고속운전과 정지를 반복하는 정속압축기에 비해서 높은 효율을 가지게 되기 때문

이다<sup>[1]-[5]</sup>.

그림 1은 에어컨시스템의 압축사이클(Compression cycle)을 보여준다. 압축사이클은 압축기와 Condenser, Evaporator로 구성된다. 압축기는 냉매를 단열압축하여 고온상태로 만들어 Condenser로 보내고, 실외기 팬을 통해서 Condenser 냉매의 열을 배출하게 된다. 온도가 낮아진 냉매는 실내기의 Evaporator에서 압력이 낮아져 단열 팽창으로 급격히 기화되면서 온도가 낮아지게 된다. 기화된 냉매는 실내기 팬을 통해서 차가운 공기를 배출한다. 이러한 압축사이클을 통해서 에어컨은 실내에 차가운 공기를 공급하게 되는데, 압축기 모터는 압축사이클에서 냉매의 흐름과 상태를 바꾸어주는 주요 동력원으로 사용된다.

압축기의 종류로는 싱글로터리(Single rolling piston), 트윈로터리(Twin rolling piston), 스크롤(Scroll)방식이 주로 사용된다. 싱글로터리는 간단한 구조로 저가격의 에어컨에 사용되고, 트윈로터리와 스크롤방식은 중고가의 에어컨에 사용된다. 기계적으로 냉매를 압축하여 토출하는 압축기는 진동이 발생하는데, 압축기 종류에 따라 진동의 발생 정도가 서로 차이를 보인다. 그림 2는

Paper number: TKPE-2014-19-5-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

† Corresponding author: bgg@knu.ac.kr, School of Energy Eng., Kyungpook National University

Tel: +82-53-950-8975 Fax: +82-53-950-8979

Manuscript received Jul. 9, 2014; accepted Aug. 28, 2014

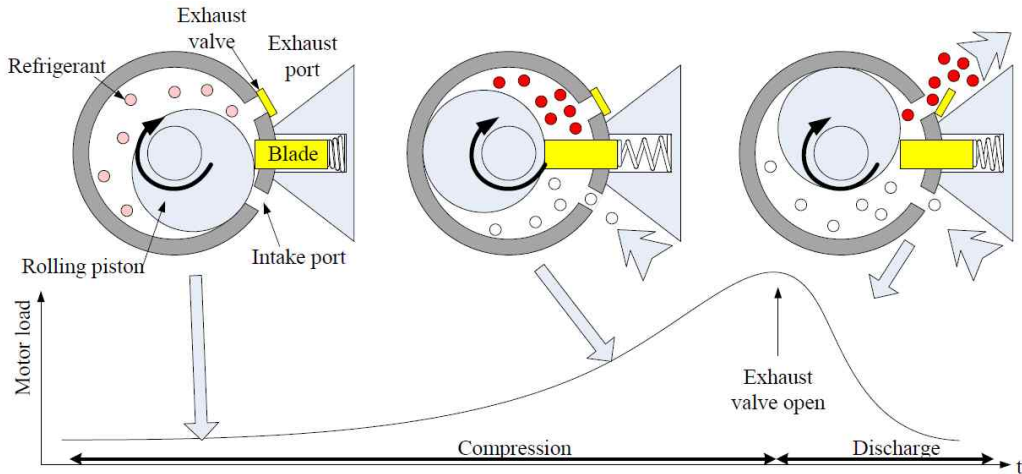


Fig. 2. Load torque pattern of single rolling piston compressor.

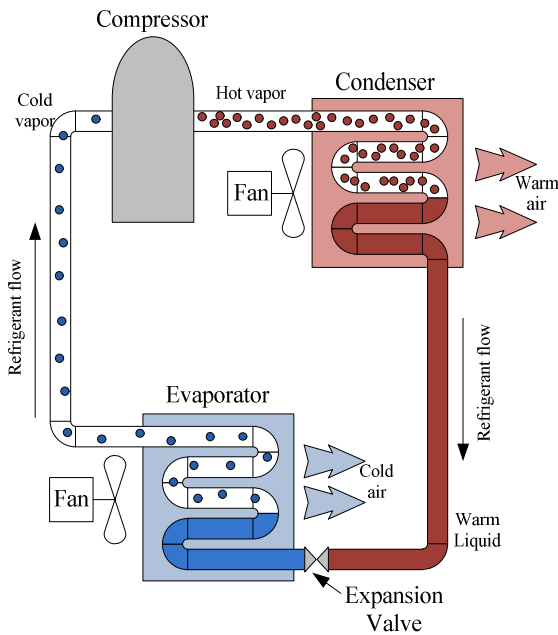


Fig. 1. Compressor cycle.

싱글 로터리 압축기의 모터가 기계적으로 1회전 할 때의 부하토크 패턴을 보여준다. 싱글 로터리는 하나의 피스톤이 회전하면서 1회전에 압축과 토출을 1번씩하게 된다. 냉매 압축시에는 높은 부하토크가 발생하다가 토출 밸브가 열린 직후에는 부하토크가 빠르게 낮아진다. 이러한 부하토크의 변화는 속도의 변화를 가져와 진동을 발생시킨다.

트윈로터리 방식의 경우에는 2개의 피스톤이 있어 압축과 토출을 1회전에 2번씩하게 되는데, 압축과 토출의 행정을 각각의 피스톤이 서로 반대 또는 어긋나게 하여 부하변동을 많이 줄여 진동 발생이 적다. 스코롤 압축기의 경우에는 연속적인 압축과 토출행정이 이루어져 진동이 아주 적게 발생한다. 그러나 싱글 로터리 방식의 압축기는 앞의 두 가지 방식과는 다르게 1회전에 압축

(높은 부하토크)과 토출(낮은 부하토크)을 한번씩만 하면서 압축기 동작을 완료해야 한다. 이는 트윈로터리와 같이 부하토크의 변동을 서로 감쇄할 수 있는 구조가 없어 진동이 많이 발생한다. 발생한 진동은 배관의 피로 파괴와 소음을 발생하므로 반드시 줄여야하는 단점이다 [1],[2]

싱글 로터리 압축기에서 발생하는 진동을 줄이기 위해서는 관성에 의해서 진동 발생이 적은 정격속도에 가까운 고속운전을 하거나, 저속운전이 필요한 경우에는 압축기 부하의 패턴을 전향제어방식으로 모터 토크 명령을 조정하여 속도 리플과 진동을 저감하는 방법을 쓴다 [1]. 압축기 특성상 내부에 위치 센서를 설치하기가 불가능하므로 위치센서가 없는 센서리스 제어방식을 사용하는데, 이 센서리스 방식에서는 속도를 미분하여 얻는 부하토크관측기(Load torque observer)를 사용하게 되면 센서리스와 부하토크관측기 사이에 간섭이 발생하여 정확한 부하추정을 할 수 없다. 그래서 기존의 다양한 부하토크관측 알고리즘을 통해서 실시간(On-line)으로 진동을 줄일 수 있는 방법은 없고, 미리 얻어진 데이터를 중심으로 구성된 전향보상기를 이용하여 진동을 저감하는 방법을 일반적으로 구현한다.

그러나 압축기 별 부하 패턴을 미리 검출하는 방법은 많은 시험을 통하여 측정하여야 하며, 냉매의 양, 실내기과 실외기사이의 배관 길이, 주위온도, 동작 주파수에 따라서 그 부하패턴이 달라져 실제 상용화하기에 어려운 점이 존재한다. 따라서 부하 패턴을 실시간으로 검출하여 보상하는 방법이 반드시 필요하다.

본 논문에서는 싱글로터리압축기의 저속 운전 시에 발생하는 부하토크 리플의 영향을 최소화할 수 있는 실시간 부하 토크리플 보상기를 제안한다. 제안된 기법은 속도 리플의 주파수 성분을 계산하고, 이를 최소화하는 방향으로 보상토크를 주입하는 방식으로 구성되어 있다. 실험을 통하여 진동이 많이 감소됨을 보여 제안된 기법의 효용성을 입증하였다 [6],[7].

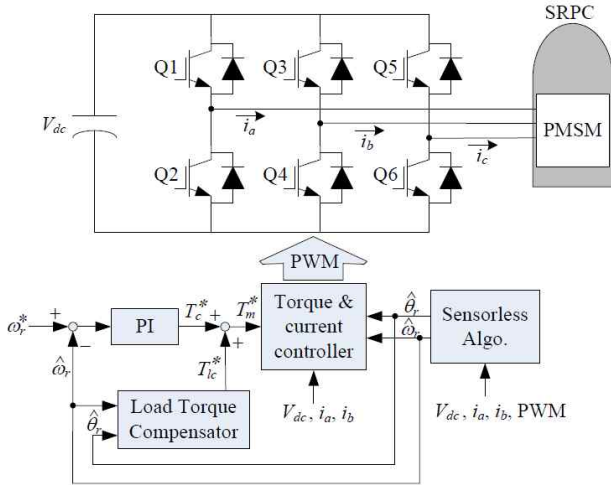


Fig. 3. System configuration.

## 2. 부하토크 리플에 따른 속도리플과 진동

위치센서를 사용하는 모터 드라이브 시스템에서의 부하토크 추정은 속도의 변화분을 이용하여 구성할 수 있다. 그러나 센서리스알고리즘을 사용한 경우에는 회전자의 속도 추정에 강한 필터를 사용하여 얻게 된다. 따라서 일반적인 부하 토크리플 추정법을 사용하게 되면 실제 부하에 비하여 위상지연이 생겨 부하토크 추정이 되지 않는 단점이 있다.

그림. 2에서와 같이 냉매의 온도와 양, 압축기 입출구 압력차에 따라 부하토크 리플은 크기와 형태가 변할 수 있지만, 발생하는 기계각과 일정한 패턴을 가지고 회전할 때마다 주기적으로 발생한다. 부하토크  $T_l$ 을 주파수 성분으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_l = T_{l0} + T_{l1}\cos(\omega_r t + \phi_1) + T_{l2}\cos(2\omega_r t + \phi_2) \dots + T_{ln}\cos(n\omega_r t + \phi_n) \dots \quad (1)$$

$T_{l0}, T_{l1}, T_{l2}, T_{ln}$ 은 부하토크의 DC성분, 1차, 2차, n차의 성분을 나타내며,  $\phi_1, \phi_2, \phi_n$ 는 부하토크의 1차, 2차, n차의 위상을 나타낸다. 각 성분들은 운전환경에 달라지며, 1차 이상의 성분들이 부하토크 리플에 해당한다.

모터의 토크와 부하토크를 포함한 기계적 다이내믹 수식을 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$\omega_r(s) = \frac{T_m(s) - T_l(s)}{Js + B} \quad (2)$$

$T_m, \omega_r, J, B$ 는 모터에서 출력되는 토크, 회전자 기계각속도, 기계적 Inertia, Friction을 나타낸다. DC성분의 부하토크는 압축기의 속도를 유지하기 위한 속도제

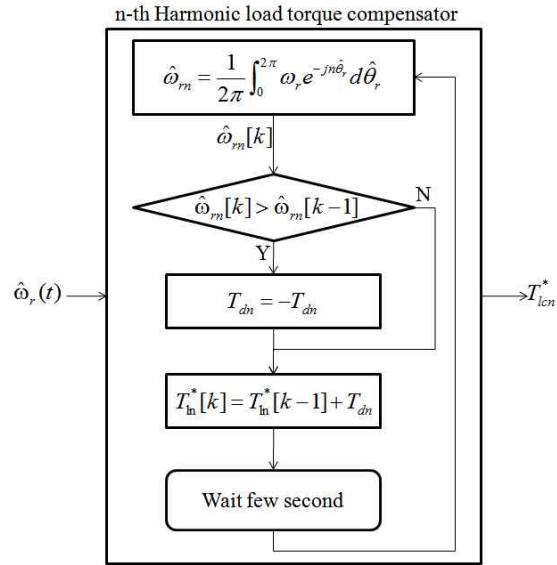


Fig. 4. Proposed load torque compensator.

어기에서 출력토크를 만들어 이를 보상하게 된다. 1차 이상의 주파수 성분은 토크 리플을 만들게 되는데 수식(2)에 의해서 같은 주파수의 보상토크가 없을 경우 속도 하모닉 성분을 가지게 되는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 속도 리플을 주파수 분석하게 되면 현재 보상되지 못한 부하 토크리플의 주파수 성분을 알 수 있는 것이다. DC성분의 속도만 있을 경우에는 속도리플이 없으며, 이는 부하토크 리플이 존재하지 않거나 모두 보상이 된 것을 나타낸다. n차성분의 속도리플이 있는 것은 n차 주파수의 보상되지 않은 부하토크 리플이 있다는 것을 나타낸다. 부하토크 보상기를 통해서 각 주파수성분의 속도리플을 없는 방향으로 보상을 하게 되면 해당하는 부하토크 리플을 보상 하는 것과 같게 된다.

## 3. 제안된 부하토크 보상기법

그림 3은 압축기와 인버터를 포함한 시스템의 구조를 보여준다.  $\omega_r^*, \hat{\omega}_r, \hat{\theta}_r$ 은 회전자 기계각속도 명령, 추정된 회전자 기계각속도, 추정된 회전자 기계각을 나타내고,  $T_c^*, T_{lc}^*, T_m^*$ 은 속도제어기의 토크명령치, 부하 토크리플 보상기의 토크 명령치, 최종 토크명령을 나타낸다.  $V_{dc}, i_a, i_b, i_c$ 는 DC-link 전압, abc상의 상전류를 나타낸다. 속도제어기의 출력 토크명령은 부하토크 보상기의 출력 토크명령과 더해져 최종 출력 토크명령을 생성하며 내부에서 필요한 전류량으로 환산되어 전류제어기의 명령으로 사용된다. 센서리스 알고리즘은 DC-link 전압, 상전류, PWM duty신호를 기반으로 속도와 회전자 기계각을 추정하게 된다<sup>[8]</sup>.

속도의 주파수 성분을 다음과 같은 푸리에 급수(Fourier's series)를 이용하여 구할 수 있다.

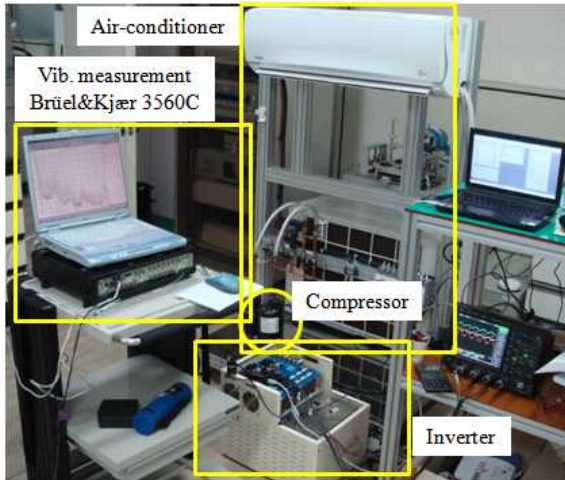


Fig. 5. Experimental setup.

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_{r0} + \hat{\omega}_{r1}e^{j\omega_0 t} + \hat{\omega}_{r2}e^{j2\omega_0 t} \dots + \hat{\omega}_{rn}e^{jn\omega_0 t} \dots, \quad (3)$$

$$\hat{\omega}_{rn} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \hat{\omega}_r e^{-jn\omega_0 t} dt, \quad n = 1, 2, \dots. \quad (4)$$

$\hat{\omega}_{r0}$ ,  $\hat{\omega}_{r1}$ ,  $\hat{\omega}_{r2}$ ,  $\hat{\omega}_{rn}$  는 속도의 DC, 1차, 2차, n차 성분을 나타낸다.  $T_p = 2\pi/\omega_0$  는 속도 리플의 한주기 시간을 나타낸다. 여기서,  $\omega_0$  는 속도의 리플이 나타나는 주기를 나타내는 각속도 성분을 나타내므로,  $\omega_0 = \omega_{r0}$  이다. 또한, 리플의 양이 적다고 했을 때,  $\omega_0 t \approx \hat{\theta}_r$  로 표시할 수 있다. 이를 바탕으로 수식(3), (4)를 다시 작성하면 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_{r0} + \hat{\omega}_{r1}e^{j\hat{\theta}_r} + \hat{\omega}_{r2}e^{j2\hat{\theta}_r} \dots + \hat{\omega}_{rn}e^{jn\hat{\theta}_r} \dots \quad (5)$$

$$\hat{\omega}_{rn} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \hat{\omega}_r e^{-jn\hat{\theta}_r} d\hat{\theta}_r, \quad n = 1, 2, \dots. \quad (6)$$

1차부터 고주파의 토크리플 중에 주파수가 작을수록 진동 및 소음의 영향은 크게 나타나게 되므로, 낮은 주파수의 속도리플을 줄일 수 있도록 하는 것이 더욱 중요하다.

그림 4는 제안된 부하토크 보상기법을 보여준다. 압축기의 속도로부터 필요한 n-차 속도 리플은 식(6)을 사용하여 검출한다. 속도 리플은 n차 토크명령으로 출력된다. n차의 토크명령을  $T_{dn}$ 만큼 증가 또는 감소하고 나서 일정시간의 안정화 시간을 지난 후 바로 전회(k-1)의 n차 속도 리플의 차와 비교하여 다음회의 토크명령 증감을 결정하게 된다.[9] n차 토크는 n차 속도 리플을 최소화하는 방향으로 계속해서 검색하여 찾아나가는 알고리즘이다. 그림에는 n차에 대한 것만 표시하였으나, 실제 구현에서는 필요한 차수에 대해서 각각 구현하여 출력된 보상토크를 합쳐서 부하보상 토크명령으로 인가되게 된다. 제안된 알고리즘에서는 부하토크 리플의 크기

는 찾아가도록 하고 위상은 미리 고정시켰다. 이는 진동을 일으키는 부하토크 리플의 주요 성분이 저주파에 위치해 있으며, 저주파 성분의 위상변화는 운전점의 환경변화에 의한 영향은 크기성분에 비하여 작기 때문에 이다. 고주파 성분을 보상한다면 운전점에 따른 위상을 보정해 주는 것이 필요하다. 다음은 알고리즘을 통해서 나온 부하 토크리플 보상기의 출력을 토크 명령으로 변환하는 것을 보여준다.

$$T_{lc}^* = T_{lc1}^* \cos(\omega_r t + \phi_1) + T_{lc2}^* \cos(2\omega_r t + \phi_2) \dots + T_{lcn}^* \cos(n\omega_r t + \phi_n) \dots, \quad (7)$$

각 보상토크의 차수에 Sine 함수를 이용하여 실시간 보상토크를 발생하게 된다.

#### 4. 실험

그림. 5는 실험 구성을 보여준다. 실험은 양산 에어컨인 SNW091AAW(LG전자)를 사용하였으며, 실외기 내부에 설치되어 있는 압축기를 배관 수정하여 외부에 설치하였다. 압축기의 진동 크기를 측정할 수 있도록 진동 측정장비(Bruel&Kajaer사, 3560C)를 사용하였다. 압축기 제어를 위해서 제품의 인버터가 아닌 별도로 구성된 인버터로 구동하였으며, 센서리스 알고리즘을 이용하여 속도제어를 할 수 있도록 하였다.[8] 전류제어기는 PI제어기를 사용하였으며, 대역폭은 100Hz로 구성하였다. 압축기의 정격속도는 60Hz (3600rpm)이며, 제품의 운전은 이 정격 속도에서 이루어질 경우 진동 발생이 적게 나왔으나, 속도가 낮을 경우 심한 진동이 발생하였다.

그림 6 은 압축기를 25Hz(1500rpm)의 속도로 운전할 때 제안된 부하 토크리플 보상기를 (a)사용하지 않은 경우와 (b)사용한 경우의 실험 결과를 보여준다. 일반적인 제어방법을 사용한 그림 6(a)의 경우 전체 진동의 크기는 10.1%이며, 회전수의 기본파 성분인 25Hz에서 진동양이 약 10%이고, 2차에서 약 3%이 발생하여 1차와 2차 부하 토크리플이 가장 큰 진동의 원인으로 분석되었다. 따라서 가장 큰 1차와 2차의 진동성분을 최소화하게 되면 진동의 양을 현격히 줄일 수 있게 될 것이다. 제안된 부하토크 보상 알고리즘은 주요 진동 인자와 마이크로프로세서의 연산능력을 고려하여 1차와 2차의 부하 토크리플에 대해서만 보상을 구현하였다. 그림 6(b)에서와 같이 제안된 제어기를 적용하면 1차와 2차 성분의 진동이 상당히 감소된 것을 볼 수 있다. 전체 진동의 크기는 2.64%이고, 1차성분의 진동양은 약 2.5%, 2차성분은 약 0.6%정도로 약 75%정도의 감소를 보여줬다. 3차 진동성분을 비교해보면, 보상을 하지 않았으므로 거의 변화가 없어야 하는데 진동이 조금 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 토크리플 보상 전류가 최대전류제한

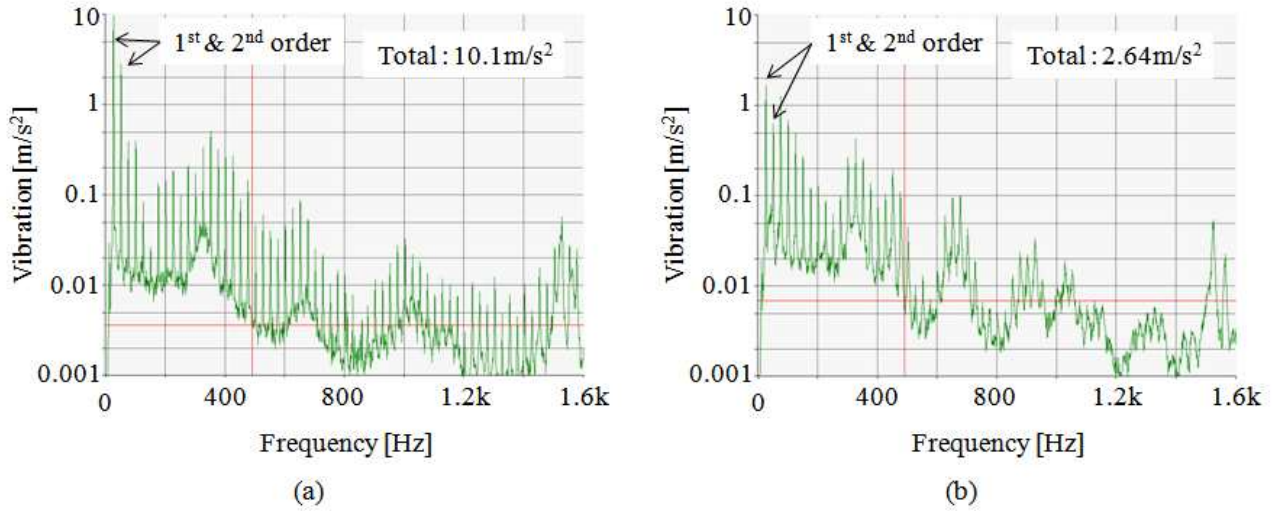


Fig. 6. Vibration test results when the compressor operates at 25Hz (a) without proposed load torque compensator method, total vibration: 10.1%, (b) with proposed load torque compensation method, total vibration: 2.64%.

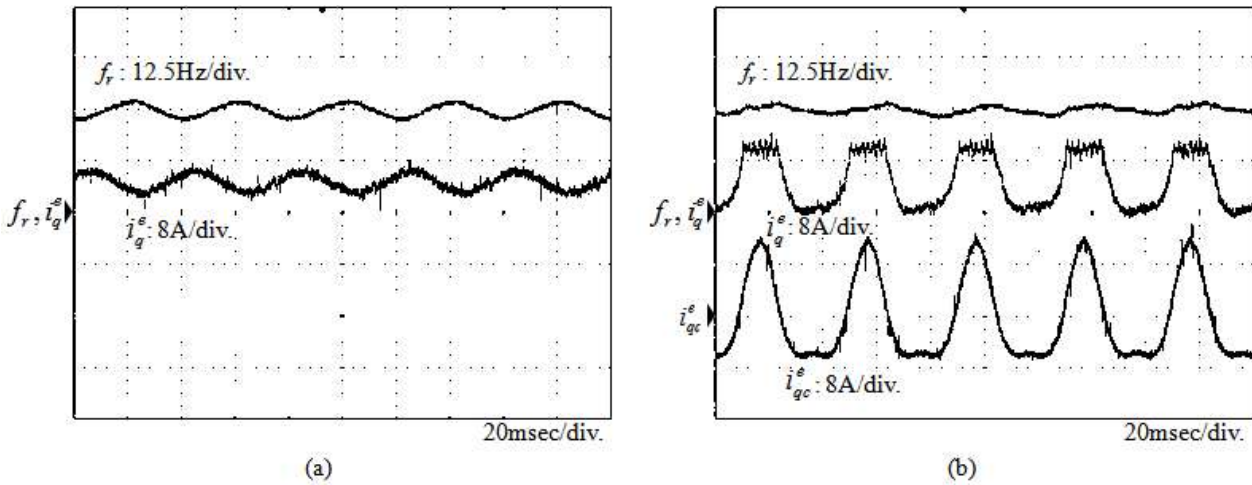


Fig. 7. Plots of speed, q-axis current, and load compensation current when the compressor operates at 25Hz (a) without proposed load torque compensator method, (b) with proposed load torque compensation method.

(Maximum current limit)에 의해서 3차 이상의 토크 하모닉이 발생하면서 발생하는 현상이다.

그림. 7은 25Hz 운전시 속도( $f_r = \hat{\omega}_r/2\pi$ ), 동기좌표계에서의 q-축 전류( $i_q^e$ )와 부하 토크리플 보상기에서 발생하는 보상전류( $i_{qc}^e$ )의 파형을 보여준다. 실험에 사용된 압축기는 IPM형 모터를 채용하고 있어, 토크명령에 대해서 dq축 전류가 각각 생성되어야 한다. 그러나 실험의 단순화를 위해서 모터의 d-축전류를 0으로 제어하고 q-축 전류만으로 토크를 발생시키는 방식을 적용하였다. 그림. 7 (a)는 제안된 부하 보상 알고리즘이 없는 일반적인 속도제어기만을 사용한 결과이고, (b)는 제안된 부하 보상 알고리즘을 사용한 결과이다. 부하토크 보상을 하지 않게 되면 부하토크의 리플에 따라 속도의 리플이

존재하며 속도제어기에서 이를 보상하기 위해 동작되어 q축 전류에도 리플이 존재한다. 제안된 알고리즘은 추정된 압축기 속도를 Feedback 받아서 필요한 진동대응(부하대응)토크 명령을 만들어 낸다. 압축기 속도로부터 싱글 로터리의 부하 패턴을 검출하여 토크제어기 명령에 속도제어기 명령과 합쳐져서 인가된다. 부하토크 리플보상의 토크명령은 주기의 합이 0이므로, 속도제어기에서 전체 속도를 관장하게 되고 진동저감 알고리즘에서는 진동대응만 하게 된다. 그림 7 (b)의 q-상 전류의 모양이 부하 패턴과 비슷하게 바뀌면서 속도가 떨어진 부분을 줄이는 효과를 발생시켜, 속도 리플이 많이 줄어 들 수 있다. 그러나, 부하토크 보상 전류는 전류 제어기에서 최대전류제한에 의해서 제한됨을 알 수 있다. 이에 의해서 발생하는 토크 하모닉은 3차이상의 고

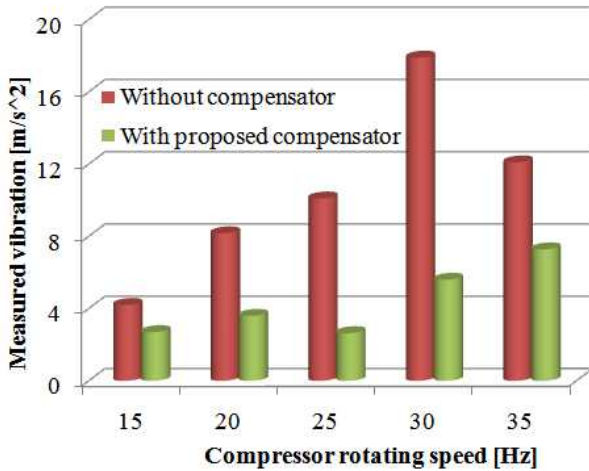


Fig. 8. Measured vibration vs. rotating speed.

차성분의 진동으로 나타나 그림 6(b)에서 관찰할 수 있었다.

그림 8은 각 운전 주파수별 진동의 양을 측정된 결과를 비교한 것이다. 제안된 부하 토크리플 보상기법을 사용하면 운전 주파수가 25Hz-30Hz사이가 가장 많은 진동 감소 결과를 얻을 수 있었다. 35Hz 이상에서는 관성에 의해서 진동의 효과가 줄어들어 개선 효과가 높지 않았다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 싱글로터리 압축기용 저속 운전 부하 토크리플 보상기를 제안하였다. 제안된 보상기는 부하패턴을 미리 알아내지 않고도 실시간으로 속도의 주파수 성분을 감지하여 진동을 최소화 할 수 있어 다양한 압축기, 다양한 환경에서 사용가능 할 것이다.

또한, 본 논문에서는 기술하지는 않았으나, 각 주파수별 위상 정보가 부하별로 변화가 발생한다. 부하의 1, 2차 성분의 경우에는 그 위상 변화가 크지 않으나, 3차 이상의 성분에서는 상대적인 위상변화가 크다. 따라서 3차이상의 부하토크 리플 보상이 필요한 경우에는 크기 뿐 아니라 위상 변화에 대해서도 제안된 알고리즘을 수정 및 적용하여 속도 리플을 최소화 하는 방향으로 구현하면 진동 저감에 도움이 될 것 예상된다.

이 논문은 2014학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음

## References

- [1] S. Lim, J. Lim, and T. Park, "Load torque compensation for low vibration & low speed control of air-con single rotary compressor," *KIPE Power Electronics Annual Conference 2010*, pp. 334-336, Jul. 2010.
- [2] C. M. Young, C. C. Liu, and C. H. Liu, "Vibration analysis of rolling piston-type compressors driven by single-phase induction motor," in *Proc. IECON'93*, Vol. 2, pp. 918-923, Nov. 1993.
- [3] T. W. Ching, "An investigation on electrical performance of variable-frequency drives for air-conditioning applications," in *Proc. EPEC2008*, pp. 1-7, Oct. 2008.
- [4] H. Murakami, Y. Honda, and H. Kiriya, "The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor," in *Proc. IAS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 840-845, Oct. 1999.
- [5] J. Donlon, J. Achhammer, H. Iwamoto, and M. Iwasaki, "Power modules for appliance motor control," *IEEE Transactions on Ind. Appl. Mag.*, Vol. 8, No. 4, pp. 26-34, Jul./Aug. 2002.
- [6] B. G. Gu, J. H. Choi, and I. S. Jung, "Load torque compensation algorithm for single rotary compressor of air conditioning system," *KIPE Power Electronics Annual Conference 2010*, pp. 320-322, Nov. 2010.
- [7] S. Ryu, I. S. Jung, J. H. Choi, B. G. Gu, and J. Kim, "Oscillation reductive method of compressor based on a frequency analysis with speed ripple and apparatus thereof," Korea patent No. 10-1162954, 2012.
- [8] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," *IEEE Ind. Appl.*, Vol. 38, No. 4, pp. 1054-1061, Jul./Aug. 2002.
- [9] C. Hua and C. Shen, "Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system," in *Proc. PESC 1998*, Vol. 1, pp. 86-93, May 1998.



### 구본관(具本瑄)

1976년 2월 6일생. 1998년 경북대 공대 전자공학과 졸업. 2000년 포항공대 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 졸업(공학박). 2005년~2007년 LG전자 선임연구원. 2007년~2014년 전자부품연구원 책임연구원. 2014년~현재 경북대 에너지공학부 조교수.