

## 철도차량 2단 피스톤 공기압축기의 시뮬레이션 연구

### Simulation Study of a Two-Stage Piston Type Air Compressor of a Railway Vehicle

김명준\*, 김성섭\*\*, 이준현\*\*, 신제창\*, 김태훈\*\*, 이진석\*\*, 조현직\*\*\*, 조인형\*\*\*\*, 강철구\*\*†

Myeong-Joon Kim\*, Sung-Sub Kim\*\*, Joon-Hyun Lee\*\*, CheChang Shin\*, Taehoon Kim\*\*, Jin-Seok Lee\*\*,

Hyun-Jik Cho\*\*\*, In-Hyeoung Joe\*\*\*\*, Chul-Goo Kang\*\*†

**초 록** 철도차량의 운용성과 주행 안정성을 보장하기 위해서는 제동시스템의 상태와 가동가능 여부를 실시간으로 확인하여야 한다. 제동시스템 내에서 공기압축기는 공기를 생성하는 가장 중요한 부분 중 하나이므로, 실제 고장 데이터를 얻기 힘들기 때문에 고장이 났을 경우 어떤 거동을 보이는지 예측해보는 것이 중요하다. 본 논문에서는 철도차량용 2단 피스톤 공기압축기의 고장 데이터 생성을 위한 선행 연구로서, 2단 피스톤 공기압축기의 수학적 모델링을 구하고 실제 가동 상황을 가정하여 MATLAB 시뮬레이션 하였다.

**주요어** : 2단 공기압축기, 제동시스템, 시뮬레이션

#### 1. 서 론

철도차량의 운용성과 주행 안전성을 보장하기 위해선 제동시스템의 잔여수명을 실시간으로 모니터링하여 고장 발생을 최소화하고 시스템에 대한 안전성을 확보해야 한다.

최근 고장검지 및 이상 탐지 기법이 발전함에 따라, 여러 분야에서 시스템의 정상(normal) 상태와 이상(abnormal) 상태 분류를 위한 연구가 진행되고 있다[1]. 하지만, 시스템의 고장 데이터를 얻는 것이 쉽지 않을 경우에 시뮬레이션을 통해서 고장시 거동을 예측하는 연구가 수행되어 왔다[2][3].

본 논문에서는 철도차량 주공기압축기로 사용되고 있는 2단 피스톤 공기압축기의 고장 데이터 생성을 위하여 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

#### 2. 시스템 구성

2단 피스톤 공기압축기의 구조는 저압 및 고압실린더는 수평으로 배치되어 있으며, 모터에 의해 가동한다. 주공기통의 압력이 목표치보다 적을 경우 모터가 회전하면서 피스톤이 왕복 운동한다. 피스톤이 상사점에서부터 운동을 시작하면 저압실린더가 팽창되고, 실린더 내부압력이 흡입공기보다 낮아지면 흡입밸브가 열려 공기가 실린더 내부로 들어오게 된다. 이어서 실린더가 압축되면, 실린더 내부압력이 토출압력보다 높아지면서 저압 토출밸브가 열려 압축된 공기가 저압 토출공간으로 이동하게 된다. 저압실린더에서 압축된 공기는 냉각기를 지나 고압실린더로 이동하게 되고, 고압실린더에서 다시 압축된 공기는 후냉각기 및 건조기를 거쳐 주공기통으로 이동하게 된다.

#### 3. 피스톤 공기압축기의 수학적 모델

본 연구에서는 유동 해석을 위해 전체 시스템을 저압실린더, 저압 토출공간, 고압실린더,

† 교신저자: 건국대학교 공과대학 기계공학과 (cgkang@konkuk.ac.kr)

\* 건국대학교 대학원 기계공학과

\* 건국대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* (주)현대로템 기술연구소

\*\*\*\* (주)보인이앤엠

고압 토출공간, 주공기통의 다섯 개의 검사체적으로 나누었다. 냉각기에서의 냉각 효과를 고려하기 위해 본 연구에서는 냉각 전 온도에 비례하여 냉각된다고 가정하였다.

저압 및 고압 실린더에 열역학 제1법칙을 적용하면 실린더 벽과의 열전달을 고려한 실린더의 온도 변화는 다음과 같다.

$$\dot{T}_c = \frac{1}{m_c c_v} [H A_c (T_w - T_c) - p_c \dot{V}_c + (c_p T_i - c_v T_c) \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} R T_c] \quad (1)$$

여기서  $p_c$  는 실린더 내부 압력을,  $V_c$  는 기구학적 계산을 통해 얻은 실린더 부피를 의미하고,  $m_c$  는 실린더 내부의 공기 질량을 의미하며,  $T_c$ ,  $T_w$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  는 각각 실린더 내부, 실린더 벽, 흡입공기, 토출공기 온도를 의미한다.  $H$  는 Woschini correlation에 의한 실린더와 벽 사이의 열전달 계수이며,  $A_c$  는 실린더와 벽이 맞닿는 면적을 의미한다[4].  $c_p$ ,  $c_v$ ,  $R$  는 각각 정압, 정적 비열, 기체 상수이며  $\dot{m}_{in}$  및  $\dot{m}_{out}$  는 각각 흡입 및 토출 밸브를 통한 공기의 질량유량이다. 식 (1)을 이용하면 각 시점에서 실린더 내부 온도를 계산할 수 있고, 이상기체 상태방정식을 적용하면 압력을 계산할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과

공기압축 시스템은 조압기(CMG, Compressor Motor Governor)에서 주공기통의 압력에 따라 모터의 가동 여부를 결정하며, 주공기통 압력이 설정 값에 도달할 경우 다음 동작 부하를 줄이기 위해 전자밸브를 통해 내부 공기를 모두 배출한다. 본 시뮬레이션에서는 실제 상황을 가정하여 주공기통의 초기 gage 압력이 7.8 bar 일 때 일정 압력에 도달할 때까지 모터를 가동한 후 정지한 후 전자밸브를 통해 공기가 빠져나가고 주공기통 압력이 다시 일정 이하로 내려갈 경우 모터를 다시 가동하는 것까지를 반영하였다. 식 (1)을 포함한 모델링된 식을 MATLAB 프로그래밍하여 시뮬레이션 하였으며, 적분은 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. Fig. 1은 시뮬레이션 결과를

보여준다. Fig. 1에서  $p_{dL}$ ,  $p_{iH}$ ,  $p_{dH}$ ,  $p_d$ ,  $p_T$  는 각각 저압 토출, 고압 흡입, 고압 토출, 공기탱크 흡입, 공기탱크 내부 압력을 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 실제 공기압축기의 시험결과와 유사한 응답을 보여주고 있다.

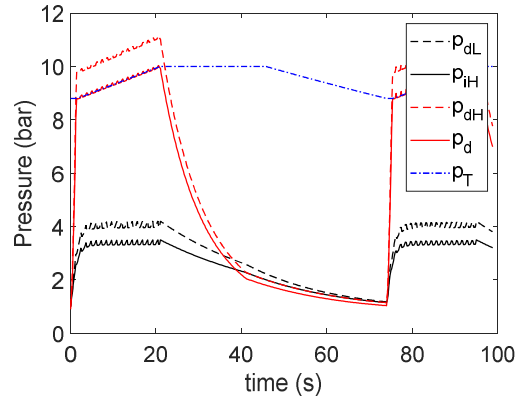


Fig. 1 Simulation results

#### 5. 결론

본 논문에서는 철도차량용 2단 피스톤 공기압축기의 수학적 모델을 구하고, MATLAB으로 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 시뮬레이션 결과 실제 철도차량 공기압축기의 거동과 유사한 응답을 얻었다. 향후 이 시뮬레이션 모델을 이용하여 고장 데이터를 생성할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 부분적으로 국토교통부 철도차량 스마트 유지보수 기술개발사업의 연구비지원(20QPWO-B152220-02)으로 수행되었으며, 또 부분적으로 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(No. 2020R1A2C1010138).

#### 참고문헌

- [1] M. Gribbestad, et al., *Entropy*, 23(1): 10.3390/e23010083, 2021.
- [2] D. McCarthy, Vibration-based diagnostics of reciprocating machinery, PhD Thesis, MIT, 1994.
- [3] M. Elhaj, et al., *J. of Mechanical Systems and Signal Processing*, 22: 374-389, 2008.
- [4] M. Farzaneh-Gord, et al., *J. of Refrigeration*, 56: 186-197, 2015.