

고압 왕복동 압축기의 밸브 거동해석

· 이 안 성*, 홍 용 주**, 정 영 식***, 변 용 수***

Valve Dynamic Analysis of a High Pressure Reciprocating Compressor

An Sung Lee, Yong Ju Hong, Young Sik Jung, Yong Su Byun

* 한국기계연구원 회전체그룹, ** 한국기계연구원 열공조기계그룹
*** (주) 범한산업

Abstract : A complex valve dynamic analysis has been performed with a high pressure reciprocating gas compressor. Valve dynamic equations, which take into account the flow continuity and cylinder pressure fluctuation, have been derived. Flow coefficients of valves has been analyzed, using CFD models. Results have shown that both of the suction and discharge valves behave favorably without any fluttering motions.

Key words: Plate Valve(플레이트 밸브), Valve Dynamics(밸브 동역학), Reciprocating Compressor(왕복동 압축기), Flow Coefficient(유동 계수), PV-Diagram(PV-선도)

1. 서론

왕복동 압축기의 성능에 가장 큰 영향을 주는 구성 부품은 흡입·토출 밸브로써, 밸브를 통한 가스 유동 및 밸브 플레이트의 거동은 가스의 물성, 흡·토출 밸브 플레이트의 동역학, 그리고 압축기 피스톤의 흡입·압축·토출·팽창 행정들과 종합적으로 연계되어 있다. 따라서, 종합 밸브 설계해석 기술의 확보는 압축기 시스템 전체에 대한 설계해석 기술의 보유를 의미한다.

본 연구에서는 먼저 밸브를 통한 질량 유동과 실린더 내 가스 질량변동의 연속조건, 그리고 크랭크 각에 따른 실린더 내 압력 변화를 연계 고려한 밸브 플레이트의 거동을 종합 유도 정식화하고^[1-4], 밸브를 통한 상세 유동해석에는 CFD(전산유체역학)를 적용하였다. 그리고, 밸브 시스템과 압축기의 연계거동 연립방정식에 Runge-Kutta법을 적용하여, 개발 대상인 351 bar 천연가스 압축기 고압단 밸브 플레이트의 거동을 종합 시뮬레이션하였다.

2. 밸브 거동 정식화

Fig. 1에 기초하여, 크랭크 각에 대한 피스톤 위치, 위치의 미분, 그리고 압축과 팽창 행정시 실

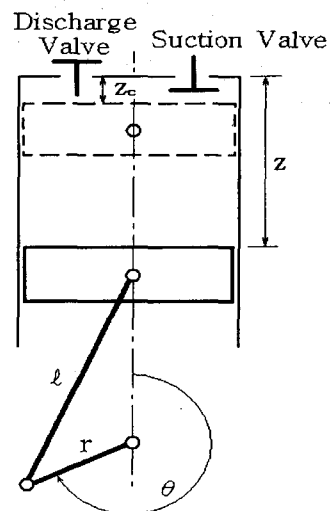


Fig. 1 Piston position as a function of crank angle.

치, 위치의 미분, 그리고 압축과 팽창 행정시 실

고압 왕복동 압축기의 밸브 거동해석

린더 압력의 미분은

$$Z = \frac{z_c}{s} + \frac{1}{2} (1 - \cos \theta) + \frac{1}{2\epsilon} (1 - \sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \theta}) \quad (1)$$

$$\frac{dZ}{d\theta} = \frac{1}{2} \sin \theta \left(1 + \frac{\epsilon \cos \theta}{\sqrt{1 - \epsilon^2 \sin^2 \theta}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dP}{d\theta} = - \frac{kP}{Z} \frac{dZ}{d\theta} \quad (3)$$

토출 행정의 순방향 유동시 토출 밸브에서의 질량 유량과 실린더 내 질량 변화의 연속조건으로부터, 실린더 압력의 크랭크 각에 대한 미분은

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{k}{Z} \left[-B_{df} X_d P_d \left(\frac{P_d}{P_d} \right)^{(k-1)/2k} \left(\frac{P}{P_d} \right)^{(k-1)/k} \times \sqrt{\left(\frac{P}{P_d} \right)^{(k-1)/k} - 1} - P \frac{dZ}{d\theta} \right] \quad (4)$$

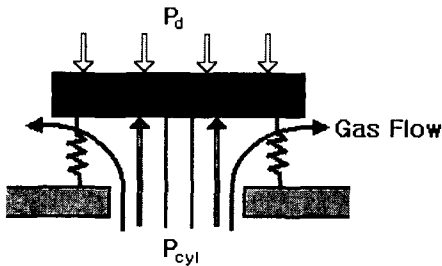


Fig. 2 Free body diagram of discharge valve plate.

Fig. 2의 토출 밸브 플레이트의 free body diagram으로부터, 토출 행정시 밸브 플레이트의 운동방정식은

$$X_d'' + 2\zeta_d \Omega_d X_d' + \Omega_d^2 X_d = \frac{c_{dD} A_{dV} P_d}{m_d x_{dL} \omega^2} (P - P_d) - \frac{F_{dV_0}}{m_d x_{dL} \omega^2} + \frac{g}{x_{dL} \omega^2} \quad (5)$$

한편, 흡입 행정의 순방향 유동시 흡입 밸브에서의 질량 유량과 실린더 내의 질량 변화의 연속조건으로부터, 실린더 압력의 크랭크 각에 대한 미분은

$$\frac{dP}{d\theta} = \frac{k}{Z} \left[B_{sf} X_s P_s \left(\frac{P}{P_s} \right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{P}{P_s} \right)^{(k-1)/k}} - P \frac{dZ}{d\theta} \right] \quad (6)$$

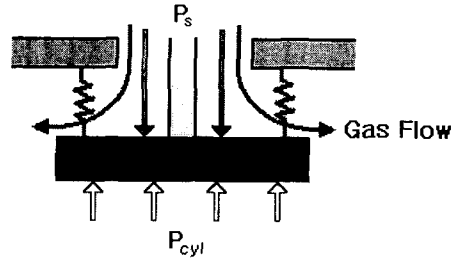


Fig. 3 Free body diagram of suction valve plate.

Fig. 3의 흡입 밸브 플레이트의 free body diagram으로부터, 흡입 행정시 밸브 플레이트의 운동방정식은

$$X_s'' + 2\zeta_s \Omega_s X_s' + \Omega_s^2 X_s = \frac{c_{sD} A_{sV} P_d}{m_s x_{sL} \omega^2} (P_s - P) - \frac{F_{sV_0}}{m_s x_{sL} \omega^2} + \frac{g}{x_{sL} \omega^2} \quad (7)$$

3. 작동 가스 물성과 압축기 데이터

3.1 가스 물성 (0 ℃, 1 bar)

- 가스 : Natural Gas
- Density : 0.7294 kg/m³
- Gas constant : 508.5 J/kg · K
- Molecular weight : 16.351 kg/kmole
- Compression ratio : 1.316 (C_p/C_v)

3.2 압축기 설계 데이터

- 흡입 압력 : 87.8 bar abs.
- 흡입 온도 : 50 ℃

- 토출 압력 : 351.0 bar abs.
- 피스톤 회전수 : 1,170 rpm
- 평균 피스톤 속도 : 3.90 m/s
- 실린더 직경 : 30 mm
- 피스톤 스트로크 : 100 mm
- 커넥팅 로드 길이 : 300 mm

로 인해 정압의 상승과 전압(total pressure)의 감소 즉 유동손실이 발생하는 것으로 예측되었다. 최종적으로, 흡입 밸브를 통한 유동을 등가 오리피스 유동 특성과 비교한 결과 유량계수 0.439를 나타내었다.

4. 흡입·토출 밸브의 유동해석

고압 밸브 시스템에서의 유량계수 (flow coefficient) 예측을 위해, 상용 열유동 해석 프로그램 FLUENT를 사용하여, 흡입·토출 밸브의 유동특성을 해석하고, 각 밸브의 유량계수를 구하였다.

유동해석시 작동유체는 천연가스(natural gas)로 고려하였으며, 천연가스는 원산지에 따라 그 조성이 다소 차이가 있으나, 대부분 메탄(CH₄)이 주성분이다. 따라서 본 해석에서는 메탄을 작동유체로 고려하였으며, 비압축성의 정상상태(steady state)로 가정하여 유동해석을 수행하였다. 또한, 해석은 최대 밸브리프트인 경우에 대해 수행하였으며, 한편 난류항은 복잡한 밸브 유동을 감안하여 RNG (Renormalization Group) k-ε 난류모형, 벽면에 대해서는 벽법칙(wall function)을 사용하였다. 또한 해석영역은 밸브시스템으로 인한 압력 손실 및 회복을 고려하여 설정하였다.

4.1 흡입 밸브의 유동해석 모델 및 해석결과

Fig. 4는 흡입 밸브의 3차원 솔리드 모델로, 8개의 흡입구를 통해 유입된 고압의 천연가스가 각각의 유로를 통해 압축기 실린더 내부로 유입되는 구조를 갖고 있다. 모델링은 전체 흡입밸브의 1/8만을 고려하였다.

Fig. 5는 흡입 밸브가 완전히 열린 상태에서 입출구의 전압력차가 29,000 Pa일 때 속도분포를 나타낸다. 해석결과로부터, 유입구로 유입된 고압의 천연가스가 90° 곡관부의 유입 유로에서 주유동 방향의 변화와 유효 유로 단면적의 감소로 인해 20 m/s 이상의 고속으로 유동함을 볼 수 있으며, 곡관의 출구부에서는 재순환 영역이 발생하는 등 복잡한 형태를 나타내고 있다. 밸브 플레이트 주위에서는 급격한 유동방향의 변화 발생으로 인한 정체점이 나타나며, 이

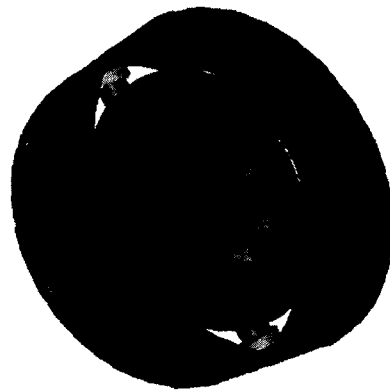


Fig. 4 Solid CAD model of the suction valve.

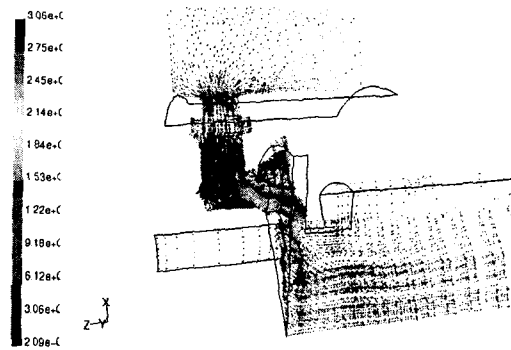


Fig. 5 Velocity vector of gas flow at the fully opened suction valve.

4.2 토출 밸브의 유동해석 모델 및 해석결과

Fig. 6은 토출 밸브의 3차원 솔리드 모델로, 실린더 내부로부터 8개의 유입구를 통해 고압의 천연가스가 밸브내로 유입되어, 밸브 플레이트와 8개의 유로를 통해 외부로 토출되는 구조를 갖고 있다. 모델링은 전체 토출 밸브의 1/8만을 고려하였다. 그리고, 입출구 경계조건으로 인한 영향을 배제하기 위해 실린더와 토출밸브 출구부의 해석영역을 충분히 크게 설정하였다.

Fig. 7은 토출 밸브가 완전히 열린 상태에서 입출구의 전압력차가 168,000 Pa일 때 속도분포를 나타낸다. 실린더로부터 토출되는 천연가스는 유입유로에서 20 m/s 이상의 고속으로 유동하고, 일부 유입유로에서 재순환 유동이 발생함에 따라 유로내에 균일한 속도분포가 나타나지 않으며, 밸브 플레이트에 충돌한 강한 유동은 출구 방향으로 급속한 유동방향의 전환을 나타내고 있다. 한편, 밸브 플레이트 하부 유로로는 출구가 존재하지 않기 때문에 정체된 유동을 관찰할 수 있다. 최종적으로, 토출 밸브를 통한 유동을 등가 오리피스 유동 특성과 비교한 결과 유량계수는 0.444를 나타내었다.

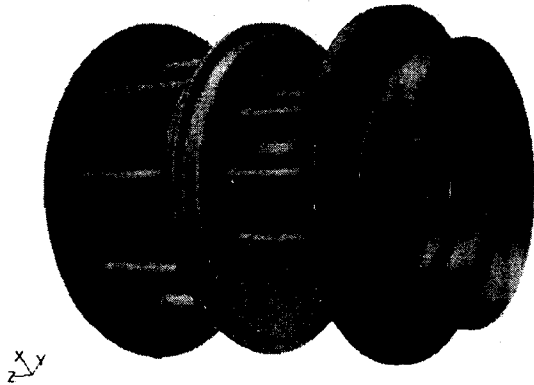


Fig. 6 Solid CAD model of the discharge valve.

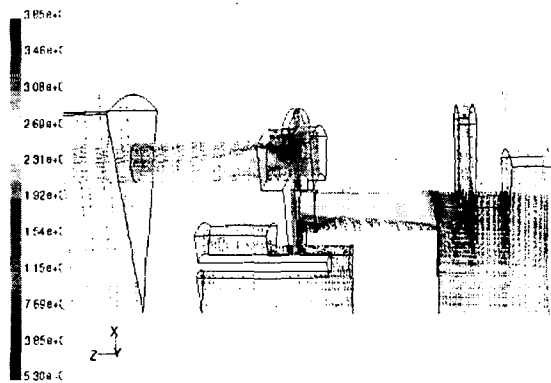


Fig. 7 Velocity vector of gas flow at the fully opened discharge valve.

5. 밸브 거동 종합 시뮬레이션

고압밸브 시스템에 대해 가스의 물성치, 흡입·토출 밸브 플레이트의 동역학, 밸브를 통한 질량 유동과 실린더 내 가스 질량변동의 연속 조건, 그리고 피스톤에 의한 흡입·압축·토출·팽창이 고려된, 크랭크 각에 따른 실린더 압력과 밸브 플레이트 거동의 종합 시뮬레이션 해를 얻었다. Fig. 8은 PV-선도를 나타내며, 밸브의 손실이 작아 압축기 피스톤과 밸브가 이상적으로 매칭 작동하고 있는 것으로 분석된다. Fig. 9는 크랭크 각에 따른 흡입 밸브 플레이트의 거동을 나타내며, 밸브가 57.5° 에서 닫히는 과정이 플러터링 없이 이상적인 거동을 하는 것으로 예측된다. Fig. 10은 크랭크 각에 따른 토출 밸브 플레이트의 거동을 나타내며, 밸브가 303.0° 에서 열리며 닫히는 과정이 매우 이상적인 거동을 하는 것으로 예측된다.

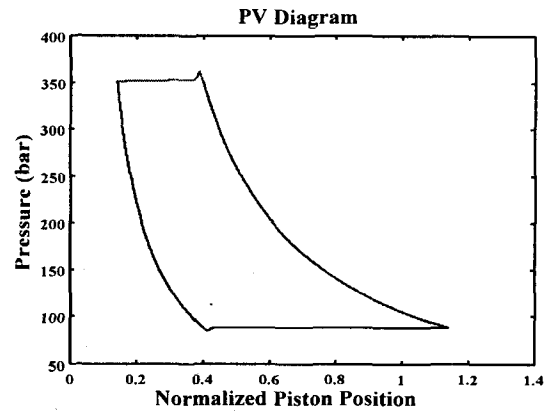


Fig. 8 Predicted PV-diagram associated with the high pressure valve system.

6. 결론

본 논문에서는 고압 왕복동 가스 압축기의 고압단을 대상으로 종합 밸브거동 해석을 수행하였다. 유동 연속과 실린더 내 압력변동을 고려한 밸브 동역학 방정식이 크랭크 각의 함수로 유도되었으며, 흡입과 토출밸브에서의 상세한 유동해석은 CFD를 이용하여 수행되었다. 흡

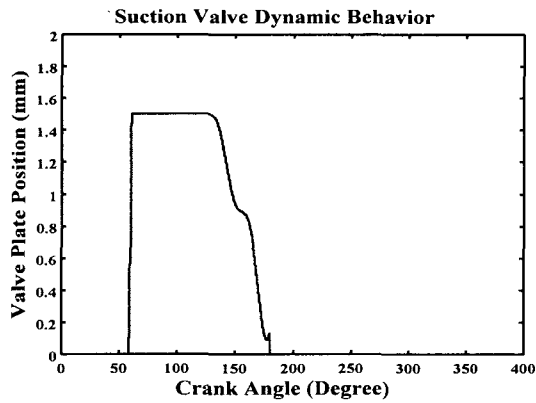


Fig. 9 Dynamic behavior of suction valve plate vs crank angle of the high pressure valve system.

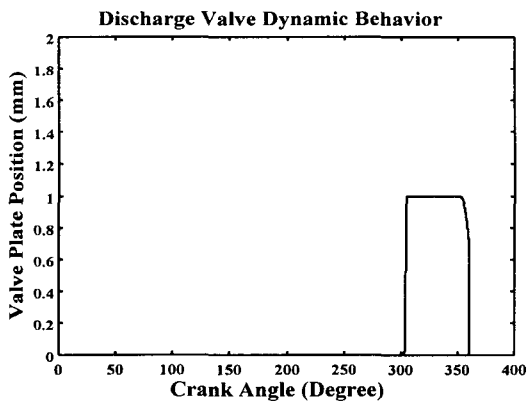


Fig. 10 Dynamic behavior of discharge valve plate vs crank angle of the high pressure valve system.

입과 토출 밸브의 종합 거동 시뮬레이션 결과, 두 밸브 모두 플레이트가 플러터링의 발생 없이 매우 양호한 거동을 하는 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

- [1] M. Costagliola, "The Theory of Spring-Loaded Valves for Reciprocating Compressors," ASME Journal of Applied Mechanics, December, pp. 415-420, 1950.
- [2] D. Woollatt and H. P. Wertheimer, "Improved Accuracy in the Calculation of Valve Dynamics in Reciprocating Compressor," ASME Paper 90-ICE-3, 1990.
- [3] M. Kato, M. Kurohashi, and M. Aoshima, "Dynamic Behavior of Valves with Pneumatic Chambers for Reciprocating Compressors," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 115, pp. 371-376, 1993.
- [4] 변형현, 박종포, 정두한, 1999, "대형 가스 엔진용 왕복동 압축기의 압력 맥동 및 진동 해석," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 486-491, 1999.