

스크롤 압축기 밸브주변의 비정상유동과 밸브거동에 관한 연구

이진갑* · 류호선*

A Study on Unsteady Flow and Movement around a Check Valve in a Scroll Compressor

Jin-Kab Lee*, Ho-Seon Rew*

Key Words: Scroll Compressor(스크롤 압축기), Check Valve(체크 밸브), Flow Induced Forces(유체유인력), Unstable Motion(비정상거동)

ABSTRACT

In a scroll compressor it is generally accepted that a check valve is necessary to prevent reverse rotation of the scrolls. The check valve is subjected to discharge pulsations and their resultant forces. The flow phenomena around the check valve may affect the efficiency and the noise level significantly. The motivation of this study is to understand the flow phenomena and the unstable motion of the check valve on operating conditions in order to identify reasons raising noise and improve the performance of the check valve. In this study, unsteady flow simulation was performed using CFD and the pressure distribution around the check valve was obtained. This paper also shows that unstable motion of the check valve on standard operating conditions through theoretical analysis and flow visualization.

1. 서 론

스크롤 압축기는 에어컨에 사용되는 냉매압축기로 종래의 왕복동식, 로터리식에 비해 효율이 높고 진동과 소음이 낮기 때문에 최근 사용범위가 급속히 확대되고 있다. 스크롤 압축기는 고정 스크롤과 선회 스크롤이 맞물려 여러 쌍의 압축실을 이루며 압축을 하기 때문에 가스 압축에 필요한 토크 부하의 변동이 타 방식의 압축기에 비해 작을 뿐 아니라, 흡입 및 토출 밸브가 없다. 이런 구조적 장점이 저진동, 저소음 및 고효율에 기여하는 기본적인 요인이다. Fig. 1은 스크롤 압축기 구조도의 일부로 압축부 및 토출부를 보인 것이다.

운전시의 압축된 가스는 고정 스크롤 중앙의 토출 구멍을 통해 분출되어 토출 커버에 놓여 있는 체크 밸브를 경유해 토출실로 나가게 된다. 압축기의 운전이 정지되었을 때 토출실의 고압의 압축가스가 고정 스크롤의 토출 구멍을 통해 압축실로 들어가서 선회스크롤이 역회전하게 된다. 이런 선회스크롤의 역회전은 토출실내의 가스압과 압축실내의 가스압이 평형을 이룰 때까지 계속된다. 이 역회전이 심할 경우 선회 및 고정스크롤의 램이 파손되어 신뢰성에 치명적인 결함을 가져올 뿐 아니라, 큰 소음을 발생시키게 된다. 체크 밸브는 운전정지시 압축 가스의 역류가 일어나지 않도록 하여 상기 문제점을 방지하는 장치로 리드 밸브, 판 밸브 및 피스톤 밸브 등의 여러 가지 구조를 각 제작

* LG전자 홈어프라이언스 연구소, Comp.팀

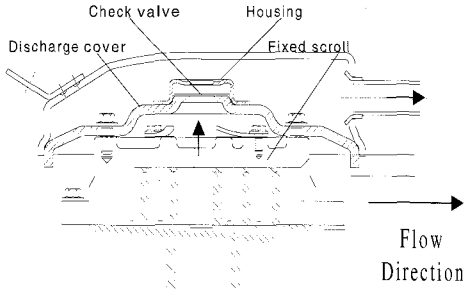


Fig. 1 Configuration of the scroll compressor around the discharge port and the outlet

회사별로 채용하고 있다. 본 연구에서의 체크 밸브는 얇은 디스크형의 판 밸브이며, Fig. 1에서 보듯이 토출커버 중앙부 상단에 설치되어 있다. 운전시 체크 밸브는 토출 가스력에 의해 하우징의 상부에 위치하고, 정지시에는 급속히 낙하하여 토출 포트를 막아 고압의 토출가스가 압축실로 역류되는 것을 방지한다. 그러나, 이 체크 밸브에 의해 2가지 종류의 소음이 발생하는데 첫째는 운전 정지시 닫히면서 나는 충격 소음이고 둘째는 운전 중에 토출가스의 압력맥동으로 인해 체크 밸브가 불안정하게 가진되어 주위의 하우징에 충돌함으로써 나는 소음이다. 본 연구는 두 번째의 운전 중에 발생되는 소음에 대한 것이다. 운전 중에 소음을 발생시키는 체크 밸브의 거동과 밸브에 가해지는 유체유인력에 대해서는 그 중요성에 비해 많은 연구가 되고 있지 않다. 이는 체크 밸브가 위치하는 부위의 구조가 매우 복잡할 뿐 아니라, 이 부위의 유동이 압축성, 비정상 및 비대칭이어서 유동현상을 정확히 계측하고 해석하는 것이 어렵기 때문이다. Grunwald & Beagle⁽¹⁾는 단순한 체크 밸브에 대한 거동을 해석과 실험적으로 구하였고, Shuji & Shinji⁽²⁾는 토출맥동 소음저감의 관점에서 압축실에서 토출실로 유출되는 토출가스의 맥동을 해석하였으며, 김명균 등⁽³⁾은 리드형의 체크 밸브가 압축실의 효율에 미치는 영향을 연구하였다. Lee 등⁽⁴⁾은 운전 정지시의 소음을 개선하기 위해 신 구조의 체크 밸브를 개발하여 작동성 평가를 하였다.

본 연구는 R22냉매를 사용한 3마력급의 스크롤 압축기에 대해 ARI조건의 정상운전과 과압축 운전시 체크 밸브의 거동에 의한 충돌소음의 현상을 규명하기 위해 체크 밸브 주위의 유동현상을 상용 패키지인 FLUENT를 이용하여 구하고, 체크 밸브에 걸리는 힘을 분석하였다. 또한, 밸브의 운동을 해석적으로 구해

가시화한 실험 결과와 비교하여 소음발생 기구에 대해 고찰하였다.

2. 밸브주변의 유동해석 및 하중분포

본 연구에서는 스크롤 압축기 밸브 주변 유동을 해석하기 위해 3차원 비정상, 압축성 및 난류 유동으로 간주하였다. 유동 해석은 FLUENT를 이용하였다. 난류 유동을 해석하기 위하여 Launder와 Spalding⁽⁵⁾의 표준 $k-\epsilon$ 모델과 벽 법칙을 사용하였다. 스크롤 압축기 밸브 주변의 형상은 상당히 복잡하기 때문에 tetrahedral 격자를 사용하였고, 비정상 유동계산을 수행하면서 발생할 수 있는 기억 용량과 저장 공간을 고려하여 격자수는 75,000개를 사용하였다. 유동해석 과정에서 사용되었던 각 요소 부품의 표면 격자는 Fig. 2와 같다.

압축기는 60 Hz로 구동되며, 연산시 시간 스텝을 1/200으로 하여 계산하였다. 스크롤 압축기는 선회 스크롤이 회전하면서 회전 스크롤과 고정 스크롤 사이에 생기는체적 변화가 시간에 따라 달라지기 때문에, 토출 압력은 시간에 따라 변하는 비정상 특성을 갖는다. 그런데 유동 해석을 위해서는 전압(total pressure)이 필요하다. 현실적으로 토출구 부분에 여러 개의 압력

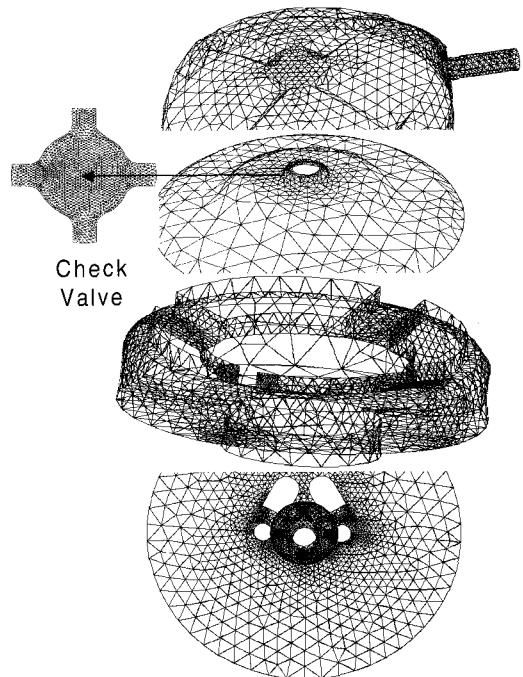


Fig. 2 Surface meshes of several parts

측정 센서를 장착하기가 곤란하기 때문에 중앙 부분의 정압을 토출구의 압력으로 상정하여, 이 압력 변화로 얻어지는 유량에 의한 동압을 합하여 전압을 구하였다. 그러나 토출 포트에서의 속도는 일정하지 않으나, 정확한 속도 분포를 얻기가 힘들 뿐 아니라 전압에 동압이 차지하는 비중이 작기(토출 가스의 시간 평균 압력은 2MPa정도임)때문에 속도분포는 편의상 일정하다고 가정하였다. 그리고 토출 커버의 온도는 측정치의 평균온도를 사용하였다. 한편 체크 밸브는 고정되어 있는 물체는 아니다. 그러나 정상상태 작동시 체크 밸브는 가스 토출력에 의해서 하우징 상단부에 고정되어 있고 운동도 거의 관찰되지는 않는다. 그러나 압축기가 정상상태보다 토출 압력이 큰 경우에는 체크 밸브가 자유롭게 움직이기 때문에 거동에 따라 유동현상이 변하여 실제에는 유동과 거동이 연성이 되어 나타나지만, 해석의 편의를 위해 이 연성의 영향은 고려하지 않는다. 한편 계산과정에서 관찰된 것은 주기의 2 배의 시간이 지나면 밸브에 작동하는 힘 등이 일정한 패턴을 나타낸 것을 관찰 할 수 있었다. 그래서 2주기 이후에 얻어진 계산 결과를 사용하였다.

3. 밸브의 거동

3.1 밸브의 거동 해석

스크롤 압축기의 성능해석 프로그램을 이용하여 밸브에 걸리는 힘을 구하고, 거동을 해석하였다. 밸브의 변위는 작용하는 힘들의 평형으로 결정되고, 밸브의 운동은 토출 가스력을 받는 1 자유도계로 단순화할 수 있다. 밸브의 모델은 Fig. 3에 나타내었고, 수치계산을 위한 흐름도는 Fig. 4와 같다.

운동방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F(t) = \int_s \Delta P ds \quad (1)$$

여기서, m은 밸브의 질량, y는 밸브의 거동량, F(t)는 밸브에 작용하는 힘으로 힘의 작용 면적 s와 밸브 상하의 압력차 ΔP로 구성된다. C는 압축가스 유동저항에 의한 감쇠계수이며, k는 밸브 표면의 오일 유막에 의한 스프링 상수이다. 변위(y)와 토출 가스압 F는 서로 영향을 주므로, 가스압과 체크 밸브 운동의 계산은 동시에 수행되어야 한다.

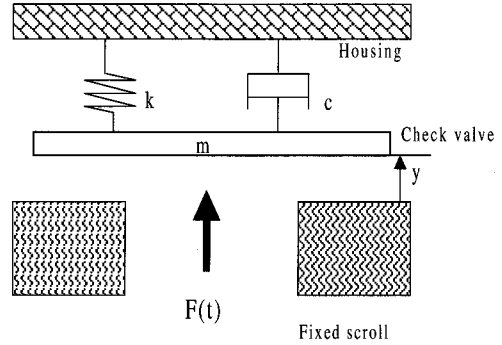


Fig. 3 Schematic of the check valve system

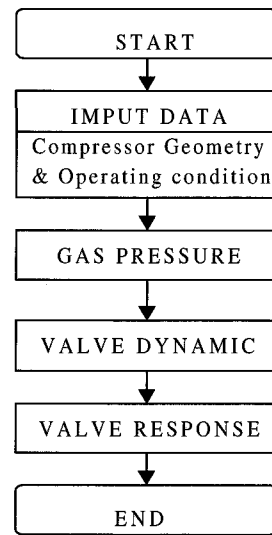


Fig. 4 Flow chart for the valve dynamic

3.2. 밸브의 거동 시험

동작시 밸브의 거동을 규명하기 위해 가시화 장치를 사용하였다. 실험장치의 구성도 및 사양은 Fig. 5와 같다. 밸브는 하우징에 가려 보이지 않으므로 경량의 T형의 봉을 밸브 표면에 부착하여 이 봉의 거동을 촬영함으로써 밸브의 운동을 유추하였다. 압축기의 구동은 ARI 조건으로 하여 이 봉의 거동을 고속카메라(KODAK BS4540, 40500장/초)로 1초당 520프레임을 촬영하여 data를 처리하였다.

이 프레임수는 60 Hz로 구동되는 압축기의 한 사이클의 거동을 고찰하는데 충분한 갯수이다. 토출가스압은 토출포트 근처에 압력센서를 부착하여 측정하였다.

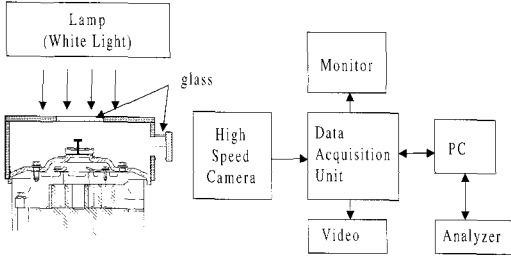


Fig. 5 Experiment set-up

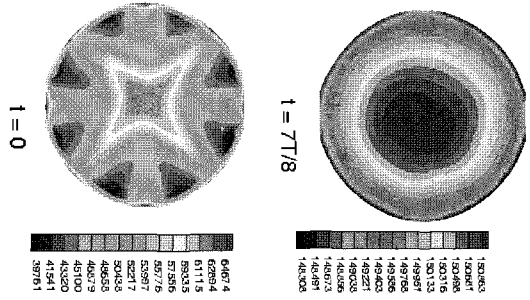


Fig. 7 Static pressure contours around the center of the check valve(bottom side); normal operation unit : pascal

4. 결과 및 고찰

4.1. 밸브 주위 유동 현상 및 하중 분포

본 연구의 유동해석시 체크 밸브가 위치하는 부근의 유동은 비정상적이다. 속도 벡터가 시간에 따라 달라지는 현상을 관찰 할 수 있었다. 대표적으로 토출압이 거의 일정하게 되는 0.55주기가 지난 상태에서 토출된 가스가 파이프를 통해서 빠져나가는 단면($y=0$)에서의 속도 벡터를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 T는 압축기 작동 주기를 나타낸다.

압축가스가 고정스크롤의 토출포트로부터 수직으로 분출되어 밸브에 가해지는 현상과, 여러 부분에서 발생하는 와류를 볼 수 있다. 특히 밸브 주위에서 매우 큰 와류현상이 나타나는데, 이는 토출커버 표면에서 유동이 거의 수평으로 이루어지기 때문이다. 토출포트의 유동입자는 직,간접으로 토출파이프로 움직이며, 유동은 비대칭임을 알 수 있다. 주기적으로 분출되는 토출가스는 밸브에 비정상적인 유동의 힘을 가하게 되는데 밸브 표면의 압력 분포는 Figs. 7~9와 같다. Fig. 7은 밸브 중앙의 디스크 부, Fig. 8과 Fig. 9는 Fig. 7의 밸브의 디스크 부에 연결되어 있는 가장자리의 팁에 걸리는 압력분포를 나타내고 있다.

밸브표면의 압력은 시간에 따라 급격히 변화하는데 압력분포는 비대칭이 되며, 밸브 아래면보다는 윗면에서

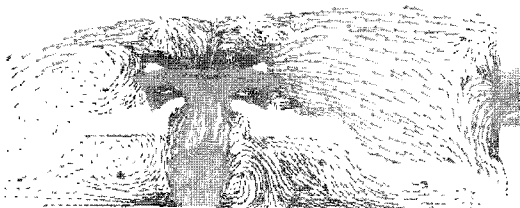


Fig. 6 Velocity vector on plane of $y=0$ at non-dimensional time $T=0.55$; normal operation

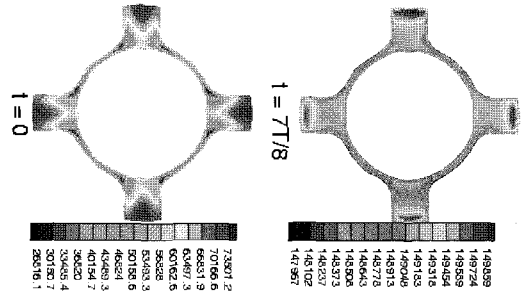


Fig. 8 Static pressure contours at the edges of the check valve(lower side); normal operation; unit : pascal

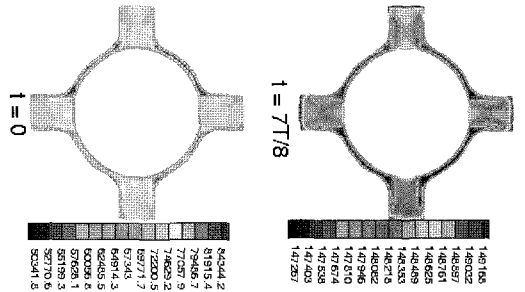


Fig. 9 Static pressure contours at the edges of the check valve(upper side); normal operation; unit : pascal

더 심하게 비대칭이 됨을 알 수 있다. 또한, 밸브표면 중간의 압력이 가장자리의 압력보다 크게 됨을 알 수 있다. 대부분의 압력분포는 $t=7/8T$ 와 비슷하나 토출압이 급격히 감소하게 되면 Fig. 7에서 보듯이 스타형상을 보이게 된다. 스타형상의 압력분포는 토출시 급격한 압력변화에 기인한다. 밸브표면의 최대압력은 Fig. 9와 같이 밸브 상부의 가장자리인 팁 부근에서 나타나게 된다.

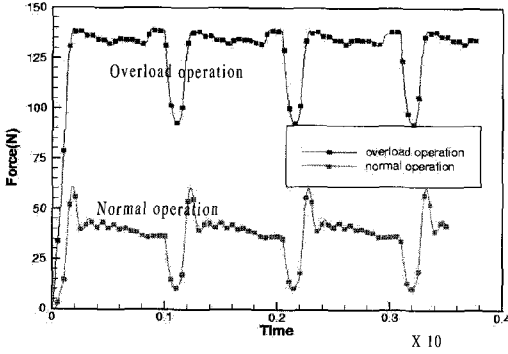


Fig. 10 Lift force of the check valve (무차원시간×10)

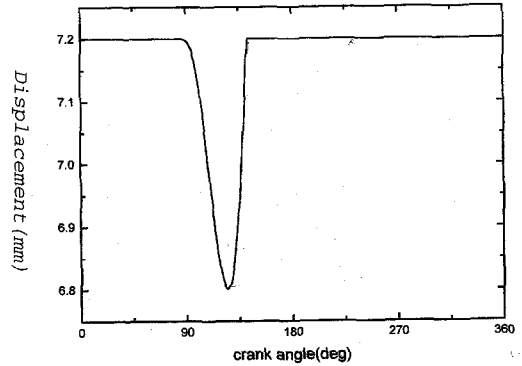


Fig. 12 Check valve displacement

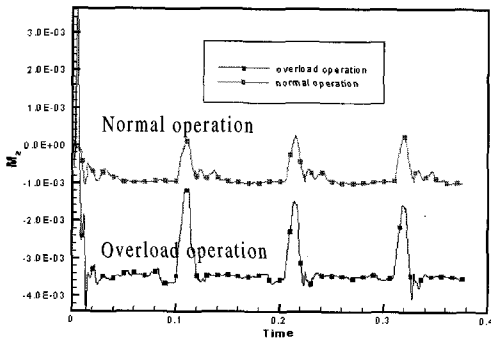


Fig. 11 Lift force of the check valve

(Moment : N-m, 시간 : 무차원시간×10)

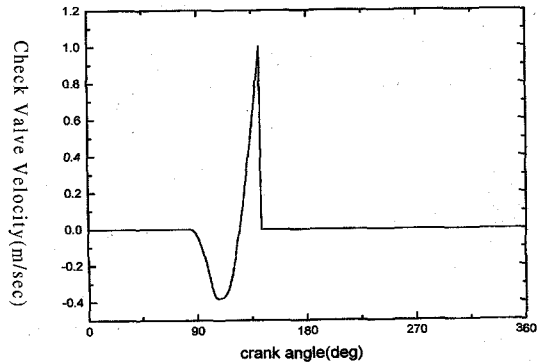


Fig. 13 Check valve velocity

4.2. 밸브의 거동과 소음 고찰

밸브의 거동을 나타내기 위해 앞 장에서 구한 각 시간 스텝당 밸브에 걸리는 압력분포를 적분하여 힘을 분석해 보면 축방향의 힘(Fig. 10)과 모멘트를 일으키는 회전방향의 힘(Fig. 11)으로 구성됨을 알 수 있다.

축방향 힘은 주기적으로 힘의 크기 변화가 반복되는 양상을 나타내고 있다. 이는 토출구에서의 가스압이 주기적으로 변하기 때문이라고 사료된다. 그러나 정상 조건에서는 축방향 힘이 오버슈트 형태로 변화하지만 토출 입력이 커지면 이러한 현상이 사라지는 것이 흥미롭다. 정상운전시에는 거의 변화가 없으나, 토출압력이 증가함에 따라 이들 힘은 급격히 증가하게 된다.

Fig. 12는 2.1장에서 해석적으로 구한 밸브의 변위, Fig. 13은 운동속도를 나타낸다.

계산은 ARI조건에서 하였으며, 밸브의 무게는 0.3g, 압축가스 유동저항에 의한 감쇠계수는 0.22로 하였고

탄성계수는 무시하였다. 밸브는 $90^\circ < \theta < 140^\circ$ 의 시간을 제외하고는 완전히 열려 있으며, $90^\circ < \theta < 140^\circ$ 에는 일시적으로 약간 감소하다가 다시 열린다. 밸브가 닫힐 때의 충돌속도는 약 1m/s이다.

Fig. 14는 가시화 실험장치의 밸브의 수직, 수평방향의 운동을 나타낸 것이다. 수평방향의 움직임은 거의 없으나, 수직방향으로 크랭크 각 1회전당 1회씩 감소함을 알 수 있다. 밸브 거동 해석의 결과는 실험 결과와 변위의 경향이나 시간은 비슷하나 변위차는 실험의 경우 0.4mm, 계산에서는 0.65mm의 차가 있음을 알 수 있다. 이는 토출개시시에 토출가스가 압축실로의 역류가 순간적으로 발생하는데, 이때의 밸브 운동과 가스의 상호작용에 의한 것으로, 이 상태에서의 밸브에 걸리는 압력의 해석과 실험의 차에 기인한다. 결국, 밸브의 거동은 유체 유인력의 불균형과 밸브 거동의 상관관계에 의해 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

정상운전 중의 체크 밸브의 소음은 4kHz의 고주

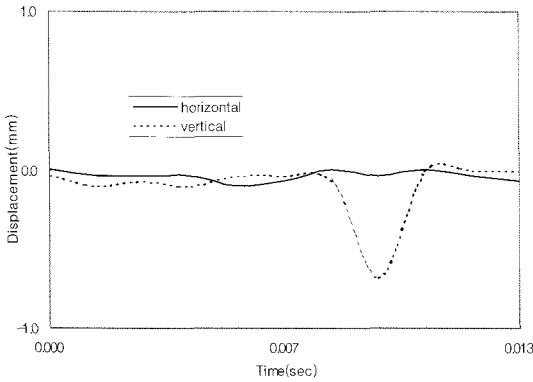


Fig 14 Vertical and horizontal motion of the check valve on operation (ARI)

과 대역에서 발생하는데, 이는 밸브의 운동이 밸브가 거의 다 열린 위치에서 밸브와 밸브 하우징간의 빠르고 반복적으로 일어나는 충돌로 여겨지며, 이 충돌은 축방향 가스력에 의한 병진모드와 밸브표면의 비대칭 압력분포로 인한 롤링모드로 생각할 수 있다. 병진모드는 밸브에 작용하는 가스력이 반복적으로 바뀌에 의해 하우징과 충돌하는 현상이고, 롤링모드는 밸브 플레이트 주위를 사방으로 돌아가는 유로 및 밸브 하우징에 마련된 유로공 등을 토출가스가 통과하면서 정확한 축대칭을 이루지 못하여 가스력이 불균형을 이루게 되어 생기는 현상이다. 밸브의 운동에 대한 본 연구의 시뮬레이션은 병진운동에 국한하였으며, 유동의 비대칭성으로 인한 롤링운동이나, 고주파 비정상유동에 기인한 밸브의 fluttering과 같은 운동은 고찰하지 않았다.

5. 결 론

스크롤 압축기에서 압축기 운전정지시의 역회전방지를 위해 사용되는 체크 밸브에 대해 밸브주위의 유동현상, 밸브표면에 걸리는 압력분포와 밸브의 거동에 대해 연구한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) Tetrahedral 격자와 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하여 비정상 압축성 유동으로 가정하여 밸브 부근의 유동현상과 밸브표면의 압력분포를 수치해석을 통하여 구하였으며, 체크 밸브에 걸리는 힘과 모멘트를 계

산하였다.

- 2) 밸브 표면에 부가되는 압력은 토출압에 매우 민감하며 표면의 최대압은 토출압이 급격히 감소될 때 이외는 밸브의 중심에 나타난다.
- 3) 밸브에 부가되는 힘은 축방향 가스력과 회전방향의 모멘트로 구성되며, 이 힘들은 토출압이 증대됨에 따라 급격히 증대된다.
- 4) 밸브의 소음은 밸브와 하우징과의 충돌로 인해 나타나며, 이 충돌은 밸브 표면의 비대칭 압력분포로 인한 롤링모드와 축방향 가스력으로 인한 병진모드에 의해 발생된다.
- 5) 밸브의 거동을 해석적으로 구하고 가시화한 결과 병진운동의 경우 거동의 경향은 해석과 실험이 잘 일치하지만, 변위차는 밸브에 작용하는 가스 힘과 밸브의 운동과 상호작용을 하기 때문에 이러한 특성을 충분히 반영하지 않아 정량적으로 실험과 계산간에는 약 63%정도 차이가 났다. 따라서 정량적으로 변위차를 구하기 위해서는 밸브와 가스가 상호작용 할 수 있는 수치해석 기법을 적용하여야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) Grunwald, S. and Beagle, W., 1990, "Check valve movement in a scroll compressor," Int. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 716~726
- (2) Shuji, M. and Shinji, N., 1996, "A study on noise reduction in a scroll compressor," Int. Comp. Eng. Conf. at Purdue, pp. 605~610
- (3) 김명균, 김재호, 김현진, 이진갑, 1997, "스크롤압축기에서 체크 밸브의 압축기 효율에 대한 영향", 공기조화 냉동공학회 하계 학술대회 논문집, pp. 740~746
- (4) Lee, S.-J., Lee, D.-S., Lee, B.-C., and Joo, Y.-S., 1998, "Development of New Check valve for Scroll Compressor," Int. Comp. Engineering Conference, Purdue Univ., pp 501~506
- (5) Launder, B.E., and Spalding, D.B., 1974, "The numerical computation of turbulent flows," Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. Vol. 3, pp. 269~289